

中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊; RCCSE中国准核心学术期刊; 日本科学技术振兴机构数据库 (JST) 收录期刊; EBSCO学术数据库收录期刊; 中国核心期刊 (遴选) 数据库收录期刊; 中国学术期刊 (光盘版) 全文收录期刊; 中文科技期刊数据库 (全文版) 收录期刊; 中国学术期刊影响因子年报统计源期刊; 超星期刊域出版平台全文收录

铁路通信信号工程技术

Railway Signalling & Communication Engineering

中国铁道学会通信信号分会指定期刊

主办单位: 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 2024. **5** 第21卷 总第161期

RSCE 《铁路通信信号工程技术》
Railway Signalling & Communication Engineering

引领学术前沿, 探索行业奥秘



期刊官网



微信公众号

广告

铁路通信信号工程技术

RAILWAY SIGNALLING & COMMUNICATION ENGINEERING

主管单位 Administrated by:

中国铁路通信信号集团有限公司 China Railway Signal & Communication Group Co., Ltd.

主办单位 Sponsored by:

北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd.

主编 Editor in Chief:

徐宗奇 Xu Zongqi

执行主编 Executive Editor:

李智宇 Li Zhiyu

编辑部主任 Director of Editorial Office:

李照敬 Li Zhaojing

责任编辑 Editor in Charge:

王丹丹, 陈超, 贯一琦 Wang Dandan, Chen Chao, Guan Yiqi

网络编辑 Web Editor:

赵月 Zhao Yue

英文编辑 English Editor:

刘旸 Liu Yang

编辑出版 Edited and Published by:

《铁路通信信号工程技术》编辑部 Editorial Office of *Railway Signalling & Communication Engineering*

地址 Address

北京市丰台科技园区汽车博物馆南路1号院 Block No.1, Qichebowuguan Nanlu, Fengtai Science Park, Fengtai District, Beijing, China

邮编: 100070 Postcode: 100070

邮箱: rsce@crscd.com.cn E-mail: rsce@crscd.com.cn

网址: <https://rsce.crscd.com.cn> URL: <https://rsce.crscd.com.cn>

编辑电话 Edition Tel:

50805951; 50805957 50805951; 50805957

广告电话 Advertisement Tel:

(010)-53110618 (010)-53110618

邮发代号: 80-532 Distribution Code: 80-532

中国标准连续出版物号 China Standard Serial Number:

ISSN 1673-4440 ISSN 1673-4440
CN 11-5423/U CN 11-5423/U

国际标准连续出版物号 International Standard Serial Number:

ISSN 1673-4440 ISSN 1673-4440

广告代理 Advertising Agency:

北京今日中铁广告有限责任公司 Beijing Jinrizhongtie Advertising Co., Ltd.

印刷 Printed by:

北京联合互通彩色印刷有限公司 Beijing Lianhehutong Print Co., Ltd.

广告发布登记 Advertising License No.

京丰市工商登字 20170003 号 BFGSG 20170003

定价: 10.00 元/期 Price: ¥10 Yuan Per Copy



月刊 Monthly

第21卷第5期总第161期 Vol.21 No.5 S.No.161

出版: 2024年5月25日 Published on: 5/25/2024

创刊: 2004年 First Issue: 2004

高级顾问: 倪光南院士

刘尚合院士

陈维江院士

Senior Consultants:

Ni Guangnan: Member, Chinese Academy of Engineering

Liu Shanghe: Member, Chinese Academy of Engineering

Chen Weijiang: Member, Chinese Academy of Sciences

主任委员: 张啸林

委员: (按姓氏笔画排序)

马丽兰 王兴中 尹福康 石先明 邢毅
刘岭 刘朝英 江明 杨岗 肖培龙
何涛 张苑 张志辉 张晓莉 罗松
周宪宝 赵晓东 钟章队 姜永富 徐中伟
徐宗奇 郭进 唐涛 曹玉 覃燕

本刊入选数据库:

中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊;
RCCSE 中国准核心学术期刊;
日本科学技术振兴机构数据库 (JST) 收录期刊;
EBSCO 学术数据库收录期刊;
中国核心期刊 (遴选) 数据库收录期刊;
中国学术期刊 (光盘版) 全文收录期刊;
中文科技期刊数据库 (全文版) 收录期刊;
中国学术期刊影响因子年报统计源期刊;
超星期刊域出版平台全文收录



<https://rsce.crscd.com.cn>

扫码打开期刊官网,
阅读、下载本刊内容

声明: 1. 本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权, 并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。若作者不同意自己的稿件以上述或其他形式被引用, 请事先声明, 否则视为同意。
2. 本刊文章版权所有, 未经书面许可, 不得以任何形式转载。

铁路通信信号工程技术 目 次

技术创新

信号技术

基于模态分析法的群组列车牵引供电系统并联谐振频率研究	阳 晋	1-7
一种优化分段式控车曲线的方法 张贵娟, 鲍鹏宇, 于晓娜, 王建敏, 张友兵, 张振兴		8-13
基于DCC的车载ATP线路数据收发和使用处理 陈 扬, 郝宇祥, 刘 云		14-19
地面安全控制中心混合控制方法研究	胡 瑞	20-26
DS6-100计算机联锁的IO仿真系统设计与实现	柳 新	27-31
全电子联锁自动测试平台设计与实现 彭 栋, 崔 岩, 曹雅鑫		32-37
CTC设备取代QJK设备人工解锁盘实现方案	潘圣浩	38-41
一种基于DX3型道口信号系统的平交道口防护方法	赵茜茹	42-45

通信及信息技术

高铁站台区“北斗+5G”列车融合定位方案探讨	罗颖欣, 丁 珣	46-52
基于CTCS-N列控系统的双电台冗余控制方法研究与设计 单飞龙, 王 佳		53-61
基于二次雷达的列车接近预警系统研究与实现	石云飞	62-69
区域轨道交通路网图系统的设计和实现	张晔伟	70-74
面向济南局铁路通信网IPv6演进研究	高 源, 张乐军	75-80

城轨交通

面向地铁施工环境的残差加权定位算法 王丽君, 蒋 锐, 杜晓伟, 李大鹏		81-89
神经网络融合多源信息的列车测速方法研究 陆海亭, 孙春洋, 王亮军, 付保明, 陈林山		90-95
城市轨道交通多节点线网云平台方案研究	刘国栋, 李金龙	96-102
既有线信号系统智能运维平台建设思考	于 柯, 王 超	103-108
列车ATC制动继电器偶发故障影响及防范对策 赵 勇, 刘 炼, 陈咪达		109-114
北京轨道交通共用场段LTE-M系统频率运用分析	李 鸣	115-121
城市轨道交通场段库门控制系统与信号系统接口方案	李 勇	122-128

CONTENTS

● Technological Innovation

Signalling Technology

Study on Parallel Resonance Frequency of Traction Power Supply System for Train Groups Based on Modal Analysis Method	Yang Jin	1-7
Optimization Method for Segmented Speed and Distance Monitoring Curve Zhang Guijuan, Bao Pengyu, Yu Xiaona, Wang Jianmin, Zhang Youbing, Zhang Zhenxing		8-13
DCC-based Processing for Line Data Transmission, Reception and Utilization by Onboard ATP Chen Yang, Hao Yuxiang, Liu Yun		14-19
Research on Hybrid Control Method for Safety Train Control System Hu Rui		20-26
Design and Implementation of IO Simulation System for DS6-100 Computer Interlocking Liu Xin		27-31
Design and Implementation of Automatic Test Platform for Fully Electronic Interlocking Peng Dong, Cui Yan, Cao Yaxin		32-37
Implementation Scheme for Replacing Manual Release Panel of QJK Equipment with CTC Equipment Pan Shenghao		38-41
New Method of Level Crossing Protection Based on DX3 Level Crossing Signaling System Zhao Qianru		42-45

Communication & Information Technologies

Discussion on "Beidou+5G" Fusion Scheme for Train Positioning in Platform Area of High Speed Railways Luo Yingxin, Ding Xun		46-52
Research and Design of Redundant Control Method for Double Radios Based on CTCS-N Train Control System Shan Feilong, Wang Jia		53-61
Research and Implementation of Train Approach Early Warning System Based on Secondary Radar Shi Yunfei		62-69
Design and Implementation of Rail Network Diagram System for Regional Rail Transit Zhang Yewei		70-74
Research on IPv6 Evolution in Railway Communication Networks of China Railway Jinan Group Co., Ltd. Gao Yuan, Zhang Lejun		75-80

● Urban Rail Transit

Residual Weighting Algorithm for Position Estimation Subway Construction Environment Wang Lijun, Jiang Rui, Du Xiaowei, Li Dapeng		81-89
Research on Train Speed Measurement Method Based on Multiple-source Information Fusion Using Neural Network..... Lu Haiting, Sun Chunyang, Wang Liangjun, Fu Baoming, Chen Linshan		90-95
Research on Cloud Platform Solution for Multi-node Network of Urban Rail Transit Liu Guodong, Li Jinlong		96-102
Thoughts on Construction of Intelligent Operation and Maintenance Platform for Existing Line Signal System Yu Ke, Wang Chao		103-108
Impacts of Accidental Faults of Train ATC Brake Relay and Countermeasures Zhao Yong, Liu Lian, Chen Mida		109-114
Analysis of Frequency Use by LTE-M System in Shared Yard Section of Rail Transit Lines in Beijing Li Ming		115-121
Research on Interface Scheme Between Depot Garage Door Control System and Signaling System for Urban Rail Transit Lines	Li Yong	122-128

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.05.001

基于模态分析法的群组列车牵引供电系统 并联谐振频率研究

阳 晋

(北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

摘要: 重载铁路运载量的不断增长, 可采用同一供电臂增加运行列车数量来解决运能不足问题。但当列车数量增多时, 多列车发出的谐波电流会分布在牵引网多位置处, 且会使谐波电流叠加, 引发严重的牵引供电系统并联谐振事故, 因此, 有必要研究多列车运行情况下系统谐波谐振频率分布。利用牵引网多导体降阶方法, 得到简化的牵引网等效电路模型。通过采用模态分析方法, 研究多列车在不同功率运行情况下牵引供电系统并联谐振频率的变化, 得到谐波谐振的节点参与信息。研究表明: 当6辆列车在牵引网以4~8 MW功率运行时, 引发系统谐振的低次谐波次数为38~43次, 高次谐波次数为116~118次。

关键词: 重载铁路; 谐波谐振; 导体降阶; 模态分析法

中图分类号: U284.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0001-07

Study on Parallel Resonance Frequency of Traction Power Supply System for Train Groups Based on Modal Analysis Method

Yang Jin

(CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: As the transport volume of heavy-haul railways continuously increases, the problem of insufficient traffic capacity may be addressed by increasing the number of trains utilizing one and the same supply arm. However, when the number of trains is increased, the harmonic currents generated by multiple trains may be distributed at multiple locations of the traction network and may be superimposed, which causes serious accidents related to the parallel resonance of traction power supply systems. Therefore, it is necessary to study the frequency distribution of system harmonic resonance in the situation of multi-train operation. In this paper, the conductor multi-conductor step-down method is adopted to establish a simplified equivalent circuit model for the traction network. Then, the modal analysis method is utilized to study the frequency changes of the parallel resonance of traction power supply systems in the situation of multi-train operation with power variation, so as to

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2024-05-07

基金项目: 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司科研项目(2300-K1200035.01)

作者简介: 阳晋(1985—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 铁路信号控制、电气化铁路过电压形成机理及防护研究, 邮箱: yangjin@crscd.com.cn.

obtain the node participation information of harmonic resonance. The research results shows that when 6 trains operate in the traction network with power variation of 4~8 MW, there are 38~43 low-order harmonic waves and 116~118 high-order harmonic waves related to system harmonic resonance.

Keywords: heavy-haul railway; harmonic resonance; conductor step-down; modal analysis method

近年来,随着国内铁路运输货物量需求的不断加大,铁路要尽快实现3万吨级重载列车的重大突破。然而,长编组列车操控复杂、单车加重会导致基础设施受损,因此通过提高列车行车密度来提升重载铁路运能,是较有应用前景的运能提升方式。

国内重载铁路列车主要型号为“韶山(SS)”系列机车,其采用中抽式(全波)整流电路,谐波次数丰富^[1]。当同一供电臂重载列车数量增多时,谐波电流不仅会分布在牵引网更多位置处,也会通过叠加作用使谐波电流增大。牵引供电系统是一个由电感和电容组合而成的非常复杂的多网孔网络,随着列车位置的不断变动,若某次谐波达到谐振条件,会使系统的电压、电流畸变,引发严重的谐波谐振事故^[2]。

目前研究谐波谐振分析方法主要有频谱分析法和模态分析法。频谱分析法的主要原理基于戴维南定理,虽然也能识别出系统谐振点和谐振频率,但不能提供更多的谐振关联信息,从而很难做出抑制手段^[3-5]。模态分析法利用电力系统节点导纳矩阵特征值奇异的原理,可确定引起的频率值,也能找到发生谐振的参与因子,得到了广泛的应用^[6]。文献[6-7]将其运用在分析电网谐波谐振,取得了良好的效果。文献[2, 8, 9]利用模态分析法,计算了列车负荷位置变动时,系统谐振频率点的变化,并给出了影响谐振的参与因子。文献[10]分析了列车运行功率、供电距离等多影响因素下牵引供电系统谐振频率的变化。文献[11]利用模态分析法探究了不同谐波源模型对谐波谐振频率的影响。文献[12]利用模态分析方法,得到不同负荷模型对牵引供电系统的谐波谐振敏感度的影响作用。但上述文献均未探究多车影响下系统的谐振频率分布特性。

因此,本文基于链式网络模型思想,将全并联AT牵引供电系统转化为简化等值电路,再利用模态分析法分析群组化列车动态运行时的并联谐振频率

分布特性,揭示影响谐振的主要影响因素。

1 全并联AT牵引供电系统等值电路模型

1.1 牵引供电系统的组成

国内牵引供电系统采用工频(50 Hz)、额定电压为25/27.5 kV的单相交流制,主要包括电源、牵引网和接地系统。整体系统结构如图1所示。其中牵引网的供电方式主要有直接供电方式、BT供电方式、CC同轴电缆供电方式和AT供电方式。由于AT供电方式具有载流能力大、对通讯线路干扰少的优点,本文对AT供电方式下的铁路牵引网进行分析。

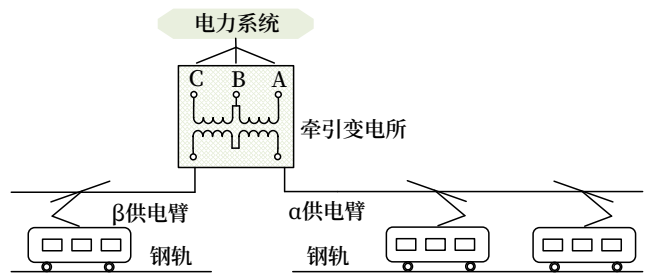


图1 牵引供电系统整体结构
Fig.1 Overall structure of traction power supply system

在AT供电方式下,牵引变电所采用2台V/x接线单相三绕组变压器。牵引网主要包含接触线、馈线以及保护线,导体长度设置为30 km。接地系统主要是钢轨和贯通地线,良好的散流可减小对周围弱点信号的侵害。牵引网和接地系统横截面示意如图2所示。

1.2 牵引供电系统电路模型

考虑牵引网上/下行的接触线、馈线、保护线和钢轨,共8条导体。根据Carson理论,可计算得到多导体串联阻抗矩阵 Z 。 Z 为8阶串联阻抗矩阵,矩阵的元素参数计算如公式(1)~(3)所示。

$$Z_{ii} = \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_g}{r_i} (\Omega/m) \quad (1)$$

$$Z_{ij} = \frac{\omega\mu_0}{8} + j \frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_g}{d_{ik}} (\Omega/m) \quad (2)$$

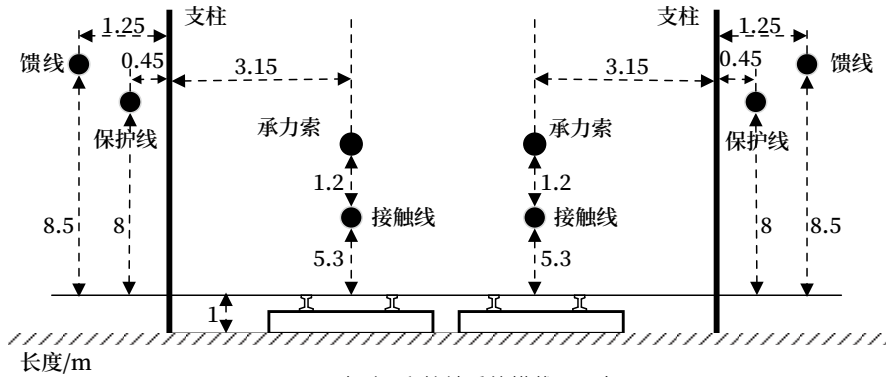


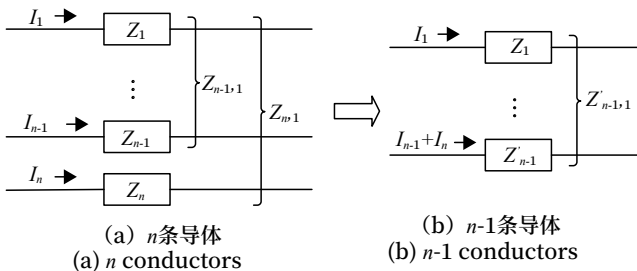
图2 牵引网和接地系统横截面示意
Fig.2 Schematic cross-section diagram of traction network and earthing system

$$D_g = 659 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (3)$$

式中, μ_0 为真空磁导率 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m; $\omega = 2\pi f$, f 为频率, Hz; ρ 为大地电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

由于 AT 供电方式下铁路牵引网导体众多, 且连接关系较为复杂, 如果将数条导体全部考虑建立牵引网链式网络模型, 将使电路结构较为复杂, 不方便开展研究工作。为此, 可通过导体等效化简的方法, 不断减少导体端口数。其简化方法如图 3 所示。

图 3 (a) 中, n 条线路电气量表达关系式如公式 (4) 所示。



(a) n 条导体
(a) n conductors
(b) $n-1$ 条导体
(b) $n-1$ conductors

图3 AT供电方式简化方法
Fig.3 Simplification method for AT power supply method

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据 Hanmin Lee 线路降阶方法^[13], 如公式 (5) ~ (8) 所示。

$$Z'_{11} = Z_{11} - \frac{(Z_{n-1,1} - Z_{n1})(Z_{1,n-1} - Z_{1,n})}{Z_{n-1,n} + Z_{n,n} - 2Z_{n-1,n}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Z'_{n-1,n-1} &= Z_{n-1,n-1} - \\ &\frac{(Z_{n-1,n-1} - Z_{n,n-1})(Z_{n-1,n-1} - Z_{n-1,n})}{Z_{n-1,n} + Z_{n,n} - 2Z_{n-1,n}} \end{aligned} \quad (6)$$

$$Z'_{1,n-1} = Z_{1,n-1} - \frac{(Z_{n-1,n-1} - Z_{n,n-1})(Z_{1,n-1} - Z_{1,n})}{Z_{n-1,n} + Z_{n,n} - 2Z_{n-1,n}} \quad (7)$$

$$Z'_{n-1,1} = Z'_{1,n-1} \quad (8)$$

得到新的 $n - 1$ 阶线路电气量表达关系式, 如公式 (9) 所示。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z'_{12} & \cdots & Z'_{1,n-1} \\ Z'_{21} & Z'_{22} & \cdots & Z'_{2,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z'_{n-1,1} & Z'_{n-1,2} & \cdots & Z'_{n-1,n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{n-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由此, 通过不断简化, 最终可得到如图 4 所示的系统等效电路。图中, Z_s 为系统参数。根据链式网络模型思想切面划分方法, 将系统等值电路切分为 6 个切面。多个列车负载可位于不同切面处, 通过设置切面间线路距离长度, 来改变列车间的动态位置。

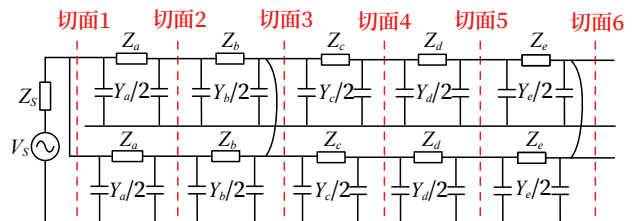


图4 系统等效电路
Fig.4 System equivalent circuit diagram

1.3 负载机车模型

现有学者对建立动态运行机车模型主要有恒电流源模型^[14]、变流器模型^[15]和恒功率源模型^[16]。由于重载列车在线路上移动时位置时刻变动, 接触线不同长度处网压不同, 因此恒电流源不够准确。

考虑精细化变流器拓扑结构和控制的列车电机模型过于复杂，故可采取恒功率源的思想，进行搭建机车负荷模型。其计算流程如图 5 所示。

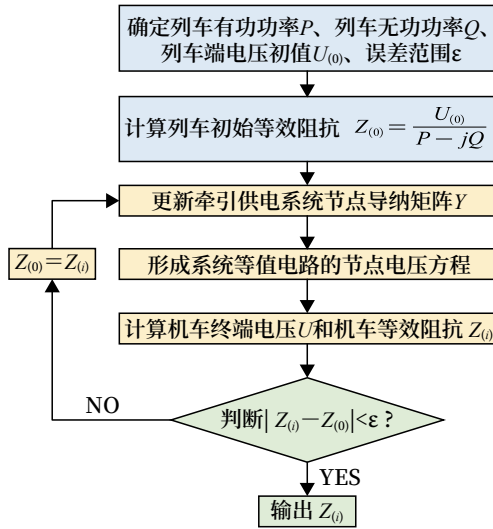


图5 机车负荷模型计算流程
Fig.5 Flow chart of locomotive load model calculation

2 模态分析法原理

在某一系统频率 f 下，可写出牵引供电系统节点导纳矩阵 Y ，依据节点电气关系，可列出节点电压方程如公式 (10) 所示。

$$V_f = Y_f^{-1} I_f \quad (10)$$

式中， V_f 为系统各切面节点电压； Y_f 为网络导纳矩阵； I_f 为节点注入电流； Y 矩阵的阶数与切面数量和导体数量有关。

当系统发生并联谐振时，即 V_f 矩阵的某一元素会呈现很大值，这主要是由在该频率下系统导纳矩阵趋向于奇异。在数学关系上表现为 Y 矩阵的对应特征值趋向于 0。将 Y 矩阵分解如公式 (11) 所示。

$$Y = L\lambda L^{-1} \quad (11)$$

式中， λ 为对角线特征矩阵； L 为左特征向量； $L^{-1} = T$ 为右特征向量。将 (2) 代入 (1) 式，如公式 (12) 所示。

$$U = \lambda J \quad (12)$$

定义 $U = L^{-1}V$ 为“模态电压向量”， $J = L^{-1}I$ 为“模态电流向量”，展开式 (3) 如公式 (13) 所示。

定义特征值倒数为特征阻抗。当特征阻抗的值

很大时，很小的模态电流就会引起很大的模态电压。

模态电流关系如公式 (14) 所示。

$$U = \begin{bmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_n^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \dots \\ J_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$J_k = T_{k1}I_1 + T_{k2}I_2 + T_{k3}I_3 + \dots + T_{kn}I_n \quad (14)$$

模态电压关系如公式 (15) 所示。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{21} \\ \dots \\ L_{n1} \end{bmatrix} U_1 + \begin{bmatrix} L_{12} \\ L_{22} \\ \dots \\ L_{n2} \end{bmatrix} U_2 + \dots + \begin{bmatrix} L_{1n} \\ L_{2n} \\ \dots \\ L_{nn} \end{bmatrix} U_n \approx \begin{bmatrix} L_{11} \\ L_{21} \\ \dots \\ L_{n1} \end{bmatrix} U_1 \quad (15)$$

可看到，如果右特征向量中 T_{k2} 有最大值，则注入电流 I_2 更能使模态电流 J_k 的值很大，即该节点处注入电流，更能引起模态谐振。另外，如果 T_{k2} 趋向于 0，则在该位置处注入多大的激励电流，都将不能引起模态谐振。如果系统出现模态 1 谐振，即可化简成该式，如果 L_{21} 的值最大，说明当发生模态谐振 1 的时候，最能从实际节点 V_3 处观察得到。故关键右特征向量能够反映节点可激励性特点，关键左特征向量能反映关键模式可观测性的特点。

模态分析法不仅能识别到系统发生的谐振频率范围，且能显示出系统各节点对模态谐振的参与度。根据模态分析原理，可将节点的可激励性与可观测性相结合，共同组成节点的参与因子。假设发生模态 1 谐振，即 λ_1^{-1} 要比其他模态阻抗大得多，所以可进行式 (8) 的化简。公式中，矩阵的对角线元素能够将同一节点的电流注入与实际电压大小联系起来，被称为节点的“参与因子”，如公式 (16) 所示。

牵引供电系统网络电路的节点导纳矩阵为 n 阶，模态个数也为 n 。所有的模态信息组合起来才能反映系统的所有振荡频率。

3 列车运行下系统谐振分析

现行重载列车多为韶山 4B 列车，其运载量为 5 kt 货物，要实现《交通强国建设纲要》提到的

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1^{-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2^{-1} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_n^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{n1} & T_{n2} & \dots & T_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} \approx \lambda_1^{-1} \begin{bmatrix} L_{11}T_{11} & L_{12}T_{12} & \dots & L_{1n}T_{1n} \\ L_{21}T_{11} & L_{22}T_{12} & \dots & L_{2n}T_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1}T_{11} & L_{n2}T_{12} & \dots & L_{nn}T_{1n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

3 万 t 铁路运量要求，即将供电臂内增加为 6 辆韶山 4B 列车。

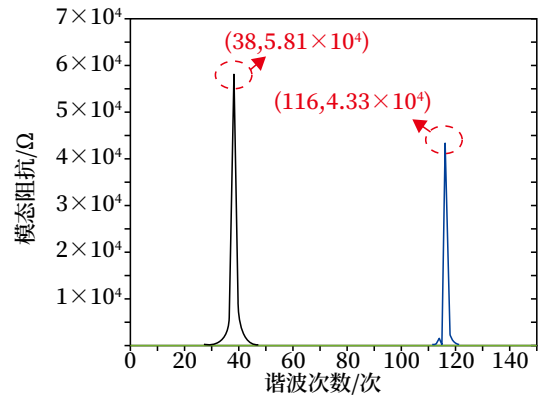
当 6 辆列车在运行时，它们运行在不同的工况，如启动或制动、爬坡或下坡时，电机旋转速度及出力不同，会表现在对外运行功率的不同。韶山 4B 列车稳定运行功率为 6.4 MW，设置列车运行功率因数为 0.97（滞后）。设置 6 辆列车分别位于 0 km、5 km、10 km、15 km、20 km、25 km 运行，功率变化范围为 4~8 MW，计算得到不同机车功率下的系统谐振信息，其主要模态信息为模态 7 和模态 8。各功率变动时系统谐振频率及模态阻抗如图 6 所示。

由图 6 可以看出，当 6 辆列车在牵引网某位置处运行时，机车运行功率不同会影响系统谐振的频率范围。当列车功率从 4 MW 增大为 8 MW 时，系统低次谐波谐振频率由 38 次增加到 43 次，系统高次谐波谐振频率由 116 次增加到 118 次。

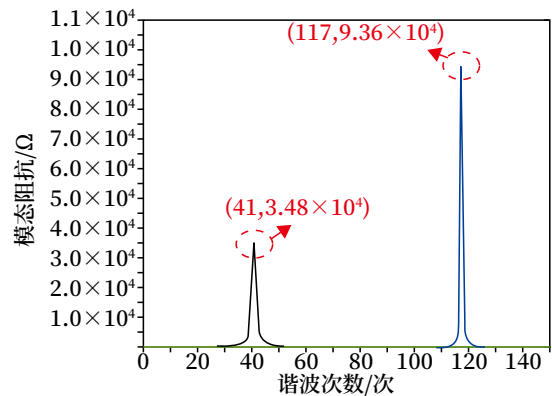
根据第 2 节确定的各功率模态信息，得到关键模态参与因子如表 1 所示。由表 1 可知，对于不同的谐振频率，主要参与节点是 3、7，但其余各节点也对其都有影响。因此，治理谐振时必须考虑整条牵引网线路的共同防护，这也正是模态分析方法的核心。

4 结论

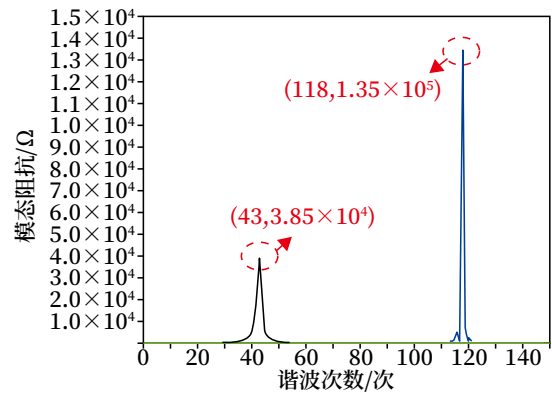
- 1) 全并联 AT 牵引供电系统构成复杂，利用导体等效化简方法，可有效降低建模及模态分析难度。
- 2) 多列车在同一供电臂运行时，会存在相互耦合作用，利用求解系统节点电压方程的不断迭代方法，可求得每辆列车对外等效阻抗。
- 3) 当 6 辆列车在同一供电臂上运行时，随着



(a) 机车运行功率为 4 MW
(a) 4 MW locomotive operation power



(b) 机车运行功率为 6 MW
(b) 6 MW locomotive operation power



图例：—模态7 —模态8 —其他模态
(c) 机车运行功率为 8 MW
(c) 8 MW locomotive operation power

图6 列车运行功率变化时的模态分析
Fig.6 Modal analysis of train operation with power variation

表1 关键模式参与因子
Tab.1 Key mode participation factors

谐振模式	运行功率/MW	谐振次数	参与因子					
			节点1	节点3	节点5	节点7	节点9	节点11
7	4	38	0.071	0.103	0.044	0.036	0.02	0.267
	6	41	0.030	0.053 2	0.080 1	0.055 8	0.027 8	0.251
	8	43	0.028 4	0.051 5	0.078 3	0.053 7	0.026 1	0.258
8	4	116	0.13	0.128	0.02	0.008	0.016 4	0.27
	6	117	0.129 8	0.125 6	0.021 3	0.006 9	0.015 5	0.272
	8	118	0.130	0.123	0.023	0.006	0.014 6	0.268

机车运行功率的变动，系统低次谐波范围是 38 ~ 43 次，高次谐波范围为 116 ~ 118 次谐波。由于列车内部变流器主要发出的谐波次数一般小于 60 次，故需更重视对低次谐波的治理。

4) 当系统发生不同谐波次数谐振时，由模态分析参与因子可找到与模态谐振关联的节点信息，为后续谐波治理、抑制系统谐振提供理论支撑。

参考文献

[1] 骆冰祥. 复杂牵引网高次谐波谐振特性及抑制方案研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.

[2] 徐志强, 李冰, 周田华, 等. 基于模态分析的运动负荷牵引电网谐波谐振分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (19): 76-80, 121.
Xu Zhiqiang, Li Bing, Zhou Tianhua, et al. Harmonic Resonance Assessment of Traction System with Moving Load Based on Modal Analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 76-80, 121.

[3] Shen Dong, Wang Zhonghong, Chen J Y, et al. Harmonic Resonance Phenomena in STATCOM and Relationship to Parameters Selection of Passive Components[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(1): 46-52.

[4] Santoso S, Maitra A. Empirical Estimation of System Parallel Resonant Frequencies Using Capacitor Switching Transient Data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1151-1156.

[5] 王彦东, 李群湛. 电力系统谐波阻抗特性及测

量方法的探讨 [J]. 电工技术杂志, 2004, 23 (3): 64-67.

[6] 徐文远, 张大海. 基于模态分析的谐波谐振评估方法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (22): 89-93.

[7] Wilsun Xu, Zhenyu Huang, Yu Cui, et al. Harmonic Resonance Mode Analysis [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1182-1190.

[8] 胡海涛, 何正友, 钱澄浩, 等. 基于模态分析的全并联 AT 网动态谐波谐振研究 [J]. 电网技术, 2012, 36 (1): 163-169.
Hu Haitao, He Zhengyou, Qian Chenghao, et al. Modal Analysis Based Research on Dynamic Harmonic Resonance of All-Parallel Autotransformer Traction Supply Network[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 163-169.

[9] 王硕禾, 蔡清亮, 许继勇, 等. 基于模态分析的牵引供电系统谐波谐振过电压研究 [J]. 铁道学报, 2013, 35 (7): 32-41.
Wang Shuohe, Cai Qingliang, Xu Jiyong, et al. Harmonic Resonance Over-Voltage of Traction Power Supply System Based on Modal Analysis[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(7): 32-41.

[10] 张丽艳, 杨亮辉. 基于模态分析的城轨交流牵引系统谐波谐振研究 [J]. 电工技术, 2020 (15): 21-25, 28.
Zhang Liyan, Yang Lianghui. Research on Harmonic Resonance of Urban Rail AC Traction System Based on Modal Analysis[J]. Electric Engineering, 2020(15): 21-25, 28.

- [11] 唐力, 胡海涛, 李朝阳, 等. 考虑谐波源支路类型的谐波谐振分析方法 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (16): 132-140.
Tang Li, Hu Haitao, Li Zhaoyang, et al. Harmonic Resonance Analysis Method Considering Branch Type of Harmonic Source[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 132-140.
- [12] 张民, 何正友, 高仕斌. 不同负荷模型下高速铁路牵引供电系统谐波谐振敏感度分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (20): 21-28.
Zhang Min, He Zhengyou, Gao Shibin. Harmonic Resonance Modal Sensitivity Analysis for High-Speed Railway Traction Supply System Considering Different Harmonic Load Models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 21-28.
- [13] Lee Hanmin, Lee Changmu, Jang G, et al. Harmonic Analysis of the Korean High-Speed Railway Using the Eight-Port Representation Model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 979-986.
- [14] 李欣然, 孙谦, 朱湘有, 等. 基于实测数据的地铁牵引负载谐波源模型 [J]. 电网技术, 2012, 36 (1): 158-162.
Li Xinran, Sun Qian, Zhu Xiangyou, et al. A Harmonic Source Model of Electrified Railway Traction Load Based on Measured Data[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 158-162.
- [15] Liao Yicheng, Liu Zhigang, Zhang Guinan, et al. Vehicle-Grid System Stability Analysis Considering Impedance Specification Based on Norm Criterion[C]//2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Busan. IEEE, 2016: 118-123.
- [16] Xiang Nianwen, Yuan Qiankun, Wang Chaoqun. Study on the Adaptability of Traction Power Supply System under the Operation of High Density Heavy Haul Train[C]//2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Hefei, China. IEEE, 2023: 1237-1242.
- [17] 罗凌峰, 曹鹤飞. 中低速磁浮 BTM 设备电磁干扰分析及优化 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (7): 64-69.
Luo Lingfeng, Cao Hefei. Analysis and Optimization of Electromagnetic Interference of Medium-Low Speed Maglev BTM Equipment[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(7):64-69.
- [18] 曹鹤飞, 孟天旭, 李昊. 恒磁场对无源应答器影响及防护技术 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (12): 1-6.
Cao Hefei, Meng Tianxu, Li Hao. Impacts of Constant Magnetic Field on Passive Balises and Its Protection Technologies[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(12):1-6.
- [19] 何文广, 潘瓯瑜. 接触网小单元供电在市域铁路的应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (1): 87-91.
He Wenguang, Pan Ouyu. Application of Catenaries Small Unit Power Supply in Suburban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1):87-91.
- [20] 郜新军, 汪洋, 周永健, 等. 过分相两次断主断问题研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (6): 112-116.
Gao Xinjun, Wang Yang, Zhou Yongjian, et al. Research on Problem of Two Main Disconnections in Neutral Section[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(6):112-116.
- [21] 李智宇. 分相区应答器传输系统电磁干扰分析及防护技术研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (7): 1-6.
Li Zhiyu. Research on Electromagnetic Interference and Protection Technology of Balise Transmission System in Neutral Section[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(7):1-6.

一种优化分段式控车曲线的方法

张贵娟^{1, 2}, 鲍鹏宇^{1, 2}, 于晓娜^{1, 2}, 王建敏^{1, 2}, 张友兵^{1, 2}, 张振兴^{1, 2}

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070;

2. 北京市高速铁路运行控制系统工程技术研究中心, 北京 100070)

摘要: 现有的车载分段式控车曲线是在 UIC544-1 标准的基础上, 由车辆的制动性能 (分段制动速度和制动减速度) 构建的制动减速度模型生成的。这样的分段式控车曲线由于没有充分考虑外部环境对车辆制动性能的影响, 导致计算出的控车曲线也不够精准, 从而降低列车运行的安全性和有效性。为解决上述问题, 通过对分段式控车曲线进行研究, 提出一种优化方法。该方法将多种线路数据 (如坡度、黏着等) 与车辆制动数据相融合, 生成更为精准的分段式控车曲线, 确保列车在各种线路条件上更加安全高效的运行。

关键词: 制动性能; 控车曲线; 线路数据; 制动减速度

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0008-06

Optimization Method for Segmented Speed and Distance Monitoring Curve

Zhang Guijuan^{1, 2}, Bao Pengyu^{1, 2}, Yu Xiaona^{1, 2}, Wang Jianmin^{1, 2},
Zhang Youbing^{1, 2}, Zhang Zhenxing^{1, 2}

(1. CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

(2. Beijing Engineering Technology Research Center of Operation Control Systems for High Speed Railways, Beijing 100070, China)

Abstract: The existing segmented speed and distance monitoring curve is generated on the basis of the UIC544-1 standard, and by means of a braking deceleration model based on the vehicle braking performance (segmented braking speed and braking deceleration). As the impacts of external environment on vehicle braking performance are not fully considered, the resulting segmented speed and distance monitoring curve is not sufficiently accurate, which affects the safety and effectiveness of train operation. To solve the above problem, this paper studies the existing segmented speed and distance monitoring curve, and on this basis, proposes an optimization method. The proposed method combines multiple types of trackside data (such as gradient and adhesion data) with vehicle braking data, to generate more accurate segmented speed and distance monitoring curves, and ensure safer and

收稿日期: 2024-01-02; 修回日期: 2024-05-07

基金项目: 国家重点研发计划课题项目 (2021YFB2300103)

发明专利: 2020 年国家发明专利 (ZL202011201047.6)

第一作者: 张贵娟 (1992—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 车载速度与距离监控, 邮箱: zhangguijuan@crscd.com.cn.

more efficient train operation under various trackside conditions.

Keywords: braking performance; speed and distance monitoring curve; trackside data; braking deceleration

1 概述

列车自动防护 (ATP) 是列车车载关键设备, 其核心技术是生成控车曲线算法, 即根据车辆制动性能、线路条件和移动授权等数据, 通过 ATP 计算出一组控车曲线, 而车载设备则根据该控车曲线实时监控列车运行速度, 保障列车安全运行^[1-3]。ATP 控车曲线通常包含: 紧急制动曲线 (Emergency Brake Intervention, EBI)、常用制动曲线 (Service Brake Intervention, SBI)、警告曲线 (Warning, W)、允许曲线 (Permitted, P) 和指示曲线 (Indication, I)。控车曲线计算的基础是制动减速度模型, 包含紧急制动减速度模型 (Emergency Brake Deceleration, EBD) 和常用制动减速度模型 (Service Brake Deceleration, SBD)。制动减速度模型的优劣影响着控车曲线, 因此通过优化制动减速度模型可以优化控车曲线。

现有的基于分段式的制动减速度模型是根据 UIC544-1^[4,5] 标准提出的。制动减速度模型生成的第一步是在车辆本身的制动数据基础上, 通过缩短模型最小制动距离与真实制动距离之间的差距, 进行速度区间的划分和速度区间分段数的确定^[6-11]。通常, 在速度分段区间内使用最小减速度值或以不大于 75% 的优化系数生成减速度值^[12]。最初的制动减速度模型只考虑了车辆的制动数据。为了进一步提高控车曲线的安全性和效率, 将坡度带来的减速度引入分段式制动减速度模型中。此时使用的坡度是平均坡度, 如 CTCS-3 列控系统中使用的制动减速度模型^[13-14]。不同轨道条件 (如干轨或湿轨等) 产生不同的黏着力, 对列车制动也存在影响, 因此一些分段式制动减速度模型也考虑了黏着力, 但是采用的是最不利情况下的黏着力, 这样提高了列车运行时的安全性, 但却在一定程度上降低了运行效率。

在一些线路上不同的线路段采用不同制动类型, 不同的制动类型也会影响制动模型, 进而影响控车曲线^[15]。同时还有一些线路数据如有电区和无电区等, 都会对制动模型和控车曲线带来一些影响。大部分 ATP 的控车曲线只考虑了坡度和黏着两个线路数据, 而使用这两个数据时也只是采用在一段距离下的最不利情况, 不是线路实时且具体的数据, 在一定程度上降低了列车的运行效率。

针对上述现有分段式制动减速度模型存在的问题, 本文提出一种优化方法, 在基础分段式制动减速度模型中引入列车运行过程中所知的线路数据, 动态地获得列车在运行过程中的制动减速度, 构建对应的制动减速度模型, 并根据该减速度模型生成一组控车曲线。本方法在保证车辆安全运行的同时也提高列车的运行效率。

2 线路数据处理

本文提出的优化分段式控车曲线方法的整体结构如图 1 所示, 输入数据分为列车制动数据和线路数据。线路数据经过线路数据处理模块处理, 生成一组由位置 and 对应值组成的数据, 使用该组数据和制动数据构建分段式制动减速度模型, 基于该减速度模型生成控车速度监控曲线。

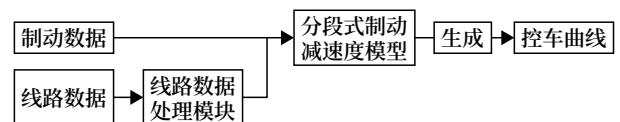


图1 整体结构简化
Fig.1 Simplification of overall structure

制动数据是描述列车性能的数据, 存在形式为 {速度, 减速度}。线路数据是列车在运行过程中通过应答器、无线消息报文或司机输入等方式获得的线路条件数据, 包括但不限于: 坡度数据、特定制动数据、轨道黏着数据和无电区轨道数据等。

上述所提到的各种线路数据，ATP 获得时通常是各自按照自己的格式进行保存，因此需要经过线路数据处理模块进行处理。线路数据处理模块的功能是：将多种零散的线路数据按照类型统一转换为 ATP 坐标系下以 { 开始位置，结束位置，对应参数值 } 形式存在的数据列表，并剔除多余重复的数据，同时记录这些数据在线路方向整体变化的情况。线路数据处理过程如下。

数据预处理：将坡度数据、特定制动数据、黏着力数据等转换为特定格式的列表数据。以坡度数据处理为例，其过程如图 2 所示。输入到 ATP 中的多段坡度数据经过处理后形成 ATP 坐标系下的坡度列表，在这个过程中会将坡度值相同的邻近的坡度合并。坡度列表是由多个以 { 开始位置，结束位置，坡度值 } 形式存在的坡度段组成，且每个坡度段的结束位置均不小于其开始位置。相邻的两个坡度段的位置不能出现交叉的情况，即在某一位置下不能同时出现多个坡度段。其他线路数据的处理过程与坡度数据的一样，最后都以列表的形式存在。

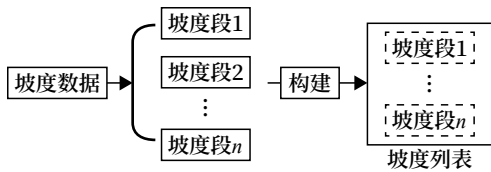


图2 坡度数据处理过程
Fig.2 Process of gradient data processing

数据整合处理：经过数据预处理获得的多种线路数据列表，这些数据列表在列表内部存在一定的联系，但是各列表之间还没有建立联系，不便统一使用各列表数据。为了解决这一问题，需要经过数据整合处理，生成统一的轨道变化列表。轨道变化点的存储格式为 { (变化点位置 P ，索引号 I)，变化点个数 N }。以坡度数据和轨道黏着数据为例，数据整合处理生成轨道条件变化列表的具体步骤如下：

步骤 1：在 ATP 坐标下，以列车当前位置为轨道变化列表中第一个变化点，此时对应的变化点位置 P 为列车当前最小估计位置，索引号 I 为 1，变

化点个数 N 为 1；

步骤 2：以此时的位置 P 从坡度列表、黏着力列表获得对应的坡度段、黏着力段，并保存坡度段的开始位置 B_g 和结束位置 E_g ，黏着力分段的开始位置 B_a 和结束位置 E_a ；

步骤 3：将坡度段的 B_g 和 E_g 与 P 进行比较，当 B_g 和 E_g 均大于 P 时， B_g 和 E_g 保持不变，否则设置对应的值为无穷远处。对黏着力段做同样的处理；

步骤 4：将 B_g 、 E_g 、 B_a 和 E_a 比较，从上述 4 个位置中取最小值对应的位置作为下一个变化点位置 P 的值，此时索引号 I 增加 1，变化点个数 N 也增加 1；

步骤 5：重复步骤 2 到 4，直到最后一个变化点位置已经超过目标点位置。

经过上述一系列步骤后，将所有的线路数据分类生成对应的数据列表，并将线路数据变化的情况整合在轨道变化情况列表中。

3 制动减速度模型

根据列车提供的制动数据可以获得六段式分段减速度。假设六段式减速度分段情况为：{ [0, v_0], a_0 , d_0 }、{ (v_0 , v_1], a_1 , d_1 }、{ (v_1 , v_2], a_2 , d_2 }、{ (v_2 , v_3], a_3 , d_3 }、{ (v_3 , v_4], a_4 , d_4 }、{ (v_4 , v_5], a_5 , d_5 }，如图 3 所示。每一分段中 { (v_n , v_{n-1}], a_n , d_n } 表示从速度 v_n 减速到速度 v_{n-1} 所需减速度为 a_n ，制动距离为 d_n 。制动距离 d_n 的计算如公式 (1) 所示。

$$d_n = \frac{v_n^2 - v_{n-1}^2}{2a_n} \quad (1)$$

经过线路数据处理模块处理后，获得线路数据列表和轨道变化情况表。以坡度数据和轨道黏着数据为例，假设从列车当前位置 p_c 到目标点 $Target$ 之间经过线路数据处理后获得 3 个轨道信息变化点，每一个轨道信息变化点具体内容如下：{ (p_0 , 0), 3 }、{ (p_1 , 1), 3 }、{ (p_2 , 2), 3 }。列车当前位置 p_c 、目标点位置 p_t 和 3 个变化点位置之间的关系为 $p_c < p_0 < p_1 < p_2 < p_t$ 。在获得这些变化点位置后，可以计算出每一个变化点距相邻变化点的距离 d_{pm} ，计算

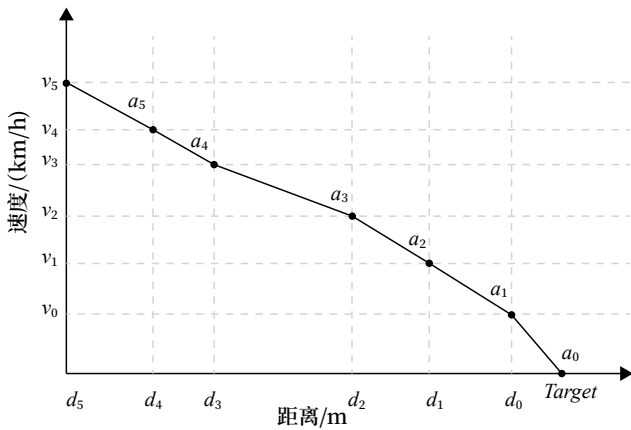


图3 六段式制动减速度分段
Fig.3 Segmentation of six-segment braking deceleration

如公式 (2) 所示;如公式 (3) 所示, 可以获得每一个变化点到相邻变化点之间的减速度值 A_n 。公式 (3) 中的 a 是从六段式分段减速度中获得, $Q_{adhesion}$ 是黏着系数, G_{grad} 是坡度带来的减速度。如公式 (4) 所示, 可以获得每个轨道信息变化点处对应的速度 v_{pn} 。通过处理 d_n 和 d_{pn} 、 v_n 和 v_{dn} 可以生成含有轨道信息变化点的减速度分段, 如图 4 所示。

$$d_{dn} = p_n - p_{n-1} \quad (2)$$

$$A_n = Q_{adhesion} \times a + G_{grad} \quad (3)$$

$$v_{dn} = \sqrt{(2A_n \times d_{dn} + v_{n-1}^2)} \quad (4)$$

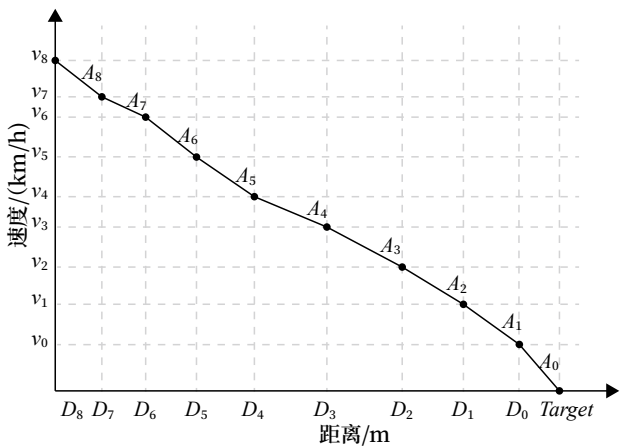


图4 融合轨道信息后的减速度分段
Fig.4 Segmentation of deceleration after combination of trackside data

将处理后的线路数据与已知的分段制动数据一起构建分段式制动减速度模型的具体步骤如下。

1) 获得列车当前位置、目标位置、目标速度。根据目标速度获得其对应制动数据分段, 分段速度

V_{id} 和对应的制动减速度 D_o 。

2) 当变化点个数 $N \geq 2$ 时, 分别获得线路变化列表中 $N - 2$ 和 $N - 1$ 对应的变化点数据。将 $N - 2$ 变化点的变化位置 P 记为距离分段的开始位置 B_d , $N - 1$ 变化点的变化位置 P 记为距离分段的结束位置 E_d , 以及该距离分段对应的距离 d_d 。根据 B_d 和 E_d 获得该距离分段点内的坡度值、黏着力值。将坡度值和黏着力值转为对应的减速度值, 并与 1) 中获得制动减速度值 D_i 相加, 即为 B_d 到 E_d 之间分段制动减速度模型的减速度值 D_o 。

3) 根据该减速度 D 、目标速度和分段速度 V_{id} , 计算该速度分段情况下对应的距离 d_v 。

4) 将速度分段距离 d_v 和距离分段距离 d_d 比较。

5) 当 $d_v > d_d$ 时, 按照速度距离公式, 计算制动模型分段距离 d 为 d_d 、减速度为 D 、末速度 V_e 为目标速度时对应的初速度 V_b 。记录此时的分段距离 d , 减速度为 D , 初速度 V_b 和末速度 V_e 。分段距离 d_v 为减去 d_d 后的值。

6) 将此时的初速度 V_b 作为下一个制动分段的末速度, 初速度为 V_{id} , 减速度为 D , 按照速度距离公式, 计算此时对应的距离 d_d , 将 d_d 与 d_v 比较。如果 d_v 仍大于该距离则重复 5) 和 6), 直到 $d_v \leq d_d$ 。

7) 当 $d_v \leq d_d$ 时, 分段距离 d 为 d_v , 减速度为 D , 末速度 V_e 为目标速度, 初速度为 V_{id} 。记录此时的分段距离 d , 减速度为 D , 初速度 V_b 和末速度。更新 d_d 为减去 d_v 后的值。

8) 更新当前末速度 V_e 为上一个的初速度 V_b , 初速度 V_b 为下一段原始制动分段速度 V_{id} , 并获得对应的制动减速度 D_i 。按照该制动减速度 D_i 、坡度和黏着计算此时对应的减速度 D 。计算末速度 V_e 、初速度 V_b 和减速度 D 对应的距离 d_o 。

9) 重复 4) 到 8), 直到将所有轨道变化列表中的变化点遍历一遍。

10) 输出 {速度, 减速度, 距离} 格式的制动减速度模型。

以上过程可以将通过线路数据处理模块生成的线路数据与列车制动数据结合起来构建更有效、更

安全的制动减速度模型。

4 控车曲线计算方法

根据第 2 小节和 3 小节的内容获得了将线路数据实时考虑且安全有效的制动减速度模型。在该制动减速度模型的基础上根据不同偏移时间可以获得不同的控车曲线，如图 5、6 所示。

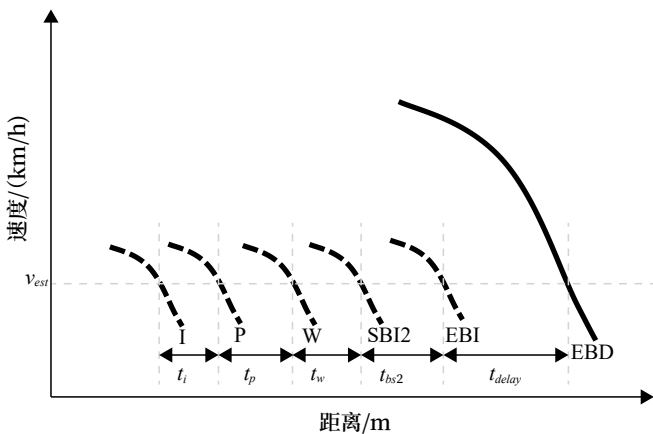


图5 基于EBD的控车曲线
Fig.5 EBD based speed and distance monitoring curve

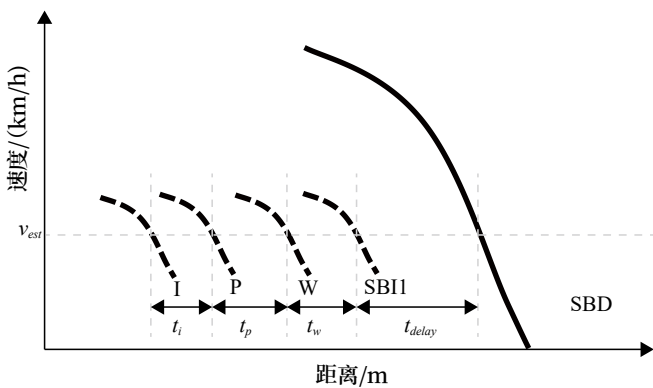


图6 基于SBD的控车曲线
Fig.6 SBD based speed and distance monitoring curve

如图 5 所示，在 EBD 制动模型基础上经过延迟时间 t_{delay} 生成紧急制动控车曲线 EBI。通过 EBI 曲线，可以获得在某一位置下 EBI 速度值，当列车速度大于 EBI 速度，车载设备触发紧急制动命令。在 SBD 模型基础上经过延迟时间 t_{delay} 生成常用制动曲线 SBI1，如图 6 所示。 t_{delay} 包含制动延迟时间 t_b 、系统延迟时间 t_{sys} 和切牵引延迟时间 t_{cutoff} 。其中，制动延迟时间 t_b 分为紧急制动延迟时间 t_{be} （由 EBD

推导 EBI 时）和常用制动延迟时间 t_{bs1} （由 SBD 推导 SBI 时）。在制动曲线（EBI 或 SBI）基础上经过不同的偏移时间可以获得对应的偏移曲线。在 EBI 曲线的基础上经过偏移时间 t_{bs2} 可以推导出 SBI2。在 SBI1 和 SBI2 曲线中取离目标点较远的部分形成常用制动控车曲线 SBI。通过 SBI 曲线可以获得某一位置下的 SBI 速度，当列车速度大于 SBI 速度，车载设备触发最大常用制动。在 SBI 曲线基础上经过偏移时间 t_w 和 t_{driver} ($t_{driver} = t_w + t_p$, t_p 是警告曲线到允许速度所偏移的时间) 分别可以获得警告曲线 W 和允许速度曲线 P 。通过警告曲线可以获得某一位置下的警告速度，当列车速度大于警告速度后，车载设备会触发切除牵引指令。通过允许曲线可以获得某一位置下的允许速度，当列车速度大于允许速度后，车载设备会提示超速，提醒列车控制速度。在允许速度曲线的基础上经过偏移时间 t_i 可以获得指示曲线 I 。通过指示速度曲线可以获得进入目标监控的位置，便于司机更好地控车。

5 总结

本文提出了一种优化现有的分段式制动减速度模型基础的方法，该方法充分考虑线路上影响列车制动性能的因素，如坡度、黏着等。通过实时动态地将这些线路数据与列车自身的制动数据相结合，构建了更为精确的制动模型，并用于车载控车曲线。基于本文的优化方案提高了制动性能和控车曲线的准确性，确保列车安全高效运行。该方法已经在欧洲五国项目中成功应用，具有广泛的应用前景和价值。

参考文献

- [1] 中国铁路总公司. 中国铁路总公司关于印发《CTCS-2 级列控车载设备暂行技术规范》的通知: 铁总运 [2014]29 号 [S]. 北京: 中国铁路总公司, 2014.
- [2] 杜江红, 郭军强. 基于列车速度的行车许可计算方法研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17 (6): 90-94.

- Du Jianghong, Guo Junqiang. Research on Calculation Method of Movement Authority Based on Train Speed[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(6): 90-94.
- [3] 江明. 轨道交通安全控制关键技术综述 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16 (11): 101-109.
- Jiang Ming. Survey of Railway Safety Control Related Key Technologies[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16(11): 101-109.
- [4] 岳林, 牛道恒. 高速列车速度监控曲线研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2014, 11 (6): 1-3.
- Yue Lin, Niu Daoheng. Research on Speed Supervision Curve for High Speed Trains[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2014, 11(6): 1-3.
- [5] 卫和君. 高铁车载 ATP 制动控车模式曲线计算方法的研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2013, 10 (S1): 33-38.
- Wei Hejun. Study on Calculation Method of ATP Braking Control Mode Curve for High-Speed Rail Vehicle[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2013, 10(S1): 33-38.
- [6] 柏卓彤, 柏赞, 李佳杰, 等. 基于制动距离表的高速铁路 ATP 常用制动曲线研究 [J]. 铁道标准设计, 2018, 62 (11): 139-143, 149.
- Bai Zhuotong, Bai Yun, Li Jiajie, et al. The Research on Automatic Train Protection Service Braking Curve Based on Braking Distance Table[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(11): 139-143, 149.
- [7] 李竹君, 毛保华, 苏梅, 等. 高速铁路列车 ATP 安全制动曲线优化设计 [J]. 铁道学报, 2018, 40 (4): 18-23.
- Li Zhujun, Mao Baohua, Su Mei, et al. Optimal Design of Safe Braking Curve of On-Board ATP System in High-Speed Train[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(4): 18-23.
- [8] 张友兵, 张波. 高速列车制动曲线的计算与验证 [J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31 (4): 97-103.
- Zhang Youbing, Zhang Bo. The Calculation and Verification of the High Speed Train Braking Curve[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(4): 97-103.
- [9] 黄卫中, 季学胜, 刘岭, 等. CTCS-3 级列控车载设备高速适应性关键技术 [J]. 中国铁道科学, 2010, 31 (3): 87-92.
- Huang Weizhong, Ji Xuesheng, Liu Ling, et al. Several Crucial Techniques for the High Speed Adaptability of CTCS-3 Train Control Onboard Equipment[J]. China Railway Science, 2010, 31(3): 87-92.
- [10] 鲍鹏宇, 陈志强, 王建敏, 等. 基于粒子群优化的列车制动曲线分段方法研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (7): 8-11.
- Bao Pengyu, Chen Zhiqiang, Wang Jianmin, et al. Research on Segmentation Method of Train Braking Curve Based on Particle Swarm Optimization[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(7): 8-11.
- [11] 钱卿. 速度 250 km/h 中国标准动车组常用制动减速度曲线设计 [J]. 铁道机车车辆, 2019, 39 (5): 87-90.
- Qian Qing. Design of Control Deceleration Curve for Service Braking of CR300 [J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(5): 87-90.
- [12] 贺广宇. 列控车载设备的控车核心算法 [J]. 中国铁道科学, 2018, 39 (3): 110-116.
- He Guangyu. Core Algorithm for Train Control Onboard Equipment[J]. China Railway Science, 2018, 39(3): 110-116.
- [13] 江明. CTCS-3 级列控系统发展历程及技术创新 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17 (1): 2-7.
- Jiang Ming. Development History and Technological Innovation of CTCS-3 Train Control System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(1): 2-7.

(下转 19页)

基于DCC的车载ATP线路数据 收发和使用处理

陈 扬, 郝宇祥, 刘 云

(国能新朔准池铁路(山西)有限责任公司, 山西朔州 036002)

摘要: 线路数据是列车能够稳定运行的关键因素, 传统的线路数据更新方法通常依赖于稳定的网络通信或大量的人力资源, 然而在一些特殊场景中, 无线网络不能覆盖或网络通信不够可靠, 会存在列车更新线路数据困难的问题, 为解决这一难题, 研究一种站内存储、区间触发的线路数据更新方法, 列车能够在无线网络无法覆盖的情况下及时更新线路数据, 从而提高列车的运行效率, 对铁路交通系统的稳定运行具有重要意义。

关键词: 线路数据; 无线覆盖; 区间; 高效

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0014-06

DCC-based Processing for Line Data Transmission, Reception and Utilization by Onboard ATP

Chen Yang, Hao Yuxiang, Liu Yun

(Guoneng Xin Shuo Zhunchi Railway (Shanxi) Co., Ltd., Shuozhou 036002, China)

Abstract: The line data is a key factor for the stable operation of trains. The traditional methods for line data update usually rely on stable network communication or plenty human resources. In some special scenarios, wireless network coverage is not available or network communication is not sufficiently reliable, which causes difficulties in line data update. To solve this problem, this paper studies a new method for line data update featuring data storage at the stations and data update at the sections. The proposed method enables timely line data update when wireless network coverage is not available. Thus, it improves the operation efficiency of trains, which has great importance for the stable operation of the railway transportation systems.

Keywords: line data; wireless coverage; section; high efficiency

1 概述

随着时代的进步, 人们的出行和货物的运输方

式日新月异, 其中轨道交通在众多方式中独树一帜, 占据了至关重要的位置。在轨道交通行业, 列车自动防护系统(Automatic Train Protection, ATP)是防护列车的运行速度不超过目标速度的安全控制系统。其中, 线路数据在该控制系统中发挥

收稿日期: 2023-12-28; 修回日期: 2024-05-02

第一作者: 陈扬(1979—), 男, 工程师, 本科, 主要研究方向: 铁道运输, 邮箱: 11250223@ceic.com。

着举足轻重的作用，是实现列车安全运行的基础和依据。一般包含轨道区段信息、坡度信息、区段限速信息等，这些数据是列车在运行过程中不可或缺的。列车根据线路数据和轨道码等信息计算出行车许可（MA），监控列车的位置和速度，保证列车安全行驶。目前，在网络通信质量较差的列车运行站场，适用于机车的列车自动防护系统的线路数据更新方式通常分为两种：接收地面布置的应答器设备的报文和读取车载电子地图内的线路数据。然而，这两种方式都存在一些问题。

当出现一些突发情况导致线路数据需要修改时，第一种方式需要人工现场或远程修改应答器内的线路数据，这种方式不仅效率低下，而且容易出错。第二种方式需要停车更换车载电子地图数据，这种方式同样存在效率低下的问题，而且灵活性也较差。为了更好地提高列车运行效率，本文提出一种基于数据管理控制设备（Data Control Center, DCC）的点对点的无线数据处理方法，这种方法通过 DCC 设备将线路数据直接传输到列车上，避免了传统方式中需要人工修改应答器或更换车载电子地图的繁琐过程。

2 DCC和ATP通信处理

DCC 和 ATP 之间采用双向通信的方式。当列车行驶进入 DCC 管辖的范围时，车载 ATP 主动向 DCC 发送注册请求，这个注册请求信息中包含车次号、车种类型等关键信息。DCC 接收到注册请求后，根据收到的注册请求信息中的车次号进行判断，当满足同该车载 ATP 建立连接的条件时，回复注册确认，进而建立会话连接。之后，一旦建立了会话连接，车载 ATP 周期性地发送列车的位置信息给 DCC。DCC 则根据列车发送的位置和联锁信息、前方进路条件等信息判断是否满足发送进路信息的条件，将线路数据周期性地发送给车载 ATP，否则周期发送心跳信息保持与 ATP 的连接。当列车越过 DCC 管辖范围时，车载 ATP 主动向 DCC 发送注销请求，DCC 根据列车位置判断满足注销条件时回复注销确认。注销后，DCC 与 ATP 之间的会话连接

将断开，但 ATP 仍然可以根据之前接收到的线路数据继续运行。具体的通信流程如图 1 所示。

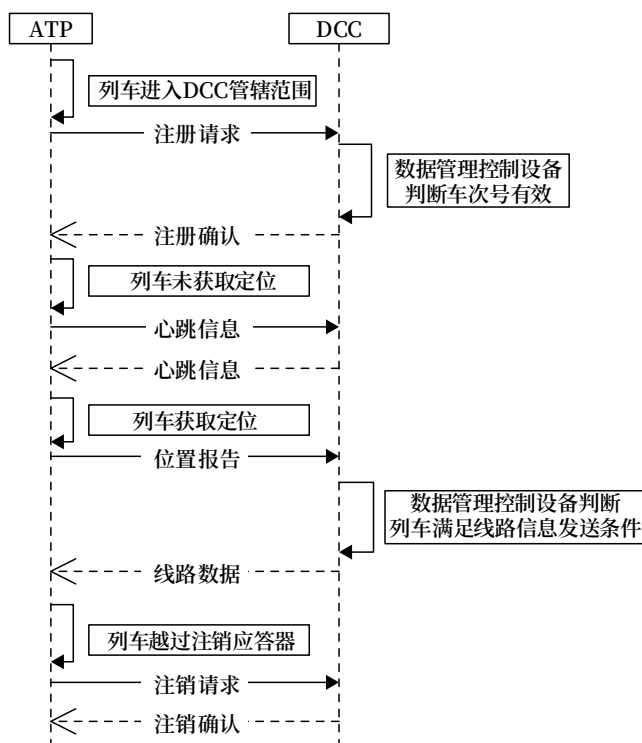


图1 ATP与DCC交互流程

Fig.1 Flow chart of interaction between ATP and DCC

3 线路数据存储处理

DCC 设备布置在站内，列车区间运行时 ATP 不能实时和 DCC 通信。因此，为了确保 ATP 能够获取到准确的线路数据，DCC 需要提前将区间的线路数据发送给车载 ATP。当列车进入 DCC 管辖范围内时，不仅能够接收处理站内的线路数据，还能接收区间的线路数据。

对于站内线路数据，车载 ATP 直接使用，将其映射到 ATP 坐标系上，用于行车许可的计算和监控列车的运行。

对于区间线路数据，由于区间线路数据包含的信息量较大，为了确保数据的完整性和传输的可靠性，需要进行分包发送和接收。ATP 在站内将区间线路数据收齐，并存储到非易失性存储内，这种存储方式可以确保即使在区间重启的情况下，ATP 也能够重新读取并处理这些数据。当列车进入区间后，将所需的区间线路数据分段读取出来，进行处理，

如图 2 所示。此外，这种分包收发的方式还提高了数据传输的效率和可靠性。由于区间线路数据量较大，如果一次性发送全部数据，会对 ATP 的处理能力和存储能力造成压力。而分包收发则可以将数据分成多个小包，逐个发送和接收，从而降低了处理和存储的难度。

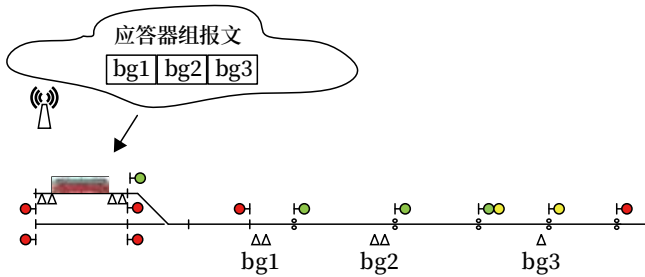


图2 区间线路数据信息
Fig.2 Information of section line data

为确保车载 ATP 能够准确地收齐区间线路数据，通信双方约定拆分后的每包区间线路数据必须包含整个区间线路数据的所有 BG 列表，这是一个确保车载 ATP 完整、准确接收区间线路数据的重要前提。

当车载 ATP 接收到 DCC 周期分包发送的区间线路数据时，将这些数据与 BG 列表进行一一对应。如果数据能够对应，那么 ATP 认为区间线路数据已经接收完毕。以下通过一个具体的例子来说明这个过程，如图 3 所示，假设车载 ATP 已经收到了 BG1、BG3、BG4、BG5 这 4 条区间报文。当下一个周期再次收到一个包含 BG6 的区间报文时，ATP 首先检查该报文内的 BG 列表是否与当前已经存储的 BG 列表一致。如果一致，那么 ATP 将包含 BG6 的区间报文存储起来。如果车载 ATP 已经存储了包含 BG6 的区间报文，那么当新收到一个包含 BG6 的报文时，ATP 用新收到的 BG6 替换之前的报文。这种机制可以确保 ATP 始终使用最新的数据。

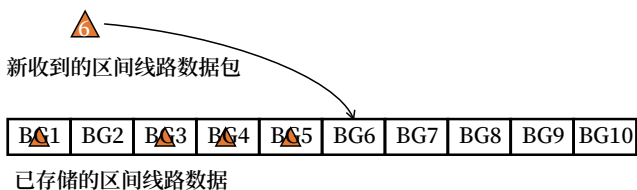


图3 区间线路数据存储
Fig.3 Storage of section line data

4 线路数据触发及使用

区间线路数据的触发分为两种：基于列车越过链接应答器的触发方式和基于 MA 越过链接应答器的触发方式。这两种方式都是为了确保 ATP 能够准确获取区间线路数据，并据此计算行车许可和监控列车运行，具体的执行步骤如下。

列车在区间上电重启，尚未接收到任何线路数据，因此 ATP 系统中的在用线路数据为空。此时，车载 ATP 会从非易失性内存中恢复区间线路数据至内存，以备后续使用。

当列车越过链接应答器时，车载 ATP 将内存中该组应答器的线路数据取出，并映射至 ATP 坐标系。

若此时的行车许可越过了下一个链接应答器，则将下一个链接应答器相应的线路数据从内存中取出，并映射至 ATP 坐标系。

如图 4 所示，列车在区间上电重启，此时车载 ATP 没有正在使用的线路数据，如图 4 中 (a) (区间启机) 所示。列车降级前行，当列车压过应答器 bg1 时，车载 ATP 将应答器 bg1 内存储的线路数据映射到 ATP 坐标系上。此时列车可以根据收到的轨道码计算行车许可，由于列车当前收到的轨道码为 L 码，行车许可的长度应该是前方第 3 个闭塞分区末端，但是由于应答器 bg1 内存储的线路数据较短，导致在用线路数据不足，行车许可只能计算到前方第 1 个闭塞分区末端，如图 4 中 (b) (线路数据不足) 所示。此时行车许可越过了应答器 bg2 的位置，车载 ATP 将应答器 bg2 内存储的线路数据映射到 ATP 坐标系上，在用线路数据延长，从而行车许可延长，提高了列车的运行限速，加快了列车的行驶速度，如图 4 中 (c) (线路充足数据) 所示。

5 区间线路数据的更新

区间线路数据只适用于区间内的行驶，当列车从区间运行至站内时，ATP 软件应删除上一站存储的区间线路数据，并重新与管辖当前车站的 DCC

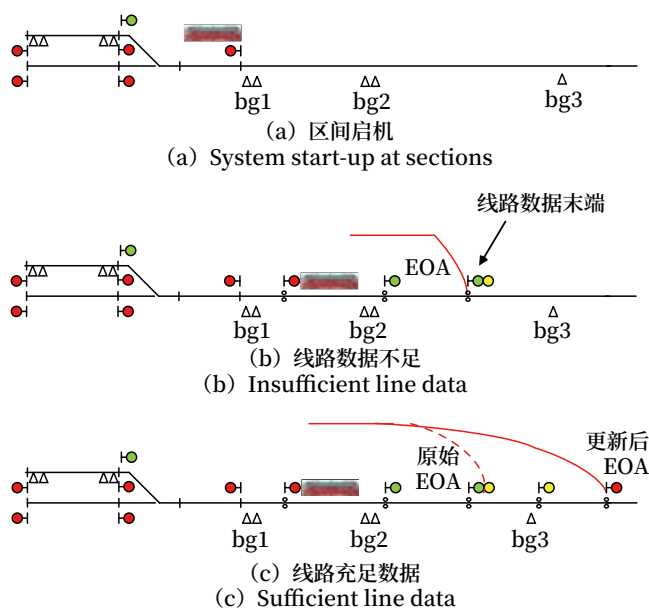


图4 区间触发线路数据方式

Fig.4 Triggering method of line data update at section

进行通信，继续接收到下一车站之前的区间线路数据，并存储到非易失性内存中。继续重复之前的步骤进行在用线路数据更新。

6 异常处理

6.1 车-地通信异常中断

在 DCC 管辖范围内，当网络等外部因素导致车-地通信异常中断时，车载 ATP 可能会面临无法及时获取站内和区间线路数据的问题。这种状况对于列车的安全运行构成了潜在的威胁。为应对这种情况，车载 ATP 需要采取一系列措施。首先，它应该立即删除正在使用的站内线路数据，确保列车不会因为使用旧站内数据影响列车安全运行。其次，车载 ATP 应清除已存储的区间线路数据，避免运行至区间使用过时或不完整的数据。通过这些措施，车载 ATP 能够最大限度地减少因车-地通信中断带来的安全风险，确保列车的正常运行。

6.2 区间线路数据未收齐

当列车驶出 DCC 管辖范围时，如果车载 ATP 尚未收集完整的区间线路数据，应视为区间线路数据不完整且无效。在这种情况下，ATP 不应存储或使用这些不完整的数据。在驶出 DCC 管辖范围前，

ATP 必须确保已完整收集区间线路数据，以避免潜在的安全风险。

6.3 区间线路数据变化

在 DCC 管辖范围内，通常是两种场景导致区间线路数据发生变化。每一种场景都有独立的解决方案，以确保列车的安全运行。

第一种场景：区间线路数据的 BG 列表没有变化，但特定 BG 的区间报文却发生了变化。在这种情况下，车载 ATP 可能只更新了部分变化的 BG 区间报文。如果 ATP 尚未接到剩余变化的 BG 区间报文，列车就已经驶出了 DCC 管辖范围，那么车载 ATP 可能会根据之前收到的 BG 报文错误地判断区间报文已收齐。这将导致区间报文未更新为最新版本，使用错误的区间报文，从而给列车运行带来风险。为了解决这个问题，当 DCC 判断符合该种异常场景时，它需要先发送一次区间线路数据为空的报文。车载 ATP 在收到这个空报文后，会清空其存储的区间线路数据，然后再重新收取更新后的区间线路数据报文。这样可以确保车载 ATP 使用的是最新、最准确的区间线路数据，从而保证列车的安全运行。

第二种场景：当区间线路数据的 BG 列表本身发生变化时，车载 ATP 需要将最新收到的 BG 区间报文内的 BG 列表与当前已存储的区间线路数据 BG 列表进行一致性判断。如果发现两者不一致，车载 ATP 将清空其存储的区间线路数据。这种一致性检查的目的是确保车载 ATP 不会使用过时或不一致的区间线路数据，从而避免可能导致的安全风险。

这两种场景的处理方式都是为了确保列车在 DCC 管辖范围内行驶时，车载 ATP 能够准确、及时地获取和使用最新的区间线路数据，以保证列车的安全运行。通过这些措施，可以有效地减少因数据变化而带来的潜在风险。

7 结束语

本文提出一种新的线路数据接收和处理方式，该方法旨在解决列车在区间内更新在用线路数据困难的问题。过去，由于技术限制，列车在区间内获

取线路数据的方式较为复杂,导致列车运行效率低下,并增加了人力成本。然而,本文提出的站内收、区间用的新型线路数据接收和处理方式,有效地解决了这一问题。列车可以在区间内实时、准确地接收到线路数据,并根据这些数据计算出行车许可和监控信息。这种方式不仅提高了列车的运行效率,还减少了人力成本,为列车的安全、高效运行提供有力的支持。

本文讨论的新型线路数据接收和方式为列车运行带来了重大的变革,为列车的高效运行打下坚实的基础。这是一项具有重要实用价值的研究成果,对于推动国内铁路运输行业的发展具有重要的意义。

参考文献

- [1] 曹晓宇. 车载ATO系统记录板数据解析工具设计[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(1): 62-68.
Cao Xiaoyu. Design of Data Parsing Tool for Record Board of Onboard ATO System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 21(1): 62-68.
- [2] 袁栩. 应答器设置位置的计算[C]//中国铁道学会. 2007年铁路通信、信号、信息专业工程设计年会论文集. 北京, 2007: 276-280.
- [3] 刘栋青, 刘天琦, 田宏达, 等. 自主运行控制模式电子地图技术研究[J]. 铁道技术标准(中英文), 2021(12): 26-31.
Liu Dongqing, Liu Tianqi, Tian Hongda, et al. Research on Electronic Map of Train Autonomous Circumambulation System[J]. Railway Technical Standard (Chinese & English), 2021(12): 26-31.
- [4] 李志兵, 王文泓, 许扬. 铁路货运枢纽综合自动化系统设计[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(1): 7-11.
Li Zhibing, Wang Wenhong, Xu Yang. Design of Integrated Automation System of Railway Freight Hub[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 7-11.
- [5] 易立富. 城轨交通列控系统的车地通信方式[J]. 都市快轨交通, 2006, 19(6): 75-77.
Yi Lifu. Train-Ground Communication Modes of the Train Control System in Urban Rail Transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2006, 19(6): 75-77.
- [6] 袁卫东. 商合杭高铁引入商丘枢纽信号系统RBC覆盖方案[J]. 铁路技术创新, 2021(2): 92-98.
Yuan Weidong. Solution to RBC Coverage after Introducing Shangqiu-Hefei-Hangzhou HSR into Signaling System of Shangqiu Hub[J]. Railway Technical Innovation, 2021(2): 92-98.
- [7] 张焱. CBTC系统车载设备常见故障原因分析及解决方案[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 224-227.
Zhang Yi. Cause Analysis and Solutions of Common Faults in CBTC System Onboard Equipment[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(9): 224-227.
- [8] 陈军华, 张星臣, 徐彬, 等. 高速铁路列车运行图稳定性及其影响因素分析[J]. 物流技术, 2011, 30(15): 81-84.
Chen Junhua, Zhang Xingchen, Xu Bin, et al. Research on High-Speed Railway Timetable Stability and Its Effect on Railway Transportation[J]. Logistics Technology, 2011, 30(15): 81-84.
- [9] 张健, 李津汉, 王伟力. 上盖物业动车运用所无线网络覆盖方案分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(3): 27-31.
Zhang Jian, Li Jinhan, Wang Weili. Analysis of Wireless Network Coverage for EMU Depot with Superstructures[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(3): 27-31.
- [10] 陈雨, 李新, 叶亮, 等. 城市轨道交通车段/场ATP系统改造策略[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(1): 56-60.
Chen Yu, Li Xin, Ye Liang, et al. Research on Reform Strategy of ATP System in Urban Rail Transit Depot/Parking Lot[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 56-60.

- [11] 宋大治, 王健, 徐钟全, 等. 城市轨道交通大数据技术应用研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (2): 70-75.
Song Dazhi, Wang Jian, Xu Zhongquan, et al. Application of Big Data Technology in Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(2): 70-75.
- [12] 童荣军. 普速铁路 CTC 中心站集中控制技术工程应用探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (3): 1-5, 16.
Tong Rongjun. Discussion on Engineering Application of Centralized Control Technology in CTC Central Station of Conventional Speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(3): 1-5, 16.
- [13] 王军贤. 中低运量城轨交通系统分析与选型 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (3): 75-78.
Wang Junxian. Analysis and Selection of Urban Rail Transit System with Medium and Low Volume[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(3): 75-78.
- [14] 何占元, 张艳辉. 朔黄铁路重载无线闭塞中心系统研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (4): 6-12, 18.
He Zhanyuan, Zhang Yanhui. Radio Block Center System for Shuozhou-Huanghua Heavy Haul Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(4): 6-12, 18.
- [15] 张家铭, 代守双. 城市轨道交通全电子计算机联锁改造工程设计方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (4): 58-63.
Zhang Jiaming, Dai Shoushuang. Design Scheme of All-Electronic Computer Interlocking Reconstruction Projects of Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(4): 58-63.
- [16] 曹晓宇. 城市轨道交通全电子计算机联锁改造工程设计方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (4): 58-63.
Zhang Jiaming, Dai Shoushuang. Design Scheme of All-Electronic Computer Interlocking Reconstruction Projects of Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(4): 58-63.

(上接 13页)

- [14] 杨栋, 王思明, 许建玉. CRH3 型动车组牵引制动模式曲线的算法研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16 (12): 94-98.
Yang Dong, Wang Siming, Xu Jianyu. On Algorithm of Traction and Braking Mode Curve for CRH3 Multiple Unit[J]. Urban Mass Transit, 2013, 16(12): 94-98.
- [15] 龙时丹. 基线 3 ETCS 列控系统 ATP 制动减速度转换模型研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (6): 1-4.
Long Shidan. Research on ETCS Baseline 3 ATP Brake Deceleration Conversion Model[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(6): 1-4.
- [16] 卢瑞冰. 一种列控车载系统的优化与实现 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (11): 1-6.
Lu Ruibing. Optimization and Implementation of Train Control On-board System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(11): 1-6.

地面安全控制中心混合控制方法研究

胡 瑞^{1, 2}

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070;

2. 北京市高速铁路运行控制系统工程技术研究中心, 北京 100070)

摘要: 地面安全控制中心 (STC) 系统是支持列车自主运行控制系统相关联锁功能的安全保障核心设备。STC 系统中信号设备的控制方法是在现有成熟联锁系统中信号设备的控制方法基础上进行优化设计而成, 结合继电器控制和全电子模块控制的优点, 根据车站类型和规模, 不同信号设备采用不同的控制方式。STC 系统信号设备的控制方法在继承全电子控制的智能化、电子化和网络化的同时, 还能够在现场布置信号设备时, 减少信号继电器的使用, 在一定程度上降低车站设备的建设及改造成本。首先介绍 STC 系统, 阐述系统功能和接口特点, 然后重点介绍 STC 系统中信号、道岔及零散继电器等信号设备的控制方法, 并分析 STC 系统信号设备控制中全电子模块与继电器的映射原则, 结合 STC 系统信号设备控制的优势, 对其未来推广应用进行展望。

关键词: STC 系统; 继电器; 全电子模块; 映射原则

中图分类号: U283.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0020-07

Research on Hybrid Control Method for Safety Train Control System

Hu Rui^{1, 2}

(1. CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

(2. Beijing Engineering Technology Research Center of Operation Control Systems for High Speed Railways, Beijing 100070, China)

Abstract: The Safety Train Control (STC) system is a type of core safety guarantee equipment that supports the interlocking functions related to the autonomous train control system. The control method for the signaling equipment in the STC system has been optimized and designed on the basis of the control method for the signaling system in existing mature interlocking systems. The advantages of relay control and fully electronic module control are combined, and different control methods are adopted for different types of signaling equipment and according to the type and scale of the stations. The control method for the signaling equipment in the STC system not only inherits the features of

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2024-03-06

基金项目: 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司科研项目 (2300-K1200045.05)

发明专利: 2022 年国家发明专利 (ZL202210354161.5); 2022 年国家发明专利 (ZL202210354183.1)

作者简介: 胡瑞 (1989—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 高速铁路列车控制系统、磁浮轨道交通系统运行控制系统技术, 邮箱: hurui@crscd.com.cn.

intelligentization, electronization and networkization of fully electronic control, but also reduces the use of signaling relays during the on-site installation of signaling equipment, which reduces the construction and retrofitting costs of station equipment to some extent. This paper first introduces the STC system, and elaborates on its system functions and interface characteristics. It then describes the control methods of such signaling equipment as signals, switches, and scattered relays in STC system. It also analyzes the mapping principles of the fully electronic modules and relays in signaling system control of STC system, and describes the prospects of the future promotion and application of signaling system control of STC system in view of its advantages.

Keywords: safety train control system; relay; fully electronic module; mapping principle

1 概述

目前大铁广泛使用的信号系统,采用分散式系统架构,将线路每个车站作为独立控制区域,通过独立的联锁系统和地面设备完成信号设备控制功能。通常每个车站需要配备一套联锁设备和地面信号设备,导致硬件设备较多,维护成本高。在目前投入运营的城市轨道交通线路中,基于通信的列车控制(CBTC)的地面控制系统大多通过分别设置计算机联锁和区域控制器(ZC)的方式来共同管理列车的运行,保证行车安全。这种地面控制不仅车地接口冗余重复、设备间耦合度高,导致系统的运营和维护成本高、运行效率较低,还增加了地面控制系统的复杂性。

随着嵌入式计算机技术、电子信息技术、通信技术、故障-安全等技术的不断完善和成熟,全电子联锁应运而生。采用集成化、模块化程度高的电子执行单元代替继电器控制轨旁信号设备,取消了组合架和接口柜之间的配线,使得系统更加安全高效、整体结构简洁且易于安装和维护。本文研究以此作为出发点,在现有城市轨道交通CBTC系统架构基础上进行优化设计,采用全电子化的信号设备控制方案,将联锁和区域控制器功能进行一体化设计,形成地面安全控制中心系统(STC)。

2 STC系统介绍

2.1 STC系统结构

STC系统是轻型轨道交通列车自主运行控制系

统的重要组成部分之一,是保障行车安全性、可靠性的地面安全控制中心系统。STC系统作为实现车-车通信移动闭塞列车控制的关键核心,具备联锁和区域控制器的功能,实现联锁ZC一体化,与车载信号系统、列车自动监控(ATS)系统共同完成列车的实时指挥,实现列车运行自动化,保证列车的安全运行。

STC系统结构如图1所示,系统主要分为4大部分。

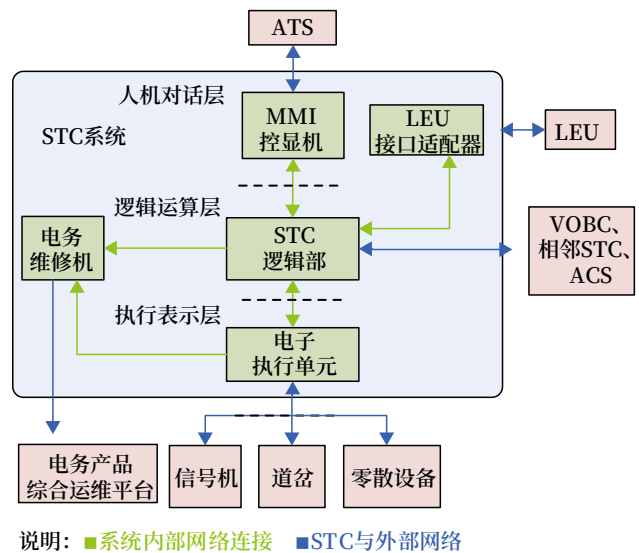


图1 STC系统结构示意图

Fig.1 Schematic structure diagram of STC system

1) STC逻辑部子系统是承担逻辑运算的核心部件,能够接受和执行操作员或ATS系统的操作指令,实现地面信号设备联锁逻辑控制功能。主要接受包括不同类型模式的进路办理和信号机、道岔、站台门等设备控制,实现列车位置识别、列车跟踪筛选和车辆信号授权计算等车辆管理功能,并准确

及时地将信号授权、特殊控制命令等信息传输给车载系统。同时能够根据其管辖区域内管理的所有列车信息、地面信号许可信息等，为通信列车搜索前序列车，配合车载系统，实现车-车通信功能。

2) 全电子执行单元子系统负责采集信息的输入及逻辑运算结果的输出。

3) MMI 子系统负责人机会话，能够通过人机接口界面下发命令（如转动道岔、排列进路）等命令，显示设备状态和进路相关信息，显示控制过程中的提示报警信息，并与 ATS 进行控制命令及状态显示数据交互。

4) 电务维修机子系统实现系统维护、故障查找等功能，记录 STC 设备的运行状态、信号机及道岔状态等关键数据，对 STC 系统状态、运行过程的中间状态（如进路状态）和设备状态（如信号机、区段、道岔等的状态）进行提示和报警，并与综合运维平台进行接口。

2.2 STC系统接口

STC 系统接口原理如图 2 所示。STC 系统与外部系统的接口主要包括与信号设备及轨旁设备的继电器接口，与 LEU、VOBC、ACS、ATS、相邻 STC 系统以及电务产品综合运维平台的通信接口。

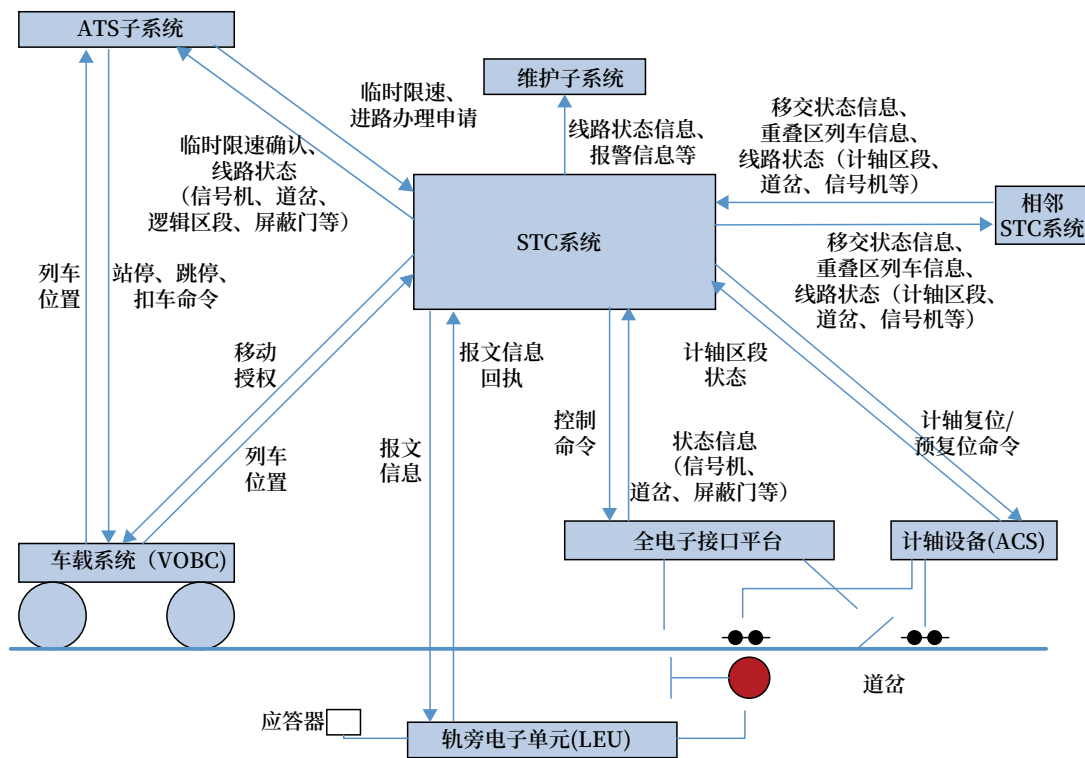


图2 STC系统接口原理
Fig.2 Interface principle diagram of STC system

与各外部接口的描述如表 1 所示。

3 STC系统信号设备控制

地面信号设备的控制，作为 STC 系统的执行层，是保证行车安全的关键环节之一。结合继电控制和全电子控制的系统特点，考虑现场设计情况，设计了满足 STC 系统的信号设备混合控制结构，以及基于此

控制结构的全电子模块与继电器之间的映射原则。

3.1 STC系统信号设备控制方法介绍

在既有的全电子联锁控制系统中，通常采用信号机模块控制信号机，道岔模块控制道岔，轨道模块控制轨道区段，输入 / 输出模块控制零散设备。因在 STC 系统中，业主对于道岔模块的使用有所限制，因此在不采用道岔模块，又要求通过采用全电

表1 STC系统外部接口

Tab.1 External interfaces of STC system

编号	接口描述	功能
1	信号设备接口	由安全平台经内部网络与全电子执行单元通信, 全电子执行单元通过信号电缆信号设备连接。实现对信号机、道岔、站台门、紧急关闭按钮等信号设备的输出控制和状态采集
2	人机接口	与操作人员接口, 实现人工操作和维护
3	计轴设备接口	与计轴系统使用以太网接口, 从计轴系统接收区段状态, 向计轴系统发送计轴复位 / 预复位命令
4	LEU接口	与 LEU 使用 RS-422, 将包含信号许可、临时限速信息的应答器报文发送至 LEU, 进而通过有源应答器传送至车载设备
5	VOBC接口	与 VOBC 使用以太网接口, 完成列车位置信息、控制信息的接收, 以及列车控制信息、特殊控制报文等信息的发送
6	邻站 STC	与相邻 STC 系统使用以太网接口, 相互交互道岔、区段、信号机、站台门、紧急关闭、照查、临时限速、移交状态、移交列车、轨道区段列车排序等信息
7	ATS接口	与 ATS 使用以太网接口, 接收 ATS 下发的选路等控制命令, 并将显示状态送给 ATS
8	综合运维平台接口	与综合运维平台使用以太网接口, 用于传递 STC 设备关键数据和系统运行状态等信息

子方式实现目标控制器逻辑与 STC 逻辑部之间的接口设计的情况下, STC 系统结合继电器控制和全电子模块控制的优点, 根据车站类型和规模, 按不同信号设备采用不同控制方式。

在设计时, 对信号机设备控制采用全电子信号模块, 而道岔和零散设备采用全电子与继电器结合控制的方式, 即将道岔和零散设备的状态通过继电器进行采集, 并进行一定的集成, 将若干不同类型的设备, 集成为一个通用的输入 / 输出模块。通过采用全电子通用模块实现设备控制逻辑, 采用继电器电路作为控制逻辑的输出, 进而达到道岔及零散设备的控制目的, 其中零散设备驱采对象包括站台门、防淹门、扣车按钮、紧急停车按钮和人员防护开关等。

STC 系统信号设备控制网络拓扑如图 3 所示。

3.2 STC系统信号设备控制逻辑

对于信号机设备, 在 STC 系统逻辑设计时, 通过信号机模块采集信号机的点灯状态信息, 进行联锁逻辑运算, 通过信号机模块输出对应逻辑运算命令, 来实现信号机灯光的控制。

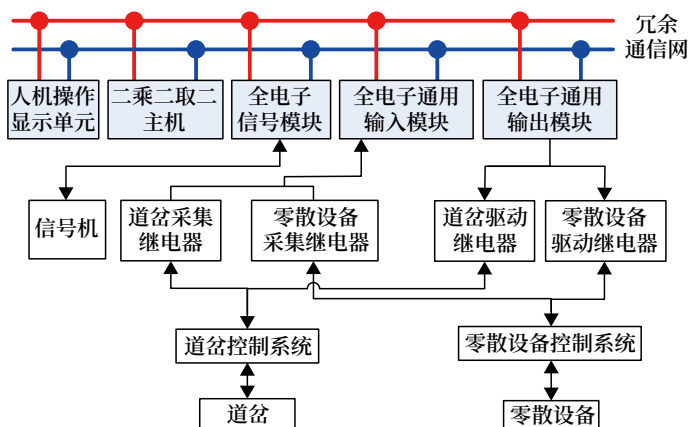


图3 STC系统信号设备控制网络拓扑示意
Fig.3 Schematic topology diagram of signaling equipment control network of STC system

对于道岔设备, 在逻辑设计时, 通过通用输入模块采集道岔相关继电器的状态, 将继电器采集状态组合成相应的道岔位置信息, 并设计输出逻辑, 将联锁逻辑运算出的道岔位置命令, 转换成继电器控制命令。然后通过采用通用输出模块, 与道岔相关继电器进行连接通信, 来控制道岔相关继电器的动作。在实现道岔控制的同时, 能够保证道岔的既有继电器控制逻辑不被修改。

对于零散设备, 在逻辑设计时, 通过通用输入模块采集零散设备继电器的状态, 进行联锁逻辑运算, 通过输出模块输出对应继电器的吸起或落下命令, 实现相应零散设备的控制。

对于单开道岔、双开道岔及相关零散设备对应的继电器, 其状态通常可以通过二元逻辑来实现, 例如道岔状态设置为定位和反位两种状态, 在代码逻辑运算中, 对应着 0 和 1 的二元逻辑。因此在采用通用模块实现对道岔及零散设备驱动继电器的直接控制时, 在运算逻辑设计中, 每个设备的命令内容和状态内容均设置为若干字节, 设定所述字节的特定比特位表示唯一的设备状态或驱动命令, 如图 4 所示。

如此, 当室外道岔设备采用三开道岔、五开道岔或者多开道岔时, 相应的位置不仅只有定位和反位, 则上述 0 和 1 对应的二元逻辑就缺少了相应的对应关系。此时多开道岔的表示信息通过多个表示继电器进行传送, 各位置表示继电器的状态传送至

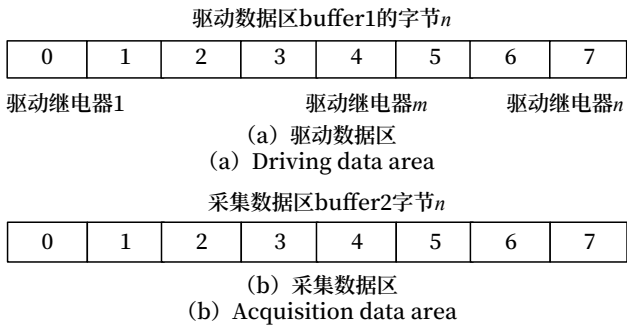


图4 STC采驱数据区与继电器对应关系示意
Fig.4 Schematic diagram of correspondence between STC I/O data area and relay

通用输入模块，通用输入模块处理之后，传送给STC系统进行逻辑运算，并将运算结果进行输出至相应的通用输出模块，通用输出模块根据输出结果，来控制驱动相应的继电器。由输出继电器将道岔的转换信息传递给道岔系统，将相关零散设备的控制信息传递给零散设备系统。道岔控制系统完成道岔向STC所要求的目标位置进行转换，转换完成之后进行机械锁闭，并向STC系统传送到岔转换后的位置表示信息。

3.3 全电子模块与继电器的映射原则

如何将全电子模块的控制映射至对应继电器的控制，是在STC信号设备控制逻辑设计时需要考虑的问题。在STC系统联锁逻辑处理时，采用配置单元配置全电子模块存储区和继电器工作区之间的映射关系。STC应用软件将命令写入命令发送区，将设备状态存放在设备状态接收区，对于各个设备的状态采集主要采用以下方式。

1) 获取继电器状态在状态接收区中的偏移量，如公式(1)所示。

$$usPosinEEUSta = (usDevID - 1U) \times 4 + nChID - 1 \quad (1)$$

其中， $usPosinEEUSta$ 为偏移量； $usDevID$ 为继电器对应的设备编号； $nChID$ 为继电器所在字节在该设备的通道号。

2) STC应用软件采集相应的继电器状态，设置设备状态接收区，相应的映射关系如图5所示。其中每个设备按着可映射3 Byte进行设计，即可在

已配置继电器位置的基础上，获取不同继电器的采集值0或1，进而组合成相应的设备状态。

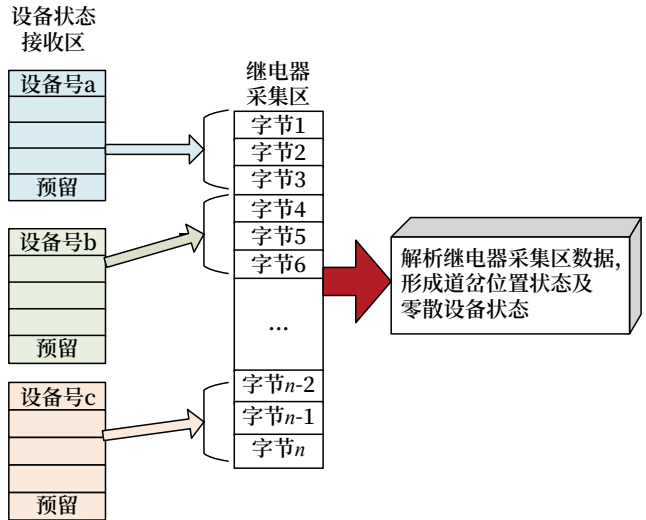


图5 通用输入模块状态接收区与继电器采集区映射示意
Fig.5 Schematic diagram of mapping between status reception area of GIU and acquisition area of relay

对于各个设备的驱动转换主要采用以下方式。

1) STC逻辑部根据操作员选路意图，形成道岔及零散设备驱动命令，按着道岔控制电路的逻辑，驱动相应的驱动继电器吸起，即设置该继电器所在继电器驱动区对应字节比特位为1，若无驱动命令，则设置该比特位为0。

2) STC应用软件根据设备命令设置继电器驱动区，然后依据相应的映射关系，如图6所示，找到该设备在命令输出区所在偏移，设置对应的命令输出区数据。STC系统将该数据输出，驱动对应的通用输出模块，通过连接相应的外部设备继电器电路，控制对应道岔或零散设备转动至规定位置。

4 STC系统信号设备控制优势

联锁设备全电子化的特点，执行机构采用全电子单元，安全技术设计，通过电子化驱采接口设计，减少继电器逻辑电路，使系统结构设计简单清晰，设备更加紧凑。在充分利用电子执行单元逻辑的优点的同时，还能适当集成成熟的继电器电路，提高系统集成化程度和工程化能力。

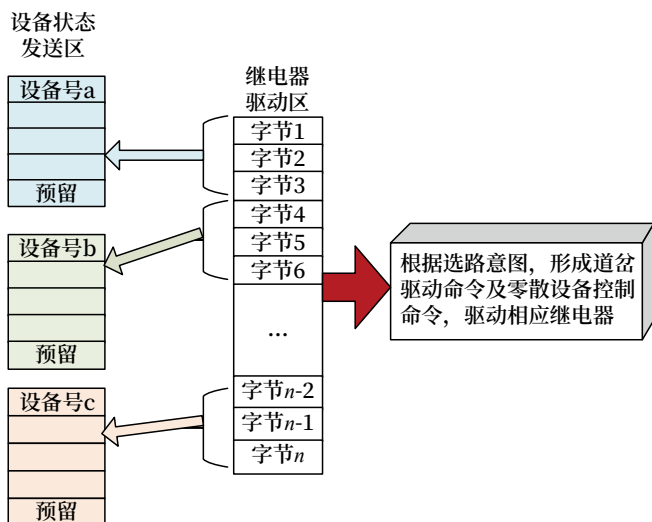


图6 通用输出模块命令发送区与继电器驱动区映射示意
Fig.6 Schematic diagram of mapping between command issuance area of GOU and driving area of relay

系统可扩展性高的特点，可通过数据配置实现模块与继电器接点的映射关系，实现模块设备局限的情况下，通过通用模块实现信号设备的电子化控制逻辑。

智能化的特点，继承既有全电子控制系统智能化优势，可具备在线检测和监测功能，实现数字化和智能化，可迅速定位信号设备故障状态，为后续STC逻辑软件部署至云平台，进一步降低建设成本和优化运营维护提供可能。

联锁、ZC一体化的特点，STC系统同时具备典型CBTC中的CBI功能和ZC功能，支持LEU报文管理、信号设备控制和列车管理等功能，并能够配合车载系统共同实现车-车通信，不仅可以在设计上简化系统间接口、降低系统复杂度，在研发、集成和维护等方面也能减少成本。

5 结语

目前基于通信的列车自主运行控制系统已成为轻量化轨道交通的首选方案，STC系统作为地面信号设备的核心控制系统，在保证可靠性和安全性的基础上，造价也相对经济。在中低速磁浮线路、山地轨道交通、市郊轻轨、城市快轨、旅游专线等线路上具备有力竞争优势和广阔应用前景。目前已成功应用于国内首条磁浮文旅项目——凤凰磁悬浮文化旅游项目，已在凤凰古城站、凤凰迎宾站、凤凰

揽胜站、凤凰等待站开通运营。系统凭借一体化程度高、全生命周期成本低、提高运营自动化程度等优势，备受业主认可。

参考文献

- [1] 国家铁路局. 铁路车站计算机联锁技术条件: TB/T 3027-2015[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [2] 何文卿. 6502电气集中电路[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
- [3] 毛芳. 关于全电子联锁与计算机联锁系统的对比分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(1): 110-114.
Mao Fang. Comparative Analysis of Full-Electronic Interlocking and Computer Interlocking Systems[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(1): 110-114.
- [4] 赵伟. 浅析全电子计算机联锁系统优缺点[J]. 科学与信息化, 2018(4): 45, 47.
- [5] 胡瑞, 周杰, 张利峰, 等. 一种信号设备的控制方法及系统: CN114442541B[P]. 2022-09-09.
- [6] 胡瑞, 胡进前, 周杰, 等. 一种全电子模块和继电器之间的映射方法及系统: CN114435425B[P]. 2022-08-09.
- [7] 左飞. 中小运量轨道交通全电子联锁系统应用研究[J]. 工程建设与设计, 2021(19): 127-129.
Zuo Fei. Research on the Application of All-Electronic Interlock System in Small and Medium Capacity Rail Transit[J]. Construction & Design for Engineering, 2021(19): 127-129.
- [8] 陈光武, 范多旺, 魏宗寿. 全电子联锁系统轨旁电子单元的研究[J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32(3): 70-73.
Chen Guangwu, Fan Duowang, Wei Zongshou. Research on All-Electronic Track-Side Unit of Railway Signal[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2013, 32(3): 70-73.
- [9] 李洁, 辛鑫. 城市轨道交通信号系统分段式改造方案[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(10): 80-85.

- Li Jie, Xin Xin. Phased Retrofitting Scheme for Signaling System for Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(10): 80-85.
- [10] 张梦乡. 中低速磁浮列车运行控制系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [11] 崔俊锋, 石晶. 轻型轨道交通机电一体化系统研究[J]. 铁道技术标准(中英文), 2021(12): 14-19, 31.
- Cui Junfeng, Shi Jing. Research on Mechatronics System of Light Rail Transit[J]. Railway Technical Standard (Chinese & English), 2021(12): 14-19, 31.
- [12] 刘栋青, 刘天琦, 田宏达, 等. 自主运行控制模式电子地图技术研究[J]. 铁道技术标准(中英文), 2021(12): 26-31.
- Liu Dongqing, Liu Tianqi, Tian Hongda, et al. Research on Electronic Map of Train Autonomous Circumambulation System[J]. Railway Technical Standard (Chinese & English), 2021(12): 26-31.
- [13] 侯礼举, 刘洪光. DS6-60全电子联锁模拟试验分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(12): 74-79.
- Hou Liju, Liu Hongguang. Analysis of DS6-60 Full Electronic Interlocking Simulation Test[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(12): 74-79.
- [14] 曹启滨. 城市轨道交通信号系统互联互通技术应用探讨[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(11): 59-64, 88.
- Cao Qibin. Application of Signaling System Interoperability Technology for Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(11): 59-64, 88.
- [15] 韩冰倩, 宿秀元. 全电子联锁系统开发与应用研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(8): 92-96.
- Han Bingqian, Su Xiuyuan. Development and Application of Full Electronic Interlocking System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(8): 92-96.
- [16] 李梅. 车-车通信与车-地通信信号系统方案可靠性分析对比[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(3): 64-68.
- Li Mei. Reliability Analysis and Comparison of Signaling System Schemes of Train Autonomous Circumambulate System and Communications Based Train Control System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(3): 64-68.
- [17] 李想, 赵京京. 铁路信号安全数据网网络管理系统优化方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(12): 26-30, 42.
- Li Xiang, Zhao Jingjing. Research on Optimization Scheme of Network Management System for Railway Vital Signaling Data Networks[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(12): 26-30, 42.
- [18] 孙哲, 王嵩, 赵佳. 高精度轨道电子地图生成系统设计与应用[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(11): 14-19.
- Sun Zhe, Wang Song, Zhao Jia. Design and Implementation of High Precision Track Electronic Map Generation System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(11): 14-19.
- [19] 刘小龙, 朱今朝, 龙飞. 城市轨道交通信号与车辆融合控制技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(9): 71-76, 96.
- Liu Xiaolong, Zhu Jinzhao, Long Fei. Research on Fusion Control Technology of Urban Rail Transit Signal and Vehicle[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(9): 71-76, 96.
- [20] 冯浩楠. 适用于城市轨道交通的全电子计算机联锁系统设计及研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(8): 2145-2155.
- Feng Haonan. Design and Research on All Electric Computer Interlocking System for Urban Transit[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(8): 2145-2155.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.05.005

DS6-100计算机联锁的IO仿真系统设计 设计与实现

柳新^{1, 2}

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070;

2. 北京市高速铁路运行控制系统工程技术研究中心, 北京 100070)

摘要: 以全新自主研发的DS6-100计算机联锁系统结构为基础, 针对DS6-100计算机联锁软件测试中IO模块需求量大、实验室测试条件难以满足的问题, 设计并实现了DS6-100计算机联锁的IO仿真系统。详细阐述系统的架构、设计原理及主要功能的设计与实现。实际测试应用结果表明, 系统满足联锁软件实验要求, 能够扩大实验覆盖程度并提升实验效率。

关键词: 计算机联锁; IO仿真; 自主化

中图分类号: U284.37

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0027-05

Design and Implementation of IO Simulation System for DS6-100 Computer Interlocking

Liu Xin^{1, 2}

(1. CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

(2. Beijing Engineering Technology Research Center of Operation Control Systems for High Speed Railways, Beijing 100070, China)

Abstract: This paper builds on the system structure of new self-developed DS6-100 computer interlocking (CI), and intends to solve the problems of needing to use a large number of IO modules and having difficulty in meeting the laboratory testing conditions during DS6-100 CI software testing. It describes the design and implementation of an IO simulation system for DS6-100 CI. The actual testing and application results show that the proposed system can meet the testing requirements of interlocking software, and expand testing coverage and improve testing efficiency.

Keywords: computer interlocking; IO simulation; self-reliant development

1 概述

计算机联锁 (Computer Interlocking) 是利用计算机对车站作业人员的操作命令及现场表示的信息进行逻辑运算, 从而对信号机及道岔等进行集中控制, 使其达到相互制约的车站联锁设备。目前,

收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2024-01-15

基金项目: 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司科研项目 (2300-K1210034.01)

作者简介: 柳新 (1995—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 铁路信号系统与仿真, 邮箱: liuxin@crscd.com.cn。

计算机联锁系统已在国内外近千个车站广泛运用，并直接关系着行车安全和铁路运营效率。

在科技自立自强战略背景下，北京全路通信信号研究设计院集团有限公司基于国产芯片安全计算机平台，自主设计生产板卡等设备，设计开发了DS6-100计算机联锁设备。全新的深度自主化联锁系统在测试过程中存在IO设备需求数量大、接口结构复杂等问题，在实验室环境下难以具备全部采用真实IO接口设备的测试条件。为此，本文设计并实现了针对DS6-100计算机联锁的IO仿真系统，用软件通信的方式实现与计算机联锁的接口功能，以确保计算机联锁系统正常运行，降低实验室测试环境的搭建成本。

2 DS6-100联锁介绍

DS6-100联锁系统是中国铁路通信信号集团有限公司以深度自主化计算机联锁设备研制及上道实验和工程应用项目为背景，基于国产芯片安全计算机平台设计开发的深度自主化计算机联锁设备。DS6-100联锁产品采用国产化的芯片、工控机、以太网交换机、显示器和电源等硬件设备，与国内公司合作开发了适用于软件运行的安达操作系统，并自主设计生产相应的板卡、机柜等硬件，重新开发的基于国产芯片安全计算机平台的联锁逻辑部和采集驱动单元，与自主化研发的控显机、监测机等共同构成了深度自主化DS6-100联锁系统。该联锁产品各组成部分、操作系统均为国产自主研发。系统构成如图1所示。

在新平台的设计中，很多平台与应用的接口函数和通信方式与既有联锁产品相比产生变化。为保障数据的安全性、实时性和可用性，核心联锁软件在适配层进行大量重新设计，主要重新开发的接口模块包括控显、监测机、IO 继电输入 / 输出、安全网通信。

3 IO仿真系统设计

3.1 IO仿真系统架构总体设计

IO 仿真系统重点在于以软件模拟的方式替代

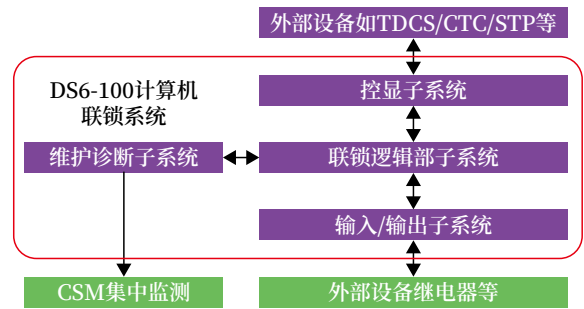


图1 DS6-100计算机联锁系统
Fig.1 DS6-100 CI system

真实IO驱采设备，最大限度地覆盖联锁实验内容，模拟实际站场计算机联锁系统所需的设备状态信息。

仿真系统支持真实设备、仿真设备混合仿真实验。系统设计如图2所示，实验中驱动点位、采集点位都需要区分真实IO部分及仿真设备部分，分别进行处理。仿真设备采用仿真IO机笼、板卡，以及仿真站场模块实现功能；真实部分采用真实IO机笼、板卡，PLC模拟继电器负载以及仿真站场模块共同实现功能。总体流程设计如下。

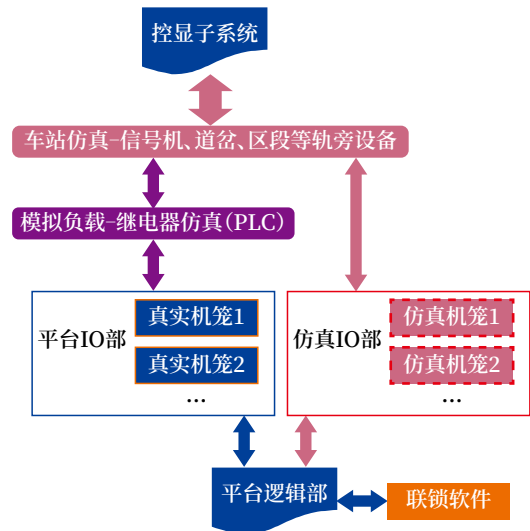


图2 DS6-100计算机联锁IO仿真系统设计框架
Fig.2 Design framework for IO simulation system of DS6-100 CI system

1) 仿真设备部分

a. 驱动命令的获取：仿真IO模块通过配置仿真机笼数量、机笼内的板卡数量建立仿真机笼、板卡对象，并与联锁逻辑部进行通讯以获取驱动命令。

b. 命令的响应、站场状态的模拟：驱动命令获

取后进行转译，送给站场设备仿真模块，站场获取驱动命令后操作仿真设备对象进行相应动作，并与控显子系统通讯，使其实时显示站场状态。

c. 采集信息的上传：站场设备状态改变后，站场仿真模块将改变后的模拟继电器采集状态发送给 IO 仿真模块，并由 IO 仿真模块通过以太网 UDP 通讯传输至平台逻辑部。

2) 真实 IO 设备部分

a. 驱动命令的获取：真实 IO 模块通过与联锁逻辑部进行通讯，以获取驱动命令、上传采集信息。真实 IO 设备通过线缆与 PLC 模拟负载直连，当联锁下达驱动命令时，真实 IO 驱动板点位亮起，同时 PLC 模拟负载中对应的模拟继电器灯亮起。模拟负载通过服务器整合驱动命令发送给站场设备仿真模块。

b. 命令的响应、站场状态的模拟：站场仿真模块获取驱动命令后操作仿真设备对象进行相应动作，并与控显子系统通讯，使其实时显示站场状态。

c. 采集信息的上传：站场设备状态改变后，站场仿真模块将改变后的模拟继电器采集状态发送 PLC 模拟负载服务器，模拟负载对应的模拟采集继电器点位灯亮起，同时真实 IO 模块对应的采集板灯位亮起，并由 IO 仿真模块传输至平台逻辑部。

3.2 IO 仿真系统主要功能设计

功能 1：与 DS6-100 联锁系统逻辑部通信功能。由于 DS6-100 联锁平台的重新设计，IO 模块与平台通信方式发生了变化，为保证数据的安全性、实时性、可用性，IO 仿真系统通过配置文件创建仿真机笼对象，每个仿真机笼对象中最多可创建 8 个仿真板卡对象，板卡类型分为采集板、驱动板，与真实 DS6-100 系统的 IO 设备完全保持一致。仿真机笼结构如图 3 所示。每块仿真采集板共对应 48 路采集状态点位，每块仿真驱动板共对应 16 路命令状态点位。IO 仿真模块中实现采集、驱动继电器点位状态与协议数据包的正、反向解析转译，并调用其创建的虚拟机笼对象通过以太网 UDP 通信的

方式与联锁逻辑部通信，在通信过程中为了安全性、可靠性的考量，增加通信序号、CRC 安全校验码等信息，通信协议和校验密钥与真实 DS6-100 联锁平台完全保持一致。

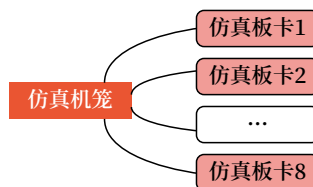


图3 仿真IO机笼结构
Fig.3 Cage structure of IO simulation system

功能 2：站场设备状态仿真功能。仿真系统通过配置读取站场设备信息，并为信号机、道岔、区段等每个站场设备创建仿真对象和对应的仿真继电器对象。通过功能 1 创建的仿真机笼对象接受联锁逻辑部的驱动命令状态，并转译为驱动继电器数组等长的二进制数组，进而对每个仿真驱动继电器进行命令，通过驱动、采集继电器的对应联锁逻辑关系，改变采集继电器状态值，再组成协议包，通过仿真机笼对象回送联锁逻辑部。真实机笼部分，站场仿真模块通过与 PLC 模拟负载服务器双向通信，获取并回送真实 IO 模块对应的驱动点位、采集点位状态，收到驱动命令时，通过驱动、采集继电器的对应联锁逻辑关系改变采集继电器状态值，再组成协议包，通过回送 PLC 模拟负载，模拟负载相应采集灯位变化后的真实 IO 同步变化，并回送联锁逻辑部。

功能 3：人机交互界面。在人机交互界面中，测试人员可以通过鼠标在模拟站场中对设备进行动作，如进行区段故障占用、信号机灯丝断丝等操作。操作命令下达后，站场仿真模块同步改变模拟采集继电器的值并通过网络通信发送给 PLC 模拟负载或通过仿真机笼对象发送给联锁逻辑部。通过与控显子系统的通信，改变其界面上相应设备的显示状态。人机界面中还显示站场所有继电器值及以太网实时通信协议包供测试人员参照。

4 实现与应用

按设计思路进行 DS6-100 计算机联锁的 IO 仿真开发，并配合 DS6-100 计算机联锁系统进行多次

二版标准站、客专标准站的仿真实验，系统运行稳定，性能良好，实验室环境为室温条件。站场仿真界面如图 4 所示。

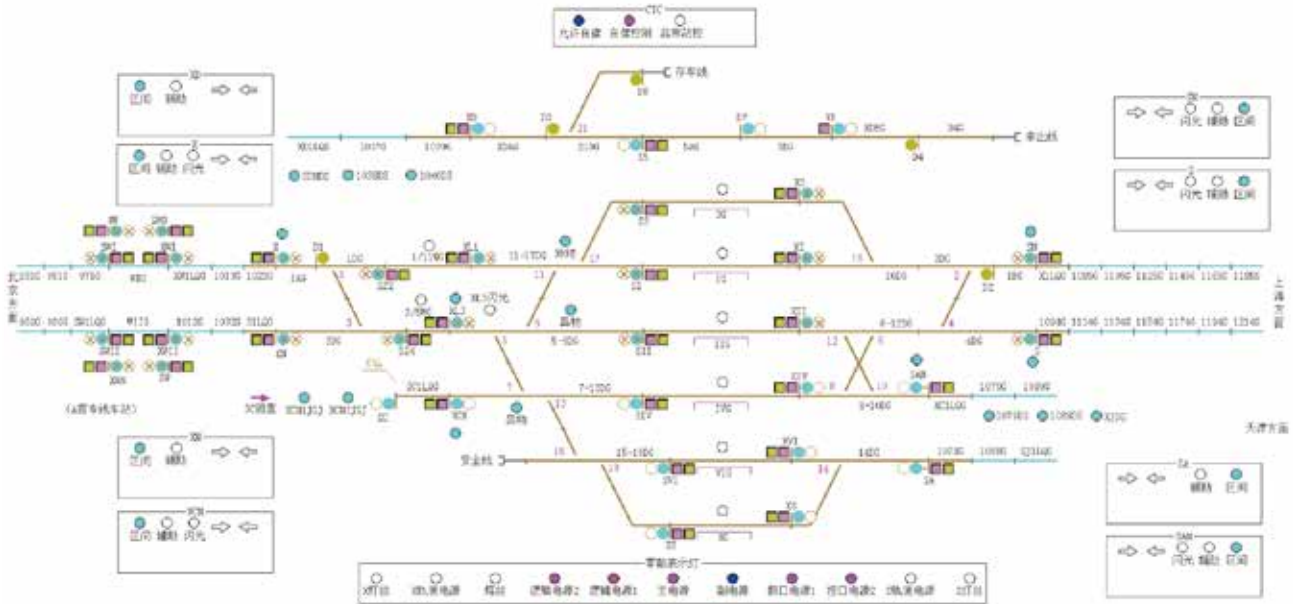


图4 站场仿真界面
Fig.4 Station simulation interface

实际应用表明，IO 仿真系统设计满足 DS6-100 计算机联锁实验需求，系统稳定，易维护升级，功耗低、运行快，符合 DS6-100 计算机联锁对于实验覆盖面、实验效率的要求。

参考文献

[1] 张文祥, 王赫. 计算机联锁工作原理 [J]. 科学与财富, 2017 (21): 208.
Zhang Wenxiang, Wang He. Working Principle of Computer Interlocking[J]. Sciences & Wealth, 2017(21): 208.

[2] 钟竞瑜. 计算机联锁系统研究 [J]. 信息技术与信息化, 2022 (1): 119-122.
Zhong Jingyu. Research on Computer Interlocking System[J]. Information Technology and Informatization, 2022(1): 119-122.

[3] 李文涛. 计算机联锁仿真试验自动执行平台研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (1): 1-6.

Li Wentao. Research on Automatic Execution Platform of Computer Based Interlocking Simulation Test[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 1-6.

[4] 张睿, 董伊龙, 张豪福, 等. 基于 Web 的计算机联锁仿真系统设计 [J]. 科学技术创新, 2022 (9): 89-92.
Zhang Rui, Dong Yilong, Zhang Haofu, et al. Design of Computer Interlocking Simulation System Based on Web[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(9): 89-92.

[5] 李胜. 计算机联锁控制电路仿真系统的设计与研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2018, 15 (1): 20-24.
Li Sheng. Design of Simulation System for Computer Interlocking Control Circuit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2018, 15(1): 20-24.

[6] 黄龙. 城轨计算机联锁仿真系统的研究与实现

- [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [7] 田文军. 信号计算机联锁系统安全性可靠性分析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2013, 10(6): 32-35.
Tian Wenjun. Analysis of Safety and Reliability of Computer Interlocking System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2013, 10(6): 32-35.
- [8] 齐志华, 姚亚平, 高术强. 基于 CAN 通信的计算机联锁 IO 仿真系统设计 [J]. 铁道通信信号, 2013, 49(11): 54-57.
Qi Zhihua, Yao Yaping, Gao Shuqiang. Design of Computer Interlocking IO Simulation System Based on CAN Communication[J]. Railway Signalling & Communication, 2013, 49(11): 54-57.
- [9] 蒋爽. 基于计算机联锁的多段延续进路设计方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(11): 20-23.
Jiang Shuang. Design Scheme of Multiple Successive Routes Based on Computer Interlocking[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(11): 20-23.
- [10] 杨斐, 苏琛. 计算机联锁试验记录分析系统设计与实现 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(9): 21-25.
Yang Fei, Su Chen. Design and Implementation of Interlocking Test Record Analysis System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(9): 21-25.
- [11] 王涛. 轨道交通信号系统中冗余技术研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(1): 12-15, 23.
Wang Tao. Research on Redundancy Technology of Signaling System for Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 12-15, 23.
- [12] 陈慧琳, 杨扬. 驼峰场联锁仿真平台研究 [J]. 铁路计算机应用, 2015, 24(9): 40-42.
Chen Huilin, Yang Yang. Interlocking Simulation Platform of Hump Marshalling Yard[J]. Railway Computer Application, 2015, 24(9): 40-42.
- [13] 黄鲁江. 基于 LabVIEW 的计算机联锁仿真系统 [J]. 铁道通信信号, 2020, 56(12): 19-21.
Huang Lujiang. Computer Interlocking Simulation System Based on LabVIEW[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(12): 19-21.
- [14] 李健. 地铁联锁仿真平台的研究 [J]. 铁道通信信号, 2013, 49(8): 51-54.
Li Jian. Research in Metro CI Simulation Platform[J]. Railway Signalling & Communication, 2013, 49(8): 51-54.
- [15] 绎明. 铁路实训基地联锁仿真与实控切换实现案例 [J]. 电气化铁道, 2023, 34(Z2): 141-143.
Hu Yiming. Case Study of Interlocking Simulation and Actual Control Switching in Railway Training Base[J]. Electric Railway, 2023, 34(Z2): 141-143.

本期广告企业简介

天水铁路电缆有限责任公司

主要生产铁路数字信号电缆、铁路内屏蔽数字信号电缆、铁路信号电缆、通信电缆、电力电缆、光电综合缆、耐火电缆、控制电缆以及各种铜绞线、电线等八大类、三千多个规格的线缆产品。还可为用户提供耐油、防腐、耐火、阻燃、耐寒、防蚁、高屏蔽等特殊要求的电缆产品。产品主要涉及铁路、城市轨道交通、冶金、能源、通信、广电、石化和建筑领域等诸多行业。

🏠 甘肃省天水市秦州区坚家河 4 号

☎ 0938-4982024

🌐 <http://tntl.crsc.cn>

(详见封三)

全电子联锁自动测试平台设计与实现

彭 栋^{1, 2}, 崔 岩^{1, 2}, 曹雅鑫^{1, 2}

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070;

2. 北京市高速铁路运行控制系统工程技术研究中心, 北京 100070)

摘要: 针对如何提升全电子联锁自动测试覆盖率、正确率等问题, 分析全电子联锁功能测试需求和测试场景, 采用模块化框架 (test script modularity) 和函数库框架 (test library architecture), 设计实现全电子联锁自动测试平台。该自动测试平台为用户提供测试函数库, 能够有效提升全电子联锁测试效率和准确率。

关键词: 全电子联锁; 自动测试平台; 功能测试

中图分类号: U284.36

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0032-06

Design and Implementation of Automatic Test Platform for Fully Electronic Interlocking

Peng Dong^{1, 2}, Cui Yan^{1, 2}, Cao Yaxin^{1, 2}

(1. CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

(2. Beijing Engineering Technology Research Center of Operation Control Systems for High Speed Railways, Beijing 100070, China)

Abstract: To explore how to improve the coverage rate and accuracy of automatic tests for full electronic interlocking, this paper analyzes the functional test requirements and test scenarios of fully electronic interlocking. It also presents the design and implementation of an automatic test platform for fully electronic interlocking with the help of test script modularity and test library architecture. The proposed automatic test platform provides users with a test function library, which can effectively enhance the test efficiency and accuracy of full electronic interlocking.

Keywords: fully electronic interlocking; automatic test platform; functional test

计算机联锁 (Computer Based Interlocking, CBI) 作为列车运行的核心控制设备, 是铁路信号系

统中至关重要的一环。计算机联锁与列车安全运行息息相关, 因此需要投入大量的时间和人力对联锁进行全方位测试, 避免出现安全问题。

目前, 国内联锁测试主要采用人工测试加部分自动测试方式。人工测试优点是测试流程相对简单, 覆盖面广, 测试过程中可以利用工程经验推断软件问题; 但缺点也显而易见, 人工测试结果依赖测试

收稿日期: 2022-07-30; 修回日期: 2024-04-10

基金项目: 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司科研项目 (2300-k1200023.01)

第一作者: 彭栋 (1992-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 铁路通信信号, 邮箱: pengdong@crscd.com.cn.

人员素质，测试过程中容易出现因懈怠、粗心导致测试结果与实际不符的情况。在自动测试方面，国内已经开发一批联锁自动测试工具，但大部分自动测试工具扩展性差，测试项单一，只能测试联锁基本功能，无法适用于更加复杂的测试场景。

近年来，随着国家“走出去”战略，中国铁路信号系统也与其他国家展开了更紧密的合作，面对更加复杂的测试场景和功能需求，测试人员对自动测试提出了更高的要求。本文针对全电子联锁测试场景和测试需求，设计实现全电子联锁自动测试平台，具有一定实际意义，也为后续联锁自动测试积累经验。

1 软件实现

1.1 需求分析

全电子联锁系统包含 MMI 子系统（控显）、联锁逻辑部子系统和全电子模块，如图 1 所示。为满足联锁逻辑部子系统所有功能测试案例和测试场景的目标，自动测试平台需满足如图 2 所示中 3 种场景下的联锁逻辑部子系统测试要求（以下联锁均指联锁逻辑部子系统）。

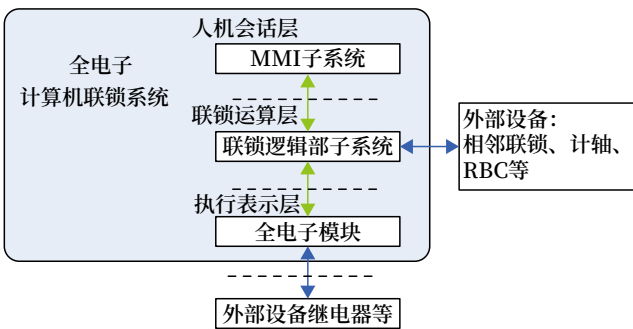


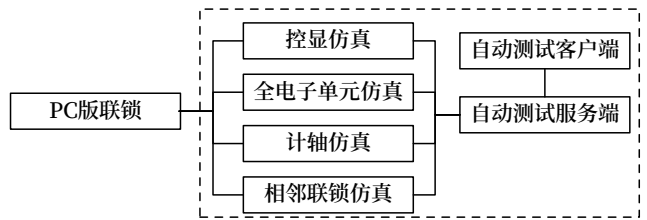
图1 全电子联锁系统
Fig.1 Fully electronic interlocking system

1) PC 版全电子联锁测试场景

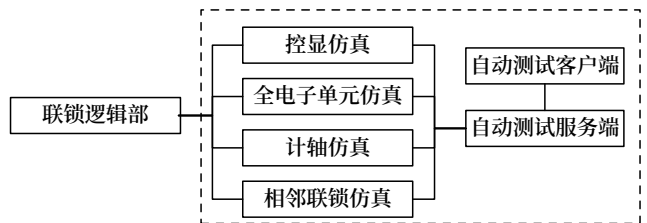
被测对象为 PC 版全电子联锁时，自动测试平台需具备控显仿真、全电子单元仿真、计轴仿真和相邻联锁仿真，作为联锁的外围控制仿真设备。

2) 真机版全电子联锁测试场景

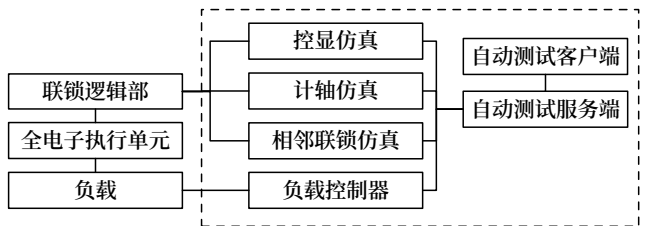
被测对象为真机版全电子联锁时，自动测试平台需具备控显仿真、全电子单元仿真、相邻联锁仿真和全电子单元仿真，作为联锁的外围控制仿真设备。



(a) 场景1: PC版联锁自动测试
(a) Scenario 1: Automatic testing on PC-version interlocking system



(b) 场景2: 真机版联锁逻辑部自动测试
(b) Scenario 2: Automatic testing on real interlocking system



(c) 场景3: 真机版全电子联锁+负载自动测试
(c) Scenario 3: Automatic testing on real interlocking system + load

图2 全电子联锁自动测试场景示意
Fig.2 Schematic diagram of automatic test scenarios of fully electronic interlocking

3) 真机版全电子联锁 + 负载测试场景

被测对象为真机版全电子联锁 + 负载时，自动测试平台需具备控显仿真、计轴仿真、相邻联锁仿真和负载控制器，作为联锁的外围仿真控制设备。

脚本编写方式、自动测试客户端软件设计、服务端软件设计以及平台内部通信协议在 3 种测试场景下一致，保证自动测试平台适用于不同场景。

为满足全电子联锁测试需求，需要设计以下仿真模拟。

仿真内部存在外部设备数据收 / 发、数据处理和自动测试通信 3 个模块。外部设备收 / 发数据模块负责与联锁设备建立通信连接，接收发送符合联锁应用协议规范的数据；数据处理模块负责解析处理应用数据和自动测试指令；自动测试收 / 发数据模块通过 TCP/IP 协议与自动测试平台服务端建立

通信连接，接收 / 发送测试指令。模块之间通过消息队列传递数据。

各个仿真器之间差异如下。

1) 控显仿真：模拟控显向联锁发送符合协议规范的操作命令，同时采集道岔、信号机、区段等设备显示状态。

2) 全电子模块仿真：模拟真实全电子模块接口，采集联锁驱动命令，反馈设备当前状态。全电子模块仿真除具备上述 3 个模块外，还包括全电子仿真代理。全电子仿真代理模拟真实接口接入联锁设备；周期采集联锁发送的道岔、信号机、继电器驱动命令，同时根据驱动命令设置设备状态。为满足异常测试的需要，全电子仿真代理具备设置道岔、信号机、继电器设备异常状态功能。

3) 计轴设备仿真：模拟站内计轴状态，发送计轴占用 / 空闲状态。

4) 临站联锁仿真：模拟邻站联锁继电器状态，辅助联锁完成区间改方。

5) 负载仿真：接收自动测试平台服务端指令，控制修改负载设备状态。

1.2 平台设计实现

自动测试平台根据功能划分为接口层（控显仿真、全电子单元仿真、计轴仿真、相邻联锁仿真）、应用层（自动测试平台服务端）和交互层（自动测试平台客户端），如图 3 所示。

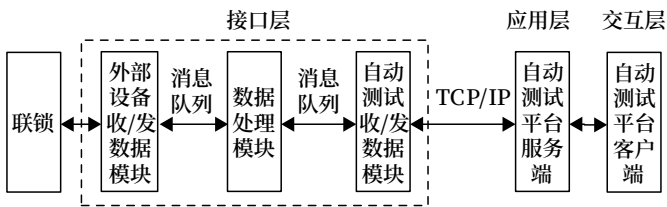


图3 自动测试平台系统架构
Fig.3 System architecture of automatic testing platform

接口层仿真具有以下 3 个模块。

1) 外部设备收发数据模块：负责与联锁建立通信连接，接收 / 发送应用数据。各个仿真根据实际连接方式和应用协议格式分别实现外部设备收 / 发数据模块。

2) 数据处理模块：负责解析处理应用数据和测试指令。

3) 自动测试收 / 发数据模块与自动测试平台服务端建立通信连接，接收 / 发送测试指令。

模块之间通过消息队列传递数据。

自动测试平台服务端具有以下 4 个功能模块。

1) 自动测试平台客户端通信模块：负责与自动测试平台客户端建立通信连接，接收测试任务执行 / 停止命令，反馈测试结果。

2) 仿真通信模块：负责与仿真建立通信连接，发送脚本测试指令，接收注册、连接确认和应用数据等消息。

3) 适配插件接口模块：负责提供 API 函数接口，执行测试脚本。

4) 测试任务管理模块：负责管理测试任务，收到客户端发送的启动 / 停止命令后执行操作。

其中适配插件接口模块实现测试 API 函数，测试人员根据测试案例和 API 函数编写测试脚本。

用户可以根据需求对自动测试平台提供的接口函数进行组合，满足复杂测试场景的测试需求，例如办理正常功能进路后检查设备状态：

1) 办理进路：调用设置控显 (set_hmi_order) 命令，输入办理进路命令类型、始终端信号机对应的按钮索引。

2) 进路始端信号机正常开放：调用根据信号机名称检查信号机点灯状态 (check_point_position_by_name) 命令，输入信号机名称、信号机状态。

3) 进路内道岔扳动到指定位置：调用根据道岔名称检查道岔位置状态函数，输入道岔名称、道岔预期状态。

4) 进路内侧防道岔扳动至指定位置：调用根据道岔名称检查道岔位置状态 (check_point_position_by_name) 函数，输入道岔名称、道岔预期状态。

5) 进路内区段锁闭：调用检查设备状态 (check_dev_state) 函数，输入区段设备类型、控制状态属性和区段索引。

自动测试平台客户端具备以下 3 个功能模块。

1) 测试任务显示模块：按照 I 级测试项、II 级测试项两个层级来描述测试内容。I 级测试项为一组同类测试案例的集合，II 级测试项为针对某一个功能或配置数据的测试案例。一个测试脚本对应一个 II 级测试项。

2) 测试结果显示模块：实时接收服务端反馈的测试结果，更新界面显示，测试步骤通过后，在结果栏显示通过。

3) 历史查询模块：查看历史测试结果，导出测试报告。

自动测试平台操作流程如图 4 所示。其测试步骤如下。

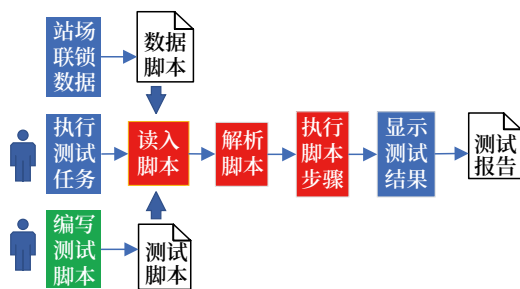


图4 自动测试平台操作步骤

Fig.4 Operation procedure of automatic test platform

1) 平台提供站场联锁数据转化工具，添加输入文件后自动生成数据脚本。

2) 测试人员根据测试案例、数据脚本和自动测试平台提供的 API 函数接口编写测试脚本。

3) 测试人员点击客户端执行测试任务按钮，客户端通知服务端启动测试任务。

4) 服务端读入数据脚本和测试脚本，驱动仿真设备向被测设备发送测试数据，验证结果是否符合预期。

5) 测试结束后，客户端界面显示测试结果通过 / 不通过，用户可通过客户端将测试结果导出，生成 pdf 格式的测试报告，生成的测试报告与测试人员手动编写的测试报告格式一致。

2 全电子联锁自动测试系统应用

2.1 客户端界面介绍

自动测试客户端界面包括测试案例视图和测试结果记录视图。

1) 测试案例视图展示了将要执行的所有案例。展示案例的名称和测试结果。

2) 测试结果记录视图显示执行的测试案例的全部步骤。当测试案例未执行时，该区域为空白。测试时，则显示图。测试记录包括测试案例号，测试依据，测试目的和测试步骤详细信息。

2.2 执行测试任务

以《铁路车站计算机联锁技术条件》(TB/T 3027-2015) 中 6.1.4.3 已开放信号机在进路上道岔位置、区段等联锁条件不满足时需关闭信号机为依据，编制《信号机前方检查条件不满足，进路内信号关闭》案例，进行自动测试执行步骤展示。

数据转化工具读取联锁进路表，将进路写入数据脚本，进路数据信息如图 5 所示。

```
route list -
[{"id": 1, "name": "CU91 002 C41(CU94)", "type": "transit", "start_sig": "CU91",
"end_sig": "CU94", "train_signal": "C04", "direction": "forward", "through": "straight",
"start_button": [{"name": "DJ9", "index": 65}, "stop_button": [{"name": "C41",
"index": 75}]]
```

图5 进路数据配置

Fig.5 Route data configuration

其中：route_list 为列表类型，一条进路对应列表中一个元素。

id 表示进路在联锁表中的排序。

name 表示进路名称。进路名称格式为：始端信号机名称 - 终端信号机名称。

type 表示进路类型，transit 表示通过进路。train 表示列车进路。calling-on 表示引导进路。shunting 表示调车进路。LTS shunting 表示始端是边界信号机的调车进路。

start_sig 表示始端信号机名称。

end_sig 表示终端信号机名。

train_signal 表示通过进路中间出站信号机名称。对于非通过进路无此字段。

start_button 表示始端按钮名称及按钮序号。

stop_button 表示终端按钮名称及按钮序号。

脚本执行包含以下步骤：

- 1) 设置联锁非常站控、上电解锁。
- 2) 模拟点击始终端信号机按钮办理进路信号机

为始端的列车进路。

- 3) 检查进路正确解锁, 信号机由远及近开放, 进路始端信号开放。
- 4) 模拟列车压入首区段, 设置区段占用。
- 5) 检查始端信号机关闭, 中间信号机开放。

- 6) 设置进路内区段故障。
- 7) 检查进路内信号全部关闭。
- 8) 恢复区段故障, 出清首区段占用。
- 9) 解锁进路。

脚本执行结果如图 6 所示。

序号	执行动作	预期结果	实际结果	结论(OK/Not OK)
1	启动联锁、控显、模拟, 条件具备后, 上电解锁操作	系统正常启动, 站场显示正常, 上电解锁状态	[state]check device Point attribute stationLock failed,failed info is: Point stationLock is 0,expected value 1;	OK
2	办理进站信号机为始端的列车进路CU92-DO1	进路锁闭, 中间信号由远及近依次开放, 主信号开放	[state]check device Point,attribute is protect, index and value {33: 1} passed	OK
3	模拟行车, 列车压入首区段	始端信号关闭, 进路上中间信号保持开放	[state]check device Signal,attribute is disp, index and value {1: 153} passed	OK
4	模拟中间信号防护的区段OS2故障	所有中间信号机关闭	[state]check device Signal,attribute is disp, index and value {1: 103} passed	OK
5	办理进站信号机为始端的列车进路CU92-DO1	进路锁闭, 中间信号由远及近依次开放, 主信号开放	[state]check device Point,attribute is protect, index and value {33: 1} passed	OK
6	模拟行车, 列车压入首区段	始端信号关闭, 进路上中间信号保持开放	[state]check device Signal,attribute is disp, index and value {1: 153} passed	OK

图6 案例执行结果
Fig.6 Execution results of test cases

3 结束语

自动测试平台已在全电子联锁项目中开展应用, 相关功能测试案例已转化为测试脚本。经测试, 自动测试脚本测试通过率达到 100%, 测试结果与人工测试结果一致。在软件回归测试时, 自动测试效率较人工测试提升显著, 极大地减小了测试人员的回归测试工作量。

虽然自动测试平台在实际工程项目中表现出极大的优点, 但也要正视平台缺点, 例如编写脚本对测试人员素质要求较高, 前期编写脚本和调试的时间较长。后期可从自动编写脚本方面入手, 继续优化自动测试平台功能。

参考文献

[1] 卡斯柯信号有限公司. 一种用于计算机联锁系统的自动化界面测试系统及应用: CN112527683B [P]. 2022-08-26.
[2] William E. Perry. 软件测试的有效方法 [M]. 高

猛, 冯飞, 徐璐, 译. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[3] 于秀山, 于洪敏. 软件测试新技术与实践 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
[4] 朱少民. 软件测试方法和技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
[5] 徐洪泽, 岳强. 车站信号计算机联锁控制系统: 原理及应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2005.
[6] 石艳敏. 基于进路控制过程的联锁软件高效率测试方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
[7] 董昱, 高雪娟. 基于场景的联锁软件形式化模型生成方法 [J]. 计算机科学, 2015, 42 (1): 193-195, 226.
Dong Yu, Gao Xuejuan. Method for Generating Formal Interlocking Software Model Based on Scenario[J]. Computer Science, 2015, 42(1): 193-195, 226.
[8] 薛丰. 计算机联锁自动测试系统研究与设计

- [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [9] 李文涛. 计算机联锁仿真试验自动执行平台研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(1): 1-6.
Li Wentao. Research on Automatic Execution Platform of Computer Based Interlocking Simulation Test[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 1-6.
- [10] 殷琴, 张立伟. 一种基于开放网络的安全通信协议实现方法 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(1): 24-27, 45.
Yin Qin, Zhang Liwei. Method for Implementing Safety Communication Protocol Based on Open Network[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(1): 24-27, 45.
- [11] 孙志科. 应用图像识别技术开发联锁自动测试工具的研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(2): 7-12.
Sun Zhike. Research on Development of Interlocking Automatic Test Tool Using Image Recognition Technology[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(2): 7-12.
- [12] 郭晨彤. 匈塞铁路联锁数据工程化生成方法与实现 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(3): 91-96.
Guo Chentong. Engineering Generation Method and Implementation of Interlocking Data for Hungary-Serbia Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(3): 91-96.
- [13] 魏博. 新型列控系统中列车完整性功能测试方法探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(5): 21-26, 31.
Wei Bo. Discussion on Test Scheme for Train Integrity Functions in New Train Control System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(5): 21-26, 31.
- [14] 展鑫, 孙颖. 列控系统车-地无线通信协议测试研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(10): 30-36.
Zhan Xin, Sun Ying. Research on Testing and Implementation of Radio Communication Protocol for High-Speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(10): 30-36.
- [15] 王军贤. 自动化测试在城轨联锁产品测试中的应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(10): 63-69.
Wang Junxian. Application of Automatic Testing in Interlocking Product Test for Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(10): 63-69.
- [16] 毛芳. 关于全电子联锁与计算机联锁系统的对比分析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(1): 110-114.
Mao Fang. Comparative Analysis of Full-Electronic Interlocking and Computer Interlocking Systems[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(1): 110-114.
- [17] 金松岳. 塞尔维亚联锁侧防功能研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(12): 106-109.
Jin Songyue. Study of Flank Protection Function of Computer Based Interlocking in Serbia[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(12): 106-109.
- [18] 胡旭. 城轨CBTC联锁表自动生成工具的研究与开发 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(8): 86-91.
Hu Xu. Development of Automatic Generation Tool of Interlocking Table for Urban Rail Transit CBTC System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(8): 86-91.
- [19] 路飞. 列控联锁一体化系统多层次结构化设计实现 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(1): 21-25.
Lu Fei. Multi-Level Structural Design and Realization of TIS System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(1): 21-25.

(下转 61页)

CTC设备取代QJK设备人工解锁盘实现方案

潘圣浩^{1, 2}

(1. 卡斯柯信号有限公司, 北京 100070;

2. 上海市铁路智能调度指挥系统工程研究中心, 上海 200071)

摘要: 目前普速铁路使用 QJK 实现区间占用逻辑检查功能时, 通过人工解锁盘进行闭塞分区占用丢失解锁, 客专线路使用 TCC 实现区间占用逻辑检查功能时, 通过 CTC 进行闭塞分区占用丢失解锁。提出普速铁路中采用 CTC 设备取代 QJK 设备人工解锁盘的方案, 通过对不同站型的分析, 采取 CTC 设备增加接口的方式设计取代 QJK 设备人工解锁盘方案, 可提高人工解锁盘功能的扩展性, 并在施工和运营维护方面也具有明显优势。

关键词: 人工解锁盘; 调度集中系统; 列车调度指挥系统

中图分类号: U284.59

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0038-04

Implementation Scheme for Replacing Manual Release Panel of QJK Equipment with CTC Equipment

Pan Shenghao^{1, 2}

(1. CASCO Signal Ltd., Beijing 100070, China)

(2. Shanghai Engineering Research Center of Railway Intelligent Dispatching Command System, Shanghai 200071, China)

Abstract: At present, when the QJK equipment is used on normal speed railways provide the logical check function of section occupation, the block section release after section occupation loss is achieved with the manual release panel. Meanwhile, when the TCC equipment is used on dedicated passenger lines to achieve such logical check function, such block section release is achieved with the CTC equipment. This paper presents a scheme for replacing the manual release panel of the QJK equipment with the CTC equipment on normal speed railways. Based on any analysis of different types of stations, it proposes the replacement of the manual release panel of the QJK equipment by adding interfaces with the CTC equipment. The proposed scheme can improve the function expansibility of the manual release panel, and has obvious advantages in construction as well as operation and maintenance.

Keywords: manual release panel; centralized traffic control system; train dispatching command system

收稿日期: 2023-08-09; 修回日期: 2024-04-12

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目 (P2022X013)

作者简介: 潘圣浩 (1983—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 铁道信号、调度集中, 邮箱: panshenghao@casco.com.cn.

1 概述

人工解锁盘是区间综合监控系统的一部分，设置在车站值班室及中继站，主要实现对本站管辖范围内各逻辑检查区段的界面操作和信息表示功能。目前普速线使用综合监控系统（QJK）实现区间占用逻辑检查功能时，通过人工解锁盘进行闭塞分区占用丢失解锁。随着调度集中（Centralized Traffic Control, CTC）设备的发展及其集成度的提高，采用 CTC 设备进行区间区段的人工解锁成为今后的发展趋势。

2 QJK设备人工解锁盘存在的问题

人工解锁盘需设置在值班室，导致值班室空间局促，同时因通信线缆较多，不利于运营维护；随着铁路运营需求的发展变化，人工解锁盘也不便于拓展改造；人工解锁盘使用多年后，因零部件老化，需要定期检修更换。因此，亟需一种集成解决方案解决此问题。

3 采用CTC设备取代QJK设备人工解锁盘方案设计

3.1 总体原则

采用 CTC 设备取代 QJK 设备人工解锁盘总体原则为增加 CTC 站机与车站 QJK 设备的直接通信接口，传递区间占用逻辑检查相关信息和命令。CTC 下发区间占用逻辑检查开启、关闭和解锁的命令，并显示区间闭塞分区的逻辑状态及相应的报警。QJK 发送区间闭塞分区逻辑状态和占用丢失报警相关信息给 CTC，执行开启、关闭和解锁等区间占用逻辑检查相关命令，并反馈执行情况给 CTC。

3.1.1 通信接口设计

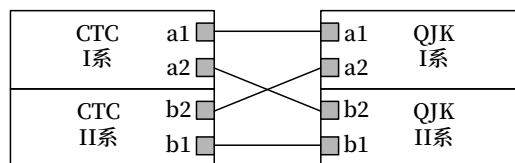
车站 QJK 设备与 CTC 站机接口，中继站 QJK 设备不与 CTC 站机接口，其逻辑状态信息和操作命令由主站 QJK 代为传递，如图 1 所示。

QJK 与 CTC 间可采用 RS-422 电缆双路交叉连接，并采取光电隔离措施，连接方式如图 2 所示。



图1 设备连接示意

Fig.1 Schematic diagram of equipment connection



图例：■ a1/a2/b1/b2 RS-422通信接口及名称

图2 CTC与QJK间连接示意

Fig.2 Schematic diagram of connection between CTC and QJK

QJK 与 CTC 间通信速率为 38 400 bit/s，1 位起始位、8 位数据位和 1 位停止位，无奇偶校验位。QJK 与 CTC 间采用标准 TB/T 3528.1 规定的 RSSP-I 安全通信协议，按 500 ms 固定周期进行数据交互。

QJK 本地设备的主系负责向 CTC 设备的主、备系发送应用数据消息；QJK 本地设备的备系仅负责向 CTC 设备发送通信检测数据。CTC 设备接收到对方备系数据，仅用于判定通信连接状态。QJK 与 CTC 间接口中所有应用层交互数据均按小端字节序传输。QJK 和 CTC 间通信应具备接口版本校验能力，接口版本信息校验不通过，则该数据包不可用，系统输出报警。

3.1.2 CTC-QJK接口协议

CTC-QJK 的接口协议可仿照目前客专 CTC 与 TCC 之间的接口协议格式进行交互。具备接口规范版本和接口数据版本校验能力，接口规范版本指 QJK 与 CTC 间通信所采用的应用层接口规范版本号，版本号应按软件变更相关规定执行，接口数据版本指 QJK 与 CTC 间通信双方接口数据版本号，版本号按软件变更相关规定执行，接口数据变化时，双方应同时升级。

3.1.3 操作权限管理

当采用 CTC 设备的终端完成区间占用逻辑检查的相关操作时，需满足以下要求。

- 1) 在分散自律模式下，区间占用逻辑检查确认

命令的人工操作权限在 CTC 调度终端和车务终端，实际执行原则按照既有客专管理办法执行。

2) 在非常站控模式下，若 CTC 站机与 QJK 通信良好，区间占用逻辑检查确认命令的人工操作权限在 CTC 车务终端，管理办法遵循既有客专要求。

3.1.4 集中控制方案设计

对于集控车站模式，设置方式如下。

各站仍独立设置 CTC 站机，QJK 与各站 CTC 站机直接接口，连接方式如图 3 所示。

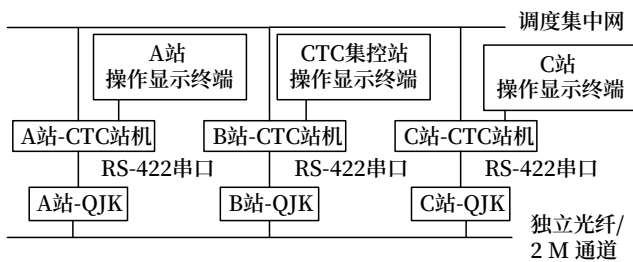


图3 集控车站设备连接示意
Fig.3 Schematic connection diagram of centralized control station equipment

集控站 CTC 站机界面应显示被控车站，同时具备操作被控车站命令的功能。集控站的 CTC 站机显示被控车站的区间信息，并将命令发送给对应车站的 CTC 站机，再发送给对应的 QJK 设备。QJK 设备仍按照各站独立配置，按本站信息发送给对应的 CTC 站机，不受集控影响，信息由 CTC 站机进行转发。

4 CTC设备取代QJK设备人工解锁盘的优势

4.1 支持多站集中控制

目前越来越多的线路采用集中控制的方式，将操作和管理集中在有人车站，减少人员配备，提升管理效能。如果采用人工解锁盘操作区间占用检查命令，则需要集中在控制车站将所有被控车站的人工解锁盘均设置在值班室。值班室空间有限，很难找到足够的空间放置，同时还要增设较多的通信线缆，不利于维护。而采用 CTC 操作，则仅需要使用既有的 CTC 操作显示器和鼠标，节约空间，操作简便。

4.2 可扩展性强

CTC 设备可以方便地进行人工解锁盘功能的扩

展和升级，适应铁路运行需求的不断变化和发展，提高了人工解锁盘功能的可持续性和灵活性。

4.3 便于施工维护

采用 CTC 设备取代 QJK 设备人工解锁盘方案，在项目前期施工和后期维护也有明显的优势。

在施工方面，调度间只需布置 CTC 设备，每个站节约原有人工解锁盘的设备布置空间，无需额外复杂的电路配线。

在运营维护方面，人工解锁盘设备若使用多年，零部件老旧，需要定期检修。而采用 CTC 设备取代 QJK 设备人工解锁盘方案由计算机完成，具有更高的可靠性和稳定性，减少因设备故障带来的影响和风险。同时维护终端显示设备运行以及通信状态，便于故障定位和问题分析，降低了维护成本。

5 总结

CTC 设备取代 QJK 设备人工解锁盘实现方案，以计算机的操作方式代替物理按钮操作方式，提高设备的集成度，节约了原有人工解锁盘的设备布置空间。同时在计算操作解锁设备时可进行操作命令核验卡控，有效防止人为操作失误。对于需要升级拓展的人解盘功能，集成在 CTC 设备中的人解盘升级拓展更为灵活，更适合现有线路的需求特点。在运营维护方面，只需集中维护 CTC 设备，减少运维工作量。

参考文献

- [1] 宋鹏飞, 赵宏涛, 王涛, 等. 多系统数据融合的智能调度集中系统方案研究 [J]. 铁道标准设计, 2021, 65 (5): 168-172.
Song Pengfei, Zhao Hongtao, Wang Tao, et al. Study on Intelligent Centralized Traffic Control System of Multi-System Data Fusion[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(5): 168-172.
- [2] 李洋, 冯振国. 调度集中系统与其他系统接口的设计与应用 [J]. 中国铁路, 2022 (1): 75-79.
Li Yang, Feng Zhenguo. Design and Application of Interface between Centralized Traffic Control

- System and other Systems[J]. China Railway, 2022(1): 75-79.
- [3] 李洪朋. 朔黄铁路调度集中系统信息共享接口研究 [J]. 铁道通信信号, 2015, 51 (10): 17-19.
Li Hongpeng. Research on Data Sharing Interface of CTC for Shuohuang Railway Line[J]. Railway Signalling & Communication, 2015, 51(10): 17-19.
- [4] 罗志刚, 杨俐, 王悦婷, 等. 高密度公交化市域铁路调度集中系统方案优化研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (11): 48-52.
Luo Zhigang, Yang Li, Wang Yueting, et al. Research on Optimization of CTC System in High Density Transit Oriented Urban Railway[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(11): 48-52.
- [5] 张昱, 何永发, 武长海. 利用既有铁路开行市域(郊)列车调度集中系统信息交互研究 [J]. 铁道标准设计, 2023, 67 (2): 166-170.
Zhang Yu, He Yongfa, Wu Changhai. Research on Information Interaction of Centralized Traffic Control System in Running Suburban Trains by Using Existing Railway[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(2): 166-170.
- [6] 黄康, 秦燕燕. 铁路列车调度指挥系统信息传输平台研究 [J]. 铁道通信信号, 2011, 47 (11): 1-3.
Huang Kang, Qin Yanyan. Study of Railway Train Dispatching Command System Data Transmission Platform[J]. Railway Signalling & Communication, 2011, 47(11): 1-3.
- [7] 魏博, 宋鹏飞, 应志鹏. 列车调度指挥系统信息共享平台的设计与实现 [J]. 铁道通信信号, 2010, 46 (10): 27-29.
Wei Bo, Song Pengfei, Ying Zhipeng. Design and Realization of Information Sharing Platforms for Train Operation Dispatching and Command System[J]. Railway Signalling & Communication, 2010, 46(10): 27-29.
- [8] 费振豪, 贺永祥. 高速铁路调度集中系统智能化研究及设计 [J]. 铁道通信信号, 2020, 56 (8): 12-15, 20.
Fei Zhenhao, He Yongxiang. Research and Design of Intelligent Centralized Traffic Control System for High-Speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(8): 12-15, 20.
- [9] 王晓辉. 区间综合监控系统在特殊车站的应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (2): 6-10.
Wang Xiaohui. Application of Sectional Integrated Supervisory and Control System(QJK) in Irregular Station[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(2): 6-10.
- [10] 童荣军. 普速铁路CTC中心站集中控制技术工程应用探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (3): 1-5, 16.
Tong Rongjun. Discussion on Engineering Application of Centralized Control Technology in CTC Central Station of Conventional Speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(3): 1-5, 16.
- [11] 赵浩森, 胡轶超. 安全监督在信号集中监测系统上的应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (1): 28-32.
Zhao Haosen, Hu Yichao. Application of Train Control Safety Information Supervision in Centralized Signaling Monitoring System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(1): 28-32.
- [12] 张洁. 区间综合监控设备存在设计问题的分析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (3): 77-80.
Zhang Jie. Analysis and Discussion on Design Problems of Section Integrated Monitoring Equipment[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(3): 77-80.
- [13] 苏向棋. 既有线增加区间占用逻辑检查试验方法思考 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (9): 97-100.

(下转 74页)

一种基于DX3型道口信号系统的 平交道口防护方法

赵茜茹

(中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 武汉 430074)

摘要: 基于DX3型道口信号系统提出一种新的道口防护方法, 即在列车信号开放条件中加入道口看守员确认道口防护完成以及遮断信号机状态的条件, 通过道口防护完全的状态来卡控列车信号机的开放条件。当所有条件均满足时, 可以实现不需要延时开放列车信号就能够实现保证平交道口行车安全的目的。同时, 大大减轻交通拥堵压力, 提高铁路列车和道路车辆的运输效率, 提升铁路平交道口的管理水平。本方法适用于不同牵引联锁或闭塞制式的单、双、多线的站内或区间道口。

关键词: 平交道口; DX3型道口信号系统; 延时开放列车信号

中图分类号: U213.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0042-04

New Method of Level Crossing Protection Based on DX3 Level Crossing Signaling System

Zhao Qianru

(China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper proposes a new method of level crossing protection based on the DX3 level crossing signaling system. The requirement on the level crossing guard to confirm the completion of level crossing protection and the status of obstruction signals is added to the clearance conditions of train signals. Thus, the clearance conditions of train signals are controlled with the completion status of level crossing protection. When all the conditions are met, the proposed method can ensure traffic safety at the level crossing without delaying the clearance of train signals. Moreover, it greatly reduces traffic congestion pressure, improves the transport efficiency of railway trains and road vehicles, and upgrades the management level of railway level crossings. The proposed method is applicable to level crossings in stations and sections of single-track, double-track and multi-track lines with various types of traction interlocking and blocking systems.

Keywords: level crossing; DX3 level crossing signaling system; delayed clearance of train signal

1 概况

站内咽喉区道口是指位于出站信号机与进站信号机之间的铁路道口。当列车接近或离去铁路道口时，自动向道路方向显示禁止或准许通行的信号，从而达到保障平交道口行车安全的目的。

依据《站内道口信号设备技术条件》(GB 10493-2018)第5.9条规定，“当信号机至道口的距离小于接近区段长度时，应采用先发出道口接近通知、收到回执、经延时后才能开放信号的方式”，提出一种道口防护方法。当道口接近点位置小于接近区段长度时，可以实现仅采用回执，不延时即开放信号安全防护平

交道口的方法。在保证平交道口行车安全的同时，提高列车和道路车辆的通行运输效率。

2 既有DX3型道口信号系统

DX3型道口信号系统是一种采用点式列车检查设备，有线的传输通道以及继电器逻辑控制电路构成的系统。适用于不同联锁或闭塞制式的单、双、多线的站内或区间道口。

如图1所示，电厂北路道口为站内道口，出站信号机距离道口中心807 m，进站信号机距离道口中心189 m，道口宽30 m，两道口信号机之间的距离为12 m。

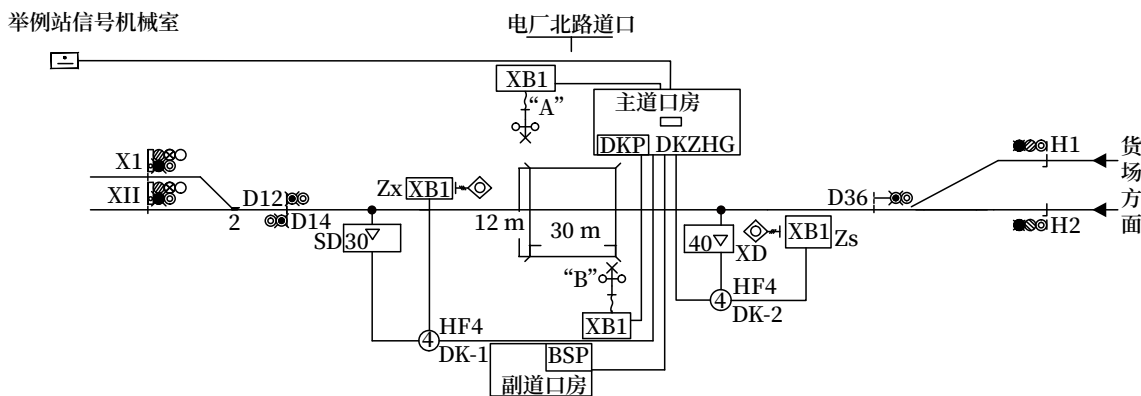


图1 电厂北路道口平面示意

Fig.1 Layout of level crossing at Dianchangbei Road

依据《铁路道岔使用规定》(铁总工电[2018]227号)，经1/9道岔弯股接发车限速35 km/h。根据标准(GB 10493-2018)计算出列车接近通知时间为43.08 s，列车接近区段长度为1 283.8 m。可以看出，道口接近点位置远远小于接近区段长度。此时，进站信号机需延时38 s，出站信号机需延时25 s。

既有的有人看守道口的防护方式为：当道口报警响起时，需人工确认道口处无车辆后关闭栏木机，等待列车出清道口后再打开栏木机。若列车出站，此过程的道路车辆至少需要等待165 s；若列车进站，此过程的道路车辆至少需要等待114 s，严重影响交通。

3 改进后的道口自动信号防护方法及流程

3.1 防护方法

本文基于DX3型道口信号系统提出一种新的道

口防护方式，即在列车信号开放条件中加入道口看守员确认道口防护完成的条件，此时列车信号的开放与否与道口是否确认防护完全紧密关联。通过道口防护完全来卡控列车信号机的开放条件，因此可以实现不需要延时开放列车信号就能够实现保证平交道口行车安全的目的。

3.2 作业流程

根据本文提出的道口防护方法的列车进/出站的流程为：当列车准备出站或者进站时，调度员排列列车进路，此时，道口开始报警，道口信号机亮红灯。道口看守员在确认道口处无车辆后关闭栏木机，确认栏木机完全关闭后，按压道口控制盘上的确认按钮。在道口不发生紧急情况时，遮断信号处于关闭状态。当联锁系统在检查完相关联锁条件后，还需要检查已按压道口确认按钮、遮断信号处于关闭状态，当

所有条件均满足时，进站信号机或出站信号机开放，列车可以进站或出站。当列车到达道口到达点后，道口结束报警，人工打开栏木机，道口信号机亮绿灯，道路车辆正常通行。流程如图 2 所示。

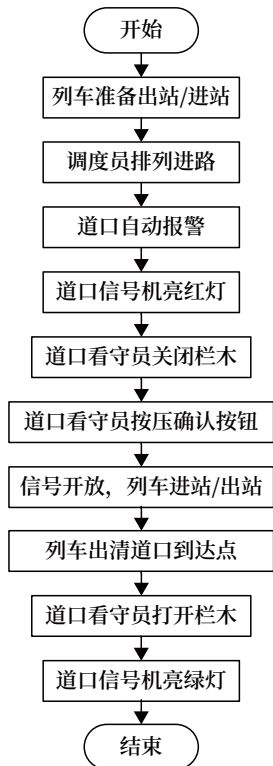


图2 道口防护方法的列车进/出站流程
Fig.2 Train arrival and departure process of proposed level crossing protection method

4 改进后的道口自动信号电路

为实现本文提出的新防护方法，基于 DX3 型道口信号电路，在车站信号机械室内联锁系统中新增两个继电器：一个是道口确认继电器 (DKQJ) 的 JWXC-1700 型继电器，一个是道口遮断信号继电器 (DKZSJ) 的 JWXC-1700 型继电器，接入 11 线如图 3 所示。

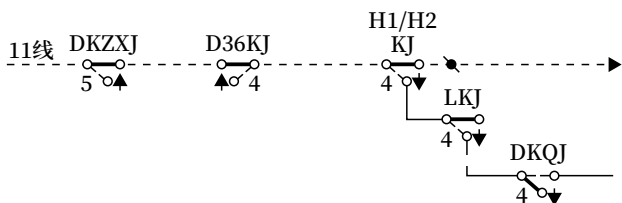


图3 道口信号控制电路原理 (一)
Fig.3 Schematic diagram of signaling control circuit for level crossing (1)

DKQJ 的吸起条件采用 DX3 型道口信号系统中确认继电器 (QJ) 的前节点；DKZSJ 的吸起条件采用 DX3 型道口信号系统中的遮断信号复示继电器 (ZXJF) 的前节点，两个电路均采用双断法，具体电路如图 4 所示。其他 DX3 型道口信号电路维持既有不变。

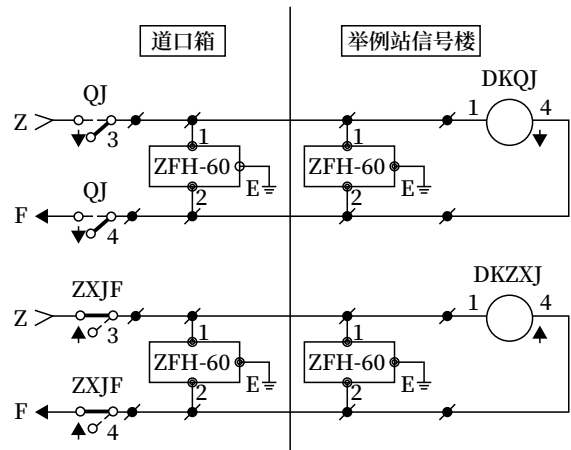


图4 道口信号控制电路原理 (二)
Fig.4 Schematic diagram of signaling control circuit for level crossing (2)

从图 3、4 可以看出，道口看守员按压道口控制盘上的确认按钮时，QJ 吸起，导致 DKQJ 吸起。遮断信号处于关闭状态时，ZXJF 为吸起状态，因此信号楼的 DKZSJ 保持吸起状态。联锁系统在需要检查相关锁条件，以及 DKQJ、DKZSJ 均为吸起状态时，11 线接通，列车信号开放。

以电厂北路道口为例，采用本文提出的道口防护方法，进站信号机或出站信号机均不需要延时。当道口报警响起时，人工确认道口防护完成后按压确认按钮，列车进站或出站，等待列车出清道口后再打开栏木机。若列车出站，此过程的道路车辆至少需要等待 139 s，比原防护方式节约了 26 s；若列车进站，此过程的道路车辆至少需要等待 75 s，比原防护方式节约了 39 s。

由于本文中提出的方法将道口防护的条件融入了列车信号机的开放条件，因此只要是有人看守的平交道口，都适合采用本文提出的道口信号防护方法。

5 结语

应用本文提出的改进后 DX3 型道口信号系统，

可以在保证平交道口安全的前提下,大大缩短道路车辆的等待时间,减轻交通拥堵压力,提升道口管理水平。对于接近点位置小于接近区段长度的道口防护方案具备一定的参考价值。

参考文献

- [1] 杨旭涛. 铁路道口自动报警与控制方案的建设与应用 [J]. 安徽冶金科技职业学院学报, 2022, 32 (1): 32-34.
Yang Xutao. Construction and Application of Automatic Alarm and Control Scheme for Railway Crossing[J]. Journal of Anhui Vocational College of Metallurgy and Technology, 2022, 32(1): 32-34.
- [2] 焦磊. 特殊道口信号电路设计 [J]. 铁道通信信号, 2014, 50 (2): 38-40.
Jiao Lei. Circuits Design for Specific Railway Crossing[J]. Railway Signalling & Communication, 2014, 50(2): 38-40.
- [3] 张德军, 邱培军, 李映, 等. 铁路货场平过道道口自动防护系统设计与实现 [J]. 铁路计算机应用, 2021, 30 (6): 52-57.
Zhang Dejun, Qiu Peijun, Li Ying, et al. Design and Implementation Automatic Protection System for Level Corridor of Railway Freight Yard[J]. Railway Computer Application, 2021, 30(6): 52-57.
- [4] 刘仕磊. 铁路道口自动控制系统研究与应用 [J]. 山东煤炭科技, 2013 (3): 266-267.
Liu Shilei. Research and Application of Railway Crossing Automatic Control System[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2013(3): 266-267.
- [5] 刘昊, 朱振华, 于建辉. 城市无人值守铁路道口自动控制系统 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2011, 34 (4): 83-86.
Liu Hao, Zhu Zhenhua, Yu Jianhui. Automatic Control System at the Unmanned Railway Crossing[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 34(4): 83-86.
- [6] 曹伟华, 郭翔, 于忠宁. 铁路道口远程集中看护控制系统的研发与应用 [J]. 铁道通信信号, 2021, 57 (4): 48-51.
Cao Weihua, Guo Xiang, Yu Zhongning. Development and Application of Remote Centralized Monitoring and Control System for Railway Crossing[J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(4): 48-51.
- [7] 田方伟. 铁路道口远程集中监控系统的实现要点分析 [J]. 中国新技术新产品, 2021 (5): 21-23.
Tian Fangwei. Analysis on the Key Points of Realizing Remote Centralized Monitoring System for Railway Crossings[J]. New Technology & New Products of China, 2021(5): 21-23.
- [8] 吴燕文. 浅谈铁路道口信号自动报警系统的问题处理 [J]. 科学与信息化, 2020 (1): 135-136.
- [9] 林卫永, 金云, 杨建华, 等. 厂矿企业铁路道口安全综合监督系统方案探讨 [J]. 铁道通信信号工程技术, 2022, 19 (1): 24-27.
Lin Weiyong, Jin Yun, Yang Jianhua, et al. Scheme of Comprehensive Safety Supervision System for Railway Crossing in Factories and Mines[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 24-27.
- [10] 张雨千. 英标体系含道口区间列车发车间隔分析 [J]. 铁道通信信号工程技术, 2024, 21 (2): 7-13.
Zhang Yuqian. Analysis of Train Departure Intervals in Block Sections with Level Crossings under British Standard System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(2): 7-13.
- [11] 池春玲, 张伟, 宋睿, 等. 都市圈轨道交通多网融合的信号系统方案研究 [J]. 铁道通信信号工程技术, 2024, 21 (1): 1-9.
Chi Chunling, Zhang Wei, Song Rui, et al. Research on Signaling System Scheme of Multi-Network Integration of Metropolitan Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(1): 1-9.

(下转 69页)

高铁站台区“北斗+5G”列车融合定位方案探讨

罗颖欣, 丁 珣

(中国铁建电气化局集团有限公司, 北京 100043)

摘要: 以北斗卫星导航定位为核心、融合多种定位方式的列车定位技术是现阶段研究的重点之一。针对高铁站台区由于雨棚等构筑物遮挡影响卫星定位精度的现状问题, 探讨采用“北斗+5G”融合定位技术方案的可行性, 在试验环境(模拟站台环境)下验证5G定位技术的精度, 并提出北斗定位与5G定位数据融合算法, 为提升列车定位精度提供新的解决方案。

关键词: 高速铁路; 北斗卫星定位; 5G定位

中图分类号: U285.21

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0046-07

Discussion on "Beidou+5G" Fusion Scheme for Train Positioning in Platform Area of High Speed Railways

Luo Yingxin, Ding Xun

(China Railway Construction Electrification Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100043, China)

Abstract: One current research focus is the train positioning technology that takes Beidou satellite navigation and positioning as the core and combines multiple positioning methods. To address the current problem of obstruction of such structures as rain sheds, which affects satellite positioning accuracy, this paper discusses the feasibility of the technical scheme of "Beidou+5G" fusion for train positioning in the platform area of high speed railways. It also presents the accuracy verification of the 5G positioning technology in an experimental environment (simulated platform environment), and proposes a fusion algorithm for Beidou and 5G positioning data, which provides a new solution for improving train positioning accuracy.

Keywords: high speed railway; Beidou satellite positioning; 5G positioning

1 概述

中国国家铁路集团有限公司于2020年发布了《新时代交通强国铁路先行规划纲要》, 提出将利用北斗卫星导航技术、5G通信技术等构成空天地一体化的列控系统。基于北斗卫星导航定位、融合多种定位方式的列车定位技术是现阶段研究的重点之一。

收稿日期: 2023-04-11; 修回日期: 2024-04-07

基金项目: 中国铁建股份有限公司科研计划课题项目(2021-C43)

第一作者: 罗颖欣(1989—), 女, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 铁路信号工程设计、科技研发, 邮箱: 413359416@qq.com。

机车综合无线通信设备（CIR系统）是铁路列车专用的无线通信设备，用于实现机车和调度台之间的通信。国内铁路存在多种通信制式。长交路运行的机车，需要在合适的地点进行电台工作模式切换才能保证通信顺利进行，因此，CIR系统应根据机车当前位置自动切换通信设备的工作模式。目前，CIR系统依靠卫星定位单元实现机车定位，但在站台区域，由于雨棚等构筑物遮挡，影响卫星定位精度，导致机车无法精确定位，CIR系统自动选线功能失效，需司机进行手动选线，增加了司机操作的复杂度、降低车机联控的可靠性。

依据相关设计规范，车站内相邻两股到发线中心线间最小距离规定为5 m；如能通过技术手段，在视野受限区域对卫星定位系统精度进行补强且定位精度达到2 m（RMS），则能够实现列车进入站台区连续精确定位、且能自行判断列车所处股道（线路）的功能。

2 北斗定位原理

卫星定位基于到达时间（Time of Arrival, TOA）的定位方法，接收机接收到可见卫星信号后，处理得到各卫星信号的发射时间，将接收机时钟反馈的接收时间与发射时间作差，进而求出接收机与卫星的距离。如图1所示，设卫星编号为 n （ $n = 1, 2, 3$ ），编号为 n 的卫星某时刻空间位置在地心地固坐标系中的坐标表示为 $(x^{(n)}, y^{(n)}, z^{(n)})$ ，接收机坐标为 (x, y, z) ，接收机解算出与该卫星的距离为 $\rho^{(n)}$ ，如公式（1）所示。

$$\begin{cases} \sqrt{(x^{(1)} - x)^2 + (y^{(1)} - y)^2 + (z^{(1)} - z)^2} + dt_u = \rho^{(1)} \\ \sqrt{(x^{(2)} - x)^2 + (y^{(2)} - y)^2 + (z^{(2)} - z)^2} + dt_u = \rho^{(2)} \\ \dots \\ \sqrt{(x^{(N)} - x)^2 + (y^{(N)} - y)^2 + (z^{(N)} - z)^2} + dt_u = \rho^{(N)} \end{cases} \quad (3)$$

3 融合定位技术选择

3.1 总体思路

针对卫星定位系统在列车运行过程中受环境因素影响定位精度甚至无法定位的情况，采用多元融

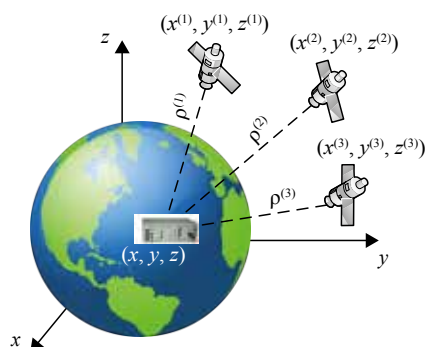


图1 北斗卫星定位示意

Fig.1 Schematic diagram of Beidou satellite positioning

$$\sqrt{(x^{(n)} - x)^2 + (y^{(n)} - y)^2 + (z^{(n)} - z)^2} = \rho^{(n)} \quad (1)$$

对不同卫星可列出与公式（1）相同的方程，联立方程组可得到 (x, y, z) 值。

事实上，接收机与卫星距离的测量值并不准确，接收机时钟与卫星自备的时钟存在偏差。此外，电离层、对流层延时也是误差的来源之一，因此 ρ 称为伪距。伪距的表达式如公式（2）所示。

$$\rho = r^{(n)} + c(\delta t_u - \delta t^{(n)}) + I + T + \varepsilon_p \quad (2)$$

其中， $r^{(n)}$ 为接收机到编号为 n 的卫星的卫星钟差； c 为光速； δt_u 、 $\delta t^{(n)}$ 分别为接收机时钟钟差、卫星时钟钟差； I 、 T 分别为电离层延时和对流层延时， ε_p 为其他误差。

公式（2）中的 $\delta t^{(n)}$ 、 I 和 T 均可视为已知参数，不考虑 ε_p ，一个方程有4个未知数，即同一历元下需要至少4个可见卫星参与解算。建立非线性方程组求解，设可见卫星数为 N ， $dt_u = c \times \delta t_u$ 表示由接收机钟差造成的误差，建立如公式（3）所示方程组。

通常采用牛顿迭代法对非线性方程组进行求解。

合的方式提高列车定位精度是现阶段主要研究的技术方案。5G作为先进的通信移动技术，具有高速率、低时延、广连接和支持快速部署等优势，赋予高速铁路信息传输更快的速率与更可靠的连接。结合目前铁路公网联合覆盖的趋势，未来可利用铁

路在站台区域部署的专网网络进行 5G 定位系统的布设，通过在站台区域部署基站、室内增设少量定位服务器的方式，较为方便地搭建 5G 室分系统。同时，列车定位信息通过 5G 专网进行传输，增强各系统间定位信息的无缝传递。

3.2 5G定位算法比选

R16 标准包含增强型小区标识定位法 (Enhanced Cell ID, E-CID)、往返时间定位法 (Round Trip Time, RTT)、下行到达时间观测差定位法 (Downlink Time Difference Of Arrival, DL-TDOA)、上行到达时间观测差定位法 (Uplink Time Difference Of Arrival, UL-TDOA)、上行到达角度定位法 (Uplink Angle of Arrival, UL-AOA) 等一系列定位方法。各种定位方法对比如表 1 所示。

表1 5G定位算法对比

Tab.1 Comparison of 5G positioning algorithms

定位方法	优点	缺点
E-CID	不需额外新增参考信号	精度受限
UL-TDOA	仅需终端支持上行参考信号发送即可实现定位，实现复杂度低	要求基站间严格同步
Multi-RTT	采用相对时间差消除了 TRP 间不同步的影响，定位精度相对较高	需要终端支持 PRS
UL-AOA	利用相对时间差，不需要 TRP 之间严格同步	依赖较高的天线阵子数，对多径敏感

其中， c 为光速， $d_{2,1} = c(\Delta t_2 - \Delta t_1) = r_2 - r_1$ 表示基站 2 相对于基站 1 的 TDOA 观测测量差值。每个 TDOA 方程都确定了一条双曲线，两条双曲线的交点即为接收机位置。进而推广到 N 个基站，如公式 (5) 所示。

基于 UL-TDOA 的算法消除了接收终端与基站间的时钟钟差，对于接收终端而言，无需再去接收

$$\begin{cases} \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = d_{2,1} \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = d_{3,1} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = d_{2,1} \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = d_{3,1} \\ \dots \\ \sqrt{(x_N - x)^2 + (y_N - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} = d_{N,1} \end{cases} \quad (5)$$

通过各定位算法对比分析，结合考虑站台环境下的实施条件，拟采用 UL-TDOA 方法进行定位。如图 2 所示，接收终端 UE 发送用于上行定位的 SRS-Pos/SRS 信号。在基站侧，基站通过 SRS-Pos/SRS 信号测量，获得 UE 与基站（包括参考基站）的 TDOA 观测测量差值，并上报给定位解算平台 (Location Based Services, LBS)。根据 TDOA 观测测量差值，LBS 采用双差分定位算法获得定位精度在米级的 UE 位置。

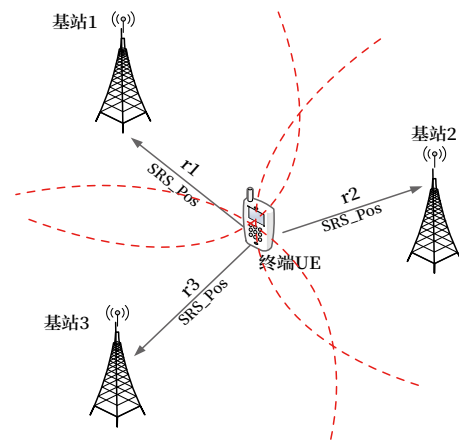


图2 UL-TDOA定位原理示意

Fig.2 Schematic principle diagram of UL-TDOA positioning

参考基站为基站 1 (x_1, y_1)，设接收终端与基站 i 的信号到达时间为 $\Delta t (i = 1, 2, 3)$ ，则如公式 (4) 所示。

和处理基站发送的时间戳。

3.3 定位精度验证

为验证定位精度，在中铁建电气化工程实验室室内环境（模拟站台遮挡环境）下部署 5G 室分系统，主要设备包括 pRRU（间距 2~3 m 布设一处）、PRHB、5G 定位服务器等。试验环境下系统结构示意图如图 3 所示。

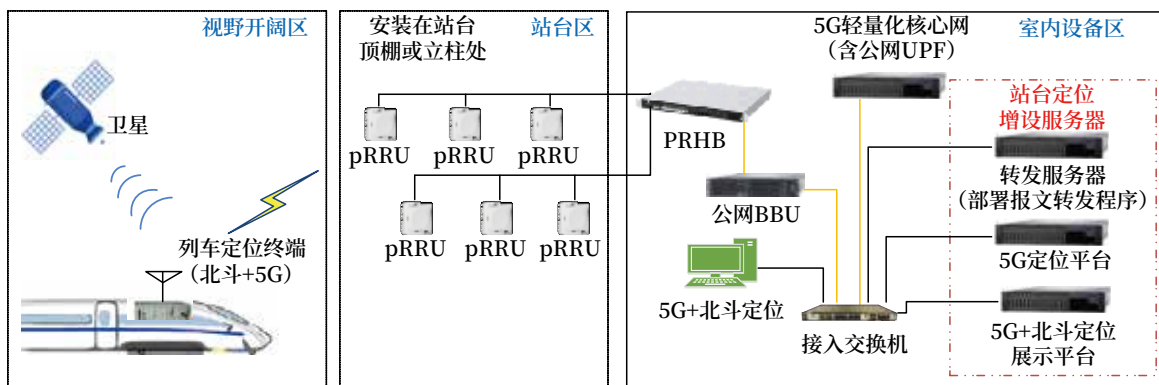


图3 “北斗+5G”定位系统结构示意图(试验环境)

Fig.3 Schematic structure diagram of "Beidou+5G" positioning system (experimental environment)

试验环境下测试两个静态点，分别为有遮挡测试和无遮挡测试。将测试终端放置于测试区域内的测试点上，在LBS侧触发周期定位，定位时长不少于3 min，输出5G单独定位结果；更换不同的测试点位置，选取5个测试点进行重复测试。

对5G上报定位数据采集并进行分析，形成结果如表2所示。

表2 5G静态测试结果汇总

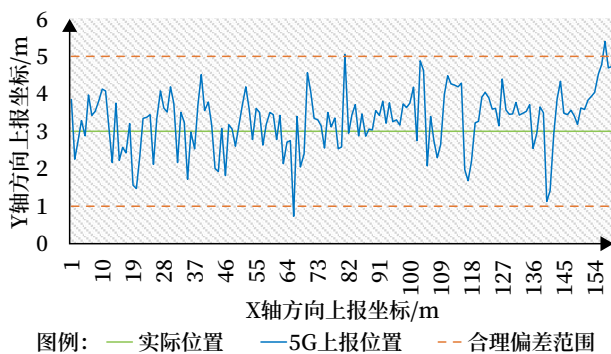
Tab.2 Summary of 5G static test results

采样编号	坐标 (x, y)	总上报次数	精度 (RMS) /m
无遮挡-1	(3,5)	268	0.894
无遮挡-2	(4,3)	256	0.678
无遮挡-3	(4,4)	239	0.535
无遮挡-4	(6,4)	290	0.620
无遮挡-5	(7,3)	264	1.658
有遮挡-1	(5,5)	253	1.832
有遮挡-2	(5,3)	513	0.882
有遮挡-3	(6,3)	462	0.794
有遮挡-4	(5,4)	320	1.142
有遮挡-5	(6,2)	219	1.300

5G 动态轨迹测试：规划2条不同方向的动态轨迹，沿直线行走，统计动态轨迹定位偏差。

动态轨迹1：测试终端沿着Y=3的直线移动，方向为X轴正方向，Y轴坐标有97.5%的点在2m范围内波动，详细波动如图4所示。

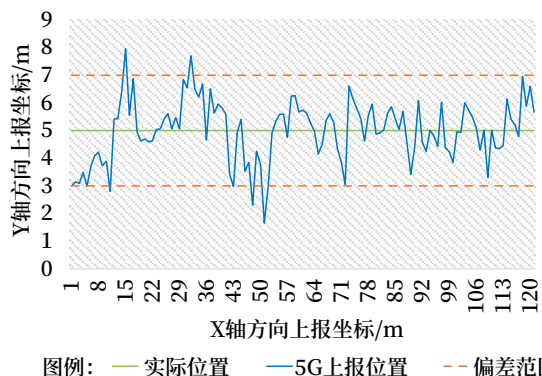
动态轨迹2：测试终端沿着X=5的直线移动，方向为Y轴正方向，X轴坐标有92.5%的点在2m范围内波动，详细波动如图5所示。



图例：— 实际位置 — 5G上报位置 - - 合理偏差范围

图4 5G定位波动(动态轨迹1)

Fig.4 5G positioning waveform (dynamic trajectory 1)



图例：— 实际位置 — 5G上报位置 - - 偏差范围

图5 5G定位波动(动态轨迹2)

Fig.5 5G positioning waveform (dynamic trajectory 2)

由测试结果可知，在静态无遮挡、静态有遮挡、动态环境下，5G定位均满足2m (RMS)的精度要求。因此，在站台区域可以采用5G定位技术对列车定位精度进行补强。

4 “北斗+5G”融合定位方案

在北斗信号与5G信号的交叠区域(线路到站台

的过渡区域), 北斗卫星信号由于受到站台的遮挡会发生严重的衰减, 可能会导致可视北斗卫星数目不足4颗, 无法利用北斗进行用户坐标解算。若接收机此时可以捕获到5G基站信号, 加入5G基站的TDOA观测测量融合解算, 可以弥补北斗卫星不足的情况, 提升在信号交叠区域定位精度, 保证定位性能。

因此, 设计“北斗+5G”联合定位系统架构, 如图6所示, 由5G基站网络、时间同步设备和“北斗+5G”融合定位接收机等3部分组成。5G基站网络由1个参考基站及至少2个普通基站构成(取决于5G覆盖范围)。

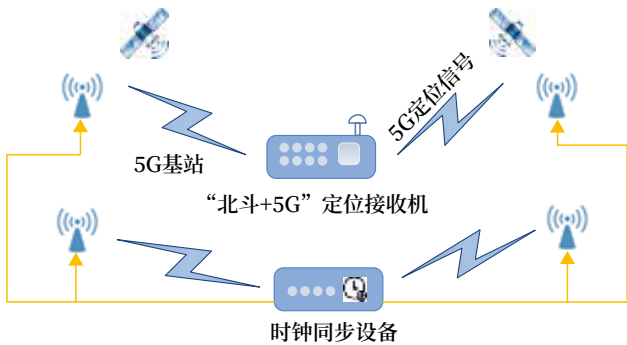


图6 “北斗+5G”联合定位系统结构
Fig.6 Structure of "Beidou+5G" combined positioning system

获取北斗数据方面, 接收机通过接收天线接收北斗卫星信号, 得到卫星观测数据(伪距、卫星坐标、卫星钟差、各项误差参数等), 如表3所示。

获取5G数据方面, 接收机接收来自5G基站的TDOA观测测量数据(5G基站的位置坐标、UL-TDOA时间等), 如表4所示。

定义拟计算的接收机坐标为 (x, y, z) , 观测北斗卫星数量 M 个, 相应的卫星坐标为 $(x^{s1}, y^{s1}, z^{s1}) \sim (x^{sM}, y^{sM}, z^{sM})$, 5G基站共有 N 个, 相应坐标为 $(x_{b1}, y_{b1}, z_{b1}) \sim (x_{bN}, y_{bN}, z_{bN})$, 其中第一个坐标为参考基站坐标。

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho^1 = \sqrt{(x^{s1} - x)^2 + (y^{s1} - y)^2 + (z^{s1} - z)^2} + \delta \\ \dots \\ \rho^M = \sqrt{(x^{sM} - x)^2 + (y^{sM} - y)^2 + (z^{sM} - z)^2} + \delta \\ d_1 = \sqrt{(x_{b2} - x)^2 + (y_{b2} - y)^2 + (z_{b2} - z)^2} - \sqrt{(x_{b1} - x)^2 + (y_{b1} - y)^2 + (z_{b1} - z)^2} \\ \dots \\ d_N = \sqrt{(x_{bN} - x)^2 + (y_{bN} - y)^2 + (z_{bN} - z)^2} - \sqrt{(x_{b1} - x)^2 + (y_{b1} - y)^2 + (z_{b1} - z)^2} \end{array} \right. \quad (6)$$

表3 北斗数据

Tab.3 Beidou data

数据类型	功能	备注
时间	与5G数据时间戳对齐	精确到毫秒
伪距 ρ	参与定位解算	
卫星坐标 (x^s, y^s, z^s)	参与定位解算	
卫星钟差 δ	消除卫星时钟带来的误差影响	
电离层、对流层延迟误差参数	消除对应误差影响	
传播路径误差参数	通过差分基站播发数据进行伪距修正	

表4 5G数据

Tab.4 5G data

数据类型	功能	备注
时间	与北斗数据时间戳对齐	精确到毫秒
UL-TDOA 时间 Δt	消除接收终端与基站间的时钟钟差	
基站坐标 (x_{bN}, y_{bN}, z_{bN})	计算各基站到接收终端的距离	精确到米级
参考基站坐标 (x_{b1}, y_{b1}, z_{b1})	作为各基站所处坐标系的位置参考值	精确到米级
参考接收机坐标	作为误差参数调整依据	
接收机、基站时间延迟		

将北斗卫星观测数据中的伪距 ρ 、卫星坐标 (x_s, y_s, z_s) 、卫星钟差 δ 等参数代入公式(3), 将5G数据中的UL-TDOA时间 Δt 、基站坐标 (x_{bN}, y_{bN}, z_{bN}) 、光速 c 代入公式(5), 联立得到“北斗+5G”融合定位系统模型, 如公式(6)所示。

采用基于高斯牛顿迭代的非线性最小二乘法等一系列方法, 拟合“北斗+5G”融合定位的非线性模型, 将结果作为最终的联合定位结果。

基于相应的定位解算原理, 可实现在北斗、5G信号均可观测的条件下的定位解算, 可实现北斗卫星数目可见较好情况下, 基于5G信号的定位精度保持和优化。在北斗卫星数目较少的情况下, 可实现基于5G定位信号的观测测量补足, 保障基于时间

到达方法进行位置解算的观测量数量。

5 结束语

目前 CIR 系统在站台区主要通过卫星定位补强的方式保障系统自动选线功能。本文结合铁路 5G-R 的发展方向及铁路公专网联合覆盖的趋势,探讨在站台区域采用“北斗+5G”融合定位技术方案的可行性,在试验环境(模拟站台环境)下验证了 5G 定位技术的精度,并提出北斗定位与 5G 定位数据融合算法,为 CIR 系统提升定位精度提供新的解决思路。后续研究过程中还需要考虑如下问题。

1) 北斗定位时间与 5G 时间的同步问题,只有相同时间的定位数据才可以进行定位结果的解算,否则不同时刻,接收机位置不同,带来粗大误差,导致解算结果误差更大,不利于方法验证。

2) 北斗天线与 5G 天线的位置校验问题,算法原理需要考虑发射机、接收机之间的绝对距离,因此两者的天线需要做好空间坐标系下的距离精确测量。

参考文献

- [1] 莫志松, 安鸿飞. 新型列控系统列车综合自主定位技术研究[J]. 铁道学报, 2022, 44(1): 56-64.
Mo Zhisong, An Hongfei. Research on Comprehensive Autonomous Positioning Technology of New Train Control System[J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(1): 56-64.
- [2] 蔡煊, 陶汉卿, 侯宇婷, 等. 北斗卫星导航系统在列车定位中的应用研究与发展[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(8): 2417-2427.
Cai Xuan, Tao Hanqing, Hou Yuting, et al. Application Research and Development of Beidou Navigation Satellite System in Train Positioning[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(8): 2417-2427.
- [3] Marais J, Beugin J, Berbineau M. A Survey of GNSS-Based Research and Developments for the European Railway Signaling[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(10): 2602-2618.
- [4] 谢和欢. 基于 5G 技术的新一代列控通信系统研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(12): 38-45.
Xie Hehuan. Research on New Generation of Train Control Communication System Based on 5G Technology[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(12): 38-45.
- [5] 陈苏, 赵晟. 5G 在智能高铁中的应用[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(7): 46-50, 76.
Chen Su, Zhao Sheng. Application of 5G in Intelligent High-Speed Railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(7): 46-50, 76.
- [6] 李健翔. 5G 移动通信网的定位技术发展趋势[J]. 移动通信, 2022, 46(1): 96-100, 106.
Li Jianxiang. The Development Trend of Positioning Technologies in 5G Mobile Communication Networks[J]. Mobile Communications, 2022, 46(1): 96-100, 106.
- [7] 郭斐, 靳文军. 基于 GPS 钟差预测模型的列车定位技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(4): 1-5.
Guo Fei, Jin Wenjun. Train Positioning Technology Based on GPS Clock-Bias Prediction Model[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(4): 1-5.
- [8] 陈瑞凤, 李君, 徐春婕, 等. 5G 在铁路智能车站中的应用[J]. 电信科学, 2021, 37(7): 86-95.
Chen Ruifeng, Li Jun, Xu Chunjie, et al. Application of 5G in Railway Smart Stations[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(7): 86-95.
- [9] 丁建文, 孙斌, 郑鹏, 等. 铁路 5G 技术创新应用探索[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(6): 1-9.
Ding Jianwen, Sun Bin, Zheng Peng, et al. Exploration of Innovative Application of 5G in Railway[J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(6): 1-9.

- [10] 龚利, 赵延杰, 朱明辉. 一种基于北斗和 5G 技术融合的复杂环境下机车定位方法 [J]. 北京交通大学学报, 2021, 45 (2): 44-51, 70.
Gong Li, Zhao Yanjie, Zhu Minghui. A Fusion Method Based on Beidou and 5G Technology for Locomotive Positioning in Complex Environment[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45(2): 44-51, 70.
- [11] 张诗壮, 李俊强, 陈诗军. 5G NR 定位技术及其部署方案 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27 (2): 49-53.
Zhang Shizhuang, Li Junqiang, Chen Shijun. 5G NR Positioning Technology and Its Deployment Scheme[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(2): 49-53.
- [12] 臧玉华, 陈静怡, 尚立, 等. 基于 TDOA 和 AOA 的 5G 室内场景三维定位方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51 (2): 180-187.
Zang Yuhua, Chen Jingyi, Shang Li, et al. Three-Dimensional Positioning Method of a 5G Indoor Distribution System Based on TDOA and AOA[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 180-187.
- [13] 刘江, 蔡伯根, 王剑. 基于卫星导航系统的列车定位技术现状与发展 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2014, 45 (11): 4033-4042.
Liu Jiang, Cai Baigen, Wang Jian. Status and Development of Satellite Navigation System Based Train Positioning Technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(11): 4033-4042.
- [14] 刘琪, 冯毅, 邱佳慧. 无线定位原理与技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- [15] 焦维新. 北斗卫星导航系统 [M]. 北京: 知识产权出版社, 2015.
- [16] 司福强. 5G+ 泛无线融合技术在地铁施工人员定位中的研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21 (2): 89-95.
Si Fuqiang. Research on 5G+Ubiquitous Wireless Fusion Technology in Metro Construction Personnel Positioning[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 21(2): 89-95.
- [17] 荣正官. 公专网融合的 5G 数据分流方法研究 [J]. 铁道建筑技术, 2023 (3): 14-16, 65.
Rong Zhenguan. Research on Data Distribution Method of 5G Public and Private Network Converged Architecture[J]. Railway Construction Technology, 2023(3): 14-16, 65.
- [18] 何丽. 基于高铁环境下的 5G 网络建设与规划 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (11): 42-46.
He Li. 5G Network Construction & Planning Based on High-speed Railway Environment[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(11):42-46.
- [19] 李强. 基于北斗卫星技术川藏铁路列控系统展望与思考 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (8): 105-110, 116.
Li Qiang. Outlook and Thinking on Train Control System for Sichuan-Tibet Railway Based on Beidou Satellite Technology[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(8):105-110, 116.
- [20] 马梓尧, 王海峰, 齐志华, 等. 一种基于 GNSS 的站内列车精确定位方法 [J]. 铁道标准设计, 2021, 65 (2): 165-172.
Ma Ziyao, Wang Haifeng, Qi Zhihua, et al. Aprecise GNSS-Based Method of Train Positioning in Railway Station[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(2): 165-172.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.05.010

基于CTCS-N列控系统的双电台冗余控制方法研究与设计

单飞龙^{1, 2}, 王佳^{1, 2}

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070;

2. 北京市高速铁路运行控制系统工程技术研究中心, 北京 100070)

摘要: 现有的CTCS列控系统大多采用单电台单连接方式实现与核心网的无线连接方案, 不能有效保证无线连接的高可靠性和降低系统故障率。设计方案不仅可实现对CTCS列控系统双电台的冗余控制, 当在用电台故障时, 车载单元会自动选择备用电台重新建立与地面设备安全无线连接, 从而保证列控系统的车载设备和地面设备无线通信快速恢复。而且在用电台可同时与多个设备建立多个安全无线连接, 大大提高CTCS列控系统的安全性、可靠性、容错性。双电台切换过程虽有一定的时延, 但对车载设备和地面设备的无线通信的影响较小。因此在列控系统的未来发展中, 双电台冗余控制将成为未来新型列控系统的发展趋势。

关键词: 双电台冗余; 车载设备; 地面设备; 协议栈; 列控系统

中图分类号: U285.21

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0053-09

Research and Design of Redundant Control Method for Double Radios Based on CTCS-N Train Control System

Shan Feilong^{1, 2}, Wang Jia^{1, 2}

(1. CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

(2. Beijing Engineering Technology Research Center of Operation Control Systems for High Speed Railways, Beijing 100070, China)

Abstract: For most existing CTCS train control systems, the single-radio and single-connection method is used to achieve wireless connection with the core network, which can neither effectively ensure the high reliability of wireless connection nor decrease the system failure rate. The design scheme proposed in this paper can not only achieve redundant control over double radios of the CTCS train control system, but also ensure that after the in-use radio fails, the onboard unit will

收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2024-03-15

基金项目: 中国神华能源公司重载列车群组运行控制系统技术研究与应用项目 (GJNY-22-7/2300-K1220053); 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司科研项目 (2300-K1220001.01.05)

第一作者: 单飞龙 (1993-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 列车自动驾驶系统, 无线通信及通信协议栈, 邮箱: danfeilong@crscd.com.cn.

automatically select the standby radio to re-establish a safe wireless connection with the wayside equipment. Thus, it ensures fast recovery of wireless communication between the onboard equipment and wayside equipment of the train control system. Moreover, the proposed design scheme allows multiple safe wireless connections between the in-use radio and multiple devices. Thus, it greatly improves the safety, reliability and fault tolerance of the CTCS train control system. Although there is some time delay in the switching process of double radios, this has very small impacts on the wireless communication between the onboard equipment and wayside equipment of the train control system. Therefore, redundant control over double radios will become a development trend of new train control systems in the future.

Keywords: double radio redundancy; onboard equipment; wayside equipment; protocol stack; train control system

1 概论

在列车运行控制系统中，车载设备通过车载电台附着并注册到 GSM-R/GPRS 无线网络，从而与地面设备建立安全无线通信。CTCS-3 列控系统使用电路域通信，随着铁路无线通信技术从电路域向分组域过渡，GPRS 分组域通信已在高铁 ATO 系统（CTCS3+ATO）和在研的新型列控系统中得到应用，也为未来 LTE 及 5G 等分组域通信技术的应用提供了基础。

在 GSM-R 电路域通信时，每个电台只能与一个地面设备建立通信，车载设备装备两个电台实现与地面无线闭塞中心（RBC）设备的安全无线连接，可支持单电台移交和双电台移交作业，特别注意的是双电台移交过程，每个电台都分别连接一个 RBC 设备；在 GPRS 分组域通信时，单个电台可同时与多个外部设备建立多个安全无线连接。现有技术下，尚无能适应上述多种场景的电台控制方案，电路域电台控制方案不适用于分组域通信，同时使用两个电台进行无线通信会造成网络资源浪费、电台利用率低等现象。无论在电路域或分组域通信时，车载电台都只建立一个安全无线连接，电台切换逻辑简单，无法实现实时诊断电台故障并及时执行切换。

本文研究的双电台冗余控制方案，不仅可满足列控系统车载设备在电路域、分组域不同特性、不同通信场景下的电台控制需求。还设计了高效的电

台切换机制，提高车载设备与地面设备安全无线通信的容错性和可靠性，大大提升列控系统的整体通信效率。

2 车-地通信介绍

车载设备和地面设备，一是通过软件应用实现网络与用户之间的双向对话，如找到通讯对方、识别网络可用资源、同步操作等；二是可以检查自身应用的相关功能，请求与对方通信。车载应用与地面应用之间采用双向认证和数据安全通信，以保证双方数据通信的安全性，提高通信数据的可靠性。车载设备和地面设备分别注册到本地核心网，并在网络上实现数据的可靠传输，从而实现车载设备和地面设备的双向安全数据信息无线传输通信。车载设备和地面设备的安全无线通信功能流程如图 1 所示。

在图 1 中，车载设备和地面设备之间安全的无线通信流程如下。

- 1) 将车载设备的应用程序和地面设备的应用程序烧入设备，检测车载设备和地面设备的硬件可用性，使得设备具备建立无线连接的基础。

- 2) 车载设备的应用层将数据信息作为用户数据传输给下一层传输层。

- 3) 当数据信息到达传输层，协议栈按照 TCP 报文格式开始封装报文，添加 TCP 报头并将上层传送来的报文数据填充在 TCP 用户数据字段中。将传输层封装好的报文发送出去，下层将到达的是

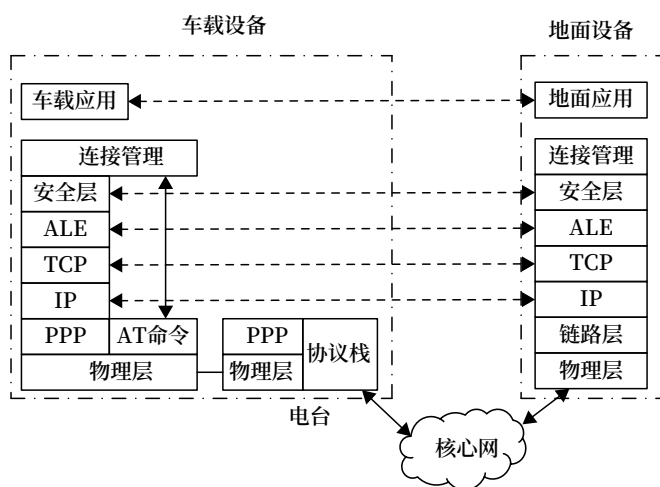


图1 车载设备与地面设备通信流程
Fig.1 Process of communication between onboard equipment and wayside equipment

网络层。

4) 在网络层时将上层报文进行 IP 封装，主要工作是添加 IP 报头等信息，之后，将 IP 封装之后的报文发送到数据链路层。

5) 当报文发送到车载设备的数据链路层，它会给报文添加以太网帧的首部和尾部，至此封装完毕，以太网帧形成。

6) 电台通过以太网物理层接口处理接收到的以太网帧数据，将其转换成适合物理介质传输的电平信号，最终通过电台天线在无线网络环境的物理介质上传输。

7) 在接收端，地面设备从核心网中获取车载设备发送的报文，经过物理层和链路数据层进行解剥离封装后发出，最后报文再经过地面设备网络层、传输层和应用层实现报文的原始数据的解析。

8) 当地面设备接收到车载设备发送的建立连接请求后，就会给车载设备发送建立连接确认报文，通过 3 次挥手机制，车载设备和地面设备建立 TCP 连接，然后双方可进行安全的数据通信。当需要断开 TCP 连接，就可以通过 4 次挥手机制断开连接。

9) 遵从上述 8 步，车载设备和地面设备就可进行 TCP 连接，安全、可靠地传输无线数据，并在需要时断开 TCP 连接。

在 CTCS 列控系统中，车载设备与地面设备

无线通信时，车载设备是连接的发起方，地面设备是响应方。车载设备一般主要指列车超速防护系统 (ATP)、列车自动驾驶系统 (ATO) 等，地面设备一般指无线闭塞中心 (RBC)、临时限速服务器 (TSRS) 等，特别在 CTCS-N 系统中，还有列尾设备 (EOT)、IP 查询服务器 (IPES)。

在分组域通信下，移动终端 MT 上电附着及 PDP 激活流程如图 2 所示。

在图 2 中，RTU 表示无线传输单元，MT 表示电台，BSS 表示基站子系统，SGSN 表示通用分组无线服务 (GPRS) 业务支持节点，GGSN 表示 GPRS 网关支持节点。MT 上电附着及 PDP 激活流程可总结如下。

1) 电台 MT 上电后，自动搜索 GPRS 网络，完成小区选择，然后进行 GPRS 附着。

2) GPRS 附着成功后，RTU 控制 MT 进行 PDP 激活。

3) SGSN 根据 PDP 激活请求中携带的 APN，选择本局 GGSN，建立 GTP 隧道。

4) GGSN 根据 APN，从对应的 IP 地址池里为 MT 动态分配 IP 地址，并返回 PDP 激活接受消息，里面携带了终端 IP 地址和当前 IP 查询服务器的 IP 地址。

5) 电台 MT 向无线传输单元 RTU 返回 PDP 激活成功。

6) PDP 激活成功后，RTU 获得 IP 地址、IP 查询服务器的 IP 地址，车载设备可与地面设备建立安全无线连接。

3 双电台冗余控制方案

在电路域下，一个车载电台只可建立一条安全无线连接，即只可与一个设备建立连接。当已有 TCP 连接后，则不会再在已用电台上建立新的无线连接，而是选择另外一个电台重新上下文激活注册网络；在分组域下，传输层可以实现多路复用的功能，在单一网络连接上可建立多个传输层的连接，即在同一个车载电台上，车载设备可与多个设备建

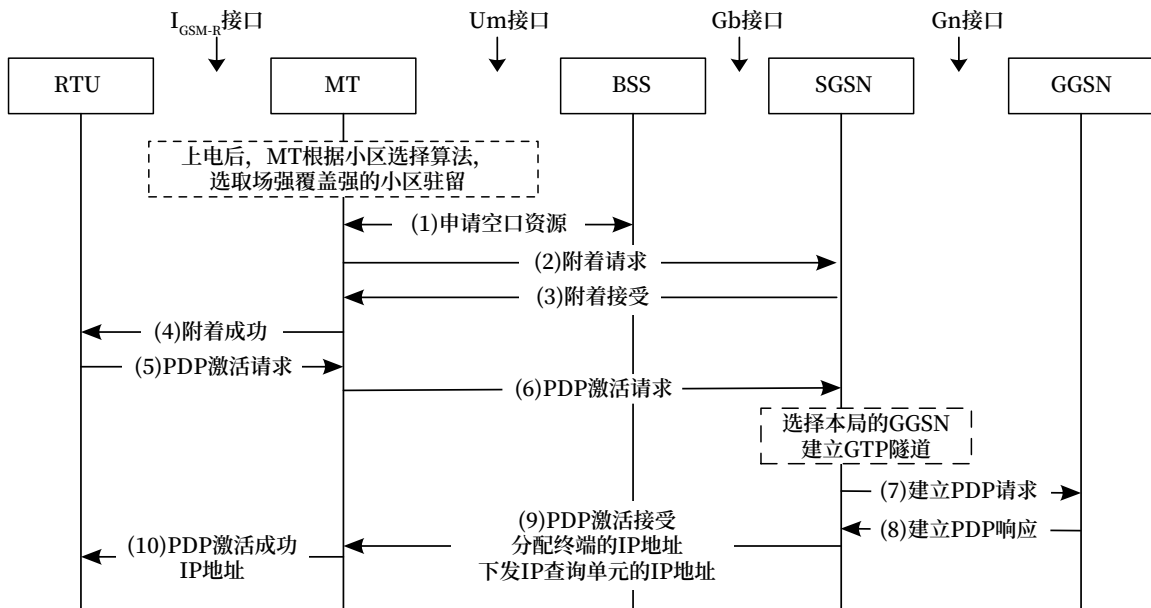


图2 MT上电附着及激活流程
Fig.2 Process of MT attachment and activation after power-on

立安全无线连接。因为分组域电台可以建立多个连接，当已建立一个 TCP 后，车载设备仍然可以再次

建立 TCP 连接。车载设备和地面设备安全无线通信的示意结构如图 3 所示。

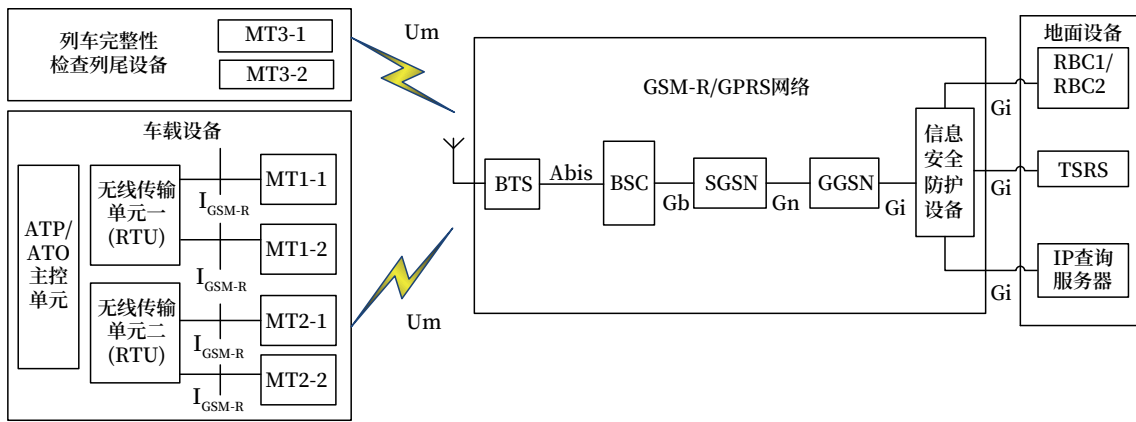


图3 车载设备与地面设备或列尾通信
Fig.3 Communication between onboard equipment and wayside equipment or EOT

如图 3 所示，BTS 表示基站收发信系统，BSC 表示基站控制器，SGSN 表示 GPRS 服务支持节点，GGSN 表示 GPRS 支持节点网关，RBC 为无线闭塞中心，TSRS 为临时限速服务器。车载设备主控单元为车载设备主要功能部分，两个无线传输单元分别控制两个电台。车载设备中的 4 个电台均为双模电台，可支持 GSM-R、GPRS 网络，无线传输单元 RTU 分别和两个双模电台相连。每个双模电台的结构相同，均包括控制板和两个通信通道，两个通信

通道分别为 GSM-R 通道和 GPRS 通道。无线传输单元 RTU 通过控制板选择指定电台的 GSM-R 通道或 GPRS 通道进行通信。在 GSM-R 覆盖网络区域，车载设备通过 MT1 或 MT2 的 GSM-R 通道，建立与地面设备 RBC 基于 GSM-R 网络的安全无线连接。在 GPRS 覆盖网络区域，车载设备通过 MT1 或 MT2 的 GPRS 通道，建立与地面设备 RBC、TSRS 或 EOT 的基于 GPRS 网络的安全无线连接。

在电路域下，以 ATP 电台 MT1-1 和 MT1-2 为

例，车地无线通信流程如下。

1) 车载设备上电后，双电台上电，电台通过 GSM-R 通道会自动搜索 GSM-R 网络，并附着 GSM-R 网。

2) 车载电台附着上 GSM-R 网后，车载设备会选择当前通信质量最好的电台进行 PDP 激活（这里假设 MT1-1 信号质量好），当 PDP 激活成功后，电台 MT1 开始注册网络。

3) 在注册 GSM-R 网络成功后，电台 MT1-1 与对端设备的电台建立 PPP 连接，此时已具有底层的物理连接，MT1-1 由命令模式进入数据模式。

4) 在底层物理连接建立成功后，车载设备控制电台 MT1-1 建立与 RBC 的 TCP 连接。

5) 经过 TCP 的“3 次握手”后，成功与地面设备 RBC 建立 TCP 连接。

6) 在 TCP 连接成功后，车载设备则与地面设备 RBC 建立安全无线连接。

7) 安全连接建立之后，车载设备就可与 RBC 进行无线数据通信。

8) 当车载设备和 RBC 任何一方主动断开安全连接后，下次重新建立安全连接优先选择电台 MT2。

在 RBC 移交前，车载设备首先利用电台 MT1-1 与地面设备 RBC1（表示第一个 RBC）建立 TCP 连接，MT1-2 处于待机状态；当列车行驶到 RBC 移交区域，车载设备会激活 MT1-2 并重新建立与 RBC2（表示与第一个 RBC 相邻的第二个 RBC）的 TCP 连接；当列车行驶出移交区域后，MT1 会断开 TCP 连接并执行去激活操作；此后 ATP 只有与 RBC 的一个 TCP 连接。

在分组域下，以电台 MT2-1 和 MT2-2 为例，车地无线通信流程如下。

1) 车载设备上电后，无线传输单元 2RTU 控制电台通过 GPRS 通道自动搜索 GPRS 网络，并附着 GPRS 网络。

2) 在电台附着上 GPRS 网络后，车载设备会选择当前通信质量最好的电台进行 PDP 激活（这里

假设 MT2-1 信号质量好）。当 PDP 激活成功后，电台 MT2-1 开始注册网络。

3) 电台 MT2-1 注册上网络后，并与对端设备的电台建立 PPP 连接，PPP 连接成功后，此时已具有底层的物理连接，电台 MT2-1 进入数据模式。

4) 车载设备下发与 IPES 建立安全无线连接请求，RTU 收到建立连接请求后，控制电台 MT2-1 与地面设备 IPES 建立 UDP 连接。

5) 车载设备下发与 TSRS 建立安全连接的请求，RTU 收到建立连接请求后，通过 TSRS 的 ID 号从 IPES 获取到 TSRS 的 IP 地址，控制电台 MT1 与地面设备 TSRS 建立 TCP 连接。

6) 经过 TCP 的“3 次握手”后，成功与地面设备 TSRS 建立 TCP 连接，并建立安全无线连接。

7) 安全连接建立之后，车载设备与地面设备 TSRS 进行无线数据通信。

8) 车载设备下发与列尾 EOT 的建立请求，RTU 收到建链请求后，通过 EOT 的 ID 号从 IPES 获取 EOT 的 IP 地址，选择在用电台 MT2-1 再次建立 TCP 连接，此时电台 MT2-1 已有两个 TCP 连接，一个 UDP 连接。

当电台 MT2-1 建立的两个 TCP 连接中只断开一个 TCP 连接（假设断开与 TSRS 的 TCP 连接）时，此时电台 MT2-1 不会执行去激活操作，电台仍处于数据模式。当车载设备再次呼叫 TSRS，RTU 仍然使用电台 MT2-1 建立与 TSRS 的 TCP 连接；当车载设备与 TSRS 和 EOT 的 TCP 连接都断开时，RTU 检测到当前电台 MT2-1 没有 TCP 连接时，车载设备的主控单元会首先断开与 IPES 的 UDP 连接，接着断开 PPP 连接，MT2-1 电台执行去激活操作，退出数据模式。此时，车载设备 RTU 会控制电台 MT2-2 进行 PDP 激活并建立 PPP 连接。当下次车载设备需要再次建立安全无线连接时，RTU 会选择电台 MT2-2 进行建立 TCP 或 UDP 连接，直到安全无线连接全断开，MT2-2 执行去激活操作，RTU 会再次选择 MT1 进行 PDP 激活并建立 PPP 连接。在车载设备与 TSRS 或 EOT 通信

过程中，如果无线传输单元 RTU 故障，主控单元将不能通过 RTU 控制两个电台执行冗余电台切换功能，也不能通过车载电台发送或接收安全无线数据。当主控单元一定时间收不到对端的安全数据，就会主动断开 TCP 连接，此时需要重启主控板或车载设备。

现有 CTCS 列控系统技术中，车载设备在分组域通信时通过两个车载电台分别与 TSRS、EOT 建立 TCP 连接，当其中一个 TCP 连接断开后，假设与 TSRS 的 TCP 连接断开，此时所用电台会执行去激活操作。当再次需要与 TSRS 建立安全无线连接时，电台再次注册网络并 PDP 激活。如果其中一个电台故障时，那车载设备只能与一个对端设备建立安全无线连接，此时即认为车载设备故障。现行的车载电台控制方案必须保证两个电台工作正常，不能出现电台故障现象，没有电台冗余功能。在 TCP 断链过程中，因电台多次执行去激活和激活操作，不能快速恢复安全无线连接，导致车载电台的可用性降低。在本文研究的双电台冗余控制方案中，车载主控单元将与 TSRS 和 EOT 的 TCP 连接建立在同一个电台，减少了多次激活和去激活电台的时间成本，优先选择通信质量好的电台进行连接，提高了通信质量和效率。在两个 TCP 连接只断开一个时，此时电台仍处于数据模式，等待再次建立 TCP 连接。只有当整个 TCP 全部断开后，车载主控单元才会控制在用电台去激活并开始使用备用电台等待再次建立 TCP 连接，缩短了重新建立 TCP 的时间，

保证安全无线通信的稳定性。本文的双电台冗余控制方案提高了对冗余电台的工作情况监测，提高了整体通信的安全性。本文的双电台冗余控制方案与现行传统控制方案对比如表 1 所示。

表1 现行电台控制方案与双电台冗余控制方案对比
Tab.1 Comparison between existing radio control scheme and double-radio redundant control scheme

类别	现行电台控制方案	双电台冗余控制方案
备用电台情况	无备用电台	有一个备用电台
电台使用情况	两个电台同时使用，无轮询机制	两个电台分开使用，有轮询机制
无线连接建立	一个电台建一个连接	一个电台建多个连接
无线连接断开	两个电台有一个或两个连接断开，电台均执行去激活操作	当电台有一个连接断开，不执行去激活操作；两个连接均断开，电台才执行去激活操作
无线连接重连	两个电台重新注网激活	当断开一个连接时，选择已用电台再次建立连接；当两个连接均断开，启用备用电台建立连接

4 实验测试验证

在 GPRS 网络环境下，利用 CTCS-N 列控系统车载设备测试本文的双电台冗余控制方案，车载设备与地面设备或列尾设备的无线通信流程如图 4 所示。

在车载设备上电后，无线传输单元 RTU2 控制电台 MT2-1 和 MT2-2 通过 GPRS 通道自动搜索 GPRS 网络，并附着 GPRS 网络；在电台附着上 GPRS 网络后，无线传输单元二 RTU2 会选择当前

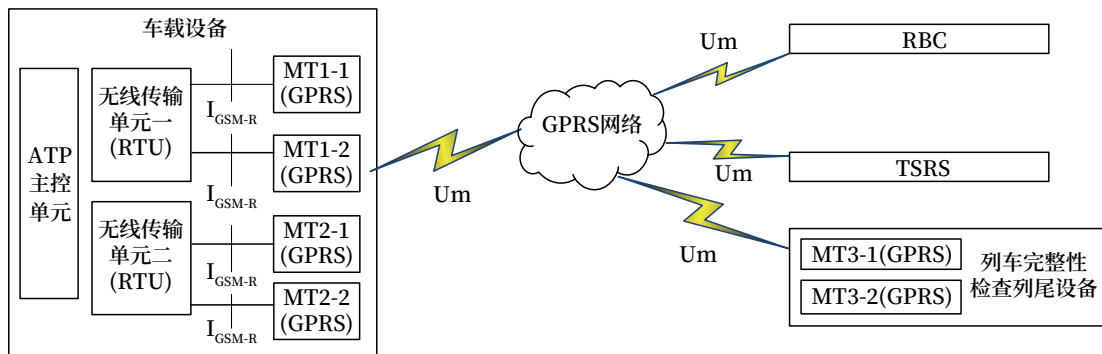


图4 双电台冗余控制方案的测试流程
Fig.4 Test process of double-radio redundant control scheme

通信质量最好的电台进行 PDP 激活（通过记录确认 MT2-2 信号质量好），当 PDP 激活成功后，电台 MT2-2 开始 PDP 激活并注册网络，电台 MT2-2 进入数据模式，此时电台 MT2-1 仍处于命令模式；通过 DMI 输入 TSRS 的 ID 号，建立与 TSRS 的 TCP 连接，并建立安全无线连接，安全连接建立之后，车载设备与地面设备 TSRS 进行无线数据通信；再次通过 DMI 输入列尾设备 ID 号，无线传输单元二 RTU 选择电台 MT2-2 再次建立与 EOT 的安全无线连接，此时电台 MT2-2 已有两个 TCP 连接。DMI 的界面显示如图 5 所示。



图5 电台MT2-2连接TSRS和EOT测试

Fig.5 Test on radio MT2-2 connected with both TSRS and EOT

首先断开 TSRS 侧的网线，通过 DMI 可发现车载设备与 TSRS 的安全连接已断开，此时与列尾的安全连接正常，通过 DMI 再次呼叫 TSRS，TSRS 连接正常，通过记录可知此时仍然使用电台 MT2-2 建立 TCP 连接；其次断开列尾 EOT 的网线，通过 DMI 可看出车载设备与列尾 EOT 断开安全无线连接，此时 TSRS 连接正常，待列尾重连结束后，再次呼叫 EOT 并建立 TCP 连接，通过记录可知此时仍然使用电台 MT2-2 建立 TCP 连接。以上两次测试的 DMI 显示分别如图 6、7 所示。

同时断开 TSRS 和 EOT 的网线，通过 DMI 可看出此时车载设备与 TSRS 和 EOT 的安全无线连接全都断开，通过记录可以看出此时也已无



图6 电台MT2-2断开TSRS和连接EOT测试

Fig.6 Test on radio MT2-2 disconnected with TSRS and connected with ETO



图7 电台MT2-2连接TSRS和断开EOT测试

Fig.7 Test on radio MT2-2 connected with TSRS and disconnected with EOT

TCP 连接，电台 MT2-2 执行去激活操作，退出数据模式。之后，无线传输单元二 RTU 会控制电台 MT2-1 进行 PDP 激活并注册网络。接着，重新呼叫 TSRS 和 EOT，从 DMI 可看出，两者都重连成功。车载与 TSRS 和 EOT 都断开时 DMI 的显示如图 8 所示。

5 结束语

本文研究的双电台冗余控制方案满足 CTCS 列控系统电路域和分组域不同运用场景下双电台冗余控制需求；支持同一车载电台上建立多个 TCP 安全



图8 电台MT2-2断开TSRS和EOT测试

Fig.8 Test on radio MT2-2 disconnected with both TSRS and EOT

无线连接；当在用电台故障时，车载设备会自动切换选择备用电台，重新建立与 TSRS、EOT 的安全无线连接；当车载设备与 TSRS 和 EOT 的无线连接，只断开其中一个时，下次再次连接仍选择在用电台；支持双电台轮询切换机制，即当与 TSRS 和 EOT 的无线连接都断开时，车载设备会选择备用电台等待再次无线连接。本双电台冗余控制方案大大提高电台利用效率、减少通信时延、增强故障容错能力。

参考文献

[1] 国家铁路局. CTCS-3 级列车运行控制系统与铁路数字移动通信系统: TB/T 3382-2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.

[2] 王鹏. 高速铁路 AT0 系统车载无线通信技术研究[J]. 中国铁路, 2018(10): 25-29.
Wang Peng. Onboard Wireless Communication Technology of HSR AT0 System[J]. China Railway, 2018(10): 25-29.

[3] 赵军武. 铁路 GPRS 网络承载 C3+AT0 业务简析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2018, 15(11): 25-30.
Zhao Junwu. Analysis of C3+AT0 Business in Railway GPRS Network[J]. Railway Signalling &

Communication Engineering, 2018, 15(11): 25-30.

[4] 中华人民共和国信息产业部. 900/1 800 MHz TDMA 数字蜂窝移动通信网通用分组无线业务 (GPRS) 设备技术要求: 移动台: YD/T 1214-2006[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.

[5] 何春明, 田振武, 史增树, 等. 临时限速服务器安全通信协议研究[J]. 铁道通信信号, 2011, 47(10): 50-52.
He Chunming, Tian Zhenwu, Shi Zengshu, et al. Study on Secure Communication Protocol of TSRS[J]. Railway Signalling & Communication, 2011, 47(10): 50-52.

[6] 江明. 轨道交通安全控制关键技术综述[J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16(11): 101-109.
Jiang Ming. Survey of Railway Safety Control Related Key Technologies[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16(11): 101-109.

[7] 宋甲英, 曲博, 李旭, 等. GPRS 数据时延分析及优化方案[J]. 中国铁路, 2007(6): 57-59, 62.

[8] 袁廷瑞, 熊洁, 路晓彤, 等. 高速铁路长大隧道 GSM-R 网络冗余组网方案分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(1): 36-41.
Yuan Tingrui, Xiong Jie, Lu Xiaotong, et al. Analysis of GSM-R Redundancy Networking Scheme for Long Tunnel of High Speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(1): 36-41.

[9] 李敏之, 孙奇. 基于 GSM-R 的 GPRS 技术在我国铁路交通运输中的应用[J]. 甘肃科技, 2005, 21(8): 32-33, 26.

[10] Luo Changqing, Ji Jinlong, Wang Qianlong, et al. Channel State Information Prediction for 5G Wireless Communications: a Deep Learning Approach[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2020, 7(1): 227-236.

[11] 张晓东, 陈延春, 陈铮. CTCS-3 级列控系统无

- 线超时 GSM-R 电台 SIM 卡故障分析及解决措施 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(1): 52-55, 87.
- Zhang Xiaodong, Chen Yanchun, Chen Zheng. Fault Analysis and Solutions of GSM-R Radio SIM Card with Wireless Timeout in CTCS-3 Train Control System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(1): 52-55, 87.
- [12] 陈苏, 赵晟. 5G 在智能高铁中的应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(7): 46-50, 76.
- Chen Su, Zhao Sheng. Application of 5G in Intelligent High-Speed Railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(7): 46-50, 76.
- [13] 葛伟涛, 冯敬然, 周敏, 等. 铁路 5G-R 无线接入网组网方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(6): 59-63.
- Ge Weitao, Feng Jingran, Zhou Min, et al. Networking Scheme of Railway 5G-R Wireless Access Network[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(6): 59-63.
- [14] 杨琪, 冯敬然, 周敏, 等. 城市轨道交通 5G 公专网融合组网方案研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(7): 63-69.
- Yang Qi, Feng Jingran, Zhou Min, et al. Research on 5G Public-Private Network Convergence Scheme for Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(7): 63-69.
- [15] 吴宇, 董成文, 李鹞. 基于 5G-R 的 CTCS-3 列控业务接口监测系统研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(6): 36-43.
- Wu Yu, Dong Chengwen, Li Kun. Research on CTCS-3 Train Control Service Interface Monitoring System Based on 5G-R[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(6): 36-43.
- [16] 葛伟涛, 冯敬然, 周敏, 等. 铁路 5G-R 无线接入网组网方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(6): 59-63.
- Ge Weitao, Feng Jingran, Zhou Min, et al. Networking Scheme of Railway 5G-R Wireless Access Network[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(6): 59-63.
- [17] 陈庭德, 王海龙, 陈煜. 移动性增强技术在铁路 5G 专网中应用场景研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(1): 42-46.
- Chen Tingde, Wang Hailong, Chen Yu. Research on Application Scenarios of Mobility Enhancement Technology in 5G-R Network[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(1): 42-46.
- *****
- (上接 37 页)
- [20] 胡伟. 论城轨车站计算机联锁仿真系统重要性 [J]. 信息通信, 2015, 28(6): 164-165.
- Hu Wei. On that Importance of Computer Interlocking Simulation System for Urban Rail Station[J]. Information & Communications, 2015, 28(6): 164-165.
- [21] 万丽雯. 基于 UML 的联锁进路控制过程建模 [J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(1): 139-142.
- Wan Liwen. Research on Route Control Process of Railway Interlocking Software Modeling Based on UML[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2012, 31(1): 139-142.
- [22] 徐中伟, 吴芳美. 基于规则的联锁软件测试集自动生成 [J]. 计算机工程, 2002, 28(1): 97-98, 109.
- Xu Zhongwei, Wu Fangmei. Automating Generation of CISS Test Set Based on Rule Base[J]. Computer Engineering, 2002, 28(1): 97-98, 109.

基于二次雷达的列车接近预警系统 研究与实现

石云飞

(国能新朔准池铁路(山西)有限责任公司, 山西朔州 036002)

摘要: 铁路上道作业过程中, 当有列车接近时, 为避免列车与人员、机具发生碰撞, 施工人员须停工下道, 因此, 准确可靠地列车接近预警对铁路施工安全非常重要。将二次雷达技术应用于列车接近预警, 对系统应用场景进行分析, 对雷达通信模块工作原理及通信方案进行了重点阐述, 对车载、地面装置结构进行设计。经过试验, 基于二次雷达的列车接近预警系统满足铁路施工作业要求。

关键词: 二次雷达; 列车; 接近预警

中图分类号: U216.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0062-08

Research and Implementation of Train Approach Early Warning System Based on Secondary Radar

Shi Yunfei

(Guoneng Xinshuo Zhunchi Railway (Shanxi) Co., Ltd., Shuozhou 036002, China)

Abstract: During on-track railway construction operation, the construction personnel have to leave the track when a train approaches, to avoid collision between the train and the personnel and machinery. Therefore, accurate and reliable train approach early warning is critical for railway construction safety. This paper describes the application of the secondary radar technology to train approach early warning. It presents an analysis of the system application scenarios, a description of the working principles and communication scheme of the radar communication module, and proposes a design of the onboard and wayside devices. The test results show that the train approach early warning system based on secondary radar meets the requirements in railway construction operation.

Keywords: secondary radar; train; approach early warning

铁路是国家大动脉, 运输任务繁忙紧张。营业线施工不能长时间封锁区间或限速运行, 这就要依

靠铁路施工安全防护系统发挥作用, 切实保障铁路运输安全和施工作业人员人身安全。在铁路施工中, 由于未严格执行规章、瞭望不及时、防护不当等因素, 叠加恶劣的施工环境、视线受阻等复杂情况, 增加了接近作业区列车对施工人员的安全威胁。例

收稿日期: 2023-11-21; 修回日期: 2024-03-20

作者简介: 石云飞(1986—), 男, 工程师, 本科, 主要研究方向: 铁道工程, 邮箱: 337387323@qq.com。

如, 2016年, 某铁路一货运列车撞上线路作业人员, 造成6人不幸遇难。事故原因是现场防护员未准确收到预警信息且未组织下道避车, 导致事故发生。因此, 急需通过技术手段弥补现有人工手段的不足, 提升营业线施工作业的安全。

1 上道作业安全管理要求

2021年, 国家铁路局发布最新的《铁路营业线施工安全管理办法》(国铁运输监[2021]31号)。通过规范作业流程确保营业线施工安全, 也是目前普遍使用的办法。

营业线施工前应当按规定设置驻站联络员、现场防护员。驻站联络员负责在运转室盯控列车运行情况, 并利用电台及时通知现场防护员和工作人员。驻站联络员是作业的总指挥, 上线作业时间、下道避车时间、结束作业时间都由驻站联络员决定。驻站联络员的眼睛要时刻盯控控制台或显示屏, 了解列车动向和设备状况, 同时也要清楚作业人员具体位置、行走路线、人员具体作业等情况。现场防护员应当根据作业现场地形条件、列车运行特点、人员和机具布置等情况确定站位和移动路径, 做好作业人员和自身防护。在有列车接近时, 还要组织作业人员下道避车。作业过程中, 驻站联络员与现场防护员须保持通信畅通并定时联系。一旦联控通信中断, 作业负责人应当立即命令所有作业人员下道。目前现场施工安全防护方法如图1所示。

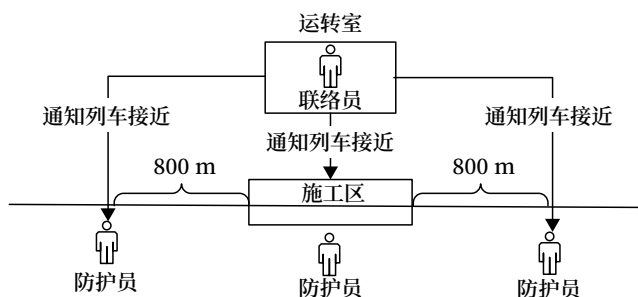


图1 施工安全防护方法示意

Fig.1 Schematic diagram of construction safety protection method

然而, 基于以上模式, 各角色获取的信息都有较大局限性, 导致在施工现场作业人员的安全不能

得到全方位的防护保障。当有机车接近时, 驻站联络员通过对讲机和安全防护员进行语音通讯, 来实现单向的安全防护信息传递。对列车定位和人员定位的手段比较单一、缺少信息的互联互通和多方联控, 能够获取的信息都有较大的局限性, 对人身安全防护的保障效果较差。

2 二次雷达及其应用场景

二次雷达是由询问雷达和应答雷达组成的无线电电子测位和辨认系统。工作时由询问雷达发射电磁波, 应答雷达接收到询问电磁波后被触发, 继而发射应答电磁波, 询问雷达根据接收到的应答电磁波, 实现识辨, 并根据发送和接收信号的时间间隔计算前后间距。二次雷达性能稳定, 可在隧道、弯道多种工况下使用, 误警率低。

基于二次雷达上述特性, 可在列车和地面施工区边界各部署一台二次雷达, 互为询问雷达和应答雷达, 用于列车接近预警。高速运行的列车持续以脉冲形式发送位置、距离信息, 地面装置接收到信息后能够进行列车接近预警。同时地面装置将施工区位置反馈给车载装置, 车载装置将相关信息显示给司机, 以供司机做出制动减速等控车决策, 从而为施工人员及行车安全提供保障。列车接近预警系统(简称系统)如图2所示。

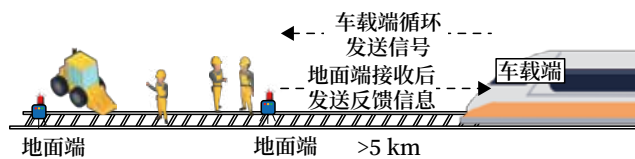


图2 系统示意

Fig.2 Schematic system diagram

部署列车接近预警系统后, 司机可通过系统获知前方有人员施工, 施工人员可通过系统获知列车接近信息。车载装置持续向行车方向发送来车信息, 部署在施工区的地面装置接收到来车信息后即开启声光报警, 并显示距离, 同时向车载设备发送应答信息。车载装置接收应答信息后显示出距施工人员

的距离，司机获悉距施工人员距离后，进行控车决策。施工人员看到、听到地面装置发出的声光报警信号后，即开始进行下道，人员、机具全部下道完毕后，施工人员按下地面装置的下道完毕键，地面装置向车载装置发送下道完毕信息，随后停止声光

报警。车载端接收到下道完毕信息，显示下道完毕，司机查看后进行控车决策。当车载端计算出距施工人员距离已进入危险距离时，则触发紧急告警。系统业务流程如图3所示。

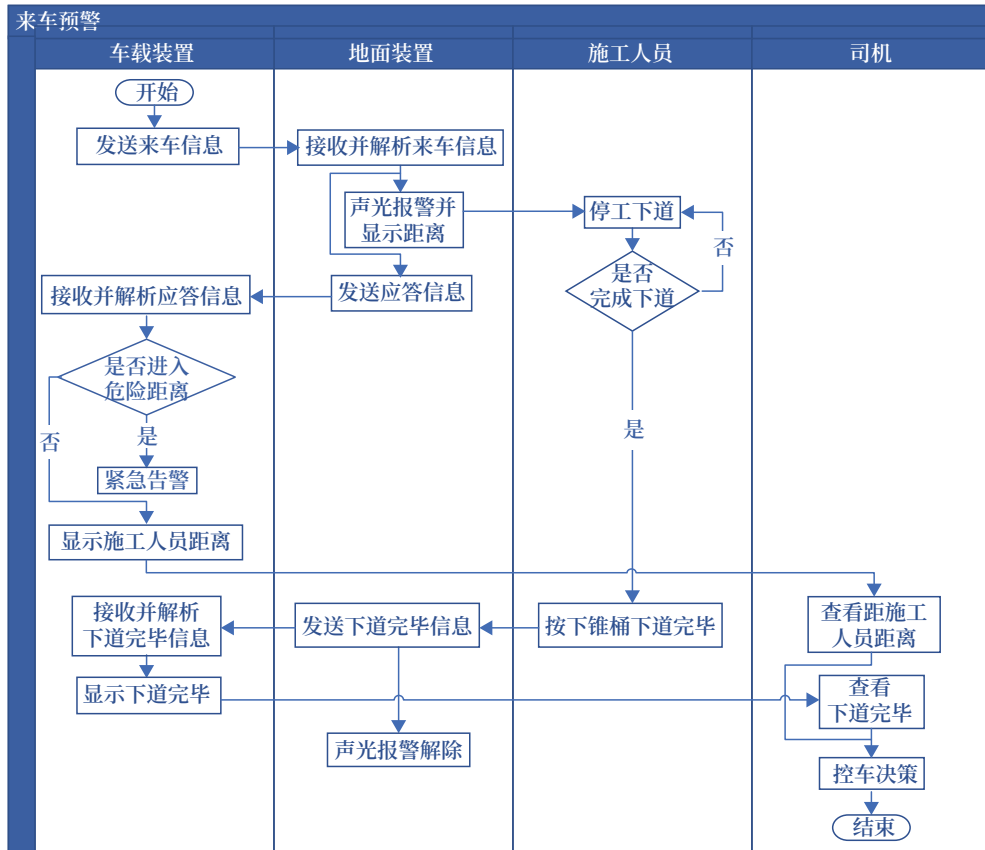


图3 系统业务流程
Fig.3 System service process

3 系统结构设计

3.1 车载装置

3.1.1 车载装置功能

上电开机：车载装置具备上电自启功能。用户无需任何操作即可完成开机操作，具备开机自检功能，上电后对自身各模块状态进行自检，并输出自检正常或自检异常两种状态。

状态显示：车载装置开机自检进入正常工作状态时，可通过指示灯显示该状态。司机人员可通过指示灯颜色获知车载装置处于正常工作状态。

施工预警：车载装置收到地面端应答信号后，

可通过 LED 屏幕向司机显示前方施工预警，司机通过查看 LED 显示信息知悉前方有人员施工。车载装置设备收到地面端发出的下道完毕信号后，可通过 LED 屏幕提示司机，司机获悉后进行控车决策。

紧急告警：车载装置计算出施工人员已进入危险距离后，通过 LED 屏幕显示紧急告警及距施工人员距离，司机知悉后进行控车决策。

距离显示：车载装置收到应答信号后，可计算出距施工人员的距离，并通过 LED 屏幕供司机查看，司机获悉后进行控车决策。

信息传送：车载装置可将距离和车速等信息发送给地面装置，以供预警。

日志记录：车载装置具备日志记录功能。系统自动记录开机、通信建立、指令、操作和预警等日志信息。

3.1.2 车载装置安装方式

一辆机车需在两端分别配置车载装置，车载装置包含机车内车载设备和机车外车顶天线。机车内车载设备安装于司机驾驶室内，可与既有车载设备共用机柜或通过车载设备外部安装孔独立安装。机车外车顶天线包含二次雷达定向天线、4G 天线和北斗定位天线，相关天线通过结构架固定于车顶，二次雷达发射面朝向机车本端前进方向。机车外车顶天线和机车内车载设备通过馈线连接。车载装置安装方式示意如图 4 所示。

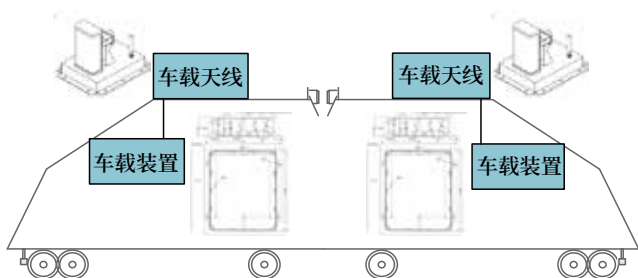


图4 车载装置安装方式示意

Fig.4 Schematic diagram of onboard device installation method

3.1.3 车载装置结构

车载装置系统组成如图 5 所示。车载装置由主控板、电源控制板、供电接口、信息输入 / 输出接口、LED 显示屏、状态指示灯、雷达通信模块和定向天线组成。其中主控板提供各模块接口，收发控制指令，对整机进行管理控制。电源控制板及供电接口为整机提供供电及电源管理。信息输入 / 输出接口、LED 显示屏和状态指示灯则提供系统的信息输入 / 输出、工作状态、报警和距离显示等功能。雷达通信模块及定向天线完成与地面端装置的无线通信。

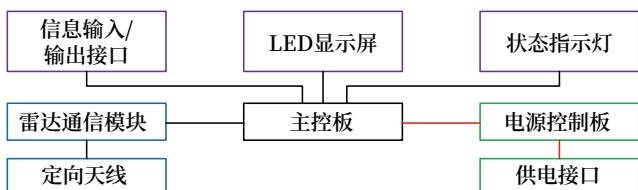


图5 车载装置结构

Fig.5 Structure of onboard device

3.2 地面装置

3.2.1 地面装置功能

上道开机：地面装置具备一键开机功能，按下开机键即可完成开机操作。地面装置具备开机自检功能，上电后对自身各模块状态进行自检，并输出自检正常或自检异常两种状态。

状态显示：地面装置开机自检正常进入待机工作状态时，可通过指示灯显示该状态。施工人员可通过指示灯颜色获知地面装置工作状态。

接近预警：地面装置收到来车信号后，可通过声光报警向施工人员发出接近预警，提示施工人员下道避车。

距离显示：地面装置收到车载装置发送的距离信息后，可通过设备集成的 LED 显示屏显示距离。

下道关机：施工人员作业完成后，施工人员可一键关闭地面端设备。

日志记录：地面装置具备日志记录功能。系统自动记录开机、通信建立、指令、操作和预警等日志信息。

3.2.2 地面装置结构

地面装置随施工人员进行部署，系统组成如图 6 所示。地面端装置由主控板、电源控制板、充电接口、电池、信息输入 / 输出接口、声光报警器、状态指示灯、电源指示灯、LED 显示屏、雷达通信模块、全向天线、紧急告警按钮及开关按钮组成。其中主控板提供各模块接口，收 / 发控制指令，并对整机进行管理控制。电源控制板、电池及充电接口为整机提供供电及电源管理。信息输入 / 输出接口、声光报警器、状态指示灯、电源指示灯和 LED 显示屏则提供系统工作状态、电量、报警、距离显示及信息输入 / 输出等功能。雷达通信模块及全向天线完成与车载装置的无线通信。紧急告警按钮提供手动启动告警功能，开关按钮则提供开 / 关机控制。

4 系统关键技术

4.1 雷达通信模块冗余设计

为提高系统可靠性，雷达通信模块采用硬件冗

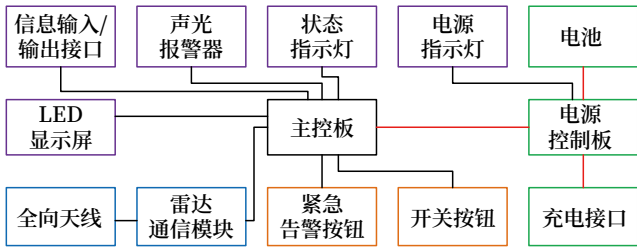


图6 地面装置结构
Fig.6 Structure of wayside device

余设计，系统保留两份设备硬件互为备份。当系统上电时，A部分先进行闭环自检，当检测A部分无异常，则A正常启动工作，同时A发送周期性脉冲到B部分；此时B部分保持静默，仅保留接收A部分脉冲的模块。当A部分上电检测到异常且无法恢复后，切换到B部分执行，B部分开启自检上电工作。当A部分正常工作中出现异常，则A停止发送周期性脉冲到B部分。B部分检测不到A部分的周期性脉冲，则认为A部分异常，B部分启动开始工作。雷达通信模块冗余结构如图7所示。

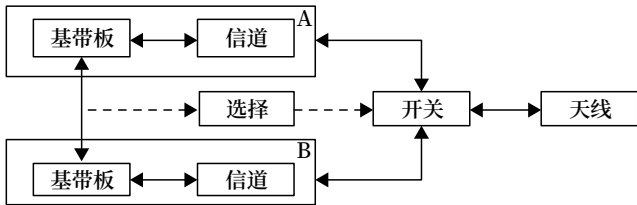


图7 雷达通信模块冗余设计
Fig.7 Redundancy design of radar communication module

4.2 正交频分复用技术

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division

Multiplexing, OFDM) 技术具有在杂波干扰下传送信号的能力，适用于工况复杂、外界干扰多的应用场景中，系统传输采用OFDM调制的传输方式，传输带宽4.5 MHz，每秒发送300个字节的有效数据。考虑到实际运行时环境的复杂性，同时考虑到低频段的拥堵，并避开铁路系统使用的频段，系统通信频段设计为1 350 ~ 1 400 MHz。

雷达通信模块发射端部分包含数据接口、生成校验码、信道编码、速率匹配、加扰码、符号调制、资源映射、OFDM调制、组帧和内插滤波等模块功能。内插滤波后生成的波形经数字模拟转换器 (Digital to Analog Converter, DAC) 转换为模拟信号，再经射频模块调制到载波后通过天线发射。频率控制模块负责控制跳频频率的变化和收/发切换。雷达通信模块发送端结构如图8所示。

雷达通信模块接收端部分依次包含抽取滤波、频偏估计、频偏补偿、OFDM解调、信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 估计、信道估计、信道均衡、符号解调、解扰、解速率匹配、信道译码和校验等功能模块。校验成功后的数据信号通过数据接口输出到上位机。频率控制模块负责控制跳频频率的变化和收/发切换。雷达通信模块接收端结构如图9所示。

4.3 有效传输距离仿真

为满足铁路列车接近预警要求，系统通信距离需大于5 km。这里按照最高的工作频率和最大的

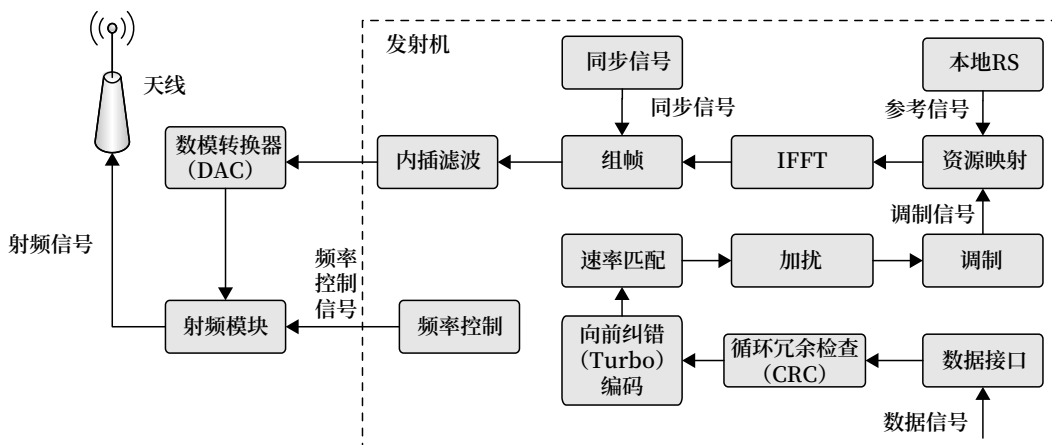


图8 雷达通信模块发射端结构
Fig.8 Transmitter structure of radar communication module

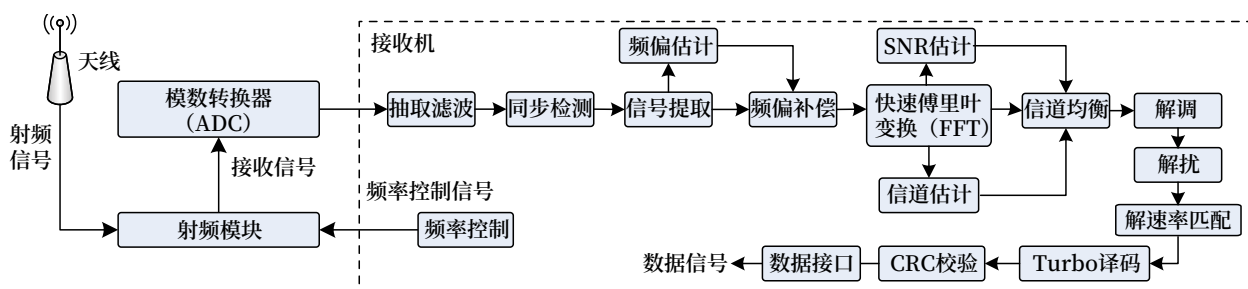


图9 雷达通信模块接收端结构
Fig.9 Receiver structure of radar communication module

传输距离来计算。假设上行工作频率为 2 GHz，距离为 5 km，自由空间衰减如公式 (1) 所示。

$$L_p = 92.45 + 20 \times \lg(f) + 20 \times \lg(d) = 92.45 + 6.02 + 13.98 \approx 112.45 \text{ dB} \quad (1)$$

系统实际最大输出功率大于 2 W，对应 33 dBm，假定车载端机定向天线增益为 6dB，地面端机全向天线增益为 1 dB，则系统灵敏度如公式 (2) 所示。

$$Pr \leq 33 + 6 + 1 - 112.45 = -72.45 \text{ dBm} \quad (2)$$

假设接收机噪声系数为 3.5，信号带宽为 4.5 MHz，灵敏度计算如公式 (3) 所示。

$$Pr = -174 + 10 \times \lg(B) + SNR + NF \approx -104 + SNR \quad (3)$$

系统要求灵敏度指标为 -72.45 dBm，则要求链路最低解调信噪比 $SNR \leq 31.5 \text{ dB}$ 。

仿真结果如图 10 所示。传输在带宽 4.5 MHz，误码率在 10^{-6} 时，系统的解调信噪比约为 1 dB。车载、地面设备进行无线通信时，离地高度约 2 ~ 5 m，电磁波靠近地面传输会产生多径效应，通过自由空间衰减模型计算损耗可能存在误差，系统通过提高天线增益的同时提高信噪比，来提高解调信噪比余量。从仿真结果分析，系统有 30 dB 左右的余量来抵消复杂环境的影响，考虑到实际实现、线损、雨衰等保留 12 dB 的余量，仍剩余 18 dB 的余量，从而保证系统的有效传输距离大于 40 km。

5 实验验证

通过实验对接近预警功能进行初步验证，采用行驶于公路的汽车模拟列车接近过程。考虑车载装置

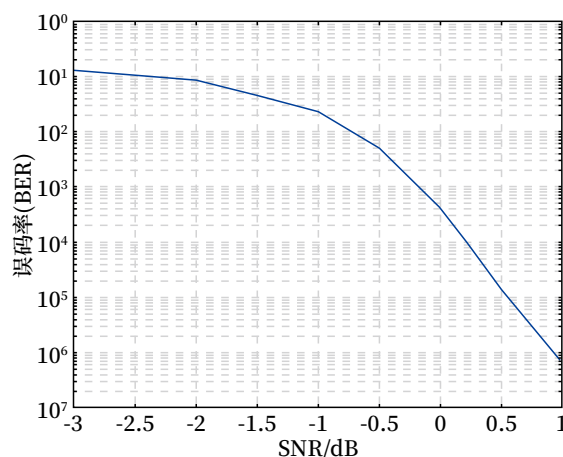


图10 信噪比仿真结果
Fig.10 Simulation results of signal to noise ratio

需要外接电源，同时天线架较高，不便于临时部署在测试车辆上。而地面施工端内置电池，且天线高度低，便于携带。从测试可行性、效率和安全的角度出发，测试过程中车载端固定部署于地面，而地面装置部署在车内，随车移动。虽与实际使用的部署位置相反，但设备的相对运动趋势与现场列车一致，测试效果相同。模拟实验环境通过地面装置 LED 显示屏显示与车载装置距离，从而可判断二次雷达通信距离及建立通信的时机。实验过程如图 11 所示。

汽车由远及近行驶，6 000 m（非直视径）处未显示距离，说明地面端无法检测到车载端信号。随着距离靠近，地面装置显示屏上显示 5 449 m，证明这个距离设备能检测到信号，车地二次雷达通信链路建立，测距功能正常工作。进入 5 100 m 直视径范围，测距数据稳定显示。并且地面施工端声光报警器在测距结果小于 5 000 m 后开始发出警报，在按下报警消除按钮后，警报消除。试验结果



图11 实验验证举例
Fig.11 Example of experimental verification

证明,系统满足5 000 m的接近预警要求。

6 总结

目前在营业线施工作业过程中,主要依赖人工管理来进行人身防护,缺乏有效手段打通列车与施工区的信息通道,对人身安全防护的保障效果较差。本文将二次雷达技术应用于列车接近预警,设计车载装置及地面装置,提出基于二次雷达的列车接近预警系统。对系统车载装置及地面装置的功能进行分析,设计具体设备结构,并通过实验对系统通信距离及接近预警功能进行验证。实验结果证明,本系统满足铁路施工作业列车接近预警要求。

参考文献

- [1] 李宝军,李庆怀,陈曦宇,等.铁路视频监控体系化建设探讨[J].铁路通信信号工程技术,2022,19(1):39-43.
Li Baojun, Li Qinghuai, Chen Xiyu, et al. Discussion on Systematic Construction of Railway Video Monitoring System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 39-43.
- [2] 王延翠,杨丽丽,王田农,等.基于二次雷达的列车辅助防护技术应用研究[J].现代信息技术,2021,5(18):51-55.
Wang Yancui, Yang Lili, Wang Tiannong, et al. Research on the Application of Train Auxiliary Protection Technology Based on Secondary Radar[J]. Modern Information Technology, 2021, 5(18): 51-55.
- [3] 宋丹,刘登.基于二次雷达技术的地铁防撞预警系统研究[J].铁路通信信号工程技术,2019,16(4):53-57.
Song Dan, Liu Deng. Collision Warning System for Urban Rail Transit Based on Secondary Surveillance Radar[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16(4): 53-57.
- [4] 王曙,薛松,李乾,等.基于二次雷达技术的列车防撞预警系统方案研究[J].中华建设,2020(20):190-191.
- [5] 吴荣斌,苗新法,宋娟.基于GPS/GPRS的列车接近预警手持终端[J].电子世界,2013(13):106-107.
- [6] 王满意.桥隧列车接近报警系统[J].铁道通信信号,2003,39(9):42-43.
- [7] 付广荣.二次雷达原理分析[J].硅谷,2014,7(3):72,70.
- [8] 卢从慧,李玉书,吴乐南.二次雷达异步干扰抑制[J].电波科学学报,2014,29(6):1081-1087.
Lu Conghui, Li Yushu, Wu Lenan. Asynchronous Interference Suppression for Secondary Surveillance Radar[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(6): 1081-1087.
- [9] 杨丽丽,王延翠.基于二次雷达的列车辅助防护系统通信方法研究[J].科技创新导报,2021,18(28):98-101.
- [10] 王壮.城市轨道交通信号系统车地无线冗余方案探索[J].铁路通信信号工程技术,2022,19(10):56-61.
Wang Zhuang. Vehicle-ground Wireless Redundancy Scheme of Urban Rail Transit Signal System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(10): 56-61.
- [11] 于秋波,韩朝建,张晓飞,等.基于接触网扩展监测的区间综合智能检测研究[J].铁路通信信号工程技术,2023,20(11):79-84.
Yu Qiubo, Han Chaojian, Zhang Xiaofei, et al.

- Research on Section Comprehensive Intelligent Detection Based on Extended Monitoring System of OCS[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(11): 79-84.
- [12] 徐华沙, 劳烁业. 基于实时参数化数据的应答器报文智能管理系统 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (10): 1-5, 36.
Xu Huasha, Lao Shuoye. Intelligent Management System of Balise Telegram Based on Real-Time Parameterized Data[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(10): 1-5, 36.
- [13] 司福强. 人车定位系统在地铁施工中的研究与应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (9): 77-82.
Si Fuqiang. Research and Application of Man-Vehicle Positioning System in Subway Construction[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(9): 77-82.
- [14] 谢庆楚. 一体化综合视频监控技术在南崇高速铁路的应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (9): 54-60.
Xie Qingchu. Application of Integrated Video Monitoring Technology in Nanning-Chongzuo High-Speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(9): 54-60.
- [15] 李珉璇, 赵耀, 吴绍华, 等. 基于 5G 的新型铁路隧道防灾疏散救援监控系统研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (7): 49-54, 58.
Li Minxuan, Zhao Yao, Wu Shaohua, et al. Research on New 5G-Based Railway Tunnel Disaster Prevention and Rescue Monitoring System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(7): 49-54, 58.

(上接 45页)

- [12] 李志兵, 王文泓, 许扬. 铁路货运枢纽综合自动化系统设计 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (1): 7-11.
Li Zhibing, Wang Wenhong, Xu Yang. Design of Integrated Automation System of Railway Freight Hub[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 7-11.
- [13] 方明亮, 卫旭初, 严之伟. 采用车地融合方式开展列控过分相计算研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (1): 1-6.
Fang Mingliang, Wei Xuchu, Yan Zhiwei. Research on Calculation for Passing through Neutral Sections in Trian Control by Applying Vehicle-Ground Integration Approach[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(1): 1-6.
- [14] 仲晓辉. 机电设备技术融合和信号系统总承包的探析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (1): 77-82.
Zhong Xiaohui. Exploration and Analysis of Technical Integration of Electromechanical Devices and General Contracting of Signaling Systems[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(1): 77-82.
- [15] 卿文杰. 宁启铁路电码化设计方案研究及应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (2): 27-32.
Qing Wenjie. Research on Nanjing-Qidong Railway Coding Design Scheme[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(2): 27-32.
- [16] 雷少龙, 成鹏, 莫运前. 咽喉区设置总出站信号机特殊联锁处理方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (3): 7-10.
Lei Shaolong, Cheng Peng, Mo Yunqian. Special Interlocking Design Scheme for Advance Starting Signal in Throat Area[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(3): 7-10.

区域轨道交通路网图系统的设计和实现

张晔伟

(北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

摘要: 针对区域轨道交通协同运输一体化的需求, 提出构建区域轨道交通路网图系统。将接入区域路网的线路基础设施状态、客流数据、列车开行情况、列车设备状态以及气象状况等各专业信息以车站和区间为节点进行拆分, 并对拆分后的数据计算和重构, 生成以车站和区间为单位的节点数据模型, 在同一个底图上进行显示, 从而对区域路网内各线路的列车分布、实时客流、设备状态以及安全预警等信息提供直观、全面的展示, 为人工决策提供便利, 为整个系统智能决策和智能指挥提供数据基础。

关键词: 路网图; 区域轨道交通; 协同运输

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0070-05

Design and Implementation of Rail Network Diagram System for Regional Rail Transit

Zhang Yewei

(CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: To meet the requirement of integrated collaborative transportation of regional rail transit, this paper proposes a rail network diagram system for regional rail transit. The information from various systems, such as the infrastructure status, passenger flow data, train operation situation, train equipment status and meteorological condition of the lines connected to the regional rail network, is split with stations and sections as nodes. Then, the split data is calculated and restructured, so that a node data model is generated with stations and sections as basic units, and all the data is displayed on the same base map. Thus, the proposed rail network diagram system provides comprehensive visual display of such information as the train distribution, real-time passenger flow, equipment status and safety early-warning of various lines in the regional rail network. It can facilitate manual decision-making and provide basic data for intelligent decision-making and commanding of the entire system.

Keywords: rail network diagram; regional rail transit; collaborative transportation

收稿日期: 2022-11-18; 修回日期: 2024-03-15

基金项目: 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司科研项目 (2300-K1170037.03)

作者简介: 张晔伟 (1987—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 通信信息、交通运输, 邮箱: zhangyewei@crscd.com.cn.

1 概述

城市轨道交通的不断发展和旅客出行需求的增加,如何利用信息技术和控制技术提高路网运营的效率和信息化水平,一直是研究的重点所在。现有的轨道交通综合监控系统更偏重于对路网中的设备设施状态进行显示和监控。而常见的轨道交通线网指挥调度系统更侧重于对各线路的运营数据进行采集和集成,通过将各线路的各个专业进行系统级集成,包括综合监控系统、信号系统、电力控制系统、乘客信息显示系统和环境设备监控系统等。每个子系统拥有独立的界面和显示屏幕,在监控中心分多个屏幕显示每个子系统的监控内容,每个系统的地图尺度和显示标准也不尽相同。当需要查看整个路网的综合信息,需要人工切换调用每个系统的界面,无法在同一个路网图中实时观察对比各项重要指标信息。本文结合城市轨道交通网络化运营新需求和现有交通监控调度系统现状,提出区域轨道交通路网图系统设计和实现方法。

2 系统设计

区域轨道交通路网图系统(简称系统),通过在数据层对各个子专业系统进行数据解析和处理,并按照车站和区间为单位节点对信息进行重构。在显示层统一的路网底图上对多项显示指标进行重绘,集中显示实时客流、实时车流和设备状态,甚至气象及危险预警等宏观态势信息,最终提供直观、全面的数据展示服务。

2.1 系统总体流程

系统首先将通过各子系统接口获取的数据进行拆分,打破以专业系统为单位的数据结构,得到以站和区间为单位的数据节点。然后根据不同的需求和数学模型,结合模型参数以及历史数据,将每个车站或区间子节点数据进行组合计算和重构,得到区间或车站节点的综合信息。最后将节点底图数据模型和节点综合信息模型组合起来形成新的节点显示模型,对底图进行重新绘制,实

现全局综合态势展示。轨道交通路网图系统总体流程如图1所示。

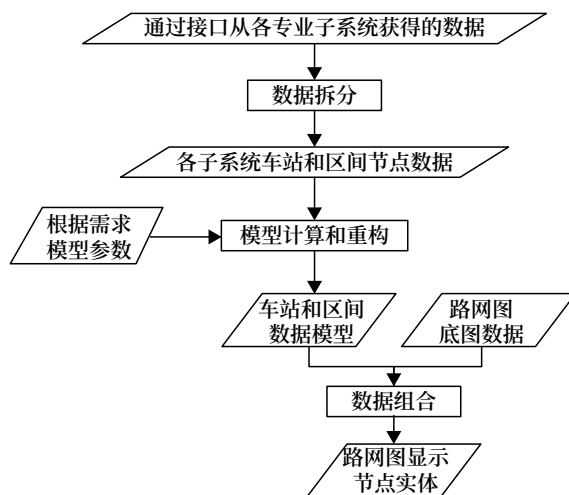


图1 系统总体流程

Fig.1 Overall flow chart of the entire system

2.2 数据拆分

数据拆分主要是根据不同类型的专业协议进行协议解析和节点统一ID匹配,最终形成以节点统一ID为主键的节点单专业信息基础数据。处理流程如图2所示。

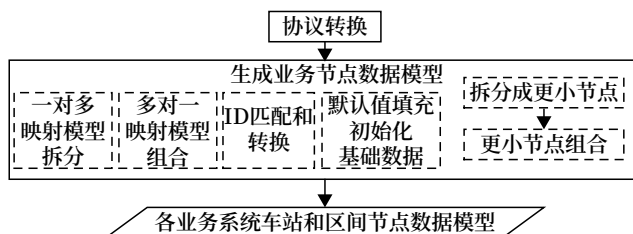


图2 数据拆分流程

Fig.2 Flow chart of data splitting

不同专业由于原始数据结构不同,拆分的方法不同,主要分为以下几种方法。

1) 原始信息与节点模型结构大体一致,只需要进行统一节点ID匹配。例如乘客信息系统给出的客流数据基本以车站为单位,给出每个车站部署的所有摄像设备采集到的客流人数总和,此时拆分只需要将原始数据匹配上统一的车站节点ID,即可形成车站节点客流信息。

2) 原始信息的数据单元小于节点模型结构,需要将原始数据的结构单元按照多对一映射模型进行

组合。例如列车满载率信息是以列车 ID 为单位给出整列车预估客流数据，此时需要根据列车 ID 和车站 ID 的实时多对一映射模型，将节点内所有列车数据组合得到区间或在站的客流数据。

3) 原始信息的数据单元大于节点模型结构，需要将原始数据按照一对多的映射模型进行拆分。例如，气象信息一般获取的是行政区域的整体气象，通过查询根据地理信息生成的气象行政区和节点 ID 一对多的映射关系模型拆分成车站或区间的气象信息。

4) 原始信息不能覆盖所有节点，需要按照标准化格式进行默认值填充。例如专业设备报警信息通常情况只给出发生故障的设备信息，因此初始化时默认填充每个节点设备信息状态为正常值，采集数据过程中只将收到的部分故障节点数据进行更新。

5) 原始信息与节点结构完全不同，需要将原始信息拆分成更小的节点单元，再进行重组生成标准节点数据。例如，列车运行计划往往是以列车时刻表为单元结构进行下发，需要将数据拆成单列列车和车站对应结构，再按照时间参数将该时间下同一个车站的不同列车组合形成车站列车时间切面数据。而进行区间组合时则需要更加复杂的运算，需要根据该区间两端的车站时刻表进行匹配。

2.3 模型计算和重构

经过数据拆分得到各节点单专业标准数据后，需要根据不同的需求和数学模型，结合模型参数以及历史数据，将每个车站或区间子节点数据进行组合计算和重构。数据模型重构流程如图 3 所示。

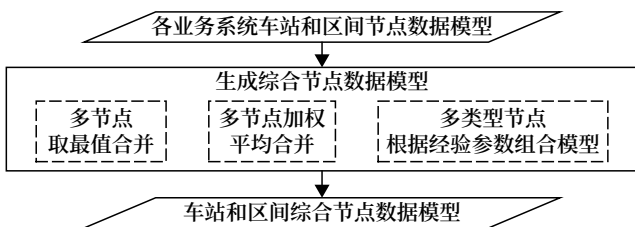


图3 数据模型重构流程
Fig.3 Flow chart of data model reconstruction

1) 多个同类型节点数据合并成一个节点数据，可利用取最值、取加权平均值等算法。例如，将不同专业的节点设备信息合并计算该节点整体设备状态，根据实际调研经验，把设备报警等级分为 3 类：

一级定义为影响行车安全报警，二级为一般报警，三级为轻微报警。当车站某个专业设备出现严重到影响行车的故障报警时，整个车站或区间也视为出现影响行车故障报警，即对各个专业节点数据取最值得到最终结果。

2) 不同类型节点数据重构，根据各种类型节点数据之间的关联，按照一定模型进行组合计算。例如根据采集到的实时客流节点信息，按照仿真算法预估的数学模型，结合设备预警信息预测的故障概率和恢复时间，以及列车位置状态和存储的历史客流信息等进行计算和重构，可以对下一时段的客流进行预推，形成本节点的客流 - 时间对应信息。

3) 此方法还有很好的扩展性，原始节点信息的增加和完备可以不断改进各个数据模型的计算算法，得到更加精确、全面的宏观态势信息数据；或者根据需求的变化，增加某些统计指标的计算，可以从若干原始节点信息以及已有的结果数据模型中，通过新的算法得到新增的统计指标模型。随着原始节点数据增加和算法的完善改进，得到的是越来越全面精确节点信息模型。

3 界面设计和实现

最后需要将计算重构后的节点综合信息展示在路网图底图上，通过读取存储好的路网图底图数据，获得每个车站或区间节点的底图显示模型，包括节点 ID、名称、中心坐标、起始点坐标、半径、宽度和颜色等属性。将节点底图显示模型和节点综合信息模型组合起来形成新的显示模型，对底图进行重新绘制，实现区域路网宏观态势图。

1) 实时客流的显示方法：在路网图上圆形节点表示车站，可以用不同半径以及多个同心圆的形式表示不同等级的车站，比如始发、终到、换乘和普通车站。在路网图上两个车站之间的连接线表示区间，连接线不同的填充颜色代表区间客流量。根据节点 ID 查询到当前时间对应的客流量换算成的客流拥挤等级，给节点显示模型的填充属性赋值相应的映射颜色。

2) 实时列车分布的显示方法：根据车站 ID 获得该车站的节点信息，查询到当前时间对应实际列

车数量和车次等信息。若该节点列车数量大于1则将列车图标填充属性设为灰色, 车身文字属性用于显示该节点列车数量, 鼠标移至列车图标, 以浮动气泡窗口的形式显示该节点所有车辆列表, 包含每辆列车车次、满载率、车载设备状态和列车方向等信息。若该节点列车数量为1时, 列车车身文字属性设为该列车车次号, 颜色填充属性为该列车满载率等级对应的颜色, 同时鼠标移至列车图标, 也可得到该列车的详细信息列表。

3) 与实时客流、实时列车分布显示方法类似, 可以选取不同形状的图标显示车站或区间节点上的其他类型信息, 例如设备状态或气象预警信息, 或者显示推算未来半小时时间段客流、计划列车分布情况等。各种信息基于同一底图, 可以灵活切换或者叠加显示。

4 结束语

本系统具有很好的扩展性, 随着数据接口的增加, 对更多数据进行接入和信息扩展。例如加入路网中的车辆、车底和乘务等资源信息, 随着原始节点信息的丰富、算法的改进, 节点综合数据模型的内容也会更加全面和准确, 与更多的系统产生共享联动, 进一步提高路网运营的集成化程度、智能化和自动化水平。

参考文献

- [1] 刘岭, 张波, 韦伟, 等. 区域轨道交通的下一站: 多制式协同运输与服务[J]. 科技纵览, 2020(1): 68-72.
- [2] 张建旭, 郭力玮. 基于在线地图交通态势分析的路网拥堵状态识别[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(5): 75-81.
Zhang Jianxu, Guo Liwei. Congestion Status Recognition of Road Network Based on Traffic Situation Analysis of Online Map[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(5): 75-81.
- [3] 刘剑. 城市区域轨道交通规划相关技术研究[J]. 运输经理世界, 2022(9): 1-3.
- [4] 刘博, 乐梅, 张军, 等. 多制式轨道交通协同应急指挥平台方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(8): 31-35.
Liu Bo, Le Mei, Zhang Jun, et al. Scheme of Collaborative Emergency Command Platform for Multi-Mode Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(8): 31-35.
- [5] 秦宁, 谢和欢. 区域轨道交通协同运输与服务系统接口技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(4): 56-62.
Qin Ning, Xie Hehuan. Research on External Interface Technology of Regional Rail Transit Collaborative Transportation and Service System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(4): 56-62.
- [6] 马兰, 燕翔, 王鹏, 等. 一体化出行服务平台架构及实现分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(3): 33-38.
Ma Lan, Yan Xiang, Wang Peng, et al. Analysis of Architecture and Implementation of Integrated Travel Service Platform[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(3): 33-38.
- [7] 刘军, 王猛, 周灿伟, 等. 城轨快普线协同模式与多专业联动方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(3): 59-64.
Liu Jun, Wang Meng, Zhou Canwei, et al. Study on Coordinated Mode and Multi-Discipline Coordinated Scheme for Urban Rapid and Urban Traditional Rail Transits[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(3): 59-64.
- [8] 李擎, 刘岭, 彭其渊, 等. 基于时空网格的铁路检查与维修计划可视化建模研究[J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(11): 46-51.
Li Qing, Liu Ling, Peng Qiyuan, et al. A Study on Time-Location Grid Based Visualization Model for Railway Inspection and Maintenance Schedule[J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(11): 46-51.

- [9] 刘博, 乐梅, 张军, 等. 多制式轨道交通协同应急指挥平台方案研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (8): 31-35.
Liu Bo, Le Mei, Zhang Jun, et al. Scheme of Collaborative Emergency Command Platform for Multi-Mode Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(8): 31-35.
- [10] 赵耀, 李珉璇, 柴天娇. 铁路综合视频监控系统与 BIM 融合应用研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (6): 26-30.
Zhao Yao, Li Minxuan, Chai Tianjiao. Research on Integration of Railway Integrated Video Monitoring System and BIM[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(6): 26-30.
- [11] 邓敏, 于洋. 城市轨道交通综合监控系统大规模全景数据并发控制及存储技术 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24 (3): 195-199.
- [12] 孙哲, 王嵩, 赵佳. 高精度轨道电子地图生成系统设计与应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (11): 14-19.
Sun Zhe, Wang Song, Zhao Jia. Design and Implementation of High Precision Track Electronic Map Generation System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(11): 14-19.
- [13] 李登辉, 彭其渊, 文超. 区域多制式轨道交通复合系统调度指挥模式研究 [J]. 铁道运输与经济, 2020, 42 (11): 97-103.
Li Denghui, Peng Qiyuan, Wen Chao. A Study on Traffic Control Schemes of Regional Multi-Mode Rail Transit System[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(11): 97-103.
- [14] 宋宗莹, 王文斌, 刘子扬, 等. 重载铁路运输大数据分析平台架构设计研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (11): 44-49.
Song Zongying, Wang Wenbin, Liu Ziyang, et al. Design and Research on Architecture of Big Data Analytics Platform in Heavy-Haul Railway Transportation[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(11): 44-49.
- [15] 吕楠, 胡清梅, 禹丹丹, 等. 全场景城轨网络化运营指挥平台探索与研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (1): 61-67, 91.
Lü Nan, Hu Qingmei, Yu Dandan, et al. Exploration and Research of Urban Rail Transit Network Operation Control Platform Based on Full-Service Scenario Interaction[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 61-67, 91.

(上接 41页)

- Su Xiangqi. Thinking of Test Methods for Adding Section Occupancy Logic Check on Existing Railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(9): 97-100.
- [14] 王定明. 铁路信号智能模拟盘研制与应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (11): 20-25.
Wang Dingming. Development and Application of Intelligent Simulation Panel for Railway Signal[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(11): 20-25.
- [15] 王定明. 计算机联锁接发列车故障设置盘的设计与实现 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21 (2): 14-19.
Wang Dingming. Design and Implementation of Fault Setting Panel for Train Receiving and Departing of CBI Training Equipment[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(2): 14-19.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.05.013

面向济南局铁路通信网IPv6演进研究

高源¹, 张乐军²

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070;

2. 中国铁路济南局集团有限公司电务部, 济南 250013)

摘要: 铁路通信网络作为铁路运输系统的关键组成部分, 在当今数据时代中扮演着至关重要的角色。IPv6 作为下一代互联网协议, 具有更大的地址空间、更好的安全性和更高的性能, 已经成为铁路通信网络演进的必然选择, 为铁路通信网络的升级和智慧铁路发展提供了广阔的前景。以济南局铁路通信网络为研究对象, 探讨济南局铁路通信网 IPv6 演进思路, 同时结合 SRv6 技术, 提出基于原生 IPv6 的济南局 SRv6 应用规划, 以满足未来铁路智能云网时代的业务应用“一跳入云”等需求, 为济南局铁路通信网 IPv6 的发展和建设提供部署方案和应用建议。

关键词: IPv6; SRv6; 铁路通信网

中图分类号: U285.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0075-06

Research on IPv6 Evolution in Railway Communication Networks of China Railway Jinan Group Co., Ltd.

Gao Yuan¹, Zhang Lejun²

(1. CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

(2. Signaling & Communication Department, China Railway Jinan Group Co. Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: As a key component of railway transportation systems, the railway communication network plays a crucial role in this data age. As the next generation internet protocol, IPv6 has larger addressing space, better security, and higher performance. It has become an inevitable choice for the evolution of the railway communication networks, and provided broad prospects for the upgrade of railway communication networks and the development of smart railways. Taking the railway communication networks of China Railway Jinan Group Co, Ltd. (CR-Jinan) as the research object, this paper discusses the evolution method of IPv6 in the railway communication networks of CR-Jinan. Making use of the SRv6 technology, it also proposes a native IPv6 based SRv6 application plan for CR-Jinan, to meet the requirements of service applications in the future era of railway smart cloud network, such as jumping into the cloud. Thus, this paper provides a deployment plan and application suggestions for

收稿日期: 2023-11-13; 修回日期: 2024-03-15

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目 (SY2021G001)

第一作者: 高源 (1996—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 云网融合、通信承载网技术, 邮箱: gaoyuan@crscd.com.cn.

the development and construction of IPv6 based railway communication networks for CR-Jinan.

Keywords: IPv6; SRv6; railway communication network

1 概述

2017年,中共中央办公厅、国务院办公厅印发《推进互联网协议第六版(IPv6)规模部署行动计划》。随着5G和云计算、云服务时代的到来,以物联网、AI人工智能为代表的新一代ICT技术广泛应用,为智慧铁路发展赋能赋智。铁路通信网络作为铁路运输系统的重要组成部分,发挥着关键作用。为满足不断增长的新型业务和接入需求,同时应对未来大规模海量终端通信的应用发展趋势,铁路通信网络需具有支持更多节点、更加安全、更加灵活等相关特性,需要进一步升级和演进。IPv6作为下一代互联网协议,具有超大的地址空间、更好的安全性和更加灵活的可编程性,因此,IPv6也成为铁路通信网络演进的必然选择和趋势。本文以济南局铁路通信网络为研究对象,结合济南局当前IPv6的需求研究,探讨济南局IPv6技术演进路径,并提出未来IPv6+时代济南局基于原生IPv6网络的SRv6应用承载规划。

2 IPv6需求分析

在铁路通信网络中,IPv6的引入受到多方面需求的推动。

1) IPv4“困境”

随着全球可供分配IPv4协议地址已经分配用尽,所有的运营商不能再申请到公网的IPv4地址池,IPv4地址枯竭问题日益突出,面临着地址不足的风险。济南局在对当今新增业务进行地址规划时,既有IPv4的地址段应用已经十分紧张,当前地址枯竭的局面不利于业务的接入和承载。而IPv6的地址空间十分广阔,相较于32 bit的IPv4地址空间,128 bit的地址长度使其具备支持数万亿个设备连接,能够满足未来铁路通信网络不断扩张的需求。

IPv6具备IPv4不支持的流标签特性,IPv6通

过16位的字段标记为流标签(IPv6 Flow Label),用于将数据包标记为一个流。流标签可以帮助网络设备识别和标记特定的数据流,使得网络路由决策更加智能化,并为数据流提供更稳定和高效的路径选择以及更好的服务质量(QoS),为业务应用提供更好的性能和用户体验。

2) 原生IPv6安全可靠

铁路通信网络对于稳定性和可靠性的要求非常高,而IPv6提供了更强的故障隔离和恢复能力,可以提高网络的可用性。IPv6在协议设计上考虑了安全性,具有内置的安全性功能,即在协议层面原生支持IPsec。它通过包含传输层端口号头部作为扩展头部的一部分进行传输,引入传输层和网络层数据进行加密和身份认证的机制,可以实现端到端的加密和认证,保护数据的完整性和机密性,从而进一步提高网络的安全性。

从应用场景角度,铁路通信网络在面向5G三大典型应用场景之一的mMTC时,需要支持大规模的物联网设备接入,IPv6的地址管理和自动配置机制能够更好地满足这一需求。IPv6引入无状态地址自动配置(Stateless Address Auto, SLAAC)机制,自动分配IP地址使用由网络管理员定义的前缀和接口标识符生成全球唯一的地址。这种自动配置的过程中,IPv6实现了安全验证机制,防止恶意设备进行伪造或拦截。

3) IPv4网络协议复杂

在当前济南局IPv4的网络当中充斥着复杂的协议,普通的业务基于IPv4地址进行通信,各类VPN业务则利用MPLS VPN中的MPLS Label进行通信,IP路由和标签交换交织在网络中,网络协议繁多,网络结构复杂。

IPv6的出现简化了当前IPv4网络的VPN协议应用。在IPv4时代,VPN通常是通过MPLS VPN (OptionA/B/C)来实现业务的接入和承载。

业务在 PE 侧接入后，广域侧网络无论是通过 LDP 隧道还是 SR 隧道，均利用 MPLS 标签 Pop 或 Switch 实现业务的传递，因此在广域侧网络层面，是通过额外引入的 MPLS 协议来进行业务的承载传递而非通过 IP 地址进行路由。而 IPv6 网络可以基于扩展头部的定制化编程，实现 VPN 业务的传递，从而简化广域侧网络的协议配置，使其更加简单、统一。

4) 云计算时代 IPv6：“一跳入云，网随云动”

随着云计算时代的发展，云计算平台具有快速、灵活地部署和调整应用程序和计算资源的优势，各大主流操作系统和应用开发架构全面支持 IPv6，云和网的边界更加模糊。“一跳入云”可以根据用户的差异化需求轻松进行扩容或缩减自身的资源。苹果公司在 2016 年发布的 iOSv9 版本开始支持 IPv6，运行该版本及后续版本的 iPhone 和 iPad 都是支持 IPv6 的移动终端。其他主流操作系统厂家，如微软、Google、IBM 都发布了支持 IPv6 版本的操作系统，操作系统的 DHCPv6 功能，能方便设备通过 DHCPv6 获取 IPv6 地址。这使得云计算应用全面步入 IPv6 时代。

主流操作系统对 IPv6 支持的情况如表 1 所示。

表1 主流操作系统对IPv6支持的情况

Tab.1 Support of mainstream operating systems for IPv6

操作系统	版本	IPv6-ready	安装 IPv6	DHCPv6
AIX	4.3	Yes	Yes	Yes
Red Hat	Enterprise 6	Yes	Yes	Yes
Solaris	10	Yes	Yes	Yes
SUSE	Enterprise 11	Yes	Yes	Yes
HP-UX	11i	Yes	Yes	Yes
IBM i	7.1	Yes	Yes	Yes
iOS	4.1	Yes	Yes	Yes
openSUSE	42.1	Yes	Yes	Yes
Ubuntu	All	Yes	Yes	Yes
Debian	3.0	Yes	Yes	Yes
Android	5.0	Yes	Yes	No
macOS	10.7	Yes	Yes	Yes
Windows NT	10	Yes	Yes	Yes

3 济南局IPv6技术演进路径

3.1 IPv6过渡技术

济南局目前网络均为 IPv4 网络，因此在向 IPv6 网络方向过渡时，需要考虑对既有网络和既有业务的兼容性，利用 IPv6 过渡技术，逐步实现向 IPv6 网络的演进。

3.1.1 双栈技术

面向当前济南局大规模 IPv4 网络，双栈技术是 IPv4 向 IPv6 过渡的一种有效的技术。在济南局向 IPv6 网络演进的初期，利用双栈技术，有效保持原有 IPv4 网络的可用性，维持既有业务不变的基础上，逐步加载 IPv6 网络平面，从而实现无损演进，双栈技术实现架构如图 1 所示。双栈技术需要网络中的节点同时支持 IPv4 和 IPv6 协议栈，源节点根据目的节点的不同选用不同的协议栈，而网络设备根据报文的协议类型选择不同的协议栈进行处理和转发。

面向济南局单一 IPv4 的大型网络，双栈技术是成熟可靠的 IPv6 演进技术，不必为不同类型的其他专业的应用单独部署网络配置，管理简单，IPv4 和 IPv6 的逻辑界面清晰。同时可平滑过渡到 IPv6，通过 IPv6 优选逐步提高 IPv6 流量占比。

3.1.2 隧道技术

常用的隧道技术主要有 6 to 4 隧道、IPv6 Over IPv4 GRE 隧道、ISATAP 隧道和 6PE/6VPE 隧道等，从而实现 IPv6 信息孤岛间互通。

隧道技术的本质是优先改造接入侧 IPv6 网络的实现，优先从接入层面支持 IPv6。广域侧承载层面依旧通过 IPv4 的方式将两端 PE 两侧的 IPv6 报文进行传递，IPv6 穿越 IPv4 隧道技术利用现有的 IPv4 网络为互相独立的 IPv6 网络提供连通性。IPv6 报文被封装在 IPv4 报文中穿越 IPv4 网络，实现 IPv6 报文的透明传输。6PE/6VPE 隧道技术的网络示意如图 2 所示。

利用隧道技术实现济南局 IPv6 技术演进的优势在于原有网络拓扑和路由几乎无需调整，用户侧、

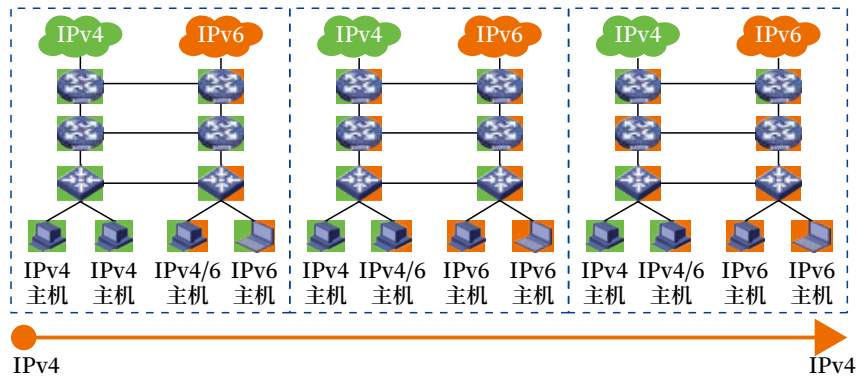


图1 双栈技术实现架构

Fig.1 Implementation architecture of dual stack technology

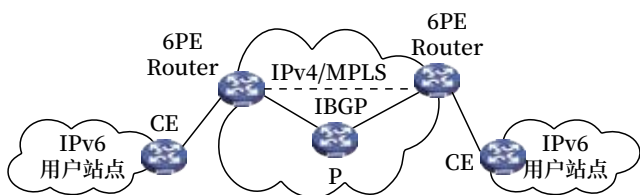


图2 6PE/6VPE网络示意

Fig.2 Schematic diagram of 6PE/6VPE network

接入侧只要简单设置即可。从济南局现网的角度来讲，保有量很大的通信承载网在改造时，在改造的中期可以优先利用隧道技术来实现终端侧IPv6的改造，从而帮助和疏导各专业业务接入层面存在的IPv4困境，利用无感隧道的方式优先拉通用户侧业务响应需求，后续逐步演进承载网络的IPv6支持与实现。

3.1.3 NAT64技术

在IPv4向IPv6网络演进过程中，NAT64技术也是高效可用的解决方案之一。NAT64继承了传统NAT技术的原理，NAT64对整个报文格式进行转换，是IPv4到IPv6或IPv6到IPv4的转换。

传统NAT和NAT64特性区别如表2所示。

表2 NAT和NAT64对比

Tab.2 Comparison between NAT and NAT64

特性	转换前	转换后
传统 NAT	源地址：私网路由用 IPv4 地址	源地址：公网可路由 IPv4 地址
NAT64	报文格式为 IPv4（或 IPv6）	报文格式为 IPv6（或 IPv4）

在济南局铁路通信网络向全IPv6网络演进的过程中，NAT64技术适合应用于过渡的最后阶段。在向IPv6网络演进的后期，通过逐步部署与

完善IPv6网络，新增用户全部通过IPv6接入，原有IPv4接入用户逐步切换为IPv6接入。因此当济南局IPv6网络存量占据主流地位时，网络中残存的IPv4业务通信将变得更加困难。NAT64技术便于网络新增的IPv6单栈接入的终端用户可以穿越IPv6网络访问残存的IPv4业务，保持良好的可用性和兼容性。

3.2 IPv6+

济南局IPv6演进的发展方向从IPv4转向为IPv6-Only后，后续演进的思路应为面向IPv6+网络的转变。IPv6+是IPv6网络的升级运用，是面向5G和云时代的IP网络创新体系。基于IPv6技术体系的各类技术应用的综合提升，IPv6+的主要技术包括SRv6和BIER6等基于Native IPv6的新技术。

3.2.1 SRv6

SRv6是基于IPv6转发平面的SR技术，其结合了SR源路由优势和IPv6简洁易扩展的特质，具有其独特的优势。SRv6在Native IPv6的基础上，融合Segment Routing的网络编程能力。Native IPv6保证网络任意结点的可达性，全网基于IPv6的地址进行寻址和转发，SRv6的网络编程能力可以对路径编程，以满足业务的SLA需求。

SRv6包含SRv6-TE Policy和SRv6-BE，其中SRv6-TE Policy实现流量工程，SRv6-BE可以实现业务灵活调度。

3.2.2 BIER6

BIER6是基于SRv6和BIER的架构思想及

IPv6 大地址空间、可扩展、可编程的特点而设计的组播方案。它使用 IPv6 的扩展头机制封装标准的 BIER 头、使用 SRv6 SID 作为目的地址指导数据面进行 BIER 头的处理、使用 IPv6 源地址标识 MVPN，不再需要 MPLS 平面来进行任何额外的基于 Label 的标签封装，单个封装即可支持逐跳的 BIER 组播复制、跨 Non-BIER 节点的多跳组播复制和跨 AS 域的报文发送或复制等场景，是 IPv6/SRv6 网络下的新一代组播方案。

4 基于原生IPv6的济南局SRv6应用承载规划

济南局基于原生 IPv6 网络可以通过 SRv6 技术来实现“大一统”的承载方案，其可以满足 L2VPN/L3VPN 多种类型业务的接入和承载，在承载侧运用 SRv6 技术，建立灵活的路径规划，以优化流量工程。根据网络负载和需求，动态调整流量路径，提高网络的性能和带宽利用率。

在济南局铁路通信网的业务应用场景中，通常有以下 VPN 类型。

- 1) L2VPN：业务应用的 IP 地址在同一个网段，通常为点对点通信业务。
- 2) L3VPN：业务应用的 IP 地址在不同网段。
- 3) EVPN：融合 L2VPN 和 L3VPN 的控制面。

SRv6 能够支持快速部署 L2 VPN /L3 VPN 业务，通过 EVPN 打通统一的控制平面。EVPN L2 VPN/L3 VPN over SRv6 业务承载模型如图 3 所示。

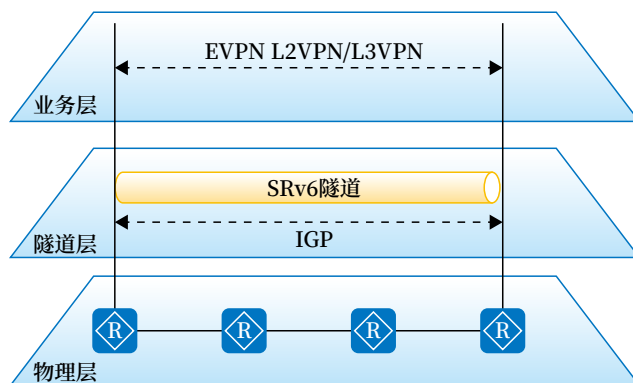


图3 EVPN L2VPN/L3VPN over SRv6业务承载模型
Fig.3 Service bearer model of EVPN L2VPN/L3VPN over SRv6

通过统一承载的方式，济南局铁路通信网络进行 IPv6 演进支持 SRv6 后，网络的业务流量模型可根据业务差异化 SLA 需求进行差异化统一承载，大流量业务和时延敏感业务根据不同的路径编排和承载方式，实现一张网络融合承载。网络架构如图 4 所示。

基于以上统一承载方式，结合实际应用对流量工程和灵活转发的需求，部分典型的业务应用及承载规划如表 3 所示。

5 结束语

在未来铁路智能云网时代，铁路通信网络将扮演更为重要和复杂的角色，需要满足更多元化的业务需求，IPv6 的演进是智慧铁路绕不开的必要路程。本文结合 IPv6 的需求，探讨济南局铁路通信网 IPv6 演进路径，同时结合 SRv6 技术，提出基于

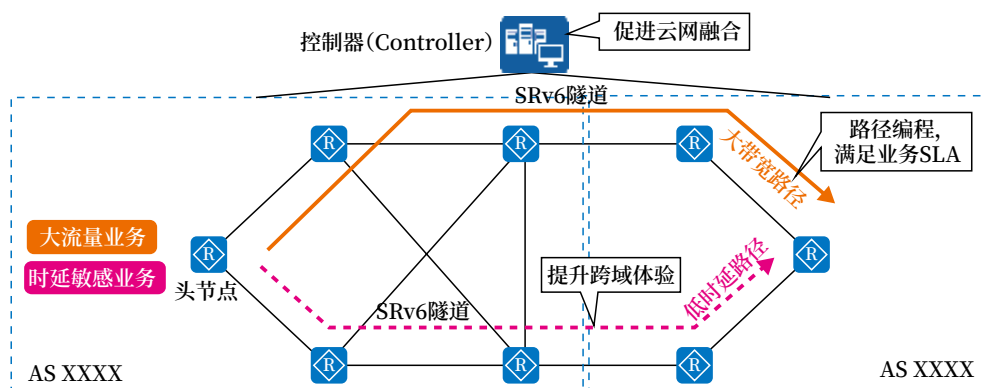


图4 基于原生IPv6的济南局SRv6网络架构
Fig.4 Architecture of native IPv6 based SRv6 networks of CR-Jinan

表3 部分典型的业务应用及承载规划

Tab.3 Some typical service applications and bearer planning

业务应用	业务接入类型	隧道类型	业务特点
多媒体调度通信系统	L2VPN	SRv6-TE Policy	点对点通信
集中监测业务	L3VPN	SRv6-BE	一般监测类业务
电力远动(SCADA)业务	L3VPN	SRv6-BE	一般监测类业务
各系统网管信息及综合网管信息	L3VPN	SRv6-BE	优先级不敏感
综合视频监控	L3VPN	SRv6-BE	大带宽业务

原生 IPv6 的济南局 SRv6 应用规划, 为实现未来铁路智能云网时代的业务应用和一跳入云等需求, 提供可参考的应用承载模型。铁路通信网络的 IPv6 升级演进不仅仅是技术的更新, 更是对智慧铁路时代的积极响应, 为实现铁路新一代智能通信网“可靠、可信、可视、可管、可控、可测”筑基坚实基础, 推动铁路通信全生命周期的高度数字化、信息化和智能化蓬勃发展。

参考文献

[1] 姜永富. 智能联接助力智慧铁路系统建设: “十四五”铁路通信发展展望 [J]. 铁道通信信号, 2021, 57 (2): 5-7, 15.
Jiang Yongfu. Intelligent Connections Facilitate Construction of Smart Railway System-Prospect on Railway Communication Development in 14th Five-Year Plan[J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(2): 5-7, 15.

[2] 王晨曦, 古锐, 肖亚群, 等. 基于“IPv6+”的智能 IP 网络方案 [J]. 电信科学, 2020, 36 (8): 66-80.

[3] 余勇志, 刘祎, 刘晓峰. IPv6+ 时代电信运营商城域网架构发展方向探究 [J]. 中国宽带, 2023, 19 (5): 36-38.

[4] 高原, 邱萍. 基于 SRv6 的铁路承载网隧道技术研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (1): 46-51, 60.
Gao Yuan, Qiu Ping. Research and Application of Railway Bearer Network Tunneling Technology Based

on SRv6[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(1): 46-51, 60.

[5] 李婷婷, 欧阳峰. IPv6 演进关键技术分析 [J]. 广播电视信息, 2021, 28 (12): 90-93.

[6] 李星. 把握历史机遇推进 IPv6 发展 [J]. 软件和集成电路, 2022 (6): 54-57.

[7] 庄文林. 铁路数据通信网 SRv6 应用技术探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (6): 31-35.
Zhuang Wenlin. Discussion on Application Technology of SRv6 in Railway IP Network[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(6): 31-35.

[8] 吴伟, 张文强, 杨广铭, 等. 5G 承载网的“SRv6+EVPN”技术研究与规模部署 [J]. 电信科学, 2020, 36 (8): 43-52.
Wu Wei, Zhang Wenqiang, Yang Guangming, et al. SRv6 +EVPN Technology Research and Scale Deployment of 5G Bearer Network[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(8): 43-52.

[9] 解冲锋, 马晨昊, 李聪, 等. 网络向 IPv6 单栈演进 构建先进云网基础设施 [J]. 通信世界, 2022 (4): 18-19.

[10] 秦壮壮, 屠礼彪, 臧寅, 等. 基于“IPv6+”的 5G 承载网切片技术与应用 [J]. 电信科学, 2020, 36 (8): 28-35.
Qin Zhuangzhuang, Tu Libiao, Zang Yin, et al. IPv6+ 5G Bearer Network Slicing Technology and Application[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(8): 28-35.

[11] 李玮琪, 杨家田, 孙强. 基于 IPv6 的铁路多媒体调度通信系统方案研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (9): 26-32.
Li Weiqi, Yang Jiatian, Sun Qiang. Research on Application Scheme of IPv6 in Railway Multimedia Dispatching Communication System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(9): 26-32.

(下转 121页)

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.05.014

面向地铁施工环境的残差加权定位算法

王丽君¹, 蒋锐², 杜晓伟², 李大鹏²

(1. 中铁十九局集团电务工程有限公司, 北京 102600;

2. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京 210003)

摘要: 在地铁施工环境中, 进行地下室内定位, 非视距误差是影响位置估计稳定性与准确性的一个重要因素。目前已经出现一些技术可以消除一定的非视距误差, 但往往都需要关于非视距信道条件的先验信息。提出一种改进的残差加权位置估计算法 (Developed residual weighting algorithm, D-rwgh), 该算法基于最小残差原则, 通过前一轮的计算不断剔除产生误差最大的基站, 然后将不同基站数对应的位置估计进行残差加权, 加权结果即为最终的定位结果。实验结果表明, 该算法无需信道的先验信息, 且在非视距传播环境下具有较好的定位精度。

关键词: 到达时间差; 最小残差原则; 加权; 非视距误差

中图分类号: TN929.53

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0081-09

Residual Weighting Algorithm for Position Estimation Subway Construction Environment

Wang Lijun¹, Jiang Rui², Du Xiaowei², Li Dapeng²

(1. China Railway 19th Bureau Group Electric Engineering Co., Ltd, Beijing 102600, China)

(2. School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: For the underground indoor positioning in the subway construction environment, the Non-Line-Of-Sight (NLOS) error is an important influencing factor for the stability and accuracy of position estimation. Some existing techniques can eliminate NLOS errors to some extent, but these techniques often require priori information about NLOS channel conditions. This paper proposes a Developed residual weighting algorithm (D-rwgh) for position estimation based on the minimum residual principles. The proposed algorithm continuously rejects the base station with the largest error through the previous round of calculation, then conducts residual weighting for the position estimation corresponding to the number of base stations, and finally takes the weighting result as the final positioning result. The test results show the proposed algorithm does not need priori information about channel conditions, and has high positioning accuracy in the NLOS environment.

Keywords: arrival time difference; minimum residual principle; weighting; non-line-of-sight error

收稿日期: 2024-01-19; 修回日期: 2024-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62271266)

第一作者: 王丽君 (1985-), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向: 机电一体化、传感器定位, 邮箱: 18796040577@139.com.

随着科技的发展,用于室外的全球定位系统(Global Positioning System, GPS)已经一步一步地融入到人们的日常生活中,极大满足了人们的出行需求。而由于GPS的信号来源是天空卫星,在地铁人员定位和室内环境中,无法搜索到GPS或北斗卫星信号,因而无法使用GPS或北斗定位技术。当轨道交通列车运行密度高、车站间距较近,列车自动控制系统^[1-4]及列车本身需要实时了解列车在线路中的精确位置,根据列车的相对位置实时、动态地^[5]对每一列车进行监督、控制^[6]、调度及安全防护^[7-9]。在地铁隧道施工场所,地铁人员定位是一个刚需,出于对职工安全负责的角度,需要对职工进行定位,职工身处风险时进行呼救报警等。此外,轨道交通的环境杂乱、出入口狭隘^[10]、人流量大,安全防控的实施难度十分大。现有的应急指挥调度,无论是日常的巡查,还是在处置突发事件过程中,由于无法获悉警员的实时方位,只能先经过语音对讲问询他们当前的地点,然后进行指挥调度,效率比较低,还可能存在交流失误导致警力误判等状况。如果能自动获得人员的精确方位,则能够协助指挥中心进行现场的警力布置,实施精准、有效的指挥调度决议计划,快速分配适宜的警力前往指定现场,因而急待寻找一种切实可行的机制来代替卫星定位、完成室内定位的需求。

综上所述,本文针对室内非视距(Non-Line of Sight, NLOS)复杂环境提出一种改进的残差加权位置估计算法(Developed residual weighting algorithm, D-rwgh),同样以最小残差准则选择不同基站数量的组合集,同时又对不同基站数量的组合结果进行比较,将最小残差值优于上一轮的基站组合保留,并根据前两轮记录的残差值为最后一轮的位置估计结果进行权重赋予。最后,对保留的位置估计进行加权,得到最后的结果。

1 相关算法研究

随着无线传感器网络的发展^[11],多种室内定位技术得到研究并取得一定的成果。目前,用

于室内的定位方法主要有:基于信号到达时间(Time of Arrival, TOA)^[12],到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)^[13],以及基于信号到达方向角(Angle of Arrival, AOA)的定位方法。其中,TDOA算法计算复杂度低、实现要求及难度小,同时它的定位精度较高,这些优点使其成为炙手可热的移动台定位方法。

在基于TDOA的定位算法中,造成定位误差的主要原因包括:接收机的内部噪声及测量系统误差和NLOS误差。系统误差较为可控且呈高斯分布;而NLOS误差是由多径效应引起,会使适用于LOS环境的算法精度急剧下滑,是定位算法中的研究重点^[14-15]。以Chan算法为例,该算法是一种基于代数关系、具有解析表达式且利用TDOA参数进行定位的经典算法。Chan算法不需要提供初始值,也不需要关于信道的任何先验信息,当定位环境为视距(Line of Sight, LOS)环境时,该算法具有高精度定位效果。但是当定位环境为NLOS环境时,受到多径效应的影响,TDOA不再是真实的时间差值,其定位精度便大打折扣。

在过去的研究中,人们已经提出很多抑制NLOS误差的方法。文献[16]考虑NLOS测量不可识别的情况,提出一种减少NLOS的技术,称为残差加权算法(Residual weighting algorithm, Rwgh),以减轻NLOS误差在位置估计中的影响。Rwgh的主要优点是不需要关于LOS-NLOS条件的统计模型或先验信息,仿真实验结果表明,在随机NLOS误差的情况下,该算法定位结果的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)大大降低。文献[17]、[18]结合[16]中算法的特点,各自提出一种新的算法,分别为低计算成本残差加权算法(Lower-Computational-Cost Residual weighting algorithm, LCC-Rwgh)和选择残差加权算法(Select Residual weighting algorithm, SRwgh),这两种算法不仅不需要LOS-NLOS信道条件的先验信息,而且当TDOA测量数大于3时,计算量相较于Rwgh会减少,且定位效果更优于Rwgh算法。文献[19]在SRwgh

算法的基础上提出 Advanced Residual weighting algorithm (A-Rwgh) 算法, 以最小残差准则对不同基站数量的组合集进行两次加权最小二乘估计, 并对不同基站数所对应的定位结果进行加权, 仿真结果表明 A-Rwgh 算法的性能优于 SRwgh。文献 [20] 将 Chan 定位算法的结果作为泰勒迭代的初值, 并通过 Taylor 算法使定位结果一步步逼近真实值, 相较于随机选取初始值进行 Taylor 迭代, 该方法提高 Taylor 收敛的概率, 提高了定位精度, 但当 NLOS 误差较大时, Taylor 反而会使定位结果更加偏离真实值。文献 [21] 提出一种 Chan-Taylor 组合加权定位算法, 该算法首先设定一个阈值, 然后对 Chan 定位算法的结果进行残差计算, 并与阈值比较, 若小于阈值则将 Chan 的定位结果作为初值代入 Taylor 算法, 得到定位结果以及对应的残差值, 将两次结果进行残差加权得到最后的定位结果, 若大于阈值则不会代入 Taylor 算法。该算法有效避免 Taylor 算法使定位结果更加偏离真实值的情况, 但要求设置一个合理的阈值, 阈值过大或者过小都会影响到定位的精度。

2 TDOA定位模型

如图 1 所示, 在二维平面下, 3 个基站可以获得两个 TDOA 值从而构成一组双曲线方程, 通过求解方程得到未知目标点 z 的坐标。

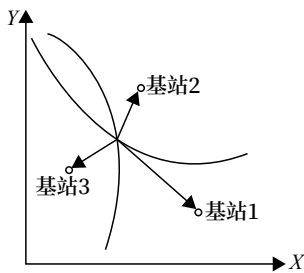


图1 TDOA定位原理
Fig.1 Principle diagram of TDOA positioning

当拥有 M 个基站时, 假设未知目标点为 $z = [x, y]$, 基站坐标为 $M_i = [x_i, y_i]$, 便可以获得 $M - 1$ 个 TDOA 值, 即 $\Delta t = [t_{2,1}, t_{3,1}, t_{4,1}, \dots, t_{M,1}]$, 则未知点到基站 i 与到基站 1 的距离差如公式 (1) 所示。

$$d_{i,1} = c \times t_{i,1} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2}, \quad i = 2, 3 \dots M \quad (1)$$

其中 x 和 y 是未知目标点的坐标, x_i 和 y_i 是第 i 个基站的坐标, $d_{i,1} = d_i - d_1$, 表示基站 i 与未知点之间的距离; c 是电波传播速度。由已知的到达距离差 Δd , 便可以推出任意两个基站与未知点的距离差, 如公式 (2)、(3) 所示。

$$d_j = d_j - d_i = (d_j - d_1) - (d_i - d_1) = d_{j,1} - d_{i,1}, \quad i = 1, 2 \dots M, j = 1, 2 \dots M \quad (2)$$

$$d_{j,i} = r_{j,i} + n_{1,j,i} + n_{2,j,i} \quad i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2 \dots M \quad (3)$$

其中 d_j 和 d_i 分别表示基站 j 和 i 到未知点之间的距离, $r_{j,i}$ 表示真实值; $n_{1,j,i}$ 为系统误差值; $n_{2,j,i}$ 为非视距误差。

3 一种改进的残差加权位置估计算法

本文采用基于代数关系的抑制 NLOS 误差方法, 在每一轮基站的选择中, 对不同基站组合对应的 TDOA 值进行 Chan 定位算法。基于最小残差原则保留残差最小的基站组合, 在保证归一化残差递减的基础上不断减少组合中的基站数, 最后对保留的位置估计进行加权得到最终结果。

残差表示为观测到的距离差与使用方程组的解计算出预测值之间的差值。在理想的情况下, 残差可以被认作误差的观测值, 定义如公式 (4) 所示。

$$Res(X, B_i) = \sum_{k=2}^a [r_k - \|X_k - X_1\|] \quad (4)$$

其中, X 为位置估计值; B_i 为基站组合; a 为总基站个数; r_k 表示距离差的观测值; X_k 表示未知点与基站的距离。得到残差后, 由于不同的组合会带来不同数量的基站, 因此要进行残差的归一化, 归一化残差定义如公式 (5) 所示。

$$\overline{Res} = \frac{Res(X, B_i)}{Size(B_i)} \quad (5)$$

不同基站组合得到的位置估计的加权结果如公式 (6) 所示。

$$X_{last} = \frac{\sum [X (\overline{Res}(X, B_i))^{-1}]}{\sum (\overline{Res}(X, B_i))^{-1}} \quad (6)$$

3.1 Chan定位算法

在使用 TDOA 方法进行定位时,测得的 TDOA 值乘上光速即得两两基站到未知点的距离差值,多个距离差值便可构成关于未知点的方程组。将公式 (1) 进行线性化处理,如公式 (7) 所示。

$$d_i^2 = (d_{i,1} + d_1)^2 = d_{i,1}^2 + 2d_{i,1}d_1 + d_1^2 = K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2$$

$$K_i = x_i^2 + y_i^2 \quad (7)$$

其中 K_i 表示基站 i 到原点的距离。

将 (7) 进一步化简可得公式 (8)。

$$d_{i,1}^2 + 2d_{i,1}d_1 = (K_i - K_1) - 2x_{i,1}x - 2y_{i,1}y$$

$$x_{i,1} = x_i - x_1, y_{i,1} = y_i - y_1 \quad (8)$$

当基站数为 3 时,公式 (8) 就可以视为一个线性方程组,求解未知目标点只需解出该方程组;当基站数大于 3 时,得到的 TDOA 值构成的方程组不再能求出唯一解,此时使用两步加权最小二乘法 (Two-step Weighted Least Squares, TWLS) 可以充分利用冗余的数据。将公式 (8) 变形,如公式 (9)、(10) 所示。

$$d_{i,1}^2 - K_i + K_1 = -2x_{i,1}x - 2y_{i,1}y - 2d_{i,1}d_1 \quad (9)$$

$$\text{即 } \frac{1}{2}(d_{i,1}^2 - K_i + K_1) = [-x_{i,1} \ -y_{i,1} \ -d_{i,1}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ d_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\text{令 } h = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} d_{2,1}^2 - K_2 + K_1 \\ d_{3,1}^2 - K_3 + K_1 \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$G = - \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} & d_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} & d_{3,1} \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad z = \begin{bmatrix} x \\ y \\ d_1 \end{bmatrix}$$

考虑到 TDOA 的观测噪声及测量的人为误差,可以将误差记为 $\varphi = h - Gz^0$ (z^0 为无噪声时 z 的表达形式)。在文献 [1] 中,噪声可由误差矢量 $\varphi = cBn + 0.5c^2 n \odot n \approx cBn$ 来表示,符号 \odot 是 Hadamard 乘积 [22], c 则代表信号的传播速度, $B = \text{diag}(d_2^0, d_3^0, \dots, d_M^0)$, 表示基站到未知点的真实距离,误差矢量 φ 的协方差矩阵 ψ 如公式 (11) 所示。

$$\psi = E[\varphi\varphi^T] = c^2 BE[nn^T]B = c^2 BQB \quad (11)$$

其中, $E[\]$ 表示求期望值; Q 为距离差的协方差矩阵。此时假定 x 、 y 、 d_1 相互独立,则可以对公式

(10) 进行第一次加权最小二乘算法,可得 z 的估计如公式 (12) 所示。

$$z = (G^T \psi^{-1} G)(G^T \psi^{-1} h) \quad (12)$$

由于 B 中含有基站与未知点之间的距离这一未知量,所以 ψ 也是未知的。假定基站与未知点很远很远,可以合理认为每一个基站与未知点的距离相等,即 B 中的每一个元素都变成了一个常数,则可以将协方差矩阵 Q 近似代替协方差矩阵 ψ ,从而得到一个初始解如公式 (13) 所示。

$$z_{\text{初始}} = (G^T Q^{-1} G)(G^T Q^{-1} h) \quad (13)$$

利用得到的初始解获得基站到未知点的距离并代入 B 矩阵,继而解得第一次加权最小二乘的结果。上述过程的前提是假定 z 间的元素相互独立,而实际上 d_1 是与 (x, y) 有关的量,此时便需要进行第二次加权最小二乘来提高定位精度。向量 z 其实是一个均值为 z^0 的随机向量,可以如公式 (14) 所示。

$$z_1 = x^0 + e_1$$

$$z_2 = y^0 + e_2$$

$$z_3 = d_1^0 + e_3 \quad (14)$$

其中 e_1 、 e_2 、 e_3 表示估计误差。由此可以构造一个新的误差矢量 ψ' ,如公式 (15) 所示。

$$\psi' = h' - G' z' \quad (15)$$

$$\text{其中, } h' = \begin{bmatrix} (z_1 - x_1)^2 \\ (z_2 - y_1)^2 \\ z_3^2 \end{bmatrix}, \quad G' = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad z' =$$

$\begin{bmatrix} (x - x_1)^2 \\ (y - y_1)^2 \end{bmatrix}$, 将公式 (14) 代入公式 (15) 得到 ψ' 的近似的协方差矩阵,如公式 (16)、(17) 所示。

$$\psi' = 4B' \text{Cov}(z) B' \quad (16)$$

$$B' = \text{diag}(x^0 - x_1, y^0 - y_1, d_1^0) \quad (17)$$

由于 ψ' 为高斯随机向量,因此同样可以采用公式 (12) 的方法进行估计,如公式 (18) 所示。

$$z' = (G'^T \psi'^{-1} G')(G'^T \psi'^{-1} h') \quad (18)$$

最终未知点的定位结果,如公式 (19) 所示。

$$z_p = \pm \sqrt{z'} + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

由于第二次 WLS 是对第一次 WLS 的精进,所以可以通过比较前后两次 WLS 的结果与基站的距

离, 消除解的模糊性。

3.2 D-rwgh算法

假设在二维平面中存在一个未知点和 N ($N > 4$) 个已知基站, 可以得到 $N - 1$ 个 TDOA 值, 即 $N - 1$ 个到达距离差, 基站的组合数设为 $K = C_N^2$ 。算法具体实施步骤如下。

1) 将 N 个基站都纳入计算, 即 $K = C_N^2 = 1$, 定义组合集为 $\{B_i, i = 1, 2, \dots, K\}$ 。对这一个组合进行两次加权最小二乘, 求出位置估计值 X 和归一化残差 \overline{Res} , 并且将归一化残差记为 min , 将此时的组合记为 $\{B_{min}\}$ 。

2) 令 $\{B_{min}\}$ 中基站的个数为 Q , 从 $\{B_{min}\}$ 中随机剔除一个基站, 即 Q 个组合, 对每种组合都进行两步加权最小二乘, 得到位置估计值 X 和归一化残差 \overline{Res} 。

3) 从基站组合中找出归一化残差最小的组合, 将其归一化残差值与 min 作比较。如果小于 min , 则将这个归一化残差记为 min 并保存这个组合的位置估计值, 同时更新 $\{B_{min}\}$, 更新后 $\{B_{min}\}$ 中基站个数为 4 时, 执行步骤 5), 否则执行步骤 2); 如果大于 min , 则执行步骤 4)。

4) 从 $\{B_{min}\}$ 中随机剔除两个基站, 对每种组合都进行两步加权最小二乘, 得到位置估计值 X 和归一化残差 \overline{Res} 。从基站组合中找出残差最小的组合, 将其归一化残差值与 min 作比较。如果小于 min , 则将这个归一化残差记为 min 并保存这个组合的位置估计值, 同时更新 $\{B_{min}\}$, 更新后 $\{B_{min}\}$ 中基站个数为 4 时, 执行步骤 5), 否则执行步骤 2); 如果大于 min , 执行步骤 4) 并且剔除的个数增加 1。

5) 当基站数剩余为 4 时, 分别取出所有基站中的每一个基站, 形成 4 个新组合, 使用只有 3 基站参与定位时的 Chan 算法, 找到归一化残差最小的那个组合及对应的位置估计值, 归一化残差值记为 $\overline{Res}(m)$, 其中 m 代表轮次。此时方程数等于未知数, Chan 算法相当于单纯的解方程式, 导致每一个归一化残差值都逼近于 0, 即残差值无效。因此,

笔者设计了一个归一化残差赋值方案。如果前两轮记录的残差值变化率过大, 则在赋值时不考虑 $m - 2$ 次的残差值, 如公式 (20) 所示。

$$\overline{Res}(m) = \overline{Res}(m - 1) \quad (20)$$

否则, 如公式 (21) 所示。

$$\overline{Res}(m) = (\overline{Res}(m - 1) + \overline{Res}(m - 2)) / 2 \quad (21)$$

6) 如果前两轮记录的残差值都过大, 说明对应的位置估计误差也会很大, 即位置估计没有参考价值, 直接将最后一轮的位置估计设为最终结果; 否则, 将所有记录的归一化残差取倒数作为对应位置估计的权重, 加权得到最终的位置估计。

整个 D-rwgh 算法的流程如图 2 所示。

4 仿真结果分析

本文研究包含 NLOS 误差的大型商业区域环境中的定位问题, 考虑有 6 个呈蜂窝状的定位基站, 如图 3 所示, 其位置分别为 (346,200)、(0,400)、(-346,200)、(-346,-200)、(0,-400)、(346,-200) (单位: m), 测量误差由系统误差 n_i (零均值高斯随机分布) 和非视距传播误差 τ_{NLOS_i} (NLOS) 组成。

为了模仿 NLOS 环境, 本文将附加时延分布概率密度函数假定为指数分布情况, 因而将基站与未知点的距离中的非视距误差 $\tau_{NLOS_i,1}$ 近似为服从均值为 0.4 的指数分布随机数乘上固定值 a , 其中 $a \in \{0, 5, 10, 15, 20, 25, 30\}$ 。使用 RMSE 来描述定位方法的精度。RMSE 的表示如公式 (22) 所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2]}{n}} \quad (22)$$

其中 (x_i, y_i) 是第 i 个基站的坐标, 并且 Monte Carlo 实验次数 n 设为 1 000。

首先分析所有基站都为 LOS 基站且只有测量误差变化的情况下, 各算法性能的变化如图 4 所示。因为在 LOS 环境中, 对于测量误差服从高斯分布的 TDOA 值, Chan 算法的定位精度很高, 远超出最小二乘定位算法, 而 D-rwgh 算法和 A-rwgh 算法中对于不同基站个数的每种组合都采用 Chan 定位算法, 所以这两种算法的性能都要远远高于 LCC-

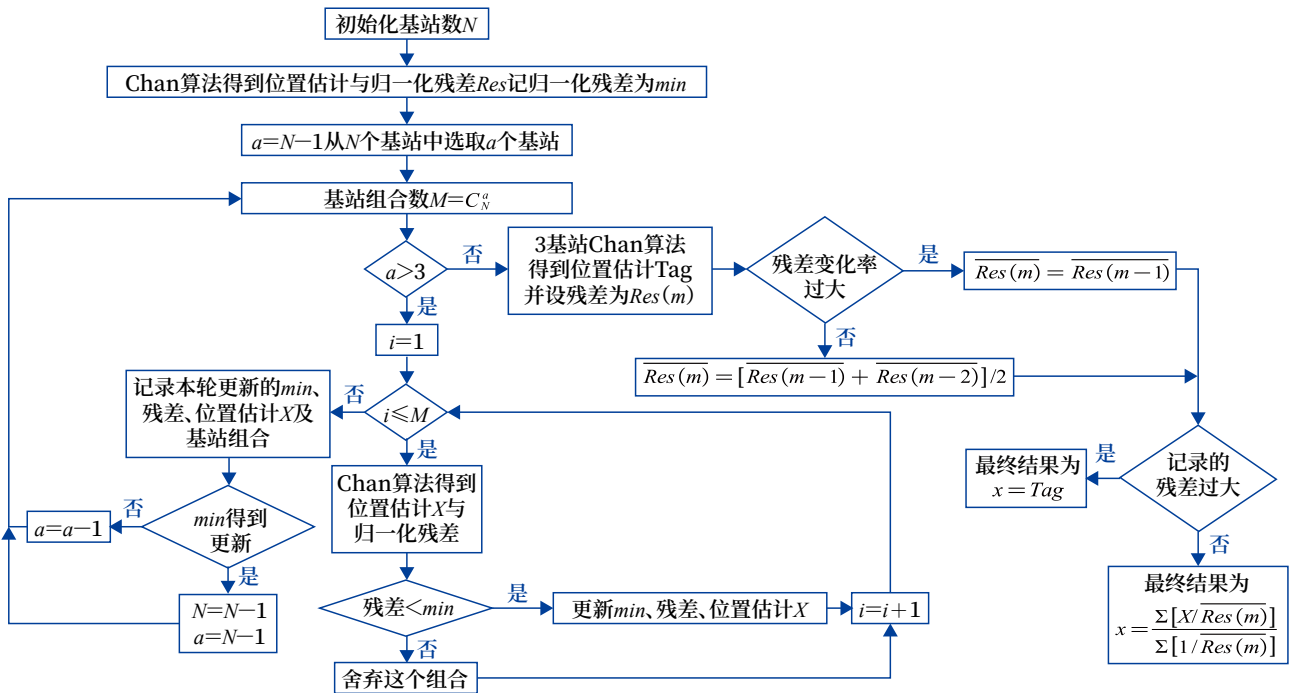
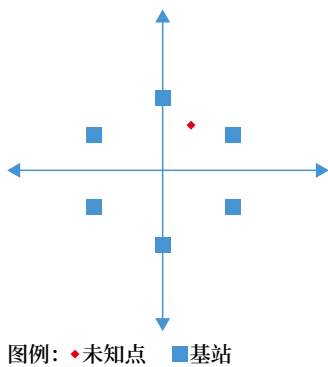


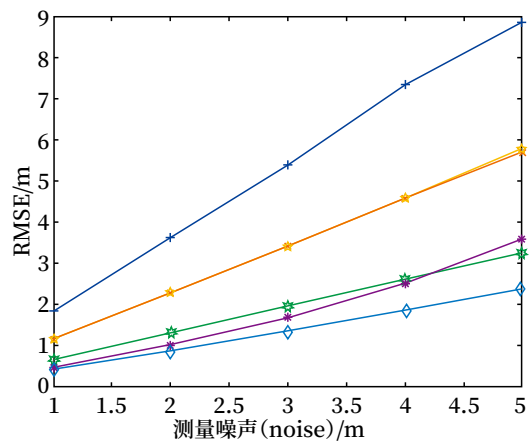
图2 D-rwgh算法流程
Fig.2 Process of D-rwgh algorithm



图例：◆未知点 ■基站

图3 基站布局
Fig.3 Layout of base stations

rwgh 算法。但是 Chan 算法、Chan-Taylor 算法以及 Chan-Taylor 加权算法都没有基站选择步骤，是 6 基站定位结果，在基站数小于等于 7 时，定位精度与基站数成正比，所以可以看到 Chan 算法、Chan-Taylor 算法以及 Chan-Taylor 加权算法的性能都要优于上面 3 种在解算过程中基站数不断减少的算法。随着系统误差标准差持续增大，6 种算法的均方根误差均呈线性变化，其中 D-rwgh 算法与另外 3 种优于它的算法的均方根误差，一直保持差值在 3 以内，可以进行高精度定位。



图例：—●— LCC-rwgh —■— A-rwgh —▲— D-rwgh —◆— Chan
—★— Chan+Taylor —◇— Chan+Taylor加权

图4 所有基站均为LOS情况下的算法性能比较
Fig.4 Algorithm performance comparison when all the base stations are LOS base stations

其次，讨论在系统误差的标准差为 1、且每个基站均有 NLOS 误差的情况下，各算法定位精度随 NLOS 误差的变化情况，如图 5 所示。

在图 5 中可以看到，当 NLOS 误差较小时，Chan 算法得到的初值较接近于真实值，进而通过 Taylor 算法更逼近真实值，此时 Chan-Taylor 算法和 Chan-Taylor 加权算法都略微优于 D-rwgh

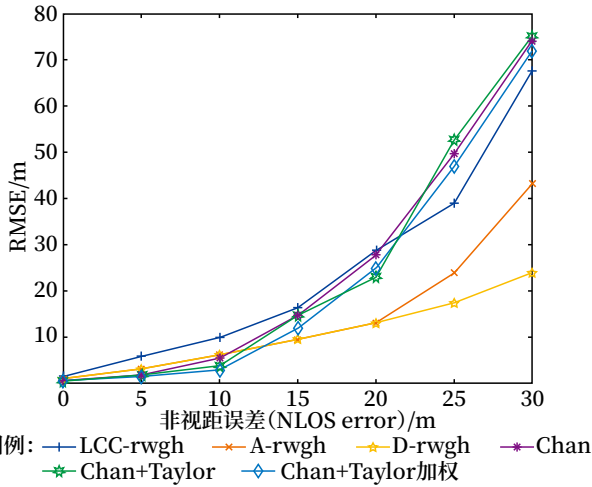
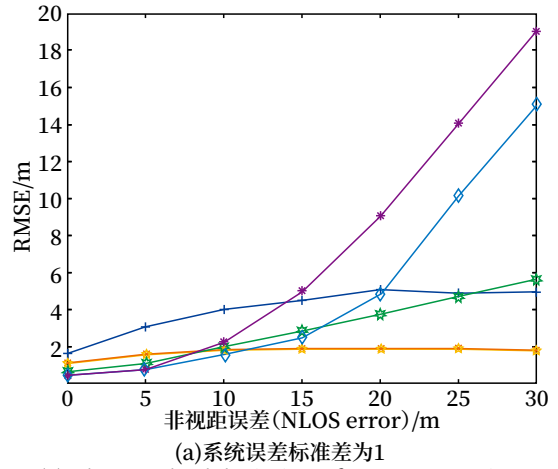


图5 系统误差标准差为1且每个基站都有NLOS情况下的算法性能比较
Fig.5 Algorithm comparison when the standard deviation of system error is 1 and all the base stations are NLOS base stations

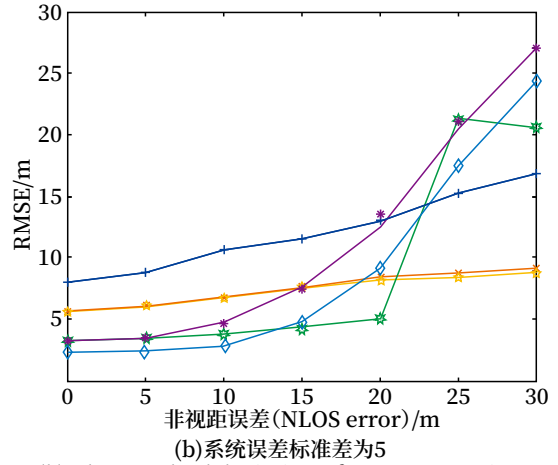
算法,但随着NLOS误差的增大,Chan初值不再具有参考价值,因此可以看到D-rwgh算法明显优于其他算法。并且由于每一种基站组合都存在NLOS误差,而在每一轮的基站选择中,D-rwgh算法比A-rwgh算法多了一步最小残差值的取舍,且D-rwgh算法多一轮3基站的目标定位并进行权重赋予,所以在NLOS误差较大的情况下,D-rwgh算法性能明显优于A-rwgh算法和LCC-rwgh算法。

接着讨论在系统误差的标准差分别为1和5、且只有一个基站有NLOS误差的情况下,各算法定位精度随NLOS误差的变化情况,如图6所示。

在图6中可以看到,当系统误差的标准差为1时,D-rwgh算法与A-rwgh算法性能几乎一致,定位误差不随NLOS误差的增加而增加,而LCC-rwgh算法由于采用最小二乘法进行位置估计,所以定位精度远差于前两种算法。而Chan算法、Chan-Taylor算法以及Chan-Taylor加权算法无法避免NLOS误差的影响,所以当NLOS误差较大时,三种算法均方根误差上升明显,性能明显劣于D-rwgh算法。当系统误差的标准差上调为5后,算法性能趋势大致不变,而由于此时只有一个基站存在NLOS误差,经过数轮的基站取舍,基本能够稳定剔除NLOS基站,并且D-rwgh算法通过判断归一化残差变化的规律,对基站数为3的



(a) The standard deviation of system error is 1



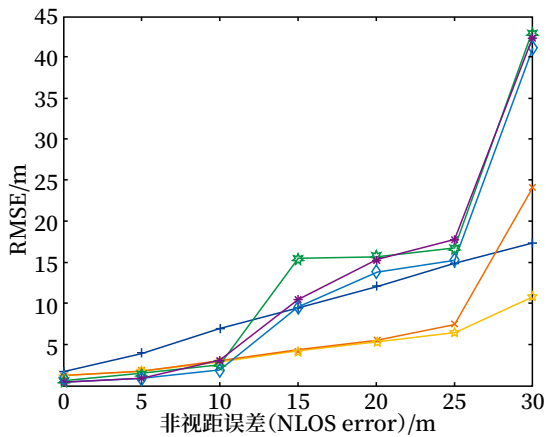
(b) The standard deviation of system error is 5

图6 只有一个NLOS基站情况下的算法性能比较
Fig.6 Algorithm performance comparison when there is only one NLOS base station

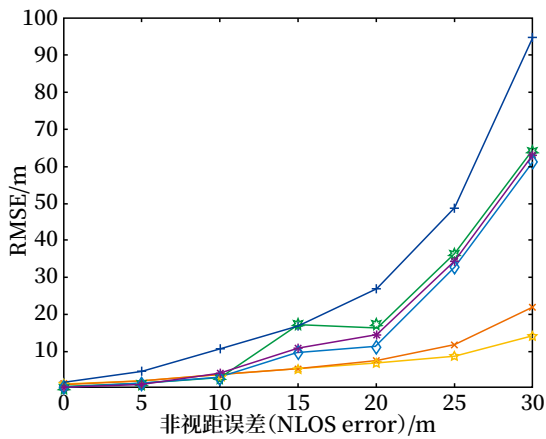
组合进行额外的权重赋值,在一定程度上更精确地剔除了NLOS基站,所以D-rwgh算法性能略优于A-rwgh算法,两者性能的差距被放大。

最后,分析当系统误差的标准差为1,而NLOS基站个数分别为2和3的情况下,各算法定位精度随NLOS误差的变化情况,如图7所示。

从图7中可以看到,此时由于包含NLOS误差的基站组合占多数,所以各算法性能较之于图6(a)急剧下降。并且由于NLOS基站的增多,Chan算法的性能受到了更大的影响,两张图中D-rwgh算法和A-rwgh算法的性能明显优于Chan算法、Chan-Taylor算法以及Chan-Taylor加权算法。而正如



(a) 2个基站有NLOS情况下
(a) There are two NLOS base stations



(b) 3个基站有NLOS情况下
(b) There are three NLOS base stations

图例: — LCC-rwgh — A-rwgh — D-rwgh — Chan
— Chan+Taylor — Chan+Taylor加权

图7 系统误差标准差为1情况下各算法性能比较
Fig.7 Algorithm performance comparison when the standard deviation of system error is 1

前文所分析，由于 D-rwgh 算法会对基站数为 3 的组合进行额外的权重赋值，能够更精确地剔除 NLOS 基站，减少 NLOS 误差，所以相较于 A-rwgh 算法，D-rwgh 算法的定性能依然最优。

5 结束语

本文提出一种 D-rwgh 组合位置估计算法。该算法基于最小残差原则并结合 Chan 算法对不同基站组进行位置求解，在保证归一化残差递减的情况下，选定每基站数相同情况中归一化残差最小的基站组合，并将归一化残差的倒数赋为该基站组合定位结果的权重，最后对所有基站组合的定位结果

进行加权得到最终的位置估计值。本文分别在全 LOS 基站、全 NLOS 基站以及 LOS-NLOS 混合基站的环境下进行多次仿真实验，将 D-rwgh 算法与 Chan 算法、Chan-Taylor 算法、Chan-Taylor 加权算法、A-rwgh 算法以及 LCC-rwgh 算法进行对比。仿真结果表明：本文算法在 LOS 环境下定位精度高，并且能够有效抑制 NLOS 误差，提高 NLOS 环境下定位的精度，满足地铁施工环境下对于人员及重要物资的实时定位需求。

参考文献

- [1] 刘肖婷. 基于 DWC PCIE Core 的数据传输系统设计 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(1): 26-29, 46.
Liu Xiaoting. Design of Data Transmission System Based on DWC PCIE Core [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(1): 26-29, 46.
- [2] 袁廷瑞, 熊浩, 路晓彤, 等. 高速铁路长大隧道 GSM-R 网络冗余组网方案分析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(1): 36-41.
Yuan Tingrui, Xiong Jie, Lu Xiaotong, et al. Analysis of GSM-R Redundancy Networking Scheme for Long Tunnel of High Speed Railway [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(1): 36-41.
- [3] 白雪. 轨道交通 LTE 系统等保接入方案及实现 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(1): 92-97.
Bai Xue. Grading Protection Access Scheme and Implementation of Rail Transit LTE System [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(1): 92-97.
- [4] 张晓东, 陈延春, 陈铮. CTCS-3 级列控系统无线超时 GSM-R 电台 SIM 卡故障分析及解决措施 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(1): 52-55, 87.
Zhang Xiaodong, Chen Yanchun, Chen Zheng. Fault Analysis and Solutions of GSM-R Radio SIM Card with Wireless Timeout in CTCS-3 Train Control System [J]. Railway Signalling & Communication

- Engineering, 2023, 20(1):52-55,87.
- [5] 赵华伟, 魏子越, 张炳森, 等. 排队论在地铁自动售检票系统中的应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(1): 78-81, 95.
Zhao Huawei, Wei Ziyue, Zhang Bingsen, et al. Application of Queuing Theory in Automatic Fare Collection System for Subway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1):78-81, 95.
- [6] 黄晓冬, 秦勇. 面向“一带一路”的昆明东编组站作业措施优化 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(2): 85-88.
Huang Xiaodong, Qin Yong. Optimizing Operational Measures of Kunming East Marshalling Yard for “Belt and Road Initiative”[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(2):85-88.
- [7] 马兰, 燕翔, 王鹏, 等. 一体化出行服务平台架构及实现分析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(3): 33-38.
Ma Lan, Yan Xiang, Wang Peng, et al. Analysis of Architecture and Implementation of Integrated Travel Service Platform[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(3):33-38.
- [8] 宋绍华. 铁路信号系统区域边界信息安全风险评估 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(4): 38-42.
Song Shaohua. Risk Assessment of Regional Boundary Information Security of Railway Signal Systems[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(4):38-42.
- [9] 贾鸿, 马樱, 张祺. 25 Hz 相敏轨道电路与 ZPW-2000A 结合处的逻辑检查故障分析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(3): 101-105.
Jia Hong, Ma Ying, Zhang Qi. Fault Analysis of Logic Check at Junction of 25 Hz Phase Sensitive Track Circuit and ZPW-2000A Track Circuit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(3):101-105.
- [10] 施篇. 巴西圣保罗 13 号线 ATC 车载设备系统
控速防护逻辑研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(4): 100-104.
Shi Pian. Speed Control and Protection Logic of ATC Onboard System of Sao Paulo Line 13 of Brazil[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(4):100-104.
- [11] Reed J H, Krizman K J, Woerner B D, et al. An Overview of the Challenges and Progress in Meeting the E-911 Requirement for Location Service[J]. IEEE Communications Magazine, 1998, 36(4):30-37.
- [12] Anagnostopoulos T, Ntalianis K, Skourlas C, et al. ToA Estimation System for Efficient Cycling in Smart Cities[C]//Proceedings of the 21st Pan-Hellenic Conference on Informatics. Larissa Greece, ACM, 2017:1-4.
- [13] Chan Y T, Ho K C. A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(8):1905-1915.
- [14] 张龙, 任修坤, 王盛, 等. 基于凸优化方法的室内 NLOS 误差抑制算法 [J]. 信息工程大学学报, 2020, 21(3): 279-284.
Zhang Long, Ren Xiukun, Wang Sheng, et al. Indoor NLOS Error Mitigation Algorithm Based on Convex Optimization Method[J]. Journal of Information Engineering University, 2020, 21(3):279-284.
- [15] 谢雪, 王浩祥, 邓平. 一种基于单次散射体定位的 TOA/AOA 混合定位算法 [J]. 电讯技术, 2022, 62(1): 110-115.
Xie Xue, Wang Haoxiang, Deng Ping. A TOA/AOA Hybrid Location Algorithm Based on Single Scatterer Localization[J]. Telecommunication Engineering, 2022, 62(1):110-115.
- [16] Chen Pichun. A Non-Line-of-Sight Error Mitigation Algorithm in Location Estimation[C]//WCNC. 1999 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (Cat.No.99TH8466). New Orleans, LA, USA. IEEE, 1999:316-320.

(下转 128 页)

神经网络融合多源信息的列车测速方法研究

陆海亭¹, 孙春洋¹, 王亮军¹, 付保明², 陈林山¹

(1. 南京交通职业技术学院, 南京 211188;

2. 苏州市轨道交通集团有限公司, 江苏苏州 215006)

摘要: 地铁列车自主测速定位的准确性与可靠性是保障其行车安全和效率的先决条件。在目前常用地铁列车测速方法的基础上, 研究传感器的选型以及相应多源数据融合算法, 提出运用神经网络融合光电式传感器、多普勒雷达传感器以及加速度计的地铁列车智能测速方法。该方法充分利用神经网络的自学习、自适应、非线性的能力, 选用光电式传感器、多普勒雷达、加速度计这三种传感器的实测数据作为其输入, 选取RBF神经网络智能融合快速寻优, 自适应地调整它们的实测数据权重, 从而得到地铁列车的实时速度值, 以期达到进一步提高列车测速的精确性与可靠性的目的。

关键词: 测速方法; 多源信息融合; RBF神经网络; 地铁列车

中图分类号: U284.48+1

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0090-06

Research on Train Speed Measurement Method Based on Multiple-source Information Fusion Using Neural Network

Lu Haiting¹, Sun Chunyang¹, Wang Liangjun¹, Fu Baoming², Chen Linshan¹

(1. Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, China)

(2. Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., Suzhou 215006, China)

Abstract: The accuracy and reliability of autonomous speed measurement and positioning for subway trains are prerequisites for ensuring their driving safety and efficiency. This paper builds on the commonly used speed measurement methods for subway trains, and studies the selection of sensors and corresponding algorithms for multi-source data fusion. On this basis, it proposes an intelligent speed measurement method for subway trains using artificial neural networks and combining photoelectric sensors, Doppler radars and accelerometers. The proposed method fully utilizes the self-learning, adaptive, and non-linear capabilities of artificial neural networks. It uses the measured data from three types of sensors, i.e. photoelectric sensors, Doppler radars and accelerometers as its input. It utilizes RBF artificial neural networks for intelligent fusion and rapid optimization. Thus, the weights of the measured data from these sensors are adaptively

收稿日期: 2023-12-03; 修回日期: 2024-05-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1600700); 南京交通职业技术学院重点科研项目(JZ2204)

第一作者: 陆海亭(1979—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 交通信息工程及控制, 邮箱: 495144219@qq.com.

adjusted to obtain the real-time speed values of subway trains, to achieve the goal of further improving the accuracy and reliability of train speed measurement.

Keywords: speed measurement method; multiple-source information fusion; RBF nerve network; subway train

1 概述

列车实际运行速度的测量是列车速度控制的先决条件。列车测速是实时测量列车在轨道上的运行速度,其主要目的是速度防护和列车定位。速度防护是通过车载测速装置将实际速度上传给车载列车自动防护(ATP)子系统,并与紧急制动速度曲线对照,一旦列车实际速度超过紧急制动速度,车载ATP立即实施制动;列车定位是依靠车载测速装置和布置在轨道中央的点式应答器(信标)配合获得列车实时位置信息,车载测速装置根据每时每刻行驶速度值计算出列车走行距离,应答器通过报文提供绝对位置坐标,经过计算得出列车在线路上的准确定位,并不间断地将列车实时位置通过区域控制器上报至中央控制器。中央控制器根据该车停车位置或与前车的相对位置和相对速度,通过一定的算法计算给出该车的移动授权,以此实现列车在线路上安全、高效运行。

《智慧城轨发展纲要》指出在基于通信的列车控制(CBTC)已经普及的情况下,新一代列车控制技术发展方向应该是系统更加智慧并最终能够实现列车的自主控制。属于下一代列控系统范畴的基于车-车通信的列车自主运行系统(TACS)对列车测速定位的准确性和可靠性有更高的要求。多传感器融合测速成为目前列车自主测速技术的重点研究方向。

列车测速传感器种类繁多、性能各异。常见的列车传感器有测速电机(又称车轮脉冲发生器,WIG)、光电式传感器(又称编码里程计,OPG)、霍尔式传感器(HES)、多普勒雷达传感器(DRS)、加速度计(ACC)、全球导航卫星系统(GNSS)。每种传感器都有其固有的优势和不足,无法满足CBTC系统高可靠精确安全定位的要求,因此,需

要采用多传感器信息融合的方式进行列车速度测量。由于地铁列车主要行驶在地下隧道环境,利用全球卫星导航系统的卫星测速方法对于地铁列车测速处于失效状态。目前,CBTC使用了具有互补和冗余特性的两种传感器,例如,采用OPG与多普勒雷达相结合、HES与多普勒雷达或者OPG与加速度计等两源数据信息相结合等技术方案。它将两源信息进行组合处理,得到较为精确、可靠的测速结果,可以保证列车运行的安全高效。多传感器信息融合是将多种传感器数据进行互补、融合,获得对某一对象的一致性描述。它不仅可以实现同类型信息的互补和冗余,对故障单元进行隔离,还可以获得大范围的被测对象信息,提升系统的可信度。故多源信息融合方法具有高精度性、高可靠性、强冗余性的特点。因此,从进一步提高列车自主测速定位精确性和可靠性角度出发,将融合测速信息从两源拓展到三源及以上很有必要。

地铁列车自主测速运用“扬长避短、优势互补、融合运用”策略的多传感器融合方案涉及到两方面:合理选用测速传感器与科学运用信息融合算法。信息融合算法主要分为基于人工智能的算法、基于量测信号数值的算法、基于统计学习的算法和基于不确定度的算法。具体算法主要包括加权平均法、K平均聚类、卡尔曼滤波、神经网络、专家系统、模糊逻辑和贝叶斯规则等。目前,利用加权平均法、卡尔曼滤波融合多种传感器研究较多,而使用人工神经网络进行数据有机融合很少。赵悦彤提出了基于联邦卡尔曼滤波算法的列车三源(OPG、雷达和加速度计)测速信息融合算法,利用标准卡尔曼滤波设计子滤波器和主滤波器模块分别实现降低传感器白噪声干扰,达到最优估计出运行状态的目的。但是,卡尔曼滤波算法较为复杂,而且受线性系统

及白噪声要求的限制。基于卡尔曼滤波的信息融合技术在解决实际应用问题时，总是存在着理想条件下系统模型精确度与现实中系统复杂的差异和变化的矛盾。

研究人员在卡尔曼滤波基础上提出了不同的改进算法以适应实际系统的真实状态。近年来，针对卡尔曼滤波发散、降维和精度较低等问题，其他领域研究人员基于神经网络、模糊理论等方法提出了智能多源信息融合技术，对组合系统模型、噪声模型及增益矩阵进行调整，在不损失状态估计精度的前提下，抑制了滤波发散、增加了系统鲁棒性。

理论上，多源信息融合测速系统状态卡尔曼滤波估计的本质是挖掘测速系统输入和输出之间的特定映射关系。神经网络尤其适用于多源信息融合等非线性系统的识别控制、预测估计。采用神经网络进行多源信息融合并进行测速系统状态估计的思路与卡尔曼滤波原理类似，通过神经网络算法将多传感器的输入信息映射（相当于滤波、变换）为系统输出的速度参数等运动状态信息以取得更好的效果。

本研究选用神经网络融合多源信息，从优选合适类型的传感器及数据融合算法两个方面着手，借助于神经网络算法的多输入、非线性映射、多输出等特点，尤其是自学习的特长，对多源传感器的数据加以智能融合，以提高地铁列车测速的精确性、可靠性。

2 方法

神经网络模拟生物神经系统，由许多可以并行运算的处理单元连接构成。单个神经元结构简单、功能有限，但是当大量神经元构成一个大规模、非线性、分布式、并行处理网络系统后，它可以分布式存储信息、协同处理信息，具有集体运算能力和自适应学习能力，具备较强的鲁棒性和容错性。因此，完全可以利用神经网络融合多源测速信息实现智能测速，主要思路是根据地铁列车运行环境和特点，优选合适的传感器作为神经网络输入，再利用神经网络优秀的非线性映射特性及自学习能力，

通过大量的数据训练，间接调整输入的多种传感器的实测数值权重，即经过智能融合后输出地铁列车的实时速度。

2.1 输入层

在输入层选用合适数量和类型的传感器。理论上，神经网络输入参数越多越好。从工程实用角度考虑，本研究输入层只使用3种数据源。OPG具有测速范围广、工作适应温度宽、使用寿命长的优点，在列车测速测距单元中使用最多，但是车轮空转或打滑时测速失效。西门子、阿尔斯通、卡斯柯、安萨尔多和北京交控等各大信号厂商均使用它作为主用传感器。多普勒雷达测速传感器在轨道交通测速领域中经常作为辅助传感器。OPG速度传感器和雷达测速能做到很好的优势互补。地铁列车高速行驶的过程中，车轮发生空转、打滑的可能性较大，导致OPG精度降低，但此时多普勒频移效应突出，雷达的测速精度较高；列车低速时空转、打滑工况很少，OPG测速精度较高，但雷达在低速时因多普勒频移效应不明显，这时其测速效果不好。OPG和雷达测速的原理不同且误差来源不同，因此互不相干，所以可以进行优势互补，用以实时测量列车速度值。加速度计属于惯性导航装置，它与OPG、雷达传感器工作原理完全不同，用以测量列车加速度值，对加速度进行积分能得到速度值，其随机误差主要由固有的测量误差和列车震动引起，基本不受空转打滑影响；除了测速之外，还可以检测车轮空转、打滑等异常状态，还可作为备用传感器使用。因此，可将它们联合使用，所测数据具有互补性。

综上，从技术经济性和工程实用性统筹考虑，输入层传感器选用OPG、多普勒雷达及加速度计。

2.2 隐含层

隐含层选用简单易行高效的人工神经网络激活（传递）函数类型处理输入层的数据。与其他类型的神经网络相比，径向基函数（RBF）神经网络隐含层只有一层，网络结构简单，训练难度不高，拓扑结构紧凑，收敛速度较快，网络还具有良好的泛化能力。这些优点使得RBF神经网络基本可以对任何

非线性函数实现逼近。从工程简便、快捷性角度考虑, 选用 RBF 神经网络。

RBF 神经网络是一种由输入层、隐含层和输出层构成的前向型神经网络。其第一层为输入层, 包括多个输入节点, 网络输入的维数决定了输入节点的数量; 第二层为隐含层, 该层是整个网络结构中最关键的一层, 它的节点数量与研究对象的复杂程度有关, 节点的传递函数使用非线性径向基函数; 第三层为输出层, 在输出层中输出节点的数量和输出的维数相等, 每一个输出节点的输出值是隐含层中节点输出值经过线性加权得到的结果。

依照上文 2.1 章节, 输入层有 3 维数据。OPG、雷达实测的列车速度数据、加速度计实测的列车加速度数据作为 3 种独立的数据源输入到 RBF 神经网络输入层中。

收集的列车历史速度数据作为训练样本 (包括训练集和验证集)。选用高斯函数作为隐含层的激活函数 (非线性函数), 如公式 (1) 所示。

$$\phi(x, c) = \exp\left(-\frac{\|x - c\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

其中, x 为输入值向量; c 为中心值; σ 为方差。RBF 神经网络的训练流程如下。

首先, 确定隐含层节点的数量, 节点个数过多时, 会导致 RBF 神经网络结构复杂化并且会使泛化性能降低, 节点个数偏少时, 神经网络拟合函数的效果不佳, 出现欠拟合的后果。对于隐含层节点的数量 p 采用经验公式, 如公式 (2) 所示。

$$p = 2n + a \quad (2)$$

其中, n 为输入层节点数量; a 为 0 到 10 之间的整数。

其次, 确定 RBF 神经网络学习过程涉及的 3 个参数: RBF 的中心值 c_j 、方差 σ_j 、以及隐含层和输出层之间的连接权重 ω_{ij} 。其中 c_j 与神经网络的分类能力和泛化性能息息相关, 使用梯度下降法对基函数中心值 c_j 进行确定。对于所有的训练样本空间而言, Φ_j 和预期输出 Y 均是已知的, 确定了 c_j 后, 使用最小二乘法得出 ω_{ij} 。

2.3 输出层

输出层用于输出测速结果。OPG 与雷达测得的实时速度、加速度计测得的实时加速度这 3 种传感器数据形成 3 维输入数据, 隐含层中利用 RBF 神经网络训练学习确定的激活函数的参数及权重值, 输出层输出 1 维速度数据, 即地铁列车实时速度。

2.4 技术方案

本测速方法的整体技术方案如图 1 所示。采用 OPG、雷达、加速度计这 3 个传感器的实测数据作为神经网络输入层的输入特征, 隐含层激活函数则充分利用 RBF 神经网络的非线性映射特性及自学习能力, 通过大量的数据训练, 用于间接调整输入的 3 种传感器的实测数值权重, 最后在输出层输出结果, 即地铁列车的实时速度数据。神经网络能对各传感器的数据信息进行融合处理, 以进一步提高测速精确性和可靠性。

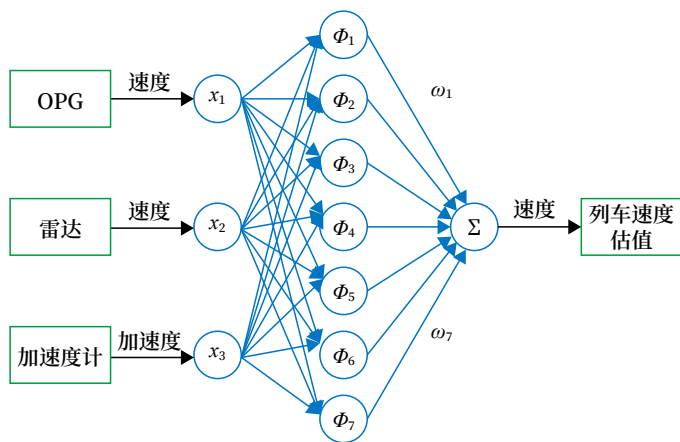


图1 RBF融合三源数据的地铁列车智能测速技术方案
Fig.1 Technical scheme of intelligent speed measurement for subway trains based on three-source information fusion using RBF nerve network

技术方案主要步骤如下。

1) 输入选择: 分别采用 OPG 与雷达的实测速度、加速度计的实测加速度数据, 这三维数据作为 RBF 神经网络算法的输入特征。

2) 网络训练: RBF 神经网络的训练学习过程分为两个阶段。第一阶段, 根据所有的输入样本确定隐含层节点数量及各节点的 c_j 、 σ_j 这两个参数。第二阶段, 在确定好隐含层的参数后, 根据样本数据利用最小二乘法计算输出层的权值 ω_{ij} 。在完成第

二阶段的训练学习后，再根据样本数据校正隐含层与输出层间的权重进一步提高神经网络的精度。

3) 输出结果：根据样本训练得出输入层的权重，对应于各种传感器的实测数据权重融合相加，从而得到速度（或位移）数据。

3 探讨

运用多源信息融合处理方法对各类传感器测量的数据进行融合处理，能提高测速定位系统的精确性及可靠性。人工神经网络具有多输入、多输出、自学习和自组织的能力，它能够很好地映射非线性特征，在特定条件下可以获得较高的估计精度；且神经网络不需要矩阵求逆和迭代逼近，计算时间明显少于卡尔曼滤波算法，不仅有利于提高测速的精确性、可靠性，还有利于提高测速实时性。

基于三源信息融合的地铁列车智能测速方法，其显著优点在于将多源信息融合技术原理和人工神经网络的优势充分有机结合。先分别通过对 OPG、雷达、加速度计传感器的实时测量，获得 2 维独立的速度实测值和 1 维加速度实测值数据，分别作为人工神经网络的输入；再采用人工神经网络智能融合算法，对 3 种传感器的速度和加速度实测值的权重系数进行自适应调整（间接调整），最终实现地铁列车实时测速结果的智能精准估测。

增加加速度计除了提高测速精确性之外，还提高了其可靠性。OPG 和雷达可以直接测出列车瞬时速度，分别适用于列车低速和高速运行的工况，互补性强；而加速度计可以直接测出列车瞬时加速度，间接得到列车的瞬时速度值（对加速度值进行积分运算），间接得出的计算速度和 OPG、雷达测得的直接速度有很好的冗余性。

此外，本方法还可以进一步拓展。首先，利用神经网络具有多输入、多输出的特点，在不改变 3 种传感器的数据情况下，除了输出速度数据外，还可以输出位置数据，甚至还可以输出速度、位置和加速度数据。其次，融合算法采用了 RBF 人工神经网络，也可以尝试其他类型的神经网络，如多层神经网络等；还可以探讨机器学习、粒子群算法等在

列车测速方面的应用。再次，传感器优化组合上，选取其他多种类型传感器的多种排列组合，对比测速效果。但是，设计新型测速方法需注意融合算法与多传感器数据的适应性与协调性。最后，三源传感器在列车头尾两端采取冗余的方式，测速单元互为热备，可以提高测速的可靠性。在工程经济成本允许的情况下，可以将输入传感器种类由三源增加到四源及以上，进一步提高测速定位精确性和可靠性。

4 结语

本文提出的方法结合地铁列车的运行环境特点，主要针对选择合适的传感器种类和选用恰当的融合算法这两方面问题开展了研究。选用合适的传感器方面，充分利用 OPG、雷达各自的优点，并弥补各自的缺点，利用加速度计通过冗余互补；融合算法方面，因加速度与速度密切相关性，直接测得 3 种传感器的速度及加速度测量值后，利用神经网络强大的非线性映射及自学习能力，进而直接获得 3 种传感器测量数据的权重值，相当于对 3 个速度测量值进行间接权重分配，进而得到更加精确可靠的地铁列车实时速度数据。

参考文献

- [1] 郜春海. 基于通信的列车运行控制 (CBTC) 系统 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [2] Muniandi G, Deenadayalan E. Train Distance and Speed Estimation Using Multi Sensor Data Fusion[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2019, 13(4): 664-671.
- [3] 孙晓光. 一种适用于中低速磁浮的测速测距系统研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2018, 15(9): 67-71.
Sun Xiaoguang. Research on Speed and Distance Measurement System of Medium-Low-Speed Maglev Train[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2018, 15(9): 67-71.
- [4] 梁波, 戴熙昌. 基于 SCADE 的多传感器列车测速定位系统模型设计 [J]. 控制与信息技术, 2023(5): 113-120.

- Liang Bo,Dai Xichang.Model Design of Multi-Sensor Train Speed Measurement and Positioning System Based on SCADE[J].Control and Information Technology,2023(5):113-120.
- [5] 江坤, 杨迪飞, 刘佳. 轻轨CBTC信号与DTC信号多制式兼容方法研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(6): 71-76.
- Jiang Kun,Yang Difei,Liu Jia.Research on Multi-Standard Compatibility Method of Light Rail CBTC and DTC Signal[J].Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(6):71-76.
- [6] 夏青. 应答器与测速组合定位在地铁中的应用[J]. 铁路通信信号工程技术, 2012, 9(2): 50-53.
- Xia Qing.Application of Balise and Speed Measuring Device Combined for Train Positioning in Metro[J].Railway Signalling & Communication Engineering, 2012, 9(2):50-53.
- [7] 谭星, 张睿兴. 城轨系统中几种常用测速方法的误差与应用分析[J]. 铁道通信信号, 2012, 48(1): 60-63.
- Tan Xing,Zhang Ruixing.Errors Analysis of Common Speed Measurement Methods in Urban Rail Transit System and Their Application[J]. Railway Signalling & Communication, 2012, 48(1):60-63.
- [8] 宋剑伟. 城市轨道交通信号系统的典型测速定位方案比较[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(4): 26-29.
- Song Jianwei.Comparison of Urban Rail Transit Signaling System Train Velocity Measurement and Positioning Schemes[J].Urban Mass Transit, 2021, 24(4):26-29.
- [9] 蔡焯, 王长林, 林颖. 基于轮轴速度传感器和加速度传感器的混合测速测距算法研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(3): 32-37.
- Cai Xuan,Wang Changlin,Lin Ying.Mixed Speed and Distance Ranging Algorithm Based on Odometer and Accelerometer[J].Urban Mass Transit, 2015, 18(3):32-37.
- [10] 顾蔡君. 城市轨道交通列车空滑检测的融合算法研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16(7): 55-60.
- Gu Caijun.Research on Fusion Algorithm for Train Skidding Detection in Urban Rail Transit[J].Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16(7):55-60.
- [11] 贾鹏. 基于SVM的列车速度融合仿真测试平台设计[J]. 铁路计算机应用, 2018, 27(4): 59-62.
- Jia Peng.Train Speed Integration Simulation Testing Platform Based on SVM[J].Railway Computer Application, 2018, 27(4):59-62.
- [12] 孟凡江, 尹逊政. 一种基于多传感器融合的冗余测速测距系统设计[J]. 铁路计算机应用, 2018, 27(1): 46-50.
- Meng Fanjiang,Yin Xunzheng.Redundant Speed Measuring and Ranging System Based on Multi-Sensor Fusion[J].Railway Computer Application, 2018, 27(1):46-50.
- [13] 杨岗, 林颖. 基于多传感器的信息融合列车定位算法研究[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(5): 42-47.
- Yang Gang,Lin Ying.Train Positioning Method Based on Multi-Sensor Information Fusion[J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55(5):42-47.
- [14] 成庶, 刘畅, 宋丽伟, 等. 基于多源信息融合的磁浮列车组合式测速定位方法[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(8): 136-140.
- Cheng Shu,Liu Chang,Song Liwei,et al.Maglev Train Integrated Positioning and Speed Measuring Method Based on Multi-Source Information Fusion[J].Urban Mass Transit, 2022, 25(8):136-140.
- [15] 方文轩, 丛佃伟. 卫星/惯性/视觉组合导航多源融合技术现状及发展[J]. 无线电工程, 2022, 52(10): 1813-1820.
- Fang Wenxuan,Cong Dianwei.Status and Development of Multi-Source Information Fusion Technology for Satellite/Inertial/Visual Integrated Navigation[J].Radio Engineering, 2022, 52(10):1813-1820.

城市轨道交通多节点线网云平台方案研究

刘国栋, 李金龙

(北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

摘要: 多种类型的云边协同方案逐步在城市轨道交通领域落地实施, 但大部分上线项目依旧存在的资源利用率低、基础性能过剩等问题。为解决以上问题, 提出一种优化设计思路, 通过构建具备中心层、线路层两层扁平化架构的多节点线网云平台, 剥离中心层与线路层业务分工, 中心层负责线网运行调度指挥、地铁数据资产汇集及服务以及线网级智慧应用基础支撑, 线路层打破各线路间壁垒, 围绕换乘站构建边缘节点, 为线路业务系统提供基础资源, 满足线路侧实时业务运行需求。通过两层架构的设计, 实现线网与线路业务分离, 在提高云架构实时响应能力的同时, 大幅度降低线网数据中心的建设规模。

关键词: 城市轨道交通; 云平台; 云边协同; 边缘计算

中图分类号: U285.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0096-07

Research on Cloud Platform Solution for Multi-node Network of Urban Rail Transit

Liu Guodong, Li Jinlong

(Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd. Beijing 100037, China)

Abstract: Although a variety of cloud-edge collaboration solutions have been gradually implemented in the field of urban rail transit, most projects that have gone online still have such problems as low resource utilization and excess basic performance. To solve these problems, this paper proposes the optimized design idea of constructing a cloud platform for multi-node line network with a two-tier flat architecture consisting of a central layer and a line layer, to eliminate the division of work between the central layer and the line layer. Thus, the central layer takes charge of the dispatching and commanding of the line network, the collection of and service for subway data assets, as well as the basic support for intelligent applications at the network level. Meanwhile, the line layer breaks the barriers among various lines, builds edge nodes around transfer stations, provides basic resources for service systems of these lines, and meets the real-time service operation needs at the line side. The two-layer architecture design achieves the separation of network and line services. It also improves the real-time

收稿日期: 2024-01-05; 修回日期: 2024-05-13

基金项目: 武汉城市轨道交通网络信息化建设示范工程项目 (PJ04443)

发明专利: 2023 年发明专利 (ZL202210942527.0)

第一作者: 刘国栋 (1987—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 轨道交通信息系统, 邮箱: 376542507@qq.com。

response capability of the cloud architecture, and greatly reduces the construction scale of the network data center.

Keywords: urban rail transit; cloud platform; cloud-edge collaboration; edge computing

1 概述

将地铁业务系统计算、存储、网络资源云化是目前智慧城轨、绿色城轨建设数字底座的主流建设思路。相较于传统架构，云计算的应用使得各业务系统不再单独设立业务服务器，而是依据实际需求，由云平台划分相应的计算资源池和存储资源池。云计算的运用有望实现通用服务器类设备的集中部署和资源整合共享，进而提升硬件资源利用率，降低项目投资和运维成本。此外，云计算在维持业务系统原有架构的基础上，通过高可用、双中心等技术手段，提升了业务的运行稳定性。参考全国各城市地铁云平台建设方案，可归纳为以下4种实施方式。

1) 方案一：中心集中云平台+传统模式车站。该方案将系统中央级云化处理；而线路车站、段、场维持各业务传统架构。

2) 方案二：中央资源集中云平台+车站后备云节点。该方案在中心集中设置业务中央级、站段级所需云化资源，站段等位置仅部署关键业务降级所需设备。

3) 方案三：集中设置中央级+站站设置边缘云。线路业务中央级由控制中心集中云平台承载，线路各车站设置边缘云节点承载车站各业务系统。

4) 方案四：集中设置中央级+集中站设置边缘云。该方案中央级与方案三一致，车站级选择信号集中站设置边缘云节点，由一个节点承载多个车站业务系统。

以上4种方案为目前在建或规划建设城市主流技术方案，其中方案一、方案二中心集中化的云计算和大数据平台带来资源集约、成本下降、数据集中等优势。同时因资源集中设置与就地设备距离过远也引申出实时响应能力弱、延迟高、传输网络要

求高等问题。此类问题对传统业务运行场景影响较小。但随着中国城市轨道交通协会《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》以及《绿色城轨发展实施方案》的发布，各城市陆续开展智慧城轨、绿色城轨建设工作，这类工作大量依赖于车站就地设备实时处理和信息反馈，中心集中型云平台建设方案已逐渐不能满足日益增加的智慧车站业务运行需求。边缘计算技术的引入增强了车站侧实时处理能力，较好地适应了业务系统站段、中心运行的需求。方案三、方案四在车站侧设置边缘节点，将实时性要求高的业务本地化部署，降低延迟、提高响应能力。而对于业务实时性需求低、算力需求大、大数据能力依赖强的业务中心部署，将分析后结果下发至站、段、场。

云边协同的部署方案已经具备满足智慧车站边缘侧业务实时响应的能力，同时也能应对大算力、大数据相关联分析的场景，逐步成为主流技术方案。一些城市也由集中云平台逐步转变为云边协同的混合架构。但结合已开展建设城市的使用情况，云边协同方案还存在进一步优化空间，边缘云的部署可从线路侧站站设置逐步调整为集中站设置，而结合城轨业务边缘侧资源需求，进一步优化边缘云部署方式，基于云边协同的城轨生产融合平台优化边缘云方案架构，旨在充分利用云平台技术优势，在充分保障地铁业务运行前提下，降低系统建设成本、提高整体资源利用率，并通过这一手段大规模降低控制中心、车站机房规模。

2 系统部署现状

2.1 传统车站设备

传统车站的弱电系统涵盖了多个专业领域，如综合监控系统（ISCS）、列车自动监控系统（ATS）、自动售检票系统（AFC）、视频监控系统（CCTV）、

乘客信息系统 (PIS)、门禁系统 (ACS) 以及安防等。这些专业系统设备主要由服务器、交换机、工作站和信息安全设备构成, 分布于通信机房、信号机房、综合监控机房等专业机房内。为确保行车安全的关键业务稳定运行, 部分关键业务采用主/备冗余方式进行保障。各业务系统按线路单独在线路中央级冗余设置中央级软件、服务器和接口设备等设施; 同时线路车站设置冗余车站级软件、服务器、接口设备等设施。传统的建设模式, 车站业务相对固化, 在没有需求增长点的背景下导致各专业资源的浪费, 部分服务器设备的 CPU 使用率不足 5%、内存使用率低于 15%。

此外, 设备用房如综合监控机房、AFC 机房、专用通信机房、站台门机房、信号机房和公安通信机房等车站用房以及配套配电、通风、消防等独立分散, 不仅使车站用房面积增加、建设成本高, 还造成耗能大的问题。

2.2 云平台模式车站设备

随着云计算技术在轨道交通领域铺开使用, 同时结合智慧车站等服务提升业务对边缘算力日益增大的需求, 各项业务逐步采用云架构部署模式, 为站级弱电系统业务提供基础设施服务。但结合武汉、西安、呼和浩特和太原等云平台先行城市建设现状, 业务系统大多仍按物理机部署情况提交云资源申请,

软件、管理和资源占用等情况并未跟随云计算的普及而做出适应性更新优化。从而导致实际基础设施由物理机变成虚拟机, 而资源利用率仍与传统模式下相近。项目建成后难以发挥云平台技术优势, 对于系统架构、资源规模、土建成本和配套设施等效益提升极其有限。

3 总体架构设计

本次方案整体框架分为线网节点、线路节点和传输网络 3 部分, 所有节点均由统一云管平台管理维护。线网节点设置于线网运营指挥中心内, 用于承载线网业务系统、大数据平台等线路运行非关键业务, 负责各线路协调、调度、应急以及新兴业务数据集成与二次开发, 从线网视角统筹管理地铁线路运营生产工作, 在重大故障状态下, 线网节点离线不影响各线路正常运行。线路节点则作为线路业务承载单元, 分散于各线路关联车站。线路节点内设置减量化运营调度人员, 负责应急模式下线路的调度管理工作。传输网络可利用线路传输通道, 无需单独建设上层骨干网, 结合网络节点、车站节点布置方式, 打造互联互通双环网结构, 成本更低、组网手段也更灵活。其逻辑架构如图 1 所示。

3.1 线网节点

线网节点设置于线网运营指挥中心内, 其由资

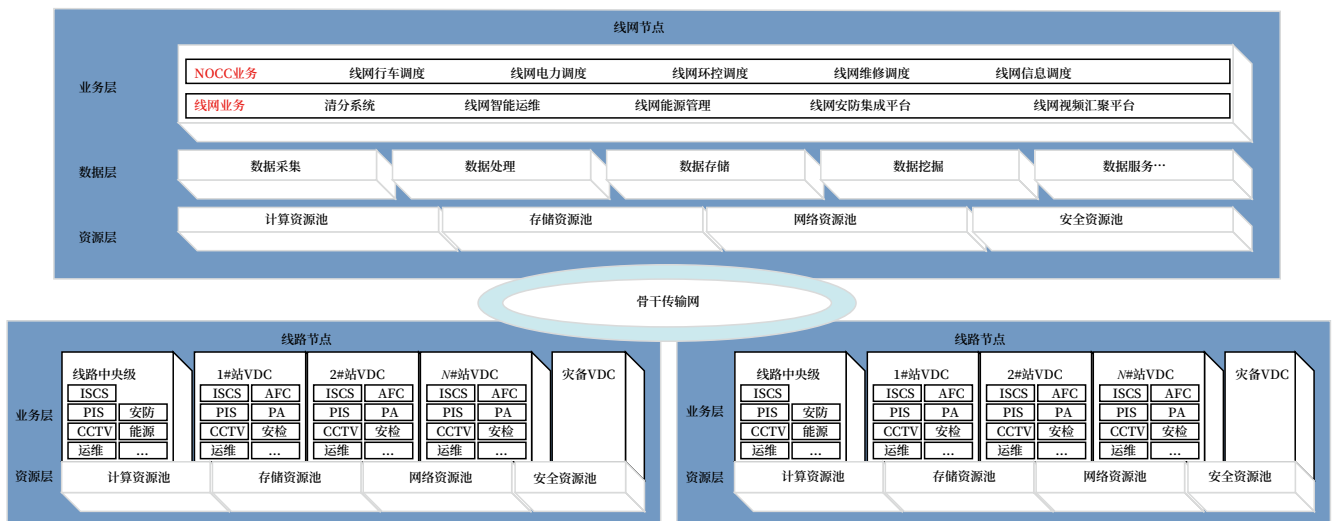


图1 多节点线网云平台方案逻辑架构
Fig.1 Logical architecture of cloud platform solution for multi-node line network

源层、数据层和业务层等部分构成。资源层为节点内业务提供基础设施服务，由计算资源池、存储资源池、网络资源池、安全资源池和云桌面等基础设施构成；数据层为线网节点内各业务提供数据的汇聚采集、融合治理、存储计算、挖掘分析和应用赋能等数据综合服务，实现各系统生产数据、运营核心主数据、领域知识数据的梳理、提炼、集成、分析、关联、挖掘和重构，打破各线路、各业务系统间数据孤岛，实现全业务范围内数据共享以及数据服务的支撑；业务层为各上层业务部署区域，包含线网运营指挥业务、线网级业务以及新兴智慧管理系统，如线网行车调度、线网电力调度、线网环控调度、线网维修调度等运营调度类业务，以及清分系统、线网智能运维、线网能源管理、线网安防集成平台和线网视频汇聚平台等线网级管理业务。

3.2 线路节点

3.2.1 功能构成

线路节点侧重于支撑线路传统业务系统运行，采用高效能二层架构组建，分别为资源层和业务层。相较于线网节点将数据层轻量化设置融入资源层内，减少线路节点设备复杂度同时提升节点内业务的运行效率。单线路节点覆盖多个车站业务范围，资源层包括计算资源池、存储资源池、网络资源池、安全资源池、云桌面和接口资源等基础设施，线路节点内主节点在业务层设置线路中央级业务资源池，所有节点业务层均设置站段资源池以及关联线路灾备资源池。站段资源池按车站或者专业划分虚拟数据中心 (Virtual Data Center, VDC)，涵盖综合监控、自动售检票、乘客信息、广播、安检和安防等线路传统弱电业务，同时也支撑智慧车站管控平台、智能视频分析和智能运维等智慧车站相关新兴业务。

3.2.2 设置方式

考虑到前文城市轨道交通云平台的实施方案中方案三站站设置边缘云以及方案四集中站设置边缘云的内容，相较于传统模式已有大幅度优化，但各线路独立运行，线路间 IT 算力资源独立部署，富余算力资源无法跨线调用。当遇到灾害、国家重大节

假日等情况时，存在单一线路客流猛增，IT 算力资源包括软件运行所需硬件基础资源不足，导致系统崩溃的情况。并且设备分散会导致设备部署数量大、资源浪费、土建需求高以及建设维护成本高等问题。考虑边缘云设备部署于本线内即可满足各项业务实时性要求。本文方案优化线路节点数量，结合线网布局选点部署，在保障业务运行的前提下实现云资源集约部署、优化网络架构的目的。

以典型城市线网图为执行对象，构建一个由 1[#]、2[#]、3[#] 及 4[#] 共 4 条线路构成的线网城市，线网构成如图 2 所示。梳理模拟线网图各线路存在如下关系，1[#] 线路与 2[#]、3[#] 线路分别存在换乘站，即 1/2[#] 换乘站、1/3[#] 换乘站；3[#] 线路与 1[#]、4[#] 线路分别存在换乘车站，即 1/3[#] 换乘站、3/4[#] 换乘站；4[#] 线路与 3[#] 线路存在换乘站即 3/4[#] 换乘站。

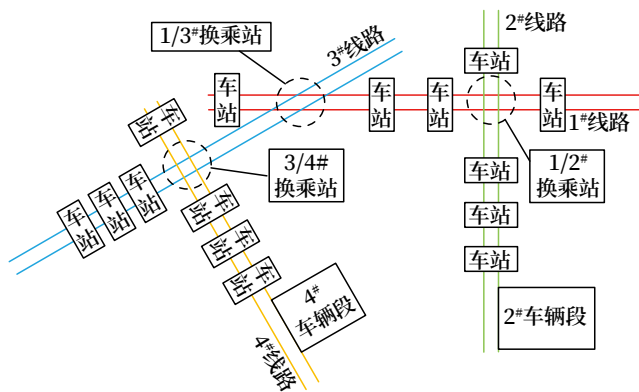


图2 典型城市线网模拟

Fig.2 Simulation of typical urban line network

线路节点是实现业务功能自治主要承载体，围绕线路换乘站设置线路节点，为本线路业务系统、智慧车站应用提供计算、存储、网络资源，线路业务系统中央级、车站级业务集中设置于节点内。当线路仅一个换乘站时，可将此换乘站设置为主节点，并在本线路车辆段内设置备节点；当线路同时有两个及以上换乘站时，可在两点同时设置线路节点，分别为线路业务提供主备资源。结合典型城市线网形式，即 1[#] 线与 3[#]、4[#] 同时有换乘关系，其中 1[#]、3[#] 具备两个换乘站，2[#]、4[#] 均只有一个换乘站，则可定义 1/2[#] 换乘站为 1[#] 线主节点，1/3[#] 换乘站为 1[#] 备节点、3[#]

备节点。3/4[#] 换乘站为 3[#] 主节点及 4[#] 主节点，同时 1/2[#] 换乘站作为 2[#] 线主节点。考虑到 2[#]、4[#] 均只有一个换乘站，则分别在 2[#]、4[#] 车辆段内设置各自备核心。以上即完成 4 条线规模线网城市边缘节点配置，节点部署如图 3 所示。

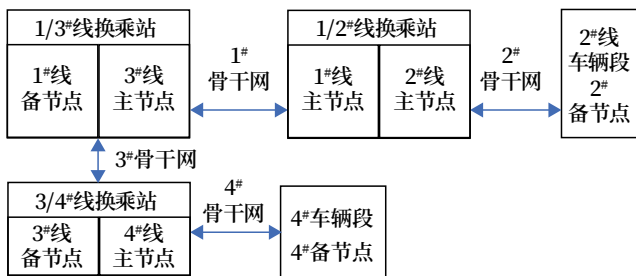


图3 节点部署示意

Fig.3 Schematic diagram of node deployment

3.3 网络构成

网络作为联通各个节点的关键组成，传统模式

下线网线路相对独立，线路建设各自线路传输网络，联通本线内站、段、场及区域控制中心，城轨线网中各节点则通过光传输网 OTN 等通信技术来实现网络互通。同线网内不同线路间网络独立导致彼此数据仅能通过线网中心实现共享，即使具备换乘关系线路间数据同步依然有较大难度。在这种层叠网络架构下，各线路资源独享不再适用于信息化手段逐渐普及的轨交领域。

本文方案从线网角度着手，统筹布局线网节点、线路节点，有别于传统网络敷设模式，本方案在换乘站增加关联车站传输节点，通过换乘站节点将线网线路传输网络互联互通，线网节点仅需联通就近车站即可实现全网域业务互通。结合典型城市线网模式，线路网络如图 4 所示。

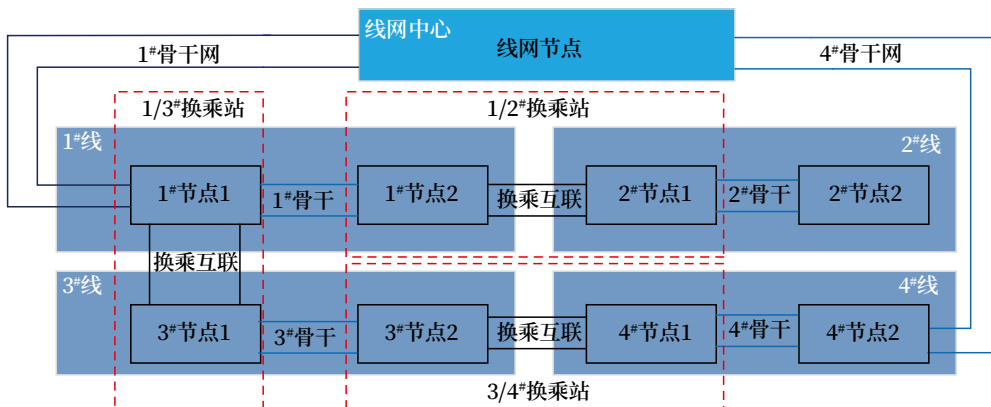


图4 典型城市组网示意

Fig.4 Schematic diagram of typical urban networking

3.4 实现状态

随着线网节点、线路节点以及网络构建完成，线网云平台也完成部署。本典型城市共部署线网节点 1 个，换乘站线路节点 3 个，车辆段线路节点 2 个。其中线网节点负责线网层面业务承载，其网络可通过任意一条线骨干网接入实现全网域网络互通。换乘站线路节点作为线路业务主承载单元，负责 1~2 条线路的主节点职能，同时也可为关联线路提供灾备节点。车辆段线路节点为单换乘线路提供灾备节点服务，考虑换乘站节点故障模式下可满足线路业务运行负载需求。典型城市多节点线网云平台联通

示意如图 5 所示。

4 实施方案

城轨建设和智慧化发展是不断迭代与持续推进的过程，宜根据当地工程现状及建设特点定制化实施。从线网规模角度出发，可将本方案实施分为初建城市、中小线网城市、大线网城市 3 种类型。

1) 初建城市。现阶段仍处于初建阶段的城市其整体线网规模上限应在 4~6 条线之间。初建期间最适于本方案的落地实施，应结合线网规划圈定线网节点、线路节点设置位置，确定线路间换乘关系。

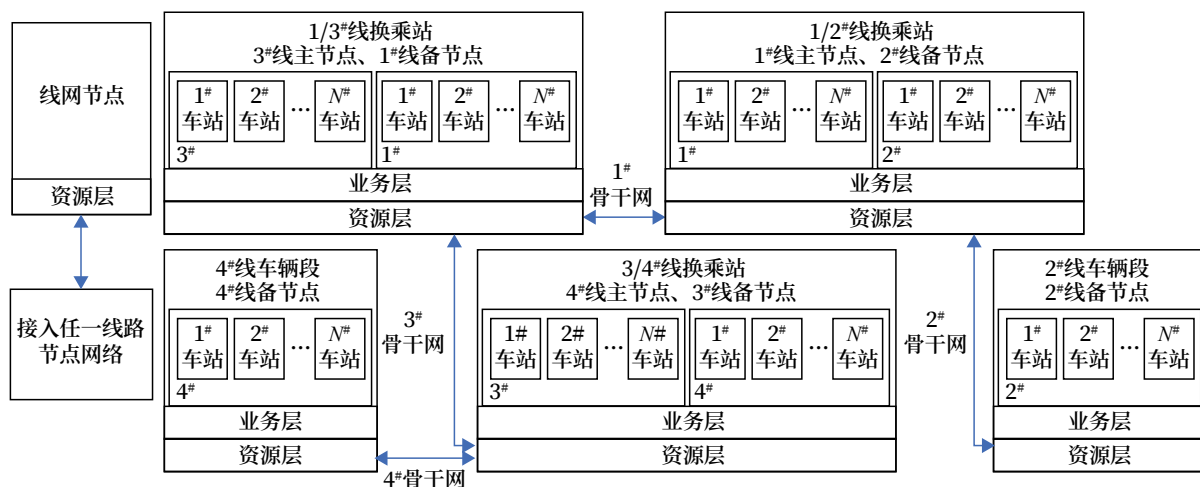


图5 线网云平台各节点联通示意
Fig.5 Schematic diagram of connection among nodes of cloud platform for line network

在集控中心设置线网节点，其容量可按线网整体规模预留。先期可结合线网规划进度分步分阶段开展建设工作。线网节点资源层按照线网业务需求建设，后续伴随新建线逐步扩容；线路节点结合线路建设时序、线路长度、换乘关系等设置，先期建设节点应预留后续线路对接接口及资源扩容能力。此模式下，后续线路可陆续纳入线网云平台内，实现线网业务一云统管。

2) 中小线网城市。此类城市线路建设已初具规模，线网节点布局需结合城市建设规划进度，若已实施线网指挥中心，可在其大修改阶段替换为线网节点模式。而线路节点可随新建线路逐步部署，先实现新建线部署工作，实现线路云架构部署。待大修改阶段逐步将线路节点植入既有线中，从而逐步实现线网云平台的整体布局。

3) 大型线网城市。对于规划30条线路以上城市，其建设、运营模式已基本稳定，若采用新型线网云平台方案则需率先开展相应建设规划工作。在二次规划阶段明确实施范围和时序，然后按照中小型线网城市模式逐步开展线网云平台部署工作。

5 结束语

多节点线网云平台方案分摊集中云平台单节点业务承载压力的同时，将部分节点下沉至线路为线路业务、智慧车站业务提供边缘化算力支撑，既满足云平台集中设置要求，也降低了传统边缘云模式下节点

设备算力过剩问题，同时大幅度降低集控中心土建规模。线网网络架构也从传统线网中心-区域中心-线路三层架构优化至线网-线路两层架构，极大降低网络复杂度，节省区域控制中心上层网成本。

本方案从技术角度具备较完善可实施性，下阶段，笔者将从跨线资源调度、跨线负载均衡、业务系统资源动态调配等角度出发进一步扩大方案实施优势，同时也将从线网调度模式、运营管理模式、灾备响应等方向开展相关研究工作。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要 [R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2020.
- [2] 张义鑫, 张炳森. 轨道交通线网智能运维系统的设计方案思考 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(10): 58-62.
Zhang Yixin, Zhang Bingsen. Design of Intelligent Operation and Maintenance System for Urban Rail Transit Network [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(10): 58-62.
- [3] 王建文, 赵文龙, 黄国辉. 云边协同的新一代城市轨道交通生产系统融合平台研究 [J]. 都市快轨交通, 2022, 35(5): 146-151.
- [4] 李朝金, 黄威. 铁路云平台建设的思考 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16(6): 47-50.

- Li Chaojin, Huang Wei. The Thinking about Cloud Platform Construction of the Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16(6): 47-50.
- [5] 常海利, 张辉, 吴正中, 等. 基于智能控制一体机的边缘云设计与实现 [J]. 都市快轨交通, 2023, 36 (5): 16-23.
- [6] 杨承东, 刘洋. 智慧城轨自动售检票系统的技术发展趋势 [J]. 都市快轨交通, 2021, 34 (1): 52-56.
- Yang Chengdong, Liu Yang. Technical Development Trend of AFC System of Smart Urban Rail Transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(1): 52-56.
- [7] 王军贤. 城轨云在全自动运行系统中的应用研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17 (9): 73-77.
- Wang Junxian. Application of Urban Rail Cloud in Fully Automatic Operation Systems[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(9): 73-77.
- [8] 刘纯洁, 张立东. 上海轨道交通智慧车站研究与实践 [J]. 隧道与轨道交通, 2019 (S2): 1-4, 26.
- [9] 李金龙, 刘国栋, 王怀, 等. 一种轨道交通线网综合监控系统及方法: CN115102787B [P]. 2023-10-27.
- [10] 李金龙, 刘国栋, 曹繁荣, 等. 一种分布式三相电源自平衡系统与方法: CN115800326A [P]. 2023-03-14.
- [11] 焦凤霞, 刘斌. 基于城轨信号系统云平台测试方法的探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (9): 73-78, 105.
- Jiao Fengxia, Liu Bin. Discussion on Cloud Platform Test System Based on Urban Rail Signal System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(9): 73-78, 105.
- [12] 李宝军, 李庆怀, 陈曦宇, 等. 铁路视频监控体系化建设探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (1): 39-43.
- Li Baojun, Li Qinghuai, Chen Xiyu, et al. Discussion on Systematic Construction of Railway Video Monitoring System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 39-43.
- [13] 彭湃. 基于云架构的线网监控系统方案研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (3): 64-67.
- Peng Pai. Research on Line/Network Monitoring System Based on Cloud Architecture[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(3): 64-67.
- [14] 李斌. 基于超融合基础架构的铁路云数据中心建设方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (3): 54-58.
- Li Bin. Construction Plan of Railway Cloud Data Center Based on Hyper-Converged Infrastructure[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(3): 54-58.
- [15] 郭弘倩, 南迪. 基于云架构的城市轨道交通信号系统方案研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21 (2): 72-77, 102.
- Guo Hongqian, Nan Di. Research on Urban Rail Transit Signal System Scheme Based on Cloud Architecture[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(2): 72-77, 102.
- [16] 宋大治, 张浩, 徐钟全, 等. 基于MPP和Hadoop的城市轨道交通线网指挥平台设计 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (8): 47-53.
- Song Dazhi, Zhang Hao, Xu Zhongquan, et al. Design of Urban Rail Transit Line Network Command Platform Based on MPP and Hadoop[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(8): 47-53.
- [17] 余才高, 代继龙, 张宁. 城市轨道交通线网中心规划研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2014, 11 (4): 53-55.

(下转 114页)

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.05.017

既有线信号系统智能运维平台建设思考

于柯¹, 王超²

(1. 北京市地铁运营有限公司, 北京 100044;

2. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

摘要: 信号系统作为保障城市轨道交通列车运行的重要系统, 其制式日新月异, 同时信号设备种类也变得更加庞杂, 这就对信号系统的运维保障提出了更高要求。传统的维护方式已经不能满足当前的运营生产需求, 通过对既有线信号系统智能运维平台建设的思考, 提供一种通过建设智能运维平台, 解决既有线信号系统维护困难的方法。

关键词: 既有线; 信号系统; 智能运维

中图分类号: U231+.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0103-06

Thoughts on Construction of Intelligent Operation and Maintenance Platform for Existing Line Signal System

Yu Ke¹, Wang Chao²

(1. Beijing Mass Transit Railway Operation Corporation Ltd., Beijing 100044, China)

(2. CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: The signal system, as an important system to ensure the train operation of urban rail transit, has undergone rapid changes in its standards. At the same time, the types of signal equipment have become more diverse, which puts higher requirements on the operation and maintenance support of the signal system. The traditional maintenance methods can no longer meet the current operational and production needs. This paper provides a method to solve the maintenance difficulties of existing line signal systems by considering the construction of intelligent operation and maintenance platforms for existing line signal systems.

Keywords: existing operational lines; signal system; intelligent operation and maintenance

城市轨道交通信号系统是保障列车运行安全的关键系统, 信号系统一旦发生故障, 极易造成中断行车事故的发生。随着列车运行密度的增加以及乘客对故障容忍度的降低, 运营单位对信号系统的故

障率和故障恢复时间提出了更高标准, 随之而来的是对信号系统的维护要求也变得更加苛刻。随着信号系统制式和设备种类不断增加, 同时由于设备老化和老旧线路设备监测不足等原因, 给信号系统的维护工作带来了极大压力。因此为满足运营需求, 提高信号系统维护水平, 对既有线路维护系统进行智能化提升, 显得尤为重要。

收稿日期: 2023-11-30; 修回日期: 2024-04-17

第一作者: 于柯(1983—), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向: 轨道交通信号, 邮箱: yuke01212177@163.com。

1 既有线监测体系现状

目前国内地铁建设较早的城市，大多数早期建设的线路，信号系统存在智能化水平较低问题。因此既有线路信号系统运营维护能力也面临着巨大的挑战，具体如下。

1.1 基础数据监测不全

大多数既有线路，只有部分设备有监测功能，且具备的监测功能尚处于数据收集层面，未实现数据分析等辅助功能。

1.2 维修方式有待提高

既有运营维修体系仍只局限于计划修、临时修、故障修，无法掌握信号设备的健康情况，无法从“故障修”转变为“状态修”。

1.3 故障定位耗时长

部分基础设备电气性能监测缺失，无监测功能支撑后台分析，既有监测设备不能为现场维护人员提供故障点进行辅助判断，导致维护人员现场确认及测试的工作量大且耗时较长。

1.4 维护经验无法借鉴

既有线路信号系统制式多样，信号基础设备也不尽相同，因此各条线路的维护经验不能相互借鉴，不能形成统一的经验库。

1.5 操作方式不统一

既有线路中不同信号厂家监测系统功能差异较大，对信号设备监测范围、集中监测能力、辅助维修开发程度不同。不同平台开发整合难度大，日常操作使用方法、数据呈现形式、分析方法不统一，一定程度上增加分析难度。

1.6 监测水平参差不齐

不同线路建设年代跨度较大，各线路监测系统版本兼容性以及硬件水平存在差异，在原有监测平台架构上提升功能难度大，无法升级实现整合。且因线路建设年代不同，部分监测软件开发后，受既有硬件设备性能制约，无法支持在线监测功能实现。

2 既有线智能运维平台建设目的及作用

2.1 执行国家规范要求

为实现交通运输部 2022 年印发的《城市轨道交通

交通信号系统运营技术规范（试行）》中关于信号系统维护监测基础数据采集的相关要求，解决部分线路尚无信号基础设备状态数据采集信息，或基础数据信息采集不全的情况。

2.2 解决运营生产中的痛点难点

现阶段大多数早期开通的既有线路，信号系统故障排查及设备维护基本依靠人工目测及万用表测量等传统手段，无法发现设备劣化趋势及潜在隐患。在设备故障后，故障分析依赖于维护人员经验，不同人员分析结论不完全一致，多数情况采用将“怀疑设备”全部更换的过度维修方式来保障运营生产。通过建立信号系统智能运维平台，实现故障预警、告警，缩短故障处置时间，将计划修转变为状态修，减少信号系统故障数量的同时，降低维护费用。

2.3 提高维护维修效率

针对目前大客流集中、行车密度高、设备老化严重、维护人员高度紧张的特点，传统的人工排查处置不但效率低，且故障排查时间与运营时间冲突，大部分维护工作需要夜间停运后才能进行。但夜间停运时间往往较短，加之检修辅助手段缺失，在时间紧任务重的情况下容易导致检修准确度较低。建立智能运维平台可以实时在线对设备状态进行监测，降低维护人员工作强度、缓解员工紧张情绪，提高维护维修效率。

2.4 实现维护手段信息化智能化

早期开通的既有线路，信号系统国外厂家较多，不同设备系统构成及维护方式各异。各线路维护经验无法借鉴，且由于维护设备的缺失，故障案例往往采用人工记录的方式，故障报警无法与工单系统联动。通过建立智能运维平台，可以将设备状态运行参数，与故障案例进行对应，当设备运行参数接近故障设备，或性能参数出现明显下降时，维护设备通过与工单系统联动，对“问题”设备智能推送维护策略，实现维护方式的信息化和智能化。

3 既有线信号系统智能运维平台建设方案

既有线智能运维平台建议按照如图 1 所示的 3

层架构进行建设，分别为基础数据采集层、线路级信息处理层、线网级信息分析层。通过完善基础层数据采集，并将信号设备基础数据上传至各线路维护支持系统，由各线路维护支持系统将维护信息上

传至信号系统智能运维平台。信号系统智能运维平台具备报警管理、维修建议、健康评估、决策支持、设备资产管理和生产信息统计管理等功能。

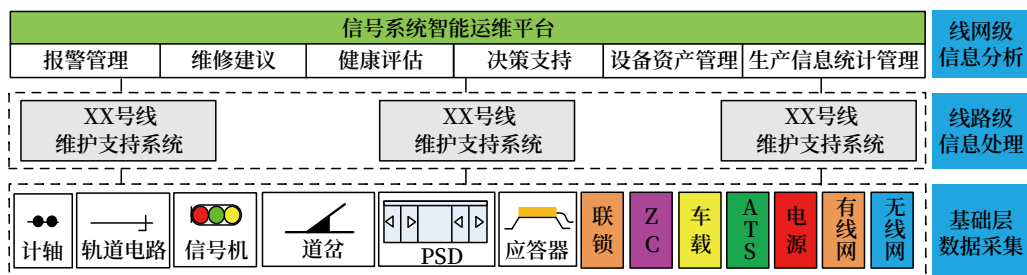


图1 智能运维平台架构

Fig.1 Architecture diagram of intelligent operation and maintenance platform

由于既有线路建设时间跨度较大，因此针对既有线路信号系统智能运维平台建设不同于新线建设。既有线路信号系统智能运维平台的建设应分三步逐层建设：第一步完善既有线路基础数据监测信息采集；第二步进行线路级维护支持系统的建设及升级；第三步统一线网级平台与线路级接口信息传输协议，搭建线网级智能运维子系统。

3.1 完善基础数据监测信息采集

基础数据监测信息的采集包含计轴、轨道电路、信号机、转辙机、站台门接口、有源应答器、联锁设备、ZC设备、车载设备、ATS设备、电源设备、有线网设备和无线网设备信息。

既有线路信号设备监测信息的建设有以下3种情况。

1) 既有线路完全不具备监测采集功能

对于完全不具备信号设备监测采集功能的既有线路，应对所有信号基础设备增加采集设备或对既有设备新增接口的方式进行设备状态信息采集。

2) 既有线路部分设备具备监测采集功能

只有部分设备具备数据监测采集功能的线路，首先应对不具备采集功能的信号设备，增加监测采集设备。通过整合既有监测设备与新增监测设备的监测信息，完成对所有信号设备监测信息的采集。

若既有监测采集设备不能通过软件/硬件升级、新增接口的方式，与新增监测设备进行整合。则应

考虑通过既有监测信息与新增设备监测信息均上传至维护支持系统，由维护支持系统进行监测信息整合的方式。

当以上方法均不能实现既有设备监测信息的整合与上传，则应结合具体线路的更新改造时间，考虑是否有必要将既有基础监测设备拆除，全部重新增加监测采集设备以实现基础设备信息采集全覆盖。

3) 既有线路设备均具备监测采集功能

具备全部设备采集功能的线路，其基础设备状态信息可在本集中站信号维护终端上显示，并应上传至维修中心线路级维护支持系统服务器。

3.2 完善线路级信息处理系统建设

线路级维护支持子系统在信号集中监测的基础上，综合信号系统各子系统维护信息，实现对信号设备全方位的监测和信息处理。线路级维护支持子系统建设方案主要分以下4种情况。

1) 既有线路无维护支持子系统

无维护支持子系统的线路，应先建设线路级维护支持子系统，通过与既有采集设备和各子系统接口，完成线路级维护支持子系统的建设。并在建设过程中预留线路级维护支持子系统与线网级信息分析系统接口，待线路级维护支持子系统建设完成后，将维护信息上传至线网级分析系统。

2) 既有线路维护支持子系统功能不全

具备维护支持子系统，但其功能不全的线路。

应通过软件升级或硬件升级的方式完善各线路维护支持子系统功能，按照全线网统一的维护支持子系统功能标准，对其进行升级改造，并预留与线网级分析系统接口。

3) 既有线路维护支持子系统不能升级改造

部分线路因受硬件性能和软件开发方式影响，不能通过升级改造的，可通过新建维护支持子系统将既有部分功能接入，同时将剩余设备新增的监测功能也接入新建维护支持子系统，以便最大程度利用既有监测设备、避免造成重复投资，新建维护支持子系统将所有维护信息统一转换成线网级平台标准协议信息后进行上传。

4) 既有线路维护支持子系统功能完善

对于近期开通的线路，其维护支持子系统功能完善，可通过升级软件的方式预留与线网级平台统一接口，完成线路级维护信息上传。

3.3 线网级智能运维子系统建设

线网级智能运维子系统的主要功能是基于数据挖掘实现对信号系统中长期运维规律的分析，为维护决策提供科学依据。因此线网级智能运维子系统建议采用“大数据+云计算”的方式进行建设，方便后期对大量数据进行存储和计算分析。

3.3.1 线网级智能运维子系统架构

线网级智能运维子系统架构建议采用如图 2 所示的 4 层架构进行建设，主要包括接入汇聚层、大数据存储层、云计算分析挖掘层和应用展示层。

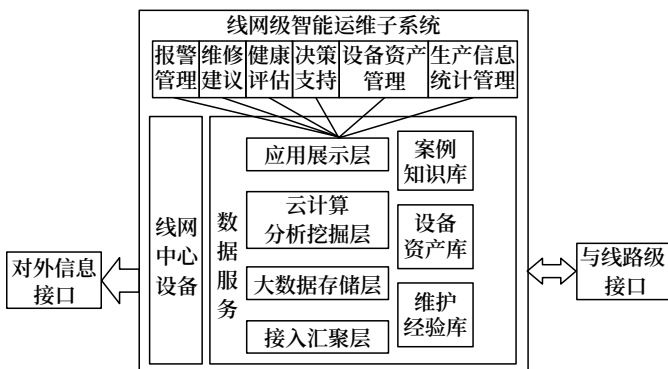


图2 线网级子系统架构

Fig.2 Network level subsystem architecture diagram

接入汇聚层：各线路通过统一的接口协议，利

用信号系统自行组建的传输通道，将线网级智能运维子系统要求的监测信息统一上传，信息上传内容包括但不限于如表 1 所示信息。

表1 线网级子系统监测信息

Tab.1 Monitoring information of Network level subsystems

序号	子系统	上传信息
1	集中监测	电缆绝缘监测、电源对地泄漏电流、信号机点灯电路电流、继电器开关量等
2	ATS	应用服务器状态、数据库服务器状态、通信前置机状态、各工作站状态等
3	ATP	设备板卡状态、电源状态、传输状态等
4	CI	设备板卡状态、电源状态、传输状态、列车占用检测设备状态、驱动采集信息等
5	有线传输网	网络拓扑结构，交换机工作状态、交换机端口使用情况、网管信息等
6	无线传输网	传输速率、误码率等
7	车载	设备板卡状态、电源状态等
8	道岔监测	道岔缺口状态、转辙机电流电压、转辙机控制电路相关继电器时序等
9	电源监测	外电网状态、电源屏工作状态、UPS 工作状态、蓄电池监测信息等

大数据存储层：将接入汇聚层收集的数据进行存储，建立对应的数据库，数据库将现场设备的告警信息、按钮开关量、电流电压模拟量信息和故障记录数据等故障信息进行分类，并传递给分析挖掘层进行计算。通过对常见故障数据的积累，利用故障诊断知识系统进行推理和判断，并根据现场故障对应的维修方法形成维护经验库。

云计算分析挖掘层：对信号设备进行工作状态监测、故障报警、设备劣化态势预估、隐患故障挖掘、故障数据统计分析、设备健康度分析和维修维护指导等。

应用展示层：主要分为生产业务应用展示及管理业务应用展示。在控制中心大屏或维护工作站上可对全线网信号设备健康度进行展示，并可在线网维修中心设置专业维护工作站，对各子系统设备状况进行实时展示。在资产维护管理工作站可对设备资产数量信息、编码信息等管理业务进行展示。

3.3.2 线网级智能运维子系统功能规划

1) 报警管理

报警管理主要实现全网状态概览，包括车站、场段、轨旁、车载等信号设备状态。报警管理操作包

括告警处理、抢修联动、纳入事件跟踪和为智能运维平台提供工单触发条件, 实现工单自动推送功能等。

2) 维修建议

维修建议主要根据设备故障原因, 推荐相应的维修计划, 或根据线网平台提供的设备健康情况, 提供预防性维修提示。维修建议信息不仅可以在信号设备室或信号工区的终端上进行显示, 也可通过维修派班系统推送至相应的维护人员手持终端。

3) 健康评估

健康评估主要包括全网实时信号设备质量评分概览, 对信号设备进行健康评分、记录健康变化、做出健康趋势预警, 提供信号设备健康评估因子分析。按系统或线路进行健康评分及统计, 包括最差设备排序、设备健康列表等。最终基于设备健康评估实现对信号设备状态的持续跟踪, 为设备状态修、中大修提供量化及维护依据。

4) 决策支持

决策支持主要提供信号设备维护决策建议报告、生产决策分析报告和人员行为分析报告等功能。最终构建信号系统可持续发展的数字化分析及决策能力, 通过持续积累完善案例、经验、模型等数字资产, 充分挖掘数据价值, 为信号运维提供更全面的数字化决策支撑。

5) 设备资产管理

在资产管理方面具有在用设备管理、备品/备件管理、信号设备统一编码管理、信号设备全生命周期流转管理和信号设备赋码管理等功能。

6) 生产信息统计管理

生产信息统计管理具有在线巡视异常信息展示、生产作业统计、作业质量结果展示和消缺情况统计展示等功能。

4 总结

针对既有线搭建智能运维平台, 能实现对既有信号系统设备运行状态的实时监控, 保障列车运行安全。同时智能运维平台能从各个方面对信号系统设备进行全方位、全天候实时监控, 当设备发生故障时, 可以与故障模型分析库建立链接关系, 高效智能分析设备故障数据, 精准判断故障点位, 提供

维修建议, 缩短故障处理时间。针对既有线搭建智能运维平台还可以监测既有信号设备是否一直处于正常状态, 能够提前发现隐患, 解决潜在“故障”, 因此既有线建设智能运维平台对保障城市轨道交通的安全和高效运营是十分必要的。

参考文献

- [1] 交通运输部办公厅. 城市轨道交通信号系统运营技术规范(试行): 交办运[2022]1号[S]. 北京: 交通运输部办公厅, 2022.
- [2] 施聪. 城市轨道交通通信信号专业的智能运维系统[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8): 172-176.
Shi Cong. Communication and Signal Intelligent Operation and Maintenance System in Urban Rail Transit[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(8): 172-176.
- [3] 陆鑫源, 朱莉, 张郁, 等. 城市轨道交通信号智能运维系统应用与实践[J]. 铁道通信信号, 2020, 56(3): 82-86.
Lu Xinyuan, Zhu Li, Zhang Yu, et al. Application and Practice of Intelligent Signal Operation and Maintenance System for Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(3): 82-86.
- [4] 杜时勇. 基于大数据的城轨信号系统线网智能运维平台研究[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(3): 13-18.
Du Shiyong. Urban Rail Transit Signal System Intelligent Operation and Maintenance Platform Based on Big Data[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(3): 13-18.
- [5] 李聪. 地铁信号系统智能运维方案设计[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(2): 86-90.
Li Cong. Design of Intelligent Operation and Maintenance Plan of Subway Signaling System[J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55(2): 86-90.
- [6] 胡威. 深圳都市圈城际铁路信号系统综合智能运维平台建设方案[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(9): 11-14, 22.

- Hu Wei. Construction Scheme of Comprehensive Intelligent Operation and Maintenance Platform for Intercity Railway Signaling System for Shenzhen Metropolitan Area[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(9): 11-14, 22.
- [7] 王东妍, 马颖伟, 李宇初, 等. 城际铁路道岔设备智能运维关键技术及应用研究 [J]. 铁道运输与经济, 2023, 45 (7): 67-75.
- Wang Dongyan, Ma Yingwei, Li Yuchu, et al. Research on Key Technology and Application of Intelligent Operation and Maintenance of Intercity Railway Turnout Equipment[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(7): 67-75.
- [8] 赖治平, 高宁, 鲁怀科. 城市轨道交通列车运行控制系统智能运维系统研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (2): 46-50.
- Lai Zhiping, Gao Ning, Lu Huaik. Intelligent Operation and Maintenance System of Urban Rail Transit Train Operation Control System[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 46-50.
- [9] 李传建. 城市轨道交通信号智能运维系统的设计与应用 [J]. 设备管理与维修, 2023 (8): 10-13.
- Li Chuanjian. Design and Application of Intelligent Operation and Maintenance of Urban Rail Transit Signal System[J]. Plant Maintenance Engineering, 2023(8): 10-13.
- [10] 胡寿建, 吴荣斌, 王亚坤, 等. 城市轨道交通信号智能运维系统设计与研究 [J]. 军民两用技术与产品, 2023 (1): 48-51.
- [11] 牛涛, 张辉. 城市轨道交通智能运维系统方案研究 [J]. 铁道运输与经济, 2022, 44 (4): 99-105.
- Niu Tao, Zhang Hui. Research on Intelligent Operation and Maintenance System Scheme of Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy, 2022, 44(4): 99-105.
- [12] 陶雨濛, 王亮军, 卫妍. 城市轨道交通信号设备智能运维系统设计 [J]. 中国新技术新产品, 2021 (15): 25-27.
- [13] 陈乐. 城市轨道交通信号智能运维探讨 [J]. 中国设备工程, 2021 (15): 13-14.
- [14] 方俊, 乔素华, 谯都督. 城市轨道交通智能运维现状分析及发展建议 [J]. 铁路技术创新, 2022 (3): 54-59.
- Fang Jun, Qiao Suhua, Qiao Dudu. Status Quo of and Suggestions for Intelligent Operation and Maintenance of Urban Rail Transit[J]. Railway Technical Innovation, 2022(3): 54-59.
- [15] 刘婧, 郭行, 蒋锐, 等. 城市轨道交通智能运维系统的研究及可行性分析 [J]. 中国新技术新产品, 2021 (5): 12-14.
- [16] 吕林潞. 城市轨道交通智能运维技术及智能基础设施建设方法 [J]. 工程技术研究, 2021, 6 (10): 116-117.
- [17] 王冰, 李洋, 王文斌, 等. 城市轨道交通智能运维技术发展及智能基础设施建设方法研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2020 (8): 75-82.
- Wang Bing, Li Yang, Wang Wenbin, et al. Research on Development of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology and Intelligent Infrastructure Construction Method[J]. Modern Urban Transit, 2020(8): 75-82.
- [18] 吕林潞. 城市轨道交通智能运维技术及智能基础设施建设方法 [J]. 工程技术研究, 2021, 6(10): 116-117.
- Lü Linlu. Intelligent Operation and Maintenance Technology of Urban Rail Transit and Intelligent Infrastructure Construction Method[J]. Engineering and Technological Research, 2021, 6(10): 116-117.
- [19] 王冰, 李洋, 王文斌, 等. 城市轨道交通智能运维技术发展及智能基础设施建设方法研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2020 (8): 75-82.
- Wang Bing, Li Yang, Wang Wenbin, et al. Research on Development of Urban Rail Transit Intelligent Operation and Maintenance Technology and Intelligent Infrastructure Construction Method[J]. Modern Urban Transit, 2020(8): 75-82.
- [20] 武强. 城市轨道交通信号设备智能运维系统顶层设计 [J]. 通信电源技术, 2021, 38 (20): 65-67.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.05.018

列车ATC制动继电器偶发故障影响及防范对策

赵勇, 刘炼, 陈咪达

(云南京建轨道交通投资建设有限公司, 昆明 650032)

摘要: 根据地铁运营时段列车冲标事件的真实场景, 深入分析列车在ATO模式下不执行制动工况的某类故障原因, 并研究实施相关防范对策, 有效提高司机人员介入效率, 降低故障发生后的次生影响。

关键词: 冲标; ATO; 制动

中图分类号: U284.71

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0109-06

Impacts of Accidental Faults of Train ATC Brake Relay and Countermeasures

Zhao Yong, Liu Lian, Chen Mida

(Yunnan Jingjian Rail Transit Investment & Construction Co. Ltd., Kunming 650032, China)

Abstract: This paper build on the real scene of an event of train surpassing the fouling post during the subway operation period, and provides an in-depth analysis of some fault causes of trains not executing the braking command in the ATO mode. It also presents the study and implementation of relevant preventive measures, which can effectively improve the intervention efficiency of drivers and reduce the secondary impacts of faults.

Keywords: surpass fouling post; ATO; brake

ATO模式即列车自动运行模式, 在该模式下, 列车由ATO系统控制自动站间运行。站间列车的启动、停车均不需司机参与, 站内ATO的启动需司机进行人工确认后启动列车出站。ATO系统为保证列车自动驾驶功能的稳定性, 采用冗余性硬件结

构和软件设计。ATO系统执行自动驾驶的过程是一个闭环反馈控制逻辑, 测速单元通过ATP向ATO发送列车的实际位置信息。反馈环路的基准输入是通过列车参数及运营要求计算得出, 其基本关系如图1所示。

ATO系统通过和列车自动防护(ATP)、列车自动监控(ATS)系统通信, 以及线路和车辆实时参数计算列车行驶至下一站的目标-速度曲线。列车以贴近目标-速度曲线的实际速度行驶, 同时自动检测应答器以精确地确定列车和ATO停车点位

收稿日期: 2023-06-06; 修回日期: 2024-04-18

基金项目: 2020年云南省交通运输厅科技创新及示范项目(云交科教[2020]3号)

第一作者: 赵勇(1988-), 男, 工程师, 本科, 主要研究方向: 城市轨道交通设施设备运维管理, 邮箱: zhaoyongbjmtr@163.com。

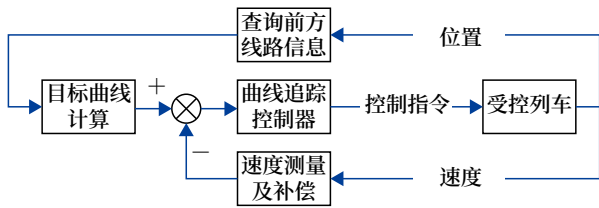


图1 ATO控制逻辑示意
Fig.1 Schematic diagram of ATO control logic

置，并实施一次性目标制动，使列车准确地停在下一个计划停车点。ATO 系统控车时，在 ATP 紧急制动触发速度曲线的防护下，ATO 系统计算出列车运行的推荐速度，并且通过输出牵引 / 制动状态命令以及代表牵引 / 制动级位大小的模拟量，来控制列车执行相关工况。其自动控制流程如图 2 所示。

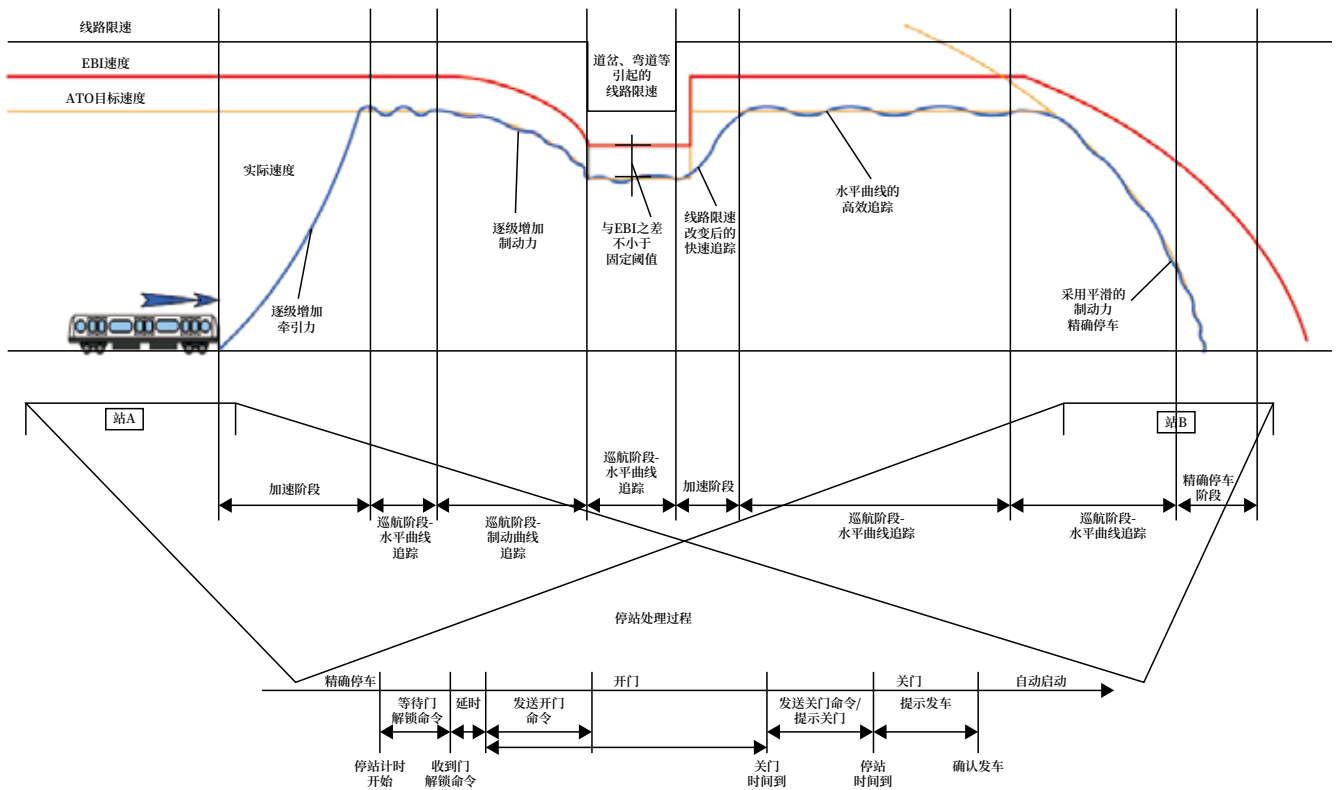


图2 ATO自动控制流程
Fig.2 Flowchart of ATO automatic control

根据以上描述可知，当 ATO 系统发出牵引 / 制动工况命令时，列车通过 ATO 车载设备获取信息，并执行相关命令。查阅相关技术规格书，车载信号设备输出端与车辆接收端以物理线路相连。此种方式可靠性、稳定性较高，但也存在链路所涉接口模块、电气元件偶发故障，导致牵引 / 制动命令未执行的情况，造成列车晚点、冲标等事件。

笔者结合地铁运营时段列车发生冲标事件的真实场景，深入分析故障原因，并研究实施相关防范对策，有效提高司机人员介入效率，降低故障发生后的次生影响。

1 典型故障

现以某地铁运营时段突发列车冲标事件实景为例，进一步分析列车在 ATO 模式下不执行制动工况的某类故障。故障实例：某日 19:56 列车 AM 模式进站速度异常，司机转 SM 手动驾驶并施加制动，列车冲标约 10 m。后续故障现象自行恢复，多次测试未复现。

该条运营线路列车为 6 辆编组 4 动 2 拖 B 型车，采用克诺尔公司的 EP2002 空气制动系统，能够实现常用制动、快速制动、保持制动、紧急制动、

停放制动、车轮防滑保护、载荷补偿和制动混合等功能。控制方式为以转向架为单位的“架控式”，内设监控终端，具有自诊断和故障记录功能，能在司机控制器或自动驾驶系统（ATO）的控制下对列车进行阶段性或一次性的制动与缓解。

故障车辆回库后，下载信号 ATO 及列车相关故障数据记录，排除了信号 ATO/ATP、列车 VCU 及克诺尔制动系统故障的可能性。

1.1 ATO数据分

列车回段后，为准确掌握事发时段设备运行状

态，通过软件下载 ATO 相关数据并分析获知，在 19:56:13，ATO 输出制动指令。但列车减速度没有同步跟随制动指令变化。ATO 系统捕捉到列车速度未下降后，持续增大制动级位模拟量输出至 100%。在车辆端 AXMe 模块已接收到模拟量的情况下，列车仍未响应减速。19:56:50，司机发现车速异常，改变列车为 SM 手动驾驶并施加制动至列车停稳，如图 3 所示。

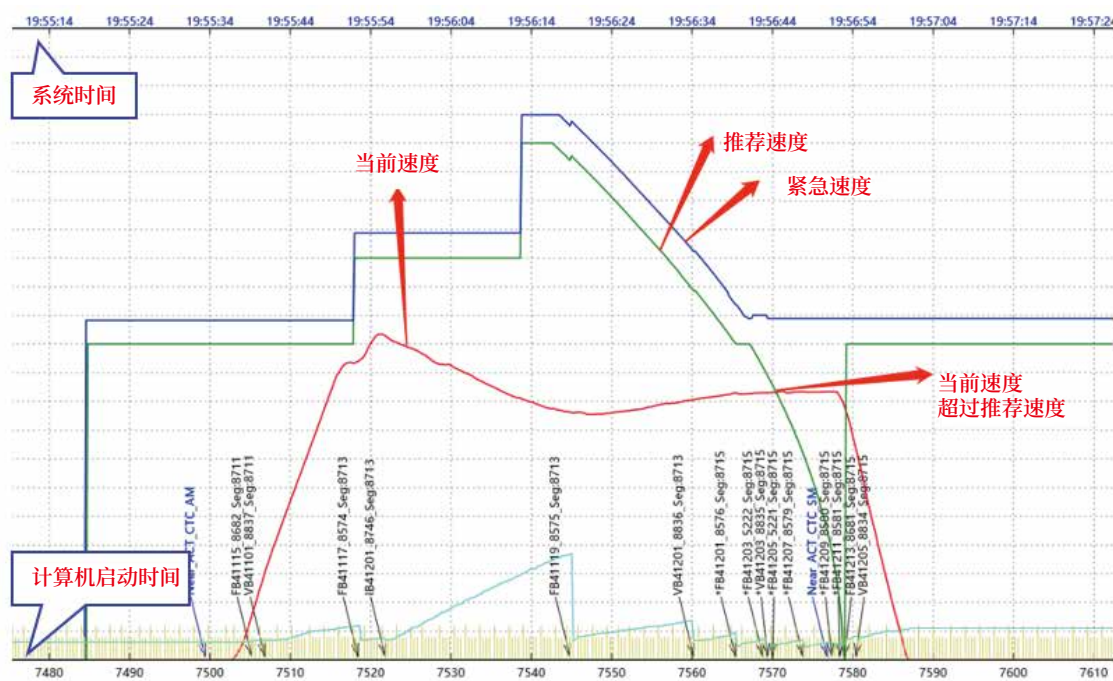


图3 CDV曲线
Fig.3 CDV curves

1.2 车辆数据分析

为与 ATO 系统数据相互佐证，下载列车事件记录数据并分析，如图 4 所示。19:56:11 至 19:56:50，Tc2_DIM1.2_ATC 制动指令为“1”、DCU 电制动有效为“0”、TCMS_HMI AM 模式为“1”。即为 AM 模式下 ATO 发出制动指令但列车端未执行制动，直到 17:56:50，BCU 反馈硬线快速制动指令为“1”，司机操作手柄至快制位，列车执行制动指令，快速制动至列车停稳，与 ATO 曲线数据图一致。

1.3 电气线路排查

结合故障时段信号 ATO 数据及列车事件记录数据进行分析，锁定相关制动回路。并依据车载信号设备与车辆电气原理图，对链路所涉及线缆、插头、继电器等元器件进行各项检查。

鉴于制动回路电气物理连接点较多，同时接线不良、电气元件偶发故障的现象又比较特殊，故障瞬间发生又瞬间恢复。通过常规的目视检查、手触检查已无法查到故障点，并根据故障发生的频率及特点安排列车正线动态调试，故障仍未复现。车辆

图4 列车事件记录
Fig.4 Train event records

技术团队在尝试多种排故手段后，为保证故障点定位准确，采用万用表测量制动回路上所有物理节点涉及的线缆、电气元件阻值，以此来判定故障点，测量范围内均无异常。

1.4 同类故障发生频率及特点

据统计，自2020年12月至2022年12月，该运营线路发生列车ATO模式下不执行制动工况故障约13起。故障特点：1) 故障均在列车手动停车后恢复；2) 列车回库后，车辆状态显示一切正常，故障无法重现。检查制动回路所涉及线缆、电气元件均无异常；3) 线路上、下行区间、站台均有发生，故障发生的时间和地点没有规律；4) 故障处理为预防性更换线缆及ATC制动继电器，更换后的列车在3个月观察期内均未出现类似故障。

1.5 故障原因

ATO列车执行制动工况的前提条件为：车辆端接收到车载信号设备发出的制动指令和制动级位。如图3、4所示，可知车辆端收到“ATC制动指令为1”“AXMe的信号电流环30293”，说明车辆端已采集相关信息，但列车未执行制动减速工况。

结合故障过程现象，并依据车载信号设备与车辆电气原理图进行分析。判断出ATO控车时段车辆端ATC制动继电器偶发故障，导致制动指令回路未断开，造成列车未执行制动减速。

2 防范对策

如上文所述，若ATO列车发生此类故障时，当乘司机发现车速异常，将列车改为SM手动驾驶，并施加制动可使列车停稳。但因人为介入时机存在个体差异性，及列车自身制动距离技术标准，易造成列车冲标和晚点等次生事件。

2.1 防范策略

从该条运营线路发生多起列车ATO模式下不执行制动工况的故障排查与处理过程可以总结出继电器选型的重要性，建议列车主机厂对ATC制动继电器进行返厂检测，并对同批次继电器进行抽样检测。若存在问题则批量整改更换，避免由于ATC继电器偶发故障造成列车不响应制动工况。

另一方面，可利用列车控制系统软件逻辑关系，增设车辆HMI弹窗报警防范措施，如图5所示，帮助当乘司机有效提高介入时效，降低次生事件影响。

2.2 防范措施原理

ATO列车执行牵引/制动工况的前提条件均为车辆端接收到车载信号设备发出的指令和级位，两者缺一不可。根据此控制逻辑，运营单位联合列车网络供应商研究分析后，决定设计当列车牵引/制动级位大于5%（即“AXMe的信号电流环7700”）时与列车实时运行状态进行对比。若此时段列车不处于牵引

或制动工况，则 HMI 显示弹窗报警，并予以蜂鸣声提示，此时当乘司机即可及时介入手动控车。



图5 HMI弹窗报警
Fig.5 HMI alarm in pop-up window

2.3 防范措施实施效果

经过测试增设 HMI 弹窗报警功能，不涉及安全导向逻辑内容，且未对车辆控车逻辑带来任何影响，能有效提升司机介入时机。增设 HMI 弹窗报警功能自 2022 年 2 月试运行以来，暂未发生因司机介入控车不及时，造成冲标事件的发生。

3 总结及建议

本文所研究的列车 ATC 制动继电器偶发故障影响具有典型性，涉及车载信号子系统、车辆制动控制系统。文章所述系统接口原理、分析逻辑、防范对策具有通用性，适用于地铁新线车辆及既有线车辆的改造。本文仅从提升司机介入时效层面探讨防范对策，亦可从技防层面如继电器选型、电气线路冗余设计、系统实时监测等角度进行扩展，有较为实用的参考意义。

参考文献

[1] 谭力天, 陈昕, 李澎东, 等. 基于统计学模型的 CBTC 系统 ATO 停车精度自适应优化算法 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(8): 78-84.
Tan Litian, Chen Xin, Li Pengdong, et al. Adaptive Optimization Algorithm for ATO Stopping

Accuracy of CBTC System Based on Statistical Model[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(8): 78-84.

- [2] 夏振东. 特殊场景下 ATO 控车方案探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(10): 79-84.
Xia Zhendong. Discussion on ATO Train Control Schemes in Special Scenarios[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(10): 79-84.
- [3] 程昌焰, 曾成. 广州地铁三号线 B1 型列车冲标问题分析及改善对策 [J]. 价值工程, 2017, 36(5): 89-90.
Cheng Changyan, Zeng Cheng. B1 Type Train out of the Position Problem Analysis and Improvement Measures for Guangzhou Metro Line 3[J]. Value Engineering, 2017, 36(5): 89-90.
- [4] 林颖, 王长林. 车载列车自动防护系统对空转及滑行的检测与校正方法研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(3): 28-31, 36.
Lin Ying, Wang Changlin. Research of Slip and Slide Detection and Adjust Method in Onboard ATP[J]. Urban Mass Transit, 2011, 14(3): 28-31, 36.
- [5] 石琪, 冯彦春. 基于 GPS 的城际列车轮径校准原理及检修 [J]. 设备管理与维修, 2018(12): 65-66.
- [6] 龚伟. 列车牵引系统空转滑行控制机理分析 [J]. 技术与市场, 2013, 20(8): 122-123.
- [7] 吴培栋. 基于 CTCS2+ATO 的市域(郊)铁路列车控系统技术研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(7): 16-23.
Wu Peidong. Research on Technology of Suburban Railway Train Control System Based on CTCS2+ATO[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(7): 16-23.
- [8] 孙志法, 程世杰. 加强型接点继电器贮存失效机理分析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(5): 67-70.
Sun Zhifa, Cheng Shijie. Analysis of Storage Failure Mechanism of Enhanced Contact

- Relay[J].Railway Signalling & Communication Engineering,2023,20(5):67-70.
- [9] 吴培栋,王硕,张友兵.高速铁路ATO系统增加自动折返功能的方案研究及实验验证[J].铁路通信信号工程技术,2023,20(8):1-7,22.
Wu Peidong,Wang Shuo,Zhang Youbing.Research on Scheme and Experimental Verification of Adding Automatic Turn-back Function Based on High-Speed Railway ATO[J].Railway Signalling & Communication Engineering,2023,20(8):1-7,22.
- [10] 吴敬华,冯飞.基于车-地数据联合分析的三起列车制动原因及对策[J].铁路通信信号工程技术,2023,20(7):104-109.
Wu Jinghua,Feng Fei.Three Train Braking Reasons and Countermeasures Based on Joint Analysis of Train-Ground Data[J].Railway Signalling & Communication Engineering,2023,20(7):104-109.
- [11] 曹晓宇.车载ATO系统记录板数据解析工具设计[J].铁路通信信号工程技术,2024,21(1):62-68.
Cao Xiaoyu.Design of Data Parsing Tool for Record Board of Onboard ATO System[J].Railway Signalling & Communication Engineering,2024,21(1):62-68.
- [12] 张帆.列车自动驾驶(ATO)季节性调节方案探讨[J].铁路通信信号工程技术,2024,21(1):87-91.
Zhang Fan.Discussion on Seasonal Regulation Scheme of Automatic Train Operation[J].Railway Signalling & Communication Engineering,2024,21(1):87-91.
- [13] 王成,刘浚锋,刘佳.巴西圣保罗13号线车载ATC系统设计[J].铁路通信信号工程技术,2024,21(2):108-113.
Wang Cheng,Liu Junfeng,Liu Jia.On-Board ATC System Design of Sao Paulo Line 13,Brazil[J].Railway Signalling & Communication Engineering,2024,21(2):108-113.
- [14] 严伟.CTCS2+ATO系统车门与站台门联动问题[J].铁路通信信号工程技术,2022,19(7):34-39.
Yan Wei.Discussion on Linkage between Train Doors and Platform Screen Doors of CTCS2+ATO System[J].Railway Signalling & Communication Engineering,2022,19(7):34-39.
- [15] 吴大武.城轨线路ATO系统控车策略优化[J].铁路通信信号工程技术,2022,19(12):60-63,79.
Wu Dawu.Optimization of Train Control Strategy of ATO System for Urban Rail Line[J].Railway Signalling & Communication Engineering,2022,19(12):60-63,79.

(上接102页)

- She Caigao,Dai Jilong,Zhang Ning.Research on TCC Planning for Urban Rail Transit[J].Railway Signalling & Communication Engineering,2014,11(4):53-55.
- [18] 胡清梅,吕楠,夏朋飞,等.新技术下北京地铁调度模式发展趋势[J].铁路通信信号工程技术,2022,19(4):47-53.
Hu Qingmei,Lü Nan,Xia Pengfei,et al.Development Trend of Beijing Rail Transit Dispatching Mode Under New Technologies[J].Railway Signalling & Communication Engineering,2022,19(4):47-53.
- [19] 陈楠,李郁,李爱琦,等.北京地铁自动售票系统技术改造的探索[J].铁路通信信号工程技术,2021,18(5):77-82,94.
Chen Nan,Li Yu,Li Aiqi,et al.Technical Transformation of Automatic Fare Collection System for Beijing Metro[J].Railway Signalling & Communication Engineering,2021,18(5):77-82,94.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.05.019

北京轨道交通共用场段LTE-M系统 频率运用分析

李 鸣

(北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

摘要: 北京轨道交通新建线路均已采用 LTE-M 系统综合承载数据及集群业务, 在两线共用场段的情况下, 不可避免存在频率干扰问题。为保障 LTE-M 系统的整体可靠性, 提出车辆段业务场景并通过对 LTE-M 系统在共用场段场景下的频率运用分析, 总结共用场段 1.8G 频率运用原则, 提高车地通信可靠性, 为共用场段 LTE-M 系统频率规划提供借鉴。

关键词: LTE-M; 共用场段; 频率运用

中图分类号: U285

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0115-07

Analysis of Frequency Use by LTE-M System in Shared Yard Section of Rail Transit Lines in Beijing

Li Ming

(CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: All the new rail transit lines in Beijing have used the LTE-M system for comprehensive bearing of data and cluster services. In the case where the two lines use a shared yard section, frequency interference becomes inevitable. To ensure the overall reliability of the LTE-M system, this paper describes the service scenarios at the rolling stock depot and analyzes the frequency use of the LTE-M system in scenario of shared yard section. On this basis, it summarizes the principles of 1.8 G frequency use for shared yard section, which improves the reliability of vehicle-ground communication, and provides reference for the frequency planning of the LTE-M system for shared yard sections.

Keywords: LTE-M; shared yard section; frequency use

1 概述

北京市在燕房线及新机场线已经成功试点了基

于 LTE-M 的车-地综合通信系统, 截至目前, 系统运行安全可靠。2018 年 5 月, 交通运输部发布《城市轨道交通运营管理规定》, 对城市轨道交通通信系统的互联互通、网络化运营等提出新要求。同年 9 月, 中国城市轨道交通协会正式发布《城市轨道交通车地综合通信系统 (LTE-M) 规范》等 19

收稿日期: 2023-03-02; 修回日期: 2024-03-11

作者简介: 李鸣 (1993—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 通信工程技术, 邮箱: liming_tx@crscd.com.cn.

项团体标准。2015年9月,北京轨道交通新线3、12、17、19号线通过初步设计评审,无线通信采用基于LTE技术的车-地综合承载通信系统。

北京轨道交通新线3号线与12号线共用东坝车辆段。在此背景下,为保证LTE-M系统的安全性和可靠性,对北京轨道交通新线工程LTE-M系统(车-地综合通信系统)频率进行规划。以每条线独立LTE-M系统为前提,开展LTE-M系统频率的规划,避免或降低相关频率干扰,保证车-地综合通信系统网络的可靠性和安全性。

2 频率运用

2.1 频率资源

北京市无线电管理局《北京市轨道交通视频传输无线专网使用频率通知书》批准的北京市轨道交通频率如下。

地面区域:1 785 ~ 1 795 MHz(除去首都国际机场和大兴国际机场地区以外的轨道交通地面区域)。

地下区域:1 785 ~ 1 805 MHz(轨道交通地下区域)。

2.2 新线频率运用原则

新线车辆段停车场均为上盖建筑,盖下区域无线覆盖均采用漏泄同轴电缆及室分天线的方式,由于上盖一体化的建筑结构,无线信号均能控制在盖下区域范围内,且受地面其他信号干扰较少,故车辆段停车场盖下区域可定义为地下区域。

北京市轨道交通新线3、12、17、19号线隧道区间、车站区域(半地下车站)、车辆段停车场盖下区域统一定义为地下区域。正常情况下使用频率为20 MHz,其中A网使用15 MHz带宽(1 785 ~ 1 800 MHz)同频组网,B网使用5 MHz带宽(1 800 ~ 1 805 MHz)同频组网。

车辆段停车场地面部分(非盖下区)为地面区域,正常情况下使用频率为15 MHz,其中A网使用10 MHz带宽(1 785 ~ 1 795 MHz)同频组网,B网共用5 MHz带宽(1 795 ~ 1 800 MHz)同频组网。

3 同频共存干扰分析

3.1 同频共存的必要条件

在一个指定的区域内(如共用的车辆基地)使用的两个LTE-M网络之间,如果采取相同或重叠的频率配置,实现同频共存的必要条件如下:

- 1) 两个系统采取相同的时隙配置和TDD同步;
- 2) 系统小区PCI采用不同配置;
- 3) 两个系统间需要提供必要的空间隔离。

其中,1)和2)可以通过网络配置和规划实现,本文不再讨论。而两个系统间需要提供必要的空间隔离能否实现则取决于场景、覆盖方式及移动用户活动范围。

3.2 同频共存干扰估算

3.2.1 同频干扰对系统的影响

根据干扰理论,同频干扰表现为接收机接收同频干扰源信号,导致接收机底噪抬升和接收机有效灵敏度降低,如图1所示。

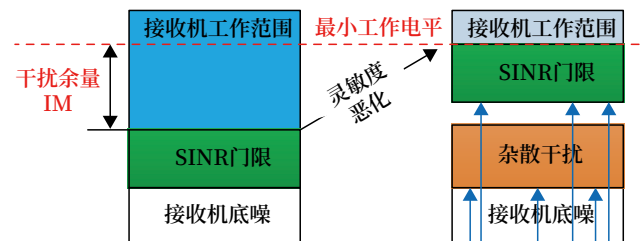


图1 干扰示意
Fig.1 Schematic diagram of interference

3.2.2 同频干扰估算

1) 共存准则

参照移动运营商杂散干扰规避准则如下。

上行降敏0.8 dB、下行降敏3 dB被定义为有干扰,可实现共存。

降敏12.4 dB被定义为严重干扰,不能共存。

2) 噪声抬升(Raise Over Thermal, ROT)计算,如公式(1)所示。

$$ROT = 10 \lg \left(\left(10^{\frac{N}{10}} + 10^{\frac{I}{10}} \right) / 10^{\frac{N}{10}} \right) = 10 \lg \left(1 + 10^{(I-N)/10} \right) \quad (1)$$

其中,ROT为接收机底噪抬升(灵敏度降低);

I 为干扰信号电平值； N 为接收机等效热噪声电平。

1) 上行方向

$10\lg(1 + 10^{\frac{(I-N)}{10}}) = 0.8$, $I - N = -7$ dB, 即受扰基站天线口接收到的杂散干扰功率应比接收机底噪低 7 dB。

$$N = -174 + 10 \times \lg(15 \times 10^3) + NF = -128 \text{ dBm}$$

$$I = -128 - 7 = -135 \text{ dBm}$$

2) 下行方向

$10\lg(1 + 10^{\frac{(I-N)}{10}}) = 3$, $I - N = 0$ dB, 即受扰终端天线口接收到的杂散干扰功率应不高于接收机底噪。

$$N = -174 + 10 \times \lg(15 \times 10^3) + NF = -125 \text{ dBm}$$

$$I = -125 - 0 = -125 \text{ dBm}$$

其中, 热噪声的频谱密度为 -174, 即 1 Hz 产生的热噪声, dBm; LTE 子载波带宽为 15×10^3 , Hz; 噪声系数 (NF), 上行 (基站) 取值 3.5 dB, 下行 (终端) 取值 7 dB。

3) 最小隔离度 MCL 估算

LTE 系统在上行方向采用动态功率控制, 下行方向采用功率分配。

以下 MCL 估算将占用 LTE-M 系统链路预算中预留的、用于抗扰本系统邻区干扰及运营商网络及其他非轨道交通行业使用 LTE-M 1.8 G 频段产生的干扰余量 IM , 常规取值: 下行 12 dB, 上行 6 dB。

1) 下行方向

假设 LTE-M 基站通道功率设定为 5 W (37 dBm), 5 MHz 系统基站发射的子载波发射功率为:

$$P - 10 \times \lg(300) = 12.0 \text{ dBm}$$

$MCL_{\min} = 12 - (-125) - 12 = 125$ dB。即干扰信号需经 125 dB 的分配及空间传播损耗, 才能实现受扰终端降敏 3 dB 接收。

2) 上行方向

终端发射功率为 23 dBm/MHz, 终端发射的子载波发射最大功率为:

$$P - 10 \times \lg(60) = 5.2 \text{ dBm},$$

$$MCL_{\min} = 5.2 - (-128) - 6 = 127 \text{ dB}。即$$

干扰信号需经 127 dB 的分配及空间传播损耗, 才能实现受扰基站降敏 0.8 dB 接收。

3.3 传播损耗估算

3.3.1 传播模型

1) 室分传播模型: 室内传播采用 Keenan-Motley 模型, 如公式 (2) 所示。

$$L_p = 32.5 + 20\lg(f) + 20\lg(d) \quad (2)$$

其中, L_p 为无线传播路径损耗, dB; f 为工作频率, 取值 1 800 MHz; d 为无线传播距离, km。

2) 杆天线传播模型

传播损耗采用 3GPP TR 36.873 建议的市区宏小区 U_{Ma} -LOS 模型。 U_{Ma} 模型是 3GPP 协议中定义的一种适合于高频的传播模型, 适用小区半径在 10 m 到 5 000 m 的宏蜂窝预测。在 $10 \text{ m} \leq d \leq d'_{BP}$ 区间的中值预测如公式 (3) 所示, 其中 $d'_{BP} = \frac{4h'_{BS}h'_{UT}f_c}{c}$; d'_{BP} 为发射天线到测试点的距离; h'_{BS} 为基站天线有效高度, m, 取值 15 m; h'_{UT} 为移动台天线高度, m, 取值 1.5 m; f_c 为中心频率, GHz, 取值 1.8 GHz; $d'_{BP} = \frac{4h'_{BS}h'_{UT}f_c}{c} = 4 \times 15 \times 1.5 \times 1\ 800 \times 106 / (3 \times 10^8) = 540 \text{ m}$;

$$PL_{U_{Ma}-LOS} = 28 + 22\lg(d) + 20\lg(f) \quad (3)$$

其中, d 为预测距离, m; f 为工作频率, 取值 1 800 MHz。

3) 漏缆传播模型

漏泄同轴电缆耦合损耗: 漏泄同轴电缆在 2 m 处的耦合损耗一般为 65 dB。

漏缆附加耦合损耗调整因子如表 1 所示。

表1 漏缆附加耦合损耗调整因子

距离 /m	空间耦合调整因子 /dB (参考值)
4	3.9
5	5.2
8	7.8
10	14
20	39
50	51

3.3.2 传播损耗与距离关系

根据选定的传播模型，LTE-M 采用不同的覆盖方式下，无线信号在空间的传输损耗如表 2 所示（不含馈线损耗、分配损耗、穿墙损耗等）。

表2 传播距离与损耗关系

Tab.2 Relationship between propagation distance and loss

传输距离 /m	空间传播损耗 /dB		
	室分天线	泄漏电缆（含耦合损耗）	杆天线
10	57.6	79.0	55.1
20	63.6	104.0	61.7
30	67.1	107.0	65.6
40	69.6	110.0	68.4
50	71.6	116.0	70.5
100	77.6	122.0	77.1
200	83.6	128.0	83.7
300	87.1	134.0	87.6
400	89.6	140.0	90.4
500	91.6	146.0	92.5

综上所述，采用不同的传播模型，传输损耗存在差异。应根据计算结果得出在共存条件下最小空间传输损耗值，结合现场环境合理选择覆盖方式，从而满足空间隔离要求，到达同频共存。

4 共用场段频率运用分析

主要结合东坝车辆段和田村停车场的建筑结构特点，进行车辆段停车场共场段时漏缆、定向天线场景下，综合考虑两线无线用户之间存在的干扰，并据此进行频率运用分析。

4.1 东坝车辆段概述

东坝车辆段为北京地铁 3 号线和 12 号线共用场段，车辆段整体平面如图 2 所示。

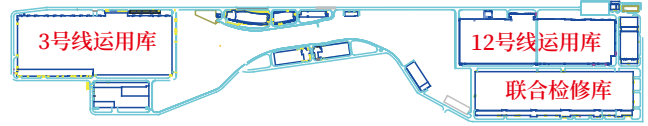


图2 东坝车辆段整体平面

Fig.2 Overall layout of Dongba rolling stock depot

据场段建筑结构分析，整个场段都在地上，上方为一整块上盖。出/入段线 U 型槽、运用库、洗车库、工程车库、调机车库是分开的；咽喉区大部分是分开的，部分交叉混跑区域共用；联合检修库、组合车库、试车线共用。非盖下区域的综合楼、变电所和物资总库虽然是分开的，但相隔较近。

4.2 车辆段业务场景分析

根据信号控制模式，场段划分为自动控制区和非自动控制区。

自动控制区包括：出/入段线、停车列检库及相应咽喉区、洗车库、月检库。

非自动控制区包括：检修库、调机工程车库、镗轮库、试车线及相应咽喉区。

根据覆盖场景分析，车辆段覆盖范围业务场景分析如表 3 所示。

4.3 共用场段频率运用分析

1) 出/入段线

东坝车辆段 3 号线和 12 号线的出/入段线分别在场段的右上方和左下方，距离相隔较远。

表3 车辆段覆盖范围业务场景

Tab.3 Service scenarios within scope of rolling stock depot

场景	承载业务及带宽		覆盖方式	终端	频率资源 / MHz
	A 网	B 网			
车辆段出/入段线、咽喉区、洗车库（库）等（盖下）	CBTC+ 集群调度业务+IMS，合计 6 ~ 15 Mbit/s	行车相关业务，6.5 Mbit/s	漏缆 + 天线	TAU、车载台、手持台	20
停车列检库（盖下）	CBTC+ 集群调度业务+IMS+ 走行部，合计 15 Mbit/s	行车相关业务，6.5 Mbit/s	天线	TAU、车载台、手持台	20
联合检修库、月检库等检修库（盖下）	集群调度业务，2 Mbit/s	集群调度业务，2 Mbit/s	天线	车载台、手持台	20
试车线（盖下）	CBTC+ 集群调度业务，4 Mbit/s	CBTC+ 集群调度业务，4 Mbit/s	漏缆	TAU、车载台、手持台	20
车辆段地面综合楼、变电所等	集群调度业务，2 Mbit/s	集群调度业务，2 Mbit/s	天线	手持台	15

出/入段线 U 型槽通过漏缆加定向天线以空间物理隔离方式可以避免线路间相互干扰, 能满足所有业务需求, 2 条线均可运用 20 MHz 频率。

2) 运用库、洗车库

运用库(含停车库)、洗车库通过漏缆或室内定向天线以空间物理隔离方式避免线路间相互干扰, 能满足行车相关业务需求, 2 条线均可运用 20 MHz 频率。

3) 咽喉区

咽喉区及其他轨行区, 有交叉混跑区域, 无法采用空间物理隔离方式, 2 条线各采用 5 MHz+5 MHz 异频组网, 可以满足 6.5 Mbit/s 业务需求。

4) 联合检修库和组合车库

联合检修库和组合车库为彼此共用区域, 无法采用空间物理隔离方式, 2 条线各采用 5 MHz+5 MHz 异频组网, 可以满足集群调度业务需求。

5) 试车线

试车线为彼此共用区域, 无法采用空间物理隔离方式, 建议采用漏缆覆盖, 2 条线各采用 5 MHz+5 MHz 异频组网, 可以满足 CBTC 和集群调度业务需求。

6) 综合楼、变电所

地面综合楼、变电所等虽然分线独立设置, 但是空间相邻, 若采用室外天线+室分天线的覆盖方式, 室外天线无法满足空间物理隔离, 2 条线各采用 3 MHz+3 MHz 频率错开, 可以满足集群调度业务需求。

当仅考虑综合楼和变电所的覆盖时, 无需设置室外天线, 通过室分天线实现建筑物内覆盖, 则 2 条线可共用 10 MHz+5 MHz。

5 田村停车场频率运用分析

田村停车场原规划为北京地铁 3 号线和 12 号线共用场段, 后取消 3 号线共用部分, 本文仍采用原共用场段进行分析。

虽是共用场段, 但出/入段线 U 型槽、咽喉区、试车线、运用库、洗车库、工程车库和调机车库都是分开的; 非盖下区域的综合楼、变电所和物资总库也是分开的, 且相隔不近。停车场整体平面如图 3 所示。

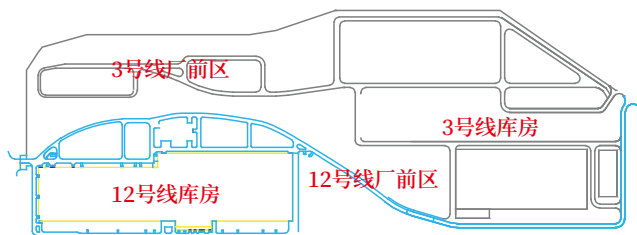


图3 田村停车场整体平面

Fig.3 Overall layout of Tiancun stabling yard

因此 3 号线和 12 号线频率原则上可以共用。为避免 2 条线邻近处同频干扰, 盖下要求采用漏缆覆盖。

6 共用场段频率运用原则

根据基于 LTE 的城市轨道交通车-地通信综合承载系统在国家铁道实验中心的测试结果及文献给出的测试数据, 15 MHz 带宽 LTE-M 网络在采用 2:2 时隙配置时, 上行平均吞吐量为 17.1 Mbit/s, 下行吞吐量为 19.3 Mbit/s。其他系统带宽 (3、5、10 MHz) 下按比例折算。综合考虑承载能力及建筑结构对共存的可能性, 共用场段频率运用措施如下。

东坝车辆段频率运用措施如表 4 所示。据此总结共用场段频率运用原则, 如表 5 所示。

表4 东坝车辆段频率运用措施

Tab.4 Frequency use measures at Dongba rolling stock depot

地点	承载业务带宽需求 / (Mbit/s)		频率资源 / MHz	频率运用 / MHz
	A 网	B 网		
车辆段出/入段线 (U 型槽附近)	15	6.5	20	共用 15+5
咽喉区	6.5	6.5	20	各 5+5
洗车库	6.5	6.5	20	共用 15+5
运用库	15	6.5	20	共用 15+5
联合检修库和组合车库	2	2	20	各 5+5
试车线	4	4	20	各 5+5
综合楼、变电所等	2	2	15	共用 10+5

7 结论

本文根据北京轨道交通 LTE-M 系统的频率资源和共用场段特点, 分析了北京轨道交通东坝车辆段及田村停车场 LTE-M 系统的干扰场景, 提出了

表5 共用场段频率运用
Tab.5 Frequency use of shared yard section

地点	频率运用原则
各自独立的车辆段出/入段线(U型槽附近)、停车列检库(运用库)、洗车库	共用 15 MHz+5 MHz
混用的咽喉区、联合检修库、组合车库、试车线	各 5 MHz+5 MHz
地面综合楼、变电所等	各 3 MHz+3 MHz (室外天线情形下) 共用 10 MHz+5 MHz (仅室分天线情形下)

共用场段场景下自动控制区和非自动控制区的频率运用原则。为 LTE-M 系统建设,特别是共用场段内的 LTE-M 系统间干扰防护方面提供参考。

参考文献

[1] 蔡京军, 丰磊, 马兰, 等. 北京大兴国际机场线基于 LTE-M 系统的业务综合承载方案 [J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22 (12): 176-181.
Cai Jingjun, Feng Lei, Ma Lan, et al. Business Comprehensive Bearing Scheme for Beijing Daxing International Airport Express Based on LTE-M System[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(12): 176-181.

[2] 戴克平, 张艳兵, 朱力, 等. 基于 LTE 的城市轨道交通车地通信综合承载系统 [J]. 都市快轨交通, 2016, 29 (1): 69-74.
Dai Keping, Zhang Yanbing, Zhu Li, et al. An Integrated LTE-Based Urban Rail Train Ground Communication System[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(1): 69-74.

[3] 周建美. LTE-M 系统频率干扰研究 [J]. 铁道通信信号, 2018, 54 (12): 86-90.
Zhou Jianmei. Study on Frequency Interference of LTE-M System[J]. Railway Signalling & Communication, 2018, 54(12): 86-90.

[4] 戴克平. LTE-M 车-地无线通信系统抗干扰研究 [J]. 铁道通信信号, 2017, 53 (2): 47-50.
Dai Keping. Research on Anti-Interference Solution for LTE-M Train-Ground Wireless Communication

in Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2017, 53(2): 47-50.

[5] 蔡秉江. 全自动运行场景下 LTE-M 系统业务分析及频率规划 [J]. 铁道勘测与设计, 2020 (4): 60-63.

[6] 王鹏. 西安机场线 LTE-M 系统干扰保护及网络优化 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24 (5): 47-50.
Wang Peng. Interference Protection and Network Optimization of LTE-M System on Xi'an Airport Intercity Railway[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(5): 47-50.

[7] 张世铭. LTE-M 系统在同站台平行换乘车站覆盖方案的应用研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16 (12): 51-55.
Zhang Shiming. Research on Application of LTE-M System Coverage Scheme of Parallel Transfer on the Same Platform[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16(12): 51-55.

[8] 蔡秉江. 全自动运行场景下 LTE-M 系统业务分析及频率规划 [J]. 铁道勘测与设计, 2020 (4): 60-63.
Cai Bingjiang. Function Analysis and Frequency Allocation of LTE-M System in Fully Automatic Operation Scenario[J]. Railway Survey and Design, 2020(4):60-63.

[9] 王鹏. 西安机场线 LTE-M 系统干扰保护及网络优化 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24 (5): 47-50.
Wang Peng. Interference Protection and Network Optimization of LTE-M System on Xi'an Airport Intercity Railway[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(5):47-50.

[10] 张世铭. LTE-M 系统在同站台平行换乘车站覆盖方案的应用研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16 (12): 51-55.
Zhang Shiming. Research on Application of LTE-M System Coverage Scheme of Parallel Transfer on the Same Platform[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019,

- 16(12):51-55.
- [11] 潘皓, 丰磊. 北京轨道交通换乘站LTE-M系统干扰分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(11): 70-75.
Pan Hao, Feng Lei. Analysis of LTE-M System Interference of Beijing Rail Transit Transfer Stations[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(11):70-75.
- [12] 白雪. 轨道交通LTE系统等保接入方案及实现[J]. 铁路通信信号工程技术, 2024, 21(1): 92-97.
Bai Xue. Grading Protection Access Scheme and Implementation of Rail Transit LTE System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2024, 21(1):92-97.
- [13] 陈尔超, 王喜军, 杨立新, 等. 轨道交通改造工程漏泄电缆敷设方案[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(2): 89-94.
Chen Erchao, Wang Xijun, Yang Lixin, et al. Research on Leakage Cable Laying Scheme in Rail Transit Modification Project[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(2):89-94.
- [14] 林静. 温州轨道交通LTE系统共用区域覆盖解决方案[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(3): 63-67.
Lin Jing. Common Area Coverage Solution of
- LTE System for Wenzhou Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(3):63-67.
- [15] 王锐. 机车综合无线通信设备功能号注册问题简析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(7): 55-58.
Wang Rui. Analysis of Registration of CIR Function Number[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(7):55-58.
- [16] 杨震, 邝荣华, 蔡景俏, 等. 基于PRP提升CBTC车地无线通信可靠性方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(9): 83-86, 100.
Yang Zhen, Kuang Ronghua, Cai Jingqiao, et al. Research on Improving Reliability of CBTC Train-Ground Wireless Communication Based on PRP[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(9):83-86,100.
- [17] 张世铭, 张建明, 许瑜. 成都地铁1号线信号系统车地无线改造工程方案[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(11): 92-96.
Zhang Shiming, Zhang Jianming, Xu Yu. Vehicle-Ground Wireless Renovation Project of Signaling System for Chengdu Metro Line 1[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(11):92-96.

(上接80页)

- [12] 夏炜炜. 基于IPv6的IP城域网优化改造方案[J]. 中国新通信, 2019, 21(15): 65.
- [13] 孙祥. 融合智能的新型IP城域网建设方案分析[J]. 通信电源技术, 2022, 39(8): 168-170.
- [14] 田辉. “IPv6+”开启下一代互联网创新之门[J]. 通信世界, 2022(4): 12-14.
- [15] 张桂玉, 刘博文, 马季春, 等. 运营商网络向SRv6技术演进的方案研究[J]. 邮电设计技术, 2023(11): 62-66.
Zhang Guiyu, Liu Bowen, Ma Jichun, et al. Research on Evolution of Operator Network to SRv6 Technology[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2023(11): 62-66.

城市轨道交通场段库门控制系统与 信号系统接口方案

李 勇

(比亚迪通信信号有限公司, 广东深圳 518118)

摘要: 城市轨道交通全自动运行线路中, 场段内停车列检库设置的库门对各全自动区域起到隔离封锁的作用。列车出/入库作业过程中, 库门需执行打开和关闭操作, 采用何种库门控制方式将会影响列车出/入库作业的安全和效率。首先介绍全自动运行线路库门控制防护原理, 然后对库门控制系统与信号系统间采用不同的接口方式进行分析 and 比较, 最后给出适用于全自动运行线路的接口方式。

关键词: 城市轨道交通; 全自动运行; 信号系统; 库门控制系统

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)05-0122-07

Research on Interface Scheme Between Depot Garage Door Control System and Signaling System for Urban Rail Transit Lines

Li Yong

(BYD Signal & Communication Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: For urban rail transit lines equipped with the Fully Automatic Operation (FAO) system, the doors of the train parking and maintenance garage in the depot service the purpose of isolating and blocking various fully automatic areas. As the garage doors need to be opened and closed when the trains enter and leave the garage, the control mode of the garage doors of urban rail transit lines can affect the safety and efficiency of train entrance to and exit from the garage. This paper first describes the principles of garage door control and protection for FAO lines. It then analyzes and compares different interface modes between the garage door control system and the signaling system. It finally proposes the interface mode suitable for FAO lines.

Keywords: urban rail transit; fully automatic operation; signaling system; garage door control system

城市轨道交通全自动运行线路场段内的停车库通常都设置有车库门, 部分库门完全由人工操作开/

关门, 比如定修线、临修线、工程车库等, 列车进/出库安全完全由人工保障。全自动运行区域的停车列检库的库门需与信号联锁系统接口, 信号系统通过采集库门状态控制列车出/入库安全运行。首先介绍车库门防护原理, 然后分别对库门控制系统和

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2024-03-14

作者简介: 李勇(1988—), 男, 工程师, 本科, 主要研究方向: 铁路信号控制, 邮箱: 348217756@qq.com。

信号系统间不同接口方式的接口电路、相关要求及安全可靠性进行分析。

1 库门防护原理

库门状态防护原理如图 1 所示。信号联锁系统采集到库门状态信息用于控制列车进路办理及信号开放。若库门为开门状态，可办理入库或出库进路，若库门为关闭状态，则不可办理入库或出库进路，已办理并开放信号的进路会自动关闭信号。同时计算机联锁（CI）会将库门状态信息发送给区域控制器（ZC），ZC 需根据库门状态信息实时监督库门状态。若库门为关闭状态，ZC 在为列车计算移动授权（MA）时，将库门所在逻辑区段起点作为危险点。若该危险点为列车运行前方最近的危险点（即列车与该库门类危险点之间无其他类型危险点），则 ZC 将该库门危险点作为最小危险点为该列车计算移动授权，MA 终点即为库门所在逻辑区段始端后退一定安全余量处，并将移动授权发送给车载控制器（VOBC）子系统，VOBC 子系统按移动授权控制列车于移动授权终点前停车。若列车运行过程中，MA 已与库门所属逻辑区段有重叠时，此时 ZC 接收到库门为关闭状态，ZC 会将 MA 回缩至库门所属逻辑区段始端。MA 回缩后，若列车离库门较远，且运行速度较低，则 VOBC 控制列车舒适减速运行至 MA 终点前停车，若列车离库门较近且运行速度超过此时的紧急制动触发速度曲线，列车则会紧急制动停车。

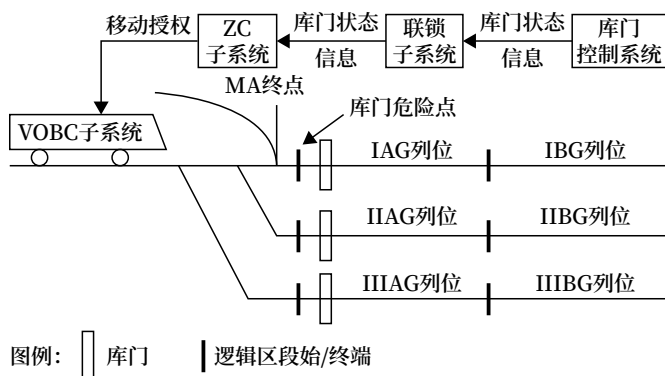


图1 库门状态防护原理

Fig.1 Principle diagram of garage door status protection

在整个防护过程中，库门状态、列车运行情况会通过数据通信系统（DCS）传输给ATS子系统，ATS人机界面会实时显示。

当某库门处于开门状态，但由于故障无法反馈正确的开门且锁闭状态信息，由调度或值班人员确认后，通过按压库门旁路按钮将该库门旁路，联锁和ZC子系统不再检查该库门关闭状态。待该库门故障处理完成后，取消库门旁路，由此减小由于库门故障对列车出/入库作业的影响。

2 库门与信号系统接口方案

库门控制系统与信号系统接口主要有两种方式：1) 信号系统仅采集库门的开门且锁闭状态，不参与控制库门打开和关闭（即只监不控，由车库门控制系统直接控制）；2) 信号系统既采集车库门开门且锁闭状态用于列车运行控制，也控制库门打开和关闭（既监又控）。后续对这两种方式的接口界面、接口电路、库门防护过程等进行分析。

2.1 信号系统仅采集库门状态（只监不控）

2.1.1 信号系统与库门控制系统接口说明

这种接口方式下，信号系统只采集库门状态信息和旁路信息。库门控制系统与信号系统接口界面如图 2 所示，接口界面设置在库门控制系统接线端子排处。

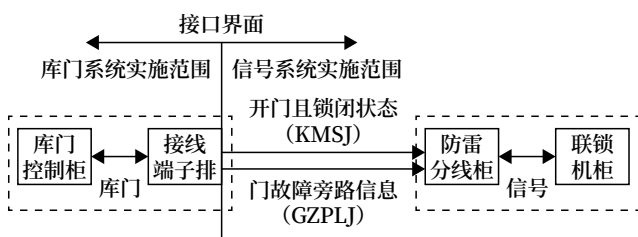


图2 库门控制系统与信号系统接口界面示意（只监不控）

Fig.2 Schematic diagram of interface between garage door control system and signaling system (only monitor, not control)

库门控制系统设置开门且锁闭继电器（KMSJ）和库门故障旁路继电器（GZPLJ），库门控制系统与信号系统间信号传递说明如表 1 所示。

信号联锁系统与库门控制系统接口电路如图 3 所示。

表1 库门控制系统与信号系统间信息传递说明（只监不控）

Tab.1 Description of information transfer between garage door control system and signaling system (only monitor, not control)

信息传递方向	信息名称	继电器名称	继电器常态	吸起状态含义	落下状态含义
库门控制系统→ 信号系统	开门且锁闭状态	开门且锁闭继电器 (KMSJ)	吸起	库门为打开且锁闭状态	库门非打开且锁闭状态
	门故障旁路信息	门故障旁路继电器 (GZPLJ)	落下	库门因故障处于非打开且锁闭 状态, 门故障旁路开关打开	门故障旁路开关关闭

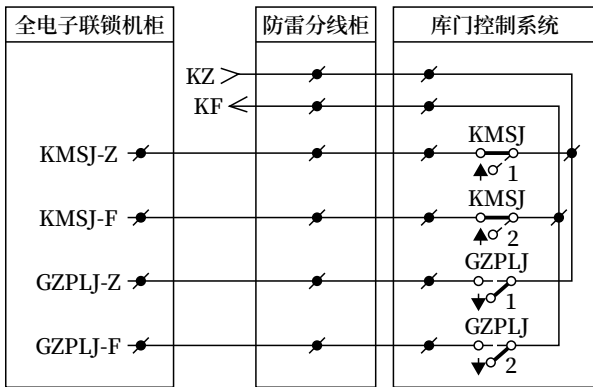


图3 库门控制系统与信号系统接口电路（只监不控）
Fig.3 Circuit diagram of interface between garage door control system and signaling system (only monitor, not control)

2.1.2 库门防护说明

库门的控制由库门专业人员完成，在库门控制室人工操作库门的打开和关闭。库门控制系统实时采集库门的状态信息，并通过硬线接口传递给信号联锁系统。当库门打开且信号系统采集到 KMSJ 吸起状态，经过该库门的列车进路可办理。当库门关闭、库门打开但未锁闭或因采集故障导致库门状态采集失败时，开门且锁闭继电器（KMSJ）落下。信号系统采集到 KMSJ 落下状态，不可办理经过该库门的列车进路，已办理经过该库门并开放信号的进路，立即关闭信号。

2.1.3 库门故障旁路

库门打开但因采集故障导致打开且锁闭状态采集失败时，为不影响列车正常出/入库作业，由人工现场确认故障库门确已打开到位，且无其他影响列车运行的情况时，可打开门故障旁路开关。库门控制系统将旁路信息发送给信号系统，联锁和 ZC 子系统不再检查该库门打开且锁闭状态，不影响经过该库门的进路办理和移动授权，列车可正常出/入该库门。

2.2 信号系统采集库门状态且控制库门开关（既监又控）

2.2.1 信号系统与库门控制系统接口说明

这种接口方式下，信号系统既需采集库门状态信息和旁路信息，又需控制库门打开和关闭。库门控制系统与信号系统接口界面如图 4 所示，接口界面同样设置在库门控制系统接线端子排处。

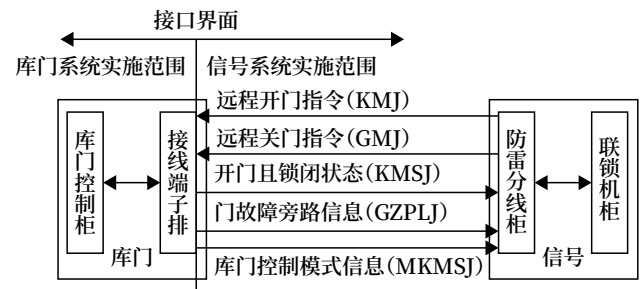


图4 库门控制系统与信号系统接口界面示意（既监又控）
Fig.4 Schematic diagram of interface between garage door control system and signaling system (monitor and control)

库门控制系统设置 KMSJ、GZPLJ、门控模式继电器（MKMSJ），信号系统设置开门继电器（KMJ）和关门继电器（GMJ）。库门控制系统与信号系统间信息传递说明如表 2 所示。

信号联锁系统与库门控制系统接口电路如图 5 所示。

2.2.2 库门现地控制模式防护说明

当库门处于现地控制模式（MKMSJ 落下）时，库门不响应信号系统远程打开或关闭控制指令，此时，库门与信号系统接口与只监不控接口方式类似，信号系统采集库门状态信息用于控制进路办理及列车运行。

2.2.3 库门远程控制模式下逻辑时序

当库门处于远程控制模式（门控模式继电器 MKMSJ 吸起）时，库门应响应信号系统远程打开

表2 库门控制系统与信号系统间信息传递说明（既监又控）

Tab.2 Description of information transfer between garage door control system and signaling system (monitor and control)

信息传递方向	信息名称	继电器名称	继电器常态	吸起状态含义	落下状态含义
信号系统→ 库门控制系统	远程开门指令	开门继电器 (KMJ)	落下	信号系统输出开门指令	信号系统未输出开门指令
	远程关门指令	关门继电器 (GMJ)	落下	信号系统输出关门指令	信号系统未输出关门指令
库门控制系统→ 信号系统	门控模式	门控模式继电器 (MKMSJ)	吸起	库门处于信号远程控制模式	库门处于现地控制模式, 不响应信号远程控制指令
	开门且锁闭状态	开门且锁闭继电器 (KMSJ)	吸起	库门为打开且锁闭状态	库门非打开且锁闭状态
	门故障旁路信息	门故障旁路继电器 (GZPLJ)	落下	库门因故障处于非打开且锁闭状态, 门故障旁路开关打开	门故障旁路开关关闭

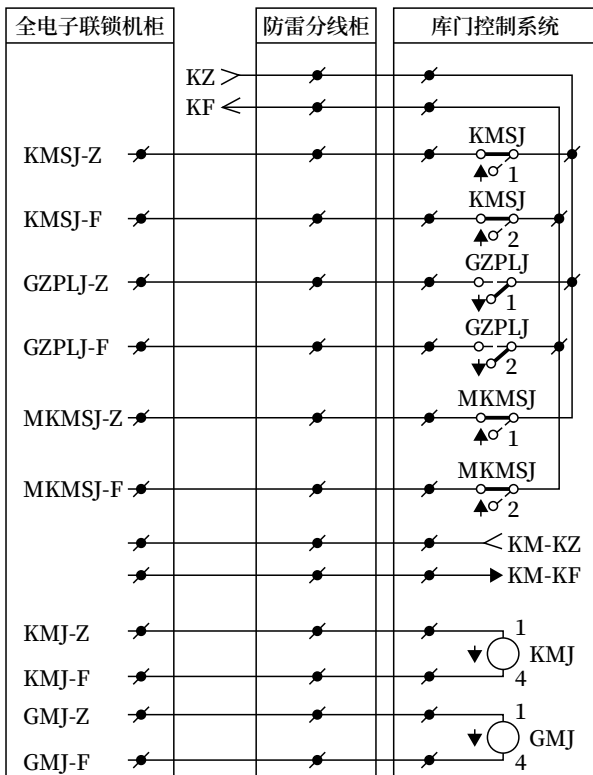


图5 库门控制系统与信号系统接口电路（既监又控）
Fig.5 Circuit diagram of interface between garage door control system and signaling system (monitor and control)

或关闭控制指令。信号系统与库门控制系统间的控制逻辑时序如图6所示。

T_0 时刻：门控模式处于远程控制模式，门故障旁路状态为关闭，库门状态为关闭，远程开门指令、远程关闭指令均未发送；

T_1 时刻：信号系统发送远程开门指令，库门控制系统收到开门指令后，开始控制库门打开；

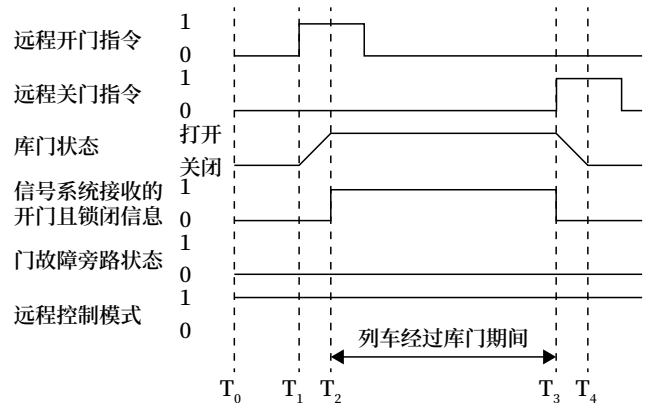


图6 信号系统与库门控制系统控制逻辑及时序
Fig.6 Control logic and sequence of garage door control system and signaling system

T_2 时刻：库门完全打开，并保持开门状态，信号系统接收到库门开门且锁闭状态信息；

T_3 时刻：信号系统发送远程关门指令，库门控制系统收到关门指令后，开始控制库门关闭，信号系统接收到库门非开门且锁闭状态信息；

T_4 时刻：库门完全关闭并保持关门状态。

2.2.4 库门远程控制模式下列车出/入库过程

当库门控制模式处于远程控制模式，库门应响应信号系统远程打开或关闭控制指令。列车出/入库运行过程中，根据列车所处位置，触发列车所需经过库门打开或关闭，详细情况如下。

列车入库作业：列车入库计划已办理，列车运行进入入库进路，当列车运行至库门的距离为列车制动距离（根据场段内列车限速和最大减速度计算）和库门动作时间及通信延迟期间列车走行距离之和

时, 信号系统向库门控制系统发送远程开门指令, 库门控制系统控制库门打开并向信号系统反馈库门打开且锁闭状态信息, 信号系统为列车延伸移动授权, 列车正常向前运行入库。若库门未正常打开, ZC 子系统为列车计算移动授权终点为库门所属逻辑区段始端回退一定安全余量处, VOBC 按移动授权控制列车在库门前停车。待库门正常打开且锁闭后, 移动授权延伸, 列车可发车入库。当列车包络完全越过库门, 信号系统向库门控制系统发送远程关门指令, 库门系统控制库门关闭。

列车出库作业: 列车出库计划已办理, 按出库计划自动唤醒后, 信号系统向库门控制系统发送远程开门指令, 库门控制系统控制库门打开并向信号系统反馈库门打开且锁闭状态信息, 信号系统为列车发送移动授权, 列车正常向前运行出库。若库门未正常打开, 位于靠近库门停车列位 (如图 1 所示 IAG 列位) 的列车不能获取移动授权不能发车, 远离库门停车列位 (如图 1 所示 IIAG 列位) 的列车运行至库门前停车 (移动授权终点为库门前)。待库门正常打开且锁闭后, 列车移动授权延伸, 可发车并出库。当列车包络完全越过库门, 信号系统向库门控制系统发送远程关门指令, 库门系统控制库门关闭。

2.2.5 库门故障旁路

当列车入库或出库过程中, 库门打开, 但未采集到打开且锁闭状态, 为不影响列车正常出/入库作业, 由调度或人工现场确认故障库门确已打开到位, 不影响列车正常通过该库门, 且无其他影响列车运行的情况时, 可打开门故障旁路开关。库门控制系统将旁路信息发送给信号系统, 联锁和 ZC 子系统不再检查该库门打开且锁闭状态, 不影响经过该库门的进路办理和移动授权, 列车可正常出/入该库门。

3 接口方案安全分析

3.1 信号系统仅采集库门状态 (只监不控)

列车入库或出库过程中, 信号系统不对库门进行控制。库门开关时机完全依赖于库门工作人员操作控制, 若过早打开或过晚关闭库门, 会导致库门

长时间处于打开状态而失去库门本身的隔离封锁的作用。若过晚打开或过早关闭库门, 则会导致影响列车通过库门的运行安全, 库门开关及列车通过库门的安全由库门工作人员、场段调度人员和司机共同保证, 信号系统不能对其进行防护。

3.2 信号系统采集库门状态且控制库门开关 (既监又控)

这种接口方式下, 远程控制模式时, 信号系统控制库门打开和关闭, 在列车运行出/入库过程中, 在合理的时机向库门控制系统发送库门打开或关闭指令, 库门系统按信号系统发送的指令控制库门。库门开关和列车通过库门的运行安全可由信号系统防护, 既能防止第一种接口方式下库门工作人员过早打开或过晚关闭库门导致库门长时间处于打开状态, 也能防止过晚打开或过早关闭库门导致影响列车通过库门运行安全。当远程控制模式无法正常使用时, 可切换至现地控制模式, 当无法获取库门打开且锁闭状态, 由人工确认库门实际处于打开状态且可保证列车安全通过, 可打开库门旁路开关, 从而有效降低由于库门故障对列车出/入库作业的影响。

4 总结

全自动运行城市轨道交通线路中, 场段全自动运行区域停车列检库需设置库门, 列车出/入库作业过程中, 需对库门执行打开和关闭操作。通过对库门系统与信号系统间两种接口方式分析及比较, 可以看出, 在全自动运行线路中, 采用既监又控的接口方式非常必要, 可避免由于库门操作人员失误导致对列车运行安全和运行效率的影响。

参考文献

- [1] 李宇麒, 高振天, 尹恩华, 等. 全自动运行线路车库门监控系统的设计与研究 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2022 (3): 22-27.
Li Yuqi, Gao Zhentian, Yin Enhua, et al. Research and Design of Garage Door Monitoring and Control System for Fully Automatic Operation (FAO)

- Line[J].Industrial Instrumentation & Automation, 2022(3):22-27.
- [2] 崔惠珊, 盖克荣, 李雪枝, 等. FAO 下信号系统与站台门一体化方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(5): 62-66.
Cui Huishan, Gai Kerong, Li Xuezhi, et al. Integrated Design Scheme of Signaling System and Platform Screen Door under FAO[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(5):62-66.
- [3] 于秦龙. 上海地铁 13 号线信号与屏蔽门系统接口分析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(5): 81-85, 91.
Yu Qinlong. Interface Analysis of Signaling System and PSD System for Shanghai Metro Line 13[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(5):81-85,91.
- [4] 严伟. CTCS2+ATO 系统车门与站台门联动问题 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(7): 34-39.
Yan Wei. Discussion on Linkage between Train Doors and Platform Screen Doors of CTCS2 + ATO System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(7):34-39.
- [5] 曹艳霞. 城市轨道交通信号系统关于信号与站台门 / 防淹门接口监测电路的分析 [J]. 数字技术与应用, 2022, 40(6): 26-28.
- [6] 李景虎. 基于城市轨道交通无人驾驶技术的站台门系统与信号系统接口设计与测试 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12): 101-105.
Li Jinghu. Design and Testing of Platform Screen Door System and Signaling System Interface Based on Urban Rail Transit FAO Technology[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12):101-105.
- [7] 冯维佳. 适用于全自动运行信号系统的站台功能研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(12): 80-83, 92.
Feng Weijia. Research on Platform Function of Fully Automatic Operation Signaling System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(12):80-83,92.
- [8] 文仁广, 伍贤维. 成都市轨道交通 18 号线长大区间防淹门远程控制方案研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2021(2): 18-21.
Wen Renguang, Wu Xianwei. Research on Remote Control Scheme of Flood Gate in Long Section of Chengdu Rail Transit Line 18[J]. Modern Urban Transit, 2021(2):18-21.
- [9] 孙宇翔. 地铁工程中防淹门控制系统与信号系统接口的探讨 [J]. 上海建设科技, 2019(4): 30-32, 36.
Sun Yuxiang. Discussion on the Interface of Anti-Flooding Door Control System and Signal System in Subway Engineering[J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2019(4):30-32,36.
- [10] 郭碧. 城轨信号系统与防淹门接口配置分析与优化 [J]. 机电信息, 2019(15): 137-139.
- [11] 魏文涛. 广州地铁 4 号线信号系统与防淹门的逻辑控制 [J]. 铁道通信信号, 2013, 49(5): 45-49.
Wei Wentao. Logic Control of Signal System and Anti-Flooding Gate in Guangzhou Metro Line 4[J]. Railway Signalling & Communication, 2013, 49(5): 45-49.
- [12] 孙宇翔. 地铁工程中防淹门控制系统与信号系统接口的探讨 [J]. 上海建设科技, 2019(4): 30-32, 36.
Sun Yuxiang. Discussion on the Interface of Anti-Flooding Door Control System and Signal System in Subway Engineering[J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2019(4): 30-32, 36.
- [13] 杨亮. 城市轨道交通信号系统和防淹门系统的接口研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(3): 90-94.
Yang Liang. Research on Interface between Signal System and Flood Gate System in Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(3): 90-94.
- [14] 常中伟. 兰州轨道交通 1 号线信号系统与防淹门接口方案探讨 [J]. 中国新技术新产品,

2016 (10): 32-33.

[15] 张强, 张扬, 刘波, 等. 城市轨道交通全自动驾驶列检库、洗车库的车库门安全防护方案[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(1): 132-136.

Zhang Qiang, Zhang Yang, Liu Bo, et al. Safety Protection Scheme for FAO Train Checkup Shed and Washing Garage Door[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(1): 132-136.

[16] 吴茜, 程梁. 城际铁路信号系统与防淹门系统接口设计研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(4): 173-176.

Wu Xi, Cheng Liang. Research on Interface

Design between Signal System and Flood Gate System in Intercity Railway[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(4): 173-176.

[17] 杨平. 地铁信号系统中防淹门的设置方案研究[J]. 电子技术与软件工程, 2022(19): 104-107.

[18] 于秦龙. 上海地铁13号线信号与屏蔽门系统接口分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(5): 81-85, 91.

Yu Qinlong. Interface Analysis of Signaling System and PSD System for Shanghai Metro Line 13[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(5): 81-85, 91.

(上接 89页)

[17] Jiao Lei, Xing Jianping, Zhang Xuan, et al. LCC-RWGH: a NLOS Error Mitigation Algorithm for Localization in Wireless Sensor Network[C]//2007 IEEE International Conference on Control and Automation. Guangzhou, China. IEEE, 2007:1354-1359.

[18] Xing Jianping, Zhang Jun, Jiao Lei, et al. A Robust Wireless Sensor Network Localization Algorithm in NLOS Environment[C]//2007 IEEE International Conference on Control and Automation. Guangzhou, China. IEEE, 2007:3244-3249.

[19] Wei Jiachen, Deng Zhongliang, Wang Hanhua, et al. An Improved Chan/Newton Combined Position Estimate Algorithm[M]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2020 Proceedings: Volume III. Singapore: Springer Singapore, 2020:437-447.

[20] Liang Zhendong, Yi Wenjun. Application of

Taylor-Chan Algorithm Based on TDOA in Sound Source Location[C]//MEMAT 2022; 2nd International Conference on Mechanical Engineering, Intelligent Manufacturing and Automation Technology. Guilin, China. VDE, 2022:1-4.

[21] Liao Mingxiang, Li Yongbo, Wang Guangyao, et al. An Indoor Positioning Algorithm Against NLOS Error Based on UWB[C]//2022 41st Chinese Control Conference (CCC). Hefei, China. IEEE, 2022:5140-5145.

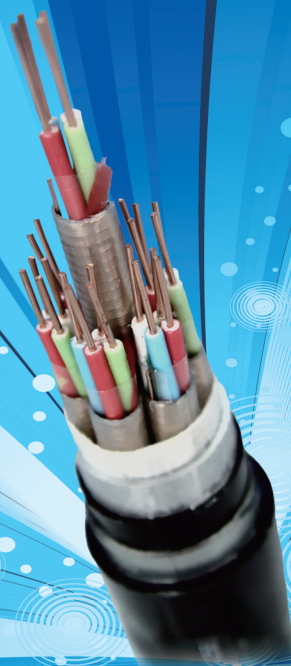
[22] 郑飞, 郑继禹. 基于TDOA的CHAN算法在UWB系统LOS和NLOS环境中的应用研究[J]. 电子技术应用, 2007, 33(11):110-113, 132.

Zheng Fei, Zheng Jiyu. Application Research of TDOA Based CHAN Algorithm under the Circumstances of LOS and NLOS in UWB System[J]. Application of Electronic Technique, 2007, 33(11):110-113, 132.



天水铁路电缆有限责任公司
Tianshui Railway Cable CO., Ltd.

天水铁路电缆有限责任公司是 1969 年建成的全路第一家生产电线电缆产品的企业，现隶属于通号电缆集团有限公司，是中国铁路通信信号股份有限公司三级子公司。



产品介绍

主要生产铁路数字信号电缆、铁路内屏蔽数字信号电缆、铁路信号电缆、通信电缆、电力电缆、光电综合缆、耐火电缆、控制电缆以及各种铜绞线、电线等八大类、三千多个规格的线缆产品。还可为用户提供耐油、防腐、耐火、阻燃、耐寒、防蚁、高屏蔽等特殊要求的电缆产品。产品主要涉及铁路、城市轨道交通、冶金、能源、通信、广电、石化和建筑领域等诸多行业。

技术优势

高新技术企业，国家知识产权优势企业，甘肃省“专精特新”中小企业，甘肃省级优秀技术中心，甘肃省工业设计中心，甘肃省技术转移示范机构，甘肃省高速铁路电缆及材料工程实验室，“铁路电缆生产技术与标准甘肃省国际科技合作基地”，省市级强工业“白名单”企业，“天水市轨道交通电缆技术创新中心”，多次荣获省市科技进步奖。相关产品有 50 余项发明和实用新型专利。主导或参与制订国家标准 1 项、行业标准 3 项、团体标准 1 项。

主要产品覆盖领域

- 高速铁路：京津客专、京沪高铁、沪杭客专、西成客专、宝兰客专、杭黄客专、京张高铁、杭绍台客专、昌景黄客专、汉巴南高铁、中兰客专、兰新高铁……
- 地铁轻轨：北京地铁、深圳地铁、重庆地铁、南宁地铁、厦门地铁、西安地铁、杭州地铁、广州地铁、武汉地铁、青岛地铁、兰州地铁……

天水铁路电缆有限责任公司

🏠 甘肃省天水市秦州区坚家河 4 号

☎ 0938-4982024

🌐 <http://thtl.csrc.cn>

国家级期刊

《铁路通信信号工程技术》

《铁路通信信号工程技术》由中国铁路通信信号集团有限公司主管
北京全路通信信号研究设计院集团有限公司主办

在铁路电务科研、设计、施工及维修等单位有较大影响，深得科技人员的好评。经国家新闻出版总署批准，自2005年12月起面向国内外公开发行人。

本刊是中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊；RCCSE中国准核心学术期刊；日本科学技术振兴机构数据库（JST）收录期刊；EBSCO学术数据库收录期刊；中国核心期刊（遴选）数据库收录期刊；中国学术期刊（光盘版）全文收录期刊；中文科技期刊数据库（全文版）收录期刊；中国学术期刊影响因子年报统计源期刊；超星期刊域出版平台全文收录；中国铁道学会通信信号分会指定期刊；国家新闻出版广电总局认定的A类学术期刊。

办刊宗旨：

为推动行业科技创新，促进研发与生产融合，带动产业协同发展，为从事轨道交通通信、信号和信息技术的广大科技人员搭建充分交流的平台，提供学习参考和论文发表的园地，充分展示国内外铁路和城市轨道交通领域的通信、信号和信息化技术的近期成果和发展动态，为推动中国轨道交通技术的创新和发展，促进中国轨道交通装备现代化而服务。

主要内容：

围绕铁路和城市轨道交通通信信号技术方面的科研创新、重点工程、优秀设计、国内外先进技术进行论述、探讨和追踪报导；对广大通信信号科技人员、高等院校师生、施工单位和企业设计施工人员，在新技术研发和工程实践中总结的科技成果进行交流；及时报导相关政策信息、标准信息 and 科技发展动态等。

订阅方式：

邮局订阅：各地邮局均可办理订阅手续，邮发代号 80-532
编辑部订阅：e-mail 或电话至编辑部
定价：10元/期
全年（12期）120元



期刊官网



微信公众号



联系方式：

电话：010-50805951；
010-50805954
期刊官网投稿：
<https://rsce.crscd.com.cn>
邮箱投稿：rsce@crscd.com.cn
地址：北京市丰台科技园区汽车博物馆南路1号院中国通号B座100070