

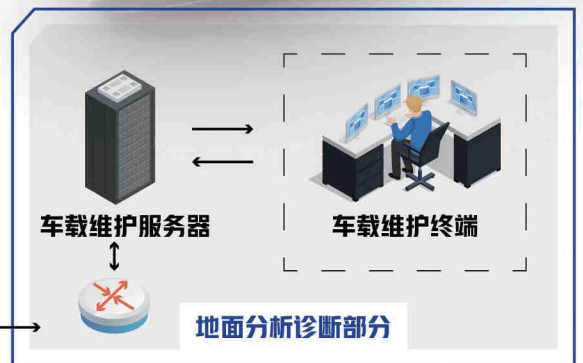
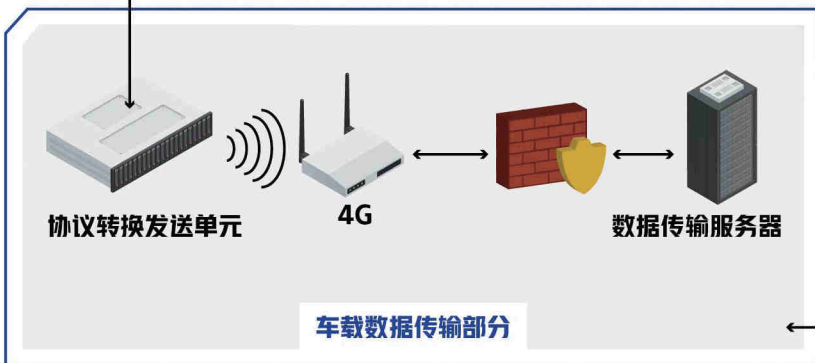
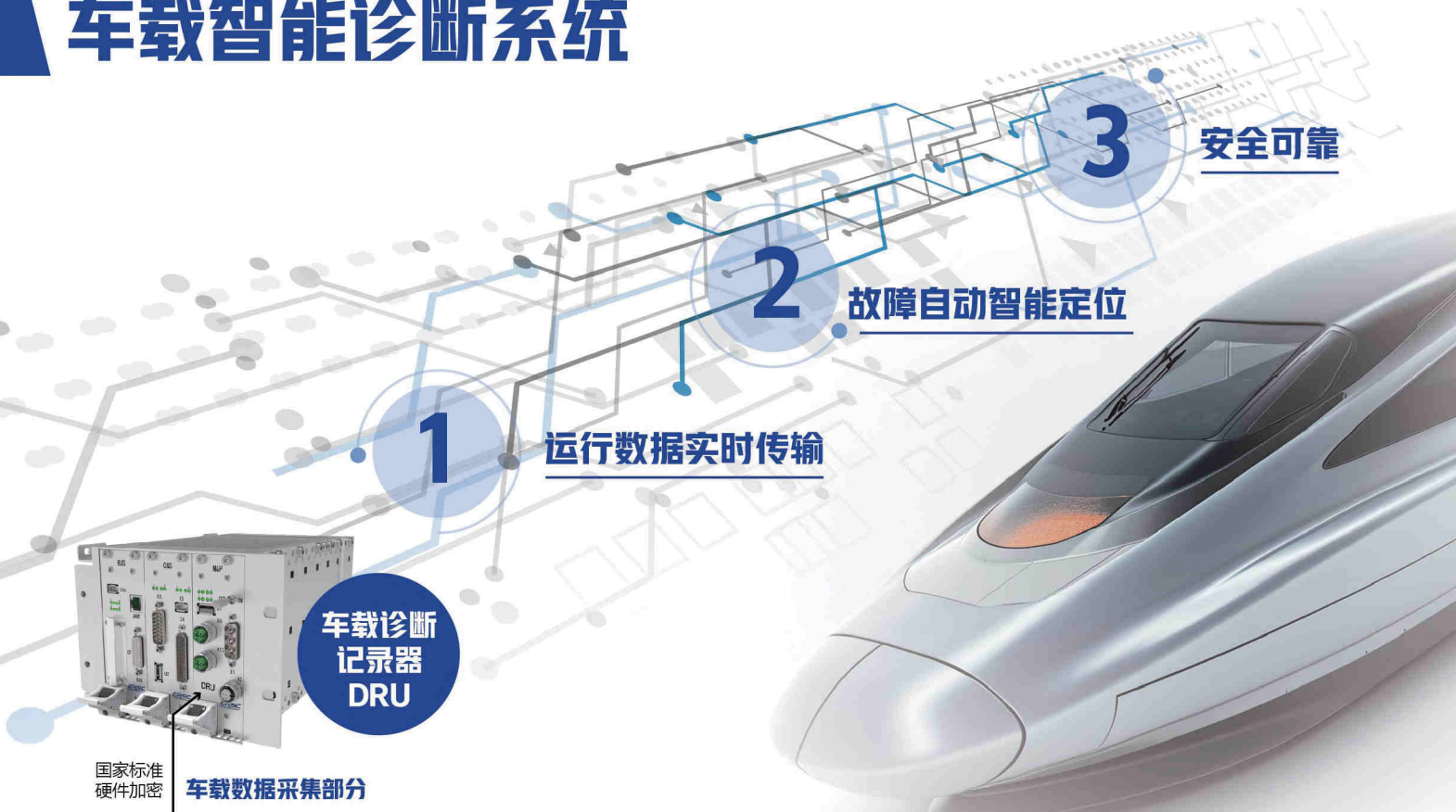
铁路通信信号工程技术

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. **1** 第21卷 总第157期

CTCS3-300T 车载智能诊断系统



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:

王锦 Wang Jin

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1期总第157期 Vol.21 No.1 S.No.157

出版: 2024年1月25日 Published on: 1/25/2024

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

都市圈轨道交通多网融合的信号系统方案研究 池春玲, 张伟, 宋睿, 符萌	1-9
TSRS与外部系统通信状态的自动测试方法研究 王秋莉, 芦时宇	10-15
高速铁路引入枢纽信号系统优化设计 邓伟龙	16-20
列控联锁一体化系统多层次结构化设计实现 路飞	21-25
基于DWC PCIE Core的数据传输系统设计 刘肖婷	26-29

通信及信息技术

铁路线路巡防平台建设方案研究 栗敏	30-35
高速铁路长大隧道GSM-R网络冗余组网方案分析 袁廷瑞, 熊洁, 路晓彤, 焦晓辉	36-41
移动性增强技术在铁路5G专网中应用场景研究 陈庭德, 王海龙, 陈煜	42-46
C3接口监测系统在高速铁路维护中的运用 陆守东	47-51
新朔铁路调度集中系统优化设计 刘燕, 谢生智, 陈永明	52-56

专题: 基于北斗的重载铁路列控系统(一)

基于北斗短报文的应用数据安全分析 苏耀伟, 曹晓宇, 史立柱	57-61
车载ATO系统记录板数据解析工具设计 曹晓宇	62-68
机车辅助驾驶系统的仿真平台研究 梁春燕	69-75

城轨交通

一种针对全自动运行系统的测试用例生成方法 梁君海, 李春峰, 万里, 杨毅峰, 薛一鸣	76-82
中低速磁浮车辆段闯红灯防护方案 路远	83-86
列车自动驾驶(ATO)季节性调节方案探讨 张帆	87-91
轨道交通LTE系统等保接入方案及实现 白雪	92-97

技术交流

QC小组法在列控系统集成项目中的应用 单鹤玲	98-102
板载继电器寿命测试系统设计与实现 王鑫, 赵兴海, 姚旺	103-107

国外项目

塞尔维亚信号系统与ETCS-2系统结合的应用 梁滨	108-115
------------------------------------	---------

行业信息

乘客搭乘首批安装ETCS系统的列车抵达伦敦(15)	
---------------------------	--

Railway Signalling & Communication Engineering

CONTENTS

Technological Innovation

Signalling Technology

Research on Signaling System Scheme of Multi-network Integration of Metropolitan Rail Transit	Chi Chunling, Zhang Wei, Song Rui, Fu Meng	1-9
Research on Automatic Test Method of Communication Status Between TSRS and External Systems	Wang Qiuli, Lu Shiyu	10-15
Optimization Design of Signaling System for Introducing High-speed Railway Lines into Hubs	Deng Weilong	16-20
Multi-level Structural Design and Realization of TIS system	Lu Fei	21-25
Design of Data Transmission System Based on DWC PCIE Core	Liu Xiaoting	26-29

Communication & Information Technologies

Research on Construction Plan of Railway Line Patrol Platform	Li Min	30-35
Analysis of GSM-R Redundancy Networking Scheme for Long Tunnel of High Speed Railway	Yuan Tingrui, Xiong Jie, Lu Xiaotong, Jiao Xiaohui	36-41
Research on Application Scenarios of Mobility Enhancement Technology in 5G-R Network	Chen Tingde, Wang Hailong, Chen Yu	42-46
Application of CTCS-3 Interface Monitoring System in High-speed Railway Maintenance	Lu Shoudong	47-51
Optimization Design of Xinshuo Railway CTC System	Liu Yan, Xie Shengzhi, Chen Yongming	52-56

Special Subject : Train Control System for Heavy Haul Railways Based on Beidou (I)

Safety Analysis of Application Data Based on Beidou Short Messages	Su Yaowei, Cao Xiaoyu, Shi Lizhu	57-61
Design of Data Parsing Tool for Record Board of Onboard ATO System	Cao Xiaoyu	62-68
Research on Simulation Platform for Locomotive Assisted Driving System	Liang Chunyan	69-75

Urban Rail Transit

Test Case Generation Method for Fully Automatic Operation System	Liang Junhai, Li Chunfeng, Wan Li, Yang Yifeng, Xue Yiming	76-82
Red Light Running Protection Scheme of Medium and Low Speed Maglev Depot	Lu Yuan	83-86
Discussion on Seasonal Regulation Scheme of Automatic Train Operation	Zhang Fan	87-91
Grading Protection Access Scheme and Implementation of Rail Transit LTE System	Bai Xue	92-97

Technological Exchange

Application of Quality Control Circle in Train Control System Integration Project	Shan Heling	98-102
Design and Implementation of Onboard Relay Life Test System	Wang Xin, Zhao Xinghai, Yao Wang	103-107

Projects Abroad

Application of Integration of Serbian Signaling System with ETCS-2 System	Liang Bin	108-115
--	-----------	---------

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.01.001

都市圈轨道交通多网融合的信号系统 方案研究

池春玲, 张伟, 宋睿, 符萌

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要: 结合都市圈网络化、公文化特点, 提出都市圈轨道交通信号系统融合的技术目标, 即采用现有技术 C2/C2+ATO 与 CBTC 系统的融合以及采用新型互联互通技术的信号系统间的融合。分析现有信号主流的 CTCS 系统与 CBTC 系统的地面和车载设备在技术层面、工作机理、系统功能等差异的基础上提出“地对车兼容”和“车对地兼容”的互联互通方案, 结合各目前相关单位在开展的研究情况, 分析新型市域铁路互联互通技术路线。

关键词: 多网融合; 信号系统; 中国列车运行控制系统; 基于通信的列车控制系统

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0001-09

Research on Signaling System Scheme of Multi-network Integration of Metropolitan Rail Transit

Chi Chunling, Zhang Wei, Song Rui, Fu Meng

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: According to the network and public transportation characteristics of the metropolitan area rails, the technical goal of integration of signaling systems is proposed, which is, the integration of existing C2/C2+ATO and CBTC systems and the integration of signaling systems using new interconnection technology. Based on the analysis of differences in technical level, working mechanism and system function between the ground and vehicle equipment of the existing mainstream CTCS and CBTC systems, the interconnection schemes of "ground-to-vehicle compatibility" and "vehicle-to-ground compatibility" are proposed. Combined with the current researches of relevant manufacturers, the new interconnection technology route of suburban railway is analyzed.

Keywords: multi-network integration; signaling system; CTCS; CBTC

收稿日期: 2023-10-18; 修回日期: 2024-01-01

基金项目: 中铁第四勘察设计院集团有限公司科研项目 (2022K012)

第一作者: 池春玲 (1977—), 女, 正高级工程师, 本科, 主要研究方向: 铁路信号专业设计、咨询、技术管理, 邮箱: tsyccel@163.com。

2019年2月, 中华人民共和国国家发展和改革委员会颁布《关于培育发展现代化都市圈的指导意见》, 提出打造轨道上的都市圈、城市群, 推动干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通“四网融合”。2022年《“十四五”现代综合交通运

输体系发展规划》中提出：强化重点城市群城际交通建设。围绕京津冀、长三角、粤港澳大湾区、成渝、长江中游等城市群，以轨道交通、高速公路为骨干，提升城际运输通道功能。加强核心城市快速直连，构建多节点、网络化的城际交通网，实现城市群内主要城市间 2 h 通达。

为响应国家相关发展要求，全国各大城市地区开展了大量城市群、都市圈多层次轨道交通的规划研究及建设工作。为实现都市圈“网络化的城际交通网”，提出了轨道交通“多网融合”的要求，其中信号系统融合成为实现多网融合的关键技术之一。

1 都市圈多网融合的内涵

1.1 多网内涵

结合国内城市群及都市圈城镇体系、多层次轨道交通网络布局规划，轨道交通的“多网”包括承担区际交通功能为主，兼顾城际交通、都市圈通勤功能的“干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通”四网；承担城际交通功能为主，兼顾都市圈通勤功能的“城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通”三网；以及衔接市域、城轨交通的“市域(郊)铁路、城市轨道交通”两网。

1.2 多网融合内涵

西南交通大学彭其渊教授对轨道交通“四网”融合的定义及内涵作出了全面系统的阐述，提出了“四网-四域-多功能”一体的理念，其中四网和上文提到的一致，四域指“时间-空间-资源-信息”，多功能指“运输组织-安全保障-旅客服务”复合网络。“四网”融合应实现“四网-四域-多功能”一体，实时智能联动，主动安全保障，主动出行服务，一站式出行。还有其他专家和研究机构也对轨道交通融合内涵提出了建设性的意见。

总结相关专家意见，“多网融合”就是不同层次、不同制式的轨道交通通过枢纽衔接、互联互通、接驳换乘、安检互信等多种方式实现功能互补、换乘便捷、资源共享和服务融合。这是一个综合性的“融合”概念，完善的换乘枢纽体系、良好的互联互

通技术、灵活的运营组织、统一兼容的安检及票制、有效的资源共享、一体化的运营管理等都是融合。其中互联互通技术是实现都市圈轨道交通融合重要的“融合”方式之一，互联互通技术是指通过工程技术改造和技术处理，实现不同制式的线路或制式相同而设备系统不同的线路列车贯通运行的融合技术。要求线路、站场、运营管理、行车组织、列车车辆、限界、牵引供电、站台屏蔽门、信号、通信等多个专业协同发展，共享网络资源，共同实现多层次、多模式、多制式的轨道交通多网融合。本文将基于假定其他专业都可实现互联互通条件的前提下，重点研究都市圈轨道交通融合的信号系统方案。

2 都市圈轨道交通信号系统融合的技术目标

分析

2.1 主流信号系统制式技术标准及互联互通性

国内当前主流信号系统制式为 CTCS 制式和 ATC 制式。

CTCS 系统由中国国家铁路集团有限公司(简称国铁集团)和国家铁路局主导的制定了统一的标准技术文件和建设管理程序，不同厂商的同一信号设备可相互兼容，不同厂商的不同信号设备间在接口方面也可以互联互通。工程设计通过在 CTCS-0(简称 C0)线路与 CTCS-2(简称 C2)线路之间、C2 线路与 CTCS-3(简称 C3)线路间设置列控等级转换点，可实现 C0 与 C2、C2 与 C3 列控系统的自动切换。

早年 ATC 制式系统一般为独自设计、研发和实施，不同厂家的 ATC 系统的设备组成、设备架构、软件功能、传输协议、接口形式和内容等均有很大差别，不支持互联互通。近年来随着轨道交通协会和各地轨道公司积极推进，制定了一批包括系统规范、接口规范、测试规范的标准化成果，多家国内供应商也完成了相应装备的研制，目前执行该标准体系的 CBTC 系统间可以实现互联互通。

2.2 主流信号系统制式应用现状

1) 干线铁路

目前, 干线铁路信号系统一般采用 CTCS 系列列控系统, C0 级列控系统主要用于 160 km/h 以下铁路, C2 级列控系统主要用于 160 km/h 以上铁路(如 200 km/h 客货共线铁路)和 200 km/h 以下的城际铁路(国铁运营), C3 主要用于 250 km/h 以上的高速铁路。城际动车组装备 C2 级列控车载设备和列车运行监控记录装置(LKJ), 可在 C0 线路运行; 250 km/h 以上高速动车组装备具有 C3 兼容 C2 级列控功能的车载设备, 可在 C2 线路上运行。

2) 城市轨道交通

目前, 城市轨道交通采用 CBTC 信号系统。根据车-地无线传输方式, CBTC 系统可分为环线的 CBTC 系统(CBTC-L)和无线 CBTC 系统(CBTC-R)。虽然环线 CBTC 系统的车-地无线通信方式相对更加稳定可靠, 但是该技术方案存在一定的技术壁垒, 且环线的轨旁设备较多, 维修维护时与轨道等工务专业存在干扰等, 所以 CBTC 系统的车-地通信系统逐渐转向了开放性和适用性更好的无线通信技术。

3) 城际、市域(郊)铁路

城际、市域(郊)铁路在轨道交通体系中位于干线铁路与城市轨道交通之间, 承上启下, 在运营需求、功能定位上也兼具了干线铁路和城市轨道交通的一些特点(如干线铁路的网络化运营, 城市轨道交通的公交化运营)。暂无针对城际、市域(郊)铁路运输需求专门开发的成熟信号系统, 相关规范对信号系统制式选择进行了描述, 如表 1 所示。

目前规划、设计的都市圈轨道交通目标速度大都集中在 100 ~ 160 km/h (仅少量采用 200 km/h), 对照表 1 规范相关描述, 城际、市域(郊)铁路可供选择的信号列控系统有 CTCS 制式中的 C2 及 C0 系统, 城市轨道交通 ATC 制式中的 CBTC 与点式 ATC 系统。其中, C0 系统由于行车间隔较高(5 min), 无法叠加 ATO 系统, 无法与站台门等系统接口, 不能很好地满足新建市域铁路公交化的运营需求; 点式 ATC 系统, 一般作为 CBTC 的备用系统使用, 为主控系统情况较少, 相比 CBTC 系

表1 城际、市域(郊)铁路执行规范、标准

Tab.1 Implementation code and standard of intercity and suburban railways

规范	信号系统制式选择相关描述
国家铁路局《市域(郊)铁路设计规范》	16.1.5 信号系统制式选择应符合下列规定: 1. 独立运行的市域(郊)铁路信号系统可采用 CTCS 制式或 ATC 制式 2. 与干线铁路、城际铁路跨线运行的市域(郊)铁路信号系统应采用 CTCS 制式
中国铁道学会《市域铁路设计规范》	16.1.3 列车运行控制可采用中国列车运行控制系统(CTCS)制式, 也可采用城市轨道交通列车自动控制(ATC)制式, 宜具备列车自动运行(ATO)功能
中国土木工程协会《市域快速轨道交通设计规范》	17.1.3 市域快轨的 ATC 系统宜采用下列系统: 1. 基于通信的列车自动控制系统(CBTC) 2. 点式列车自动控制系统(iATC) 3. 中国列车控制系统 2 级加 ATO (CTCS-2+ATO)
国家铁路局《城际铁路设计规范》	14.3.1 列车运行控制应采用中国列车运行控制系统(CTCS), 并应符合下列基本要求: 1. 设计速度 200 km/h 的线路, 地面应配置 CTCS-2 级列控系统; 设计 160 km/h 及以下的线路, 应根据行车间隔、站间距、停车精度等要求, 地面可配置 CTCS-0 或 CTCS-2 级列控系统 2. 采用 CTCS-2 级列控系统时可根据需要设置 ATO 子系统

统能力低, 且尚无实现互联互通案例。因此目前实施的都市圈城际、市域(郊)铁主流信号系统制式采用 C2/C2+ATO 列控系统及 CBTC。

2.3 信号系统融合的技术目标

考虑到都市圈通勤功能, 都市圈多网融合主要指“城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通”三网融合。结合目前各层级线网信号系统制式的选择情况, 为满足都市圈列车的跨线运行, 都市圈信号系统融合的技术目标就是指采用现有技术 C2/C2+ATO 与 CBTC 的融合以及采用新型互联互通技术的信号系统间的融合。

3 现有信号技术融合方案

C2+ATO 信号系统以 C2 为核心, 根据城际、市域公交化等运营需求, 在 C2 的基础上叠加 ATO, 其架构和功能等均包含 C2 系统。下文对 C2 系统均以 C2+ATO 为例进行分析。

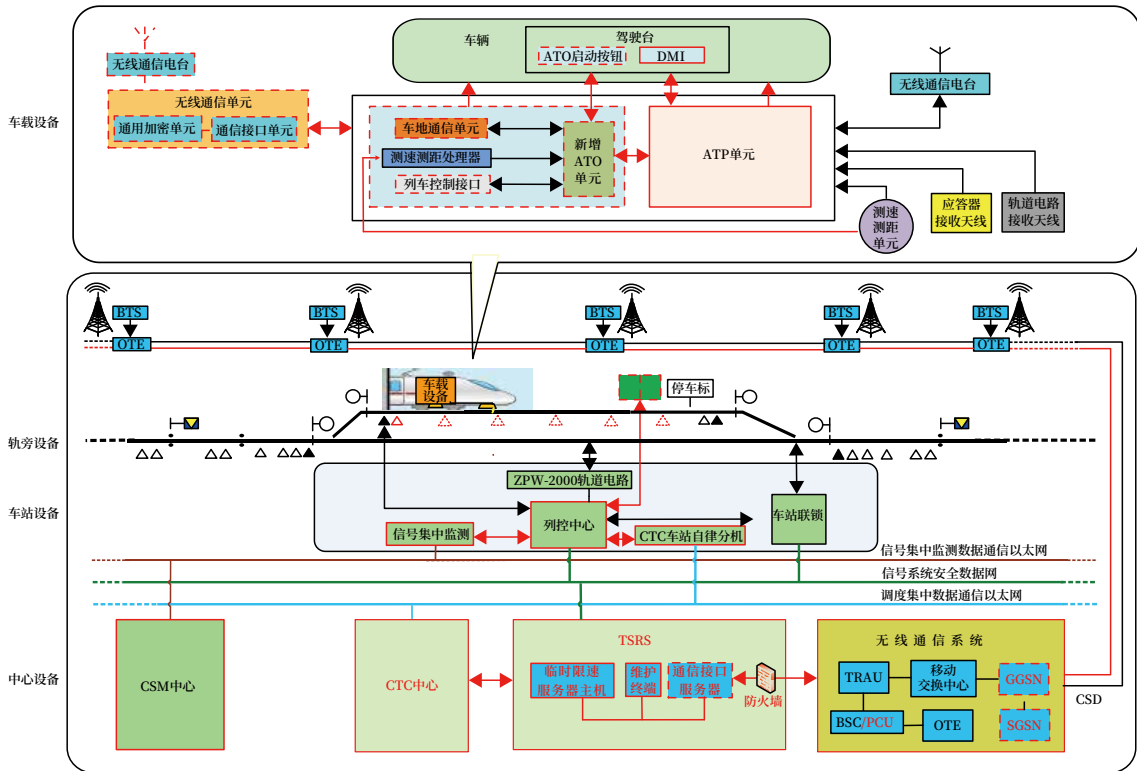
3.1 C2/C2+ATO与CBTC系统差异性分析

3.1.1 系统架构

1) C2+ATO

C2+ATO 系统由调度集中系统 (CTC)、C2 级列车运行控制系统、ATO 系统、车站联锁系统

(CBI)、信号集中监测系统 (CSM) 等构成。其系统架构如图 1 所示。



图例：红色虚线为新增内容 -- 红色实线为既有设备修改 — 黑色实线示意为既有 — 停车标志牌 □ 无源应答器 △ 有源应答器 ▲ 站台门 ■

图1 C2+ATO系统架构示意
Fig.1 C2+ATO system architecture diagram

2) CBTC

CBTC 以行车指挥和列车运行控制为核心，主要由列车自动监控子系统 (ATS)、列车自动防护子系统 (ATP)、ATO 系统、联锁系统、维护监测系统等组成。其系统架构如图 2 所示。

3.1.2 系统功能

C2+ATO 系统和 CBTC 系统各设备主要功能如图 3 所示。

3.1.3 差异性分析

1) 系统架构及功能差异

结合图 1 ~ 3, C2+ATO 系统和 CBTC 系统架构 (含组成及接口) 以及系统功能主要差异如表 2 所示。

2) 工程实施差异

由于适用不同的标准体系, C2+ATO 系统与

CBTC 系统在系统工程实施存在的主要差异如表 3 所示。

3.2 C2/C2+ATO与CBTC系统互联互通方案

通过上述研究可知, C2 系统与 CBTC 系统技术层面存在较大差别, 两系统的工作机理不同, 系统功能也存在区别。要实现 C2 系统与 CBTC 系统互联互通, 实现跨线运营的需求, 需要解决两个系统间地面和车载设备的差异性。目前多个单位也开展了类似课题研究, 提出了“地对车兼容”和“车对地兼容”的互联互通方案。

3.2.1 地对车兼容方案

“地对车兼容方案”是指在共线运营区段地面设置一套兼容 C2 系统和 CBTC 系统的信号系统设备, 称之为 C2+CBTC/C2+ATO+CBTC 系统方案。装备 CBTC 车载设备仅接收地面的 CBTC 信息, 按

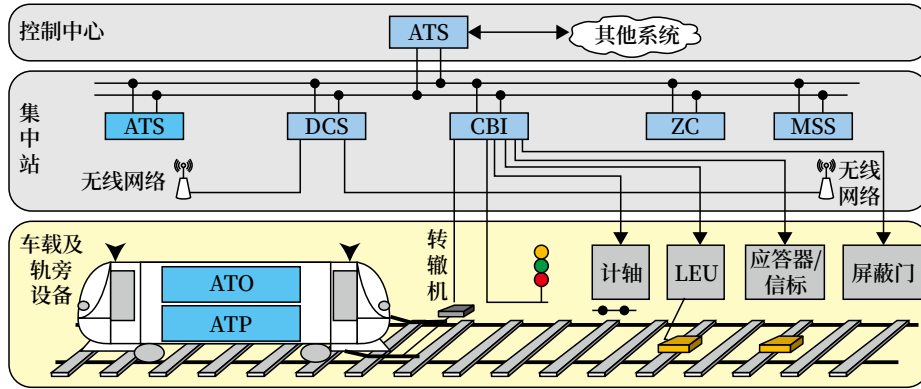


图2 CBTC系统基本架构示意
Fig.2 CBTC system architecture diagram

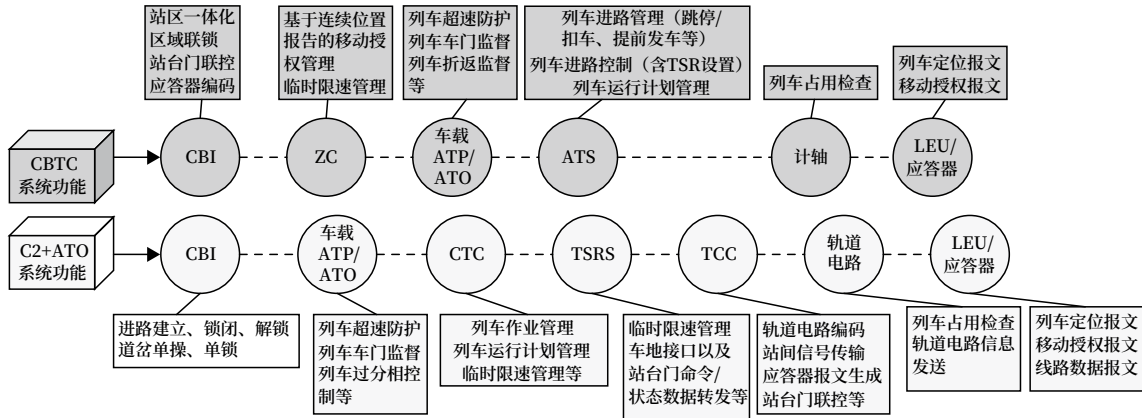


图3 C2+ATO/CBTC系统功能示意
Fig.3 C2+ATO/CBTC system function diagram

表2 C2+ATO与CBTC系统的架构、功能差异

Tab.2 Differences in system architecture and functionality between C2+ATO and CBTC

系统或设备	系统架构 (含组成及接口) 差异	系统功能差异
计算机联锁 (CBI/CI)	CBTC 系统较 C2+ATO 系统增加直接对车的通信	CBTC 系统功能更复杂, 同步实现 C2 系统列控中心部分功能, 如站台门的防护及控制功能
行车指挥系统 (ATS/CTC)	CBTC 系统 (ATS) 较 C2+ATO (CTC) 系统增加直接对车的通信	ATS 较 CTC 而言: 增加: 跳停 / 扣停, 进路控制、列车运行等级管理功能 缺少: 调度命令发布与传送功能
移动授权 MA	CBTC 的 MA 由 ZC 向其控制范围内的列车提供, C2 由轨道电路进行连续信息传输	
临时限速	CBTC 系统中的 ATS 和 ZC 共同完成了 C2+ATO 系统中的 TSRS 功能	
站台门控制	CBTC 系统由 LEU 和 CBI 共同实现, C2+ATO 系统由 TSRS 和 TCC 共同实现	
列控系统	轨道电路	CBTC 设计轴轨道电路, C2 系统站内和区间设轨道电路 C2+ATO 系统的轨道电路主要实现轨道占用检查、断轨检查、机车信号发送、系统移动授权生成、联锁进路的建立和解锁等功能; CBTC 系统中轨道电路只实现降级模式下的轨道占用功能
应答器	无源应答器均通过接收车载天线与车载接口 有源应答器接口关系 C2+ATO 系统为应答器 -LEU-TCC-CBI 或 TSRS, CBTC 为应答器 -LEU-CBI	C2+ATO 系统向车载设备传输移动授权, CBTC 系统点式后备模式下, 向车载设备传输移动授权
车载 ATP/ATO	C2+ATO 系统和 CBTC 系统的 ATP 和 ATO 主控单元均独立设置	C2+ATO 系统暂无自动折返功能, 自动化等级为 GoA2 级 CBTC 系统具备自动折返功能, 自动化等级可达 GoA4 级
车地接口	C2+ATO 系统车地接口包括 TCC (通过轨道电路和应答器) -CC (车载控制器), TSRS-CC; CBTC 系统车地接口包括 CBI-CC, ZC-CC, ATS-CC	

表3 C2+ATO与CBTC在系统工程实施中存在的主要差异

Tab.3 Main differences between C2+ATO system and CBTC system in the system engineering implementation

工程内容	C2+ATO 系统	CBTC 系统	差异分析
信号机设置	站内设置实体信号机，区间设置实体信号机或标志牌	站内和区间都设置实体信号机	信号机的灯位和显示含义不一样
应答器设置	工程设置原则和信息包定义格式执行国家铁路局、国铁集团等相关国铁规范	工程设置原则和信息包定义格式执行T/CAMET 04011.1等相关地铁规范	设置原则和报文规则、用途不同
线路数据 (电子地图)	电子地图存储在设备中，存储格式和报文描述格式一致，可以互联互通	存储在车载和地面设备中，且以车载设备为主，不同信号设备厂商车载电子地图存储格式和描述方式存在较大差异，无法互联互通	CBTC 线路间无法实现跨线运行，C2+ATO 系统线路间可实现跨线运行
调度指挥	CTC 中心系统具备线网运营	ATS 中心缺乏线网级上层调度指挥能力	线网运营能力不一样
行车方向	左侧行车	右侧行车	行车方向不一致
通信形式	以地→对车单向通信为主，依靠轨道电路、无点式应答器、GSM-R 完成	采用基于 LTE、WLAN 等技术的无线车地双向通信	
维护能力	地面和车载设备兼容，备品备件、仪器仪表及检修设施可以共享	地面和车载备品备件、仪器仪表及场段停车及检修设施共享能力差	通用性不一样
运营管理	国铁统一管理	轨道公司自营自管	管理模式不一样

CBTC 控车；装备 C2 等级车载设备仅接收地面的 C2 信息，按 C2 控车。

C2+CBTC/C2+ATO+CBTC 系统方案应保证 C2+ATO 系统与 CBTC 系统两者基本系统功能不变。在此前提下，对两者功能相同或相似，子系统或设备进行优化整合；功能不同，子系统或设备进行共存兼容性分析并对其改进。需要解决的关键技术问题包括轨道电路功能、应答器的设置、信号机设置、联锁技术标准、行车指挥系统网络化、车-地通信形式等 C2 系统与 CBTC 系统技术冲突。以 C2+ATO+CBTC 系统为例，其系统结构如图 4 所示。

C2+ATO+CBTC 方案中 C2 子系统架构与现有

C2+ATO 系统相同；由于 ZC、CBI、TCC、TSRS 等 SIL4 级轨旁设备构建的安全数据网与现有 C2 系统不同，需要配套修改 CBI、TCC、TSRS 的通信协议。与现有 CBTC 系统相比，ATS（图 4 为 CTC）系统单独组网，新增 TSRS 管理电子地图，新增 ZC-TSRS 通信协议，同时配套修改原 ZC-ATS 接口协议。

3.2.2 车对地兼容方案

“车对地兼容方案”是指跨线运行的列车装备两种制式的车载设备（或部分部件共用）或通用型车载设备，列车从一种信号制式的线路驶入另一种信号制式的线路时，车载设备自动切换或停车人工切换到相应信号制式工作。有两种方案。

1) 方案 1：独立两套车载设备

跨线列车端部（车头/车尾）同时装备独立的车载设备，保持原有车载硬件设备配置，包括 DMI（可采用一套显示屏，也可分开）、LTE-M 天线、GSM-R 天线、C2 的 TCR 接收线圈、C2 应答器天线、C2 速度传感器、C2 雷达、CBTC 应答器天线、CBTC 速度传感器和 CBTC 雷达。

两套独立车载设备分别用于在 CBTC 区域和 C2 区域控车，需要停车人工切换。将来切换技术成熟后可通过切换装置升级为自动切换方式。

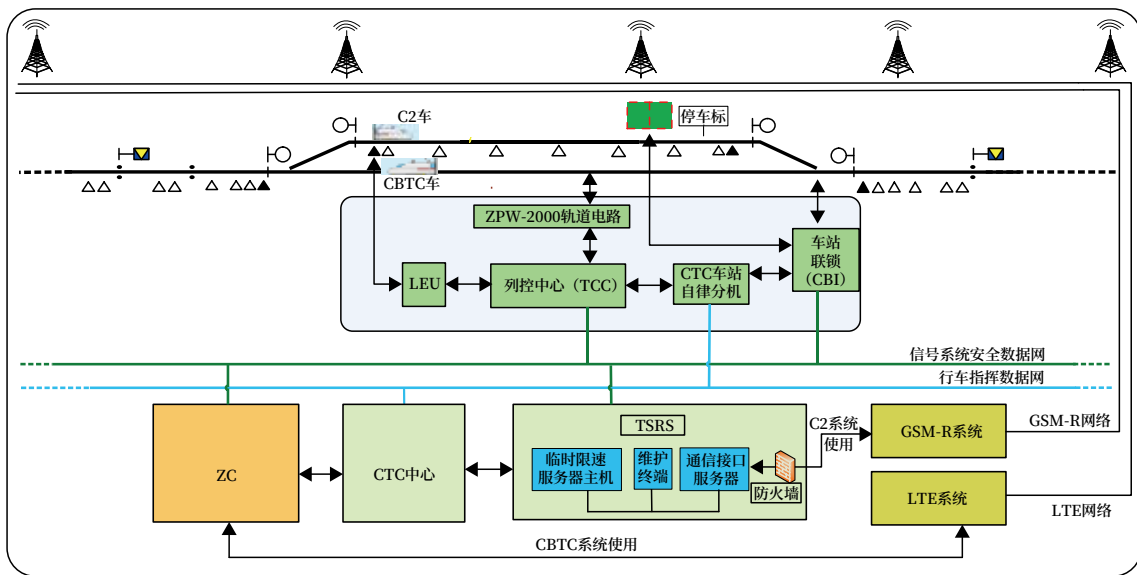
2) 方案 2：通用车载设备

该方案车载设备采用一套硬件设备，在其上部署两套软件（分别对应 CBTC 工作模式与 C2 工作模式）。每端列车设有 CBTC 与 C2 车载共用的 DMI、应答器天线、速度传感器和雷达以及 LTE/GSM-R 双模天线。

车载系统可根据接收到的轨旁信息（轨道电路或 MA）和存储的电子地图数据，自动判断当前采取何种工作模式，停车或不停车切换 CBTC 或 C2 两种制式。

3) 方案对比分析

方案 1 的优点是对单一车载基本无改动，仅需增加切换模块，技术条件较为成熟，近期内可实施性高。缺点是装备完全独立双套车载，车载费用较



图例: ▣ 停车标志牌 △ 无源应答器 ▲ 有源应答器 ■ 站台门

图4 C2+ATO+CBTC系统结构示意图
Fig.4 C2+ATO+CBTC system structure diagram

高；由于设备分开设置未集成，受车上空间限制，安装较为困难，可能需要对车进行一些修改；同时，简单叠加后双套系统共计 7 种控制等级，13 种驾驶模式，对司机的要求较高。

方案 2 的优点是节省车载设备硬件，节省车内安装空间，对车辆的改造较小。其缺点是该方案目前没有成熟的设备，新研发的设备需对软硬件架构进行较大改动，需重新做 CRCC 或 SIL4 认证，在工程上应用时其流程较为繁琐。

据调研，目前对于不同信号制式间的跨线运行，海外的主流解决方案是车载兼容地面，只是在兼容车载的配置上有所不同。其中伦敦 Crossrail 开行列车根据信号制式种类配备 CBTC、ETCS、TPWS 共 3 套不同的车载系统，在相应列控区段自动切换到相应的车载设备运行；日本 JR 铁路和地铁开行列车配备满足 ATS-P+ATPS 信号系统的多套车载设备，通过司机手动切换，实现对地面列控系统的兼容；巴黎 RER-E 融合了 NExTEO、KVB 以及 EVC 系统的一体化车载实现跨线运行，如图 5 所示。国内跨线运行的列车远期技术成熟后推荐优先采用通用车载方案，近期若为缩短新型车载的研发、上道认证周期，推荐采用“独立两套车载设备”。

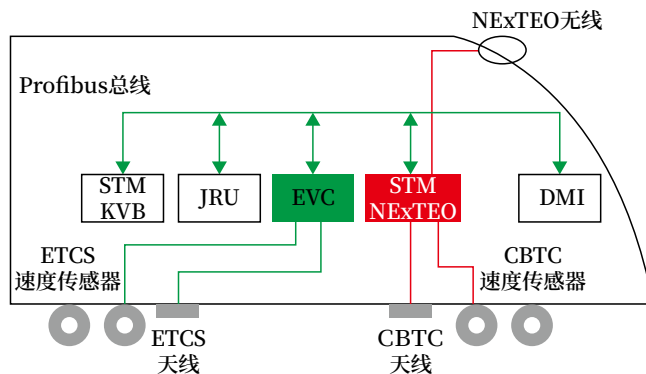


图5 巴黎RER-E一体化车载系统结构示意图
Fig.5 Paris RER-E integrated vehicle system structure diagram

3.3 其他融合技术研究

为实现都市圈轨道交通融合，同时满足其公交化运营，针对现有 C2 系统和 CBTC 系统，相关单位和人员正在进行或计划进行以下研究。

1) C2+ATO 自动折返功能

目前 C2+ATO 系统未实现自动折返功能，不满足都市圈城际、市域（郊）铁路公交化运营对行车密度硬性要求，各设备厂家也已开展相关研究。主要思路是通过增加或利用 MVB 贯通线使实现两头车载通信，并增加特定功能模块用于两头车载的唤醒与休眠。

2) 与站台门系统融合

目前, C2+ATO 系统与 CBTC 系统均具备与站台门系统通过继电接口进行信息互传, 从车载发车命令到站台门动作环节多, 时延较大, 影响效率; 故障点较多、安全性差; 站台门系统与信号系统电源、监测等设备重复设置, 成本高且维护不便。需进一步研究站台门系统与信号系统融合, 减少信号与站台门动作时间, 提升运营效率, 整合并提高安全性。目前部分厂家已经实现了接口优化、设备整合、站台门控制器与车载直接通信等功能研究和试验, 但受到站台门系统达不到 SIL4 级、维护部门等影响, 距离真正的融合还有一定的差距。

3) CBTC 系统车载地图地面化

目前, CBTC 线路间车载电子地图无法实时更新, 尚未满足复杂环境下互联互通运营要求。线网中只要存在线路信息变化将涉及到全网在此线运行列车的车载电子地图换装, 工作量大且不利于运营维护。目前一些设备厂家已考虑将电子地图由车载存储改为地面发送(如通过地面的 ZC 进行发送, 在列车连接 ZC 时同步更新车载电子地图)。

4 新型市域铁路互联互通技术及新型系统展望

4.1 基于CTCS制式的CTCS-N系统

CTCS-N 系统是由国铁集团牵头, 在现行 CTCS 列控系统的基础上, 为进一步提高系统能力, 减少行车间隔, 提升系统自动化程度而开发的基于无线通信的新型移动闭塞列控系统。CTCS-N 系统在 C3+ATO 的基础上对模块功能、系统构架进行了开发、升级, 具备向上扩展功能, 实现列车位置连续追踪功能条件下的全自动运行 (GoA4) 控制功能条件。同时具备向下兼容 C2、C3 的能力。

据了解, CTCS-N 系统与城轨 CBTC 系统的互联互通技术已纳入开发计划中。其技术路线主要考虑通过采用融合型车载方式, 将 CTCS 列控系统中已经设置较为单一轨道电路功能的 STM 模块, 扩展增加为轨道电路叠加城轨 CBTC 车载主控单元的复合功能 STM 模块, 沿用 CTCS 与原 STM 接口协议, 实现与城轨 CBTC 系统的互联互通功能。

4.2 其他多网融合市域信号系统

众多设备厂家开展了一系列关于融合系统的研究工作, 如深圳城际铁路智能列控系统、STCS、CBTC-R 等。其主要目的都是研发一种能够同时兼容 CTCS 和 CBTC 的列车控制系统, 不但具备以移动闭塞为基础的高密度、公交化运营能力, 还能实现与采用 CTCS 系统的既有国铁、城际铁路、与新建采用互联互通标准的 CBTC 系统的城市轨道交通线路的互通运行。

目前都市圈轨道交通信号系统融合的主要技术路线可以概括为:

- 1) 通过车载兼容应对跨线运行场景: 列车配置双制式车载设备, 支持人工停车切换和车载自动切换;
- 2) 通过轨旁兼容应对共线运行场景: 共线区段地面同时布置 CTCS 和 CBTC 轨旁设备。联锁和列控单套化, 对功能进行整合;
- 3) 对 CTC/ATS 调度系统进行整合, 从而开发出具备兼顾公交化、网络化运营的新型调度指挥系统。

5 结语

由于都市圈轨道交通跨线融合运营场景不一, 信号系统融合方案也不一, 应分析城际、市域、城市轨道交通网内、网间不同的运营场景列车跨线需求。结合各线的运营管理体制(国铁管理还是轨道公司自管自营), 产品开发阶段与工程建设及规划需求的匹配(如后期是否有升级改造), 既有线路信号系统制式, 相关专业配套技术(如无线通信)等, 综合研究后做出合理的融合方案。

参考文献

- [1] 肖慎, 胡俊豪, 吴迪. 我国区域多层次轨道交通融合发展研究 [J]. 现代交通技术, 2021, 18 (4): 82-86.
- Xiao Shen, Hu Junhao, Wu Di. Research on the Integration and Development of Multi-Level

- Rail Transit in China[J]. Modern Transportation Technology, 2021, 18(4): 82-86.
- [2] 李乾社. 市域铁路信号列控制式的研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17 (2): 10-15.
Li Qianshe. Research on Signal Train Control System for Regional Railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(2): 10-15.
- [3] 王国军. 市域铁路信号电缆危险影响及防护方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (2): 65-69.
Wang Guojun. Dangerous Effects and Protection Schemes of Railway Signaling Cables in Suburban Railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(2): 65-69.
- [4] 全宏宇, 张敏慧. 市域铁路 CTCS-2 与 CBTC 列控系统切换方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (1): 61-66, 94.
Quan Hongyu, Zhang Minhui. Scheme for Switching between CTCS-2 and CBTC Train Control Systems for Suburban Railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(1): 61-66, 94.
- [5] 中华人民共和国国家铁路局. 市域(郊)铁路设计规范: TB 10624-2020 [S]. 北京: 中国铁路出版社, 2020.
- [6] 中国铁道学会. 市域铁路设计规范: T/CRSC 0101-2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [7] 中国土木工程学会. 市域快速轨道交通设计规范: T/CCES 2-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [8] 中华人民共和国国家铁路局. 城际铁路设计规范: TB 10623-2014 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- [9] 张敏慧. 国铁与城轨信号系统差异及互通性探讨 [J]. 铁道工程学报, 2019, 36 (12): 76-80.
Zhang Minhui. Exploration on the Difference and Interoperation between National Railway and Urban Signaling Systems[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(12): 76-80.

《铁路通信信号工程技术》简介

基本信息:《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的国家级期刊。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。经新闻出版总署批准,自2005年12月起面向国内外公开发行。国内统一连续出版物号:CN11-5423/U。国际标准连续出版物号:ISSN1673-4440。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。

投稿方式:

期刊官网投稿: <https://rsce.crscd.com.cn>

邮箱投稿: rsce@crsdc.com.cn

联系方式:

邮编: 100070 电话: 50805951

网址: www.crsdc.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



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

扫码打开期刊官网,
阅读、下载本刊内容



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

扫码打开期刊公众号,
阅读、下载本刊内容

TSRS与外部系统通信状态的自动测试方法

王秋莉, 芦时宇

(卡斯柯信号有限公司, 北京 100070)

摘要: 在新型列控系统中, 为确保在部分逻辑通道故障的情况下维持 TSRS 与其外部系统正常的通信连接, 需对 TSRS 与外部系统的逻辑通道和应用层连接状态进行严格的室内测试。提出一种 TSRS 与其外部设备通信状态的自动测试方法及装置, 该装置通过读取原始输入数据, 获取 TSRS 与被测外部系统的 IP 地址, 然后采用判定表法针对多情形进行排列组合, 生成每个外设的逻辑通道状态和应用层连接状态的全遍历测试序列, 再通过该装置的 IP 自动修改功能, 自动执行测试并记录测试结果, 然后根据 TSRS 和外部系统的通信原理进行判定, 自动输出预期结果, 最后将自动测试结果与预期结果进行对比, 生成最终测试结果表格。该方法可避免测试场景的遗漏, 保证测试结果的正确性, 快速提升测试效率。

关键词: TSRS; 通信状态; 测试

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0010-06

Research on Automatic Test Method of Communication Status Between TSRS and External Systems

Wang Qiuli, Lu Shiyu

(CASCO Signal Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: In the new train control system, it is necessary to conduct strict indoor tests on the logical channel and application layer connection status between TSRS and external systems in order to ensure their normal communication connection in the case of partial logical channel failure. This paper proposes an automatic test method and device of the communication status between TSRS and its external systems. The device obtains the IP addresses of TSRS and the external system under test by reading the original input data, and then uses the decision table method to arrange and combine multiple situations to generate a full-traversal test sequence of the logical channel status and application layer connection status of each external system, and then automatically executes the test and records the test results through the IP automatic modification function of the device, and then judges them according to the communication principle of TSRS and the external systems, automatically outputs the expected results, and finally compares the automatic test results with the expected results to generate

收稿日期: 2022-11-22; 修回日期: 2024-01-05

发明专利: 2022 年国家发明专利 (ZL202210483232.1)

第一作者: 王秋莉 (1992—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 新型列控临时限速服务器测试, 邮箱: 1205843513@qq.com.

a final test result table. This method can avoid the omission of test scenarios, ensure the correctness of test results, and quickly improve the test efficiency.

Keywords: TSRS; communication status; test

临时速服务器 (Temporary Speed Restriction Server, TSRS) 负责新型列控系统管辖范围内临时限速、电子地图、卫星差分等数据集中管理功能, 提供临时限速命令的存储、校验、拆分、删除、下达和取消等逻辑执行功能, 遵循“故障-安全”设计原则, 是基于二乘二取二安全冗余平台开发的限速命令集中管理设备。

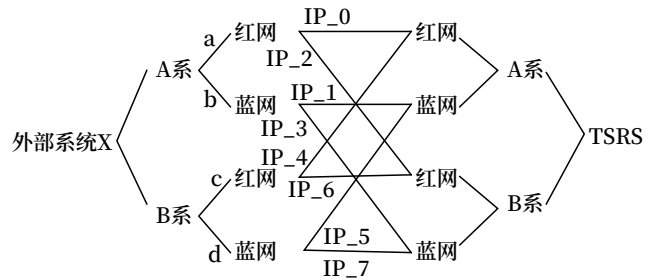
1 通信模型

在新型列控系统中, 临时速服务器是重要的列车运行基础数据, 能够保证临时限速命令的整个处理和执行流程的正确性、可靠性和安全性, 包括主处理单元 (Main Process Unit, MPU)、主网络通信单元 (Main Network Communication Unit, MNCU)、主通信单元 (Main Communication Unit, MCU)。临时限速服务器逻辑运算板包括 MPU1、MPU2; 通信板包括 MNCU1、MNCU2 以及 MCU, 主要负责与调度集中系统 (Centralized Traffic Control system, CTC)、无线闭塞中心 (Radio Block Center, RBC)、相邻 TSRS、列控联锁一体化 (Train Control and Interlocking Integration System, TIS)、车载等外部系统进行通信。当外部系统的安全通信协议类型基于 RSSP-I 和 RSSP-II 时, TSRS 与外部系统的通信模型如图 1 所示。

2 自动测试模型

本文提出了一种基于新型列控系统临时限速服务器与外部系统逻辑通道及应用层连接状态检查的自动测试方法及装置。TSRS 与外部设备通信状态的自动测试由 5 个模块组成, 如图 2 所示。

该装置通过读取原始输入数据, 获取 TSRS 与被测外部设备的 IP 地址 (IP_0-IP_7), 然后采用判



注: 逻辑通道a表示外部设备A系和TSRS-A和TSRS-B系红网
逻辑通道b表示外部设备A系和TSRS-A和TSRS-B系蓝网
逻辑通道c表示外部设备B系和TSRS-A和TSRS-B系红网
逻辑通道d表示外部设备B系和TSRS-A和TSRS-B系蓝网

图1 外部系统与临时限速服务器的网络通信模型
Fig.1 Network communication model between external systems and TSRS

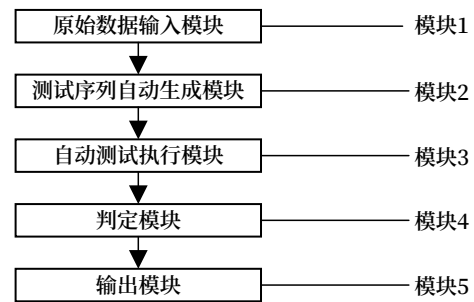


图2 测试模型模块组成
Fig.2 Test model module composition

定表法针对多情形进行排列组合, 生成每个外设的通道状态和应用状态的全遍历测试序列, 再通过该装置的 IP 自动修改功能, 自动执行测试并记录测试结果; 最后根据临时限速服务器和外部系统的通信原理进行判定, 自动输出逻辑通道状态和应用层连接状态的预期结果, 然后将自动测试结果与预期结果进行对比, 最后生成测试结果表格。其自动测试执行流程如图 3 所示。

2.1 原始数据输入模块

该模块负责读取原始输入的数据, 获取 TSRS 与被测外部系统的 IP 地址 (IP_0-IP_7), 模块具体的步骤如下所示。

Step1: 该模块从“地面设备信息表”中提取 TSRS 与外部系统进行通信的“设备名称”, 包含

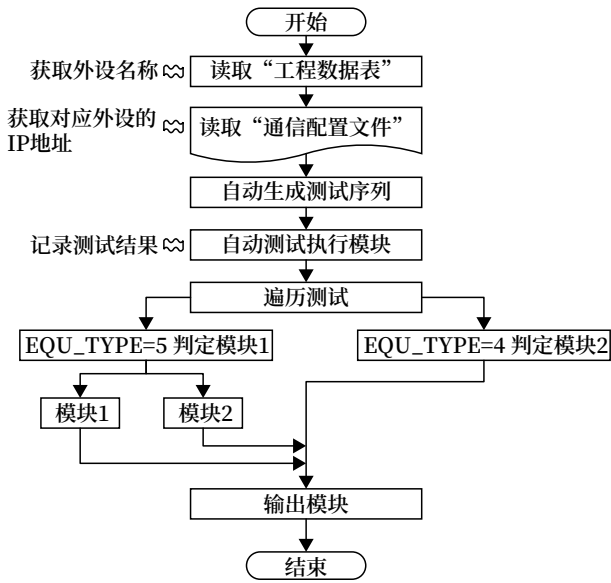


图3 自动测试流程
Fig.3 Automated test flowchart

TSRS-1、CTC-1、TSRS-2、TIS 和 RBC，如表 1 所示。

表1 “设备名称”获取表格
Tab.1 Obtained device name list

序号	地面设备名称	设备类型
1	TSRS-1	TSRS
2	CTC-1	CTC
3	TSRS-2	TSRS
4	TIS	TIS
5	RBC-1	RBC

Step2：该模块读取“通信配置文件”获取服务器与外设通信 IP 地址。从“通信配置文件”中提取目标外部系统与 TSRS 的通信 IP：识别字段“NAME=E-X-A1”“NAME=E-X-A2”“NAME=E-X-B1”“NAME=E-X-B2”，查找对应的 IP 地址，并写入对应的 sheet（设备名称 X）页中，如表 2 所示。

通过 Step1 获取的“设备名称”，依次遍历与本地临时限速服务器进行通信的所有外部设备 (CTC、相邻 TSRS、RBC、TIS)。

2.2 测试序列自动生成模块

该模块通过读取“设备名称”及对应外设的通信 IP₀-IP₇，采用判定表法针对多情形进行排列组合，生成每个外设的通道状态和应用状态的部分遍

表2 获取临时限速服务器与外部系统X的通信IP (IP₀-IP₇)
Tab.2 Obtained communication IP of TSRS and external system X (IP₀-IP₇)

物理通道	逻辑通道 (NAME)	IP 地址 (外设端)	备注
1	E-X-A1	IP ₀	通道 1：外设 A 系和 TSRS-A 系红网
		IP ₁	通道 2：外设 A 系和 TSRS-A 系蓝网
2	E-X-A2	IP ₂	通道 3：外设 A 系和 TSRS-B 系红网
		IP ₃	通道 4：外设 A 系和 TSRS-B 系蓝网
3	E-X-B1	IP ₄	通道 5：外设 B 系和 TSRS-A 系红网
		IP ₅	通道 6：外设 B 系和 TSRS-A 系蓝网
4	E-X-B2	IP ₆	通道 7：外设 B 系和 TSRS-B 系红网
		IP ₇	通道 8：外设 B 系和 TSRS-B 系蓝网

注：X 表示 step1 提取的“设备名称”；E 表示外部系统的通信的安全协议类型（包括 RSSP-I 和 RSSP-II），CTC、相邻 TSRS、RBC 为 RSSP-II 设备（通信配置文件中字段“EQU_TYPE=5”）

历测试序列，如表 3 所示。

2.3 自动测试执行模块

该模块通过该装置的 IP 自动修改功能，自动执行测试并记录测试结果，执行步骤如下所示。

Step1：自动删除 IP 地址，该模块读取表 3 的测试序列，若 TC(i) 的第 i 行的 IP 地址对应为“0”，则表示序列 i 需运行该模块从外部设备所在的工控机上将其对应的 IP 删除，即断开该通道。

Step2：记录测试结果，从服务器发送到维护终端的“通信状态信息包”中获取并记录此时逻辑通道和应用连接状态，断开则填“0”，连接则填“1”。

Step3：自动恢复 IP 地址，第 i 行结果记录完毕，即表格中测试结果不为空，则运行该模块，自动添加被删除的 IP 地址。

i+1，重复 Step1 ~ 3，遍历表格 3 中所有的测试序列。

2.4 判定模块

该模块根据临时限速服务器和外部系统的通信

表3 测试序列自动生成

Tab.3 Automatically generated test sequence

序号 TC(i)	逻辑通道 a		逻辑通道 b		逻辑通道 c		逻辑通道 d	
	IP_0	IP_2	IP_1	IP_3	IP_4	IP_6	IP_5	IP_7
1	0	0	0	1	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	1	0	0	0	0
6	0	1	1	0	0	0	0	0
7	0	1	1	1	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	1	0	0	0	0
10	1	0	1	0	0	0	0	0
11	1	0	1	1	0	0	0	0
12	1	1	0	0	0	0	0	0
13	1	1	0	1	0	0	0	0
14	1	1	1	0	0	0	0	0
15	1	1	1	1	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	1
17	0	0	0	0	0	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	1	1
19	0	0	0	0	0	1	0	0
20	0	0	0	0	0	1	0	1
21	0	0	0	0	0	1	1	0
22	0	0	0	0	0	1	1	1
23	0	0	0	0	1	0	0	0
24	0	0	0	0	1	0	0	1
25	0	0	0	0	1	0	1	0
26	0	0	0	0	1	0	1	1
27	0	0	0	0	1	1	0	0
28	0	0	0	0	1	1	0	1
29	0	0	0	0	1	1	1	0
30	0	0	0	0	1	1	1	1
				...				
46	1	1	1	1	1	1	1	1

原理进行判定, 自动输出逻辑通道状态和应用层连接状态的预期结果。根据通信配置文件中“EQU_TYPE”字段的不同, 判定模块分为判定模块1(安全协议类型为RSSP-II)、判定模块2(安全协议类型为RSSP-I)。该模块将结果填至测试表格中的“预期结果”。

2.4.1 判定模块1

若 EQU_TYPE=5 (RSSP-II 设备), 执行判定模块1。

1) 逻辑通道判定

逻辑通道 a/b/c/d 结果取值有 3 种情况, 分别为:

a. 红色 :0=[0 0], 逻辑通道断开;

b. 黄色 :1=[0 1]U[1 0], 逻辑通道单系连接;

c. 绿色 :1=[1 1] 逻辑通道连接。

2) 应用层连接状态判定

8 通道中有任意一通道正常连接, 则 TSRS 可与外设正常通信。应用层连接状态结果取值有两种情况, 分别为:

a. 应用层连接正常 1: $\sum IP_i \neq 0, (i = 0 \sim 7)$;

b. 应用层连接断开 0: $\sum IP_i = 0, (i = 0 \sim 7)$ 。

2.4.2 判定模块2

EQU_TYPE=4 (RSSP-I 设备) 时, 执行判定模块 2 (包括模块 1 和模块 2)。RSSP-I 设备应用层连接状态只取主系的状态, 因此判断应用层连接状态时, 只需判断与主系连接的 IP 值是否为真。

1) 模块 1: A 主 B 备

a. 应用层连接正常 1: $\sum IP_i \neq 0, (i = 0、1、4、5)$;

b. 应用层连接断开 0: $\sum IP_i = 0, (i = 0、1、4、5)$ 。

2) 模块 2: B 主 A 备

a. 应用层连接正常 1: $\sum IP_i \neq 0, (i = 2、3、6、7)$;

b. 应用层连接断开 0: $\sum IP_i = 0, (i = 2、3、6、7)$ 。

2.5 输出模块

输出模块将自动测试结果与预期结果进行对比, 生成最终测试结果表格。测试结果与预期结果的测试结论若一致, 测试结论为“OK”, 单元格标为绿色, 若不一致, 测试结论为“NOK”, 单元格标为红色。测试结果输出表如图 4 所示。

3 总结

新型列控系统临时限速服务器的外设较多, 每个外设各种通断的逻辑组合较多, 现有技术场景覆盖率低, 容易造成重要场景的遗漏。在新型列控系统临时限速服务器与外部系统的通信测试中, 现有技术采用人工控制网络通断, 通过维护终端查看逻

序列号 TC(i)	逻辑通道a		逻辑通道b		逻辑通道c		逻辑通道d		测试结果				预期结果				判定结果 OK/NOK		
	IP.0	IP.2	IP.1	IP.3	IP.4	IP.6	IP.5	IP.7	逻辑通道a	逻辑通道b	逻辑通道c	逻辑通道d	应用层连接	逻辑通道a	逻辑通道b	逻辑通道c		逻辑通道d	应用层连接状态
1	0	0	0	1	0	0	0	0						0	1	0	0		
2	0	0	1	0	0	0	0	0						0	1	0	0		
3	0	0	1	1	0	0	0	0						0	1	0	0		
4	0	1	0	0	0	0	0	0						1	0	0	0		
5	0	1	0	1	0	0	0	0						1	1	0	0		
6	0	1	1	0	0	0	0	0						1	1	0	0		
7	0	1	1	1	0	0	0	0						1	1	0	0		
8	1	0	0	0	0	0	0	0						1	0	0	0		
9	1	0	0	1	0	0	0	0						1	1	0	0		
10	1	0	1	0	0	0	0	0						1	1	0	0		
11	1	0	1	1	0	0	0	0						1	1	0	0		
12	1	1	0	0	0	0	0	0						1	0	0	0		
13	1	1	0	1	0	0	0	0						1	1	0	0		
14	1	1	1	0	0	0	0	0						1	1	0	0		
15	1	1	1	1	0	0	0	0						1	1	0	0		
16	0	0	0	0	0	0	0	1						0	0	0	1		
17	0	0	0	0	0	0	1	0						0	0	0	1		
18	0	0	0	0	0	0	1	1						0	0	0	1		
19	0	0	0	0	0	1	0	0						0	0	1	0		
20	0	0	0	0	0	1	0	1						0	0	1	1		
21	0	0	0	0	0	1	1	0						0	0	1	1		
22	0	0	0	0	0	1	1	1						0	0	1	1		
23	0	0	0	0	1	0	0	0						0	0	1	0		
24	0	0	0	0	1	0	0	1						0	0	1	1		
25	0	0	0	0	1	0	1	0						0	0	1	1		
26	0	0	0	0	1	0	1	1						0	0	1	1		
27	0	0	0	0	1	1	0	0						0	0	1	0		
28	0	0	0	0	1	1	0	1						0	0	1	0		
29	0	0	0	0	1	1	1	0						0	0	1	1		
30	0	0	0	0	1	1	1	1						0	0	1	1		
31	0	0	0	0	0	0	0	0						0	0	0	0		
32	0	0	0	1	0	0	0	1						0	1	0	1		
33	0	0	1	0	0	0	1	0						0	1	0	1		
34	0	0	1	1	0	0	1	1						0	1	0	1		
35	0	1	0	0	0	1	0	0						1	0	1	0		
36	0	1	0	1	0	1	0	1						1	1	1	1		
37	0	1	1	0	0	1	1	0						1	1	1	1		
38	0	1	1	1	0	1	1	1						1	1	1	1		
39	1	0	0	0	1	0	0	0						1	0	1	0		
40	1	0	0	1	1	0	0	1						1	1	1	1		
41	1	0	1	0	1	0	1	0						1	1	1	1		
42	1	0	1	1	1	0	1	1						1	1	1	1		
43	1	1	0	0	1	1	0	0						1	0	1	0		
44	1	1	0	1	1	1	0	1						1	1	1	1		
45	1	1	1	0	1	1	1	0						1	1	1	1		
46	1	1	1	1	1	1	1	1						1	1	1	1		

图4 测试结果输出
Fig.4 Test result output

辑通道和模块（应用层连接）的颜色来判断，这种测试冗余，测试效率较低。若对所有情形的遍历测试，需要耗费大量的人力与时间，且长时间测试会加大测试人员的疲劳度，影响测试结果的正确性，测试效率较低。本文提出的基于新型列控系统临时限速服务器的外部设备逻辑通道及应用层连接状态检查的自动测试方法及装置，实现 TSRS 与外部系统的逻辑通道及应用层连接状态的室内测试，不仅可以快速提升测试效率，节省人力和时间；还可以保证测试结果的正确性，减少人为操作对测试环境的破坏，避免场景的遗漏，让测试更加全面。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路通信业务分类: TB/T 3130-2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
[2] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路数据通信网

设计规范: TB 10087-2010[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.

[3] 郭伟, 开祥宝, 李士祥, 等. 临时限速服务器自动测试平台的研究与实现 [J]. 铁路计算机应用, 2012, 21 (10): 26-29.
Guo Wei, Kai Xiangbao, Li Shixiang, et al. Research and Implementation on Automatic Testing Platform of Temporary Speed Restriction Server[J]. Railway Computer Application, 2012, 21(10): 26-29.
[4] 陈滨, 周小辉. 列控中心临时限速信息包 [CTCS-2] 编码方案研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (12): 7-13.
Chen Bin, Zhou Xiaohui. Research on Encoding Scheme of Balise Telegram [CTCS-2] for Temporary Speed Restriction of Train Control Center[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20 (12): 7-13.

- [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] 岑博文, 陈邦兴, 万勇兵, 等. 列控系统临时限速服务器仿真测试平台研究 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33 (1): 372-376.
Cen Bowen, Chen Bangxing, Wan Yongbing, et al. Research on Simulation and Test Platform of Train Control System Temporary Speed Restriction Server[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(1): 372-376.
- [7] 中国铁路总公司. 临时限速服务器技术规范 (暂行) [S]: 铁运 [2012]213 号. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [8] 谢再盛. 车载接口仿真系统实现 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (10): 18-21.
Xie Zaisheng. Implementation of Vehicle Interface Simulation System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(10):18-21.
- [9] 李雪, 许扬. 5G-R 信令组网方案研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17 (10): 33-36.
Li Xue, Xu Yang. Research on 5G-R Signaling Networking Scheme[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(10): 33-36.
- [10] 中国铁路总公司. 临时限速服务器 TSRS 接口规范: 运基信号 [2010]534 号 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2010.
- [11] 王硕, 吴培栋, 张友兵. 基于 DRPP 的列控车载设备测试序列生成方法 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (4): 14-20.
Wang Shuo, Wu Peidong, Zhang Youbing. Test Sequence Generation Approach for On-Board Train Control Equipment Based on DRPP[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(4): 14-20.

行业信息

乘客搭乘首批安装ETCS数字信号系统的列车抵达伦敦

这是价值 14 亿英镑的东海岸数字计划的一个重要里程碑。该计划旨在通过数字信号使铁路服务可靠和可持续发展。

2023 年 11 月 27 日, 哥维亚环海铁路 (Govia Thameslink Railway)、英国铁路网 (Network Rail) 和西门子交通集团 (Siemens Mobility) 启用 ETCS 系统后, 首辆安装数字信号的大北方客运列车在芬斯伯里公园 (Finsbury Park) 和沼泽门 (Moorgate) 之间运行。

此后, 随着越来越多的大北方司机参加这项技术的培训, 将逐步在更多的列车上安装数字信号。传统信号将保留在轨道的一侧, 直到培训结束, 旧的系统可以拆除。驾驶室外的数字信号有助于司机“看到”更远的前方, 从而提高列车的运行效率。

因此, 使用数字 ETCS 系统的司机将不再依赖于信号“停”或“行”的信息, 而是能够根据驾驶室系统设定的目标速度进行驾驶。这个系统根据轨道上安装的应答器不断更新其他列车的位置。

基于东海岸数字计划解决方案, 正在伦敦到彼得伯勒 (Peterborough) 北部的东海岸干线上安装 ETCS 系统。该计划还为在更广泛的英国网络中数字信号的扩展提供了基础。

该计划的下一阶段将在东海岸干线的韦文花园城 (Welwyn Garden City) 和希钦 (Hitchin) 之间安装数字信号, 预计到 2025 年底, 第一批安装数字信号的列车将在这条线路上运行。

(北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 范婷婷翻译自: <https://railway-news.com> 2023-11-28)

高速铁路引入枢纽信号系统优化设计

邓伟龙

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

摘要: 高速铁路引入枢纽给信号系统设计带来挑战, 结合京沈客专引入北京枢纽, 从枢纽内列控等级选择、场联分界处自动触发、提高枢纽整体运行效率等方面提出优化方案, 以期对其他类似工程建设起到借鉴、参考作用。

关键词: 优化设计; 枢纽; 高速铁路; 列控等级选择; 场联分界; 自动触发; 提高效率

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0016-05

Optimization Design of Signaling System for Introducing High-speed Railway Lines into Hubs

Deng Weilong

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: The introduction of high-speed railway lines into hubs brings challenges to the design of signaling system. Combined with the introduction of Beijing-Shenyang Passenger Dedicated Railway into Beijing hub, this paper proposes optimization schemes from the aspects of the selection of train control level in the hub, automatic trigger at the liaison boundary between yards, and improving the overall operation efficiency of the hub, so as to serve as a reference for other similar projects.

Keywords: optimization design; hub; high-speed railway; train control level selection; liaison boundary between yards; automatic trigger; improving efficiency

随着国内高速铁路建设的不断发展, 开通运营里程逐年增加, 高速铁路网日趋完善, 高速铁路引入枢纽的情况也不断增多。由于铁路枢纽内车站规模大、站型复杂, 引入枢纽各线的线路等级、技术标准差异性大, 给信号系统设计带来不小的挑战。为此, 本文以京沈客专引入北京枢纽为例, 对枢纽内信号系统设计的几个特殊点优化方案进行探讨。

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-11-27

作者简介: 邓伟龙(1983—), 男, 正高级工程师, 本科, 主要研究方向: 铁路信号, 邮箱: 13602015156@126.com。

1 京沈客专引入北京枢纽概况

新建北京至沈阳铁路客运专线(简称京沈客专)地处华北地区的北京市、河北省和东北地区辽宁省, 线路自北京朝阳站起, 向东北延伸, 依次经过北京市顺义区、昌平区、怀柔区及密云区、河北省承德市、辽宁省朝阳市、阜新市, 最后到达辽宁省的省会沈阳市, 至沈阳站止, 线路全长约 697 km。

北京枢纽主要包括: 新建北京朝阳站、北京朝阳动车所、驼房营线路所、小井村 1 号线路所、小

井村2号线路所、上行疏散线、动车走行线,既有京哈铁路、东星线、东北环线等。北京枢纽示意如图1所示。

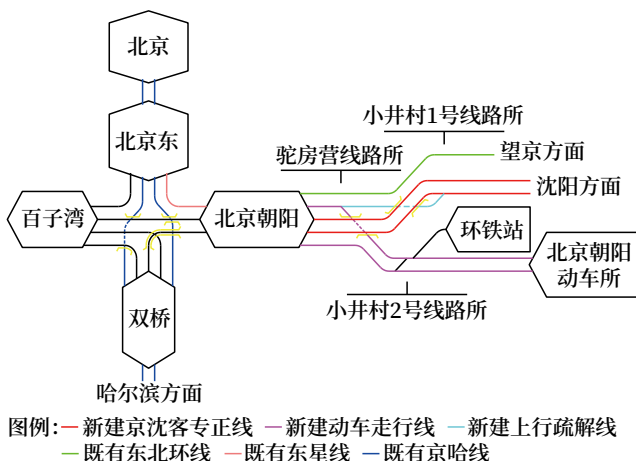


图1 北京枢纽示意
Fig.1 Schematic diagram of Beijing hub

2 枢纽列控等级优化

设计初期,北京朝阳站作为京沈客专的始发终到站,根据相关技术规范要求,新建京沈客专正线、上行疏散线采用CTCS-3(简称C3)级列控系统,动车走行线采用CTCS-2(简称C2)级列控系统,各既有线路均维持CTCS-0(简称C0)级列控系统。后根据中国国家铁路集团有限公司(以下简称“国铁集团”)相关要求,开展北京站至北京枢纽各方向高铁衔接径路改造工作,京沈客专需利用既有东星线、京哈线等引入北京站。

由于装备C3级车载ATP的动车组列车一般不装设列车运行监控装置(简称LKJ),动车组跨线运行时存在车、地不匹配的问题,需要对枢纽内相关既有线路进行适应性改造。

枢纽内既有线路改造通常有两种改造方案:一是将相关的既有线路、车站设备均改造为C3级,则C3动车组无需切换可直接接入北京站;二是将相关的既有线路、车站设备均改造为C2级,C3动车组切换为C2级后接入北京站。在改造为C2级的方案中,还存在将C3/C2切换点设置在北京朝阳沈阳端还是北京端的问题。因此,按3个方案进行比较。

2.1 方案一:枢纽改造为C3级

该方案需将既有东星线、既有京哈线北京站—北京站范围改造为C3级,RBC覆盖至北京站。

优点是C3动车组可以不用切换列控等级直接接入北京站;C3车载设备故障时可以降级为C2控车。

缺点是RBC覆盖范围大,枢纽内需考虑清频与频点设置等问题;枢纽内C3系统与其他既有线路接口多,工程量大,后期维护工作量大;工程投资相对较高;其他C2线路接入时需要切换为C3。

2.2 方案二:枢纽改造为C2级,在东星线上切换

该方案需将既有东星线、既有京哈线北京站—北京站范围改造为C2级,在东星线上设置C3/C2切换点,RBC覆盖至北京东站。

优点是RBC覆盖范围、C3系统接口、工程量、后期维护工作量、工程投资等均较方案一大幅减少。

缺点是C3动车组需切换至C2级才能接入北京站,车载设备故障时只能按照非正常状态组织行车。

2.3 方案三:枢纽改造为C2级,在京沈正线切换

该方案将既有东星线、既有京哈线北京站—北京站范围改造为C2级,在京沈客专正线小井村1号线路所外方(沈阳方向)设置C3/C2切换点,RBC覆盖至北京朝阳站。

与方案二相比,优点是较进一步减少了RBC覆盖范围、C3系统接口、工程量、后期维护工作量及工程投资等。缺点是以北京朝阳为终到站的C3动车组也需要转换为C2级。

2.4 方案比选

以北京枢纽为整体分析,由于京唐城际铁路经既有京哈线接入北京站,京张高铁经既有东北环线、东星线、京哈线接入北京站,上述两线与京沈客专不能完全同步实施。若采用方案一或方案二,均存在相关线路接入枢纽时需要对接枢纽内C3系统进行再次改造的问题,改造实施难度大,联调联试工作量大,安全风险大,同时也会影响京沈客专的正常运营。此外,既有东星线为单线,区间长度仅1.7 km左右,区间无通过信号机,也不具备布置双向C3/C2切换应答器组的条件。枢纽内运行速度

较低，C2 系统不会影响整体的运输能力。因此，从节省工程投资、降低枢纽实施难度和安全风险等角度出发，最终采用了方案三，即枢纽按 C2 系统改造，C3/C2 切换点设置在京沈正线上。这也符合后期国铁集团“新建高铁引入枢纽原则上采用 C2 级列控系统”的要求。

3 场联分界处自动触发优化

北京朝阳站受地形及征地拆迁等原因限制，高速场、普速场咽喉区连接紧密。根据站场股道功能分配，6G～XVG 为高速场接发车股道，1G～5G、16G、17G 为普速场接发车股道，普速场呈“C”字形外包高速场，如图 2 所示。

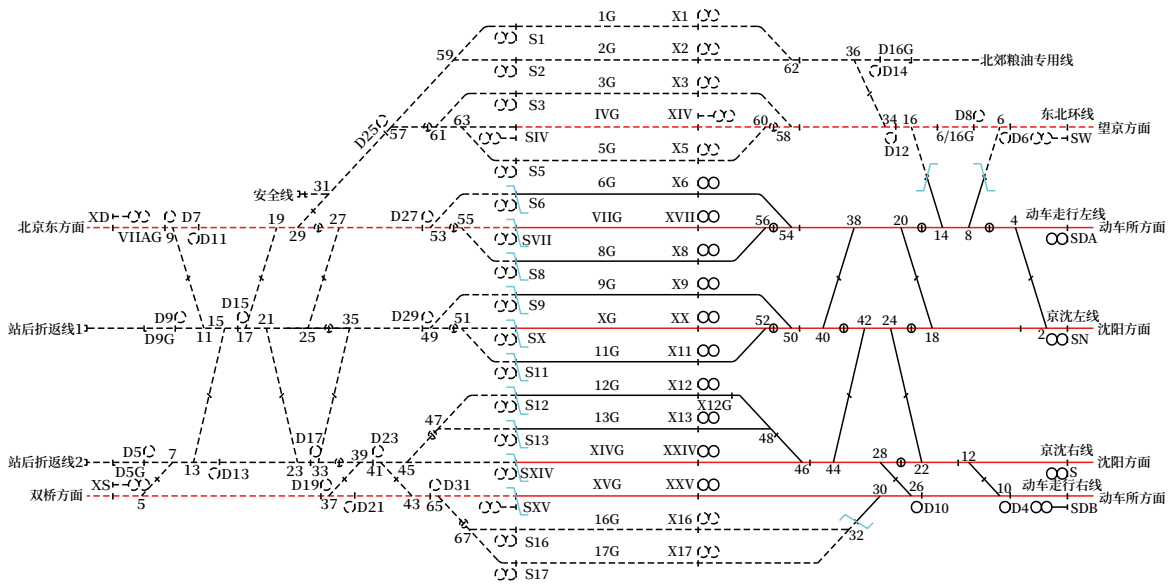


图2 北京朝阳站出站信号机处场联分界示意

Fig.2 Schematic diagram of liaison boundary between yards at starting signal in Beijing Chaoyang station

由于站场布置特殊，北京朝阳站高速场、普速场间存在多处场联。就南咽喉而言，10 处场间分界一般设置在出站信号机处，S6～SXV 出站信号机及全部南咽喉区的道岔、轨道电路均由普速场控制（虚线部分），6G～XVG 由高速场控制（实线部分），同时高速场设 S6～SXV 的复示信号。

计算机联锁系统和列控系统均可按图 2 所示场联分界方案实现两场间的进路控制，但 CTC 系统中，股道和咽喉区分属不同车场，不能实现两场间进路自动触发，具体分析如下。

1) 由普速场北京东方面至高速场股道的接车进路，由于高速场没有咽喉区，CTC 自律机无法判断列车进站的过程，列车到达高速场 6G～XVG 后，无法自动报到达点。

2) 由高速场股道向普速场北京东方面的发车进

路，由于出站信号机和咽喉区均由普速场控制，列车自 6G～XVG 出发后，高速场无法自动报出发点。

为减少进路不能自动触发的场间分界处数，减少现场作业量，在保证站场各股道使用功能不变的前提下进行优化设计，将场联分界移至岔前绝缘节处，同时在场间分界处两场分别设置虚拟信号机和相应的列车按钮。其中 6G～8G 分界于 53# 岔前，结合 D27 设置 XXT4-D27、SXT4 虚拟信号机；9G～11G 分界于 49# 岔前，结合 D29 设置 XXT5-D29、SXT5 虚拟信号机；12G、13G 分界于 47# 岔前，设置 XXT6、SXT6 虚拟信号机，XIVG、XVG 维持分界于 SXIV、SXV 出站信号机处，如图 3 所示。

对普速场而言，XD 进站信号机与上行虚拟信号机 (SXT4、SXT5、SXT6) 间可组成完整的通过进路；对高速场而言，下行虚拟信号机 (XXT4-D27、

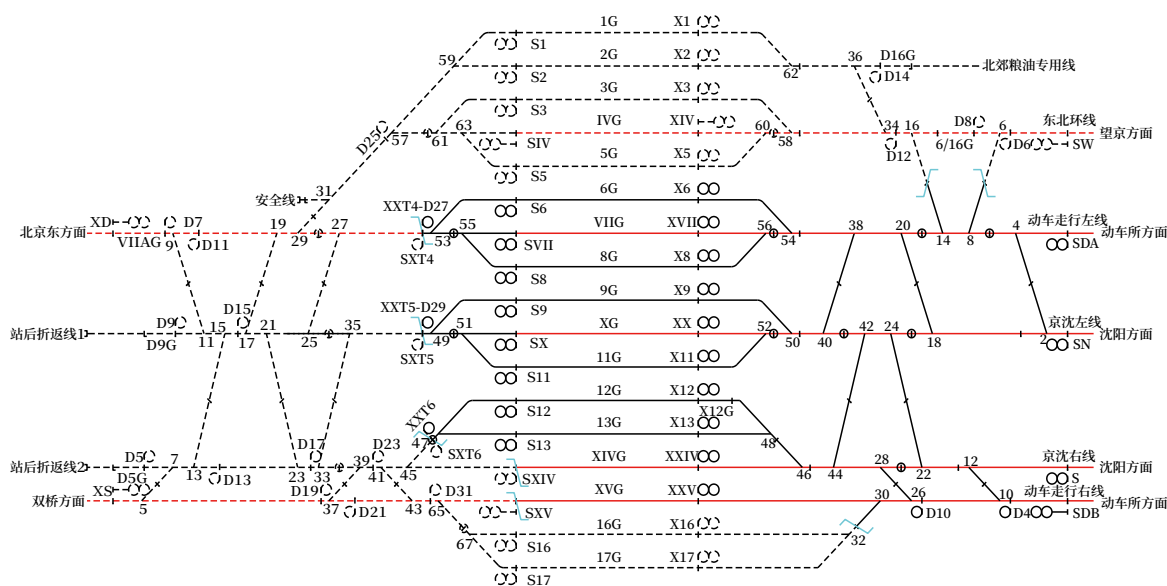


图3 北京朝阳站岔前绝缘处场联分界示意

Fig.3 Schematic diagram of liaison boundary between yards at insulation joint in front of turnout in Beijing Chaoyang station

XXT5-D29、XXT6) 与 S6 ~ S13 出站信号机可组成完整的接发车进路。因此, CTC 系统可实现 6G ~ 13G 的进路自动触发, 具体分析如下。

1) 由普速场北京东方面至高速场股道 (6G ~ 13G) 的进路, 先办理高速场的接车进路, 再办理普速场的通过进路。列车压入 XD 进站信号机内方后, 普速场报通过点; 列车完全接入 6G ~ 13G 后, 高速场报到达点。

2) 由高速场股道 (6G ~ 13G) 向普速场北京东方面的发车进路, 先办理普速场的通过进路, 再办理高速场的发车进路。列车压入 S6 ~ SXV 出站信号机内方后, 高速场报出发点; 列车压入上行虚拟信号机内方后, 普速场报通过点。

尽管受站型和股道使用要求的限制, XIVG、XVG 仍保留在 SXIV、SXV 出站信号机处分界, 不能实现自动触发, 但南咽喉场联数量由 10 处减为 5 处, 不能自动触发的股道接发车进路数量由 10 处减少为 2 处, 优化效果显著。

4 提高枢纽运行效率优化

4.1 原方案存在的问题

北京枢纽北京朝阳站附近, 为满足上行疏散线与动车走行左线疏散设置了驼房营线路所、满足上

行疏散线与京沈上行正线疏散设置了小井村 1 号线路所、满足铁科试验列车利用动车走行线进出环铁站设置小井村 2 号线路所。但枢纽内用地紧张, 驼房营线路所、小井村 2 号线路所附近均不具备设置信号用房的条件, 因此, 驼房营线路所与小井村 1 号线路所合用一套联锁、CTC 设备, 在小井村 1 号线路所附近设置信号楼; 小井村 2 号线路所与北京朝阳动车所合用一套联锁、CCS 设备, 在北京朝阳动车所内设置信号楼。各线路所、车站位置及连接关系、信号机布置等如图 4 所示。

该方案从联锁关系上是可行的, 但从运输角度来看, 存在两个问题。

1) 不利于调度员区分方向

小井村 1 号线路所、驼房营线路所合设一套联锁、CTC 设备, 其在调度台上显示为 1 个车站 (所), 但京沈上行正线的动车组列车经小井村 1 号线路所 5[#] 道岔的直向和侧向均去往北京朝阳高速场, 非常不利于调度员区分列车运行方向。

2) 运行效率较低

按照 CTC 自动触发通过进路、发车进路的逻辑, 需要前次列车出清车站 1LQ 之后, 方可自动触发后次列车的进路。

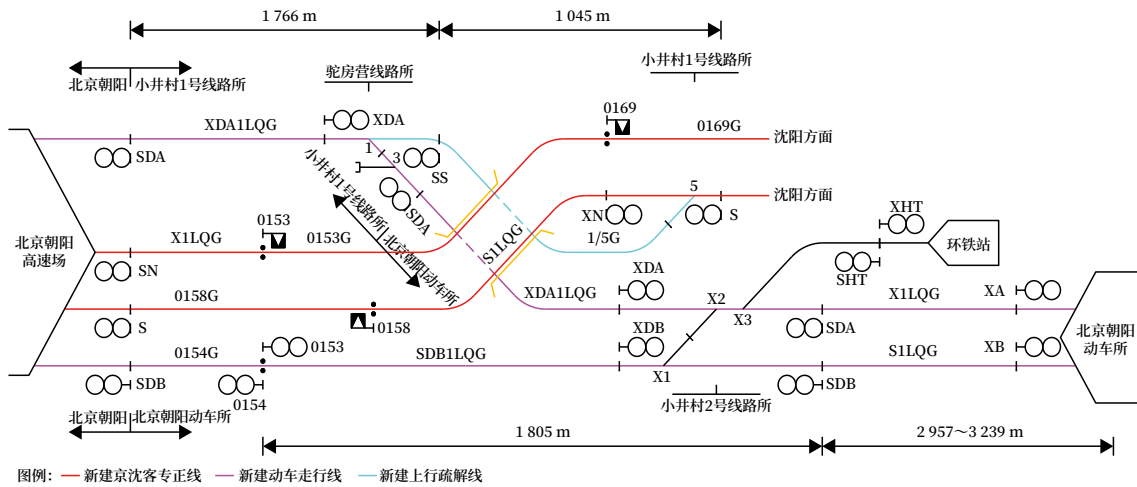


图4 北京朝阳枢纽线路示意图
Fig.4 Schematic diagram of block posts in Beijing Chaoyang hub

a. 小井村1号线路所S通过信号机经5[#]道岔侧向至驼房营线路所SS通过信号机至北京朝阳高速场的进路，需列车出清小井村1号线路所管辖的XDA1LQG后，方可触发下一条进路。整条进路长度2811m，且上行疏解线受竖曲线影响固定限速45km/h，因此整体效率较低。

b. 北京朝阳动车所经小井村2号线路所至北京朝阳高速场的进路，动车走行左线需列车出清北京朝阳动车所管辖的XDA1LQG后，方可触发下一条进路；动车走行右线需列车出清SDB1LQG后，方可触发下一条进路。最长的进路达5044m，其中3100m限速45km/h，且北京朝阳动车所设有踏面诊断设备，该段限速35km/h，整体运行效率较低。当清晨动车组需要密集出所时，低效率运行对整体运输的影响将尤为明显。

4.2 优化方案

1) 小井村1号线路所与驼房营线路所仍合用一套联锁设备，一套CTC主机，但分别设置小井村1号线路所、驼房营线路所两个CTC终端，调度台上显示为2个车站(所)，则京沈上行正线的列车经小井村1号线路所5[#]道岔的直向去往北京朝阳高速场，侧向去驼房营线路所，便于调度员区分列车运行方向。同时，小井村1号线路所S通过信号机经5[#]道岔侧向至驼房营线路所SS通过信号机至北京朝阳高速场的进路，列车出清1/5G后，即可触发

下一条进路，缩短1766m走行距离的时间，可提高运行效率。

2) 北京朝阳动车所与小井村2号线路所仍合用一套联锁设备，一套CCS主机，但分别设置北京朝阳动车所、小井村2号线路所两个CCS终端，调度台上显示为2个车站(所)。北京朝阳动车所经小井村2号线路所至北京朝阳高速场的进路，动车走行左线列车出清X1LQG后，动车走行右线列车出清S1LQG后，即可触发下一条进路，分别缩短967m、1805m走行距离的时间，可提高运行效率。

5 结束语

高速铁路引入铁路枢纽对信号系统的设计要求相对较高，以京沈客专引入北京枢纽信号系统的优化方案为例，对设计过程中遇到的问题及优化解决方案进行归纳总结。京沈客专自2021年1月开通至今，运行平稳，各方反馈意见良好。在枢纽内信号工程的特殊场景下，上述优化方案具有一定代表性，期望该优化方案对其他类似工程建设能起到借鉴和参考作用。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家铁路局. 高速铁路设计规 (下转35页)

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.01.004

列控联锁一体化系统多层次结构化设计实现

路 飞

(卡斯柯信号有限公司, 北京 100070)

摘要: 列控联锁一体化系统(TIS)集成计算机联锁系统和列控中心系统接口和功能,在现场设备维护、系统实时性控制等方面带来一系列优点,但也随之带来软件功能的复杂性。考虑设备现场需具备更好的可维护性和可操作性,从功能结构上进行层次划分,例如站内联锁关系、区间信号机控制、轨道电路编码等作为CTCS-0级列控系统线路功能,临时限速及有源应答器功能作为CTCS-2/CTCS-3级列控系统线路功能,再结合数据配置进行多层次模块化管理,软件采用独立模块结构化设计,不同功能的数据配置、软件升级互不影响,降低不同功能模块之间的耦合性,既有利于工程实施,便于数据配置和软件维护以及故障分析定位,又有利于对系统整体安全性进行分析。

关键词: 列控联锁一体化系统; 模块化管理; 结构化设计; 接口

中图分类号: U284.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0021-05

Multi-level Structural Design and Realization of TIS system

Lu Fei

(CASCO Signal Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: TIS integrates the interfaces and functions of the computer based interlocking system and the train control center system, which brings a number of advantages in field equipment maintenance and real-time system control, but also brings the complexity of software functions. Considering that the equipment needs to have better maintainability and operability in the field, it is divided into levels from the functional structure. For example, the station interlocking relationship, section signal control, track circuit coding, etc. are taken as the functional requirements of CTCS-0 train control system lines, and the temporary speed restriction and switchable balise function are taken as the functional requirements of CTCS-2/CTCS-3 train control system lines. Combined with the data configuration, multi-level modular management can be carried out. The software is designed in structural method with independent modules. The data configuration and software upgrade of different functions do not affect each other, and the coupling between different functional modules is reduced. This is not only conducive to the project implementation, data configuration, software maintenance and fault analysis

收稿日期: 2022-11-02; 修回日期: 2023-12-06

基金项目: 卡斯柯信号有限公司科研项目(RA.J0118059)

作者简介: 路飞(1987—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 列车控制系统, 邮箱: lufei@casco.com.cn。

and location, but also conducive to the analysis of the overall safety of the system.

Keywords: TIS; modular management; structured design; interface

1 概述

在目前的 CTCS-2 和 CTCS-3 列车运行控制系统中，列控中心和计算机联锁是重要组成部分，也是核心地面安全设备，对列车的高效安全运行起着至关重要的作用。其中计算机联锁通过软件实现站内联锁关系，并且可控制信号机、操动道岔等轨旁电子单元（LEU），列控中心控制轨道电路向车载设备发送编码信息，并通过应答器向车载设备发送报文数据信息。列控联锁一体化设备集成了列控中心和计算机联锁的功能，减少现场设备数量，解决了设备间信息共享延时、信息冗余以及接口复杂等问题，减少现场设备接口，降低信息冗余性，提升了系统可靠性，同时也提升了设备的可维护性。

2 列控联锁一体化系统（TIS）结构化设计

列控中心系统由逻辑处理子系统以及维护终端子系统构成。逻辑处理子系统的硬件采用二乘二取二设计，满足故障 - 安全原则。计算机联锁系统由逻辑处理子系统、控显机子系统以及维护终端子系统构成，逻辑处理子系统硬件以采用二乘二取二结构设计，满足故障 - 安全原则。因此，列控中心和计算机联锁的既有结构和安全要求是相同的。

2.1 接口部分设计

与既有列控中心设备的外部接口和计算机联锁的外部接口相比，列控联锁一体化系统的外部接口设备有所减少，列控联锁一体化系统的外部接口对象包括相邻站列控联锁一体化、相邻站联锁、相邻站列控中心、无线闭塞中心（RBC）、临时限速服务器（TSRS）、调度集中（CTC）、集中监测（CSM）、轨道电路、道岔转辙机和信号机等轨旁设备。既有列控中心与 LEU 接口为外部设备接口，可通过网络或串口通信，通过 LEU 向有源应答器发送报文数据，在列控联锁一体化系统中可直接通过目

标控制器向有源应答器发送报文数据。

CTCS-2 级与 CTCS-3 级模式下对于列控中心和计算机联锁的外部接口形式基本一致，接口层面与既有 CTCS-2 级或 CTCS-3 级模式可保证完全一致，安全通信协议、连接方式、继电器接口采集等均无变化。且相比传统 CTCS-2 级或 CTCS-3 级列控系统设备，列控联锁一体化系统的外部设备接口进一步减少，更加便于现场维护。软件层面仅涉及到部分系统的应用层协议变化，影响范围较小。

2.2 系统结构设计

为实现列控联锁一体化的功能，需要对系统结构进行合理设计。系统结构包括系统预处理单元、外部信息接口单元，逻辑运算单元和信息维护单元。系统结构设计如图 1 所示。

从功能角度划分，可分为 CTCS-0 级功能和 CTCS-2 级 /CTCS-3 级功能。从系统设计角度可分为软件管理和数据配置管理。

CTCS-2 级系统主要基于轨道电路和应答器传输列车行车许可信息，CTCS-3 级系统为基于 GSM-R 无线通信实现车 - 地信息双向传输，通过无线闭塞中心形成行车许可。对于既有列控中心设备，在 CTCS-2 级系统和 CTCS-3 级系统中功能基本一致。对于计算机联锁设备，除在 CTCS-3 级系统上增加与无线闭塞中心接口外，其余功能与 CTCS-2 级系统功能基本一致。作为列控联锁一体化设备，可将 CTCS-2 级系统功能和 CTCS-3 级系统功能进行统一管理。

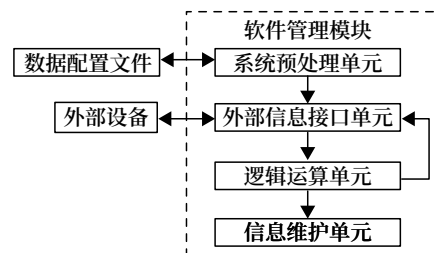


图1 系统结构设计示意
Fig.1 System structure design diagram

2.2.1 系统预处理单元

系统预处理层主要负责应用数据和配置的读取,为主运算逻辑单元读入运算所需的配置信息、站场数据、线路数据等,并开始进行系统初始化,分配内存地址,设置内存变量,同时对系统进行上电自检。如果系统预处理时发生读取数据配置失败、系统内存初始化失败或者上电自检失败等,系统则无法正常启动。

2.2.2 外部信息接口单元

外部信息接口单元主要负责一体化系统与外部设备的接口功能,包括继电采驱接口和通信接口数据交互,接口方式与既有列控中心或计算机联锁系统相似,列控中心和计算机联锁系统集成对外部设备接口无影响。且设备集成后,各个功能模块可以统一综合处理外部设备接口信息,针对既有列控中心和计算机联锁两套系统共用的输入信息,有效解决由于输入信息不一致或者信息延时所带来的问题。从设计实现以及后期运营维护方面,均不存在技术和管理上的障碍。

2.2.3 逻辑运算单元

逻辑运算单元为系统的核心处理单元,作为列控联锁一体化设备最为重要的组成部分,用来实现一体化系统的功能逻辑计算。逻辑层通过二乘二取二安全平台主机实现。软件的功能实现按照 CTCS-0 级列控系统线路和 CTCS-2/CTCS-3 级列控系统线路功能分开设计独立模块的原则,定义模块 1 负责 CTCS-0 级功能逻辑,定义模块 2 负责 CTCS-2 级 /CTCS-3 级功能逻辑。其中 CTCS-0 级功能包括站内联锁逻辑、区间及站内编码功能,区间信号机控制功能和区间方向控制功能等,不包括线路数据相关功能。CTCS-2 级 /CTCS-3 级主要功能为线路临时限速处理和报文数据处理功能。定义模块 3 负责系统内部模块间数据交互,作为内部模块接口,各模块间运算结果系统充分共享,有效组织各个功能模块协调运行。

模块 1 主要实现站内联锁逻辑,包括进路建立、锁闭、解锁,信号机控制和道岔控制。该处理方式

与既有计算机联锁系统一致。另外还会处理既有列控中心相关的不涉及线路数据功能,包括区段编码功能、编码方向控制功能、区间信号机控制功能,区间方向控制功能和区间占用逻辑检查功能等。该模块不依赖于线路数据,且该功能的输入相对稳定,各个子功能间关联紧密,采取模块集成的方式处理。

在 CTCS-2 或 CTCS-3 级列控系统线路上,系统功能应包括临时限速处理和报文功能处理。临时限速处理和报文数据处理作为列控中心系统中十分重要控车功能,逻辑运算较为复杂,且依赖于线路数据,会随线路数据调整而调整,实际应用中有可能会出现修改较为频繁的情况,故单独设计功能模块 2 来实现临时限速处理和报文数据处理。

目前 CTCS-2/CTCS-3 级线路中,临时限速命令由 CTC 下发,由临时限速服务器负责临时限速的管理,列控联锁一体化系统或列控中心系统负责限速执行,通过应答器报文的方式向车载设备输出。列控联锁一体化系统作为集成设备,亦可考虑将临时限速的管理纳入到列控联锁一体化系统的模块 2 中一并处理,进一步减少现场设备维护强度。接口处理与 CTC 和列控中心接口方式保持一致。

两个不同功能的模块虽然功能方面互不影响,独立运算,但各模块的内部计算结果在模块间可以相互复用,这就需要通过设计内部关联接口模块,即系统通过模块 3 实现实时传输模块间的共享信息。例如模块 1 在处理编码功能时需要临时限速数据作为输入,模块 2 应答器报文数据处理时需要进路信息,接口模块 3 作为信息传输介质,负责内部模块运算结果信息的充分共享,将模块 3 设计为共享内存区,功能模块可直接访问共享内存区获取需要的输入信息。

站内和区间线路之间的信息交互无需再通过外部接口传输,有效解决了信息传输延时、设备集成调试等问题。逻辑运算单元模块间数据交互流程如图 2 所示。

针对现场线路复杂,不同线路存在不同功能需求的情况,可通过功能模块、配置数据以及接口的裁

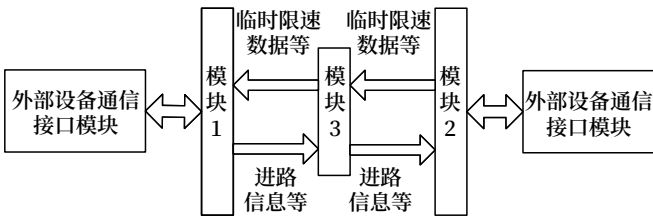


图2 逻辑运算单元模块间数据交互流程

Fig.2 Flow chart of data interaction between logical operation unit modules

剪和组合满足现场各种线路场景，应用于 CTCS-0、CTCS-2 或者 CTCS-3 级列控系统线路。根据实际线路所需需求功能对系统的功能模块和配置数据进行裁剪、拆分组合。系统通过合理的结构分层设计来实现适配不同的线路场景需求。

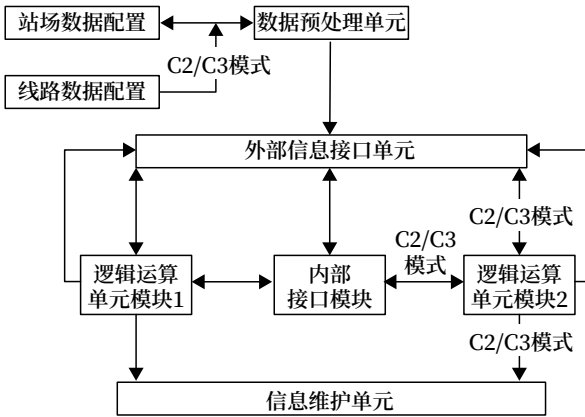


图3 系统功能模块结构

Fig.3 System function module structure

2.2.4 信息维护单元

信息维护层的主要功能为对设备运行情况，系统报警和数据查询等维护功能的实现。一体化系统将列控中心和计算机联锁集成，对设备的维护需求也随之提升。信息维护层通过多个维护信息数据处理方式进行展示，通过列表、图形、曲线描述、文字显示等多态组合，可使维护人员清晰地了解设备运行状态。

信息维护层还应针对系统不同功能模块运行数据，建立起系统统一的信息拓扑关系，动态分析关联的信息之间相互影响，使数据信息之间能够相融合，进行集成性的联动分析，以形成整体设备运行情况综合状态。

2.3 安全性分析

列控联锁一体化系统采用模块化分层设计管理，对于该设计的安全性进行分析。该系统的设计通过模块化分层思想实现，系统的安全性分析也应更加注重模块层级的安全性评估。根据模块实现的不同功能进行划分，将系统模块划分为非安全功能模块和安全功能模块，其中安全功能模块又可分为安全关键等级低和安全关键等级高的模块。系统模块安全分析流程如图 4 所示。

1) 非安全功能模块：模块本身无安全逻辑运算功能，考虑模块的输出数据相对于安全功能模块的影响，确保其数据结果不对其他安全功能模块造成影响。例如信息维护单元模块不参与系统逻辑运算，只作为维护数据输出记录。

2) 安全关键等级低的模块：不参与系统核心逻辑运算，负责系统内部模块接口数据流控制。例如系统内部接口单元，内部建立模块间的安全通信协议，负责安全功能模块间的数据信息交互，确保模块间交互数据完整可靠。

3) 安全关键等级高的模块：负责处理系统功能逻辑运算，输出数据为直接影响列车运行的安全功能模块。对其模块内部进行逻辑结合安全需求进行分析，同时针对模块间运算时序、边界值，模块间数据流交互以及模块间耦合度进行安全分析。

对于系统的安全分析应先选取功能模块，确定模块安全关键等级，建立安全分析模型和系统失效模型，并设计相应安全防护措施防止失效发生或降低失效发生的危害，使系统达到 SIL4 的安全等级。

对于系统的安全性，同样采用功能模块分层的方式进行具有针对性的安全分析，既确保系统安全性又可提高系统安全分析效率。

3 总结与展望

列控联锁一体化作为今后的重要发展方向，有效减少地面信号系统设备数量及系统间外部接口，降低地面信号系统复杂度，充分根据当前系统功能以及当前多种系统之间的复杂接口导致难以解决的

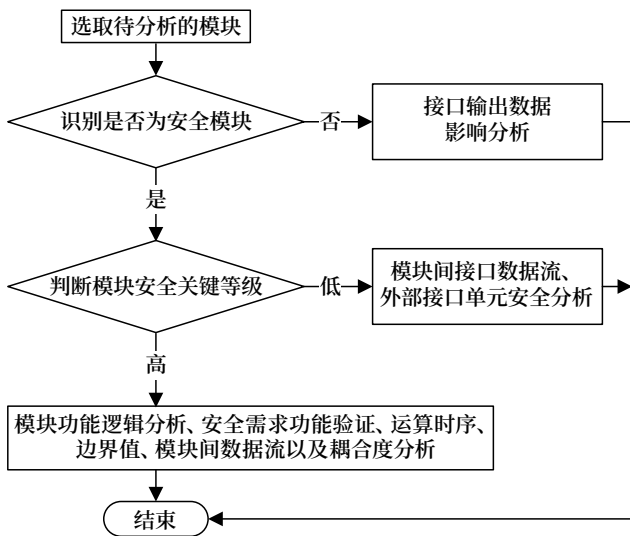


图4 系统模块安全分析流程

Fig.4 System module safety analysis flow chart

问题进行系统集成。具有功能结构划明确、可维护性强、实时性高等优点。在当前列控联锁一体化系统除实现了客专模式下的计算机联锁和列控中心的基础功能外，还新增了适配新型列控系统的闭塞切换、点/灭灯控制等功能。并且已在新型列控系统上进行仿真试验。

本文利用模块化设计思想将各个子功能有序地结合在一起，针对客专线功能需求，充分考虑了设计开发、现场需求以及现场运营维护等方面。结构设计清晰，实现信息有序的共享和逻辑处理，并对模块化结构进行安全性分析。为列控联锁一体化系统在客专上的应用提供了有效的技术方案。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家铁路局. 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] 中华人民共和国国家铁路局. 列控中心技术条件: TB/T 3439-2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [3] 中国铁路总公司. 高铁列控中心接口暂行技术规范: 铁总运[2015]75号[S]. 北京: 中国铁路总公司, 2015.
- [4] 中国铁路总公司. CTCS-3级列车运行控制系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
- [5] 中国铁路总公司. CTCS-2级列车运行控制系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
- [6] 王海忠. 列控联锁一体化系统设计方案探讨[J]. 铁道通信信号, 2009, 45(1): 19-21.
Wang Haizhong. Integration Schema Study of Train Control & Interlocking System[J]. Railway Signalling & Communication, 2009, 45(1): 19-21.
- [7] 赵旭东. 基于高速铁路的车站区间一体化技术方案研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(1): 122-126.
Zhao Xudong. Technical Scheme Research for Station-Section Integration Based on High Speed Railway[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(1): 122-126.
- [8] 王先明, 周艳丽, 张健伟. 特殊场景下列控级间切换方案优化[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(8): 13-18.
Wang Xianming, Zhou Yanli, Zhang Jianwei. Optimization of Transition Scheme between Train Control Levels in Special Scenarios[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(8): 13-18.
- [9] 曾庆文, 王建学, 杨厅. 列控中心临时限速检查范围的工程运用[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(9): 11-15.
Zeng Qingwen, Wang Jianxue, Yang Ting. Engineering Application of Temporary Speed Restriction Inspection Range of Train Control Center[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(9): 11-15.
- [10] 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.

基于DWC PCIE Core的数据传输系统设计

刘肖婷^{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: 在铁路信号系统中, 为有效减少铁路信号系统设备 CPU 资源占用率, 设计一种基于 DWC PCIE Core 的数据发送与接收系统。该系统采用内嵌 ARM Cortex-A9 双核的 FPGA 开发板套件, 利用 FPGA 的灵活性和可扩展性, 采用可配置的 PCIE 硬核 IP 模块以及以太网硬核 IP 模块。该系统主要介绍 Host PC 与 FPGA 之间基于 PCIE 2.0 的 DMA 数据传输以及 FPGA 之间基于 GMAC 的以太网数据传输, 通过 PCIE 总线、以太网基于 DMA 模块实现数据高速可靠传输。

关键词: DWC PCIE Core; FPGA; 数据传输; DMA

中图分类号: U284.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0026-04

Design of Data Transmission System Based on DWC PCIE Core

Liu Xiaoting^{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: In the railway signaling system, a data sending and receiving system based on DWC PCIE Core is designed to reduce the CPU resource occupancy of railway signaling system. The system adopts FPGA development board suite embedded with ARM Cortex-A9 dual core, which takes the advantage of the flexibility and scalability of FPGA, and uses configurable PCIE hard core IP module and configurable Ethernet hard core IP module. This paper mainly introduces the realization of high-speed and reliable data transmission through PCIE bus and Ethernet based on DMA modules between Host PC and FPGA and between FPGA boards.

Keywords: DWC PCIE Core; FPGA; data transmission; DMA

1 概述

铁路信号设备是铁路运输的基础设施, 是保

证行车安全、提高运输效率的重要设备, 在传递信息和改善行车人员劳动条件等方面发挥着重要的作用。为提高铁路信号的安全性和可靠性, 铁路信号设备多采用冗余结构或混合冗余结构。结合铁路设备冗余结构, 基于现场可编辑门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 可扩展处理平台, 开发一种高速数据传输系统, 同时有效减小

收稿日期: 2020-12-29; 修回日期: 2023-12-19

基金项目: 国家重点研究计划项目 (2022YFB4300600)

作者简介: 刘肖婷 (1989—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 嵌入式软件开发, 邮箱: liuxiaoting@crscd.com.cn。

CPU 负载。

本系统利用 ARM Cortex-A9 双核处理器高速数据通信的功能，同时基于该处理器高性能和高能耗的特性，降低功耗和成本。利用 FPGA 可编程平台，设计高速率、多通道的高速串行计算机扩展总线标准（Peripheral Component Interconnect Express, PCIE）接口。同时设计千兆以太网和万兆以太网接口，以满足不同速率以太网的需求。

2 硬件系统基本结构

硬件系统采用 Xilinx 公司的 UltraScale+ XCVU9P-L2FLGA2104 FPGA。上位机与 FPGA 间通过 PCIE 2.0 通信，使用直接内存存取（Direct Memory Access, DMA）的数据传输方法，能有效减少 CPU 负载，提高数据传输速率。FPGA 之间通过千兆或万兆以太网通信。硬件系统还包括串行外围设备（Serial Peripheral Interface, SPI）接口、通用异步接收 / 发送器（Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART）接口、SD 卡接口、片内 RAM 以及外部存储器控制器等。硬件系统基本结构如图 1 所示。硬件系统外接 SD 卡

存储驱动程序，并通过 PCIE2.0 与 Host PC 通信。

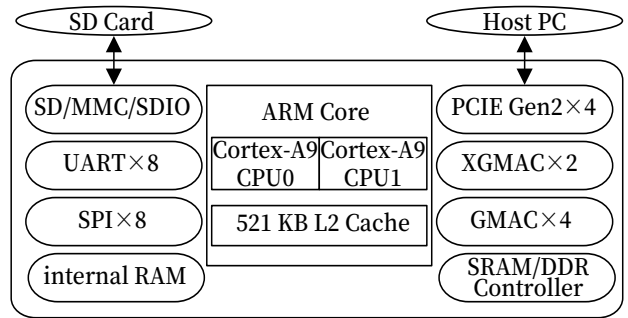


图1 硬件系统基本结构
Fig.1 Hardware system basic structure

3 数据通信系统

FPGA 通过 PCIE 2.0 x4 连接上位机，FPGA 之间通过 10 G 或者 1 G 以太网通信。发送主机 Host PC-A、接收主机 Host-B、发送下位机 FPGA-a 和接收下位机 FPGA-b 之间数据通信系统结构如图 2 所示。该通信系统主要实现 PCIE 系统逻辑、以太网数据传输以及 DMA 数据传输。其中 PCIE 系统逻辑实现 PCIE 总线协议的核心部分，包括物理层和数据链路层的全部功能，以及应用逻辑数据传输所依赖的传输层部分。

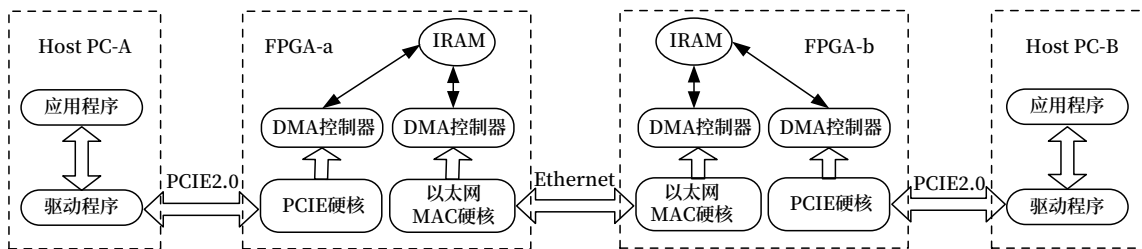


图2 数据通信系统结构
Fig.2 Data communication system structure

图 2 中上位机与 FPGA 之间的通信是基于 DWC PCIE Core 的 DMA 数据传输，上位机系统内存为 DMA 通道分配内存，即 DMA 映射区，也叫 DMA 缓冲区。用户将应用数据写入上位机系统内存，DMA 把数据从 DMA 缓存区传送至 FPGA 片内 RAM。上位机系统内存与 FPGA 片内 RAM 之间就建立了一条 DMA 通道。

下位机之间通过以太网进行数据通信。该系统设计成 6 组以太网接口，4 路千兆以太网和 2 路

万兆以太网，以满足不同场景对以太网速率的差异化需求。

4 数据传输过程

上位机与 FPGA 及 FPGA 之间数据通信过程如图 3 所示，FPGA 之间以 GMAC 为例说明。Host PC-A 为数据发送端，Host PC-B 为数据接收端。Host PC-A 发送数据时，首先查询 FPGA 片内 PCIE 接收数据缓存状态寄存器。如果该缓存状态

为空, Host PC-A 把数据帧发送出去并启动 DMA 操作。

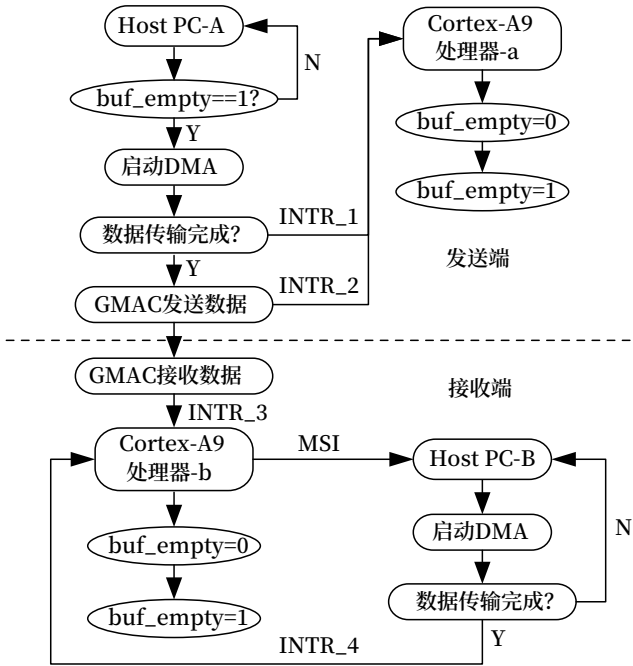


图3 数据传输流程设计
Fig.3 Data transmission process design

启动 DMA 操作主要包括检查与配置 DMA 控制寄存器。首先查询 DMA 通道状态是否空闲, 如果正在使用则返回错误, 空闲则获取数据帧大小。然后使能 DMA 读引擎和 Linked List 操作模式, 将 linked list data 写入 DMA channel context 寄存器中, 使 DMA 能够多次对多块内存进行读写操作。最后配置 Doorbell Number 指定 DMA 传输通道并开启 DMA 数据传输。由于在驱动程序中使能了 iATU 单元, 内核首先需要检查 TLP 地址域首尾地址是否在 outbound 寄存器组中, 如果匹配成功, DMA 将会启动数据传输, 把 Host PC-A 系统内存数据读至 FPGA 片内 PCIE 接收数据缓存中。之后 Cortex-A9 处理器 -a 会收到 PCIE 控制器的 INTR1。如果 INTR1 为数据传输错误中断, 处理器会进入相应的中断响应程序。如果为数据传输完成中断, 处理器会把 PCIE 缓存区状态置为满状态。

FPGA 将通过 PCIe 总线接收的数据保存至片

上 RAM, FPGA 接收数据之后给 Cortex-A9 处理器发送中断, Cortex-A9 处理器接收中断之后将控制权交给以太网 DMA, 以太网 DMA 将 FPGA 片上 RAM 中的数据读出, 保存至以太网模块的内存中。GMAC 控制器等待 DMA 数据传输完成后, 通过以太网把数据发送出去, 同时触发中断 INTR2 给本地处理器, 处理器检测到 GMAC 中断之后将缓存区状态置为空。

接收端 GMAC 接收数据后发送中断 INTR3 给 Cortex-A9 处理器 -b, 处理器检测到接收数据中断后, 将 GMAC 接收缓存区状态置为满状态, 同时会发送 MSI 中断给 Host PC-B。Host PC-B 检测到 MSI 中断就会启动 DMA。DMA 数据传输如果出现错误, 就会给 Host PC-B 发送错误中断, Host PC-B 响应的中断。如果数据传输完成且没有出错, PCIE 控制器发送中断 INTR4 给处理器 -b, 处理器 -b 将内存状态置为空, 这就完成了一次 DMA 读写数据过程。

5 TCP/IP协议的实现

FPGA 之间的通信基于 MAC 层的数据传输。基于 ucousii 驱动程序, 通过 socket 编程实现 TCP/IP 协议, 以保证数据的可靠性传输。socket 编程的实现以及 TCP 服务器端和客户端通信过程如图 4 所示。

服务器端调用 NetSock_Open 和 NetSock_Bind 函数分别创建并监听套接字。之后调用 NetSock_Listen 函数允许操作系统开始接收客户、完成连接阶段并把他们放入被服务的列表。之后服务器进程开始循环, 并且依次对客户进行服务。每次循环, 服务器进程都会调用 NetSock_Accept 函数从服务列表里取出一个客户对其进行服务。如果列表为空, 那么 NetSock_Accept 函数进入阻塞状态, 直到出现一个客户待服务。NetSock_Accept 函数返回一个新套接字, 该套接字是由内核为服务器接受客户连接创建的已连接套接字。

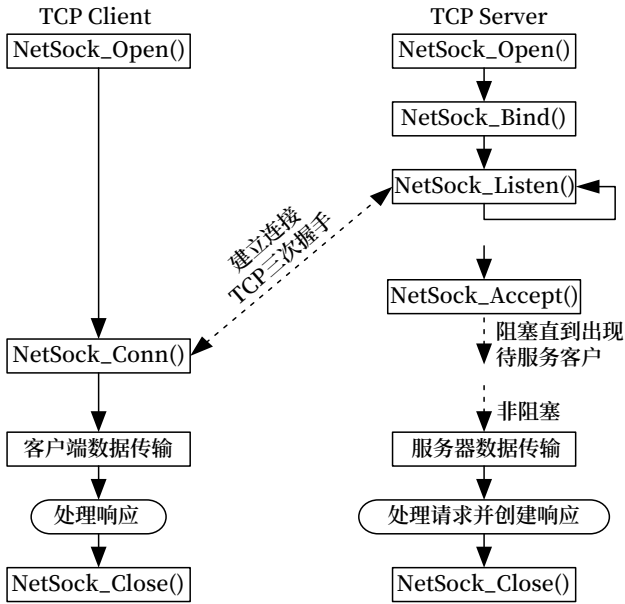


图4 TCP服务器与客户端通信过程
Fig.4 Communication process between TCP server and client

客户端首先调用 NetSock_Open 函数创建套接字，然后调用 NetSock_Conn 函数建立与 TCP 服务器的连接，发起三路握手。建立连接后，客户端与服务器端可以交换数据。

使用 Wireshark 软件捕获建立连接前 3 次握手，建立连接后数据发送与接收，数据传输完成后、握手结束的完整过程。Wireshark 捕捉到的数据传输过程如图 5 所示。

6 结论

本文采用 FPGA 设计了上位机与 FPGA 之间基于 DWC PCIE Core 的 DMA 数据传输，以及 FPGA 之间基于以太网的数据传输。通过 DMA 的数据传输以及共享内存的设计，能够大大减少上位

464	J922.917999	192.168.144.128	10.2.49.41	TCP	74 J9878 - 55555 [SYN] Seq 0 Win 64248 Len 0 PS 1468 SALK PLBY 1 lswal J/4J0121J1 lbcoc 0 N5 128
465	J922.918091	VMware 08:19:0b	Broadcast	ARP	42 Who has 192.168.144.128? Tell 192.168.144.2
466	J922.918094	VMware J8:14:49	VMware 08:19:0b	ARP	00 192.168.144.128 is at 08:0c:29:0e:14:49
467	J922.918043	10.2.49.41	192.168.144.128	TCP	58 55555 - 19879 [SYN, ACK] Seq 0 Ack 1 Win 64248 Len 0 MSS 1460
468	J922.918951	192.168.144.128	10.2.49.41	TCP	08 J9878 - 55555 [ACK] Seq 1 Ack 1 Win 64248 Len 0
469	J922.918995	192.168.144.128	10.2.49.41	TCP	71 J9878 - 55555 [PSH, ACK] Seq 1 Ack 1 Win 64248 Len 17
470	J922.919029	192.168.144.128	10.2.49.41	TCP	08 J9878 - 55555 [FIN, ACK] Seq 19 Ack 1 Win 64248 Len 0
471	J922.919058	10.2.49.41	192.168.144.128	TCP	54 55555 - 19879 [ACK] Seq 1 Ack 18 Win 64248 Len 0
472	J922.919097	10.2.49.41	192.168.144.128	TCP	54 55555 - 19879 [ACK] Seq 1 Ack 19 Win 64219 Len 0
473	J922.919095	10.2.49.41	192.168.144.128	TCP	54 55555 - 19879 [FIN, PSH, ACK] Seq 1 Ack 19 Win 64219 Len 0
474	J922.919713	192.168.144.128	10.2.49.41	TCP	08 J9878 - 55555 [ACK] Seq 19 Ack 1 Win 64248 Len 0
475	J927.937449	VMware J8:14:49	VMware 08:19:0b	ARP	00 Who has 192.168.144.2? Tell 192.168.144.128

图5 基于TCP/IP协议的数据传输
Fig.5 Data transmission based on TCP/IP protocol

机 CPU 负载，提高数据传输效率。通过 TCP/IP socket 编程，保证数据的可靠性传输。如果采用更高版本的 PCIE 或者 16 通道，传输速率还会有更大的提升空间。

参考文献

[1] 王齐. PCI Express 体系结构导读 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
 [2] 陈学松. 深入 Linux 设备驱动程序内核机制 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
 [3] Behrouz A. Forouzan, Firouz Mosharrarf. Computer Networks: A Top-Down Approach[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
 [4] W.Richard Stevens, Bill Fenner, Andrew M. Rudoff. UNIX 网络编程 卷1 套接字联网 API

[M]. 3 版. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
 [5] 任哲. 嵌入式实时操作系统 $\mu C/OS-II$ 原理及应用 [M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
 [6] 吴桂龙. 提高传输以太网汇聚业务安全系数探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (2): 30-34.
 Wu Guilong. Discussion on Improving Security Factor of Transmitting Ethernet Aggregation Service[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(2): 30-34.
 [7] 杨亚涛, 张松涛, 李子臣, 等. 基于 Zynq 平台 PCIE 高速数据接口的设计与实现 [J]. 电子科技大学学报, 2017, 46 (3): 522-528.

(下转 46页)

铁路线路巡防平台建设方案研究

栗 敏

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要: 结合铁路视频采集点分布特征, 对区间视频采集点进行分类, 分析线路巡防平台的接入需求, 提出线路巡防平台的建设方案, 包括路局级线路巡防中心平台、站段巡防大屏、车间巡防终端及数据传输通道 4 部分。线路巡防中心平台采用云协同技术, 对现场视频流研判、上传并报警, 并与铁路综合视频监控系统、其他外部系统相连, 实现资源共享。站段配置巡防大屏, 车间配置巡防终端, 并结合既有铁路承载网的建设情况, 提出通道建设方案。该平台包含专业管理强化、智能化技防、巡防策略优化等 3 个功能, 为铁路线路巡防平台的建设提供参考。

关键词: 线路巡防平台; 云协同; 综合视频; 通道建设

中图分类号: U285

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0030-06

Research on Construction Plan of Railway Line Patrol Platform

Li Min

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

Abstract: Based on the distribution characteristics of railway video acquisition points, this paper classifies the section video collection points, analyzes the access requirements of the line patrol platform, and puts forward the construction scheme of line patrol platform, which includes four parts: line patrol center platform, station and depot patrol screens, workshop patrol terminals and data transmission channels. The line patrol center platform adopts the cloud collaboration technology to analyze, upload, and alarm on-site video stream, and is connected to the railway comprehensive video monitoring system and other external systems to share resources. Stations and depots are equipped with large patrol screens, and workshops are equipped with patrol terminals. Based on the characteristics of patrol platform construction, a supporting channel construction is proposed. This platform has three major functions including professional management enhancement, intelligent technical defense, and patrol strategy optimization. This paper provides the reference for the construction of railway line patrol platforms.

Keywords: railway line patrol platform; cloud collaboration; comprehensive video monitoring system; channel construction

收稿日期: 2023-07-19; 修回日期: 2024-01-05

基金项目: 湖北省重点研发计划项目 (2021BAA170)

作者简介: 栗敏 (1992—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 铁路通信工程, 邮箱: 1512956635@qq.com.

1 概述

目前,综合视频监控系統作为铁路运输指挥、生产作业、公安保卫、安全生产的一种重要技术手段,其采集点分散,采集信息繁杂。如何有效提取采集点采集的信息,遇到事故时如何进行快速处置,路局中心、站段、车间各级部门如何共享资源,各系统间如何互联互通,成为研究的重点。

根据中国国家铁路集团有限公司(简称国铁集团)党组《国铁集团关于开展“守底线、补短板、除隐患、防风险”安全专项整治行动的通知》(铁党办[2022]16号)相关文件要求,结合不同等级铁路的视频监控特征,通过信息化、自动化、智能化等技术手段,充分利用监测预警资源,研究建设涵盖巡查、监控、处理、指挥、控制、应急等功能的线路巡防平台,成为提升“护路联防”的重要手段之一。

以强基达标、源头治理、专项整治作为工作方法,在充分利用既有铁路综合视频资源的基础上,结合新标准、新规范,研判线路外部较高风险处所,更换或补强既有铁路视频采集点,结合云协同技术,从而建设人机巡查、视频联动等功能于一体的线路巡防平台。

由于视频采集点、线路巡防终端、线路巡防中心平台分布于线路、车间、站段、路局中心等处,分布分散,巡防平台的通道建设成为平台成功建设与否的重要一环。结合承载网结构特征,利用或补强既有铁路承载网各节点设备,构建线路巡防平台的重要通道。

线路巡防平台的建设,使现场、车间、站段与路局中心共享资源,第一时间发现并处置铁路险情和沿线灾害,筑牢铁路环境安全屏障,保障运输安全。同时,促进线路巡防工作调度、指挥、管理和组织方式革新,规范巡防工作管理流程,提高风险防控水平。

2 平台接入需求分析

线路巡防平台的视频信息来源于铁路综合视频

监控系统,由于铁路综合视频监控系統采集的视频信息来源广泛,需对该信息进行筛选、确定后,再统一接入线路巡防平台。

根据国铁集团相关规范及文件要求,铁路综合视频监控系统的线路视频采集点主要涵盖车站咽喉区、接触网分相区、隧道口、隧道紧急出口/避难所、桥梁救援疏散通道、路基、路基与桥梁结合部等处。为满足巡防平台“实时巡查、重点盯控”要求,需对涉及危及铁路行车安全及设备安全的处所采用高清夜视摄像机进行实时监控,并将实时视频统一纳入线路巡防平台中。

运营铁路优先考虑利用既有综合视频监控采集点设备实现关键地段的实时监控。由于既有线路视频监控区域普遍存在盲区,同时,既有摄像机采集的视频流监视效果不能全部满足新的使用需求,接入线路巡防平台前,需考虑更换或补强视频采集点设备。

较高风险地段暂按三级进行分类,泥石流、落石等地段按照一级问题归类,人员、动物入侵等易发生地段按照二级问题归类,其他地段按照三级问题归类。各视频采集点采集的视频数据根据较高风险地段的分级特征及运营单位相关意见进行对应分类,级别较高的视频数据优先接入线路巡防平台,同时,线路巡防平台需考虑预留级别较低的视频数据的接入能力。

3 线路巡防平台建设方案

线路巡防平台建设,是以路局为中心,向站段和车间覆盖。包括路局级线路巡防中心平台(简称中心平台)、站段巡防大屏、车间巡防终端及数据传输通道4部分。中心平台部署于各路局信息机房,采用云协同技术,对现场采集点的视频流进行研判、上传和报警;站段设置巡防大屏;车间配置巡防终端;车间、站段、路局中心共享视频流信息。

3.1 中心平台架构分析

中心平台采用集中部署的方式,在路局集团公司信息机房内部署。该平台与铁路综合视频监控系

统的局级区域中心相连，支撑路局集团公司、站段、车间三级用户使用。同时，巡防平台亦可与其他外部系统相连，共享信息，如图1所示。

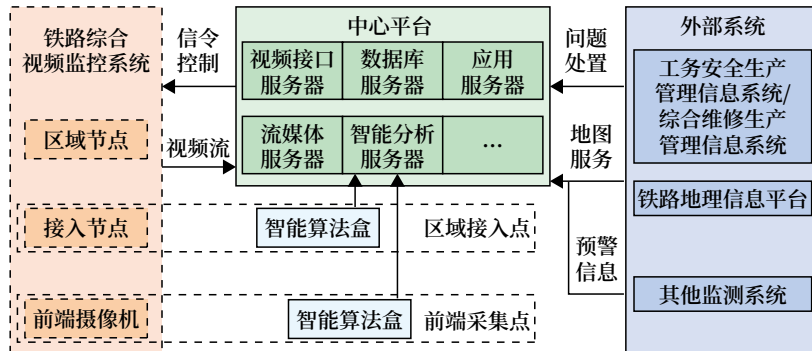


图1 中心平台架构
Fig.1 Center patrol platform architecture diagram

中心平台设备主要包括应用服务器、数据库服务器、流媒体服务器、内服网应用接口服务器、视频接口服务器、综合视频专网应用接口服务器、视频分析服务器、地图服务器、存储设备及存储互联交换机等。

中心平台采用云协同技术，边端算法和云端算法相结合，利用智能算法盒分析现场视频流，并对视频流信息进行研判、上传并报警。智能算法盒分布于前端视频采集点及各接入节点处，包含视频编码、数据传输、存储、智能算法等多种技术，单台智能分析算法盒并发分析路数不少于4路。智能算法盒实现边端算法，对铁路综合视频监控系统各采集点采集的视频流进行边端检测，快速检查异常，并向云端发送预警图像，云端智能分析服务器对边端发送的预警图像进行二次判识，减少误报，将判识结果推送至巡防终端并报警弹窗。

中心平台与铁路综合视频监控系统路局区域中心节点互联，利用铁路综合视频监控系统VPN编号接入铁路数据通信网，巡防平台核心交换机和综合视频监控系统区域节点交换机相连。中心平台与综合视频监控系统间设置网关设备，通过视频网关设备，可获取综合视频监控系统平台的实时视频流，查看综合视频监控系统平台的录像视频，查询各摄像机的状态。

中心平台可与工务安全生产管理信息系统、综合维修生产管理信息系统互联，共享信息，协同处

置各类问题；亦可与铁路地理信息平台互联，地理信息平台为巡防平台提供电子地图服务；也可预留其他检测系统端口，实现功能的扩展与共享。

铁路综合视频监控系统由铁路专用数据通信网承载，工务安全生产管理信息系统、综合维修生产管理信息系统由铁路局内部服务网承载，其他系统亦可由铁路局外部服务网或互联网承载。由于承载网的多样性，各级系统间访问的网络安全成为重中之重。为满足网络安全要求，中心平台设置网络安全设备，主要包括新一代防火墙、入侵检测、流量监测设备、核查服务器、终端管控服务器、数据防泄漏设备、运维审计系统服务器、日志审计系统服务器、漏洞扫描服务器和防病毒服务器等。

3.2 站段巡防大屏建设

路局站段的安全生产调度指挥中心配置线路巡防平台巡防大屏，以满足站段调度指挥安全生产的需要。巡防大屏可实时展示线路预警信息，展示各车间、站段巡查问题总数及未处理总数，展示巡防重点位置的数量（包括不限于隧道口、公跨桥、路隧桥结合部、路堑、救援疏散通道等），展示本段巡防计划中重点任务及完成比例，同时可以实时调看视频流信息。

巡防大屏可采用激光大屏显示系统，由2台超短焦4k高清激光工程投影机、1台媒体矩阵（32路输入12路输出，可扩展）、1台视频融合服务器（12路视

频输入,可扩展至24路)、1块6 m(长)×1.86 m(高)的无源荧幕组成。

3.3 车间巡防终端配置

为有效建设事故现场的“最后一公里”,铁路沿线各车间结合实际使用需求配置巡防终端。各巡防终端采用互联网接入方式,统一接入中心平台。巡防终端分为两类,一类用于监测、维护和管理智能分析算法盒,一类用于现场巡查、问题录入及应急处置。

巡防终端CPU核数 ≥ 6 ,内存 ≥ 16 GB,硬盘 ≥ 1 TB,拥有10/100/1000 M网络接口,包含LCD显示屏,显示面积 ≥ 23 英寸,拥有Windows操作系统。

3.4 数据传输通道方案

线路巡防平台各子系统设备分布于路局信息机房、站段、各车间及铁路沿线各视频采集点处,设备设施分布分散,各设备设施的互联互通成为线路巡防平台建设中的关键一环。结合各处通信网络带宽、网络设备特征,选择合适的通道,承载线路巡防平台系统中各设备设施的业务成为研究的重点。

线路巡防平台的通道建设依托于铁路既有通信承载网。目前,通信承载网主要有传输系统、数据网及接入网系统。根据线路巡防平台设备部署地不同的承载网设备特征,结合各设备业务的带宽需求,选择合适的承载网设备进行业务承载。通过计算各处业务接入的带宽需求,分析各处承载网设备是否满足接入条件,考虑各处承载网设备是否需要新设或补强。

结合线路巡防平台系统的架构,平台的通道建设主要涉及中心平台与路局综合视频区域中心间、智能分析算法盒与前端采集点间、巡防终端与中心平台间等3个部分。

中心平台与路局综合视频区域中心。考虑中心平台设备部署地新增的通道带宽需求较大,该地新设路由器设备,建立局域网,并利用路局既有数据通信网提供的光通道与路局既有综合视频区域中心互联。

智能分析算法盒与前端采集点。若单台智能分析算法盒并发分析4路视频,带宽需求约为10 M,

智能分析算法盒与既有/补强前端采集点间利用数据网通道实现数据传输。

巡防终端与中心平台。工务段需设置巡防大屏,车间根据需要设置巡防终端,结合站段、各车间通信承载网的设置情况,灵活地选用传输设备、数据网或接入网设备,提供巡防大屏、各巡防终端至中心平台新增的通道需求。

4 巡防平台主要功能

线路巡防平台主要具备分类分级巡防策略优化功能、创新的智能化技防功能和专业管理强化功能。

1) 线路巡防平台具备分类分级巡防策略优化功能。巡防平台将铁路沿线风险等级细化分类,按照“场景”“天气”和“问题”3个方面划分,确保关键场景重点盯控,关键天气加密盯控,关键问题闭环盯控。根据风险管控要求,场景划分为重点、关注、一般共3个等级,天气划分为特殊和一般2个等级。根据不同等级确定巡查频次,最高等级即重点场景特殊天气,该等级下巡查频次设置为3 min巡查。根据不同风险分类,实行三级动态管理,精准管控风险。针对泥石流、落石等一级问题,立即扣停列车,确保行车安全;针对人员、动物入侵等二级问题,采取添乘、出巡等方式,现场确认;其他三级问题纳入问题库管理,按时销号。

2) 线路巡防平台具备创新的智能化技防功能。巡防平台利用大数据、人工智能等先进的技术手段,将技防、人防、物防巧妙地结合,应用视频智能分析技术、摄像机+传感器智能分析技术等,科学、准确、及时地提高监测监控、预警预判、风险评估等,逐步实现针对险情、灾情、异物侵限、闲杂人员或大型动物入侵线路安全限界等危及行车及设备安全风险的自动预警。

3) 线路巡防平台具有专业管理强化功能。铁路局站段建立适当的管理办法,配备相关监控人员,合理利用线路巡防平台。该平台作为段调度指挥的组成部分,依托段级管理,同时,各工务车间具备一定的监控职能,建立了事故现场的“最后一公

里”，更加快速、准确地处置问题。该平台作为防范各类安全风险、应对处置各类突发事件的指挥中枢，承担险情、灾情实时监控预警、应急处置、协调指挥和信息管理等职责，提升了工务部门应急管理的科学化、专业化、智能化和精细化。

5 结束语

本文结合铁路线路综合视频采集点分布特征及风险等级，确定了线路巡防平台的接入需求，提出了线路巡防平台的建设方案，线路巡防中心平台亦可与其他系统相连，实现数据共享。

该平台建立的分级体系，能够快速分类问题，提升事故处理能力；利用大数据、人工智能等新技术，提高现场监控、判断能力；同时，铁路局站段的管理更加科学化、专业化、智能化。

本文充分说明线路巡防平台建设的可行性及必要性，研究线路巡防平台的建设方案，为提升“护路联防”工作提供技术支撑。

参考文献

- [1] 陈梅, 袁振江, 陈宏宇, 等. 铁路线路巡防视频监控需求分析与方案研究 [J]. 中国铁路, 2022 (7): 125-133.
Chen Mei, Yuan Zhenjiang, Chen Hongyu, et al. Demand Analysis and Scheme Research on Video Surveillance of Railway Track Patrol[J]. China Railway, 2022(7): 125-133.
- [2] 王昊. 铁路综合视频监控系统技术规范发展与解析 [J]. 中国铁路, 2023 (2): 113-119.
Wang Hao. Development and Analysis of Technical Specifications for Railway Integrated Video Surveillance System[J]. China Railway, 2023(2): 113-119.
- [3] 许辉. 铁路综合视频监控系统网络安全建设的研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (5): 39-43.
Xu Hui. Research on Cyber-Security of Railway Integrated Video Monitoring System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(5): 39-43.
- [4] 杨天骄. 下一代铁路综合视频监控系统发展方向探讨 [J]. 铁道通信信号, 2020, 56 (6): 28-32.
Yang Tianjiao. Discussion on Development Direction of Next Generation Integrated Video Surveillance System for Railway[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(6): 28-32.
- [5] 赵一颖, 姜志威. 铁路客站视频监控前端的设置方法与技术展望 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (2): 62-67.
Zhao Yiying, Jiang Zhiwei. Setting Method and Technical Prospect of Video Monitoring Front End at Railway Passenger Station[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(2): 62-67.
- [6] 诸叶刚. 铁路综合视频监控系统网络安全防护体系构建思路探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17 (6): 71-76.
Zhu Yegang. Discussion on Construction of Network Security Protection System for Railway Integrated Video Monitoring System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(6): 71-76.
- [7] 梁洪源, 曹凌云. 低时延、高可靠的车云协同安全策略研究 [J]. 信息通信技术, 2022, 16 (5): 18-22.
Liang Hongyuan, Cao Lingyun. Research on Low Delay and High Reliability Vehicle Cloud Collaborative Security Strategy[J]. Information and Communications Technologies, 2022, 16(5): 18-22.
- [8] 丁飞, 张楠, 李升波, 等. 智能网联车路云协同系统架构与关键技术研究综述 [J]. 自动化学报, 2022, 48 (12): 2863-2885.
Ding Fei, Zhang Nan, Li Shengbo, et al. A Survey of Architecture and Key Technologies of Intelligent Connected Vehicle-Road-Cloud Cooperation System[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(12): 2863-2885.
- [9] 刘跃遥, 陈谦, 曹坤. 铁路综合视频监控系统三种平台架构对比分析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (8): 37-40.
Liu Yueyao, Chen Qian, Cao Kun. Comparative

Analysis of Three Architecture Platforms of Railway Integrated Video Monitoring Systems[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(8): 37-40.

- [10] 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.

- [11] 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.

- [12] 赵越, 杨家田, 王永岗, 等. 铁路综合视频监控系 IPv6 升级改造方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (10): 30-35.

Zhao Yue, Yang Jiatian, Wang Yonggang, et al. IPv6 Upgrading Scheme of Railway Integrated Video Monitoring System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 30-35.

(上接 20页)

范:TB 10621-2014[S]. 北京:中国铁道出版社, 2014.

- [2] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路信号设计规范:TB 10007-2017[S]. 北京:中国铁道出版社, 2017.

- [3] 王先明, 周艳丽, 张健伟. 特殊场景下列控级间切换方案优化 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(8): 13-18, 31.

Wang Xianming, Zhou Yanli, Zhang Jianwei. Optimization of Transition Scheme between Train Control Levels in Special Scenarios[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(8): 13-18,31.

- [4] 马樱, 张祺, 胡欢. 高铁/客专线路交汇车站调度台划分方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(9): 111-116.

Ma Ying, Zhang Qi, Hu Huan. Discussion on Division Scheme of Dispatching Console at Intersection Station of High Speed Railway and Passenger Dedicated Line[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(9): 111-116.

- [5] 孟润虎, 陈洪雨, 韩成彦. 红灯重复显示 CTC 跨站自触功能的设计与实现 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(6): 6-10.

Meng Runhu, Chen Hongyu, Han Chengyan. Design and Realization of Auto-triggering Function of CTC System Across Station in Red Light Repetition Scenario[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(6): 6-10.

- [6] 李亚兰. 一站两场场间渡线道岔场联电路设计 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(3): 23-26.

Li Yalan. Design of Liaison Circuit for Crossover Turnout Between Yards of Station with Two Yards[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(3): 23-26.

- [7] 解峰. 合肥南动车所列车运行模式的研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(6): 34-39.

Xie Feng. Research on Train Operation Mode of Hefei South EMU Workshop[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(6): 34-39.

- [8] 何永发. 高速铁路枢纽联络线设置与信号系统优化匹配研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(1): 13-19.

He Yongfa. Research on Layout of Liaison Lines of High-speed Railway Hubs and Optimized Matching of Signaling Systems[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(1): 13-19.

高速铁路长大隧道GSM-R网络冗余组网方案分析

袁廷瑞¹, 熊洁¹, 路晓彤², 焦晓辉²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031;

2. 中国国家铁路集团有限公司工管中心, 北京 100844)

摘要: 高速铁路长大隧道需要按照 GSM-R 冗余组网方案进行覆盖。目前 GSM-R 网络可采用数字直放站与分布式基站作为数字中继设备, 两种设备均有多种组网方案。从故障应对能力、载频利用率、建设成本等多个角度开展分析, 对比多种高速铁路隧道内 GSM-R 数字中继设备冗余组网方案, 提出各种方案的适用范围和性能优劣。

关键词: GSM-R; 组网; 高速铁路; 隧道; 无线通信

中图分类号: U285.21

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0036-06

Analysis of GSM-R Redundancy Networking Scheme for Long Tunnel of High Speed Railway

Yuan Tingrui¹, Xiong Jie¹, Lu Xiaotong², Jiao Xiaohui²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

(2. Engineering Management Center, China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China)

Abstract: Long tunnels of high-speed railway need to be covered according to GSM-R redundancy networking scheme. At present, GSM-R network can use two kinds of digital relay equipment: digital repeater and distributed base station. Both of the equipment have a variety of networking solutions. This paper analyzes the fault response capability, carrier frequency utilization, construction cost and other aspects, compares various GSM-R digital relay equipment redundancy networking schemes in high-speed railway tunnels, and proposes the application scope and performance advantages and disadvantages of various schemes.

Keywords: GSM-R; networking; high speed railway; tunnel; wireless communication

1 概述

国内高速铁路多采用基于 GSM-R 网络的 CTCS-3 级列控系统, 根据《铁路数字移动通信

收稿日期: 2022-11-15; 修回日期: 2023-12-20

第一作者: 袁廷瑞 (1994—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 铁路无线通信, 邮箱: tingrui_yuan@163.com.

系统(GSM-R)设计规范》(TB 10088-2015)第4.2.11条要求规定,“CTCS-3级列车运行控制区段、机车同步操控区段应根据需要进行冗余无线覆盖设计”。目前高速铁路隧道内冗余覆盖支持多种方案,根据设备类型可分为数字直放站与分布式基站;根据组网方式可分为交织组网与同站址组网。本文主要针对长大隧道的冗余覆盖方案进行分析对比。

2 铁路无线通信设备简介

目前,国内铁路无线通信弱场区一般使用数字直放站或分布式基站与漏泄同轴电缆覆盖。其中数字直放站由近端机(MU)与远端机(RU)组成,一个MU可以携带多个RU;分布式基站由室内基带处理单元(BBU)和射频拉远单元(RRU)构成,一个BBU可以携带多个RRU。各厂家的数字直放站设备配置和实现方案基本一致,组网方案主要受限于传输时延;分布式基站各厂家配置差异较大。

国内GSM-R分布式基站供应商主要有中兴、华为、诺基亚和凯普施。4个厂家的设备配置如表1所示。

表1 各厂家分布式基站设备配置情况
Tab.1 Equipment configuration of distributed base stations by different manufacturers

序号	内容	中兴	华为	诺基亚	凯普施
1	BBU的核心处理器或主控板冗余热备	单套BBU能实现	需2套BBU实现	需2套BBU实现	单套BBU能实现
2	RRU的载波单元分板设置	1套RRU只有1个载频板,1处需2套RRU实现	1套RRU只有1个载频板,1处需2套RRU实现	1套RRU只有1个载频板,1处需2套RRU实现	单套RRU能实现
3	BBU光口数量	4个	6个	6个	8个
4	环型组网环路数量和环内RRU数量	2×3	3×4	3×6	4×6
5	BBU至最远端RRU光缆距离/km	20	40	18	12

中兴、华为、诺基亚、凯普施分布式基站的设

备配置和组网方案各不相同。凯普施的分布式基站基本上与数字直放站组网方式相同,中兴、华为、诺基亚的分布式基站实现方式基本一致,RRU无法同时接入两个不同BBU信源,均需在同一站点设置两套RRU分别接入不同BBU。同时各厂家设备配置能力有较大差异,导致各厂家具有不同的隧道覆盖能力。下面将针对数字直放站与分布式基站隧道内冗余组网方案开展对比分析。

3 长大隧道GSM-R网络冗余组网方案

3.1 冗余组网基本原则

铁路冗余组网中采用“交织”“同站址”来区分网络覆盖方式,采用“主从”“主备”来区分业务承载情况。

“交织”方式中,两相邻站点的场强需相互覆盖到对方站址,站间距一般为单个站点覆盖半径;“同站址”方式中,两相邻站点场强不需要覆盖到对方站址,只需满足同小区场强连续、异小区重叠覆盖距离满足切换要求,因此站间距可大于单个站点覆盖半径。

“主从”网络中,不同基站互为主从信源,正常工作时均承担业务,任一基站故障时由另一基站承载全部业务;“主备”网络中,主基站作为主用信源,承载所有业务,备基站只作为备用信源,平时不承载业务,仅在主基站故障时承载业务。“主从”网络比“主备”网络具有更高的载频利用率。

3.2 数字直放站

方案1:数字直放站交织主从冗余覆盖(1.5 km站间距)

方案1组网方案如图1所示,该方案与模拟直放站基本一致,在隧道口设置基站,在隧道内每站点设置单套数字直放站远端机(RU)。以RU3与RU4中间为切换区,将不同BTS设置为主/从信源,主/从信源信号电平差距6~8 dB。正常情况下,BTS1和BTS2共同承载业务。

相较于模拟直放站,数字直放站可以调节时延,RU站间距可以增加至1.5 km,而且具备噪声抑制

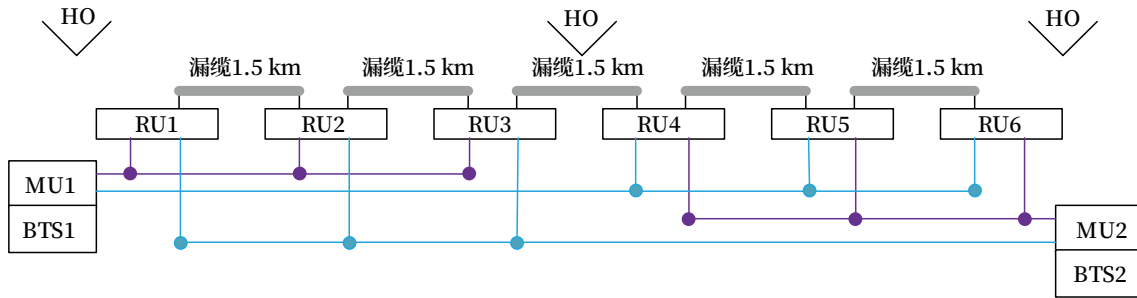


图1 数字直放站交织主从冗余覆盖方案 (1.5 km站间距)
Fig.1 Interleaved master-slave redundancy coverage scheme of digital repeater (1.5 km station spacing)

能力，通信质量得到提升。但由于数字直放站系统时延问题，组网上相对于模拟直放站有两个不同之处：一是基站处也需要设置远端机，BTS 射频无法直接使用；二是近端机连接远端机的最远限制距离减少，在交织主从冗余方案下，仅支持 16.5 km 左右的隧道冗余覆盖。在更长隧道进行冗余覆盖时，一般采用同站址主从冗余（方案 2）或同站址主备冗余方案（方案 3）。

方案 2：数字直放站同站址主从冗余覆盖 (2 km 站间距)

方案 2 组网方案如图 2 所示。该方案在隧道口设置基站，隧道内每个站点设置 2 套远端机 RU 分别接入不同 BTS 信源，以中间切换区将不同 BTS 设置为主 / 从信源。在主远端机 RU 故障情况下，由备 RU 提供覆盖，主 / 从信源信号电平差距 6 ~ 8 dB。

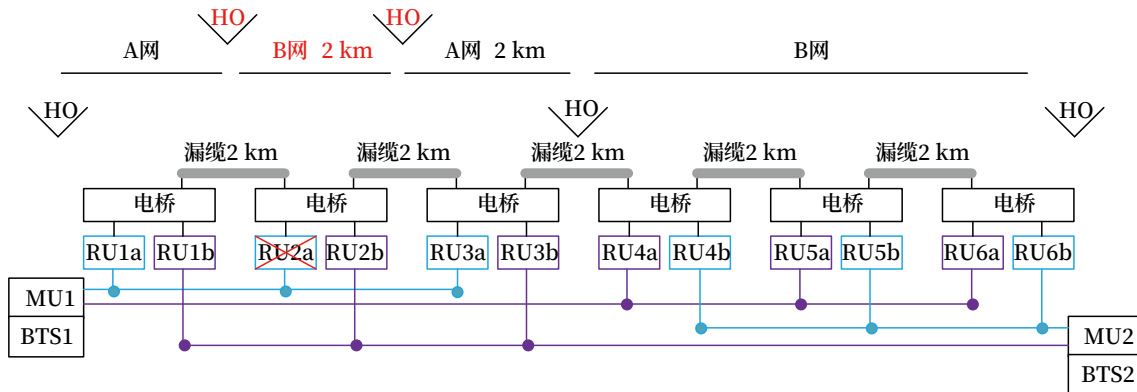


图2 数字直放站同站址主从冗余覆盖方案 (2 km站间距)
Fig.2 Master-slave redundancy coverage scheme at the same site of digital repeater (2 km station spacing)

数字直放站组网时，小区切换主要靠信号电平强弱来进行，单个 RU 设备故障时，会发生 2 次小区切换，如图 2 所示。为保证单设备故障后小区重叠覆盖距离满足 2 次切换需求（按 10 s 考虑，长度约为 1 km），最长站间距建议控制在 2 km 左右。当隧道长度小于 16.5 km 时，该方案相对于方案 1 站间距即无法有效增加，反而会增设更多的远端机，不具备优势；当隧道长度大于 16.5 km 时，该方案才具备应用价值。

方案 3 组网方案如图 3 所示。该方案与方案 2 的组网基本一致，主要区别在于 BTS1 为主基站信源，BTS2 为备用基站信源，中间不发生切换，正常工作时网络业务均由 BTS1 承载，故障时才由 BTS2 承载业务。同时，由于该方案在单个 RU 故障时会发生切换，站间距也无法进一步增加。同方案 2 一样，只有当隧道长度大于 16.5 km 时，该方案才具备应用价值。

3.3 分布式基站

由于凯普施的分布式基站与数字直放站组网方式基本相同，可参考方案 1 ~ 3，不再赘述。下面

方案 3：数字直放站同站址主备冗余覆盖 (2 km 站间距)

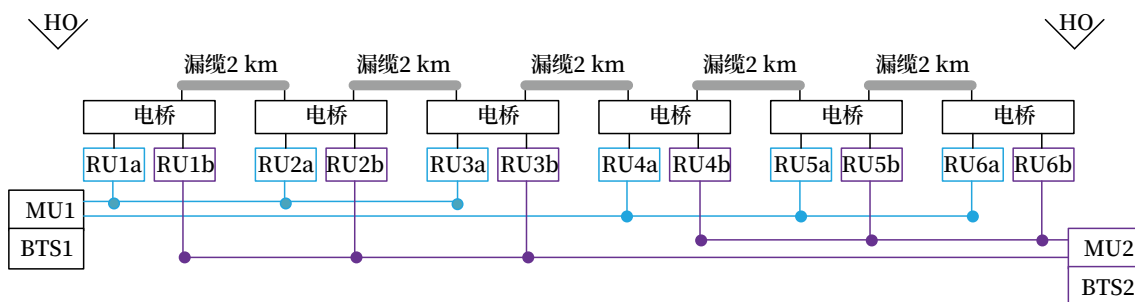


图3 数字直放站同站址主备冗余覆盖方案 (2 km站间距)

Fig.3 Main and standby redundancy coverage scheme at the same site of digital repeater (2 km station spacing)

针对中兴、华为、诺基亚的分布式基站分析长大隧道的冗余覆盖方案。

方案4：分布式基站交织主从冗余覆盖 (1.5 km 站间距)

方案4组网方案如图4所示。在隧道口设置基

站 BBU，在隧道内每站点均需设置两套 RRU 分别接入不同 BBU，以中间切换区将不同 BBU 设置为主/从信源，正常情况下 BBU1 和 BBU2 均需承载业务。与数字直放站不同的是，分布式基站方案每个站点都需要设置两套 RRU。

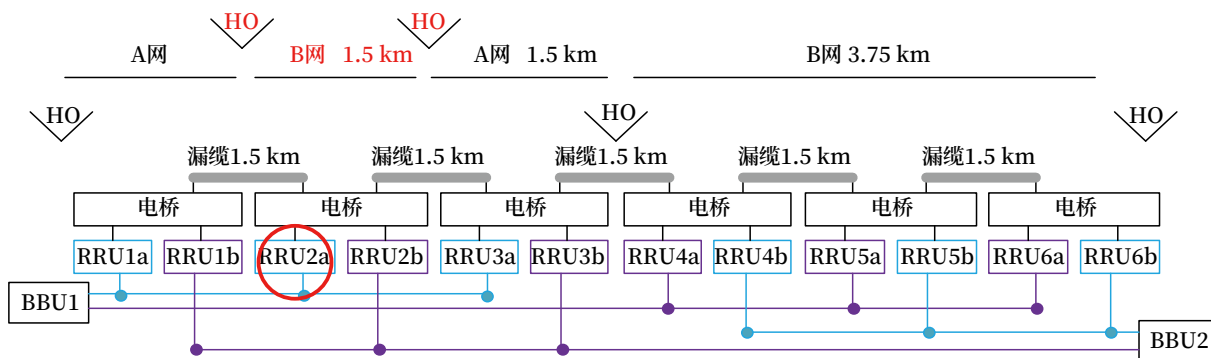


图4 分布式基站交织主从冗余覆盖方案 (1.5 km站间距)

Fig.4 Interleaved master-slave redundancy coverage scheme of distributed base station (1.5 km station spacing)

图4中红圈RRU2a故障时，该站点会由RRU2b发出BBU2的基站信号，在该站点附近区域的漏缆中BBU2的信号明显强于BBU1信号，将导致发生小区切换。同时，为避免连续发生2次小区切换导致传输无差错时间小于20 s，需分布式基站具备小区切换的优化能力（当切换到备用网络后驻留时间大于20 s，期间不进行切换）。

方案5：分布式基站同站址主从冗余覆盖 (2 km 站间距)

方案5组网方案如图5所示。该方案组网与方案4一致，只是将站间距增加为2 km（建议最长站间距控制在2 km左右，原因同方案2）。这样当某站点单个RRU故障时发生2次小区切换后，传输无差错时间也不会小于20 s，但由于站间距为

2 km，相邻站点无法做到覆盖到根部的交织覆盖，当同站址的两套RRU同时故障时，该站点区域存在弱场。

方案6：分布式基站同站址主备冗余覆盖 (2 km 站间距)

方案6组网方案如图6所示。该方案与方案5的组网基本一致，主要区别在于BBU1为主基站信源，BBU2为备用基站信源，中间不发生切换，正常工作时网络业务均由BBU1承载，故障时才由BBU2承载业务。同时，由于该方案在单个RRU故障时会发生切换，同小区站间距无法进一步增加。

4 方案对比分析

以上方案简要对比如表2所示。

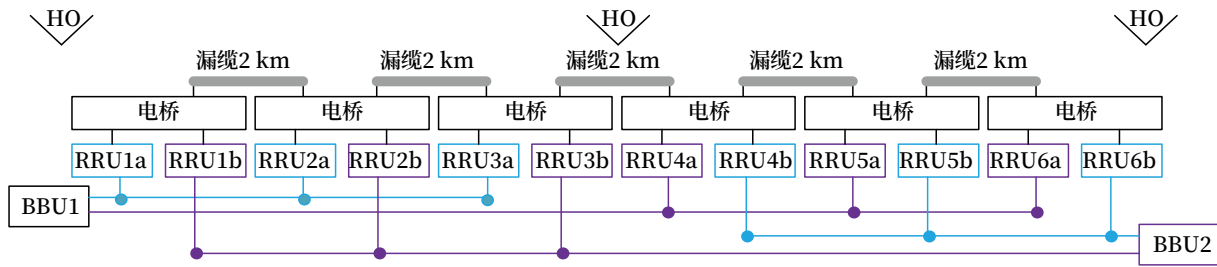


图5 分布式基站同站址主从冗余覆盖方案 (2 km站间距)
Fig.5 Master-slave redundancy coverage scheme at the same site of distributed base station (2 km station spacing)

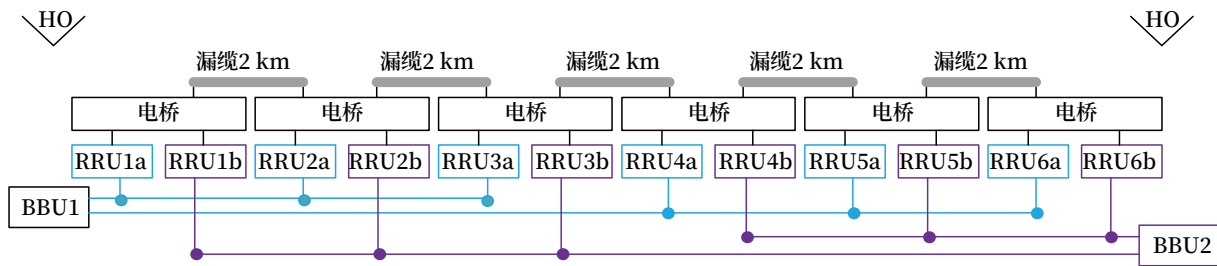


图6 分布式基站同站址主备冗余覆盖方案 (2 km站间距)
Fig.6 Main and standby redundancy coverage scheme at the same site of distributed base station (2 km station spacing)

通过以上分析，在长大隧道进行冗余组网覆盖时，分布式基站和数字直放站适合采用的冗余方案不同。考虑只在隧道口设置基站的情况下，数字直放站在隧道长度小于 16.5 km 时，适合采用 1.5 km 站间距的交织主从冗余方案（方案 1）；当隧道长度大于 16.5 km 时，可采用 2 km 站间距的同站址主从冗余（方案 2）或主备冗余方案（方案 3）。分布式基站交织主从冗余（方案 4）存在所需设备数量过多、厂家支持程度不同等问题；更适合采用 2 km 站间距的同站址主从冗余（方案 5）或主备冗余方案

（方案 6），主从冗余的载频利用率较高。

5 结束语

本文针对 GSM-R 网络在长大隧道内的冗余覆盖情况，结合各厂家设备支持情况与传输无差错时间要求，对比分析了数字直放站与分布式基站的多种组网方案，给出了各种方案的适用范围建议。

分布式基站与数字直放站都可以满足高速铁路无线网络冗余覆盖需求，但实现方式差异较大。两种方案各有优劣：数字直放站建设成本低，但对组

表 2 长大隧道冗余覆盖组网方案对比

Tab.2 Comparison of redundant coverage networking schemes for long tunnels

方案	站间距/ km	设备 数量	单设备 故障	单站点所有 设备故障	正常工作时 载频利用率	支持最大隧道长度（只在隧道口 设置基站时）/km			建设成本	C3 线路 开通案例
1) 数字直放站 交织主从	1.5	少	正常	正常	1	16.5			低	有
2) 数字直放站 同站址主从	2	多	正常	弱区	1	19.5			低	无
3) 数字直放站 同站址主备	2	多	正常	弱区	0.5	19.5			低	无
4) 分布式基站 交织主从	1.5	多	故障	正常	1	中兴 7.5	华为 16.5	诺基亚 18	高	无
5) 分布式基站 同站址主从	2	多	正常	弱区	1	中兴 10	华为 22	诺基亚 18	中	无
6) 分布式基站 同站址主备	2	多	正常	弱区	0.5	中兴 10	华为 22	诺基亚 18	中	无

网时延要求更高,同时增加了运维工作量和网络故障环节;分布式基站方案更易维护,且对时延约束不敏感,但成本较高。关于各方案支持的最大隧道长度,数字直放站主要受限于时延约束;分布式基站主要受限于BBU光口数量或光缆距离,如果能进一步优化相关性能,将会有更多运用场景。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路数字移动通信系统(GSM-R)设计规范:TB 10088-2015[S]. 北京:中国铁道出版社,2016.
- [2] 中华人民共和国铁道部. 铁路数字移动通信系统:TB/T 3324-2013[S]. 北京:中国铁道出版社,2013.
- [3] 中华人民共和国铁道部. 铁路数字移动通信系统(GSM-R)总体技术要求:TB/T 3324-2013[S]. 北京:中国铁道出版社,2013.
- [4] 刘宁,赵留俊,葛伟涛. 铁路长大隧道数字直放站拉远距离及切换区间距分析[J]. 铁路通信信号工程技术,2022,19(5):38-43.
Liu Ning, Zhao Liujun, Ge Weitao. Analysis of Long-Distance Extension of Digital Repeater and Spacing between Devices in Switching Zone of Long Railway Tunnel[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(5): 38-43.
- [5] 赵寅龙. GSM-R线路交叉区域异常占用引起CTCS-3降级分析与优化[J]. 铁路通信信号工程技术,2023,20(1):40-45.
Zhao Yinlong. Analysis and Optimization of CTCS-3 Degradation Faults Caused by Abnormal Occupancy in GSM-R Line Crossing Area[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(1): 40-45.
- [6] 张健,朱啸豪,王伟力. 高速铁路复杂线路区段GSM-R系统方案设计与网络优化[J]. 铁路通信信号工程技术,2023,20(2):42-48.
Zhang Jian, Zhu Xiaohao, Wang Weili. Scheme Design and Network Optimization of GSM-R System in Complex Line Section of High Speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(2): 42-48.
- [7] 梅靖. 镇江枢纽地区GSM-R网络优化案例[J]. 铁路通信信号工程技术,2023,20(4):46-51,72.
Mei Jing. Case Study on GSM-R Network Optimization in Zhenjiang Hub Area[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(4): 46-51, 72.
- [8] 刘宁. 高速铁路超长跨海大桥无线方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术,2022,19(2):24-29.
Liu Ning. Research on Wireless Schemes for Ultra-Long Sea-Crossing Bridge of High-Speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(2): 24-29.
- [9] 高建平. 数字光纤直放站在铁路通信中的应用[J]. 铁路通信信号工程技术,2022,19(7):54-57.
Gao Jianping. Application of Digital Optical Fiber Repeaters in Railway Communication[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(7): 54-57.
- [10] 魏旻,胡雪阳,葛伟涛. 南沿江城际铁路漏湖大桥GSM-R覆盖方案[J]. 铁路通信信号工程技术,2022,19(11):37-41.
Wei Min, Hu Xueyang, Ge Weitao. Study on GSM-R Coverage Scheme for Gehu Bridge of Nanyanjiang Intercity Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(11): 37-41.

移动性增强技术在铁路5G专网中 应用场景研究

陈庭德, 王海龙, 陈 煜

(南京泰通科技股份有限公司, 南京 210039)

摘要: 超高可靠低时延通信是5G移动通信系统的三大特性之一, 移动性增强是实现超高可靠低时延特性的一个关键技术。铁路5G专网同样也有高可靠性低时延的要求, 列车在高速运行过程中, 用户设备需要不断在相邻小区间进行业务切换, 主要探讨移动性增强技术中的条件切换、双激活协议栈和快速切换失败恢复等3项功能在铁路5G专网中的应用场景。根据这3项功能的工作机制和铁路5G专网覆盖模型的特点, 认为双激活协议栈和快速切换失败恢复对减少业务中断时延, 保障列车运行安全具有很好的应用价值。

关键词: 移动性增强; 铁路5G专网; 条件切换; 双激活协议栈; 快速切换失败恢复

中图分类号: U285.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0042-05

Research on Application Scenarios of Mobility Enhancement Technology in 5G-R Network

Chen Tingde, Wang Hailong, Chen Yu

(Nanjing Ticom Technology Co., Ltd., Nanjing 210039, China)

Abstract: Ultra-Reliable and Low-latency Communication (URLLC) is one of the three major characteristics of 5G mobile communication systems, and mobility enhancement is a key technology to achieve ultra-high reliability and low-latency characteristics. The 5G for Railways (5G-R) network also has those requirements, to provide reliable connectivity and enhanced performance for safe and efficient railways. During the high-speed operation of trains, the user equipment (UE) needs to continuously handover between adjacent cells. This paper mainly discusses the application scenarios of three functions of the mobility enhancement technology, conditional handover, dual active protocol stack and fast handover failure recovery, in the 5G-R network. According to the working mechanism of these three functions and the characteristics of the 5G-R network coverage model, this paper believes that the dual active protocol stack and fast handover failure recovery have good application value in reducing service interruption delay and ensuring train operation safety.

收稿日期: 2023-01-10; 修回日期: 2023-12-05

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(P2020G004)

第一作者: 陈庭德(1981—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 5G无线接入网, 邮箱: wellade@163.com。

Keywords: mobility enhancement; 5G-R network; conditional handover; dual active protocol stack; fast handover failure recovery

1 概述

高铁为人们的出行带来了便捷。目前,国内高速铁路专网移动通信系统更新换代势在必行,5G专网在铁路领域的应用已得到学术界和行业专家的极大关注。GSM-R已经无法满足高铁通信技术发展的需求,5G-R更有可能成为铁路通信系统的新标准。中国国家铁路集团有限公司(简称国铁集团)发布了《国铁集团关于加快推进5G技术铁路应用发展的实施意见》和《铁路5G技术应用科技攻关三年行动计划》,提出了铁路5G专用移动通信(5G-R)系统的发展规划和行动部署,开展了5G-R关键技术、技术装备和标准体系等相关研究,从而推进5G-R系统的标准化工作。加快推进5G技术应用,是推动新时代铁路高质量发展、实现交通强国铁路先行的重要步骤。移动性增强作为超高可靠低时延特性的关键技术之一,在铁路5G专网中有着广泛的应用场景和较高的研究价值。

2 移动性增强在3GPP 5G技术标准中的演进

国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)定义了5G的3大特性,即增强型移动宽带(Enhanced Mobile Broadband, eMBB)、超高可靠低时延通信(Ultra-Reliable and Low Latency Communications, URLLC)和大规模机器类型通信(Massive Machine Type Communication, mMTC)。第三代合作伙伴项目(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)是国际5G标准化组织之一。R15版本是3GPP发布的第一个5G标准,该版本冻结于2018年9月。R15版本实现了对组网模式、信道编码和增强型移动宽带等功能的支持。2020年7月冻结的R16版本对R15版本进行了扩展,并对R15版本部分特性进行了增强,主要表现在自组织网络、大规模机器类型通信、超高可靠低时延通信和移动性增强等

方面。R17版本于2022年6月冻结,该标准进一步拓展了5G的应用场景,主要表现在覆盖增强、进一步增强的超高可靠低时延通信、轻量级5G和非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)等方面。移动性增强技术在R16版本中第一次被提出,在后续版本中进行了进一步迭代和优化。

3 铁路5G专网基站覆盖模型

5G公网一般采用蜂窝网格覆盖模型,一个基站为了覆盖一个网格,需将辐射角配置为 120° 。铁路5G专网部署在铁路沿线,一般采用线性覆盖模型,如图1所示。基站天线架设方式有:单天线覆盖、双信源双天线覆盖和单信源双天线覆盖。为了保障小区信号质量,提升覆盖距离,降低能耗,铁路5G专网的基站天线辐射角一般配置为 90° 。铁路5G专网基站天线一般采用双信源双天线覆盖方式,如图1所示,基站1会形成两个覆盖区域:覆盖区域1-L和覆盖区域1-R。为了减少列车在行驶过程中的切换次数,铁路5G专网使用小区合并技术,将覆盖区域1-L和覆盖区域1-R合并成一个小小区。两个相邻基站的覆盖区域会有重叠区域,同时将两个相邻基站的小区配置成Xn邻区关系,这样,在列车行驶在该区域时,可以进行Xn邻区切换。

4 移动性增强技术

为提升时延敏感类业务的用户体验,减少切换的中断时延,提高切换流程的可靠性与鲁棒性,3GPP在R16版本中引入了多个移动性增强技术,包括条件切换(Conditional Handover, CHO)、双激活协议栈(Dual Active Protocol Stack, DAPS)和快速切换失败恢复(Fast Handover Failure Recovery, FHFR)等。

4.1 条件切换

条件切换是指用户设备(User Equipment,

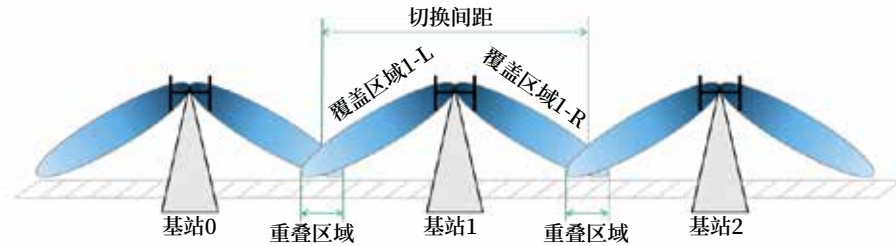


图1 铁路5G专网基站覆盖模型
Fig.1 Base station coverage model of 5G-R network

UE) 在切换时同时满足一个或多个切换执行条件。用户设备根据条件切换配置开始评估这些执行条件，一旦用户设备选定一个条件开始执行切换，则结束执行条件的评估。条件切换配置包括候选目标基站的候选小区的条件切换配置和源基站的执行条件。一个执行条件可以由一个或两个触发条件组成，触发条件包括 A3 事件、A5 事件、参考信号类型和信号质量等。如果一个候选目标基站满足切换执行条件时，用户设备直接决定切换，而无需等待源基站下发切换命令。当条件切换执行时，用户设备开始在目标基站小区进行同步，建立无线资源控制 (Radio Resource Control, RRC) 连接。同时用户设备从源基站小区分离，不再监控源基站小区。在与目标基站小区 RRC 连接建立完成后，用户设备释放条件切换配置。

4.2 双激活协议栈

双激活协议栈功能是指在切换过程中，用户设备在收到切换的 RRC 消息之后，会继续保持与源基站小区连接，直到在目标基站小区完成随机接入才会释放与源基站小区连接。在双激活协议栈切换过程中，用户设备在释放与源基站小区连接之前，一直从源基站小区接收下行用户数据。同样的，在完成与目标基站小区随机接入过程之前，一直向源基站小区发送上行用户数据。

双激活协议栈功能需要用户设备侧协议栈支持。在收到切换命令之后，用户设备侧协议栈为目标基站小区创建一个媒介接入控制 (Medium Access Control, MAC) 实体。对于配置了双激活协议栈功能的每一个数据无线承载 (Data Radio Bearer,

DRB)，为目标基站小区创建一个无线链路控制 (Radio Link Control, RLC) 实体，并且与专业业务信道 (Dedicated Traffic Channel, DTCH) 逻辑信道进行绑定。对于配置了双激活协议栈功能的每一个 DRB，重配分组数据汇聚协议 (Packet Data Convergence Protocol, PDCP) 实体，包括源基站小区和目标基站小区各自的安全配置和鲁棒性头部压缩 (Robust Header Compression, ROHC) 功能，并且分别与配置的源基站小区和目标基站小区的 RLC 实体进行绑定。

4.3 快速切换失败恢复

不支持快速切换失败恢复功能的无线链路失败重建过程如下：

- 1) 用户设备检测到与源基站服务小区的物理层失去同步，启动 T310 定时器；
- 2) 当 T310 定时器超时，即认为无线链路失败，此时用户设备发起 RRC 重建过程。

支持快速切换失败恢复功能的无线链路失败重建过程如下。

- 1) 用户设备检测到与源基站服务小区的物理层失去同步，启动 T310 定时器；
- 2) 在 T310 定时器运行期间，用户设备检测到切换事件的触发时间 (Time To Trigger, TTT) 满足时长，则启动 T312 定时器；
- 3) 用户设备开始上报测量报告，准备发起切换流程；
- 4) 但直到 T312 定时器超时，因为某些原因，用户设备未收到源基站下发的切换命令，此时，T310 定时器还未超时，为了尽快恢复业务，用户设

备即可以认为无线链路失败，从而发起 RRC 重建过程。

为了减少业务的中断时间，T312 定时器的配置时长要比 T310 定时器的配置时长小得多。

5 移动性增强技术在铁路5G专网中的应用

执行条件切换时，为提高切换成功率，需要有多个拥有邻区关系的候选目标基站小区。因此，条件切换适用于 5G 公网中蜂窝网格覆盖模型的切换场景。而铁路 5G 专网采用的是线性覆盖模型，在重叠区域，一个小区一般只有一个邻区，故不推荐在铁路 5G 专网切换场景中使用条件切换。

双激活协议栈功能主要是要在用户设备执行切换时，为源基站小区和目标基站小区分别创建各自的协议栈实体，这样可以让用户设备同时保持与源基站小区和目标基站小区的连接，从而将业务中断时延降低到 0 ms。该功能同时适用于 5G 公网中蜂窝网格覆盖模型和铁路 5G 专网中线性覆盖模型。当列车行驶在重叠区域进行切换时，业务不需要中断，从而有效保障了列车的运行安全。

快速切换失败恢复功能是在用户设备与源基站小区物理层失去同步，启动时长较长的 T310 定时器，在该定时器还未超时，满足切换条件，用户设备同时开启时长较短的 T312 定时器。一旦 T312 定时器超时，用户设备随即在源基站小区进行 RRC 连接重建，减少业务中断时延。T310 定时器时长一般配置为 1 000 ms，TTT 一般配置为 40 ms，T312 定时器时长一般配置为 200 ms，重新接入时长大约为 60 ms。为保障切换成功率，列车在重叠区域以最高速行驶时需有 3 次切换机会。国内高铁的运行速度最快可以达到 350 km/h，铁路 5G 专网的基站覆盖半径大约是 2 ~ 3 km。以高铁时速 350 km、基站覆盖半径 3 km 为例，重叠区域长度如公式 (1) 所示。

重叠区域长度 = (TTT 时长 + T312 时长 + 重新接入时长) × 3 × 列车速度 (1)

由公式 (1) 可知，重叠区域长度约为 90 m，

推荐配置为 150 m。切换间距、重叠区域行驶时长、高铁切换时间间隔如公式 (2) ~ (4) 所示。

切换间距 = 基站覆盖半径 × 2 - 重叠区域长度 (2)

重叠区域行驶时长 = 重叠区域长度 / 列车速度 (3)

高铁切换时间间隔 = 切换间距 / 列车速度 (4)

由以上可知，切换间距约为 5 850 m，高铁大约每分钟需要进行一次 Xn 邻区切换，并且需要在 1.5 s 之内完成切换。

在铁路 5G 专网的组网模型中，由公式 (3) 可知，高速列车在重叠区域的行驶时间大约为 1.5 s，列车上的用户设备在 T312 定时器超时后，有足够的时间在源基站小区进行重新接入。在 5G 公网中，用户设备大多都是中低速移动，用户设备在源基站小区重建 RRC 连接的时间将会更充裕。所以，该功能同时适用于 5G 公网覆盖模型和铁路 5G 专网覆盖模型，从而减少业务中断时间，提升系统可靠性。

6 结束语

本文对移动性增强技术中条件切换、双激活协议栈和快速切换失败恢复等 3 种功能的工作原理进行了介绍，分析了这 3 种功能的应用场景。结合铁路 5G 专网的组网模型特点，给出了这 3 种移动性增强技术在铁路 5G 专网中的应用建议。双激活协议栈功能和快速切换失败恢复功能可明显减少用户设备在切换过程中业务中断时延，例如列控信息端到端传输时延，大大提升业务体验，有效保障列车的运行安全。铁路 5G 通信系统标准正在制定当中，希望本文的建议能为铁路 5G 专网的发展带来一些有益的思考。

参考文献

- [1] 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.
Chen Su, Zhao Sheng. Application of 5G in Intelligent High-speed Railways [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 46-50.

- [2] 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.
- [3] 姜永富. 铁路 5G-R 研发关键问题探讨 [J]. 中国铁路, 2022 (9): 8-11.
Jiang Yongfu. Discussion on Priorities of Railway 5G-R Research and Development[J]. China Railway, 2022(9): 8-11.
- [4] 王芳, 石波, 蔺伟. 铁路 5G-R 技术标准体系研究 [J]. 中国铁路, 2022 (9): 31-37.
Wang Fang, Shi Bo, Lin Wei. Railway 5G-R Technical Standard System[J]. China Railway, 2022(9): 31-37.
- [5] 李春铎, 郭强亮, 闫晓宇, 等. 基于 5G-R 的智能调度通信业务服务质量保障研究 [J]. 铁道通信信号, 2022, 58 (8): 17-21, 36.
Li Chunduo, Guo Qiangliang, Yan Xiaoyu, et al. Research on Service Quality Assurance of Intelligent Dispatching Communication Service Based on 5G-R[J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(8): 17-21, 36.
- [6] 李路鹏. 5G 移动性增强技术分析 [J]. 移动通信, 2020, 44 (7): 55-59.
Li Lupeng. Analysis on 5G Mobility Enhancement Technology[J]. Mobile Communications, 2020, 44(7): 55-59.
- [7] 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.
- [8] 杨琪, 冯敬然, 周敏, 等. 城市轨道交通 5G 公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.

(上接 29 页)

- Yang Yatao, Zhang Songtao, Li Zichen, et al. Design and Implementation for High Speed Data Transfer Interface of PCI Express Based on Zynq Platform[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(3): 522-528.
- [8] 刘光宇, 马盼, 刘肖婷, 等. 基于 UVM 的应答器传输模块验证方法研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20 (9): 7-10.
Liu Guangyu, Ma Pan, Liu Xiaoting, et al. Research on Verification Method of Balise Transmission Module Based on UVM[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(9): 7-10.
- [9] 宋仕坤. 基于以太网 MAC IP 核的 IEEE1588 协议的设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [10] 刘浩, 田泽, 刘承禹, 等. 基于 DMA 的双通道千兆以太网 MAC 设计与验证 [J]. 计算机技术与发展, 2016, 26 (5): 132-134.
Liu Hao, Tian Ze, Liu Chengyu, et al. Design and Verification of Dual-Channel Gigabit Ethernet MAC Based on DMA[J]. Computer Technology and Development, 2016, 26(5): 132-134.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.01.009

C3接口监测系统在高速铁路维护中的运用

陆守东

(中国铁路上海局集团有限公司上海通信段, 上海 200434)

摘要: 无线连接超时是影响 CTCS-3 列控系统安全平稳工作的重要问题, CTCS-3 通信接口监测系统是维护铁路移动通信系统 GSM-R 网络安全工作与稳定性的最主要措施。简要研究 CTCS-3 无线通信超时的原因过程, 根据日常接口监测系统对无线通信超时问题进行数据分析, 总结无线网络超时的原因过程。

关键词: 无线连接超时; GSM-R 网络; 分析

中图分类号: U285.21

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0047-05

Application of CTCS-3 Interface Monitoring System in High-speed Railway Maintenance

Lu Shoudong

(Shanghai Communication Depot, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: The wireless connection timeout is an important problem that interferes with the safe and stable operation of the CTCS-3 train control system. The CTCS-3 communication interface monitoring system is the main measure to maintain the security and stability of the GSM-R network. This paper briefly studies the problem of CTCS-3 wireless communication timeout, analyzes the data of wireless communication timeout based on the daily interface monitoring system, and summarizes the cause and process of wireless network timeout.

Keywords: wireless connection timeout; GSM-R network; analysis

1 概况

近十年来,中国高铁的发展势头很快,截止2023年11月底,我国高速铁路总营业里程已超过4.3万公里,稳居全球首位。按照我国的《中长期铁路网规划》(2016-2030年),国内将建设成“八纵八横”高铁骨干网。近年来相继开通的

武广高铁、沪昆高铁、合福高铁等,最高建设速度在300 km/h以上,这些高速铁路控制系统均采用中国列车运行控制系统第3级(Chinese Train Control System, CTCS-3),简称C3系统。C3系统是利用铁路数字移动通信系统(GSM-Railway, GSM-R)无线网络实现列车-地面信号双向传送,该控制系统包括车载设备和地面设施。车载装置主要负责接收地面指令,形成速度模式曲线,为维持列车运行安全而对列车进行监控等工作。地面装置主要根据联锁办理的进路,将行车许可等指令发送

收稿日期: 2023-07-04; 修回日期: 2023-12-10

作者简介: 陆守东(1982—),男,工程师,本科,主要研究方向: 铁路通信, 邮箱: 18055151199@163.com。

至车载设备,其中,列车车载装置列车自动防护(Automatic Train Protection, ATP)和无线闭塞中心(Radio Block Center, RBC)均为C3系统中的重要设备。RBC根据轨道电路、联锁进路等数据生成行车许可,并将行车许可、线路参数、临时限速等通过GSM-R无线通讯系统传输到车载设备上;同时,利用GSM-R无线通讯系统接收位置、列车数据等车载设备发送的信息。ATP根据行车许可、线路参数、临时限速等数据以及地面设备传送的动车组参数,并根据目标速度和连续车速的变化模式形成动态速度曲线,以跟踪车辆的安全行驶,实现超速防护。GSM-R网核心通常包含移动交换子系统、无线分组交换子系统(General Packet Radio Service, GPRS)、智能网接口等,一般采用冗余交叉覆盖的方式进行组网,提高无线运行网络的可靠性。

C3系统遵循统一接口标准和标准的安全通信协议,涉及核心的关键设备,需要冗余设置。C3级列车运行控制系统是实时控制列车安全运行间隔、避免列车超速运行的高速铁路核心技术装备和安全保障系统,但在实际运用中,常由于各类因素造成降级。本文主要阐述C3系统组成、无线超时原因,并通过日常C3系统通信超时的障碍事例处置,总结无线超时的分析流程。CTCS系统结构示意图如图1所示。

2 接口监测系统结构

C3接口监测系统是集信令采集管理、信息收集分析、在线用户监视、网络状况监测、查询数据分析、中断统计分析和日志图表等多项模块功能于一体的复合型无线网络监测的综合管理系统。一般由信息采集部分、信令数据处理系统部分、信息存储部分、综合分析处理部分等组成,其中信息存储部分和信息综合分析处理部分具有较强的互动性。结构方面主要有采集层、处理层、分析层3部分。其中,采集层由Abis接口、A接口、PRI接口信令及数据采集主机等构成;处理层则由接口处理服务

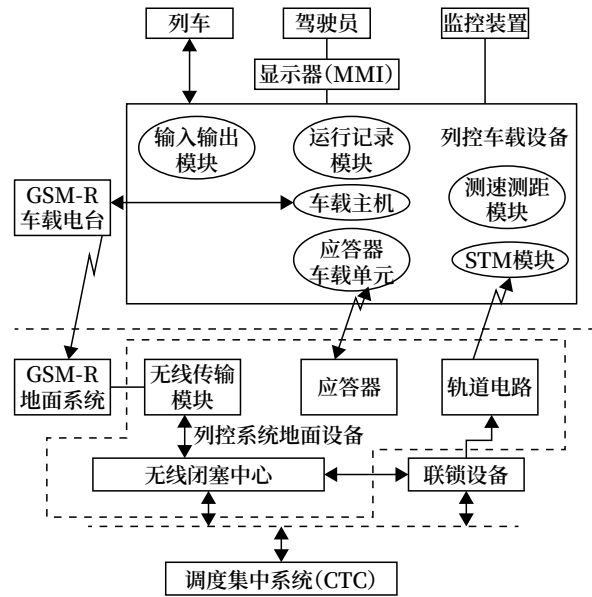


图1 CTCS系统结构示意图
Fig.1 CTCS system structure diagram

器/数据库系统,网关等构成;分析层则由综合数据分析服务器和网管等构成。GSM-R网络接口监测系统在现网中的位置如图2所示。监测接口的定义及与监测系统的互联方式如下。

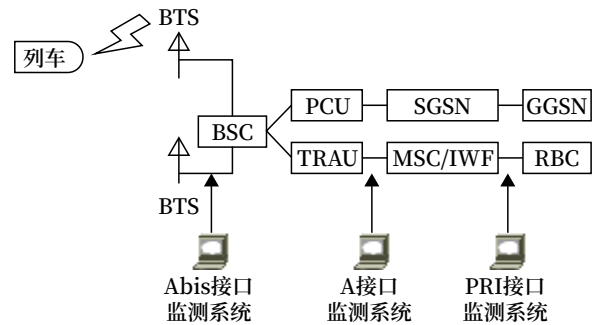


图2 GSM-R网络接口监测系统在现网中的位置
Fig.2 Position of GSM-R network interface monitoring system in the existing network

Abis接口:基站控制器(BSC)和基站收发信机(BTS)的通信接口。

A接口:网络交换子系统(NSS)与基站子系统(BSS)的通信接口(MSC至BSC之间)。

PRI接口:网络交换子系统NSS与无线闭塞中心RBC的通信接口。

C3接口监测系统是根据被监测用户的网络信令,对A接口、Abis接口及PRI接口进行实时监

测的关键设备，对网络进行全程实时监控，并关联显示 A 接口、Abis 接口和 PRI 接口上的相关用户信令消息。并且基于 C3 接口监测自身的结构特点，不但可以即时监听最基本的信令消息，还具有其他功能。

1) 实时监测机车车辆，及其运行过程中的相关信息，按车次监测，包括当日已经运行和正在运行的列车。对机车的运行信息进行实时监控，包括机车运行的位置，所处小区的电平状态，实时的状态信息以及机车的全部接口。

2) 监测网络信令链路的情况，对话务负荷的统计分析。

3 无线超时的原因

无线超时是基于 GSM-R 的 C3 级列控系统经常出现的问题，信号弱、设备故障、干扰等情况都有可能引发无线闭塞中心 RBC 与列车之间单向或者双向的通信异常，导致列车控制在发生无线超时时，会从 C3 降到 CTCS-2（简称 C2）。在 C3 系统实际运用中，C3 故障主要表现为降级。引起 C3 降级的原因主要有两种可能：一是信号原因，表现为车载设备不良、RBC 设备不正常等；二是通信原因，表现为外部无线电磁环境干扰、小区或 BSC 切换异常、通信设备故障等。由于 C3 级系统实现列车控制方式相对较为复杂，因此导致通信超时原因很多，这其中原因不明的事件又占据了相当的比例。原因不明类问题是指虽然可以初步确认为下行质量突降、上行质量突降、乒乓切换、越区切换和回切等，但是还不能确定造成问题的根本原因。而导致这一情况的主要根源就是系统设备出自不同厂家，尽管在技术条件、接口等有统一的标准，但在不同厂家设备的结合部，依然存在一定的通用问题。

4 接口监测系统的应用

对于无线连接超时分析，一般从车载设备和 GSM-R 网络两方面进行。

车载设备分析的内容主要包括，是否出现单

MT 工作，天馈线及其他连接处有无异常，以及发生超时后，在后续交权区运行的状态情况。车载司法记录单元（JRU）用来记录列车运行中通过车载设备采集的原始数据以及通过车载设备所输出的控制数据，下载相关数据进行分析。根据故障特点分析是否多次、重复发生，发生位置是否固定等情况进行综合性的判断分析。

GSM-R 网络数据分析主要包括：对接口监测数据进行分析，对 PRI 接口、Abis 接口、A 接口数据信息进行查询分析。对通信设备工作状态分析，重点是对 MSC、BSC、BTS 及直放站等网管，伴随发生的告警信息进行分析，以及传输设备运行工作状态。对比分析故障地点附近的无线超时故障发生时段，前后列车的工作状态。现场测试排查分析，对干扰源的定位、场强覆盖情况测试检查、通信质量及 TA 测试情况等，并根据 GSM-R 系统图、RBC 管辖区等基础技术资料，对整个网络组网的分析。

通信维护部门日常 C3 接口监测系统网管是重点对列车运行过程中的接口监控数据进行分析，对 PRI 接口信令交互信息、电台呼叫记录等进行数据分析；Abis 接口通信测量报告、切换历史记录，查询是否存在中断前切换失败的情况；A 接口呼叫记录及信令流程。通过查询分析各接口数据，初步确定在故障地点附近的列车运行状况，初步定位障碍原因。

案例（无线信号干扰）：正常列车在行进过程中，需要在 GSM-R 网络的各基站间进行不断切换，且通话质量不低于 5 级，以便和地面列控中心一直取得联系。但如果行进过程中受到无线信号干扰，造成通信质量下降至 6~7 级，会引起 C3 降级。例如 2022 年 1 月 12 日网管通过 C3 接口监测系统查询：13:19，列车 G1978 运行至 K989+040 处，通信质量劣化。查询信令流程正常，查询 Abis 接口信令详情，发现在该区段下行通信质量从之前的 4 级以上已经劣化至 6~7 级。说明列车经过此处时，通过质量呈现劣化趋势。现场排查由于运营商无线设备信号干扰造成通话质量下降，如图 3 所示。

序号	时间	位置	上行电平	下行电平	上行质量	下行质量	其他
1	2022-01-22 13:14:05.4000	14807173006 007343	1478	1478	0	0	
2	2022-01-22 13:14:06.2000	14807173006 007343	1478	1478	0	0	
3	2022-01-22 13:14:06.6210	14807173006 007343	1478	1478	0	0	
4	2022-01-22 13:14:07.0420	14807173006 007343	1478	1478	0	0	
5	2022-01-22 13:14:07.4630	14807173006 007343	1478	1478	0	0	
6	2022-01-22 13:14:07.8840	14807173006 007343	1478	1478	0	0	
7	2022-01-22 13:14:08.3050	14807173006 007343	1478	1478	0	0	
8	2022-01-22 13:14:08.7260	14807173006 007343	1478	1478	0	0	
9	2022-01-22 13:14:09.1470	14807173006 007343	1478	1478	0	0	
10	2022-01-22 13:14:09.5680	14807173006 007343	1478	1478	0	0	

图3 G1978接口监测查询数据
Fig.3 G1978 interface monitoring and query data

案例（车载设备故障）：列车在运行时，需要经过不同的列控中心，为了更好地做到列控数据无缝交接，在高铁上全部是双套电台交替工作，称为交权。但是由于车载设备原因，某种情况下一个电台工作异常，在该交权时没有发挥作用，无法实现无缝交接，而是由同一个电台在2个列控中心先中断连接再重新发起呼叫，从而造成C3无线超时，这种现象为单电台故障。在检测系统中表象为Abis接口数据的上、下行电平值会发生突降，通话质量劣化至6~7级。例如2022年3月1日，G7071次列车运行至K1105+270处，发生无线连接超时，造成降级。查看信令流程正常。在发生无线超时时Abis接口数据上行、下行反应出的电平值由-62 dBm突降至-110 dBm，造成上、下行通信质量劣化至7级。

由此可以看出，C3接口数据分析对于处置无线连接超时问题起到了关键作用，对有效处理无线超时发挥了指导性作用。

5 总结

C3系统对保障高速铁路行车安全、提高运输效

率具有重大意义，是确保动车组行车安全、提高列车运行效率的关键技术设备。GSM-R无线网络是C3系统与列车信息的传送平台，网络的运行状态必须实时监控。通过C3接口监测系统，掌握网络的实时状态，通过数据的分析发现网络质量方面的问题，及时制定方案在发生降级前提前干预，尽量减少C3降级问题的发生。同时也可以通过接口监测系统采集的数据，分析C3降级的原因，采取针对性措施及时处理，避免同一问题重复造成C3降级的问题，从而保障GSM-R网络稳定运行，确保高铁运行安全。

参考文献

- [1] 孙斌. GSM-R网络接口监测系统在高速铁路运营维护中的应用[J]. 铁路技术创新, 2011(2): 108-111.
Sun Bin. Application of GSM-R Network Interface Monitoring System in High-Speed Railway Operation and Maintenance[J]. Railway Technical Innovation, 2011(2): 108-111.
- [2] 王启铭. 大秦线GSM-R应用业务运营维护管理

- 系统分析[J]. 中国铁路, 2008(7): 16-18, 30, 4.
- Wang Qiming. Analysis on Operation, Maintenance and Management System of GSM-R Application on Datong-Qinhuangdao Line[J]. China Railway, 2008(7): 16-18, 30, 4.
- [3] 钟章队, 李旭, 蒋文怡, 等. 铁路综合数字移动通信系统(GSM-R)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
- [4] 赵寅龙. GSM-R 线路交叉区域异常占用引起 CTCS-3 降级分析与优化[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(1): 40-45.
- Zhao Yinlong. Analysis and Optimization of CTCS-3 Degradation Faults Caused by Abnormal Occupancy in GSM-R Line Crossing Area[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(1): 40-45.
- [5] 卫磊. 叙毕铁路 GSM-R 系统干扰排查案例分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(11): 60-65.
- Wei Lei. Case Analysis of Interference Investigation of GSM-R System in Xuyong-Bijie Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(11): 60-65.
- [6] 柳小燕. 浅谈高速铁路 GSM-R 系统运行故障处理[J]. 科学时代, 2014(4): 1-2.
- [7] 段清豪. 高速铁路 GSM-R 无线通信网络的优化设计[J]. 中国新通信, 2021, 23(7): 12-13.
- Duan Qinghao. Optimal Design of GSM-R Wireless Communication Network for High-Speed Railway[J]. China New Telecommunications, 2021, 23(7): 12-13.
- [8] 赖乾玲. 如何利用接口监测系统对 C3 故障分析[J]. 硅谷, 2013, 6(24): 75-76.
- Lai Qianling. How to Analyze C3 Fault by Interface Monitoring System[J]. Silicon Valley, 2013, 6(24): 75-76.
- [9] 石先明. 高速铁路 CTCS-3 级列控系统无线闭塞中心工程设计[J]. 中国铁路, 2009(11): 1-6.
- Shi Xianming. Engineering Design of Wireless Block Center for CTCS-3 Train Control System of High-Speed Railway[J]. China Railway, 2009(11): 1-6.
- [10] 孙昱. C3 列控系统通信超时及降级运用的分析与措施[J]. 数字化用户, 2018, 24(16): 14.
- Sun Yu. Analysis and Measures of Communication Timeout and Degraded Application in C3 Train Control System[J]. ShuZiHua YongHu, 2018, 24(16): 14.
- [11] 董丽. C3 列控系统通信超时及降级运用的分析与措施[J]. 中国铁路, 2017(12): 45-50.
- Dong Li. Fault Analysis and Corrective Measure for Communication Timeout and Downgrade Application in C3 Train Control System[J]. China Railway, 2017(12): 45-50.
- [12] 石先明. 高速铁路 CTCS-3 级列控系统无线闭塞中心工程设计[J]. 中国铁路, 2009(11): 1-6.
- Shi Xianming. Engineering Design of Wireless Block Center for CTCS-3 Train Control System of High-Speed Railway[J]. China Railway, 2009(11): 1-6.
- [13] 丁珣. 高速铁路 GSM-R 网络直放站覆盖区段网络优化[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(2): 29-35.
- Ding Xun. Network Optimization of GSM-R Network Repeater Coverage Section of High-Speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(2): 29-35.

新朔铁路调度集中系统优化设计

刘 燕, 谢生智, 陈永明

(国能新朔铁路有限责任公司, 内蒙古鄂尔多斯 017100)

摘要: 探讨新朔铁路调度系统的实施与效果。该系统成功落地应用, 实现调度集中系统与调度信息系统的深度融合, 使两者能够一体化运行, 提高运输组织效率。为确保系统的稳定性和安全性, 对调度集中系统可能存在的安全隐患进行深入的分析, 并提出改进策略和预防措施。在系统的实际应用中, 对出现的问题进行分析, 提出具体解决方案和建议。最后, 对系统在新朔铁路的未来发展进行前瞻性的展望, 包括控制集中化、联锁一体化和通信现代化等。

关键词: 调度集中; 信息; 集中控制; 通信网络; 调度指挥

中图分类号: U284.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0052-05

Optimization Design of Xinshuo Railway CTC System

Liu Yan, Xie Shengzhi, Chen Yongming

(CHN Energy Xinshuo Railway Co., Ltd., Ordos 017000, China)

Abstract: This paper provides a detailed discussion on the implementation and effect of CHN Energy dispatching system in Xinshuo Railway. The successful deployment of this system has achieved a deep integration of CTC system and the dispatch information system, allowing them to operate in a unified manner, and improving the efficiency of transportation organization. To ensure the stability and safety of the system, potential safety risks of CTC system are thoroughly analyzed, and improvement strategies and preventive measures are proposed. In the practical application of the system, the problems are analyzed, and specific solutions and suggestions are put forward. Finally, the future development of the system in Xinshuo Railway is prospected, including centralized control, integrated interlocking, and modernized communication, etc.

Keywords: Centralized Traffic Control (CTC); information; centralized control; communication network; dispatching command

国能新朔铁路有限责任公司下辖大准铁路、准池铁路和新准铁路, 营业总里程 631 km。线路横

跨内蒙古西部和山西省北部, 深入内蒙古鄂尔多斯和山西朔州市大型能源基地, 经包神线、甘泉线北望甘其毛都口岸, 经东乌线、三新线西通宁东矿区, 经大秦线、朔黄线东达北方 4 港; 主要承担着国家能源集团准格尔矿区和地方煤炭外运的重要任务,

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2023-08-25

第一作者: 刘燕 (1973—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 铁路运输组织, 邮箱: 1179015548@qq.com。

是国家能源投资集团有限责任公司（简称国家能源集团）铁路网的重要组成部分，其运输安全和效率直接影响国家能源集团“产运销”一体化战略的实施，是“争运量、保畅通”的关键部分。

1 新朔铁路调度系统应用现状

1.1 建设铁路调度系统的必要性

铁路运输业务不断发展，列车调度指挥系统和调度集中系统已经覆盖全路调度所和车站，成为铁路运输生产中不可或缺的行车调度指挥系统^[1]。该系统由大量计算机设备、网络设备、专用设备和各种业务软件组成，有效降低了工作人员的劳动强度，极大提高了运输组织效率，为迅速提高运能奠定了坚实基础^[2-3]。继2006年全路18个铁路局公司全局覆盖列车调度指挥系统之后，调度集中系统作为列车调度指挥系统的高效运输系统延伸，是一种新型的行车指挥和信号控制设备，同时也是一种新的高效运输组织管理模式^[4]。该系统是整个货运专线运输信息系统的核心，覆盖调度中心和车站几乎所有重要的运输岗位。作为信号设备，采用了高可靠技术以保证信号安全，并可以与货运专线功能相对简单的其他专业调度（如计划、施工、货运、电力等）进行有机结合，实现行车集中指挥自动化、智能化和高效化^[5]。

1.2 原调度系统应用情况

2019年新朔铁路组建成立，原大准、准池、新准铁路组建成为国家能源集团新朔铁路有限责任公司。原大准、准池铁路使用铁科院调度集中2.0及列车调度指挥2.0系统，先后于2016年及2017年组织在大准线、准池线部分站点进行调度集中系统运输试验。由于大准、准池铁路无线列调通信网络使用450 MHz+400 kHz，存在“大三角”及“小三角”通信不畅问题，带宽无法满足调度集中2.0系统进路预告及无线调度命令上车等功能的实现^[6]，助理调度员作用无法充分发挥。后调度集中系统各车站降级使用列车调度指挥2.0系统。原新准铁路由于建设初期未使用调度指挥系统，行车指挥使用

基本的行车方法。

1.3 现铁路调度系统概况

新朔铁路在用国家能源集团铁路调度系统调度中心设置远程调度台终端及14个综合调度信息模块，如图1所示。实现43个车站与新建的神池南调度中心机房通信功能，配套建设货运营销、机务调度、施工管理等计划管理。目前已完成新朔铁路管内3条铁路（大准、准池、新准铁路）调度系统功能的正式开通，14个信息模块部分实现正式开通。

1) 信号部分

新朔铁路系统公司管内43个车站的调度系统设备全部新设，采用调度集中3.0系统及列车调度指挥系统3.0系统，其中燕庄、黍地沟等共计39站按照调度集中3.0系统设置，点岱沟、南坪、岱海电厂、唐公塔电厂共计4站按列车调度指挥系统3.0系统设置。新设车站服务器6套。全部新设车站自律机/综合处理机、电务维护终端、车站服务器、通信质量监督设备、车务终端、信号员终端、车务管理终端、网络设备、电源设备、信息安全设备和防雷设备等。

2) 信息部分

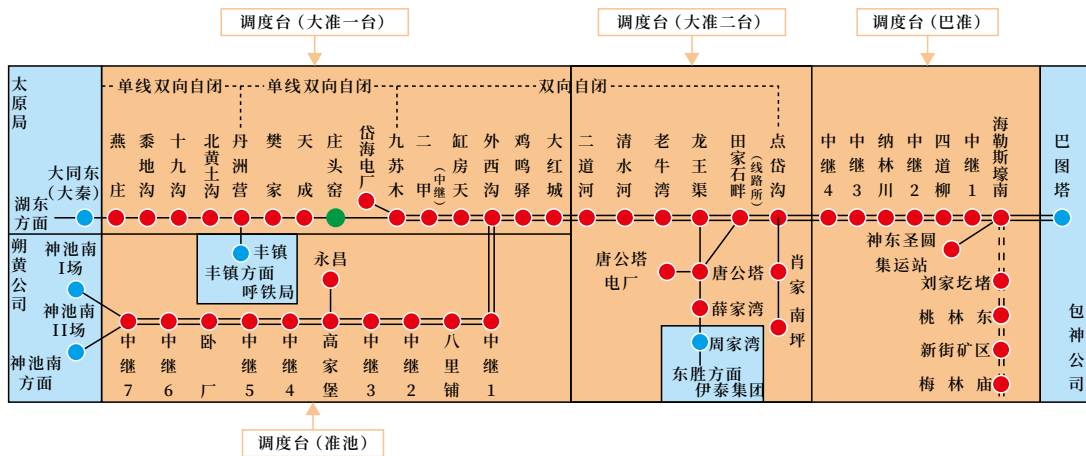
信息系统部分共分为10个模块（计划调度、车站管理、移动终端APP、统计分析、货运营销、机车调度、车辆调度、货运调度、施工调度、系统管理）建设。

3) 通信部分

管内43个车站共划分为5个环路，采用环路双网结构统一接入神池南核心网络，再通过专用通道延伸至远程调度中心，实现异地实时指挥。

1.4 安全风险及改进措施

调度集中系统的安全性对调度指挥效率和运输生产安全具有重要影响。系统可能出现故障的原因有多种，如设备与既有线路兼容性不足、中心设备距离较远、新技术应用后操作人员不熟悉、新设备上线后维护人员和操作人员基本技能不扎实，以及组织管理上存在诸多薄弱环节等。对此：首先，建议提高维护设备质量，通过委托专业化机构进行定



图例：1. ●为本公司车站 ●站改撤销站；2. ●为接口车站；3. — 为自动闭塞区段；4. — 为半自动闭塞/自动站间闭塞区段；5. - - 为预留线路

图1 新朔调度系统框架示意
Fig.1 Xinshuo railway dispatching system framework diagram

期巡检，确保调度系统设备的正常运行；其次，依据《调度集中系统技术条件》(Q/CR 518-2016)第13.1条规定调度集中系统应配置运维子系统即综合维护平台^[7]。该平台集设备监控、网络监控和应用程序状态监控于一体，能够在线实时监测、故障诊断、远程协同、应急处置和运维管理等功能，为调度系统运行监控、维护和管理提供技术支持；然后，完善规章制度也是提高调度指挥安全的有效措施。实时监控列车运行状态，一旦出现故障，立即采取解决对策加以处理。加强对行车组织、设备维修、应急救援和检测监控等方面的重视学习，开展非正常情况下的应急行车组织培训及演练工作；最后，提高调度人员的综合水平，培养处理突发事件的能力。这些建议都是为了保障调度集中系统的安全，而调度集中系统是整个运行系统的关键部分，必须确保分散自律调度集中系统设备运行的安全。

1.5 现调度系统面临的问题

由于受限于450 MHz无线列调系统带宽，经调度集中系统行车试验，进路预告功能无法应用^[8]，无线调度命令上车试验成功率约为70%~90%，调度集中3.0系统下的分散自律模式（中心控制）功能无法实现。目前新朔铁路在管内车站开通了分散自律模式（车站控制），实现了列车进路自动办理。但是部分作业繁忙区段调度集中3.0降级，只

开通了TDCS 3.0功能，仍使用非常站控模式办理进路。对此，调度集中系统需要对业务繁忙区段的车站作业场景进行深入分析和适配性修改，以满足新朔铁路全线调度集中控制的要求。

系统建设时期提出了TD结合的工作思路，从目前的信息系统建设及应用进度来看，系统实现了信号、通信、信息的“一张蓝图”建设。系统先后在朔黄、包神、新朔等单位开通应用，对现场作业、施工登销记、计划管理、调度信息化等方面的发展提供了较好的技术支持，较多原来的纸质作业由线下调整至线上执行，信息化水平进一步提升。目前来看，信息与信号之间的交流互通仍需进一步开发，例如现车管理与调度集中系统之间的信息交互障碍，导致调度集中系统在实现调车自动化方面存在着较多困难。对此，调度系统需要扩展TD协议，以业务为主线，双方信息进行深度融合。

2 新朔铁路调度系统发展建议

2.1 控制集中化

2019年12月中国国家铁路集团有限公司（简称国铁集团）工电部组织完成普速铁路调度中心站集中控制技术方案的编制。为降低普速铁路调度集中区段调度员工作强度，把调度员的部分工作下放车站值班员作业集中，提高职工工作的便利性，改善

工作环境等方面从行业层面制定了统一标准。采用中心站集中控制，在中心站设置集控台，将相邻多个车站的操作集中到中心站控制。车站操作方式的车站，根据需要可纳入中心站集控台，也可单独设置；车站调车方式的车站，全部纳入中心站集控台。分为“车站调车+车站操作（全部车站调车）”或“车站全部为车站操作方式”模式。集控站具备列车股道运用列车、调车进路办理等功能^[9]。集控台内管辖车站全部纳入车站操作方式时，调度台仅安排列车运行计划的次序，股道运用全部由集控台分配。维持既有调度集中系统整体系统结构不变。中心站不单设本站车务终端，由集控台担任管辖所有车站车务终端职能。在中心站集中控制后，列车运行于区域集控范围之内时，只与中心站的值班员（或内勤助理值班员）进行联系，不再与区域集控站车站值班员进行联系。

2.2 联锁一体化

目前主流计算机联锁系统为单独成套，相对独立运行，各站计算机联锁设备不进行组网联合运用。根据国铁集团对联锁系统改进工作部署要求，研究联锁一体化系统以实现多站计算机联锁设备组网运行及区间信号设备与站内信号设备一体化纳入计算机联锁系统管理。既可实现区间联锁逻辑检查以确保持行车安全，又可实现多站联锁系统组网运行，实现集中控制，为减员增效提供有效途径。

2.3 通信网络现代化

LTE-R (Long Term Evolution for Railways) 网络是一种增强型的 TD-LTE (Time Division Long Term Evolution) 网络，专门为重载铁路的调度通信设计。它能够支持重载组合列车无线重联、集群调度通信、无线调度命令和无线车次号校核等业务，并满足重载铁路专用调度通信的要求^[10]。调度员可以通过调度系统计算机编辑调度命令，并通过 LTE-R 无线调度子系统以分组交换的方式将编辑好的命令传输到相应的机车司机处。机车司机可以通过车载调度命令接收子系统存储和打印调度命令，并且调度员可以在调度系统显示传输

成功的信息。新朔铁路在准池铁路卧厂-神池南区段建设 LTE-R 网络，以满足列车重联通信、长交路列车开行等需求。基于北斗定位、5G 技术在铁路通信网络方面进行进一步探索，逐步开展大准线、准池线 4G、5G、北斗技术的应用，带动调度系统向新的发展方向。

3 结束语

新朔铁路调度集中系统的实施使得调度员可以从繁琐的手工作业中解脱出来，从而更加专注于运输组织和安全保障方面的工作。同时，可以有效地规避传统上依赖人主观控制的一些安全因素，从而提高运输安全性和运行效率。未来，打通信号+信息的梗阻，应用集中控制，研究多站联锁一体化，完善通信网络，是调度集中系统在新朔铁路的发展趋势。调度集中系统将为新朔铁路列车的高效运行提供可靠的保障，为提高效率、扩大运输能力奠定基础，为“能源保障、西煤东运”作出贡献。

参考文献

- [1] 晏子峰. 铁路调度集中系统智能运维构建探讨[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(9): 15-18.
Yan Zifeng. Discussion on Intelligent Operation and Maintenance of Centralized Traffic Control System in Railway[J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(9): 15-18.
- [2] 刘建民, 祝小莹. 胶济客专铁路 CTC 系统运用分析[J]. 中小企业管理与科技, 2016(2): 261.
Liu Jianmin, Zhu Xiaoying. Application Analysis of CTC System in Jiaoji Passenger Dedicated Railway[J]. Management & Technology of SME, 2016(2): 261.
- [3] 王振一, 曹桢, 宋晓丽. 铁路调度集中系统运输指挥信息数据双路传输研究[J]. 铁道运输与经济, 2018, 40(9): 46-50.
Wang Zhenyi, Cao Zhen, Song Xiaoli. A Research on Dual-Channel Traffic Dispatching Information

Data Transmission of the Railway Centralized Traffic Control System[J]. Railway Transport and Economy, 2018, 40(9): 46-50.

[4] 王振东, 齐威, 苗义烽, 等. 基于云计算技术的铁路调度集中系统架构设计研究 [J]. 铁道运输与经济, 2020, 42 (1): 38-43.
Wang Zhendong, Qi Wei, Miao Yifeng, et al. A Study on the Design of the Architecture of Railway CTC System Based on Cloud Computing Technology[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(1): 38-43.

[5] 王强, 费振豪. 调度集中系统在普速铁路运用方案探讨 [J]. 中国铁路, 2020 (8): 46-49.
Wang Qiang, Fei Zhenhao. Study on Application Scheme of Centralized Traffic Control System to Conventional Railway[J]. China Railway, 2020(8): 46-49.

[6] 付红升, 兰海, 钟章队. 基于 GSM-R 实现多机车同步操作控制 [J]. 中国铁路, 2004 (6): 30-33.
Fu Hongsheng, Lan Hai, Zhong Zhangdui. Realization of Synchronous Operation Control of Multiple Locomotives Based on GSM-R[J]. China Railway, 2004(6): 30-33.

[7] 中华人民共和国国家铁路局. 调度集中系统技术条件: TB/T 3471-2016 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.

[8] 余红梅. 铁路分散自律 CTC 系统的应用问题及对策 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2015, 12 (1): 8-11.
Yu Hongmei. Research on Application Problems and Countermeasures of Railway FZ-CTC System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2015, 12(1): 8-11.

[9] 陈宣, 李华荣, 王如跃. 基于 CTC3.0 系统的车站调车进路控制方案 [J]. 铁道通信信号, 2018, 54 (7): 14-16.
Chen Xuan, Li Huarong, Wang Ruyue. Route Control Scheme for Shunting at Station Based on CTC3.0 System[J]. Railway Signalling & Communication, 2018, 54(7): 14-16.

[10] 孔宾. LTE-R 网络技术在重载铁路的应用 [J]. 铁路计算机应用, 2015, 24 (8): 42-45.
Kong Bin. Application of LTE-R Network Technology in Heavy Haul Railway[J]. Railway Computer Application, 2015, 24(8): 42-45.

本期广告企业简介

北京全路通信信号研究设计院集团有限公司

CTCS3-300T车载设备智能诊断系统产品

- 1) 解决 300T 车载记录不全、记录数据下载不及时问题, 实现对故障准确定位, 尤其可对线上运行车辆发生的故障及时制定有效应急预案, 减小故障对经济和社会效益的影响。
- 2) 根据大量运营数据的分析积累, 通过大数据挖掘技术, 预测模块劣化趋势, 实现故障预警, 提前预防处理, 有效降低故障率。
- 3) 降低维护人员的工作强度, 节约人工成本。
- 4) 安全性强, 对 300T 设备正常控车无任何潜在风险。该产品由通号院 300T 车载开发团队结合 300T 车载设备系统原理定制开发, 可有效保障 300T 车载设备信息安全与运行安全。

地址: 北京市丰台科技园区汽车博物馆南路 1 号院中国通号大厦 邮编: 100070

E-mail: jiangguohua@crscd.com.cn

(详见封面)

编者按:

重载铁路作为货运铁路的重要组成部分,智慧重载在智慧交通发展中尤为重要。在《交通强国建设纲要》和《“十四五”交通领域科技创新规划》指引下,为落实智慧交通发展方向,推动北斗在智能铁路等领域的创新应用,本刊设置“基于北斗的重载铁路列控系统”专题,重点研究基于北斗的重载铁路列控系统,提出一套基于北斗全功能应用的高标准、高安全、高可靠的重载铁路列控系统,形成一套适合当前重载铁路现状并满足未来发展需求的列控系统解决方案,用于指导系统装备研制及工程示范应用,为创新技术落地应用提供技术指导,为重载铁路智慧化建设奠定安全基础。

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.01.011

基于北斗短报文的应用数据安全分析

苏耀伟, 曹晓宇, 史立柱

(国能新朔准池铁路(山西)有限责任公司, 山西朔州 036003)

摘要: 随着北斗卫星导航系统发展,已有大量北斗短报文在地质灾害频繁区段进行应用数据传输的相关研究,如何分析其安全性成为能否工程应用的关键。采用FMEA给出基于北斗短报文的应用数据安全分析方法,以保证数据的正确性为出发点,分析可能的失效模式,尤其是数据变化带来的风险,根据失效模式,给出相应的风险减轻措施,来预防或减轻风险。从而为北斗短报文在未来轨道交通领域的广泛应用提供安全助力,以提高系统整体安全性。

关键词: FMEA; 北斗; 短报文; 临时限速

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0057-05

Safety Analysis of Application Data Based on Beidou Short Messages

Su Yaowei, Cao Xiaoyu, Shi Lizhu

(CHN Energy Xinshuo Zhunchi Railway (Shanxi) Co., Ltd., Shuozhou 036003, China)

Abstract: With the development of Beidou navigation satellite system, a large number of studies have been conducted on the application data transmission of Beidou short messages in areas with frequent geological disasters. How to analyze its safety has become the key to engineering application. In this paper, FMEA is used to provide an application data safety analysis method based on Beidou short messages. In order to ensure the correctness of data as the starting point, possible failure modes are analyzed, especially the risks caused by data changes. According to the failure mode, the corresponding

收稿日期: 2023-11-08; 修回日期: 2024-01-13

第一作者: 苏耀伟(1988—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 交通信息工程及控制, 邮箱: 20008007@ceic.com。

risk mitigation measures are given to prevent or mitigate the risks. This will provide safety assistance for the wide application of Beidou short message in the future rail transit field to improve the overall safety of the system.

Keywords: FMEA; Beidou; short message; temporary speed restriction

1 概述

随着科技进步，国内铁路信号系统也经历了快速的发展，信号系统作为列车运行安全的核心设备，为保障列车高效、安全的运行发挥了巨大的作用。在信号控制系统中，目前国铁应用广泛的车地通信是通过轨道电路传输系统、应答器传输系统、GSM-R 网络完成的，地铁中的车-地通信/车-车通信则是通过 LTE、4G/5G 等网络来完成^[1-5]。

北斗卫星导航系统全球化服务的逐步实现，北斗定位、北斗短报文功能也在各个领域得到了广泛应用，例如地质灾害监测领域。目前大部分公路桥梁、边坡、大坝、尾矿库等容易发生地质灾害的地方都布设有基于北斗定位的高精度位移监测系统，可以在没有 4G/5G 传输信号的时候，将预警信息通过卫星通信传输给用户^[6-8]。

目前国有铁路的总里程已经达到 14.6 万 km，里程长、分布广。在不依赖既有信号系统的情况下，将列车运行前方的线路信息、临时限速、区间灾害信息、前车的位置信息、速度信息及运行方向等信息通过北斗短报文的形式由地面传递给列车（车-地通信）或在列车间进行传输（车-车通信），一方面能够提高运行效率，另一方面也为保障运行安全提供多一层防护。

2 基于北斗短报文的应用

2.1 北斗三号短报文简介

2020 年 6 月 23 日，北斗三号最后一颗全球组网卫星在西昌卫星发射中心点火升空，发射成功。北斗三号全球卫星导航系统完成全球星座部署。2020 年 6 月 30 日，北斗“收官之星”成功定点，30 颗北斗三号卫星也已全部转入长期管理模式，标志着中国北斗卫星导航系统向全球组网完成又迈出

重要一步。2020 年 7 月 31 日，北斗三号全球卫星导航系统建成并正式开通，提前半年完成组网，标志着中国北斗“三步走”发展战略圆满完成，北斗事业进入到全球服务新时代。

北斗三号全球卫星导航系统（简称北斗三号系统），采用 30 颗卫星 3 种轨道的混合星座模式。在 30 颗组网卫星中，有 24 颗地球中圆轨道卫星（MEO 卫星），轨道高度 21 528 km，于 2019 年完成发射；除这 24 颗卫星外，北斗三号系统还有不同于其他全球卫星导航系统的 6 颗卫星，其中 3 颗在地球静止轨道、3 颗在倾斜地球同步轨道，地球静止轨道卫星（GEO 卫星）轨道高度 35 786 km，轨道倾角 0°，轨道平面和赤道平面重合，与地球自转同步；倾斜地球同步轨道卫星（IGSO 卫星）轨道高度 35 786 km，轨道倾角 55°。3 种轨道混合星座布局，从而达到全球覆盖。北斗三号系统的 30 颗卫星提供定位导航授时、短报文通信、国际搜救三大全球服务。

北斗短报文是一种短消息通信技术，是中国自主研发的、北斗卫星导航系统独具特色的功能，起源于北斗一号，采用 RDSS+ 短报文通信机制，可通过星间链路实现全球短报文通信。具有全天候、全域广覆盖、可靠性高等特点。

2.2 北斗短报文的工作原理

用户设备 1（短报文发送方）将通信申请信号（自定义消息内容）发送给北斗卫星接收单元；北斗卫星接收单元收到申请后将电文广播给接收方北斗卫星接收单元；接收方卫星接收单元接收到信号后将电文发给用户设备 2（短报文接收方）。

目前，北斗设备单卡机每分钟只能发送一次短报文，多卡机每分钟最多发送 16 次短报文，指挥机有通播功能。

发送方和接收方设备通过北斗卫星接收单元接

收和发送短报文信息包，每个中断都有唯一的ID号，采用轮询的方式，通过北斗短报文交互信息，如图1所示。

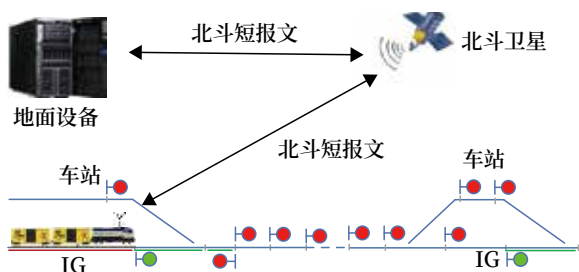


图1 基于北斗短报文的列车车-地通信/车-车通信系统工作原理
Fig.1 Working principle of vehicle-ground communication/
vehicle-vehicle communication system based on Beidou short messages

通信原理如下：

- 1) 用户设备1（短报文发送方）将通信申请信号（自定义消息内容）发送给北斗卫星接收单元；
- 2) 通讯申请信号经由北斗卫星地面中心站持续广播给用户；
- 3) 接收方卫星接收单元接收到信号后将电文发给用户设备2（短报文接收方），完成一次通讯。

3 安全分析

3.1 背景

在CTCS-0（简称C0）线路升级改造过程中，为保障改造过程中线路的正常运行以及降低后续线路升级所带来的软件升级的工作量，区间设置的应答器组仅存储了应答器ID信息，并无区间线路数据，以避免线路改造涉及的多次线路数据修改造成的大量应答器烧写工作。

因此在区间无网络敷设的线路，列车可以在出站前接收并存储带应答器列表的区间线路数据及临时限速信息。如果在区间遇到车载列车自动防护系统（Automatic Train Protection System, ATP）重启等故障，便可以通过北斗短报文与地面设备确认其存储的数据是否有变化。在确认无变化后，驾驶列车通过应答器组（或通过北斗定位功能加单应答器）重新获取定位和运行方向后，可以继续依据该线路数据和临时限速信息运行，从而使列车快速

恢复正常运行模式，提高运行效率。

这些信息应至少包括应答器列表的区间线路数据确认、临时限速等信息。

3.2 FMEA分析方法

故障模式与影响分析（Failure Modes and Effects Analysis, FMEA）是一种预防性的质量工具，用于在产品设计或流程控制过程中识别和评估潜在的设计或流程故障模式及其对系统性能的影响。FMEA通过对产品设计或流程中可能出现的故障模式进行系统性的分析，能够找出潜在的设计或流程故障，并评估它们对最终产品或服务的影响。同时，FMEA也为改进设计和流程提供了依据，它可以帮助组织找出可能会影响产品质量、安全性、可靠性和满足性能要求的潜在问题，从而提前采取措施避免这些问题。FMEA分析步骤如下：

- 1) 定义分析系统的边界条件；
- 2) 依据系统定义或需求文档，明确分析对象的范围及主要功能；
- 3) 定义失效的判断标准及失效模式；
- 4) 分析造成失效模式的原因；
- 5) 分析各种失效模式可能导致分析对象自身的影响、对上一级的影响及对系统的最终影响，根据最终影响确定各种失效模式的后果危害度；
- 6) 针对各种失效模式、失效原因和造成的影响提出可能的设计改进措施和/或使用补偿措施并分析剩余风险；
- 7) 根据分析结果将具有安全风险的影响列入危险源清单。

3.3 FMEA分析结果

以线路信息和临时限速信息包信息为例，通过FMEA分析的方式给出简单的分析示例。因着重于短报文应用的功能安全层面，因此示例中不做风险评价与再评价。

假设与限制如下，设备的ID号具有唯一性。以线路信息和临时限速数据包为例进行分析，线路信息的分析结果如表1所示。

应用FMEA分析对线路信息数据包的存储数据

表1 线路信息安全分析

Tab.1 Line information safety analysis

故障模式	本层影响	最终影响	风险	措施编号	改进措施
因某种原因区间线路数据发生变化, 从而导致存储的数据不再有效	ATP 使用了无效的线路数据	ATP 使用错误的线路数据计算模式曲线	撞车或脱轨	S-001	信息包中应有数据校验信息, 以保证数据的完整性和一致性
车载设备出站前未存储成功线路数据	ATP 使用既有存储的线路数据	ATP 使用错误的线路数据计算模式曲线	撞车或脱轨	S-001	信息包中应有数据校验信息, 以保证数据的完整性和一致性
消息损坏	ATP 收到的线路数据不全或不可用或被篡改	ATP 使用错误的线路数据计算模式曲线	撞车或脱轨	S-001	信息包中应有数据校验信息, 以保证数据的完整性和一致性
消息延迟	ATP 延迟收到线路信息	将降级降速, 人工保障安全运行	无	—	—
消息伪装	ATP 收到错误的线路信息	ATP 使用错误的线路数据计算模式曲线	撞车或脱轨	S-002	设备间应采用动态密钥等方法来防护通信伪装带来的风险

失效、出站前未存储成功线路数据、消息损坏、消息延迟和消息伪装 5 种故障模式进行分析, 结果表明, 除消息延迟外都会导致列车撞车或脱轨, 因此针对上述故障模式, 给出在数据包中增加数据校验信息, 以保证数据的完整性和一致性和采用动态密

钥等方法来防护通信伪装带来的风险的整改方案, 为北斗短报文的应用提供参考。

临时限速数据的分析结果如表 2 所示。

应用 FMEA 对临时限速数据包的消息删除、消息损坏、消息延迟和消息伪装 4 种故障模式进行分

表2 临时限速数据包安全分析

Tab.2 Safety analysis of temporary speed restriction packets

故障模式	本层影响	最终影响	风险	措施编号	改进措施	备注
消息删除	ATP 未收到临时限速设置或取消命令	未收到临时限速设置, ATP 模式曲线速度计算过高 未收到临时限速取消命令, ATP 模式曲线速度计算过低	ATP 模式曲线速度计算过高可能导致脱轨	S-003	发送方在规定时间内未收到接收方发送的确认收到信息时应按对方未收到处理 (如报警等)	
				S-004	接收方在发出请求后、在规定时间内未收到发送方发送的短报文信息应导向安全侧	
				S-005	运营人员应通过其他方式确保司机收到临时限速信息	
消息损坏	ATP 收到的临时限速命令不全或不可用或被篡改	ATP 使用错误的临时限速计算模式曲线	撞车或脱轨	S-001	信息包中应有数据校验信息, 以保证数据的完整性和一致性	
消息延迟 (临时限速过期)	ATP 延迟收到临时限速命令	延迟收到临时限速设置, ATP 模式曲线速度计算过高 延迟收到临时限速取消命令, ATP 模式曲线速度计算过低	ATP 模式曲线速度计算过高可能导致脱轨	S-003	发送方在规定时间内未收到接收方发送的确认收到信息时应按对方未收到处理 (如报警等)	遇到消息排队的情况时可能存在消息延迟几分钟的情况, 因此信号系统应考虑消息采用指挥机或其他方式来降低消息延迟时间
				S-004	接收方在发出请求后、在规定时间内未收到发送方发送的短报文信息应导向安全侧	
				S-005	运营人员应通过其他方式确保司机收到临时限速信息	
消息伪装	ATP 收到错误的临时限速信息	ATP 使用错误的临时限速设计或取消信息计算模式曲线	撞车或脱轨	S-002	设备间应采用动态密钥等方法来防护通信伪装带来的风险	

析, 结果表明上述故障模式都会使 ATP 模式曲线速度计算过高, 可能导致脱轨。因此针对上述故障模式, 给出接收方在发出请求后在规定时间内未收到发送方发送的短报文信息则导向安全侧, 运营人员应通过其他方式确保司机收到临时限速信息及采用动态密钥等方法来防护通信伪装带来的风险的整改方案, 以保证列车的运行安全。

4 结束语

北斗卫星通信系统的短报文目前可以作为信号系统的辅助系统。在设备故障或 ATP 重启时, 通过其他设备为列车提供运行必需的相关信息, 是提高运行效率、进一步保障安全的一种方式, 其具体应用形式还在探讨之中。短报文目前因其发送机制限制以及环境限制(卫星信号弱的地区, 如隧道等), 其在铁路领域的广泛应用还待进一步开发。

目前北斗卫星定位功能在列车测速测距、列车完整性检查等方面已经有了实际的应用。由于该功能的应用不同于短报文, 其涉及车载 ATP 核心功能的计算, 因此其安全分析不同于北斗短报文的应用, 北斗定位的准确性及正确性需要进一步确认。因此可以采用异构的 M 取 N 结构等方式来保障安全, 有涉及该功能应用的项目建议做针对性的安全分析。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 轨道交通 通信、信号和处理系统 控制和防护系统软件: GB/T 28808-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 轨道交通可靠性、可用性、可维护性和安全性规范及示例: GB/T 21562-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 轨道交通 通信、信号和处理系统 信号用安全相关电子系统: GB/T 28809-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 系统可靠性分析技术失效模式和影响分析(FMEA)程序: GB/T 7826-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [5] 刘锋. 基于通信的列车控制模式下的列车定位新技术[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(4): 48-53.
Liu Feng. Theories on New Technology Applied in CBTC Mode Train Positioning[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(4): 48-53.
- [6] 张炯韬. 北斗卫星导航系统在铁路应急通信中的应用研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2013, 10(6): 11-12, 43.
Zhang Jiongtao. Research on Application of BeiDou Navigation Satellite System in Railway Emergency Communication[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2013, 10(6): 11-12, 43.
- [7] 樊玉明, 王剑, 上官伟, 等. 基于北斗导航卫星系统的轨道交通应用关键技术研究[C]//第八届中国智能交通年会优秀论文集——轨道交通. 合肥, 2013: 293-301.
- [8] 蔡焯, 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.

车载ATO系统记录板数据解析工具设计

曹晓宇

(国能新朔准池铁路(山西)有限责任公司, 山西朔州 036003)

摘要: 为实现对列车记录数据的读取、解析与显示, 便于数据分析和列控系统的后期维护, 开发车载自动驾驶(Automatic Train Operation, ATO)系统记录板数据解析工具。在对车载ATO系统记录板数据解析工具需求规范进行深入分析的基础上, 明确解析工具的各项具体功能, 给出软件的总体设计思路及各功能的详细设计流程, 最后介绍软件的使用方法, 为后续用户使用提供指导。同时基于实测数据对软件功能进行测试验证。测试结果表明, 所开发的解析工具可完全实现设计功能, 且操作便捷。

关键词: 数据解析; 软件设计; 车载ATO系统

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0062-07

Design of Data Parsing Tool for Record Board of Onboard ATO System

Cao Xiaoyu

(CHN Energy Xinshuo Zhunchi Railway (Shanxi) Co., Ltd., Shuozhou 036003, China)

Abstract: In order to realize the reading, parsing and display of the train record data, and to facilitate the data analysis and the later maintenance of the train control system, a data parsing tool for the onboard automatic train operation (ATO) system record board is developed. Based on the in-depth analysis of the requirement specifications, the specific functions of the parsing tool are clarified, and the general design idea of the software and the detailed design process of each function are given. Finally, the usage of the software is introduced to provide guidance for subsequent users. Meanwhile, the software functions are tested and verified based on the measured data. The test results show that the developed parsing tool can fully realize the designed functions and is easy to operate.

Keywords: data analysis; software development; onboard ATO systems

1 概述

随着现代铁路货运的发展, 铁路货运日益向重载化快捷化方向迈进, 对列车的控制提出了更高的

要求。基于北斗的重载铁路列控系统车载ATO系统通过模拟和替代司机操作实现列车自动驾驶, 是提高货运铁路运输效率、降低司机劳动强度的核心装备。车载ATO系统是在重载货运列车上设置列车自动驾驶单元, 在列车自动保护系统(Automatic Train Protection, ATP)的防护下, 接收ATP转发的线路数据, 实现列车的起车、加速、巡航、减

收稿日期: 2023-09-25; 修回日期: 2024-01-07

作者简介: 曹晓宇(1990—), 男, 工程师, 本科, 主要研究方向: 通信工程, 邮箱: 445424850@qq.com。

速、停车的自动控制，已在城市轨道交通和高速铁路领域得到广泛的应用，是未来重载列车运行控制的发展方向。

ATO 系统包括地面设备和车载设备两部分。车载设备是根据地面各种设备提供的信息（包括线路数据、临时限速等）结合列车参数，计算出列车运行控制曲线，实现控车运行。ATO 车载设备记录的内容主要包括 ATO 工作状态信息、ATO 接收的地面信息、ATO 控制输出信息和 ATO 故障报警信息等。这些信息对列车安全、高效、平稳运行至关重要。车载 ATO 系统记录板通过记录以上信息，为列车运行控制决策提供可靠数据来源。

车载 ATO 系统记录板数据解析工具是解析 ATO 记录板数据的可视化工具，主要功能包括记录文档的读取、解析和显示等。本文依据车载 ATO 系统记录板数据解析工具需求规范，首先对解析工具进行总体设计，然后阐述各功能的设计流程，最后给出解析工具的使用方法和测试结果。

2 功能需求分析

2.1 基本功能

车载 ATO 系统记录板数据解析工具应具备以下 3 点基本功能：

- 1) 能支持重载列车自动驾驶产品的记录板日志解析；
- 2) 能根据不同用户设置不同的权限，即 ATO 软件维护人员权限应支持查看所有记录板解析数据结果，业主权限仅能支持查看部分解析数据结果；
- 3) 支持在输入正确账号密码的情况下，进入 ATO 软件维护人员权限模式，业主权限无需账号密码即可进入。

2.2 主要功能

数据解析工具的主要功能包括记录文档的读取、解析和显示等。

2.2.1 记录文档提取

解析工具对操作人员选择的记录板日志（.txt 格式）进行读取。当所选记录板日志文档格式正确

时，则读取成功。当记录板日志读取失败时，解析工具支持报错并且能够重新选择。

2.2.2 记录数据解析

解析工具按照车载 ATO 记录板接口协议，将记录板日志的所有记录数据解析为可读数据。根据记录数据消息长度一致性，判断消息是否有效。若消息有效，则解析该消息的所有子包；若消息无效，则报错并丢弃这条消息并且进行下一条消息的解析。此外，解析工具应能解析记录数据消息子包，若子包号错误或子包长度错误，则丢弃这个子包继续进行解析。若记录数据消息存在 ATO 系统输入输出原始数据，解析工具应能剥离出 ATO 系统输入输出原始字节流。

2.2.3 记录数据显示

解析工具的显示界面以图表和图线两种形式展示解析结果，并在界面上分区显示。显示内容包括：

- 1) 所选记录板日志的所有记录数据消息的解析结果；
- 2) 以十六进制显示原始记录消息和 ATO 系统输入输出字节流；
- 3) 所选记录板日志的记录数据消息中不同子包的发送周期；
- 4) 以周期号为横坐标，速度为纵坐标的直角坐标系的相关速度 - 周期曲线，主要包括当前速度曲线、ATP 允许速度曲线和 ATO 命令速度曲线。

需要说明的是，显示界面应能通过速度 - 周期曲线上的鼠标移动或者按键控制显示鼠标位置当前周期的解析结果，并且速度 - 周期曲线应能支持整体缩放功能。

此外，为便于快速分析，显示界面还应能根据鼠标位置当前周期记录消息进行简单计算处理，包括但不限于：计算当前速度距 ATP 允许速度差、当前速度距 ATP 命令速度差和当前速度距 ATO 命令速度差。

3 软件描述与功能设计

3.1 软件描述

车载 ATO 系统记录板数据解析工具是解析

ATO 记录板数据的可視化解析工具，便于数据解析和车载 ATO 系统维护，其中解析工具由 Visual Studio 2019 平台 C# 语言编写，界面设计基于 WinForm 工具，采用 .NET Framework 4.6 框架和 DevExpress 20.1 插件共同完成。

解析工具的输入为原始记录板日志压缩包经过解压拼接后的记录数据。输入数据应符合记录板接口协议规定的格式。解析工具输出为解析后的记录数据，包括：ATP → ATO 信息原始数据、ATO 功能业务信息数据、ATO 控车信息数据、ATO 故障数据和参数及配置信息数据等。

3.2 功能设计

3.2.1 总体设计思路

解析工具的解析界面布局沿用 JRU viewer 的整体风格，使用扁平化的界面设计方式对解析结果进行展示，主要包括图形显示区、数据显示区、扩展区、数据输入区，如图 1 所示。

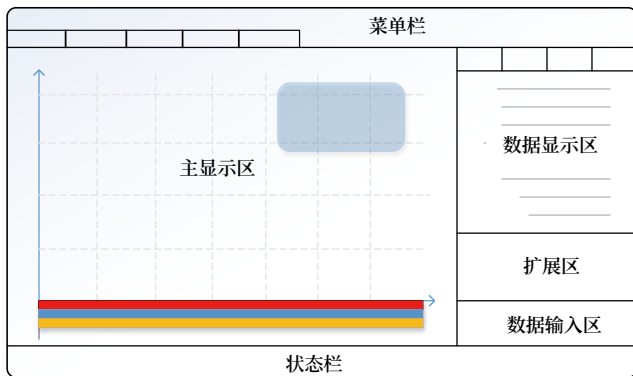


图1 车载ATO系统记录数据解析工具布局示意
Fig.1 Layout of record data parsing tool for onboard ATO system

考虑到不同产品线记录板数据解析工具的兼容性，提供统一的程序入口界面，便于不同产品线维护人员的使用。工具统一入口设计流程如图 2 所示。

解析工具在功能设计上主要包括文件读取、数据解析、数据显示、曲线绘制 4 个部分，由于 C# 是面向对象的语言，所以在程序设计上，将以上这些功能分别在不同的类中实现，解析工具类设计如下。

Form.cs：窗体类，设计窗体，实现窗体事件的响应。

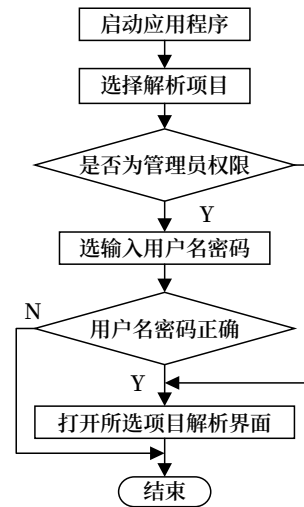


图2 解析界面入口逻辑流程
Fig.2 Logic flow chart of parsing interface gateway

GraphicUserControl.cs：图形用户控制类，实现图形的绘制。

ATOMessage.cs：ATO 消息类，解析 ATO 记录板数据的消息头及子包号，查找对应子包并且解析。

ATOPacket.cs：ATO 子包类，定义 ATO 记录板数据的子包及调用解析函数按位解析子包变量。

ATPMessage.cs：ATP 子包类，定义 ATP-ATO 子包变量，按需解析 ATP-ATO 通信信息。

MVBMessage.cs：MVB 子包类，定义子包 ATO-MVB 变量，按需解析 ATO-MVB 通信信息。

ByteStuffing.cs：处理类，对帧进行转义、按位解析等功能。

各类之间的关系如图 3 所示。

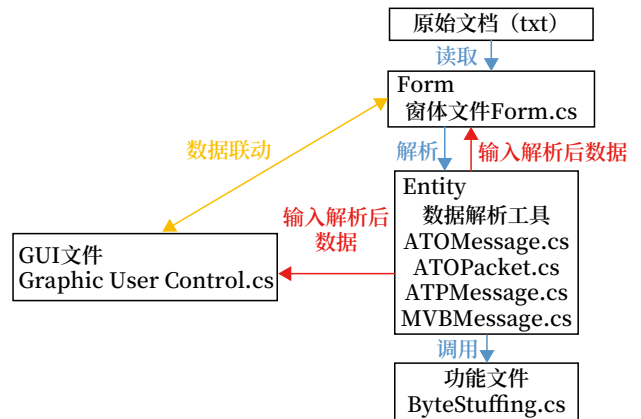


图3 类关系
Fig.3 Class relationship

3.2.2 文件读取

记录板原始记录日志经过 `can_analyse_c3client_v0.0.6` 工具解压拼接后，每条消息 16 进制按行显示，文件读取就是把保存解压拼接后的记录数据转换为可供程序使用的字节数组形式，用于下一步数据解析。解析软件设计打开文件按钮，点击可选择需要解析的记录文件，选定文件后开启后台线程逐行读取文件内的数据流，将每一行的字节流转义后保存在集合中。文件读取部分程序集成在窗体类中，即 `Form.cs`。

3.2.3 数据解析

数据解析就是将字节数组按照记录板数据接口协议转换为对应的变量。字节数组按照接口协议先解析消息头，再解析子包头，根据子包头号查找对应子包里的变量，逐位取出解析，如数据包中含有子包，则按照相同的方法在子包对应的类中继续查找解析。由于各项目 ATO 记录板接口协议不同，记录消息中子包格式和字段也有所差异（本文对各项目接口协议子包的差异类不做赘述），但是解析逻辑基本一致，数据解析部分的程序主要集成在 `ATOMessage`、`ATOPacket`、`ATPMessage`、`MVBMessage` 这 4 个类中，其中 `ATOMessage` 类主要解析消息头和子包号，查询子包解析函数，`ATOPacket`、`ATPMessage`、`MVBMessage` 类为具体的子包字段信息和解析过程。

3.2.4 数据显示

数据显示是将解析出来的记录板数据按照需求显示在界面上，在界面上可选择 `tabpage` 切换查看不同类型的数据。主要包括详细数据、原始数据、固定信息、应答器信息、车辆接口数据等。解析出的数据被归类显示，显示的形式使用 `TreeList` 树形表格和 `TextBox` 文本框的方式。显示程序集成在窗体类 `Form.cs` 中。

3.2.5 曲线绘制

曲线绘制是按照需求文档将一些重点信息绘制成曲线图或者在周期坐标中标识，其坐标轴、曲线、标识的绘制均在 `GUI` 类中。绘制横坐标为周

期，纵坐标为速度的直角坐标系，直角坐标系下方为信息标识轨，`GUI` 上横坐标每个像素点代表一个周期，将这个周期需要绘制的数据绘制到纵坐标上，上一周期与本周期的坐标点相连，即可绘制成连续的曲线图。若上一周期未收到数据包，则向前推演。`GUI` 上的曲线图与数据显示联动，`MouseMove` 时间和 `MouseClicked` 事件记录鼠标在 `GUI` 上移动或者单击的横坐标值，通过计算得到对应周期的 `ATOMessage` 类，将此类作为参数传递给数据显示函数中，以此方法使得曲线图与数据联动显示。

此外，曲线绘制须具备缩放功能，即能对于所有周期点按照周期数 / 屏幕横向分辨率（像素）的倍数进行采样，将抽取到的周期号对应的数据绘制在界面上。

4 软件应用

由于不同项目的记录板接口规范不同，在使用时需要选择对应项目的记录板数据解析工具进行解析，否则本解析工具解析出的数据不具备正确性。以下操作说明以重载列车 ATO 产品记录数据解析工具为例。

4.1 数据准备

解析工具输入的数据需要严格按照各项目 ATO 数据记录接口规范，输入的记录板数据文档应为 `.txt` 格式。由于 ATO 记录板的下载限制，从 ATO 记录板获取的原始记录日志为多个较短数据压缩包形式，因此需要对从 ATO 记录板下载的数据进行解压拼接，使其成为解析工具可输入的原始数据文档。

在记录板下载的压缩数据文件夹里粘贴脚本 `can_analyse_c3client_v0.0.6`，运行脚本 `can_analyse_c3client_v0.0.6`，便可将脚本所在文件夹里的压缩数据进行解压和拼接，最终形成 3 个文档：`xxxx_L_can_log.txt`、`xxxx_R_can_log.txt`、`xxxx_Err_can_log.txt`，其中 `xxxx` 代表记录数据的日期，`xxxx_L_can_log` 表示左系记录数据，`xxxx_R_can_log` 表示右系记录数据，`xxxx_`

Err_can_log 表示错误数据。如图 4 所示，给出 2022 年 5 月 4 日一组运行数据，解析后的结果：20220504_L_can_log.txt、20220504_R_can_log.txt、20220504_Err_can_log.txt。用户可选择所需要的记录板原始数据作为本工具的输入数据文档。

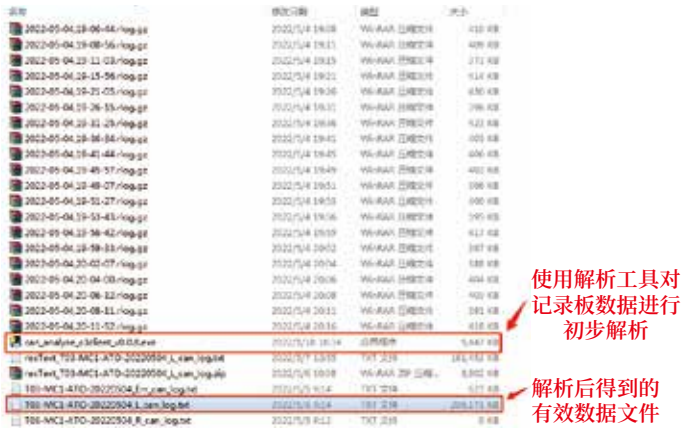


图4 解压拼包过程
Fig.4 Unpackage and package process

4.2 软件登录与配置

解析工具启动后即为登录界面，如图 5 所示。操作人员应选择解析项目和登录权限。若选择管理员权

限登录，需在指定位置输入用户名和密码，点击“登录”按钮，账号与密码校验通过后即完成登录。若为用户模式登录，则不需要输入用户名和密码，点击“登录”按钮，账号与密码校验通过后即完成登录。



图5 登录页面
Fig.5 Login page

4.3 记录日志读取

完成登录后，解析工具自动跳转至所选项目和所选权限下的解析界面，如图 6 所示。界面包括菜单栏、图形绘制区和数据显示区 3 个功能分区。其中，菜单栏汇集了解析工具的基本功能，图形绘制区对解析后的部分数据进行曲线图绘制，数据显示区对解析后的所有数据进行分类显示。

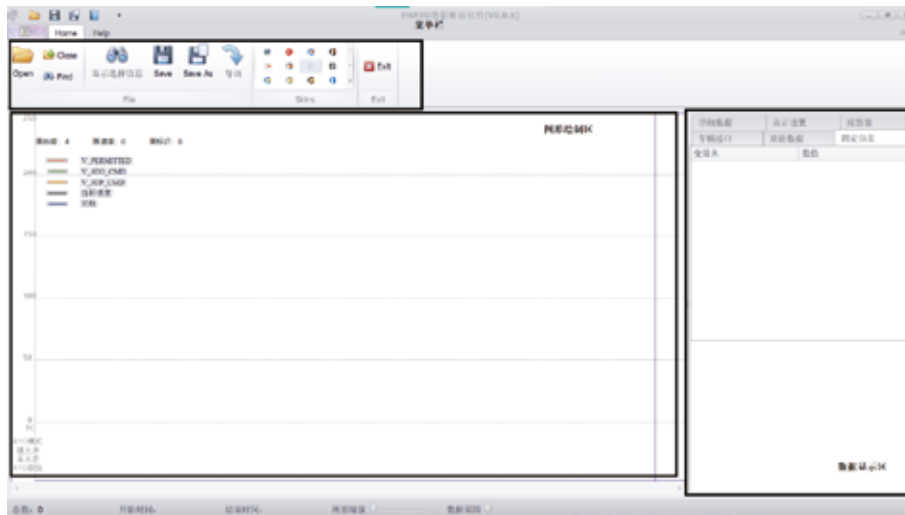


图6 解析页面
Fig.6 Parse page

点击菜单栏中的“Open”图标，选择由 4.1 节说明的原始记录数据，点击“打开”，如图 7 所示，等待十几秒，解析后的结果将会显示在工具界面上。

4.4 解析结果查看

输入正确的原始记录数据解析后，工具界面如图 8 所示，图形绘制区的每一个像素点代表一个周期，用户可根据图例查看各曲线的含义，图形绘制

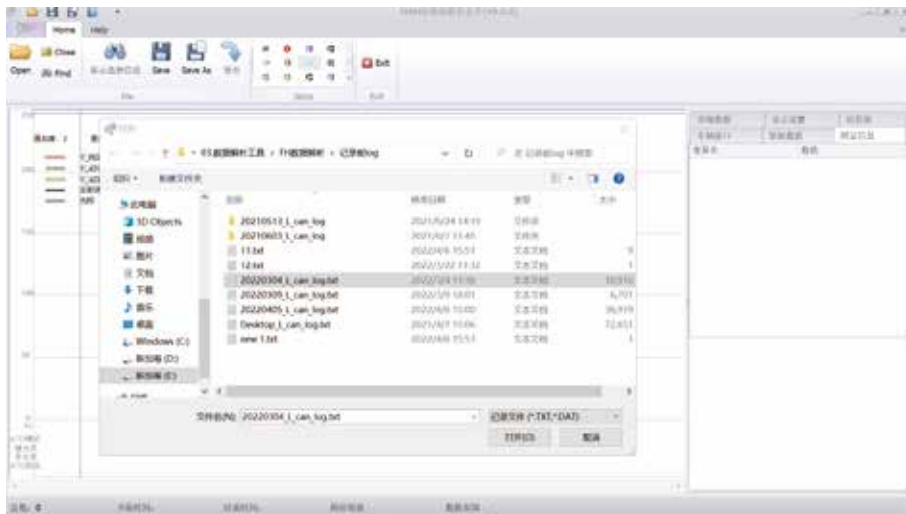


图7 数据读取
Fig.7 Data reading

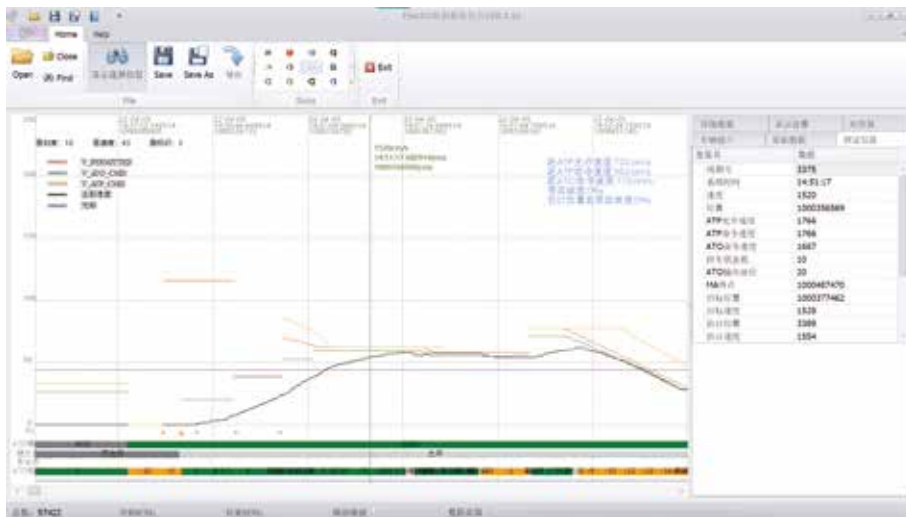


图8 数据解析结果
Fig.8 Data parsing results

区下部为 ATO 模式、硬允许、ATO 级位等状态信息。随着光标在图形绘制区移动，数据显示区的详细数据页可显示该周期所有的记录数据。“固定信息”页是对详细数据中较为重要的信息进行摘要显示，方便查看重要信息。“原始数据”页是对 ATO 与其他接口之间的通信原始数据进行数据提取，便于二次解析。“显示设置”页是对接口规范中的各个子包进行区分，选择某几个子包的复选框，则可在图形绘制区底部显示发送该子包的周期。“车辆接口”页显示 ATO 与 TCMS 的交互信息，该数据显

示功能目前预留。“应答器”页显示应答器及位置校正相关信息，目前只有 C3ATO 该页面有数据显示，其他项目不具备此页的数据显示。

经实测数据验证，解析工具预设的所有功能均可正确执行，人机界面友好，操作方便，能够满足设计需求。

5 结束语

为便于重载列车运行状态、控制策略优化分析、控制策略调整和系统维护等工作，开发了一款

基于 C 语言的适用于重载列车的车载 ATO 系统记录板数据解析工具。首先根据解析工具功能需求,将解析工具软件划分为数据读取、数据解析、数据显示和曲线绘制等 4 个功能模块。然后详细阐述了各功能模块的设计方法,其中解析工具由 Visual Studio 2019 平台 C# 语言编写,界面设计基于 WinForm 工具、采用 .NET Framework 4.6 框架和 DevExpress 20.1 插件共同完成。最后以重载列车 ATO 产品记录数据解析工具为例,给出完整的软件操作流程,并对软件功能进行了测试。测试结果验证了所开发的解析工具的功能性和可操作性。该软件人机界面友好、操作方便,为研究人员分析车辆运行状况、算法改进和系统维护提供便利。适用于重载列车的车载 ATO 系统记录板数据解析工具的设计不仅简化了数据解析和分析的过程,也为研究人员和技术人员提供了一个有力的工具,以更好地理解列车的运行情况、改进列车控制策略,并及时识别和解决潜在的系统问题,从而提高列车运行的效率和安全性。

参考文献

- [1] 薛文静, 张东海. 自学习算法在列车自动驾驶系统的应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (10): 68-72.
Xue Wenjing, Zhang Donghai. Application of Self-learning Algorithm in Automatic Train Operation System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(10): 68-72.
- [2] 宋扬. 城轨全自动运行系统发展历程及展望 [J]. 交通世界, 2020 (13): 154-156.
Song Yang. Development Course and Prospect of Urban Rail Automatic Operation System[J]. TranspoWorld, 2020(13): 154-156.
- [3] 赵小军, 黄天天, 马金鑫. 列控系统信息安全风险分析与防护技术探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (9): 46-50.
Han Lifeng. Technologies and Developing Trend of Chinese Train Control Systems[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(9):46-50.
- [4] 江明. 高速铁路自动驾驶系统安全风险分析及发展方向 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16 (4): 1-6.
Jiang Ming. Safety Risk Analysis and Development Trend of High Speed Railway Automatic Train Operation System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16(4): 1-6.
- [5] 杜凯冰, 张征方, 文宇良. 重载货运列车自动驾驶控制技术研究 [J]. 控制与信息技术, 2020 (2): 31-35.
Du Kaibing, Zhang Zhengfang, Wen Yuliang. Research on Autonomous Driving Control Technology for Heavy Haul Train[J]. Control and Information Technology, 2020(2): 31-35.
- [6] 肖家博, 丁荣军, 尚敬. 重载列车关键控制技术研究 and 展望 [J]. 机车电传动, 2019 (1): 1-8, 29.
Xiao Jiabo, Ding Rongjun, Shang Jing. Research and Prospect of Key Control Technology for Heavy-Haul Trains[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(1): 1-8, 29.
- [7] 尚敬, 刘勇, 江帆. 机车自动驾驶技术研究与应用 [J]. 机车电传动, 2023 (1): 1-12.
Shang Jing, Liu Yong, Jiang Fan. Research and Application of Locomotive Automatic Operation Technology[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(1): 1-12.
- [8] 王岩. 高速铁路 ATO 系统列控车载设备仿真测试系统设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.01.013

机车辅助驾驶系统的仿真平台研究

梁春燕

(国能新朔准池铁路(山西)有限责任公司, 山西朔州 036003)

摘要: 介绍一种基于仿真平台的机车辅助驾驶系统研究方法。机车辅助驾驶系统已成为提高行驶安全和效率的关键技术, 然而, 直接在实际机车上进行系统测试可能存在风险且成本高昂。因此, 开发适用于机车辅助驾驶系统的仿真平台是必要的。通过对现有仿真平台的综述, 分析其优点和不足, 并提出一种基于虚拟现实技术的仿真平台设计方案。该平台能够模拟各种驾驶场景和交通情况, 并允许研究人员对机车辅助驾驶系统进行准确的性能评估和功能测试。最后, 通过实验验证该仿真平台的有效性和可行性, 为机车辅助驾驶系统的研发提供有力支持。

关键词: 机车辅助驾驶系统; 仿真平台; 虚拟现实; 性能评估; 功能测试

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0069-07

Research on Simulation Platform for Locomotive Assisted Driving System

Liang Chunyan

(CHN Energy Xinshuo Zhunchi Railway (Shanxi) Co., Ltd., Shuozhou 036003, China)

Abstract: This paper introduces a research method for locomotive-assisted driving systems based on simulation platform. Locomotive-assisted driving systems have become a key technology in improving driving safety and efficiency. However, conducting system testing directly on actual locomotives may pose risks and incur high costs. Therefore, the development of a simulation platform suitable for locomotive-assisted driving systems is necessary. This paper provides an overview of existing simulation platforms, analyzes their advantages and limitations, and proposes a design scheme for a simulation platform based on virtual reality technology. This platform can simulate various driving scenarios and traffic conditions, allowing researchers to conduct accurate performance evaluations and functional tests of locomotive-assisted driving systems. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed simulation platform are validated through tests, providing strong support for the development of locomotive-assisted driving systems.

Keywords: locomotive-assisted driving system; simulation platform; virtual reality; performance evaluation; functionality testing

收稿日期: 2023-09-25; 修回日期: 2024-01-11

作者简介: 梁春燕(1992—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 交通信息, 邮箱: 20051642@ceic.com。

1 概述

重载铁路运输作为大宗物资的主要运输方式,

具备高效的运输能力、成本效益以及全天候的运营特点。过去这种运输方式主要依赖于人工驾驶，但这种方法面临着一些挑战。首先，由于重载货物列车的编组和载重量较大，这增加了驾驶员操作的复杂性。长时间的驾驶工作容易使驾驶员感到疲劳，可能导致驾驶失误。这些失误可能引发列车的纵向冲击、非正常停车、超速或者断钩等严重问题，从而对铁路运输的安全性构成威胁。为了提高运输效率、降低成本并减轻驾驶员的工作负担，需要采取相应的措施来改善这种情况，机车辅助驾驶系统在提高机车行驶安全性和驾驶效率方面具有巨大潜力。然而直接在实际机车上测试系统存在风险且成本高昂，因此建立适用于机车辅助驾驶系统的仿真平台成为关注焦点。中国铁道科学研究院集团有限公司于2019开发了基于LKJ的机车辅助驾驶系统，能够依靠LKJ中的线路信息GPRS接收到的调度信息和运行计划进行线路规划。北京交通大学针对自研的辅助驾驶系统，开发了一套半实物综合实验平台。德国联邦铁路公司开发了一套现代化的机车辅助驾驶系统仿真平台，用于测试和验证新的辅助驾驶系统的功能和安全性能。该平台能够模拟不同的运行情景，并支持对系统参数的调整和优化。日本国铁在机车辅助驾驶系统的研究上也取得了一定的成果，他们借助仿真平台，进行列车行驶的动态仿真和性能评估，以实现列车的安全运行和提高运行效率。由于在机车辅助驾驶系统方面的研究还在不断发展中，并且涉及到多个方面的技术和应用，针对仿真平台的研究也是一个较为复杂的领域。因此，根据具体的研究目标 and 需求，选取合适的国内外研究成果和仿真平台，进行进一步的研究和应用是必要的。

本论文旨在介绍一种适用于机车的辅助驾驶系统仿真平台，以实现了对机车辅助驾驶系统的准确评估和测试。本论文首先对仿真平台的功能需求进行分析，基于具体的功能需求，提出仿真平台设计方案。同时，该平台还集成了机车辅助驾驶系统的算法和控制逻辑，可以进行性能评估和功能测试。

2 仿真平台的功能需求

铁路机车辅助驾驶系统仿真平台的设计功能需求包括模拟铁路环境、生成列车运行情况、模拟机车行为、模拟信号系统、模拟传感器输出、集成机车辅助驾驶系统算法、交互式界面、性能评估和功能测试、数据记录和分析、场景编辑和模型定制能力。

1) 模拟铁路环境

能够模拟铁路线路和车站环境，包括不同类型的铁路线路（高速铁路、普速铁路等）和车站设施。

2) 生成列车运行情况

能够生成列车的运行情况，包括列车的行驶速度、加速度、制动性能和列车间的距离等。

3) 模拟机车行为

能够准确模拟机车的行驶行为，包括车辆的起步、加速、减速、制动等操作。

4) 模拟信号系统

能够模拟铁路信号系统，包括信号机、信号灯、标志和信号逻辑，以及模拟信号系统对机车行驶的影响。

5) 集成机车辅助驾驶系统算法

能够将机车辅助驾驶系统的算法集成到仿真平台中，使其能够与仿真环境进行交互和测试。

6) 交互式界面

提供友好的交互式界面，使用户能够与仿真平台进行交互，如设置参数、调整算法、观察仿真结果等。

7) 性能评估和功能测试

能够对机车辅助驾驶系统进行性能评估和功能测试，包括评估平台能够支持与辅助驾驶系统之间每200 ms进行一次通信，辅助驾驶系统具备实时处理能力、响应时间和稳定性等指标，以及验证系统功能的有效性和可靠性。

8) 数据记录和分析

具备数据记录和分析功能，能够记录仿真过程中的关键数据，如机车行驶数据、传感器数据等，并支持对这些数据进行分析 and 可视化展示。

9) 场景编辑和模型定制

提供场景编辑和模型定制的功能，使用户能够根据需要创建特定的仿真场景和定制机车模型。

3 仿真平台设计方法

1) 系统架构设计

确定仿真平台的整体架构，包括软件和硬件组成部分。采用分布式架构，将仿真模型和用户界面分离，以提高系统的可扩展性和灵活性。

2) 用户界面设计

设计易于使用的用户界面，使驾驶员能够直观地理解列车运行情况，并进行操作和控制。界面应具备实时显示和交互功能，以提供与真实运行情况相似的使用体验。

3) 辅助驾驶功能设计

根据实际需求，确定需要实现的辅助驾驶功能，如自动制动、自动驾驶及辅助驾驶等。设计相应的算法和控制逻辑，实现这些功能并与仿真模型进行集成。

4) 数据记录和分析

设计数据记录和分析功能，可以记录仿真过程中的关键数据，如列车速度、位置、控制输入等。这些数据可以用于系统性能评估、故障分析和算法改进。

5) 接口和集成

设计与外部系统的接口，如列车信号系统、列车控制系统等。确保仿真平台与现实世界的数据和控制信息的交互能够正常进行。

6) 软件开发和调试

根据设计方案，进行仿真平台的软件开发和调试工作。实施软件开发过程中的质量控制措施，如单元测试、集成测试和系统测试，确保软件的正确性和稳定性。

4 工作原理

整个工作原理依靠数据采集、模型构建和仿真模拟的流程来模拟机车辅助驾驶系统的运行。通过仿真平台的工作，可以评估系统在各种情况下的性能、安全性和可靠性，为算法的开发和系统的优化提供有价值的参考和支持。

1) 列车动力学模型的工作原理

列车动力学模型基于物理原理和数学模型来描

述和模拟列车在运行过程中的动力学行为。该模型考虑列车的质量、惯性、摩擦力、制动力和牵引力等因素，并通过计算模拟列车的加速度、速度和位置等参数。其工作通常包括以下步骤：

输入参数：输入列车质量、牵引力、阻力、曲线半径、坡度、摩擦系数和空气阻力等参数。

设定初始化状态：设定初始条件，如初始速度、位置等。

计算牵引力和阻力：根据输入参数和列车状态，计算牵引力和阻力，其中牵引力受牵引系统和列车功率的影响，阻力受空气阻力、摩擦阻力和坡度影响。

计算加速度：根据牵引力和阻力的平衡，计算列车的加速度。

更新速度和位置：根据计算得到的加速度，更新列车的速度和位置。

循环迭代：重复进行加速度计算和状态更新，以模拟列车在时间上的运行过程。

2) 轨道系统模型的工作原理

轨道系统模型用于模拟列车在轨道上的运行状况，包括轨道几何、曲线半径、坡度、道岔等参数。该模型考虑列车与轨道之间的交互作用，包括车轮与轨道之间的接触力、轮轨摩擦等因素。其工作一般包括以下步骤：

将轨道参数写入脚本：包括轨道几何、曲线半径、坡度、道岔等参数。

列车与轨道交互：根据列车位置和轨道参数，计算列车与轨道之间的交互作用，包括车轮与轨道之间的接触力、摩擦力等。

轮轨接触模型：使用适当的轮轨接触模型，考虑动力学和力学因素，计算列车受到的轮轨接触力和摩擦力。

速度、加速度和位置更新：根据计算得到的轮轨接触力和摩擦力，更新列车的速度、加速度和位置。

循环迭代：重复进行轮轨交互计算和状态更新，以模拟列车在时间上的轨道运行过程。

3) 信号系统模型的工作原理

信号系统模型用于模拟列车在运行过程中的信号控制和指示。该模型考虑不同类型的信号灯、信号机、信号电路和信号命令等元素。其工作一般包括以下步骤：

输入信号参数：包括信号灯状态、信号机位置、信号命令等参数。

信号状态监测：根据输入参数，监测信号状态，并确定列车应该采取的行动。

信号控制和指示：根据信号状态和运行需求，生成相应的信号控制和指示，如允许前进、减速、停车等。

列车响应：列车根据接收到的信号控制和指示，采取相应的行动，如加速、减速、停车等。

循环迭代：重复进行信号状态监测、信号控制和列车响应，以模拟列车在运行过程中的信号控制

和指示过程。

5 试验验证

根据列车辅助驾驶设备的系统需求规范的条目，从用户使用及业务场景的角度出发设计测试案例。例如验证机车辅助驾驶系统的功能、性能和安全性能，评估其对驾驶员的辅助效果，检验系统是否满足设计要求等。列车辅助驾驶设备目标机测试环境如图1所示。

测试根据测试仿真软件进行黑盒测试，共设计29个测试案例，执行1轮测试，本次测试的结论为：测试通过。

列车辅助驾驶仿真模型司机操控界面如图2所示。此界面可设置列车起始位置，并操控方向手柄、牵引制动手柄、大闸及小闸位置等。

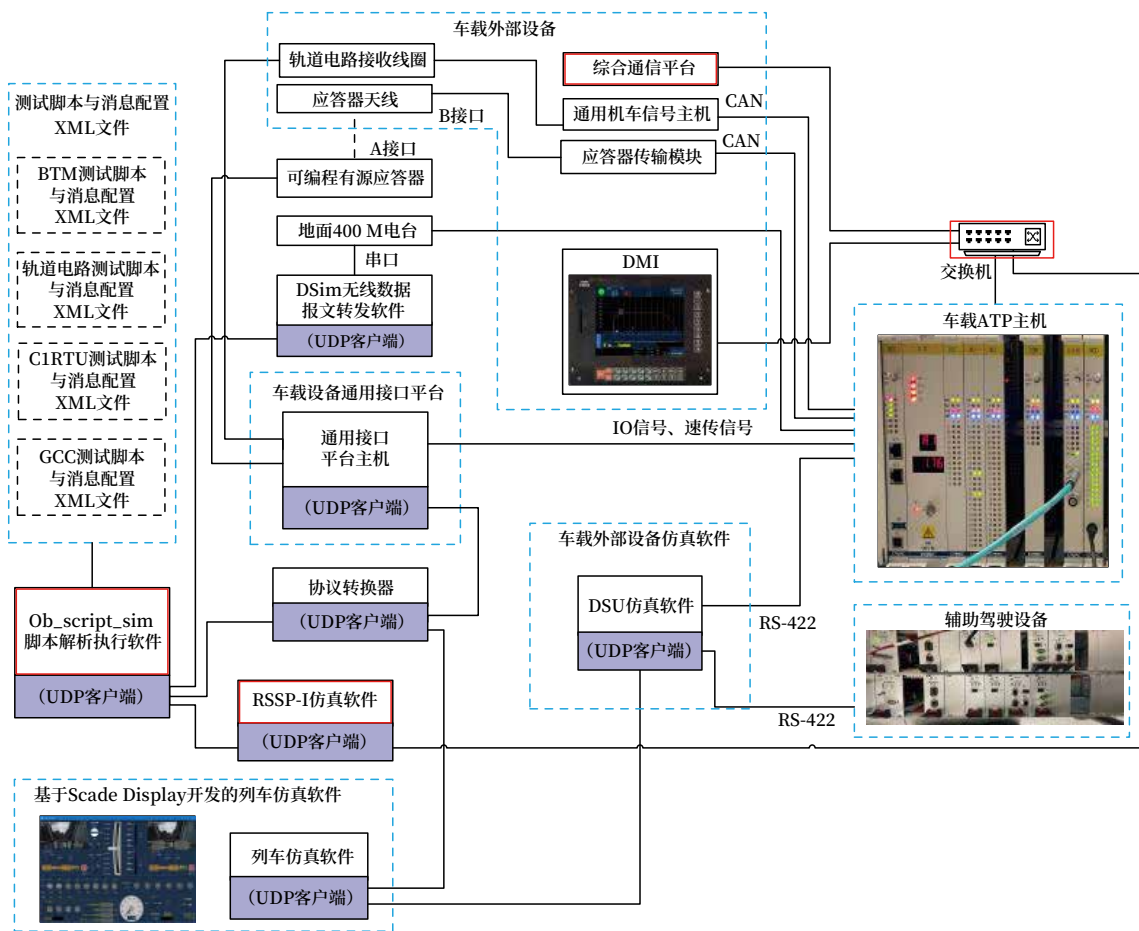


图1 列车辅助驾驶设备目标机测试环境示意

Fig.1 Test environment diagram of target device for locomotive-assisted driving equipment



图2 司机操控界面
Fig.2 Driver control interface

司机根据当前列车基本信息填入司机号、车种标识、车次号码、列车类型、列车总重、列车辆数、计长等信息，此信息将发送至辅助驾驶系统，辅助驾驶设备根据列车信息对系统参数调整和优化。列车基本信息输入界面如图3所示。



图3 列车基本信息输入界面
Fig.3 Basic train information input interface

当列车进入辅助驾驶模式后，系统将读入轨道参数：包括轨道几何、曲线半径、坡度、道岔等参数，用于生成限速曲线及传入列车辅助驾驶设备控制列车牵引制动大小。限速曲线显示界面如图4所示。

司机可选择自动驾驶或辅助驾驶模式。若司机选择自动驾驶模式，辅助驾驶设备将根据线路信息及列车基本信息计算级位及大小闸施加大小。其中线路信息包括线路坡度、弧度、停车点、限速等，列车基本信息包括司机号、车种标识、车次号码、



图4 限速曲线显示界面
Fig.4 Speed restriction curve display interface

列车类型、列车总重、列车辆数和计长等。辅助驾驶设备根据信号机允许信号及前方限速信息等控制列车驾驶，列车仿真模型将列车辅助驾驶设备施加级位及大小闸转换为列车加速度，控制列车加速及减速。辅助驾驶设备控制列车自动起车及加速过程如图5所示。

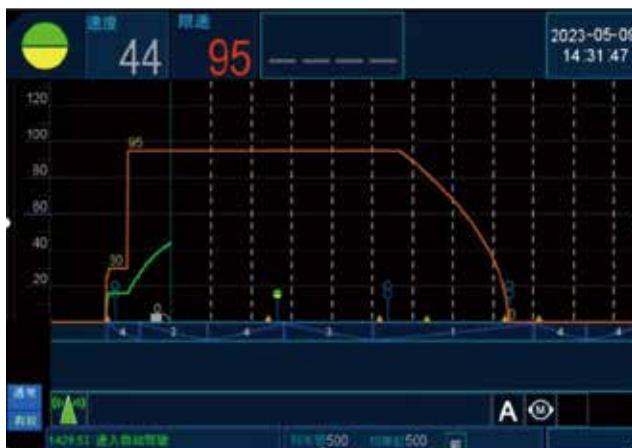


图5 自动起车及加速过程显示界面
Fig.5 Automatic start and acceleration process display interface

当列车速度接近限速曲线，辅助驾驶设备根据列车限速及停车点位置等信息，控制列车匀速运行。辅助驾驶设备控制列车巡航过程如图6所示。

辅助驾驶设备根据列车限速及停车点位置等信息，计算列车电制动及空气制动施加时机及施加大小，列车将辅助驾驶设备施加级位及大小闸转换为列车加速度，最终控制列车在停车点前减速停车。辅助驾驶设备控制列车自动减速及停车过程如图7所示。

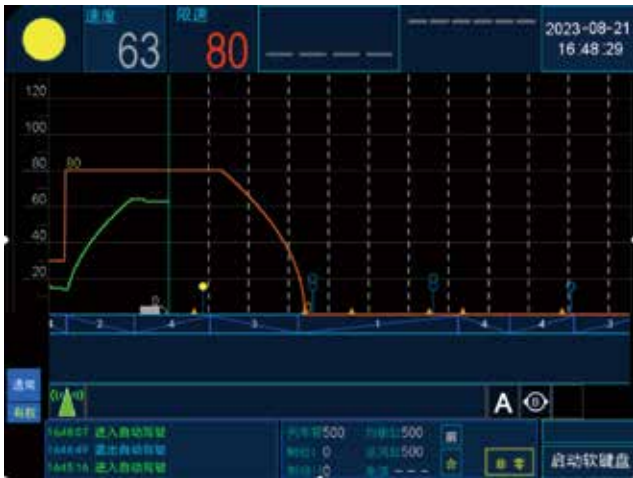


图6 自动巡航过程显示界面
Fig.6 Automatic cruise process display interface

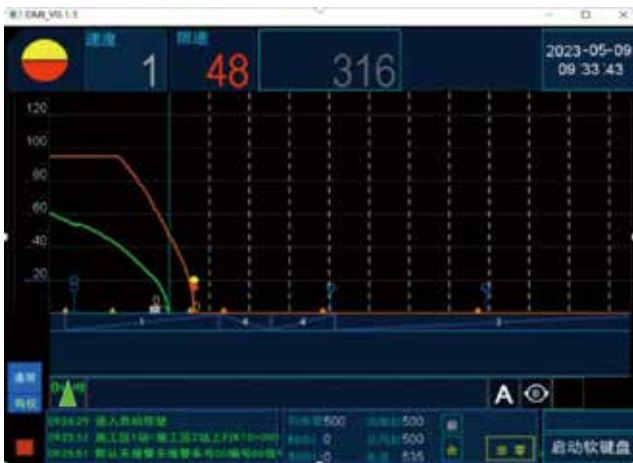


图7 自动减速及停车过程显示界面
Fig.7 Automatic deceleration and stopping process display interface

当司机选择辅助驾驶模式后，司机将手动控制列车牵引及制动，列车辅助驾驶设备根据列车基本信息、线路条件及列车当前速度位置等计算列车辅助驾驶曲线，同时将给出列车在当前周期推荐级位及大小闸位置，司机可参考辅助驾驶推荐信息控制列车运行。手动控制列车起车后辅助驾驶曲线显示界面如图 8 所示，其中绿色曲线为列车实际运行曲线，蓝色曲线为辅助驾驶曲线。

手动控制加速至 82 km/h 后，辅助驾驶曲线显示界面如图 9 所示。

辅助驾驶系统串口时间数据打印如图 10 所示。辅助驾驶系统向平台发送数据，平台收到数据后，辅助驾驶经过 200 ms 会再次向平台继续进行数据



图8 辅助驾驶曲线显示界面
Fig.8 Assisted driving curve display interface



图9 加速至82 km/h后辅助驾驶曲线显示界面
Fig.9 Assisted driving curve display interface after acceleration to 82 km/h

发送。根据记录可以看出辅助驾驶与平台交互时间稳定为 200 ms 一次，证明平台能够支持与辅助驾驶系统之间每 200 ms 进行一次通信。辅助驾驶系统具备实时处理能力，并能持续稳定进行数据发送。

辅助驾驶设备在运行过程中会进行数据记录，记录仿真过程中的关键数据，如列车速度、位置、控制输入等。这些数据可以用于系统性能评估、故障分析和算法改进。

通过实验验证，本论文所提出的基于虚拟现实技术的仿真平台在准确性能评估和功能测试方面表现出色。利用该平台，研究人员可以根据实际需求设计和优化机车辅助驾驶系统的功能和算法。同时，该平台还可以帮助培训机车司机，提高其对机车辅助驾驶系统的熟悉程度，从而提高驾驶安全性。

```

Line 447: 18:30:38:229---CORE_TASK_CY_B 3580,7---
Line 465: 18:30:38:438---CORE_TASK_CY_B 3780,8---
Line 484: 18:30:38:628---CORE_TASK_CY_B 3980,9---
Line 503: 18:30:38:833---CORE_TASK_CY_B 4180,10---
Line 521: 18:30:39:035---CORE_TASK_CY_B 4380,11---
Line 540: 18:30:39:228---CORE_TASK_CY_B 4580,12---
Line 559: 18:30:39:428---CORE_TASK_CY_B 4780,13---
Line 577: 18:30:39:637---CORE_TASK_CY_B 4980,14---
Line 596: 18:30:39:832---CORE_TASK_CY_B 5180,15---
Line 615: 18:30:40:028---CORE_TASK_CY_B 5380,16---
Line 633: 18:30:40:235---CORE_TASK_CY_B 5580,17---
Line 652: 18:30:40:428---CORE_TASK_CY_B 5780,18---
Line 671: 18:30:40:628---CORE_TASK_CY_B 5980,19---
Line 689: 18:30:40:835---CORE_TASK_CY_B 6180,20---
Line 708: 18:30:41:028---CORE_TASK_CY_B 6380,21---
Line 727: 18:30:41:228---CORE_TASK_CY_B 6580,22---
Line 745: 18:30:41:435---CORE_TASK_CY_B 6780,23---
Line 764: 18:30:41:628---CORE_TASK_CY_B 6980,24---
Line 783: 18:30:41:831---CORE_TASK_CY_B 7180,25---
Line 802: 18:30:42:035---CORE_TASK_CY_B 7380,26---
Line 821: 18:30:42:229---CORE_TASK_CY_B 7580,27---
Line 840: 18:30:42:428---CORE_TASK_CY_B 7780,28---
Line 858: 18:30:42:636---CORE_TASK_CY_B 7980,29---
Line 877: 18:30:42:832---CORE_TASK_CY_B 8180,30---
Line 896: 18:30:43:029---CORE_TASK_CY_B 8380,31---
Line 916: 18:30:43:238---CORE_TASK_CY_B 8580,32---
Line 935: 18:30:43:429---CORE_TASK_CY_B 8780,33---
Line 954: 18:30:43:628---CORE_TASK_CY_B 8980,34---
Line 972: 18:30:43:836---CORE_TASK_CY_B 9180,35---
Line 994: 18:30:44:029---CORE_TASK_CY_B 9380,36---
Line 1013: 18:30:44:229---CORE_TASK_CY_B 9580,37---
Line 1031: 18:30:44:435---CORE_TASK_CY_B 9780,38---
Line 1050: 18:30:44:629---CORE_TASK_CY_B 9980,39---
Line 1069: 18:30:44:832---CORE_TASK_CY_B 10180,40---
Line 1148: 18:30:45:071---CORE_TASK_CY_B 10380,41---

```

响应时间

每200 ms 相应一次

图10 串口数据打印
Fig.10 Serial port data printing

6 结论

本文通过设计基于虚拟现实技术的仿真平台,实现对适用于重载列车的机车辅助驾驶系统的准确评估和测试,为适用于重载列车的机车辅助驾驶系统的研究和开发提供了强有力的支持,该平台能够准确模拟各种驾驶场景和交通情况,并提供了平台设计的详细方法和实验验证的结果。未来的研究可以进一步优化该仿真平台的性能和功能。重载列车辅助驾驶系统仿真平台的设计有助于在安全、经济的环境中开发、验证和优化系统,提高系统的性能、可靠性和应急响应能力。同时,为相关人员提供培训和技能提升的机会,确保他们能够熟练操作和维护系统。

参考文献

- [1] 李宏伟, 赵杨坤. 350 km/h 复兴号动车组制动闸片在服役过程中的磨损行为及其使用寿命预测 [J]. 铁道机车车辆, 2021, 41 (2): 22-27.
Li Hongwei, Zhao Yangkun. Wear Performance and Life Prediction of Brake Pad in Service Process of 350 km/h High-Speed Train[J]. Railway

Locomotive & Car, 2021, 41(2): 22-27.

- [2] 黄传东, 王杰, 宋岩峰. 不同控车模式对闸片磨损影响的分析 [J]. 铁道机车车辆, 2018, 38 (2): 26-28.

Huang Chuandong, Wang Jie, Song Yanfeng. Analysis on the Influence to the Wear of Brake Pads under Different Vehicle Control Modes[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(2): 26-28.

- [3] 吴希荣. 高速列车电空制动分配优化研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016.

- [4] 程永谊. 城市轨道交通制动模式对车轮踏面非正常磨损影响的研究 [D]. 北京: 铁道部科学研究院, 2007.

- [5] 王超. 地铁车辆制动控制与纵向冲击 [J]. 洛阳理工学院学报 (自然科学版), 2015, 25 (2): 56-58.

Wang Chao. Metro Vehicle Braking Control and Longitudinal Impact[J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 25(2): 56-58.

- [6] 曲健伟, 冯晓云, 王青元, 等. 考虑冲击限制和响应下列车参考速度仿真模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51 (9): 125-129.

Qu Jianwei, Feng Xiaoyun, Wang Qingyuan, et al. Simulation Model of Train Reference Speed Considering Jerk Limitation and Response Process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(9): 125-129.

- [7] 冯江华, 黎向宇, 胡云卿, 等. 地铁列车舒适度最优的自动驾驶过程建模及求解 [J]. 控制与信息技术, 2018 (6): 32-37.

Feng Jianghua, Li Xiangyu, Hu Yunqing, et al. Automatic Driving Process Modeling and Solving of the Riding Comfort Optimal Problem for Metro Trains[J]. Control and Information Technology, 2018(6): 32-37.

- [8] 马永靖, 杨广楠, 郑魏婧, 等. 动车组闸片寿命预测研究 [J]. 铁道机车车辆, 2022, 42 (1): 60-64.

(下转 91页)

一种针对全自动运行系统的测试用例生成方法

梁君海¹, 李春峰¹, 万里¹, 杨毅峰², 薛一鸣²

(1. 中车成都机车车辆有限公司西南研发中心, 成都 610511;

2. 西南交通大学信息科学与技术学院, 成都 610097)

摘要: 针对全自动运行系统测试指定路径覆盖的测试需求, 基于时间自动机建模理论提出满足指定路径覆盖和边覆盖的全自动运行系统测试用例自动生成算法。研究时间自动机建模理论, 建立全自动运行系统的时间自动机模型; 为表征全自动运行系统指定路径覆盖的测试需求, 提出基于时间自动机模型的标记变量建模方法; 结合 Yggdrasil 的测试用例生成机制, 提出全自动运行系统测试用例生成方法, 同时满足全自动运行系统测试的指定路径覆盖和边覆盖准则; 以全自动运行系统的模式转换功能为例, 建立时间自动机模型并生成测试用例。结果表明, 测试用例 100% 覆盖测试人员指定的测试需求和时间自动机模型所有的边, 能够满足全自动运行系统指定路径覆盖的测试要求。

关键词: 全自动运行系统; 指定路径覆盖; 时间自动机; Yggdrasil; 测试用例

中图分类号: U231+.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0076-07

Test Case Generation Method for Fully Automatic Operation System

Liang Junhai¹, Li Chunfeng¹, Wan Li¹, Yang Yifeng², Xue Yiming²

(1. Southwest R&D Center, CRRC Chengdu Locomotive&Rolling Stock Co., Ltd., Chengdu 610511, China)

(2. The School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610097, China)

Abstract: Aiming at the test requirements of specified path coverage of fully automatic operation (FAO) system test, this paper proposes an algorithm for automatic generation of test cases for FAO based on the modeling theory of timed automata to meet the specified path coverage and edge coverage. Firstly, the modeling theory of timed automata is studied, and the FAO timed automata model is established. Then, a modeling method to add marker variables to the d automata model is proposed to characterize the FAO test requirements of specified path coverage. Thirdly, combined with the test case generation mechanism of Yggdrasil, a test case generation method of FAO is proposed, which satisfies both the specified path

收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2023-12-21

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题项目 (N2018G062, K2018G011); 四川省科技计划资助项目 (2021YJ0070)

第一作者: 梁君海 (1976—), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 全自动运行系统测试, 邮箱: liangjunhai@crrecg.cc.

coverage and edge coverage criteria of FAO. Finally, taking the mode conversion function of FAO as an example, the timed automata model is established and test cases are generated. The results show that the test cases cover 100 % of the test requirements specified by the tester and all the edges of the timed automata model, which can meet the test requirements of the specified path coverage of FAO.

Keywords: fully automatic operation system; specify path coverage; timed automata; yggdrasil; test case

1 概述

随着社会经济的高速发展,轨道交通正向着智能和集约的方向迅速发展^[1],全自动运行系统(Fully Automatic Operation, FAO)已成为轨道交通领域的热点研究内容。全自动运行系统基于计算机、通信和系统集成等技术,对相关设备自动进行控制,实现列车运行全过程的自动化^[2]。全自动运行系统是典型的安全关键系统(Safety-Critical System),系统逻辑复杂,规模庞大,一旦失效,影响巨大。因此,在投入运营前对全自动运行系统进行全面系统的测试具有重要意义。

文献[3]提出一种城市轨道交通全自动驾驶车辆仿真测试平台方案,以测试验证车辆在全自动运营场景和人工驾驶运营场景下的正常和故障工况。文献[4]以上海轨道交通10号线为例,对列车休眠和唤醒场景进行了深入分析。文献[5]对城市轨道交通全自动运行系统进行介绍,以典型运营场景为例对全自动运营场景进行梳理,分析关键装备的功能需求以及各设备专业之间的接口关系。文献[6]结合国际标准研究全自动运行系统典型的系统功能与安全需求,对运营场景进行分析,对国内自主研发全自动运行系统提出参考建议。文献[7]分析了CBTC-RF信号系统驾驶模式及模式间转换应遵循的原则。

目前,全自动运行系统的研究主要集中在系统方案和仿真分析,对测试用例生成方法的研究较少。时间自动机具有严格的数学定义,在轨道交通测试建模领域取得了广泛的应用^[8-10]。本文结合全自动运行系统的特点,针对全自动运行系统测试用例生成过程中存在的指定路径覆盖的需求,基于时间自

动机建模理论,提出全自动运行系统的测试用例自动生成方法,对全自动运行系统的安全性保障具有一定的意义。

2 时间自动机及UPPAAL介绍

时间自动机(Timed Automata, TA)由Stanford大学的Rajeev Alur和David Dill于20世纪90年代提出。时间自动机对有限自动机进行了扩展,使用有限个时钟变量表示有时间约束的状态转换图,进而描述系统的实时行为^[11-12]。

定义1(时间自动机) TA定义为一个六元组 $\langle S, S_0, \Sigma, X, I, E \rangle$,其中:

S 是有穷位置的集合;

S_0 是初始事件的集合;

Σ 是有穷事件的集合;

X 是有穷时钟的集合;

I 是每个位置的映射,对 $s \in S$ 指定 $\Phi(x)$ 中一个时间约束 δ ;

$E \subseteq S \times \Sigma \times \Phi(x) \times 2^X \times S$ 表示位置转移的集合。

$\langle s, a, \varphi, \lambda, s' \rangle$ 表示输入动作 a 时,从位置 s 到 s' 的转移; φ 是 X 上的一个时钟约束,在转移发生时被满足; $\lambda \in X$ 是在该转移发生时复位的时钟集合。

UPPAAL是由瑞典Uppsala大学和丹麦Aalborg大学联合开发的针对TA理论的建模、验证和测试用例生成工具。UPPAAL拓展了TA理论,扩展出变量和通道等元素,UPPAAL提供Yggdrasil从TA模型自动生成测试用例^[13],包括3个阶段:

1) Query File, Yggdrasil加载验证Query文件,将可达性分析的路径转换为测试用例;

2) Depth Search,采用随机深度优先搜索算

法, 将搜索所得路径自动转换为测试用例;

3) Single Step, 针对阶段 1) 和阶段 2) 中未覆盖的边进行可达性分析生成测试用例, 直到覆盖模型中所有的边。

3 全自动运行系统测试用例生成算法

3.1 全自动运行系统测试用例生成问题

全自动运行系统的测试用例主要由测试人员依据经验人工编制, 通常由测试人员根据积累的测试关键项, 指定测试过程中的某几个步骤, 或指定某几个环节之间需要满足的条件, 然后人工编制完整的测试用例。全自动运行系统交互复杂, 测试步骤较多, 人工编制测试用例存在效率低、容易遗漏测试需求等问题^[14]。

定义 2 (指定路径覆盖) 测试需求包含一个测试路径集合 P , 其中 P 以参数的形式给出。

如图 1 所示, TA_{ex} 模型包括 6 个位置, 根据测试经验, 测试用例需要测试 $S4 \rightarrow S5 \rightarrow S6$ 指定的测试路径, 即指定测试路径覆盖: $P = \{(S4,S5),(S5,S6)\}$ 。

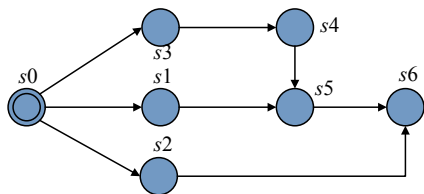


图1 TAex模型示例
Fig.1 TAex model example

3.2 全自动运行系统测试用例生成算法

Yggdrasil 生成测试用例时不考虑指定路径覆盖。如图 1 所示的 TA 模型, Yggdrasil 生成如下 4 条测试用例, 未覆盖指定的测试需求 P , 不能满足全自动运行系统指定路径覆盖的要求。

- 1) $S0 \rightarrow S3 \rightarrow S4$;
- 2) $S0 \rightarrow S2 \rightarrow S6$;
- 3) $S0 \rightarrow S3 \rightarrow S4 \rightarrow S5$;
- 4) $S0 \rightarrow S1 \rightarrow S5 \rightarrow S6$ 。

基于以上问题, 提出全自动运行系统测试用例生成方法。首先, 在全自动运行系统功能模型的基

础上增加测试标记变量, 达到在模型的边或节点位置上描述测试人员指定测试需求的目的, 即在全自动运行系统的功能模型中表征测试人员指定的测试路径需求, 形成全自动运行系统的测试模型。测试标记变量仅用于反应测试人员指定的测试需求, 不改变全自动运行系统模型的功能逻辑; 然后, 编制测试人员指定的测试需求的 Query 文件, 以 Yggdrasil 的 Query File 测试用例生成方法对验证文件生成测试用例, 满足测试人员的指定路径覆盖; 最后, 针对尚未覆盖的边, 利用 UPPAAL 的 Depth Search 和 Single Step 方法生成测试用例, 实现 100% 边覆盖, 如图 2 所示。

设 U 表示全自动运行系统测试人员指定的路径覆盖需求集, t 表示算法当前迭代生成的测试用例, R 表示算法生成的测试用例集。全自动运行系统测试用例生成算法如图 3 所示。算法开始时, R 是一个空集。算法每次迭代生成一条测试用例, 将该测试用例添加到 R 中, 直到算法结束。

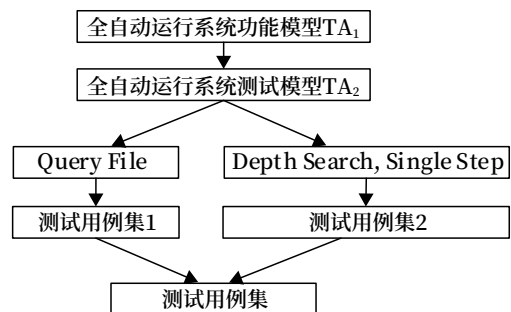


图2 测试用例生成流程
Fig.2 Test case generation process

以图 1 所示的模型为例, 指定路径覆盖为 $(S4,S5),(S5,S6)$ 。对边 $(S4,S5)$ 和 $(S5,S6)$ 分别增加测试标记的 int 变量 $b45$ 和 $b56$ 。满足指定路径覆盖的验证性质为: $q:: = E \langle \rangle b45 \text{ and } b56$ 。

采用算法 1, Yggdrasil 生成 3 条测试用例, 100% 实现边覆盖, 且测试用例 3 覆盖指定路径覆盖的需求。

- 1) $S0 \rightarrow S1 \rightarrow S5$;
- 2) $S0 \rightarrow S2 \rightarrow S6$;
- 3) $S0 \rightarrow S3 \rightarrow S4 \rightarrow S5 \rightarrow S6$ 。

全自动运行系统测试用例生成算法
 输入：指定路径覆盖需求集 U 、TA模型 TA_1
 输出：测试用例集 R
 $R = \emptyset$
 在 TA_1 中增加测试变量构造测试模型 TA_2
 DO
 选择 $u \in U$
 生成 u 的验证文件 q
 使用UPPAAL query file方法生成 q 的测试用例 t_1
 $R = R \cup t_1$ /*增加测试用例到测试用例集*/
 $U = U/u$ /*从 U 中删除已分析的指定路径覆盖需求 u^* */
 WHILE $U \neq \emptyset$
 采用UPPAAL depth search方法生成测试用例 t_2
 $R = R \cup t_2$ /*增加测试用例到测试用例集*/
 采用UPPAAL single step方法生成测试用例 t_3
 $R = R \cup t_3$ /*增加测试用例到测试用例集*/

图3 测试用例生成算法
 Fig.3 Test case generation algorithm

4 全自动运行系统模式转换

以全自动运行系统模式转换功能为例，介绍全自动运行系统的测试用例生成方法。

全自动运行系统模式转换功能包括 TIAS、司机、VOBC 与列车 4 个参与者，功能流程如图 4 所示。全自动运行系统投入运营时，TIAS 将远程唤醒指令发送到 VOBC，VOBC 与车辆进行自检，唤醒列车进入 FAM 模式待命。列车以 FAM 模式运行过程中出现车辆与 VOBC 通信故障等情况时，系统申请进入 CAM 模式，经 TIAS 人工授权后，系统驾驶模式由 FAM 模式转换为 CAM 模式。FAM 模式运行过程中，若列车遇到特殊情况需要降级时，列车停稳后，激活相应端的司机室钥匙，车载 VOBC 退出 FAM 模式，进入 CM 模式，转入人工驾驶^[15]。

5 模式转换UPPAAL建模

根据全自动运行系统模式转换流程建立全自动运行系统的 TA 模型，并采用全自动运行系统测试用例生成算法生成测试用例。

5.1 模式转换时间自动机模型

全自动运行系统模式转换流程包括 TIAS、列车、司机和 VOBC 4 个子系统，模式转换的 TA 模型 $MODE_{TA}$ 为各个子系统的 TA 模型的积：
 $MODE_{TA} = TIAS_{TA} || VOBC_{TA} || DRIVER_{TA} || TRAIN_{TA}$

其中， $TIAS_{TA}$ 主要完成 TIAS 信息的发送和接

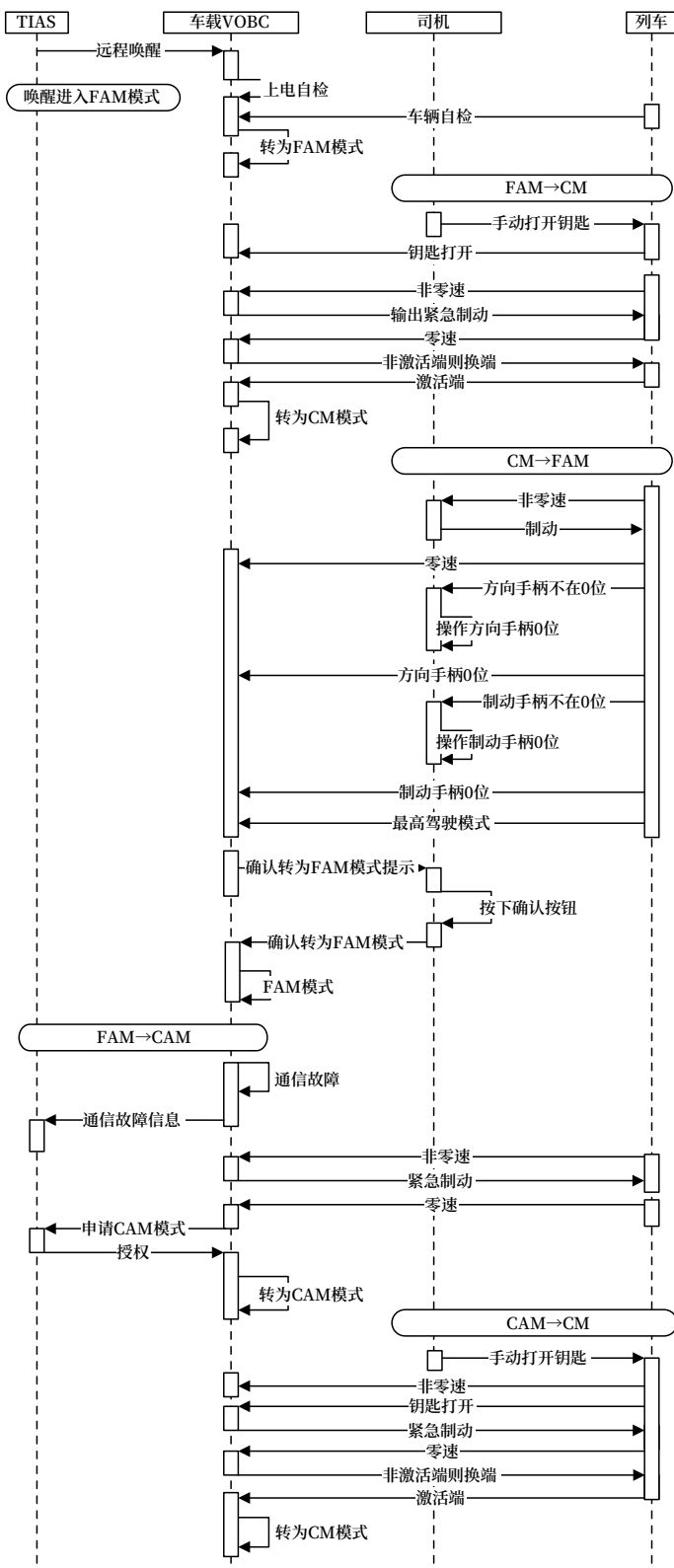


图4 全自动运行系统模式转换流程序列图
 Fig.4 FAO mode conversion process sequence diagram

受、列车动作授权的处理等功能；VOBC_{TA} 主要执行列车在模式转换流程中的动作，包括列车上电自

检、升级条件的检查、列车运行中故障信息的发送以及模式转换；DRIVER_{TA} 主要模拟司机在模式转换流程中手动操作钥匙开关和模式转换确认；TRAIN_{TA} 主要输出列车速度信息和非激活端换端等操作。

MODE_{TA} 如图 5 所示，共含 58 个位置、90 个迁移、27 个通道和 13 个变量，主要变量名称及其含义如表 1 所示。

5.2 测试用例生成

以 CM 模式转换到 FAM 模式为例，介绍测试用例生成过程。根据专家经验，模式转换具有如表 2 所示的测试需求。

根据全自动运行系统测试用例生成算法，为表征测试场景，MODE_{TA} 模型中包含了测试标记的 int 变量，主要变量如表 3 所示。

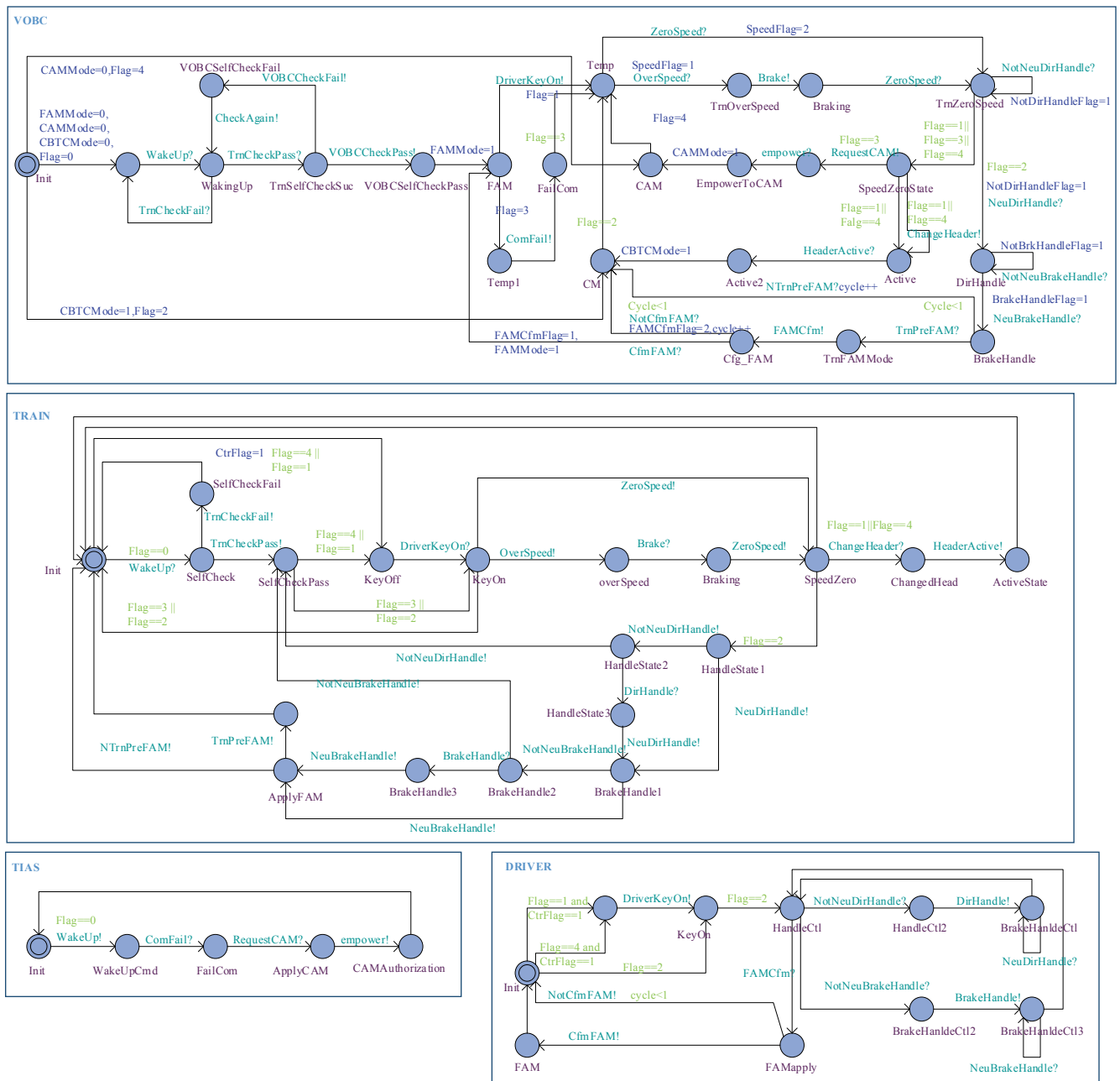


图5 全自动运行系统模式转换TA模型MODE_{TA}
Fig.5 FAO mode conversion TA model MODE_{TA}

表1 MODE_{TA}位置及变量含义Tab.1 MODE_{TA} location and variable meaning

位置	描述
WakeUpCmd	唤醒列车指令
SelfCheck	上电自检
FAM	FAM 模式运行
TrnOverSpeed	列车超速运行
Braking	输出制动
TrnZeroSpeed	列车零速状态
ChangeHead	列车换端
CM	CM 模式运行
EmpowerToCAM	授权转为 CAM 模式
CfmFAM	司机确认 FAM 模式
DirHandle	方向手柄位置

表2 CM模式转换FAM模式的测试场景

Tab.2 Test scenario of conversion of CM to FAM mode

序号	测试场景
1	速度不为 0, 方向手柄和制动手柄均不在零位
2	速度为 0, 方向手柄和制动手柄均在零位, 司机确认模式转换
3	方向手柄在零位, 制动手柄不在零位
4	制动手柄在零位, 方向手柄不在零位

表4 CM转FAM模式测试需求及验证性质

Tab.4 Test requirements and verification properties of conversion of CM to FAM mode

序号	测试需求	验证语句	指定路径覆盖
1	测试需求 1	$E \langle \rangle ((Flag == 2) \text{ and } (CMMode == 1 \text{ and } FAMMode == 1) \text{ and } (SpeedFlag == 1) \text{ and } (NotDirHandleFlag == 1) \text{ and } (NotBrkHandleFlag == 1))$	(Temp, TrnOverSpeed)、(TrnZeroSpeed, DirHandle)、(DirHandle, DirHandle)
2	测试需求 2	$E \langle \rangle ((Flag == 2) \text{ and } (CMMode == 1 \text{ and } FAMMode == 1) \text{ and } (SpeedFlag == 1) \text{ and } (DirHandleFlag == 1) \text{ and } (BrakeHandleFlag == 1) \text{ and } (FAMCfmFlag == 1))$	(Temp, TrnOverSpeed)、(TrnZeroSpeed, DirHandle)、(CfgFAM, FAM)
3	测试需求 3	$E \langle \rangle ((Flag == 2) \text{ and } (CMMode == 1 \text{ and } FAMMode == 1) \text{ and } (DirHandleFlag == 1) \text{ and } (NotBrkHandleFlag == 1))$	(TrnZeroSpeed, DirHandle)、(DirHandle, DirHandle)
4	测试需求 4	$E \langle \rangle ((Flag == 2) \text{ and } (CMMode == 1 \text{ and } FAMMode == 1) \text{ and } (NotDirHandleFlag == 1) \text{ and } (BrakeHandleFlag == 1))$	((TrnZeroSpeed, TrnZeroSpeed))、(DirHandle, DirHandle)

利用 UPPAAL 的 Query 文件生成测试用例, 针对表 2 的 4 个测试需求, 生成 4 条测试用例。以测试用例 1 为例, 其覆盖测试场景 1, 测试过程如下: 测试初始为 CM 模式, 列车速度不为 0, 司机制动将列车速度降为 0 后, 操作方向手柄至零位, 操作制动手柄至零位, VOBC 检测列车最高驾驶模式指令为全自动驾驶模式, 提示司机确认模式转换, 但司机未确认该信息。同时, 列车超速, 司机将列车速度制动为 0 后, 确认模式转换, 列车转换至 FAM 模式。

利用 Yggdrasil 的 Depth Search 和 Single Step 方法对模型中未覆盖的边继续生成测试用例, 新生成 14 条测试用例, 其中 Depth Search 方法生成 1 条测试用例, Single Step 方法生成 13 条测试

表3 测试模型中的主要变量

Tab.3 Main variables in test model

序号	变量	说明
1	Flag	值 0, 1, 2, 3, 4 分别表示测试唤醒转 FAM 模式, FAM 转 CM, CM 转 FAM, FAM 转 CAM, CAM 转 FAM 模式
2	CMMode	值 0, 1, 分别表示非 CM 模式和 CM 模式
3	FAMMode	值 0, 1, 分别表示非 FAM 模式和 FAM 模式
4	SpeedFlag	值 1, 2 分别表示速度不为 0 和速度为 0
5	NotDirHandleFlag	值 0, 1 分别表示方向手柄在 0 位和不在 0 位
6	NotBrkHandleFlag	值 0, 1 分别表示制动手柄在 0 位和不在 0 位
7	FAMCfmFlag	值 1, 2 分别司机确认和不确认模式转换

测试需求 1 ~ 4 对应的 BNF 验证语句如表 4 所示。

用例。即算法一共生成 18 条测试用例, 边覆盖率为 100%, 且完全覆盖测试人员指定的 4 条测试需求。

6 结论

本文针对全自动运行系统测试用例编制过程中的指定路径覆盖问题, 研究时间自动机建模理论, 提出了基于 Yggdrasil 的指定路径覆盖测试用例自动生成算法。以全自动运行系统的模式转换功能为例, 建立模式转换的时间自动机模型, 并采用论文提出的算法生成测试用例。结果表明, 论文生成的测试用例 100% 覆盖测试人员指定的测试需求, 同时 100% 覆盖时间自动机模型中所有的边, 能够满足全自动运行系统指定路径覆盖的测试用例生成要求。

参考文献

- [1] 徐燕芬, 赵婧, 姜仕军. 下一代地铁列车网络控制系统的研制 [J]. 铁道车辆, 2017, 55(7): 27-31, 51.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通全自动运行系统规范: T/CAMET 04017.1-2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.
- [3] 李小勇, 郑斌, 闫迷军, 等. 一种城市轨道交通全自动驾驶车辆仿真测试平台方案 [J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(Z1): 10-13.
Li Xiaoyong, Zheng Bin, Yan Mijun, et al. Scheme of Urban Rail Transit Fully Automatic Vehicle Simulation Test Platform[J]. Railway Locomotive & Car, 2019, 39(Z1): 10-13.
- [4] 范晓栋. 全自动驾驶系统列车正线休眠唤醒区域全覆盖的研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(11): 166-168.
Fan Xiaodong. Research on Train Main Line Dormancy and Awakening Area Full Coverage in Fully Automatic Driving System[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(11): 166-168.
- [5] 温朋哲, 徐道亮, 高士杰, 等. 城市轨道交通全自动运营场景及功能需求分析 [J]. 机车电传动, 2020(3): 132-136.
Wen Pengzhe, Xu Daoliang, Gao Shijie, et al. Analysis on Full Automatic Operation Scenes and Related Functional Requirements of Urban Railway Transport[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(3): 132-136.
- [6] 闫宏伟, 燕飞. 城市轨道交通全自动运行系统及安全需求 [J]. 都市快轨交通, 2017, 30(3): 50-55, 87.
Yan Hongwei, Yan Fei. Fully Automatic Operation System and Its Safety Requirement of Urban Rail Transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2017, 30(3): 50-55, 87.
- [7] 刘涛. CBTC-RF 信号系统下的驾驶模式及转换原则 [J]. 铁道通信信号, 2009, 45(11): 4-6.
- [8] 康仁伟. 基于时间自动机的 CTCS-3 级列控系统建模方法与验证研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [9] 张大鹏. 基于时间自动机的跨界临时限速建模与分析 [J]. 铁道通信信号, 2018, 54(2): 5-10.
Zhang Dapeng. Cross-Boundary TSR Modeling and Analysis Based on Timed Automata[J]. Railway Signalling & Communication, 2018, 54(2): 5-10.
- [10] 胡雪莲, 陶彩霞. 基于 MSC 与 UPPAAL 的列控系统等级转换场景形式化验证 [J]. 铁道标准设计, 2015, 59(2): 122-127.
Hu Xuelian, Tao Caixia. Formal Verification of Level Transition Process in Train Control System Based on MSC and UPPAAL[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(2): 122-127.
- [11] Larsen K G, Mikucionis M, Nielsen B. Online Testing of Real-Time Systems Using Uppaal[C]// Grabowski J, Nielsen B. International Workshop on Formal Approaches to Software Testing. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005: 79-94.
- [12] Alur R, Dill D L. A Theory of Timed Automata[J]. Theoretical Computer Science, 1994, 126(2): 183-235.
- [13] Li Yao, Zhang Xiaoxia, Zhang Yadong, et al. Towards a Test Paths Generation Method for CTCS Level Transition[J]. MATEC Web of Conferences, 2020, 325: 01001.
- [14] 赖琴, 张亚东, 饶畅, 等. 列车车载设备测试案例辅助管理工具设计 [J]. 铁路计算机应用, 2022, 31(6): 62-67.
Lai Qin, Zhang Yadong, Rao Chang, et al. Design of Test Cases Auxiliary Management Tool for On-Board Equipment of Train Operation Control[J]. Railway Computer Application, 2022, 31(6): 62-67.
- [15] 耿文波, 陈海燕. 轨道交通信号系统列车定位与驾驶模式转换的探讨 [J]. 铁道通信信号, 2019, 55(5): 73-76.
Geng Wenbo, Chen Haiyan. Discussion of Train Positioning and Transition of Driving Mode of Signaling System in Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55(5): 73-76.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.01.015

中低速磁浮车辆段闯红灯防护方案

路 远

(北京城市快轨建设管理有限公司, 北京 100071)

摘要: 针对中低速磁浮交通车辆段闯红灯防护需求, 提出车辆段RM模式闯红灯防护方案, 取得良好效果, 保障中低速磁浮车辆段的平稳运行。方案为后续中低速磁浮交通的建设和运营积累经验。

关键词: 中低速磁浮交通; 车辆段; 闯红灯防护

中图分类号: U284.93

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0083-04

Red Light Running Protection Scheme of Medium and Low Speed Maglev Depot

Lu Yuan

(Beijing Urban Rapid Transit Construction Management Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: According to the requirements of red light running protection of medium and low speed maglev depot, this paper proposes the corresponding protection scheme of running red light in RM mode of depot. The scheme has achieved good results to guarantee the stable operation of medium and low speed maglev depot. The scheme provides experiences for subsequent construction and operation of medium and low maglev transit.

Keywords: medium and low speed maglev transit; depot; red light running protection

1 概述

北京市中低速磁浮交通示范线(北京S1线)的线路全长10.2 km, 起点石厂站, 终点苹果园站, 全线设8座车站, 采用中低速磁浮列车。2017年12月30日, 石厂站至金安桥站7站开始载客试运营, 2021年12月30日, 苹果园站开始载客试运营。

湖南凤凰磁浮观光快线全长9.1 km, 设车站4座, 预留车站2座, 起点凤凰古城站, 终点凤凰等

待站, 采用中低速磁浮列车, 于2022年5月1日开始载客试运营。

北京S1线信号系统正线采用的感应环线基于通信的列车控制系统(CBTC), 系统具备连续式控制级及联锁控制级。车辆段采用联锁级控制列车运行, 列车驾驶模式为限制人工驾驶模式(RM)或者非限制人工驾驶模式(EUM)。

凤凰磁浮快线正线采用基于无线通信的CBTC系统, 系统具备连续式控制级、点式控制级以及联锁控制级。车辆段采用联锁级控制列车运行, 列车驾驶模式为RM模式或EUM模式。

中低速磁浮道岔比较特殊, 道岔活动梁为整体

收稿日期: 2023-09-13; 修回日期: 2023-12-30

作者简介: 路远(1986—)男, 工程师, 本科, 主要研究方向: 铁路信号, 邮箱: luyuan@bjjcx.net。

转动，未导通的道岔开向轨道是悬空的。当列车运行至未导通的道岔时，列车继续前行存在跳崖风险，需要考虑车辆段 RM 模式下的闯红灯防护方案。

2 车辆段闯红灯防护需求分析

车辆段内列车运行在联锁控制级下，RM 模式为车辆段正常的列车驾驶模式。

车辆段闯红灯防护的重点为防止列车“跳崖”。以车辆段三开道岔为例，三开道岔由道岔活动梁和道岔剁梁构成，其中道岔活动梁是可以转动，道岔剁梁固定不动，在正常线路和道岔活动梁之间起连接作用，如图 1 所示。

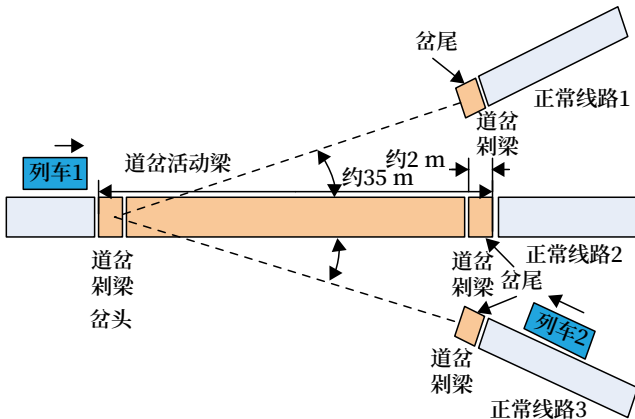


图1 三开道岔平面示意图
Fig.1 Three-throw turnout diagram

在图 1 中，三开道岔左侧的道岔剁梁位置为盆头，三开道岔右侧的道岔剁梁位置为盆尾。

当列车 1 从盆头向盆尾方向运行时，道岔活动梁总是和正常线路 1、2 或 3 中的一条连接（此处不考虑道岔转动不到位或正在转换过程中），列车 1 不会存在“跳崖”风险。

当列车 2 从盆尾向盆头方向运行时，道岔活动梁可能和正常线路 1、2 中的一条连接而没有和线路 3 连接，列车 2 向前运行时，可能会存在“跳崖”风险。

因此，车辆段闯红灯防护的范围主要为对出库的信号机进行防护，段内其他区域内不配置 RM 模式下的闯红灯防护功能。

3 中低速磁浮车辆段闯红灯防护方案

下面主要介绍北京 S1 线和凤凰磁浮快线车辆

段闯红灯防护方案。

3.1 北京 S1 线车辆段闯红灯防护方案

北京 S1 线车辆段闯红灯设备主要包括联锁、车地通信（TWC）环线设备和车载设备。

北京 S1 线正线车地通信采用 TWC 环线设备进行车地双向通信，利用环线边界和环线交叉点进行位置校正。车辆段 TWC 设备仅进行地到车单向通信，车载 ATP 在车辆段内没有定位，不向地面发送列车位置报告。车辆段联锁向地面 TWC 发送设备发送地面信号机状态信息，地面 TWC 发送设备将信息送到轨旁环线上，车载 TWC 收到信息后送给车载列车自动防护（ATP）进行处理。

在出库调车信号机前方铺设 TWC 环线设备，用于向列车发送地面信号机的显示状态。在日检线、洗车线、吹扫线、周检线、月检线出库信号机外方设置 TWC 环线，环线布置如图 2 所示。环线设置不影响列车动车试闸。

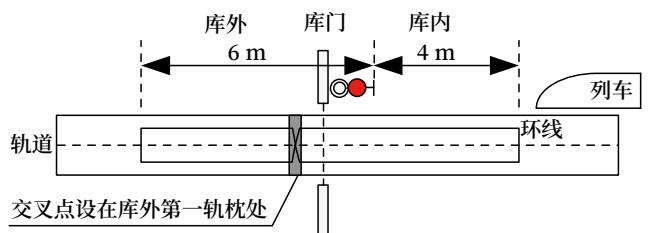


图2 车辆段出库环线布置示意图
Fig.2 Depot exit loop layout diagram

为使列车在出库时有效接收地面环线信息，车辆段内出库信号机每段环线长度 10 m，库内信号机外方布置 4 m，信号机内方布置 6 m，环线长度设置 10 m。为使平衡环线参数，不做位置校正，在环线中间 5 m 处设置 1 个交叉点。

联锁根据进路状态和信号机状态向 TWC 环线发送出库信号机状态信息，正常工作时，信号机状态信息包括：红灯信号、白灯信号、无效信号。当出库信号机红灯时，发送红灯信号；当出库信号机白灯时，发送白灯信号；当反向入库进路锁闭后，环线向车载设备发送无效信号。

在 RM 模式下，车载设备通过地面 TWC 环线设备接收到列车前方信号机的状态。如果列车前方

信号机为允许信号白灯，车载 ATP 允许列车前行；如果前方信号机为禁止信号红灯，车载 ATP 将立即施加紧急制动，并在车载人机界面上进行相应显示，此时司机若要向前推进列车，需要切除 ATP；如果车载 ATP 未收到信号或收到无效信号，均不做任何处理，仍按之前驾驶模式继续运行。

根据车载 TWC 天线安装位置、地面环线距危险点的距离以及根据安全制动模型计算的列车制动距离，列车出库运行速度需 $\leq 8 \text{ km/h}$ ，满足目前运营库内运行速度 $\leq 5 \text{ km/h}$ 的规定。

对于未装载 ATP 列车或者列车处于 EUM 模式下，不具备闯红灯防护功能，需人工保证安全，按照地面信号显示行车。车辆段内工程车线、定修线、临修线和厂修线信号机前方未铺设闯红灯环线，不

具备闯红灯防护功能，需人工保证安全，按照地面信号显示行车。

3.2 凤凰磁浮车辆段闯红灯防护方案

凤凰磁浮快线车辆段闯红灯防护设备主要包括联锁、地面电子单元 (LEU)、应答器和车载设备。

如图 3 所示，凤凰磁浮快线正线采用无线进行车地双向通信，采用应答器进行位置校准和地车信息传递。车辆段采用应答器进行位置校准和地车信息传递，无源应答器用于向车载传输固定信息，有源应答器除向车载传输固定信息外，还可传输变化信息。车辆段联锁通过 LEU 向轨旁主应答器（有源应答器）发送信号机状态报文，车载应答器传输模块 (BTM) 收到信息后传送给车载 ATP，车载 ATP 根据收到的信息进行处理。

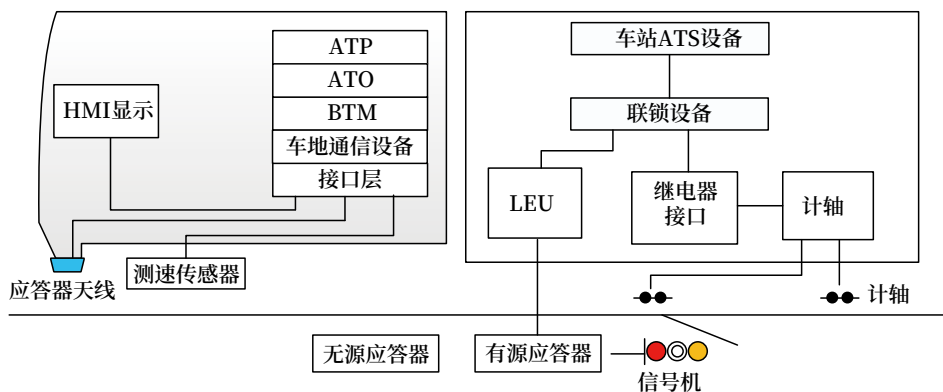


图3 车辆段闯红灯工作原理
Fig.3 Depot running red light working principle

联锁通过 LEU 向主应答器发送信号机状态报文。报文分为：红灯报文（禁止信号）、黄灯报文（列车进路允许信号）、白灯报文（调车进路允许信号）、红黄报文（引导信号）以及默认报文。

闯红灯防护原则如下。

车辆段内闯红灯防护应答器成组设置。如图 4 所示，B1 与 VB，B2 与 VB 各为一组闯红灯防护应答器。VB 为主应答器，是有源应答器，可以向列车传输信号机灯位信息。B1 为无源应答器，用于列车正常方向运行时，在通过 VB 时建立定位。B2 为无源应答器，为避免无定位的回库列车通过主信号应答器 VB 读到红灯报文后导致非预期的紧急制动，用于列车在反方向通过主应答器 VB 前建立列车定位。

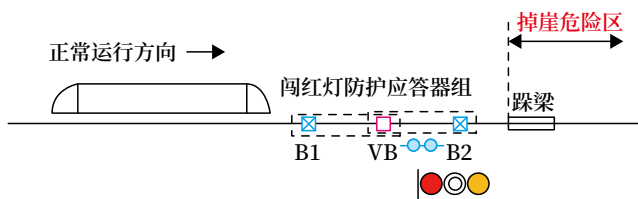


图4 车辆段出库应答器布置示意
Fig.4 Balise layout diagram of depot exit line

当列车有定位时，闯红灯防护功能才具备方向性，当闯红灯防护报文与列车运行方向一致时，才会触发紧急制动，该功能不会影响相反方向运行的列车通过主信号应答器。当列车顺序通过 B1 与 VB，读到 VB 中的红灯报文时，执行闯红灯防护功能；当列车顺序通过 B2 与 VB 时，不执行闯红灯防护功能。

当列车没有定位时，闯红灯功能无方向性，若

未收到 B1 或者 B2 应答器报文, 列车无论从任何方向读取到主信号应答器 VB 中的红灯报文, 均会触发紧急制动。

当先收到应答器 B1 时, 车载 ATP 对闯红灯防护应答器组中有源应答器丢失、默认报文或报文无法解析时, 按闯红灯防护处理, 触发列车紧急制动。当先收到应答器 B2 时, 车载 ATP 对上述情况不按闯红灯防护处理, 不触发列车紧急制动。

根据主信号应答器距前方危险点的距离, 以及安全制动模型计算的列车制动距离, 列车在 RM 模式出库时, 速度不应大于 15 km/h。

对于未装载 ATP 列车或者列车处于 EUM 模式下, 无法实现闯红灯防护功能, 需要人工保证安全, 按照地面信号显示行车。

4 结语

中低速磁浮道岔比较特殊, 车辆段采用 RM 模式, 通过车辆段 RM 模式闯红灯防护方案, 可以有效对列车误闯红灯进行防护。同时, 对于未装载车载 ATP 的列车、列车处于 EUM 模式下以及部分不设置闯红灯防护的区域, 不具备闯红灯防护功能, 需要采取管理措施, 人工保证安全。技术措施和管理措施相结合才是构成安全运营的整体控制方式。

随着技术的进步, 部分地铁车辆段采用自动化车辆段, 可以对车辆段闯红灯进行更有效的防护。对于中低速磁浮交通来讲, 自动化车辆段是未来的发展方向。

参考文献

[1] 王冠, 杨明春. 基于点式 ATC 系统的中低速磁浮信号系统提升建构 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (7): 70-76.
Wang Guan, Yang Mingchun. Improvement of Low-Medium Speed Maglev Signal System Based on Intermittent ATC System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(7): 70-76.

[2] 孙吉良. 中低速磁浮交通运行控制系统车地双向通信设备的研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2013, 10 (5): 52-57.

Sun Jiliang. Train-Ground Two-Way Communication Equipment of Low-Medium Speed MATC System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2013, 10(5): 52-57.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中低速磁浮交通运行控制技术规范: CJJ/T 255-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2017.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中低速磁浮交通设计规范: CJJ/T 262-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2017.

[5] 赵鑫, 蒋先进, 蒋淮申. 重庆市单轨交通三号线列车闯红灯防护技术简介 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2014, 11 (5): 69-71.
Zhao Xin, Jiang Xianjin, Jiang Huaishen. Protection Technology of Train Overrunning a Red Light in Chongqing Monorail Transit Line 3[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2014, 11(5): 69-71.

[6] 郭弘阳. 城市轨道交通自动化车辆段/停车场信号系统研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2018, 15 (1): 41-45.
Guo Hongyang. Research on Signaling System for Automation Depot in Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2018, 15(1): 41-45.

[7] 赵东亮. 中低速磁浮信号车地通信电磁干扰研究与实现 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (2): 59-64.
Zhao Dongliang. Research on EMI of TWC of Signaling System for Medium and Low Speed Maglev Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(2): 59-64.

[8] 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.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.01.016

列车自动驾驶 (ATO) 季节性调节方案探讨

张帆

(卡斯柯信号有限公司, 北京 100070)

摘要: ATO 目前已广泛应用到地铁列车的车载信号系统, 提高地铁列车的运行效率, 而列车的制动性能对 ATO 控制精准停车有比较大的影响。列车制动性能, 特别是气制动性能可能存在一定的不稳定性, 对 ATO 发出制动指令的响应会出现较大的偏差, 其中一个较重要因素就是季节以及气温的影响。探讨针对列车制动季节性变化进行相应的优化、增加自动驾驶系统的自适应能力的方法。结合制动性能变化, 对每一个制动变化时段做出单独的制动驾驶控制策略组, 在相应的时间段 (或其他设定条件) 自动切换、调节, 使在不同的列车制动性能下, 自动驾驶系统均能实现精准停靠站台, 提高乘客上下车效率。

关键词: ATO; ATO 控车方案; ATO 停车精度季节性变化

中图分类号: U231+.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0087-05

Discussion on Seasonal Regulation Scheme of Automatic Train Operation

Zhang Fan

(CASCO Signal Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Automatic Train Operation (ATO) has been widely applied to the onboard signaling system of subway trains, which improves the operation efficiency of subway trains. The braking performance of the train has a greater impact on the precise stop controlled by ATO. The train braking performance, especially the air braking performance, may be unstable to a certain extent, and the response to ATO's braking command may have a large deviation. One of the more important factors is the influence of season and temperature. This paper explores the method of optimizing the seasonal deviation of train braking and adding the adaptive ability of ATO system. In combination with the braking performance change of a certain line, a separate braking control strategy group is made for each braking change period, and switch and adjust is conducted automatically in the corresponding time period (or other setting conditions), so that under different train braking performance, ATO system can achieve precise stopping at the platform and improve the efficiency of passengers getting on and off.

Keywords: ATO; control strategy by ATO; seasonal variation of ATO stopping accuracy

收稿日期: 2022-12-23; 修回日期: 2023-12-04

基金项目: 卡斯柯信号有限公司工程项目 (A5. AW115329)

作者简介: 张帆 (1988—), 男, 工程师, 本科, 主要研究方向: ATC 列车自动控制, 邮箱: zhangfan@casco.com.cn.

1 问题来源

目前一般地铁线路列车自动驾驶 (Automatic

Train Operation, ATO) 采用固定的控车策略。随着列车制动系统性能的变化, 自动驾驶停车精度会有一定范围的浮动, 对于有些地铁线路, 停车精度会随着季节变化而出现周期性变化, 比如夏季多出现过标、冬季多出现欠标。此时列车会超出地铁站台的停车窗口, 列车自动驾驶的停车位置会超出站台门的范围, 导致无法打开列车车门与站台门。

究其原因, 是列车响应的制动性能(以测出的加速度表示)出现了偏差。如图 1 所示, 可以看出在夏季, 列车的制动性能可能会随着气温的升高, 在曲线后段(多为气制动介入后、电制动-气制动转换过程中)列车实际的减速度会变小、偏离 ATO 模型中的期望加速度 a_0 (图 1 中虚线)。在冬季, 由于气温变低, 列车的制动性能可能存在一定程度的增大, 在曲线后段(气制动介入后、电制动-气制动转换过程中)列车实际的减速度会变大、偏离 ATO 模型中的期望加速度 a_0 (图 1 中虚线)。

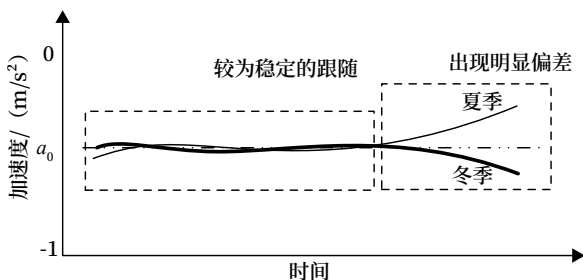


图1 夏季、冬季列车停车加速度跟随曲线示意
Fig.1 Schematic diagram of train stop acceleration following curve in summer and winter

2 解决方案探讨

依据 ATO 控车原理, 针对此问题笔者认为可采用下面方法执行。

由于 ATO 停车精度季节性变化的根本原因为列车气制动性能的不稳定性和周期性变化, 车辆方可以将制动性能优化, 提高稳定性, ATO 停车精度会有较好表现。

一旦车辆无法继续优化制动性能, 需要 ATO 做补偿性优化。此优化基于 ATO 自动判断, 进而改变 ATO 对列车制动系统的控制策略, 最终实现 ATO 在站台精确停车。优化流程主要分为两个步骤:

对切换 ATO 控制策略时机的判断;

确定控制策略中包含的内容(策略组)。

2.1 切换ATO控制策略的时机

ATO 停车精度的变化可以有多种表现形式。如不同运营时段、不同季节, 甚至带有一定随机性的变化。可将各种外部因素当作触发条件, 匹配出不同的 ATO 策略。笔者遇到较多因季节变化而造成的 ATO 停车精度变化, 所以暂以此为主因素输入进行 ATO 相应的优化方法的阐述。

如图 2 所示, 先以地铁列车制动性能变化最明显、表现最为极端的夏季与冬季制定基础性的策略组分区, 选取一个合适的时间点在两种策略组之间制定切换时机, 即切分点 1。

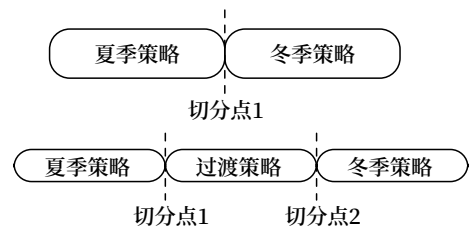


图2 按夏季、冬季、过渡策略切分示意
Fig.2 Schematic diagram of segmentation by summer, winter and transition strategies

由于夏季与冬季的 ATO 调节策略可能存在较大的差距, 如果以单一固定点切换点作切分, 在切分点前后停车精度会有一个较大幅度整体偏移。为避免过于机械僵化的切换, 可在夏季与冬季策略之前添加若干个不同的切分点, 如图 2 所示, 这样就可以按照实际需要增加策略组切换的平滑度, 使 ATO 自动补偿调节向无感化靠拢。

2.2 切换ATO控制策略的时机

针对策略中具体调节内容项的选择, 从 ATO 控车逻辑与实际应用出发, 选取以下 3 种主因素。

1) ATO 模型中的预期减速度

如表 1 所示, 列车气制动一般以制动缸压力为衡量标准, 故每次对 ATO 系统发出的制动指令信号响应的偏离值是以压力绝对数值大小为标准, 如 ± 20 kPa。而 ATO 停车精度的效果实际是与偏差的百分比相关。所以相同的制动性能偏差对不同大小的基础制动缸压力而言, 造成的制动百分比效果是不同的, 如图 3 所示。

表1 车辆制动系统对不同级位响应减速度偏差

Tab.1 Deceleration deviation of train braking response to different levels

制动级位	制动力 / 减速度				偏差 / %
	AW2 对应的制动力 / kN	AW2 平均减速度 / (m/s ²)	(AW2+20kPa) 对应的制动力 / kN	(AW2+20kPa) 平均减速度 / (m/s ²)	
100% 最大常用 - 制动力值	328.748 591	1.00	355.806 087 9	1.082 304 527	8.23%
70% 最大常用 - 制动力值	211.950 395	0.70	239.007 891 8	0.789 361 702	12.77%
50% 最大常用 - 制动力值	162.344 983	0.50	189.402 480 3	0.583 333 333	16.67%

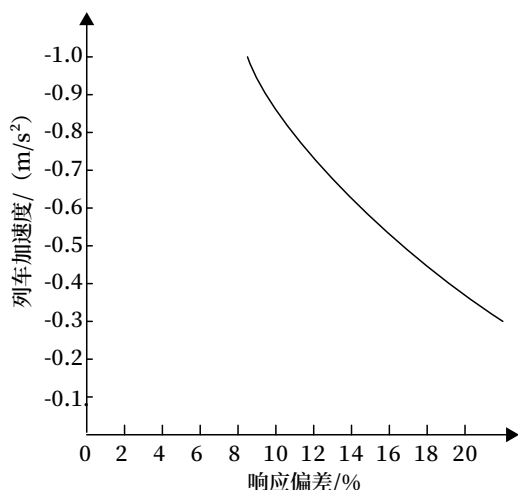


图3 停车减速度-响应偏差关联示意
Fig.3 Schematic diagram of train stop deceleration-response deviation correlation

根据实际应用经验, 当上述偏差在 10% 以内时, ATO 使用预先设置的停车减速度并稍加修正命令级位, 就有很高概率将列车控制在理想的停车范围内 (如 ATO 实际停车位置在停车窗 30 cm 以内);

当上述偏差在 10% ~ 20% 时, ATO 对停车精度有一定的调节能力, 可利用在 ATO 停车策略中精调过的滑模控制、比例积分控制对列车的加速度进行闭环反馈调节计算, 并输出给车辆相应的制动指令与级位, 进而可以较为稳妥地将列车停进最大停车窗 (如标准停车窗 ± 50 cm 以内)。

当上述偏差大于 20% 时, 预先设置的单一 ATO 控制策略对列车车速、减速度的控制力下降, 易出现在站台停车过、欠标的情况。

因此, 在条件允许的前提下, 可以适当将 ATO 停车模型中的减速度调高, 给车辆响应偏差留更大的宽容度。

2) 制动级位与制动效果 (如列车减速度) 映射关系

这个映射关系会发生改变, 特别是列车气制动启用时。如图 4 所示, ATO 发出恒定的减速度申请 (恒定制动级位), 列车实际响应的减速度在低速电制动-空气制动转换过程中, 会出现更大的偏移。列车响应减速度曲线在夏季会向变小的方向偏移, 在冬季会向变大的方向偏移。

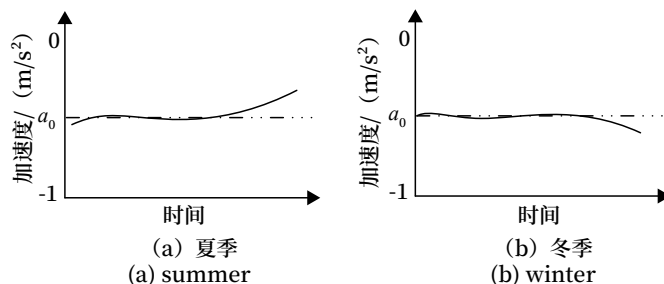


图4 加速度-制动级位映射示意1
Fig.4 Acceleration-brake level mapping (1)

因此在车辆制动性能周期性变化范围过大时, 只用一条停车减速度-制动级位理想曲线不能完全调和夏季与冬季的需求, 结果是 ATO 停车精度也出现偏移。

为了消除偏移造成的影响, 可以调整级位与制动减速度的映射关系。

同样以夏季、冬季为例, 可选用如 5 图所示中两种不同的停车度速度-制动级位对应关系。在夏季曲线中, 相比 ATO 模型计算出的理论曲线, 为了获得同等的减速度, ATO 系统将给车辆 TCMS 网络发送相对更大的级位, 对列车施加相对更大的制动力, 减少因制动力衰减而造成停车过标的情况; 冬季曲线则相反, 相比 ATO 模型计算出的理论曲线, 获取同样的减速度对应更小的级位, 即 ATO

系统给车辆 TCMS 网络发送相对更小的级位，使列车施加相对更小的制动力，抵消制动力过大的效果影响，减少停车欠标的情况。

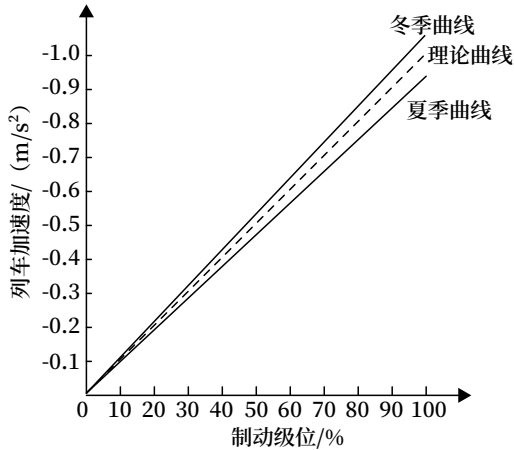


图5 加速度-制动级位映射示意2
Fig.5 Acceleration-brake level mapping (2)

此种方法可在夏季时进行制动力的正向补偿，改善制动力的衰减状况；在冬季时进行级位的负向补偿，改善制动力的过度施加状况。

3) ATO 模型中停车位置的微调

对于已经执行了较好停车策略优化的控车策略，ATO 停车效果上已趋近于某一精度，而此精度与停车“零点”未完全重合，如图 6 所示。

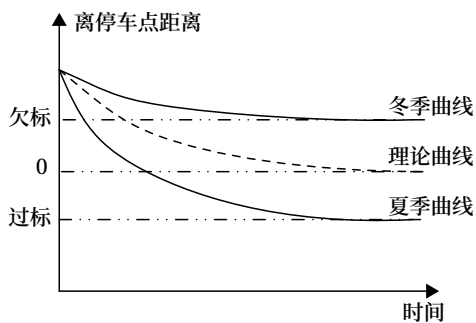


图6 实际停车精度与ATO模型精度偏差示意
Fig.6 Schematic diagram of deviation between actual stop accuracy and ATO model accuracy

由于距离停车“零点”十分接近，已不宜再对停车策略作大幅度调整。此时可以采用将模型中虚拟停车位置向真实停车位置“贴合”，如图 7 所示，将夏季 ATO 模型停车曲线向坐标正方向调节；将冬季 ATO 模型停车曲线向坐标负方向调节，以接

近停车“零点”。

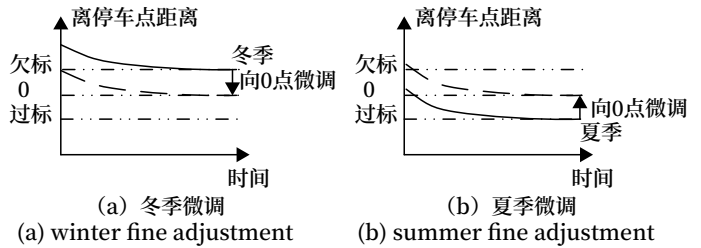


图7 冬、夏季向两个方向微调的示意
Fig.7 Schematic diagram of fine adjustment in two directions in winter and summer

3 结束语

本文结合某些地铁线路中 ATO 停车精度季节性变化的实际情况，阐述了一种用于补偿地铁列车制动系统响应偏差的方法。总体来说此种方法有着两个着重点。

第一点为适用场景：此种方法主要适用具有一定规律的 ATO 停车精度变化的场景，较为常见的场景为季节性变化；同样也可作其他场景的适配，适合更多其他可细分的条件、逻辑，或以强制性的外部输入为条件来作为触发条件。

第二点为策略组所包含子策略的选择：本文主要探讨了 3 种在实践中较为常见的调节方向，而且这 3 个子策略所包含组合在调节的次序上有一定的层次与互补性，也具有相当的通用性。

参考文献

- [1] 刘浩, 钱存元, 施招东. 基于模糊自适应 PID 控制的 ATO 系统控制算法 [J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20 (3): 40-45.
Liu Hao, Qian Cunyuan, Shi Zhaodong. ATO System Control Algorithm Based on Fuzzy Adaptive PID[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(3): 40-45.
- [2] 任林杰, 范多旺, 杨军霞. 基于 GA 优化模糊 PID 控制的 ATO 算法研究 [J]. 铁道标准设计, 2017, 61 (2): 127-130.
Ren Linjie, Fan Duowang, Yang Junxia. Research on ATO Algorithm Based on Fuzzy PID Control

- with Optimized GA[J]. Railway Standard Design, 2017, 61(2): 127-130.
- [3] 唐涛, 黄良骥. 列车自动驾驶系统控制算法综述 [J]. 铁道学报, 2003, 25 (2): 98-102.
Tang Tao, Huang Liangji. A Survey of Control Algorithm for Automatic Train Operation[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(2): 98-102.
- [4] 孟建军, 刘震. 城轨列车精确停车智能控制算法研究与仿真 [J]. 计算机工程与应用, 2019, 55 (23): 257-264.
Meng Jianjun, Liu Zhen. Research on Intelligent Algorithm for Precise Parking of Urban Rail Transit Based on Predictive Fuzzy PID[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(23): 257-264.
- [5] 张驰, 谭南林, 周挺, 等. 基于分数阶PID控制器的地铁列车优化控制研究 [J]. 铁道学报, 2018, 40 (10): 8-14.
Zhang Chi, Tan Nanlin, Zhou Ting, et al. Research on Optimal Control of Subway Train Based on Fractional Order PID Controller[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(10): 8-14.
- [6] 胡震, 邹德旋, 张旭. R-dPSO 算法及其在ATO控制策略中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2018, 54 (24): 212-220, 226.
Hu Zhen, Zou Dexuan, Zhang Xu. R-dPSO Algorithm and Its Application in ATO Control Strategy[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(24): 212-220, 226.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 张强, 陈德旺, 于振宇. 城市轨道交通ATO系统性能指标评价 [J]. 都市轨道交通, 2011, 24 (4): 26-29.
Zhang Qiang, Chen Dewang, Yu Zhenyu. Performance Evaluation of Urban Rail Transit ATO System[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2011, 24(4): 26-29.
- [10] 欧阳全裕, 杨作刚, 姜传治. 关于《地铁设计规范》中部分条文的讨论 [J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9 (4): 14-17.
Ouyang Quanyu, Yang Zuogang, Jiang Chuazhi. On the Items of "Code for Metro Design"[J]. Urban Mass Transit, 2006, 9(4): 14-17.

(上接 75页)

- Ma Yongjing, Yang Guangnan, Zheng Weijing, et al. Research on Service-Life Prediction of EMU Brake Pads[J]. Railway Locomotive & Car, 2022, 42(1): 60-64.
- [9] 薛文静, 张东海. 自学习算法在列车自动驾驶系统的应用 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (10): 68-72.
Xue Wenjing, Zhang Donghai. Application of Self-Learning Algorithm in Automatic Train Operation System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(10): 68-72.

轨道交通LTE系统等保接入方案及实现

白雪

(西安市轨道交通集团有限公司, 西安 710021)

摘要: 根据西安地铁 14 号线研究对承载信号业务的 LTE 系统增加 3 级等级保护的具体方案及步骤, 针对 14 号线线路特点提出 2 个可行的等级保护接入方案, 并通过网络架构及性能评估比较, 选择最优的等保接入方案, 确保网络传输的安全稳定。同时通过等保系统相关接口配置、注意事项等描述, 详细阐述涉及行车安全的 LTE 系统在增加等级保护过程中的重要步骤, 确保网络安全, 为轨道交通信号系统的行车指挥和列车运行控制提供重要保证, 为后续轨道交通等保接入提供可参考价值。

关键词: 等级保护; LTE 系统; 信号系统

中图分类号: U231+.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0092-06

Grading Protection Access Scheme and Implementation of Rail Transit LTE System

Bai Xue

(Xi'an Rail Transit Group Co., Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: This paper studies the specific schemes and steps of adding three grades of protection to LTE system carrying signal services based on Xi'an Metro Line 14. Two feasible access schemes of grading protection are proposed according to the characteristics of Line 14, and the optimal grading protection access scheme is selected through network architecture and performance evaluation and comparison to ensure the security and stability of network transmission. At the same time, through the description of the relevant interface configuration and precautions of the grading protection system, the important steps in the process of adding grading protection to LTE system involving the safety of train operation are elaborated to ensure network security, provide important guarantee for traffic control of rail transit signaling system, and provide reference value for subsequent rail transit grading protection access.

Keywords: grading protection; LTE system; signaling system

城市轨道交通信息化系统的集成化、智能化程度越来越高, 随之而来的网络安全面临的挑战也变

得更大, 信息系统一旦出现故障, 车辆调度、故障报警、安全运维等各个环节都将无法正常进行。而 LTE 作为承载信号系统 CBTC 业务涉及行车安全, 若出现网络安全事故将直接影响人们的正常生活, 因此, 对城市轨道交通 LTE 系统安全的 3 级等级

收稿日期: 2022-10-10; 修回日期: 2023-12-04

作者简介: 白雪 (1994—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 轨道交通专用通信工程, 邮箱: 734918776@qq.com。

保护研究有着重要意义。本文通过罗列 LTE 系统 2 个等保接入方案，对比方案并选择最优方案，实现 LTE 网络的等保接入，确保列车高效率运行。

1 工程背景

1.1 等保设备组成

西安地铁 14 号线在控制中心部署统一的安全管理平台，方便对 LTE 系统部署工业防火墙、工业安全监测与审计系统和工控主机卫士等所有安全防护设备，进行统一管理和维护。LTE 系统等保设备主要分为硬件安全设备和主机防护软件 2 大部分，其中硬件设备包含统一安全管理平台、安全运维管理系统、日志审计与分析系统、漏洞扫描系统、工控安全监测与审计系统、入侵检测系统和 A、B 网工业互联防火墙，具体安全设备及作用如表 1 所示。

表1 安全设备
Tab.1 Safety equipment

设备名称	作用
入侵检测系统	入侵检测
日志审计与分析系统	日志审计
A 网工业互联防火墙	安全防御
B 网工业互联防火墙	安全防御
统一安全管理平台	安全管理
安全运维管理系统	安全运维
工控漏洞扫描平台	漏洞扫描
工控安全监测与审计系统	监测审计

1.2 LTE有线部分既有接口

西安地铁 14 号线车地通信采用基于 TD-LTE 的宽带移动通信系统，LTE 综合承载子系统作为信号系统数据通信子系统（Data Communications System, DCS）的组成部分，采用 A、B 双网冗余组网设计，信号 CBTC 业务信息通过 A、B 双网承载并同时传输，保证其对网络可靠性的要求。同时还与通信 PIS 系统、车辆 TCMS 系统、通信集中告警系统及时钟系统都存在有物理接口。其中 A 网设有上述全部物理接口，B 网设置除通信 PIS 系统外的全部物理接口。LTE 系统有线部分网络与外部系统的物理接口均设置在控制中心 A、B 网核心网交换机上，具体位置如表 2 所示。

表2 LTE系统有线部分网络与外部系统的物理接口

Tab.2 Physical interfaces between LTE wired network and external systems

设备名称	端口号	接口业务
LTE-A 网核心网交换机（电口）	29	正线信号业务
	30	正线信号业务（冷备接口）
	21	试车线信号业务
	24	PIS/CCTV 业务
	32	PIS/CCTV 业务
	26	集中告警
	22	时钟 NTP
LTE-B 网核心网交换机（电口）	23	TCMS 业务（预留接口）
	29	正线信号业务
	30	正线信号业务（冷备接口）
	21	试车线信号业务
	26	集中告警
	22	时钟 NTP

LTE 网管工作站分布情况：停车场网管室 A、B 网各 1 台；控制中心网管室、控制中心通信设备室 A、B 网各 1 台。此次 14 号线部署的旁路设备为工控安全监测与审计系统和入侵检测系统。入侵检测系统的数据来源是由工控安全监测与审计系统发送，入侵检测系统业务口不接入 LTE 核心交换机，只有工控安全监测与审计系统通过核心交换机的镜像功能接收数据，且该设备只被动接收数据进行分析，监视交换机内的网络流量和会话情况，不会主动对 LTE 网络转发业务数据，不对 LTE 网络造成影响。

2 等保部署方案一

2.1 工业防火墙接入

将工业防火墙串接在 LTE 核心交换机与其他外部接口（CBTC、信号、集中告警、时钟、CCTV、PIS）之间，对 LTE 网络边界进行隔离，工业防火墙的管理口连接在 LTE 核心交换机划分的 VLAN 内，为完成与其他安全设备组网。

2.2 旁路设备接入

统一安全管理平台、安全运维管理系统、日志审计与分析系统、漏洞扫描系统、工控安全监测与审计系统、入侵检测系统旁路均部署在 LTE 的核心交换机处，其中统一安全管理平台需对工业防火墙、工控安全监测与审计系统、工控主机卫士进行统一管理，并负责接收运行状态和告警信息的安全设备

策略管理和下发，具体系统网络拓扑如图 1 所示。

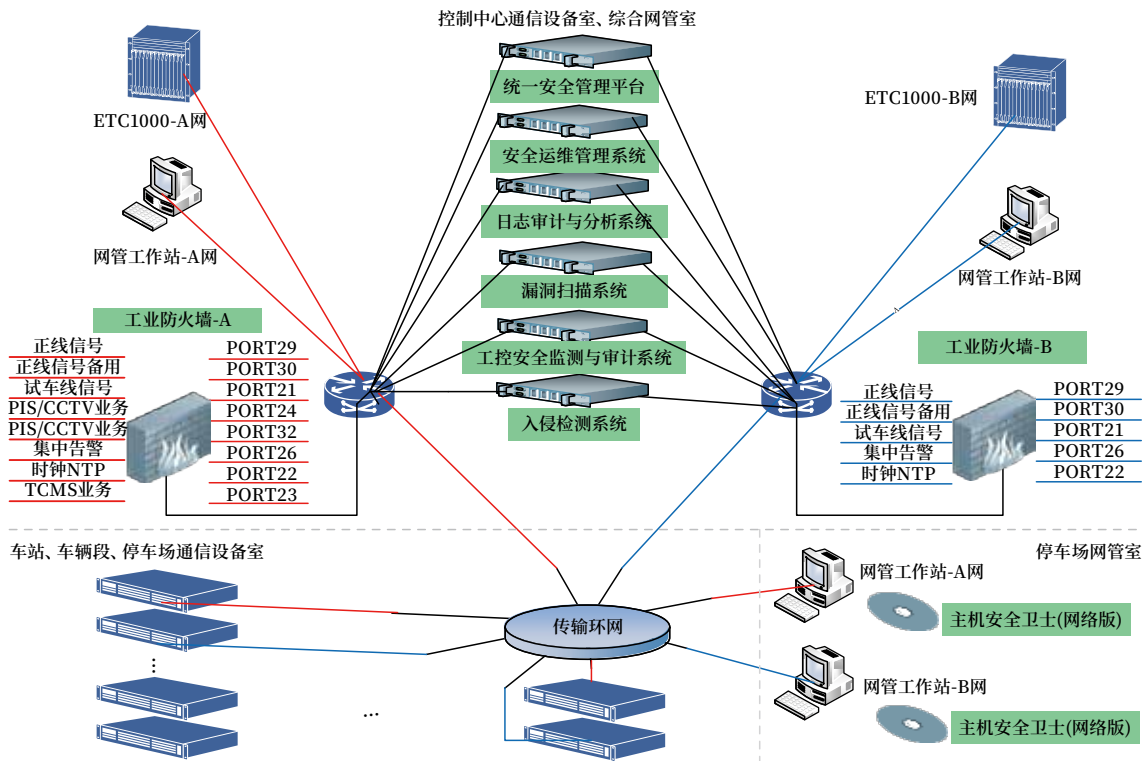


图1 方案1系统网络拓扑
Fig.1 System network topology of solution 1

日志审计分析系统负责对 LTE 系统内所有网络设备、服务器、工作站、安全设备等相关日志信息进行统一收集分析和展示。漏洞扫描系统旁路负责对 LTE 系统内的网络设备、服务器和工作站等进行漏洞扫描和检查。工控安全监测与审计系统和入侵检测系统各自的业务口被动接收 LTE 核心交换机发来的镜像流量，主要负责对网络会话流量及网络内的入侵或恶意行为分析和采集。安全运维管理系统通过 2 个管理口对 LTE 系统的服务器、工作站、交换机等进行集中运维管理，同时通过管理口将安全运维管理系统产生的日志信息发送至日志审计与分析系统。

2.3 主机安全卫士接入

工控主机卫士软件为白名单机制的终端防护软件，部署在控制中心网管室的 LTE 网管工作站中，用于维护控制中心通信设备室的服务器和车站的服务器等。该软件除在主机层面开展安全防护，也需将终端状态和告警及日志信息发送至统一安全管理平台，接收统一安全管理平台的策略指令。

3 等保部署方案二

3.1 旁路设备接入

本方案在交换机内对安全设备管理口进行 2 层隔离，使安全设备与 LTE 网络内其他设备不产生通信；其次所有安全设备的管理口只接在 LTE 的 A 网交换机，因此不会对 LTE 的 B 网产生影响；同时日志审计与分析系统、安全运维管理系统只对此 VLAN 内安全设备的日志进行运维管理。A/B 网各配 1 台工业防火墙进行部署，所有安全设备管理口及旁路部署的安全设备的业务口只接入 A 网核心交换机，均不接入 B 网，同时工业防火墙的管理口只用于设备状态和告警信息的上传和策略接收。并且系统中管理口与业务口不关联，因此串接在 B 网的工业防火墙不会因业务接入而影响 B 网，系统的管理口接入 A 网也不会对 A/B 网业务产生影响。系统网络拓扑如图 2 所示。

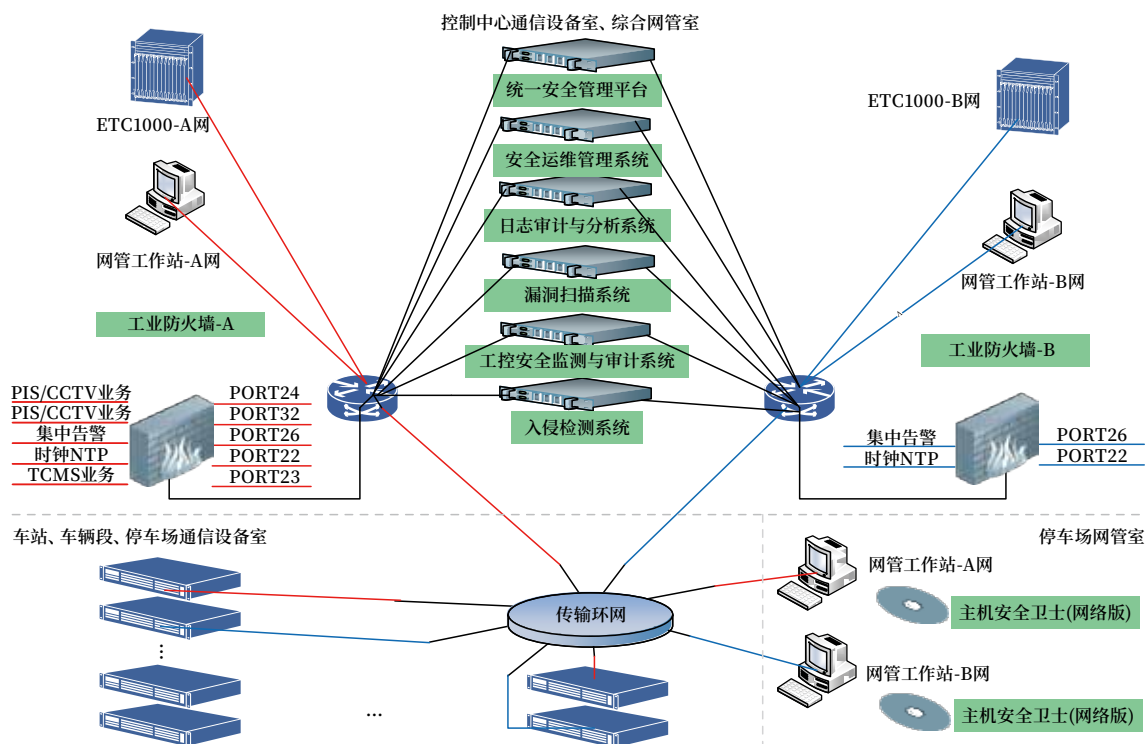


图2 方案2系统网络拓扑
Fig.2 System network topology of solution 2

3.2 主机安全卫士接入

因统一安全管理平台只接入 A 网，且无法与 LTE 系统内的所有工作站和服务器进行通信，致使工控主机卫士无法通过平台获取授权和集中管理，因此需将 LTE 系统所需部署的主机卫士改为单机版软件进行部署。单机版的告警信息和日志内容记录在本地进行信息处理，统一安全管理平台部署完毕后再进行主机安全卫士的接入。需要在 14 号线各车站、停车场、控制中心通信网管室以及控制中心通信设备室的 LTE 相关网管工作站进行安装，实现各站级安全监测条件。

4 方案对比

1) 部署方案一

所有硬件设备所连接的端口划分了 VLAN 及 VLAN 地址，设备网卡配置了网关，安全设备可遍历访问至 LTE 全网设备，可能会对 LTE 网络造成影响。在空策略防火墙接入确认对相关业务无影响且稳定运行一段时间以后，没有对 A 网防火墙做 1 个宽松的策略模板，致使交换机资源被大量占用。

交换机会对所有接收到的数据包进行 CRC 错误检测和长度校验，将检查出有错误的包丢弃，正确的包转发。该过程中可能存在 CRC 错误检测和长度校验中均未检测出的错误包，将会堆积在动态缓存中，等缓存中堆积满就会造成交换机死机的现象。

2) 部署方案二

本方案中取消了安全设备所属 VLAN 的路由，在交换机内对安全设备管理口进行 2 层隔离，避免安全设备与 LTE 网络内其他设备产生通信；其次，所有安全设备的管理口及旁路部署安全设备的业务口，只接在 LTE 的 A 网交换机，避免对 LTE 的 B 网产生影响，取消了安全设备所属 VLAN 的路由；LTE A 网核心网交换机只为旁路设备提供内部交换的接口，且接口均划分在一个 2 层 VLAN 下。需在 14 号线相关站点及设备室的 LTE 相关网管工作站安装工控主机卫士。

3) 方案比较

部署方案一能够详细遍历 LTE 全网设备，对网络出现问题能够实时检测，并给出检测信息，对于 LTE 网管工作站和服务器改造升级较大，若网络

出现网络风暴、MAC 地址漂移等现象，不能够快速定位故障点；而部署方案二增加了 2 层隔离交换机，对于 LTE 网络起过滤隔离作用，不用详细遍历 LTE 全网，网络风险较小，网络时延较小，并且一旦 LTE 网络出现问题能够快速定位故障点，但是对于网络各节点遍历性要求降低。西安地铁 14 号线鉴于传输速率及可靠性要求，采取方案二实现 LTE 等保系统的接入。现以网络时延作为性能评估指标，若流量传输时间越小则表明网络传输性能越好，反之则传输性能越差；通过外挂检测设备来计算平均时延。并对系统的传输时延进行统计，通过累加计算出各检测系统中各路径的传输时延，如公式 (1) 所示。

$$\overline{delay} = \frac{\sum_{i=1}^n path_i_delay}{n} \quad (1)$$

公式中 \overline{delay} 表示网络的平均时延， $path_i_delay$ 表示检测的网络时延， n 表示检测的设备总数，在网络趋于稳定状态时进行统计，计算平均传输时延，统计计算后的对比如图 3 所示。

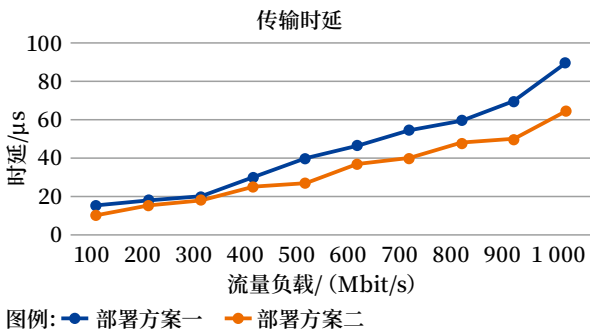


图3 时延对比
Fig.3 Time delay comparison diagram

从图 3 中可以看出，2 种部署方案的平均传输时延均随负载的增加而增加；当流量负载低于 300 Mbits/s 时，2 种部署方案平均时延相差不大，但当负载超过 300 Mbit/s 之后，2 种部署方案平均时延的上升趋势都较为明显，这是由于随着流量负载的不断增加，网络链路负载增加，因此链路传输过程中会出现网络时延增加的现象，但从整体来看，随着负载的增加，部署方案二降低网络时延的能力更为凸显。

5 等保设备接入实施步骤

1) 删除 LTE 核心网交换机上等保设备管理业务的 Vlanif 地址（即等保安全设备的网关），在 A 网核心交换机 44 口配置为工控安全监测与审计系统所需的镜像口，用于接受捕获集中告警、时钟系统接口的流量。

2) 接空策略防火墙，并且利用 1~2 个动车点测试 A 网防火墙功能，确认无异常再接入 B 网。

3) 防火墙安全策略确认无异常后，利用 1~2 个动车点测试 A 网核心交换机旁路设备。逐个设备接入并检测，确认旁路设备无影响后，在 A 网核心交换机正式接入旁路设备。

4) 在空策略防火墙上加载安全策略，并且利用 1~2 个动车点测试 A 网防火墙对策略工作效果，观察网络是否存在异常，确认无异常再在 B 网防火墙上加载并测试安全策略。

5) 工控主机卫士安装测试，在 1 台影响较小的工作站进行系统备份和病毒查杀工作，如出现问题或主机病毒，可将备份的系统回退避免影响，由运营和厂家共同确认并进行杀毒处理，再无上述问题之后进行主机卫士安装测试。

6) 测试后主机卫士运行无任何问题，对剩余网管工作站进行系统备份、病毒查杀和主机卫士安装的工作。

6 风险控制

1) 参考 CCTV 系统工业防火墙接入时，因时钟接口长时间中断而导致无法自动校时的问题，在 LTE 系统工业防火墙接入完成后，对系统设备的校时情况进行查验，确认网络时钟 (Network Time Protocol, NTP) 恢复正常。

2) 防火墙安全策略涉及对 PIS/CCTV 业务、时钟系统、集中告警系统业务报文的白名单过滤，需要相关专业厂家对与其系统相关的安全策略进行评审，并在策略加载完成后进行业务确认。

3) 防火墙安全策略部署完成后，外部系统升级

或配置变更时应考虑其业务是否与原安全策略相匹配, 避免新增业务报文被拦截。

7 总结

本文研究基于轨道交通 LTE 系统等级保护接入问题, 在控制中心设置统一安全管理平台实现对信号系统全网安全设备、安全事件、安全策略、安全运维的统一集中监控、管理及预警, 提高全面的安全管理、风险管理能力。列出 2 个接入方案, 对比方案优缺点, 选择最优方案接入, 总结接入要点及风险控制, 接口对接过程中注意事项等, 为今后轨道交通 LTE 等保系统的接入提供可参考价值。

参考文献

- [1] 李振. LTE 技术在城市轨道交通 CBTC 系统中的应用 [J]. 低碳世界, 2019, 9 (11): 227-228.
Li Zhen. Application of LTE Technology in CBTC System of Urban Rail Transit[J]. Low Carbon World, 2019, 9(11): 227-228.
- [2] 纪文莉. 上海轨道交通 LTE 综合承载网络架构研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24 (6): 146-150.
Ji Wenli. Study on LTE Comprehensive Bearing Network Architecture of Shanghai Rail Transit[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 146-150.
- [3] 李洋. LTE-M 车地通信接口监测软件设计开发 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [4] 马遥. 5G 环境下网络等级保护工作策略研究 [J]. 通信电源技术, 2020, 37 (5): 212-213.
Ma Yao. Research on the Work Strategy of Network Level Protection in 5G Environment[J]. Telecom Power Technology, 2020, 37(5): 212-213.
- [5] 杜皎. 网络等级保护中的边界防护机制 [J]. 信息网络安全, 2007 (8): 24-27.
Du Jiao. Border Protection Mechanism in Network Level Protection[J]. Netinfo Security, 2007(8): 24-27.
- [6] 史雅天. LTE 技术在城市轨道交通信号系统中的应用分析 [J]. 中国战略新兴产业, 2018 (12): 122.
Shi Yatian. Application Analysis of LTE Technology in Urban Rail Transit Signal System[J]. China Strategic Emerging Industry, 2018(12): 122.
- [7] 费黎丽. 信息系统等级保护测评报告自动评分研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [8] 张媛. LTE-U 在市域快线中综合业务承载的应用研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (8): 82-85.
Zhang Yuan. Application of LTE-U in Integrated Service Carrying of Urban Express Line[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(8): 82-85.
- [9] 归甜甜, 苏阿峰. 地铁信号系统 WLAN 与 LTE 车-地无线通信方案对比分析 [J]. 铁道通信信号, 2020, 56 (5): 83-86.
Gui Tiantian, Su Afeng. Comparative Analysis of WLAN and LTE as Train-Ground Radio Communication in Metro[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(5): 83-86.
- [10] 刘净, 陈燕. LTE 技术在城市轨道交通信号系统中的应用探讨 [J]. 科技资讯, 2020, 18 (22): 10-12.
Liu Jing, Chen Yan. Discussion on the Application of LTE Technology in Urban Rail Transit Signal System[J]. Science & Technology Information, 2020, 18(22): 10-12.
- [11] 孟寒松. LTE 承载市域铁路信号系统研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (7): 111-114, 119.
Meng Hansong. Research on LTE Bearing Suburban Railway Signaling System[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(7): 111-114, 119.
- [12] 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.

QC小组法在列控系统集成项目中的应用

单鹤玲

(北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

摘要: 基于列控系统集成项目实施质量管理的必要性和重要性, 在系统的研究项目质量管理理论知识的基础上, 以质量管理(QC小组法)在沪杭列控系统集成项目实施过程中的优秀实践为支撑, 对在高铁列控系统集成项目中实施质量管理模式和方法进行研究, 希望提供一种适用于高铁列控系统集成项目的质量管理方法, 有效控制高铁项目风险, 保证项目质量, 确保高铁运输安全, 支持高铁事业的发展。

关键词: QC小组; 高铁列控系统; 系统集成项目; 质量管理

中图分类号: U284

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0098-05

Application of Quality Control Circle in Train Control System Integration Project

Shan Heling

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

Abstract: Considering the necessity and importance of applying quality management in the integration project of high-speed railway train control system, this paper firstly makes systematic research on theories related to project quality management. On this basis, it makes a further analysis on the modes and methods of quality management (Quality Control Circle) by taking the successful experiences of quality management in the implementation process of Shanghai-Hangzhou high-speed railway train control system integration project as an example, hoping to provide a solution of quality management method suitable for integration project of high-speed railway train control system, so as to effectively guarantee the project quality, ensure the safety of high-speed railway transportation, and support the development of high-speed railway industry.

Keywords: Quality Control Circle (QCC); train control system for high-speed railways; system integration project; quality management

1 相关理论基础

1.1 QC小组法

QC小组(Quality Control Circle), 即质量

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2023-11-09

作者简介: 单鹤玲(1980—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 质量管理, 邮箱: shanheling@crscd.com.cn.

控制小组, 是“在生产或工作岗位上从事各种劳动的职工, 围绕企业的经营战略、方针目标和现场存在的问题, 以改进质量、降低消耗、提高人的素质和经济效益为目的的组织, 运用质量管理的理论和方法开展活动的小组。”

在实施质量的管理过程中, 人的作用是产品质

量的决定性因素。处于生产第一线的员工，他们对影响产品质量的因素最清楚，将这些人员以一定形式（也就是 QC 小组的形式）组织起来，共同管理产品质量，研究影响质量的问题并针对这些问题采取有效的控制措施，成为群众性质量管理活动的一种有效组织形式，它具有明显的自主性、广泛的群众性、高度的民主性和严密的科学性。

1.2 QC小组活动程序

实施 QC 小组方法，需要结合专业技术和管理工作两个方面，其在程序上遵循 PDCA 循环：P（Plan）计划、D（Do）执行、C（Check）检查、A（Action）处理。

P 计划阶段一般包含 6 个步骤：选定课题、识别主要问题、确定目标、原因分析、要因确认和制定对策；D 阶段即按照制定的对策实施的阶段；C 阶段对于所取得的效果进行检查；A 阶段包含两个步骤：制定巩固措施，防止问题再发生；提出遗留问题及下一步打算，这一系列过程即为 QC 小组的活动程序。

PDCA 循环具有循环前进、阶梯上升的特点，也就是按 PDCA 顺序前进，如图 1、2 所示，就能逐级上升达到更高的水平。同时，PDCA 的每个阶段本身也有它的小循环，让这个阶段的工作逐层循环、提高。

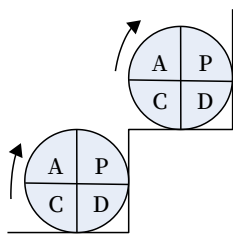


图1 PDCA循环阶梯示意
Fig.1 PDCA cycle ladder diagram

2 沪杭列控系统集成项目QC小组实施过程

2.1 人员组成

QC 小组一般由第一线的领导人员、技术人员、管理人员自主形成。通过实行自主管理，互相启发、集思广益，同时遵循科学的工作程序，层层深入地

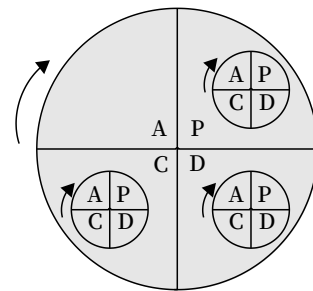


图2 PDCA自身循环示意
Fig.2 PDCA self-cycle diagram

分析问题、解决问题，保证工作的严密性、科学性。

沪杭项目 QC 小组按照 QC 小组法应用原则，主要由项目直接领导、各子系统负责人、各工作环节负责人自主组成，主要人员如表 1 所示。

表 1 沪杭项目QC小组人员构成

Tab.1 QC group role List in Shanghai-Hangzhou project

序号	项目组内角色
1	项目总工程师
2	项目质量、安全主管
3	项目质量工程师
4	项目安全工程师
5	专业系统集成负责人
6	专业系统设计负责人
7	各子系统负责人
8	各子系统开发负责人
9	各子系统测试负责人

2.2 选择课题

通过对沪杭项目进行风险源识别，识别出其中存在的一些隐性风险。例如：本项目第一次采用新开发的 iLOCK 联锁系统，并应用于 CTCS-3（简称 C3）项目中，RBC 系统同时连接数个 CBI 及 TSR 子系统等，为此，必须通过大量、完整的测试保证能解决这些问题给稳定性带来的风险。因此，项目组决定运用 QC 的理论和方法，针对沪杭实验室测试，成立沪杭客专实验室集成测试 QC 小组，对“沪杭实验室集成”课题进行攻关。

2.3 设定目标

基于现状分析，QC 小组对所掌握问题进行充分的讨论和分析，经与项目相关领导、专家、负责人沟通，针对问题明确制定了小组目标，并对目标实现进行可行性分析。

2.3.1 小组目标

QC 小组目标：确保沪杭各子系统软件功能满足需求，接口完善，达到开通要求，目标分解如下：

- 1) 测试需完成 C3 列控系统功能的全覆盖；
- 2) 通过实验室系统集成测试发现问题，提交开发环节修正后，确保子系统接口的完整性和正确性；
- 3) 通过实验室系统集成测试发现问题，由数据工程师重新核实，确保沪杭客专数据的准确性；
- 4) 通过版本控制确保各子系统软件版本统一性；
- 5) 完成缺陷分析和应急措施制定。

2.3.2 目标可行性

QC 小组在确定小组目标后，对目标的可行性进行分析，认为所确定目标可实现，分析如下：

- 1) 项目所在设计单位在业内享有盛誉，具有丰富的高铁列控系统集成经验；
- 2) 沪杭列控系统集成测试有 ETCS、CTCS 系

统测试案例库等可借鉴；

- 3) 项目所在设计单位已有多个子系统专项实验室及 C3 列控系统综合集成实验室；
- 4) 项目所在设计单位拥有众多经验丰富的专家，在技术上和研究重点上能够做好把关工作；
- 5) 项目所在单位相关领导对本次 QC 小组活动非常重视，给予了大力支持，并提供了充足的项目资金；
- 6) 沪杭项目组为一支具有丰富工作经历，参加过客运专线调试开通工作的团队，为课题完成奠定了基础。

2.4 分析原因

实验室集成测试 QC 小组对影响沪杭 C3 列控系统集成测试有效性的各方面原因进行分析后，利用因果图法找出阻碍沪杭系统实验室集成测试有效性的因素，如图 3 所示。

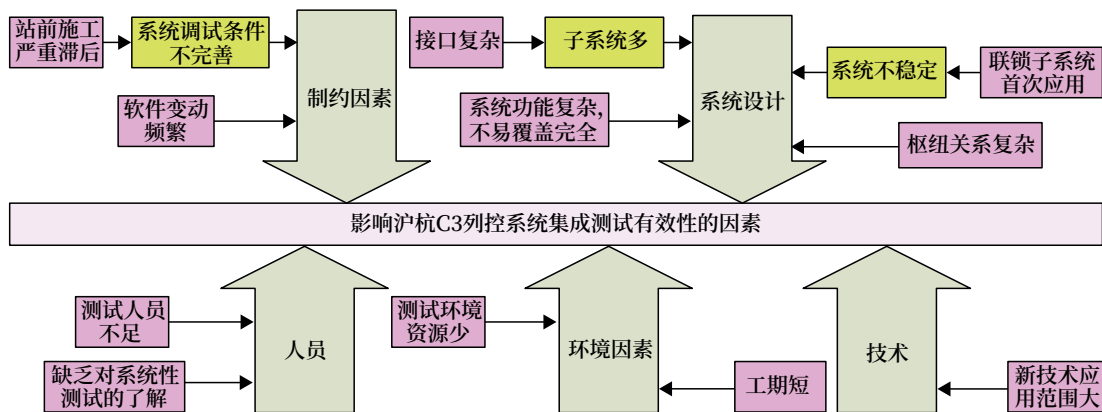


图3 影响沪杭C3级列控系统集成测试有效性的因果分析

Fig.3 Cause-effect analysis chart affecting Shanghai-Hangzhou CTCS-3 train control system integration test effectiveness

2.5 要因确认

在对影响沪杭 C3 列控系统集成测试有效性的原因进行分析识别后，QC 小组全体成员针对所得出的 11 项末端因素逐一进行分析讨论，将各项末端因素分类，找出影响问题的主要原因，制定要因确认如表 2 所示。

2.6 制定对策

在经过原因分析确定要因后，QC 小组针对已确定的每条主要原因提出相应对策，并对对策的有

效性、可实施性进行研讨，最终形成本课题的要因对策，如表 3 所示。

2.7 执行措施

对策制定完成后，项目成员按照对策表严格执行应对措施，QC 小组跟踪实施效果如下。

1) 措施一

项目组成员通过分析 C3 功能和运营场景，制定测试矩阵，并据此编制测试案例，保证测试案例覆盖所有沪杭线车站，覆盖 C3 列控系统所有功能。

表2 要因确认

Tab.2 Essential factor confirmation

序号	末端因素	要因确认内容	结论
1	系统功能复杂, 不易覆盖完全	沪杭项目列控系统集成场景、案例组合多, 当前测试案例未能完全覆盖	主因
2	枢纽站关系复杂	沪杭项目虹桥枢纽共有5个车场, 规模大、关系复杂、涉及众多厂家不同型号设备	主因
3	子系统多, 接口复杂	沪杭项目包括 GSM-R 在内约有 24 种接口, 复杂程度对于系统的整体功能及性能影响很大	主因
4	站前线路不具备测试条件	站前线路, 主要是站内侧线施工严重滞后, 不具备条件, 影响现场验证测试工作, 可以通过项目组与现场施工单位协调解决	非主因
5	任务量大, 工期太短	受各方因素影响导致集成测试时间被极大压缩, 且受站前施工进度滞后影响, 数据变动频繁	主因
6	测试环境资源缺少	当前测试实验室真实设备缺少, 可以通过模拟仿真系统解决	非主因
7	新技术应用范围广	项目组通过调用有多年列控系统集成经验的老专家指导、支持解决	非主因
8	联锁子系统在 C3 线路首次应用, 带来系统稳定性问题	首次在 C3 线路应用的 iLOCK 联锁子系统, 需借鉴武广联锁系统集成经验加强功能和接口测试	主因
9	软件频繁变动	软件版本多, 难于管理, 各项测试任务量大	主因
10	测试人员不足	实验室集成测试工程师缺少, 项目组可通过调用、增加人员解决	非主因
11	缺乏对系统性测试的了解	通过加强培训解决	非主因

项目小组共编制测试案例 336 个, 其中功能性测试案例 291 个, 稳定性测试案例 45 个, 包含全部 14 个运营场景和全部 C3 功能。

2) 措施二

为克服新研发联锁子系统接入可能产生的问题, 项目组成员模拟武广客专联锁系统研制及测试过程, 针对新联锁系统执行了 4 轮功能测试、3 轮稳定测试, 确保能够免除系统接入带来的不利因素, 保证相应功能的有效性、稳定性。

3) 措施三

表3 要因对策

Tab.3 Essential factor countermeasure

序号	要因	对策	措施	达到目标	负责人
1	新开发联锁没有应用实例	参考其他项目的联锁测试实验, 吸取先进经验	借鉴武广联锁系统的测试经验, 完善新联锁接口稳定性、系统稳定性的相关测试案例编写	满足系统设计需求	联锁子系统负责人
2	测试案例难于覆盖系统的全部功能	借鉴国内、国外及武广项目的相关经验	对 C3 系统的运营场景及线路特性进行深入研究, 制定相应的测试案例	全面覆盖 C3 系统全部功能	测试总工
3	复杂的枢纽接口问题	进行模拟仿真测试	根据现场场景对枢纽进行仿真, 对系统 C3 功能和数据进行全、全程测试	枢纽部分如期完工	系统测试负责人
4	接口复杂	加强接口部分的管理	根据制定的管理措施, 保证所有子系统接口在进行接口验证测试前必须完成子系统接口自测	子系统符合实验室要求	系统测试负责人
5	工期紧张、任务重	分时、分组进行测试	通过适当增加工时, 设备全天候运行的方式解决	根据现场进度完成室内测试	测试实施负责人
6	数据频繁变动	每日召开例会	及时掌握数据变化情况, 提前沟通发现问题	及时获取变动通知	系统测试负责人

根据现场反馈, 项目组在实验室进行了故障复现测试, 同时模拟相同场景进行测试, 两者对比, 寻找差异。

4) 措施四

由于工期紧张、站前滞后严重, 测试时间压缩, 数据频繁变动, 室内测试任务变得异常繁重, 为此, 项目组采用分组、分时测试方法, 结合实验室和现场场景, 互相验证, 最终完成了测试目标, 四电集成的工作重心转移至现场动态验收阶段。

5) 措施五

针对软件频繁变动带来的管理难题, 项目组安排专职的配置管理人员, 配置专用服务器, 对软件的发布、部署进行统一管理, 保证测试软件与现场部署软件的一致性及被测软件的有效性, 更由此提前发现软件中存在的缺陷, 据此对各种因数据变化

而造成的修改进行验证，同时，对现场发现的问题进行再测试，保证沪杭客专联调联试及试运行阶段的平稳运行。

2.8 检查效果

通过项目组的努力，C3 实验室的集成测试为现场联调提供充分的信息支持和坚实的技术支持，为沪杭系统的集成分担了很大的压力，现场故障明显减少，系统稳定运行，大步提高系统集成测试的有效性，带来了很好的经济效益和社会效益。

1) 技术效果

QC 小组对沪杭实验室集成测试，对测试发现故障与测试案例比率进行统计（测试发现故障与测试案例比率 = (测试发现故障)/(测试案例数 × 测试轮数)，如图 4 所示，其中，沪杭测试案例数为 336)，沪杭 C3 列控系统实验室集成工作产生技术效果显著。

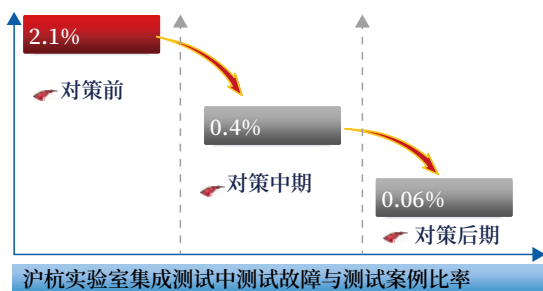


图4 技术效果
Fig.4 Technical effect

2) 社会效果

沪杭客专顺利开通，项目组获得年度铁道部火车头奖、上海铁路局安全生产奖等，沪杭列控系统集成测试有效性 QC 小组获得当年铁道部优秀质量管理小组奖。沪杭的顺利开通有效解决长三角地区交通瓶颈，充分显示由客运专线带来的“同城效应”。

3) 无形效果

通过在沪杭项目中实施 QC 小组活动，小组成员在质量意识、个人能力等方面得到很大提高，给未来应用 QC 知识、解决相应问题以及在团队合作方面，都增强极大的信心。

3 总结

沪杭项目组为对关键风险进行攻关成立 QC 小组，通过 QC 小组法，参与对危险源的分析，找出制约沪杭集成的关键因素，在有限的时间和资源下，充分调动所有成员的能动性，针对主因，制定对策，落实负责人并编制实施计划，通过大量的测试和验证解决了沪杭系统集成过程中遇到的大量问题，大幅度提高了现场的效率，节省联调联试时间。同时，通过在项目中实施 QC 小组法，项目组体会到小组成员“质量”观念得到加强，认为这种方法在高铁列控系统集成项目中有较高的应用价值。

参考文献

- [1] 任旭. 工程风险管理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [2] 卢有杰, 卢家仪. 项目风险管理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [3] 沈建明. 项目风险管理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] 熊伟. 运筹学 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] 黄绍伟. 浅谈客专工程施工安全质量管理 [J]. 中国新技术新产品, 2012 (12): 256.
Huang Shaowei. Discussion on Safety and Quality Management of Passenger Dedicated Engineering Construction[J]. China New Technologies and Products, 2012(12): 256.
- [6] 刘鑫. 秦沈客运专线工程质量管理综述 [J]. 铁道标准设计, 2001, 45 (10): 8-11.
Liu Xin. Summary of Quality Management of Qinhuangdao-Shenyang Passenger Dedicated Line Project[J]. Railway Standard Design, 2001, 45(10): 8-11.
- [7] 宋沛东, 张勇. CTCS3 仿真测试平台: RBC 仿真子系统的设计与实现 [J]. 中国科技信息, 2008 (1): 100-101, 103.

(下转 115页)

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2024.01.019

板载继电器寿命测试系统设计与实现

王鑫, 赵兴海, 姚旺

(沈阳铁路信号有限责任公司, 沈阳 110025)

摘要: 为实际测试板载继电器是否能够达到使用期限的要求, 提高板载继电器产品的稳定性和可靠性, 设计基于嵌入式的板载继电器寿命测试系统对板载继电器的机械寿命和电气寿命进行测试。在系统结构方面, 分为下位机和上位机两部分, 下位机以嵌入式系统为基础, 通过主控模块完成对板载继电器的驱动及外围逻辑电路的搭建, 对动作过程中待测继电器的接点状态进行采集并将故障信息进行编码, 通过 RS-232 通信方式将故障编码信息传输给上位机。上位机采用 C# 编程语言进行设计, 具有对故障编码信息进行存储、分析与显示等功能。最后, 通过系统联调实验验证此系统在信息采集、数据通信以及故障诊断等方面的可行性和实用性。

关键词: 板载继电器; 寿命测试; 故障诊断; RS-232 通信; 嵌入式

中图分类号: U284.71

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0103-05

Design and Implementation of Onboard Relay Life Test System

Wang Xin, Zhao Xinghai, Yao Wang

(Shenyang Railway Signal Co., Ltd., Shenyang 110025, China)

Abstract: In order to actually test whether the onboard relay can meet the requirements of the service life and improve the stability and reliability of the onboard relay products, an embedded onboard relay life test system is designed to test the mechanical and electrical life of the on-board relay. In terms of system structure, it is divided into two parts: the lower computer and the upper computer. Based on the embedded system, the lower computer completes the drive of the onboard relay and the construction of the peripheral logic circuit by way of the main control module, collects the contact state of the relay to be measured in the process of action and codes the fault information, and transmits the coded fault information to the upper computer through RS-232 communication. The upper computer is designed with C# programming language, and has the functions of storing, analyzing and displaying the coded fault information. Finally, the feasibility and practicability of the system in information acquisition, data communication and fault diagnosis are verified through system joint debugging.

Keywords: onboard relay; life test; fault diagnosis; RS-232 communication; embedded

收稿日期: 2022-09-03; 修回日期: 2023-09-08

基金项目: 沈阳铁路信号有限责任公司科研项目 (2300-K1220003)

第一作者: 王鑫 (1981—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 设备检测技术, 邮箱: 1403202199@qq.com。

1 概述

继电器作为一种具有隔离功能的自动开关元件, 因为其出色的控制功能被广泛应用于遥控、遥测、

通讯、自动控制、机电一体化及电力电子设备中。其中，板载继电器作为面向铁路信号系统印制板应用的低高度小型继电器，是铁路列车控制系统和计算机联锁设备中的重要组成部件，在铁路运行安全系统中发挥了重要作用。因此，板载继电器的使用寿命直接关系到铁路信号设备的维护周期以及整个铁路系统的运行安全。

板载继电器作为电磁继电器的一种，通过输入额定电压使磁路系统中铁芯励磁，靠磁力将衔铁吸引，衔铁带动拉杆使接点系统动作，完成继电器通断功能。在继电器使用过程中，影响继电器寿命试验的因素有很多，例如结构误差、材料磨损等原因造成继电器无法正常工作。通过对失效继电器分析可知，零部件的磨损是影响继电器使用寿命最重要的原因，按照磨损位置大致可以分为以下3类。

1) 塑料件磨损：拉杆是继电器的关键零部件之一，它是磁路系统与接点系统连接的桥梁，如果拉杆磨损严重，会导致继电器动作时衔铁带动拉杆的行程发生变化，从而影响接点压力，磨损严重时可能无法使接点正常闭合。

2) 金属件磨损：在继电器使用期间，衔铁要经历百万次以上的动作，磨损会导致衔铁转动角度变大，使磁路主气隙变大，降低磁路系统的工作效率，影响继电器产品性能。

3) 触头磨损：继电器动作时要求触头表面光滑无破损，但随着动作次数的增加，触头表面会发生变化，在接触点位置会形成接触凹坑，有表面处理的触头镀层可能会破损，使接点压力降低，接触电阻变大，影响继电器的产品性能。

为了实际测量板载继电器是否能够达到使用寿命要求，将继电器的元器件缺陷和生产过程中存在的隐患提前暴露，保证继电器产品能够经得住时间的考验，提高板载继电器的稳定性和可靠性，需要对继电器进行寿命实验。板载继电器的寿命测试周期较长，测试过程需记录测试数据以备后期分析，且需要对机械寿命和电气寿命两种测试指标进行测试，工作量较大且测试过程比较繁琐。采用人工测

试或单一功能的测试台都会造成人力、物力的浪费。

为了解决上述问题，设计基于嵌入式的板载继电器寿命测试系统。该系统分为上位机和下位机两部分，由硬件系统和软件系统组成。通过硬件系统和软件系统的配合克服了以往检测系统检测范围及检测内容相对单一的缺点，可以对不同型号板载继电器的机械寿命和电气寿命在不同运行条件下的运行状态进行检测。上位机通过与下位机的信息交互，完成对测试过程中测试参数的设置，并对待测继电器的故障信息进行分析、显示及存储。

2 硬件系统

板载继电器寿命测试系统能否正常工作、实现其既定功能与硬件系统息息相关。在硬件系统设计过程中，除了要考虑系统所要求的采样准确性、通信实时性和数据传输稳定性等技术指标外，还要考虑软硬件的可维护性和扩展性，以便对系统进一步集成开发与后期系统维护与升级。其硬件系统单工位结构示意图如图1所示。

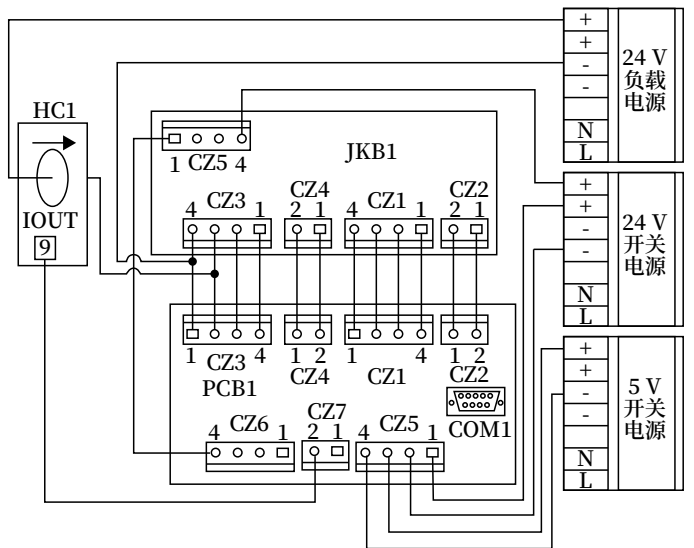


图1 单工位硬件系统结构
Fig.1 Single-station hardware system structure

该系统设置2个测试区域共8个测试工位，每个区域内的4个测试工位可同时对同种型号的继电器进行机械寿命或电气寿命的测试，且两个测试区域之间相互独立，拥有各自的辅助测试设备。通过

8个主控板对相应数量的板载继电器的接点状态进行实时采集,在进行电气寿命测试时,通过霍尔传感器的返回值检测接点的工作情况。主控板接收到霍尔传感器的信号后,通过RS-232通信串口与上位机进行信息的传输。上位机与下位机的信息交互过程中各个测试模块间相互独立、互不干扰,保证信息采集的准确性。

2.1 主控模块

主控模块采用PIC18F45K80增强型闪存单片机作为主控芯片,每个测试模块控制板内部通过单片机接收到上位机的指令,驱动相应的电路来控制小型继电器进行测试所需要的各种逻辑关系及电路连接,以此来完成相应接点状态信息的采集。若待测继电器存在故障,通过单片机内部程序对故障信息进行编码,进而完成采集信息的传输。主控模块实物如图2所示。

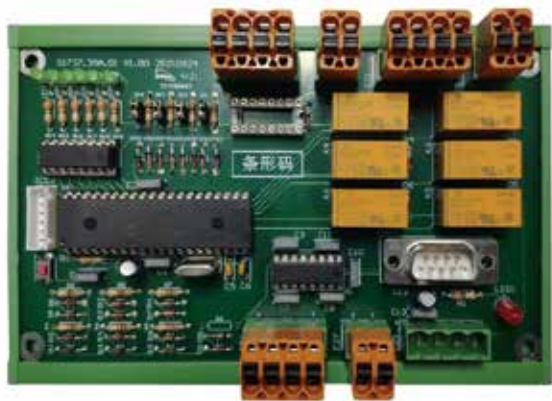


图2 主控模块实物

Fig.2 Physical drawing of main control module

2.2 电源模块

电源装置的可靠性决定了系统中各个元件的有效性以及复杂系统能否实现无故障运行。在本文设计的板载继电器寿命测试系统中,电源模块分为驱动电源和负载电源两部分。驱动电源采用的UNO POWER电源,其具有效率高、空载损耗低、输出稳定等优点,保证在机械寿命时为待测继电器及逻辑电路的切换提供稳定的电源输出,保证测试系统对故障信息诊断的准确性;负载电源采用魏德米勒

Pro MAX电源,通过给待测继电器接点增加负载电源模拟继电器的实际工作环境,测试待测继电器在使用过程中的电气寿命,而负载电源输出的稳定性和可靠性保证了测试条件的一致性。

2.3 传感器模块

在本文设计的系统采用JK-D800A系列霍尔电流传感器检测继电器动作过程中检测点是否有电流流过,达到分析继电器接点通断的目的。当检测点有电流流过时,霍尔传感器内部会因为磁感应强度的变化使霍尔电压值发生改变,将霍尔传感器的输出端与主控芯片的检测端相连,通过输出电压值的变化确定在进行电气寿命实验时待测继电器接点的通断状态,达到实时监测继电器接点的目的。

3 软件系统

为了使板载继电器寿命测试系统能够满足要求,不仅需要设计硬件系统,还需要相应软件程序与硬件电路进行配合,才能发挥系统真正的测试作用。本文设计的板载继电器寿命测试系统软件分为下位机软件 and 上位机软件两个部分。下位机软件程序负责待测继电器接点状态的采集、数据编码及传输,上位机软件负责录入待测继电器的相关信息、设置测试过程中的相关参数,并对采集到的数据进行处理,将结果进行显示。

3.1 下位机软件

下位机是以嵌入式系统为基础进行设计开发,嵌入式系统最大的优点是可以对软件系统进行模块化编程。作为待测继电器接点状态采集的首要环节,其采集信号的质量严重影响信号传输、诊断等一系列功能的正常实现。

通过对本文设计的系统既定功能的进行详细分析后,可以得到下位机软件系统主程序流程及数据编码程序流程,如图3、4所示。

3.2 上位机软件

上位机软件采用C#程序开发语言进行人机界面和控制程序的开发设计,通过上位机显示界面可以输入待测继电器的编码和型号、选择待测继电器

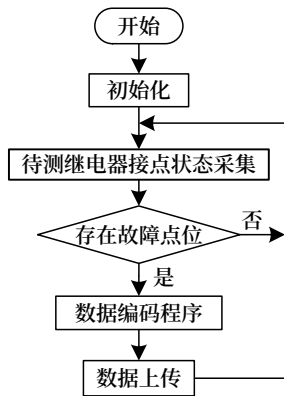


图3 下位机主程序流程
Fig.3 Main program flowchart of the lower computer

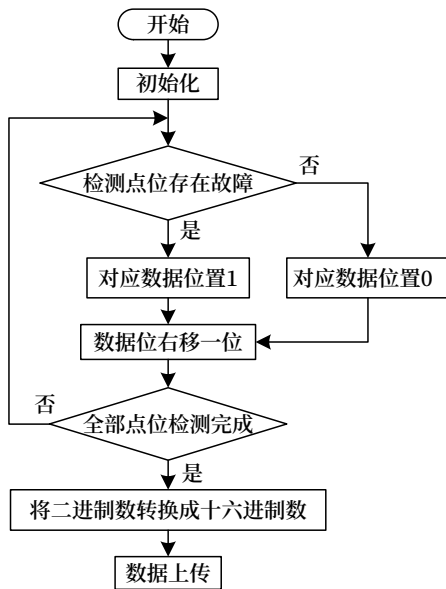


图4 数据编码程序流程
Fig.4 Data coding program flowchart

进行机械寿命测试还是电气寿命测试，同时还可以对测试过程中的最大动作次数、最大失效次数、动作频率、占空比等参数进行设置。待测继电器在测试过程中出现的相关故障信息也在上位机界面中进行统计并显示，并将测试数据进行自动存储，以便进行后期分析。

4 系统测试

将整个测试系统组装完成并检查电路连接无误后，启动电源进行上电操作。系统自检完成后，可通过上位机显示界面上的设备状态指示灯得知系统工作状态是否正常。在上位机界面内将测试过程中

的相关参数设置完成后即可开始测试。上位机初始界面如图5所示。

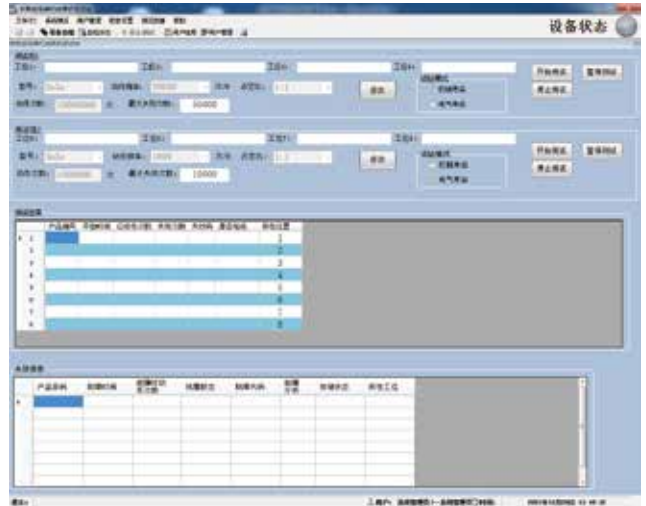


图5 上位机初始界面
Fig.5 Initial interface of the upper computer

为检测本文设计的系统是否可以识别出待测继电器存在的故障，通过改变继电器结构模拟故障情况进行测试。由图6中显示可知，测试过程中，若待测继电器有故障发生，上位机通过接收下位机发送的故障代码，通过解码程序解析出待测继电器的故障位置并在失效信息显示框内显示故障继电器的信息、故障发生的时间、故障时动作次数以及故障发生时的线圈状态，并将数据自动保存，达到对待测继电器进行分析改进的目的。

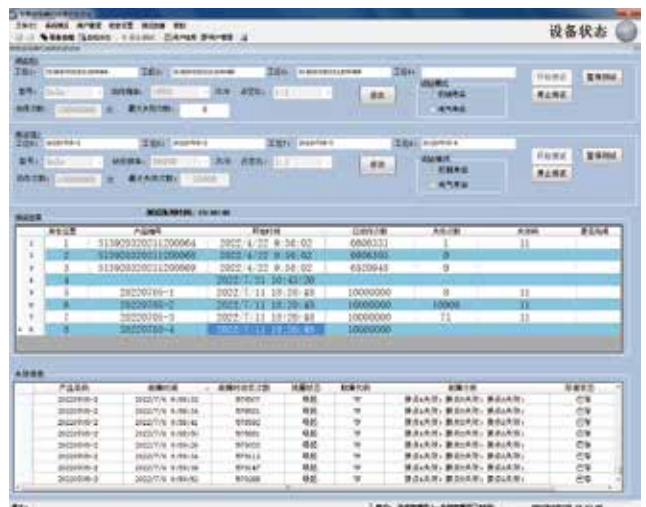


图6 测试信息显示界面
Fig.6 Test information display interface

5 结论

本文设计的板载继电器多工位寿命测试系统可以同时板载继电器的机械寿命和电气寿命进行自动测试并记录每次故障产生的原因及位置,提高故障定位的精确度,有利于故障排除及后期分析,在故障数超过允许值或动作次数达到设定值后自动停止,在丰富测试项的同时提高测试条件的一致性;同时,为满足不同使用条件下,继电器的动作频率不同的情况,该测试台可以提供多种动作频率进行测试,提高测试效率,保证测试环境与使用环境的一致性,为板载继电器的使用寿命评估提供强有力的数据支撑。

参考文献

- [1] 李锋. 一种继电器可靠性分析的方法及测试平台[J]. 电子技术, 2021, 50(8): 292-293, 296.
Li Feng. A Method of Test Platform for Relay Reliability Analysis[J]. Electronic Technology, 2021, 50(8): 292-293, 296.
- [2] 郭国庆, 李庆诗, 刘炜. 继电器缓冲包装跌落试验与设计方法[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(5): 104-108.
Guo Guoqing, Li Qingshi, Liu Wei. Cushion Packaging Drop Test and Design Method of Relay[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(5): 104-108.
- [3] 翁悦宁, 许赛文. 一种铁路信号继电器测试电路[J]. 兰州工业学院学报, 2018, 25(6): 47-51.
Weng Yuening, Xu Saiwen. A Railway Signal Relay Test Circuit[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2018, 25(6): 47-51.
- [4] 梁春风, 陈润焱. 地铁列车继电器测试装置的设计[J]. 机车电传动, 2018(3): 112-113.
- [5] 张钦. 铁路继电器自动测试装置的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [6] 王江, 韩征权. 继电器混合负载寿命试验设备的改进[J]. 机电元件, 2020, 40(5): 43-44, 48.
Wang Jiang, Han Zhengquan. Improvement of Relay Mixed Load-Life Testing Equipment[J]. Electromechanical Components, 2020, 40(5): 43-44, 48.
- [7] 方明义, 陈新春, 刘静然, 等. 继电器测试设备的研究与应用[J]. 现代电子技术, 2012, 35(8): 185-187.
Fang Mingyi, Chen Xinchun, Liu Jingran, et al. Study and Application of Relay Test Equipment[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(8): 185-187.
- [8] 付立民. 全电子联锁开发和应用研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(3): 32-38.
Fu Limin. Research on Development and Application of Full Electronic Interlocking[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(3): 32-38.
- [9] 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.

塞尔维亚信号系统与ETCS-2系统结合的应用

梁 滨

(北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

摘要: 根据塞尔维亚铁路信号系统的系统需求和本国列车防护系统的特点, 通过对 ETCS 等级转换、行车许可的分析, 提出塞尔维亚信号系统与 ETCS-2 系统结合的适配性解决方案和应用探讨, 为中国高铁技术装备“走出去”提供技术参考。

关键词: 匈塞铁路; ETCS-2; 行车许可; 过走防护; 危险点

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2024)01-0108-08

Application of Integration of Serbian Signaling System with ETCS-2 System

Liang Bin

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

Abstract: According to the requirements of Serbian railway signaling system and the characteristics of the national train protection system, this paper puts forward the adaptive solution and application discussion of integration of Serbian signalling system with ETCS-2 system based on the analysis of ETCS level transition and movement authority, so as to provide technical reference for the "Go Global" of China's high-speed railway technology and equipment.

Keywords: Hungary-Serbia Railway; ETCS-2; movement authority; overlap; danger point

1 塞尔维亚铁路信号系统及欧洲铁路通道概述

截至 2021 年, 塞尔维亚国内运营铁路里程达到 3 333.4 km, 运营车站 404 个, 铁路通道与周边各国均有接口。塞尔维亚铁路信号系统, 多数车站装备了继电联锁或者电子臂板联锁设备, 全国有 4 个车站装备了计算机联锁设备; 区间闭塞采用三显示自动闭塞或者站间闭塞; 干线铁路车站和区间装备感应式

列车防护系统 I60 (德语: Induktive Zugsicherung I60, Indusi I60) 型自动停车系统。

随着塞尔维亚境内泛欧铁路走廊 10 号、11 号通道的修建, 对塞尔维亚铁路信号系统提出了与欧洲其他国家互联互通的要求, 需要在既有信号系统的基础上叠加欧洲列车运行控制系统 (European Train Control System, ETCS)。结合匈塞铁路塞尔维亚段的建设探讨塞尔维亚信号系统与 ETCS-2 列控系统结合的若干问题。

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2023-10-21

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 (N2022B009)

作者简介: 梁滨 (1985—), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向: 铁路信号, 邮箱: liangbin@crscd.com.cn。

2 塞尔维亚信号系统的特殊点

2.1 过走防护的处理

根据塞尔维亚信号安全设备技术规则 Rulebook

on Technical Requirements for Signal - Safety Devices ("Official Gazette of the Republic of Serbia" No.18/16 and 89/16) 要求, 列车进路末端应设置不小于 50 m 的过走防护距离。塞尔维亚信号系统通常在站内采用单独的轨道区段作为保护区段, 区间以及进站信号机处, 采用绝缘节 (或计轴磁头) 设置于列车信号机内方不小于 50 m 的位

置来实现不小于 50 m 的过走防护距离。

对于接车进路, 保护区段随着选排进路选出, 并采取与主进路相同的原则检查道岔位置、区段空闲、侧防条件满足等条件后锁闭进路; 在主进路随着列车顺序占压完全解锁后延时 90 s 自动解锁, 或列车未进入, 采用人工解锁进路后随主进路一并解锁。站内保护区段如图 1 所示。

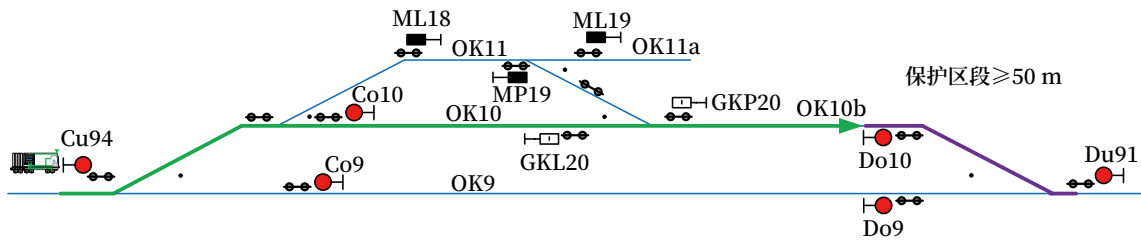


图1 站内过走防护示意
Fig.1 Station overlap diagram

发车进路和区间闭塞分区采用闭塞分区区段末端区间信号机与绝缘节 (或计轴磁头) 间差置的距

离作为过走防护距离, 不设置独立的保护区段, 如图 2 所示。

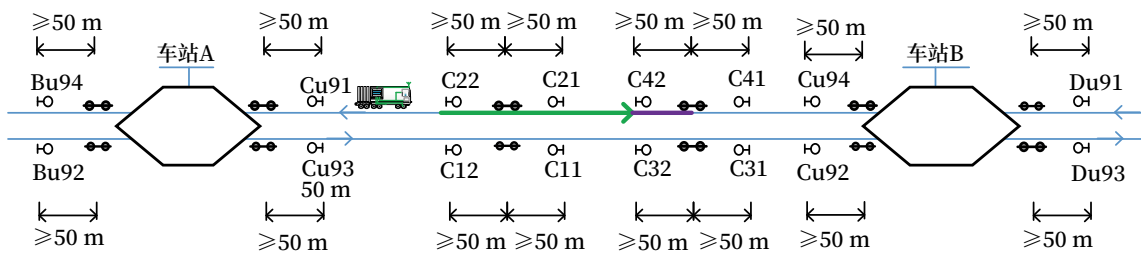


图2 区间过走防护示意
Fig.2 Section overlap diagram

2.2 自动停车系统

塞尔维亚采用 Indusi I60 型自动停车系统作为本国列车防护系统。Indusi I60 型自动停车系统是一种点式列车防护系统, 由轨旁设备和车载设备组成。Indusi 轨旁设备包括 500 Hz、1 000/2 000 Hz 应答器, 由电感、电容组成相应频率的谐振回路; Indusi 车载包括车载计算机、人机界面、车载天线和速度传感器。系统工作时, 车载天线对外发送 500 Hz、1 000 Hz、2 000 Hz 频率的信号, 列车经过轨旁应答器时, 车载设备通过磁通量的变化感应所经过的轨旁应答器谐振频率, 从而触发车载设备采取相应的措施。

在车站、区间的列车信号机, 以及站间闭塞的

进站预告信号机处安装 1 000/2 000 Hz 应答器, 其中 1 000 Hz 信号指示在规定的时间内列车速度降至某规定值 (不同制动模型的时间和速度值不一致); 2 000 Hz 信号指示立即实施制动; 根据防护需要在距列车信号机一定距离设置 500 Hz 应答器设备, 车载收到 500 Hz 信号时检查列车速度, 在列车运行 153 m 内列车速度降至某规定值, 持续监控列车速度。Indusi 系统制动模型如图 3 所示。

2.3 站内联锁和区间闭塞设备 (APB) 接口

塞尔维亚既有贝尔格莱德 - 旧帕佐瓦 - 希德 (克罗地亚边境) 车站站内采用西门子 SpDrS64-JŽ 型继电联锁, 区间采用 SpDrS64-JŽ 型自动闭塞设备, 支持双线双方向自动闭塞; 旧帕佐瓦 - 诺维

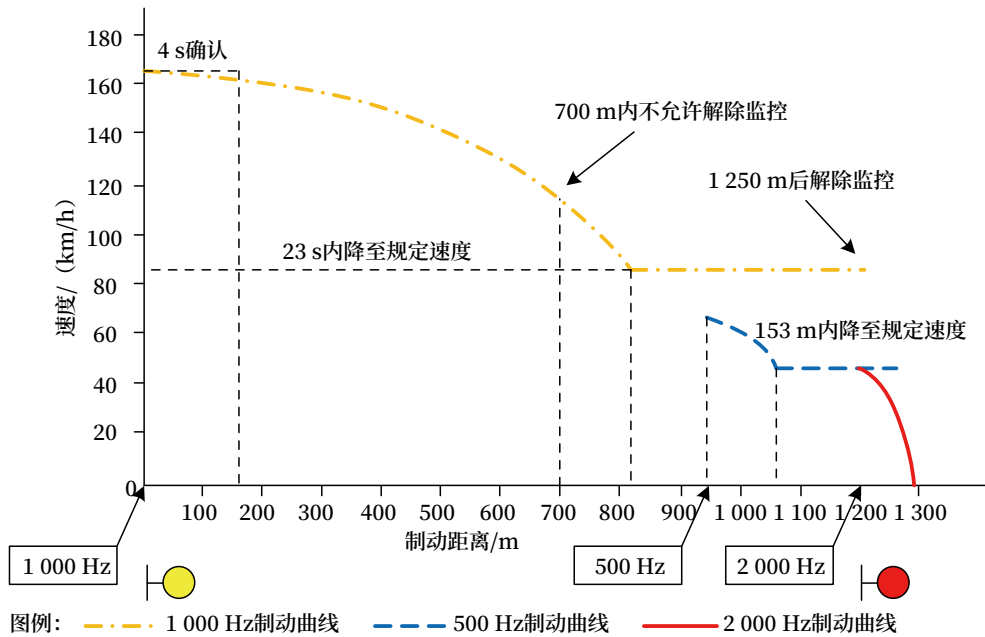


图3 Indusi自动停车系统制动曲线示意
Fig.3 Braking curve diagram of Indusi automatic stopping system

萨德-苏博蒂察-克莱比奥（匈牙利边境）车站站内采用西屋 CIW-WABCO-209.000-JŽ.69 型继电器联锁，区间采用 CIW-WABCO-210, 000-JŽ.69 型自动闭塞设备，支持双线双方向自动闭塞。站内联锁设备集中设置于机械室内，区间自动闭塞设备分散设置于区间 APB 房屋内，每个信号点设置一个 APB 房屋，控制该信号点处双方向区间通过信号机、轨道电路以及 Indusi 设备，双线区段可控制 4 架通过信号机及相关设备。

匈塞铁路建设后，正线车站采用 DS6-60 全电子联锁，控制站内设备以及区间信号机点灯，与其他支线接口处（如旧帕佐瓦-希德方向），需与既有区间自动闭塞设备接口，完成改方、发车信号开放条件检查、区间条件传递等功能。

3 塞尔维亚信号系统与ETCS-2结合

3.1 匈塞ETCS-2系统概述

匈塞铁路作为泛欧 10 号通道的一部分，为满足跨境列车互联互通运行的要求，匈塞铁路塞尔维亚境内采用 ETCS-2 级列控系统，满足 TSI CCS 规范子集 #3（ETCS 基线 3 发布 2）中系统功能和接口规范要求，系统版本 X=1，不采用 ETCS-1 级系

统作为后备模式。

匈塞铁路 ETCS 系统支持以下 15 种工作模式，分别为：完全监控模式（Full Supervision, FS）、目视模式（On Sight, OS）、人工驾驶模式（Staff Responsible, SR）、调车模式（Shunting, SH）、未装配模式（Unfitted, UN）、休眠模式（Sleeping, SL）、待机模式（Stand By, SB）、冒进模式（Trip, TR）、冒后模式（Post Trip, PT）、系统故障模式（System Failure, SF）、隔离模式（Isolation, IS）、未上电模式（No Power, NP）、非本务模式（Non Leading, NL）、国家系统模式（National System, SN）和退行模式（Reversing, RV），系统版本 X=2 支持的部分监控模式（Limited Supervision, LS）、被动调车模式（Passive Shunting, PS）可在后续系统版本升级后支持。

ETCS-2 列控系统由车载和轨旁设备构成。列控轨旁设备由无线闭塞中心（RBC）、临时限速服务器（TSRS）、安全数据网接入设备、应答器等组成。根据线路和车站规模，匈塞铁路塞尔维亚境内设置 3 套 RBC、2 套 TSRS 设备，集中设置于贝尔格莱德中心站 RBC 机房内。RBC 根据区段占用、联锁进路

等信息生成行车许可 (MA), 并通过 GSM-R 无线通信系统将 MA、线路参数、临时限速传输给车载设备; 同时通过 GSM-R 无线通信系统接收车载设备发送的位置和列车数据等信息。临时限速命令由临时限速服务器统一管理, 在调度中心由 CTC 操作终端进行临时限速下达和取消操作。采用计轴占用检查装置

实现对列车占用区间、车站轨道区段的检查; 考虑到匈塞铁路需运行既有列车, 轨旁信号和 Indusi 自动停车设备得到保留, 计算机联锁设备通过设置于轨旁的目标控制器控制区间信号机和 Indusi 设备, 并将轨道区段与信号点灯状态结合送给 RBC。匈塞铁路 ETCS-2 系统总体结构如图 4 所示。

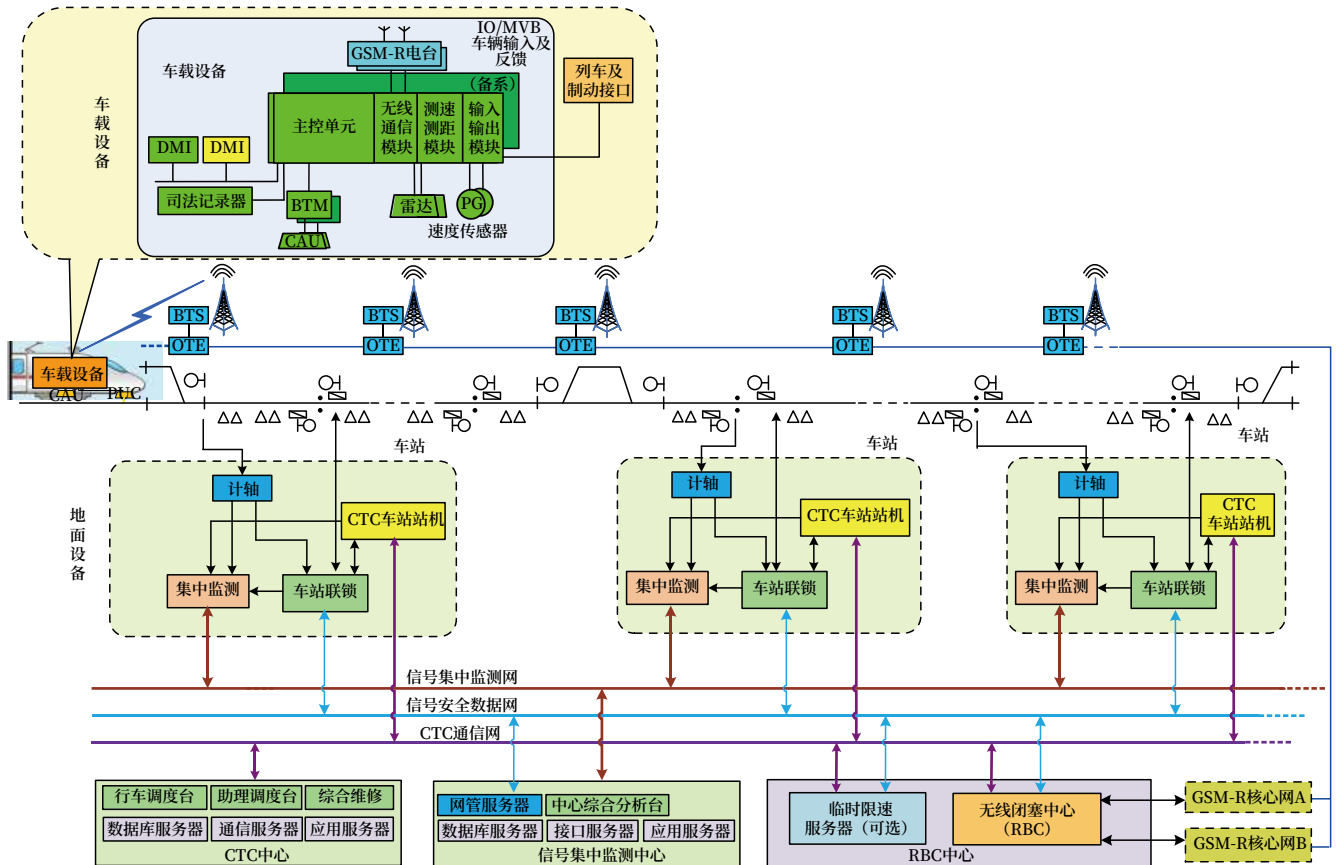


图4 ETCS-2系统总体结构示意图

Fig.4 Overall structure diagram of ETCS-2 system

3.2 与既有国家模式的结合

3.2.1 运输需求

基于列控车载设备考虑, 将会有以下 3 种列车在匈塞铁路上运行:

1) 同时安装了 ETCS 车载设备和既有国家模式车载设备 (PZB/Indusi) 的列车, 或 ETCS 车载设备兼容了 PZB 功能, 例如塞尔维亚新采购的高速列车;

2) 仅安装了既有国家模式车载设备 (PZB/Indusi) 的列车, 例如塞尔维亚既有运行的客车和

货车;

3) 仅安装 ETCS 车载设备的列车 (ETCS 车载设备不兼容 PZB 功能), 例如其他国家 (国家模式为非 PZB/Indusi 系统) 的跨国列车。

对于第一种类型的列车, 在 ETCS 轨旁设备正常工作时, 司机凭车载信号在 ETCS 车载设备的监控下运行。如果 ETCS 轨旁设备发生故障, 在列车停车后, 司机可以操作将车载设备转为 SN 模式 (ETCS-NTC 等级), 司机按照塞尔维亚既有行车管理办法行车, 以轨旁信号作为行车凭证, PZB/

Indusi 系统提供一定程度的速度监控和闯红灯防护功能。

对于第二种类型的列车，司机按照塞尔维亚既有行车管理办法行车，以轨旁信号作为行车凭证，PZB/Indusi 系统提供一定程度的速度监控和闯红灯防护功能。

对于第三种类型的列车，在 ETCS 轨旁设备正常工作时，司机凭车载信号在 ETCS 车载设备的监控下运行。如果 ETCS 轨旁设备发生故障，在列车停车后，司机可以将车载设备转为 UN 模式（ETCS-0 等级），司机按照塞尔维亚既有行车管理办法行车，以轨旁信号作为行车凭证，不超过 UN 模式的顶棚速度运行。

3.2.2 等级转换

匈塞铁路为既有线路更新改造，与塞尔维亚境内其他线路接口较多。考虑到匈塞铁路列车套跑至其他线路的需求，在线路衔接处设置等级转换点。

1) ETCS-0/NTC → ETCS-2

在 ETCS-0/NTC → ETCS-2 等级转换处，设置 GSM-R 注册、RBC 呼叫、等级转换预告、等级转换执行 4 组应答器（应答器组由两台无源应答器组成），上述应答器组可与其他用途的应答器合用，也可以根据需要单独设置，应答器组间距离根据 GSM-R 网络 QoS 要求（Subset-093）以及车-地间数据通信时间综合考虑。ETCS-0/NTC → ETCS-2 等级转换信息由 RBC 发送。

2) ETCS-2 → ETCS-0/NTC

在 ETCS-2 → ETCS-0/NTC 等级转换处，设置等级转换预告、等级转换执行 2 组应答器，并且在等级转换执行应答器后方设置一组应答器用于断开 RBC 连接（应答器组由两台无源应答器组成）。上述应答器组可与其他用途的应答器合用，也可以根据需要单独设置。

本线列车向支线运行时，ETCS-2 → ETCS-0/NTC 等级转换需要 APB 设备向联锁提供区间方向、区段状态和信号机点灯状态，进而提供给 RBC 以实现列车完全监控模式下进行等级转换。

3) 等级转换列表

车载设备收到轨旁设备提供的等级转换优先级列表，将选用车载设备所支持的等级中与轨旁设备的等级转换优先级列表中最高优先级的等级，即如果车载设备支持 1、0、NTC X 三种等级。轨旁设备提供优先级列表为 2、NTC X、1、NTC Y，则车载会采用 NTC X 等级；如果车载设备支持 1、0、NTC Y 三种等级，则车载会采用 1 级。

PZB/Indusi 系统作为 NTC 等级的一种，欧洲铁路局为不同国家分配了 4 个 NID_NTC 值（NID_NTC 即为基线 2 中的 NID_STM，例如给武广 CTCS-2 分配的 NID_STM=45），分别是 NID_NTC=6（德国、奥地利的 PZB 90 系统）、NID_NTC=9（德国、奥地利、以色列的 PZB/LZB 系统）、NID_NTC=27（克罗地亚、斯洛文尼亚的 Indusi I60 系统）以及 NID_NTC=36（罗马尼亚的 Indusi I60 系统）。2021 年初，经塞尔维亚铁路基础设施公司申请，欧洲铁路局将 NID_NTC=27 也分配给了塞尔维亚的 Indusi I60 系统。

考虑到塞尔维亚干线铁路及运营车辆均装备了 PZB/Indusi 设备，且国家模式运行的效率及安全性要高于 ETCS-0，所以在 ETCS-2 → ETCS-0/NTC 等级转换信息中仅配置 NTC 等级，不配置 ETCS-0 等级，并且 NTC 等级中严格按照欧洲铁路局分配的 NID_NTC=27 进行配置。后续如果有其他国家列车在该线路运营，可以通过修改车载设备以支持 NID_NTC=27，或者修改轨旁设备增加其他 NID_NTC 值。如果有不支持 PZB/Indusi 设备的列车运行时，还需在等级转换时考虑增加对 ETCS-0 等级的支持。

3.2.3 行车许可的描述

1) MA 的结构

由于塞尔维亚的联锁进路存在过走防护（信号机内方单独区段或利用信号机至计轴点间距离），需要对 MA 中的保护区段 / 危险点信息进行描述。MA 中保护区段 / 危险点信息的示意如图 5 所示。

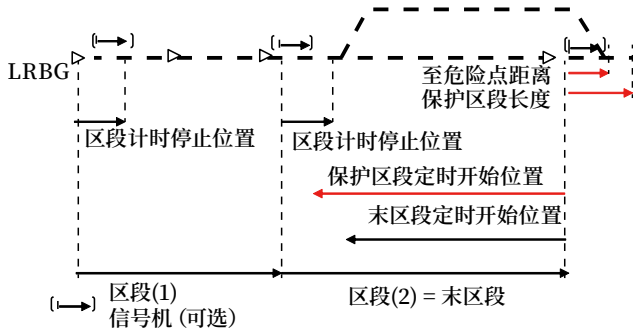


图5 ETCS行车许可结构
Fig.5 ETCS movement authority structure

ETCS-2/3级MA信息包P15中对于保护区段/危险点的描述如表1所示。

表1 ETCS-2行车许可关于保护区段/危险点的数据描述
Tab.1 Description of data of ETCS-2 movement authority about overlap sections/danger points

变量名	位数	说明
Q_DANGERPOINT	1	危险点描述的限定词
→ D_DP	15	从MA终点到危险点的距离
→ V_RELEASEDP	7	危险点相关的开口速度
Q_OVERLAP	1	保护区段描述的限定词
→ D_STARTOL	15	保护区段定时器开始计时的地点至MA终点的距离
→ T_OL	10	保护区段的有效时间, 列车可以使用保护区段的时间, 从列车到达D_STARTOL指定位置的时刻开始计时
→ D_OL	15	MA终点至保护区段端点的距离
→ V_RELEASEOL	7	保护区段相关的开口速度

对于危险点：

a. Q_DANGERPOINT为危险点的描述, 0为无危险点信息, 1为后面有危险点信息描述, 取值为1时, 后续D_DP、V_RELEASEDP变量生效；

b. D_DP为EoA至危险点的距离；

c. V_RELEASEDP为与危险点相关的开口速度。

对于保护区段：

d. Q_OVERLAP为保护区段的描述, 0为无保护区段信息, 1为后面有保护区段信息描述, 取值为1时, 后续D_STARTOL、T_OL、D_OL、V_RELEASEOL变量生效；

e. D_STARTOL为保护区段定时器开始计时的

地点至运行许可终点的距离；

f. T_OL为保护区段的有效时间；

g. D_OL为EoA至保护区段末端的距离；

h. V_RELEASEOL为与保护区段相关的开口速度。

对于上文2.1节中提到的塞尔维亚国内信号系统对于过走防护的处理方式, MA中描述如下。

对于采用信号机至内方绝缘节(或计轴磁头)间距离作为过走防护的情况, MA中将末区段终点描述至信号机, 信号机内方的绝缘节(或计轴磁头)描述为危险点；对于采用信号机内方若干个轨道区段作为过走防护的情况, MA中将末区段终点描述至信号机, 联锁表中规定的若干个保护区段的总长度描述为保护区段。

2) 开口速度的选取

MA中开口速度的描述有3种方式：指定具体开口速度值、由车载设备计算开口速度值和使用国家值。

开口速度的计算需要综合考虑线路条件、保护区段/危险点距离、列车置信区间大小、列车反应时间等因素, 由于车的参数无法获取, 由轨旁设备计算开口速度并发给车载的方式存在安全风险, 故不采用指定开口速度值的方式。

由于塞尔维亚信号安全设备技术规则要求过走防护距离不小于50m, 在匈塞铁路塞尔维亚段工程设计中, 区间通过信号机及进站处的危险点通常为50m。接车进路的保护区段由一个或若干个轨道区段组成, 长度50~200多m不等。塞尔维亚ETCS系统用户需求规定开口速度国家值为20km/h。如果采用国家值, 对于过走防护距离较短的情况, 20km/h的开口速度可能导致列车最小安全前端越过EoA冒进停车后越过过走防护距离, 存在安全风险；对于过走防护距离较长的情况, 可以通过更高的开口速度提升列车通过效率, 采用国家值会降低列车通过效率。

综合考虑安全、效率, 开口速度采用由车载设备计算的方式。在后续工程的实际测试中, 列车接

近 EoA 时开口速度在 5 ~ 35 km/h 不等。

3) 保护区段计时的问题

塞尔维亚联锁用户需求规定列车完全进入股道后, 接车进路解锁; 带中岔的股道为列车出清中岔进入最后一个无岔区段后, 接车进路解锁; 保护区段解锁时机为列车完全进入股道(或进路内最后一个无岔区段)后 90 s, 即进路解锁后保护区段延时 90 s 解锁。

对于 ETCS 系统, OVERLAP 计时如果与联锁不一致, 可能会出现以下情况: 联锁保护区段已经解锁, 但 MA 中 OVERLAP 还存在, 导致列车可能越过 EoA 压入正在转动的道岔, 造成行车安全风险; 联锁保护区段还未解锁, 但 MA 中 OVERLAP 已撤销, 导致列车无法靠近信号机对标停车, 影响效率。

基于上述原因, OVERLAP 计时应与联锁中保护区段解锁时间一致。但是在 MA 结构中, 开始计时的地点变量 D_STARTOL 为该点距 EoA 的距离, 每条进路只能描述一个固定的长度, 列车的最大安全前端越过该点时开始计时; 而联锁中保护区段解锁计时的开始条件为车尾进入股道, 两者不能完全吻合, 变量 D_STARTOL 只能写入具体数值而不能加入车长的计算。所以结合上述对安全和效率的影响综合考虑, 并且通常情况下列车压入股道后 90 s 能停稳到期望的位置, 所以 ETCS 系统中 OVERLAP 比联锁提前解锁基本不存在影响效率的问题。所以在工程实践中, OVERLAP 的保持时间 T_OL 取值与联锁解锁时间一致的 90 s, 计时起点 D_STARTOL 为列车压入股道, 即 D_STARTOL 取值为股道长度。

4) 进一步探讨

上述 MA 的处理方式中, ETCS 系统中 OVERLAP 撤销时间比联锁中保护区段解锁时间提前了一个车长, 车载设备在删除部分线路数据后, 会再次向 RBC 请求 MA。这个时候联锁中的保护区段尚未解锁, 向 RBC 发送的进路状态保持不变, RBC 将带保护区段的 MA 再次发给车载, 车载收到

MA 后判断保护区段延时已经结束, 可能会再次删除保护区段的数据, 导致 RBC 循环发送 MA, 直至保护区段解锁或者列车停稳。

如果 RBC 在收到原因为删除数据的 MA 请求(基线 2 的 M132 中 Q_TRACKDEL=1 或基线 3 的 M132 中 Q_MARQSTREASON=x1xxx)时, 向车载发送 MA 中删除 OVERLAP (Q_OVERLAP=0), 这样能使车地一致性更好。需要考虑对 RBC 处理 MA 的方式、RBC 与联锁接口, 联锁对保护区段的处理方式进行修改。

4 结语

匈塞铁路是中国自主研发列车运行控制系统落地欧洲的第一个项目。塞尔维亚段的建设开通, 对中国高铁技术装备“走出去”提出了一些思考。

首先, 充分调研目标国的铁路技术规范、用户需求和互联互通需求, 系统设计需要考虑与既有国家模式的结合, 对系统进行适配性开发或定制化改造, 及时取得产品层面的目标国准入认证。

其次, 注重工程的认证评估工作, 系统层面对国家规范、互联互通、安全性的符合性认证工作贯穿整个工程的需求定义、设计、集成、调试和运营全过程, 及时做好技术储备。

同时也可以在国外工程建设过程中吸取一些新的技术和理念, 为后续中国高铁技术的持续发展进步以及技术装备更好地“走出去”夯实基础。

参考文献

- [1] ERA, UNISIG, EEIG ERTMS USERS GROUP. System Requirements Specification: SUBSET-026[S]. Valenciennes: ERA, 2016.
- [2] ERA, UNISIG, EEIG ERTMS USERS GROUP. Dimensioning and Engineering Rules: SUBSET-040[S]. Valenciennes: ERA, 2016.
- [3] ERA, UNISIG, EEIG ERTMS USERS GROUP. Safety Requirements for the Technical Interoperability of ETCS in Levels 1&2: SUBSET-

- 091[S]. Valenciennes: ERA, 2016.
- [4] ERA, UNISIG, EEIG ERTMS USERS GROUP. GSM-R Bearer Service Requirements: SUBSET-093[S]. Valenciennes: ERA, 2022.
- [5] ERA, UNISIG, EEIG ERTMS USERS GROUP. Rulebook on Technical Requirements for Signal-Safety Devices: SUBSET-093[S]. Valenciennes: ERA, 2022.
- [6] Railway Directorate. Rulebook on Technical Requirements for Signal-Safety Devices: "Official Gazette of RS" No.18/16 and 89/16[S]. Railway Directorate, 2016.
- [7] 陈立华. 匈塞铁路塞尔维亚境内信号系统技术方案研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16(10): 94-100, 105.
Chen Lihua. Technical Scheme of Signaling System for Serbia Section of Hungary-Serbia Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16(10): 94-100, 105.
- [8] 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.
- [9] 张友兵, 陈志强, 王建敏, 等. ETCS 基线 3 的系统版本管理方法 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(7): 12-17.
Zhang Youbing, Chen Zhiqiang, Wang Jianmin, et al. System Version Management Method for ETCS Baseline 3[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(7): 12-17.
- [10] 马作泽. 匈塞铁路塞尔维亚段信号系统设计方案研究 [J]. 铁道通信信号, 2021, 57(3): 17-21.
Ma Zuoze. Study on Design of Signaling System for Serbia Section of Hungary-Serbia Railway[J]. Railway Signalling & Communication, 2021, 57(3): 17-21.

(上接 102页)

- Song Peidong, Zhang Yong. The CTCS3 Simulation and Testing Platform—Design and Implementation of Radio Block Center Simulation Subsystem[J]. China Science and Technology Information, 2008(1): 100-101, 103.
- [8] 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.
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.
- [9] 姚敏, 张森. 模糊一致矩阵及其在软科学中的应用 [J]. 系统工程, 1997, 15(2): 54-57.
Yao Min, Zhang Sen. Fuzzy Consistent Matrix and Its Applications in Soft Science[J]. Systems Engineering, 1997, 15(2): 54-57.
- [10] 徐泽水. AHP 中两类标度的关系研究 [J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(7): 97-101.
Xu Zeshui. Study on the Relation between Two Classes of Scales in AHP[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1999, 19(7): 97-101.

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

月刊



《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的国家级期刊。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刊。国内统一连续出版物号：CN11-5423/U。国际标准连续出版物号：ISSN1673-4440。本刊是中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊；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。

主要内容是围绕铁路和城市轨道交通通信信号技术方面的重点工程、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在新技术的引进吸收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。对开发、研制和生产铁路通信信号产品的公司、企业也有很好的参考价值，并可为高等院校师生提供交流园地和学习参考。

投稿方式：

期刊官网投稿：<https://rsce.crscd.com.cn>

邮箱投稿：rsce@crsdc.com.cn

联系方式：

邮编：100070

电话：50805951

网址：www.crsdc.com.cn

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

订 价：每期10元，全年（12期）120元

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

ISSN 1673-4440
CN 11-5423/U



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

扫码打开期刊官网，
阅读、下载本刊内容

ISSN 1673-4440



9 771673 444248

邮发代号：80-532 国内定价：10元/期