

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

铁路通信信号工程技术

Railway Signalling & Communication Engineering

中国铁道学会通信信号分会指定期刊

主办单位: 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 2023. 8 第20卷 总第152期



运达科技

股票代码:300440

致力于为轨道交通业务领域
提供智能化解决方案及服务



国铁安全联锁监控系统

室内客户端+备用操作台



操作终端



27.5KV验电接地



电动隔离开关



门禁设备 (一体式)



门禁设备 (分离式)



声光报警设备



警示设备



联系电话
028 8283 9999

地址: 四川省成都市高新区西部园区康强四路99号
网址: <http://www.yd-tec.com>
邮箱: gtbg@yunda-tec.com

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:

王冲 Wang Chong

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:

010-51865951; 010-51865957 010-51865951; 010-51865957

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20卷第8期总第152期 Vol.20 No.8 S.No.152

出版: 2023年8月25日 Published on: 8/25/2023

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

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 吴培栋, 王 硕, 张友兵	1-7
铁路信号电路设计安全性研究与分析 张昌平, 白书涵	8-12
CTCS-2级列控系统大号码道岔有源应答器组特殊场景探讨 张会志	13-16
盐通客专信号系统联调联试范围及问题分析 靳 栋, 周永健	17-22
CTC区域集控系统实施应用的研究 李永强, 方玉宝, 席春华	23-27
基于CTC系统的城际折返站车次号实现自动变更的研究 王宝宝	28-31

通信及信息技术

下一代铁路移动通信中公专网系统间干扰协调的研究 张 驰, 寇 鸣, 刘 兴, 郭瑞彬	32-36
铁路综合视频监控系统三种平台架构对比分析 刘跃遥, 陈 谦, 曹 坤	37-40
铁路视频监控摄像机选型研究 陈宏宇	41-46
Apriori算法在C3无线通信超时分析中的应用与研究 冯迎辰	47-51

城轨交通

基于FBG和EMD的悬挂式永磁磁浮轨道厢梁应力检测技术研究 贺航宇, 王岁儿, 吴春晓, 王 晟, 李 擎	52-58
南京地铁5G公网智能应用探索及实践 杨 勇, 孙舒森, 王国华, 吴 可	59-65
曲线钢轨打磨质量与地铁运行振动响应的相关性分析 李现鹏, 白 磊, 吕金桐, 丁 明, 李 擎	66-71
齿轨列车齿轨轮轨切换车载ATP控制研究 刘浚锋, 蒋 彪, 王 成	72-77
全自动运行系统控制中心与备用控制中心切换方案 薛 强, 张永会	78-82
工业以太网PROFINET在站台门系统中的应用及优化 李安福	83-89

技术交流

某站接近信号机点灯电路的分析及优化设计 李 厦	90-94
站间联系电路的问题分析与改进 胡井海, 王宇琮, 蔡微微	95-100
双极型晶体管PN结电容温度特性研究 温术来, 张 磊, 于树永, 卢 江	101-106
PCB印制板的通流量影响因素分析 牛颖聪	107-111

国外信息

西门子交通集团收购意大利交通优化企业 Optrail 公司 (27)	新的公共交通应用程序在意大利热那亚投入使用 (89)	英国高铁2号线寻求站台屏蔽门供应商 (111)
------------------------------------	----------------------------	-------------------------

Railway Signalling & Communication Engineering

CONTENTS

Technological Innovation

Signalling Technology

Research on Scheme and Experimental Verification of Adding Automatic Turn-back Function Based on High-speed Railway ATO.....	Wu Peidong, Wang Shuo, Zhang Youbing	1-7
Research and Analysis of Railway Signal Circuit Design Safety	Zhang Changping, Bai Shuhan	8-12
Discussion on Special Scenarios of Switchable Balise Group for Large Number Turnouts in CTCS-2 Train Control System.....	Zhang Huizhi	13-16
Scope of Integration Test and Commissioning and Problem Analysis of Signal System for Yancheng-Nantong High-speed Railway	Jin Dong, Zhou Yongjian	17-22
Research on Implementation and Application of CTC Regional Centralized Control System	Li Yongqiang, Fang Yubao, Xi Chunhua	23-27
Research on Realizing Automatic Change of Train Numbers of Inter-city Railway Turn-back Stations Based on CTC System.....	Wang Baobao	28-31

Communication & Information Technologies

Research on Interference Coordination Between Public and Private Network Systems in Next Generation Railway Mobile Communication	Zhang Chi, Kou Ming, Liu Xing, Guo Ruibin	32-36
Comparative Analysis of Three Architecture Platforms of Railway Integrated Video Monitoring Systems	Liu Yueyao, Chen Qian, Cao Kun	37-40
Research on Selection of Video Surveillance Cameras for Railways	Chen Hongyu	41-46
Research and Application of Apriori Algorithm in Analyzing C3 Wireless Communication Timeout	Feng Yingchen	47-51

Urban Rail Transit

Research on Stress Detection Technology for Suspended Permanent-magnet Maglev Track Box Girder Based on FBG and EMD	He Hangyu, Wang Suier, Wu Chunxiao, Wang Sheng, Li Qing	52-58
Exploration of Intelligent Application of 5G Public Network Specialized in Nanjing Metro	Yang Yong, Sun Shumiao, Wang Guohua, Wu Ke	59-65
Correlation Analysis Between Quality of Curve Rail Grinding Operations and Metro Vehicle Body Vibration Response	Li Xianpeng, Bai Lei, Lü Jintong, Ding Ming, Li Qing	66-71
Research on On-board ATP Control of Gear Rail and Wheel Rail Switching of Rack Railway Trains	Liu Junfeng, Jiang Biao, Wang Cheng	72-77
Switching Scheme of OCC and BOCC in Fully Automatic Operation	Xue Qiang, Zhang Yonghui	78-82
Application and Optimization of Industrial Ethernet PROFINET in Platform Door Systems	Li Anfu	83-89

Technological Exchange

Analysis and Optimized Design of Approach Signal Lighting Circuit of a Station	Li Sha	90-94
Problem Analysis and Improvement of Liaison Circuit Between Stations	Hu Jinghai, Wang Yucong, Cai Weiwei	95-100
Research on Temperature Characteristics of PN Junction Capacitance of Bipolar Transistor	Wen Shulai, Zhang Lei, Yu Shuyong, Lu Jiang	101-106
Analysis of Influencing Factors of PCB Current Carrying Capacity	Niu Yingcong	107-111

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2023.08.001

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

吴培栋^{1, 2}, 王 硕^{1, 2}, 张友兵^{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: 为进一步扩展高速铁路ATO系统的自动化范围, 简要分析高速铁路自动折返运营场景, 基于高速铁路ATO系统, 提出一种增加自动折返功能的方案, 并对地面设备、首端车载设备、尾端车载设备的接口及功能进行定义和分配, 针对自动折返过程中的不同状态转换进行描述。基于半实物仿真平台, 对方案进行实验验证, 结果证明其有效性。

关键词: 高速铁路ATO系统; 自动折返; 首尾通信; 状态转换; 方案研究

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0001-07

Research on Scheme and Experimental Verification of Adding Automatic Turn-back Function Based on High-speed Railway ATO

Wu Peidong^{1, 2}, Wang Shuo^{1, 2}, Zhang Youbing^{1, 2}

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

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

Abstract: To further extend the automation scope of the high-speed railway ATO system, a brief analysis of the high-speed railway automatic turn-back operation scenario is presented. Based on the high-speed railway ATO system, a scheme is proposed to add the automatic turn-back function, and the interfaces and functions of the ground equipment, the head on-board equipment and the tail on-board equipment are defined and assigned. The different state transitions during the automatic turn-back process are described. Based on the semi-physical simulation platform, the scheme is experimentally verified and the results prove its effectiveness.

Keywords: high speed railway ATO system; automatic turn-back; head and tail communications; state transition; research on the scheme

收稿日期: 2023-04-07; 修回日期: 2023-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1934221)

第一作者: 吴培栋 (1982—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 列控车载设备关键技术与方法, 邮箱: wupeidong@crscd.com.cn.

2019年12月30日,京张高铁顺利开通,首次实现了列车自动驾驶技术在时速350 km高速铁路上的应用,使国内高铁自动驾驶技术处于全球领先水平,为国内未来自感知、自学习、自适应、自操纵的列车无人自动驾驶、全自动无人驾驶智能铁路奠定了技术基础^[1]。

根据IEC 62290.1规定的自动化等级^[2],京张高铁使用的高速铁路列车自动驾驶系统(Automatic Train Operation, ATO)属于GoA2级,实现了列车在正线运行时司机辅助下的自动驾驶,列车到达终点站后的折返换端、调车回库等作业仍使用传统的人工驾驶模式。根据实际运营统计,以复兴号为例,短编组折返继乘约15 min,重联编组约20 min,效率较低^[3]。特别是对于一些繁忙的客运专线、城际线路、市域(郊)铁路,传统的换端和折返方式成为限制高速铁路进一步提升运营效率的瓶颈^[4]。因此,在高速铁路ATO列控系统实现自动折返功能是目前亟待解决的技术问题。

为了提高高速铁路的列车折返能力,本文基于高速铁路ATO系统提出了一种列车自动折返的方案。该方案在满足既有运输场景的前提下,拓展了高速铁路ATO系统的自动控制范围,并有效缩短了折返间隔时间,提高了运营效率。本文基于半实物仿真平台,对方案进行了实验验证,结果证明了该方案的有效性。

1 高速铁路ATO系统

高速铁路ATO系统是在CTCS-2/CTCS-3级列控系统的基础上,车载设置ATO单元实现自动驾驶控制,地面设置专用精确定位应答器实现精确定位,地面设备通过GPRS通信实现站台门控制、站间数据发送和列车运行调整计划(简称运行计划)处理。高速铁路ATO系统主要功能包括:车站自动发车、区间自动运行、车站自动停车、车门自动开门(防护)、车门/站台门联动控制^[5-6]。高速铁路ATO系统结构示意图如图1所示^[7]。

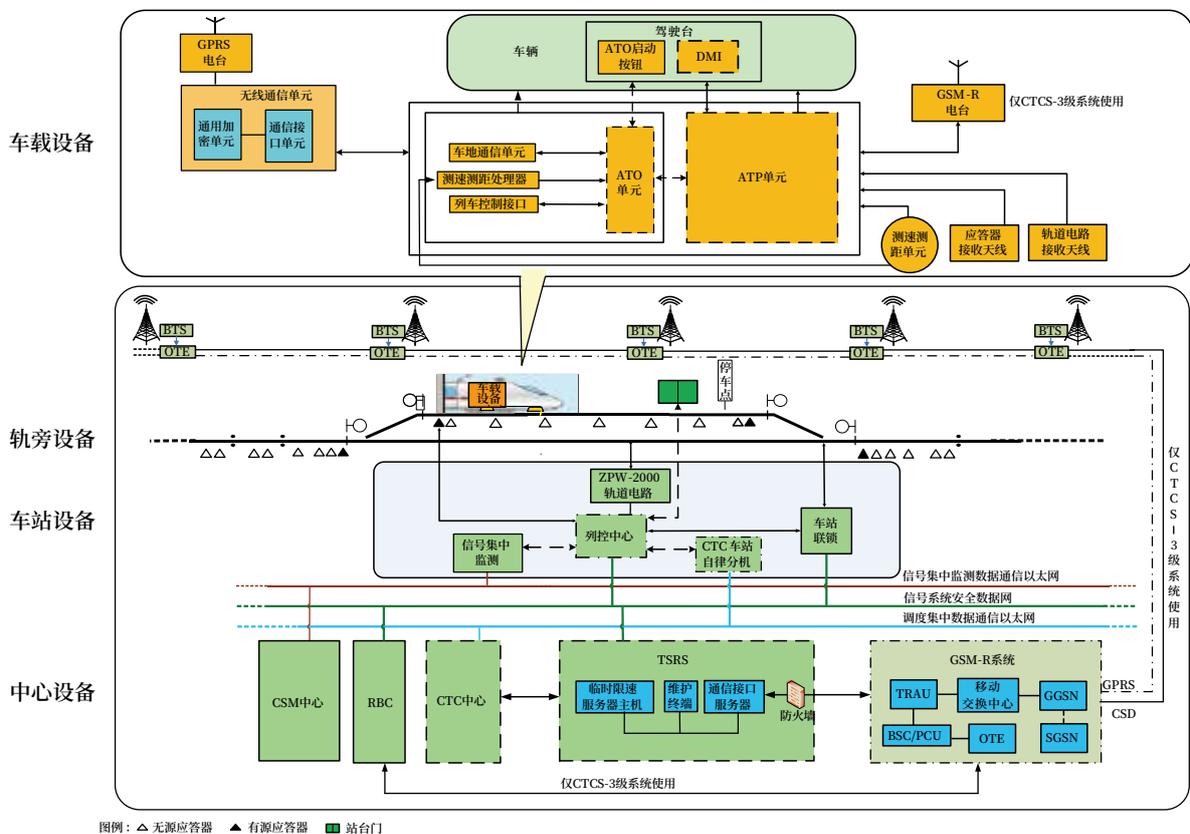


图1 高速铁路ATO系统结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of high speed railway ATO system structure

2 自动折返场景

自动折返包括站后自动折返和原地自动折返两种运营场景，由于原地自动折返场景与站后自动折返的原地自动折返的部分场景基本相同，因此本文仅对站后自动折返场景进行研究。按照时序，站后自动折返分为折入折返线、自动换端、折出折返线3个阶段^[8]。以下以典型的站形对站后自动折返场景进行简单分析。

如图2所示，自动折返前，列车在站内下行方向侧线股道停车。条件具备后，自动折返流程启动，列控系统控制列车启动，驶入折返线后停车，停车位置如图3所示。

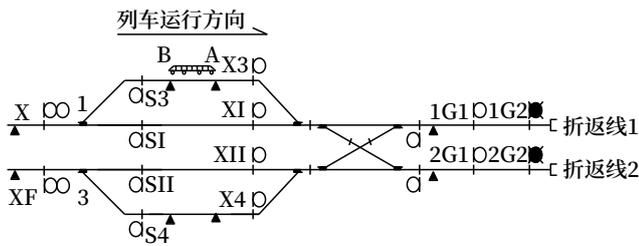


图2 列车折入折返线前示意
Fig.2 Schematic diagram before the train arrives at the turn-back line

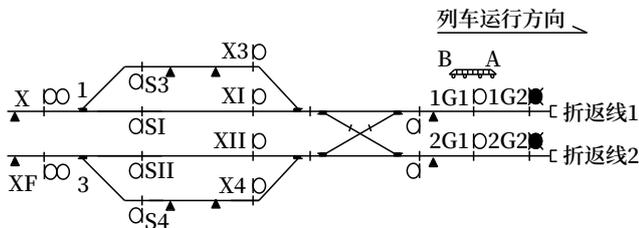


图3 列车折入折返线后示意
Fig.3 Schematic diagram after the train arrives at the turn-back line

列车在折返轨停车后，列控系统完成自动换端，列车运行方向改变，如图4所示。

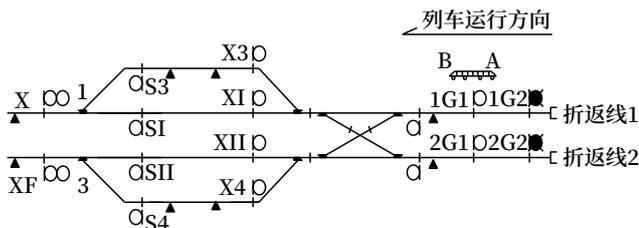


图4 列车在折返线换端后示意
Fig.4 Schematic diagram after switching train ends on the turn-back line

条件具备后，列控系统控制列车启动，列车驶

出折返线，在站内上行方向侧线股道停车，自动折返结束，如图5所示。

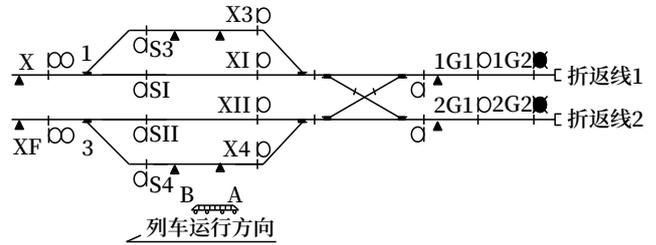


图5 列车折出折返线后示意
Fig.5 Schematic diagram after the train leaves the turn-back line

3 自动折返实现方案

基于如图1所示的高速铁路ATO系统，为增加自动折返功能，需变更调度集中监测（Centralized Traffic Control System, CTC）、临时限速服务器（Temporary Speed Restriction Server, TSRS）、列控中心（Train Control Center, TCC）、车载设备含列车自动保护系统（Automatic Train Protection, ATP）和ATO软件，即图1中虚线框的设备。同时，列车两端的车载设备需增加通信接口，实现首尾通信。车载设备与列车增加折返相关接口，支持列车在无司机操作的自动折返过程中，响应车载设备输出的牵引制动指令。其中，CTC实现自动折返计划的下发和折返进路的办理，TSRS负责将自动折返计划转发至对应的车载设备，车载设备负责自动折返计划的响应和执行。

3.1 车地交互信息

为实现以上总体方案中自动折返计划的下发，车载设备和地面设备需通过车地无线通信交互以下自动折返相关信息。

CTC经过TSRS发送至车载设备的自动折返命令信息如表1所示。

车载设备结合自身工作状态，检查接收到的自动折返命令合法后，经过TSRS发送至CTC的自动折返状态信息如表2所示。

3.2 首尾交互信息

为实现以上总体方案中自动折返计划的响应和执行，列车首尾两端的车载设备通过首尾通信交互

表1 自动折返命令

Tab.1 Automatic turn-back command

序号	信息	信息说明
1	折返计划	站后自动折返或原地自动折返
2	发车股道编号	自动折返发车时所在的股道编号
3	换端后车次号	自动折返换端后的运营车次号
4	终到股道编号	自动折返终到后所在的股道编号
5	是否办客	自动折返终到后是否办客

表2 自动折返状态

Tab.2 Automatic turn-back state

序号	信息	信息说明
1	折返计划	对 TSRS 发送的自动折返计划是否响应
2	发车股道编号	自动折返发车时所在的股道编号
3	终到股道编号	自动折返终到后所在的股道编号
4	换端后车次号	自动折返换端后的运营车次号
5	是否办客	自动折返终到后是否办客
6	自动折返状态	非自动折返状态 站后自动折返准备状态、站后自动折返折入状态、站后自动折返折出状态 原地自动折返预备状态、原地自动折返状态

以下自动折返相关信息，如表 3 所示。

3.3 车载设备与列车接口

为实现以上总体方案中自动折返计划的响应和执行，车载设备与列车增加以下自动折返相关接口，如表 4 所示。

3.4 自动折返准备控制

车载设备检测到列车进站停稳停准后，满足自动折返条件，则控制折返指示灯闪烁，以此提示司机按压折返按钮。

车载设备检测到折返按钮被按下后，控制折返指示灯常亮，通过人机界面单元（Driver-Machine Interface, DMI）显示黄色的自动折返图标，并输出折返激活信号。

车载设备检测到折返激活反馈信号后，通过 DMI 提示“关闭驾驶室”，进入自动折返准备状态。

车载设备进入自动折返的条件主要包括：

- 1) 驾驶室激活；
- 2) 车载设备工作状态正常且处于 AM 模式；

表3 车载设备首尾交互信息

Tab.3 On-board device head and tail interaction information

序号	信息	信息说明
1	首尾标识	首尾或尾端
2	车次号	—
3	司机号	—
4	列车编组类型	单编或重联
5	驾驶室钥匙状态	插入或未插入
6	折返激活状态	激活或未激活
7	停稳停准状态	未停稳、停稳未停准或停稳停准
8	轨道电路载频	上行或下行
9	轨道电路低频	—
10	TSRS IP	TSRS 设备的 IP 地址
11	TSRS 连接状态	正在注册、已连接、正在注销、已断开
12	ATP 工作状态	正常或异常
13	预选 ATO	预选或未预选
14	ATP 工作模式	待机、部分、完全、引导、目视、调车、机车信号、休眠、隔离
15	ATO 工作状态	正常或异常
16	ATO 工作模式	未建立、预备、自动驾驶、故障
17	自动折返状态	非自动折返状态 站后自动折返准备状态、站后自动折返折入状态、站后自动折返折出状态 原地自动折返预备状态、原地自动折返状态
18	折返 / 换端请求	自折请求或自动换端请求
19	折返 / 换端确认	自折确认或自动换端确认
20	退出折返 / 换端命令	退出
21	是否具备折返 / 换端	具备或不具备

表4 车载设备与列车接口

Tab.4 The interface between on-board device and train

序号	信息	信息说明
1	折返激活	车载设备向列车输出，表示当前处于自动折返状态，请求列车响应车载设备输出的牵引、制动等控制命令
2	折返激活反馈	列车向车载设备输出，表示列车检测到车载设备输出的折返激活，并可以响应车载设备输出的牵引、制动等控制命令

- 3) 车载设备收到有效的站后自动折返计划；
- 4) 车载设备与 TSRS 连接状态正常；
- 5) 对端车载设备工作状态正常。

非自动折返状态和自动折返准备状态之间的状

态转换如图 6 所示。

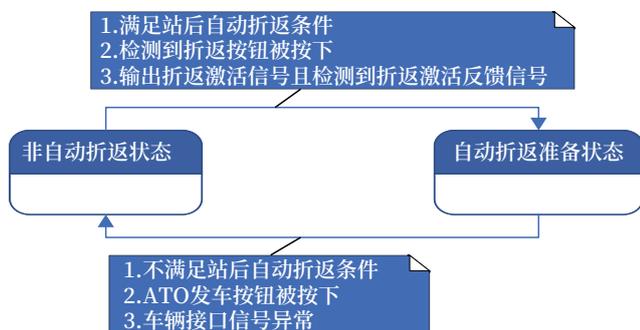


图6 自动折返准备状态转换
Fig.6 State transition diagram of the train preparing for the automatic turn-back

3.5 折入控制

车载设备在自动折返准备状态下，当检测到驾驶室钥匙被拔出后，认为司机启动自动折返流程。车载设备通过首尾通信，检测到尾端车载设备也满足站后自动折返条件后，控制 DMI 显示绿色自动折返图标，表示进入自动折返状态。车载设备检测到地面轨道电路发送允许码后，认为折入进路开放，控制列车驶入折返轨。

在折入过程中，车载设备检测到工作状态异常、与 TSRS 的连接状态异常或车辆接口信号异常时，退出自动折返折入状态，进入非自动折返状态。

非自动折返状态、自动折返准备状态和自动折返折入状态之间的状态转换如图 7 所示。

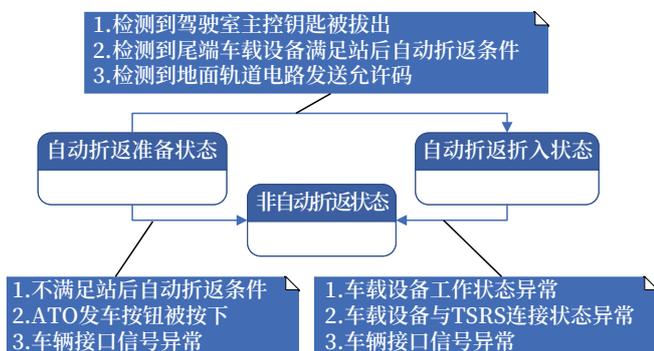


图7 自动折返折入状态转换
Fig.7 State transition diagram of the train entering the turn-back line

3.6 自动换端控制

车载设备检测到列车在折返轨停稳后，控制列车输出最大常用制动，并通过首尾通信与尾端车载

设备完成原地自动折返的交权。此时，首端车载设备认为完成首端的自动折返控制，取消输出折返激活信号，断开与 TSRS 的连接，控制折返指示灯熄灭，控制 DMI 删除绿色自动折返图标。

尾端车载设备与首端完成交权后，升级为新的首端车载设备，检测到原首端车载设备取消输出折返激活信号后，控制输出折返激活信号，建立与 TSRS 的连接，控制折返指示灯常亮，控制 DMI 显示绿色自动折返图标，进入原地自动折返状态。

新首端车载设备在原地自动折返状态下，自动完成启动流程及自检，等待发车条件具备后控制列车驶出折返轨。

非自动折返状态、自动折返折入状态、原地自动折返预备状态、原地自动折返状态之间的状态转换如图 8 所示。

3.7 折出控制

车载设备处于原地自动折返状态，检测到地面轨道电路发送允许码后，进入自动折返折出状态，控制列车驶出折返轨。

车载设备检测到列车在站台停稳停准且驾驶台主控钥匙插入后，控制折返指示灯熄灭，控制 DMI 删除绿色自动折返图标，退出自动折返折出状态，进入非自动折返状态。

非自动折返状态、原地自动折返状态、自动折返折出状态之间的状态转换如图 9 所示。

4 实验室测试

为验证本文提出的自动折返方案及应用该方案后对折返效率的提升效果，搭建了实验室半实物仿真环境。其中，车载设备、TSRS、TCC 使用真实设备，CTC、计算机联锁 (Computer Based Interlocking, CBI)、轨道电路、应答器使用仿真设备，仿真列车使用 CR400BF 型复兴号动车组，地面线路使用基于高铁客专车站典型进路精简后的线路数据。折返时间起始时刻为折返前列车从站台发车的时刻，折返时间结束时刻为折返后列车到达站台停稳的时刻。与自动折返实验相关的列车关键

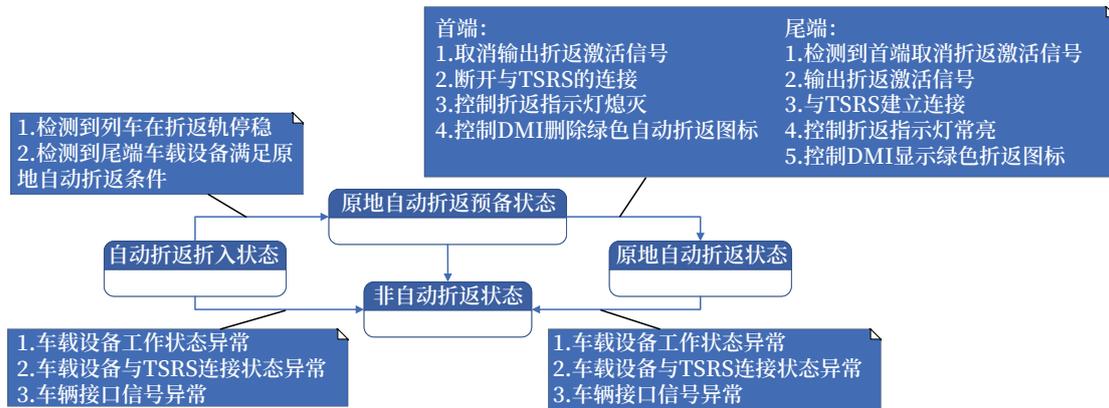


图8 原地自动折返状态转换
Fig.8 State transition diagram of switching train ends

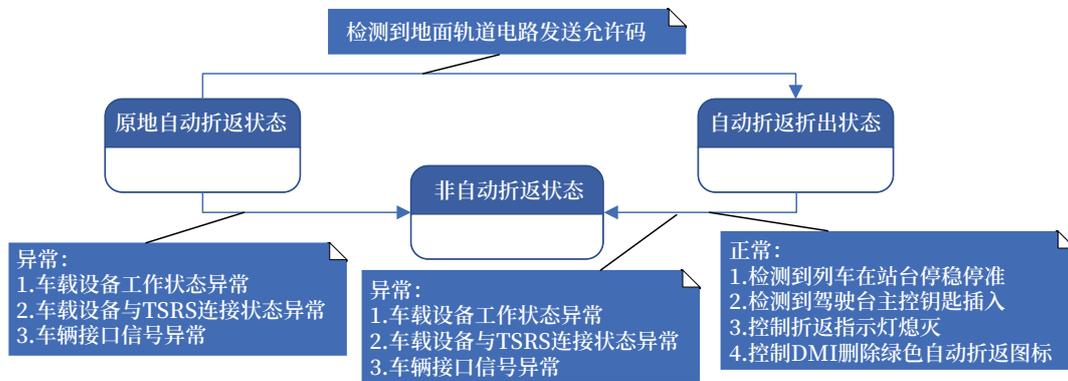


图9 自动折返折出状态转换
Fig.9 State transition diagram of the train leaving the turn-back line

参数如表 5 所示。

与自动折返实验相关的线路关键参数如图 10 所示，其中道岔限速 45 km/h。列车行驶路径为上行 4 股—折返 I 轨—下行 I 股。

实验过程中，自动折返开始时刻与结束时刻的 DMI 显示分别如图 11 和 12 所示。

实验结果表明，本文提出的列车自动折返方案可满足折返场景和需求，多次测试的平均折返时间为 160 s，相对于传统的人工控制折返，可大大提高折返效率。

5 结论

本文基于高速铁路 ATO 系统提出的列车自动折返方案，可实现列车自动折返，满足既有运输场景和需求，可提高运输效率。该方案的实现拓展了

表5 实验相关列车关键参数

Tab.5 Key experiment-related train parameters

参数	取值
列车长度	208 m
定员载重	5.2 t
ATP 牵引切除延时	1 s
ATP 制动施加延时	2.3 s
牵引到制动转换的延时	3 s
ATO 牵引切除延时	0.2 s
ATO 牵引施加延时	0.2 s
ATO 制动切除延时	3.6 s
ATO 牵引施加延时	3 s
牵引力	0 ~ 160 km/h : 0.487 5 v+534 (单位, kN)
电制动力	0 ~ 160 km/h : 0.447 4 v+556 (单位, kN)
运行阻力	3.99+0.012 7 v+0.001 043 v ² (单位, N/t)

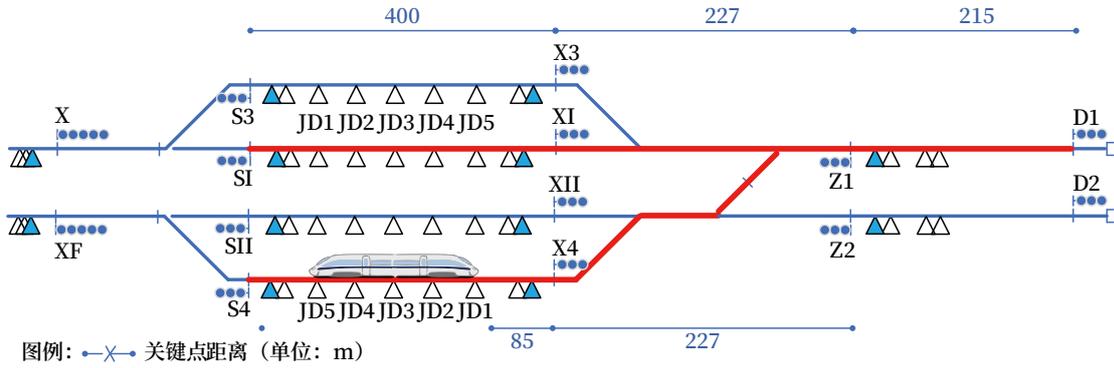


图10 实验线路
Fig.10 Experimental lines



图11 自动折返开始时刻DMI显示
Fig.11 The display of DMI at the start of the automatic turn-back process



图12 自动折返结束时刻DMI显示
Fig.12 The display of DMI at the end of the automatic turn-back process

高速铁路 ATO 系统的自动控制范围, 为高速铁路 ATO 系统应用于一些繁忙的客运专线、城际线路、市域(郊)铁路提供了一种解决方案。不足之处在于, 本文仅研究了自动折返方案的正常场景, 对于折返过程中的所有异常场景, 后续有必要逐一开展深入研究, 保证自动折返的可用性和安全性。

参考文献

[1] 王同军. 中国智能高速铁路体系架构研究及应用 [J]. 铁道学报, 2019, 41 (11): 1-9.
Wang Tongjun. Research and Applications of China Intelligent High-Speed Railway Architecture[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(11): 1-9.

[2] International Electrotechnical Commission. Railway Applications-Urban Guided Transport Management and Command/control Systems-Part1: System Principles and Fundamental Concepts:IEC 62290.1-2014 [S]. International Electrotechnical Commission, 2014.

[3] 潘琢, 崔衍渠, 谭彬, 等. CTCS-2 信号系统下城际铁路折返能力研究 [J]. 铁道工程学报, 2022, 39 (4): 59-66.
Pan Zhuo, Cui Yanqu, Tan Bin, et al. Research on the Return Capacity of Intercity Railway under CTCS-2 Signal System[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(4): 59-66.

(下转 22页)

铁路信号电路设计安全性研究与分析

张昌平¹, 白书涵²

(1. 浙江众合科技股份有限公司, 杭州 311305;

2. 浙江省轨道交通建设与管理协会, 杭州 310014)

摘要: 铁路信号电路用于控制信号设备保证行车安全和提高运输效率, 具有安全性和可靠性。继电电路设备在实际运用中, 也存在发生故障不导向安全的可能性。结合信号电路设计中潜在的不安全因素, 进行研究和故障假设, 分析电路设计的风险因素, 通过查规对标排除漏洞和隐患, 防患于未然, 确保信号电路设计符合“故障-安全”原则。

关键词: 铁路; 信号; 电路; 安全

中图分类号: U213.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0008-05

Research and Analysis of Railway Signal Circuit Design Safety

Zhang Changping¹, Bai Shuhan²

(1. UniTTEC Co., Ltd., Hangzhou 311305, China)

(2. Zhejiang Railway Construction and Management Association, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Railway signal circuits are used to control signal equipment to ensure driving safety and improve transportation efficiency with safety and reliability. However, in the actual use of relay circuit equipment, it is possible that the circuits fail to respond in a safe manner in the event of failure. This paper analyzes the potential unsafe factors in signal circuit design, conducts research and fault hypotheses, analyzes the risk factors of circuit design, eliminates loopholes and hidden dangers through checking and benchmarking, prevents problems before they occur, and ensures that the signal circuit design conforms to the "fail-safe" principle.

Keywords: railway; signal; circuit; safety

1 概述

信号电路由控制电源、继电器及其接点、变压器、熔断器、电子元器件及导线构成。设计电路时

不仅要可能对发生的各种故障进行分析和假设(如断线、混电、串电、短路, 电子元器件的损坏等), 还要研究分析各种可能的故障因素对电路动作的影响, 判断故障能否导向安全。安全可靠的电路不但要满足设计规范和标准, 还要符合“故障-安全”原则。

收稿日期: 2022-10-25; 修回日期: 2023-06-15

第一作者: 张昌平(1964—), 男, 高级工程师, 本科, 主要

研究方向: 交通信号与自动控制, 邮箱: hsjzcp@126.com。

2 问题的提出及分析

某地铁公司发现 ZDJ9 交流转辙机启动电路中的 1DQJ、2DQJ、1DQJF 继电器（加强）接点，因道岔启动电流大，在使用一段时间后，就会出现灼烧变黑或出现齐根折断的现象。以上两种情况的出现均会产生故障，影响运营秩序。

为解决这个难题，对道岔启动电路进行了技改。

增设与 2DQJ、1DQJF 同型号的 2DQJF、1DQJF1 复示继电器（如图 1 虚线框所示），其加强接点与原启动电路加强接点并联接入（如图 2 虚线框所示），以起到启动电流分流的作用。同时也可避免因继电器一组接点折断或接触不良而引发的故障。

图 1 虚线框内为新增 1DQJF1、2DQJF 复示继电器，分别与原 1DQJF、2DQJ 继电器线圈并联接入以便与其同步工作。

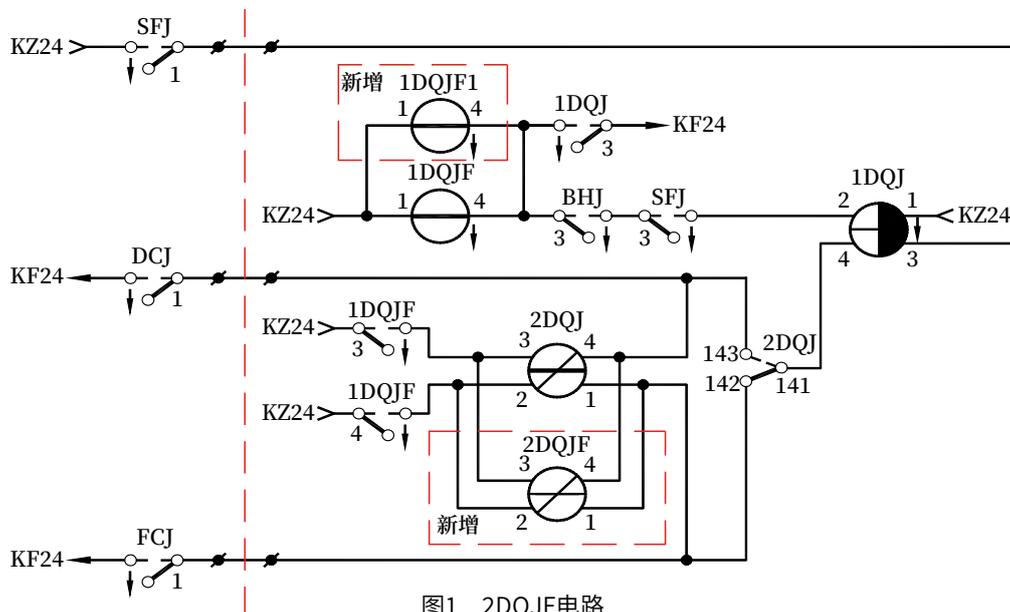


图1 2DQJF电路
Fig.1 2DQJF circuit

在图 2 所示道岔控制电路中，对电路中 AC380-B/C 相电源通路上的 1DQJF、2DQJ 接点分别并联新增 1DQJF1、2DQJF 复示继电器接点，对电路中 AC380-A 相电源通路上的 1DQJ 第 1 组接点，并联使用新增复示继电器替换下来的 1DQJ 第 2 组接点，即把 AC380-A/B/C 三相电源原单接点通路全部改造成双接点并联通路（如图 2 虚线框所示）。

技改后地铁公司在实际应用中，通过“转辙机在线监测仪”，对继电器接点电流进行监测。对比监测电流发现改用双接点后，接点电流指标已发生明显下降，减少了瞬间电流对继电器接点的冲击，提高了继电器使用的稳定性。另外通过道岔启动电路并联接点，避免因继电器接点问题而引发的故障，极大地提高了设备的稳定性，确保运营秩序，达到

了技改的预期效果。

2.1 对技改电路的分析

技改后的电路通过实际运营并没有发现问题，但可进行一些故障假设，如对主继电器与复示继电器动作不一致进行假设，假设情况有多种。

第一种假设 2DQJ 转极，2DQJF 因故不转极；第二种假设 1DQJF 励磁，1DQJF1 因故不励磁；第三种假设 1DQJF 励磁与 2DQJ 转极，1DQJF1 励磁与 2DQJF 因故不转极等。还有多种其他假设，不再一一列举。

现仅对第一种假设情况 2DQJ 转极，2DQJF 因故不转极电路分析如下。

正常操纵道岔时，AC380 电源通过线缆传送到电转机三相线圈，三相线圈采用星型连接。道

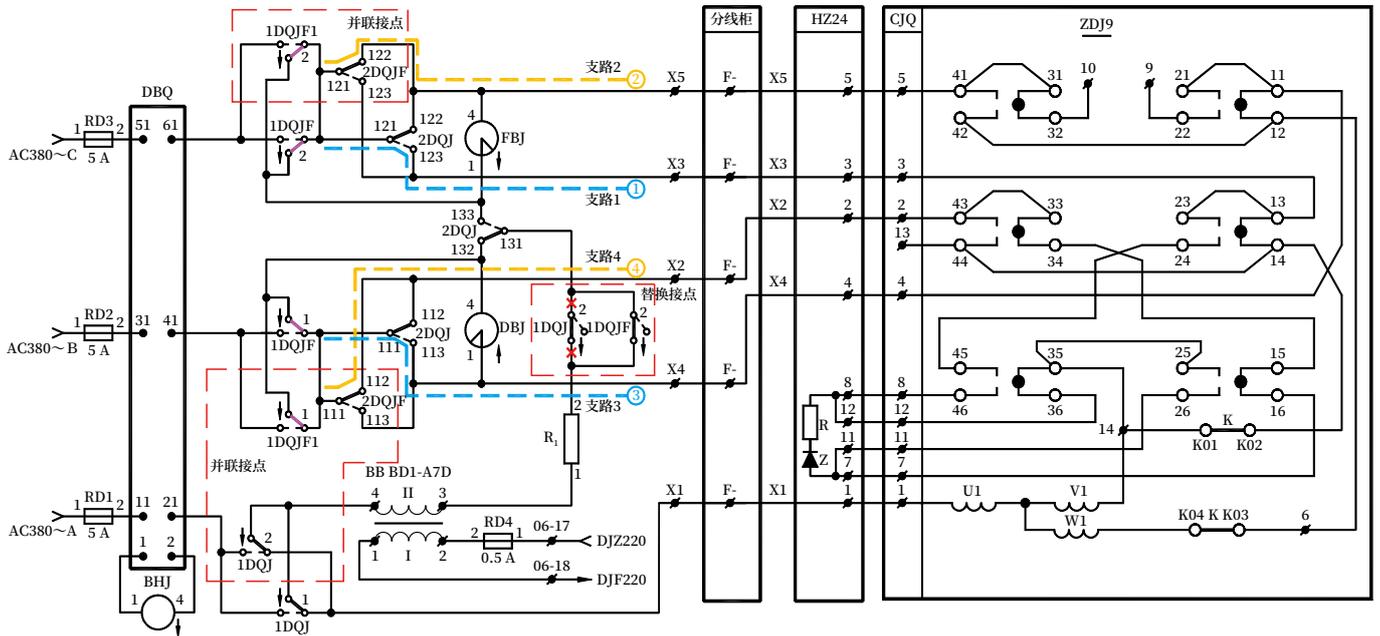


图2 转辙机控制电路
Fig.2 Switch machine control circuit

岔操反位时，AC380 电源线 X1 传送 A 相、线 X3 传送 C 相、线 X4 传送 B 相电源。道岔操定位时，AC380 电源线 X1 送 A 相、线 X2 送 B 相、线 X5 送 C 相电源。电转机线圈 U1 接收线 X1 的 A 相电源为公共端，V1 与 W1 两线圈通过 B、C 相电源换相实现定位转换和反位转换。

如果道岔操反位时，假设 2DQJ 转极反位打落，2DQJF 因故不转极仍保持在定位吸起状态，由于启动电路使用了两个不同继电器的接点并联，则 C 相电源输出存在两条支路。支路①经转极的 2DQJ121-123 接点由线 X3 经转辙机开闭器接点把 C 相电源送至线圈 V1，其传输路径 AC380-C→RD3→DBQ51-61→1DQJF/1DQJF1(21-22)→2DQJ121-123→X3→开闭器 13-14→K02-01→线圈 V1；支路②经未转极的 2DQJF121-122 接点由线 X5 把 C 相电源送至转辙机 41 接点（此时转辙机未启动 41-42 断开），其传输路径 AC380-C→RD3→DBQ51-61→1DQJF/1DQJF1(21-22)→2DQJF121-122→X5→开闭器 41。

同样 B 相电源输出也存在两条支路，经支路③转极的 2DQJ111-113 接点把 B 相电源由线 X4 经转

辙机开闭器接点送至转辙机线圈 W1，其传输路径略；经支路④未转极的 2DQJF111-112 接点把 B 相电源由线 X2 送至转辙机 43 接点（此时转辙机未启动 43-44 断开），其传输路径略；A 相电源为共用送至线圈 U1，其传输路径 AC380-A→RD1→DBQ11-21→1DQJ11-12/1DQJ21-22→X1→线圈 U1（此时道岔五条线都有电）。由于转辙机三相线圈 U1、V1、W1 分别有了 A、C、B 相电源，转辙机开始启动。

转辙机启动后，开闭器第三排接点立即断开，第四排接点闭合，即 41-42 与 43-44 闭合接通。先前经线 X5 送至 41 点的 C 相电源继续通过开闭器 41-42→12→K03-04→线圈 W1。这样在转换中的转辙机线圈 W1 端同时有 B 相和 C 相电源，出现电源短路跳 B 相 RD2 断路器。同样，先前经线 X2 送至 43 接点的 B 相电源继续通过开闭器 43-44→14→K02-01→线圈 V1，这样在转换中的转辙机线圈 V1 端同时有 C 相和 B 相电源，出现电源短路跳 C 相 RD3 断路器，使转辙机在转换途中停转，道岔处于四开状态。

其他假设同样存在不确定的风险因素，并不都

能引发电源短路跳断路器自保,也有可能发生严重的信号升级或烧损设备等不可控事故。

2.2 电路存在的问题

电路设计存在缺陷,违反《铁路信号设计规范》中“集中联锁结合电路的复示继电器应防止动作不一致可能产生危及行车安全的后果,合用继电器接点时应防止电路串电”的规定。

2.3 对技改电路的改进

为防止主继电器与复示继电器出现动作不一致引发的问题,应对图2电路进行改进。也就是把B相和C相电源并接接点分别改造成使用同一台继电器的两组接点,即B相分别使用1DQJF和2DQJ同一台继电器的两组接点并联,C相分别使用1DQJF1和2DQJF同一台继电器的两组接点并联,来保证继电器动作不一致时,因同一台继电器的并联接点同步,即使2DQJF故障也能断开B相或C相电源,使设备停止动作,不会出现串电短路现象,能保证故障导向安全,也满足设计规范标准。

3 事故案例

3.1 事故概况

某站下行进站信号机未开放的情况下,其外方第一架通过信号机显示绿黄灯(应显示黄灯),信号显示升级,构成铁路交通一般C类事故。

3.2 事故原因

因新设区间逻辑检查设备新增信号复示继电器控制电源设计错误,在关断新增QKF电源RD-LJJC断路器后(如图3打×处所示),构成迂回电路。

如图3虚线所示,使既有X-LXJ2F(下行列车信号第二复示继电器)的继电器线圈通过迂回电路错误保持吸起,最终导致信号显示升级事故的发生。

3.3 电路分析

1) 图3中FJF复示继电器为JYXC-270极性保持继电器、LXJF/LXJ2F为JWXC-1700,既有的X-LXJ2F设在QZ2架。粗线框内的X-LXJF、X-FJF两个复示继电器及熔断器RD-LJJC为新增设备设在LJJC架。当RD-LJJC断路器闭合状态时,既有

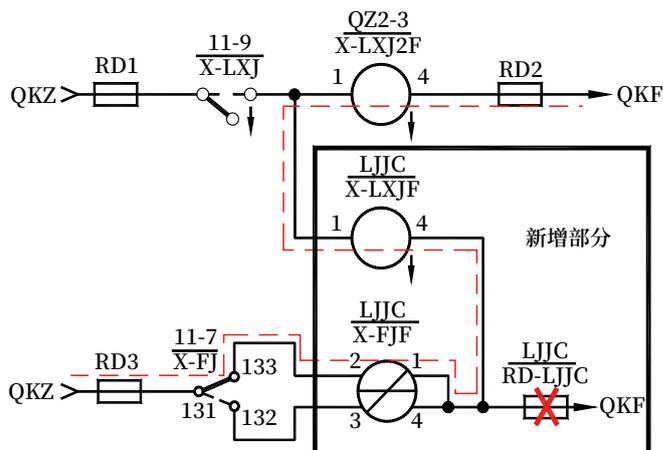


图3 LXJF电路
Fig.3 LXJF circuit

X-LXJ2F线圈4通过QZ2架RD2供QKF电源,新增X-LXJF线圈4及X-FJF线圈4通过新增RD-LJJC熔断器供QKF电源,3个继电器线圈4同显负极性电源性质,不会出现迂回串电回路。

2) 当RD-LJJC断路器断开后,既有X-LXJ2F线圈4仍通过RD2供QKF电源,而新增X-LXJF线圈4及X-FJF线圈4由于缺失了RD-LJJC熔断器的QKF电源,导致X-LXJF线圈4与X-FJF线圈4并联关系变更为串联关系,使X-LXJ2F与X-LXJF和X-FJF三个继电器线圈形成串联回路,通过图3中虚线迂回电路错误吸起。在下行进站信号机关闭的情况下,使其外方第一架通过信号机显示绿黄灯(应显示黄灯),信号显示升级。

3) 既有X-LXJ2F串电励磁电路:QKZ(11架)→X-FJ131-132→X-FJF2-1→X-LXJF4-1→X-LXJ2F1-4→RD2→QKF(QZ2架)

如果直流控制电源是24V,串电回路总电阻 $R=135\Omega+1700\Omega+1700\Omega=3535\Omega$ (135Ω 与 1700Ω 是线圈电阻),根据欧姆定律串电回路中的各继电器端电压计算如下:

$$UFJF: V = I \times R = 24 / 3535 \times 135 = 0.92 \text{ V} \quad (1.07 \text{ V}); \quad (1)$$

$$ULXJF: V = I \times R = 24 / 3535 \times 1700 = 11.54 \text{ V} \quad (13.46 \text{ V}); \quad (2)$$

$$ULXJ2F: V = I \times R = 24 / 3535 \times 1700 =$$

11.54 V (13.46 V)。 (3)

式中括号中数字为控制电源 28 V 时计算出的电压。继电器 JWXC-1700 工作值不大于 16.8 V, 释放值不小于 3.8 V。计算出的 11.54 V 已能使 X-LXJ2F 保持吸起 (现场实测值 X-LXJ2F 及 X-LXJF 继电器 13 V 左右, 推测直流控制电源应在 24 ~ 28 V 间), X-FJF 极性保持继电器不论是否转极都不影响 LXJ2F/LXJF 的励磁。

4) 负载反极现象。正常状态电路中 3 个继电器线圈 4 都是 QKF 电源, 是负极性电源性质。当 RD-LJJC 熔断器断开后, X-LXJF 与 X-FJF 的线圈 4 失去 QKF 电源, X-LXJF 与 X-FJF 和 X-LXJ2F 继电器形成串联电路, 由 11 架的 QKZ 电源为 X-LXJF 线圈 4 提供正极性电源, 也就是电源反极现象。电源反极的后果是易导致串电使继电器错误励磁吸起。

3.4 电路存在问题

1) 电路电源设计存在缺陷, 违反《铁路信号设计规范》中“集中联锁结合电路的复示继电器应防止动作不一致可能产生危及行车安全的后果, 合用继电器接点时应防止电路串电”的规定。

2) 控制电源使用未执行“当位于不同组合架的多台继电器共用一组接点条件时, 应使用同一架上电源”的原则。

3) 违反《铁路信号设计规范》中“接近信号机由黄灯转为绿灯或绿黄灯时, 应连续检查主体信号机在开放状态”的规定。

3.5 其他

增设信号复示继电器后, 联锁回采条件没有复示继电器与主继电器状态的一致性检查, 不能实现故障导向安全。

4 结语

综上所述, 道岔技改电路与事故案例电路, 都违反了设计规范相关标准, 为信号设备留下了潜在

安全隐患。如果电路存在潜在的缺陷, 一旦条件构成, 则这个电路可能就不再是安全电路, 本文事故案例就很好诠释了这个问题。

继电电路设备本身无法杜绝故障的发生, 设计电路时一定要符合设计规范和标准, 多多进行故障假设。认真研究分析电路中的各种风险因素。对有回采或采集的继电器设复示时要采集复示继电器接点, 共用接点及电源设计要符合规范标准, 杜绝设计缺陷, 确保电路故障后设备动作后果导向安全方面, 这是信号设计从业者必备的责任和担当。

参考文献

- [1] 王秉文. 6502 电气集中工程设计 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.
- [2] 何文卿. 6502 电气集中电路 [M]. 2 版 (修订本). 北京: 中国铁道出版社, 1997.
- [3] 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.
- [4] 中国铁路通信信号总公司研究设计院. 铁路工程设计技术手册: 信号 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 铁路信号 AX 系列继电器: GB/T 7417-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [6] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路信号故障-安全原则: TB/T 2615-2018 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [7] 中华人民共和国铁道部. 铁路信号站内联锁设计规范: TB 10071-2000 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [8] 樊西宁. 道岔控制电路分布电容探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19 (1): 92-95.
Fan Xining. Discussion on Distributed Capacitance in Switch Control Circuit [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 92-95.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2023.08.003

CTCS-2级列控系统大号码道岔 有源应答器组特殊场景探讨

张会志

(中国国家铁路集团有限公司上海安监特派办, 上海 200120)

摘要: 描述高速铁路大号码道岔应答器组的设置和报文发送方式, 并对报文数据差异、接近区段长度距离不足和短区间等特殊场景下造成列车在通过大号码道岔时降速运行原因进行分析, 提出在工程设计、数据编制中相应的解决对策, 对提高高速铁路运营效率具有一定的指导意义。

关键词: 大号码道岔; 有源应答器; 报文

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0013-04

Discussion on Special Scenarios of Switchable Balise Group for Large Number Turnouts in CTCS-2 Level Train Control System

Zhang Huizhi

(Shanghai Office of Safety Supervision and Management Commissioner, China State Railway Group Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: This paper firstly describes the setting of switchable balise group for large size turnouts and the method of sending telegrams in the high-speed railways. Then an analysis is conducted on the reasons for train speed reduction when passing through large turnouts in special scenarios such as inconsistent telegram data, insufficient distance of approaching sections and short sections. Finally, it summarizes several types of problems frequently encountered in engineering design and data compilation, and proposes the corresponding solutions, which have certain guiding significance for improving the operational efficiency of high-speed railways.

Keywords: large size turnout; switchable balise; telegram

高速铁路网络扩展以及新建线路的进一步增多, 辙岔号大于 1/18 的道岔 (简称大号码道岔) 在车站、线路所内的线路上得到大量运用。为了提高列车运行速度, 在车站、线路所大号码道岔外方均设

置有源应答器组用于发送大号码道岔预告报文。但是在工程设计、数据编制的过程中, 由于设计人员对于大号码道岔应答器组的设置和报文发送条件理解的偏差, 导致工程应用中出现一些问题, 影响运用和调试。

收稿日期: 2023-05-16; 修回日期: 2023-08-11

第一作者: 张会志 (1965—), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向: 铁道信号和安全管理, 邮箱: zhanghuizhi2288@dingtalk.com。

1 大号码道岔应答器组的设置及报文发送

大号码道岔应答器组 (DD) 通常设置于大号码

道岔外方发送 U2S 码的闭塞分区入口内方 200 m 处, 该应答器组设置示意如图 1 所示。

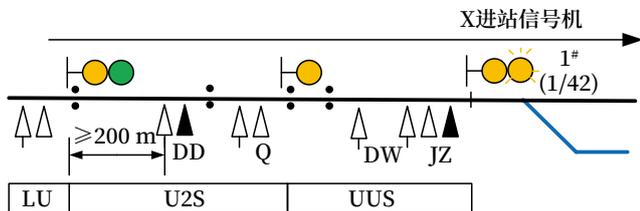


图1 大号码道岔应答器组设置示意
Fig.1 Setting balise groups for large number turnout

当 U2S 闭塞分区入口内方不具备设置条件时, 可在防护大号码道岔的 U2S 或 UUS 闭塞分区内距大号码道岔较远处设置大号码道岔应答器组。当与定位应答器组 [DW] 合用时, 由一个有源应答器和一个无源应答器构成。

大号码道岔有源应答器中主要包含大号码道岔信息包 [CTCS-4]、轨道区段信息包 [CTCS-1] 和线路速度信息包 [ETCS-27], 信息包数据均为正向有效。其中 [CTCS-4] 包数据范围为列车至大号码道岔的距离及大号码道岔侧向运行允许的速度; [CTCS-1] 包特殊情况下可发送与大号码道岔进路一致的轨道区段数据; [ETCS-27] 包特殊情况下可发送与大号码道岔进路一致的速度信息, 数据范围与轨道区段数据范围一致。

2 大号码道岔特殊场景

在实际调试试验过程中发现部分场景下, 列车未按照侧向允许速度通过大号码道岔问题, 不能达到大号码道岔设计的初衷, 无法最大限度提高运行效率, 这些问题需要在前期设计阶段予以解决。以图 1 为例, 车站 1# 道岔为 42 号大号码道岔, 侧向允许速度为 160 km/h。

2.1 特殊场景1: 列车收到[CTCS-4]包, 但在X进站信号机前速度未达到规定速度

列车运行至车站 X 信号机前, 允许速度为 80 km/h, 经过该信号机后变为 160 km/h, 该处为 160 km/h 大号码道岔, 列车未实现大号码道岔侧线最高速度通过功能。

问题分析: 列车经过区间大号码道岔应答器组 (DD) 时收到 [CTCS-4] 包, 该包描述距防护大号码道岔信号机位置的距离为 5 000 m, 允许速度为 160 km/h; 此时 [CTCS-1] 包描述距进站信号机位置的距离为 4 000 m, [CTCS-4] 包与 [CTCS-1] 包描述的位置不是同一个位置, 故列控车载设备 ATP 在该位置不启用大号码道岔信息, 列车在进站信号机前按 80 km/h 目标速度运行, 运行速度逐步下降到 80 km/h。列车在经过进站应答器组 (JZ) 后更新轨道区段信息, 描述信息与 DD 应答器组描述的大号码道岔位置一致, 因此在更新该线路数据后, 允许速度至 160 km/h。

由于大号码道岔应答器组中同时发送 [CTCS-4] 包、[CTCS-1] 包和 [ETCS-27] 包, 列控车载设备 ATP 在收到上述信息后对不同信息包提供的数据进行比较, 比较不一致会导向安全侧, 即大号码道岔信息包失效, 确保列车运行安全。因此在编制报文时, 应确保不同信息包数据的一致性。

2.2 特殊场景2: 列车收到[CTCS-4]包前列控车载设备ATP的允许速度下降

以图 1 场景为例, 列车在 U2S 区段允许速度由 180 km/h 下降到 170 km/h, 收到大号码道岔应答器报文后, 允许速度恢复至 180 km/h。

问题分析: 如图 2 所示, 列车收到 LU 码后, 以 X 进站信号机为目标点控制速度, 此时目标点速度为 0 km/h; 之后进入 U2S 码区段, 目标点速度变为 80 km/h, 但是“U2S+UUS”闭塞分区的总长度不满足列车从 180 km/h 常用制动至 80 km/h 的要求, 导致常用制动模式曲线 (NBP) 开始出现下降, 允许速度下降至 170 km/h; 当列车越过 DD 后, 目标点速度变为 160 km/h, 满足列车以 180 km/h 运行至目标点速度 160 km/h 的要求, 允许速度又提升至 180 km/h。

实验室中根据 CTCS-2 级 200C 列控车载设备检算结果, CHR2 型动车组以 180 km/h 速度运行至目标速度为 0 km/h 的目标点信号机 X, NBP 下降点至目标点距离小于 CHR3A 型动车组常用制动

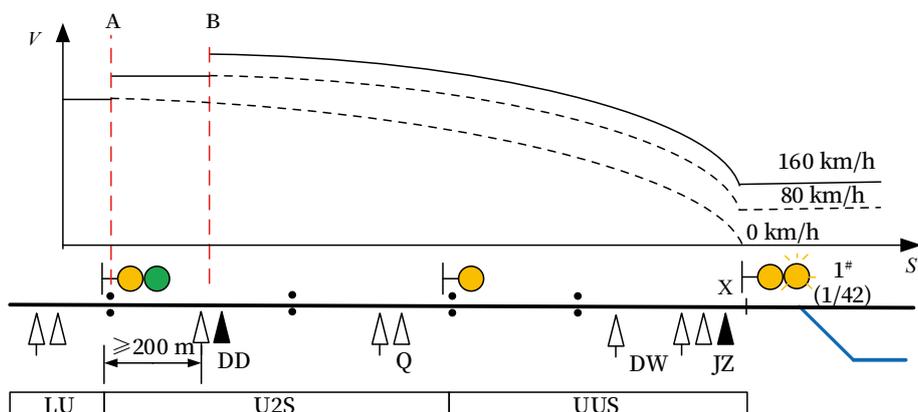


图2 特殊场景2中动车组运行速度曲线示意
Fig.2 EMU running speed curve in special scenario 2

停车所需要的制动距离，所以在未收到大号码道岔应答器数据前，必然会出现NBP下降情况。

由于列车在收到大号码道岔预告信息前，列控车载设备ATP根据地面低频信息提供的前方空闲分区数量和区间应答器提供的分区长度来控制速度，如果在设计过程中接近区段长度的检算未考虑大号码道岔过岔速度要求，就会出现先减速后提速的现象。在工程设计中应充分评估对运营效率的影响，如果对运营效率影响较大，应考虑采用更合适的辙

岔号道岔或者适当延长接近区段的闭塞分区长度。

2.3 特殊场景3：设置大号码道岔的车站（所）因短区间而无法达到允许过岔速度值

如图3所示，M线路所1[#]道岔为42号道岔，侧向允许速度为160 km/h，在通过信号机XS外方U2S区段设置大号码道岔应答器组（DD）。列车经过M线路所的大号码道岔时，最大允许速度为120 km/h，未能达到最高允许速度160 km/h。

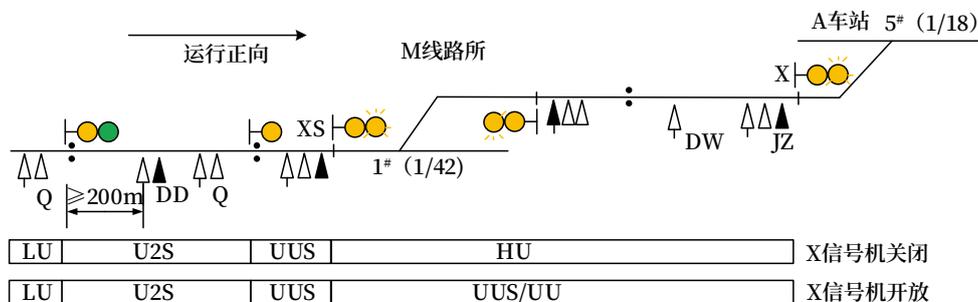


图3 特殊场景3线路示意
Fig.3 Track diagram in special scenario 3

问题分析：对于具备大号码道岔的侧向进路，当侧向接车信号开放UUS信号，且同时满足以下条件时，TCC发送大号码道岔数据包：1) 进路行车许可长度超过制动距离检查范围；2) 侧向进路范围内以及离去区段制动距离内无低于大号码道岔侧向允许速度的临时限速；3) 大号码道岔应答器组所在闭塞分区（不含）至防护大号码道岔的信号机之间的所有闭塞分区（进路）均空闲。因此，列车经过大号码道岔侧向最高允许速度除线路限速外，还应满足列车按

照道岔区段线路允许最高码序至目标点，实施常用制动能够可靠停车的速度限制。通过实验室仿真试验发现，列车在CTCS-2等级下，由M线路所XS信号机至A车站X信号机之间距离不满足列车按大号码道岔速度160 km/h常用制动至A车站X进站信号前方停车的要求；在A车站X进站信号机开放的情况下，也无法满足列车由大号码道岔速度160 km/h常用制动至UUS出口速度80 km/h的距离要求。A车站X信号机在关闭和开放条件下允许速度如下。

1) 当 A 车站 X 进站信号机关闭条件下, 列车越过 M 线路所 XS 进站信号机后收到 HU 码时, 列车允许速度由 160 km/h 降至 127 km/h, 触发常用制动。

2) 当 A 车站 X 进路信号机开放条件下, 列车越过 M 线路所 XS 进站信号机后收到 UUS 码时, 列车以 UUS 码闭塞分区出口速度 80 km/h 进行控车运行, 允许速度由 160 km/h 降至 142 km/h, 同样触发常用制动。

以上问题是由于 M 线路所至 A 车站站间距离过短, 不满足列车以大号码道岔最高允许速度 160 km/h 通过后, 道岔区段线路允许最高码序至目标点列车按照常用制动能够可靠停车的距离要求所致。

对于大号码道岔应答器发送 [CTCS-4] 包需满足的条件: 条件 1: 进路行车许可长度超过制动距离检查范围; 条件 2: 侧向进路范围内以及离去区段制动距离内无低于大号码道岔侧向允许速度的临时限速。在这个特殊场景中, 遇到短区间这个高速铁路信号设计中经常遇到的问题。虽然区段空闲条件满足且没有临时限速, 但是由于区间较短且前方为车站, 信号显示会对列车运行速度造成影响: 如果前方信号关闭就相当于不满足条件 1, 所以无法发送大号码道岔应答器报文, 没有发挥出大号码道岔的作用; 如果前方信号开放, 由于限定了入口速度, 但是列控中心并不以前方信号的显示和 UUS 码闭塞分区出口速度作为发送大号码预告报文的条件, 所以产生了速度突降。因此, 在大号码道岔的设计中, 应充分考虑线路最高码序至目标点常用制动距离的要求。

3 结语

本文对大号码道岔调试及运营特殊场景中降速原因进行分析, 对工程建设提出以下建议。

1) 从设计源头进行改进, 在设计阶段充分考虑接近区段、车站短区间等影响大号码道岔作用发挥的不利因素, 充分发挥大号码道岔提速效能。

2) 数据编制中应对报文内数据的一致性进行检查, 包括数据来源一致以及不同信息包的数据逻辑

一致。

参考文献

- [1] 中国国家铁路集团有限公司. 列控系统应答器应用技术条件: Q/CR 769-2020[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2020.
- [2] 中华人民共和国国家铁路局. CTCS-2 级列控车载设备技术条件: TB/T 3529-2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [3] 中华人民共和国国家铁路局. CTCS-2 级列控系统总体技术要求: TB/T 3516-2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
- [4] 中华人民共和国国家铁路局. 机车信号信息定义及分配: TB/T 3060-2016E[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.
- [5] 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.
- [6] 郜新军, 王文涛, 周永健, 等. 高铁列控系统大号码道岔试验场景研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(4): 1-4.
Gao Xinjun, Wang Wentao, Zhou Yongjian, et al. Research on Test Scene of Large-Number Turnout for High Speed Railway Train Control System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(4): 1-4.
- [7] 莫志松. 西部高原山区高速铁路列控系统方案探讨[J]. 中国铁路, 2021(5): 77-83.
Mo Zhisong. Discussion on Train Control System Scheme of High Speed Railway in Mountainous Area of Western Plateau[J]. China Railway, 2021(5): 77-83.
- [8] 梁志国, 卢佩玲, 付伟. 铁路列控联锁一体化系统研究[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(S1): 98-102.
Liang Zhiguo, Lu Peiling, Fu Wei. Study on Integrated System of Railway TCC and Interlocking[J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55(S1): 98-102.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2023.08.004

盐通客专信号系统联调联试范围及问题分析

靳 栋¹, 周永健²

(1. 上海铁路通信有限公司, 上海 200071;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081)

摘要: 盐通客专由于其自身的特殊性, 信号设备厂家众多, 接口关系复杂, 且邻线站改较多, 如何安全高效完成联调联试成为各信号集成厂家的首要目标。基于检验测试单位的试验大纲, 结合现场实际工程情况, 分析并明确适用于盐通客专的测试案例范围以及相关线路跑车试验范围。针对试验过程中发现的问题, 借助盐通客专列控工程数据表、JRU软件、RBC数据分析软件等多种辅助工具, 从不同角度联合查找问题根源, 进而给出解决方案。最后总结试验范围和问题分析对于联调联试的重要性, 为线路开通提供重要科学依据。

关键词: 联调联试; 盐通客专; 信号系统; 试验范围; 问题分析

中图分类号: U284.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0017-06

Scope of Integration Test and Commissioning and Problem Analysis of Signal System for Yancheng-Nantong High-speed Railway

Jin Dong¹, Zhou Yongjian²

(1. Shanghai Railway Communication Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

(2. China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Due to its unique characteristics, the Yancheng-Nantong High-speed Railway involves many signal equipment manufacturers, complex interface relationships, and frequent modifications to adjacent line stations. How to complete the integration test and commissioning safely and efficiently has become the primary goal of each signal integration manufacturer. Based on the test outline of the testers and the actual engineering situation on site, the scope of test cases applicable to the Yancheng-Nantong High-speed Railway and the test scope of train operation on related lines are analyzed and clarified. In view of the problems found in the test process, with the help of various auxiliary tools such as Train Control Engineering Data Sheet for this Railway, JRU software, RBC data analysis software, etc., the paper introduces the root causes of the problem from different perspectives, provides solutions, and summarizes the importance of the test scope and problem analysis to the integration test

收稿日期: 2022-08-01; 修回日期: 2023-07-17

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题项目 (P2021G053)

第一作者: 靳栋 (1986—), 男, 工程师, 本科, 主要研究方向: 铁路信号, 邮箱: jindong1@crsc.cn.

and commissioning, and it also provides an important scientific basis for the operation of the line.

Keywords: integration test and commissioning; Yancheng-Nantong High-speed Railway; signal system; scope of test; problem analysis

联调联试是实现新建高速铁路安全顺利开通的重要举措。通过明确联调联试试验范围,可以对特定信号系统的各项功能、性能以及接口关系进行全面测试和深度验证,及时发现潜在的问题并分析整改,确保各项参数达到设计要求,以达到按照设计要求一次开通的目的。

1 概述

盐通客专联调联试于2020年10月23日开始,先后采用电务检测车(999285)、轨道检查车(999339)、接触网检测车(999454)、综合检测列车(0203)、信号试验车(300T、300H、300S、200H、200C)等车型展开试验,11月26日正式结束,共历时35天,期间信号专业从不同角度和范围对盐通客专CTCS-3/CTCS-2列控系统及设备、接口、数据进行综合性检测,确保列控系统各项参数整体满足设计要求。下面就盐通客专信号系统联调联试试验范围及测试中发现的问题进行简要探讨及分析。

2 适用于盐通客专信号系统联调联试范围

2.1 适用于盐通客专的联调联试测试案例范围

盐通客专信号系统测试案例依据盐通客专联调联试试验大纲,同时结合现场特定试验条件,测试范围涵盖339个CTCS-3(简称C3)进路,346个CTCS-2(简称C2)进路。因盐通客专全线无异物侵限灾害防护区段,故C3级列控系统测试包括注册与启动22个、注销13个、等级转换27个、行车许可147个、RBC切换56个、自动过分相3个、临时限速15个、调车作业8个、人工解锁进路1个、降级情况31个、设备冗余4个等共11种运营场景。C3级列控系统后备功能测试包括正常行车12个、模式转换10个、临时限速2个、自动过分

相1个、引导作业2个、调车作业1个、故障处理2个、设备冗余2个、大号码道岔3个共9种运营场景。

2.2 适用于盐通客专的相关线路跑车测试范围

盐通客专属于国内沿海高铁的一部分,地理环境复杂,建设较晚,与既有线衔接较多,衔接站多存在信号软件修改的情况,因此明确盐通客专的相关线路跑车测试范围成为信号专业的重中之重。测试范围需涵盖正线区间的盐城徐盐场至南通西站,正线车站的盐城徐盐场S/SF口、盐城大丰、东台盐通场、海安盐通场、如皋南、南通西(盐城方向),相关线路所的国道村线路所、陈桥线路所(侧向),相关联络线的陈桥联络线(国道村线路所至陈桥线路所),以及因盐通客专接入引起的徐盐客专、沪苏通铁路、宁启铁路的相关测试进路及拉通测试。盐通客专车站平面示意图如图1所示。

以上测试范围仅限于与动车组相关的C2、C3级进路,不含以上各车站与动车组C2、C3级进路无关的调车线、牵出线、货物线、段管线、岔线及安全线等,不含其他与盐通客专及相关工程无关的联络线。

3 测试问题分析

因盐通客专信号设备由多家厂商供货,接口关系复杂,设计参数难度大,在联调联试期间不可避免的会测出各种不同程度的问题,如应答器安装位置、应答器报文数据、TSRS软件逻辑、车载逻辑、轨道电路码序、RBC软件逻辑等问题。下面仅对部分典型问题进行简要分析。

3.1 单电台移交场景下C3降为C2

联调期间某日,G55610次(CRH380B-3644/300T/C3),盐通下行线反向,列车在K2附近与RBC断链,DMI提示进入C2等级,司机确认C2

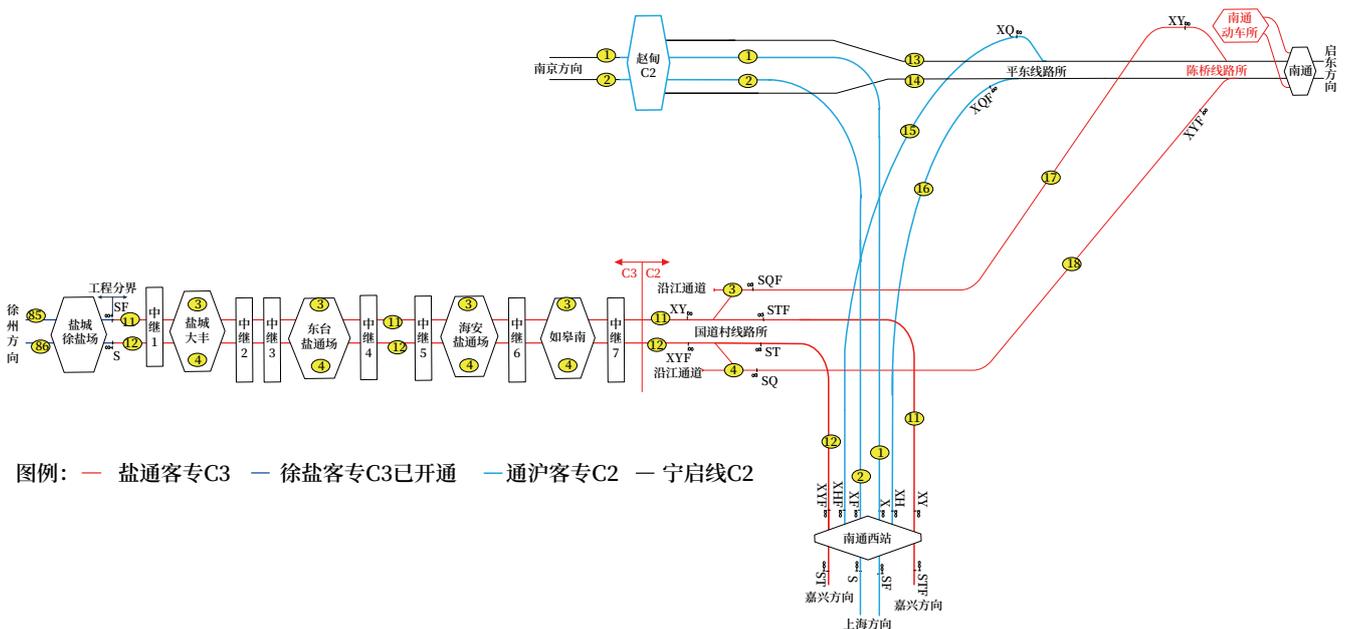


图1 盐通客专车站平面示意

Fig.1 Layout of the station of Yancheng-Nantong High-speed Railway

等级后，列车继续运行进入盐城徐盐场。

1) 问题分析

车载JRU数据分析：查看JRU数据，问题时间节点处，ATP收到P131包，显示列车由盐通RBC1向徐盐RBC3进行移交，由于备用电台工作异常，无法与接收RBC（徐盐RBC3）建立通信（主用电台在与移交RBC通信）。当列车越过移交边界，随后车载向移交RBC发送M156结束会话。车地间20s左右无通信，无线超时降级。

地面RBC数据分析：查看盐通RBC1（移交RBC）数据，问题时间节点处，盐通RBC1判断列车车头越过移交边界，向徐盐RBC3发送M203移交通告消息；当盐通RBC1收到列车发送的M136位置报告，此时列车车头距离编号为90-1-1-13（YTK6+741）应答器的距离为35m，列车车尾已越过移交边界；随即盐通RBC1回复列车M24+P42，要求列车终止通信会话；然后盐通RBC1收到列车发送的M156结束通信会话；盐通RBC1回复列车M39确认通信会话结束；至此RBC与列车通信中断。

地面三接口数据分析：PRI接口数据显示

G55610（14984174543）于问题发生当日从国道村线路所起呼，问题发生时间节点前后，接权的MT（14984174542）在交权的MT（14984174543）挂断5s之后才发起呼叫，因此OBU对RBC发送M156，RBC回应OBU M39包，导致RBC异常对OBU发起了DC消息，随即拆线。期间无线通信信号电平、质量、拆线的信令流程均在正常范围内。即此次拆线为正常的拆线流程。

2) 结论

经车载/地面/通信侧分析，列车由盐通RBC1向徐盐RBC3进行移交，由于备用电台工作异常，无法与接收RBC（徐盐RBC3）建立通信。列车越过移交边界，随后车载向移交RBC发送M156结束会话。车地间20s左右无通信，导致无线超时降级，此为特殊场景下的300T单电台试验，属于300T车载固有逻辑，符合预期结果。

3.2 允许速度短时间内跳变

联调期间某日，G55813次（CRH2C-2089/300S/C3）经盐通下行线正方向运行至国道村线路所通过，K142级间切换点处允许速度由250km/h抬升至300km/h，约3s后突降至250km/h。

1) 问题分析

查看车载JRU(300S)数据,允许速度跳变时间节点处,车载设备收到应答器090-1-11-9包含等级转预告的信息,预告前方距离等级转换点7 802 m。等级转换预告点(应答器90-1-11-9)至执行点(应答器90-1-11-27)之间链接的应答器如下:90-1-11-11、90-1-11-13、90-1-11-15、90-1-11-17、90-1-11-19、90-1-11-21、90-1-11-23、90-1-11-25。由于300S车载设备只能依据8组最近相关应答器组去定位等级转换点位置,当等级转换预告应答器编号不在8组内时,等级转换点的C2允许速度会变为无效值。因而出现在等级转换点前,车载出现瞬间抬升,过等级转换点后又突降的情况。此为300S车载固有逻辑,需在下一版软件进行优化。

2) 解决方案

为满足300S车载预告点到执行点(含执行点)8组以内的要求,同时尽量减少对既有设备的影响,经建设单位、运营单位、设计单位、集成单位及相关设备商等各部门讨论后决定将原设置的两组C3/C2预告应答器组均维持不变,在090-1-11-013无源应答器组内增补C3/C2预告信息,增补预告信息后,该预告点应答器组与执行应答器组的组间距数量为8,以满足300S车载逻辑的要求。

3) 结论

受影响应答器组报文需要修改,已上道运行的列控中心、RBC设备无需调整。经后续试验验证,300S列车未见异常。

3.3 码序与起模降速问题

因新建盐通客专引入,根据《盐通线列控数据V0.4》,引起徐盐客专圩洋线路所C2数据配置及有源应答器报文修改,并增加特殊场景下的大号码道岔应答器组控制防护功能。需对圩洋线路所TS-TXL、TXLF-TSF大号码道岔进路降级逻辑检查试验,TXL-TS、TXLF-TSF C2级接车进路试验。

联调期间某日,G55710次(CRH380B-3644/300T/C2)沿徐盐客专上行线正向,圩洋线路所通过,经盐城北客车联络线上行线正向运

行。在故障时间节点处,试验列车处于C2完全模式,机车码序LU→U2→UU,列车的允许速度为45 km/h,与列控工程数据表中描述的大号码道岔不符。当列车通过TXLF信号机后,列车的允许速度由120 km/h突降至100 km/h。一周后,试验列车以C2模式沿徐盐客专下行线反向运行,圩洋线路所通过,经盐城北客车联络线下行线反向。列车以C2等级完全模式越过TXL信号机后,坡度从8‰变至-16‰,允许速度由120 km/h突降至110 km/h。

同日,G55712次(CRH380B-3644/300T/C3)沿徐盐客专上行线正向,圩洋线路所通过,盐城北客车联络线上行线正向。在故障时间节点处,列车以C3完全模式运行至盐城北客车联络线接近区段,机车信号UU,列车的允许速度为120 km/h,等级转换后,列车以C2完全模式过TXLF信号机后,列车的允许速度由120 km/h突降至110 km/h,列车触发EB制动停车。一周后,试验列车以C3模式沿徐盐客专下行线反向,圩洋线路所通过,盐城北客车联络线下行线反向运行。列车以C3等级完全模式越过TXL信号机后,允许速度120 km/h突降至110 km/h。

1) 问题分析

码序问题:查看JRU数据,G55710次在徐盐客专上行正向运行,大号码检查区段需盐城北站IIG开放,导致大号码道岔接近区段未发出UUS/CTCS-4包;G55712次在徐盐客专下行反向运行,因盐城北客车联络线只有一个闭塞分区,导致联络线区间发送UU码,大号码接近区段也无法发送UUS。

起模降速问题:在故障时间节点,因徐盐正线应答器BTS/BTSF描述坡度与联络线应答器BTXLF/BTXL描述坡度有较大差异(正线应答器BTS/BTSF描述坡度数据未按安全侧坡度描述),且后者描述的坡度为下坡,坡度较大,车载在进入联络线区间后重新计算控车模式曲线,造成G55710及G55712次列车允许速度突降;同时由于G55712次列车运行速度高于允许速度超过10 km/h,导致

触发 EB 制动。

2) 解决方案

方案一：根据《列控系统应答器应用技术条件》(Q/CR 769-2020)第 6.2.2.8 章节，当不同进路坡度上下坡度不同且坡度相差较大时，坡度数据可在有源应答器中描述。即删除圩洋线路所 BTS 无源应答器中的接车坡度数据，由有源应答器根据实际进路情况发送相应坡度数据，可确保去往徐盐和连盐方向的坡度数据与线路实际一致，此方案描述的坡度最为准确。

方案二：修改 BTS 的正向接车坡度，由原描述徐盐 TXF 方向改为描述连盐、徐盐两个方向较为不利的坡度，可保证去往连盐盐城北时先后经过的 BTS 和 TXLF 两个应答器时没有明显的坡度突变。另外防止收到 BTS 出现坡度突变，同时修改 BTS 外方最近的 Q 应答器组 B3088 中的正向坡度。同理，当盐城北客车联络线下行线正方向运行，圩洋线路所通过，为保证先后经过的 BTSF 和 BTXL 的两个应答器时坡度没有明显突变，修改 BTSF 的反向接车坡度，由原描述徐盐 TX 方向改为描述连盐、徐盐两个方向较为不利的坡度。另外防止收到 BTSF 出现坡度突变，同时修改 BTSF 外方的最近的发送反向数据的应答器组盐城徐盐场 BX 中的反向坡度。

3) 结论

综合考虑变更周期、实施难度等因素，采用方案二，利用天窗点修改应答器报文后，跑车试验自盐城徐盐场经圩洋线路所的 TS-TXLF 及 TSF-TXL 通过进路，同时试验 TS-TXF 和 TSF-TX 通过进路，复测复检未见异常。

4 结束语

联调联试是高速铁路动态验收的主要内容，明确试验检测范围尤为重要，在特定范围内可以有针对性的、系统性的、全方位的进行动态检测，同时检测过程可能会出现各种各样的问题，每个问题都要经过从发现问题、分析问题到最终解决问题的过

程，期间积累了大量宝贵数据和实践经验，正是这些数据和经验推动着国内高速铁路信号系统性能逐渐优化，功能持续迭代，保证了国内高速铁路运行的安全和稳定。盐通客专信号系统联调联试坚持问题导向、目标导向和结果导向，坚持红线意识和底线思维，明确试验范围，深挖测试问题根源，对信号系统的功能需求、接口匹配关系、设计参数、整体运行性能等进行全面试验和评估，高质量高效率交出了完美答卷，为客运专线优质高效顺利开通运营提供了重要科学依据。

参考文献

- [1] 霍黎明, 武钰喜. 高速铁路联调联试信号系统动态检测典型问题分析 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2021.
- [2] 张秀广. 高速铁路通信信号系统联调联试关键技术 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2011, 8(6): 1-6.
Zhang Xiuguang. Key Technology of Integrated Commissioning and Testing of Communication & Signal Systems for High-Speed Railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2011, 8(6): 1-6.
- [3] 中国国家铁路集团有限公司. 高速铁路联调联试及运行试验管理办法: 铁工管 [2021]119 号 [S]. 北京: 中国国家铁路集团有限公司, 2021.
- [4] 禹志阳. 高速铁路信号系统测试技术研究及展望 [J]. 铁道通信信号, 2019, 55(S1): 137-141.
Yu Zhiyang. Research and Prospect on Test Technology for the Signaling System in High-Speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55(S1): 137-141.
- [5] 禹志阳. 高速铁路信号系统联调联试常见问题分析与对策 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2013, 10(1): 1-4, 11.
Yu Zhiyang. Analysis and Solution of Common Problems in Integrated Commissioning and Testing of High-Speed Railway Signal Systems[J]. Railway

- Signalling & Communication Engineering, 2013, 10(1): 1-4, 11.
- [6] 周永健, 刘德超, 李万生, 等. 联调联试中列控系统兼容性问题探讨 [J]. 铁道通信信号, 2020, 56 (5): 25-29.
Zhou Yongjian, Liu Dechao, Li Wansheng, et al. Problem Discussion about Compatibility of Train Control System during Integration Test and Commissioning[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(5): 25-29.
- [7] 何春明, 陈盈, 石海丰, 等. 郑州-西安客运专线CTCS-3级列控系统联调联试 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2011, 8 (4): 14-17.
He Chunming, Chen Ying, Shi Haifeng, et al. Integrated Testing and Commissioning of CTCS-3 Train Control System for Zhengzhou-Xian DPL[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2011, 8(4): 14-17.
- [8] 中国铁路总公司. 高速铁路联调联试及运行试验技术规范: Q/CR 472 [S]. 北京: 中国铁路总公司, 2015.
- [9] 中华人民共和国铁道部. 高速铁路工程动态验收技术规范: TB 10761-2013 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
- [10] 司静. 高速铁路通信信号系统联调联试标准化管理 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (1): 85-90.
Si Jing. Standardization Management of Integrated Commissioning and Testing for High-Speed Railway Signaling and Communication System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(1): 85-90.

(上接7页)

- [4] 杨俐. 上海机场联络线列车自动折返方案研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (11): 9-13.
Yang Li. Research on Automatic Train Turn-back Scheme of Shanghai Rail Transit Airport Link Line[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(11): 9-13.
- [5] 徐轶劫. CTCS2+ATO 城际列控系统与高速铁路ATO 系统差异性及应用趋势探讨 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (3): 37-42.
Xu Yijie. Discussion on Differences and Application Trends of CTCS2+ATO Intercity Train Control System and High-Speed Railway ATO System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(3): 37-42.
- [6] 刘鸿飞. 简析高速铁路ATO 系统与城际铁路CTCS2+ATO 系统的区别 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17 (2): 40-44.
Liu Hongfei. Analysis of Differences between ATO System for High-Speed Railways and CTCS2+ATO System for Intercity Railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(2): 40-44.
- [7] 中国国家铁路集团有限公司. 高速铁路ATO 系统暂行总体技术方案: TJ/DW 202-2018 [S]. 北京: 中国国家铁路集团有限公司, 2018.
- [8] 王栋, 刘实秋. 城际铁路应用无人自动折返技术研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2018, 15 (12): 47-52.
Wang Dong, Liu Shiqiu. Study on Application of Automatic Turn-back Technology in Intercity Railways[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2018, 15(12): 47-52.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2023.08.005

CTC区域集控系统实施应用的研究

李永强¹, 方玉宝¹, 席春华²

(1. 卡斯柯信号有限公司, 上海 200071;

2. 中国铁路上海局集团有限公司, 上海 200071)

摘要: 为适应普速铁路 CTC 中心站集中控制的需求, 实现现代铁路运输减员增效目标, 可在 CTC 整体系统结构及行车组织原则不变的前提下, 根据线路及车站运输需求部署 CTC 区域集控系统方案。通过对 CTC 区域集控系统结构、系统功能实现、系统部署方案来深入分析系统功能实现、工程实施及对铁路建设运营效益的提升效果。为服务国内铁路运输的高质量发展提供支撑及借鉴。

关键词: CTC; 区域集控; 减员增效

中图分类号: U282+.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0023-05

Research on Implementation and Application of CTC Regional Centralized Control System

Li Yongqiang¹, Fang Yubao¹, Xi Chunhua²

(1. CASCO Signal Ltd., Shanghai 200071, China)

(2. China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: In order to meet the demand for centralized control of CTC central stations of common speed railways and realize the goal of reducing personnel and increasing efficiency in modern railway transportation, the CTC regional centralized control system scheme can be deployed according to the transportation demand of lines and stations on the premise that the overall system structure and operation organization principle of CTC remain unchanged. Through in-depth analysis of CTC regional centralized control system structure, system function realization and system deployment scheme, this paper discusses the system function realization, project implementation and the improvement effect on railway construction and operation benefits. It provides support and reference for the high-quality development of railway transportation in China.

Keywords: CTC; regional centralized control; reducing staff and increasing efficiency

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2023-06-27

第一作者: 李永强 (1983—), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向: 铁路信号调度集中系统, 邮箱: lyqwin2012@163.com.

为适应普速铁路 CTC 中心站集中控制的需求, 减轻普速铁路 CTC 调度员的工作强度和压力, 中国国家铁路集团有限公司工电通号函 [2019]48 号文提

出 CTC 中心站集中控制方案。在 CTC 整体系统结构及行车组织原则不变的前提下，在中心站设置集中控制操作终端（集控台），实现将相邻多个车站的操作集中到中心站控制，由中心站集控台分担一部分调度员工作，同时可以合理减少多个集控站上的人员配备，以实现铁路运输减员增效的目标。CTC 区域集控系统的实施应用是分散自律 CTC 系统在普速铁路上的灵活应用和改革创新，进一步推动了国内铁路运输的高质量发展。

1 CTC区域集控系统结构

CTC 区域集控系统基于分散自律 CTC 系统，路局调度中心、区域集控台中心站、区域集控车站等通过双路传输网络连接，区域集控中心站除部署 CTC 车站的自律机、车务终端外还需新增车站服务器、占线图后台服务、调监服务及占线图软件，集控站部署自律机及车务终端。其中区域集控的所有车站自律机连接中心站车站服务器，中心站主要通过占线图软件实现调度中心与车站的列车行车计划调度相关功能，通过中心站车务终端站场图实现所有集控站的进路控制操作功能。CTC 区域集控系统结构如图 1 所示。

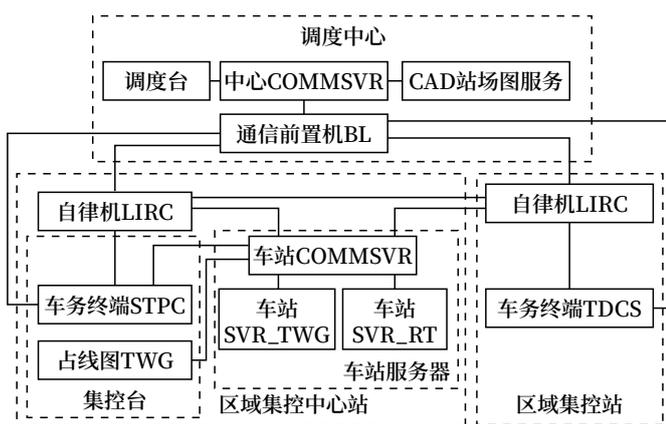


图1 CTC区域集控系统结构

Fig.1 Structure of CTC regional centralized control system

2 CTC区域集控系统功能实现

在区域集控系统中心站管控相邻多个集控站，中心站集控台具备与调度台之间进行中心操作、车

站操作、车站调车操作方式的转换功能。车站控制模式转换在中心站统一完成，在车站操作方式下，中心站集控台具备所辖各车站列车自动触发办理和股道更改运用功能，同时具备调度命令的编辑、下达和转发功能。区域集控站的 CTC 终端设备在各种模式下都无进路操作权限，仅作为应急处置时的后备手段具备 TDCS 功能。集控台对各站的进路控制权限，由该站所属操作方式决定。

2.1 调度台功能

调度台具备向集控台、区域集控站下发阶段计划功能，根据区域集控车站的控制模式向不同的车站设备下发阶段计划。车站操作方式下，调度台会将阶段计划下发给区域集控车站的车务终端和中心站，由中心站调整计划后再将计划下发至区域集控车站的自律机和车务终端。中心操作方式、车站调车操作方式、非常站控模式下调度台会将阶段计划下发给区域集控车站的自律机、车务终端和中心站。调度台具备向集控台和区域集控站下发调度命令的功能，集控台具备调度命令转发功能。调度员可根据实际需求选择区域集控站的设备下发调度命令，系统提供区域集控站和中心站受令点，调度员给中心站下发调度命令后，中心站值班员可根据实际需求给受控的集控站转发该调度命令。

2.2 车站服务器功能

区域集控中心站新增的车站服务器与调度中心通信前置机连接，同时与中心站占线图、中心站自律机及所有区域集控站的自律机相连，车站服务器包含车站通信服务器（SVT_RT）和占线图后台（SVR_TWG）两个软件，其中车站通信服务器负责处理调度中心调度命令和把行车计划转发到各受控的集控站，占线图后台负责被集控范围内车站的行车计划、调度命令和车站实际报点等信息的存储、转发和处理，是调度中心与区域集控中心实现 CTC 区域集控功能的枢纽。

2.3 占线图功能

区域集控系统占线图软件安装在区域集控中心站，用于被集控范围内所有车站的列车计划管理工

作, 主要实现阶段计划管理、调度命令管理、设置和取消接/发车进路自动触发、邻站预告、人工报点、同步自动报点、显示邻站报点、上报列车速报、上报站存车、查询确报、阶段记事管理、阶段计划下发、修改列车出/入口和行车日志打印等功能。接收调度台计划, 图表形式显示管内车站计划线, 可直接在计划线上修改各站股道、列车属性, 不具备更改计划线时间及到开关系的权限。

区域集控占线图对列车计划采用图形化和表格化两种方式显示及操作, 即计划图表和行车日志。

在车站操作方式下, 阶段计划由调度中心运行图从日班计划上图后进行计划再编辑(修改计划时间、预设股道), 下达至中心站集控台的占线图。占线图签收计划后可以阶段计划再编辑, 对计划中的接/发车股道进行修改, 修改后下发至所属车站。当占线图更改股道信息时, 会把更改股道消息发送至对应车站的自律机, 此时自律机需要主动向车务终端发送股道变化消息, 从而保证占线图股道变化的同时, 各车站车务终端进路序列、行车日志股道同步变化。区域集控系统占线如图 2 所示。

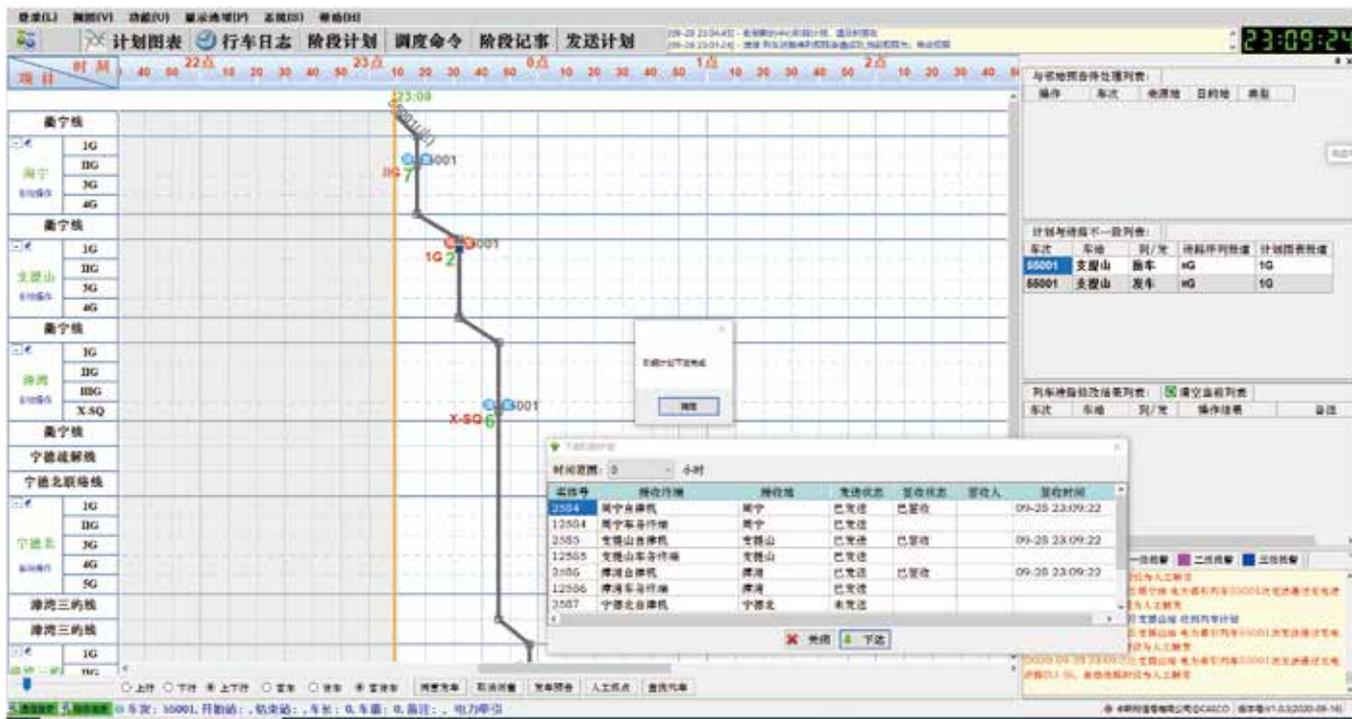


图2 CTC区域集控系统占线图

Fig.2 Graph of train management of CTC regional centralized control system

在区域集控占线图行车日志界面以表格化的方式显示单个车站所有列车的车次、属性、到达计划与实际、出发计划与实际、注意事项和作业流程等内容。占线图上的行车日志包含中心站以及所管辖集控站, 可以自由切换。通过行车日志可进行邻站预告, 中心站以及所管辖的集控站之间不进行邻站预告, 中心站管辖的边界邻站之间可通过占线图进行邻站预告。区域集控占线图接收由调度中心下发的调度命令。可以新建、修改和删除调度命令, 发

送调度命令至集控站车务终端或发送无线调度命令至机车、打印调度命令、上报被集控站的站存车与列车速报信息。占线图的双机同步依靠 SVR_TWG 数据的同步。

针对枢纽站目前运行图的列车计划只能描述列车在整个车站的出/入口和到/发时间, 不能描述列车在车站各车场的进路情况。由车站占线图软件实现接收中心行调的单站计划信息, 然后基于规则将大站列车计划拆分为多场、站的列车计划, 调

整出入口、时间、股道后下发给自律机，以实现中心站 CTC 集控功能，提高车站自动化作业效率与列车作业安全。与区域集控模式的区别包括：接收单站列车计划、根据车次接续规则合并多个调度台的列车计划、根据计划拆分规则将大站计划拆分为小站计划、调整股道、调整时间、出入口、根据规则自动分配股道和向中心发送列车报点信息等。

3 区域集控系统实施部署方案

CTC 区域集控系统部署方案可以根据线路及车站运输实际需求灵活合理部署。此方案最大的特点是实现在中心站进行所有集控车站的列车计划和进路办理的操作，以达到减员增效的目的。CTC 区域集控中心站机械室部署车站服务器、自律机和车务终端等设备，集控站部署自律机和车务终端设备。中心站集控台部署值班员和信号员显示操作终端，区域集控系统显示终端部署如图 3 所示。值班员机配置两台显示器，一台用于多站调监画面显示（管内所有站及邻站），一台用于车务管理办公；信号员机配置两台显示器，一台用于集控台占线图终端计划管理，一台用于车务终端单站画面显示和进路控制操作；通过车站菜单切换可以实现对区域集控各单站进行操作，中心站车务终端对站场功能条、进路序列显示及界面边框进行了优化设计，采用无边

框界面显示，更加实用和美观。区域集控中心站车务终端单站界面如图 4 所示。

信号员A机 占线图	信号员A机 单站图	车务 管理终端	值班员A机 多站图
信号员B机 多站图		车务 办公电脑	值班员B机 占线图
			值班员B机 单站图

图3 区域集控系统显示终端部署
Fig.3 Deployment of display terminals of regional centralized control system

4 区域集控系统实施应用效果

CTC 区域集控系统行车组织指挥的基本原则不变。列车调度员通过 TDCS 方式下达行车指挥，各站（线路所）列车运行调整计划、区间列车运行组织由列车调度员负责。中心站开通 CTC 区域集控功能，由中心站车站值班员负责区域集控车站（线路所）行车作业。

目前，CTC 区域集控系统方案已经在国铁衢宁铁路成功实施应用。衢宁铁路全线新建 28 个客货运车站，为单线站间自动闭塞线路，设计时速 160 km。针对普速线路车站数量多且存在客货混运，大部分车站存在列车及调车作业的实际情况，采用 CTC 区域集控系统方案，行车运输作业操作控制合理分配到调度中心及区域集控中心站，不影响铁路建设工期，且投入运用后可大大减少车务人员配备，降低开通运营后的人工成本和生产成本，可实现减

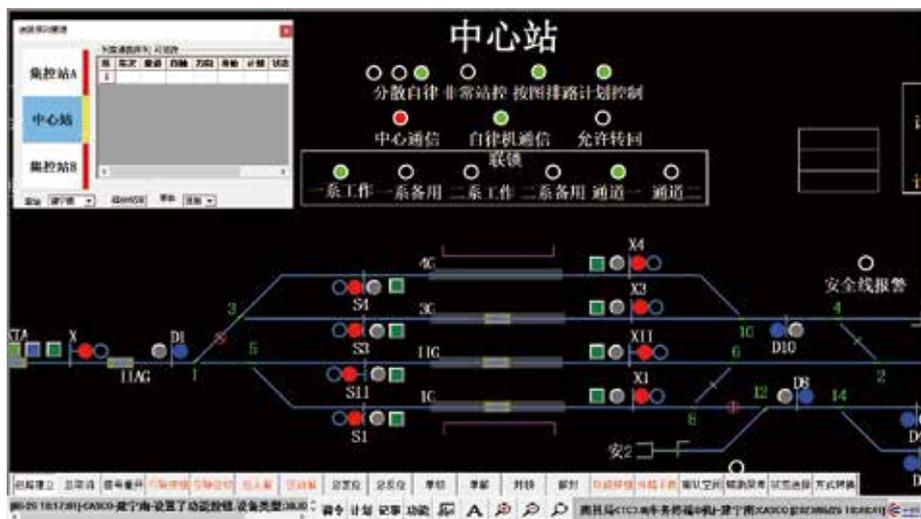


图4 区域集控中心站车务终端单站界面
Fig.4 Single station interface of train service terminal of regional centralized control center station

员增效的目标。该技术方案也将在浦梅、兴泉等线路全面推广实施应用,并着力节支降耗、改革创新,进一步推动实现国内铁路运输的高质量发展。

参考文献

- [1] 陈宣,王兴利,李华荣,等.一种基于 CTC3.0 的区域集控站进路办理的实现方法:CN202010099863.4[P]. 2020-02-18.
- [2] 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.
- [3] 王秀娟,郭辉,王永涛.基于区域计算机联锁的 CTC 系统研究[J].铁道学报,2010,32(4):130-133.
Wang Xiujuan, Guo Hui, Wang Yongtao. Research on CTC System Based on Area Control Computer Interlocking[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(4): 130-133.
- [4] 刘俊.普速铁路调度集中控制系统运用优化对策探讨[J].铁道运输与经济,2019,41(8):1-5.
Liu Jun. A Tentative Study on the Optimizing Countermeasures for the Application of Centralized Traffic Control System of Conventional Railway[J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(8): 1-5.
- [5] 冯振国,陈宣,胡飞虎.关于动车所 CTC3.0 系统研究与实现[J].铁路通信信号工程技术,2021,18(3):7-11.
Feng Zhengguo, Chen Xuan, Hu Feihu. Research and Implementation of CTC3.0 System for EMU Depots[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(3): 7-11.
- [6] 童荣军.普速铁路 CTC 中心站集中控制技术工程应用探讨[J].铁路通信信号工程技术,2022,19(3):1-5,16.
Tong Rongjun. Discussion on Engineering Application of Centralized Control Technology in CTC Central Station of Conventional Speed Railway[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(3): 1-5, 16.
- [7] 中国铁路总公司.调度集中操作显示规范:铁总工电[2018]69号[S].北京:中国铁路总公司,2018.
- [8] 余红梅.我国铁路 CTC 系统的应用现状研究分析[J].高速铁路技术,2014,5(3):5-8.
Yu Hongmei. Research and Analysis on Railway FZ-CTC System Application Status[J]. High Speed Railway Technology, 2014, 5(3): 5-8.

国外信息

西门子交通集团收购意大利交通优化企业 Optrail 公司

意大利西门子交通集团已收购 Optrail 公司,该公司提供用于优化铁路交通管理的数学算法。

Optrail 公司应用运筹学和机器学习来解决运输和物流领域的实际问题。其核心产品通过集成优化算法来提供实时冲突解决方案,超越依次“会让和越行”这种传统规划方法,在整个铁路网络中实现自动调度。

在 6 月 1 日宣布这项收购后,Optrail 公司仍将总部设在罗马,同时将其技术集成到西门子交通集团位于汉诺威的子公司 Hacon 公司的列车规划软件中。

西门子交通集团软件业务部门首席运营官弗兰克·格肯(Frank Gerken)表示,“将 Optrail 公司的数学方法与我们现有的交通管理产品 TPS.live 相结合,将会提高铁路运营的效率。”

(北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 冷宁翻译自:www.railwaygazette.com 2023-06-06)

基于CTC系统的城际折返站车次号 实现自动变更的研究

王宝宝

(广东城际铁路运营有限公司, 广州 510330)

摘要: 从 CTC 系统实现车次号跟踪的原理出发, 阐述列车到达折返站后 CTC 系统车次号自动变更逻辑的实现过程, 通过白云机场北折返站为例, 说明站内折返和站后折返的情景下实现车次号自动变更功能的过程和作业方式, 在车次密集、公文化运营需求的趋势下, 解决调度员在折返站手动修改车次可能造成的车次修改错误、车次修改延时等原因导致的信号不能按照计划开放的问题。

关键词: CTC 系统; 折返站; 车次号; 自动变更; 白云机场北站

中图分类号: U284.59

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0028-04

Research on Realizing Automatic Change of Train Numbers of Inter-city Railway Turn-back Stations Based on CTC System

Wang Baobao

(Guangdong Intercity Railway Operation Co., Ltd., Guangzhou 510330, China)

Abstract: Based on the principle of CTC system to realize the tracking of train number, this paper expounds the process of realizing the logic of automatic change of train number of CTC system after the train arrives at the turnback station. Taking Baiyun International Airport North Turnback Station as an example, the process and operation mode of realizing the automatic change function of train number in the situation of turning back in or after the station are illustrated. It solves the problem that the signal cannot be cleared according to the plan due to the train number modification error and the train number modification delay caused by the dispatcher manually modifying the train number at the turnback station.

Keywords: CTC system; turn-back station; train number; automatic change; Guangzhou Baiyun International Airport North Station

分散自律调度集中系统 (CTC) 是将计算机技
术网络、铁路运输指挥和现代控制技术相融合的先

进行车指挥系统。运行图软件主要运行于 CTC 系统
的中心调度台部分, 部分查询和综控模式运行在各
路局维护工区或中心机房中。CTC 系统运行图软件
集运行计划调整、列车运行控制和车站报点显示于
一体, 方便调度员计划部署的使用, 减轻了调度员

收稿日期: 2022-07-04; 修回日期: 2023-06-15

第一作者: 王宝宝 (1984—), 男, 工程师, 硕士, 主要研
究方向: 铁道信号, 邮箱: bobman@vip.qq.com.

运营指挥的工作量。随着 CTC 系统在铁路调度指挥中的逐渐推广，调度员能够利用 CTC 系统对车次号进行有效管理显得尤为重要。

1 车次号跟踪逻辑

CTC 系统里车次窗是车次号的存储位置，在车站的股道与区间上均应设置车次窗，列车信号机反向第一个区段应设置车次窗。轨道区段占用时，驱动车次号在车次窗中移动区间车次跟踪与站内车次跟踪。

1.1 区间车次跟踪逻辑

区间占用后（红色光带表示占用），反向搜索车次号并移动车次。对于自动闭塞区间，只有相邻的前方区段占用时才能正常跟踪；半自动闭塞区间，车次跟踪可跨过无采集的区间。

1.2 站内车次跟踪逻辑

信号机前方第一个区段占用时，如果此区段有进路标记，则反向搜索车次号并向前移动车次，移动的目标车次窗是向前搜索得到的第一个车次窗。进路标志取消，区段占用出清，信号机关闭，向前搜索设备并取消设备的进路标志。

2 城际线路折返车站实现车次号自动变更的功能说明

功能说明

调度员在系统录入车次号（车站控制模式下由车站值班员录入），CTC 根据列控发送过来的区间占用红光带信息，逐段区间进行占用，车次号也随之移动跟踪。如果两条交路在同一个站进行折返，且车组编号相同，则需对车次号进行修改，再从终到站开往始发站，在折返站 CTC 车次号的自动变更功能成为运输部门的迫切需求。

为保证旅客的有效输送和动车组的充分利用，在城际列车开行方案中，存在一些车站要开行折返列车。折返列车在 CTC 系统中体现为运行图中运行交路为相同车底的两条运行线。如图 1 所示。

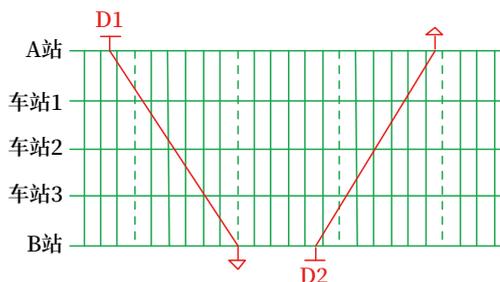


图1 相同车底号的两条运行图

Fig.1 Diagram of two operation lines with the same train carriage model

2.1 车次号自动变更功能在折返站的实现方式

为解决调度员在折返站手动输入车次号的问题，CTC 系统增加了车组管理功能，可通过车组管理对运行图上运行交路为相同车组号的计划线形成联动。

同一车组号的列车，在同一股道上进行折返，这里定义折返前为前车，折返后为后车，前车根据计划终到，运行图程序会将后车车次设置到前车作为出发车的车次中，这样就实现了后车计划车次号的自动变更，减少调度员人为操作失误的风险。

2.2 运行图中自动变更车次号功能在折返站的实现

定义 D1、D2 为同一车组编号的不同车次，在 B 站（D1 终到、D2 始发）进行折返作业，D1 为前车，D2 为后车，因此按照编组逻辑，将后车 D2 车次设置到 D1 的始发车次中，注意是相同股道。具体流程如图 2 所示。

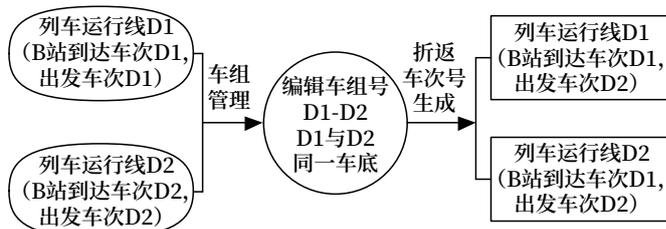


图2 车组号编辑管理流程

Fig.2 Flowchart for editing and managing trainset numbers

折返车次变更成功后，D1 在 B 站的到达车次为 D1，出发车次为 D2；D2 在 B 站的到达车次为 D1，出发车次为 D2，列车运行计划同步会将 D1 与 D2 进行关联，显示车组勾联关系。D1 的到达车次和出发车次均为 D1，D2 的到达车次和出发车次均为 D2，运行图在对车次变更完成后，车次号

D1、D2 在 B 站的到达车次均变为 D1，出发车次均变为 D2，如图 3 所示。

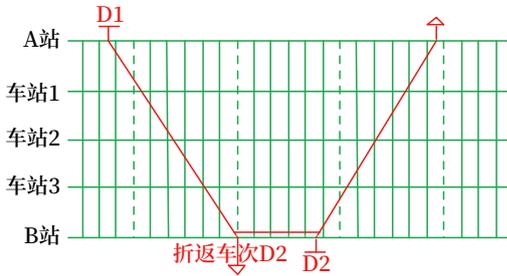


图3 折返线中的车组勾联关系
Fig.3 Coupling relationship of trainsets on the turn-back line

2.3 折返站CTC自动变更车次号功能的拓展

CTC 还可以直接通过运输调度管理系统 (TDMS) 接口, 以消息队列 (MQ) 消息方式直接获取折返车次的固定车组勾联关系, 从而实现在折返站相同车底列车运行线的自动勾联, 极大减轻调度员进行车组编辑的工作量。TDMS 通过 MQ 消息给 CTC 传递始发列车在折返车站的前序列车 ID 信息 (前一趟列车的全局唯一 ID 号), CTC 系统获取列

车运行计划后, 根据列车前序 ID 进行相同车底列车运行线在折返站自动勾联。如图 4 所示。



图4 通过TDMS接口获取折返车次的固定车组勾联关系流程
Fig.4 Flowchart of retrieving the fixed trainset coupling relationship between the train numbers of turn-back trains using TDMS interface

3 白云机场北站折返车次的实现

广州东环城际铁路的白云机场北为尽头站, 在开通运营后, 该站存在站内折返的车次应用需求。该需求在珠三角城际境内开通的线路中首次出现。为提高运输效率、降低调度员人工修订车次号工作量, CTC 系统专门对此需求进行了研究, 具体情况如下。

3.1 白云机场北站站场

白云机场北站站场情况, IG、IIG 为到发线, ZF1G、ZF3G 为折返线, 如图 5 所示。

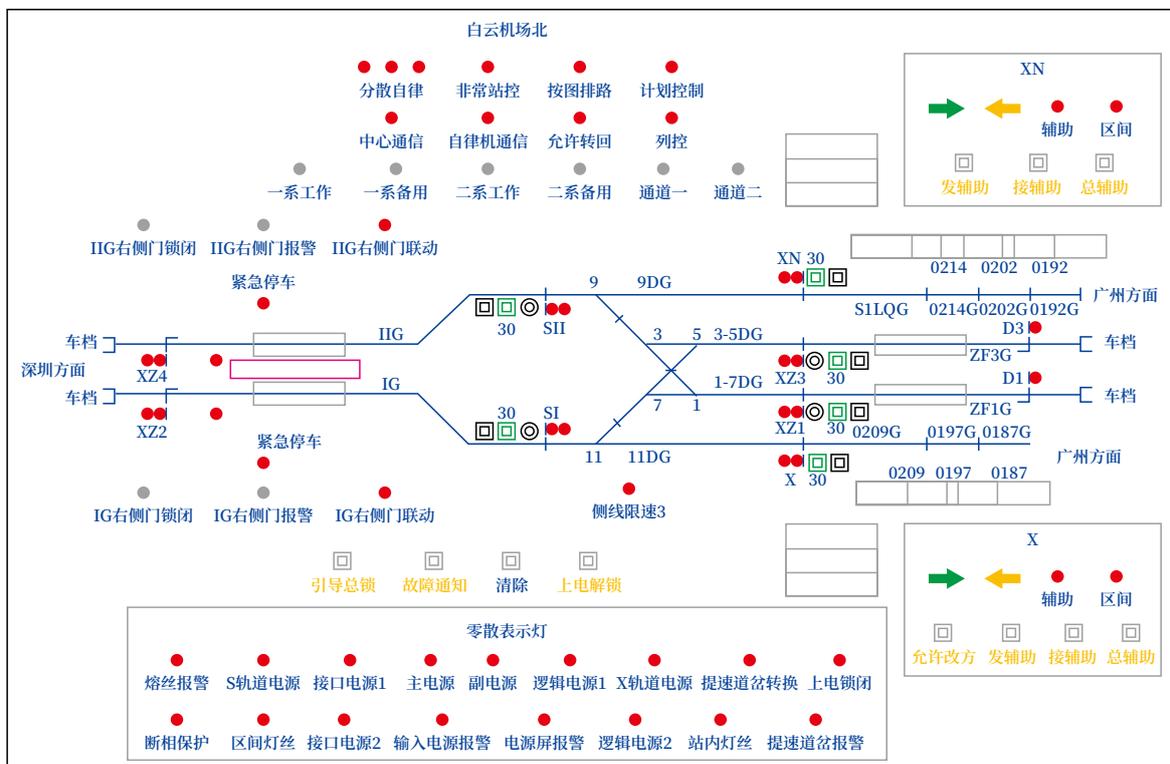


图5 白云机场北站站场
Fig.5 Layout of Guangzhou Baiyun International Airport North Station

3.2 白云机场北站折返作业的逻辑

鉴于白云机场北的站后折返的功能特殊性，白云机场北 CTC 系统的站后折返操作方式如下。

1) 在运行图上铺画在白云机场北 I 道终到的计划如 C7001，再铺画从白云机场北 II 道始发的计划 C7002。

2) 设置 C7001 及 C7002 运行线为同一车组，选中运行线 C7001 设置其站后折返车次为 C7002。并且选择站后折返的股道为 ZF1G (ZF3G)。

3) 下达计划后，自律机根据此计划生成站后折返股道为 ZF1G (ZF3G) 的计划序列，并按照 C7001 车次停稳后 60 s 自动触发往折返轨 ZF1G (ZF3G) 的接车进路，车次到达折返 3G 停稳后自动变更车次号为 C7002；5 min 后自动触发 C7002 往 2G 的发车进路。

行调运行图上对站后折返股道 ZF1G (ZF3G) 可选及显示，自律机同步能生成对应 ZF1G (ZF3G) 的计划进路序列，如图 6 所示。

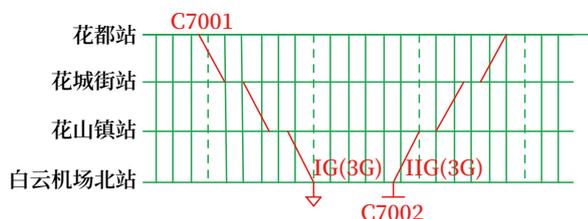


图6 白云机场北站折返车次
Fig.6 Train numbers of turn-back trains of
Guangzhou Baiyun International Airport North Station

3.3 白云机场北站折返的作业过程

对于 CTC 而言，站内折返和站后折返的逻辑相同，对于阶段计划为折角车次的列车，具备自动变更车次号的功能。当到开列车完全到达股道，在车次号处显示停稳标志，折角车次号自动变更。新白广城际南延段开通后，可对白云机场北通过列车进行车次号变更，当列车完全进入股道，接车进路序列状态由占用变为出清后，折角车次号自动变更。

折返的作业流程情况如下：

- 1) 下行列车进站后，将在 IG 停车；
- 2) 列车在 IG 下完旅客后，经 SI 信号机开往

ZF1G 或 ZF3G；

- 3) 列车在 ZF1G 或 ZF3G 停留，进行换端作业；
- 4) 列车完成换端作业后，经 XZ1 或 XZ3 信号机开往 IIG，完成折返；
- 5) 列车在 IIG 停留，旅客上车；
- 6) 列车从 IIG 经 SII 信号机上行发车；
- 7) 整个折返过程，全部按列车信号走行，由行调下发阶段计划（包含折返列车计划）。

4 结论

在城际铁路中，公交化运营的需求已经成为趋势，在车次密集的运营环境下，对折返站的调度指挥的自动化要求也越来越高，因此解决调度员在折返站手动修改车次可能造成的车次修改错误、车次修改延时等导致的信号不能按照计划开放的问题就显得尤为重要，所以在折返站实现列车车次号自动变更，对城际铁路及高速铁路运输指挥有较大的指导意义，一定程度上保障了系统的稳定运行。

参考文献

- [1] 郭玉珊，成正波，陈绍文．基于车车通信系统的折返能力研究[J]．铁路通信信号工程技术，2021，18（7）：77-80.
Guo Yushan, Cheng Zhengbo, Chen Shaowen. Study on Turn-back Capacity Based on TACS[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(7): 77-80.
- [2] 杨春妮．城市轨道交通折返能力分析 & 优化[J]．铁路通信信号工程技术，2022，19（3）：89-94.
Yang Chunni. Analysis and Optimization Measures of Urban Rail Transit Turn-back Capacity[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(3): 89-94.
- [3] 马冲．城市轨道交通列车折返能力优化方案研究[J]．铁路通信信号工程技术，2022，19（6）：76-80.

(下转 46页)

下一代铁路移动通信中公专网系统间 干扰协调的研究

张 驰¹, 寇 鸣², 刘 兴², 郭瑞彬³

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070;

2. 中国铁路武汉局集团有限公司, 武汉 430064;

3. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 针对下一代铁路移动通信技术中公专网系统间存在频率干扰的情况, 研究干扰产生的原因、发生干扰的场景并分析抑制干扰采用的方法, 研究 3GPP 中基站隔离度的要求并给出公转网无线系统部署要求, 以及驻波比 (VSWR)、带外信号抑制比和滤波器插入损耗等参数相互制约的关系, 通过仿真得出三者间的关系以及铁路专网无线通信系统滤波器指标要求。

关键词: 邻信道干扰; 杂散干扰; 带外抑制; 滚降; 频分多路复用; 相邻通道泄漏比; 相邻信道选择性

中图分类号: U285.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0032-05

Research on Interference Coordination Between Public and Private Network Systems in Next Generation Railway Mobile Communication

Zhang Chi¹, Kou Ming², Liu Xing², Guo Ruibin³

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

(2. China Railway Wuhan Group Co., Ltd., Wuhan 430064, China)

(3. School of Electronic and Informaiton Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper mainly focuses on the frequency interference between public and private network systems in the next generation of railway mobile communication technology, and studies the causes of the interference, the scenarios of the interference and the methods to suppress the interference. The requirements of base station isolation degree in 3GPP are studied and the deployment requirements of wireless system between public and private networks are given. This paper shows that the parameters of VSWR, out-of-band signal rejection ratio and filter insertion loss are mutually restrictive. Through

收稿日期: 2022-06-17; 修回日期: 2023-06-15

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司重大科研项目 (P2021G012)

第一作者: 张驰 (1984—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 铁路无线通信, 邮箱: zhangchi@crscd.com.cn.

simulation, the relationship among the three parameters and the filter index requirements of wireless communication systems in the railway private networks are obtained.

Keywords: adjacent channel interference; spurious interference; out-of-band suppression; roll down; Frequency Division Multiplexing (FDM); Adjacent Channel Leakage Ratio (ACLR); Adjacent Channel Selectivity (ACS)

1 5G NR系统间干扰概况及场景

随着 5G NR 的全面部署, 频段的使用和站址日益成为影响网络建设的核心。系统间干扰分析成为下一代铁路移动通信需要考虑的问题。系统间干扰不仅影响铁路基站的部署, 也影响系统专用设备

的射频指标要求。

接收机除了接收本系统内的发射机发射信号外, 也同时受到其他系统发射机的影响, 其他系统发射机对于本系统接收机就是干扰源。从形成的角度区分, 系统间干扰包括邻信道干扰、杂散干扰、互调干扰、交调干扰和阻塞干扰 5 种。

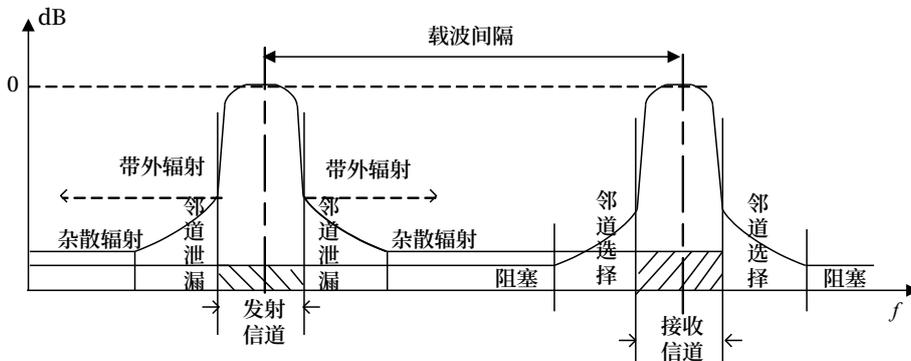


图1 系统间干扰示意
Fig.1 Schematic diagram of inter-system interference

邻道干扰涉及的技术指标有发射机接收机的邻道泄漏功率比 (ACLR)、杂散发射限制、邻道选择性 (ACS)、NR 带外阻塞要求等。参数说明如表 1 所示。

表1 参数说明

Tab.1 Parameter specification

项目	说明
发射机参数	ACLR: 信道内发射功率与泄漏到邻频道功率之比, 主要包括第一邻频、第二邻频
接收机参数	ACS: 用于刻画接收机滤波器的频率选择特性, 表征接收机在所分配的频道频率上收到的工作于距中心频率一定间隔的相邻信道上的其他信号的强弱
邻道干扰总功率	$P_{tx} = \text{干扰发射机功率}$
工程简化	$ACIR = \text{邻道干扰功率比}$

铁路 5G 专网待申请的 2.1 GHz 频段频率与联通已分配的 2.1 GHz 频段之间没有间隔频段, 2.1 GHz 频段目前在国内的使用情况如图 2 所示。

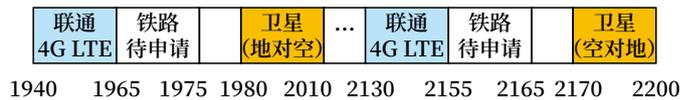


图2 2.1 GHz频率分配情况
Fig.2 Status of 2.1 GHz frequency allocation

两个系统之间的干扰主要发生在彼此的终端和基站之间, 如图 3 所示。

具体包括以下干扰场景。

1) 系统间终端对基站的干扰 (以联通终端干扰铁路基站为例)

当联通终端离联通基站较远而离铁路基站较近时, 需要发射较强的信号, 这将使铁路基站接收到的联通终端信号要比铁路终端信号强很多, 抬升了铁路基站的底噪, 从而降低铁路基站的灵敏度, 出现远近效应。

2) 系统间基站对终端的干扰 (以联通基站干扰铁路终端为例)

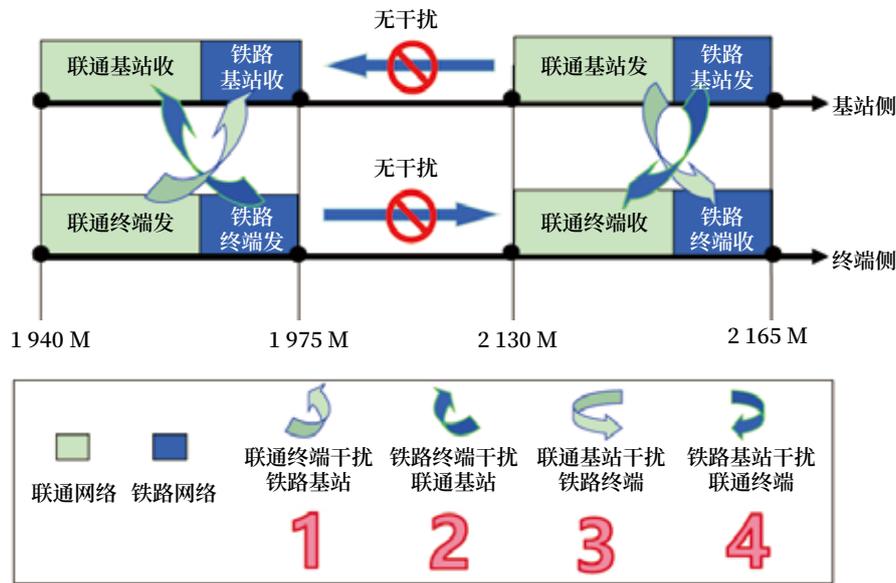


图3 铁路5G专网与中国联通干扰示意

Fig.3 Schematic diagram of the interference between railway 5G private network and China unicom network

当铁路终端离铁路基站较远而离联通基站较近时，接收到的联通基站的信号比铁路基站的信号要强，从而降低了铁路信号的 SINR，甚至低于解调门限，出现远近效应。

2 5G NR系统间干扰分析及措施

针对以上干扰，分析抗干扰措施。

1) 降低 5G 专网基站间距

为克服联通终端对 5G 专网基站的影响，联通 4G 终端的发射功率为 23 dBm，在 Band1 频段的带内抑制度为 30 dB，根据 3GPP 协议规定，5G 基站接收灵敏度约为 -97 dBm，联通终端对 5G 专网基站的隔离度要求应为 $23 - (-97) - 30 = 90$ dB，按照自由空间 Los 传播模型计算，此时联通终端与 5G 专网基站间隔距离应在 380 m 以上，否则会使 5G 专网基站底噪最大抬升 20 dB 以上。而实际上 380 m 的间隔距离很难控制，按照底噪抬升 20 dB 考虑，则 5G 专网基站间距需缩小到正常的 1/4 左右才能避免干扰，由于运营商 2.1G 基站在城区以及郊区已经大量部署，将导致相应区域 5G 专网基站站点数量增加，从而使建设成本和维护工作量加大。

2) 控制联通基站和铁路基站间距

考虑最恶劣情况，铁路终端在联通基站下面，此时铁路终端与联通基站间的耦合损耗为 70 dB 左右，考虑联通基站发射功率为 46 dBm，目前商用终端的邻信道干扰比 (ACIR) 能力为 30 dB，则落到铁路终端带内的干扰功率为 $46 - 70 - 30 = -54$ dBm/20 MHz，按照信号与干扰加噪声比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) = 0 dB，则要求 5G 专网基站到达铁路终端的功率应该大于 -54 dBm，考虑铁路 10 MHz 带宽，则要求 5G 专网基站到联通基站下参考信号接收功率 (Reference Signal Receiving Power, RSRP) - 82 dBm。

目前联通基站已大量部署，发射频宽一般是 40 ~ 60 MHz，按照 Cost231-Hata 模型，基站高度 30 m，终端高度 4 m，不考虑天线增益和仿真结果，需要联通基站和铁路基站的距离应不超过 300 m。

3) 双方对基站加滤波器

基站与基站间干扰，在整网都受到干扰的情况下，可以考虑安装滤波器的方式进行解决。在存在一定保护带的情况下，安装合适的滤波器能够解决各种干扰问题，其中在受扰系统上安装滤波器可以解决阻塞与互调干扰，而在施扰系统上安装滤波器

则可以解决杂散干扰。同时，安装滤波器也可以解决大多数基站与终端的干扰问题。

由于铁路待申请频段与卫星频段只有 5 MHz 的间隔，为了避免 5G 专网基站对 2 170 ~ 2 200 MHz 卫星频段干扰，根据工信部无函 2016 第 193 号文和无函 2016 第 195 号文规定“2 100 MHz 频段的 LTE FDD 系统基站每个端口在 2 170 ~ 2 200 频段内无用发射应小于 - 65 dBm/MHz”，铁路需要考虑基站加装定制滤波器，开发 10 MHz RRU 窄带滤波射频模块。

由于滤波器对于系统间边缘频带的抑制效果有限，需要考虑在系统间边带预留，联通现网 2.1G 频段 LTE FDD 使用的 20 M 带宽，在不影响系统带宽的情况下，边带预留可达 1 MHz，5G 标准中标准子载波间隔 (Sub-Carrier Space, SCS) 共分 15 kHz、30 kHz 和 60 kHz 3 种，对于 5G NR 的 $BW = NRB \times SCS \times 12 \text{ kHz}$ ，铁路下一代基站全部采用的是 $SCS = 15 \text{ kHz}$ 的标准。

3GPP 标准 TS 38.104 中 (TS38 的 BS、MU、AAU 等相关标准都是用的同一个载波标准)，10 MHz 带宽，30 kHz 的 SCS 下的 NRB 是 24 个 (15 kHz 是 52 个，30 kHz 是 24 个，60 kHz 是 11 个)。

所以 $BW = 24 \times 30 \text{ kHz} \times 12 \text{ kHz} = 8.64 \text{ MHz}$ ，滚降共 1.36 MHz，单边 0.68 MHz，所以边带留 0.5 MHz 滚降可以兼顾多种制式，同理 30 kHz 的 SCS 下边带留 0.3 MHz 滚降。结合之前的介绍，在两种 SCS 下边带保护 1.5 MHz/1.3 MHz 可以基本满足与联通的隔离带要求。

增加滤波器后网络中驻波比 (VSWR)、带外信号抑制比和滤波器插入损耗等参数是相互制约的关系，在提高带外信号抑制比的情况下，插损和驻波比参数会相应劣化。针对铁路下一代专用移动通信频率范围及使用场景，不同最小频率间隔及不同 SCS 条件下插损变化曲线也不同。

a. $SCS = 30 \text{ kHz}$ ，铁路 5G_NR 滤波器电气指标如表 2 所示，VSWR、带外信号抑制比和滤波器插入损耗关系如图 4 所示。

表2 SCS=30 kHz,铁路5G_NR滤波器电气指标

Tab.2 SCS=30 kHz, electrical indices of 5G_NR filters of railways

项目	ANT1- ANT2		ANT1- ANT2	
工作温度	25°C (常温)		-25°C ~ +65°C (高低温)	
频段范围 / MHz	1 965.5 ~ 1 975	2 155.5 ~ 2 165	1 965.5 ~ 1 975	2 155.5 ~ 2 165
插入损耗 / dB	≤ 3.0		≤ 3.9	
驻波比	≤ 1.25		≤ 1.3	
带外抑制 / dB	≥ 38@1 920 ~ 1 962 MHz		≥ 38@1 920 ~ 1 962 MHz	
	≥ 20@1 962 ~ 1 964 MHz		≥ 12@1 962 ~ 1 964 MHz	
	≥ 47@2 010 ~ 2 025 MHz		≥ 47@2 010 ~ 2 025 MHz	
	≥ 38@2 110 ~ 2 151 MHz		≥ 38@2 110 ~ 2 151 MHz	
	≥ 20@2 151 ~ 2 154 MHz		≥ 12@2 151 ~ 2 154 MHz	

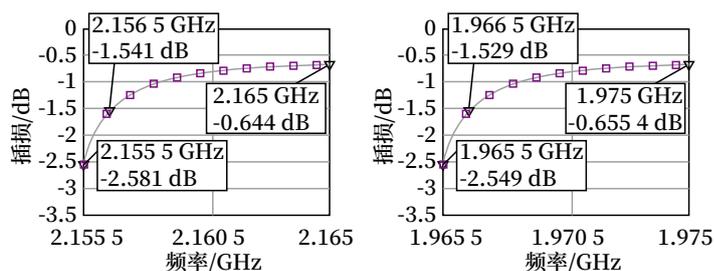


图4 SCS为30 kHz滤波器插损曲线

Fig.4 Curve chart of filter insertion loss for SCS of 30 kHz

表3 SCS=15 kHz,铁路5G_NR滤波器电气指标

Tab.3 SCS=15 kHz, electrical indices of 5G_NR filters of railways

项目	ANT1- ANT2		ANT1- ANT2	
工作温度	25°C (常温)		-25°C ~ +65°C (高低温)	
频段范围 / MHz	1 965.3 ~ 1 975	2 155.3 ~ 2 165	1965.3 ~ 1975	2155.3 ~ 2165
插入损耗 / dB	≤ 3.4		≤ 5.0	
驻波比	≤ 1.25		≤ 1.3	
带外抑制 / dB	≥ 38@1 920 ~ 1 962 MHz		≥ 38@1 920 ~ 1 962 MHz	
	≥ 20@1 962 ~ 1 964 MHz		≥ 10@1 962 ~ 1 964 MHz	
	≥ 45@2 010 ~ 2 025 MHz		≥ 45@2 010 ~ 2 025 MHz	
	≥ 38@2 110 ~ 2 151 MHz		≥ 38@2 110 ~ 2 151 MHz	
	≥ 20@2 151 ~ 2 154 MHz		≥ 10@2 151 ~ 2 154 MHz	

b. SCS = 15 kHz, 铁路 5G_NR 滤波器电气指标如表 3 所示, VSWR、带外信号抑制比和滤波器插入损耗关系如图 5 所示。

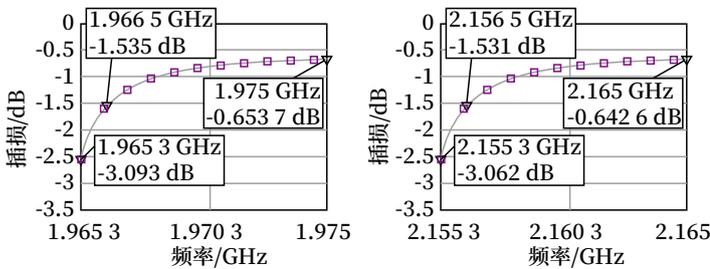


图5 SCS为15 kHz时滤波器插损曲线
Fig.5 Curve chart of filter insertion loss for SCS of 15 kHz

此外, 滤波器本身为无源器件, 材料的选择对性能影响较大。3GPP TS38.104 中对于发射机的 ACLR 指标要求如下。

基站信道带宽 (MHz) 为 10 MHz 时, 邻近信道中心频率偏移低于发射的最低或高于最高载波中心频率 = 10 MHz。此条件下 ACLR 要求为 45 dB。

通过上述分析, 建议铁路 5G-R 专网提高 3 dB, 即在引入干扰信号时增加 3 dB。

对 ACS 指标要求为, 在基站信道带宽为 10 MHz 时, 干扰信号平均功率为 -52 dBm, $ACS = \text{干扰信号平均功率} - P_{\text{REFSENS}} + 6 \text{ dB} + \text{载干比}$, 经过计算取值为 42.5 dB。根据上述分析, 铁路 5G-R 专网在该参数上应更为严格, 引入干扰信号时增加 3 dB, 即该参数在 3GPP 标准基础上提高 3 dB。该指标提高后, 要求 5G-R 无线接入系统在滤波器设计时, 需在满足驻波比要求的条件下, 通过选取滚降系数更小、性能更高的滤波器来实现更高的隔离度。

3 结论

综上所述, 通过在基站和终端侧增加滤波器、合理规划站址以及对终端的改进, 可以有效地解决公专网系统间干扰问题。同时应适当提高双方系统设备的 ACLR 和 ACS 两个指标, 保证系统间干扰处于较低水平。

参考文献

- [1] 王映民, 孙韶辉. 5G 移动通信系统设计与标准详解 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.
- [2] 徐俊, 袁弋非. 5G-NR 信道编码 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019.
- [3] 曹志刚, 钱亚生. 现代通信原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [4] Mengali U, D'Andrea A N. Synchronization techniques for digital receivers[M]. New York: Plenum Press, 1997.
- [5] 宋心刚, 张冬晨, 李行政, 等. 2.6 GHz 频段 5G 上行干扰分析与识别研究 [J]. 电信工程技术与标准化, 2021, 34 (4): 74-81.
Song Xingang, Zhang Dongchen, Li Xingzheng, et al. Research on Interference Analyzing and Recognition of 5G in 2.6 GHz[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2021, 34(4): 74-81.
- [6] 胡炫光. 5G NR 系统共存干扰研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [7] 王建敏. 兼容 GSM-R 和 5G-R 互联互通的列控系统无线通信方案研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (5): 42-46, 99.
Wang Jianmin. Research on Wireless Communication Scheme of Train Control System Compatible with 5G-R and GSM-R Interoperability[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(5): 42-46, 99.
- [8] 张涛. 室内分布系统干扰问题和解决方案研究 [J]. 邮电设计技术, 2015 (12): 43-48.
Zhang Tao. Research on Interference Problems and Solution of Indoor Distributed Antenna System[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2015(12): 43-48.
- [9] 逢天洋, 李永贵, 牛英滔, 等. 通信电子干扰的分类与发展 [J]. 通信技术, 2018, 51 (10): 2271-2278.
Pang Tianyang, Li Yonggui, Niu Yingtao, et al. Classification and Development of Communication Electronic Jamming[J]. Communications Technology, 2018, 51(10): 2271-2278.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2023.08.008

铁路综合视频监控系统三种平台架构对比分析

刘跃遥¹, 陈 谦², 曹 坤³

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070;

2. 中国铁路青藏集团有限公司, 西宁 810000;

3. 中国铁路西安局集团有限公司, 西安 710054)

摘要: 传统架构、云计算+云存储架构、超融合架构方案作为综合视频平台建设的三大主流方案, 在一定约束条件下从技术架构、设备方案、功耗几个方面做一些定量对比分析, 并给出具体计算过程, 得出各平台架构方案的优缺点和适用范围, 为铁路综合视频改造平台方案选择提供参考。

关键词: 铁路综合视频; 传统架构; 云计算+云存储架构; 超融合架构

中图分类号: U285

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0037-04

Comparative Analysis of Three Architecture Platforms of Railway Integrated Video Monitoring Systems

Liu Yueyao¹, Chen Qian², Cao Kun³

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

(2. China Railway Qinghai-Tibet Group Co., Ltd., Xining 810000, China)

(3. China Railway Xi'an Group Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Traditional architecture, cloud computing & cloud storage architecture, and hyper-converged architecture are the three mainstream solutions for the construction of integrated video platforms. This paper conducts some quantitative comparative analysis from the aspects of technical architecture, equipment scheme and power consumption under certain constraints, and presents the specific calculation process, the advantages and disadvantages of each platform architecture scheme and the scope of application. It provides a reference for the selection of railway integrated video transformation platform.

Keywords: integrated video of railway; traditional architecture; cloud computing & cloud storage architecture; hyper-converged architecture

收稿日期: 2023-03-06; 修回日期: 2023-08-09

第一作者: 刘跃遥(1990—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 铁路通信, 邮箱: liuyueyao@crscd.com.cn.

1 概述

铁路综合视频监控平台建设中常用3种架构：传统架构、云计算+云存储架构和超融合架构。

传统架构：采用独立的管理服务器、分转发服务器、存储服务器和磁盘阵列等设备，利用IP存储局域网(IP Storage Area Network, IP SAN)存储技术，采用RAID 5保护机制实现平台构建。

云计算+云存储架构：两个独立的云平台，分别将一组物理服务器组成集群，集群中物理资源，包括CPU、内存、存储和网络等，形成资源池，虚拟化技术可以实现单CPU模拟多CPU并行，允许一个平台同时运行多个操作系统，并且应用程序均可以在相互独立的空间内运行而互不影响。用户可以通过网络方便快捷地访问平台，资源可动态配置、按需使用。

超融合架构：与云计算+云存储架构相同之处在于都是基于物理服务器组成集群，不同之处为超融合技术是将计算和存储融合，利用同一组物理服务器实现功能。

基于3种视频平台架构的网络拓扑如图1~3所示。

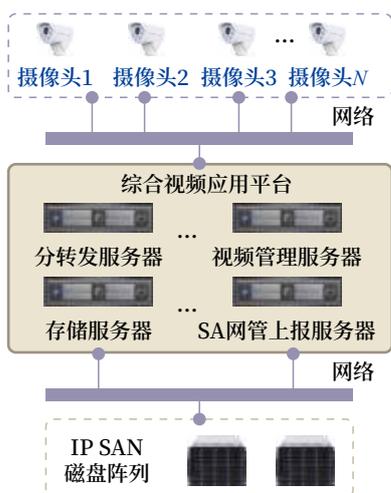


图1 传统视频存储部署架构
Fig.1 Traditional video storage deployment architecture

本文旨在对3种架构做出对比分析，以便为综合视频工程平台建设方案提供参考。

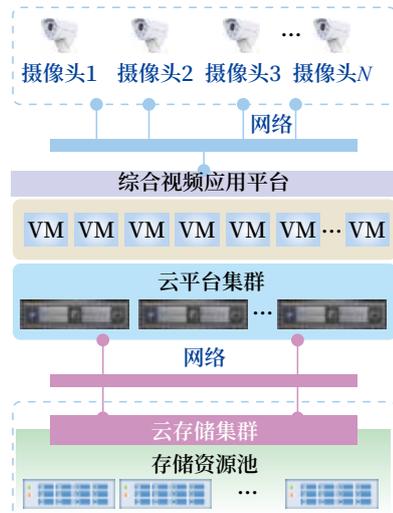


图2 云计算+云存储独立部署整体架构
Fig.2 Diagram of the overall architecture of the independent deployment of cloud computing & cloud storage

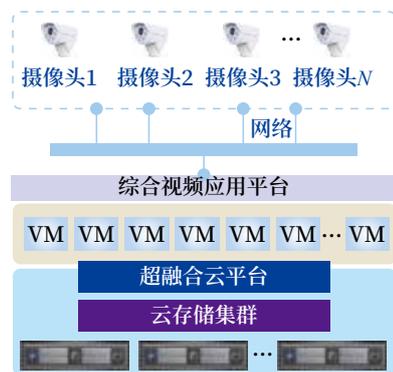


图3 超融合部署整体架构
Fig.3 Diagram of the overall architecture of hyper-converged deployment

2 综合视频平台架构方案对比

按照一个站的规模，1 000路高清视频，H.265前端编码，单路码流按照2 Mbit/s计算，其中存储需求按30%视频流存90天，70%视频流存30天，按照《铁路综合视频监控系统技术要求》(Q/CR 575-2022)，参考《铁路综合视频监控系统技术要求》(Q/CR 575-2017)，将3种架构在设备方案、冗余方案、机柜方案、功耗方面做出对比，如表1所示。

3 计算过程

3.1 存储容量需求计算过程

存储容量 = 路数 × 码流 × 3 600 × 24 × 天数 / 8 / 1 024 / 1 024，1 000路综合视频存储容量需求为988.8 T。

表1 综合视频平台架构对比
Tab.1 A comparison between integrated video platform architectures

综合视频平台架构	设备名称	设备数量	设备配置	冗余方案	机架占用需求 / 台	机柜需求	功耗 / 台
传统架构	分转发服务器	4	单路 6 核 1.6GHz, 16G	无, 只在 IP SAN 中有热备盘	分转发服务器 2U	2	750 W
	存储服务器	5			存储服务器 2U		1 300 W
	管理服务器	1			管理服务器 2U		750 W
	SA 网管上报服务器	1			SA 网管上报服务器 2U		750 W
	存储设备	5			存储设备 4U		750 W
云计算 + 云存储架构	云计算集群服务器	3	云计算集群, 双路 10 核 2.2 GHz, 256 G	云计算集群冗余 1 台, 云存储集群冗余 1 台	云计算服务器 2U	2	750 W
	云存储集群服务器	4	云存储集群, 双路 10 核 2.2 GHz, 256 G		云存储服务器 4U		1 300 W
超融合架构	超融合集群服务器	5	超融合集群, 双路 10 核 2.2 GHz, 256 G	超融合集群冗余 2 台	超融合服务器 4U	1	1 300 W

3.2 存储设备需求计算过程

首先明确相关系数： $\eta_1 = M / (M+N)$ 为考虑 $M+N$ 冗余系数；

η_2 为考虑存储开销，考虑单盘故障的恢复所需要的存储等所需系数，取 0.85；

η_3 为进制转换系数 = $10\ 004 / 10\ 244 \approx 0.91$ 。

1) 传统架构

IP SAN 采用 RAID 5 冗余，冗余系数（可用容量 / 裸容量） η_1 为 66.6%，单盘采用 12 T 硬盘，单台设备为 4U，36 盘位。

存储设备数量 = $988.8 / 66.6\% / 0.85 / 0.91 / 12 / 36 \approx 5$ 。

2) 云计算 + 云存储架构

云存储采用 3+1 纠删码冗余，冗余系数（可用容量 / 裸容量） η_1 为 75%，单盘采用 12 T 硬盘，单台设备为 4U，36 盘位。

存储设备数量 = $988.8 / 75\% / 0.85 / 0.91 / 12 / 36 \approx 4$ 。

3) 超融合架构

由于超融合技术是将计算和存储融合在一套集群服务器设备，从平台安全角度考虑，宕机 2 台作为冗余，因此超融合架构中云存储采用 4 + 2 纠删码冗余，冗余系数（可用容量 / 裸容量） η_1 为 67%，单盘采用 12 T 硬盘，单台设备为 4U，36 盘位。

存储设备数量 = $988.8 / 67\% / 0.85 / 0.91 / 12 / 36 \approx 5$ 。

3.3 计算平台需求计算过程

1) 传统架构

根据《铁路综合视频监控系统技术要求》(Q/CR 575-2017) 要求，在 2 Mbit/s 码流时，服务器配置不低于单路 6 核 1.6 GHz，16 G 时，分转发服务器单台能承担 256 路，存储服务器单台能承担 200 路，因此 1 000 路综合视频需配置 4 台分转发、5 台存储服务器。另根据需要，分别配置 1 台管理服务器、1 台 SA 网管上报服务器。

2) 云计算 + 云存储架构

根据《铁路综合视频监控系统技术要求》(Q/CR 575-2022) 要求，采用双 CPU 10 核 20 线程、内存为 256 G 的云计算服务器，根据目前的工程经验，16 核可承担 200 路视频，1 000 路综合视频至少需要 80 核，每台双路 10 核服务器可提供的计算能力为 2×10 核 $\times 2 - 8$ 核（平台管理所需计算资源）共计 32 核，需 3 台计算服务器可满足计算能力需求。

3) 超融合架构

在存储中超融合架构配置了 5 台双路 10 核服务器，可承担算力为 $(2 \times 10$ 核 $\times 2 - 8$ 核（平台管理所需计算资源） $\times 5$ 共计 160 核，满足 1 000 路综合视频 80 核的需求。

4 对比分析

1) 传统架构

传统架构优点为作为目前铁路综合视频主流的平台方案,技术成熟、对网络带宽要求较低。

缺点为不同业务单元独立部署服务器,存在大量的资源浪费,容易形成数据孤岛;IP SAN 存储技术可解决大规模视频数据存储的要求,但随着视频监控系统的规模越来越大,由于存储磁盘阵列控制器的并发输入输出带宽约 1 000 MHz,视频业务主要功能在写入,而读取受限,对于将来铁路客运、工务、公安要求实时读出视频流的情况,SAN 存储可能会存在瓶颈;SAN 存储技术扩容不灵活,当扩容存储容量时,SAN 存储除了对摄像机信息重新配置外,还需对既有磁盘阵列格式化磁盘,重新做 RAID 组的数据分配及保护。

2) 云计算 + 云存储架构

云计算 + 云存储架构是今后铁路综合视频平台建设的主流方案。优点为云平台是按需提供 IT 计算能力的服务模式,将一组物理服务器组成集群,集群中物理资源,包括 CPU、内存、存储和网络等,形成资源池,虚拟化技术可以实现单 CPU 模拟多 CPU 并行,允许一个平台同时运行多个操作系统,并且应用程序均可以在相互独立的空间内运行而互不影响,用户可以通过网络方便快捷地访问平台,资源可动态配置、按需使用;云存储是存储发展方向,实时视频流接入应用服务器,通过应用服务器进入云存储设备,由云存储设备对存储空间按负载均衡分配。当存储空间不足需扩容存储容量时,云存储扩容不影响既有业务。当一块硬盘故障、一台云存储设备故障时,均可以将视频流存储到本地其他硬盘或其他云存储设备上。

缺点为对网络带宽要求较高,对视频接入路数较少时,性价比较低,该方案不适用于基础网络较差或视频路数较少的线路。

3) 超融合架构

超融合架构在云计算 + 云存储架构的基础之上更深度的整合设备资源,可以有效减少设备数量,适用于机房空间资源紧张的接入节点。缺点在于目前主流的超融合架构是不具备优化存储资源的能力,牺牲了一定存储读写能力,读写效率较慢。

5 结束语

铁路综合视频平台建设技术架构决定了视频改造的整体技术架构,不同等级的线路根据综合视频建设的需求,需要针对视频建设规模进行具体测算,选取最适合的平台解决方案。本文通过在一定限定条件下,采用具体的测算模型,定量对比不同平台架构的技术方案优缺点,为后续铁路综合视频平台建设技术架构选择提供借鉴。

参考文献

- [1] 中国国家铁路集团有限公司. 铁路综合视频监控系统技术要求: Q/CR 575-2022[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2022.
- [2] 中国国家铁路集团有限公司. 铁路综合视频监控系统技术要求: Q/CR 575-2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [3] 程智源, 严瑾. 基于云存储的铁路综合视频监控系统方案研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(2): 51-55, 61.
Cheng Zhiyuan, Yan Jin. Research on Scheme of Railway Integrated Video Monitoring System Based on Cloud Storage[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(2): 51-55, 61.
- [4] 杨传辉. 大规模分布式存储系统: 原理解析与架构实战[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [5] 高福生. 铁路视频监控云平台实施方案探讨[J]. 中国铁路, 2018(5): 95-99.
Gao Fusheng. Research on Implementation Plan for Cloud Platform of Railway Video Surveillance[J]. China Railway, 2018(5): 95-99.
- [6] 孔令鑫. 云存储云计算及视频新技术在铁路中

(下转 58页)

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2023.08.009

铁路视频监控摄像机选型研究

陈宏宇

(北京国铁华晨通信科技有限公司, 北京 100070)

摘要: 从需求出发, 对铁路综合视频监控系统发展中摄像机的类型和具体技术指标的发展变化进行分析梳理, 并系统归纳总结工程中大量应用的摄像机的重点技术内容, 概括工程建设中摄像机选型关注的重点问题, 并提出选型建议, 为既有视频系统维护以及新建和改扩建工程具有指导意义。

关键词: 铁路; 视频监控摄像机; 设备选型

中图分类号: U285

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0041-06

Research on Selection of Video Surveillance Cameras for Railways

Chen Hongyu

(Beijing GuoTieHuaChen Communication Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Taking customer demands into consideration, this paper analyzes and sorts out the development and changes in camera types and specific technical indicators of comprehensive video surveillance systems of railways. It systematically summarizes the crucial technical information about the cameras that are widely used in projects, identifies the key issues to be considered when selecting cameras for engineering construction, and puts forward recommendations for camera selection. This paper provides guidance for the maintenance of existing video systems and for new, improved and expanded projects.

Keywords: railway; video surveillance camera; selection of cameras

视频监控数字和智能化时代的来临, 视频监控在各领域得到了广泛的应用和发展, 在铁路运输行业中所占的地位和所起的作用有目共睹。2008年起, 相继出台了铁路综合视频监控系统相关技术标准和建设标准。在铁路综合视频监控系统的建设和运用中, 监控摄像机的选型和应用基本上决定了视频监控系统的质量。

1 铁路用视频监控摄像机演变过程概述

在铁路综合视频监控系统建设前, 铁路各专业建设了大小各自独立的模拟视频监控系统, 采用的摄像机均为黑白图像的模拟摄像机, 图像质量不大于 400 TVL。随着模拟数字系统的大量应用, 前端设备用模拟摄像机 + 编码器的方式, 摄像机的分辨率以 4CIF(704×576) 为主。近年来, 随着 IP 摄像机的大量普及, 铁路新建和改建视频系统均开始采用 720P (1 280×720) 和 1 080P

收稿日期: 2023-03-21; 修回日期: 2023-08-05

第一作者: 陈宏宇 (1990—), 女, 工程师, 本科, 主要研究方向: 铁路视频监控, 邮箱: chenhongyu@crsc.cn。

(1 920×1 080) IP 摄像机, 2017 年后, 铁路综合视频监控系统对彩色摄像机像素要求为不低于 1 080P (1 920×1 080), 并且激光摄像机被大量应用。2022 年, 4k 超高清摄像机、一体化高清摄像机和全景摄像机被正式纳入标准并根据需要应用到具体工程中。结合铁路综合视频监控系统具体应用及相关标准规定, 铁路用视频监控摄像机技术要求和应用阶段可以参照标准进行划分。截止目前, 具体分为 4 个阶段。

- 1) 《铁路综合视频监控系统技术规范 (试行)》(运基通信 [2008]630 号) (以下简称 630 号文) 实施阶段;
- 2) 《铁路综合视频监控系统技术规范 (v1.0)》

- (铁总运 [2013]71 号) (以下简称 71 号文) 实施阶段;
- 3) 《铁路综合视频监控系统技术规范》(Q/CR 575-2017) (以下简称 Q/CR 575-2017) 实施阶段;
- 4) 《铁路综合视频监控系统技术规范》(Q/CR 575-2022) (以下简称 “Q/CR 575-2022”) 实施阶段。

2 铁路用视频监控摄像机技术要求分析比较

2.1 通用要求

技术标准和规范中对摄像机的指标要求, 为产品设计、制造、工程设计中的产品选型、验收测试及运行维护提供了技术依据。如表 1 所示, 通过比较各个阶段摄像机最基本的通用要求, 可以看出产品和技术的演进过程及关注点的变化。

表1 铁路用视频监控摄像机技术通用要求

Tab.1 General technical requirements for railway-specific video surveillance cameras

序号	技术指标	630 号文阶段	71 号文阶段	Q/CR 575-2017 阶段	Q/CR 575-2022 阶段
1	镜头接口类型	C/CS	C/CS, 且接口类型一致	非一体化摄像机与镜头接口类型为 C 或 CS	非一体化摄像机与镜头接口类型为 C 或 CS
2	强光抑制、逆光补偿、宽动态 (应用于光线对比强烈的监视场所的摄像机)	具有	具有	具有, 宽动态范围不应小于 120 dB	具有, 范围不应小于 100 dB
3	电子曝光、白平衡以及自动增益控制	具有	具有	自动增益控制、自动白平衡调整、背光补偿、自动电子快门、自动光圈功能	自动增益控制、自动白平衡调整、背光补偿、自动电子快门、自动光圈功能
4	防抖动、电子透雾	特殊场合支持防抖功能	特殊场合支持防抖功能	特殊场合支持防抖功能	室外摄像机应支持防抖和电子透雾功能
5	自动彩转黑、帧积累	室外一体化球型摄像机应支持自动彩转黑功能; 低照度摄像机具有帧积累功能	室外一体化球型摄像机、半球摄像机应支持自动彩转黑功能; 低照度和昼夜转换摄像机具有帧积累功能。IP 摄像机日夜模式自动转换功能	日夜模式 自动转换功能	日夜模式 自动转换功能
6	视频内容分析	—	—	移动侦测、遮挡告警、视频丢失告警功能	支持同一场景内划分多个防区; 支持移动侦测、入侵检测、遗留物检测、逆行检测、人车物识别等一种或多种分析类型
7	分辨率、帧率 IP 摄像机标称像素 / 分辨率	CCD 像素不应低于 38 万, 最大帧率不应低于 25 帧 / 秒	不低于 4 CIF (704×576), 最大帧率不应低于 25 帧 / 秒	不低于 1 080P : 1 920×1 080 (200 万像素), 最大帧率不应低于 25 帧 / 秒	不低于 1 080P : 1 920×1 080 (200 万像素), 最大帧率不应低于 25 帧 / 秒
8	信噪比	室内不低于 48 dB, 室外不低于 50 dB	不低于 50 dB	不低于 55 dB	不低于 55 dB
9	IP 摄像机多码流输出	—	支持不同码率的设定, 支持多码流输出	最低可至 4CIF 或 D1, 不小于 4 路主码流并发输出	不应小于 2 路码流并发输出
10	视频编码算法	—	IP 摄像机应支持 H.264、MPEG-4 或 AVS	应支持 H.264, 宜支持 H.265 或 SVAC 视频编码	应支持 H.265、H.264, 宜支持 SVAC 视频编码
11	特殊场合的 9:16 显示功能	—	具有	具有	具有
12	交直流供电	支持	支持, IP 摄像机根据需要可支持 PoE 供电方式	支持, IP 摄像机根据需要可支持 PoE 供电方式	支持, 应满足 GA/T 1127-2013 中 5.1.3 的规定

2.2 模拟摄像机具体技术指标

除了通用指标外，模拟摄像机只在 630 号文阶段和 71 号文阶段应用。摄像机类型包括彩色枪型摄像机、昼/夜转换型摄像机、低照度摄像机、一

体化球型摄像机、半球模拟摄像机、激光模拟摄像机及非制冷型红外热成像摄像机，主要技术指标如表 2 所示，非制冷型红外热成像摄像机技术指标如表 3 所示。

表2 模拟摄像机具体指标要求

Tab.2 Specific requirements for analog camera indicators

序号	摄像机类型	技术指标				
		分辨率 (TVL) (不小于)		最低照度	帧积累 /PTZ/ 激光	
		630 号文	71 号文	630 号文 /71 号文	630 号文	71 号文
1	彩色枪型摄像机	室内: 480 TVL; 室外: 540 TVL	室内: 510 TVL; 室外: 540 TVL	室内: 1 lx, F1.2; 室外: 0.8 lx, F1.2	—	帧积累功能
2	昼/夜转换型摄像机	530 TVL (黑白); 480 TVL (彩色)	530 TVL (黑白); 510 TVL (彩色)	彩色 0.8 lx, F1.2, 黑白 0.08 lx, F1.2,	—	帧积累功能
3	低照度摄像机	540 TVL	540 TVL	0.01 lx, F1.2,	帧积累功能	帧积累功能
4	一体化球型摄像机	室内: 480 TVL; 室外: 520 TVL	480 TVL	0.8 lx, F1.2,	转动: 水平 360°, 垂直 90°; 支持编程预置位 PELCO-P 和 PELCO-D 协议	转动: 水平 360°, 垂直 90°; 支持编程预置位, PELCO-P 和 PELCO-D 协议
5	半球模拟摄像机	—	480 TVL	1.0 lx, F1.2	—	—
6	激光模拟摄像机 (激光器)	—	—	—	—	激光器: 无红曝, 波长不小于 940 nm; MTBF 不小于 10 000 h

表3 非制冷型红外热成像摄像机技术指标

Tab.3 Technical indicators of uncooled infrared thermal imaging cameras

序号	技术指标	630 号文阶段 (模拟)	71 号文阶段 (模拟/IP)	Q/CR 575-2017 阶段 (模拟/IP)	Q/CR 575-2022 阶段 (模拟/IP)
1	分辨率 (像素)	≥ 320×240	≥ 320×240	≥ 320×240	至少应支持 384×288 或 640×512
2	启动时间	< 30 s	< 30 s	< 30 s	—
3	视角	≥ 14°×10°	≥ 14°×10°	≥ 14°×10°	—
4	光谱范围 /μm	7~14	7~14	7~14	8~14
5	信噪比 /dB	≥ 50	≥ 50	≥ 50	—
6	热灵敏度 /°C	优于 0.1	优于 0.1	≤ 0.03	—
7	视频内容分析功能	—	—	IP 红外热像仪支持入侵检测	支持
8	防护等级	室外 IP66 (GB/T 4208-2008)	室外 IP66 (GB/T 4208-2008)	室外 IP66 (GB/T 4208-2008)	室外 IP66 (GB/T 4208-2017)
9	MTBF	室内: 1×10 ⁴ h 室外: 2×10 ⁴ h 室外特殊场合: 5×10 ⁴ h	2×10 ⁴ h 室外特殊场合: 5×10 ⁴ h	5×10 ⁴ h	5×10 ⁴ h
10	噪声等效温差 (NETD) 值	—	—	—	不应大于 50mK (环境温度为 23°C ±5°C)
11	最小可分辨温差 (MRTD) 值	—	—	—	不应大于 0.8K (环境温度为 23°C ±5°C)

2.3 IP摄像机具体指标要求

2.3.1 71号文阶段和Q/CR 575-2017阶段

71 号文阶段和 Q/CR 575-2017 阶段的 IP 摄像机信噪比指标均要求不小于 55 dB，分辨率要求支持 1 080P、720P 和 4CF，其他主要具体指标要求如表 4 所示。

2.3.2 Q/CR 575-2022 阶段

进入 Q/CR 575-2022 阶段，视频监控新技术不断涌现，具有一体化、高分辨率、长距离、昼/夜监视功能的摄像机和视频内容分析的智能摄像机被应用到铁路视频监控系统中，如表 5、6 所示，分别给出一些常用摄像机的具体指标要求。

表4 IP摄像机具体指标要求
Tab.4 Specific requirements for IP camera indicators

序号	摄像机类型	技术指标			
		最低照度		PTZ	红外补光 / 激光
		71 号文	Q/CR 575-2017	71 号文	Q/CR 575-2017
1	彩色枪型 IP 摄像机	室内：彩色 0.5 lx, 黑白 0.1 lx F1.2 室外：彩色 0.3 lx, 黑白 0.06 lx, F1.2	彩色：0.01 Lux, F1.2 ; 黑白：0.001 Lux, F1.2	—	红外补光距离 ≥ 100 m
2	低照度 IP 摄像机	室内：彩色 0.2 lx, 黑白 0.04 lx F1.2 室外：彩色 0.1 lx, 黑白 0.02 lx, F1.2	彩色：0.001 Lux, F1.2 黑白：0.0001 Lux, F1.2	—	红外补光距离 ≥ 100 m
3	一体化球型 IP 摄像机	彩色：0.8 lx, F1.0, 黑白：0.08 lx, F1.0	彩色 0.005 Lux, F1.2 黑白 0.000 5 Lux, F1.2	转动：水平 360°，垂直 90°； 支持编程预置位 PELCO-P 和 PELCO-D 协议	红外补光距离 ≥ 30 m
4	半球型 IP 摄像机	彩色：0.4 lx, F1.0	彩色：0.01 Lux, F1.2 黑白：0.001 Lux, F1.2	—	支持无红曝红外， 波长 ≥ 940 nm， 红外补光距离不小于 150 m
5	IP 激光摄像机	—	彩色：0.001 Lux, F1.2 黑白：0.0001 Lux, F1.2	—	—
6	宽动态枪型 IP 摄像机 (71 号文)	室内：彩色 0.5 lx, 黑白 0.1 lx F1.2 室外：彩色 0.3 lx, 黑白 0.06 lx, F1.2	—	宽动态范围不小于 120 dB	—

表5 Q/CR 575-2022阶段摄像机的具体指标要求
Tab.5 Specific requirements for the camera indicators in Phase Q/CR 575-2022

序号	摄像机类型	技术指标		
		传感器靶面尺寸	宽动态 / 云镜控制	红外补光 / 激光 / 其他
1	固定枪型摄像机	室内型：不应小于 1/2.8 英寸； 室外型：不应小于 1/1.8 英寸	宽动态范围不小于 100 dB	室外型：应支持无红曝红外，峰值波长为 (940±10)nm
2	云台枪型摄像机	室内不应小于 1/2.8 英寸，室外不应小于 1/1.8 英寸	宽动态范围不小于 100 dB	室外型摄像机应支持无红曝红外，峰值波长为 (940±10)nm
3	一体化半球型摄像机	不应低于 1/2.8 英寸	宽动态范围不小于 100 dB； 镜头应支持电动变焦功能	红外补光距离不小于 30 m 室外一体化半球摄像机应支持无红曝红外，峰值波长为 (940±10)nm
4	一体化球型摄像机	不应低于 1/2.8 英寸	水平预置点速度不应低于 240°/s，垂直预置点速度不应低于 180°/s	水平键控速度为 0.1°/s ~ 180°/s 可调， 垂直键控速度为 0.1°/s ~ 90°/s 可调 红外灯：累积工作 3×10 ⁴ h 光功率下降不应大于 30%
5	枪球一体摄像机	均不应小于 1/1.8 英寸	宽动态摄像机范围不小于 100 dB	枪机实现静态全覆盖，球机实现动态细节覆盖，枪机路宜支持垂直方向电动调节
6	全景摄像机	不应小于 1/1.8 英寸	具有云镜控制功能	采用一体化设计，通过前端拼接方式将 2 个及以上传感器图片整合为一张 180°的全景图片，实现区域的全景覆盖 支持 AR 功能，可与其他细节场景视频监控点位结合，在全景画面中展示

3 摄像机选型分析和建议

3.1 主要变化

通过以上详细分析和对比，不难看出，随着摄像机技术的发展和铁路应用场景的需求变化，促使铁路用摄像机发生了以下主要变化。

1) 智能摄像机应用已经成为发展方向：模拟摄像机被 IP 摄像机取代，普通黑白摄像机被彩色摄像机取代，红外补光 + 摄像机被具有夜视功能的一体化摄像机取代。

2) 摄像机图像分辨率逐步提高：摄像机像素从 CIF (352×288)、4 CIF (704×576)、720P

表6 Q/CR 575-2022阶段激光云台枪型摄像机具体指标要求

Tab.6 Specific requirements for the indicators of bullet security cameras with laser devices and pan/tilt heads in Phase Q/CR 575-2022

序号	摄像机要求	激光器要求	镜头要求	云台要求	功耗/重量/外形尺寸
1	传感器靶面尺寸：不应小于1/1.8英寸	激光束和摄像机变焦同步，变焦结束后，激光束同步时间不应大于1s	最远夜视距离为1500m时，镜头焦距不应小于750mm，倍数不应低于30倍，通光口径不应低于80mm	云台载重：焦距500(含)~1000mm的长焦摄像机：云台载重不应小于50kg；焦距500mm以下的中短焦摄像机：云台载重不应小于25kg	摄像机(含云台等部件)整体功耗不应大于210W
2	具有温度补偿功能，当温度变化不应超过(10±35)℃时，图像清晰度下降不应大于50%	激光器光功率：镜头焦距不应小于750mm：光功率不应小于18W；镜头焦距不应小于300mm：光功率不应小于8W	最远夜视距离为500m时，镜头焦距不应小于300mm，倍数不应低于20倍，通光口径不应低于65mm	应支持水平旋转角度0°~360°，垂直旋转角度-70°~+20°	重量不应大于50kg
3	应支持长焦限速功能	光照度低于10Lux时，应自动开启激光器	镜头内外不应采用2倍镜	最大水平旋转角速度不应小于6°/s，最大垂直面旋转角速度不应小于3°/s	最大外形尺寸不应超过：750mm(长)×450mm(宽)×650mm(高)
4	信噪比不应小于56dB	激光衰减：累积工作2×10 ⁴ h光功率下降不应大于30%	—	转动次数不应小于5×10 ⁵ 次	—
5	防护罩玻璃应采用红外增透和防水防尘镀膜工艺	支持无红曝红外，峰值波长为(940±10)nm	—	支持PELCO-D和PELCO-P协议	—

(1280×720)、1080P(1920×1080)到4k以及更高像素不断提高。非制冷型红外热成像摄像机分辨率像素从320×240到至少支持384×288或640×512。

3) 增加宽动态、逆光补偿、防抖动功能：根据应用场景的实际需要，白天光线变化强需要关注宽动态、逆光补偿等功能，室外受环境和铁路沿线列车行车振动影响，安装高度高(铁塔)需重点关注防抖动功能。

3.2 选型建议

在工程设计和设备招标中，对摄像机的选型应考虑以下方面的问题。

根据应用场景、监视范围、监视目标要求、图像质量要求、环境条件要求、供电资源及传输资源要求、系统安全和安装条件等选择技术先进、维护方便、性价比高并满足用户需求的产品。

1) 摄像机分辨率不低于1080P。

2) 根据应用场景的实际需要，白天光线变化强需要关注宽动态、逆光补偿等功能，室外受环境

和铁路沿线列车行车振动影响，安装高度高(铁塔)需重点关注防抖动功能。

3) 应用在线路上的红外和激光摄像机，波长选择不能干扰行车，峰值波长为(940±10)nm。在铁路线路接触网杆和立杆安装的摄像机大多采用固定枪型摄像机。

4) 应用在铁路线路巡视的摄像机，一般安装在既有GSM-R铁塔上，监控距离≥1.5km，一般选用激光云台枪型摄像机，塔底监视的摄像机选用一体化球型摄像机。

5) 线路隧道口、隧路(桥)结合部等重点区域可选择有夜视功能的枪球一体摄像机。

6) 设备机房一般选用一体化球型摄像机和一体化半球型摄像机。

7) 站内可根据应用场景选用固定枪型摄像机、云台枪型摄像机、一体化球型摄像机和一体化半球型摄像机，站内广场可选用大场景摄像机。

4 结束语

铁路综合视频监控系统建设和应用历经多年，

早期使用的摄像机没有全部更新改造,存在着大量的维护工作。本文研究梳理的内容不仅利于今后的工程设计和设备选型,也能为现有视频系统的设备状态维护提供帮助。

参考文献

[1] 孙嵘, 姜志威. 高速铁路一体化综合视频监控
控系统构建研究 [J]. 铁路通信信号工程技术,
2020, 17 (3): 19-24.
Sun Rong, Jiang Zhiwei. Study on Construction
Scheme of Integrated Video Monitoring System
for High-Speed Railway[J]. Railway Signalling &
Communication Engineering, 2020, 17(3): 19-24.

[2] 刘清华, 许辉, 王赛超. 关于青藏铁路格拉段
视频监控更新改造方案的研究 [J]. 铁路通
信信号工程技术, 2021, 18 (6): 51-58.
Liu Qinghua, Xu Hui, Wang Saichao. Scheme for
Upgrading and Transformation of Video Monitoring
System of Golmud-Lhasa Section of Qinghai-Tibet
Railway[J]. Railway Signalling & Communication
Engineering, 2021, 18(6): 51-58.

[3] 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 Qinghui, Chen Xiyu, et al.
Discussion on Systematic Construction of Railway
Video Monitoring System[J]. Railway Signalling &
Communication Engineering, 2022, 19(1): 39-43.

[4] 赵越, 杨家田, 王永岗, 等. 铁路综合视频监
控系统 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(10): 30-35.

[5] 中华人民共和国铁道部. 铁路综合视频监控系
统技术规范 (试行): 运基通信 [2008]630 号
[S]. 北京: 中华人民共和国铁道部, 2008.

[6] 中国铁路总公司. 铁路综合视频监控系统技术
规范 (V1.0): 铁总运 [2013]71 号 [S]. 北京:
中国铁路总公司, 2013.

[7] 中国铁路总公司. 铁路综合视频监控系统技术
规范: Q/CR 575-2017[S]. 北京: 中国铁道出版
社, 2017.

[8] 中国国家铁路集团有限公司. 铁路综合视频监
控系统技术规范: Q/CR 575-2022 [S]. 北京: 中
国铁道出版社, 2022.

(上接 31页)

Ma Chong. Optimization Scheme of Train Turn-
back Capacity of Urban Rail Transit[J]. Railway
Signalling & Communication Engineering, 2022,
19(6): 76-80.

[4] 徐华, 任贸城. TDCS/CTC 系统局间信息交互方
式优化 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20
(1): 56-60.
Xu Hua, Ren Maocheng. Optimization of
Information Interaction Modes between Railway
Bureaus in TDCS/CTC System[J]. Railway
Signalling & Communication Engineering, 2023,

20(1): 56-60.

[5] 王栋, 刘实秋. 城际铁路应用无人自动折返技
术研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2018, 15
(12): 47-52.
Wang Dong, Liu Shiqiu. Study on Application
of Automatic Turn-back Technology in Intercity
Railways[J]. Railway Signalling & Communication
Engineering, 2018, 15(12): 47-52.

[6] 洪鑫. 高速铁路列车运行调整一体化优化方法
[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.

[7] 韩咏馨. 高速铁路周期化列车运行图编制研究
[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2023.08.010

Apriori算法在C3无线通信超时分析中的应用与研究

冯迎辰

(北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

摘要: 无线通信超时是影响CTCS-3级列控系统安全稳定运行的主要因素之一。传统无线通信超时问题分析依靠人工处理, 工作量大、效率低。针对此问题, 提出一种基于数据挖掘分析算法的智能分析技术, 并利用Apriori算法对各类监测数据进行综合分析, 能够实现故障原因的高效、准确定位。

关键词: CTCS-3; 无线通信超时; Apriori 算法

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0047-05

Research and Application of Apriori Algorithm in Analyzing C3 Wireless Communication Timeout

Feng Yingchen

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

Abstract: Wireless timeout has become one of the main problems affecting the safe and stable operation of CTCS-3 train control system. Traditionally, analysis of such timeout issues relies on manual processing, resulting in a heavy workload and low efficiency. Aiming at solving the problem of CTCS-3 train control system wireless timeout, this paper presents an intelligent analysis technology based on data mining analysis algorithm, and uses the Apriori algorithm to comprehensively analyze all kinds of monitoring data so that fault causes are located more efficiently and accurately.

Keywords: CTCS-3; wireless communication timeout; Apriori algorithm

1 概述

CTCS-3级列车运行控制系统(简称C3列控系统

统)是保障高速列车安全运行,提升运输效率的核心安全装备。C3列控系统包含车载设备和地面设备两部分,通过GSM-R无线通信系统实现车-地信息交互。无线通信超时容易导致C3列控系统降级,影响铁路正常运输秩序。随着高铁不断提速及后续CR450高速动车组上线,无线通信超时已成为制约C3级列控系统安全稳定运行的主要因素之一,仅2021年全路发生无线通信超时6000余次。在

收稿日期: 2022-02-22; 修回日期: 2023-07-07

发明专利: 2016年国家发明专利(CN201610698563.1)

第一作者: 冯迎辰(1991—),男,工程师,硕士,主要研究方向: C3无线通信超时智能分析系统,邮箱: fengyingchen@crscd.com.cn。

2020年的京广高铁、京沪高铁、沪昆铁路的无线超时统计中，无法确定的故障占5%~10%，而且故障确认速率慢，确认周期可达到2个月左右，如表1所示。

表1 2020年京广高铁、京沪高铁、沪昆高铁无线超时统计
Tab.1 Statistics on wireless communication timeout of Beijing-Guangzhou High-speed Railway, Beijing-Shanghai High-speed Railway and Shanghai-Kunming High-speed Railway in 2020

路局	统计时间段	故障总件数	信号类问题	通信类问题	偶发原因不明类单MT问题	其他未明原因类
京广高铁	2020年1月1日—12月30日	111	72	25	2	12
京沪高铁	2020年1月1日—12月30日	1100	668	325	22	85
沪昆高铁	2020年1月1日—12月30日	199	124	66	1	8

当前无线通信超时问题分析主要依靠人工处理C3业务监测、RBC接口监测、车载/基站空口监测、GPRS分组域监测和干扰监测等产品存储的大量监测数据，存在工作量大、效率低、复杂问题难以定位、超时隐患无法预警等问题。本文提出了一种基于数据挖掘分析算法的智能分析技术，可以提高分析效率、快速定位超时问题、实现超时预警。

2 无线超时智能分析系统

数据挖掘算法是对大数据挖掘分析算法的统称，其中较为常用的是Apriori算法，FP-growth算法及其改进算法等。本文以Apriori算法为例，研究其在C3无线通信超时分析中的应用。

2.1 系统描述

数据挖掘的一般流程为，设 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$ 是 m 个不同项的项集， $X \in I, Y \in I$ ，并且 X 和 Y 是不相交的项集，即 $X \cap Y = \varnothing$ 。关联规则的属性可以用以下3个参数描述：一是支持度 (support)，定义为全体事务集 T 中有 $S\%$ 的事务同时支持事务集 X 和 Y ，则称 $S\%$ 为关联规则 $X \rightarrow Y$ 的支持度。支持度表示规则的频繁程度，用 $S(X \rightarrow Y)$ 表示。其中，最小支持度用 Minsup 表示。二是置信度 (confidence)，定义为全体事务集 T 中支持事务

集 X 的事务中，有 $C\%$ 的事务同时也支持事务集 Y ， $C\%$ 为关联规则 $X \rightarrow Y$ 的置信度。置信度表示规则的强度，用 $C(X \rightarrow Y)$ 表示。其中，最小置信度用 Minconf 表示。三是频繁项集，定义为支持度不小于最小支持度 (Minsup) 的事务集，称为频繁项集。

关联规则的挖掘问题就是在事物数据库 D 中找出具有用户给定的满足一定条件的最小支持度 Minsup 和最小置信度 Minconf 的关联规则。

在列控系统中，则需要定义当发生无线超时故障时，某两个或多个因素的最小支持度 $S\%$ 或最小置信度 $C\%$ 。关联规则的挖掘意义就是，针对发生的故障 X ，找到符合其最小支持度 $S\%$ 的因素，或者符合最小置信度 $C\%$ 的某几种因素，以此高效地找到引起故障的几率。

2.2 理论模型

专家系统是一种基于专家知识和经验的计算机系统，并以此作为计算机系统的决策依据，用来应对复杂的决策问题。

在专家系统中，通常分为数据源、数据输入、数据输出、推理机和知识库等部分。

知识库用于存储专家提供知识的数据库称为知识库。它是专家系统的关键，系统可以通过知识获取，实现自动学习功能。

当工作时，推理机根据当前问题的条件或已知信息，对知识库中的规则进行反复匹配，得到新的结论，从而得到问题求解的结果。

C3无线通信超时案例中，输入的数据类型可能包括GSM-R接口监测数据、ATP日志数据、动态检测数据、RBC日志数据等；而输出的数据包括故障预警、故障原因分析、解决方案或分析报告等。C3无线通信超时的专家系统模型示意如图1所示。

3 Apriori算法思想

在铁路系统的监测检测数据中，如果对监测检测数据不进行特征提取，这将会影响整个智能分析技术的时效性。数据挖掘分析算法是常见的针对大数据挖掘分析算法的统称，其中较为常用的包括

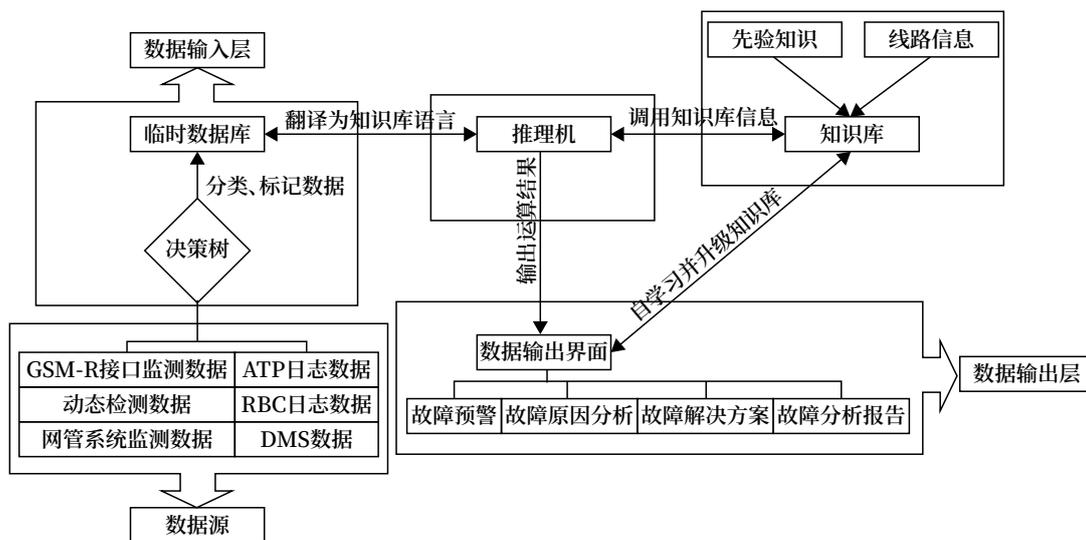


图1 C3无线通信超时智能分析系统模型
Fig.1 Model of the intelligent analysis system for C3 wireless communication timeout

Apriori 算法、FP-growth 算法以及其改进算法等。

在目前的 C3 无线超时故障分析中，存在如下特点。

1) 参数类型完全已知：例如列车速度、公里标、超时时间戳、信号强度、超时前后信息内容等。

2) 最优取值范围明确，但实际情况复杂：例如通信信号强度要求大于 - 75 dBm，但并不意味着信号强度大于 - 75 dBm 时就一定没问题。具体通信时，还要考虑电台性能、多径效应等信号环境、列车运行速率乃至于时刻、天气情况等因素。

3) 数据总量大：虽然单电台传输的 C3 信息数据不大于 100 kbit/s，但如果结合诸如时间戳、公里标、超时时长等参数，以及通信空口数据，每秒产生的数据可以达到 1 MByte 数量级。

例如，某厂商电台在华北地区运行基本良好，但在南方偶尔出现超时故障，路局做过针对性对比实验，但问题难以复现。

后经过多次测试，发现原因是由于南方气温 / 湿度较高，在晴天的午后，由于长时间太阳直射，通信系统由于高温而导致性能下降。而对比测试的时间多为天窗点，夜晚天气凉爽，则无法复现。

在这个例子中，超时故障出现概率低，但与时刻、天气、气温等因素有强烈的关系，人工统计时很容易忽略这些因素。但如果采用 Apriori 等算法，不

论原因出现的频率高低与否，只要与故障呈强烈的正相关性，都可以被知识库采纳，作为判定条件之一。数据分析算法逻辑的示意流程如图 2 所示。

Apriori 算法的核心思想是发现逐步排除影响较小的参数，找寻特定事件参数的频繁项集的异常参数组合与故障的对应关系，并排除相关性不大的异常参数。

下述流程图中所有故障、参数名称均为举例，不代表任何实际参考意义。

4 Apriori算法应用分析

下面举例说明 Apriori 算法的大体流程：假定知识库工程师最近发现了一种新的故障类型，小区切换故障。知识库需要对最近一段时间内出现的小区切换故障与参数进行处理运算，并将这种故障与所得到的异常参数之间的关系定期更新进入知识库中进行储存。知识库内找寻与故障有关参数组合的算法流程。Apriori 算法的示意流程如图 3 所示。

1) 假设最近发生了 4 次小区切换故障，在这 4 次故障（时点①，②，③，④）发生时会有 5 种参数发生异常，分别是直放站设备掉电 (A)、无线参数设置不合理 (B)、Abis 接口时隙故障 (C)、附近车辆干扰 (D)、ATP 主机重启 (E)。具体每次发生故障时出现异常的参数如图 3 左上的表格所示。

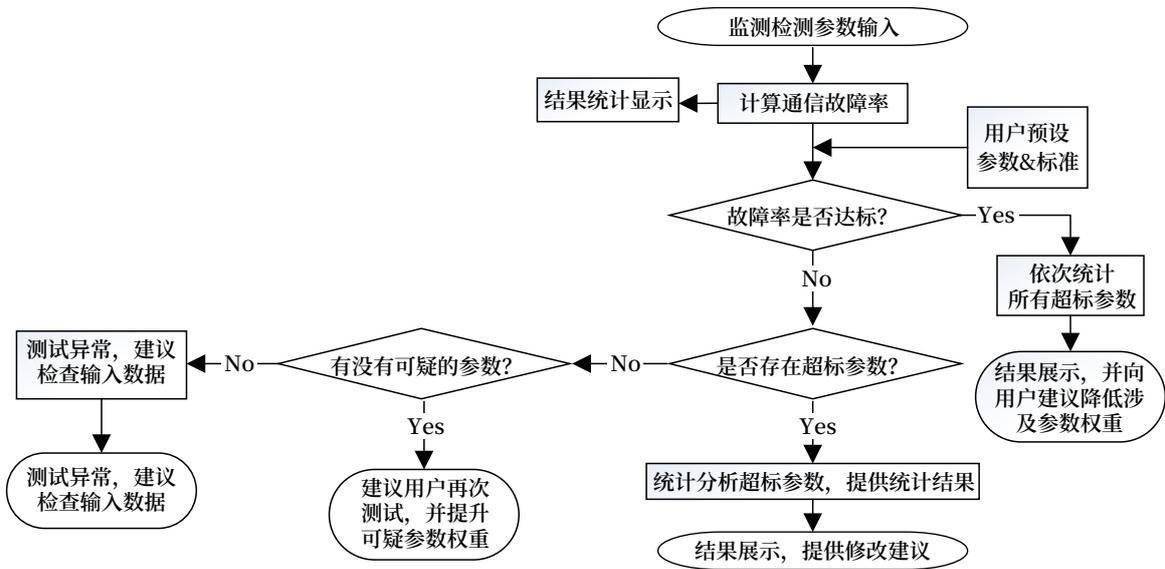


图2 数据分析算法逻辑
Fig.2 Logic of the data analysis algorithm

2) 支持度表示在所有调查的故障中, 某个参数或参数集在故障中出现的百分比。如在图3 候选项集 C1 中, 因为直放站设备掉电 (A) 在 4 次故障中的①, ③时点出现了, 所以 {A} 的支持度为 2/4, 即 50%。附近车辆干扰 (D) 在 4 次故障中仅在时点①出现过一次, 所以 {D} 的支持度仅为 1/4, 即 25%。在这个例子中假定阈值为 50%。

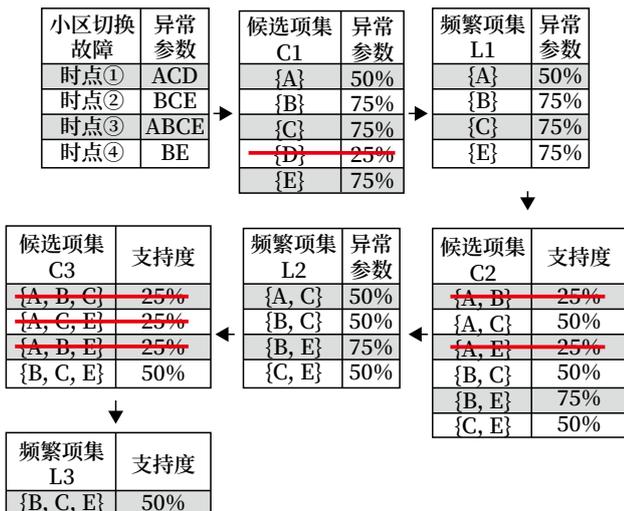


图3 算法流程
Fig.3 Flowchart of the algorithm

3) 知识库先对参数进行分集, 得到 {A}{B}{C}{D}{E} 5 个单项集, 其中附近车辆干扰 (D) 的支持度仅为 25%, 没有达到阈值要求, 故频繁项集 L1

包括 {A}{B}{C}{E} 4 个。

4) 在对频繁项集 L1 内的参数进行组合, 得到 6 个二项集, 其中 {A,B}、{A,E} 的支持度没有达到阈值要求, 所以频繁项集 L2 包括 {A,C}、{B,C}、{B,E}、{C,E} 4 个。

5) 以此类推, 可以得到频繁项集 L3 只包含 {B,C,E}。总结来说, 导致小区切换异常的参数可能分别是无线参数设置不合理 (B)、Abis 接口时隙故障 (C)、ATP 主机重启 (E)。知识库会将小区切换异常这个故障与这些异常参数建立联系, 并统计异常发生的概率, 最后收录进知识库的数据将会是故障 - 相关参数的信息。

6) 知识库中会针对某一类故障与不同的异常参数, 或某一异常参数与不同的故障等关系进行运算, 运算结果包括且不局限于故障类型、异常参数类型、故障发生原因、故障解决办法和故障等级等。

5 结束语

本文通过研究分析基于知识的智能分析技术模型, 根据典型案例研究智能分析技术, 包括特征选取的主要思想、铁路监测检测数据的特点, 确定出针对 CTCS-3 系统故障预警与分析的算法; 以此提出针对无线通信超时的智能分析技术方案。提出更

完善、更优化的 C3 列控系统车-地通信超时故障检测和分析的建议,减少无线通信超时的发生概率和处理时效。提高 C3 系统的可用度,保障列车安全稳定运行,对于铁路高效运输、加强运输安全具有重大现实意义。

参考文献

- [1] 王猛,周宇晖. CTCS-3 级列控系统无线超时问题分析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2016, 13(4): 28-32.
Wang Meng, Zhou Yuhui. Analysis of Radio Overtime Problem in CTCS-3 System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2016, 13(4): 28-32.
- [2] 郭媛忠. CTCS-3 级列车运行控制系统无线超时故障分析 [J]. 铁道通信信号, 2014, 50(7): 73-75.
Guo Yuanzhong. Fault Analysis of Wireless Connection Timeout in CTCS-3 ATC[J]. Railway Signalling & Communication, 2014, 50(7): 73-75.
- [3] 司景萍, 马继昌, 牛家骅, 等. 基于模糊神经网络的智能故障诊断专家系统 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(4): 164-171.
Si Jingping, Ma Jichang, Niu Jiahua, et al. An Intelligent Fault Diagnosis Expert System Based on Fuzzy Neural Network[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4): 164-171.
- [4] 何勇, 李增芳. 智能化故障诊断技术的研究与应用 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003, 29(2): 119-124.
He Yong, Li Zengfang. The Research and Application of Intelligent Fault Diagnosis Methods[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University (Agric& Life Sci), 2003, 29(2): 119-124.
- [5] 晏蒲柳, 夏德麟, 郭成城. 计算机网络智能故障诊断知识库构造方法 [J]. 模式识别与人工智能, 2000, 13(2): 142-145.
Yan Puliou, Xia Delin, Guo Chengcheng. Approach about the Knowledge Base Construction for Intelligent Fault Diagnosis in Computer Networks[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2000, 13(2): 142-145.
- [6] 刘宜平. 基于智能信息处理技术的故障诊断方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.
- [7] 肖小锋, 蔡金燕, 李文钊. 基于证据理论的多诊断智能体解的综合方法 [J]. 兵工学报, 2006, 27(4): 737-740.
Xiao Xiaofeng, Cai Jinyan, Li Wenzhao. Conclusions Synthesis Method of Multi-Diagnosis Agent Based on Evidence Theory[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(4): 737-740.
- [8] 曾毅, 周湘贞. 大数据环境下基于 Hadoop 框架的改进 Apriori 挖掘算法 [J]. 机床与液压, 2019, 47(6): 98-103.
Zeng Yi, Zhou Xiangzhen. An Improved Apriori Mining Algorithm Based on Hadoop Framework in Big Data Environment[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(6): 98-103.
- [9] 王青, 谭良, 杨显华. 基于 Spark 的 Apriori 并行算法优化实现 [J]. 郑州大学学报(理学版), 2016, 48(4): 60-64.
Wang Qing, Tan Liang, Yang Xianhua. Optimization of Apriori Parallel Algorithm Based on Spark[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2016, 48(4): 60-64.
- [10] 赵学健, 孙知信, 袁源, 等. 一种正交链表存储的改进 Apriori 算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2016, 37(10): 2291-2295.
Zhao Xuejian, Sun Zhixin, Yuan Yuan, et al. An Improved Apriori Algorithm Based on Orthogonal List Storage[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2016, 37(10): 2291-2295.
- [11] 李俏. CTCS-3 级列控系统无线超时智能分析系统研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(3): 32-36.
Li Qiao. Research on Intelligent Analysis System for Wireless Communication Time-out of CTCS-3 Train Control System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(3): 32-36.

基于FBG和EMD的 悬挂式永磁磁浮轨道厢梁应力检测技术研究

贺航宇^{1, 2}, 王岁儿^{1, 2}, 吴春晓^{1, 2}, 王 晟^{1, 2}, 李 擎^{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. 先进轨道交通工业互联网北京市工程研究中心, 北京 100070)

摘要: 提出一种基于经验模态分解方法(EMD)的悬挂式永磁磁浮轨道厢梁光纤布拉格光栅(FBG)应力检测技术, 用于检测过车时轨道厢梁应力, 检测应力是否在安全范围内, 保证行车安全性和平稳性。考虑到强磁场以及电磁干扰影响, 采用轨上无电的FBG光栅传感应力检测方案, 在上/下导向轮行径位置处分别布置一个测试点。FBG测试点受低频挠曲应力和高频导向轮应力双重作用, 采用EMD方法分离两种应力, 实验结果表明过车应力测试结果符合预期, 可以有效确保轨道厢梁健康以及车辆的行驶安全。

关键词: 悬挂式永磁磁浮轨道交通; 经验模态分解方法(EMD); 光纤布拉格光栅(FBG); 应力检测

中图分类号: U237

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0052-07

Research on Stress Detection Technology for Suspended Permanent-magnet Maglev Track Box Girder Based on FBG and EMD

He Hangyu^{1, 2}, Wang Suier^{1, 2}, Wu Chunxiao^{1, 2}, Wang Sheng^{1, 2}, Li Qing^{1, 2}

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

(2. Advanced Rail Transit Industrial Internet Beijing Engineering Research Center, Beijing 100070, China)

Abstract: This paper proposes a Fiber Bragg Grating (FBG) stress detection technology based on Empirical Mode Decomposition (EMD) for suspended permanent magnet maglev box girder, which is used to detect the stress of the track box girder when the vehicle passes through, check whether the stress is within the safe range, and ensure the operation safety and stability of vehicles. Considering the influence of strong magnetic field and electromagnetic interference, the FBG grating sensing stress detection scheme without electricity on the track is adopted, and a test point is respectively arranged at the travel position of the upper and lower guide wheels. The FBG test point is subject to both low-

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2023-08-10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4300600)

第一作者: 贺航宇(1981—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 铁路信号, 邮箱: hehangyu@crscd.com.cn.

frequency flexure stress and high-frequency guide wheel stress, and the EMD method is used to separate the two stresses. The experimental results show that the test results of vehicle passing stress in line with expectations. The stress detection technology for track box girder described in this paper can effectively ensure the health of track box girder and the operation safety of vehicles.

Keywords: suspended permanent-magnet maglev rail transit; Empirical Mode Decomposition (EMD); Fiber Bragg Grating (FBG); stress detection

悬挂式单轨是国内近年来轨道交通发展到一定规模和覆盖面的情况下兴起的一种新型轨道交通制式,在某些适用条件下具有特殊的优越性。悬挂式单轨行走轮如果采用橡胶轮胎,行驶过程中会与钢梁接触摩擦增加电能的损耗,此外橡胶轮需要经常更换导致维护成本高,而电磁悬浮和超导磁浮又无法解决断电情况下的安全性问题,能克服上述不利因素的永磁磁浮轨道交通系统研究成为热点。永磁悬挂式单轨交通系统相比于悬挂式单轨(The suspended monorail transit),钢梁和车体采用稀土永磁体,具有高悬浮效率,非接触的走行方式。悬浮零功率不消耗电能,运行成本低,绿色环保,舒适静音,可广泛适用于景区、沿江、环湖、特色小镇、交通接驳,以及环境优美、地形起伏的中小型丘陵城市发展公共交通兼城市景观建设。

永磁磁浮轨道交通系统的走行控制模块主要由悬浮架导向轮来控制,通过轨道箱梁约束导向轮进行控制列车平稳运行,导向轮通过弹簧机构始终与轨道箱梁紧贴,列车在行驶时需要导向轮对轨道箱梁一定预设的应力保证车辆的控制。轨道梁为底部开口的薄壁箱梁,车辆磁浮板在列车载荷作用机理与传统钢轮钢轨也有较大的差异。由此可见,相比常规铁路系统,悬挂式磁浮车辆与轨道梁桥动力相互作用特性、车辆和轨道梁桥力学特性及行车安全性评估均有较大的不同。在车辆运行过程中振动、环境尤其是风、乘客移动导致横向摇摆和横向振动较为显著,这也导致车辆导向轮与钢梁间应力会发生变化;为了保障列车安全运行,需要对导向轮对轨道箱梁的应力进行检测,检测导向轮对轨道箱梁应力是否在设计安全范围内,对保障行车安全性具有重要意义。

针对悬挂式永磁磁浮轨新制式轨道交通,考虑

到应力检测适用范围和轨道电气防护要求,传统的电应变片应力检测精度及电气特性不满足需求,因而应力检测采用光纤布拉格光栅(FBG)传感器。FBG安装在轨道箱梁外壁上,光源及光信号解调布置在室内,光信号通过光缆传输至室内,传输距离可达20 km以上。轨道厢梁在过车时,FBG受到导向轮的压应力和车重引起的轨道厢梁的挠曲应力同时作用,其中导向轮压过FBG接触时间短(为高频信号)相对于车辆通过完整一节轨道厢梁时间长(属于较低频信号),但是这两种信号周期远小于采样周期,传统的FIR、IIR滤波器不太适用,因此引入经验模态分解方法(EMD)分离这两种信号。通过对轨道厢梁应力的检测,可以确保轨道厢梁健康以及车辆的行驶安全。

1 FBG永磁磁浮轨道交通应力检测

1.1 FBG原理简介

应力检测传感器是光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)。FBG是一种通过一定方法使光纤纤芯的折射率发生轴向周期性调制而形成的衍射光栅,是一种无源滤波器件。由于FBG的反射特性,入射进FBG的宽带光只有满足一定条件的光才能被反射回来,其余的光都被透射出去。当一束宽光谱光经过FBG时,满足FBG布拉格条件的波长将产生反射,其余的波长透过FBG继续传输。FBG反射光的波长 λ_{Bragg} 由光栅的栅距 Λ 决定,两者之间的关系由公式(1)决定:

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

其中 n_{eff} 是光栅的有效折射率。

基于FBG应力检测传感器原理是将钢梁微应变FBG中心波长的移动,通过检测光栅反射的中心波长移动实现对钢梁应力的检测。其中心波长变化与

轴向应变均是线性关系，如公式（2）所示：

$$\Delta\lambda = K_\varepsilon\varepsilon + K_T T \quad (2)$$

式中： $\Delta\lambda$ 为FBG中心波长变化量； K_ε 为应变灵敏度系数， ε 代表应变变化。以使用最为广泛的中心波长在C波段的FBG裸栅为例， K_ε 为1.2 pm/ $\mu\varepsilon$ 。

1.2 永磁磁浮轨道交通试验线

试验线约800 m，两端设有一处车站和一处静调库，在车站进站处设有一处道岔，试验线采用双线吊梁Y型柱子，两个悬挂支撑柱空间距约为25 m。车体由两节直通的车体组合而成，车体控制和悬浮由四个悬浮架上下8个导向轮和8个永磁磁浮板实现，车体总长度约20 m，钢制轨道厢梁上每隔一段距离加装加强筋，车辆最高运行速度80 km/h，如图1所示。

1.3 轨道厢梁应力分析

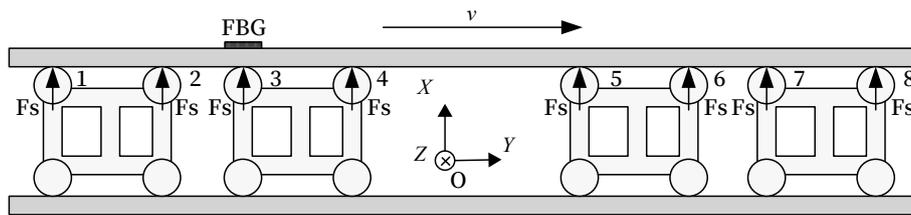
为了对轨道厢梁进行应力检测，需要对其主要受力特性进行简要分析，本文选取两个Y型柱间的一截轨道厢梁进行分析。如图2所示，可以看出在O-xy平面，轨道厢梁主要受导向轮沿x轴水平方向的应力 F_s ，从图2中可以看出上下8个导向轮对轨道厢梁侧壁的应力，上导向轮的应力为 F_{su} ，下导向轮的应力为 F_{sd} ，车辆导向轮由上下8个导向轮组合。正视图，FBG1安装在上导向轮行径位置处，而FBG2安装在下导向轮的行径位置处，该节轨道厢梁可以简化成简支梁模型，车辆自重载荷 q 加载在轨道向量上时，轨道厢梁会在O-yz平面产生挠曲变形，而上下导向轮行径位置在轨道厢梁侧壁的中性层的上边和下边，在车重载荷作用下，FBG1处



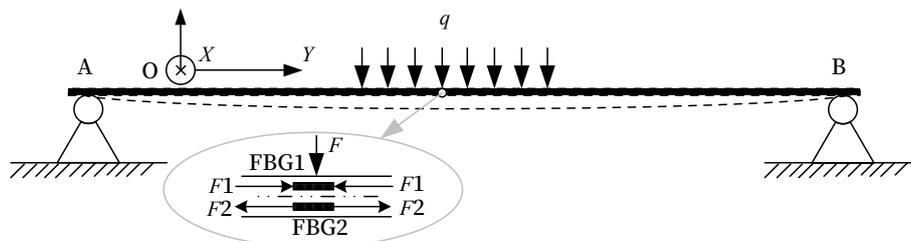
(a)试验线外观图1 (b)试验线外观图2 (c)FBG安装布置
(a)Test line appearance 1 (b)Test line appearance 2 (c)FBG installation layout

图1 试验线及FBG安装布置

Fig.1 Test line and FBG installation layout



(a) 车辆应力俯视
(a)Top view of the stress on vehicle



(b) 车辆应力正视
(b)Front view of the stress on vehicle

图2 车辆应力俯视及正视图

Fig.2 Top and front view of the stress on vehicle

会有沿 y 轴方向的压应力 $F1$ ，而在 FBG2 处则会有沿 y 轴方向的压应力 $F2$ 。

1.4 经验模态分解

EMD 方法将信号分解成多个不同频率信号分量和余量。不同频率信号也称本征模函数 (Intrinsic Mode Functions, IMFs)，本质通过信号的时间尺度特征来获得其本征波动模式，该分解过程可以称之为“筛选 (sifting)”过程。在 EMD 分解之后，原始信号 $x(t)$ 可以表示为公式 (3)：

$$x(t) = \sum_{i=1}^N IMF_i + r_N(t) \quad (3)$$

EMD 主要步骤如下：

第一步，找出信号 $x(t)$ 中的所有的局部极值；

第二步，分别利用极大值、极小值经三次样条插值得上下包络信号 $u_0(t)$ 、 $d_0(t)$ ；

第三步，计算平均包络如公式 (4) 所示：

$$m_0(t) = [u_0(t) + d_0(t)]/2 \quad (4)$$

第四步，从信号 $x(t)$ 减去平均包络 $m_0(t)$ ，如公式 (5) 所示：

$$h_1(t) = x(t) - m_0(t) \quad (5)$$

第五步，若 $h_1(t)$ 满足 IMF 筛选规则，则 $IMF_1 = h_1(t)$ ；否则 $h_1(t)$ 为筛选过程的数据，并重复第一步至第四步。该过程将重复进行，直到 $h_{1k}(t)$ 满足 IMF 筛选规则或某个终止条件为止。

第六步，从 $x(t)$ 中减去 IMF_1 以获得残差，如公式 (6) 所示：

$$r_1(t) = x(t) - IMF_1 \quad (6)$$

第七步，将 $r_1(t)$ 视为新信号，重复第一步至第六步，可以获得其他 IMF 分量，直到 $r_N(t)$ 变为常数、单调函数或只有一个极值的函数，分解完成。

筛选规则：1) 总的极端点和零交叉点应相等，或至多相差一个；2) 在任何时候，由局部极值点形成的上下包络线的均值为零。

2 测试及结果分析

2.1 测试点布置

现场测试选取一段直线轨道厢梁进行应力测试。FBG 轨道应变检测共选取 2 个安装位置 (如图 1 所

示)，FBG1、FBG2 分别安装于轨道厢表面上、下两导向轮经过位置。

2.2 应力检测算法

如图 3 所示，为车辆 20 km/h 通过图 2 布置的应力检测点 FBG1、FBG2 时中心波长变化量，其中红色曲线为 FBG1 受外界应力波长变化量，从图 3 中可明显看出波长变化量主要是由向下低频波形叠加几个高频波形两部分组成，从 FBG1 受力分析 (详见图 2) 低频波形是由车辆自重挠曲应变产生的，FBG1 在轨道厢梁中性层的上面因而受压应力，挠曲应力引起的波长会减小，而高频波形则是车辆通过测试位置时导向轮对 FBG 直接应力作用结果。同理，蓝色曲线为 FBG2 过车时应力引起的波长变化量，FBG2 在轨道厢梁中性层的下面因而受拉应力，挠曲应力引起的波长会变大。

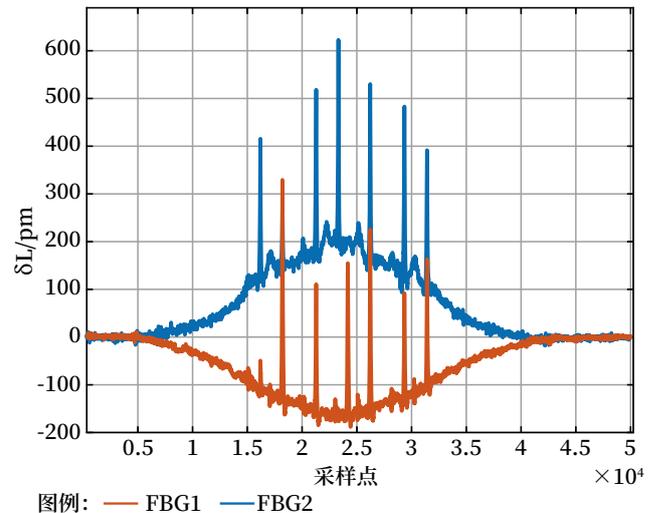


图3 过车FBG1、FBG2曲线
Fig.3 FBG1 and FBG2 curves after the vehicle passes

从 FBG 力学分析及如图 4 所示中 FBG 应力引起的波长变化量曲线可知，车辆自重引起的波长变化量属于低频信号或者趋势项，而导向轮作用在 FBG 上时间较短为高频信号。经验模态分解方法可将信号分解成不同频率的本征模态函数，如图 5 所示为 FBG1 应力测试数据的经验模态分解结果，可以看出 FBG1 应力测试波长变化量被分解为 10 个本征模态函数，从 IMF1 至 IMF10 信号的频率依次降低，IMF10 为趋势项。图 4 为 FBG2 应力测

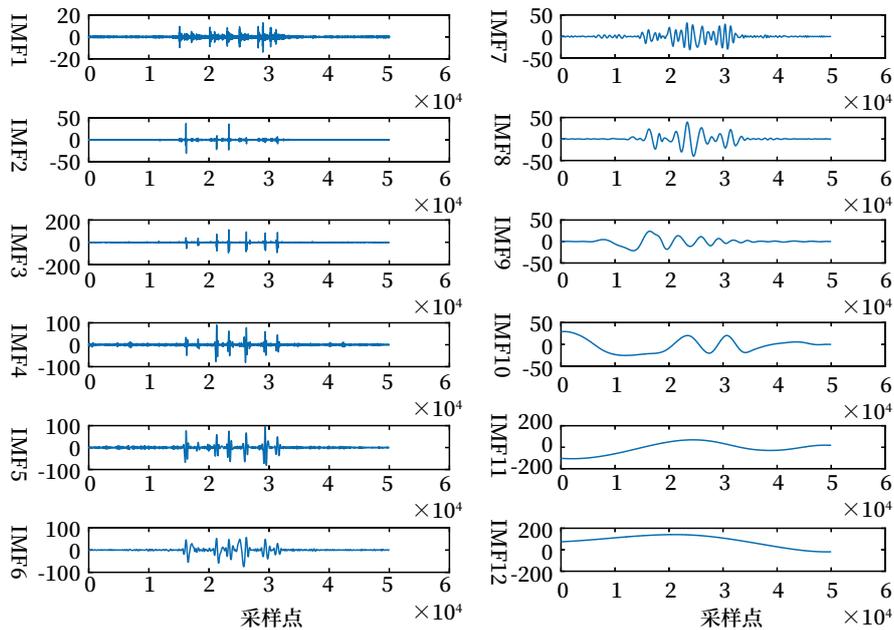


图4 FBG2测试数据分解
Fig.4 FBG2 test data decomposition

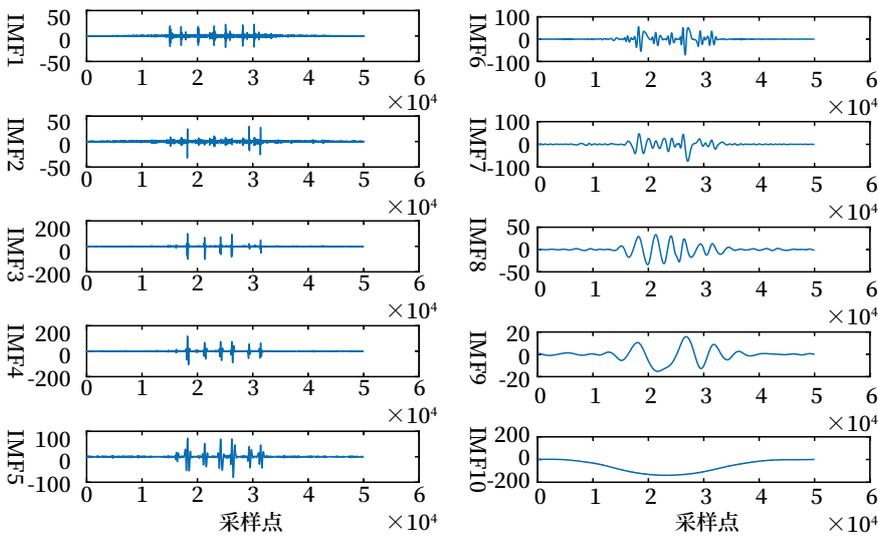


图5 FBG1测试数据分解
Fig.5 FBG1 test data decomposition

试数据的经验模态分解结果，可以看出FBG2应力测试波长变化量被分解为12个本征模态函数，从IMF1至IMF12信号的频率依次降低，IMF11、IMF12为趋势项。

对信号分解后，将分解的趋势项和低频信号进行重构分离出挠曲应力波长变化量，对剩余的信号进行重构获得导向轮应力波长变化量，对FBG2分解的IMF11、IMF12两个趋势项和IMF9、IMF10

两个低频信号项进行重构，可以获得FBG2处挠曲应变（如图6中黑色曲线所示），从原信号中可有效分离挠曲应变。

分离完挠曲应变后，对信号分解剩余的IMF项进行重构得到导向轮应力波长变化量，图7分别为FBG1、FBG2导向轮波长变化量，通过标定获得波长量与应力间的转换系数，FBG1的标定系数为37.453 2 N/pm ($1 \text{ pm} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}$)，FBG2的标

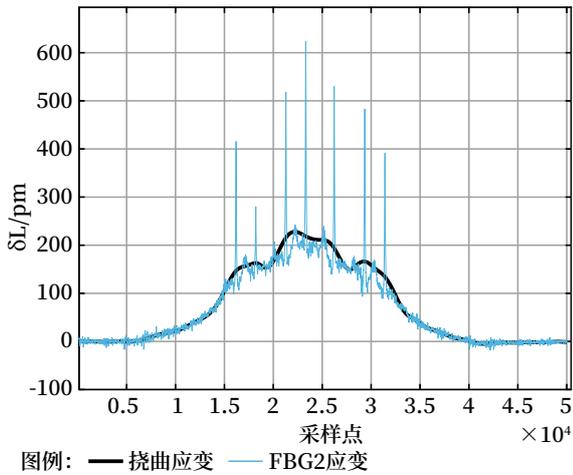


图6 FBG2挠曲应变
Fig.6 FBG2 flexural strain diagram

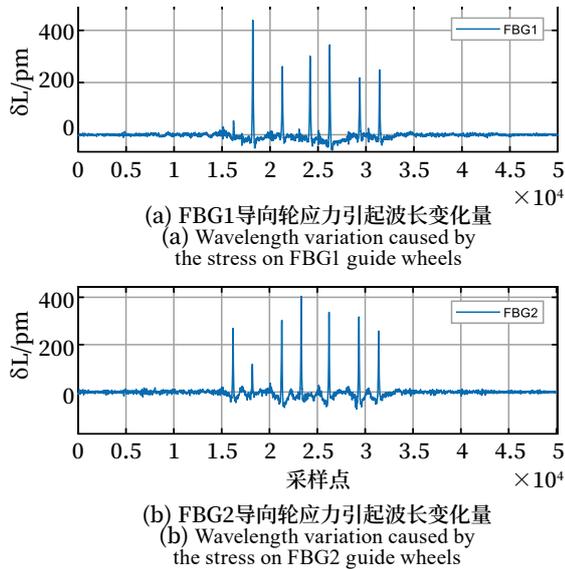


图7 FBG1、FBG2导向轮应力引起波长变化量
Fig.7 Wavelength variation caused by the stress on FBG1 and FBG2 guide wheels

定系数为 41.666 6 N/pm，将如图 7 所示中 FBG1、FBG2 波长变化量转成应力，结果统计如表 1 所示，FBG1 处导向轮最大应力为 16.44 kN，而 FBG2 处导向轮最大应力为 16.83 kN，此次行车导向轮的应力均在设计安全范围内，其中上导向轮处挠曲应变应力为 8.54 kN，下导向轮处挠曲应变应力为 6.37 kN。

3 结论

本文所述悬挂式永磁磁浮轨道厢梁应力检测技

表1 过车试验轨道厢梁应力统计

Tab.1 Statistical table for the stress on track box girder in train passing test

序号	上导向轮处应力 /kN	下导向轮处应力 /kN
1	1.99	11.21
2	16.44	4.87
3	9.78	12.58
4	0.00	16.83
5	11.24	0.00
6	12.88	14.04
7	8.16	13.21
8	9.33	10.75
最大值 (Max)	16.44	16.83

术，可以有效地检测过车时轨道厢梁应力。通过检测上导向轮的最大应力为 16.44 kN，下导向轮的最大应力为 16.83 kN，表明检测的应力值均在轨道厢梁正常运行阈值内。通过分析发现所测车辆第四个上导向轮和第五个下导向轮最小应力为 0，表明该导向轮与轨道厢梁没有紧密接触，需要调整优化。进一步的研究工作将开展全线轨道厢梁关键应力检测部署，构建相应数据库并进行数据挖掘，从而实现轨道厢梁全线应力检测，保障行车安全。

参考文献

- [1] 余浩伟, 徐银光, 李涛, 等. 悬挂式单轨交通在国内的适应性研究 [J]. 铁道工程学报, 2019, 36 (4): 70-74.
Yu Haowei, Xu Yinguang, Li Tao, et al. Research on the Adaptability of Suspended Monorail in China[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(4): 70-74.
- [2] 过振宇, 杨杰. 永磁悬浮轨道侧向力控制系统的 DMC-PID 控制策略 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (6): 1373-1381.
Guo Zhenyu, Yang Jie. The DMC-PID Control Strategy of the Lateral Force Control System of Permanent Magnetic Levitation Track[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(6): 1373-1381.
- [3] 王盼盼, 杨杰, 邹吉强, 等. 基于改进自抗扰

控制器的磁浮列车速度跟踪控制研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20 (1): 310-320.

Wang Panpan, Yang Jie, Zou Jiqiang, et al. Design Maglev Train Speed Tracking System Based on Improved Active Disturbance Rejection Controller[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(1): 310-320.

[4] 彭月, 苏芷玄, 杨杰, 等. 基于 PSO-BP-PID 单点混合悬浮球控制算法研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19 (6): 1511-1520.

Peng Yue, Su Zhixuan, Yang Jie, et al. On Hybrid Single-Point Magnetic Levitation Ball Control Algorithm Based on BP-PID[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(6): 1511-1520.

[5] 黄晓翠, 贾小平, 傅茂海, 等. 悬挂式单轨车辆悬吊系统横向刚度优化设计与验证 [J]. 机车电传动, 2022 (5): 9-16.

Huang Xiaocui, Jia Xiaoping, Fu Maohai, et al. Optimal Design and Verification of Lateral Stiffness of Suspension System for Suspended Monorail Train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2022(5): 9-16.

[6] 李靖, 刘诗文, 祝兵, 等. 风力作用下悬挂式单轨车辆-桥梁系统耦合振动仿真研究 [J]. 都市快轨交通, 2022, 35 (5): 104-110.

Li Jing, Liu Shiwen, Zhu Bing, et al. Simulation Research on Coupling Vibration of Suspended Monorail Vehicular-Bridge System Exposed to

Wind[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2022, 35(5): 104-110.

[7] 柴文浩, 杨雅勋, 张宇航, 等. 基于经验模态分解的预应力孔道缺陷信号分析 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2023, 59 (1): 129-135, 142.

Chai Wenhao, Yang Yaxun, Zhang Yuhang, et al. Analysis of Pre-Stressed Tendon Duct Signals Based on Empirical Modal Decomposition[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2023, 59(1): 129-135, 142.

[8] 杨友涛, 刘国祥, 刘成龙, 等. 高速铁路轨道不平顺参数多尺度相关性分析 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2019, 49 (2): 416-425.

Yang Youtao, Liu Guoxiang, Liu Chenglong, et al. Multi-Scale Correlation Analysis of Track Irregularities of High Speed Railway[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2019, 49(2): 416-425.

[9] 张晖, 鲁明明, 丁华平, 等. 基于经验模态分解法的桥梁应变信号降噪方法研究 [J]. 电子测量技术, 2016, 39 (10): 166-170.

Zhang Hui, Lu Mingming, Ding Huaping, et al. Research of De-Noiseing Method of Bridge Strain Signal Based on Empirical Mode Decomposition Method[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(10):166-170.

(上接 40页)

的应用和实践 [J]. 中国铁路, 2016 (5): 106-110.

Kong Lingxin. Application and Practice of Cloud Storage, Cloud Computing and New Video Technology in Railway[J]. China Railway, 2016(5): 106-110.

[7] 沈朝. 铁路高清视频监控系统的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.

[8] 王玉强. 铁路综合视频监控系统云存储的测试研究 [J]. 铁道通信信号, 2020, 56 (5): 55-58.

Wang Yuqiang. Test Study on Cloud Storage of Video Surveillance System for Railway[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56(5): 55-58.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2023.08.012

南京地铁5G公网智能应用探索及实践

杨勇¹, 孙舒淼¹, 王国华², 吴可²

(1. 南京地铁建设有限责任公司, 南京 210017;

2. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

摘要: 以南京地铁在5G方面的应用探索为出发点, 利用公网5G的高带宽低时延特性及资源隔离手段赋能轨道交通行业, 覆盖轨道交通全场景, 并创造性提出跨行业商业模式, 探索出一条适合城轨行业的绿色低碳发展之路, 取得数字化绿色化协同发展的明显成效, 推动城轨行业高质量可持续发展。

关键词: 南京地铁; 城市轨道交通; 5G公网

中图分类号: U285.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0059-07

Exploration of Intelligent Application of 5G Public Network Specialized in Nanjing Metro

Yang Yong¹, Sun Shumiao¹, Wang Guohua², Wu Ke²

(1. Nanjing Metro Construction Co., Ltd., Nanjing 210017, China)

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

Abstract: This paper takes the exploration of the application of 5G in Nanjing Metro as the starting point, makes use of the high bandwidth and low latency characteristics and resource isolation means of 5G on the public network to empower the urban rail transit industry, covers all the scenarios of rail transit, creatively proposes a cross-industry business model, explores a green and low-carbon development path suitable for the urban rail transit industry, and achieves noticeable results in the coordinated development of digitalization and greenization, promoting the high-quality sustainable development of the urban rail transit industry.

Keywords: Nanjing metro; urban rail transit; customized 5G public network

1 概述

城市轨道交通是城市运作的大动脉和展示城市形象的重要窗口, 无线通信系统作为城市轨道交通的重要子系统之一, 为地铁行车安全、提高运输效率和管理水平、改善服务质量提供重要保证。但随着城市轨道交通的发展及技术的进步, 无线通信系

收稿日期: 2023-03-22; 修回日期: 2023-08-07

基金项目: 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司科研项目(2300-G4220007.01)

第一作者: 杨勇(1983—), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向: 地铁通信, 邮箱: 164190380@qq.com。

统也面临着越来越多的问题和挑战，如无线制式繁多、独立建设、投资较高、各城市频点批复不一、频率干扰较多、带宽不足等问题；此外，随着云计算、大数据、物联网、人工智能等信息技术兴起，轨道交通行业也诞生了诸多智能及智慧应用，如智慧车站、车辆智能运维、车载设备智能运维、电扶梯智能运维、轨行区智能监测等，都对无线通信承载网络提出更高的要求，既有线通信系统已无法满足，亟需更高性能、更多样化的无线通信系统制式。

第五代移动通信技术（5th Generation Mobile Communication Technology, 5G）作为新基建7大领域之首，具备高速率、低时延和大连接的特点，是提供数字转型、智能升级、融合创新等服务的基础设施体系，可有效解决目前城市轨道交通遇到的问题和挑战，成为实现城市轨道交通数字化及绿色化的重要支撑。

在国家“双碳”及江苏省数字化绿色化协同转型发展的战略部署下，南京地铁积极探索城轨行业的发展方向，通过运营商5G网络，智慧赋能城市轨道交通各项业务，促进不同行业融合，有效推动数字化、绿色化协同发展。

2 南京地铁5G+轨道交通融合创新探索

自3GPP发布标准以来，5G技术迈出了飞速发展的步伐。截止目前，5G基站已基本覆盖全国地级以上城市，并逐步实现轨道交通线路及区间的全面覆盖。同时，在城市轨道交通领域，南京、石家庄、武汉、杭州等地均已开展基于5G公网的智慧化应用探索。5G网络可以提供新的连接通道，实现各类数据业务联接重塑，促进工业化和信息化的深度融合。

2.1 南京地铁5G+试验测试

基于以上分析及思考，南京地铁联合运营商、轨道交通产业链各单位，于2020年在马群车辆基地搭建了全国首个5G智慧轨道示范项目。项目利用中国联通3.5 GHz频谱，完成基于NSA&SA两种模式下的5G地铁专网建设。系统通过在信号楼、综合楼、列检库建设5G宏站，在室内建设数字化室分设备，在试车线1.2 km模拟隧道场景的3.5 GHz漏缆覆盖完成整个试验基地的5G网络建设，同时，在试车线设备室布放了5G MEC设备对接各业务测试平台，实现轨道交通数据业务SA本地实时处理。5G网络分布如图1所示。



图1 5G网络分布

Fig.1 5G network distribution

试验项目开展了全场景、多阶段、全业务、边缘云测试和应用部署，涵盖了轨道交通信号、车辆、通信、AFC、综合监控、电扶梯 6 大专业，开展了

多种 5G 切片方案的试验验证工作，验证公网 5G 对轨道交通业务的适应性。切片方案如图 2 所示。

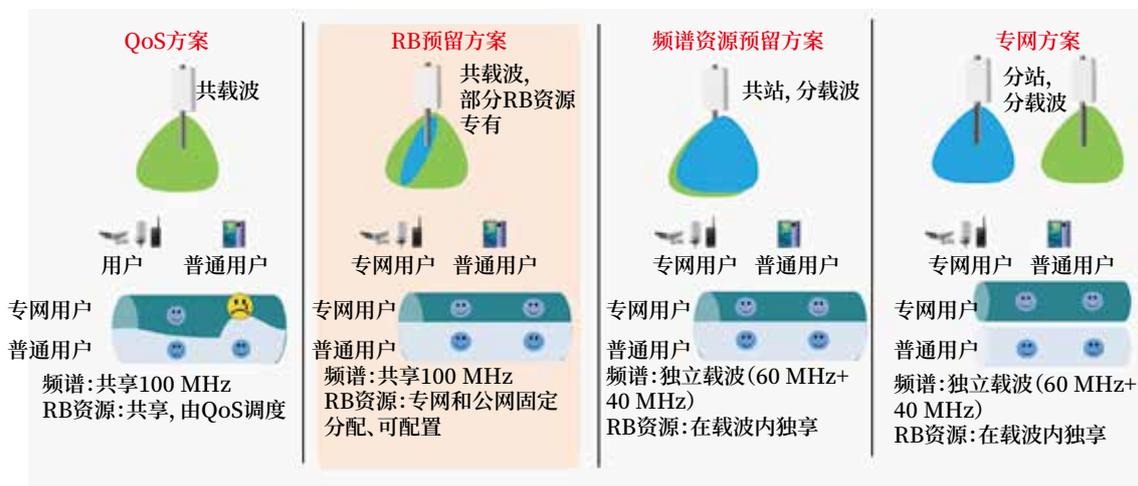


图2 5G切片方案

Fig.2 Solution for 5G network slicing

1) 软切片测试

软切片验证测试共有 6 大系统共十几个厂家参与，优先级共划分 4 个等级。测试场景分为车载静态或动态测试、轨旁设备或机房内测试，如

表 1 所示，车载场景当前所有业务并发状态下上行占用速率 57 Mbit/s，5G 小区上行总带宽能力达 200 Mbit/s。

表1 软切片测试场景

Tab.1 Test scenarios for soft slicing

厂家类别	厂家名称	业务类型	拟定 QCI	测试场景
信号	西门子	列控和紧急文本 (低时延)	3	静态 + 动车测试
信号	西门子	列车运行控制信息 (主 / 备)	6	静态 + 动车测试
车辆	株洲时代	列车控制业务数据 TCMS, 车门、空调、制动	7	静态 + 动车测试
车辆	阿尔斯通	列车控制业务数据 (主 / 备)	7	静态 + 动车测试
综合监控	南瑞	智慧车站综合管理系统	7	轨旁配电房独立测试, 联通加载
自动售检票	熊猫	交易数据处理、终端设备监控、系统运营管理 (3 种业务接在 1 张卡下, 交易数据处理要求级别最高)	7	综合北楼 3 楼独立测试, 联通加载
CCTV	视频 4 厂家	视频监控, 业务场景描述	7	轨旁独立测试, 联通加载
大数据	西门子	列车大数据平台	7	静态 + 动车测试
电扶梯设备	博华	电扶梯运营管理 (主 / 备)	8	设备房内独立测试, 联通加载

经过测试，优先级在速率保障方面效果非常明显，能保障优先级用户在重载条件下正常开展业务，达到预期目标，普通用户接入不会影响优先级用户的资源占用。

优先级 3 在时延方面可提供相对较好的保障，可为列控等时延敏感型业务提供可靠保障。

地铁业务上行带宽占用需求大，下行业务量小；而普通大网用户集中使用下行流量。当优先级用户抢占小区上行带宽的情况下，普通用户下载类业务基本不受影响，但会影响普通用户的大数据上传能力（如大文件上载、4K 高清视频直播等特殊人群的需求）。

2) 基于 RB 资源预留的硬切片测试

基于 RB 资源预留的硬切片测试是在 5G 专网上给地铁专网用户开辟一个专网切片，地铁所有业务走专用通道接入网络，经 MEC 转发至各业务子系统。

通过在硬切片环境下对静态业务及动车业务的测试，得出结论：公网负荷高低不影响专网服务性能，硬切片隔离能力达到预期效果。专网切片空闲状态下低时延业务可以获得优良的低时延特性，在重载下低时延能力有所下降，但相比软切片测试的时延要低。

2.2 南京地铁首创城市轨道交通5G公网

南京地铁通过马群试验测试，积累了大量实际数据及测试成果，经过多家单位梳理总结，以轨道交通 5G 公网行业白皮书的形式发布了相关成果。白皮书中首次提出 5G 公网概念，即基于运营商 5G 公网，通过资源隔离等技术手段，提供专属网络能力，承载轨道交通相关数据业务，覆盖轨道交通全场景，从而实现 5G 公网专用。

通过马群试验测试，还总结出以下两点结论，一是在 5G 公网基础上，仅需增加边缘计算设备，采用切片技术即可构建 5G 公网，承载城市轨道交通业务；二是 5G 公网具备承载轨道交通各专

用业务的能力，效果良好。

3 南京地铁5G公网应用部署方案

2021 年 12 月 28 日，首次搭载 5G 公网智能应用的宁句线工程顺利开通，南京地铁将前期理论及试验成果在工程线路落地，是对数字化绿色化智慧城轨转型发展的有力实践。5G 公网智能应用方案共享运营商 5G 承载网、接入网及核心网，在不自建无线网络系统的前提下，仅在轨道交通侧增加 MEC 设备，即可实现轨道交通智慧业务的传送及应用。

3.1 首创5G公网+MEC+专网应用的公网架构

宁句线工程构建 5G 公网+MEC+专网应用架构，是全国首个都市圈轨道交通 5G 公网应用架构如图 3 所示，首次在运营线路上对 5G 公网进行应用示范。

5G 公网无线信号覆盖范围包括两个车站及正线所有区间，在百水桥站通信设备室设置边缘计算 MEC 设备，通过光纤通道接入运营商地铁内有线网络，从而接入运营商 5G 网络，构建 5G 公网。5G

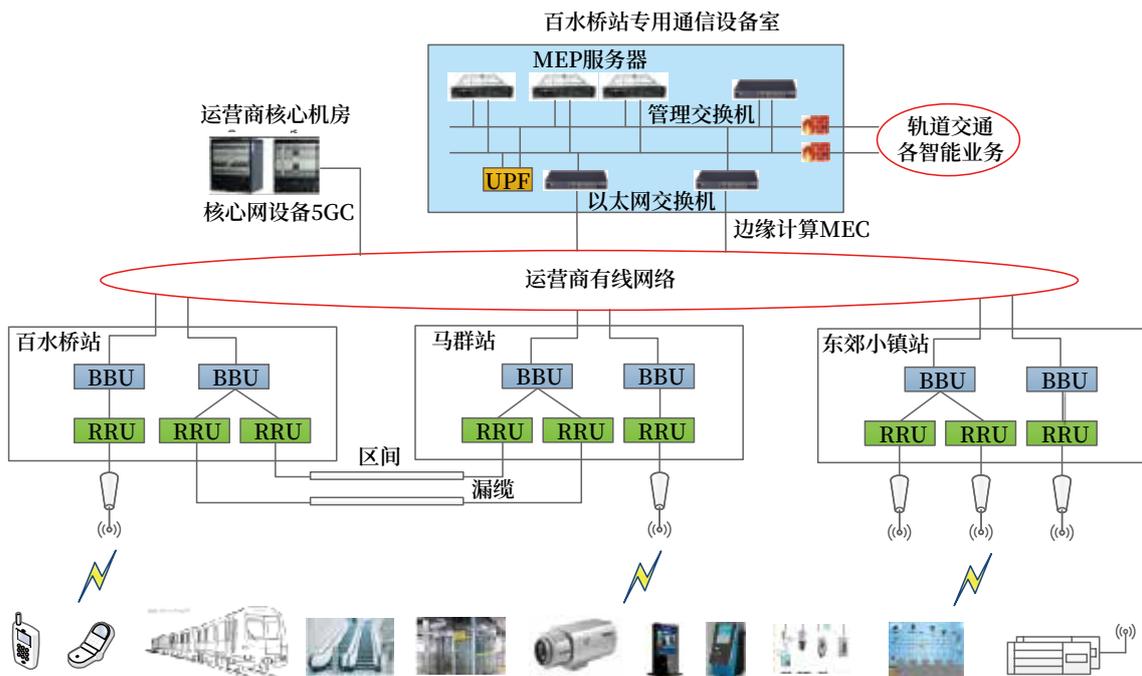


图3 宁句线5G公网网络构架示意

Fig.3 The network architecture for the customized 5G public network of Nanjing Metro Line S6

公网在正线区间（含高架）承载车地无线数据业务，在车站区间承载固定终端的数据业务，轨道交通内

各业务系统通过防火墙与 MEC 设备连接，实现各业务系统的数据落地，具体业务流向如图 4 所示。

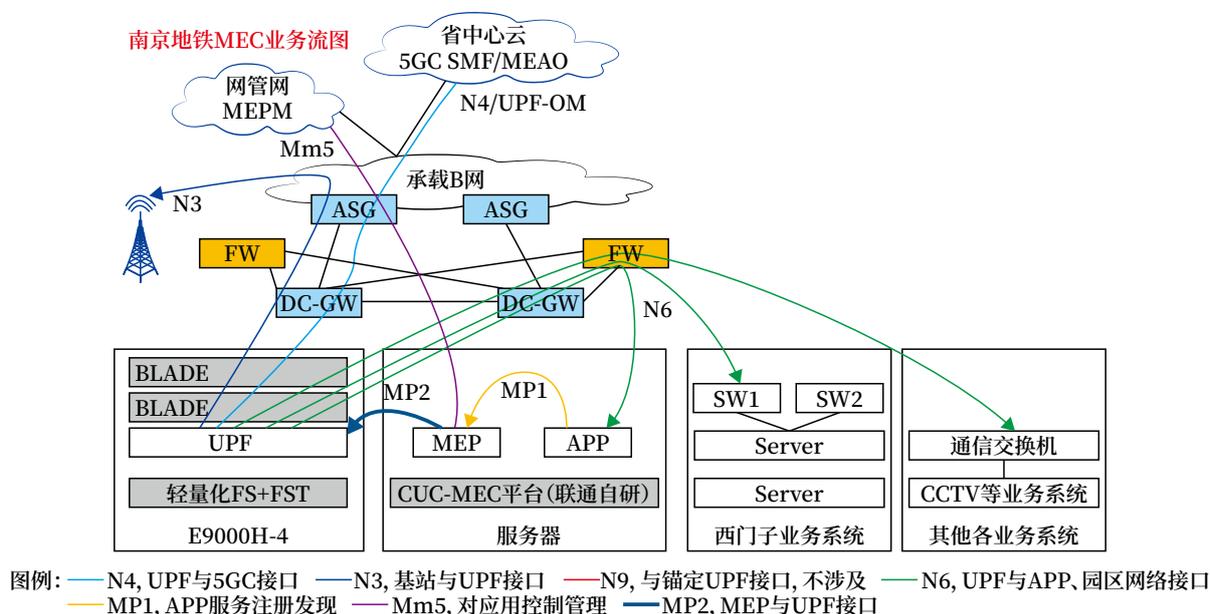


图4 5G+MEC地铁业务流向
Fig.4 5G+MEC metro service flows

3.2 5G公网覆盖方案

根据宁句线示范工程智能应用的实际需求，5G公网覆盖分为室内和区间两部分。室内覆盖站厅、站台等公共区域，包括站厅公共区、站台公共区、出/入口通道等处，区间覆盖所有正线轨行区。

3.2.1 室内5G公网覆盖方案

根据宁句线示范工程智能应用的实际需求，5G公网需要覆盖包括站厅、站台公共区及出/入口通道等处。5G公网采用BBU+PHUB+PRRU对车站公共区进行全覆盖，信源设备均设置在民用通信设备室。

车站站厅站台5G覆盖质量指标及时延指标如表2所示。

3.2.2 区间5G公网覆盖方案

地下区间5G公网覆盖方案：地下区间统一

采用1-1/4泄漏同轴电缆进行覆盖，隧道内采用4T4R方案，百水桥站和马群站轨行区、以及马群站折返线区域采用2T2R方案。

区间过渡段5G公网覆盖方案：在铁塔上新增5G AAU设备实现5G公网覆盖。新设5G设备利用联通公司提供的光缆接入宁句线民用通信传输网，业务数据回传至百水桥站MEC设备。

区间5G覆盖质量指标及时延指标如表3、4所示。

3.3 业务承载落地方案及效果

宁句线5G公网承载6大系统业务，包括信号系统、车辆系统、电扶梯系统、自动售检票（AFC）系统、综合监控系统及通信系统，首批接入的5G终端数量近50台，每月产生流量11TB。

表2 车站5G覆盖质量指标及时延指标

Tab.2 The quality indicators and time delay indicators for 5G coverage at stations

测试点	平均RSRP/dBm	平均SINR/dB	平均下行/(M/(bit/s))	平均上行/(M/(bit/s))	时延(连续发包)/ms		
					平均	最大	最小
百水桥站厅	-78.11	21.07	756	228	16.91	23	14
百水桥站台	-76.83	19.13	756	228	17	25	14

表3 区间5G覆盖质量指标

Tab.3 The quality indicators for 5G coverage on sections

测试区间	平均 RSRP/dBm	SS-RSRP \geq -90 dBm 的概率/%	平均 SINR/dB	SS-SINR \geq 5 dB 的概率/%
马群→白水桥	-78.46	96.1	15.76	99.62
白水桥→马群	-73.42	94	18.47	99.73

表4 区间5G覆盖时延指标

Tab.4 The delay indicators for 5G coverage on sections

测试区间	帧长/Byte	时延 (连续发包) /ms			丢包率/%
		平均	最大	最小	
马群→白水桥	64	9.96	17	6	0
	256	9.93	17	6	0
	1 280	12.19	21	8	0
白水桥→马群	64	9.83	17	6	0
	256	10.02	19	6	0
	1 280	12.4	22	8	0

3.3.1 信号系统

信号专业在列车上设置 5G TAU 设备 (区分红蓝网), 利用 5G 公专网将车载控制单元 (OBCU) 和车辆段调度 (DCM) 数据传输至控制中心信号系统进行数据分析处理, 并在 NCC 大屏上进行可视化展示。

5G 公专网的建设实现了信号车载数据的实时回传, 数据经系统分析处理, 可实时进行雷达异常 (测速)、模块故障 (停车)、车轮磨损程度、电机、停车位位置矫正等故障排查, 助力地铁运营及时发现列车运行故障隐患, 缩短故障恢复时间, 节省人工拷贝成本。

3.3.2 车辆系统

利用信号专业列车至控制中心的有线网络和 5G 公专网, 将车辆专业 RST 数据传输到控制中心云平台内列车智能运维系统中, 并在 NCC 大屏上进行展示。

5G 公专网的低时延特性为车辆运行状态监测业务传输时延提供保障, 确保车辆运行状态监测业务不中断, 5G 传输时延不超过 100 ms 的概率不小于 99%, 确保数据传输安全可靠。

3.3.3 通信系统

通信系统设置自带 5G 接入模块的高清摄像机, 利用 5G 公专网将摄像机视频传输至车站视频监控系

统平台中, 实现各视频监控终端对 5G 摄像机图像的调看, 利用既有数据通道接入 NCC 平台, 在 NCC 大屏上显示监控图像。

利用 5G 公专网助力通信系统实现应急指挥、调度、线路运营、应急和维护等需要的视频和管理等业务。5G 公专网可保障视频融合调度业务系统可靠性不低于 99.9%, 传输时延不超过 150 ms 的概率不小于 99%。

3.3.4 综合监控系统

综合监控系统在白水桥区间设备及过渡段安防设备上设置 5G CPE 设备, 接入 5G 公专网, 采集综合监控专业区间设备及工况数据、过渡段安防监控数据、安防设备状态及报警情况, 将数据预处理后传输至控制中心云平台综合监控系统中, 并在 NCC 大屏上进行展示。经过实际验证, 隧道摄像头、传感器信号数据实时上传至控制中心运营系统, 效果良好。

3.3.5 电扶梯监测诊断系统

利用电扶梯侧设置的 5G CPE 设备, 将电扶梯监测诊断数据接入 5G 公专网, 并传输至控制中心云平台电扶梯监测诊断系统中, 在 NCC 大屏上进行展示。

5G 公专网的大带宽特性满足自动扶梯监测诊断业务的实时上传需求, 5G 公专网保障其系统丢包率不超过 1%, 每部电扶梯传输速率上行不小于 3 Mbit/s。

3.3.6 AFC

在 AFC 系统的查询机和补票机上增加 5G CPE 设备, 利用 5G 公专网, 将查询机和补票机数据传输至控制中心云平台 AFC SC 系统中, 并在 NCC 大屏上进行展示。

AFC 业务包括终端设备、系统运营管理和交易数据处理等环节。5G 公专网可保证 AFC 业务系统可靠性不低于 99.9%, 传输时延不超过 100 ms 的概率不小于 99%, 终端设备监控及系统运营管理环节丢包率不超过 1%, 交易数据处理系统丢包率不超过 0.1%。

4 总结

南京地铁通过宁句线 5G 公专网智能应用, 取

得以下成效：一是 5G 公专网关键指标达到预期效果；二是 5G 公专网车地回传时延和带宽达到预期效果；三是 5G 网络切片技术可保障轨道交通业务优先使用，满足城市轨道交通业务各项性能要求。

南京地铁 5G 公专网从行业合作、共建共享、资源共用、节省投资等多方面出发，有效提升 5G 资源利用率，充分响应了国家低碳绿色发展要求，大大降低了建设成本、运营成本和改造成本；同时 5G 公专网结合云数融合平台及新一代信号系统，共同打造数字化、绿色化协同转型发展精品工程，为轨道交通绿色持续发展提供了解决方案。

5 展望

南京地铁对 5G 技术的探索实践只是 5G 技术在城市轨道交通应用的一小部分，未来还有更多的智能应用有待进一步挖掘。南京地铁始创的 5G 网络架构、独创的行业白皮书、开创的商业合作模式，已逐步形成全国示范性，目前已在多个城市轨道交通行业中进行不同程度的应用探索，正在引领轨道交通行业加速向数字化、网络化、智慧化的方向转型，推动智慧城轨建设，并有力促进不同行业的融合创新和资源共享，推进经济高质量发展。

目前，南京地铁正在与中国城市轨道交通协会、各设计院及设备厂商共同编制城市轨道交通 5G 公专网系列团体标准，作为南京都市圈智慧市域快轨示范工程的主要成果，编制完成后将进一步推动《中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要》《中国城市轨道交通绿色城轨发展行动方案》快速向前，引领智慧城轨及绿色城轨发展潮流。

参考文献

- [1] 裴顺鑫, 孙舒淼. 5G+ 南京地铁创新探索 [J]. 城市轨道交通, 2020(9): 24-27.
Pei Shunxin, Sun Shumiao. Exploration on Innovation of 5G+ Nanjing Metro[J]. China Metros, 2020(9): 24-27.
- [2] 何涛, 党选丽. 城市轨道交通 5G 公专网建设思路探讨 [J]. 现代城市轨道交通, 2021(12): 85-90.
- [3] 李辉, 张新波. 公专融合 5G 车地无线通信系统 [J]. 光通信研究, 2021(3): 72-78.
Li Hui, Zhang Xinbo. Wireless Communication System of 5G Vehicle and Ground Fused by Public and Private Network[J]. Study on Optical Communications, 2021(3): 72-78.
- [4] 杨琪, 冯敬然, 周敏, 等. 城市轨道交通 5G 公专网融合组网方案研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(7): 63-69.
Yang Qi, Feng Jingran, Zhou Min, et al. Research on 5G Public-Private Network Convergence Scheme for Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(7): 63-69.
- [5] 高义标. 5G 承载城轨车-地综合通信的方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(9): 69-72, 100.
Gao Yibiao. Research on Scheme of 5G Carrying Integrated Vehicle-Ground Communication for Urban Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(9): 69-72, 100.
- [6] 张博, 余晓君, 卫建芳, 等. 城市轨道交通 5G 虚拟专网建设方案研究 [J]. 电子技术应用, 2021, 47(5): 19-24.
Zhang Bo, Yu Xiaojun, Wei Jianfang, et al. Research on Construction Scheme Of Virtual 5G Private Network for Urban Rail Transit[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(5): 19-24.
- [7] 景亮, 赵程, 燕玲, 等. 基于 5G 通信的智慧地铁运营模式设计 [J]. 现代城市轨道交通, 2021(6): 76-80.
Jing Liang, Zhao Cheng, Yan Ling, et al. Design of Intelligent Metro Operation Mode based on 5G Communication[J]. China Metros, 2021(6): 76-80.

曲线钢轨打磨质量与地铁运行振动响应的 相关性分析

李现鹏¹, 白磊², 吕金桐¹, 丁明², 李擎³

(1. 郑州地铁集团有限公司运营分公司, 郑州 450046;

2. 北京九州一轨环境科技股份有限公司, 北京 100070;

3. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070)

摘要: 地铁曲线钢轨打磨可有效降低车厢横向、垂向振动加速度, 提升车辆运行平稳性。提出基于车辆运行平稳性的振动响应指数, 衡量车体经过曲线的振动响应程度, 评价曲线设备质量。为综合评定钢轨打磨作业质量的即时效果、保持效果, 提出钢轨打磨作业改善系数。在此基础上, 研究建立曲线钢轨打磨质量与地铁运行振动响应的相关性分析模型。选取郑州地铁1号线的实际数据对提出模型的有效性进行验证, 计算结果表明, 该模型可以有效分析地铁运行振动响应与钢轨打磨作业质量的相关性, 对指导运维生产具有重要作用。

关键词: 地铁; 曲线钢轨打磨; 车辆运行平稳性; 维修质量; 相关性分析; 改善系数

中图分类号: U211.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0066-06

Correlation Analysis Between Quality of Curve Rail Grinding Operations and Metro Vehicle Body Vibration Response

Li Xianpeng¹, Bai Lei², Lü Jintong¹, Ding Ming², Li Qing³

(1. Operating Branch, Zhengzhou Metro Group Co., Ltd., Zhengzhou 450046, China;

2. Beijing Jiuzhouyigui Environmental Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China;

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

Abstract: Curve rail grinding for metros can effectively reduce the lateral and vertical vibration acceleration of the vehicle, thereby improving the running stability of vehicles. Using the running stability measurement of vehicles, the paper proposes a vibration evaluation index to evaluate the vibration response degree of the vehicle body passing through a curve and to assess the quality of the

收稿日期: 2023-03-03; 修回日期: 2023-08-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4300500); 国家自然科学基金项目(62132003); 郑州地铁集团有限公司运营分公司科研项目(ZGYY-10TFY-D21065); 甘肃省科技计划项目(22CX8JA142)

第一作者: 李现鹏(1987—), 男, 工程师, 本科, 主要研究方向: 城市轨道交通, 邮箱: lixianpeng@zzmetro.cn.

curve equipment. To comprehensively evaluate the immediate effect and the ongoing effect of the maintenance quality, a recovery coefficient of the rail grinding operation is proposed. Furthermore, a correlation analysis model between vehicle body vibration response and the quality of the curve rail grinding operation is established. The actual data of Zhengzhou Metro Line 1 is used to verify the proposed model. The calculation results show that the model can effectively analyze the correlation between the vehicle body vibration response and the quality of rail grinding operations, and play a major role in guiding the track maintenance.

Keywords: urban rail transit; curve rail grinding; running stability of vehicles; maintenance quality; correlation analysis; recovery coefficient

地铁运营时间增加以及新建线路投入运营后, 乘客对地铁运行的安全性、舒适性要求的日益提高。曲线钢轨打磨有助于改善轮轨接触关系, 提升车辆运行平稳性, 同时消除钢轨既有病害, 减缓钢轨病害发展, 延长钢轨使用寿命。研究分析曲线钢轨打磨质量与地铁运行振动响应的相关性, 对优化曲线钢轨打磨方案、提升曲线钢轨打磨作业质量具有重要意义。

目前, 根据《城市轨道交通设施运营监测与评价方法第4部分: 轨道和路基》(GB/T 39559.4-2020)^[1], 一般从轨道不平顺、曲线圆顺性和曲线磨耗等维度, 评价曲线质量的好坏。郑州地铁《线路检修规程》^[2]规定, 采用分波长谷深值超限百分率, 评价曲线钢轨波磨状态。波长范围划分为10~30 mm、30~100 mm、100~300 mm、300~1 000 mm, 如10~30 mm波长范围的谷深值阈值是0.2 mm, 超限百分率的阈值是50%。文献[3]提出可采用通过曲线时的车辆振动与噪声响应数据, 采用加权计数综合评定曲线质量状态。文献[4-5]提出采用累计失效概率, 从可靠性角度评价曲线质量。

根据北京市轨道交通建设管理有限公司企标《城市轨道交通钢轨预防性修理性打磨及验收标准》, 钢轨打磨的验收项目包括: 打磨深度、打磨面粗糙度、打磨廓形、表面硬度、分波长谷深值的超限百分率等。如钢轨表面不平顺最大谷深小于0.2 mm、打磨面粗糙度应不大于10 μm 。文献[6]基于钢轨

打磨前后的轨道不平顺状态及钢轨、道床、隧道壁振动加速度数据, 采用时域、频域的对比分析方法, 评估钢轨打磨效果。文献[7]通过定量化对比措施实施前后的钢轨、道床、隧道壁振动数据, 评估钢轨打磨等的整治效果。文献[8]采用钢轨、轨道板振动位移与加速度峰值的变化, 评价钢轨打磨质量。

曲线钢轨打磨作业会影响即时的曲线设备质量, 以及曲线设备状态劣化快慢。上述研究选取的指标改善量仅能说明打磨作业的即时效果, 并不能全面反映打磨作业的维修质量。

本文创新提出钢轨打磨作业改善系数, 评定钢轨打磨作业的即时效果与保持效果, 全面反映钢轨打磨作业改善效果与维修质量。利用车辆运行平稳性检测数据, 建立振动响应指数, 衡量地铁运行振动响应程度。以单个曲线为研究对象, 提出地铁运行振动响应指数与曲线钢轨打磨作业改善系数的相关性分析方法, 并根据郑州地铁1号线实际数据, 进行实例分析研究。

1 相关性分析

以单个曲线设备为研究对象, 采集钢轨打磨作业前后的振动响应指数、钢轨打磨改善系数, 研究振动响应指数与钢轨打磨改善系数的相关性, 分析振动响应指数各单项指标与钢轨打磨作业质量的相关关系。

1.1 振动响应指数

1) 运行平稳性均值

依据新版《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》^[9], 车辆运行平稳性指标 (5 s 计权) 的计算方法, 如公式 (1)、(2) 所示。该指标值越大, 运行平稳性越差, 具体管理阈值见文献 [9]。

$$w_h = 7.08 \times \sqrt[10]{\frac{a_h^3}{f} F(f)} \quad (1)$$

$$w_v = 7.08 \times \sqrt[10]{\frac{a_v^3}{f} F(f)} \quad (2)$$

公式中, w_h 表示横向平稳性指标; w_v 表示垂向运行平稳性; a_h 表示车厢横向振动加速度; a_v 表示车厢垂向振动加速度; f 表示振动频率; $F(f)$ 表示频率修正系数, 详见文献 [9]。

采用运行平稳性的均值, 描述车厢在经过曲线时的整体振动响应情况, 如公式 (3)、(4) 所示。

$$e_h = \frac{1}{L} \int_0^L w_h(x) dx \quad (3)$$

$$e_v = \frac{1}{L} \int_0^L w_v(x) dx \quad (4)$$

公式中, e_h 表示横向运行平稳性均值; e_v 表示垂向运行平均性均值; L 表示曲线全长。

2) 振动响应指数

为综合评价电客车在行驶曲线过程中的振动响应, 提出振动响应指数 (Vibration Evaluation Index, VEI), 其计算如公式 (5) 所示。公式中 α 、 β 的赋值可根据实际情况确定。 α 、 β 的取值范围如公式 (6)、(7) 所示。VEI 数值越大, 说明相应曲线的整体质量越差。

$$k = \alpha e_h + \beta e_v \quad (5)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (6)$$

$$0 < \alpha, \beta < 1 \quad (7)$$

1.2 钢轨打磨作业改善系数

为评价钢轨打磨作业维修质量, 根据钢轨打磨前后的振动响应指数 VEI, 本文提出钢轨打磨作业改善系数 η 。钢轨打磨作业改善系数 η 由改善量 ω 、发展速率 θ 两部分组成, 其计算如公式 (8) 所示。其中, 改善量 ω 用来描述钢轨打磨作业的即时效果, 其计算如公式 (9) 所示。发展速率 θ 用来描述钢轨打磨作业对曲线设备状态劣化快慢的影响, 评

价钢轨打磨作业的持续效果, 其计算见公式 (10)。发展速率 θ 越小, 表明打磨作业持续效果越好。 p_1 表示改善量 ω 的权重系数, p_2 表示发展速率 θ 的权重系数。 p_1 、 p_2 的取值范围如公式 (11)、(12) 所示。 p_1 、 p_2 的赋值取决于由地铁运维工程师对 ω 、 θ 的侧重情况。

$$\eta = p_1 \omega + p_2 \theta \quad (8)$$

$$\omega = k_1 - k_2 \quad (9)$$

$$\theta = (k_3 - k_2)/(t_3 - t_2) \quad (10)$$

$$p_1 + p_2 = 1 \quad (11)$$

$$0 < p_1, p_2 < 1 \quad (12)$$

打磨前最后 1 次曲线质量状态, 用打磨前的振动响应指数 k_1 描述。打磨后首次曲线质量状态, 用打磨后第 1 次检测的振动响应指数 k_2 描述。打磨后第 2 次曲线质量状态, 用第 2 次检测的振动响应指数 k_3 描述。 k_1 、 k_2 、 k_3 之间的关系如图 1 所示。改善系数 η 可体现打磨作业对即时的曲线质量和曲线状态劣化率的综合效果, 改善系数越大说明打磨作业质量越好。

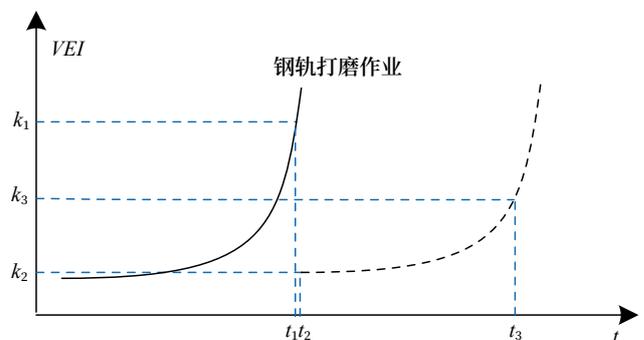


图1 k_1, k_2, k_3 关系
Fig.1 Relationship among k_1, k_2 and k_3

1.3 相关性分析模型

以单个曲线为研究对象, 根据钢轨打磨作业数据与相应的 VEI 数据, 可建立曲线设备的打磨前振动响应指数 VEI 中单项指标与打磨作业改善系数的一一对应关系, 在此基础上建立 VEI 中各单项指标 e_h 、 e_v 与钢轨打磨作业质量 η 的相关性分析模型。

为衡量振动响应指数 VEI 中单项指标 e_h 、 e_v 与钢轨打磨作业改善系数 η 的相关性, 本文采用皮尔

逊相关系数的计算方法,如公式(13)所示。

$$\rho_{i,\eta} = \rho(i,\eta) = \frac{\text{cov}(i,\eta)}{\sigma_i\sigma_\eta} \quad (13)$$

公式中, i 表示打磨前 VEI 中的单项指标, $i \in (e_h, e_v)$ 。 $\rho_{i,\eta}$ 表示打磨前 VEI 中单项指标 i 与相应改善系数 η 之间的相关系数。 $\text{cov}(i,\eta)$ 表示 VEI 中的单项指标 i 与 η 的协方差, σ_i 、 σ_η 表示 VEI 中的单项指标 i 、 η 的标准差。

$|\rho_{i,\eta}|$ 数值越接近1,表示单项指标 i 和改善系数 η 之间的相关性越高; $|\rho_{i,\eta}|$ 越接近0,表示相关性越低; $\rho_{i,\eta} > 0$,表示单项指标 i 和改善系数 η 为正相关,即说明打磨作业改善系数 η 与单项指标 i 具有同时增加或同时减少的倾向; $\rho_{i,\eta} < 0$ 表示单项指标 i 和改善系数 η 为负相关; $\rho_{i,\eta} = 0$ 表示量单项指标 i 和改善系数 η 间不存在相关性。

通过对比 VEI 中的不同单项指标 e_h 、 e_v 和改善系数 η 之间的相关系数 $\rho_{i,\eta}$ 的相对大小,可衡量 e_h 、 e_v 和改善系数 η 之间的相关程度的相对高低,筛选

出与打磨作业质量紧密相关的单项指标 i ,可将与打磨作业质量有较高正相关性的单项指标 i 作为打磨作业决策依据。

2 实例分析

以采集到的郑州地铁1号线实际数据为例,分析曲线钢轨打磨质量与地铁运行振动响应的相关性。

2.1 实例背景

郑州地铁1号线运营里程为41.2 km,共设30座车站,全部为地下线,一期工程的开通运营时间是2013年12月28日。选取00137次电客车2021年5月20日、2022年3月3日、2022年8月18日线路质量智能检测仪的检测数据进行对比。00137次电客车在上述期间内未开展镟轮、大修作业。00137次电客车在2021年5月20日、2022年3月3日和2022年8月18日,1号线下行的车厢横向振动加速度波形对比如图2所示。

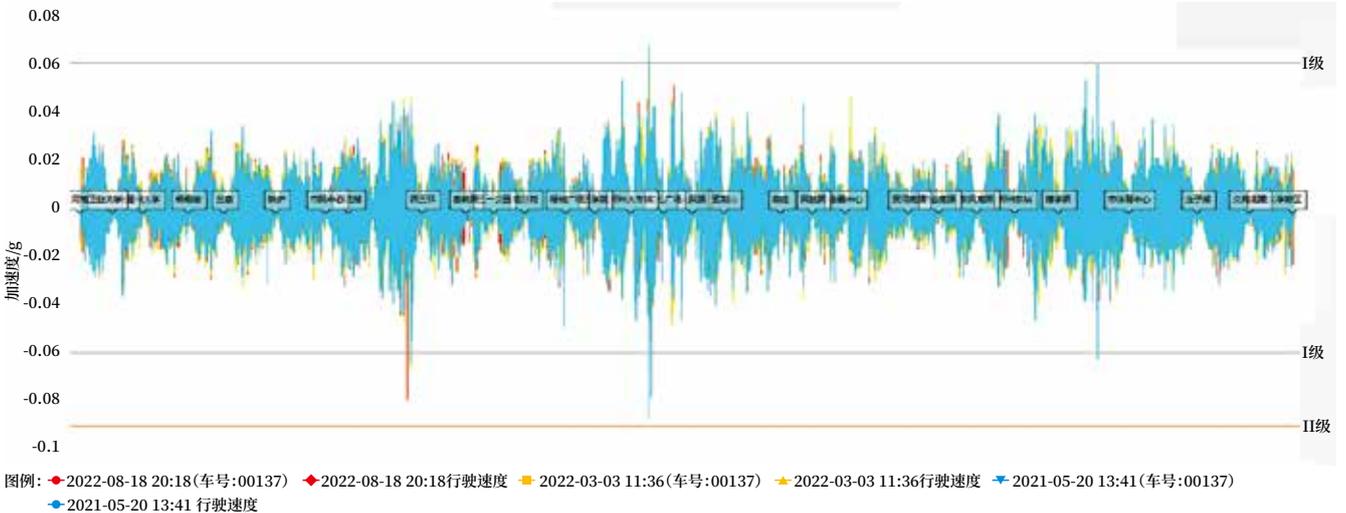


图2 00137次电客车郑州地铁1号线下行车厢横向振动加速度波形对比
Fig.2 Comparison of the waveforms of horizontal vibration acceleration of the vehicle body of Electric Passenger Train No.00137 in the down direction of Zhengzhou Metro Line 1

2021年5月20日至2022年3月3日间郑州地铁1号线下行的打磨作业记录,如表1所示。

2.2 结果分析

2.2.1 改善系数的计算

根据上文的计算方法,权重系数 $\alpha = 0.5$ 、 $\beta = 0.5$, $p_1 = 0.5$, $p_2 = 0.5$ 。上述6条曲线钢轨打磨

后的计算的改善量、发展速率、改善系数,如表2所示。

表2中所有曲线钢轨打磨后的改善量均大于0,这表明钢轨打磨可以很好地降低曲线地段车体横向、垂向振动加速度,提升车辆运行平稳性。以郑州火车站-二七广场区间下行的K18+052-K18+315曲

表1 郑州地铁1号线历史打磨记录

Tab.1 Historical grinding records of Zhengzhou Metro Line 1

序号	区间	开始里程 / km	结束里程 / km	打磨日期
1	郑州火车站 - 二七广场	18.052	18.316	2022.02.14
2	郑州火车站 - 二七广场	18.921	19.024	2022.02.14
3	紫荆山 - 燕庄	22.553	22.742	2021.11.01
4	紫荆山 - 燕庄	22.772	23.243	2021.11.01
5	黄河南路 - 农业南路	28.154	28.300	2021.10.13
6	博学路 - 市体育中心	34.872	34.978	2021.10.13

表2 郑州地铁1号线曲线钢轨打磨的改善系数

Tab.2 Recovery coefficient of curve rail grinding operations on Zhengzhou Metro Line 1

序号	区间	开始里程 / km	结束里程 / km	改善量 ω	发展速率 θ	改善系数 η
1	郑州火车站 - 二七广场	18.052	18.316	0.101 4	0.007 6	0.054 5
2	郑州火车站 - 二七广场	18.921	19.024	0.195 0	0.027 2	0.111 1
3	紫荆山 - 燕庄	22.553	22.742	0.054 8	0.010 8	0.032 8
4	紫荆山 - 燕庄	22.772	23.243	0.047 7	0.011 8	0.029 8
5	黄河南路 - 农业南路	28.154	28.300	0.074 5	0.012 3	0.043 4
6	博学路 - 市体育中心	34.872	34.978	0.048 3	0.002 2	0.025 3

线设备为例, 2022年2月14打磨后的改善量 ω 为0.1014。00137次电客车在该钢轨打磨前后的两次车厢横向振动加速度波形对比如图3所示, 图3中黄色曲线为2021年5月20日车厢横向振动加速度曲线, 红色曲线为2022年3月3日车厢横向振动加速度曲线, 从图3中可明显看出该区段经过曲线钢轨打磨, 相同里程点的横向振动加速度幅值明显下降。

2.2.2 相关分析

根据表2中的计算结果, 1号线振动响应指数中单项指标与曲线钢轨打磨作业改善系数的相关系数 $\rho_{i,\eta}$, 如表3所示。从表3中可看出, e_h 、 e_v 与改善系数 η 正相关, 相应的相关系数分别为0.206、0.092, 打磨作业改善系数 η 与 e_h 、 e_v 具有同时增加或同时减少的倾向, 且 e_h 与改善系数 η 的正相关程度相对最高。此外, e_h 与 e_v 的相关系数为0.882, 这说明横向运行平稳性, 与垂向运行平稳性显著正相关。

3 结束语

基于车辆运行平稳性, 以单个曲线为研究对象, 提出了曲线的振动响应综合评定指标, 评定曲线质量状态。

以单个曲线为研究对象, 采用打磨前振动响应指标VEI和打磨作业改善系数的历史数据, 提出了地铁运行振动响应与曲线钢轨打磨作业质量的相关性分析方法。

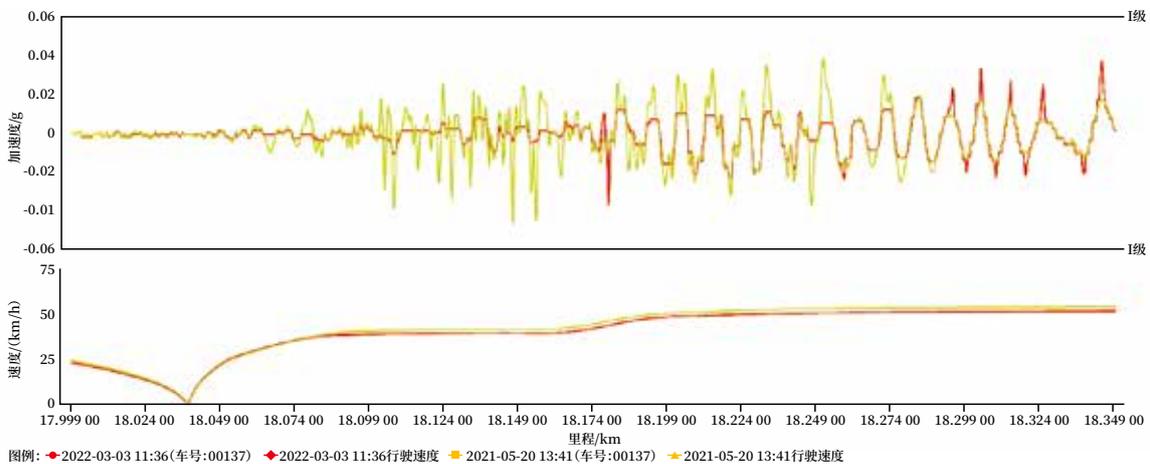


图3 00137次电客车车厢横向振动加速度波形对比

Fig.3 Comparison of the waveforms of horizontal vibration acceleration of the vehicle body of Electric Passenger Train No.00137

表3 振动响应指数中单项指标与钢轨打磨作业改善系数的相关系数

Tab.3 The correlation coefficient between individual indicators in the vibration evaluation index and the recovery coefficient of rail grinding operations

相关系数 ρ		指标		
		e_h	e_v	η
指标	e_h	1.000	0.882	0.206
	e_v	0.882	1.000	0.092
	η	0.206	0.092	1.000

采用郑州地铁1号线的实际数据,验证了提出的相关性分析模型的有效性,对提高打磨作业维修质量有指导作用。实例中钢轨打磨可以很好降低曲线地段车体垂向、横向振动加速度,横向运行平稳性均值与改善系数的正相关程度相对最高。

下一步将采集更全面的现场数据,研究曲线钢轨打磨作业方案与进度计划的优化编制,实现维修资源的合理分配与高效利用。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.城市轨道交通设施运营监测技术规范 第4部分:轨道和路基:GB/T 39559.4-2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [2] 郑州地铁集团有限公司运营分公司.线路检修规程(A/5):Q/ZDYY-SC-GJ-JG-01-2022[S].郑州:郑州地铁集团有限公司运营分公司,2022.
- [3] 时光明,白磊,高培正,等.基于车体振动与噪声响应的城市轨道交通线路曲线健康状态评定模型[J].城市轨道交通研究,2022,25(1):70-74.
Shi Guangming, Bai Lei, Gao Peizheng, et al. Urban Rail Transit Curve Health Condition Evaluation Model Based on Vehicle Body Vibration and Noise Response[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(1): 70-74.
- [4] Bai Wenfei, Sun Quanxin, Wang Futian, et al. A Segmental Evaluation Model for Determining Residual Rail Service Life Based on a Discrete-State Conditional Probabilistic Method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 2019, 233(2): 211-225.
- [5] Bai Lei, Liu Rengkui, Wang Feng, et al. Estimating Railway Rail Service Life: a Rail-Grid-Based Approach[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2017, 105: 54-65.
- [6] 张伯林,张宏亮,辛涛,等.城市轨道交通钢轨打磨措施的减振效果测试研究[J].现代城市轨道交通,2021(5):52-56.
Zhang Bolin, Zhang Hongliang, Xin Tao, et al. Test and Research on Vibration Control Effect of Rail Grinding Measures in Urban Rail Transit[J]. Modern Urban Transit, 2021(5): 52-56.
- [7] 余才高,张伯林,刘铁旭,等.南京地铁1号线珠江路站振动及二次结构噪声整治研究[J].都市轨道交通,2021,34(4):113-118.
She Caigao, Zhang Bolin, Liu Tiexu, et al. Vibration and Secondary Structure Noise Control of Zhujiang Road Station of Nanjing Metro Line 1[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(4): 113-118.
- [8] 肖乾,高雪山,昌超.钢轨打磨处理对轮轨型面匹配及轨道振动响应特征影响[J].铁道学报,2021,43(2):125-133.
Xiao Qian, Gao Xueshan, Chang Chao. Influence of Rail Grinding on Wheel-Rail Profile Matching and Track Vibration Response Characteristics[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(2): 125-133.
- [9] 中华人民共和国国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范:GB/T 5599-2019[S].北京:中国标准出版社,2019.

齿轨列车齿轨轮轨切换车载ATP控制研究

刘浚锋^{1, 2}, 蒋彪³, 王成^{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;
3. 湖南轨道交通控股集团有限公司, 长沙 410000)

摘要: 介绍山地齿轨列车的特点以及在国内起步的状况, 分析信号系统在齿轨列车安全控制的特殊性。着重对山地齿轨列车“入齿”和“出齿”过程中信号系统的控制策略进行描述, 并对齿轨列车在齿轨区和轮轨区进行切换运营时信号系统安全防护曲线的计算进行分析和论述, 提出停车切换和动态切换的方法。

关键词: 齿轨列车; 入齿控制; 出齿控制; ATP曲线计算

中图分类号: U284.48

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0072-06

Research on On-board ATP Control of Gear Rail and Wheel Rail Switching of Rack Railway Trains

Liu Junfeng^{1, 2}, Jiang Biao³, Wang Cheng^{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)
- (3. Hunan Rail Transit Holding Group Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: This paper introduces the characteristics of mountain rack railway trains and their starting status in China. The particularities of the signal system in the safety control of the rack railway trains are analyzed. The control strategy of the signal system in the process of "gear in" and "gear out" of the mountain rack railway trains is described emphatically. It also analyzes and discusses the calculation of safety protection curves of signal system when a rack railway train switches between the gear rail area and the wheel rail area. The methods of stationary-train switching and dynamic switching are proposed.

Keywords: rack railway train; "gear in" control; "gear out" control; ATP curve calculation

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2023-06-13

基金项目: 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司科研项目(2300-K1200045.03)

第一作者: 刘浚锋(1976—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 城市轨道交通信号系统控制, 邮箱: liujunfeng@cscd.com.cn.

齿轨铁路(Rack Railway)亦称Cog Railway, 是一种采用齿轮齿轨驱动或齿轮齿轨+钢轮钢轨驱动的交通形式, 其主要特点是在轨道中间铺设有一条特殊的齿条, 列车转向架中部装有驱动齿轮, 在坡道区域驱动齿轮与地面上的齿轨啮合。齿轨车辆

可克服黏着力不足的问题，具有较强的爬坡能力。

齿轨铁路通常采用 1 000 mm 轨距。为提高齿轨铁路运行速度、满足长大距离建设齿轨铁路的需要，通常采用齿轮齿轨+钢轮钢轨驱动的模式，坡度 $\geq 40\text{‰}$ 时采用齿轨驱动，坡度 $< 40\text{‰}$ 时采用钢轮钢轨驱动。最高运行速度不超过 120 km/h，最大坡度不超过 480‰的山地。

1 齿轨铁路发展概况

山地齿轨铁路在国外应用比较广泛，截止目前，国外已建成的山地轨道交通线路约 180 条，总里程超过 3 000 km，主要分布于瑞士、德国、法国、奥地利、日本、美国等国家。山地齿轨铁路在国内尚处于起步阶段，截至 2023 年 6 月，没有正式的商业运营线路。近年来，国内先后在四姑娘山、九寨沟、光雾山、玉龙拉错、神农架等地开展山地轨道交通线路规划研究和工程设计研究，目前部分重点项目已正式开工。由于齿轨铁路的特殊性，齿轨列车信号系统控制也需要进行相应的适应性研究。

2 齿轨区和轮轨区切换

由于齿轨铁路采用齿轮齿轨+钢轮钢轨驱动的模式，所以齿轨列车在运营过程中存在齿轨区和轮轨区的运营切换的问题，即“入齿”和“出齿”的操作。

轨道交通信号系统是保证列车安全运营的核心设备，随着齿轨铁路的建设和运营，信号系统也需要针对这一特殊的轨道交通系统做出相应的调整 and 适应。本文主要从车载 ATP 系统的角度出发，针对齿轨列车的特点，对车载 ATP 设计的一些特殊问题进行研究和讨论。

既有的城市轨道交通信号系统运营的线路和车辆工况都是相对比较固定的。而齿轨铁路采用齿轮+钢轮钢轨的模式，使列车的运行工况发生了很大的改变，线路条件也发生很大的改变。齿轨列车的主要技术要求如表 1 所示。

从表 1 可以看出，齿轨列车在黏着路段和齿轨路段的启动加速度和紧急制动减速度有很大差别。这些参数都对车载 ATP 计算列车安全防护曲线有关

表1 车辆主要技术要求

Tab.1 Main technical requirements for rack railway trains

项目		车辆类型	
		I 型	II 型
车体高度 /mm		3 800 ~ 3 900	3 800 ~ 3 900
车体宽度 /mm		2 000 ~ 2 500	2 000 ~ 2 500
齿轮啮合形式		竖向啮合	水平啮合
轴重 /t		≤ 12	≤ 12
车体基本长度 /m		15 ~ 20	10 ~ 15
最高运行速度 / (km/h)		黏着路段	120
		齿轨路段	40
启动加速度 / (m/s ²)	黏着路段	0 ~ 40 km/h	≥ 0.8
		0 ~ 120 km/h	≥ 0.4
	齿轨路段	0 ~ 20 km/h	≥ 0.5
紧急制动减速度 / (m/s ²)	黏着路段	≥ 1.2	—
	齿轨路段	≥ 0.3	≥ 0.3
最大坡度 /‰	黏着路段	40	—
	齿轨路段	250	480
最小平面曲线半径 /m	黏着路段	150	—
	齿轨路段	400	150

键影响。所以车载 ATP 针对齿轨区和轮轨区切换时需要考虑下面两个问题：1) “入齿”和“出齿”控制。2) 齿轮区和轮轨区切换时安全控制曲线的计算。

3 “入齿”和“出齿”控制

3.1 “入齿”控制

齿轮车的入齿装置即轮轨与齿轨之间的过渡地段，为保证齿轨可靠入齿一般采用三段缓冲式入齿装置，如图 1 所示。该装置主要由线速度同步区、啮合校正区以及齿轨啮合区 3 部分组成。在装置底部装有橡胶件，可以避免在啮合过程中齿轮与齿条之间发生顶齿现象。在线速度同步区，齿轮与过渡装置间的相互作用力使得钢轮相对钢轨能进行纵向滑动，进而最终实现齿轮与齿轨的准确啮合。

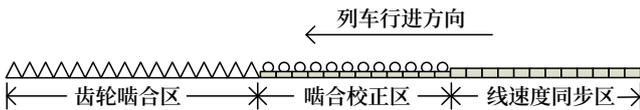


图1 入齿装置示意
Fig.1 Schematic diagram of "gear in" device

车载 ATP 在控制列车进入齿轨区时，需要在进入线速度同步区时给列车接口输出控制命令控制列车的齿盘落下并与齿轨啮合。为保证齿盘能可靠的与齿轨啮合，除了地面设置相应的入齿装置外，车载 ATP 还需要控制列车在一定限速以下（例如 20 km/h），保证齿轨可靠入齿。

信号系统控制齿轨列车进入齿轨区的设计示意如图 2 所示。

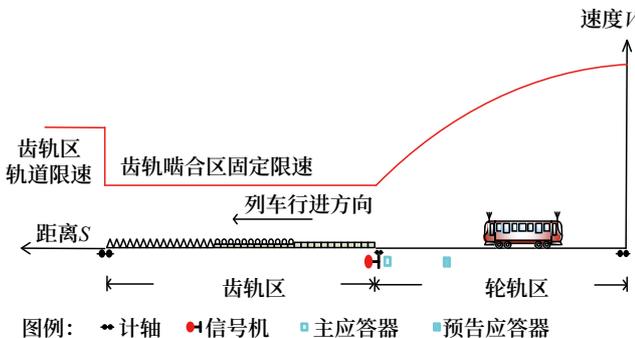


图2 “入齿”控制示意
Fig.2 Schematic diagram of "gear in" control

车载 ATP 在轮轨区时通过无线网络接收联锁发送的轨道占用和进路信息，或者通过接收有源应答器获取移动授权信息，根据列车定位信息并查询车载 ATP 的车载数据计算车载 ATP 的移动授权。车载 ATP 的车载数据对齿轮啮合区轨道配置齿轨啮合区固定限速（例如 20 km/h）。

齿轨啮合区一次只能让一列齿轨车占用。车载 ATP 在计算移动授权时，若齿轨啮合区已经有列车占用，那么本车的移动授权不应进入该轨道区段。当车载 ATP 的移动授权可越过轮轨区终端进入齿轨区时，按照齿轨区目标点限速计算安全控制曲线，在列车最大安全前端进入齿轨区时把限速压到齿轨啮合区固定限速。此时，车载 ATP 通过网络通信提示车载 ATO 已经进入齿轮啮合区，ATO 在车载 ATP 的防护下平稳控制列车行进。同时，车载 ATP 通过 HMI 提示司机即将输出控制命令控制列车的齿盘落下并与齿轨啮合。车载 ATP 输出控制命令给齿轨列车，列车自动落下齿盘进行啮合操作。在啮合过程中，需要车载 ATO 控制列车以一定的速度匀速行驶，以利于啮合的成功。

当车载 ATP 从列车的通信网络获取齿轮啮合状态为成功时，表示齿轮车在齿轨啮合区完成啮合，车载 ATP 提示 ATO 并在 HMI 上显示啮合成功。

3.2 “出齿”控制

齿轨列车从齿轨区进入轮轨区时，车载 ATP 依据联锁发送的轨道占用和进路信息，或者通过接收有源应答器获取移动授权信息，结合车载 ATP 存储的线路数据计算列车即将进入轮轨区（如图 3 所示）。车载 ATP 依据存储的脱离齿轨区段限速进行安全曲线计算，控制齿轨列车以规定的低速进入脱离区。当车载 ATP 判断列车完全进入脱离后，给列车接口输出控制命令控制列车的齿盘提起，当车载 ATP 从列车的通信网络获取齿盘已提起的状态时，通过网络和 HMI 分别给 ATO 和司机提示列车进入轮轨区。

当车载 ATP 处于故障状态或者 RM 模式状态时，齿轨列车的“入齿”和“出齿”操作都由司机手动操作完成。

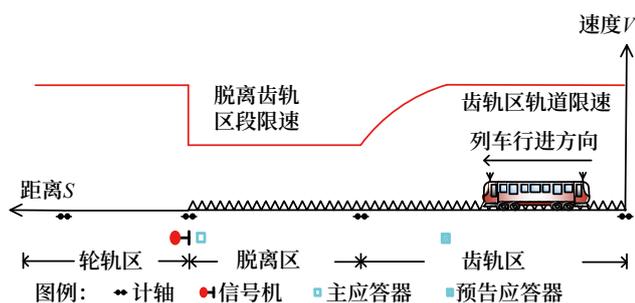


图3 “出齿”控制示意
Fig.3 Schematic diagram of "gear out" control

4 齿轮区和轮轨区切换时安全控制曲线的计算

从表1可以看出,齿轨列车在齿轨区和轮轨区运行过程中,列车能保证的最小紧急制动率、制动延时、最大加速度等车辆参数有很大区别。这些差别导致车载ATP在这两个区域进行安全曲线计算时需要分开进行考虑,并且需要进一步考虑列车在两种区域进行切换的过程中,使计算出来的安全制动曲线既满足安全要求又具有较好的平滑性。既要防止计算出的防护曲线过低从而降低运行效率,又要防止曲线有较大的跳动(尤其是突然向下跳动)从而影响列车驾驶的舒适性。

目前城轨车载ATP的安全曲线计算是按照IEEE1474的安全制动模型进行设计。其中应考虑列车位置的不确定性、列车初始速度、速度测量误差、线路坡度、紧急制动的触发延时、列车的动作延时、列车紧急制动减速度等因素的影响,具体的计算方法本文不进行描述,可以直接参考IEEE1474标准。

通常轮轨或者磁悬浮列车车载ATP按照列车性能和以上因素预先准备一套相应的安全曲线计算模型参数,以这些参数为基础进行实时安全曲线计算。由于齿轮列车有黏着路段、齿轮路段的相互切换,且两种运行工况下列车的相关参数差别很大。如果按照安全侧取参数进行计算会降低列车的运行效率。基于这样的考虑,可以按照黏着路段和齿轮路段的不同列车牵引制动工况准备两套安全曲线计算模型的参数,配置在车载ATP的数据区。车载ATP在

进行安全曲线计算时根据地面控制设备给出的移动授权,查询车载电子数据,判断出列车当前移动授权是在齿轮路段还是在黏着路段,从而采用相应的安全曲线计算模型参数进行计算。

在实际应用中有的线路是进行停车切换的,如图4所示。列车在轮轨区进站以后停车,该站台是轮轨区和齿轮区切换站台,当进入齿轮区的进路开放,列车再次启动时,车载ATP安全曲线计算模型采用齿轮区的参数,防护列车低速进入啮合限速区。若从齿轮区进入轮轨区,车载ATP安全曲线计算模型参数切换正好相反。

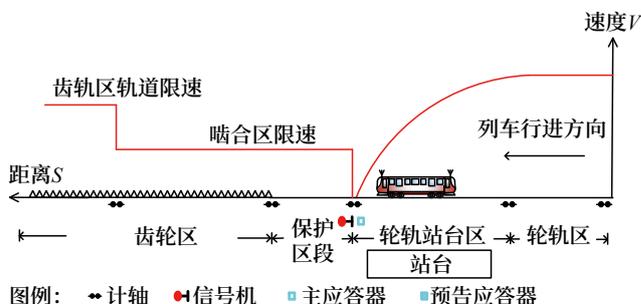


图4 停车曲线切换
Fig.4 Curve switching for a stationary train

有的线路由于两种运行区域切换较多,运行线路比较复杂,需要不停车直接从轮轨区过渡到齿轨区或者从齿轨区过渡到轮轨区。即车载ATP在计算安全曲线时需要同时考虑齿轨运行和轮轨运行列车的不同工况对车载ATP安全曲线计算模型的参数选取。以从轮轨区进入齿轮区为例,运行场景如图5所示。车载ATP从地面控制设备获得的移动授权从轮轨区直接延伸进入齿轮区,即车载ATP的移动授权既有在轮轨区又有在齿轮区。从A点开始进入齿轮啮合区是一个较低的限速,通常情况下A点是车载ATP的目前的最严格目标点。车载ATP在进行曲线计算的时候需要确保列车到达A点时把安全防护曲线压到啮合区限速以下。过了A点以后会出现下一个最严格限速点,假设是B点。B点在齿轨区,如果在计算A点对当前限速的影响时不考虑B点的影响,那么很可能会出现列车一经过A点,限速立刻有一个较大的下跳,从而影响曲线的连续性,

很容易造成司机驾驶超速紧急制动停车。

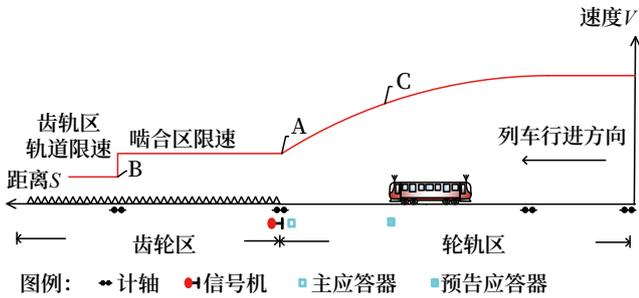


图5 动态曲线切换
Fig.5 Dynamic curve switching

基于这样的考虑，当车载 ATP 获取的移动授权跨越轮轨区和齿轨区时，采用动态计算两个最严格目标点的方式确保安全曲线的安全性、连续性和提高效率。车载 ATP 依据移动授权、临时限速、车载线路数据，首先查询距离列车最近第一目标点 A，第一目标限速点通过以后的下一个目标限速点是第二目标限速点 B。当两个目标点均在齿轨区时，采用齿轨区的安全曲线计算参数进行计算；当两个目标点均在轮轨区时，采用轮轨区的安全曲线计算参数进行计算；当第一个目标点 A 在轮轨区，第二个目标点 B 在齿轨区时，需要采用两种参数进行计算。

由于第一目标点 A 在轮轨区，所以采用轮轨区安全曲线参数计算目标限速 V_c ；第二目标点 B 采用齿轨区安全曲线参数进行计算，其对目标点 A 的影响限速并取其最小值 V_{ba} ；同时计算 A 点轮轨参数下的顶棚限速 V_a 。取 V_a 和 V_{ba} 的最小值；若最小值是 V_a ，则当前安全曲线的限速是 V_a 和 V_c 的较大值；若最小值是 V_{ba} ，则需要重新按照 V_{ba} 对列车当前位置的限速 V_c 进行计算得出新的 V_c ，然后取 V_c 和 V_{ba} 的较大值为安全曲线的限速值。处理流程如图 6 所示。这样的计算方式既可以保证安全曲线的安全性又可以确保轮轨和齿轨区跨越时不至于引起限速的跳动。若线路限速点较多且比较密集，可以考虑计算第三个最严格目标点以保证限速的平滑性。

5 结束语

本文针对齿轨 + 轮轨列车运行过程中信号系统

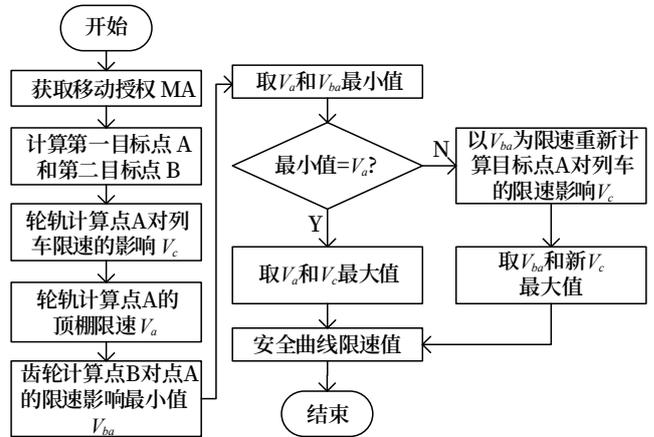


图6 动态曲线切换流程
Fig.6 Dynamic curve switching flow chart

车载 ATP 的控制过程与传统线路和信号系统的不同点进行分析，得出“入齿”和“出齿”控制的可行方法。对齿轨和轮轨两种运行方式的切换和切换过程中曲线计算的方法进行探讨，得出比较有效的计算方法。由于齿轨 + 轮轨的轨道交通方式在国内还在初始起步阶段，后续还有许多控制方法需要继续深入研究和探讨。

参考文献

- [1] 沈健. 山地齿轨旅游交通系统技术及应用研究 [J]. 机械工程与自动化, 2020 (4): 222-224.
Shen Jian. Research on Technology and Application of Mountainous Rack Tourism Transportation System[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2020(4): 222-224.
- [2] 余浩伟, 徐银光, 林世金. 《山地(齿轨)轨道交通技术规范》主要内容解析 [J]. 铁道标准设计, 2020, 64 (11): 40-43, 98.
Yu Haowei, Xu Yinguang, Lin Shijin. Analysis of the Main Contents of Technical Code of Mountain (Rack) Rail Transit[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(11): 40-43, 98.
- [3] 王怀松, 曾科智, 王坚强, 等. 山地轨道交通信号系统方案研究 [J]. 铁道通信信号, 2022, 58 (4): 75-82.
Wang Huaisong, Zeng Kezhi, Wang Jianqiang, et

- al. Research of Signaling System for Mountain Rail Transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(4): 75-82.
- [4] 牛悦丞, 李芾, 丁军君, 等. 齿轨铁路发展及应用现状综述 [J]. 铁道标准设计, 2019, 63(12): 37-43.
Niu Yuecheng, Li Fu, Ding Junjun, et al. Overview of Mountain Rack Railway Development and Application[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(12): 37-43.
- [5] 章玉伟, 唐勇. 都四山地轨道交通关键技术创新研究 [J]. 中国铁路, 2021(3): 101-105.
Zhang Yuwei, Tang Yong. Research on Innovations in Key Technology of Dujiangyan-Mt.Siguniang Mountain Rail Transit[J]. China Railway, 2021(3): 101-105.
- [6] 鄢红英, 徐银光, 李艳. 齿轨在山地旅游轨道交通中的应用及工程化发展方向 [J]. 工程建设与设计, 2018(21): 136-138.
Yan Hongying, Xu Yinguang, Li Yan. The Application of Toothed Rail in Mountain Tourism Rail Transit and Its Development Direction of Engineering[J]. Construction & Design for Engineering, 2018(21): 136-138.
- [7] 余浩伟, 章玉伟, 陈粒. 齿轨铁路技术特点与应用展望研究 [J]. 铁道工程学报, 2020, 37(10): 6-10.
Yu Haowei, Zhang Yuwei, Chen Li. Research on the Technical Characteristics and Application Prospect of the Rack Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(10): 6-10.
- [8] 王正邦. 齿轨铁路轨道系统技术研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(1): 176-179.
Wang Zhengbang. Research on Rack Railway Track System Technology[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(1): 176-179.
- [9] 王四虎. 车载ATP设备软件信息化管理的研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(11): 47-50, 60.
Wang Sihu. Research on Onboard ATP Software Informatization Management[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(11): 47-50, 60.

本期广告企业简介

成都运达科技股份有限公司

运达科技
国铁安全联锁监控系统

致力于为轨道交通业务领域
提供智能化解决方案及服务

联系电话 :028-82839999
地址: 四川省成都市高新区西部园区康强四路 99号
网址: <http://www.yd-tec.com>
邮箱: gtbg@yunda-tec.com

(详见封面)

全自动运行系统 控制中心与备用控制中心切换方案

薛 强, 张永会

(卡斯柯信号有限公司, 上海 200071)

摘要:城市轨道交通全自动运行系统专业性强、技术设备复杂、时效性强,在极端灾害发生时,控制中心有可能陷入瘫痪状态,导致控制中心各专业系统无法完成正常的功能,进而影响城市轨道交通的正常运营。备用控制中心为城市轨道交通全自动运行系统的必备配置,系统整体的可用性和安全性在备用控制中心加持下有较大改善。结合信号系统、通信系统、综合监控系统主备控制中心系统内部冗余切换机制、设备典型配置、系统接口切换影响及切换场景,在此基础上给出主备控制中心切换设计方案的优劣势比较,为城市轨道交通全自动运行系统建设中主备控制中心系统切换设计提供借鉴和指导。

关键词:城市轨道交通;全自动运行;信号系统;通信系统;综合监控系统;控制中心;备用控制中心

中图分类号:U239.5

文献标志码:A

文章编号:1673-4440(2023)08-0078-05

Switching Scheme of OCC and BOCC in Fully Automatic Operation

Xue Qiang, Zhang Yonghui

(CASCO Signal Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: Fully automatic operation system has the characteristics of strong professionalism, complex technical equipment and strong timeliness in urban rail transit. However, operating control center (OCC) may become paralyzed in times of extreme disasters, resulting in the failure of all professional systems to complete normal functions, thus affecting the normal operation of urban rail transit. The backup operational control center (BOCC) is defined as the essential configuration of the fully automatic operation system of urban rail transit, and the overall availability and safety of system are greatly improved with the addition of BOCC. This paper analyzes the internal redundant switching mechanism, the typical configuration of the equipment, and the impact of switching between the interfaces of the core professional system and the switching scenarios of the core system of OCC and BOCC of signal systems, data communication system and integrated supervision and control systems. Based on the above description and the comparison of the advantages and disadvantages of switching

收稿日期:2023-02-21;修回日期:2023-08-09

第一作者:薛强(1986—),男,高级工程师,本科,主要研究方向:城市轨道交通信号系统,邮箱:xueqiang@casco.com.cn.

design, this paper provides reference and guidance for the core professional system switching design of the OCC and BOCC for fully automatic operation in urban rail transit.

Keywords: urban rail transit; fully automatic operation system; signal system; communication system; integrated supervision and control system; OCC; BOCC

城市轨道交通全自动运行系统在国内各大城市迅速发展,全自动运行系统技术已成为城市轨道交通建设中的一种主流技术。城市轨道交通系统专业性强、技术设备复杂、时效性强,在极端灾害发生时,控制中心有可能陷入瘫痪状态,导致控制中心各专业系统无法正常完成轨道交通线路监视监控工作,进而影响城市轨道交通的正常运营。为避免这种灾害情况的发生,控制中心部署的信号系统、通信系统、综合监控系统(ISCS)在设计时,采用主用控制中心和备用控制中心系统冗余的方式,当主用控制中心正常时,由主用控制中心负责城市轨道交通运营的监控,当主用控制中心某一核心专业系统故障或者所有系统故障时,由备用控制中心接管,进而继续维持整个中心系统的监控能力,保证轨道交通运营的可用性、可靠性和安全性。

1 全自动运行核心系统主备控制中心设备组成

全自动运行线路控制中心应防范控制中心失效的风险隐患,采取异地灾备措施,需设置备用控制中心,同时在实现灾备定位基础上,实现热备冗余,满足全自动运行中心级设备高可靠运行需求。

全自动运行系统主、备控制中心核心系统主要包括信号系统、通信系统、ISCS等,各核心系统之间相互接口,信息共享,构成完整的城市轨道交通中心系统。各核心系统主用控制中心(OCC)和备用控制中心(BOCC)设备组成说明如下。

1.1 信号系统主、备控制中心设备组成

信号系统主用控制中心设有双套冗余服务器(包括2台数据库服务器、2台应用服务器、2台通信前置机(CFEP)),若干台行车调度员工作站。

备用控制中心设置有单套或双套冗余服务器,若干台行车调度员工作站。

其中,数据库服务器用于时刻表信息,告警等

信息,作为服务端分别与应用服务器、通信前置机、中心工作站有连接关系。应用服务器用于实现全部线路包括车辆段/停车场的ATS功能处理,实现信号设备和列车的远程自动控制。应用服务器为双机热备设计,备机实时从主机获得同步的各种数据,在主机故障情况下可实现快速切换。通信前置机主要负责与外部通信接口交互信息。中心调度工作站有多台设备,用于中心操作人员的监视和控制的人机界面。

主、备控制中心分别通过通信前置机与外部接口系统通信。主用控制中心应用/数据库服务器仅可从相应的通信前置机交互相关信息;备用控制中心应用/数据库服务器仅可从相应的通信前置机交互相关信息。

信号系统内部故障需进行主、备控制中心切换的场景主要包含:OCC两台应用服务器发生故障、OCC数据库服务器发生故障、OCC通信前置机发生故障和OCC电源故障或灾害,整体不可用等情况。

1.2 通信系统主/备控制中心设备组成

通信系统由传输、专用无线、公务电话、专用电话、视频监控、广播、时钟、综合网管、电源、视频会议和乘客信息系统等子系统组成,通信系统各子系统主、备中心典型的冗余配置及内部切换如表1所示。

表1中:1)“主备各单套或双套,互为冗余”指主用控制中心和备用控制中心均为单套设备或均为双套设备,主/备用控制中心两个单套或双套设备组成中心级冗余设备;2)“主/备中心独立设置,不冗余”指主用控制中心和备用控制中心各配置独立的设备,两个中心设备独立运行,不冗余。

通信系统中,专用无线、广播、时钟、乘客信息系统与信号系统存在接口关系,视频监控、广播、时钟、乘客信息系统与综合监控系统存在接口关系。

1.3 综合监控系统主/备控制中心设备组成

综合监控包括OCC、BOCC、车站系统,各部

表1 通信系统各子系统典型冗余配置及内部切换

Tab.1 Typical redundant configuration and internal switching of each subsystem of the communication system

系统名称	主 / 备中心设备配置及冗余方式	主 / 备中心切换方式
传输系统	双通道 1:1	无需切换
专用无线系统	主备各单套或双套, 互为冗余	自动切换
公务电话系统	主备各单套或双套, 互为冗余	自动切换
视频监控系统	主备各单套或双套, 互为冗余	自动切换
广播系统	主备各单套或双套, 互为冗余	自动切换
综合网管系统	主备各单套或双套, 互为冗余	自动切换
乘客信息系统	主备各单套或双套, 互为冗余	自动切换
时钟系统	主备各单套或双套, 互为冗余	无需切换
专用电话系统	主备各单套或双套, 互为冗余	不需要切换, 主备交叉冗余
视频会议系统	主备中心独立设置, 不冗余	无需切换
电源系统	主备中心独立设置, 不冗余	网管自动切换, UPS 设备不切换

分之间通过环网相连, 采用分层、分布式系统结构。综合监控按业务分为中心级和车站级两级管理, 主、备控制中心配置冗余服务器 (包括 OCC ISCS 实时服务器, OCC ISCS 历史服务器, 车站实时 / 历史服务器, 车辆段 / 停车场实时服务器, FEP, 每个车站 / 车辆段 / 停车场部署冗余车站实时 / 历史服务器、冗余通信前置机。

当 OCC 中心实时服务器故障时, 车站实时服务器自动升为主机, 期间产生的历史数据写入本地缓存。

当 OCC 中心实时服务器故障恢复后, 故障期间产生的数据, 自动从车站历史服务器的缓存中自动同步至中心历史服务器中。

综合监控系统与信号系统、自动售检票系统、通信系统 (广播系统、视频监视系统、乘客信息显示系统、通信综合网管系统、时钟系统等) 之间存在接口数据交换, 但其数据处理相对独立, 综合监控系统与各互联系统交换必要的信息, 实

现联动等功能。

综合监控系统内部故障需进行主、备控制中心切换的场景包含 OCC 实时服务器故障、OCC 骨干网故障和与 OCC 接口系统通讯故障等情况。

2 核心系统之间主、备中心切换方案

对于全自动运行线路, 控制中心行车指挥及应急事件处理是运营需求的核心内容, 其整体可用性和灵活性是保障运营的关键。控制中心信号系统、通信系统、综合监控系统内部涉及子系统较多, 除信号系统与综合监控系统、信号系统与通信系统 (乘客信息、专用无线、广播系统、时钟系统)、通信系统 (乘客信息、广播、视频监控系统、时钟系统等) 与综合监控系统存在接口, 其他子系统仅涉及内部主、备中心切换, 不涉及接口系统的切换, 因此下文将针对以上接口系统之间相互影响提出可行的解决方案。

信号系统与通信系统、综合监控系统主 / 备控制中心设备接口关系如图 1 所示。

2.1 各核心系统整体切换方案

为提高系统整体可靠性和可用性, 全自动运行无人驾驶项目宜配置主、备控制中心, 主、备控制中心之间切换主要考虑主用控制中心灾备情况下的整体切换。因此本方案为大多城市实施及参照的主 / 备中心切换方案。

主、备控制中心核心系统整体切换方案信息通道关系如图 2 所示。

通常, 各核心系统 OCC 和 BOCC 设备独立运行, 核心系统之间接口通信在 OCC 或者在 BOCC 实现信息交互。信号系统 OCC 设备作为主用, 通过 OCC 通信前置机与通信系统 / 综合监控系统 OCC 设备进行信息交互, 当 OCC 设备通信中断或者 OCC 设备故障不可用时, 信号系统 BOCC 设备切换为主用, 通过 BOCC 通信前置机与通信系统 / 综合监控系统 BOCC 设备进行信息交互。OCC 和 BOCC 接口系统间无通信, 即信号系统、通信系统、ISCS 任一 OCC 系统故障时, 各接口系统必须

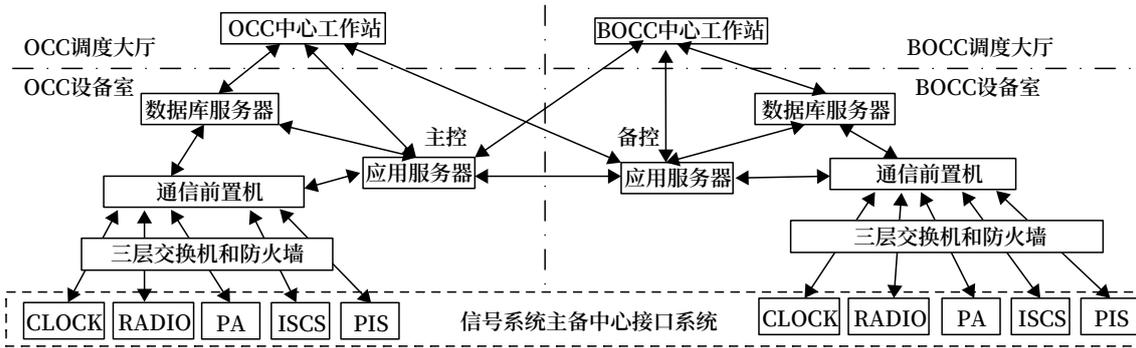


图1 主/备控制中心核心系统接口关系示意

Fig.1 Relationship among the interfaces of the core system of OCC and BOCC

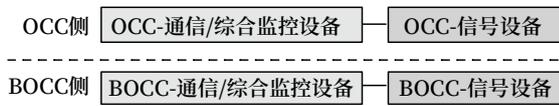


图2 主/备控制中心核心系统整体切换方案信息通道关系示意
Fig.2 Relationship among the information channels in the overall switching scheme for the core system of OCC and BOCC

同步切换至 BOCC 系统进行接口信息交互。

核心系统整体切换方案，主要考虑灾备情况下的整体切换，对于单个核心系统故障时，主要以及时维修单个系统设备为主。若存在长时间单个系统无法恢复，需进行主、备控制中心切换时，核心系统需同步切换至 BOCC。若单个系统故障时，不进行主、备控制中心整体切换，则故障系统运营服务水平降低，需人工进行应急服务，如站台乘客信息系统中心服务器故障时，无法为站台乘客提供列车到 / 发时刻、跳停等相关列车运行信息。本方案在应用时，需运营单位制定相应的主、备控制中心切换应急处置流程，明确进行切换的时机、影响范围，以及运营组织和维护响应策略。

2.2 接口系统不跟随切换方案

主、备控制中心整体切换方案的主要问题在于 OCC 和 BOCC 是否进行整体切换，很大程度上取决于某一单独核心系统故障时，无法实现 OCC 和 BOCC 之间接口系统的通信，才导致各核心系统需整体切换，对于中心系统功能切换以及运营人员的调配等均带来较大的影响，不利于运营组织，且存在随时中断运营风险。

因此，基于以上考虑，本方案中只在整体切换方案的基础上，需新增一路传输通道供信号系统

与通信系统和 ISCS 主、备控制中心互联使用。当 OCC 通信 / 综合监控系统中心设备发生故障时，通信 / 综合监控系统自动切换至 BOCC 通信设备，通信 / 综合监控系统 BOCC 设备通过新增的传输通道与 OCC 信号系统建立通信。当 OCC 信号系统发生故障时，信号系统手动切换至 BOCC 备用设备，通信 / 综合监控系统中心设备通过新增传输通道与 BOCC 信号系统建立通信。即接口系统中，任一单一系统故障时，不会引起整个控制中心所有系统同时切换，仅单一故障系统内部实现主、备中心切换，与之接口系统仍然可以通过新增传输通道实现主、备控制中心之间接口信息的交互，运营人员对全线列车监控的控制权限、系统功能、办公位置等均无需变化，极大地提高了系统整体可靠性和可用性。

通信系统、综合监控系统与信号系统通过新增主、备中心传输通道实现主、备中心信息交互，如图 3 所示。

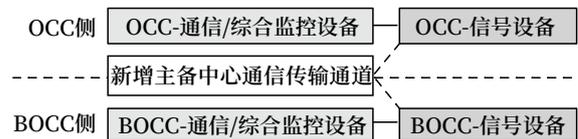


图3 主/备控制中心接口系统不跟随切换方案信息通道关系示意
Fig.3 Relationship among the information channels for the interface system of OCC and BOCC that does not follow the switching scheme

2.3 方案优缺点比较及设计建议

两种方案优劣性对比如表 2 所示。

通过以上两种方案对比，接口系统不跟随切换

表2 主/备控制中心核心系统两种切换方案优劣对比
Tab.2 Comparison of the advantages and disadvantages of two switching schemes for the core system of OCC and BOCC

方案名称	优点	缺点	运营影响及建议
各核心系统整体切换方案	网络结构简单； 无需新增通道及设备	各专业均需同步切换，涉及范围广、影响大、不宜组织	单一系统故障 / 多个系统故障 / OCC 灾备时需控制中心整体切换至备用中心组织运营； 对于仅用于灾备，不考虑单一系统故障切换的项目，可采用此方案
接口系统不跟随切换方案	可不跟随切换，灵活度高； 影响范围小，运营组织简单	通信 / 综合监控与信号接口新增主备传输通道，成本有所增加	单一系统的切换由系统内部实现，对运营影响小，运营组织灵活，对备用控制中心定位较高（不仅仅用于灾备），投资成本可控的项目，可采用此方案； 鉴于方案网络结构较为复杂，可提前在实验室进行接口功能的验证

方案从很大程度上提高了控制中心系统整体的可用性，运营组织的灵活度。不管采用哪种方案，系统设计时，宜在各核心系统工作站界面增加人工切换操作菜单以及连接服务器状态显示图标，在进行主、备控制中心控制权切换时，通过工作站界面可以直连至对应的服务器，也可实时监督服务器状态，给调度操作人员更加直观的用户体验。

3 结束语

轨道交通控制中心的设置、功能定位等将直接影响城市轨道交通运营组织的实施。本文结合城市轨道交通全自动运营需求和行业规范要求，对控制中心核心系统主、备中心设备切换方案进行对比分析，并提出了较优的实施方案。在实际应用时需同步考虑备用控制中心设计定位、主 / 备控制中心人员配备、以及地铁公司相关管理规定等情况，主、备控制中心切换方案的选取须与运营组织架构及安全定位相吻合，并同步考虑投资成本、简化运营组织管理等方面，确定更优化的设计方案。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[2] 李苏雯, 康进赞, 李连成. 城市轨道交通通信系统主备用中心切换功能分析 [J]. 铁路计算机应用, 2009, 18 (5): 45-48.

Li Suwen, Kang Jinyun, Li Liancheng. Analysis for Switch Function of Control Center and Stand-by Control Center in City Metro Communication System[J]. Railway Computer Application, 2009, 18(5): 45-48.

[3] 孟娜娜, 王志心, 严海鑫. 综合监控系统主备控制中心切换功能分析 [J]. 江苏科技信息, 2022, 39 (25): 59-61, 69.

Meng Nana, Wang Zhixin, Yan Haixin. Analysis of Switching Function of Main and Standby Control Centers of Integrated Supervisory Control System[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2022, 39(25): 59-61, 69.

[4] 秦兵. 轨道交通控制中心灾备设置及实施方案探讨 [J]. 电气化铁道, 2017, 28 (Z1): 172-175, 178.

[5] 赵野, 张宁, 刘德武, 等. 无锡地铁综合监控智能检测维修平台设计研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (5): 83-87.

Zhao Ye, Zhang Ning, Liu Dewu, et al. Design of Intelligent Detection and Maintenance Platform of Integrated Monitoring System for Wuxi Metro[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(5): 83-87.

[6] 梁强升. 城市轨道交通运营控制中心设置研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2008, 11 (7): 17-20, 38.

Liang Qiangsheng. On the Distribution of Operation Control Centers for Metro Network[J]. Urban Mass Transit, 2008, 11(7): 17-20, 38.

[7] 马龙. 全自动运行系统试车线共享车辆段室内信号设备方案 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (12): 95-98, 102.

Ma Long. Scheme of Test Track Sharing Indoor Signal Equipment in Depot of Fully Automatic Operation System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(12): 95-98, 102.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2023.08.016

工业以太网PROFINET在站台门系统中的应用及优化

李安福

(西安铁路信号有限责任公司, 西安 710100)

摘要: 介绍站台门系统的系统组成、工作原理, 以及国内外城市轨道交通站台门行业两种主流的现场总线控制系统: 以 CAN-BUS 或 Modbus 为代表的第一代现场总线为核心的站台门控制系统; 和以 Profinet 工业以太网为代表的第二代现场总线为核心的站台门控制系统。详述它们的网络构成、拓扑结构以及系统优缺点。针对现有系统中通信网络复杂、节点数量多等问题, 提出通过整合增强 DCU 功能和采用双主站冗余等措施的改进方案。该方案对于站台门系统的产业升级和工业以太网在站台门系统的推广应用具有较好的工程应用和指导意义。

关键词: 现场总线; Profinet; 工业以太网; 站台门系统; 屏蔽门系统

中图分类号: U239.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0083-07

Application and Optimization of Industrial Ethernet PROFINET in Platform Door Systems

Li Anfu

(Xi'an Railway Signal Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

Abstract: This paper introduces the system composition and working principles of the platform door systems, as well as two mainstream fieldbus control systems in the platform door industry of urban rail transit at home and abroad: the systems with the first generation of fieldbus as the core, represented by CAN-BUS or Modbus; and the systems with the second generation fieldbus as the core, represented by Profinet industrial Ethernet. Their network composition, topology, and system advantages and disadvantages are detailed in this paper. Aiming at solving the problems of complex communication network and a large number of nodes in the existing systems, an improved scheme is proposed, which is enhancing the DCU function through integration and adopting dual-master redundancy. The scheme has good engineering applications and guiding significance in the field of the industrial upgrading of the platform door systems and the popularization and application of industrial Ethernet in such systems.

Keywords: fieldbus; profinet; industrial Ethernet; platform door system; platform screen door system

收稿日期: 2022-03-23; 修回日期: 2023-07-13

基金项目: 西安铁路信号有限责任公司科研项目 (2600-G5160001)

第一作者: 李安福 (1972—), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向: 应答器系统、道岔融雪系统、站台门系统等研发工作, 邮箱: leeanfux@sina.com。

城市轨道交通站台屏蔽门系统 (Platform Screen Doors System, PSD) 是安装于地铁、轻轨、城际、公交、高铁等交通车站站台, 将轨道与站台候车区隔离, 可多级控制开启与关闭的滑动的连续屏障。站台门系统是集建筑、机械、电气、计算机网络、自动控制和信息等多门学科技术为一体的综合性产品工程, 是站台安全防护设施。站台门包括屏蔽门 (全高) 和安全门 (半高), 主要由门体结构、门机系统、电源系统和监控系统 4 部分组成。

监控系统是站台门系统的核心子系统, 主要作用是不断采集来自于信号系统 (Signalling, SIG)、中央控制盘 (Platform Screen Door Central Control Panel, PSC)、综合后备盘 (Integrated Backup Panel, IBP)、就地控制盒 (Local Control Box, LCB) 等控制点的控制信息, 按其控制优先级进行逻辑处理, 形成控制命令, 通过控制硬线指挥各门控单元 (Door Control Unit, DCU) 进行开/关门动作, 并驱动电磁阀、声光报警信息等; 对整个屏蔽门系统运行状态及参数进行实时监测, 并将相关信息反馈给 SIG 和机电设备监控系统 (Electrical and Mechanical Control System, EMCS) 等其他系统。

监控系统包括 PSC、单元控制器 (Platform Edge Door Controller, PEDC)、就地控制盘 (Platform Screen Door Local Control Panel, PSL)、IBP、DCU、综合监控系统 (Multiple Monitor System, MMS)、LCB、控制局域网、网间通讯协议转换器、安全继电器回路设备、通讯总线及协议转换器等。其中 PEDC、DCU、MMS 之间通过通信网络、总线相连, 进行信息交换; 且 MMS 还与系统之外的 EMCS 相连, 将整个 PSD 的系统工作状态和数据传送给它。所以, 它们之间采用的通信方式、网路拓扑结构直接关乎整个网络的通信速度、可靠性、安全性以及可扩展性。

1 采用第一代现场总线的站台门监控系统

目前, 国内大多数站台门系统供应商采用如

图 1 所示的网络模式和拓扑结构。PEDC、DCU、MMS 之间通常采用 CAN-BUS 或 Modbus 等第一代现场总线; MMS 通常采用工控机 + Windows, PEDC 通常采用 PLC, 而 DCU 为各公司自研的专用电机控制产品。

为保证通信的可靠, 上、下行两个方向均采用两套通信总线, 形成冗余。在总线上的各个节点中, MMS 作为通信的主站, 其他各节点作为从站。每个通信周期中, 都由 MMS 发出呼叫指令, 呼叫总线上某个或全部节点; 各节点收到呼叫指令后, 对指令进行解析, 如果指令中的目的地址与自己的地址相匹配, 则按规定的时段内发送相应的应答信息; 否则忽略此命令。当 PEDC 收到 MMS 呼叫自己的指令时, 发送相应的应答信息, 表示 PEDC 在线状态; 除此之外 PEDC 处于监听总线的状态, 只处理有关安全回路、开门到位、关门到位等传感器的信息, 不发应答信息。当各 DCU 收到 MMS 呼叫自己的指令时, 将采集到的门位置、电机状态、电磁阀状态、传感器状态等信息, 在规定的时段内发送给 MMS; 同时接收、保存来自 MMS 设定的各种参数、开/关门曲线等。通信时在两条总线上同时发送; 接收端收到任何一条总线上的信息有效时, 即认为本次通信成功。

MMS、PSA/ISCS 及 EMCS 之间通过交换机组成以太网网络, MMS 将站台门的相关信息发送给 PSA/ISCS 及 EMCS, 同时接受它们的查询等任务。

PEDC 和 MMS 都属于 PSC 一部分, 通常布置在车站的机械室。PSC 与各 DCU 的距离最远可达 200 m。为了保证通信的误码率, 按照 CAN 和 Modbus 通信波特率与总线长度的关系, 相应的波特率设置为不应超过 250 kbit/s。对于采用一控两驱 DCU 的站台门系统来说, 站台一侧 DCU 的数量为 24 个; 站台门系统的相关标准中, 要求全部节点的轮询周期不超过 2 s, 那么分配给每个节点的通信时间长度不会超过 100 ms, 每个节点发送的数据不超 1 kbytes, 信息量较少, 只能传送如 DCU 的工作状态、传感器的状态等, 无法实时传送

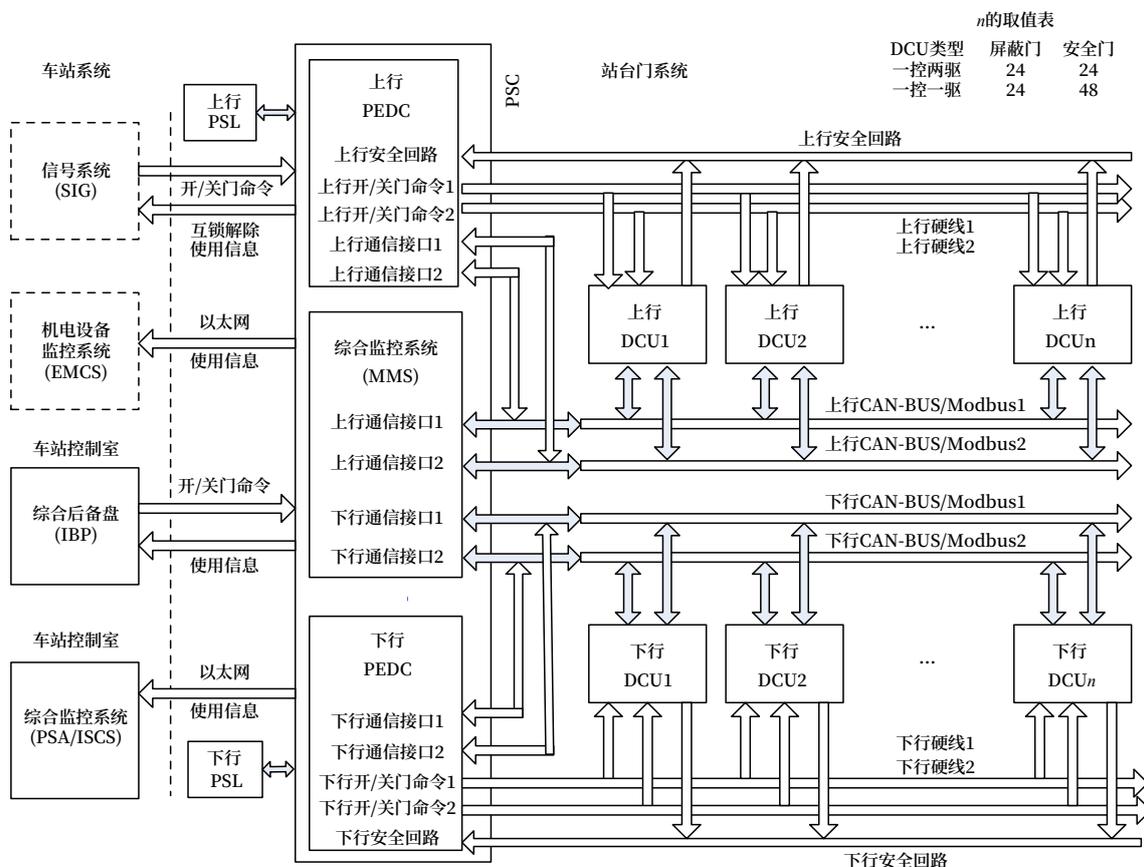


图1 采用现场总线的站台门监控系统

Fig.1 Platform door monitoring system using fieldbus

如门体速度曲线、电机电流曲线等数据量较大的信息。而对于采用一控一驱 DCU 的安全门系统来说, 站台一侧 DCU 的数量增加 1 倍, 达到了 48 个, 这样分配给每个 DCU 的通信间隔就更短, 传送的信息量就更少。

2 采用工业以太网的站台门监控系统

近年来, 随着以太网的日益成熟和应用普及, 以太网技术已经深入到人们日常生活中的方方面面; 同时, 从以太网技术延伸出的工业以太网技术在工业自动化系统中也扮演着至关重要的角色, 应用也越来越广泛, 成为新一代现场总线的发展趋势。

工业以太网具有以下几个主要优点。1) 速度快: 工业以太网将第一代现场总线最高速度从 1 Mbit/s 提高到现在的 100 Mbit/s, 极大解决了速度瓶颈问题; 2) 实时性好: 传统以太网的数据传输延时一般在 100 ms 以上, 而自动化行业所需的延

时一般要求 10 ms 以下, 所以传统以太网无法满足自动化领域对实时性的需求。而工业以太网具有低延时性能, 可将延时降低到几十 μs ; 3) 可靠性高: 以太网的设计之初并不是以工业环境为应用场景。所以当它用到工业现场, 面对恶劣的工作环境, 严重的线间干扰等情况时, 必然会引起设备的可靠性降低。而工业以太网完全满足这些要求, 且具有可恢复性、可维护性等, 保证网络系统中任何组件发生故障时, 不会导致应用程序、操作系统、甚至网络系统的崩溃或瘫痪; 它还满足工业环境的抗冲击、耐振动、工作温度范围宽、耐腐蚀、防尘、防水和较好的电磁兼容性等方面的要求。

目前, 全世界主流工业以太网标准有 Ethernet/IP、Profinet、Powerlink、EtherCAT、Sercosiii 等。各种总线标准各有优缺点, 目前 Z011 站台门系统采用 Profinet 标准, 它是德国西门子公司于 2001 年发布的工业以太网的规范, 并一直在完善和

发展。

先从一个简单拓扑结构的 Profinet 网络讲述其特点。

如图 2 所示，整个网络由一个 Profinet 主站、 n 个 Profinet 从站组成。主站和从站都有两个 RJ-45 接口，一个 IN，一个 OUT。主站的 OUT 与从站 1 的 IN 相连，从站 1 的 OUT 与从站 2 的 IN 相连，依次类推，最后一个从站 n 的 OUT 再回到主站的 IN，这样就组成了一个简单的 Profinet 环网。主站呼叫从站，各从站按要求应答。假如，当从站 2 和从站 3 之间的线路故障时，从站 1 和从站 2 通过前面的线路与主站进行通信，而从站 3 和从站 4……从站 n 通过后面的线路与主站进行通信，这样就实现了故障环网冗余功能。该网络还有一个特点，它将线缆用量节省到最大。如果采用以太网将各节点组网，最简单有效的拓扑结构是菊花型，以交换机为中心，每个节点到交换机都需要一条线缆，线缆用量较大；而且这样的网络还没有冗余功能。所以 Profinet 网络的低成本和冗余功能也是其优势之一。

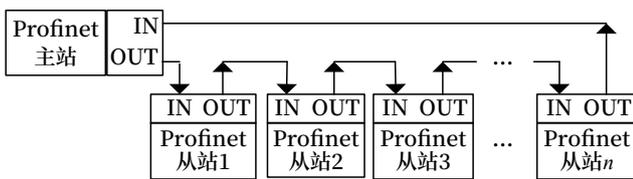


图2 简单的Profinet环形网络
Fig.2 Simple Profinet ring network

在 Z011 站台门系统中，采用了如图 3 所示的网络拓扑。DCU 由 ATE530S、Profinet 通信模块、LOGO PLC、ET 交换机等组成。LOGO PLC 实时采集命令硬线上的开 / 关门指令，通过 I/O（输入 / 输出）方式通知 ATE530S 进行开 / 关门动作；在开 / 关门过程中，驱动报警灯和蜂鸣器，给出声光报警信号；并实时采集门的位置、电磁阀节点、各传感器的状态等信息；各 LOGO PLC 通过 ET 交换机与 Profinet 交换机（U1）组成一条线性以太网网络；Profinet 交换机（U1）、PEDC（U3）、PN

主站（U4）组成 Profinet 网络。这样，各 LOGO PLC 融入到整个 Profinet 网络。

在 DCU 中，ATE530S 与 Profinet 通信模块通过内部高速接口，将其工作状态、门体速度曲线、电机电流曲线实时传送给 Profinet 通信模块，各 Profinet 通信模块与 Profinet 交换机（U1）组成标准的、具有冗余功能的环形 Profinet 网络。这样各 ATE530S 也融入整个 Profinet 网络。

由于当网络上任何相邻节点之间的距离超过 100 m 时，信号衰减将导致通信速度下降甚至通信故障，这一问题在网络布线时要特别关注，按如下方式布线就可满足距离要求；图 3 中各 Profinet 节点连接顺序为：Profinet 交换机（U1）→ DCU1 → DCU3 → ... DCU23 → DCU24 → DCU22 → ... DCU2 → Profinet 交换机（U1）。而以太网各节点的连接顺序为：Profinet 交换机（U1）→ DCU1 → DCU2 → ... DCU23 → DCU24。另外，由于 Profinet 交换机（U1）和各 DCU 安装在站台侧，而 PEDC（U3）、PN 主站（U4）、MMS/ISCS（U6）等安装在车站机械室中，在有的站场中会遇到 Profinet 交换机（U1）与 PEDC（U3）之间的距离大于 100 m 的情况，这时可使用光纤传输，在 PEDC 侧加装一个光纤模块（U2），而 Profinet 交换机（U1）本身是带有光纤接口的，可直接使用。光纤模块（U2）的使用，提高了通信距离和信号质量。

整个 Profinet 通信网络的主站是 S7-1500 PLC（U4），它负责对整个站台一侧网络上的 DCU、PEDC 等从站发起轮询；各从站收到呼叫自己的指令后，对指令进行解析，按要求进行回答。S7-1500 PLC 不仅有 Profinet 接口，还具有标准的以太网接口。两个方向的 S7-1500 PLC 通过以太网接口、以太网交换机与 MMS/ISCS（U6）、EMCS（U7）组成网络，最终两个方向的站台门系统的全部信息显示在 MMS 和 EMCS 上，并有存储、查询、打印等功能。

在图 3 的网络中，Profinet 和 Ethernet 的网络速度都是 100 Mbit/s，这样就极大提升了整个网

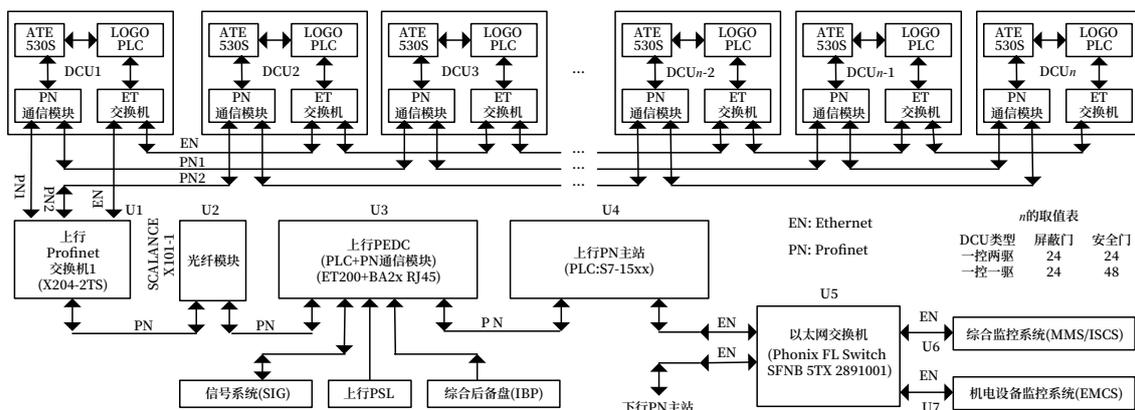


图3 采用工业以太网的站台门监控系统

Fig.3 Platform door monitoring system using industrial Ethernet

络的速度，使系统的轮询周期变得很短。系统的信息量也大幅度提高，可实时查询门体速度曲线、电机电流曲线等数据量较大的信息。

3 优化

虽然图3的控制系统和网络具有很多优点，但还有很大的改进空间。1) 通信网络复杂：连接DCU有两条网络，一条是由LOGO PLC、ET交换机和Profinet交换机组成的线性以太网；另一条是由各Profinet通信模块和Profinet交换机组成的环形的Profinet工业以太网，两条不同标准的网络并存使网路显得有些复杂；2) 节点数量多：由于DCU是一控一驱，对于屏蔽门系统来说需要24个，整个Profinet网络的负荷还算适度。但对于半高的安全门系统就需要48个，整个Profinet网络的负荷比较大；3) 组成DCU部件太多：由于DCU是以ATE530S为核心来搭建的，而ATE530S的I/O资源较少，所以采用小型化的PLC进行I/O扩展。这样DCU就由ATE530S、Profinet通信模块、LOGO PLC、ET交换机等组成，显得较复杂。

为此，Z011新一代站台门系统极大地整合了系统资源。1) 将通信网络统一成Profinet工业以太网一种制式；2) 将DCU设计成一控两驱，不管是全高屏蔽门还是半高安全门都只需要24个；3) 将LOGO PLC承担的I/O功能整合到DCU中，这样也就不需要ET交换机了。

如图4所示，DCU为一控两驱，它具有丰富的I/O功能，整合了LOGO PLC的功能。单侧站台仅需24个；PN为Profinet交换机，通过高速接口（如CAN、Modbus等）与DCU通信，DCU的所有信息都先发送给它，它以100 Mbit/s的速率在Profinet环网中与主站进行通信；上、下行各有一个环网，两个主站通过以太网交换机与MMS和EMCS交换信息。

如图5所示，它将上、下行所有48个DCU、2个PEDC、2个PN主站整合成一个大的环网，该环网的PN主站也具有冗余功能，当一个主站故障时，整个网络仍可以正常工作。但节点数量较多，网络负荷有些大，需在冗余和速度两方面权衡。

4 总结

随着世界范围内工业4.0和物联网的大力推广，以Profinet为代表的工业以太网产品越来越多的服务于工业现场；反过来各种应用需求又加速使各大IT厂商推出更多的产品以满足各种应用场景和需求。本文介绍的以Profinet工业以太网为核心的控制系统已成功运用于西安地铁4、6、14号线路及全国其他线路；相比于采用第一代现场总线CAN-BUS或Modbus等总线的控制系统来说，采用工业以太网的控制系统的信息量更大、反应周期更快、运营效率更高、维护更精准快捷。随着工业以太网技术和产品的不断发展和完善，站台门的控制系统

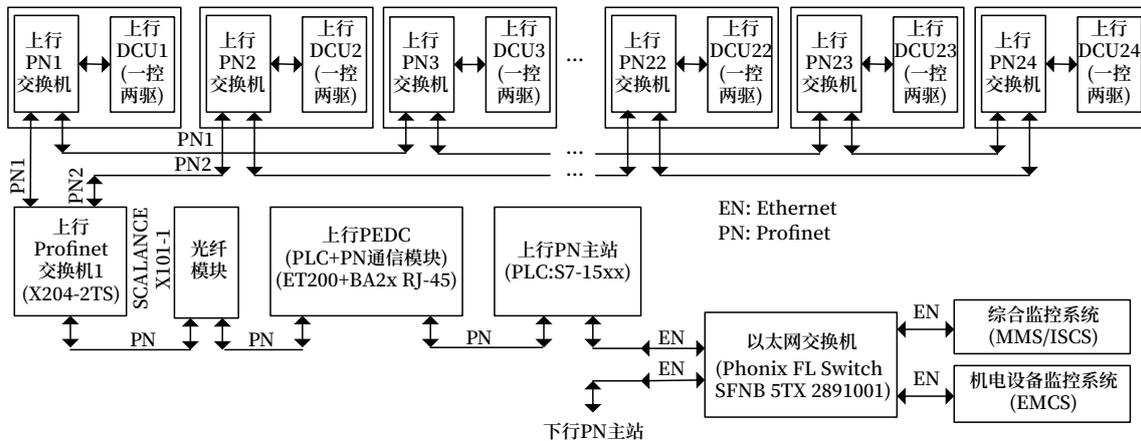


图4 单主站环网的站台门监控系统

Fig.4 Platform door monitoring system based on a ring network with a single master station

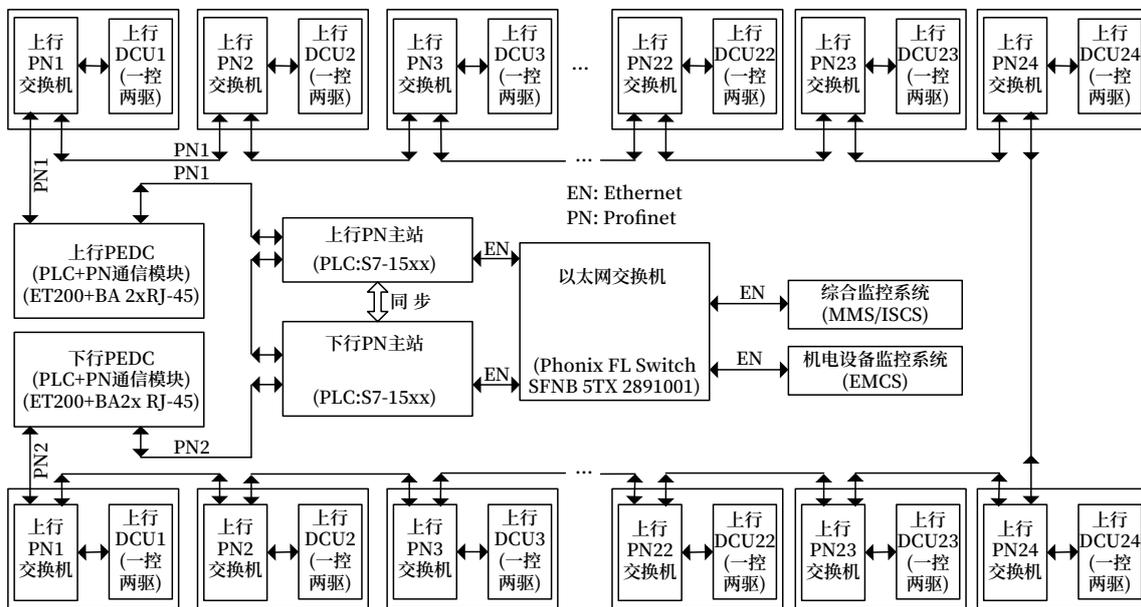


图5 双主站环网的站台门监控系统

Fig.5 Platform door monitoring system based on a ring network with double master stations

也会不断发展和完善。

参考文献

[1] 陈曦. 大话 Profinet 智能连接工业 4.0 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
 [2] 王平, 谢昊飞, 肖琼. 工业以太网技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
 [3] 王德吉. 西门子工业网络通信技术详解 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
 [4] 崔坚, 西门子(中国)有限公司. SIMATIC S7-1500 与 TIA 博途软件使用指南 [M]. 北京: 机械

工业出版社, 2020.

[5] 肖贺, 管海兵, 宦飞. 工业以太网冗余技术分析 [J]. 信息安全与通信保密, 2012, 10(3): 59-63, 67.
 Xiao He, Guan Haibing, Huan Fei. Analysis of Redundancy Technology for Industrial Ethernet [J]. Information Security and Communications Privacy, 2012, 10(3): 59-63, 67.
 [6] 刘光平. 基于 CAN 总线的地铁屏蔽门控制系统研究 [J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2012, 29(12): 66-71.

Liu Guangping. Research on Control System of Metro Platform Screen Door Based on CAN Bus[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2012, 29(12): 66-71.

[7] 董洪卫, 赵博伦. 全自动运行系统站台门间隙探测与信号系统接口探究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (9): 69-72.

Dong Hongwei, Zhao Bolun. Interface between Platform Door Gap Detection and Signal System in Full-Automatic Operation System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(9): 69-72.

[8] 吕秉略, 童东兵, 陈巧玉, 等. 地铁屏蔽门控

制系统研究与设计 [J]. 上海工程技术大学学报, 2018, 32 (2): 137-140, 156.

Lyu Binglue, Tong Dongbing, Chen Qiaoyu, et al. Research and Design on Control System of Subway Platform Screen Door[J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2018, 32(2): 137-140, 156.

[9] 智莹, 刘旭. 基于 Profinet 的冗余环网设计与实现 [J]. 鞍山师范学院学报, 2018, 20 (2): 64-67, 90.

Zhi Ying, Liu Xu. Design and Implementation of Redundance Loop Net Based on Profinet[J]. Journal of Anshan Normal University, 2018, 20(2): 64-67, 90.

* * * * *

国外信息

新的公共交通应用程序在意大利热那亚投入使用

在日立铁路公司与热那亚运输企业热那亚公共交通公司 (AMT) 签订新的协议后, 日立铁路公司推出的世界首个 360Pass 应用程序投入使用。这个应用程序连接整个热那亚的公共交通基础设施, 可以服务所有 60 万名居民和每年 350 万名访客。

这个 360Pass 应用程序, 在热那亚被称为 “GoGoGe”, 已经成功完成为期一年的测试, 将会改变整个热那亚的多式联运。通过将公营和私营运输系统整合, 这个应用程序使得在此生活或者访问的每个人都可以规划、预定多式联运旅程, 并且为此支付最低票款。这个新型应用程序可以完全免费下载。

GoGoGe 可谓日立铁路公司、热那亚公共交通公司以及热那亚市政府合作的产物, 旨在通过提供满足热那亚大量乘客的 “最后一公里” 需求, 鼓励使用公共交通工具并且租用电动车辆。通过将公营和私营运输系统整合, 这个应用程序允许用户规划、预定多式联运旅程, 并且为此支付票款。这个应用程序总共将 663 辆巴士、2 500 个公交车站、每年运量达到 1 500 万人次的一条地铁线路、两条缆车线路、具有历史意义的一条山区铁路线路、10 个公共电梯和全长 50 km 的两条郊区公交线路连接起来。此外, 这个应用程序允许用户通过按动手机上面的一个按钮, 租用电动小汽车、支付停车费用, 或者找到电动摩托车。

这个应用将会自动检测用户乘坐热那亚的公交、有轨电车和地铁支付的总票款何时达到周卡的价格 (17.50 欧元)。在总票款达到这个上限后, 用户可以在当周剩余时间内免费乘车, 无需额外支付费用。如果用户频繁乘坐公共交通工具, 将会可以节省大量支出, 例如, 乘客每周五天乘坐巴士和地铁上下班, 通过使用周卡可以直接节省 12.50 欧元。

通过使用这个应用程序, 不再需要排队购买传统纸质车票, 或者为了使用不同交通服务下载多个应用程序。这个 360Pass 应用程序连接热那亚各个车辆和车站的 5G 蓝牙传感器, 以便识别乘客的上车时间、旅行距离和下车时间。这样, 即便用户乘坐多种交通工具, 也能支付最低票款。

除了上述商业应用此外, 通过日立铁路公司与意大利国家铁路集团 (Trenitalia) 新近的合作, 这个应用程序的用户将会可以乘坐区域和城际列车以及热那亚的公共交通工具, 并且可以享受每周最低票价。通过这个 360Pass 应用程序, 乘客可以获得最为迅速、方便的多式联运线路选项和实时旅程信息更新, 并且可以查询公交服务的频率, 根据自动的需要选择乘客较少的班次。为了突出这项技术的价值, 日立铁路公司近期委托他方, 开展有关公共交通的一项全球民意研究, 根据这项研究, 如果可以获得每个班次的拥挤程度的实时信息, 73% 的受访者将会更有可能乘坐公共交通工具。

(北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 刘旻翻译自: www.railwaypro.com 2023-07-31)

某站接近信号机点灯电路的分析及优化设计

李 厦

(乌鲁木齐铁建工程咨询有限公司, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 设计速度 120 km/h 自动站间闭塞区段某车站信号施工图, 设有接近信号机。对其点灯电路进行分析, 当办理经道岔直向接车进路, 进站信号机显示黄灯, 接近信号机显示绿黄灯。列车车辆驶入第二接近区段, 接近信号机由绿黄转移为黄灯时, 灯丝监督继电器 (DJ)、二灯丝监督继电器 (2DJ) 同时吸起, 导致接近信号机点灯电流超出灯丝继电器工作电流范围, 接近信号机存在一定的使用风险。因此, 须对此接近信号机电路进行优化设计。分析不同场景下信号点灯电路接通公式, 模拟列车车辆驶入第一、二接近区段时信号显示, 进行对比计算, 找出矛盾关键点, 给出解决方案。

关键词: 点灯电路; 接近信号机; 灯光转移; 点灯电流

中图分类号: U284.11

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0090-05

Analysis and Optimized Design of Approach Signal Lighting Circuit of a Station

Li Sha

(Urumqi Tiejian Engineering Consultants Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: For the automatic inter-station block section with a design speed of 120 km/h in the signal construction drawing of a station, the lighting circuit for the approach signal in this drawing is analyzed. When setting the straight receiving route going through the turnout, the home signal displays a yellow aspect and the approach signal displays a green and yellow aspect. When the train moves into the second approach section and the approach signal aspect changes from green and yellow to yellow, the filament supervision relay (DJ) and the second filament supervision relay (2DJ) are energized at the same time, causing the lighting current of the approach signal to exceed the working current range of the filament relay. This poses a certain risk when using the approach signal. Therefore, it is necessary to optimize the design of the approach signal circuit. This paper analyzes the connection formulas of the signal lighting circuit in different scenarios, simulates the signal aspects when the train enters the first and second approach sections, carries out comparative calculations, identifies the key points of inconsistency, and provides solutions.

Keywords: lighting circuit; approach signal; changes in signal aspects; lighting current

收稿日期: 2022-12-23; 修回日期: 2023-06-20

第一作者: 李厦 (1985—), 男, 工程师, 本科, 主要研究方向: 铁道信号, 邮箱: 1397151989@qq.com。

在某车站信号专业施工图设计过程中发现，接近信号机点灯电路存在两条回路同时沟通黄灯点灯电路且灯丝监督继电器（DJ）、2DJ 同时吸起的情况。基于此特殊情况，对该站接近信号机点灯电路进行深入分析，并进行优化设计，消除该现象。

1 接近信号机

位于自动站间闭塞区段，设计速度 120 km/h 以上，进站信号机外方设置接近信号机和两个接近区段；接近信号机设在第一接近区段和第二接近区段分界处。

接近信号机与同方向进站信号机显示关系为：

同方向进站信号机显示绿（L）灯，接近信号机显示绿（L）灯；

同方向进站信号机显示黄（U）灯，接近信号机显示绿黄（LU）灯；

同方向进站信号机显示双黄（UU）灯，接近信号机显示黄（U）灯；

同方向进站信号机显示禁止灯光或引导信号，接近信号机显示黄灯。

2 接近信号机点灯场景分析

按照该站接近信号机点灯电路如图 1 所示，分不同场景逐一进行分析。

2.1 第一种场景

1) 办理经道岔直向接车进路时，进站信号机显示 U 灯，接近信号机显示 LU 灯。此时列车信号继电器（LXJ）吸起、正线信号继电器（ZXJ）吸起、通过信号继电器（TXJ）落下，对应复示继电器同步动作。接近信号机点灯回路如下。

L 灯：XJZ220—RD3 1-2—DJ5-6—2JG_{组合} GJ31-32—LXJ3F61-62—ZXJ2F61-62—TXJ2F61-63—2DJ11-12—电缆线路—点灯单元—电缆线路—2DJ22-21—TXJ2F83-81—ZXJ2F82-81—LXJ3F82-81—2JG_{组合} GJ42-41—RD2 2-1—XJF220。

注：XJZ：信号交流电源（正）；XJF：信号交流电源（负）；RD：断路器；2JG：二接轨；GJ：

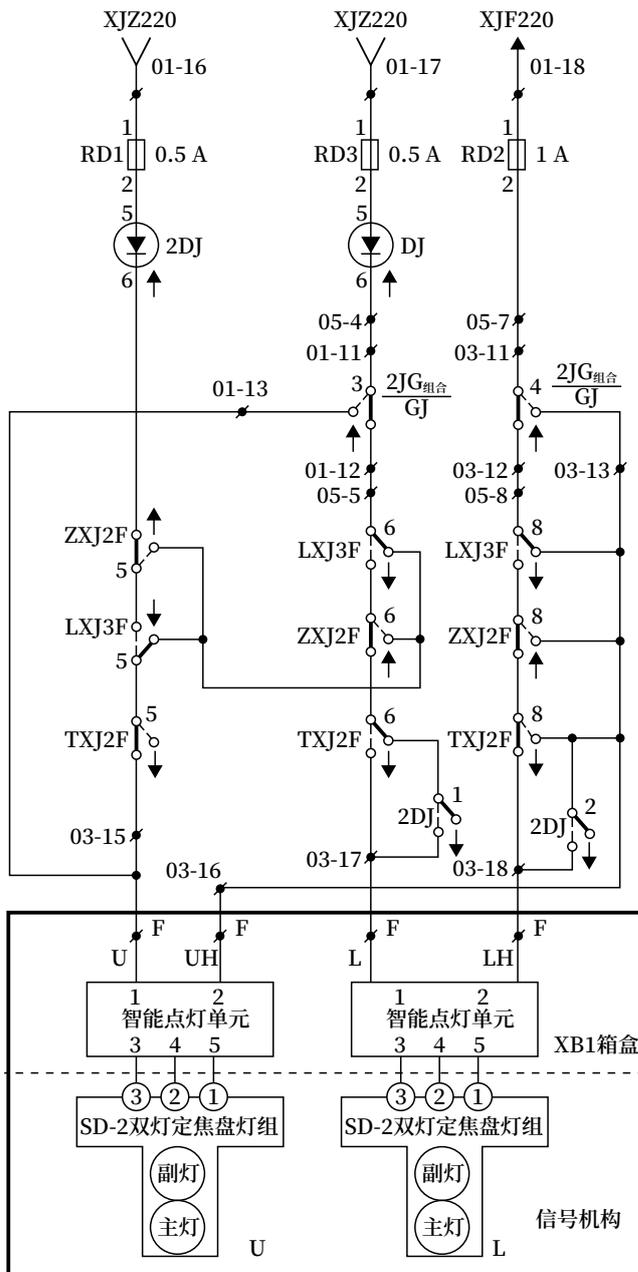


图1 某车站接近信号机点灯电路

Fig.1 Diagram of the lighting circuit for the approach signal of a station
轨道继电器。

U 灯：XJZ220—RD1 1-2—2DJ5-6—ZXJ2F52-51—LXJ3F52-51—TXJ2F51-53—电缆线路—点灯单元—电缆线路—TXJ2F83-81—ZXJ2F82-81—LXJ3F82-81—2JG_{组合} GJ42-41—RD2 2-1—XJF220。

2) 当列车或机车车辆驶入第一接近轨道区段（1JG）后，接近信号机、进站信号机灯光显示不发生变化。

3) 当列车或机车车辆驶入第二接近轨道区段(2JG)后,接近信号机发生灯光转移,显示U灯。此时,LXJ吸起、ZXJ吸起、TXJ落下(维持不变),2JG组合GJ失磁落下,对应复示继电器状态一致。接近信号机U灯点灯回路有两条,分别为:

a. XJZ220—RD3 1-2—DJ5-6—2JG组合GJ31-33—电缆线路—点灯单元—电缆线路—2JG组合GJ43-41—RD2 2-1—XJF220。

b. XJZ220—RD1 1-2—2DJ5-6—ZXJ2F52-51—LXJ3F52-51—TXJ2F51-53—电缆线路—点灯单元—电缆线路—2JG组合GJ43-41—RD2 2-1—XJF220。

2.2 第二种场景

1) 办理正线通过进路时,进站信号机显示L灯,接近信号机显示L灯。此时LXJ、ZXJ、TXJ均吸起,对应复示继电器同步动作。接近信号机点灯回路为:

XJZ220—RD3 1-2—DJ5-6—2JG组合GJ31-32—LXJ3F61-62—ZXJ2F61-62—TXJ2F61-62—电缆线路—点灯单元—电缆线路—TXJ2F82-81—ZXJ2F82-81—LXJ3F82-81—2JG组合GJ42-41—RD2 2-1—XJF220。

2) 当列车或机车车辆驶入1JG后,接近信号机、进站信号机灯光显示不发生变化。

3) 当列车或机车车辆驶入2JG后,接近信号机发生灯光转移,显示U灯。此时LXJ、ZXJ、TXJ均保持吸起,2JG组合GJ落下,对应复示继电器状态一致。接近信号机U灯点灯回路为:

XJZ220—RD3 1-2—DJ5-6—2JG组合GJ31-33—电缆线路—点灯单元—电缆线路—2JG组合GJ43-41—RD2 2-1—XJF220。

2.3 第三种场景

1) 办理经道岔侧向接车进路时,进站信号机显示UU灯,接近信号机显示U灯。此时LXJ吸起、ZXJ落下、TXJ落下,对应复示继电器同步动作。接近信号机点灯回路为:

XJZ220—RD3 1-2—DJ5-6—2JG组合GJ31-32—LXJ3F61-62—ZXJ2F61-63—ZXJ2F53-51—

LXJ3F52-51—TXJ2F51-53—电缆线路—点灯单元—电缆线路—ZXJ2F83-81—LXJ3F82-81—2JG组合GJ42-41—RD2 2-1—XJF220。

2) 当列车或机车车辆驶入1JG后,接近信号机、进站信号机灯光显示不发生变化。

3) 当列车或机车车辆驶入2JG后,接近信号机灯光不转移,依旧显示U灯。此时,LXJ吸起、ZXJ落下、TXJ落下(维持不变),2JG组合GJ落下。此时点灯回路为:

XJZ220—RD3 1-2—DJ5-6—2JG组合GJ31-33—电缆线路—点灯单元—电缆线路—2JG组合GJ43-41—RD2 2-1—XJF220。

3 点灯电路问题分析

上述分析中第一种场景,办理经道岔直向接车进路时,进站信号机显示U灯,接近信号机显示LU灯。当列车或机车车辆驶入2JG时,会造成DJ、2DJ同时吸起。第二种、第三种场景不会产生该现象。现对第一种场景相关问题进行分析。

第一种场景下,当列车或机车车辆驶入2JG后,U灯两条点灯回路均沟通,DJ、2DJ均吸起。第一种场景接近信号机U灯点灯电路简化如图2所示。

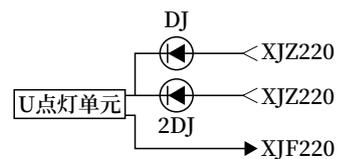


图2 第一种场景接近信号机U灯点灯电路简化
Fig.2 The simplified lighting circuit for Lamp U of the approach signal in scenario No.1

其他场景下,当列车或机车车辆驶入2JG后,只沟通一条U灯点灯回路,DJ吸起。其他场景接近信号机U灯点灯电路简化如图3所示。

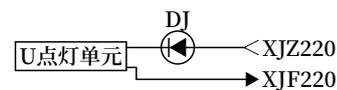


图3 其他场景接近信号机U灯点灯电路简化
Fig.3 The simplified lighting circuit for Lamp U of the approach signal in other scenarios

对比图 2、3 可知，列车或机车车辆驶入 2JG 时 U 灯点灯回路，第一种场景相当于其他场景增加一个 2DJ 并联分支。根据并联电路原理，可得公式 (1)、(2)：

$$I_{\text{总}1} = I_{\text{DJ}1} + I_{\text{2DJ}1} \quad (1)$$

其中， $I_{\text{DJ}1}$ ：第一种场景下经过 DJ 的电流； $I_{\text{2DJ}1}$ ：第一种场景下经过 2DJ 的电流。

$$I_{\text{总}} = I_{\text{DJ}} \quad (2)$$

其中， I_{DJ} ：其他场景下经过 DJ 的电流。

信号点灯电源 XJZ、XJF 电压保持恒定，室内配线和电缆线路电阻等参数基本一致，由 $I = U/R$ 可得：

$$I_{\text{总}1} = I_{\text{总}} \quad (3)$$

对于第一种场景接近信号机 U 灯点灯电路，DJ、2DJ 分支的电源 XJZ、XJF 电压相同，内部配线和电缆线路电阻、继电器接点接触电阻基本相同，可得：

$$I_{\text{DJ}1} = I_{\text{2DJ}1} \quad (4)$$

由公式 (1) ~ (4) 推导，可得：

$$I_{\text{DJ}1} + I_{\text{2DJ}1} = I_{\text{DJ}}$$

$$2I_{\text{DJ}1} = I_{\text{DJ}}$$

$$I_{\text{DJ}1} = 1/2 I_{\text{DJ}};$$

$$2I_{\text{2DJ}1} = I_{\text{DJ}}$$

$$I_{\text{2DJ}1} = 1/2 I_{\text{DJ}}$$

即：第一种场景下接近信号机 U 灯点灯电路 DJ、2DJ 点灯电流大约为其他场景下 DJ 点灯电流的 1/2。

该站计算机联锁通用图双接近区段组合内部配线图，DJ、2DJ 采用 JZXC-H18 继电器，为整流型继电器。根据《普速铁路信号维护规则》中 11.2.13 条环境温度 20℃ 时，JZXC-H18 电流工作值不大于 AC100 mA。

其他场景下，接近信号机 DJ、2DJ 点灯电流在标准范围内。第一种场景下接近信号机 U 灯点灯电路 DJ、2DJ 点灯电流为其 1/2，超出标准范围，存在一定的使用风险。

4 优化设计

为确保接近信号机灯丝监督继电器可靠动作，需根据第一种场景分析对 U 灯点灯电路进行优化设计。

若办理经道岔直向接车进路，列车或机车车辆驶入 2JG 后，只允许 1 台 DJ 吸起，那么点灯电流可维持在标准范围，DJ 能可靠工作。对照图 2，保留一个分支，即保留 DJ 或 2DJ。

通过 3 种场景分析，列车或机车车辆驶入 2JG 后，经由 DJ 的点灯回路，3 种场景下均沟通。而经由 2DJ 的点灯回路，只在第一种场景下沟通。据此，保留 DJ 分支回路，切断 2DJ 分支回路，成为电路优化设计的首选思路。此种修改方式，对原点灯电路改动最小，对其他场景点灯回路沟通没影响。

当列车或机车车辆进入 2JG 后，沟通 DJ 回路，DJ 保持吸起；切断 2DJ 回路，2DJ 落下。唯一 DJ 监督 U 灯点灯电路，由此问题迎刃而解。

参照其他场景下 DJ 点灯电路，可在 2DJ 和 ZXJ2F 之间增加 2JG_{组合} 轨道复示继电器接点条件，如图 4 所示，因 2JG_{组合} GJ 无空接点，因此增加 GJF 用于该电路，如图 5 所示。

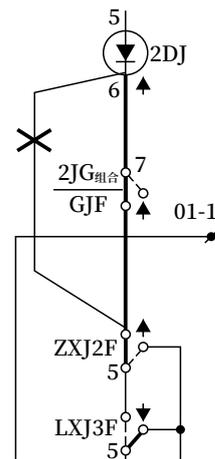


图4 某车站接近信号机点灯电路图优化部分设计
Fig.4 Optimized part in the design of the lighting circuit for the approach signal of the station

此时，当列车或机车车辆驶入 2JG 后，接近信号机 U 灯点灯回路仅保留第一条，即：

XJZ220—RD3 1-2—DJ5-6—2JG_{组合} GJ31-33—电

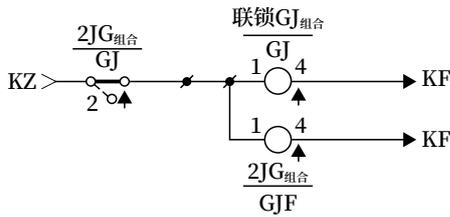


图5 2JG_{组合}GJF励磁电路

Fig.5 Energizing circuit of 2JG in combination with GJF

缆线路—点灯单元—电缆线路—2JG_{组合}GJ43-41—RD2 2-1—XJF220。

原 2DJ 分支点灯回路被 2JG 组合轨道继电器接点切断，电路如下：

XJZ220—RD1 1-2—2DJ5-6 \times ZXJ2F52-51—LXJ3F52-51—TXJ2F51-53—电缆线路—点灯单元—电缆线路—2JG_{组合}GJ43-41—RD2 2-1—XJF220。

5 结束语

该站接近信号机点灯电路优化设计，符合设计意图，满足信号设计规范要求，继电器点灯电流等参数在标准范围内。接近信号机点灯电路施工图已成功在该站运用，保证了接近信号机的可靠运用。同时为类似接近信号机点灯电路设计提供借鉴。

参考文献

[1] 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.
[2] 林瑜筠. 铁路信号工程设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015: 45-46.
[3] 中华人民共和国铁道部. 铁路信号交流继电器通用技术条件: TB/T 2120-1990[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1990.

[4] 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.

[5] 窦磊. 嘉兴站上行出站信号机点灯电路修改及验证[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023, 20(1): 99-104.

Dou Lei. Modification and Verification of Lighting Circuits of Up-Direction Starting Signals at Jiaxing Railway Station[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2023, 20(1): 99-104.

[6] 石玉莹, 方亚非, 张红华. 遮断信号机点灯电路的改进[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(12): 101-104, 109.

Shi Yuying, Fang Yafei, Zhang Honghua. Improvement of Lighting Circuit of Obstruction Signal[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(12): 101-104, 109.

[7] 赵阳, 马衍明. 进站信号机显示及区间三接近编码电路的分析与改进[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(1): 96-100.

Zhao Yang, Ma Yanming. Analysis and Improvement of Home Signal Aspect and Third Approach Section Coding Circuit[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(1): 96-100.

[8] 蔡菁华. 车站直控远程信号机点灯方案讨论[J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18(7): 102-106.

Cai Jinghua. Remote Control Scheme of Signal Lighting by Station[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(7): 102-106.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2023.08.018

站间联系电路的问题分析与改进

胡井海, 王宇琮, 蔡微微

(卡斯柯信号有限公司, 北京 100070)

摘要: 相邻的两个铁路车站, 在其间不能装设预告信号机时, 可采用站间联系电路作为闭塞设备使用。主要研究计算机联锁设备与站间联系电路相结合时, 采用的采集驱动电路在发生接车站计算机联锁系统重启、排列发车进路后瞬间取消该进路时, 存在区间方向自动翻转与“双接近”的典型问题, 对其产生的原因进行分析, 并提出改进思路和具体的解决方案, 为类似工程问题提供参考。

关键词: 计算机联锁; 站间联系电路; 重启; 发车锁闭

中图分类号: U284.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0095-06

Problem Analysis and Improvement of Liaison Circuit Between Stations

Hu Jinghai, Wang Yucong, Cai Weiwei

(CASCO Signal Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: When it is not possible to install a distant signal between two adjacent railway stations, a liaison circuit between the stations can be used as a block device. This paper mainly studies the typical problems that involve the acquisition drive circuit which occur when Computer Based Interlocking (CBI) is combined with the liaison circuit between the stations, including the problem of automatic reversal of section direction when the CBI system of the receiving station restarts, and the problem of “double approaching” when a departure route is set and then immediately canceled. This paper analyzes the causes, and puts forward improvement ideas and specific solutions in order to provide reference for similar engineering problems.

Keywords: CBI; liaison circuit between stations; restart; departure route locking

甲乙两站均采用计算机联锁系统(CBI)结合继电器实现站间联系电路逻辑, 站场结构如图1所示。其中甲站当前为发车站, 乙站当前为接车站。CBI

设备采集站间联系电路中关键继电器的状态, 用于区间方向和闭塞状态的显示, 以及作为发车信号开放的检查条件, 同时驱动相关继电器用于动作站间联系继电器, 以实现区间运行方向的改变等。甲乙两站既有CBI采集、驱动的继电器如表1中方式一所示。

两站之间均未排列接发车进路, 区间空闲, 站间联系电路工作正常, 如图2~5所示, 其中FSJ为CBI驱动, 图5中仅做逻辑示意。甲站操作显示

收稿日期: 2022-03-02; 修回日期: 2023-06-20

基金项目: 卡斯柯信号有限公司科研开发项目(RA-11119002)

第一作者: 胡井海(1988—), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向: 铁道信号, 邮箱: hujinghai@casco.com.cn。

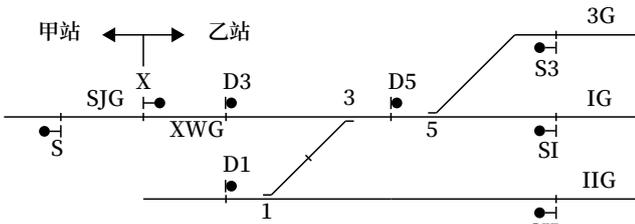


图1 举例站示意

Fig.1 Schematic diagram of an example station

表1 计算机联锁采集驱动方式

Tab.1 CBI acquisition drive mode

方式	采集	驱动
方式一	一照查继电器 (1ZCJ)、二照查继电器 (2ZCJ)、监督区间继电器 (JQJ)、接近预告轨道继电器 (JYGJ)、接车继电器 (JJ)、发车锁闭继电器 (FSJ)、股道检查继电器 (GJJ)、故障按钮继电器 (GAJ)	FSJ、GJJ、GAJ
方式二	1ZCJ、2ZCJ、JQJ、JYGJ、线路继电器 (XLJ)、FSJ、GJJ、正电继电器 (ZDJ)、JJ	FSJ、GJJ、ZDJ、JJ
方式三	1ZCJ、2ZCJ、JQJ、JYGJ、XLJ、FSJ、GJJ、ZDJ、JJ	FSJ、GJJ、ZDJ

界面 (Man Machine Interface, MMI) 中“S-发车方向”表示灯点亮, 乙站 MMI 中“X-接车方向”表示灯点亮。

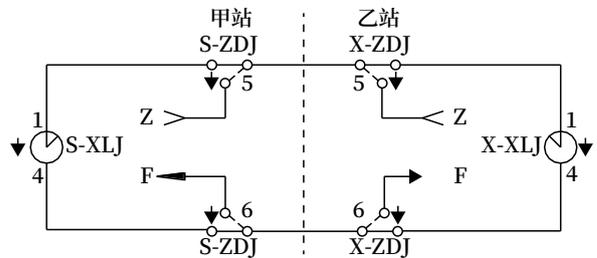


图2 站间联系电路 (一)

Fig.2 Liaison circuit between stations(1)

1 问题一: 接车站CBI设备重启后, 两站区间方向自动翻转

1.1 现象描述

由于某种原因 (例如 CBI 判断发生无驱动有采

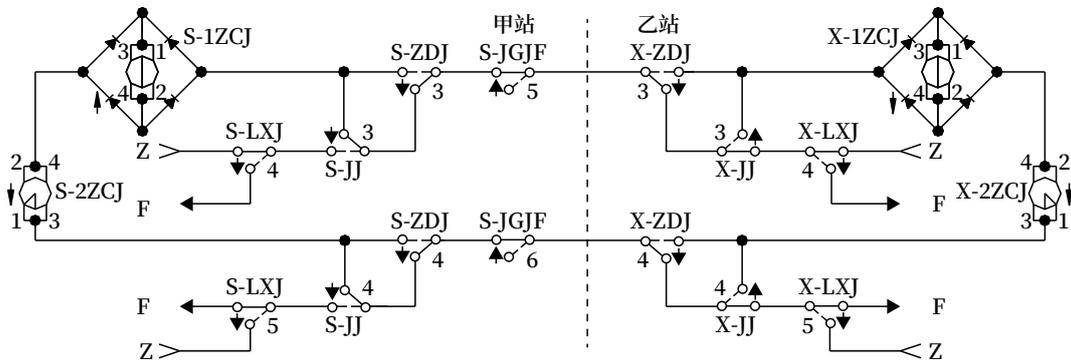


图3 站间联系电路 (二)

Fig.3 Liaison circuit between stations(2)

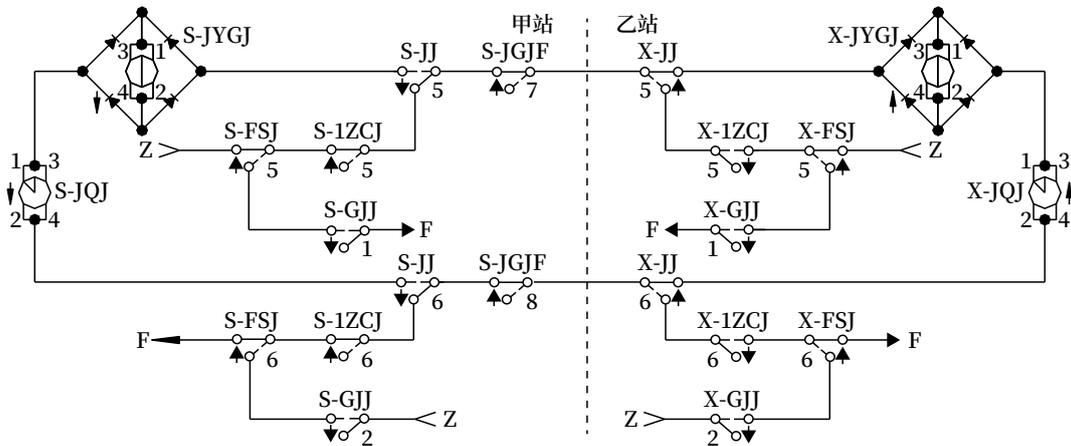


图4 站间联系电路 (三)

Fig.4 Liaison circuit between stations(3)

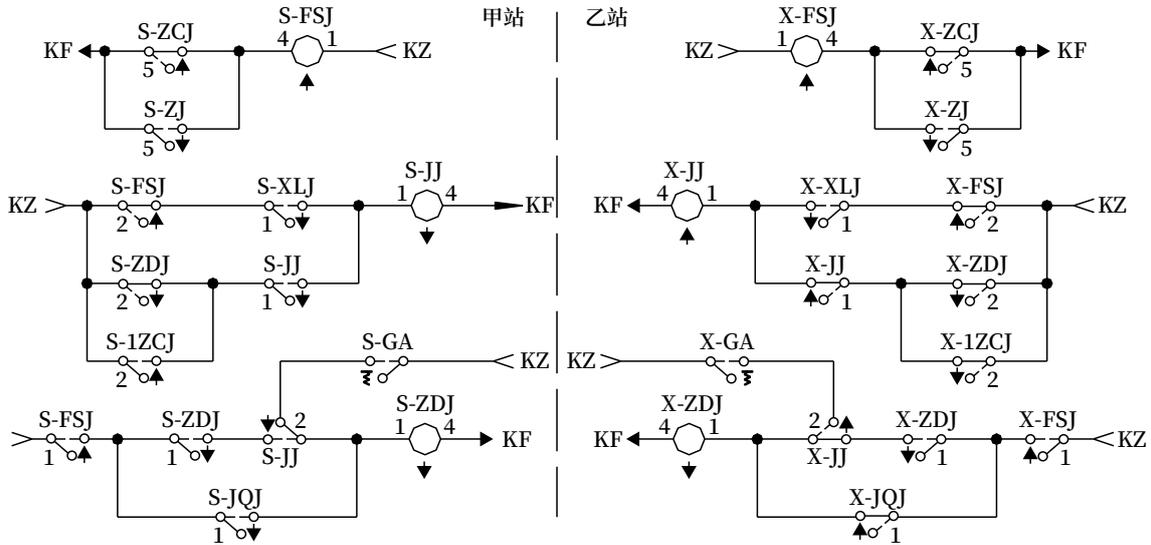


图5 站间联系电路 (四)
Fig.5 Liaison circuit between stations(4)

集现象), 乙站 CBI 发生双系重启现象。重新启动后, 甲站 MMI 中“S- 发车方向”表示灯灭灯, “S- 接车方向”表示灯点亮, 乙站 MMI 中“X- 发车方向”表示灯点亮, “X- 接车方向”表示灯灭灯。

1.2 原因分析

采用 CBI 软件驱动方式时, 软件逻辑分为: 与 (*), 或 (+), 非 (.N.) 3 种。表 1 中方式一所示, 定义 X-FSJ、X-GJJ、X-GA 参数和 X-FSJ-OUT、X-GJJ-OUT、X-GA-OUT 参数, X-FSJ、X-GJJ、X-GA 为中间参数, X-FSJ-OUT、X-GJJ-OUT、X-GA-OUT 为 CBI 驱动的真实继电器, X-FSJ 的软件内部逻辑为: $X-FSJ = X-ZCJ + D3-ZJ$, $X-FSJ-OUT = X-FSJ$, 与图 5 中继电逻辑一致, 可知当乙站未排列向 X 的发车进路时 $X-FSJ \uparrow$ 。图 4 中 X-GJJ 的软件内部逻辑为: $X-GJJ = SI-LKJ * 5DG-DGJ * 3DG-DGJ * XWG-DGJ * 5-DBJ * 3-DBJ * .N.D5-KJ * .N.D5-ZJ * .N.D3-KJ * .N.D3-ZJ * .N.X-LKJ * X-LZJ$, $X-GJJ-OUT = X-GJJ$, 与《6502 电气集中电路》中逻辑一致。可知当乙站未排列向 X 的发车进路时, $X-GJJ \downarrow$ 。

当乙站 CBI 在重启过程中或重启后上电解锁之前, 乙站 CBI 所有驱动的继电器均为落下状态, 由于乙站 $X-FSJ \downarrow$, 导致站间联系电路发生动作, 变化如下。

1) 乙站 $X-ZDJ \uparrow$, 其电路为: $KZ-X-FSJ_{11-13}-$

$X-JQJ_{11-12}-X-ZDJ_{1-4}-KF$, 如图 5 所示;

2) 甲站 $S-XLJ \uparrow$, 其电路为: $Z-X-ZDJ_{52-51}-S-ZDJ_{51-53}-S-XLJ_{1-4}-S-ZDJ_{63-61}-X-ZDJ_{61-62}-F$, 如图 2 所示;

3) 甲站 $S-JJ \uparrow$, 其电路为: $KZ-S-FSJ_{21-22}-S-XLJ_{11-12}-S-JJ_{1-4}-KF$, 如图 5 所示;

4) 乙站 $X-1ZCJ \uparrow$, 其电路为: $Z-S-LXJ_{43-41}-S-JJ_{32-31}-S-ZDJ_{33-31}-S-JGJF_{52-51}-X-ZDJ_{31-32}-X-1ZCJ_{1, 3-2, 4}-X-2ZCJ_{2, 4-1, 3}-X-ZDJ_{42-41}-S-JGJF_{61-62}-S-ZDJ_{41-43}-S-JJ_{41-42}-S-LXJ_{51-53}-F$, 同时甲站 $S-1ZCJ \downarrow$, 甲站 S 口变为接车方向, 如图 3、6 所示;

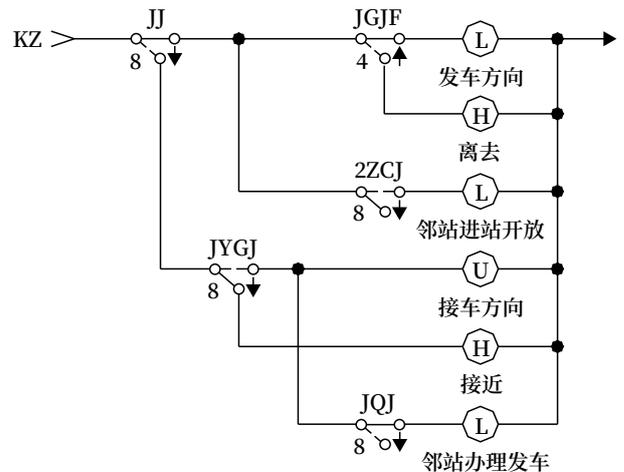


图6 操作显示界面表示灯逻辑电路
Fig.6 Logic circuit for the MMI indicator lights

5) $X-FSJ \downarrow$ 、 $X-ZDJ \uparrow$ 、 $X-1ZCJ \uparrow$ 使乙站

X-JJ ↓, 如图 5 所示。

乙站 CBI 重启成功并执行上电解锁命令后, X 口变为发车方向, 如图 6 所示。

采用 CBI 系统时, 图 6 中表示灯软件逻辑分别为: 发车方向表示灯 X-FCD=.N.X-JJ*SJG-DGJ, 离去表示灯 X-LQD=.N.X-JJ*.N.SJG-DGJ, 邻站进站开放表示灯 X-LZJZKFD=.N.X-JJ*X-ZZCJ, 接车方向表示灯 X-JCD=X-JJ*X-JYGJ, 接近表示灯 X-JJD=X-JJ*.N.X-JYGJ, 邻站办理发车表示灯 X-LZBLFCD=X-JJ*X-JYGJ*.N.X-JQJ。

1.3 解决方式一

乙站 CBI 重启过程中停止驱动 FSJ, 相当于乙站办理了发车进路, 而其他外部继电电路可以正常工作, 进而导致区间方向自动进行翻转。甲乙两站 CBI 设备可将表 1 中方式一 X-JJ 和 X-ZDJ 原继电逻辑由 CBI 软件实现并驱动, 即采用表 1 中方式二的采集、驱动方式既可避免 1.1 节现象发生, 又可取消图 5 中的全部配线工作。原 X-JJ 与 X-ZDJ 电路转变为 CBI 软件逻辑为: $X-JJ=X-XLJ*X-FSJ+X-JJ*.N.X-ZDJ+X-JJ*.N.X-1ZCJ$, $X-JJ-OUT=X-JJ$, $X-ZDJ=X-GA*.N.X-JJ+.N.X-FSJ*X-JQJ+.N.X-FSJ*X-ZDJ*X-JJ$, $X-ZDJ-OUT=X-ZDJ$, 与继电电路逻辑一致。

当乙站 CBI 重启过程中, X-FSJ、X-GJJ、X-ZDJ、X-JJ 全部处于落下状态, 断开了图 2 中甲站 S-XLJ 吸起的电源条件。乙站 CBI 重启成功并执行上电解锁命令后, 站间联系电路变化如下:

1) 甲站: S-JGJF ↑、S-FSJ ↑, 其余继电器全部为落下状态;

2) 乙站: X-FSJ ↑, 其余继电器全部为落下状态。

甲站 MMI 中“S-发车方向”表示灯点亮, 乙站 MMI 中“X-发车方向”表示灯点亮, 甲乙两站出现“双发”现象, 由于 S-1ZCJ 与 X-1ZCJ 均为落下状态, 所以任一站办理发车进路都不能开放出站信号。若要使电路恢复正常状态, 需在其中一站 MMI 中按压故障按钮 (GA), 以甲站电路为例 (乙站同理) 站间联系电路变化如下:

1) 甲站 S-ZDJ ↑, 其电路为: $KZ-S-GA-S-JJ_{23-21}-S-ZDJ_{1-4}-KF$, 如图 5 所示;

2) 乙站 X-XLJ ↑, 其电路为: $Z-S-ZDJ_{52-51}-X-ZDJ_{51-53}-X-XLJ_{1-4}-X-ZDJ_{63-61}-S-ZDJ_{61-62}-F$, 如图 2 所示;

3) 乙站 X-JJ ↑, 其电路为: $KZ-X-FSJ_{21-22}-X-XLJ_{11-12}-X-JJ_{1-4}-KF$, 如图 5 所示;

4) 甲站 S-1ZCJ ↑, 其电路为: $Z-X-LXJ_{43-41}-X-JJ_{32-31}-X-ZDJ_{33-31}-S-JGJF_{51-52}-S-ZDJ_{31-32}-S-1ZCJ_{1, 3-2, 4}-S-2ZCJ_{2, 4-1, 3}-S-ZDJ_{42-41}-S-JGJF_{62-61}-X-ZDJ_{41-43}-X-JJ_{41-42}-X-LXJ_{51-53}-F$, 如图 3 所示;

5) 乙站 X-JYGJ ↑、X-JQJ ↑, 其电路为: $Z-S-FSJ_{52-51}-S-1ZCJ_{52-51}-S-JJ_{53-51}-S-JGJF_{71-72}-X-JJ_{51-52}-X-JYGJ_{1, 3-2, 4}-X-JQJ_{1, 3-2, 4}-X-JJ_{62-61}-S-JGJF_{81-82}-S-JJ_{61-63}-S-1ZCJ_{61-62}-S-FSJ_{61-62}-F$, 乙站 X 口变为接车方向, 如图 4、6 所示。

1.4 解决方式二

对比解决方式一, 将表 1 中方式二由 CBI 驱动的 JJ 继电器, 改为由继电电路驱动, 即变为表 1 中方式三所示的驱动采集方式。当乙站 CBI 重启过程中, X-JJ 保持吸起, 其电路为: $KZ-X-ZDJ_{21-23}-X-JJ_{11-12}-X-JJ_{1-4}-KF$ 或 $KZ-X-1ZCJ_{21-23}-X-JJ_{11-12}-X-JJ_{1-4}-KF$, 如图 5 所示。X-FSJ、X-GJJ、X-ZDJ 全部处于落下状态, 断开了图 2 中甲站 S-XLJ 吸起的电源条件, 而图 3、4 中的 1ZCJ、2ZCJ、JYGJ、JQJ 状态则不受 CBI 重启影响。乙站 CBI 重启成功并执行上电解锁命令后, 站间联系电路变化如下:

1) 甲站: S-JGJF ↑、S-FSJ ↑、S-1ZCJ ↑, 其余继电器全部为落下状态;

2) 乙站: X-FSJ ↑、X-JJ ↑、X-JYGJ ↑、X-JQJ ↑, 其余继电器全部为落下状态。

甲站 MMI 中“S-发车方向”表示灯点亮, 乙站 MMI 中“X-接车方向”表示灯点亮, 乙站 CBI 重启后站间联系电路自动复原。

1.5 对比分析

针对问题一所提出的两种方案, 均将 ZDJ 改为 CBI 软件实现并驱动, 区别在于方式一中 CBI 多驱

动了JJ。而方式一在接车站重启后，虽然站间联系电路本身没有发生改方动作，但是在MMI上会显示“双发”，容易引起误解，并需要车站值班员办理“事故”按钮操作复原故障电路，增加人为操作确认的手续，且与现行技术条件不符；方式二既满足区间运行方向没有改变，同时在接车站重启后，站间联系电路能够恢复原状态，因此对比分析，认为方式二更优。

2 问题二：排列发车进路后瞬间取消该进路，导致两站出现“双接近”故障

2.1 现象描述

乙站办理SI-X的发车进路后，随即取消该条进路，此时甲站MMI中“S-接近”表示灯点亮，“S-发车方向”表示灯灭灯，乙站MMI中“X-接近”表示灯点亮，“X-发车方向”表示灯灭灯，甲乙两站出现“双接近”现象。

2.2 原因分析

乙站办理SI-X的发车进路，电路动作顺序如1.2节中1)~3)所示，取消SI-X的发车进路后，站间联系电路变化如下：

1) 乙站X-ZDJ ↓，X-FSJ ↑断开X-ZDJ的励磁电源，如图5所示；

2) 由于甲站S-JJ ↑且乙站X-ZDJ ↓、X-JJ ↑，图3中Z-S-LXJ₄₃₋₄₁-S-JJ₃₂₋₃₁-S-ZDJ₃₃₋₃₁-S-JGJF₅₂₋₅₁-X-ZDJ₃₁₋₃₃-X-JJ₃₁₋₃₂-X-LXJ₄₁₋₄₃-Z与F-S-LXJ₅₃₋₅₁-S-JJ₄₂₋₄₁-S-ZDJ₄₃₋₄₁-S-JGJF₆₂₋₆₁-X-ZDJ₄₁₋₄₃-X-JJ₄₁₋₄₂-X-LXJ₅₁₋₅₃-F电路不通，导致S-1ZCJ ↓、X-1ZCJ ↓，S-JYGJ ↓、X-JYGJ ↓、S-JQJ ↓、X-JQJ ↓，两站均变为接车站，如图6所示。

出现“双接近”现象后，由于S-JJ与X-JJ都在吸起状态，所以甲乙两站按压故障按钮无法使站间联系电路复原。若要电路复原可采取如下方法：

方法一：拔掉接车继电器，以乙站为例介绍（甲站同理）。拔出X-JJ使其断电落下后，再重新插入原处，强制断开X-JJ的自保支路，如图5所示，

X-JJ ↓，乙站变为发车站，站间联系电路变化如下：

1) 乙站X-1ZCJ ↑，其电路为：Z-S-LXJ₄₃₋₄₁-S-JJ₃₂₋₃₁-S-ZDJ₃₃₋₃₁-S-JGJF₅₂₋₅₁-X-ZDJ₃₁₋₃₃-X-JJ₃₁₋₃₃-X-1ZCJ_{1、3-2、4}-X-2ZCJ_{2、4-1、3}-X-JJ₄₃₋₄₁-X-ZDJ₄₃₋₄₁-S-JGJF₆₁₋₆₂-S-ZDJ₄₁₋₄₃-S-JJ₄₁₋₄₂-S-LXJ₅₁₋₅₃-F，如图3所示；

2) 甲站S-JYGJ ↑、S-JQJ ↑，其电路与1.3节中5)一致，至此站间联系电路恢复常态。

方法二：重启CBI。在CBI重启过程中使X-JJ ↓，其电路动作顺序与方法一原理完全相同。

2.3 解决方式一

若既有CBI采用表1中方式一的驱动采集方式时，解决方法如下：当X-ZDJ落下时，X-1ZCJ还未励磁吸起，会出现“双接近”现象。修改原图5中ZDJ励磁电路，通过并联电阻电容的方法，使ZDJ缓放3s以上，可避免该问题发生，如图7所示。

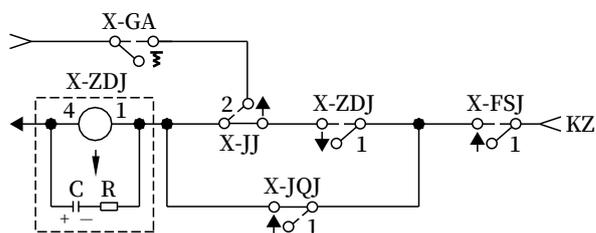


图7 修改后的ZDJ电路
Fig.7 Modified ZDJ circuit

2.4 解决方式二

若既有CBI采用表1中方式二与方式三的驱动采集方式时，解决方法如下：需修改CBI驱动ZDJ的动作时序。原X-ZDJ的软件驱动逻辑为： $X-ZDJ = X-GA \cdot N.X-JJ + N.X-FSJ \cdot X-JQJ + N.X-FSJ \cdot X-ZDJ \cdot X-JJ$ ，在此基础上增加X-ZDJT参数，即图7中X-ZDJ继电器的电阻电容电路，假设延时时间为3s，软件内部逻辑为： $TIME\ DELAY = 3\ s$ ， $X-ZDJT = N.X-ZDJ$ 。当X-ZDJ为1时，X-ZDJT逻辑值立即为0，当X-ZDJ为0时，X-ZDJT在3s后逻辑值为1。定义X-ZDJF参数， $X-ZDJF = X-ZDJ + X-ZDJF \cdot N.X-ZDJT$ ，CBI上电启动时，X-ZDJ值为0，X-ZDJF值为0；当X-ZDJ值由0

变为 1 时, X-ZDJF 逻辑值立即变为 1; 当 X-ZDJ 值由 1 变为 0 时, X-ZDJF 逻辑值在 3 s 后变为 1。X-ZDJ-OUT=X-ZDJF。X-ZDJ 继电器的吸起落下状态随 X-ZDJ-OUT 参数而变化。即 CBI 驱动的正电继电器, 满足励磁条件时立即吸起, 不满足条件时延时落下, 延时时间可由 CBI 软件根据实际需求进行灵活配置。

3 结束语

综合考虑, 为了同时解决计算机联锁系统站间联系结合电路中两个场景下出现的问题, 更优的处理方式应为: CBI 设备将继电电路中 ZDJ 的逻辑纳入软件实现并驱动, 用以解决问题一“接车站 CBI 设备重启后, 两站区间方向自动翻转”, 与此同时, CBI 软件实现的 ZDJ 逻辑可考虑增加延时缓放处理, 用于解决问题二“发车站排列发车进路后瞬间取消该进路, 导致两站双接近故障”。

参考文献

[1] 何文卿. 6502 电气集中电路 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1997.

[2] 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.

[3] 中华人民共和国国家铁路局. 集中联锁结合电路一般原则: TB/T 2307-2017 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.

[4] 中华人民共和国国家铁路局. 铁路信号故障 -

安全原则: TB/T 2615-2018 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.

[5] 晏子峰, 叶云龙, 杨卫东. 继电时序电路中 RC (电阻 - 电容) 电路的作用 [J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24 (4): 85-87.

Yan Zifeng, Ye Yunlong, Yang Weidong. Function of RC Circuit in Relay Sequential Circuit [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(4): 85-87.

[6] 王殿宝. 单线自动站间联系电路的改进 [J]. 铁道通信信号, 2016, 52 (6): 49, 65.

Wang Dianbao. Improvement of Automatic Inter-Station Liaison Circuit within Single Track Line [J]. Railway Signalling & Communication, 2016, 52(6): 49, 65.

[7] 王艳平. 关于站间联系电路不能正常解锁的分析与处理 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2009, 6 (1): 42-44.

Wang Yanping. Analysis and Proposal of Abnormal Release of Liaison Circuit between Stations [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2009, 6(1): 42-44.

[8] 杨美君. 联锁驱动继电器动作时序对低频码的影响及优化分析 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (9): 13-18.

Yang Meijun. Influence of Interlocking Drive Relay Actions on Low-Frequency Codes and Its Optimization Analysis [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2021, 18(9): 13-18.

铁路通信信号工程技术期刊简介

《铁路通信信号工程技术》由中国铁路通信信号集团有限公司主管, 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司主办, 在铁路电务科研、设计、施工及维修等单位有较大影响, 深得科技人员的好评。经国家新闻出版总署批准, 自 2005 年 12 月起面向国内外公开发行人。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。

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2023.08.019

双极型晶体管PN结电容温度特性研究

温术来, 张 磊, 于树永, 卢 江

(北京铁路信号有限公司, 北京 102613)

摘要: 以轨道电路系统中常用某型号双极型晶体管为对象, 结合轨道电路系统信号特点, 研究环境温度对其PN结电容的影响规律。研究发现, 该款晶体管基极-发射极与基极-集电极PN结电容变化规律基本一致, 即随外加电场增加PN结, 电容值也随之增加, 且由势垒电容逐渐向扩散电容转变。当外加电场低于内建电场时, PN结电容值随环境温度升高而增加; 当外加电场高于内建电场时, PN结电容值则随环境温度升高而逐渐减小。本研究对晶体管选型、维护及故障失效分析具有实际工程价值。

关键词: 双极型晶体管; 结电容; PN结

中图分类号: TN321

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0101-06

Research on Temperature Characteristics of PN Junction Capacitance of Bipolar Transistor

Wen Shulai, Zhang Lei, Yu Shuyong, Lu Jiang

(Beijing Railway Signal Co., Ltd., Beijing 102613, China)

Abstract: In this paper, taking a commonly-used model of bipolar junction transistor as an example, the patterns of the effect of environmental temperature on the PN junction capacitance are investigated based on the signal features of track circuit systems. The results show that the PN junction capacitance between the base and emitter has the same variation trend as the PN junction capacitance between the base and collector. This means that as the external electric field rises, the value of the PN junction capacitance also increases, changing from barrier to diffusion capacitance. The PN junction capacitance decreases as the temperature increases when the external electric field is higher than built-in field. However, when the external field is lower than built-in field, the PN junction capacitance increases as the temperature rises. The study result is valuable to device selection, maintenance and fault analysis in practical engineering.

Keywords: bipolar junction transistor; junction capacitance; PN junction

收稿日期: 2022-04-12; 修回日期: 2023-06-17

基金项目: 北京铁路信号有限公司科研开发项目(2000-K1220003)

第一作者: 温术来(1983—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向: 轨道电路器件及性能, 邮箱: shulaiwen@163.com.

1 概述

双极型晶体管是目前轨道电路发送器中功率放大模块的核心元器件, 主要是对轨道电路信号进行

功率放大, 以确保其能实现远距离传输, 该晶体管性能对轨道电路是否稳定可靠工作具有显著影响。一般来说, PN 结是影响晶体管实现功能的内在因素, 诸多晶体管重要参数如放大倍数 β 及截止频率 f_T 均与之密切相关^[1-6], 因此对 PN 结展开研究有助于对晶体管性能进行判断。PN 结电容是反映晶体管 PN 结微观结构的敏感参数, PN 结状态发生改变均可引起 PN 结电容值发生变化。可见, 对 PN 结电容特性进行分析可有效反映晶体管状态, 进而对轨道电路发送器放大模块工作状态及故障失效进行判断, 具有实际工程意义。

晶体管 PN 结电容特性一直是该领域科技工作者的热点研究问题之一^[7]。林和等人测量锗隧道二极管和离子注入型 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ PN 结时发现电容-电压曲线存在异常现象, 并推导出隧道电容的表达式^[8]。樊启勇等人发现当正向偏压小于 30 mV 时 PN 结扩散电容的对数与正向偏压成正比, 当正向偏压大于 30 mV 时则会偏离线性关系^[9]。李潮锐等人则测量了 PN 结电容与偏置电压关系, 通过 $n = 1/2$ 及 $n = 1/3$ 两模型共同描述, 更准确地获得 PN 结杂质浓度分布规律及物理参数^[10]。任舰等人则报道了晶格匹配 $\text{In}_{0.17}\text{Al}_{0.83}\text{N}/\text{GaN}$ 异质结圆形平面结构肖特基二极管的电容频散特性, 发现当频率高于 200 kHz 后积累区电容随频率出现增加现象^[11]。由此可见, PN 结电容的研究在理论、试验及模型建立等方面均取得了积极成果, 但目前轨道信号领域对晶体管 PN 结特性研究的报道相对较少, 对轨道电路产品分析存在一定的制约, 因此有必要结合轨道电路产品应用特点, 对晶体管 PN 结特性展开积极探索, 实现工程应用价值。

从现场应用来看, 轨道电路发送器附近环境温度相对较高, 尤其在长距离传输的情况下该现象更为显著, 这是由于发送器中功率放大模块放热所致。周围环境温度的升高又有可能反作用于发送器功率放大模块中的元器件。因此, 环境温度对发送器功率放大模块中晶体管的影响则成为重点关注问题。鉴于此, 本文以轨道电路发送器中双极型晶体管为研究对象, 选择 PN 结电容这一关键参数展开研究, 针对轨道电路系统的信号特点及使用环境, 系统研

究该晶体管基极-发射极、基极-集电极间 PN 结电容在不同环境温度下的变化规律, 并对相应的内在机制进行探讨。该研究为晶体管在复杂环境下使用、维护及故障分析提供数据支持。

2 试验方法与过程

试验样品为轨道电路发送器功率放大模块中双极型 NPN 晶体管, 放大倍数 $\beta = 80 \sim 100$ 。试验测试仪器为 HIOKI IM3570 型号阻抗分析仪, 用于测量晶体管基极-发射极、基极-集电极 PN 结电容值, 测试时电压范围 0.1 ~ 1.2 V, 采用轨道电路系统信号频率, 分别为 1 700 Hz、2 000 Hz、2 300 Hz 及 2 600 Hz; TPS TL-05-70-FH 高低温湿热试验箱提供恒定环境温度, 温度范围 -60 ~ 140 °C。

试验过程: 将样品置于试验箱中, 按预定温度进行设置, 当试验箱达到设定温度后, 保温 1 h, 然后开始测量。测试时固定测试频率, 分别测试晶体管基极-发射极及基极-集电极 PN 结在 0.1 ~ 1.2 V 电压范围内的电容值, 并进行数据采集处理。测试如图 1 所示, 当测试基极-发射极间 PN 结电容时, 采用阻抗分析仪探头连接 B 端子及 E 端子; 当测试基极-集电极间 PN 结电容时, 采用阻抗分析仪探头连接 B 端子及 C 端子。

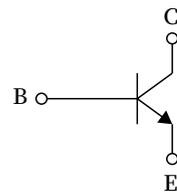


图1 测试示意
Fig.1 Testing diagram

3 结果与讨论

3.1 基极-发射极

在不同环境温度下, 外加电场对晶体管基极-发射极 PN 结电容值的影响规律如图 2 所示。由图 2 可见, 当环境温度保持不变时, PN 结电容值随外加电场的增加而逐渐增加。在 PN 结电容值随外加电场增加的过程中出现一处明显地突变。该突变区

域内外加电场与PN结内建电场大致相等。随环境温度的升高,突变区域向左偏移,即向低外加电场的方向偏移。而当环境温度超过80°C后,突变区域出现突然左移的现象,说明此时晶体管内部微观形态受环境温度影响发生突变。

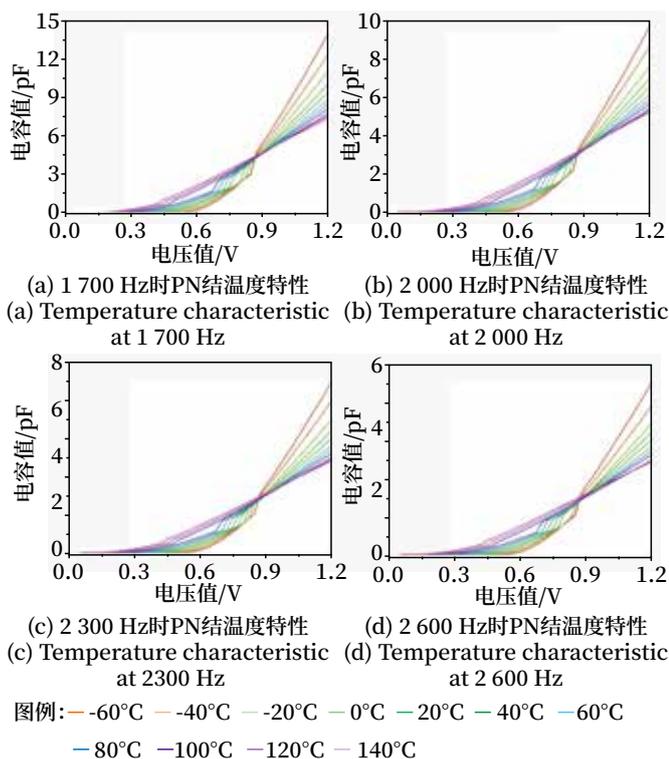
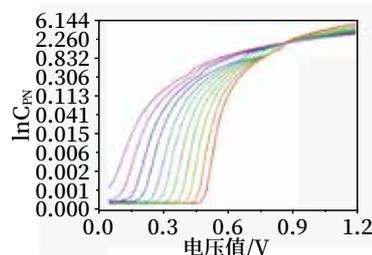


图2 不同频率下晶体管基极-发射极PN结电容温度特性研究
Fig.2 The temperature characteristic of PN junction between base and emitter of bipolar junction transistor at different working frequency

PN结电容值随外加电场变的现象与其微观结构密切相关。为进一步探讨PN结微观结构与电容值的关系,按文献[12]中所述,将1700 Hz时不同环境温度下的PN结电容值取对数作为纵坐标,并以外加电场值为横坐标,如图3所示。从图3中可以看出,该对数值随外加电场变化规律大致可分为3部分:1) 当外加电场较小时PN结电容值随之呈线性变化,且变化幅度较小,甚至不发生明显变化。如当环境温度为-60°C时,PN结电容值在0.1~0.4 V范围内变化不大,该区域为“小电压区域”。该“小电压区域”受环境温度影响显著,即随环境温度逐渐升高时逐渐缩小,在120°C时“小电压区域”基本消失;2) 当外加电场超过“小电压

区域”范围而未达到内建电场时,PN结电容的对数值随外加电场的增加呈现非线性关系;3) 在外加电场超过内建电场的范围后,随外加电场的增加,PN结电容值的对数值与外加电场值基本呈线性关系。该对数曲线呈现这种形态主要与外加电场作用下PN结电容类型不同所致,分析认为在“小电压区域”内PN结电容以势垒电容为主,当外加电场增加超出内建电场后,PN结电容主要体现为扩散电容;而在“小电压区域”与内建电场之间PN结电容是势垒电容与扩散电容共同作用的结果。



图例: -60°C -40°C -20°C 0°C 20°C 40°C 60°C
-80°C -100°C -120°C -140°C

图3 1 700 Hz晶体管基极-发射极PN结电容取自然对数 $\ln C_{PN}$ 时温度特性

Fig.3 The $\ln C_{PN}$ temperature characteristic of PN junction between base and emitter of bipolar junction transistor at a working frequency of 1 700 Hz

另外,从图3中可见PN结电容值不仅与外加电场大小有关,其受环境温度影响也存在一定的规律性。当外加电场低于内建电场时,随环境温度的升高,PN结电容值逐渐增加;当外加电场高于内建电场时,随环境温度的升高,PN结电容值逐渐降低。这是如前所述,PN结电容主要是势垒电容及扩散电容共同作用的结果。当外加电场低于PN结内建电场时,主要以势垒电容为主,势垒电容主要反映PN结空间电荷区的电荷量随外界条件的变化,环境温度升高则导致空间电荷区电荷热运动加剧,电荷外溢效果增强,空间电荷区厚度变薄,PN结电容则增加;当外加电场高于PN结内建电场时,主要以扩散电容为主,扩散电容则用来描述空间电荷区外侧的非平衡少数子积累引起的电容效应。随环境温度的升高,非平衡少数子运动加强,削弱了PN结两侧少子的积累效应,致使PN结电容降低。

使用频率对双极型晶体管基极-发射极PN结电容值的影响如图4所示。从图4可见在不同环境

温度下, 随晶体管使用频率的增加, 基极 - 发射极 PN 结电容值逐渐降低。这是由于在施加一定频率的信号时, 空间电荷区区域不断发生充放电, 从而形成电容效应。随着信号频率的增加, 空间电荷区两侧电荷响应相对变慢, 从而导致空间电荷区两侧电荷数量变少, 由此产生的电容效应也逐渐减弱, 因此 PN 结电容值随使用频率的增加逐渐降低, 这一现象与文献 [13] 报道基本一致。另外发现, 虽然使用频率不同, 但 PN 结电容值发生突变对应的外加电场值并未发生明显变化, 可见该突变区域为双极型晶体管本征特性, 受环境温度影响很大, 与信号频率关系不大。

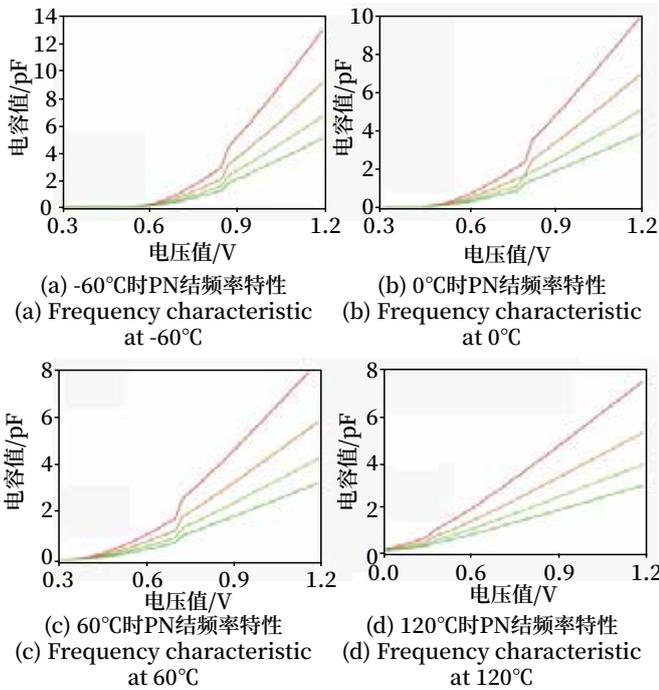


图4 不同环境温度下晶体管基极-发射极PN结电容频率特性研究
Fig.4 The frequency characteristic of PN junction between base and emitter of bipolar junction transistor at different ambient temperature

3.2 基极-集电极

在研究晶体管基极 - 发射极 PN 结电容温度特性的基础上, 进一步研究晶体管基极 - 集电极间 PN 结温度特性, 以便更深入明确晶体管器件整体温度特性。图 5 为不同环境温度下晶体管基极 - 集电极间 PN 结电容温度特性, 频率分别为 1 700 Hz、2 000 Hz、2 300 Hz 及 2 600 Hz。由图 5 可见, 基

极 - 集电极 PN 结与基极 - 发射极 PN 结温度特性基本保持一致, 即在不同环境温度下基极 - 集电极 PN 结电容值随外加电场的增加逐渐增大, 且发现在随外加电场增加的过程中 PN 结电容值出现突变现象, 突变区域对应的外加电场值则随环境温度的增加逐渐降低。以使用频率 1 700 Hz 为例, 如图 6 所示, 将晶体管基极 - 集电极 PN 结电容值取对数, 并以外加电场值为横坐标作图。结合图 5、6 进行分析, 基极 - 集电极 PN 结电容值随外加电场变化也存在 3 个区域: “小电压区域”内主要以势垒电容为主; 外加电场大于内建电场时主要以扩散电容为主; “小电压区域”与内建电场之间势垒电容及扩散电容同时存在。

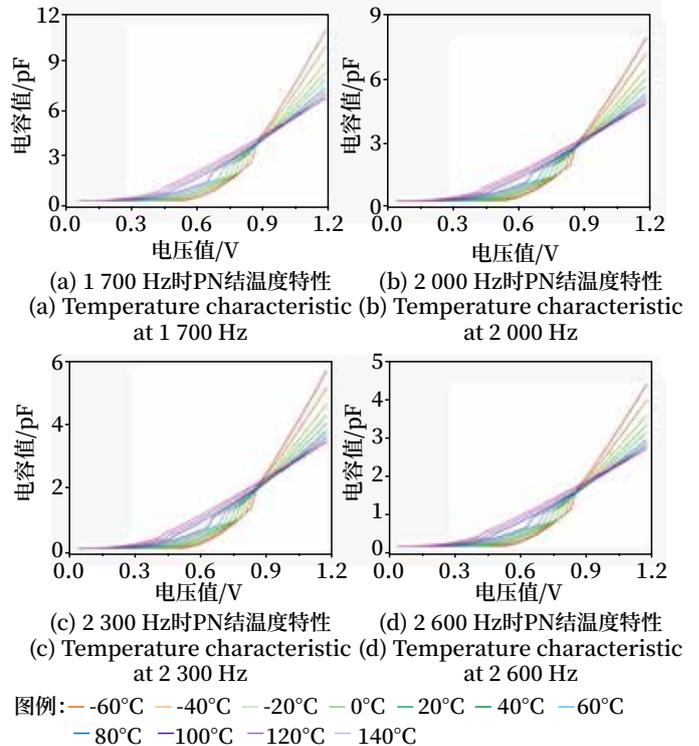
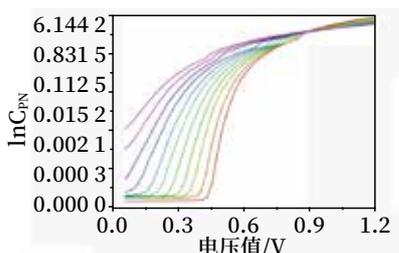


图5 不同频率下晶体管基极-集电极PN结电容温度特性
Fig.5 The temperature characteristic of PN junction between base and collector of bipolar junction transistor at different working frequency

图 7 则选取 4 种环境温度下使用频率对基极 - 集电极 PN 结电容值的影响。从图 7 可见对于晶体管基极 - 集电极 PN 结电容来讲, 在不同环境温度均出现了随使用频率的增加, PN 结电容值逐渐下降的规律。与基极 - 发射极 PN 结电容随使用频率变化的现象一致, 同样是由于随着使用频率的增加, PN 结两侧的电荷来不及响应, 导致充放电过程滞缓, PN 结两侧充放电效应降低, 从而引发电容效应下降。



图例: -60°C -40°C -20°C 0°C 20°C 40°C 60°C
80°C 100°C 120°C 140°C

图6 1700 Hz晶体管基极-集电极PN结电容
取自然对数 $\ln C_{PN}$ 时温度特性研究

Fig.6 The $\ln C_{PN}$ temperature characteristic of PN junction between base and collector of bipolar junction transistor at a working frequency of 1700 Hz

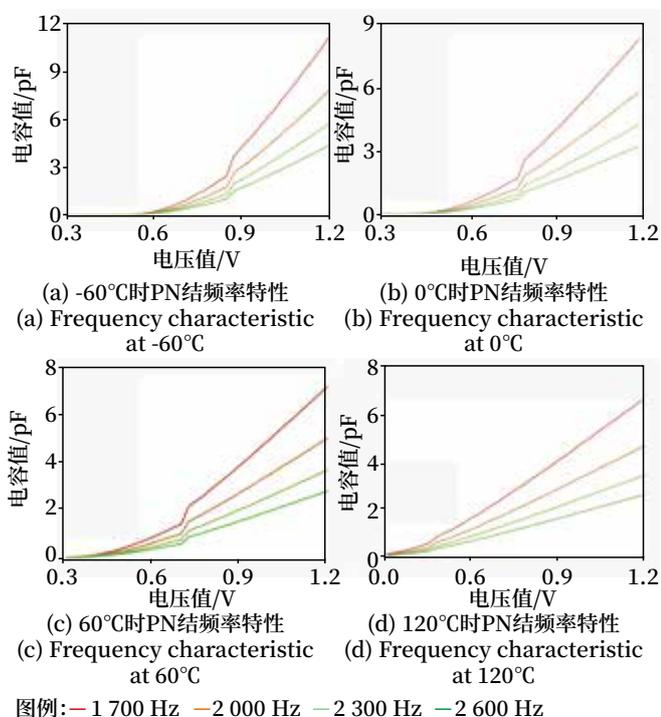


图7 不同环境温度下晶体管基极-集电极PN结电容频率特性研究
Fig.7 The frequency characteristic of PN junction between base and collector of bipolar junction transistor at different ambient temperature

3.3 轨道电路故障-安全问题讨论

由上述研究可知, 随环境温度的升高, 晶体管基极-发射极、基极-集电极PN结电容均出现显著变化, PN结电容对轨道电路工作的影响有以下两方面。

1) 信号传输通道阻抗失配。轨道电路信号传输通道充分考虑阻抗匹配原则。PN结电容受环境影响发生变化, 则晶体管输入阻抗及输出阻抗亦发生改变。这种情况下信号源内阻、晶体管负载与晶体管出现阻抗不匹配的情况, 这样降低轨道电路工作

的安全可靠性;

2) 晶体管偏置电路不适配。从上述研究数据可知, 随环境温度的升高, 晶体管PN结内建电场发生改变, 特别是当环境温度超过80°C后内建电场变化尤其明显。晶体管静态偏置电路设计和内建电场形成的PN结压降密切相关。当内建电场发生突变后, 原偏置电路则出现不适配的问题, 导致轨道电路信号失真。

需要说明的是, 以上两种可能情况需设计实验深入验证, 这将在后续工作中予以体现。

4 结论

本文以ZPW-2000A轨道电路发送器功率放大模块中某双极型晶体管为例, 系统研究晶体管基极-发射极及基极-集电极PN结电容温度特性, 并对相关机制进行简要分析, 主要结论如下。

1) 该晶体管基极-发射极、基极-集电极PN结电容值变化规律基本一致, 均随外加电场增加呈现递增规律; 随外加电场的增加, PN结电容值依次出现以势垒电容为主、势垒电容与扩散电容并存、以扩散电容为主等3个阶段的演化规律。

2) 晶体管基极-发射极、基极-集电极PN结电容值在随外加电场增加的过程中出现突变区域, 且突变区域对应的外加电场值随环境温度的升高而降低。当环境温度超过80°C时, 该外加电场值及其对应电容值出现突然降低的现象。

3) 在不同环境温度下, 晶体管基极-发射极、基极-集电极PN结电容值随使用频率的增加逐渐降低, 出现明显的电容频率散射现象。

参考文献

- [1] 胡蓉. 双极型晶体三极管倒置工作状态的参数分析[J]. 电子测试, 2019(19): 56-57.
Hu Rong. Parameter Analysis of Inverted Working State of Bipolar Type Crystal Transistor[J]. Electronic Test, 2019(19): 56-57.
- [2] 张宏强, 王勇, 刘乃安. 晶体三极管开关混频电路研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(9): 127-131, 136.

- Zhang Hongqiang, Wang Yong, Liu Naian. Research on BJT Switch Mixing Circuit[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(9): 127-131, 136.
- [3] 崔渊, 房鸿旭, 高倩, 等. 一种三极管放大电路参数及故障测试装置的设计 [J]. 江苏理工学院学报, 2020, 26 (6): 17-24.
- Cui Yuan, Fang Hongxu, Gao Qian, et al. Design of a Triode Amplifier Circuit Parameters and Fault Measuring Device[J]. Journal of Jiangsu University of Technology, 2020, 26(6): 17-24.
- [4] 张华杰. 功率晶体管直流增益温度变化率的研究及埋层结构优化 [J]. 电子元件与材料, 2019, 38 (11): 29-36.
- Zhang Huajie. Study on Temperature Ramp Rate of DC Gain of Power Transistor and Optimization of Buried Layer Structure[J]. Electronic Components and Materials, 2019, 38(11): 29-36.
- [5] 王宁, 李伟, 范文兵, 等. 红外光电晶体管结构参数优化及温度稳定性研究 [J]. 电子元件与材料, 2019, 38 (7): 55-62.
- Wang Ning, Li Wei, Fan Wenbing, et al. Optimization of Structural Parameters and Temperature Stability of Infrared Phototransistors[J]. Electronic Components and Materials, 2019, 38(7): 55-62.
- [6] 吴永辉, 魏洪涛, 刘军, 等. InP 双异质结双极晶体管的相位噪声特性 [J]. 半导体技术, 2019, 44 (7): 537-541, 547.
- Wu Yonghui, Wei Hongtao, Liu Jun, et al. Phase Noise Characteristics of InP DHBT Devices[J]. Semiconductor Technology, 2019, 44(7): 537-541, 547.
- [7] 夏逸骁, 陶雪慧. 碳化硅 MOSFET 结电容模型 [J]. 电力电子技术, 2020, 54 (10): 13-16.
- Xia Yixiao, Tao Xuehui. Junction Capacitance Model of SiC MOSFET[J]. Power Electronics, 2020, 54(10): 13-16.
- [8] 林和, 汤定元. PN 结带-带隧道电容的理论实验研究 [J]. 红外研究 (A 辑), 1987, 6 (2): 81-86.
- Lin He, Tang Dingyuan. Band to Band Tunneling Capacitance of Pn Junctions-Theoretical and Experimental Research[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1987, 6(2): 81-86.
- [9] 樊启勇, 侯清润. PN 结电容与正向直流偏压的关系 [J]. 物理与工程, 2009, 19 (1): 13-16.
- Fan Qiyong, Hou Qingrun. Influence of Forward Bias Voltage on the Capacitance of Pn Junction[J]. Physics and Engineering, 2009, 19(1): 13-16.
- [10] 李潮锐, 刘小伟. 二极管 p-n 结杂质浓度分布模型改进 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2008, 47 (3): 37-40, 46.
- Li Chaorui, Liu Xiaowei. An Improved Model for Analysis on Impurity Distribution in Diode p-n Junction[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2008, 47(3): 37-40, 46.
- [11] 任舰, 苏丽娜, 李文佳. 晶格匹配 In-0.17Al0.83N/GaN 异质结电容散射机制 [J]. 物理学报, 2018, 67 (24): 212-216.
- Ren Jian, Su Lina, Li Wenjia. Capacitance Scattering Mechanism in Lattice-Matched In_{0.17}Al_{0.83}N/GaN Heterojunction Schottky Diodes[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(24): 212-216.
- [12] 王立英, 冯列峰. PN 结型器件在交流小信号下的电容特性 [J]. 大学物理, 2018, 37 (1): 64-67, 76.
- Wang Liying, Feng Liefeng. Capacitance Characteristics of PN Junction Devices under AC Small Signal[J]. College Physics, 2018, 37(1): 64-67, 76.
- [13] 程星福, 刘显明, 陈伟民, 等. 发光二极管的反偏电容和电导特性研究 [J]. 光电子激光, 2014, 25 (4): 648-652.
- Cheng Xingfu, Liu Xianming, Chen Weimin, et al. Reverse-Biased Capacitance and Conductance Characteristics for Lighting Emitting Diodes[J]. Journal of OptoelectronicsLaser, 2014, 25(4): 648-652.

DOI: 10.3969/j.issn.1673-4440.2023.08.020

PCB印制板的通流量影响因素分析

牛颖聪

(北京铁路信号有限公司, 北京 102613)

摘要: 主要通过介绍影响 PCB 通流量的重要因素: 覆铜厚度、温升、走线宽度、走线位置等条件, 分析各因素对 PCB 通流量变化的影响; 通过控制单一变量, 来研究通流量的变化, 最终为印制板选择合适的制板参数, 使 PCB 设计更加合理。根据研究结果, 对 ZPW·F-K 型发送器的 PCB 参数进行核算, 确认发送器的参数选择符合设计要求。

关键词: 通流量; 影响因素; 覆铜厚度; 线宽

中图分类号: TH162

文献标志码: A

文章编号: 1673-4440(2023)08-0107-05

Analysis of Influencing Factors of PCB Current Carrying Capacity

Niu Yingcong

(Beijing Railway Signal Co., Ltd., Beijing 102613, China)

Abstract: This paper mainly introduces the important factors affecting the PCB current carrying capacity: copper thickness, temperature rise, trace width, trace positioning and other conditions that can change the current carrying capacity, and analyzes the influence of each factor on the change of PCB current carrying capacity. By controlling a single variable at a time, it studies the changes in such capacity so as to choose the appropriate board parameters for the printed boards, which makes PCB design more reasonable. According to the research results, the PCB parameters of ZPW·F-K transmitters are calculated to confirm that the selection of transmitter parameters meet the design requirements.

Keywords: current carrying capacity; influencing factors; copper thickness; trace width

1 概述

PCB 印制板是电子工业产品的重要部件之一。几乎每种电子设备, 小到电子手表、计算器, 大到计算机, 通讯电子设备, 军用武器系统, 只要有电子元器件的产品都要使用印制板。而电子元器件之间是通过焊盘和 PCB 板条连接的, 因此 PCB 印制

板板条参数选择正确与否直接影响 PCB 印制板的使用性能。

而困扰 PCB 工程师的问题是如何设置合理的 PCB 板参数, 使 PCB 能完成产品承载任务。本文主要通过论述影响 PCB 板条通流量的因素, 引出如何在新焊盘 PCB 板条设计中选择优化的参数设置。

2 影响因素

PCB 印制板板条的材质一般以铜箔为主, 因此本文论述的关于板条参数选择的材质也是铜箔, 铜

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2023-06-20

第一作者: 牛颖聪 (1983—), 女, 工程师, 本科, 主要研究方向: 机柜及 PCB 配线设计, 邮箱: niuyingcong@163.com。

线的载流能力和以下因素有关：1) 线是走在表面还是走在内层；2) 铜箔的厚度；3) 走线的宽度；4) 铜条在工作时产生的温升。因此根据实际应用的需求，结合以上4点，可以合理计算出印制板板条的参数。

PCB铜厚1 oz指的是1 oz铜箔均匀铺在1平方英寸的印制板上，它所能达到的厚度约为1.4 mil (35 μm)。

覆铜走线方式对传输电流通流量有很大的影响。如果铜线走表层的话，PCB印制板表层布线两侧分别是绝缘介质和空气（忽略阻焊油漆），等效介电常数比中间层要小很多，且表层利于散热，保证覆铜的温度不至于过高，提升通流能力；覆铜在内层不利于散热，通流能力下降，因此表层的通流量要大于内层的。而且由于表层有SMD焊盘，内层却没有，所以布线空间内层比表层更大，更容易布线。但介质分布在内层两侧，相对比而言，等效介电常数大于表层，所以传输延时大，信号传输速度慢，电流通过量较表层小。因此表层和内层之间的最大通流量是有一定差异的。

因此在PCB布线时，可以使电源和地层在PCB板内层中，而信号线处于PCB板外层。

一般有经验公式，电流密度取30 A/mm²，每平方毫米线宽可以流过的电流 $I = 30 \times W \times H$ (A)，其中 W 为走线宽度 (mm)， H 为覆铜厚度 (mm)。例如PCB覆铜厚度为35 μm，假如线宽为1 mm，那么板条最大的通流量 $I_{max} = 30 \times 0.035 \times 1 = 1.05$ A，经验公式有利于在选择PCB印制板板条的线宽和厚度做参考，避免因盲目选择而造成不必要的浪费或者不合理的设置。PCB板铜箔宽度、厚度与载流量的对照如表1所示。

表1很直观地体现线宽、厚度与对应的载流量之间的关系：随着线宽和厚度的增加，载流能力也在提升。在25℃常温下，表1数据中的电流值为最大能够承受的载流量，仅作为理论参考值。在实际PCB设计中，还需要考虑制造工艺、板材工艺、工作温度、气压等其他因素。

导体通电后都会产生热量，导体表面的温度会

表1 PCB板铜箔宽度、厚度与载流量的对照

Tab.1 Comparison of copper foil width, thickness and current carrying capacity of PCB

宽度 / mm(mil)	载流量 / A		
	70 μm(2 oz)	50 μm(1.5 oz)	35 μm(1 oz)
2.50 (98)	6.00	5.10	4.50
2.00 (78)	5.10	4.30	4.00
1.50 (59)	4.20	3.50	3.20
1.20 (47)	3.60	3.00	2.70
1.00 (40)	3.20	2.60	2.30
0.80 (32)	2.80	2.40	2.00
0.60 (24)	2.30	1.90	1.60
0.50 (20)	2.00	1.70	1.35
0.40 (16)	1.70	1.35	1.10
0.30 (12)	1.30	1.10	0.80
0.20 (8)	0.90	0.70	0.55
0.15 (6)	0.70	0.50	0.20

注：用铜皮作导线通过大电流时，铜箔宽度的载流量参考表中数值的50%考虑设计

随着时间的推移不断升高，直到达到平衡。达到稳定的前提条件是平衡后3 h内温差范围低于2℃，此时测出来的温度就是导体最终的温度。温度升高到的温度与周围环境温度之间的温度差称为温升，温升的单位用开尔文 (K) 表示。

而具体通流量的计算如公式(1)、(2)所示。

$$I = KT^{0.44}A^{0.725} \quad (1)$$

$$A = W \times d \quad (2)$$

其中： I ——最大允许电流，A。

K ——通流量修正系数，覆铜线在内层时， K 取0.024；覆铜线在外层时， K 取0.048。

T ——最大温升，℃。

A ——覆铜截面积，mil²（注意这里不是mm²）。

W ——铜线的宽度，mil。

d ——铜线的覆铜厚度，mil。

此公式展示最大通流量和温升、线宽、铜厚之间的关系。当确定 I 、 T 、 A 、 W 、 d 5个量中的任意4个，就能求出剩下的一个量。

假如：10℃温升、最大通流量为5 A，代入通流量的计算公式中：

$$5 = 0.048 \times 10^{0.44} \times A^{0.75} ;$$

$A^{0.75} = 5 / (0.048 \times 10^{0.44}) = 37.82 \text{ mil}^2$;
 如果假设 $d = 70 \mu\text{m} = 2.7559 \text{ mil}$;
 则线宽 $W = A / 2.7559 = 46 \text{ mil} = 1.17 \text{ mm}$ 。

根据上式得出线宽后，在 PCB 设计时就可以按照计算值，绘制板条宽度。此外，印制板导线温升与导线宽度和负载电流的图表关系如图 1 所示。

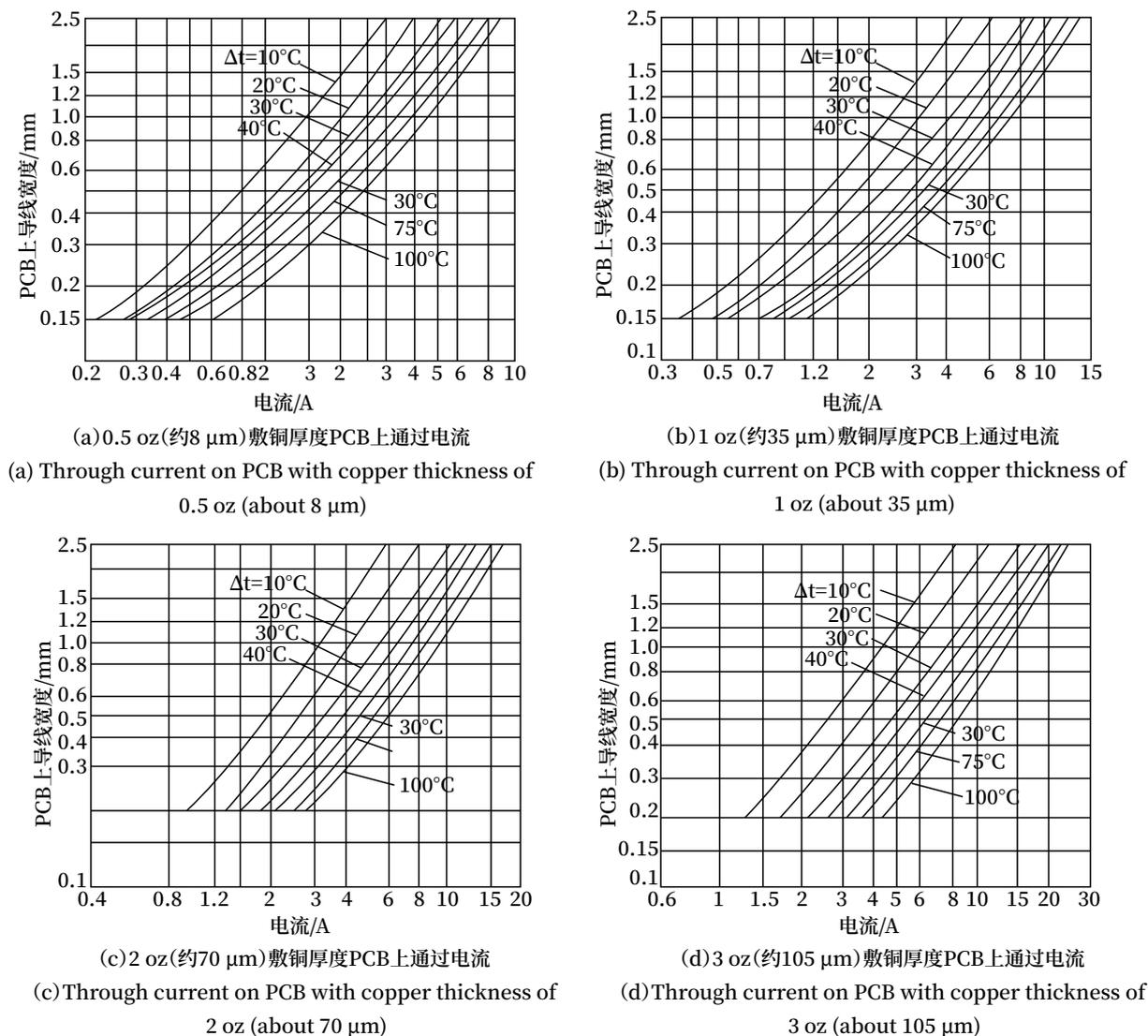


图1 印制板导线温升与导线宽度和负载电流的关系
 Fig.1 The relationship between the temperature rise of PCB traces and trace width and load current

PCB 基材通常采用 FR-4 材料，铜箔都有较高的附着强度和工作温度。在实际应用中，PCB 温度最高时不超过 150°C，一旦超过 150°C 就很接近焊锡的熔点 (183°C)。另外 PCB 板上元器件允许的最高温度也应该考虑在内，但同时设计过程中还要考虑 PCB 温度较高时对功率器件散热的影响。

在实际应用中，PCB 板上导线还会受到焊盘和过孔的影响。例如焊盘较多的线路，焊盘在过锡后，元件引脚和焊锡之间的电流承载值会大幅度增加，

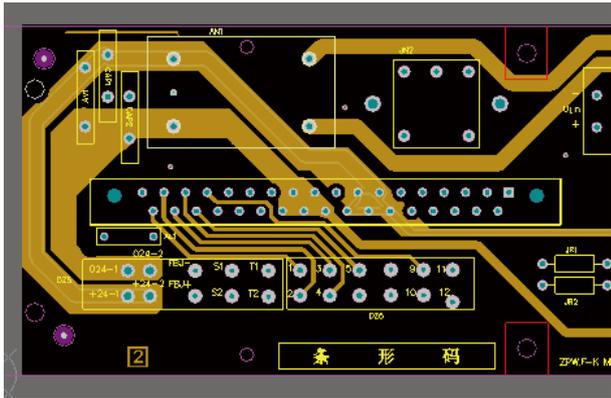
当电流瞬间波动时，可能会出现焊盘与焊盘之间某一段线路被烧毁的现象，主要原因是增强了焊盘端的电流承载值，而焊盘之间的板条最大的电流承载值为导线宽度允许的最大电流值。一般的解决方法是，在 PCB 排板允许的情况下，适当增加导线宽度，留有一定的裕量，从而提高 PCB 板条载流能力。

3 实际案例分析

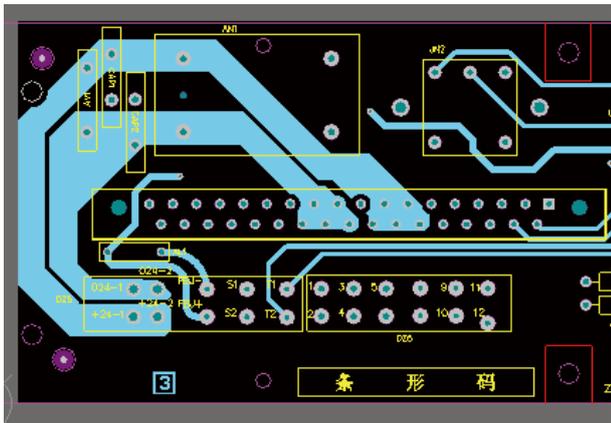
以 ZPW·F-K 型无绝缘发送器 MB 印制板为

例, 介绍 MB 印制板覆铜厚度的确定, 以及现生产 MB 印制板覆铜厚度是否满足设备要求。

已知 MB 印制板中电源入口处为双层覆铜处理, 在 Middle1, Middle2 均有覆铜, 消耗最大电流为工作在一电平时, $I_{\max} = 5.6 \text{ A}$, 板条线宽最窄处为 $W = 150 \text{ mil}$ (不计网格覆铜), 如图 2 所示。



(a)MB印制板正面
(a)The front of MB board



(b)MB印制板背面
(b)The back of MB board

图2 MB印制板覆铜结构
Fig.2 Copper cladding of MB board

通过原理图可以知道, 电源入口 +24 V 进入设备后, 一路供给发送器 DY 印制板用于安全与门, 驱动 FBJ 继电器, 还有一路通过电源模块转换为 5 V, 用于驱动数字电路工作; 另有一路用于给功放电路供电, 而 GF 印制板所消耗的比重远大于 DY 印制板。再按照允许通过最大电流 200% 设计, 即 $I_{\max} = 5.6 \times 200\% = 11.2 \text{ A}$, 假如 ZPW·F-K 型无绝缘发送器工作时最大温升为 40°C 。

因此通过公式: $I = K T^{0.44} A^{0.725}$, 将各个参数带

入公式中:

$$11.2 = 0.024 \times 40^{0.44} \times A^{0.725};$$

$$\text{得出 } A = 511.804 \text{ mil}^2;$$

又因为 $A = W \times d$, 所以 $d = 511.804/150 = 3.412 \text{ mil}$ 。

由于 Middle1 和 Middle2 均有覆铜, 因此单层覆铜 $d = 1.706 \text{ mil}$, 即发送器 MB 印制板覆铜厚度为 $43.33 \mu\text{m}$ (1.706 mil) 就满足设计要求。而目前发送器 MB 印制板覆铜厚度选择为 $70 \mu\text{m}$, 远大于计算值, 因此客专发送器 MB 印制板覆铜厚度设计能满足设备工作要求。

4 总结

本文通过分析 PCB 印制板通流量的影响因素, 通过理论计算推导结合实际案例的综合分析, 提供一种分析设计 PCB 印制板参数的方法。因此在产品设计开发时, 综合考虑产品功耗因素, 选择合适的 PCB 参数具有很好的指导意义和应用价值。

参考文献

- [1] 毛楠, 孙瑛. 电子电路抗干扰实用技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [2] 王林, 刘方, 张柱, 等. 一种通过贴片增加 PCB 线路导体载流量的方法: CN101925259A [P]. 2010-12-22.
- [3] 袁为群, 宋建远, 陈世荣. 基于信号完整性的高速 PCB 优化设计与研究 [J]. 广东工业大学学报, 2019, 36 (6): 74-79.
Yuan Weiqun, Song Jianyuan, Chen Shirong. Research and Optimization Design of High-Speed PCB Based on Signal Integrity[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2019, 36(6): 74-79.
- [4] 陈雨田, 陈彧欣, 张海礁, 等. 柔性电缆 PCB 内电层载流量研究与实验验证 [J]. 现代防御技术, 2023, 51 (2): 14-22.
Chen Yutian, Chen Yuxin, Zhang Haijiao, et al. Research and Experimental Verification of Current-Carrying Capacity of Electrical Layer in Flexible

- PCB Cable[J]. Modern Defence Technology, 2023, 51(2): 14-22.
- [5] 郑久霞, 黄云钟, 曹磊磊, 等. PCB 不同线宽设计对阻抗测试结果的影响与研究 [J]. 印制电路信息, 2021, 29 (Z1): 15-23.
Zheng Jiuxia, Huang Yunzhong, Cao Leilei, et al. The Influence and Research of PCB Different Line Width Design on Impedance Test Results[J]. Printed Circuit Information, 2021, 29(Z1): 15-23.
- [6] 黄振伦, 王国, 廉泽阳, 等. 平面变压器 PCB 的耐电压可靠性能力研究 [J]. 印制电路信息, 2021, 29 (Z1): 201-206.
Huang Zhenlun, Wang Guo, Lian Zeyang, et al. Research on Withstand Voltage Reliability Capability of Planar Transformer PCB[J]. Printed Circuit Information, 2021, 29(Z1): 201-206.
- [7] 崔正丹, 胡军辉. PCB 高厚径比树脂塞孔裂纹产生机理分析与验证 [J]. 印制电路信息, 2021, 29 (Z1): 301-308.
Cui Zhengdan, Hu Junhui. Analysis and Verification of Resin Crack Formation Mechanism of Resin Filling in High Aspect Ratio PCB[J]. Printed Circuit Information, 2021, 29(Z1): 301-308.
- [8] 郑俊钦. 覆铜箔层压板相对介电常数的检测试验及其不确定度分析 [J]. 海峡科学, 2013 (8): 47-49, 81.
Zheng Junqin. Test and Uncertainty Analysis of Relative Dielectric Constant of Copper Clad Laminate[J]. Straits Science, 2013(8): 47-49, 81.

国外信息

英国高铁2号线寻求站台屏蔽门供应商

高铁2号线有限公司 (HS2 Ltd.) 已经启动确定专业承包商的流程, 以便为高铁2号线老橡树公共站 (Old Oak Common) 和换乘站安装高铁站台屏蔽门。

这个新的合同机遇涉及签署一份框架协议, 这份框架协议涵盖站台边缘的站台护栏以及自动门。这些设备将会与车门对齐, 这点与伦敦伊丽莎白线新建车站的设置相似。

这份框架协议和各个分订单 (包括维护工作, 以及曼彻斯特机场站的可选额外工作) 的合同总额, 可以达到9300万英镑 (折合1.0757亿欧元)。这份框架协议和第一个分订单的授予时间预计为2025年年初。

在中标后, 承包商将会与高铁2号线有限公司合作, 以便确定站台屏蔽门设计。在设计、安装、测试和调试以及持续支持和维护过程中, 承包商将会与车站和系统承包商配合。

站台屏蔽门将会使得站台上方的乘客上车更加安全, 支持操作人员实现安全的列车调度, 并且使得所有乘客畅通无阻、不会迷路, 并且乘车更加舒适。

高铁2号线将会改善伦敦、伯明翰和英国北部地区的铁路联通, 有助消除区域发展差距, 并且提供取代汽车和飞机的零碳出行方式。在英国范围内, 施工工作正在推进, 共有大约3000名人员支持这个项目。这个项目第1阶段从伦敦和伯明翰连接起来, 将会建设4个主要车站, 以便允许乘客在高速铁路和地方交通线路以及与希思罗和伯明翰机场连线间换乘。

为高铁2号线提供的站台屏蔽门, 将会安装在伦敦西部的老橡树公共站以及靠近伯明翰机场的换乘站。这份框架协议还有一个可选项, 这个可选项涉及为规划建设曼彻斯特机场站提供相同系统。这个车站属于第2b阶段, 第2b阶段将伯明翰和曼彻斯特连接起来。

(北京全路通信信号研究设计院集团有限公司 刘昶翻译自: www.railwaypro.com 2023-07-26)



《铁路通信信号工程技术》由中国铁路通信信号集团有限公司主管，北京全路通信信号研究设计院集团有限公司主办，在铁路电务科研、设计、施工及维修等单位有较大影响，深得科技人员的好评。经国家新闻出版总署批准，自2005年12月起面向国内外公开发行人。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科研创新、重点工程、优秀设计、国内外先进技术进行论述、探讨和追踪报导；对广大通信信号科技人员、高等院校师生、施工单位和企业设计施工人员，在新技术研发和工程实践中总结的科技成果进行交流；及时报导相关政策信息、标准信息 and 科技发展动态等。设有：学术探讨、技术创新、重点工程、城轨交通、技术交流、知识讲座、综述·评述、国外信息、行业动态等栏目。

投稿方式：

期刊官网投稿：<https://rsce.crsed.com.cn>

邮箱投稿：rsce@crscd.com.cn

知网投稿：<http://www.tltx.cbpt.cnki.net/WKD>

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

邮编：100070

电话：010-51865951

传真：010-51841598

网址：www.crsed.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



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

扫码打开期刊官网，
阅读、下载本刊内容

ISSN 1673-4440
CN 11-5423/U

ISSN 1673-4440



9 771673 444231

邮发代号：80-532 国内定价：10元/期