

杭州地铁 1 号线计轴红光带问题分析及解决方案

金刚伟¹ 丁玲玲² 李启磊² 郑 飞²

(1. 杭州杭港地铁有限公司, 310020, 杭州; 2. 杭州杭港地铁五号线有限公司, 311100, 杭州)

摘 要 [目的]在杭州地铁 1 号线三期区段动车调试及试运行过程中,在线路不同位置处,计轴设备均出现了受扰异常占用(红光带)的情况,严重影响了地铁的运营安全。因此,有必要对异常受扰场景进行分析和测试试验,选择合适的改进方案解决计轴设备的受扰异常占用问题。[方法]介绍了列车通过 1 号线三期计轴区段异常受扰占用情况;分析了列车牵引设备回流与计轴设备干扰谐波之间的关系,并进行了相关调查测试及验证;提出了列车牵引设备与计轴设备工作频段重叠产生干扰谐波的解决方案。[结果及结论]对于 1 号线三期工程列车通过三期计轴区段异常受扰占用(红光带)情况,可采用优化列车牵引系统设备工作频率参数的方法解决该问题,错开列车牵引设备工作频段与计轴设备工作频段,以解决设备的同频干扰问题。

关键词 地铁;红光带;计轴传感器;干扰谐波电流

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.07.059

Analysis and Solutions of Axle Counter Red-light Band Issues on Hangzhou Metro Line 1

JIN Gangwei¹, DING Lingling², LI Qilei², ZHENG Fei²

(1. Hangzhou MTR Co., Ltd., 310020, Hangzhou, China;

2. Hangzhou MTR Line 5 Co., Ltd., 311100, Hangzhou, China)

Abstract [Objective] During the train commissioning and trial operation of Hangzhou Metro Line 1 Phase III section, abnormal occupancy (red-light band) appears in axle counter equipment at different positions along the line, significantly affecting metro operational safety. Therefore, it is necessary to carry out analysis and tests on abnormal interference scenarios, selecting appropriate improvement schemes to solve the abnormal occupancy problem for axle counter equipment. [Method] The situation of abnormal interference and occupation during trains passing through the Phase III axle counting section is introduced. The relation between train traction equipment circuit return and axle counter equipment interference harmonics is analyzed, and relevant investigation, testing, and verification are conducted. Solutions for addressing the interference harmonics generated by the overlapping working frequency bands

of train traction equipment and axle counter equipment are proposed. [Result & Conclusion] For the abnormal occupation (red-light band) situation during Line 1 Phase III project train passing through Phase III axle counting section, it is feasible to tackle the issue by optimizing train traction system equipment working frequency parameters. By shifting the working frequency band of train traction equipment away from that of the axle counter equipment, the issue of equipment co-frequency interference can be solved.

Key words metro; red-light band; axle counter sensor; interference harmonics current

0 引言

随着 CBTC(基于通信的列车控制)技术的发展,CBTC 系统在城市轨道交通中的应用越来越普遍。为了提高 CBTC 系统的可用性,确保其在出现故障后的系统降级功能能够正常运行,越来越多的城市轨道交通线路中会保留计轴设备来检测轨道占用情况^[1-3]。

牵引供电是目前轨道交通的主要动力源,牵引供电回路通常由变电所、接触网、列车及钢轨回流线组成。列车牵引供电设备(主要为牵引逆变器和辅助逆变器)在非线性整流逆变过程中往往会产生丰富的谐波电流,若其与轨旁设备在同一工作频段,会对轨旁设备产生严重的干扰。

杭州地铁 1 号线(以下简称“1 号线”)三期下沙江滨站—萧山国际机场站于 2020 年 12 月底开通,采用计轴传感器作为列车占用轨道区域的检测设备,通过统计进入及离开区段车轴数的一致性来判断列车占用和出清情况。1 号线三期列车于 2021 年 1 月投入运营载客,期间在 1 号线三期区段(下沙江滨站—萧山国际机场站)的不同位置均出现了计轴传感器红光带问题。1 号线全线(湘湖站—萧山国际机场站)采用 2 种计轴传感器检测和 3 种车型混跑。两种计轴传感器分别为既有线(湘湖站—下

沙江滨站)的法国泰雷兹 ZP30K 型计轴传感器和三期区段(下沙江滨站—萧山国际机场站)的北京永列 YLJZ-F1 型计轴传感器。1 号线的 3 种车型分别为:1 号线老列车(采用西门子牵引供电设备);1 号线增购列车(采用西门子牵引供电设备);1 号线三期列车(采用时代电气牵引供电设备)。因此,计轴传感器需要同时应对共线运营的、不同牵引供电设备的多种列车。需要说明的是:1 号线老列车和 1 号线增购列车采用的西门子牵引供电设备在全线运营时均未出现红光带问题;1 号线三期列车采用的时代电气牵引供电设备在既有线(湘湖站—下沙江滨站)运营时,未出现红光带问题。

鉴于此,本文针对 1 号线三期列车在三期区段不同位置出现的计轴传感器红光带问题,通过在列车上安装罗氏线圈 CWT30B,在计轴区段轨道安装低频磁场天线设备,以及在实验室搭建计轴传感器测试平台测试等方法,分析列车牵引设备回流与计轴设备干扰谐波产生的关系,最终通过优化列车牵引系统设备工作频率参数解决该问题。本文研究可为计轴传感器的干扰(红光带)问题提供新的解决思路。

1 计轴传感器概述

根据不同的车轮检测方式,计轴传感器可分为两种:通过检测车轮的轮辐来计入或计出一轴;通过检测车轮边缘来计入或计出一轴。1 号线三期区段采用的 YLJZ-F1 型计轴传感器属于轮辐型传感器,由于轮辐型传感器的磁场路径和牵引回流磁力线方向相同,所以比较容易受牵引回流磁力线的干扰。

YLJZ-F1 型计轴传感器有 2 个完全独立的磁感应单元 SK1 和 SK2。当列车车轮依次经过独立的 2 个磁感应单元时,计轴传感器依次输出 2 个计轴脉冲信号。这 2 个脉冲信号需要同时满足以下条件才认为是有效信号:① 2 个脉冲信号必须有先后顺序;② 2 个脉冲信号中间必须有重叠区域。

在计轴传感器处加装示波器,以采集列车经过磁头的信号波形。分析采集到的 1 号线三期列车经过计轴传感器时的干扰波形可知,当列车经过时,SK1 的轮脉冲明显受到严重干扰。计轴传感器内的 LC(电感电容)振荡器(敏感部件)有 2 个工作频点,分别为 27.5 kHz 和 30.0 kHz。若计轴传感器周围环境中存在同频段的谐波电流磁场,将会对计轴

传感器内的工作频点造成严重干扰,导致计轴错误,并产生红光带。

2 干扰谐波电流产生原因分析

2.1 正线测试

为研究计轴传感器干扰谐波与列车之间的关系,对正线计轴传感器进行干扰测试。由于 YLJZ-F1 型计轴传感器的工作频率为 27.0 ~ 32.0 kHz,其工作原理与法国泰雷兹的 ZP30K 计轴传感器几乎一致,通过参考 BS EN 50592:2016《铁路应用与车轴计数器电磁兼容的机车车辆试验》中的测试方法,对计轴传感器 x 、 y 、 z 方向(x 方向取为列车行进方向; y 方向取为平行轨道方向; z 方向取为垂直轨道方向。)的干扰限值进行评估,评估主要基于两个方面:列车自身磁场对计轴传感器的干扰;列车通过牵引回流对计轴传感器的干扰。

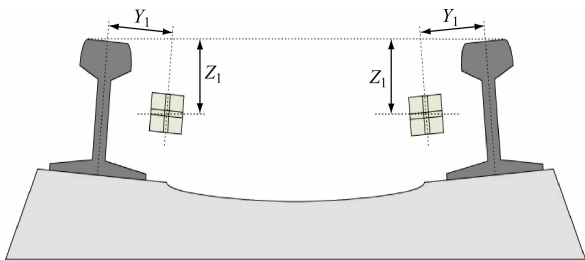
采用罗氏线圈 CWT30B 测试列车某一动力车厢底部高压箱的总输入电流、牵引逆变器输入电流及辅助逆变器输入电流,分析列车自身磁场对计轴传感器的干扰。测试设备放置位置照片如图 1 所示。



图 1 测试设备放置位置照片

Fig. 1 Photo of testing equipment placement position

采用在轨道上安装低频磁场天线的方法分析列车通过牵引回流对计轴传感器的干扰。低频磁场天线安装位置示意图如图 2 所示。动车来回测试的流程为:① 列车在 1/3 牵引工况下进行测试。列车以 1/3 最大牵引力通过低频磁场天线,测试天线在 x 、 y 、 z 三个方向上接收的低频磁场干扰大小。② 列车在 1/3 制动工况下进行测试。列车以 1/3 最大制动力通过低频磁场天线,测试天线在 x 、 y 、 z 三个



注: Y_1 为轨道中心线与天线中心线的纵向安装距离; Z_1 为轨道中心线与天线中心线的垂直安装距离。

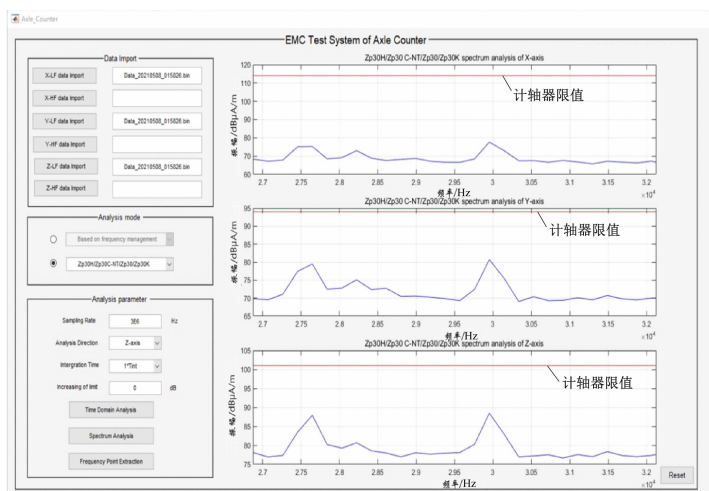
图2 低频磁场天线安装位置示意图

Fig. 2 Diagram of low-frequency magnetic field antenna installation position

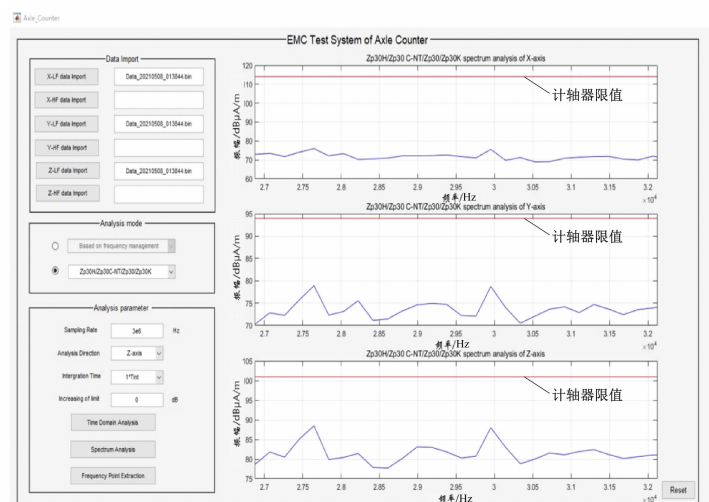
方向上接收的低频磁场干扰大小。③ 列车在最大牵引工况下进行测试。列车以最大牵引力通过低频磁场天线,测试天线在 x 、 y 、 z 三个方向上接收的

低频磁场干扰大小。④ 列车在最大制动工况下进行测试。列车以最大制动力通过低频磁场天线,测试天线在 x 、 y 、 z 三个方向上接收的低频磁场干扰大小。

在列车自身磁场发射试验中,列车经过计轴传感器天线或在远端进行 100% 牵引或 100% 制动时,会对天线周围的磁场产生影响,提高计轴传感器天线周围的磁场强度。根据 PD CLC/TS 50238-3: 2019《铁路应用. 机车与计轴传感器兼容性》标准中的计轴传感器干扰限值 (x 向干扰限制 $< 114 \text{ dB} \cdot \mu\text{A}/\text{m}$, y 向干扰限制 $< 84 \text{ dB} \cdot \mu\text{A}/\text{m}$, z 向干扰限制 $< 101 \text{ dB} \cdot \mu\text{A}/\text{m}$) 进行判定,列车所造成的磁场影响并未超过其标准限值。牵引和制动工况下,列车自身磁场与计轴传感器限值的软件截图如图 3 所示。



a) 制动工况波形



b) 牵引工况波形

图3 牵引和制动工况下列车自身磁场与计轴传感器限值的软件截图

Fig. 3 Software screenshot of train magnetic field and axle counter sensor limit values under traction and braking working conditions

牵引回流测试频域图如图4所示。通过牵引回流测试及计轴传感器周边磁场测试可知,牵引回流波形存在明显的工作频点为 27.5 kHz 和 30.0 kHz 的频率峰值。无论是列车在远端还是通过计轴传感器上方时,计轴传感器附近磁场也存在同样的频率峰值。由此可知,计轴传感器周边的磁场主要是由牵引回流造成的。

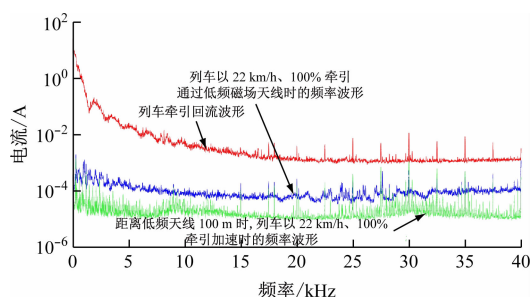


图4 牵引回流测试频域图

Fig. 4 Frequency-domain diagram of traction return current test

2.2 计轴传感器测试平台

为研究计轴传感器波形震荡是否与牵引回流有关,搭建了计轴传感器测试平台。测试平台包括计轴传感器磁头、钢轨、轨旁电子单元(接线盒)、差分分波器、信号源等设备。测试时,加入不同频率及幅值的干扰信号,通过监测轨旁电子单元前端及后端输出电压(轨旁电子单元前端信号是指计轴传感器磁头回传的原始电压;轨旁电子单元后端信号是指回传信号经过滤波及鉴幅鉴相后的输出电压),判断计轴传感器低频振荡的产生机理。

经过测试验证可知,YLJZ-F1 型计轴传感器 30.0 kHz 磁头的实际中心频率为 30.2 kHz,27.5 kHz 磁头的实际中心频率为 27.6 kHz,存在一定的频偏现象。30.0 kHz 磁头的敏感频段为 29.7 ~ 30.7 kHz,而 27.5 kHz 磁头的敏感频段为 27.1 ~ 28.1 kHz。不同工作频点磁头在加入干扰信号(400 mA 的干扰电流)后的计轴传感器后端电压峰值,如图5所示。当加入相同大小的干扰信号时,越靠近中心频率,轨旁电子单元后端电压峰值数据的波动越大。超出上述频段范围后,加入干扰信号将不再影响计轴传感器工作。在干扰频段范围内,当加入的干扰频率以 100 Hz 的数值间隔进行变化时,轨旁电子单元后端电压峰值数据出现的振荡频率大小也以 100 Hz 的数值间隔进行变化。因此,可以尝试调整牵引供电设备的工作频率,以避免计轴传感器

两个中心工作频点 30.2 kHz 与 27.6 kHz,偏离中心工作频点越大,计轴传感器受干扰影响越小。若牵引供电设备工作频率能避开 29.7 ~ 30.7 kHz 和 27.1 ~ 28.1 kHz 频段,则可以从根本上解决计轴传感器的红光带问题。

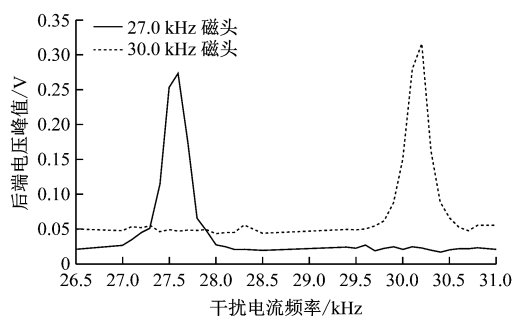


图5 不同工作频点磁头在加入干扰信号后的计轴传感器后端电压峰值

Fig. 5 Peak terminal voltage of axle counter sensor for magnetic heads with different working frequencies after adding interference signals

2.3 牵引逆变器和辅助逆变器工作频率

为了研究 27.5 kHz 和 30.0 kHz 谐波电流分量产生的原因,在试验线上修改了牵引逆变器的工作频率。现场测试牵引逆变器的正线电流与负线电流后发现,工作频点为 27.5 kHz 和 30.0 kHz 的频率峰值依然存在,因此判断谐波电流分量并不是由列车的牵引逆变器设备产生的。在车库内对辅助逆变器的负线电流进行测试后发现,其具有明显的 27.5 kHz 与 30.0 kHz 的谐波电流。

由上述试验可知,YLJZ-F1 型计轴传感器的干扰频段为中心频点 ± 500 Hz 范围。通过测量南阳站、萧山国际机场站和杭州大会展中心站的计轴传感器中心频点,取中心频点最低的计轴传感器与中心频点最高的计轴传感器的工作频率,分别减少和增加 500 Hz,这一个频率区段即为 YLJZ-F1 型计轴传感器受干扰的频段(即 29.37 ~ 30.82 kHz 与 26.91 ~ 28.29 kHz)。由 Fourier 变换函数可知,若想要避开计轴传感器受干扰的频段,同时评估辅助逆变器的安全与功能可靠性,可通过计算修改斩波频率。不同斩波频率下的谐波分量如表1所示。

3 计轴传感器红光带解决措施

3.1 辅助逆变器 DC(直流)/DC 斩波频率调整测试

在实验室搭建辅助逆变器测试平台,通过修改

表 1 不同斩波频率下的谐波分量

Tab. 1 Harmonic components at different chopping frequencies

DCDC 模块斩波 频率/kHz	谐波分量/kHz				
	9 次谐波	10 次谐波	11 次谐波	12 次谐波	13 次谐波
2.4	21.6	24.0	26.4	28.8	31.2
2.6	23.4	26.0	28.6	31.2	33.8

注:当斩波频率为 2.4 kHz 时,YLJZ-F1 型计轴传感器受干扰频段为 29.37 ~ 30.82 kHz;当斩波频率为 2.6 kHz 时,YLJZ-F1 型计轴传感器受干扰频段为 26.91 ~ 28.29 kHz。

辅助逆变器的软件,测试对比辅助逆变器的负线电流数据。不同斩波频率下的负线电流如图 6 所示。当斩波频率为 2.4 kHz 时,负线电流在工作频点 27.5 kHz 与 30.0 kHz 处的谐波分量比其在 2.5 kHz 斩波频率处的谐波分量分别降低了 40.88 倍与

11.85 倍。当斩波频率为 2.6 kHz 时,在工作频点 27.5 kHz 与 30.0 kHz 处的谐波分量比其在 2.5 kHz 斩波频率处的谐波分量分别降低了 46.00 倍与 54.16 倍。两种斩波频率下的谐波分量均在计轴传感器干扰频段范围之外。

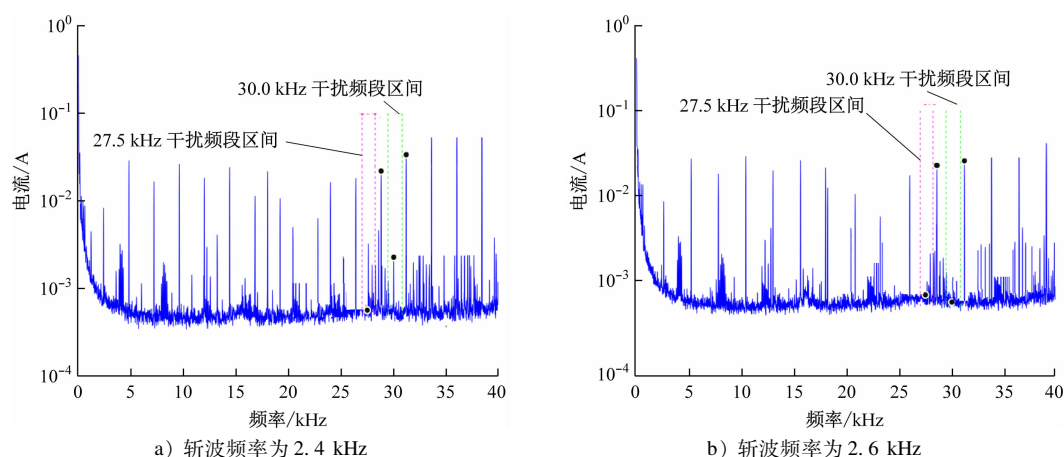


图 6 不同斩波频率下的负线电流

Fig. 6 Negative line current at different chopping frequencies

3.2 正线辅助逆变器 DCDC 模块斩波频率调整测试及效果验证

在正线线路上测试与验证斩波频率为 2.4 kHz 与 2.6 kHz 的辅助逆变器程序,提取列车辅助逆变器的负线电流数据与计轴传感器后端波形数据。在辅助逆变器软件中,分析不同斩波频率对 YLJZ-F1 型计轴传感器后端波形的振荡影响程度。不同斩波频率在不同测试工况下的负线电流分量及最大分量,如表 2 所示。

斩波频率为 2.4 kHz 的辅助逆变器软件可以使计轴传感器工作频点 27.5 kHz 负线电流分量降低至少 29.00 倍,使工作频点为 30.0 kHz 的负线电流分量降低至少 3.93 倍,使 27.0 kHz 频段负线电流最大分量至少降低 5.34 倍,使 30.0 kHz 频段负线电流最大分量至少降低 3.93 倍。

斩波频率为 2.6 kHz 的辅助逆变器软件可以使工作频点为 27.5 kHz 负线电流分量降低至少 26.00

倍,使工作频点为 30.0 kHz 负线电流分量至少降低 8.07 倍,使 27.0 kHz 频段负线电流最大分量至少降低 9.39 倍,使 30.0 kHz 频段负线电流最大分量至少降低 8.07 倍。

通过测量计轴传感器后端波形数据,在斩波频率为 2.4 kHz 与 2.6 kHz 辅助逆变器软件下,YLJZ-F1 型计轴传感器后端波形均未出现振荡。根据电流测试结果,选取斩波频率为 2.6 kHz 的辅助逆变器软件降低电流的效果更好。将 1 号线三期列车辅助逆变器 DCDC 模块斩波频率修改为 2.6 kHz 后,1 号线三期区段红光带频发现象得到了有效解决。

4 结语

牵引供电回流中包含了丰富的谐波电流分量,若谐波电流与计轴传感器处于同一工作频段,将对

表 2 不同斩波频率在不同测试工况下的负线电流分量及电流最大分量

Tab. 2 Negative line current components and maximum current components under different test conditions with different chopping frequencies

辅助逆变器斩波频率/kHz	测试工况	工作频点为 27.5 kHz 的负线电流分量/mA	工作频点为 30.0 kHz 的负线电流分量/mA	27.0 kHz 频段负线电流最大分量/mA	30.0 kHz 频段负线电流最大分量/mA
2.5	30% 牵引	30.790	25.240	30.790	25.240
	100% 牵引	34.200	46.930	34.200	46.930
	30% 制动	31.750	48.230	31.750	48.230
	100% 制动	28.960	37.420	28.960	37.420
2.4	30% 牵引	0.725	6.420	4.330	6.420
	100% 牵引	0.793	3.930	6.320	3.930
	30% 制动	0.898	6.860	6.360	6.860
	100% 制动	0.991	3.510	5.420	4.900
2.6	30% 牵引	1.034	3.127	3.277	3.127
	100% 牵引	1.250	2.108	3.337	2.499
	30% 制动	1.566	2.344	3.063	3.062
	100% 制动	1.105	2.516	2.703	2.850

注:27.0 kHz 频段指 1 号线 YLJZ-F1 型计轴传感器 27.0 kHz 磁头受干扰的频段(26.91 ~ 28.29 kHz);30.0 kHz 频段指 1 号线 YLJZ-F1 型计轴传感器 30.0 kHz 磁头受干扰的频段(29.37 ~ 30.82 kHz);30% 牵引工况指列车以 30% 的牵引力经过计轴点;100% 牵引工况指列车以 100% 的牵引力经过计轴点;30% 制动工况指列车经过计轴点位置时施加 30% 的制动力;100% 制动工况指列车经过计轴点位置时施加 100% 的制动力。

计轴传感器产生干扰,从而出现红光带问题。本文提出了解决红光带问题的新思路,对列车牵引设备工作频率参数进行优化调整,通过“移频”方式,将列车牵引设备工作频段与计轴传感器工作频段错开,从而避免了设备的同频干扰问题。

参考文献

[1] 石卫师. 基于计轴系统的轨道电路棕光带故障分析探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2021(6): 24.
SHI Weishi. Analysis and discussion on brown light band fault of track circuit based on axle counter system[J]. Modern Urban Transit, 2021(6): 24.
[2] 傅明华. 基于计轴系统的城轨交通信号系统道岔区段占用检查安全性分析研究[J]. 现代城市轨道交通, 2022(11): 95.

FU Minghua. Research on safety analysis of turnout section occupancy check in urban rail transit signal system based on axle counting system[J]. Modern Urban Transit, 2022(11): 95.
[3] 刘俊杰, 石卫师. 南宁市轨道交通 1 号线分段开通信号系统核心要点[J]. 现代城市轨道交通, 2019(6): 69.
LIU Junjie, SHI Weishi. Key points of section by section opening of signaling system on Nanning Urban Rail Transit Line 1[J]. Modern Urban Transit, 2019(6): 69.

· 收稿日期:2022-01-03 修回日期:2022-02-03 出版日期:2024-07-10
Received:2022-01-03 Revised:2022-02-03 Published:2024-07-10
· 通信作者:金刚伟,工程师, gangwei.jin@mtrhz.com.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

