

城市轨道交通钢轨电位和新型回流装置研究

王沛沛

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉//助理工程师)

摘要 以成都地铁为例, 基于钢轨绝缘节的老化和单向导通装置频繁导通问题, 将车辆段及停车场等效为小电阻接地支路进行仿真。仿真结果表明, 小电阻接地支路可使正线钢轨电位最大提升 27.2 V, 威胁了正线的安全运营。据此提出一种应用于车辆段与停车场的新型钢轨回流装置, 并介绍其控制方法。该新型钢轨回流装置具有辅助列车安全通过绝缘节遏制车辆段与停车场内杂散电流、评估钢轨绝缘节绝缘性能和测量出入段线钢轨过渡电阻的功能。

关键词 城市轨道交通; 杂散电流; 钢轨绝缘节; 钢轨电位; 回流装置

中图分类号 U284.26

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.05.045

Research on Rail Potential of Urban Rail Transit and New Reflux Device

WANG Peipei

Abstract Taking Chengdu metro as the background and focusing on problems like the rail insulation joint aging and the frequent unidirectional conduction device troubles, the vehicle depot and train parking lot are equivalent to small resistance grounding branch for simulation. The result shows that the small resistance grounding branch could raise the maximum rail potential up to 27.2 V, directly threatening the main line safe operation. Therefore, the application of a new rail reflux apparatus between vehicle depot and train parking lot is proposed, the control method of which is introduced. This device could help train passing through the insulation joint safely, cut off the stray current between vehicle depot and train parking lot vehicle depot and train parking lot, evaluate the insulation performance of rail insulation joints and measure the rail transition resistance of the access lines as well.

Key words urban rail transit; stray current; insulated rail joint; rail potential; unidirectional conduction device

Author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

目前,城市轨道交通直流牵引供电系统多采用 DC 1500V/DC 750V 的供电制式^[1-2]。列车通过受

电弓从接触网取流,走行轨兼作回流轨,以此构成电气回路。由于钢轨对地不能完全绝缘,这种直流供电方式会存在钢轨电位和杂散电流泄漏问题。

1 钢轨电位的仿真计算

为了防止正线钢轨产生杂散电流,钢轨要对地绝缘安装。车辆段及停车场(以下简为“段场”)主要用于列车的维护与检修等,为保证库内作业人员的安全,库内钢轨通过接地极进行接地。在地铁运营期间,为防止正线电流流经段场内的钢轨流入大地,进而形成杂散电流泄漏,通常将在库前和出入线分别设置钢轨绝缘节,并将单向导通装置并联安装于绝缘节的两端(如图 1 所示)。由于钢轨绝缘节一般安装在露天的户外,故雨雪的侵蚀和维护不当均容易导致绝缘节的失效。

单向导通装置的正极接车辆段或停车场钢轨,负极接正线钢轨。文献[3]经试验证明,当前的单向导通装置在运营时段会出现双方向导通的现象。

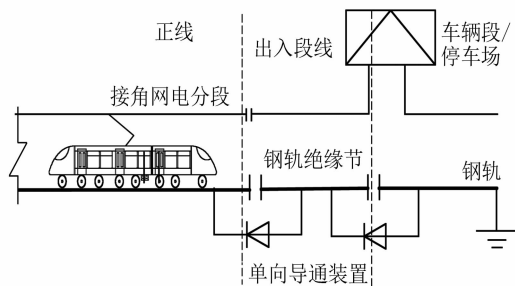


图 1 场段的回流系统结构示意图

绝缘节失效或单向导通装置的导通都会引起正线钢轨电位的升高。本文以成都地铁 1 号线为例,将段场等效为小电阻接地,建立仿真模型,针对不同的发车密度研究段场对正线钢轨电位的影响。

1.1 建立仿真模型

在仿真模型中,整流机组外特性曲线可以用连接起点与终点的直线来等效^[4]。直线斜率为等效

电压源的内阻,截距为等效理想电压源的数值。整流机组可用变化的理想电压源 V_s 和内阻 R_s 的戴维南等效电路来描述,如图2所示。

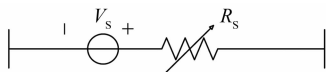


图2 整流机组模型

正线钢轨-杂散电流收集网-大地的钢轨电位计算模型如图3所示。钢轨纵向电阻为 $r_{g,i}$ (根据现场测试结果,取 $0.0365 \Omega/\text{km}$)^[5],杂散电流收集网纵向电阻为 $r_{p,i}$ (根据现场测试结果,取值为 $0.08 \sim 0.12 \Omega/\text{km}$),钢轨对杂散电流收集网过渡电阻为 $r_{a,i}$ (新建线路 $r_{a,i}$ 不低于 $15 \Omega \cdot \text{km}$,运行线路 $r_{a,i}$ 不低于 $3 \Omega \cdot \text{km}$)^[2],杂散电流收集网对地过渡电阻为 $r_{b,i}$ 。列车等效为直流电流源,电流 I 为成都地铁1号线线路列车运行时的实际取流测量值。

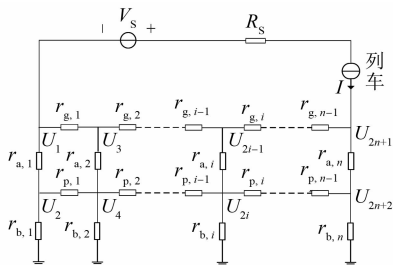
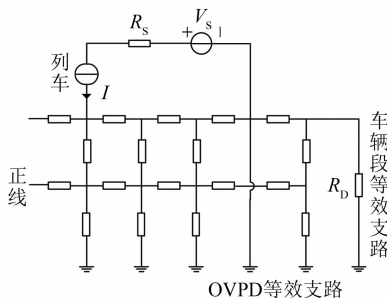


图3 钢轨-杂散电流收集网-大地的钢轨电位模型

故节点电压方程为：

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{r_{g,1}} + \frac{1}{r_{a,1}} \right) U_1 - \frac{1}{r_{a,1}} U_2 - \frac{1}{r_{g,1}} U_3 = -I \\ -\frac{1}{r_{a,1}} U_1 + \left(\frac{1}{r_{a,1}} + \frac{1}{r_{b,1}} + \frac{1}{r_{p,1}} \right) U_2 - \frac{1}{r_{p,1}} U_4 = 0 \\ -\frac{1}{r_{g,1}} U_2 + \left(\frac{1}{r_{g,1}} + \frac{1}{r_{g,2}} + \frac{1}{r_{a,2}} \right) U_4 - \frac{1}{r_{a,2}} U_5 - \frac{1}{r_{g,2}} U_6 = 0 \\ -\frac{1}{r_{p,1}} U_3 - \frac{1}{r_{a,2}} U_4 + \left(\frac{1}{r_{a,2}} + \frac{1}{r_{b,2}} + \frac{1}{r_{p,1}} + \frac{1}{r_{p,2}} \right) U_5 - \frac{1}{r_{p,2}} U_7 = 0 \\ \vdots \\ -\frac{1}{r_{g,n-1}} U_{2n-1} + \left(\frac{1}{r_{g,n-1}} + \frac{1}{r_{a,n}} \right) U_{2n+1} - \frac{1}{r_{a,n}} U_{2n+2} = I \\ -\frac{1}{r_{p,n-1}} U_{2n} - \frac{1}{r_{a,n}} U_{2n+1} + \left(\frac{1}{r_{p,n-1}} + \frac{1}{r_{a,n}} + \frac{1}{r_{b,n}} \right) U_{2n+2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

正线和段场的接触网由电分段分隔。当列车只在正线行驶时,可将段场和列检库等效为接地电阻支路,其电阻值等于列检库内的接地电阻值(如图4所示)。



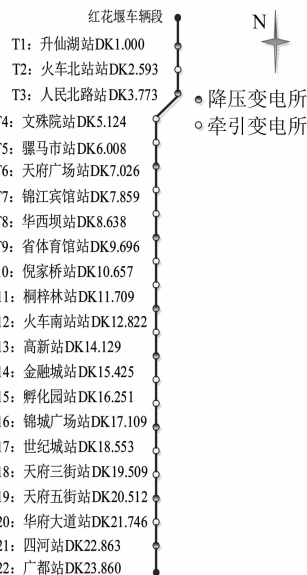
注： R_D 为段场等效电阻(按不大于 4Ω 考虑)；OVPD 为钢轨电位限制装置

图4 OVPD和车辆段等效支路模型

段场等效支路在节点 i 加入。节点数不变,节点导纳矩阵阶数不变,仅自导纳 Y_{ii} 发生变化。变化后的自导纳为 $Y_{ii,变} = Y_{ii} + \frac{1}{R_D}$ 。

1.2 仿真参数

成都地铁1号线总长23.9 km,有22座地下车站。牵引所和普通车站的分布图如图5所示。线路两端分设段场。



注：T1~T22为车站编号；DK表示车站中心公里标

图5 成都地铁1号线车站及段场分布

成都地铁1号线采用地铁B型车,6节编组,其最高运行速度为 80 km/h 。部分区段的列车牵引电流实测曲线如图6所示。

单线轨道的仿真参数设置如下:接触网电阻为 $0.01430 \Omega/\text{km}$,钢轨纵向电阻(单线2股钢轨并联)为 $0.01825 \Omega/\text{km}$,杂散电流收集网纵向电阻为 $0.08000 \Omega/\text{km}$,钢轨对杂散电流收集网过渡电阻为 $15 \Omega \cdot \text{km}$,杂散电流收集网对地过渡电阻

为 $3 \Omega \cdot \text{km}$ 。

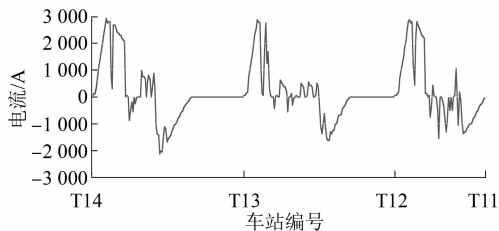


图6 成都地铁1号线部分区段列车牵引电流曲线

段场等效为接地电阻 1Ω 的接地支路。整流机组额定容量为 $2 \times 2\,000 \text{ kVA}$, 接触网额定空载电压为 $1\,593 \text{ V}$ 。牵引变压器 35 kV 处短路容量为 130 MVA , 整流机组交流侧额定电压 $U_r = 1\,180 \text{ V}$, 直流电压调整率 $\alpha_d = 8\%$ 。

1.3 仿真结果

设置单列车从 T1 站向 T22 站运行, 仿真得到不同运行时的全线车站钢轨电位分布, 如图 7 所示。

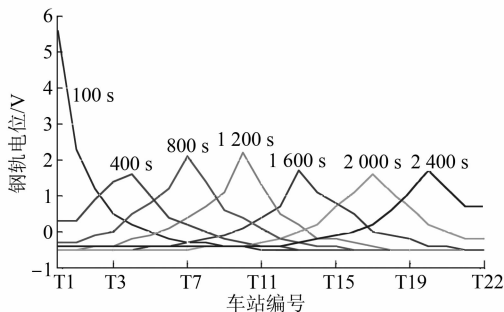


图7 单列车运行工况下不同运行时间的全线钢轨电位

由图 7 可知, 当线路上只有 1 辆车的时候, 全线的钢轨电位最高处即为列车所在位置, 且钢轨电位随线路两端方向呈降低趋势。

设置列车的发车间隔为 240 s , 并令全线每小时行车 10 对。经仿真计算, 得到 T7~T11 车站内的钢轨电位波形图如图 8 所示。

从图 8 中可以明显看到, 与正常工况相比, 在段场等效接地工况下的各车站钢轨电位明显提升, 最大提升了 27.2 V 。

当列车的发车间隔设置为 140 s 时, 全线每 h 行车 25 对。仿真设置三种不同的工况: 在正线的两端段场等效接地(工况 1)、单端停车场等效接地(工况 2)和正常工况。选取某车站 3 个工况下的轨电位进行分析, 如图 9 所示。正常工况仿真下, 车站钢轨电位最高为 63.6 V , 最低为 -9.5 V ; 工况 1 下, 车站钢轨电位最高为 84.2 V , 最低为

-20.6 V ; 工况 2 下, 车站钢轨电位最高为 89.8 V , 最低为 -10.8 V 。

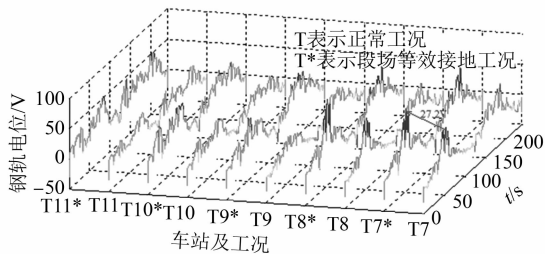


图8 各车站不同工况下正线钢轨电位仿真波形图

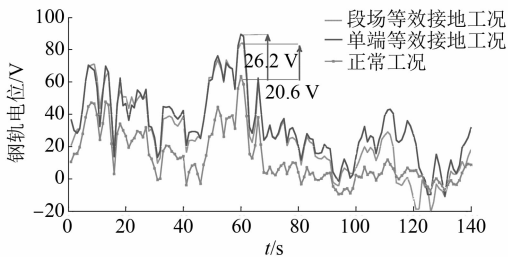


图9 正线某车站钢轨电位仿真波形图

仿真结果表明: 在停车场单端等效接地时, 车站的正向钢轨电位提高了 26.2 V ; 在线路两端的段场均等效接地时, 车站的负向钢轨电位降低了 11.1 V 。

2 新型钢轨回流装置及其控制方法

2.1 新型钢轨回流装置

由上述分析可知, 段场咽喉区绝缘节的失效引起了正线钢轨电位抬升。故本文提出一种新型钢轨回流装置可有效治理该类问题。该装置结构如图 10 所示。在正线钢轨 MR 和段场的出入线钢轨 AR 之间设置回流装置 IBD。本文针对钢轨电位的特点, 对当前段场与正线之间的钢轨回流系统做出改进, 并增加了隔离装置: 接触网之间设置接触网电分段的联络开关 DF; IBD 包括在钢轨绝缘节 JJ1 两端反向并联的大功率全控型电力电子器件 V1 和 V2, 以及由电源 DY、开关 S、电流传感器 C1 组成的串联支路; 在钢轨绝缘节 JJ1 前后安装第一位置列车检测设备(位置传感器) J1 和第二位置列车检测设备(位置传感器) J2。

该新型钢轨回流装置兼具钢轨绝缘节绝缘性能评估功能和出入线碎石道床上钢轨过渡电阻测试功能。其主电路有一台大功率直流电源 DY, 电源负极接正线钢轨一侧, 正极经控制开关 S 和电流传感器 C1 连接至段场钢轨 AR 一侧; 在 IBD 通

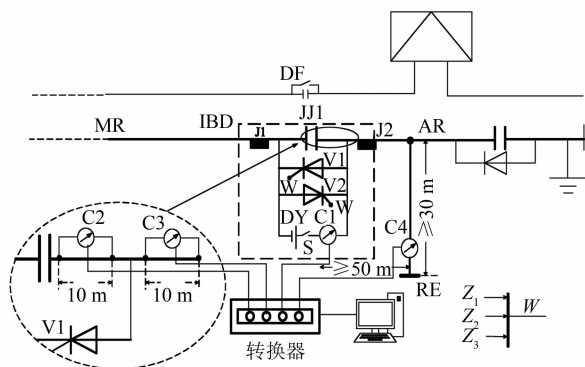


图10 新型钢轨回流装置结构图

过电缆连接段场钢轨 AR 位置的前后分别设置固定长度(可取 10 m)纵向钢轨电压的高精度电压传感器 C2 和 C3。在距离钢轨绝缘节 JJ1 水平距离 50 m 之外、距离 AR 钢轨垂直距离 30 m 之外处埋设硫酸铜参考电极 RE。设置电压传感器 C4 检测 AR 钢轨对硫酸铜参考电极电位。电流传感器 C1、C2、C3 和 C4 经转换器连接处理器,通过后台显示器动态显示当前的测试信息。

IBD(导通装置)在无列车通过时处于关断状态,能有效遏制正线产生的杂散电流入侵段场。当有列车通过此处时,为避免列车跨越钢轨绝缘节处产生打火问题,可通过列车位置感应器 J1 和 J2 及时控制 IBD 闭合,以电气连接正线钢轨和出入线钢轨。在无列车运行时,还可控制 IBD 关断,实施钢轨绝缘节绝缘性能评估和出入线碎石道床处钢轨对地的过渡电阻测试。

2.2 控制方法

正常供电时,DF 关断,信号 $Z_2 = 0$; S 处于断开状态,信号 $Z_3 = 0$ (见图 11)。

t_1 时刻,列车从正线返回段场, J1 首先感应到来车信号,由 J1 及 J2 输出信号($X = 1, Y = 0, X + Y > 0$)至 IBD 的控制装置 DR,立即输出控制信号 $Z_1 = 1$ 。逻辑判断模块根据图 11 的逻辑运算,输出信号 $W = 1$ 至 DR,以控制 V1 和 V2 导通; X, Y, Z_1 的信号时序关系图如图 12 所示。

t_2 时刻,当列车前轮到达 J2 处,但后轮未越过 J1 时, J1、J2 输出信号($X = 1, Y = 1, X + Y > 0$);列车后轮越过 J1 且未越过 J2 时, J1、J2 输出信号($X = 0, Y = 1, X + Y > 0$)至 DR,立即输出控制信号 $Z_1 = 1$ 。逻辑判断模块根据图 11 逻辑运算,输出信号 $W = 1$ 至 DR,以控制 V1 和 V2 导通。

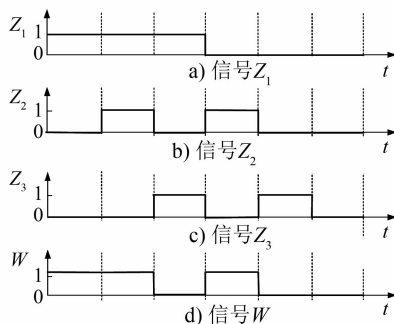
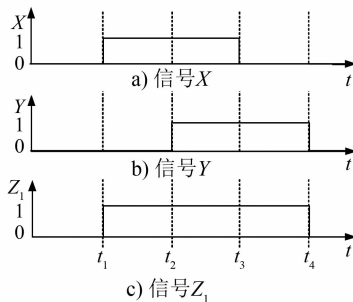


图11 控制信号 X、Y、Z 的时序图

图12 控制信号 Z_1, Z_2, Z_3 和 W 的时序图

t_3 时刻,当列车后轮完全越过 J2 时, J1 和 J2 输出信号($X = 0, Y = 0, X + Y = 0$)至 DR,而后输出信号($Z_1 = 0$)至逻辑模块,控制 V1 和 V2 关断。

当列车返回时,经过钢轨绝缘节 JJ1 的两个轮对到来位置传感器 J1 和 J2 时, IBD 工作方式与列车进库时方式相同。当段场内的牵引所故障失电,库内接触网又需要正常供电而闭合 DF 时,为保证段场内的列车可以正常的牵引回流, DF 闭合时输出的控制信号($Z_2 = 1, W = 1$)长期控制 IBD 闭合,直至段场内的牵引所故障恢复后, DF 才断开。当在非运营时间启用该套装置的过渡电阻测量和绝缘节绝缘性能评估功能时,开关 S 闭合,控制信号为 $Z_3 = 1, W = 0$,控制 IBD 处于关断状态。

3 结论

1) 城市轨道交通段场的绝缘节失效或传统单向导通装置导通,对全线绝缘安装的钢轨而言等效于接地支路。仿真验证结果表明,在正常的发车工况下,绝缘节失效或传统单向导通装置导通可使得正线的轨电位最大抬升 27.2 V。这进一步导致正线轨电位抬升,使某些车站钢轨电位限制装置动作(OVPD 接地),使杂散电流进一步加剧。

2) 新型钢轨回流装置及其控制方法既可以有

(下转第 199 页)

性线接地实现的(如图5所示)^[11]。为避免‘断零’造成UPS瞬变电压烧毁设备,其静态转换开关一般选用3极。对于这类负荷(如表1中的信号电源1(主)),建议采用测温式电气火灾监控探测器替代剩余电流探测器,以消除误报警。

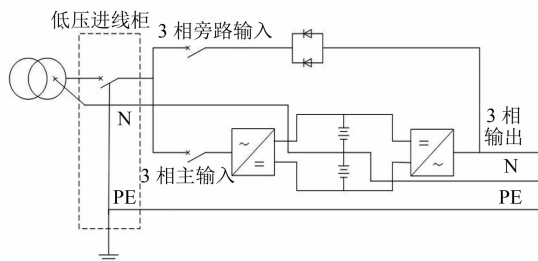


图5 UPS的接地系统

4 结语

本文结合某车站的实测数据,具体分析了电气火灾监控系统的误报警原因和排查方案,对城市轨道交通项目采用剩余电流式探测器的电气火灾监控系统的设计提出以下建议:

1) 环控负荷的剩余电流式电气火灾监控探测器宜设置在环控电控柜内,并取消400 V开关柜至环控柜回路的探测器设置

2) 弱电系统宜选用具备中性线重叠转换功能的4极转换开关

3) UPS静态转换开关为3极的弱电系统回路建议采用测温式探测器替代剩余电流式探测器

4) 设备选型时应要求探测器具备固有漏电补偿功能。

另外,目前已经有部分产品具备剩余电流监测数据的智能分析功能,能结合监测数据、采样时间及回路电气特征等多项因素,确定电气火灾监控

系统发出误报警的性质及根源(智能分析的原理与本文所述类同),为运维人员提供故障分类及快速定位参考。这类新的技术手段值得工程技术人员进一步关注和尝试。

更为重要的,工程建设中应严格把控施工不规范的问题,以确保电气火灾监控系统预警功能的有效应用。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 交通建筑电气设计规范: JGJ 243—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 69.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. (2018版) 建筑设计防火规范: GB 50016—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018: 131.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 火灾自动报警设计规范: GB 50116—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013: 38.
- [4] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 电气火灾监控系统工程技术规程: DG/TJ-08-2150—2014[S]. 上海: 同济大学出版社, 2014: 18.
- [5] 王一平, 李国有, 陈晓明. 剩余电流式电气火灾监控探测器的设置[J]. 建筑电气, 2015(2): 24.
- [6] 王德发. 城市轨道交通电气火灾监控系统应用方案[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(3): 107.
- [7] 万聪, 李成波, 范可, 等. 剩余电流式电气火灾监控器安装使用常见问题的探讨[J]. 智能建筑电气技术, 2012, 6(3): 50.
- [8] 王厚余. 建筑物电气装置600问[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 93.
- [9] 王厚余. 低压电气装置的设计安装和检验[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [10] 张振宇. 轨道交通车站电气火灾监控系统误报诊断探讨[J]. 电气技术, 2018(10): 107.
- [11] 杜皓明. 数据中心UPS上游低压配电系统4极开关的应用问题[R/OL]. 施耐德电气信息技术, (2018-10-26) [2018-11-30]. <https://mp.weixin.qq.com/s/GqnoMhQ2Nzry-kCy7vFkMA>.

(收稿日期: 2019-03-09)

(上接第195页)

效检测钢轨绝缘节的绝缘性能,又可以辅助列车安全通过绝缘节,避免其车轮发生打火现象,还能在没有列车进出段场时切断杂散电流的流通路径,从而缓解正线轨电位、遏制杂散电流。该方案对后续线路建设具有指导意义。

参考文献

- [1] 于松伟, 杨兴山, 韩连祥, 等. 城市轨道交通供电系统设计原理与应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [3] 唐靖坤, 刘炜, 王沛沛, 等. 一种车辆段、停车场与正线之间的钢轨回流装置[C]//中国铁道学会自动化委员会. 中国铁道学会电气化委员会2017年年会及新技术研讨会论文集. 北京: 中国铁道学会, 2017.
- [4] 刘炜, 李群湛, 李良威. 基于多折线外特性模型的直流牵引供电系统稳态短路计算[J]. 机车电传动, 2008(1): 61.
- [5] 王沛沛, 刘炜, 廖钧, 等. 城市轨道交通钢轨纵向电阻和轨地过渡电阻检测[J]. 电气化铁道, 2016(增刊): 9.

(收稿日期: 2018-10-05)