

城市轨道交通钢轨电位限制技术研究

陈超录¹, 杨 洋², 解培金¹, 胡 平¹, 陈 辉¹

(1. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 海军驻湖南地区军事代表室, 湖南 湘潭 411100)

摘 要: 钢轨电位限制装置是城市轨道交通供电系统保护设备中重要组成部分。分析了城市轨道交通钢轨电位限制保护的基本原理, 并针对其关键部件设计了一种新型的城市轨道交通钢轨电位限制器, 通过短路电流计算分析为钢轨电位限制器中双向晶闸管组件的选型设计提供了依据, 确定了适合的晶闸管参数配置, 同时设计了一种基于高压触发二极管的电压可控电路, 用于实现钢轨电位限制器的动作电压整定。试验结果表明, 该新型钢轨电位限制器动作可靠, 工作稳定, 满足性能要求, 同时适用于不同地铁线路的灵活整定要求。

关键词: 城市轨道交通; 钢轨电位限制器; 短路电流计算; 晶闸管

中图分类号: U239.5; U223.8

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.06.021

Technology Research on Rail Potential Limit of Urban Rail Transit

CHEN Chaolu¹, YANG Yang², XIE Peijin¹, HU Ping¹, CHEN Hui¹

(1. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Military Representative Office of the Navy in Hunan, Xiangtan, Hunan 411100, China)

Abstract: The OVPD device is an important component of the protective equipment in the power supply system of urban rail transit. Basic principle of rail potential limiting protection for urban rail transit was analyzed, and a new type of rail potential limiter for urban rail transit was designed, which provided the basis for the selection of the thyristor of the rail potential limiter through the calculation of short-circuit current, and determined the appropriate thyristor parameters. Meanwhile, a voltage controlled circuit based on high-voltage trigger diode was designed which was used to adjust the operation voltage of the rail potential limiter. The test results showed that the new type rail potential limiter was reliable and stable, which could meet the requirement of performance. It was also suitable for flexible setting of different metro lines.

Keywords: urban rail transit; rail potential limiter; short-circuit current calculation; thyristor

0 引言

随着城市轨道交通技术的发展及以人为本的建设理念要求的提高, 人身安全防护问题越来越受到重视。钢轨电位限制装置作为城市轨道交通供电系统的关键设备, 承担着限制钢轨电位、保护乘客安全的重任^[1]。钢轨电位限制器是钢轨电位限制装置中的重要组成部分, 主要承担系统中第三段钢轨电压保护功能, 当轨地之间电压达到第三段电压保护整定值时, 触发其中的晶闸管回路导通, 使钢轨与地短接。钢轨电位限制

器主要包括晶闸管组件和触发控制器模块。目前市面上的钢轨电位限制器产品种类较多, 但大多按通用经验选用2套相同参数的晶闸管组件反并联连接进行双向保护, 且触发控制模块只有一个电压整定值, 不适用于多种地铁线路的灵活设置要求^[1-2]。本文通过对外部线路短路电流计算, 分析了不同方向上晶闸管承受的不同的瞬时短路电流值, 在新型钢轨电位限制器设计中对正、反向晶闸管选用合适的参数及数量配置, 对性能进行了优化, 同时本文还设计了一套基于高压触发二极管的电压可控电路, 以达到在一台钢轨电位限制器中进行多个电压动作值调节的目的。

收稿日期: 2017-07-27; 修回日期: 2018-07-23

1 系统结构及原理

钢轨电位限制装置在直流牵引供电系统中, 安装于走行轨和大地之间, 其主要作用是防止在乘客上下车时由于其他列车的运行, 使钢轨对地电位过高或其他异常电位 (如变电所正极接地、走行区正负极短接等) 对人身造成电击伤害。钢轨电位限制装置中主要短接装置是接触器支路和双向晶闸管支路共同组成的并联电路, 用于短接走行轨和大地, 钢轨电位限制装置结构见图 1。

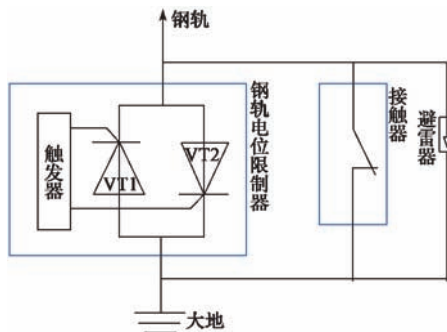


图 1 钢轨电位限制装置结构图

钢轨电位限制装置工作时有 2 套短接装置直接检测钢轨对地电位, 当钢轨对地电位超过设定的电压值时, 钢轨电位限制装置按设定电压值的不同进行相应保护动作, 一般分为 3 段保护, 其中 I 段、II 段保护利用接触器闭合实现接地, III 段保护利用钢轨电位限制器中双向晶闸管的快速动作特性实现接地。

目前不同地铁线路其 III 段钢轨电位限制保护整定值与动作逻辑稍有差别, 本文以典型的保护动作逻辑进行分析。

① I 段电压保护: 钢轨与大地之间的电压差大于 I 段动作电压整定值, 接触器合闸, 将钢轨与大地有效短接, 以降低钢轨电位, 保持一定时间后恢复断开。为防止快速瞬变的电压值引起接触器频繁动作, 设定若接触器连续动作 3 次后, 接触器将不再恢复断开, 保持闭锁状态。

② II 段电压保护: 钢轨与大地之间的电压差大于 II 段动作电压整定值, 接触器保持闭合, 不再恢复断开, 为持续闭锁状态。

③ III 段电压保护: 钢轨与大地之间的电压差大于 III 段动作电压整定值时, 晶闸管回路首先在约 0.2 ms 内导通, 使钢轨与地短接, 并向接触器发出合闸信号, 启动接触器合闸并保持在闭合状态。接触器合闸后, 晶闸管回路立即断开。维护人员排除故障, 将钢轨电位限制装置复位后, 钢轨电位限制装置才返回正常运行状态^[3-4]。

钢轨电位限制器主要用于实现 3 段电压保护, 硬件组成为一套反并联的晶闸管组件和对应的触发控制器模块。为了实现钢轨与大地之间的双向电压保护, 目前钢轨电位限制器产品中的晶闸管组件大多按经验设计采用 2 个相同参数的晶闸管进行反并联, 一般都选用对应通态不重复浪涌电流 I_{TSM} 为 80 kA 左右的晶闸管, 选型不够优化, 成本相对较高, 而且触发器模块仅固定配置为一种电压级别, 若要重新整定参数的话需更换触发器模

块, 不满足地铁灵活配置的性能要求^[2-3]。

2 短路电流计算及晶闸管选型分析

根据钢轨电位限制装置工作原理, 只有钢轨电位突然增大, 达到第 III 段电压保护值时, 钢轨电位限制器才动作。晶闸管作为钢轨电位限制器中的主要耐受电流元件, 晶闸管的选型需满足最大短路电流要求, 这样基于实际工况选择参数合适的晶闸管组件对钢轨电位限制器的设计尤为重要。下面通过短路电流计算及工况分析为钢轨电位限制器中双向晶闸管的选型设计提供依据。

2.1 短路电流计算分析

目前城市轨道交通供电系统电压有 DC 750 V 与 DC 1 500 V 这 2 种制式。本文出于最大短路电流计算考虑, 选择 DC 1 500 V 供电电压进行计算, 最大机组容量按 2.5 MVA 考虑, 计算时不考虑供电系统特殊情况, 以正常运行时的情况考虑, 并做以下简化计算模型假设^[5-7]:

① 短路点假设为 A 变电所出口近端 0.1 km 处, 两变电所最小间距 2 km;

② 供电系统为分区供电且正常双边供电模式, 不考虑其他供电区间影响;

③ 供电系统短路时相邻变电所输出电压相同, 且对侧的接触轨 (网) 对本侧影响忽略不计。

基于以上考虑, 双边供电系统等效电路图如图 2 所示。

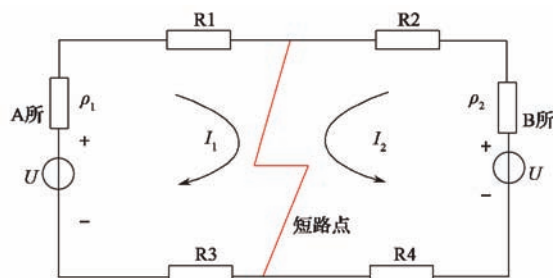


图 2 双边供电等效电路图

A 变电所在短路点产生的短路电流为

$$I_1 = \frac{U_n}{\rho_1 + R_1 + R_3} = \frac{1.5}{0.042 + 0.001 + 0.0015} \approx 33.71 \text{ kA} \quad (1)$$

其中:

$$\rho_1 = K_r \cdot \frac{U_d}{100} \cdot \frac{U_n^2}{0.9nS_T} = 1.2 \times \frac{7}{100} \times \frac{1.5^2}{0.9 \times 2 \times 2.5} = 0.042 \text{ } \Omega \quad (2)$$

$$R_1 = RL = 0.01 \times 0.1 = 0.001 \text{ } \Omega \quad (3)$$

$$R_3 = rL = 0.015 \times 0.1 = 0.0015 \text{ } \Omega \quad (4)$$

B 变电所在短路点产生的短路电流为

$$I_2 = \frac{U_n}{\rho_2 + R_2 + R_4} = \frac{1.5}{0.035 + 0.019 + 0.029} \approx 18.07 \text{ kA} \quad (5)$$

其中:

$$\rho_2 = K_r \frac{U_d}{100} \cdot \frac{U_n^2}{0.9nS_T} = 1.0 \times \frac{7}{100} \times \frac{1.5^2}{0.9 \times 2 \times 2.5} = 0.035 \Omega \quad (6)$$

$$R_2 = Rl = 0.01 \times 1.9 = 0.019 \Omega \quad (7)$$

$$R_4 = rl = 0.015 \times 1.9 = 0.029 \Omega \quad (8)$$

式中: U_n 为牵引变电所母线电压, kV;

ρ_1, ρ_2 分别为 A 变电所和 B 变电所内阻, Ω ;

R_1, R_2 分别为 A 变电所和 B 变电所出口距短路点接触轨(网)电阻, Ω ;

R_3, R_4 分别为 A 变电所和 B 变电所出口距短路点走行轨电阻, Ω ;

L, l 分别为 A 变电所和 B 变电所出口距短路点距离, km;

R 为接触轨(网)平均电阻, 取值 $0.01 \Omega/\text{km}^{[5]}$;

r 为走行轨平均电阻(双轨并联连接), 取值 $0.015 \Omega/\text{km}^{[6]}$;

U_d 为牵引变压器短路阻抗电压与额定电压的比, 取 7%;

S_T 为变压器容量, 按最大机组容量 2.5 MVA 考虑;

n 为牵引整流机组数, 一般取 2;

系数 0.9 为牵引变压器与整流器的匹配系数;

K_r 为内阻系数, 出口短路时可取 1.3, 100 m 处短路时取 1.2, 远端短路时取 $1.0^{[5]}$ 。

根据 KCL 定律^[5], 最终短路点总电流:

$$I = I_1 + I_2 = 33.71 + 18.07 \approx 52 \text{ kA} \quad (9)$$

2.2 工况分析

钢轨电位限制装置监测到电位异常升高, 一般包括走行区接触轨(接触网)与钢轨短路及变电所正极接地 2 种情况, 下面就这 2 种情况对晶闸管耐受电流进行分析。

①当接触轨(网)与钢轨或者车壳短路, 即正负极短路, 等效电路如图 3 所示, 钢轨电位限制器中晶闸管 VT2 被触发导通, 使钢轨与大地短接。依据《地铁杂散电流腐蚀防护技术规程》(CJJ 49—1992)第 4.2.1 条规定, 兼用作回流的地铁钢轨与隧洞主体结构或大地之间的过渡电阻值 R_1 (按闭塞区间分断进行测量并换算为 1 km 长度的电阻值), 对于新建线路不应小于 $15 \Omega/\text{km}$, 对于运行线路不应小于 $3 \Omega/\text{km}$, 本文中过渡电阻值 R_1 按照 $3 \Omega/\text{km}$ 进行计算。

按等效电路分析, 流过晶闸管 VT2 的电流:

$$I_1 = I \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 52 \times \frac{0.015 \times 0.1}{3 \times 0.1 + 0.015 \times 0.1} \approx 0.26 \text{ kA} \quad (I_1 \ll I_2) \quad (10)$$

短路点设为近端 0.1 km 处, 双轨并联走行轨电阻取 $0.015 \Omega/\text{km}^{[6]}$; 图 3 中 I_1 为短路电流过晶闸管 VT2 电流值, I_2 为短路电流经钢轨返回直流系统负极电流值, R_1 为过渡电阻值, R_2 为走行轨内阻值。

根据以上分析可知, 接触轨(网)与钢轨短路时流过晶闸管 VT2 的短路电流很小, 短路电流中的大部分经走行轨返回直流系统负极, 并触发直流馈线断路器本体大电流脱扣装置保护动作, 其动作时间一般小于 $10 \text{ ms}^{[5,8]}$ 。

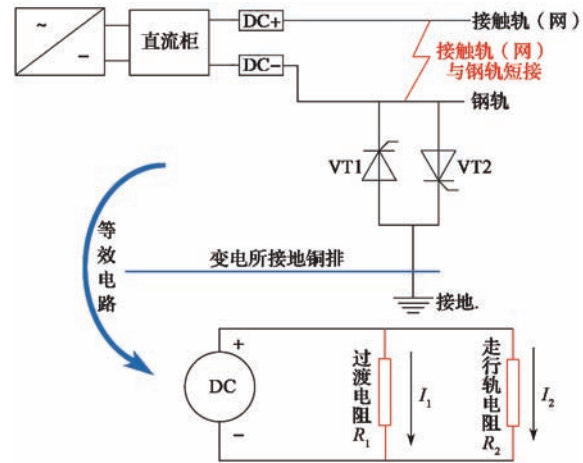


图 3 走行区接触轨(接触网)与钢轨短接工况图

②当变电所直流正极与大地短接, 等效电路如图 4 所示。钢轨电位限制器会检测到大地与钢轨之间存在压差(该压差为系统电压 U_n), 晶闸管 VT1 导通, 电流由直流正极流出, 经接地铜排、晶闸管 VT1、钢轨返回直流负极, 等效为直流正负极短路, 电流大小等效为近端短路电流 $I=52 \text{ kA}$, 并触发直流断路器大电流脱扣保护, 直流断路器动作时间一般小于 $10 \text{ ms}^{[8]}$ 。

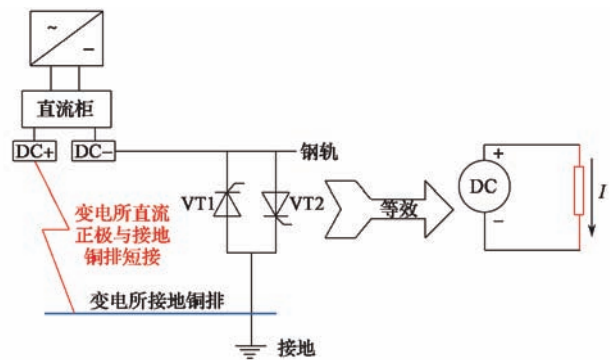


图 4 变电所直流正极与大地短接工况图

2.3 晶闸管选型分析

基于以上工况分析, 短路时, 钢轨电位限制器中大地对钢轨方向, 晶闸管 VT1 承受瞬时短路电流很大, 约为 52 kA , 时间小于 10 ms ; 钢轨对大地方向, 晶闸管 VT2 承受瞬时短路电流较小, 小于 1000 A , 时间小于 10 ms 。可见, 钢轨电位限制器晶闸管组件短路电流走向主要表现为大地对钢轨方向, 由于钢轨电位限制器是瞬时工作, 一般不考虑晶闸管的通态平均电流参数, 出于设计冗余及可靠性考虑, 本文设计新型钢轨电位限制器选用 3 个晶闸管并联。

选用晶闸管技术参数如下:

断态和反向重复峰值电压 V_{DRM}	2 400 V
通态平均电流 I_T	2 730 A

通态不重复浪涌电流 (10 ms) I_{TSM} 45 kA

组件连接图如图 5 所示, 其中 VD1 与 VD2 并联, 电流方向为大地对钢轨方向, 最大短路耐受电流为 90 kA, VD3 电流方向为钢轨对地方向, 最大短路耐受电流为 45 kA, 参数满足短路工况分析要求, 且 2 个方向按实际工况选用不同短路容量的晶闸管配置, 性能及成本要优于按一般经验设计采用 2 台 I_{TSM} 为 80 kVA 左右 (对应 I_T 为 5 200 A 左右) 的晶闸管并联组件^[9-10]。

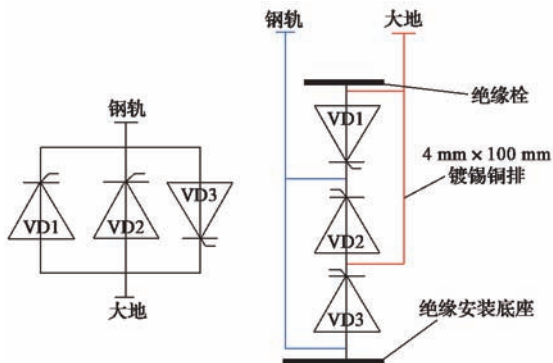


图 5 新型钢轨电位限制器晶闸管组件结构及连接图

3 可调电压电路设计

目前大多钢轨电位限制器产品其触发器模块只固定一种电压级别, 若要重新整定参数则需要更换触发器模块, 性价比不高, 且不满足不同地铁线路的灵活整定要求。本文针对钢轨电位限制器的触发器模块设计了一种新型电压可控电路, 用于实现在同一台钢轨电位限制器中调整动作电压的功能。

本电路主要是基于高压触发二极管设计, 使用单向高压触发二极管 SIDAC 串联组合成不同的触发电压等级, 构成 120~600 V 电压挡位可调整宽范围, 一共有 9 个挡位: 120 V, 180 V, 240 V, 300 V, 360 V, 420 V, 480 V, 540 V, 600 V。基于高压触发二极管的特性, 电压精度可控制在 $\pm 5\%$ 以内, 基本满足目前国内所有不同地铁线路的整定要求, 人机接口采用 9 挡位万能转化开关设计, 方便实用, 该电路简化图如图 6 所示。

4 试验结果

基于以上对城市轨道交通钢轨电位限制的原理分析及技术研究, 在设计新型钢轨电位限制器样机上进行试验。将直流电源全部施加在钢轨电位限制器晶闸管两端, 并串联保护电阻, 试验时依次选择相应挡位,

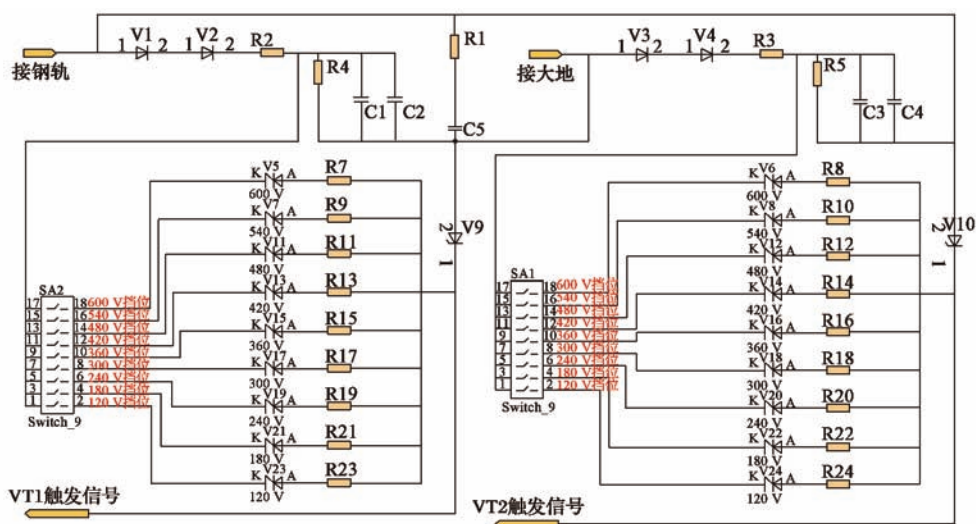


图 6 电压可控电路设计简化框图

调整直流电源输出, 通过示波器记录晶闸管触发时动作波形及动作时间, 试验结果如图 7~ 图 9。

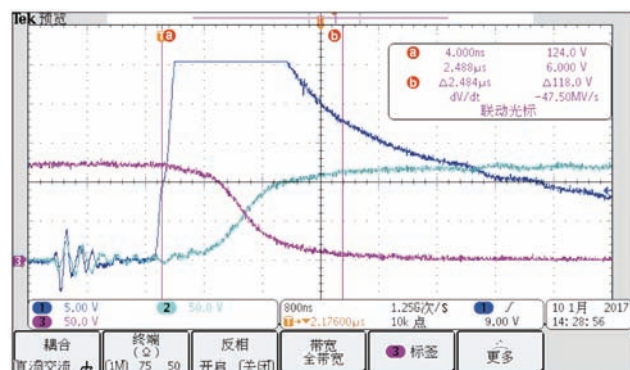


图 7 120 V 挡位试验波形图

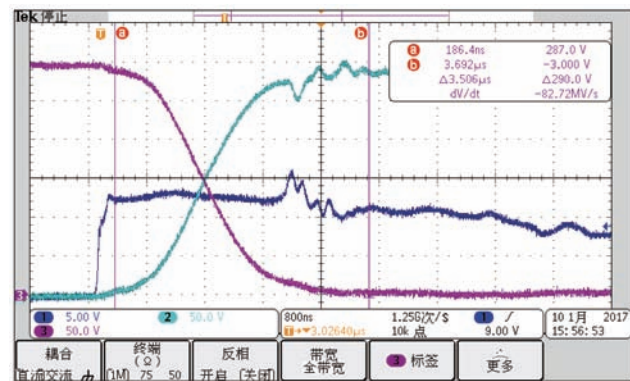


图 8 300 V 挡位试验波形图

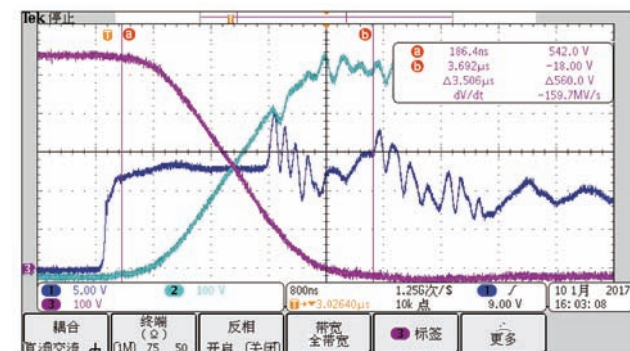


图 9 540 V 挡位试验波形图

图 7~ 图 9 中, 蓝色曲线表示晶闸管门极脉冲触发

信号, 绿色曲线表示晶闸管串联保护电阻两端电压, 紫色曲线表示晶闸管两端实际电压。通过示波器标签功能指示紫色曲线的电压跳变来验证晶闸管的导通情况, 试验结果表明: 在选择各个挡位情况下, 钢轨电位限制器晶闸管组件均能在对应挡位范围内及时动作, 动作值及动作时间均在要求的范围以内, 动作稳定可靠, 满足性能要求。

5 结语

本文通过对城轨供电系统外部短路电流的计算, 为新型钢轨电位限制器的晶闸管组件提供了选型依据, 分析了正、反方向上晶闸管承受的不同的瞬时短路电流值, 并在晶闸管组件选型设计上采用合适的参数及数量配置, 优化了产品性能, 同时通过在触发器模块中设计加入一套基于高压触发二极管的电压可控电路, 具备9个电压可调挡位, 满足钢轨电位限制器动作电压可调的多功能应用要求。样机的试验结果表明, 采用改进方案后, 该新型钢轨电位限制器动作可靠, 性能满足要求, 可灵活应用于不同地铁线路的供电系统钢轨电位限制保护领域。

参考文献:

[1] 王凯健, 韩连祥. 钢轨电位限制器新型控制方式研究[J]. 都

市轨道交通, 2012(6): 103-105.

- [2] 李志慧. 地铁供电系统中 OVPD 的主要参数分析[J]. 电气化铁道, 2016(1): 38-41.
- [3] 刘建华, 李艳, 刘旭. 框架保护与钢轨电位限制装置保护的研究[J]. 城市轨道交通研究, 2015(10): 53-56.
- [4] 田胜利. 轨道交通直流框架保护与钢轨电位限制装置关系分析[J]. 现代城市轨道交通, 2004(3): 28-30.
- [5] 于松伟, 杨兴山, 韩连祥, 等. 城市轨道交通供电系统设计原理及应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
- [6] 潘宇辉. 浅谈地铁钢轨过渡电阻的测试[J]. 技术与市场, 2011(4): 46-47.
- [7] 王军, 翁创业. 直流牵引供电系统短路试验浅析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2011(4): 64-66.
- [8] 汪孔屏. 浅议轨道交通直流牵引供电系统的构成与保护配置[J]. 上海电器技术, 2005(4): 33-38.
- [9] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [10] 赵争鸣, 袁立强, 鲁挺, 等. 我国大容量电力电子技术与应用发展趋势[J]. 电气工程学报, 2015(4): 26-34.

作者简介: 陈超录(1970-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 现从事城轨牵引系统、机电系统集成技术开发工作。

(上接第96页)

②通过有限元分析以及疲劳试验充分验证, 产品强度和疲劳寿命满足设计要求, 具有较高的可靠性, 可满足低地板车的装车 and 运行要求。

③转动铰接装置选用材料及工艺过程可靠。

参考文献:

[1] 低地板有轨电车车辆通用技术条件: CJ-T 417—2012[S].

2012.

- [2] 沈训梁, 陆云, 李俊, 等. 100%低地板有轨电车及其转向架发展现状[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(5): 21-24.
- [3] 葛党朝. 低地板轻轨车辆的总体方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14(9): 58-61.
- [4] 徐灏. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

作者简介: 罗 斌(1986-), 男, 高级工程师, 主要从事轨道车辆车体连接部件的研发工作。

动态消息

《机车电传动》不接受 电子邮件投稿的通知

我刊于2016年开始使用采编系统收稿, 稿件全部从《机

车电传动》网站的在线投稿系统中登记, 不再接受电子邮件投稿。请投稿作者到我刊官网(<http://edl.crczic.cc/>)进行注册账号后再按照要求投稿。如遇网站异常, 可与编辑部联系(0731-28498221, 28498141), 我们会尽快为您处理。如果给您带来不便, 敬请谅解。

《机车电传动》编辑部