

冲击响应特性在轨地过渡电阻检测中的应用

曹晓斌¹ 叶俊² 王满想³ 季耀政¹ 简明华¹ 谢金洋¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 611756, 成都; 2. 阳光电源股份有限公司, 230088, 合肥;

3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 450003, 郑州)

摘要 [目的]城市轨道交通线路杂散电流的危害越来越不容忽视。杂散电流不易检测,轨地过渡电阻的大小是影响杂散电流最关键的因素,因此,通过检测轨地过渡电阻的大小来判断杂散电流的影响程度,是治理杂散电流的有效方法。[方法]基于 EMTP(电磁暂态程序)软件,搭建了轨道电路分布参数仿真模型。采用单一控制变量法,分别得到了分布电容、分布电感、钢轨纵向电阻、轨地过渡电阻对冲击阻抗时变特性曲线的影响规律。提出利用冲击阻抗时变比值曲线来判断轨地过渡电阻是否符合要求的方法,并对成都某条城市轨道交通线路进行了实际测量,对该方法进行了验证。[结果及结论]7~20 μs 时间段内,仅轨地过渡电阻1个参数对冲击阻抗时变特性造成影响。可利用此特征下的冲击阻抗时变特性来反映轨地过渡电阻情况,并对轨地过渡电阻值是否满足规范要求进行有效判断。实测结果表明,该检测方法具有可行性和实用性。

关键词 城市轨道交通; 供电; 杂散电流; 轨地过渡电阻; 冲击阻抗时变特性

中图分类号 U223.6⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.09.030

Application of Impulse Response Characteristics in Rail-ground Transition Resistance Measurement

CAO Xiaobin¹, YE Jun², WANG Manxiang³, JI Yaozheng¹, JIAN Minghua¹, XIE Jinyang¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China; 2. Sungrow Power Supply Co., Ltd., 230088, Hefei, China; 3. Yellow River Survey, Planning and Design Institute Co., Ltd., 450003, Zhengzhou, China)

Abstract [Objective] The stray current harm in urban rail transit lines is increasingly non-ignorable. Stray current is not easy to be detected, and the amount of the rail-ground transition resistance is a crucial factor affecting stray current. Therefore, measuring the amount of the rail-ground transition resistance is an effective stray current control method to judge the influence degree of stray current. [Method] Based on EMTP

(electromagnetic transient program) software, a simulation model of the track circuit distributed parameters is built. The respective influence patterns of the distributed capacitance, distributed inductance, longitudinal resistance of the steel rail, and the rail-ground transition resistance on the time-varying characteristic curve of impulse impedance are obtained by using the single control variable method. The method of using impulse impedance time-varying ratio curve to judge whether the rail-ground transition resistance meets the requirement is proposed, and further verified by actual measurement of an urban rail transit line in Chengdu. [Result & Conclusion] Within 7~20 μs , only the rail-ground transition resistance parameter may affect the time-varying characteristics of the impulse impedance. Therefore, it can be used to reflect the condition of the rail-ground transition resistance and make valid judgement on whether the rail-ground transition resistance meets the requirement in the specification or not. Test results show that the measuring method is feasible and practical.

Key words urban rail transit; power supply; stray current; rail-ground transition resistance; time-varying characteristics of impulse impedance

城市轨道交通牵引供电系统一般采用走行轨回流,而钢轨对地不可能做到完全绝缘,因此会有一部分电流泄漏到周围环境中,形成杂散电流^[1-2]。随着城市轨道交通的高速发展,杂散电流腐蚀隧道结构钢筋及周边油气管道,造成了变压器直流偏磁等危害,这些危害不容忽视^[3-4]。杂散电流具有周期性、无方向性及影响范围广等特点,导致其很难被直接测量^[5-6]。相关研究表明,钢轨对地绝缘性能是影响杂散电流大小的主要原因^[7],轨地过渡电阻越大,钢轨对地绝缘性能越好。由此,若轨地过渡电阻值符合标准要求,则可以减小杂散电流带来的危害。冲击响应法是一种应用广泛的诊断方法,具有操作简单、检测误差小且效率高等优点,近年来受到很多学者关注且被广泛应用。文献[8]基于

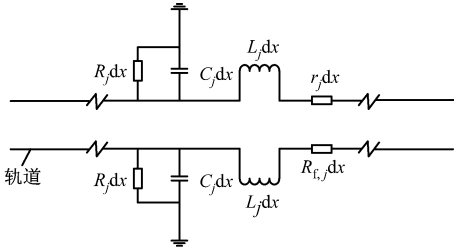
冲击响应,对卫星运输进行了应用分析。文献[9]基于冲击响应谱,对列车设备冲击环境特性进行了分析。

为了研究冲击响应法在轨地过渡电阻检测应用中的可行性,本文基于 EMTP(电磁暂态程序)软件,从分布电感、分布电容、钢轨纵向电阻、冲击电流波的波头时间和波尾时间、轨地过渡电阻等方面,分析冲击阻抗时变特性曲线,以期在轨地过渡电阻的检测提供新的方法。

1 轨道电路仿真模型建立及仿真参数设置

1.1 轨道电路仿真模型建立

本文借鉴大多数学者将轨道线路等效为常用的分布参数单元电路模型(Γ 形或 π 形模型)^[10]。将轨道电路看成由无限多个小段传输线连接而成的电路,并选用分布电感 L 、分布电容 C 、分布电阻 R_f 和轨地过渡电阻 R 等参数,在 EMTP 软件中搭建轨道电路分布参数模型,如图 1 所示。



注: dx —单位长度,由轨道模型长度及模型分段长度决定; j —轨道电路分布参数模型中的第 j 个单元; $R_j dx$ —单位轨道长度下第 j 个单元的轨地过渡电阻值; $C_j dx$ —单位轨道长度下第 j 个单元的分布电容值; $L_j dx$ —单位轨道长度下第 j 个单元的分布电感值; $R_{f,j} dx$ —单位轨道长度下第 j 个单元的分布电阻值。

图 1 轨道电路分布参数模型

Fig. 1 Distributed parameter model of track circuit

1.2 仿真参数设置

将轨道线路等效为传输线模型,通过计算单元电路中等效电容 C_j 、钢轨的自感 L_0 、钢轨间互感 M_0 、钢轨纵向电阻 R_0 及轨地过渡电阻 R 等分布参数,得到 EMTP 软件仿真中各参数的设定值。经查阅资料和文献,本文采用标准钢轨型号(60 kg/m)及标准轨距(轨距 $d = 1\,435\text{ mm}$),钢轨等效半径 a 取 0.060 m , R_0 取 $0.04\text{ }\Omega/\text{km}$ 。

基于 CJJ 49—2020《地铁杂散电流腐蚀防护技术规程》的要求,新建线路的轨地过渡电阻不应小于 $15\text{ }\Omega \cdot \text{km}$ 。故本文参数中, R 取 $15\text{ }\Omega \cdot \text{km}$,轨道长度 l 取 1 km 。

模型中的等效电容 C_j 由 2 条钢轨之间的电容 $C_{\text{轨-轨}}$ 、钢轨对地间的电容 $C_{\text{轨-地}}$ 组成,其等效电路如图 2 所示。

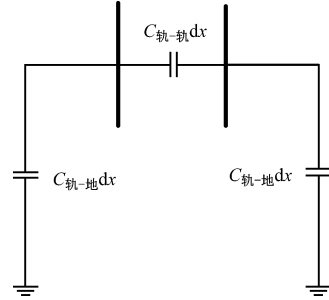


图 2 模型的电容等效电路

Fig. 2 Equivalent capacitance circuit of the model

设 ε_r 为相对介电常数, ε_0 为真空介电常数,则空气介电常数 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ 。 $C_{\text{轨-轨}}$ 的计算式^[11]为:

$$C_{\text{轨-轨}} = \frac{\pi \varepsilon l}{\ln(d/a)} \quad (1)$$

$C_{\text{轨-地}}$ 可等效为圆柱形导体与无限大平面之间的电容,其计算式为:

$$C_{\text{轨-地}} = \frac{2\pi \varepsilon l}{\ln\left(\frac{d}{a} + \sqrt{\frac{d^2}{a^2} - 1}\right)} \quad (2)$$

根据图 2,可得到 C_j 的计算式为:

$$C_j = C_{\text{轨-轨}} + C_{\text{轨-地}}/2 \quad (3)$$

设 μ_0 为真空磁导率。把钢轨等效为 2 个平行导体, L_0 、 M_0 的计算式分别为:

$$L_0 = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \frac{d}{a} - \frac{a^2}{d^2} - \frac{3}{2} \frac{a^4}{d^4} \right) \quad (4)$$

$$M_0 = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{d} - 1 \right) \quad (5)$$

$d = 1\,435\text{ mm}$, $a = 0.060\text{ m}$, $R_0 = 0.04\text{ }\Omega/\text{km}$, $l = 1\text{ km}$, $\varepsilon_r = 1.000\,585$, $\varepsilon_0 = 8.854\,187\,817 \times 10^{-12}\text{ F/m}$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\text{ H/m}$ 。经计算可得, $C_{\text{轨-轨}} = 9.29 \times 10^{-9}\text{ F/km}$, $C_{\text{轨-地}} = 2.969\,29 \times 10^{-8}\text{ F/km}$ 。由式(3)一式(5)可得 $C_j = 2.409 \times 10^{-8}\text{ F/km}$, $L_0 = 1.6 \times 10^{-3}\text{ H/km}$, $M_0 = 1.28 \times 10^{-4}\text{ H/km}$ 。

2 轨道电路参数对冲击阻抗时变特性的影响

本文在钢轨与大地间施加冲击电流,仿真得到电流注入点处随时间变化的冲击电压及电流的波形,并用各时刻的电压除以对应时刻的电流,进而得到冲击阻抗在时域内的变化曲线,即冲击阻抗时

变特性。

为了研究轨道各参数值的改变对冲击阻抗时变特性的影响,本文采用单一控制变量法,分别得到分布电容、分布电感、钢轨纵向电阻、轨地过渡电阻不同取值情况下对冲击阻抗时变特性曲线的影响规律,其结果如图3—图6所示。

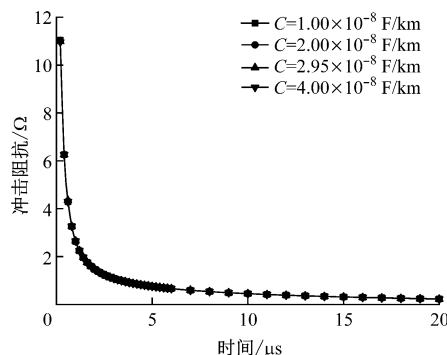


图3 不同分布电容取值对冲击阻抗时变特性的影响

Fig. 3 Effect of different distributed capacitance values on time-varying characteristics of the impulse impedance

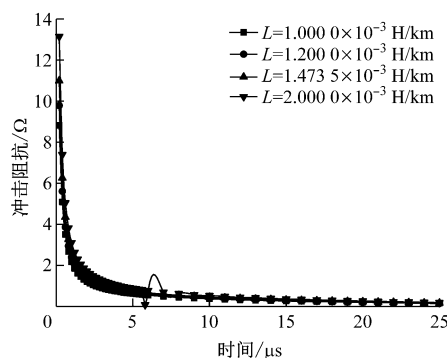


图4 不同分布电感取值对冲击阻抗时变特性的影响

Fig. 4 Effect of different distributed inductance values on time-varying characteristics of the impulse impedance

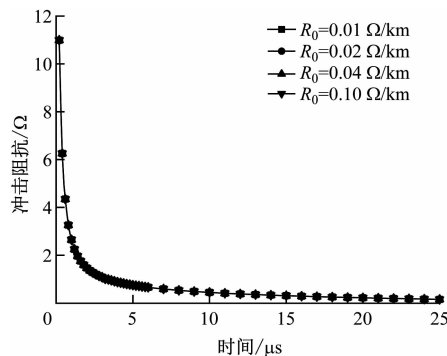


图5 不同纵向电阻取值对冲击阻抗时变特性的影响

Fig. 5 Effect of different longitudinal resistance values on time-varying characteristics of the impulse impedance

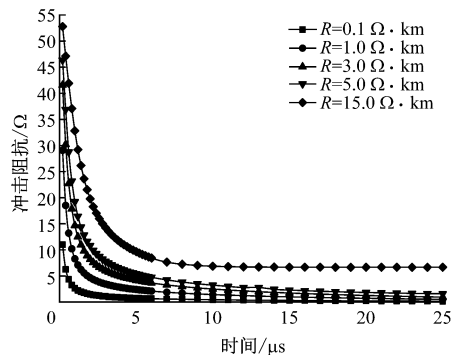


图6 不同轨地过渡电阻取值对冲击阻抗时变特性的影响

Fig. 6 Effect of different rail-ground transition resistance values on time-varying characteristics of the impulse impedance

由图3—图6可知:

1) 随着分布电容的增大,冲击阻抗时变特性曲线走向不变。当时间小于 $7 \mu\text{s}$ 时,分布电感越大,冲击阻抗越大;时间大于 $7 \mu\text{s}$ 时,随着分布电感的增加,冲击阻抗基本不变。随着钢轨纵向电阻的增加,冲击阻抗不变。

2) 随着轨地过渡电阻的增加,冲击阻抗时变特性曲线逐渐向上平移;当时间小于 $20 \mu\text{s}$ 时,随着时间的增加,冲击阻抗逐渐降低;时间大于 $20 \mu\text{s}$ 时,随着时间增加,冲击阻抗几乎不变。这是由于当时间小于 $20 \mu\text{s}$ 时,冲击阻抗主要受分布电感及分布电容的影响;而当时间大于 $20 \mu\text{s}$ 时,冲击阻抗受轨地过渡电阻影响较大,由于轨地过渡电阻恒定(不受频率影响),因此冲击阻抗几乎不随时间变化。

由此可见,分布电容、钢轨纵向电阻对冲击阻抗时变特性基本没有影响,但分布电感、轨地过渡电阻对冲击阻抗时变特性的影响很大。

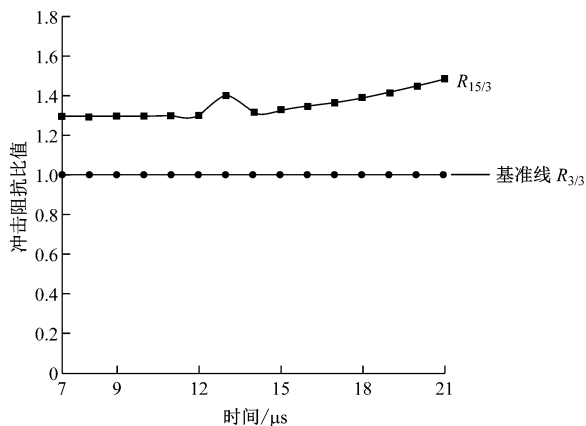
3 轨地过渡电阻的检测方法及实实验证

3.1 检测方法的建立

由上节可知,分布电感对冲击阻抗时变曲线的影响主要在 $0 \sim 7 \mu\text{s}$ 时间段内,轨地过渡电阻对冲击阻抗时变曲线的影响在 $0 \sim 20 \mu\text{s}$ 时间段内。因此,选择 $7 \sim 20 \mu\text{s}$ 这一时间段对轨地过渡电阻进行研究,可以排除分布电感对冲击阻抗的影响。

为了更加清楚地判断冲击阻抗与轨地过渡电阻的关系,同时排除仿真取值因素的影响,本文以轨地过渡电阻值取 $3 \Omega \cdot \text{km}$ 时的冲击阻抗时变曲线为基准,将轨地过渡电阻值为 $15 \Omega \cdot \text{km}$ 时的仿真结果除以对应时刻轨地过渡电阻值为 $3 \Omega \cdot \text{km}$

时的仿真结果,进而得到时间段为 $7 \sim 20 \mu\text{s}$ 时的冲击阻抗比值时变曲线,如图 7 所示。



注: $R_{15/3}$ 表示轨地过渡电阻值为 $15 \Omega \cdot \text{km}$ 时的仿真结果除以轨地过渡电阻为 $3 \Omega \cdot \text{km}$ 的仿真结果; $R_{3/3}$ 表示轨地过渡电阻值为 $3 \Omega \cdot \text{km}$ 时的仿真结果除以轨地过渡电阻为 $3 \Omega \cdot \text{km}$ 的仿真结果(即参考基准线)。

图 7 仿真时间为 $7 \sim 20 \mu\text{s}$ 时的冲击阻抗比值时变曲线

Fig. 7 Impulse impedance ratio time-varying curve within the simulation period of $7 \sim 20 \mu\text{s}$

从图 7 看出,在 $7 \sim 20 \mu\text{s}$ 时间段内,当冲击阻抗比值小于 1 时,轨地过渡电阻值小于 $3 \Omega \cdot \text{km}$;当冲击阻抗比值位于两条曲线之间时,轨地过渡电阻值大于 $3 \Omega \cdot \text{km}$ 、小于 $15 \Omega \cdot \text{km}$ 。基于此方法,可以将实测数据的冲击阻抗比值与上述基准曲线进行对比,就能达到检测轨地过渡电阻大小的目的。

3.2 试验雷电冲击电流波的选取

要利用上文所述方法检测轨地过渡电阻,实测时须采用试验的雷电冲击电流波。图 8 为冲击电流波不同波头时间对冲击阻抗时变特性的影响。图 9

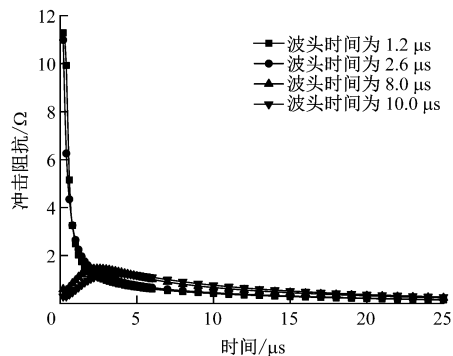


图 8 冲击电流波不同波头时间对冲击阻抗时变特性的影响

Fig. 8 Effect of different wave head times of impulse current wave on time-varying characteristics of impulse impedance

为冲击电流波不同波尾时间对冲击阻抗时变特性的影响。由图 8、图 9 可知:实测时应选取波头时间和波尾时间均较小的冲击电流波形,以减小对冲击阻抗时变曲线的影响。

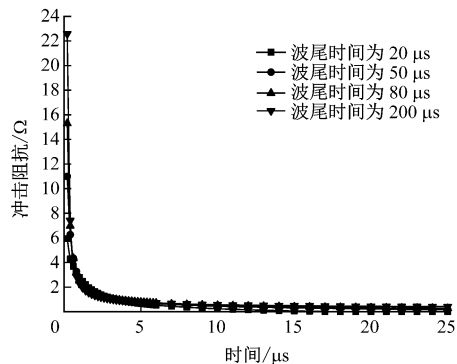


图 9 冲击电流波不同波尾时间对冲击阻抗时变特性的影响

Fig. 9 Effect of different wave tail time of impulse current wave on time-varying characteristics of impulse impedance

3.3 实测方法的验证

本文对成都某城市轨道交通线路进行实际测量,其测量原理如图 10 所示。通过向轨道注入冲击电流,测量注入点处的电压值及电流值,进而计算得到轨道电路冲击阻抗比值时变曲线,并将其与仿真得到的冲击阻抗比值时变曲线进行对比。

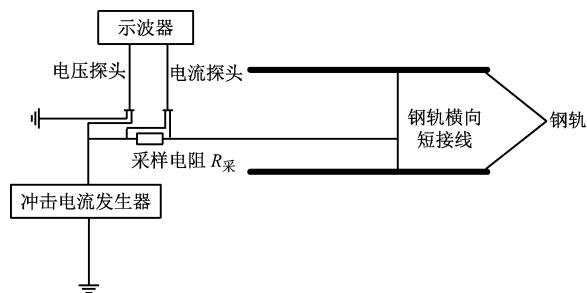


图 10 轨道电路冲击阻抗比值时变特性曲线测量原理

Fig. 10 Measurement schematic diagram of the track circuit impulse impedance ratio time-varying characteristic curve

设 $R_{\text{实测}/3}$ 为实测冲击阻抗值与轨地过渡电阻为 $3 \Omega \cdot \text{km}$ 时仿真结果的比值。图 11 为仿真得到的冲击阻抗比值 ($R_{3/3}$ 、 $R_{15/3}$) 与实测计算得到的冲击阻抗比值 ($R_{\text{实测}/3}$) 对比情况。从图 11 可知, $R_{\text{实测}/3}$ 曲线均在 $R_{3/3}$ 曲线的下方,则判定该线的实测轨地过渡电阻小于 $3 \Omega \cdot \text{km}$ 。由此可认为,冲击阻抗时变比值曲线可以较为直观、清晰地判断城市轨道交通线路轨道过渡电阻是否满足规范要求。

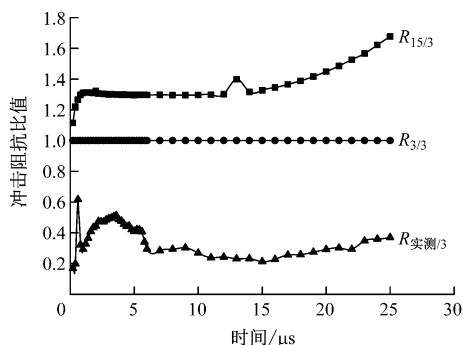


图 11 仿真得到的冲击阻抗比值与实测轨地过渡电阻计算得到的冲击阻抗比值的对比

Fig. 11 Comparison of the simulated impulse impedance ratio and the calculated one by measuring rail-ground transition resistance

4 结语

1) 在轨道参数中,分布电容、钢轨纵向电阻对冲击阻抗时变曲线基本无影响。分布电感、轨地过渡电阻对冲击阻抗时变曲线影响很大,分布电感对冲击阻抗时变特性的影响时间段集中在 $0 \sim 7 \mu\text{s}$, 轨地过渡电阻对冲击阻抗时变特性的影响时间段集中在 $0 \sim 20 \mu\text{s}$ 。

2) 在实测试验中,应选取波头时间及波尾时间均较小的冲击电流波,以排除波头时间、波尾时间对冲击阻抗时变曲线的影响。

3) $7 \sim 20 \mu\text{s}$ 时间段内,仅轨地过渡电阻 1 个参数对冲击阻抗时变曲线有影响,可通过冲击阻抗比值时变特性来判断轨地过渡电阻值是否满足规范要求。

参考文献

- [1] 王彦忠. 城市轨道交通对城市发展与环境影响的研究[J]. 工程建设与设计, 2019(5): 140.
WANG Yanzhong. Research on the impact of urban rail transit on urban development and environment[J]. Construction & Design for Engineering, 2019(5): 140.
- [2] WEN C, LI J, WANG S, et al. Experimental study on stray current corrosion of coated pipeline steel[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27: 1555.
- [3] 陆晨浩, 农兴中, 范进, 等. 杂散电流作用下钢筋混凝土腐蚀电流时变规律研究[J]. 混凝土, 2021(1): 13.
LU Chenhao, NONG Xingzhong, FAN Jin, et al. Study on time-varying regularity of reinforced concrete corrosion current under stray current[J]. Concrete, 2021(1): 13.
- [4] 肖强荣. 地铁杂散电流对成品油管道牺牲阳极的影响及防护措施[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2021, 38(1): 1.

- XIAO Qiangrong. Influence of subway stray current on sacrificial anode of product oil pipeline and protection measures[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2021, 38(1): 1.
- [5] 陈志光, 吴聪, 秦朝葵. 轨道交通检修基地杂散电流测试分析[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(3): 37.
CHEN Zhiguang, WU Cong, QIN Chaokui. Test and analysis of stray current in rail transit maintenance base[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(3): 37.
- [6] 叶远锡, 李明, 王勇. 输油管道杂散电流干扰的检测及对应措施[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(5): 360.
YE Yuanxi, LI Ming, WANG Yong. Detection and countermeasures of stray current interference on an oil pipeline[J]. Corrosion & Protection, 2016, 37(5): 360.
- [7] 李鲲鹏, 曹晓斌, 沈豪, 等. 环境因素对地铁钢轨扣件绝缘性能影响的试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(3): 48.
LI Kunpeng, CAO Xiaobin, SHEN Hao, et al. Experimental study of environmental influence on metro rail fastener insulation performance[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(3): 48.
- [8] 陈夜, 冯彦军, 郑鸣轩, 等. 冲击响应谱在卫星运输冲击响应分析中的应用[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(2): 138.
CHEN Ye, FENG Yanjun, ZHENG Mingxuan, et al. Application of shock response spectrum in analysis of satellite transportation shock response[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(2): 138.
- [9] 豆硕, 刘志明, 王文静, 等. 基于冲击响应谱高速列车设备冲击环境特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(5): 1843.
DOU Shuo, LIU Zhiming, WANG Wenjing, et al. Analysis of shock environment characteristics of high-speed train equipment based on shock response spectrum[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(5): 1843.
- [10] 姜锋, 姜鹏, 周威, 等. 基于 ATP-EMTP 对新型输电线路杆塔接地型式的研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(5): 104.
JIANG Feng, JIANG Peng, ZHOU Wei, et al. Research on the tower grounding type of the new type of transmission line based on ATP-EMTP[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(5): 104.
- [11] 朱冰, 刘中田, 周果. 基于电磁场模型的轨道电路钢轨阻抗研究[J]. 铁路计算机应用, 2014, 23(5): 52.
ZHU Bing, LIU Zhongtian, ZHOU Guo. Study on track circuit impedance based on electromagnetic field model[J]. Railway Computer Application, 2014, 23(5): 52.

· 收稿日期:2022-04-29 修回日期:2022-06-13 出版日期:2024-09-10
Received:2022-04-29 Revised:2022-06-13 Published:2024-09-10
· 第一作者:曹晓斌,副教授, cxb@swjtu.cn
通信作者:叶俊,助理工程师, 2432801102@qq.com
· ©《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