

城市轨道交通钢轨扣件对地绝缘组成及影响因素研究

徐超^{1,2} 李鲲鹏^{2,3} 曹晓斌² 李瑞芳² 孙晓东² 陈力生²

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 100161, 北京; 2. 西南交通大学电气工程学院, 610031, 成都;

3. 广州地铁设计研究院有限公司, 510010, 广州//第一作者, 助理工程师)

摘要 轨地过渡电阻降低是城市轨道交通系统中杂散电流产生的重要原因。建立了钢轨扣件整体仿真模型, 分析了扣件组表面电阻的组成及分布, 利用 Ansoft 软件仿真研究了不同污层电导率下的表面电阻值, 以及厚度和污秽分布情况对扣件表面电阻的影响。研究成果揭示了轨地绝缘性能下降的主要原因: 表面电阻与污层电导率呈线性关系, 一般污秽情况下扣件表面电阻远小于体电阻; 随着污秽层厚度的增加, 表面电阻值呈非线性下降趋势; 随着运行年限的增加, 污秽进入扣件组器件的夹缝中, 表面电阻值会降低。

关键词 城市轨道交通; 钢轨扣件; 杂散电流; 对地绝缘

中图分类号 U213.5⁺3; U284.25

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.06.029

Ground Insulation Composition and Influencing Factors of Rail Fastener in Urban Rail Transit

XU Chao, LI Kunpeng, CAO Xiaobin, LI Ruifang, SUN Xiaodong, CHEN Lisheng

Abstract Track-to-earth resistance reduction is an important factor that causes the stray current in urban rail transit system. To resolve the problem, an integral simulation model of rail fastener is established, which is used to analyze the composition and distribution of fastener surface resistance. Then, the surface resistance under the conductivity of different pollution layers, the influence of thickness and distribution of pollution layers on the surface resistance are studied by using the Ansoft simulation software. The results show that the surface resistance reduction is linearly related to the pollution layer conductivity. In general, the fastener surface resistance is much smaller than the bulk resistance, but with the increase of thickness in the pollution layer, the surface resistance will show a nonlinear downward trend. Following the increase of operation years, the value of surface resistance will decrease because the filth gets into the cracks of fastener group.

Key words urban rail transit; rail fastener; stray current; ground insulation

First-author's address Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., 100161, Beijing, China

城市轨道交通杂散电流对地下隧道结构钢筋、高架桥结构钢筋、沿线金属管线等金属设施产生严重的电流腐蚀作用, 甚至危及建筑设施的安全^[1-4]。目前的地铁设计中会在钢轨与混凝土枕之间安装绝缘扣件, 以保证轨地之间有较高的绝缘电阻。但是, 系统在运行中不可避免受到污染、潮湿、地下渗水、漏水等因素的影响, 扣件表面电阻远小于体电阻, 而造成轨地间的绝缘损失。

国内外学者对于城市轨道交通迷流的产生、防护措施等方面展开了广泛的研究^[5-6]。文献[7]从城市轨道交通走行轨对地过渡电阻角度, 分析其对地铁杂散电流分布的影响以及腐蚀数据。文献[8]模拟了水和土壤两种腐蚀介质, 对混凝土中的钢筋在不同外电压时发生的腐蚀进行了试验。文献[9]建立了二维地铁杂散电流场数学模型, 分析杂散电流分布规律和影响范围, 确定杂散电流防护范围。文献[10]推导了不同模型结构下的钢轨对地电位、轨道回流的电流大小和杂散电流的电路计算模型。文献[11]构建了基于电场的杂散电流模型, 用以分析杂散电流的分布。但对于钢轨对地绝缘电阻的组成, 以及表面污秽对轨地过渡电阻的影响, 目前国内外鲜有研究。为此, 本文针对轨地绝缘损失而造成地铁迷流的问题, 分析了泄漏电流在扣件表面的流电路径, 在钢轨绝缘扣件仿真模型的基础上, 利用 Ansoft 仿真软件的场计算模块, 研究不同污层电导率、厚度和污秽分布情况下的表面电阻值。

1 钢轨绝缘扣件的结构及组成

选取广州地铁应用较多的弹条Ⅲ型分开式扣件进行研究, 其大体结构如图1所示。在组成扣件的各个器件中, 轨距块、轨下垫板、铁垫板下垫板和塑料套管是主要的绝缘器件。其中: 轨距块不仅可以调节轨距, 还具备隔离钢轨和弹条的作用; 轨下垫板兼具减振、隔离钢轨与铁垫板的功能; 铁垫板下垫板和塑

料套管主要用来减振,以及使铁垫板和混凝土枕保持绝缘。塑料套管由于被嵌入混凝土中,对表面泄漏电流的影响程度较小,不是本文研究的重点。

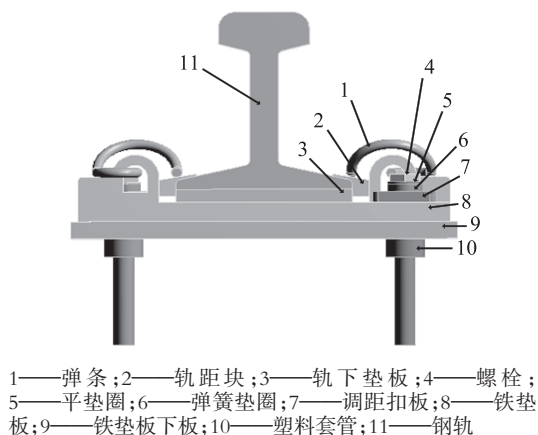


图1 弹条Ⅲ型分开式扣件结构

表1为扣件组各个器件的材料和电学特性。按照实际尺寸建立了弹条Ⅲ型分开式扣件的简化模型,并在仿真时输入相应材料的电学特性,如图2所示。从图2可以看出,轨距块、轨下垫板和铁垫板下垫板都有裸露在空气中的部分,表面容易附着地下渗水、灰尘、金属屑等污秽。连续的污秽堆积会使绝

缘器件的表面电阻降低,并通过连接各金属器件,在钢轨与混凝土之间形成泄漏电流的流通路径,降低了轨地的绝缘性能。

表1 钢轨绝缘扣件组器件组成及电学特性

扣件组器件	材料	常温电导率/(S/m)
轨下垫板	热塑性聚酯弹性体	1.587×10^{-12}
轨距块	玻纤增强聚酰胺	1.000×10^{-10}
铁垫板下垫板	热塑性聚酯弹性体	1.587×10^{-12}
Ⅲ型弹条	60Si2Mn	2.380×10^6
螺栓	45号钢	4.590×10^7
平垫圈	Q235-A	3.000×10^6
弹簧垫圈	65Mn	2.200×10^6
调距扣板	QT450-10	2.000×10^6
铁垫板	QT450-10	2.000×10^6
塑料套管	玻纤增强聚酰胺	1.000×10^{-10}

2 钢轨绝缘扣件表面电阻的构成分析

钢轨产生对地电位时,扣件组无法完全绝缘即会产生泄漏电流。泄漏电流按流通路径可分为体电流和表面电流两种。针对轨距块、轨下垫板和铁垫板下垫板的6个表面,各表面上泄漏电流的流通路径如图3所示。

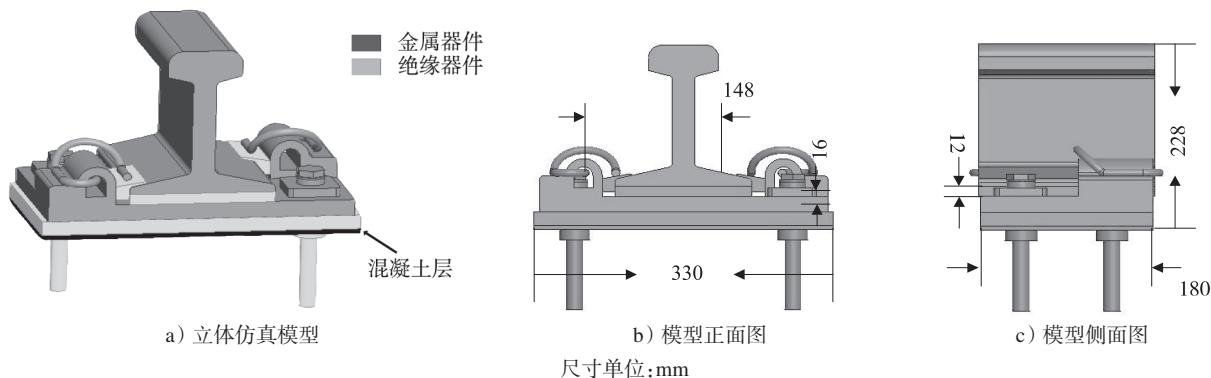


图2 扣件仿真模型及主要绝缘器件尺寸

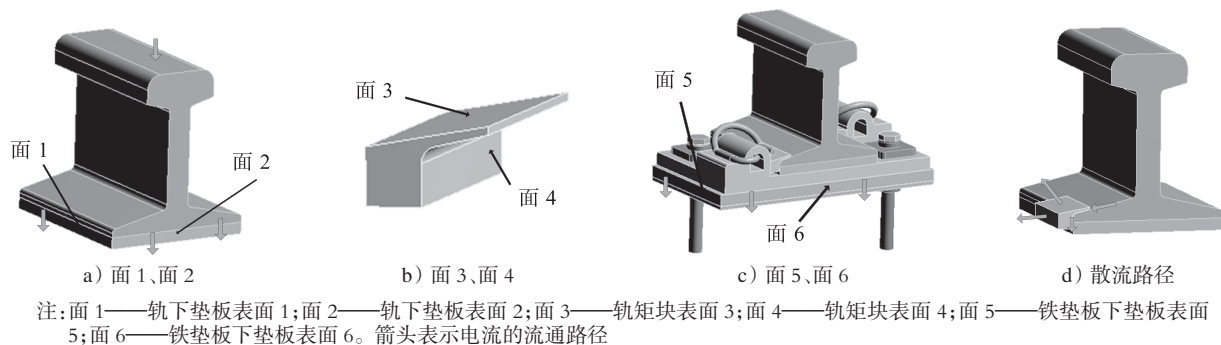


图3 扣件6个表面及泄漏电流流通路径示意图

由图2所示的绝缘扣件的结构可知,泄漏电流在扣件表面的流通过程可分为两部分:首先是从钢轨到铁垫板,泄漏电流流过轨下垫板的侧面、轨距块上下表面,流通过程如图3a)、图3d)中箭头所示;其次是从铁垫板到混凝土轨枕,泄漏电流经过铁垫板下垫板的侧面,流通过程如图3c)中箭头所示。此外,还有一部分泄漏电流通过轨距块、轨下垫板和铁垫板下垫板的体电阻散流。

泄漏电流的流通过程可更直观地反映出体电阻与各部分表面电阻的组成及分布,如图4所示: R_1 、 R_2 为轨距块上下表面的表面电阻; R_3 为轨下垫板侧面的表面电阻; $R_4 \sim R_6$ 为轨距块、轨下垫板的体电阻; R_7 、 R_8 分别为铁垫板下垫板的侧面表面电阻和体电阻; U 为钢轨与轨枕之间的电压。从图4中的电路模型可以看出,轨距块、轨下垫板和铁垫板下垫板的表面电阻对于流入地下的杂散电流的幅值和分布有较大影响。当表面电阻远小于体电阻时,泄漏电流主要由扣件表面散流到地下。绝缘器件表面受污染程度不同,会导致表面电阻不同。一方面各绝缘器件的表面容易附着污秽;另一方面由于轨距块和铁垫板、轨下垫板等器件之间因尺寸问题而无法紧密贴合,也会形成可积累污秽的缝隙。

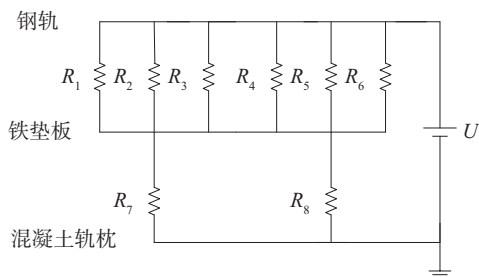


图4 扣件组体电阻和表面电阻的分布示意图

3 扣件组表面电阻的仿真分析与影响因素研究

采用功能强大的电磁仿真软件 Ansoft 研究探讨表面电阻受污秽层厚度、电导率和污秽分布的影响,并确定不同污染程度和污秽分布情况下表面电阻的变化规律及数值范围。Ansoft 软件内置的场计算模块可在特定的实体上执行积分运算。因此,利用电流密度 J 的矢量代数计算可获得扣件组各部分表面电阻、体电阻的值:

$$P = \int \mathbf{E} \mathbf{J} d\mathbf{v} = \int \frac{\mathbf{J}}{\sigma} \mathbf{J} d\mathbf{v} \quad (1)$$

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (2)$$

式中:

P ——一定电流流过后产生的功率;

E ——电场强度;

J ——电流密度;

σ ——电导率;

I ——流过物体的电流;

R ——该物体的电阻。

3.1 扣件组各绝缘件的体电阻值

利用表面电阻的仿真计算方法得到各绝缘器件的体电阻,如表2所示。由于组成轨距块、轨下垫板、铁垫板下垫板的材料的电导率很小,因此扣件组本身的绝缘性能良好。

表2 扣件组绝缘器件电阻仿真结果

绝缘器件	绝缘电阻/ $M\Omega$
轨距块	1.92×10^6
轨下垫板	1.71×10^7
铁垫板下垫板	2.67×10^7

3.2 不同污层电导率下的表面电阻值

利用 J 的仿真结果以及式(1)、式(2),可通过场计算器计算出扣件表面电阻。改变污秽层电导率可得到不同的表面电阻值。通过污秽试验测量发现,多种盐度下绝缘子表面污层电导率数量级在 $10^{-5} \text{ S/m}^{[12]}$,故对 $10^{-4} \sim 10^{-7} \text{ S/m}$ 4种污层电导率下的表面电阻进行仿真计算。基于图3的6个面,计算出不同污秽层电导率下轨下垫板、轨距块和铁垫板下垫板的表面电阻(见表3)。取污秽层厚度为 0.3 mm 进行计算,扣件组不同部位的表面电阻与电导率之间均为线性关系。当表面污层电导率较小,达到 10^{-7} S/m 数量级时,表面电阻则达到了千兆欧级别,但仍小于各绝缘器件的体电阻。

城市轨道交通系统中的扣件所处环境复杂,扣件受地下水渗水、金属屑、灰尘等的影响,扣件组表面污层电导率在运行了一段时间后一般会变大,扣件表面的泄漏电流随之也会增加。在恶劣环境如地下水渗水、降雨引起潮湿的情况下,扣件表面污秽会湿润甚至形成一层水膜,污秽层电导率升高,极有可能接近水的电导率,数量级可达到 $10 \sim 1000 \text{ S/m}$ 。此时,扣件各表面的表面电阻仿真值下降为 $0.1 \sim 10.0 \Omega$ 的数量级,将严重影响轨地绝缘。

3.3 扣件表面积污厚度对表面电阻的影响

随着表面积污程度的加深,扣件表面污秽层的

表3 不同污层电导率下各表面的电阻值

污秽层	电导率数量级/(S/m)	表面电阻值/M Ω
面 1	10^{-4}	3.27
	10^{-5}	32.67
	10^{-6}	326.72
	10^{-7}	3267.20
面 2	10^{-4}	2.64
	10^{-5}	26.39
	10^{-6}	263.87
	10^{-7}	2638.73
面 3	10^{-4}	7.36
	10^{-5}	73.63
	10^{-6}	736.32
	10^{-7}	7363.19
面 4	10^{-4}	4.41
	10^{-5}	44.12
	10^{-6}	441.18
	10^{-7}	4411.83
面 5	10^{-4}	3.57
	10^{-5}	35.68
	10^{-6}	356.81
	10^{-7}	3568.11
面 6	10^{-4}	1.41
	10^{-5}	14.10
	10^{-6}	141.05
	10^{-7}	1410.45

厚度也会增加。在模型中设置污层电导率为 10^{-5} S/m, 并改变污秽层厚度得到不同的电流密度场 J , 利用式(1)、式(2)计算厚度在 0.15 ~ 1.05 mm 之间变化时的表面电阻值。从图 5 可看出, 6 个表面的电阻值均随污秽层厚度的增加而呈现非线性下降, 且下降趋势基本相同。在污秽层厚度小于 0.3 mm 时, 表面电阻受污秽层厚度的影响较大。随着污秽层厚度增加, 表面电阻值继续下降, 厚度的影响逐渐减弱, 6 个表面的电阻值下降幅度也越来越小。因此, 在实际运行环境中, 如果不及时对钢轨扣件表面进行清扫, 扣件表面随时间积累产生的污秽层厚度达到一定水平, 将会造成表面电阻降低、扣件组绝缘效果下降。

3.4 污秽在扣件表面的分布情况对表面电阻的影响

城市轨道交通地下线路的扣件组受到地下渗水的影响, 城市轨道交通地上线路的扣件组受到降雨、风沙的影响。污水混合着金属屑附着在扣件组表面, 严重时还会渗入轨距块、轨下垫板等器件的夹缝, 将污秽送进夹缝中, 从而增加了表面污秽层的覆盖面积和延伸长度。图 6 为轨下垫板、轨距块和铁垫板下垫板的表面污秽层逐渐延伸进入夹缝的情况。表 4 是污层电导率为 10^{-5} S/m 和厚度为 0.3 mm 时, 面

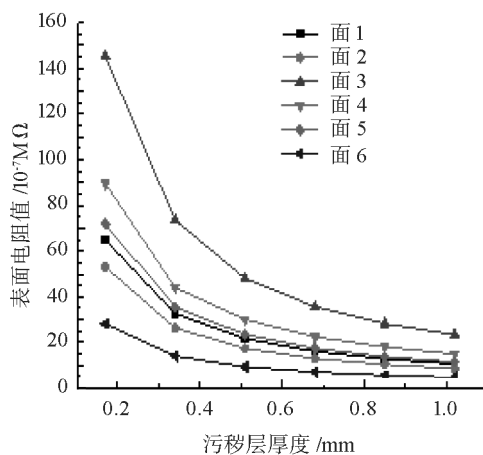


图5 污秽层厚度与表面电阻的关系

1、面3和面6在污秽进入轨距块等器件夹缝处的表面电阻值。

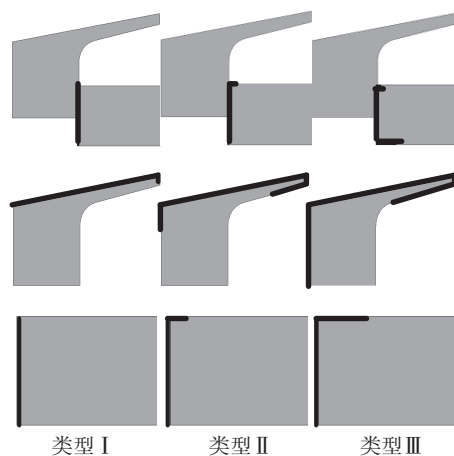


图6 污秽分布类型示意图

表4 不同污秽分布类型的表面电阻值

污秽层	表面电阻值/M Ω		
	类型 I	类型 II	类型 III
面 1	33.04	32.37	32.26
面 3	73.83	73.36	73.20
面 6	14.10	13.83	13.75

经过对这几种污秽情况下表面电阻的仿真计算发现, 扣件组器件的夹缝进入污秽时, 表面电阻值有小幅的下降。如图 6 和表 4 所示, 以面 1 举例说明, 对于不同的污秽分布类型 I、II、III, 污秽从面 1 进入钢轨和轨下垫板、轨下垫板和铁垫板的夹缝后, 表面电阻从 33.04 M Ω 下降到 32.37 M Ω 和 32.26 M Ω 。表面电阻的降低会使表面泄漏电流增加, 而且进入夹缝的污秽难以清理, 因此在扣件组安装时可

(下转第 137 页)

基坑监测中房屋累计沉降最大值为 -4.2 mm ,地表沉降累计最大值为 -17.2 mm ,水平位移累计最大值为 16.8 mm ,地下水位变化累计最大值为 -260 mm ,也均满足明挖基本保护要求。根据上述监测数据可看出,仿真数值模拟及现场实测数据基本吻合。由此可见,本工程采用的门式加固体系及分期施工组织方案对既有地铁隧道的保护有效、可靠,满足施工的技术要求。

5 结语

明挖基坑卸荷及降水对邻近地铁隧道有一定的影响。通过三维有限元分析及现场实测数据来看,基坑开挖范围越大、暴露时间越长、土体力学性质越差,地铁隧道所受的影响程度也越大。根据实际工

(上接第132页)

选择将缝隙用绝缘胶密封。

4 结语

轨地之间保持一定的绝缘性能是抑制杂散电流的重要措施。扣件组各绝缘器件的体电阻很大,然而扣件表面积累的污秽会导致扣件表面电阻值下降。运行一段时间后,扣件表面电阻将远小于体电阻,轨地过渡电阻因此而降低。

表面电阻对轨地绝缘性能影响很大,主要与污秽层的电导率、厚度和污秽分布情况有关。污秽层电导率与表面电阻呈线性关系,一般情况下表面电阻远小于扣件组的体电阻;随着污秽的累积,表面电阻值随厚度的增加而逐渐降低,但厚度超过 0.3 mm 后,表面电阻的下降幅度越来越小。当附着在表面的污秽进入轨距块、铁垫板等器件的夹缝时,表面电阻的值有小幅下降。由本文的仿真结果得出一定条件下6个表面的电阻值,并可计算出相应条件下扣件的总表面电阻。以上研究成果可为钢轨对地绝缘的组成,以及表面污秽对轨地过渡电阻的影响研究提供参考。

参考文献

[1] 秦峰,朱祥连,奚杰,等.城市轨道交通设施杂散电流的防护

程情况提出的坑底土体加固、结合地道底板设置抗拔桩的门式框架结构等措施,对地铁隧道起到了确实有效的保护作用,可为今后类似工程提供良好的借鉴。

参考文献

- [1] 刘国彬,黄院雄,侯学渊.基坑工程下已运行地铁区间隧道上抬变形的控制研究与实践[J].岩石力学与工程学报,2001,20(2):202.
- [2] 陈郁,张冬梅.基坑开挖对下卧隧道隆起的实测影响分析[J].地下空间与工程学报,2004,24(增刊1):748.
- [3] 刘小建,贾坚.地铁隧道上方基坑卸荷回弹及控制的试验和探讨[J].地下工程与隧道,2008(2):41.

(收稿日期:2017-07-27)

[J].机电工程,2013(1):102.

- [2] 张泽萌.地铁杂散电流防护措施的研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [3] 蒋雪峰,邱忠才,孟军,等.对地铁中杂散电流泄漏造成腐蚀问题的探索[J].中国科技信息,2009(2):264.
- [4] 许建国.浅谈杂散电流腐蚀机理及防护措施[J].铁道机车车辆,2005(3):61.
- [5] LEE C H. Evaluation of the maximum potential rise in Taipei rail transit systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005,20(2):1379.
- [6] CHARALAMBOUS C,COTTON I. Influence of soil structures on corrosion performance of floating-DC transit systems[J]. Electric Power Applications,2007,1(1):9.
- [7] 蔡力,王建国,樊亚东,等.地铁走行轨对地过渡电阻杂散电流分布的影响[J].高压技术,2015(11):3604.
- [8] 周晓军,高波.地铁杂流对钢筋混凝土中钢筋腐蚀的试验研究[J].铁道学报,1999(5):99.
- [9] 胡云进,钟振,方镜平.地铁杂散电流场的有限元模拟[J].中国铁道科学,2011(6):129.
- [10] 杨迪.城市轨道交通杂散电流实验系统设计与仿真[D].成都:西南交通大学,2013.
- [11] 庞原冰,李群湛,刘炜,等.基于电场的地铁杂散电流模型研究[J].城市轨道交通研究,2008(2):27.
- [12] 宋毅.绝缘子表面污层电导率的影响因素研究[J].高压电器,2014,50(10):102.

(收稿日期:2017-08-28)