

考虑地铁车辆牵引因素下杂散电流的规律研究

蔡智超, 程 浩, 林知明

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:在直流牵引供电系统中,杂散电流将直接影响地铁中电气设备、设施的正常运行,因此研究杂散电流分布特性情况对减小杂散电流泄露、保证运营安全有重要作用。本文将地铁车辆牵引特性引入直流牵引系统,建立了地铁杂散电流和地铁车辆运行特性之间的动态分布模型,分析在牵引特征下杂散电流的分布情况,并且考虑牵引路径中坡度、隧道长度、曲线半径等相关阻力对杂散电流和轨道电压分布的影响。模型结果表明,地铁车辆牵引特性及牵引路径等相关因素对杂散电流的影响值得关注,相关结论将有利于指导地铁内杂散电流的防护工作。

关键词:杂散电流;城市轨道交通;牵引特性

DOI: 10.12067/ATEEE1709044 **文章编号:** 1003-3076(2018)08-0082-07 **中图分类号:** TB24

1 引言

随着大、中型城市交通问题的日益突出,优先发展公共交通,大力发展城市轨道交通已成为城市交通发展的必然趋势。目前,我国城市轨道交通已进入大规模、高速度发展阶段。在2016年5月发改委和交通部联合印发的《交通基础设施重大工程建设三年行动计划》中,计划2016~2018年将重点推进103个项目前期工作,新建城市轨道交通2000km以上。

直流牵引供电系统作为城市轨道交通工程中重要机电设备系统,其肩负着城市地铁车辆运营等重要任务。在城市轨道交通受到重视的同时,出现了诸多的问题,同时提出了许多解决方案。在非高峰时段,为提高功率因数,提出了一种基于能馈式的无功补偿方案^[1],为设计更加经济的城市轨道交通系统,基于直线感应电机的驱动技术成为了优先选择的方案^[2]。

牵引电流由牵引变电所的正极出发,经由接触网、地铁车辆和回流轨(即走行轨)返回牵引变电所的负极。因此,轨道部分不仅作为行驶线路而铺设,而且作为牵引电流回流至牵引变电所的引流导体^[3]。但钢轨与道床结构钢之间的绝缘电阻不是无限大,这样势必造成流经钢轨的牵引电流不能全

部经由钢轨流回牵引变电所的负极。而泄漏在道床等结构钢中的约5%左右的牵引电流(即杂散电流)将沿着低阻抗路径回流至变电所负极^[4]。然而,当钢轨对地绝缘发生破坏时,杂散电流将占到牵引电流的50%以上,这会产生严重的运营安全问题。更为严重的是,杂散电流所流经的沿线结构钢筋、管线等将构成伏打电池,所产生的氧化还原反应将在埋地金属表面形成腐蚀成分,集中在阳极区的腐蚀比自然腐蚀严重数十倍、甚至百倍,同时引起过高的接地电位以及降低钢轨整体的对地绝缘性等诸多危害。

据此,详细研究杂散电流分布特性,对于帮助设计者从源头上根本隔离和控制杂散电流的泄漏量有重要意义。闫明富等人^[5]建立了单、双边供电方式的电路模型,通过数学模型分析了两种供电方式下钢轨电位及杂散电流的分布情况。赵丽平等人^[6]通过搭建牵引特性下的杂散电流分布模型,分析多辆列车在不同牵引工况下对杂散电流和轨道电压的分布影响。王盟等人利用有限元法,对弧形轨道的电流分布特性进行了研究^[7]。文献[8]通过可变电阻的方式来模拟轨道列车运行状态并搭建杂散电流求解模型,文献[9]研究不同土壤电导特性对杂散电流分布的影响。诸多研究表明杂散电流分布情况

收稿日期: 2017-09-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(51565012)、江西省青年科学基金项目(20171BAB216035)
作者简介: 蔡智超(1989-),男,江西籍,讲师,在站博士后,研究方向为电工理论与新技术;
程 浩(1994-),男,江西籍,硕士研究生,研究方向为地铁杂散电流腐蚀监测及防护。

受众多可变参量影响。除考虑上述影响杂散电流的因素之外,还有许多研究针对钢轨焊接^[10]、钢轨对地电阻变化^[10,11]、二极管接地方案^[12,13]、绝缘垫分布^[13,14]等因素。

本文根据轨道列车运行状况,考虑地铁车辆的阻力特性建立双边供电模式下杂散电流及轨道电压的动态分布研究模型,分析了地铁车辆牵引及制动速度、地铁车辆行驶路径中坡度、曲线半径和隧道等重要因素对杂散电流和轨道电压的影响。研究结果表明杂散电流分布情况与回路路径特征(列车行驶路径特征)、地铁车辆运行状况等因素有重要关联。

2 杂散电流的动态分布模型

2.1 双边供电静态分布模型

由于钢轨沿线均有电流向土壤内部泄漏,因此需将供电及回流线路按照分布参数电阻网络进行分析。如图1所示,将双边供电系统轨道-埋地金属-大地阻抗模型沿纵横双向分成若干个极小电阻单元进行处理,通过对极小阻抗单元的传输线路分析即可获得整个钢轨沿线的钢轨电位和杂散电流的特征。图1的传输线电阻网络模型主要包含运营轨处相关导体电阻,并假设导体电阻均为均匀分布,相关仿真模型参数如表1所示。其中基本阻力经验公式中, w_{jz} 为列车运行的单位基本阻力, v 为列车运行的速度。

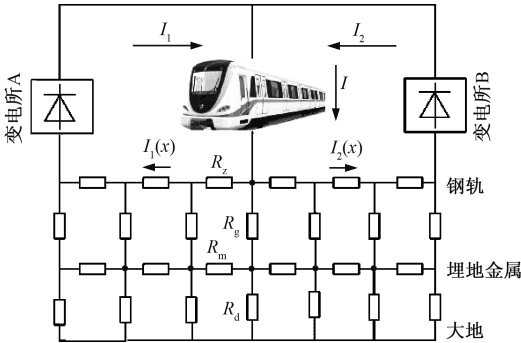


图1 双边供电系统轨道-埋地金属-大地电阻模型

Fig.1 Rail-buried metal-earth resistance model

当列车从牵引变电所A驶向牵引变电所B的过程中, R_z 和 R_m 的值在不断增大,而 R_d 和 R_g 的值在不断减小。列车分别距离牵引变电所A、牵引变电所B的距离为 L_1 、 L_2 ,两个变电所为列车提供的电流分别为 $I_1(x)$ 和 $I_2(x)$, $i_1(x)$ 和 $i_2(x)$ 为轨道电流,列车运行取流为 I , x 为计算点距变电所的距离。基于Kirchhoff电流定律可以求解轨道电压、杂散电流。

表1 地铁及运营轨道仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of metro and rail		
参数		数值
运营轨道	轨道纵向电阻 $R_z/(\Omega/\text{km})$	0.026
	埋地金属结构纵向电阻 $R_m/(\Omega/\text{km})$	0.01
	轨道对埋地金属的过渡电阻 $R_g/(\Omega/\text{km})$	15
地铁	列车总质量 M/t	289.6
	两边牵引变电所的距离 L/km	1.38
	预设限速 $V/(\text{km/h})$	80
	列车供电电压 U/V	1500
重力加速度	$g/(\text{m/s}^2)$	9.8
基本阻力经验公式	$w_{jz} = 1.82143 + 0.030612v + 0.000251v^2$	

当 $x \in [0, L_1]$ 时,即 x 在 L_1 段中取值,列车距牵引变电所A的轨道电压 $u_1(x)$ 及杂散电流 $i_{s1}(x)$ 求解公式为:

$$u_1(x) = -I_1 Z \frac{R_z}{R_z + R_m} \tanh \frac{aL_1}{2} \cosh(ax) + I_1 Z \frac{R_z}{R_z + R_m} \sinh(ax) \quad (1)$$

$$i_{s1}(x) = I_1 - i_1(x) = I_1 \frac{R_z}{R_z + R_m} \tanh \frac{aL_1}{2} \cdot \sinh(ax) - I_1 \frac{R_z}{R_z + R_m} \cosh(ax) + I_1 \frac{R_z}{R_z + R_m} \quad (2)$$

式中, $Z = [R_g(R_z + R_m)]^{1/2}$; $a = [(R_z + R_m)/R_g]^{1/2}$ 。

当 $x \in [L_1, L]$ 时,即 x 在 L_2 段中取值时,列车位置 x 距变电所B的距离为 $L - x$,列车距牵引变电所B的轨道电压 $u_2(x)$ 及杂散电流 $i_{s2}(x)$ 求解公式为:

$$u_2(x) = -I_2 Z \frac{R_z}{R_z + R_m} \tanh \frac{aL_2}{2} \cdot \cosh[a(L - x)] + I_2 Z \frac{R_z}{R_z + R_m} \sinh[a(L - x)] \quad (3)$$

$$i_{s2}(x) = I_2 - i_2(x) = I_2 \frac{R_z}{R_z + R_m} \tanh \frac{aL_2}{2} \cdot \sinh[a(L - x)] - I_2 \frac{R_z}{R_z + R_m} \cosh[a(L - x)] + I_2 \frac{R_z}{R_z + R_m} \quad (4)$$

2.2 地铁车辆牵引计算

城市轨道交通拥有其独特的营运特点,主要表现在紧急制动距离短、区间长度比较短、线路纵横断面变化幅度较大、启动制动过程频繁。因此地铁车辆牵引运动过程尽可能保持理想策略,不仅对于列车的加速和减速过程有所限制,同时在列车进入经济速度以后尽可能保持匀速前进。某营运线路列车运行时间-距离-速度曲线如图2所示,在列车加速牵引、匀速、制动过程中列车合力 C 分别为 $F - W_0$ 、 0 、 $-(B + W_0)$,其中 F 为牵引力, W_0 为列车的基本阻力和附加阻力之和, B 为制动力。

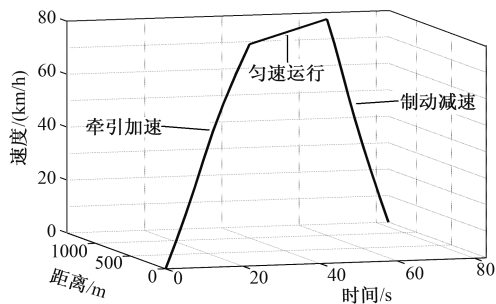


图2 某营运线路列车运行时间-距离-速度曲线图

Fig.2 Running time-distance-speed curve of locomotive

随着地铁运行过程中运行状态的频繁变化,列车动能将根据运行线路和运营条件的不同存在显著的特性,其公式为:

$$E_k = \frac{Mv^2}{2}(1 + \gamma) \quad (5)$$

式中, E_k 为列车动能; M 为列车总质量; v 为列车速度; $\gamma = \sum (MR_h^2)^{-1}$,为回转质量系数(与机车车型有关,一般取0.06),其中 R_h 为旋转部分的换算半径,即列车旋转部分的动能折算质量与列车全部质量的比值。再对式(5)两端进行微分,且动能增量等于合力所做的功,可以得到:

$$dE_k = CdS = Cvdv = M(1 + \gamma)v dv \quad (6)$$

$$dS = S_2 - S_1 = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a_1} \quad (7)$$

式中, v_1 和 v_2 为相邻两个时刻的速度; S_1 和 S_2 为相邻两个速度时刻地铁列车行驶的距离; a_1 为这两个相邻速度的列车平均加速度; dS 为两相邻隧道时刻列车行驶的距离差。

联立式(6)和式(7)可以得到地铁行驶距离与列车牵引特性之间的关系表达式。联立式(1)~式(4)可求解地铁轨道电压、杂散电流动态分布情况。

3 杂散电流动态分布

基于图2某一运营列车牵引数据可知,地铁速度从0开始牵引加速,当列车速度达到预设限速80km/h时(时刻为28.4s,列车离起始变电所的距离为0.365km),列车转为匀速行驶;当列车匀速行驶至1.16km处(时刻为63s),列车转为制动行驶,速度不断减小直至靠站停车。联系受流功率情况,由牵引计算可求得地铁车辆运行时取流特性,结果如图3所示。

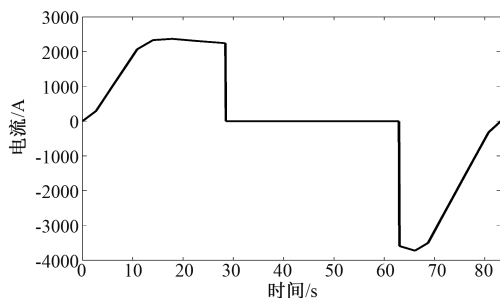


图3 列车取流特性图

Fig.3 Locomotive current characteristic curve

由图3可知,地铁车辆在牵引加速及制动过程中接触网或第三轨的电流是波动变化的,而在匀速过程中,列车几乎不需要取流。列车牵引负荷随着牵引特性变化,具有强烈的波动性,并且在不同时刻牵引变电所、接触网/第三轨、列车、钢轨、大地都构成一个不断变化的直流网络结构,而最终列车运行状态及列车取流特性将直接影响杂散电流的分布情况。

选择在列车加速牵引过程中对应的不同速度(30km/h、50km/h、80km/h)以及列车制动过程中对应的不同速度(80km/h、50km/h、30km/h)等时刻求解杂散电流和轨道电压的动态分布,结果如图4所示。由图4可知,牵引加速过程和制动减速中不同速度的列车运行对杂散电流幅值影响有显著差异。牵引加速时地铁车辆的行驶处钢轨电位为正的最大值,双边供电区域电位为负的最大值。该处杂散电流从走行轨流出,杂散电流峰值在地铁车辆距行驶方向牵引变电所中间距离处,制动减速时则相反。

杂散电流和轨道电压峰值与牵引速度成正相关性,列车行驶的速度越大,所泄露的杂散电流和轨道电压的值越大。即列车牵引加速至最高速度时,两端牵引变电所附近的埋地金属受杂散电流腐蚀最大;当列车制动减速时,列车所处的埋地金属受杂散电流腐蚀最大。

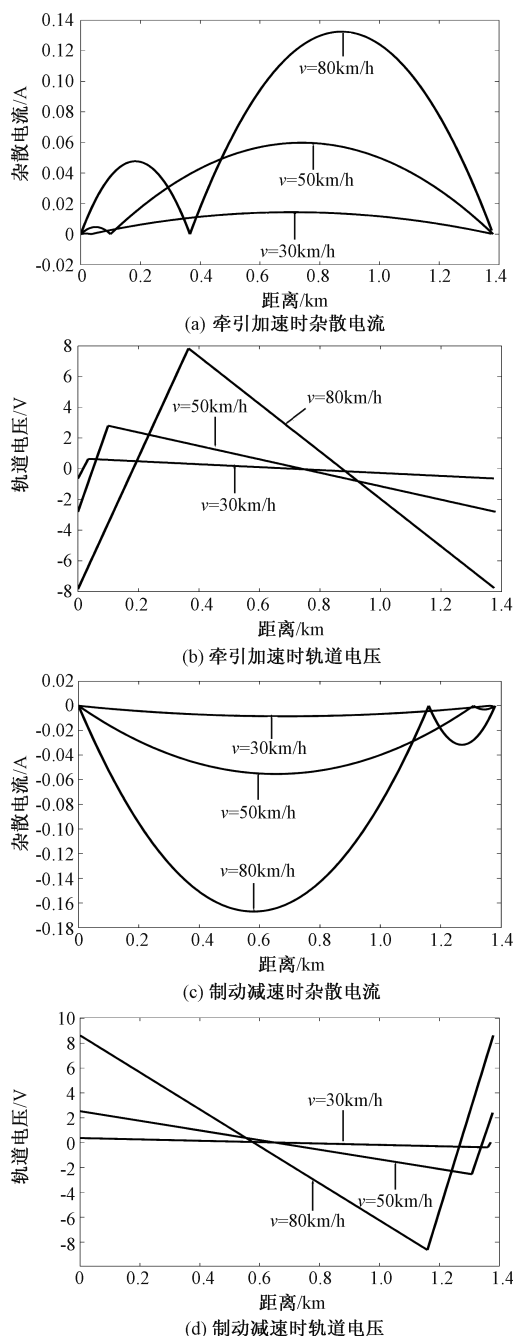


图4 杂散电流、轨道电压在不同速度下的动态分布情况

Fig.4 Stray current and rail potential curves when locomotive under different speeds

4 附加阻力下的杂散电流仿真分析

构成列车的基本阻力因素有很多,有的因素并不能通过定量的公式计算,因此基本阻力大小由经验公式所得,牵引力和制动力由机车特性曲线所得。列车在真正的运行过程中,运行阻力除了基本阻力,

还有附加阻力,附加阻力是由线路或者桥梁、隧道等原因形成的阻力,包括坡度附加阻力、曲线附加阻力和隧道附加阻力。

4.1 坡度对地铁杂散电流和轨道电压分布的影响

在实际线路中,坡度的夹角 θ 都比较小,单位坡度阻力 $w_i = 1000\sin\theta = i$, i 为坡度千分数。由于考虑地铁车辆运行的实际情况,运营线路一般是两边高中间低,这样有利于节能。出站的列车由于下坡而很快提高速度,进站的列车借助上坡来降低速度,这种建造方法在运营时更加节能降耗。

图5(a)和图5(b)分别为牵引加速阶段速度为80km/h($i = -4 \sim 0$)和制动减速阶段速度为50km/h($i = 0 \sim 4$)时不同坡度下杂散电流的动态分布图。为了更好地分析坡度对杂散电流和轨道电压的影响,本文对坡度 $i = -4, 0, 4$ 时的参数进行统计,结果如表2和表3所示。

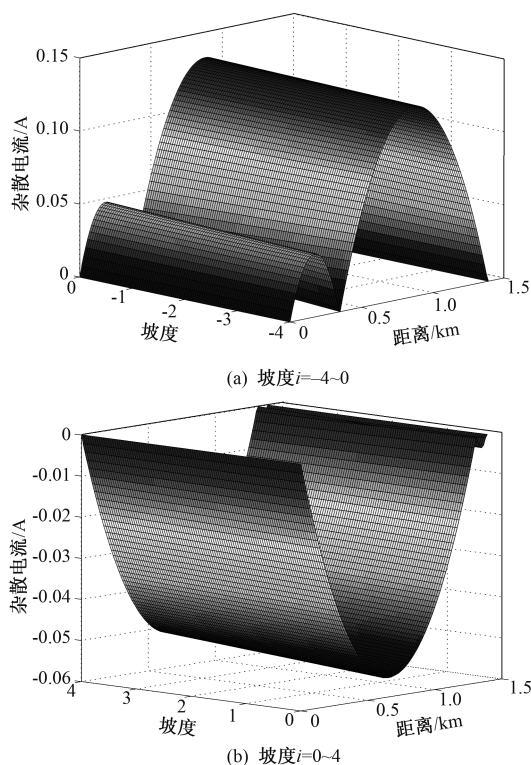


图5 考虑坡度阻力时杂散电流动态分布

Fig.5 Stray current curves when considering slope resistance

由表2和表3可知,在牵引加速阶段中,随着下坡坡度的增大,两端牵引变电所附近的埋地金属受杂散电流腐蚀将有一定程度的缓解,因此加速过程中坡度的增加将降低泄露电流的产生;在制动减速阶段中,随着上坡坡度的增大,列车所处的埋地金属受杂散电流腐蚀将有一定程度的缓解,因此减速过

表 2 牵引加速考虑坡度时轨道电压和杂散电流分布参数统计

Tab.2 Stray current and rail potential distribution parameters when considering slope in locomotive traction accelerating

	$i = 0$	$i = -4$
V_{\max}/V	7. 8389	7. 5504
V_{\min}/V	-7. 8389	-7. 5504
I_{\max}/A	0. 1325	0. 1302

表 3 制动减速阶段考虑坡度时轨道电压和杂散电流分布参数统计

Tab.3 Stray current and rail potential distribution parameters when considering slope in locomotive braking deceleration

	$i = 0$	$i = 4$
V_{\max}/V	2. 5370	2. 3468
V_{\min}/V	-2. 5370	2. 3468
I_{\min}/A	-0. 0553	-0. 0514

程中坡度的增加将同样降低泄露电流。

4.2 隧道阻力对杂散电流和轨道电压的影响

隧道阻力与隧道长度、隧道截面积、列车截面积、列车外形等因素有关,目前理论计算尚不成熟,通常的经验公式为: $w_s = 0.00013L_s$, L_s 为隧道长度。而列车线路有可能在高架、地面、隧道等路面进行交互。图 6 为地铁车辆制动减速的上坡阶段(坡度 $i = 4$)考虑隧道阻力下制动速度为 50km/h 这一时刻杂散电流和轨道电压的动态分布。对图 6 数据进行统计,结果如表 4 所示。

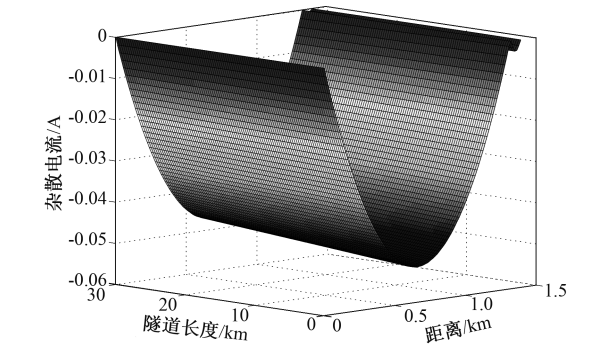


图 6 考虑隧道阻力时杂散电流的动态分布
Fig. 6 Stray current curves when considering tunnel resistance

由表 4 可知,不考虑隧道阻力时泄漏的杂散电流最大值为 $-0.0514A$,轨道电压最大值为 $2.3468V$;隧道长度为 30km 时泄漏的杂散电流最大值为 $-0.0471A$,轨道电压最大值为 $2.1396V$ 。列车在制动过程中考虑隧道阻力时,随着隧道长度的增大,列车所处地的埋地金属受杂散电流腐蚀将得到

表 4 制动减速阶段考虑隧道阻力时轨道电压和杂散电流分布参数统计

Tab.4 Stray current and rail potential distribution parameters when considering tunnel in locomotive braking deceleration

	$L_s = 30km$	$L_s = 0$
V_{\max}/V	2. 1396	2. 3468
V_{\min}/V	-2. 1396	2. 3468
I_{\min}/A	-0. 0471	-0. 0514

缓解,因此减速过程中隧道长度增加的同时降低了杂散电流的影响。

4.3 曲线阻力对杂散电流和轨道电压的影响

曲线附加阻力与曲线半径、列车速度、曲线外轨超高以及轨距加宽、地铁车辆的轴距等许多因素有关,很难直接用理论方法推导,一般采用经验公式 $w_c = A/R$, A 为经验常数,一般取值为 600, R 为曲线半径。图 7 为考虑曲线阻力时杂散电流的动态分布。对图 7 数据进行统计,结果如表 5 所示。

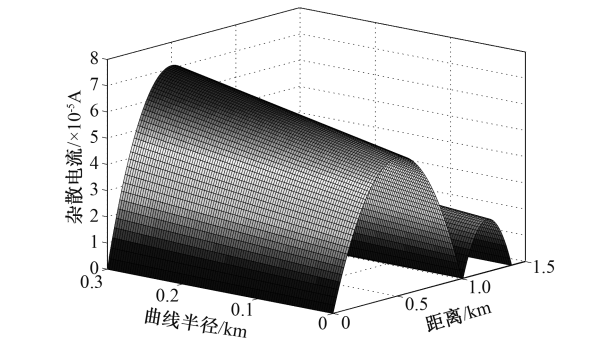


图 7 考虑曲线阻力时杂散电流动态分布
Fig. 7 Stray current curves when considering curve resistance

表 5 考虑曲线阻力的轨道电压和杂散电流分布参数统计
Tab.5 Stray current and rail potential distribution parameters when considering curve resistance

	$R = 300m$	$R = 0$
V_{\max}/V	0. 0043	0. 0032
V_{\min}/V	-0. 0043	-0. 0032
I_{\max}/A	0.7107×10^{-4}	0.5306×10^{-4}

由图 7 和表 5 可知,不考虑曲线阻力时杂散电流的最大值为 $0.5306 \times 10^{-4} A$,轨道电压最大值为 $0.0032V$;曲线长度为 300m 时杂散电流的最大值为 $0.7107 \times 10^{-4} A$,轨道电压最大值为 $0.0043V$ 。随着曲线长度的增加,杂散电流的值在不断的增大。地铁匀速行驶中,其几乎不存在任何取流,此时杂散电流也是极其微弱的,虽然曲线阻力对匀速行驶中

的杂散电流影响较大,但相比于隧道阻力以及坡度的阻力可以忽略不计。

5 结论

本文在地铁杂散电流静态分布模型基础上,通过引入列车牵引特性建立了地铁杂散电流动态分布模型,分析了考虑地铁车辆运营状态下(牵引、制动)钢轨对地电位和杂散电流动态分布规律。主要得到如下结论:

(1)列车牵引状态对列车取流有显著影响,即地铁车辆在牵引加速及减速状态下有明显的杂散电流波动。

(2)牵引加速过程和制动减速中不同速度的列车运行对杂散电流幅值影响有显著差异,并且分别在牵引变电所和列车处附近的金属管线发生电腐蚀现象。

(3)坡度大小、曲线半径、隧道长度等附加阻力都对杂散电流和轨道电压的大小有一定的影响,坡度大小及隧道长度相比曲线半径影响更大。

综上,在牵引加速阶段的上坡路段和制动减速的下坡路段、上高架的上坡路段会增大杂散电流的泄露,需要着重考虑这些路段的防护和监测,同时需要加强牵引变电所附近处杂散电流的防护监测。地铁设计过程中可综合考虑以上因素来制定合理的排流方案,做好相应的防护工作,从而最大限度地减小杂散电流,保证地铁车辆安全可靠的运行。

参考文献 (References):

- [1] 朱士友,阮白水,全恒立,等 (Zhu Shiyu, Ruan Baishui, Quan Hengli, et al.). 基于能馈式牵引供电装置的城市轨道交通无功补偿策略 (Study of urban rail reactive power compensation strategy based on energy-fed traction power supply equipment) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2013, 32 (2): 16-19.
- [2] 马欲洁,柴建云 (Ma Yujie, Chai Jianyun). 城市轨道交通中直线感应电机的非线性设计 (Nonlinear design of linear induction motor for urban rail transit) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2006, 25 (3): 59-63.
- [3] Ogunsola A, Mariscotti A. Electromagnetic compatibility in railways: Analysis and management [M]. New York: Springer-Verlag, 2013.
- [4] Charalambous C A, Cotton I, Aylott P. Modeling for preliminary stray current design assessments: The effect of

- crosstrack regeneration supply [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (3): 1899-1908.
- [5] 闫明富,李夏青,王奎鹏 (Yan Mingfu, Li Xiqing, Wang Kuijuan). 地铁钢轨电位和杂散电流分布研究及仿真 (Research and simulation of metro rail potential and stray current distribution) [J]. 北京石油化工学报 (Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology), 2013, 21 (1): 37-41.
- [6] Zhao Liping, Li Jianhua, Liu Mingjie. Simulation and analysis of metro stray current based on multi-locomotives condition [A]. 35th Chinese Control Conference [C]. Chengdu, China, 2016. 9252-9258.
- [7] 王盟,赵莹,袁伟群,等 (Wang Meng, Zhao Ying, Yuan Weiqun, et al.). 弧形轨道结构下电流分布特性的仿真研究 (Simulation study on current distribution characteristics of arc rail structure) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (8): 51-55.
- [8] Ibrahim Amr, Elrayyah Ali, Sozer Yilmaz. DC railway system emulator for stray current and touch voltage prediction [J]. IEEE Transactions on Industry Applications. 2017, 53 (1): 439-446.
- [9] Zaboli Aydin, Vahidi Behrooz, Yousefi Sasan, et al. Evaluation and control of stray current in DC-electrified railway systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66 (2): 974-980.
- [10] Sim W M, Chan C F. Stray current monitoring and control on Singapore MRT system [A]. 2004 International Conference on Power System Technology [C]. 2004. 2: 1898-1903.
- [11] Pham K D, Thomas R S, Stinger W E. Analysis of stray current, track-to-earth potentials and substation negative grounding in DC traction electrification system [A]. Proceedings of the 2001 IEEE/ASME Joint Railroad Conference [C]. 2001. 141-160.
- [12] Mariscotti A, Reggiani U, Ogunsola A, et al. Mitigation of electromagnetic interference generated by stray current from a dc rail traction system [A]. International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE [C]. 2012. 1-6.
- [13] Niasati M, Gholami A. Overview of stray current control in DC railway systems [A]. 2008 International Conference on Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age [C]. 2008. 1-6.
- [14] Rodriguez Jorge Valero, Feito Javier Sanz. Calculation of remote effects of stray currents on rail voltages in DC railways systems [J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2013, 3 (2): 31-40.

Study of stray current considering traction factors of rail vehicles

CAI Zhi-chao, CHENG Hao, LIN Zhi-ming

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In the DC traction power supply system, the hazards of stray current will directly affect the normal operation of the electrical equipment, facilities in the subway. In order to ensure the safety of operation, the study of stray current analysis characteristics of the situation plays an important role to reduce stray current leakage. In this paper, the traction characteristics of the rail vehicle are imported into the DC traction system, and the dynamic distribution model between the stray current and the running characteristics of the rail vehicle is established. The distribution of stray current under acceleration and braking traction is analyzed, and the influence of the slope, length of the tunnel and curve radius on the distribution of stray current and orbital voltage is considered. The results show that the traction characteristics of traction path and other related factors have significant effect on the stray current, and the relevant results will be beneficial to further guide the works of the stray current protection.

Key words: stray current; urban rail transit; traction characteristics