

中低速磁浮列车车体接地回流特性研究

邓江明¹, 陈特放², 彭奇彪¹

(1. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412001;
2. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 针对目前中低速磁浮列车采用的第三轨受流方式, 建立了车体放电主电路的接地阻容(R-C)网络的数学函数, 结合函数的波特图和实测频谱数据开展了接地电流特征研究。理论分析与实测数据表明, 车体电位累积与泄放体现出动态变化与平衡特性, 可进一步优化R-C参数并采取悬浮架与车体分开接地, 以形成快速导流通道, 改善接地性能。

关键词: 中低速磁浮列车; 车体; 接地; 阻容网络; 电荷泄放

中图分类号: U292.91⁺7

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.05.111

Study of Grounding Current Characteristics of Power Supply Main Loop in the Medium-low Speed Maglev System

DENG Jiangming¹, CHEN Tefang², PENG Qibiao¹

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

2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: As to the power supply main loop in the medium-low speed maglev system which employ the third trail, a mathematical model of resistance capacitance (R-C) ground network was built, and ground current characteristics were analyzed from its bode diagram and measured spectral data. The theoretical and experimental results showed that the accumulation and discharge of vehicle body potential had dynamic balance characteristic, by further optimizing the R-C parameters as well as separating the suspension modulars from the vehicle body, a rapid current diversion channel was formed to improve the system grounding performance.

Keywords: medium-low speed maglev train; vehicle body; grounding; resistance capacitance network; charge release

0 引言

随着国内首条、全球最长的常导短定子中低速磁浮商业线——长沙磁浮快线于2016年5月6日正式投入载客试运营, 中低速磁浮列车以其绿色环保、安静舒适、爬坡能力强、转弯半径小、建造成本低的优势, 在城市轨道交通应用上体现出较强的环境适应性和较好的社会经济性^[1]。

列车悬浮运行时, 除与受流轨有接触外, 车体本身与轨道是非接触的, 但车辆与轨道存在动静态电磁等因素, 对车辆的接地系统、电磁兼容提出了新的需

求。相比传统轮轨接触式列车利用轮对分散接地的方式^[2-3], 磁浮列车采用双端第三轨集中接地模式。实际上, 磁浮车辆不仅需要第三轨获取主电气设备的工作电流, 还需要将车体感生电势导入第三轨, 并防止其他车辆产生的电势通过第三轨串入本车干扰本车地电位。另外, 携带大噪声的接地电流会干扰车体地电位, 从而间接干扰车上的弱电设备, 引起弱电设备通信偶发性工作异常, 危害行车安全^[4]。

鉴于当前开展中低速磁悬浮列车技术研究及应用的国家和地区为数不多, 关于磁浮车辆的接地设计及电磁兼容的解决策略鲜有报道, 仅国内提出了一种磁浮车辆供电网负极轨通过电阻接地方案^[5]。为此有必

要针对磁浮列车不同于轮轨列车的车体接地技术部分进行深入分析, 并进一步考虑其电磁兼容的影响因素, 提出应对措施, 优化车辆设计, 提高车辆安全性, 为磁浮车辆推广应用奠定基础。

1 车体主要保护接地网配置

车载电气设备保护接地涵盖两大类。
一类是 110 V 电压网络负载, 如图 1 所示结构布局, 其形式主要采用 110 V 电压负极串联绕线电阻 R 后接车体。

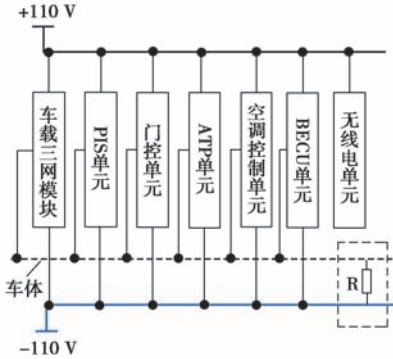


图 1 车载 110 V 网络接地示意图

图 1 中的电阻 R 可适当抬升 110 V 负极电位, 减少控制用电网受车体电荷波动的影响。

另一类是高压网络负载, 如图 2 所示结构布局, 其形式主要采用高压网络串联二极管 - 电容 - 电阻 (V-C-R) 负载后接车体, 如图 2 所示。

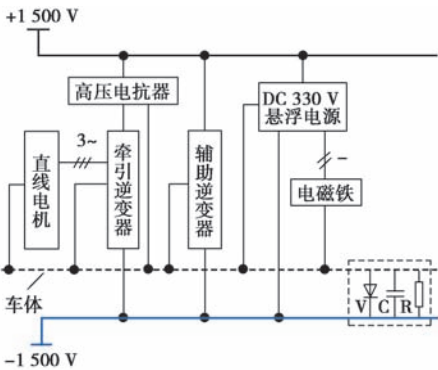


图 2 车载高压网络接地示意图

图 2 中电阻 R 可适当抬升车体地电位, 减少其受线路上其他运行车辆流向 1 500 V 负极侧电流的影响; 电容 C 可起高频滤波作用; 二极管 V 可将车体瞬间短路电流导入轨道保护 R、C 元件。

图 1 中的 110 V 电压网络负载本身产生的电磁噪声等级较低, 对车体电位影响较小。而图 2 中高压网络负载工作时会产生较大的电磁噪声, 要么其本身工作磁场与车体耦合^[6], 要么其保护外壳与车体直接相连, 此 2 种情况均会较大程度影响车体地电位, 因此是本文研究的侧重点。

2 车体主电路寄生电容特性

磁浮车辆运行时处于悬浮状态, 车辆 1 500 V 高电

压网络负载接地主要依靠车体直流 1 500 V 电压负极相连。高压网络主要的负载异步直线感应电机工作时, 初级铁心通过接地块与车体直接相连, 如图 3 所示。



图 3 直线电机初级与车体端接图

电机励磁电流大小与铁心交变磁场强弱密切相关, 并催生初级绕组与车体之间的等效寄生电容 C_p 特性, 如图 4 所示。等效寄生电容的存在影响了车体向大地放电的时间^[7], 其中车体电荷 Q 与电压 u 平衡关系如下:

$$u=Q/C \tag{1}$$

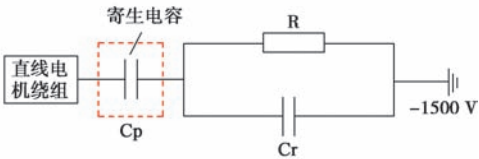


图 4 近似寄生电容特性电路结构

3 车体主电路接地回流动态平衡关系

综上分析, 并考虑到直线电机在车体感生的电流向大地放电的途径是阻容 (RC) 网络, 下面进一步建立主接地电流放电回路的数学模型, 如图 5 所示。

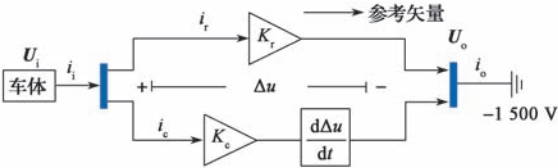


图 5 阻容网络函数

图 5 中, 车体电位为 U_i , 其对大地放电电流为 i_o , 电阻 R 支路电流为 i_r , 电容 C 支路电流为 i_c , K_r 为选定的电阻值参数, K_c 为选定的电容值参数, 结合电路输入输出特性, 可得:

$$i_o=i_r+i_c \tag{2}$$

$$i_r=\Delta u/K_r \tag{3}$$

$$i_c=K_c\frac{d\Delta u}{dt} \tag{4}$$

对式 (2) ~ 式 (4) 进行拉式变换, 并处理可得车体对地放电一阶阻抗函数 $Z(s)$:

$$Z(s)=\frac{\Delta U(s)}{I_i(s)}=\frac{K_r}{1+K_rK_c\cdot s} \tag{5}$$

车 - 地放电电压动态平衡矢量方程:

$$U_i=\Delta U+U_o. \tag{6}$$

由式 (5)、式 (6) 得放电电流矢量方程:

$$I_i(s)=(U_i(s)-(U_o(s))/Z(s) \tag{7}$$

目前所用参数选
定值, K_r 与 K_c 参数
如表 1 所示。

表 1 接地阻抗函数值

参数	K_r	K_c
取值	30×10^{-3}	2.2×10^{-9}

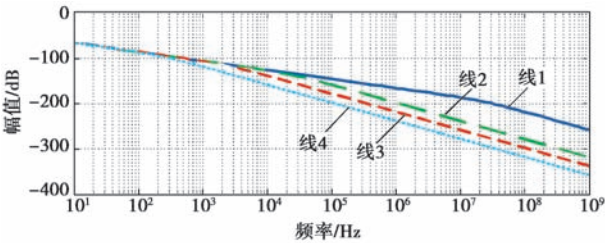
4 仿真校算与试验测试

采用 Matlab 的 Simulink 对式 (5) 所得放电阻抗函数在不同的函数选定值下进行了仿真校算, 以验证参数选定的放电效果, 比对参数值如表 2 所示。

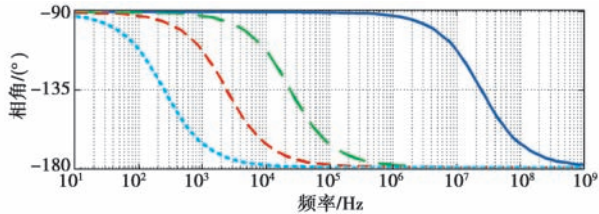
表 2 接地阻抗函数对比值

参数	线 1	线 2	线 3	线 4
K_r	30×10^{-3}	30×10^{-3}	30×10^{-3}	30×10^{-3}
K_c	2.2×10^{-6}	2.2×10^{-3}	2.2×10^{-2}	2.2×10^{-1}

因车体电位波动时以阶跃和冲击为主要影响特征, 故本文主要分析接地阻抗函数的阶跃和冲击响应。图 6、图 7 分别为接地阻抗网络在单位阶跃响应与单位冲击响应下的波特图。

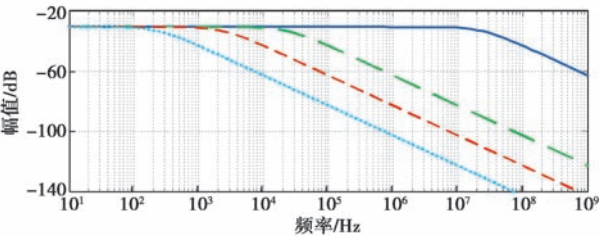


(a) 幅频特性

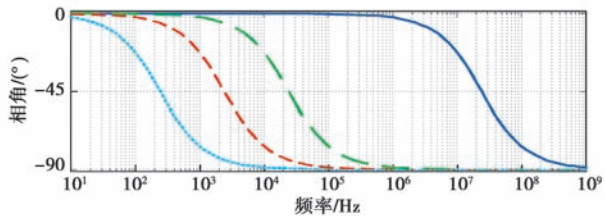


(b) 相频特性

图 6 单位阶跃响应幅相特性图



(a) 幅频特性



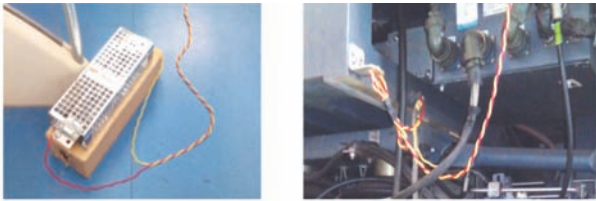
(b) 相频特性

图 7 单位冲击响应幅相特性图

由图 6、图 7 中相频图可知放电电压相位滞后放电电流相位 90° 。由图 6、图 7 的幅频图可知, 在目前的选定参数值下, 100 Hz 以内的电磁冲击扰动信号衰减速度较慢, 100 Hz 以后接地电容值越大, 接地电流的冲击扰动信号衰减速度越快。对于高频接地电流扰动信号大于 10^6 Hz 有 -2 dB/Hz 衰减效果, 对于一般电

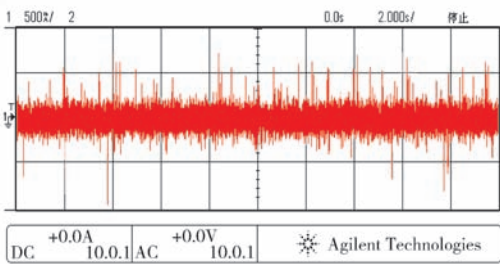
磁扰动信号小于 100 Hz 范围无明显衰减作用。

试验时将车体主接地电路 (见图 2) 通过导线连上 $30\text{ m}\Omega$ 电阻, 并用示波器电流夹钳采集线缆端噪声电流数据, 如图 8 所示, 并进行了后期的傅里叶频谱分析得到如图 9~图 13 波形, 其中数据记录一个周期 20 s, 见表 3~表 7。

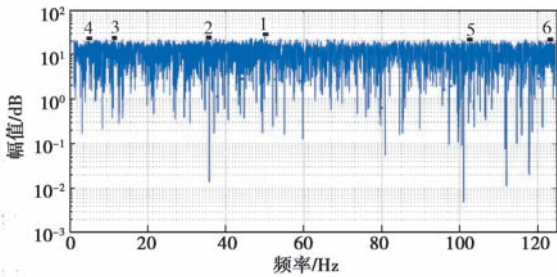


(a) 30 mΩ 接地电阻 (b) 车体接地点

图 8 接地测试现场布置图

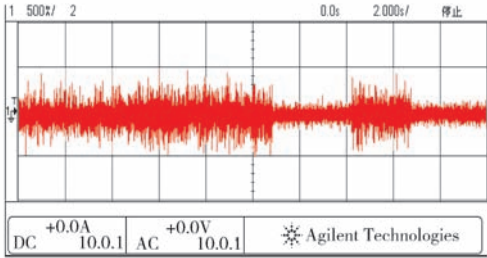


(a) 车体电流波动情况

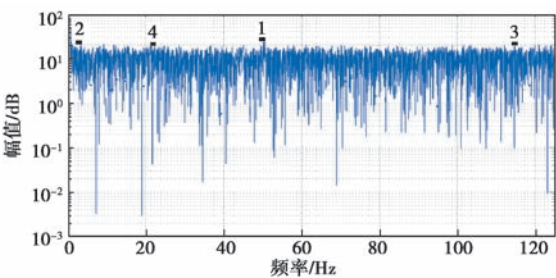


(b) 车体电流频谱分析结果

图 9 车辆正常运行状态波形



(a) 车体电流波动情况



(b) 车体电流频谱分析结果

图 10 车辆启动-停车-启动状态波形

表 3 图 9 频谱强度数据统计表

强度排序	频率 /Hz	幅值 /dB
1	50.216 67	27.868 76
2	35.491 94	23.336 84
3	11.413 57	22.885 76
4	4.974 365	22.176 91
5	102.615 4	21.577 82
6	123.184 2	21.477 88

表 4 图 10 频谱强度数据统计表

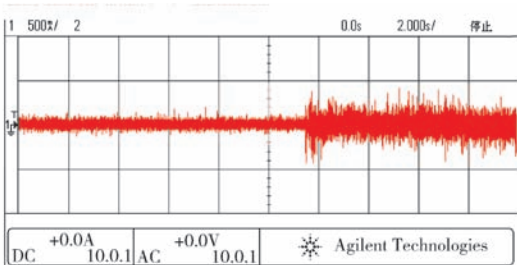
强度排序	频率 /Hz	幅值 /dB
1	49.911 50	26.466 28
2	2.822 876	22.817 01
3	114.746 1	21.455 28
4	21.804 81	20.818 52

表 5 图 11 频谱强度数据统计表

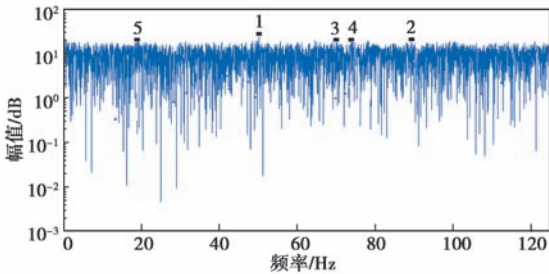
强度排序	频率 /Hz	幅值 /dB
1	50.216 67	27.615 07
2	89.263 92	20.718 44
3	69.462 90	20.478 00
4	73.852 54	20.328 82
5	19.012 45	20.290 55

表 6 图 12 频谱强度数据统计表

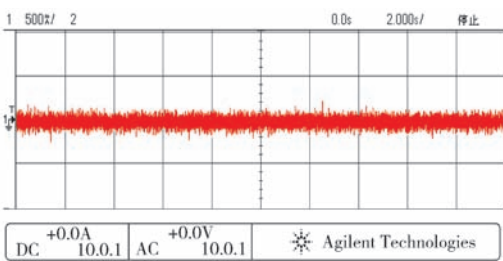
强度排序	频率 /Hz	幅值 /dB
1	50.216 67	24.038 75
2	52.078 25	19.167 87
3	21.011 35	19.239 69
4	52.078 25	19.167 87
5	122.222 9	18.003 84



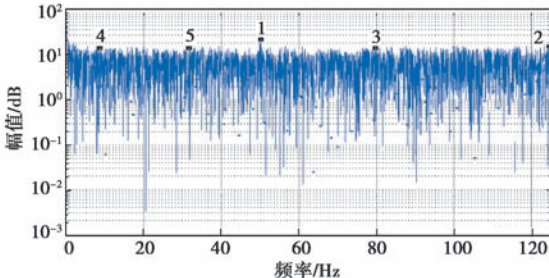
(a) 车体电流波动情况



(b) 车体电流频谱分析结果
图 11 车辆启动瞬间波形



(a) 车体电流波动情况



(b) 车体电流频谱分析结果

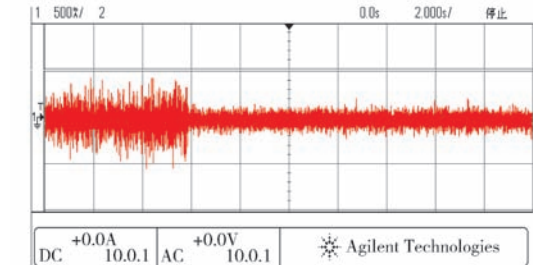
图 13 车辆停车静浮状态波形

表 7 图 13 频谱强度数据统计

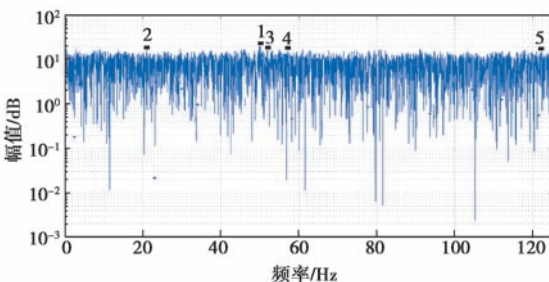
强度排序	频率 /Hz	幅值 /dB
1	50.231 93	23.902 37
2	124.600 3	16.410 06
3	79.803 47	15.360 15
4	8.590 698	15.311 92
5	31.661 99	15.187 90

由图 9~图 12 车辆运行状态可知,工频 50 Hz 噪声能量较其他频率成分突出,只要车辆直线电机处于工作状态(牵引、制动、惰行),接地噪声电流就瞬间产生,只要停车封锁牵引输出,接地噪声电流随即减弱。鉴于定子侧最大工作频率小于 100 Hz,频谱分析结果表明噪声电流频率广泛分布在 0~100 Hz 范围内,各频带能量比重散布均匀。

对比图 9、图 13 可知,虽然作为噪声的主要频率 50 Hz 左右的噪声能量最为突出,但是车辆一运行,则各频带噪声能量均大幅提升,50 Hz 频率能量仅提升



(a) 车体电流波动情况



(b) 车体电流频谱分析结果
图 12 车辆停车瞬间波形

了约 3 dB, 其他频率能量提高了近 6 dB, 车体电荷被积累抬升, 同时通过 R-C 泄放通路导入主电路 1 500 V 负极侧, 泄放与积累达到动态平衡关系。

综上数据分析结果, 目前中低速磁浮车体主电路接地配置的 RC 阻抗网络参数虽然可将车体产生的噪声电流实时注入 1 500 V 负极侧, 但是还进一步优化 R-C 网络阻抗值并考虑将悬浮架与车体分开导流, 以匹配直线电机绕组产生的寄生电容特性, 增强 1 500 V 接地通路的低通滤波功能, 以提高车体电荷泄放能力。

5 结论

论文针对中低速磁浮列车采用第三轨主电路接地方式, 建立了接地阻容 (RC) 网络的数学函数, 结合函数的波特图和实测频谱数据开展了接地电流特征研究, 相关研究及试验数据表明:

①中低速磁浮列车车体电荷的累积与泄放表现出动态变化与平衡的特性;

②因车辆运行时各噪声能量幅值提升, 在考虑直线电机绕组寄生电容特征的前提下可进一步优化阻容

网络 (RC) 值并选择将悬浮架与车体分开导流, 以获得较佳的电荷泄放性能。

参考文献:

- [1] 刘友梅, 杨颖. 城轨交通的一种新模式—直线电机驱动地铁车辆 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2003, 26(4): 4-7.
- [2] 朱军, 王健全, 李林森. 城轨车辆接地系统设计 [J]. 车辆产品与零部件, 2009, 47(1): 26-27.
- [3] 陈晶晶, 马德明. 高速铁路常用供电方式接地回流研究 [J]. 铁道技术监督, 2007, 35(10): 24-26.
- [4] 李传伟. 电子电气设备接地探讨 [J]. 化工装备, 2009, 11(1): 36-40.
- [5] 陈贵荣, 王宁, 李杰, 等. 用于中低速磁浮列车的接地与保护方法: 201110027036.5 [P]. 2011-07-20.
- [6] 杨会民, 陈珺, 刘波. 影响接地电阻的因素及减小接地电阻的方法 [J]. 中国测试, 2009, 35(2): 106-108.
- [7] 张宇. 复合材料飞机的电流回路接地技术研究 [J]. 航空科学技术, 2011(6): 27-30.

作者简介: 邓江明 (1987-), 男, 博士, 工程师, 现从事磁浮交通系统设计研发工作。

(上接第 87 页) 对于弓网系统的广义动态建模, 可以有效地逼近弓网系统接触力随时间变化的动态行为, 反应列车受流质量。

4 结语

本文提出基于 LSSVM 的弓网系统广义动态建模方法, 并对弓网实际检测数据进行建模预报试验。利用 LSSVM 的方法改进 ARX Hammerstein 弓网模型非线性部分, 并对模型参数进行辨识。LSSVM 在处理小样本、高维数、非线性复杂数据等方面具有优势, 而 ARX Hammerstein 模型能较好地处理非线性动态数据, 2 种模型相结合恰好满足数据复杂多变的弓网系统特性。列车弓网系统动力学模型本身就是一个动态变化的线性和非线性模型的叠加, 采用子结构方法分别建立列车接触网、受电弓子系统模型进而得到弓网系统的整体动力学模型, 最后基于 Matlab 平台进行弓网系统接触力的建模和预报试验。试验结果表明, 基于 LSSVM 的 ARX Hammerstein 弓网模型具有较高的接触力预报精度, 能够反应弓网系统实际运行状况, 为轨道交通弓网系统建模和预测控制提供了新的方法, 以保证列车稳定接触受流和高速安全运行。

参考文献:

- [1] 周宁, 张卫华, 王冬. 受电弓等效模型参数识别及动态性能测试 [J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(3): 398-403.
- [2] 李瑞平, 周宁, 张卫华, 等. 受电弓气动抬升力计算方法与分析 [J]. 铁道学报, 2012, 34(8): 26-32.
- [3] 李瑞平, 周宁, 张卫华. 高速列车过隧道对弓网动力学影响分析 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(6): 33-37.

- [4] 张卫华. 高速列车耦合大系统动力学理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [5] 蔡成标, 翟婉明. 高速铁路受电弓—接触网系统动态性能仿真研究 [J]. 铁道学报, 1997(5): 39-44.
- [6] 周宁, 张卫华. 基于直接积分法的弓网耦合系统动态性能仿真分析 [J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 71-76.
- [7] 吴燕, 吴俊勇, 郑积浩. 弓网系统动态振动性能的仿真研究 [J]. 铁道学报, 2009, 31(5): 113-117.
- [8] 杨康, 陈唐龙, 于龙, 等. 大型列车弓网系统优化建模与仿真分析 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(3): 201-207.
- [9] 吴燕, 吴俊勇, 郑积浩, 等. 高速受电弓—接触网动态受流性能及双弓距离的研究 [J]. 铁道学报, 2010, 32(4): 38-43.
- [10] 吕青松. 接触网波动特性及其传播规律研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [11] 万连录, 邱明. 集中质量对接触网仿真的影响研究 [J]. 铁路工程造价管理, 2013(3): 21-25.
- [12] 朱学峰. CSTR 的非线性预测控制 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 1995, 2(6): 7-16.
- [13] Janczak A. Neural Network Approach for Identification of Hammerstein Systems [J]. International Journal of Control, 2004, 76(17): 1749-1766.
- [14] Goethals I, Pelckmans K, Suykens J A K, et al. Identification of MIMO Hammerstein Models Using Least Squares Support Vector Machines [J]. Automatic, 2005, 41(7): 1263-1272.
- [15] 杨岗, 李蓓. 高速动车受电弓滚动弓头特性研究 [J]. 机车电传动, 2010 (4): 79-83.
- [16] Suykens J A K, Vandewalle J. Least Squares Support Vector Machines [J]. Neural Processing Letter, 1999, 9(3): 293-300.
- [17] 黄玉萍. 基于 LSSVM 的弓网系统建模研究 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2015.

作者简介: 黄玉萍 (1989-), 女, 硕士, 主要研究方向为轨道交通控制及弓网建模。