

波动载荷下弓网滑动接触电阻的数学模型研究

赵国强¹, 张 军¹, 陈忠华¹, 王福征¹, 卢 韦²

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105;
2. 国网山东省电力公司东营河口区供电公司, 山东 东营 257000)

摘要: 列车的运行安全离不开良好的弓网电接触,接触电阻可反映电接触质量。工作时,牵引电流、滑动速度、压力载荷及其波动都对接触电阻产生影响。利用实验机测试不同牵引电流、滑动速度、接触压力、载荷波动幅度和波动频率条件下的弓网接触电阻,得出接触电阻在不同条件下的变化趋势,根据实验结果和理论分析,建立了接触电阻关于牵引电流、滑动速度、接触压力、波动幅度的数学模型。研究表明,接触电阻随牵引电流的增大而减小,随滑动速度的提高而呈线性增大,随接触压力的增大而减小,随载荷幅度的增大而微弱增大,载荷频率的变化对其无明显影响。并验证了该模型的有效性。

关键词: 弓网系统; 接触电阻; 牵引电流; 滑动速度; 波动载荷; 非线性拟合

DOI: 10.12067/ATEEE1801019 **文章编号:** 1003-3076(2018)11-0082-07 **中图分类号:** TM922

1 引言

弓网系统(以下简称“弓网”)作为现代电气化高速铁路主要装备技术内容之一,其接触性能直接影响高速列车安全运行。随着行驶速度的提高,列车的安全稳定运行对弓网电接触性能提出了更高要求。接触电阻是弓网滑动电接触的基本参量,其大小能反映实际接触状况和工作状态。接触电阻过大将导致接触区过热加剧磨损,降低弓网工作寿命,严重时影响运行安全。实际工作运行中,弓网压力载荷是波动的,导致接触电阻变化更加复杂。所以,波动载荷下弓网接触电阻的研究对高速列车的发展有现实意义。

弓网电接触研究近年来取得一些成果。文献[1]汇总了弓网电接触的接触电阻、热效应、摩擦磨损性能及受电弓滑板材料方面的研究现状。文献[2]提出了相对稳定系数和载流效率的概念,分析了不同接触压力和滑动速度下相对稳定系数和载流效率的变化趋势。文献[3]实验分析了接触压力、滑动速度、牵引电流在滑动电接触中对载流效率的影响和作用机理。文献[4]实验并分析了不同牵引

电流、接触压力和运行速度条件对弓网接触电阻的影响,确定了弓网最优压力载荷。文献[5]研究了不同牵引电流、接触压力条件下静态弓网接触电阻的数学表达式。文献[6,7]研究了不同接触压力、滑动速度、接触电流对弓网接触电阻的影响,对大量的实验数据进行拟合,得到了弓网接触电阻关于滑动速度、接触压力和牵引电流的数学表达式。

目前,弓网电接触的研究主要围绕磨损磨损和电接触特性。动态弓网接触电阻模型的研究较少,关于载荷波动下动态弓网接触电阻的研究,还未见相关报道。本文将利用自行研制的实验机,测试并分析不同的牵引电流、滑动速度和接触压力对弓网接触电阻的影响,在此基础上考虑载荷波动幅度和波动频率对弓网接触电阻的影响,并根据实验结果和理论分析,建立弓网接触电阻关于上述因素的数学模型,并验证该模型有效。

2 实验装置与材料

2.1 实验装置

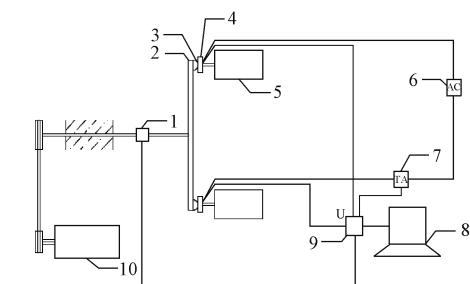
研究室自行研制的实验机能模拟弓网系统工作时“之”字形的滑动运行轨迹。实验机用音圈电机

收稿日期: 2018-01-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477071)

作者简介: 赵国强(1965-),男,辽宁籍,教授,硕导,研究方向为现代电力电子、电接触理论;
张 军(1992-),男,山东籍,硕士研究生,研究方向为电接触理论及其应用。

代替砝码供给压力载荷,可以更精确地施加压力载荷,实现压力载荷的柔和变化,电接触实验机示意图如图 1 所示。



1—转矩转速传感器;2—转盘;3—接触线;4—碳滑板;
5—线圈电机;6—电源;7—电流互感器;
8—上位机;9—下位机;10—电机

图 1 电接触试验机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sliding electrical contact test machine

2.2 实验材料

实验中用到的接触导线材料为纯铜,截面积为 120mm^2 ,硬度为 96.2HBS。浸金属碳滑板化学成分见表 1。

表 1 碳滑板化学成分

Tab. 1 Chemical composition of slide material

成分	C	Cu	Pb	Sb	其他
质量百分数(%)	92.95	3.91	0.98	0.55	1.61

3 实验结果及模型的建立

实验中,导电斑点剧烈变化,使弓网接触电阻实际上围绕一个中值上下波动,因此实验采用平均值来表示弓网接触电阻^[8]。

通过实验结果和理论分析,本文将建立一个弓网接触电阻 R_c 关于牵引电流 I 、滑动速度 v 、接触压力 F 、波动幅度 φ 和波动频率 ω 在内的多元非线性回归数学模型:

$$R_c = R_{(I,v,F,\varphi,\omega)} \quad (1)$$

3.1 牵引电流对接触电阻的影响

3.1.1 实验结果分析

在不同滑动速度、波动幅度和频率条件下测量不同牵引电流下的接触电阻大小,其随牵引电流的变化曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出,随着牵引电流增大接触电阻减小,且下降趋势逐渐变缓。滑动速度和波动载荷的变化不影响接触电阻变化趋势。

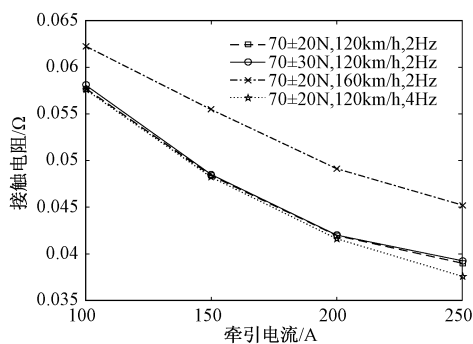


图 2 接触电阻随牵引电流的变化

Fig. 2 Change of contact resistance with traction current

“焦耳热”导致的温度升高是牵引电流影响接触电阻的主要原因。牵引电流增大使电弧发生的概率和电弧能量都升高,接触区温度进一步提高^[8,9]。接触区的高温使材料软化导致实际接触面积变大,同时电效应导致暗膜击穿,接触质量进一步提升,接触电阻变小。因接触区温度不能无限增大,温度临界值的限制阻止接触电阻进一步减小。上述因素导致接触电阻随牵引电流的增大而减小并趋于平缓。

3.1.2 接触电阻关于牵引电流的模型

霍尔姆对表面膜影响接触电阻的研究中发现,表面膜对接触电阻的影响很小,在实际计算时,一般不考虑表面膜的影响^[10],即接触电阻主要指收缩电阻。

“焦耳热”对收缩电阻产生很大影响^[10],收缩电阻与通过电流接触部位温度变化量关系如下:

$$\frac{R_\theta}{R_0} = 1 + \frac{2}{3}\beta\theta \quad (2)$$

式中, R_θ 和 R_0 分别为考虑电流和不考虑电流焦耳热影响的收缩电阻; β 为金属导体的电阻温度系数; θ 为温度变化量。

大电流下的温度与电流有关,可以用关于电流的二阶模型来预测某电流下的温度^[11]。则式(2)可表示为:

$$\frac{R_\theta}{R_0} = 1 + \frac{2}{3}\beta(AI^2 + BI + C) \quad (3)$$

式中, A, B, C 为经验参数。

除去表面膜的影响,结合式(1)~式(3),可得接触电阻关于牵引电流的模型:

$$R_{(I,v,F,\varphi,\omega)} = (aI^2 + bI + c)R_{(v,F,\varphi,\omega)} \quad (4)$$

式中, a, b, c 为经验参数。

建立的模型符合接触电阻关于牵引电流的变化趋势。

3.2 滑动速度对接触电阻的影响

3.2.1 实验结果分析

不同接触压力、波动幅度和频率条件下接触电阻随滑动速度的变化曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出接触电阻随速度提高而增大,呈很强的线性关系,条件变化时,线性关系基本不受影响。

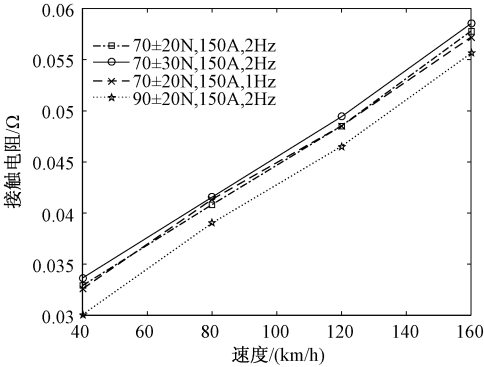


图 3 接触电阻随滑动速度的变化

Fig. 3 Change of contact resistance with sliding speed

在滑动过程中,新旧导电斑点的持续交替变化,导致接触质量变差。在高速滑动摩擦作用和离线率变高使电弧频发的影响下,接触区温度变高,材料性能劣化,滑动速度的提高使接触区可能发生熔融甚至喷溅现象,损耗加剧,进一步恶化电接触质量^[12],接触电阻变大。另外,材料接触表面的氧化膜因机械摩擦作用不断被擦拭破坏,膜电阻减小。这些因素的综合作用导致接触电阻随滑动速度的提高而呈较强的线性增大。

3.2.2 接触电阻关于滑动速度的模型

不考虑牵引电流的影响,不同接触压力、波动幅度和波动频率的条件下,接触电阻随滑动速度的变化呈现良好的线性关系,且线性关系不受接触压力、波动幅度和频率条件改变的影响,即滑动速度对接触电阻线性影响的斜率与接触压力、波动幅度和频率条件的改变无关。接触电阻关于滑动速度的模型可以表示为:

$$R_{(v,F,\varphi,\omega)} = kv + R_{(F,\varphi,\omega)} \tag{5}$$

式中, k 为经验参数。

3.3 接触压力对接触电阻的影响

3.3.1 实验结果分析

不同条件下接触电阻随接触压力的变化曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出接触电阻随接触压力的增大而减小^[13],且下降趋势逐渐平缓,同时载荷的波动会影响接触电阻的大小。

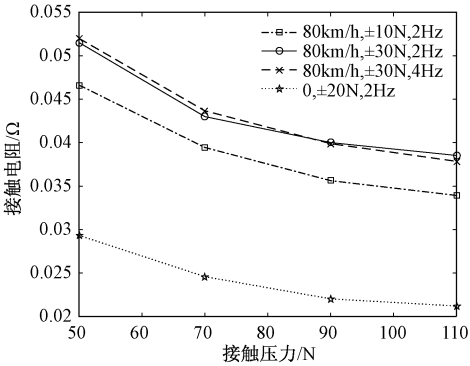


图 4 接触电阻随接触压力的变化

Fig. 4 Contact resistance change with contact pressure

接触压力主要通过改变导电斑点的实际接触面积来影响接触电阻。根据 Herz 弹性接触理论,接触压力增大导致导电斑点实际接触面积增大,表面膜遭到破坏,接触电阻变小^[14]。当接触压力接近临界值时,接触电阻趋于平稳。

3.3.2 接触电阻关于接触压力的模型

霍尔姆根据对不同压力接触电阻的研究,得到满足一定使用条件的经验公式来表示接触压力对接触电阻的影响关系^[10],即

$$R_{(F)} = \frac{p}{F^m} \tag{6}$$

式中, p 、 m 为经验参数, $m \in (0,1)$ 。

3.4 波动幅度对接触电阻的影响

3.4.1 实验结果分析

不同条件下接触电阻随波动幅度的变化曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出接触电阻随波动幅度增大而增大,且增大趋势趋于明显。

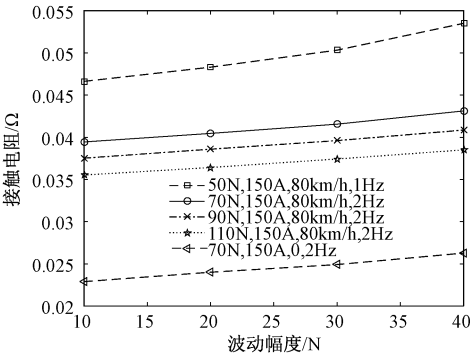


图 5 接触电阻随波动幅度的变化

Fig. 5 Change of contact resistance with fluctuation range

载荷波动通过压力载荷大小的周期变化影响接触电阻。载荷压力会改变导电斑点大小的变化,接

触压力载荷处于波动时,导电斑点的形状及数目产生更为剧烈的变化,弓网的离线率升高。离线时刻接触区火花放电和电弧放电产生的能量,集中作用在离线时刻的接触区域,材料接触区发生熔融甚至气化,磨损磨耗加剧接触导致接触区表面形貌变差^[15,16],实际电接触状况进一步恶化,使得接触电阻大小在载荷波动时大于载荷固定时。并且波动幅度增大时,接触情况恶化程度越大,故波动幅度增加接触电阻变大。当基础接触压力增大时,降低了弓网离线率,遏止了磨损进一步加剧,接触电阻变小。

3.4.2 接触电阻关于波动幅度的模型

通过上位机控制音圈电机使压力载荷呈正弦周期变化。为了研究载荷波动幅度对接触电阻的影响,将压力载荷的正弦变化等效成三角波函数变化,波形如图 6 所示。

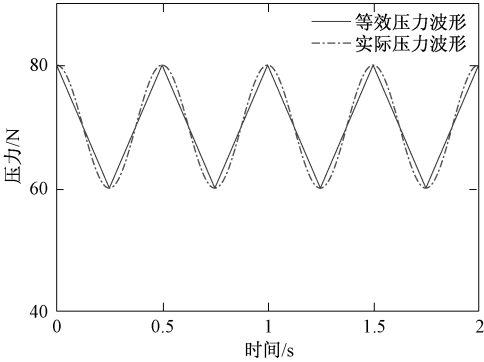


图 6 压力载荷变化的等效波形

Fig. 6 Equivalence waveform of pressure load changes

式(6)为接触电阻关于接触压力的数学模型,在图 6 等效压力载荷波动变化下,根据式(6)接触电阻的变化趋势如图 7 所示。

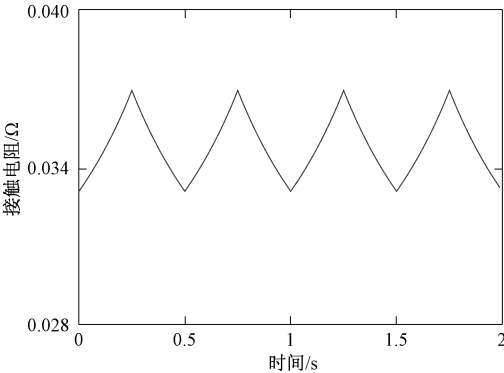


图 7 等效后接触电阻的变化

Fig. 7 Changes in equivalent post contact resistance

接触电阻的大小随压力载荷的周期变化也周期

性变化,一个周期接触电阻的平均值就是所求接触电阻,同时考虑到压力载荷变化等效产生的误差得:

$$R_{(F,\varphi)} = \frac{2}{4\varphi} \int_{F-\varphi}^{F+\varphi} \frac{P}{f^m} df + z_{\varphi} \tag{7}$$

式中, φ 为波动幅度; F 为基础压力载荷; f 为接触压力瞬时值; $\varphi < F$; m 为经验参数, $m \in (0,1)$; z_{φ} 为误差修正项。

由于等效后的接触压力变化不大,且实际波动幅度也比较小,等效产生的误差可忽略不计,式(7)可简化为:

$$R_{(F,\varphi)} = \frac{P}{2\varphi(1-m)} [(F+\varphi)^{1-m} - (F-\varphi)^{1-m}] \tag{8}$$

所得的式(8)满足实验结果接触电阻关于压力和波动幅度的变化趋势。

3.5 波动频率对接触电阻的影响

不同条件下接触电阻随波动频率的变化曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出接触电阻随波动频率的增大轻微波动,无明显的变化趋势。静态条件下,接触电阻随波动频率的增大几乎不发生变化。

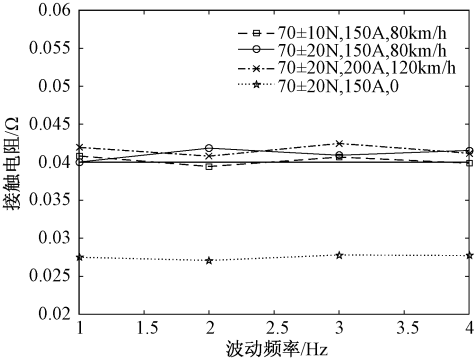


图 8 接触电阻随波动频率的变化

Fig. 8 Change of contact resistance with fluctuation frequency

波动频率变化,改变了接触压力的变化速度,加剧了弓网工作瞬时状态变化的复杂程度,而接触压力的变化范围未发生改变,即相当于等效压力不变,所以理论上频率变化不影响接触电阻的大小。同时,在微动对电接触影响的研究中,Castel 指出微动频率低于 50Hz 时对接触电阻的影响极小^[17]。综上所述,可认定波动频率对实验接触电阻大小没有明显影响。

3.6 接触电阻关于牵引电流、滑动速度、接触压力和波动幅度的数学模型

上文分别建立了接触电阻关于牵引电流、滑动速度、接触压力和波动幅度的数学模型,结合式(1)

~式(8),得到接触电阻关于上述因素的数学模型如下:

$$R_c = (aI^2 + bI + c) \{kv + \frac{p}{2\varphi d} \cdot [(F + \varphi)^d - (F - \varphi)^d] \}$$

(9)

式中, $d = (1 - m) \in (0, 1)$; $\varphi < F$; a, b, c, k, p, d 为未知参数;自变量为牵引电流 I 、滑动速度 v 、接触压力 F 和波动幅度 φ 。

4 模型的参数估计与验证

4.1 参数估计和模型评估

选取了接触电阻关于牵引电流、滑动速度、接触压力和波动幅度的变化趋势的 51 组实验数据,对数学模型进行拟合。
拟合采用曲线拟合软件 1stOpt^[18]。拟合软件对参数输出结果见表 2。

表 2 模型参数值

Tab. 2 Parameters' value in model

参数	输出值
a	5.5580951051867e-6
b	-0.00605492493679581
c	2.32035971841451
k	0.000132446866968053
p	0.182251264991496
d	0.431157053240652

软件也给出模型的部分回归统计量,见表 3。

表 3 回归统计量表

Tab. 3 Table of regression statistics

统计量	输出值
均方差	0.00134203534422932
残差平方和	9.18540021231963e-5
相关系数	0.990971554281414
相关系数之平方	0.982024621394921
修正 R 平方	0.980027357105467
确定系数	0.981983962858231
卡方系数	0.0011618234068892
F 统计	496.736318497053

由表 3 可知,模型的拟合程度高,误差小,该模型很好地反映出接触电阻关于各因素的数学特性。

4.2 模型的实验验证

额外测量 4 组实验值,对比预测值,验证模型的有效性。实验条件见表 4。
验证结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出通过数学模型得到的接触电阻预测响应值与实验结果基本吻合,误差很小,在 0.002Ω 以内,变化趋势基本

一致,表明建立的接触电阻的数学模型能很好地预测出某给定条件下的接触电阻,该模型有效。

表 4 验证实验条件

Tab. 4 Verifies the experimental conditions

组别	电流/ A	速度/ (km/h)	压力/ N	幅度/ N	频率/ Hz
一	100	120	70	20	1
	150	120	70	20	1
	200	120	70	20	1
	250	120	70	20	1
二	150	50	70	20	2
	150	90	70	20	2
	150	130	70	20	2
	150	170	70	20	2
三	120	120	50	20	2
	120	120	60	20	2
	120	120	70	20	2
	120	120	80	20	2
四	150	160	70	10	4
	150	160	70	20	4
	150	160	70	30	4
	150	160	70	40	4

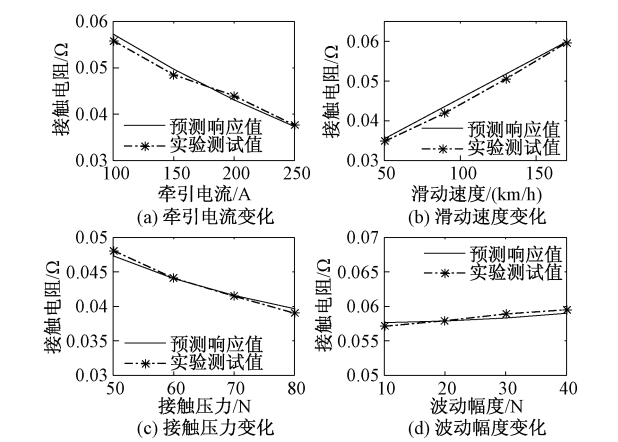


图 9 模型与实测值的曲线
Fig. 9 Curves of model and measured value

5 结论

- (1)牵引电流通过“焦耳热”影响电接触性能。在牵引电流从 100A 到 250A 时,牵引电流增大接触电阻减小并趋于平缓。
- (2)滑动速度使接触斑点发生持续变化,影响接触质量,弓网接触电阻随滑动速度从 40km/h 到 160km/h 呈较强的线性增加。
- (3)接触压力增大使导电斑点面积增大,提高了接触质量。接触电阻随接触压力增大下降的趋势

趋于平缓。

(4) 载荷波动实质是接触压力的持续周期变化从而影响接触电阻。接触电阻随波动幅度的增大而微弱增大。波动频率对接触电阻没有明显影响。

(5) 在实验结果和理论分析的基础上, 建立了弓网接触电阻关于牵引电流、滑动速度、接触压力和波动幅度的数学模型, 采用全局优化算法的 1stOpt 确定了参数, 评估了模型, 并通过实验验证了该模型的有效性。

(6) 本文主要研究了波动载荷下接触电阻的一般特性规律及其计算模型, 对于载荷波动条件下弓网工作瞬时状态的研究, 课题组会做后续跟进。

参考文献 (References):

- [1] 吴广宁, 周悦, 雷栋, 等 (Wu Guangning, Zhou Yue, Lei Dong, et al.). 弓网电接触研究进展 (Research advances in electric contact between pantograph and catenary) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2016, 42 (11): 3495-3506.
- [2] 郭凤仪, 姜国强, 赵汝彬, 等 (Guo Fengyi, Jiang Guoqiang, Zhao Rubin, et al.). 基于相对稳定系数的滑动电接触特性 (Sliding electric contact characteristics based on relative stability coefficients) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2009, 29 (36): 113-119.
- [3] 郭凤仪, 张晓晓 (Guo Fengyi, Zhang Xiaoxiao). 弓网系统中滑动电接触受流效率的研究 (Research of sliding electric contact current receiving efficiency in pantograph-catenary system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (10): 39-43.
- [4] 吴杰, 高国强, 魏文赋, 等 (Wu Jie, Gao Guoqiang, Wei Wenfu, et al.). 弓网系统滑动电接触特性 (Characterization of sliding electrical contact of pantograph-catenary system) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (11): 3635-3641.
- [5] 王万岗, 梁明亮, 吴广宁, 等 (Wang Wangang, Liang Mingliang, Wu Guangning, et al.). 弓网系统静态接触电阻特性研究 (Characteristic of static contact resistance between pantograph and catenary) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2012, 48 (1): 30-34.
- [6] 李春茂, 朱宁俊, 吴广宁, 等 (Li Chunmao, Zhu Ningjun, Wu Guangning, et al.). 弓网系统动态接触电阻数学模型的研究 (Investigation on the mathematical model of dynamic contact resistance of pantograph-catenary system) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (11): 3554-3560.
- [7] 陈忠华, 石英龙, 时光, 等 (Chen Zhonghua, Shi Yinglong, Shi Guang, et al.). 受电弓滑板与接触网导线接触电阻计算模型 (Calculation model of the contact resistance between pantograph slide and contact wire) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (5): 188-195.
- [8] 董丙杰, 胡艳, 陈光雄, 等 (Dong Bingjie, Hu Yan, Chen Guangxiong, et al.). 受电弓/接触网载流摩擦的电弧放电和碳滑板温度试验研究 (Experimental study on arc discharge and carbon slide temperature rise of pantograph/contact net friction) [J]. 润滑与密封 (Lubrication Sealing), 2016, 41 (12): 41-45.
- [9] 郭凤仪, 刘帅, 王智勇 (Guo Fengyi, Liu Shuai, Wang Zhiyong). 弓网系统滑动电接触瞬态温度场仿真研究 (Simulation of transient temperature field in a pantograph system with a sliding contact) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (3): 29-34.
- [10] 程礼春 (Cheng Lichun). 电接触理论及应用 (Electric contact theory and its application) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2010.
- [11] 邹学伟, 李日波, 王文, 等 (Zou Xuewei, Li Ribo, Wang Wen, et al.). 金属线夹类设备温度与电流关系 (Discussion of the relationship between temperature and current for the metal clip devices) [J]. 湖南电力 (Hunan Electric Power), 2016, 36 (2): 50-53.
- [12] Yang H J, Chen G X, Gao G Q, et al. Experimental research on the friction and wear properties of a contact strip of a pantograph-catenary system at the sliding speed of 350 km/h with electric current [J]. Wear, 2015, 332-333: 949-955.
- [13] Wang W, Dong A, Wu G, et al. Study on characterization of electrical contact between pantograph and catenary [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110 (3): 1-6.
- [14] Wang W G, Wu Guangning, Gao G Q, et al. Characterization of contact resistance between pantograph and catenary system [J]. Journal of Central South University, 2012, 43 (10): 3857-3864.
- [15] Ding T, Chen G X, Li Y M, et al. Arc erosive characteristics of a carbon strip sliding against a copper contact wire in a high-speed electrified railway [J]. Tribology International, 2014, 79 (11): 8-15.
- [16] 刘文正, 王溢斐, 王天宇, 等 (Liu Wenzheng, Wang Yifei, Wang Tianyu, et al.). 离线时刻对弓网电弧特性的影响 (Influence of off-line time on arcing characteristics of pantograph) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2016, 42 (11): 3524-3532.

[17] 布朗诺维克, 康奇兹, 米西金 (Brown Novick, Connecticut, Michael). 电接触理论、应用与技术 (Electric contact theory, application and technology) [M]. 许良军, 芦娜, 林雪燕, 等, 译 (Xu Liangjun, Lu na, Lin Xueyan, et al.). 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2010.

[18] 闫志学 (Yan Zhixue). 基于 1stOpt 软件的 GNSS 高程拟合研究 (Research on GNSS elevation fitting based on 1stOpt software) [J]. 东华理工大学学报 (自然科学版) (Journal of Donghua Polytechnic University (Natural science edition)), 2016, 39 (S1): 70-72.

Study on mathematical model of sliding contact resistance of pantograph under fluctuating load

ZHAO Guo-qiang¹, ZHANG Jun¹, CHEN Zhong-hua¹, WANG Fu-zheng¹, LU Wei²

- (1. College of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;
2. Dongying Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Dongying 257000, China)

Abstract: The contact resistance is related to the influence of various factors on the electrical contact of the pantograph, and the contact resistance directly reflects the electrical contact performance of the pantograph and network. The traction current, sliding speed, contact pressure and its fluctuation can all affect the contact resistance of the pantograph and network. The contact resistance of pantograph catenary under different traction current, sliding speed, contact pressure, fluctuating amplitude of load and frequency of fluctuation is tested by testing machine. The trend of contact resistance on these factors is analyzed, and the mechanism of action is elucidated. The research shows that the contact resistance decreases with the increase of traction current, increases linearly with the increase of sliding speed, decreases with the increase of contact pressure, and weakly increases with the increase of load amplitude. The change of load frequency has no obvious effect on it. According to the results and theoretical analysis, a mathematical model of contact resistance about traction current, sliding speed, contact pressure, fluctuation amplitude and frequency is established, and the validity of the model is verified.

Key words: pantograph catenary system; contact resistance; traction current; sliding speed; fluctuating load; nonlinear fitting