

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.03.026

## 波动载荷和电流作用下的弓网摩擦力模型研究

陈忠华<sup>1</sup>, 杨泽斌<sup>2</sup>, 张海洲<sup>3</sup>, 时光<sup>2</sup>

(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. 国网山西省电力公司长治供电公司, 山西 长治 046000; 3. 国网山西省电力公司长治市屯留区供电公司, 山西 屯留 046100)

**摘要:** 电气化铁路中接触网与受电弓良好的接触是列车安全可靠运行的前提条件,而弓网的接触是载流条件下的摩擦接触,因此有必要对其摩擦接触进行深入研究。文中通过滑动电接触实验机,开展不同工况(压力波动幅度、压力波动频率、接触电流、滑动速度)条件下的弓网滑动电接触摩擦力研究。研究表明:作用于滑板上的接触电流增大时,弓网间的滑动摩擦力随之减小;压力波动幅度和滑动速度增大时,弓网间的摩擦力也随之增大;压力波动频率对弓网摩擦力的影响极小。利用曲线估计的基本思想,优选出最能表达压力波动幅度、接触电流、滑动速度各参量对弓网间滑动摩擦力影响的单一因素数学模型;在此基础上,通过多元回归方法建立压力波动载荷和电流作用下的弓网摩擦力模型并验证模型的有效性。

**关键词:** 压力波动载荷; 接触电流; 曲线估计; 多元回归模型; 弓网摩擦力建模

### Study on Frictional Model of Bow Net under Fluctuation Load and Current

CHEN Zhonghua<sup>1</sup>, YANG Zebin<sup>2</sup>, ZHANG Haizhou<sup>3</sup>, SHI Guang<sup>2</sup>

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Liaoning Huludao 125105, China; 2. Changzhi Power Supply Company of State Grid Shanxi Electric Power Company, Shanxi Changzhi 046000, China; 3. State Grid Shanxi Electric Power Company Changzhi Tunliu District Power Supply Company, Shanxi Tunliu 046100, China)

**Abstract:** The good contact between the catenary and the pantograph in the electrified railway is the precondition for the safe and reliable operation of the train. The contact of the pantograph is the frictional contact under the current-carrying conditions. Therefore, it is necessary to conduct in-depth research on the frictional contact. In this paper, sliding electric contact testing machine is used to study the sliding electric contact friction force of bow nets under different working conditions (pressure fluctuation amplitude, pressure fluctuation frequency, contact current, sliding speed). The results show that the sliding friction between the pantographs decreases with the increase of the contact current on the slide; When the pressure fluctuation amplitude and sliding velocity increase, the friction between the pantographs also increases. The pressure fluctuation frequency has little effect on the pantograph friction force. By using the basic idea of curve estimation, a single factor mathematical model that best expresses the influence of pressure fluctuation amplitude, contact current, and sliding speed on the sliding friction between pantographs is presented; On this basis, the multi-regression method is used to establish the model of the bow-net friction under the action of pressure fluctuation load and current and verify the validity of the model.

**Key words:** pressure fluctuation load; contact current; curve estimation; multi-regression model; friction modeling of bow net

### 0 引言

弓网摩擦力是处于电场中的摩擦副在电流通过条件下的相互阻碍作用,其大小受电接触系统和

机械摩擦系统的耦合影响。受电弓与接触网是两个独立的弹性系统的组合,当受电弓与接触网接触并高速运行时,受电弓是振动的激励源,接触网导线受到外界扰动力,会引起接触网导线在垂向的振

收稿日期:2019-11-12; 修回日期:2020-01-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477071)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477071).

动,振动在接触网导线上传播形成波,当主横波遇到吊弦、定位线夹等集中质量时,部分透射波会继续向前传播,而部分将形成新的反射波。当受电弓遇到新的反射波时,其运动分量的幅度会增大,显著地影响着弓网间的摩擦行为和耦合状态<sup>[1]</sup>,从而影响受电弓的受流质量,进而影响列车的安全可靠运行,因此,研究波动状态下的弓网摩擦力具有重要的意义。

目前,关于弓网滑动电接触和非电流条件下的滑动摩擦力相关研究成果显著。但从查阅的文献来看,电接触涉及最优压力载荷<sup>[2-4]</sup>、接触温升<sup>[5-6]</sup>、接触电阻<sup>[7-8]</sup>、接触噪声<sup>[9]</sup>、接触材料<sup>[10-11]</sup>、摩擦磨损<sup>[12-14]</sup>等方面的研究,但未见有涉及到摩擦力方面的相关研究,因此,从摩擦力方面进行电接触的研究就非常有意义;滑动摩擦力涉及接触材料<sup>[15-16]</sup>、摩擦系数<sup>[17-18]</sup>、表面形貌<sup>[19-20]</sup>、表面温度<sup>[21]</sup>、表面润滑<sup>[22]</sup>等方面的研究,其研究未见涉及电流相关的影响因素;因此,电流和波动状态下的弓网滑动摩擦力亟待去研究。

文中是在滑动电接触实验平台上开展不同压力波动幅度、压力波动频率、接触电流和滑动速度作用下的弓网滑动电接触摩擦力的研究。通过分析各参量对弓网间滑动摩擦力的影响,并利用曲线估计的基本思想,确定各参量对弓网摩擦力影响的单变量数学模型。在此基础上,结合多元回归方法,建立压力波动幅度和电流作用下的弓网摩擦力模型并验证模型的有效性。

## 1 实验设备及材料

### 1.1 实验设备

弓网滑动电接触摩擦力研究实验是在滑动电接触实验机(图1)上进行的,该实验机调速范围为0~350 km/h;接触压力的变化范围为0~300 N;加载的接触电流最大能达到800 A。

实验中通过LABVIEW实验平台控制压力波动幅度、压力波动频率、滑动速度、接触电流这4个参量的实验值;同时对压力波动幅度、压力波动频率、滑动速度、接触电流、摩擦系数、弓网摩擦力等参量实时在线检测,随时对实验数据进行处理并存储。实验中弓网摩擦力是通过转矩传感器测量出摩擦力矩,除以力臂获得。

### 1.2 实验材料

实验所用的是浸金属碳滑板,其成分参数见表1。接触导线材料为硬度96.2HBS、截面积120 mm<sup>2</sup>的

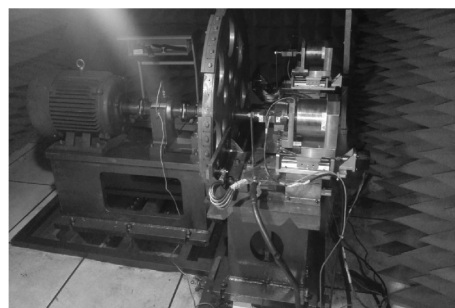


图1 滑动电接触实验机

Fig. 1 Sliding electrical contact testing machine  
纯铜导线。

表1 浸金属碳滑板成分参数

Table 1 Ingredients of immersion metal carbon

| skateboard |      |       |      | wt.% |
|------------|------|-------|------|------|
| 铜          | 锑    | 碳     | 铅    | 其他   |
| 3.91       | 0.55 | 92.95 | 0.98 | 1.61 |

## 2 实验结果的理论及计算分析

实验研究了不同工况(压力波动幅度、压力波动频率、滑动速度、接触电流)条件下的弓网滑动摩擦力的变化情况。为了减少误差,经过3次有效实验,并对相同工况条件下的这3次实验数据取算术平均值。

### 2.1 压力波动幅度对弓网摩擦力的影响

#### 2.1.1 压力波动幅度对摩擦力影响的理论分析

在压力波动频率为2 Hz,滑动速度为80 km/h,接触电流为100、150、200、250 A作用下,弓网摩擦力随压力波动幅度变化的特性曲线见图2。

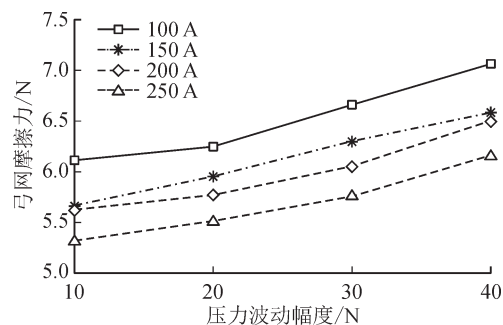


图2 弓网摩擦力随压力波动幅度变化的特性曲线

Fig. 2 Curve of the variation of pantograph friction force with pressure fluctuation amplitude

理论分析:弓网滑动电接触实际就是滑板表面粗糙峰与接触网导线间的接触。随着压力波动幅度的增加,弓网间的接触越来越不稳定,极易产生电弧,而电弧的烧蚀使得滑板表面越来越粗糙,相对运动时粗糙峰间的相互阻碍作用增强;同时当波动压力增大时,使得更多的粗糙峰同时接触,滑动过程中相互阻碍作用的粗糙峰数目增多<sup>[23]</sup>;因此,弓

网摩擦力随压力波动幅度的增加而增大。

### 2.1.2 压力波动幅度对摩擦力影响的计算分析

1)数学模型。根据图2不同压力波动幅度作用下的弓网摩擦力曲线变化规律,利用曲线估计的基本思想,文中选取了具有代表性的7组数学模型来反映曲线变化规律见表2。

表2 7组数学模型

Table 2 Seven mathematical models

| 模型名称    | 模型表达式                       |
|---------|-----------------------------|
| 一次线性函数型 | $y = b_0 + b_1 t$           |
| 二次曲线函数型 | $y = b_0 + b_1 t + b_2 t^2$ |
| 倒幂函数型   | $y = b_0 + (b_1/t)$         |
| 对数曲线型   | $y = b_0 + b_1 \ln t$       |
| 增长函数型   | $y = \exp(b_0 + b_1 t)$     |
| 幂函数曲线型  | $y = b_0 t^{b_1}$           |
| 指数曲线型   | $y = b_0 \exp(b_1 t)$       |

2)数学模型拟合指标。复相关系数R:度量复相关程度的指标。复相关系数取值范围在0~1之间,越接近1,表示相关性越强,其模型是优选模型;越接近0,表示相关性越差,其模型不符合要求。

判定系数 $R^2$ :直观判断拟合优劣的指标;该系数越接近1,模型的拟合优度越高,说明实验数据在回归拟合线附近越密集。判定系数的计算公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

式(1)中: $(y_i - \hat{y}_i)$ 为实验值与回归值的离差; $(y_i - \bar{y})$ 为实验值与平均值的离差。

显著性F检验:确认所选的数学模型中被解释变量与解释变量之间的关系是否很好地拟合了实数据。

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 / 1}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - 2)} \quad (2)$$

式(2)中, $N$ 为实验点数。

3)模型选择。结合压力波动频率为2 Hz,滑动速度为80 km/h,接触电流为100、150、200、250 A作用下,不同压力波动幅度 $((70 \pm 10)$ 、 $(70 \pm 20)$ 、 $(70 \pm 30)$ 、 $(70 \pm 40)$  N)对弓网摩擦力影响的实验数据,根据表2选定的7组数学模型(线性、二次、倒数、对数、增长、乘幂、指数),通过MATLAB做的数学模型拟合对比见表3。

从表3分析知:二次曲线函数模型为最优模型,表3中二次曲线函数模型的复相关系数:0.996 0;判定系数:0.992 0;显著性:248.290 4都是最高值,初选为二次曲线函数模型。

表3 各数学模型拟合统计表

Table 3 Statistical tables for each mathematical model

| 模型名称    | 模型表达式                       | 复相关系数R  | 判定系数 $R^2$ | 显著性F      |
|---------|-----------------------------|---------|------------|-----------|
| 一次线性函数型 | $y = b_0 + b_1 t$           | 0.979 5 | 0.959 4    | 47.298 6  |
| 二次曲线函数型 | $y = b_0 + b_1 t + b_2 t^2$ | 0.996 0 | 0.992 0    | 248.290 4 |
| 倒幂函数型   | $y = b_0 + (b_1/t)$         | 0.836 5 | 0.699 7    | 4.660 5   |
| 对数曲线型   | $y = b_0 + b_1 \ln t$       | 0.921 7 | 0.849 5    | 11.290 4  |
| 增长函数型   | $y = \exp(b_0 + b_1 t)$     | 0.993 9 | 0.987 9    | 57.268 4  |
| 幂函数曲线型  | $y = b_0 t^{b_1}$           | 0.937 2 | 0.878 4    | 12.908 9  |
| 指数曲线型   | $y = b_0 \exp(b_1 t)$       | 0.986 8 | 0.973 8    | 58.755 6  |

综合考虑,为了以后结合接触电流和滑动速度建立模型,所以在保证准确的前提下,尽量保证形式一致。最终选择为二次曲线函数模型。表达式为

$$f = a_0 + a_1 F + a_2 F^2 \quad (3)$$

## 2.2 接触电流对弓网摩擦力的影响

### 2.2.1 接触电流对弓网摩擦力影响的理论分析

在压力波动频率为2 Hz,滑动速度为80 km/h,压力波动幅度为 $(70 \pm 10)$ 、 $(70 \pm 20)$ 、 $(70 \pm 30)$ 、 $(70 \pm 40)$  N条件下,弓网摩擦力随接触电流变化的特性曲线见

图3。

理论分析:弓网摩擦力随接触电流增大而减小。主要是由于接触电流的作用下,产生较大的电阻热和电弧热,同时弓网间的机械摩擦也产生大量的机械摩擦热,因此,电阻热、电弧热和机械摩擦热相互叠加使得滑板接触表面的温度急剧增加<sup>[5-6]</sup>,使得滑板接触表面材料软化,导致接触表面的粗糙峰相互阻碍作用减小,因此,弓网摩擦力随之减少;同时,相对滑动时滑板磨损中碳屑屑残留于滑板表

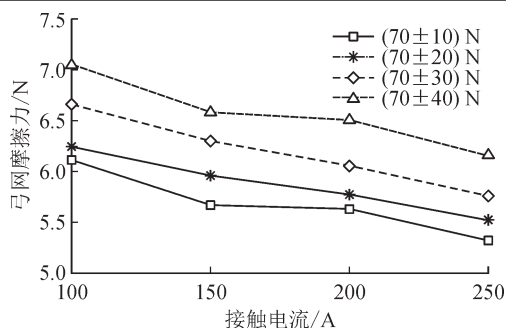


图3 弓网摩擦力随接触电流变化的特性曲线

Fig. 3 Characteristic curve of the frictional force of the pantograph with contact current

面,由于细小的碳碎屑有一定的润滑作用,使得弓网摩擦力随接触电流增大而减小。

### 2.2.2 接触电流对弓网摩擦力影响的计算分析

根据压力波动频率为2 Hz,滑动速度为80 km/h,压力波动幅度为(70±10)、(70±20)、(70±30)、(70±40) N条件下,不同接触电流(100、150、200、250 A)作用下的弓网摩擦的实验数据。同理,利用曲线估计的基本思想,按照2.1.2.3节模型选择的基本步骤,计算得出不同电流作用条件下的弓网摩擦力模型为

$$f = b_0 + b_1 I + b_2 I^2 \quad (4)$$

## 2.3 滑动速度和压力波动频率对弓网摩擦力的影响

### 2.3.1 滑动速度和压力波动频率对弓网摩擦力的影响的理论分析

在接触电流为150 A、压力波动幅度为(70±20) N、滑动速度为40、80、120、160 km/h和压力波动频率为1、2、3、4 Hz作用下的弓网摩擦力特性曲线见图4。

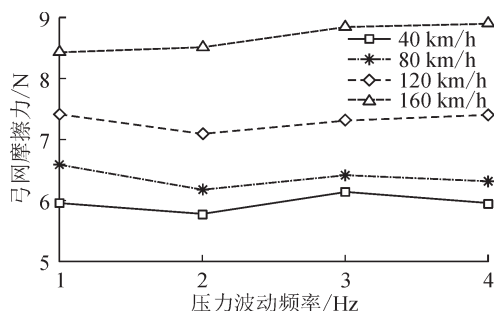


图4 弓网摩擦力随压力波动频率变化的特性曲线

Fig. 4 Characteristic curve of the frequency of bow-net friction with pressure fluctuation

理论分析:弓网摩擦力随压力波动频率的变化幅度较小,实验数据显示基本处于水平直线变化,因此,压力波动频率对弓网摩擦力的影响较少,文中忽略压力波动频率对弓网摩擦力的影响;弓网摩擦力随滑动速度的提高而增大。滑动速度的提高,使弓网间的离线率增加,滑板和接触导线的接触很不稳定,容易产生电弧;同时,速度的提高,接触导

线波动振幅也随之加大,也容易产生电弧。电弧会对滑板进行烧蚀,使滑板表面变的越来越粗糙,直接导致滑板相对运动更加不平顺,相互阻碍作用增加<sup>[24-26]</sup>,因此,滑动速度的提高引起了弓网间摩擦力的增大。

### 2.3.2 滑动速度对弓网摩擦力影响的计算分析

同理,利用曲线估计的基本思想,按照2.1.2中3)节模型选择的基本步骤,根据图4特性曲线的实验数据,比对各模型的统计指标,计算得出滑动速度对弓网摩擦力影响的计算模型为

$$f = c_0 + c_1 V + c_2 V^2 \quad (5)$$

## 3 弓网摩擦力建模

### 3.1 摩擦力多元回归模型的建立

设因变量为 $y$ 、 $k$ 个自变量分别为 $x_1, x_2, \dots, x_k$ ,描述因变量 $y$ 如何依赖于自变量 $x_1, x_2, \dots, x_k$ 的方程一般可表示为: $y = B_0 + B_1 x_1 + B_2 x_2 + \dots + B_k x_k$ 。其中: $B_0, B_1, B_2, \dots, B_k$ 是模型的参数。

以压力波动幅度 $F$ 、接触电流 $I$ 和滑动速度 $V$ 为依托建立系列多元回归模型,模型形式为

$$f = a_1 F + a_2 F^2 + b_1 I + b_2 I^2 + c_1 V + c_2 V^2 + d \quad (6)$$

当滑动速度为0,接触电流为0,压力波动幅度为0时,理论分析知:弓网滑动摩擦力也应该是0,因此,弓网摩擦力模型变为

$$f = a_1 F + a_2 F^2 + b_1 I + b_2 I^2 + c_1 V + c_2 V^2 \quad (7)$$

式(7)中: $f$ 为弓网摩擦力,N; $F$ 为压力波动幅度,(10< $F$ <40) N; $I$ 为接触电流,(0< $I$ <800) A; $V$ 为滑动速度,(0< $V$ <350) km/h; $a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d$ 相关系数。

经MATLAB计算可得出模型中各待定系数,建立弓网摩擦力模型表达式为

$$f = 0.101\ 808 F - 0.001\ 338 F^2 + 0.044\ 144 I - 0.000\ 137 I^2 + 0.137\ 16 V + 0.000\ 053 V^2 \quad (8)$$

### 3.2 弓网摩擦力模型的检验

从未参与拟合的数据中分别选取接触电流100 A、压力波动频率为2 Hz、滑动速度为120 km/h和压力波动幅度为(70±10)、(70±20)、(70±30)、(70±40) N;选取压力波动幅度为(70±20) N、压力波动频率为2 Hz、滑动速度为40 km/h和接触电流100、150、200、250 A条件下的弓网摩擦力实验数值同模型计算值统计比对分别见表4、5。

从表4、5可知:复相关系数都非常接近1,说明拟合效果好;通过查找显著性F检验临界值表,显著性水平为0.05条件下, $F(3,4) = 9.117$ ,而检验的显

表4 不同压力波动幅度对弓网摩擦力影响的实验值和模型值统计对比

Table 4 Statistical comparison of experimental and model values for the effects of different pressure fluctuation amplitudes on pantograph friction

| 压力波动<br>幅度/N | 实验<br>值/N | 模型<br>值/N | 复相关<br>系数 $R$ | 显著性<br>$F$ |
|--------------|-----------|-----------|---------------|------------|
| 70±10        | 6.482     | 6.333     | 0.965 8       | 112.475    |
| 70±20        | 6.802     | 6.950     |               |            |
| 70±30        | 7.195     | 7.299     |               |            |
| 70±40        | 7.321     | 7.381     |               |            |

表5 不同接触电流对弓网摩擦力影响的实验值和模型值统计

Table 5 The statistics of experimental and model values for the effects of different contact currents on the friction of the bow net

| 接触<br>电流/A | 实验<br>值/N | 模型<br>值/N | 复相关系数<br>$R$ | 显著性<br>$F$ |
|------------|-----------|-----------|--------------|------------|
| 100        | 5.721     | 5.779     | 0.952 5      | 242.876    |
| 150        | 5.623     | 5.674     |              |            |
| 200        | 5.431     | 5.485     |              |            |
| 250        | 4.976     | 4.612     |              |            |

著性 $F$ 值远远大于9.117,可以说明各个自变量对因变量总体上都显著,证明所建模型有效。

## 4 结论

通过滑动电接触实验机,针对弓网摩擦力进行实验研究,得出如下的结论:

1)弓网摩擦力随压力波动幅度和滑动速度的增加而增大;随接触电流的增加减小;压力波动频率对弓网摩擦力影响较小。

2)分析压力波动幅度、接触电流和滑动速度各个因素对弓网摩擦力影响的特性曲线规律,并利用曲线估计的基本思想,得出压力波动幅度、接触电流和滑动速度各自对弓网摩擦力影响的模型,其模型为二次曲线函数模型。

3)结合压力波动幅度、接触电流和滑动速度对弓网摩擦力影响的特性曲线规律和各自参量的计算模型,建立压力波动载荷和电流作用下的弓网摩擦力模型,并证明了模型的有效性。为后续弓网滑动电接触的更深入研究奠定基础。

## 参考文献:

[1] 孙立金.解析接触网高速受流动态特性之间的关联[J]. 铁道勘察,2010(4): 117-120.

SUN Lijin. Resolving the correlation between high-speed current flow dynamic characteristics of contact networks[J]. Railway Investigation and Surveying,2010(4): 117-120.

[2] 时光,陈忠华,郭凤仪.强电流滑动电接触下最佳法向载荷[J]. 电工技术学报,2014,29(01):23-30.

SHI Guang, CHEN Zhonghua, GUO Fengyi. Optimal normal load of sliding electrical contacts under high current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1):23-30.

[3] 陈忠华,唐博,时光,等.弓网多目标滑动电接触下最优压力载[J]. 电工技术学报,2015,30(17):154-160.

CHEN Zhonghua, TANG Bo, SHI Guang, et al. Optimal pressure load under multi-objective sliding electric contact in the pantograph - catenary system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(17):154-160.

[4] 任志玲,郭超,徐丽霞. QGA-SVM在弓网滑动电接触下的最优载荷研究[J]. 高压电器,2015, 51(4):133-138.

REN Zhiling, GUO Chao, XU Lixia. Application of qga - svm to load optimization for pantograph - catenary system sliding electrical contact[J]. High Voltage Apparatus,2015, 51(4): 133-138.

[5] 郭凤仪,刘帅,王智勇.弓网系统滑动电接触瞬态温度场仿真研究[J]. 电工电能新技术,2017, 36(3):29-34.

GUO Fengyi, LIU Shuai, WANG Zhiyong. Research on transient temperature field of electrical sliding contact in pantograph and catenary system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2017,36(03):29-34.

[6] 张玉燕,孙莎莎,王振春,等.高速载流电枢表面瞬态温度场仿真与测量[J]. 兵工学报,2017, 38(9):1692-1698.

ZHANG Yuyan, SUN Shasha, WANG Zhenchun, et al. Simulation and measurement of surface transient temperature field of high-speed current-carrying armature[J]. Acta Armamentarii,2017(9):1692-1698.

[7] 吴杰,高国强,魏文赋,等.弓网系统滑动电接触特性[J]. 高电压技术,2015,41(11):3635-3641.

WU Jie, GAO Guoqiang, WEI Wenfu, et al. Characterization of sliding electrical contact of pantograph-catenary system[J]. High Voltage Engineering,2015,41(11):3635-3641.

[8] 王刚,谭盛武,林生军,等.基于模糊系统的接触电阻建模方法[J]. 高电压技术,2017,43(3):940-945.

WANG Gang, TAN Shengwu, LIN Shengjun, et al. Modeling method of contact resistance based on fuzzy system[J]. High Voltage Engineering,2017,43(3):940-945.

[9] 郭凤仪,王喜利,王智勇,等.弓网电弧辐射电场噪声实验研究[J]. 电工技术学报,2015, 30(14):220-225.

GUO Fengyi, WANG Xili, WANG Zhiyong, et al. Research on radiated electric field noise of pantograph arc[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14):220-225.

[10] WANG Lipeng, ZHANG Tao, ZHANG Lei, et al. Thermo-stability, mechanical and tribological behaviors of polyimide matrix composites interpenetrated with foamed copper [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016,26(9):2336-2346.

[11] 万成,李继文,王展,等.高致密细晶W-25Cu触头材料的电接触性能[J]. 中国有色金属学报,2017, 27(3):

- 504-513.  
WAN Cheng, LI Jiwen, WANG Zhan, et al. Performances of high-density fine-grain W-25Cu electrical contact materials[J]. China Journal of nonferrous metals, 2017, 27(3): 504-513.
- [12] 武云龙, 黄 海, 付文明, 等. 弓网载流效率及其对碳滑板磨损性能影响的试验研究[J]. 表面技术, 2017, 46(6): 21-26.  
WU Yunlong, HUANG Hai, FU Wenming, et al. Experimental study on pantograph-catenary current-carrying efficiency and its influence on wear resistance of carbon strip [J]. Surface Technology, 2017, 46(6):21-26.
- [13] 章赛丹, 陈光雄, 杨红娟. 接触压力对碳滑板/铜接触线载流摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2012, 37(9): 41-45.  
ZHANG Saidan, CHEN Guangxiong, YANG Hongjuan. Effect of contact pressure on friction and wear behavior of carbon strip/copper contact wire under AC passage[J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(9):41-45.
- [14] 胡 艳, 董丙杰, 黄 海, 等. 碳滑板/接触线摩擦磨损性能[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(2):56-63.  
HU Yan, DONG Bingjie, HUANG Hai, et al. Friction and wear behavior of carbon strip/contact wire[J]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 16(2):56-63.
- [15] 章志远, 艾复俊, 何贵男. 影响滑动摩擦力的因素[J]. 科技与创新, 2015(15):108-110.  
ZHANG Zhiyuan, AI Fujun, HE Guinan. Factors affecting sliding friction[J]. Technology and Innovation, 2015(15): 108-110.
- [16] JIANG Xiaosong, WANG Naijuan, ZHU Degui. Friction and wear properties of in-situ synthesized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced aluminum composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7):2352-2358.
- [17] 陈晶晶, 王成鑫, 林 强. 基于分子动力学方法的多层石墨烯超滑失效机理分析[J]. 摩擦学学报, 2017, 37(5): 594-601.  
CHEN Jingjing, WANG Chenxin, LIN Qiang. Mechanism analysis for the breakdown of superlubricity with multilayer graphene based on molecular dynamics method[J]. Tribology, 2017, 37(5):594-601.
- [18] 孙安元, 吴亚平, 陈 坤, 等. 瞬时滑动状态下轮轨摩擦系数试验研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(2):48-52  
SUN Anyuan, WU Yaping, CHEN Kun, et al. Experimental research on wheel/rail friction coefficient under transient sliding condition[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(2): 48-52.
- [19] 南江红, 刘 更, 佟瑞庭, 等. 纳观纹理表面相关参数对滑动摩擦过程的影响[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(2): 225-230.  
NAN Jianghong, LIU Geng, DONG Ruiting, et al. The effects of nanoscale texture surface's parameters on sliding friction process[J]. Mechanical Science and Technology, 2013, 32(2):225-230.
- [20] 王亚珍, 黄 平. 纳米级随机粗糙表面微观滑动摩擦力的计算研究[J]. 物理学报, 2013, 62(10):341-346.  
WANG Yazhen, HUANG Ping. Study on micro sliding friction of randomly nanorough surface[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(10):341-346.
- [21] SYGUT P. Theoretical analysis of unit friction force working on the metal contact surface with the roll change during feedstock with non-uniform temperature distribution rolling process[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2016, 61(2):927-932.
- [22] 董国忠, 张 辉, 李 月, 等. 混合弹流润滑系统的建模与摩擦学特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(1): 107-114.  
DONG Guozhong, ZHANG Hui, LI Yue, et al. A mixed elasto-hydrodynamic lubrication model for studying tribological properties of rough surfaces[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(1):107-114.
- [23] 田 磊, 孙乐民, 赵燕霞, 等. 波动载荷对C/C复合材料/铬青铜摩擦副载流摩擦磨损性能的影响[J]. 润滑与密封, 2011, 36(11):37-40.  
TIAN Lei, SUN Lemin, ZHAO Yanxia, et al. Effects of fluctuating load on friction and wear property of C/C composite/QCr0.5 under electrical current[J]. Lubrication and Seal, 2011, 36(11):37-40.
- [24] 高宗宝, 吴广宁, 吕 玮, 等. 高速电气化铁路中的弓网电弧现象研究综述[J]. 高压电器, 2009, 45(3):104-108.  
GAO Zongbao, WU Guangning, LYU Wei, et al. Research review of arc phenomenon between pantograph and catenary in high-speed electrified railway[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3):104-108.
- [25] 胡道春, 孙乐民, 上官宝, 等. 电弧能量对浸金属碳滑板材料载流摩擦磨损性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(1):36-42.  
HU Daochun, SUN Lemin, SHANGGUAN Bao, et al. Effect of arc discharge on friction and wear properties of metal-impregnated carbon strip sliding against Cu trolley under electric current[J]. Journal of Tribology, 2009, 29(1):36-42.
- [26] 王万岗, 吴广守, 高国强, 等. 高速铁路弓网电弧试验系统[J]. 铁道学报, 2012, 34(4):22-27.  
WANG Wangang, WU Guangning, GAO Guoqiang, et al. The pantograph-catenary arc test system for high-speed railways[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(4):22-27.

陈忠华(1965—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为电机与电器、电接触理论及其应用。

杨泽斌(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电接触理论及其应用(通讯作者)。

张海洲(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电接触理论及其应用。

时光(1981—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电接触理论及其应用、非线性系统。