

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2023.06.011

# 基于 ANSYS 的荷载工况对轮轨接触阻抗的影响

苏鹏飞<sup>1</sup>, 谭丽<sup>1</sup>, 温润<sup>2</sup>

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 西北民族大学电气工程学院, 兰州 730030)

**摘要:** 高速铁路站内绝缘节烧损事故时有发生, 轮轨接触电阻是引起轮轨电弧造成绝缘节烧损的重要指标, 因此准确计算接触电阻是分析绝缘节烧损问题的重要基础, 接触电阻的大小主要取决于轮轨接触斑点的面积。对此, 通过有限元分析软件 ANSYS 计算不同荷载工况下轮轨接触面积, 分析列车轴重和偏移量对接触电阻的影响规律。结果表明, 轴重从 9 t 增加到 27 t 时, 轮轨接触电阻减小近 36.2%; 横移量增大 10 mm 时, 轮轨接触电阻减小 18.9%。轮轨接触电阻的变化随着轴重和轮轨横移量的增加呈现相同变化趋势。

**关键词:** 有限元法; 荷载工况; 接触面积; 接触电阻

中图分类号: U238; U284.25

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)06-122-08

## The influence of load condition on wheel-rail contact impedance based on ANSYS

SU Pengfei<sup>1</sup>, TAN Li<sup>1</sup>, WEN Run<sup>2</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, P. R. China; 2. School of Electrical Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730030, P. R. China)

**Abstract:** The burning accidents of insulation joints often occur in high-speed railway stations. The wheel-rail contact resistance is an important factor to cause the burning loss of insulation joints by wheel-rail arc. Therefore, accurate calculation of contact resistance is important for analyzing the burning loss of insulation joint. The level of the contact resistance mainly depends on the area of the wheel and rail contact spots. In this paper, first, the wheel-rail contact area under different working conditions was calculated by ANSYS. Then, the influence of the train axle load and offset on contact spot area was investigated. The results show that when axle load increased from 9 t to 27 t, the wheel-rail contact resistance decreased by nearly 36.2%. The wheel-rail contact resistance decreased by 18.9% when the lateral displacement increased by 10 mm. The change of wheel-rail contact resistance presented the same trend with the increase of axle load and wheel-rail contact resistance.

**Keywords:** finite element method; load condition; contact area; contact resistance

收稿日期: 2020-12-11 网络出版日期: 2021-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51967010); 兰州交通大学青年科学研究基金项目(1200060833)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51967010), and the Youth Scientific Research Fund of Lanzhou Jiaotong University(1200060833).

作者简介: 苏鹏飞(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事计算机系统方向研究, (E-mail)704807837@qq.com。

通信作者: 谭丽, 女, 副教授, 主要从事计算机联锁系统方向研究, (E-mail)2403323264@qq.com。

在高铁牵引供电系统中,钢轨作为牵引电流回流的载体,为保证站内牵引电流正常传输防止牵引回流成环造成轨道电路串码,需合理布置导通和切断点。切割绝缘节两侧牵引回流无法连续传输,造成绝缘节两端存在电位差,易发生绝缘节烧损事故。在沪宁、京沪、武广等线路上多次出现的站内绝缘节烧损现象中,切断点绝缘节烧损的几率最高,烧损程度更为严重。烧损的绝缘节无法满足相邻轨道间正常绝缘,使得轨道电路出现红光带,影响车站正常行车作业,对线路安全也有影响。

国内外学者针对高速铁路站内切断点绝缘节烧损情况进行分析研究。杨世武等<sup>[1]</sup>利用真实钢轨,模拟列车运行场景,复现绝缘节烧损现象。分析得出在列车运行经过牵引回流切断点时,轮轨接触会有短暂断开,电流通路被瞬间切断,此时会在轮轨分离点处出现电弧,从而确定是由于电弧的高温造成绝缘节的烧损。刘志明<sup>[2]</sup>通过现场真实测试研究了电弧灼伤机理,提出单端回流和双向回流两种条件下抑制电弧烧损绝缘节的方案。毕红军等<sup>[3]</sup>通过将原有的“一头断”改为两边绝缘节均为回流断点的“两头堵”方式,增加回流通路,达到降低绝缘节两端的电位差目的,尚文斌<sup>[4]</sup>将电接触理论运用到轮轨接触电阻计算中,为分析电弧烧损绝缘节问题提供新思路。

针对绝缘节烧损问题,尚文斌<sup>[4]</sup>通过建立轮对经过绝缘节时轮轨接触面积变化模型,对轮轨动态接触电阻进行分析。但在实际运行中,轮轨接触面积随着列车轴重,轮轨间横移量等因素改变存在较大变化,所以,准确分析不同荷载工况下轮轨接触面积,计算更为准确的轮轨接触电阻,提高对绝缘节两侧电位差计算精度。接触电阻主要依托轮轨宏观接触面积和轮轨实际接触面积2个因素。ANSYS有限元分析软件能灵活简便处理几何非线性问题,利用该软件建立轮轨接触模型,通过改变模型位置和载荷大小可以准确模拟计算不同荷载工况下的轮轨宏观接触面积,分析不同荷载工况下的接触电阻。

笔者利用ANSYS有限元仿真软件,选取LM<sub>A</sub>型轮踏面和60 kg·m<sup>-1</sup>钢轨形面参数建立了轮轨接触模型,分析计算不同载荷、横移量的轮轨宏观接触面积,综合电接触理论,计算出不同工况下轮轨间接触电阻,找出不同荷载工况对轮轨接触电阻的影响规律,为后续分析轮轨电弧特性、解决绝缘节烧损问题奠定基础<sup>[5-6]</sup>。

## 1 接触电阻的理论基础

电接触理论建立在接触电阻理论之上,德国学者R.Holm在20世纪50年代时对电接触理论进行了系统研究,电接触理论中最重要特征是电接触电阻。强调当电流通过2物体接触面时,只有发生真实接触的微小凸体才能为牵引电流提供泄放通路,电流经过的真实接触面积为各微小凸体接触面积总和;电流在流经接触面时,通路有效截面瞬间减小,电流线在通过有效接触斑点时收缩,此时将接触斑点收缩电流线的现象等效为接触表面存在收缩电阻。R.Holm将电流通过的真实接触斑点称作导电斑点<sup>[7]</sup>,并假设导电斑点是半径为 $\alpha$ 的圆形斑点,导电斑点总面积只是宏观接触面积中的一部分,宏观接触面积中若有 $n$ 个导电斑,则收缩电阻由单个导电斑的自收缩电阻 $R_s$ 和各导电斑之间的互收缩电阻 $R_m$ 组成

$$R_b = R_s + R_m = \frac{\rho}{2 \sum_{i=1}^n \alpha_i} + \frac{\frac{\rho}{\pi} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{\alpha_i \alpha_j}{S_{ij}} \right)}{\left( \sum_{i=1}^n \alpha_i \right)^2}, \quad (1)$$

式中: $\alpha_i$ 、 $\alpha_j$ 为不同导电斑的半径, $i \neq j$ ;  $S_{ij}$ 为导电斑之间的距离,当导电斑之间的距离远大于其自身直径时,互收缩电阻 $R_m$ 可以忽略。当两接触物体之间存在沙石、铁锈等导电性差的物质时,这些杂质同样会对电流流通造成影响,这时称轮轨间存在膜电阻 $R_f$ ,收缩电阻和膜电阻统一构成了接触电阻 $R_c$ 。

$$R_c = R_b + R_f. \quad (2)$$

由于高铁站内作业量大,列车运行时速高,使得钢轨轨面上难以长期存在沙石、铁锈等杂质,所以轮轨间出现膜电阻的情况不多见。研究只计算收缩电阻这一部分,即接触电阻仅由导电斑点产生的收缩电阻构成。通过文献[4]可知,接触电阻与接触面积和电阻率的函数关系为

$$R = \frac{0.939(S_r/S_a)^{-0.174} \rho}{2 \sqrt{\frac{S_a}{\pi}}}, \quad (3)$$

式中,  $S_a$  为有限元计算出的宏观接触面积, 由于轮踏面和钢轨轨面并不是单一曲面, 不同位置的弧度有很大区别, 所以轮轨接触斑为不规则斑点。为便于计算, 将不规则的接触斑按面积等效为圆形; 轮轨电阻率  $\rho=2.1 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ ;  $S_r$  为轮轨真实接触面积。通过该方法可计算出轮轨接触电阻大小。

德国物理学家海因里希·鲁道夫·赫兹(Heinrich Rudolf Hertz)1882年发表了关于接触力学的著名文章《关于弹性固体的接触》<sup>[6]</sup>, 在该研究中发现2个圆柱透镜间隙中的Newton光学干涉条纹呈现出椭圆形等值线特征, 学者在赫兹的研究基础之上发展了基于Hertz接触理论的轮轨接触理论, 详细描述了真实接触面积的计算方法, 为分析轮轨接触问题提供理论基础。但Holm<sup>[7]</sup>在分析接触电阻时发现, 当椭圆形接触斑的长短轴之比非常小的时候, 只要保持  $ab=r^2$ , 此时计算出的收缩电阻误差非常小, 可忽略不计。所以轮轨真实接触斑半径的计算公式可以改写为

$$\left(\frac{r}{n}\right)^3 = \frac{3\pi N(k_1+k_2)}{4(A+B)}, \quad (4)$$

式中:  $n$  为Hertz接触理论规定的系数;  $N$  为接触斑上的法向载荷;  $k_1$  为车轮的材料常数;  $k_2$  为钢轨的材料常数, 材料常数与物体材料的弹性模量和泊松比有关。  $A$ 、 $B$  为轮轨间初始间隙函数的常数, 视轮轨相接触的具体情况而定, 主要与轮轨形面参数有关。

## 2 轮轨有限元计算模型

### 2.1 基本假设

列车运行过程中, 车轮、钢轨受到很多变约束力, 且材料性能变化、车轮运动轨迹等因素也是难以捕捉, 所以导致轮轨接触问题十分复杂。为了便于计算不同荷载工况下的轮轨宏观接触面积, 选取单一车轮与钢轨进行建模, 并作出以下假设:

- 1) 车轮和钢轨采用弹塑性本构关系的材料, 取双线性各向同性强化模型;
- 2) 车轮只做竖直方向移动, 不考虑滚动速度, 并沿钢轨延伸方向和垂直方向受固定约束;
- 3) 车轮与车轴刚性连接, 在车轴中心处以集中荷载方式施加轴重载荷;
- 4) 约束钢轨底面的全部自由度和两端  $z$  方向的自由度, 模拟钢轨固接。

### 2.2 轮轨材料本构关系

在工程实际中, 很多工程材料都是在弹塑性状态下工作的, 因此在弹塑性状态下分析轮轨接触问题能更接近实际情况, 所以采用双线性各向同性强化弹塑性模型作为轮轨接触面积计算的本构关系<sup>[8-10]</sup>, 应力-应变方程如式(5)所示

$$\delta = \begin{cases} E_c \\ \delta_s + E_p \varepsilon \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $\delta$  为应力;  $\delta_s$  为初始屈服极限;  $\varepsilon$  为弹塑性应变,  $E_c$  为杨氏模量;  $E_p$  为应变强化模量。

### 2.3 参数设置

为了模拟真实的动车组轮轨接触关系, 选取高铁常用的  $\text{LM}_A$  型轮踏面的车轮以及国产  $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$  钢轨建立轮轨接触模型<sup>[11-13]</sup>。根据国标 TB/T499-2016 对机车车辆车轮轮缘踏面外形的相关规定和  $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$  型钢轨外形参数在 ANSYS 有限元分析软件中建立轮轨接触模型, 相关参数为滚动轮半径  $890 \text{ mm}$ , 钢轨轨底坡为  $1:40$ 。

由于轮轨材料参数的高度相似性, 所以在同一工况下, 车轮与钢轨的接触区域应力应变在同一数量级, 故将轮轨相互作用视为柔体-柔体, 且接触方式为面-面接触的问题。研究主要对象为钢轨, 所以在 ANSYS 建模过程中将轮踏面定义为接触面, 选用 CONTACT174 接触单元; 将钢轨轨面定义为目标面, 选用 TARGET170 目标单元。在发生接触的 2 面建立接触, 并按摩尔-库伦准则定义摩擦, 这样做可准确计算出轨面接触斑的各项参数<sup>[14-16]</sup>。在车轮中心节点处以集中荷载的形式施加不同运营工况下载荷, 模拟不同轴

重下真实状态。建模车轮与钢轨的各项材料参数如表1所示<sup>[5]</sup>。

表1 轮轨材料参数

Table 1 Material parameters of wheel and rail

参数	材料	密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比
车轮	R8T	7800	205.6	0.3
钢轨	U71Mn	7850	210.0	0.29

## 2.4 网格划分

笔者采用拥有8节点SOLID185单元定义车轮和钢轨，SOLID185单元用于构造三维固体结构模型，单元通过8个节点来定义，每个节点有3个沿着 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的平动自由度，单元具有超弹性、应力刚化、蠕变、大变形和大应变能力，模拟计算轮轨接触的各项指标参数。车轮与钢轨的材料参数不同，所以在对模型进行划分网格时，选取相应材料模型并利用ANSYS中的自由网格划分技术对车轮与钢轨进行划分，满足计算精度要求的前提下计算轮轨宏观接触面积。网格划分后的模型如图1所示。



图1 轮轨接触有限元模型

Fig. 1 Wheel and rail contact ansys model

## 3 结果分析

### 3.1 列车轴重对接触电阻的影响

为分析列车轴重对轮轨接触电阻的影响，将车轮与钢轨设置处于对中位置，即无横移量，分别选用9、12、15、18、21、24、27 t轴重在车轮有限元模型的中心节点处施加 $y$ 轴负方向载荷，模拟计算不同轴重下的轮轨宏观接触面积，利用Hertz接触理论计算不同轴重下的轮轨实际接触面积。图2给出不同轴重作用下的轮轨宏观接触斑及其应力分布，通过计算发生接触单元个数确定轮轨宏观接触面积，即表2中的 $S_a$ 。将不同轴重以及所需轮轨各项参数代入式(4)进行计算，可计算得到不同轴重下的轮轨真实接触斑半径，计算轮轨接触斑真实接触面积 $S_r$ 。

表2计算不同轴重下轮轨接触面积，当列车的轴重增大时，轮轨的接触面积就会相应增大，轴重从9 t增加到27 t时，轮轨真实接触面积增长了110%；宏观接触面积增长130%，轴重对接触斑面积的影响不可忽视。图3给出不同轴重作用下真实接触面积 $S_r$ 和宏观接触面积 $S_a$ 的变化趋势。轮轨接触面积随着轴重的增加，处于线性增长的趋势，这与现场真实情况相符。

综合Hertz接触理论计算出真实接触面积 $S_r$ 和有限元计算出的宏观接触面积 $S_a$ ，利用电接触理论中接触电阻计算方法，得出不同轴重条件下轮轨接触电阻的具体阻值。当轴重为9 t时，真实接触面积为 $46 \text{ mm}^2$ ，宏观接触面积为 $98 \text{ mm}^2$ ，代入式(3)计算轮轨接触电阻为 $R=2.09\times 10^{-5} \Omega$ 。图4显示不同轴重下轮轨接触电阻的变化，当轴重增加时，轮轨接触电阻呈减小趋势，微观上轮轨表面较高的微凸体发生了塑性形变，导致较矮微凸体也发生接触，接触斑内发生接触的微凸体数量增加，轮轨间有效导电斑点数目相应增多。接触斑收缩电流线的能力由于接触斑点增多而下降，宏观上反映出轮轨接触电阻呈下降趋势。

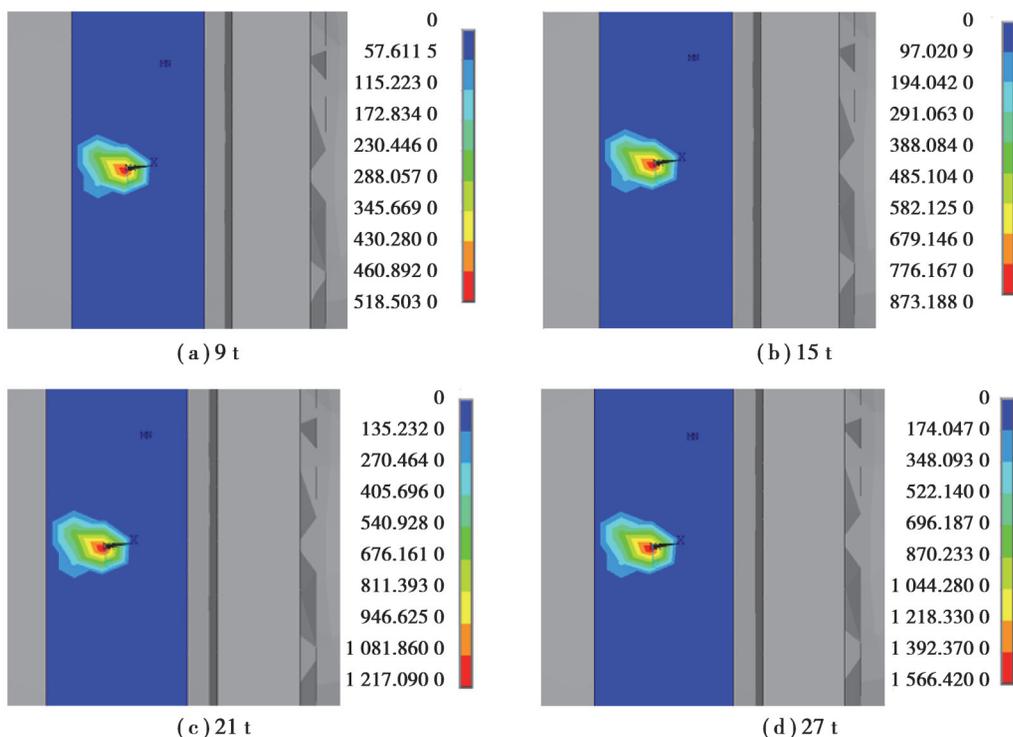


图2 轴重对接触斑的影响

Fig. 2 Influence of axle weight on contact spot

表2 不同轴重下的轮轨接触面积

Table 2 Contact area of wheel and rail under different axle loads

轴重/t	9	12	15	18	21	24	27
$S_f/\text{mm}^2$	46	57	66	74	82	90	97
$S_r/\text{mm}^2$	98	118	144	166	182	204	226

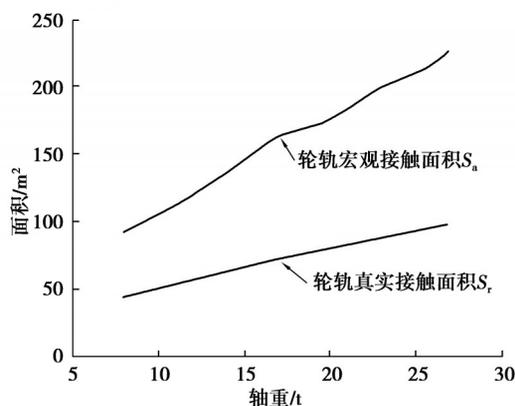


图3 接触面积变化趋势

Fig. 3 Variation trend of contact area

利用 MATLAB 中的拟合工具箱 cftool 对图 4 进行拟合, 可以发现, 接触电阻随轴重变化的函数关系为式(6)所示, 式中  $A$  为  $1.61 \times 10^{-8}$ ,  $B$  为  $-9.491 \times 10^{-7}$ ,  $C$  为  $2.751 \times 10^{-5}$ 。

$$R = AG^2 + BG + C \tag{6}$$

### 3.2 轮轨横移量对接触电阻的影响

通过调研现场实际情况, 高铁站内最易发生绝缘节烧损现象的为切割绝缘节, 该绝缘节位于站场侧

线。然而当列车从侧线发车时，必然会经过道岔弯股，由于列车受到离心力作用，车轮和钢轨没有处于对中位置，即轮轨之间存在不同横移量。轮轨真实接触面积在不同横移量时没有明显变化，所以在轴重一定时，轮轨真实接触面积应为定值，研究对轮轨接触模型进行多次修正，固定轴重大小，仅改变轮轨横移量来模拟计算轮轨接触面积，选取轴重为 16 t，横移量为 -5~5 mm 进行分析。图 5 为不同横移量下宏观接触斑及其应力分布，通过计算发生接触的单元个数，求得轮轨宏观接触面积  $S_a$  (见表 3)。

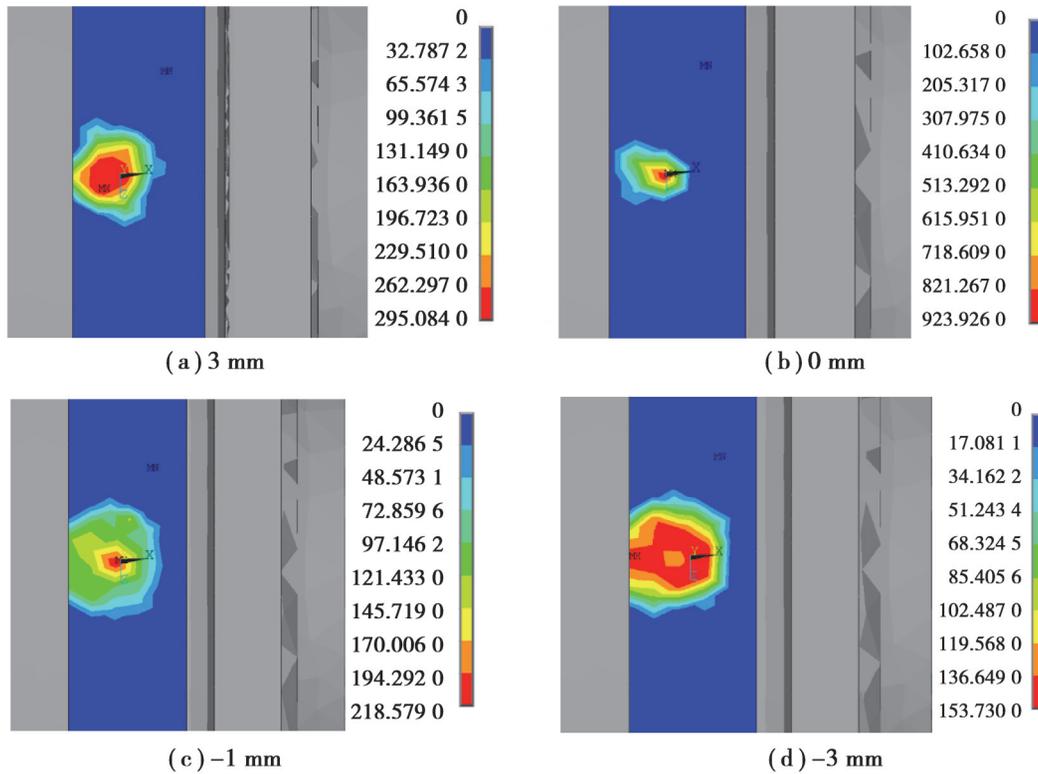


图 5 横移量对接触斑的影响

Fig. 5 Influence of lateral displacement on contact spot

从有限元分析结果中发现，当车轮轮缘越靠近钢轨中心时，轮轨宏观接触面积越大；反之，宏观接触面积呈减小趋势，这与轮踏面外形半径以及垂直方向作用力  $N$  有关。在不同位置时，轮轨相接触的弧面角度有细微差别，所以导致宏观接触面积有较大变化。

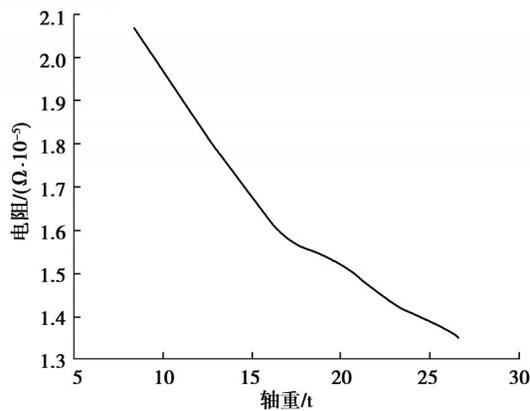


图 4 接触电阻变化趋势

Fig. 4 Variation trend of contact resistance

表3 不同横移量下的轮轨宏观接触面积

Table 3 Macroscopic contact area of wheel and rail under different lateral displacement

横移量/mm	5	4	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5
$S_a/\text{mm}^2$	178	172	165	163	162	160	155	149	134	117

将不同横移量下轮轨宏观接触面积  $S_a$  以及真实接触面积  $S_r$  代入式(3), 即可计算得出不同横移量下轮轨接触电阻阻值。图6表示了接触电阻随横移量变化的关系。

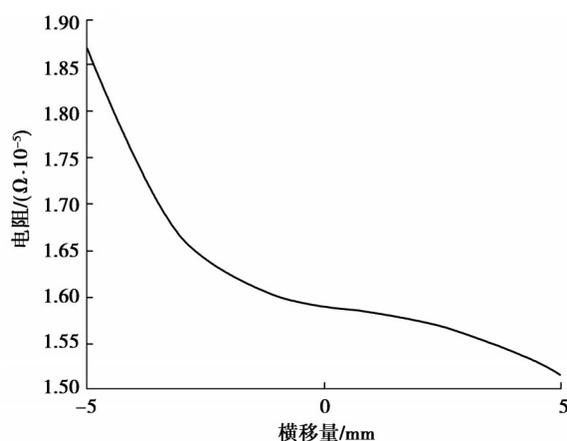


图6 不同横移量下接触电阻值

Fig. 6 Contact resistance values under different lateral displacement

利用 MATLAB 中的拟合工具箱 cftool 对图4进行拟合, 可以发现, 接触电阻随轴重变化的函数关系为式(7)所示, 式中  $P_1$  为  $9.968 \times 10^{-10}$ ,  $P_2$  为  $-1.147 \times 10^{-8}$ ,  $P_3$  为  $1.671 \times 10^{-8}$ ,  $P_4$  为  $-6.794 \times 10^{-8}$ ,  $P_5$  为  $1.589 \times 10^{-5}$ 。

$$R = p_1 x^4 + p_2 x^3 + p_3 x^2 + p_4 x + p_5 \quad (7)$$

综上所述, 列车载荷和轮轨间横移量对轮轨接触电阻有明显影响, 轮轨接触斑宏观接触面积最大为  $226 \text{ mm}^2$ , 而中国高铁站内所用的绝缘节大都为胶粘绝缘节, 宽度为  $6 \sim 10 \text{ mm}$ , 所以在列车通过绝缘节时, 接触斑会出现在绝缘节上, 绝缘节两侧均无该轮对的牵引电流泄流, 但列车运行方向后方钢轨轨面由于存在接触电阻, 轨面产生较高电位, 该电压不会瞬间消失, 将会导致轮对经过绝缘节处时钢轨轨头与轮踏面之间产生电弧。

## 4 结论

在分析轮轨电弧烧损绝缘节问题时, 准确计算轮轨接触电阻是分析轮轨电弧特性的基础。荷载工况对轮轨接触电阻有较大影响, 通过 ANSYS 建立轮轨接触模型, 分析计算不同工况下轮轨宏观接触面积, 综合电接触理论实现轮轨接触电阻计算, 可较好分析荷载工况对接触电阻的影响规律。

以 LMA 型轮踏面的车轮以及国产  $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$  钢轨进行分析计算, 结果表明: 当列车轴重增加  $18 \text{ t}$  时, 轮轨接触电阻减小近  $36.2\%$ ; 横移量减小  $10 \text{ mm}$  的过程中, 轮轨接触电阻减小近  $18.9\%$ , 列车轴重和轮轨横移量对轮轨接触电阻有明显影响, 给出接触电阻随列车轴重或轮轨横移量变化的函数关系表达式, 为进一步分析轮轨电压奠定基础。

## 参考文献

- [1] 杨世武, 姜锡义, 王星晖, 等. 高速铁路站内绝缘节和钢轨烧损模拟测试及研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(10):82-88.  
Yang S W, Jiang X Y, Wang X H, et al. Study and simulation tests of burning damage to insulation joints and rails in high-speed railway stations[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(10):82-88.(in Chinese)
- [2] 刘志明. 京沪高铁电弧灼伤钢轨和绝缘节问题的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.  
Liu Z M. Study on the problem of arc burning rail and insulation joint of Beijing-Shanghai high-speed railway[D]. Beijing:

- Beijing Jiaotong University,2014.(in Chinese)
- [ 3 ] 毕红军,丁志东,石先明,等. 高铁站内绝缘节烧损解决方案[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(3):6-9.  
Bi H J, Ding Z D, Shi X M, et al. A solution for burning damage to insulation joints in high-speed railway stations[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(3):6-9.(in Chinese)
- [ 4 ] 尚文斌. 牵引电流回流对高速铁路站内绝缘节和钢轨烧损的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学,2018.  
Shang W B. Study on the burning loss of insulation joints and rails in high-speed railway stations caused by traction current backflow[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2018. (in Chinese)
- [ 5 ] 孙上鹏,赵会兵,陈德旺,等. 基于电接触理论的轨道电路分路电阻计算方法研究[J]. 铁道学报, 2014, 36(3): 31-36.  
Sun S P, Zhao H B, Chen D W, et al. Research on method for calculation of shunt resistances of track circuits using electrical contact theory[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(3): 31-36.(in Chinese)
- [ 6 ] Hertz H. Ueber Die Berührung fester elastischer Körper[J].Journal für Die Reine und Angewandte Mathematik, 1882: 156-171.
- [ 7 ] Holm R, Holm E. Electric contacts; theory and application[M]. Array Berlin; New York: Springer-Verlag, 1967.
- [ 8 ] 郭佳. 基于ANSYS的高速列车轮轨接触工况和材料参数研究[D]. 南昌: 华东交通大学,2017.  
Guo J. Research on wheel/rail contact condition and material parameters of high-speed train based on ANSYS[D]. Nanchang: East China Jiaotong University,2017. (in Chinese)
- [ 9 ] An T. Micro-alloying of passenger train wheel steel[C]//proceeding of the 12th international congress on wheel Set.China:sept, 1998:39-43.
- [ 10 ] Bucher F, Dmitriev A I, Ertz M, et al. Multiscale simulation of dry friction in wheel/rail contact[J]. Wear, 2006, 261(7/8): 874-884.
- [ 11 ] 王晓明,尚文斌,尚文卿. 高速铁路站内绝缘节轮轨动态接触阻抗的研究[J]. 铁道通信信号, 2017, 53(8): 10-13.  
Wang X M, Shang W B, Shang W Q. Study on dynamic contact impedance of insulated joint wheel-rail in high-speed railway station[J]. Railway Signalling & Communication, 2017, 53(8): 10-13.(in Chinese)
- [ 12 ] 崔耀林,唐逢光,杨尚霄,等. 重载铁路站场绝缘节烧损故障分析[J]. 电气化铁道, 2018, 29(6):103-106.  
Cui Y L, Tang F G, Yang S X, et al. Fault analysis of insulation joint burning in heavy-haul railway station and yard[J]. Electric Railway, 2018, 29(6):103-106.(in Chinese)
- [ 13 ] 代礼强. 浅析高铁牵引回流烧损轨道电路绝缘处理方法[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(2): 45-47.  
Dai L Q. Analysis on insulation treatment method of track circuit burned by traction reflux of high-speed rail[J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55(2): 45-47.(in Chinese)
- [ 14 ] El-sayed H M, Lotfy M, El-din Zohny H N, et al. A three dimensional finite element analysis of insulated rail joints deterioration[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 91: 201-215.
- [ 15 ] Yun H B, Lee K C, Park Y J, et al. Rail neutral temperature monitoring using non-contact photoluminescence Piezospectroscopy: a field study at high-speed rail track[J]. Construction and Building Materials, 2019, 204: 357-370.
- [ 16 ] Rathod C, Wexler D, Chandra T, et al. Microstructural characterisation of railhead damage in insulated rail joints[J]. Materials Science Forum, 2012, 706: 2937-2942.

(编辑 侯 湘)