DOI: 10.3901/JME.2019.14.104

基于有限元摩擦功计算的钢轨磨耗预测方法^{*}

张 军 刘佳欢 王雪萍 马 贺

(北京建筑大学城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室 北京 100044)

摘要: 轮轨磨耗问题影响列车运行的平稳及安全。为研究钢轨磨耗规律,基于轮轨接触的有限元计算模型,分析不同牵引或制动力及横移量等对轮轨接触的影响规律,提出有限元摩擦功计算方法,对地铁钢轨进行磨耗量及磨耗后型面预测,并探究车轮的通过次数对钢轨磨耗的影响。研究表明,根据功的物理意义,接触斑节点的摩擦功与摩擦力及相对位移直接相关;牵引或制动力及不同横移量作用下,轮轨接触斑的摩擦功均呈中部小、后部及两侧大的分布规律,这与接触斑上黏着区与蠕滑区的分布规律对应;在接触区内,钢轨的累积磨耗量沿横向呈中间高两侧低的分布规律,磨耗深度随车轮通过次数的增加近似呈正比增加;运用摩擦功计算方法预测的钢轨磨耗量与实测结果基本相符,与标准型面数据的预测结果相比,采用磨耗后型面的有限元计算结果预测的钢轨累积磨耗量,与实测型面更加接近。

关键词: 轮轨接触;有限元法;摩擦功;磨耗预测

中图分类号: U270

Wheel-rail Friction Work Calculation Method and Rail Wear Prediction Based on Finite Element Method

ZHANG Jun LIU Jiahuan WANG Xueping MA He

(Beijing Key Laboratory of Urban Rail Transport Vehicle Service Performance,
Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044)

Abstract: Wheel/rail wear problems would affect the stability and safety of a train. In order to study the wear pattern of the subway rail, a frictional work calculation method based on wheel-rail contact calculation, using finite element method (FEM), is proposed. The effects of different traction or braking force and lateral displacement on the wheel-rail contact area are analyzed to predict the wear amount and the worn profiles of the rail, and to study how the passing times of wheels effect on rail's wear. As the research results showed, the frictional work is directly related to the frictional forces and relative displacements of the contact point, which accords with the physical meaning of the work. Also, using the frictional work calculation method to predict the wear amount is basically consistent with the measured results. Under the conditions of traction or braking forces and different lateral displacements, the distribution law of the frictional work is small in the middle, large at the back and both sides, and it corresponds to the distribution law of the adhesion zone and the creep zone on the contact spot. In the contact area, the law of accumulative wear amount along the lateral direction is high in the middle and low on both sides, and the wear depth increases approximately in proportion to the passing times. Using the calculation results by FEM to predict the rail wear, the simulation results basically fit those measured datas. Furthermore, comparing with the standard model, the prediction results of the worn model are closer to the measured ones.

Key words: wheel-rail contact; FEM; frictional work; wear prediction

0 前言

随着当今铁路行业逐渐向着高速、高效的方向发展,轮轨间的磨耗问题逐渐加剧,这会降低列车运行的稳定性和安全性,恶劣情况下甚至会引发脱

轨事故^[1-2]。若可预测轮轨接触磨耗情况,采取积极有效的减磨措施,则可准确地确定车辆检修时间、车轮镟修周期、钢轨使用寿命等,这对于铁路行业的发展来说,具有重要意义^[3-5]。

KALKER^[6]基于动力学计算模型,首次提出基于轮轨接触分析的磨耗数值方法。JENDE^[7]对车轮轨迹进行跟踪模拟,获得车轮踏面更新及磨损量,通过与实测线路比较,提出一种车轮轮廓磨损的预

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51775031)。20180401 收到初稿,20181217 收到修改稿

测方法及磨耗理论, 并沿用至今。BRAGHIN 等^[8]在 Kalker 数值算法基础上提出一种与试验结果较为符合的新的理论算法。罗仁等^[9]采用 Archard 经典磨耗模型和摩擦功计算方法, 通过与实际测量磨耗车轮踏面对比, 探究出车轮磨耗分布与运行里程之间的关系。许立群等^[10]计算分析磨耗初期、中期、后期三个阶段的车轮磨耗情况, 并提出相应的减磨措施。

在磨耗预测问题上, 以往学者们大都基于车辆-轨道耦合动力学滚动接触模型, 运用磨耗功理论计算并预测轮轨型面磨耗发展情况。本文应用轮轨接触有限元仿真计算结果, 提出一种新的摩擦功计算方法, 针对北京某地铁线路, 预测车轮在钢轨上滚过一定次数后, 钢轨轨顶累积磨耗量及磨耗型面的分布情况, 为下一步减磨研究提供理论基础。

1 有限元分析

1.1 有限元模型建立

北京地铁车辆为 LM 型车轮踏面, 标准钢轨廓形为 60CN 型, 运用轮轨外形测量仪对某运行线路进行现场实测, 得到车轮与钢轨的磨耗后型面, 如图 1 所示。

图 1 轮轨型面

将标准轮轨型面及获得的实测轮轨型面分别建立有限元接触模型。轨底坡设为 1:40; 车轮弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3; 钢轨弹性模量为 205

GPa, 泊松比为 0.3^[11]。选用隐式接触算法, 轮轨间摩擦因数为 0.3; 由于轮辐外形对轮轨接触情况影响不大, 将轮辐结构简化处理; 轮轨接触区网格加密划分, 模型采用八结点线性六面体单元, 共划分为 131 941 个单元, 如图 2 所示。

图 2 轮轨接触有限元模型网格划分

图 3 为有限元模型在坐标系中的方向示意图, 其中车轴方向为横向(X 轴), 轴重方向为垂向(Y 轴), 车轮运行方向为纵轴(Z 轴)。由于地铁车辆启动和制动频繁, 牵引力和制动力对于车轮踏面及钢轨顶面的型面磨耗起主要作用。为了探究轮轨接触情况随牵引力或制动力及横移量的变化规律, 计算载荷工况如下: 轴重为 14 t; 车轮牵引力或制动力分别为 0 kN、10 kN、20 kN、30 kN; 横移量分别为 ± 10 mm、 ± 8 mm、 ± 6 mm、 ± 4 mm、 ± 2 mm 及 0 mm(对中位置), 其中车轮轮缘靠近轨距角为正横移, 轮缘远离轨距角为负横移。

图 3 坐标示意图

1.2 牵引制动对轮轨接触的影响

由文献[12]可知, 等值的牵引力和制动力对轮轨接触作用效果大小相同, 方向相反。施加牵引力或制动力后, 车轮与钢轨沿纵向产生相对滑动, 由于轮轨接触斑节点的位移量不同, 从而产生节点相对位移^[13]。将接触斑上节点相对位移 $s = 0$ mm 的节点区域定义为黏着区, $s > 0$ mm 的节点区域定义为

蠕滑区,如图4所示,其中箭头指向为车轮运行方向。不同牵引力或制动力对轮轨接触斑形状影响较小,接触斑均呈椭圆形;在牵引或制动力为0 kN时,接触斑上各节点均为黏着状态;增加牵引或制动力,接触斑后侧和两侧为蠕滑区;随着力矩的增大,黏着区面积减少,蠕滑区逐渐覆盖黏着区。

○ 蠕滑区 △ 黏着区

图4 接触斑分布图

接触斑上摩擦力及节点相对位移分布如图5、6所示,摩擦力分布呈“黏着区小,蠕滑区大”的分布规律,与相对位移分布规律一致;摩擦力在黏着区与蠕滑区交界处易出现峰值,并随牵引或制动力的增加而逐渐增大。

图5 摩擦力分布图

图6 相对位移分布图

1.3 横移量对轮轨接触的影响

研究表明,车轮横移量对轮轨接触特性有明显影响^[14]。不同横移量工况的钢轨接触斑结果如图7、8所示。

图7 标准轮轨接触不同横移量接触斑对比

图8 磨耗轮轨接触不同横移量接触斑对比

当标准轮轨型面在对中位置接触(即横移量为0)时,轮轨接触斑呈近似椭圆形,横向长约6 mm,纵向长约14 mm;当车轮横移量为正时,接触斑靠近轨距角,呈细长形;当车轮横移量为负时,接触斑面积增大,逐渐呈扁圆形。

由于磨耗后的轮轨表面不平顺,接触斑不再是规则形状。当磨耗后轮轨型面在对中位置接触时,接触斑近似呈“凸形状”分布,横向长度为10 mm,纵向长度为14 mm;当车轮横移量为正时,接触斑逐渐靠近轨距角;当车轮横移量为负时,轮轨型面呈多点接触,接触面积不连续,且随着横移量的增大,接触斑明显呈条纹形状分布。

2 基于有限元法的摩擦功计算方法

2.1 经典磨耗功公式

目前的滚动接触力学研究一致认为,车轮与钢轨表面接触的磨耗量大小与接触面间摩擦力所产生功率具有直接关系^[15-17]。国内外专家学者基于轮轨接触动力学计算模型对磨耗功进行总结,如式(1)所示^[18-20]。磨耗功为蠕滑力与蠕滑率的乘积,用以表征轮轨磨耗程度,并认为磨耗功与磨耗量呈线性关系。

$$W = F_x \xi_x + F_y \xi_y + M_z \xi_z \quad (1)$$

式中, F_x 表示纵向蠕滑力; F_y 表示横向蠕滑力; M_z 表示自旋蠕滑力矩; ξ_x 表示纵向蠕滑率; ξ_y 表示横向蠕滑率; ξ_z 表示自旋蠕滑率。

2.2 基于有限元法的摩擦功计算方法

基于有限元接触计算结果,提出一种摩擦功计算方法,即接触斑上每个接触点的摩擦功等于该接触点对应的摩擦力(即切向力)与相对位移的乘积,如式(2)及图9所示

$$W_{ij} = F_{ij} \cdot s_{ij} \quad (2)$$

式中, W_{ij} 为接触斑上任意节点的摩擦功; F_{ij} 为各节点摩擦力; s_{ij} 为接触点对的相对位移。

图9 接触斑上摩擦功示意图

2.3 牵引制动力对摩擦功的影响

根据式(2)及图5、6的摩擦力和相对位移结果,计算出不同牵引或制动力工况的摩擦功,如图10所示

(a) 10 kN

(b) 20 kN

(c) 30 kN

图10 摩擦功分布图

示。在单个接触斑上, 摩擦功较小的区域始终分布于黏着区, 并且由黏着区向蠕滑区递增, 在接触斑后部及两侧出现摩擦功峰值; 摩擦功随着牵引或制动力的增大而逐渐增大, 这表明在车辆运行时, 牵引力和制动力对车轮踏面及钢轨表面磨耗有显著影响。

2.4 接触斑上摩擦功的简化

假设车轮相对钢轨在横向距离上满足式(3)所示正态分布规律, 即轮轨在某位置接触次数最多, 并向两边递减。

$$N(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中, μ 表示正态分布函数数学期望; σ 表示标准差; x 表示轮轨接触点的横向位置坐标。

通过与实际工况对比, 发现轮轨在对中位置接触次数最多, 即 $\mu=0$, $\sigma=10$, 如图 11 所示。

图 11 单个接触斑上叠加摩擦功

车轮相对钢轨横移量为 $[-10 \text{ mm}, 10 \text{ mm}]$, 在横向位置上将不同横移量位置接触斑摩擦功按照正态分布函数叠加, 如式(4)~(6)所示

$$n_m = N(x_m, \mu, \sigma) \quad (4)$$

$$n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_m = n \quad (5)$$

$$W = K \cdot (n_1 P_1 + n_2 P_2 + \dots + n_m P_m) \quad (6)$$

式中, P_m 不同横移量对应的摩擦功矩阵, $m \in [-10, 10]$; 每个横移量对应接触次数分别为 $n_1, n_2, \dots, n_m$; n 表示磨耗总次数; W 表示累积磨耗量矩阵; K 表示磨耗系数。

假设列车在钢轨上运行时, 相同横移量的接触斑状态沿纵向不变。当车轮滚动接触钢轨顶面时, 某接触位置的钢轨接触斑可视为多个接触斑沿纵向平移形成。将接触斑上各节点摩擦功沿运行方向叠加, 即为车轮滚过一次钢轨的摩擦功总和, 如图 12 所示。

本文提出基于有限元法的摩擦功计算方法, 其优点在于根据功的物理意义, 接触节点的摩擦功与摩擦力及相对位移直接相关; 将轮轨型面在不同位

图 12 单个接触斑上叠加摩擦功

置匹配后, 建立有限元模型可计算不同接触位置的接触斑摩擦功; 通过轮轨有限元接触计算, 得到摩擦力和相对位移分布规律, 可反映轴重、随速度变化的轮轨间摩擦因数以及轮轨型面的影响, 为轮轨磨耗预测提供新的理论方法。

3 钢轨磨耗量预测

3.1 确定磨耗次数及磨耗系数

根据实际测算可知所测钢轨上通过的车轮次数 n 约为 2.7×10^8 次。

根据式(4)~(6)对磨耗后钢轨进行磨耗量预测, 利用反推法取与实测磨耗钢轨型面较为贴近的 K 值, 经比较, $K=1.3 \times 10^{-10}$ 。

3.2 运用标准型面预测磨耗量

运用标准轮轨型面在不同横移量时接触斑的叠加摩擦功, 进行钢轨磨耗预测, 如图 13 所示。与文献[21]中钢轨累积磨耗量的预测情况相近, 即中间磨耗量大, 两侧磨耗量小, 最大值为 1.8 mm 。图 14 为标准钢轨型面及实测型面与预测型面对比图。

图 13 钢轨累积磨耗量分布图

(a) 预测结果与实测结果

(b) 不同型面的轨面局部图

图 14 预测型面与实测型面对比

3.3 运用磨耗后型面预测磨耗量

运用磨耗后轮轨型面在不同横移量时接触斑的叠加摩擦功, 进行钢轨磨耗预测, 如图 15 所示, 累积磨耗量呈中间高两侧低的分布规律, 即在对中位置附近磨耗量较大, 两侧磨耗量较小, 最大磨耗量为 1.5 mm。

图 15 钢轨累计磨耗量分布图

图 16 为标准钢轨型面及实测型面与预测型面

(a) 预测结果与实测结果

(b) 不同型面的轨面局部图

图 16 预测型面与实测型面对比

对比图。与标准型面预测结果相比, 采用磨耗型轮轨型面有限元计算结果预测钢轨累积磨耗量的曲线更为平整, 所出现的波浪形更少, 与实测型面更加接近。

对车辆在钢轨上不同通过次数的钢轨累积磨耗量及磨耗型面进行预测, 如图 17、18 所示。磨耗次数越多, 钢轨累积磨耗量越大, 磨耗越深, 且近似呈正比关系, 当磨耗 5 亿次后, 钢轨累积磨耗量最大值达到 2.9 mm。

图 17 磨耗次数对钢轨累积磨耗量的影响

图 18 磨耗次数对钢轨型面分布的影响

4 结论

本文采用基于有限元法的摩擦功计算方法, 对钢轨磨耗量及磨耗型面进行了预测, 得到以下主要结论。

(1) 根据功的物理意义, 接触节点的摩擦功与摩擦力及相对位移直接相关; 应用有限元摩擦功计算方法预测的钢轨磨耗量与实测结果基本相符, 为钢轨磨耗型面预测及钢轨打磨周期提供一定的理论参考。

(2) 牵引或制动力及不同横移量作用下, 摩擦功均呈中部小, 后部及两侧大的分布规律, 这与接触斑上黏着区与蠕滑区的分布规律对应。

(3) 累积磨耗量沿横向位置呈中间高两侧低的分布规律; 磨耗深度随着车轮通过次数的增加近似呈正比增加; 相比标准型面预测结果, 采用磨耗后型面匹配的轮轨有限元计算结果, 预测的钢轨累积

磨耗量曲线更为平整, 与实测型面更加接近。

参 考 文 献

- [1] 陆文教. 地铁车轮磨耗数值仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
LU Wenjiao. Numerical simulation of wheel wear of Metro[D]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University, 2016.
- [2] 曹洪凯, 周业明, 关庆华, 等. 地铁车轮磨耗及其对轮轨匹配状态的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(11): 17-20.
CAO Hongkai, ZHOU Yeming, GUAN Qinghua, et al. Metro wheel wear and its influence on wheel-rail matching[J]. Urban Rail Transit, 2017, 20(11): 17-20.
- [3] 丁军君, 黄运华, 李芾. 地铁车辆车轮磨耗仿真研究[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(10): 73-77.
DING Junjun, HUANG Yunhua, LI Fu. Simulation research on wheel wear of metro vehicles[J]. Urban Transit Research, 2013, 16(10): 73-77.
- [4] 于春广, 陶功权. 地铁车轮磨耗测试及数值仿真[J]. 工程力学, 2016, 33(1): 201-208.
YU Chunguang, TAO Gongquan. Analysis of metro wheel wear based on field measurement and numerical simulation[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 201-208.
- [5] 徐会杰, 刘启宾, 彭华, 等. 基于轮轨接触的高速铁路钢轨磨耗量[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(3): 44-49.
XU Huijie, LIU Qibin, PENG Hua, et al. High-speed rail rail wear based on wheel-rail contact[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(3): 44-49.
- [6] KALKER J J. Simulation of the development of a railway wheel profile trough wear[J]. Wear, 1991, 150(10): 355-365.
- [7] JENDE L T. Prediction of wheel profile wear-comparisons with field measurements[J]. Wear, 2002, 253(1-2): 89-99.
- [8] BRAGHIN F, BRUNI S, RESTA F. Wear of railway wheel profiles: A comparison between experimental results and a mathematical model[J]. Vehicle System Dynamics, 2003, 37(1): 478-489.
- [9] 罗仁, 曾京, 戴焕云, 等. 高速列车车轮磨耗预测仿真[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(6): 551-558.
LUO Ren, ZENG Jing, DAI Huanyun, et al. Simulation of wheel wear prediction of high speed train[J]. Tribology, 2009, 29(6): 551-558.
- [10] 许立群, 贾日海, 李瑞玉, 等. 提速客车车轮磨耗的原因与预防措施[J]. 铁道车辆, 2000, 38(12): 40-41.
XU Liqun, JIA Rihai, LI Ruiyu, et al. Causes to wheel wear on speed increased passenger cars and prevention measures[J]. Railway Vehicles, 2000, 38(12): 40-41.
- [11] 孙树磊, 丁军君, 李芾, 等. 地铁车辆轮轨法向接触问题研究[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(8): 39-43.
SUN Shulei, DING Junjun, LI Fu, et al. Research on the normal contact problem of metro wheels and rails[J]. Urban Rail Transit Study, 2013, 16(8): 39-43.
- [12] 张军, 刘佳欢. 不同牵引制动工况下轮轨接触有限元分析[J]. 北京建筑工程学院学报, 2016, 32(3): 127-131.
ZHANG Jun, LIU Jiahuan. Finite element analysis of wheel rail contact under different traction and braking conditions[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2016, 32(3): 127-131.
- [13] 金学松, 刘启跃. 轮轨摩擦学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
JIN Xuesong, LIU Qiyue. Tribology of Wheel and Rail[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [14] 肖乾, 徐红霞, 黄碧坤, 等. 轮对横移对高速轮轨稳态滚动接触蠕滑力和蠕滑率的影响[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(4): 88-93.
XIAO Qian, XU Hongxia, HUANG Bikun, et al. Effect of wheelset lateral shift on creep force and creep rate of steady rolling contact creep in high-speed wheel-rail[J]. China Railway Science, 2014, 35(4): 88-93.
- [15] LUO R, ZENG J, WU P B, et al. Simulation and analysis of wheel out-of-roundness wear of high-speed train[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(5): 30-35.
- [16] IGNESTI M, MALVEZZI M, MARINI L, et al. Development of a wear model for the prediction of wheel and rail profile evolution in railway systems[J]. Wear, 2012, 284-285(1): 1-17.
- [17] INNOCENTI A, MARINI L, MELI E, et al. A new wear model for the analysis of wheel and rail profile evolution on complex railway networks[C]// International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. 2013: 45-70.
- [18] 林凤涛. 高速列车车轮磨耗及型面优化研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
LIN Fengtao. Research on wheel wear and profile optimization of high-speed trains[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2014.
- [19] 张俊峰. 地铁线路曲线半径和列车速度对轮轨磨耗的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(6): 99-103.
ZHANG Junfeng. Influence of curve radius and train speed of metro lines on wheel-rail wear[J]. Urban Rail Transit Study, 2014, 17(6): 99-103.
- [20] 杨柳青. CRH5 型动车组轮轨磨损及疲劳性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016.
YANG Liuqing. Research of wear and fatigue life of

wheel of CRH5[D]. Hangzhou : Zhejiang Sci-Tech University, 2016.

[21] 肖乾. 轮轨滚动接触弹性分析及疲劳损伤研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2012.

XIAO Qian. Elastoplastic analysis and fatigue damage of

wheel-rail rolling contact[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2012.

作者简介: 张军(通信作者), 男, 1972 年出生, 教授, 博士。主要研究方向为轮轨关系。

E-mail: zhangjun611@bucea.edu.cn