

地铁线路曲线段几何形位对轮轨接触状态的影响^{*}龙 静¹ 张丹萍² 叶淑琴² 李仕游¹ 王 健¹

(1. 广州地铁集团有限公司, 510330, 广州;

2. 广州瀚阳工程咨询有限公司, 510220, 广州//第一作者, 高级工程师)

摘 要 采用 Ansys 软件建立了地铁线路小半径曲线区段的轮轨接触三维有限元模型, 通过改变曲线半径、超高、轨底坡与轨距, 分析曲线的几何形位对轮轨接触状态的影响。计算结果表明: 在小半径曲线区段, 车辆轮对轮缘容易与钢轨轨距角发生挤压, 导致钢轨轨距角应力集中, 加剧磨耗发展; 随着曲线半径的增大, 最大接触等效应力有所减小; 超高设置应综合考虑曲线半径与行车速度, 充分平衡列车通过小半径曲线时产生的离心力; 随着轨底坡增大至 1/20, 轮轨配合更紧密, 接触应力显著减小; 适当加宽轨距可改善轮轨的匹配状态。

关键词 地铁线路; 曲线段; 几何形位; 轮轨关系

中图分类号 U213.2; U211.5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.09.002

Influence of Metro Line Curve Section Geometry on Wheel-rail Contact Condition

LONG Jing, ZHANG Danping, YE Shuqin, LI Shiyu, WANG Jian

Abstract Ansys software is adopted to build a metro small-radius curve section wheel-rail contact 3D finite element model. By changing curve radius, superelevation, rail cant and rail gauge, the impact of curve geometry on wheel-rail contact is analyzed. Calculation results show that, in small-radius curve section, the wheelset flange can easily press against rail gauge head, significantly concentrating the flange force on the rail gauge head and worsening wear development. As curve radius increases, the maximum contact equivalent stress reduces. The superelevation setting should comprehensively consider curve radius and vehicle running speed, fully balancing the centrifugal force induced from train passing small-radius curve. With rail cant increasing to 1/20, the wheel-rail contact is more compact, and the contact stress is substantially reduced. Properly widening rail gauge can improve the wheel-rail interaction.

Key words metro line; curve section; geometry; wheel-

rail relation

First-author's address Guangzhou Metro Group Co., Ltd., 510330, Guangzhou, China

以地铁为主的城市轨道交通(以下简称“城轨交通”)具有快捷、准点、舒适、安全等特点。随着国内城市地铁系统的迅速发展,地铁已成为市民日常出行的重要方式之一。由于线路规划和用地制约等因素,曲线区段在地铁线网中占有相当大的比重。曲线区段成为了地铁线路的薄弱环节之一。随着地铁运量日益增加,钢轨的磨耗发展尤为严峻,尤其是小半径曲线区段,外股钢轨往往因为侧面磨耗到限而频繁换轨。

近年来,不少研究表明,合理设置铁路曲线轨道几何形位可以有效改善铁路轮轨的接触状态,从而减缓曲线区段钢轨的侧磨发展。文献[1]基于迹线法对不同轨底坡下,不同轮轨型面的轮轨几何接触关系进行了研究,利用三维非赫兹滚动接触理论确定了不同轨底坡下,高速车轮与 60N 钢轨匹配时的轮轨接触应力和滚动接触疲劳因子等参数的变化规律。文献[2-3]通过非赫兹滚动接触理论和 Contact 数值程序,分析了不同轨底坡、轨距、曲线半径等轨道参数对轮轨接触行为的影响。文献[4]通过 SIMPACK 软件和车轮磨耗仿真程序,分析不同曲线半径、轨距、钢轨型面下的车轮磨耗寿命。文献[5]以列车车轮通过铁路曲线段时的轮轨接触问题为研究对象,引入切向力计算模型,研究速度、曲率半径、轴质量等因素对轮轨接触表面应力和内部应力的影响规律。文献[6]通过 SIMPACK 软件建立轮轨关系模型,分析了地铁列车的轮轨横向力、轮轨垂向力、磨耗指数在不同过超高、正常超高、欠超高下的变化规律。

^{*} 国家重点研发计划项目(2017YFB1201202)

以地铁为对象的相关研究较少,由于地铁线路曲线多、半径小、班次密集,钢轨的磨损发展尤其严峻,研究曲线区段几何形位对地铁轮轨接触行为的影响十分重要。另外,列车通过小半径曲线时,车轮轮缘与钢轨轨距角贴靠,基于弹性半空间条件的非赫兹理论不再适用,而有限元法不受弹性半空间条件限制。本文基于广州地铁某号线小半径曲线区段上股钢轨侧磨发展过快的现象,采用 Ansys 软件建立轮轨三维弹塑性有限元模型,通过改变曲线区段的几何形位,如曲线半径、超高、轨底坡和轨距等,研究轮轨接触应力的变化规律。研究结果可为地铁小半径曲线区段的几何形位设置或维修养护提供理论参考依据。

1 轮轨弹塑性三维有限元模型

1.1 材料参数

轮轨材料参数采用弹塑性线性强化材料,其应力-应变关系为:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \sigma < \sigma_s \\ \sigma_s + E_p(\varepsilon - \varepsilon_s), & \sigma \geq \sigma_s \end{cases} \quad (1)$$

式中:

E ——材料弹性模量,取为 206 GPa;

E_p ——应变强化模量,取为 26 110 MPa;

σ_s ——屈服应力,取为 624 MPa;

σ ——应力;

ε ——应变;

ε_s ——屈服点处总应变。

1.2 有限元模型

参照广州地铁某号线小半径曲线区段(半径为 300 m),设置轨距为 1 435 mm,钢轨轨底坡为 1/40,外股钢轨超高为 120 mm,建立三维弹塑性有限元模型。钢轨采用 CHN60 轨,车轮采用 LM(车辆踏面)型踏面,钢轨和车轮均采用标准廓形,轮对轴重为 13 t。车轮和钢轨均选取 SOLID45 实体单元,钢轨与车轮之间为面-面接触,接触对采用 TARGET170 和 CONTACT174 单元,钢轨为接触单元,车轮为目标单元,摩擦因数为 0.3。为保证计算精度兼顾节约计算资源,对于车轮接触点附近 10° 范围内以及钢轨接触点附近 40 mm 长度区域内进行精细网格划分,最终单元网格最小尺寸取为 2 mm 以下,非接触区域网格逐渐稀疏,计算结果精度符合弹性赫兹接触理论验证^[7]。轮轨接触有限元模型如图 1 所示。

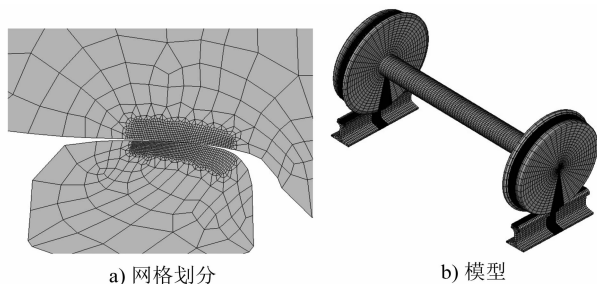


图 1 轮轨接触有限元模型

Fig. 1 Finite element model of wheel-rail contact

1.3 荷载和边界条件

对于钢轨底部采用固支约束,并约束轮对纵向位移(轮对行进方向)。列车在通过小半径曲线时,作用在车轮上的荷载除了轴重外,还需考虑离心力的作用,离心力 F 的计算公式为:

$$F = \frac{mv^2}{R} \quad (2)$$

式中:

m ——轴重,取为 13 t;

v ——列车行驶速度,取为 60 km/h;

R ——曲线半径,取为 300 m。

2 有限元分析结果

建立轮轨三维弹塑性有限元模型,设置不同的轮对横移量、曲线半径、超高、轨底坡和轨距值,并计算轮轨接触应力,分析结果论述如下。

2.1 横移量

建立在不同轮对横移量工况下的轮轨接触有限元模型,计算外股钢轨工作面的接触应力。在轮对横移量(以轮缘与钢轨贴靠方向为正方向)为 8 mm 时,轮轨接触发生轮缘贴靠,故设置轮对横移量范围 $[-8 \text{ mm}, 8 \text{ mm}]$ 。不同轮对横移量下,钢轨的最大等效接触应力变化如图 2 所示。

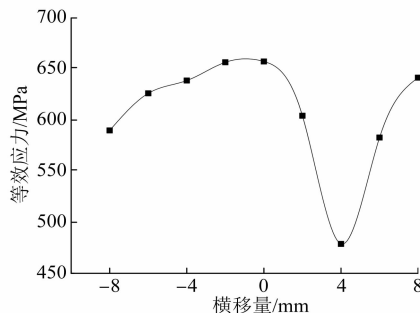


图 2 不同轮对横移量下的钢轨最大接触等效应力变化图
Fig. 2 Diagram of rail maximum contact equivalent stress variation of different wheelset lateral translation

在轮对向轨道内侧运动时,轮轨接触位置在轨顶附近,横向力较小,轨道主要承受垂向力。在轮对横移量为 4 mm 工况下,轮轨接触应力云图如图 3 所示。由图 3 可知,当轮对横移量为 4 mm 时,最大接触等效应力为 478.8 MPa。接触位置位于轨头半径 80 mm 区域,接触斑较为规则,面积达 150 mm²,型面配合相对较好。随着轮对往内横移,钢轨承受的横向力减小、垂向力增大,轨道承受大部分荷载。随着轮对往外横移,钢轨承受的横向力增大。在轮对横移量为 8 mm 工况下,轮轨接触应力云图如图 4 所示。由图 4 可知,当轮对横移量为 8 mm 时,轮缘与钢轨发生贴靠,接触位置处于轨距角附近。接触斑呈斑条状,面积仅为 65 mm²,接触应力较大,达到 641.6 MPa。这时,钢轨轨距角易发生应力集中现象,侧磨发展加速,甚至发生塑性变形,最终导致飞边。

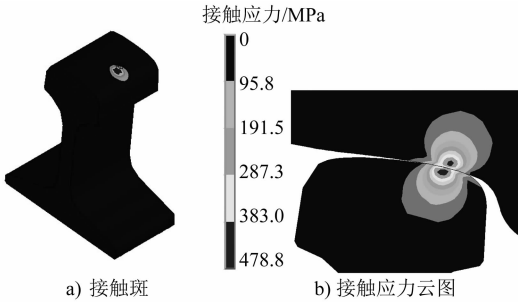


图 3 轮对横移量 4 mm 工况下的轮轨接触应力云图
Fig. 3 Wheel-rail contact stress nephogram under working condition of wheelset lateral translation of 4 mm

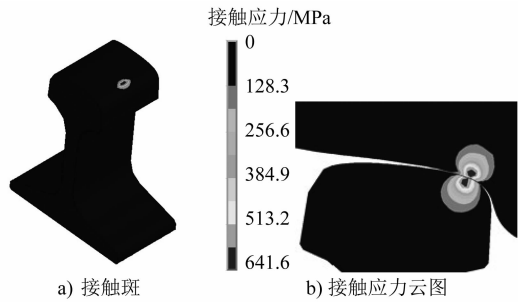


图 4 轮对横移量 8 mm 工况下的轮轨接触应力云图
Fig. 4 Wheel-rail contact stress nephogram under working condition of wheelset lateral translation of 8 mm

2.2 曲线半径

分别设置曲线半径为 300 m、400 m、500 m 与 600 m,调整轮轨接触有限元模型并进行计算。当轮轨横移量为 4 mm 时,在不同曲线半径下,外股钢轨最大接触等效应力的变化如图 5 所示。由图 5 可知,随着曲线半径的增大,最大接触等效应力逐渐

减小,且趋势逐渐减缓。由式(2)可知,列车通过曲线产生的离心力与曲线半径相关,增大半径能够导致作用于钢轨上的横向力减小,但其趋势随着曲线半径的进一步增大而趋缓。有限元模型的分析结果基本符合这一规律。由此可见,在城轨交通线路的设计阶段,应尽量增大曲线半径以减缓钢轨磨损,进而延长钢轨的服役周期。

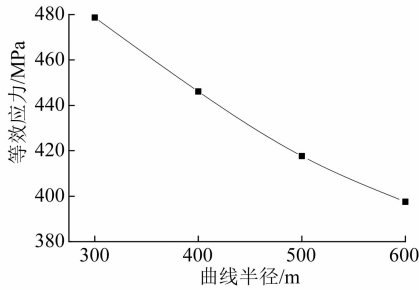


图 5 不同曲线半径下的最大接触等效应力变化图
Fig. 5 Diagram of maximum contact equivalent stress of different curve radius

2.3 超高

将计算场景的外股钢轨设置为 120 mm 超高,在轮对往外移动时,钢轨仍承受较大的横向力。根据 GB 50157—2013《地铁设计规范》,平衡超高 h 可由超高计算公式计算获得:

$$h = \frac{11.8 v^2}{R} \quad (3)$$

通过计算可知,平衡超高为 141 mm。由此可见,既有超高设置属于欠超高状态,离心力未能充分平衡,容易导致外轨承受偏载。重新设置超高为 141mm 的轮轨接触有限元计算模型,其轮轨接触应力分布如图 6 所示。由图 6 可知,在相同轮对横移量作用下,外股钢轨的最大接触等效应力明显减小。在相同工况下(轮对横移量为 4 mm),横向力减小,等效应力相应降低至 438.5 MPa。

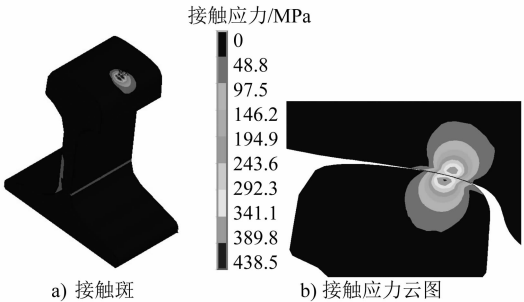


图 6 超高为 141 mm 时的轮轨接触应力分布图
Fig. 6 Nephogram of wheel-rail contact stress with superelevation of 141 mm

2.4 轨底坡

广州地铁某号线正线曲线多、半径小,且运营列车轴重较轻,行走光带常常出现过宽、甚至双光带的现象。近年来一些研究表明,在不同的轨底坡下,高铁铁路轮轨接触匹配有所变化^[2-3]。为了分析轨底坡对小半径区段轮轨接触的影响,比较 1/40 和 1/20 两种轨底坡下的轮轨接触受力状态。设置 1/20 的轨底坡,调整轮轨接触的有限元模型。当轮轨横移量为 4 mm 时,轮轨与钢轨发生贴靠现象,故横移量范围设置为[-4 mm, 4 mm]。由此可见,适当调整轨底坡可使轮轨接触点向轨顶集中,以避免光带过宽。

1/20 轨底坡的钢轨最大接触等效应力变化如图 7 所示。由图 7 可知,与 1/40 的轨底坡设置(见图 2)相比,随轮对横移变化的接触等效应力明显减小。其中,轮轨接触最佳匹配位置向轨道内侧移动,最小值为 405.2 MPa,发生在轮对横移量为 2mm 时,降低了 15.4%。当轮轨与钢轨贴靠时(轮对横移量为 4 mm),轮轨接触等效应力为 423.6 MPa,与 1/40 轨底坡设置的轮轨贴靠工况(轮对横移量为 8 mm)相比,降低了 34.0%。不同轨底坡下的轮轨接触关系对比如图 8 所示。由图 8 可知,在这两种工况下,轮轨接触位置相近,而 1/20 轨底坡下的轮轨接触更为紧密,接触应力有所减小。

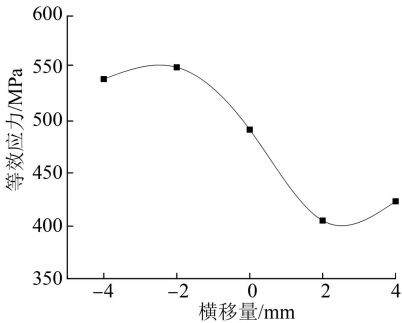


图 7 1/20 轨底坡的钢轨最大接触等效应力变化图
Fig. 7 Diagram of rail maximum contact equivalent stress with rail cant of 1/20

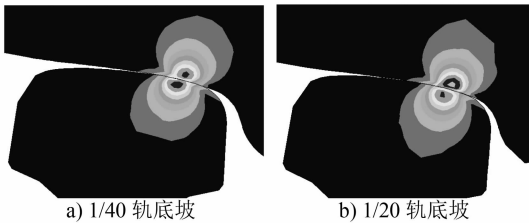


图 8 不同轨底坡下的轮轨接触关系对比
Fig. 8 Comparison of wheel-rail contact stress of different rail cants

2.5 轨距

轨距大小将会直接影响轮轨的接触位置。算例轨距沿用广州地铁某号线 300 m 半径曲线区段的实际轨距设置,取为 1 435 mm。按照《铁路技术管理规程》规定,分别设置标准轨距以及 2 mm、4 mm、6 mm 与 8 mm 轨距,调整轮轨接触有限元模型,以分析轨距对轮轨接触应力的影响。

轮轨最大接触等效应力和接触斑面积随轨距加宽的变化情况如图 9 所示,其中,算例的轮对横移量均为 8 mm。由图 9 可知,随着轨距加宽值从标准轨距增加至 8 mm,轮轨接触斑面积呈增加趋势,从标准轨距下的 65 mm² 增加到加宽 8 mm 的 150 mm²,轮轨配合状态有所改善;轮轨接触等效应力相应呈下降趋势,从标准轨距下的 641.5 MPa 下降至加宽 8 mm 的 457.8 MPa,降低了 20.7%。轮轨接触位置随着加宽值的变化如图 10 所示。在相同轮对横移量、标准轨距下,轮对容易与钢轨发生贴靠,从而产生巨大的横向力。随着轨距的增加,在相同的轮对横移量下,轮轨接触位置向轨顶靠近,接触应力分布更加均匀。由此可见,在小半径曲线区段,宜适当增大轨距以改善轮轨的接触状态。值得注意的是,轨距加宽会增大轮轨游间(见图 10 c)),过大的加宽值可能会影响列车的行车平稳性。

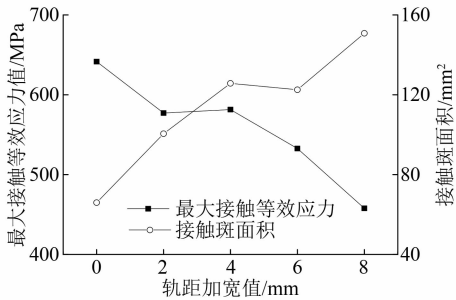


图 9 不同轨距下轮轨接触状态变化图
Fig. 9 Variation of wheel-rail contact state with different rail gauges

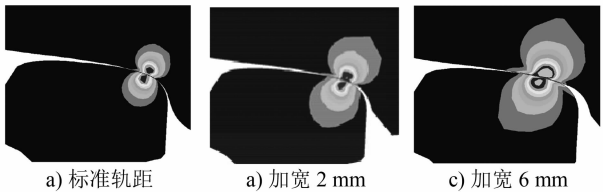


图 10 轮轨接触位置随着轨距加宽值的变化
Fig. 10 Change of wheel-rail contact position as rail gauge widens

3 结语

基于地铁小半径曲线外股钢轨磨耗发展过快的现象,本文采用 Ansys 软件建立了曲线轮轨三维弹塑性接触有限元模型,通过调整曲线几何形位分析上股钢轨接触状态的变化,获得以下结论:

1) 在小半径曲线区段,由于离心力的影响,列车轮对容易与钢轨轨距角发生挤压,导致钢轨轨距角应力集中,加剧磨耗发展。

2) 随着曲线半径的增大,最大接触等效应力减小且趋势逐渐减缓。在进行地铁线路设计时,应综合考虑运行条件,合理增加曲线半径。

3) 合理设置钢轨超高可有效平衡列车通过曲线产生的离心力,从而减小轮轨接触应力。

4) 改变轨底坡设置可改变轮轨的接触位置。当轨底坡增加到 1/20 时,轮轨接触更紧密。在不同轮对横移量下,钢轨的接触应力均大幅减小。由此可见,在曲线轨道几何形位设计或维修养护时,可适当增大轨底坡。

5) 对于小半径曲线,适当加宽轨距可改善轮轨匹配状态,并减小接触应力。线路设计时应综合考虑这些因素,轨道维修养护可考虑通过钢轨打磨手段加宽轨距。

参考文献

- [1] 钱瑶,王平,苏谦,等. 轨底坡对高速铁路轮轨接触行为影响分析[J]. 铁道工程学报,2018(3):18.
- QIAN Yao, WANG Ping, SU Qian, et al. Effect analysis of rail cant on the wheel-rail contact behavior of high-speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018(3):18.

- [2] 王文健,郭俊,刘启跃. 轨道参数对轮轨滚动接触行为的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版),2010(6):213.
- WANG Wenjian, GUO Jun, LIU Qiyue. Effects of track parameters on rolling contact behavior of wheel-rail[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010(6):213.
- [3] 王文健,郭俊,刘启跃. 轨道结构参数对轮轨滚动接触应力影响[J]. 机械工程学报,2009(5):39.
- WANG Wenjian, GUO Jun, LIU Qiyue. Effect of track structure parameters on rolling contact stresses of wheel-rail[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009(5):39.
- [4] 丁军君,李芾,周张义,等. 基于车轮磨耗寿命预测的轨道参数研究[J]. 铁道科学与工程学报,2013(4):13.
- DING Junjun, LI Fu, HOU Zhangyi, et al. Parametric study of the railway based on wheel wear lifetime prediction[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013(4):13.
- [5] 黄龙文,李正美,安琦. 铁路曲线区段轮轨接触应力计算方法[J]. 华东理工大学学报(自然科学版),2017(1):133.
- HUANG Longwen, LI Zhengmei, AN Qi. Calculation method of wheel/rail contact stress when passing through curved track [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017(1):133.
- [6] 周素霞,薛蕊. 地铁线路超高对轮轨磨耗的影响[J]. 北京交通大学学报,2015(1):101.
- ZHOU Suxia, XUE Rui. Influence of superelevation of subway line act on wheel-rail wear [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015(1):101.
- [7] 王晨阳,赵吉中,徐祥,等. 地铁曲线段轮轨接触三维有限元分析[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2018(2):36.
- WANG Chenyang, ZHAO Jizhong, XU Xiang, et al. Three-dimensional finite element analysis of wheel-rail contact for curved subway[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2018(2):36.

(收稿日期:2020-08-26)

(上接第 5 页)

- [6] FLOYD R W. Algorithm 97: shortest path[J]. Communications of the ACM, 1962(6):345.
- [7] 叶红霞. 突发事件下城市轨道交通网络客流重分布预测方法研究与应用[J]. 城市轨道交通研究,2018(8):63.
- YE Hongxia. On the prediction method of passenger flow redistribution under urban rail transit network emergency [J]. Urban Mass Transit, 2018(8):63.
- [8] 钟璧檣,楼栋,周一威. 基于轨道交通网络特点的 K 最短路算法研究[J]. 都市快轨交通,2019(1):72.
- ZHONG Biqiang, LOU Dong, ZHOU Yiwei. Shortest-path

algorithm based on the characteristics of rail transit network[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019(1):72.

- [9] 许胜博,朱志国. 基于换乘次数的城市轨道交通有效径路集生成算法研究[J]. 交通运输工程与信息学报,2017(2):83.
- XU Shengbo, ZHU Zhiguo. Study on effective path set generating algorithm for urban rail transit based on transfer times [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2017(2):83.

(收稿日期:2020-08-06)