

基于电磁作用增加轮轨黏着力的仿真研究

应之丁, 陈家敏

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 针对列车牵引和制动时黏着力不足的问题, 基于电磁作用原理提出一种安装在转向架上的新型电磁增黏装置。围绕高速旋转车轮, 设置电磁线圈, 建立电磁增黏装置基本结构模型, 在车轮与钢轨之间形成电磁场, 分析轮轨之间电磁作用力随列车速度的变化规律, 以及电磁吸力对轮轨黏着力影响。通过调整线圈高度和厚度比例及围绕车轮上下空间的布置, 强化轮轨接触附近的磁场强度和磁力线分布, 设计电磁增黏装置导磁外壳形式和气隙控制磁路的导向及作用范围, 同时考虑车辆限界及安装条件, 优化性能和结构参数。仿真结果表明, 电磁增黏装置可以明显提高各个速度阶段轮轨之间垂向压力, 增加轮轨黏着力; 同时, 通过调节两侧车轮压力, 可提高列车运行平稳性。

关键词: 轮轨关系; 轮轨增压; 电磁场分析; 仿真优化

中图分类号: U270.33

文献标志码: A

Simulation Research on Increasing Wheel-Rail Adhesion Based on Electromagnetic Effect

YING Zhiding, CHEN Jiamin

(Institute of Railway Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aimed at the problem of insufficient adhesion during train traction and braking, a novel electromagnetic thickening device mounted on the bogie is proposed based on the principle of electromagnetic action. Around the high-speed rotating wheel, the electromagnetic coil is set, the basic structural model of the electromagnetic thickening device is established, an electromagnetic field between the wheel and the rail is formed, and the variation law of the electromagnetic force between the wheel and the rail with the train speed, and the impact of electromagnetic attraction on the wheel rail adhesion are analyzed. By adjusting the coil height and thickness ratio

and the arrangement around the upper and lower spaces of the wheel, the magnetic field strength and the magnetic field line distribution near the wheel-rail contact are strengthened, and the electromagnetically-adhesive device magnetic conductive shell form and the air gap control magnetic circuit are guided and scoped, and the vehicle is considered, taking into consideration the limit and installation conditions to optimize performance and structural parameters. The simulation results show that the electromagnetic thickening device can significantly improve the vertical pressure between the wheel and rail at each speed stage, and can increase the wheel-rail adhesion. At the same time, by adjusting the pressure at both sides of the wheel, the running stability of the train can be improved.

Key words: wheel-rail interface; wheel and rail pressurization; electromagnetic field analysis; simulation and optimization

列车运行和制动过程中所需的牵引力和制动力产生于轮轨间的黏着力, 轮轨接触关系作为列车运行控制和安全保障的核心, 需要进行深入研究。

国内外专业机构对轮轨黏着问题开展了多项技术研究, 如在现有的轮轨黏着系数条件下, 提出蠕滑率控制的思路 and 具体控制曲线和对策^[1-5]; 通过撒砂控制直接增加轮轨间粗糙度以改善轮轨黏着条件, 相应的研究方向偏向于砂粒选型和喷砂流速等, 此技术因对轮轨磨损较大^[6-7]及用沙量限制, 大都用在紧急情况; 此外通过采用踏面清扫闸瓦以保持踏面干净, 同时用闸瓦中的增黏成分提高轮轨黏着系数, 但增黏效果有限^[2]; 一些文献分析了在一定范围内轴重变化对黏着的影响等^[8]。以上都是针对影响黏着效率的车轮及踏面、钢轨表面、运行速度、轴重等

收稿日期: 2019-04-11

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1201302-12B); 上海市自然科学基金(17ZR1432000)

第一作者: 应之丁(1964—), 男, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为机车车辆和城市轨道交通车辆的制动。

E-mail: yingzhiding@tongji.edu.cn

通信作者: 陈家敏(1996—), 男, 硕士生, 主要研究方向为机车车辆制动。 E-mail: chenjiamin616@126.com



开展的研究分析。

轮轨之间的黏着力等于轴重乘以黏着系数,所以本文基于电磁作用,通过增加轮轨之间垂向力,而不是增加实际轴重,来提高列车牵引和制动过程中的黏着力。本文研究围绕高速旋转车轮的电磁增黏装置,设置电磁线圈,在车轮与钢轨之间形成电磁场,将车轮作为磁化组件,通过线圈绕组产生的电磁吸力增加轮轨之间的垂向力,也称之为电磁轴重,以提高轮轨黏着力。列车运行结束时,通过反向励磁消磁。

此外,在列车过曲线时,主动控制施加在不同车轮附近的电磁增黏装置励磁电流大小,调节两侧车轮与轨道之间垂向力,改善列车在不同线路半径、不同速度条件下的运行平稳性。目前,国内外在此研究方向上尚未见到文献报道。

1 电磁增黏装置基本结构和电磁场

设计安装在转向架上的新型电磁增黏装置,核心思想是利用电磁铁对钢轨产生的吸力,通过在车轮周围布置电磁线圈,形成一个巨大的电磁铁,对轨道施加电磁吸力,从而达到增加轴重控制的效果。图1为电磁增黏装置电磁线圈部分的基本结构示意图,此外,还包括励磁电源、控制装置、悬吊结构等。

影响轮轨之间电磁吸力的因素主要包括:电磁线圈安匝数及在空间的布置,即电磁场设计;车轮与钢轨之间的磁路,含车轮、线圈、钢轨、磁轭(线圈壳体);速度、尺寸、形状、材料等技术参数对电磁场作用力的影响。因此,建立电磁增黏装置电磁场仿真模型,进行电磁场及作用力计算分析。

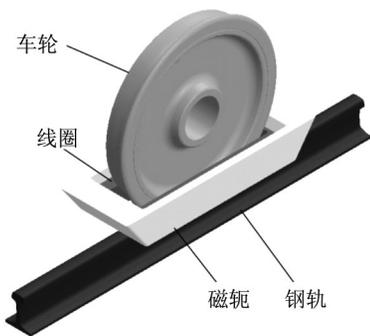


图1 电磁增黏装置电磁线圈部分结构示意图

Fig.1 Structure of electromagnetic adhesion device

因为空间磁场复杂多变且影响参数较多,计算不确定性大大提高,难以得出较好的结果。考虑轮轨垂向作用和纵向影响因素是研究目标的焦点,分

析电磁场基本形态集中在车轮圆周面和钢轨纵向上,故将电磁场在轨道横向截面方向视为理想稳定匀称的,采用轨道纵向截面方向的二维模型对电磁增黏装置进行分析,如图2所示。

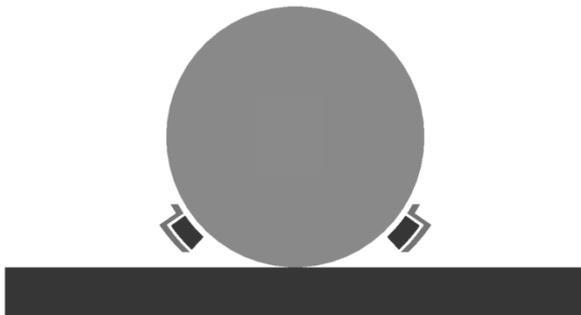


图2 电磁线圈部分二维模型

Fig.2 Two-dimensional model

2 电磁增黏装置电磁力变化规律

2.1 电磁吸力变化规律

将电磁增黏装置电磁线圈模型视为一种特殊形状的电磁铁,考虑车轮作为形状奇异的铁芯,所围绕的线圈分布复杂,线圈尺寸、形式多样等因素,所以以单束线圈为基本单元,然后分段积分计算。忽略漏磁及各部件间的空气间隙等因素,根据毕奥-萨伐尔定律^[9],计算出任意载流导线在空间任意点处的磁感应强度为

$$B' = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Idl \cdot r}{|r|^3} \quad (1)$$

式中: I 为单匝电流; dl 为导线长度元; r 为导线与任意点之间的距离; μ_0 为真空磁导率。

根据能量法计算出电磁吸力为

$$F = \frac{B\Delta S}{2\mu_0} \quad (2)$$

式中: B 为对 B' 积分后的磁感应强度; ΔS 为车轮离散模块投射到轨道的面积。

以此评估不同线圈尺寸和位置及积聚和分散布置对电磁吸力影响,形成电磁增黏装置基本结构和技术参数,进一步进行电磁场有限元仿真分析。

电磁增黏装置的磁场分布如图3所示,电磁增黏装置产生的电磁场从车轮高处分散到轮轨接触处集聚,形成大致方向类似的吸力电磁铁磁场,可以产生轮轨之间的电磁吸力,但其磁路方向和有效作用面积随装置结构参数变化有较大的不同。

在列车时速 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、线圈励磁电流 10 A 、线圈匝数 1000 、线圈距轨面高度 25 mm 时,考察电磁

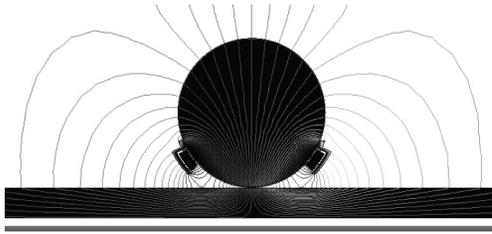


图 3 磁场分布

Fig.3 Distribution of magnetic field

场空间分布。图 4 所示为电磁吸力随时间变化曲线。

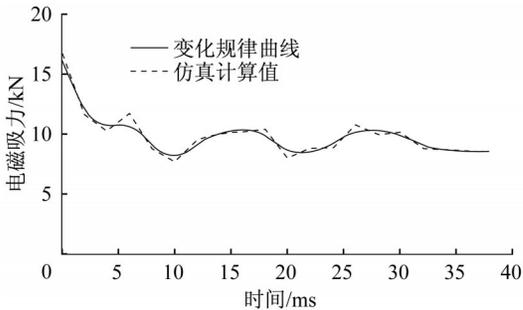


图 4 电磁吸力随时间变化曲线

Fig.4 Electromagnetic suction versus time curve

列车过曲线时,内外轨高差使车辆轮重产生差异,引起振动。由文献[10]可知,增大轴重可提升平稳性。电磁增黏装置可在不提高实际轴重、不改变车辆重心下,通过调整内外轨上车轮位置的线圈励磁电流,调整轮轨之间垂向力,提高列车运行平稳性。

2.2 速度变化对电磁吸力的影响

考虑到列车运行中存在不同的工况,随着速度的提高,尤其在高速区间,电磁场将会发生剧烈变化,进而对电磁吸力产生影响,因此对时速 300~350 km·h⁻¹的列车进行研究,分析高速运行过程中 10%(±25 km·h⁻¹)的速度扰动是否会对在恒定直流电作用下的电磁增黏作用效果产生影响。电磁力随速度的变化规律如图 5 所示。

由于轮轨一直处于接触状态,所以轮轨接触附近空间的磁场稳定,列车速度变化对电磁吸力基本无影响,电磁增黏装置能在列车高速运行中保持稳定有效的工作。

2.3 励磁线圈距轨面高度对电磁吸力的影响

保持线圈与车轮踏面距离不变,改变线圈底距轨顶距离,列车运动状态下轮轨电磁吸力与线圈高度的关系如图 6 所示。线圈高度影响线圈-踏面及线圈-轨面之间的磁阻大小,随着线圈高度升高,总

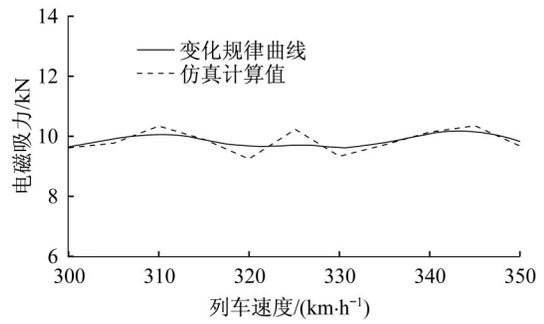


图 5 速度对电磁吸力的影响

Fig.5 Effect of speed on electromagnetic attraction

磁阻减小,电磁吸力增加。

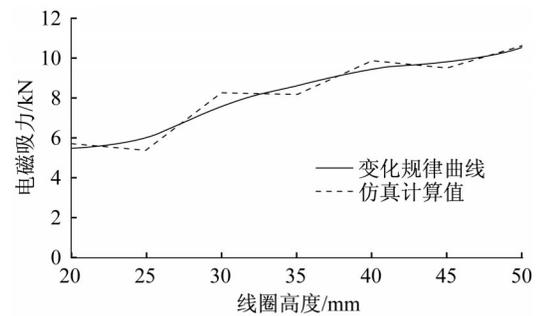


图 6 线圈高度对电磁吸力的影响

Fig.6 Effect of coil height on electromagnetic attraction

2.4 电流变化对电磁吸力的影响

在列车运行过程中,根据运行过程中所处工况的不同,需要对轮轨间电磁吸力进行有效控制。在线圈匝数一定的情况下控制装置的电流大小可以有效改变电磁增压效果。改变励磁直流电流大小,得到电磁吸力随电流变化的曲线,如图 7 所示。

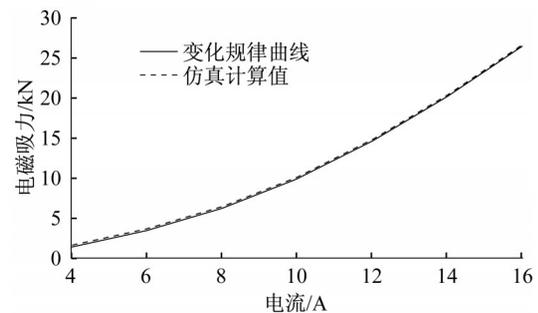


图 7 电流对电磁吸力的影响

Fig.7 Effect of current on electromagnetic attraction

轮轨垂向电磁吸力与其所对应的励磁电流呈现二次关系,即

$$y = 0.4462x^2 + 0.6149x + 0.3154 \quad (3)$$

根据励磁电流与电磁吸力之间的关系,主动调整励磁电流,从而获得足够的黏着力,调整两侧车轮压力,保持列车运行平稳性。

3 列车起动瞬间电磁力变化规律

电磁增黏装置也可以用于列车起动阶段。不同车辆起动加速度各不相同,假定起动加速度为 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,得到列车起动瞬间电磁吸力变化曲线,如图8所示。

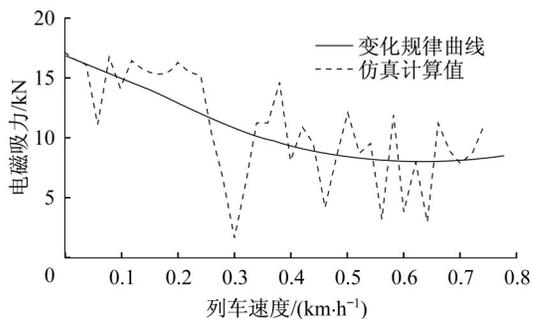


图8 电磁吸力变化曲线

Fig.8 Electromagnetic suction

列车起动瞬间,轮轨之间发生相对运动时,电磁场不稳定,电磁吸力急剧下降,然后趋于稳定。

4 结语

提出一种安装在转向架上的新型电磁增黏装置。通过在高速旋转车轮周围设置电磁线圈,使车轮与钢轨之间形成电磁场,从而产生电磁吸力以增加轮轨之间垂向力,也称之为电磁轴重,以提高轮轨黏着力。建立电磁增黏装置基本结构模型,探讨这类异型电磁场计算方法,分析轮轨之间电磁作用力随列车速度变化规律,以及电磁吸力对轮轨黏着力的影响。进一步分析结构及技术参数对电磁场的影响,确定线圈匝数及在空间的布置。

电磁增黏装置可以改善列车牵引或制动过程中由于轮轨之间黏着力不足而导致的牵引和制动力不足的问题,保障列车安全运行。在不同列车时速时电磁增黏装置可以维持相对恒定的轴重增量,通过调节两侧轮轨之间的作用力,改善列车运行平稳性。在列车起动瞬间电磁急剧下降,而后趋于稳定,保障列车具有足够的牵引力。电磁增黏装置对下一步列车提速的实现有一定的促进作用。

参考文献:

- [1] KUMAR S, RAJKUMAR B R. Laboratory simulation of wheel and rail contact related parameters [J]. Area Bulletin, 1980, 82:1.
- [2] 鲍维千. 关于机车粘着的一些概念及提高机车粘着性能的措施[J]. 内燃机车, 1999(1):8.
BAO Weiqian. Some concepts about locomotive adhesion and measures to improve the adhesion performance of locomotives [J]. Diesel locomotive, 1999(1): 8.
- [3] 申鹏, 宋建华, 王海洋, 等. 环境条件对轮轨黏着特性影响的试验研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(5):26.
SHEN Peng, SONG Jianhua, WANG Haiyang, et al. Experimental study on the influence of environmental conditions on wheel-rail adhesion characteristics [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(5):26.
- [4] 金雪岩, 刘启跃, 王夏秋. 轮轨粘着-蠕滑特性试验研究[J]. 铁道学报, 2000(1):36.
JIN Xueyan, LIU Qiyue, WANG Xiaqiu. Experimental study on wheel-rail adhesion-creep characteristics [J]. Journal of the China Railway Society, 2000(1):36.
- [5] 常崇义, 王成国, 钱立新, 等. 重载轮轨黏着特性的数值分析[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(1):86.
CHANG Chongyi, WANG Chengguo, QIAN Lixin, et al. Numerical analysis of adhesive characteristics of heavy-duty wheels and rails [J]. China Railway Science, 2012, 33(1):86.
- [6] KAORU Ohno, 初明玲. 替代撒砂改善粘着新方法的研制[J]. 国外铁道车辆, 1996(3):48.
KAORU Ohno, CHU Mingling. Development of a new method to improve adhesion by sanding [J]. Foreign Railway Vehicles, 1996 (3): 48.
- [7] 申鹏, 王文健, 张鸿斐, 等. 撒砂对轮轨粘着特性的影响[J]. 机械工程学报, 2010, 46(16):74.
SHEN Peng, WANG Wenjian, ZHANG Hongfei, et al. Effect of sanding on wheel rail adhesion characteristics [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 74.
- [8] 吴兵, 温泽峰, 王衡禹, 等. 高速轮轨黏着特性影响因素研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(3):18.
WU Bing, WEN Zefeng, WANG Hengyu, et al. Study on the influencing factors of high-speed wheel-rail adhesion characteristics [J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(3):18.
- [9] ERLICHSON, HERMAN. The experiments of biot and savart concerning the force exerted by a current on a magnetic needle [J]. American Journal of Physics, 1998, 66(5):385.
- [10] 杜建华, 陈康. 轴重及悬挂参数对大功率六轴交流传动机车运行平稳性的影响[J]. 内燃机车, 2010(10):1.
DU Jianhua, CHEN Kang. Effect of axle load and suspension parameters on the running stability of high-power six-axis AC drive locomotive [J]. Diesel Vehicles, 2010(10):1.