

基于电磁作用增强列车黏着力的研究

应之丁, 李晨欣, 陈家敏

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 针对高速列车在进一步发展过程中面临的轮轨黏着力不足的问题, 基于电磁作用原理, 提出一种电磁增压装置, 利用电磁线圈在车轮和钢轨之间产生吸力, 增加列车黏着力。首先建立电磁增压装置基本结构模型, 进行电磁吸力计算, 仿真分析研究列车速度、励磁电流、缠绕线圈形状和匝数分布、线圈距轨面高度等对电磁吸力的影响。研制了电磁试验装置对模型进行试验, 验证了电磁场仿真结果的准确性, 得到电磁吸力随速度、电流、线圈距轨面高度、线圈形状变化的规律。结果表明电磁增压装置能满足不同速度阶段的增加黏着力需求, 并在需要时可对车轮添加反向励磁电流进行消磁。研究表明通过合理调节励磁电流大小可实现对转向架各车轮电磁吸力的稳定控制, 可有效改善列车运行平稳性, 提高列车运行的安全性。

关键词: 电磁作用; 电磁吸力; 轮轨黏着力; 电磁试验

中图分类号: U270.33

文献标志码: A

Enhancing Adhesion of Train Based on Electromagnetic Action

YING Zhiding, LI Chenxin, CHEN Jiamin

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

Abstract: Aimed at the problem of insufficient adhesion between the wheel and the rail in the further development of high-speed train, an electromagnetic supercharging device was proposed based on the principle of electromagnetic action. An electromagnetic coil was used to generate the suction between the wheel and the rail to increase the adhesion of train. First, the basic structure model of electromagnetic supercharging device is established and the electromagnetic suction was calculated. Then, the effects of train speed, excitation current, winding coil circle number distribution and shape of coil, and coil height from rail surface on

electromagnetic suction were simulated and analysed. The electromagnetic testing apparatus was developed to verify the exactness of the model and obtain the variation law of electromagnetic suction with speed, current, coil height from rail surface, and coil shape. The results show that the electromagnetic supercharging device can meet the requirements of increasing adhesion and degaussing wheels at different speed stages and can add reverse excitation current to the wheel for demagnetization when necessary. The research shows that the stable control of the electromagnetic suction of each wheel of the bogie can be achieved by reasonably adjusting the excitation current, which can effectively improve the stability and safety of train operation.

Key words: electromagnetic action; electromagnetic suction; wheel rail adhesion; electromagnetic test

列车牵引力和制动力产生于轮轨之间的黏着力^[1], 在高速运行或遇恶劣天气时, 轮轨之间的黏着系数及产生的黏着力会下降很多, 列车运行的平稳性和安全性会受到严重影响。因此深入研究利用电磁作用增加列车黏着力, 对增强列车运行平稳性和下一步列车提速都具有重要意义。

国内外对列车黏着问题进行了大量深入的研究, 文献[2]利用小试验机研究了速度、粗糙度对黏着系数的影响; 文献[3-4]对干态和湿态轮轨的接触表面粗糙度和车轮的转动速度等对黏着系数特性的影响进行了分析; 文献[5]对粗糙度、温度等因素进行了试验研究, 获得了干湿和油污等情况下的轮轨黏着系数; 文献[6]利用滚动振动试验台对黏着特性进行了水介质作用时的试验与分析; 文献[7-8]研究发现当车轮直径增大时, 轮轨的接触面积也相应

收稿日期: 2021-02-03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1201302-12B); 上海市自然科学基金(17ZR1432000); “十三五”国家重点研发计划(2016YFB1200602)

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、城市轨道交通车辆制动。

E-mail: yingzhiding@tongji.edu.cn

通信作者: 李晨欣(1998—), 女, 硕士生, 主要研究方向为机车车辆制动。E-mail: lichenxin1020@163.com



论文
拓展
介绍

的增加,轮轨黏着系数增加;文献[9]采用增黏摩擦块,通过清扫踏面表面,保证适当的粗糙度,有效减少了轮轨擦伤;文献[10]采用磁轨制动,利用电磁吸力与钢轨接触摩擦将动能转化为热能,进行消耗,实现列车制动。

本文依托现有的轮轨关系及电磁作用原理,提出通过电磁作用增强列车黏着力构想,利用电流的磁效应磁化车轮从而对轨道施加电磁吸力,达到增加轴重控制的效果,以此增加列车黏着力。

1 电磁增压装置设计与电磁吸力计算

1.1 电磁增压装置结构设计

轮轨黏着力为轴重与轮轨黏着系数的乘积,可根据电磁原理设计一种电磁增压装置,即环绕车轮的电磁线圈通入相应的励磁电流,在轮轨间产生较大的垂向电磁吸力来增加轮轨之间垂向虚拟轴重,从而提高黏着力,可改善重载列车启动加速时黏着力不足以及高速列车高速区域黏着力快速下降而引发牵引和制动力不足的问题,保障列车安全运行。图1为将电磁增压装置安装在某型动车组转向架上的示意图,此外,还包括励磁电源、控制装置、悬吊等。

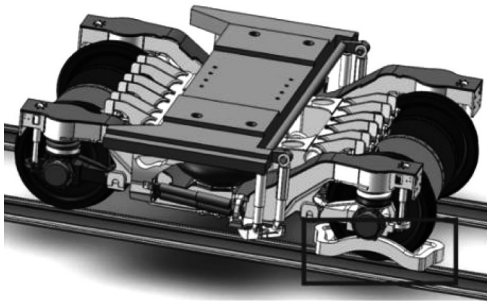


图1 电磁增压装置安装在转向架上的示意图

Fig. 1 Layout of electromagnetic supercharging device

将车轮看作一个铁芯,通过在车轮外部布设线圈,使得轮轨之间产生吸力。励磁线圈在车轮、磁轭和钢轨之间产生的磁感线回路如图2所示,通过直接磁化轮轨接触位置处的车轮踏面减小电磁场回路中的磁阻,提高电磁吸力。

1.2 电磁吸力计算

电磁增压装置产生的电磁场可以视为异形电磁铁产生,分为车轮和钢轨间的接触部分和存在空气的非接触部分,因此对两部分分别讨论。

对于存在空气的非接触部分,轮轨气隙处的磁

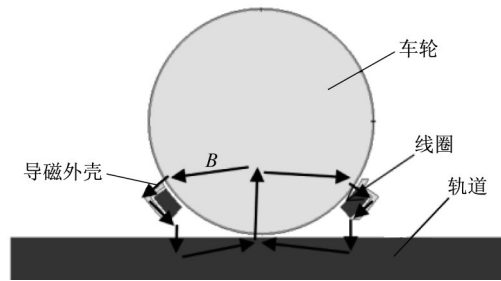


图2 电磁作用原理

Fig. 2 Schematic diagram of electromagnetic action

感应强度 B 为^[11-14]

$$B = \frac{NI}{l_0} \mu_0 \quad (1)$$

式中: I 为单匝电流; N 为线圈匝数; l_0 为螺线管长度; μ_0 为真空磁导率。考虑磁漏相对整个磁场比例分散有限,采用能量法可以推导出,电磁吸力在磁感应强度均匀分布的气隙处为

$$F_f = \frac{B^2 S'}{2\mu_0} \quad (2)$$

式中: F_f 为气隙处的电磁吸力; S' 为车轮投射到轨道的投影面积; μ_0 为真空磁导率。将式(1)代入式(2)中得到电磁吸力

$$F_f = \frac{(NI)^2 S' \mu_0}{2l_0^2} \quad (3)$$

实际磁路中存在磁漏现象^[12],因此在计算中根据设计经验选定为磁漏系数 K_f 代入,此时电磁增压装置非接触部分的电磁吸力为

$$F_f = \frac{(NI)^2 S' \mu_0}{2K_f^2 l_0^2} \quad (4)$$

由于轮轨之间存在接触斑,当间隙为零时,从理论上而言电磁吸力为无穷大,但显然与实际不符。从微观结构上看,轮轨之间气隙总是存在的,因此将该气隙设为等效气隙 l_0' 。在计算过程中,可将轮轨贴合接触面位置部分视为特殊形式的起重电磁铁来计算^[13-14]。此时电磁增压装置在轮轨接触部分的电磁吸力为

$$F_c = \frac{B^2 S_c}{2\mu_0} = \frac{\left(\frac{NI}{l_0'} \mu_0\right)^2 S_c}{2\mu_0} = \frac{(NI)^2}{2l_0'^2} S_c \mu_0 \quad (5)$$

式中: F_c 为轮轨接触部分的电磁吸力; S_c 为导线长度元轮轨接触斑面积; l_0' 为轮轨贴合处接触斑空气隙。综上,电磁增压装置总电磁吸力为

$$F = F_c + \int F_f = \frac{(NI)^2}{2l_0'^2 K_f^2} S_c \mu_0 + \int_s \left(\frac{NI}{K_f}\right)^2 \frac{S' \mu_0}{2l_0'^2} dS \quad (6)$$

2 电磁增压装置电磁场仿真研究

基于所设计的电磁增压装置中的车轮线圈结构,应用Maxwell仿真软件进行仿真研究,如图3,分析电磁作用关系对轮轨之间的黏着力影响。

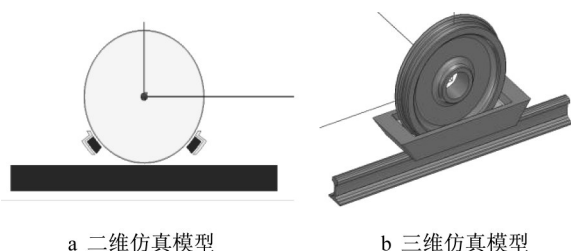


图3 电磁增压装置仿真模型

Fig. 3 Simulation model of electromagnetic supercharging device

根据仿真模型计算得到磁场分布情况如图4所示,从图4a中可以看出由电磁增黏装置产生的电磁场在轮轨接触斑处集聚,在车轮高分散,磁感线从车轮穿过磁轭进入到钢轨,再从钢轨和车轮接触点返回形成一个回路。从图4b中可以看出钢轨和车轮接触部分的磁场强度最大,车轮上半部分和远离轮轨接触部分的磁场强度较小。

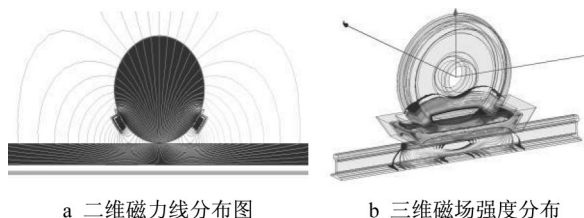


图4 电磁增压装置磁场分布

Fig. 4 Magnetic field distribution of electromagnetic supercharging device

根据式(6)可以看出电磁吸力是由速度、电流大小、线圈距轨面的高度、线圈形状等参数所决定的,为了进一步优化模型,改善电磁增压装置性能,需要对各个参数进行分析。

2.1 速度对电磁吸力的影响

由于在列车实际运行过程中速度会发生变化,当运行速度变化时,尤其运行在高速区间时,电磁场会发生畸变,进而对电磁吸力产生影响,因此需要对不同时速时电磁增压装置特性进行研究。通过仿真验证在不同列车时速下线圈励磁对轮轨增黏作用效果,当线圈匝数为1000、励磁电流为10 A时,列车速度对电磁吸力的影响如图5所示。

在Matlab软件里采用最小二乘法进行拟合,电

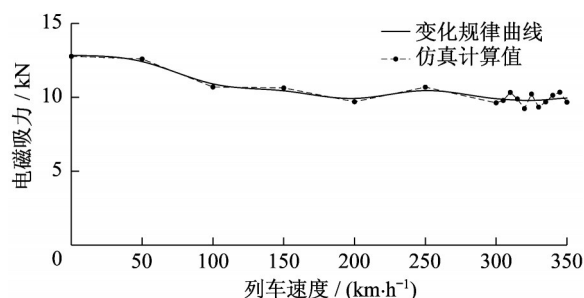


图5 列车速度对电磁吸力的影响

Fig. 5 Effect of train speed on electromagnetic suction

磁吸力与列车速度的关系为

$$F = 0.0001v^2 - 0.0238v + 13.0133 \quad (7)$$

由于轮轨之间一直保持接触,磁场稳定,由图5可见,当列车速度从零到350 km·h⁻¹变化时电磁吸力的变化较小。高速时电磁吸力较低速时电磁吸力有所降低,但降低较少,可说明电磁增压装置在列车高速运行时仍能起稳定有效的作用;列车时速为300~350 km·h⁻¹时对应的电磁平均吸力相较于列车时速为0~50 km·h⁻¹时的电磁平均吸力降低了33%,因此电磁增压装置在低速段具有更显著的效果。

2.2 励磁电流对电磁吸力的影响

在列车实际运行过程中,需要根据运行过程中速度、黏着条件等工况的不同,对电磁吸力进行实时控制。通过改变电源控制装置中的电流大小,进而实现对电磁吸力的改变,实现实时调整电磁增强轮轨黏着力的效果。电磁吸力随电流变化的曲线如图6。

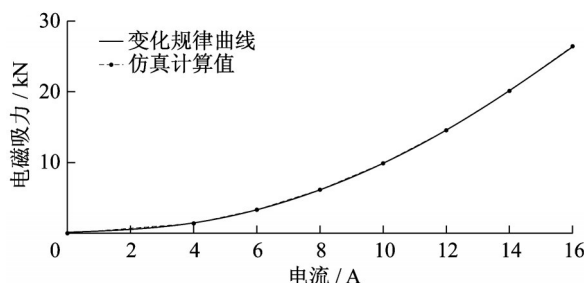


图6 电流对电磁吸力的影响

Fig. 6 Effect of current on electromagnetic suction

轮轨电磁作用装置的电磁吸力与电流的关系为

$$F = 0.0825I^2 + 0.3519I \quad (8)$$

从图6可以看出,电磁吸力随励磁电流的增加而增大,但考虑到实际情况中,电流较大时产生的热量较多,可能会对线圈产生损害,此时电磁吸力无法再提高,因此电流不宜设置过大。

2.3 线圈高度对电磁吸力的影响

考虑到铁路运行状况,避免励磁线圈受到车轮与轨道抛溅物过大的损伤,同时与车轮踏面也保持一定距离,避免发生碰撞。改变线圈距轨面高度,得到在列车运行时线圈高度对电磁吸力的影响如图7。

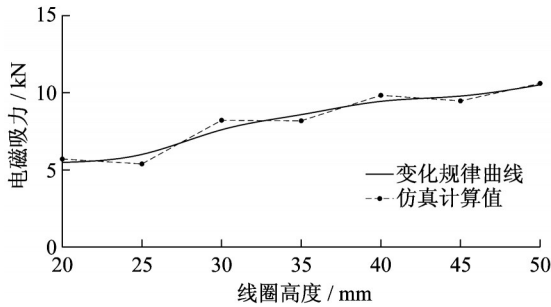


图7 线圈高度对电磁吸力的影响

Fig. 7 Effect of height of coil on electromagnetic suction

电磁吸力与线圈高度的关系可以拟合为

$$F = 0.0025h^2 + 0.3525h - 0.7760 \quad (9)$$

由图7可知,在相同的电流激励下,在一定线圈高度范围内,随着线圈位置的升高,可以获得更大的电磁吸力。因此,在一定范围内可以提高电磁线圈的高度来增加电磁吸力,但是为避免电磁场对转向架轴端仪器进行干扰,高度不宜过大。

2.4 线圈形状对电磁吸力的影响

保持线圈截面积不变,改变电磁线圈的形状与对应的磁轭,分析形状对电磁吸力的影响。如图8是圆形线圈和方形线圈所得到的电磁吸力随电流变化的曲线。对电磁吸力与电流大小关系进行分析,

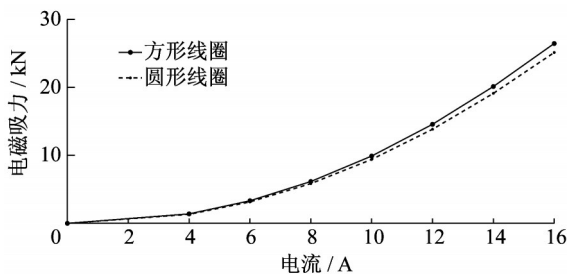


图8 线圈形状对电磁吸力的影响

Fig. 8 Effect of coil shape on electromagnetic suction

可以发现圆形线圈和方形线圈电磁吸力相差不大,方形线圈产生的力较大,从结构和工艺上考虑优先选用方形线圈。

2.5 线圈宽度对电磁吸力的影响

保持线圈截面积不变,通过改变线圈宽度,从而改

变线圈形状,改变电磁线圈底部宽度,得到在列车运行时电磁线圈宽度与轮轨电磁吸力的关系,如图9。

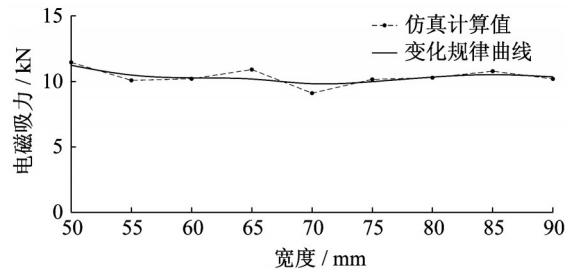


图9 线圈宽度对电磁吸力的影响

Fig. 9 Effect of width of coil on electromagnetic suction

电磁吸力与线圈宽度的关系可以拟合为

$$F = 0.0021h^2 - 0.3032h + 21.0284 \quad (10)$$

可见在保持电流不变的情况下,线圈宽度增加,电磁吸力略有减小。这是由于随着线圈宽度增加,总磁阻会增加,电磁吸力减小。因此,在一定范围内可以通过减小电磁线圈的宽度来增加电磁吸力。

2.6 电磁吸力的稳定控制

列车减速或加速时如何保持相同的电磁增黏力,需要进行深入的研究,因此利用电磁增压装置在监测到列车实际运行速度时主动调节电源控制装置中的励磁电流大小。如图10所示为保持电磁吸力20 kN不变,电源控制装置中的励磁电流随列车运行速度的控制曲线。

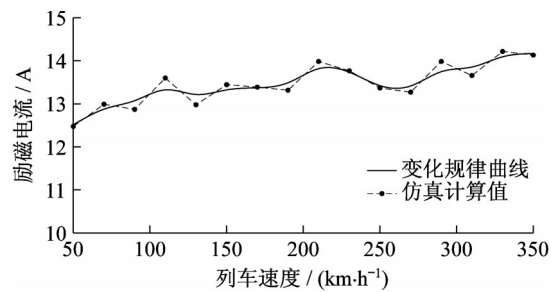


图10 励磁电流控制曲线

Fig. 10 Curve of excitation current control

由图10可知,列车不同速度时所需的电流大小不同,并非线性关系,需要提前对电流大小进行计算。在列车时速为250 km·h⁻¹时,在线圈中施加电流13.368 A(线圈匝数1 000)即可满足产生20 kN电磁吸力的需求,而在350 km·h⁻¹时,则需要提供电流14.132 A,电流大小仅仅增加5.7%,通过改变较小的电流值就可以实现电磁吸力的稳定控制。

励磁电流与列车速度的关系可以拟合为

$$F = -0.0001v^2 + 0.027v + 11.4767 \quad (11)$$

3 电磁增压装置试验

为验证上述轮轨电磁增压装置仿真结果的准确性,需要利用电磁作用试验装置对电磁增压装置进行试验研究、分析对比,建立1:10轮轨电磁作用装置试验台。见图11。

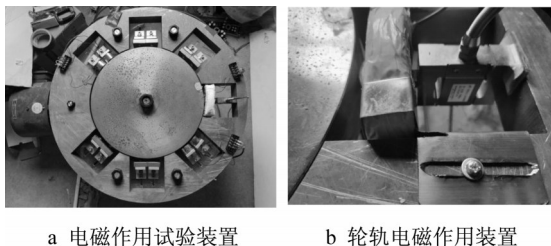


图11 电磁作用试验装置

Fig. 11 Test device for electromagnetic effects

电磁作用试验装置将电机转速、电流、转矩、频率以及励磁线圈电流、拉压力传感器等数据信息进行采集,实现对电磁试验执行系统的精确控制。通过中控对电机转速进行控制,转盘在电机的带动下进行转动。对电流进行处理,为电磁线圈提供直流电,同时在中控设置直流电流大小。电磁线圈通电产生磁场,通过霍尔传感器可以获取此时的磁场强度,利用拉压力传感器获得电磁吸力。

图12为触摸式控制面板,实时显示运行频率、运行速度、输出电流、输出转矩和传感器拉压力,可以调整频率从而控制电机转速,利用U盘可以将数据导出。

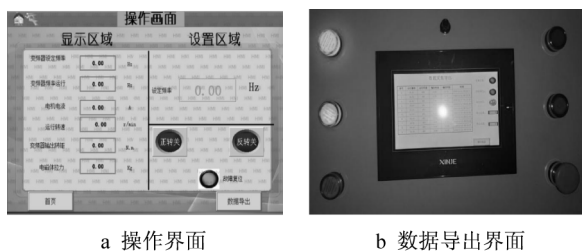


图12 操作面板

Fig. 12 Operation panel

3.1 电磁吸力随速度变化的规律

设定电流为3A,改变转盘的转速,试验测得电磁吸力随速度的变化规律如图13所示。

可以看出试验结果与仿真结果在试验速度为 $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以下时基本保持一致,速度超过 $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,电磁吸力会随着速度增加而急速降低,最后在

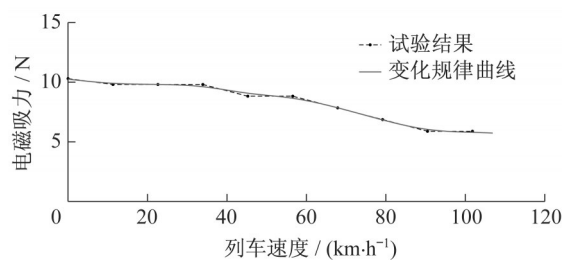


图13 电磁吸力随速度变化的规律曲线

Fig. 13 Electromagnetic suction versus velocity

$90 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右保持稳定。电磁吸力与列车速度的关系可以拟合为

$$F = -0.0001v^2 + 0.0015v + 10.3182 \quad (12)$$

3.2 电磁吸力随电流变化的规律

保持转速不变,改变励磁直流电流大小,试验测得电磁吸力随电流变化的规律曲线如图14所示。

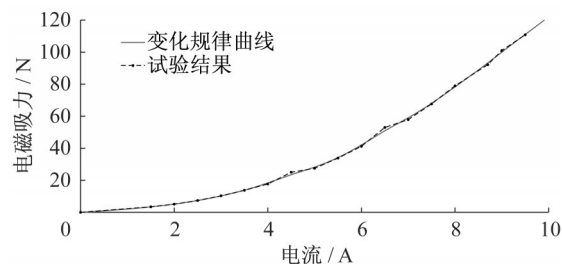


图14 电磁吸力随电流变化的规律曲线

Fig. 14 Electromagnetic suction versus current

由图14可以明显看出试验结果与仿真结果变化趋势一致,电磁增压装置的电磁吸力与电流呈二次关系,可以通过仿真结果来预测试验结果。电磁吸力与电流的关系可以拟合为

$$F = 1.3663I^2 - 1.1546I \quad (13)$$

3.3 电磁吸力随线圈高度变化的规律

保持电流和转速不变,改变线圈距轨顶距离,测得电磁吸力随线圈高度的变化规律如图15。由图15可见,在线圈高度为 $0\sim 2 \text{ mm}$ 时试验结果与仿真结果保持一致;在 $4\sim 10 \text{ mm}$ 时,电磁吸力随着线圈高度的增加而减小。电磁吸力与线圈高度的关系可以拟合为

$$F = 0.0355h^2 - 0.7418h + 10.3969 \quad (14)$$

通过对比电流、速度和线圈高度对电磁吸力的试验结果和仿真结果,发现仿真结果与试验结果较为吻合,可以较好反映电磁吸力随各个参数变化的趋势,验证了本文建立的模型及仿真结果的准确性。

另经过反向励磁电流试验发现对车轮消磁也有明显效果。

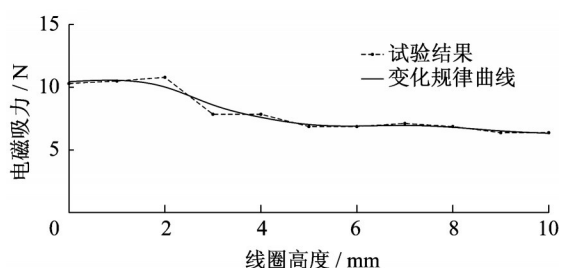


图 15 电磁吸力随线圈高度变化的规律曲线

Fig. 15 Electromagnetic suction versus height of coil

4 结语

(1) 针对列车在实际运行中黏着力不足的问题,提出一种电磁增压装置基本模式,利用电磁线圈在车轮与钢轨之间形成电磁场,产生电磁吸力以增加轮轨之间垂向力。

(2) 建立电磁增压装置基本结构模型,推导异形电磁铁产生的电磁吸力计算公式。

(3) 仿真分析轮轨之间磁场具体分布情况,研究列车速度、电流、线圈距轨面高度、线圈形状等对电磁吸力的影响,取得电磁增压装置合理的结构参数。

(4) 结合电磁作用试验装置试验得到电磁增压装置中电磁吸力随各个参数变化的规律,验证了所建立的电磁场模型及仿真结果的准确性。

基于电磁作用所提出的电磁增压装置,可以在不同列车时速时调节电磁增压装置电流大小,保持恒定的电磁吸力,可进一步应用于实际工程中,有助于加强列车运行安全性、平稳性以及改善高速列车曲线通过性能。

作者贡献声明:

应之丁:方法提出、构建架构、论文审阅与修改。

李晨欣:建模分析、论文撰写。

陈家敏:试验设计指导。

参考文献:

[1] 陈人名. 铁道车辆制动[M]. 北京:中国铁道出版社,2005.
CHEN Renming. Railway vehicle braking [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.

[2] 白井城造,大山忠夫,程恩清. 高速铁路车辆的黏着特性及其控制[J]. 电力机车技术,1980(7):30.
SHIRO Shirai, TADA O Oyama, CHENG Enqing. Adhesion characteristics and control of high-speed railway vehicles [J]. Electric Locomotive Technology, 1980(7):30.

[3] OHYAMA T. Adhesion characteristics of wheel/rail system

and its control at high speeds [J]. Quarterly Report of RTRI, 1992(5):24.

- [4] OHYAMA T. Some basic studies on the influence of surface contamination on adhesion force between wheel and rail at higher speeds [J]. QR of RTRI, 1989(6):46.
- [5] KOAN-SOK Baek, KEIJI Kyogoku, TSUNAMITSU Nakahara. An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling - sliding wheel/rail contacts under dry - wet conditions [J]. Wear, 2007(3):23.
- [6] 申鹏. 轮轨黏着特性试验研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2012.
SHEN Peng. Experimental study on wheel rail adhesion characteristics [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [7] 金雪岩,刘启跃,王夏秋. 轮轨黏着-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 China Railway Society, 2000(1):36.
- [8] 王夏秋. 机车轴重、轮径对轮轨黏着-蠕滑特性的影响 [C]//中国机械工程学会摩擦学分会、西安交通大学. 第六届全国摩擦学学术会议论文集(下册). [S.1.]:中国机械工程学会摩擦学分会, 1997:155-157.
WANG Xiaqiu. Influence of axle load and wheel diameter on wheel/rail adhesion and creepage characteristics of locomotive [C]//Tribology Branch of Chinese Mechanical Engineering Society, Xi 'an Jiaotong University. Proceedings of the 6th National Tribology Academic Conference (Vol. 2). [S.1.]: Tribology Branch of Chinese Mechanical Engineering Society, 1997:155-157.
- [9] 张芳. 合金铸铁闸瓦的改进 [J]. 国外机车车辆工艺, 2013(6):32.
ZHANG Fang. Improvement of alloy cast iron brake shoes [J]. Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology, 2013(6):32.
- [10] 刘汝让. 磁轨制动及其作用原理 [J]. 机车车辆工艺, 2001(5):1.
LIU Rurang. Magnetic rail braking and its action principle [J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2001(5):1.
- [11] 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.
- [12] 王淑红,肖旭亮,熊光煜. 直流恒力电磁铁特性 [J]. 机械工程学报, 2008(2):244.
WANG Shuhong, XIAO Xuliang, XIONG Guangyu. Characteristics of DC constant force electromagnet [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008(2):244.
- [13] 钱家骊. 电磁铁吸力公式的讨论 [J]. 电工技术杂志, 2001(1):59.
QIAN Jiakun. Discussion on the suction formula of electromagnet [J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2001(1):59.
- [14] 李开业,董恩. 电磁铁吸力的模拟计算线路 [J]. 山东工学院学报, 1960(5):40.
LI Kaikai, DONG En. Simulation calculation circuit of electromagnet suction [J]. Journal of Shandong Institute of Technology, 1960(5):40.