

# 基于环形电磁线圈的轮轨增压方案

应之丁 李 艺 桂安登

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院,201804,上海//第一作者,副教授)

**摘 要** 针对列车制动时黏着力不足的问题,基于车轮结构和电磁学基本原理提出一种固定在转向架上的环形电磁线圈方案。该方案利用电磁线圈磁化车轮,使其对轨道产生垂向吸力以增加轴重。对所提方案设置内嵌环形线圈励磁模型和外置环形线圈励磁模型,并基于 Ansoft Maxwell 电磁场分析软件分析了两种模型的磁感应强度、垂向电磁吸力等参数。计算结果表明:在内嵌环形线圈励磁模型中,轮轨的增压效果不明显,其增加轴重的调节效果不显著;而在外置环形线圈模型中,轮轨接触位置产生了更稳定的励磁作用,轮轨处可获得较大的垂向电磁吸力,车轮增压效果明显。

**关键词** 轨道交通;轮轨增压;环形电磁线圈;轮轨关系

**中图分类号** U211.5

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.01.043

## Wheel-rail Pressurization Scheme Based on Electromagnetic Ring Coil

YING Zhiding, LI Yi, GUI Andeng

**Abstract** Aiming at the problem of insufficient adhesion during train braking, based on the wheel structure and the basic principle of electromagnetism, a scheme of electromagnetic ring coil fixed on bogie is proposed. The scheme uses electromagnetic coil to magnetize the wheel, generating vertical attraction on the track to increase axle load. Embedded ring coil excitation model and external ring coil excitation model are set in the mentioned scheme, and parameters of the two models such as electromagnetic flux density and vertical electromagnetic adhesion are analyzed using Ansoft Maxwell electromagnetic field analysis software. Calculation results show that in the embedded ring coil excitation model, the pressurization effect on wheel-rail is not obvious, as well as the adjustment effect of axle load increase; while in the external ring coil model, more stable excitation has been produced on wheel-rail contact position, and the wheel-rail can obtain larger vertical electromagnetic attraction, demonstrating evident pressurization effect on the wheel.

**Key words** rail transit; wheel-rail pressurization; electromagnetic ring coil; wheel-rail relationship

**Author's address** Institute of Rail Transit, Tongji Univer-

sity, 201804, Shanghai, China

列车基础制动力由轮轨间的相互黏着关系产生,提高轮轨间的黏着作用可以有效提高列车设计时速标准。文献[1]研究发现,通过改善轮轨表面清洁、增加轴重等方法可以增大轮轨黏着系数。文献[2]利用 MMS-2A 型微型计算机控制摩擦磨损试验机进行试验,认为轮轨接触面积和黏着力随着轴重的增加而增大。文献[3]的研究表明,增加轴重负载会导致车轮黏着系数下降以及黏着力上升。

本文根据现有轮轨黏着关系及电磁学原理,提出一种轮轨电磁增压方案。该方案通过电磁线圈磁化车轮,令轮轨间产生较大的垂向电磁吸力,从而达到增加轴重的目的。本文同时设置了内嵌环形线圈励磁模型和外置环形线圈励磁模型,基于 Ansoft Maxwell 电磁场分析软件分析了两种模型的磁感应强度、垂向电磁吸力等参数。所提方案可以改善列车运行过程中由于轮轨之间黏着力不足而引发的制动力不足问题,为列车轮轨增加黏着力问题提供解决思路。

## 1 增压方案中施加电磁力的相关因素分析

基于车轮结构的增压方案示意图如图 1 所示。图 1 的基本原理为将环绕车轮布置的励磁线圈和车轮简化为一个巨大的电磁铁,励磁电流输入环形线圈产生磁场磁化车轮,同时对轨道产生电磁吸力,以实现增大轮轨间垂向作用力的目标,即通过电磁作用增加轴重来提高轮轨黏着力。但由于轮轨间

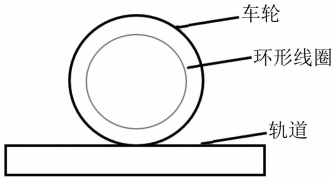


图 1 基于车轮结构的增压方案示意图

Fig. 1 Diagram of pressurization scheme based on wheel structure

的复杂接触关系、线圈尺寸及形式多样等因素的影响,需要通过建立轮轨间的电磁场模型来分析各因素对电磁场形态的影响。

轮轨接触关系示意图如图 2 所示,可采用经验公式计算电磁吸力。由于轮轨接触面不固定,选取车轮踏面中段与上部轨面接触这一位置进行分析。车辆与轨道在列车运行过程中相互贴合,可忽略轮轨接触面上的空气间隙,分段计算电磁作用吸力。在计算电磁场时,需要对给定区域中的微积分方程进行求解。由于轮轨模型几何结构的复杂性,通过数值计算方法离散求解区域<sup>[4]</sup>。

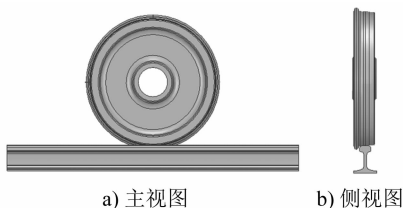


图 2 轮轨接触关系示意图

Fig. 2 Diagram of wheel-rail contact relationship

由于只计算垂向电磁作用力,所以采用纵向离散轮轨模型。利用能量法进行推导,考虑到漏磁现象,对于离散模块任一子单元的电磁力  $F_{\Delta S}$  的计算公式为<sup>[5]</sup>:

$$F_{\Delta S} = \left( \frac{B_{\Delta S}}{K_f} \right)^2 \frac{\Delta S}{2\mu_0} \quad (1)$$

式中:

$B_{\Delta S}$ ——离散单元所处位置的磁感应强度, T;

$S$ ——车轮离散模块投射到对应轨道表面的投影面积,  $m^2$ ;

$\mu_0$ ——真空磁导率;

$K_f$ ——漏磁系数。

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<sup>[6]</sup>,轮轨接触斑励磁下对轨道的电磁吸引力  $F_p$  为:

$$F_p = \frac{B^2 S_p}{2\mu_0} = \frac{\left( \frac{NI}{\delta} \mu_0 \right)^2 S_p}{2\mu_0} = \frac{(NI)^2}{2\delta^2} S_p \mu_0 \quad (2)$$

式中:

$S_p$ ——轮轨接触斑面积,  $mm^2$ ;

$I$ ——励磁电流, A;

$N$ ——线圈匝数, 匝;

$B$ ——磁感应强度, T;

$\delta$ ——集肤深度, mm。

根据经验,通常认为轮轨贴合处接触斑空气隙为 0.5 mm。综上所述,总的电磁吸力可以表示为:

$$F_{\text{total}} = F_p + \int F_{\Delta S} = \frac{(NI)^2}{2\delta^2} S_p \mu_0 + \int \left( \frac{B_{\Delta S}}{K_f} \right)^2 \frac{\Delta S dS}{2\mu_0} \quad (3)$$

## 2 基于转向架车轮结构的增压模型

根据上述环绕车轮布置线圈的电磁增压原理,选择车轮侧面布置线圈,设置内嵌环形线圈励磁模型和外置环形线圈励磁模型。内嵌环形线圈励磁模型如图 3 所示。由图 3 可知,线圈内嵌在车轮轮毂内侧且相对车轮保持固定,励磁线圈通电后可磁化车轮踏面,从而实现对轨道的吸附作用。该方案的优点为:利用车轮内部空间,不影响现有转向架结构;回路磁阻较小,在踏面处可获得一定的磁感应强度。

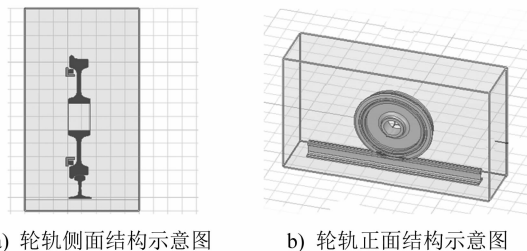


图 3 内嵌环形线圈励磁模型

Fig. 3 Embedded ring coil excitation model

外置环形线圈励磁模型如图 4 所示。在空间电磁场中,考虑到磁感线回路被约束在强铁磁性材料边界内而不易穿过空气-铁磁性材料交界面的情况,选择将线圈贴近轮轨接触面,在车轮外侧面外置励磁装置。环形线圈通电后构成的磁感线闭合回路 A 如图 4 b) 所示。由于回路中磁阻较小,相同电流激励下所获得的磁感应强度更大。在轮轨接触面上,磁感线方向与其法线方向重合,轮轨间电磁吸力的垂向分力最大。

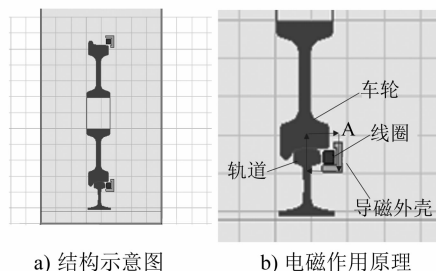


图 4 外置环形线圈励磁模型

Fig. 4 External ring coil excitation model

### 3 电磁增压模型仿真

基于 Ansoft Maxwell 电磁场分析软件,根据电磁场原理及实际线路情况向线圈输入恒定直流电激励产生恒稳磁场,计算电磁场在轮轨间隙位置处的电磁吸力。

#### 3.1 内嵌环形线圈励磁模型

静磁场中,对线圈施加 10 kAN(安匝数)的直流电激励,计算获得轨道所受垂向电磁吸力为 114.87 N。通过软件仿真获得的内嵌环形线圈励磁模型磁感应强度云图如图 5 所示,其中导磁外壳厚度为 20 mm。由图 5 可知,磁感线主要通过导磁壳体导流构成回路,导磁壳体截面上的磁感应强度达到了 1.20 T。由图 5 b)可知,该处电磁场畸变突出,磁感应强度最大值达到了 0.12 T。由于轮轨间不存在接触,轨面其他部分的磁感应强度只有 0.08 T 左右。

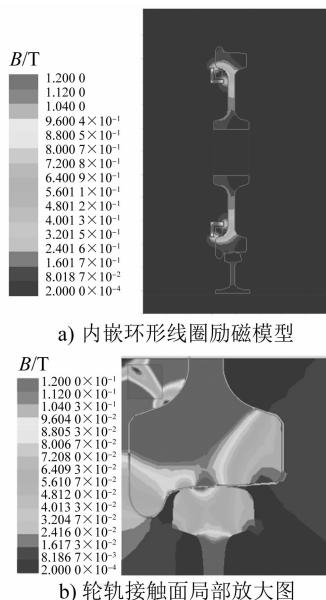


图 5 内嵌环形线圈励磁模型磁感应强度云图

Fig. 5 Electromagnetic flux intensity nephogram of embedded ring coil excitation model

磁场主要集聚在轮毂内侧,由于车轮材料具有强铁磁性,磁感线不易穿透车轮抵达轨道轨面,轮轨间隙位置的磁感应强度较低。选择线圈励磁直流电区间 3~15 kAN,以 1 kAN 为步长,获得轮轨间垂向电磁吸力随着线圈励磁安匝数的变化如图 6 所示。由图 6 可知,在提供激励 15 kAN 的情况下,产生的电磁吸力仍不足 300 N。由此可知,内嵌环形线圈励磁模型对轮轨的增压效果不明显,其增加轴重的调节效果不显著。

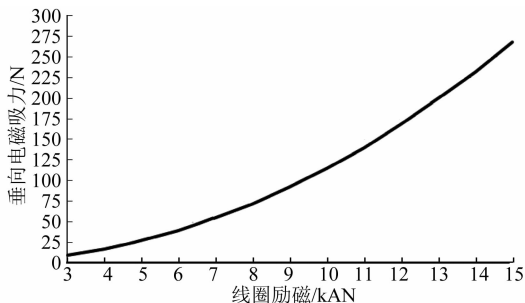


图 6 内嵌环形线圈励磁模型中的垂向电磁吸力随线圈励磁安匝数的变化

Fig. 6 Diagram of vertical electromagnetic attraction changing with ring coil excitation ampere-turns in the embedded ring coil excitation model

#### 3.2 外置环形线圈励磁模型

静磁场中,对线圈施加 10 kAN 的直流电激励,计算获得轨道所受垂向电磁吸力为 3 979.80 N,其作用效果约是内嵌环形线圈励磁模型的 34 倍。通过软件仿真获得的外置环形线圈励磁模型磁感应强度云图如图 7 所示。磁场在轮轨接触面上的磁感应强度达到了 0.90 T,在轨面上的磁感应强度均匀分布且数值在 0.80 T 左右。相比于内嵌环形线圈励磁模型,外置环形线圈励磁模型可对轮轨接触位置产生更加稳定的励磁作用,轮轨接触面可获得较大的磁感应强度值,且其磁感线垂直于轮轨接触面,即该处可获得最大的垂向电磁吸力,对车轮增压效果明显。

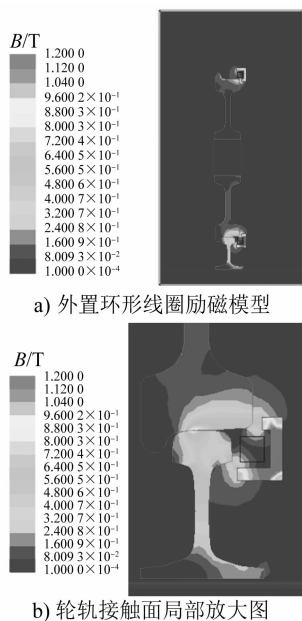


图 7 外置环形线圈励磁模型磁感应强度分布

Fig. 7 Electromagnetic flux intensity distribution of external ring coil excitation model

选择线圈励磁直流电区间 3~15 kAN, 以 1 kAN 为步长, 获得轮轨间垂向电磁吸力随着线圈励磁安匝数的变化如图 8 所示。由图 8 可知, 垂向电磁吸力与线圈励磁安匝数呈二次函数关系, 符合电磁铁电磁吸力简化模型。对于轴重约为 21~23 t 的车辆, 在 10 kAN 的线圈直流电激励作用下, 所提模型可以增加 3.5% 左右的轴重, 在 15 kAN 的线圈直流电激励作用下, 所提模型可以获得 7.4% 的补充轴重, 初步满足轮轨增压需求。

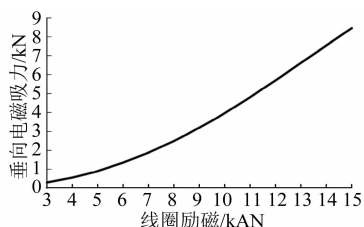


图 8 外置环形线圈励磁模型垂向电磁吸力随线圈励磁安匝数的变化

Fig. 8 Diagram of vertical electromagnetic attraction changing with ring coil excitation ampere-turns of external ring coil excitation model

## 4 结语

本文根据轮轨现有结构及电磁学基本原理提出环形电磁线圈增压方案。利用电磁线圈磁化车轮, 使其对轨道产生垂向电磁吸力以增加轴重, 进而增大轮轨间的最大制动力。内嵌环形线圈模型充分利用了车轮内部空间且相对车轮保持固定, 不影响现有转向架结构。该方案轮轨间隙位置的磁感应强度较低, 对轮轨的增压效果不明显, 对轴重增加的调节平衡效果不显著。外置环形线圈模型将线圈贴近轮轨接触面的车轮外侧面。相比于内

嵌环形线圈模型, 外置环形线圈可对轮轨接触位置产生更稳定的励磁作用, 轮轨处可获得较大的垂向电磁吸力, 对车轮增压效果明显。

## 参考文献

- [1] 赵伟, 张军, 王春艳, 等. 接触角和横向载荷对轮轨粘着的影响[J]. 机械工程学报, 2011, 47(22): 100.  
ZHAO Wei, ZHANG Jun, WANG Chunyan, et al. Effects of the contact angle and lateral load on the wheel/rail adhesion [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(22): 100.
- [2] 刘腾飞, 王文健, 郭火明, 等. 介质作用下轮轨增粘特性[J]. 中国表面工程, 2013, 26(1): 86.  
LIU Tengfei, WANG Wenjian, GUO Huoming, et al. Improving adhesion characteristics of wheel/rail under the medium conditions [J]. China Surface Engineering, 2013, 26(1): 86.
- [3] 王文健, 郭俊, 刘启跃. 不同介质作用下轮轨粘着特性研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(7): 100.  
WANG Wenjian, GUO Jun, LIU Qiyue. Study on adhesion characteristic of wheel/rail under different medium conditions [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(7): 100.
- [4] 谢德馨, 杨仕友. 工程电磁场数值分析与优化设计[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2017.  
XIE Dexin, YANG Shiyu. Numerical analysis and optimization of engineering electromagnetic fields [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [5] 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, 44(2): 244.  
WANG Shuhong, XIAO Xuliang, XIONG Guangyu. Direct current electromagnets with constant traction characteristic [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(2): 244.
- [6] 钱家骊. 电磁铁吸力公式的讨论[J]. 电工技术杂志, 2001, 20(1): 59.  
QIAN Jiali. Discussion on the formula of electromagnet suction force [J]. Electrotechnical Journal, 2001, 20(1): 59.

(收稿日期: 2021-09-20)

(上接第 209 页)

- [4] 肖铭钊, 郭圣煜, 余群舟, 等. 基于图示语言的地铁施工安全培训效果分析[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(1): 59.  
XIAO Mingzhao, GUO Shengyu, YU Qunzhou, et al. Effect analysis of the visual language-based safety training system for metro construction [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015, 32(1): 59.
- [5] 李权. 地铁车站施工现场视频监控点布置优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.  
LI Quan. Research on optimization of video monitoring points placement in construction site of subway station [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [6] 朱红霞. 地铁某盾构区间视频监控摄像头布置研究[J]. 土木工程信息技术, 2016, 8(3): 107.

- ZHU Hongxia. Research on video surveillance camera arrangement of a subway shield zone [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2016, 8(3): 107.
- [7] 刘文静. 明挖法地铁车站起重吊装机械作业安全研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.  
LIU Wenjing. Study on hoisting machinery operation safety in open-cut subway stations construction [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [8] 闫秀芳. 地铁工程施工现场安全风险研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.  
YAN Xiufang. Research on security risk management of subway construction site [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

(收稿日期: 2020-10-13)