

基于电磁场形态调整的涡流制动效能分析

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: 针对磁悬浮列车线性涡流制动装置制动力不足的问题, 对励磁电流和气隙等参数以及磁轭厚度、铁芯宽度和极距等结构参数进行分析。基于电磁场形态分析, 采用脉冲电流作为激励形式, 增大磁场作用范围, 从而有效提高制动力。结果表明, 在一定范围内, 增加脉冲幅值能有效提高制动力, 随着脉冲高电平幅值的增加, 制动力明显减小; 脉冲频率对制动力的影响较小; 占空比越高, 制动力越大。

关键词: 列车制动; 磁悬浮; 线性涡流制动; 脉冲电流

中图分类号: U260.35

文献标志码: A

Efficiency Analysis of Eddy Current Braking Based on Electromagnetic Field Shape Adjustment

YING Zhiding, CHEN Jiamin

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

Abstract: In order to handle the problem of insufficient braking force produced by the maglev linear eddy current braking device, we corrected specific parameters in electromagnetic field, such as the exciting current, air gap, yoke thickness, core width and polar pitch. The pulse-current was used as the exciting form to increase magnetic field intensity, which can keep a high-speed field shape. By analyzing the deformation of the moving electromagnetic field, the braking force of the braking device is effectively improved. The results show that within a certain range, increasing the pulse amplitude can effectively improve the braking force. On the other hand, as the amplitude of the high pulse level increases, the braking force will greatly decrease. Besides, the pulse frequency has a relatively small impact on braking force. Meanwhile, the higher duty-cycle of pulse can also be used to generate greater braking force.

Key words: train braking; maglev train; linear eddy current braking; pulse current

线性涡流制动是磁悬浮列车唯一的紧急制动方式, 因此保证并提高线性涡流制动装置的制动效能非常重要。

国内外学者对涡流制动装置进行了深入研究。文献[1-2]中线性涡流制动装置被成功应用在高速列车上并得到试验验证。文献[3]中研制了轨道涡流制动试验台。文献[4-6]中分析了涡流制动力和电磁吸力与各参数变量的数值关系, 并结合仿真结果进行了结构优化设计。文献[7]中提出了一种混合励磁涡流制动系统, 并进行了结构优化。对涡流制动装置的结构优化和制动性能试验的研究较多, 而通过励磁电流形态的改变来提高涡流制动力的研究较少。

结合涡流电磁场模型, 在不同速度、励磁电流和气隙等参数下, 对涡流电磁场形态进行仿真分析。在掌握了电磁场形态对电磁力影响规律的基础上, 对不同大小、频率和占空比的脉冲电流产生的电磁场及制动力进行分析, 以期获得涡流制动效能提高的突破。

1 涡流制动电磁作用场分析

图 1a 为涡流制动装置模型, 由磁轭、线圈和铁芯组成, 电磁铁由 12 个磁极组成, NS 极交替布置。图 1b 为涡流制动试验装置。

在建立涡流电磁场模型的过程中, 需要推导电磁场强度和电磁力的计算公式, 以及分析各要素对电磁场形态的影响。

收稿日期: 2019-05-29

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



论文
拓展
介绍

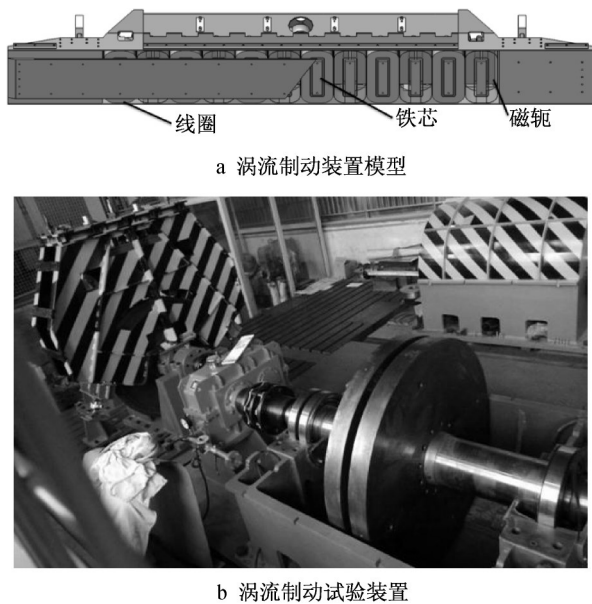


图1 涡流制动装置

Fig.1 Eddy current braking device

在电磁铁与感应轨的相对运动过程中,感应轨上半径为 r 的圆形涡流区域内磁通量按照 $B\pi r^2 - 0 - B\pi r^2 - 0$ (B 为磁感应强度)的余弦规律变化,如图2所示。实际上,在均匀分布的磁场中,圆形载流线圈所受到的安培力的矢量和为零。在非均匀分布的磁场中,线圈励磁引起的圆形感应涡流会产生不同大小的洛伦兹力合力。

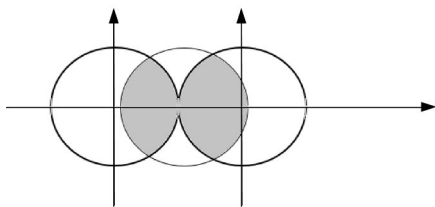


图2 励磁线圈相对于感应轨的圆形涡流运动

Fig.2 Circular eddy current movement of excitation coil relative to induction rail

电磁铁相对于感应轨运动,为方便分析,将其等效为电磁铁线圈静止,而感应轨上的圆形涡流做线性运动。当圆形涡流的前半圈进入线圈时,通过涡流回路的磁通量增加,产生阻碍涡流回路磁通量增大的涡流,假设该涡流方向为顺时针方向,涡流回路前半圈切割磁力线产生的洛伦兹力与感应轨前进方向相反,阻碍感应轨前进;当圆形涡流的后半圈离开线圈时,通过涡流回路的磁通量减少,产生阻碍涡流回路磁通量减少的涡流,该涡流方向为逆时针方向,涡流回路后半圈切割磁力线产生的洛伦兹力也和感

应轨前进方向相反。因此,2个力矢量和即为圆形涡流在磁场中所受到的洛伦兹力。

电磁铁转化为圆形线圈励磁形式,通过毕奥-萨伐尔方法^[8]计算线圈磁感应强度,计算式如下所示:

$$B = \frac{32\rho h\mu_0 NI_0}{\sqrt{2} K_e \mu_0 \pi v \delta D^2 + 32\rho h l_0} \quad (1)$$

式中: l_0 为气隙; μ_0 为空气磁导率; ρ 为电阻率; δ 为集肤深度; I_0 为励磁电流; v 为列车运行速度; D 为直径; K_e 为折算系数; h 为极间距; N 为线圈匝数。

依据能量法^[8]推导出制动力,计算式如下所示:

$$F = \frac{K_1 I_0^2 \sqrt{v}}{(K_2 \sqrt{v} + K_3 l_0)^2} \quad (2)$$

式中: K_1 、 K_2 、 K_3 为常数,与材料和尺寸、结构有关。

由式(1)和式(2)可知:速度、励磁电流、电磁材料、线性涡流制动装置结构等参数直接影响电磁场强度和制动力的大小。合理的结构设计能有效提高制动效能。

2 制动效能的影响因素分析

2.1 速度对制动效能的影响

图3为0~300 km·h⁻¹时制动力随速度的变化曲线。在低速时制动力随速度的增加而增加,达到一定临界值后,涡流磁场的去磁作用以及漏磁不断增大。因此,在高速时制动力随速度的增加而下降,50~150 km·h⁻¹时制动力最佳。

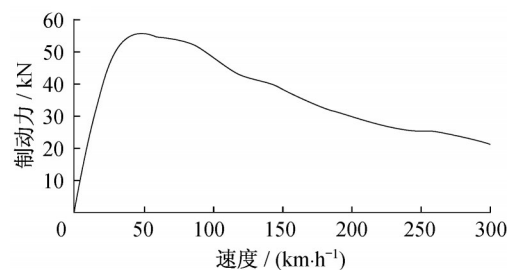


图3 不同速度下的制动效能曲线

Fig.3 Braking efficiency curve at different speeds

2.2 励磁电流对制动效能的影响

图4为不同励磁电流对制动力的影响曲线。同一速度下,电流越大,磁通密度越大,制动力越大。考虑到最大允许纵向力的限制,电流不宜超过56.7 A。

2.3 气隙大小对制动效能的影响

图5为不同气隙对制动力的影响曲线。制动间隙越小,总磁阻越小,磁通密度越大,制动力越大。

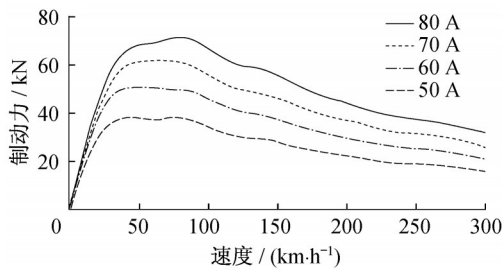


图4 不同励磁电流下的制动效能曲线

Fig.4 Braking efficiency curves at different excitation currents

然而,间隙过小时制动力变化太快,无法得到较稳定的制动力,因此需要有一套实时控制电流大小的反馈机制。在没有良好的反馈机制时,间隙最好控制在11 mm以上。

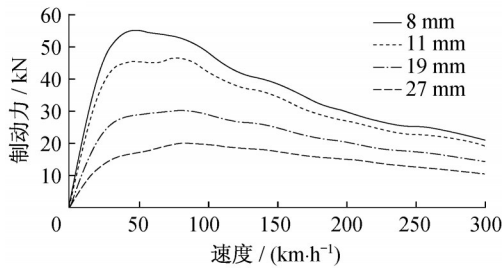


图5 不同气隙下的制动效能曲线

Fig.5 Braking efficiency curves at different air gaps

2.4 电磁材料对制动效能的影响

图6为3种材料的电磁铁铁芯在不同速度时的制动力。铁芯材料对制动力影响较小,采用St37作为导磁材料较好。

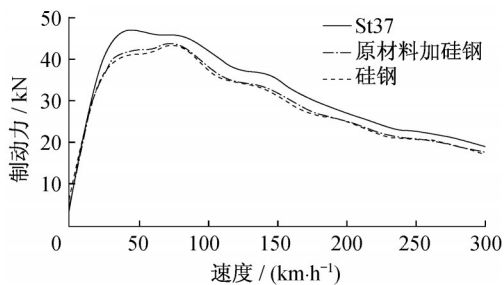


图6 不同材料下的制动效能曲线

Fig.6 Braking efficiency curves for different materials

2.5 磁极排列方式对制动效能的影响

图7为不同的磁极排列方式对制动力的影响曲线。NSNS排列方式的制动力明显大于NSSN排列方式。2种排列方式产生磁通的闭合回路路径不同,NSNS排列方式响应时间更短,制动力的波动更小,

因此制动效果更好。

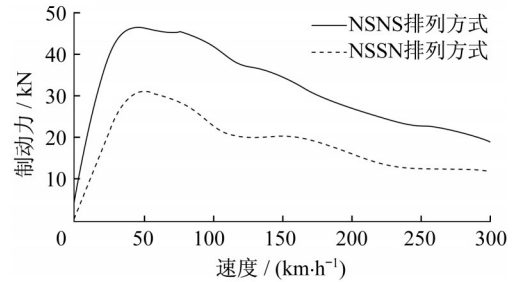


图7 不同排列方式下的制动效能曲线

Fig.7 Braking efficiency curves at different arrangements

2.6 磁轭厚度对制动效能的影响

模拟了不同磁轭厚度在 $300 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的制动力,如图8所示。当磁轭厚度在30 mm以下时,制动力随厚度增加而增加,达到30 mm以后,磁轭中的磁力线畸变较小,制动力几乎不随厚度变化,因此磁轭厚度不需要再进行优化。

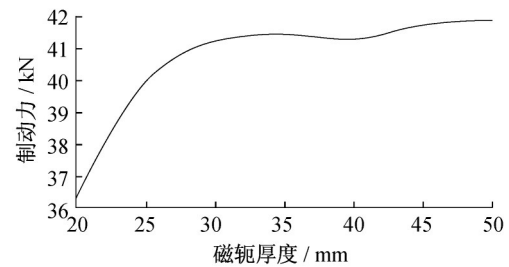


图8 不同磁轭厚度下的制动效能曲线

Fig.8 Braking efficiency curve at different yoke thicknesses

2.7 磁极宽度对制动效能的影响

保持极距168 mm不变的同时改变磁极宽度,得到的制动力变化曲线如图9所示。磁极宽度较大时,漏磁通减小,主磁通增加,磁极宽度在120 mm时,制动力最大。

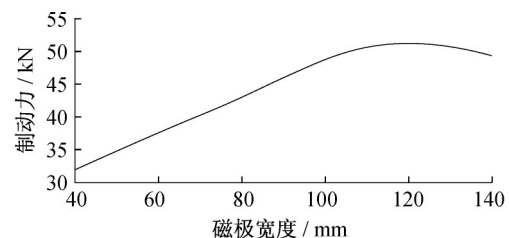


图9 不同磁极宽度下的制动效能曲线

Fig.9 Braking efficiency curve at different magnetic pole widths

2.8 极距大小对制动效能的影响

保持磁极宽度与极距比0.7不变的同时改变极距大小,不同极距时的制动力变化如图10所示。由图10可知,极距为120~180 mm时,制动力几乎保持不变。考虑到磁性部分长度一定,极距越小可安装磁极对数越多,最佳极距为130 mm,铁芯宽度为92 mm。

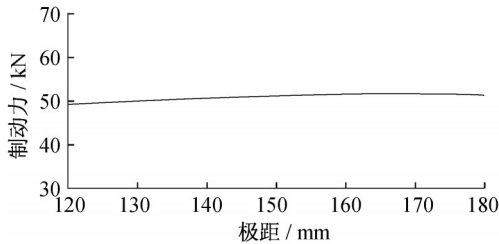


图10 不同极距下的制动效能曲线

Fig.10 Braking efficiency curve at different pole distances

3 脉冲电流对制动效能的影响

涡流制动力实际上是磁场对感应涡流产生的力,因此电磁场内磁场和感应涡流分布以及作用范围被称为电磁场形态。磁场穿透深度、磁场方向和感应涡流范围等对电磁力大小有决定性影响。

在其他物理量一定的条件下,最有可能改变电磁场形态的是励磁电流特性的改变。在保持原有输入励磁电流功率不变的条件下,将原有直流改为脉冲电流。

涡流的电流密度在z轴的分布不均匀,按指数规律衰减,即涡流的集肤效应使得涡流电流主要分布在感应板靠近磁极侧的表层中。工程计算中常采用等效透入深度来计算集肤深度,计算式如下所示:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (3)$$

式中: μ 为感应板的磁导率; f 为磁场变化频率。

制动磁铁对侧向导轨的最大允许纵向力为60 kN,制动磁铁磁极的电磁势最大不能超过20.4 kA。如图11所示,采用脉冲电流,在极短时间内以及控制励磁功率适当提高的基础上,改变电磁场的分布,增大磁场作用涡流区域的范围。

直流电流和脉冲电流的磁力线如图12所示。随速度变化的闭环磁力线变得越来越倾斜,垂直于导轨的磁力线分量和分布于导轨平面的涡流作用力减小。

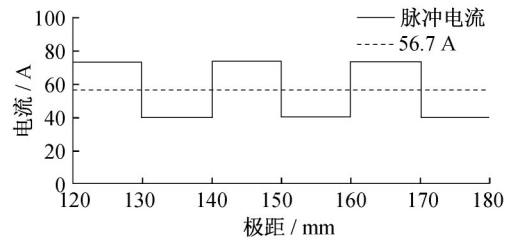


图11 脉冲方波电流

Fig.11 Pulse square wave current

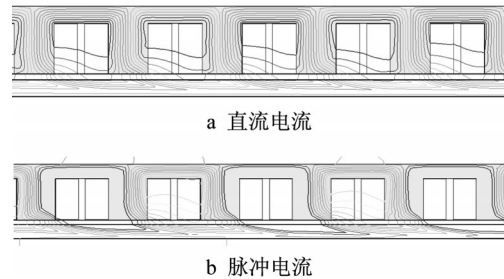


图12 磁力线

Fig.12 Magnetic line of force

从图12可看出,脉冲电流的磁力线深度明显比直流电流大,因此可以在一定程度上增加励磁磁通进入感应轨的深度,使得作用于涡流的范围更大,从而提高制动力。同时,脉冲电流的磁力线倾斜角度比直流电流明显减小,因此垂直于导轨的磁力线分量较大,产生的电磁涡流作用力也较大。

3.1 不同脉冲幅值对制动效能的影响

保持电流密度不变,对不同脉冲幅值时的制动力进行分析。图13为改变脉冲高电平幅值时制动力的变化曲线。由图13可得:在56~62 A时增加脉冲高电平幅值,增大磁力线的垂直分量,能有效提高制动力;在62~108 A时随着脉冲高电平幅值的减小,对应的制动力相应增加。

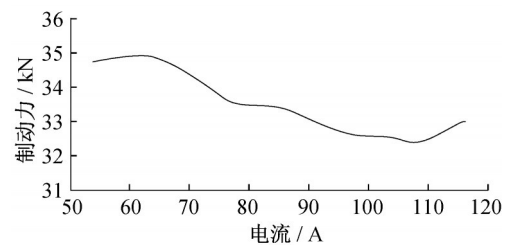


图13 不同脉冲幅值下的制动效能曲线

Fig.13 Braking efficiency curve at different pulse amplitudes

3.2 不同脉冲频率对制动效能的影响

如图14所示,改变脉冲电流频率,对制动力进行分析。可以看出,脉冲频率对制动力的影响不明

显,改变脉冲频率无法提高制动效能。

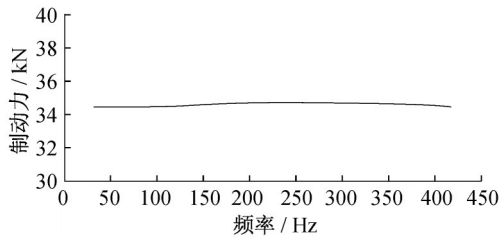


图14 不同脉冲频率下的制动效能曲线

Fig.14 Braking efficiency curve at different pulse frequencies

3.3 脉冲电流不同占空比对制动效能的影响

如图15所示,保持电流密度不变,对不同脉冲占空比时的制动力进行分析。可以看出,脉冲占空比越高,产生制动力时间越长,平均制动力越大。因此,可以通过适当提高脉冲电流的占空比来提高制动力。

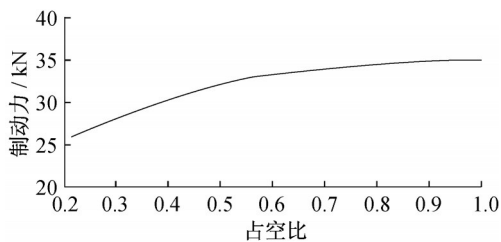


图15 不同占空比下的制动效能曲线

Fig.15 Braking efficiency curve at different duty cycles

4 结语

磁悬浮列车线性涡流制动装置制动力在低速时随着速度的增加而增加,达到一定临界值后,制动力在高速时随速度的增加而下降,50~150 km·h⁻¹时制动力最佳。

励磁电流越大,制动力越大,在高速时影响较小;间隙越小,制动力越大,间隙最好控制在11 mm以上;St37电磁铁铁芯制动力最大;NSNS排列方式制动效果更好。

磁轭厚度在30 mm以上时对制动力影响较小,磁极宽度在120 mm时制动力最大,极距大小对制动

力影响较小。

脉冲电流的磁场深度较直流电流更大,可以有效地提高制动力。在一定范围内,增加脉冲高电平幅值能有效提高制动力,随着幅值的增加,制动力明显减小;脉冲频率对制动力的影响较小;占空比越高,制动力越大。

参考文献:

- [1] ALBERTZ D, DAPPEN S, HENNEBERGER G. Calculation of the 3D nonlinear eddy current field in moving conductors and its application to braking systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(3):768.
- [2] HECQUET M, BROCHET P, LEE S J, *et al.* A linear eddy current braking system defined by finite element method [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(3):1841.
- [3] 应之丁,夏寅荪,邵丙衡. 轨道涡流制动试验与研究[J]. 上海铁道大学学报:理工辑, 1999(6):97.
YING Zhiding, XIA Yinsun, SHAO Bingheng. Experiment and research of orbital eddy current braking [J]. Journal of Shanghai Railway University: Science and Engineering Series, 1999(6):97.
- [4] 邓妮. 磁浮列车涡流制动系统建模及紧急制动控制策略的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
DENG Ni. Modeling of eddy current braking system and research on emergency braking control strategy for maglev train [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [5] KRISHNA G L, KUMAR K M. Investigation on eddy current braking systems: a review [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 592/593/594:1089.
- [6] LEE K, PARK K. Modeling eddy currents with boundary conditions by using Coulomb's law and the method of images [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2):1333.
- [7] 严国斌,方攸同,张帆. 高速列车混合励磁涡流制动系统的设计与分析[J]. 机电工程, 2010, 27(8):19.
YAN Guobin, FANG Youtong, ZHANG Fan. Design and analysis of hybrid excitation eddy current braking system for high speed trains [J]. Mechanical & Electrical Engineering, 2010, 27(8):19.
- [8] 应之丁,林建平. 有轨电车涡流减速机理及制动力矩模型[M]. 上海: 同济大学出版社, 2014.
YING Zhiding, LIN Jianping. Eddy current deceleration mechanism and braking torque model of trams [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2014.