

高速列车线性涡流制动参数特性仿真分析

徐磊¹ 刘赛赛²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛;

2. 南京中车浦镇海泰制动设备有限公司, 211899, 南京//第一作者, 正高级工程师)

摘要 目的:随着我国高速列车的飞速发展及运营时速的不断提高,高速列车的制动系统也面临着更高的要求。线性涡流制动具有与轮轨黏着无关、无磨损和制动力平稳等突出优点,有望应用于我国新一代高速列车,特探究线性涡流制动的影响参数并分析其特性。方法:基于电磁理论推导的线性涡流制动计算公式确定了其主要影响参数为列车速度、励磁电流及气隙,并借助有限元仿真方法研究了不同速度、励磁电流、气隙对制动力及垂向电磁吸力的影响。结果及结论:仿真结果表明:不同制动工况下,涡流制动力在所研究速度范围内都能够保持较为平稳的特性,垂向吸力则随着速度的提高而下降;制动力与吸力均随着励磁电流的增大、气隙的减小而增大,且呈现出在列车速度较低时对励磁电流与气隙的变化更为敏感的特性;在所研究范围内,励磁电流对制动力的影响大于气隙,因此对涡流制动力的控制更适合采用调节励磁电流的方式进行。

关键词 高速动车组;线性涡流制动;有限元仿真;参数分析

中图分类号 U270.35;U266.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.07.015

Parametric Characteristic Simulation Analysis of High-speed Train Linear Eddy Current Brake

XU Lei, LIU Saisai

Abstract Objective: With the rapid development and continuous improvement of high-speed train operation speed in China, the braking system of high-speed trains is also facing higher requirements. Linear EC (eddy current) brake, characterized by its independence of wheel-rail adhesion, absence of wear, and smooth braking force, holds great potential for application in the next generation high-speed trains in China. Therefore, the linear EC brake influencing parameters are explored and their characteristics are analyzed. Method: The main influencing parameters of linear EC brake are determined based on calculation formula derived from electromagnetic theory, including train speed, excitation current, and air gap. Finite element simulation method is employed to investigate the

effects of different speeds, excitation currents, and air gaps on braking force and vertical electromagnetic suction force. Result & Conclusion: Simulation results show that under different braking conditions, the EC braking force can maintain a relatively stable characteristic within the studied speed range, while the vertical suction force decreases as the speed increases. Both braking force and suction force increase with the larger excitation current and smaller air gap, while demonstrating a higher sensitivity to changes in excitation current and air gap at lower train speeds. Within the studied range, the excitation current has a greater impact on braking force than the air gap does, suggesting that it is more suitable to control the EC braking force through excitation current adjustment.

Key words high-speed EMU; linear eddy current brake; finite element simulation; parameter analysis

First-author's address CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., 266111, Qingdao, China

1 概述

随着我国高速列车的飞速发展及运营时速的不断提高,高速列车的制动系统也面临着更高的要求。当列车的运行速度提高到300 km/h以上时,若仍使用电制动与空气制动混合制动的模式,将会产生轮轨间摩擦系数低、制动盘热容量不足、磨损加剧等问题,而线性涡流制动具备与轮轨黏着无关、无磨损、可调节性强及制动力平稳等优点^[1-6],已成为新一代高速列车制动系统的研究热点之一。线性涡流制动器装配在高速列车的每节拖车转向架下方。线性涡流制动器的装配位置示意图如图1所示。

线性涡流制动的原理是利用电磁感应现象,通过列车的运动使钢轨中产生涡流,感应磁场阻碍列车的运动,从而实现制动的效果。其过程受到多个不同参数的影响,且这些参数之间具有非线性特

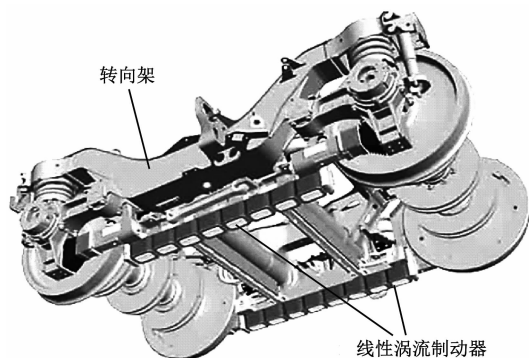


图1 线性涡流制动器的装配位置示意图

Fig. 1 Diagram of linear eddy current brake installation position

征,同时还必须考虑涡流的集肤效应。这导致分析难度极大。文献[7]曾利用“迎流的”有限元分析法对制动力进行了分析计算。文献[8-9]推导了涡流制动特性方程以解释涡流制动的物理过程。文献[10]利用试验台对高速列车线性涡流制动的特性及影响参数进行了研究。以上研究受限于解析法的简化以及试验工况的局限性,并未对各个制动参数的特性进行详细分析。

为更深入地分析高速列车线性涡流制动的参数特性,本文在电磁理论公式的基础上,对线性涡流制动的影响参数进行了分析,并借助有限元仿真方法研究了列车速度、励磁电流、气隙对涡流制动力及垂向电磁吸力的影响特性,为进一步完善高速列车线性涡流制动器提供参考依据。

2 线性涡流制动原理及计算参数分析

高速列车线性涡流制动器结构示意图如图2所示,由磁轭、钢轨及8个磁极极性交替排布的磁极组成,每个磁极均包含铁心与线圈。

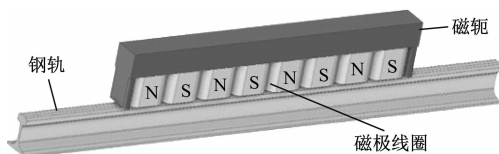


图2 高速列车线性涡流制动器结构示意图

Fig. 2 Diagram of high-speed train linear eddy current brake system structure

当上述线圈励磁后,磁轭、相邻2个磁极的铁心、气隙与钢轨构成闭合磁路,便能产生感应磁场。随着高铁列车的运动钢轨将产生涡流,使得原磁场磁力线畸变,电磁铁产生的电磁力在原磁场垂向力

的基础上生成一个纵向的分力,即涡流制动力。

根据等效磁路原理和能量守恒定律,可推导出到线性涡流制动力 F 为^[7-9]:

$$F = \frac{8\sqrt{2}\pi^{5/2}\mu_0^2\rho^{3/2}\tau^{1/2}N^2I_0^2D^4\sqrt{v}}{\sqrt{\mu}\left(16\rho\tau l_0 + k_e\sqrt{\frac{\pi\tau\rho}{\mu}}\mu_0D^2\sqrt{v}\right)^2} \quad (1)$$

式中:

μ_0 ——空气磁导率,单位 H/m;

μ ——钢轨磁导率,单位 H/m;

ρ ——钢轨电阻率,单位 Ωm ;

τ ——磁极极距,单位 m;

N ——线圈匝数,单位 匝;

D ——涡流直径,单位 m;

v ——列车速度,单位 m/s;

I_0 ——励磁电流,单位 A;

l_0 ——气隙,单位 m。

k_e ——涡流经验折算系数。

μ_0 、 μ 、 ρ 均为材料参数,在实际应用中难以改变; τ 、 N 、 D 均为制动器尺寸结构参数,由于线性涡流制动器的形式尺寸受到转向架下方空间限制^[11],在实际中也难以调整。

由式(1)可知,除难以改变的材料参数及尺寸参数之外,对线性涡流制动力产生直接影响的关键参数有列车速度 v 、励磁电流 I_0 和气隙 l_0 。其中,励磁电流与制动力正相关,气隙与制动力负相关,而列车速度与制动力的关系无法从式(1)中直接看出。

因此,本文将建立线性涡流制动有限元模型,详细分析上述3个关键参数对线性涡流制动特性的影响。

3 线性涡流制动仿真模型

在通用电磁有限元分析软件 ANSYS Maxwell 中建立线性涡流制动器仿真模型如图3所示。图3中上半部分为磁轭、铁心及磁极线圈,下半部分为钢轨, x 轴正方向表示涡流制动器产生的制动力方向, y 轴正方向表示涡流制动器产生的垂向吸力方向。



图3 线性涡流制动器仿真模型

Fig. 3 Simulation model of linear eddy current brake system

线性涡流制动器仿真模型(以下简为“仿真模型”)尺寸如表 1 所示。

表 1 线性涡流制动器仿真模型尺寸

Tab. 1 Dimensions of linear eddy current brake system simulation model

制动器总长/mm	制动器总高/mm	磁极数量/个	磁极极距/mm	钢轨高度/mm	钢轨材料
1 540	269	8	180	176	U71Mn

根据上述所建立的仿真模型,对列车速度、励磁电流及气隙进行相应设置后可仿真得到制动器所产生的涡流制动力与垂向吸力。图 4 为列车速度为 50~400 km/h、励磁电流为 95 A、气隙为 7 mm 工况下的电磁力仿真曲线。图 5 为相同工况下德国 ICE3 型列车的实测电磁力曲线^[12]。

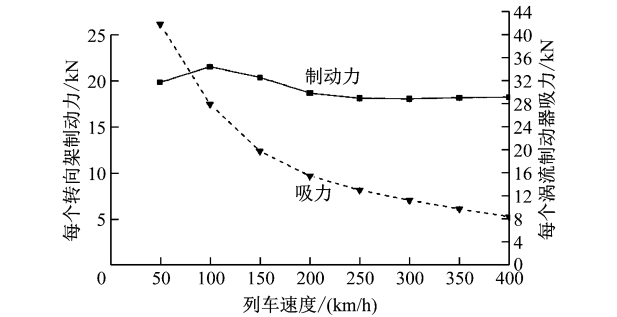


图 4 电磁力仿真曲线

Fig. 4 Curves of electromagnetic force simulation

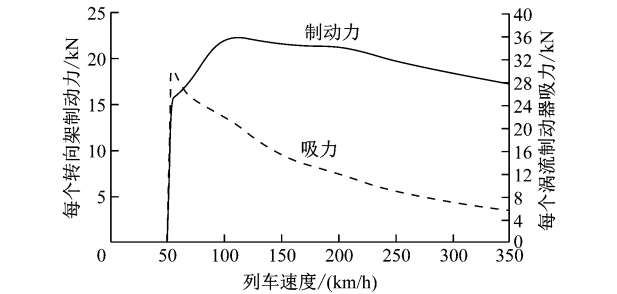


图 5 德国 ICE3 型列车实测电磁力曲线

Fig. 5 Field-measured electromagnetic force curves of German ICE3-type train

分析图 4 和图 5 可知,仿真电磁力和德国 ICE3 型列车实测电磁力随列车速度的变化趋势几乎一致:当列车速度在 100 km/h 左右时,制动力达到最大值,约为 22 kN;随着速度提高缓慢下降,在整个高速范围内保持较为恒定的理想特性,而垂向吸力始终随着列车速度的提高逐渐下降,且列车速度越高吸力下降曲线越平缓。

4 各参数对线性涡流制动性能的影响分析

4.1 列车速度的影响

分别取列车速度为 100 km/h、200 km/h、300 km/h、400 km/h,在标准气隙为 7 mm 工况下,将励磁电流分别设置为 60 A(常用制动)、78 A(最大常用制动)和 95 A(紧急制动),得到涡流制动力与吸力随列车速度变化曲线,如图 6 和图 7 所示。由图 6 和图 7 可知,涡流制动力随列车速度的变化并不表现出单调性,而是在所研究的速度范围内均保持较为平稳的特性,且励磁电流越小制动力曲线越平缓;吸力则随着列车运行速度的提高而逐渐减低,列车速度越小,则吸力对速度的变化越敏感。因此,考虑到涡流制动力在高速时的稳定性以及吸力在高速时较小的特性,线性涡流制动十分适合高速列车使用。

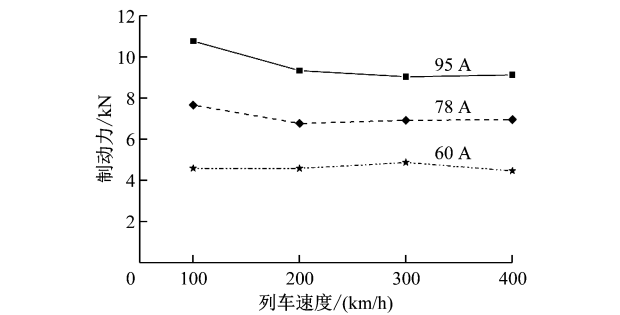


图 6 不同励磁电流下制动力随列车速度变化曲线

Fig. 6 Curves of braking force changing with train speed under different exciting current conditions

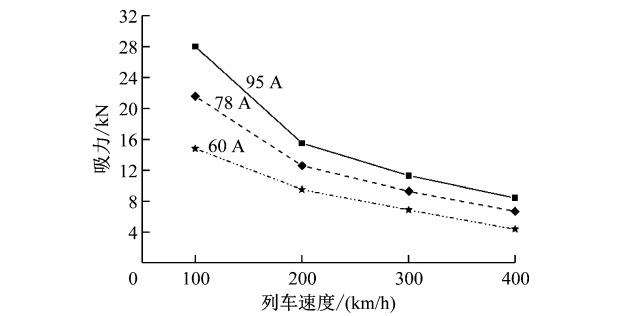


图 7 不同励磁电流下垂向吸力随列车速度变化曲线

Fig. 7 Curves of vertical suction changing with train speed under different exciting current conditions

4.2 励磁电流的影响

在给定标准气隙为 7 mm 工况下,将励磁电流分别设置为 60 A(常用制动)、78 A(最大常用制动)和 95 A(紧急制动),可得到不同列车速度下,涡流制动力与吸力随励磁电流变化曲线,如图 8 和图

9所示。由图8和图9可知,随着励磁电流的增大,涡流制动力与吸力均随之增大。同时,注意到两图不同速度下的各条曲线中,速度为100 km/h的曲线上升斜率最大,而速度为400 km/h的曲线斜率最小、曲线最平缓,体现了速度较低时制动力和吸力对励磁电流的变化更敏感的特性。

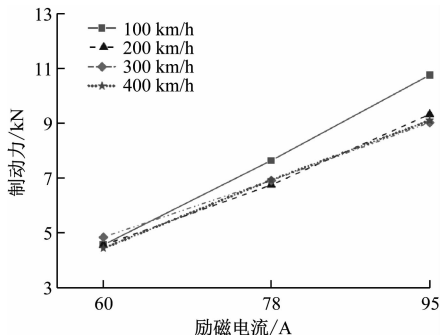


图8 不同速度等级下制动力随励磁电流变化曲线

Fig. 8 Curves of braking force changing with excitation current at different speed levels

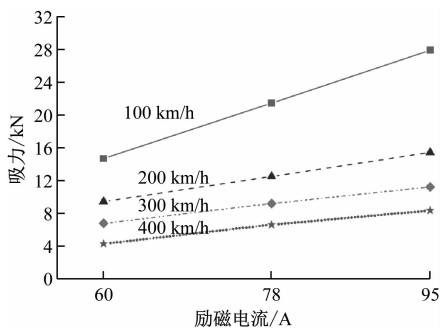


图9 不同速度等级下垂向吸力随励磁电流变化曲线

Fig. 9 Curves of vertical suction changing with excitation current at different speed levels

4.3 气隙的影响

在给定励磁电流为95 A工况下,将气隙分别设置为6 mm、7 mm和8 mm,可得到不同列车速度下,涡流制动力与吸力随气隙变化曲线,如图10和图11所示。由图10和图11可知,随着气隙增大,涡流制动力与吸力均随之减小。注意到两图不同速度的各条曲线中,速度为100 km/h的曲线下降斜率最大,而速度为400 km/h的曲线斜率最小、曲线最平缓,体现了速度较低时制动力和吸力均对气隙变化更敏感的特性。同时,对比图8与图10、图9与图11可见,在所研究范围内,励磁电流对制动力与吸力的影响大于气隙。而气隙是由转向架与线性涡流制动器的机械连接装置进行控制,考虑到列车运行过程中的微小振动,气隙不可设置得太小,

因此不宜用调整气隙的方式对涡流制动力进行控制,而应采用调节励磁电流的方式控制线性涡流制动力。

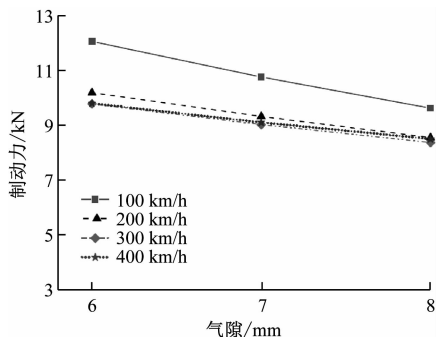


图10 不同速度等级下制动力随气隙变化曲线

Fig. 10 Curves of braking force changing with air gap at different speed levels

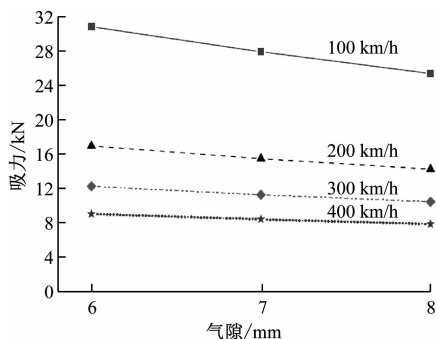


图11 不同速度等级下垂向吸力随气隙变化曲线

Fig. 11 Curves of vertical suction changing with air gap at different speed levels

5 结语

本文根据理论公式分析以及有限元仿真计算,对高速列车线性涡流制动参数特性进行了深入分析,可得到以下结论:

1) 除去在实际应用中难以改变的材料参数以及尺寸参数之外,对线性涡流制动力产生直接影响的关键参数为列车速度、励磁电流和气隙;

2) 涡流制动力对列车速度的变化不敏感,在所研究的整个速度范围内保持较为稳定的良好特性,而吸力随着列车速度的提高而减小,且列车速度越低吸力变化越大;

3) 涡流制动力与吸力均随着励磁电流的增大、气隙的减小而增大,且在列车速度较低时对励磁电流与气隙的变化都更敏感;

4) 在所研究范围内,励磁电流对涡流制动力的影响大于气隙,因此对涡流制动力的控制更适合采

用调节励磁电流的方式进行。

本文所取得的上述仿真研究结论可为高速列车线性涡流制动器的设计、优化与应用提供一定的参考依据。

参考文献

- [1] 丁福焰,吕宝佳,顾磊磊. 高速列车涡流制动技术综述[J]. 铁道机车车辆,2012,32(6):1.
DING Fuyan, LYU Baojia, GU leilei. Summary of eddy current braking technology of high-speed train[J]. Railway Locomotive & Car,2012,32(6):1.
- [2] LOBEL W,徐佩芬. ICE3——新一代欧洲高速动车组[J]. 电力牵引快报,1998(1):1.
LOBEL W, XU Peifen. ICE3—the new generation of high-speed EMU in Europe[J]. Electric Traction Express,1998(1):1.
- [3] CREDNER W D M, 柳宇刚. 线性涡流制动的发展及其在ICE3 动车组上的应用[J]. 变流技术与电力牵引,2001(3):22.
CREDNER W D M, LIU Yugang. Linear eddy current brake development and application in ICE3[J]. Converter Technology & Electric Traction,2001(3):22.
- [4] GRABER J,张彦儒. ICE3 列车直线涡流制动装置[J]. 国外机车车辆工艺,2003(5):1.
GRABER J, ZHANG Yanru. Linear eddy current brake of ICE3 trains[J]. Foreign Locomotive & Rolling Stock Technology,2003(5):1.
- [5] PREM J, 王渤洪. 大功率常用制动系统——ICE3 的涡流制动(一)[J]. 变流技术与电力牵引,2005(1):7.
PREM J, WANG Bohong. Eddy-current brake in the ICE 3 as high-efficiency service brake system—part 1[J]. Converter Technology & Electric Traction,2005(1):7.
- [6] PREM J,王渤洪. 大功率常用制动系统——ICE3 的涡流制动(二)[J]. 变流技术与电力牵引,2005(3):15.
PREM J, WANG Bohong. Eddy-current brake in the ICE 3 as high-efficiency service brake system—part 2[J]. Converter Technology & Electric Traction,2005(3):15.
- [7] 朱仙福,张秀荣. 高速列车轨道涡流制动的制动力分析与计算[J]. 上海铁道大学学报(自然科学版),1996,17(4):1.
ZHU Xianfu, ZHANG Xiurong. Analysis and calculation of braking force on rail eddy current braking of high-speed trains[J]. Journal of Shanghai Tiedao University(Natural Science Edition), 1996,17(4):1.
- [8] 郭其一,胡景泰,路向阳,等. 高速列车线性涡流制动的特性研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2006,34(6):804.
GUO Qiyi, HU Jingtai, LU Xiangyang, et al. Braking characteristic research of linear eddy current brake for high-speed train[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006,34(6):804.
- [9] 吴云飞. 高速动车组线性轨道涡流制动系统研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.
WU Yunfei. Research on linear eddy current braking system of high-speed emu [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2017.
- [10] 丁福焰,王可,宋跃超,等. 高速列车线性涡流制动特性的试验研究[J]. 中国铁道科学,2019,40(6):126.
DING Fuyan, WANG Ke, SONG Yuechao, et al. Experimental study on characteristics of linear eddy current brake for high-speed train[J]. China Railway Science,2019,40(6):126.
- [11] 王可,丁福焰,王立超,等. 机车车辆限界与非黏着制动装置相关问题研究[J]. 铁道标准设计,2022,66(12):162.
WANG Ke, DING Fuyan, WANG Lichao, et al. Study on the issues related to rolling stock gauge standards and non-adhesion brakes[J]. Railway Standard Design,2022,66(12):162.
- [12] SAUMWEBER E,王渤洪. 轨道制动器领域的新发展[J]. 电力牵引快报,1999(4):27.
SAUMWEBER E, WANG Bohong. New developments in the track brake field[J]. Electric Traction Express,1999(4):27.

(收稿日期:2023-02-08)

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

