

## 中低速磁浮列车电磁线性涡流制动装置控制效能研究

陈家敏<sup>1</sup> 应 博<sup>2</sup>

(1. 上海机动车检测认证技术研究中心有限公司, 201805, 上海; 2. 上海地铁维护保障有限公司车辆分公司, 200233, 上海)

**摘 要** [目的] 线性涡流制动装置是磁浮列车的关键技术之一, 但该技术目前仍不够成熟。对涡流制动技术进行研究, 具有非常重要的理论意义和应用价值。[方法] 建立了中低速磁浮列车线性涡流制动装置的模型, 推导得到总涡流制动力  $F$  的计算式。为验证所设计涡流制动装置的减速效能, 研制了涡流制动实物装置, 并进行了台架试验。建立了电磁涡流制动力矩控制系统模型, 分别基于开环控制算法、PID(比例-积分-微分)控制算法及模糊控制算法, 得到这三种控制算法的中低速磁浮列车制动力特征曲线, 进而对中低速磁浮列车的电磁涡流制动效能进行了深入分析。[结果及结论] 对比仿真结果和试验实测结果, 列车制动力的变化趋势几乎一致, 由此可认为所推导的数学模型可信度较高。开环控制算法存在明显的超调, 模糊控制算法较 PID 控制算法表现更佳。

**关键词** 中低速磁浮; 列车; 制动控制; 电磁涡流制动效能  
**中图分类号** U266.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.04.020

## Research on Control Efficiency of Electromagnetic Linear Eddy Current Braking Device for Medium-low Speed Maglev Trains

CHEN Jiamin<sup>1</sup>, YING Bo<sup>2</sup>

(1. Shanghai Motor Vehicle Testing Center Technology Co., Ltd., 201805, Shanghai, China; 2. Vehicle Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200233, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Linear eddy current braking device is one of the key technologies for maglev trains, but this technology is still not mature enough. It is of great theoretical significance and application value to study the eddy current braking technology. [Method] A model of linear eddy current braking device for medium-low speed maglev trains is established, and the formula for calculating the total eddy current braking force  $F$  is derived. To verify the deceleration efficiency of the designed eddy current braking device, an eddy current physical device is developed and a test bench experiment is carried out. A model of electromagnetic eddy current braking torque control system is established, and based on open-loop control, PID (proportional-integral-derivative) control, and fuzzy control

three control algorithms, the respective medium-low speed maglev train braking force characteristic curves are obtained. The electromagnetic eddy current braking efficiency of medium-low speed maglev trains is then thoroughly analyzed. [Result & Conclusion] Comparing the simulation results with the experimental measurements, the changing trends of the train braking force are almost identical, indicating a high credibility of the derived mathematical model. The open-loop control algorithm exhibits significant overshooting, while the fuzzy control algorithm outperforms the PID control algorithm.

**Key words** medium-low speed maglev; train; braking control; electromagnetic eddy current braking efficiency

线性涡流制动装置是磁浮列车的关键技术之一, 但该技术目前仍不够成熟。未来, 涡流制动技术将会更加广泛地应用在我国轨道交通磁浮列车的制动系统中, 因此, 对涡流制动技术进行研究具有重要的理论意义和应用价值。

通过理论结合仿真的方法, 可进一步探讨涡流制动技术中的难点和关键问题。国内外专家对线性涡流制动装置进行了深入的研究, 在涡流制动机理、制动力与参数间关系等方面进行了一系列的分析研究<sup>[1-5]</sup>。为了尽可能减少列车在制动过程中的速度波动, 需要为涡流制动装置设计合理的控制系统, 以输出合适的制动力。文献[6]从模糊控制的角度, 针对磁浮列车涡流制动装置制定了紧急制动策略。文献[7]对电磁缓速器制动力矩施加了开环控制策略控制。文献[8]以 PWM(脉冲宽度调制)的方式来控制涡流制动装置的制动力。

本文在研究不同中低速磁浮列车运行速度线性涡流制动装置制动力的基础上, 对涡流制动力的控制效能进行研究, 以期今后研制更为完善的线性涡流制动装置提供参考。

## 1 建立线性涡流制动装置模型

中低速磁浮列车线性涡流制动装置的基本结构如图 1 所示, 制动电磁铁由磁轭、励磁线圈和铁心组

成,电磁铁由 12 个磁极组成,N 极、S 极交替排列。给励磁线圈通电时,磁力线从 N 极出发,通过磁极与感应轨间的间隙后穿过感应轨表面,再通过间隙回到 S 极,然后向上通过磁轭再次回到 N 极,由此形成闭合回路。当感应轨相对磁场运动时,穿过金属任意回路的磁通量将发生变化,金属块内将产生感应电动势,并在闭合回路中产生感应涡流。涡流产生的磁场对制动电磁铁主磁场有抑制作用(即阻止列车前进),进而达到控制中低速磁浮列车制动的目的。

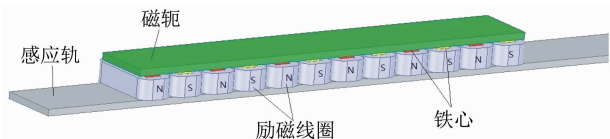


图 1 中低速磁浮列车线性涡流制动装置的基本结构

Fig. 1 Basic structure of linear eddy current braking device for medium-low speed maglev train

设  $B$  为磁感应强度(单位为 T),  $v$  为列车运行速度(单位为 km/h),  $h$  为一对 N 极、S 极的间距(单位为 m)。忽略磁路饱和问题,在磁极与感应轨相对运动的过程中,感应轨上圆形区域(其半径为  $r$ )内的磁通量按照  $B\pi r^2 \rightarrow 0 \rightarrow B\pi r^2 \rightarrow 0$  的余弦规律变化。整个涡流制动装置包括 12 个制动电磁铁,由此可得到总涡流制动力  $F$ (单位为 kN)的计算式为:

$$F = \frac{12\sqrt{2}\rho^{\frac{3}{2}}h^{\frac{1}{2}}\mu_0^2\mu^{-\frac{1}{2}}N^2\pi^{\frac{5}{2}}D^4I_0^2\sqrt{v}}{\left(\frac{\rho h\pi}{\mu}K_e\mu_0D^2\sqrt{v}+16\rho hI_0\right)^2} \quad (1)$$

式中:

$\rho$ ——钢轨电阻率,单位  $\Omega\text{m}$ ,其值与钢轨材料有关;

$\delta$ ——集肤深度,单位 m,其值与钢轨磁导率有关;

$\mu_0$ ——空气磁导率,取  $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ;

$\mu$ ——磁导率,单位  $\text{H/m}$ ;

$N$ ——线圈匝数;

$I_0$ ——励磁电流,单位 A;

$K_e$ ——磁动势和电流的折算系数;

$l_0$ ——线圈与感应轨之间的间隙,单位 m;

$D$ ——线圈的直径,单位 m。

## 2 涡流制动装置试验分析

既有的数学模型仿真计算仅对涡流制动装置进行了定性分析,为验证所设计涡流制动装置的减速

效能,本文在研究过程中与厂家合作,共同研制了涡流制动装置,并进行了台架试验。涡流制动试验装置实物图如图 2 所示。



图 2 涡流制动试验装置实物图

Fig. 2 Photo of eddy current braking test device

本文采用数值法、解析法对电磁涡流制动力进行仿真,并将这两个方法得到的仿真值与试验实测值进行对比。图 3 为  $I_0 = 56.1 \text{ A}$  时三条电磁涡流制动力特征曲线的对比结果。

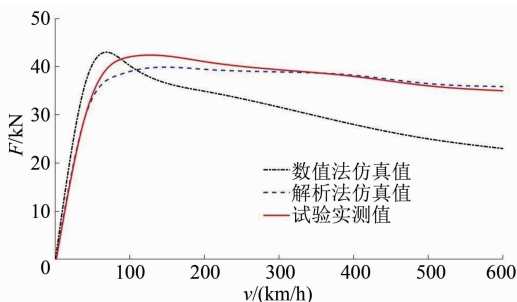


图 3  $I_0 = 56.7 \text{ A}$  时三条电磁涡流制动力特征曲线的对比结果

Fig. 3 Comparison results of the three electromagnetic eddy current braking force characteristic curves with  $I_0 = 56.7 \text{ A}$

由图 3 可知:①两条仿真值曲线和试验实测曲线在制动力变化趋势上几乎一致;②  $v = 0 \sim 600 \text{ km/h}$  时,  $F$  在低速区域随  $v$  的增加而增加,待达到一定临界值后在高速区随  $v$  的增加而下降;③随着  $v$  的增加,感应轨中产生涡流的等效线圈磁通密度随之增加,  $F$  也随之增加。当  $F$  增至最大制动力值时,和趋肤效应有关的涡流分布逐渐趋于稳定,磁力线的弯曲变形达到极限,磁力线平行并聚集到此位置,由此磁场作用的涡流等效线圈制动力也达到极限。由于制动过程中产生了涡流退磁效应,励磁线圈的等效电阻随  $v$  的增加逐渐增加,同时由于受到升温对其他参数的影响及漏磁不断增大的影响,电磁涡流制动力下降。

### 3 制动力矩控制系统模型

通过上文制动力数学模型可知,制动力与电流、速度等参数存在一定的关系。为了确保中低速磁浮列车涡流制动装置在不同的  $v$  下能够稳定地输出恒定的制动力矩,需要设计合理的电磁涡流制动力控制方案。本文设计的电磁涡流制动力矩控制算法包括 PID(比例-积分-微分)控制算法及模糊控制算法,同时将这两种算法的控制效果与开环控制算法的控制效果进行比较。

#### 3.1 PID 控制算法

PID 控制算法是经典控制理论中相对成熟的控制算法。可以通过对 PID 相应参数的整定,得到相对满意的涡流制动力的控制效果。设  $U$  为输出值,其计算式为:

$$U = k_p e_1 + k_d \dot{e}_1 + k_i \int e_1 dt \quad (2)$$

式中:

- $e_1$ ——误差值;
- $k_p$ ——比例函数;
- $k_d$ ——微分函数;
- $k_i$ ——积分函数;
- $t$ ——涡流制动力控制时间。

#### 3.2 模糊控制算法

中低速磁浮列车涡流制动装置本身是一个非线性的复杂系统,很难精准地建立数学模型(如采用经典的控制理论算法),其局限性往往较为明显。为此,本文采用模糊控制算法作进一步的分析。该算法可以模糊化感知变量,同时基于事先设定的控制规则,对系统进行精确控制。在该算法中输入 3 个相应的语言变量,将电流变化  $I$  作为输出语言变量。各变量采用相同的模糊状态词集{NB,NS,ZE,PS,PB},分别对应{负大,负小,零,正小,正大},用以表示变量值的符号及绝对值大小。各模糊状态隶属度函数统一设为三角形函数,如图 4 所示。

在期望  $F=30$  kN 的条件下,分别采用了开环控制算法、模糊控制算法和 PID 控制算法对中低速磁浮列车制动力进行研究。图 5 为三种控制算法下仿真得到的中低速磁浮列车制动力特征曲线。

由图 5 可知:①开环控制算法下,随着  $v$  的减小,由于励磁电流保持不变, $F$  呈现先增加后急速降低的变化趋势;②采用模糊控制算法和 PID 控制算法后,励磁电流能够根据  $F$  的变化而变化,能够

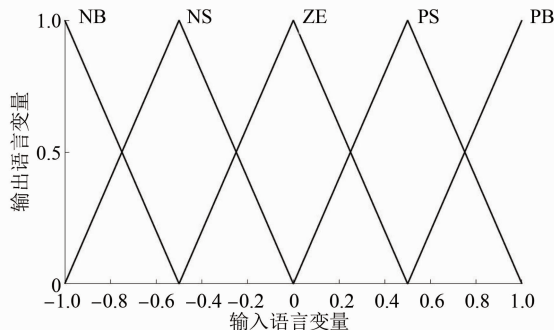


图 4 各模糊状态隶属度函数

Fig. 4 Membership function of each fuzzy state

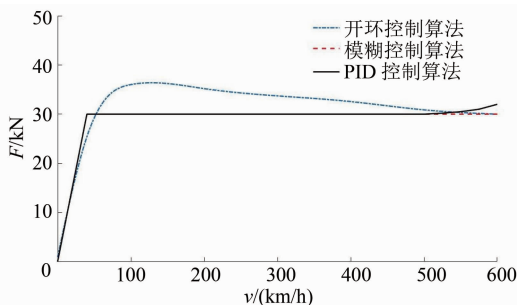


图 5 三种控制算法下仿真得到的中低速磁浮列车制动力特征曲线

Fig. 5 Braking force characteristic curves of medium-low speed maglev train simulated under three control algorithms

稳定地将  $F$  保持在期望值附近;③采用模糊控制算法和 PID 控制算法能够有效地对中低速磁浮列车进行较为精确的制动控制;④开环控制算法存在明显的超调,模糊控制算法较 PID 控制算法表现更佳。

### 4 结语

本文基于理论计算和数值分析,对中低速磁浮列车的电磁涡流制动效能进行了深入的分析。对比仿真结果和试验实测结果可知,列车制动力的变化趋势几乎一致,由此可认为本文推导的数学模型可信度较高。相对于开环控制算法,模糊控制算法和 PID 控制算法能更有效地控制列车制动力,这两种算法均能满足性能和精度的要求。开环控制算法存在明显的超调,模糊控制算法较 PID 控制算法表现更佳。本研究可为中低速磁浮列车的实际设计及线性涡流制动装置的设计提供参考。

### 参考文献

- [1] 应之丁,林建平. 列车涡流制动机理及制动力矩模型[M]. 上海: 同济大学出版社, 2014.
- YING Zhiding, LIN Jianping. Mechanism and torque model of

- eddy current braking on high-speed train[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2014.
- [2] 严国斌. 高速列车混合励磁涡流轨道制动系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- YAN Guobin. The study of hybrid excitation rail eddy current braking system of high-speed train[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [3] 应之丁, 陈家敏. 永磁减速装置结构对制动性能的影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(9): 18.
- YING Zhiding, CHEN Jiamin. Influence analysis of the permanent magnet reducer structure on braking performance[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(9): 18.
- [4] 应之丁, 陈家敏. 基于电磁场形态调整的涡流制动效能分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 436.
- YING Zhiding, CHEN Jiamin. Efficiency analysis of eddy current braking based on electromagnetic field shape adjustment[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(3): 436.
- [5] 应之丁, 陈家敏. 涡旋源密度对旋转涡流制动装置性能的影响[J]. 机电传动, 2019(3): 39.
- YING Zhiding, CHEN Jiamin. Influence of vortex source density on performance of rotatory eddy current brake device[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(3): 39.
- [6] 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 and control simulation for eddy current braking system of maglev train[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [7] ANWAR S, STEVENSON R C. Torque characteristics analysis for optimal design of a copper-layered eddy current brake system[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(4): 497.
- [8] 朱科. 列车的轮缘涡流制动[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- ZHU Ke. Eddy Current braking of the train wheel rim[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2015.
- 收稿日期:2021-12-04 修回日期:2022-07-15 出版日期:2024-04-10  
Received:2021-12-04 Revised:2022-07-15 Published:2024-04-10  
• 通信作者:陈家敏, 硕士研究生, chenjiamin616@126.com  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第 105 页)

- ZUO Jianyong, LUO Zhuojun. Air-pumping effect analysis for brake disc of high-speed train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(2): 34.
- [3] 左建勇, 刘家良, 胡果, 等. 基于瞬态温升仿真的列车制动盘结构研究[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(9): 13.
- ZUO Jianyong, LIU Jialiang, HU Guo, et al. Analysis on the structural parameters of train brake disc based on transient temperature simulation[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(9): 13.
- [4] 卢术娟, 周素霞, 杨文澈, 等. 制动盘散热筋结构设计与热容量分析[J]. 中国科技论文, 2019, 14(6): 642.
- LU Shujuan, ZHOU Suxia, YANG Wenche, et al. Structural design and thermal capacity analysis of brake disc cooling ribs[J]. China Sciencepaper, 2019, 14(6): 642.
- [5] 李继山, 顾磊磊, 焦标强, 等. 350km/h 高速列车轮装制动盘仿真分析[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(2): 7.
- LI Jishan, GU Leilei, JIAO Biaoqiang, et al. Finite element analysis of the brake disc for 350 km/h high-speed train[J]. Railway Locomotive & Car, 2013, 33(2): 7.
- [6] SHAHZAMANIAN M M, SAHARI B B, BAYAT M, et al. Finite element analysis of thermoelastic contact problem in functionally graded axisymmetric brake disks[J]. Composite Structures, 2010, 92(7): 1591.
- [7] JIANG L, JIANG Y L, YU L, et al. Thermal analysis for brake disks of SiC/6061 Al alloy co-continuous composite for CRH3 during emergency braking considering airflow cooling[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(11): 2783.
- 收稿日期:2023-04-10 修回日期:2023-06-26 出版日期:2024-04-10  
Received:2023-04-10 Revised:2023-06-26 Published:2024-04-10  
• 第一作者:鄢艳丽, 高级工程师, yyli841211@163.com  
通信作者:翟耕慰, 博士研究生, 2111246@tongji.edu.cn  
• ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

<http://umt1998.tongji.edu.cn>