

基于 Maxwell 3D 的不同磁路双定子单转子电磁制动器制动力矩研究

申 锋¹, 赵朝会^{1,2}, 夏 莉¹

(1. 上海电机学院 电气学院, 上海 201306; 2. 上海昂电电机有限公司, 上海 201111)

摘 要: 对于双定子单转子电磁制动器, 研究了两种磁路结构方案。借助 Maxwell 软件三维求解器, 采用有限元法对两种磁路结构的电磁制动器进行仿真分析, 验证了其可行性。比较了两种磁路下电磁制动器的转子电涡流、制动力矩, 不同励磁电流下制动力矩响应情况, 不同转子材料下制动力矩响应情况以及不同气隙长度下制动力矩响应情况。结果表明双定子单转子电磁制动器第一种磁路结构制动特性优于第二种。

关键词: 电磁制动器; 磁通路径; 有限元法; 制动力矩

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)05-0014-06

Study of Braking Torque of Double Stators-Single Rotor Electromagnetic Brake with Different Magnetic Circuits Based on Maxwell 3D

SHEN Feng¹, ZHAO Chaohui^{1,2}, XIA Li¹

(1. School of Electric Engineer, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Angdian Motor Co., Ltd., Shanghai 201111, China)

Abstract: For double stators-single rotor electromagnetic brake, two kinds of magnetic circuit structures were researched. With the three-dimensional solver of Maxwell software, the electromagnetic brake of two magnetic circuit structures was simulated by the finite element method, and its feasibility was verified. Under the comparison of the electromagnetic brake of two magnetic circuit structures, the rotor eddy currents, braking torque and braking torque responses for different exciting currents, different rotor materials and different air gap length were obtained, and the results showed that the first magnetic circuit's braking characteristic was superior to the second one for double stators-single rotor electromagnetic brake.

Key words: electromagnetic brake; magnetic flux path; finite element method; braking torque

0 引 言

与传统摩擦制动相比, 电磁制动为非接触式制动, 具有无摩擦、无噪声、不产生粉尘和平稳制动等优点^[1]。电磁制动器已经被应用在许多工业领域(如车辆悬挂系统、高铁制动系统、传输系统等)^[2-5]。根据励磁装置的布置方式不同, 可以将电磁制动器分为单盘式、双盘式和转筒式 3 种形式^[6]。本文所研究的双定子单转子电磁制动器属于单盘式结构。

目前国内外都在开展对于电磁制动器的研究。文献[7-8]设计了一种单定子单转子低功率电磁制动器, 用有限元方法进行了分析, 研究了制动盘厚度对制动器制动力矩的影响。文献[9]设计分析了一种单定子单转子电磁制动器, 并对其进行了实时动态转矩控制试验。文献[10-11]分析了双定子单转子电磁制动器励磁电流、励磁绕组形状对制动力矩的影响。文献[12-13]设计了一种盘式制动器辅助电磁制动装置, 采用优化设计方法, 以提高汽车制动力矩为目标, 对制动器的

作者简介: 申 锋(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机本体设计。

赵朝会(1963—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子及电力传动。

结构参数进行了优化设计。

本文针对双定子单转子电磁制动器,设计了两种不同励磁绕组,以使制动器处于制动状态时磁通能够形成不同的磁路走向。建立了电磁制动器完整的三维有限元模型,借助 Maxwell 软件三维瞬态求解器进行有限元分析,验证了两种磁路结构的正确性,比较了两种磁路下电磁制动器的转子电涡流、制动力矩以及不同励磁电流下制动力矩的响应情况,为设计制动器提供了一定的参考依据。

1 电磁制动的基本理论

当导体在磁场中运动或者静止导体处于随时间变化的磁场中,由楞次定律可知导体将产生感应电动势,如式(1)所示:

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

式中: E —— 电场强度;

B —— 磁感应强度。

此时电场会在闭合导体中产生电流,此电流被称为电涡流,如式(2)所示:

$$J = \sigma E \quad (2)$$

式中: σ —— 电导率;

J —— 电流密度。

电涡流和磁场相互作用会产生阻碍导体运动的制动力和制动力矩,如式(3)、式(4)所示:

$$F = JB \quad (3)$$

$$T = Fr \quad (4)$$

式中: F —— 制动力;

r —— 制动盘半径;

T —— 制动力矩。

导体在磁场中运动感应出电涡流,从能量转化的角度来看,可以将运动导体的动能转化为焦耳热,散发到周围空间中,实现运动导体的减速、停车。电磁制动器制动力矩的大小与电磁制动器的结构参数、电磁线圈参数、材料参数和运动导体的速度等变量有关^[14]。

2 双定子单转子电磁制动器

2.1 双定子单转子电磁制动器的结构模型

图1显示的是1/4双定子单转子电磁制动器结构模型,由定子轭部1、定子轭部2、绕组、铁心、

转子(制动盘)组成,铁心和转子间留有极小的气隙。定子轭部上安装若干带铁心的绕组,绕组产生的磁通经过铁心、气隙、转子、相邻绕组的气隙、铁心和定子轭部形成闭合回路。制动时转子表面会产生电涡流,电涡流与气隙磁场相互作用产生制动力矩使转子减速。

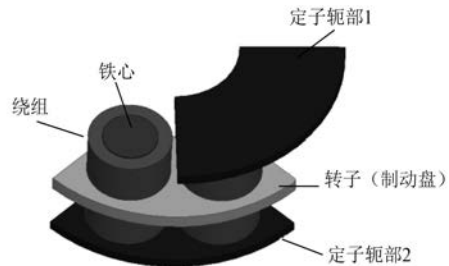


图1 1/4双定子单转子电磁制动器结构模型

2.2 双定子单转子电磁制动器的两种磁路

图2所示为双定子单转子电磁制动器制动状态下的两种磁路路径。定子侧相邻励磁绕组极性相反,为N-S-N-S形式交叉排列。两种磁路的不同点在于磁路1中与定子1的N极相对应的是定子2的S极,磁路2中与定子1的N极相对应的是定子2的N极。因此制动器处于制动状态时绕组产生的磁通所经过的闭合路径不同(如图2中箭头所示)。

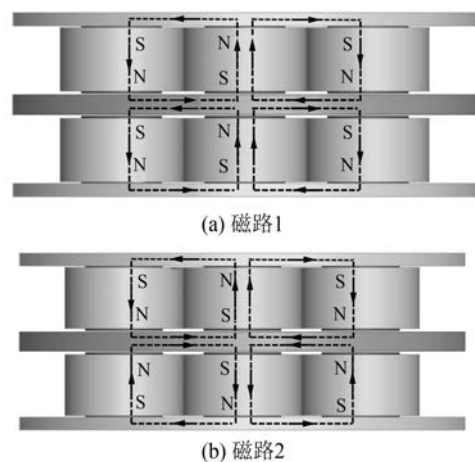


图2 双定子单转子电磁制动器制动时磁通路径

2.3 双定子单转子电磁制动器的基本参数

电磁制动器的基本参数如表1所示,磁路1和磁路2只有绕组磁极不同,其他结构参数相同。

表 1 电磁制动器的基本参数

| 参数名称 | 参数值 |
|------------|---------|
| 单侧极对数 | 4 |
| 每极匝数/匝 | 300 |
| 定子外径、内径/mm | 310/120 |
| 转子外径、内径/mm | 310/120 |
| 气隙长度/mm | 1 |
| 定子轭厚度/mm | 8 |
| 转子厚度/mm | 12 |
| 线圈长度/mm | 40 |
| 绕组材料 | 铜 |
| 定子轭部、铁心材料 | 1008 钢 |
| 转子(制动盘)材料 | 1008 钢 |

3 制动器 3D 有限元分析

3.1 制动器 3D 几何模型和网格剖分

由于双定子单转子电磁制动器磁通方向沿轴向穿过气隙, 所以对其计算分析需要进行 3D 仿真。利用 Maxwell 3D 对电磁制动器进行有限元分析, 3D 模型和网格剖分如图 3 所示。

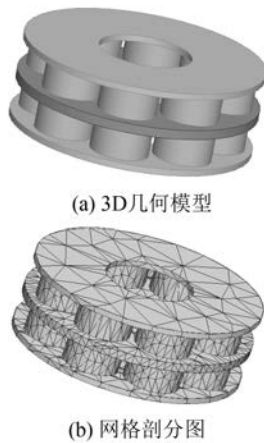


图 3 3D 几何模型和网格剖分示意图

3.2 两种磁路可行性的验证

瞬态场仿真中设置制动器绕组励磁电流为 10 A、转子速度为 600 r/min、时间步长设为 1 ms、仿真时间设为 80 ms、 $t = 30$ ms 时, 两种磁路下电磁制动器的磁通密度矢量图如图 4 所示。

图 4 所示为双定子单转子电磁制动器磁路 1、磁路 2 在 Maxwell 3D 瞬态仿真下的磁通密度矢量。从图 4 中可以看出磁路 1、磁路 2 的磁通

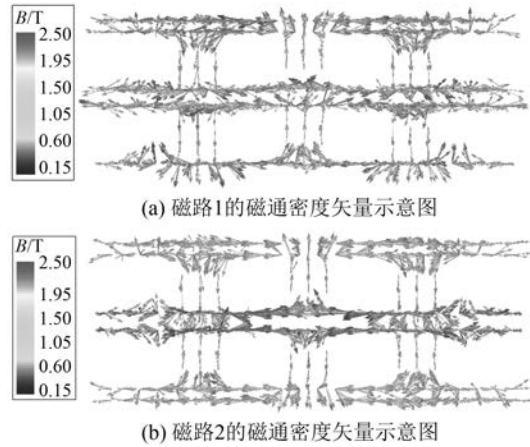


图 4 电磁制动器磁通密度矢量示意图

密度矢量形成的闭合路径与第 2.2 节中设想的磁路 1、磁路 2 的闭合磁通路径相吻合, 表明这两种磁通路径结构成立。

4 两种磁路下电磁制动器的比较

4.1 两种磁路下电磁制动器转子电涡流的比较

由于集肤效应, 电涡流主要分布在运动导体靠近磁极两侧的表层中^[15]。在 $t = 30$ ms 时, 两种磁路下电磁制动器转子电涡流密度云图、电涡流密度矢量如图 5、图 6 所示。

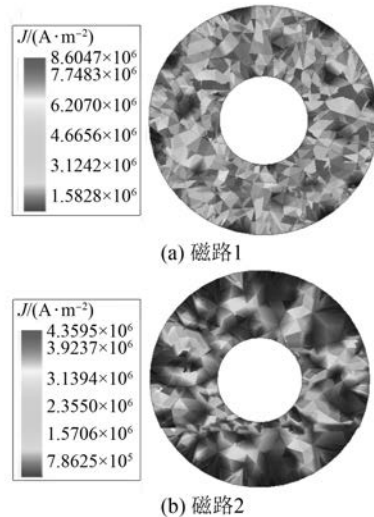


图 5 电磁制动器转子电涡流密度云图

图 5 所示为两种磁路下转子表面电涡流分布情况, 可以看出涡流主要分在线圈作用的部分, 未被线圈作用的部分涡流值很小。磁路 1 的电涡流密度明显大于磁路 2 的电涡流密度。图 6 所示为

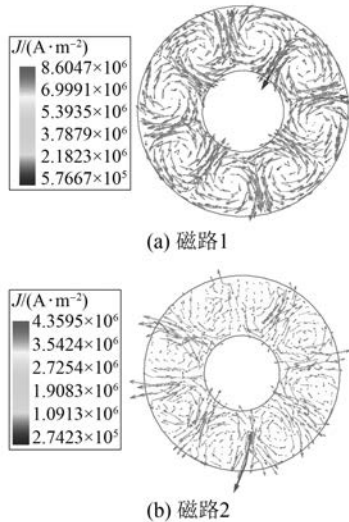


图6 电磁制动器转子电涡流密度矢量示意图

两种磁路下转子表面的电涡流矢量,电涡流流成闭合环状,8个励磁绕组形成了8个电涡流流环线。

4.2 两种磁路下电磁制动器制动力矩的比较

制动力矩是衡量电磁制动器使用性能的重要指标^[16]。在Maxwell 3D瞬态场仿真中时间步长设为1 ms,仿真时间设为80 ms,共80步。两种磁路下制动力矩的响应曲线如图7所示。

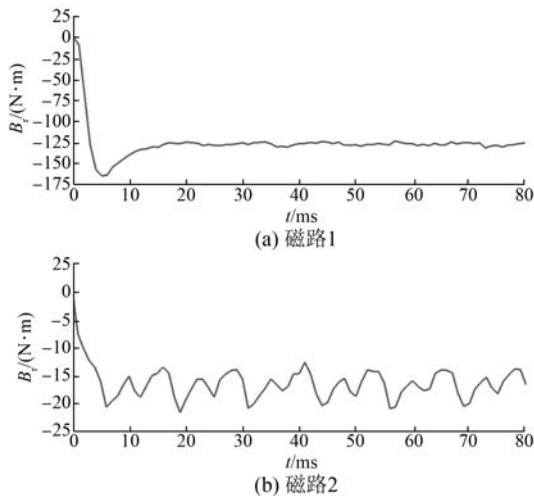


图7 电磁制动器制动力矩的响应曲线

由图5、图6可以看出磁路1制动器制动力矩的响应时间约为20 ms,制动力矩约稳定在125 N·m;磁路2制动器制动力矩的响应时间约为10 ms,制动力矩稳定在15~20 N·m,并且稳定时制动力矩比磁路1制动力矩波动大。

4.3 不同励磁电流下两种磁路电磁制动器制动力矩的比较

设置绕组励磁电流为6~10 A,选取步长为1 A,仿真时间步长设为1 ms,仿真时间设为50 ms,不同励磁电流下两种磁路制动器制动力矩的响应曲线如图8所示。

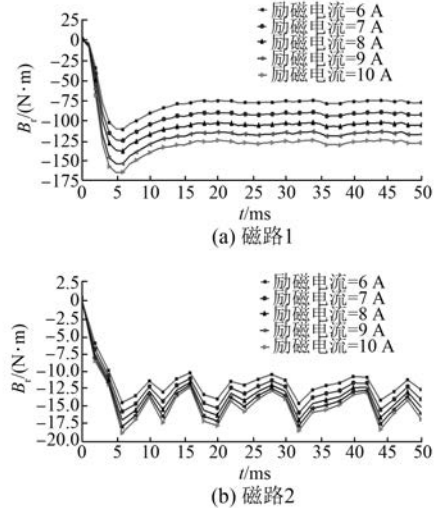


图8 不同励磁电流下制动器制动力矩响应曲线

由图8可以看出,无论是磁路1还是磁路2,随着励磁电流的增加,制动力矩都增大。那是由于随着励磁电流增加,气隙磁感应强度增大,进而制动力矩增大,但磁路2制动器力矩增大的幅度比磁路1小。

4.4 不同转子材料下两种磁路电磁制动器制动力矩的比较

设置绕组励磁电流为10 A,仿真时间步长设为1 ms,仿真时间设为50 ms,不同转子材料下两种磁路制动器制动力矩的响应曲线如图9所示。

由图9可以看出,无论是磁路1还是磁路2,转子材料为铜、铝时的制动力矩远小于转子材料为钢时的制动力矩。在转子为同一种材料的情况下,磁路1的制动力矩明显大于磁路2。铜、铝的磁导率很低,不易导磁,在电磁制动器中,转子作为磁路的一部分,使用磁导率高的材料有利于增大制动力矩。

4.5 不同气隙长度下两种磁路电磁制动器制动力矩的比较

设置绕组的励磁电流为10 A,仿真时间步长设为1 ms,仿真时间设为50 ms,不同气隙长度下两

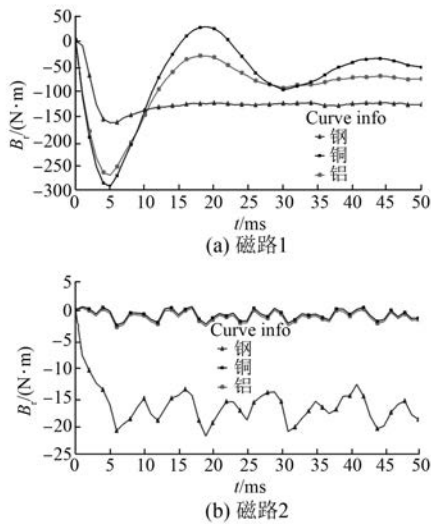


图9 不同转子材料下制动器制动力矩响应曲线

种磁路制动器制动力矩的响应曲线如图 10 所示。

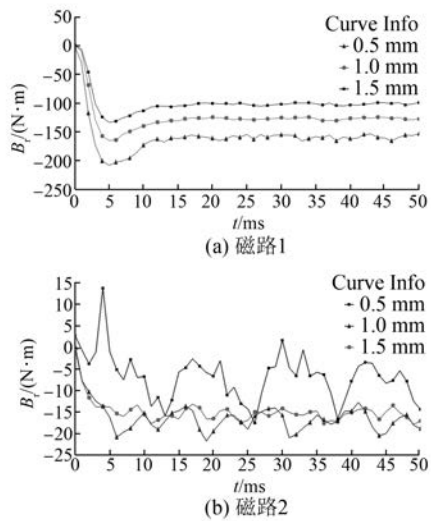


图 10 不同气隙长度下制动器制动力矩响应曲线

由图 10 可以看出,磁路 1 中随着气隙长度减小,制动力矩逐渐增大。减小励磁绕组和转子间的气隙长度,可以减小磁路中的磁阻,增大磁路中的磁感应强度,从而增大制动力矩。磁路 2 中气隙长度变化时,制动力矩变化不明显,且相同气隙长度下磁路 2 的制动力矩远小于磁路 1 的制动力矩。

5 结 语

本文针对双定子单转子电磁制动器研究了两种磁路方案。通过有限元法对制动器进行仿真分

析,验证了电磁制动器两种磁路的可行性。比较了两种磁路下制动器的转子电涡流、制动力矩,不同励磁电流下制动力矩响应情况,不同转子材料下制动力矩响应情况以及不同气隙长度下制动力矩响应情况,得出以下结论:

- (1) 双定子单转子电磁制动器的两种磁路结构可行。
- (2) 磁路 1 制动器的制动力矩明显大于磁路 2 制动器的制动力矩,响应时间略大于磁路 2 的响应时间。磁路 2 制动器的制动力矩比磁路 1 制动器的制动力矩波动大,因此第一种磁路结构制动特性优于第二种。
- (3) 适当增加励磁电流有利于提高制动力矩。
- (4) 转子材料为钢时的制动力矩远大于转子材料为铜、铝时的制动力矩。
- (5) 适当减小励磁绕组和转子间的气隙长度有利于提高制动力矩。

【参 考 文 献】

[1] EDWARDS J D, JAYAWANT B V. Permanent magnet linear eddy current brake with a non-magnetic reaction plate [J]. IEEE Proc Electr Power Appl, 1999, 146(6): 627-631.

[2] EBRAHIMI B. Development of Hybrid Electromagnetic Dampers for Vehicle Suspension Systems[D]. Waterloo: University of Waterloo, 2009.

[3] ZAMANI A. Design of a controller for rail eddy current brake system[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2014, 4(2): 38-44.

[4] WAGN P J, CHIUH S J. Analysis of eddy-current brakes for high speed railway[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(4): 1237-1239.

[5] WALLACE A, JOUANNE A V, WILLIAMSON S, et al. Performance prediction and test of adjustable, permanent-magnet, load transmission systems[C] // Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference, 2001: 1648-1655.

[6] 张端军, 顾晓丹, 何仁. 电涡流制动的工作原理及其在汽车上应用[J]. 机械设计与制造, 2014(1): 121-123.

[7] ONUR M O, KOCABAS D A, HABIRFINITE I. Elements analysis of a small power eddy current brake [C] // Proceedings of 15th International Conference

- Mechatronika, 2012; 1-5.
- [8] GULBAHCE M O, KOCABAS D A, ATALAY A K. Determination of the effect of conductive disk thickness on braking torque for a low power eddy current brake [C] // 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2013; 1272-1276.
- [9] GULEC M, YOLACAN E, AYDIN M. Design, analysis and real time dynamic torque control of single-rotor—single-stator axial flux eddy current brake [J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10 (9): 869-876.
- [10] GULABAHCE M O, KOCABAS D A, ATALAY A K. A study to determine the act of excitation current on braking torque for a low power eddy current brake [C] // 2013 International Electric Machines & Drives Conference, 2013; 1321-1325.
- [11] GULABAHCE M O, KOCABAS D A, NAYMAN F. Investigation of the effect of pole shape on braking torque for a low power eddy current brake by finite elements method [C] // 2013 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 2013; 263-267.
- [12] 陈东, 范帅. 基于 Maxwell 的盘式制动器辅助电磁制动装置的有限元分析 [J]. 新技术新工艺, 2013 (9): 32-35.
- [13] 陈东, 范帅. 盘式制动器辅助电磁制动装置的结构优化设计 [J]. 机械设计, 2013, 30(5): 48-52.
- [14] 张端军, 何仁, 顾晓丹. 车用电磁制动器制动力的计算与分析 [J]. 汽车工程, 2013, 35(10): 904-907, 920.
- [15] EDWARDS J D, JAYAWANT B V, DAWSON W R C, et al. Permanent magnet linear eddy-current brake with a non-magnetic reaction plate [J]. IEE Proc-Electr Power Appl, 1999, 146(6): 627-631.
- [16] 何仁, 胡东海, 张端军. 汽车电磁制动技术的研究与进展 [J]. 汽车安全与节能学报, 2013 (3): 202-214.

收稿日期: 2017-10-10

(上接第 13 页)

【参考文献】

- [1] 张德民, 徐仕源. 基于自抗扰的自适应控制在永磁同步电机控制中的应用 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(4): 70-73.
- [2] 薛薇, 路雅立. 永磁同步电机调速系统的模糊自抗扰控制 [J]. 电机与控制应用, 2013, 40(8): 57-60.
- [3] 韩京清. 控制理论——模型论还是控制论 [J]. 系统科学与数学, 1989, 9(4): 328-335.
- [4] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术 [J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
- [5] 高志强. 自抗扰控制思想探究 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498-1510.
- [6] 刘旭东, 李珂, 孙静, 等. 基于广义预测控制和扩展状态观测器的永磁同步电机控制 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(12): 1613-1619.
- [7] LIU H, LI S. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 1171-1183.
- [8] LI G, XU W, ZHAO J, et al. Precise robust adaptive dynamic surface control of permanent magnet synchronous motor based on extended state observer [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(5): 590-599.
- [9] CARPIUC S C, LAZAR C. Fast real-time constrained predictive current control in permanent magnet synchronous machine-based automotive traction drives [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(4): 326-335.
- [10] LI J, REN H P, ZHONG Y R. Robust speed control of induction motor drives using first-order auto-disturbance rejection controllers [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 712-720.
- [11] YANG M, LANG X, LONG J, et al. A flux immunity robust predictive current control with incremental model and extended state observer for PMSM drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12): 9267-9279.

收稿日期: 2017-09-27