

基于有限元法的永磁缓速器涡流场分析

叶乐志, 李德胜

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124)

摘要: 为了提高缓速器气隙磁场和制动力矩计算精度, 将矢量磁位法应用到永磁缓速器涡流场有限元计算中, 并考虑转子磁导率的非线性以及涡流产生磁场对永磁体磁场削弱作用. 应用电磁场有限元仿真软件, 采用混合自动剖分技术, 得到缓速器电磁场数值解. 试验结果表明, 静态工作间隙磁感应强度计算值与试验值误差在 5% 以下, 永磁缓速器制动力矩数值计算值与试验值吻合较好.

关键词: 辅助制动; 涡流场; 有限元法; 永磁缓速器

中图分类号: U 463.5

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2010)12-1613-05

随着现代汽车技术的快速发展, 人们在追求汽车动力性和舒适性的同时, 对汽车行车的安全性提出了更加迫切的要求. 车用永磁缓速器是近年发展起来的一种新型节能、环保的辅助制动装置, 是整车制动系统的一个主要组成部分^[1-3]. 永磁缓速器电磁场计算一直受到国内外学者的重视, 用多种方法计算永磁缓速器电磁场^[4-8]取得了较好的计算效果. 本文在上述工作的基础上, 将矢量磁位法应用到永磁缓速器涡流场计算中, 采用四面体和六面体对场域进行三维剖分, 在计算中考虑转子磁导率的非线性以及涡流产生磁场对永磁体磁场削弱作用, 提高了缓速器气隙磁场和制动力矩的计算精度.

1 数学模型

1.1 基本假设

在分析转子涡流去磁场过程中, 作如下简化和假定^[9-10]:

- 1) 转子简化成圆环, 略去转子外表面散热叶片影响.
- 2) 转子电导率为常数, 其磁导率不受温度影响且不考虑磁路的磁滞损耗和杂散损耗的影响.
- 3) 忽略涡流场中位移电流及磁场的空间高次谐波.

为减小模型的尺寸, 有效地节省计算资源, 利用周期边界条件和对称边界条件建立永磁缓速器 1/16 模型, 如图 1(a)所示. 在上述假定下, 缓速器求解区域如图 1(b)所示. 转子和定子材料分别为 20 C M o 钢和 20 C F. 为考虑转子磁导率的非线性, 转子材料的磁导率应用 20 C M o 钢的磁特性曲线. 钕铁硼永磁体 N35SH 为平行磁化, 剩磁 B_r 为 1.2 T. 在缓速器工作时, 涡流只在转子上产生, 转子电导率 σ 为 7×10^6 S/m.

1.2 基本方程

由于转子内部存在涡流, 引入复矢量磁位 A , 并采用规范方法, 电磁场方程为^[11-12]

$$\nabla \times \nabla \times A + j\omega\sigma A - J_s = 0 \quad (1)$$

式中, ν 为磁阻率; σ 为电导率; J_s 为电流密度. 在永磁体中不存在涡流, 方程为

$$\text{rot}(\nu \text{rot} A) = \nu \text{rot} M \quad (2)$$

式中, M 为磁化强度矢量; ν_0 为真空磁阻率.

收稿日期: 2008-12-11

基金项目: 北京市教育委员会科技成果转化基金资助项目 (JP001014200801); 北京工业大学博士创新计划基金资助项目 (bex-2009-001).

作者简介: 叶乐志 (1982-), 男, 江西乐平人, 博士研究生.

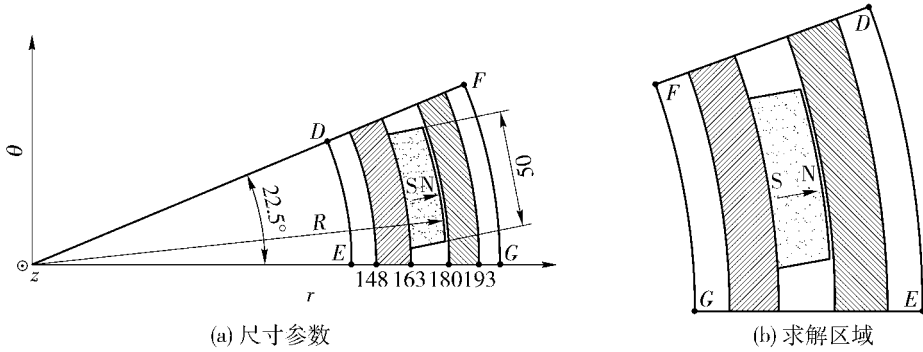


图 1 永磁缓速器计算模型

Fig 1 Permanent magnet retarder analysis model

采用准三维方法,将 A 和 J_s 表示为

$$A = [A_r(r, z) \mathbf{i} + j A_\theta(r, z) \mathbf{j} + A_z(r, z) \mathbf{k}] e^{j p \theta} \tag{3}$$

$$J_s = [J_r(r, z) \mathbf{i} + j J_\theta(r, z) \mathbf{j} + J_z(r, z) \mathbf{k}] e^{j p \theta} \tag{4}$$

式中 p 为永磁体磁极对数,此时磁通密度矢量为

$$B = \left[j \left(-\frac{p}{r} A_z - \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) \mathbf{j} + \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(r A_\theta)}{\partial r} - \frac{p}{r} A_r \right] \mathbf{k} \right] e^{j p \theta} \tag{5}$$

从式 (1) ~ 式 (5) 能得到磁通密度和涡流分布.

1.3 边界条件和网格划分

1) 在 GE 边界面上,磁场强度与边界面垂直,有

$$\mathbf{v}_n \times (\nabla \times A) = \left[\frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \right] \mathbf{i} - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(r A_\theta)}{\partial r} - \frac{p}{r} A_r \right] \mathbf{j} = 0 \tag{6}$$

2) 在 DF 边界面上,磁场强度在边界两边对称,有

$$\mathbf{v}_n \cdot (\nabla \times A) = j \left[\frac{1}{r} \frac{\partial(r A_\theta)}{\partial r} - \frac{p}{r} A_r \right] = 0 \tag{7}$$

且 DF 为垂直边界条件,图 2 表现了边界处磁通密度和涡流密度的关系,有

$$B_1 = B_2, J_1 = J_2 \tag{8}$$

3) FG 和 DE 边界为无穷远边界,有

$$A = 0 \tag{9}$$

采用混合自动剖分技术对网格划分,划分后的模型见图 3. 模型最小网格单元为 3 mm,剖分单元为四面体和六面体.

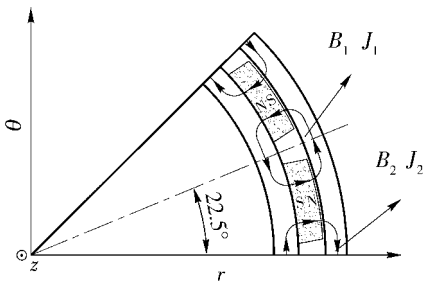


图 2 边界条件上磁通密度和涡流密度

Fig 2 Flux density and eddy current density on boundary

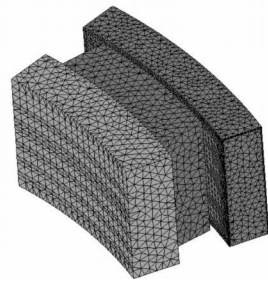


图 3 永磁缓速器网格划分

Fig 3 Permanent magnet retarder mesh

2 数值计算

MAG-Studio是由日本综合研究所(JRI)开发的功能齐全、应用广泛的电磁场分析软件. 软件可以对各种电机及电磁设备进行精确的电磁场分析, 为用户提供设计上的帮助, 降低用户产品的开发周期. 本文应用 MAG-Studio对永磁缓速器的涡流场进行分析.

2.1 磁通密度

图 4为缓速器 1 000 r/min时转子上的磁通密度分布. 与静止时相比, 磁通密度矢量方向发生改变, 并在转子内表面存在轴向分量, 这是转子上涡流产生的磁场与永久磁铁磁场作用的结果.

2.2 涡流密度

图 5为转子在不同速度下涡流分布. 图中涡流方向所产生的磁场正好和永久磁铁产生的磁场相反, 最大涡流密度产生在转子正对永久磁铁边缘处且在旋转方向前侧.

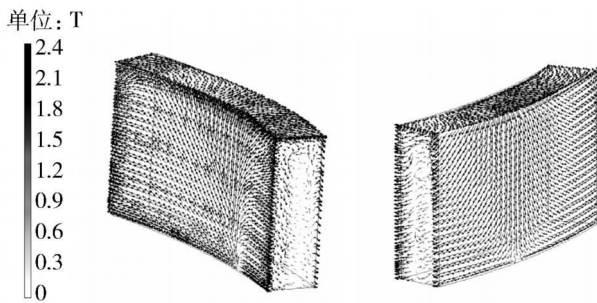


图 4 转子磁通密度分布
Fig 4 Flux density distribution on rotor

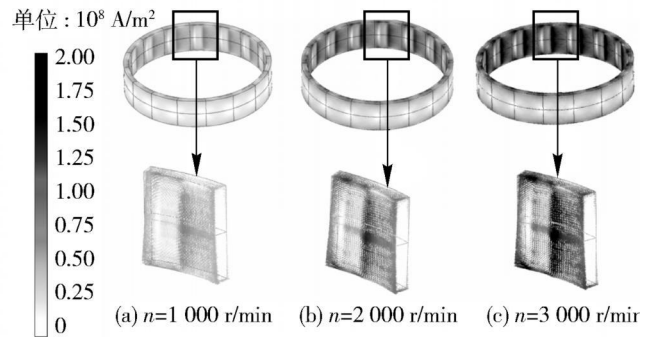


图 5 指定速度下转子涡流分布
Fig 5 Eddy current distribution on rotor under detem inate speed

3 试验

将设计的永磁缓速器进行台架试验, 图 6为试验结构原理图. 电机经过变速箱减速后, 轴上安装扭矩仪用于测量缓速器的制动力矩.

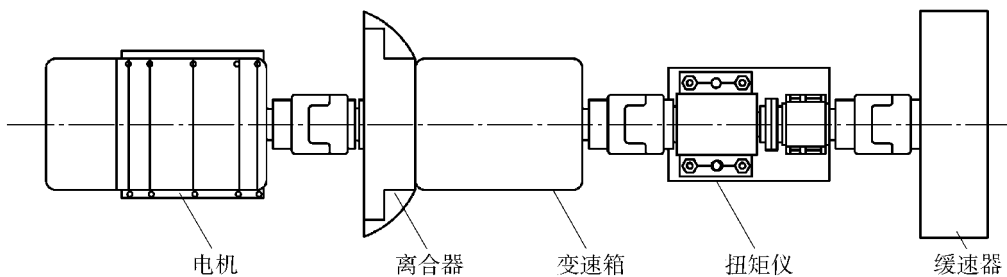


图 6 台架试验结构原理图
Fig 6 Test structure drawing

用数字特斯拉计测量永磁缓速器静止时工作气隙的磁感应强度, 试验中所用特斯拉计参数如下: 测量范围 0~2 T; 最高分辨率 0.1 mT; 在 25 mT~1.5 T范围内, 准确度 $\leq \pm 1\%$ (读数) $\pm 0.1\%$ (满度). 图 7为缓速器静止时工作间隙磁感应强度计算值和测量值曲线, 计算值和测量值误差不超过 5%, 数值计算精度较高.

图 8对比了转子在 1 000、2 000、3 000 r/min 情况下缓速器制动力矩的数值计算值和测量值,计算值和测量值吻合较好. 在 3 000 r/min 时,缓速器测量值低于计算值,这可能是因为高速情况下转子温度急剧升高,转子材料属性发生改变,导致制动力矩下降明显,而数值计算中没有考虑转子电导率和磁导率的温升影响.

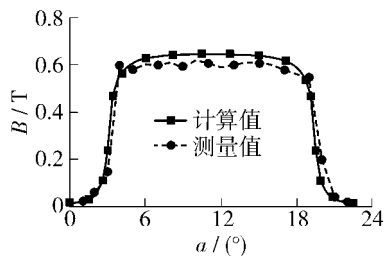


图 7 工作间隙磁感应强度

Fig 7 Flux densities in the air gap

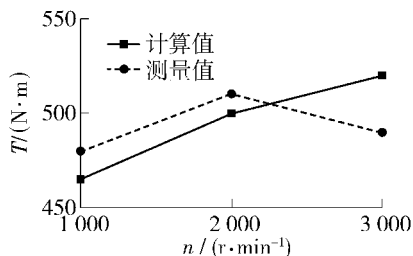


图 8 缓速器制动力矩曲线

Fig 8 Braking torque curve

4 结论

1) 用复矢量磁位方法描述缓速器动态涡流场,通过施加边界条件和划分有限元网格得到磁场和涡流场分布.

2) 静态工作间隙磁感应强度计算值与试验值误差在 5% 以下,数值计算值精度较高.

3) 永磁缓速器制动力矩计算值与试验值吻合较好.

参考文献:

- [1] 朱宁,王永华. 轻型永久磁铁式汽车缓速器[J]. 客车技术与研究, 2002, 24(4): 19-20.
ZHU Ning WANG Yong-hua Light vehicle permanent magnet retarder[J]. Bus Technology and Research, 2002, 24(4): 19-20. (in Chinese)
- [2] 胡青训,何仁. 车用永久磁铁缓速器工作原理及使用[J]. 客车技术, 2005, 3: 22-25.
HU Qing-xun HE Ren Working principle and usage of vehicle-used permanent magnet type retarder[J]. Bus Technology, 2005, 3: 22-25. (in Chinese)
- [3] 赵小波,姬长英,周俊,等. 永磁涡流制动技术及其应用研究[J]. 新技术新工艺, 2007, 10: 58-62.
ZHAO Xiao-bo JI Chang-ying ZHOU Jun et al Application research and summary of permanent magnet eddy current braking[J]. New Technology & New Process, 2007, 10: 58-62. (in Chinese)
- [4] GAY S E, EHSANIM. Parametric analysis of eddy current brake performance with by 3D finite element analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(2): 319-328.
- [5] 黄亦其,姬长英. 车用永磁式缓速器电磁场分析方法[J]. 河南科技大学学报:自然科学版, 2007, 28(6): 28-32.
HUANG Yi-qi JI Chang-ying Analysis methods on magnetic field of permanent magnet retarder[J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2007, 28(6): 28-32. (in Chinese)
- [6] 唐永春,叶云岳. 永磁涡流制动的有限元分析和设计[J]. 微电机, 2006, 39(3): 34-36.
TANG Yong-chun YE Yun-yue Analysis of permanent magnet eddy-current brake with finite element method[J]. Micromotors Servo Technique, 2006, 39(3): 34-36. (in Chinese)
- [7] 张逸成,沈玉琢,庞乾麟,等. 旋转涡流制动器电磁机构的设计研究[J]. 铁道学报, 1998, 20(6): 22-27.
ZHANG Yi-cheng SHEN Yu-zhuo PANG Qian-lin et al Design research on electromagnetic system of rotating eddy current brake[J]. Journal of the China Railway Society, 1998, 20(6): 22-27. (in Chinese)
- [8] TAKAHASHI Nario YAMADA Chuji KUWAHARA Tohru. Optimization of permanent magnet type of retarder using 3-D finite element method and direct search method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(5): 2996-2999.
- [9] ZHAO Xiao-bo JI Chang-ying Analysis of flux leakage in novel permanent magnet type eddy current retarder for vehicle applications[C]// IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, September 3-5, 2008, Harbin; IEEE Press, 2008: 1-4.

- [10] MURAMATSU N K, TAKAHASHI N, HASHIO T. 3-D eddy current analysis in moving conductor of permanent magnet type of retarder using moving coordinate system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(2): 1312-1317.
- [11] CHARIM V K, KONRAD A, PALMO M A, et al. Three-dimensional vector potential analysis for machine field problems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1982, 18(2): 436-446.
- [12] 裴远航, 董人麟. 用有限元方法计算汽轮发电机端部涡流场和温度场 [J]. 电工技术学报, 1989(2): 17-24.
PEI Yuan-hang, DONG Ren-lin. A computation of eddy current and temperature field of stator end of turbine generator by finite element method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1989(2): 17-24. (in Chinese)

Eddy Current Field Analysis in Permanent Magnet Retarder Based on Finite Element Method

YE Le-zhi LI De-sheng

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology,
Beijing 100124, China)

Abstract: In order to improve the calculation accuracy of air-gap magnetic field and retarder brake torque, vector magnetic method is applied to eddy current field finite element analysis in permanent magnet retarder, and non-linear permeability of rotor and the weakening effect in magnetic field generated by eddy current magnetic field are considered. By using finite element simulation software and hybrid automatic mesh generation techniques, a numerical solution of permanent magnet retarder electromagnetic fields is obtained. Experiments show that the discrepancy of flux densities in the air gap between measurement and calculation is below 5%, and the calculated braking torque is fairly in good agreement with the measured one.

Key words: auxiliary brake; eddy current field; finite element method; permanent magnet retarder

(责任编辑 梁 洁)