

文章编号:1000-582X(2012)07-001-06

轮毂电机嵌入式电磁驻车制动设计与仿真

陈齐平¹,舒红宇¹,瞿飞俊¹,谢鑫¹,谢安源²

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400044;2. 重庆神驰机电有限公司,重庆 400700)

摘要:根据电磁理论和电磁制动器的工作原理,设计了一种能耗低、嵌入式轮毂电机内部的电磁断电制动新型结构,并且提出了分析计算方法。对电磁制动器进行了磁路分析,建立了数学模型。通过 Ansoft 软件建立了三维有限元模型,对电磁制动器的电磁性能和工作特性进行分析,并对电磁制动器工作过程进行动态仿真研究。分析了电磁制动器内部复杂的磁场强度分布和电密分布等,得到了激励绕组电流、电磁力与工作气隙以及衔铁位移等变化曲线。电磁吸力的实验结果与仿真计算结果一致,表明电磁有限元方法分析电磁制动器的电磁性能是准确可靠的,能满足电动代步车驻车制动系统的灵敏性、可靠性和特殊要求。

关键词:电磁制动器;Ansoft;有限元法;性能分析;仿真

中图分类号:U463.51

文献标志码:A

Design and simulation of electromagnetic parking brake embedded in-wheel motor

CHEN Qiping¹, SHU Hongyu¹, QU Feijun¹, XIE Xin¹, XIE Anyuan²

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Chongqing Senci Electrical & Mechanical Co., Ltd, Chongqing 400700, China)

Abstract: Based on the electromagnetic theory and the work principle of electromagnetic parking brake, a new structure power breaker electromagnetic brake is designed, which is low energy consumption and embedded in in-wheel motor, and a kind of analysis computation method is proposed. Through the analysis of magnetic circuit of electromagnetic brake, the mathematical model is established. A three-dimensional finite element model is established via Ansoft software with the purpose of analyzing the electromagnetic property and work performance of electromagnetic brake, as well as simulating the dynamic work process of electromagnetic brake. By profoundly investigating the intricate internal magnetic field strength and power density distribution of the electromagnetic brake, the current research has obtained the exciting coil with time curve, electromagnetic force with work air gap curve and the armature displacement with time curve, etc. The conformity of the final simulation results with the experimental data indicates that the electromagnetic finite element method is accurate and reliable to analyze the electromagnetic property of electromagnetic brake, which can meet the requirements of sensitivity, reliability and specialization in electric scooter parking brake system.

Key words: electromagnetic brake; Ansoft; finite element method; performance analysis; simulation

收稿日期:2012-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175532);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS12110010)

作者简介:陈齐平(1984-),男,重庆大学博士研究生,主要从事汽车电控及机电一体化研究。

舒红宇(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail) shycqu@163.com。

电动代步车是电动车发展主流背景下,应老龄化社会以及照顾残疾人等需要而出现的。它是为老年人和残疾人等生活通行提供便利的一种新兴微型环保电动车,其研究与开发具有重要的社会意义和广阔的市场前景。电磁制动器具有结构紧密、安装方便、噪声低、高效性、灵敏性、制动可靠等优点^[1-2],是一种理想的电气自动化器件,应用到电动代步车驻车制动系统具有重要意义。

车辆电磁制动器是一种用电磁方式驱动的制动器,普遍装备在房车及拖车上。电磁体作为电磁制动器的核心部件,其性能好坏直接影响制动系统的可靠性、寿命和能耗^[3]。侯永涛等^[4]通过对电磁制动器电磁体的工作机理及受力情况进行分析,建立了基于集成设计平台的电磁体优化算法流程,实现了计算机辅助设计,但缺乏对其电磁体内部复杂电磁场分析;Kawase 等^[5]采用三维有限元法分析了一种永磁电磁体的操作特性,但缺乏对边界约束说明以及试验验证;徐兴等^[6]提出了电磁体非对称的准椭圆结构,并对此进行了理论计算;李仲兴等^[7]采用有限元法建立电磁体-摩擦环三维模型,对电磁体进行电磁场分析,得到内部磁感应强度分布,但他们都缺乏对电磁体动态特性进行分析研究。

笔者在研制电动代步车驻车电磁制动器时,为了更好地了解电磁体内部复杂电磁场,提高电磁体的设计进度,采用 Ansoft 公司的电磁分析软件对电磁制动器的电磁性能和工作特性进行分析,对电磁制动器工作过程进行动态仿真研究,并进行了实验验证。研究表明有限元磁场分析方法对电磁制动器电磁体复杂磁场分析是准确可靠的,且此方法应用到电动代步车驻车电磁制动器开发设计,是一种高效率、低成本及可靠性高的方法。

1 磁路分析与数学模型建立

根据电磁理论知识对电磁制动器进行磁路分析,整个磁路主要由运动衔铁磁势、磁轭铁心磁势和工作气隙磁势组成,通过插值法、数学积分等^[8-9],可以计算出电磁制动器的磁阻,进而可以计算电磁吸力。电磁制动器等效磁路如图 1 所示,图中 F_M 为磁动势, δ_{a1} 和 δ_{a2} 为运动衔铁磁导, δ_{b1} 和 δ_{b2} 为工作气隙磁导, δ_{c1} 、 δ_{c2} 和 δ_{c3} 为磁轭铁心磁导,且箭头方向表示电磁制动器的磁路中磁感应强度的方向,也即为磁钢中磁通的流向。

根据电磁学理论知识,忽略边缘扩散,工作气隙的磁导计算公式为

$$\delta = \frac{\mu \times s}{\sigma}, \quad (1)$$

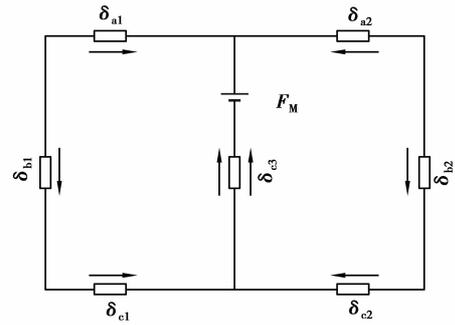


图 1 电磁制动器等效磁路

式中: s 为磁路的有效横截面积; μ 为磁路中材料的磁导率; σ 为磁路的工作气隙有效长度。

在电磁制动器工作过程,线圈产生的电场能量为 W , 矢量磁位为 \mathbf{A} , 运动衔铁固定在自身坐标系,由时间偏导数,可得运动方程式。电感随着工作气隙而发生变化,因而推导出线圈磁链的变化率为

$$W = \frac{\epsilon}{2} \int_{\Omega} |\nabla \varphi|^2 d\Omega = \frac{\epsilon}{2} \sum_{e=1}^n \int_{\sigma^e} \sum_{e=1}^n \int_{\sigma^e} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] d\Omega, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{v} \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_s - \delta \times \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \delta \times \nabla - \nabla \times H_c + \delta \times \mathbf{v} \times \nabla \times \mathbf{A}, \quad (3)$$

$$L(\sigma) = \frac{2W}{i^2}, \quad (4)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = L(\sigma) \times \frac{di}{dt} + \frac{di}{dt} \times \frac{d\sigma}{dt} \times i. \quad (5)$$

式(2)~(5)中: ϵ 为介电常数; Ω 为积分路径确定的曲面; φ 为线圈磁通量; \mathbf{J}_s 为均匀分布的电流密度; ψ 为线圈中磁链; $L(\sigma)$ 为线圈电感与工作气隙的函数; i 为线圈的电流; t 为运动衔铁的运动时刻。

根据麦克斯韦方程中的法拉第电磁感应定律,任何电场中,闭合回路中的感应电动势与穿过此回路的磁通量随时间的变化率成正比,其积分表达式为式(6),由积分表达式导出能用有限元处理电磁问题的微分方程为式(7),从而进一步推导出感应电动势为式(8)。

$$\oint_{\Gamma} \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \iint_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \times d\mathbf{s}, \quad (6)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (7)$$

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = - N \times \frac{d\varphi}{dt}. \quad (8)$$

式(6)~(7)中: Γ 为曲面 Ω 的边界; \mathbf{E} 为电场强度; l 为积分路径; \mathbf{B} 为磁感应强度; e 为感应电动势。

在电磁制动器工作过程时,根据电压平衡方程,可得线圈两端的电压为

$$V = ri + N \times \frac{d\phi}{dt}, \quad (9)$$

式中: V 为线圈的端电压; r 为线圈的电阻; N 激励线圈匝数。由式(9)可以推导出线圈通电时,电流随时间的变化规律为指数函数。

根据牛顿第二运动定律,忽略空气阻力时,可以推导出电磁制动器的电磁吸力为

$$F(\sigma) = M \times \frac{dv(\sigma)}{dt}, \quad (10)$$

式中: $F(\sigma)$ 为电磁吸力; M 为运动衔铁的质量; $v(\sigma)$ 为运动衔铁速度与工作气隙的函数。由上面的动态微分方程组,建立了数学模型,经过迭代计算,即可得到电磁吸力^[10-11]。

2 有限元模型建立与分析

笔者研究的对象是电动代步车驻车系统的电磁制动器,采用 ansoft 电磁有限元软件进行建模和仿真分析。首先根据电动代步车驻车系统的可靠性、操纵灵敏性、快速响应及节能环保等要求,优化设计出电磁制动器主要技术参数,并通过 Maxwell 3D 模块生成有限元三维模型,如图 2 所示,最后采用 Maxwell 3D 中的瞬态模块进行有限元计算^[12]。电磁制动器三维计算模型主要由激励绕组、磁轭铁心、运动衔铁、band 运动区域和真空求解域构成。电磁制动器有限元模型的磁通经流的路径为磁轭铁心、运动衔铁及真空求解域。

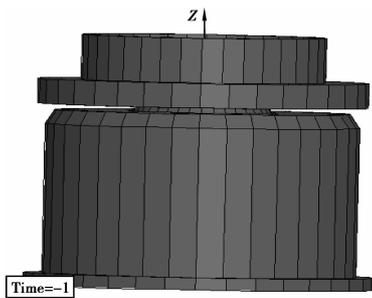


图 2 三维有限元模型

2.1 外电路模型建立与分析

采用 ansoft 软件的 Maxwell Circuit Editor 模块建立外电路模型,与前面建立的几何模型构成一套完整的有限元模型,利用场路耦合有限元计算来实现激励绕组的特殊激励,从而进行准确的动态仿真分析。电动代步车驻车电磁制动器的激励电路原理图如图 3 所示,电路原理图主要由直流电压源、FEM 线圈、电流表、线圈等效电阻组成。图 3 中, V 为激励电源, L 为 FEM 线圈, A 为电流表,PWM 为脉宽电压调节模块, W 为开关, r 为线圈等效电阻。

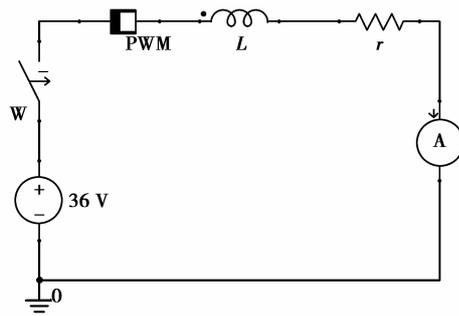


图 3 激励电路原理图

由图 3 可知,电磁制动器的激励电路工作原理是采用直流激励,电路从驱动轮毂电机蓄电池中获得 36 V 直流电,通过单片机检测和脉宽电压调节,在激励线圈上会得到脉动直流电压,在线圈内的电流正向流动。当需要驻车或者紧急制动时,只要断电即产生制动,绕组线圈中存储的能量进行电流释放,当电流释放到一定程度时,电磁力小于弹簧的预紧力,弹簧则弹出压在上面的运动衔铁,从而使镶嵌在运动衔铁上的锥形摩擦盘制动轮毂电机^[13-14]。当行驶需要解除制动时,其过程为:先对电磁制动器通以较大电流,克服弹簧力、摩擦力和衔铁惯性而实现快速吸合,从而取消制动。当电磁吸合后,电磁制动器间隙消除,磁阻大大降低,这时通以较小电流维持吸合,以降低电能消耗,达到节能目的。

2.2 有限元网格剖分

电磁有限元软件可以自动进行网格剖分,但为了确保磁路计算与磁场分析准确性,需要进行手动有限元网格剖分^[11]。笔者采用 inside selection 和 surface approximation 方法,将所求解的磁场域划分为 30 905 个单元,图 4(a)为网格剖分整体图和图 4(b)局部放大图。

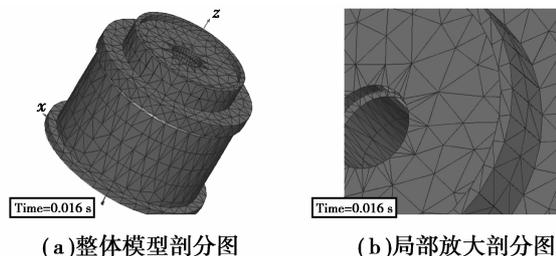


图 4 有限元网格剖分图

从图 4 可知,有限元网格剖分总体比较均匀,其中在磁场变化较大和磁场较强的地方,网格剖分密度要高些,如运动衔铁内圆及面连接处。因此,有限元网格剖分达到预期效果,能满足有限元计算的准确性。

3 电磁制动器动态有限元仿真与分析

在 Ansoft 电磁场有限元软件的 Maxwell 3D 模块中,电动代步车驻车制动系统电磁制动器进行二维瞬态仿真。

3.1 电磁场分析

在对电磁制动器进行三维电磁场分析时,选取第 16 ms 时的磁轭铁心磁通密度云图、运动衔铁磁通密度云图,分别如图 5 和图 6,其余时刻类似分析。由图 5 可知,磁轭铁心内下侧的磁密较大,颜色较深且分布较为集中,而外侧磁密分布较小,这是由于磁轭的内外侧体积不一样以及磁轭铁心内部阶梯结构造成的,所以在设计时需要平衡两侧以及上下的磁密分布,尽可能地加大磁轭铁心利用率。由图 6 可知,运动衔铁的磁密分布不均匀,靠近内孔处的磁密较大,而随着半径增加外侧磁感应强度逐渐减小,这是由运动衔铁内外体积结构以及内部锥形结构造成的。

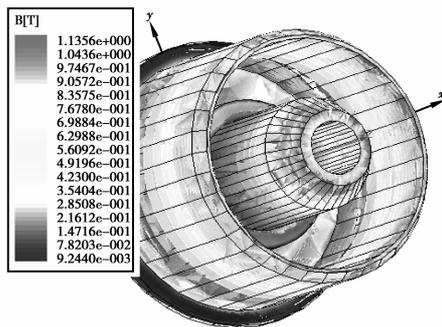


图 5 磁轭铁心磁通密度云图

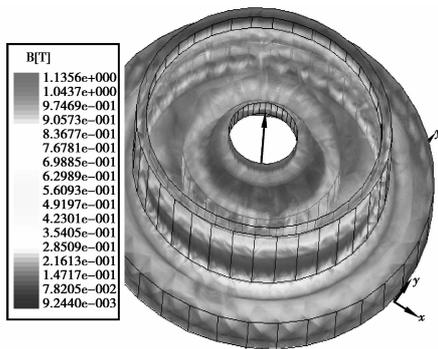


图 6 运动衔铁磁通密度云图

因此,由上分析可知,磁轭铁心与运动衔铁磁感应强度分布较为一致,从而能确定电磁制动器的磁感应强度饱和度分布,这为今后的电磁制动器设计分析提供理论基础。

在电磁制动器激励线圈绕组内,某一刻的电流

密度基本是各处相等的,如图 7 所示。当瞬态场在 16 ms 时,从 Z 轴方向看去,电流的流向为顺时针流动,且电密大小约为 3.2×10^6 A/m²。通过借助磁轭铁心磁通密度云图、运动衔铁磁通密度云图和激励绕组电密矢量图,可以确定电磁制动器内部电磁场的具体分布,以及各个部分磁场的饱和情况,从而更好地为优化电磁制动器的结构提供理论依据。

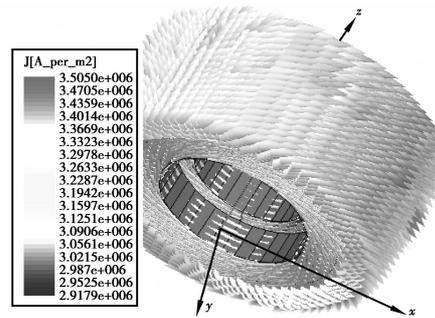


图 7 激励绕组电密矢量图

3.2 动态过程分析

对 Maxwell 3D 建立的三维有限元模型,进行瞬态仿真分析,目的是为了观察电磁制动器运行初始时刻到稳定时刻的电磁制动器性能参数的变化。动态仿真时,蓄电池电压为 36 V,激励线圈匝数为 5 000 匝,线圈电阻为 100 Ω,设衔铁沿 Z 轴负方向运行,运行极限位置为 2.299 mm,因此动态仿真曲线中的负号只表示方向。由图 8 运动位置与时间曲线中的 G 点可知,在 19 ms 时刻,衔铁运动到极限位置 2.299 mm,完成了电磁制动器的加电吸合过程。

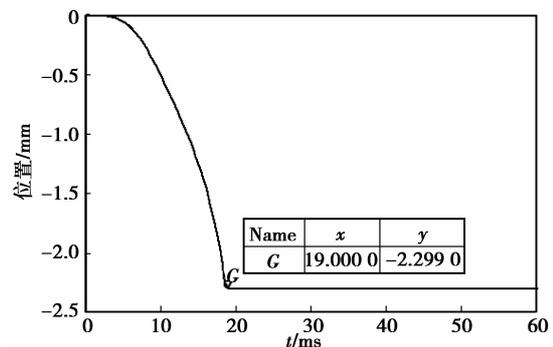


图 8 运动位置曲线

由图 9 激励电流曲线可知,激励线圈在通电瞬间,电流按指数规律增加。在衔铁运动期间,线圈中产生的运动反电动势 $i \times \frac{\partial L}{\partial \sigma} \times \frac{d\sigma}{dt}$ 会增加,从而使自感电动势 $L \times \frac{di}{dt}$ 减小。因为运动衔铁开始运动时,

速度很小,运动反电动势也很小,导致电流增长速度变小。随着运动速度和运动反电动势的增加,电流通过最高点 P 后有下降趋势。从 P 点到 D 点,运动衔铁进入接触阶段,此时运动速度变小,使运动反电动势极性改变但绝对值增加,从而使电流减小。当运动时刻到 D 点,运动反电动势为零,电流重新按新的指数规律增加,直到稳态为止^[15-17]。

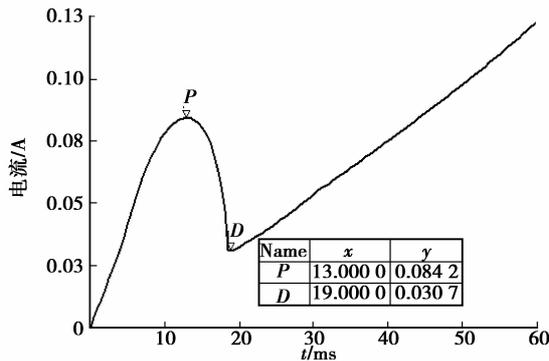


图 9 激励电流曲线

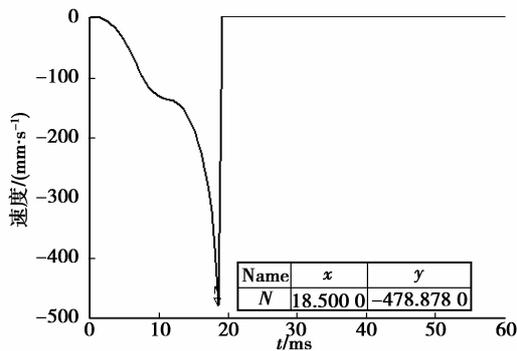


图 10 衔铁速度曲线

由图 10 衔铁速度与时间曲线可知,衔铁运动到 N 点位置时,达到最高速度 478.678 mm/s。在电磁体未饱和状态下,电磁吸力与工作气隙、激励绕组磁链曲线仿真计算结果如图 11 和 12 所示。

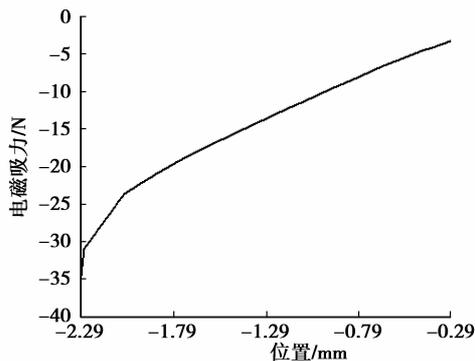


图 11 电磁吸力曲线

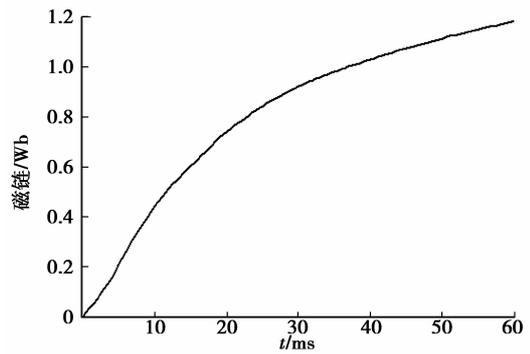


图 12 激励绕组磁链曲线

4 实验对比分析

电动代步车驻车制动系统中,线圈中通电电流与匝数乘积,即安匝数,对电磁体的电磁吸力影响较大。电磁制动器电流来自于电动代步车的车载蓄电池,随着蓄电池的工作时间的增加,其电流也随之下降。因此,非常有必要研究电磁吸力在不同的安匝数下的变化情况。其次,为了验证电磁有限元软件计算电磁体电磁吸力的准确性,本课题建立了测量电磁吸力实验平台,实验平台的方案图如图 13 所示。

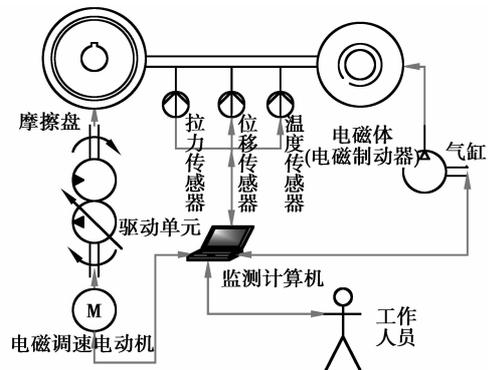


图 13 测量电磁吸力实验平台

主要由摩擦盘、电磁体、拉力传感器、位移传感器、电磁调速电机、监测计算机、气缸等组成。将实验数据与电磁有限元软件计算得到的数据进行比较,如图 14 所示。

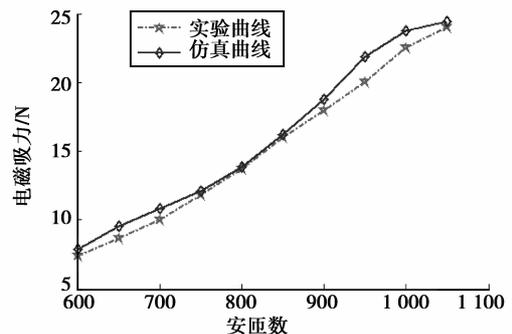


图 14 实验结果与仿真结果对比

由图 14 可知,电磁有限元软件仿真计算结果相对实验结果偏大,但总体上误差不大,且两者变化趋势一致,造成偏差的原因是软件在简化后的理想状态下进行计算,没有考虑边缘磁通泄漏等,因此试验结果验证了电磁有限元计算方法是准确可靠的。

5 总 结

1) 根据电磁理论和动力学原理,设计出一种微型电动车的新型电磁制动器,对其进行了磁路分析,建立了数学模型。

2) 利用 Ansoft 电磁有限元分析软件,在 Maxwell 3D 环境下建立了电磁制动器三维仿真模型,对其进行了电磁性能和动态性能分析,获得了电磁制动器的工作特性和工作规律。仿真分析结果准确反映了电磁制动器的内部复杂磁场分布,为这款新型驻车制动器优化设计提供理论依据。

3) 设计了测量电磁吸力实验平台,将实验数据与电磁有限元软件计算得到的数据进行对比分析,实验结果证明了该方法在工程应用中是准确可靠的。

参考文献:

- [1] Bottauscio O, Chiamopi M, Manzin A. Modeling analysis of the electromagnetic braking action on rotating solid cylinders [J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32(1): 12-27.
- [2] Yu H Q, Wang B F, Li H Q, et al. Influence of electromagnetic brake on flow field of liquid steel in the slab continuous casting mold [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 202(1-3): 179-187.
- [3] Psyk V, Risch D, Kinsey B L, et al. Electromagnetic forming-a review [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(5): 787-829.
- [4] 侯永涛,周孔亢,郭鹏飞. 基于集成设计平台车辆电磁制动器电磁体的优化及稳健设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 121-127.
HOU Yongtao, ZHOU Kongkang, GUO Pengfei. Optimum and robust design of electromagnet for the brake of vehicle based on integrated design environment[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 121-127.
- [5] Kawase Y, Yamaguchi T, Iwashita K, et al. 3-D finite element analysis of dynamic characteristics of electromagnet with permanent magnets [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 1339-1342.
- [6] 徐兴,陈照章,李仲兴. 拖车电磁制动器电磁体工作姿态稳定性的研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(14): 1645-1648.
XU Xing, CHEN Zhaozhang, LI Zhongxing. A study of working-gesture stability of electromagnet for electromagnetic brake of tractor-semitrailer [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2008, 19(14): 1645-1648.
- [7] 李仲兴,周孔亢,许海春,等. 车辆电磁制动器电磁体磁场分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(11): 203-206.
LI Zhongxing, ZHOU Kongkang, XU Haichun, et al. Analysis on magnetic field of electromagnet for electric brake [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(11): 203-206.
- [8] 韩力,范镇南,周光厚,等. 大型水轮发电机电磁场模型及其对温度场的影响[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(9): 47-55.
HAN Li, FAN Zhennan, ZHOU Guanghou, et al. Electromagnetic field models and their influences on the temperature field of large hydro-generator [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(9): 47-55.
- [9] Guo S H. An eigen theory of electromagnetic waves based on the standard spaces [J]. International Journal of Engineering Science, 2009, 47(3): 405-412.
- [10] 江洪,陈燎,祁晨宇,等. 车辆电磁制动器 CAT 系统的开发[J]. 机械工程学报, 2008, 44(12): 261-267.
JIANG Hong, CHEN Liao, QI Chenyu, et al. Development of computer aided test system for vehicle electric brake [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(12): 261-267.
- [11] 赵博,张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- [12] Maviglia F, Albanese R, Alonso A, et al. Electromagnetic analysis of breakdown conditions in JET [J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86: 675-679.
- [13] Junior M T, Gerges S N Y, Jordan R. Analysis of brake squeal noise using the finite element method; a parametric study [J]. Applied Acoustics, 2008, 69(2): 147-162.
- [14] 陈然,孙冬野,刘永刚. 双离合器式自动变速器建模与控制仿真[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(9): 1-7.
CHEN Ran, SUN Dongye, LIU Yonggang. Modeling and control system simulation of automobile DCT [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(9): 1-7.
- [15] 李勇,崔友,陆永平. 一种高速电磁制动器制动过程的动态特性分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 131-135.
LI Yong, CUI You, LU Yongping. Dynamic characteristics of braking process for a high speed electro magnetic brake [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 131-135.
- [16] Hadziselimovic M, Virtic P, Stumberger G, et al. Determining force characteristics of an electromagnetic brake using co-energy [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 320(20): 556-561.
- [17] Tomura S, Kunieda M. Analysis of electromagnetic force in wire-EDM [J]. Precision Engineering, 2009, 33(3): 255-262.