

混合磁悬浮球系统磁场数值计算

高颖^{1,2}, 江东¹, 杨嘉祥¹

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 黑龙江省电力科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 利用有限元法对混合磁悬浮球系统中的磁场及磁力进行了数值计算, 并利用检测系统对混合磁悬浮球间隙中的磁感应强度、磁场力、控制电流进行了测量. 测量数据与计算结果基本相符. 研究结果可为进一步改进磁悬浮系统设计和降低控制功耗提供参考.

关键词: 混合磁悬浮球系统; 磁场; 数值计算; 有限元法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2683(2008)05-0099-04

Magnetic Field Calculation of Hybrid Magnetic Levitation Ball System

GAO Ying^{1,2}, JIANG Dong¹, YANG Jia-xiang¹

(1. School of Electric & Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China;
2. Heilongjiang Electric Power Research Institute, Harbin 150030, China)

Abstract: The finite element method (FEM) is applied to analyze and calculate the magnetic field strength and the magnetic force of the hybrid magnetic levitation ball system, and the magnetic field, force of magnetic field, and control-current are measured in the experimental system. The measured data accord with the calculating results. This investigation can give reference to further improving the magnetic suspension system design and reducing the controller power consumption.

Key words: hybrid magnetic levitation ball system; magnetic field; numerical calculation; finite element method (FEM)

1 前言

磁悬浮技术基本原理是通过控制线圈电流产生不同大小的磁场力, 使得悬浮体受到的磁场力与自身重力相平衡从而实现悬浮. 为实现稳定悬浮, 关键问题是系统结构设计和控制器的设计.

从理论上讲悬浮在空中的物体不做功, 功耗应为零, 因此当前很多设计采用电磁永磁混合磁悬浮系统来降低功耗, 追求“零功率控制”^[1]. 为获得尽可能低的控制功耗, 系统设计的重点之一是电磁铁和永磁铁的结构设计、参数设定以及寻找稳定平衡

点. 目前人们对磁悬浮技术的研究探讨多集中在控制方面^[2-4], 对磁悬浮系统的磁场及磁力分析计算相对较少, 并且在已有的文献中, 多针对特定磁悬浮系统如磁悬浮列车和磁悬浮轴承等进行分析计算^[5-6].

磁悬浮球系统是磁悬浮技术研究的基础, 具有单自由度、无耦合、易于搭建实验平台的优势, 且其系统设计理论、控制理论通用于任何磁悬浮系统. 正是鉴于这种理论通用性和可移植性^[7], 本文搭建了单自由度混合磁悬浮球实验测试系统, 利用有限元软件计算其磁场分布、磁场力大小, 并讨论了其结构参数对系统性能的影响.

收稿日期: 2008-01-16

基金项目: 博士专项资助项目(20040214003).

作者简介: 高颖(1978-), 女, 哈尔滨理工大学硕士研究生.

2 磁悬浮球系统磁场数值模拟

采用电磁场分析软件 Maxwell/2D 静磁场求解器利用虚功法计算磁场力,通过有限元的后处理绘制磁悬浮球系统的磁力线分布、磁场强度分布、磁感应强度分布,并对系统进行二维参数化分析,计算出变气隙、变控制电流作用下的磁场力变化曲线。

2.1 物理模型建立

电磁铁和磁悬浮球为图 1 所示轴对称系统,磁场及磁场力只与电磁铁和永磁铁相关,且磁悬浮球体为塑料材质,在建模时可忽略球体,因此在 $R-z$ 平面等效成如图 2 的二维模型。图中铁芯为纯铁材料,铁心半径 10 mm;长度 90 mm;线圈为铜绕组线,线径 0.9 mm,1 340 匝,9 层;永磁铁选用圆柱形钕铁硼 NdFe35,半径 13.5 mm,厚度 15 mm;气隙距离为 26 mm。

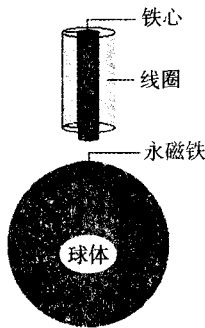


图1 磁悬浮球模型

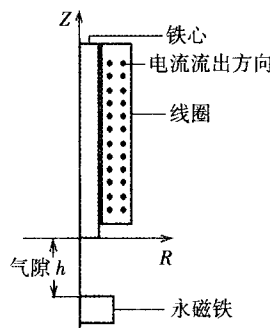


图2 等效二维模型

2.2 控制方程

由磁场基本方程可以导出磁矢势方程:

$$\nabla \times \vec{H} = \nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu} = \nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} = \vec{J} \quad (1)$$

式中: \vec{H} 为磁场强度; \vec{B} 为磁感应强度; μ 为磁导率; \vec{A} 为矢量磁位; \vec{J} 为电流密度。

采用柱坐标 (ρ, ϕ, z) , 由于悬浮系统的对称性, 有 $B_\phi = 0, A_\rho = 0, A_z = 0, J_\rho = 0, J_z = 0$ 。式(1)可以写成

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A_\phi = J_\phi \quad (2)$$

计算场域中某一点的磁感应强度

$$\vec{B} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho A_\phi) \vec{e}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} (\rho A_\phi) \vec{e}_z \quad (3)$$

式中: \vec{e}_ρ, \vec{e}_z 分别为 ρ, z 坐标的单位向量, 在 $R-z$ 平面内, 令 $\rho = R$, 则有

$$\vec{B} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} (R A_\phi) \hat{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial z} (R A_\phi) \hat{z} \quad (4)$$

场域中任意两点间的磁通

$$\Phi = 2\pi R (A_{\phi 1} - A_{\phi 2}) \quad (5)$$

磁场力的计算采用虚功法, 载流系统中, 有若干线圈, 线圈在外加电压 $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$ 作用下, 通有电流 $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ 。假设在某一时刻 dt 时间内, 仅有线圈 k 沿坐标轴 z 有一位移 dz , 则整个系统功能发生变化, 即

$$dW = dz W_m + f dz \quad (6)$$

上式表明: 所有电源提供的能量 W 等于磁场能量的增量 W_m 与磁场力 f 所做的功之和。假设媒质无能量损耗, 则

$$dW = \sum_{k=1}^n I_k d\phi_k \quad (7)$$

若保持各磁链 ϕ_k 不变, $d\phi_k = 0$, 则由式(5)可得

$$dz W_m + f dz = 0$$

$$f dz = - dz W_m |_{\phi_k = \text{常量}}$$

即

$$f = - \frac{dz W_m}{dz} |_{\phi_k = \text{常量}} = - \frac{\partial W_m}{\partial z} |_{\phi_k = \text{常量}} \quad (8)$$

2.3 数值解析

上述方程通过图 3 所示的流程进行求解。在初始条件设定及场域剖分后, 分别采用了一般问题的求解和二维参数化分析求解。前者目的是得出磁场及磁力线分布以分析电磁铁及永磁铁的结构参数; 后者目的是选择恰当的平衡点并进一步优化设计。

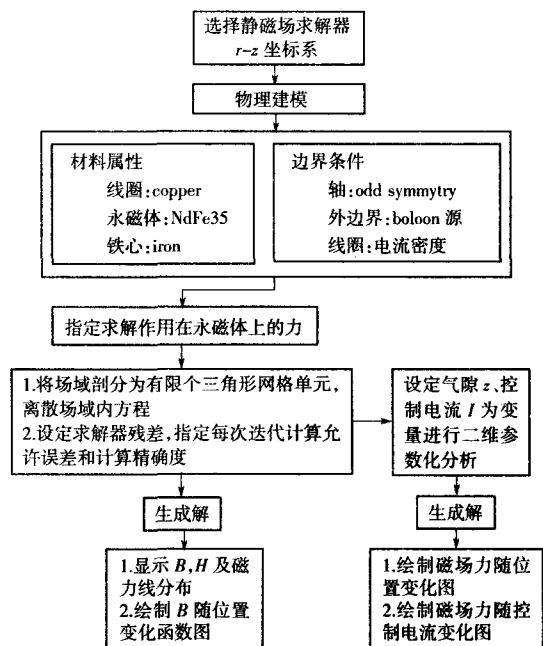


图3 数值模拟步骤

3 数值模拟、实验测试结果及比较

3.1 磁场数值模拟结果

磁场计算是假定在电磁线圈中输入 0.4 A 电流,相应电流密度为 $3.96 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ 。磁力线、磁感应强度 B 和磁场强度 H 分布如图 4、图 5 所示。由图可见,磁力线在永磁铁的柱面处最密集,磁场强度最大,永磁铁所提供的磁场力也相应较大,其作用是克服重力。电磁铁产生的磁力线相对较稀疏,提供的磁场力较小,主要用于控制磁悬浮球体的平衡。

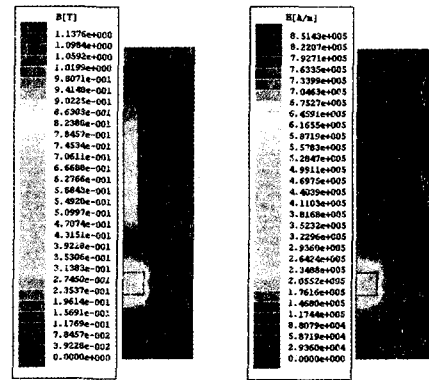


图5 磁感应强度和磁场强度分布

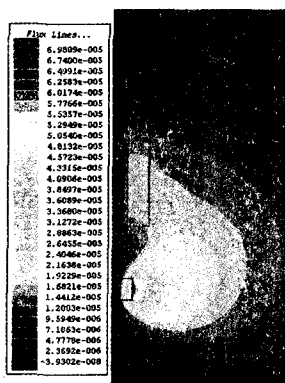


图4 磁力线分布

3.2 磁场模拟及实验结果比较

图 6、图 7 分别描述了磁感应强度沿 z 方向变化和沿 r 方向变化的计算值和实测值曲线。

图 6 可以看出,在 $r=0 \text{ mm}$ 即轴线上,磁感应强度随着 z 增加而增大,在距永磁铁最近处达到最大值;在 $r=10 \text{ mm}$ 处,磁感应强度随着 z 增加先减小后增大,在距铁芯 6 mm 左右处出现最小值,之后随着与永磁铁距离拉近而增大,从图 5 磁感应强度分布图中也可看出这种现象,其原因是电磁铁作用较之永磁铁要小,因此在靠近铁芯处会产生一个低值的凹陷区域;在 $r=20 \text{ mm}$ 处,距离轴线较远,整个磁

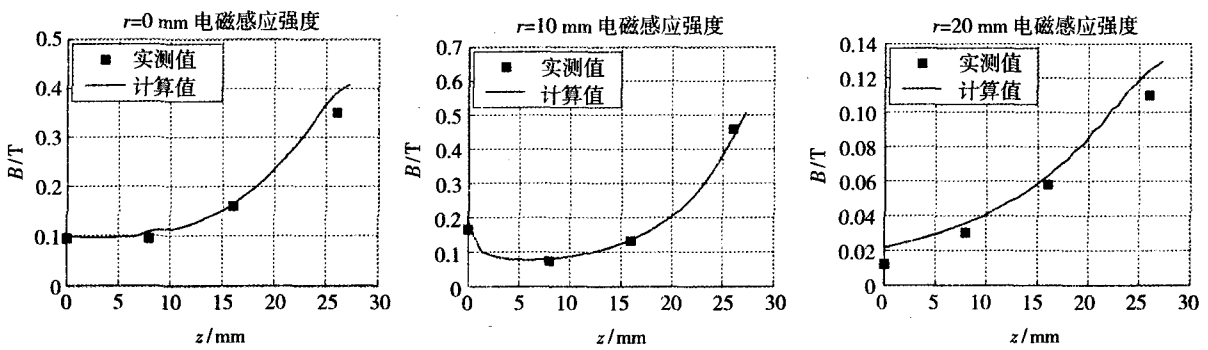


图6 磁感应强度沿 z 方向变化

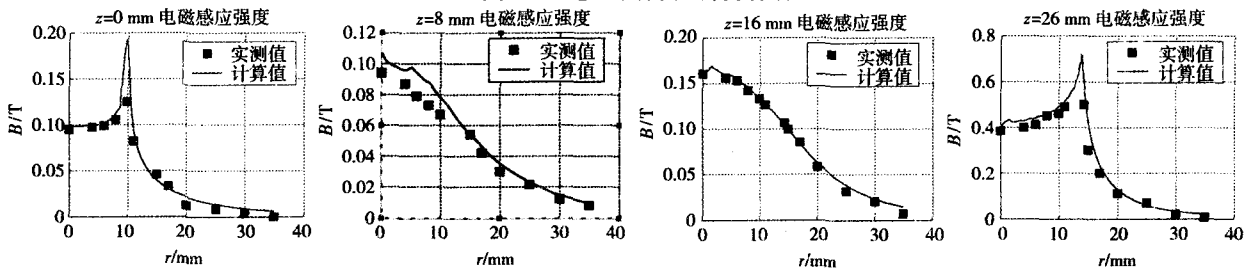


图7 磁感应强度沿 r 方向变化

感应强度比较均匀分布,不会出现凹陷区域,因此磁感应强度数值较小并且随着 z 的增加而增大。

图 7 可以看出, $z=0 \text{ mm}$ 和 $z=26 \text{ mm}$ 即靠近铁芯和靠近永磁铁处均有磁感应强度的峰值出现,然

后随距离增加而减小,这是由于磁体的边缘处磁力线最密集,磁感应强度最大; $z=8 \text{ mm}$ 和 $z=16 \text{ mm}$ 即两个磁铁中间区域磁感应强度均随着距离增加而减小。

由图可见,实测数据与计算值大致吻合,但是在有峰值处差值较大,但趋势一致,这主要是因为试验平台测量精确度较差,难以测量到最值点.

3.3 磁场力数值模拟及实验结果比较

本文研究目的是磁悬浮球系统结构的优化设计,因此需设定的变量包括气隙高度 h 、控制电流 I 、磁铁厚度 d 、磁铁面积 S 以及线圈匝数 N 等. 由于建模时确定了永磁铁和电磁线圈的结构参数,因此只考虑气隙高度和控制电流与磁场引力 F 的关系.

图8、图9分别为磁场力随气隙和控制电流变化的数值模拟曲线,图10、图11为相应的实测数据所绘制曲线. 可以看出磁场力与气隙之间是非线性关系,而磁场力与电流成正比关系. 图9和图11中不同气隙下曲线斜率不同,随着气隙增大斜率减小,即气隙越大磁力系数越小,电磁线圈产生的力对悬浮球的影响越小,因此,气隙中的磁场并非均匀变化的.

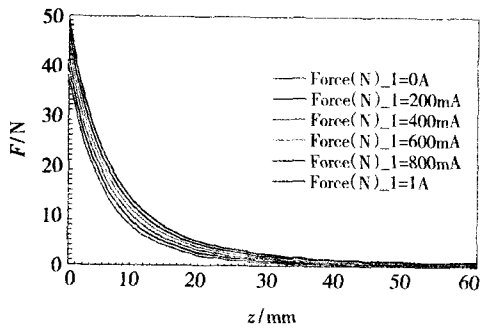


图8 不同控制电流作用下磁场力随气隙变化

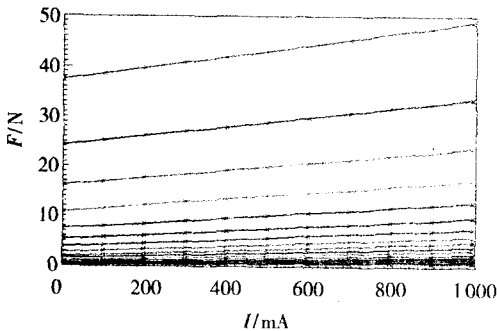


图9 不同气隙下磁场力随控制电流变化

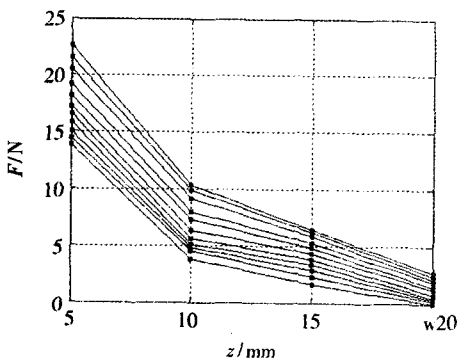


图10 实测不同控制电流下磁场力随气隙变化

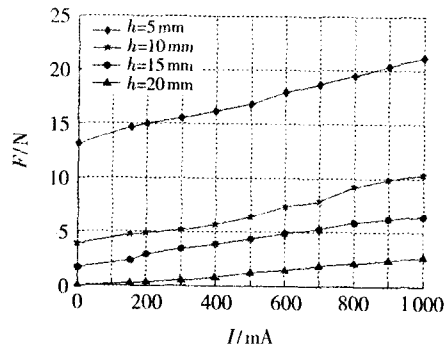


图11 实测不同气隙下磁场力随电流变化

4 结论

本文利用有限元法对磁悬浮球系统进行了磁场及磁力的分析计算,并利用二维参数化分析以控制电流和气隙为变量得出了磁场力随控制电流变化和磁场力随位置变化函数图,计算结果与实验结果吻合良好,证明了这种分析方法的正确性. 在此基础上,还可以进一步研究以磁铁和电磁线圈的结构参数为变量讨论磁场力的变化情况. 由于磁悬浮球系统理论的通用性,这种求解方法可以移植到其它磁悬浮系统中,为结构设计,参数优化和平衡点的选取提供了有益的模版.

参考文献:

- [1] 龙志强,王水泉,尹力明. 磁悬浮系统中的零功率、大刚度控制研究[J]. 机电工程,1998,15(2):45-48.
- [2] HENNEBERGER G. Contactless Transportation Vehicle with 4 Hybrid-excited Magnets and an Energy Saving Levitation Control [C]. LDIA'95, Nagasaki, 1995.
- [3] 刘同娟,金能强. 电磁永磁混合磁浮系统的专家PID控制仿真[J]. 电机与控制应用,2005,32(8):29-31.
- [4] HAJJAJI E H, OULADSINE M. Modeling and Nonlinear Control of Magnetic Levitation System [J]. IEEE Trans. Ind. Electron, 2001,48:831-838.
- [5] 郭亮,卢琴芬,叶云岳. 磁悬浮列车用直线电机的有限元分析和电感计算[J]. 浙江大学学报,2006,40(1):167-170.
- [6] 胡颖,屠关镇,林小林. 电磁悬浮控制系统磁场有限元分析[J]. 微特电机,2004,32(4):8-10.
- [7] 唐达. 磁悬浮球评述及降低其功耗的方法[J]. 上海电机学报,2005,8(3):72-75.

(编辑:王萍)