

平面转子磁悬浮陀螺的原理、建模与分析

杨劲松, 江 磊, 钟智勇, 张怀武

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川成都 610054)

摘要: 实现平面转子的稳定悬浮是磁悬浮陀螺的关键所在。介绍了一种利用微细加工方法实现的磁悬浮陀螺仪模型的悬浮系统。在该悬浮系统中, 利用电感检测的方法获取转子的位置信号, 并对该信号进行 PID 处理, 再将其用于控制悬浮线圈中的电流大小对悬浮力进行控制, 最终实现了平面转子的稳定悬浮。文中进行了系统建模, 对系统悬浮力进行分析, 同时利用 Mat lab/simulink 对其仿真, 得出了转子位置的动态响应, 并通过改变仿真参数, 对系统结构、悬浮高度等参数进行优化。

关键词: 磁悬浮陀螺; 原理; 建模; 动态仿真

中图分类号: U666.12+.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-3830(2008)01-0010-04

Principle, Modeling and Analysis of Magnetically Suspended Gyro With Planar Rotator

YANG Jin-song, JIANG Lei, ZHONG Zhi-yong, ZHANG Huai-wu

State key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China

Abstract: It is top key for the magnetically suspended gyro to realize stable suspension of the planar rotator. This paper introduced one kind of suspended system in the magnetically suspended gyro, which was based on fine fabrication. In this system, position signal was got by the method of inductance-detection, and processed by PID, then it was used to control the electrical current in the magnetically suspended loops which determines the suspending force, and as a consequence the stable suspension of the planar rotator was achieved in the end. Furthermore, system model was set up to analyses the suspending force, and Mat lab/simulink was used to simulate the dynamic response of the position of the planar rotator. Finally, parameters like constructure of the system and suspended height were optimized.

Key words: magnetically suspended gyro; principle; modeling; dynamic simulation

1 引言

惯性导航系统由于其完全自主式导航等优点, 广泛应用于导弹制导、卫星定位等领域。陀螺作为惯性导航系统的核心器件, 其体积、精度、稳定性都对惯性导航系统有着决定性的影响。传统的机械陀螺由于误差较大, 提供的信息可靠性低^[1], 在很多领域已经趋于淘汰。近年来, 磁悬浮陀螺由于其理论上的高精度、高稳定性等特性引起了人们的广泛关注。

对磁悬浮陀螺的关注始于 1990 年代。1995 年, 英国 Sheffield 大学的 Shearwood 等人^[2]提出了一

种高频下铝转子产生的感应涡流与线圈磁场相互作用, 产生的电磁力将转子悬浮的磁悬浮转子陀螺。这种系统由于其涡流生热、粘滞转矩及开环侧向刚度低等原因限制了其发展。2001 年, 上海交通大学^[3]提出一种将旋转、稳定和悬浮三种线圈分开, 应用闭环控制的新结构磁悬浮微陀螺, 但其悬浮原理与 Shearwood 等人设计的陀螺悬浮原理类似, 也没有能够进一步发展。2004 年, Dauwalter, Charles R 等^[4]提出了一种基于变磁阻马达驱动的磁悬浮转子陀螺实验装置, 该陀螺能够满足捷连式导航的要求, 但是没有关于该研究的进一步报导。

作者根据磁悬浮陀螺仪的原理^[5-7], 利用微细加工的方法制作出尺寸在几十毫米量级的磁悬浮陀螺模型。本文主要对该模型中磁悬浮系统的实现

收稿日期: 2007-06-03 修回日期: 2007-09-21

作者通信: E-mail: axue5137550@163.com

进行具体的阐述,并通过建模和仿真对系统结构以及悬浮高度等参数进行优化。

2 磁悬浮系统的原理

图 1、2 分别为悬浮系统的结构原理图和悬浮薄片、悬浮磁芯的俯视图。磁悬浮系统是为了满足磁悬浮陀螺的需求,悬浮体为质量很小的平面转子。在单独的悬浮实验中,可利用同等质量的圆形薄片取代平面转子,以减小微细加工的难度。圆形薄片由高磁导率的软磁材料制成,薄片上方设计有扁平圆柱和圆环形的凸起,与悬浮磁芯的凸极相匹配,能有效遏制转子的左右偏移,增大了悬浮刚度。转子薄片下方的固定装置中设计有三个相间 120° 的长方体小孔,用于紧配三个检测线圈。检测线圈、悬浮薄片和悬浮线圈均保持水平,以保证上下固定装置之间的气隙大小一致。上方固定装置的位置调节设计成粗调和微调结合,用于方便而精细地改变气隙大小。

位置传感器为带相敏整流的交流电桥,选择一定值电感作为基准值,检测线圈的电感随悬浮体位

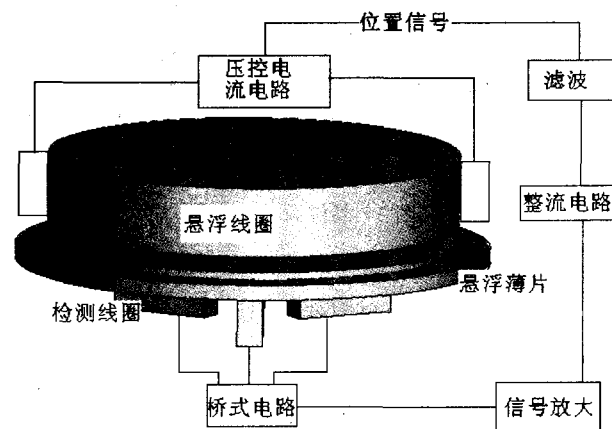


图 1 悬浮系统结构原理图

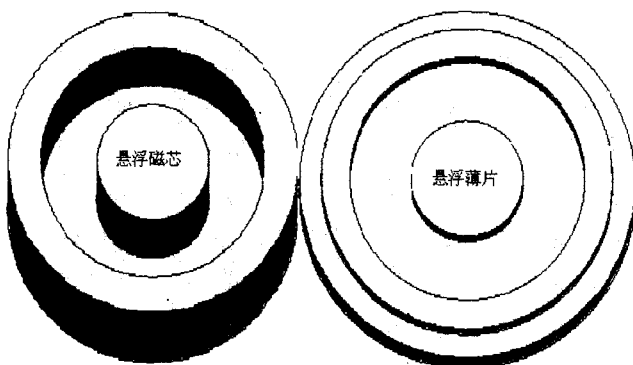


图 2 悬浮薄片和悬浮磁芯的俯视图

置的变化而变化,交流电桥的输出电压也随之发生改变,其关系式为

$$U_{out} = \left(\frac{j \frac{1}{2\pi f C}}{R + j(2\pi f L_1 - \frac{1}{2\pi f C})} - \frac{j \frac{1}{2\pi f C}}{R + j(2\pi f L_2 - \frac{1}{2\pi f C})} \right) U_{in} \quad (1)$$

式中, C 为平衡电容, R 为对称电阻, U_{in} 为输入电压, U_{out} 为输出电压, f 为前端输入信号频率, L_1 为检测线圈电感, L_2 为定值电感。此交流电桥的前端输入信号频率为 10kHz, 振幅为 5V。输出电压经过放大、PID 控制、整流、滤波后与悬浮线圈和悬浮体之间的距离 l 成反比例关系。其中选用可调放大倍数的高性能差动放大电路来提高交流电桥的灵敏度,这种放大电路具有高输入电阻、低失调和低漂移的特点,可有效地减小干扰。具体实验中,应根据气隙 l 的大小合理选择放大倍数。

悬浮体先落于底座上,悬浮线圈与悬浮体之间的气隙 l 为最大,检测线圈输出的位置信号也为最大,此信号值经处理后通过压控电流电路作用于悬浮线圈,调节滑动变阻器使悬浮力大于悬浮体自身重力,软磁薄片开始上升,随着 l 减小,悬浮线圈电流以更快的速率减小,当悬浮力小于薄片自身重力,薄片上升到最高点(小于上下固定装置之间的总气隙)后作下落运动,在此动态过程中,加入一微分电路增加阻尼,最终使悬浮体稳定悬浮。

为选取合理的参数,先理论计算悬浮力等于重力时的悬浮高度和安匝数的对应关系。在上述磁悬浮系统中令 A 为磁芯凸极的面积, μ_0 为真空磁导率, $I(t)$ 为悬浮线圈的电流, ϕ_r 为磁芯的磁通, ϕ_m 为气隙磁通。则气隙磁通密度为(气隙很小,忽略漏磁):

$$B = \frac{\phi_m}{A} \approx \frac{\phi_r}{A} = \frac{\mu_0 N I(t)}{2l(t)} \quad (2)$$

其磁场储能为:

$$W(I, C) = \int \phi(I, t) dI = \int \frac{\mu_0 N I(t) N}{2l(t)} dI = \frac{\mu_0 N^2 A I^2}{2l} \quad (3)$$

则可得悬浮线圈对悬浮体的吸力:

$$F(I, l) = \frac{\partial W(I, l)}{\partial l} = -\frac{\mu_0 N^2 A I^2}{4l^2} \quad (4)$$

可见电磁吸力 F 与气隙 l 的平方成反比,与悬浮线圈中的电流的平方成正比。取 $F=mg$ 。即:

$$|F(I,l)| = \frac{\mu_0 N^2 A I^2}{4l^2} = G = mg \quad (5)$$

$$\Rightarrow \frac{N^2 I^2}{l^2} = \frac{4mg}{\mu_0 A} \Rightarrow \frac{NI}{l} = 2\sqrt{\frac{mg}{\mu_0 A}} = K \quad (6)$$

$$\Rightarrow NI = Kl \quad (7)$$

由此可以根据悬浮线圈的安匝数来确定气隙的大小，反之亦然。具体的实验中，系统的气隙 l ，安匝数均为可调，多次实验确定出最优的系统参数。

3 磁悬浮系统的建模和 Simulink 仿真

为了对此磁悬浮系统进行稳态分析和动态分析，我们利用 Mat lab/Simulink 软件对其进行建模，Mat lab/Simulink 具有强大的数值计算功能和非线性模块，且在仿真过程中能够适时地对仿真参数进行修改，通过仿真结果的分析，可对悬浮体结构参数、悬浮高度等进行优化。悬浮线圈产生的悬浮力与悬浮体位置的关系是进行仿真的关键。由于电路中的 R 值很小，所以建模时将其省略，则(1)式便可简化为：

$$U_{out} = \left(\frac{1}{4\pi^2 f^2 CL_1 - 1} - \frac{1}{4\pi^2 f^2 CL_2 - 1} \right) U_{in} \quad (8)$$

将电感随气隙变化的公式： $L = \frac{N^2}{\sum l_i / \mu_i A_i}$ 、磁芯磁

阻 R_m 代入可得：

$$U_{out} = \left(\frac{l + R_m \mu_0 A}{4\pi^2 f^2 CN^2 \mu_0 A - R_m \mu_0 A - l} - \frac{1}{4\pi^2 f^2 CL_2 - 1} \right) U_{in} \quad (9)$$

代入具体数据后可得加载到压控电流电路上的电压与 l 的关系式为：

$$\begin{cases} U = 20 - \frac{100}{4.04 + 800l} & (1.2\text{mm} < l < 3\text{mm}) \\ U = 0 & (0 < l \leq 1.2\text{mm}) \end{cases} \quad (10)$$

实验中通过缓慢改变悬浮体与检测线圈的位置关系，测得 20 个不同位置下，经过放大、整流、滤波处理的电压 U 与气隙 l 的关系后，代入 (10) 式验证，由于误差均很小，所以可以确定以上近似的可行性和建模的正确性。将处理过的位置信号传递到压控电流电路中，可得到电流和气隙关系的表达式：

$$\begin{cases} I(l) = 2 - \frac{10}{4.04 + 800l} & (1.2\text{mm} < l < 3\text{mm}) \\ I(l) = 0 & (0 < l \leq 1.2\text{mm}) \end{cases} \quad (11)$$

将此关系式代入 (4) 式可得：

$$\begin{cases} |F(I,C)| = \frac{\mu_0 N^2 A I^2}{4l^2} \\ = \frac{11.6 - 19292l + 8038400l^2}{10^7 (16.3l^2 + 6464l^3 + 640000l^4)} & (12) \\ & (1.2\text{mm} < l < 3\text{mm}) \\ |F(I,C)| = 0 & (0 < l \leq 1.2\text{mm}) \end{cases}$$

从而确定了悬浮力与薄片的位置关系。在此基础上，对磁悬浮系统进行建模仿真，得到如图 3 所示的仿真结果。由图可知此悬浮系统最终能趋向稳定，且悬浮体的平衡位置为 $l=1.5\text{mm}$ 处左右，平衡位置可通过改变定值电感的值来改变，在有阻尼的情况下，系统经过一定时间后稳定，阻尼越大，悬浮稳定度越好，悬浮刚度越高。仿真过程中改变系统的结构参数、悬浮高度、电路的传递函数等各种参数来观察仿真结果，进而对整个系统的各个参数进行优化。

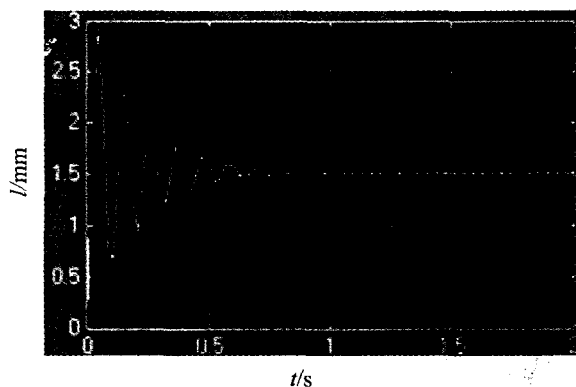


图 3 悬浮系统仿真图

4 实验结果

实验中，选取悬浮线圈匝数为 120 匝，等效串联电阻为 2.9Ω 。交流电桥的前端输入选取频率为 10kHz 、振幅为 5V 的正弦信号。此时测得多组电压 U 与气隙 l 的关系，经过取平均等处理后得出图 4 所示曲线。图中实线为理论推导的 $U-l$ 曲线，带点线为实测的 20 个点连线组成，实测值与理论值误差在 8% 以内，可见信号处理系统具有较高的精度。选取检测线圈定值电感的实验中，分别设基准电感为 $100\mu\text{H}$ 、 $400\mu\text{H}$ 、 $1000\mu\text{H}$ 三组，实验结果表明，当定值电感 L_2 为 $100\mu\text{H}$ 时， U_{out} 输出随位置变化不明显，不利于检测；当 $L_2 > 400\mu\text{H}$ 时满足检测要求，考虑到 L_2 过大，要求线圈匝数过多，物理上实现起来相对复杂，最终选取 $L_2 = 400\mu\text{H}$ 。实验中通过改变悬浮线圈上的电阻来改变线圈电流的大小，从而能够有效改变悬浮体的悬浮高度，由

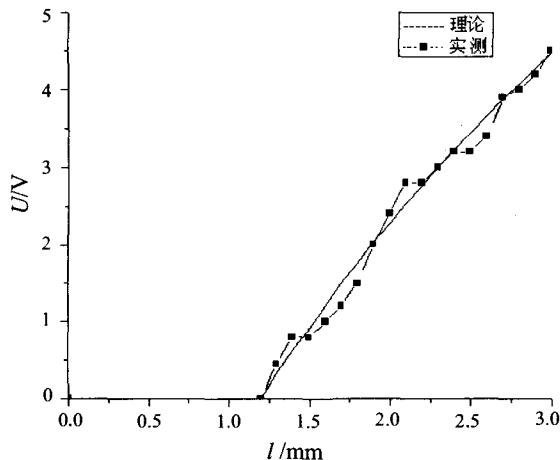


图4 U-I曲线

于悬浮高度的选择范围较大,本文通过 simulink 仿真得到最佳的悬浮点为 $l=1.5\text{mm}$ 处,选取 $l=1.2\text{mm}$, 1.3mm , 1.4mm , 1.5mm , 1.6mm , 1.7mm , 1.8mm , 1.9mm , 2.0mm 九处悬浮点进行悬浮实验,调节悬浮线圈电流值分别使其悬浮,得到在 $l=1.8\text{mm}$ 处具有较大的悬浮刚度,实现了平面转子的稳定悬浮。

5 结语

本文介绍了一种带位置传感器的主动悬浮系统,系统各部分结构件通过精细加工的方法得到,

(上接9页)

磁粉颗粒的形状对离合器性能有较大影响。片状磁粉尖晶面易磨损,形成的细粉磨粒容易在离合器的工作面上形成渣壳,使工作间隙缩小,能够传递的转矩明显减小^[4];另外,磁粉颗粒的球形度和流动性密切相关,球形度越高,其流动性越好,有利于快速离合,还可减少离合器在滑差工况下工作面的磨损。

国内汽车磁粉离合器使用较多的是椭圆形不锈钢系磁粉颗粒,直径在 $0.004\sim 0.08\text{mm}$ 。德国科比(KEB)有限公司生产的磁粉离合器及制动器的磁粉直径只有 $40\mu\text{m}$,形状与土豆相似。国外磁粉产品 70%呈土豆状,30%呈球形。

6 发展趋势

磁粉离合器从出现到现在已有近 60 年的发展,其设计与制造技术已逐渐成熟,并且成功应用到了工业控制的各个领域。汽车传动系统是磁粉离合器的一个新的应用领域,汽车磁粉离合器还处于初步发展阶段。离合器在汽车行驶的绝大部分时间

同时用 Mat lab/Simulink 软件建立了悬浮系统的动态模型,该模型通用性强,参数修改方便,适用于系统的稳态分析和动态分析,对实验具有很重要的指导意义。实验结果证明,该悬浮系统具有一定的稳定性和抗干扰能力,适用于陀螺的磁悬浮系统^[8],为下一步磁悬浮陀螺微型化的开展打下了基础。

参考文献:

- [1] 王洪志. [J]. 光学仪器, 2004, 26(1): 49-51.
- [2] Shearwood C, Williams C B, Mellor P H, et al. [J]. Electronics Letters, 1995, 31 (21): 1845-1846.
- [3] 陈文元, 等. [J]. 压电和声光(增刊), 2001, 23 (50): 364-365.
- [4] Dauwalter Charles R, Ha Joung C. [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2005, 20(2): 21-26.
- [5] 易敬曾. 磁路计算与磁路设计[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1987.
- [6] 虞烈. 可控磁悬浮转子系统[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [7] R H 弗雷泽, P J 基林森, G A 奥伯贝克(廖朝佩等译). 磁悬浮和电悬浮[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [8] Shearwood C, Williams C B, Yates R B, et al. [J]. IEEE Colloquium (Digest), n 039, 1996, 6/1-6/3.

作者简介: 杨劲松(1983-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 研究方向为磁悬浮转子微陀螺。

里是结合的,而现在的汽车磁粉离合器在结合时处于全通电状态,所以磁粉离合器的结合消耗了大量的电能,这必然会加重汽车电源系统的供电负担,因此研究节能型、智能化控制的汽车磁粉离合器将成为未来汽车磁粉离合器的一个发展方向。

自动传动系统是汽车传动系的发展趋势^[5]。汽车磁粉离合器的应用,将进一步提高汽车传动系的自动化水平,推动汽车向自动化、智能化发展。

参考文献:

- [1] 魏英俊, 常思勤, 胡平, 等. [J]. 机械制造, 2004, 42 (482): 12-14.
- [2] 孙守礼. [J]. 武汉工学院学报, 1995, 17(2): 44-50.
- [3] 阮忠唐. 联轴器、离合器设计与选用指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 270-277.
- [4] 刘祖林, 向乐新, 游凤荷, 等. [J]. 武汉汽车工业大学学报, 1996, 18(5): 41-45.
- [5] 徐石安, 江发潮. 汽车离合器[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 1-13.

作者简介: 侯树展(1983-), 山东临沂人, 硕士研究生, 研究方向为汽车电子技术。