

薄圆盘形转子 5 自由度磁悬浮轴承系统研究

Research on system of thin disc rotor five DOF magnetic bearing

马磊忠, 徐龙祥

MA Lei-zhong, XU Long-xiang

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘要: 本文研制了一种新型的薄圆盘形转子 5 自由度磁悬浮轴承系统, 介绍了其基本结构和工作原理, 计算推导了此系统的数学模型, 得到了 5 个自由度之间的耦合情况, 主要有惯性耦合和陀螺效应耦合, 并求出了此系统数学模型的状态方程, 由状态方程可知此系统是可以控制的, 为盘类转子磁悬浮轴承系统的设计提供了参考。采用经典 PID 分散控制策略对系统进行了实验研究, 给出了 PID 控制的实验波形。实验结果表明此耦合系统强制解耦后采用经典 PID 分散控制能够使 5 个自由度同时稳定悬浮。

关键词: 薄圆盘形转子; 磁悬浮轴承; 解耦

中图分类号: TH133.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-0134(2009)01-0031-04

0 引言

主动磁悬浮轴承是一种利用可控电磁力作用将转子悬浮于空间、使转子和轴承分开、实现无机械接触的新型高性能轴承, 与传统的滚动和滑动轴承相比, 磁悬浮轴承具有无机械接触、无磨损、无须润滑等一系列优良品质, 使它广泛应用于能源、交通、超高速、航空航天等领域。

国外曾经有文献^[1-2]提出过几种类似薄圆盘形转子磁悬浮轴承系统的观点, 国内也有文献^[3]提出过, 此类轴承轴向可以做的很短, 更大地缩减了轴向体积。与轴类磁悬浮轴承相比薄圆盘形转子磁悬浮轴承同样也为 5 个自由度, 不同的是其轴向为 3 个自由度, 采用 3 个轴向磁悬浮轴承做支撑, 径向为 2 个自由度, 采用一个径向磁悬浮轴承做支撑。本文对该系统进行了数学建模分析, 并得到了 5 自由度之间的耦合情况, 其 5 个自由度之间是存在耦合的, 这种耦合主要表现为惯性耦合和陀螺效应耦合, 为今后对该系统采用分散控制和集中控制奠定了基础。

1 薄圆盘形转子 5 自由度磁悬浮轴承系统的结构和工作原理

薄圆盘形转子 5 自由度磁悬浮轴承系统的基本结构如图 1 所示, 由轴向磁悬浮轴承、径向磁悬浮轴承、薄圆盘形转子、盘式电机、轴向和径向传感器等组成。轴向磁悬浮轴承和径向磁悬浮轴承都为

差动结构。采用 PID 分散控制策略, 5 个自由度单独控制。

此系统轴向 3 个自由度 (沿 z 轴的移动和绕 x、y 轴的转动) 用 3 个轴向磁悬浮轴承控制, 采用 3 点确定一个平面的原理使圆盘能够工作在一个平面上; 用一个径向磁悬浮轴承控制圆盘在径向 2 个自由度 (沿 x、y 轴) 的移动, 只有绕 z 轴转动的自由度不施加控制, 这样 5 个自由度的磁悬浮轴承同时工作使薄圆盘形转子悬浮起来。转子稳定悬浮后盘式电机开始工作, 使转子转动起来。

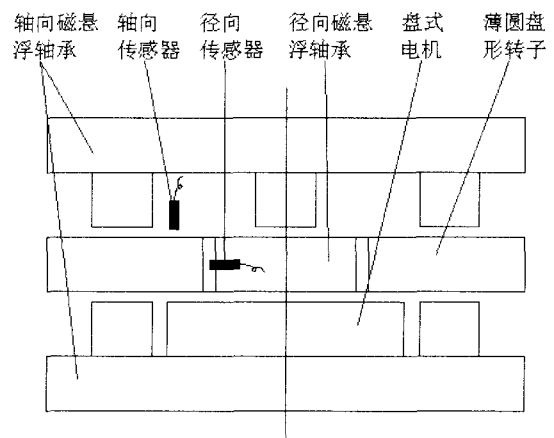


图 1 薄圆盘形转子 5 自由度磁悬浮轴承基本结构

收稿日期: 2008-10-14

作者简介: 马磊忠 (1980 -), 男, 山西榆次人, 硕士研究生在读, 主要研究方向为磁悬浮轴承。

2 系统数学模型的建立

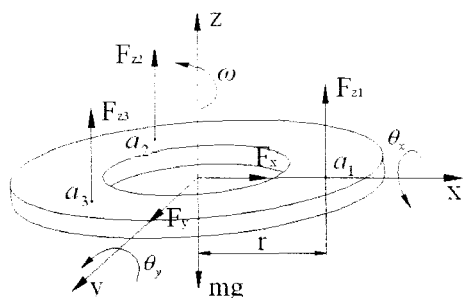


图2 薄圆盘形转子结构简图

在以下分析中均按如下设定：转子结构简图如图2所示，是刚性的，不发生几何变形。 c 为转子的质心，以质心为原点建立三维坐标系，3个坐标轴的方向均满足右手螺旋定则。 m 为转子质量， ω 是转子绕 z 轴转动的角速度， J_x 、 J_y 、 J_z 分别为转子绕 x 、 y 、 z 轴转动的转动惯量，由于其对称性故有， $J_x=J_y=J$ ， θ_x 、 θ_y 分别为转子处于平衡位置时受到扰动后绕 x 、 y 轴转动了的角度值， a_1 、 a_2 、 a_3 分别为3个轴向轴承的支撑点，3个支撑点在一个圆周上均匀分布， r 为轴向3个支撑点到薄圆盘形转子质心的距离。磁悬浮磁轴承产生的电磁力分别沿 x 、 y 、 z 轴平行的方向，且规定沿坐标轴的正方向为正方向，根据牛顿运动定理和动量矩定理，可以得到以下的转子运动方程：

$$\begin{cases} mx_c'' = F_x \\ my_c'' = F_y \\ mz_c'' = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} \\ J\theta_x'' + J_z\omega\theta_y' = \sqrt{3}/2(F_{z2}r - F_{z3}r) \\ J\theta_y'' - J_z\omega\theta_x' = F_{z1}r - 1/2(F_{z2}r + F_{z3}r) \end{cases} \quad (1)$$

x_c'' 、 y_c'' 、 z_c'' 、 θ_x'' 、 θ_y'' 分别为各变量对时间的二阶导数， θ_x' 、 θ_y' 分别为各变量对时间的一阶导数， F_x 、 F_y 、 F_{z1} 、 F_{z2} 、 F_{z3} 分别为轴向和径向磁悬浮轴承所产生的电磁力，可表示为：

$$\begin{cases} F_x = k_x x + k_{ix} i_x \\ F_y = k_y y + k_{iy} i_y \\ F_{z1} = k_{z1} z_1 + k_{i1} i_1 \\ F_{z2} = k_{z2} z_2 + k_{i2} i_2 \\ F_{z3} = k_{z3} z_3 + k_{i3} i_3 \end{cases} \quad (2)$$

(2)式中， x 、 y 、 z_1 、 z_2 、 z_3 适分别为转子受到扰动后在磁悬浮轴承的支撑处相对于其在平衡位置时的位移值， i_x 、 i_y 、 i_1 、 i_2 、 i_3 分别为轴向磁悬浮轴承和径向磁悬浮轴承线圈中的控制电流， k_x 、 k_y 、 k_{z1} 、 k_{z2} 、 k_{z3} 为位移刚度系数， k_{ix} 、 k_{iy} 、 k_{i1} 、 k_{i2} 、 k_{i3} 为电流刚度系数。

把圆盘的工作面看成一平面，那么图2中圆盘平面的方程为：

$$\begin{aligned} & \frac{\sqrt{3}}{2}(-2z_1 + z_2 + z_3)x + \frac{3}{2}(-z_2 + z_3)y + \\ & \frac{3\sqrt{3}}{2}rz - \frac{\sqrt{3}}{2}r(z_1 + z_2 + z_3) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

经过计算可求得圆盘平面与 x 轴和 y 轴的夹角分别为：

$$\begin{cases} \sin\theta_y = \frac{2z_1 - z_2 - z_3}{\sqrt{(-2z_1 + z_2 + z_3)^2 + 3(-2z_2 + z_3)^2 + 9r^2}} \\ \sin\theta_x = \frac{3(z_2 - z_3)}{\sqrt{3(-2z_1 + z_2 + z_3)^2 + 9(-2z_2 + z_3)^2 + 27r^2}} \end{cases} \quad (4)$$

由于磁悬浮轴承的工作间隙很小，有 z_1 、 z_2 、 $z_3 \ll r$ ， $|\theta_x| \ll 1$ 和 $|\theta_y| \ll 1$ ，所以

$$\begin{cases} \theta_y \approx \sin\theta_y \approx \frac{2z_1 - z_2 - z_3}{3r} \\ \theta_x \approx \sin\theta_x \approx \frac{z_2 - z_3}{\sqrt{3}r} \end{cases} \quad (5)$$

这样就可以得出， $[x_c \ y_c \ z_c \ \theta_x \ \theta_y]^T$ 与 $[x \ y \ z_1 \ z_2 \ z_3]^T$ 的关系为：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}r} & -\frac{1}{\sqrt{3}r} \\ 0 & 0 & \frac{2}{3r} & -\frac{1}{3r} & -\frac{1}{3r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

经过计算可得到转子最终的运动微分方程为：

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{mr^2+4J}{9r^2} & \frac{mr^2-2J}{9r^2} & \frac{mr^2-2J}{9r^2} \\ 0 & 0 & \frac{mr^2-2J}{9r^2} & \frac{mr^2+4J}{9r^2} & \frac{mr^2-2J}{9r^2} \\ 0 & 0 & \frac{mr^2-2J}{9r^2} & \frac{mr^2-2J}{9r^2} & \frac{mr^2+4J}{9r^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z_1'' \\ z_2'' \\ z_3'' \end{bmatrix} \\
 & + \frac{2J_z\omega}{3\sqrt{3}r^2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z_1' \\ z_2' \\ z_3' \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} -k_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{z1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{z2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{z3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} -k_{ix} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_{iy} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -k_{i1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -k_{i2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{i3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x \\ i_y \\ i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (7) \\
 & \text{令} \begin{cases} m_z = (mr^2 + 4J)/9r^2 \\ m_0 = (mr^2 - 2J)/9r^2 \\ a = 2J_z\omega/3\sqrt{3}r^2 \end{cases} \quad (8)
 \end{aligned}$$

m_z 为转子轴向3个自由度上的等效质量，也可称之为当量质量， m_0 为耦合质量， a 称为系统的陀螺效应系数。从(8)式中可以看出，轴向3个自由度之间存在惯性耦合和陀螺效应耦合；轴向3个自由度与径向2个自由度之间则不存在这两种耦合。惯性耦合的解耦可以通过机构解耦，即设计合理的转子结构，使得耦合质量 m_0 尽可能最小，使其耦合程度大大减小；当转速 ω 较低时，则可以忽略陀螺效应耦合。

3 系统数学模型的状态方程

为了简便起见，下面我们还是以磁悬浮轴承支撑处转子的位移来进行理论分析。同样假设磁悬浮轴承转子处于小范围运动情况下，我们选取系统的状态向量、控制向量、输出向量分别为：

$$\begin{aligned}
 X(t) &= [x \ y \ z_1 \ z_2 \ z_3 \ x' \ y' \ z_1' \ z_2' \ z_3']^T \\
 U(t) &= [i_x \ i_y \ i_{z1} \ i_{z2} \ i_{z3}]^T
 \end{aligned}$$

$$Y(t) = [x \ y \ z_1 \ z_2 \ z_3]^T$$

那么，薄圆盘形转子5自由度磁悬浮轴承的力学模型可用以下状态方程来表示：

$$\begin{cases} X(t)' = AX(t) + BU(t) \\ Y(t) = CX(t) \end{cases} \quad (9)$$

$X(t)$ 是10×1矩阵向量 A 阵是10×10的常数阵
 $Y(t)$ 是5×1的向量 C 阵是5×10的常数阵
 $U(t)$ 是5×1的向量 B 阵是10×5的常数阵

这就是考虑了惯性耦合和陀螺效应耦合的薄圆盘形转子5自由度磁悬浮轴承的状态方程，由此可见此系统是可以控制和可以观察的。

4 实验分析

图3是薄圆盘形转子5自由度磁悬浮轴承系统的实物图，系统的具体参数：转子质量为6kg，轴向磁悬浮轴承工作气隙 δ_1 （单边）为0.35mm，线圈匝数 N_1 为200匝，单个磁极的面积 A_1 为314mm²，偏置电流 I_{01} 为1.2A；径向磁悬浮轴承工作气隙 δ_2 （单边）为0.25mm，线圈匝数 N_2 为160匝，单个磁极的面积 A_2 为110mm²，偏置电流 I_{02} 为2A，传感器的灵敏度为8V/mm。

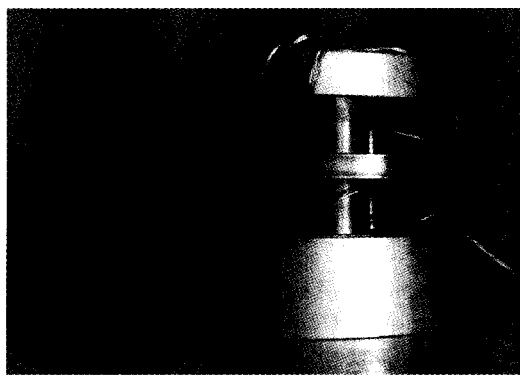


图3 薄圆盘形转子5自由度磁悬浮轴承系统

控制策略采用经典PID分散控制，由于此系统模型为耦合模型，需对其进行解耦，在本次统中可以求得当量质量 $m_z=1.78$ kg，耦合质量 $m_0=0.11$ kg，可以看出当量质量比耦合质量大很多，这里把耦合质量强制忽略掉，令(7)中第一个矩阵为 D ，那么

$$D = \begin{bmatrix} 6.00 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6.00 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.78 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.78 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.78 \end{bmatrix}$$

【下转第57页】

tion—的过程中,cpu将不会被网络分析任务抢占,汇编指令被打断的情况也不再发生。经测试表明,火控系统从上位机收到的发射命令与火控系统向下位机下达的武器开盖命令一致,系统可靠性得以保证。

6 结束语

原子操作本身必须是短而精的,它不能操作复杂或长时间占用cpu,否则即使正确添加了保护,也有可能造成死锁甚至系统崩溃。本文结合火控系统实际应用,详细分析了武器开盖任务与网络分析任务在执行系统指令时原子操作错误的实质,通过添加互斥信号灯的方法解决了低优先级任务原子操作

易被打断的问题,提高了系统的可靠性。软件经测试表明,火控系统的实时性,准确性均达到设计标准,完全满足用户要求。

参考文献:

- [1] 李放敏.VxWorks高级程序设计[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [2] Wind River.VxWorks BSP 开发人员指南.王金刚,苏琪,杨锡勋,译.北京:清华大学出版社,2003.
- [3] 王金刚,宫青霖,杨锡勋等.基于VxWorks嵌入式实时系统设计[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [4] 王学龙.嵌入式VxWorks系统开发与应用[M].北京:人民邮电出版社,2003.

【上接第33页】

转速较低时可以忽略陀螺效应耦合,整个耦合系统就可解耦为5个独立的自由度了。

在进行试验调试过程中观察通过传感器输出的电压信号来判断系统是否悬浮,传感器的检测电压为0~5V,当传感器输出的电压信号为2.5V时表明转子已经悬浮。实验调试时先对每个自由度单独进行调试,各个自由度稳定悬浮后再进行5个自由度一起调试。由于此系统5自由度之间轴向3个自由度(第1、2、3自由度)相互耦合,径向两个自由度(第4、5自由度)之间以及与其它3个自由之间相互独立,故这里只截取了轴向3个自由度(第1、2、3自由度)和径向一个自由度(第4自由度)的实验波形,实验波形图如图4所示:

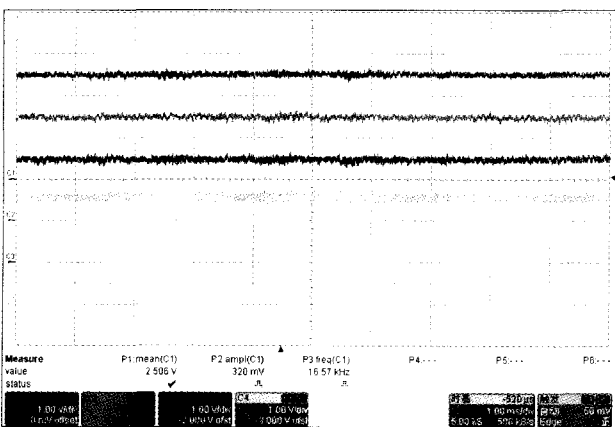


图4 5自由度同时悬浮时的位移波形图

从实验波形图可以看出采用分散控制能够使5个自由度同时悬浮,从波形的平滑程度看,本系统

的悬浮效果还是不错的。转子稳定悬浮后盘式电机开始工作,使转子转动起来。关于转子的转动将另文讨论。

5 结论

本文针对一种新型的薄圆盘形转子5自由度磁悬浮轴承结构和整个系统模型进行了具体的研究,这种结构的磁悬浮轴承和以往的轴类磁悬浮轴承相比有很大的不同,这种结构的磁悬浮轴承轴向可以做得很短,适合一些轴向空间小的场合使用。

通过对整个系统数学建模分析得出了整个系统5个自由度之间的耦合情况:与轴类磁悬浮轴承一样同样存在惯性耦合和陀螺效应耦合,并对其进行解耦。最后通过试验调试,采用经典PID分散控制系统对整个系统实施控制,使转子稳定悬浮。结果证明经过强制解耦后此系统可以稳定悬浮。

参考文献:

- [1] Koichi Oka,Toshiro Higuchi.Magnetic Suspension System with Permanent Magnet Motion Control[J].Fourth International Symposium on Magnetic Bearings,1994,8:131-137.
- [2] Ju Jin,Toshiro Higuchi,Manabu Kanemoto.Electrostatic Silicon Wafer Suspension[J].Fourth International Symposium on Magnetic Bearings, 1994,8:343-348.
- [3] 文湘隆,杨怀玉.基于盘类转子的磁力轴承系统研究[J].北京:通用机械,2005,7:81-83.
- [4] 胡业发,等.磁力轴承的基础理论与应用[M].机械工业出版社,2006.3.
- [5] 王晓光,等.磁悬浮盘片支承原理的研究[J].湖北工业大学学报,2007,22(4):14-17.