

文章编号 1004-924X(2015)08-2211-09

双框架磁悬浮控制力矩陀螺磁轴承 负载力矩复合补偿的控制

谢进进*, 刘 刚, 文 通

(北京航空航天大学 惯性技术重点实验室, 北京 100191)

摘要:提出一种基于角速率前馈与力矩观测相结合的磁轴承负载力矩复合补偿控制方法来提高双框架磁悬浮控制力矩陀螺磁悬浮转子的悬浮精度。建立了双框架磁悬浮控制力矩陀螺磁悬浮转子动力学模型,分析了内外框架转动情况下的磁轴承负载力矩。分别基于框架角速率前馈和力矩观测设计了磁轴承负载力矩复合补偿控制方法,分析了补偿后系统的稳定性。最后,利用实验室研制的样机搭建试验平台对本文所提出的方法进行了实验验证。结果表明:在框架以角加速度 $120(^{\circ})/s^2$ 启动至 $10(^{\circ})/s$ 时,该方法使转子 A_x 端位移跳动量减小为未补偿前的 44.8%;内外框架以幅值频率 10 Hz 正弦激励时,转子 A_x 、 B_y 端的位移跳动量分别减小为未补偿前的 23.4% 和 35.5%。结果显示提出的方法有效地提高了磁悬浮转子在负载力矩扰动下的悬浮精度。

关键词:双框架磁悬浮控制力矩陀螺;磁轴承;负载力矩;角速率前馈;力矩观测;复合补偿

中图分类号:TP273;V448.22 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152308.2211

Composite compensation for load torque of active magnetic bearing in DGMSCMG

XIE Jin-jin*, LIU Gang, WEN Tong

(Key Laboratory of Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

* Corresponding author, E-mail: xiejjin1002@163.com

Abstract: By combining with the angular rate feedforward controller and a load torque observer, a composite compensation method for the load torque of an active magnetic bearing was proposed to improve the suspension accuracy of the magnetically suspended rotor in a Double-gimbal Magnetically Suspended Control Moment Gyro(DGMSCMG). The dynamical model of the magnetically suspended rotor in the DGMSCMG was established, and the load torque of the active magnetic bearing with inner and outer gimbal movements was analyzed. Then the composite compensation control method based on the angular rate feedforward controller and the load torque observer was designed, and the system stability after compensation was discussed. Finally, the performance of the proposed method was verified by a prototype developed by the our laboratory. The experimental results show that the displacement jitters at the end A_x of the rotor have reduced to 44.8% when angular rates of the gimbal starts from $120(^{\circ})/s^2$ to $10(^{\circ})/s$. Moreover, the displacement jitters have reduced to 23.4% and 35.5% at

收稿日期:2014-12-24;修订日期:2015-02-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61374029, No. 61374211, No. 61203203)

the end A_x and end B_y of the rotor when angular rates of the gimbal are excited by the sinusoidal signal with the amplitude $10(^{\circ})/s$ and frequency of 10 Hz, respectively. The results indicate that the proposed method increases the control accuracy of the magnetically suspended rotor with the load torque by gimbal movements.

Key words: Double-gimbal Magnetically Suspended Control Moment Gyro (DGMSCMG); magnetic bearing; load torque; angular velocity feedforward; torque observer; composite compensation

1 引言

控制力矩陀螺 (Control Moment Gyro, CMG) 具有输出力矩大, 响应速度快等优点, 是航天器姿态控制的关键执行机构^[1-3]。与机械轴承 CMG 相比, 采用磁悬浮轴承支承的 CMG (MSCMG) 具有无摩擦, 无磨损, 无需润滑, 刚度阻尼可调, 可主动振动控制以及高精度, 长寿命等优点, 目前已成为 CMG 研究的热点^[4-5]。在 MSCMG 的研究中, 双框架 MSCMG (Double-gimbal MSCMG, DGMSCMG) 与单框架 MSCMG (Single-gimbal MSCMG, SGMSCMG) 相比, 能输出更多自由度的控制力矩, 可有效减小姿控执行机构的体积重量和奇异性, 提高系统的冗余度, 是未来航天器的理想执行机构^[6-7]。

在 MSCMG 中, 磁轴承除了需要提供转子的悬浮力外, 还要提供负载输出陀螺力矩, 而该负载力矩又反作用于磁轴承系统。由于磁轴承为一种有间隙的弹性支承, 负载力矩会使磁悬浮转子 (Magnetically Suspended Rotor, MSR) 位移跳动量加大, 严重时会导致转子碰撞保护轴承, 影响磁轴承系统的稳定性和输出力矩精度。而与 SGMSCMG 相比, DGMSCMG 由于存在内外框架的相对运动, 负载力矩更为复杂, 对磁轴承系统的影响更为剧烈, 给 MSR 控制带来更大难度。因此, 需要采取有效措施减小负载力矩对磁轴承系统的影响, 从而在保证磁轴承系统稳定性的同时提高 DGMSCMG 输出力矩精度。

克服磁轴承负载力矩的方法有 3 类: (1) 由于负载力矩产生的根本原因为磁轴承系统与框架系统之间的耦合, 解耦控制成为克服负载力矩的可行方法。文献[8]提出逆系统和内模控制相结合的解耦方法, 实现 SGMSCMG 中磁轴承系统与框架系统的解耦控制。解耦控制方法理论上可以达

到较高的精度, 但在实际工程应用中由于存在建模误差, 参数摄动以及执行器的滞后等, 往往难以获得理想的控制精度。(2) 将负载力矩看作磁轴承系统的扰动, 对负载力矩进行补偿, 其中前馈补偿应用较为广泛。文献[9-10]将加速度前馈方法应用于磁轴承系统之中, 取得良好的控制效果, 但其是针对转子的平动扰动。文献[11-13]针对 MSCMG 中磁轴承负载力矩的抑制, 提出框架角速率-电流前馈补偿方法, 有效减小了转子位移跳动量, 但该方法存在较大的近似误差, 其控制精度还可以进一步提高。此外, 干扰观测补偿方法由于不需要额外传感器而得到广泛应用^[14-15], 但现有的研究大多针对磁轴承单自由度扰动抑制, 且干扰观测会存在一定滞后, 对于需要高动态响应的 DGMSCMG 会产生一定影响。(3) 由于对外界扰动及模型摄动的不变性, 鲁棒控制方法也被用于 MSR 的控制, 如 H_{∞} 控制^[16], μ 综合控制^[17], 滑模控制^[18]等。但鲁棒控制方法不以负载或扰动的抑制为目的, 当面对大量值或者周期性的负载力矩时, 其控制性能会显著下降。

本文从工程应用出发, 在文献[11-13]的基础上, 结合前馈补偿与观测补偿各自的优点, 针对 DGMSCMG 中磁轴承系统的负载力矩抑制, 提出一种基于框架角速率前馈和负载力矩观测相结合的补偿控制方法并进行试验验证, 有效地提高了磁悬浮转子在负载力矩扰动下的悬浮精度。

2 DGMSCMG 磁悬浮转子动力学

2.1 DGMSCMG 结构

图 1 所示为 DGMSCMG 结构原理图, 由基座, 内、外框架及陀螺房等组成。其中陀螺房和内框架固连, 高速转子安装于陀螺房内, 由永磁偏置混合磁轴承提供支承, 包括 2 组径向磁轴承和 2 个轴向磁轴承, 对高速转子的 2 个径向平动自由

度和转动自由度以及轴向平动自由度进行主动控制。

在 DGMSCMG 中,高速转子恒速旋转,提供恒定的角动量,内外框架以一定的角速度旋转改变角动量的方向,从而对外输出陀螺力矩。

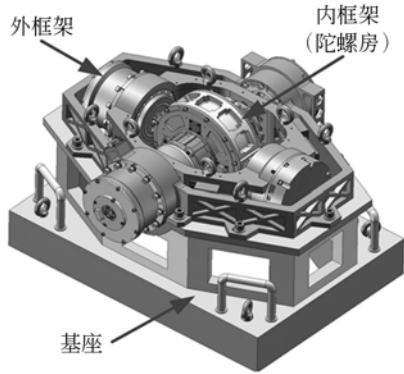


图 1 DGMSCMG 结构原理图
Fig. 1 Structural diagram of DGMSCMG

2.2 转子动力学模型

图 2 和图 3 所示为 DGMSCMG 及其 MSR 坐标系示意图。其中, $o-x_i y_i z_i$ 为惯性坐标系,在地面试验时,基座与其固连; $o-x_j y_j z_j$ 为外框架坐标系,初始状态与 $o-x_i y_i z_i$ 重合,相对于 $o-y_i$ 轴旋转,定义转角为 θ ; $o-x_g y_g z_g$ 为内框架坐标系,初态时与 $o-x_j y_j z_j$ 重合,相对于 $o-x_j$ 轴旋转,定义转角为 φ ; $o-x_b y_b z_b$ 为磁轴承定子坐标系,因陀螺房与内框架固连,因此 $o-x_b y_b z_b$ 与 $o-x_j y_j z_j$ 重合,且 $o-x_b$ 与 $o-y_b$ 分别指向电磁力方向; $o-x_f y_f z_f$ 为虚拟内环坐标系,相对于 $o-x_b$ 和 $o-y_b$ 分别转动,其转角分别用卡尔丹角 α 和 β 表示; $o-x_r y_r z_r$ 为转子坐标系,相对于 $o-x_f y_f z_f$ 绕 $o-z_f$ 轴旋转,定义转子旋转角速度为 Ω 。

忽略重力的影响,假定磁轴承径向四个通道对称,对转子径向平动运用牛顿第二定律,转动运动在 $o-x_f y_f z_f$ 中运用欧拉动力学方程,同时忽略其中的小量,得到内外框架转动情况下 MSR 动力学方程:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = f_x \\ m\ddot{y} = f_y \\ \mathbf{J}_r(\ddot{\alpha} + \ddot{\varphi}) + \mathbf{H}_z(\dot{\theta}\cos\varphi + \dot{\beta}) = \mathbf{M}_x \\ \mathbf{J}_r(\ddot{\theta}\cos\varphi + \ddot{\beta}) - \mathbf{H}_z(\dot{\alpha} + \dot{\varphi}) = \mathbf{M}_y \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{J}_r = \mathbf{J}_x = \mathbf{J}_y$ 为转子的赤道转动惯量, $\mathbf{H}_z = \mathbf{J}_z \cdot \Omega$ 为转子角动量。 f_x 和 f_y 为磁轴承径向方向

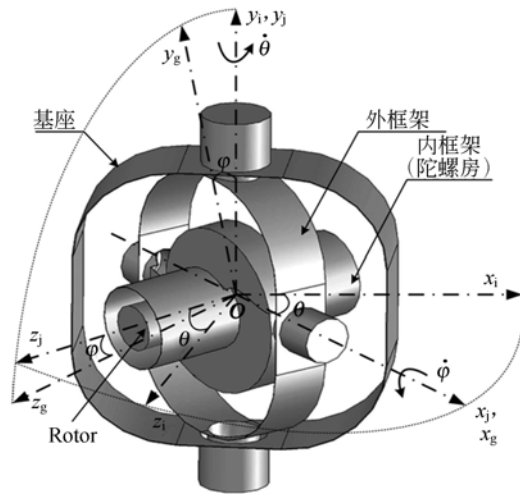


图 2 DGMSCMG 坐标系
Fig. 2 Coordinate system definition of DGMSCMG

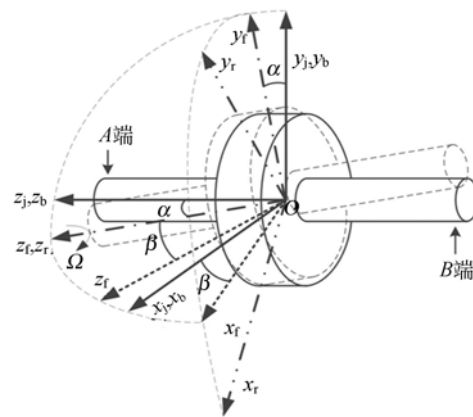


图 3 磁悬浮转子坐标系示意图
Fig. 3 Coordinate definition of magnetically suspended rotor

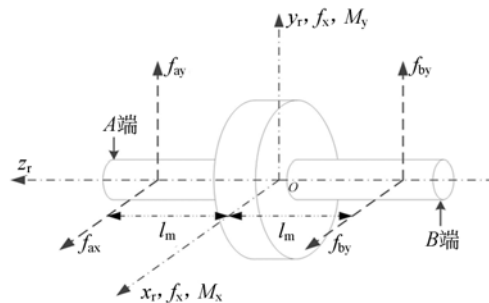


图 4 转子径向受力示意图
Fig. 4 Magnetic force of rotor in radial direction

平动控制力, \mathbf{M}_x 和 \mathbf{M}_y 为磁轴承径向方向控制力矩, 其可以根据如图 4 所示 MSR 径向方向受力示意图得出:

$$\begin{cases} f_x = f_{ax} + f_{bx} \\ f_y = f_{ay} + f_{by} \\ \mathbf{M}_x = f_{by}l_m - f_{ay}l_m \\ \mathbf{M}_y = f_{ax}l_m - f_{bx}l_m \end{cases}, \quad (2)$$

式中: l_m 为磁中心到转子几何中心的距离; f_{ax} , f_{ay} , f_{bx} 和 f_{by} 分别为转子径向 4 个通道所受到的电磁力, 在工作点附近可以表示为:

$$f_t = k_{it}i_t + k_{ht}h_t, \quad (3)$$

其中: t 分别表示通道 ax , ay , bx 和 by 。 k_{it} 为电流刚度, i_t 为线圈电流, k_{ht} 为位移刚度, h_t 为对应磁轴承通道的转子位移。

2.3 磁轴承负载力矩分析

当 DGMSCMG 内、外框架静止, 也即 $\dot{\varphi} = \dot{\theta} = 0$ ($^\circ$)/s 时, 式(1)可以简化为:

$$\begin{cases} \mathbf{J}_r \ddot{\alpha} + \mathbf{J}_z \Omega \cdot \dot{\beta} = \mathbf{M}_x \\ \mathbf{J}_r \ddot{\beta} + \mathbf{J}_z \Omega \cdot \dot{\alpha} = \mathbf{M}_y \end{cases}, \quad (4)$$

式(4)即为框架静止时的转子转动动力学方程(陀螺技术方程)。整理式(1)可得:

$$\begin{cases} \mathbf{J}_r \ddot{\alpha} + \mathbf{J}_z \Omega \cdot \dot{\beta} = \mathbf{M}_x + \mathbf{M}_{dx} + \Delta \mathbf{M}_{dx} \\ \mathbf{J}_r \ddot{\beta} + \mathbf{J}_z \Omega \cdot \dot{\alpha} = \mathbf{M}_y + \mathbf{M}_{dy} + \Delta \mathbf{M}_{dy} \end{cases}, \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{dx} = -\mathbf{J}_z \Omega \cdot \dot{\theta} \cos \varphi - \mathbf{J}_r \ddot{\varphi} + \Delta \mathbf{M}_{dx} \\ \mathbf{M}_{dy} = -\mathbf{J}_z \Omega \cdot \dot{\varphi} - \mathbf{J}_r \ddot{\theta} \cos \varphi + \Delta \mathbf{M}_{dy} \end{cases}. \quad (6)$$

对比式(5)和(4)可以看出, 等式右端多出 \mathbf{M}_{dx} , $\Delta \mathbf{M}_{dx}$, \mathbf{M}_{dy} , $\Delta \mathbf{M}_{dy}$ 项。表明框架的转动产生了额外的负载力矩作用于磁轴承。其中与框架角速度相关的称为陀螺负载力矩, 与框架角加速度相关的称为惯性负载力矩, $\Delta \mathbf{M}_{dx}$, $\Delta \mathbf{M}_{dy}$ 为负载力矩的小量。进一步分析可知, 与 SGMSCMG 相比, 由于存在内外框架相对运动, DGMSCMG 中磁轴承的负载力矩形式更为复杂, 呈现非线性等特点, 导致 MSR 的动力学行为更为复杂。

传统的前馈补偿方法在设计时往往会忽略负载力矩中的加速度项及高阶小量项, 使得对负载力矩的补偿不全面。本文利用框架角速率前馈补偿对已知的可测负载力矩进行补偿, 此外设计力矩观测器对未知的及不可测负载力矩进行补偿。该复合补偿方法可以实现两种补偿方法的互补。设计力矩观测器可以提高负载力矩的补偿精度,

同时框架角速率前馈补偿可以提高观测器观测误差的收敛速度, 提高力矩补偿的动态响应能力。

3 复合补偿控制策略

3.1 力矩观测器设计

设计力矩观测器的目的是估计负载力矩中的不可测量的含框架角加速度的项, 形式复杂的高阶项以及其他的未知随机扰动力矩, 以便实现补偿的全面性, 提高控制精度。

为了便于力矩观测器设计, 将式(5)改写成矩阵形式:

$$\mathbf{J} \ddot{\xi} + \mathbf{H} \dot{\xi} = \mathbf{M} + \mathbf{M}_g, \quad (7)$$

$$\text{其中: } \mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_r & 0 \\ 0 & J_r \end{bmatrix}, \quad \xi = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & H_z \\ -H_z & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_g = [M_{dx} + \Delta M_{dx}, M_{dy} + \Delta M_{dy}].$$

负载力矩观测器基于一类非线性干扰观测器进行设计^[19], 其形式为:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon} = -\mathbf{L}(\xi, \dot{\xi}) \epsilon + \mathbf{L}(\xi, \dot{\xi}) (\mathbf{H} \dot{\xi} - \mathbf{M} - \mathbf{p}(\xi, \dot{\xi})) \\ \dot{\mathbf{M}}_g = \epsilon + \mathbf{p}(\xi, \dot{\xi}) \end{cases}, \quad (8)$$

式中 ϵ , $\mathbf{L}(\xi, \dot{\xi})$, $\mathbf{p}(\xi, \dot{\xi})$ 为力矩观测器的内部状态变量, 且有:

$$\mathbf{p}(\xi, \dot{\xi}) = c \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\alpha} + \dot{\beta} \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \dot{\xi}, \quad (9)$$

其中 $c \in \mathbb{R}^+$ 为观测器的增益。

$\mathbf{L}(\xi, \dot{\xi})$ 与 $\mathbf{p}(\xi, \dot{\xi})$ 满足下面关系,

$$\mathbf{L}(\xi, \dot{\xi}) \mathbf{J} \ddot{\xi} = \frac{d\mathbf{p}(\xi, \dot{\xi})}{dt} = c \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \dot{\xi}. \quad (10)$$

3.2 复合补偿控制算法

图 5 所示为包含复合补偿控制算法的控制系统框图。位移传感器检测转子偏移参考位置的位移, 控制算法根据位移偏差计算出控制量, 复合补偿控制算法计算出克服负载力矩所需的补偿量, 生成相应的 PWM 控制信号, 通过功放产生控制电流, 驱动磁轴承产生电磁力使转子悬浮在参考位置。

对称转子的平动运动与转动运动解耦, 因此, 对转动运动进行补偿时可以不考虑平动运动的影响, 有:

$$\begin{cases} f_x = f_{ax} + f_{bx} = 0 \\ f_y = f_{ay} + f_{by} = 0 \end{cases}. \quad (11)$$

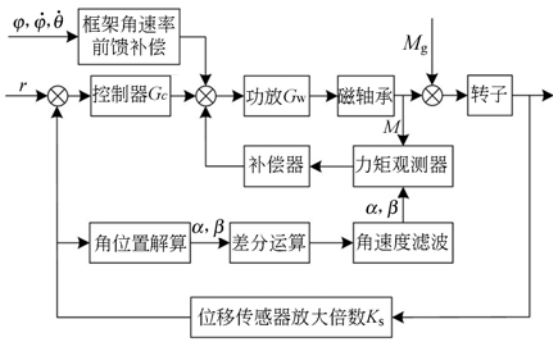


图 5 磁悬浮转子控制系统框图

Fig. 5 Block diagram of control system for MSR

由于框架带宽(10 Hz)远远低于功放的截止频率(2 kHz),可以忽略功放带宽的影响,将其看成一个直流放大器。假设四通道功放对称,且功放的直流增益为 k_w ,可以得到磁轴承克服负载力矩所需的电流折合到径向 4 个通道的补偿控制量为:

$$\begin{cases} u_{ca,x} = (\frac{J_z \Omega \dot{\varphi} + \hat{M}_{g,y}}{l_m} - k_{ha,x} \cdot h_{a,x}) / 2k_{ia,x}k_w \\ u_{cb,x} = -(\frac{J_z \Omega \dot{\varphi} + \hat{M}_{g,y}}{l_m} - k_{hb,x} \cdot h_{b,x}) / 2k_{ib,x}k_w \\ u_{ca,y} = -(\frac{J_z \Omega \dot{\theta} \cos \varphi + \hat{M}_{g,x}}{l_m} - k_{ha,y} \cdot h_{a,y}) / 2k_{ia,y}k_w \\ u_{cb,y} = -(\frac{J_z \Omega \dot{\theta} \cos \varphi + \hat{M}_{g,x}}{l_m} - k_{hb,y} \cdot h_{b,y}) / 2k_{ib,y}k_w \end{cases} \quad (12)$$

3.3 稳定性分析

设控制器传递函数矩阵为 G_c , 转子转动动力学模型为 G_r , 位移传感器放大倍数为 k_s , 可得没有加入补偿时参考位置 r 到转子位移输出 y 之间的传递函数矩阵:

$$T = k_w k_i G_c G_r (I - k_h + k_s k_w k_i G_c G_r)^{-1} \quad (13)$$

当引入复合补偿控制之后,负载力矩 M_g 到转子位移输出 y 之间的传递函数矩阵为:

$$T_G = (I - K_c K k_w k_i) G_r (I - k_h + k_s k_w k_i G_c G_r)^{-1} \quad (14)$$

可以看到,加入复合补偿控制没有改变原闭环系统的极点。根据鲁棒稳定性理论,在控制器 G_c 保证系统稳定的前提下, T_G 稳定的条件是 $\|K_c K\| < \lambda$, 即要求力矩观测器对负载力矩的估计能量有界。根据[19]分析,该力矩观测器是按指数收敛的,因而可以保证闭环系统在补偿后的稳定性。

4 试验验证

4.1 试验平台

图 6 所示为 DGMSCMG 试验平台,包括 DGMSCMG 样机,电源箱,控制线路盒及示波器等。

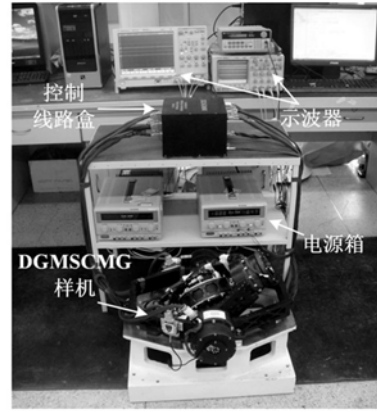


图 6 DGMSCMG 试验平台

Fig. 6 Experimental setup of DGMSCMG

DGMSCMG 磁悬浮转子结构参数如表 1 所示。

表 1 DGMSCMG 磁轴承转子参数

Tab. 1 Parameters of magnetically suspended rotor

参数名	参数描述	参数值
m/kg	转子质量	4.75
$J_r/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	转子赤道转动惯量	0.009 48
$J_z/\text{kg} \cdot \text{m}^2$	转子极转动惯量	0.014 46
$k_i/\text{N} \cdot \text{A}^{-1}$	磁轴承径向电流刚度	209
$k_h/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	磁轴承径向位移刚度	9.1×10^5
l_s/mm	位移传感器中心到转子中心距离	48.92
l_m/mm	磁轴承中心到转子中心距离	77.61

磁轴承控制器基于 DSP TMS320C31 架构,其中控制器的伺服频率为 5 kHz。试验中采用实验室已经成熟应用的 PID+交叉反馈解耦方法进行磁悬浮转子稳定悬浮控制,如图 7 所示。交叉反馈主要用于抑制高速下转子的陀螺效应,用低通滤波器(LPF)提取转子的进动频率,高通滤波器(HPF)提取转子的章动频率, k_{cl} 和 k_{ch} 分别为低通交叉系数和高通交叉系数。最终的控制量由 PID 加交叉反馈解耦控制得到的稳定悬浮控制量与负载力矩复合补偿控制量组合而成。

PID 控制器离散化后传递函数为:

$$H_c(z) = K_p \left[1 + \frac{T}{T_i(1-z^{-1})} + \frac{T_d(1-z^{-1})}{T+T_f(1-z^{-1})} \right], \quad (15)$$

式中: T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数, T_f 为不完全微分系数, T 为采样时间 $200 \mu\text{s}$ 。

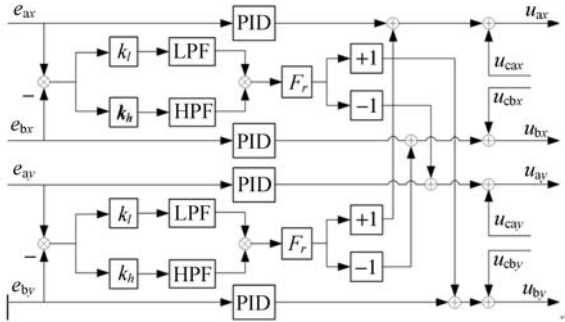


图 7 控制器框图

Fig. 7 Block diagram of PID plus cross feedback control

转子转速为 $15\,000 \text{ r/min}$ 时, 控制器参数如

表 2 所示。表中 $k_{id} = \frac{k_p}{T_i}$, $k_d = k_p T_d$ 。

表 2 磁轴承转子控制参数

Tab. 2 Control parameters of MSR

参数名	参数描述	参数值
k_p	比例系数	4.0
k_{id}	积分系数	0.003 75
k_d	微分系数	5.5
k_{cl}	低通交叉系数	0.000 5
k_{ch}	高通交叉系数	0.004 5
amp_kp	电流环比例系数	1.3
i_co	电流环反馈系数	9.8
$k_w/A \cdot V^{-1}$	功放直流增益	0.67
c	力矩观测器增益	4.15

在补偿量的计算中, 前馈补偿可以通过实时计算得到, 而力矩观测器的离散形式为:

$$\begin{cases} (1 + \frac{c}{J_r} T - z^{-1}) \epsilon_1 = K_1 T \\ (1 + \frac{c}{J_r} T - z^{-1}) \epsilon_2 = (K_2 - \frac{c}{J_r} \epsilon_1) T \end{cases}, \quad (16)$$

其中 $\begin{cases} K_1 = \frac{c}{J_r} (\mathbf{H}_z \dot{\beta} - \mathbf{M}_x - \dot{\alpha}) \\ K_2 = \frac{c}{J_r} [\mathbf{H}_z (\dot{\beta} - \dot{\alpha}) - \mathbf{M}_y - c(2\dot{\alpha} + \dot{\beta})] \end{cases}$ 为实时

计算的量。在基于 DSP 的系统中, 将转换成差分

方程, 通过编程实现控制算法的集成。

4.2 试验结果及分析

首先进行动框架启动时负载力矩对 MSR 位移影响试验。内外框架初始状态为 $\varphi=0^\circ, \theta=0^\circ$, 此时内外框架正交, 框架启动后产生的负载力矩最大。在 0.2 s 时, 内外框架分别以 $120^\circ/\text{s}^2$ 的角加速度从 0 加速到 $10^\circ/\text{s}$ 。

以 A_x 端为例, 图 7~9 分别为在不加补偿, 加入前馈补偿以及加入复合补偿控制方法情况下框架启动时的转子位移曲线。经过测量, 当不加入补偿控制时, 启动框架后负载力矩所导致的转子位移跳动量约为 $81.2 \mu\text{m}$, 调节时间约为 0.12 s ; 在加入前馈补偿后转子位移跳动量约为 $56.3 \mu\text{m}$, 调节时间约为 0.04 s ; 加入复合补偿控制后, 转子位移跳动量约为 $36.4 \mu\text{m}$, 调节时间约为 0.07 s 。可以看到, 采用前馈补偿后, 框架启动时负载力矩引起的转子位移跳动量减小为没有补偿时的 69%; 而采用复合补偿使转子的位移跳动量减小为没有补偿时的 44.8%。与前馈补偿相比, 复合补偿虽然调节时间稍长, 但其进一步减小了框架启动时的转子位移跳动量。

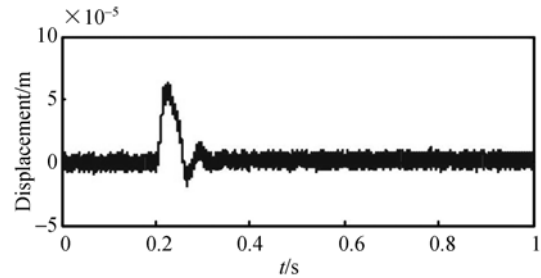


图 8 未加补偿时转子 A_x 端位移

Fig. 8 Displacement at end A_x without compensation

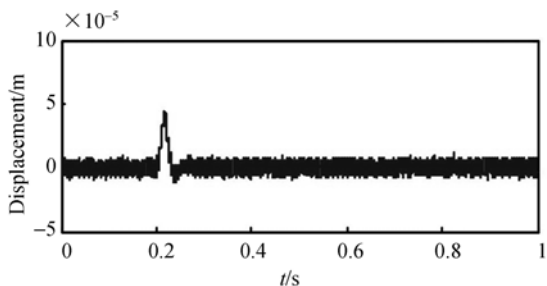


图 9 加入前馈补偿时转子 A_x 端位移

Fig. 9 Displacement at end A_x with feedforward compensation

利用内外框架角速率正弦激励验证了提出的复合补偿控制方法对负载力矩的抑制作用。试验条件为:内外框架处于正交位置,分别以幅值 $10(^{\circ})/s$,频率 10 Hz 激励。分别测试通道 A_x 、 B_y 的位移波形。

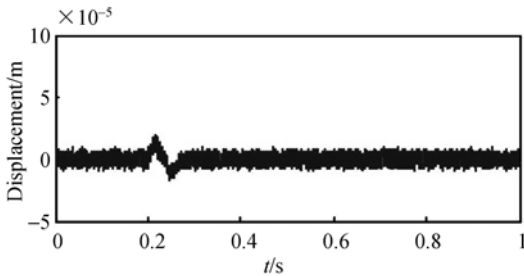


图 10 加入复合补偿时转子 A_x 端位移

Fig. 10 Displacement at end A_x with composite compensation

图 11 所示为在 0.5 s 时加入前馈补偿后 A_x 、 B_y 端的位移波形。可以测量得到未加入补偿前,在负载力矩干扰下, A_x 端转子位移跳动量为 $148.3\ \mu\text{m}$, B_y 端转子位移跳动量为 $162.5\ \mu\text{m}$,采用前馈补偿控制后,转子位移跳动量 A_x 端为 $69.4\ \mu\text{m}$, B_y 端为 $78.0\ \mu\text{m}$ 。分别降低为前馈补偿前的 46.8% 和 48% 。

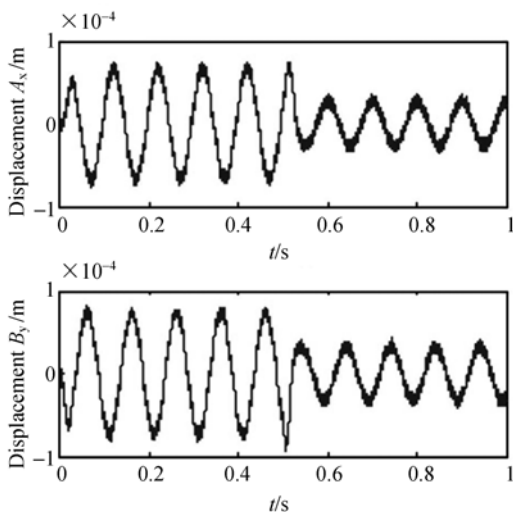


图 11 加入前馈补偿时转子 A_x 、 B_y 端位移

Fig. 11 Displacements at end A_x and B_y with forward-back compensation

图 12 所示为在 0.5 s 时加入复合补偿控制方法后 A_x 、 B_y 端的转子位移波形。经过测量,未补偿前, A_x 端转子位移跳动量为 $149.3\ \mu\text{m}$, B_y

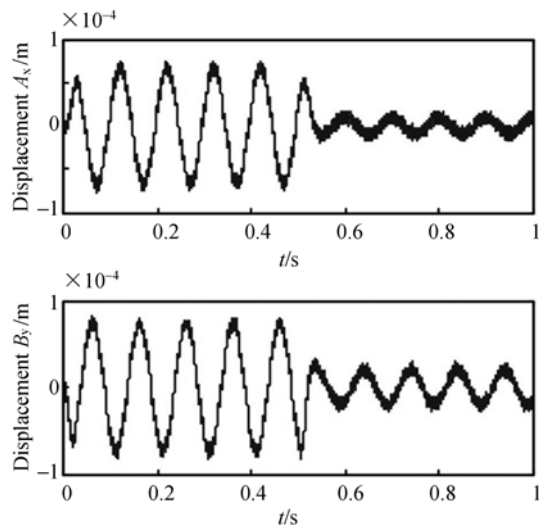


图 12 加入复合补偿时转子 A_x 、 B_y 端位移

Fig. 12 Displacement at end A_x and B_y with composite compensation

端的转子位移跳动量为 $158.2\ \mu\text{m}$,补偿后 A_x 为 $34.9\ \mu\text{m}$, B_y 为 $56.2\ \mu\text{m}$,分别降低为补偿前的 23.4% 和 35.5% 。

在试验中,前馈补偿与观测器补偿的量相当,这是因为在前馈补偿中,只对陀螺力矩进行补偿,而未对惯性力矩进行补偿,同时由于 $\sigma_{x_b y_b z_b}$ 与 $\sigma_{x_j y_j z_j}$ 会存在偏差以及重力的存在也降低了前馈补偿的精度。试验表明,基于角速率前馈与力矩观测的复合补偿控制方法与单纯的前馈补偿相比,更进一步地减小了 MSR 在框架负载力矩扰动下的位移跳动量,提高了转子控制精度。

5 结 论

本文从工程应用中提高双框架磁悬浮控制力矩陀螺磁悬浮转子悬浮精度出发,提出一种基于角速率前馈与力矩观测相结合的磁轴承负载力矩复合补偿控制方法。首先建立了转子动力学模型,对动框架引起的磁轴承负载力矩进行分析。然后设计负载力矩观测器,提出负载力矩的复合补偿控制策略,采用角速率前馈对可测量的陀螺力矩项进行补偿,力矩观测对惯性力矩项及其他不可测的负载力矩进行补偿。最后,利用实验室研制的双框架磁悬浮控制力矩陀螺样机搭建试验平台进行试验验证。试验结果表明:复合补偿控制方法使框架以 $120(^{\circ})/s^2$ 的角加速度启动至 10

(°)s 时, 转子 A_x 端位移跳动量减小为没有补偿前的 44.8%, 内外框架以幅值频率 10 Hz 正弦激励时转子 A_x 、 B_y 端的位移跳动量分别减小为没

有补偿前的 23.4% 和 35.5%, 有效地提高了磁悬浮转子在负载力矩扰动下的悬浮精度。

参考文献:

- [1] 陈茂胜, 金光, 安源, 等. 采用自适应 pi 控制的单框架控制力矩陀螺角动量飞轮系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1075-1081.
CHEN M SH, JIN G, AN Y, *et al.*. Design of angular momentum wheel in SGCMG using adaptive compensation PI control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1075-1081. (in Chinese)
- [2] 谷松, 贾继强, 金光. 快速机动小卫星执行机构研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8): 1540-1545.
GU S, JIA J G, JIN G. Research on momentum management of fast slew maneuver small satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(8): 1540-1545. (in Chinese)
- [3] ABBAS H S, ALI A, HASHEMI S M, *et al.*. LPV state-feedback control of a control moment gyroscope [J]. *Control Engineering Practice*, 2014, 24: 129-137.
- [4] REN Y, FANG J C. High-precision and Strong-robustness control for an MSCMG based on modal separation and rotation motion decoupling strategy [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(3): 1539-1551.
- [5] 魏彤, 房建成. 高速大惯量磁悬浮转子系统章动交叉控制的保相角裕度设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(3): 858-865.
WEI T, FANG J CH. Proof-phase-margin design of nutation cross-feedback control in magnetically suspended high-speed rotor system with large rotary inertia [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 858-865. (in Chinese)
- [6] 徐洪亮, 翟传润, 战兴群, 等. 双框架控制力矩陀螺伪逆控制律设计及仿真[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(5): 851-855.
XU H L, ZHAI CH R, ZHAN X Q, *et al.*. Design and simulation of pseudo-Inverse control law for double gimbal control moment gyro [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2008, 42(5): 851-855. (in Chinese)
- [7] FANG J C, ZHENG SH Q, HAN B CH. AMB vibration control for structural resonance of double-gimbal control moment gyro with high-speed magnetically suspended rotor [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(1): 32-43.
- [8] FANG J C, REN Y. High-precision control for a single-gimbal magnetically suspended control moment gyro based on inverse system method [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(9): 4331-4342.
- [9] SUZUKI Y. Acceleration feedforward control for active magnetic bearing systems excited by ground motion [C]. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 1998, 145(2): 113-118.
- [10] KANG M S, YOON W H. Acceleration feedforward control in active magnetic bearing system subject to base motion by filtered-X LMS algorithm [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(1): 134-140.
- [11] 魏彤, 房建成. 磁悬浮控制力矩陀螺的动框架效应及其角速率前馈控制方法研究[J]. 宇航学报, 2005, 26(1): 19-23.
WEI T, FANG J CH. Moving-gimbal effects and angular rate feedforward control in magnetically suspended rotor system of CMG [J]. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(1): 19-23. (in Chinese)
- [12] 郑世强, 房建成, 韩邦成. 提高双框架磁悬浮 CMG 动态响应能力的磁轴承补偿控制方法与试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(20): 22-28.
ZHENG SH Q, FANG J CH, HAN B CH. Compensation control method and experimental study of magnetic bearing to improve dynamic response ability of double gimbal magnetically suspended control moment gyroscope [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(20): 22-28. (in Chinese)
- [13] 魏彤, 房建成, 刘珠荣. 双框架磁悬浮控制力矩陀螺动框架效应补偿方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(2): 159-165.
WEI T, FANG J CH, LIU ZH R. Moving-gimbal effects compensation of double gimbal magnetically suspended control moment gyroscope based on compound control [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(2): 159-165. (in Chinese)

- [14] 丁力, 房建成, 魏彤, 等. 一种抑制扰动的轴向磁轴承鲁棒控制新方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(4): 420-423.
DING L, FANG J CH, WEI T, *et al.*. Robust control method for disturbance rejection on axial magnetic bearing [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(4): 420-423. (in Chinese)
- [15] DESHPANDE V S, MOHAN B, SHENDGE P, *et al.*. Disturbance observer based sliding mode control of active suspension systems[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2014: 2281-2296.
- [16] JASTRZEBSKI R P, HYNYNEN K M, SMIRNOV A. H^∞ control of active magnetic suspension [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24: 995-1006.
- [17] RIEMANN B, PERINI E A, CAVALCA K L, *et al.*. Oil whip instability control using μ -synthesis technique on a magnetic actuator[J]. *Journal of sound and vibration*, 2013, 332: 654-673.
- [18] KANG M S, LYOU J, LEE J K. Sliding mode control for an active magnetic bearing system subject to base motion[J]. *Mechatronics*, 2010, 20: 171-178.
- [19] CHEN W H, BALLANCE D J, GAWTHROP P J, *et al.* A nonlinear disturbance observer for robotic manipulators[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2000, 47(4): 932-938.

作者简介:



文 通 (1983—), 男, 湖南衡阳人, 博士, 讲师。2012 年于北京航空航天大学获得博士学位, 主要从事磁悬浮飞轮磁轴承控制技术, 磁悬浮惯性稳定平台控制技术, 电涡流位移传感器技术等方面研究。E-mail: wentong@buaa.edu.cn

导师简介:



刘 刚 (1970—), 男, 山东济南人, 教授, 博士生导师。1998 年于山东大学获得硕士学位, 2001 年于大连理工大学获得博士学位, 2003 年北京航空航天大学博士后出站, 主要从事航天器姿态控制技术, 磁悬浮惯性执行机构, 精密机电控制系统技术等方面的研究。E-mail: lgang@buaa.edu.cn

通信作者:



谢进进 (1986—), 男, 江苏南通人, 博士研究生。2008 年于东南大学获得学士学位, 主要从事磁悬浮控制力矩陀螺磁轴承高精度控制技术, 电涡流位移传感器技术等方面研究。E-mail: xiejin1002@163.com