

五自由度磁悬浮轴承的扰动补偿 控制系统设计

李克翔, 邓智泉, 刘程子, 华 春

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘 要: 在比例-积分-微分(PID)控制的基础上加入扰动补偿环节,设计了五自由度磁悬浮轴承的扰动补偿控制系统.通过对转子运动模型的分析,修正并得到了更为精确的磁悬浮轴承扰动观测器模型.对离散化的扰动观测器进行了稳定性分析和参数整定方法研究,进而使扰动观测器的参数整定过程更为规范与便捷.实验结果表明:在PID控制基础上加入扰动补偿控制,转子受扰自由度的位移波动分别减小了38.7%和67%,转子在20000 r/min转速下的轴心运动轨迹波动减小了21%,从而验证了扰动补偿控制相比于PID控制的优越性.

关 键 词: 磁悬浮轴承; 扰动补偿控制; 线性扩张状态观测器; 稳定性验证; 参数整定

中图分类号: V233; TH133.3

文献标志码: A

Design of disturbance rejection control system for 5-DOF magnetic bearing

LI Ke-xiang, DENG Zhi-quan, LIU Cheng-zi, HUA Chun

(College of Automation Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The disturbance rejection control system for 5 degree-of-freedom (DOF) magnetic bearing was designed based on proportion-integration-differentiation (PID) control combined with disturbance rejection process. Through analysis of the rotor motion model, a more accurate disturbance observer model of magnetic bearing was revised and obtained. The stability analysis of the discrete disturbance observer was conducted and the parameter tuning method was elaborated, making the parameter tuning process of disturbance observer more normative and convenient. The experimental results show that: when the disturbance rejection control is employed in PID control, displacement fluctuations of rotor disturbed DOFs are reduced by 38.7% and 67% respectively, and the motion track fluctuation of the rotor axis center is reduced by 21% with rotating speed of 20000 r/min, thus verifying the superiority of the disturbance rejection control compared with PID control.

Key words: magnetic bearing; disturbance rejection control;

linear extend state observer; stability verification; parameters tuning

磁悬浮轴承(以下简称磁轴承)是一种高性能轴承,可以利用磁场力将转子悬浮于空中,使定子

与转子之间没有机械接触^[1].与传统的滑动轴承和滚动轴承相比,磁轴承具有无机械摩擦、噪声

收稿日期:2013-11-18

基金项目:国家自然科学基金(51277094);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfjj201413);中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介:李克翔(1991—),男,江苏洪泽人,硕士生,主要从事混合型磁悬浮轴承研究. E-mail:lkxzdh@nuaa.edu.cn

小、寿命长、动力损失小、无润滑油污染等优势,因此在航空航天、能源交通、机械工业等领域有着极其广泛的应用前景^[2-3]. 由于PID控制不完全依赖于控制对象模型、调节参数相对简单,且在消除位移误差的同时可以使系统具有较好的静态性能,因此目前约90%的磁轴承在使用PID控制转子的稳定悬浮^[4].

然而,PID控制存在其固有缺陷^[5]:①系统具有“快速性”与“超调”的矛盾;②理想微分器很难实现;③P,I,D的线性组合方式值得商榷;④积分环节并不能抑制随机变化的扰动,且有反应迟钝、易引发超调、使控制量饱和等问题. 对此,韩京清提出自抗扰控制(active disturbance rejection control,ADRC)技术,以弥补PID控制的不足^[6].

自抗扰控制具有实时估计扰动和扰动补偿的功能,即抗扰动能力,其结构框图如图1所示(图中符号含义参考文献^[7]),由过渡过程(TD)、扩张状态观测器(ESO)、状态误差反馈律(NLSF)、扰动补偿4部分组成. 在对扰动估算补偿的过程中,ESO不需要直接测量扰动,也不需要确定扰动的数学模型,因此,是一种通用且实用的控制器^[7].

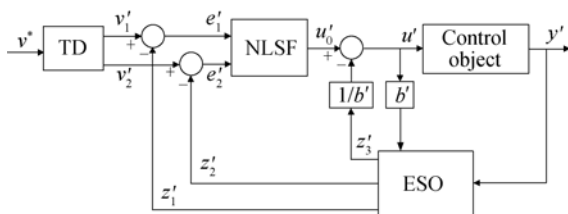


图1 自抗扰控制结构框图

Fig. 1 Structure diagram of ADRC

经过十多年的发展,国内外取得了许多与ADRC相关的研究成果. 不仅在理论研究上有诸多进展^[8-9],ADRC的应用研究也不断涌现. 在运动控制领域,文献^[10-11]在伺服系统中应用了ADRC,文献^[12]将ADRC应用在了异步电动机的直接转矩控制中,还有学者进行了永磁同步电动机的扰动补偿控制^[13];在陀螺仪控制的相关文献中,同样可见ADRC的应用研究^[14];另外还有其在纸卷张力与速度调节^[15]、化工过程控制^[16]、电力系统^[17]、飞行控制^[18-19]等诸多领域中的应用研究.

在磁轴承控制领域,也出现了一些关于ADRC的研究. Alexander等利用ADRC完成了无位移传感器的磁轴承转子悬浮控制的设计,并仿

真验证了转子受阶跃扰动的抗扰能力^[20];其在飞轮储能磁轴承上也展开了ADRC的应用研究,进行了三自由度扰动补偿控制仿真,得出了其控制效果优于PID控制的结论^[21]. 文献^[22]在无轴承电动机中应用了ADRC,有效提高了无轴承电动机的悬浮性能.

ADRC的核心是ESO,它将作用于被控对象的所有不确定因素都归结于“未知扰动”,利用对象的输入、输出信息将这一扰动值估算出来,最终将这一估算值补偿入控制系统,即可实现系统的自抗扰功能^[7]. 在自抗扰理论中,通常将ESO设为非线性的形式,而文献^[23]在理论上证明了在系统模型未知的情况下,可以构造出合适的线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)使估计误差有界,并证明了线性自抗扰控制下闭环系统输入、输出的稳定性. 周振雄等成功地将线性自抗扰控制应用于平面磁轴承的悬浮控制中^[24];王大朋则实现了其在高速电动机磁轴承中的应用^[25].

纵观已有的ADRC在磁轴承中的应用研究,可见大部分研究存在几点问题:①应用于磁轴承的ESO模型不够精确;②由于ADRC与PID控制算法的结构完全不同,且PID控制参数的最优性值得商榷,因此两者的控制效果并不具有可比性;③大多研究并未涉及ADRC的实验验证.

针对以上问题,本文开展了以下几点研究工作:①通过分析磁轴承转子运动的数学模型对LESO进行了修正,使得磁轴承的扰动观测器模型更加精确;②在磁轴承PID控制的基础上,仅引入了LESO部分进行扰动的估算与补偿,并使两种控制方法中的PID控制参数保持一致,从而体现扰动观测器的扰动补偿能力;③对离散化的扰动观测器进行了稳定性分析与参数整定方法研究,从而使扰动观测器的参数整定方法更为便捷;④利用仿真和实验,验证修正后的LESO应用于五自由度磁轴承的可行性与优越性.

1 磁轴承扰动补偿控制模型

五自由度磁轴承各自由度之间存在耦合效应,因此利用分散的PID控制不利于获得良好的控制性能. 而LESO可以将各自由度之间的耦合作用与外界扰动共同算作总和扰动,并对这一总和扰动进行补偿,因此将LESO用于各自由度的分散控制可以改善对耦合系统的控制性能.

由于轴向自由度与径向自由度之间耦合较

弱,且本文研究的磁轴承为双边混合型轴向径向磁轴承,转子在轴向上刚度较强,在PID控制的实验中抗扰性较好,因此本文对径向4个自由度采用扰动补偿控制,轴向自由度仍使用PID控制。

1.1 扰动补偿控制系统框图

为了与PID控制的性能进行对比,本文仅在PID控制基础上加入扰动观测器,构成了图2所示磁轴承一个自由度的扰动补偿控制框图,图中虚线框部分即为所设计的控制器结构框图。将径向4个自由度分别进行基于扰动补偿的PID控制,即可实现扰动补偿的分散控制。

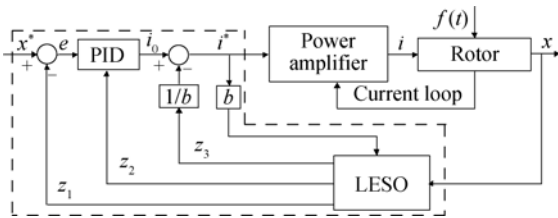


图2 磁轴承一个自由度的扰动补偿控制框图

Fig. 2 Block diagram of 1-DOF magnetic bearing with disturbance rejection control

图2中 x^* 为位移给定值, x 为该自由度实际位移, e 为位移误差, i_0 为通过PID控制算得的悬浮绕组电流环控制信号, i^* 为经LESO补偿后的电流环电流给定值, i 为实际电流, $f(t)$ 为外扰(包括外界扰动力以及其他自由度对其耦合作用); z_1, z_2, z_3 为LESO估算出的3个状态变量,分别为转子此自由度上的位移估计值、速度估计值、扰动力产生加速度的估计值; b 为扰动补偿系数,与磁轴承的参数有关。

理论上,在 z_1, z_2 均估算准确的前提下,可以将 z_1 作为位移反馈, z_2 作为速度量引入PID的微分控制中,如图2所示。但是本文为了增强扰动补偿控制与PID控制之间的可比性,仅在相同参数PID控制条件下增加了以 z_3 为反馈量的扰动补偿环节, z_1, z_2 仅进行了估算而未引入控制环节。

综上所述,本文的磁轴承扰动补偿控制由位环、扰动补偿环、电流环三环构成。PID控制根据转子的位移误差算出所需悬浮电流值,LESO实时估算扰动值并将其补偿入控制系统,从而在PID控制较好静态性能的基础上,实现实时的ADRC,进一步提高系统的动态性能。

1.2 扰动补偿控制模型建立

1.2.1 转子运动模型

根据文献[26]可知,永磁偏置轴向径向磁轴承一个自由度的悬浮力线性模型为

$$F_x = K_i i + K_x x \quad (1)$$

其中 K_i 为磁轴承的电流刚度, K_x 为位移刚度。那么在考虑外界扰动力 f_x 的情况下,可得此自由度的运动状态方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{K_i}{m} i + \frac{K_x}{m} x_1 + \frac{f_x}{m} \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中 x_1 为位移, x_2 为速度, m 为质量。在运动状态方程式(2)的基础上,扩张状态量 $x_3 = f_x/m$,即扰动力产生的加速度。记 $\dot{x}_3 = \omega(t)$,可得到扩张状态后的转子运动模型

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{K_i}{m} i + \frac{K_x}{m} x_1 + x_3 \\ \dot{x}_3 = \omega(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (3)$$

1.2.2 扰动观测器模型

设置扰动观测器为如下的LESO形式:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = z_1 - x_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02} e_1 + bu + dz_1 \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03} e_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 分别为位移反馈增益、速度反馈增益和扰动反馈增益, u 为控制电流。取 $b = K_i/m, d = K_x/m$,记扰动观测器的观测位移误差 $e_1 = z_1 - y, e_2 = z_2 - x_2, e_3 = z_3 - x_3$,可得

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \beta_{01} e_1 \\ \dot{e}_2 = e_3 - \beta_{02} e_1 + \frac{K_x}{m} e_1 \\ \dot{e}_3 = -\omega(t) - \beta_{03} e_1 \end{cases} \quad (5)$$

达到稳态时,式(5)各式均为0,可得观测误差

$$\begin{cases} e_1 = -\frac{\omega(t)}{\beta_{03}} \\ e_2 = -\beta_{01} \frac{\omega(t)}{\beta_{03}} \\ e_3 = -\beta_{02} \frac{\omega(t)}{\beta_{03}} - \frac{K_x}{m} e_1 \end{cases} \quad (6)$$

由此可见,当 β_{03} 相比 $\omega(t)$ 足够大,这些误差可以足够小,趋近于0,即实现了

$$z_1 \rightarrow x_1 \quad z_2 \rightarrow x_2 \quad z_3 \rightarrow x_3 = \frac{f_x}{m} \quad (7)$$

其中 z_3 即为扰动估算值。

1.2.3 扰动补偿模型

由扰动观测器式(4)得到扰动估算值 z_3 , 将 i 取为

$$i = i_0 - \frac{z_3}{b} = i_0 - \frac{z_3 m}{K_i} \quad (8)$$

那么, 转子运动模型式(2)可化为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{K_i}{m} i_0 + \frac{K_x}{m} x_1 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

如此, 控制系统即可补偿控制对象受到的实时扰动, 实现了 ADRC。

1.3 扰动补偿控制模型修正

1.3.1 扰动观测器模型修正

值得注意的是, 相比于一般的 LESO

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - x_1 \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} e_1 \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02} e_1 + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03} e_1 \end{cases} \quad (10)$$

本文建立的扰动观测器式(4)中增加了修正项 $z_1 K_x/m$ 。原因在于, 如果用式(10)建立扰动观测器模型, 得误差方程

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - \beta_{01} e_1 \\ \dot{e}_2 = e_3 - \beta_{02} e_1 - \frac{K_x}{m} x_1 \\ \dot{e}_3 = -\omega(t) - \beta_{03} e_1 \end{cases} \quad (11)$$

算得 $e_3 = \frac{-\beta_{02} \omega(t)}{\beta_{03}} + \frac{x_1 K_x}{m}$, 不能确保 e_3 趋于 0,

即存在观测误差。而式(4)建立的扰动观测器模型即可消除这一误差。

这是由于被控对象除控制器施力所产生的加速度外, 通常还有 3 部分加速度: 系统确知加速度、系统不确定加速度和外扰部分^[7]。根据式(3)可知, 转子运动模型中含有确知加速度 $x_1 K_x/m$, 因此适用于磁轴承的 ESO 需修正, 才可以消除确知加速度引起的误差。

1.3.2 参数修正

由建立的扰动观测器式(4)及扰动补偿模型式(8)可知, 有参数 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}, b = K_i/m, d = K_x/m$ 需要确定。 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 为反馈增益, 需要在实验中进行整定; K_i 与 K_x 分别为电流刚度和位移

刚度, 通过 ANSOFT 软件对本文磁轴承进行三维电磁学仿真可知, 在工作范围内基本为常数, 径向电流刚度为 284 N/A, 位移刚度为 2160 N/mm。

而值得注意的是, 在分散控制的前提下, m 取转子总质量是不准确的。为了得到一个自由度运动相对于该自由度电磁力的等效质量, 需要对转子整体的运动进行数学模型的建立。图 3 为磁轴承转子悬浮状态示意图。

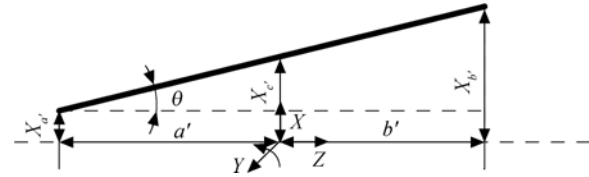


图3 磁轴承转子悬浮状态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of magnetic bearing rotor suspension

如图 3 所示, 在转子两端各有一个轴向径向磁轴承提供了 X 轴方向的悬浮力, 分别距离质心为 a', b' ; X 轴方向转子偏离平衡位置分别为 $X_{a'}, X_{b'}$, 质心偏离为 $X_{c'}$; 转子总质量为 m_1 。

转速较低时, 忽略陀螺耦合效应^[25], 从而易得 X 方向的转子动力学方程

$$\begin{cases} m_1 \ddot{X}_{c'} = F_{Xa'} + F_{Xb'} \\ J_Y \ddot{\theta} = F_{Xb'} b' - F_{Xa'} a' \end{cases} \quad (12)$$

式中 $F_{Xa'}$ 和 $F_{Xb'}$ 分别为两端受到的悬浮力。根据几何关系: $X_{c'} = (a' X_{b'} + b' X_{a'}) / (a' + b')$, $\theta = (X_{b'} - X_{a'}) / (a' + b')$, 那么

$$\begin{cases} \dot{X}_{a'} = \frac{F_{Xa'} J_Y + F_{Xb'} J_Y + a'^2 F_{Xa'} m_1 - a' b' F_{Xb'} m_1}{J_Y m_1} \\ \dot{X}_{b'} = \frac{F_{Xa'} J_Y + F_{Xb'} J_Y - a' b' F_{Xa'} m_1 + b'^2 F_{Xb'} m_1}{J_Y m_1} \end{cases} \quad (13)$$

已知转子总质量 $m_1 = 3.7 \text{ kg}$, 用软件 Solidworks 建立转子的三维模型, 通过仿真计算可以得到各参数值: $a' = 90.8 \text{ mm}$, $b' = 105.2 \text{ mm}$, 转动惯量 $J_Y = 0.0264 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 代入式(13)可得

$$\begin{cases} \dot{X}_{a'} = 0.58 F_{Xa'} - 0.093 F_{Xb'} \\ \dot{X}_{b'} = -0.093 F_{Xa'} + 0.688 F_{Xb'} \end{cases} \quad (14)$$

由此, 左右两端径向一个自由度上的等效质量分别为 1.72, 1.45 kg, 而非转子总质量 3.7 kg, 将扰

动观测器模型、扰动补偿模型中的参数 m 取为等效质量可使扰动补偿更为精确。

2 扰动观测器参数整定方法

2.1 带宽概念整定法

针对 ESO 多个参数整定复杂的问题,文献[27]提出了用带宽概念确定 LESO 参数的简便方法.本文利用此方法进行参数整定,但需要结合修正后的扰动观测器模型进行参数配置的修正。

误差方程式(6)的特征多项式为

$$s^3 + \beta_{01}s^2 + \left[\beta_{02} - \frac{K_x}{m}\right]s + \beta_{03} \quad (15)$$

由 Lyapunov 稳定性判据,特征多项式的全部特征值为负时,系统在 Lyapunov 意义下稳定;又因稳定性比较好且能给出较好过渡过程的特征方程的形式为 $(s+\omega)^3$,那么有

$$(s+\omega)^3 = s^3 + 3\omega s^2 + 3\omega^2 s + \omega^3 = s^3 + \beta_{01}s^2 + \left[\beta_{02} - \frac{K_x}{m}\right]s + \beta_{03} \quad (16)$$

将 $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ 配置成 $3\omega, 3\omega^2 + \frac{K_x}{m}, \omega^3$ 的形式,则仅调节 ω 即可实现参数的配置,至于取什么样的 ω 是根据扰动观测器的带宽要求进行确定。

由于第 1.3.1 节的模型修正,相比于文献[27]中 LESO 参数配置的一般形式 $3\omega, 3\omega^2, \omega^3$,本文在参数配置形式中增添 $\frac{K_x}{m}$ 项,如此可以使磁轴承扰动观测器的参数配置更为优化。

2.2 离散扰动观测器稳定性分析

为了实现数字控制,需要对建立的扰动观测器模型离散化,并验证其稳定性。

由第 1.2 节建立的模型,经过离散化,求得 LESO 观测扰动的广义误差方程为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} e_1(k+1) \\ e_2(k+1) \\ e_3(k+1) \end{bmatrix} = (\mathbf{M} - \mathbf{L}\mathbf{G}) \begin{bmatrix} e_1(k) \\ e_2(k) \\ e_3(k) \end{bmatrix} \\ \tilde{y}(k) = \mathbf{G} \begin{bmatrix} e_1(k) \\ e_2(k) \\ e_3(k) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

式中 $\tilde{y}$ 为输出的误差, $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ Td & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $\mathbf{L} =$

$$\begin{bmatrix} T\beta_{01} \\ T\beta_{02} \\ T\beta_{03} \end{bmatrix}, \mathbf{G} = [1 \quad 0 \quad 0], T \text{ 为采样时间.}$$

根据线性定常离散系统可观性判据得

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{G} \\ \mathbf{GM} \\ \mathbf{GM}^2 \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & T & 0 \\ 1 & 2T & T^2 \end{bmatrix} = 3 \quad (18)$$

采样时间 T 不为 0 时,式(18)成立,状态可观测。

根据理论“如果特征矩阵特征根全部分布于单位圆内,设计的扰动观测器则稳定”,得 $\mathbf{M} - \mathbf{L}\mathbf{G}$ 的特征多项式如下:

$$\begin{aligned} & q^3 + (T\beta_{01} - 3)q^2 + (-T^2d + T^2\beta_{02} - \\ & 2T\beta_{01} + 3)q + (dT^2 + T^3\beta_{03} - \\ & T^2\beta_{02} + T\beta_{01} - 1) \end{aligned} \quad (19)$$

那么,可以求得系统的稳定判据为

$$\begin{cases} T^3\beta_{03} > 0 \\ 2T^2\beta_{02} - 3T^3\beta_{03} - 2dT^2 > 0 \\ 8 - 4T\beta_{01} + 2T^2\beta_{02} - T^3\beta_{03} - 2dT^2 > 0 \\ (2T^2\beta_{02} - 3T^3\beta_{03} - 2dT^2) \cdot \\ (4T\beta_{01} - 4T^2\beta_{02} + 3T^3\beta_{03} + 4dT^2) > \\ T^3\beta_{03}(8 - 4T\beta_{01} + 2T^2\beta_{02} - T^3\beta_{03} - 2dT^2) \end{cases} \quad (20)$$

将第 2.1 节中确定的参数配置形式 $\beta_{01} = 3\omega, \beta_{02} = 3\omega^2 + \frac{K_x}{m}, \beta_{03} = \omega^3$ 代入扰动观测器的稳定判据式(20),可得 ω 的稳定域为

$$0 < \omega < \frac{2}{T} \quad (21)$$

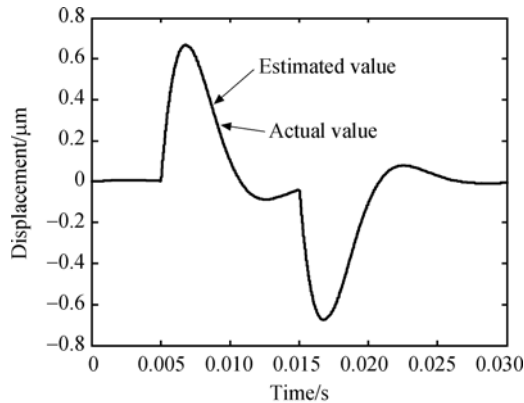
综上,利用修正后带宽概念配置 LESO 参数建立扰动观测器模型,并结合稳定域范围进行参数整定,即可使参数整定过程更加规范和便捷。

3 仿真实验

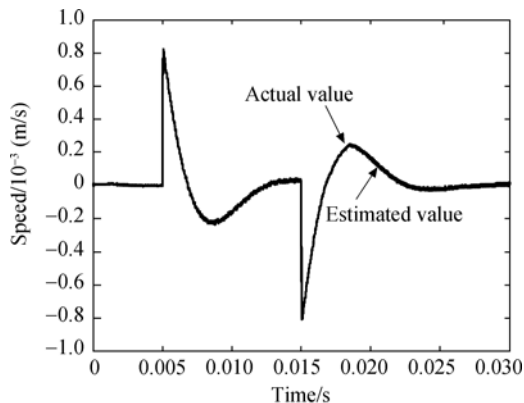
依据建立的磁轴承转子运动模型、扰动观测器模型及带宽概念整定 LESO 参数的方法,搭建了 Matlab/Simulink 模型,以验证扰动补偿控制在磁轴承中应用的可行性;并将其与 PID 控制系统相比较,以验证扰动补偿控制的优越性。

为了体现扰动补偿环节的作用,在两种控制方法的仿真模型中,PID 控制的参数保持一致,其中比例环节 $K_p = 13$,积分环节 $K_i = 600$,微分环节 $K_d = 0.1$;定转子间气隙为 $500 \mu\text{m}$;其他参数与第 1.3 节中提到的各参数一致.利用带宽概念调节 LESO 参数,整定参数 $\omega = 5 \times 10^4$ 。

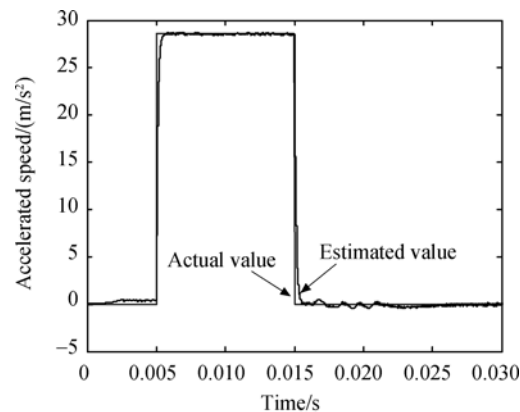
为了验证 LESO 的扰动补偿能力,本文以最严重的外扰形式——阶跃扰动为例,对仿真结果进行分析.图 4 为 LESO 对位移、速度、扰动产生



(a) 位移估算



(b) 速度估算



(c) 扰动产生加速度估算

图4 LESO估算结果

Fig. 4 Estimated results of LESO

加速度的估算结果,可见估算结果均较为准确。

图5为PID控制与扰动补偿控制后的位移波动比较。由图5可知,未施加扰动补偿控制时,转子产生了最大值约为 $75\mu\text{m}$ 的位移波动;施加扰动补偿控制后,转子的位移波动很小,约为 $3\mu\text{m}$,位移最大值波动缩小为补偿前的 $1/25$,且调节时间快,在受扰过程中基本已受控至平衡位置。

经过仿真,可以得出结论:利用修正后的LESO,可以很好地对转子所受扰动进行估算,并可

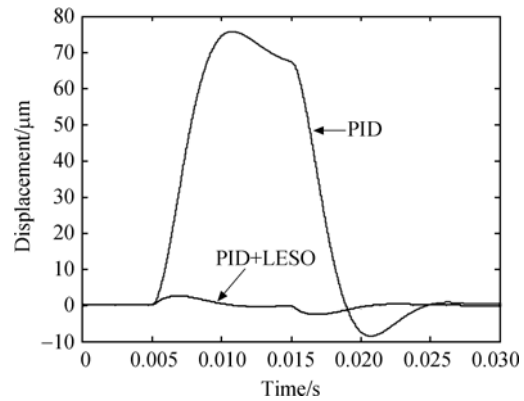


图5 PID控制与扰动补偿控制性能比较

Fig. 5 Performance comparison of PID control and disturbance rejection control

以进行有效地补偿;系统对扰动的抗干扰性与快速性都有了显著的提高。

4 实验验证

本文的实验对象为一台五自由度磁悬浮开关磁阻电动机。电动机两端分别为一个三自由度混合型磁轴承,中部为开关磁阻电动机,转子质量为 3.7kg ,轴向、径向定转子气隙均为 $500\mu\text{m}$,转子实物图如图6所示。定义转子一端的水平、竖直方向为 $x_{\text{case}}, y_{\text{case}}$ 自由度,转子另一端的水平、竖直方向为 $u_{\text{case}}, v_{\text{case}}$ 自由度。

磁轴承由控制芯片DSP2812实现位移环的数字控制,中断周期为 $40\mu\text{s}$,经整定取LESO的参数 $\omega=2\times 10^4$,符合式(21)稳定域范围;磁轴承电流环采用三电平采样-保持控制策略;开关磁阻电动机由控制芯片DSP2812实现高转速控制。



图6 转子实物图

Fig. 6 Image of rotor

在相同PID控制参数下,本文分别在扰动补偿控制及PID控制下进行了转子扰动实验与电动机旋转实验,并对两种控制方法下的控制性能进行了对比分析。

4.1 转子扰动实验

在转子静态悬浮的前提下,以转子径向竖直

方向为例,施加脉冲扰动,对比PID控制和扰动补偿控制的控制性能.图7为PID控制以及扰动补偿控制下的位移波形图.位移传感器测量精度为16 V/mm.

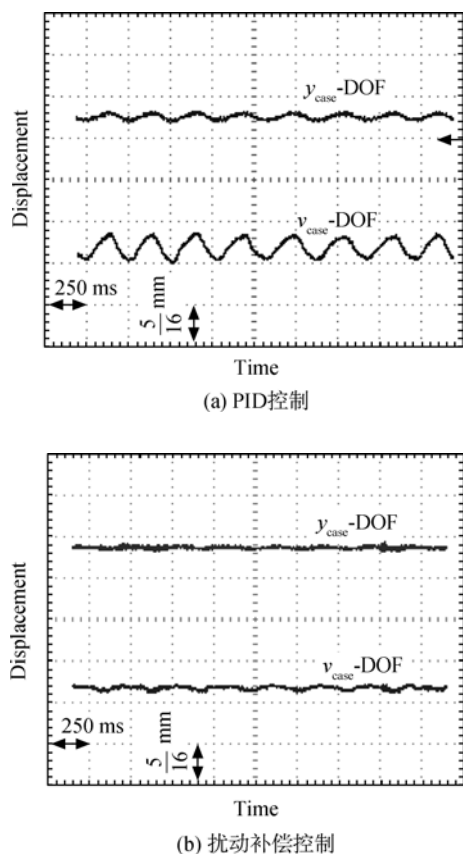


图7 转子扰动实验位移波形图

Fig. 7 Displacement wave of rotor experiment under disturbance

本实验为径向竖直方向的脉冲扰动实验,由于扰动力施加在转子靠近 v_{case} 自由度一端,因此相同控制策略下, v_{case} 自由度的位移波动比 y_{case} 自由度位移波动大.

由实验位移波形可知,施加同样的脉冲扰动,在PID控制基础上增加扰动补偿控制, y_{case} 自由度最大位移波动由 $31 \mu\text{m}$ 减小到 $19 \mu\text{m}$,缩小了38.7%; v_{case} 自由度最大位移波动由 $94 \mu\text{m}$ 减小到 $31 \mu\text{m}$,缩小了67%.转子径向水平方向施加扰动,也有相近的补偿效果.由此可见,经过扰动补偿控制可以很好地抑制外扰对转子悬浮的影响.

4.2 电动机旋转实验

用电动机拖动稳定悬浮的转子以20 000 r/min旋转,对比PID控制和扰动补偿控制的控制性能.以转子一端为例,取 x_{case} , y_{case} 自由度为横、纵坐标,绘制了转子一端轴心运动轨迹.图8

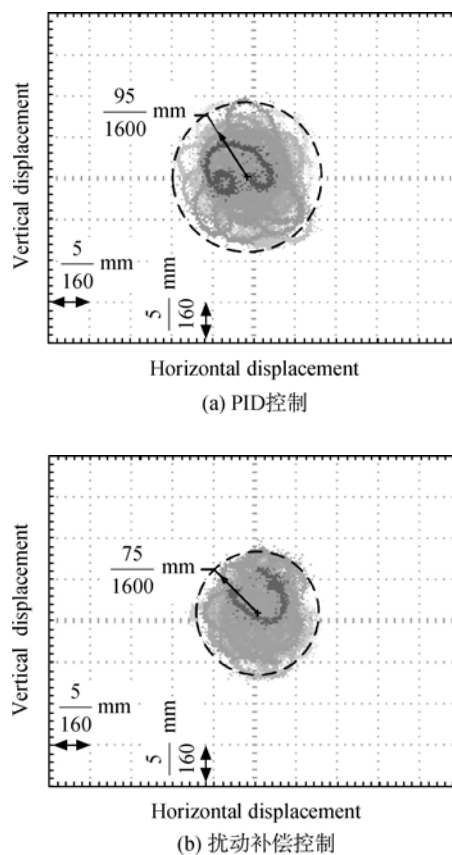


图8 转子轴心运动轨迹

Fig. 8 Motion tracks of rotor axis center

为PID控制以及扰动补偿控制的转子轴心运动轨迹.

由转子轴心运动轨迹可知,同样转速下,在PID控制基础上增加扰动补偿控制,转子轴心运动最大位移由 $59.4 \mu\text{m}$ 减小到 $46.9 \mu\text{m}$,缩小了21%.转子另一端轴心运动轨迹也有同样相近的补偿效果.由此可见,扰动补偿控制对旋转转子的偏心扰动具有一定的抗扰作用.

由以上实验可以得出结论:扰动补偿控制应用于五自由度磁轴承,可以很好地弥补PID控制的缺陷,提高系统的抗扰性能.

5 结 论

本文设计了应用于磁轴承的扰动补偿控制系统.通过对转子运动模型及参数的分析与修正,搭建了更为精确的磁轴承扰动观测器模型;在利用带宽概念整定参数使参数数量减少的基础上,计算出了参数稳定域范围,使得参数的整定过程更为规范与便捷;通过仿真与实验,验证了LESO应用于磁轴承扰动补偿控制的可行性,并在相同PID控制参数的基础上证明了扰动补偿控制相比于PID控制方法的优越性.从而有效地提高了五

自由度磁轴承的抗扰性能。

参考文献:

- [1] 罗诗旭. 磁悬浮轴承系统的数字控制技术研究[D]. 上海: 上海大学, 2003.
LUO Shixu. Digital control technology research of magnetic bearing system [D]. Shanghai: Shanghai University, 2003. (in Chinese)
- [2] 赵艾萍, 凌卫青, 谢友柏. 支承飞轮的推力磁轴承设计[J]. 航空学报, 2001, 22(4): 355-358.
ZHAO Aiping, LING Weiqing, XIE Youbai. Axial magnetic bearings design for a flywheel energy storage system [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2001, 22(4): 355-358. (in Chinese)
- [3] 卞斌. 基于DSP平台的磁悬浮轴承数字控制系统[D]. 济南: 山东大学, 2012.
BIAN Bin. Digital control system of active magnetic bearing based on DSP platform [D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [4] 汪波. 高速磁悬浮开关磁阻电机的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
WANG Bo. The study of high speed magnetic suspended switched reluctance motor [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [5] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
HAN Jingqing. From PID technique to active disturbance rejection control technique [J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13-18. (in Chinese)
- [6] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
HAN Jingqing. Auto disturbance rejection controller and its applications [J]. Control and Design, 1998, 13(1): 19-23. (in Chinese)
- [7] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [8] GUO Baozhu, ZHAO Zhiliang. On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty [J]. Systems and Control Letters, 2011, 60(6): 420-430.
- [9] 薛文超. 自抗扰控制的理论分析[D]. 北京: 中国科学院, 2012.
XUE Wenchao. Theoretical analysis of active disturbance rejection control [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [10] ZHANG Ying, CAI Ling, MENG Qingde, et al. A novel active disturbances rejection fuzzy servo system position controller [R]. Harbin: 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2006.
- [11] LI Xinhua, CHEN Wenlei. Application of active disturbance rejection controller for high precision servo system [R]. Jilin, Jilin: International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer, 2011.
- [12] REN Yifeng, DUAN Xiaoli. Research of active disturbance rejection controller in speed regulation of induction motor [R]. Hohhot: 2nd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2011.
- [13] LIU Yingpei, LI Ran. An improved method for direct torque control system [R]. Hong Kong: 3rd International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, 2013.
- [14] ZHENG Qing, GAO Zhiqiang. Disturbance rejection in MEMS gyroscope: problems and solutions [R]. Yantai Shandong: 30th Chinese Control Conference, 2011.
- [15] ZHOU Wankun, GAO Zhiqiang. An active disturbance rejection approach to tension and velocity regulations in web processing lines [R]. Singapore City: IEEE International Conference on Control Applications, 2007.
- [16] CHEN Zhongzhou, ZHENG Qing, GAO Zhiqiang. Active disturbance rejection control of chemical processes [R]. Singapore City: IEEE International Conference on Control Applications, 2007.
- [17] DONG Lili, ZHANG Yao. On design of a robust load frequency controller for interconnected power systems [R]. Baltimore: 2010 American Control Conference, 2010.
- [18] WANG Jian, HE Linshu, SUN Mingwei. Application of active disturbance rejection control to integrated flight-propulsion control [R]. Xuzhou Jiangsu: Chinese Control and Decision Conference, 2010.
- [19] 赵春哲, 黄一. 基于自抗扰控制的制导与运动控制一体化设计[J]. 系统科学与数学, 2010, 30(6): 742-751.
ZHAO Chunzhe, HUANG Yi. ADRC based integrated guidance and control scheme [J]. Journal of System Science and Mathematical Science, 2010, 30(6): 742-751. (in Chinese)
- [20] Alexander B X S, Rarick R, DONG Lili. An application of active disturbance rejection control to self-sensing magnetic bearings [R]. New York: 2007 American Control Conference, 2007.
- [21] Alexander B X S, Rarick R, DONG Lili. A novel application of an extended state observer for high performance control of NASA's HSS flywheel and fault detection [R]. Seattle: 2008 American Control Conference, 2008.
- [22] 王晓琳, 贺鹏. 无轴承扰动补偿悬浮系统的稳定性分析与验证[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(5): 665-672.
WANG Xiaolin, HE Peng. Stability analysis and verification for bearingless of magnetic levitation system with disturbance rejection [J]. Control Theory and Applications, 2012, 29(5): 665-672. (in Chinese)
- [23] 陈增强, 孙明玮, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报, 2012, 38(9): 1-7.
CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, YANG Ruiguang. Research on the stability of linear active disturbance rejection control [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(9): 1-7. (in Chinese)
- [24] 周振雄, 曲永印, 杨建东, 等. 采用改进型自抗扰控制器的平

- 面磁轴承悬浮控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 31-38.
- ZHOU Zhenxiong, QU Yongyin, YANG Jiandong, et al. Levitation control of a planar magnetic bearing based on improved ADRC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 31-38. (in Chinese)
- [25] 王大朋. 高速电机磁轴承控制与监测技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.
- WANG Dapeng. Study on control and monitoring technology of magnetic bearing for high-speed machine[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [26] 李冰, 邓智泉, 严仰光. 一种新颖的永磁偏置三自由度电磁轴承[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(1): 81-85.
- LI Bing, DENG Zhiquan, YAN Yangguang. Permanent magnet biased electromagnetism bearing with three degrees of freedom [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 35(1): 81-85. (in Chinese)
- [27] GAO Zhiqiang. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design[R]. Minneapolis: 2006 American Control Conference, 2006.