

基于 H_{∞} 和干扰观测器的磁悬浮轴承干扰抑制方法

周衡,金超武

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:磁悬浮轴承-转子系统在高速工作时,多种工况均会对系统存在外部引入的低频正弦干扰。针对此类问题,设计干扰观测器对外部干扰进行抵消,设计 H_{∞} 对系统中存在的未建模动态、参数和结构的不确定性进行抑制,使得系统具有更好的鲁棒性和抗干扰性能。建立磁悬浮轴承-转子系统的数学建模,设计基于 H_{∞} 和干扰观测器的复合控制器。仿真与实验结果表明:干扰频率在 20 Hz~50 Hz 范围内,相比于传统的 H_{∞} 控制器,复合控制器具有更好的抗干扰性能。

关键词:磁悬浮轴承;干扰观测器; H_{∞} 控制器;干扰抑制

中图分类号:TH133.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)03-0149-03

Disturbance Suppression Method of Magnetic Bearing Based on H_{∞} and Disturbance Observer

ZHOU Heng, JIN Chaowu

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aimed at the external low-frequency sinusoidal disturbance of magnetic bearing rotor system working at high speed under various working conditions, the disturbance observer is designed to counteract the external disturbance, and the H_{∞} is designed to suppress the uncertainties of unmodeled dynamics, parameters and structure, obtaining better robustness and anti-interference performance of the system. The mathematical model of the magnetic bearing rotor system is established, and the composite controller based on H_{∞} and disturbance observer is designed. The simulation and experiment results show that the composite controller, with the disturbance frequency within 20 Hz-50 Hz, has better anti-disturbance performance than the traditional H_{∞} controller.

Keywords: magnetic bearing; disturbance observer; H_{∞} controller; disturbance rejection

0 引言

主动磁悬浮轴承(active magnetic bearing, AMB)是一种利用电磁力对转子进行重力抵消的新型非接触式支承结构。与传统轴承相比,它具有无摩擦、无污染、不需要润滑、寿命长等优点^[1]。相比于传统的旋转机械装备,磁悬浮转子通常需要在高速下稳定运行。如何保证磁悬浮转子在高速下稳定运行是需要解决的一个重要问题。磁悬浮轴承-转子系统在高速失稳,其主要原因在于转速同频分量增大和低频振动的增加。转速同频分量的增大可以通过动平衡技术解决^[2]。在保证转子具有较好的动平衡时,低频振动成为影响磁悬浮轴承-转子系统在高速运行时稳定性的一个重要因素,对磁悬浮轴承-转子系统中低频振动的抑制,可以有效提高其在高速工作时的稳定性。

目前对于如何抑制磁悬浮轴承-转子系统在高速工作的低频振动的研究相对较少。北航的刘健等^[3]设计一种干扰观测器来抑制系统在高速时出现的低频扰动,其只针对单一干扰频率进行了验证。WEN X Y 等^[4]设计一种复合分层抗干扰控制器,可以对外部有界干扰进行有效抑制。

本文采用复合抗干扰控制器。内层控制器选取干扰观测器对外部干扰进行观测并进行前馈补偿,外层控制器使用 H_{∞} 控制器保证系统在高速工作时的稳定性。通过仿真对该方法的抗干扰性能进行验证,当转子转动频率为 500 Hz 时,施加不同频率的干扰信号。仿真结果表明:该方法有效降低了低频扰动对于系统的影响,提高了磁悬浮轴承-转子系统在高速时的鲁棒性与抗干扰性能。实验验证了该方法可以有效地抑制 50 Hz 的正弦干扰信号。

1 复合分层抗干扰控制器设计

1.1 磁悬浮轴承数学模型

建立精确的被控对象数学模型,是设计磁悬浮轴承-转子系统复合分层抗干扰控制器的基础,所以对磁悬浮轴承-转子系统数学模型进行分析是很有必要的。为了使复合分层抗干扰控制器获得更好的动态性能,将磁悬浮轴承-转子、传感器和功率放大器结合起来作为控制器的被控对象,建立如图 1 所示的磁悬浮-转子示意图,并规定图中各个向量的方向。

基金项目:国家自然科学基金项目(5187051379)

第一作者简介:周衡(1995—),男,甘肃酒泉人,硕士研究生,研究方向为磁悬浮技术。

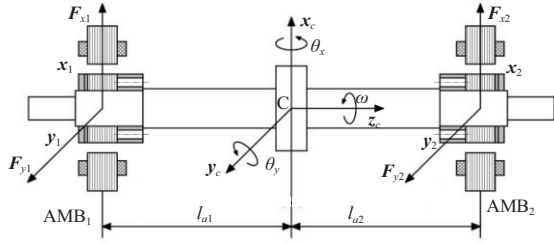


图1 磁悬浮轴承-转子示意图

根据图1磁悬浮轴承-转子受力图,令:

$$\mathbf{q} = [x_c \quad \theta_x \quad y_c \quad \theta_y]^T$$

$$\mathbf{F} = [F_{x1} \quad F_{y1} \quad F_{x2} \quad F_{y2}]^T \quad (1)$$

则在转子质心C处建立转子径向自由度的运动学方程^[5]可以表示为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \omega\mathbf{G}\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{A}\mathbf{F} \quad (2)$$

式中:质量矩阵 \mathbf{M} 、陀螺矩矩阵 \mathbf{G} 和矩阵 \mathbf{A} 可分别由式(3)获得:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_y \end{bmatrix}; \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -J_z & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & l_{a1} & 0 & -l_{a2} \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ -l_{a1} & 0 & l_{a2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: m 为转子的质量; J_x 、 J_y 和 J_z 分别为转子绕 x 、 y 和 z 轴转动的转动惯量。

根据式(2)可知,惯性耦合和陀螺力矩耦合存在于径向各个自由度之间。惯性耦合在理论上可以通过合理的结构设计进行避免。一般情况下,在低转速时可以将陀螺力矩耦合忽略不计。结合式(2)可得解耦后磁悬浮轴承-转子系统径向自由度的传递函数:

$$\frac{X_i(s)}{I_{xi}(s)} = \frac{k_{ii}}{m_i s^2 - k_{xi}} \quad (4)$$

式中: k_{ii} 为各个自由度的电流刚度; k_{xi} 为各个自由度的位移刚度; m_i 为各个自由度的当量质量。

本文使用的磁悬浮轴承的径向保护间隙为0.25 mm,传感器输出的转子位移电压信号在0~5 V之间,可以得到径向传感器环节的数学模型

$$K_s = 20\,000 \text{ V/m} \quad (5)$$

本文使用的功率放大器在磁悬浮轴承-转子系统工作时,可以将其视为比例环节,其接受的电压信号为-5 V~+5 V,径向自由度的输出电流信号为0~3.4 A,可以得到功率放大器环节的数学模型

$$K_a = 0.34 \text{ A/V} \quad (6)$$

结合式(4)-式(6),可以得到磁悬浮轴承-转子径向自由度机电一体化模型的传递函数

$$\frac{X_i(s)}{I_{xi}(s)} = \frac{k_{ii} K_a K_s}{m_i s^2 - k_{xi}} \quad (7)$$

1.2 干扰观测器设计

干扰观测器的基本思想是将外部干扰、实际模型与名义模型的差异全部等效为干扰观测器的输入端,观测出等效干扰,在控制系统中引入相同的补偿量,实现对干扰的完全抑制。干扰观测器基本原理框图如图2所示。

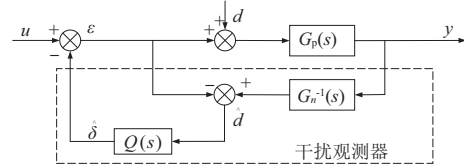


图2 干扰观测器原理图

图2中 $G_p(s)$ 为被控对象的传递函数, $G_n^{-1}(s)$ 为名义模型 $G_n(s)$ 的逆模型。由于被控对象 $G_p(s)$ 的精确数学模型无法得到,本文使用 $G_n^{-1}(s)$ 来替代 $G_p^{-1}(s)$; u 为控制器输出信号, d 为外部干扰信号。

根据图2,可以得到从输入 u 到输出 y 的传递函数和从输入 d 到输出 y 的传递函数分别为:

$$G_{uy} = \frac{G_p(s) G_n(s)}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)] Q(s)} \quad (8)$$

$$G_{dy} = \frac{G_p(s) G_n(s) [1 - Q(s)]}{G_n(s) + [G_p(s) - G_n(s)] Q(s)} \quad (9)$$

当 $G_n(s) \approx G_p(s)$ 时,从式(8)和式(9)中可以发现,干扰观测器对于外环控制器并不会造成影响。

通过上述分析可知,采用低通滤波器设计 $Q(s)$ 可以实现对低频干扰的有效抑制。目前常用的低通滤波器 $Q(s)$ 的形式为

$$Q(s) = \frac{\sum_{k=0}^M \alpha_k (\tau s)^k}{(\tau s + 1)^N} \quad (10)$$

式中: $\alpha_k = \frac{N!}{(N-k)! k!}$,为系数; N 和 M 分别为分母和分子的阶数。

1.3 H_∞ 控制器设计

通过1.2小节分析可知,干扰观测器的设计对 H_∞ 控制器的设计没有任何影响,当标称模型近似于实际模型时, H_∞ 控制器与干扰观测器可以独立设计。

本文针对单自由度磁悬浮轴承模型设计 H_∞ 控制器,将式(9)转化为状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k_{xi} & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_{ii} k_a k_s \end{bmatrix} U \\ \mathbf{Y} = [1 \quad 0] \mathbf{X} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{X} = [x_1, \dot{x}_1]$,为状态向量; U 为控制器输出的电压控制量 u_1 。

在磁悬浮轴承-转子系统中,由于干扰与参数不确定性同时存在,模型的不确定性也会影响系统的鲁棒性。在设计控制器时,需要同时考虑干扰的抑制能力和系统的鲁棒性。本文采用混合灵敏度 H_∞ 控制器设计方法设计控

制器,选取灵敏度加权函数和补灵敏度加权函数,通过选取合适的加权函数来建立广义被控对象。

混合灵敏度 H_∞ 方法原理框图如图 3 所示。其中 r 为系统参考输入量; y 为系统输出量; e 为跟踪误差量; u 为控制器输出量; d 为外部干扰量; z_1 、 z_2 和 z_3 为控制评价输出信号; W_1 和 W_3 分别为系统的灵敏度函数和补灵敏度函数, W_2 为不确定性权函数。当确定了 W_1 、 W_2 和 W_3 之后,即可求出控制器 K 。

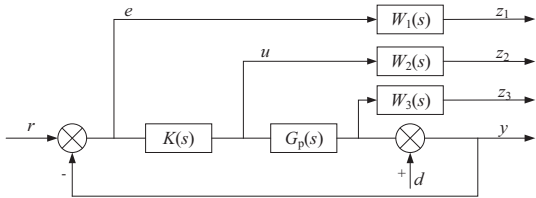


图 3 混合灵敏度 H_∞ 方法原理框图

灵敏度函数表示系统对于外部干扰的抑制能力,其为 d 到 y 的闭环传递函数:

$$S(s) = \frac{1}{1 + G_p(s)K(s)} \quad (12)$$

补灵敏度函数表示系统对于未建模动态的抑制能力,其为 r 到 y 的传递函数:

$$T(s) = \frac{G_p(s)K(s)}{1 + G_p(s)K(s)} \quad (13)$$

混合灵敏度控制器设计的关键在于选择合适的加权函数。目前,加权函数的选用应该满足鲁棒控制第一定理:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}[S(j\omega)] &\leq \bar{\sigma}[W_1(j\omega)^{-1}] \\ \bar{\sigma}[T(j\omega)] &\leq \bar{\sigma}[W_3(j\omega)^{-1}] \end{aligned} \quad (14)$$

2 仿真

2.1 仿真条件

本小节将通过 Matlab/Simulink 软件平台,对复合抗干扰控制器的性能进行验证。 H_∞ 和干扰观测器的仿真框图如图 4 所示。被控系统中包含磁悬浮轴承-转子系统、功率放大器和传感器。 r 为系统参考输入, d 为外部干扰, y 为系统输出。

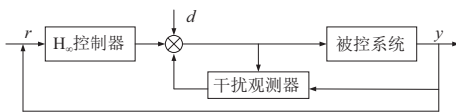


图 4 H_∞ 和干扰观测器仿真框图

本文所设计的干扰观测器中,采用分子为一阶、分母为三阶的低通滤波器,选取 $\tau = 0.0001$ 。

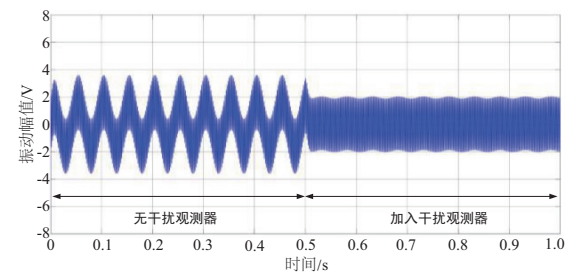
在 H_∞ 控制器的设计中,选取加权函数分别为:

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{3000}{8.5s + 1.5} \\ W_2 &= 2.5 \times 10^{-6} \\ W_3 &= \frac{0.8s}{18s + 8000} \end{aligned} \quad (15)$$

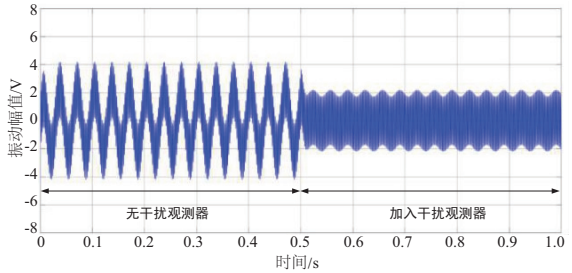
2.2 仿真实验

针对磁悬浮轴承-转子系统中存在的低频扰动,旋转频率为 500 Hz 时,对系统施加不同频率的扰动,对控制器的鲁棒性和抗干扰性能进行仿真实验。

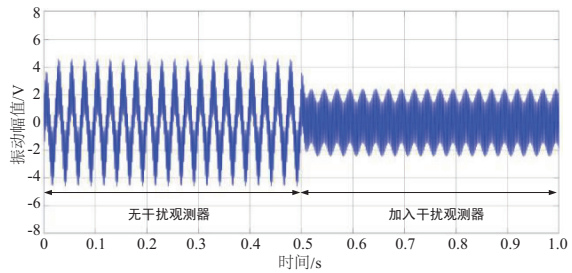
图 5 中,图 5(a)~图 5(d) 分别为系统加入频率为 20 Hz、30 Hz、40 Hz 和 50 Hz、幅值为 1.5 V 的正弦干扰。从 0 s 开始,在系统中加入干扰;在 0.5 s 时,引入干扰观测器对干扰进行前馈补偿。可以从图中看出,干扰在幅值相同时,频率越高,系统中产生的振动幅值越大,在引入干扰观测器对干扰进行前馈补偿后,可以明显降低系统的振动幅值,有效地提升系统的抗干扰能力,验证了基于 H_∞ 和干扰观测器的复合控制器在系统高速工作时对于外部引入的低频干扰有较好的抑制作用。



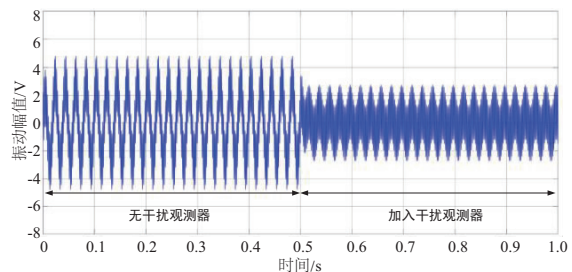
(a) 干扰频率 20 Hz



(b) 干扰频率 30 Hz



(c) 干扰频率 40 Hz



(d) 干扰频率 50 Hz

图 5 H_∞ 和复合控制器对低频干扰的抑制效果对比

(下转第 158 页)

- 下冲击载荷研究[J]. 轴承, 2015(8):1-4, 8.
- [3] 邢亚航, 郝如江, 余忠潇. 基于 MED-ITD 和 CICA 的滚动轴承故障诊断[J]. 轴承, 2021(1):39-45.
- [4] 孟凡念, 杜文辽, 巩晓赞, 等. 基于粒子群优化最小二乘支持向量机的滚动轴承故障识别[J]. 轴承, 2020(12):43-50.
- [5] 杨芸丞, 孙雪丽, 钟兆根. 一种 α 稳定分布噪声下的跳频参数盲估计方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(2):16-22.
- [6] 陆炫宇, 许凯嘉, 张国勇, 等. 在量化阵列框架下的对称 Alpha 稳定信号检测的预处理方法[J]. 信号处理, 2019, 35(8):1425-1431.
- [7] RAJESWARI C, SATHIYABHAMA B, DEVENDIRAN S, et al. Bearing fault diagnosis using wavelet packet transform, hybrid PSO and support vector machine [J]. Procedia Engineering, 2014, 97:1772-1783.
- [8] 张俊林, 王彬, 汪洋, 等. 一种 α 稳定分布噪声下 OFDM 信号调制识别与参数估计算法[J]. 电子学报, 2018, 46(6):1390-1396.
- [9] 唐刚, 朱立军, 胡雄. 基于优化 VMD 和深度置信网络的滚动轴承故障诊断[J]. 轴承, 2020(10):47-53.
- [10] 张川东. 风力发电机传动系统故障诊断的时频综合分析方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2014.
- [11] GUO Y P, XIONG Y, SONG G C. Rolling bearing fault diagnosis with EMD - based fault characteristic frequency difference analysis[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 596:437-441.
- [12] 李长宁. 机械故障信号统计建模及其故障诊断方法的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [13] 余香梅, 舒彤. 基于 α 稳定分布参数和支持向量机的齿轮箱故障诊断方法[J]. 测控技术, 2012, 31(8):23-26, 30.
- [14] 唐友福, 刘树林, 刘颖慧, 等. 基于 α 稳定分布的往复压缩机故障诊断方法[J]. 化工机械, 2011, 38(5):555-558.
- [15] JAYASWAL P, VERMA S N, WADHWANI A K. Development of EBP - artificial neural network expert system for rolling element bearing fault diagnosis [J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 17(8):1131-1148.
- [16] 高经纬, 张培林, 任国全, 等. 基于遗传算法的轴承信号分形无标度区的截取[J]. 轴承, 2003(12):36-38.

收稿日期:2021-08-18

(上接第 151 页)

3 实验

在磁悬浮轴承-转子系统上进行高速旋转实验。在仿真中可以观察到, 干扰频率越高, 磁悬浮轴承-转子的振动幅值越大。在实验中, 对系统施加频率为 50 Hz、幅值为 0.1 V 的正弦干扰信号, 分别采用 H_{∞} 控制器与复合控制器进行控制, 实验结果如图 6 所示(本刊为黑白印刷, 如有疑问请咨询作者)。

图 6 中, 磁悬浮轴承-转子在 H_{∞} 控制器控制下的最大振动幅值为 9.49 μm , 在复合控制器控制下的最大振动幅值为 7.06 μm 。与 H_{∞} 控制器相比, 复合控制器控制下的振动幅值减小了 25.6%, 有效地提高了磁悬浮轴承-转子系统的抗干扰性能。

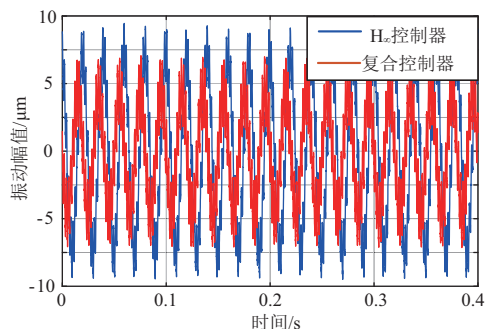


图 6 H_{∞} 和复合控制器对 50 Hz 干扰的抑制效果对比

4 结语

1) 本文所采用的基于 H_{∞} 和干扰观测器的复合控制器相较于传统 H_{∞} 控制器, 对于低频正弦干扰的抑制效果更加显著, 可以有效地提高系统的抗干扰性能;

2) 基于 H_{∞} 和干扰观测器的复合控制器结构简单, 参数选取容易, 便于实现;

3) 通过仿真验证, 磁悬浮轴承-转子系统在 500 Hz 工作时, 对于 20 Hz ~ 50 Hz 范围内的干扰有明显的抑制作用;

4) 通过实验, 复合控制器可以对 50 Hz 正弦干扰引起的振动进行有效地抑制。

参考文献:

- [1] ABRAHAMSSON J, HEDLUND M, KAMF T, et al. High-speed kinetic energy buffer: optimization of composite shell and magnetic bearings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6):3012-3021.
- [2] 谢振宇, 牟伟兴, 周红凯, 等. 基于转速的磁悬浮轴承转子系统变参数控制[J]. 振动工程学报, 2012, 25(6):739-744.
- [3] 刘健, 郑世强, 房建成. 高速磁悬浮电机转子低频振动干扰观测与抑制研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(5):741-747.
- [4] WEN X Y, GUO L. Composite hierarchical control for magnetic bearing based on disturbance observer [C]. Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing: 2010: 6173-6178.
- [5] 徐园平. 柔性转子磁悬浮轴承支承特性辨识[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.

收稿日期:2021-01-13