

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.06.017

轴向永磁卸载混合磁悬浮轴承 μ 控制器

田陈鑫, 谢伟东

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘 要: 磁悬浮轴承是一种新型无接触轴承, 文章以带有永磁卸载轴承的轴向电磁磁悬浮轴承为研究对象。由于对永磁力的线性化产生一定误差, 为保证稳定悬浮本文利用结构奇异值 μ 综合法设计了电磁轴承 μ 控制系统, 并将永磁力误差作为不确定量引入。最后通过仿真证明控制器满足工作要求。图5 参11

关 键 词: 永磁卸载轴承; 电磁轴承; 鲁棒控制; μ 综合法

中图分类号: TH133.35

文献标志码: B

文章编号: 1005-2895(2012)06-0065-03

μ Controller Design for Axial AMB with a Permanent Unloading Magnet

TIAN Chenxin, XIE Weidong

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Magnetic suspension bearing is a new non-contact bearings technology. This paper focused on an axial active magnetic bearing with a permanent unloading magnet, and designed an active magnetic bearing μ controlling system with μ comprehensive method. Because of the permanent magnet linear force with some errors, in order to ensure stable suspension, a μ -Synthesis control system is needed, as well as quoted the permanent magnet error as an uncertain quantity. Finally, the simulation proved the controller can meet the job requirements. [Ch, 5 fig. 11 ref.]

Key words: permanent unloading magnet; active magnetic bearing; robust control; μ -synthesis

0 引言

磁悬浮轴承是利用磁力使转子无接触悬浮的一种新型轴承, 具有无摩擦、无需润滑等优点^[1]。根据磁力来源可分为电磁轴承、永磁轴承和超导轴承。电磁轴承通过控制器控制电磁铁对吸引力实现转子稳定悬浮, 具有刚度和阻尼可调的优点。永磁轴承是由永磁铁提供转子悬浮所需的磁力, 其具有结构简单、无需外部能量的特点。结构中既有电磁铁, 又有永磁铁或超导体的称为混合轴承^[2]。混合磁悬浮轴承综合电磁磁悬浮轴承阻尼刚度可调以及永磁轴承节能的优点。本文的研究对象即为永磁——电磁混合磁悬浮轴承, 其中永磁轴承起卸载作用, 承受大部分转子的重力; 电磁轴承起调节作用, 控制转子使其稳定悬浮。

控制器是电磁轴承设计的核心, 其性能直接决定了轴承的刚度、阻尼等参数^[3]。由于永磁轴承磁力与位移为非线性关系, 在对其线性化时存在一定误差。为使转子稳定悬浮, 考虑采用鲁棒 μ 控制策略^[4], 将

永磁力线性化后的误差作为参数摄动进行有针对性的抑制。

1 电磁轴承建模分析

电磁轴承结构由控制器、功率放大器、电磁铁和位移传感器组成。其工作原理为利用位移传感器检测转子偏离参考位置的位移, 控制器计算出控制信号, 然后功率放大器将控制信号转换为控制电流, 达到调节电磁力使转子回到给定位置^[5-6]。

由于永磁铁吸引力不仅与材料和气隙厚度有关, 还受其形状等因素的影响, 吸引力和气隙厚度为非线性函数^[7], 且很难得到其函数表达式。用 ANSYS 分析, 将气隙分为几层分别计算得: 在最接近时, 转子与永磁轴承间的气隙为 1 mm, 永磁力为 1 000 N; 在平衡位置处气隙为 1.5 mm, 永磁力为 860 N; 在最远即起浮位置处, 气隙为 2.7 mm, 永磁力为 610 N。分析磁悬浮轴承工作过程可知, 当转子发生偏离而处于平衡位置下方时, 要求轴承对转子的吸引力大于转子自身

收稿日期: 2011-10-13; 修回日期: 2011-10-30

作者简介: 田陈鑫(1986), 男, 浙江杭州人, 硕士研究生, 主要从事电磁轴承、飞轮电池方面的研究。E-mail: xwd@zjut.edu.cn

的重力,从而使转子向上运动至平衡位置处;当转子发生偏离而处于平衡位置上方时,要求轴承对转子的吸引力小于转子自身的重力,从而使转子向下运动至平衡位置处。因此可以使线性化后永磁轴承的吸引力在平衡位置上方时大于其实际数值,而在平衡位置下方时小于其理论数值,从而保证线性化对转子的平衡的影响是偏保守的。线性化后永磁轴承吸引力与气隙厚度有如下近似关系

$$F_p = -233\ 333z + 1\ 210 \quad (1)$$

其中 z 为转子偏离参考位置的位移/mm。

在稳定工作点附近对电磁铁电磁力线性化后可得^[8]

$$F_A = k_i i - k_x z \quad (2)$$

其中 k_i 和 k_x 分别为电磁轴承的电流刚度和位移刚度。

根据公式(1)和(2),可得转子运动方程

$$m\ddot{z} = k_i i - k_x z + F_p \quad (3)$$

代入数值,并经拉普拉斯变换后可得轴承转子系统传递函数^[9]

$$G(s) = \frac{246}{113s^2 + 562\ 333} \quad (4)$$

功率放大器和位移传感器的传递函数可以近似认为是比例环节 $K_p(s)$ 和 $K_s(s)$ 。

2 μ 控制器设计与分析

2.1 系统不确定性描述

永磁轴承力线性化带来了一定的不确定性。考察线性化后割线的斜率,此时的斜率为 $k = -233\ 333$,而过平衡位置点($z = 1.5\text{ mm}$, $F = 860\text{ N}$)和最小值点($z = 2.7\text{ mm}$, $F = 610\text{ N}$)得割线斜率为 $k = -208\ 333$ 。斜率误差为 11%。考虑取 $k = -233\ 333$ 为斜率的标称量,不确定量为 11%。

位移传感器灵敏度较易受温度的影响,而电磁轴承工作时由于磁滞等现象,会产生很大的热量,使温度升高,造成位移传感器工作环境恶化。文中所用位移传感器探头在工作温度 $-20 \sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内温度漂移为 $0.025\%/^\circ\text{C}$,探头线圈受温度的影响在 $-20 \sim 150\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内最大偏差 $\pm 2\%$,探头的线性误差在 $\pm 1\%$ 。综合以上数据,取位移传感器比例环节 $K_s(s)$ 的不确定量为 $\pm 5\%$ 。

2.2 性能加权函数选择

防止功率放大器输出电流过大损坏电磁轴承线圈^[10],需要选择合适的输入加权函数,使功率放大器在控制频带内的输出电流不超过许用电流 6 A。另一方面在超过控制频带后通过输入加权来抑制控制电流

中的高频成分。经过多次调试输入加权函数选为

$$W_u(s) = (\frac{s}{3\ 100} + 1) / (\frac{s}{42\ 100} + 1) \quad (5)$$

为约束转子的轴向位移,同时抑制低频噪声和干扰,通常选用低通传递函数作为性能加权。经多次试验确定性能加权函数分别为

$$W_p(s) = 10(\frac{s}{380} + 1) / (\frac{s}{0.5} + 1) \quad (6)$$

图 1 为考虑了以上系统不确定性和性能加权函数的控制系统框图。

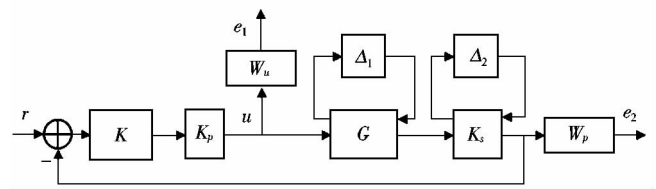


图 1 磁悬浮轴承转子控制系统框图

Figure 1 Schematic diagram of rotor control system with active magnetic bearing

2.3 控制器 μ 分析

通过 μ 综合法中的 D-K 迭代法,经 2 次计算得控制器 K 为

$$K = \frac{8.971s^3 + 3.768e^5s^2 + 2.108e^6s + 8.598e^8}{s^4 + 3.259e^3s^3 + 8.13e^5s^2 + 1.117e^8s + 5.562e^7} \quad (7)$$

闭环控制系统的结构奇异值 μ 的频率响应曲线如图 2 所示。图中可见,在整个控制频带范围内,闭环控制系统的结构奇异值 μ 均小于 1,根据鲁棒稳定性和鲁棒性能判断标准^[11],控制器满足要求。控制系统的结构奇异值 μ 的最大值为 0.085,在 $\omega = 65.8\text{ rad/s}$ 处出现。这表明系统能够承受 1170% 的模型不确定性,说明闭环系统拥有较大的稳定裕度。

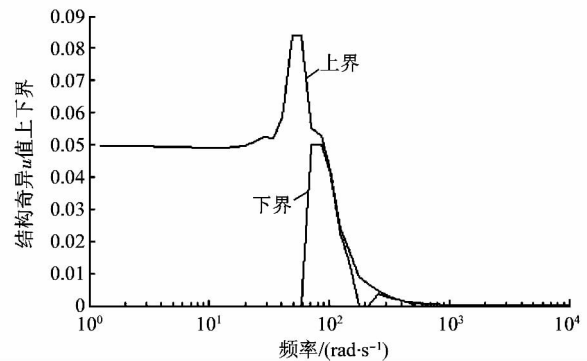


图 2 轴向控制系统 μ 曲线

Figure 2 μ bounds for axial controller

3 仿真研究

为验证控制器能否满足转子稳定悬浮的要求,利

用 Matlab/Simlink 平台对转子的起浮和抗干扰能力进行了仿真验证。

图 3 为转子起浮时转子到理想平衡位置的偏移量变化曲线。可以看到,调节时间为 0.2 s,超调量为 8.7%,即 0.087 mm,稳定悬浮后的静态误差为 -0.008 mm。图 4 为转子起浮时电磁铁线圈电流的变化量,需要说明的是,模型建立是取电流变化量为变量,即此处电流为实际线圈电流减去偏置电流 2 A 以后的值。图中可见电流变化量最大值为 3 A,稳定悬浮后电流为 2.7 A,所以实际线圈电流分别为 5 A 和 4.7 A,均小于电磁铁的许用电流 6 A,可以认为是安全的。

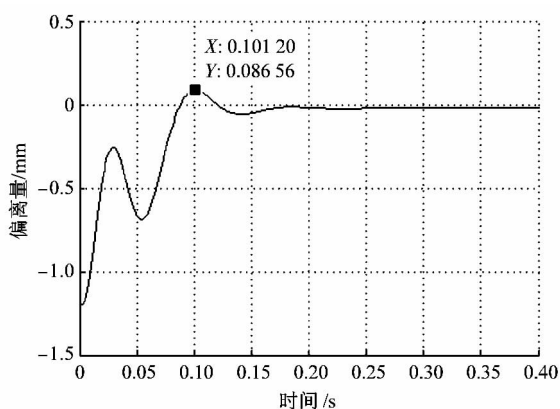


图 3 转子起浮位移变化

Figure 3 Change of disturbance when rotor is floating

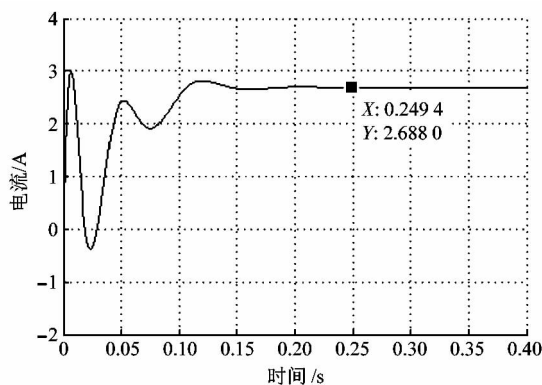


图 4 起浮时电流变化量

Figure 4 Change of current when rotor is floating

图 5 为在悬浮状态时受到 100 N 持续干扰力时转子偏离量的变化曲线。干扰力通过磁悬浮轴承电流刚度,以电流的形式作用于转子。

图中显示转子受到 100 N 持续干扰力后发生振动,振动幅度小于 0.3 mm,偏离量峰值为 0.2 mm,占气隙厚度的 20%,这表明轴向磁悬浮轴承具有较高的刚度。调节时间为 0.2 s,稳定后基本悬浮于理想平衡位置。

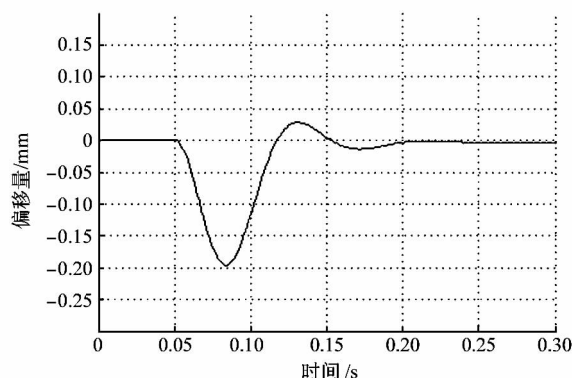


图 5 持续干扰力作用时的偏移量

Figure 5 Displacement with continued disturbance

4 结语

分析了带有永磁卸载轴承的主动磁悬浮轴承中,由于永磁轴承线性化造成的控制系统参数摄动,并引入性能指标加权函数,应用结构奇异值 μ 综合理论设计了主动磁悬浮轴承的 μ 控制器,成功实现了在整个不确定范围内的鲁棒控制。通过仿真表明,转子起浮正常,调节时间为 0.2 s,稳态误差为 0.008 mm,且具有较高的刚度,能够满足工作需要。

参考文献 (References):

- [1] SCHWEITZER G, BLEULER H, TRAXLER A. Active magnetic bearings: basics, properties and application of active magnetic bearings [M]. Switzerland: Vdf Hochschulverlag, 1994.
- [2] 杨作新. 磁轴承磨床电主轴的鲁棒控制[D]. 北京:清华大学, 2001.
- [3] 陈龙, 杨怀玉, 胡业发. 外形要求下径向磁力轴承的参数分析[J]. 轻工机械, 2005, 23(4): 59-61.
- [4] STEPHENS L S, KNOSPE C R. μ -synthesis based, robust controller design for AMB machining spindles[C]// MATSUMURA F, OKADA Y, FUJITA M, et al. eds. Proceeding of the 5th International Symposium on Magnetic Bearings. Kanazawa: Kanazawa University, 1996: 153-158.
- [5] 杨怀玉, 胡业发, 陈龙. 结构参数对磁力轴承转子动态特性影响[J]. 轻工机械, 2005, 23(4): 56-58.
- [6] 周伟, 杨小飞. 磁悬浮轴承控制系统的硬件设计[J]. 机电工程, 2009, 26(7): 83-87.
- [7] 赵雪山. 永磁偏置径向轴向磁轴承 H_{∞} 控制系统的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [8] 汪希平, 章东义, 张刚, 等. 电磁轴承及其系统设计方法[J]. 机械工程学报, 2002, 38(5): 1-5.
- [9] 杨声云. 电磁轴承-转子系统控制方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- [10] 郑世强, 房建成, 魏彤, 等. MSCMG 磁轴承 μ 综合控制方法与实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(6): 1375-1380.
- [11] 梅生伟, 申铁龙, 刘志刚. 现代鲁棒控制理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2012.06.018

2D 数字伺服阀的特性实验研究

张啟暉, 李 胜, 阮 健, 方 亮

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘 要:采用位置跟踪和电流反馈的双闭环控制下,对2D数字伺服阀的动静特性进行实验研究。动态工作下,阀的阶跃响应时间最快可达到6 ms,在输入信号的幅值对应为阀最大开口的25%下,幅频特性为-3 dB对应的频宽约为65 Hz,静态状态下,阀芯转角输入与轴向位移输出基本成线性。实验结果表明,2D数字伺服阀具有良好的线性度和对数频率特性。图8参9

关 键 词:2D数字阀;静态特性;动态特性

中图分类号:TH137.5

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2012)06-0068-04

Experimental Research on the 2D Digital Servo Valve's Characteristics

ZHANG Qihui, LI Sheng, RUAN Jian, FANG Liang

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Under the location tracking and current feedback dual-loop control, the paper carried out the experimental study the static and dynamic characteristics of 2D digital servo valve. In dynamic working condition, the valve's fastest step response time can reach 6 ms. The amplitude of the input signal corresponding to the 25% of valve opening, amplitude-frequency characteristics correspond to -3 dB bandwidth is about 65 Hz. In static state, the input of valve angle and the output of axial displacement is linear basically. Experimental results show that 2D digital servo valve has good linearity and logistic frequency characteristics. [Ch, 8 fig. 9 ref.]

Key words: 2D digital valve; static characteristics; dynamic characteristics

0 引言

当今世界,计算机应用技术取得了非常广泛的应用,通过计算机技术应用于电液控制系统中,从而可以进行实时的控制,这将是未来的液压技术发展的重要趋势^[1]。数字阀可以不用数模转换器,而直接和电脑相连接。在电液伺服控制系统中,数字阀尤为重要,它具有机电转换和将信号放大的作用,在很大程度上对整个电液伺服控制系统的性能起到了决定性的影响^[2]。

2D数字伺服阀,是数字控制阀中的一种,其具有良好的控制性能^[3],并且具有良好的流量特性,因而其静态特性以及动态特性作为基本特性^[4],常常是研究的主要特性,文中对其进行重点的分析。

1 2D数字阀的工作原理

2D数字伺服阀利用阀芯双运动自由度以及伺服

螺旋槽机构设计而成^[5],2D数字阀的工作原理如图1所示。数字阀通过阀套上开的伺服螺旋槽机构以及阀芯上的高低压孔组成数字阀的导控级^[6]。

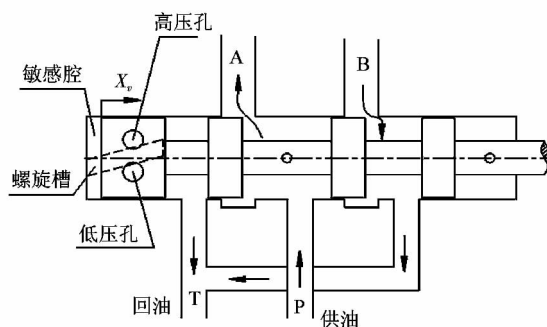


图1 2D数字阀工作原理

Figure 1 Principle of 2D digital valve

在静态情况下,螺旋槽正好处于高低压孔之间,不

收稿日期:2011-10-11;修回日期:2011-10-20

作者简介:张啟暉(1986),男,福建三明人,硕士研究生,主要研究方向为流体传动与控制。E-mail:zhang_qhui@163.com