

电力与传动控制

磁悬浮轴承开关功率放大器及其 电流控制策略优化研究

贺 西, 何亚屏, 李 嘉

(株洲变流技术国家工程研究中心有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 为优化磁悬浮轴承系统的响应速度及系统稳定性, 文章通过分析磁悬浮轴承开关功率放大器性能特点, 提出了一种五轴共桥臂拓扑结构, 其具有器件少、损耗小等应用优势; 同时在分析磁浮轴承控制系统传递函数的基础上, 推导出了使系统稳定的电流环带宽、系统阻尼与系统刚度的限制条件, 并设计了一种基于模型预测的电流控制策略, 其能显著提高电流环的响应速度, 进而改善系统的总体性能。经仿真与实验证实, 采用五轴共桥臂拓扑结构能够降低 50% 的系统损耗, 且基于模型预测的电流策略能显著提升系统响应速度并保证系统的稳定性。

关键词: 磁悬浮轴承; 开关功率放大器; 控制带宽; 模型预测; 共桥臂拓扑

中图分类号: TN722.7⁺5

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)02-0041-08

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.02.007

Switching Power Amplifier and Its Improved Current Control Strategy of Active Magnetic Bearing

HE Xi, HE Yaping, LI Jia

(Zhuzhou National Engineering Research Center of Converters Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In order to optimize the performance of the magnetic bearing system, a five-axis common-bridge arm topology structure is proposed by analyzing the performance characteristics of magnetic bearing switching power amplifier, which has the advantages of less devices and less loss. At the same time, on the basis of analyzing the magnetic bearing control system transfer function, the system current loop bandwidth and the damping and stiffness of the constraints are deduced, and a current control strategy based on model prediction is designed, which can significantly improve response speed of current loop and overall performance of system. Simulation and test results show that the five-axis common bridge arm topology can reduce the system loss by 50%, and the current strategy based on model prediction can improve the system response speed and system stability.

Keywords: active magnetic bearing; switching amplifier; control bandwidth; model to predict; common-bridge arm topology

0 引言

电磁悬浮技术自发明以来已被进行广泛的应用研究^[1], 其最早在磁悬浮列车上得以工程化实现, 而

后逐渐应用于电机轴承领域^[2]。采用电磁悬浮技术的磁悬浮电机轴承因其无接触、无须润滑、无磨损等优势, 而备受青睐^[3], 已逐步在医疗设备、涡轮机械等领域得以应用。

磁浮系统功率放大器(简称“功放”)是磁悬浮轴承系统的重要部件, 其通常包括线性功放和开关功放。其中, 线性功放因其固有的损耗较大的缺陷而

收稿日期: 2020-09-02

作者简介: 贺西(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事电机及磁悬浮轴承控制研究。

基金项目: 湖南省科技创新计划项目(2018XK2202)

很少被用于大功率应用场合^[4],故此磁悬浮轴承系统多采用开关功放。文献[5]设计了一种五相六桥臂开关功放拓扑,以减小控制器的体积并简化控制策略。文献[6]介绍了一种新型变流器拓扑及其电流调制策略,采用该策略能改善控制系统的动态性能。上述文献分别从减少器件数量及降低损耗的方向进行了拓扑优化,但未考虑拓扑优化对控制响应速度的影响。

磁悬浮轴承的控制策略是影响磁悬浮轴承位置瞬态响应速度、刚度和系统效率的重要因素,国内外有大量的文献进行了研究。文献[7]评估了一种线性变参数控制策略在磁悬浮轴承系统中的应用。文献[8]研究了主动磁悬浮轴承控制系统的参数辨识与鲁棒控制策略。文献[9]研究了磁悬浮轴承控制系统的传递函数并分析了系统的稳定性。这些研究都侧重于磁悬浮轴承的位置环控制,而对于磁悬浮轴承开关功放对系统的稳定性影响及其与系统阻尼、刚度的关系,则未进行相应分析。若开关功放的带宽过小,将导致系统电流环响应速度过慢、系统等效刚度变差,甚至使系统失稳。

本文通过对典型的工程化磁悬浮轴承开关功放拓扑特征进行分析,设计了更优的功放拓扑,并通过仿真与试验验证其可行性。为进一步优化系统性能,通过分析控制策略与系统稳定性的关系,文中提出了一种适应优化后拓扑的控制策略;最终,通过仿真与试验,优化了系统控制参数并验证了所提拓扑与控制策略的优化特征。

1 磁悬浮轴承开关功放

磁悬浮轴承包含两个径向轴承和一个轴向轴承,共计10个电磁线圈,以控制刚性转子的5个自由度(图1);其中每两个线圈构成一组差动线圈,以产生正向作用力与反向作用力。

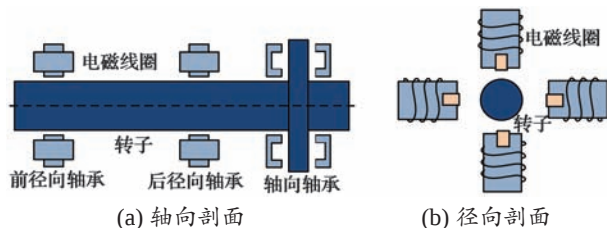


图1 磁悬浮轴承剖面图

Fig. 1 Cross-section diagram of active magnetic bearing

图2为磁悬浮轴承差动控制示意,其中 i_0 为偏置电流, i_x 为差分电流, s_0 为平衡位置气隙长度。在磁场确定的情况下,轴承磁铁差动控制的磁场力与气隙长度及差分电流相关,通过控制差分电流便可控制

磁场力,进而控制轴承位置。

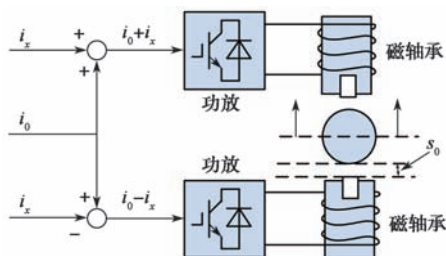


图2 磁悬浮轴承差动控制

Fig. 2 Differential control for active magnetic bearing

开关功放是磁悬浮轴承控制系统的重要环节,其将控制信号转换为电感电流输出,进而产生磁场力来驱动电磁轴承的悬浮。需要指出的是,磁悬浮轴承的电磁力仅与电流的大小有关,而与电流的方向无关。故而,在不使用永磁偏置的磁悬浮轴承系统中,电机转子的每个自由度上会配置一对电感线圈,以具备产生正负作用力的能力。一个五轴磁悬浮轴承系统的轴承线圈数为10,其磁悬浮轴承开关功放需要具备独立控制这10个线圈电流的能力。由电力电子器件组成的开关功放拓扑常见类型有H桥型和共桥臂型。为减少器件数量并降低损耗,本文在分析以上两种拓扑的基础上,提出一种新型的五轴共桥臂型开关功放拓扑结构。

1.1 H桥型拓扑

工程中普遍应用的磁悬浮轴承开关功放拓扑如图3所示,其采用单个H桥电路控制单个线圈,各线圈的控制互不干扰,且直流侧电压利用率为100%。该拓扑的缺点在于所用电力电子器件较多,10个电感线圈需要20个开关管桥臂。

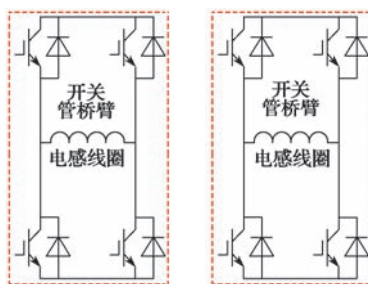


图3 H桥型开关功放拓扑

Fig. 3 H-bridge switching power amplifier topology

1.2 单轴共桥臂型拓扑

为节省成本、提高控制器的功率密度,有学者提出了如图4所示的单轴共桥臂型开关功放拓扑^[6],其共用桥臂采用50%固定占空比的调制方式,绕组桥臂采用与共用桥臂反向的可变占空比的调制方式。当绕组桥臂的开关管和与其相对应的共用桥臂的开

关管都导通时，回路处于正向导通状态；当绕组桥臂的开关管和与其相对应的共用桥臂的开关管都关断时，回路处于负向导通状态；当绕组桥臂的开关管和与其相对应的共用桥臂的开关管仅有一个导通时，回路处于续流状态。单轴共桥臂型拓扑的优点在于开关器件较少，其用 15 个开关管桥臂便可独立控制 10 个电感线圈的电流。

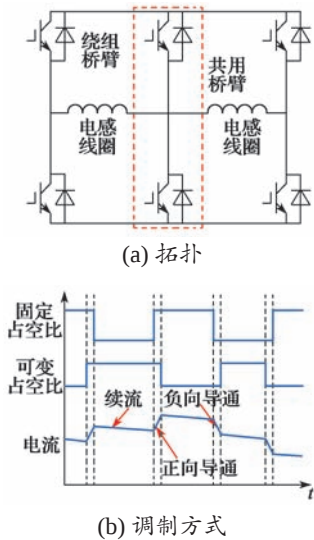


图 4 单轴共桥臂型开关功放拓扑及调制方式
Fig. 4 Single-axis common-bridge switching power amplifier topology and its modulation mode

1.3 五轴共桥臂型拓扑

对于采用单轴共桥臂型拓扑结构的五轴磁悬浮轴承系统开关功放来说，其 5 个共用桥臂开关管的导通方式是一样的^[7]，故可将其合并成为一个共用桥臂，形成如图 5 所示的五轴共桥臂型拓扑结构。该拓扑仅用 11 个开关管桥臂就能控制 10 个电感线圈的电流，可进一步减少开关器件数量，降低控制器的总成本；同时，更少的器件也意味着更高的可靠性。

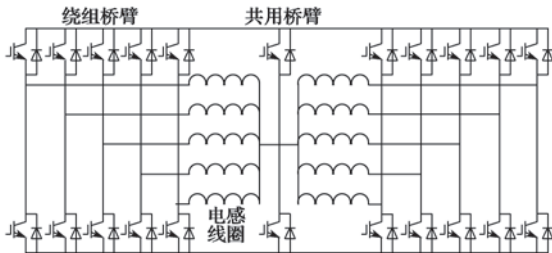
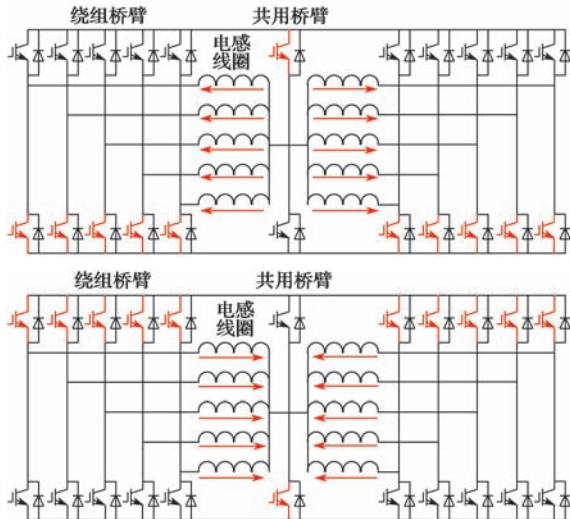


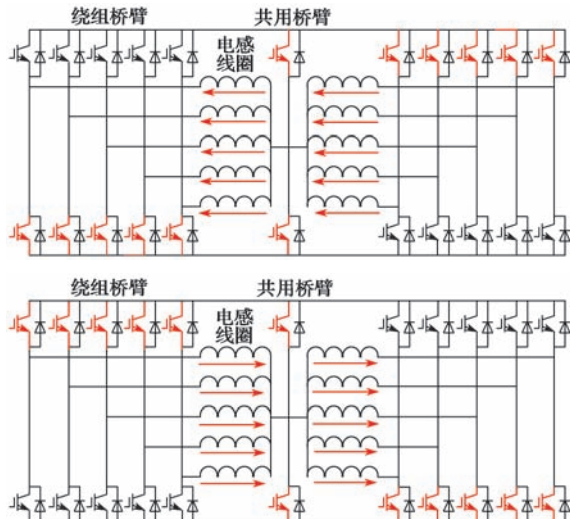
图 5 五轴共桥臂型开关功放拓扑
Fig. 5 Five-axis common-bridge switch power amplifier topology

五轴共桥臂仍可采用如图 4 (b) 所示的调制方式，但其电流的流通方式可以有如图 6 所示的两种不同的形式：同向方式与反向方式。从图中可以看出，同向方式利用绕组桥臂的上管与共用桥臂的下管（或

者绕组桥臂的下管与共用桥臂的上管）对电感电流进行控制，共用桥臂中的电流为所有绕组桥臂中的电流之和，这样会导致共用桥臂的功耗很大，不利于开关功放的长期稳定运行；而反向方式利用左侧绕组桥臂的上管和右侧绕组桥臂的下管（或者左侧绕组桥臂的下管与右侧绕组桥臂的上管）电感电流进行控制。这样绕组桥臂中的电流会在共用桥臂的中点中和，共用桥臂中的电流会很小，开关功放的总功耗显著下降。因此，对于五轴共桥臂拓扑而言，采用反向电流控制方式更佳。



(a) 同向方式



(b) 反向方式

图 6 五轴共桥臂型开关功放的电流流通方式
Fig. 6 Current direction of the five-axis common-bridge switch power amplifier topology

由于磁悬浮轴承通常采用电流差分控制，每个径向自由度的两个线圈电流和相等，采用如图 7 所示的线圈配置可以使得共用桥臂中的电流最小，且大小为轴向两个线圈中电流之差。

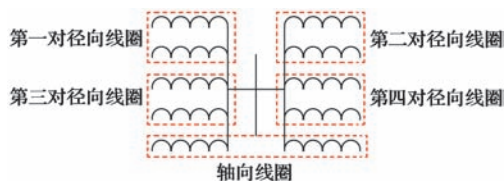


图7 线圈配置方式

Fig. 7 Configuration mode of active magnetic bearing coils

2 磁悬浮轴承系统稳定性分析及电流控制策略改进

2.1 开关功放模态分析

无论哪种磁悬浮轴承开关功放拓扑结构,其都是利用斩波原理控制开关管的导通与关断,进而控制电感线圈两端的平均电压,最终达到控制线圈电感电流的效果。在一个开关周期内,开关功放拓扑可能有3种模态:正向导通、续流与负向导通。图8展示了这3种模态,其中, V_{dc} 为直流侧电压, L 为线圈电感值, R 为线圈电阻值, i_L 为电感电流。

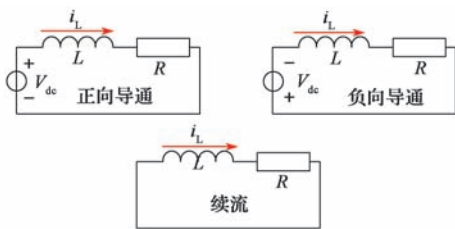


图8 开关功放模态

Fig. 8 Transient states of switching power amplifier

设开关功放一个开关周期内正向导通的时间比例为 d_+ , 负向导通的时间比例为 d_- , 续流的时间比例为 d_0 。对一个周期内的回路工作状态进行加权处理,得到回路的方程如式(1)所示。

$$Ri_L + L \frac{di_L}{dt} = d_+ V_{dc} - d_- V_{dc} + d_0 \times 0 = d_+ V_{dc} - d_- V_{dc} \quad (1)$$

对于共桥臂型的拓扑, d_+ 与 d_- 的取值范围为 0~0.5, 导通的时间比例即为直流侧电压的利用率。

分析式(1)可知,电感电流的变化率与回路电感值、正负向导通时间、偏置电流以及直流侧电压值有关。设直流侧电压利用率为 n , 则得到电感电流的最大变化率如式(2)所示。

$$\max \left(\frac{di_L}{dt} \right) = \frac{nV_{dc} - Ri_0}{L} \quad (2)$$

实际中,偏置电流与回路电阻值很小,式(2)可化简为式(3)。

$$\max \left(\frac{di_L}{dt} \right) = \frac{nV_{dc}}{L} \quad (3)$$

由式(3)可知,电感电流的最大变化率即电流的响应速度会受到电感值、直流侧电压值及其利用率限制,而电感电流的响应速度会影响系统的整体性能。

2.2 系统稳定性分析

磁悬浮轴承控制系统单轴控制原理如图9所示。其中, x^* 为位置参考信号, x 为位置输出, m 为转子质量, k_i 为力电流系数, k_s 为力位移系数, G_{pos} 为位置环控制传递函数, G_{cur} 为电流环控制传递函数, G_{PA} 为功放传递函数。

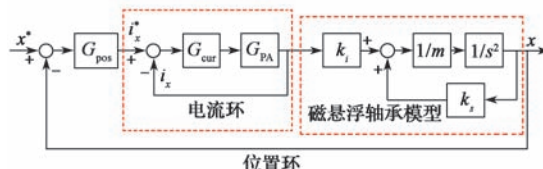


图9 单轴控制框图

Fig. 9 Control topology of single-axis system

对于位置环控制传递函数 G_{pos} , 一般采用 PD 控制方式, 其参数选择如式(4)所示。其中, k 为系统刚度, D 为系统阻尼。

$$G_{pos} = \frac{k + k_s}{k_i} + \frac{D}{k_i} s \quad (4)$$

电流内环由电流控制环节及功放环节组成, 一般可以将其等效为一定带宽下的积分环节。设电流环带宽为 ω_c , 则其开环传递函数为

$$G_{cur} \times G_{PA} = \frac{\omega_c}{s} \quad (5)$$

选定磁悬浮轴承系统的参数(表1), 在不同的电流环带宽以及不同系统刚度下对系统的稳定性进行分析。

表1 磁悬浮轴承参数

Tab. 1 Parameters of the active magnetic bearing

参数	数值
$k_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	4.3×10^6
$k_i/(\text{N} \cdot \text{A}^{-1})$	2.1×10^3
m/kg	91.79

单轴控制模式下(图9), 电流环的闭环传递函数如下:

$$G_c(s) = \frac{G_{pos} G_{cur} G_{PA} k_i}{ms^2 + G_{cur} G_{PA} (ms^2 + G_{pos} k_i + k_s)} \quad (6)$$

将式(4)与式(5)代入式(6), 可得

$$G_c(s) = \frac{D\omega_c s + (k + k_s)\omega_c}{ms^3 + m\omega_c s^2 + (D\omega_c - k_s)s + k\omega_c} \quad (7)$$

当取系统刚度为自然刚度 ($k=k_s$)、系统阻尼为临

界阻尼 ($D=2\sqrt{mk}$) 并使 ω_c 在 $[1, 500]$ 内变化时, 绘制出系统的闭环极点轨迹如图 10(a) 所示。可以看出, 当 ω_c 下降到一定值时, 系统闭环极点的实部为正值, 系统失稳。

设 $\omega_c=300$, 并使 k 在 $0.1 k_s \sim 10 k_s$ 范围内变化时, 绘制出系统的闭环极点轨迹, 如图 10(b) 所示。可以看出, 一定电流环带宽情况下, 刚度过大或者过小都会导致系统不稳定。

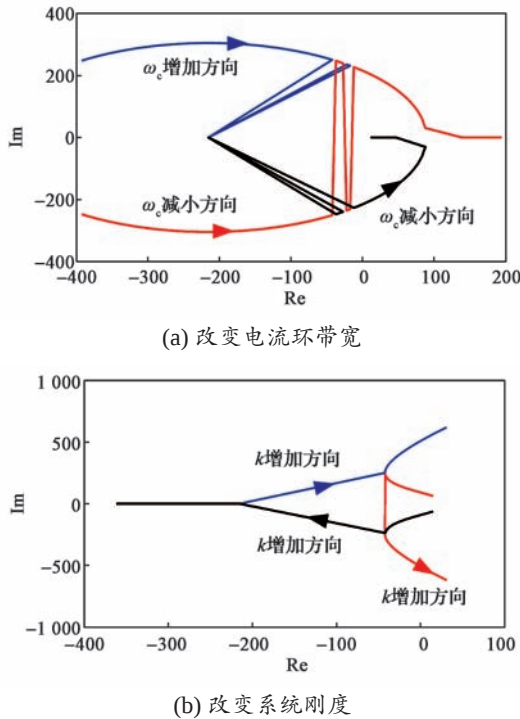


图 10 系统闭环极点轨迹

Fig. 10 Closed-loop pole trajectory of the system

综上分析可知, ω_c 实际上会限制系统的刚度。

分析式 (7), 其特征方程为

$$D(s)=ms^3+m\omega_c s^2+(D\omega_c-k_s)s+k\omega_c \quad (8)$$

利用劳斯判据, 可以得出使系统稳定的条件:

$$m\omega_c(D\omega_c-k_s)-mk\omega_c>0 \quad (9)$$

整理式 (9), 得到

$$\frac{k+k_s}{D\omega_c}<1 \quad (10)$$

根据式 (10) 可知, 当 k 和 D 一定时, ω_c 需要大于 $(k+k_s)/D$; 同样, 当 D 和 ω_c 一定时, 系统能达到的最大刚度为 $(D\omega_c-k_s)$ 。在一般的工程实践中, 可根据式 (10) 来设定合适的 ω_c ; 或者, 当 ω_c 一定时, 根据式 (10) 计算出系统可以达到的最大刚度。

2.3 开关功放电流控制策略的改进

由 2.2 节的分析可知, 磁悬浮轴承控制系统的稳定性受电流内环的影响很大, 系统的刚度受到电流带

宽的限制; 而在系统刚度一定的情况下, 较小的电流内环响应速度会使系统失稳。

实际工程应用中, 电流控制环节 G_{cur} 一般可设计为 PI 控制器, 通常情况下, 采用 PI 控制器所构成的电流环就可以取得很好的控制效果。但是, 磁悬浮轴承控制系统对电流的响应速度要求很高, 而 PI 控制器受限于其闭环调节过程, 无法发挥出如式 (3) 所示的电流环最大的响应速度, 因此需要采用一种响应速度更快的电流控制方式。

为了发挥出开关功放的全部带宽性能, 本文引入一种基于模型预测的控制策略来对磁悬浮轴承控制系统的电流内环进行重新设计。模型预测控制利用每一个采样瞬间的系统状态来求解下一个采样周期的控制动作。

对式 (1) 所示的单个开关周期内的开关功放回路方程进行离散化处理, 具体如式 (11) 所示。

$$dV_{dc}=L\frac{(i_{k+1}-i_k)}{T}+R\frac{(i_{k+1}+i_k)}{2} \quad (11)$$

式中: T ——开关周期; d ——接入直流侧电源时间的比率; i_k 与 i_{k+1} ——相邻两个开关周期的电流采样值。

由式 (11) 可知, 若设 i_{k+1} 为电流参考值 i_{ref} , i_k 为电流反馈值, 则可预测出下一个开关周期所需要的 d 值:

$$d=L\frac{(i_{k+1}-i_k)}{TV_{dc}}+R\frac{(i_{k+1}+i_k)}{2V_{dc}}=L\frac{(i_{ref}-i_k)}{TV_{dc}}+R\frac{(i_{ref}+i_k)}{2V_{dc}} \quad (12)$$

参照式 (12) 可得到基于模型预测的电流控制策略 (图 11)。图中, i_s^* 为参考电流, i_s 为反馈电流。通过该控制策略, 可以极大地提高电流的响应速度。

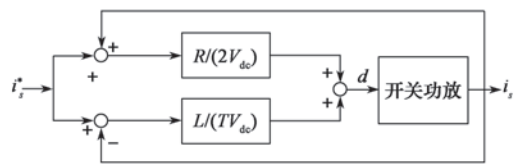


图 11 基于模型预测的电流控制策略

Fig. 11 Current control strategy based on predicted model

3 仿真及实验

为了验证本文理论分析的正确性以及所提控制策略的有效性, 文章搭建仿真模型及实验平台进行实验验证。

3.1 仿真验证

采用如表 2 所示的磁悬浮轴承开关功放及线圈参数, 在 Matlab 中搭建了仿真模型, 对不同开关功放拓扑、不同控制方式下的电流响应及位置响应进行了仿真分析。

表 2 磁悬浮轴承开关功放及线圈的参数
Tab. 2 Parameters of the active magnetic bearing switching power amplifier and coil

参数	数值
直流侧电压 /V	300
线圈电阻 /Ω	1.32
线圈电感 /H	0.682 5
额定电流 /A	4

图 12 为不同拓扑下的电流响应波形。可以看出，单轴共桥臂型拓扑与五轴共桥臂型拓扑的电流响应速度一样；而 H 桥拓扑的响应速度要快于共桥臂型拓扑的，这也与 1.1 节和 2.1 节的理论分析结果相符。

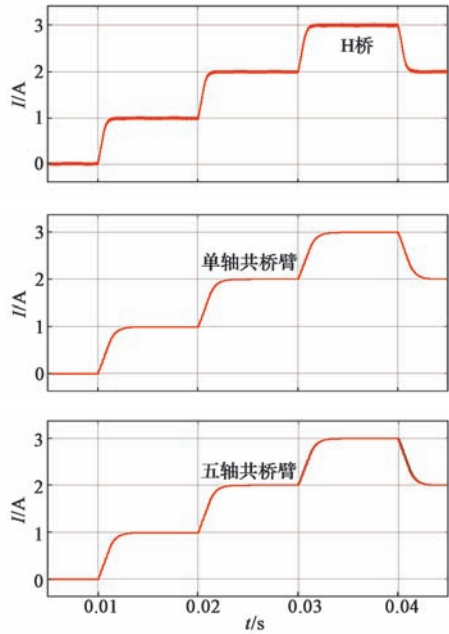


图 12 不同拓扑下的电流响应波形
Fig. 12 Current response speeds of different topologies

选用五轴共桥臂型的开关功放拓扑对不同电流控制方式进行仿真分析，结果如图 13 所示。可以看出，基于模型预测控制策略下的电流响应速度和控制精度都要明显优于 PI 控制策略的。

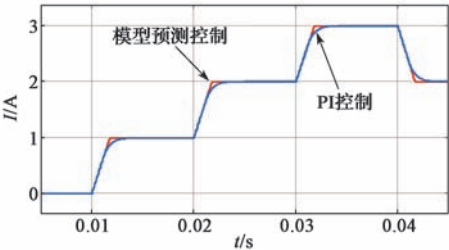
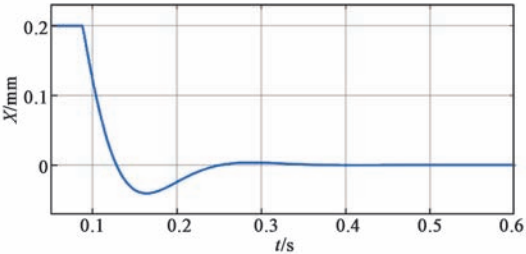
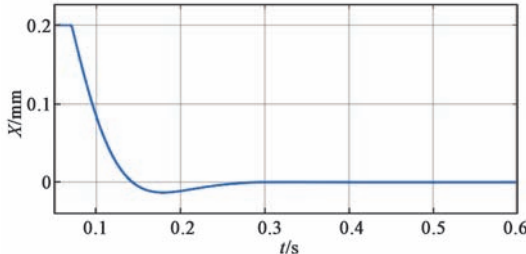


图 13 不同控制方式下五轴共桥臂系统的电流响应波形
Fig. 13 Current responses of the five-axis common-bridge system with different control strategies

综合表 1 与表 2 的磁悬浮轴承参数，可仿真得到不同电流控制方式以及不同系统刚度下磁悬浮轴承的位移响应波形，如图 14 和图 15 所示，其中纵轴 X 表示位移。图 14 为 $k=k_s$ 时的位移响应波形。可以看出，系统刚度较小时，两种电流控制方式都可以起到很好的控制效果。图 15 为 $k=1.2k_s$ 时的位移响应波形。可以看出，增大系统刚度后，PI 电流控制策略下，系统已经失稳；而在基于模型预测的电流控制策略下，系统仍能稳定运行。

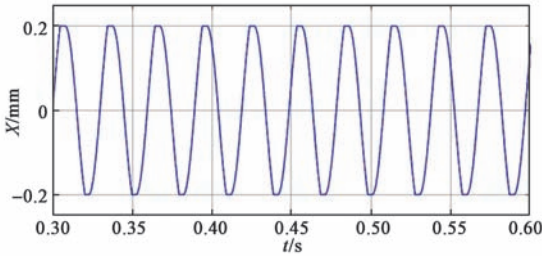


(a) 基于 PI 控制策略

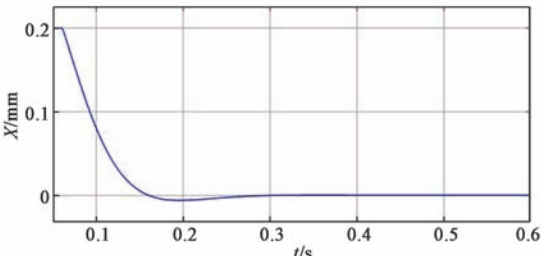


(b) 基于模型预测的电流控制策略

图 14 $k=k_s$ 时的位移响应
Fig. 14 Displacement responses as $k=k_s$



(a) 基于 PI 控制策略



(b) 基于模型预测的电流控制策略

图 15 $k=1.2k_s$ 时的位移响应
Fig. 15 Displacement responses as $k=1.2k_s$

图 16 示出五轴共桥臂输出电流波形。可以看出，电流可在共用桥臂中点处中和，共用桥臂开关管中的

电流显著减少。

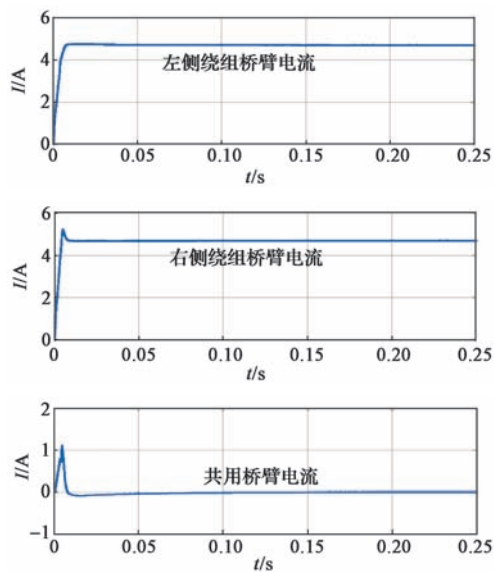


图 16 五轴共桥臂系统桥臂输出电流
Fig. 16 Bridge arm output currents of the five-axis common-bridge system

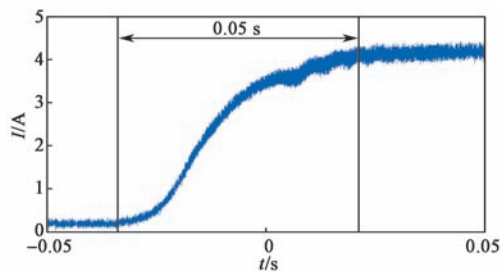
3.2 实验

综上理论研究及仿真，本文搭建了实验平台进行磁悬浮轴承系统功能验证，如图 17 所示。实验平台包含功率放大器、控制器、位置传感器以及磁悬浮电机，相关的实验参数如表 1 和表 2 所示。

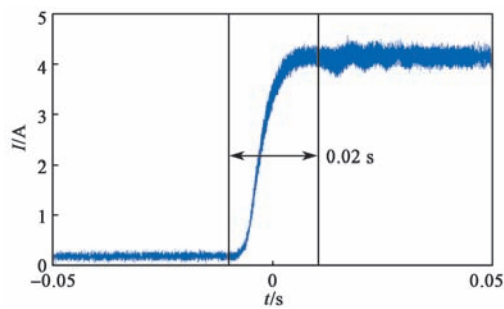


图 17 磁悬浮轴承系统实验平台
Fig. 17 Test platform for the active magnetic bearing

首先进行电流闭环实验，分别采用 PI 控制方式与模型预测控制方式，得到电流的响应波形如图 18 所示。可以看出，模型预测控制策略下的电流响应速度优于 PI 控制策略下的。



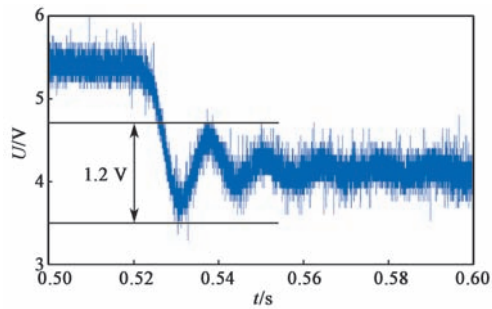
(a) 基于 PI 控制策略



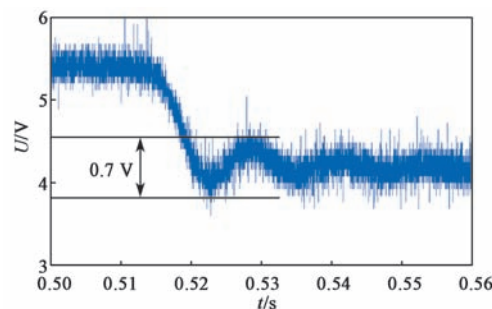
(b) 基于模型预测的电流控制策略
图 18 不同控制策略下的磁悬浮轴承系统
电流响应

Fig. 18 Current responses of the active magnetic bearing system with different control strategies

然后进行位置控制，得到不同控制方式以及不同控制参数下的位移响应曲线，如图 19 和图 20 所示。图中，纵坐标 U 为位移信号的采样值，1 V 代表 100 μm 。同样可以看出，基于模型预测的电流控制策略有着更好的位置控制性能与稳定性。

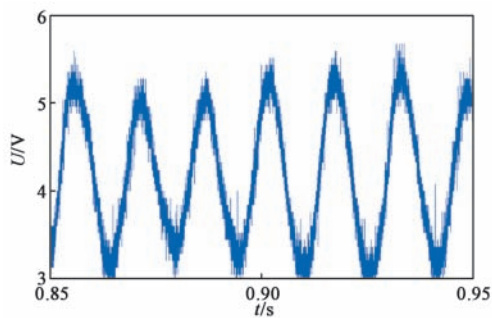


(a) 基于 PI 控制策略

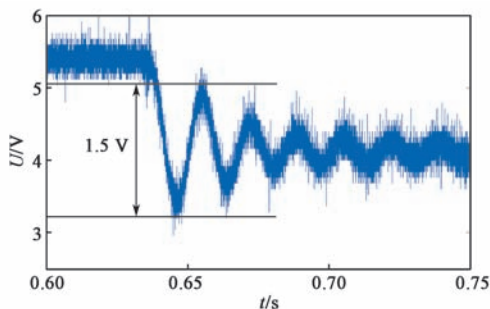


(b) 基于模型预测的电流控制策略

图 19 $k=k_s$ 时的位移响应波形
Fig. 19 Displacement response as $k=k_s$



(a) 基于 PI 控制策略



(b) 基于模型预测的电流控制策略

图 20 $k=1.2k_s$ 时的位移响应

Fig. 20 Displacement response as $k=1.2k_s$

4 结语

为优化磁悬浮轴承系统的性能,本文研究了磁悬浮轴承开关功放的拓扑结构及其带宽对系统性能的影响,提出了一种新型的五轴共桥臂型开关功放拓扑结构和对应的优化控制策略。通过仿真和实验,得出相关结论如下:

(1) 所提出的五轴共桥臂型开关功放拓扑结构仅用 11 个开关管桥臂就能实现磁悬浮轴承 10 个电磁线圈的独立控制,降低了系统的总体损耗。

(2) 电流环的带宽(即电流的响应速度)会受电感值、直流侧电压值及其利用率的限制。在系统参数一定的情况下,为使电流环获得足够的带宽,需设置足够高的直流侧电压。

(3) 磁悬浮系统稳定的限定条件为 $\frac{k+k_s}{D\omega_c} < 1$, ω_c 过小或者 k 过大,都会导致系统失稳。

(4) 基于模型预测的电流控制策略能显著提高电流内环的响应速度(即电流环的带宽),进而改善系统的性能。

参考文献:

[1] SCHWEITZER G, MASLEN E H, BLEULER H, et al. Magnetic

Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery[M]. Germany: Springer Press, 2010.

[2] CHIBA A, FUKAO T, ICHIKAWA O, et al. Magnetic Bearings and Bearingless Drives[M]. London: Elsevier Press, 2005.

[3] CHIBA A, FUKAO T, ICHIKAWA O. Magnetic Bearings and Bearingless Drives[J]. The Netherlands: Elsevier, Amsterdam, 2005.

[4] CARABELLI S, MADDALENO F, MUZZARELLI M. High efficiency linear power amplifier for active magnetic bearings[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(1):17-24.

[5] LIU C Z, DENG Z Q, HUA C, et al. Design and implementation of a five-phase six-leg switching power amplifier for five degrees of freedom magnetic levitation bearing system[C]//2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013:1254-1258.

[6] JIANG D, KSHIRSAGAR P. Analysis and Control of a Novel Power Electronics Converter for Active Magnetic Bearing Drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2222-2232.

[7] LU B, CHOI H, BUCKNER G D, et al. Linear parameter-varying techniques for control of a magnetic bearing system[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(10):1161-1172.

[8] NOSHADI A, SHI J, LEE W S, et al. System Identification and Robust Control of Multi-Input Multi-Output Active Magnetic Bearing Systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(4): 1222-1239.

[9] WEI C S, SOFFKER D. Optimization strategy for PID controller design of AMB rotor systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(3): 788-803.

[10] JIANG D, LI T, HU Z D, et al. Novel Topologies of Power Electronics Converter as Active Magnetic Bearing Drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 950-959.

[11] ZHOU X, FANG J, XU S. Analysis and suppression of the suspended rotor displacement fluctuation influence for motor system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6966-6974.

[12] GOSIEWSKI Z, MYSTKOWSKI A. Robust control of active magnetic suspension: analytical and experimental results[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2008, 22(6):1297-1303.