

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.06.002

重载磁悬浮轴承电控系统的研究*

程炜超, 谢振宇, 张云聪, 郝建胜
(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对大型高速旋转机械中磁悬浮轴承电磁力小和响应(电流响应和电磁力响应)速度较慢等问题,采用了 IGBT 器件作为功率器件,研究了变换器的拓扑结构及其控制方法,设计制作了高电压大电流功率放大器和电压可调高频开关功率电源。将设计制作的功率放大器和开关功率电源,与实验室已有的传感器和数字控制器相结合,搭建了重载磁悬浮轴承电控系统,并将其应用于磁悬浮飞轮转子试验台进行了试验。试验及研究结果表明:重载磁悬浮轴承电控系统的最大输出电流为 120 A,最大输出电压为 450 V,大大提高了磁悬浮轴承的电磁力和响应速度,并且其能够保证飞轮转子在工作转速范围内稳定运行。

关键词:功率放大器;IGBT;开关电源;高频变压器;FPGA

中图分类号:TH133.3;TH39;TM133

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)06-0562-06

Electric control system of heavy-load magnetic bearing

CHENG Wei-chao, XIE Zhen-yu, ZHANG Yun-cong, HAO Jian-sheng
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problems of small electromagnetic force and slow response (current response and electromagnetic force response) of magnetic bearing in large high-speed rotating machinery, IGBT was used as the power device. The topologies of the converter and its control methods were studied. The power amplifier and voltage adjustable high frequency switching power supply were designed and fabricated. The designed power amplifier and switching power supply were combined with the existing sensors and digital controllers of the laboratory to build a heavy-duty magnetic suspension bearing electronic control system and applied to the magnetic suspension flywheel rotor test bench. The test results show that the maximum output current of the heavy magnetic suspension bearing electronic control system is 120A, and the maximum output voltage is 450V, which greatly improves the electromagnetic force and response speed of the magnetic suspension bearing, and it can ensure the stable operation of the flywheel rotor within the working speed range.

Key words: power amplifier; IGBT; switching power supply; high-frequency transform; FPGA

0 引言

当前,旋转机械正向高速、重载和细长方向发展。磁悬浮轴承具有无接触、高转速和主动控制等优点,因而得到了广泛应用^[1]。一般磁悬浮轴承电控系统包括传感器、控制器、功率放大器和线性功率电源等。

单自由度磁悬浮轴承转子系统的工作原理是:首先,传感器检测转子的位移,并将位移信号转化为电压信号;其次,控制器接受上述电压信号,与预定位置的参考值做比较得出偏差,并按照相应的控制策略对偏差进行处理,得到控制信号的输出;最后,功率放大器接受控制信号,并根据该信号调整磁悬浮轴承线圈上的电流大小,以改变电磁铁 A 和 B 的吸力,从而改变转子偏离平衡位置的趋势,保证其稳

收稿日期:2018-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275238)

作者简介:程炜超(1993-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要从事磁悬浮技术方面的研究。E-mail:1575717504@163.com

定悬浮^[2]。

应用于大型高速旋转机械中的重载磁悬浮轴承,要求其功率放大器能够提供高电压大电流输出。由于 MOSFET(金属—氧化物半导体场效应晶体管)器件的极限电流有限,必须采用 IGBT 器件增加输出电流;另外线性功率电源的体积较大,功率因素也较低,需要采用开关功率电源,以便提供大电压输出。

本文将研制基于 IGBT 器件的功率放大器和电压可调高频开关功率电源,并引入磁悬浮轴承系统中,以完成实际测试。

1 功率放大器

功率放大器是磁悬浮轴承电控系统的重要组成部分,其功能是向线圈提供合适的电流以产生所需要的电磁力,其性能对转子的控制精度和最高转速有着决定性的影响,同时也会影响磁悬浮轴承的能量损耗^[3]。

功率放大器由电流控制模块、PWM 模块、驱动电路和换能电路组成,功率放大器结构图如图 1 所示。

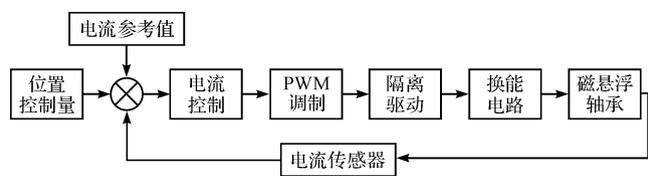


图 1 功率放大器结构图

1.1 功率放大器的研制

1.1.1 换能器设计

在磁悬浮轴承系统中,为了提高磁悬浮轴承的力响应速度,常常采用提高电源电压的方法^[4]。但是这样会使两电平功放中的电流纹显著增大,因此,本文采用了三电平开关功放,其电流纹波与电源电压几乎无关,从而可以通过提高电源电压的方法来提力响应速度。

三电平开关功放的换能电路为一个改进型的半桥电路,如图 2 所示。

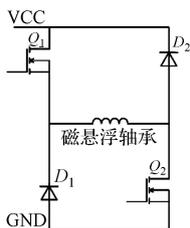


图 2 换能电路

三电平开关功放中有 2 个 IGBT,一共有 4 种工作模式,分别为:Q₁ 和 Q₂ 同时打开;Q₁ 和 Q₂ 同时关闭;Q₁ 和 Q₂ 其中一个打开和另一个关闭。当 Q₁ 和 Q₂ 共同导通时,磁悬浮轴承中流过的电流增加;当两者同时关断时,线圈电流通过 VD₁ 和 VD₂ 续流,线圈电流减小;当 Q₁ 和 Q₂ 只有一个关断时,Q₂、D₁ 和磁悬浮轴承或者 Q₁、D₂ 和磁悬浮轴承形成回路,其理想状态下,输出电流为直线,但是此时回路中存在电阻,因此电流值会下降。

在每个周期中,Q₁ 和 Q₂ 都会在短时间内同时导通,使线圈电流从最小值增加到最大值。由于这段时间相对于整个周期而言极短,可以忽略不计。

根据文献中计算三电平 PWM 功放电流纹波 I_w/I 的公式,忽略功率器件和二极管导通电压的压降,可以得到下述公式^[5]:

$$\frac{I_w}{I} = \sqrt{\frac{2\exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) + \frac{T}{\tau}\exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) - 2 + \frac{T}{\tau}}{2I^2\left[\exp\left(-\frac{T}{\tau}\right) - 1\right]}} \quad (1)$$

式中:τ—常数(只与圈线的电感和电阻有关)。

由式(1)可以得出:三电平功率放大器输出恒定电流时,电流纹波大小与直流电压无关。

1.1.2 电流控制模块设计

电流控制是脉宽调制型开关功放最关键的部分,目的是使电流输出能够及时跟随位移控制量。本文的电流控制是通过 PI 调节器来保证环路稳定性和高静态精度,其传递函数为:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (2)$$

式中:K_p—比例系数;T_i—积分时间系数;E(k)—图 1 中位置控制量、电流反馈量和电流参考值的加权;U(k)—电流控制的输出,作为 PWM 模块调制占空比的输入。

比例系数 K_p 决定功率放大器电流的响应速度,K_p 太大,会导致输出的 PWM 波占空比在 0 ~ 100% 之间摆动,造成电流震荡;如果太小,电流响应速度慢,系统的动态性能差。积分时间系数决定了电流的静态精度,合适的积分时间系数,虽然不能减小电流纹波,但是能减小电流的平均误差。

本文 PI 控制模块使用比例积分运算电路,通过改变电阻和电容的大小,来改变式(2)中的比例系数和积分时间系数。

1.1.3 驱动模块设计

本文采用的功率器件为 IGBT,其对驱动电路模块

有以下要求^[6-7]：

(1) IGBT 为电压型控制器件,因此对栅-源极的电压幅值 V_{GS} 有要求,为防止 IGBT 误导通,需要提供一定幅值的关断负压;

(2) 进入驱动电路的信号和输出信号需要隔离;

(3) 驱动电压的“开路脉冲”要陡;

(4) 栅-源驱动脉冲电压的幅值 V_{GS} 要足够大,为了降低通态电阻或压降,驱动电压范围为 12 V ~ 18 V,同时为了防止栅-源之间的击穿,一般要求 V_{GS} 应小于 20 V,为此需要反向耐压值为 20 V 的肖特基二极管钳位来限制电压。

本文采用了光电耦合器 TLP350,将驱动信号和模拟控制信号进行有效的电气隔离,同时用推挽电路将 PWM 波功率放大为用来驱动功率器件 IGBT 的 PWM1,如图 3 所示。

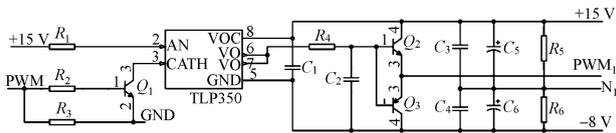


图 3 驱动电路

图 3 中:

PWM 是通过上述电流控制模块得到的 $U(k)$ 与频率和幅值一定的三角波相比较后,经过与非门得到的; N_1 为 +15 V 和 -8 V 的参考电势,即 0 V,但不同于 GND;当 PWM 为高电平时,N 型三极管 Q_1 导通,光电耦合器 TLP350 输入端有电流经过,其输出脚 6/7 为高电平,则驱动推挽电路中的 N 型三极管 Q_2 导通,P 型三极管 Q_3 截止,PWM₁ 输出 +15 V;当 PWM 为低电平时,N 型三角管 Q_2 截止,光电耦合器 TLP350 输入端没有电流流过;其输出角 6/7 为低电平,则推挽电路中 N 型三极管 Q_2 截止,P 型三极管 Q_3 导通,PWM₁ 为 -8 V。

1.2 功率放大器性能试验

根据上述传递函数,本文设计制作了应用于重载磁悬浮轴承电控系统的功率放大器,其功率器件为 IGBT (FF150R12RT4),开关频率为 8 kHz。

功率放大器的性能测试,其本质是磁悬浮轴承电控系统内环—电流环的测试。本文分别对其进行静态测试和动态测试。静态测试时,影响功率放大器的因素只有磁悬浮轴承中的电流,没有转子位置的影响,即没有位置控制量的输入。通过电流钳测得的磁悬浮轴承线圈实际电流与功率放大器内部设定的参考值(电

流参考量)的关系如图 4 所示。

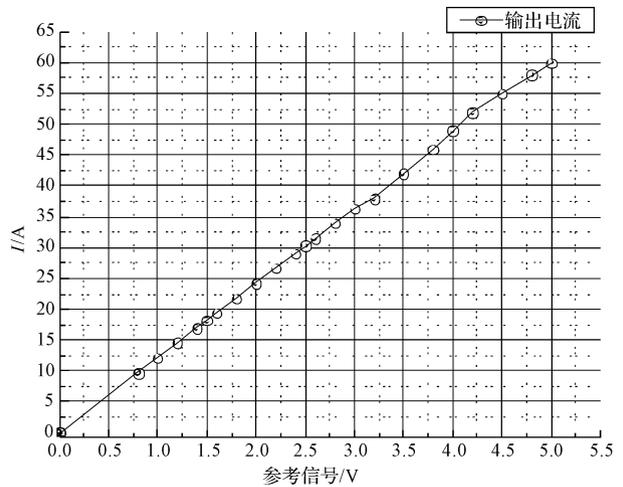


图 4 输出电路和参考电流对比图

由图 4 可得:

电流值与参考值基本上是线性的,并且电流值可以很好地跟随电流参考量的变化,表明电流控制的有效性。

功率放大器除了需要具有优良的静态性能外,还需要有良好的动态性能以适应转子的旋转状态。在同样的测试条件下,本研究在功率放大器的位置控制量输入处用信号发生器施加无偏置、峰值为 8 V 的正弦波作为激励,以模拟转子旋转时其振动的同频成分。

试验时功率放大器的静态电流为 60 A,输入电压为 450 V。由于输入的信号为 ± 4 V,而设计的 PID 信号的输入范围为 (-5 V, +5 V),因此信号引起的电流峰值为偏置电流的 80%,即 48 A。

以功率放大器控制的电流响应为纵坐标,整个电流环的控制是稳定的,设计的功率放大器的通频带为 1 300 Hz,得到的幅频特性曲线如图 5 所示。

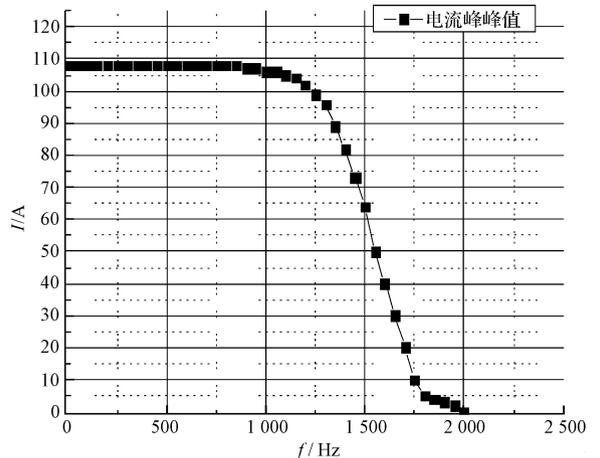


图 5 功率放大器幅频特性曲线

2 开关功率电源

与传统线性功率电源相比,开关电源有转换效率高、稳压范围宽、功率密度大、重量轻、体积小、可自动控制等优点^[8-9]。在一些磁悬浮轴承电控系统中,电源采用传统的线性电源,电压是恒定的。但是对于不同负载的磁悬浮轴承电控系统,为了提高磁悬浮轴承承载力的响应速度,常常采用提高电源电压的方法。针对这一特点,本文设计制作了中低压可调高频开关电源。

2.1 主电路设计

研制的开关功率电源采用“AC-DC-AC-DC”的变换结构,开关电源主电路原理图如图6所示。

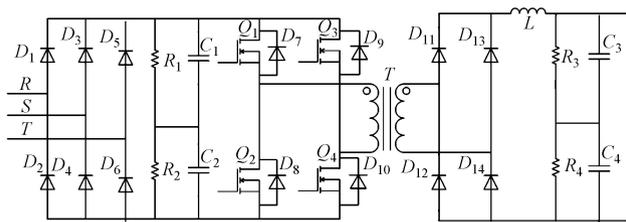


图6 开关电源主电路原理图

根据开关功率电源拓扑电路的技术规范,其输入为三相工频交流电。

首先,通过使用整流桥和滤波电容,将三相交流电整流滤波为直流电;

其次,直流电压输入至由2个IGBT模块(每个IGBT模块有2个IGBT)组成的全桥逆变器中,经其逆变的高频方波电压作为高频变压器原边输入;

最后,高频变压器副边输出的交流方波电压再由整流桥和电感、电容组成的滤波电路进行整流、滤波,输出恒定的直流电。

2.2 高频变压器设计

高频变压器根据 A_p 法计算设计,即先求出磁芯窗口面积 A_w 与磁芯有效截面积 A_e 的乘积 A_p (磁芯面积乘积)^[10]:

$$A_p = A_w A_e \quad (3)$$

根据 A_p 与变压器功率处理能力的关系,有:

$$A_p = \left(\frac{P_i \times 10^4}{K_f K_u B_m J f} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (4)$$

式中: P_i —视在功率; K_f —波形系数, $K_f = 4$; K_u —窗口系数, $K_u = 0.4$; B_m —饱和磁密度, $B_m = 0.3 \text{ T}$; J —电流密度(当导线是铜时,电流密度为 5 A/mm^2); f —工

作频率; α —常数(由所用磁芯决定)。

根据计算出的数据及厂家提供可供选择的磁芯尺寸,选定EE110/56/36铁氧体磁芯,将2个该磁芯叠加后,组成变压器的主磁芯结构。从式(4)中不难得出,高频变压器工作频率越高,其面积越小。因此,相比于传统线性电源,高频变压器可有效降低功率开关电源的体积及重量,提升功率密度。

原边匝数计算公式为:

$$N_p = \frac{V_l \times 10^4}{K_f A_e B_m f} = 24 \quad (5)$$

式中: V_l —母线电压, $V_l = 538 \text{ V}$ 。

匝比 $n = 1$,可得每组副边匝数为:

$$N_s = n N_p = 24 \quad (6)$$

考虑到趋肤效应^[11],采用的单股紫铜线直径为 $D = 0.9 \text{ mm}$,电流密度为 5 A/mm^2 ,原边单匝线圈的股数 N_1 为:

$$N_1 = \frac{P_{in}}{I_0 V_l D_{max}} = 7 \quad (7)$$

式中: P_{in} —输入功率, $P_{in} = 7.5 \text{ kW}$; I_0 —单股导线流过的电流强度, $I_0 = 3.15 \text{ A}$; D_{max} —电源电压输出最大功率时变换器的占空比。

高频变压器副边的股数 N_2 为:

$$N_2 = \frac{N_1}{n} = 7 \quad (8)$$

2.3 控制电路设计

开关电源的控制由设计的FPGA集成控制器实现。其硬件电路可分为4部分:

(1)信号调理电路。负责调理采样输入的电压和电流信号;

(2)AD转换电路。将上述模拟信号转换为数字信号;

(3)FPGA电路。包括AD模块、PI模块和PWM模块3个模块,分别负责控制AD采样、电压和电流控制、以及移向PWM波的产生,是整个控制器的核心;

(4)驱动电路。负责控制功率器件IGBT的通断。

2.3.1 AD采样控制模块

AD采样控制模块的功能是将来自电压和电流传感器的电压信号转化为数字信号,并将它们送入运算模块。本文选择Analog Devices公司的AD7938芯片用于采集电路的设计和程序编写。AD7938具有 1.5 MHz 吞吐量和8通道单端采集功能^[12]。

2.3.2 移相PWM产生模块

作为FPGA的最终输出,移向PWM直接连接光

耦,作为功率器件 IGBT 驱动电路的驱动输入,这可以大大减少元器件的数量并改善系统的集成度,实现移相控制。在时钟不变的前提下,移相角的精度和调节速度是对立的,而且 PWM 频率过高对功率器件的寿命不利。经综合考虑,本文选择移相 PWM 的频率为 8 kHz,分辨率为 1/1 024,移相角的范围为 10° ~ 180°。为了防止出现变换器上下桥直通现象,上下桥 PWM 设置了 3 μs 的死区时间。

2.4 开关功率电源试验结果

在开关功率电源使用前,需要对其性能进行测试。考虑到在空载时,开关功率电源输出电压不能稳定,所以在检测时本文给开关功率电源外接了一个负载。

检测得到的开关功率电源的输出电压与 FPGA 内部程序给定的参考值的关系如图 7 所示。

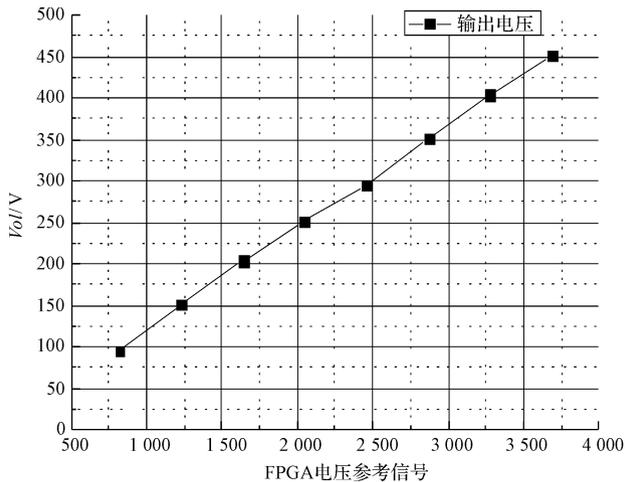


图 7 输出电压与电压参考值的关系曲线

从图 7 可知:

输出电压值与内部参考值成线性关系,其线性度为 99%,表明电压控制是有效的。

3 重载磁悬浮轴承电控系统试验

3.1 试验台

本文将研制的功率放大器和电压可调高频开关功率电源,与实验室已有的传感器和控制器结合,组成重载磁悬浮轴承电控系统。由于缺乏大型实验台,本文将该重载磁悬浮轴承电控系统直接应用于飞轮试验台进行验证。

磁悬浮飞轮的机械结构如图 8 所示。

图 8 中,径向和轴向磁悬浮轴承的基本参数如表 1 所示。

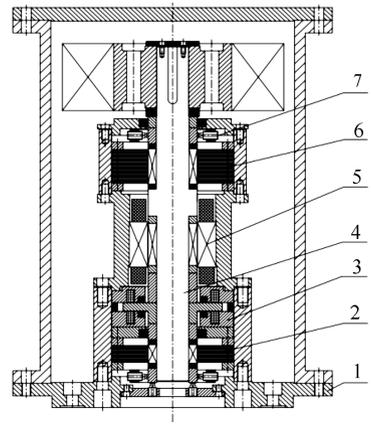


图 8 五自由度磁悬浮飞轮系统机械结构图

1—壳体;2—下径向磁悬浮轴承;3—轴向磁悬浮轴承;4—飞轮转子;5—电机定子;6—上径向磁轴承;7—位移传感器

表 1 飞轮中磁悬浮轴承设计参数

参数	径向数据	轴向数据
单边气隙/mm	0.25	0.2
保护轴承气隙/mm	0.15	0.1
承载力/N	465/232.5	400
磁悬浮轴承电流/A	8	4
磁悬浮轴承电压/V	100	100

根据表 1 中磁悬浮轴承的设计要求,本文利用研制的重载磁悬浮轴承电控系统,将飞轮转子五自由度稳定悬浮,并高速旋转。

3.2 测试结果与分析

通过飞轮转子内置高频电机带动转子高速旋转,其工作转速为 12 000 r/min。在运行过程中,系统转子的振动情况由电涡流位移传感器进行实时监测。

采用信号采集卡采集轴向磁悬浮轴承的电涡流位移传感器输出信号,并通过 Origin 软件绘制转子的轴向同频振动位移曲线,如图 9 所示。

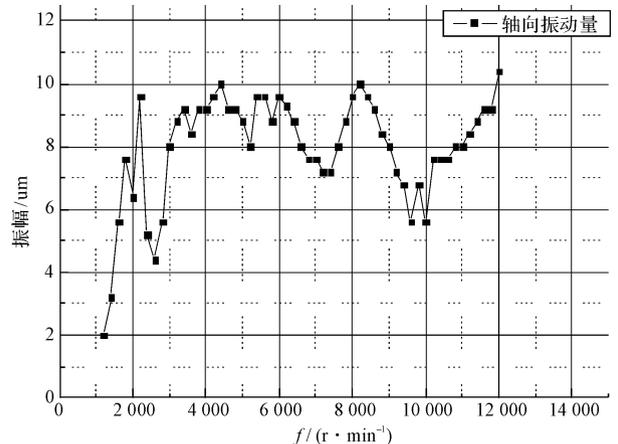


图 9 飞轮转子轴向的同频振幅曲线

由图9可以看出:

在整个转速范围内,飞轮转子的振幅都比较小,最大处为10.4 μm ,占保护气隙的10.4%。这说明本文研制的重载磁悬浮轴承电控系统能够有效控制飞轮转子的稳定悬浮和旋转。

4 结束语

由于大型高速旋转机械中,存在磁悬浮轴承电磁力小和响应速度慢的问题,本研究针对磁悬浮轴承电控系统,研制了功率放大器和电压可调高频开关功率电源,并对其性能进行了测试,结果如下:

(1)开关功率电源的性能测试结果表明:其最大输出电压为DC 450 V,最大输出电流为15 A,满足所研制的功率放大器的需求;

(2)功率放大器的性能测试结果表明:在DC 450 V功率电压输入时,功率放大器最大输出电流为120 A,线性度为99%,通频带为1 300 Hz,其静态性能和动态性能满足重载磁悬浮轴承的需要;

(3)磁悬浮飞轮转子系统高速旋转试验结果表明:本文构建的重载磁悬浮轴承电控系统,能够保证飞轮转子在工作转速范围内稳定运行。

参考文献(References):

[1] SCHWEITER G, BLEULERH, TRAXLERA. Active magnetic bearing-basics, properties and application of active magnetic

bearings[M]. Zurich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH, 1994.

- [2] 张浩. 基于变偏置电流方式的车载飞轮电池控制策略研究[D]. 南京:南京航空航天大学机电学院, 2016.
- [3] 张晓阳, 谢振宇, 黄云龙, 等. 磁悬浮电主轴集成控制系统的动态性能研究[J]. 机械与电子, 2017, 35(4): 3-8.
- [4] 陈立群, 谢友柏. 电磁轴承开关功放设计[J]. 机电工程, 1998, 15(2): 50-52.
- [5] ZHANG Jing. Power amplifier for magnetic bearings[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technonlogy, 1995.
- [6] 刘凤君. 现代高频开关电源技术及应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [7] 马成. 数字化高频逆变电镀电源的研究[D]. 广州:华南理工大学机械电子工程学院, 2011.
- [8] 林雪松. 高频开关电源建模及其控制技术研究[D]. 河北:河北工业大学控制科学与工程学院, 2014.
- [9] COLAKI, TUNCAYN. High current low voltage modular power converter for load acid battery charging[C]. 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore: IEEE, 2008.
- [10] 胡科堂. 高电压大功率开关电源拓扑电路的设计与研究[D]. 北京:北京工业大学电控学院, 2013.
- [11] 谢处方, 饶克瑾. 电磁场与电磁波[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [12] 周小超. 无人机非相似余度飞控计算机系统设计与研究[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院, 2013.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

程炜超, 谢振宇, 张云聪, 等. 重载磁悬浮轴承电控系统的研究[J]. 机电工程, 2019, 36(6): 562-567.

CHENG Wei-chao, XIE Zhen-yu, ZHANG Yun-cong, et al. Electric control system of heavy-load magnetic bearing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(6): 562-567.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>