

基于 TMS320F28335 的新型恒流源偏置磁轴承控制方案设计

胡磊, 宗鸣

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:介绍了恒流源偏置磁轴承的研究进展,并设计一种新型恒流源偏置电磁轴承控制方案。该方案以 TMS320F28335 DSP 芯片为控制核心,详细介绍了所用开关功放的电路原理图以及新型恒流源偏置磁轴承的绕组结构与控制原理。研究表明,新型控制方案有助于提高恒流源偏置磁轴承的响应速度和控制精度,有很好的参考价值。

关键词:磁轴承;恒流源偏置;TMS320F28335;功放;数字控制

中图分类号:TP271.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2016)01-0033-06

磁轴承是典型的机电一体化产品,由于其无接触、无磨损因而无需润滑等优点广泛使用于真空无菌等环境中^[1]。磁轴承主要有无源磁轴承、有源磁轴承和混合磁轴承,其中无源磁轴承完全使用永磁体产生电磁力将转子悬浮于空中;有源磁轴承采用在定子上绕线圈通电产生电磁力;混合磁轴承更多的是永磁偏置磁轴承,即用永磁体产生偏置磁场,用绕线圈通电产生电磁力^[2]。本文所设计的新型恒流源偏置磁轴承属于有源磁轴承范畴。

磁轴承转子与电磁铁的气隙往往只有零点几毫米,如果使用传统的模拟控制器难以满足磁轴承对控制器高速性、高可靠性和高精度性的要求。现有的磁轴承控制器多采用处理速度达到纳秒级的数字信号处理器 DSP。本方案采用 2000 系列芯片 TMS320F28335。

1 恒流源偏置磁轴承研究进展

由于铁芯磁化曲线起始阶段呈现如图 1 所示的非线性,将导致在小电流时磁轴承力与电流的关系呈现严重的非线性,影响磁轴承控制的难度。因此,在电磁轴承中往往加入偏置磁场,使铁芯磁化曲线的起始点在曲线线性段的中间点位置,提高磁轴承的控制精度^[3]。

KATSUMATA 等^[4]在 1994 年最先提出如图 2

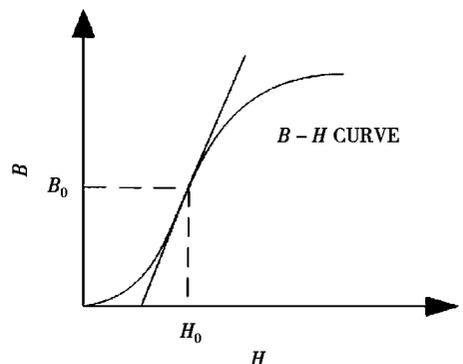


图 1 铁芯磁化曲线

Fig. 1 Magnetizing curve of iron core

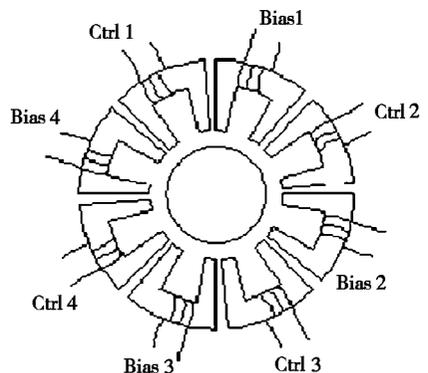


图 2 16 极结构恒流源偏置磁轴承

Fig. 2 16 pole structure constant current source biased magnetic bearing

所示的可以增加载荷能力的恒流源偏置径向磁轴承,该方案采用偏置线圈和控制线圈完全独立的 8 极对 16 极结构,通过飞轮试验表明该轴承可以提高承载力,IANNELO^[5]1995 年提出五自由度恒流源偏置磁轴承;杨平^[6]1999 年研究了两个 E 型相对的电磁铁且分别绕有控制线圈和偏置线圈的

单自由度恒流源偏置磁轴承;李黎川等^[7]2003 年研制了一个可以明显降低功耗且采用两个 3 极电磁铁的恒流源偏置磁悬浮控制平台;张艳花等^[8-9]提出了如图 3 所示的恒流源偏置磁轴承的双绕组结构,并做了功耗试验。

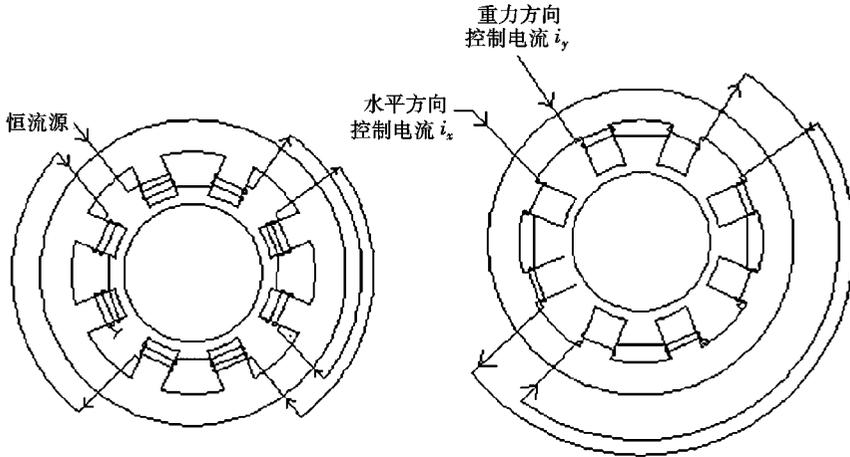


图 3 恒流源偏置双绕组结构

Fig. 3 Constant current source bias double winding structure

2 恒流源偏置绕组结构

磁轴承采用 4 极对 8 磁极的空间结构,其恒流源偏置的绕线形式如图 4 所示。由图 4 可以看出该绕线形式下,整个磁轴承将在径向 X、Y 方向产生对轴承转子相同的 4 个方向的磁场力,但其合力为零。恒流源产生的偏置磁场可以为铁芯进行预磁化,使其工作点位于铁芯磁化曲线的线性段中点附近。

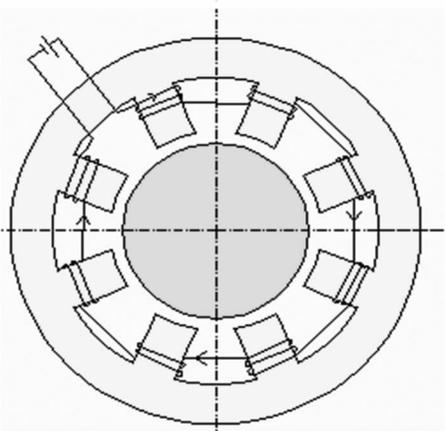


图 4 恒流源偏置绕组结构

Fig. 4 Constant current source bias winding structure

3 径向 Y 方向设计

3.1 径向 Y 方向绕组结构及其原理

磁轴承径向 Y 方向使用如图 5 所示的差动绕组结构。在该绕线结构下,当采用图 5 所示的电流进出方向,使得径向 Y 方向上面的控制绕组产生的磁场与恒流源产生的磁场叠加,下面的控制绕组产生的磁场与恒流源产生的磁场相减,上下磁场的差值使得径向 Y 方向产生的合力向上,该向上的合力与转子的重力进行平衡。

当转子受外界扰动产生向上的偏移时,安装在磁轴承径向方向的一对差动电涡流位移传感器将检测出转子相对于平衡点的位移,并将位移信号差动调理成电压信号反馈给 DSP 控制器。DSP 控制器再通过一定的控制算法调节输出的 PWM 占空比,使得半桥 H 开关功放的导通时间降低,从而降低线圈绕组控制电流大小。径向 Y 方向上下两个绕组的控制电流大小相同,当控制电流变小时,Y 方向上面的整个绕组产生的磁场力变小,下面的整个绕组产生的磁场力变大,从而将往上偏移的转子迅速拉回来。转子向下偏移时的控制原理同上。

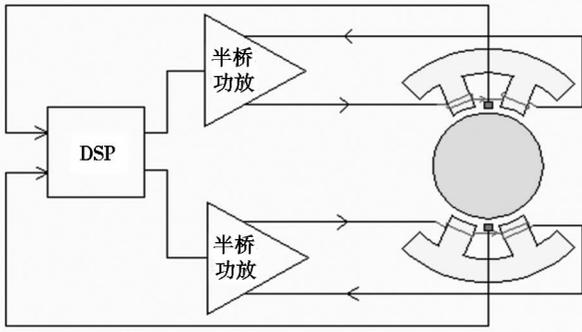


图 5 径向 Y 方向绕组结构及其控制原理图
 Fig. 5 The radial direction of Y winding structure and control principle diagram

3.2 驱动电路

TMS320F28335 的 PWM 口输出电流较小,难以直接导通场效应管。场效应管栅极的导通电压一般在十几伏,因此对于磁轴承控制的功放部分需要在 DSP 控制器与半桥电路之间接入驱动电路。本设计采用常用的 IR2101 驱动电路,如图 6 所示。

IR2101 是一种 CMOS 驱动芯片,该芯片通过 NMOS 和 PMOS 两路驱动一组场效应三极管。IR2101 的 HIN 和 LIN 口分别接 TMS320F28335 的 PWM 口, D1 二极管与 C1 电容组成自举升压电路。该二极管的作用是防止电流倒灌,而电容

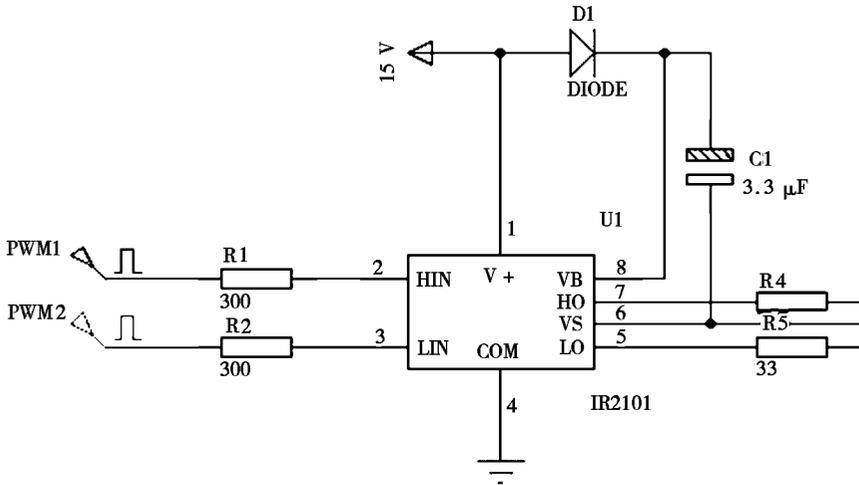


图 6 IR2101 驱动电路
 Fig. 6 IR2101 drive circuit

的作用是用来储存电压的^[10],可以为半桥式电路提供参考电压。磁轴承径向两自由度控制电路的驱动部分都可以采用类似的方法。

3.3 半桥 H 功放电路

由于在径向 Y 方向流过电磁铁线圈的电流是单向的,因此新型磁轴承控制方案的功放电流桥部分采用半桥 H 电路,其电路原理图如图 7 所示。图中的电感与电阻代表磁轴承电磁铁的线圈,每个场效应三极管都并联着一组阻容吸收电路,对电路起保护作用。TMS320F28335 的 PWM 口输出占空比可调的 PWM 波形,该 PWM 波经过驱动电路对半桥 H 电路的场效应三极管进行通断,通过调节电压源作用在电磁铁线圈上的时间从而改变控制电流的大小。

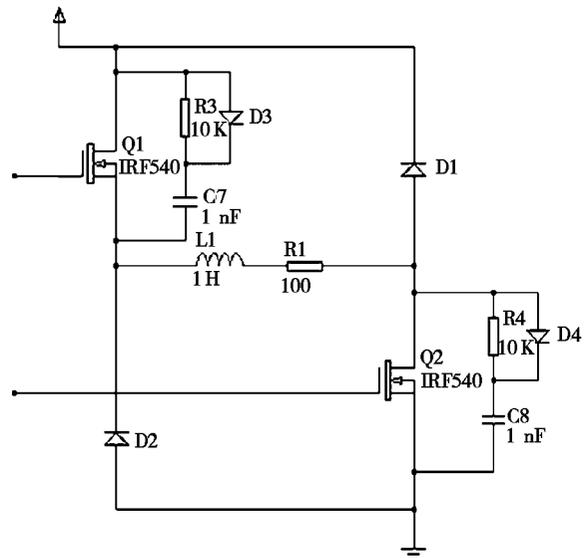


图 7 半桥 H 功放电路原理图
 Fig. 7 Half bridge H power amplifier circuit principle diagram

4 径向 X 方向

4.1 径向 X 方向绕组结构及其控制原理

径向 X 方向仍然采用差动绕组控制的形式。与径向 Y 方向不同的是,径向 X 方向控制绕组的电流是双向的,因此其功放电路采用全桥 H 功放。当轴承转子受外界扰动向左偏时,安装在磁轴承径向 X 方向的一组差动电涡流位移传感器检测出位移大小,并反馈给 DSP 控制器;DSP 控制器根据控制算法分别调节图 8 左右两侧的全桥

H 功放中场效应管的导通顺序以及导通时间,使得径向 X 方向左侧电磁铁线圈流过从上到下的电流,右侧电磁铁线圈流过从下往上的电流。电磁铁左右两侧相同的绕线方式下流过不同方向的控制电流,该控制电流产生的磁场分别与各自的恒流源偏置产生的磁场叠加,使得磁轴承转子在径向 X 方向左侧受到的力减小,而对应的右侧受到的磁场力增加,迅速将已经向左偏移的转子拉回。当转子受到外界扰动向右偏移时,其控制原理与向左偏移时类似,不再赘述。

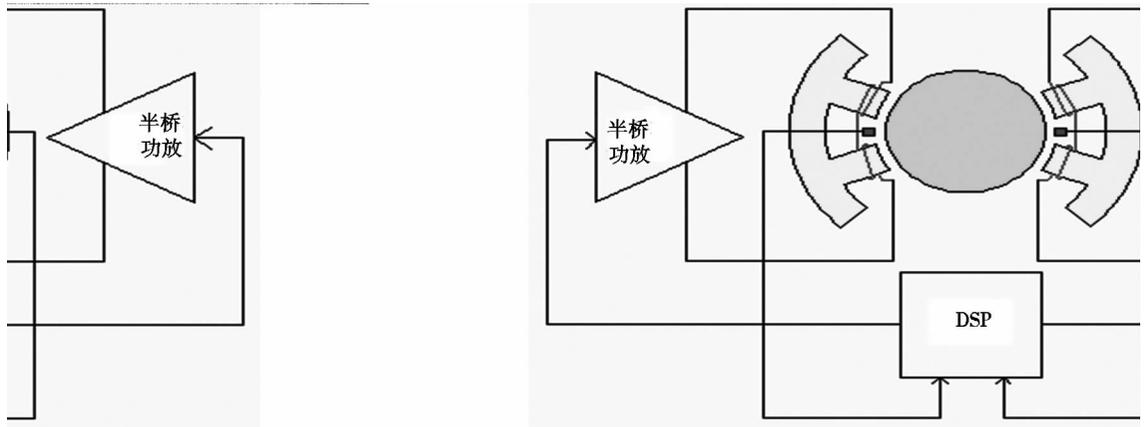


图 8 径向 X 方向绕组结构及其控制原理图

Fig. 8 The radial direction of X winding structure and control principle diagram

4.2 全桥 H 功放电路

由于新型恒流源偏置磁轴承控制方案在径向 X 方向的控制线圈需在转子不同方向偏移时流过方向可调的电流,因此不同于径向 Y 方向的半桥 H 功放,本设计采用全桥 H 功放,其电路原理图如图 9 所示。

图 9 全桥 H 电路的电感与电阻代表磁轴承电磁铁线圈的等效电阻和电感,根据轴承转子在径向 X 方向偏移的方向,分别控制着 Q3、Q6 的同时导通,Q4、Q5 的同时关断;或者 Q4、Q5 的同时导通,Q3、Q6 的同时关断。

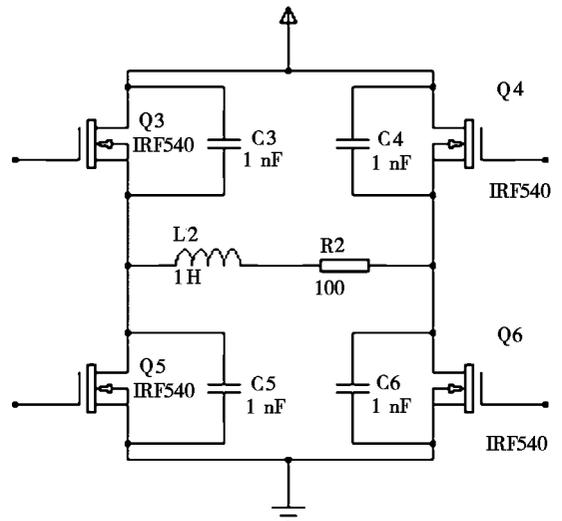


图 9 全桥 H 电路原理图

Fig. 9 Full bridge H circuit principle diagram

5 DSP 控制部分

本设计采用 DSP 2000 系列一款精于电机工控的芯片——TMS320F28335。该芯片是 TI(Texas Instruments)公司研发的主频达到 150 MHz、浮点数为 32 位的集 DSP 和微控制器的优点于一身的数字控制处理器^[11]。新型恒流源偏置磁轴承控制方案的 DSP 控制框图如图 10 所示。

6 新型恒流源偏置磁轴承控制方案总框图与分析

新型恒流源偏置磁轴承的总框图如图 11 所示,其中 A1 与 A2 代表径向 Y 方向的差动电涡流

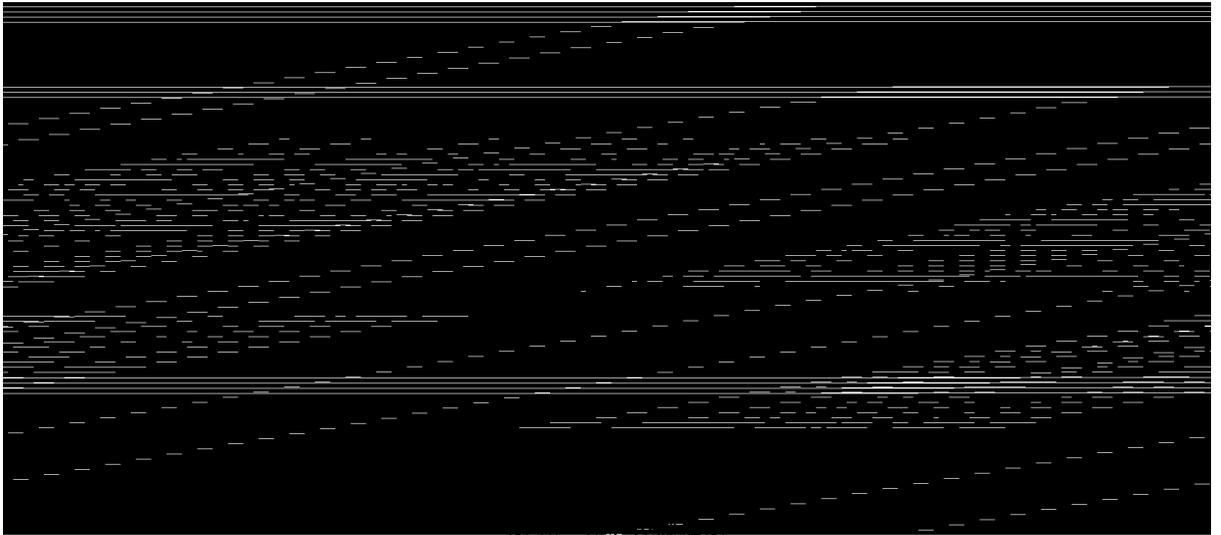


图 10 DSP 控制框图

Fig. 10 The block diagram of the DSP control

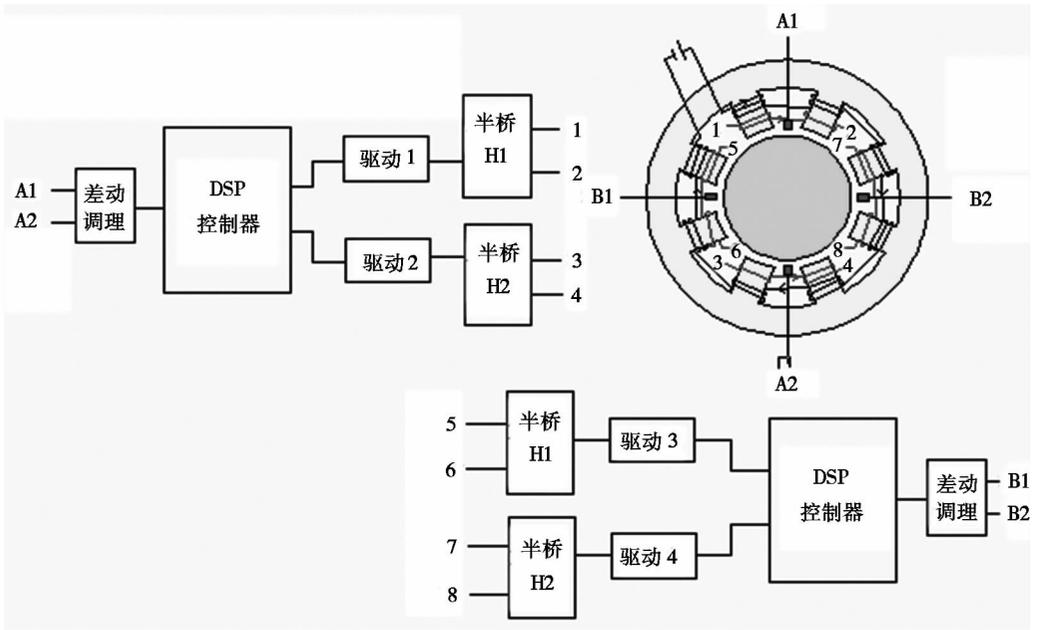


图 11 新型恒流源偏置磁轴承控制方案总框图

Fig. 11 A new constant current source biased magnetic bearing control scheme diagram

传感器, B1 和 B2 代表径向 X 方向的差动电涡流传感器;磁轴承 8 个极上靠内部闭合的线代表恒流源偏置线圈,靠转子侧断开的线代表控制线圈,两个 DSP 控制器代表一个 TMS320F28335 控制器。磁轴承的绕组线圈往往缠绕几百匝,呈现较强的感性,强感性线圈会对不断瞬间变化的电流产生一定的阻碍,使得电感电流滞后于电压,影响磁轴承的控制精度和响应速度。

图 12 给出了磁轴承线圈电感大小对其电流改变速度影响的仿真图,图中实线代表 30 mH 的

磁轴承线圈,虚线代表 60 mH 的线圈,可以看出前者在快速性上有明显的改善。新设计方案将径向 Y 方向和 X 方向的线圈分别控制,相比于图 3 所示的恒流源偏置控制方案,新设计方案仅仅是多了些桥式电路和一些 PWM 口,而绕组线圈在每个方向上的电感却降为原来的一半。新设计方案充分利用 TMS320F28335 的 PWM 口,用外部控制策略代替磁轴承线圈物理上的连接。此外现有的数字控制以及数字开关功放无论在理论上还是实验上都比较成熟,完全可以得到保障。

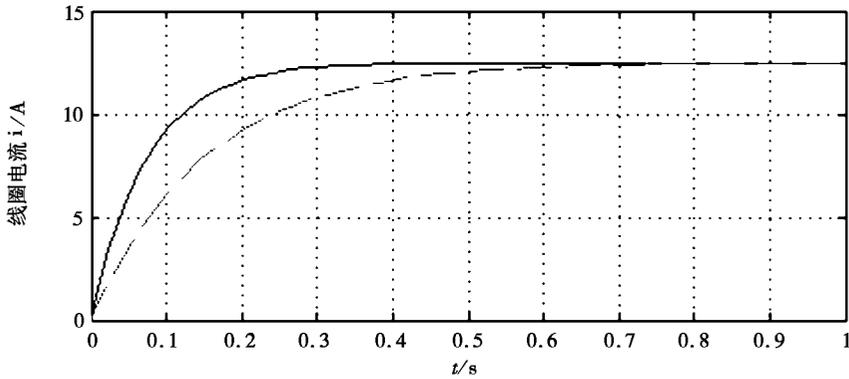


图 12 磁轴承线圈电感大小与其响应速度关系仿真图

Fig. 12 The simulation map for Magnetic bearing coil inductance with response speed

结 语

相比于传统磁轴承控制与永磁偏置磁轴承控制,恒流源偏置磁轴承的控制无论在理论研究还是实验验证上都比较欠缺。本文在介绍恒流源偏

置磁轴承国内外研究进展的基础上,提出一种以 TMS320F28335 为控制核心的新型恒流源偏置磁轴承控制方案的设计,在理论上论证了该方案在提高磁轴承控制精度和快速性上的优势,为相应的实验验证提供准备。

参考文献:

[1] SCHWEITZER G, MASLEN E H. Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery[M]. Berlin: Heidelberg, 2009.

[2] 张维煜,朱焜秋,袁野. 磁悬浮轴承应用发展及关键技术综述[J]. 电工技术学报,2015,30(12):12-16.

[3] 宗鸣. 永磁偏置混合式磁轴承及其控制方法的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2007.

[4] KATSUMATA S, MADDALI V. Magnetic bearings with weight bias actuators for high dynamic response[C]. The 4th International Symposium on Magnetic Bearings,1994:257-262.

[5] IANNELLO V. Magnetic bearing systems for gas turbine engines[C]//The 4th industrial conference and exhibition on applications of magnetic bearings, magnetic drives, and dry gas seals, Alexandria, UA (United States), 10-11 Aug 1995.

[6] 杨平. 偏置线圈式电磁轴承的研究[J]. 连云港化工高等专科学校学报,1999,12(4):6-10.

[7] 李黎川,丁玉成,卢秉恒. 超精密磁悬浮工作台的一种低功耗磁悬浮设计[J]. 微细加工技术,2003(4):45-50.

[8] 张艳花. 恒流源偏置的磁悬浮轴承的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.

[9] 徐建根,徐龙祥,纪历. 恒流源偏置磁悬浮轴承系统的功耗试验[J]. 机械设计与研究,2014,29(6):144-147.

[10] 曹广忠,潘剑飞,黄苏丹,等. 磁悬浮系统控制算法及实现[M]. 北京:清华大学出版社,2013.

[11] 张卿杰,徐友,左楠,等. 手把手教你学 DSP——基于 TMS320F28335[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2015.

Design of a New Type of Constant Current Source Bias Magnetic Bearing Control Scheme Based on TMS320F28335

HU Lei, ZONG Ming

(School of electrical engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning 110870, China)

Abstract:The research progress of the constant current source bias magnetic bearing is introduced. And the control scheme of a new type of constant current source bias magnetic bearing is designed. The scheme takes the TMS320F28335 DSP chip as the control core. The circuit schematic diagram of switching power amplifier and the winding structure and control principle of a new type of constant current source bias magnetic bearing are introduced in detail. Research shows that the new control scheme can improve the response speed and control precision of constant current source biased magnetic bearings, and have a good reference value.

Keywords:magnetic bearing; constant current biased; TMS320F28335; power amplifier; digital control

(责任编辑:李华云)