

基于 FPGA 的主动电磁轴承控制系统设计^①

王春生 曾文海 (湖南大学 电气与信息工程学院 湖南 长沙 410082)

摘要: 分析了主动电磁轴承的组成和控制系统的结构, 提出一种基于 FPGA 的主动电磁轴承控制系统, 然后对控制系统的各个模块进行分析和 FPGA 设计, 最后对设计的系统进行了仿真, 结果显示系统满足低功耗、高实时性的要求。

关键词: 主动电磁轴承; 功率放大器; PWM; FPGA 设计

FPGA-Based Design for AMB Control System

WANG Chun-Sheng, ZENG Wen-Hai

(Department of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper analyzes the active magnetic bearing and its control system structure, and proposes a FPGA-based active magnetic bearing control system. It then analyzes and designs each module of the control system. Finally, this paper presents a simulation of the design of the system. Results show that the control module meets the system's low power, high real-time needs.

Keywords: AMB; PA; PWM; FPGA design

电磁轴承是一种新型轴承, 是利用电磁力将转子悬浮于空中, 然后用电机带动转子进行运动的一种轴承。电磁轴承和普通轴承相比具有无摩擦、无损耗等优点, 并越来越多的应用在高速机械加工和储能飞轮等高速和真空领域中。电磁轴承系统控制方式一般为模拟控制方式和数字控制方式, 模拟电路结构简单, 实时性高, 但难于实现复杂控制算法, 动态性能差。基于程序的数字控制器(DSP 等)能够实现高性能的控制算法, 但是必须顺序执行程序, 延迟较大, 实时性差。本文提出一种基于 FPGA 的设计, FPGA(现场可编程大规模门阵列)近年来异军突起, 广泛应用于工业领域, 由于其为硬件编程, 处理方式为并行执行, 既有高实时性, 又可以实现复杂算发, 从而解决了上述矛盾。

1 电磁轴承组成及其闭环反馈系统设计方法

如图 1 所示, 主动轴承由定子, 电磁铁, 转子组

成。定子和转子之间的空隙平均为 1mm, 转子直径为 60mm, 定子厚度为 48mm。定子包括 8 个电磁铁, 其中 4 个产生的电磁力在 y 轴把转子控制在平衡位置, 另外 4 个转子在 x 轴方向控制转子^[1]。每个垂直方向上包括一个位移传感器来测量转子和定子之间的位移, 每个线圈外接一个电流传感器。

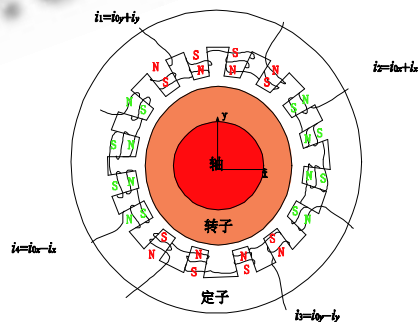


图 1 主动电磁轴承

电磁轴承系统是非稳定性系统, 需要控制系统电路控制转子在稳定的位置旋转。本文采用双闭环反馈

^① 收稿时间:2010-01-25;收到修改稿时间:2010-03-18

系统来稳定转子运动位置和线圈电流。在闭环反馈系统中，一般对轴承模型进行线性化处理，线性化模型仅考虑其中的一个方向(比如 y 轴)可由电气方程(1)和机械方程(2)来描述。

$$u_y = R_y i_y + L_{dy} \frac{di_y}{dt} + k_{iy} \frac{dy}{dt} \quad (1)$$

$$k_{iy} i_y + k_{sy} y = m \frac{d^2 y}{dt^2} + F_{ey} \quad (2)$$

方程(1)描述线圈电压，电流以及轴位移之间的关系，而方程(2)描述电磁轴承 y 轴方向上的电磁力，转子重力，位移和转子质量之间的关系。式中： u_y —线圈电压； i_y —线圈电流； k_{iy} — y 方向线圈电流刚度系数； k_{sy} — y 方向位移刚度系数； R_y —线圈电阻； L_{dy} —线圈动态电感；主动电磁轴承的转轴在 x 轴和 y 轴方向的位移可以表示为关于控制电流和外力的函数，通过拉普拉斯变换可以表示为：

$$\begin{bmatrix} x(s) \\ y(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{k_{ix}}{ms^2 - k_{xx}} & 0 \\ 0 & \frac{k_{iy}}{ms^2 - k_{yy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_x(s) \\ i_y(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{ms^2 - k_{xx}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{ms^2 - k_{yy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{ext}(s) \\ F_{ey}(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

主动电磁轴承控制系统如图 2 所示，此框图结构是在 y 轴方向的一路控制回路，主要由 4 部分组成：**AMB 控制器**，功率放大器，传感器，**AMB**。**AMB 控制器**的 PID 和 PI 分别控制位移和电流的稳定。功率放大器为系统的执行机构，通过控制电流来稳定轴承线圈的电流和转子的位置^[2,3]。其中 PID 控制器通过控制电流来控制转子位移：

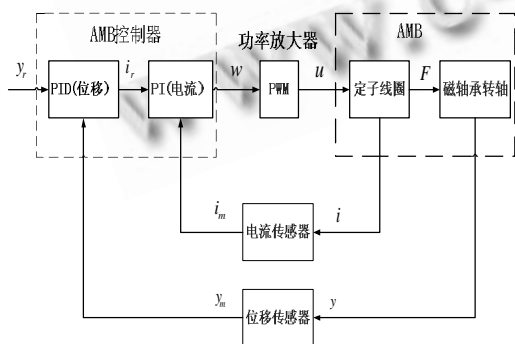


图 2 控制系统结构

$$i(s) = G_{PID}(s)e(s) = K_p \left(1 + T_D s + \frac{1}{T_I s} \right) e(s) \quad (4)$$

(4)式 $e(s)$ 为位移差值输入， $G_{PID}(s)$ 为 PID 控制器传递函数， i_r 为控制电流输出。PID 系数的整定通过根轨迹法求得。

2 基于FPGA的控制系统

电磁轴承控制系统的框图如图 3 所示，其中本文采用的 FPGA 为 ALTERA 公司 CYCLONE 系列的 EP1C4F324C6，FPGA 的输入数据包括：经 14 位 A/D 转换器的反馈信号，clk 时钟信号(50MHZ)，nwrst 复位信号，定子转子间距设定值，PID 控制器各参数(由上位机设定)。FPGA 的输出为四个全桥电路的输入触发信号。开关频率为 10k 到 20k 之间。系统的电路的直流电压为 10V-30V 之间，输出电流不超过 5A。

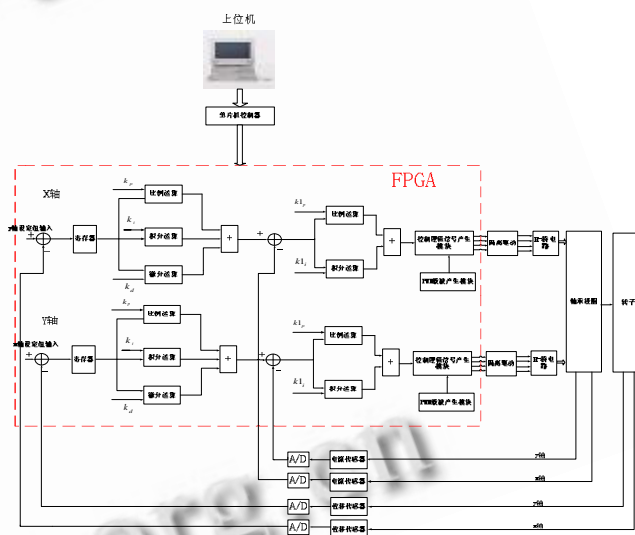


图 3 系统简图

系统的主要模块包括：PID 模块，PI 模块，控制逻辑信号产生模块，PWM 载波产生模块，单片机，工控机，隔离驱动(光电隔离)，MOSFET(全桥电路)，A/D 转换器，传感器等。其中前四个模块是在 FPGA 中实现。

2.1 PID 控制

控制器是整个电磁轴承系统的控制核心，其性能决定了系统的静态、动态性能的好坏，电磁轴承系统控制器一般分为数字控制器和模拟控制器。由于数字控制器易于实现各种复杂算法和比较高的动态性能，所以数字控制器是逐渐取代模拟控制器。近年来，随着电子业的飞速发展，一些复杂的算法可以在数字芯片(DSP 或 FPGA)内实现，比如模糊控制，神经网络，遗传算法等。本文采用双闭环控制，其中外环为 PID 控制，主要控制

转子的位移，而内环为 PI 控制，稳定线圈电流。PID 控制看似简单，但实际上关于调节比例、微分、积分环节的最优参数却是永无止境的。本系统中的整定好的参数由上位机通过单片机输入到 FPGA。

在 FPGA 中实现 PID 控制器，PID 控制器主要包括三个运算单元：比例运算、积分运算、微分运算。把 PID 算法转化为数字形式可以表示为[4]：

$$u(n) = K_p e(n) + K_i \sum e(n) + K_d [e(n) - e(n-1)] \quad (5)$$

(5)中 $u(n)$ 为时刻 PID 的输出， $e(n)$ 为误差信号（反馈信号和设定信号的差值）， k_p 为比例系数， k_i 为积分系数， k_d 为微分系数。各个系数以及输入数据均用浮点数表示，以提高系统性能。三个运算单元均用 VerilogHDL 描述完成，分别用一个寄存器来寄存运算结果。

2.2 三电平 PWM 功率放大器原理

PWM 功率放大器分为：两电平功率放大器和三电平功率放大器，其中两电平功率放大器是功率放大器的输出为 +U 或者 -U（U 为全桥电路供电电压），电流纹波振幅为：

$$\Delta i = \frac{UT_s}{2L} \quad (6)$$

其中 U 为直流电压， T_s 为开关周期，从方程(6)我们可以看出电流纹波振幅正比于直流电压而反比于开关频率。如果通过提高直流电压来得到一个陡峭的电流上升沿，那么就需要提高开关频率以降低纹波，从而提高了系统的开关功率，而这种情况在三电平开关功放中得到很好的解决[5]。三电平功率放大器的输出电压包括三种状态：+U，-U 和 0，其电流纹波的振幅为：

$$\Delta i = (I + \frac{2U_{om}}{R}) \frac{(1 - \exp(-\frac{T_s}{2t}))}{(1 + \exp(-\frac{T_s}{2t}))} \quad (7)$$

其中 I 为系统工作时线圈电流， U_{om} 为开关器件电势差， $t = L/R$ ，从方程(7)可以看出通过提高桥电路的直流电压来提高系统电流性能，而开关频率相对得到降低，从而降低了开关功率，因此本设计采用三电平开关功率放大器。

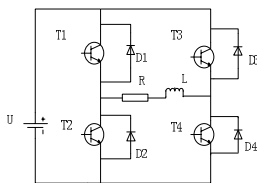


图 4 H-桥电路

三电平功率放大器的全桥电路如图 4 所示，R 和 L 分别表示线圈的电阻和电感，四只三极管 T1、T2、T3 和 T4 分别通过隔离驱动与 FPGA 的控制输出相连。FPGA 通过控制四个三极管的通断使线圈电流处于三种状态：充电状态，放电状态和续流状态。在充电状态下，T1 和 T4 导通，通过解微分方程得线圈电流为：

$$i(t) = \frac{U - 2V_m}{R_m} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (8)$$

式中 V_m 为三极管正向导通压降， I_0 为初始电流， τ 为线圈时间常数。由于 t 远远大于开关周期，所以电流快速上升。而在放电状态下，T2 和 T3 导通，线圈电流为：

$$i(t) = -\frac{U + 2V_D}{R_m} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

式中 V_D 为二极管正向导通压降，线圈向电源回馈能量，电流快速减少。

第三种状态续流状态下，T1 导通，T1 和 D3 构成回路，此时线圈电流为：

$$i(t) = -\frac{V_m + V_D}{R_m} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

在这种情况下电流以的速度缓慢下降。在电磁轴承系统中由于转子大部分时间能够在线圈的中心旋转，只有转子位置或线圈电流超出或低于一定的范围，线圈才处于充电和放电状态，而大部分时间处于续流状态，因而大大减小了开关频率。

2.3 三电平 PWM 功率放大器设计

数字功率放大器模块主要包括两部分：PWM 载波产生模块和控制逻辑产生模块。PWM 载波产生模块主要产生三角波，其设计原理为：在 FPGA 中设置一个寄存器和一个计数器，计数器包括使能和清零信号输入，在使能信号为真时，计算器向上计数，当计数器的计数值达到一个设定值(N)时，计数器开始向下计数，当计数器值为零时，计数器再次向上计数，依次循环，通过一个寄存器输出，即可得到一个最大值为 N 的三角波。控制逻辑产生模块的控制策略为：

1)设在时刻三角波的输出为 $n(t)$ ，PID 模块的输出为 $e(t)$ ，控制逻辑产生模块输出为 Q1、Q2、Q3、Q4。

2)当 $e(t) \geq 0$ 时，电磁线圈为续流状态或充电状态， $e(t) > n(t)$ ，线圈处于充电状态， $e(t) \leq n(t)$ ，线圈处于

续流状态。

3)当时 $e(t) < 0$ 时,电磁线圈为续流状态或放电状态, $|e(t)| > n(t)$, 线圈处于放电状态, $|e(t)| \leq n(t)$, 线圈处于续流状态。

4)在三种状态下,控制逻辑产生模块的输出如表 1 所示。其中在续流状态下, Q1、Q2、Q3、Q4 的输出有多种组合,本文中输出分别为 1、0、1、0。

表 1 控制逻辑模块的输出

控制逻辑 电磁线圈	Q1	Q2	Q3	Q4
充电状态	1	0	0	1
放电状态	0	1	1	0
续流状态	1	0	0/1	0

3 仿真结果及其分析

如图 5 所示,系统的控制模块均在 QUARTUS - II7.2 软件平台下设计,分为 2 大设计部分:位移闭环控制设计和电流闭环控制设计。资源消耗如图 6 所示,整个控制部分的实现仅消耗 1000 多逻辑单元,剩余资源可以增加更多控制环节来优化设计。在仿真中,由于电磁轴承的转子和定子之间的空隙为 1mm,所以 y 的范围为: 0mm-1mm。而电流范围为: 0A-5A;

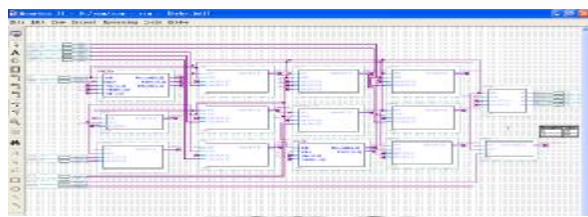


图 5 控制系统顶层模块在 QUARTUS II 平台下的实现

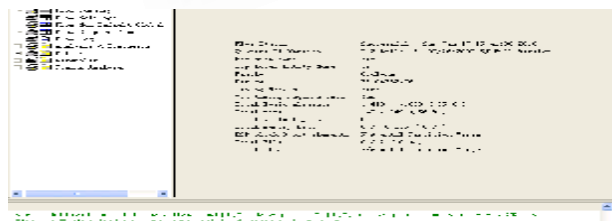


图 6 逻辑资源利用

仿真波形图如图 7 所示,当输入位移值 move 从低

于设定值 M 逐渐增加到超出 M 时,可以从 q1、q2、q3、q4 的状态看出,系统大部分时间处于续流状态 (q1q2q3q4=1010),只有在位移远离设定值时才会出现充电、放电状态,从而大大减少了开关频率,降低系统功率。在 move 值远低于设定值时, q1q2q3q4=1001,系统进入充电状态。在 move 值远高于设定值时, q1q2q3q4=0110,系统进入放状态。从实时性上考虑, FPGA 为硬件编程,时钟频率可以达几百兆赫兹,并且并行处理,从反馈信号输入到控制信号输出,时间延迟只有几百纳秒,实时性和动态性能非常好。



图 7 QUARTUS II 仿真波形图

4 结束语

本文研究了电磁轴承的双闭环控制系统,然后提出了基于 FPGA 的设计,对控制系统的各个模块进行了原理性分析和设计,并且在设计中引入 PID 控制等算法,提高了系统的动态性能。在此基础上,本设计还有待进一步完善,可以引入一些复杂控制算法,如模糊控制、遗传算法等等,对于这些算法 FPGA 实现还需进一步深入研究。

参考文献

- 1 Wajnert D, Zimon J. Control system design active magnetic bearing, 2009.SCE 11 09.2nd International Students Conference on Electrodynamical and Mechatronics. 2009.35-36.
- 2 汪希平,朱礼进,于良等.主动电磁轴承转子系统动力学特性的研究.机械工程学报,2001,37(11):7-12.
- 3 虞烈.可控磁悬浮转子系统.北京:科学出版社,2003.
- 4 苏义鑫,王娟,胡业发.磁悬浮轴承的变参数 PD 控制.仪器与仪表,2002,(12):13-22.
- 5 Monmasson E, Cirstea MN. FPGA design methodology for industrial control systems-A review. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007,54(8):1926-1935.