

# 基于 DSP 的磁悬浮轴承控制系统的研究 \*

施文娟

(盐城师范学院 物理科学与电子技术学院, 江苏 盐城 224002)

**摘要:** 介绍了磁悬浮轴承控制系统的组成、工作原理和数学控制模型以及基于 DSP 的磁轴承数字控制器的总体结构。控制方法上采用了非线性 PID 控制策略。实验结果表明, 将 DSP 用于磁悬浮轴承数字控制效果良好, 对开发数字控制磁轴承系统具有参考和应用价值。

**关键词:** 磁悬浮轴承; 数字控制器; TMS320F6713; 非线性 PID 控制; 控制策略

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)07-0019-03

## Study on magnetic bearing control system based on DSP

Shi Wenjuan

(Department of Physics and Electronics, Yancheng Normal University, Yancheng 224002, China)

**Abstract:** This paper introduces components of magnetic bearing system, the work principle, the mathematics model and the digital control system of magnetic bearing system based on DSP. The nonlinear PID control strategy is adopted. The digital controller can be debugged easily and works steadily and with lower noise and better performance. Experiment result shows that it's good to apply DSP into magnetic bearing control system, and the result plays an important role in the reference and application of the development of the digital control system of magnetic bearing.

**Key words:** magnetic bearing; digital controller; TMS320F6713; nonlinear PID control; control strategy

磁悬浮轴承系统由控制器、转子、电磁线圈、位移传感器和功率放大器组成。本文所设计的磁悬浮实验装置结构图如图 1 所示。其基本工作原理是: 当转轴处于轴套内径中心位置时, 转轴与轴套中的各个电磁铁下的气隙长度相等, 此状态称之为磁悬浮轴承转轴的平衡状态。如果磁悬浮轴承的转轴处于平衡状态并稳定运行时, 转轴上的负载突然有一变化, 原来处于平衡的状态被破坏, 每个电磁铁下的气隙长度也发生了变化, 此时电磁铁下的间隙传感器将立即反映出这一变化, 电磁力控制器将根据这一变化调节各个电磁铁线圈中的电流来改变各个电磁铁的电磁力, 使得转轴回到原来的平衡状态<sup>[1]</sup>。

磁悬浮轴承的控制器是磁悬浮轴承系统的核心, 控制器性能的好坏直接影响到磁悬浮轴承系统的工作特性<sup>[2]</sup>。采用性能优良的控制器可以使磁悬浮轴承动态刚度、阻尼与其工作环境甚至是运行状态相适应。DSP 不仅具有数字控制的所有优点, 而且体积小、抗干扰能力强, 可以对载荷、位移、振动、磁力轴承线圈电流及其运

行实现在线监控, 易于实现良好的人机界面, 能对意外和紧急状况以及安全问题做出及时处理<sup>[3]</sup>。

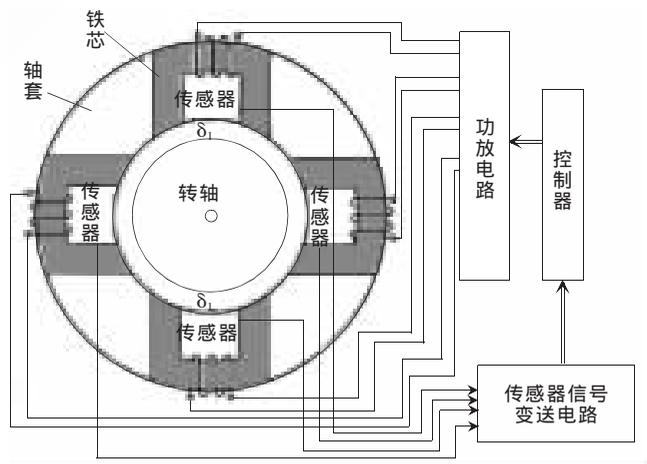


图 1 磁悬浮实验装置结构图

因此, 本文以 TI 公司 DSP 芯片 TMS320F6713 为核心, 以 SIGNETICS 公司的 NE5520 为气隙检测传感器<sup>[4]</sup>, 设计了一种数字控制器, 实现了磁悬浮轴承的稳定悬浮。

\* 基金项目: 江苏教育厅自然科学基金基础研究项目资助(10KJB170012)

## 1 磁悬浮实验装置组成及控制数学模型

磁悬浮实验装置在转轴的上下、左右方向各有两套差动变压器式的间隙检测传感器和电磁铁。实际上,一个处于三维空间上的转子,一共包含6个自由度:沿 $x$ 轴、 $y$ 轴、 $z$ 轴三个方向平动的自由度以及分别绕这三个轴转动的3个转动自由度。其中绕 $z$ 轴的转动 $\Omega$ 由驱动电机控制,磁悬浮轴承控制器控制其余5个自由度:质心在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴方向上的3个平动运动及绕 $x$ 、 $y$ 轴的转动自由度 $\alpha$ 和 $\beta$ 。根据转子动力学理论,对于一个五自由度的磁悬浮轴承系统,通过制造工艺上的特殊处理后,可以认为其轴向子系统与径向子系统之间在一般情况下是没有耦合的,这样就可以将上述五自由度磁悬浮轴承控制系统分解为5个单自由度磁悬浮轴承控制系统。实践证明,对于刚性转子来说,以上方法可以满足系统的性能要求。一个单自由度磁悬浮轴承系统的原理图如图2所示。其中,电磁铁采用电流迭加型,即控制电流 $i_0$ 和偏磁电流 $i$ 共用一个线圈,质量为 $m$ 的转子置于同一水平面的电磁铁I和电磁铁II之间,并只考虑转子在水平方向所承受的外力。

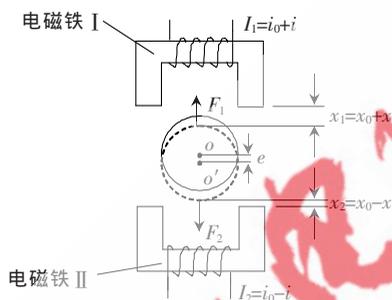


图2 单自由度磁悬浮轴承系统原理图

根据牛顿运动定律,在 $x$ 方向上的力学方程为:

$$m\ddot{x} = k_i i + k_x x \quad (1)$$

式中, $i$ 为偏磁电流; $x$ 为轴承向下偏离平衡位置的间隙长度; $k_x$ 为力-位移刚度系数,其物理意义与一般机械系统中的弹簧刚度系数相同; $k_i$ 为力-电流刚度系数。 $k_x$ 、 $k_i$ 分别为:

$$\begin{cases} k_x = \frac{\partial F}{\partial x} = -\mu_0 S N^2 \frac{i_0^2}{x_0^3} \\ k_i = \frac{\partial F}{\partial i} = \mu_0 S N^2 \frac{i_0}{x_0^2} \end{cases}$$

式中, $S$ 为间隙的横截面积, $N$ 为线圈匝数, $F$ 为定子与转子间的吸引力, $i$ 为转子在平衡位置时线圈中的电流值, $x_0$ 为当转子处于平衡位置时定子与转子的间隙,空气磁导率 $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ 。

根据牛顿定律及拉式变换,以电流 $I(S)$ 作为系统的输入, $X(S)$ 位移作为系统的输出,则单自由度磁悬浮轴承的开环传递函数为:

$$G(S) = \frac{X(S)}{I(S)} = \frac{k_i}{mS^2 - k_x} \quad (2)$$

由式(2)可知,单自由度磁悬浮系统的传递函数有一个一阶极点位于复平面的右半平面。因此,该系统为一个二阶不稳定系统,必须引入控制器并通过闭环控制才能使其稳定。由控制器 $G_c(S)$ 、功率放大器 $G_p(S)$ 、传感器 $G_s(S)$ 、电磁铁以及转子一起构成了磁悬浮轴承闭环系统,其结构框图如图3所示。

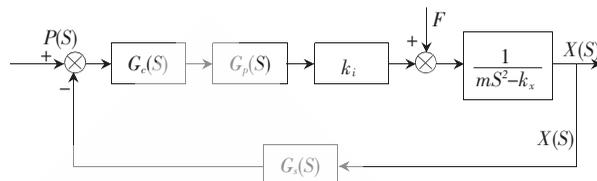


图3 磁悬浮轴承闭环系统结构框图

以转子的给定位置 $P(S)$ 作为系统的输入,转子的实际位置 $X(S)$ 作为输出,得闭环系统的传递函数为:

$$\Phi(S) = \frac{k_i G_c(S) G_p(S)}{mS^2 - k_x + k_i G_c(S) G_p(S) G_s(S)} \quad (3)$$

## 2 磁悬浮轴承控制系统硬件设计

数字信号处理器 TMS320F6713 是一款主频可达 200 MHz 的浮点处理器,其在速度、精度、性能、扩展等方面具有优势,即数字 I/O 口设计、串行通信接口、丰富的指令集等;6 路 12 bit A/D 转换器,可实现同步采样;4 路 12 bit 的 D/A 转换器。所以 TMS320F6713 是磁悬浮平台数字控制器的首选芯片。

单自由度磁轴承控制系统的总体结构示意图如图4所示,由控制器、功率放大电路、磁悬浮轴承、气隙检测传感器组成。

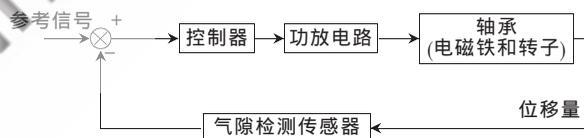


图4 单自由度磁轴承控制系统的总体结构示意图

## 3 控制策略

PID 控制方法的参数确定很方便,结构改变较灵活,易于实现。虽然磁悬浮轴承系统的动态过程还没有完全被掌握,还得不到各种磁悬浮轴承的精确的数学模型,而 PID 控制并不需要精确的数学模型,因而具有灵活性和适应性,而且在自动调节的基础上,还保留人工参与管理的特点。所以 PID 控制仍然是首选的控制策略之一<sup>[5]</sup>。把 PID 控制律改写成 P、I、D 分开形式:

$$u = K_p \varepsilon + K_i \int_0^t \varepsilon dt + K_d \dot{\varepsilon}$$

式中, $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 分别为比例系数、积分系数和微分系数, $\varepsilon$ 为偏差。

非线性 PID 控制器的示意图如图5所示。其控制原理为:由参考输入 $r(t)$ 和系统输入 $y(t)$ 经过处理所得误

差  $\varepsilon$ 、误差积分  $\int \varepsilon$  和误差微分  $\dot{\varepsilon}$  的非线性组合来产生控制信号  $u(t)$ ，利用非线性特性改善稳态偏差及暂态过程。 $\varepsilon$ 、 $\int \varepsilon$ 、 $\dot{\varepsilon}$  可表示为：

$$\begin{cases} \varepsilon = y(t) - r(t) \\ \dot{\varepsilon} = \frac{d}{dt}(y(t) - r(t)) \\ \int_0^t \varepsilon dt = \int_0^t (y(t) - r(t)) dt \end{cases}$$

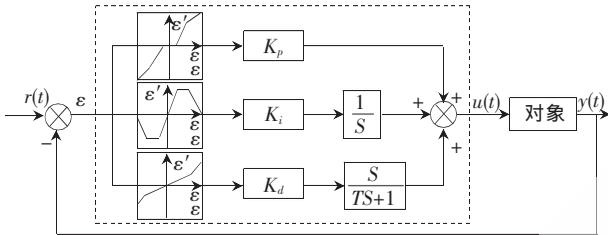


图5 非线性PID控制器结构框图

本文所设计的非线性函数在控制运行的时候能动态地调整  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$  的大小，既利用了原有的经验基础，又克服了传统PID的局限。其原理如图5所示，即通过对P、I、D三项的非线性组合来组成非线性PID控制器，具体来说就是根据误差  $\varepsilon$  的大小来调整  $K_p$ 、 $K_i$  和  $K_d$ 。分析如下：

(1)  $K_p$  主要影响系统的响应速度。增大比例系数，可提高系统的响应速度。但在接近稳态区域时，如果比例系数过大，将会导致过大的超调，甚至可能带来系统的不稳定。

(2)  $K_i$  主要影响系统的稳态精度。积分作用的引入，能消除静差，提高系统的无差度<sup>[5]</sup>。但在系统响应过程的初期，一般偏差比较大，如果积分系数选取不适当，就可能使系统响应过程引起积分饱和现象。

(3)  $K_d$  主要影响系统误差变化速率。在系统响应过程中，当误差向某个方向变化时起制动作用，提前预报误差的变化方向，能有效地减小超调<sup>[5]</sup>。

#### 4 实验结果

对磁悬浮轴承控制系统做了实验，实验参数如下：转子质量  $m=2.69$  kg，线圈匝数  $N=1500$  匝，气隙长度为  $0.5$  mm，磁极截面积  $S=100$  mm<sup>2</sup>，对应位移刚度系数  $K_1=$

$2.03572 \times 10^5$  N/m，电流刚度系数  $K_2=339.3$  N/A。通过Matlab软件将采集数据进行仿真处理，磁轴承从开始运行到处于稳定状态，其位移信号如图6所示。图6中纵坐标表示的是磁轴承的位移量通过差动变压器信号变送专用芯片NE5520检测到的输出电压信号，横坐标表示的是通过数据采集卡PC-7483采集的数据个数，共1000个。

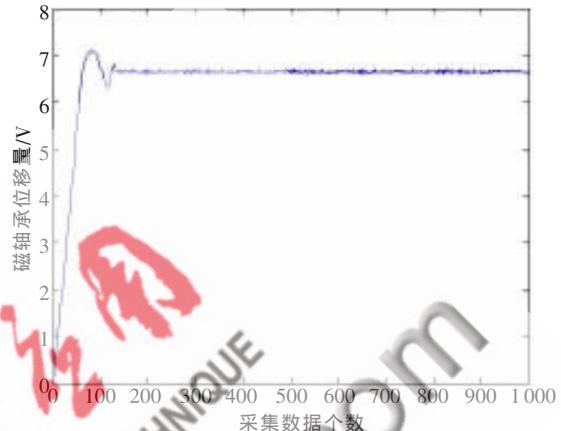


图6 单自由度磁悬浮轴承仿真转子位移曲线图

本系统基于TMS320F6713设计的磁悬浮轴承数字控制器，简化了硬件设计，提高了系统的可靠性，控制效果较好，并具有较好的鲁棒性。该磁悬浮平台控制系统的研究为进一步探索磁悬浮控制技术打下了良好的基础。参考文献

- [1] 张茂青,林红.磁悬浮轴承连续式模糊控制系统[J].仪表技术与传感器,2002(12):13-14.
- [2] 吕冬明,徐春广,郝娟.磁悬浮系统模糊PID控制器设计[J].机床与液压,2009,32(2):83-85.
- [3] 吴华春,胡业发,周祖德.磁悬浮主轴DSP控制系统的研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(6):39-42.
- [4] 张茂青,章建民.差动变压器专用芯片NE5520的原理与应用[J].电测与仪表,1997(5):41-43.
- [5] 陶永华,尹怡欣.新型PID控制及其应用[M].北京:机械工业出版社,1998.

(收稿日期:2010-12-02)

#### 作者简介:

施文娟,女,1981年生,硕士,讲师,主要研究方向:嵌入式系统设计。