

## 陀螺仪有源磁悬浮控制系统的设计与实现

韩剑辉<sup>1,2</sup>, 许镇琳<sup>1</sup>, 赵承利<sup>2</sup>

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072; 2. 天津航海仪器研究所, 天津 300131)

**摘要:** 为克服液浮陀螺仪在动态工作情况下精度的不确定性, 提高陀螺仪的动态性能和稳定性, 设计了一种有源磁悬浮数字控制系统。该系统利用相关解调技术解算反馈控制数据, 实现液浮陀螺仪浮子在三维空间中快速精确确定。实验证明, 该方案设计先进可行, 采用有源磁悬浮系统的液浮陀螺仪 24 h 随机漂移为  $0.0006^\circ/\text{h}$ 。

**关键词:** 有源磁悬浮; 闭环; 数字信号处理器 (DSP); 陀螺仪

**中图分类号:** V241.5<sup>+</sup>.52      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0493-2137(2008)08-0937-04

## Design for Control System of Active Magnetic Suspension Used in Gyroscope

HAN Jian-hui<sup>1,2</sup>, XU Zhen-lin<sup>1</sup>, ZHAO Cheng-li<sup>2</sup>

(1.School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2.Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin 300131, China)

**Abstract:** In order to overcome the uncertainty of floated gyroscope in the dynamic condition, and upgrade the dynamic performance and stability of gyroscope, a control system of digital active magnetic suspension was designed. In the system, a method of digital demodulation based on phase coherence was used to calculate the feedback data, then the float of floated gyroscope was positioned in the center precisely and quickly. Testing results show that the design is feasible, and 24 h random drift of floated gyroscope with active magnetic suspension is  $0.0006^\circ/\text{h}$ .

**Keywords:** active magnetic suspension; closed-loop; digital signal processor (DSP); gyroscope

应用磁悬浮技术对液浮陀螺仪浮子进行有效控制, 可以使陀螺仪浮子与壳体之间无机械接触、无机械摩擦, 把浮子上的干扰力矩减至最低程度。磁悬浮技术是高精度液浮陀螺仪设计中的关键技术。国内在 20 世纪 70 年代已开展这方面的研究, 由于受电子元器件及体积功耗等方面的影响, 研究主要侧重于无源磁悬浮系统。近年来, 随着电子技术的发展, 针对无源磁悬浮系统刚度低、定中精度不高等缺点, 开展了数字式有源磁悬浮系统<sup>[1-4]</sup>的研究工作。

笔者提出的有源磁悬浮系统利用位置敏感元件对陀螺浮子位置的弱信号进行检测, 使用数字信号处理器 (digital signal processor, DSP) 解算捕捉到的浮子位移信息, 并以相应的方式控制回路的工作状态,

提高了系统刚度, 实现了陀螺仪浮子在陀螺壳体内精确定中。

### 1 磁悬浮基本原理

磁悬浮的工作原理是在磁场力的作用下, 使仪表浮子沿着仪表壳体的某一个轴或几个轴保持一定的位置。这种方式下的悬浮是静不定的。要使其稳定可以通过 2 种方法达到: 一是按一定时间间隔敏感浮子位置的变化, 通过伺服作用, 以足够的磁场力控制浮子速度的变化, 从而把浮子的位置控制在允许的变化范围内; 二是调整磁悬浮元件本身激磁电路的参数使其达到受控的目的。受伺服系统控制的磁悬浮叫做

收稿日期: 2007-09-13; 修回日期: 2008-05-05.

作者简介: 韩剑辉 (1966—), 男, 博士研究生, hanjianhui1004@yahoo.com.cn.

通讯作者: 许镇琳, zlxu@eyou.com.

有源磁悬浮系统,而调整元件激磁电路参数得到的悬浮叫做无源磁悬浮系统。

当浮子受扰动,沿一坐标轴偏离中心位置时,一侧气隙变窄,磁通减小;另一侧气隙变大,磁通增加。此时沿某一坐标轴作用在悬浮元件上的瞬时净恢复力  $F_r$  可用解析式<sup>[5]</sup>表示为

$$F_r = -(F_2 - F_1) = -\left(\frac{2\Phi_2^2}{2\mu A} - \frac{2\Phi_1^2}{2\mu A}\right) = -\frac{N^2\mu A}{4g_0^2} \left[ \frac{i_2^2}{\left(1 + \frac{x}{g_0}\right)^2} - \frac{i_1^2}{\left(1 - \frac{x}{g_0}\right)^2} \right] \quad (1)$$

式中:  $g_0$  为悬浮定中时的额定气隙;  $x$  为浮子的位移;  $N$  为线圈匝数;  $i_2$  和  $i_1$  分别为两边线圈的电流;  $\Phi_2$  和  $\Phi_1$  分别为两边气隙中的磁通量;  $A$  为气隙横截面积;  $\mu$  为气隙磁导率。

系统受扰动的动态过程取决于悬浮系统的作用力、浮子质量、液体的阻尼作用等因素,其动态微分方程可表示为

$$m\ddot{x} + B\dot{x} = F_d - F_r \quad (2)$$

式中:  $F_d$  为外干扰力;  $m$  为浮子质量;  $B$  为浮液阻尼系数;  $F_r$  是悬浮工作电流和浮子位移的函数,通常是非线性的。在小位移时  $F_r$  可近似表示为

$$F_r = K_I I_c + K_x x \quad (3)$$

式中:  $K_I$  为电流量系数;  $K_x$  为等效刚度系数;  $I_c$  为悬浮工作电流。

在系统受到某个方向扰动时,浮子沿该方向产生位移,浮子上力的平衡状态被破坏,结果产生与浮子移动方向相反的作用力,使浮子回到中心位置。图 1 为不考虑信号的超前-滞后关系、简化后的反馈控制图,图中  $K$  为回路放大系数,  $F_f$  和  $F_x$  分别为反馈电流和位移所产生的力。

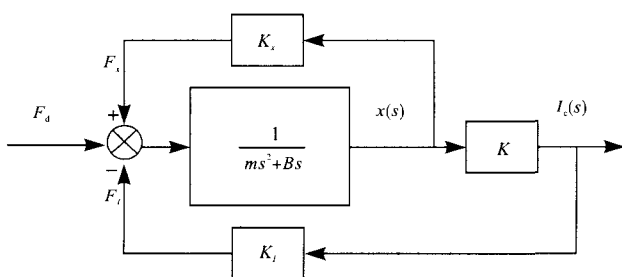


图 1 数字式有源磁悬浮系统控制示意

Fig.1 Control diagram of digital active magnetic suspension system

## 2 数字式有源磁悬浮控制系统

### 2.1 有源数字控制系统的特点

无源悬浮控制回路与有源悬浮控制回路各有其特点。无源悬浮结构简单,体积小,成本低,但恢复力和刚度较小。而有源悬浮的刚度与恢复力大大增加,系统功耗低,同时用数字检测方法取代模拟检测方法克服了模拟电路无法解决的偏置漂移问题,提高了系统的精度。而随着数字技术的飞速发展,有源回路的体积和重量也逐步得到解决。

### 2.2 有源控制系统的组成与结构

和传统的模拟控制回路相似,数字控制回路的表体部分也是由 1 对电阻元件与 1 对线圈构成检测桥路,桥路信号经高灵敏度的差分式前放检测出浮子的位移信号,供系统采集处理。

为适应磁悬浮实时控制的要求,有源磁悬浮的数字控制器由 A/D、数字信号处理器和 D/A 组成。DSP 选用美国德州仪器公司生产的定点数字处理器,具有硬件乘法器,指令周期短,可实时完成信号解调和反馈控制。图 2 为数字式有源磁悬浮控制系统的结构组成。

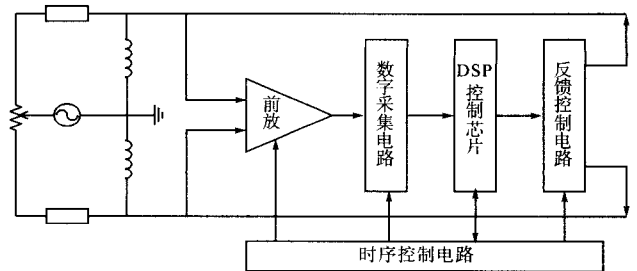


图 2 数字式有源磁悬浮系统结构示意图

Fig.2 Structure of digital active magnetic suspension system

## 3 有源磁悬浮系统控制软件

控制软件包括系统初始化、信号采集处理、控制算法等几个部分。软件使用基于 DSP 芯片的汇编语言<sup>[6]</sup>编写,执行效率高,满足控制系统的实时性要求。笔者按照斯考贝图劳悬浮时间分配系统<sup>[7]</sup>的工作方式,设计了以 DSP 芯片为核心的数字智能控制算法,如图 3 所示。该算法根据系统误差量的不同范围调节控制器参数,使控制过程一直处于最优状态。

### 3.1 信号采集处理

磁悬浮系统的一个控制周期包括 3 个时段,采样

时间  $t_s$ 、加力时间  $t_f$  和等待时间  $t_w$ ，一个控制周期的采样时间段内可进行  $n$  次采样。系统同时采集浮子位置信号和激磁信号，采样值分别存入数组  $y(n)$ 、 $r(n)$  中。由于系统噪声较大，采用相关检测技术提取位置信号<sup>[8]</sup>。

$$e(n) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} y(j)r(j-m) \quad (4)$$

式中： $e(n)$  为本次控制周期的误差量信号； $m$  为相关信号的延时。

### 3.2 控制算法

依据浮子在壳体中的位置将控制器工作范围划分为 3 个区段：①浮子远离中心位置；②浮子接近中心位置；③浮子已进入中心区域。系统的误差值  $e(n)$  取值范围在  $\pm 2000$  之间， $u(n)$  为当前控制器输出量，控制方式描述如下，控制软件流程见图 3。

(1)  $|e(n)| > 1300$  时，直接输出系统限定<sup>[9]</sup>的最大控制量  $u_{max}$ ， $u(n) = u_{max}$ ；控制周期为 16 ms，其中  $t_s = 1$  ms， $t_f = 14$  ms， $t_w = 1$  ms。

(2)  $1300 \geq |e(n)| > 200$  时，控制量的输出

$$u(n) = k'u(n-1) + \sum_{j=0}^2 k(j)e(n-j) \quad (5)$$

式中： $e(n)$ 、 $e(n-1)$  和  $e(n-2)$  分别表示第  $n$  次、第  $n-1$  次和第  $n-2$  次的浮子位置误差； $k' = 0.31$ 、 $k(0) = 2.87$ 、 $k(1) = 0.81$ 、 $k(2) = 0.2$  为一组实验确定的控制器参数。

控制周期为 11 ms，其中  $t_s = 2$  ms， $t_f = 8$  ms， $t_w = 1$  ms。

(3)  $|e(n)| \leq 200$  时，控制量的输出

$$u(n) = q'u(n-1) + \sum_{j=0}^2 q(j)e(n-j) \quad (6)$$

式中： $q' = 0.56$ 、 $q(0) = 0.92$ 、 $q(1) = 0.65$ 、 $q(2) = 0.43$  为一组实验确定的控制器参数。

控制周期为 8 ms，其中  $t_s = 2$  ms， $t_f = 3$  ms， $t_w = 3$  ms。

控制量  $u_{max}$  决定系统最大刚度，数值不宜过大，小于 40 mA；控制周期长短影响陀螺精度，取值范围为 3~25 ms。对不同陀螺在一定取值范围内通过分组实验确定各控制参数<sup>[10]</sup>。

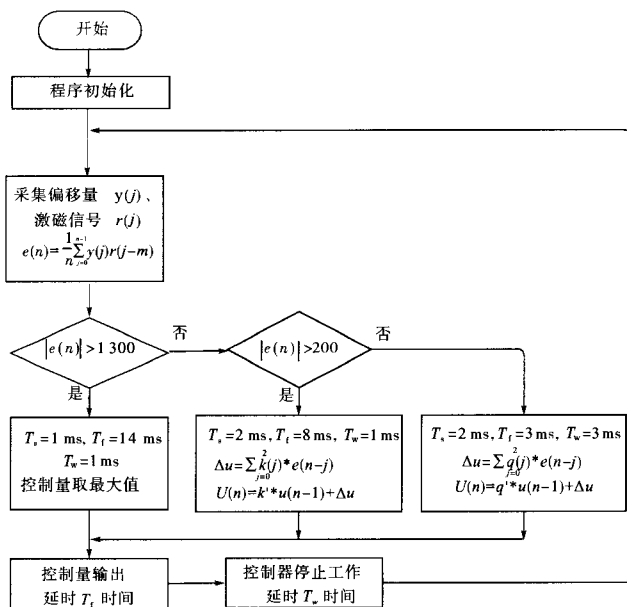


图 3 控制软件流程

Fig.3 Flow chart of controlling software

## 4 系统实验数据

把数字式有源磁悬浮系统与液浮陀螺仪相连在陀螺测试台上，依据速率积分陀螺测试规范进行测试。从表 1 和表 2 的数据可以看出，采用该控制系统时，水平姿态测漂 7 次均值为 0.000 60 °/h，方位姿态测漂 7 次均值为 0.001 29 °/h。而采用无源磁悬浮系统，该陀螺仪水平姿态 7 次测漂均值为 0.001 43 °/h，方位姿态 7 次测漂均值为 0.002 16 °/h。

表 1 陀螺仪水平姿态 24 h 有源和无源随机漂移对照

Tab.1 Comparison of 24 h horizontal random drift data between active and passive suspensions of gyroscope (°/h)

种类	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	均值
无源	0.001 2	0.001 8	0.001 4	0.001 1	0.001 7	0.001 5	0.001 3	0.001 43
有源	0.000 51	0.000 79	0.000 54	0.000 46	0.000 82	0.000 49	0.000 57	0.000 60

表 2 陀螺仪方位状态 24 h 有源和无源随机漂移对照

Tab.2 Comparison of 24 h azimuthal random drift data between active and passive suspensions of gyroscope (°/h)

种类	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	第 6 次	第 7 次	均值
无源	0.002 2	0.002 4	0.002 1	0.002 0	0.002 3	0.002 1	0.002 0	0.002 16
有源	0.001 0	0.001 5	0.001 4	0.001 1	0.001 5	0.001 3	0.001 2	0.001 29

图 4 为陀螺仪采用有源磁悬浮控制系统水平姿态 24 h 随机漂移曲线. 水平轴为测试时间(每分钟 1 个点), 垂直轴为陀螺仪力矩器反馈电流. 从图中可以看出陀螺仪输出稳定性良好.

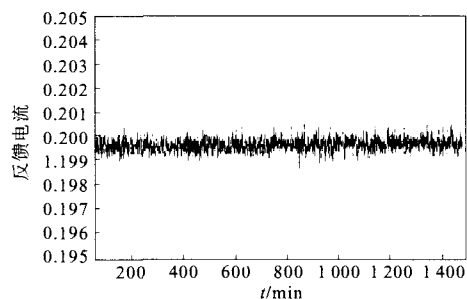


图 4 陀螺仪采用有源磁悬浮控制系统 24 h 随机漂移曲线  
Fig.4 Twenty-four hours' random drift curve of gyroscope with control system of active magnetic suspension

## 5 结 语

采用数字式有源磁悬浮控制方案时陀螺仪各项指标均达到设计要求, 与采用无源磁悬浮系统相比, 各项性能指标大幅度提高. 数字式有源磁悬浮系统具有刚度大、定中精度高、竖立时间短等优点, 当浮子处于定中状态时, 系统工作电流很小或趋于零, 近似地实现了零功率控制. 测试数据表明, 采用该方案时陀螺的精度与长期稳定性明显提高. 同时, 该系统结构简单, 系统参数调整方便, 可以应用于多种陀螺的支承系统中, 便于批量生产.

### 参考文献:

- [1] Jayawant B V, Dawson B E, Whorlow R J. Digitally controlled transducerless magnetic suspension system [J]. *IEE Proc Sci Meas Technol*, 1996, 143(1): 47-51
- [2] Fang Zifan, Deng Zhaoxiang, Lu Haifeng. A tunable fuzzy logic controller for the vehicle semi-active suspension system [J]. *Journal of Chongqing University: English Edition*, 2002, 1(2): 16-19.
- [3] Cao Jiangtao, Liu Honghai, Li Ping. A study of electric vehicle suspension control system based on an improved half-vehicle model [J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2007, 4(3): 236-242.
- [4] Liu Shaojun, Huang Zhonghua, Chen Yizhang. Automobile active suspension system with fuzzy control [J]. *Journal of Central South University Technology*, 2004, 11(2): 206-209.
- [5] 赵丙权, 谷云彪, 凌林本, 等. 数字式有源磁悬浮技术 [J]. *中国惯性技术学报*, 2005, 13(2): 66-69.  
Zhao Bingquan, Gu Yunbiao, Ling Linben, et al. Digital active magnetic suspension [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2005, 13(2): 66-69 (in Chinese).
- [6] Texas Instruments. TMS320C1x/C2x/C2xx/C5x Assembly Language User's Guide [EB/OL]. <http://www.ti.com>. 2005.
- [7] 弗雷泽 R H. 磁悬浮与电悬浮 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.  
Frazer R H. *Magnetic and Electric Suspensions* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982 (in Chinese).
- [8] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.  
Hu Guangshu. *Digital Signal Processing—Theory, Algorithm and Realization* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998 (in Chinese).
- [9] 王永彤, 孙书祺, 王 巍. 有源磁悬浮控制回路和三浮陀螺的匹配研究 [J]. *导航与控制*, 2003, 2(2): 40-44.  
Wang Yongtong, Sun Shuqi, Wang Wei. Research of control circuits of active magnetic suspension matched with three-floated gyro [J]. *Navigation and Control*, 2003, 2(2): 40-44 (in Chinese).
- [10] Shi Jian, Yan Guozheng, Li Lichuan. Research of dynamic model's building of active magnetic suspension systems [J]. *Journal of Donghua University: English Edition*, 2006, 23(3): 131-135.