

# 一种基于 DSP 的磁悬浮控制力矩陀螺框架伺服系统

张 峰, 房建成

(北京航空航天大学, 北京 100083)

**摘 要:** 针对磁悬浮控制力矩陀螺框架系统的高精度控制问题, 提出了基于 DSP2812 的数字控制方案, 设计了 PID 三环控制器, 并采用速度前馈和加速度前馈控制, 提高了系统的带宽。实验表明, 该控制力矩陀螺框架系统达到了很高的控制精度和较快的响应速度。

**关键词:** 控制力矩陀螺; 框架伺服; 前馈控制; DSP2812; 直流力矩电动机

## A MSCMG's Gimbal Servo System Based on DSP

ZHANG Feng, FANG Jian-cheng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** A digital control method based on DSP controller is presented in this paper, which solves MSCMG's high precision gimbal control problem. 3 closed-loop controller using PID is designed, and feedforward controller is adopted to increase the bandwidth of the system. Experiment shows that MSCMG's gimbal based on this method accomplishes a high velocity precision and a quick responding velocity.

**KEY WORDS:** Control moment gyro; Gimbal servo; Feedforward control; DSP2812; DC torque motor

## 0 引 言

磁悬浮控制力矩陀螺是空间站长期运行航天器的关键执行机构, 与机械轴承支撑相比, 电磁轴承本身所具有的无磨损、寿命长、功耗低、振动小、无需润滑和可主动控制等众多优点, 更适合航天技术的高要求<sup>[1-2]</sup>。从控制力矩陀螺输出的陀螺力矩表达式  $H = M \times \omega$  看, 陀螺力矩的精度由转子的角动量和框架角速率两方面决定。然而转子的转速固定在 20 000 r/min, 转子角动量值很大, 对框架角速率的要求高, 所以本系统明确提出了框架角速率和系统带宽两个指标。系统采用了高精度的光电码盘作为角位置传感器, 并以 DSP 作为数字硬件控制核心, 设计了 PID 三环控制器<sup>[3]</sup>, 以最外层的位置环确保了高精度的框架角速率, 并且采用速度前馈和加速度前馈控制方法拓展了系统带宽<sup>[4]</sup>。经过大量的实验表明, 框架角速率达到了很高的精度, 系统也满足了设计的带宽要求。

## 1 框架系统建模

控制力矩陀螺系统指标如表 1。

表 1 控制力矩陀螺系统指标

| 物理量   | 性能指标            |
|-------|-----------------|
| 转子转速  | 20 000 r/min    |
| 转子角动量 | 200 N·ms        |
| 框架角速率 | 0.01°/s ~ 10°/s |
| 系统带宽  | 3 Hz            |

本文提出的控制方法均以磁悬浮控制力矩陀螺框架系统为控制对象, 该框架系统的电机为直流力矩电机, 直流电机的工作特性好, 数学模型较简单, 所采用的位置传感器为光电码盘传感器, 该传感器 18 000 线刻分, 后经 1 024 细分, 最小的角度分辨率可以达到 0.00002°。不考虑系统的机械谐振模态, 系统动态可以描述如下:

$$R_a i + L_a \frac{di}{dt} + K_e \theta_m = u_m$$

$$J_m \theta_m + B_m \dot{\theta}_m = T_m - T_d$$

$$T_m = K_t i$$

式中,  $R_a$  为电枢电阻,  $L_a$  为电枢电感,  $K_e$  为反电

动势系数,  $\theta_m$  为电机转角,  $J_m$  为电机和负载转动惯量,  $B_m$  为粘性阻尼系数,  $T_m$  为电机输出力矩,  $K_t$  为电磁转矩系数,  $T_d$  为摩擦力矩, 磁轴承对框架的干扰力矩和外部干扰力矩等。图 1 为不考虑机械模态时机械伺服系统框图。

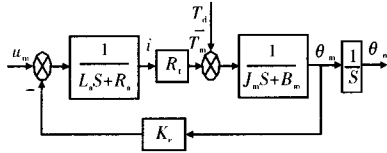


图 1 机械伺服系统框图

在采用电流型功放的前提下, 电机对象的输入为电流, 输出为框架角速率, 则对象的传递函数可以表示为:

$$G(S) = \frac{1}{J_m S + B_m}$$

## 2 框架控制系统

### 2.1 硬件结构

控制力矩陀螺框架系统采用基于 DSP2812 的数字控制方案, 硬件控制系统总框图如图 2 所示, 整个控制系统可以分为上位机和下位机两大部分。下位机按功能又可分为 5 个部分: (1) DSP2812 作为控制核心, 主要进行各种控制方法的计算, 并利用片内 A/D 转换电路完成对绕组电流的采样, 此外协调各个外设间的工作; (2) 采样电路中, 电流互感器串连在电机绕组中, 而不是放在电源总线上, 这样就可以减小电流采样非线性带来的影响, 电流互感器的输出电压信号再由 DSP 内部 A/D 电路转换成数字量; (3) 框架角位置传感器则采用高分辨率光电码盘, 该光电码盘 18 000 刻线, 并经过 1 024 细分, 角度分辨率可以达到 0.00002 度, 光电码盘的输出脉冲信号由 Heidenhain 公司的 IK410V 完成解码, 通过 16 位数据总线与 DSP 相连, 框架角速率的反馈信号则采用位置信号的差分信号; (4) 电机驱动电路采用高集成芯片 L6203, 其驱动电路由 DSP 生成的 PWM 信号经光耦后给出; (5) 系统还扩展了 256 k × 16 的大容量片外 RAM, 可以存储电流、位置、速率等信息, 为系统的辨识提供有用的数据。

速率信号的控制命令由上位机给出, 上位机与下位机间通过串口进行通信, 通信波特率采用 115 200。此外, 系统的测试功能也主要由上位机完成,

测试内容包括速率精度、速率平稳度和系统带宽等。

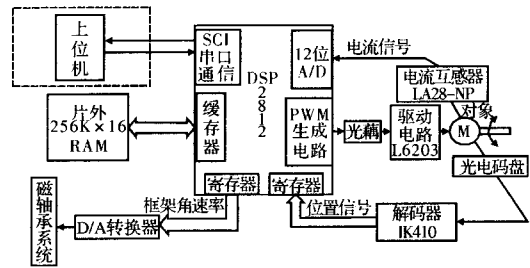


图 2 硬件控制系统总框图

### 2.2 软件算法

框架系统控制原理图如图 3 所示, 控制器由 PID 三环闭环控制和前馈控制构成, 三环分别为电流环、速率环和位置环, 三环的采样率分别为 30 K、5 K 和 1 K。

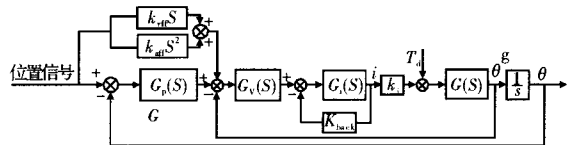


图 3 框架系统控制原理图

电流环只采用了比例调节, 这是因为要保证系统的快速响应能力, 结合功放的特性, 电流环实际上是一个小惯性环节, 可以简化为一个比例, 即:

$$K_{ip} = \frac{G_j(s)}{1 + K_{back} G_i(s)} \times 0.636$$

在设计速率环时, 用动态分析仪测定了速率环控制器后的系统模型, 即:

$$G'_v(s) = K_{ip} K_t G(s) = \frac{1.329}{S + 0.41}$$

考虑到速率环的反馈信号是位置的差分信号, 因此速率环的主要任务是保证框架的快速性, 并尽可能提高系统的刚度和展宽速率环路的频带, 因此速率环的控制器也只采用了比例调节, 即:

$$G_v(s) = 7.5$$

图 4 是在此控制器下的速率响应曲线。

位置环的作用是保证系统的速率精度, 因为本系统所用的位置传感器精度可以达到 0.00002 度, 位置环控制器后的开环系统模型为:

$$G'_p(s) = G_v(s) G'_v(s) \frac{1}{S} = \frac{9.968}{S(S + 10.378)}$$

是一个 I 型系统, 而位置环的给定输入从形式上看是斜坡信号。根据控制理论, 对于斜坡信号来说, 系统只有在 II 型以上时静差才可以达到零, 所以位置环的控制器中必定有积分控制, 本

系统采用的是全 PID 控制。

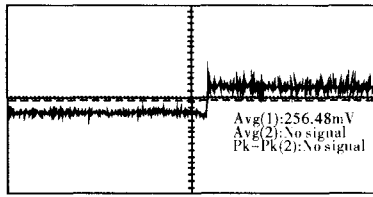


图4 速率闭环下的速率响应曲线

控制系统的软件流程主要由, A/D 中断和 Timer3 中断来实现。A/D 中断的频率为 30 K, 主要完成电流环的计算。Timer3 中断的频率为 5 K, 主要做为速率环的计算使用。在一个位置环周期内, 进行 5 个速率环伺服, 因此本系统的位置环采样频率选择为 1 K。

前馈控制器采用速度前馈和加速度前馈, 来提高系统的跟踪性能, 前馈引入点在速度环的前段, 离散化后的前馈环节传递函数为  $K_{vff}(1 - Z^{-1}) + K_{aff}(1 - 2Z^{-1} + Z^{-2})$ , 式中  $K_{vff}$  为速度前馈系数,  $K_{aff}$  为加速度前馈系数。图 5 和图 6 分别是未加前馈和前馈系数在 ( $K_{vff} = 100$ ,  $K_{aff} = 5$ ) 下的速率跟踪曲线。两图中下方的曲线均为给定信号, 上方曲线均为输出差分速率信号, 从两幅图中可以明显地看出前馈控制器对提高信号跟踪能力的作用。

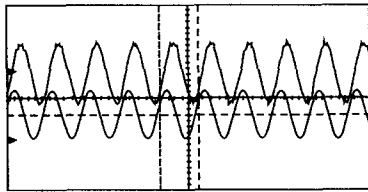


图5 无前馈控制器速率曲线

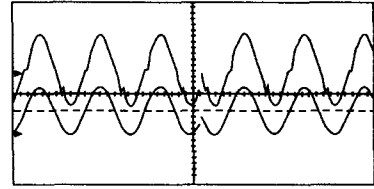


图6 有前馈控制器速率曲线

### 3 结 论

研究了磁悬浮控制力矩陀螺框架系统的高精度控制问题, 基于 DSP2812 的数字控制电路, 提出了三环 PID 加前馈控制的方案, 在转子转速 20 000 r/min 的情况下, 框架角速率精度达到了千分之五, 满足了设计要求。测试表明, 该方案下的框架系统达到了很高的控制精度。

### 参考文献

- [1] Mihaielov M. Single Gimbal Control Moment Gyroscope System [R]. Lecture Note, Beijing, 1995.
- [2] Bedrossian, Nazareth S, Paradiso, et al. Redundant Single Gimbal Control Moment Gyroscope Singularity Analysis[J]. Journal of Guidance and Control, 1990, 13: 1096-1101.
- [3] 刘强. 现代高精度数字伺服系统运动控制理论及应用研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.
- [4] Tsao T C. Optimal Feedforward Digital Tracking Controller Design [J]. ASME Journal Dynamic System Measurement and Control, 1994, 116: 583-591.

作者简介: 张 峰(1980 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为磁悬浮控制力矩陀螺框架系统研究。