

# 基于 DSP 的小型随动系统设计

李 波<sup>1</sup>, 陈兆兵<sup>2,3</sup>, 郭 劲<sup>2</sup>

- (1. 海军驻长春地区航空军事代表室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要:**为解决当前某小型随动系统控制下功能单一、精度较低的问题,介绍了一种采用无刷力矩电机的伺服控制系统。进行了基于 TMS320F2812 的随动系统设计。依据设计要求和实际机械结构参数建立了伺服控制模型,并对模型进行了软件和硬件的设计与分析。最后对该伺服系统进行了基于 Matlab 软件的伺服控制仿真,并在仿真试验环境下对控制效果进行了探讨,得到了与设计要求基本符合的结论。该控制方式下系统的最大加速度可达  $80^\circ/\text{s}^2$ ,而跟踪的方位误差可以有效控制在  $0.1^\circ$  下,完全能够满足系统的设计要求。

**关键词:**力矩电机;伺服设计;DSP; Matlab 仿真

**中图分类号:**TP273

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2011)01-0181-04

## A Minitype Servo System Design Based on DSP

LI Bo<sup>1</sup>, CHEN Zhao-bing<sup>2,3</sup>, GUO Jin<sup>2</sup>

- (1. Naval Aviation Resident Office at Changchun, Changchun 130033, China;
2. Changchun Ins. of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sci., Changchun 130033, China;
3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Introduced a kind of servo tracking system about no brush moment electromotor system for solving the problems of function singleness and low precision on some certain minitype servo system. Designed the servo system which based on TMS320F2812. Set up the servocontrol model based on the designing demand and the mechanism fabric parameter, and designed the software and hardware of the model. Did the servocontrol simulation of the servo system based on Matlab, and did some experiments. The result is nearly accordant between the simulation result and the design demand which can provide the basis to the feasibility conclusions. This control system can reach  $80^\circ/\text{s}^2$  at the most acceleration, and the fix error can be controlled under  $0.1^\circ$ . This control system can satisfy the system design requests.

**Key words:** moment electromotor; servo design; DSP; Matlab simulation

## 0 引 言

力矩电机具有软的机械特性,在随动系统的伺服系统中应用非常广泛。其具有低转速、大扭矩、过载能力强、响应快、特性线性度好、力矩波动小等特点,可直接驱动负载省去减速传动齿轮,从而提高了系统的运行精度。因此在伺服系统设计中采用小型低转矩力矩电机对某伺服机构进行驱动。

文中首先介绍了应用于该机构的力矩电机特性和 TMS320F2812DSP 的发展应用及其特点,重点解决了该随动系统的伺服控制问题,以某小型伺服平台的随

动控制为研究对象,以 TMS320F2812 为控制主体,对该随动系统进行了硬件设计、软件设计及相关的分析与探讨。最后以 matlab 为仿真工具对系统的控制进行了仿真,得到了一系列仿真结果。将仿真结果与系统的实验结果进行了对比验证,得到了与设计要求相符的结论。

## 1 系统所采用的 DSP 与直流力矩电机介绍

### 1.1 TMS320F2812DSP 控制内核介绍

数字信号处理器(DSP)技术领域是当今半导体工业最热门的技术领域之一<sup>[1-3]</sup>。当前在随动系统的伺服控制应用中 TI 公司的 2000 系列 DSP 应用非常广泛,该平台集成了诸多高级控制功能,核心是其中的一颗 IC,其具有非常强大的控制能力和数据处理能力。在本设计中将采用该公司生产的 2000 系列 DSP 中的

收稿日期:2010-04-07;修回日期:2010-07-10

基金项目:中国科学院三期创新项目(061X20C0660)

作者简介:李 波(1972-),男,湖北随州人,硕士研究生,从事海军装备研制、生产的质量监督与检验验收。

TMS320F2812DSP 来实现系统的控制,利用其精度高、响应速度快、集成度高的优点,提高伺服控制的应用效率,同时降低功耗。实践证明该控制内核可完全满足系统的控制要求。表 1 为该 DSP 的特点。

表 1 TMS320F2812 信号处理器参数

项目	主频	精度	寻址空间	存储空间	中断个数	A/D 位数	加密位数
参数	150MHz	32 位	4MB	128k×16 位	45 个	12 位	128 位

从表 1 中可以看出电机的伺服控制所需的各种先进的外设均集成在该处理器内核上。TI 公司生产的 TMS320F2812DSP 在伺服控制领域中有非常好的应用,该 DSP32 位的控制精度、150MHz 的主频为系统的伺服提供了足够快的速度与精确性,而 4MB 的寻址空间和 128k×16 位的存储空间为系统的伺服提供了足够的灵活性。由于有 128 位的加密位数,因此可以有效地保护内部的数据不被窃取,从而保护产品的知识产权。两路的采用保持电路由 16 通道 12 位的 ADC 单元组合而成,其有能力实现双通道信号的同步采样<sup>[4-6]</sup>。基于此种优点,在设计中选用了该型号的信号处理器作为内核。

## 1.2 直流无刷力矩电机简介

直接驱动旋转电机在多种应用中已经取代了传统的、带机械传动的伺服电机系统。直流力矩电机的应用正是基于此状况而发展起来的。传统的带机械传动的伺服电机系统在设计初始成本中具有一定的优势,但这种系统存在的一些无法解决的缺陷使其在高精度定位系统的应用受到了极大的限制。定位误差和调谐困难时传统带机械传动伺服系统的常见问题,它们是由传动的柔性和无效间隙引起的。而直驱直流电机直接与负载连接,省掉了电动机与负载之间的诸如齿轮变速箱、皮带、滑轮、联轴器等机械传动部件,其定位精度为普通传动系统的 50 倍,该种电机为高精度定位随动系统的设计提供了支持。

直驱力矩电机在结构主要有三种:封闭式直驱电机、无框架直驱电机、模块化直驱电机。带外壳的封闭式直驱电机是将转子、定子和在出厂前完成对准的反馈装置集成到一个带有精密轴承的外壳中,属于一种完整的解决方案。负载可以骑跨在该型电机的轴承上,在应用时需要把电机连接到负载上并让所用的多个轴承完成对准,这是一项费时、繁重的工作,故而该型电机多用于分度和速率转台上。无框架直驱电机提供了目前最为紧凑的机械伺服解决方案。其采用独立的转子和定子而不使用轴承。这些零件成为机器的一个整体组成部分,另外还包括了一些必要的反馈装置。该型电机对于机器预留空间有限或总重量有着关键影响的系统方案来说是理想的选择。该型电机为专门定

制,因此其费用较高且系统维护较为繁琐。无框架式力矩电机多用于机载和地面车辆的应用上。模块化直驱电机的结构包括一个独特的无轴承外壳以及外壳中的集成转子、定子和高分辨率反馈装置。该型直驱技术的应用消除了机械传动部件,既保留了直驱系统的所有优点,又避开了传统的封闭式或无框架电机的复杂而昂贵的缺点。该直驱电机利用新颖的压缩连接装置来将转子和转轴连接到一起,并附带一种独特的夹头设计,能够实现“即装即用”。该型直驱电机适用于工厂的生产化应用。综合以上三种直驱电机的优缺点,依据所设计的小型随动系统的要求,选用对系统的质量、转动惯量和空间要求最低的无框架式力矩电机。

## 2 伺服控制系统的软硬件设计

根据系统要求以及所设计的随动系统的机械结构需要确定了该伺服系统的硬件指标,系统为周向旋转式结构。表 2 为控制伺服系统的机械结构参数。这些参数通过三维软件直接输出,其中的最大加速度和电机的转矩则是根据系统的设计要求及相关参数的计算获得的。

表 2 模型伺服系统的机械结构参数

项目	质量	转动惯量	最大加速度	电机转矩	所用轴承
参数	4.2kg	0.03kg·m <sup>2</sup>	1.20rad/s <sup>2</sup>	0.8Nm	单向推力球轴承

要进行系统的软硬件设计首先要确定系统整体的传递函数。无论是位置控制系统还是速度控制系统,都是带动被控对象做机械运动,被控对象就是系统输出端的机械负载,它与执行元件的机械传动联系有多种形式,文中所述的系统采用的传动联系为直接驱动式,因此传统上由于速比及传动效率引起的负载折算可不考虑。系统整体的传递函数可用式(1)表示<sup>[7]</sup>,其中  $U$  为电机电枢两端电压; $i$  为电机电枢回路的电流; $J_L$  为该随动系统的转动惯量; $J_m$  为伺服控制电机的转动惯量; $R$  为电机电枢的回路电阻; $L$  为电枢电路的电感; $C_m$  为整个电机转矩的系数; $K_e$  为该电机势的系数; $n$  为电机转子的转速; $T_e = L/R$  为电气的时间常数; $T_m = \frac{(J_m + J_L)R}{K_e C_m}$  所表示的是机电时间常数。

$$G_m(s) = \frac{n(s)}{U(s)} = \frac{1/K_e}{T_e T_m s^2 + T_m s + 1} \approx \frac{1/K_e}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)} \quad (1)$$

将上述模型伺服系统的机械结构参数代入到式(1)中,经过化简可以得到式(2)所示的该随动系统的负载传递函数具体形式。

$$G_{wm}(s) = \frac{1/0.92}{(2.23s + 1)(0.0011s + 1)} \quad (2)$$

## 2.1 伺服系统硬件设计

整个随动系统伺服控制的硬件组成比较多,主要有电源电路、A/D 转换电路、异步串行通信接口电路以及 CPLD 等硬件组成。在整个硬件系统中 TMS320 F2812DSP 是核心硬件,该核心与上位机的通讯依靠 RS232 接口实现,通过 SN74LS245 与 TL16C554 硬件实现其与外部总线的连接。

为了降低电路影响,在设计中使 DSP 的多路 PWM 信号经过光电隔离后再输出到系统的功率放大模块,而系统中的电源电路则采用 PS767D318 硬件实现<sup>[8]</sup>。控制器的两个事件管理器 EVA, EVB 可以分别提供 8 路 PWM 信号,事件管理器的周期寄存器 T1PR 的值决定 PWM 的周期,其计数方式采用连续增计数。整个随动系统伺服控制部分的硬件控制结构图如图 1 所示。

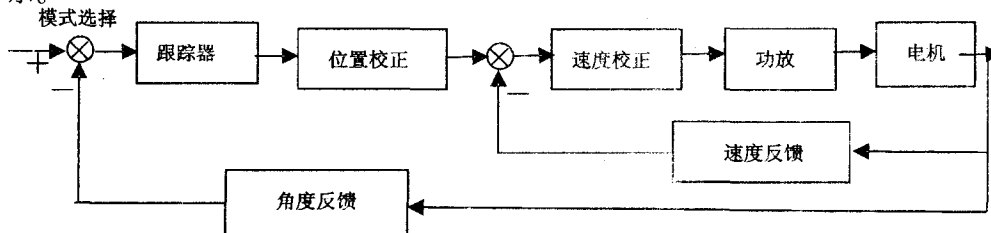


图1 随动系统伺服控制结构图

本伺服系统采用单轴结构,仅在方位方向有转动,在俯仰方向采用单一方式。因此该系统采用一个力矩电机进行驱动,该电机与上面的负载为直接刚性连接。系统为无中心轴的结构,其中间部分为导电环,为上部的系统提供电力及控制信号传输。系统要求的周向定位精度为  $0.1^\circ$ ,在硬件设计过程中要充分考虑这些限制进行合理的误差分配。

## 2.2 伺服系统软件设计

伺服控制的软件设计采用模块化方法,将整个功能主要分为伺服主程序、中断子程序以及速度控制子程序等部分。主程序完成全局变量的初始化、DSP 初始化及等待的定时中断,它是一个无限循环程序。中断程序是整个系统软件的核心,它主要完成系统采样调节、直接转矩控制算法及串行通讯。本系统的速度调节以一定的间隔进行一次的方式进行,调节周期为 1 次/50ms。该运动控制模块的核心为 TMS320F2812 DSP,该模块能够实现对伺服系统的闭环控制。系统的主程序控制流程图如图 2 所示。

系统的定位精度在很大程度上取决于反馈测量系统的精度,其位置环和速度环的设计至关重要。本伺

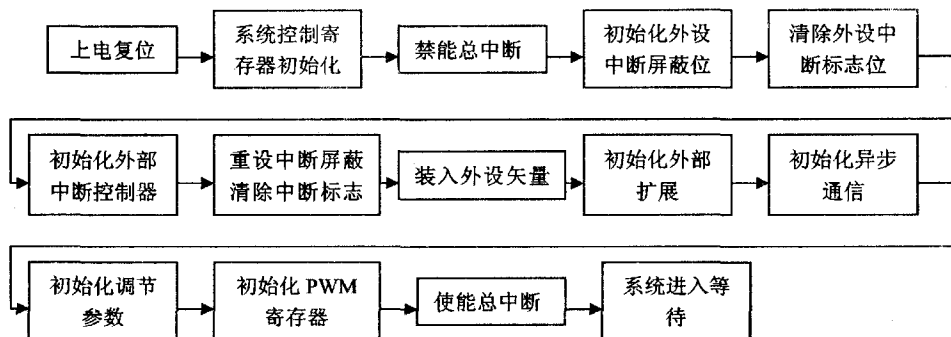


图2 主程序流程图

服系统模型的位置环以 PID 与前馈控制相结合的方式实现。该伺服控制的输出如式(3)所示。该式中各个参数的含义如下:  $E_n$ —在  $n$  时刻进行的采样时间点上伺服系统的给定位置与光电编码器实际的位置的偏差量;  $V_i$  与  $ACC_i$  分别为随动系统所跟踪的目标的速度与加速度;  $K_p$  为位置控制器的比例环节;  $K_d$  为位置控制器的微分环节;  $K_i$  为位置控制器的积分增益环节;  $K_{off}$  为位置控制器的系统速度环节;  $K_{aff}$  为系统加速度前馈增益。速度环的伺服控制采用 PI 控制方式, (4) 式为

控制器输出。该式中  $E_m$  为第  $n$  个采样时刻随动系统输出的速度给定值与速度实际值间的偏差;  $K_p$  为稳定环控制器比例增益;  $K_{in}$

为积分增益。

$$\omega_n = E_n K_p + (E_n - E_{n-1}) K_d + \left( \sum_{j=0}^n E_j \right) K_i + V_i K_{off} + ACC_i K_{aff} \quad (3)$$

$$U_n = E_m K_{vp} + \left( \sum_{j=0}^n E_{vj} \right) K_{vi} \quad (4)$$

## 3 伺服系统的 Matlab 仿真与结果分析

确定系统的数学模型及其软硬件设计后,进行了基于 matlab 的验证性仿真。图 3 所示为系统伺服传递函数的 bode 图,由该图可知,当角频率  $\omega$  由 0 变为正无穷时,  $\varphi(\omega)$  并不穿越  $-\pi$  线,因此该系统的开环载荷系统均是稳定的。系统的位置和速度环节的调节输出所确定的开环传递函数如式(5)所示。所加校正环节如式(6)所示。

$$G_0(s) = \frac{5.12}{s(0.1s + 1)(0.56s + 1)} \quad (5)$$

$$R(s) = \frac{0.512s + 1}{0.076s + 1} \quad (6)$$

为了验证该伺服系统校正前后的响应效果,首先依据式(5)和(6)设定了反馈系数为 1 的定值,以单位阶跃为输入信号,对加校正环节和不加校正环节的响

应进行分析<sup>[9-13]</sup>。图 4 表示的就是上述单位阶跃响应的对比结果。

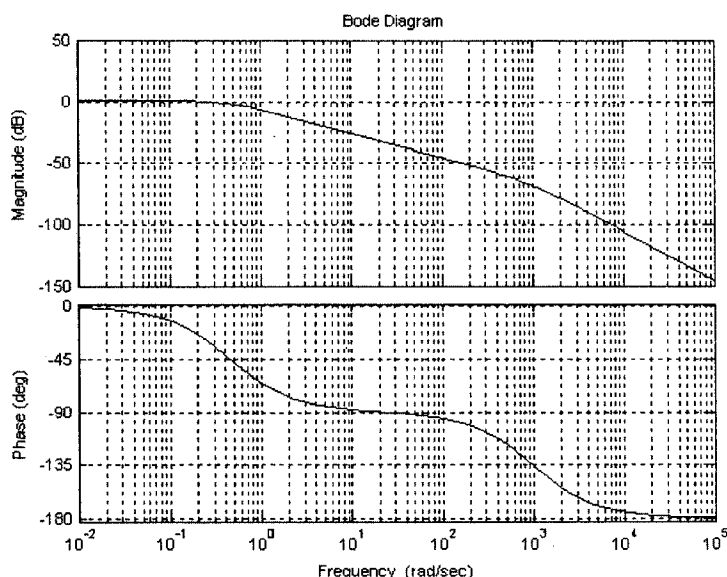


图 3 系统负载传递函数的 bode

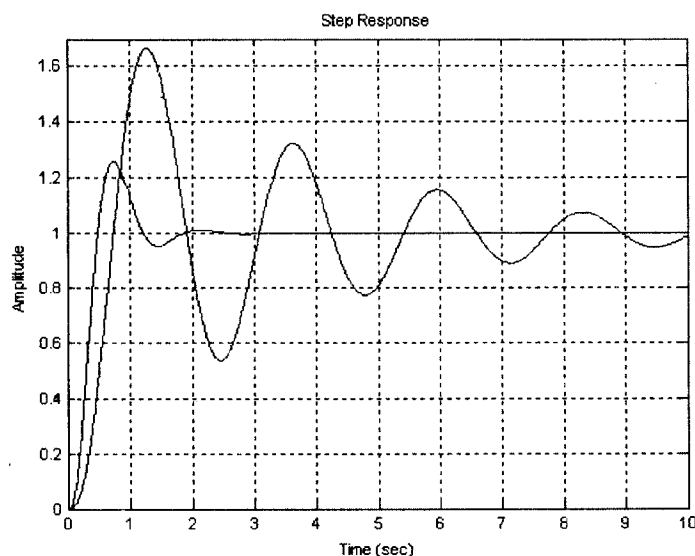


图 4 方位控制系统校正前后的单位阶跃响应对比

从图 4 可以看出单位阶跃响应校正前的幅值为 1.921deg, 而相角裕量为 13.924deg, 该单位阶跃响应校正后的幅值为 4.397deg, 而相角裕量为 42.368deg。该伺服系统校正后的稳定程度比校正前有了很大的提高。系统的上升时间、稳定速度以及其他稳态指标均较为理想, 可以认为校正后的指标能够满足系统要求。该小型随动系统的设计总质量为 12kg, 为车载小型光电系统。通过后续的仿真测试, 发现文中所探讨的基于 DSP 的小型随动系统设计方案能够达到对伺服系统进行平稳、准确运动控制的目标, 系统在该控制方案下的最大加速度可达  $80^\circ/\text{s}^2$ , 而跟踪的方位误差可以有效控制在  $0.1^\circ$  下, 完全能够满足系统的设计要求。

## 4 结束语

文中针对小型随动系统, 分析了其直驱力矩电机和 TMS320F2812DSP 内核的特点。为解决当前某小型随动系统控制功能单一、控制方法落后的问题, 在某小型随动系统的伺服控制中引入 TMS320F2812DSP, 并对该系统进行了基于该 DSP 核心的硬件与软件设计。然后对该控制系统进行了仿真与评估, 得到了该系统有效的结论, 该系统完全能够实现系统  $0.1^\circ$  的定位要求的目标。文中所设计的这种控制方法可以应用于其他随动系统中, 为系统的伺服控制设计提供了一种参考。

### 参考文献:

- [1] 苏奎峰, 吕强, 常天庆, 等. TMS320X281XDSP 原理及 C 程序开发[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [2] 武俊峰, 吴一辉, 安静, 等. 姿控飞轮变结构变速积分控制的实现[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 149-155.
- [3] 苏奎峰, 吕强, 耿庆峰, 等. TMS320F2812 原理与开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [4] 王习文, 马军, 陈娟, 等. 飞机三维姿态测量的角平分线方向向量法[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 369-376.
- [5] 胡新宁, 王厚生, 王晖, 等. 超导转子旋转驱动装置的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 169-174.
- [6] 樊琼剑, 李莉, 沈春林, 等. 体三维成像的螺旋扫描系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 183-189.
- [7] 田学光, 田兴志, 刘轩, 等. 大型精密转台高精度角度微驱动装置的研制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1112-1118.
- [8] 宁大勇, 高云国, 刘稀凤. 基于高精度位移传感器的减振平台[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 646-652.
- [9] 张宁, 沈湘衡, 杨亮. 应用跟踪误差等效模型评价光电经纬仪跟踪性能[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 677-684.
- [10] 张跃, 段镇. 轴对称飞行器滚转稳定控制与舵机技术指标[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 100-107.
- [11] 飞思科技产品研发中心. matlab7.0 基础与提高[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [12] 李焱, 陈涛. 舰载光电设备跟踪掠海目标的控制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 935-942.
- [13] 郝双晖, 刘勇, 郝明晖. 绝对式多极磁电轴角编码器的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 863-871.