

基于 DSP 某高炮随动控制系统设计

狄芳¹, 焦仁雷², 谈乐斌², 潘孝斌²

(1. 三江学院, 南京 210012; 2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对高炮随动系统的控制精度问题, 设计一套基于 DSP 随动控制系统设计方案, 介绍了系统的软硬件; 基于 CCS3.3 开发环境的基础上, 对随动控制系统试验台进行在线调试, 并根据上位机给出速度与位置目标参数进行实验调试信号, 测出实际测量与目标值之间的实时误差, 并且对仿真结果进行分析, 实验结果表明, 系统设计合理, 满足各性能指标要求, 稳定性好、具有快速跟踪能力。

关键词: 高炮; 伺服; 无刷直流伺服电机; 三环控制; 调试; 数字信号处理器

Design of Anti-aircraft Gun Servo Control System Based on DSP

Di Fang¹, Jiao Renlei², Tan Lebin², Pan Xiaobin²

(1. Sanjiang University, Nanjing 210012, China; 2. College of Mechanical Engineering, Nanjing University of science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Due to accuracy of anti-aircraft gun servo system, servo control system based on DSP has been designed, and software and hardware is introduced. Based on CCS3.3 development environment, the servo control system test platform between the actual measurement and the target for online debugging, and a sinusoidal signal of experimental testing signal according to the PC, the error between actual measurement and real-time target, and the simulation results are analyzed, the experimental results shows that the system design reasonable, to meet the requirements of the performance index, good stability, with fast tracking capability.

Keywords: anti-aircraft gun; servo; DC servo motor; system loop; debug; digital signal processor

0 引言

火炮随动系统是火力系统的核心, 也是火炮火控系统的执行部分。随着现代控制技术和信息化技术的发展, 武装直升机、飞行器以及各种机载空地导弹等空中目标不断的发展创新, 现代攻击战术日新月异, 对现代高炮火控系统提出了更高、更新的要求^[1-3]。在国内外小口径高炮随动控制系统领域, 目前已装备以及正在研制的位置伺服控制系统主要有直流电机扩大机随动系统、可控硅随动系统、直流脉宽随动系统和交流脉宽随动系统^[4], 其中直流脉宽随动控制系统具有良好的动、静态性能与稳定性、质量轻、低速性能好、可维护强、调速范围宽、噪声小、可靠性高、寿命长等优点^[5], 是火控随动系统领域的主导系统。由于高精度模拟元件使系统只能达到角分级, 而采用数字控制元件可以大大提高控制精度, 使精度可以达到秒分级。本文提出设计一套全数字火控随动系统, 采用高性能易于实现控制算法的嵌入式控制器 TMS320F2812 控制无刷直流伺服电机, 驱动炮塔与摇架的转动, 用增量式编码器形成全闭环的控制系统, 通过 VB 编程界面与下位机进行信息的交换, 实现对系统高低射角与方向射角的实时跟踪。

1 随动系统软硬件的设计

控制系统的总体设计主要包括直流电源、TMS320F2812

开发板、驱动器、两个无刷直流伺服电机、编码器和高炮系统的高低机与方向机组成, 也包括它们的电源电路、保护电路以及外部接口电路, 结构框图如图 1 所示。通过驱动器霍尔元件进行对有位置传感器的无刷直流伺服电机进行位置控制, 形成位置反馈, 通过旋转编码器对无刷直流伺服电机进行速度或位置控制, 形成速度或位置反馈, 驱动部分用 IR 公司的 IR2136S 驱动芯片, 实现对无刷直流伺服电机的闭环控制, 进一步提高系统的控制精度。由 DSP 控制器输出 2 组 6 路 PWM (PWM1-PWM6 与 PWM7-PWM12), 分别控制两个电机, 调整 PWM 波的占空比 d , 控制逆变器开关导通与关闭的顺序, 控制电枢电流 i_a 的变化以及输出平稳的转矩, 实现对无刷直流伺服电机高效性、高转矩和高精度的控制。

1.1 系统主程序的设计

系统的主程序主要完成寄存器配置、各模块的初始化、中断资源的配置、PLL 时钟设置、获取高低机与方向机低速轴的位置检测, 计算目标位置与当前位置的误差, 计算输出电压、电流检测等, 最终完成高炮随动控制系统的整个闭环控制。系统的主流程图如图 2 所示。

DSP 系统初始化主程序:

```
void main(void)
```

```
{
```

```
    InitSysCtrl(); //初始化系统、CPU 时钟频率的配置、看门狗、晶体振荡器 OSC 和 PLL 设置
```

```
    DINT; //禁止、清除所有 CPU/PIE 中断向量表
```

```
    IER = 0x0000;
```

```
    IFR = 0x0000; //清中断
```

收稿日期:2014-05-11; 修回日期:2014-06-12。

基金项目:江苏省博士后科学基金(2013M531359)。

作者简介:狄芳(1979-),女,江苏人,硕士,讲师,主要从事应用数学、偏微分方程等方向的研究。

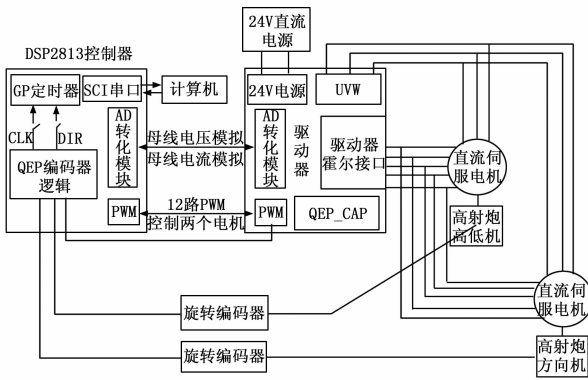


图 1 控制系统硬件设计结构框图

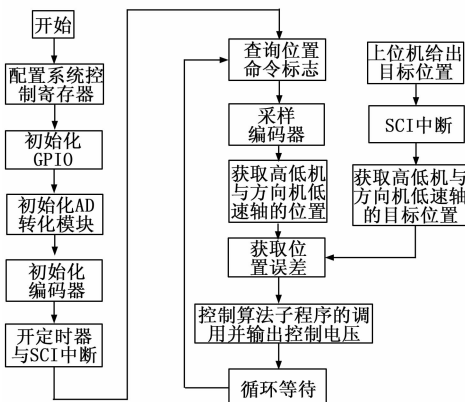


图 2 系统的主流程图

```

InitPieCtrl(); //初始化 PIE 寄存器
Init_EVA_PWM(); //初始化 PWM
Init_CAP (); //初始化 CAP
InitPieVectTable(); //初始化 PIE 向量表
Init_Adc(); //初始化 A/D 模块
Init_Gpio (); //初始化 GPIO 口
Init_EVA(); //初始化事件管理 A
Init_EVb(); //初始化事件管理 B
Init_SCI(); //初始化 SCI
Init_CpuTimers(); //初始化定时器
ConfigCpuTimer(&CpuTimer0,10,10000);
Start_CpuTimer0(); //启动定时器
ConfigCpuTimer(&CpuTimer1,10,10000);
Start_CpuTimer1();
IER |= M_INT1; //使能 CPU 的 INT1 中断
IER |= M_INT2; //使能 CPU 的 INT2 中断
IER |= M_INT3; //使能 CPU 的 INT3 中断
Init_Start_motor(); //初始化电机
EINT; //使能全局中断 INTM
ERTM; //使能全局实时中断 DBGM
while(1) //循环等待
{
}
}
    
```

1.2 驱动模板与电源模块

随动控制系统驱动部分经常会对控制部分带来一定的干扰, 通过隔离模块获取各自的电源, 获取不同的电压, 直接给功率放大器与驱动模块提供电源, 这种设计简单, 可靠性高。驱动板上有的部件也可以通过 DSP 提供电压, 例如 AD 模块与 DSP 开发板的外部接口相连。采用 +24 V 的单独外部直流源供电通过 IRF3205S 驱动芯片给无刷直流伺服电机供电, 而无刷直流伺服电机本身自带的霍尔传感器由驱动板通过光电耦合器 HCPL-063 提供 +5 V 的电压供电。

1.3 电流检测与保护模块

获取电流信号的一般采用采样电阻与电流传感器。本随动控制系统的电流信号微弱, 数值比较小, 采用串联采样小电阻方法来获取电流的实际大小。电流检测电路将采样电阻两端的电压通过有源滤波器, 经过隔离放大器 HCNR200 送入模数转化器 A/D, 模数转化器 A/D 采样来获取实际电流值的大小。

在随动控制系统中, 对保护电路很重要, 保护控制器 DSP 芯片以及伺服电机驱动板, 模数转化器 A/D 不仅可以检测电流、母线电压, 可以对驱动板过压或欠压的保护。采用隔离放大器 HCNR200 将控制信号与驱动信号进行信号间的隔离, 其中, HCNR200 是隔离放大器, 具有良好的线性、稳定性, 电路简单, 信号宽带达到 1 MHz。

电流检测模块的目的获得电流的大小^[6]。根据霍尔传感器的工作状态, 确定当前逆变器的导通情况, 选择适当的相电流作为电流调节的反馈信息, 完成对电流的调节, 通过检测电阻, 确定电机正常工作的电枢电压的平均值以及占空比 d 。

1.4 位置检测电路

PWM 脉宽调制在许多控制领域已得到广泛应用。通过微处理器的数字输出端控制模拟电路。PWM 波用于运动控制与电机控制。在电机控制过程中, PWM 信号主要作用于功率器件, 控制它的开关转换时间, 换句话说, 就是通过 PWM 波占空比 d 大小控制电机的电枢电压, 产生一定的电流波形、频率与能量的多少, 进一步控制电机的转矩与转动速度。PWM 电路主要包括 PWM 发生器、可以编程死区 (DBU)、PWM 电路的输出逻辑、空间向量状态机^[7]。

定时器 1 作为脉冲宽度调制信号的时基, 通过设置比较单元的寄存器 COMCONA, 产生对称的三角波信号, 再通过比较匹配单元, 得到一定占空比 d 的 PWM 信号波形。根据寄存器 CMPR1 的设定值, 三角波值小于寄存器 CMPR1 的设定值, 输出低电平信号, 三角波值大于寄存器 CMPR1 的设定值, 输出高电平信号, 产生对称的 PWM 波形。

直流电机感应电动势与电压关系表达式^[8]为: $E = dU$

直流电机感应电动势与转子速度成正比^[9-10]。当电压 U 不变时, 转子转动速度与 PWM 信号波形占空比 d 成正比, 所以可以通过调节 PWM 信号波形占空比 d 来控制转子转速。

要实现无刷直流伺服电机的位置反馈, 可以通过两个传感器实现, 一个是无刷直流伺服电机转子上的位置传感器, 自身带有霍尔元件, 通过输出三路高速脉冲信号 H1-H3 来检测转子的位置; 另一个是高低机与方向机的低速轴上带有一个编码器。无刷直流伺服电机在转子位置传感器输出端与驱动板的 HALL 借口相连, 驱动板的 CAP1-CAP3 与

DSP 的 EVA 捕获单元相连接。每一个霍尔传感器 H1—H3 都会产生 180° 的脉宽输出信号^[11]，3 个霍尔传感器呈空间 120° 分布，每一个信号高低电平变化都会检测到，共 6 上升或者下降沿，就会有 6 次换相。在 DSP 将对捕获口 CAP1、CAP2、CAP3 设置为 I/O 口，并检测该 I/O 口电平，通过霍尔信号电平状态的变化，就可以知道 H1~H3 在什么沿什么时候触发捕获中断，就可以形成霍尔信号电平状态与换相的对应关系表^[12-13]。

位置检测采用的是旋转编码器，高低机与方向机的低速轴与旋转编码器同轴相连接。本系统采用 2500 脉冲每转，通过传动比转化到高低机与方向机对应的电机分别为 0.144° 和 0.144° 编码器产生一个脉冲，产生一个脉冲高炮高低机与方向机所需转过的角度分别是 0.003 6° 和 0.001 6°，精度要求满足随动控制要求。根据光电编码器数据传输协议以及控制说明书，对控制模式与方向设置，完成对其初始化，获取位置。DSP 程序的流程图如图 3 所示。

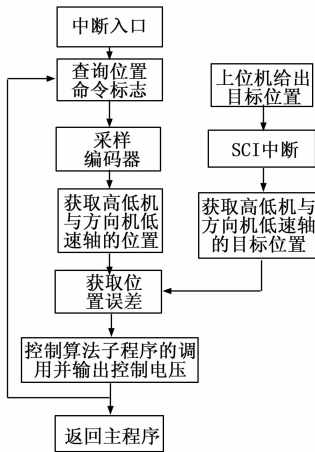


图 3 位置检测模块程序的流程图

1.5 速度检测电路

为了精度得到速度与位置，通过高低机与方向机低速轴连接数字量的增量式光电编码器来控制伺服位置，增量式光电编码器有光码盘与光电检测装置组成，光码盘相当于光电开关，增量式光电编码器的轴与高低机与方向机低速轴同轴，使光电信号按照一定的脉冲接通与断开，通过光电检测装置计算每秒输出的脉冲数，计算转动轴的转速。

采用增量式光电旋转编码器的测速常用有 3 种方法：M 法、T 法和 M/T 法。

M 法测速又称脉冲数测速，通过计算一个周期 T_c 内编码器的脉冲个数 M_1 计算转速 n 的方法^[14]，得到转速的计算公式：

$$n = 60 M_1 / Z T_c \quad (1)$$

其中： Z 为光电编码器每转一圈输出的脉冲个数。

由公式 (1) 知，编码器的脉冲个数 M_1 与转速 n 成正比，转速 n 越大，编码器的脉冲个数越大，系统的测量精度就越高。

T 法测速又称周期法测速，利用旋转编码器两个相邻输出脉冲之间的时间间隔计算转速的方法^[15]。旋转编码器两个

输出脉冲间记录 M_2 个时钟脉冲，脉冲发出的频率为 f ，编码器每转有 Z 个脉冲个数，转动轴转动一周所用时间为 $Z M_2 / f$ ，得到转速的计算公式

$$n = 60 f / Z M_2 \quad (2)$$

由公式 (2) 知，转速 n 越大，旋转编码器两个输出脉冲间记录 M_2 越小，测量精度就越低。综上两种方法的分析，高速自动采用脉冲数测速法，低速自动采用周期法测速法，此时相当于采用两种方法，即 M/T 法。

在一个周期 T 内编码器光电盘的转角为 θ ，转角的表达式为

$$\theta = 2\pi n T / 60 \quad (3)$$

还可以表示为

$$\theta = 2\pi n M_1 / Z \quad (4)$$

根据周期法测速，输出脉冲的周期：

$$T = M_2 / f \quad (5)$$

结合公式 (1) 与公式 (5) 测速轴的转速：

$$n = 60 f M_1 / Z M_2 \quad (6)$$

光电编码器的 A、B 相与 TMS320F2812 的 QEP 电路相连接，通过将转速与位置信号转化成微型计算机可以识别的脉冲信号。

通过电流检测装置，得到 PWM 占空比 d 实现对速度的调节。测速计数示意图如图 4 所示， L_1 是光电编码器 A 相脉冲， T_1 是对光电编码器输出信号的 4 倍频计数， L_2 是高速计数时钟脉冲波形^[16]。每次在 \uparrow 处都会 M_1 、 M_2 计数，通过对 L_1 的计数计算出 M_1 ，通过 L_2 的计数计算出 M_2 ，保存当前捕获到的 T_1 、 T_2 计算值，其值分别为 T_{2_new} 和 K_T 。由公式 (6) 测速轴的转速公式： $n = 60 f M_1 / Z M_2$ ，计算转速。每次进入周期中断，周期的次数 K_T 得加 1，计算 M_2 值。

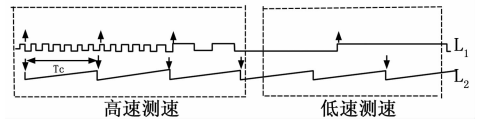


图 4 测速计数示意图

该系统根据以上的分析，给出 DSP 测速 M/T 方法的流程图，如图 5 所示。

2 实验调试

2.1 高炮高低机实验台

高炮随动控制系统高低机实验台^[17]所用的设备主要包括驱动器、直流电源、DSP 数字控制处理器、直流伺服电机、减速器、高炮高低机、火炮高低机模拟配重块等，通过 VB 编程软件不断收集跟踪目标位置，实现火炮身管的快速移动，实现火炮随动控制。DSP 不断读取上位机目标位置信号，实现系统的随动控制，上位机有两种数据，上位机有两种数据，一种是静态值，目标位置是静止不动，观察系统的速度自我调节能力。另一种是动态值，目标位置按一定的轨迹运动，观察系统的跟踪性能。目标位置输入值的采集，一般用指挥仪测量元件，但是由于实验条件与时间的限制，本系统采用 VB 给定目标轨迹曲线或定值作为系统的目标位置

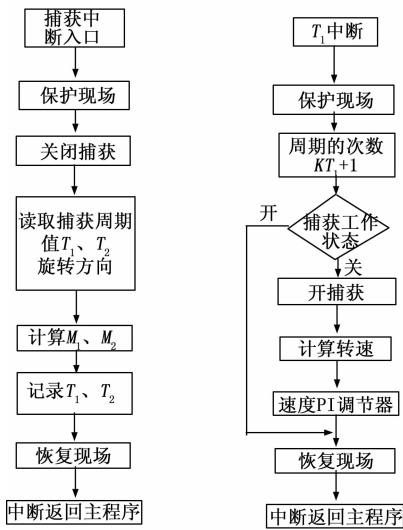


图 5 速度检测模块程序的流程图

的输入值, 随动实验按给定轨迹或定值进行跟踪, 观察随动控制系统的控制效果。

2.2 实验结果分析

高炮高低机系统低速随动 60° 阶跃给定位置曲线实验结果如图 6 所示, 速度达到低速给定值后, 按给定速度做匀速运动, 直达位置达到给定的转角, 其速度最大误差 0.2818° 。从实验结果知, 低速控制系统没有出现低速爬动、蠕动或者不稳定现象。最大误差量满足系统的性能指标与设计要

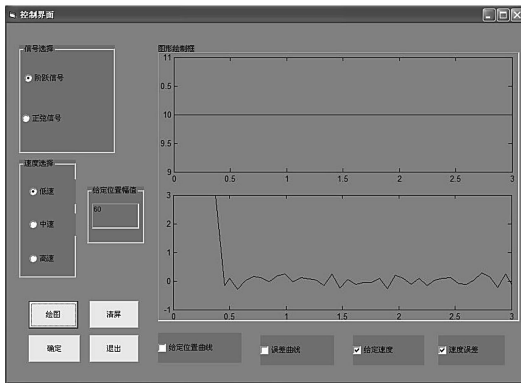


图 6 低速随动阶跃 60° 速度实验结果

速度自我调节性好。高炮高低机 60° 正弦位置跟踪误差曲线实验结果如图 7 所示, 其最大误差 0.296° 。正弦曲线可以体现出系统随时加减速, 反应系统整体动态性能以及良好的跟踪能力, 系统误差一直在系统允许的范围内变化, 满足系统性能指标与设计要

3 结束语

关于高炮随动控制系统软硬件分析, 基于 CCS3.3 开发环境的基础上, 对随动控制系统试验台进行在线调试, 并根据上位机给出阶跃信号与正弦信号两种位置目标实验调试信号, 测出实际测量与目标位置之间的实时误差, 并且对仿真

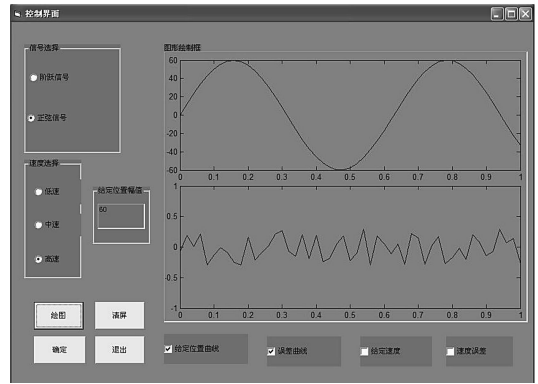


图 7 60° 正弦位置跟踪误差曲线实验结果

结果进行分析, 实验结果表明, 该实验台具有快速跟踪能力及良好的控制精度, 为进一步研究打下基础。

参考文献:

- [1] 谈乐斌, 张相炎, 管红根等. 火炮概论 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [2] 顾乃宁. 基于 dsp 的数字火控随动系统的设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [3] 匡斌峰. 基于 DSP 的数字伺服系统研制及控制算法的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [4] 张晓明. 基于 DSP 的数字火控随动系统设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [5] 蒋尔涛. 某型数字化随动系统分析及其调测系统设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [6] Chen C J Zhao N Jin H T etc. Design and implementation of the servo control system based on DSP [J]. Computer and Information Science, 2010, 3 (4): 131-134.
- [7] 付永余. 无位置传感器无刷直流电动机控制系统的设计 [D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [8] 齐利民. 电动车用无刷直流电机无位置传感器控制研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
- [9] Padmaraja Yedamale. 冰箱的直流无刷电机控制 [J]. 世界电子元器件, 2009, (4): 41-43.
- [10] 彭钰珍. 小容量无刷直流电动机无位置传感器控制技术的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [11] 宋 亮. 基于 DSP 的智能轮椅驱动系统的研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
- [12] 周 洲. 基于 DSP 的机器人运动控制器的设计与分析 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [13] Shalesh Prabhakar Walkar, B E. A low-cost low-loss brushless permanent magnet motor drive [D]. University of Pune. 2001.
- [14] 任志斌. 电动机的 DSP 控制技术与实践 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [15] 陈福龙. 基于 DSP 的永磁同步电动机伺服控制系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [16] 王仁峰. 基于 XC164 的异步电机矢量控制系统的研究与实现 [D]. 上海: 上海大学, 2007.
- [17] 焦仁雷, 谈乐斌, 潘孝斌. 某高炮随动控制系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, (6): 1821-1823.