

# 导弹电动舵机控制系统设计

王世涛<sup>1</sup>, 董海迪<sup>2</sup>

(1. 中国人民解放军 31002 部队, 北京 100161; 2. 海军工程大学 兵器工程学院, 武汉 430030)

**摘要:** 针对某型导弹现有电液伺服系统存在动态响应速度慢、结构复杂、可靠性差、使用维护困难等缺点, 研究提出了一种以大功率无刷直流电机为控制对象的电流/位置/速度三闭环反馈控制系统设计方案; 采用 DSP 和 FPGA 的组合作模式, 其中 DSP 内部主控制程序实现系统初始化、三闭环控制算法和产生 PWM 信号等功能, FPGA 则实现各功能电路的时序逻辑控制; 通过构建由模拟制导计算机、1553B 总线通讯网络和舵机控制系统组成的测试系统, 验证了三闭环电动舵机控制系统设计方案的可行性; 实验结果表明, 该导弹电动舵机控制系统最大负载扭矩为  $75 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 满载角速度为  $200^\circ/\text{s}$ , 调节时间小于  $70 \text{ ms}$  ( $\pm 10^\circ$  阶跃信号), 动态相移小于  $5\%$  ( $2^\circ, 1 \text{ Hz}$ ), 具有输出力矩大、响应速度快、控制精度高、使用寿命长和可维护性好等优点。

**关键词:** 电动舵机; 无刷直流电机; 原理样机; 性能测试

## Design of Control System for Missile Electric Actuator

WANG Shitao<sup>1</sup>, DONG Haidi<sup>2</sup>

(1. PLA of 31002 Unit, Beijing 100161, China;

2. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings of the existing electro-hydraulic servo system of a certain missile, such as slow dynamic response speed, complex structure, poor reliability and difficult maintenance, a design scheme of current / position / speed three closed loop feedback control system based on high power brushless DC motor was proposed. The combination mode of DSP and FPGA was adopted. The functions of system initialization, three closed-loop control algorithm and PWM signal generation were realized in the main control program of DSP and timing logic control of each functional circuit was realized in FPGA. By constructing a test system consisting of a simulation guidance computer, a 1553B bus communication network and a steering gear control system, the feasibility of the design scheme of the three-loop electric steering gear control system was verified. Experimental results showed that the maximum load torque of the missile electric steering gear control system was  $75 \text{ N} \cdot \text{m}$ , the full load angular velocity was  $200^\circ/\text{s}$ , the adjustment time was less than  $70 \text{ ms}$  ( $\pm 10^\circ$  step signal), and the dynamic phase shift was less than  $5\%$  ( $2^\circ, 1 \text{ Hz}$ ). The missile electric steering gear control system owns the advantages of large output torque, fast response speed, high control accuracy, long service life and good maintainability.

**Keyword:** electromechanical actuator; brushless dc motor; principle prototype; performance test

## 0 引言

导弹舵机伺服系统按照功率能源分为电动伺服舵机、气动伺服舵机和电液伺服舵机三类<sup>[1-2]</sup>。电动伺服舵机具有结构简单、使用维护方便、动态响应速度快等优点, 广泛应用于导弹伺服控制系统中, 具有良好的应用前景<sup>[3]</sup>。导弹电动伺服舵机是一种复杂的机电一体化系统, 属于典型位置随动系统, 其控制精度直接影响到导弹制导和姿态控制精度, 从而影响到导弹的命中精度。大力矩、高动态的控制系统设计与工程实现一直是制约导弹电动伺服舵机发展的瓶颈问题<sup>[4]</sup>。

本文以某型导弹大功率电动舵机控制系统的设计指标为依据, 开展了控制系统硬件与软件设计、原理样机研制与性能实验等工作。论文结构安排如下: 第 1 节分析舵机控制系统组成及工作原理; 第 2 节提出控制系统硬件设计

方案; 第 3 节提出控制系统软件设计流程; 第 4 节详细介绍三闭环控制算法的具体实现; 第 5 节通过原理样机实验测试控制系统性能; 最后是论文的总结。

## 1 控制系统总体设计方案

### 1.1 系统组成及工作原理

舵机控制系统主要由伺服电机、主功率驱动电路、减速传动机构以及电机工作电流、转子转速、喷管偏角等检测传感器组成<sup>[5]</sup>, 如图 1 所示。

导弹电动舵机控制系统在正常工作状态下, 弹上制导计算机通过总线不断给电动舵机控制系统发送调整指令信号, 伺服控制器接收到调整指令信号后, 经过算法处理, 控制无刷直流电机转动, 进而驱动喷管进行摆动, 同时伺服控制器还将调节过程中实际测量得到的喷管偏角信号反馈回弹上制导计算机; 而当发生故障时, 弹上制导计算机

收稿日期: 2021-08-11; 修回日期: 2021-10-17。

作者简介: 王世涛(1979-), 男, 山东临沂人, 博士, 高级工程师, 主要从事导弹控制与攻防对抗技术方向的研究。

通讯作者: 董海迪(1988-), 男, 湖北武汉人, 博士, 讲师, 主要从事导弹测试、故障诊断及性能评价方向的研究。

引用格式: 王世涛, 董海迪. 导弹电动舵机控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 116-121, 147.

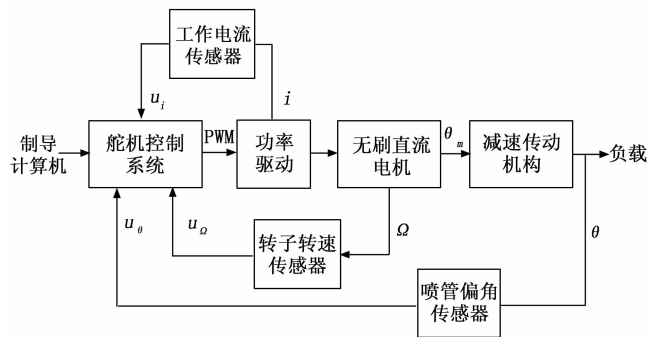


图 1 舵机控制系统组成结构

给电动舵机控制系统发送安全控制指令信号, 伺服控制器接收到安全控制信号后, 依据预先装订好的程序工作, 配合导弹的安全自毁动作。无刷直流电机一般采用高速的 PWM 控制方式进行调速, 通过输出频率一定, 占空比可调节的 PWM 信号, 实现对无刷直流电机输入端口电压的控制, 进而控制其转速, 从而驱动导弹喷管摆动, 最终实现对导弹的飞行姿态和轨迹的控制。

### 1.2 控制器设计

考虑到 PID 控制具有算法简单、鲁棒性好、易于实现等优点, 论文采用 PID 控制算法设计三闭环控制器。在伺服系统的控制系统设计中通常采用典型 I 型和典型 II 型系统结构<sup>[6]</sup>来提高系统的稳定性和控制精度。

舵机控制系统采用位置、速度、电流三闭环控制策略<sup>[7]</sup>, 电流环控制的稳态要求是无静差, 动态要求是迅速跟踪期望电流变化, 且不允许有太大的超调, 因此电流环按照典型 I 型系统校正, 电流调节器选为 PI 调节器, 具体为:

$$\mu(k) = Kp\_I * e(k) + Ki\_I * error\_sum\_I$$

式中,  $\mu(k)$  为电流环输出,  $Kp\_I$  为比例调节系数,  $Ki\_I$  为积分调节系数,  $e(k)$  为电流误差量,  $error\_sum\_I$  为电流累计误差。

速度环控制的稳态要求是无静差, 动态要求是抗扰动性强, 因此速度环按照典型 II 型系统校正, 速度环选用 PI 调节器, 具体为:

$$\mu(k) = Kp\_S * e(k) + Ki\_S * error\_sum\_S$$

式中,  $\mu(k)$  为速度环输出,  $Kp\_S$  为比例调节系数,  $Ki\_S$  为积分调节系数,  $e(k)$  为速度误差量,  $error\_sum\_S$  为速度累计误差。

根据位置环响应速度快且无超调的要求, 位置环应该按典型 I 型系统校正, 因此位置环采用 P 调节器, 具体为:

$$\mu(k) = Kp\_P * e(k)$$

式中,  $\mu(k)$  为位置环输出,  $Kp\_P$  为比例调节系数,  $e(k)$  为位置误差量。

## 2 硬件设计

系统硬件电路设计主要由电机功率驱动电路和三闭环反馈回路组成, 具体硬件结构如图 2 所示, 包括 DSP 主控单元、FPGA 逻辑控制单元、功率驱动电路、相电流测

量电路、转子位置及转速检测电路、喷管偏角测量电路、限位等故障保护电路和 1553B 总线通讯接口电路等。

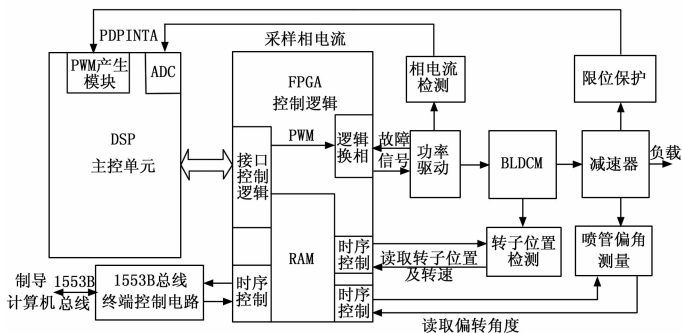


图 2 控制系统硬件结构

其中, DSP 作为主控单元, 在其内部实现系统主控程序和 3 个闭环的控制算法, 具体过程如下: DSP 通过 1553B 总线与弹上计算机之间进行可靠通信, 收到弹上计算机下达的喷管转动偏角的控制指令; 同时 DSP 通过 FPGA 控制喷管偏角测量电路、转子位置检测电路和 ADC 模块分别采集得到喷管的实际偏角、电机转子的转动速度和电机相电流; 控制指令和实测信号经过 DSP 内部的三闭环控制算法运算后输出 PWM 信号, 驱动电机转动, 从而带动喷管偏转。

### 2.1 1553B 总线通讯接口电路

1553B 总线通讯接口设计采取通讯协议芯片方式实现, FPGA 与 BU-61580 的电路连接如图 3 所示。BU-61580 芯片工作在 16 位缓冲模式下, 芯片在消息传输出现错误或接收到新消息时, 通过 INT 信号申请中断, FPGA 通过查询 READYD 信号来确定 BU-61580 芯片的工作状态, 当 READYD 信号为低电平时表示 BU-61580 芯片完成了一次读/写操作。

### 2.2 电机功率驱动电路设计

电机功率驱动电路设计主要采用 7MBP75RJ120 型功率驱动模块, 具体电路如图 4 所示。通过 DSP 产生 PWM 信号控制功率驱动模块 IPM 内部的 IGBT, 实现对电机的转动控制, 同时功率驱动模块 IPM 的欠压、过热、过流故障信号 ALMU、ALMV、ALMW 和短路信号 ALM 通过高速光耦芯片 TLP521-1 传递给 FPGA, 以便发生故障时系统及时处理。

### 2.3 转子位置检测电路

转子位置检测电路采用 TS2620N21E11 型旋转变压器, 解码芯片为 FB9412PB 型角位速度数字转换器, 分辨率 5.3', 精度 ±7.8', 最大跟踪速度 1 000 rps, 可输出角度和速度数据, 其中角度输出为 0°~ 360°自然二进制码, 速度输出为跟踪速度的二进制补码。具体电路如图 5 所示。

### 2.4 电流测量电路

电流测量电路原理如图 6 所示, 将霍尔电流传感器 HMS 20-P 的输出 Vout 与参考输出 Vref 两者相减可以减小温度对 LEM 影响, 差值经过 2 V 抬升电压处理, 转换为

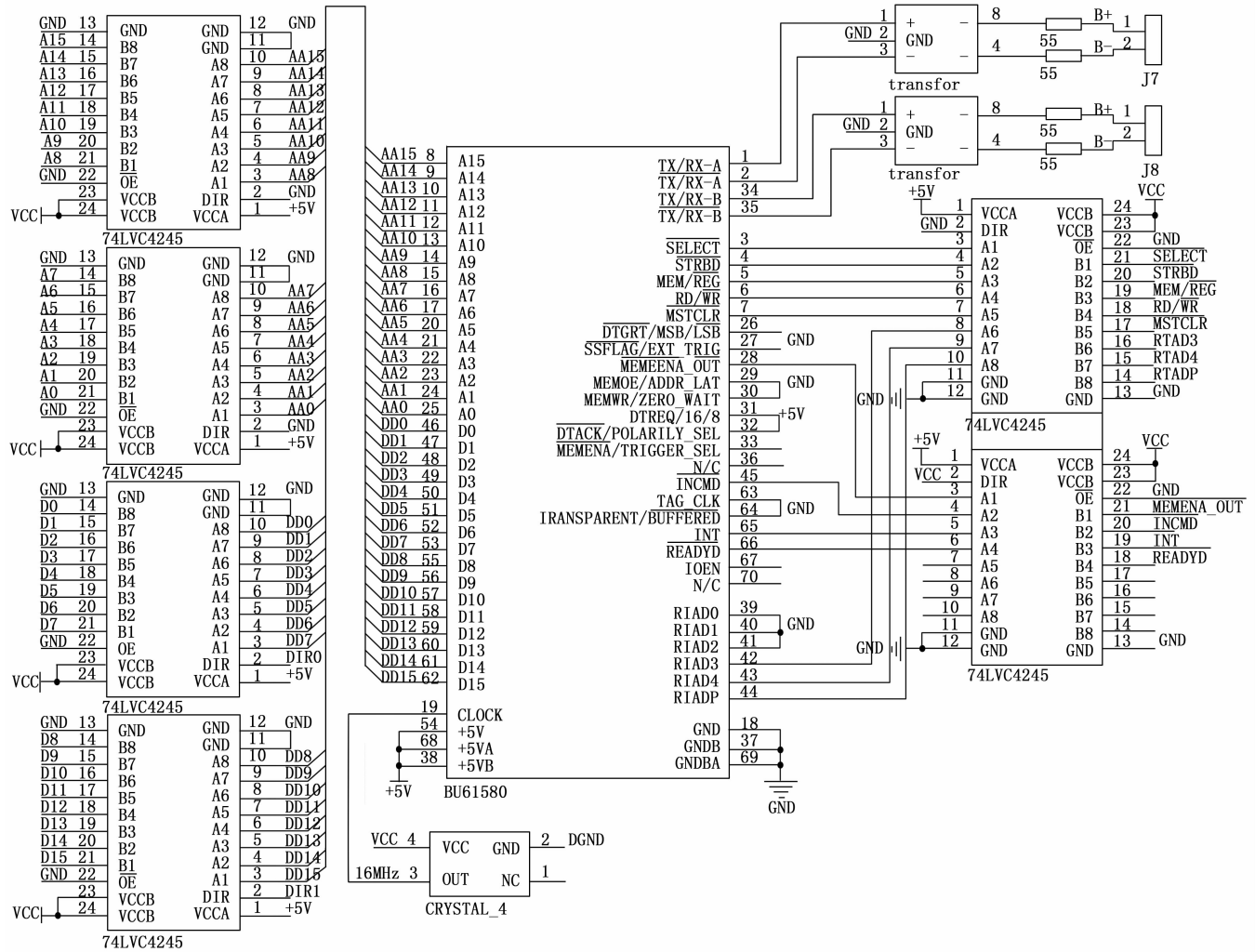


图 3 BU-61580 与 FPGA 连接电路

正值，以 4:3 比例缩小后，实际输出范围为 0~3 V，可以直接接入 ADC 端口。两个二极管组成限压保护电路，防止传感器输出电压过大烧坏 ADC 口。

### 2.5 喷管偏角测量电路

喷管偏角测量电路选用 EQN425 型多圈绝对值编码器，最大转数为 4 096，每转位置数为 8 192 (13 bits)，精度为 ±20"，计算时间 ≤ 0.5 μs，编码数据类型为格雷码，对应输出信号为同步串行信号 (SSI)。选择 SSI208P 芯片作为 SSI 信号的接口转并口模块，该模块能够自动将 SSI 数据转换为 8 位并行数据，数据更新率大于 100 kHz。具体电路原理如图 7 所示。

## 3 软件设计

### 3.1 软件控制流程

舵机控制系统的软件程序设计主要由两部分组成：DSP 内部实现的主控制程序和 FPGA 内部实现的时序控制逻辑。其中，DSP 主控制程序采用 C 语言编写，在 CCS 3.0 环境下编译；FPGA 硬件逻辑采用 Verilog 语言编写，在 Quartus II 9.1 环境下编译。系统整体软件流程如图 8~9 所示。

主控制程序首先进行上电初始化和通讯自检，初始化流程如图 9 所示，主要完成 DSP 的基本配置，涉及到相关寄存器的读写操作；1553B 功能芯片地址设置和工作模式选择；FPGA 程序从 EPCS4 芯片配置到主体芯片；转子初始定位和偏角测量电路零位标定。在开始工作前，控制系统需要与制导计算机进行通讯自检，保证通讯通道畅通。

控制系统接收到制导计算机发送的指令后，经过 FPGA 指令译码，转换成 DSP 可识别的控制信号，中断通知 DSP，同时开启 DSP 的 ADC 采样和转子位置、转速和喷管偏角测量。DSP 响应中断，从 FPGA 读取控制指令信号和实际测量的喷管偏角及转速信号，结合 ADC 采样到的相电流信号，通过数字滤波处理和三闭环 PID 算法运算，输出调制 PWM 到 FPGA。FPGA 结合检测到的转子位置信号，经过换相逻辑处理，控制六路 PWM 输出，直接作用于功率驱动模块，控制电机转动。

### 3.2 三闭环控制算法实现

控制器的电流、速度和位置三闭环控制算法是在 DSP 的 XINT1 外部中断服务程序中实现的<sup>[8-9]</sup>，程序流程如图

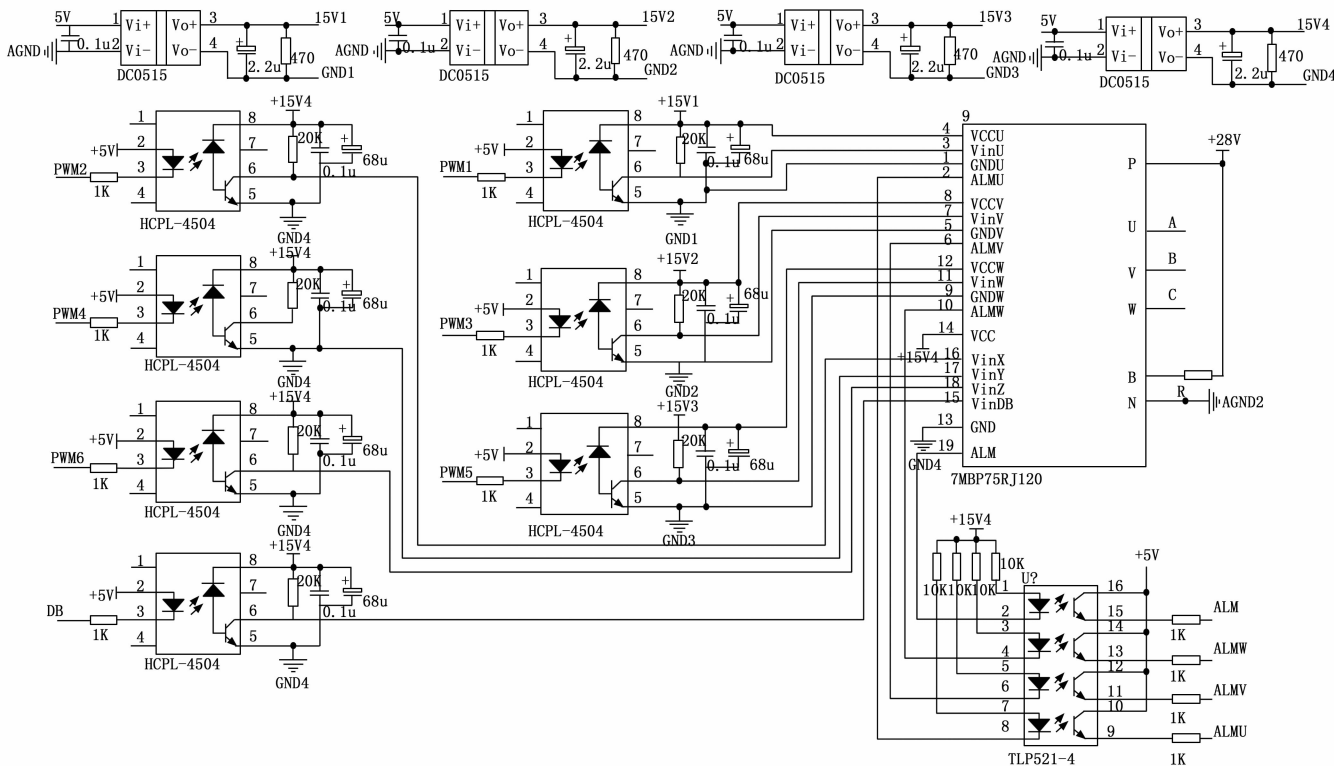


图 4 IPM 模块应用电路

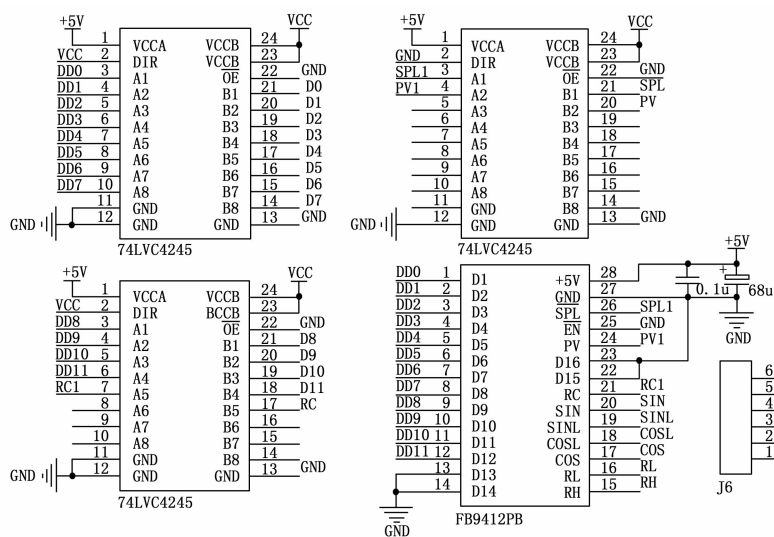


图 5 FB9412PB 连接电路

10 所示。当 ADC 采样相电流结束后, 就开始执行电流环调节程序, 将上次速度调节器的输出作为电流期望值计算偏差量, 经 PI 调节后输出给 PWM 产生模块。同时 Timer 1 进行计数操作, 当达到速度环调节时间时, 中断执行速度调节程序产生新的电流期望值 (S\_D)。图 11 为电流环程序流程图, 其中, cnt\_I 表示 Timer 计数值,  $e(k)$  为误差量, error\_sum\_I 为误差累加,  $u(k)$  为电流环输出。

速度环的工作频率是电流环频率的十分之一, 采用 PI 控制算法<sup>[10]</sup>。速度环调节程序运行的同时, 就开始 Timer 2

计数操作, 如果达到位置环的调节时间, 中断执行位置环调节程序, 如果没有达到, 继续执行速度计算函数。算法过程为: 将上次位置调节器输出作为当前速度期望值, 计算当前速度偏差量  $e(k)$ , 经过 PI 算法调节后输出更新电流环输入。速度环程序流程图如图 12 所示, 图中, cnt\_S 表示 Timer 2 计数值,  $u(k)$  为速度环输出。

位置环处于最外环, 计算频率最低<sup>[11]</sup>。当执行位置环调节程序时, DSP 直接读取 FPGA 内部存储的调整信号和实际测量的偏角, 经比例 P 调节后输出, 更新速度环期望值。位置环程序流程图如图 13 所示。

#### 4 实验结果与分析

在电动舵机系统硬件电路综合调试和软件控制程序设计的基础上, 构建原理样机性能测试实验平台对舵机控制系统的动态性能和稳态精度进行测试<sup>[12-14]</sup>, 以验证系统设计方案的可行性。论文所搭建的样机试验平台如图 14 所示, 主要由舵机控制器、喷管仿真实物、模拟制导计算机、1553B 通讯总线、直流稳压电源、示波器和频率信号发生器组成。

具体实验步骤为: 1) 采用 28 V/50 A 和 5 V/12 A 直流稳压电源给舵机系统供电; 2) 用频率信号发生器产生标准的脉冲信号和正弦信号, 分别测试舵机控制系统 3 个闭环回路是否正常工作; 3) 将 1553B 通讯板设置为总线控制

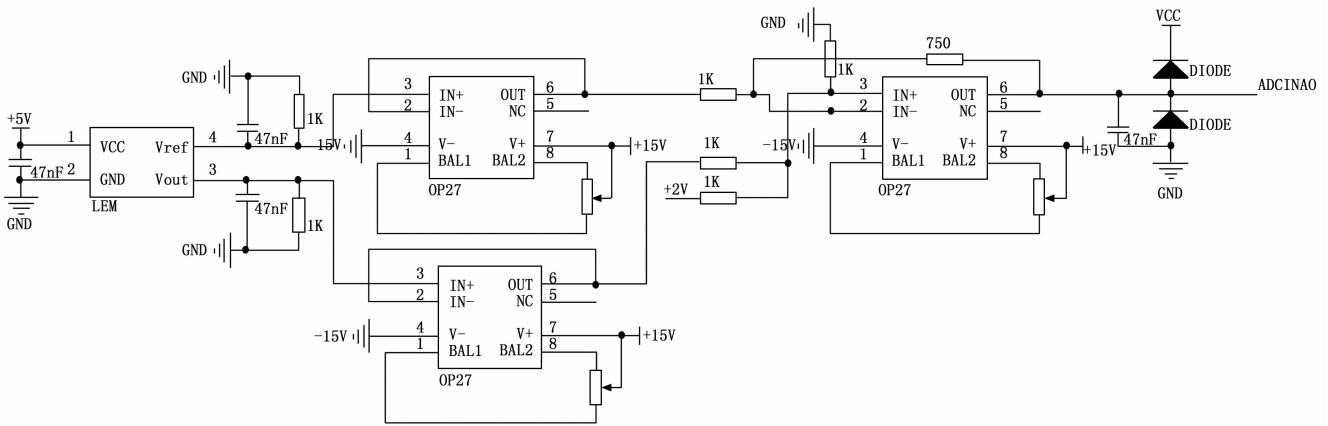


图 6 A 相电流采样电路

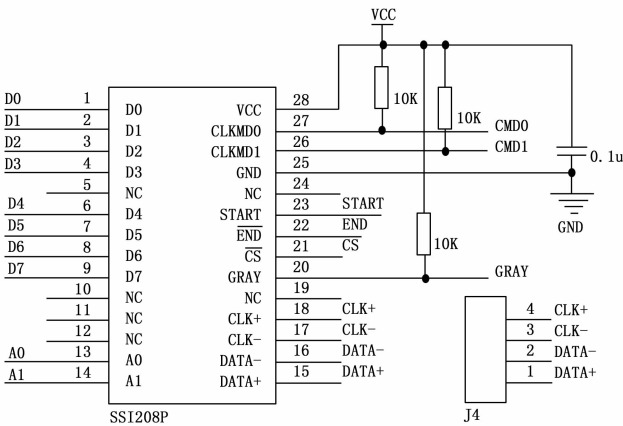


图 7 SSI208P 连接电路

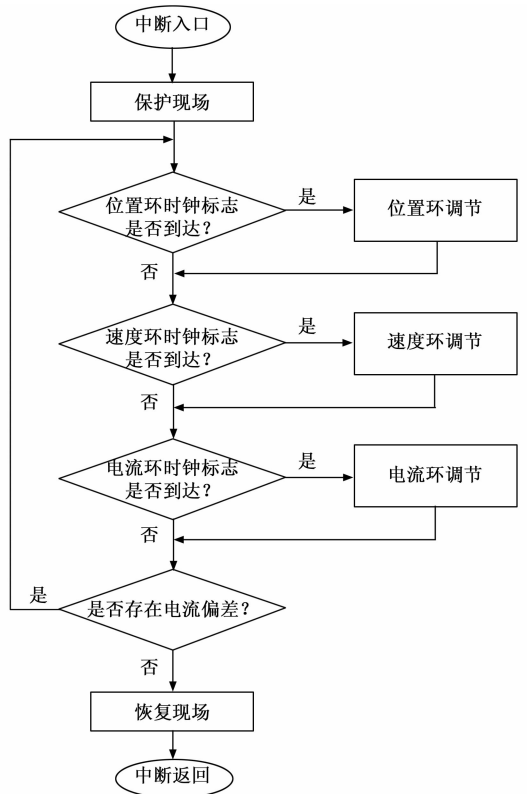


图 10 外部中断服务程序

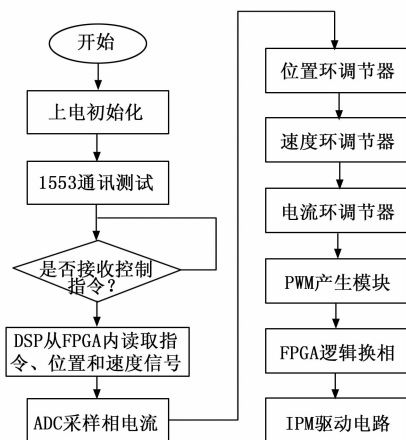


图 8 控制系统软件流程

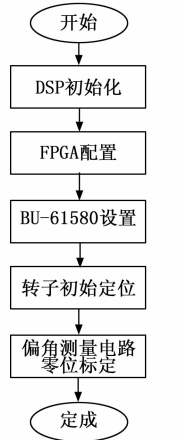


图 9 系统初始化流程

通过 1553B 总线控制器给舵机系统发送幅值大小为  $\pm 10^\circ$  的阶跃激励信号<sup>[15-17]</sup>，同时接收舵机系统在调整过程中实际测量得到的喷管偏角信号，通过 Matlab 绘制输入输出信号曲线，所得结果如图 16 所示。

从图 16 中可以得到，系统在  $+10^\circ$  阶跃信号激励下的上升时间为 46 ms，调节时间为 65 ms，超调量为 5.2%； $-10^\circ$  阶跃信号激励下的上升时间为 47 ms，调节时间为 67 ms，超调量为 5.1%，完全达到了舵机控制系统设计的动态响应性能指标要求。

工作模式，模拟制导计算机，通过双屏蔽电缆和总线耦合器与舵机控制系统的通讯接口连接，直接使用通讯板卡自带的驱动程序给舵机控制系统发送控制指令，同时接收系统反馈的实测偏角信号，程序截图如图 15 所示。

#### 4.1 系统快速性能测试

为了测试舵机控制系统的动态响应性能和稳态精度，

#### 4.2 系统跟踪性能测试

为了测试舵机控制系统的跟踪性能，给系统施加不同

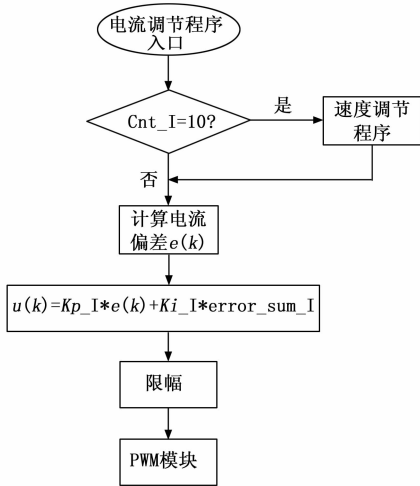


图 11 电流环调节程序

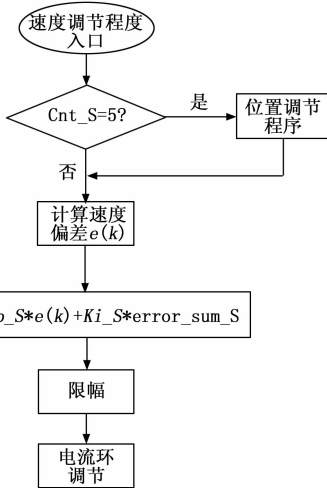


图 12 速度环调节程序

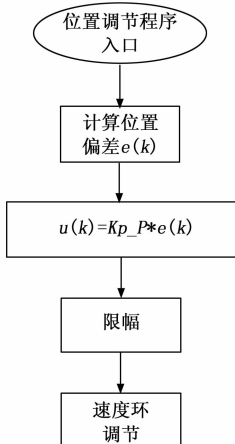


图 13 位置环调节程序

频率、幅值的正弦信号<sup>[18-20]</sup>。首先利用 Matlab 分别将幅值为 2°和 5°, 频率为 1 Hz、2 Hz 和 5 Hz 的正弦信号进行离散化处理, 通过 1553B 总线控制器给系统发送离散的正弦

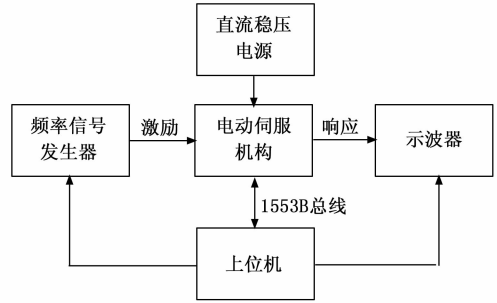


图 14 样机实验平台



图 15 1553B 总线通讯实验程序截图

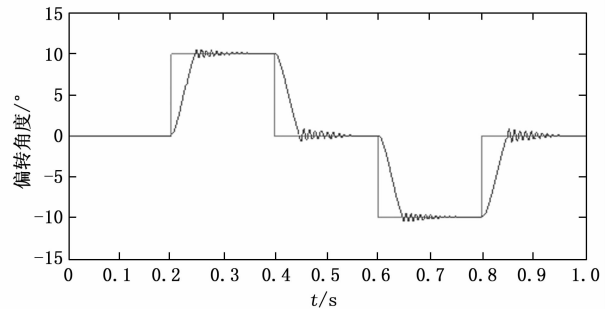


图 16 阶跃信号响应实验曲线

波激励信号, 同时接收控制系统测量得到的喷管实际偏角输出。系统在不同激励下输出响应幅值、相移、最大跟踪误差, 如表 1 所示。从表 1 中数据可以看出, 随着激励信号频率增大, 系统响应输出幅值减小、相移增大、跟踪误差增大; 随着激励信号幅值增大, 系统相移增大、跟踪误差增大。部分实验结果如图 17 所示。

表 1 跟随性能实验结果表

施加激励 (频率、幅值)	输出幅值/ (°)	相移/(°)	最大跟踪 误差/(%)
1 Hz, 2°	1.92	1.92	4.1
2 Hz, 2°	1.83	3.36	10.2
5 Hz, 2°	1.76	9.63	14.8
1 Hz, 5°	4.75	2.52	5.3
2 Hz, 5°	4.42	4.25	11.9
5 Hz, 5°	4.21	11.43	18.1

(下转第 147 页)