



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

计算机控制系统

实验指导书

(2020 版)

夏洁 编

自动化与电气教学实验中心

2020 年 2 月

目录

概述/前言/课程介绍	1
基本要求与注意事项	2
一、安全操作守则.....	2
二、预习要求.....	2
三、出勤要求.....	3
第一部分 实验系统操作指导	4
1.1 计算机控制系统综合实验平台介绍	4
1.1.1 实验设备	4
1.1.2 控制系统的通信网络	4
1.1.3 控制软件实现的硬件平台	5
1.2 准备构建的实验系统类型.....	5
2 仪器设备使用方法.....	5
2.1 模拟机平台	5
2.2 小功率伺服电机	6
2.3 单片机实验平台	7
3 实验系统软件介绍.....	9
3.1 串口调试助手	9
3.2 ICCAVR 编译器.....	10
3.2.1 ICCAVR 编译器简介.....	10
3.2.2 新建工程	10
3.2.3 硬件设置	10
3.2.4 生成初始化代码	12
3.2.5 编译及生成执行文件代码	12
3.2.6 执行文件到单片机的下载	12

第二部分 计算机控制系统实验指导	14
实验一 小功率随动系统的元部件测试与建模实验	14
一、实验目的	14
二、实验内容	14
三、实验设备及其仪器	14
四、预习要求	14
五、实验原理、相关特性测试及其测试步骤	15
六、实验系统使用时的注意事项	19
八、实验报告要求	19
九、课后思考题	20
十、参考资料	21
实验二 基于 ATmega128 单片机平台的部件性能测试实验	22
一、实验目的	22
二、实验内容	22
三、实验设备	22
四、预习要求	22
五、实验原理	23
六、实验步骤	27
七、注意事项	29
八、实验报告要求	29
九、课后思考题	29
十、参考资料	29
实验三 以搭建模型为被控对象的综合控制实验	29
一、实验目的	30
二、实验内容	30
三、实验设备	31
四、预习要求	31
五、实验原理	32

六、实验步骤	32
七、注意事项	33
八、实验报告要求	33
九、课后思考题	34
十、参考资料	34
实验四 以伺服系统为被控对象的综合控制实验	35
一、实验目的	36
二、实验内容	36
三、实验设备	37
四、预习要求	37
五、实验原理	37
六、实验步骤	38
七、注意事项	39
八、实验报告要求	39
九、课后思考题	40
十、参考资料	40
附件 1 实验报告模板	41

概述/前言/课程介绍

计算机控制系统在国民经济各个领域中获得了广泛的应用。自动控制专业的大学生除了必须要具有牢固的计算机控制系统的理论及设计基础外，还必须具备计算机控制系统的独立调试能力。《计算机控制系列实验》课就是一门以培养学生实现计算机控制系统实验开发能力的专业课，涉及到计算机控制系统的工程实现中的很多问题，包括：A/D、D/A 的原理及应用、中断技术、码制转换、溢出保护、比例因子配置等。本实验课将以小功率随动系统为被控对象，进行系统主要元部件测试与建模。具体实现实验中，将根据控制平台与被控对象的不同，分成微机对直流电机的控制、单片机 ATmega128 对模拟机的控制两种。采用双向选择的方式，将参加实验的学生相应的分成两组。实验学生利用所选择的实现平台来实现对模拟数据采集以及输出测试、定时中断，完成对闭环计算机控制系统调试等系列实验。结合必要的知识介绍，培养学生掌握计算机控制系统的元部件测试、实时软件编程以及闭环系统调试能力，使学生初步达到能独立组成和调试计算机控制系统的能力，为今后从事相关系统的开发打下必要的基础。

基本要求与注意事项

一、安全操作守则

1. 首次进入实验室参加实验的学生应认真听取实验指导教师对于安全内容的介绍。
2. 实验室总电源由指导教师负责，学生不得擅自接触。
3. 为确保人身安全，电机实验时应注意衣服、围巾、发辫及实验用线，防止卷入电动机旋转部件。实验过程中需妥善保管好水杯、饮料瓶等容器，不许放置在实验操作台上。
4. 学生进行实验时，独立完成的实验线路连接或改接，须经指导教师检查无误并提醒注意事项后，方可接通电源。
5. 严禁带电接线、拆线、接触带电裸露部位及电机旋转部件。
6. 各种仪表、设备在使用前应先确认其所在电路的额定工作状态，选择合理的量程。若认为仪表、设备存在问题或发生故障，应报告指导教师，不得自行排除故障。
7. 实验中发生故障时，必须立即切断电源并保护现场，同时报告指导教师。待查明原因并排除故障后，才可继续进行实验。
8. 实验室内禁止打闹、大声喧哗、乱扔废物以及其它不文明行为。
9. 实验开始后，学生不得远离实验装置或做与实验无关的事。
10. 实验完毕后应首先切断电源，再经指导教师检查实验数据后方可拆除实验线路，并将实验仪表、用线摆放整齐。

二、预习要求

为加深学生对准备实验内容的认识，尽快熟悉实验仪器，保证教学效果，要求学生每次实验前先做好实验预习。实验预习要求如下：

1. 预习实验指导书及教材有关知识。
2. 了解实验目的、预习有关芯片、部件、仪器设备以及系统的依据、原理与应用电路及其使用。
3. 初步确定实验步骤。

4. 实验前预习有关软件知识，按照所给定的性能指标要求，进行控制器的设计，通过仿真验证。

5. 初步构建实验框架、内容和方案，以待与实验指导教师商定实施，完成计算机控制系统的闭环实验。

三、出勤要求

为强化实验教学管理，规范实验教学过程，提高教学质量，根据实际情况，特制订以下出勤要求：

1. 每次实验必须准时参加，不得迟到、早退，实验时间一律进行考勤。
2. 实验时间一般不得请事假，特殊情况的事假必须有学院盖章的事假条。病假必须有校医院的病假条。
3. 自觉遵守实验室的各项规章制度，注意保持实验室的清洁卫生，爱护实验设备。

第一部分 实验系统操作指导

作为将来从事计算机控制以及相关的工程技术人员，在掌握计算机控制理论、设计方法的同时，必须通过较完整的实验教学的训练，使其具备针对实际计算机控制系统的分析、设计以及系统调试等综合能力，构筑进行开发所必须的工程思维。因此需要给学生提供一个合适的综合实验平台，以便进行系统有效的综合设计及系统调试训练。

当今已进入网络时代，工业自动化控制领域开始向嵌入式和网络化方向迅猛发展，实现网络化控制正逐步成为现代化生产的要求和标志。这又从技术上提出了对实验平台具备嵌入式和网络化的需求。

计算机控制系统是门实践性很强的课程，对于学生的教学要求是除了对基础知识更为扎实和深度的要求外，还增加了对专业领域的新技术的学习、开发工程系统的能力、独立开展科研工作的能力、善于探索学习和掌握新技术的能力等要求。对学生实现高层次的自主学习技能训练，所涉及的计算机控制系统实验则主要侧重于综合设计性实验和研究创新性实验。在 985 教育振兴行动计划项目的支持下，北航自动化学院自动化与电气教学实验心构建了以下的计算机控制系统综合实验平台。

1.1 计算机控制系统综合实验平台介绍

计算机控制系统综合实验平台可分为三大部分：实验设备、控制系统的通信网络、控制软件实现的硬件平台。

1.1.1 实验设备

综合实验平台中设计需要用到的实验设备及其测量仪器有：（1）微机（台式机或笔记本）；（2）数字万用表；（3）光电式转速表；（4）电感表；（5）ATmega128 单片机实验平台（单片机控制回路模块）；（6）XSJ-3 小功率直流随动系统；（7）模拟计算机等。

其中的单片机实验平台、小功率直流随动系统和模拟计算机如图 1-1 所示。

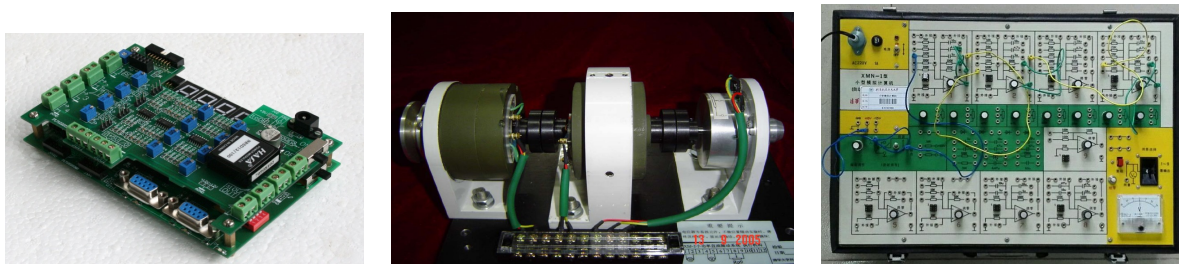


图 1-1 单片机实验平台、小功率直流随动系统和模拟计算机

目前计算机控制系统实验平台用于构建被控对象实验设备有：模拟机平台、小功率伺服电机。

1.1.2 控制系统的通信网络

为了获得实验有效数据，以便于处理、归纳分析总结，需要将实验过程中产生的有关数据进行保存，而实验平台采用单片机时无法保存相关数据，因此，需要借鉴某种总线将实验数据传出来。为此，计算机控制系统综合实验平台选用了 RS232 串口作为通信网络。

1.1.3 控制软件实现的硬件平台

软件实现的目的是在所选用的硬件基础上实现所设计的控制规律。因此，控制软件实现平台的基础为所选用的硬件实现平台。目前针对本科生计算机控制系统实验所选定的控制软件实现硬件平台有：微机（或笔记本）平台、单片机实验平台

1.2 准备构建的实验系统类型

计算机控制系统综合实验平台采用积木化的实验内容，以自主实验为主导的实验方法进行实验教学。该综合实验平台可以构成如图 1-2 所示的各种控制系统。

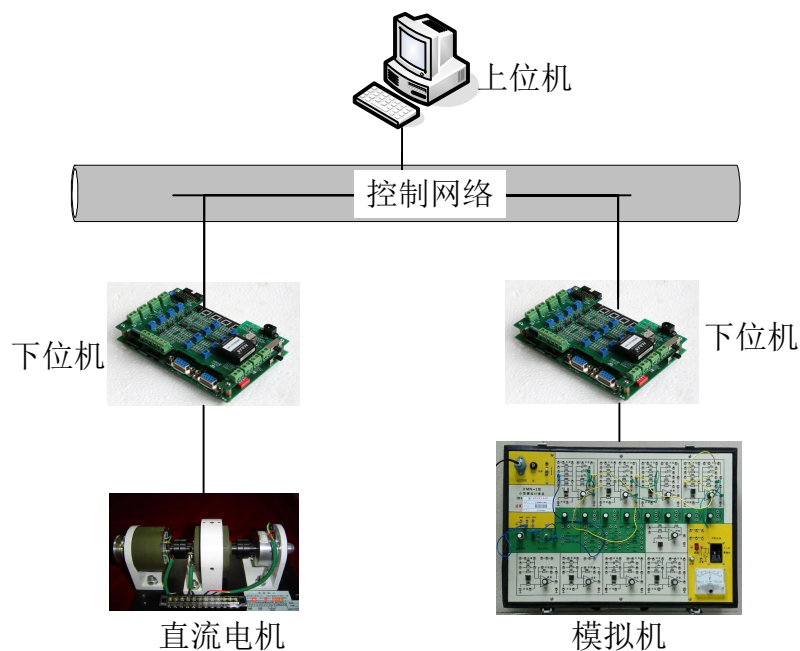


图 1-2 两级控制系统结构示意图

控制网络利用串口通信方式、USB 通信方式实现。

上位机完成实验过程中从键盘输入数据的处理和保存、控制算法的设定计算和优化、实验过程数据纪录、实验装置运行状态的监视和实验数据的显示等功能。即实现过程管理级功能，担当工程师站的作用。

下位机完成与控制系统实验设备相关的所有逻辑控制、数字控制等实时控制任务，即担当直接控制级。

上位机通过控制网络向下位机发布指令，接收下位机上传的状态信息。上位机用户程序根据需要读取数据，并对数据进行图形显示、归档、打印输出等处理。

2 仪器设备使用方法

综合实验平台中设计需要用到的实验测量仪器有：数字万用表、光电式转速表、电感表等，这里就不展开进行介绍。只介绍模拟计算机、XSJ-3 小功率直流随动系统和单片机实验平台。

2.1 模拟机平台

已知某些被控对象的传递函数，则可以利用模拟机平台上的电阻、电容、放大器等

器件，搭建对应的对象模型。采用这种平台的好处是，可以任意改变传递函数的参数。几种典型环节的搭建如图 1-3 所示。

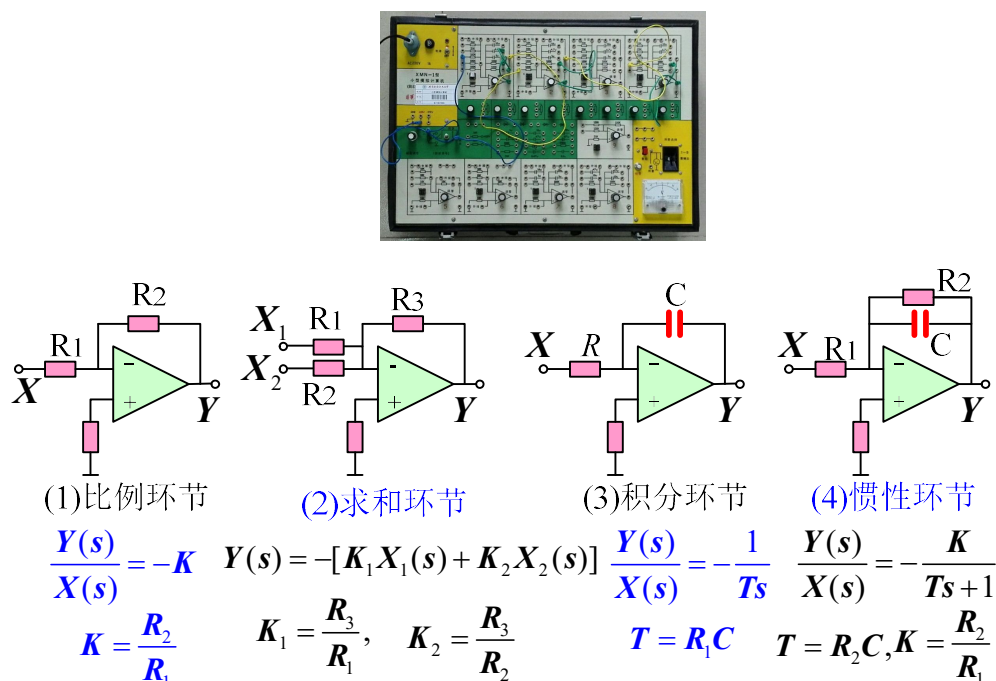


图 1-3 模拟机及其利用其可搭建的几种典型环节图

2.2 小功率伺服电机

小功率伺服电机是运动控制领域的常见以及主要的执行机构，它具有死区和饱和等非线性特性，同时又是一个开环稳定的系统，因此将其选为被控对象具有典型的实际意义。该伺服电机的转角通过精密单圈电位计来测得，与电机同轴的测速发电机可以获得电机的转动速度。

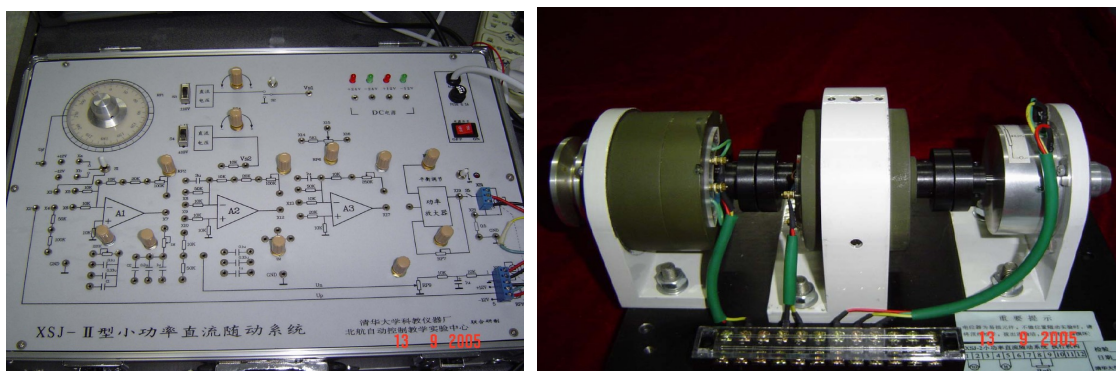


图 1-4 小功率伺服电机

小功率随动系统的元部件共包括执行电机、测速发电机、角位置测量电位计、直流放大器、系统控制台、计算机系统等六个主要部件，其中执行电机和系统控制台构成被控对象，测速发电机和角位置测量电位计分别构成速度反馈（内环）和位置反馈（外环），加上计算机系统和 A/D、D/A 转换器便可构成数字式的计算机控制系统。

主要元部件的性能指标：

（一）执行电机

本实验系统选取直流低速力矩电机SYL-5，产品出厂时给定的技术数据为：

- 峰值力矩 T_p : 5(-5%)公斤·厘米
- 峰值电流 I_p : 1.8安培
- 峰值电压 V_p : 20伏
- 空载转速 n_0 : 500转/分

(二) 测速发电机

选用永磁直流测速发电机70CYD-1，它的主要技术数据为：

- ✧ 信号输出斜率: 1伏/弧度/秒
- ✧ 极限转速: 400转/分
- ✧ 输出特性线性度: 1%
- ✧ 最小负载: 23千欧
- ✧ 静磨擦力矩: 300克·厘米

(三) 角位置测量电位计

选用高精度合成膜电位计: WHJ-2，主要技术数据如下

- 阻值: 1.5千欧
- 功率: 2W
- 线性度: 0.5% 电气角度: 330度;
- 机械转角: 360°无止档。

以上三个部件已组装成一个整体，三者用联轴节均同轴连接。在组合体上面有一接线板，分别为电位计正负电压及输出信号接线柱；力矩电机的控制电压接线柱；测速发电机接线柱。在组合体左端装有转角测量用的刻度盘；右端可往电机轴上加装惯性轮，以改变负载的转动惯量。

在开环或调速系统实验时，为减少电位计磨损，应将电位计断开。

2.3 单片机实验平台

1. 控制系统组成和外观：

AVR单片机控制系统由单片机控制器（简称“数字板”），AD、DA接口转换器（简称“模拟板”）和电源等组成。在使用时，模拟板安装在数字板的上面，如图1-5所示：

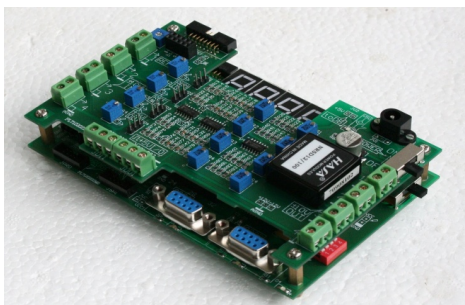


图 1-5 ATmega128 单片机平台

2. 控制系统基本功能：

- 1) 处理器特性: 采用 8 位 ATmega128 处理器，16MHz 晶振，128K 字节 FLASH 程序存储器。
- 2) 4 路 AD 输入: 输入电压范围 $\pm 10V$ ，采样速率 65~260 微秒，精度 10 位。
- 3) 4 路 DA 输出: 输出电压范围 $\pm 10V$ ，控制频率 $\leq 50Hz$ ，波纹 $< 0.5mV$ ，PWM

频率 1kHz, 精度 16 位。

- 4) 2 路电平输入：高电平：7~10V，低电平：0V。
- 5) 2 路电平输出：高电平：5V，低电平：0V。
- 6) 4 位 LED 数码管显示：采用软件实现显示操作。
- 7) 2 路 TTL 串行接口。
- 8) 2 路标准 232 接口。
- 9) 1 路高速 SPI 串行接口。
- 10) 多路 I/O 接口及所有端口引出：用于测量及更广泛的应用。

3. 数字板基本功能:

- 1) 处理器特性: ATmega128 处理器, 8 位, 16MHz 晶振, 128K 字节 FLASH 程序存储器, 先进的 RISC 精简指令集, 具有 16MIPS 能力。
- 2) 8 路 10 位 AD 输入: 采样速率 65~260 微秒, 精度 10 位。
- 3) 6 路 16 位 PWM 输出: 多种频率和多种 PWM 输出方式, 精度 16 位。
- 4) 4 位 LED 数码管显示: 采用 8 段 LED 共阴发光管, 用软件实现数码显示操作。
- 5) 2 路 TTL 串行接口: 采用 ATmega128 片内 2 路串行 UART 接口。
- 6) 2 路 232 串行接口: 由 2 路 UART 接口转化成的 2 路标准 232 接口。
- 7) 1 路 SPI 串行接口:
- 8) 4 位开关排: 用于执行程序的控制。
- 9) 多路 I/O 接口插座及所有端口引出: 本系统设有多路实用的 IO 接口插座, 并将 ATmega128 所有 I/O 端口引出, 便于更广泛的应用及测量。

4. 模拟板

模拟板的布局及各部名称如图 1-6 所示。

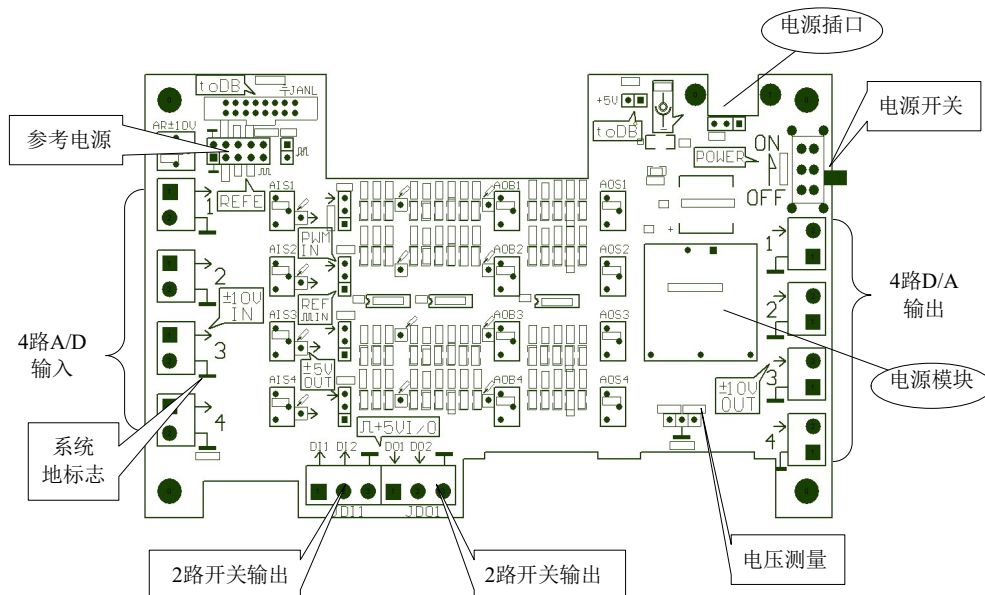


图 1-6 单片机平台模拟板布局图

5. 单片机平台拨码工作模式

在控制系统配套的光盘中，有一个检验程序“demo3.hex”，其用途是对系统的主要

功能进行检验和调整，同时也为用户提供了这个程序的 C 语言编程范例，供用户参考。

检验程序由 10 个子功能组成，分别对应拨码开关 1~10 的位置，这些子功能是：

- 1) 第 1 通道 AD 输入与显示。
- 2) 第 2 通道 AD 输入与显示。
- 3) 第 3 通道 AD 输入与显示。
- 4) 第 4 通道 AD 输入与显示。
- 5) 1~4 通道 DA 输出 PWM 占空比为 0% 的测试。
- 6) 1~4 通道 DA 输出 PWM 占空比为 25% 的测试。
- 7) 1~4 通道 DA 输出 PWM 占空比为 50% 的测试。
- 8) 1~4 通道 DA 输出 PWM 占空比为 75% 的测试。
- 9) 1~4 通道 DA 输出 PWM 占空比为 100% 的测试。
- 10) 1~4 通道 AD 输入后不加处理，然后通过 PWM 产生 DA 输出的测试。

拨码开关的位置含义见图 1-7，例如“1”“2”“3”分别如图 1-7 所示。

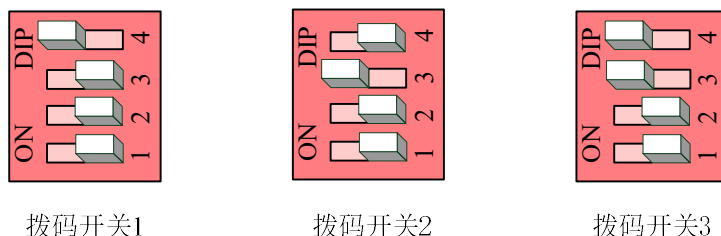


图 1-7 单片机平台拨码开关含义

3 实验系统软件介绍

实验系统采用的软件有：串口调试助手、ICCAVR 编译器等。前者运行在微机或笔记本上，用于串口收发单片机数据，后者为一种使用 ANSI C 语言来开发微控制器（MCU）程序的一个工具软件平台。

3.1 串口调试助手

串口调试助手的界面如图 1-8 所示。

用户通过在对画面菜单中直接选择所需要设置的参数，就可以工作在预定的串口环境下。

一般需要设置的有：串口号（COM1~COM8）、波特率（需要与单片机的设置一致，常用 9600）、校验位（NONE）、数据位（8 位）、停止位（1 位）。

此外，还需要选择“十六进制显示”以及“十六进制发送”。

串口助手画面的右上方框内显示的是串口接收到的数据，右下方框内显示的是待串口发送的数据。可以通过点击按键“更改”来设置接收数据准备存放的数据文件路径，通过点击按键“保存显示数据”，就可以将右上方框内显示的串口接收的数据保存到指定路径下的文件中，通常这个数据文件名为：Rec0i.txt。其中的 i 从 0 开始，依次顺序增加。

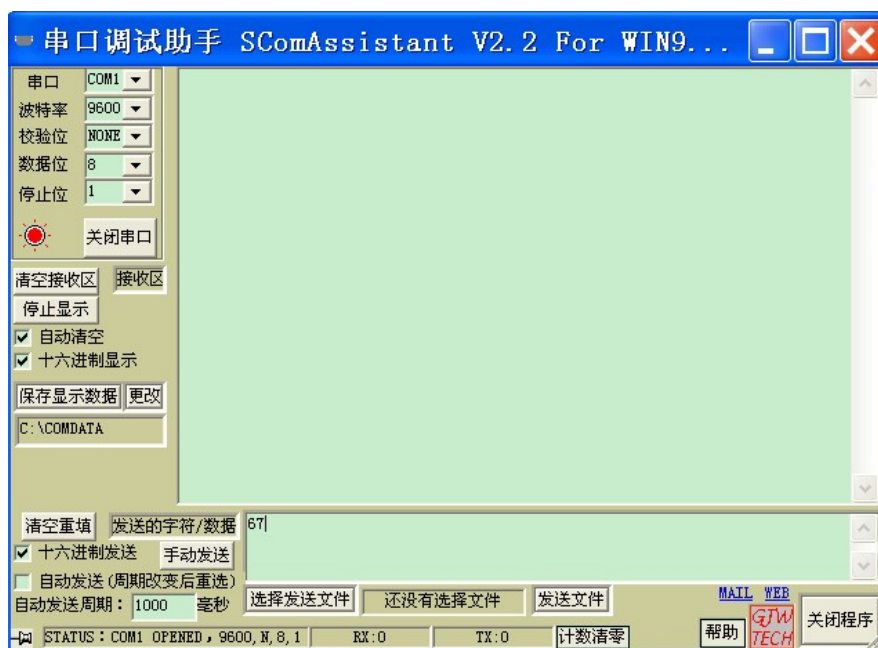


图 1-8 串口调试助手画面

3.2 ICCAVR 编译器

3.2.1 ICCAVR 编译器简介

ICCAVR 是一种使用 ANSI C 语言来开发微控制器（MCU）程序的一个工具。

特点：是一个综合了编辑器和工程管理器的集成工作环境（IDE），是纯 32 位的程序。支持长文件名。

源程序全部被组织到工程中，文件的编辑和工程的构筑也在 IDE 环境中完成。该工程管理器还能直接产生 INTER HEX 格式文件的烧写文件和符合 AVR Studio 的调试文件（COFF 格式）。

3.2.2 新建工程

1) 打开 ICCAVR 平台

2) 建立本项目所在的文件夹 Work2，并将当前目录设置到该目录下，指定项目名称 work2。

3.2.3 硬件设置

1) CPU 设置

选择“Project/Option”，设置 CPU 及堆栈大小，如图 1-9 所示。

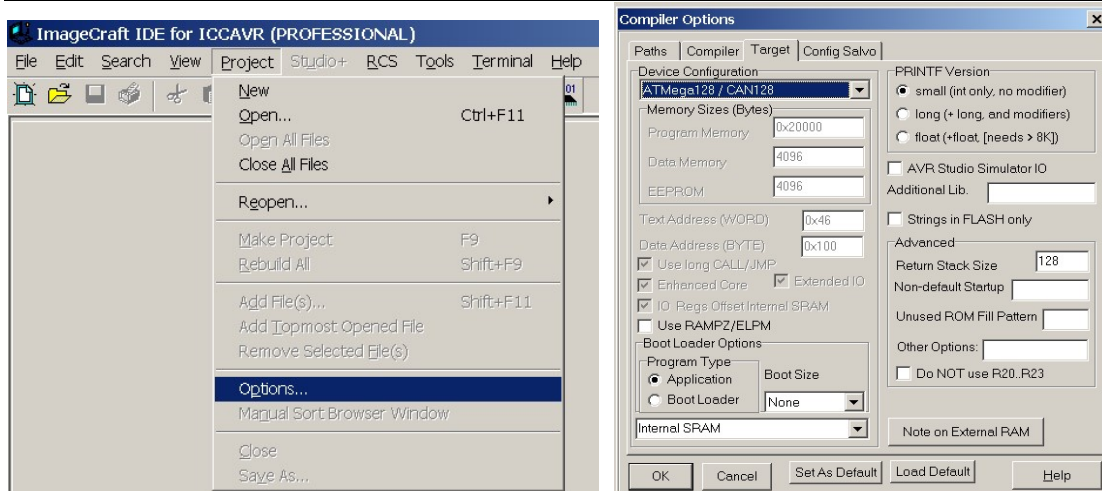



图 1-9 单片机 CPU 设置画面

2) 进行其他硬件接口的设置

应用构筑向导“魔术棒” 是用于创建外围设备初始化代码的一个图形界面。使用编译选项中指定的目标MCU来产生相应的选项和代码。显示目标MCU的每一个外围设备子系统，设置MCU所具有的中断、内存、定时器、I/O端口、UART、SPI和模拟量比较器等外围设备，并产生相应的代码。

进行其他硬件接口设置的过程是：点击魔术棒图标，弹出以下菜单（如图1-10所示），可进行相应的设置：

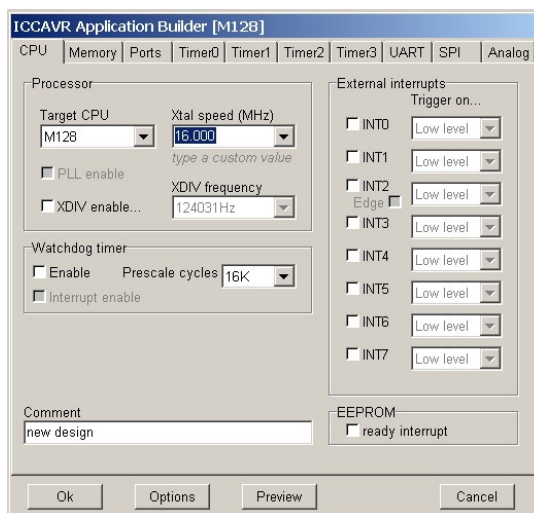


图 1-10 单片机 CPU 设置画面

- 1) 设置CPU、晶振及堆栈大小
- 2) Memory菜单
- 3) Ports菜单(端口)
- 4) 定时器/计数器Timer0菜单
- 5) 定时器/计数器Timer1菜单

- 6) 定时器/计数器Timer2菜单
- 7) 定时器/计数器Timer3菜单
- 8) UART串口菜单
- 9) SPI同步串行口菜单
- 10) Analog模拟比较器及A/D转换菜单

3.2.4 生成初始化代码

在图1-10中，点击“ok”按键后，就可以得到所需的硬件初始化程序段。即该平台将自动生成一个文件，里面将所设置的东西自动生成文件中的相应代码。

注意：（1）这些代码需要保存到一个指定的*.c文件中；（2）需要将该文件添加到所建立的项目中。

3.2.5 编译及生成执行文件代码

点击图1-11中红色框住的按键图标，就可以对所显示的当前工作文件夹下的文件进行编译，若无错误就会产生相应的同名的可执行文件*.hex。

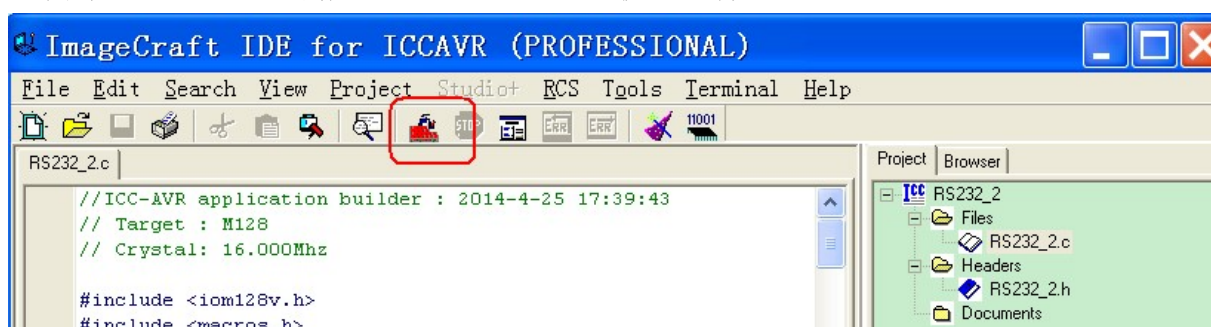


图 1-11 ICCAVR 编译生成执行文件的画面

3.2.6 执行文件到单片机的下载

若运行 ICCAVR 的微机平台是在 windows XP 下，则按照下面介绍的步骤进行。

点击图 1-12 中最上面发热红色框住的按键图标，就可以弹出一个菜单如图 1-12 所示。从中间红色框图中选择需要下载的执行文件。点击最下面的红色框中的按键，就可以将所显示的执行文件下载在单片机上。

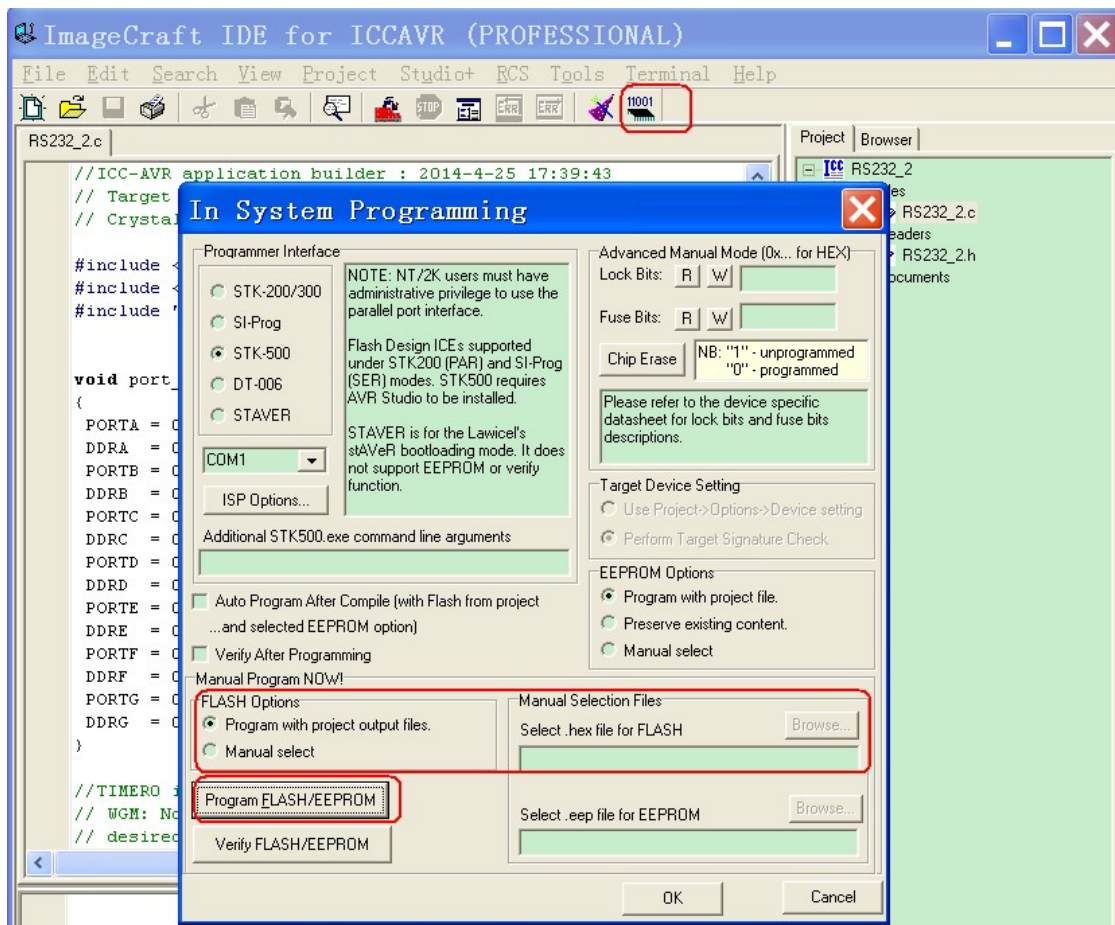


图 1-12 ICCAVR 对执行文件下载的画面

第二部分 计算机控制系统实验指导

说明：实验一和实验二是所有同学必做的，实验三和实验四则选作其中一个。

实验一 小功率随动系统的元部件测试与建模实验

一、实验目的

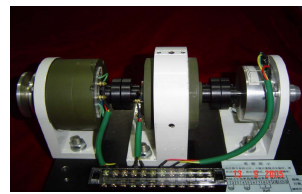
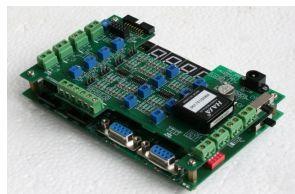
1. 了解小功率随动系统元部件的基本原理及输入输出特性；
2. 掌握测量仪器的使用方法和元部件的测试方法；
3. 学习数据处理和利用工程方法建立被控对象的数学模型的基本方法；
4. 了解元部件的非线性因素及模型误差产生的原因等；
5. 了解最小二乘拟合方法及其使用

二、实验内容

1. 分别测试力矩电机、测速机、功率放大器及反馈电位计的各种性能及输入输出特性；
2. 根据测试结果建立小功率随动系统的数学模型

三、实验设备及其仪器

1. IBM PC 系列微机一台
2. ATmega128 单片机实验设备一套
3. XSJ-3 小功率直流随动系统一套
4. 数字万用表一台
5. 光电式转速表一台
6. 电感表一台



四、预习要求

1. 预习实验指导书及教材部分有关电机的知识；
2. 了解实验目的、预习有关仪器的使用情况、直流伺服电机的原理、放大器的测试方法、功放器件的测试方法。
3. 了解相关各种物理量的测试方法，初步确定测试实验步骤。
4. 测试数据表格的准备及其记录。

5. 测试数据的处理方法预习。

五、实验原理、相关特性测试及其测试步骤

1、电机相关参数测量

(1) 电机电阻

利用万用表的欧姆档直接测试电机电枢的电阻，并且在测试时电刷与电枢处于不同接触位置时多测几次，取平均值。测量结果填入表 1。

表 1 电机内阻测量表

$\theta (^{\circ})$	0	20	40	60	80	100	120	140	160
$R(\Omega)$									
$\theta (^{\circ})$	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
$R(\Omega)$									
平均值									

(2) 电机电感

利用电感表直接测试电机电枢的电感，并且在测试时电刷与电枢处于不同接触位置时多测几次，取平均值。测量结果填入表 2。

表 2 电机电感测量表

$\theta (^{\circ})$	0	20	40	60	80	100	120	140	160
$L(\text{mH})$									
$\theta (^{\circ})$	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
$L(\text{mH})$									
平均值									

(3) 电机死区电压

将电压加至电机两端，将稳压电源置于最小档，电压接近 0，合上开关 K 后，慢慢增大电压到电机刚好开始转动，读下这时的 U，即为死区电压。测量时将电机的起始位置放在几个不同角度，重复实验。然后再将电压反极性重复上述实验，将测量结果填入表 3，并计算出两个方向的死区电压平均值和最大值。

表 3 死区电压测量

$\theta (^{\circ})$	0	20	40	60	80	100	120	140	160
$U(\text{v})$									
平均值 $U = \underline{\hspace{1cm}} \text{v}$ 最大值 $U = \underline{\hspace{1cm}} \text{v}$									
$\theta (^{\circ})$	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
$U(\text{v})$									
平均值 $U = \underline{\hspace{1cm}} \text{v}$ 最大值 $U = \underline{\hspace{1cm}} \text{v}$									

(4) 机电常数

用过渡过程测试法进行电机机电时间常数的测量。将开关突然闭合，一个阶跃电压 U_a 加到电枢两端，通过一路 A/D 把这个过程采入单片机，利用串口发送到微机，再并利

用微机会绘出输出曲线。

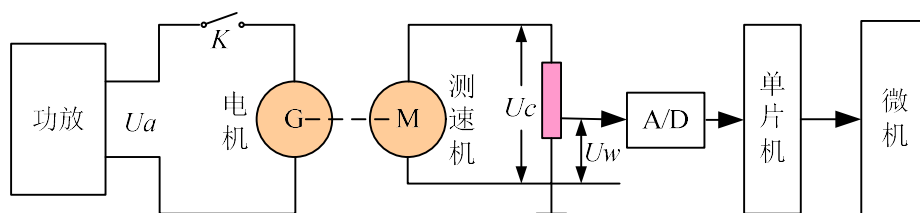


图 2-1 机电时间常数测量电路

特别注意：由于测速机的输出电压比较大，超过 A/D 的测量范围，所以需要进行适当的分压，将分压信号压制到 A/D 的测量范围（-10V~+10V）内，方可用 A/D 检测分压信号，否则将会将大信号引入单片机，造成烧毁单片机等设备的严重后果。

可将 U_a 与转速 ω 的动态响应看成非周期（惯性）环节，从图 2-2 中可求得 T_m （按 5%误差带计算）。

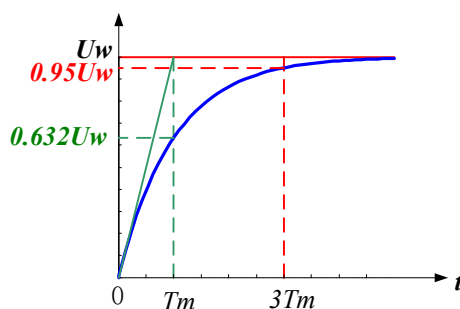


图 2-2 根据阶跃响应计算时间常数

（5）电机调速特性

调速特性是在一定的负载下，转速与控制电压的关系曲线。在电机的工作电压范围内，改变控制电压，并用光电转速表测量电机相应转速。每改变一次电压后，测量一个转速，并记录光电转速表所记录的脉冲个数（即光电转速表的显示数据），如此重复此过程则可得此方向一组数据，填入表 4；然后把电机上所加电压的极性对调，再重复上述过程，则又可得一组数据，填入表 4。测试完成后绘出调速特性曲线，并计算最小二乘法拟合之后的斜率及截矩值。

表 4 电机调速特性测量表

正 转									
Ua(V)	死区	4	6	8	10	12	14	16	18
N(脉冲/分)									
n(转/分)									
Ω (rad/s)									
反 转									
Ua(V)	死区	4	6	8	10	12	14	16	18
N(脉冲/分)									
n(转/分)									
Ω (rad/s)									
平均值	Ω (rad/s) =								

2、测速机相关参数测量

测速机最重要的特性是它的输入输出特性。测试电路如图 2-3 所示：

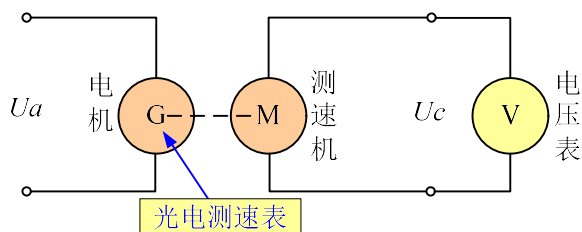


图 2-3 测速机特性测试

在电机工作电压范围内，改变控制电压，并用光电转速表测量电机相应转速，同时用数字电压表测量测速机两端电压，并记录此电压值及光电转速表所记录的脉冲个数，如此重复便可得此方向一组数据，填入表5；然后把电机上所加电压的极性对调，再重复上述过程，则又可得一组数据，填入表5。测试完成后绘制测速机梯度图，并计算最小二乘法拟合之后的截距及斜率值。

表 5 测速机梯度测量表

正 转									
Ua(V)	死区	4	6	8	10	12	14	16	18
N(脉冲/分)									
n(转/分)									
Ω (rad/s)									
Uc(V)									
反 转									
Ua(V)	死区	4	6	8	10	12	14	16	18
N(脉冲/分)									
n(转/分)									
Ω (rad/s)									
Uc(V)									
平均值	Ω (rad/s) =								

3、同轴电位计梯度测量

电位计测试时主要测量线性度，其对应测量电路如图 2-4 所示。

在空载的情况下，将电位计在 $0\sim 360^\circ$ 之间旋转，每转动 20° ，用数字电压表测量输出电压值，如此重复可得一组数据，填入表 6 中。将测量数据绘制拟合曲线，求出电位计对应梯度。

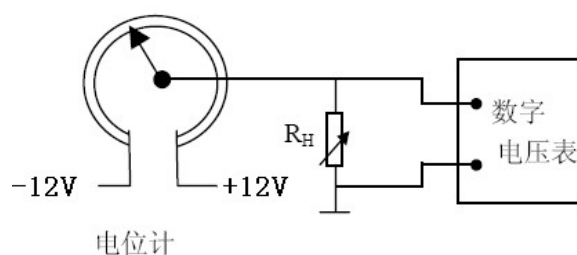


图 2-4 同轴电位计测量

表 6 电位计梯度测量表

$\theta (^{\circ})$	0	20	40	60	80	100	120	140	160
U(v)									
$\theta (^{\circ})$	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
U(v)									

4、控制放大箱相关测量

小功率随动系统（XSJ-2）控制放大箱的面板如图 2-5 所示。其中的指令电位计如图 2-6 所示，功率放大部分如图 2-7 所示。这两者都需要进行相应的测量。

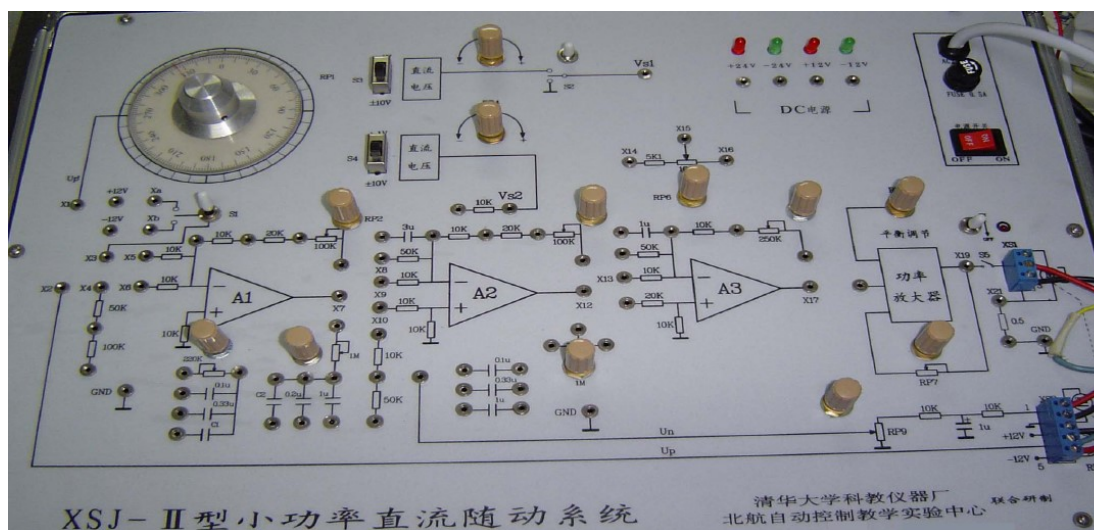


图 2-5 小功率直流随动系统控制放大箱的面板图

（1）指令电位计梯度测量

需要检测该功率放大器的有效线性工作范围。

测量的方法以及对应表格参见图 2-4 和表 6。最后应该获得相应的数据，并根据测量数据绘制拟合曲线，求出指令电位计对应梯度。

（2）功率放大器线性工作范围测量

从图 2-7 可以看到，其中的“平衡调节”电位计主要作用是调零用，通过调节反馈电位计 RP7，可以实现改变功率放大器增益的目的。具体检测时，可以利用指令电位计给出功放的输入信号。由于功放的线性工作范围极为有限，所以需要慢慢增加输入或调节反馈电位计。



图 2-6 指令电位计

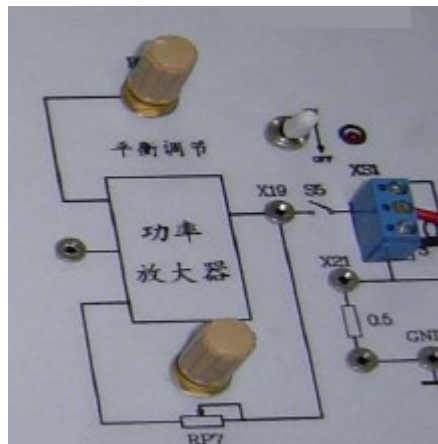


图 2-7 功率放大器

六、实验系统使用时的注意事项

1. 检查执行机构中各连接轴是否紧固；用手转动电机轴不应有碰擦和卡住的现象。检查调节器内各接插件是否紧固；接线螺钉及插孔有无松动，并应予以加以紧固，然后再通电实验。

2. 执行机构上的反馈电位器是 360° 无止挡的，因此，可以任意转动而不致损坏，但在作开环实验或调速实验时，最好将它与电机轴脱开。以免电位器的电刷长时间高速摩擦而影响电位器的精度和寿命。

3. 在进行系统实验之前，应对系统各级零点进行调整，并对系统反馈极性进行判别。

- 运放 A1 级零点的调整——断开给定电位计，将 X5（或 X6）端接地，使运放 A1 的放大倍数为 1，调节电位计 RP2，使其输出端（X7）为零。其余运放级的零点调整类同。

- 系统零点的调整——断开反馈电位计和给定电位计，不加任何校正环节，使运放 A1、A2、A3 和功率放大级串联。设置运放 A1、A2、A3 的放大倍数都为 1，并将 X5 端接地，调节“平衡调节”电位器，使输出端（X19）为零。

- 系统反馈极性的判别——根据反馈控制原理，反馈极性的判别方法可多种多样。一种实用方法为：断开反馈电位计，使系统开环。给定电位计转过一个小的正角度，（用数字万用表测得是一个小的正电压，正、负方向任定），这时电动机便转动起来。记住电机的转动方向，然后将给定电位计置零（或断开），按原来电机转动方向，用手转动电机轴使反馈电位计从零位转过一个角度，用数字万用表测量反馈电位计的输出电压。若是负电压，则系统的反馈极性为负反馈，否则为正反馈。（思考：若是正反馈应怎么办？）

八、实验报告要求

实验报告中应包括以下内容：

1. 本实验所涉及工程问题描述

利用所提供的仪器设备、通过本实验的测量，可以得到很多关于试验系统的数据，需要分析哪些是影响直流伺服电机工作的主要因素，哪些对建立直流伺服电机、测速机、

电位计等传递函数产生关键影响。从实际物理概念来分析，这几种器件或设备对应的工作情况又该如何反应出来，各起什么作用。实验数据最终处理结果的意义何在。

结合专业方向——飞行器的导航制导与控制，考虑该实验设备对应的工程问题可能是什么。

2. 实验工作原理与理论分析

从测量结果来分析了解掌握直流伺服电机、测速机、功率放大器及反馈电位计的作用，输入输出特性、工作原理。

3. 预习思考题的实验验证分析（根据实验内容注明具体要求）

可验证力矩电机、测速机、功率放大器及反馈电位计的各种性能及输入输出特性；与课堂或教材中引用的结果是否有出入，考虑直流电机为何可以近似成 2 阶函数。一些非线性的因素表现在哪里，范围有多大。

4. 实验过程描述和实验结果分析（根据实验内容注明具体要求）

记录实验过程，依据自控控制、自控元件等基本原理解，对所获得的数据进行处理，建立力矩伺服电机、测速机、功率放大器及反馈电位计的传递函数。

5. 实验结论（根据实验内容注明具体要求）

根据测试结果建立小功率随动系统的数学模型。

6. 个人体会和建议

提出个人的观点、体会和想法、建议。

九、课后思考题

1. 实际电机传函的非线性因素如何处理？
2. 电机的饱和因素对电机的动态控制可能会什么影响？
3. 电机的死区电压会对电机精确控制效果有什么影响？

十、参考资料

- 1、程鹏，自动控制原理，高等教育出版社，2011 年 7 月。
- 2、高金源等，计算机控制系统，高等教育出版社，2010 年 1 月。

实验二 基于 ATmega128 单片机平台的部件性能测试实验

一、实验目的

1. 了解 ATmega128 单片机平台内部的储存方式，掌握数据转换的编程方法；
2. 测量 A/D、D/A 接口的输入/输出特性，分析误差产生原因。
3. 了解中断的原理，掌握中断编程方法；掌握定时器的工作原理、使用以及编程方法；掌握定时器中断程序的设计方法
4. 熟悉串口总线的通信原理，学习和掌握串口线数据通讯的方法，掌握两种平台之间通讯的硬件连接及软件编制。

二、实验内容

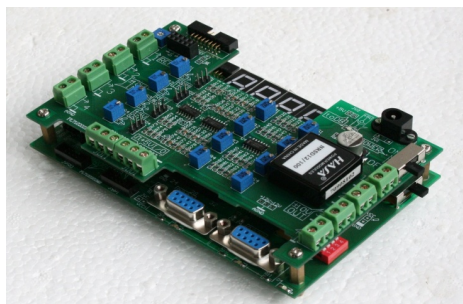
1. **A/D、D/A 测试实验**——熟悉使用给定的 ATmega128 单片机控制回路模块以及其附带的 A/D 及 D/A 接口电路的使用；进行模拟信号的采集以及转换；针对给定的数字信号进行模拟量的转换。

2. **定时中断实验**——利用单片机平台的定时器，设置中断信号，编制调试每 0.5 秒采样一次的中断服务子程序。

3. **与微机的数据通讯实验**——微机接收单片机通过串口发送过来的数据，并在 CRT 上显示出来；单片机通过串口接收微机传来的数据后，在 LED 上显示；通过检测收发是否一致，来检测数据通讯是否正常。

三、实验设备

1. IBM PC 系列微机或笔记本一台
2. ATmega128 单片机实验设备一套
3. 数字万用表一台



四、预习要求

1. 学习提供的实验指导书的相关部分知识，复习微机原理相关的接口、通信、中断等方面的知识。
2. 预习所用测量仪器以及实验平台的使用。
3. 预习了解 AVR 单片机的功能及其使用。

4. 熟悉相关的实验原理

五、实验原理

1. ATmega128单片机A/D转换特点

- ☐ 10 位逐次逼近型精度
- ☐ 0.5 LSB 的非线性度, ± 2 LSB 的绝对精度
- ☐ 13 - 260 μ s 的转换时间, 最高分辨率时采样率高达15kSPS
- ☐ 8 路复用的单端输入通道, 7 路差分输入通道, 2 路可选增益为10x 与200x 的差分输入通道
- ☐ 可选的左对齐ADC 读数
- ☐ 0 - VCC 的 ADC 输入电压范围
- ☐ 可选的2.56V ADC 参考电压
- ☐ 连续转换或单次转换模式
- ☐ ADC 转换结束中断
- ☐ 基于睡眠模式的噪声抑制器

2. 经过调理电路后, 单片机平台具有以下特点:

- ☐ 处理器特性: 采用8位ATmega128处理器, 16MHz晶振, 128K字节FLASH程序存储器。
- ☐ 4路AD输入: 输入电压 ± 10 V, 采样速率65~260微秒, 精度10位。
- ☐ 4路DA输出: 输出电压范围 ± 10 V, 控制频率 ≤ 50 Hz, 波纹 < 0.5 mV, PWM频率1kHz, 精度16位。
- ☐ 2路电平输入: 高电平: 7~10V, 低电平: 0V。
- ☐ 2路电平输出: 高电平: 5V, 低电平: 0V。
- ☐ 4位LED数码管显示: 采用软件实现显示操作。
- ☐ 2路TTL串行接口。
- ☐ 2路标准232接口。

3. ADC转换步骤:

- ◆ 初始化ADC模块
- ◆ 软件启动ADC, 向ADC启动转换位ADSC位写"1"可以启动单次转换。在转换过程中此位保持为高, 直到转换结束, 然后被硬件清零。
- ◆ 等待ADC中断, 或查询相应的状态标志位
- ◆ 在AC结果寄存器中读取ADC转换结果。

例如, 测试通道ADChannel (=0~3) 的相应程序为:

```
StartADC();  
while(!(ADCSRA & (1<<ADIF))); //conversion complete, read value (int) using...  
ch[ADChannel] = ADCL;           //Read 8 low bits first (important)  
ch[ADChannel] += (int)ADCH << 8; //read 2 high bits and shift into top byte
```

ADC转换步骤:

利用定时器1和定时器3实现了4路D/A转换, 所以对应的输出程序(假设已经进行了相应的初始化后)为:

```
OCR1AH = pwmValue[0]>>8; OCR1AL = pwmValue[0]; // D/A1输出
OCR1BH = pwmValue[1]>>8; OCR1BL = pwmValue[1]; // D/A1输出
OCR3BH = pwmValue[2]>>8; OCR3BL = pwmValue[2]; // D/A1输出
OCR3CH = pwmValue[3]>>8; OCR3CL = pwmValue[3]; // D/A1输出
```

关于ATmega128单片机说明和编程操作请参考《ATmega128_英文版数据手册》。

4. 单片机控制回路定时器情况

ATmega128 有 2 个 8 位 CPU 定时器（分别称为 CPU 定时器 0、2）、2 个 16 位 CPU 定时器（分别称为 CPU 定时器 1、3）。目前只有定时器 0、2 留给用户使用。

5. ATmega128 中断系统

0000~003FH 为存储系统的中断向量表，存放中断子程序的入口地址。

表 7 ATmega128 中断向量表

向量号	程序地址	中断源	中断定义
1	\$0000	RESET	复位
2	\$0002	INT0	外部中断请求 0
3	\$0004	INT1	外部中断请求 1
4	\$0006	INT2	外部中断请求 2
5	\$0008	INT3	外部中断请求 3
6	\$000A	INT4	外部中断请求 4
7	\$000C	INT5	外部中断请求 5
8	\$000E	INT6	外部中断请求 6
9	\$0010	INT7	外部中断请求 7
10	\$0012	TIMER2 COMP	T/C 2 比较匹配
11	\$0014	TIMER2 OVF	T/C 2 溢出
12	\$0016	TIMER1 CAPT	T/C 1 捕捉事件
13	\$0018	TIMER1 COMPA	T/C 1 比较匹配 A
14	\$001A	TIMER1 COMPB	T/C 1 比较匹配 B
15	\$001C	TIMER1 OVF	T/C 1 溢出
16	\$001E	TIMER0 COMP	T/C 0 比较匹配
17	\$0020	TIMER0 OVF	T/C 0 溢出
18	\$0022	SPI, STC	SPI 串行传输结束
19	\$0024	USART0, RX	USART0, Rx 结束
20	\$0026	USART0, UDRE	USART0 数据寄存器空
21	\$0028	USART0, TX	USART0, Tx 结束
22	\$002A	ADC	ADC 转换结束
23	\$002C	EE READY	EEPROM 就绪
24	\$002E	ANALOG COMP	模拟比较器
25	\$0030	TIMER1 COMPC	T/C 1 比较匹配 C
26	\$0032	TIMER3 CAPT	T/C 3 捕捉事件
27	\$0034	TIMER3 COMPA	T/C 3 比较匹配 A
28	\$0036	TIMER3 COMPB	T/C 3 比较匹配 B

29	\$0038	TIMER3 COMPC	T/C 3 比较匹配 C
30	\$003A	TIMER3 OVF	T/C 3 溢出
31	\$003C	USART1, RX	USART1, Rx 结束
32	\$003E	USART1, UDRE	USART1 数据寄存器空
33	\$0040	USART1, TX	USART1, Tx 结束
34	\$0042	TWI	两线串行接口
35	\$0044	SPM READY	保存程序存储器内容就绪

6、串口通信原理

串行接口

- ❖ 将接收来自CPU的并行数据字符转换为连续的串行数据流发送出去
- ❖ 将接收的串行数据流转换为并行的数据字符供给CPU的器件

RS-232通信协议

通信协议是指通信双方的一种约定。约定包括对数据格式、同步方式、传送速度、传送步骤、检纠错方式以及控制字符定义等问题做出统一规定，通信双方必须共同遵守。

物理接口标准中串行通信接口的基本任务：

- a) 实现数据格式化
- b) 进行串—并转换
- c) 控制数据传输速率
- d) 进行错误检测
- e) 进行TTL与EIA电平转换
- f) 提供EIA-RS-232C接口标准所要求的信号线

软件协议中的串行通信协议有以下两类：

① 异步通信协议——起止式异步协议

- 特点是一个字符一个字符传输，并且传送一个字符总是以起始位开始，以停止位结束，字符之间没有固定的时间间隔要求。
- 异步通信是按字符传输的，每传输一个字符，就用起始位来通知收方，以此来重新核对收发双方同步。
- 异步双方不需要共同的时钟，也就是接收方不知道发送方什么时候发送。
- 特点：简单、点对点、通信效率低

② 同步通信协议

- 有面向字符的和面向比特的两种协议
- 同步就是双方有一个共同的时钟，当发送时，接收方同时准备接收。
- 特点：复杂、点对多点、通信效率高

针对异步通信方式的详细说明：

1) 异步串行方式

异步串行方式是将传输数据的每个字符一位接一位(例如先低位、后高位)地传送。数据的各不同位可以分时使用同一传输通道，因此串行I/O可以减少信号连线，最少用一对线即可进行。接收方对于同一根线上一连串的数字信号，首先要分割成位，再按位组成字符。为了恢复发送的信息，双方必须协调工作。在微型计算机中大量使用异步串行I/O方式，双方使用各自的时钟信号，而且允许时钟频率有一定误差，因此实现

较容易。但是由于每个字符都要独立确定起始和结束(即每个字符都要重新同步), 字符和字符间还可能有长度不定的空闲时间, 因此效率较低。

异步串行通信中一个字符的传送格式。开始前, 线路处于空闲状态, 送出连续“1”。传送开始时首先发一个“0”作为起始位, 然后出现在通信线上的是字符的二进制编码数据。每个字符的数据位长可以约定为5位、6位、7位或8位, 一般采用ASCII编码。后面是奇偶校验位, 根据约定, 用奇偶校验位将所传字符中为“1”的位数凑成奇数个或偶数个。也可以约定不要奇偶校验, 这样就取消奇偶校验位。最后是表示停止位的“1”信号, 这个停止位可以约定持续1位、1.5位或2位的时间宽度。至此一个字符传送完毕, 线路又进入空闲, 持续为“1”。经过一段随机的时间后, 下一个字符开始传送才又发出起始位。

每一个数据位的宽度等于传送波特率的倒数。微机异步串行通信中, 常用的波特率为50, 95, 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600等。

接收方按约定的格式接收数据, 并进行检查, 可以查出以下三种错误:

- (1) 奇偶错: 在约定奇偶检查的情况下, 接收到的字符奇偶状态和约定不符。
- (2) 帧格式错: 一个字符从起始位到停止位的总位数不对。
- (3) 溢出错: 若先接收的字符尚未被微机读取, 后面的字符又传送过来, 则产生溢出错。

每一种错误都会给出相应的出错信息, 提示用户处理。

2) 串行接口的物理层标准

通用的串行I/O接口有许多种, 现仅就最常见的EIA RS-232C标准作简单介绍。

这是美国电子工业协会推荐的一种标准(Electronic industries Association Recommended Standard)。它在一种25针接插件(DB-25)上定义了串行通信的有关信号。这个标准后来被世界各国所接受并使用到计算机的I/O接口中。

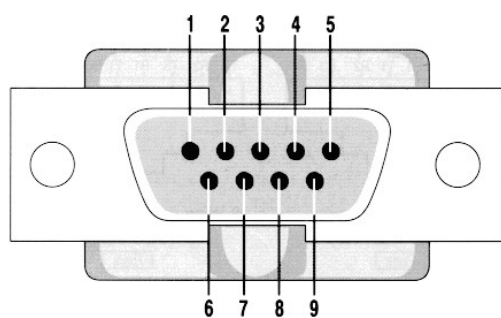


图2-8 RS232的9针接口图

TXD (pin 3): 串口数据输出

RXD (pin 2): 串口数据输入

GND (pin 5): 地线

① 信号连线

在实际异步串行通信中, 并不要求用全部的RS-232C信号, 许多PC/XT兼容机仅用15针接插件(DB-15)来引出其异步串行I/O信号, 而PC中更是大量采用9针接插件(DB-9)来担当此任。实际应用时, 可以最简化采用3根线来实现串口数据的收发, 如图

2-1所示。

TXD / RXD 是一对数据线，TXD 称发送数据输出，RXD 称接收数据输入。

信号地：所有的信号都要通过信号地线构成耦合回路。通信线有以上三条(TXD、RXD和信号地)就能工作了。其余信号主要用于双方设备通信过程中的联络(握手信号)，而且有些信号仅用于和MODEM 的联络。若采取微型机对微型机直接通信，且双方可直接对异步串行通信电路芯片编程，若设置成不要任何联络信号，则其它线都可不接。有时在通信线的同一端将相关信号短接以“自握手”方式满足联络要求。

② 信号电平规定

RS—232C 规定了双极性的信号逻辑电平：

-3V 到-25V 之间的电平表示逻辑“1”。

+3V 到+25V 之间的电平表示逻辑“0”。

因此这是一套负逻辑定义。

以上标准称为EIA 电平。PC / XT 系列使用的信号电平是-12V 和+12V，符合EIA 标准，但在计算机内部流动的信号都是TTL 电平，因此这中间需要用电平转换电路。常用芯片MCI488 或SN75150 将TTL 电平转换为EIA 电平，MCI489 或SN75154 将EIA 电平转换为TTL 电平。PC / XT 系列以这种方式进行串行通信时，在波特率不高于9600 的情况下，理论上通信线的长度限制组为15 米。

六、实验步骤

1、关于A/D、D/A测试

可以参考研制单位提供的参考程序“demo3C例程”。

测试过程（利用公司提供的测试程序）

将demo3.hex下载到单片机上，通过拨动拨码开关到不同的位置，就可以进行不同的测试。下面分别是拨码开关拨到相应值时，可以进行的测试：

1. 第1通道AD输入与显示。
2. 第2通道AD输入与显示。
3. 第3通道AD输入与显示。
4. 第4通道AD输入与显示。
5. 1~4通道DA输出PWM占空比为0%的测试。 对应D/A输出-10V
6. 1~4通道DA输出PWM占空比为25%的测试。对应D/A输出-5V
7. 1~4通道DA输出PWM占空比为50%的测试。对应D/A输出0V
8. 1~4通道DA输出PWM占空比为75%的测试。对应D/A输出+5V
9. 1~4通道DA输出PWM占空比为100%的测试。对应D/A输出+10V
10. 1~4通道AD输入后不加处理，然后通过PWM产生DA输出的测试

A/D测试信号来源如图2-9所示。

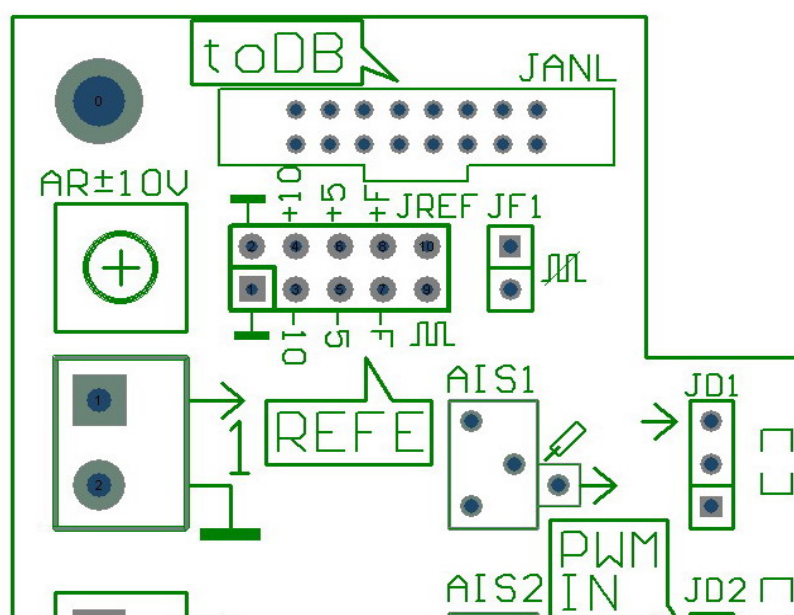


图2-9 控制回路模拟板上的测试信号来源示意图

控制回路模拟板上的“REFE”为标准信号来源（-10V,-5V,0V,+5V,10V）。若希望采用-10V~+10V中的一个任意信号，则为图上的点“AR±10”

一般控制回路模拟板上的测试信号输入及输出电压测试点如图2-10所示。

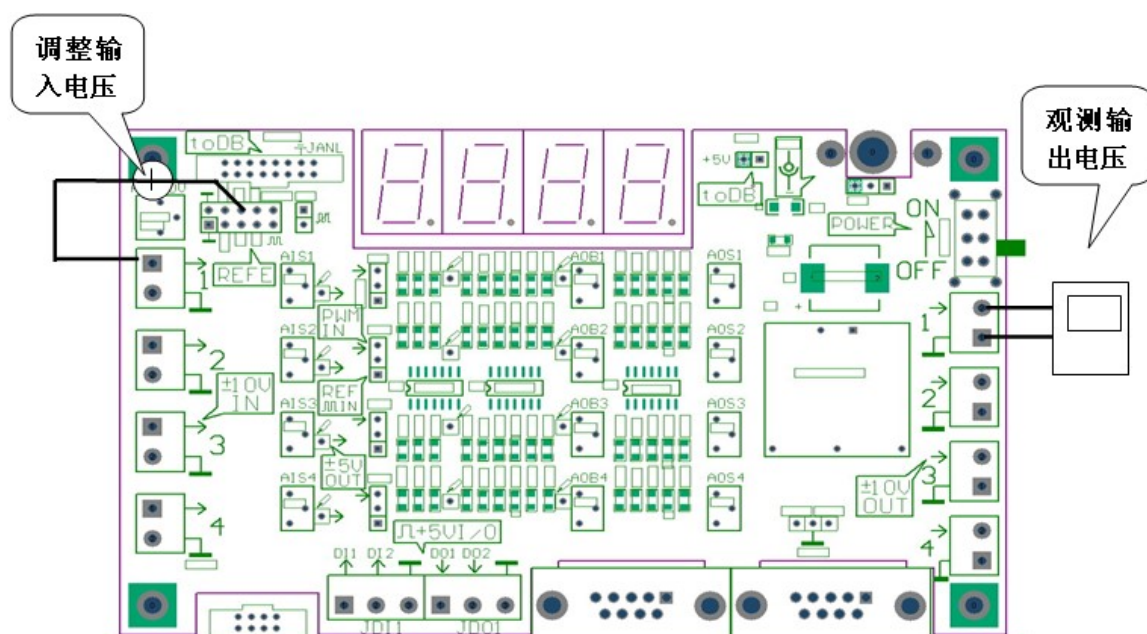


图2-10 控制回路模拟板上的测试信号输入及输出电压测试点示意图

3、关于定时器和中断测试

利用单片机的8位定时器/计数器T0或T2，建立一个程序项目，设置采样周期=500毫秒的定时中断及其显示。

注意：8位定时器无法设定500毫秒的定时中断，需要结合软件计数器n和硬件定时

器 T_h 来满足这个要求。使得满足 $n \cdot T_h = 500$ 毫秒；且每个采样周期刷新一次LED显示器。

4、关于与微机的数据通讯测试

微机用户发送1个数，并将发送的1个数在CRT上显示出来；单片机平台收到微机用户传来的数据后，把每个数据加6，将处理后的数据发送微机用户；微机用户接收单片机平台用户发送的数据，并将他们显示出来；通过串口线进行数据通讯。

七、注意事项

1. 已经将 A/D 端口的地用胶封上，以免误将测试信号插入 A/D 端口的地，造成短路。

八、实验报告要求

本实验是为下一个综合实验打下所需要的各方面的基础，因此不需要单独撰写实验报告。

九、课后思考题

无

十、参考资料

- 1) 研制单片机控制回路模块的厂家提供的“控制系统说明书”。
- 2) ATmega128 中文版数据手册.pdf
- 3) ATmega128 英文版数据手册.pdf

实验三 以搭建模型为被控对象的综合控制实验

实验对象指标要求

由于模拟机平台上搭建的被控对象的参数与选用的电阻、电容数值有关，且可以通过选用不同的电阻电容，轻易改变被控对象的参数值，因此可以每年更换被控对象的参数。以下是 2013 年所需选用的参数：

被控对象的传递函数为： $G(s) = \frac{2}{s(2s+1)}$ ，采样周期 $T=0.5$ 秒，从下面给出的设计

指标中选择一组，利用计算机辅助设计数字控制器 $D(z)$ ，并用数字仿真验证设计指标。

设计指标为：

第一组：时域指标： $\sigma\% < 20\%$ ， $t_s \leq 9s$ ；

第二组：设计指标为（可以考虑采用 W 平面设计法+BODE 设计法）：

(1) 频域： $\gamma \geq 50^\circ$, $\omega_c \geq 0.5 \text{ rad/s}$;

(2) 时域： $\sigma\% < 25\%$, $t_s \leq 10 \text{ s}$;

(3) 静态： $K_v = 2 (1/\text{秒})$

用模拟机搭建的被控对象模型，例如针对某个给定的传递函数，可以搭建的对象模型如图 2-11 所示，图中的电阻和电容的选值只是作为参考值，学生可以根据模拟机所提供的电阻和电容值进行选择使用，只要满足传递函数的系数配置即可。

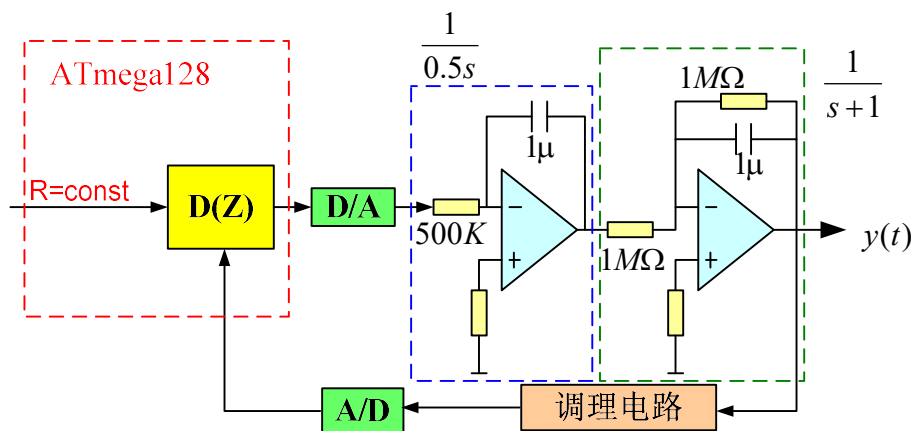


图 2-11 传递函数为 $G(s) = \frac{2}{s(s+1)}$ 所对应搭建对象及闭环控制结构图

一、实验目的

1. 熟悉及其使用 ATmega128 单片机平台的使用；
2. 编制 A/D、D/A 接口的测试程序，分析测量误差产生原因，掌握数据转换的编程方法。
3. 了解中断的原理，掌握定时中断，串口接收中断等中断编程方法。
4. 掌握并熟悉应用定时器功能，实现所设置的采样周期。
5. 学习应用串口通信通讯技术，编程实现上下位机的实时通讯。
6. 运用课程学习所介绍的方式方法，设计满足性能指标要求的控制器并进行仿真验证。
7. 构成闭环实时控制回路，进行闭环回路的控制验证。

二、实验内容

1. 熟悉使用给定的 ATmega128 单片机控制回路模块以及其附带的 A/D 及 D/A 接口

电路的使用；进行模拟信号的采集以及转换；针对给定的数字信号进行模拟量的转换。

2. 将采样数据的高 8 位通过串口送微机显示并保留在所设定的文件中，以便绘图及事后分析用。

3. 控制 20 拍，保证系统进入稳态，即进入 5% 的误差带。

4. 采用最左一位数码管显示采样次数 0~F，最右两位用于显示采样结果。注意采用动态显示方式，必须留有余辉效应。

5. 利用模拟板上的多选择开关设置工作模态（可进行系统的闭环控制）和其他模态（保证 D/A 输出为零，进行被控对象状态清零等辅助工作）。

6. 采用作为上位机的微机或笔记本通过串口来设置指令信号，考虑到系统允许的超调量，指令阶跃信号的输入值应当适当设计，以使对象的最大超调信号能够被采样进入计算机。

7. 针对给定的传递函数，在模拟机平台上搭建相应的被控对象。

8. 计算并选择适当的器件，达到调理电路的要求。

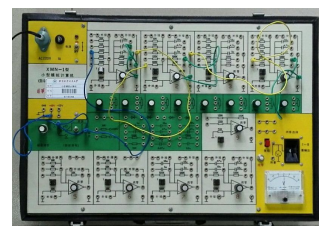
9. 设计数字控制器，进行仿真验证。

10. 利用单片机平台作为下位机实现所设计的数字控制器，满足位置回路设计要求；通过 RS232 串口，将被控对象的状态发送给上位机（微机）；接收上位机的指令信号。

11. 上位机发送指令、接收状态，保存闭环控制系统运行的状态数据到相关的数据文件中，以便对控制效果进行有效的分析，绘制相应的曲线，获得有益的结论。

三、实验设备

1. IBM PC 系列微机或笔记本一台
2. ATmega128 单片机实验设备一套
3. 数字万用表一台
4. 模拟机一台



四、预习要求

1. 学习提供的实验指导书的相关部分知识，复习微机原理相关的接口、通信、中断等方面的知识。

2. 预习所用测量仪器以及实验平台的使用，了解 AVR 单片机的功能及其使用。

3. 计算机控制课程中关于构建计算机控制系统的第 7 章和工程实现对应的第 8 章方

面的相关内容。

五、实验原理

计算机控制课程中关于构建计算机控制系统的第7章和工程实现对应的第8章方面的相关内容。

六、实验步骤

步骤 1: 熟悉使用开发平台环境，测试了解 demo3C 例程。

步骤 2: 利用 ICCAVR 建立自己的一个项目，尽可能具备以下功能：

- (1) 定时中断，采样周期=0.5 秒
- (2) 显示：一位为采样拍数，两位为采样的高 8 位。要求间隔一毫秒显示一位
- (3) A/D 前增加一个 1/2 的放大器（以实现 -14V~+14V 的采样），调通：
A/D → 码制转换 1 → 控制器 $D(z)=1$ → 限幅保护 → 码制转换 2 → D/A

使得： $\boxed{D/A \text{ 测量值} = A/D \text{ 输入电压值}}$

步骤 3: 实现单片机到上位微机的串口通信，注意串口收发数据之前以及之后对应的数据格式转换。

步骤 4: 利用模拟板上的多选择开关设置工作模态（可进行系统的闭环控制）和其他模态（保证 D/A 输出为零，进行被控对象状态清零等辅助工作）。

注意单片机程序各个层次的关系：

第一层（最外层）为 while(1);

第二层：拨码开关检测，两种工作模式

第三层：1) 非工作模式：进行必要的变量初始化，保证 D/A 输出为 0V，不进行串口发数；2) 工作模式：进行闭环控制、串口发数

第四层：（只有工作模式内有）到采样周期时间（到 0.5 秒）。

采样、码制转换 1、控制算法 I、限幅保护、码制转换 2、D/A、控制算法 II、串口发数。

闲置时间进行显示工作。

步骤 5: 控制律阶跃响应仿真及验证

(1) 控制律阶跃响应仿真

利用 simulink 搭建图 2-12 所示的仿真结构图，其中的 $D(z)$ 模块对应为自己设计得到的控制器模块。从右侧的示波器上可以看到控制器的阶跃响应曲线，例如可以是图 2-13 所示曲线中一种或其他的（与控制器有关）。

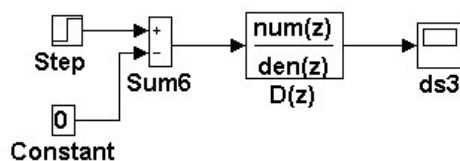


图 2-12 控制律实现测试比对用的对应的 simulink 结构图

将所得到的曲线作为标准曲线，用万用表的电压表测量 D/A 输出，检查比对是否与所用的标准曲线一致，以便于寻找解决编程存在的问题。

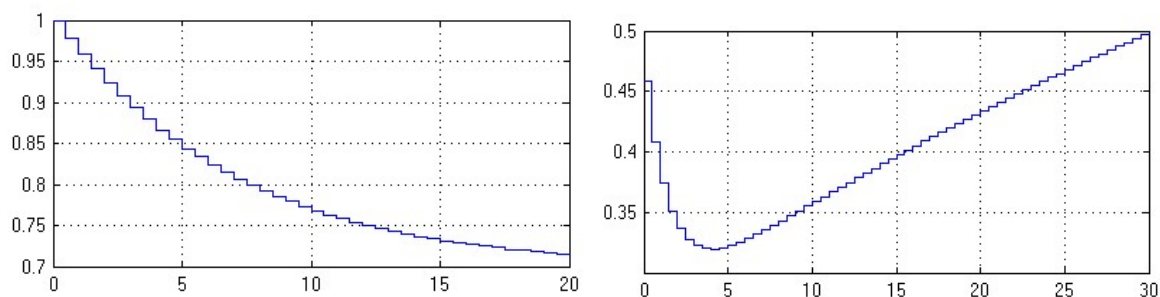


图 2-13 控制律实现测试比对曲线事例图

(2) 控制律阶跃响应验证

在实现前面功能要求的基础上，将控制律编排进去。将采样接地（或空接）。将所得到的曲线作为标准曲线，用万用表的电压表测量 D/A 输出，检查比对是否与所用的标准曲线一致，以便于寻找解决编程存在的问题。

步骤 6：搭建被控对象

在采用模拟机搭建对象时，必须保证所采用的每个器件以及每条通路、每条接线都是正确完好的。

注意：由于对象中具有一个积分环节，而且模拟机的工作电压为 $-15\text{V}\sim+15\text{V}$ ，因此导致对象的最大输出可以达到 -14V 或 14V 。而实际 A/D 可测量的最大值为 $-10\text{V}\sim+10\text{V}$ ，为此需要进行适当的工作：

- (1) 增加一个将对象输出结果进行折半的环节；
- (2) 该增益的变化需要通过数字控制器的增益配置来保证；
- (3) 注意检查极性是否有变化，若有，应如何应对？

步骤 7：实现闭环系统的控制。

七、注意事项

1. 指令阶跃信号可以采用模拟信号设置，亦可以采用计算机设置。建议采用后者进行。
2. 系统的正常工作的前提，首先是组成系统的各个部件正常工作。正确搭建被控对象模型。构建恰当的调理电路，使得调理电路的输出信号范围落于 A/D 测试信号范围内。
3. 码制变换和限幅保护的幅值需要认真考虑。
4. 中断服务子程序中，一般不要做太多的任务，可以设置简单的计算以及设置标志量。主程序是一个死循环的程序，一般通过标志量来检查判断具体程序的执行。
5. 由于被控对象带一阶积分环节，在开始进行闭环控制之前，应当对被控对象进行复位清零操作，以释放积分器（电容）的值（即给电容放电）。

八、实验报告要求

实验报告中应包括以下内容：

1. 本实验所涉及工程问题描述，归纳总结所给的传递函数可能对应的工程实际被控

对象，针对这类对象的简化过程，进行给定传递函数对应原系统分析。

2. 设计过程（需要满足指标要求）、仿真验证时域指标（超调量、稳态时间、误差系数等）。

3. 整个系统结构组成图（包括用模拟机搭建对象）。

4. 控制器算法编排图、算法流程图、软件工作流程图、信号分析，相关硬件的码制、工作范围、运算码制说明、采样周期实现（相关参数计算以及实现说明）。

5. 应用程序。

6. 闭环控制实验结果（数据、对应图形、超调量、稳态时间）、仿真结果与实验结果比较分析。

7. 实验结论。

8. 个人体会和建议。

九、课后思考题

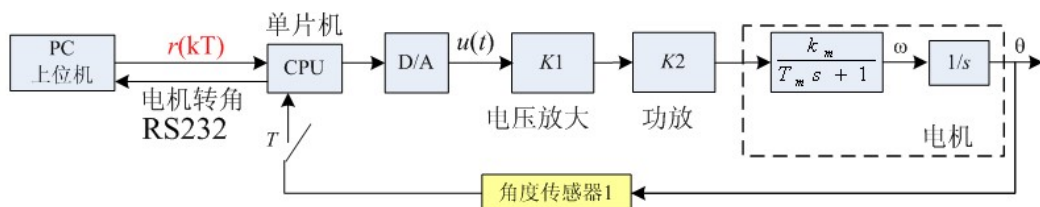
无

十、参考资料

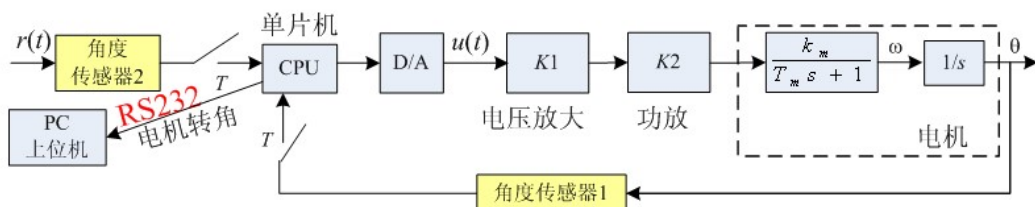
- 1) 高金源主编，计算机控制系统，高等教育出版社，2010 年 1 月。
- 2) 姚燕南主编，微型计算机原理，西安电子科技大学出版社
- 3) 研制单片机控制回路模块的厂家提供的“控制系统说明书”。
- 4) ATmega128 中文版数据手册.pdf
- 5) ATmega128 英文版数据手册.pdf

实验四 以伺服系统为被控对象的综合控制实验

被控对象为一个带有均质圆盘负载的直流力矩电机，其对应系统方框图如图 1-14 所示。



第一种实验系统结构



第二种实验系统结构

图 2-14 实验系统结构图

根据前面的元部件测试及其建模要求，可以获得以下的对应参数：

- (1) 电机传函、(2) 电机启动电压（大于等于死区电压）、(3) 测速机传递系数 k_ω 、
- (4) 电机同轴电位计传递系数、(5) 功放箱线性工作范围、(6) 指令转角电位计传递系数等。

直流伺服电机的控制指标要求

(1) 模拟电路设计要求

当 D/A 输出 $\leq 120\text{mV}$ 时，电机开始转动；

(2) 位置回路设计要求

在求得上述速度回路传递函数的前提下，利用极点配置方法求全状态反馈增益，使得系统的期望极点满足： $\xi \geq 0.9$ ， $\omega_n \geq 20\text{rad/s}$ 。（给定采样周期 $T=0.010\text{s}$ ，也可以自己根据实际系统选定）。

(3) 观测器设计要求

假定伺服系统转角 θ 可测，设计降维观测器，并假定降维观测器的观测误差衰减率是闭环系统衰减率的 4 倍。

- ✓ 根据所设计得到的反馈增益 K_{F1} 、 K_{F2} 及观测器方程，求控制器方程 $D(z)$ ；
- ✓ 按照某种编排实现方法，编排控制器方程 $D(z)$ 的实现算法。

(4) 控制器实现要求

编排实现控制器，在指令转角为 $+90^\circ$ 及 -90° 时，控制电机满足转角指令及其指标要求。

一、实验目的

1. 熟悉及其使用 ATmega128 单片机平台的使用；
2. 编制 A/D、D/A 接口的测试程序，分析测量误差产生原因，掌握数据转换的编程方法。
3. 了解中断的原理，掌握定时中断，串口接收中断等中断编程方法。
4. 掌握并熟悉应用定时器功能，实现所设置的采样周期。
5. 学习应用串口通信通讯技术，编程实现上下位机的实时通讯。
6. 运用课程学习所介绍的方式方法，设计满足性能指标要求的控制器并进行仿真验证。
7. 构成闭环实时控制回路，进行闭环回路的控制验证。

二、实验内容

1. 熟悉使用给定的 ATmega128 单片机控制回路模块以及其附带的 A/D 及 D/A 接口电路的使用；进行模拟信号的采集以及转换；针对给定的数字信号进行模拟量的转换。
2. 采样选用双极性 A/D ($-10V \sim +10V$)，输出采用双极性 D/A ($-10V \sim +10V$)。将采样数据的高 8 位通过串口送微机显示并保留在所设定的文件中，以便绘图及事后分析用。
3. 由于采样周期比较小，显示没有余辉无法肉眼看出。为检测定时器的正确性，首先设置采样周期=0.5 秒的定时，采用一位数码管显示采样次数 0~F。最后，当所有软件调试正确，接口及其码制转换正确，实施闭环控制实验时，才将采样周期恢复到原先预定的 0.1 秒。
4. 利用单片机控制回路模拟板上的多选择开关设置工作模态(可进行系统的闭环控制)和其他模态（保证 D/A 输出为零，进行被控对象状态清零等辅助工作）。
5. 计算并选择适当的器件，达到 A/D 调理电路的要求。

6. 根据设计结果正确选择及其连接控制放大箱上相应的放大器和电阻, 构成闭环实时控制回路。

7. 设计数字控制器, 进行仿真验证。

8. 利用单片机平台作为下位机实现所设计的数字控制器, 满足位置回路设计要求; 通过 RS232 串口, 将被控对象的状态发送给上位机 (微机); 接收上位机设置的指令信号。

9. 上位机发送指令、接收状态, 保存闭环控制系统运行的状态数据到相关的数据文件中, 以便对控制效果进行有效的分析, 绘制相应的曲线, 获得有益的结论。

三、实验设备

1. IBM PC 系列微机或笔记本一台
2. ATmega128 单片机实验设备一套
3. 数字万用表一台
4. 直流伺服电机一台



四、预习要求

1. 学习提供的实验指导书的相关部分知识, 复习微机原理相关的接口、通信、中断等方面的知识。

2. 预习所用测量仪器以及实验平台的使用, 了解 AVR 单片机的功能及其使用。

3. 计算机控制课程中关于构建计算机控制系统的第 7 章和工程实现对应的第 8 章方面的相关内容。

五、实验原理

计算机控制课程中关于构建计算机控制系统的第 7 章和工程实现对应的第 8 章方面的相关内容。针对第一种系统结构得到对应的实验连接图如图 2-15 所示。

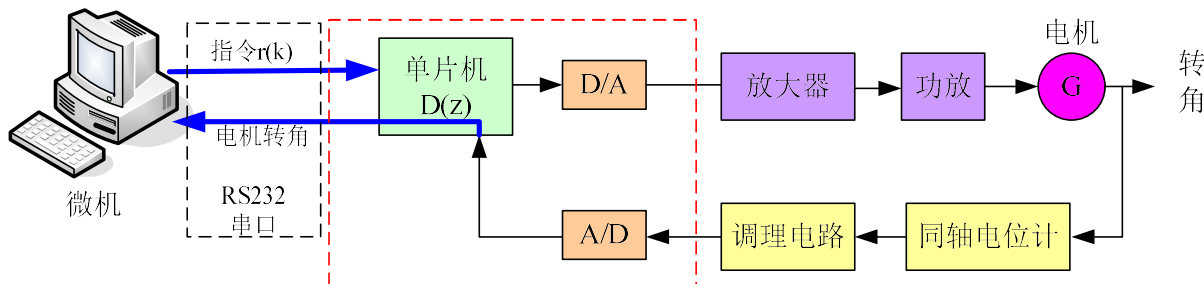


图 2-15 实验系统连接图

六、实验步骤

步骤 1: 熟悉使用开发平台环境，测试了解 demo3C 例程。

步骤 2: 利用 ICCAVR 建立自己的一个项目，尽可能具备以下功能：

- (4) 定时中断，采样周期=0.5 秒
- (5) 显示：一位为采样拍数，两位为采样的高 8 位。要求间隔一毫秒显示一位
- (6) A/D 前增加一个 $1/2$ 的放大器（以实现 $-14V \sim +14V$ 的采样），调通：
A/D \rightarrow 码制转换 1 \rightarrow 控制器 $D(z)=1 \rightarrow$ 限幅保护 \rightarrow 码制转换 2 \rightarrow D/A

使得： $D/A \text{ 测量值} = A/D \text{ 输入电压值}$

步骤 3: 实现单片机到上位微机的串口通信，注意串口收发数据之前以及之后对应的数据格式转换。

步骤 4: 利用模拟板上的多选择开关设置工作模态（可进行系统的闭环控制）和其他模态（保证 D/A 输出为零，进行被控对象状态清零等辅助工作）。

注意单片机程序各个层次的关系：

第一层（最外层）为 while(1);

第二层：拨码开关检测，两种工作模式

第三层：

1) 非工作模式：进行必要的变量初始化，保证 D/A 输出为 0V，不进行串口发数；

2) 工作模式：进行闭环控制、串口发数

第四层：（只有工作模式内有）到采样周期时间（到 0.5 秒）。

采样、码制转换 1、控制算法 I、限幅保护、码制转换 2、D/A、控制算法 II、串口发数。

闲置时间进行显示工作。

步骤 5: 控制律阶跃响应仿真及验证

(1) 控制律阶跃响应仿真

利用 simulink 搭建图 2-16 所示的仿真结构图，其中的 $D(z)$ 模块对应为自己设计得到的控制器模块。从右侧的示波器上可以看到控制器的阶跃响应曲线，例如可以是图 2-17 所示曲线中一种或其他的（与控制器有关）。

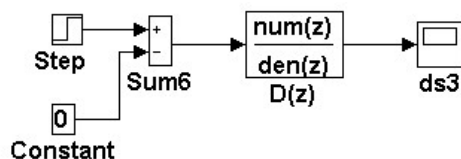


图 2-16 控制律实现测试比对用的对应的 simulink 结构图

在实现前面功能要求的基础上，将控制律编排进去。将采样接地（或空接）。将所得到的曲线作为标准曲线，用万用表的电压表测量 D/A 输出，检查比对是否与所用的标准曲线一致，以便于寻找解决编程存在的问题。

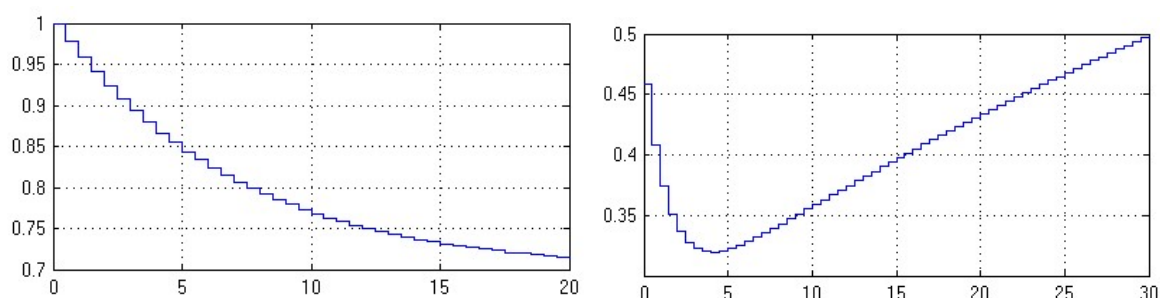


图 2-17 控制律实现测试比对曲线事例图

(2) 控制律阶跃响应验证

在实现前面功能要求的基础上，将控制律编排进去。将采样接地（或空接），用电表测试 D/A 输出的结果是否与仿真结果相同，若不同，则肯定是程序编制有问题。

步骤 6：搭建被控对象

在采用连接搭建试验系统时，必须保证实验系统所采用的每个器件以及每条通路、每条接线都是正确完好的。

特别注意：由于直流伺服电机的同轴电位计工作电压为 $-12\text{V}\sim+12\text{V}$ ，因此导致对象的最大输出可以达到 -12V 或 12V 。而实际 A/D 可测量的最大值为 $-10\text{V}\sim+10\text{V}$ ，为此需要进行适当的工作：

- (1) 增加一个调理电路，将对象输出结果进行折半的环节；
- (2) 该增益的变化需要通过数字控制器的增益配置来保证；
- (3) 注意检查极性是否有变化，若有，应如何应对？

步骤 7：实现闭环系统的控制。

七、注意事项

- 1、指令阶跃信号可以采用模拟信号设置，亦可以采用计算机设置。建议采用后者进行。
- 2、系统的正常工作的前提，首先是组成系统的各个部件正常工作。正确搭建被控对象模型。构建恰当的调理电路，使得调理电路的输出信号范围落于 A/D 测试信号范围内。
- 3、码制变换和限幅保护的幅值需要认真考虑。
- 4、中断服务子程序中，一般不要做太多的任务，可以设置简单的计算以及设置标志量。主程序是一个死循环的程序，一般通过标志量来检查判断具体程序的执行。
- 5、由于电机的同轴电位计的抱紧螺丝容易松动，实验前需要检查一下，并检查当电位计指针指向 0 的时候，是否电位计输出也是 0V 电压。若不是则需要进行适当的调整。

八、实验报告要求

实验报告中应包括以下内容：

1. 本实验所涉及工程问题描述，归纳总结所给的传递函数可能对应的工程实际被控对象，针对这类对象的简化过程，进行给定传递函数对应原系统分析。
2. 设计过程（需要满足指标要求）、仿真验证时域指标（超调量、稳态时间、误差

系数等)。

3. 整个系统结构组成图（包括用模拟机搭建对象）。
4. 控制器算法编排图、算法流程图、软件工作流程图、信号分析，相关硬件的码制、工作范围、运算码制说明、采样周期实现（相关参数计算以及实现说明）。
5. 应用程序。
6. 闭环控制实验结果（数据、对应图形、超调量、稳态时间）、仿真结果与实验结果比较分析。
7. 实验结论。
8. 个人体会和建议。

九、课后思考题

无

十、参考资料

- 1) 高金源主编，计算机控制系统，高等教育出版社，2010 年 1 月。
- 2) 姚燕南主编，微型计算机原理，西安电子科技大学出版社
- 3) 研制单片机控制回路模块的厂家提供的“控制系统说明书”。
- 4) ATmega128 中文版数据手册.pdf
- 5) ATmega128 英文版数据手册.pdf

附件 1 实验报告模板



成 绩 _____

北京航空航天大学

BEIHANG UNIVERSITY

实验报告

院（系）名称	自动化科学与电气工程学院
专 业 名 称	自动化
学 生 学 号	XXXX
学 生 姓 名	XXXX
指 导 教 师	XXXX

2020 年 2 月

实验一 *****

(三号，黑体；居中；单倍行距；段前、段后各 0.5 行)

实验时间_____ 实验编号_____ 同组同学_____

(“实验编号”填写实验所用计算机编号；若有同组实验同学，需在“同组同学”处填写其姓名，没有则填无)

一、实验背景 (四号黑体；左对齐；单倍行距；段前、段后 0.5 行)

1. 描述实验所涉及的工程问题。
2. 小四号，宋体，英文及字母 Times New Roman 体；首行缩进 2 字符；两端对齐；1.5 倍行距。

二、实验原理

1. 分析实验的工作原理。
2. 小四号，宋体，英文及字母 Times New Roman 体；首行缩进 2 字符；两端对齐；1.5 倍行距。

三、预习思考题的实验验证

1. 预习思考题的实验验证分析。
2. 小四号，宋体，英文及字母 Times New Roman 体；首行缩进 2 字符；两端对齐；1.5 倍行距。

四、实验过程与结果

1. 写清实验步骤、所用实验方法与得到的实验结果。
2. 小四号，宋体，英文及字母 Times New Roman 体；首行缩进 2 字符；两端对齐；1.5 倍行距。

五、结果分析与实验结论

1. 对实验所得结果进行数据分析处理，推导、总结实验结论。
2. 小四号，宋体，英文及字母 Times New Roman 体；首行缩进 2 字符；两端对齐；1.5 倍行距。

六、收获、体会及建议

1. 总结实验收获与个人体会；欢迎同学提出改善实验课程的建议。
2. 小四号，宋体，英文及字母 Times New Roman 体；首行缩进 2 字符；两端对齐；1.5 倍行距。

注意：括号（）内为说明事项，最终实验报告中须删除！