

应用型人才培养

高等学校“十二五”规划教材

微型计算机控制技术实验教程

(含实验报告书)

李雪霞◎编著

西北工业大学出版社

高等学校“十二五”规划教材

微型计算机控制技术

实验教程

(含实验报告书)

李雪霞 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是针对微型计算机控制技术课程的实验环节所涉及的应用软件及实践内容、方法而编写的。主要内容包括:TKCE—2 型自控计控教学实验箱结构及功能特点,TKCE—2 型自控计控教学实验箱的硬件资源,即系统各主要功能模块和系统单元电路、A/D 与 D/A 转换、数字滤波器、离散化方法研究、数字 PID 调节器算法、积分分离数字 PID 调节器算法、最少拍控制算法研究、具有纯滞后系统的大林算法、模糊控制系统、具有单神经元控制器的控制系统、步进电机转速控制系统、单闭环温度恒值控制系统、单闭环直流调速系统等,涵盖了微型计算机控制技术的主要知识点。旨在通过实践环节,帮助学生加深对本课程所涉及知识的理解,为将来更好地应用计算机技术奠定基础。

本书可作为高等学校自动化、计算机科学与技术、测控技术与仪表等相关专业的实验课程教材。

图书在版编目(CIP)数据

微型计算机控制技术实验教程/李雪霞编著. —西安:西北工业大学出版社,2015.4
ISBN 978-7-5612-4380-0

I. ①微… II. ①李… III. ①微型计算机—计算机控制—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 086927 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:5.25

字 数:115 千字

版 次:2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

定 价:15.00 元

前 言

数字计算机由于其具有强大的算术运算、逻辑判断、记忆等信息加工能力,使得它一诞生就被应用到控制领域。随着计算机科学技术的发展,在 20 世纪 60 年代控制理论即得到应用,而现代控制理论的发展,又为计算机控制技术的发展奠定了广阔的理论基础。特别是微电子技术的发展给计算机控制技术提供了物质基础。现在,在工业生产等领域中,计算机控制技术正广泛深入地得到应用,并取得了可喜的经济效益和社会效益。

为适应当前科学技术的发展,在自动化及相关专业中开设了微型计算机控制技术课程,作为大学生的必修课。“计算机控制技术实验系统”就是为这门课程的教学和实验环节而设计的。系统采用 AD/DA 卡,通过 RS232 串口与计算机连接,实现信号源信号的输出和系统响应信号的采集,采集后信号通过计算机显示屏显示,省去了外接信号源和示波器测量响应信号的麻烦。杭州天科教仪设备有限公司设计的 TKCE—2 型自动控制实验系统支持计算机控制理论课的所有实验,通过这套实验仪器可使学生进一步了解和掌握计算机控制理论的基本概念、控制系统的分析方法和设计方法以及控制算法的编程实现,学习和掌握系统模拟电路的构成和测试技术,提高应用计算机的能力及水平。另外,本套教学实验箱还配有 3 个实际的控制对象:温控炉、直流电机、步进电机,通过对这 3 个对象的控制可以提高学生对实际控制对象的感性认识。

本书是根据微型计算机控制技术课程教学大纲的要求,配合微型计算机控制系统教学,引导学生理解、领会教学内容,增强分析问题、解决问题的实际动手能力而编写的实验教学指导书。全书内容分为 3 部分,第一部分 TKCE—2 型自控计控教学实验箱使用说明,分别介绍该实验设备的功能、结构组成、软件开发平台和系统单元电路。第二部分介绍了 12 个基础实验。第三部分为实验报告。

本书由李雪霞编著。在编写过程中,王卫军、刘永飞等提出了宝贵的建议与指导,在此表示深深的感谢。

由于水平和经验所限,书中不足和疏漏之处在所难免,恳请广大读者指正!联系邮箱: Xsnow99@sina.com。

编 者

2014 年 6 月

目 录

第一部分	TKCE—2 型自控计控教学实验箱使用说明	1
第二部分	计算机控制技术基础实验	4
实验一	A/D 与 D/A 转换	4
实验二	数字滤波器	7
实验三	离散化方法研究	10
实验四	数字 PID 调节器算法	15
实验五	积分分离数字 PID 调节器算法	19
实验六	最少拍控制算法研究	21
实验七	具有纯滞后系统的大林算法	26
实验八	模糊控制系统	29
实验九	具有单神经元控制器的控制系统	32
实验十	步进电机转速控制系统	37
实验十一	单闭环温度恒值控制系统	39
实验十二	单闭环直流调速系统	41
第三部分	实验报告	45

第一部分 TKCE—2 型自控计控 教学实验箱使用说明

一、系统概述

TKCE—2 型自控计控教学实验箱是杭州天科教仪设备有限公司结合教学和实践的需要而进行精心设计的实验系统。该系统适用于高校的“自动控制原理”、“计算机控制技术”等课程的实验教学。该实验箱具有实验功能全、资源丰富、使用灵活、接线可靠、操作快捷、维护简单等优点。

实验箱的硬件部分主要由直流稳压电源、低频函数信号发生器、阶跃信号发生器、低频频率计、交/直流数字电压表、数据采集接口单元、步进电机单元、直流电机单元、温度控制单元、通用单元电路、电位器组等组成。

上位机软件则集中了虚拟示波器、信号发生器、VBScript 和 JScript 脚本编程器、实验仿真、实验报告生成器等多种功能于一体。其中虚拟示波器可显示各种波形,有 X-T, X-Y, Bode 图 3 种显示方式,并具有图形和数据存储、打印的功能。VBScript 脚本编程器提供了一个开放的编程环境,用户可在上面编写各种算法及控制程序。

实验箱通过电路单元模拟控制工程中的各种典型环节和控制系统,并对控制系统进行仿真研究,使学生通过实验对控制理论及计算机控制算法有更深一步的理解,并提高分析与综合系统的能力。同时,通过对本实验箱中 3 个实际被控对象的控制,使学生熟悉各种算法在实际控制系统中的应用。

在实验设计上,控制理论既有模拟部分的实验,又有离散部分的实验;既有经典理论实验,又有现代控制理论实验;而计算机控制系统除了常规的实验外,还增加了当前工业上应用广泛、效果显著的模糊控制、神经元控制、二次型最优控制等实验。

系统有下述功能特点。

(1)以 PC 为操作台,高效率支持“计算机控制”的教学实验。

(2)系统含有高阶模拟单元,可根据教学实验需要进行灵活组合,构成各种典型环节与系统。

(3)系统含有界面友好、功能丰富的软件。PC 在实验中,除了用做实验测试所需的虚拟仪器外,还可用做测试信号发生器以及具有很强柔性的数字控制器。

(4)系统的硬件、软件设计充分考虑了开放型、研究型实验的需要。用户可自己设计实验内容,构建系统对象,编写控制算法,进行计算机控制技术的研究。

二、硬件的组成及使用

1. 直流稳压电源

直流稳压电源主要用于给实验箱提供电源。有 $\pm 5\text{V}/0.5\text{A}$, $\pm 12\text{V}/0.5\text{A}$ 四路, 每路均有短路保护自恢复功能。它们的开关分别由相关的钮子开关控制, 并由相应发光二极管指示。

实验前, 启动实验箱左下角的开关, 并根据需要将 $\pm 5\text{V}$, $\pm 12\text{V}$ 钮子开关拨到“开”的位置。

实验时, 通过 2 号连接导线将直流电源接到需要的位置。

2. 低频函数信号发生器

低频函数信号发生器由单片集成函数信号发生器专用芯片及外围电路组合而成, 主要输出有正弦信号、三角波信号、方波信号、斜坡信号和抛物线信号。输出频率分为 f_1, f_2, f_3 三挡。

使用时先将信号发生器单元的钮子开关拨到“开”的位置, 并根据需要选择合适的波形及频率的挡位, 然后调节“频率调节”和“幅度调节”微调电位器, 以得到所需要的频率和幅值, 并通过 2 号连接导线将其接到需要的位置。

3. 锁零按钮

锁零按钮用于实验前运放单元中电容器的放电。当按下按钮时, 通用单元中的场效应管处于短路状态, 电容器放电, 让电容器两端的初始电压为 0V ; 当按钮复位时, 单元中的场效应管处于开路状态, 此时可以开始实验。

4. 阶跃信号发生器

阶跃信号发生器主要提供实验时的阶跃给定信号, 其输出电压范围约为 $-5\text{V} \sim +5\text{V}$, 正负挡连续可调。使用时根据需要可选择正输出或负输出, 具体通过“阶跃信号发生器”单元的钮子开关来实现。当按下自锁按钮时, 单元的输出端输出一个可调(选择正输出时, 调 RP1 电位器; 选择负输出时, 调 RP2 电位器)的阶跃信号(当输出电压为 1V 时, 即为单位阶跃信号), 实验开始; 当按钮复位时, 单元的输出端输出电压为 0V 。

注: 单元的输出电压可通过实验箱上的交/直流数字电压表来进行测量。

5. 低频频率计

低频频率计是由单片机 89C2051 和 7 位共阴极 LED 数码管设计而成的, 具有输入阻抗大和灵敏度高的优点。其测频范围为 $0.1\text{Hz} \sim 9999.999\text{kHz}(10\text{MHz})$ 。

低频频率计主要用来测量函数信号发生器或外来周期信号的频率, 使用时先将低频频率计的电源钮子开关拨到“开”的位置, 然后根据需要将测量钮子开关拨到“外测”(此时通过“输入”和“地”输入端输入外来周期信号)或“内测”(此时测量低频函数信号发生器输出信号的频率)。

另外, 本单元还有一个复位按钮, 以对低频频率计进行复位操作。

注意: 将“内测/外测”开关置于“外测”, 而输入接口没接被测信号时, 频率计有时会显示一定数据的频率, 这是由于频率计的输入阻抗大, 灵敏度高, 从而感应到一定数值的频率。此现象并不影响内/外测频。

6. 交/直流数字电压表

交/直流数字电压表有 3 个量程, 分别为 200mV , 2V , 20V 。当自锁开关不按下时, 它作直

流电压表使用,这时可用于测量直流电压;当自锁开关按下时,作交流毫伏级电压表使用,它具有频带宽(10Hz~400 kHz)、精度高($\pm 5\%$)和真有效值测量的特点,即使测量窄脉冲信号,也能测得其精确的有效值,其适用的波峰因数范围可达到 10。

7. 通用单元电路

通用单元电路具体见实验箱所示单元、“反相器单元”。这些单元主要由运算放大器、电容、电阻、电位器和一些自由布线区等组成。通过接线和短路帽的选择,可以模拟各种受控对象的数学模型,主要用于比例、积分、微分、惯性等电路环节的构造。一般为反向端输入,其中电阻多为常用阻值 $51\text{k}\Omega$, $100\text{k}\Omega$, $200\text{k}\Omega$, $510\text{k}\Omega$; 电容多在反馈端,电容值为 $0.1\mu\text{F}$, $1\mu\text{F}$, $10\mu\text{F}$ 。

以组建积分环节为例,积分环节的时间常数为 1s 。首先确定带运放的单元,且其前后的元器件分别为 $100\text{k}\Omega$, $10\mu\text{F}$ ($T=100\text{k}\times 10\mu=1\text{s}$),通过观察通用单元电路 U9 可满足要求,然后将 $100\text{k}\Omega$ 和 $10\mu\text{F}$ 两引脚对应的插针使用短路帽连接起来。

实验前先按下“锁零按钮”对电容放电,然后用 2 号导线将单位阶跃信号输出端接到积分单元的输入端,积分电路的输出端接至反向器单元,保证输入、输出方向的一致性。然后按下“锁零按钮”和阶跃信号输出按钮,用示波器观察输出曲线,其具体电路如图 1-1 所示。

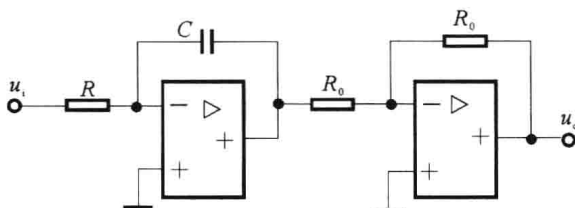


图 1-1

8. 非线性单元

非线性单元由两个含有非线性元件的电路组成,一个含有双向稳压管,另一个含有两个单向二极管并且需要外加 $\pm 12\text{V}$ 直流电源,可研究非线性环节的静态特性和非线性系统。其中 $10\text{k}\Omega$, $47\text{k}\Omega$ 电位器由电位器组单元提供。电位器的使用可由 2 号导线将电位器引出端点接入至相应电路中。但在实验前先断开电位器与电路的连线,用万用表测量好所需电阻的阻值,然后再接入电路中。

9. 数据采集接口单元

数据采集卡采用,它可直接插在 IBM-PC/AT 或与之兼容的计算机内,其采样频率为 350kHz ;有 2 路单端 A/D 模拟量输入,转换精度均为 16 位;2 路 D/A 模拟量输出,转换精度均为 12 位;4 路开关量输出。

注意:使用时采集卡和试验台要共地。

10. 实物实验单元

实物实验单元包括温度控制单元、直流电机单元和步进电机单元,主要用于计算机控制技术实验中,使用方法详见实验指导书。

第二部分 计算机控制技术基础实验

实验一 A/D 与 D/A 转换

一、实验目的

- (1) 通过实验了解实验系统的结构与使用方法。
- (2) 通过实验了解模拟量通道中模/数转换与数/模转换的实现方法。

二、实验设备

- (1) TKCE—2 型自控计控教学实验箱。
- (2) 数据采集卡 1 块及 USB 线 1 根。
- (3) PC 1 台(含实验软件)。

三、实验内容

- (1) 输入一定值的电压或函数信号,测取模/数转换的特性,并分析之。
- (2) 用上位机软件输出函数信号,用示波器测量其输出信号,完成通道的数/模转换实验。

四、实验步骤

(1) 启动实验箱的“电源开关”,打开 $\pm 5\text{V}$, $\pm 12\text{V}$ 电源。将“阶跃信号发生器”单元输出端连接到“数据采集接口单元”的“AD0”通道,同时将采集接口单元的“DA0”输出端连接到接口单元的“AD1”输入端。

(2) 将“阶跃信号发生器”的输入电压调节为 1V。

(3) 启动计算机,打开实验软件,用脚本编辑器中示波器观察波形。

(4) 利用上位机的“脚本编程器”可编程实现各种典型信号(如正弦信号、方波信号、斜坡信号、抛物线信号等)的产生。其函数表达式分别如下:

1) 正弦信号:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi), \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

2) 斜坡信号:

$$y = \begin{cases} at, & 0 \leq t < T_1 \\ 0, & T_1 \leq t < T \end{cases}, \quad a \text{ 为常量}$$

3) 抛物线信号:

$$y = \begin{cases} \frac{1}{2}at^2, & 0 \leq t < T_1 \\ 0, & T_1 \leq t < T \end{cases}, \quad a \text{ 为常量}$$

(5) 在脚本编辑器窗口下打开上述函数的脚本文件,点击“运行”即可输出其函数信号,用示波器观测。

五、附录

1. 数据采集卡

本实验箱采用了数据采集卡,它是一种基于 USB 总线的数据采集卡,卡上装有分辨率为 14 位的 A/D 转换器和分辨率为 12 位的 D/A 转换器,其转换器的输入量程均为 ±10V,输出量程均为 ±5V。该采集卡为用户提供 4 路模拟量输入通道和 2 路模拟量输出通道。其主要特点如下:

- (1)支持 USB1.1 协议,真正实现即插即用。
- (2)400kHz 14 位 A/D 转换器,通过率为 350K,12 位 D/A 转换器,建立时间为 10μs。
- (3)4 通道模拟量输入和 2 通道模拟量输出。
- (4)8K 深度的 FIFO 保证数据的完整性。
- (5)8 路开关量输入,8 路开关量输出。

2. (A/D)/(D/A)转换原理

数据采集卡采用 USB 卡,该卡在进行 A/D 转换实验时,输入电压与二进制的对应关系为:−10~10V 对应为 0~16 383(A/D 转换为 14 位),其中 0V 为 8192。其主要数据格式见表 2-1(采用双极性模拟输入)。

表 2-1

输 入	A/D 转换原始码(二进制)	A/D 转换原始码(十六进制)	求补后的码(十进制)
正满度	01 1111 1111 1111	1FFF	16383
正满度-1LSB	01 1111 1111 1110	1FFE	16382
中间值(零点)	00 0000 0000 0000	0000	8192
负满度+1LSB	10 0000 0000 0001	2001	1
负满度	10 0000 0000 0000	2000	0

而 D/A 转换时的数据转换关系为:−5~5V 对应为 0~4 095(D/A 转换为 12 位),其数据格式(双极性电压输出时)见表 2-2。

表 2-2

输 入	D/A 转换数据编码
正满度	1111 1111 1111
正满度-1LSB	1111 1111 1110
中间值(零点)	1000 0000 0000
负满度+1LSB	0000 0000 0001
负满度	0000 0000 0000

3. 编程实现测试信号的产生

利用上位机的“脚本编程器”可编程实现产生各种典型信号,如正弦信号、方波信号、斜坡信号、抛物线信号等。其函数表达式分别如下:

1) 正弦信号:

$$y = A \sin(\omega t + \varphi), \quad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

2) 方波信号:

$$y = \begin{cases} A, & 0 \leq t < T_1 \\ 0, & T_1 \leq t < T \end{cases}$$

3) 斜坡信号:

$$y = \begin{cases} at, & 0 \leq t < T_1 \\ 0, & T_1 \leq t < T \end{cases}, \quad a \text{ 为常量}$$

4) 抛物线信号:

$$y = \begin{cases} \frac{1}{2}at^2, & 0 \leq t < T_1 \\ 0, & T_1 \leq t < T \end{cases}, \quad a \text{ 为常量}$$

这里以抛物线信号为例进行编程,其具体程序如下:

```
dim tx, op, a                                ‘初始化函数
sub Initialize(arg)                          ‘初始化函数
WriteData 0, 1                               ‘对采集卡的输出端口 DA1 进行初始化
tx = 0                                       ‘对变量初始化
end sub
sub TakeOneStep (arg)                       ‘算法运行函数
a = 1
op = 0.5 * a * tx * tx
tx = tx + 0.1                               ‘0.1 为时间步长
if op > 3 then                               ‘波形限幅
tx = 0
end if
WriteData op, 1                             ‘数据从采集卡的 DA1 端口输出
end sub
sub Finalize (arg)                          ‘退出函数
WriteData 0, 1
end sub
```

通过改变变量 tx, a 的值可改变抛物线的上升斜率。

实验二 数字滤波器

一、实验目的

- (1) 通过实验熟悉数字滤波器的实现方法。
- (2) 研究滤波器参数的变化对滤波性能的影响。

二、实验设备

- (1) TKCE—2 型自控计控教学实验箱。
- (2) 数据采集卡 1 块及 USB 线 1 根。
- (3) PC 1 台(含实验软件)。

三、实验内容

- (1) 设计一个带尖脉冲(频率可变)干扰信号和正弦信号输入的模拟加法电路。
- (2) 设计并调试一阶数字滤波器。
- (3) 设计并调试高阶数字滤波器。

四、实验原理

1. 数字滤波器

在许多信息处理过程中,如对信号的滤波、检测、预测等都要广泛地用到滤波器。数字滤波器是数字信号处理中广泛使用的一种线性环节,它从本质上说是将一组输入的数字序列通过一定规则的运算后转变为另一组希望输出的数字序列。一般可以用两种方法来实现:一种是用数字硬件来实现;另一种是用计算机的软件编程来实现。

一个数字滤波器,它所表达的运算可用差分方程表示为

$$y(n) = \sum_{i=0}^N a_i x(n-i) + \sum_{i=0}^N b_i y(n-i)$$

2. 一阶数字滤波器及其数字化

一阶数字滤波器的传递函数为

$$G_F(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau s + 1}$$

利用一阶差分法离散化,可以得到一阶数字滤波器的算法如下:

$$y(k) = \frac{T_s}{\tau} x(k) + (1 - \frac{T_s}{\tau}) y(k-1)$$

式中, T_s 为采样周期; τ 为滤波器的时间常数。 T_s 和 τ 应根据信号的频谱来选择。

3. 高阶数字滤波器

高阶数字滤波器算法很多,这里只给出一种加权平均算法:

$$y(K) = A_1 x(K) + A_2 x(K-1) + A_3 x(K-2) + A_4 x(K-3)$$

式中,权系数 A_i 满足: $\sum_{i=1}^4 A_i = 1$ 。同样, A_i 也根据信号的频谱来选择。

五、实验步骤

1. 实验接线及准备

(1) 启动计算机, 运行实验软件。

(2) 启动实验箱的“电源开关”, 打开 $\pm 5\text{V}$, $\pm 12\text{V}$ 电源。将低频函数信号发生器单元输出端连接到采集卡的“AD0”通道, 并选择方波输出。在虚拟示波器观测方波信号的频率和幅值, 然后调节信号发生器中的“频率调节”和“幅度调节”电位器, 使方波信号的频率和幅值分别为 4Hz , 2V 。然后断开与采集卡的连接, 将低频函数信号发生器单元输出端连接到“脉冲产生电路”单元输入端, 产生一个尖脉冲信号 U 。

(3) 按图 2-1 连接电路, 其中正弦信号来自数据采集卡的“DA0”输出端, 尖脉冲信号来自无源校正和脉冲产生电路的输出端。图 2-1 所示电路的输出端与数据采集卡的“AD0”输入端相连。

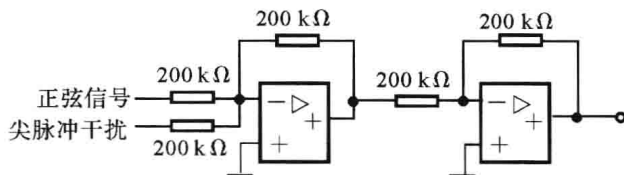


图 2-1 测试信号的产生电路图

2. 脚本程序运行

(1) 打开实验软件的脚本编辑器窗口。

(2) 在脚本编辑器窗口的文件菜单下点击“打开”按钮, 并在“计算机控制算法 VBS\计算机控制技术基础算法”文件夹下选中“数字滤波”脚本程序并打开, 阅读、理解该程序, 然后点击脚本编辑器窗口的调试菜单下“步长设置”, 将脚本算法的运行步长设为 10ms 。

(3) 点击脚本编辑器窗口的调试菜单下“启动”, 用双踪示波器分别观察图 2-2 的输出端和数据采集卡输出端“DA1”的波形。调节信号发生器中的“频率调节”电位器, 改变方波信号的频率(即尖脉冲干扰信号的频率)。观察数字滤波器的滤波效果。

(4) 点击脚本编辑器的调试菜单下“停止”, 修改算法程序中的参数 T_s (注: 修改 T_s 时要同步修改算法的运行步长)、 T_i 两个参数, 然后再运行该程序, 在示波器上再次观察参数变化对滤波效果的影响。

(5) 实验结束后, 关闭脚本编辑器窗口, 退出实验软件。

六、实验报告要求

(1) 画出尖脉冲干扰信号的产生电路图。

(2) 编写一阶数字滤波器的脚本程序。

(3) 绘制加数字滤波器前、后的输出波形, 并分析程序中参数的变化对其滤波效果的影响。

七、附录

1. 尖脉冲干扰信号产生的模拟电路图

如图 2-2 所示。通过改变方波信号的频率, 即可改变尖脉冲的频率。

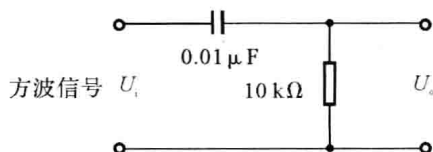


图 2-2 尖脉冲产生电路

2. 实验电路的信号的产生

把图 2-2 产生的尖脉冲信号视为干扰信号,与一低频正弦信号(由上位机的“脚本编辑器”编程输出)输入到图 2-1 所示的两个输入端。

3. 一阶数字滤波器的程序编写与调试示例

```

dim pv,op1,op2,Ts,t,opx,x,Ti          ‘变量定义
sub Initialize(arg)                    ‘初始化函数
WriteData 0,1
opx=0
end sub
sub TakeOneStep (arg)                  ‘算法运行函数
pv=ReadData(1)                        ‘采集卡通道 1 的测量值
op1=2 * sin(x)                        ‘正弦信号的产生
x=x+0.1
Ti=0.02
Ts=0.01                               ‘采样时间 10ms
op2=Ts/Ti * pv+(1-Ts/Ti) * opx        ‘一阶数字滤波器的输出
opx=op2
if op2>=4.9 then
op2=4.9
end if
if op2<=-4.9 then
op2=-4.9
end if
WriteData op1,1                        ‘正弦信号从 DA1 端口输出
WriteData op2,2                        ‘滤波后的信号从 DA2 端口输出
end sub
sub Finalize (arg)                    ‘退出函数
WriteData 0,1
WriteData 0,2
end sub
    
```

实验三 离散化方法研究

一、实验目的

- (1) 学习并掌握数字控制器的设计方法。
- (2) 熟悉将模拟控制器 $D(S)$ 离散为数字控制器的原理与方法。
- (3) 通过数模混合实验,对 $D(S)$ 的多种离散化方法进行比较研究,并对 $D(S)$ 离散化前后闭环系统的性能进行比较,以加深对计算机控制系统的理解。

二、实验设备

- (1) TKCE—2 型自控计控教学实验箱。
- (2) 数据采集卡 1 块及 USB 线 1 根。
- (3) PC 1 台(含实验软件)。

三、实验内容

- (1) 按连续系统的要求,根据图 2-4 所示的方案设计一个与被控对象串联的模拟控制器 $D(S)$,并用示波器观测系统的动态特性。
- (2) 利用实验平台,设计一个数-模混合仿真的计算机控制系统,并利用 $D(S)$ 离散化后所编写的程序对系统进行控制。
- (3) 研究采样周期 T_s 变化时,不同离散化的方法对闭环控制系统性能的影响。
- (4) 对上述连续系统和计算机控制系统的动态性能进行比较研究。

四、实验原理

由于计算机的发展,计算机及其相应的信号变换装置(A/D 转换器和 D/A 转换器)取代了常规的模拟控制。在对原有的连续控制系统进行改造时,最方便的办法是将原来的模拟控制器离散化,其实质是将数字控制部分(A/D 转换器、计算机和 D/A 转换器)看成一个整体,它的输入与输出都是模拟量,因而可等效于一个连续的传递函数 $D(S)$ 。这样,计算机控制系统可近似地视为以 $D(S)$ 为控制器的连续控制系统。

现在以一个具体的二阶系统来说明 $D(S)$ 控制器的离散化方法。

1. 二阶系统的原理图

二阶系统的原理图和模拟电路图分别如图 2-3 和图 2-4 所示。

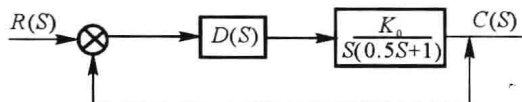


图 2-3 二阶系统原理图

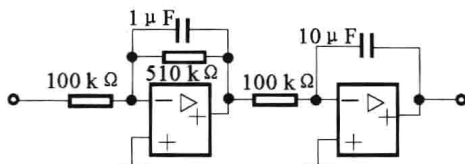


图 2-4 二阶系统的模拟电路图

2. 系统性能指标要求

系统的速度误差系数 $K_v \geq 5 \text{ s}^{-1}$, 超调量 $\delta_p \leq 10\%$, 系统的调整时间 $t_s \leq 1 \text{ s}$ 。

据 K_v 要求可得

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \frac{K_0}{S(0.5S+1)} = 5, \quad K_0 = 5$$

$$G_0(S) = \frac{5}{S(0.5S+1)} = \frac{10}{S(S+2)}$$

令 $D(S) = \frac{S+2}{S+a}$, 则校正后的开环传递函数为

$$D(S) = \frac{S+2}{S+a} \times \frac{10}{S(S+2)} = \frac{10}{S(S+a)} = \frac{\omega_n}{S(S+2\xi\omega_n)}$$

由上式得

$$\omega_n = \sqrt{10}, \quad 2\xi\omega_n = a$$

取

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

则

$$a = 2 \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{10} = 4.47$$

$$D(S) = \frac{S+2}{S+4.47} = \frac{2}{4.47} \times \frac{1+0.5S}{1+0.22S} = 0.45 \times \frac{1+0.5S}{1+0.22S}$$

所以, 校正后二阶系统的模拟电路图如图 2-5 所示。

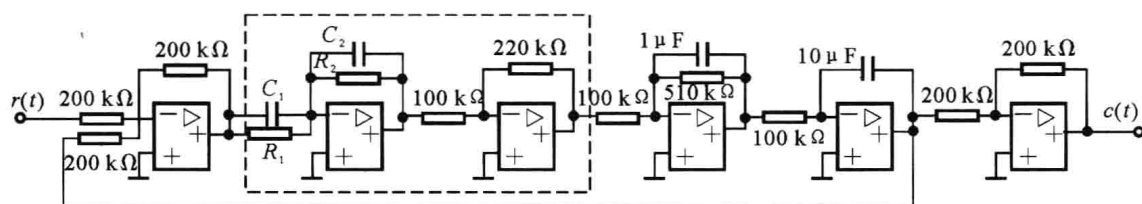


图 2-5 校正后二阶系统的模拟电路图

$$D(S) = \frac{R_2}{R_1} \frac{(1+R_1C_1S)}{(1+R_2C_2S)} \times 2.2 = \frac{1+0.5S}{1+0.22S}$$

为使校正后的 $K_v = 5$, 要求对象 K 由 5 增至 10, 则有

$$R_1 = 500 \text{ k}\Omega, \quad C_1 = 1 \mu\text{F}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = 0.45, R_2 = 220 \text{ k}\Omega (\text{实际可取 } 200 \text{ k}\Omega \text{ 电阻}), \quad C_2 = 1 \mu\text{F}$$

3. $D(S)$ 的离散化算法

如图 2-6 所示。

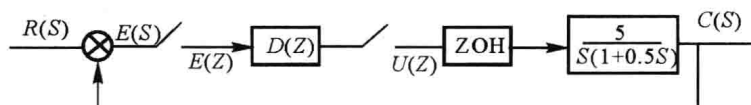


图 2-6 数-模混合控制的框图

图 2-6 中 $D(S)$ 的离散化可通过数据采集卡的采样开关来实现。

传递函数与 Z 传递函数间的相互转换, 可视为模拟滤波器与数字滤波器之间的转换。常用的转换方法有: ① 阶跃响应不变法(或用脉冲响应法); ② 后向差分法; ③ 双线性变换。

(1) 阶跃响应不变法:

$$u(t) = L^{-1}\left[\frac{1}{S}D(S)\right]$$

$$u(kT) = u_s(kT)$$

$$u(z) = Z[u(kT)] = Z[u_s(kT)]$$

$u(kT)$ 为数字滤波器在阶跃作用下输出响应的 $u(kT)$; $u_s(kT)$ 为模拟滤波器在阶跃作用下输出响应的采样值 $u_s(kT)$, 有

$$D(Z) = \frac{U(Z)}{E(Z)} = \frac{Z[u_s(kT)]}{\frac{1}{1-z^{-1}}}$$

$$D(S) = \frac{1+0.5S}{1+0.22S}, \quad U(S) = \frac{1+0.5S}{S(1+0.22S)} = \frac{1}{S} + \frac{1.27}{S+4.54}$$

$$u(t) = 1 + 1.27e^{-4.54t}$$

$$u(z) = \frac{1}{1-z^{-1}} + \frac{1.27}{1-e^{-4.54T}z^{-1}} = \frac{2.27 - (1.27 + e^{-4.54T})z^{-1}}{(1-z^{-1})(1-e^{-4.54T}z^{-1})}$$

据此得

$$D(Z) = \frac{U(Z)}{E(Z)} = \frac{U(z)}{\frac{1}{1-z^{-1}}} = \frac{2.27 - (1.27 + e^{-4.54T})z^{-1}}{1 - e^{-4.54T}z^{-1}}$$

即

$$U(k) = e^{-4.54T}U(k-1) + 2.27e(k) - (1.27 + e^{-4.54T})e(k-1)$$

(2) 后向差分法:

令 $de(t) \approx e(k) - e(k-1)$, $dt = T$, 有

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T}$$

后向差分 S 与 Z 之间关系为

$$S = \frac{1-z^{-1}}{T}$$

代入 $D(S)$ 表达式中, 有

$$\frac{U(Z)}{E(Z)} = D(Z) = \frac{1+0.5\frac{1-Z^{-1}}{T}}{1+0.22\frac{1-Z^{-1}}{T}} = \frac{1}{T+0.22} \times \frac{T+0.5-0.5Z^{-1}}{1-\frac{0.22}{T+0.22}Z^{-1}}$$

于是得

$$U(k) = \frac{0.22}{T+0.22}U(k-1) + \frac{T+0.5}{T+0.22}e(k) - \frac{0.5}{T+0.22}e(k-1)$$

(3) 双线性变换:

$$Z = e^{Ts} = \frac{e^{\frac{T}{2}s}}{e^{-\frac{T}{2}s}}$$

由泰勒级数得