

高等学校实验课系列教材

自动控制原理及系统实验

陈今润 主编

重庆大学出版社

内 容 简 介

本实验教材力图构建自动控制原理综合的实验体系,这个体系涵盖模拟仿真、数字仿真和物理模型3种常用实验手段,在实验内容上,由基础性实验演进到综合性实验,再过渡到开放性实验。目的在于改变传统的单纯的验证性的实验模式,提高学生综合应用知识的能力。

本书第1章简单地概述了自动控制实验的基本情况,介绍了一些相关的数据处理方法;第2章的任务主要是培养学生相关实验的基本技能,在保留部分传统内容的基础上,也结合进了新的内容,如模拟仿真与数字仿真的相互结合。第3章围绕水箱物理模型,设计了3个综合性的实验,实验内容反映了实际情况,由于实验手段更新较大,为这类实验的课堂完成创造了条件。第4章是一些带有开放性的实验。具体实验教学安排可分别从这4章中挑选部分内容组成。

本教材可与自动控制原理、现代控制理论、最优控制和过程控制等课程配套使用,而且也适用于相关专业研究生的专业实验。

图书在版编目(CIP)数据
自动控制原理及系统实验/陈今润主编. —重庆:重庆大学出版社,2005.9
(高等学校实验课系列教材)
ISBN 7-5624-3482-4
. 自... . 陈... . 自动控制理论—实验—高等学校—教材 自动控制系统—实验—高等学校—教材 . TP13-33 TP273-33
中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第089470号

自动控制原理及系统实验

陈今润 主编
责任编辑:谭 敏 版式设计:谭 敏
责任校对:李定群 责任印制:秦 梅
*
重庆大学出版社出版发行
出版人:张鸽盛
社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内
邮编:400030
电话:(023) 65102378 65105781
传真:(023) 65103686 65105565
网址: <http://www.cqup.com.cn>
邮箱: fxk@cqup.com.cn (市场营销部)
全国新华书店经销
重庆科情印务有限公司印刷

*
开本:787×1092 1/16 印张:5.75 字数:144千
2005年9月第1版 2005年9月第1次印刷
印数:1—3000
ISBN 7-5624-3482-4 定价:10.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究。

前言

自动控制是以控制理论为基础,集成各学科门类的应用技术,为了达到控制目的而发展出来的系统理论与工程技术。自动控制与工业、国防、航空航天乃至高品质的现代化生活均有着非常密切的关系,其应用涵盖现代生活的各个层面,小至自动照相机大至磁悬浮列车的自动控制,都可以反映出自动控制不仅是一个独立的学科门类,更重要的是它与其他相关学科门类整合后所产生的应用成果。因此,学习自动控制理论不能仅限于掌握该课程所论述的某些基本原理和基本的分析方法,还应注重培养理论联系实际的基本技能。实验教学是完善这个教学目的的有效途径,在实验中,学生可将观察到的现象与系统的内在特性联系起来,加深对理论的理解,对培养学生分析解决问题的能力以及调试操作的技能都有一定的帮助。

如何提高实验教学的质量是编写这本实验教材试图解决的一个基本问题,我们认为,实验教学的目的除了论证和检验课程所论述的某些基本原理、基本分析方法外,还应该提供能让学生主动参与和创新的空间,引导他们学习的兴趣,在解决实际问题的过程中,真正掌握课堂教学所介绍的普遍原理、一般方法和常用手段。

为此,根据现有的实验条件和教学的基本要求,本教材将实验内容划分成 3 个部分:

第 1 部分为基础实验,在模拟和数字仿真实验装置上训练学生的基本实验技能,重点掌握相关测试仪器的使用,实验数据的整理以及自动控制系统分析和设计的常用方法。

第 2 部分为综合性实验,以三容水箱的物理模型作为控制对象,使实验的过程更接近实际问题,重点培养学生综合应用理论知识和相关技术解决实际问题的能力。

第 3 部分为设计性实验,以典型的小车倒立摆为控制对象,从分析对象的运动特性入手,直至完成稳摆或起摆倒立的

控制。认真体会系统建模——选用控制规律——仿真实验——调试运行这个不断循环反复的设计过程,目的在于激发学生努力掌握新的设计手段和方法,提高综合设计的能力,拓展课堂教学的内容。

在实验内容的设计上,同时兼顾了经典控制理论和现代控制理论两部分的基本内容,做到实验与理论教学的平稳衔接,尽量满足既不过分增加实验的难度,又能提高学生实践能力的要求。

教材中选编的实验是在学校实验室的装置上经过几届学生使用后修改整理而成。可作为《自动控制原理》配套实验教材使用。本书由陈今润主编,参加本书编写的还有祖正容、陈钢、张赞宁和刘和松等。

由于编者水平有限,书中疏漏不妥之处,恳请读者批评指正。

编者
2005年4月

第 1 章

基本实验技术

1.1 自动控制系统的模拟

所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用外加设备或装置使生产过程或被控对象中的某一物理量(或多个物理量)能准确地按照预期的规律去运行或变化。将这种外加的设备或装置称为控制装置(或校正装置)。简单地看,自动控制系统是由被控对象和控制装置组合而成。控制系统的分析主要是认识系统中的相关参数与系统动态性能的关系,而控制系统的设计则是在前者的基础上,综合出能满足性能指标要求的控制装置。在系统分析阶段通常先借助实验的手段建立被控对象的数学模型,才可能运用理论知识对控制系统运行理论方面的分析、计算。控制系统的设计完成后,应通过实验验证,以检验设计的效果,并为改进设计提供依据。这是一个需要多次反复的过程,只有这样,才能解决理论与实践的差距,使设计工作达到满意的水平。从中可看出,不论是控制系统的分析或设计都离不开相应的实验。其实验技术对研究自动控制系统具有重要的作用。

由于实际的被控对象或生产过程五花八门,而且通常过于庞杂,不便于在实验室真实再现,受此约束,常采用模拟方法进行实验研究,模拟就是用某一领域中容易实现的现象去模仿另一领域中我们所研究的现象。特别是当研究对象比较复杂时,模拟更显出其重要性。模拟研究的特点是设计一个与现象或过程相似或类比的模型,通过模型来间接地了解、处理或控制这个现象或过程。模拟也可叫做仿真,通俗地讲就是模仿真实的东西。根据模拟的性质来区分,模拟可以分为物理模拟和数学模拟两大类。

物理模拟法是按比例地缩小或放大实际系统,制作出实际系统的物理模型。然后在该模型上直接进行调试和分析。在物理模型与原型中进行的过程,其物理本质完全相同,显然,物理模型是建立在过程相似的基础上。这种方法受到以下条件的制约:制作实际系统的物理模型往往相当困难,特别是复杂的系统,要制作它的实际模型并非容易,花费也十分昂贵。如果实际系统的参数发生改变,模型也要做相应的改变。不是十分重要的场合这种方法一般不采用。

在物理模型上进行实验。保证了系统原型的物理本质, 因此, 它能比较全面地表现被研究过程的物理规律, 能观察到数学模型不可能包含的真实过程所具有的现象。

数学模拟法是先根据控制的目标和对象的特征, 对问题进行必要的、合理的简化, 在此基础上分析对象的因果关系, 利用对象的内在规律和适当的数学工具, 构造对象内各个量间的等式关系或其他数学结构。这些数学关系能反映实际过程的基本进行规律, 称为数学模型。例如用线性微分方程或状态方程来描述某一运动过程, 该微分方程或状态方程就是被描述的某一运动过程的数学模型。有了数学模型, 就可以方便地利用计算机(包括模拟计算机、数字计算机和混合计算机) 对系统进行仿真实验。

这种实验技术的显著特点是, 可以用同一装置去模拟各种物理本质截然不同的实际系统。虽然各种物理现象千差万别, 其物理本质和参数也各不相同, 但它们的变化规律往往具有类似之处, 即不同的物理系统可以用若干相同的运算模块构成的数学模型来描述。由于各种运算模块易于标准化, 因此数学模拟的通用性很强, 能直接避免物理模型中遇到的诸多困难和不便。由于数学模拟具有这些长处, 它是研究自动控制系统的重要实验手段。

当然, 数学模拟只有在系统的数学模型建立之后才有可能实现, 而建立一个真实系统的数学模型是一个不断逼近的过程, 这是它的不足之处。事实上, 数学模拟与物理模拟是可以互相补充, 而不是相互排斥的, 很多情况下两者是结合使用的。

1.2 实现数学模拟的基本方式

实际系统的数学模型是一个或一组微分方程式, 用计算机来解这些方程的过程称为仿真实验。在自动控制系统的仿真实验中, 可选用的计算工具有模拟计算机、数字计算机和混合计算机, 通常把模拟计算机进行的模拟称为模拟仿真, 把数字计算机进行的模拟称为数字仿真, 而把混合计算机进行的模拟称为数-模混合仿真或混合仿真。

模拟仿真采用模拟计算机和电子模拟装置进行控制系统的模拟实验。它运算放大器的基本特性(开环增益高, 输入阻抗大, 输出阻抗小) 设置了不同的输入网络和反馈网络, 来模拟自动控制系统的各种典型环节, 如求和、积分、微分等基本的运算单元, 再把各种典型环节按数学模型的要求形式连接起来构成实验系统。如(1.1) 式为惯性-阻尼-弹簧的数学模型, 它反映的是系统内存在阻尼系数 f 和弹簧系数 k 的条件下, 质量块 m 的位移 x 与外力 F 之间的运动关系

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F - f \frac{dx}{dt} - kx \tag{1.1}$$

图 1.1 就是该数学模型的模拟仿真实验的排题图, 可看出, 模拟仿真是利用模拟电路解算数学模型的过程, 其中的基本运算单元由运算放大器、电阻器、电容器以及晶体管等构成。因此可以说, 模拟仿真依靠的是硬件技术。

它的优点是: 由于模拟仿真可以实现各运算部件的并行运算, 因而运算速度很快, 很容易做到实时甚至超实时模拟, 这在工程应用上特别重要。当系统具有非线性、变参数等环节时, 可以不必作近似忽略, 因而比理论分析更能真实地反映系统的实际情况。它的缺点是: 计算的精度较低; 没有记忆装置和逻辑判断能力; 对于一些特殊的环节, 线路较复杂而且精度也较差;

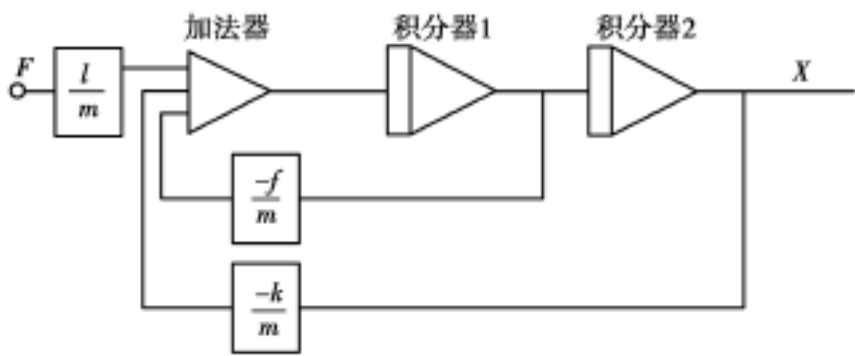


图 1.1 惯性-阻尼-弹簧系统的模拟仿真排队图

数学模型发生改变需要更改相应的接线。

数字仿真采用数字计算机进行模拟, 整个模拟过程包含在一组模拟程序中, 也就是说, 数字仿真依靠的主要是软件技术。当今最流行的数字仿真平台是 Matlab / Simulink, 图 1.2 表示在 Matlab / Simulink 平台上编制的惯性-阻尼-弹簧系统的数字仿真程序。

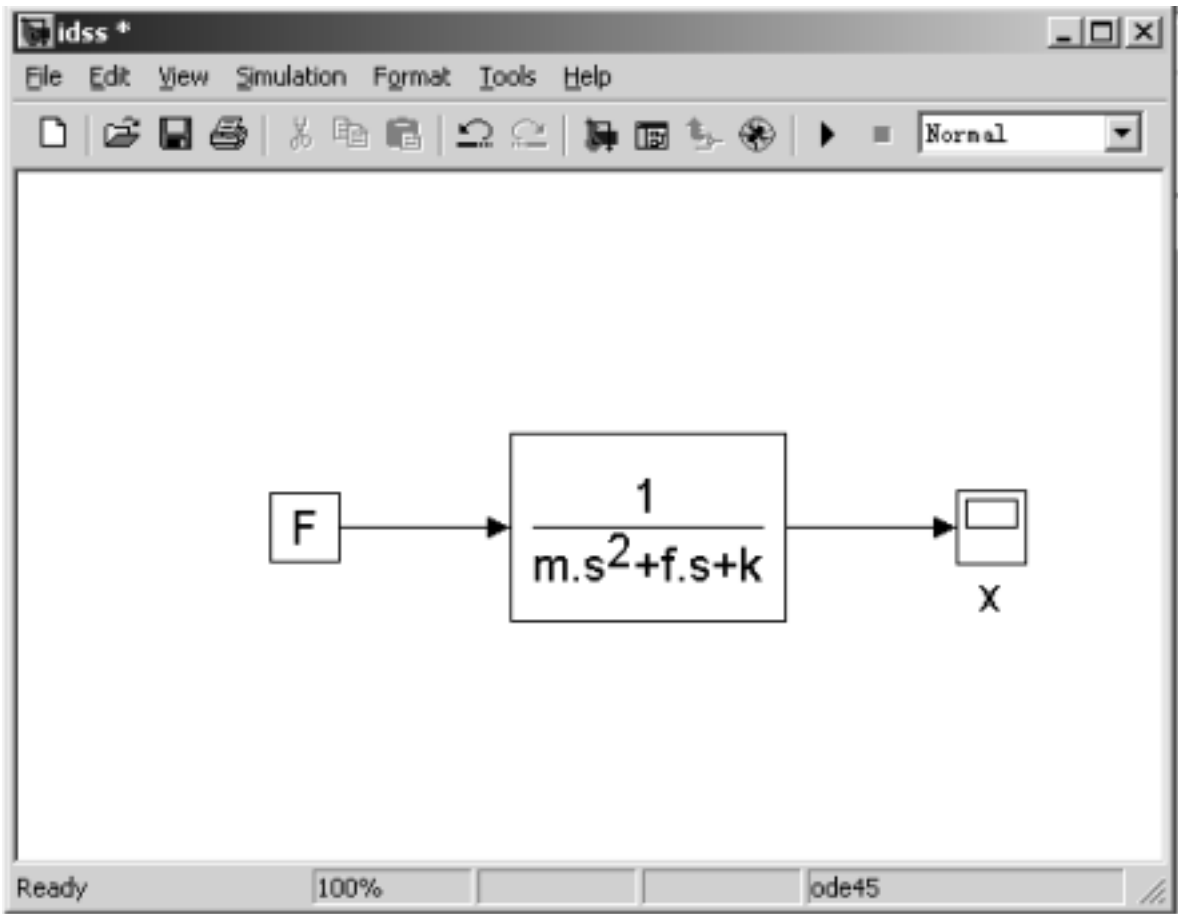


图 1.2 在 Matlab / Simulink 平台上编制的惯性-阻尼-弹簧系统的数字仿真程序

数字仿真的优点是: 运算精度高; 具有很强的逻辑判断能力和记忆能力; 为实验数据的采集和处理提供了完善和便利的条件。解题只需改动软件, 因此实验准备的周期短, 费用少。主要的缺点是: 它的运算是串行的, 难以做到实时仿真。特别是对反应较快的控制系统, 要做到实时仿真就很困难。

模拟仿真和数字仿真是控制系统的常用的实验方法, 而建立数学模型的过程中往往需要忽略一些次要因素, 从而回避了实际系统中存在的各种复杂的因素。也就是说, 设计的控制系统只在一定程度上接近实际的物理系统, 在调试中还可能出现各种各样的实际问题。需分析并逐步解决所出现的实际问题, 才能进一步完善设计。

1.3 对象传递函数的实验测定

对象的数学模型是设计自动控制系统首先要解决的基本问题。对象的数学模型通常通过机理分析和实验测定来加以认识。其中实验测定是常用的基本方法,即便是机理分析往往也只能解决模型的大致结构形式,还需实验测试确定其中的待定参数。实验测试对象动态特性常分为时域法、频率法和统计法等几种方法。

时域法是通过加入脉冲、阶跃或方波等输入信号,测试对象相应的输出响应,通过获取的实验数据整理出对象数学模型的经验式。

频率法是在对被测对象的输入端加入无畸变的正弦激励信号,然后测量对象的输出响应。对于最小相位系统,只需根据记录的稳态量值画出对数幅频曲线,然后用斜率为 0 dB/dec, ± 20 dB/dec, ± 40 dB/dec 等线段去逼近,即得对数幅频曲线的折线形式(不必作相频曲线)。在折线上定出各段的转折频率,即可写出被测对象的传递函数。图 1.3 示意了频率特性实验的原理,其中正弦信号源可以是机械、电气和气动等形式,根据对象类型和要求不同,应选用不同的频率范围 $0 \sim \omega_{\max}$ 。确定最高频率 ω_{\max} 的简单方法是,不断增加输入信号的振荡频率,直到输出量的振幅趋近于零(或减少到当 $\omega = 0$ 时幅值的 $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{100}$)。这个频率就记作 ω_{\max} 。变换器必须是比例环节,且有相同的传递函数,它将输入、输出信号变换为标准电量信号 u_r 和 u_c ,便于记录处理。

由于被测对象总有非线性因素,无论时域特性或频率特性的实验都应控制输入信号的幅度。信号幅度过大,易引起系统饱和,稳态输出不再是正弦信号,从而得不到准确的试验数据;如果信号幅度太小,也会由于死区,使稳态输出波形变形严重,导致过大的测量误差。频率特性实验中,在输入信号作用下,需要使被测对象稳定一段时间,才能确保测量的数据满足实验的要求。

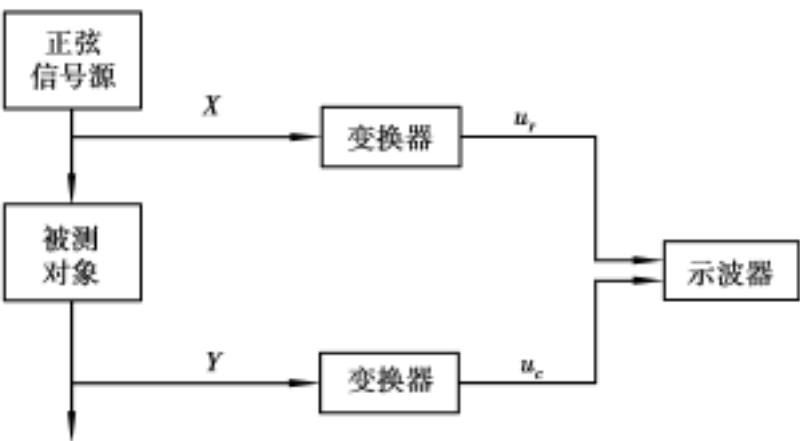


图 1.3 频率特性实验的示意图

工程实际中,为便于实验研究,常采用以下几种形式的传递函数来逼近实际对象或过程的动态特性,其中带传递延迟的传递函数也多用于逼近高阶系统。下面简要地介绍其中部分传递函数的实验测定方法。有关的详细内容可参见参考文献。

表 1.1 工程中常选用的传递函数

自平衡对象的传递函数	无自平衡对象的传递函数
$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$	$G(s) = \frac{1}{Ts}$
$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-s}$	$G(s) = \frac{1}{Ts} e^{-s}$
$G(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2 Ts + 1}$	$G(s) = \frac{1}{T_1 s (T_2 s + 1)}$
$G(s) = \frac{K}{T^2 s^2 + 2 Ts + 1} e^{-s}$	$G(s) = \frac{1}{T_1 s (T_2 s + 1)} e^{-s}$

1.3.1 由飞升曲线确定一阶惯性环节的参数

所谓飞升曲线是在输入 $x(t)$ 阶跃作用下, 对象输出 $y(t)$ 响应的过渡过程。

若实验飞升曲线 $y(t)$ 在输入 $x(t)$ 发生阶跃的瞬间, 其斜率不为零而为最大值, 然后逐渐上升到稳态值 $y(\infty)$, 如图 1.4 所示。则该过程的传递函数可用一阶非周期环节 $\frac{K}{Ts + 1}$ 来近似, 确定式中未知参数 K 和 T 的方法如下:

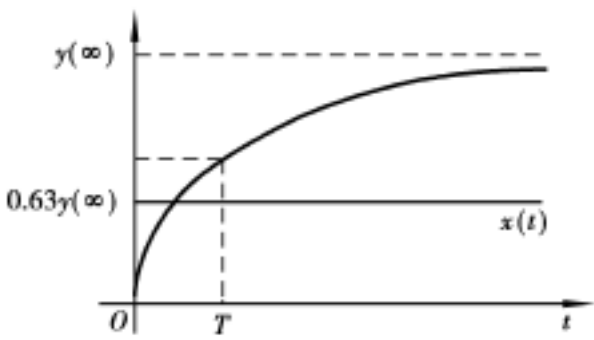


图 1.4 一阶惯性环节的飞升曲线

静态增益 $K = \frac{y(\infty)}{x(0)}$ (1.2)

将实验飞升曲线 $y(t)$ 改写成标么化飞升曲线 $y^*(t) = \frac{y(t)}{y(\infty)}$, 标么化飞升曲线的表达式为

$$y^* = 1 - e^{-t/T}$$

由此, 只需任选某个时刻 t_1 , 找出 $y^*(t_1)$ 的值, 就可解出:

时间常数 $T = \frac{t_1}{\ln [1 - y^*(t_1)]}$ (1.3)

若取 $y^*(t_1) = 0.63$, 则 $T = t_1$ 。
由实验飞升曲线求得时间常数 T 后, 通常应另选几个值对计算结果进行校对, 如

$$y^*(2T) = 1 - e^{-2} = 0.87$$
$$y^*\left[\frac{1}{2}T\right] = 1 - e^{-1/2} = 0.39$$

用以判断模型的合理性。

1.3.2 由飞升曲线确定二阶惯性对象的参数

大多数实际象的实验飞升曲线是一条 S 形曲线, 如图 1.5 所示。在实践中, 对于这类形态

的飞升曲线,常选用二阶过阻尼对象、带时延的一阶惯性对象或带时延的二阶惯性对象来近似

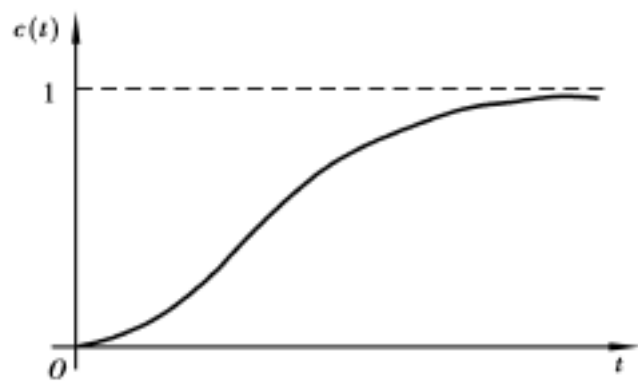


图 1.5 二阶过阻尼对象的飞升曲线

实际对象,这种方法适用于一大类工业生产过程。至于得到了一条 S 形的实验飞升曲线后,究竟选用哪种对象来近似,没有严格的区分方法。在取得实验飞升曲线后,可先观察一下,若在 $t=0$ 后一段时间内飞升曲线的坐标值接近为 0,那么就可用带时延的对象来近似。否则就选用二阶过阻尼对象来近似。也可以将不同的计算结果与实验曲线对比,观察哪个精确度好,就选择哪个。

对于二阶过阻尼对象的实验飞升曲线,先用式(1.2)和式(1.3)求得静态增益 K 及标么化飞升曲线 $y^*(t)$ 。标么化飞升曲线 $y^*(t)$ 反映了如下对象的飞升过程

$$G(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2T s + 1}$$

上式的传递函数中静态增益 $K=1$,只有 T 和 两个待定参数,令

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{1}{T} \left[- \sqrt{\tau^2 - 1} \right] \\ \tau_2 &= \frac{1}{T} \left[+ \sqrt{\tau^2 - 1} \right] \end{aligned}$$

或

$$\begin{cases} T = \frac{1}{\sqrt{\tau_1^2 - \tau_2^2}} \\ \tau = \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{2\sqrt{\tau_1^2 - \tau_2^2}} \end{cases}$$

(1.4)

于是

$$G(s) = \frac{1}{(s + \tau_1)(s + \tau_2)} \tag{1.5}$$

在单位阶跃作用下,输出的飞升曲线为

$$y^*(t) = 1 - \frac{\tau_2}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\tau_1 t} + \frac{\tau_1}{\tau_2 - \tau_1} e^{-\tau_2 t} \tag{1.6}$$

令

$$\tau_2 = a - \tau_1 \tag{1.7}$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时,则式(1.6)可表示成

$$\ln [1 - y^*(t)] = \ln \left[\frac{a}{a - 1} \right] - \tau_1 t \tag{1.8}$$

由此可看出,当 $t \rightarrow \infty$ 时,在半对数坐标上, $\ln [1 - y^*(t)]$ 趋近于一条直线,该直线的斜率 k 及截距 b 分别为

$$\begin{cases} k = -\tau_1 \\ b = \ln \left[\frac{a}{a - 1} \right] \end{cases}$$

(1.9)

因此只要在半对数坐标纸上画出 t 较大时对应的 $\ln [1 - y^*(t)]$ 的图形,然后作出渐进线,再求出此直线的斜率 k 及截距 b ,就可算出

$$\begin{cases} \tau_1 = -k \\ a = \frac{e^b}{e^b - 1} \end{cases}$$

(1.10)

再根据式(1.4)、式(1.7)二式,即可算出 T 及 τ 。

若采用常用对数, 渐进线的斜率 k 及截距 b 为

$$\begin{cases} k = -0.4343 \tau_1 \\ b = \lg\left[\frac{a}{a-1}\right] \end{cases}$$

(1.11)

此时则有

$$\begin{cases} \tau_1 = -2.303k \\ a = \frac{1}{1-10^{-b}} \end{cases}$$

(1.12)

表 1.2 为实验数据处理的示例, 表中的数据只需选择响应过程趋于稳定的部分, 在半对数坐标 (纵轴为对数刻度标注, 横轴为等分刻度标注时间 t) 上描出实验数据及渐进线, 如图 1.6 所示。可得:

斜率 $k = -0.2208$, 将此直线向左边延长, 得到与纵轴的交点, 该交点即为截距 $b = 3.5$, 利用式(1.12)、式(1.7)和式(1.4)3 式计算出二阶对象的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{2.76s^2 + 3.35s + 1}$$

表 1.2 二阶惯性对象飞升实验数据的整理

t	$y^*(t)$	$1 - y^*(t)$	$\lg[1 - y^*(t)]$
6	0.863 175	0.136 825	- 0.863 9
8	0.945 158	0.054 842	- 1.200 9
10	0.978 710	0.021 290	- 1.671 9
12	0.991 885	0.008 115	- 2.090 7
14	0.996 948	0.003 052	- 2.515 4
16	0.998 860	0.001 140	- 2.943 1
18	0.999 576	0.000 424	- 3.372 6
20	0.999 843	0.000 157	- 3.814 1

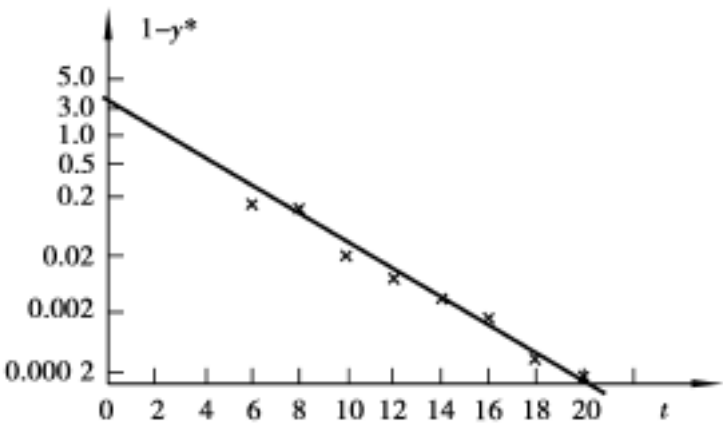


图 1.6 半对数坐标上求取实验数据渐进线的斜率和截距

对于带时延的象在测出相应的时延大小后, 其惯性部分可参照一阶或二阶惯性对象的建模方法进行处理, 限于篇幅, 不再赘述。

除上述的动态实验外,控制对象的特性实验还包括静态实验,静态实验是在对象的输入与输出的各阶导数均等于零情况下,对其各种性能参数的测试,通过静态实验可以得到对象的死区范围、线性段、饱和段等性能参数。有关静态实验数据处理的内容在相关的实验中再具体介绍。

第 2 章

自动控制原理仿真实验

2.1 实验装置简介

仿真实验是自动控制原理及系统的常用的基本实验手段,在高校中普遍采用模拟仿真实验装置或采用数字计算机在 MATLAB 环境下进行数字仿真。为便于了解实验装置使用的基本情况,选择我实验室配置的 TDN-AC/ACS 自动控制原理/计算机控制原理教学实验系统进行简介。

2.1.1 TDN-AC/ACS 系统

该系统通过对单元电路的灵活组态,即“搭积木”式组态,构造出各种形式和阶次的模拟环节和控制系统。系统内主要的单元电路有:信号发生单元、采样保持器及单稳单元、运算模拟单元、非线性单元、数/模转换单元、模/数转换单元、状态指示灯单元、单节拍脉冲发生单元、电位器单元、-5 V 电源发生单元、信号测量单元、驱动单元、电机单元等。

1. 系统电源

TDN-AC/ACS 系统采用开关电源作为系统工作和实验的电源,其主要技术指标为:

输入电压: AC165 ~260 V

输出电压/电流: +5 V/2 A, +12 V/0.2 A, -12 V/0.2 A

输出功率: 15 W

效率: 75 %

稳压性能:

电压调整率 0.2 %

负载调整率 0.5 %

纹波系数 0.5 %

工作环境温度: -5 ~40

2. 信号的产生

(1) 阶跃信号的产生

阶跃信号的产生, 是由单节拍脉冲发生单元(如图 2.1) 和电位器单元(如图 2.2) 组成, 其电路为图 2.3。

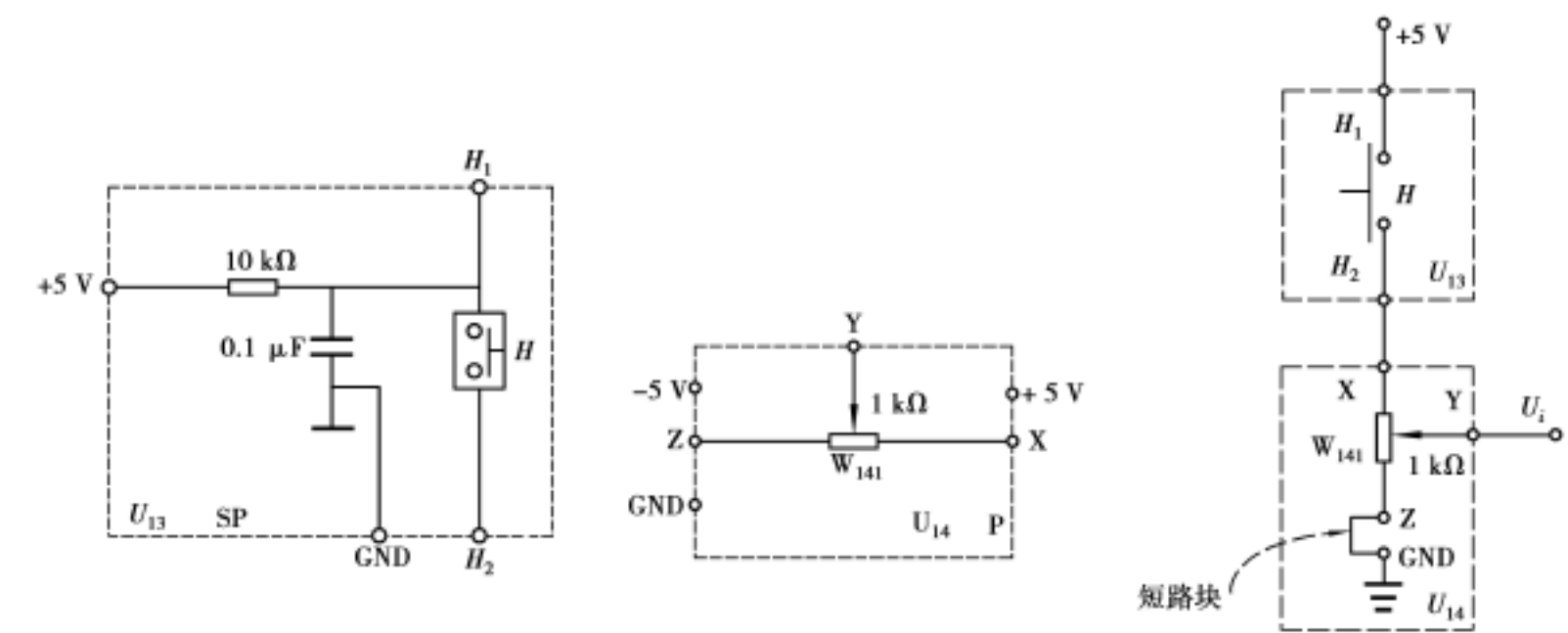


图 2.1 单元拍脉冲发生单元 图 2.2 电位器单元 图 2.3 阶跃信号发生电路

具体线路的形成: 在 U_{13} SP 单元中, 将 H_1 与 $+5\text{ V}$ 插针用“ 短路块 ”短接, H_2 插针用排线接至 U_{14} P 单元的 X 插针; 在 U_{14} P 单元中, 将 Z 插针和 GND 插针用“ 短路块 ”短接, 最后由插座的 Y 端输出阶跃信号。

(2) 正弦信号的产生

U_{15} SIN 正弦波信号发生单元, 见图 2.4。

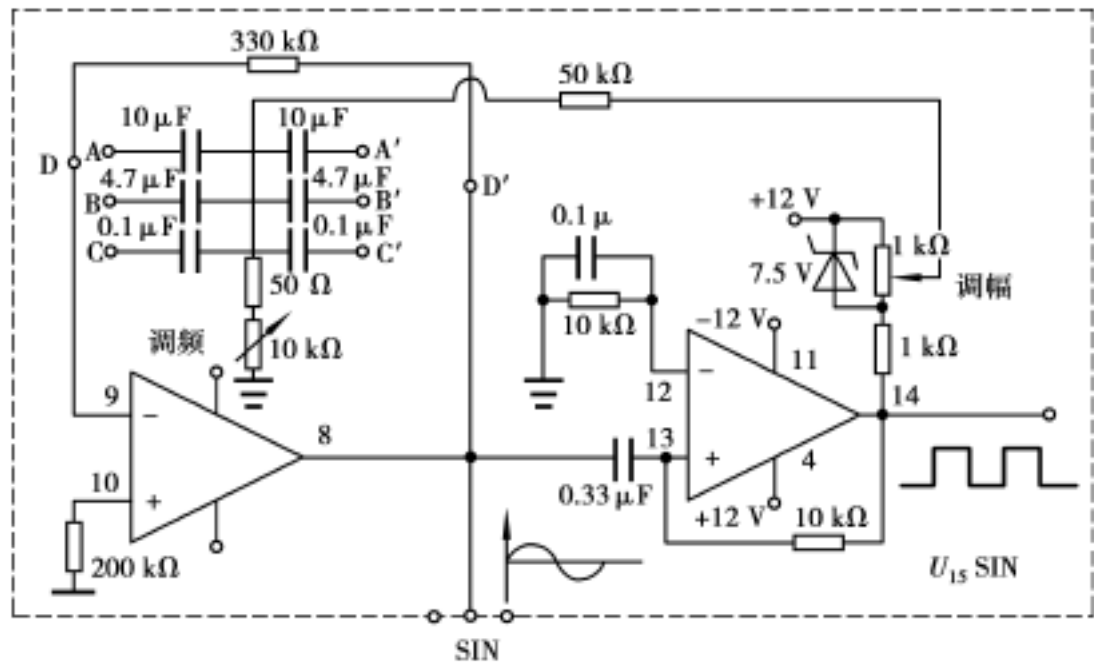


图 2.4 U_{15} SIN 正弦波信号发生单元

这个电路将产生频率从 0.2 Hz 到 400 Hz 的正弦波和方波。正弦波幅值在 $\pm 5\text{ V}$ 范围内。振荡器的频率容易通过改变单个电阻来调谐, 这比通过多个元件同时调谐要优越得多, 而且当频率改变时, 输出幅度比较稳定。运放 LM324 既用在调谐回路里(管脚 8, 9, 10), 也用作电压比较器(管脚 12, 13, 14), 电压比较器用来产生方波信号, 由此方波来驱动调谐电路。这个电

路的频率由 R_1, R_2, C_1, C_2, R_3 控制, 在 R_1, R_2, C_1, C_2 一定的时候, 通过改变可调电阻 R_3 来调谐。滤波器调谐不会影响它的增益和带宽, 所以输出幅度不随频率变化而变化。

(3) 方波、斜波、抛物波的产生

方波、斜波、抛物波的产生可以通过 U_1SG 典型信号发生单元来实现, 其原理图见图 2. 5。该单元产生方波、斜波、抛物波信号的幅值、频率可调(通过调电位器 W_{12}, W_{11})。

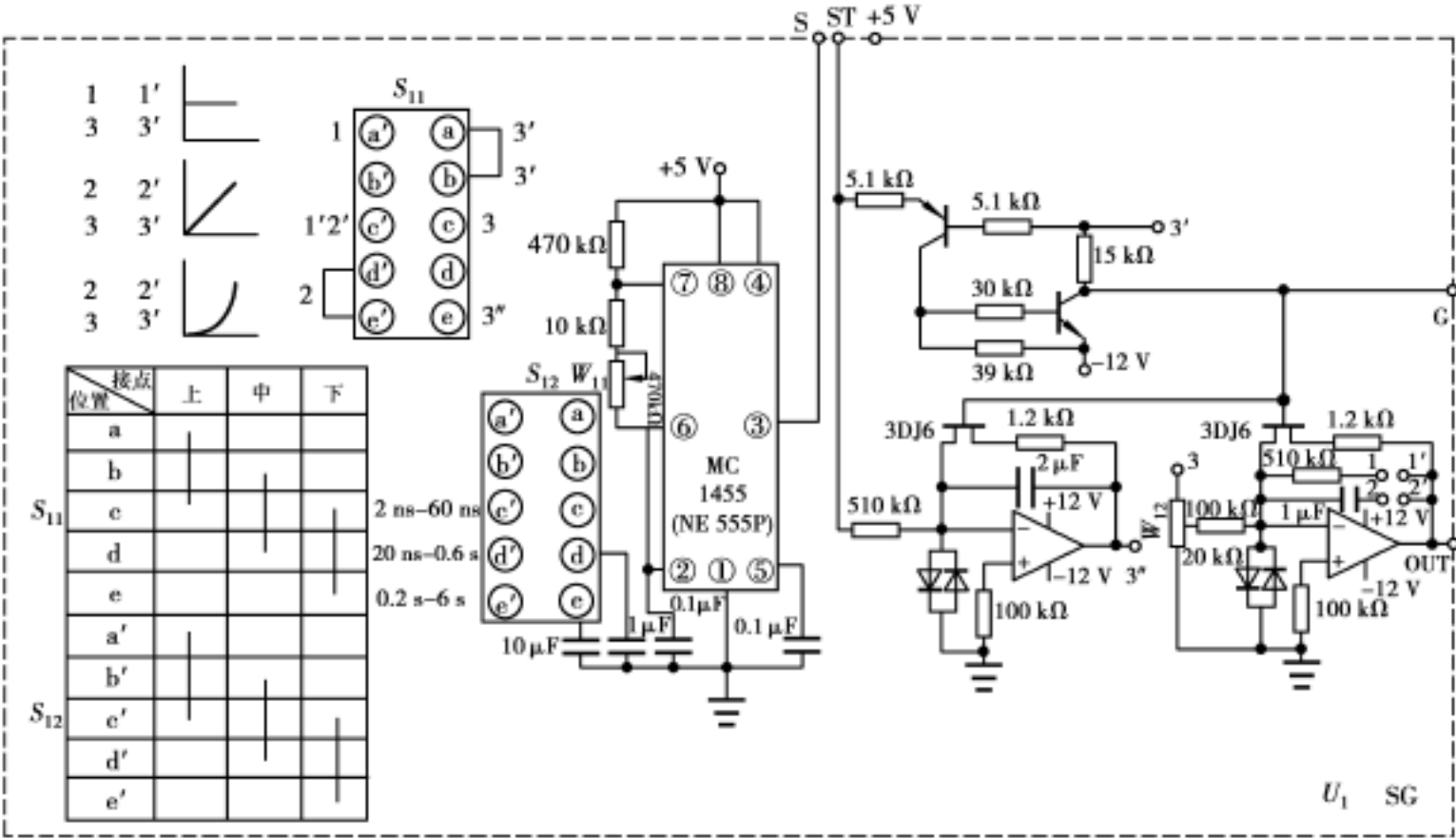


图 2. 5 U_1SG 典型信号发生单元

U_1SG 单元的 S 端为 MC1455 输出端, S 与 ST 短接时有锁零操作(S 端非零时不锁, 为零时锁), 此时, U_1SG 单元的 OUT 端可产生 3 种信号; 当 ST 端与 S 端断开, 而和 $+5V$ 短接时, 无锁零操作, OUT 端无信号, S 端只产生方波, 短接可用板上现成的短路块短接。值得注意的是, 由于锁零操作的存在, 所以产生的斜波、抛物波的运放也锁零, 若 MC1455 周期过长或信号幅度过大, 斜波、抛物波曲线后部将变平。

3. 采样保持器及单稳单元电路(见图 2. 6)

U_2SH 单元有一路采样器 LF398, IN 为采样保持器输入, OUT 为输出, 输入输出电平范围 $\pm 12V$, PU 为控制端, 用逻辑电平控制, 高电平采样, 低电平保持, 采样时间为 $10\mu s$ 。采样保持器用于模拟系统采样, 其输出给 A/D 器件时, 可以缩小因 A/D 器件转换时间(约 $100\mu s$) 带来的误差。

4. 运算模拟单元电路(见图 2. 7)

运算模拟单元就是我们来自自由组态的“ 积木”, 现在就运放单元举一个简单的例子加以说明。

实验要求: 尽可能利用板上的电位器来搭接一个比例环节。

传递函数为 $G(S) = K = R_f / R_0 = 20k / 10k = 2$

实验步骤:

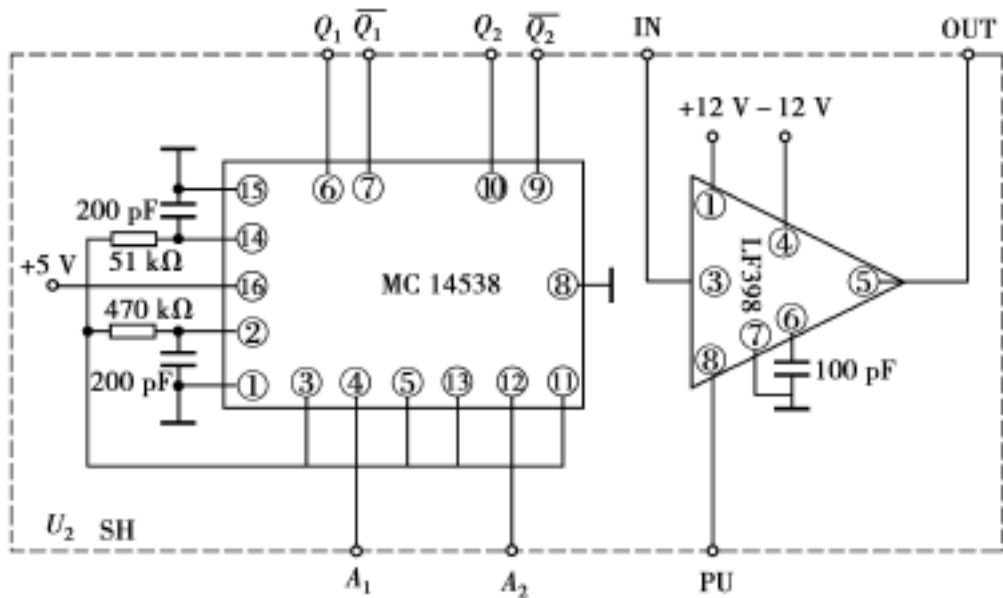


图 2.6 采样保持器及单稳单元电路

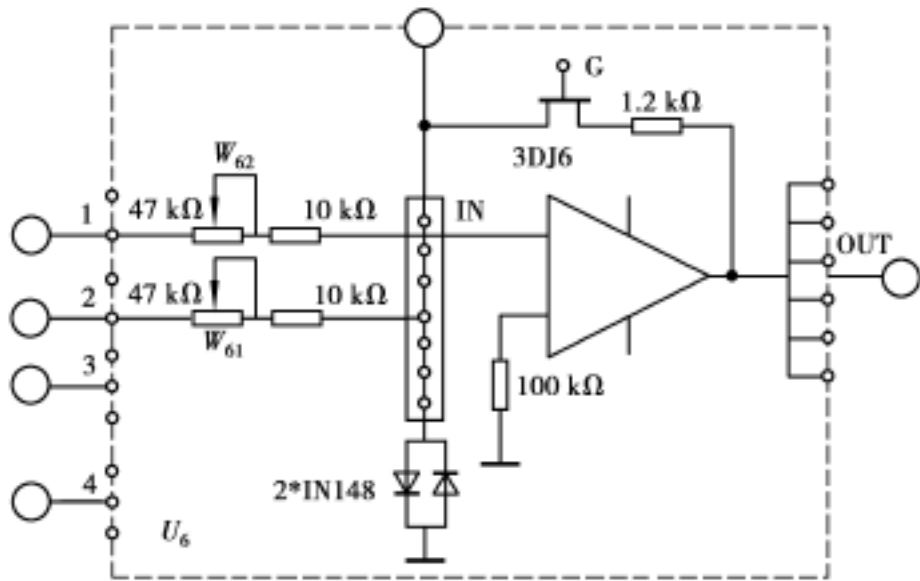
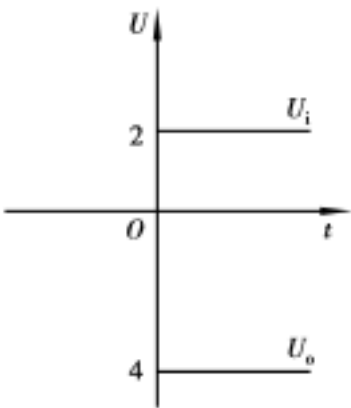


图 2.7 运算模拟单元电路

1) 先将输入电阻 $R_0 = 10\text{ k}$ 确定。
方法: 用万用表测量“1”和“IN”端, 调节与之对应的 47 k 电位器。如用 U_6 单元, 则调 W_{62} , 使万用表显示为 10 k 。



2) 再调整反馈电阻使 $R_f = 20\text{ k}$ 。
方法: 用万用表测量“2”和“IN”端, 调节 W_{61} , 使万用表显示为 20 k , 然后用一根单股导线将“2”端和“OUT”端连接起来, 构成 $R_f = 20\text{ k}$ 。

3) 将 U_1 SG 单元产生的方波信号加到 U_6 单元的“1”端, 用示波器观察 U_6 单元的“OUT”端输出波形。调整 R_f 或 R_0 , 使其放大倍数改变, 响应曲线如图 2.8 所示。(U_i 指输入信号; U_o 指输出信号)

图 2.8 响应曲线
方波信号的产生: 首先将 ST 插针与 S 插针用短路块短接, 将 S_{11} 置阶跃挡调 W_{12} , 使幅值为 2 V ; 将 S_{12} 置 $0.2 \sim 6\text{ s}$ 挡, 调 W_{11} 使其周期为 4 s , 以上都是通过示波器观察 OUT 端得到的。

同样的道理, 若搭接积分环节输入电阻接法同前, 反馈回路须改变, 要外接电容(在所配

的实验元器件中可找到需要的电容), 比如在 IN 和 OUT 端直接插入电容, 这样就可构成简单的积分环节。对于其他的环节, 接法可参照以上说明, 在此不再赘述。

以上只是介绍此单元, 其他运放单元 ($U_3 \sim U_8$) 原理相同, 只是输入电阻的大小不同(参照附录), 用户可以根据自己的需要进行选择使用。从而使实验效果更加理想。

5. 非线性用单元电路(见图 2.9)

供死区非线性和间隙非线性模拟电路插接电阻用。

6. 数/模转换单元电路(见图 2.10)

数模 (D/A) 转换单元为 U_{10} DAC, 采用 DAC0832 芯片, 转换精度为 8 位二进制码。输入数字范围为 00H ~ FFH, 对应输出 (U_{10} 单元的 OUT 端) 为 - 5 V ~ + 4.96 V。80H 对应于 0 V。输入数字量的 8 位数据线接至 8088CPU 的数据总线上, 另外, 读线和片选线已接好, 其口地址为 00H。

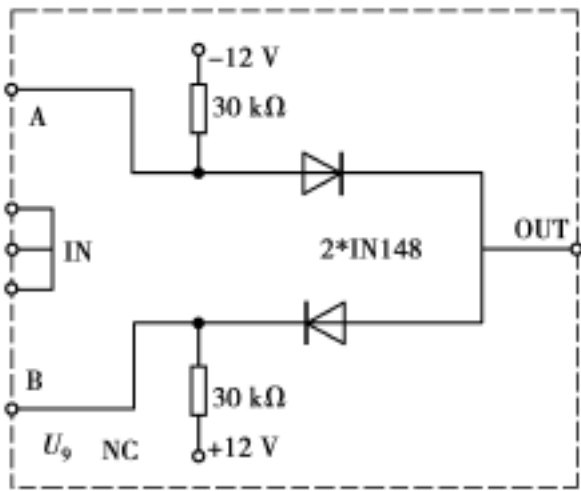


图 2.9 非线性用单元电路

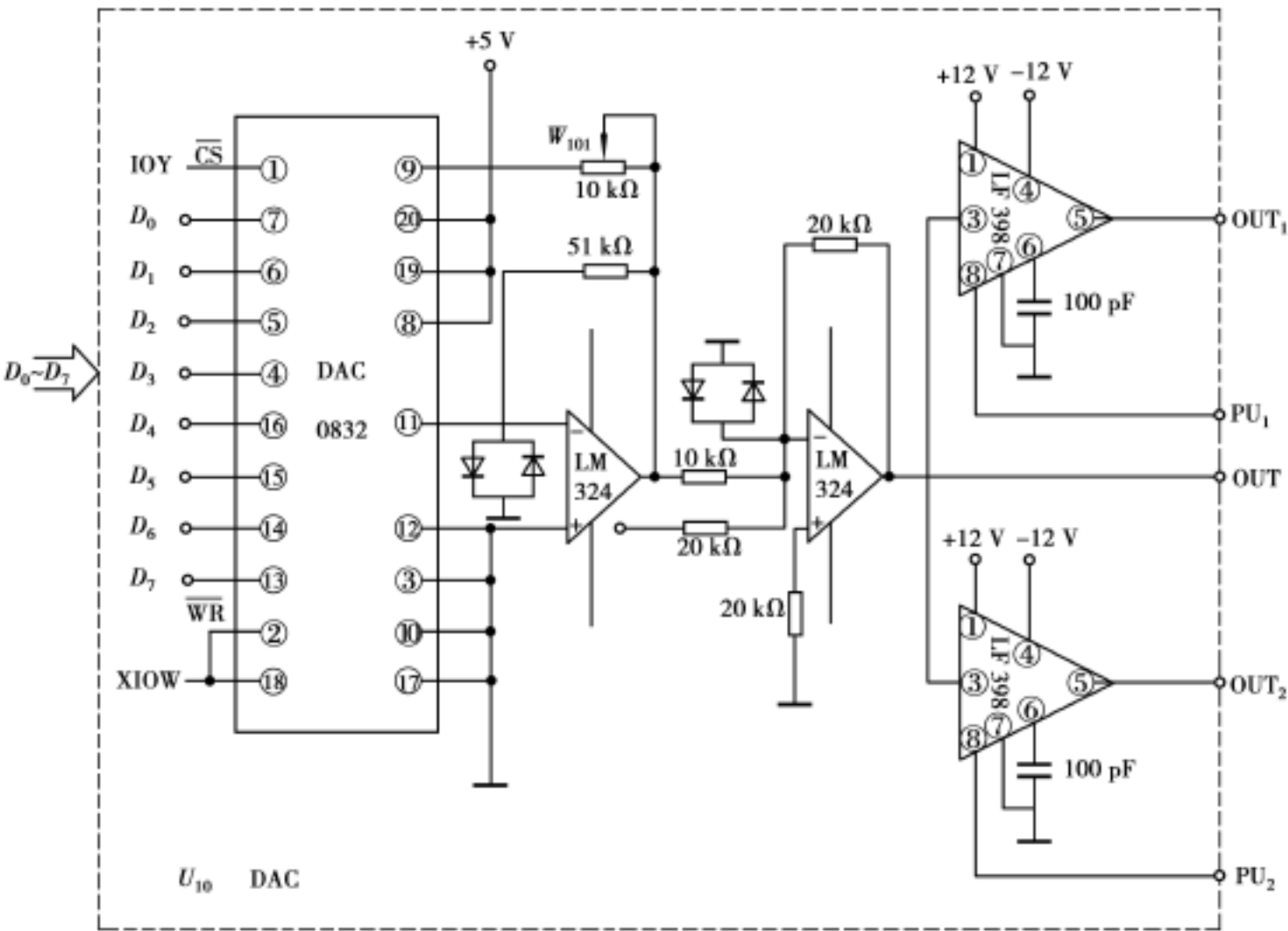


图 2.10 数/模转换单元电路

7. 模/数转换单元电路(见图 2.11)

模数 (A/D) 转换单元为 U_{12} ADC, 它采用 ADC0809 芯片, 分辨度为 8 位二进制码。模拟输入通道 8 路 ($IN_0 \sim IN_7$), 通过三端地址码 A, B, C 多路开关可选通 8 路模拟输入的任何一路进

行 A/D 变换。其中 $IN_1 \sim IN_5$ 的模拟量输入允许范围: $0 \sim 4.98\text{ V}$, 对应数字量 $00\text{H} \sim \text{FFH}$, 2.5 V 对应 80H 。 IN_6 和 IN_7 两路由于接了上拉电阻, 所以模拟量输入允许范围: $-5 \sim +4.96\text{ V}$, 对应数字量 $00\text{H} \sim \text{FFH}$ 。 0 V 对应 80H 。 输出 8 位数据线已接到 8088CPU 中的 8255 端口 A (已通过扁平电缆引到板子上)。 其他控制线根据实验要求另外连接(A, B, C, 1, EOC, $IN_0 \sim IN_7$)。 需要说明的是, 在电烤箱的控制实验中, 为简化实验线, IN_0 接 $500\ \Omega$ 对地电阻, 0809 的 CLOCK 线已接系统时钟 OPCLK, 频率为 1.1625 MHz 。

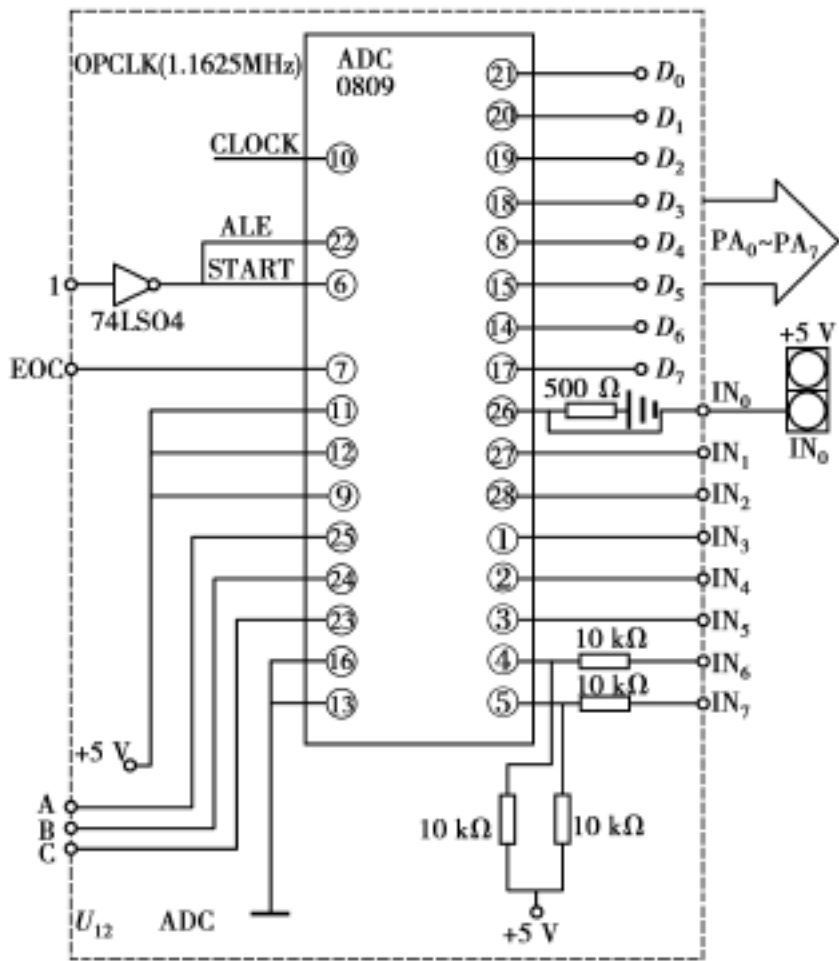


图 2.11 模/数转换单元电路

8. 状态指示灯单元(见图 2.12)
是用来显示实验现象的。

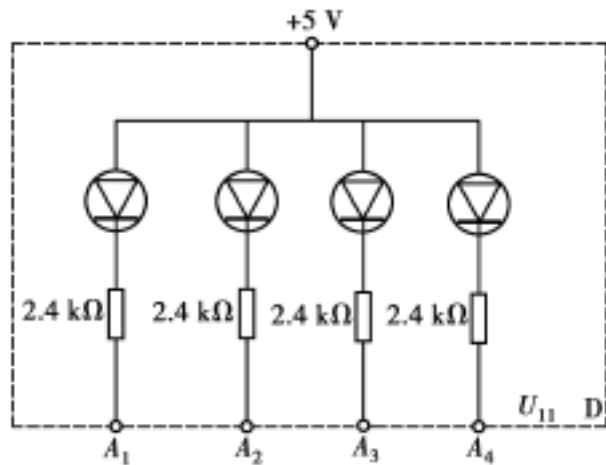


图 2.12 状态指示灯单元

9. -5 V 稳压集成电路单元(见图 2.13)

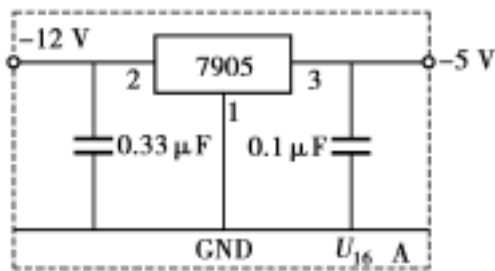


图 2.13 - 5 V 稳压集成电路单元

10. 驱动单元

驱动单元由 12 V 达林顿驱动电路及输出指示灯构成。驱动控制信号输入端 A ~D 为高电平有效, 当对应达林顿管输入 A ~D 的高电平被拉低时(相应指示灯亮), 在公共 +12 V 端驱动下, 可完成对 DC12 V 负载的驱动功能(注意: 负载不要过大), 其原理如图 2.14 所示。

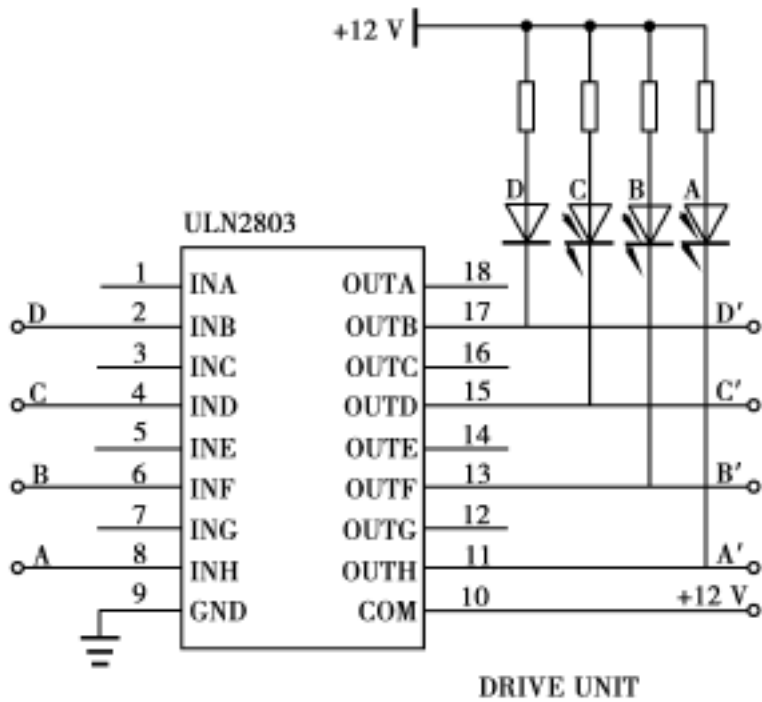


图 2.14 驱动单元

11. 电机调速单元

电机调速单元由 DC12 V, 1.1 W 直流电机、小磁钢、霍尔测速电路及输出构成。本单元用于直流电机闭环调速, 贴在直流风扇背面的小磁钢能随风扇一起旋转, 每当经过底部霍尔元件上方时, 对应霍尔输出由高电平变为低电平, 形成一个脉冲, 且相应指示灯闪亮。风扇电源输入排针(1,2)可用排线转接在驱动单元输出的 +12 V 和 A 排针上, 控制信号可加在 A 处, 反馈信号由霍尔输出排针(HR)引出。(风扇红线 1 为正极接 +12 V, 黑线 2 为负极接 A, 最高转速不超过 4 300 n/min), 其原理如图 2.15 所示。

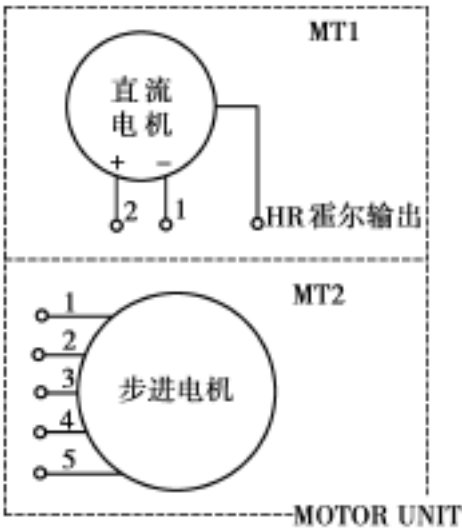


图 2.15 电机调速单元

2.1.2 超低频虚拟示波器

超低频虚拟示波器系采用虚拟仪器软件 Labview 6.0 自主开发的用于学生实验的计算机辅助测量系统, 见图 2.16, 其主要功能为:

- 1) 100 Ks/s 的高采样率, 12 bit 分辨率。
- 2) 带宽 1 kHz
- 3) 同时采集并显示 2 通道波形(Channel A, Channel B), 通道号可任意选择, 各通道增益可调。
- 4) 最大输入电压范围 +10 V, 垂直灵敏度 0.15 V。
- 5) 自动测定周期、频率、等波形参数。
- 6) 存储量 1 Ms
- 7) 支持数据输出至 Excel、Word 等程序。
- 8) 李沙育图形(X-Y PLOT)。
- 9) 波形回放, 可截取任意时刻的存储波形用于分析。
- 10) 打印输出。

1. 基本操作

信号通过端子板进入到计算机中, 会在图 2.16 中显示出来, 点击“ 存盘 ”按钮可以将曲线存储到指定位置, 并可以使用“ 回放 ”按钮回放波形曲线。

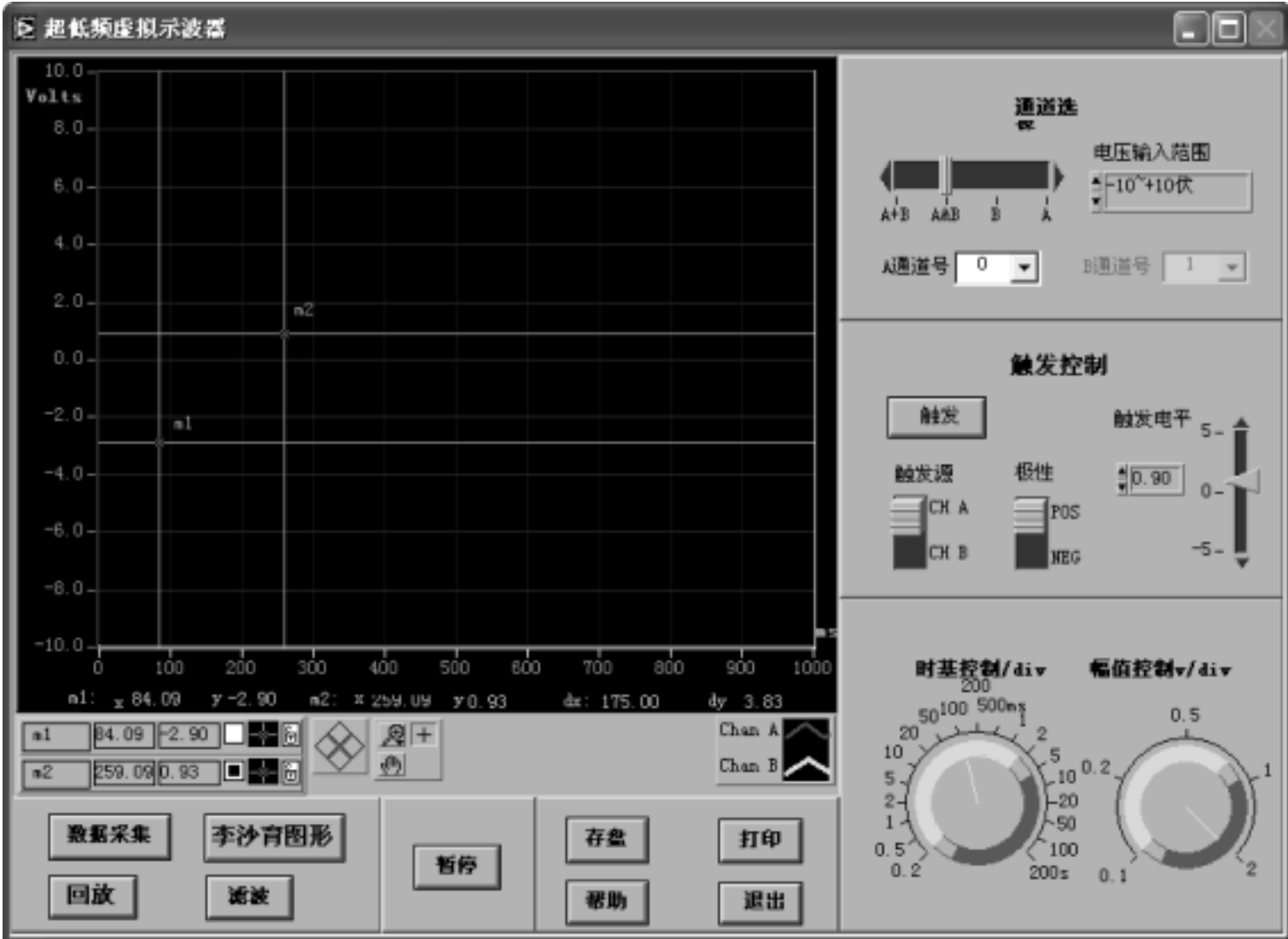


图 2.16 超低频虚拟示波器

- 在使用波形回放的功能时, 需要注意几个问题:
- 1) 通过菜单项 Operate 下的 Rerun 可以多次重复运行程序以截取想要的波形。
 - 2) 如果显示的波形一片漆黑, 是因为截取的波形的周期过多造成的, 应减少截取的采样点数。
 - 3) 波形数据起始位置最小为 32, 因为存储的文件中前 32 个数据是文件头。

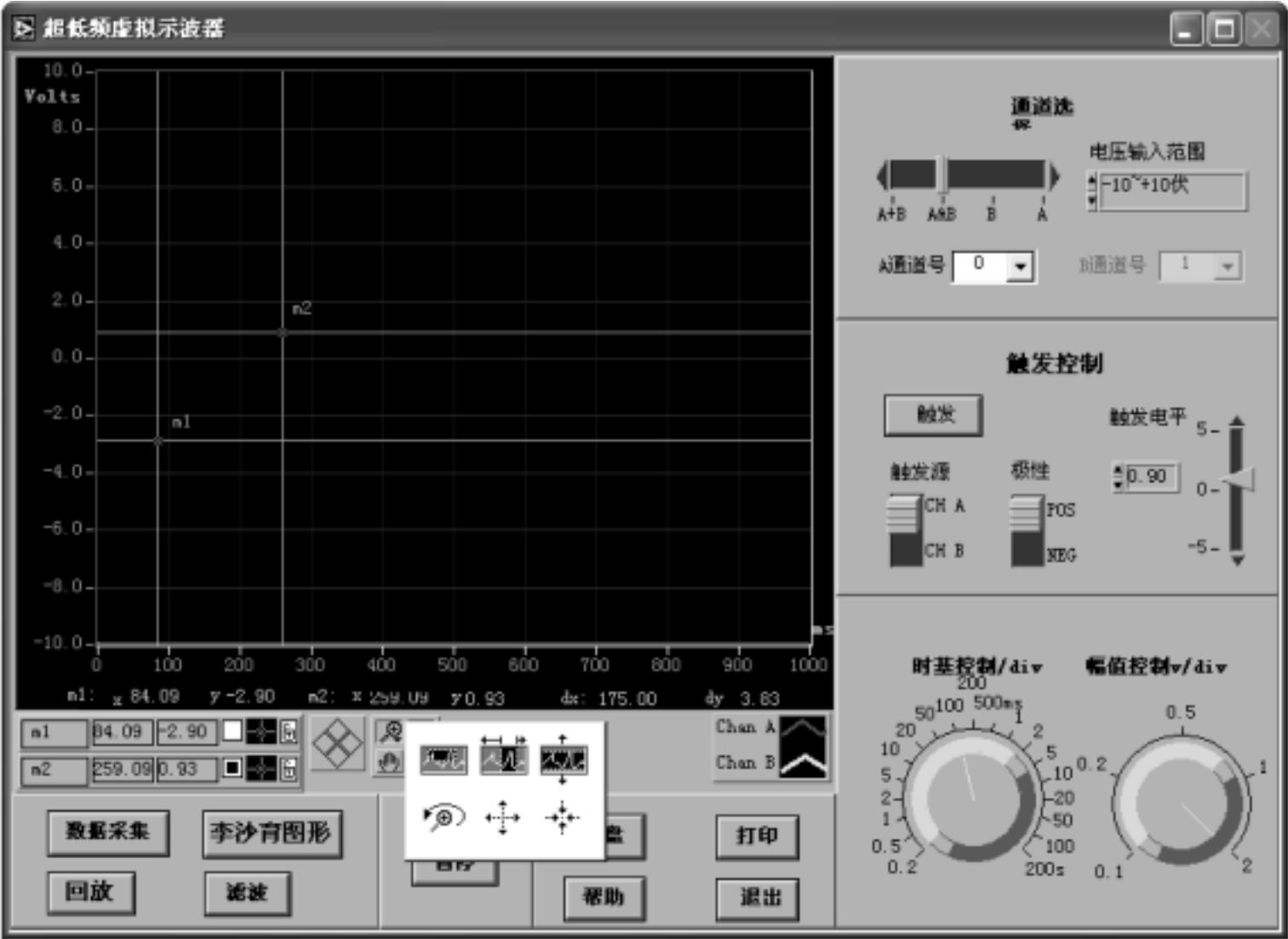


图 2.17 图形工具主界面

图 2.17 显示的是打开了图形工具的主界面, 有 6 种图形工具可供选择, 见图 2.18, 分别为波形曲线纵横方向的拉伸、压缩及撤销等操作功能, 具体见按钮上的图示符号。

2. 信号参数的测量

超低频虚拟示波器还提供了对输入信号的指标参数进行数字显示的功能, 图 2.19 是参数测量的界面, 通道可以进行选择, 此处测量的是 A 通道 - 10.0 V 的直流电压信号, 也可通过点击按钮“再测量一次”重新测量。以下是参数测量中有关参数的说明:

- 直流分量: 输入信号序列的直流电平估计值。
- 交流分量: 输入信号序列的交流电平估计值。
- 周期: 一个完整波的时间, 为频率的倒数。
- 信号频率: 单位时间内波的个数。
- 占空比: 脉冲波形的正半周的时间长度与其周期的比值。
- 均值电压: 输入信号序列的平均值。
- 峰值-峰值: 输入信号序列的最大值与输入序列的最小值的差值。
- 最大值: 输入信号序列的最大值。
- 最小值: 输入信号序列的最小值。
- 宽度 + : 波形在其正半周的时间长度。
- 宽度 - : 波形在其负半周的时间长度。

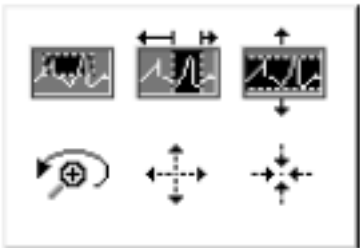


图 2.18 图形工具



图 2.19 参数测量界面

宽度: 脉冲波形幅度从其上升沿的 50% 到下降沿的 50% 的时间。

上升时间: 脉冲波形幅度从其上升沿的 10% ~90% 的时间。

下降时间: 脉冲波形幅度从其下降沿的 90% ~10% 的时间。

延迟时间: 脉冲波形幅度从其开始到上升沿的 50% 的时间。

峰值: 脉冲在其达到稳态前达到的最大值的基准线的值。

基值: 脉冲在其稳定期间达到的最小值的基准线的值。

振动幅值: 峰值与基值的差值。

过冲 + : 脉冲波形的最大值与其峰值的差值与幅度的比值。

过冲 - : 脉冲波形的基值与其最小值的差值与幅度的比值。

宽度 + 和宽度 - 是通过统计一个波形内载波形直流分量上下的时间长度来推算的。

参数测量应该注意的几个问题:

1) 对周期性波形的测量应该用大于

3 个周期的波形数据(通过回放可以截取波形数据的长度), 这样数据才更准确。

2) 通过菜单项 Operate 下的 Rerun 可以多次重复运行程序进行参数测量。

3. 李沙育图形

当两通道同时输入测量信号时, 可在屏幕上显示李沙育图形, 图 2.20 显示的是两路 - 10 V 直流信号的李沙育图形。

使用中需要注意:

1) 如果所画的图形线条过粗, 证明输入的波形数据过多; 如果所画图形没有完全闭合, 证明输入的波形数据过少, 没有一周周期。均应该通过回放操作, 截取两到 3 个波形, 再重新运行本程序。

2) 通过菜单项 Operate 下的 Rerun 可以多次重复运行程序进行参数测量。

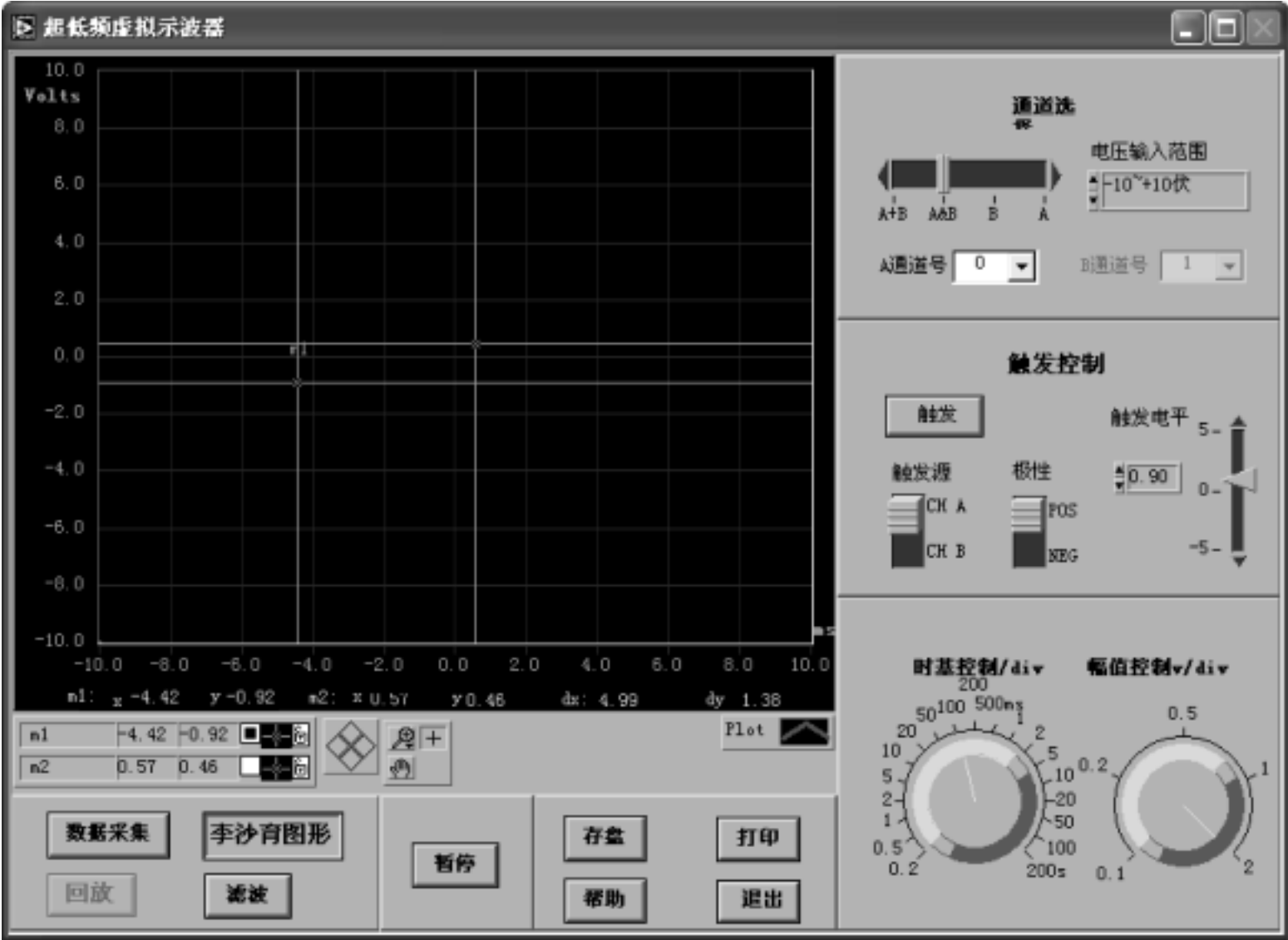


图 2.20 李沙育图形界面

2.2 实验项目及其指导

实验 1 典型线性环节的模拟

1. 实验目的

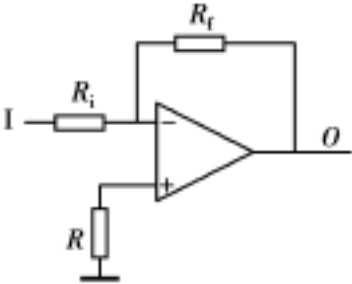
- 1) 掌握在模拟仿真机上构建典型线性环节的模拟方法;
- 2) 掌握线路参数对典型线性环节特性的影响。

2. 实验内容

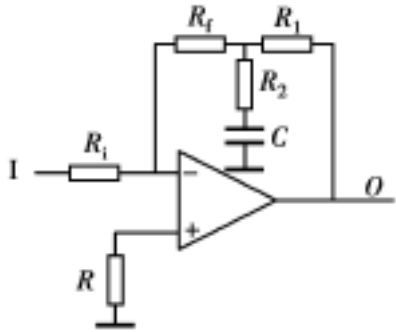
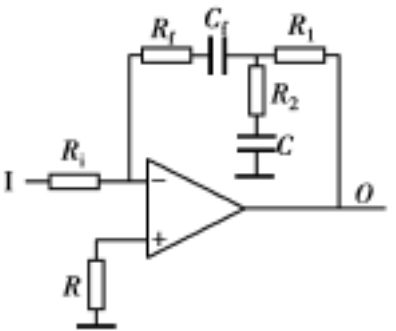
- 1) 构建 $K_p = 0.5$ 和 $K_p = 1$ 的比例环节, 并测试它们的阶跃响应;
- 2) 构建 $T_i = 1\text{ s}$ 和 $T_i = 4.7\text{ s}$ 的积分环节, 并测试它们的阶跃响应;
- 3) 构建 $K_p = 1, T_i = 1\text{ s}$ 和 $K_p = 2, T_i = 4.7\text{ s}$ 的惯性环节, 并测试它们的阶跃响应;
- 4) 构建 $K_p = 1, T_i = 4.7\text{ s}$ 比例积分环节, 并测试它的阶跃响应;
- 5) 构建 $K_p = 2, T_d = 3.0\text{ s}$ 比例微分环节, 并测试它的阶跃响应;
- 6) 构建 $K_p = 1, T_i = 18.8\text{ s}, T_d = 3.525\text{ s}$ 的比例积分微分环节, 并测试它的阶跃响应。

3. 典型环节的模拟实验线路

表 2.1 典型环节的模拟实验线路

环 节	传 递 函 数	模拟实验线路
比例 环节	$G(s) = K_p = \frac{R_f}{R_i}$	<div></div> <p>比例环节模拟电路图</p>

续表

环 节	传 递 函 数	模拟实验线路
比例微分 环节	$G(s) = K_p \frac{T_d s + 1}{T_f s + 1}$ $K_p = \frac{R_f + R_1}{R_i} \quad T_f = R_2 C$ $T_d = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_f + R_2 R_f}{R_1 R_f}$	 <p>比例微分环节模拟电路图</p>
比例积分 微分环节	$G(s) = K_p \frac{(T_i s + 1)(T_d s + 1)}{T_i s}$ $K_p = \frac{R_f + R_1}{R_i} + \frac{R_2 + R_1}{R_i} \cdot \frac{C}{C_f}$ $T_f = R_2 C$ $T_i = (R_1 + R_f) \cdot C_f + (R_1 + R_2) \cdot C$ $T_d = \frac{(R_1 R_2 + R_1 R_f + R_2 R_f) \cdot C C_f}{(R_1 + R_f) \cdot C_f + (R_1 + R_2) \cdot C}$	 <p>比例积分微分环节模拟电路图</p>

4. 实验仪器设备

- 1) TDN-AC/ACS 自动控制原理模拟实验机 1 台；
- 2) 计算机(配虚拟示波器及 Matlab 软件) 1 台；
- 3) 万用表 1 块；
- 4) 网络打印机 1 台；
- 5) 电阻、电容及连接导线 若干。

5. 实验预习要求

- 1) 了解实验仪器及其相应软件的使用方法；
- 2) 推导典型运算环节的传递函数；
- 3) 复习典型环节的阶跃响应过程以及各元件参数对该过程的影响；
- 4) 预先绘出上述各环节阶跃响应的基本形态。

6. 实验步骤

- 1) 根据各环节的模拟电路在自动控制原理模拟仿真机上搭建实验线路；
- 2) 按照实验要求做出结果, 观察、记录实验结果。

7. 思考题

实验中的环节都是所谓线性环节, 在实际中这些环节的线性范围受哪些因素影响?

8. 实验报告要求

- 1) 比较、分析参数改变前后的响应过程, 给出结论；

2) 给出实验的记录结果并与预习的结果相比较。

实验 2 二阶系统的过渡过程

在控制理论中, 在闭环主导极点概念的基础上, 二阶系统具有相当的代表性, 因为它的动态响应的性能指标与系统参数之间的关系非常简明, 分析设计比较容易, 在一定条件下, 常可以近似一大类高阶系统。

1. 实验目的
- 1) 学习自动控制系统动态性能指标的测试技术及系统阶跃响应曲线的测试方法;
- 2) 研究二阶系统的两个重要参数, 和 T 对系统动态品质的影响;
- 3) 观察在不同参数下, 二阶系统的阶跃响应曲线, 并测出超调量 % 和调整时间 t_s ;
- 4) 定量分析 和 T 与超调量 %, 调整时间 t_s 的关系。
2. 实验内容
- 1) 利用 MATLAB 对模拟仿真模型进行数字仿真, 观察图形, 在结果正确后, 则进行下一步;
- 2) 保持 T 不变, 改变阻尼比 , 如分别为 0. 2, 0. 7, 1, 观察过渡过程曲线的变化情况;
- 3) 保持 不变, 改变系统的时间常数 T, 如分别为 0. 47, 1, 1. 47, 观察过渡过程曲线的变化情况。

3. 实验原理

典型二阶系统的方框图如图 2. 21 所示。

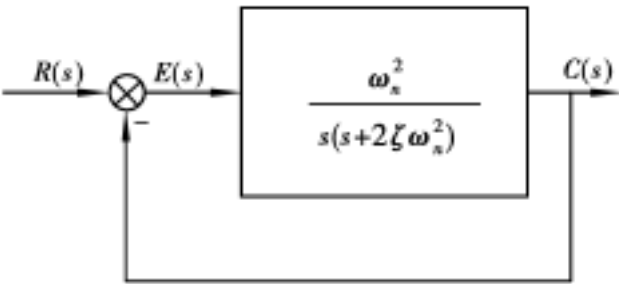


图 2. 21 典型二阶系统的方框图

该系统的闭环传递函数为

$$\begin{aligned} \Phi(s) &= \frac{1}{T^2 s^2 + 2T s + 1} \\ &= \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \end{aligned}$$

其中, T 为时间常数, $\omega_n = \frac{1}{T}$, ζ 为阻尼比。当 $0 <$

$\zeta < 1$ 时, 该系统称为欠阻尼系统, 其阶跃响应输出是衰减振荡的过程, 系统的动态性能指标主要有:

最大超调量或最大百分比超调量 M_p 或 % : 最大超调量是指在动态过程中被控量超过其稳态值的最大偏差。最大百分比超调量也简称超调量, 定义如下:

$$\% = \frac{C_{\max} - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

(2. 1)

式中 C_{\max} 输出量的最大值;
 $C(\infty)$ 输出量的稳态值。

超调量与系统中参数的关系为

$$\% = e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\%$$

(2. 2)

峰值时间 t_p : 响应曲线到达第一个峰值所需要的时间。

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

(2. 3)

小, 并用万用表测出给定信号的幅值。

- 4) 从虚拟示波器上观察并记录过渡过程曲线; 按实验内容逐项进行, 数据记录于表内。
- 5) 调试过程中, 为便于改变 ζ 或 T , 可参考如下的选配方法选择元器件参数。
时间常数不变(如 $T=1$), 改变系统的阻尼比 ζ , 可通过调整电位器 R_f (470 k Ω) 进行, 其余参数为: $R=1$ M Ω , $R_i=100$ k Ω , $C=1$ μ F。
阻尼比不变(如 $\zeta=0.7$), 改变系统的时间常数 T (如 T 分别为 0.47, 1, 1.47), 主要通过选配 R 和 C , 选配的情况为 $R=(0.47, 1, 0.47)$ M Ω , 对应 $C=(1, 1, 4.7)$ μ F, 其余参数: $R_i=100$ k Ω , $R_f=470$ k Ω 。

实验的相关参数及测试的数据填入下表中。

表 2.2 实验的相关参数及测试数据表

	T	R	C	R_f	$c(t_p)$	$c(\infty)$	超调量		调节时间	
							理论值	实测值	理论值	实测值

8. 实验思考题

- 1) 在模拟系统中若阶跃输入幅值过大, 会产生什么结果?
- 2) 在模拟仿真中为什么要多增一个 1/s 的比例环节?
- 3) 在模拟系统中如何实现负反馈, 如何实现单位负反馈?
- 4) 开环增益 K 和惯性环节的时间常数对系统的性能有何影响?

9. 实验报告要求

- 1) 写明实验线路及原始数据。要有准确的实验记录(包括测量参数) 与理论值做比较。
- 2) 利用 MATLAB 对所实验的系统进行数字仿真的结果及波形。
- 3) 对实验中出现的问题及现象要有准确的描述和分析。
- 4) 推导模拟电路的闭环传递函数, 并确定 ζ , T 和 R, C 的关系。
- 5) 回答实验思考题, 写出本实验的体会及建议。

实验 3 二阶系统频率特性的测试

频率特性是系统(或元件) 对不同频率正弦输入信号的响应特性。对线性系统来说, 输入为正弦量, 则其稳态输出也将是同频率的正弦量; 但幅值和相位一般都不同于输入量。在一定频率范围内逐次改变输入的频率, 则输出的幅值与相位都会发生变化。在各实验频率点上, 测试输出与输入之间的幅值比和相位差, 这是实验测定频率特性的基本方法。

由于控制系统对正弦输入具有较强的衰减作用, 并且频率特性是在系统处于稳定的状态下进行测试, 外来的随机干扰相对较小。而时域法则是在系统处于过渡过程状态下进行测试, 外来随机干扰对实验结果的影响相对要大得多。虽然测试控制系统的频率特性要比测试时域

响应复杂,但频率特性能较准确地反映被测系统的动态特性。因测试频率特性是建立系统动态数学模型的一种重要方法。

测量控制系统或环节的频率特性的方法有以下几种:直接记录法、李沙育图形法、补偿法、正弦信号分析相关法等等。本实验主要采用直接记录法和李沙育图形法。

1. 实验目的

- 1) 掌握频率特性的测试方法及原理;
- 2) 掌握二阶系统的频域指标与时域指标的对应关系;
- 3) 掌握频率特性的表示方法(对数频率特性、幅相频率特性等)。

2. 实验内容

在模拟仿真机上先搭建一个欠阻尼的二阶系统,测试该系统的频率特性。

1) 确定输入信号的频率范围和测试点

在对数频率特性上常采用折线表示幅频特性,横坐标上对数刻度的一个单位正好对应 10 倍频程,这是在 $0 \sim \omega_{\max}$ 范围内安排测试点的极好依据。确定最高频率 ω_{\max} 的简单方法是,在该频率点上,输出量的振幅趋近于零(或减少到当 $\omega = 0$ 时幅值的 $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{100}$)。

2) 将输入信号的频率逐渐提高(或降低),依次测出每一频率下峰-峰值和相角,由于欠阻尼的二阶系统存在谐振频率,要注意寻找谐振频率和转折频率。为此可在其附近可多安排几个测试点。

3) 当频率特性测试完成,将该环节输入端接入阶跃信号,记录一条阶跃响应曲线,以便将建立的频率模型与实际效果进行比较。

3. 实验原理

测量控制系统频率特性的方法就本实验所做的有两种:

对于稳定线性系统,测量其频率特性就是对被测系统输入某一频率的正弦信号,然后测量其稳态输出与输入的幅值比 $\frac{Y_m(\omega)}{X_m(\omega)}$ 和相位差 $\phi(\omega)$,每改变一次频率就得到一组幅值比和相位差,若在某频率范围内进行逐步扫频,测量就可以得到此频率范围内的幅频特性 $|G(j\omega)|$ 和相频特性 $\phi(\omega) = \phi(\omega)$ 的曲线。

输入输出曲线的直接记录法:

信号发生器每给出一个频率 $\omega = \frac{1}{T}$,待输出稳定后,即可在虚拟示波器上获得一组输入输出曲线。测量幅频特性时,一般为了读取方便,输入输出均取峰值。测量相频特性时,则测出输入与输出峰值之间的距离 d ,输入曲线前后两个峰值之间的距离 d_0 ,则某一频率时的相位差值为 $\phi(\omega) = -\frac{d_0}{d} \times 360^\circ$;若输出超前于输入,则 $\phi > 0$,符号应取正。在示波器上测试相位差的方法示意如图 2.24。

在测定的频率范围内逐渐改变输入频率,重复上述测量就可以得到一系列对应不同频率的幅值比和相位差的值。从而得到被测系统的幅频特性 $A(\omega)$ 和相频特性 $\phi(\omega)$ 。

对于二阶振荡环节,其传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{T^2 s^2 + 2\zeta TS + 1}$$

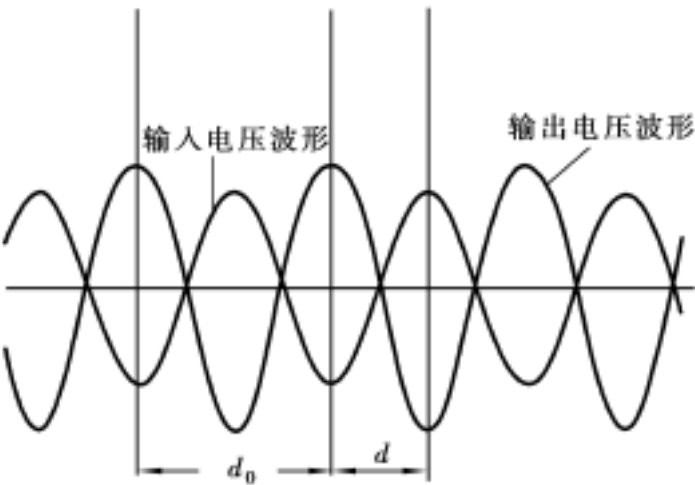


图 2.24 在示波器上测试相位差的示意图

当 $0 < \zeta < 1$ 时, 以 j 代替 s 可得振荡环节的频率特性:

幅频特性:
$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - T^2 \omega^2)^2 + (2 \zeta T \omega)^2}} \tag{2.6}$$

相频特性:
$$\varphi(\omega) = - \arctan \frac{2 \zeta T \omega}{1 - T^2 \omega^2} \tag{2.7}$$

二阶系统频率特性曲线如图 2.25 所示:

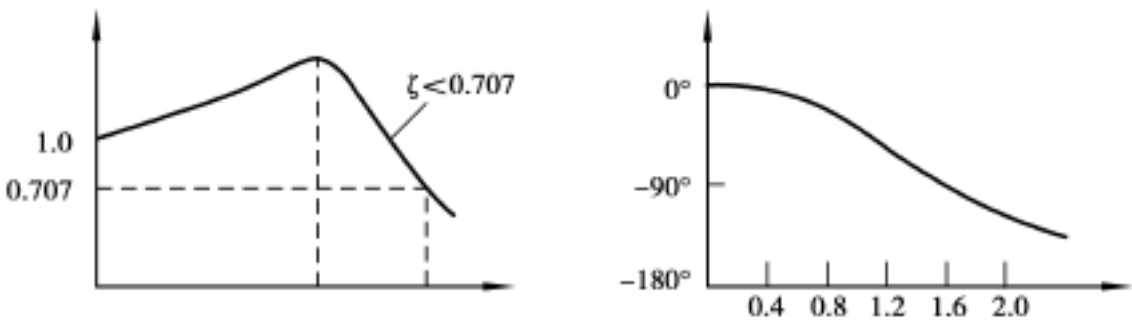


图 2.25 二阶系统频率特性曲线图

二阶振荡环节的谐振频率 ω_r 和谐振峰值 M_r 。

谐振频率 ω_r : $A(\omega)$ 在某频率 ω 处有峰值, 则该频率称为谐振频率 ω_r 。取 $A(\omega)$ 对 ω 的导数并令其为零, 可得到:

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2 \zeta^2} \tag{2.8}$$

谐振峰值 M_r : 当 ζ 较小时, 在对数幅频特性上可明显地观察到一个高峰, 称谐振峰值 M_r 。将式(2.8)代入式(2.6), 即可得出:

$$M_r = A(\omega_r)_{\max} = \frac{1}{2 \sqrt{1 - \zeta^2}} \tag{2.9}$$

当 $0 < \zeta < 0.707$ 时, 闭环频率特性的谐振峰值 M_r 才可以反映二阶系统的阻尼系数 ζ , 从而反映系统的超调量; 而 ω_r 可以反映给定 ω_n 下的自然振荡频率 ω_n , 从而反映响应速度。

4. 模拟仿真电路及实验步骤

模拟仿真电路如图 2.26。

该环节为一振荡环节, 其传递函数为

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \zeta \omega_n s + \omega_n^2}$$

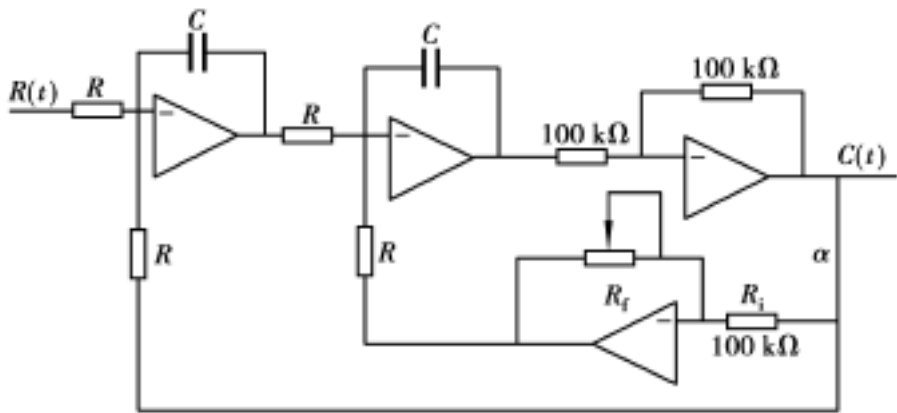


图 2.26 模拟仿真电路

实验步骤:

- 1) 选定 R, C, R_f 的值, 使实验系统的稳定裕度较小(如 $\gamma = 0.2$); 便于实验中观察到谐振峰值。可选 $\zeta_n = 1$ 。
- 2) 模拟仿真机上搭建好实验线路;
- 3) 加入阶跃输入(需调整好幅度的大小), 观察系统振荡的大小, 以便进一步确定 R, C, R_f 的值;
- 4) 电路参数选定后进行频率特性测试, 按照安排的频率点依次改变输入信号的频率(或 $T, T = \frac{1}{\omega}$), 待输出稳定后测量输出的幅值的相位差, 同时记录下输入的频率和幅值。
- 5) 频率特性测试完毕后, 该系统接入阶跃输入信号, 记录下响应曲线并在其上标注出超调量、峰值时间和调整时间的指标。

5. 实验仪器设备

- 1) TDN-AC/ACS 自动控制原理模拟实验机 1 台;
- 2) 计算机(配虚拟示波器及 Matlab 软件) 1 台;
- 3) 万用表 1 块;
- 4) 网络打印机 1 台;
- 5) 电阻、电容及连接导线 若干。

6. 实验预习要求

- 1) 复习典型环节(特别是二阶振荡环节)的对数幅频特性和相频特性;
- 2) 推导出实验电路的传递函数;
- 3) 选择好实验电路的参数, 计算出转折频率 ω_n 、阻尼比 ζ 、峰值频率 ω_r 、谐振峰值 M_r 、时间常数 T 的值, 用半对数坐标画出理论频率特性曲线(最好利用 Matlab 计算);
- 4) 了解直接记录法测量频率特性的原理和方法。

7. 实验报告要求

- 1) 被测系统的模拟电路图及传递函数、计算出的模拟电路的 ω_n, T, ζ, M_r 的值;
- 2) 将实验记录数据整理列表; 根据实验数据在用半对数坐标画出模拟电路的 Bode 图并在同一张图上附上理论计算的结果, 以便理论分析与实际测量相比较。分析造成两者之间产生差异的原因;
- 3) 根据实验结果求出 M_r 的值, 利用前述的 M_r 与 ζ 的关系计算出对应的 ζ %;
- 4) 给出模拟电路的阶跃响应曲线, 并从上求出相关的性能指标 $\sigma\%$ 。将它与上一步计算

- 出的 % 做比较, 讨论二阶系统的频域指标和时域指标的关系;
- 5) 要求将预习报告附后;
 - 6) 实验数据记录参考格式如下:

表 2.3 实验数据记录参考格式表

参 数 \	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0
T											
A()											
L()											
()											

注: 频率范围及实验频率由实验的具体情况确定, 但在谐振峰值周围应多安排几个测试点。

8. 实验思考题
- 1) 能否根据实验所得的 Bode 图确定系统的传递函数? 如何确定?
 - 2) 用实验确定的传递函数计算出相应的阶跃响应, 它与实验结果的差异可从哪些方面比较?

实验 4 线性系统的稳定性分析

对于控制系统来讲, 稳定性问题是首先要解决的问题, 只有稳定的系统才能正常工作。如果系统在平衡状态受到有界的外作用, 它将离开原来的平衡状态产生偏差, 不论偏差多大, 当外作用取消后都能以足够的精度恢复到原来的平衡状态, 则称这种系统是稳定的, 否则就是不稳定的。稳定性表征的是系统去掉外作用后自身的一种恢复能力, 对于线性系统, 它仅与系统的结构和参数有关, 与初始条件及外作用无关, 它是系统自身的固有特性。

1. 实验目的
- 1) 研究线性系统的参数(开环增益 K 和时间常数 T) 对稳定性的影响;
 - 2) 掌握参数根轨迹的分析方法;
 - 3) 比较理论分析与实际结果的接近程度。
2. 实验内容
- 1) 测定系统的临界开环增益 K_c ;
 - 2) 系统的开环比例系数 K 对稳定性的影响;
 - 3) 系统中各时间常数对稳定性的影响。

3. 实验原理

临界稳定是系统界于稳定与不稳定之间的一中临界状态, 在自动控制系统的整定过程中具有重要的指导作用。实验测定系统临界开环增益 K_c 的方法是闭环的情况下使系统产生临界振荡, 在保持系统参数不变的条件下, 切除反馈回路, 此时开环系统的稳态输出与输入的幅值比即为系统的临界开环增益 K_c 。根轨迹法是分析系统参数对其性能影响的一种有效的方法, 理论分析可全局地掌握参数变化对性能的影响, 而实验测定需重复地安排若干的实验点才能反映出大致的影响趋势。这是在对象的数学模型不清楚的条件下, 不可避免的工作, 同时也

是对理论分析的一种补充和修正。理论分析与实验论证互为依存是科学研究的基本方法。

4. 实验仪器设备

- 1) TDN-AC/ACS 自动控制原理模拟实验机 1 台;
- 2) 计算机(配虚拟示波器及 Matlab 软件) 1 台;
- 3) 万用表 1 块;
- 4) 网络打印机 1 台;
- 5) 电阻、电容及连接导线 若干。

5. 实验预习要求

- 1) 复习教材中有关自动控制系统的稳定性的概念,掌握稳定性判据的充分必要条件;
- 2) 掌握根轨迹分析的相关内容;
- 3) 预习实验内容,明确实验过程及相关步骤,为解答思考题拟订观察和分析的方案。

6. 模拟仿真电路及实验步骤

实验系统的方框图:

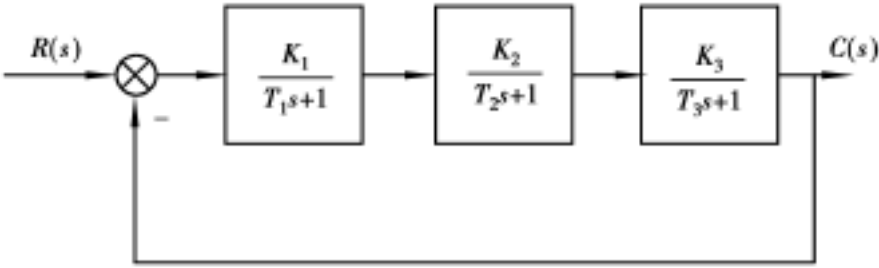


图 2.27 三阶系统方框图

模拟仿真电路图:

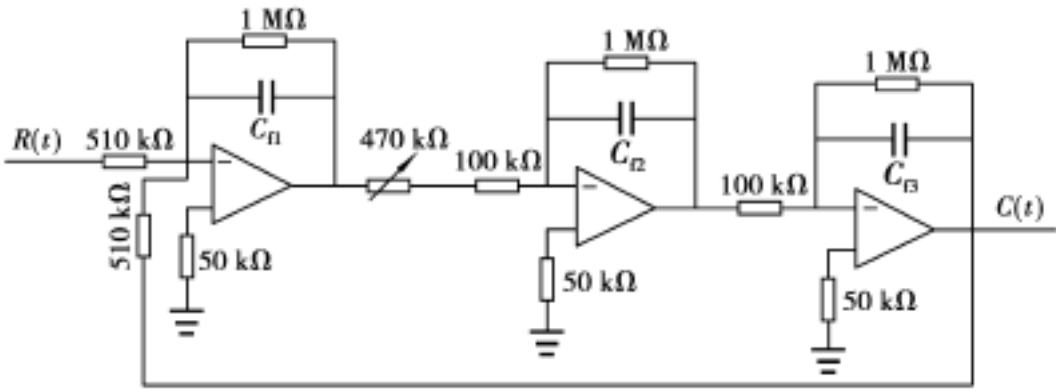


图 2.28 三阶系统模拟电路图

三阶系统中 $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$, 其中 $K_1 = 2, K_2 = \frac{1M}{100K + W_R}, K_3 = \frac{1M}{R_{i3}}$,

$T_1 = 1M \cdot C_n, T_2 = 1M \cdot C_{n2}, T_3 = 1M \cdot C_{n3}$

实验步骤:

- (1) 测定临界开环增益 K_c ;
- 给定三阶系统如上图所示, 其中: $c_{n1} = c_{n2} = c_{n3} = 0.47 \mu F, R_{i3} = 1 M$
- 1) 先将电位器 W_r 置于最大(470 k) ;
- 2) 加入 $r = 0.5 V$ 的阶跃信号;
- 3) 调整 W_r 使系统输出 c 呈等幅振荡, 记录此输出 c ;

4) 保持 W_r 不变, 断开反馈线, 维持 $r = 0.5 \text{ V}$, 测取系统输出电压 U_c 。则: $K_c = \frac{U_c}{X}$ 。

(2) 系统的开环增益 K 对稳定性的影响;

1) 适当调整 W_r , 观察 K 增大、 K 减小时的系统响应曲线;

2) 记录当 $K = \frac{1}{2}K_{j1}$ 时的系统响应曲线;

3) 记录当 $K = \frac{5}{4}K_{j1}$ 时的系统响应曲线;

(3) 系统中各时间常数的比例系数 对稳定性的影响。

设三阶系统为: $\frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)(T_3s+1)}$

其中 $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3; T = 0.47 \text{ s}$

$$T_1 = \frac{T}{2}; T_2 = T; T_3 = T$$

1) 求取该系统在 $\zeta = 2$ 时的临界开环比例系数 K_{j2} , 记录此时的系统响应曲线;

2) 记录该系统在 $\zeta = 5; K = K_{j2}$ 时系统响应曲线;

3) 记录该系统在 $\zeta = 1; K = K_{j2}$ 时系统响应曲线。

7. 实验报告

1) 绘出系统的模拟电路, 根据稳态误差的计算公式, 分别求出各模拟电路的稳态误差;

2) 列出各模拟电路稳态误差的测试结果, 并与计算结果进行比较、分析;

3) 根据实验结果说明线性系统的开环比例系数 K 及时间常数 T 对稳定性的影响。

8. 实验思考题

1) 计算实验给定的三阶系统临界开环增益 K_c 及其呈现等幅振荡的自振频率 ω_j , 并将它们与实验结果相比较。

2) 三阶系统的各时间常数怎样组合时, 系统的稳定性最好? 怎样组合时, 系统的稳定性最差?

3) 根据实验结果结合理论分析, 总结开环增益 K 及时间常数 T 影响系统稳定性的规律。

实验 5 线性系统的串联校正

自动控制系统的设计就是要使控制系统在稳定性、稳态误差和动态响应 3 个方面满足一定的技术要求。这往往需要在原系统中引入校正装置来改善系统的性能。这种对系统性能改善的方式称为校正。由于对象的实际情况不相同, 采用校正的具体方法也不一样。但根据校正装置在系统中所处位置的不同, 可概括为串联校正和并联(反馈)校正。选用校正方式, 确定校正装置的结构和参数是设计自动控制系统的一项基本任务。

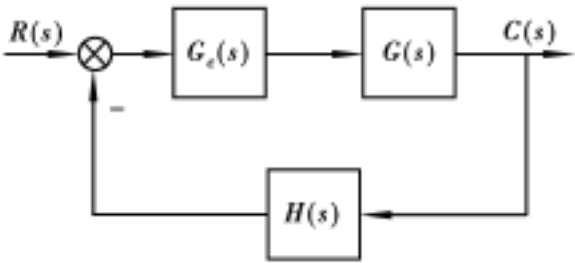


图 2.29 串联校正系统方框图

串联校正

串联校正就是将校正装置串联在反馈控制系统的前向通道中, 方框图如图 2.29 所示。

根据校正装置对系统开环频率特性的影响, 可分为超前校正、滞后校正和滞后-超前校正等。在工程上, 常分别采用 PD, PI 和 PID 不同的控制规律来实现

上述的校正,用以改善系统的性能。因此校正装置也常称为控制器。

反馈(并联) 校正

反馈校正就是将校正装置接在局部反馈通道中。在自动控制系统中,为了改善控制系统的性能,除了采用串联校正外,反馈校正也是常用的校正形式之一。它在系统中的形式如图2.30所示。

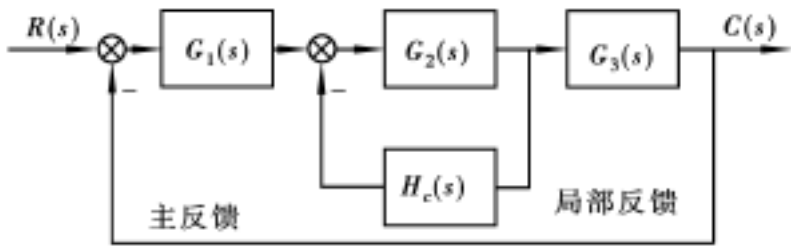


图 2.30 反馈(并联) 校正系统方框图

$H_c(s)$ 为反馈(并联) 校正的传递函数。

在这种校正方式中,校正装置 $H_c(s)$ 反馈包围了系统的部分环节,形成局部反馈,从而改变了系统的结构、参数和性能,达到了校正的目的。

1. 实验目的

1) 掌握比例(P)、比例微分(PD)、比例积分(PI)以及PID不同控制规律对控制系统性能的影响;充分认识P、I、D三参数对改善系统性能的不同作用。

2) 掌握超前校正装置的设计和实现方法;

3) 学习利用MATLAB下SISO Design Tool进行自动控制系统设计;

4) 学习系统调试中校正参数的整定方法。

2. 实验内容

1) 单位反馈系统,其开环传递函数为

$$G_0 = \frac{K}{s(s+1)(0.125s+1)}$$

要求稳态速度误差系数 $K_v = 20(1/s)$,相角裕量 $= 50^\circ$;调整时间 $t_s = 4s$ 。利用MATLAB下SISO Design Tool的设计平台,分别进行P、PD、PI及PID的串联校正,并比较各种控制规律能达到的实际效果,分析其作用。

2) 单位反馈系统,其开环传递函数为

$$G_0 = \frac{40}{s^2 + 2s + 40}$$

要求稳态速度误差系数 $K_v = 20(1/s)$,超调量 $\% = 25\%$,调整时间 $t_s = 1s$ 。

在MATLAB下SISO Design Tool的设计平台上进行串联超前校正,设计的结果在模拟仿真机上实验验证是实践设计工作的一个基本过程。

3. 实验原理

用频率法进行串联校正是引入校正装置改善原系统的频率特性,使校正后的系统不仅具有合适的稳定裕量,且幅频特性在高、中、低各频段具有较理想的形态。由于设计过程在频域内进行,而控制系统的实际性能更易于在时域内直观地考察,即设计的效果一般在时域内进行实验验证。因此设计和验证总是在不同的环境下进行,是一个明显的“试凑”过程。

MATLAB提供的SISO Design Tool将频率法、根轨迹法以及系统的仿真实验集成在一个环

境下。设计者只需载入对象的模型并选择校正的方式,就可用鼠标改变开环系统的增益或校正装置零极点的位置,改变的效果在系统的 Bode 图或根轨迹图上同步反映出来,校正系统的闭环响应曲线也可及时地观察。显著地改善了设计工作的条件,使设计的效率得到提高。

利用 SISO Design Tool 设计者可以快速完成以下工作:

- 根轨迹法或 Bode 图设计超前/滞后网络和滤波器。
- 添加/删减校正装置的零极点。
- 观察闭环系统响应(使用 LTI Viewer)。
- 调整系统幅值或相位裕度。
- 系统在连续或离散状态下的互换。

用 SISO Design Tool 进行设计的简单过程如下。

首先在 MATLAB 中打开【Control System Toolbox】下的【SISO Design Tool】,出现设计的主窗口,如图 2.31 所示。在主窗口中,完成以下工作后,就可进行校正装置的“试凑”设计。

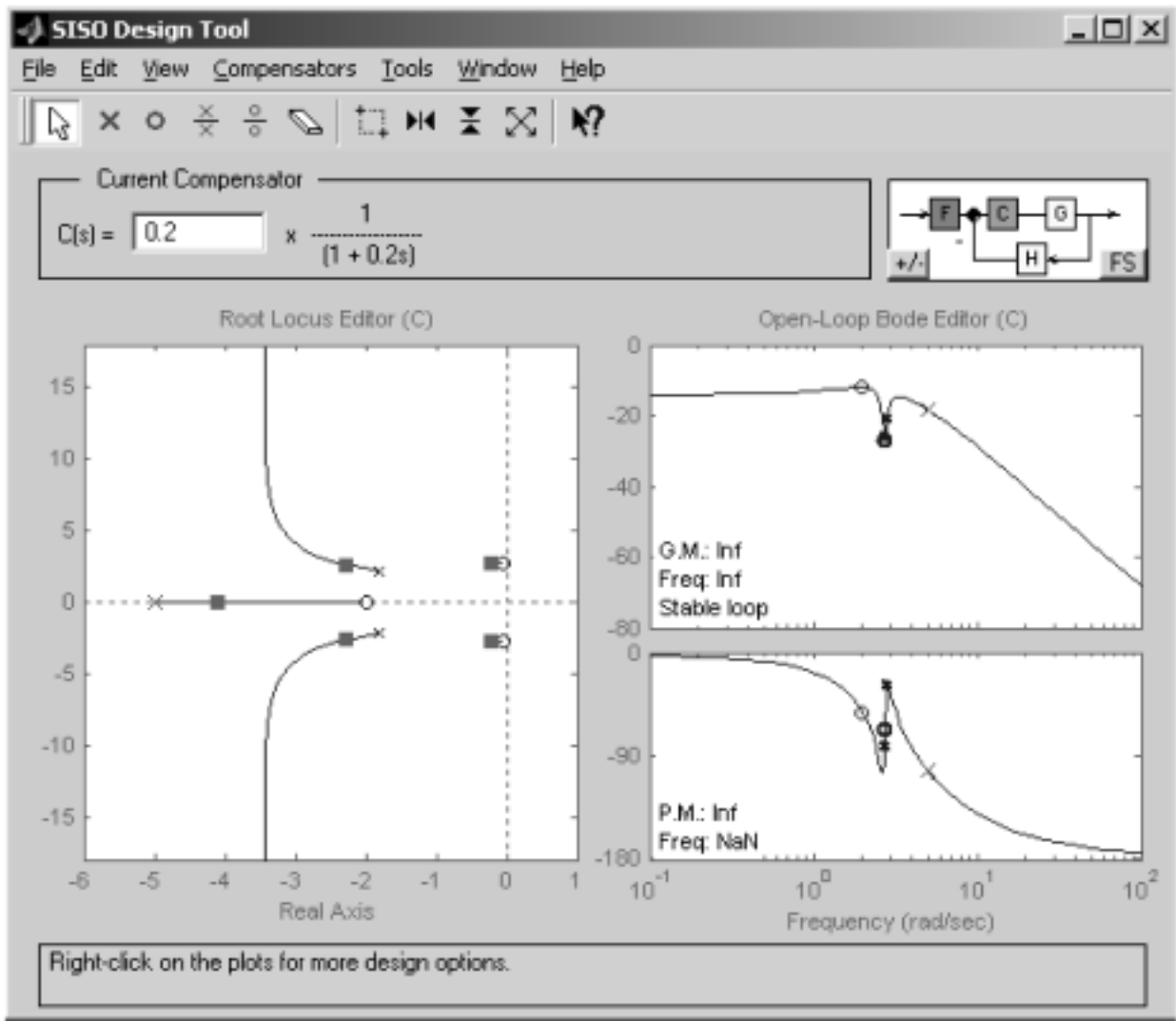


图 2.31 SISO Design Tool 的主窗口

用【File】菜单中的【Import】载入对象的模型;

在【Compensators】菜单中【Edit】下选【C】载入校正装置。在 Current Compensator 栏中将显示当前校正装置结构和参数;

在主窗口的系统结构显示栏中,【FS】按钮用于选择串联或反馈校正;

设计的过程主要是通过鼠标移动校正装置的增益和零极点的位置,同时观察系统根轨迹或 Bode 图的变化,直到满意为止。此时可【Tools】菜单的【Loop Responses】选择校正后系统的闭环响应,验证设计的效果。如与要求的性能有差距,立即就可在主窗口改进设计。最后设计

的结果可作为进一步模拟仿真的依据。

为能更主动地在 SISO Design Tool 环境下完成设计,有必要了解 P, I, D 三参数对改善系统性能的不同作用。

比例增(P 作用)大,系统响应快,对提高稳态精度有益,但若过大易引起过度的振荡,降低相对稳定性。

微分(D 作用)对改善动态性能和抑制超调有利,但若过强,即校正装置的零点靠近原点或者使开环的截止频率增大,不仅不能改善动态性能,反而易引入噪声干扰。

积分(I 作用)主要是消除或减弱稳态误差,但会延长调整时间,参数调整不当容易振荡。

正确选择这三作用的方法简单地可归纳成,单靠提高 P 作用不能满足动态指标时,可考虑加入 D 作用。加入 D 作用后应适当减小 P 作用,两者相互配合,在 SISO Design Tool 上极容易观察到这个调整过程所产生的效果。一般来讲,应先满足动态性能,在此基础上,如达不到稳态指标,才考虑加入 I 作用。

4. 实验步骤及线路

1) 实验内容的第一部分按实验原理介绍的方法在课外时间完成,在 SISO Design Tool 设计平台上进行串联校正,比较 P, PD, PI 及 PID 不同控制规律的作用效果。实验中应注意观察校正装置的增益和零极点位置改变后所带来的不同影响,确定出不同控制作用的最佳效果。这本质上是搜索最佳参数组合的问题,因此应预定一个初步的搜索目标,如超调量最小或调整时间最短等,才会避免盲目搜索,在较短的时间内得到搜索结果。在 SISO Design Tool 上设计的结果可在模拟仿真机上实验验证。该控制系统的方框图如图 2.32,模拟仿真图 2.33 中的虚线框为校正装置的位置,PD, PI, PID 等控制规律的模拟电路参见表 2.1。

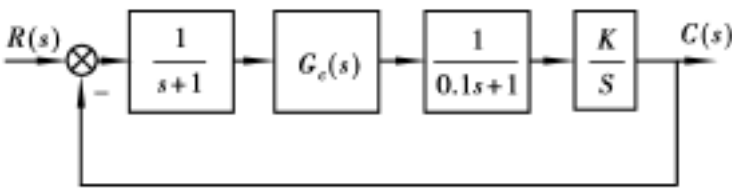


图 2.32 串联校正示意方框图

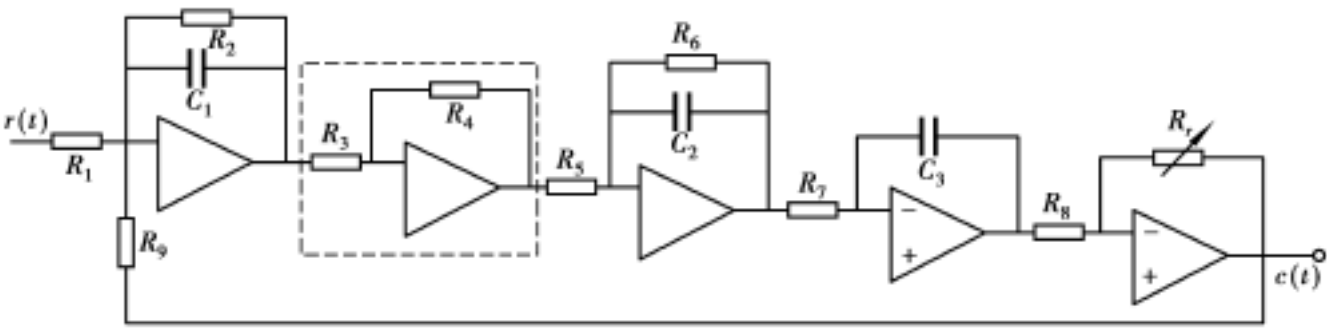


图 2.33 串联校正系统示意模拟图

图 2.33 中各环节的参数为

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_9 = 1\text{ M} \Omega, R_7 = 100\text{ k} \Omega,$
 $R_8 = 1\text{ M} \Omega, C_1 = 1\text{ }\mu\text{F}, C_2 = 0.1\text{ }\mu\text{F}, C_3 = 1\text{ }\mu\text{F}$
则: $T_1 = R_1 C_1 = 1, T_2 = R_5 C_2 = 0.1, T_3 = 1, K = R_8 / R_7 = 10$

2) 实验内容的第 2 部分在第 1 部分预习的基础上,先在 SISO Design Tool 设计平台上完成校正装置的设计,并在该平台上取得的校正前后的数字仿真结果。

在模拟仿真机上, 未经校正系统的模拟电路图如图 2.34 所示。加入阶跃信号, 记录下输出的响应过程, 并测试出超调量和调整时间。

校正后系统的模拟电路图如图 2.35 所示, 根据设计的结果配置校正装置的参数, 并核实其余环节的参数是否与设计参数相吻合。连接好实验线路后, 加入阶跃信号, 记录下输出的响应过程, 并测试出超调量和调整时间。

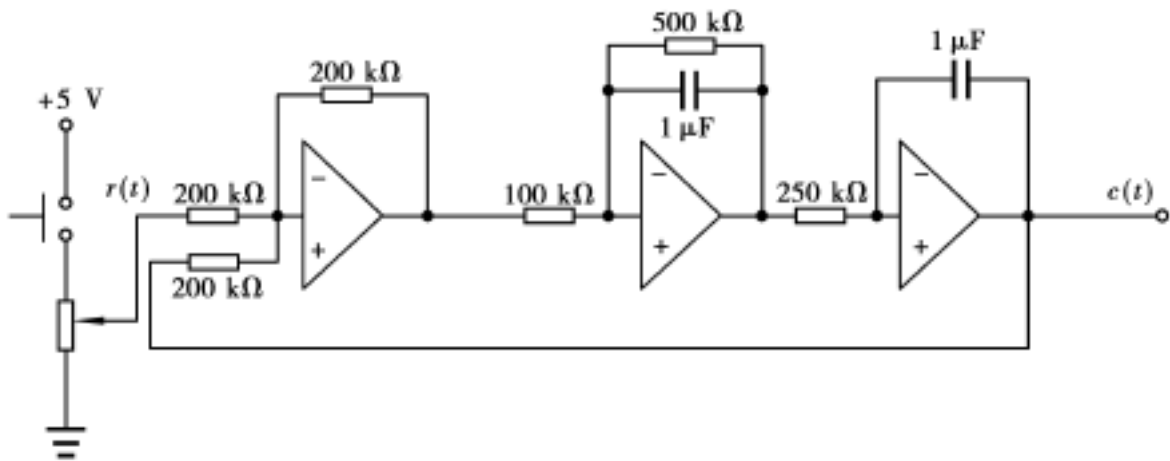


图 2.34 未校正系统的模拟电路图

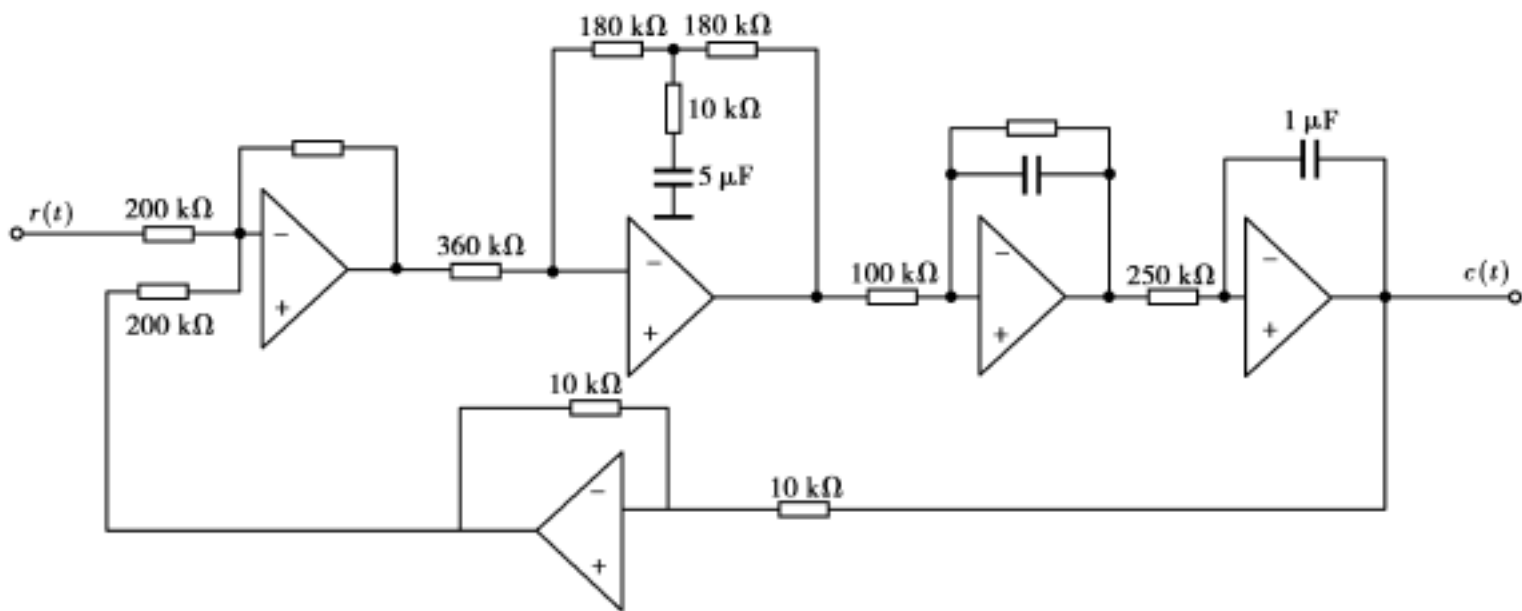


图 2.35 加入校正装置后的模拟电路图

5. 实验仪器设备

- 1) TDN-AC/ACS 自动控制原理模拟实验机 1 台;
- 2) 计算机(配虚拟示波器及 Matlab 软件) 1 台;
- 3) 万用表 1 块;
- 4) 网络打印机 1 台;
- 5) 电阻、电容及连接导线 若干。

6. 预习要求

- 1) 复习时域指标与频域指标之间的关系、各种校正环节的作用;
- 2) 写出校正前系统的传递函数及判断该系统是否稳定;
- 3) 画出校正前系统的波德图及算出系统校正前的动态指标 M_p, t_s 的理论值;
- 4) 求出原系统校正前后的相角裕量和幅值裕量。

7. 实验报告要求

- 1) 首先根据学习机上已有的参数将计算所需元件的参数, 按图接系统的模拟电路及校正网络; 按照实验步骤, 记录实验数据, 从曲线上求出 % 和 t_s , 并加以整理填入自拟表格中;
- 2) 画出校正前后系统的波德图, 并分析校正前后系统的稳定性和动态指标, 并与实验结果进行比较;
- 3) 阐明各种校正环节的作用;
- 4) 当 % 相同时, 试分析加有 PID 校正与不加校正的区别。

8. 实验思考题

- 1) 怎样检验稳态速度误差系数是否满足给定值? 如何保证系统为负反馈系统?
- 2) 有源校正和无源校正装置各有什么特点?
- 3) 如图 2.36 所示的模拟电路能否做为超前校正装置? 试计算其传递函数?

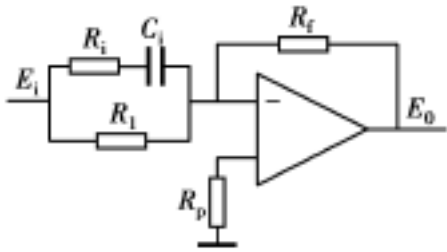


图 2.36 思考题 3 图

- 4) 若 $G_c(s) = \frac{1.5s+1}{0.5s+1}$, 能否计算出校正后系统的闭环主导极点及与之对应的 ζ_n , ω_n ?

实验 6 典型非线性环节的模拟

实际的自动控制系统总是程度不同地存在着非线性, 所谓的线性系统只是在一定的条件下近似处理的结果。描述本质非线性典型环节的一般方法是测试出其输入-输出特性曲线。测试这条曲线的方法属于静态实验, 基本过程是, 在环节的输入端加入直流信号, 并在一定的范围内逐点改变输入幅值的大小, 待输出稳定后, 测量出环节对应的输出幅值, 将测试的数据描绘在以输入幅值为横坐标, 输出幅值为纵坐标的坐标图上, 即得到所谓的输入-输出特性曲线。

1. 实验目的

学习系统的静态实验技术, 掌握测试非线性环节特性的基本方法。

- 1) 认识各种典型非线性环节的基本特性, 掌握模拟分析的基本原理和方法;
- 2) 认识影响典型非线性环节特性的特征参数, 并掌握特征参数变化对特性的影响。

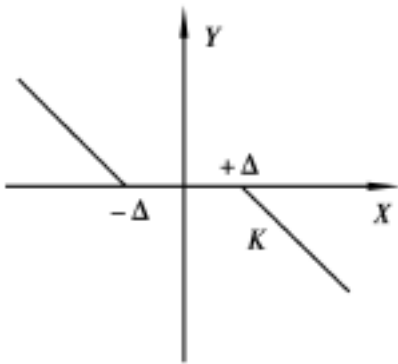


图 2.37 死区输入-输出特性曲线

2. 实验内容

- 1) 模拟死区非线性特性;
- 2) 模拟饱和非线性特性;
- 3) 模拟继电非线性特性;
- 4) 模拟间隙非线性特性。

3. 实验原理

- 1) 死区非线性: 死区非线性的输入-输出特性曲线如图 2.37 所示, 其中特征参数 Δ 由图 2.38 中的 R_2 调整, 即

$$\Delta = \frac{R_2}{30} \times 12 = 0.4R_2$$

图 2.38 中 $R_2 = R_1$, R_2 的单位为 k , 实际还应考虑二极管的压降对 Δ 的影响。死区非线性

性另一特征参数斜率 k 与图 2.38 中的 R_f 和 R_0 有关。即

$$k = \frac{R_f}{R_0}$$

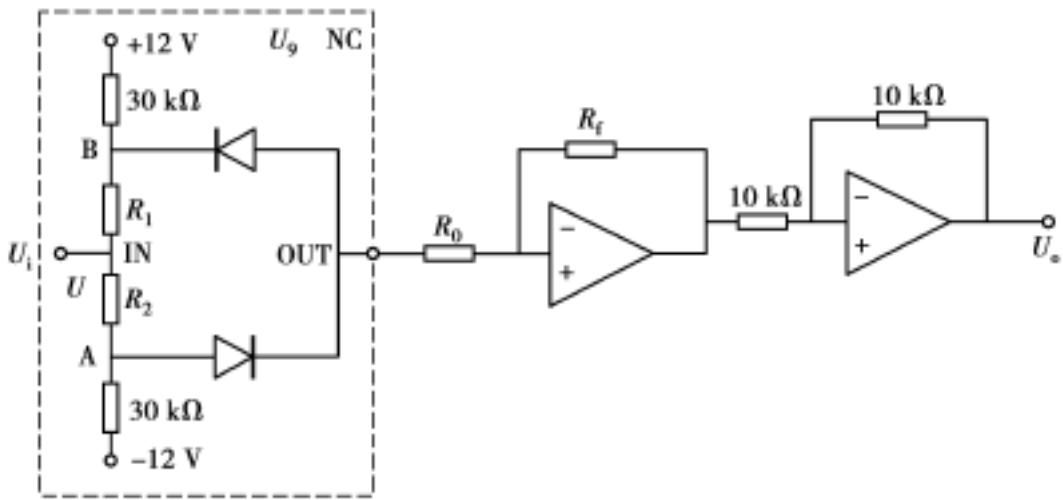


图 2.38 死区非线性模拟电路图

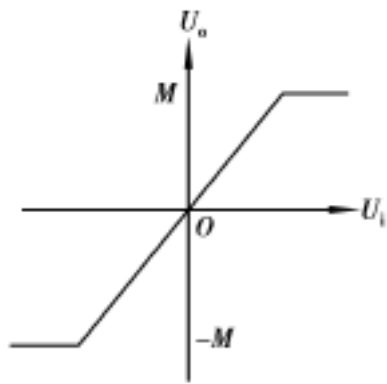


图 2.39 饱和特性输入-输出特性曲线

2) 饱和非线性特性: 理想饱和特性如图 2.39 所示, 特性参数饱和值 M 取决于图 2.40 中的双向稳压管的稳压值, 另一特征参数斜率 k 等于图 2.40 中前一级反馈电阻 R_f 与输入电阻 R_0 之比, 即

$$k = \frac{R_f}{R_0}$$

3) 继电特性: 继电特性的输入输出特性由图 2.41 所示, 特征参数 M 值由图 2.42 中的双向稳压管的稳压值决定。

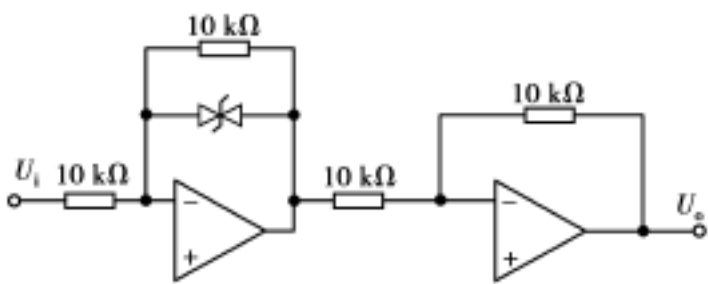


图 2.40 饱和特性模拟电路图

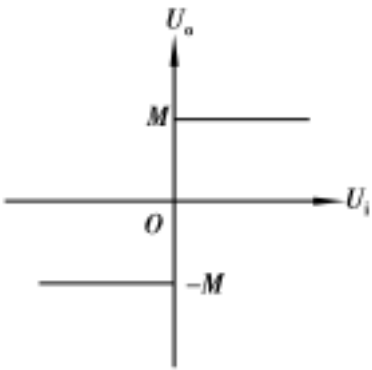


图 2.41 继电输入-输出特性

4) 间隙特性: 间隙特性的输入输出特性如图 2.43 所示。特征参数滞环宽度 由图 2.44 中的 R_2 调整。即

$$= \frac{R_2}{30} \times 12 = 0.4R_2 \text{ V}$$

在图 2.44 中 $R_2 = R_1$, R_2 的单位为 k 。另一特征参数斜率 \tan 与图 2.44 中的参数关系为

$$\tan = \frac{C_f}{C_1} \times \frac{R_f}{R_0}$$

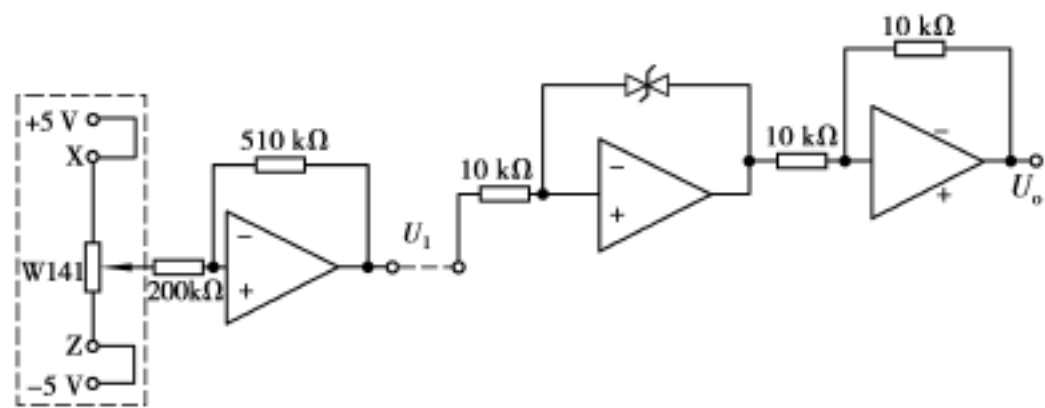


图 2.42 继电特性模拟电路图

改变 R_2 和 R_1 可以改变滞回特性的宽度, 改变 $\frac{R_f}{R_0}$ 或 $\frac{C_1}{C_f}$ 的比

值可调节特性斜率 \tan 。

4. 实验仪器设备

- 1) TDN-AC/ACS 自动控制原理模拟实验机 1 台;
- 2) 计算机 1 台;
- 3) 网络打印机 LQ-1600K 1 台;
- 4) 万用表 1 块;
- 5) 连接导线 若干。

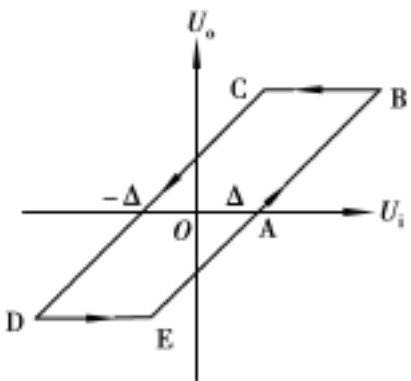


图 2.43 间隙输入-输出特性

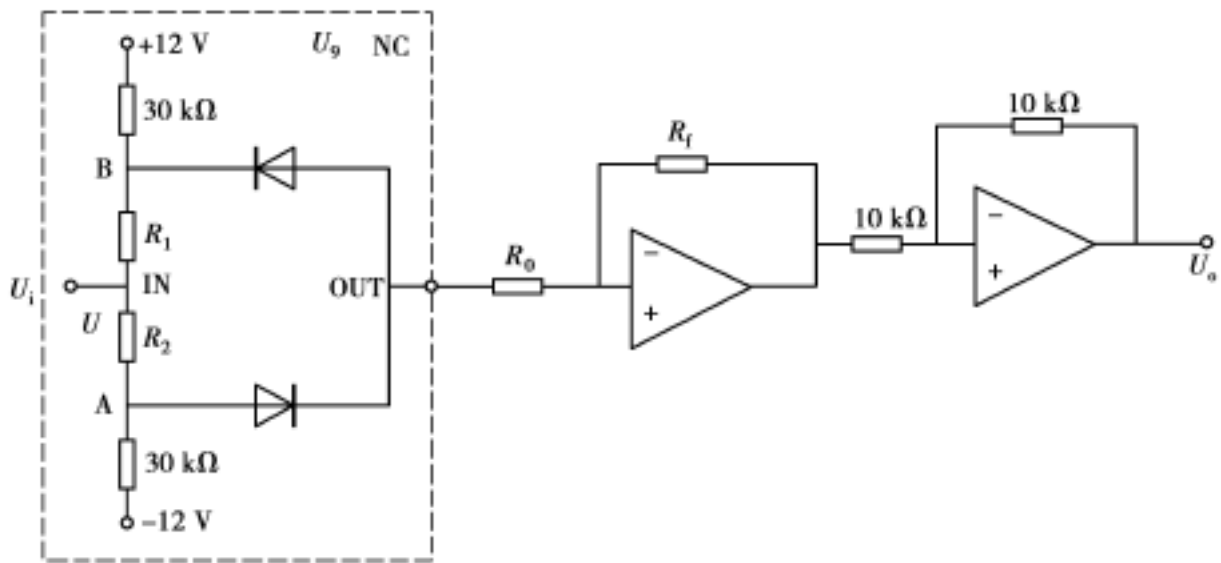


图 2.44 间隙特性模拟电路图

5. 实验预习要求

了解各种典型非线性环节的模拟电路的原理。

6. 实验步骤

- 1) 确定死区的特征参数并按死区非线性环节的模拟电路搭建实验电路;
- 2) 调节输入电压, 待输出稳定后, 对应记录下输入输出的数据;
- 3) 改变死区的特征参数重复上述过程;
- 4) 确定饱和和非线性的特征参数并按饱和非线性环节的模拟电路打尖实验电路;
- 5) 调节输入电压, 待输出稳定后, 对应记录下输入输出的数据;
- 6) 改变饱和特性的特征参数重复上述过程;

7) 按照前述两个环节的实验方法选择性地作出间隙和继电非线性的特性曲线。

7. 实验报告

- 1) 画出非线性环节的模拟电路;
- 2) 记录实验数据, 数据记录的格式如下, 注意记录数据时按输入变化方向进行;

非线性环节								
特征参数								
模拟电路参数								
测试数据								
输入 /V								
输出 /V								

- 3) 根据测试的数据, 在坐标上绘出输入-输出曲线, 并标出相应的特征参数;
- 4) 比较特征参数的计算值与实测数据, 分析产生误差的原因;
- 5) 分析参数变化对非线性特性的影响。

8. 实验思考题

- 1) 在测试间隙非线性时, 在记录数据的过程中应注意什么?
- 2) 以下两个模拟电路分别模拟哪种非线性环节? 分析各自的特征参数与电路参数的关系。

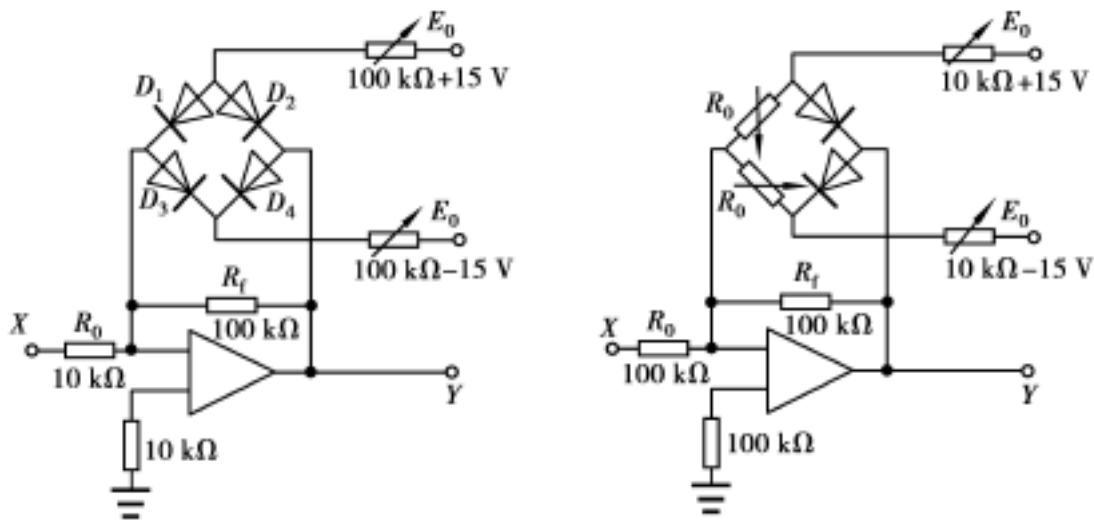


图 2.45 非线性环节的模拟电路

实验 7 非线性系统模拟及相平面分析

对于一个非线性系统输入一系列不同幅度的阶跃信号, 所产生的位移-速度曲线族绘制在同一张平面图上, 就叫相平面图。相平面图是分析非线性系统在阶跃输入下的瞬态响应以及求解初始条件影响的有效手段。绘制相平面图的主要方法有图解法、解析法和实验法。其中实验的方法是一种获得相轨迹比较容易的途径, 根据轨迹形状和位置就能分析系统动态和稳态特性。

1. 实验目的

- 1) 掌握相平面图分析非线性系统的方法;

- 2) 运用相平面法分析非线性系统的稳定性, 研究极限环对系统品质的影响;
- 3) 学习非线性系统的模拟电路构成方法以及引入速度反馈后相图发生的变化。

2. 实验内容

- 1) 观察和分析不带速度负反馈的继电器非线性系统相轨迹;
- 2) 观察和分析带速度负反馈的继电器非线性系统的相轨迹;
- 3) 观察和分析继电器非线性三阶系统的相轨迹。

3. 实验原理和系统结构

- 1) 不带速度反馈的继电器非线性系统的原理图及模拟电路图如图 2.46 和图 2.47 所示。

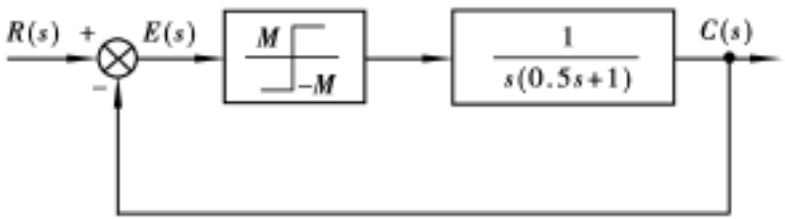


图 2.46 不带速度反馈的继电器非线性系统的原理图

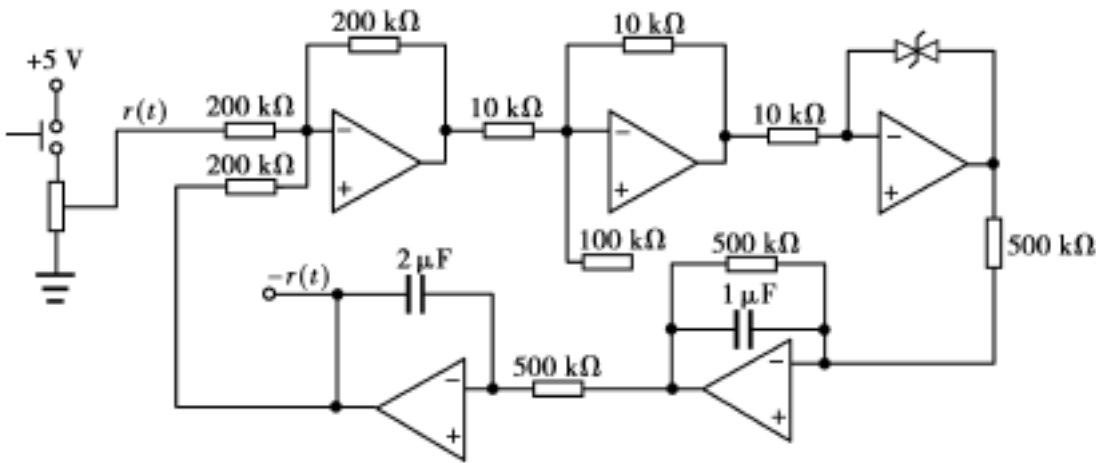


图 2.47 不带速度反馈的继电器非线性系统的模拟图

所示非线性系统可由下式表示

$$\begin{cases} T\ddot{c} + \dot{c} + kM = 0 & (e > 0) \\ T\ddot{c} + \dot{c} - kM = 0 & (e < 0) \end{cases}$$

式中, T 为时间常数($T=0.5$), K 为线性部分开环增益($K=1$), M 为稳压管稳压值。采用 \dot{e} 和 e 为相平面坐标, 由

$$\begin{aligned} e &= r - c \\ \dot{e} &= -\dot{c} \end{aligned}$$

式变为

$$\begin{cases} T\ddot{e} + \dot{e} + kM = 0 & (e > 0) \\ T\ddot{e} + \dot{e} - kM = 0 & (e < 0) \end{cases}$$

代入 $T=0.5, K=1$, 以及所选用稳压值 M , 应用等倾线法作出当初始条件为

$$e(0) = r(0) - c(0) = r(0) = R$$

时的相轨迹, 改变 $r(0)$ 值就可得到一族相轨迹。

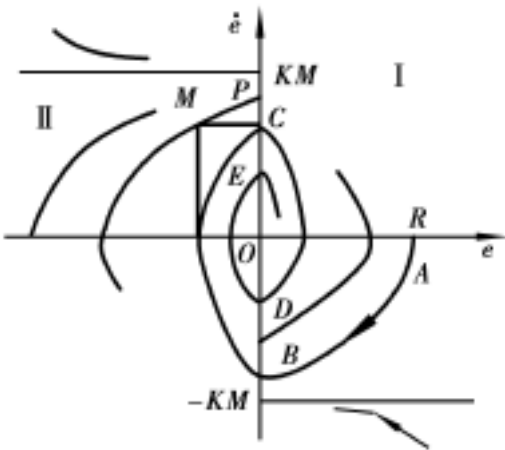


图 2.48 不带速度反馈的继电型非线性系统的相平面图

图 2.48 中的纵坐标将相平面分成 I 和 II 两个区域, \dot{e} 轴是两组相轨迹的分界线, 假如系统在区域内从初始点 A 开始沿相轨迹运动到分界线上的点 B, 在区域 II 内从点 B 沿相轨迹运动到点 C, 再进入区域 I, 经过几次往返运动, 若是理想继电特性则系统逐渐收敛于原点。

带速度负反馈的继电型非线性系统原理方块图如图 2.49 所示。相轨迹如图 2.50 所示, 继电型非线性系统用速度反馈可减小超调量 $\sigma_p\%$ (M_p), 缩短调节时间 t_s , 减小振荡次数。

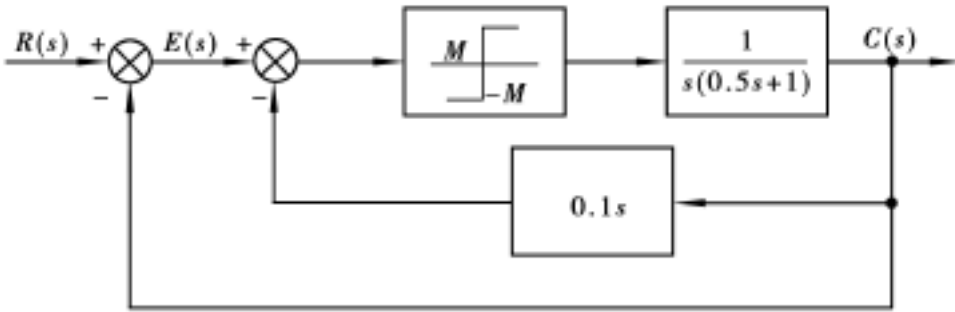


图 2.49 带速度负反馈的继电型非线性系统原理图

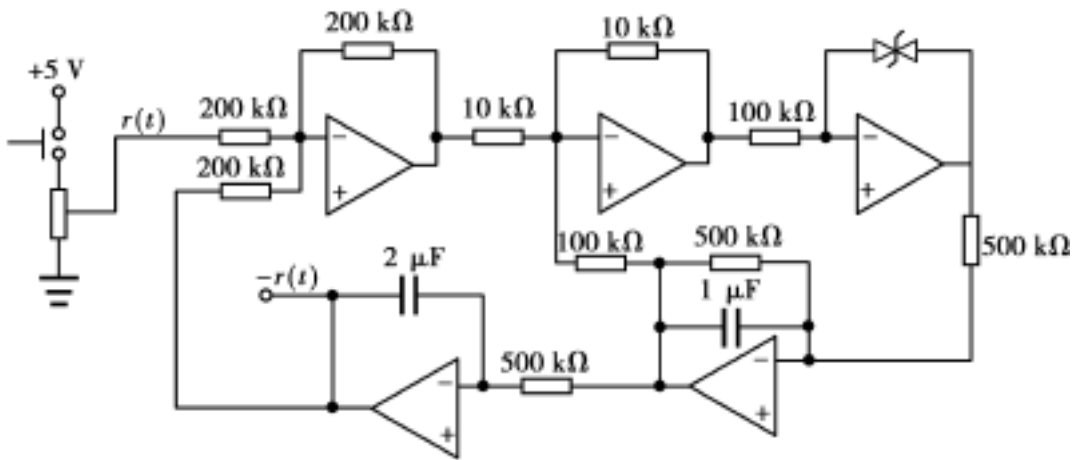


图 2.50 带速度负反馈的继电型非线性系统模拟图

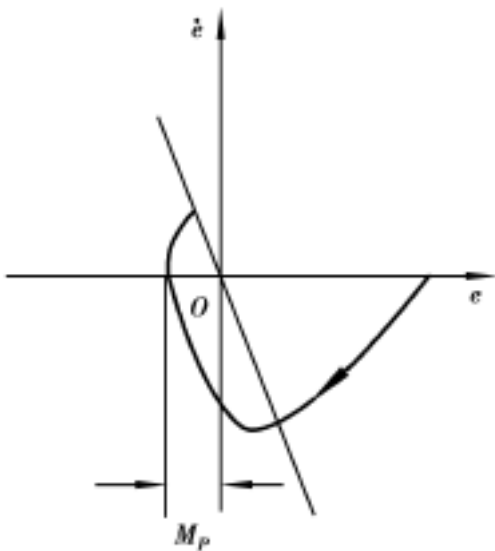


图 2.51 带速度负反馈的继电型非线性系统相平面图

2) 对于二阶系统相平面图包含系统运动的全部信息,对于高阶系统相平面图虽不包含系统运动的全部信息,但是表征了系统某些状态运动过程,而用实验法可以直接获得系统的相轨迹,相平面图对于高阶系统的研究也有用。继电型非线性三阶系统原理方块图和模拟电路图如图 2.52 和图 2.53 所示。

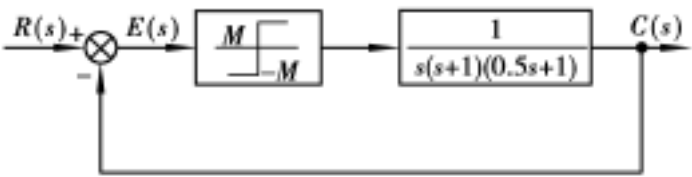


图 2.52 继电型非线性三阶系统原理图

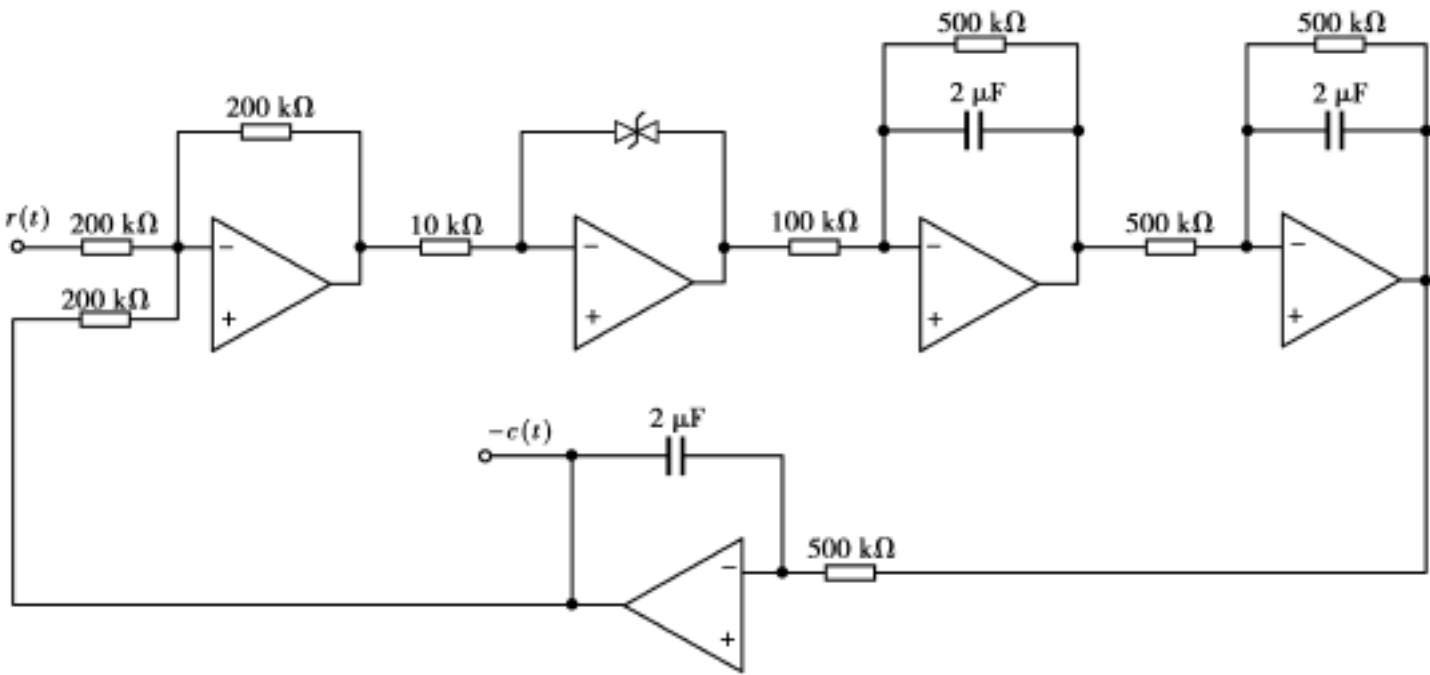


图 2.53 继电型非线性三阶系统模拟图

应用描述函数法分析图 2.51 所示继电型非线性三阶系统的稳定性。为此在复平面 $G(s)$ 上分别画出线性部分 $G(j\omega)$ 轨迹和非线性元件的 $-1/N$ 轨迹,然后分析系统的稳定性,若存在极限环则求出极限环的振幅和周期。

图 2.54 表示图 2.52 所示系统非线性元件 $-1/N$ 轨迹及线性部分 $G(j\omega)$ 轨迹,两轨迹相交于点 A,系统存在稳定极限环。令

$$\text{Im}[G(j\omega)] = 0$$

可求出极限环的角频率 ω_A , 令

$$-\frac{1}{N} = \text{Re}[G(j\omega_A)]$$

可求得 N 。再根据描述公式可得到极限环的振幅值。因为继电型非线性元件

$$N = \frac{4M}{E_m}$$

式中, E_m 为非线性元件的输入振幅值,所以极限环的振幅 E_m 为

$$E_m = \frac{4M}{N}$$

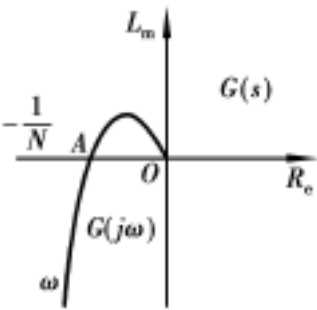


图 2.54 描述函数法分析继电型非线性三阶系统的稳定性

若减小线性部分增益使 $G(j)$ 与 $-1/N$ 不相交则系统极限环消失, 系统变为稳定系统。

4. 实验仪器设备

- 1) TDN-AC/ACS 自动控制原理模拟实验机 1 台;
- 2) 计算机(配虚拟示波器及 Matlab 软件) 1 台;
- 3) 万用表 1 只;
- 4) PCI—1710 数据采集卡及端子板 1 块;
- 5) 网络打印机 1 台;
- 6) 电阻、电容及连接导线 若干。

5. 实验内容及步骤

(1) 不带速度负反馈的继电型非线性系统

将信号源单元 U_1SG 的 ST 端(插针)与 +5 V 端(插针)用短路块短接。按图 2.47 接线后, 在系统输入端分别施加 5 V, 4 V, 3 V, 2 V 和 1 V 电压时, 用示波器观察并记录系统在 $e-\dot{e}$ 平面上的相轨迹。测量在 5 V 阶跃信号下系统的超调量 $\sigma_p\%$ 和振荡次数。

(2) 带速度负反馈的继电型非线性系统

按图 2.50 接线, 在系统输入端分别施加 5 V, 4 V, 3 V, 2 V 和 1 V 电压时, 用示波器观察并记录系统在 $e-\dot{e}$ 平面上的相轨迹。测量在 5 V 阶跃信号下系统的超调量 $\sigma_p\%$ 和振荡次数。研究带速度负反馈继电型非线性系统的动态性能。

表 2.4

	不带速度负反馈的继电型非线性系统	带速度负反馈的继电型非线性系统
$\sigma_p\%$		
振荡次数		

(3) 继电型非线性三阶系统

- 1) 按图 2.53 接线;
- 2) 观测系统在 $e-\dot{e}$ 平面上的相轨迹;
- 3) 测量自激振荡的振幅和周期;
- 4) 继续减少线性部分增益, 直至自激振荡现象消失;
- 5) 将极限环的振幅、周期和角频率填入表 2.5 中。

表 2.5

线 性 部 分	非线性部分	角频率 $\omega_A/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	周期 T/s	振幅 E_m/V
		理论 测量	理论 测量	理论 测量
$G(j) = \frac{5}{j(j+1)(0.5j+1)}$	继电型			

6. 实验报告

- 1) 根据实验结果, 比较加上速度反馈前后阶跃输入下系统的超调量 $\sigma_p\%$ 和振荡次数;
- 2) 观测继电型非线性三阶系统的自激振荡现象, 对比理论值和实际值;
- 3) 适当减小电型非线性三阶系统线性部分增益, 从示波器上看出系统的输出为衰减振荡, 自激振荡随着线性部分增益的减小而消失。

7. 思考

- 1) 其他非线性系统和继电型非线性系统有何不同?
- 2) 改变阶跃信号幅值、开环放大系数或非线性环节的限幅电压所造成相迹的变化各是怎样的?
- 3) 加上速度反馈前后的相迹有何不同?

实验 8 采样控制系统模拟及稳定性分析

1. 实验目的

- 1) 了解信号的采样和恢复过程, 掌握其基本原理;
- 2) 比较二阶连续系统与采样系统的动态性能;
- 3) 了解系统构成形式对采样系统性能的影响。

2. 实验仪器设备

- 1) TDN-AC/ACS 自动控制原理模拟实验机 1 台;
- 2) 计算机(配虚拟示波器及 Matlab 软件) 1 台;
- 3) 万用表 1 只;
- 4) PCI—1710 数据采集卡及端子板 1 块;
- 5) 网络打印机 1 台;
- 6) 电阻、电容及连接导线 若干。

3. 实验原理和系统结构

实验采用“ 采样-保持器 ”组件 LF398, 它具有将连续信号离散后再以零阶保持器输出信号的功能。其管脚连接如图所示, 采样周期 T 等于输入至 LF398 第 8 脚的脉冲周期, 此脉冲由多谐振荡器(组件 MC1555 及其阻容元件构成) 发生的方波经单稳电路产生, 改变多谐振荡器的周期即改变采样周期。

图 2. 55 是 LF398 采样-保持器的原理方块图。

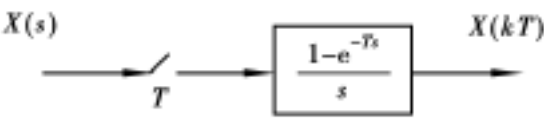


图 2. 55 LF398 采样-保持器的原理方块图

- 1) 信号的采样保持电路如图 2.56 所示。

连续信号 $x(t)$ 经采样器采样后变为离散信号 $x^*(t)$, 香农采样定理指出, 离散信号 $x^*(t)$ 可以完全复原为连续信号的条件为

$\omega_s \geq 2 \omega_{max}$

式中 ω_s 为采样角频率, $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$ (T 为采样周期)。 ω_{max} 为连续信号 $x(t)$ 的幅频谱 $|x(j\omega)|$ 的上

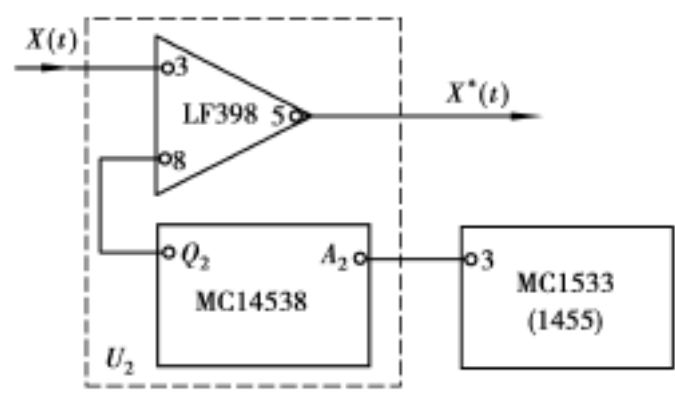


图 2.56 信号的采样保持电路图

限频率。该式也可以表示成

$$T_{\max}$$

2) 闭环采样控制系统的原理方块图和电路图如图 2.57 和图 2.58 所示。

$$\begin{aligned} Z\left[\frac{25(1-e^{-Ts})}{s^2(0.5s+1)}\right] &= 25(1-z^{-1})Z\left[\frac{1}{s^2(0.5s+1)}\right] \\ &= \frac{12.5[(2T-1+e^{-2T})z+(1-e^{-2T}-2Te^{-2T})]}{(z-1)(z-e^{-2T})} \end{aligned}$$

闭环脉冲传递函数为

$$\frac{C(z)}{R(z)} = \frac{12.5[(2T-1+e^{-2T})z+(1-e^{-2T}-2Te^{-2T})]}{Z^2+(25T-13.5+11.5e^{-2T})z+(12.5-11.5e^{-2T}-25Te^{-2T})}$$

闭环采样系统的特征方程式为：

$$z^2+(25T-13.5+11.5e^{-2T})z+(12.5-11.5e^{-2T}-25Te^{-2T})=0$$

从上式可知，特征方程的根与采样周期有关，若特征根的模均小于 1 则系统稳定，若有一个特征根的模大于 1 则系统不稳定。因此系统的稳定性与采样周期 T 的大小有关。

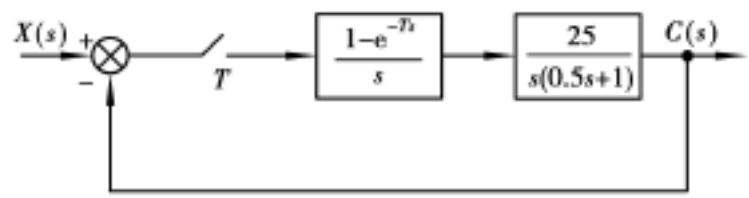


图 2.57 闭环采样控制系统的原理方框图

4. 实验内容及步骤

- (1) 将信号源单元 U₁SG 的 ST 端(插针)与 +5 V 端(插针)用短路块短接
 - 1) 按图 2.56 接线。将 U₁₅SIN 单元的频率为 25 Hz 的正弦信号接至 LF398 的输入端；
 - 2) 将信号源的单元的开关 S₁₂ 置于“ 2 ~60 ms ”挡，调节电位器 W₁₁ 使采样周期 T=3 ms；
 - 3) 用示波器同时观测 LF398 的输入波形和输出波形，此时两者应该一致；
 - 4) 改变采样周期直至 20 ms，观测输出波形。此时输出波形仍为输入波形的采样波形，还未失真，但当 T>20 ms 时将没有输出波形，系统采样失真，从而验证香农采样定理。
- (2) 采样系统的稳定性及瞬态响应
 - 1) 按图 2.58 接线。取 T=3 ms；
 - 2) 加阶跃信号 r(t)，观察并记录系统的输出波形 c(t)，测量超调值 $\sigma_p\%$ ；
 - 3) 将信号源单元的开关 S₁₂ 置于“ 2 ~600 ms ”挡，调节电位器 W₁₁ 使采样周期 T=30 ms，系

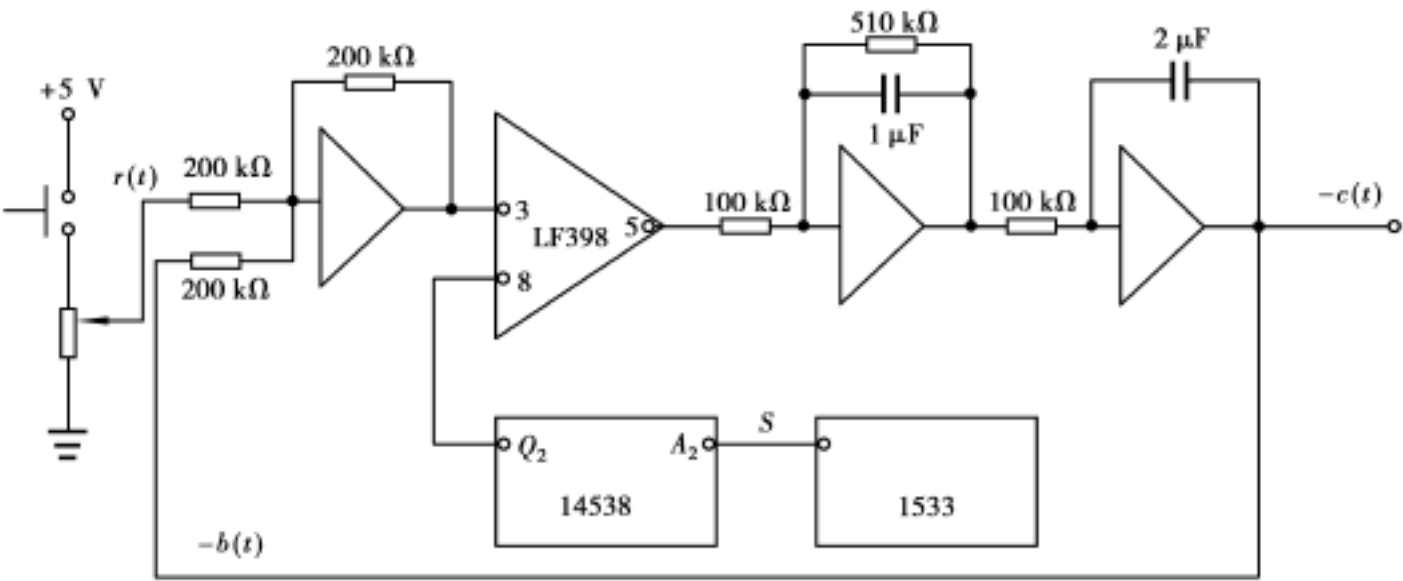


图 2.58 闭环采样控制系统的原理电路图

统加阶跃信号观察并记录系统的输出波形, 测量超调值 $p\%$;

- 4) 调节电位器 W_{11} 使采样周期 $T=150\text{ ms}$, 观测并记录系统的输出波形;
- 5) 将实验记录结果填入表 2.6 中。

表 2.6

采样周期 T/ms	$p/\%$	稳定性 $\%$	响应曲线
3			
30			
150			

5. 实验报告要求

- 1) 按实验要求整理实验记录曲线、数据及实验现象;
- 2) 验证香农采样定理;
- 3) 比较二阶连续系统和采样系统的性能, 分析采样保持器的作用及它对系统性能产生的影响;
- 4) 理论上分析采样周期对采样系统性能的影响, 计算出使系统对于临界稳定时的采样周期, 并与实验结果比较。

6. 思考

- 1) 由采样定理 $\omega_s \geq 2 \omega_{\max}$, 当正弦信号的角频率 50 rad/s 时为满足采样定理, 采样周期不能超过多少?
- 2) 采样周期选择的原则有哪些?

第 3 章

自动控制系统综合性实验

3.1 概 述

自动控制系统的模型通常分为数学模型和物理模型两种。单纯利用数学模型进行的仿真实验属于离线仿真,即整个实验过程都是以系统的数学模型为基础,在计算机上完成。仿真实验得到的结果还需移植到实际系统上进一步完善,也就是说,还要经过所谓的在线实验过程,才能最终完成控制系统的设计。

这两种不同的实验过程有各自的特点和任务,离线仿真的主要目的是论证和比较控制方案,这是需要反复实验的过程,因此,借助仿真实验,无论是在设计的效率或实验的成本上都有极大的优势。在线实验主要是验证控制方案的实际运行效果,为改进设计提供依据。如将离线仿真和在线实验整合在一个平台下,即仿真的结果不需移植就可直接作用到实际对象上,控制的效果又可直接返回到仿真环境中,对进一步改善实验手段,提高实验的水平都有积极意义。

在 Matlab/Simulink 环境下开发的控制系统综合实验平台初步实现了离线仿真和在线实验的集成和整合,为便于同学实验,先就离线仿真和在线实验的相关概念做简要介绍。离线仿真的一般过程如图 3.1 所示。

该过程是一个循环反复的过程,各个阶段运行的环境是不一致的,各阶段的交流需要通过文档的交换来完成,这将导致整个实验过程是顺序的,而不是迭代式的。开发者在进行下一阶段前必须首先重新输入上一阶段的结果,这样不仅麻烦,而且容易出错。当系统的设计不能满足要求时,必须不断地修改模型或方案,再重新开始进行下一次实验。

在线实验又称硬件回路仿真。它是将系统的部分实物(如控制系统的测量传感器、控制器、伺服执行机构)通过计算机的输入输出板卡接入 Matlab 的仿真回路中,通过切换,完成离线仿真和在线实验的转换,即离线仿真结果无需移植就直接作用在对象上,实现在实物环境下的在线实验。这种手段能将设计的各个阶段集成在一个统一的环境下连贯地完成整个系统的设计。

Matlab/Simulink 及其各种丰富的工具箱为并行工程的实现提供了一体化的快速解决途

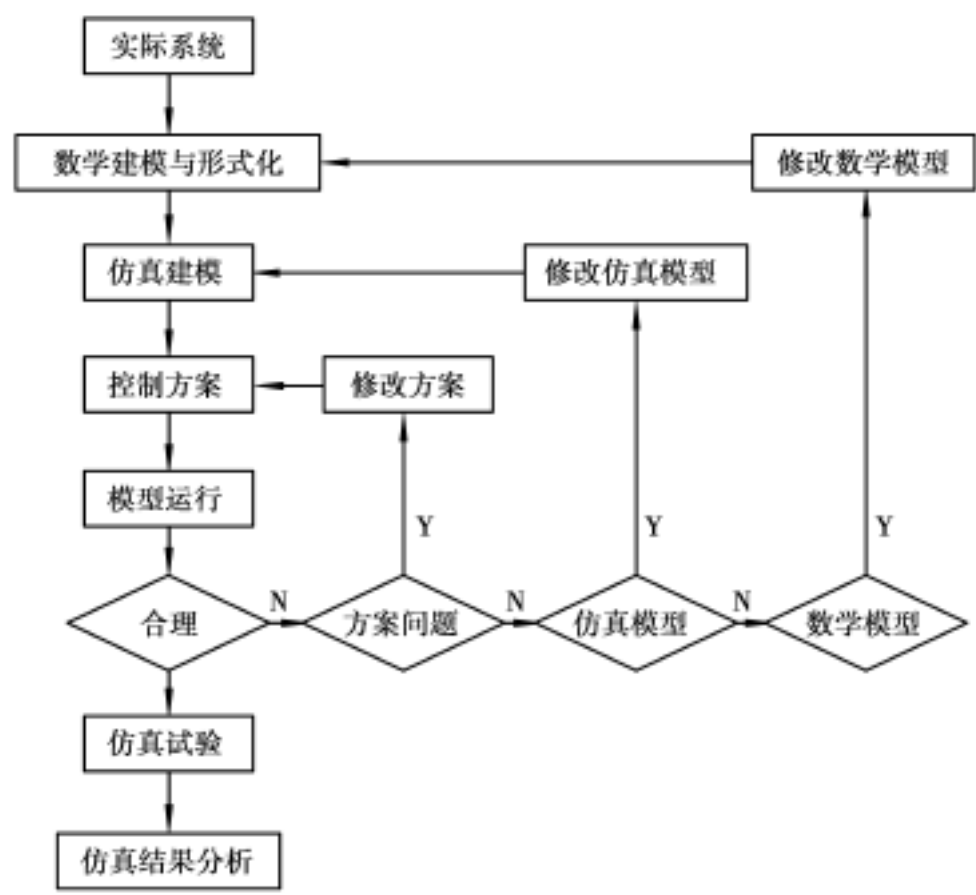


图 3.1 系统离线仿真的一般过程

径。使用 Matlab/Simulink 及其工具箱为上述设计过程的每一个阶段都提供了相应的技术支撑。即可以在统一的环境下使用不同的工具完成不同阶段的具体任务,从而消除了设计中各阶段之间相互交流的障碍,在该环境下,系统在线实验及与离线仿真的联系可用图 3.2 表示。

本章提供的综合实验平台是基于 Matlab 6.5/Simulink 开发的,在综合实验平台的图形用户界面(GUI) 的帮助下,不仅能在线修改 Simulink 框图的参数,还能将 Simulink 搭建的仿真实验与 Matlab 的 Real-Time Workshop(RTW) 有机联系起来,从而自动地从 Simulink 模型产生 C 和 Ada 代码,实现对实验对象的实时控制。便于用户顺利完成离线仿真和在线实验的“无缝”衔接,使注意力更集中到自己的实验任务上。有关 RTW 的基本原理及应用的具体情况可参阅文献。

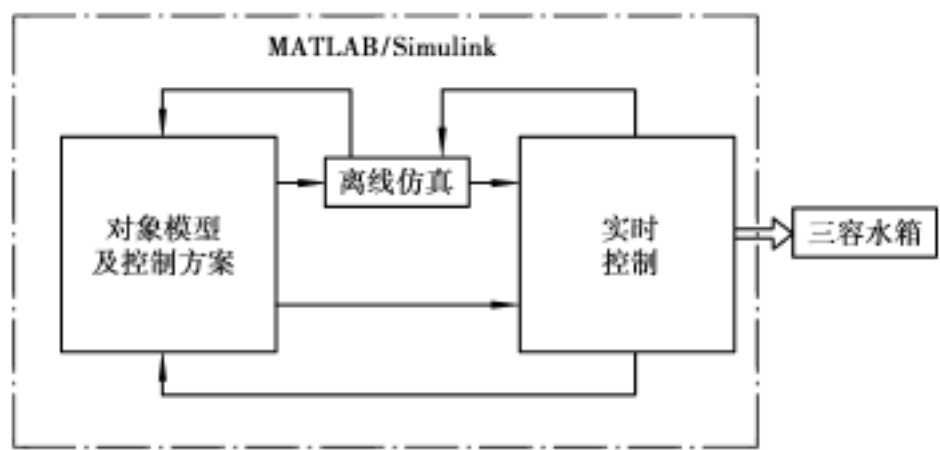


图 3.2 系统在线实验与离线仿真的联系

3.2 自动控制系统综合实验平台

所谓自动控制系统综合实验平台是将被控的实物模型集成在 Matlab 的仿真环境下,使原本分离的各个设计阶段如,建立数学模型、系统综合与设计、仿真验证、实物调试等能在统一的环境下完成。实现资源共享,达到节约成本,提高效率的目的。在这样的平台下,设计者可免去许多耗时费力的实验准备工作,集中精力于设计任务上。是现代实验技术发展的一个方向。

3.2.1 平台运行环境及其配置

1. 平台运行环境要求

硬件环境要求, PC P 以上微机, 内存不小于 128 M。
软件环境要求, 操作系统为 Microsoft Windows 2000 或 Windows XP, Matlab 6.5 并安装 RTW 工具箱, VC ++ 6.0 或 Borland C ++ 5.1 等第三方 C 语言编译器。

2. 结构和功能介绍

系统硬件结构如图 3.3 所示。

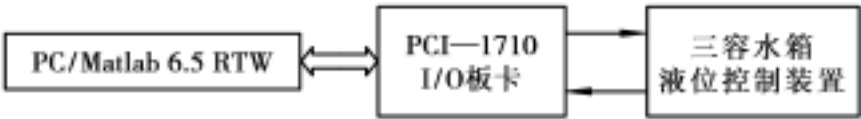


图 3.3 系统硬件结构示意图

实验平台采用的实物对象为 QXLTT 三容水箱液位控制装置。该装置是 1 台多输入和多输出的非线性的具有耦合关系的物理模型。其主体是用透明的有机玻璃制成的 3 个圆柱形容器罐和一个蓄水箱, 3 个反压式液位传感器 LT1, LT2 和 LT3 分别用于测量容器罐的液位高度。配置有两个水泵 P1 和 P2, 出水流量由相应的调节阀控制, 实物图及示意图如图 3.4。

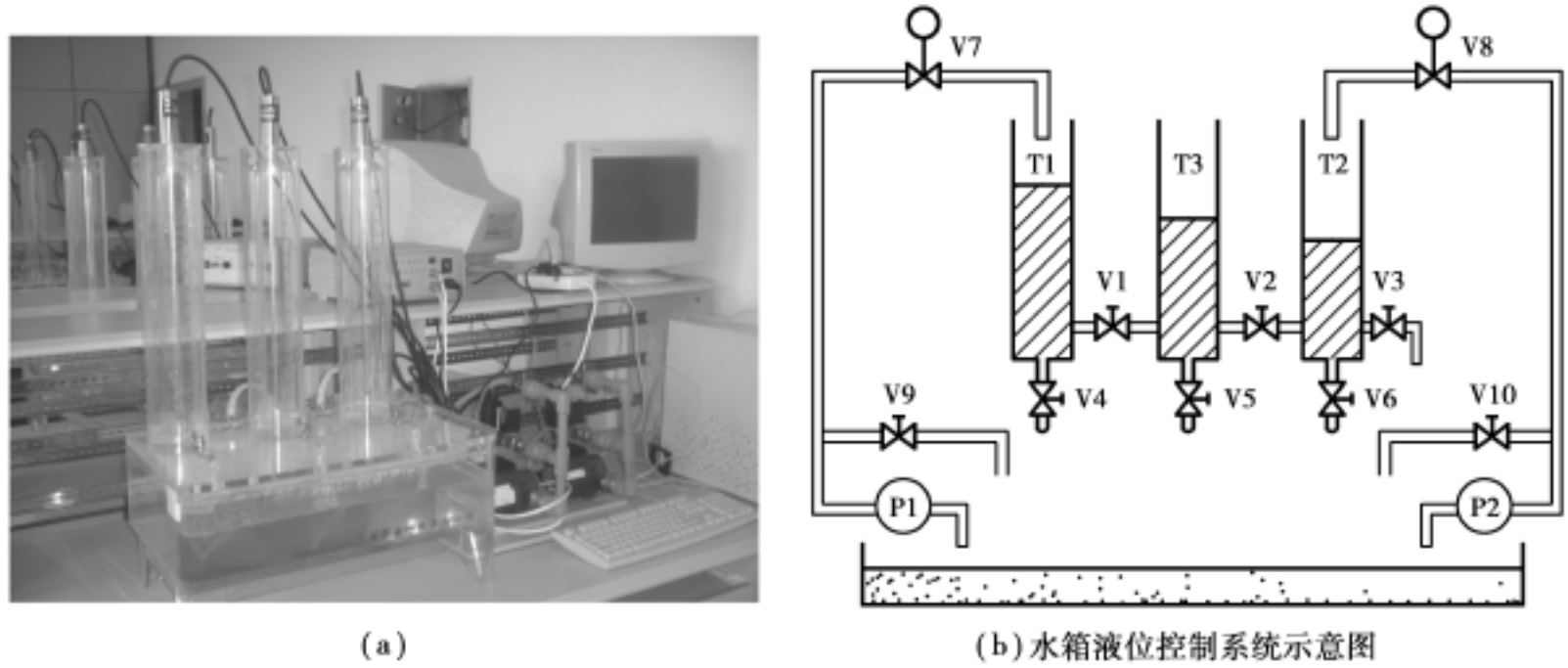


图 3.4

三个圆柱形容器分别经手动阀 V1 和 V2 互为串联连接, 蓄水箱中的液体由泵 P1 和 P2 抽

出注入容器 T1、T2 以改变 T1 和 T2 的液位, 液体经手动阀 V3 再流入蓄水箱形成循环。改变手动调节阀 V1 和 V2 的开度, 便可改变容器 T3 液位的关联关系(即改变 3 个容器中液位的耦合程度)。调节手动阀 V4、V5 和 V6 的开度则可改变系统的传递函数, 可模拟系统内部的扰动。

很显然, 在这个系统中, 可操作的变量分别是流入容器 T1 和 T2 的液体流量, 而控制变量则分别是容器 T1 和 T2 的液位。通过手动阀门(V1 ~V6) 开和闭的不同组合可灵活地改变对象的特性。既可以组成常规的有自平衡能力的对象如: 一阶惯性对象、二阶惯性对象和三阶惯性对象; 也可构成无自平衡能力的对象。还可构筑成多输入多输出的具有耦合关系的复杂系统(容器 T3 的液位与 T1 和 T2 两个容器液位相互牵连)。另外系统调节流量的手段是通过控制调节阀的开度来实现的, 而开度与流量的关系并非严格的线性关系, 加之从容器内流出的流量本来就与液位的平方有关系, 所以本系统具有一定的非线性。由于实物装置的这个特点, 使实验更接近真实情况, 可完善纯粹仿真实验的不足, 也为实验者提供了更多的选择条件。

实物模型上液位传感器的测量信号和调节阀的控制信号通过 PCI—1710 数据接口卡(或 RS232/485) 与控制计算机相连, 其中重要的是 PCI—1710 数据接口卡置于 Matlab 的 RTW 实时内核控制下, 为仿真实验完成后直接过渡到实物调试提供了条件。

相关硬件的技术指标是, 液位传感器测量信号为标准的 4 ~20 mA 或 1 ~5 V 直流信号(操作箱面板上开关可选); 调节阀的控制信号为 0 ~10 V, 1 ~5 V 或 4 ~20 mA, 由软件设置选择。

PCI—1710 数据接口卡为 PCI 总线的多功能数据采集卡, 具有 12 位 A/D 转换、D/A 转换, 数字量输入、数字量输出以及计数器/定时器等最常用的测量和控制功能。在实验平台上组成控制系统的结构如图 3.5 所示。

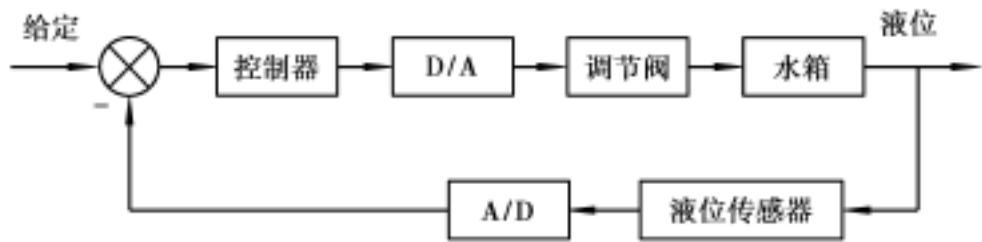


图 3.5 控制系统结构框图

综合实验平台的软件体系基于 Matlab 6.5/Simulink 构建, 用户主要在开发出的图形界面(GUI) 的帮助下完成控制系统的设计和调试任务。在 GUI 的帮助下, 用户可不必了解若干烦琐的技术细节, 而能顺利完成自己的实验任务。由于篇幅有限, 这里并不详细介绍 Simulink 的基本应用, 具体内容请参阅文献。

图形用户界面 GUI 的主控画面如图 3.6。在 Matlab 命令窗口中键入 threetank 命令, 就可开启该主控画面。主控画面分为 3 个区: 控制区、曲线显示区和控制系统结构框图显示区。下面分别介绍各区的具体内容及操作方法。

- 控制区内包含如下的选择和操作:
 - 实验项目下拉菜单: 用于选择实验项目, 如: 液位对象的特性实验; 串联校正(PID 控制) 的仿真实验或在线实验; 反馈校正(串级调节) 的仿真实验或在线实验等选项。
 - P, I, D 参数修改框: 可以分别输入控制器 PID 参数, 离线仿真和在线实验共用一组参数, 直接输入即可改变 Simulink 框图中相应的参数。也用于显示当前的 P, I, D 参数。
 - 控制按钮: 包括离线仿真实验按钮和开始在线实验按钮。

液位显示窗: 显示 3 个容器当前的液位值。

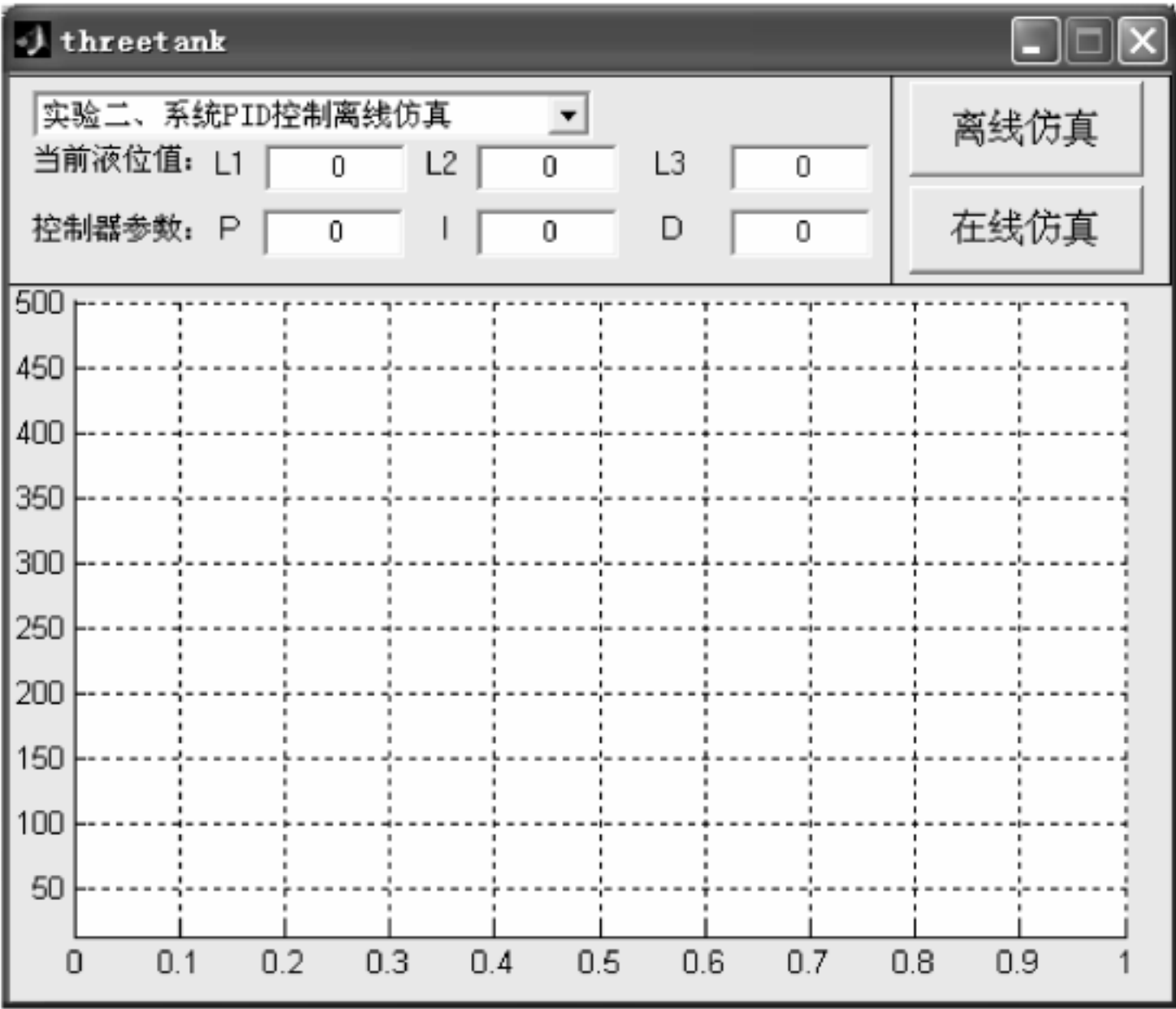


图 3.6 GUI 主控画面

曲线显示区: 进行离线仿真时显示仿真的结果曲线; 在线实验结束后显示系统输出动态曲线。

系统在线实验和离线仿真时, Simulink 的程序图稍有不同, 两种程序图分别由图 3.7 和图

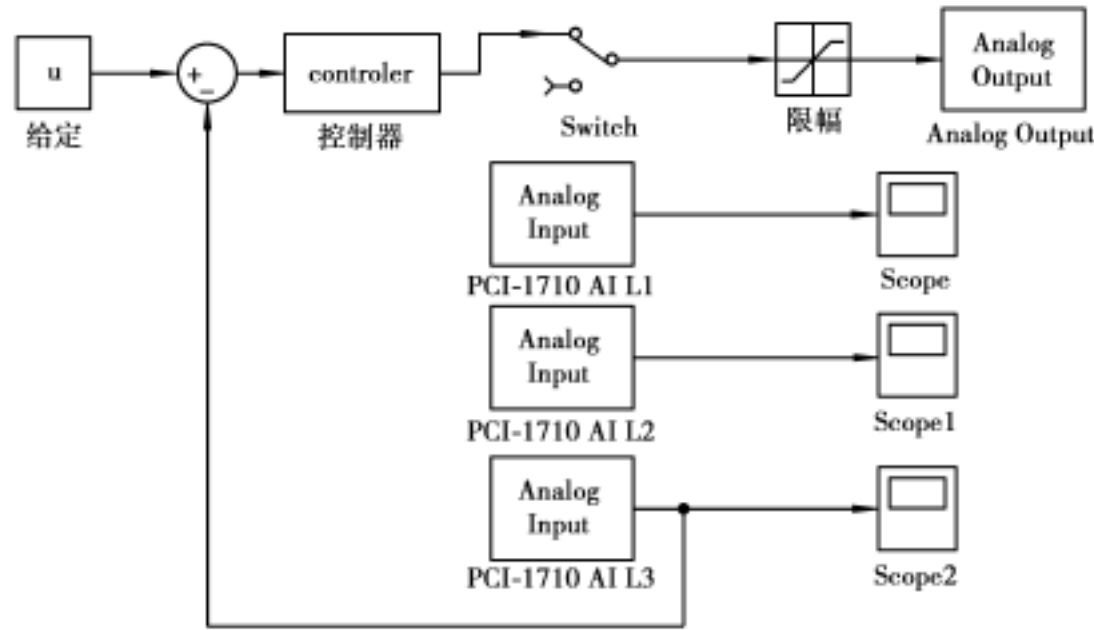


图 3.7 系统在线实验的 Simulink 程序图

3.8 示出。其中离线仿真采用 Simulink 正常模式(normal mode), 在线实验则采用 Simulink 外部模式(external mode), 外部模式只支持定步长仿真。可以把 Simulink 作为图形用户界面在线修改仿真参数。

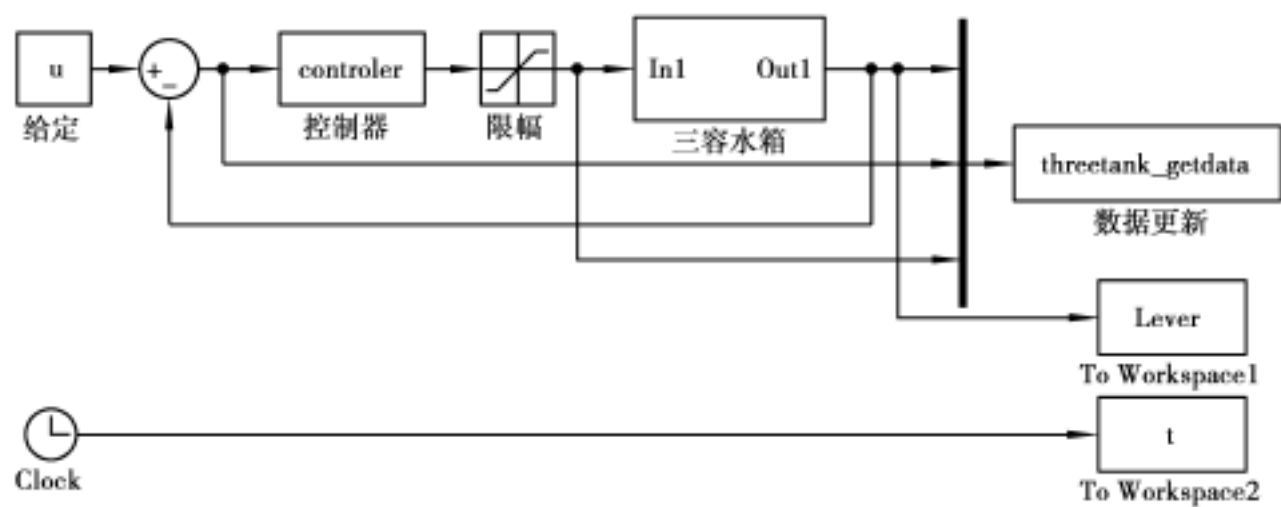


图 3.8 系统离线仿真的 Simulink 程序图

3.2.2 综合实验平台的使用方法

在 GUI 主控界面的介绍中已经对该界面上各元素的操作做了说明, 下面具体介绍系统仿真的过程以及有关的操作方法。

1. 系统仿真的过程

系统在线实验及离线仿真的操作过程基本一致, 只是 Simulink 的程序图和参数选取略有不同。现分别简述如下。

系统离线仿真实验过程如下:

首先, 打开系统离线仿真 Simulink 框图 threetankoffline_sim.mdl(或者从 GUI 上选择相应实验项目的离线仿真选项, 同时会打开 threetankoffline_sim.mdl)。其菜单栏与工具栏如图 3.9, 在图中圈出位置选择 Normal, 或者从菜单栏选择 Simulation, 然后从下拉菜单中选择 Normal。(Simulink 框图保存时该选项已选定, 读者可以保持不变)。

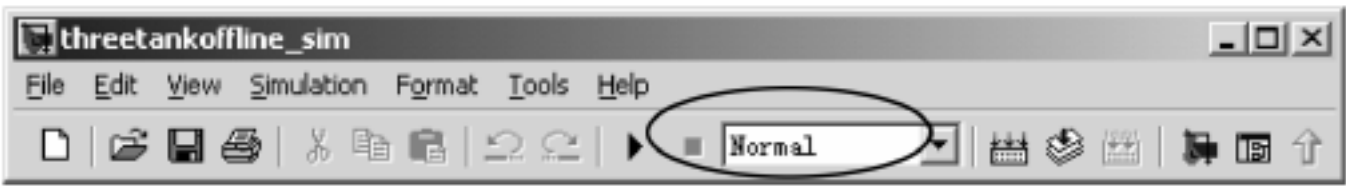


图 3.9 选择 Normal 模式

然后, 点击工具栏上的“▶”或者在 GUI 上点击“ 离线仿真实验 ”按钮就可以对系统进行离线仿真了。由于离线仿真很快结束, 点击结束按钮, 所以在 GUI 上也并未设置“ 结束离线仿真 ”按钮。

系统在线实验的过程如下:

首先打开系统在线实验的 Simulink 程序框图 threetankonline_sim.mdl(或者从 GUI 上选择相应实验项目的在线实验选项, 同时会打开 threetankonline_sim.mdl)。其菜单栏和工具栏如图 3.10, 在图中圈出位置选择 External, 或者从菜单栏选择 Simulation, 然后从下拉菜单中选择 External。(Simulink 框图保存时该选项已选定, 读者可以保持不变)

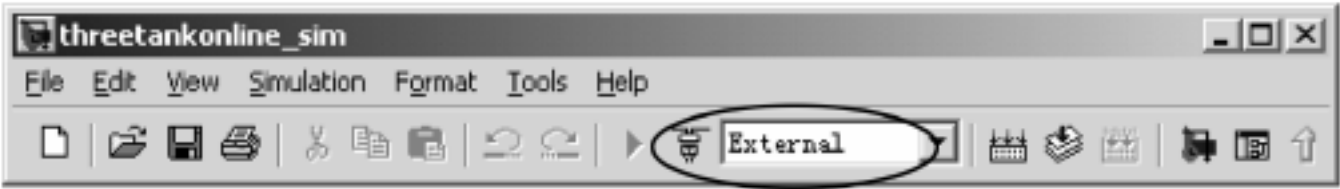


图 3.10 选择 External 模式

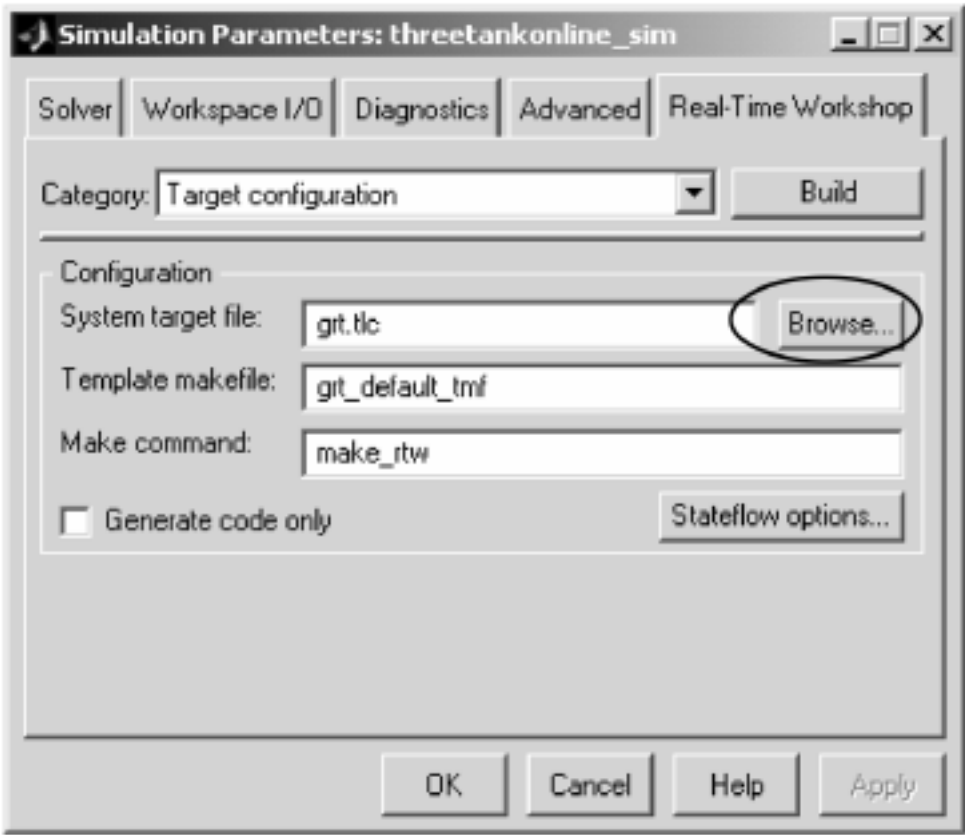




图 3.11 系统在线实验 Real-Time Workshop 参数设置

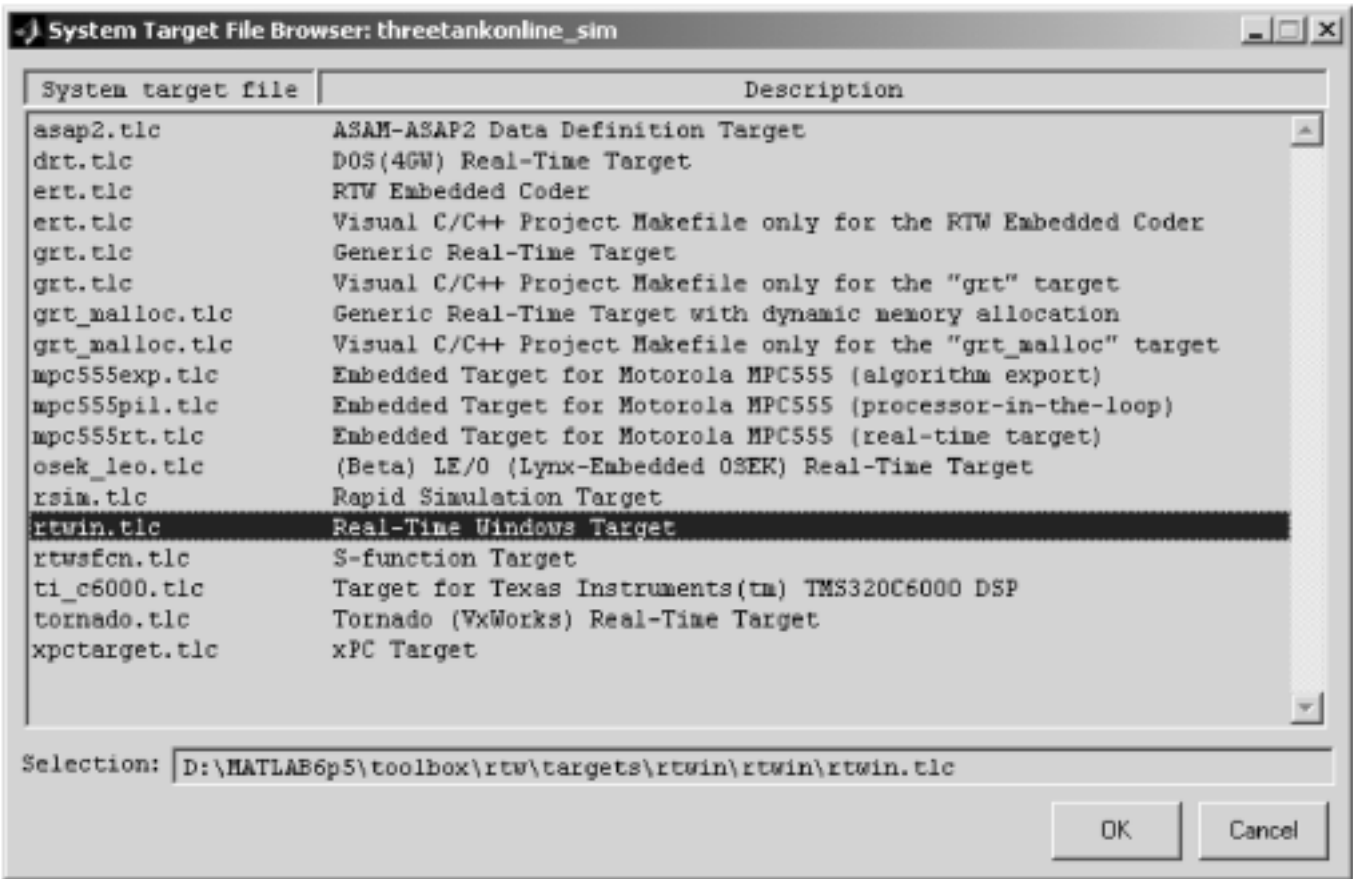
然后, 选择菜单栏上的 Simulation | Simulation Parameters | Real-Time Workshop, 打开如图 3.11 的窗口; 点击 Browse 按钮打开如图 3.12 的窗口。在如图 3.12(a) 的窗口中选择“ rtw. tlc ”一行, 点击 OK 关闭此窗口。此时 System target file 一栏变为 rtwin. tlc, 下面的 Template makefile 以及 Make command 也随之变化, 如图 3.12(b) 。点击 Build 按钮。或者从菜单栏选择 Tools | Real-Time Workshop | Options 打开图 3.11 同样的窗口进行相同的设置。

最后, 如图 3.13, 选择工具栏上的 , 或者从 Simulation 菜单下选择 Connect to target, 此时 Simulation 菜单下 Start real-time code 以及工具栏上的  使能, 点击此选项, 即开始了系统在线实验过程。完成 Connect to target 一步以后, 也可以在 GUI 上点击“ 开始在线实验 ”按钮开始系统在线实验过程。

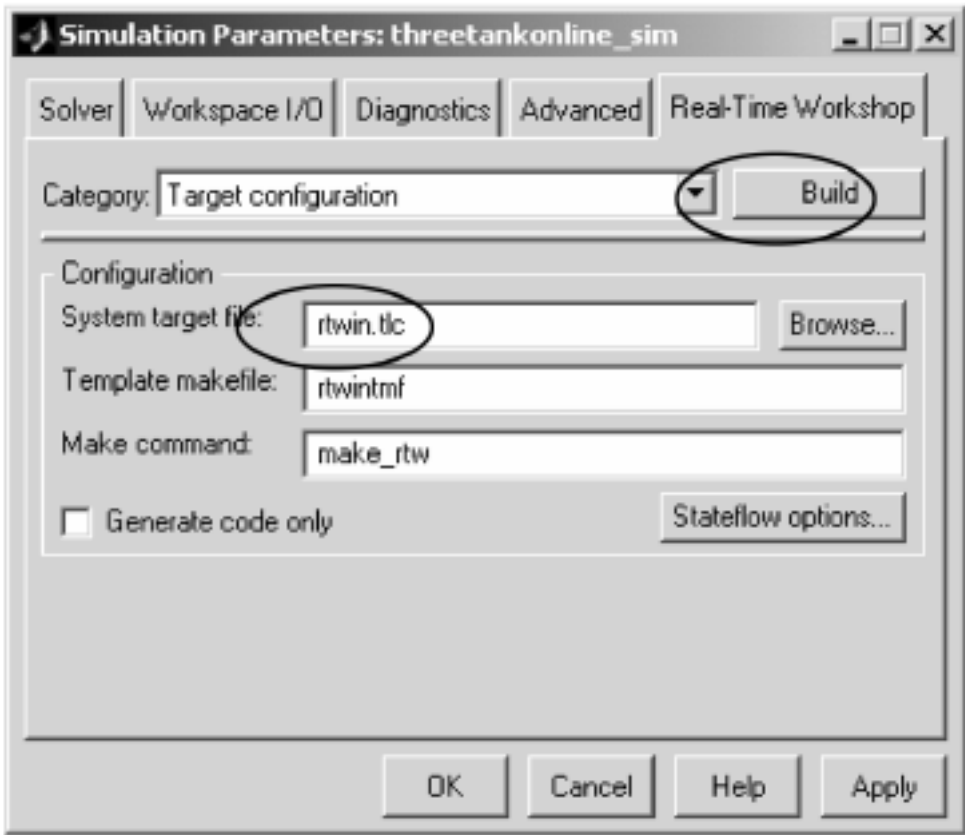
开始系统在线实验后, 在 GUI 上点击“ 结束在线实验 ”按钮可以中止实验的进行。

2. 获取仿真结果

本平台对应的主控文件为 threetank. m, 保存于 Matlab 的 work 目录下。在 Matlab 命令窗口输入 threetank 即可以打开 GUI 的主控画面。完成相应的仿真实验后, 仿真的时间及液位值保存在 Matlab 的 Workspace 中, 名称分别为: Lever, 表示液位值; t, 表示仿真时间。具体实验项目中如果用到这两个量进行数据处理, 可以直接应用其变量名。



(a) 系统在线实验 TLC 文件选择



(b) 系统在线实验 TLC 文件选择

图 3.12



图 3.13 与对象连接

3.3 实验项目及其实验指导

实验 1 对象特性的实验测试

1. 实验目的

- 1) 掌握对象静态特性的测试方法;
- 2) 掌握对象动态特性的测试方法;
- 3) 掌握阶跃干扰法测试对象特性的数据处理方法;
- 4) 通过实验认识对象的非线性。

2. 实验原理

环节(或系统)的特性包括静态特性和动态特性两部分。

对象的静态特性可以反映对象的静态增益及其非线性的情况,如死区、饱和等。为选择控制方案提供依据。三容水箱系统的非线性主要体现在调节阀的开度与流量关系即调节阀的流量特性,以及容器内的流出量与液位高度关系两个方面。调节阀的理想流量特性如图 3.14。理想流量特性是在假定控制阀前后压差不变的情况下得到的,而实际上控制阀前后压差总是变化的,考虑到阀门可能存在的死区及饱和特性,阀门的工作流量特性如图 3.15 所示。

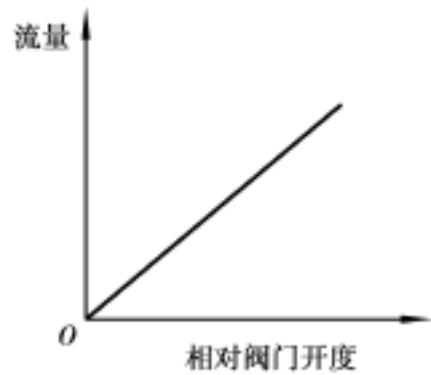


图 3.14 线性阀理想流量特性示意

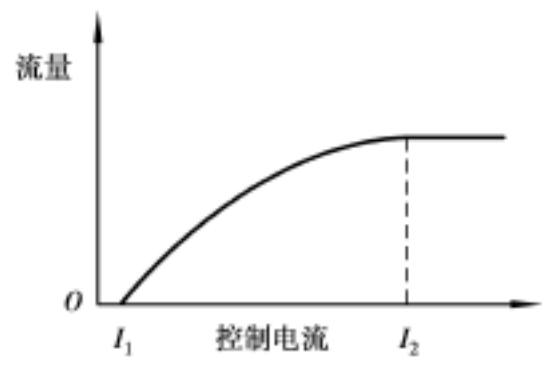


图 3.15 线性阀工作流量特性示意

由于实验装置没有加装流量检测元件,为测试调节阀的静态特性,具体的实验原理如下,给定调节阀一个固定开度信号,在一个规定的时间内,注入无自衡能力的单容对象内的液体体积增量是可以测试的。为此,在这个开度下对应的平均流量 Q 由式(3.1)确定。

$$Q = Sh/t \tag{3.1}$$

式中 Q — 平均体积流量 kg/s ;
 S — 圆柱形水箱的截面积 m^2 ;
 h — 液位高度 m ;
 t — 规定的时间 s 。

改变阀门的开度(即改变控制电流的大小)就可测得不同阀门开度下对应的流量。设采集到的流量序列为 Q_i , 电流序列为 I_i ($i = 1, 2, \dots, n$; n 为采集点数)。考虑到阀门的控制作用应有正反方向的区分,可选择阀门 50% 的开度作为零点,根据测试数据的形态可粗略划分出死区、线性区和饱和区。对于线性区可应用最小二乘法进行 Q, I 的拟合,其公式为式(3.2)、式(3.3)。

$$Q = Q_0 + K_I I \tag{3.2}$$

则

$$\hat{I}_1 = \frac{L_{IQ}}{L_{II}}, \quad \hat{Q}_0 = \bar{Q} - \hat{I}_1 \bar{I} \tag{3.3}$$

其中

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i, \quad \bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i, \quad L_{IQ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i Q_i - n \bar{I} \cdot \bar{Q}, \quad L_{II} = \bar{I}^2 - n \bar{I}^2$$

常用的动态特性实验测试方法有阶跃干扰法和矩形脉冲干扰法(详见相关教材, 这里不再赘述)。此时系统运行于在线仿真的开环状态。

本实验采用阶跃干扰法测定双容对象或三容对象的动态特性。在调节阀的控制端加一阶跃信号, 随即记录对象输出参数随时间变化的过渡过程曲线, 即阶跃响应曲线, 利用响应曲线的数据并应用 1.3 节“对象传递函数的实验测定”中介绍的方法求得广义对象的静态增益和时间常数。

3. 实验内容

- 1) 测试阀门的流量特性, 方法是逐步改变阀门的控制电流, 并在规定的时间内测定单容水箱的液位高度, 按实验原理介绍的方法建立阀门的流量特性;
- 2) 测定惯性环节的动态模型, 应用阶跃干扰法测定双容和三容水箱广义对象的动态特性。

4. 实验装置的配置

测试阀门流量特性时, 应关断 V1 和 V4 手动阀, 控制 V7 调节阀, 以使 T1 容器成为无自衡能力的单容对象。如选用 T2 容器作对象, 配置装置的原则是相同的。

测试双容惯性环节的动态特性时, 关闭 P2, 启动泵 P1, 调节阀 V7 控制输入的大小, T3 的液位选择作为系统输出。同时应关断 V2 和 V4 手动阀, 打开 V1 和 V5 手动阀, 此时被控对象为单输入单输出的双容惯性对象。控制输入不经过控制器直接作用在控制阀上, 此时系统结构框图如图 3.16 所示。

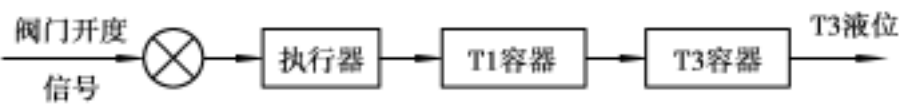


图 3.16 双容对象动态特性测试图

测试三容惯性环节的动态特性时, 关闭 P2, 启动 P1, 调节阀 V7 控制输入的大小, T2 的液位选作系统输出。手动阀 V1, V2, V4, V5 和 V6 全部关闭, V3 打开。此时被控对象为单输入单输出的三容惯性对象, 控制输入不经过控制器直接作用在控制阀上, 此时系统结构如图3.17 所示。



图 3.17 三容对象动态特性测试图

5. 实验前预习要求

- 1) 熟悉本实验所用实验装置、控制系统和 Simulink 的使用方法;
- 2) 复习对象特性实验测试原理和数据处理方法;
- 3) 仔细阅读本实验指导书;

4) 对要求记录的项目和数据要做到心中有数。

6. 实验步骤

(1) 测试调节阀流量特性

- 1) 在 GUI 对应下拉菜单处选择“ 对象特性测试 ”;
- 2) 关闭手动阀 V1, V4, 在 GUI 上改变控制器的控制电流, 启动 P1, 关闭 P2。测出 1 min 内 T1 的液位高度, 将控制电流及对应液位值记录在下表中。其中实验时间及容器截面积已经在表中给出。

给定值/mA	20	18	16	14	12	10	8	6	5	4
稳态液位值/m										
实验时间 t/s	60		容器截面积 S/m ²					0.006 5		

注: 每次给定值改变, 都要打开 V1 阀, 排空 T1 中的水。

(2) 测试惯性对象的动态特性

排空 T1, T2 和 T3。选一个阀门开度, 测取双容水箱或三容水箱的飞升响应曲线, 将相应数据记录在下表中。具体时间选取需足够准确反映对象的动态特性(测试的数据存在 Matlab 的变量中, 可选用。)

时间/s								
液位值 /m								

7. 实验报告要求

(1) 数据处理

1) 测试调节阀流量特性实验数据处理

按式 3.3.1 计算出不同液位对应的流量。以控制器给定电流值为横坐标, 流量值为纵坐标, 绘出调节阀的流量特性曲线。可按实验原理介绍的方法, 以 50% 阀门开度作为零点, 观察流量特性是否存在较明显的本质非线性。也可以由所得数据序列应用 Matlab 的 poly 函数进行曲线拟合。

2) 对象动态特性实验数据处理

根据表 2 记录数据描绘广义对象的阶跃响应曲线, 可用 Matlab 打印出;
由响应曲线求出对象的静态增益 K、时间常数 T。方法可参考 1.3 节“ 对象传递函数的实验测定 ”;

根据求得的 K, T, 写出对象的传递函数;
将传递函数转换成时间函数, 绘出曲线与原响应曲线进行比较验证。

(2) 实验报告内容

- 1) 实验目的及要求;
- 2) 实验方案及控制线路图;
- 3) 整理实验原始数据, 按数据处理要求进行。绘出静态和动态特性曲线, 求出对象特性参数, 并分析实验结果;
- 4) 实验中出现的现象及其分析;

8. 思考题

- 对象特性包括哪些内容？具体含义是什么？
- 如何用实验的方法测定液位传感器的静态特性？
- 进行对象动态特性和静态特性测试时，要分别注意哪些问题？
- 结合本实验对象分析影响 $K, T,$ 的因素有哪些？彼此间有什么影响和联系？

实验 2 PID 控制系统的设计与调试

1. 实验目的

- 1) 掌握单输入单输出控制系统的组成方法；
- 2) 掌握控制系统串联校正的设计方法；
- 3) 掌握 P, I, D 参数的对控制质量的影响；
- 4) 了解工程上对参数整定的方法及过程并了解控制系统实际投运的方法。

2. 实验原理

串联校正是广泛采用的自动控制系统的的设计方法, PID 控制是串联校正在工程上的典型应用。在控制对象特性确定的情况下, 控制系统的控制质量在一定的程度上取决于控制器 PID 三参数的整定。所谓控制器的参数整定, 就是通过一定的方法和步骤, 确定控制器最佳整定参数, 即比例系数 K_p 、积分时间 T_i 和微分时间 T_d 的最佳组合形态。

根据自动控制原理可知, 控制系统的设计是建立在对象数学模型的基础上, 可采用时域法、根轨迹法和频率法等多种不同的方法进行。在 Matlab 的环境下设计过程很便于进行, 见第 2 章实验 5“ 线性系统串联校正 ”。对于大多数过程控制系统而言, 由于对象数学模型的近似性, 设计的结果往往不能完全满足实际的需要。要经过实验调试的过程, 才能确定出控制器参数的合理配置。通常将递减比为 4 : 1 的阶跃响应过程视为较理想的过程, 此时系统不仅具有适当的稳定裕度和快速性, 又便于人工操作管理。因此, 习惯上把满足这一递减比过程的控制器参数称为最佳参数。递减比定义为图 3.18 中 A 与 B 的比值。为接近这个目标, 有必要认识 P, I, D 三参数在控制中的内在作用。

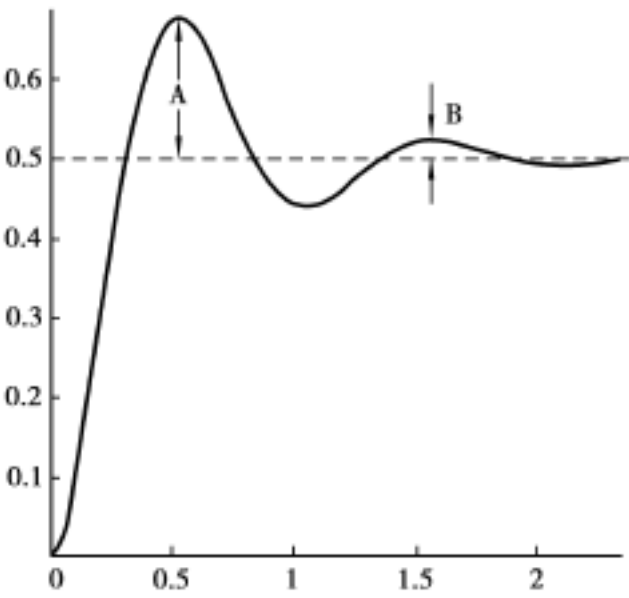


图 3.18 递减比的说明图

为接近这个目标, 有必要认识 P, I, D 三参数在控制中的内在作用。

PID 控制器是一种线性控制器, PID 的控制规律为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

- 式中 $e(t) = c(t) - r(t)$;
- $r(t)$ —— 给定值;
 - $c(t)$ —— 实际输出值。

PID 控制器的传递函数为

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right]$$

模拟 PID 控制器的结构如图 3.19 所示。

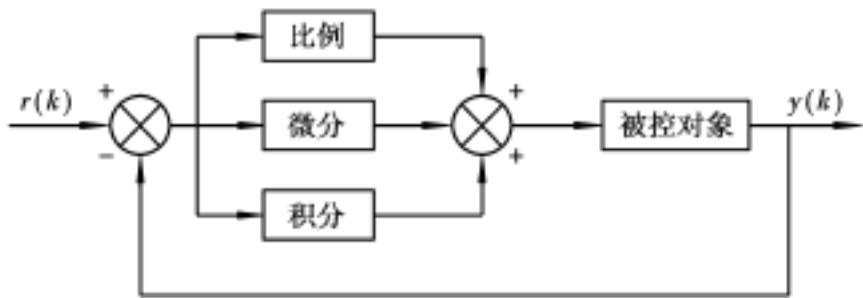


图 3.19 模拟 PID 控制器

一般地讲, PID 控制器个环节的控制作用如下:

比例作用: 系统的偏差反映到控制器的输入端, 即可产生控制作用。控制作用的大小与系统的偏差成比例。单纯的比例控制是一种有差控制。

积分作用: 主要是提高系统的型别, 用于消除稳态误差。积分作用的强弱用积分时间 T_i 表示, 积分时间小, 积分作用强。

微分作用: 反映偏差的变化趋势, 特别是当对象惯性过大时, 能在偏差出现太大之前提早产生控制作用。相对于纯比例控制而言, 对改善系统的动态特性有明显的作用, 有利于减小超调和缩短调节时间。微分作用的强弱用微分时间 T_d 表示, 微分时间大, 微分作用强。

从 PID 的传递函数也可进一步总结出, 初投 PID 控制器时, 切除积分作用和微分作用, 仅有比例作用。若不能满足动态指标要求, 可采用 PD 控制; 若 P 作用能满足动态指标要求, 而稳态误差较大, 则可采用 PI 控制。

PD 控制相对 P 控制增加了一个零点, 微分时间 T_d 越大, 该零点靠近虚轴。系统的阻尼比减小, 此时可减小 K_p 来调整动态性能。需注意微分时间 T_d 过大对抑制噪声干扰不利。

PI 控制相对 P 控制增加了一对零极点, 这对零极点能成为偶极子, 对系统的动态性能影响就较小。这要求积分时间大。因此加入 I 作用后, 积分时间 T_i 应由大到小逐步调整。调整的基本原则是, T_i 减小, 对缩短调整时间有利, 但系统的稳定裕度有所下降。应在稳定裕度和调整时间之间根据需要做出合理的选择。

PID 控制相对于 P 控制增加了两个零点和一个极点, 根据前述的介绍, 简单归纳成, 三作用投入的顺序依次为 P, D, I, 即先满足动态性能, 再考虑稳态性能。这样整定 PID 控制器类似分别整定 PD 和 PI 控制器。便于尽量减弱各参数间的相互影响, 使调试工作每个阶段的任务相对较明确, 不致过于混乱。

3. 实验内容及步骤

- 1) 根据本章实验一所测得的双容或三容对象的特性参数及由此得到的传递函数修改 threetankoffline.mdl 框图中对象传递函数的参数;
- 2) 分别应用 P, PI, PID 控制器对对象进行离线仿真, 根据实验原理中介绍的相关规律获得衰减比为 4 : 1 时对应的控制参数;
- 3) 用上一步得到的控制参数修改 threetankonline.mdl 控制器的参数, 手动调整液位输出至给定值附近后开始进行在线实时实验。通过开关 V4, V5 或 V6 可以对系统施加干扰。记录系统动态特性曲线;

- 4) 观察系统离线仿真和实时实验的动态特性曲线, 计算出响应曲线的各项性能指标;
- 5) 如果系统在线实时实验结果与离线仿真相距较大, 则分析原因, 调整控制参数反复进行 2, 3, 4, 5 步实验, 直到系统性能指标满足要求。

4. 实验装置的配置

图 3. 20、图 3. 21 为本实验采用的控制系统结构框图。

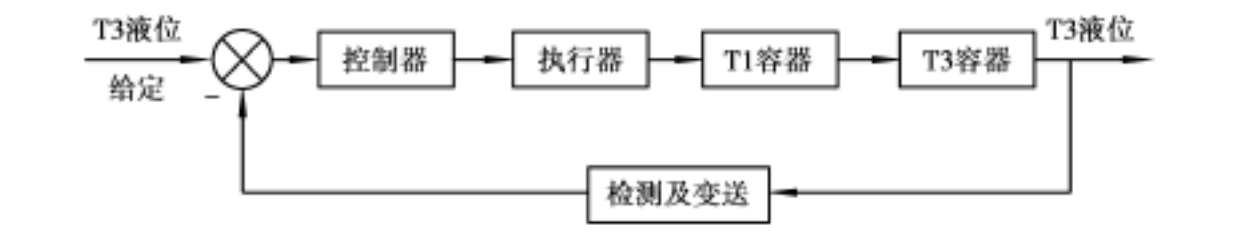


图 3. 20 双容对象控制系统结构框图

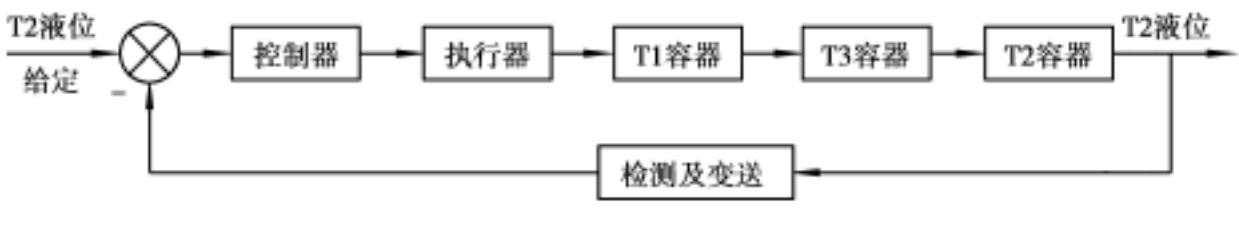


图 3. 21 三容水箱控制结构框图

5. 实验前预习要求
- 1) 熟悉应用 Matlab 进行控制系统分析的方法、命令;
 - 2) 熟悉对 Simulink 框图中的模块进行参数修改的方法;
 - 3) 对要求记录的曲线和数据应结合复习教科书的有关内容时, 认真分析和准备, 做到心中有数;
 - 4) 仔细阅读本实验指导书。
6. 实验注意事项
- 1) 实验前应认真检查所用实验装置、控制系统和变送器等工作是否正常;
 - 2) 应检查管道连接是否正确, 管路应无泄漏。并请指导教师确认无误后方能送电, 开始进行实验;
 - 3) 实验前应熟悉工艺流程, 搞清每个变送器、阀门的作用及安装位置, 做到心中有数, 以便熟练操作;
 - 4) 实验过程中, 应随时认真地观察各参数的变化情况, 准确记录每一个需要记录的数据; 同时注意观察各仪器设备的工作状况。若发现故障或异常情况, 应及时分析原因, 设法排除故障, 并立即报告指导教师;
 - 5) 注意观察并记录实验中所发生的现象, 认真思考和分析;
 - 6) 由于是液位对象, 可能出现加入微分作用后效果反而不良的现象, 可如实记录, 分析原因。

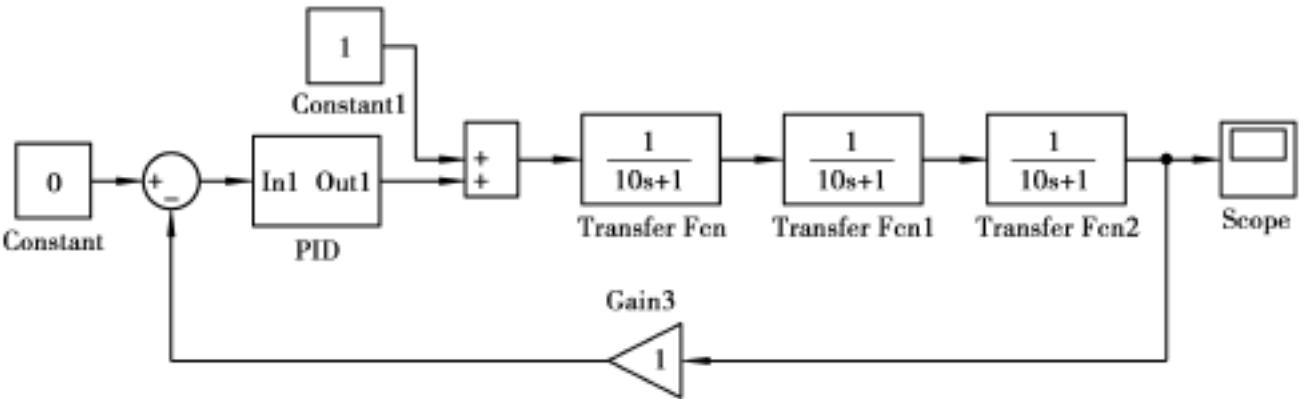
7. 实验报告要求

- 1) 整理离线仿真和在线实时实验的记录, 计算出各自相应的性能指标(超调量 $\sigma_p\%$, 衰减比和调节时间 t_s 等);
- 2) 分析 P, I, D 控制参数对系统稳定性及动态性能的不同影响;
- 3) 应用所学理论知识对实验中出现的现象进行分析和总结;

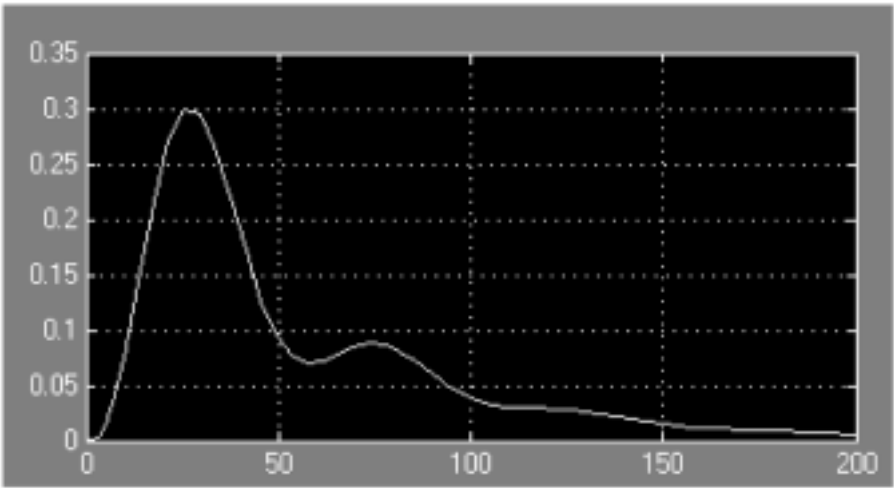
- 4) 回答思考题;
 - 5) 实验的体会与建议。
8. 思考题
- 1) 哪些因素在什么情况下会影响离线仿真与实时实验的结果相距较大?
 - 2) 如发生上问的情况, 请举例说明离线仿真应作哪些修改, 可取得与实时实验相一致的结果。
 - 3) 系统开始进行在线实验前为什么要先手动调整液位至给定值附近?
 - 4) PID 控制器的零极点位置与 K_p 、 T_d 、 T_i 之间存在什么关系, 简单规纳零极点位置随三参数变化的移动情况。

实验 3 反馈校正系统的设计与调试

1. 实验目的
- 1) 掌握反馈校正的目的和手段;
 - 2) 掌握反馈校正系统的结构和组成特点;
 - 3) 掌握反馈校正系统的设计和调试方法;
 - 4) 认识典型的反馈校正系统——串级控制;
 - 5) 学习串级控制中副参数的选择原则。
2. 实验原理
- 反馈校正通常改善对象的某些特性, 达到提高控制性能的目的。
- 对于图 3.21 所示的三容水箱控制系统, 如果扰动直接影响 T1 容器的液位(比如: 手动阀 V4 变化了一个开度), 这个变化要经过 T1, T3 及连接管道才能最终影响到 T2 液位, T2 液位作



(a) 三阶单回路控制系统Simulink程序图



(b) 三阶单回路控制系统阶跃扰动响应曲线

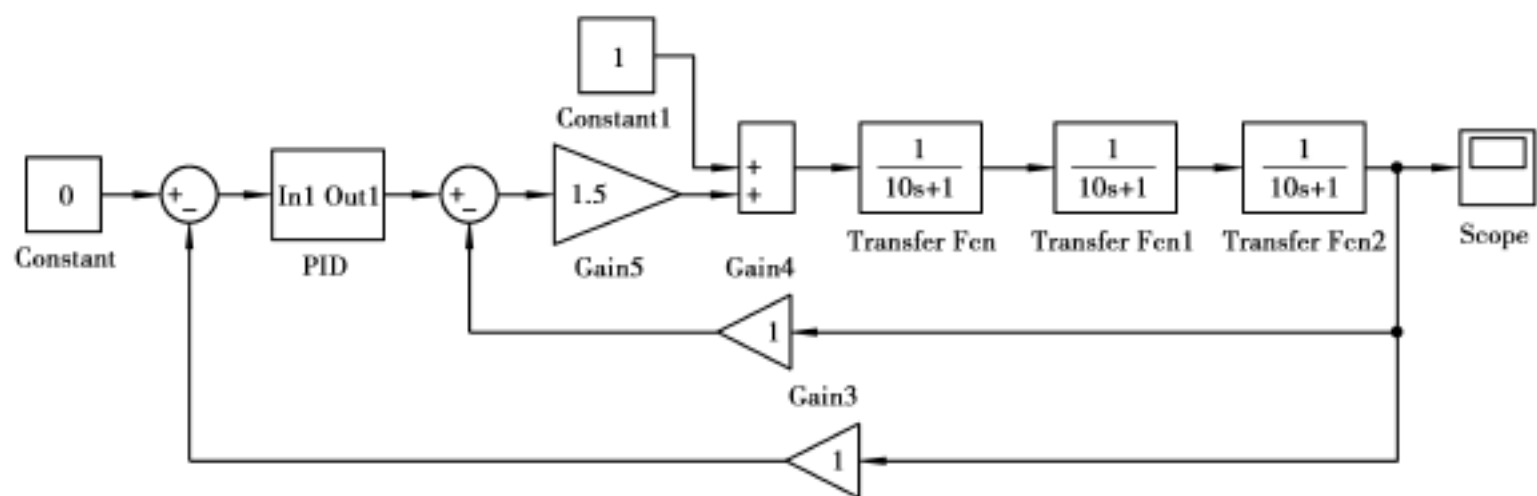
图 3.22

为主调节参数,在反映干扰的影响上明显有滞后。控制很不及时,也就是说,从扰动到 T2 液位这个通道上时间常数较大,不利于有效的克服扰动。在图 3.23 中,选用 T1 的液位作为副调节参数,当扰动产生时,就可及时的发出相应的控制作用;由 T1 所构成的反馈回路即反馈校正,也称为副回路,由 T2 构成的反馈回路称为主回路。比较图 3.22 和图 3.24 可以看出,在同样的干扰下,反馈校正之后超调明显减小,此时主控制器的参数与图 3.22 中控制器的参数相同。

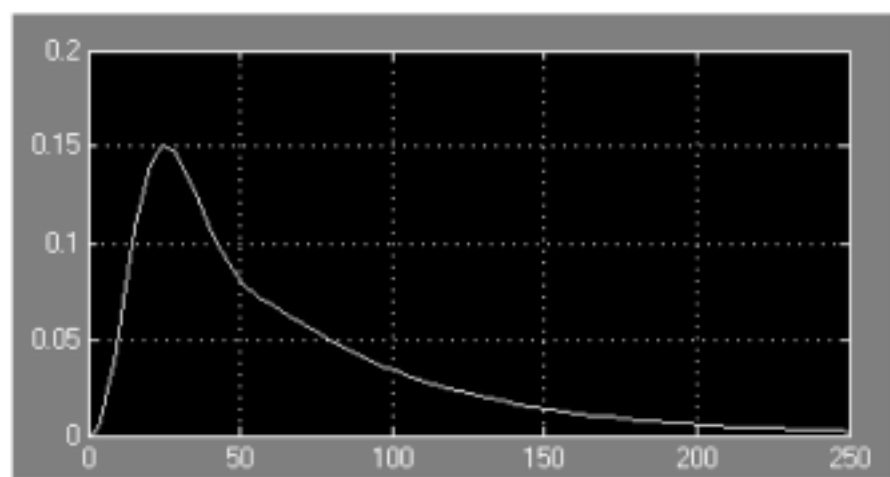
这里反馈校正的思想是把时间常数较大的被控对象分解为两个时间常数较小的被控对象,如 T1 可以作为第一个被控对象, T2 可以作为第二个被控对象,也就是在原被控对象中找出一个中间变量——T1 液位 L1, 它能提前反映扰动的作用,可使整个系统的被控制变量得到较精确的控制。如此得到的系统控制框图如图 3.23。



图 3.23 串级系统控制系统结构框图



(a) 三阶串级控制系统Simulink程序图



(b) 三阶串级控制系统阶跃扰动响应曲线

图 3.24

T1 液位控制质量要求不高,所以副控制器采用比例即可,比例系数一般经验值为 1.25 ~ 5。这样可将内环简化为一个环节,外环就可以作为单回路控制系统来进行分析。

3. 实验装置配置

T2 液位作为系统的主调节参数, T1 液位作为副调节参数, 调节阀 V7 作为执行机构, 手动阀 V4 可作为扰动加入的地点。按图 3.23 组成串级控制系统。

4. 实验前预习要求

1) 熟悉修改 Simulink 框图的方法;

2) 仔细阅读本实验指导书, 若干扰通过改变 V4 的开度引入系统, 预先提出离线仿真框图, 为完成实验做到心中有数。

5. 实验内容

1) 以 L1 为中间被控制变量, 对局部反馈系统进行离线仿真, 得到衰减比为 4:1 的控制器参数, 然后对系统进行在线实验。为完成离线仿真, 需根据上述的框图先完成有关对象的特性实验。有关的实验方案自行设计。

2) 比较上述局部反馈系统和 L2 为被控变量构成简单调节系统时的控制质量;

3) 分别比较以液位 L1 和 L3 为中间被控变量构成局部反馈系统时调节控制的变化;

4) 研究干扰分别加于 T1 和 T3 时, 局部反馈系统控制质量的变化。

6. 实验步骤

(1) 以 L1 为中间被控制变量的局部反馈实验

1) 以液位 L1 为中间被控变量, 液位 L2 为被控变量, 副控制器按经验值已经设为纯比例控制, 改变 threetankoffline.mdl 和 threetankonline.mdl 的结构。首先对系统进行离线仿真, 获得衰减比为 4:1 时对应的 P, I, D 参数值;

2) 手动调整液位输出至给定值附近后开始进行在线实时实验。通过开、关 V4, V5 或 V6 可以对系统施加干扰。记录每次控制参数改变时、干扰位置不同时的系统动态特性曲线;

3) 分析系统实时动态特性曲线, 计算出响应曲线的性能指标, 观察是否与离线仿真时的性能指标相接近;

4) 如果系统在线实时仿真结果不能满足性能指标要求, 则分析原因, 调整控制参数反复进行 1)、2)、3)、4) 步实验, 直到系统性能指标满足要求。

(2) 以 L3 为中间被控制变量的局部反馈实验

1) 以 L3 为中间控制被变量, 液位 L2 为被控变量, 副控制器按经验值设为纯比例控制, 改变 threetankoffline.mdl 和 threetankonline.mdl 的结构, 对系统进行离线仿真, 获得衰减比为 4:1 时对应的控制参数值;

2) 进行与(1)中 2)、3)、4) 步相同的实验。

7. 实验注意事项

1) 实验前应认真检查所用实验装置、控制系统和变送器等工作是否正常;

2) 应检查管道连接是否正确, 管路应无泄漏。并请指导教师确认无误后方能送电, 开始进行实验;

3) 实验前应熟悉工艺流程, 搞清每个变送器、阀门的作用及安装位置, 做到心中有数, 以便熟练操作;

4) 实验过程中, 应随时认真地观察各参数的变化情况, 准确记录每一个需要记录的数据; 同时注意观察各仪器设备的工作状况。若发现故障或异常情况, 应及时分析原因, 设法排除故障, 并立即报告指导教师;

5) 注意观察并记录实验中所发生的现象,认真思考和分析;

6) 由于是液位对象,可能出现加入微分作用后效果反而不良的现象,可如实记录,分析原因。

8. 实验报告要求

(1) 数据处理

整理实验记录曲线。

(2) 实验报告内容

1) 实验目的及要求;

2) 原始实验记录曲线;

3) 各项实验的原理图及实验过程;

4) 比较局部反馈控制与简单控制的控制质量;

5) 比较干扰位置变化时,局部反馈控制的控制质量;

6) 比较选用不同的中间被控制变量构成局部反馈控制系统时的控制质量;

7) 实验中出现的现象及其分析;

8) 回答思考题:

9. 思考题

本次实验中采用了哪些反馈校正措施?对系统特性作了哪些改善?

中间被控制变量该如何选择?

实验中,干扰是如何加入的?它与主被控量之间的传递函数如何表示?

在具体控制过程中遇到了哪些问题,你是如何解决的?

第 4 章

直线型倒立摆开放式试验平台

4.1 概 述

本章中的实验,选用小车倒立摆系统作为被控对象。当今,倒立摆系统已成为自动控制理论中的典型实验装置和物理模型。许多抽象的控制概念如控制系统的稳定性、可控性、系统收敛速度和抗干扰能力,都可以通过倒立摆系统直观的表现出来,而控制中的许多关键问题,如镇定问题,非线性问题,鲁棒性问题,随动问题及跟踪问题等,都可以以倒立摆为对象加以研究。在研究和验证控制算法时利用倒立摆系统进行仿真和实验,其稳定效果的好坏非常明了,控制算法的好坏一目了然。可以说,作为一个非线性自然不稳定系统,小车倒立摆系统已成为控制理论教学及开展各种控制实验的理想平台。

在实验室现有固高倒立摆硬件平台的基础上,本章为学生提供了开放式的软件实验平台,目的是使同学们能够理论联系实际,通过对倒立摆进行实际的控制来激发对控制理论的兴趣,加深对控制理论的理解;同时,该平台提供了较大的开发空间,鼓励学生在该实验平台上自主开发、设计新实验,对各种控制算法进行验证和研究,使学生的综合开发能力得到锻炼。

为方便学生进行设计型的综合实验,本章前两节对实验平台进行了详细介绍并辅之以相关的资料。另外,本章还提供了 4 个实验,包括一级倒立摆的状态空间极点配置和 LQR 控制,二级倒立摆的 LQR 控制和一级柔性连接倒立摆的控制。这些实验的设计旨在抛砖引玉,使实验人员了解实验的要求和基本过程,并可作为实验人员进一步开发的“模板”。

4.2 基于 GT400 运动控制卡函数库的实验平台

4.2.1 倒立摆系统硬件构成

本实验平台的硬件除 PC 机以外全部由深圳固高公司提供,其硬件框图如图 4.1 所示。

其中,倒立摆系统是由倒立摆本体、电控箱及运动控制卡和普通 PC 机等 3 大部分组成的

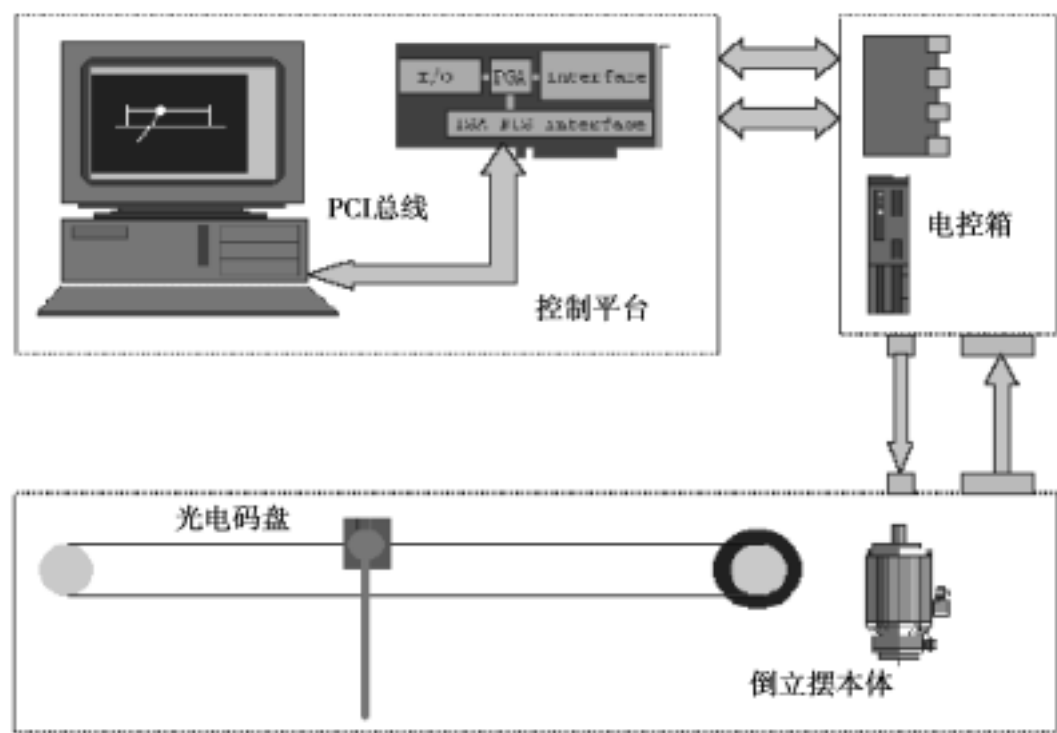


图 4.1 深圳固高倒立摆系统硬件框图

控制平台。图中光电码盘 1 由伺服电机自带,对于直线型倒立摆,小车的位移可以通过对码盘的编码值进行换算得到,速度信号可以通过对位移的差分得到。各个摆杆的角度由光电码盘测量并直接反馈到控制卡,而角速度信号可以通过对角度的差分得到,计算机从运动控制卡中实时读取数据,确定控制决策(电机的输出力矩);并发给运动控制卡,运动控制卡经过 DSP 内部的控制算法实现该控制决策,产生相应的控制量,使电机转动,驱动小车按控制要求进行运动,以达到控制目的。

4.2.2 倒立摆系统控制的软件实现

固高公司生产的 GT 系列运动控制器,可以同步控制四个运动轴,实现多轴协调运动。其核心由 ADSP2181 数字信号处理器和 FPGA 组成,可以实现高性能的控制计算。该运动控制器提供 C 语言函数库实现复杂的控制功能,用户能够将这些控制函数与自己控制系统所需的数据处理、界面显示、用户接口等应用程序模块集成在一起,建造符合特定要求的控制系统。

运动控制器函数库的使用

运动控制器提供 DOS 下的运动函数库和 Windows 下的运动函数动态链接库。用户只要调用运动函数库中的函数,就可以实现运动控制器的各种功能。下面讲述 Windows 系统下函数库的使用(DOS 下函数库的使用请参看《GT400 运动控制器编程手册》)。

windows 下的动态链接库存放于固高产品配套光盘的 windows\dll 下,共 3 个文件,分别为 gtdll.h, GTDLL.lib, GTDLL.dll。这些文件是用 VC++ 编写的。为方便大家编程,对于目前经常使用的高级编程语言: VC, VB, Delphi, 动态链接库全部给予了支持,使用方法如下:

- 1) VC 中的使用
- 在用户程序中加入:
#include "Gt400.h"
#include "gt400data.h"
- 并在 VC 环境菜单中,选择 project—setting—link, 在 Object/library modules 中输入 gt400.lib, 然后用户即可在程序中调用动态链接库中函数。

2) VB 中的使用

用户可根据板卡的总线类型, 将光盘中 Windows\VB 目录下提供的 GTDeclarPCI. bas 加入用户的工程中, 即可直接调用。

3) Delphi 中的使用

用户可将光盘中目录 Windows\Delphi 下提供的 GTFunc. pas 加入用户的工程文件中, 即可直接调用。

至此, 程序员可以选择一种自己熟悉的高级语言进行程序的编写, 通过调用运动函数库提供的函数来方便地控制小车的运动, 进而控制摆的运动状态, 以验证控制算法。

常用运动库函数简介

GT_Open() 打开运动控制器设备
与其对应的函数是: GT_Close(), 关闭运动控制器设备, 在程序结束时必须调用此函数。

GT_SetSmplTm() 参数 Timer 的单位是微秒
运动控制器以特定的控制周期刷新控制输出。因为运动控制器在控制周期内要完成必要的控制计算, 控制周期不能太小。运动控制器默认的控制周期是 200 微秒, 这个控制周期对于普通的用户能够安全可靠的工作。

GT_LmtSns() 设置限位开关有效电平
运动控制器通过两个限位开关自动地设定控制轴的运动范围。一旦限位开关被触发, 运动控制器自动地禁止控制轴朝越限的方向运动。运动控制器默认的限位开关为常闭开关。即正常工作时, 限位开关信号为低电平; 限位开关触发时, 限位开关为高电平。可以通过该函数来改变限位开关有效电平。

GT_Axis() 设置当前轴
运动控制器可以同时控制四个控制轴, 并且控制轴可以独立设置参数。为了提高主机与运动控制器的通讯效率, 运动控制器采用控制轴寻址的策略。在调用单轴命令时, 都是作用于当前轴的, 运动控制器默认的当前轴为第一轴, 要想对其他轴发送命令, 首先要调用设置当前轴命令。

GT_ClrSts() 清除当前轴状态
GT_AxisOn() 当前轴驱动使能
GT_CloseLoop() 设置为闭环控制

调用该命令后, 当前轴工作在闭环方式, 运动控制器将当前规划的运动位置、速度、加速度送入数字伺服滤波器, 与反馈的实际位置进行比较获得控制输出信号, 使小车达到期望的运动状态。

设置数字伺服滤波参数
数字滤波器的作用是使伺服电机快速、精确、平稳的达到设定的速度, 加速度以及目标位置。GT 运动控制器采用 PID 数字伺服滤波器, 外加速度和加速度前馈, 即 $PID + K_{vff} + K_{aff}$ 滤波器。调节各参数, 该滤波器能对大多数系统实现精确而稳定的控制。滤波器原理如图 4. 2 所示。

函数库提供了一系列用于设置当前轴伺服滤波器参数的函数, 为了方便实验人员快速开发程序, 本节给出了这些函数, 并给出各个参数的参考设定值, 以缩短开发人员调试参数的时间。见表 4. 1。

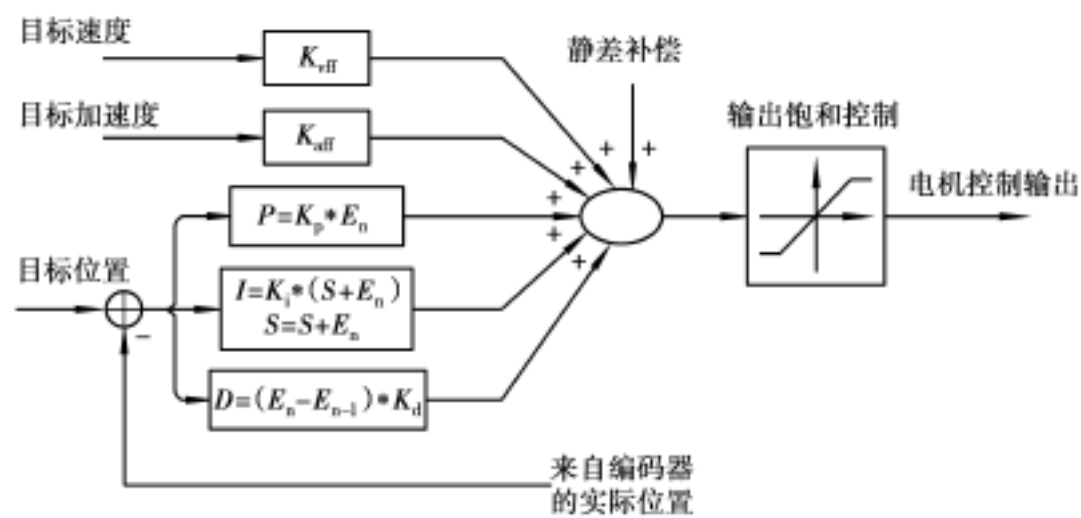


图 4.2 数字伺服滤波器的原理图

表 4.1 伺服滤波器参数设置函数

函数名	功 能	参考取值
GT_SetKp()	设置比例增益	3
GT_SetKi()	设置积分增益	0
GT_SetKd()	设置微分增益	10
GT_SetKvff()	设置速度前馈增益	0
GT_SetKaff()	设置加速度前馈增益	0
GT_SetILmt()	设置误差积分饱和值	5 000
GT_SetMtrLmt()	设置输出饱和值	32 767
GT_SetMtrBias()	设置输出零点偏移值	305

速度控制模式

运动控制器针对单轴运动提供 4 种运动控制模式: S 曲线模式、梯形曲线模式、速度控制模式、电子齿轮模式。某一种运动模式设定后,该轴保持这种运动模式,直到设置新的运动模式为止。对于各模式之间的切换,除电子齿轮模式之外,其他模式必须是在当前轴运动完全停止的情况下进行。否则命令视为非法,控制器设置命令出错状态标志。控制器中的不同的轴可以工作在不同的运动模式下。对于不同的控制模式,需要设置不同的运动参数。由于很多控制系统只需要控制小车的加速度和小车的最大速度,在控制系统中用得比较多的是速度控制模式,在该模式下,开始运动时将以设定的加速度连续加速到设定的最大速度,运动方向由最大速度的符号确定,即正速度产生正向运动,而负速度则产生负运动。在运动过程中,这两个参数可以随时修改。其相关的库函数有

GT_SetMAcc() 设置当前轴最大加速度

GT_SetVel() 设置当前轴的目标速度

单轴运动停止

在某些情况下,为了安全起见,或为了实现某些特定的运动轨迹,需要某些位置或某个时刻使运动停止,运动控制器对于单轴运动提供两种方法实现这一功能:急停和平滑停止。

GT_SmthStp() 平滑停止当前轴的运动

急停命令使单轴运动立即停止,同时速度设为 0。加/减速控制器也停止工作。当不需要减速过程而希望紧急停止控制轴的运动时,通常采用该命令。急停命令在单轴的四种运动控制模式下都有效

GT_AbptStp() 立即停止当前轴的运动

平滑停止命令使单轴运动平滑终止。此时,控制轴运动以设定的加速度减速直到速度为 0,减速过程与加速过程对称。该命令需与 GT_Update() 或 GT_MltiUpdt 函数结合使用才能生效。

GT_Update() 实现当前轴立即刷新,使当前轴的运动参数或缓冲区命令生效

GT_MltiUpdt() 实现多轴运动参数(命令)立即刷新

即多个控制轴同步刷新参数(命令)。在希望多个控制轴运动同步的情况下,可以采用此命令来实现多控制轴运动同步。

这里仅介绍了一些使用频率较高的库函数,其他有关库函数的详细说明请参看《GT400 运动控制器编程手册》。

4.3 基于 Simulink 环境的实时控制平台

在 Matlab 环境下进行控制系统的设计、分析和综合已经成为很方便的事,但对系统的计算机实时控制往往都是在 DOS 或 Windows 环境下编制特定的控制程序。本平台扩充了 Simulink 模块库,提供了 Simulink 中的倒立摆实时控制工具包,并给出了直线一级倒立摆和二级倒立摆的 LQR 控制模型。

4.3.1 实时控制平台的开发过程及实现原理

概述

一般情况下,计算机实时控制软件通常是在 DOS 环境下实现的,因为 DOS 是一个单任务操作系统,控制软件能够独占 CPU 等系统资源,使得计算机控制程序以比较精确的采样周期对系统进行采样,并计算得到当前控制量,从而实现实时控制。然而,采用 DOS 进行实时控制软件的编制很费事,而且很多代码都花在控制程序界面的显示更新上;对实验所得数据的后期处理也不是很方便。而 Matlab 和 Simulink 在控制系统的建模与仿真领域的应用已经非常广泛,其中 Simulink 凭借其强大的仿真能力和数据显示能力受到了控制工程师们的青睐。

本平台没有安装和利用 Matlab 中的 RTW,也没有安装操作系统实时内核。由于 Matlab 是一个开放式的软件环境,可以通过添加 M-Fuction 和 S-Funtion 写成的工具包不断扩展和增强其在本实验平台中的功能,结合实验平台的可扩展性和可持续性开发,运用一系列 S-Fuction,开发出了 Simulink 中的倒立摆实时控制工具包(Inverted Pendulum Toolbox),扩充了 Simulink 模块库,实现了在 Simulink 环境中倒立摆的实时控制以及对控制结果进行图形化的分析,极大的提高了控制系统的设计效率,使研究人员和实验人员可以将主要精力放在控制算法的研究及控制效果的分析上。

Inverted Pendulum Toolbox 工具箱的开发

整个工具箱的开发仍然是在固高公司提供的硬件体系结构下进行的。在运动控制器中已

经提供了用 C 语言写成的各种命令的函数库。为了能在 Matlab/Simulink 环境下使用这些函数功能, 依照 Matlab 中 S-Function 的规范给需要使用的板卡库函数包上一层 S-Funtion 函数的外壳, 通过编写 S-Function 和 M-Function, 扩充 Matlab 工具箱。利用易于硬件读写编程的 C 语言编制程序直接和控制板卡打交道的 S-Function 模块, 就可以在 Simulink 环境中用这些模块搭建成控制系统, 从而实现在 Simulink 环境下对被控系统进行实时控制的目的。

这样做可以实现该平台后期的可持续开发, 如: 假设倒立摆系统的硬件有变更, 可以根据需要, 按规范自行封装 S-Funtion, 从而完成对工具箱的更新。

实验平台实时性的实现

实时控制系统中时间是最重要的因素, 程序要求和“真实”时间有某种同步关系。为了在 Simulink 环境中取得这种同步关系, 构建了 Simulink 下的实时控制模型, 原理是通过获取并计算计算机系统的两次绝对时钟时间之差得到均匀的实时控制周期。实验表明, 这种软件定时的方法在性能较高的计算机(如主频为 600 MHz 的计算机)上能够取得毫秒级的定时精度, 完全可以用于被控对象的计算机实时控制上。

4.3.2 Inverted Pendulum Toolbox 常用模块简介

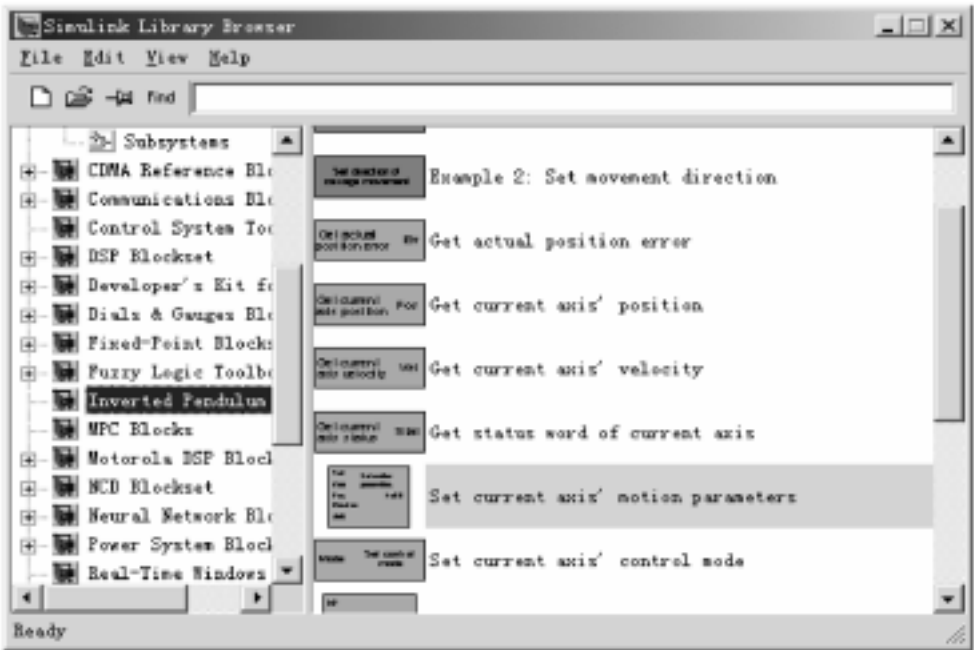


图 4.3 Simulink 中扩展的 Inverted Pendulum Toolbox

Set initial parameters
对运动控制卡的必要的参数进行初始化, 是实时控制必不可少的一个环节。该模块执行后, 伺服驱动器开始工作, 在控制模型开始运行的时候, 该模块仅运行一次。如需对初始化参数进行修改, 只需改写 pend.h 文件中的相应参数即可。

Get current axis ' position
得到当前运动轴的位置值。该值以编码器的数值给出, 若需要换算成米, 需要乘上相应的比例系数。

Set digital filter parameters
设置数字滤波参数。其输入依次为 K_p , K_d , K_i , K_{VFF} 。

Set profile mode
设置运动曲线模式。输入为一常量, 其中, 0 为 S 曲线运动模式, 1 为梯形曲线模式, 其他

值为速度模式。系统默认为速度模式。

Set current axis ' motion parameters

设置当前轴的运动方式。在速度运动模式下, 需要依次输入两个常数, 分别为给定的速度和加速度。

MATLAB Function

该模块是实时控制系统所必需的。其保证了试验平台实时性的实现。其所作的工作即为第 4.3.3 节所讲述的内容。

除上述主要模块外, 该试验平台还给出了一些 demo, 如直线一级摆的 PID 控制, 一级摆和二级摆的 LQR 控制。开发者可参照上述 demo 的结构很方便对实际系统的模型进行搭建和控制算法的开发。

由于基于 Simulink 的实时控制平台具有直观、方便而且人机交互界面良好等特点, 推荐对 C/VC 不熟悉的实验人员使用该平台。

4.3.3 Inverted Pendulum Toolbox 使用举例

本节通过介绍演示实验 Single pendulum PID control Demo 来介绍本平台的使用方法。
首先, 启动 Matlab 6.1, 点击工具栏中 Simulink 图标(或直接在命令行中输入 Simulink) , 启动 Simulink, 打开 Inverted Pendulum Toolbox, 找到 Single pendulum PID control Demo, 如图 4.4 所示。

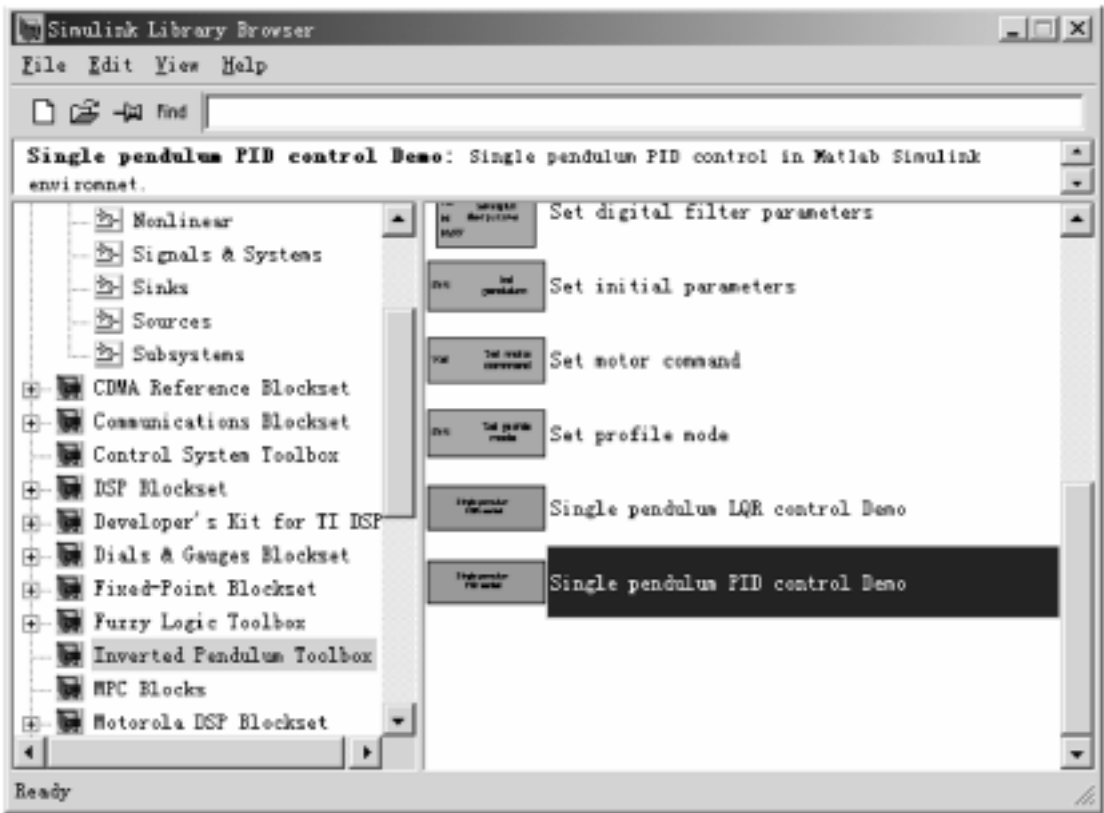


图 4.4 在 Simulink 中打开 Inverted Pendulum Toolbox

模型结构及模块功能简介:

双击打开 Single pendulum PID control Demo 模型, 如图 4.5 所示。

可以看出, 该模型包含 Clock, STEP_SIZE, MATLAB Function 3 个模块和 Pendulum Initialization, Start Real Pendulum Control 两个子系统。

下面分别进行介绍:

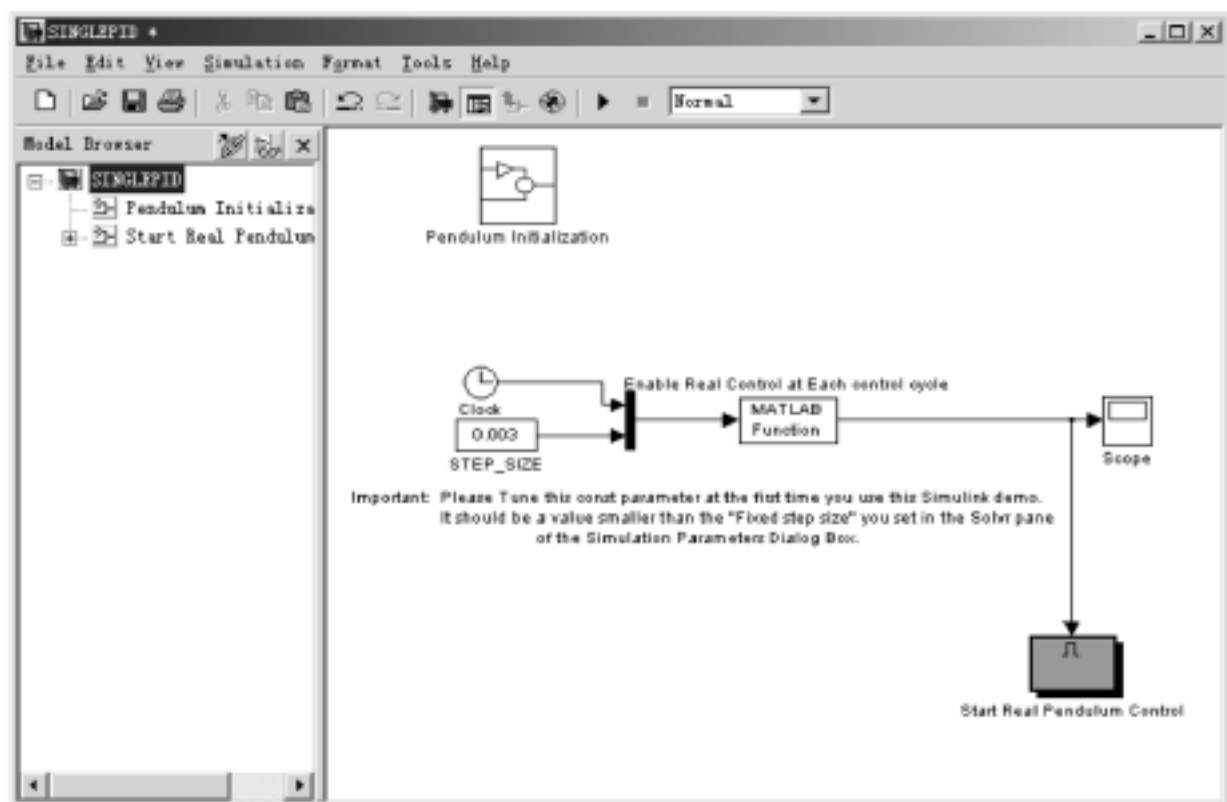


图 4.5 Single pendulum PID control Demo 模型

STEP_SIZE 用于决定计算机进行两次实时控制之间的时间差, 即控制周期, 而 Clock 模块用于提供 CPU 的绝对时间。MATLAB Function 是一个 m 函数, 将系统的绝对时间变换成以 STEP_SIZE 为周期的尖峰脉冲形式输出(可在 Scope 中进行观察), 用来使能条件子系统 Start Real Pendulum Control, 以实现每隔 STEP_SIZE 时间间隔进行一次实时控制。

Pendulum Initialization 子系统对倒立摆系统进行初始化, 包括对模型参数的初始化和运动模式的初始化。双击打开子系统, 其内部结构如图 4.6。

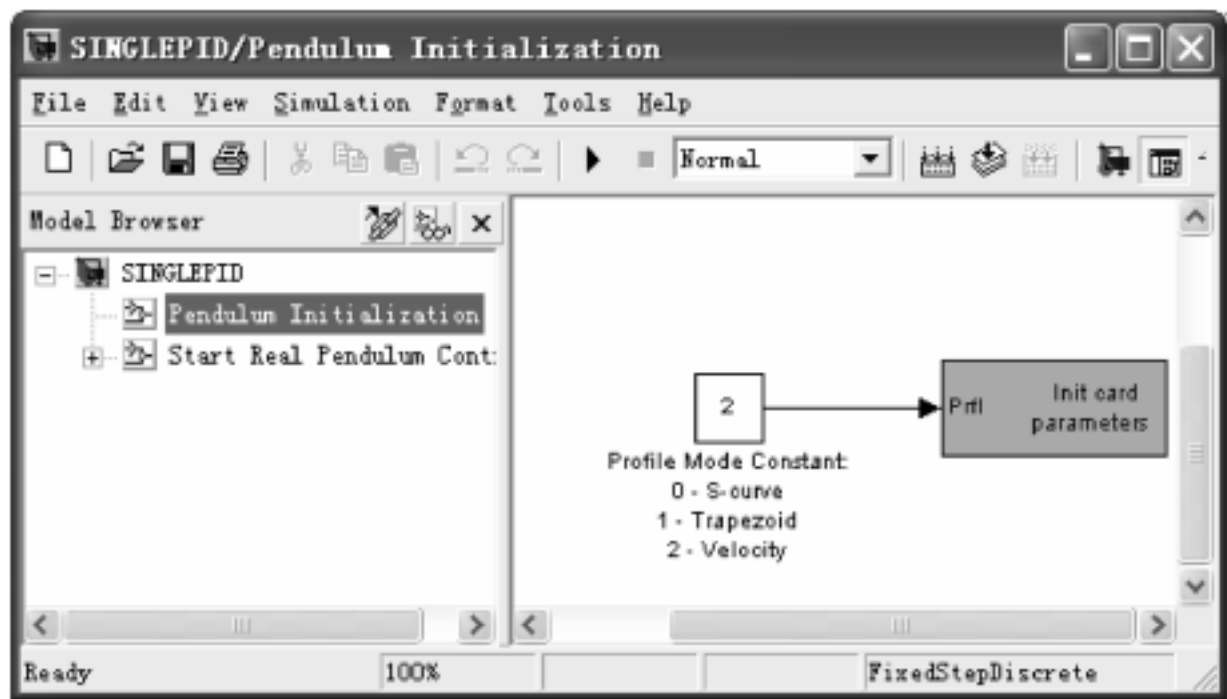


图 4.6 Pendulum Initialization 子系统内部模块

Start Real Pendulum Control 子系统按既定的控制算法执行一次实时控制, 其内部结构如图 4.7 所示。

同其他实验一样, 该子系统的搭建包含 3 大部分, 它们是本实验平台下搭建实时控制系统不可或缺的 3 部分(实验人员可以模仿这种搭建方法, 开发各种实验模型):

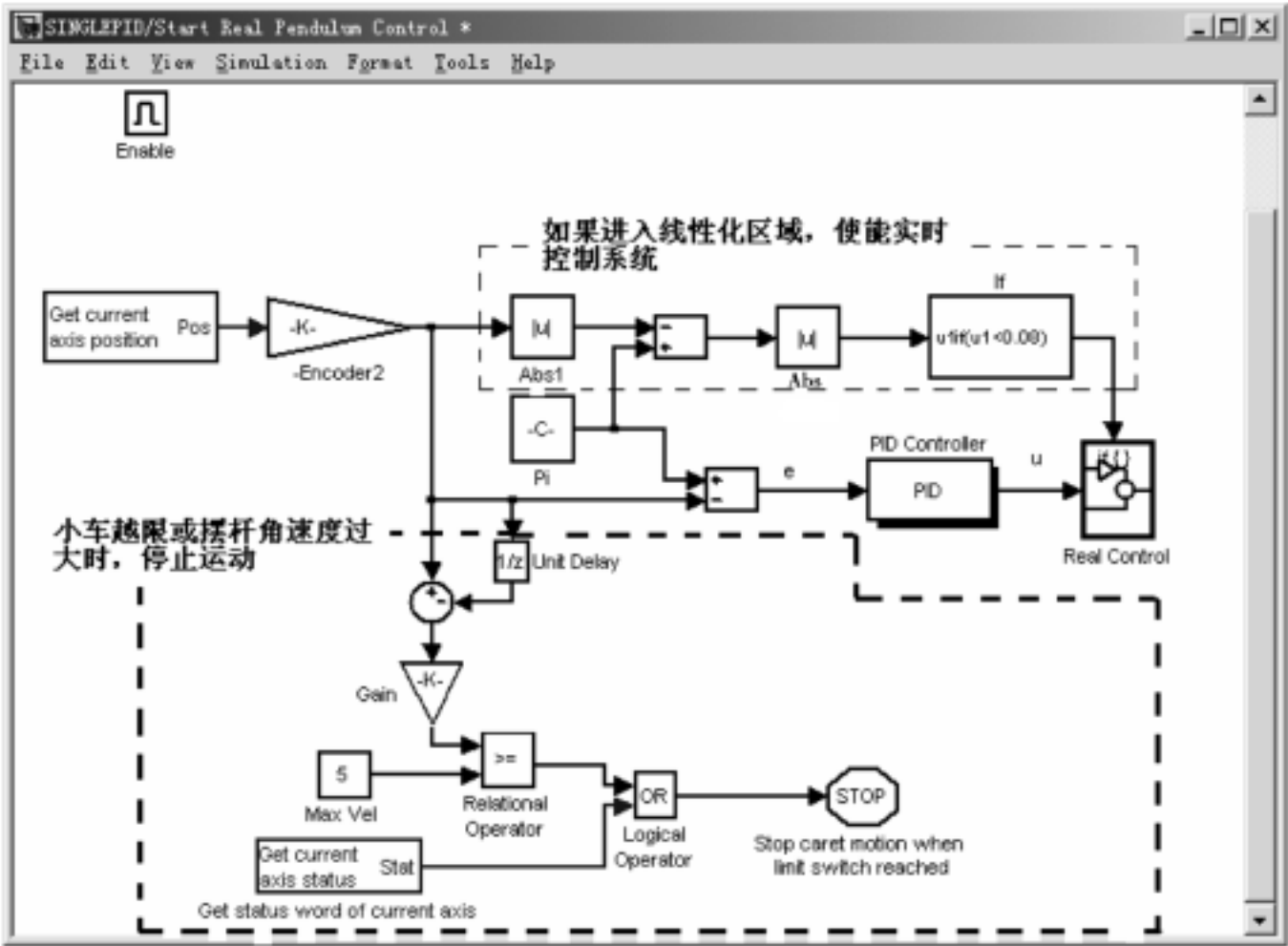


图 4.7 Start Real Pendulum Control 子系统

(1) 粗虚线框内部的模块, 是对小车倒立摆系统的保护措施。其通过对摆杆的角位置信号取一阶差分得到摆杆的角速度, 当角速度大于 5 rad/s 时, 或者当小车达到极限位置时, 即停止对系统的实时控制。

(2) 细虚线框内部的模块, 用于判断摆杆的位置是否进入到了线性化的区域内, 如果进入到线性化区域, 则使能实时控制。

(3) 余下的部分, 构成了反馈控制系统: 以 为给定信号, 与摆杆的实际位置比较得到偏差信号, 作为控制器的输入。控制器选用 PID 控制算法, 以小车运动的加速度作为输出信号, 送给执行器(Real Control 子系统)。

该子系统还包含一个 Real Control 的条件子系统, 其作用相当于控制系统中的执行器, 当摆杆的位置在线性化的区域内时, 以小车的加速度为信号, 驱动小车运动。

实验的主要步骤:

(1) 配置仿真参数

本组实验中主要是对求解器属性页进行设置。在 Simulink 菜单栏中选择 Simulink Parameters 选项, 弹出对话框如图 4.8 所示。

该属性页包含仿真时间, 求解器和积分步长的设置, 实验人员可根据具体的情况进行设置。本演示实验中的设置情况如图 4.8 所示。

(2) 设定实时控制的周期

双击 STEP_SIZE 模块, 设置实时控制的周期, 默认周期为 0.012 s, 实验人员可根据需要修改, 但一定要小于求解器中设定的积分步长值。

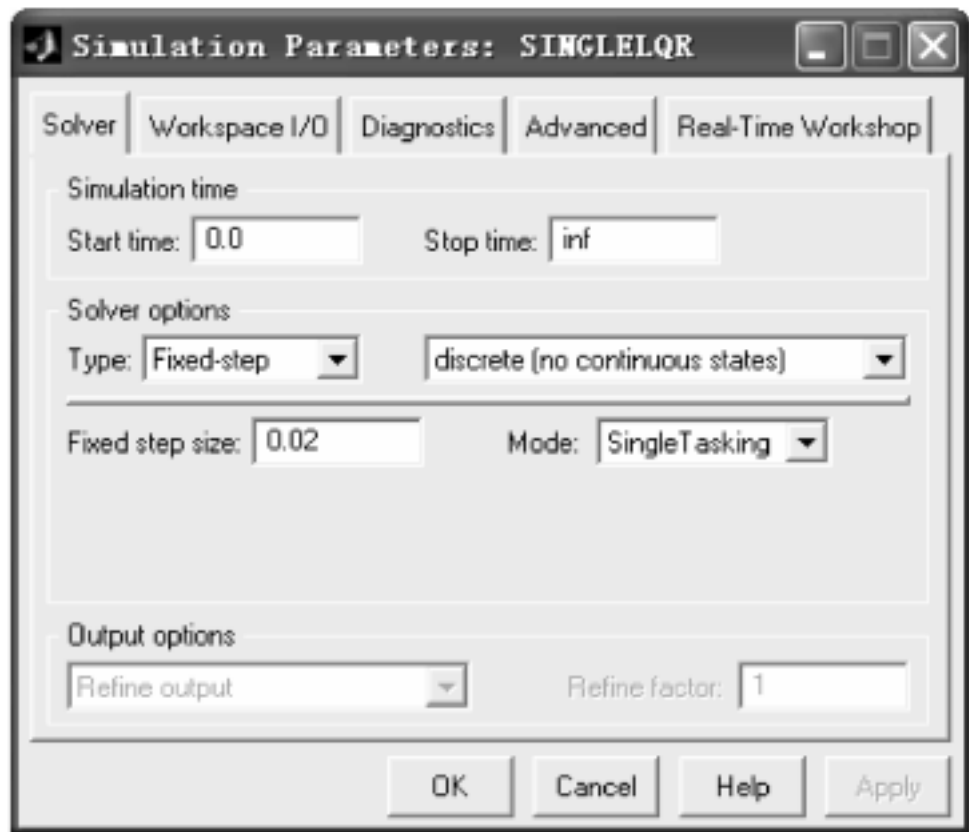


图 4.8 Simulink Parameters 中 Solver 属性页

(3) 开始实验

首先在 Matlab 的环境下进行离散仿真, 选择响应效果比较好的几组 PID 参数, 进行在线实验。双击 PID 控制器模块, 即可对参数进行设定, 如图 4.9 所示。

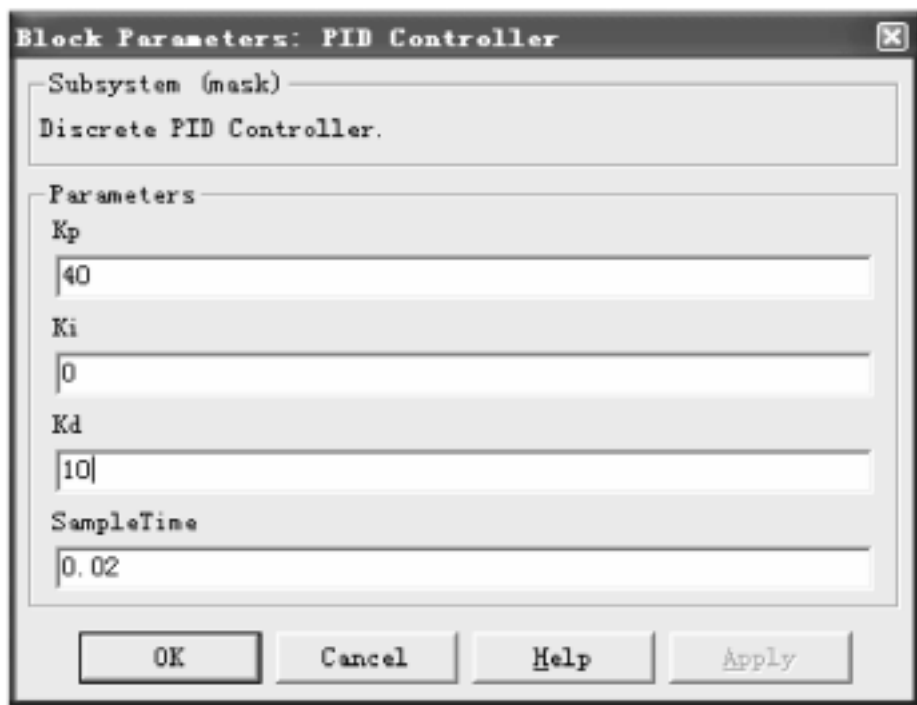


图 4.9 PID 控制器参数设定

设定完成后, 点击工具栏中“ Start simulation ”按钮, 即可进行在线实验了。

4.4 实验项目及其指导

实验 1 状态空间极点配置

在现代控制理论中, 极点配置算法通过设计状态反馈控制器将多变量系统的闭环极点配置在期望的位置上, 从而使系统满足瞬态和稳态性能指标。本实验将针对直线型一级倒立摆系统应用极点配置法设计控制器。由于建立一级倒立摆非线性动力学方程较为容易, 本实验原理中略去了建立动力学方程的过程, 而将重点放在对极点配置算法的介绍上。

1. 实验原理

假设已经建立了倒立摆系统的非线性动力学方程:

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{mL(m+M)g}{I(m+M)+mML^2} - \frac{mL}{I(m+M)+mML^2}u \\ \ddot{\theta} = -\frac{m^2L^2g}{I(m+M)+mML^2} + \frac{I+mL^2}{I(m+M)+mML^2}u \end{cases}$$

上述方程中各符号的含义及在本系统中实际的数值见表 4. 2。

表 4.2 动力学方程中各符号含义

符 号	意 义	数 值	单 位
M	小车质量	1.096	kg
m	摆杆质量	0.109	kg
b	摩擦系数	0.1	N · s · m ⁻¹
L	转轴到摆杆质心的长度	0.25	m
I	摆杆转动惯量	0.003 4	kg · m · m
x	小车位置坐标		m
	摆与垂直方向的夹角		rad

取摆杆的角度、角速度以及小车的位置和速度为状态变量, 得状态向量:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$

则线性系统的状态方程为

$$\dot{x} = Ax + Bu, \text{ 其中}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{mL(m+M)g}{I(m+M)+mML^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{m^2L^2g}{I(m+M)+mML^2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{mL}{I(m+M)+mML^2} \\ 0 \\ \frac{I+mL^2}{I(m+M)+mML^2} \end{bmatrix}$$

选择摆杆的倾斜角度 和小车的水平位置 x 作为倒立摆杆/小车系统的输出, 则输出方程为

$$y = \begin{bmatrix} \theta \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = Cx$$

至此, 在本实验中建立了一级倒立摆系统的状态空间描述。

为实现系统的闭环控制, 我们引入状态反馈, 当参考输入为零时, 其系统框图如图 4. 10 所示。

如图所示, 设反馈增益矩阵为 $K = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$, 则采用状态反馈后, 改变了原状态方程, 但输出方程不变。简记闭环系统为 $k = [(A+BK), B, C]$, 则该系统的控制率为

$$u = Kx = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + k_4 x_4$$

$$= k_1 \theta + k_2 \dot{\theta} + k_3 x + k_4 \dot{x}$$

可以看出, 确定控制率, 只需确定增益矩阵 K 即可, 下面介绍如何采用极点配置的方法确定 K 。

根据线性系统理论, 采用状态反馈时闭环极点配置在任意位置上的充要条件是受控对象的 (A, B, C) 完全能控。通过计算受控对象的能控性矩阵(请读者自行计算), 可以判断该受控对象完全能控, 故可以对闭环极点任意配置。

其中, 闭环系统的特征多项式为 $f(s) = \det[sI - (A+BK)]$, 令 $f(s) = 0$, 可以得到 s 的四次代数方程:

$$s^4 - (ck_2 + dk_4)s^3 - (a + ck_1 + dk_3)s^2 + (ad - bc)k_4s + (ad - bc)k_3 = 0 \quad (4.1)$$

其中

$$a = \frac{mL(m+M)g}{I(m+M)+mML^2}, \quad b = -\frac{m^2L^2g}{I(m+M)+mML^2}$$

$$c = -\frac{mL}{I(m+M)+mML^2}, \quad d = \frac{I+mL^2}{I(m+M)+mML^2}$$

适当选择反馈系数 k_1, k_2, k_3, k_4 , 系统的特征根可以取得希望的值。

将 4 个期望极点 p_1, p_2, p_3, p_4 设为四次代数方程(4. 1) 的根, 则有

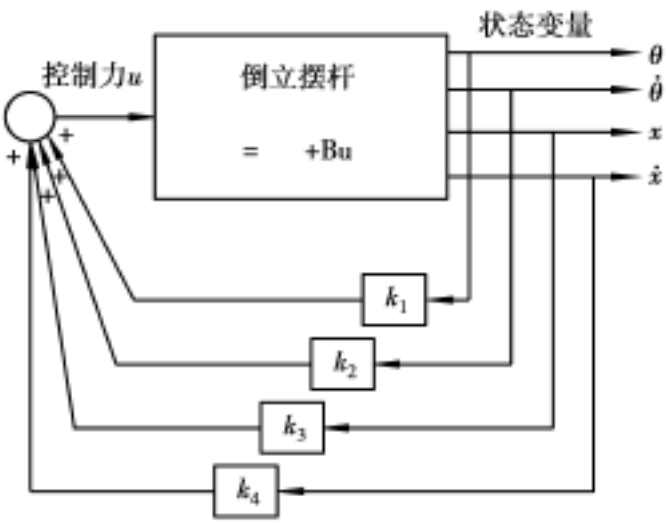


图 4. 10 状态反馈系统框图

$$(s - p_1)(s - p_2)(s - p_3)(s - p_4) = 0 \tag{4.2}$$

将式(4.2)展开,与式(4.1)进行比较,使对应项系数相等,即可解出系统的反馈系数 k_1, k_2, k_3, k_4 ,从而得到反馈矩阵 K 及控制率 u 。

应用此种方法给出的状态反馈控制器,可以使处于任意初始状态的系统稳定在平衡状态,即所有的状态变量都可以稳定在零的状态。这就意味着即使在初始状态或因存在外扰时,摆杆稍有倾斜或小车偏离基准位置,依靠该状态反馈控制也可以使摆杆垂直竖立,使小车保持在基准位置。

相对平衡状态的偏移,得到迅速修正的程度要依赖于指定的特征根的值。一般说来,将指定的特征根配置在原点的左侧,离原点越远,控制动作就越迅速,相应地就需要更大的控制力和快速的灵敏度。

总之,在实际控制系统中,若由极点配置法决定反馈系数,必须反复进行仿真,以得到在特定的硬件制约下满足具体控制目标的控制系统。

2. 实验内容及步骤

1) 应用 Matlab 进行仿真,通过调节参数仔细观察其对系统瞬态响应和稳态响应的影响。找到几组合适的控制器参数作为实际控制的参数。

注： 对象参数请用户根据实际系统自行调节。
利用 Matlab 的 place 命令可以方便地进行极点配置。

2) 进入 Matlab/Simulink 窗口,点击 Inverted Pendulum Toolbox,可以仿照 Single Pendulum LQR control Demo 搭建一实时控制系统,设定控制器参数和控制周期,进行在线实验。

由于本实验是开放性实验,实验人员也可以根据固高提供的运动控制函数库自行用高级语言编写程序进行一级倒立摆的实时控制实验。

- 3) 如果效果不理想,调整控制器参数,直到获得较好的控制效果。
- 4) 认真完成实验,记录实验中的重要数据及曲线,并提交实验报告。分析理论结果与实际结果的差异。

3. 实验报告格式及要求

1) 按表 4.2,将受控对象的参数代入到状态空间模型中,计算对象的系统矩阵 A , 输入矩阵 B , 输出矩阵 C , 写出系统的状态方程和输出方程。

$A =$

$B =$

$C =$

状态方程:

输出方程:

2) 计算受控对象(小车倒立摆系统)的能控性矩阵 M , 判断系统是否具有能控性。

$M =$

是否满秩?

3) 在 Matlab 环境下编写程序,进行极点配置算法的离线仿真;给出系统时域响应比较理想时的闭环系统极点和相应的反馈系数 k_1, k_2, k_3, k_4 ,画出此时的小车位置响应和摆杆位置的响应曲线图。

闭环系统期望极点:

反馈系数:

响应曲线图:

- 4) 在 Simulink 实时控制平台搭建实时控制系统(或在 VC 平台下进行),对离线仿真得到的理想参数进行在线实验;记录实时系统的响应曲线;简要分析仿真响应和实际响应的差异。
- 5) 实验中编写的源程序清单。

实验2 LQR 控制器设计与调节

最优控制理论主要是依据庞德里亚金的极值原理,通过对性能指标的优化寻找可以使目标极小的控制器。其中线性二次型性能指标因为可以通过求解 Riccati 方程得到控制器参数,并且随着计算机技术的进步,求解过程变得越来越简单,因而在线性多变量系统的控制器设计中应用较广。利用线性二次型性能指标设计的控制器称作 LQR 控制器。上个实验已经得到了直线一级倒立摆系统比较精确的动力学模型,下面针对直线型一级倒立摆系统应用 LQR 法设计与调节控制器,控制摆杆保持在平衡位置。

1. LQR 理论基础

(1) 线性二次型问题

设线性时变系统的状态空间表达式为

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A(t)x(t) + B(t)u(t), \quad x(t_0) = x_0 \\ y(t) &= C(t)x(t)\end{aligned}$$

性能泛函的一般形式为:

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \left[x^T Q_1(t) x + u^T Q_2(t) u \right] dt + \frac{1}{2} x^T(t_f) Q_0 x(t_f) \quad (4.3)$$

式中 $Q_1(t)$ —— $n \times n$ 维半正定的状态加权矩阵;

$Q_2(t)$ —— $n \times n$ 维正定的控制加权矩阵;

Q_0 —— $n \times n$ 维半正定的终端加权矩阵。

在二次型性能泛函中,各项都有明确的物理含义,分述如下:

被积函数第一项 $L_x = x^T Q_1(t) x$, 若 x 表示误差矢量,那么 L_x 表示误差平方。因为 $Q_1(t)$ 半正定,所以只要出现误差, L_x 总是非负的。 L_x 是用以衡量误差 x 大小的代价函数, x 越大,则支付的代价越大。在 x 是标量函数的情况下 $L_x = \frac{1}{2} x^2$, 那么 $\frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} x^2 dt$ 表示误差平方的积分。

$Q_1(t)$ 通常是对角线常阵,对角线上的元素 q_{1i} 分别表示对相应误差分量 x_i 的重视程度。越加重对误差分量的重视,希望它越小,相应地,其加权系数 q_{1i} 就应取得越大。

被积函数中第二项 $L_u = \frac{1}{2} u^T Q_2(t) u$, 表示动态过程中对控制的约束或要求。因 $Q_2(t)$ 为正定,所以只要存在控制, L_u 总是正的。如果把 u 看做电压或电流的函数的话,那么 L_u 与功率成正比,而 $\frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} u^T Q_2(t) u dt$ 则表示在区间 $[0, t_f]$ 内消耗的能量。因此, L_u 是用来衡量控制功率大小的代价函数。

式中 $\frac{1}{2} x^T(t_f) Q_0 x(t_f)$ 突出了对终端误差的要求,叫做终端代价函数。例如,在宇航的交会问题中,由于要求两个飞行体终态严格一致,因此,必须加入这一项,已体现 t_f 时的误差足够小。至于 $Q_2(t)$, Q_0 的加权意义与 $Q_1(t)$ 相仿。

设计 LQR 控制器的目标就是确定最优控制 $u^*(t)$, 使性能指标式(4.3)极小,即:使系统

在整个控制过程中的动态跟踪误差与控制能量消耗, 以及控制过程结束时的末端跟踪偏差综合最优。

线性二次型最优控制问题有 3 种类型: 状态调节器问题, 输出调节器问题和输出跟踪系统问题。

本实验研究的是状态调节器问题, 其任务是, 当系统受到扰动偏离原零平衡状态时, 要求产生一控制向量, 使系统状态恢复到原平衡状态附近, 并使性能指标式(4.3) 极小。

(2) 有限时间调节器问题

有限时间调节器问题, 是指在有限的时间区间 $[t_0, t_f]$ 内, 寻求最优控制规律 u , 将系统从初始状态转移到零点附近, 并使给定的性能泛函取极值。

依据最小值原理, 可以推导出最优控制率为

$$u^*(t) = - Q_2^{-1}(t) B^T(t) P(t) x(t) = - K(t) x(t)$$

则 $n \times n$ 维最优反馈增益矩阵 $K(t) = Q_2^{-1}(t) B^T(t) P(t)$ (4.4)

这说明, 对于线性二次型问题, 最优控制可由全部状态变量构成的最优线性反馈来实现。其闭环系统的结构框图与状态反馈的结构框图完全一样。

式(4.4) 中的 $P(t)$ 满足 Riccati 矩阵微分方程:

$$\dot{P}(t) = - P(t) A(t) - A^T(t) P(t) + P(t) B(t) Q_2^{-1}(t) B^T(t) P(t) - Q_1(t)$$

边界条件 $P(t_f) = Q_0$

(3) 无限时间状态调节器问题

若系统受扰偏离原平衡状态后, 希望系统能最优地恢复到原平衡状态, 不产生稳态误差, 则必须采用无限时间状态调节器; 若同时要求最优闭环系统渐近稳定, 则应采用无限时间定常状态调节器, 其最优状态反馈矩阵为常阵, 可以离线计算, 便于实时控制。本实验中倒立摆系统的控制问题就是要设计一最优反馈矩阵, 并要求其为常阵, 故本实验中调节器的设计是一个无限时间状态调节器的问题。

可以证明, 若线性定常系统 $\dot{x} = Ax + Bu$ 能控, 性能泛函为

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{\infty} [x^T Q_1 x + u^T Q_2 u] dt$$

其中, u 不受限制, Q_1 是半正定常数矩阵, Q_2 为正定常数矩阵。则最优控制存在, 且惟一:

$$u^*(t) = - Q_2^{-1} B^T P x(t) = - Kx(t)$$

式中 P —— $n \times n$ 维正定常数矩阵, 满足下列 Riccati 矩阵代数方程:

$$- PA - A^T P + PBQ_2^{-1} B^T P - Q_1 = 0$$

K 为全状态反馈矩阵, 而 P 是一个实对称常数矩阵, 因此构成的是一个线性定常闭环系统。

对于无限时间状态调节器, 这里强调以下几点:

1) 适用于线性定常系统, 且要求系统完全能控。因为在无限时间调节器中, 控制区间扩大至无穷, 倘若系统不能控, 则无论哪一个控制矢量都将由于 $t \rightarrow \infty$, 而使性能泛函趋于无穷, 从而无法比较其优劣。因此, 能控性条件是从保证性能泛函的优劣能进行比较的角度考虑的。

2) 在性能泛函中, 由于 $t_f \rightarrow \infty$, 而使终端泛函 $\frac{1}{2} x^T(t_f) Q_0 x(t_f)$ 失去了意义, 即 $Q_0 = 0$ 。

3) 闭环系统是渐近稳定的, 即系统矩阵 $[A - BQ_2^{-1} B^T P]$ 的特征值均具有负实部, 而不论原

受控系统 A 的特征值如何。

2. 实验内容及步骤

1) 根据建模结果, 将对象参数代入模型, 检验系统是否具有能控性, 是否具备设计无限时间状态调节器的可能性。

2) 在 Matlab 环境中进行仿真实验, 通过调节参数仔细观察思考其对系统瞬态响应和稳态响应的影响。找到几组合适的控制器参数作为实际控制的参数。

注: 对于无限时间调节器的设计问题, Matlab 提供了 `lqr` 函数, 其常用的命令格式为 $[K, S, E] = \text{LQR}(A, B, Q, R)$, 其中 A 为系统矩阵, B 为输入矩阵, Q 为状态加权矩阵, R 为输入加权矩阵。返回值中, K 为全状态反馈增益矩阵, S 为 Riccati 方程的解, E 为闭环系统的特征值。利用该命令可以方便地计算出 K , 从而得到最优控制律 $u^*(t)$ 。

3) 进入 Matlab/Simulink 环境, 点击 Inverted Pendulum Toolbox, 在其右边点击 Single Pendulum LQR Control Demo, 进行实时控制实验。在 Start Real Pendulum Control/LQR 模块中将控制器参数修改为仿真得到的几组合适的参数, 观察实际控制效果。

实验人员也可以自行搭建实时控制模块,进行实验,亦可在固高运动控制器函数库的基础上应用高级语言自行编制算法进行实时控制(具体请参考实验平台的介绍)。

4) 如果控制效果不理想, 调整控制器的参数, 直到获得较好的控制效果。

5) 认真完成实验,记录重要数据及曲线,做好实验报告,分析理论结果与实际结果的差异。

3. 实验报告格式及要求

1) 按表 4.2, 计算对象的系统矩阵 A , 输入矩阵 B , 输出矩阵 C , 写出系统的状态方程和输出方程。

$$A =$$
$$\mathbf{B} =$$
$$\mathbf{C} =$$

状态方程:

输出方程:

2) 计算受控对象(小车倒立摆系统)的能控性矩阵 M , 判断系统是否具有能控性, 以确保系统具备设计无限时间定常状态调节器的可能性。

$$\mathbf{M} =$$

是否满秩？

3) 在 Matlab 环境下编写程序, 进行 LQR 算法的离线仿真; 给出系统时域响应比较理想时的状态加权阵 Q 和输入加权阵 R , 以及此时闭环系统的特征值和最优控制率 $u(t) = -Kx(t)$; 画出此时的小车位置响应和摆杆位置的响应曲线图。

状态加权阵 $Q =$

输入加权阵 $R =$

闭环系统的特征值:

最优控制率 $u(t) =$

响应曲线图:

4) 在 Simulink 实时控制平台搭建实时控制系统(或在 VC 平台下实现),对离线仿真得到的理想参数进行在线实验;记录实时系统的响应曲线;简要分析仿真响应和实际响应的差异。

5) 实验中编写的源程序清单

实验 3 直线两级倒立摆的 LQR 控制

1. 实验原理

(1) 系统数学建模

在忽略了空气阻力及各种摩擦之后, 可将倒立摆系统抽象成小车、匀质杆和质量块组成的系统, 如图 4.11 所示。

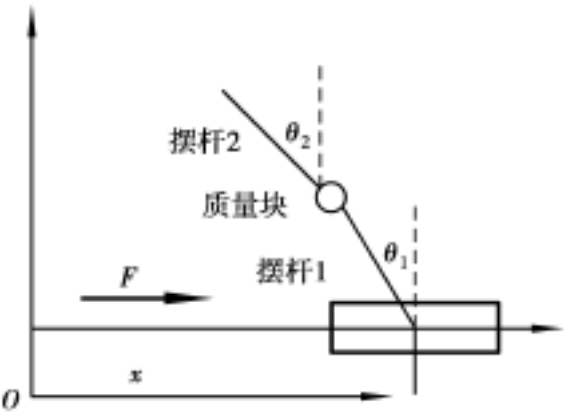


图 4.11 两级小车倒立摆系统

动力学系统中用到的符号含义见表 4.3。

利用拉格朗日方程推导倒立摆运动学方程, 拉格朗日方程为

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q, \dot{q})$$

其中, L 为拉格朗日算子, q 为系统的广义坐标, T 为系统的动能, V 为系统的势能。拉格朗日方程由广义坐标 q_i 和 L 表示为:

表 4.3 动力学系统中各符号含义

符 号	意 义	数 值	单 位
M	小车质量	1.32	kg
m_1	摆杆 1 质量	0.04	kg
m_2	摆杆 2 质量	0.132	kg
m_3	质量块的质量	0.208	kg
l_1	转轴到摆杆 1 质心的长度	0.09	m
l_2	转轴到摆杆 2 质心的长度	0.27	m
x	小车位置坐标		m
θ_1	摆杆 1 与垂直向上方向的夹角		rad
θ_2	摆杆 2 与垂直向上方向的夹角		rad
F	作用在系统上的外力		N

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = f_i$$

其中, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, f_i 为系统沿该广义坐标方向上的外力, 在本系统中, 设系统的 3 个广义坐标分别是 x , θ_1 和 θ_2 。

由于在广义坐标上 θ_1, θ_2 均无外力作用, 有以下等式成立:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right] - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = 0 \tag{4.5}$$

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right] - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = 0 \tag{4.6}$$

求解代数方程, 表示成以下形式:

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2, x) \tag{4.7}$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2, x) \tag{4.8}$$

取平衡位置时各变量初值为零 $(x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2, x) = (0, 0, 0, 0, 0)$ ，将式(4.7)、式(4.8)在平衡位置进行泰勒级数展开，并线性化，得到

$$\dot{x}_1 = K_{12} x_1 + K_{13} x_2 + K_{17} x \tag{4.9}$$

$$\dot{x}_2 = K_{22} x_1 + K_{23} x_2 + K_{27} x \tag{4.10}$$

其中

$$\begin{aligned} K_{12} &= \frac{3(-2gm_1 - 4gm_2 - 4gm_3)}{2(-4m_1 - 3m_2 - 12m_3)l_1} & K_{13} &= \frac{9m_2g}{2(-4m_1 - 3m_2 - 12m_3)l_1} \\ K_{17} &= \frac{3(-2m_1 - m_2 - 4m_3)}{2(-4m_1 - 3m_2 - 12m_3)l_1} & K_{22} &= \frac{2g[m_1 + 2(m_2 + m_3)]}{4m_2l_2 - \frac{16}{9}[m_1 + 3(m_2 + m_3)]l_2} \\ K_{23} &= \frac{4g[m_1 + 3(m_2 + m_3)]}{3\left\{4m_2l_2 - \frac{16}{9}[m_1 + 3(m_2 + m_3)]l_2\right\}} \\ K_{27} &= \frac{2[m_1 + 2(m_2 + m_3)] - \frac{4}{3}[m_1 + 3(m_2 + m_3)]}{4m_2l_2 - \frac{16}{9}[m_1 + 3(m_2 + m_3)]l_2} \end{aligned}$$

现在得到了两个线性微分方程，由于采用加速度作为输入，因此还需要加上一个方程

$$u = x \tag{4.11}$$

取状态变量如下：

$$x_1 = x, \quad x_2 = \dot{x}_1, \quad x_3 = \dot{x}_2, \quad x_4 = \ddot{x}_1, \quad x_5 = \ddot{x}_2, \quad x_6 = \ddot{x}$$

由式(4.9)、式(4.10)、式(4.11)得到状态空间方程如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{12} & K_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & K_{23} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ K_{17} \\ K_{27} \end{bmatrix} u$$

(2) LQR 最优控制器的设计

关于 LQR 的相关理论知识，请参看实验二。本实验主要介绍状态加权阵 Q 和输入加权阵 R 对系统性能的影响。

Q 矩阵如下：

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C}^T \mathbf{x} \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{X} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{Y} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{Z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中, X 代表小车位置的敏感程度, 而 Y 和 Z 是摆杆 1 和摆杆 2 角度的敏感程度。

Q 和 R 矩阵这两个参数用来平衡系统对状态量和输入量的敏感程度,在此,假设控制向量 $u(t)$ 是不受约束的。Q、R 阵选取时应遵循道基本原则为:

- 1) 如果想提高控制的快速响应特性, 则可提高 Q 中相应元素的比重;
 - 2) 如果想有效地抑制控制量的幅值及其引起的能量消耗, 则可增大 R ;
 - 3) Q 、 R 的选择是相互制约的, 这两个参数用来平衡系统对输入量和状态量的敏感程度。
- 实验时要反复进行仿真, 得到满足硬件条件制约和系统性能指标要求的参数。

2. 实验内容及步骤

- 1) 根据建模结果仔细计算并寻找合适的理论控制器参数。

2) 在 Matlab 环境中进行仿真实验, 通过调节加权矩阵的数值仔细观察思考控制器参数对系统瞬态响应和稳态响应的影响。找到几组合适的控制器参数作为实际控制的参数。

注: 对于无限时间调节器的设计问题, Matlab 提供了 `lqr` 函数, 其常用的命令格式为 $[K, S, E] = \text{LQR}(A, B, Q, R)$, 其中 A 为系统矩阵, B 为输入矩阵, Q 为状态加权矩阵, R 为输入加权矩阵。返回值中, K 为全状态反馈增益矩阵, S 为 Riccati 方程的解, E 为闭环系统的特征值。利用该命令可以方便地计算出几组 K 。

3) 进入 Matlab Simulink 窗口, 点击 Inverted Pendulum Toolbox, 在其右边点击 Double Pendulum LQR Control Demo, 进行实时控制实验。在 Start Real Pendulum Control/LQR2 模块中将控制器参数修改为仿真得到的几组合适的参数, 观察实际控制效果。

实验人员也可以自行搭建实时控制模块,进行实验,亦可在固高运动控制器函数库的基础上应用高级语言自行编制算法进行实时控制(具体请参考实验平台的介绍)。

- 4) 如果控制效果不理想,调整控制器的参数,直到获得较好的控制效果。

5) 认真完成实验,记录重要数据及曲线,做好实验报告,分析理论结果与实际结果的差异。

3. 实验报告格式及要求

- 1) 按表 4.3, 计算对象的系统矩阵 A , 输入矩阵 B , 输出矩阵 C , 写出系统的状态方程和输出方程。

$$A =$$
$$\mathbf{B} =$$
$$\mathbf{C} =$$

状态方程:

输出方程:

- 2) 计算受控对象(小车倒立摆系统)的能控性矩阵 M , 判断系统是否具有能控性, 以确保系统具备设计无限时间定常状态调节器的可能性。

$$\mathbf{M} =$$

是否满秩？

- 3) 在 Matlab 环境下编写程序, 进行 LQR 算法的离线仿真; 给出系统时域响应比较理想时

的状态加权阵 Q 和输入加权阵 R , 以及此时闭环系统的特征值和最优控制率 $u(t) = -Kx(t)$; 画出此时的小车位置响应和摆杆位置的响应曲线图。

- 状态加权阵 $Q =$
输入加权阵 $R =$
闭环系统的特征值:
最优控制率 $u(t) =$
响应曲线图:
- 4) 分析状态加权阵 Q 和输入加权阵 R 的取值变化对系统性能的影响。
- 5) 在 Simulink 实时控制平台(或 VC 环境下)搭建实时控制系统, 对离线仿真得到的理想参数进行在线实验; 记录实时系统的响应曲线; 简要分析仿真响应和实际响应的差异。
- 6) 实验中编写的源程序清单

实验 4 直线一级柔性连接倒立摆系统的控制

1. 建立倒立摆系统的数学模型

柔性连接的倒立摆系统是在直线倒立摆系统的基础上引入自由振荡环节, 使闭环控制系统的响应频率受到弹簧振荡频率的限制, 从而增加了对该系统控制器设计的难度。

实验中应用的柔性倒立摆系统模型及坐标定义如图 4.12 所示。

为了获得被控系统的数学模型, 应用拉格朗日方程方法:

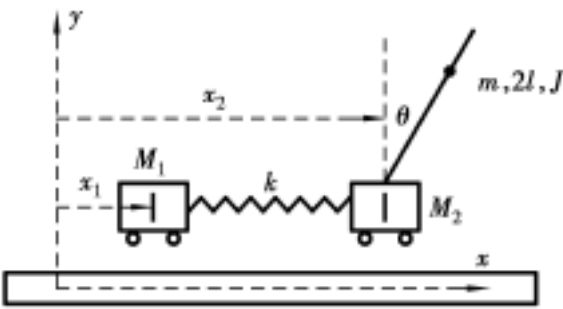


图 4.12 柔性摆系统模型及坐标定义

式中, L 为拉格朗日算子, q_i 为系统的广义坐标; $i = 1, 2, 3, q = \{x_1, x_2, \}$ 称为广义变量; 称为系统沿该广义坐标方向上的广义外力。 $T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)$ 是系统的动能, V 是系统的势能。

如图所示的定义, 对于柔性连接倒立摆系统, 可得

$$\begin{aligned} T_{M1} &= \frac{1}{2}M_1 \dot{x}_1^2, & T_{M2} &= \frac{1}{2}M_2 \dot{x}_2^2 \\ T_m &= \int_0^{2\pi} dT = \frac{1}{2}m\dot{x}_2^2 + ml\dot{x}_2 \dot{\theta} \cos \theta + (J + ml^2) \dot{\theta}^2 \\ V_m &= mgl \cos \theta \\ V_k &= \frac{1}{2}k(x_2 - x_1)^2 \end{aligned}$$

式中, J 为摆杆以底端转轴为中心的转动惯量, 因此得到拉格朗日算子

$$L = T - V = \frac{1}{2}M_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}M_2 \dot{x}_2^2 + \frac{1}{2}m\dot{x}_2^2 + ml\dot{x}_2 \dot{\theta} \cos \theta +$$

$$(J + ml^2) \ddot{\theta} - mgl \cos \theta = \frac{1}{2}k(x_2 - x_1)^2$$

根据拉格朗日方程, 可得

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{x}_1 + k(x_1 - x_2) &= F - c_{x1} \dot{x}_1 - k(x_1 - x_2) - ml \ddot{\theta} \sin \theta + (M_2 + m) \ddot{x}_2 + ml \ddot{\theta} \cos \theta \\ &= -c_{x2} \dot{x}_2 ml x_2 \cos \theta + (J + ml^2) \ddot{\theta} - mgl \sin \theta = -c \dot{\theta} \end{aligned}$$

写成状态空间表达式

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{kp_2}{p_1} - \frac{kp_2}{p_1} & -\frac{gp_3^2}{p_1} & 0 & -\frac{c_{x2}p_2}{p_1} & \frac{c}{p_1}p_3 \\ -\frac{kp_3}{p_1} & \frac{kp_3}{p_1} & \frac{g(M_2 + m)p_3}{p_1} & 0 & -\frac{c_{x2}p_3}{p_1} & -\frac{c(M_2 + m)}{p_1} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_1$$

令 $v_1 = x_1$, 则在平衡点 $X = \{x_1, x_2, \theta, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{\theta}\} = \{0, 0, 0, 0, 0, 0\}$ 对系统进行线性化得到

$$Y = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} X$$

式中, $p_1 = M_2 ml^2 + J(M_2 + m)$; $p_2 = J + ml^2$; $p_3 = ml$ 。

如果令 $T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, 则: $\bar{X} = TX = \{x_1, \theta, x_2, \dot{x}_1, \dot{\theta}, \dot{x}_2\}^T$

从而有

$$\begin{cases} \dot{\bar{X}} = \bar{A} \bar{X} + \bar{B} U \\ Y = \bar{C} \bar{X} \end{cases}, \text{ 其中, } \bar{A} = TAT^{-1}; \bar{B} = TB; \bar{C} = CT^{-1}$$

至此, 建立了倒立摆系统的状态空间模型。

2. 稳定性分析

在不加任何控制器的情况下, 对系统进行稳定性分析。将实际系统的参数带入到上述状态空间方程中, 求取系统的特征根, 判断开环系统是否稳定。

如果开环系统不稳定, 则需要设计控制器。

3. 控制器设计

如果要设计控制器, 第一步应该对系统的可控性进行分析。求取系统的能控性矩阵, 判断系统是否可控, 如果能控性矩阵满秩, 则系统完全可控, 可以对其极点进行任意配置。

至此, 你可以在实验平台上设计自己的控制算法, 进行仿真并在实际系统上进行验证了。

实验内容及步骤自拟, 实验完成后认真完成并提交实验报告。

4. 实验报告格式及要求

1) 将受控对象的参数代入到状态空间模型中, 给出系统的状态方程和输出方程。

状态方程:

输出方程:

2) 求取开环系统的特征根, 并分析开环系统的稳定性。

开环系统特征根:

3) 计算受控对象(柔性连接倒立摆系统) 的能控性矩阵 M , 判断系统是否具有能控性。

$M =$

是否满秩?

4) 给出所用控制算法的控制率, 记录算法中涉及的重要参数; 并给出离线仿真时小车位置响应和摆杆位置的响应曲线图。

5) 在 Simulink 实时控制平台(或 VC 环境下) 搭建实时控制系统, 对离线仿真得到的理想参数进行在线实验; 记录实时系统的响应曲线; 简要分析仿真响应和实际响应的差异。

6) 实验中编写的源程序清单。

参考文献

- 1 杨立主编. 计算机控制与仿真技术. 北京: 中国水利水电出版社, 2003
- 2 郭齐胜, 李光辉, 张伟编著. 计算机仿真原理. 北京: 经济科学出版社, 2002
- 3 杨涤等编著. 系统实时仿真开发环境与应用. 北京: 清华大学出版社, 2002
- 4 上海齐鑫自动化设备有限公司产品介绍
- 5 重庆大学自动控制原理实验指导书
- 6 沈辉编著. 精通 SIMULINK 系统仿真与控制. 北京: 北京大学出版社, 2003
- 7 姚俊, 马松辉编著. Simulink 建模与仿真. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002
- 8 王忠勇, 蒋天发, 刘宪林主编. 系统分析与控制. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003
- 9 何离庆主编. 过程控制系统与装置. 重庆: 重庆大学出版社, 2003
- 10 邓为民. 自动控制原理实验教程. 航空工业出版社, 1991
- 11 中国科学技术大学编著. 固高摆系统与自动控制实验. 2002
- 12 固高科技(深圳)有限公司 GT 运动控制器编程手册
- 13 沈辉编著. 精通 Simulink 系统仿真与控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003
- 14 涂植英主编. 自动控制原理. 重庆: 重庆大学出版社, 2005
- 15 潘裕焕编著. 生产过程自动化中的数学模型. 北京: 科学出版社, 1977