



3.1 概述

一般来说,实验研究的方法有两种:一种是在真实系统上进行,另一种是在模型上进行。对于比较简单的被控对象,可以在实际系统上进行实验和调试,以获得较好的性能指标。但是在生产过程中,大部分的被控对象比较复杂,如火箭发射、反应堆控制、电力系统等,考虑到安全性、经济性以及进行实验研究的可能性等原因,在实际系统上进行实验通常是不允许的。这时,就需要先把实际系统建立成物理模型或数学模型来研究,然后把对模型实验研究的结果应用到实际系统中去,这种方法叫做模拟或仿真研究,简称“仿真”。

物理仿真就是用缩小了或放大了的尺寸制作成与真实物理系统相同的模型所进行的实验,模型的变量和物理系统完全相同,如用小功率随动系统模拟大功率随动系统,或者用许多小容量的同步机、感应电动机与直流电动机组成一个电力系统的仿真模型来研究电力系统的暂态过程等。这种方法的优点是可以比较直观和全面地表现被研究过程的物理现象,并能观察到用数学模型不可能包含在数学方程中的真实过程所具有的现象。但是物理模拟造价昂贵,而且要做大量的安装、接线、调整等工作,因而准备的周期较长。

数学仿真是将实际系统的运动规律用数学方程(一组微分方程或差分方程)来描述,然后再用模拟计算机或数字计算机来解这些方程。由于在模拟过程中,模型和真实系统具有相同的数学模型,因此就动态性能而言,对模型的研究就可以代替对真实系统的研究。

数学仿真比物理仿真具有更广泛的用途,它可用同一套设备对物理性质截然不同的许多控制系统进行研究。虽然数学仿真中的模型与原型的物理模型本质是不同的,但是它们遵循同样的数学模型,即数学仿真利用了原型和模型之间方程式的相似性,因此,二者的动态性能是一

致的。数学仿真的准备工作量小、周期短、费用少、数据处理简单,因此数学仿真比物理仿真发展更迅速。由于数学仿真的主要工具是计算机,因此一般又称之为“计算机仿真”。计算机仿真分为三种:用模拟计算机进行仿真的,称为“模拟仿真”;用数字计算机进行仿真的,称为“数字仿真”;用数字计算机和模拟计算机联合进行仿真的称为“混合仿真”。

总的来说,控制理论实验可分为三种基本类型:

(1) 采用模拟机进行控制系统的模拟仿真实验。运用运算放大器的基本特性,设置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,再按实验系统的组成对整个系统进行模拟。

(2) 采用数字计算机进行控制系统的数字仿真实验。首先建立控制系统的数学模型,然后选择运算简单、速度快、准确度高的计算方法来编写计算程序,或直接选用仿真软件,如 MATLAB 等。

(3) 在实际物理系统(随动系统、温控系统)上进行实验。模拟仿真和数字仿真是设计控制系统的常用方法。由于这两种实验方法都是在给定数学模型的基础上进行的,而在建立系统的数学模型时往往忽略一些次要因素,即回避了实际系统中的各种复杂因素,这样所得到的数学模型是实际系统的近似模型,因而仿真实验所得到的实验结果只能近似地表示实际系统的性能。总之,仿真实验一般用于控制系统设计的初级阶段,最后还必须在实际系统的反复调整和测试过程中不断发现问题、分析问题和解决问题,从而进一步完善设计,全面达到设计所要求的各项性能指标。

3.2 自动控制原理模拟机的组成

现在普遍使用的自动控制原理模拟机大多以积分器和加法器为基础,配置了二极管、电位器、分压器、电阻、电容等部件,其操作面板直观地显示了运算单元的连接方式,并且具有直流稳压电源和计算机接口,可方便地连接计算机,组成数字、模拟实验系统,所以自动控制原理模拟机也可作为专用的自动控制原理学习机来用,它可以组成 PID 调节以及各种非线性环节,使用简单,操作方便,参数选择范围较广,能灵活地对系统进行电子模拟。如图 3-1 所示,就是清华大学科仪仪器厂生产的 XMN-2 型自动控制原理学习机。

该款自动控制原理学习机的主要特点是:

(1) 专为自动化专业设计,整机结构合理,单元电路设置符合自动控制原理实验要求,参数改变灵活,排题方便。

(2) 供使用的运算放大器采用 OP07,它具有高增益,输入失调电压、电流较小,由它组成的加法器和积分器的“零点”和“积分漂移”也都较小。

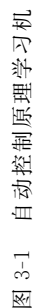


图 3-1 自动控制原理学习机

(3) 操作面板上都设置了“复位”键,能方便地消除积分器电容上的残余电荷,从而提高了本机重复运算的精度。

(4) 具有计算机接口,可方便连接计算机,组成数字/模拟实验系统。

在使用模拟机时有如下注意事项:

(1) 在连接模拟电路时,应关闭模拟机直流电源。经过检查,确认模拟电路连接无误后方可通电。

(2) 不用的运算放大器应接成比例器的形式,以防止损坏。

3.2.1 组成运算部件的基本原理

在 XMN-2 型模拟机上进行加、减、积分等运算的运算部件都是选用高增益、低漂移的直流运算放大器配以适当的输入网络、反馈网络组成,如图 3-2、图 3-3 所示。

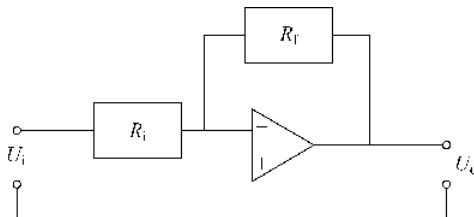


图 3-2 高增益直流运算放大器和无源网络组成的运算部件图

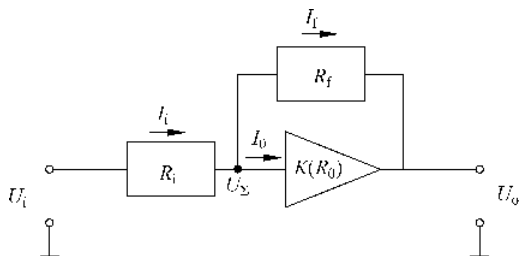


图 3-3 高增益直流运算放大器和无源网络组成的运算电路图

其中, R_i ——输入阻抗

R_f ——反馈阻抗

R_0 ——运算放大器内阻

U_i ——输入电压

U_o ——输出电压

U_Σ ——相加点电压

I_i ——输入电流

I_f ——反馈电流

I_o ——进入运算放大器的电流

K ——运算放大器的开环增益

由图 3-3 知

$$I_i = I_f + I_o$$

$$\text{即 } \frac{U_i - U_\Sigma}{R_i} = \frac{U_\Sigma - U_o}{R_f} + \frac{U_\Sigma}{R_o} \quad (3-1)$$

又因为

$$U_o = -KU_\Sigma$$

所以

$$U_\Sigma = -\frac{U_o}{K} \quad (3-2)$$

将式(3-2)代入式(3-1)得到

$$\frac{U_i}{R_i} = \frac{1+K}{KR_f}U_o - \left(\frac{U_o}{KR_o} + \frac{U_o}{KR_i} \right) \quad (3-3)$$

由于 $K > 10^7$, U_o 最大为 100V, R_o, R_i 为几百欧姆,

所以

$$\frac{U_o}{KR_o} + \frac{U_o}{KR_i} \approx 0, \quad \frac{K+1}{K} = 1$$

得到

$$\frac{U_i}{R_i} = -\frac{U_o}{R_f}$$

所以

$$U_o = -\frac{R_f}{R_i}U_i \quad (3-4)$$

式(3-4)是组成运算部件的基本运算公式。可以看出: 输出信号和输入信号是相反的; 输出电压和输入电压之比等于反馈阻抗之比; 此式是近似式, 只有 K 值很大时, 才能减小误差。

3.2.2 主要运算部件

1. 反号器

在图 3-4 中, 若选择 $R_f = R_i = R$, 则 $\frac{U_o}{U_i} = -1$, 这恰好把输入电压反了一个符号, 故称之为反号器。

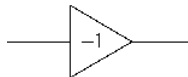


图 3-4 反号器

2. 比例器和比例加法器

在图 3-5(a)中, 若取 $R_f \neq R_i$, 则 $\frac{U_o}{U_i} = -\frac{R_f}{R_i}$, 或 $U_o = -\frac{R_f}{R_i}U_i$ 。式中, R_f/R_i 即为比例系数。

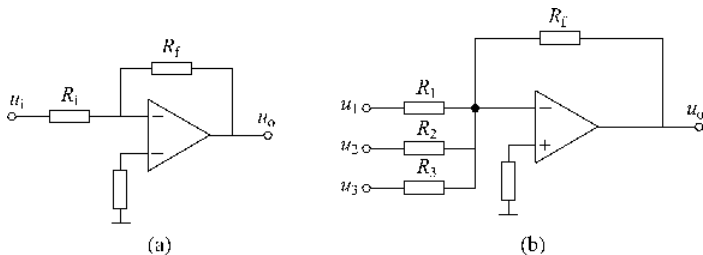


图 3-5 比例器和比例加法器

若运算放大器的输入是由多条不同电阻支路所组成,如图 3-5(b)所示,便构成比例加法器。如图 3-5(b)中所示比例加法器的输出电压,可用下式表示

$$U_o = - \left(\frac{R_f}{R_1} U_1 + \frac{R_f}{R_2} U_2 + \frac{R_f}{R_3} U_3 \right)$$

3. 积分器

若反馈电阻 R_f 换成电容,即构成积分器或加法积分器。如图 3-6 所示。

$$\frac{U_o}{U_i} = - \frac{1}{R_f C} = - \frac{1}{T}$$

或

$$u_o(t) = - \frac{1}{T} \int_0^t u_i(t) dt + u_o(0)$$

式中, $T=RC$ ——积分时间常数; $u_o(0)$ ——积分的初始条件。

当积分器的输入阻抗为多条电阻支路时,即构成积分加法器。

4. 系数器

在模拟机中,常用到乘一个小于 1 的系数,它可用分压电位器来实现。系数器的电路如图 3-7 所示。

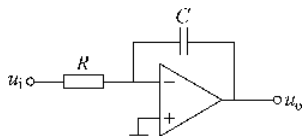


图 3-6 积分器

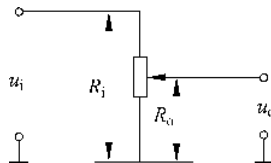


图 3-7 系数器

由图 3-7 可得

$$u_o = \frac{R_o}{R_i} u_1 = \alpha u_i$$

式中,系数 $\alpha = R_o/R_i \leq 1$ 。

3.3 典型环节的模拟

根据数学模型的相似原理,可应用电子元件模拟工程系统中的典型环节,然后加入典型测试信号,测试环节的输出响应。反之,从实测的输出响应,也可以求得未知环节的传递函数及其各个参数。

模拟典型环节传递函数的方法有两种:第一种,利用模拟机中的运算部件,采用逐项积分法,进行适当的组合,构成典型环节传递函数模拟结构图;第二种,将运算放大器与不同的输入网络及反馈网络组合,构成传递函数模拟线路图,这种方法可以称为复合网络法。这里主要介绍第二种方法。

组成各种典型环节的运算部件是运算放大器。它是一种高增益、低漂移的直流放大器,如图 3-8(a)所示是运算放大器的原用符号,(b)是国际标准符号。运算放大器有一个输出端和两个输入端,“—”表示反相输入端;“+”表示同相输入端。由于同相放大电路出现共模电压,易于导致运算误差,因此在模拟机中,一般采用反相输入端,正相端可通过一个电阻接地。

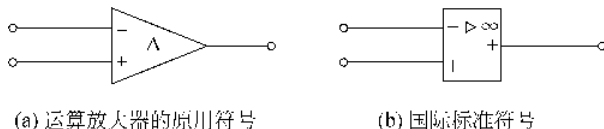


图 3-8 运算放大器的原用符号

利用运算放大器与不同的网络组合,可实现不同的环节。

3.3.1 比例环节

传递函数:

$$G(s) = K, \quad K = \frac{R_2}{R_1}$$

比例环节电路如图 3-9 所示。

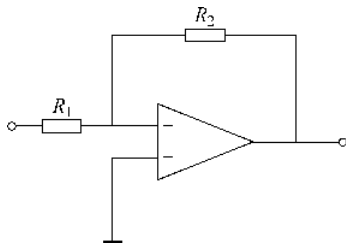


图 3-9 比例环节

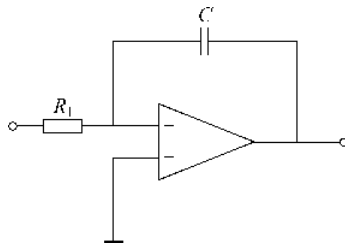


图 3-10 积分环节

3.3.2 积分环节

传递函数：

$$G(s) = \frac{1}{Ts}, \quad T = R_1 C$$

积分环节电路如图 3-10 所示。

3.3.3 微分环节

传递函数：

$$G(s) = Ts, \quad T = RC$$

微分环节电路如图 3-11 所示。

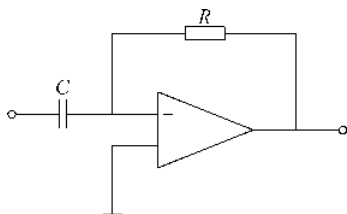


图 3-11 微分环节

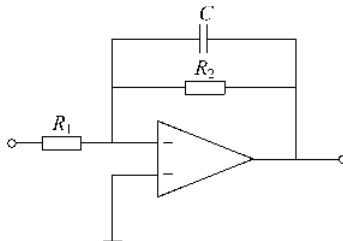


图 3-12 惯性环节

3.3.4 惯性环节

传递函数：

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}, \quad K = \frac{R_2}{R_1}, \quad T = R_2 C$$

惯性环节电路如图 3-12 所示。

3.3.5 比例积分环节

传递函数：

$$G(s) = K \left(1 + \frac{1}{Ts} \right), \quad K = \frac{R_2}{R_1}, \quad T = R_2 C$$

比例积分环节电路如图 3-13 所示。

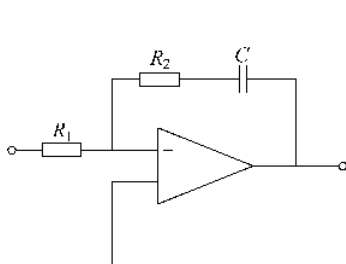


图 3-13 比例积分环节

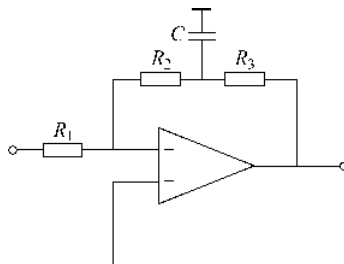


图 3-14 比例微分环节

3.3.6 比例微分环节

传递函数：

$$G(s) = K(1 + \tau s), \quad K = \frac{R_2 + R_3}{R_1},$$

$$\tau = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} C$$

比例微分环节电路如图 3-14 所示。

3.3.7 模拟仿真实例

知道了各环节的传递函数，便可以将其连成系统模拟图进行模拟仿真。但是在连接模拟线路时有以下注意事项：

- (1) 注意各环节顺序及输入和输出关系；
 - (2) 在模拟图中，最好标定所用的每一个运算放大器的号码和各组件所设置的数值，并应与在模拟机上的实际排题顺序相一致；
 - (3) 在模拟图上需判别反馈的极性，牢记经过一个运算放大器改变一次符号；
 - (4) 为了确保模拟的精度，尽量用最少的运算放大器完成所要求的模拟任务。
- 这里给出一个示例，可以从中看出典型环节的模拟仿真步骤。

例如，某系统如图 3-15 所示。

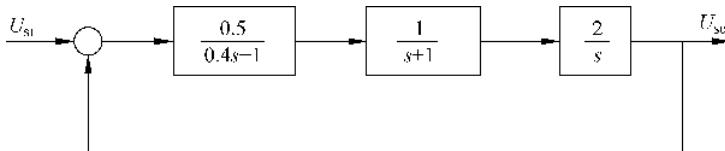


图 3-15 系统结构图

由图 3-15 可知系统由三个典型环节组成，即

$G_1(s) = \frac{0.5}{0.4s+1}$ 为惯性环节, 且 $K_1=0.5, T_1=0.4$;

$G_2(s) = \frac{1}{s+1}$ 为惯性环节, 且 $K_2=1, T_2=1$;

$G_3(s) = \frac{2}{s} = \frac{1}{0.5s}$ 为积分环节, 且 $K_3=2$ 或 $T_3=0.5$ 。

现在可分别画出三个典型环节的模拟线路图, 如图 3-16(a)、(b)、(c) 所示。

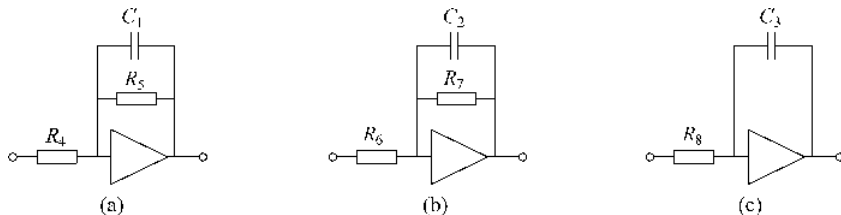


图 3-16 各环节的模拟电路图

图 3-16 中, $C_1 = C_2 = 2\mu\text{F}$, $C_3 = 1\mu\text{F}$, $R_4 = 400\text{k}\Omega$, $R_5 = 200\text{k}\Omega$, $R_6 = R_7 = R_8 = 500\text{k}\Omega$ 。

把图 3-16(a)、(b)、(c) 三图按原系统中环节关系如图 3-17 那样连接起来, 即为系统的模拟结构图。这里为了保证输入信号与输出信号的极性相同, 正向通道用了四个运算放大器; 为了保证负反馈连接, 反馈通道又用了—个反号器。

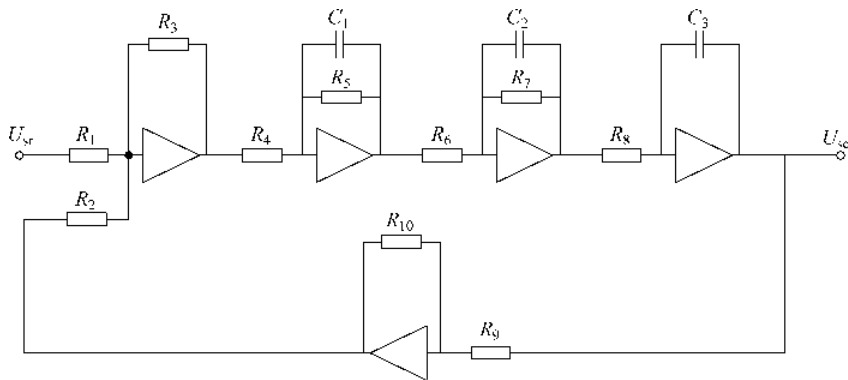


图 3-17 系统模拟电路图

图 3-17 中, $R_1 = R_2 = R_3 = R_9 = R_{10} = 200\text{k}\Omega$ 。

3.4 非线性特性的模拟

实际的自动控制系统原则上说都是非线性系统, 而在理论分析时, 往往把一些系统看作线性系统来处理, 事实上, 这是在做了一定的忽略和近似基础上进行

的。这种忽略和近似对一些系统而言是可行的,但是对许多系统往往会造成不正确的结果。但在理论分析时,如果考虑这些因素,又会造成很大困难,甚至无法得出解析解。而用模拟分析方法来分析这些系统,却能不忽略这些因素的影响,真实地反映系统的特性。

3.4.1 电位器接地式二极管单元

首先,介绍典型非线性特性模拟的依据。大多数非线性特性,如饱和特性、继电特性和死区特性等都是利用运算放大器和二极管箝位电路的适当组合进行模拟的。电位器接地式二极管单元电路如图 3-18 所示,用此电路可实现如图 3-19 所示的特性。

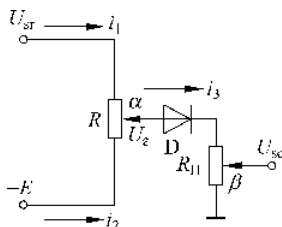


图 3-18 电位器接地式二极管单元电路图

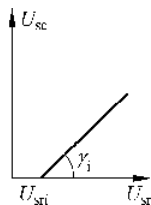


图 3-19 电位器接地式二极管单元特性图

该电路由电位器 R 、 R_H 和二极管 D 组成。 U_{sr} 为输入信号, U_{sc} 为输出信号, $-E$ 为供电电源, α 和 β 为电位器调整系数值。

先假设图 3-18 中二极管为导通, 并忽略二极管的导通电压降, 根据基尔霍夫定律可知, i_1 、 i_2 和 i_3 交汇点处的总电流 $\sum i = 0$, $i_1 + i_2 = i_3$, 由此可知,

$$\frac{U_{sr} - U_{\epsilon}}{\alpha R} + \frac{-E - U_{\epsilon}}{(1 - \alpha)R} = \frac{U_{\epsilon}}{R_H} \quad (3-5)$$

由式(3-5)可求出,

$$U_{\epsilon} = \frac{(1 - \alpha)R_H U_{sr} - \alpha R_H E}{\alpha R - \alpha^2 R + R_H} = \frac{U_{sr} - \frac{\alpha}{1 - \alpha} E}{\frac{1}{1 - \alpha} + \frac{\alpha R}{R_H}} \quad (3-6)$$

而

$$\begin{aligned} U_{sc} &= U_{\epsilon} \beta = \frac{\beta}{\frac{1}{1 - \alpha} + \frac{\alpha R}{R_H}} \left(U_{sr} - \frac{\alpha}{1 - \alpha} E \right) \\ &= K_i (U_{sr} - U_{sri}) \end{aligned} \quad (3-7)$$

另外, 由图 3-18 还看出, 当 $U_{\epsilon} < 0$ 时, 二极管不导通, 即 $U_{sr} < \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) E$ 。而当