

系统分析与控制

TSINGHUA COMPUTER

TSINGHUA COMPUTER

编著 TSINGHUA COMPUTER

TSINGHUA COMPUTER

TSINGHUA COMPUTER

TSINGHUA COMPUTER

TSINGHUA COMPUTER

TSINGHUA COMPUTER

TSINGHUA COMPUTER

TSINGHUA COMPUTER

清华大学出版社

TP27

TP27

6

系统分析与控制

孙增圻 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书主要针对连续系统,同时兼顾离散和采样系统,介绍了控制系统的数学模型、时域分析、频域分析、综合和设计以及采样控制系统理论等内容。在介绍上述内容时,侧重于物理概念的阐述以及理论和方法的具体应用。本书将经典控制理论和现代控制理论的内容互相结合,融为一体,用较少的篇幅介绍了系统与控制理论中最基本和核心的内容。

为便于巩固所学内容及自学的需要,本书每章后面均附有习题。同时书后附有部分习题的答案及实验指导。

本书可作为计算机系、自动化系、电子系、电机系、机械系等有关专业大学本科生的教材,也可供有关教师和科研人员学习参考。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

7676/11

系统分析与控制/孙增圻编著. —北京:清华大学出版社,1994

ISBN 7-302-01615-1

I. 系… II. 孙… III. ①连续系统(自动化)-系统分析-数学模型 ②离散系统-特点分析-数学模型 ③采样系统-系统分析-数学模型 IV. TP27

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 09084 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

责任编辑:贾仲良

印刷者:北京密云胶印厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:19.25 字数:457 千字

版 次:1994 年 11 月第 1 版 1994 年 11 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-01615-1/TP·684

印 数:0001—4000

定 价:11.20 元

前 言

本书是为非控制类专业本科生编写的基础教材。其内容曾为清华大学计算机系本科生讲授多遍。在多次讲课的基础上,经过对材料的精心选择和系统组织而形成该书。它力图用较少的篇幅,系统地介绍系统分析和控制理论中的最基本和核心的内容。

本书着重介绍了基于传递函数的经典控制理论,它是系统分析和控制的基本内容,也是目前工程上应用最广泛的理论和方法。基于状态空间模型的现代控制理论具有适用范围宽、表示简洁、便于计算机计算等优点,因而它也是不可或缺的部分。这两种理论在历史上是先后发展起来的,本书尝试将它们互相结合、融为一体地加以介绍,并突出其中最主要的内容。

本书内容以线性连续系统为主,这是系统分析和控制理论中的基础内容。同时,随着计算机应用的日渐广泛,越来越多的系统采用计算机控制。因而本书也用了一定的篇幅介绍采样控制系统理论,它为计算机控制系统的分析和设计提供了理论基础。

在介绍控制系统分析和设计的各种方法时,本书着重介绍频域法,尤其是对数频率特性法。该方法具有作图容易、分析方便、物理意义明显等优点。对另一种方法——根轨迹法只作了十分简单的介绍。这一方面是受学时和篇幅的限制,而更主要是考虑到对于非控制类专业的学生,没有必要花费更多的时间和精力去学习解决同一问题的另外一种方法。

本书内容力求理论联系实际,注重实用。对于基本理论和方法的叙述,重点不在形式化的推证过程,而更侧重于物理概念的阐述和它们的具体应用。同时,书中也对有些内容进行了加工和提炼,以求更加简单和实用。例如,本书没有介绍信号流程图,而是结合结构图介绍了梅逊公式,具体表述上也有改进,使其更便于应用。对于控制系统的分析和设计,本书总结了一些比较简单实用的方法,并给出了一些估算系统性能的近似公式。

为了便于巩固和检验所学内容,同时也为自学的读者提供方便,本书每章后面均附有习题。同时书后附有部分习题的答案及实验指导。

本书可用作有关专业本科生的教材,大约需要 70 学时,全部内容可以在一个学期内授完。

在本书编写过程中,陆文娟参加了第二、三、四章的编写,叶榛、盛放、郭木河也为本书作了有益的工作。在此向他们表示感谢。

由于作者的水平所限,书中尚有许多不足之处,欢迎读者批评指正。

孙增圻

1993 年 10 月于清华大学

目 录

前言	I
第一章 绪论	1
1.1 系统	1
1 什么是系统	1
2 系统的分类	2
1.2 控制系统	3
1 基本概念	4
2 开环控制	4
3 闭环控制	6
4 复合控制	8
1.3 系统分析与控制	9
习题	10
第二章 控制系统的数学模型	12
2.1 概述	12
1 什么是数学模型	12
2 怎样建立数学模型	12
2.2 微分方程	13
2.3 传递函数	14
2.4 状态方程	17
2.5 传递函数与状态方程的转换	19
1 状态方程到传递函数的转换	20
2 传递函数到状态方程的转换	21
2.6 结构图	26
1 结构图表示	26
2 结构图的等效变换及化简	27
3 梅逊公式	32
2.7 脉冲响应和阶跃响应	36
1 单位脉冲响应	36
2 单位阶跃响应	37
2.8 频率特性	38
2.9 非线性模型的线性化	39
2.10 系统建模举例	42
1 机械转动系统	42
2 直流电动机	44
3 直流电机控制系统	47
4 温度控制系统	49

• I •

习题	49
第三章 控制系统的时域分析	61
3.1 基于微分方程和传递函数求解时间响应	61
1 典型输入函数	61
2 基于高阶微分方程求解时间响应	62
3 基于传递函数求解时间响应	65
3.2 基于状态方程求解时间响应	66
1 状态方程的求解	67
2 矩阵指数	71
3.3 稳定性	72
1 线性定常系统的稳定性条件	72
2 劳斯判据	73
3.4 能控性和能观性	76
1 基本概念	76
2 能控性和能观性判据	77
3.5 稳态性能	80
1 基本概念	80
2 阶跃输入时的稳态误差	83
3 斜坡输入时的稳态误差	84
4 抛物线输入时的稳态误差	85
3.6 动态性能指标	87
1 阶跃响应指标	87
2 积分型指标	88
3.7 低阶系统动态性能	89
1 一阶系统	89
2 二阶系统	90
3.8 高阶系统动态性能	94
1 高阶系统的近似简化	94
2 附加零极点的影响	96
3.9 根轨迹简介	98
1 问题描述	98
2 根轨迹的绘制	99
3 根轨迹的主要应用	101
习题	103
第四章 控制系统的频域分析	111
4.1 概述	111
1 频域分析法的特点	111
2 频率特性与时域响应的关系	112
4.2 频率特性图	115
1 极坐标图	116
2 对数频率特性图	117
4.3 基本环节的 Bode 图	120

1	比例环节	120
2	积分环节	121
3	纯微分环节	121
4	一阶惯性环节	121
5	一阶微分环节	122
6	二阶振荡环节	122
7	二阶微分环节	124
8	非最小相位环节	124
4.4	复杂传递函数的 Bode 图	125
4.5	Nyquist 稳定判据	129
1	幅角原理	129
2	基于极坐标图的 Nyquist 判据	131
3	基于 Bode 图的 Nyquist 判据	136
4.6	稳定裕量	141
1	相位裕量	141
2	增益裕量	142
4.7	闭环与开环频率特性的关系	143
4.8	性能指标	145
1	稳态性能指标	145
2	时域动态指标	145
3	闭环频域动态指标	146
4	开环频域动态指标	146
5	抗干扰性能	147
6	控制作用	148
7	鲁棒性	148
4.9	根据开环频率特性分析系统性能	149
1	开环对数频率特性与稳态性能	149
2	开环模型与动态性能	150
3	几个近似关系	155
4	根据开环 Bode 图分析系统时域动态性能	158
	习题	161
第五章	控制系统的设计	170
5.1	概述	170
1	控制器的设计方法	170
2	控制器的结构	171
5.2	期望开环频率特性	172
1	典型的期望开环特性	172
2	稳态性能与低频段	173
3	动态性能与中频段	173
5.3	常用串联校正传递函数	181
1	超前校正	181
2	滞后校正	184

3	超前滞后校正	185
5.4	串联校正设计举例	187
1	综合法设计	188
2	分析法设计	191
5.5	并联校正	191
1	并联校正的等效关系	191
2	速度反馈	193
3	速度微分反馈	194
4	并联校正设计举例	196
5	串联校正与并联校正的比较	198
6	两种校正方法的综合应用及校正装置的局限性	198
5.6	标准传递函数法	199
1	ITAE 准则	200
2	按巴特渥斯滤波器确定标准传递函数	201
3	标准传递函数法综合串联校正装置举例	203
5.7	抗干扰性能的考虑	204
5.8	复合控制	205
1	跟踪输入的复合控制	206
2	抗干扰的复合控制	207
5.9	极点配置设计法	209
1	按极点配置设计控制规律	209
2	按极点配置设计观测器	212
3	分离性原理	215
4	跟踪系统设计	218
	习题	221
第六章	采样控制系统理论	225
6.1	概述	225
6.2	采样控制系统的数学描述	226
1	差分方程	226
2	离散状态方程	226
3	z 变换及其性质	228
4	离散传递函数	231
5	结构图	236
6.3	采样控制系统分析	238
1	计算时间响应	238
2	稳定性	239
3	能控性和能观性	241
4	稳态性能	241
5	动态性能	244
6.4	采样控制系统的设计	251
1	连续系统等效设计法	251
2	直接离散化设计法	255

3 极点配置设计法	258
习题	270
主要参考文献	271
附录一 拉普拉斯变换表	272
附录二 部分习题参考答案	274
附录三 《系统分析与控制》课实验指导	279
实验一 连续系统的时域分析	279
实验一的程序使用说明	282
实验二 开环频率特性与系统性能的关系	285
实验三 控制系统设计的模拟研究	289
实验四 采样控制系统的分析和设计	292
实验四的程序使用说明	295
KJ92 型自动控制系统模拟机简介	298

第一章 绪 论

1.1 系 统

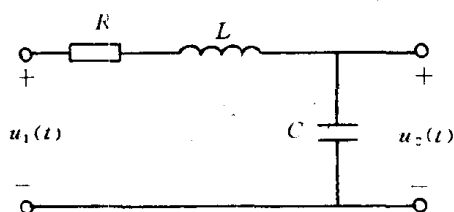
1 什么是系统

系统对于人们来说并不是一个陌生的名词,如电路系统、机械制造系统、化工过程系统、航天飞行系统、社会经济系统、生态环境系统、人体生命系统等都是经常碰到的术语。但是,要确切回答什么是系统却不是一件很容易的事情。由于系统的概念含义很广,因此很难给出非常严格的定义。

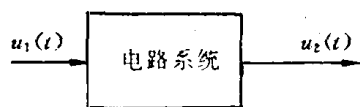
一般说来,系统可以看成是由相互关联和相互作用的若干部分组合而成的具有特定功能的整体。

例如,图 1.1(a)所示为一电路系统,它是由电阻、电感和电容这三个部件依次串联而组成的串联谐振网络。对于该电路系统也可以用图 1.1(b)所示的结构图来表示,其中 $u_1(t)$ 是系统的输入, $u_2(t)$ 是系统的输出。

再如,图 1.2(a)所示为一个具有两个关节的平面机械手的简化示意图。它是由两个手臂、两个关节、一个抓手以及两个安装在关节处的电机(图中未画出)所组成的机械手系统。它也可用图 1.2(b)所示的结构图来表示。其中 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 是该系统的输入量,它们分别表示加在两个关节控制电机上的控制电压; $x(t)$ 和 $y(t)$ 是该系统的输出量,它们表示机械手末端的位置。

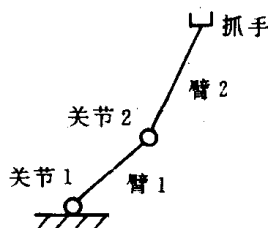


(a)

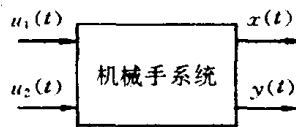


(b)

图 1.1 电路系统



(a)



(b)

图 1.2 机械手系统

从上面两个例子可以看出,一个系统可以用图 1.3 所示的一般形式的结构图来表示。其中 $u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)$ 是系统的 m 个输入, $y_1(t), y_2(t), \dots, y_r(t)$ 是系统的 r 个输出。输

入信号通常是控制输入、参考输入或干扰输入,某些类型的输入信号(如干扰)常常是不可测量的。而输出信号一般均假定可以通过传感装置测量得到。

本书主要研究动态系统或称为动力学系统。对于动态系统,其输出和输入的关系常常可以用一组微分方程或差分方程来描述。

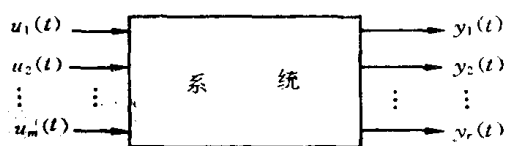


图 1.3 具有 m 个输入 r 个输出的系统

2 系统的分类

按照不同的标准可以有不同的分类方法,下面给出常见的几种。

(1) 按物理属性分

按照系统的物理属性和应用的领域,系统主要分为两大类:工程系统和非工程系统。工程系统主要指工业上应用的各种系统。如化工系统、热工系统、冶金系统、制造系统、航空航天系统等。非工程系统则包罗万象,它包括了除上述工程系统以外的各种系统,如经济系统、社会系统、生态系统、生命系统、人口系统等。

(2) 按方程类型分

前面提到,对于动态系统,其输出量与输入量之间的关系可以用一组微分方程或差分方程来描述。如果描述动态系统的方程是线性的,则称相应的系统为线性系统,否则为非线性系统。线性系统的一个最大的特点是满足叠加原理。

设系统的行为可以用如下的算子形式描述

$$y(t) = F(u) \quad (1.1)$$

对于线性系统,则有

$$F(k_1 u_1 + k_2 u_2) = k_1 F(u_1) + k_2 F(u_2) \quad (1.2)$$

上式便是叠加原理的数学描述。

实际上,严格的线性系统是很少的。但是,许多非线性系统可以在一定程度上用线性系统来近似。由于线性系统的分析和控制相对较为简单,相应的理论比较成熟,而且它也是进一步分析非线性系统的基础,因此本书将只讨论线性系统的分析和控制。

(3) 按参数类型分

在描述系统的方程中,如果所有的参数均为常数,则称相应的系统为定常系统或称时不变系统;反之,若其中有些参数是随时间变化的,则称相应的系统为时变系统或非定常系统。

注意,定常系统和时变系统是针对系统的参数而言的;而线性系统和非线性系统是针对系统的变量而言的。如果一个系统既是线性系统也是定常系统,则合称为线性定常系统。本书中着重讨论线性定常系统。

例如,下面两个微分方程描述两个不同的系统

$$\dot{y}(t) + 3y(t) = 4u(t) \quad (1.3)$$

$$\dot{y}(t) + 3ty^2(t) = 4u(t) \quad (1.4)$$

根据上述定义,式(1.3)是线性定常系统,式(1.4)是非线性时变系统。

还有另外一种按照参数类型划分系统的方法。如图1.1所示的RLC串联电路。系统的参数可以用 R 、 L 、 C 三个集总的参数来描述,其相应的数学描述为常微分方程,这样的系统称为集总参数系统。显然,式(1.3)和(1.4)所示即为集总参数系统。还有另外一类系统,它包含参数沿空间分布的元件,如长传输线、长传热导体等,相应的数学描述为偏微分方程,这样的系统称为分布参数系统。

(4) 按信号类型分

若系统中各处的信号(这里所说的信号也就是前面说的变量)均为时间的连续信号,则称该系统为时间连续系统或简称连续系统,相应的数学描述为微分方程。显然,式(1.3)和(1.4)所示的系统均为连续系统。

若系统中各处的信号均为时间的离散信号,则称该系统为时间离散系统或简称离散系统。下式所描述的系统即为离散系统

$$y(k) + 0.5y(k-1) = 2u(k) \quad (1.5)$$

在实际的工程系统中很少有真正的离散系统,但是很多计算机控制系统可以简化为离散系统来进行分析和设计。

若一个系统中既含有时间连续信号也包含有时间离散信号,它们之间用采样器或保持器相连接(第六章将对此作具体介绍),则该系统为采样数据系统,简称采样系统。如果忽略计算机及其接口电路中的量化效应,计算机控制系统即为典型的采样系统。

若在一个系统中包含有数字信号,则称该系统为数字系统。计算机中用二进制数所表示的量即为典型的数字信号,它既是时间上离散的又是幅值上量化的信号,因此,包含计算机的系统均为数字系统。为了简化问题的分析,数字系统常常简化为采样系统、离散系统甚至连续系统来进行分析。

本书将用主要篇幅讨论连续系统,最后一章集中讨论离散和采样系统。

(5) 按变量个数分

如图1.3所示,若 $m=r=1$,即系统的输入和输出均为一个变量,则称该系统为单输入单输出系统或简称为单变量系统。若输入和输出量的个数均大于1,则称相应的系统为多输入多输出系统或称多变量系统。介乎这两者之间的则有单输入多输出系统和多输入单输出系统,有时也将它们归类于多变量系统。本书将主要讨论单输入单输出系统。

此外,若按照系统的规模可以将系统划分为一般系统、大系统和巨系统。若按照系统的复杂程度则可分为简单系统和复杂系统。若按照系统所具有的智能高低则可划分为普通系统和智能系统。

1.2 控制系统

控制系统是系统的一个子类。本书将着重研究控制系统这个子类,而且主要是工程控制系统。下面对控制系统的基本概念及主要的控制方法作一概述。

1 基本概念

什么是控制系统,这很难给下一个准确的定义。不妨可以这样说:通过一定的控制方法,使系统能够达到要求的性能,这样的系统便称为控制系统。

控制系统所要求的性能,归纳起来主要有以下两个方面:

(1) 跟随输入的性能。对于一个控制系统,通常都要求其输出量随输入量的变化而变化,输入量可能是常数或随时间变化的轨迹。如工业过程中常见的温度控制系统、压力控制系统等,其输入量通常是常数,因而要求控制系统的输出也维持为恒值,这时的输入通常称为给定值、整定值或期望值。在另一些情形中,如雷达天线跟踪空中目标的控制系统中、弧焊机器人末端跟踪焊缝轨迹的控制系统中,其输入量则是随时间变化的轨迹,要求控制系统的输出要能够跟随输入轨迹的变化而变化,这时的输入通常称为参考输入、期望输入或指令输入等。

(2) 抗干扰的性能。对于一个控制系统,它除了受到参考输入的作用外,往往还会受到外界干扰的作用,如图 1.4 所示。其中参考输入是希望的输入,干扰则是不希望的输入。这时控制的目标除了上面第一条,即跟随输入的性能要求外,还要求控制系统具有抗干扰的性能,即系统的输出尽量不受干扰的影响。

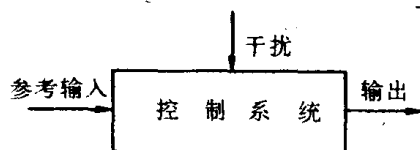


图 1.4 控制系统的输入和输出

综合以上两条,对控制系统的性能要求可以归结为一句话:要求控制系统的输出尽量跟随参考输入的变化,而尽量不受干扰的影响。

针对每个具体的控制系统,对以上两条控制性能的要求,其侧重点可能不一样。对于参考输入为定值或很少变化的情况,这时的性能要求主要是抗干扰。这样的控制系统通常称为调节系统,如上面所说的温度控制系统,压力控制系统等均为调节系统。对于参考输入随时间变化的情况,主要是要输出量紧紧跟随输入量的变化而变化,同时也要求具有抗干扰性能。这时由于侧重点在于跟随输入,因而常称这样一类系统为跟踪系统、随动系统或伺服系统。如上面提到的雷达天线跟踪目标的控制系统、弧焊机器人末端跟踪焊缝的控制系统均为跟踪系统。

一个控制系统主要由控制器和控制对象两大部分组成,它们一起组成了控制系统以实现所要求的控制性能。

为了实现所要求的控制性能,通常可采用以下三种控制方法:开环控制、闭环控制和复合控制。

2 开环控制

若控制器与控制对象之间只有正向作用而没有反向联系,如图 1.5 所示,这样的控制过程称为开环控制。

例如,图 1.6 表示一个手动调压系统。它就是一个简单的开环控制系统,其中激磁电压 u_1 是参考输入,发电机的激磁回路是控制器,激磁磁通 ϕ 是控制作用,发电机的电枢回

路是控制对象,电枢端电压 u_2 是输出量,有时也称作被控制量,负载变化可以看成是主要的干扰。这里只有控制器到控制对象的正向作用,没有控制对象到控制器的反向联系,因而这是典型的开环控制系统。

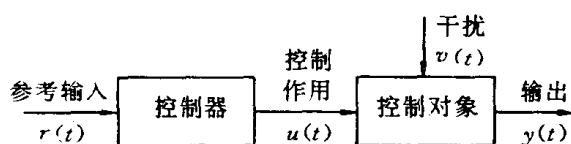


图 1.5 开环控制

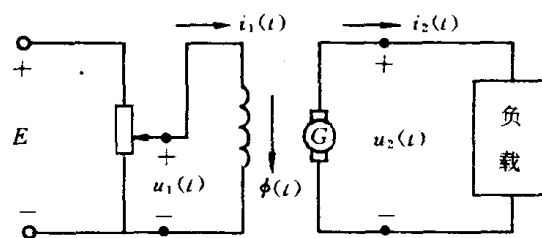


图 1.6 手动调压系统

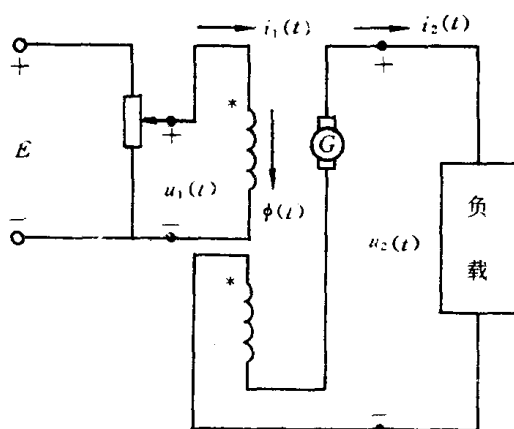


图 1.7 具有抗干扰补偿的调压系统

上面讨论的开环控制主要考虑输出跟随输入的控制,而对于干扰则没有采取任何控制措施。例如在图 1.6 中,若负载电流增大,即 $i_2(t)$ 增大,则输出电压 $u_2(t)$ 便要减小,在这里未采取任何控制措施来维持 $u_2(t)$ 不变或使 $u_2(t)$ 减小得少一些。鉴于此,在图 1.6 的基础上适当加以修正,如图 1.7 所示,便得到一个具有抗干扰控制性能的调压系统。这里,在电枢回路中也串联了一个线圈,它产生的磁通与激磁回路所产生的磁通的方向是一致的。当负载发生变化时,譬如说负载电流增大,即 $i_2(t)$ 增大时,如果没有这个串激线圈的作用,输出电压 $u_2(t)$ 将减小。由于 $i_2(t)$ 增大使总的磁通 $\phi(t)$ 也增大,这时若适当地设计该串激线圈的匝数,便可使输出电压 $u_2(t)$ 维持不变。画出这时的系统结构如图 1.8 所示。从图中看出,这时仍只有控制器对控制对象的正向作用,而无控制对象对控制器的反向联系,因而它仍然是开环控制,与上面不同的是,它增加了一个对干扰的补偿控制作用。

开环控制的结构和原理都比较简单,它的最大缺点是控制精度不高。由于在开环控制系统中只有控制器对控制对象的正向作用,对于控制的效果没有反馈,因而控制误差不能得到纠正。如在图 1.6 中由于负载变化产生输出量的误差便是这种情形。在图 1.7 中增加了对于

干扰的补偿措施,显然它对于负载变化这种干扰具有很好的补偿作用,但它对于别的干扰(如电网电压波动)却没有任何补偿作用。对于干扰的补偿首先要求它是可以测量的,对于不能测量的干扰,也就无法采用补偿的控制方法,下面将要介绍的闭环控制方法在一定程

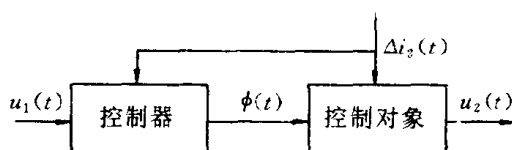


图 1.8 具有干扰补偿的开环控制

度上可以克服上述缺点。

3 闭环控制

若控制器与控制对象之间既有正向作用又有反向联系,如图 1.9 所示,这样的控制过程称为闭环控制。控制对象对控制器的反向作用通常称为反馈,因此闭环控制也称反馈控制。

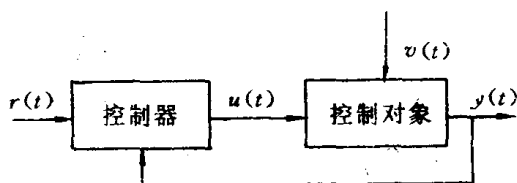


图 1.9 闭环控制

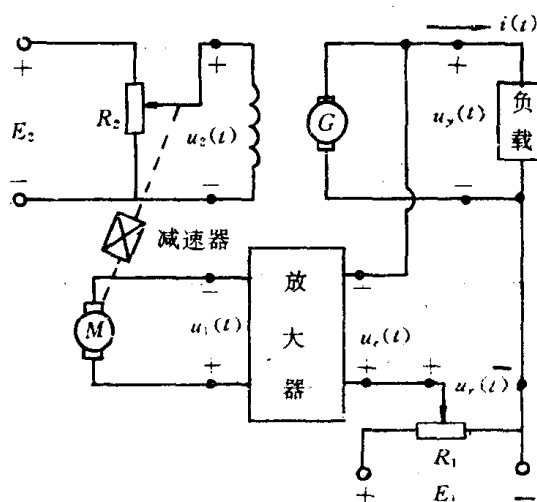


图 1.10 自动调压系统(一)

图 1.10 表示了一个反馈控制的自动调压系统。下面具体分析它的反馈控制原理。为了分析方便,画出该系统的原理框图如图 1.11 所示。

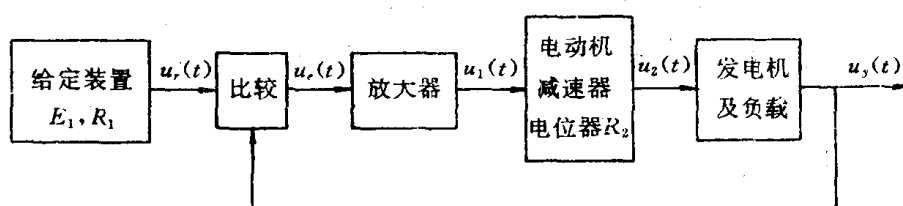


图 1.11 自动调压系统(一)的原理框图

设系统原已处于稳定状态,即 $u_y(t) = u_r(t)$, $u_e(t) = 0$, $u_1(t) = 0$, 电机不转,系统处于静止状态。

首先考虑系统跟随输入的性能。设参考输入 $u_r(t)$ 增大,则 $u_e(t) = u_r(t) - u_y(t)$ 也增大, $u_1(t) = K u_e(t)$ 也随之增大(其中 K 是放大器的放大倍数), $u_1(t)$ 加到电动机的电枢上使电机转动,带动电位器旋钮转动,使电压 $u_2(t)$ 发生变化。若电机接线的极性正确,电机转动的结果使得电压 $u_2(t)$ 增加,最后 $u_y(t)$ 也增加。依靠反馈控制,最终使得输出量跟随输入量的变化而变化。进一步分析看出,只要存在误差,即 $u_e(t) \neq 0$,则电机便要旋转,对输出量进行调节,一直到 $u_y(t) = u_r(t)$ 即 $u_e(t) = 0$ 整个系统才稳定下来。系统进入稳态

后,原理上输出量的稳态误差为零,因此称该系统对于给定量输入是无静差的。

接着考虑系统抗干扰的性能。设负载电流增大,即 $i(t)$ 增大 $\rightarrow u_y(t)$ 减小 $\rightarrow u_e(t) = u_r(t) - u_y(t)$ 增大 $\rightarrow u_1(t) = Ku_e(t)$ 增大 $\rightarrow$ 电机转动 $\rightarrow u_2(t)$ 增大 $\rightarrow u_y(t)$ 增大。这里“ $\rightarrow$ ”表示“引起”或“导致”的意思。从上面的分析看出,由于负载的变化引起输出量的变化,依靠反馈控制作用,最终又将输出量调节到原来的数值。从而并没有产生输出量的误差。因此,该系统对于负载变化的干扰也是无静差的。

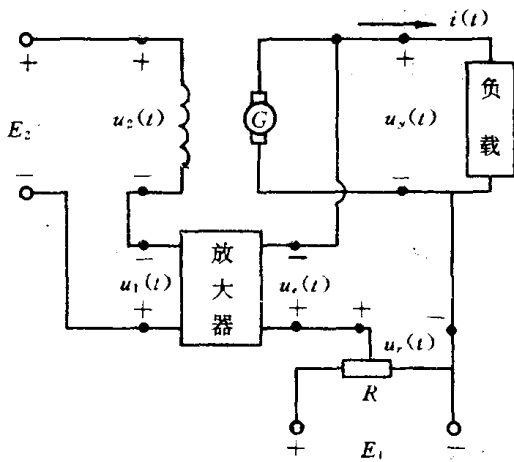


图 1.12 自动调压系统(二)

将图 1.10 稍加修改变成如图 1.12 所示,这时它仍是反馈控制的自动调压系统。仿照上面类似的分析,不难看出它仍具有跟踪输入和抗干扰的性能。但是,这时它对于给定量输入和负载电流变化的干扰均是有静差的。下面以抗干扰性为例来说明这一点。

设系统原来的状态为 $u_y(t) = u_r(t)$, $u_e(t) = u_1(t) = 0$, $u_2(t) = E_2$ 。若负载电流增大,则将引起如下一系列的变化: $i(t)$ 增大 $\rightarrow u_y(t)$ 减小 $\rightarrow u_e(t) = u_r(t) - u_y(t)$ 增大 $\rightarrow u_1(t) = Ku_e(t)$ 增大 $\rightarrow u_2(t) = E_2 + u_1(t)$ 增大 $\rightarrow u_y(t)$ 增大。但在该例中,

输出电压 $u_y(t)$ 将不能恢复到原来的数值,因为若 $u_y(t)$ 恢复到原来数值,则 $u_e(t) = 0$, $u_1(t) = 0$, $u_2(t) = E_2$, 控制作用 $u_2(t)$ 又回到系统原来的状态,输出电压 $u_y(t)$ 随负载电流增大而减小,这说明 $u_y(t)$ 不可能回复到原来的数值,也就是说依靠反馈控制只能减小误差而不能完全消除误差。这说明它对负载变化的干扰是有静差的。

根据上述分析可以总结出反馈控制的基本原理为:利用误差来产生调节作用并进而消除或减小误差。这是与图 1.7 所示系统中利用干扰补偿的控制原理完全不同的。

在反馈控制系统中,一个很重要的问题是反馈的极性。在上面的讨论中均假设误差的调节作用使得误差减小或消除,这样的反馈连接称为负反馈。如果相反,即误差的调节作用是使误差进一步增加,这样的反馈连接称为正反馈。例如在图 1.10 中,若将电动机两端的连线对调位置,那么当负载增大时将会产生如下的一系列变化:负载增大 $\rightarrow i(t)$ 增大 $\rightarrow u_y(t)$ 减小 $\rightarrow u_e(t)$ 增大 $\rightarrow u_1(t)$ 增大 $\rightarrow$ 电机转动(转动方向与以前相反) $\rightarrow u_2(t)$ 减小 $\rightarrow u_y(t)$ 进一步减小,从而使得输出电压更加偏离整定值,这是我们所不希望的,所以一定要接成负反馈才能产生要求的调节作用。

如何判断反馈极性在实际系统调试中是一个很重要的问题。在有些情况下可以直接进行试验,若错接成正反馈,系统的误差将越来越大,最后导致饱和。如出现这种情况,将闭环系统中任何一处的极性调换即可改换成负反馈。但在许多情况下往往不允许作这样的试验,因为一旦出现正反馈,将可能导致破坏性的后果。这时可采用如下的方法来判断反馈的极性:在闭环系统的环路上任取一处 a 点断开,如图 1.13 所示。在断开处 a 加一小的扰动输入,然后检测或分析在断点的另一端 a' 所产生的输出信号,如果 a' 的信号与 a

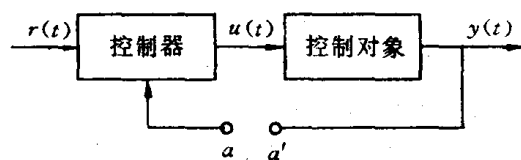


图 1.13 判断反馈极性

点的信号极性相反,则说明原来的连接为负反馈,反之即为正反馈。

以上列举了两个闭环控制系统的典型例子。图 1.14 表示了一般情况下闭环控制系统的原理结构,其中各功能部件的作用分别为:

给定装置——用来产生参考输入。

比较装置——将参考输入与反馈信号进行比较。

校正装置——用来改善闭环系统的稳定性和其它性能。

放大装置——信号放大及变换。

执行装置——具体产生控制作用的装置。

控制对象——实际被控过程。

量测装置——量测输出量,产生所需要的反馈量。

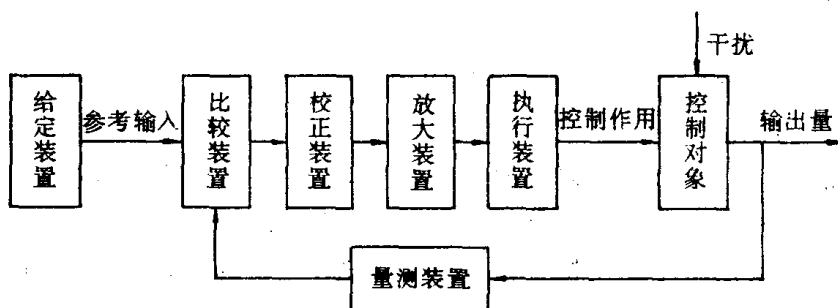


图 1.14 闭环控制系统的典型结构

图 1.11 表示了图 1.10 所示自动调压系统的原理框图,与图 1.14 的典型结构相比,这里缺少了校正装置和量测装置。校正装置主要用来改善系统的稳定性和其它性能,本书第五、第六章将要对此进行详细讨论。图 1.10 的系统只是用来说明基本的反馈控制原理,因而未加入校正装置,同时在该系统中输出量即可直接用作反馈量,因而不需要附加的量测装置。

参照图 1.14 的典型结构可以画出图 1.12 所示系统的原理结构图,如图 1.15 所示。其中也没有校正装置和量测装置。

4 复合控制

前面介绍了开环控制和闭环控制的两种控制方法。开环控制具有结构简单、实现容易、工作稳定的优点,其主要的缺点是控制精度较低,即使采用干扰补偿,也只能针对特定