

中国科学院指定考研参考书



修订版

# 自动控制原理

庞国仲 编

ZIDONG KONGZHI  
YUANLI

中国科学技术大学出版社

# 自动控制原理

(修订版)

庞国仲 编

中国科学技术大学出版社

2007·合肥

### 图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/庞国仲编. —合肥:中国科学技术大学出版社,1998.2(2007.8重印)  
ISBN 978-7-312-00987-7

I 自动控制原理

II 庞国仲

III ① 线性系统 ② 非线性系统 ③ 系统设计 ④ 系统分析

IV TP

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路96号 邮编:230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

全国新华书店经销

开本:787×1092/16 印张:29.25 字数:730千

1993年3月第1版 1998年2月修订版 2007年8月第4次印刷

印数:12001—14000册

定价:40.00元

## 内 容 简 介

本书比较全面地阐述了古典控制理论,包括单变量线性定常系统的数学描述及性能指标、时域分析、根轨迹法和频率特性法,控制系统的设计与校正、控制对象时滞特性及时滞系统的设计方法。还较系统地介绍了非线性系统的分析方法,包括描述函数法、相平面法、非线性系统线性化及基于这一理论的试验建模方法。

在阐述理论和方法时,特别着重控制理论中的基本概念,如反馈、动态、稳定性和非线性线性化等。

本书注重控制系统的实际知识,如控制对象的动态特性及工程上通常采用的简化处理方法,时滞系统设计等。

本书配有较多的习题和例题,以利读者深入理解和运用基本理论。

本书可作为高等学校自动控制专业及有关专业本科生学习自动控制理论的教材,亦可作为科技和工程人员进修自动控制理论的参考书。

# 前 言

所谓自动控制,就是在没有人直接参与下,由控制器(一种装置)产生的控制信号使生产过程或控制对象的某一物理量准确地按照预定的规律变化。

随着科学技术和工业生产的发展,控制理论已广泛用于工业生产的各个领域,并成为探索各种新技术的工具。

自动控制原理是控制理论的基础,它是研究控制理论中的基本概念、基本理论和方法。其主要内容是:单变量线性定常系统理论、分析与设计方法,非线性系统分析方法。这些理论和方法可直接用于实际控制系统的设计。自动控制原理在控制理论中占有非常重要的地位。

基于自动控制原理的特点,编写该书时力求做到以下几点:

1. 作为理论课,要保持其系统性和完整性;
2. 作为专业基础课,应该准确、清楚地阐述控制理论中的基本概念;
3. 注重理论联系实际和系统设计的实际知识。

本书以理论的系统性和完整性为主,基本概念和控制系统的实际知识放在有关章节中阐述,独立性较强的部分单独为章。

自动控制原理的主体是单变量线性定常系统理论的分析及设计方法,这是本书阐述的重点。

第一章讲述控制系统的基本知识。重点是了解开环系统和闭环系统的特点,并指出反馈控制就是利用偏差实现控制。

第二章是单变量线性定常系统的数学描述。在其三种数学描述中,主要讲述传递函数,对于比较简单的控制对象和元件在大范围内是线性的,因而很容易求出它们的传递函数。而比较复杂的工业对象和元件都具有非线性特性。除几种典型非线性特性外,可以利用非线性线性化原理,将它们近似为线性系统。因此,非线性线性化原理是非常重要的。本章还从物理概念和数学上阐述系统动态这一重要概念。由于各种不同的物理系统有相同的动态特性及数学描述形式,因而控制理论能用于不同的工程领域。

第三章为单变量线性定常系统的性能指标。首先推导出单变量线性定常系统输出响应的一般形式,据此引入稳定性两个基本概念:渐近稳定性和有界输入-有界输出稳定性,并证明了相应的稳定性定理,进而得到确定线性定常系统稳定性的代数判据。依据线性定常系统的单位阶跃响应,定义了系统的瞬态性能指标。本章还研究了系统稳态特性,定义了系统的偏差和误差,指出了二者的差别。在单变量线性定常系统中用稳态偏差代替稳态误差。

第五章为系统的时域分析。重点研究了典型的一阶系统和二阶系统在几种输入信号下的响应及二阶系统的时域指标。这是因为:这两类系统经常出现,许多高阶系统实际上可以近似为一阶系统或二阶系统,而且可以清楚地阐明其时间常数、阻尼比和自然频率的含义。在高阶系统中,主要讨论高阶系统近似为低阶系统的原则,并指出用二阶系统近似代替高阶系统在控制系统设计中占有重要的地位。

第六章为根轨迹法,主要研究负反馈系统中增益参数  $k$  变化时,根轨迹的作图规则。进而

讨论了任何参数或两个参数同时变化时及正反馈系统根轨迹的作图规则。

第七章为频域分析。首先介绍了开环频率特性的三种图形形式,在此基础上阐述了单变量线性定常系统的奈氏稳定判据和系统稳定裕量。规定了系统的开环和闭环频域指标,并建立了典型二阶系统时域指标和频域指标的关系。

第九章为单变量线性定常系统设计与校正。主要是用频域法和根轨迹法对系统进行串联和(或)反馈校正,并简单介绍了前馈控制,串级控制和复合控制。

第十章讨论了带时滞的单变量线性系统的分析与设计。相当广泛的一类工业对象是有时滞的,因而了解控制对象的时滞特性,对时滞系统的设计是有实际意义的。

为讲清反馈这一概念和增加控制系统的实际知识,本书增写了第四章和第八章。

第四章是在第一章的基础上,进一步阐述反馈这一重要概念及反馈在控制系统中的作用,引进了系统灵敏度的概念,并建立了反馈和系统灵敏度之间的联系。

第八章讨论控制对象的动态特性。通过分析一个实际工业对象,使我们认识到实际控制对象的动态特性是相当复杂的。要用单变量线性定常系统理论设计控制系统,必须对控制对象的动态特性进行简化和近似处理。在此基础上介绍了实际控制对象试验建立数学模型的方法。着重指出的是,系统建模和控制策略始终是一个灵敏的焦点。虽然设计了能实用的单变量系统,但由于对控制对象做了简化和近似处理,出现了系统小范围稳定大范围不一定稳定的问题,控制对象也表现出明显的参数不确定性。

第十一章深入讨论了非线性系统。实际系统都存在各种非线性因素,在设计系统时,有不同的处理方法。这里主要研究含有典型非线性特性系统的描述函数,相平面分析方法。

本书舍弃了离散系统理论,因为计算机控制系统已成为单独的一门课程。

本书没有涉及控制系统计算机辅助设计,因为单变量系统计算机辅助设计已经普及,不少学校都已把它列入正常的实验教学。

本书有较多的例题和习题,供读者学习时使用。

作者多年从事自动控制原理的教学,并完成了多个实际的工业控制系统,在此基础上,精心确定该书的内容。初稿在中国科学技术大学自动化系自动控制专业的教学中用过多次。

由于作者水平有限,书中可能存在错误和不妥之处,希望读者不吝指正。

作者

1993年2月于合肥

# 目 次

前言 .....	II
<b>1 绪 论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 引言 .....	1
1.2 人工控制和自动控制 .....	3
1.3 开环控制系统 .....	5
1.4 闭环控制系统 .....	6
1.5 反馈控制系统的组成、分类和性能指标 .....	7
习题 .....	12
<b>2 单变量线性定常系统的数学描述 .....</b>	<b>15</b>
2.1 系统的动态特性 .....	15
2.2 单变量线性定常系统的数学描述 .....	16
2.2.1 微分方程描述 .....	17
2.2.2 传递函数描述 .....	19
2.2.3 状态空间描述 .....	22
2.3 典型环节及其传递函数 .....	28
2.3.1 电路系统 .....	28
2.3.2 机械系统 .....	30
2.3.3 机电系统 .....	34
2.4 控制系统方块图 .....	36
2.5 信号流图 .....	49
2.6 非线性微分方程线性化 .....	56
习题 .....	68
<b>3 单变量线性定常系统的性能指标 .....</b>	<b>73</b>
3.1 引言 .....	73
3.2 单变量线性定常系统的输出响应 .....	73
3.3 单变量线性定常系统的稳定性 .....	76
3.4 劳斯稳定判据 .....	79
3.5 控制系统的瞬态特性 .....	87
3.6 控制系统的稳态特性 .....	88
3.7 动态误差系数 .....	96
习题 .....	100



<b>4 控制系统中的反馈</b> .....	105
4.1 引言 .....	105
4.2 反馈可减小系统参数的变化 .....	105
4.3 反馈可改善系统的瞬态特性 .....	108
4.4 反馈可减弱干扰信号的影响 .....	109
4.5 例题 .....	112
习题 .....	116
<b>5 时域分析</b> .....	120
5.1 引言 .....	120
5.2 典型输入信号 .....	120
5.3 脉冲响应函数 .....	122
5.4 一阶系统 .....	123
5.5 二阶系统 .....	126
5.6 二阶系统的校正 .....	137
5.7 高阶系统 .....	141
5.8 复平面上稳定性分析 .....	148
习题 .....	149
<b>6 根轨迹法</b> .....	152
6.1 引言 .....	152
6.2 根轨迹的基本原理 .....	154
6.3 绘制根轨迹图的规则 .....	155
6.4 非最小相位系统根轨迹图 .....	172
6.5 参数根轨迹 .....	176
6.6 二阶系统的根轨迹校正 .....	181
习题 .....	184
<b>7 频域分析</b> .....	187
7.1 频率特性 .....	187
7.2 幅相特性 .....	189
7.3 对数频率特性 .....	203
7.4 对数幅相特性 .....	217
7.5 奈魁斯特稳定判据 .....	218
7.6 控制系统的相对稳定性 .....	233
7.7 闭环频率特性 .....	237
7.8 频域性能指标与时域性能指标间的关系 .....	245
习题 .....	257



<b>8 工业对象的动态特性及测试方法</b> .....	263
8.1 引言 .....	263
8.2 工业加热炉的动态特性 .....	263
8.3 控制对象动态特性的测试方法 .....	267
8.4 由测试的数据或曲线求对象的数学模型 .....	278
习题 .....	284
<b>9 控制系统设计与校正</b> .....	286
9.1 引言 .....	286
9.2 校正方法和校正装置 .....	288
9.2.1 滞后与超前校正装置 .....	288
9.2.2 P-I-D 校正装置 .....	292
9.3 用根轨迹法对系统进行串联校正 .....	302
9.3.1 超前校正 .....	303
9.3.1.1 超前校正装置最佳确定法 .....	304
9.3.1.2 设计超前校正装置的沃伦-罗斯(Warren-Ross)法 .....	309
9.3.1.3 确定超前校正装置的作图方法 .....	312
9.3.2 滞后校正 .....	314
9.3.3 滞后-超前校正 .....	318
9.4 用频率响应法对系统进行串联校正 .....	320
9.4.1 超前校正 .....	322
9.4.2 滞后校正 .....	326
9.4.3 滞后-超前校正 .....	330
9.4.4 抵消不希望极点 .....	333
9.5 反馈校正 .....	334
9.5.1 基于根轨迹法的反馈校正 .....	335
9.5.2 基于频率响应法的反馈校正 .....	340
9.5.3 用串联和反馈两种方法校正系统 .....	345
9.6 其它控制方式 .....	347
9.6.1 前馈控制 .....	347
9.6.2 复合控制 .....	349
9.6.3 串级控制 .....	352
习题 .....	354
<b>10 时滞系统分析与设计</b> .....	359
10.1 引言 .....	359
10.2 时滞系统的频域分析 .....	360
10.3 时滞系统的根轨迹分析 .....	363
10.4 时滞系统的分析与设计方法 .....	366

10.5 采用 Smith 预估时滞系统的稳定性 .....	373
习题.....	376
<b>11 非线性系统.....</b>	<b>377</b>
11.1 引言.....	377
11.2 常见的非线性因素及对系统特性的影响.....	382
11.3 非线性系统的描述函数方法.....	385
11.3.1 描述函数.....	385
11.3.2 用描述函数法分析非线性系统.....	394
11.3.3 非线性系统校正.....	401
11.4 非线性系统相平面分析方法.....	405
11.4.1 相平面法的基本概念.....	405
11.4.2 相轨迹作图方法.....	413
11.4.3 由相平面图求时间解.....	419
11.4.4 线性系统的相平面分析.....	422
11.4.5 非线性系统的相平面分析.....	424
11.5 利用非线性特性改善系统性能.....	438
习题.....	441
<b>附录 拉普拉斯变换.....</b>	<b>446</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>457</b>

# 1 绪 论

## 1.1 引 言

第一次工业革命促进了自动控制的飞速发展,由詹姆斯·瓦特(James. Watt)发明的蒸汽机离心调速器是一个最著名的例子。不过,这个装置在运行过程中,汽机的转速在某些条件下会自发振荡。这个问题引起了一些学者的兴趣,其中马克斯威尔(J. G. Maxwell)根据力学原理,用常系数线性微分方程描述了调速器-汽机-负荷系统,并得出一个简单的代数判据,圆满地解决了这个问题。此后,两位数学家劳斯(Routh)和赫尔维茨(Hurwitz)把这种思想扩展到用高阶微分方程描述的更为复杂的系统,1895年他们各自发表了著名的代数判据,就是现在的劳斯-赫尔维茨判据。在以后相当长的时期内,工程师们依据这个准则设计系统,保证了系统的稳定性,并具有满意的控制精度。但那时对系统的瞬态特性没有提出明确的要求。

第二次世界大战期间,军工技术的发展,要求控制系统能够准确地跟踪迅速变化的目标,即要求系统有良好的瞬态特性。当时设计这类系统所需的理论已经在通信工程中发展形成,这就是以奈魁斯特(Nyquist)稳定判据为基础的频率响应理论。

频率响应理论是分析、设计单变量系统非常有效的工具。设计者只需根据系统的开环频率特性,就能够判断闭环系统的稳定性和给出稳定裕量的信息,同时又能非常直观地表示出系统的主要参数,即开环增益与闭环系统稳定性的关系。频率响应法圆满地解决了单变量系统的设计问题。

1948年伊万斯(W. R. Evans)提出了控制系统分析、设计的根轨迹法。

由于这些贡献,控制理论第一阶段的工作基本上完成了。人们后来把以频率响应法和根轨迹法为核心的控制理论称为古典控制理论。

古典控制理论在工程系统中得到了极为广泛的应用,大大提高了工业、国防等科学技术领域的自动化水平。控制工程取得的巨大成就引发了人们新的欲念,即把这种理论推广到更为复杂的系统,在这种情况下,古典控制理论就显得无能为力了,因为:

1. 古典控制理论只限于研究线性定常系统。即使对最简单的非线性系统也无法处理;
2. 古典控制理论只限于分析和设计单变量系统,采用系统的输入-输出描述方式,这就从本质上忽略了系统结构的内在特性,因而不能处理输入和输出皆大于1的系统。实际上,大多数工程对象都是多输入-多输出系统,尽管人们做了很多尝试,但是,用古典控制理论设计这类系统都没有得到满意的结果;
3. 古典控制理论采用试探法设计系统,即按某种方法确定合适的、简单的、工程上易于实现的控制器,然后对系统进行分析,直至找到满意的结果为止。虽然这种设计方法具有实用等很多优点,但是,在推理上却是不能令人满意的,效果也不是最佳的,人们自然提出这样一个问题,即对一个特定的应用课题,能否找到最佳的设计。

由于古典控制理论的上述缺陷,促使人们研究更新的控制理论,于是,现代控制理论就应

运而生了。

50年代中期,由于空间技术的发展,控制对象更加复杂,对控制系统的要求更高,这就为控制理论的发展提出了新的研究课题。很多学者为此付出了辛勤的工作,60年代末形成了现代控制理论,其基本内容是:

1. 线性系统的状态空间理论;
2. 最佳滤波理论;
3. 最优控制理论;
4. 系统辨识理论。

现代控制理论采取状态空间描述形式,以解析计算为主要手段,实现性能指标最优。它在宇航领域获得了卓有成效的应用。

然而当现代控制理论用于工业过程控制时,效果并不像人们期望的那样理想,其主要原因是:

1. 工业对象难以得到准确的数学模型;
2. 控制对象的性能指标难以用明显的数学形式表达出来;
3. 设计的控制器往往过于复杂,甚至不可实现。

在这样的背景下,人们又恢复了对频域法的兴趣。70年代初,英国学者罗森布洛克(Rosenbrock)以状态空间和矩阵代数为基础,把单变量系统频域方法推广到多变量系统。到70年代末,终于形成了多变量系统频域设计方法。该方法是把具有强关联的多输入-多输出系统设计转化成若干个单变量系统设计,所以它继承了单变量系统频域法的优点:不要求精确的数学模型,容易满足工程上的限制;设计的控制器既能满足系统指标要求,又结构简单,易于在物理上实现,便于工程上推广。因而,对广大熟悉单变量系统频域法的工程技术人员具有很大的吸引力。

60年代发展的多变量系统的时域方法和70年代发展的多变量系统的频域方法都属于传统的反馈设计方法,它对于参数确定性系统能进行有效的设计。但是,比较复杂的控制对象,如飞机和导弹,工业加热炉、各种类型的精馏塔、工业锅炉和化学反应器等,都具有明显的参数不确定性。对这类控制对象采用多变量系统的时域和频域方法设计的控制系统,就难以保证系统在各种工况下都稳定,并具有良好的性能。为了解决参数不确定性系统的设计问题,70年代末,人们开始研究控制系统的鲁棒性。由于控制系统鲁棒性理论是对传统反馈理论的发展,故研究的方法也分为时域和频域方法。近年来虽然鲁棒性研究有很大的进展,但还未投入实际应用。多变量系统鲁棒性理论及分析、设计具有广阔应用前景,它是对传统反馈设计理论的革命性变革,因而是近十年来线性控制系统理论最重要的进展之一。

此外,控制理论还有很多分支,如自适应控制理论,非线性理论,时变系统理论,分布参数理论,大系统理论,随机控制、离散事件和混合动力学系统、分散控制、智能控制和混沌控制、控制系统的计算机辅助设计。

自动控制在工业、国防和科学技术中起着非常重要的作用。实现了生产过程和武器的自动化,极大地提高了生产率;自动控制使系统具有高度的准确性,大大提高了产品的质量,提高了武器的命中率和战斗力;对于某些准确度高、动作极为迅速的操作,人工无法实现,而采用自动控制技术却能有效地完成;某些人工不能直接参与的场合,如原子能生产过程、导弹制导、人造卫星空中检修、海底探矿等,更离不开自动控制技术。

## 1.2 人工控制和自动控制

在现代工业生产过程中,有很多物理量(如流量、温度、压力、转速、位置、液位及氧量等)要求保持恒定,或按一定的规律变化。但是,这些工业设备在运行中负载经常变化,还存在着各种干扰,使这些物理量偏离给定值或给定的运动规律。为此需要调整相应的另一些物理量以适应负载的变化和抵消干扰的影响。例如,在工业锅炉中,要保持蒸汽压力恒定,但是,锅炉在运行过程中的用汽量(即负载)经常变化,而且还存在着各种随机干扰,使蒸汽压力偏离恒定值。在这种情况下,就要不断改变给煤量(同时也相应改变进风量),才能使蒸汽压力恒定。类似的例子:如工业锅炉中还要保持炉膛压力恒定,汽包水位在一定范围内波动;工业加热炉中要保持热油出口温度恒定;精馏塔中塔顶温度保持恒定;火炮跟踪飞机时,火炮口要随飞机方位和俯仰的改变而变化等。那么,如何实现对这些物理量的控制呢?

起初由人对这些物理量进行控制,即人工控制。在长期的生产实践中,人们总结出控制规律及人在控制中的作用,逐渐用一些装置代替人的职能,这就实现了自动控制。下面以恒温箱控制系统为例,弄清恒温箱的人工控制、自动控制及二者的关系,进而阐明自动控制系统的工作原理。

图 1.1 是恒温箱的人工控制系统。要求恒温箱中的温度保持给定值。为了测量恒温箱中的温度,安装一个温度计来指示恒温箱中的温度,此即为系统的输出量,或称被控量。操纵者始终观察温度计的温度,并和给定温度相比较。当发现恒温箱中的温度高于给定值时,就减小调压器的输出电流,使恒温箱中的温度降低;反之,则增加调压器的输出电流,使恒温箱中的温度升高,这样就可以使恒温箱中的温度保持给定值。从上述分析可以看出人在控制中的作用:

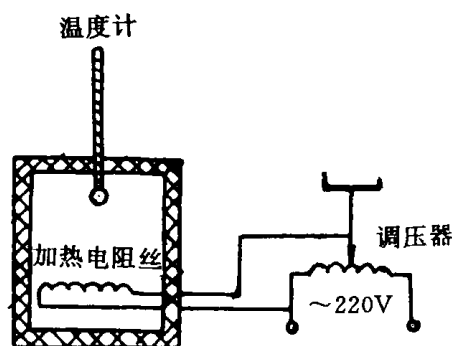


图 1.1 恒温箱人工控制系统

1. 观察恒温箱中的温度(即温度计的温度);
2. 把恒温箱中的实际温度和给定温度相比较,得出二个温度偏差的极性(正或负)和大小;
3. 根据偏差的极性和大小,用手改变调压器输出电流,使恒温箱中的温度保持在给定范围内。

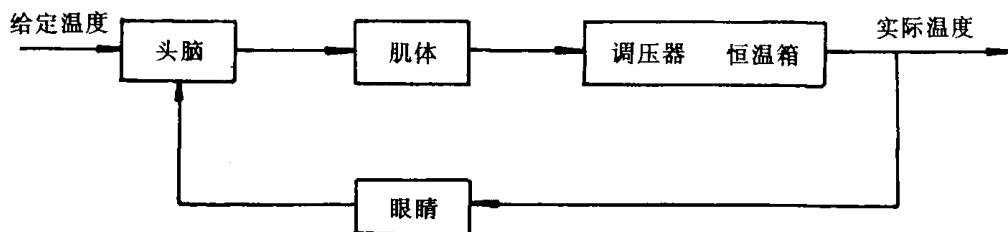


图 1.2 恒温箱人工控制系统方块图

可见,人工控制就是不断地观察被控制物理量的实际值,并和给定值相比较,求出实际值和给定值的偏差,根据偏差的极性和大小改变另一物理量,使被控制物理量的实际值等于或接

近给定值。

恒温箱人工控制系统可用方块图表示,如图 1.2 所示。

对于恒温箱人工控制系统,如果能用一些设备模仿和代替人的职能,就可以把它变成自动控制系统。

恒温箱自动控制系统如图 1.3 所示。

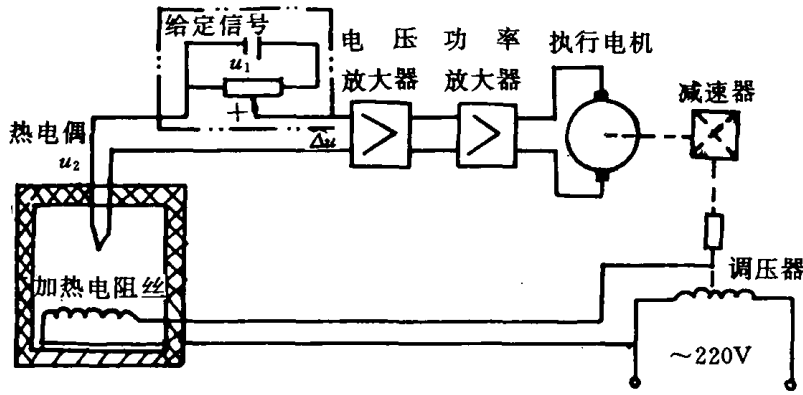


图 1.3 恒温箱自动控制系统

将恒温箱的给定温度用电压  $u_1$  表示。热电偶测量出恒温箱的实际温度,用电压  $u_2$  表示。两个电压通过比较电路产生偏差信号  $\Delta u = u_1 - u_2$ ,  $\Delta u$  的正负表示实际温度低于或高于给定温度,其大小表示两个温度偏差多大。偏差电压经过电压和功率放大后,去控制电动机的旋转速度和方向,通过传动装置带动调压器的滑动触头,以增加或减小调压器的输出电流,于是改变了恒温箱的温度,使其保持给定值。例如,当恒温箱内温度高于给定值时,  $\Delta u$  为负,这样根据  $\Delta u$  的大小,减小调压器的输出电流,直到恒温箱内温度达到给定值为止。此时  $\Delta u = 0$ ,于是电动机停止转动,这样就完成了控制任务。由这些装置便组成了自动控制系统,该控制系统也可以用方块图表示,如图 1.4 所示。

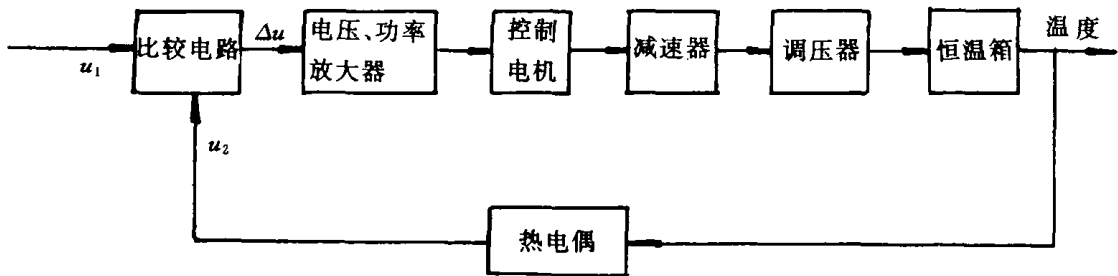


图 1.4 恒温箱自动控制系统方块图

图 1.4 可以化成图 1.5 的形式。

比较图 1.2 和 1.5 可以看出,人工控制系统和自动控制系统非常相似,测量装置(热电偶)类似于人的眼睛;比较电路完成人的大脑的功能;放大器,电机和减速器代替人的肌体。显然,只要用一些装置模仿和代替人的功能,就可以将一个人工控制系统变成自动控制系统。

人工控制系统和自动控制系统的共同点是:比较给定信号和实际信号,利用给定信号和实际信号的偏差产生控制作用以减小偏差。而在自动控制系统中,偏差是通过反馈建立起来的。所谓反馈就是把系统的输出信号(或经过变换)返回到输入端,与输入信号进行比较,产生偏差信号,并根据偏差信号的大小和极性产生控制作用,使偏差减小或消除。可见,自动控制系统是

建立在反馈基础上的,所以又称反馈控制系统。

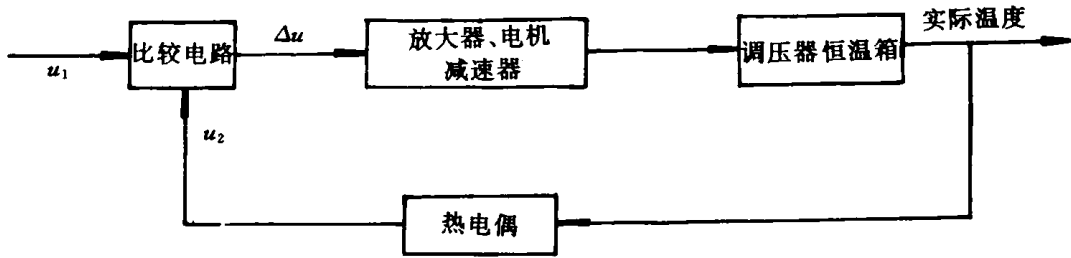


图 1.5 图 1.4 的简化形式

### 1.3 开环控制系统

控制系统中根据有无反馈,把控制系统分为开环控制系统和闭环控制系统。

一个控制系统中,如果输出信号不反馈到输入端产生控制作用,称这种系统为开环控制系统。

图 1.6 为一开环控制系统。它是由给定电压控制机械轴的转角。例如,用电压表测量电压时,就是由指针的偏转角准确地反映出被测电压的大小。又如,用电压控制飞机各操作舵的偏角,于是舵的偏角随着给定电压而变化。

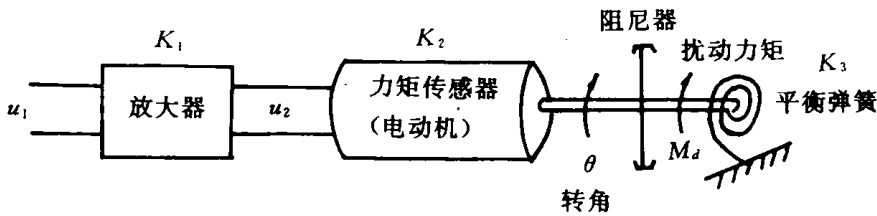


图 1.6 开环控制系统

图 1.6 所示的开环控制系统中,输入电压  $u_1$  加到放大器上,其输出电压为

$$u_2 = K_1 u_1 \quad (1.1)$$

其中  $K_1$  为放大器的放大系数。电压  $u_2$  加到力矩传感器上。如果电动机控制绕组的电感可以忽略,电动机的输出力矩为

$$M = K_2 u_2 = K_1 K_2 u_1 \quad (1.2)$$

其中  $K_2$  为电动机的系数。

在电动机力矩的作用下,机械部分将产生转动。由于受到粘性摩擦和弹簧恢复力矩的作用,最后停止在平衡位置上。此时,转角  $\theta$  和力矩  $M$  的关系为

$$\theta = K_3 M \quad (1.3)$$

其中  $K_3$  为弹簧系数。

将式(1.2)代入式(1.3)中,得到输入电压和转角的关系,即

$$\theta = K_1 K_2 K_3 u_1 \quad (1.4)$$

式(1.4)描述了该系统输入与输出的稳态关系。

如果放大器、电动机和弹簧都是线性的,即  $K_1, K_2$  和  $K_3$  都是常数,那么机械转角就能准确地反映外加电压的大小,系统就没有误差。但是,这种理想情况很难实现,因为  $K_1, K_2$  和  $K_3$



很难长期保持不变,若它们变化 10%,那么控制系统的误差就是 10%。可见开环控制系统的精度很难长期保持不变,要使开环系统精度高,就要求组成系统的各元件不仅精度高,而且其参数要长期稳定。

若该系统中存在着随机干扰,例如机械轴受到随机干扰力矩  $M_d$  作用,于是机械轴的转角为

$$\theta = K_1 K_2 K_3 u_1 + K_3 M_d \quad (1.5)$$

可见,干扰将引起误差。因为干扰力矩的变化规律事先无法确定。故不能用常规方法消除其影响。显然,开环控制系统抗干扰能力差。

开环控制系统具有结构简单、易于调整、容易实现、也不存在稳定性问题等优点。因此,在系统内部和外部扰动较小、使用的元件参数又比较稳定时,可以采用开环控制系统。

## 1.4 闭环控制系统

在控制系统中,如果把系统输出信号反馈到输入端,由输入信号和输出信号产生的偏差信号对系统进行控制,这种系统即为闭环控制系统,也称为反馈控制系统。

图 1.6 所示的开环控制系统中,在机械轴上安装一个电位计,用于测量输出转角的实际值。电位计的输出电压为  $u_f$ ,并将它反馈到输入端,把反馈电压  $u_f$  和输入电压  $u_1$  按相反的极性串接起来,加到放大器的输入端,这样就构成了反馈系统,如图 1.7 所示。

电位计输出电压为

$$u_f = K_f \theta \quad (1.6)$$

放大器输入端电压为

$$\Delta u = u_1 - u_f \quad (1.7)$$

放大器输出电压为

$$u_2 = K_1 (u_1 - K_f \theta) \quad (1.8)$$

电动机的力矩为

$$M = K_1 K_2 (u_1 - K_f \theta) \quad (1.9)$$

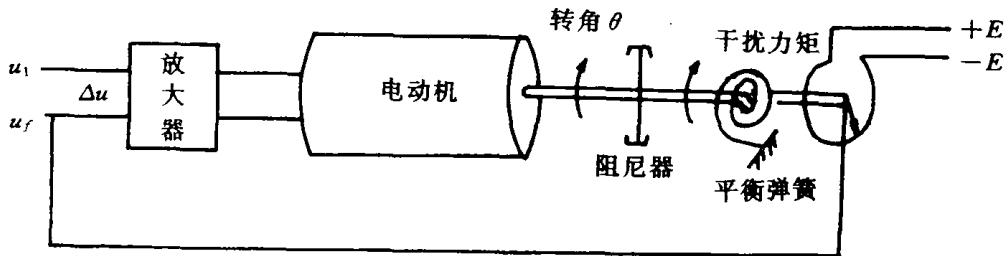


图 1.7 闭环控制系统

存在干扰力矩  $M_d$  的情况下,机械轴的转角为

$$\theta = K_1 K_2 K_3 (u_1 - K_f \theta) + K_3 M_d \quad (1.10)$$

变换上式得到

$$\theta = \frac{K_1 K_2 K_3}{1 + K_1 K_2 K_3 K_f} u_1 + \frac{K_3}{1 + K_1 K_2 K_3 K_f} M_d \quad (1.11)$$

比较式(1.5)和(1.11),可以看出,在闭环控制中干扰力矩所产生的输出量偏离仅是开环控制系统的 $(1+K_1K_2K_3K_f)$ 分之一。如果回路增益 $K_1K_2K_3K_f$ 足够大,干扰力矩使输出角度的偏差就变得很小了。显然,闭环控制系统比开环控制系统抗干扰能力强。

在干扰力矩 $M_d=0$ 时,闭环控制系统的输入-输出关系为

$$\theta = \frac{K_1K_2K_3}{1 + K_1K_2K_3K_f}u_1 \quad (1.12)$$

现在分析闭环控制系统前向通道元件的放大系数发生变化引起的误差。不论前向通道那个元件的放大系数发生变化,使总的放大系数变化 $\Delta K_1K_2K_3$ ,其相对变化为 $\Delta K_1K_2K_3/K_1K_2K_3$ 。通过简单的微分运算可得到输出量的相对变化量为

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = \frac{1}{1 + K_1K_2K_3K_f} \cdot \frac{\Delta K_1K_2K_3}{K_1K_2K_3} \quad (1.13)$$

可见,前向通道元件的放大系数发生变化时,在闭环控制系统引起的输出误差,仅是开环控制系统的 $(1+K_1K_2K_3K_f)$ 分之一。因此,在闭环控制系统中,对前向通道元件的精度要求不高,这样就可以用成本较低的元件构成精确的控制系统。

如果回路增益 $K_1K_2K_3K_f \gg 1$ ,则式(1.12)可写成

$$\theta \approx \frac{1}{K_f}u_1 \quad (1.14)$$

显然,闭环控制系统的输入-输出特性仅由反馈元件决定。这也表明前向通道的元件精度对控制系统的精度几乎没有影响。

由式(1.14)很容易推出如下关系式

$$\frac{\Delta\theta}{\theta} = -\frac{\Delta K_f}{K_f} \quad (1.15)$$

上式表明反馈元件不稳定将直接引起输出的误差,如果 $K_f$ 变化10%,那么控制系统的输出误差就是10%。这个结论和开环控制系统是一致的。因此,在构成闭环控制系统时,要特别注意挑选反馈元件,因为它决定了系统的精度。这是很容易理解的,我们知道闭环控制系统是根据偏差进行控制的,而偏差是借助测量元件得到的,如果测量元件本身不稳定,那么控制系统的准确性就很难保证了。

通过上述分析可以看出闭环控制系统有很多优点,因此,对于要求较高的控制系统都采用闭环控制系统。但是,闭环控制系统却有一个突出的问题,即系统的稳定性。就是说一个系统的开环控制是稳定的,而闭环控制系统不一定稳定。它是指如果参数选择不合适,会使闭环系统不稳定,甚至使系统完全失去控制。

总之,如果系统的输入信号是预先知道的,而且又不存在外部干扰,最好采用开环控制系统。如果构成系统的元件参数不稳定,又存在无法预计的干扰,应采用闭环控制系统。

## 1.5 反馈控制系统的组成、分类和性能指标

对于各种反馈控制系统,用途不同,遵循的物理规律不同,其结构的复杂程度也不同,但它们有一个共同的基本组成形式。图1.8给出了反馈控制系统组成的方块图,它表示了信息的传递途径和各个元件之间的相互关系。反馈控制系统由前向通道和一个(或几个)反馈通道,通过比较元件构成闭环。