

高等学校控制与信息类专业  
精品课程建设**推荐教材**

# 自动控制原理

张志钢 编著  
邹本国 审定



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

TP13

206

2007

# 自动控制原理

张志钢 编著

邹本国 审定



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书全面系统地介绍了自动控制系统分析、设计的理论与方法。全书共八章，内容包括：自动控制的基本概念，控制系统的数学模型，控制系统的时域分析、根轨迹分析、频域分析方法，控制系统的常规校正方法，离散控制系统，现代控制理论初步等。

本书可作为高职高专自动化、信息技术、机电一体化等相关专业的专科教材使用，也可作为成人教育和继续教育的教材，并可供本科生和从事控制领域工作的科研人员作为参考用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/张志钢编著. —北京：中国电力出版社，2007

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5171 - 1

I. 自… II. 张… III. 自动控制理论 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 004556 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 2 月第一版 2007 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.75 印张 383 千字

印数 0001—3200 册 定价 28.00 元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

## 前 言

工业生产过程控制是一个重要的应用领域,自动控制技术正是以此为背景,为适应复杂对象、更好地完成控制任务而发展起来的一门新技术。自动控制原理现已成为我国高等院校各类自动化、电子与电气工程、计算机应用、机电一体化等专业的主干专业基础课。

本书全面地阐述了自动控制的基本理论,系统地介绍了对控制系统进行分析、设计的研究方法,并力求能全面反映过程控制中新技术、新方法的应用。重点讨论经典控制理论,也涉及现代控制理论的初步知识。本书以基本概念为先导,以反馈设计的方法为主线,注重控制理论的工程应用背景。在内容的编排上,既照顾到理论体系的完整性,又坚持少而精的原则,具有系统性、逻辑性及实用性强的特点,便于读者自学。

全书共分八章。第一章介绍了自动控制的基本概念和常用术语,对自动控制的发展历程进行了简要回顾,对研究的对象和任务进行了分析,并给出控制系统的分类方法。

第二章介绍了控制系统数学模型的含义和建立方法,数学建模方法有机理分析法和实验建模法,数学模型主要有微分方程和传递函数两种形式,并着重对热工被控对象与自动控制器进行分析,对基于方框图、信号流图的模型简化方法进行详细讨论。

第三章介绍了线性控制系统的时域分析方法,详尽地分析了一阶及二阶系统的时域响应,并着重研究了控制系统的稳定性分析与稳态误差的计算方法。

第四章介绍了根轨迹分析方法,对于开环传递函数中有待定参数的情形下,能快速、简洁地得到闭环系统特征根的运动轨迹,进而确定系统的动态特性。

第五章介绍了控制系统的频域分析方法,主要有奈氏图分析、伯德图分析方法,给出了稳定裕度的频域性能指标,讨论了开环频率特性与闭环频率特性的分析方法。

第六章介绍了线性系统的校正方法,重点介绍了工程上常用的频域法校正,也讨论了针对复杂过程的串级校正、复合校正及纯迟延校正等内容。

第七章介绍了离散控制系统理论,引入了 $Z$ 变换作为分析的基础,对采样系统理论进行了叙述。通过与连续系统对照,给出了离散系统数学模型及控制稳定性、精确性的分析方法,重点介绍了以数字PID控制器为代表的连续化控制器设计方法和以最少拍设计为代表的离散化控制器设计方法。

第八章介绍了现代控制理论的初步知识,初步介绍了状态空间分析方法。引入状态及状态的可控性、可观性等重要概念,着重介绍了基于极点配置技术的状态反馈设计和状态观测器设计方法。

本书由山东电力高等专科学校张志钢副教授编著。在本书的编写过程中,王付生教授给予了大力支持并提供了大量参考资料,在此表示衷心感谢。

作者特别感谢山东电力研究院邹本国教授于百忙之中审阅了全部书稿,对本书的框架及内容提出了宝贵的修改意见。

本书可作为高职高专自动化、信息技术、机电一体化等相关专业的专科教材使用,也可作为成人教育和继续教育的教材,并可供本科生和从事控制领域工作的科研人员作为参考用书。

由于自动控制技术发展迅速，有些在生产过程中得到应用的新技术、新方法未能在本教材中有所体现。加之编著水平的限制，书中难免存在不当或错误之处，恳请各界专家和广大读者不吝批评指正。

作者

2006年12月

## 目 录

### 前言

<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 人工控制与自动控制.....	2
第二节 热工过程自动控制.....	3
第三节 自动控制的基本概念.....	4
第四节 典型输入信号及其拉氏变换.....	6
第五节 自动控制系统的构成.....	8
第六节 自动控制的基本方式.....	8
第七节 控制系统的分类.....	10
第八节 对控制系统的基本要求.....	12
小结.....	13
习题.....	14
<b>第二章 控制系统的数学模型</b> .....	15
第一节 微分方程.....	15
第二节 传递函数.....	18
第三节 控制系统的方框图.....	21
第四节 典型环节的动态特性.....	23
第五节 热工控制对象.....	30
第六节 控制器的基本控制规律.....	32
第七节 方框图的等效变换.....	39
第八节 信号流图及梅逊公式.....	42
小结.....	44
习题.....	45
<b>第三章 线性系统的时域分析</b> .....	48
第一节 引言.....	48
第二节 一阶系统的时域分析.....	50
第三节 二阶系统的时域分析.....	51
第四节 高阶系统的时域分析.....	59
第五节 控制系统的稳定性分析.....	61
第六节 控制系统的稳态误差分析.....	68
小结.....	74
习题.....	74

<b>第四章 控制系统的根轨迹分析</b> .....	77
第一节 根轨迹的基本概念 .....	77
第二节 绘制根轨迹的条件和基本规则 .....	78
第三节 几类特殊根轨迹分析 .....	88
第四节 开环零极点变化对根轨迹的影响 .....	91
小结 .....	95
习题 .....	96
<b>第五章 控制系统的频域分析法</b> .....	98
第一节 频率特性的基本概念 .....	98
第二节 控制系统的开环频率特性 .....	102
第三节 控制系统的伯德图（开环对数坐标图） .....	108
第四节 奈奎斯特稳定判据 .....	118
第五节 稳定裕度 .....	123
第六节 开环频率特性分析 .....	127
第七节 闭环频率特性 .....	131
小结 .....	138
习题 .....	139
<b>第六章 控制系统的校正</b> .....	142
第一节 引言 .....	142
第二节 系统的设计及校正问题 .....	142
第三节 频域法串联校正 .....	146
第四节 控制系统的纯迟延校正 .....	154
小结 .....	156
习题 .....	156
<b>第七章 离散控制系统</b> .....	158
第一节 采样过程和采样定理 .....	159
第二节 采样信号的保持 .....	162
第三节 Z 变换 .....	164
第四节 离散系统的数学模型 .....	168
第五节 离散系统的稳定性分析 .....	172
第六节 离散系统的稳态误差分析 .....	175
第七节 离散系统的动态响应分析 .....	178
第八节 离散系统的设计 .....	180
小结 .....	194
习题 .....	195

<b>第八章 现代控制理论初步</b> .....	198
第一节 状态空间法基本概念.....	198
第二节 状态方程的解.....	209
第三节 连续系统状态空间模型的离散化.....	214
第四节 可控性与可观性分析.....	216
第五节 将系统的传递函数化为状态空间模型.....	220
第六节 状态空间模型的相似变换.....	222
第七节 状态反馈控制.....	229
第八节 状态观测器设计.....	231
小结.....	236
习题.....	236
<b>附录 拉普拉斯变换</b> .....	239
<b>参考文献</b> .....	243



# 第一章 绪 论

自动控制技术在工业生产中被广泛采用，能完成各种复杂的控制任务，极大地提高劳动生产率，降低操作人员的劳动强度。比如，锅炉水位和压力的控制、电机转速的控制、卫星的运行轨道的控制、导弹飞行轨道的控制等。18世纪，瓦特（J. Watt, 1736 - 1819）为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器，被公认是自动控制领域的首项重大成果。之后，自动控制技术广泛地应用于各个领域。到目前为止，从天上宇宙飞船、地面电气机车到水下机器人，从军事武器、工农业生产到家用电器，我们都可以看到自动控制技术的应用。

自动控制技术是通过自动控制系统来实现其应用的，自动控制理论是关于自动控制系统建模、分析和设计方法的一般性理论。自动控制理论和实践不断发展，为人们提供了获得动态系统最佳性能的方法。因此，大多数工程技术人员和科学工作者都必须具备一定的自动控制知识。自动控制理论有非常强的应用背景，它来源于生产实践，并对人们参加社会生产有强大的指导作用。由于自动控制技术的广泛应用，在工农业生产领域劳动生产率得到大幅提高，生产的高安全性和产品的高质量有了可靠保障，工人劳动强度大幅降低。21世纪以后，随着经济、科技、国防事业的发展和人们生活水平的提高，自动控制技术所起的作用更为重要，自动控制技术也正不断取得新的发展。

自动控制技术的发展历程，按时间先后可分经典控制与现代控制两个阶段。经典控制又分萌芽期、发展期、成熟期。在20世纪20~40年代，涌现出许多经典控制理论的先驱。1922年，迈纳斯基（Minorsky）研制出船舶操纵自动控制器，并且证明了如何从描述系统的微分方程中确定系统的稳定性。1932年，奈奎斯特（Nyquist）提出了频域分析方法，能根据对正弦输入的开环稳态响应，来确定闭环系统的稳定性。1934年，黑曾（Hezen）提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念，讨论了可以精确跟踪变化的输入信号的继电器式伺服机构。从20世纪40年代末到50年代初，伊凡思（Evans）提出并完善了根轨迹法。他们的工作为经典控制理论奠定了坚实的基础，同时促进了二次大战中许多武器和通信系统自动化水平的提高。

频率响应法和根轨迹法是经典控制理论的核心。由这两种方法设计出来的系统是稳定的，并且在一定程度上满足某些性能要求。一般来说，这些系统是令人满意的，但它不是某种意义上的最佳系统。从20世纪50年代末期开始，控制系统设计问题的重点，从设计许多可行系统中的一种系统，转变到设计在某种意义上的一种最佳系统。实际的工程系统朝着更加复杂的方向发展，这主要是由于控制任务的复杂性、高精度的要求、性能指标要求的多元化等因素所引起的。复杂系统可能具有多输入量和多输出量，并且可能是时变的。

到20世纪60年代初期，出现了划时代意义的状态空间方法、极大值原理、Kalman滤波技术及Bellman动态规划等。这样，经典控制理论的发展与现代控制理论接轨。现代控制系统主要研究的对象主要是更为复杂的多输入多输出随机的非线性时变系统，研究的内容主要有系统辨识与自适应控制、最优估计、最优控制、鲁棒控制、非线性控制、模式识别、智能控制等内容。利用状态变量、基于时域分析的现代控制理论应运而生，并不断取得新的进展。这就适应了现代设备复杂性日益增加的需要，同时也满足了军事、空间技术和工业应

用领域对精确度、质量和成本方面的严格要求。现代控制理论近期的应用已经推广到非工程系统,如生物医学系统、经济系统和社会经济系统等研究领域。从1960年开始,随着大规模、超大规模集成电路技术等硬件技术的飞速发展,以DCS为代表的计算机控制系统造价大幅降低,并在工业生产过程中迅速普及,为全面提高过程控制自动化水平创造了条件,也为设计复杂系统提供了可能性。离散控制系统,即计算机数字控制系统,是工业过程自动控制的一种主要形式,随着计算机的出现应运而生,其理论进展基本上与连续系统控制理论的发展同步。

现代控制理论与传统控制理论形成鲜明的对照,前者适用于多输入、多输出系统,系统可以是线性的或非线性的,也可以是定常的或时变的;后者则仅仅适用于线性时不变、单输入、单输出系统。此外,现代控制理论本质上是一种时域方法,而传统控制理论则是一种复频域方法。经典控制系统的基本数学工具就是拉氏变换,采用的数学模型就是微分方程及传递函数。而现代控制理论的数学工具是工程矩阵理论,其数学模型是状态空间方程。

现代控制理论是在经典控制理论的基础上发展起来的。二者从产生到发展,在诸多方面都相互渗透。尽管两种方法从模型描述到设计方法各有不同,但二者的设计结果可借用拉氏变换及反变换在一定条件下相互转化。

## 第一节 人工控制与自动控制

控制任务可由人工控制或自动控制两种方式来完成,而自动控制已完全取代人工控制方式。自动控制实际上也是借助人工控制的思想来完成控制任务的,其控制流程和任务完全一致,只是执行任务的是控制装置,而不是完全靠人来执行。自动控制技术的核心内容就是反馈控制,主要包括信息获取、信息分析计算、控制输出等重要环节。信息获取要依靠传感器和变送器,信息的分析计算要依靠控制器,控制量的输出则用于驱动执行机构。下面就通过实例具体说明自动控制与人工控制的区别和联系,并给出实现自动控制的条件。

生产过程中,为了保证产品质量和保证生产过程的正常进行,需要对某一些可测的物理量参数进行控制。以电厂汽包炉的水位控制为例,锅炉的任务主要是对汽包内部的给水进行加热,产生一定规格的蒸汽,供给汽轮机。锅炉控制的任务是保持汽包水位在正常值,并维持在一个很小的误差范围内,使机组安全运行。而汽包水位又要随外界电网负荷(用电量)的变化而经常变动,负荷增加时,必须增大蒸汽流量,同时也要相应地增大给水流量,否则汽包水位会降低,甚至有烧干锅的危险;反之,蒸汽流量减小时,给水流量也要相应减小,否则会造成汽包水位升高,甚至造成满水事故。汽包水位是反映锅炉是否正常运行的主要参数之一。为了维持汽包水位在正常值,就需要不断调整给水量的大小。汽包水位控制可以用如图1-1所示两种方法实现。

当水位的给定值信号不变,且给水输入量与蒸汽输出量相当时,汽包水位处于平衡状态。而当蒸汽流量 $D$ 发生变化或者水位的给定值信号 $H_0$ 发生变化,就需要对给水量大小 $W$ 进行调整。

### 1. 人工控制

人工控制的过程是通过人的三个器官来完成的:

眼——用来观察水位的变化情况,并将观察结果送到大脑;

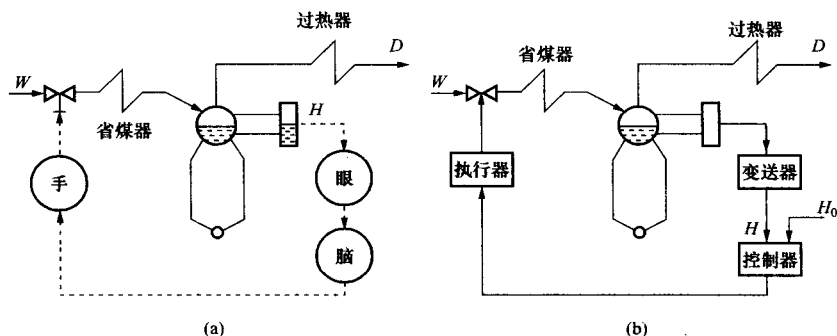


图 1-1 汽包水位控制

(a) 汽包水位人工控制；(b) 汽包水位自动控制

脑——对眼传送过来的水位信息进行思考、分析、比较，并作出判断，确定给水阀门的开关方向与幅度，然后向手发出控制阀门的命令；

手——执行由大脑发送的控制命令，操作给水阀门，调整阀门的开度，以改变给水流量  $W$ ，经过反复操作，最终使水位  $H$  稳定在给定值上。

在整个调节过程中，人的眼睛起观察作用，脑起运算作用，手起执行作用。三者相互协调，共同完成对水位的调节任务。人工控制的效果好坏取决于操作人员的熟练程度，缺点是由于人有思考时间而造成的控制不及时和存在操作误差，控制的精确度较低，调节时间延长，而且操作人员的劳动强度非常大。汽包水位的人工控制如图 1-1 (a) 所示。

## 2. 自动控制

上述的控制过程可以设计一套仪表（自动控制装置），在无人参与的情况下来全自动实现。这种在没有人直接参与的情况下，利用自动控制装置使整个生产过程的某些物理量按预定要求变化的过程称为**自动控制**。自动控制是在人工控制的基础上发展起来的。

汽包水位自动控制如图 1-1 (b) 所示，这里用测量元件（传感器、变送器）取代人的眼睛，起到观察作用，用来检测水位情况，并向控制器发出检测结果，即水位信号（例如电信号）；用控制器取代大脑，起运算作用，即通过比较得到水位测量信号  $H$  与正常水位信号  $H_0$  的偏差，确定控制信号的大小和方向，向执行机构（如给水阀门）发出控制指令信号；用执行器取代手，起执行命令的作用，即控制给水阀开度。这一过程不断地自动进行重复，通过不停地改变给水流量大小，最终使汽包水位在给定值。由汽包、给水系统与控制装置构成的系统，就是一个典型的自动控制系统。

当然，在锅炉容量较小的时候，汽包水位变化较慢，采用人工控制时效果还可以。随着机组容量增大，锅炉的蒸发速度加快，仅靠人力，凭经验调整汽包水位，几乎无法实现。这就要求采用自动控制技术，用自动仪表或装置来代替人工操作，既保证了生产的安全、可靠，又能提高劳动生产率，改善操作人员的劳动条件及减轻劳动强度。

## 第二节 热工过程自动控制

生产过程中需要施加控制的热工参数主要类型有温度、压力、流量、液位、化学成分等

物理量，且数量非常多。火电厂热力生产过程的自动控制，主要包括下面几个方面内容。

#### 1. 自动检测系统

自动检测系统包括热工测量与显示两个部分。通过检测仪表、显示仪表或其他自动装置，将反映生产过程的热工参数及各生产设备的工作状态连续地测量到，并集中加以显示、记录和积算，为操作人员监视生产状况与操作创造条件；为自动控制系统和自动保护提供所需的信号；为企业经济核算和管理提供数据。因此，热工测量是整个自动控制系统的基础。对于大型机组，测点非常多，常采用巡回检测的方式。随着计算机在过程控制中的广泛应用，不仅可对这些热工参数进行采集、处理和显示，还能对主、辅机组的热效率等二次参数进行计算或对机组的运行趋势进行分析。

#### 2. 自动控制系统

自动控制是指利用自动化装置，使被控对象的某些被控量自动地保持在规定范围内的过程，这些被控量是时间连续的模拟信号。热力生产过程经常受到各种因素的干扰，使运行工况偏离期望值。自动控制系统的任务就是自动地对生产过程施加控制，使之回到规定的工况。在复杂工况及连续生产条件下，自动控制是应用最为普遍的一种手段，控制系统性能的优劣对生产过程的经济、安全运行有极大的影响。

#### 3. 顺序控制系统

顺序控制是利用自动化仪表或设备，使被控对象按照生产过程的顺序和条件，有条不紊地、有步骤地自动按照顺序动作的控制过程。自动控制与顺序控制的区别是，前者是连续物理量的控制，而后者是开关量的控制。火电厂的顺序控制系统主要用于主、辅机的启停和主辅设备的切换，以及某些经常性的工作循环，如补给水的化学处理、锅炉点火和烟道吹灰等。顺序控制可简化操作步骤、避免误操作、加快机组启停速度，极大地提高火电厂的自动化水平。

#### 4. 自动报警和自动保护系统

自动报警系统又称热工信号系统，是监视机组异常情况的工具。当机组的热工参数、主辅机或各自动装置出现异常情况时，该系统利用灯光和音响发出报警信号，以引起运行人员的注意。

当机组出现危急情况时，自动保护系统会迅速采取措施，关停某些设备的运行，以保护主辅机系统，避免设备损毁及事故范围扩大。自动报警和自动保护系统也都是对开关量的控制，是自动控制系统的必要组成部分。

### 第三节 自动控制的基本概念

在详细讨论控制系统之前，先对一些常用术语加以定义。

#### 1. 被控量、给定值、控制量、偏差量

**被控量**是表征生产过程进行情况是否正常而需要加以调节的物理量，是连续时间的信号，通常是系统的输出量。如图 1-1 中的汽包水位就是被控量。常见的被控量有温度、压力、位移、转速、流量、液位等过程变量。**给定值**也称为期望值或设定值，它是系统的输入量，被控量只有在给定值附近变化，才能保证整个系统安全正常运行。**控制量**是一种由控制器决定的量值或状态，它要通过驱动执行机构（如阀门等）的动作来影响被控量的值。**偏**

差量是指给定值与被控量测量值之间的偏差，可作为确定控制量大小的依据。

## 2. 被控对象

被控对象也称为受控对象，简称对象，它可能是一个设备，多数由一些机器零件有机地组合在一起，其作用是完成一种特定的操作。在本书中，任何被控物体（如一段过热器、一台锅炉、一台汽轮机、一台化学反应器、一架飞机等）均称为一个对象。如图 1-1 所示的系统中，锅炉汽包就是被控对象。

## 3. 过程

韦伯斯特（Merriam-Webster）字典对过程的定义是：一种自然的逐渐进行的运行或发展，其特征是有一系列逐渐变化，以相对固定的方式相继发生在运行或发展过程中，并且最后导致一种特定的结果或目标；或者也可以定义为人为的或自发的连续进行的运行状态，这种运行状态由一系列被控制的动作和一直进行到某一特定结果或目标的有规则的运动构成。

一个自动控制过程的实现，要求先确定出控制回路合适的给定值，再对系统被控量的大小进行测量，经控制器分析得到控制量，最后使控制量作用于系统的被控对象，以修正或限制测量值对期望值的偏差。

图 1-2 中的  $y(t)$  就是被控量， $r(t)$  表示给定值， $e(t)$  为偏差量， $u(t)$  表示控制量。在本书中，任何被控制的运行状态（如化学过程、经济学过程和生物学过程）称为过程。

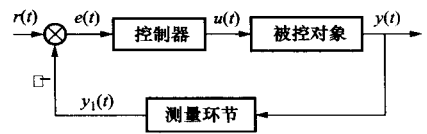


图 1-2 典型的控制系统示意图

## 4. 系统

系统是由内部互相联系的部件按照一定规律组成，能够完成一定功能的有机整体。系统是一些部件的组合，这些部件组合在一起，完成一定的任务。系统不限于物理系统。系统的概念可以应用于抽象的动态现象，如在经济学中遇到的一些现象。因此，系统这个词，应当理解为包含了物理学、生物学和经济学等方面的系统。

在进行数学处理时，常将系统视为黑箱，只关心其外部特性。系统的输出量必定会随输入量的变化而变化，即输入量是因、输出量是果，整个系统就可以看成是一个因果系统。

## 5. 扰动

除给定值外，能对被控量产生影响的物理量就称为扰动。扰动量通常会对系统的输出量产生不利影响。如果扰动产生在系统的内部，就称为内部扰动；当扰动产生在系统的外部时，则称为外部扰动。外部扰动也是系统的输入量。例如，在图 1-1 中，能引起水位信号变化的干扰因素有多种，除负荷变化外，还有测量噪声等。对于可测量的扰动，或者可预测的扰动，总是可以在系统中通过人为地设计前馈或局部反馈校正环节而加以补偿。对于随机或不可测量的扰动，可以考虑设计硬件滤波或软件滤波等措施加以抑制。

## 6. 反馈控制

被控量的变化反过来会影响偏差值的变化，这种作用就称为反馈。反馈控制能够在存在扰动的情况下，力图减小系统的输出量与某种参考输入量之间的偏差，并且其控制原理也正是基于这种偏差。这种反馈作用不断进行，使被控量与给定值之间的偏差逐渐减小。例如，使汽包较高的水位逐渐降低或使较低的水位逐渐升高，这种反馈作用称为负反馈；若使偏高的水位继续升高，或使偏低的水位继续降低，这种反馈作用称为正反馈。显然，只有当控制器与被控对象之间构成一个闭环负反馈系统，才可能构成一个稳

定的自动控制系统。反馈控制的应用不只局限于单回路控制系统，也适用于多变量控制、鲁棒控制、智能控制等系统。

### 第四节 典型输入信号及其拉氏变换

工程上，可以假定  $t < 0$  时，所有物理量信号大小均为 0，即处于零初始状态。这个零状态，可以理解为生产过程处于某种平衡状态；信号为 0 状态，并不一定表明其物理量大小为 0，而是取平衡状态的物理量值。

#### 1. 脉冲信号

$$f(t) = \begin{cases} +\infty & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases}, \text{且} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = A \quad (1.1)$$

可以看出，脉冲的面积等于  $A$ 。应当指出的是，当描述脉冲输入时，脉冲的面积大小是非常重要的，而脉冲的精确形状通常并不重要。脉冲信号如图 1-3。

当持续时间  $h$  趋近于零时，高度  $A/h$  趋近于无穷大，但是脉冲下包围的面积仍然等于  $A$ 。对图 1-3 所示的脉冲信号运用罗必塔法则，可以计算其拉氏变换为

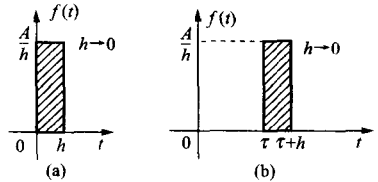


图 1-3 脉冲信号  
(a) 不带时滞；(b) 带时滞

$$L[f(t)] = \lim_{h \rightarrow 0} \int_0^h \frac{A}{h} e^{-st} dt = A \quad (1.2)$$

面积等于 1 的脉冲函数称为单位脉冲函数，也称为狄拉克 (Dirac) -  $\delta$  函数，记为  $\delta(t)$ 。发生在  $t = \tau$  的单位脉冲函数通常写成  $\delta(t - \tau)$ 。 $\delta(t - \tau)$  满足下列条件

$$\delta(t - \tau) = \begin{cases} 0 & t \neq \tau \\ \infty & t = \tau \end{cases}, \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - \tau) dt = 1 \quad (1.3)$$

其拉氏变换为

$$L[\delta(t - \tau)] = e^{-\tau s} \quad (1.4)$$

需要注意的是，量值为无穷大且持续时间为零的脉冲函数，只是纯数学意义上的一种假定，在实际的物理系统中不存在。但是，如果系统的脉动输入量值很大，而持续时间与系统的时间常数相比非常小时，可用脉冲函数去近似表示脉动输入。例如，当力或者力矩输入量  $f(t)$  在很短的持续时间内 ( $0 < t < h$ ) 作用到系统上，并且  $f(t)$  的量值充分大，致使积分  $\int_0^h f(t) dt$  不能忽视时，这个输入量就可以看作是一个脉冲输入。脉冲输入量能在一个无限小的时间内向系统提供能量。

#### 2. 阶跃信号

$$f(t) = \begin{cases} A & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1.5)$$

式中， $A$  为常数。可以看出，该函数是指数函数  $Ae^{-at}$  在  $a = 0$  时的特殊情况，其拉氏变换为

$$L[f(t)] = \frac{A}{s} \quad (1.6)$$

当  $A=1$  时的阶跃函数称为单位阶跃函数。发生在  $t=0$  时刻的单位阶跃函数通常写成  $1(t)$ ，高度为  $A$  的阶跃函数，发生在  $t=0$  时，则可写成  $A \cdot 1(t)$ 。

发生在  $t=\tau$  的单位阶跃函数通常写成  $1(t-\tau)$ ，其拉氏变换为

$$L[1(t-\tau)] = \frac{1}{s} e^{-\tau s} \quad (1.7)$$

### 3. 斜坡信号

$$f(t) = \begin{cases} At & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

式中， $A$  为常数。其拉氏变换为

$$\begin{aligned} L[f(t)] &= \int_0^{\infty} Ate^{-st} dt = A \int_0^{\infty} \left(-\frac{1}{s}\right) t de^{-st} \\ &= \left(-\frac{A}{s}\right) \left[ te^{-st} \Big|_0^{\infty} - \int_0^{\infty} e^{-st} dt \right] = \frac{A}{s^2} \end{aligned} \quad (1.9)$$

当  $A=1$  时，称为单位斜坡函数或单位速度函数。

### 4. 指数信号

$$f(t) = \begin{cases} Ae^{-at} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

式中  $A$  和  $a$  为常数。计算指数函数的拉氏变换如下

$$L[f(t)] = \int_0^{\infty} Ae^{-at} e^{-st} dt = A \int_0^{\infty} e^{-(s+a)t} dt = \frac{A}{s+a} \quad (1.11)$$

可以看出，指数函数在复平面产生了一个极点。

### 5. 正弦信号和余弦信号

考虑正弦信号

$$f(t) = \begin{cases} A \sin \omega t & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1.12)$$

式中， $A$  和  $\omega$  为常数。由欧拉公式可知

$$\sin \omega t = \frac{1}{2j} (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}) \quad (1.13)$$

其拉氏变换可计算如下

$$\begin{aligned} F(s) &= L[f(t)] = \frac{A}{2j} \int_0^{\infty} (e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}) e^{-st} dt \\ &= \frac{A}{2j} \frac{1}{s-j\omega} - \frac{A}{2j} \frac{1}{s+j\omega} \\ &= \frac{A\omega}{s^2 + \omega^2} \end{aligned} \quad (1.14)$$

类似地，可求出余弦信号  $f(t) = A \cos \omega t$  的拉氏变换为

$$F(s) = L[f(t)] = \frac{As}{s^2 + \omega^2} \quad (1.15)$$

## 第五节 自动控制系统的构成

总的来看,自动控制系统是由被控对象和广义控制器两个部分组成的。其中,广义的控制器又是由一些基本的部件或元件构成。各元件都有自己的作用,也都是自动控制系统正常工作所不可或缺的。在通常的模拟控制系统中,常见的控制部件有下面几种。

### 1. 测量元件

测量元件的作用是将被控量的大小检测出来。如果该物理量是非电量,还要将它转化为与之对应的电量信号(如4~20mA的电流或1~5V的电压)。例如,可用热电偶或热电阻测量温度信号;用电位器或自整角机或旋转变压器等测量角度;用差压变送器来检测与处理流量信号。测量元件的特性应该准确、稳定,不受环境条件变化的影响。随着检测技术的发展,新的测量元件和部件也不断被研制出来。

### 2. 整定元件

整定元件的作用就是为控制系统提供给定值信号,以保证系统能正常工作。整定元件给出的信号也必须准确、精确、稳定。

### 3. 比较器

比较器的作用是将整定元件得到的给定值信号和测量元件给出的实际生产过程的被控量信号进行比较,求出它们之间的偏差。常用差动放大器或机械的差动装置作为比较器。

### 4. 放大器和控制器

由比较器给出的偏差量信号可能过于微弱,无法直接带动执行机构。因此要通过放大器对偏差信号进行放大,保证输出有足够的功率,完成控制功能。针对各种被控对象,通常要引入控制器这一装置来改善系统的动态和稳态特性,使产生的控制作用足够强、足够快,能与被控对象的动态特性相适应,更好地发挥控制效果。这些装置就是控制器,也称校正器或补偿器。

### 5. 执行器

执行器的作用是接受控制器给出的控制量信号,并将其作用于被控对象上,影响被控量,使之较快地趋近于整定元件发出的给定值信号,使偏差量趋于0。

通常,上述职能元件都是电气元件,整个系统都是电的系统。在电装置无法使用时,也可用气动或液动的控制系统。但从控制的角度来看,它们之间并无本质的不同。

在实际的控制系统中,同一元件可能具备上述多种元件职能。以计算机控制系统为例,作为控制核心的计算机,能完成上述整定元件、比较器、放大器与控制器等多项功能。狭义的控制器的专指放大器与控制器。

## 第六节 自动控制的基本方式

自动控制的基本方式有开环控制、闭环控制和复合控制三种。

### 一、开环控制

如果控制作用不受被控量的影响,即控制信号只取决于给定值,这种控制方式称为开环控制。由于从给定值到被控信号只有正向作用而无反馈作用,因此开环控制又称为前馈控制



或顺馈控制。开环控制系统如图 1-4 所示。

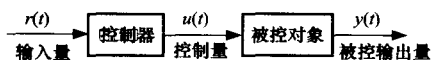


图 1-4 开环控制系统

开环控制系统有两种常见形式，一种是如图 1-4 所示的按给定值操作的开环控制系统。显然，当系统受到某种干扰而使被控量偏离其期望值时，这种类型的控制系统无法实现全自动补偿，系统的控制精度难以得到很好保证。常要由人工监控系统与之相配合才能正常工作，并非真正意义上的自动控制。当系统的结构参数稳定，干扰极弱或控制精度要求不高时，可采用这种开环控制方式。

另一种是如图 1-5 所示的系统，称为按干扰补偿的开环控制系统。分析可知，要想稳定被控量  $y(t)$ ，就要在干扰信号  $n(t)$  出现时，改变控制量  $u(t)$ ，使之对被控量的影响与干扰量对被控量的影响互相抵消，以保持被控量不变。该方法针对可测量的干扰，专门设计出干扰补偿通道克服干扰对系统的不利影响。对不可测干扰，无法对其直接设计补偿，可考虑设计硬件滤波电路或用软件滤波等方法对其进行抑制。

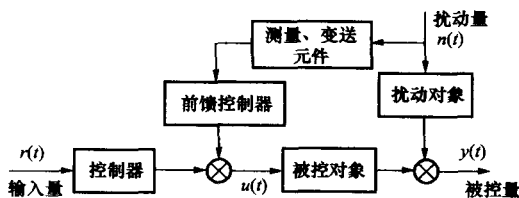


图 1-5 按干扰补偿的开环控制系统

开环控制的优点是结构简单，系统成本低；缺点是控制精度差，被控量不能得到准确控制。开环控制的实例很多，如小型机组的微机监控系统、加热炉温度的控制等。

## 二、闭环控制

如果控制量不仅取决于给定值，还与被控量的大小有关，这种控制方式称为闭环控制。

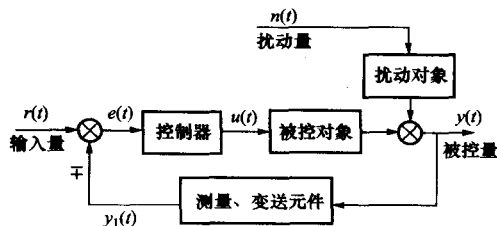


图 1-6 闭环控制系统

闭环控制系统如图 1-6 所示，被控量信号  $y(t)$  通过测量、变送后被反馈回来与参考输入信号  $r(t)$  比较，所得误差信号  $e(t)$  送入控制器，进而产生控制信号  $u(t)$ 。在这种方式下，由于被控输出与参考输入的路径是闭合的，称为闭环控制；又因输出信号被反馈到输入端，故又称为反馈控制。这里，由于偏差信号是参考信号  $r(t)$  与被控输出信号测量值  $y_1(t)$  之差，故又称

负反馈控制。如果送入控制器的信号是参考信号  $r(t)$  与被控输出信号测量值  $y_1(t)$  之和，则这种反馈称为正反馈。按正反馈方式构成的闭环控制系统，通常是不能正常稳定工作的，工程中较少采用。

闭环控制系统的结构较开环系统复杂，但能实现被控量的精确控制，应用也极其广泛。在工业生产中，按照偏差控制的闭环系统种类繁多，尽管它们完成的控制任务不同，具体结构不一样，但是，从检测被控量、计算偏差量、再利用偏差量求出控制量，并对控制对象施加控制，使偏差减小的这一控制过程却是相同的。

需要注意的是：即使是闭环系统，仍可能出现被控量不衰减甚至渐扩振荡问题，即存在所谓稳定性问题。产生稳定性问题的原因在于闭环控制系统的组成环节可能存在大惯性、大时滞等特性，例如被控对象存在较大的惯性与延时，那么被控信号将不能及时反映出控制信