



高等学校“十二五”规划教材

GAODENG XUEXIAO "12·5" GUIHUA JIAOCAI

# 控制工程基础

主 编 王晓梅



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press



高等学校“十二五”规划教材

# 控制工程基础

主 编 王晓梅

副主编 李 诚 宋乐鹏

北 京

冶金工业出版社

2013

## 内 容 简 介

本书主要阐述经典控制论的基本原理、基础知识、基本分析方法、设计校正和工程设计方法,内容包括系统的数学模型、时域分析、频域分析、稳定性分析、校正与设计等,目的是使学生建立动态设计的概念,为后续课程运用控制理论和进一步深造打下基础。

本书可作为本科或高职高专院校机械工程、电气工程、仪器科学与工程、动力工程等工专业的教材,推荐学时为48~64学时,其中实验6~8学时,也可用作成教、函授学生的教材,还可供有关专业工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础/王晓梅主编. —北京:冶金工业出版社, 2013. 7

高等学校“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6350-2

I. ①控… II. ①王… III. ①自动控制理论—高等学校—教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第184517号

出版人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号, 邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 陈慰萍 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6350-2

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷

2013年7月第1版, 2013年7月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16; 10.25印张; 248千字; 156页

**24.00元**

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街46号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

# 前 言

本书各章节内容以国家教指委 2008 年 8 月发布的《中国机械工程学科教程》为依据, 参照“控制理论知识领域的知识单元和知识点”选定。本书的编写, 结合了编写教师近 20 年教学过程中积累的大量教学改革经验, 同时吸取了许多兄弟院校同类教材和相关文献的优点, 着眼于教学、科研及工程实用性的需求, 力求使概念清晰正确、知识结构合理, 突出经典控制理论的正确运用。本书在编写中注意突出以下几个方面:

(1) 注重基本理论与基本概念의 阐述。简化数学推导, 明确物理概念, 强调实际应用, 力求深入浅出和突出重点。

(2) 注重启发性。讲解中注意承上启下提出问题, 引导读者建立解决问题的思路, 培养读者主动学习与创新的能力。

(3) 便于自主学习。内容编排按照“基本概念→系统建模→系统分析→系统校正与设计”的路线, 清晰地展示经典控制论的构架与内容, 方便读者自主学习与参考。

(4) 注重综合运用能力, 强调综合运用知识对系统进行跟踪和分析与设计的训练。

(5) 注重 MATLAB 控制系统工具箱的介绍与运用。利用 MATLAB 解题实例, 帮助读者学习利用 MATLAB 进行系统建模、分析和设计的初步知识。

本书由重庆科技学院王晓梅老师担任主编, 由重庆工程职业技术学院李诚老师、重庆科技学院宋乐鹏老师担任副主编。本书第 1、3、4 章由重庆科技学院王晓梅老师编写, 第 2 章由重庆科技学院宋乐鹏老师编写, 第 5.1~5.5 节、第 6.1~6.5 节由重庆工程职业技术学院李诚老师编写, 第 5.6 节由重庆科技学院周雄教授编写, 第 6.6 节由重庆科技学院阳小燕老师编写。重庆科技学院的黎泽伦、文成老师为第 1 章至第 4 章提供了部分参考资料。

限于编者的水平, 书中不足之处恳请广大读者与专家批评指正。

编 者

2013 年 6 月于重庆

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 工程控制论的研究对象与任务 .....	2
1.2.1 工程控制论的研究对象 .....	2
1.2.2 工程控制论的研究任务 .....	2
1.3 控制系统的基本概念、工作原理及基本组成 .....	4
1.3.1 反馈的概念 .....	4
1.3.2 控制系统的工作原理 .....	5
1.3.3 反馈控制系统的基本组成 .....	7
1.4 控制系统的分类及对控制系统的基本要求 .....	8
1.4.1 控制系统的分类 .....	8
1.4.2 对控制系统的基本要求 .....	9
习题 .....	10
<b>2 控制系统的数学模型</b> .....	12
2.1 系统的微分方程 .....	12
2.1.1 概述 .....	12
2.1.2 列写微分方程的一般方法 .....	12
2.1.3 机械系统的微分方程 .....	14
2.1.4 电气系统的微分方程 .....	15
2.1.5 液压系统的微分方程 .....	16
2.2 拉普拉斯变换的数学方法 .....	17
2.2.1 拉氏变换的定义 .....	17
2.2.2 拉氏变换定理 .....	18
2.2.3 拉氏反变换的数学方法 .....	20
2.2.4 用拉氏变换解常微分方程 .....	22
2.3 传递函数 .....	23
2.3.1 传递函数的定义和特点 .....	23
2.3.2 传递函数的零点、极点和放大系数 .....	24
2.3.3 典型环节的传递函数 .....	25
2.3.4 相似系统 .....	30
2.4 传递函数方框图及其简化 .....	30

2.4.1	方框图的结构要素	31
2.4.2	环节的基本连接方式	31
2.4.3	方框图的变换	33
2.4.4	梅森公式	36
2.5	多输入反馈控制系统的传递函数	38
2.6	利用 MATLAB 建立系统数学模型	40
2.6.1	MATLAB 中数学模型表示	40
2.6.2	模型之间的转换	41
2.6.3	系统建模	41
2.6.4	进行部分分式展开	43
	习题	44
3	控制系统的时域分析	47
3.1	概述	47
3.1.1	时间响应及其组成	47
3.1.2	典型输入信号	49
3.2	一阶系统的时间响应	50
3.2.1	典型一阶系统的数学模型	50
3.2.2	一阶系统的单位脉冲响应	50
3.2.3	一阶系统的单位阶跃响应	51
3.2.4	线性系统响应之间的关系	52
3.3	二阶系统的时间响应	52
3.3.1	典型二阶系统的数学模型	52
3.3.2	二阶系统的单位脉冲响应	53
3.3.3	二阶系统的单位阶跃响应	54
3.4	二阶系统瞬态响应性能指标	55
3.4.1	常用的性能指标	56
3.4.2	二阶系统性能指标计算举例	58
3.5	系统的误差分析与计算	60
3.5.1	系统的误差 $e(t)$ 与偏差 $\varepsilon(t)$	60
3.5.2	误差 $e(t)$ 的一般计算	61
3.5.3	与输入有关的稳态偏差	62
3.5.4	与干扰有关的稳态偏差	64
3.6	利用 MATLAB 进行时域分析	66
3.6.1	用 MATLAB 求系统时间响应	66
3.6.2	利用 MATLAB 求系统的瞬态性能指标	67
	习题	69

<b>4 控制系统的频域分析</b> .....	72
4.1 频率特性概述 .....	72
4.1.1 频率特性的基本概念 .....	72
4.1.2 频率特性的求法 .....	74
4.1.3 频率特性的表示方法 .....	75
4.2 频率特性的极坐标图 (Nyquist 图) .....	76
4.2.1 极坐标图的基本概念 .....	76
4.2.2 典型环节极坐标图 .....	76
4.2.3 绘制系统极坐标图的一般步骤 .....	80
4.3 频率特性的对数坐标图 (Bode 图) .....	82
4.3.1 对数坐标图的基本概念 .....	82
4.3.2 典型环节的对数坐标图 .....	83
4.3.3 绘制系统对数坐标图的一般步骤 .....	89
4.4 频率特性的特征量 .....	90
4.5 最小相位系统的基本概念 .....	92
4.6 系统辨识 .....	93
4.6.1 系统辨识的一般方法 .....	93
4.6.2 利用 Bode 图进行最小相位系统辨识 .....	93
4.6.3 用 Bode 图对最小相位系统进行辨识的步骤 .....	94
4.7 利用 MATLAB 进行频域分析 .....	97
4.7.1 用 MATLAB 绘制 Nyquist 图和 Bode 图 .....	97
4.7.2 利用 MATLAB 求系统的频域特征量 .....	98
习题 .....	100
<b>5 控制系统的稳定性分析</b> .....	102
5.1 概述 .....	102
5.1.1 稳定的基本概念 .....	102
5.1.2 判别系统稳定性的基本准则 .....	103
5.1.3 确定系统稳定的方法 .....	105
5.2 Routh (劳斯) 稳定判据 .....	106
5.2.1 Routh 稳定判据的基本原理 .....	106
5.2.2 Routh 稳定判据的特殊情况 .....	108
5.2.3 Routh 稳定判据的应用 .....	110
5.3 Nyquist (奈奎斯特) 稳定判据 .....	112
5.3.1 Nyquist 稳定判据基础 .....	112
5.3.2 应用 Nyquist 稳定判据的步骤 .....	117
5.3.3 穿越的概念 .....	119
5.4 Bode (伯德) 稳定判据 .....	119

5.4.1 Nyquist 图与 Bode 图的对应关系	120
5.4.2 穿越的概念	120
5.4.3 Bode 稳定判据的充要条件	121
5.5 系统的相对稳定性	121
5.5.1 相位裕量 $\gamma$	122
5.5.2 幅值裕量 $K_g$	122
5.6 利用 MATLAB 进行稳定性分析	123
5.6.1 利用 MATLAB 求系统的特征根	124
5.6.2 利用 MATLAB 分析系统的相对稳定性	124
习题	126
<b>6 控制系统的校正与设计</b>	<b>129</b>
6.1 控制系统的性能指标	130
6.1.1 时域性能指标	130
6.1.2 频域性能指标	131
6.1.3 综合性能指标 (误差准则)	131
6.1.4 时域与频域性能指标之间的关系	131
6.2 控制系统校正的基本概念	132
6.2.1 校正的概念	132
6.2.2 校正的方式	133
6.3 控制系统的串联校正	134
6.3.1 增益调整	134
6.3.2 相位超前校正	135
6.3.3 相位滞后校正	139
6.3.4 相位滞后-超前校正环节	143
6.4 控制系统的反馈校正	147
6.4.1 位置 (比例) 反馈	148
6.4.2 速度 (微分) 反馈	149
6.5 控制系统的 PID 校正	149
6.5.1 PID 控制规律	149
6.5.2 PID 校正器的形式与作用	150
6.6 利用 MATLAB 设计控制系统的校正	153
习题	155
<b>参考文献</b>	<b>156</b>



# 1 绪 论

本章着重介绍控制理论的基本概念，并列举一些应用实例。本章的知识结构如图1-1所示。

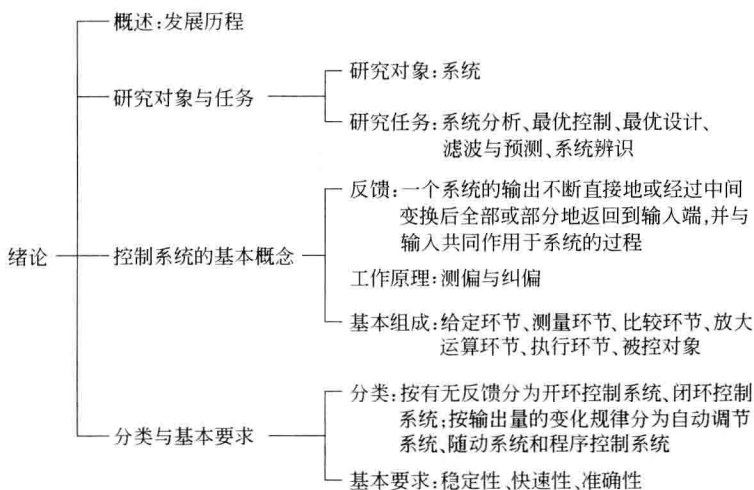


图 1-1 第 1 章知识结构

## 1.1 概述

“控制工程基础”主要阐述自动控制技术的基础理论。机械控制工程基础是控制论 (Cybernetics) 与机械工程技术理论之间的边缘学科，侧重介绍机械工程的控制原理，同时密切结合工程实际，是一门技术基础课程。

随着计算机技术的不断发展，机械制造技术发展的一个明显而重要的趋势是越来越广泛、深入地引入了控制理论，例如，工业机器人、数控机床、机床动态测试与分析、电液伺服系统、精密仪器设备等都要用到控制工程的基础知识。

相对论、量子论和控制论被认为是 20 世纪上半叶的三大伟绩，称为三项技术革命，是人类认识客观世界的三大飞跃。控制论的两个核心是信息论和反馈控制。其中反馈控制的概念早在 1868 年麦克斯韦发表的《论调速器》一文中就已经提出来了。第二次世界大战期间及战后，电子技术、火力控制技术、航空自动驾驶、生产自动化、高速电子计算机等科学技术迅速发展。控制论正是在这基础上，总结有关学科的研究成果并加以提高而形成的。首先创立这门学科的是数学家、信息理论家诺伯特·维纳 (Norbert Wiener)，他于 1948 年发表了《控制论》。维纳通过比较研究发现，在机器系统与生命系统甚至社会系统、经济系统都具有一个共同特点，即通过信息的传递、加工处理并利用反馈来进行控

制，这就是控制论的中心思想。我国科学家钱学森于 1954 年发表专著《工程控制论》(英文版)，首先提出了“工程控制论”的概念，并将控制论推广到工程领域。

随着科学技术的不断发展，控制理论日趋成熟，它对社会进步和生产发展起到了深远的影响。控制论的发展过程大体可分为三个阶段。

第一阶段：20 世纪 40~50 年代为“经典控制理论”发展阶段。经典控制理论主要以拉普拉斯变换为数学基础，以传递函数为分析和设计基础，基本的方法体系主要以作图、查表和便于手工计算的方法为基础。这种方法对于线性定常系统是成熟有效的。

第二阶段：20 世纪 60~70 年代为“现代控制理论”的发展阶段。现代控制理论是用状态空间法作为分析和设计的基础，基本的方法是时间域方法。这种方法对线性系统、非线性系统、时变系统、单变量和多变量系统均适用。

第三阶段：20 世纪 70 年代末至今，控制理论向着“智能控制理论”方向发展。智能控制理论是通过研究与模拟人类活动的机理，研究具有仿人工智能的工程控制和信息处理问题。目前智能控制理论已经形成了模糊控制、神经网络控制和专家控制等重要的分支。

控制理论的发展历程，充分反映了人类社会由机械化走向电气化，进而迈向自动化、信息化和智能化的时代特征。

## 1.2 工程控制论的研究对象与任务

工程控制论主要研究工程技术中广义系统的动力学问题。具体地说，就是研究工程技术中的广义系统在一定的外界条件作用下，从系统一定的初始状态出发，经历的由其内部的固有特性所决定的整个动态历程，就是研究输入、输出和系统三者之间的动态关系。

### 1.2.1 工程控制论的研究对象

由以上叙述分析可知，工程控制论的研究对象就是系统（或广义系统）。

系统是指按一定规律联系在一起的元素的集合。构成系统的要素包括元素以及元素之间的关系。系统与外界之间的交互作用包括外界对系统的作用（如输入、干扰等）以及系统对外界的作用（如输出）。系统可大可小、可简可繁、可虚可实，完全由研究的需要来决定。系统、输入、输出三者之间的动态关系可由系统框图 1-2 简要表示。

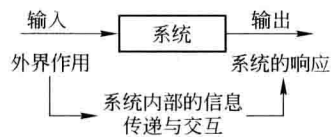


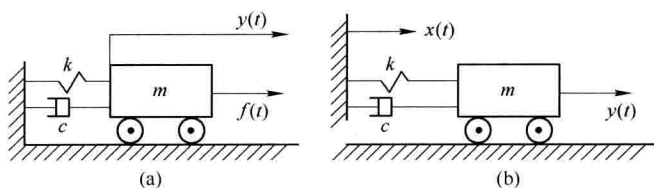
图 1-2 系统的框图

广义系统是指具备系统要素的一切事物或对象，譬如，机器系统、生命系统、思维、学习、工作、社会经济系统、生产系统等。机械工程中的广义系统可以是元件、部件、仪器、设备，也可以是加工过程、操作设备、测量，还可以是车间、部门、工厂、企业、企业集团、全球制造行业等。

### 1.2.2 工程控制论的研究任务

简单地说，工程控制论主要研究动力学问题，下面以图 1-3 所示机械系统为例进行说明。

图 1-3 (a)、(b) 分别表示同一个质量-阻尼-弹簧单自由度系统在不同输入时的情况。图中， $m$ 、 $c$ 、 $k$  分别表示质量、黏性阻尼系数和弹簧刚度。

图 1-3  $m-c-k$  单自由度系统

对于图 1-3 (a) 所示的系统而言, 输入为作用在质量块上的外力  $f(t)$ , 输出为质量块的位移  $y(t)$ , 系统的动力学方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = f(t) \\ y(0) = y_0 \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0 \end{cases} \quad (1-1)$$

对于图 1-3 (b) 所示的系统而言, 输入为作用在支座的位移  $x(t)$ , 输出为质量块的位移  $y(t)$ , 系统的动力学方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = c\dot{x}(t) + kx(t) \\ y(0) = y_0 \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0 \end{cases} \quad (1-2)$$

为了更直观地分析, 令  $p = d/dt$  (微分算子), 则方程 (1-1) 和方程 (1-2) 分别简化为:

$$(mp^2 + cp + k)y(t) = f(t)$$

和

$$(mp^2 + cp + k)y(t) = (cp + k)x(t)$$

显然, 图 1-3 所示两个系统的动力学方程的左端算子相同, 它由系统本身的结构和结构参数所决定, 反映了与外作用无关的系统本身的固有特性; 右端算子反映了系统与外界的关系。

由动力学方程可以看出, 上例所示系统的动力学方程包含以下五个环节:

- (1) 系统的初始条件:  $y(0) = y_0, \dot{y}(0) = \dot{y}_0$ 。
- (2) 系统的固有特性:  $mp^2 + cp + k$ 。
- (3) 系统的输入或激励:  $f(t), x(t)$ 。
- (4) 系统与外界之间的关系:  $1, cp + k$ 。
- (5) 系统对输入的响应 (系统的输出):  $y(t)$ 。

上例中  $y(t)$  即为动力学方程的解, 它由系统的初始条件、系统的固有特性、系统的输入以及系统与输入之间的关系所决定。

由以上分析可知, 就系统、输入、输出三者之间的动态关系而言, 工程控制论的研究任务可归纳为以下五个方面:

- (1) 系统分析问题。已知系统和输入, 求系统的响应 (或输出), 并通过响应来研究系统本身的问题。
- (2) 最优控制问题。已知系统, 设计输入, 且确定的输入应使输出尽可能符合给定的最佳要求。
- (3) 最优设计问题。已知输入, 设计系统, 且确定的系统应使输出尽可能符合给定的最佳要求。

(4) 滤波与预测问题。已知输出，确定系统，以识别输入或输入中的有关信息。

(5) 系统辨识问题。已知系统的输入与输出，求系统的结构与参数，即建立系统的数学模型。

本书主要以经典控制理论研究其中的任务 (1)，并用适当的篇幅介绍任务 (5) 中的一种研究方法。

### 1.3 控制系统的基本概念、工作原理及基本组成

#### 1.3.1 反馈的概念

反馈是控制工程基础中一个最基本、最重要的概念，也是工程系统的动态模型或许多动态系统的一大特点。所谓反馈，就是指一个系统的输出，不断直接地或经过中间变换后全部或部分地返回到输入端，并与输入共同作用于系统的过程。

按照是否人为设置反馈控制装置，反馈可以分为内反馈与外反馈。

图 1-4 所示为发动机离心调速系统结构原理简图。燃料燃烧形成的燃气作为动力源作用在发动机上，通过发动机内部信息的传递与加工处理，使得发动机输出轴产生一定速度的转动。如果没有图 1-4 中虚线框所示的离心调速装置，当发动机负载一定时，输入的燃气量越多，发动机输出轴就转动得越快；反之就越慢。当发动机输出轴所带的负载变化时，如果输入的燃气量恒定，则发动机的输出转速会发生变化，负载越大转速就会越慢。

发动机离心调速系统的目的是，无论作用在发动机上的负载怎么变化，其输出转速基本恒定。其工作原理为：如果负载变化使  $\omega$  增大，离心结构的滑套就会上移，通过  $ab$  杆带动液压比例控制器的滑阀阀芯上移，高压油通过油路 1 进入油缸

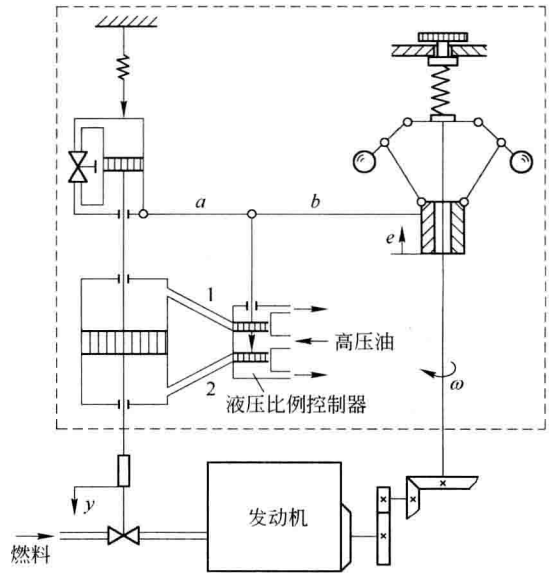


图 1-4 发动机离心调速系统结构原理简图

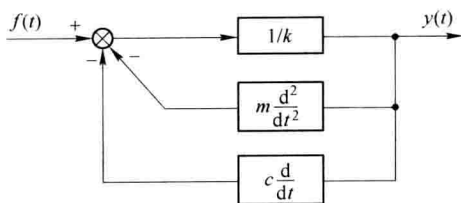
上侧油箱，进而推动动力活塞下移，致使油门关小，输出转速  $\omega$  减小，直到液压滑阀回复到中性， $\omega$  回到设定值，自动调节结束。反之亦然。

另外，以图 1-3 (a) 所示系统为例，其动力学方程可整理为：

$$ky(t) = f(t) - m\ddot{y}(t) - c\dot{y}(t)$$

按上式作出能表达出系统信息传递与交换的方框图 1-5。

从图 1-5 分析可知， $f(t)$  作用在弹簧  $k$  上，弹簧产生位移  $y(t)$ ，而  $y(t)$  又使质量  $m$  和阻尼  $c$  运动，产生惯性力  $-m\ddot{y}(t)$  和阻尼力  $-c\dot{y}(t)$ ，它们反馈作用到弹簧  $k$  上，使弹簧位移产生相应的变化。这里，质量  $m$  对位移  $y(t)$  起着二阶微分反馈的作用，阻尼  $c$  则起着一阶微分反馈的作用。这种信息传递与相互反复循环，使系统处于运动状态。

图 1-5  $m-c-k$  单自由度系统方框图

在这两个例子中，反馈在本质上都是信息的传递与交互。但从具体形式上看，有所不同。对于发动机离心调速系统来说，离心调速器是人为附加的反馈控制装置，其目的在于抵抗由于负载变化这一干扰引起的输出轴转速的变化，这种反馈称为外反馈。而  $m-c-k$  系统中存在的反馈为内反馈，这种反馈是系统内部的信息交互，反映了系统内部各元素之间互为因果的连

接关系，反映了系统的动态特性。

由此，内反馈与外反馈的定义可归纳为：

(1) 内反馈：在系统或过程中存在的各种自然形成的反馈。它是系统内部各个元素之间相互耦合的结果，是造成系统存在一定动态特性的根本原因。

(2) 外反馈：在控制系统中，为达到某种控制目的而人为加入的反馈。

除此之外，按照反馈作用使输出的偏离程度增加或减小的情况分，反馈可以分为正反馈与负反馈。

(1) 负反馈：输出（被控量）偏离设定值（目标值）时，反馈作用使输出偏离程度减小，并力图达到设定值。这类系统的控制过程实质上就是“测偏与纠偏”的过程。例如，发动机离心调速系统、液面自动调节器、恒温箱、数控机床进给伺服系统、火炮自动瞄准等的反馈均属于负反馈。

(2) 正反馈：输出（被控量）偏离设定值（目标值）时，反馈作用使输出偏离程度加剧。例如，自激振荡器、火药爆炸、热核反应、机器疲劳破坏等的反馈均属于正反馈。

### 1.3.2 控制系统的工作原理

系统可以分为非控制系统和控制系统两大类。那些仅仅由人工完成开、关两种状态的系统属于非控制系统，如搅拌机、普通卷扬机、教室里的照明系统等。控制系统是指系统的可变输出能按照要求由参考输入或控制输入进行调节的系统，如发动机离心调速系统、液面自动调节系统、数控机床的进给系统等。控制系统又分为人工控制系统和自动控制

系统。下面以恒温箱为研究对象，简单分析控制系统的工作原理。图 1-6 所示为人工控制的恒温箱。当箱中的温度受环境温度或电源电压波动等外来干扰而变化时，为满足箱中温度恒定的要求，可由人工来移动调压器的活动触头，以改变加热电阻丝的电流，从而控制箱内的温度。箱内温度由温度计来检测。这里，恒温箱为被控对象，箱内温度为被控量（参数），温度计为检测元件，调压器为控制器。人工控制恒温箱温度的过程如下：

(1) 观察由温度计测出的恒温箱的温度。

(2) 与所要求的温度值（给定值）进行比较，得出偏差的大小和方向。

(3) 根据偏差调节调压器，进行箱内温度的控制。当恒温箱的温度低于给定温度时，人工移动调压器触头向右，以增加加热电阻丝的电流，使温度升高到给定值；相反，当恒

温箱的温度高于所要求的温度值时，可人工移动调压器触头向左，以减小加热电阻丝的电流，使箱中温度下降到给定值。

由此可见，人在此控制中的作用是检测、求偏差以及进行纠正偏差的控制，简单地说，就是“测偏与纠偏”的控制。如果用一个自动控制器来代替人的职能，那么人工控制系统就可以变成一个自动控制系统。

图 1-7 所示为自动控制的恒温箱。在这个自动控制系统中，图 1-6 中的温度计由热电偶代替，并增加了电气、电动机和减速器等装置。

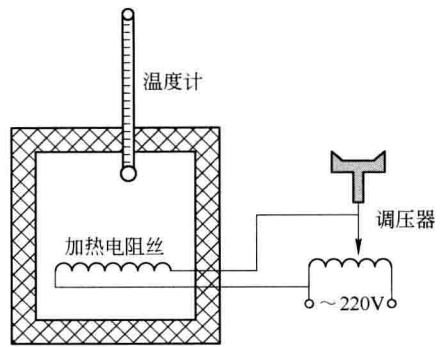


图 1-6 人工控制的恒温箱

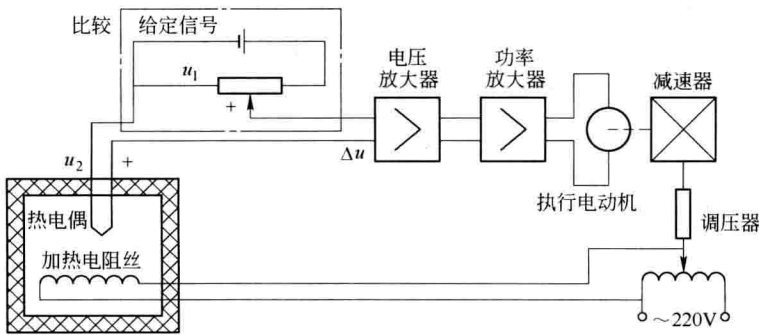


图 1-7 恒温箱自动控制系统

在这个系统中，选取电压  $u_1$  代表恒温箱的给定信号，当外界因素引起箱内温度变化时，热电偶作为检测元件，把箱内温度转换为对应的电压信号  $u_2$ ，并使  $u_2$  能反馈回去与给定信号  $u_1$  相比较，产生温度的偏差信号  $\Delta u = u_1 - u_2$ ，经电压、功率放大后，来控制执行电动机的旋转速度与方向，并通过传动机构及减速器带动调压器触头移动，使加热电阻丝的电流增加或减小，直至  $\Delta u = 0$ ，此时箱内温度达到给定值，电动机停转，温度自动调节结束。

对比恒温箱人工控制系统与自动控制系统，可以看出以下几点：

- (1) 测量：前者靠操作者的眼睛，而后者通过热电偶输出  $u_2$  来测量。
- (2) 比较：前者靠操作者的头脑，而后者靠自动控制器。
- (3) 执行：前者靠操作者的手，而后者由电动机等执行机构完成。

图 1-7 所示系统的物理结构框图如图 1-8 所示。图中方框表示系统的各个组成部分，直线箭头代表信号的流向，其上的标注表示传递的信号， $\otimes$  代表比较环节。热电偶是置于反馈通道中的测量元件，从结构框图上看，系统存在反馈。

工程技术领域中越来越多地采用了自动控制系统。在这种系统中，往往有“反馈控制”。反馈控制是实现自动控制的最基本的方法。因为没有反馈就无法测量偏差，就无法根据偏差自动控制系统纠正偏差。

一般在自动控制系统中，偏差是基于反馈建立起来的。自动控制的过程就是“测偏与纠偏”的过程，这一原理又称为反馈控制原理。利用此原理组成的系统称为反馈控制系统。它具备测量、比较和执行三个基本功能。

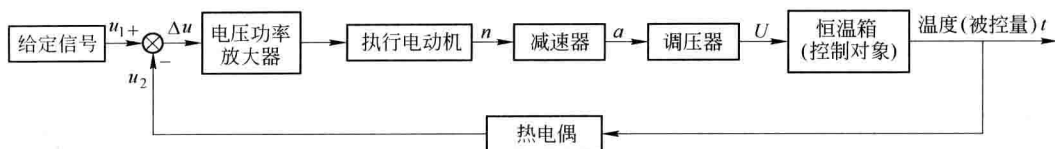


图 1-8 恒温箱自动控制系统的物理结构框图

### 1.3.3 反馈控制系统的基本组成

典型反馈控制系统的组成如图 1-9 所示。

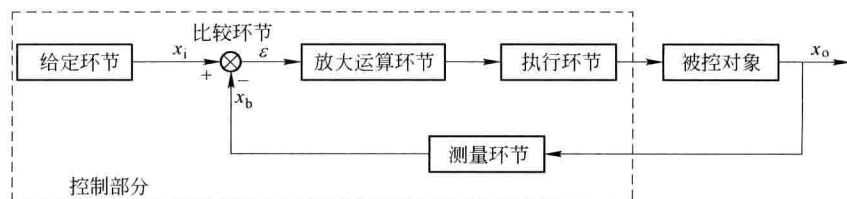


图 1-9 典型反馈控制系统的组成

典型的反馈控制系统包括给定环节、测量环节、比较环节、放大运算环节、执行环节、被控对象等。

**给定环节**——主要用于产生给定信号或输入信号，例如，恒温箱自动控制系统的给定电位。

**测量环节**——测量被控量或输出量，并将被控量转换为便于传送的另一物理量（一般为电量）。例如，热敏感元件、压力传感器、调速系统的测速发电机均为这类环节。

**比较环节**——用来比较输入信号与反馈信号的大小，并得到一个小功率的偏差信号。例如差接电路、旋转变压器、机械式差动装置、运算放大器等都可以作为比较元件。

**放大运算环节**——对偏差信号进行信号放大和功率放大的环节，以带动执行环节实现控制。常用的放大类型有电流放大、电气-液压放大。电流伺服阀、伺服功率放大器等都可以作为放大运算环节。

**执行环节**——接收放大运算环节送来的控制信号，驱动被控对象按照预期的规律运行。例如，执行电动机、液压缸等都可以作为执行环节。

**被控对象**——控制系统所要操纵的对象，它的输出量就是系统的被控量，如数控车床的刀架台、发动机等。

尽管不同的反馈控制系统是由许多起着不同作用的环节组成的，但都可以看成是由控制部分和被控部分组成。

## 1.4 控制系统的分类及对控制系统的基本要求

### 1.4.1 控制系统的分类

为了分析、研究或综合问题方便起见，控制系统可从不同的角度进行分类。

#### 1.4.1.1 按反馈情况分类

按反馈情况分，控制系统可分为开环控制系统和闭环控制系统。

(1) 开环控制系统：系统的输出量对系统没有控制作用，即系统中无反馈回路。例如普通洗衣机，它按洗衣、清衣、脱水的顺序进行工作，无需对输出信号即衣服的清洁程度进行测量。又如步进电动机驱动的数控机床，输入程序通过数控装置，控制伺服系统带动工作台运动到指定位置，而实际的位置信号不通过检测元件检测并反馈。这些都是典型的开环控制系统，其方框图如图 1-10 所示。

(2) 闭环控制系统：系统的输出量对系统有控制作用，即系统中存在反馈回路。如前面介绍的发动机离心调速系统、恒温箱、液面自动调节器、伺服电机驱动的数控机床等，均属于闭环控制系统，其方框图如图 1-11 所示。

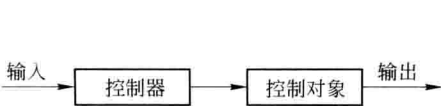


图 1-10 开环控制系统方框图

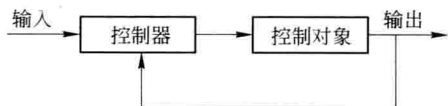


图 1-11 闭环控制系统方框图

可见，闭环系统的输出可作为反馈信息来改变有关环节的输入，进而改变输出本身，以获得高精度的输出。所以，大量的自动控制系统都采用闭环系统。

比较开环控制系统和闭环控制系统，它们的特点是：

(1) 开环控制系统没有抗干扰能力，不能自动纠偏，精度较低，但其结构较简单，容易实现。它主要用于精度要求不太高的场合。

(2) 闭环控制系统抗干扰能力强，有自动纠偏的能力，较开环控制系统的精度高，设计时要着重考虑稳定性问题。其结构相对复杂，设计、制造与调试较困难。它主要用于精度要求较高的系统中。精度和稳定性之间的矛盾是闭环系统存在的主要矛盾。

#### 1.4.1.2 按输出量的变化规律分类

按输出量的变化规律分，控制系统可分为自动调节系统、随动系统和程序控制系统。

(1) 自动调节系统：又称为恒值控制系统，是在外界干扰作用下，输出量仍能基本保持为常量的系统，即“输出恒定”的系统。例如发动机离心调速系统、恒温箱、液面自动调节器等均属于这类系统。自动调节系统因为存在反馈，所以一定是闭环控制系统。

(2) 随动系统：又称为伺服系统，是在外界条件作用下，输出能相应于输入在广阔范围内按任意规律变化的系统，即“输出随输入变化而变化”的系统。例如炮瞄雷达系统、导弹目标自动跟踪系统、液压仿形刀架、全自动照相机的闪光系统、调焦系统等都是随动系统。这类系统也具有反馈控制，也一定是闭环控制系统。

(3) 程序控制系统：在外界条件作用下，输出按照预定程序变化的系统，即“输出



按程序变化”的系统。例如数控机床的进给系统、全自动洗衣机、微波炉等均为程序控制系统。这类系统根据具体情况不同，可以是开环的，也可以是闭环的。

### 1.4.1.3 其他分类

除了上述两种分类方式以外，控制系统还可按信号类型、系统性质、参数的变化情况、被控量的类型等分类。

控制系统按信号类型可分为连续控制系统和离散控制系统；按系统的性质可分为线性控制系统和非线性控制系统；按系统参数的变化情况可分为定常系统和时变系统；按被控量的类型可分为位移控制系统、速度控制系统、压力控制系统、流量控制系统、温度控制系统等。

### 1.4.2 对控制系统的基本要求

评价一个控制系统的好坏，其指标是多种多样的。对于每一个具体的系统，由于控制对象不同、工作方式不同、完成的任务不同，因此，对系统的性能要求也不完全一样，甚至差异很大。但是对控制系统的基本要求（即控制系统所需的基本性能）一般可归纳为“稳、快、准”，即稳定性、快速性与准确性。系统的稳、快、准与有关的性能一起统称为系统的动态性能或动态特性。

(1) 稳定性：系统抵抗动态过程振荡倾向和系统能够恢复平衡状态的能力。稳定性是控制系统正常工作的首要条件，而且也是最重要的条件。如果用输出响应的自由响应曲线来表示，该曲线收敛的系统为稳定的系统；如果曲线呈等幅振荡，则系统为临界稳定系统；若该曲线发散，则系统为发散的系统，如图 1-12 所示。后两种系统均为不稳定的系统。

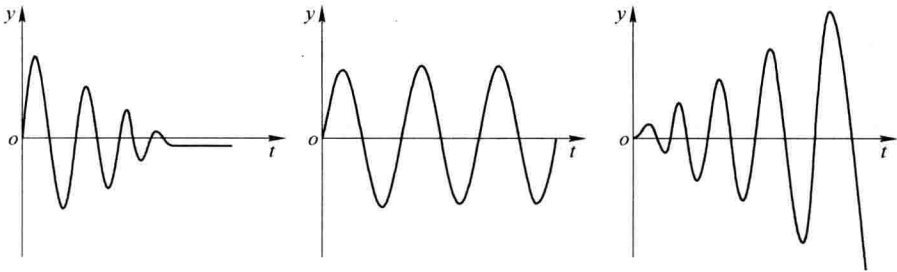


图 1-12 系统自由响应三种状态

(2) 快速性：系统输出量与给定输入量之间产生偏差时，系统消除这种偏差过程的快速程度。

(3) 准确性：系统在调整过程结束后（即达到稳定后），系统输出量与给定的输入量之间的偏差或静态精度。

在同一个控制系统中，稳、快、准这三个性能指标是相互制约的。根据被控对象的具体情况，不同系统对稳、快、准的要求会各有侧重。例如，随动系统对快速性要求较高，而调速系统对稳定性有较严格的要求。