



精品课程教材

机械控制 工程基础

JIXIE KONGZHI
GONGCHENG JICHU

主编 ◎ 王仲民



国防工业出版社

National Defense Industry Press

机械控制工程基础

主编 王仲民
参编 蒋丽 刘朝华 刘学斌
刘玉山 王宏民
主审 戴怡

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要介绍了控制工程的基本概念和基础知识,以及 MATLAB 软件在控制系统分析与设计中的应用。全书共分 7 章,内容包括绪论、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析、控制系统的频域分析、控制系统的根轨迹、控制系统的综合与校正以及计算机控制系统初步等部分。书中以大量机电系统的控制实例渗透于各章节,每章前配有“主要内容”、“重点与难点”和“基本要求”,章后配有“本章小结”和“思考题与习题”,便于读者学习和巩固所学知识。并在书后附有部分思考题与习题的参考答案,以配合课堂教学,帮助读者准确理解有关概念,掌握解题方法与技巧。

全书章节内容连贯,系统性强。注重控制理论在机械工程中的应用,并结合机械系统实例,对系统进行分析与设计,为将来运用控制理论解决机械工程中的实际问题打下基础。

本书可作为应用型本科院校机械工程类专业、测控技术及仪器类专业及高职高专院校自动化类专业的教材,也可作为相关领域的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

机械控制工程基础/王仲民主编. —北京:国防工业出版社,2010.3
ISBN 978-7-118-06699-9

I. ①机... II. ①王... III. ①机械工程-控制系统
IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 024000 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 313 千字

2010 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

随着现代科学技术的迅速发展,特别是随着机械自动化程度、仪器设备精度、劳动生产率等不断地提高,使得自动控制技术在机械制造中的地位显得越来越重要。而计算机技术、电子技术的飞速发展又为控制理论在机械制造中的广泛应用提供了条件。机械控制工程基础是工科院校机械类和近机类专业重要的专业基础课,随着科学技术的飞速发展,越来越多的专业都将该课程列为必修课。对于大多数工程技术人员和科学工作者来说,自动控制已经成为必不可少的基础知识,很好地掌握并应用自动控制理论尤为重要。

本书总结了近年来教学实践和教学改革的经验,并借鉴了国内外同类优秀教材,由工作在教学第一线具有丰富教学经验的几位教师编撰而成。本书具有以下特点:

(1) 从工程应用角度,阐述了自动控制的基本概念、基本原理和基本方法。考虑到机械工程各专业的需求和特点,本书注重简明扼要、通俗易懂。

(2) 充分利用现代计算机工具,基于 MATLAB 软件,强化了在传统理论学习中计算机辅助分析与设计的作用。

(3) 在介绍中多以机械系统为对象,将自动控制理论与机械系统控制等具体问题结合起来,并在应用中进一步学习、消化理解和掌握控制理论和技术。

(4) 内容前后知识衔接紧密,每章前配有“主要内容”、“重点与难点”和“基本要求”,章后配有“本章小结”和“思考题与习题”,便于读者巩固所学知识及自学。

(5) 增加了“常用控制工程术语汉英对照表”,便于读者对于控制类英文资料的理解与阅读。

本书主要介绍了工程中广为应用的经典控制理论以及计算机控制系统初步等内容,主要包括自动控制系统的基本概念、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析、控制系统的频域分析、控制系统的根轨迹、控制系统的综合与校正以及计算机控制系统初步等。以经典控制理论为主,尽量淡化繁冗的理论推导,注重基本概念和原理的阐述,系统性强,便于学生自学。同时,配有适量的思考题与习题,以配合课堂教学,帮助读者准确理解有关概念,掌握解题方法和技巧。

本书由天津师范学院王仲民副教授主编。参加编写工作的有王仲民(第1章和附录C)、刘学斌(第2章)、刘朝华(第3章)、蒋丽(第4章和第6章)、刘玉山(第5章和附录A、附录B);黑龙江科技学院王宏民(第6章、第7章)。全书由王仲民修改、整理并统稿,由天津师范学院戴怡教授主审。

本书虽在多年的教学中不断地充实和改进,但由于水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者提出宝贵意见,在此深表谢意!

编 者
2009年12月7日

目 录

常用符号表	1
第 1 章 绪论	3
1.1 引言	3
1.1.1 控制理论的发展	4
1.1.2 MATLAB 工程软件	4
1.2 自动控制系统的基本概念	5
1.2.1 自动控制系统的工作原理	5
1.2.2 自动控制系统的的基本控制方式	6
1.2.3 自动控制系统的的基本组成	8
1.3 自动控制系统的分类	9
1.4 对控制系统的基本要求	10
1.5 本课程的学习方法	10
本章小结	11
思考题与习题	11
第 2 章 控制系统的数学模型	12
2.1 控制系统的微分方程	12
2.1.1 线性系统(元部件)微分方程的建立	12
2.1.2 非线性系统微分方程的线性化	16
2.2 控制系统的传递函数	18
2.2.1 传递函数概述	18
2.2.2 常用控制元件的传递函数	19
2.2.3 典型环节的传递函数	25
2.2.4 传递函数的标准形式	25
2.3 控制系统的结构图及其等效变换	27
2.3.1 结构图概述	27
2.3.2 结构图的等效变换	29
2.4 控制系统的几种常用传递函数	32
2.4.1 系统的开环传递函数	33
2.4.2 闭环系统的传递函数	33

2.4.3	闭环系统的误差传递函数	33
2.5	控制系统数学模型的 MATLAB 实现	36
2.5.1	传递函数的 MATLAB 描述	36
2.5.2	Simulink 动态结构图	36
2.5.3	数学模型的转换	37
本章小结	.....	38
思考题与习题	.....	38
第 3 章	控制系统的时域分析	41
3.1	时间响应与典型输入信号	42
3.1.1	时间响应的概念	42
3.1.2	典型输入信号	42
3.2	一阶系统的时间响应	44
3.2.1	一阶系统的数学模型	44
3.2.2	一阶系统的单位脉冲响应	44
3.2.3	一阶系统的单位阶跃响应	44
3.2.4	一阶系统的单位速度响应	46
3.3	二阶系统的时间响应	46
3.3.1	二阶系统的数学模型	46
3.3.2	二阶系统的单位阶跃响应	47
3.4	瞬态响应的性能指标	50
3.5	稳态误差分析与计算	54
3.5.1	稳态误差的概念	54
3.5.2	稳态误差的计算	56
3.5.3	稳态误差系数	56
3.5.4	干扰作用下的稳态误差	58
3.6	Routh—Hurwitz 稳定判据	59
3.6.1	Hurwitz 稳定性判据	59
3.6.2	Routh 判据	60
3.7	MATLAB 环境下时域响应分析	63
本章小结	.....	66
思考题与习题	.....	66
第 4 章	控制系统的频域分析	68
4.1	频率特性的基本概念	69
4.1.1	频率特性概述	69
4.1.2	频率特性的求取方法	70

4.1.3	频率特性的表示法	72
4.2	典型环节的频率特性	75
4.2.1	比例环节	75
4.2.2	积分环节	77
4.2.3	惯性环节	78
4.2.4	振荡环节	80
4.2.5	微分环节	83
4.2.6	延时环节	85
4.2.7	最小相位系统与非最小相位系统	86
4.3	控制系统的开环频率特性	87
4.3.1	系统开环幅相频率特性	87
4.3.2	系统开环对数频率特性	91
4.4	控制系统的频域稳定性分析	95
4.4.1	系统开环频率特性与闭环特征式的关系	96
4.4.2	幅角变化与系统稳定性的关系	97
4.4.3	Nyquist 稳定判据	97
4.4.4	应用 Bode 图判断闭环系统的稳定性	100
4.5	开环频率特性分析	102
4.5.1	开环频域性能指标	102
4.5.2	开环频率特性与时域指标的关系	105
4.5.3	中频段特性与开环频率特性间的关系	108
4.6	闭环频率特性分析	109
4.6.1	闭环频率特性	110
4.6.2	闭环频域指标	110
4.6.3	闭环频域性能指标与时域指标	111
本章小结	.....	112
思考题与习题	.....	113
第 5 章	控制系统的根轨迹	116
5.1	根轨迹与控制系统特性	116
5.2	绘制根轨迹的基本法则	119
5.3	用根轨迹分析控制系统的性能	127
5.4	利用 MATLAB 绘制系统根轨迹	129
本章小结	.....	131
思考题与习题	.....	131
第 6 章	控制系统的综合与校正	133
6.1	控制系统校正的基本概念	133

6.1.1	控制系统校正与校正装置	133
6.1.2	控制系统的性能指标	134
6.1.3	校正方式	135
6.2	校正装置及其特性	136
6.2.1	超前校正装置	136
6.2.2	滞后校正装置	138
6.2.3	滞后—超前校正装置	140
6.3	串联校正	143
6.3.1	相位超前校正	143
6.3.2	相位滞后校正	147
6.3.3	串联滞后—超前校正	149
6.4	并联校正	152
6.4.1	反馈校正	152
6.4.2	前馈校正	155
6.5	MATLAB 在系统校正中的基本应用	156
	本章小结	160
	思考题与习题	160
第7章	计算机控制系统初步	162
7.1	计算机控制系统概述	163
7.1.1	计算机控制系统的基本概念	163
7.1.2	计算机控制系统的组成	164
7.1.3	计算机控制系统的分类	165
7.1.4	计算机控制系统的发展概况	167
7.1.5	计算机控制系统的发展趋势	168
7.2	信号的采样与复原	169
7.2.1	计算机控制系统的信号形式	169
7.2.2	采样定理	170
7.2.3	信号的复原	171
7.3	z 变换及其逆变换	173
7.3.1	z 变换的定义	173
7.3.2	z 变换的性质	174
7.3.3	z 逆变换	175
7.4	计算机控制系统的数学模型	178
7.4.1	线性差分方程	178
7.4.2	脉冲传递函数	179
7.5	计算机控制系统的控制算法	182

7.5.1 数字 PID 控制算法	182
7.5.2 数字 PID 控制器的改进	183
7.5.3 数字 PID 调节器参数整定	185
本章小结	187
思考题与习题	187
附录 A 拉普拉斯变换	188
附录 B 常用函数的拉普拉斯变换和 z 变换表	200
附录 C 常用控制工程术语汉英对照表	201
思考题与习题参考答案	206
参考文献	211

常用符号表

m	质量
c	阻尼系数
k	弹簧弹性系数
R	电阻
C	电容
L	电感
K	增益或放大系数
K^*	根轨迹增益
$L[\quad]$	拉普拉斯变换(Laplace 变换)
$L^{-1}[\quad]$	拉普拉斯逆变换
$r(t)$	输入(激励)
$R(s)$	$L[r(t)]$
$c(t)$	输出(响应)
$C(s)$	$L[c(t)]$
$\delta(t)$	单位脉冲函数
$G(s)$	传递函数或前向通道传递函数
$H(s)$	反馈通道传递函数
$H(j\omega)$	反馈通道频率特性
$G(s)$	系统的开环传递函数
$\Phi(s)$	系统闭环传递函数
$G(j\omega)$	系统的(开环)频率特性
$\Phi(j\omega)$	系统的闭环频率特性
$n(t)$	干扰信号
$N(s)$	$L[n(t)]$
T	时间常数或时间
ω_n	无阻尼固有频率
ω_d	阻尼振荡频率
ω_T	转折(转角)频率
ω_c	截止频率或穿越频率或剪切频率
ω_b	带宽频率
ω_r	谐振频率
ξ	阻尼比

M_r	谐振峰值
$M_p(\sigma\%)$	超调量
K_g	幅值裕度或幅值裕量
γ	相角裕度或相位裕量
h	中频宽度
e_{ss}	系统稳态误差
$e_r(t)$	系统误差
K_p	稳态位置误差系数
K_v	稳态速度误差系数
K_a	稳态加速度误差系数
$x^*(t)$	$x(t)$ 采样后的时间序列
ω_s	采样频率
$Z[\]$	z 变换
$Z^{-1}[\]$	z 逆变换
$G(z)$	离散系统的传递函数(或脉冲传递函数)

第1章 绪 论

[主要内容]

- (1) 自动控制系统的基本概念及工作原理。
- (2) 控制系统的类型。
- (3) 对控制系统的基本要求。

[重点与难点]

反馈控制原理及控制系统的性能指标。

[基本要求]

- (1) 了解自动控制的概念及其研究对象与任务。
- (2) 了解反馈的基本概念。
- (3) 了解控制系统的分类方法。
- (4) 掌握对控制系统的基本要求。
- (5) 掌握控制系统的基本组成和工作原理。

“机械控制工程”是研究应用控制理论的基本原理和方法来解决机械工程中的自动控制问题,它是一门技术科学。随着工业生产和科学技术的不断发展,越来越显示出“机械控制工程”的重要性,为人们所瞩目。这不仅是今天自动化技术发展的需要,而且也与信息科学和系统科学密切相关,更重要的是它提供了辩证的系统分析方法,即不但从局部,而且从整体上来认识与分析机械系统,进而去改进机械系统,以满足科技发展和工业生产的需要。

本书主要介绍经典控制理论的基础内容,重点是将其结合机械工程实际,建立基本的概念,掌握基本理论与方法,并能够进行应用。

1.1 引 言

机械控制工程是以控制理论为理论基础,以有关自动控制与系统动力学的理论及其在机械工程中的应用为主要研究对象的一门技术科学。目前,机械制造业发展的一个明显而重要的趋势是越来越广泛而深入地引入了控制理论。例如,数控机床、工业机器人、电液伺服系统和动态测试等都需要用到控制理论的基础知识。21世纪的机械产品将是整体最佳为目标、以自动控制为核心的高性能、多功能的机电一体化产品。因此,控制理论不仅是一门极为重要的学科,而且也是科学方法论之一。

自动控制,就是在没有人的直接参与下,利用控制器(如机械装置、电器装置或电子计算机),使生产过程或被控对象(如机器或电气设备)的某些物理量(如速度、位移、电压、电流、压力、流量、温度等)自动地按照预定的规律运行。在工程与科学技术的发展过程中,自动控制扮演着重要的角色。除在宇宙飞船系统、导弹制导系统与机器人系统等领域中,自动控制具有特别重要的作用之外,它已成为现代机器制造业和工业生产过程中的重要而不可缺少的组成部分。例如,在发电厂的生产过程中,要想使发电机不受负载变化和原动机转速波动的影响而正常供电,就必须保持其输出电压恒定。食品厂在生产熟食时,就必须按照加工要求严格控制烘炉的炉温。在机械加工的过程中,只有机床工作台和刀架的位置准确地跟随指令进给,才能加工出高精度的零件。在轮船和飞机的航行中,要保证能按照制定的航线行驶,就必须采取一定的措施使其运动轨迹满足要求而不受其他因素的干扰等。

1.1.1 控制理论的发展

控制理论的诞生源于解决机电液等工程问题的需要,即实际生产需求促进了理论的发展。随着科学技术的进步,特别是计算机技术的发展,控制理论日渐成熟,对促进生产的发展和社会进步产生了深远的影响。根据控制理论发展的进程,可分为“经典控制理论”、“现代控制理论”和“大系统理论与智能控制理论”三个阶段。20世纪40年代至50年代为“经典控制理论”发展时期,经典控制理论以传递函数为基础,研究单输入—单输出(SISO)控制系统的分析与设计问题。对于线性定常系统,这种方法是成熟有效的。20世纪60年代至70年代为“现代控制理论”发展时期,现代控制理论是以状态空间法为基础,研究多输入—多输出(MIMO)、非线性及时变系统的分析和设计问题。从20世纪70年代末至今,控制理论向着“大系统理论与智能控制理论”发展。“大系统理论”是控制理论在广度上的开拓,它是用控制与信息观点研究大系统的结构方案、总体设计中的分析方法和协调问题;而“智能控制理论”是控制理论在深度上的挖掘,它是通过研究与模拟人类活动的机理,研究具有仿人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系统等重要的分支。

从控制理论的发展中可以看出,“经典控制理论”是基础,“现代控制理论”和“智能控制理论”是在此基础上发展起来的,是经典控制理论的延伸和拓展。时至今日,“经典控制理论”在大多数实际工程中仍然是极为重要的,相当多的工程问题用它来解决还是非常有效的。本书主要介绍经典控制理论。

1.1.2 MATLAB 工程软件

MATLAB 最早主要用于现代控制中复杂的矩阵、向量的各种运算。后来由于不断扩展,相应地增加了许多其他学科的专门工具包,现在的 MATLAB 已不仅仅局限于现代控制系统分析和综合应用,它已是包罗众多学科的功能强大的“技术计算语言”。它对于提高人们对各种控制系统、控制理论与方法的理解和分析综合能力是非常有帮助的,它是计算机技术的发展对控制理论的又一大贡献。本书结合控制理论,在每章中简要介绍了 MATLAB 软件在控制理论中的基本应用。

1.2 自动控制系统的基本概念

自动控制系统是指能够对被控对象的工作状态进行自动控制的系统,包括被控对象和控制装置。被控对象是指要求实现自动控制的机器、设备或生产过程;控制装置是指对被控对象起控制作用的设备总体。常见的控制系统可以是仅控制一个物理量,可以是包括一个企业、机构全部过程的大系统,可以是一个具体的工程系统,也可以是抽象的社会系统、生态系统或经济系统等。

1.2.1 自动控制系统的工作原理

自动控制往往是参考人工控制而建立起来的。如实现恒温控制有两种方法:人工控制和自动控制。本章以控制恒温箱为例说明自动控制系统的工作原理,图 1-1 为人工控制的恒温箱,人工控制恒温箱调节过程如下:

- (1) 观测由检测元件(温度计)测量出恒温箱内的温度(被控制量)。
- (2) 与要求的温度(期望值)进行比较,得出温度偏差的大小与方向。
- (3) 根据偏差的大小和方向调节调压器,控制加热电阻丝的电流以调节温度回复到要求值。

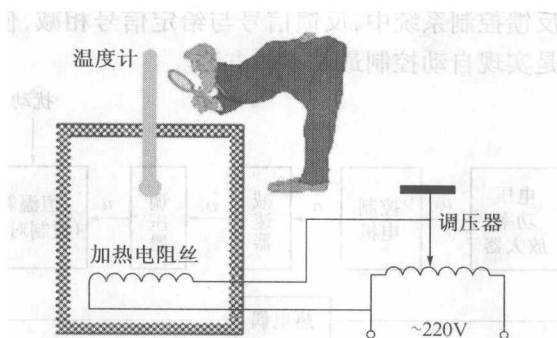


图 1-1 人工控制的恒温箱

因此,人工控制的过程是检测、求偏差、再控制,以纠正偏差的过程。其实质是“检测偏差再纠正偏差”。图 1-2 为恒温箱自动控制系统,其功能框图如图 1-3 所示。其中,恒温箱的温度是由给定信号电压 u_1 控制,当外界因素引起箱内的温度变化时,热电偶作为检测元件把温度转换成对应的电压信号 u_2 ,并反馈回去与给定信号 u_1 相比较,所得结果即为温度的偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。经过电压、功率放大后,用以改变电动机的转速和方向,并通过传动装置拖动调压器的动触头。当温度偏高时,动触头向减小电流的方向运动;反之,动触头向增大电流的方向移动,直到温度达到给定值为止。即只有在偏差信号 $\Delta u = 0$ 时,电动机才停转,这样就完成了所要求的控制任务。

自动控制系统的工作原理如下:

- (1) 检测输出量(被控制量)的实际值。
- (2) 将输出量的实际值与给定值(输入量)进行比较而得出偏差。
- (3) 根据偏差值产生的控制调节作用消除偏差,使输出量维持在期望的输出值。

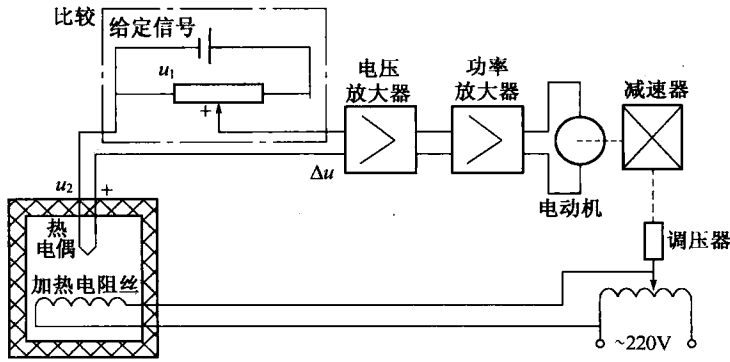


图 1-2 恒温箱自动控制系统

由于存在输出量反馈,该自动控制系统能在存在扰动的情况下,自动减少系统的输出量与参考输入量之间的偏差,故称为反馈控制。显然,反馈控制建立在偏差基础上,其控制方式为“检测偏差用以纠正偏差”。反馈控制原理是:只要恒温箱内实际温度不等于期望温度,即只要出现偏差,就会产生纠正偏差的控制作用,直至恒温箱内实际温度等于期望温度,即偏差消失为止。这种基于反馈原理,能对输出量与参考输入量进行比较,并力图保持两者之间既定关系的系统,称为反馈控制系统。反馈控制系统具备测量、比较与执行三个基本功能。在反馈控制系统中,反馈信号与给定信号相减,使偏差越来越小,称为负反馈。负反馈控制是实现自动控制最基本的方法。

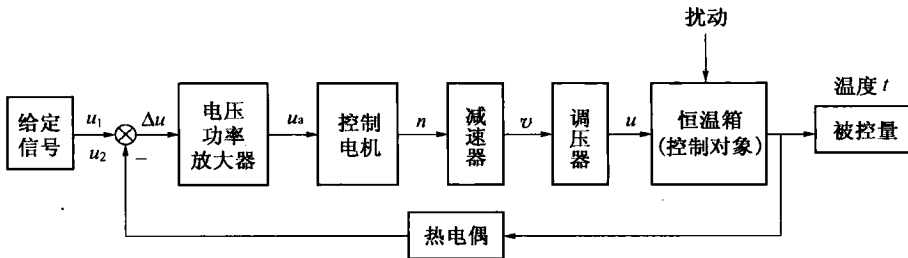


图 1-3 恒温箱自动控制系统功能框图

1.2.2 自动控制系统的基本控制方式

实际的控制系统根据有无反馈作用可分为开环控制系统、闭环控制系统、复合控制系统三类。

1. 开环控制系统

控制器与被控对象之间只有顺向作用而没有反向联系的控制过程,其输出量只受控于控制量,而对系统的控制作用没有影响的这一类系统称为开环控制系统,如图 1-4 所示。系统的特点是:系统仅受输入量和扰动量控制,输入—输出关系需要事先准确调好;输出端和输入端之间不存在反馈回路,信号是单向传递的;输出量在整个控制过程中对系统的控制不产生任何影响,无抗干扰能力。开环控制系统的优点是简单、稳定、可靠。如果组成系统的元件特性和参数值比较稳定,且外界干扰较小,开环控制能够保持一定的精度。其缺点是:精度通常较低,而且无自动纠偏能力。图 1-5 为数控机床进给系统,没

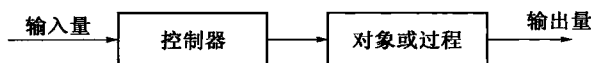


图 1-4 开环控制系统

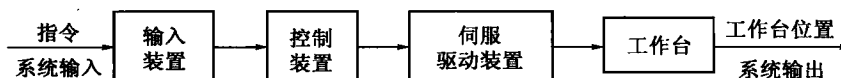


图 1-5 数控机床的开环控制系统

有反馈通道,因此是开环控制系统。

2. 闭环控制系统

控制系统的输出与输入之间有反馈通道,即系统的输出对控制作用有直接影响的系统称为闭环控制系统。因此,反馈系统也就是闭环控制系统,其结构如图 1-6 所示。图 1-3 就是一个闭环控制系统,其工作原理前已述及。从定义可以明显看出,闭环控制系统的特点是:有反馈检测环节,输出端和输入端之间存在反馈回路,输出量对控制过程有直接影响;按偏差控制,有抗干扰的能力。闭环的作用是:应用反馈,减少偏差。闭环控制系统的优点是:精度高,对外部扰动和系统参数变化不敏感;缺点是:存在稳定、振荡、超调等问题,而且系统性能分析与设计比较困难。

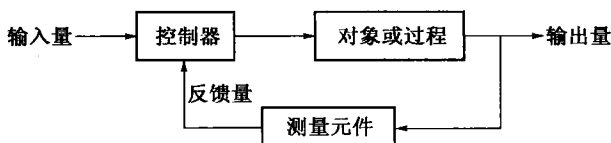


图 1-6 闭环控制系统

在控制系统中,反馈的概念非常重要。在图 1-6 中,如果将反馈环节取得的实际输出信号加以处理,并在输入信号中减去这样的反馈量,再将结果输入到控制器中去控制被控制对象,称这样的反馈为负反馈;反之,若由输入量和反馈量相加作为控制器的输入,则称为正反馈。

3. 复合控制系统

复合控制系统是开环控制与闭环控制相结合的一种控制方式,是在闭环控制回路的基础上,附加一个输入信号或扰动作用的顺馈通路,来提高系统的控制精度。典型的复合控制系统如图 1-7 所示。在这种控制系统中,附加的开环控制通路的作用主要是提供输入补偿量,以补偿由闭环系统的原理性误差或内外扰动引起的控制精度的不足,并同时改善系统的动态性能。按照补偿对象的不同,补偿方式分为按输入量的补偿(图 1-7(a))和按扰动量的补偿(图 1-7(b))两种。前者的补偿作用主要是给控制量提供一个补偿量,以减小或消除存在于闭环系统的原理性误差;后者的补偿作用主要是事先给扰动量提供一个补偿量,以减小或消除扰动对输入量的影响。

复合控制系统具有控制精度高、动态性能好的优点,应用十分广泛。目前,在火炮、雷达、飞机自动驾驶仪等对控制精度和动态性能两者同时要求较高的控制系统中,一般都采用复合控制。

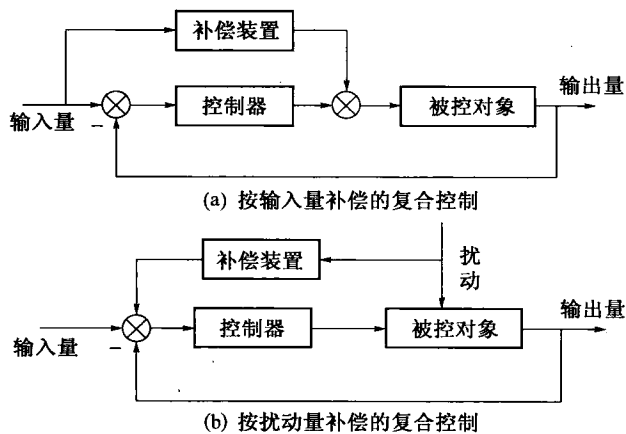


图 1-7 复合控制系统

1.2.3 自动控制系统的基本组成

自动控制系统是由各种结构不同的元部件组成的,一个典型的自动控制系统的基本组成可用图 1-8 来表示。从完成自动控制这一功能来看,一个系统必然包含被控对象和控制装置两大部分,而控制装置是由具有一定功能的各种基本元部件组成的。在不同系统中,结构完全不同的元部件却可以具有相同的功能。因此,将组成系统的元部件按功能分类主要由以下几种:

- (1) 给定元件: 又称输入元件,其功能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量。
- (2) 测量元件: 检测被控制的物理量,如果这个物理量是非电量,一般再转换为电量。例如,测速发电机用于检测电动机轴的速度并转换为电压;电位器、旋转变压器或自整角机用于检测角度并转换为电压;热电偶用于检测温度并转换为电压等。
- (3) 比较元件: 把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的输入值进行比较,得出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。
- (4) 放大元件: 将比较元件给出的偏差信号进行放大,用来推动执行元件去控制被控对象。
- (5) 执行元件: 直接推动被控对象,使其被控量发生变化。常用的执行元件有电动机、液压马达、阀等。
- (6) 被控对象: 控制系统所要操纵的对象,它的输出量即为系统得被控制量,如机

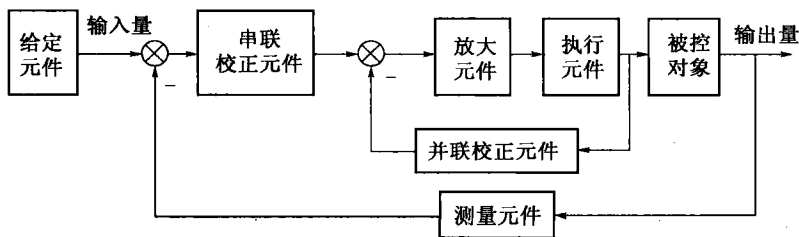


图 1-8 典型闭环控制系统的基本组成