

全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

控制工程基础

主 编 彭珍瑞 董海棠



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

控制工程基础

Kongzhi Gongcheng Jichu

主 编 彭 珍 瑞 董 海 棠
副 主 编 徐 创 文 殷 红 王 永
主 审 高 溥 滕 青 芳



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书以大学本科教育为背景,以经典控制理论为主要内容,系统且有重点地论述连续控制系统的分析和研究方法。考虑到计算机应用的推广和求解手段的进步,还简要介绍计算机离散控制系统的概念和基本分析方法。

全书共分八章。内容包括控制工程的基本概念,拉普拉斯变换,系统的数学模型,系统的时域响应分析、稳定性概念及劳斯稳定判据,根轨迹设计方法,系统的频率特性、奈奎斯特稳定判据以及用伯德稳定判据来判断系统相对稳定性等系统稳定性分析方法,系统的设计和校正技术,离散控制系统的基本知识等。

本书适用于机械设计制造及其自动化、电子信息工程、测控技术与仪器、热能与动力工程、工业工程、材料科学等专业大学本科生作为教材使用,也可供系统与控制领域的广大工程技术人员和科技工作者学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础/彭珍瑞,董海棠主编. —北京:高等教育出版社,2010.6

ISBN 978-7-04-029109-4

I. ①控… II. ①彭… ②董… 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(2010)第081813号

策划编辑 段博原 责任编辑 查成东 封面设计 于涛
责任绘图 尹莉 版式设计 余杨 责任校对 王雨
责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120

经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 北京铭传印刷有限公司

开本 787×960 1/16
印张 21
字数 390 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2010年6月第1版
印次 2010年6月第1次印刷
定价 32.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29109-00

前 言

本书以大学本科教育为背景，结合编者近些年的教学实践，以经典控制理论为主要内容，系统且有重点地论述连续控制系统的分析和研究方法。考虑计算机应用的推广和求解手段的进步，还简要介绍计算机离散控制系统的概念和基本分析方法。

本书注重将经典的理论知识与现代计算机仿真技术和实验技术相结合，更有利于工科学生对控制理论的学习和应用。书中给出了大量控制工程中常用术语的英文表述，可增强读者对控制领域科技英语的认知，为阅读控制类英文原版资料奠定基础。同时，将 MATLAB 仿真技术应用到控制系统分析方法中，使工程实例与仿真程序的应用融为一体，更有利于提高学习效果。

全书共分八章。内容包括控制工程的基本概念，拉普拉斯变换；系统的数学模型，系统的时域响应及稳定性分析，根轨迹设计方法，系统的频率特性，控制系统的设计和校正，离散控制系统的基本知识等。

各章节内容概括如下：第一章介绍机械工程控制的基本概念和控制系统的的基础知识。第二章阐述常用时间函数的拉普拉斯变换和基本的拉普拉斯变换定理（如果读者已经具备了拉普拉斯变换方面的知识，可以跳过本章）。第三章研究动态系统（大多为机械、电气和电子系统）的数学模型，并推导出它们的传递函数。第四章研究具有阶跃、斜坡和脉冲输入的动态系统瞬态响应分析，还介绍了稳定性概念及劳斯稳定判据。第五章研究控制系统的根轨迹分析方法并详细讨论了根轨迹的作图方法。第六章介绍频率响应的基本知识，讨论了频率特性的极坐标图和对数坐标图，并在此基础上，介绍奈奎斯特稳定判据以及用伯德稳定判据来判断系统相对稳定性等系统稳定性分析方法。第七章研究采用频率响应法的设计和校正技术，其中详细地介绍了采用伯德图方法的超前、滞后以及超前-滞后校正装置的设计，PID 控制以及对控制器的参数值进行优化选取的方法。第八章介绍离散控制系统的基本知识和基于 z 变换的数学分析方法。

本书强调基本概念，在知识的介绍过程中力求避免高深的数学论证，同时也提供了一些数学证明以加深读者对有关内容的理解。书中的例题经过精心安排，在各部分内容介绍中，适时插入 MATLAB 仿真程序强化理论知识的验证，使读者可以很好地理解所讨论的相关内容。每章后面都配有习题，书后附有习题答案，以便读者巩固所学知识。

本书的知识结构由理论到应用再到设计，体系结构和实例取材强调基础性

和实用性。本书的编写符合理工科学生的认识规律，适合地方工程应用型高校机械设计制造及其自动化、电子信息工程、测控技术与仪器、热能与动力工程、工业工程、材料科学等专业本科生作为教材使用，也可供系统与控制领域的广大工程技术人员和科技工作者学习参考。

与本书配套使用的《控制工程基础习题集》在高等教育出版社同步发行，二者结合使用，学习效果更好。本书的主要内容已制作成多媒体教学课件，需要者可与出版社联系。

本书由彭珍瑞、董海棠担任主编，由徐创文、殷红、王永担任副主编。高溥、藤青芳审阅了本书。由董海棠、葛动元、胡靖明、雷文斌、李春锋、李双科、李杨、梁达平、梁亮、彭玉海、彭珍瑞、祁文哲、王彩霞、杨成慧、杨红平、王永、徐创文、殷红、张建育、周朝晖等共同编写完成。最后由彭珍瑞、董海棠、殷红统稿、定稿。特别感谢郭光辉教授对本书的编写提出了建设性的指导意见。在本书的编写过程中还得到蔡慧林、郭同章、张永恒、张宝霞、孟建军、袁文华等老师的大力支持，缪仲翠、祝磊、余金华、杨世强、武福、冯月春、黄晓鹏、李方、李永春、武祥等同志也做了许多具体工作，在此一并表示感谢。此外，在本书的编写过程中我们参考了一些相关的优秀教材，受益匪浅，特向其作者表示谢意。

由于编者水平有限，书中难免会有不妥和错误之处，恳请读者批评指正，有关意见和建议可发送到我们的邮箱：pengzr@yahoo.cn，dhaitang@yahoo.cn。

编 者

2009年11月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 控制论的基本含义	1
第二节 控制的基本方式	4
第三节 反馈控制系统的基本组成	8
第四节 自动控制系统的分类	10
第五节 对控制系统的性能要求	13
第六节 自动控制的应用举例	15
第七节 MATLAB 在控制系统中的应用	18
第八节 本课程的特点与学习方法	18
习题	19
第二章 拉普拉斯变换	21
第一节 拉普拉斯变换简介	21
第二节 拉普拉斯变换的性质	25
第三节 拉普拉斯反变换	37
第四节 用拉普拉斯变换解线性微分方程	42
习题	43
第三章 系统的数学模型	45
第一节 概述	45
第二节 系统的微分方程	47
第三节 传递函数	58
第四节 典型环节的传递函数	65
第五节 相似原理	72
第六节 系统传递函数方框图及其简化	74
第七节 控制系统的信号流图	90
第八节 系统的状态空间描述	94
习题	103
第四章 系统的时域响应分析	107
第一节 时域响应概述	107
第二节 典型的输入信号	111
第三节 控制系统的时域性能指标	112

第四节	一阶系统的时域响应	113
第五节	二阶系统的时域响应	122
第六节	欠阻尼二阶系统的时域性能指标	133
第七节	高阶系统的时域响应	140
第八节	系统的稳定性分析	143
第九节	控制系统的稳态误差	154
习题	166
第五章	根轨迹设计方法	169
第一节	根轨迹的基本概念	169
第二节	绘制根轨迹的基本条件	171
第三节	绘制根轨迹的基本规则	175
第四节	广义根轨迹	185
第五节	利用根轨迹分析系统的性能	188
习题	193
第六章	频率特性分析法	195
第一节	频率特性概述	195
第二节	频率特性的极坐标图	200
第三节	奈奎斯特稳定判据	212
第四节	频率特性的对数坐标图	222
第五节	伯德稳定判据	238
第六节	系统的相对稳定性	241
第七节	闭环频率特性及频域性能指标	251
习题	253
第七章	系统的设计与校正	257
第一节	系统设计与校正的概述	257
第二节	常用校正装置及其特性	263
第三节	串联校正	273
第四节	PID 校正器的设计	287
习题	292
第八章	离散控制系统	295
第一节	线性离散系统概述	295
第二节	离散控制系统的数学基础	298
第三节	脉冲传递函数	307
第四节	离散系统的性能分析	310

习题	315
附录 习题参考答案	318
参考文献	324

第一章 绪 论

控制工程在现代技术和科学的发展进程中起着极为重要的作用。在工农业生产、交通运输、国防建设、科学研究及日常生活等各个领域，自动控制技术的应用非常广泛。从工艺过程中对压力、温度、湿度、粘度和流量的控制到机械制造业中机械零件的加工、处理和装配，自动控制技术都是其重要的组成部分。太空航行、人造卫星等高新技术中，更渗透着控制工程的辉煌成果。

自动控制理论与实践的不断发展，为人们提供了设计最佳系统的方法，大大提高了生产率，同时促进了技术的进步。目前，工程技术人员和科学工作者都十分重视自动控制理论的学习。在大学里，控制论已成为国内外许多专业普遍开设的课程。

第一节 控制论的基本含义

一、什么是控制

在现代社会中，到处都在使用“控制”这个词。所谓控制（control），是指由人或控制装置使受控对象按照一定目的来动作所进行的操作。例如：用微型计算机控制热处理炉的炉温使之保持某个恒定值或按一定规律变化，钢铁工厂中的轧制控制使连轧机各轧辊的既定转速保持不变，机床工作台和刀架的位置控制使之准确地跟踪进给指令等。其中，热处理炉、轧辊、工作台和刀架就是受控对象（controlled object）。温度、转速、位置是分别表征这些机器设备工作状态的物理量，称为被控量（controlled variable）。要求这些被控量所应保持的数值或变化规律，称为这些被控量的期望值。而操作或控制的任务就是使受控对象的被控量等于或按一定精度符合期望值。

控制的任务如果是由人来完成，则称为人工控制。如果人不经常直接参与，而是用控制装置来完成，则称为自动控制。控制装置和受控对象的组合，称为自动控制系统。

任何实际运行的物理系统都是因果系统，输出（output variable）（或称响应）是输入（input variable）（或称激励）引起的后果。自动控制系统的输入称为给定量（reference variable）或称参考输入量，输出就是被控量。这种关系可以用由方框及输入输出箭头表示的方框图（block diagram）来描

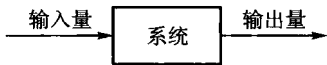


图 1-1-1 系统方框图

述,如图 1-1-1 所示。给定量一般由人事先设定或由另外的自动装置给定。各种自动控制系统的共同点是:不需要人经常直接参与而能按照给定量自动地做出相应的反应,使被控量等于或按一定精度符合期望值。而周围环境的各种因素以及系统本身的各因素会时常干扰它,给系统以附加输入或使系统的特性发生变化。实现自动控制需要有相应的技术科学基础。控制工程技术科学常称为自动控制技术科学,它研究的中心问题就是如何抵消或削弱这些因素的影响,改善控制精度,从而实现自动控制的任务。

二、控制论

控制论 (cybernetics) 的形成和发展是始于技术的。从解决生产实践问题开始,首先建立的是工程控制论,即从工程技术中提炼工程技术的理论,它是控制工程系统技术的总结。其后,由于其对生产力的发展、尖端技术的研究与尖端武器的研制以及非工程系统包括社会管理等方面都产生了重大的影响。因此,控制论在建立后的短时期内便迅速渗透到许多科学技术领域中,并以相关的分析观点派生出许多新型的边缘学科。其中包括生物控制论、经济控制论、社会控制论等。20 世纪上半叶,相对论、量子论和控制论被认为是三大伟绩,称为三项科学革命,是人类认识客观世界的三大飞跃。

由上可知,控制论是一门多学科的技术科学。它的任务是对各类系统中的信息传递与转换关系进行定量分析,然后根据这些定量关系预见整个系统的行为。没有定量分析,就没有控制论。因此,在理论的研究中,广泛地利用了各种数学工具。微积分、微分方程、概率论、高等数学、复变函数、泛函分析、变分法、拓扑学等几乎数学的所有分支理论都渗透到了控制论的研究中。从这个意义上说,控制论可以称作应用数学的一个分支。

我们要讨论的自动控制理论,仅仅是工程控制论的一个部分,它只研究控制系统分析和设计的一般理论。按照自动化技术发展的不同阶段,自动控制理论相应地分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。目前,控制理论已不仅仅是数学研究人员关心的课题,由于它对工程实践的指导作用,已成为工程技术人员的必修课。在技术高度发达的今天,控制工程师已更多更广泛地将控制理论与控制技术结合起来,在各个专业工程领域中,将人们的许多希望和梦想变成了现实。所以,自动控制已被列为最有前途的领域之一,而它的发展趋势也是无可限量的。

(一) 控制理论的基础观念

控制理论是建立在有可能发展成为用一般方法来研究各种各样系统控制过程这一基础上的理论。这个观念的重要性在于它提供了一个有力的工具来定量

地描述解决复杂问题的过程。这就是说它的目的是综合自动控制方面的技术成果，提炼出一般性的理论，并指出进一步发展的方向，从而对自动控制技术的发展起指导作用。

(二) 控制理论的研究对象

控制论的研究是面向系统的。广义地说，从控制论大学科的角度看，控制论是研究信息的产生、转换、传递、控制、预报的科学。简而言之，是研究有输入与输出信息的系统。但从工程控制的角度来说，控制理论研究的对象可狭义地定义为这样一种信息系统，即根据期望的输出来改变输入，使系统的输出能有某种预期的效果。

(三) 控制理论在工程中的应用方法

控制论是应用数学的一个分支，它的某些理论的研究要借助于抽象数学。而控制论的研究成果若要应用于实际工程中，就必须在理论概念与用来解决这些问题的实用方法之间架设一座桥梁。理论本身不能直接解决工程技术中的实际问题，要靠工程领域中相应的自动化技术来实现。钱学森在《工程控制论》再版前言中指出“无论学习工程控制论的读者或者研究工作者，都至少应该熟悉一个具体领域中的工程实际问题，这样才能对这一学科中的基本命题、方法和结论有深刻的理解”。比如：在工业生产以及交通运输等各个领域，利用机械系统（包括流体系统）进行生产的过程是最为广泛存在的，所以就有必要建立以机械工程控制技术为主要研究对象的“机械工程控制论”或简称“机械控制工程”这样一门技术科学。

三、工程控制论

工程控制论研究以工程技术为对象的控制论问题。具体地讲，是研究在这一工程领域中广义系统的动力学问题，也就是研究系统及其输入、输出三者之间的动态关系。例如，在机床数控技术中，调整到一定状态的数控机床就是系统，数控指令就是输入，与数控机床有关的运动就是输出。

因此，就系统及其输入、输出三者之间的动态关系而言，控制工程主要研究并解决如下几个方面的问题：

(1) 当系统已定，并且输入已知时，求出系统的输出（响应），并通过输出来研究系统本身的有关问题，即系统分析；

(2) 当系统已定，且系统的输出也已给定，要确定系统的输入应使输出尽可能符合给定的最佳要求，即系统的最优控制；

(3) 当输入已知，且输出也是给定时，确定系统以使得输出尽可能符合给定的最佳要求，此即最优设计；

(4) 当输入与输出均已知时，求出系统的结构与参数，即建立系统的数

学模型，此即系统识别或系统辨识；

(5) 当系统已定，输出已知时，以识别输入或输入中的有关信息，此即滤波与预测。

从本质上讲，问题(1)是已知系统与输入求输出，问题(2)与(5)是已知系统与输出求输入，问题(3)与(4)是已知输入与输出求系统。

本书主要是以经典控制理论来研究问题(1)，也以适当篇幅来研究其他问题。

第二节 控制的基本方式

控制论的一个极其重要的概念就是信息传递、反馈以及利用反馈进行控制。无论是机械工程系统、生物系统或社会经济系统都存在信息的传递与反馈，并可利用反馈进行控制以使系统按一定“目的”进行运动。

反馈控制是自动控制系统最基本的控制方式，也是应用最广泛的一种控制方式。除此之外，还有开环控制方式和复合控制方式，它们都有其各自的特点和不同的适用场合。近几十年来，以现代数学为基础，引入电子计算机的新的控制方式也有了很大发展，例如最优控制、自适应控制、模糊控制等。本节着重介绍经典控制理论中的反馈原理和开环、闭环两种控制方式。

一、反馈

所谓信息的反馈(feedback)，就是把一个系统的输出信号不断直接地或经过中间变换后间接地全部或部分地返回，再输入到系统中去。如果反馈回去的信号与原系统的输入信号的作用性质相反(或相位相差 180°)则称之为“负反馈”(negative feedback)；如果作用性质或相位相同，则称之为“正反馈”(positive feedback)。

在负反馈控制中，反馈信号与输入信号相减，使得产生的偏差越来越小，以实现控制任务。这也是人为的外加反馈中采用较多的方式。

人类很多简单的活动都利用了负反馈的原理以保持正常的动作。例如，人用手取桌上的书，书的位置是手运动的指令信息(即为输入信号)。取书时，眼睛连续目测手的当前位置(即为输出信号)，并将这个信息送入大脑(即为反馈信号)，大脑判断手与书的距离，产生偏差信号，并根据其大小发出控制手臂移动的命令，逐渐使偏差减小。显然，只要这个偏差存在，上述过程就要反复进行，直到偏差减小为零，手便取到书了。所以，人用手取桌子上的书，就是一个负反馈系统。这个负反馈控制系统的基本组成及其工作原理可以用一个闭环的方框图(图1-2-1)表示。可见负反馈控制就是采用负反馈并利用

偏差进行闭环控制的过程，当控制过程使得偏差信号逐渐减小为零时，系统便达到平衡状态，控制任务完成，控制目的就实现了。

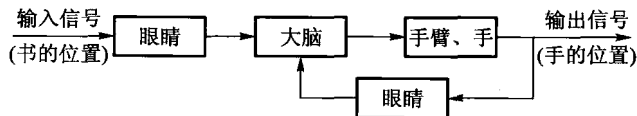


图 1-2-1 人取书的反馈控制方框图

而正反馈往往起到一种信号叠加放大的效果，通常在系统内部出现。在许多系统中，往往存在因相互耦合作用构成的非人为的“内在”反馈，从而形成一个闭环系统。例如，机械系统中因作用力与反作用力的相互耦合而形成内在反馈。又如在机械系统中自激振荡的产生，也必是存在内在的反馈使能量在内部循环，促使振动持续进行。

为了说明内在反馈的情形，观察图 1-2-2 所示的二自由度机械系统。

当质量 m_2 有一小位移 x_2 ，使质量 m_1 产生相应的位移 x_1 ，其运动方程为

$$m_1 x_1'' + (k_1 + k_2) x_1 = k_2 x_2 \quad (1-2-1)$$

而 x_1 又反过来影响质量 m_2 运动，其运动方程为

$$m_2 x_2'' + k_2 x_2 = k_2 x_1 \quad (1-2-2)$$

信息量 x_1 与 x_2 的传递关系式 (1-2-1) 和式 (1-2-2) 可以表示如图 1-2-3 所示的闭环系统。

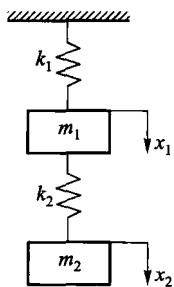


图 1-2-2 二自由度机械系统

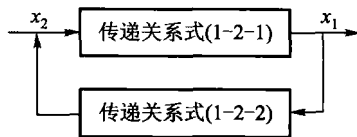


图 1-2-3 系统方框图

可见，工程系统中广泛存在着内在的或外加的反馈。根据系统是否存在反馈，可将系统分为开环系统和闭环系统两大类。

二、控制的基本方式

(一) 开环控制

系统的输出量对系统无控制作用，或者说系统中无反馈回路的系统，称为开环控制系统 (open loop control system)。例如洗衣机，它按洗衣、清水、去水、干衣的顺序进行工作，无须对输出信号即衣服的清洁程度进行测量；又如

简易数控机床的进给系统，其方框图如图 1-2-4 所示。在此系统中，输入装置、控制装置、伺服驱动装置和工作台这四个环节输入的变化自然会影响到工作台位置即系统的输出。但是，系统的输出并不影响任一环节的输入，因为这里没有任何反馈回路。



图 1-2-4 机床开环控制系统方框图

(二) 闭环控制

系统的输出量对系统有控制作用，或者说系统中存在反馈回路的系统，称为**闭环控制系统**（closed loop control system）。在闭环系统的方框图中，任何一个环节的输入都可以受到系统输出的反馈作用。控制装置的输入受到输出的反馈作用时，该系统就称为全闭环系统，或简称为闭环系统。例如，图 1-2-5 所示的数控机床进给系统方框图，系统的输出通过由检测装置构成的反馈回路，进入控制装置，控制装置比较输入信号与反馈信号，并将比较后的偏差信号送入驱动装置，驱动工作台运动，直到偏差信号为零，驱动装置不再提供进给，此时工作台的位置与期望值相等。

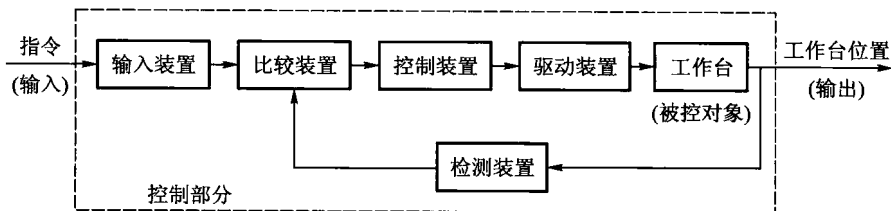


图 1-2-5 机床闭环控制系统方框图

(三) 开环与闭环控制系统的比较

闭环控制系统的优点是采用了反馈，系统中真正起调节作用的信号已不再是输入量，而是偏差信号，这与开环控制系统有着明显的不同。所以，闭环系统的响应对外部干扰和内部系统的参数变化不敏感。这样，对于给定的控制对象，有可能采用不太精密且成本较低的元件构成精密的控制系统。在开环情况下，就不可能做到这一点。

从稳定性的角度出发，开环控制系统比较容易建立。但是在闭环系统中，稳定性则始终是一个重要问题。因为闭环系统可能出现超调误差，从而导致系统做等幅振荡或变幅振荡。

可见，当系统的输入量能预先知道，并且不存在其他任何扰动时，采用开环控制比较合适，只有当存在无法预计的扰动和系统中元件的参数存在着无法

预计的变化时，闭环控制系统才具有优越性。另外，闭环系统中采用的元件数量比相应的开环系统多，因此闭环系统的成本和功率通常比较高。为了减小系统所需要的功率，在可能的情况下，应当采用开环控制。通常将开环控制与闭环控制适当地结合在一起，比较经济，并且能够获得满意的系统性能。

工程上常采用的复合控制方法，就是把两者结合起来使用。复合控制实质上是在闭环控制回路的基础上，附加一个输入信号（给定信号或扰动信号）的顺馈通路，对该输入信号实行加强或补偿，以达到精确的控制效果。常见的方式有以下两种：

（一）附加给定输入补偿的复合控制

图 1-2-6 给出了附加给定输入补偿的复合控制方框图。通常，附加的补偿装置可提供一个顺馈控制信号，与原输入信号一起对被控对象进行控制，以提高系统的跟踪能力。这是一种对控制能力的加强作用，往往提供的是输入信号微分的，起到超前控制作用。

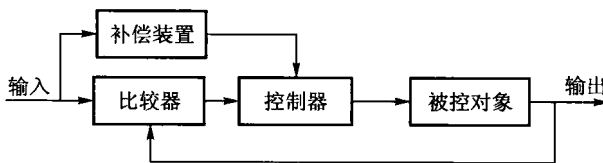


图 1-2-6 附加给定输入补偿的复合控制

（二）附加扰动输入补偿的复合控制

图 1-2-7 给出了附加扰动输入补偿的复合控制方框图。附加的补偿装置所提供的控制作用，主要起到对扰动影响“防患未然”的效果。故应按照不变性原理来设计，即保证系统输出与作用在系统上的扰动完全无关，这一点与前一种补偿作用截然不同。

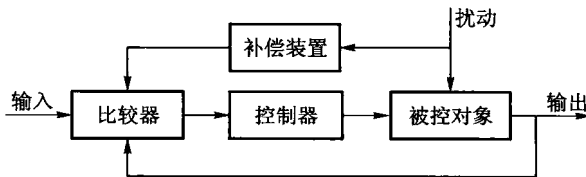


图 1-2-7 附加扰动输入补偿的复合控制

附加的顺馈通路相当于开环控制。因此，此控制方法对其本身补偿装置的性能稳定性要求较高，否则，会由于参数本身的漂移而减弱其补偿效果。此外，顺馈通路对闭环回路性能影响不大，特别对其稳定性无影响，却能大大提高系统控制精度，因此获得了广泛应用。

第三节 反馈控制系统的基本组成

典型的反馈控制系统基本组成如图 1-3-1 所示。

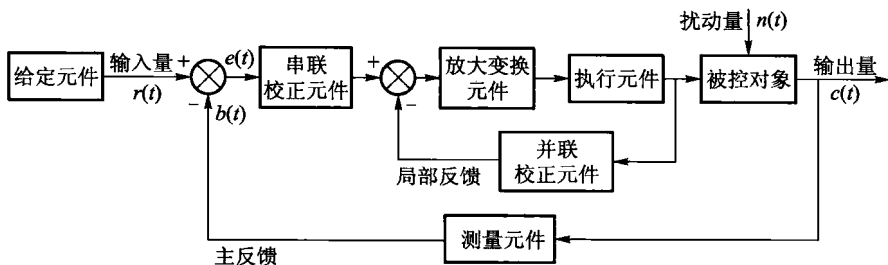


图 1-3-1 反馈控制系统基本组成

反馈控制系统是由各种结构不同的元件组成的。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职能的各种基本元件组成的。在不同系统中，结构完全不同的元件却可以具有相同的职能，因此将组成系统的职能元件按职能分类主要有以下几种：

给定元件（reference element）用于给出输入信号的环节，以确定被控对象的目标值（或称给定值）。给定环节可以用各种形式（电量、非电量、数字量、模拟量）发出信号，例如数控机床进给系统的输入装置就是给定环节。

测量元件（measurement element）用于检测被控量，通常出现在反馈回路中。如果测出的物理量属于非电量，大多数情况下要把它转换成电量，以利用电的手段加以处理。例如，数控机床上的检测装置将位移量转化成电压量后送入下一环节。

比较元件（comparison element）用于把测量元件检测到的实际输出值经过变换后与给定元件给出的输入值进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。比较元件在方框图中用符号“ \otimes ”表示。“-”号表示负反馈；“+”号表示正反馈。

放大元件（amplification element）用于将比较元件给出的偏差信号进行放大，以足够的功率来推动执行元件去控制被控对象。通常可用晶体管、集成电路、晶闸管等组成的电压放大器和功率放大器来放大电压偏差信号。

执行元件（actuator element）用于直接驱动被控对象，使被控量发生变化。用作执行元件的有各种伺服阀、伺服电动机、液压伺服油缸和液压伺服马达等。

校正元件（correction element）亦称补偿元件，它是在系统基本结构基础

上附加的元部件，其参数可灵活调整，以改善系统的性能。工程上又称为调节器，常用串联或反馈的方式连接在系统中。简单的校正元件可以是一个 RC 网络，复杂的校正元件可含有电子计算机。

在工程实际中，比较元件、放大元件及校正元件常常合并在一起形成一个装置，这样的装置称为控制元件或控制器。

在图 1-3-1 的典型反馈控制方框图中，用方框表示各个元件，用单向箭头表示各种不同的信号和流向。为了便于叙述，本书将自动控制系统的基本变量及表示符号统一表示为如下形式：

输入信号 $r(t)$ ：人为给定的，又称给定量。是使系统具有预定性能或预定输出的激发信号，它代表输出的期望值。

输出信号 $c(t)$ ：被控制量。它表征对象或过程的状态和性能。系统的输出称为对输入的响应。

反馈信号 $b(t)$ ：从输出端或中间环节引出来并直接或经过变换以后传输到输入端比较元件中去的信号，或者是从输出端引出来并直接或经过变换以后传输到中间环节比较元件中去的信号。反馈信号有正负之分，正反馈使输入信号与反馈信号叠加，结果使得控制作用加强；负反馈使输入信号与反馈信号相减，结果使控制作用减小。

偏差信号 $e(t)$ ：比较元件的输出，等于输入信号与主反馈信号之差，即 $e(t) = r(t) - b(t)$ 。偏差信号只存在于闭环系统中，它是闭环控制系统中真正起到调节和控制作用的信号。

误差信号 $\varepsilon(t)$ ：输出信号的期望值与实际值之差。由于输出信号的期望值只是一个理想值，在实际系统中是无法测量的，故误差是一个理论值。

扰动信号 $n(t)$ ：来自系统内部或外部的、干扰和破坏系统具有的预定性能和预定输出的信号。尽管扰动信号对系统工作往往产生不利影响，但它是客观存在的，对系统来说也是一种输入外作用。只是我们特别地将有用的输入称为输入信号或给定输入，将有害的输入称为干扰（disturbance）或扰动信号。现实中，如电源电压的波动，环境温度、压力以及负载的变化，飞行中气流的冲击等，均为扰动。

在图 1-3-1 的信号单向传递中，信号从输入端沿箭头方向到达输出端的传输通道称为前向通道（forward path）。前向通道可以有多个，其中有一个是主通道（main path）。与前向通道信号传递方向相反的通道称为反馈通道（feedback path）。反馈通道有主反馈和局部反馈之分。从输出端到输入端的反馈称为主反馈（main feedback），从中间环节到输入端或从输出端到中间环节的反馈称为局部反馈（local feedback）。前向通道与主反馈通道共同构成主回路，而局部反馈通路可构成内回路。只包含一个主反馈通道的系统称单回路系