

机电控制工程基础

JIDIAN KONGZHI GONGCHENG JICHU

(第2版)

李建勇 主编



国家开放大学

THE OPEN UNIVERSITY OF CHINA

机电控制工程基础 (第2版)

李建勇 主 编

常州大学图书馆
藏书章

中央广播电视大学出版社·北京



图书在版编目 (CIP) 数据

机电控制工程基础/李建勇主编. —2 版. -- 北京:
中央广播电视大学出版社, 2016. 1

ISBN 978 - 7 - 304 - 07675 - 7

I. ①机… II. ①李… III. ①机电一体化—控制
系统—开放大学—教材 IV. ①TH - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 314825 号

版权所有, 翻印必究。

机电控制工程基础 (第 2 版)

JIDIAN KONGZHI GONGCHENG JICHU

李建勇 主编

出版·发行: 中央广播电视大学出版社

电话: 营销中心 010 - 66490011

总编室 010 - 68182524

网址: <http://www.crtvup.com.cn>

地址: 北京市海淀区西四环中路 45 号

邮编: 100039

经销: 新华书店北京发行所

策划编辑: 邹伯夏

版式设计: 赵 洋

责任编辑: 闫海新

责任校对: 张 娜

责任印制: 赵连生

印刷: 北京世汉凌云印刷有限公司

印数: 2001~4000

版本: 2016 年 1 月第 2 版

2016 年 8 月第 2 次印刷

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16

印张: 16.5 字数: 364 千字

书号: ISBN 978 - 7 - 304 - 07675 - 7

定价: 28.00 元

(如有缺页或倒装, 本社负责退换)

自动控制技术作为一种技术手段已广泛地应用于工农业生产、交通运输和国防建设等领域。同时,指导自动控制系统分析和设计的控制理论也有了很大的发展。在20世纪40年代至50年代发展起来的经典控制理论至今仍被成功地应用于单变量定常系统的分析和设计。本教材是为了适应广播电视大学机电类本科生教学的需要,根据相应的教学大纲和学时安排,遵循“必需”、“够用”的原则,在李建勇、吴斌编著的《机电控制工程基础》的基础上重新编写的。

本版教材在第1版的基础上对各章内容都做了或多或少的补充和修改。教材着重建立基本概念和阐述解决控制问题的基本方法,简化和略去了和机电工程距离较远、较艰深的严格数学推导内容;引入和编写了较多的例题和习题,便于学生自学;增加了利用MATLAB软件进行控制系统分析和综合。

本书正文安排了6章的内容。

第1章介绍了自动控制的基本概念,重点讨论了反馈控制系统的工作原理和组成,并初步介绍了控制系统的性能指标。

第2章介绍了自动控制系统的数学模型,包括微分方程、系统传递函数及图形化的数学模型——系统动态结构图、信号流图,并介绍了利用结构图的等效变换及梅逊(Mason)增益公式来确定系统传递函数的方法。

第3章介绍了线性系统的时域分析法,重点讨论了一阶系统、二阶系统的分析和计算,系统的稳定性分析(劳斯判据),稳态误差的分析与计算。

第4章介绍了线性系统的根轨迹分析方法,包括根轨迹方程与根轨迹的绘制法则及利用根轨迹对系统性能进行分析的方法。

第5章介绍了频率域方法,包括频率特性及其图示方法、物理意义,频域稳定判据及开、闭环频率特性与系统性能的关系。

第6章介绍了线性系统的校正方法,主要有常用校正方案、基于频率域的串联校正法及PID校正等。

附录中提供了机电控制工程基础的实验指导书,包括典型环节模拟、时域分析、MATLAB仿真、系统频率特性研究及控制系统的校正研究。

本书可作为高等学校机电类专业的本科生教材,也可作为成人教育和继续教育的教材,还可作为科技人员的参考书。

本教材由北京交通大学李建勇教授主编。李建勇教授完成了第1章全章及第6章部分内容的编写,北京交通大学吴斌副教授完成了第2、3、4、5全章及第6章部分内容的编写。

本教材在编写中参考了很多同类优秀教材,在此表示感谢。

由于时间仓促和水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请各位读者批评指正。

编者

2015年3月

第1章 概 论	1
1.1 引言	1
1.2 自动控制简史	2
1.3 自动控制的基本概念	3
1.4 自动控制的基本方式	6
1.5 自动控制系统的基本环节	9
1.6 自动控制系统的分类	10
1.7 对自动控制系统的基本要求	14
1.8 控制系统实例	15
本章小结	16
习题	16
第2章 自动控制系统的数学模型	19
2.1 引言	19
2.2 控制系统微分方程的建立	20
2.3 数学模型的线性化	23
2.4 传递函数	25
2.5 系统动态结构图与系统传递函数	36
2.6 控制系统的信号流图	47
2.7 控制系统数学模型的 MATLAB 实现	50
本章小结	51
习题	51
第3章 控制系统的时域分析	57
3.1 引言	57
3.2 测试输入信号与性能指标	58
3.3 一阶系统的阶跃响应	62
3.4 二阶系统的阶跃响应	64
3.5 高阶系统的阶跃响应	72
3.6 控制系统的稳定性分析	74
3.7 控制系统的稳态误差分析	81
3.8 用 MATLAB 进行系统时域分析	94

本章小结	99
习题	99

第4章 根轨迹法

4.1 引言	103
4.2 根轨迹与根轨迹方程	104
4.3 绘制根轨迹的基本法则	108
4.4 典型系统的根轨迹绘制	115
4.5 其他参数的根轨迹图	123
4.6 闭环系统零点和极点的分布与性能指标	125
4.7 借助 MATLAB 进行系统根轨迹分析	131
本章小结	135
习题	136

第5章 频率响应法

5.1 引言	139
5.2 频率特性的基本概念	140
5.3 典型环节的频率特性	146
5.4 系统的开环频率特性	155
5.5 用频率特性分析系统的稳定性	161
5.6 系统的动态性能与开环频率特性	171
5.7 基于 MATLAB 的控制系统频域分析	179
本章小结	183
习题	184

第6章 控制系统的综合与校正

6.1 引言	189
6.2 串联校正	191
6.3 基于频率法的串联校正	202
6.4 反馈校正	213
6.5 前馈校正	215
6.6 基于 MATLAB 的系统校正	217
本章小结	224
习题	224

附 录	227
附录 1 拉普拉斯变换及反变换	227
附录 2 《机电控制工程基础实验指导书》	231
附录 3 自动控制原理实验设备使用手册	249
参考文献	256

第 1 章

概 论

导 读

本章将引导读者进入控制工程领域，主要介绍了控制理论在工程中的应用和发展、控制系统的基本概念。

学习建议

本章内容是围绕控制系统的基本概念展开的，学习者可结合工程实例分析来理解和掌握控制系统的基本概念，重点掌握负反馈原理与闭环控制系统的组成环节等。

学习目标

1. 熟练掌握开环控制与闭环控制系统的基本知识、闭环控制系统的基本概念。
2. 掌握自动控制系统性能指标的基本概念。
3. 能够运用负反馈原理阐述系统的自动调整过程。
4. 了解相关的工程实例。

1.1 引 言

在工程和科学技术的发展过程中，自动控制担负着重要的角色。自动控制除了在宇宙飞船系统、导弹制导系统和机器人系统等领域中具有特别重要的作用外，它已成为现代机器制造业和工业生产过程中不可或缺的重要组成部分。例如，在制造工业的数控机床控制中，在航空航天工业的自动驾驶仪系统设计中，以及在汽车工业的汽车设计中，自动控制都是必不可少的。此外，工业中的过程控制对温度、压力、流量、电流、电压、位置、速度和加速度等操作过程，都广泛地应用着自动控制技术。

自动控制技术的应用不仅使生产过程实现自动化，提高了劳动生产率和产品质量，使人们从繁重的体力劳动和大量重复性的脑力劳动中解放出来，而且在人类征服大自然、探索新能源、发展空间技术和创造人类社会文明等方面也具有十分重要的意义。

2 机电控制工程基础

自动控制理论是研究关于自动控制系统组成、分析和设计的一般性理论，是研究自动控制共同规律的技术科学。作为现代的工程技术人员和科学工作者，必须具备一定的自动控制理论基础知识。

1.2 自动控制简史

自动控制理论是在人类征服自然的生产实践活动中孕育、产生并随着社会生产和科学技术的进步而不断发展和完善起来的。

早在古代，劳动人民就凭借生产实践中积累的丰富经验和对反馈概念的直观认识，发明了许多闪烁控制理论智慧火花的杰作。例如：我国北宋时代的苏颂和韩公廉利用天衡装置制造的水运仪象台，就是一个按负反馈原理构成的闭环非线性自动控制系统；1681年法国物理学家丹尼斯·帕潘（Dennis Papin）发明了用作安全调节装置的锅炉压力调节器；1765年俄国人普尔佐诺夫（I. Polzunov）发明了蒸汽锅炉水位调节器；等等。

1788年，英国人瓦特（James Watt）在他发明的蒸汽机上使用了离心调速器，解决了蒸汽机的速度控制问题，引起了人们对控制技术的重视。以后人们曾经试图改善调速器的准确性，但却常常导致系统产生振荡。

实践中出现的问题促使科学家们从理论上进行探索与研究。1868年，英国物理学家麦克斯韦（J. C. Maxwell）通过对调速系统线性常微分方程的建立和分析，解释了瓦特速度控制系统中出现的稳定性问题，开辟了用数学方法研究控制系统的途径。此后，英国数学家劳斯（E. J. Routh）和德国数学家胡尔维茨（A. Hurwitz）分别在1877年和1895年独立地建立了直接根据代数方程的系数判别系统稳定性的准则。这些方法奠定了经典控制理论中时域分析法的基础。

1932年，美国物理学家奈奎斯特（H. Nyquist）研究了长距离电话线信号传输中出现的失真问题，运用复变函数理论建立了以频率特性为基础的稳定性判据，奠定了频率响应法的基础。随后，美国贝尔实验室的荷兰裔科学家伯德（H. W. Bode）和美国Taylor仪器公司的尼柯尔斯（N. B. Nichols）在20世纪30年代末和40年代初进一步将频率响应法加以发展，形成了经典控制理论的频域分析法，为工程技术人员提供了一个设计反馈控制系统的有效工具。

第二次世界大战期间，反馈控制方法被广泛用于设计研制飞机自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达天线控制系统以及其他军用系统。这些系统的复杂性及其对快速跟踪、精确控制的高性能追求，迫切要求拓展已有的控制技术，从而促使产生了许多新的见解和方法，同时，还促进了对非线性系统、采样系统以及随机控制系统的研究。

1948年，美国科学家伊万斯（W. R. Evans）创立了根轨迹分析方法，为分析系统性能随系统参数变化的规律性提供了有力工具，被广泛应用于反馈控制系统的分析和设计中。

以传递函数作为描述系统的数学模型，以时域分析法、根轨迹法和频域分析法为主要分

析设计工具,构成了经典控制理论的基本框架。到20世纪50年代,经典控制理论发展到相当成熟的地步,形成了相对完整的理论体系,为指导当时的控制工程实践发挥了极大的作用。

频域分析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令人满意的,但它不是某种意义上的最优系统。从20世纪50年代末开始,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某种意义上的最优系统上。

具有多输入、多输出的现代设备变得越来越复杂,但经典控制理论只涉及单输入、单输出系统,不能解决如时变参数问题以及多变量、强耦合等复杂的控制问题。大约从1960年开始,数字计算机的出现为复杂系统的时域分析提供了可能性,因此,基于状态空间模型的现代控制理论应运而生,从而适应了现代设备日益增加的复杂性,同时也满足了军事、空间技术和工业应用领域对精度、质量和成本等方面的严格要求。

从1960年到1980年,不论是确定性系统和随机系统的最优控制,还是复杂系统的自适应和学习控制,都得到了充分的研究。从1980年至今,现代控制理论的研究进展集中在鲁棒控制、智能控制及其相关的课题上。现代控制理论的应用已经扩展到非工程系统,如生物系统、医学系统和经济系统等。

控制理论目前还在向更纵深、更广阔的领域发展,无论在数学工具、理论基础还是在研究方法上都产生了实质性的飞跃。

1.3 自动控制的基本概念

所谓自动控制,就是在没有人直接参与的情况下使被控对象的某些物理量准确地按照预期规律变化。例如:数控加工中心能够按预先排定的工艺程序自动地进刀切削,加工出预期的几何形状;焊接机器人可以按工艺要求焊接流水线上的各个机械部件;温度控制系统能保持恒温;等等。所有这些系统都有一个共同点,即都是一个或一些被控制的物理量按照给定量的变化而变化。给定量可以是具体的物理量,如电压、位移、角度等,也可以是数字量。一般来说,如何使得被控制的物理量按照给定量的变化规律而变化,是控制系统要完成的基本任务。

1.3.1 定 义

在讨论控制系统之前,需要对一些术语加以定义。

(1) 被控量。被控量是一种被测量和被控制的量值或状态。通常,被控量是系统的输出量。

(2) 对象。它可能是一个设备,多数由一些机器部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,称任何被控物体(如一种机械装置)为一个对象。

(3) 过程。任何被控制的运行状态为过程,如化学过程、经济学过程等。

(4) 系统。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。它包含了物理学、生物学和经济学等方面的系统。

(5) 扰动。扰动是一种对系统的输出产生不利影响的信号。若扰动产生于系统内部，则称为内部扰动；反之，当扰动产生于系统外部时，称为外部扰动。

(6) 反馈控制。它是一种控制，能够在存在扰动的情况下力图减小系统的输出量和给定输入量之间的偏差。

1.3.2 自动控制系统的工作原理

在各种生产过程以及生产设备中，常常需要使其中某些物理量（如温度、压力、位置、转速等）保持恒定，或者让它们按照一定的规律变化。要满足这种需要，就应该对生产机械或设备进行及时控制和调整，以抵消外界的扰动和影响。那么，控制系统是怎样实现对这些物理量的自动控制呢？自动控制系统为什么能够保持温度、压力或转速恒定？火炮又为什么能够自动跟踪目标？要回答这些问题，还是先看看恒温控制系统这个例子，研究一下它是怎样实现恒温控制的，在这个基础上再总结控制系统的共同规律。

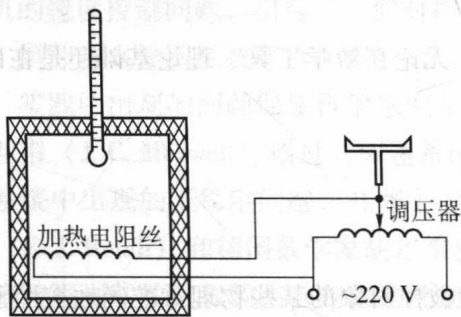


图 1-1 人工控制的恒温箱

实现恒温控制有两种方法，即人工控制和自动控制，其中很多自动控制都是受到人工控制的启发而实现的。如图 1-1 所示为人工控制的恒温箱。人工控制的任务是克服外来干扰（如电源电压波动、环境温度变化等），保持恒温箱的温度恒定，以满足物体对温度的要求。这可以通过移动调压器的活动触头位置来改变加热电阻丝的电流，以达到所要求的温度。箱内温度是由温度计进行测量的。人工调节过程可以归纳如下：

- (1) 观察由测量元件（温度计）测出的恒温箱的温度（被控制量）。
- (2) 与要求的温度值（给定值）进行比较，得出偏差的大小和方向。
- (3) 根据偏差的大小和方向进行控制。当恒温箱的温度高于所要求的给定温度值时，移动调压器将电流减小，使炉温降到正常范围内；若恒温箱的温度低于给定的温度，则移动调压器将电流增加，使温度升到正常范围。

因此，人工控制的过程就是测量、求偏差，再控制以纠正偏差的过程，简单地讲，就是“检测偏差用以纠正偏差”的过程。显然，其中需要一个测量元件（温度计）和一个控制元件（如调压器），还需要将被控制量（恒温箱的温度）与给定温度进行比较，以决定怎样去控制调压器，而这些都是通过人来实现的。

对于这样简单的控制形式，如果能找到一个控制器代替人的职能，那么人工调节系统就可以变成自动控制系统了。图 1-2 所示是恒温箱的自动控制系统。在这个控制系统中，恒温箱的温度是由给定信号电压 u_1 控制的。当外界因素引起箱内温度变化后，作为测量元件

的热电偶将与温度相对应的电压信号 u_2 测出，并反馈回去与给定信号 u_1 进行比较，所得的结果即为温度的偏差信号 Δu 。温度的偏差信号经过电压放大器和功率放大器放大后，控制执行电机的旋转速度与方向，并通过传动装置拖动调压器动触头。当恒温箱内温度偏高时，使调压器减小加热电流，反之加大电流，直到温度达到给定值为止。温度达到给定值时，偏差信号 $\Delta u = 0$ ，电机停止运行。这样，就完成了所要求的控制任务。所有这些装置便组成了一个自动控制系统。

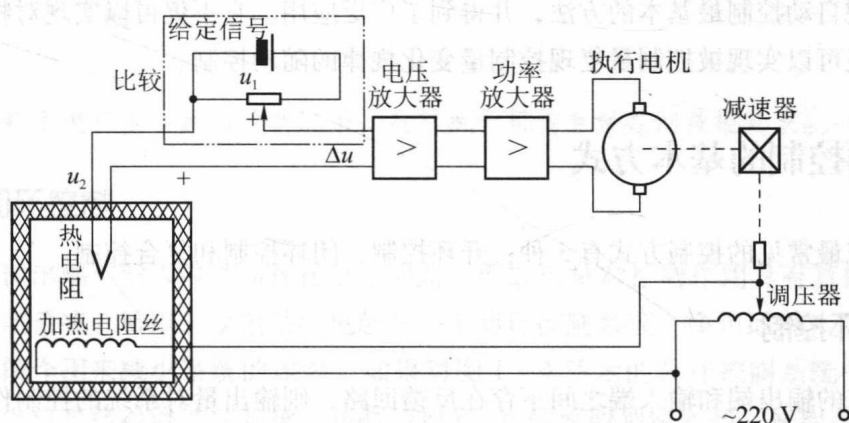


图 1-2 恒温箱的自动控制系统

上述人工控制系统和自动控制系统是极其相似的，误差测量装置类似于操纵者的眼睛（测量作用），自动控制器类似于操纵者的头脑（比较作用），执行机构类似于操纵者的肢体（执行作用）。

通过上面的分析可以看出，不论是人工控制还是自动控制，它们都有两个共同点：一是要检测偏差，二是要用检测到的偏差去纠正偏差。可见，没有偏差便没有调节过程。通常，在自动控制系统中这一偏差是通过反馈建立起来的。给定量称为控制系统的输入量，被控制量称为系统的输出量。反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号的全部或部分返回输入端，使之与输入量进行比较，比较的结果称为偏差。控制系统就是根据这一偏差的大小和方向进行工作的，使偏差减小或消除，从而使输出量与输入量一致。因此，基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”这一原理又称为反馈控制原理。利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。

现将图 1-2 画成图 1-3 所示的职能方块图形式。图 1-3 中方块代表系统的各个组成部分，⊗代表比较元件，方块两边的直线及其标注代表该组成部分在控制过程中相互作用的物理量，箭头代表作用的方向。方块图对于了解系统的作用原理是显而易见的。同时还可以看出，被调节量（温度）是系统的输出量，给定的电压信号是系统的输入量。偏差是通过热电偶将输出量反馈到输入端与输入量比较而得的。

从以上温度自动控制系统可以看出，反馈控制有两个最主要的特点：一是有反馈存在，二是按偏差进行控制。实现自动控制的装置可以各不相同，但反馈控制原理却是相同的。反



图 1-3 恒温箱温度自动控制系统方块图

反馈控制是实现自动控制最基本的方法，并得到了广泛应用。它不仅可以实现对物理量的恒值控制，而且还可以实现被控制量复现控制量变化规律的随动控制。

1.4 自动控制的基本方式

控制系统最常见的控制方式有 3 种：开环控制、闭环控制和复合控制。

1.4.1 开环控制

如果系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路，则输出量对系统的控制作用就没有影响，这样的系统称为开环控制系统。图 1-4 所示为一个开环速度控制系统。它根据控制信号的大小和方向来控制负载转速的大小和方向。开环控制系统的原理很简单，控制信号通过放大器放大；输出一个电流给伺服阀，伺服阀供给一定的流量给液压电动机带动负载以一定的转速运动。这个系统对被控制量（负载转速）不进行任何检测，因为没有反馈也谈不上与控制信号进行比较，以产生的偏差信号来对系统进行再控制，即它仅是根据控制信号来对负载进行控制的。因此，开环控制系统的精度主要取决于系统的校准精度，取决于在工作过程中保持校准值以及组成系统的元件特性和参数值的稳定程度。

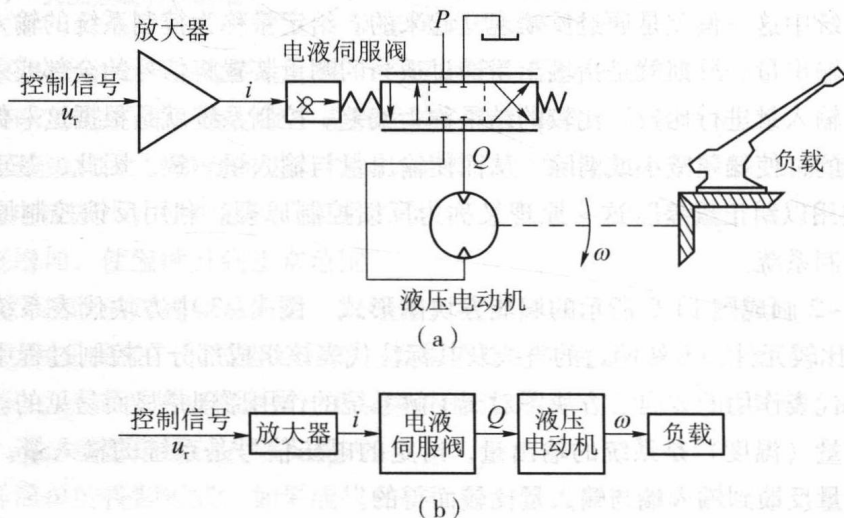


图 1-4 开环速度控制系统

(a) 原理图；(b) 职能方块图

如果系统不存在内部扰动和外部扰动，并且在元件参数比较稳定的情况下，开环控制系统是比较简单并且可以保证足够的精度的。但在系统存在扰动的情况下，如果被控制的输出量偏离给定量，则开环控制系统就没有纠正的能力了。如图 1-4 所示的系统中，当负载力矩增加时，由于伺服阀的流量随负载压力的增加而减小，以及液压系统内漏损增加等原因，就会造成液压马达转速降低。因为没有反馈比较，所以就没有办法自动校正输出量到给定值，从而使开环控制系统的精度降低。为了对其进行补偿，必须借助人工改变输入量。

【要点】

开环控制系统在没有反馈的情况下，利用执行机构直接控制被控对象。

1.4.2 闭环控制

系统的输出端与输入端之间存在反馈回路，即输出量对控制作用具有直接影响的系统，称为闭环控制系统。所以，反馈系统也就是一个闭环控制系统。换句话说，“闭环”的含义就是应用反馈作用来减小系统的误差。如果对图 1-4 所示的开环控制系统引入反馈回路，即用测速发电机直接检测被控制量（负载转速），然后反馈到输入端，就构成了闭环控制系统，如图 1-5 所示。

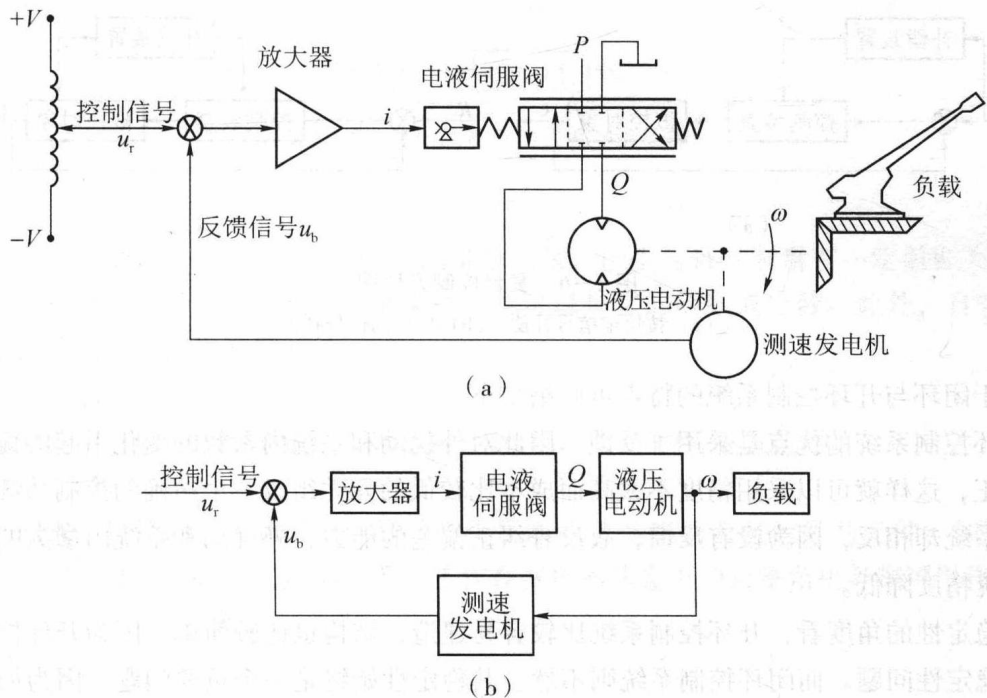


图 1-5 闭环速度控制系统

(a) 原理图；(b) 职能方块图

闭环控制系统的突出优点是精度高，只要被控制量的实际值偏离给定值，闭环控制就会产生控制作用来减少这一偏差。但是，闭环控制系统也有它的缺点。闭环控制系统是以偏差消除偏差的，但是系统要工作就必有偏差存在，因此这类系统的精度也是有限制的，也就是说这类系统有其自身的矛盾。当然，通过适当的措施可以使误差减到极小。另外，由于组成系统的元件的惯性、传动链的间隙等因素的存在，如果配合不当，将会引起反馈控制系统的振荡，从而使系统不能稳定工作。因此精度和稳定性之间的矛盾始终是闭环控制系统中的主要矛盾。

【要点】

闭环控制系统对输出进行测量，然后将此测量信号反馈回系统输入端，与预期的输入（参考或给定输入）进行比较，并按偏差进行调节。

1.4.3 复合控制

复合控制是闭环控制和开环控制相结合的一种方式。实质上是在闭环控制的基础上附加一个输入信号（给定或扰动）的顺馈通路，对该信号带来的干扰进行补偿，如图 1-6 所示。它与仅用负反馈的控制系统相比，具有反应快、精度高、工作可靠等优点，具体内容详见第 3 章。

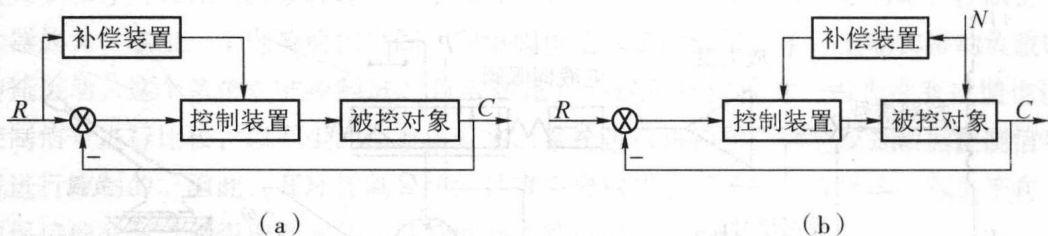


图 1-6 复合控制方块图

(a) 按给定信号补偿；(b) 按扰动信号补偿

对于闭环与开环控制系统的特点可归纳如下：

闭环控制系统的优点是采用了反馈，因此对外扰动和系统内参数的变化引起的偏差能够自动纠正，这样就可以采用精度不太高而成本比较低的元件组成一个精确的控制系统。而开环控制系统却相反，因为没有反馈，故没有纠正偏差的能力，外扰动和系统内参数的变化将引起系统精度降低。

从稳定性的角度看，开环控制系统比较容易建造，结构也比较简单，因为开环控制系统不存在稳定性问题。而闭环控制系统则不然，其稳定性始终是一个重要问题。因为如果参数选得不适当，将会造成系统振荡，甚至使系统完全失去控制。

应当指出，如果系统的输入量能预先知道，并且不存在外部扰动，则最好采用开环控制。如果存在无法预计的扰动，或系统中元件参数不稳定，则采用闭环控制的优点显得特别

突出。当对整个系统的性能要求比较高时，为了解决闭环控制时精度和稳定性之间存在的矛盾，往往将开环和闭环结合在一起应用，即采用复合控制系统比较适宜。

我们主要研究的是闭环控制系统，即着重研究实现反馈控制的理论和方法。我们所说的控制系统，一般是指闭环控制系统。闭环控制系统是本书讨论的重点。

1.5 自动控制系统的的基本环节

对于一个控制系统来说，不管其结构多复杂，用途多广泛，它都是由一些具有不同职能的基本元件组成的。图 1-7 所示是一个典型的反馈控制系统，它表示了这些元件在系统中的位置及其相互间的联系。作为一个典型的反馈控制系统应该包括被控对象、检测偏差所必需的测量元件、给定元件、比较元件以及用以纠正偏差所必需的放大变换元件和执行机构等。

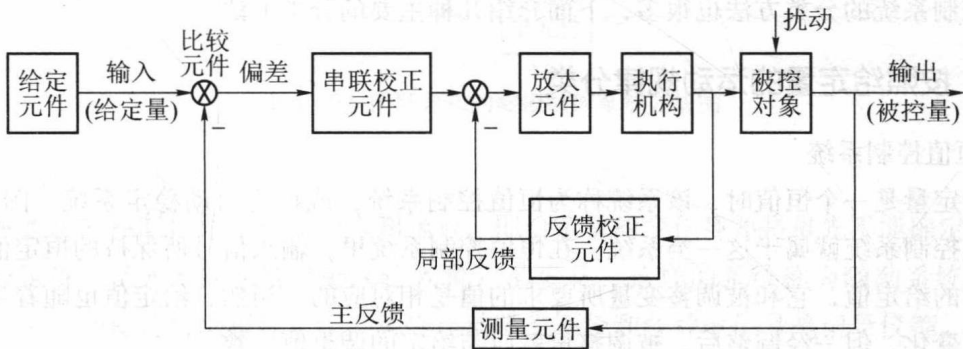


图 1-7 典型的反馈控制系统方块图

1. 测量元件

测量元件（如图 1-2 中的热电偶）测量输出量，产生与被控制量有一定函数关系的反馈信号。这种反馈信号可以是被控制量本身，也可以是它的函数或导数。此外，自整角机、回转变压器等都可以作为测量元件。

2. 给定元件

给定元件主要用于产生给定或输入信号，如图 1-2 中的指令电位器。

3. 比较元件

它是用来比较控制信号和反馈信号并产生反映两者差值的偏差信号的元件，如图 1-2 中的比较电路。此外，机械式差动装置、工作在变压器状态下的自整角机等都可以作为比较元件。

4. 放大变换元件

放大变换元件是把偏差信号放大并进行能量形式（电气、机械、液压）转换使之达到足够的幅值和功率的元件，如图 1-2 中的两级放大器。

5. 执行机构

它是根据控制信号的运动规律直接对控制对象进行操作的元件，如图 1-2 中的执行电

机。此外，常作为执行元件的有液压马达和伺服电动机等。

6. 被控对象

被控对象简称对象，是控制系统所要操纵的对象，即负载。它的输出量即为系统的被控制量，如图 1-2 中的恒温箱。

以上是构成反馈控制系统最基本的不可缺少的部分。此外，还有校正元件，或称为校正装置。它是为了改善系统的控制性能而加入系统的。串联在系统前向通路内的校正装置称为串联校正装置，接成反馈形式的校正装置称为并联校正装置（或称为局部反馈）。

1.6 自动控制系统的分类

自动控制系统的种类很多，应用范围很广，它们的结构性能和完成的任务也各不一样，因此，控制系统的分类方法也很多，下面介绍几种主要的分类方法。

1.6.1 按照给定量的运动规律分类

1. 恒值控制系统

当给定量是一个恒值时，该系统称为恒值控制系统，或称为自动稳定系统。图 1-2 所示的恒温控制系统就属于这一类系统。在恒值控制系统里，输入信号所保持的恒定值通常称为控制器的给定值，它和被调整变量所要求的值是相对应的。当然，给定值也随着生产条件的变化而变化，但一经调整后，被调整量就应与给定的调整值一致。

对于恒值控制系统，一般设计和分析的重点是研究各种干扰对被控对象的影响，以及从克服扰动的角度进行设计计算，也就是如何在存在扰动的前提下将实际的输出量保持在希望的给定值上。

2. 程序控制系统

当控制作用按预先给定的规律（又称为程序）变化时，也就是当输入量为已知给定值的时间函数时，该系统称为程序控制系统。机械加工中的程序控制机床就是一个很好的程序控制系统的例子。

图 1-8 所示是数控机床系统原理图。它由程序输入设备、运算控制器和执行机构组成。程序输入的作用是根据加工图纸的要求，选定加工过程，编制程序指令。程序输入设备首先把程序指令记录在穿孔纸带上，加工时，由光电阅读机把记录在穿孔纸带上的程序指令变成电脉冲（指令脉冲）送入运算控制器。运算控制器完成对控制脉冲的寄存、交换和计算，并输出控制脉冲给执行机构。执行机构再将运算控制器送来的电脉冲信号变成驱动机床的运动，完成程序指令的要求。执行机构可以是步进电动机，组成图 1-8 所示的开环控制系统，也可按反馈控制原理组成图 1-9 所示的闭环系统。若执行机构为一般的电动机，则变换放大环节将把控制脉冲变换成能对电机进行控制的电压，于是电动机驱动切削刀具按图纸要求进行加工。