



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



“十三五”普通高等教育规划教材

(第三版)

控制工程基础

KONGZHI GONGCHENG JICHU

邱瑛 曲云霞 主编



中国质检出版社
中国标准出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



“十三五”普通高等教育规划教材

控制工程基础

(第三版)

邱 瑛 曲云霞 主编

中国质检出版社
中国标准出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

控制工程基础/邱瑛, 曲云霞主编. —3 版. —北京:
中国质检出版社, 2017. 6
ISBN 978-7-5026-4435-2

I. ①控… II. ①邱… ②曲… 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 (2017) 第 112676 号

内 容 提 要

本书是基于 OBE (Outcomes-based Education, OBE) 的办学理念, 为适应机械设计制造及其自动化、机械电子工程、测控技术与仪器、车辆工程等相关专业的培养目标和毕业要求, 以及各专业领域发展的迫切需要而编写的。本书系统介绍了经典控制理论及其应用。其主要内容包括: 控制系统的基本概念、基本原理、数学模型、频率特性分析、系统稳定性分析、时间响应及稳态误差分析、根轨迹分析、控制系统综合与校正、离散控制系统分析与校正、典型控制系统应用案例, 并附有工程设计选编题目。

本书可作为高等工科院校机械工程类专业教材, 也可作为工程技术人员的专业参考书。

中国质检出版社 出版发行
中国标准出版社

北京市朝阳区和平里西街甲 2 号 (100029)

北京市西城区三里河北街 16 号 (100045)

网址: www.spc.net.cn

总编室: (010) 68533533 发行中心: (010) 51780238

读者服务部: (010) 68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 14.75 字数 342 千字

2017 年 6 月第三版 2017 年 6 月第三次印刷

*

定价: 35.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换

版权专有 侵权必究

举报电话: (010) 68510107

编 审 委 员 会

主 编 邱 瑛 曲云霞
参 编 魏 智 贞今天 程 娥
主 审 高铁红

前 言

本书是基于 OBE (Outcomes - based Education, OBE) 的办学理念, 为适应机械设计制造及其自动化、机械电子工程、测控技术与仪器、车辆工程等相关专业的培养目标和毕业要求, 以及各专业领域发展的迫切需要编写而成。

本书为适应拓宽专业口径的需要, 从直观的物理概念出发分析解决问题, 强调工程应用内容。编者总结了多年的教学实践经验, 并参考国内外同类教材和其他有关文献, 在《控制工程基础》原教材的基础上进行了重新修订编写。全书为适应普通高等工科院校《控制工程基础》课程 32~48 学时教学需要, 秉承少而精的原则, 以经典控制理论为主线, 主要阐述了控制系统的基本概念、数学模型的建立及应用, 控制系统的性能要求及分析方法, 离散控制系统的性能要求及分析方法, MATLAB 软件工具在控制系统分析和综合中的应用。作为一门重要的专业技术基础课程, 涉及内容广且抽象、教学难度大, 选用“机、电、液”方面的例题以便读者理解和掌握。本书力求将控制理论与工程实践相结合, 培养学生针对工程问题进行建模、分析和设计的能力, 专辟一章阐述控制理论在工程中的典型应用, 同时书后附有针对性的控制系统设计题目以供练习。

全书共九章。第一章主要阐述控制系统的基本概念; 第二章、第三章讲述控制系统的微分方程、传递函数、频率特性三种形式数学模型的基本概念、建立方法及其求解分析过程; 第四章、第五章介绍控制系统的稳定性分析、时间响应及稳态误差分析; 第六章介绍根轨迹分析法; 第七章介绍控制系统的综合与校正; 第八章介绍线性离散系统分析与校正; 第九章介绍控制系统工程应用典型案例的分析与设计方法; 直流电动机调速系统作为循序渐进学习示例贯穿始终, 以工程实例逐步有序揭示控制系统的分析和设计, 紧贴各章知识点; 每章后附有习题, 以帮助读者有效理解和建立系统工程概念; 书末附有 2 个附录, 附录 1 是拉普拉斯变换与反变换, 附录 2 是针对工程应用而选编的控制系统分析设计题目。

本书第一章、第五章、第七章由河北工业大学曲云霞编写, 第二章、第三章、第四章由河北工业大学邱瑛编写, 第六章由天津工业大学负今天编写, 第八章由河北工业大学魏智编写, 第九章由邱瑛、曲云霞编写, 附录 1 由曲云霞编写, 附录 2 由邱瑛、程娥编写, 全书由邱瑛、曲云霞统稿, 由河北工业大学



高铁红教授主审。在编写过程中参考了有关院校、企业和科研单位的著作、资料 and 文献，并得到了许多专家、教授的支持和帮助，在此表示衷心感谢。

限于学识和经验，本书疏漏之处在所难免，恳请同行专家和读者不吝赐教。

编者

2017 年 4 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 控制系统的基本概念	(3)
第三节 控制系统的基本类型	(9)
第四节 对控制系统的基本要求	(10)
第五节 循序渐进学习示例：直流电动机调速系统	(12)
习题	(13)
第二章 控制系统的数学模型	(15)
第一节 数学模型概述	(15)
第二节 物理系统的微分方程	(16)
第三节 传递函数及典型环节传递函数	(24)
第四节 控制系统的方框图及其等效变换	(32)
第五节 反馈控制系统的传递函数	(37)
第六节 循序渐进学习示例：直流电动机调速系统	(42)
第七节 利用 MATLAB 绘制零-极点分布图	(45)
习题	(45)
第三章 频率特性	(48)
第一节 概述	(48)
第二节 幅相频率特性图——奈奎斯特 (Nyquist) 图	(50)
第三节 对数频率特性图——波德 (Bode) 图	(57)
第四节 频率特性的实验测定法	(66)
第五节 循序渐进学习示例：直流电动机调速系统	(69)
第六节 利用 MATLAB 绘制频率特性图	(70)
习题	(74)
第四章 控制系统的稳定性分析	(76)
第一节 概述	(76)
第二节 代数稳定性判据	(78)
第三节 奈奎斯特频率稳定性判据	(85)
第四节 对数频率稳定性判据	(89)
第五节 控制系统的相对稳定性	(92)
第六节 循序渐进学习示例：直流电动机调速系统	(97)
第七节 利用 MATLAB 分析系统稳定性	(98)



习题	(101)
第五章 控制系统的时间响应及稳态误差分析	(103)
第一节 概述	(103)
第二节 一阶系统的时间响应	(105)
第三节 二阶系统的时间响应	(107)
第四节 二阶系统的性能指标分析	(110)
第五节 高阶系统的时间响应	(117)
第六节 稳态误差	(119)
第七节 循序渐进学习示例：直流电动机调速系统	(125)
第八节 利用 MATLAB 分析控制系统的特点及性能	(129)
习题	(133)
第六章 控制系统的根轨迹分析	(134)
第一节 概述	(134)
第二节 根轨迹绘制的基本法则	(136)
第三节 控制系统的根轨迹分析	(141)
第四节 循序渐进学习示例：直流电动机调速系统	(142)
第五节 利用 MATLAB 进行控制系统根轨迹绘制	(143)
习题	(145)
第七章 控制系统的综合与校正	(146)
第一节 概述	(146)
第二节 常用校正装置及其特性	(147)
第三节 控制系统串联校正举例	(155)
第四节 并联校正	(161)
第五节 循序渐进学习示例：直流电动机调速系统	(163)
第六节 利用 MATLAB 进行控制系统设计	(166)
习题	(168)
第八章 离散控制系统分析与校正	(169)
第一节 概述	(169)
第二节 采样过程与采样定理	(170)
第三节 Z 变换和 Z 反变换	(175)
第四节 离散控制系统的数学模型	(179)
第五节 离散控制系统的性能分析	(185)
第六节 离散控制系统的设计与校正	(191)
第七节 利用 MATLAB 设计计算机控制系统	(197)
习题	(198)

第九章 典型控制系统应用案例	(201)
第一节 直线一级倒立摆的建模分析与校正控制	(201)
第二节 阀控马达速度控制系统	(204)
第三节 哈勃太空望远镜指向控制系统	(208)
附录 1 拉普拉斯变换与反变换	(212)
附录 2 基于 MATLAB 的控制系统分析设计题目选编	(220)
题目 1 磁悬浮球控制系统分析	(220)
题目 2 液位自动控制系统分析	(221)
题目 3 机液位置伺服系统稳定性分析	(222)
题目 4 电液力控制系统分析与校正设计	(222)
题目 5 数控直线运动工作台位置控制系统分析与设计	(223)
题目 6 机械手臂回转伺服系统分析	(223)
题目 7 仿形刀架机液伺服控制系统分析	(224)
参考文献	(225)

第一章

绪 论

第一节 概 述

控制工程主要研究有关自动控制和系统动力学的基础理论及其在工程中的应用。它是一门新兴技术科学，也是一门边缘科学，它的理论基础是控制理论。

控制理论的产生可以追溯到 1788 年瓦特 (J. Watt) 为控制蒸汽机速度而发明的蒸汽机离心调速器，其原理示意图如图 1-1 所示。离心调速器的作用是使蒸汽机在工作负荷不同时输出轴转速 n 保持不变，其核心是应用了反馈控制原理。离心调速器是自动控制领域的第一项重大成果。

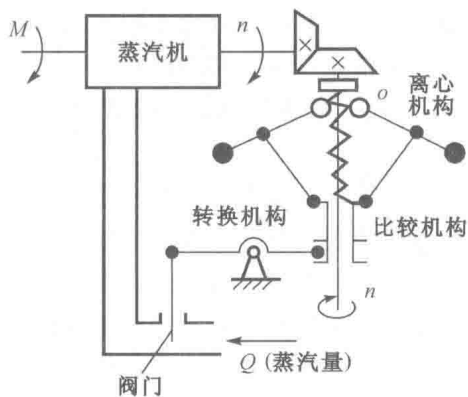


图 1-1 瓦特发明的蒸汽机离心调速器原理示意图

但是，瓦特发明的离心调速器使用后发现存在着不稳定的现象，由此引发了许多学者为此进行的一系列的深入研究。1868 年，英国物理学家马克斯威尔 (J. C. Maxwell) 发表了第一篇关于“论调速器”的文章，首先提出了“反馈控制”的概念，解释了蒸汽机速度不稳定的原因，并且指出了避免不稳定的调速器的设计准则，这在低阶微分方程式中应用是成功的。1884 年和 1895 年，劳斯 (E. J. Routh) 和霍尔维茨 (A. Hurwitz) 把马克斯威尔的理论扩展到用高阶微分方程描述的更为复杂的系统，并分别提出了两种著名的代数稳定性判据。1932 年奈奎斯特 (H. Nyquist) 研制出电子管振荡器，同时提出了著名的 Nyquist 稳定性判据，此后，波德 (H. W. Bode) 总结出了负反馈放大器。第二次世界大战期间，美国 MIT 伺服机构实验室等对以往的自动调节器和负反馈放大器做了总结，提出了反馈控制的数学基础。与此同时，伴随着随动系统（例如，火炮自动瞄准系统、雷达自动跟踪目标系统等）在军事领域中的广泛应用，1945 年第一本经典控制理论书籍《伺服机构》出版。1948 年美国数学家维纳 (N. Wiener) 出版了著名的《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》一书，他揭示了无论机器系统、生命系统甚至社会和经济系统中，都存在一个共同本质的特点，它们都是通过信息的传递、处理与反馈来进行控制，这就是控制论的中心思想。1950 年伊万斯 (W. R. Evans) 提出的根轨迹法提供了寻找特征方程根的比较简易的图解方



法,至此,形成了完整的经典控制理论。经典控制理论主要用于单输入—单输出控制系统的分析和设计,它主要是在复数域(特别是频率域)内利用传递函数(或频率特性)来研究和解决系统的稳定性、响应快速性与响应准确性等问题。

第二次世界大战以后,反馈控制系统不仅局限在军事领域的应用,而且在民用生产部门的应用激增,许多工程设计方法和理论研究更加完善。控制论的观点和方法已经渗透到工业、农业、航空和空间技术、社会经济及生产管理、生物工程、医学等各个领域。我国学者钱学森从控制论这一总题目中,把已被当时科学技术和工程实践所证明的部分分离出来,创立了“工程控制论”,并于1954年出版了《工程控制论》这一名著,这对控制理论的发展与应用起到了很大的推动作用。

20世纪50年代末与60年代初,一方面由于工业生产、火箭和空间技术的发展,出现了多变量、非线性和时变参数系统,经典控制理论已经不能满足要求;另一方面由于电子计算机技术的发展与应用,半导体和电子技术、计算技术的发展,各种传感器和自动检测技术的发展,使控制理论发展到了一个新阶段,从而产生了现代控制理论。现代控制理论主要是在时间域内利用状态空间理论来研究和解决多输入—多输出、非线性、时变系统的最优控制等问题。近年来,控制理论在同有关学科(例如,模糊数学、分形几何、分叉与混沌、灰色理论、人工智能、人工神经网络、遗传算法等)的交叉、渗透与结合中不断发展,在鲁棒控制、 H_∞ 控制、最优控制、系统辨识、自适应控制、智能控制等方面又有重大进展。

自从20世纪60年代以来控制理论在机械工程领域及诸多工程领域中得到了越来越广泛、深入的应用,在机械工程领域,如数控机床、数控加工中心的伺服系统的建立和分析,多台计算机控制设备、柔性制造系统、计算机集成制造系统、机器人、微细加工、电气液压伺服系统、光机电一体化系统、机床动态特性分析、动态测试、汽车悬挂减震系统、驾驶操纵控制系统、引擎控制系统等;在其他工程领域,如电力工业能量的储存、控制和传输,冶金工业对温度、板材的厚度、宽度、质量控制,化工领域对温度、压力控制等,所有这一切都和控制理论的发展息息相关。当前机械工程的一个新的发展方向是以整体为最佳目标,以自动控制为核心,运用控制理论、微电子技术、计算机技术及机械工程等学科方面的理论和技术,发展机电一体化技术,提高生产效能、质量并推出更好的柔性和更高的自主性的机电一体化产品及生产过程。解决上述问题的基础之一就是必须具备坚实的控制理论基础,以控制理论作指导解决工程中的实际问题。

控制工程作为一门技术科学,它主要是研究控制理论及其在机械工程领域和其他工程领域中的应用。本书主要介绍经典控制理论的基本内容,重点是其中的线性连续控制理论及其在机械工程领域分析、设计中的应用。由于计算机技术的迅猛发展及其在控制工程领域的广泛深入的应用,本书以适当的篇幅介绍了计算机控制的基础即离散系统的有关内容,并在各章后面编入了应用MATLAB语言进行控制系统的计算机辅助分析内容。

学习本门学科应以新的视角分析和考虑问题。因为,控制理论不仅是一门重要的学科,而且也是重要的科学方法论。它研究的对象是一个“系统”,并且这个系统不断地运动,即系统不断地经历着动态历过程。系统不断地通过信息的传递、加工处理并利用反馈来进行控制,这就是前述的控制理论的中心思想。因此,学习本门课程要能以系统的而不是孤立的、动态的而不是静态的观点和方法来思考和解决问题,掌握控制理论的基本概念、基本理论和基本方法并注意结合实际,为解决工程中的控制问题打下基础。

第二节 控制系统的基本概念

一、控制系统的基本工作原理

控制系统通常由控制器（控制装置）和被控对象两大部分组成。其中被控对象是指系统中需要加以控制的机器、设备或生产过程；控制器是指能够对被控对象产生控制作用的设备的总体。控制系统的任务就是使被控对象的物理量按照预先给定的控制规律变化。控制系统的控制有人工控制和自动控制。下面以保持恒温箱内温度恒定的控制过程为例来说明人工控制和自动控制的工作原理。

图 1-2 所示为人工控制的恒温箱。在这个系统中，被控制对象为恒温箱，被控制量为恒温箱内的温度，系统的任务是克服外来干扰（电源电压波动、环境温度变化等）保持恒温箱内的温度恒定。人工控制的过程是：

(1) 观察由检测元件（温度计）测出的恒温箱内的温度（即被控制量的实际值）；

(2) 与要求的温度值（即被控制量的给定值）进行比较，得出温度偏差的大小和方向；

(3) 大脑根据偏差的大小和方向发出指令，经人体的动力作用，用手调节调压器的电压。当恒温箱内实际温度高于给定值时，移动调压器使其输出电压减小，直到使恒温箱内温度调整到给定值为止。反之亦然。

可见，上述人工控制是由人来完成读取被控制量——恒温箱内的实际温度值，并与预先输入大脑中的温度给定值进行比较，根据比较得出偏差的大小和方向对调压器进行调节，以达到消除偏差的目的。概括地说，上述人工控制过程就是“检测偏差并用以消除偏差”的过程。

对于上述的控制过程，如能找到一个“控制装置”代替人的职能，那么，这个系统就可以变为自动控制系统了，如图 1-3 所示。

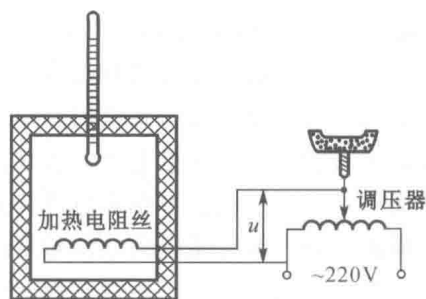


图 1-2 人工控制恒温箱

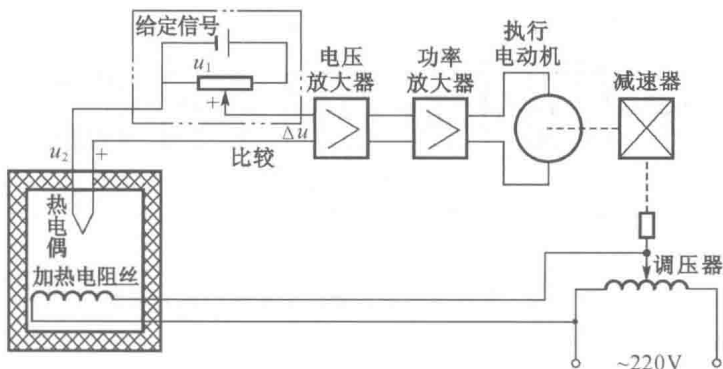


图 1-3 恒温箱温度自动控制系统



在这个温度自动控制系统中, 电压信号 u_1 表示温度的给定值, 热电偶检测实际温度, 并将测出的实际温度转换为电压信号 u_2 , u_2 与给定信号 u_1 进行比较, 比较后得出偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$ 。偏差信号经过电压和功率放大后, 用以控制直流电机的旋转速度和方向, 并经传动装置拖动调压器触头, 以改变其输出电压, 使恒温箱内温度向相反方向变化, 直到恢复到给定温度值为止。此时偏差信号 $\Delta u = 0$, 电机停止运转, 控制调节过程结束, 系统达到新的稳定平衡状态。由于干扰因素总是经常出现的, 因而调节过程是不断进行的。

上述自动控制过程与人工控制过程是极其相似的, 同样也是“检测偏差并用以消除偏差”。由此可知, 不论采用人工控制还是自动控制都具有以下共同点: (1) 要检测被控制量的实际值; (2) 被控制量的实际值要与给定值进行比较得出偏差值; (3) 要用偏差值产生控制调节作用再去消除偏差。

图 1-1 所示的离心调速器的控制原理与图 1-3 所示的恒温箱温度自动控制系统的控制原理是相同的。这些系统之所以能够产生使系统的被控制量克服干扰以后保持恒定的调节作用, 是由系统的反馈量与系统的给定量进行比较所得的偏差而产生的。没有负反馈, 调节作用也就不可能产生, 偏差也就无法消除。

反馈是指对系统的被控制量进行测量, 并加以处理 (取其一部分或全部、或其函数等) 后, 再返回输入端与系统的给定量进行比较的过程。如果反馈量对给定量起增强作用, 则称为正反馈; 反之, 如果反馈量对给定量起减弱作用, 则称为负反馈。通常, 控制系统采用负反馈。基于负反馈基础上的“检测偏差并用以消除偏差”的控制原理, 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。

上述控制系统都是有外加检测装置的外在反馈控制系统, 而在实际动力学系统中还有另外一种反馈, 即固有反馈 (或内在反馈), 它没有外加的检测装置, 但是, 变量与变量之间相互制约, 构成了闭合的因果关系。例如机械传动系统、机械加工系统、直流电机系统等。从控制理论的角度, 它们都是一个反馈控制过程, 因而都可以用控制理论加以解决。

对于图 1-3 所示系统的原理图可用图 1-4 所示的职能方框图来表示。表示系统的组成、各元件作用关系及信号传递 (或流通) 关系的图形称为职能方框图。图中各个方框代表组成的元件, $\otimes$ 表示比较元件, 负号表示负反馈, 箭头的方向表示信号流动方向, 带箭头的直线上面标的符号代表传递的信号 (物理量)。由系统方框图可见, 上述控制系统中信号的传递形成一个封闭回路, 变量与变量之间构成了闭合的因果关系, 因而形成一个反馈控制系统。

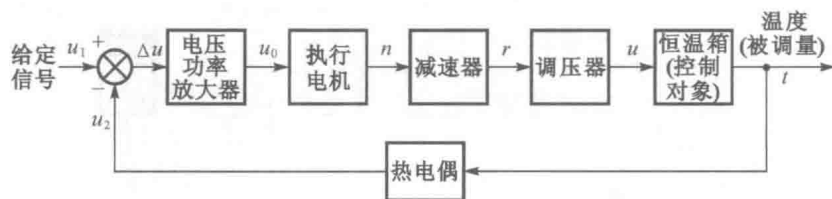


图 1-4 恒温箱温度自动控制系统职能方框图

下面将控制系统中常用的概念和术语的含义说明如下。

系统: 为了完成一定的任务而将一些具有一定功能的元、部件或设备组合起来的总体称为系统。系统具有相对性, 在一个大的系统中可以包含一些小的子系统。

输出量（或称输出信号、被控制量）：是指控制系统中需要加以控制的物理量。系统的输出量常用符号 $x_o(t)$ 表示。

输入量（或称输入信号、给定值、给定量）：是指输入给控制系统用以控制输出量变化规律的物理量。它作用于系统输入端，直接地或间接地表示系统输出量的期望值（给定值）。系统的输入量常用符号 $x_i(t)$ 表示。

这里应该注意控制系统的输出量和输入量与实际系统的物质流量的区别。例如，水箱液位控制系统，水箱实际流出的是液体，控制系统的输出量则是液面高度，输入量则是液面的期望高度。

扰动量（或称扰动信号）：指那些能使输出量偏离预定要求（期望值）的意外干扰因素，广义上说也是输入量，它与输入量相同之处是都会使输出量发生变化，不同之处是扰动量引起的输出量的变化是人们不期望的。扰动量不仅来自系统的外部，也可来自系统的内部。

反馈量（或称反馈信号）：是指把输出量取出并直接或经转换以后送回到输入端与输入信号进行比较的物理量。

二、开环、闭环和复合控制系统

控制系统按其有无反馈作用和反馈作用的方式可分为三类：开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

1. 开环控制系统

如果系统的输出量和输入量之间没有反馈作用，输出量对系统的控制过程不发生影响时，这样的系统称为开环控制系统。图 1-5 是数控线切割机的进给系统，由输入装置产生的输入电信号 x_i 经控制器的处理、计算发出脉冲信号控制步进电机的转角，再经过齿轮传动及丝杠螺母驱动工作台做 x_o 直线运动。该系统中对工作台的实际位移没有测量，更没有把输出量 x_o 反馈到控制器中去，系统只是单方向的依一定的程序或规律实现控制，对应于每一个输入量有一个输出量，因而是一个开环控制系统。这个系统工作台的位移精度取决于输入信号和组成系统的各环节的工作精度，而各种干扰因素也将对其有明显的影

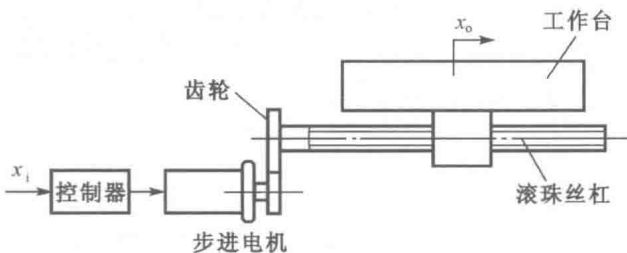


图 1-5 数控线切割机的进给系统



图 1-6 开环控制系统的职能方块图

因此，如果系统的干扰因素和元件特性变化不大，或可预先估计其变化范围并可预先加以补偿时，采用开环控制系统具有一定的优越性，并能达到相当高的精度。

2. 闭环控制系统

如果系统的输出量与输入量之间具有反馈联系，即输出量对系统的控制过程有直接影响，这样的系统称为闭环控制系统。闭环控制系统是按照反馈控制原理工作的，又称为反馈

开环控制系统的职能方块图如图 1-6 所示。开环控制系统具有一些特点，如系统结构比较简单、成本低、响应速度快、工作稳定，但是，当系统输出量有了误差无法自动调整。



控制系统。这种系统的信号传递路线构成闭合回路（闭环）。前面介绍的离心调速器控制系统和恒温箱温度恒定自动控制系统都是闭环控制系统。下面再介绍两个闭环控制系统的实例。

图 1-7 所示为数控线切割机工作台进给系统的闭环控制系统。此系统是在图 1-5 所示开环系统的基础上，主要增加了直线位移测量装置 7 而构成的。图中 x_i 是表示位移指令的电压输入信号， x_o 是工作台输出位移。此系统的任务是保证工作台位移 x_o 能依输入信号 x_i 的变化而变化，且当工作台位移 x_o 有了误差系统能自动进行纠正。例如，当工作台的实际位移 x_o 有了偏差，由直线位移测量装置 7（例如，光栅）测出工作台的实际位移 x_o ，转变成了电压信号并经放大器 8 放大后返回到输入端，在比较环节 1 中与输入信号 x_i 作比较，得出偏差信号，经放大器 2 放大后，控制直流伺服电机 4，经滚珠丝杠 5 和驱动工作台 6 去减小系统偏差，从而提高系统的控制精度。在这个系统中直流伺服电机部分还采用了局部的速度反馈控制，在直流伺服电机上装有测速发电机 3，将直流电机的实际转速测出，并以电压的形式反馈到直流电机的输入端，与输入电压信号进行比较后，得出偏差，再用偏差信号进行控制。采用这个速度反馈是为了改善直流伺服电机的动态特性，进一步改善整个闭环控制系统的动态性能。

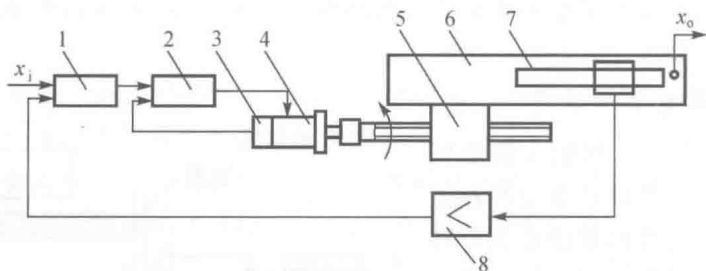


图 1-7 数控线切割机工作台进给闭环控制系统

1—比较环节；2—放大器；3—测速电机；4—直流伺服电机；
5—滚珠丝杠；6—工作台；7—直线位移测量装置；8—放大器

图 1-8 (a) 是由伺服阀和液压缸组成的液压伺服系统的工作原理图。输入量是伺服阀阀芯直线位移 $x_i(t)$ ，输出量是液压缸缸体直线位移 $x_o(t)$ 。当输入量 $x_i(t)$ 为零时，伺服阀阀芯位于中间位置，液压缸两腔没有液压油流动，液压缸缸体也就处于静止状态，其输出位移 $x_o(t)$ 等于零。若操纵杆推动阀芯向右移动一个距离 $x_i(t)$ ，在此瞬间阀芯相对阀套将有油口开度 e ， $e=x_i(t)$ ，这时高压油进入液压缸右腔，缸体开始向右移动一个位移 $x_o(t)$ 。由于液压缸缸体和伺服阀阀套是一体的，故缸体移动也即阀套移动，而使阀口开度逐渐关小。很显然，在阀芯位移作用下，伺服阀油口开度应是 $e=x_i(t)-x_o(t)$ 。当 $x_i(t)=x_o(t)$ 时，油口开度 $e=0$ ，即阀芯又恢复到伺服阀的中间位置，缸体也就停止在一个新的位置上。

这样，当给伺服阀阀芯输入一个任意的位移信号 $x_i(t)$ ，缸体就有一个输出位移信号 $x_o(t)$ 与 $x_i(t)$ 相对应。 $x_o(t)$ 并以负反馈的作用与输入信号 $x_i(t)$ 比较产生误差信号 e 。可见这个液压伺服系统是一个具有负反馈的闭环控制系统。由上述分析可以看出反馈作用的存在，是由系统内部缸体与阀套为一体而决定的，其控制作用方框图如图 1-8 (b) 所示。

由上述可知，闭环控制系统的优点是，当系统的元件特性发生变化或出现干扰因素时，

引起的输出量的误差可以自动的进行纠正，其控制精度较高。但由于控制系统中总有储能元件存在，或在传动装置中存在摩擦、间隙等非线性因素的影响，如果参数选择不适当将会引起闭环控制系统振荡，甚至不能工作。因此，控制精度和稳定性之间的矛盾，必须通过合理选择系统参数来解决。另外，一般说来，闭环控制系统的结构复杂，相对于开环系统成本高。

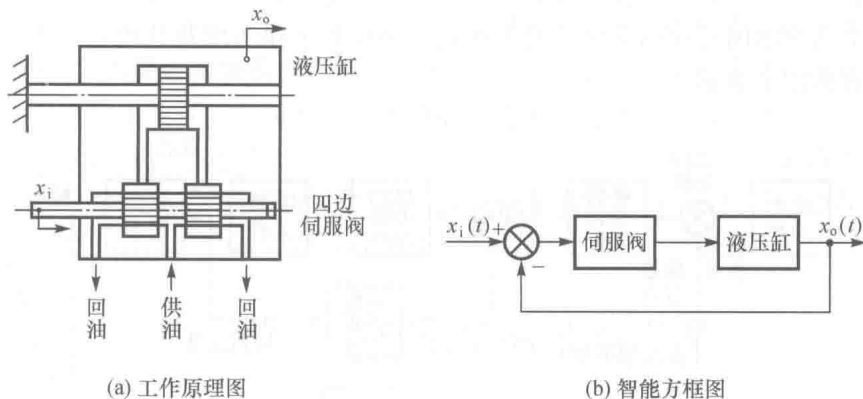


图 1-8 液压伺服系统

综上所述，在实际应用中，当系统的输入量能够预先知道，并且不存在任何扰动或干扰不大时，可采用开环控制系统；而当存在无法预计的干扰因素或系统中元件参数存在无法预计的变化时，可采用闭环控制系统。实际中，大量的自动控制系统都是采用负反馈的闭环控制系统。

3. 复合控制系统

在输出和输入之间同时存在开环控制和闭环控制的系统，称为复合控制系统。它实质上是在闭环控制系统的基础上，用开环通路提供一个补偿的输入作用，如图 1-9 所示。这种系统兼有开环和闭环两种系统的优点，因而可大大提高系统的性能。

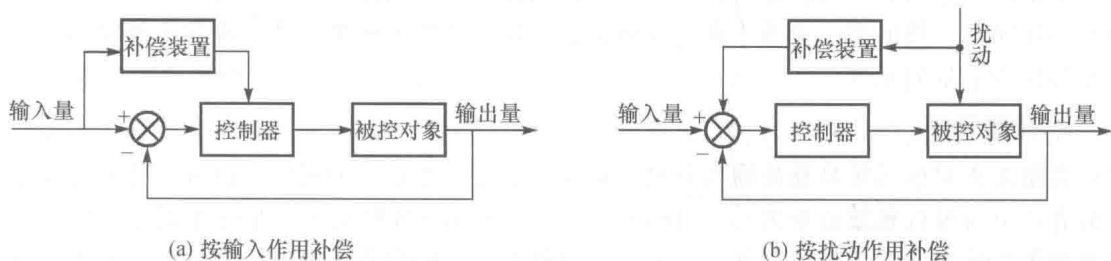


图 1-9 复合控制系统

复合控制系统图 1-9 (a) 为按输入作用补偿的复合控制系统，图 1-9 (b) 为按扰动作用补偿的复合控制系统。这两种系统通过开环补偿通道将输入信号或扰动量的变化及时地直接地传递给控制系统，可使系统有更高的控制精度和快速性，并可改善系统其他动态性能指标。有时称上面两种复合控制系统为前馈（顺馈）控制系统。

下面重点研究闭环控制系统。



三、闭环控制系统的基本组成

对于各种用于自动控制的闭环控制系统, 尽管功用、结构的复杂程度不同, 采用的元件和能量形式有各种类型, 但它们都采用了负反馈工作原理。相同的工作原理, 决定它们必然有类似组成形式。就其大体结构和组成而言, 可分为“控制装置”(控制器)和“被控对象”两个部分。它们各有其相对的独立性, 但二者必须紧密结合, 才能获得完善的控制性能。一般说来, 一个典型的闭环控制系统的基本组成、元件类型和功用及其相互关系可用图 1-10 所示的职能方框图来表示。

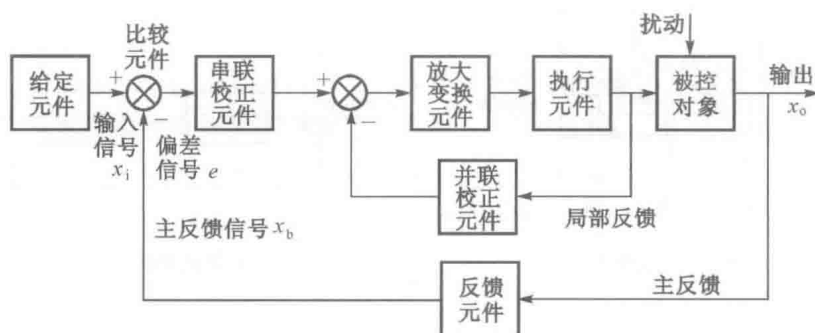


图 1-10 典型闭环控制系统的职能方框图

现将典型闭环控制系统的组成元件及功用说明如下。

1. 给定元件

用来产生控制信号或输入信号(输入量) $x_i(t)$ 的元件。例如数控机床进给系统的输入装置、恒温箱控制系统的给定电位器就是给定元件。

2. 反馈元件(检测元件)

用来测量(输出量)被控制量的实际值, 并经过处理、转换为与输出量有一定函数关系的反馈量的元件。这种反馈量可以是输出量本身(单位反馈系统)或是与输出量成比例, 或是输出量的其他函数。反馈量与输入量应是相同性质的物理量, 才能进行比较。前述例子中的离心调速器、热电偶、光栅、测速发电机、电位器等均为此类元件。检测元件大多是将非电量转换为电量的元件。

3. 比较元件

它是用来对输入信号和反馈信号进行比较, 得出偏差信号的元件。比较元件实际上是信号综合环节(可以相减或相加), 它往往不是一个专门的物理元件, 有时也叫比较环节, 如前述例子中的离心调速器的套筒比较机构、恒温箱自动控制系统中的比较电路等, 而自整角机、旋转变压器等是物理的比较元件。

4. 放大变换元件

它是对偏差信号进行信号放大和功率放大的元件。如电压、电流、功率放大器、晶闸管整流调压装置和电液伺服阀等。

5. 执行元件(驱动元件)

它接收放大变换元件发出的控制信号, 直接驱动被控对象工作, 使输出量按照预期的规