



高等学校电子信息类规划教材

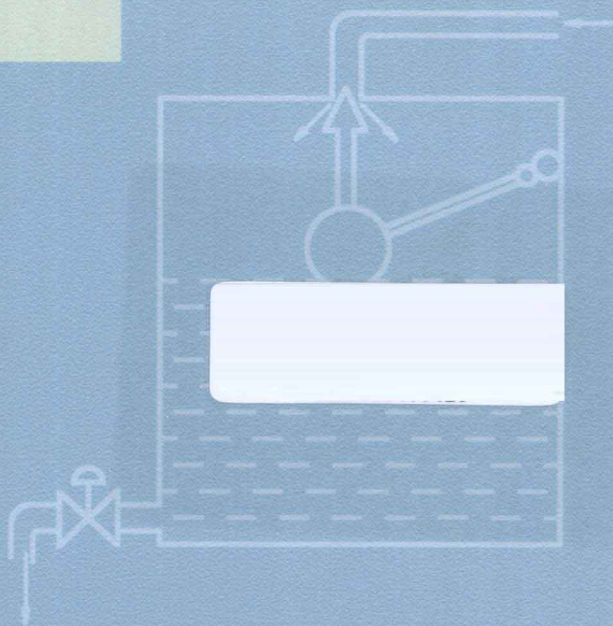
自动化专业系列教材

自动控制原理

ZIDONG KONGZHI YUANLI

第四版

高国燊 余文杰 编著
彭康拥 陈来好



自动化专业系列教材

自动控制原理

(第四版)

高国荣 余文杰 编著
彭康拥 陈来好



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

·广州·

内 容 简 介

本书的内容包括：经典控制理论的线性定常系统理论（时域分析法、根轨迹法、频率响应法等）；非线性系统理论和线性离散（时间）控制系统理论；应用 MATLAB 软件对控制系统进行分析计算和设计的方法。

本书在保持课程内容的系统性和连贯性的基础上，重点突出，篇幅精简。各章均有较丰富的例题和习题，便于读者自学。

本书可作为高等学校工科自动化专业及相近专业的教材，也可供有关专业师生及从事自动化方面工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动控制原理/高国桢等编著.—4 版.—广州：华南理工大学出版社，2013.2
自动化专业系列教材
ISBN 978-7-5623-3863-5

I. ①自… II. ①高… 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 017000 号

自动控制原理

高国桢 余文休 彭康拥 陈来好 编著

出版人：韩中伟

出版发行：华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼，邮编 510640)

<http://www.scutpress.com.cn> E-mail: scute13@scut.edu.cn

营销部电话：020-87113487 87111048 (传真)

责任编辑：詹志青

印刷者：佛山市浩文彩色印刷有限公司

开 本：787mm×1092mm 1/16 印张：29.25 字数：730 千

版 次：2013 年 2 月第 4 版 2013 年 2 月第 13 次印刷

印 数：62001 ~ 67000 册

定 价：39.80 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作，根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》，我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社、各专业教学指导委员会，在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上，根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求，编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报，经各学校、出版社推荐，由各专业教学指导委员会评选，并由我部教材办与各专指委、出版社商定后审核确定的。本轮规划教材的编制，注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需、尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时，选择了一批对学科发展具有重要意义、反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划，以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验，这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足，希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议，以不断提高教材的编写、出版质量，共同为电子信息类专业教材建设服务。

电子工业部教材办公室

第四版前言

全国高校自动控制专业教学指导委员会编审推荐出版的《自动控制原理》1999年8月第一版，2005年5月第二版，2009年9月第三版，至2011年8月，已印刷12次，累计印刷62000册。本书被全国几十所理工院校选作教材，收到良好的教学效果，受到广大读者的欢迎。

本书第二版增加了用MATLAB对控制系统进行仿真的相关内容，如第三章第八节介绍用MATLAB作稳定性分析、时域分析及SIMULINK仿真方法；第四章第七节介绍用MATLAB绘制根轨迹图；第五章第九节介绍用MATLAB绘制频率特性图，从而使学生掌握用MATLAB对控制系统进行仿真的基本方法，不断对课堂讲授的重要结论和实例进行仿真，加深对自动控制理论的理解。第二版还增加了根轨迹的分离点和会合点的一种求法——切线法。

本书第三版增加了第六章第七节：MATLAB单输入单输出系统设计工具SISO Design Tool。通过介绍MATLAB控制系统工具箱中的MATLAB6.5 SISO Design Tool单输入单输出系统设计工具，使学生掌握SISO Design Tool，能同时使用根轨迹图与伯德图，通过修改线性控制系统相关环节的零点、极点及增益等进行SISO线性控制系统设计。并增加了第七章第三节：非线性控制系统的MATLAB仿真举例。通过含饱和限幅特性的非线性控制系统和利用非线性特性改善系统的控制性能两个实例，介绍MATLAB在非线性控制系统仿真分析中的应用。

编者根据第三版出版至今近四年的使用情况，结合多媒体教学课件建设经验，第四版增加了第八章第九节：离散（时间）控制系统的MATLAB仿真举例；原第三章第八节离散系统稳定性分析例题移至新增的第八章第九节内；第三章第八节增加三个二阶系统瞬态性能仿真程序，以便学生加深对离散（时间）控制系统理论的理解，进一步掌握MATLAB在仿真分析中的应用。

本次修订由彭康拥副教授执笔，高国桀教授、余文杰教授审定。本次修订得到华南理工大学自动化学院陈安、张梅、高红霞等老师以及华南理工大学自动化学院、华南理工大学广州学院、华南理工大学出版社的大力支持和帮助，在此向他们表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者

2013年1月

前 言

本教材系按电子工业部的《1996—2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由全国高校自动控制专业教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由华南理工大学高国燊担任主编，主审是哈尔滨工业大学王广雄，责任编委是华中理工大学的汪秉文。

本教材的参考学时数为 90 学时，其主要内容包括经典控制理论的线性定常系统理论、非线性系统理论和线性离散系统理论。第一章介绍自动控制系统的一般概念；第二章介绍控制系统的数学模型；第三章论述时域分析法；第四章论述根轨迹法；第五章论述频率响应分析法；第六章为线性定常系统校正装置的综合；第七章论述非线性系统理论，分别介绍描述函数法和相平面分析法；第八章介绍线性离散系统的基本理论及离散控制系统的分析。

使用本教材前，读者应具有高等数学、运算微积初步、电路分析、电子技术、电机等方面的知识。使用本教材，最好能安排 20 学时左右的实验课时，以便使读者更好地掌握本教材所论述的基本概念、基本理论和分析方法。此外，为便于读者自学，即将出版与本教材配套的《自动控制原理精选题型详解》。

本书第一、二、四、五、六章由华南理工大学余文休教授编写，第三、七、八章由高国燊教授编写。书稿经哈尔滨工业大学王广雄教授主审，他为本书提出许多宝贵意见；在编写本书的过程中，编者参考了由周其节教授主编的《自动控制原理》（华南理工大学出版社出版，1989），得益甚多，在此向他们表示诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 引言.....	(1)
第二节 自动控制的基本概念.....	(3)
第三节 自动控制系统的组成.....	(7)
第四节 自动控制系统的分类.....	(9)
第五节 自动控制系统的实例.....	(10)
第六节 对自动控制系统的的基本要求及本课程的研究内容.....	(14)
本章小结.....	(16)
习题.....	(16)
第二章 自动控制系统的数学模型	(19)
第一节 控制系统微分方程的编写.....	(19)
第二节 传递函数.....	(27)
第三节 控制系统的结构图及其等效变换.....	(39)
第四节 自动控制系统的传递函数.....	(48)
第五节 信号流图.....	(50)
第六节 脉冲响应函数.....	(55)
本章小结.....	(55)
习题.....	(56)
第三章 自动控制系统的时域分析	(62)
第一节 稳定性和代数稳定判据.....	(62)
第二节 典型输入信号和阶跃响应性能指标.....	(70)
第三节 一阶系统的动态性能指标.....	(73)
第四节 二阶系统的动态性能指标.....	(75)
第五节 高阶系统的动态性能.....	(93)
第六节 稳态误差分析.....	(102)
第七节 基本控制规律的分析.....	(112)
第八节 利用 MATLAB 进行时域分析.....	(117)
本章小结.....	(133)
习题.....	(134)
第四章 根轨迹分析法	(137)
第一节 根轨迹的基本概念.....	(137)
第二节 绘制根轨迹的基本法则.....	(141)
第三节 控制系统根轨迹的绘制.....	(156)

第四节	求取闭环系统零、极点的方法	(172)
第五节	增加开环零、极点对根轨迹的影响	(177)
第六节	控制系统的根轨迹法分析举例	(180)
第七节	利用 MATLAB 绘制根轨迹图	(185)
	本章小结	(186)
	习题	(187)
第五章	频率特性分析法	(189)
第一节	频率特性的基本概念	(189)
第二节	频率特性的几种图示方法	(193)
第三节	典型环节的频率特性	(198)
第四节	系统的开环频率特性	(209)
第五节	奈奎斯特稳定判据	(221)
第六节	稳定裕度	(236)
第七节	利用开环频率特性分析系统的性能	(240)
第八节	利用闭环频率特性分析系统的性能	(249)
第九节	利用 MATLAB 绘制频率特性曲线图	(261)
	本章小结	(263)
	习题	(264)
第六章	自动控制系统的校正	(268)
第一节	控制系统校正的基本概念	(268)
第二节	常用校正装置及其特性	(271)
第三节	自动控制系统的频率法校正	(282)
第四节	串联校正装置的根轨迹法设计	(299)
第五节	串联校正装置的期望对数频率特性设计法	(305)
第六节	并联校正装置的设计	(314)
第七节	MATLAB 单输入单输出系统设计工具 SISO Design Tool	(318)
	本章小结	(324)
	习题	(324)
第七章	非线性控制系统的分析方法	(328)
第一节	非线性控制系统概述	(328)
第二节	相平面分析法	(332)
第三节	非线性控制系统的 MATLAB 仿真举例	(372)
	本章小结	(376)
	习题	(376)
第八章	线性离散(时间)控制系统分析	(378)
第一节	线性离散(时间)控制系统的基本概念	(378)
第二节	采样过程和采样定理	(382)
第三节	Z 变换	(388)
第四节	离散(时间)控制系统的数学模型	(400)

第五节	离散(时间)控制系统稳定性分析	(415)
第六节	离散(时间)控制系统的稳态误差分析	(421)
第七节	离散(时间)控制系统的动态性能分析	(424)
第八节	离散(时间)控制系统的校正	(430)
第九节	离散(时间)控制系统的 MATLAB 仿真举例	(440)
本章小结		(450)
习题		(451)
附录		(454)
附录 I	常用函数拉氏变换表	(454)
附录 II	拉氏变换的一些定理	(455)
附录 III	Z 变换表	(456)
参考文献		(458)

第一章 绪 论

本章将从人工控制与自动控制过程的比较入手，简要介绍自动控制技术的发展过程与展望、自动控制的基本概念、定义及有关的名词、术语。进而引出自动控制系统的构成和分类方法，以及工程上对自动控制系统的基本要求，从而给本课程的研究对象和学习目的提供一个较为清晰的轮廓。

此外，本章还将介绍自动控制系统在各行业中的应用实例，以便使读者对自动控制系统实际应用的广泛性有较深的认识，并对各种不同类型控制系统的工作原理有进一步的理解，为以后各章节的学习奠定良好的基础。

第一节 引 言

自动控制学科由自动控制技术和自动控制理论两部分组成。

近几十年来，自动控制技术正在迅猛地发展，并在工农业生产、交通运输、国防建设和航空、航天事业等领域中获得广泛的应用。随着生产和科学技术的发展，自动控制技术至今已渗透到各种学科领域，成为促进当代生产发展和科学技术进步的重要因素。

所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，利用自动控制装置(简称控制器)使整个生产过程或工作机械(称为被控对象)自动地按预先规定的规律运行，或使它的某些物理量(称为被控量)按预定的要求产生变化。

事实上，任何技术设备、工作机械或生产过程都必须按要求运行。例如，要想使发电机正常供电，其输出的电压和频率必须保持恒定，尽量不受负荷变化的干扰；要想使数控机床加工出高精度的工件，就必须保证其工作台或刀架的进给量准确地按照程序指令的设定值变化；要使烘烤炉提供优质的产品，就必须严格地控制炉温；要使火炮能自动跟踪并命中飞行目标，炮身就必须按照指挥仪的命令而作方位角和俯仰角的变动；要把数吨重的人造卫星送入数百公里高空的轨道，使其所携带的各种仪器能长期、准确地工作，就必须保持卫星的正确姿态，使它的太阳能电池一直朝向太阳，无线电发射天线一直指向地球……所有这一切都是以高水平的自动控制技术为前提的。

随着自动控制技术的广泛应用和迅猛发展，出现了许多新问题，这些问题要求从理论上加以解决。自动控制理论正是在解决这些实际技术问题的过程中逐步形成和发展起来的。它是研究自动控制技术的基础理论，是研究自动控制共同规律的技术科学。按其发展的不同阶段，可把自动控制理论分为经典控制理论和现代控制理论两大部分。

经典控制理论也就是自动控制原理，是 20 世纪 40 年代到 50 年代形成的一门独立学科。早期的控制系统较为简单，只要列出微分方程并求解之，就可以用时域法分析它们的性能。第二次世界大战前后，由于生产和军事的需要，各国均在大力研制新型武器，于是

出现了较复杂的控制系统，这些系统通常是用高阶微分方程来描述的。由于高阶微分方程求解的困难，各种控制系统的理论研究和分析方法就应运而生。1932年奈奎斯特(H. Nyquist)在研究负反馈放大器时创立了有名的稳定性判据，并提出了稳定裕量的概念。在此基础上，1945年伯德(H. W. Bode)提出了分析控制系统的一种图解方法即频率法，致使研究控制系统的方法由初期的时域分析转到频域分析。随后，1948年伊文斯(W. R. Evans)又创立了另一种图解法即有名的根轨迹法。追溯到1877年，劳斯(E. Routh)和1895年赫维茨(A. Hurwitz)分别独立地提出了关于判断控制系统稳定性的代数判据。这些都是经典控制理论的重要组成部分。20世纪50年代中期，经典控制理论又添加了非线性系统理论和离散控制理论，从而形成了完整的理论体系。

20世纪50年代开始，由于空间技术的发展，各种高速、高性能的飞行器相继出现，要求高精度地处理多变量、非线性、时变和自适应等控制问题，20世纪60年代初又形成了现代控制理论。现代控制理论的基础是：1956年庞特里亚金(Л. С. Понтрягин)提出了极大值原理，1957年贝尔曼(R. Bellman)提出了动态规划，1960年卡尔曼(R. E. Kalman)提出了最优滤波理论以及状态空间方法的应用。从20世纪60年代至今40多年来，现代控制理论又有巨大的发展，并形成了若干学科分支，如线性系统理论、最优控制理论、动态系统辨识、自适应控制、大系统理论等。

经典控制理论和现代控制理论构成了全部的控制理论。其中，经典控制理论以传递函数为数学工具，研究单输入、单输出的自动控制系统的分析与设计问题。主要研究方法有时域分析法、根轨迹法和频率特性法。而现代控制理论则以矩阵理论等近代数学方法作为工具，不仅研究系统的输入、输出特性，而且还研究系统的内部特性。它适用于研究多输入、多输出的复杂系统，这些系统可以是线性的、非线性的、定常的或时变的。其主要研究方法是状态空间法。

自动控制技术的应用推动了控制理论的发展；而自动控制理论的发展又指导了控制技术中的应用，使其进一步完善。随着科学技术的发展，自动控制技术及理论已经广泛地应用于机械、冶金、石油、化工、电子、电力、航空、航海、航天、核反应堆等各个学科领域。近年来，控制科学的应用范围还扩展到生物、医学、环境、经济管理和其它许多社会生活领域，并为各学科之间的相互渗透起了促进作用。可以毫不夸张地说，自动控制技术和理论已经成为现代化社会不可缺少的组成部分。自动控制技术的应用不仅使生产过程实现自动化，从而提高了劳动生产率和产品质量，降低生产成本，提高经济效益，改善劳动条件，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都具有十分重要的意义。作为现代的工程技术人员和科学工作者，都必须具备一定的自动控制理论基础知识。

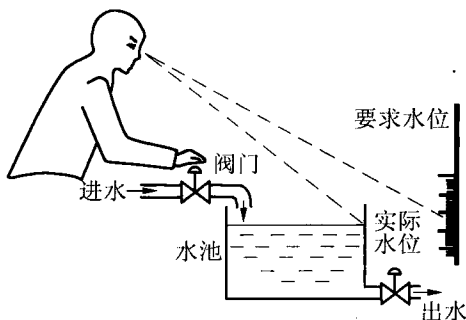
尽管自动控制装置是各式各样的，它们的用途和具体结构也各不相同，但是它们的基本原理是一样的。本教材——《自动控制原理》阐述的是建立在各种自动控制装置基础之上的统一理论，是研究自动控制共通规律的基础理论。在选材上，本教材只介绍经典控制理论的有关内容，以求为进一步深入学习自动控制有关课程及其它相关学科奠定良好的基础。至于现代控制理论的内容，在大学本科教学中，将安排在后置课程——现代控制理论课程中去讲授。

第二节 自动控制的基本概念

在许多工业生产过程或生产设备运行中,为了维持正常的工作条件,往往需要对某些物理量(如温度、压力、流量、液位、电压、位移、转速等)进行控制,使其尽量维持在某个数值附近,或使其按一定规律变化。要满足这种需要,就应该对生产机械或设备进行及时的操作和控制,以抵消外界的扰动和影响。这种操作和控制,既可以用人工操作来完成,又可以用自动控制来完成。

一、人工控制与自动控制

图 1-1 所示是人工控制的水位保持恒定的供水系统。水池中的水源不断地经出水管道流出,以供用户使用。随着用水量的增多,水池中的水位必然下降。这时,若要保持水位高度不变,就得开大进水阀门,增加进水量以作补充。在本例中,进水阀门的开启程度(简称开度)并非是一成不变的,而是根据实际水位的多少(它反映出用水量大小)进行操纵的。上述过程可由人工操作实现。正确的操作步骤是:



(1) 将水位的要求值(期望水位值)牢记在大脑中。

(2) 用眼睛和测量工具测量水池实际水位。

(3) 将期望水位与实际水位进行比较、计算,从而得出误差值。

(4) 按照误差的大小和正负性质,由大脑指挥手去正确地调节进水阀门。所谓正确调节,是要按减小误差的方向来调节进水阀门的开度。

由于图 1-1 所示为有人直接参与控制,故称为人工控制。在本例中,水池中的水位是被控制的物理量,简称被控量。水池这个设备是控制的对象,简称对象。

人工控制的过程是测量、求误差、控制、再测量、再求误差、再控制这样一种不断循环的过程。其控制目的是要尽量减小误差,使被控量尽可能地保持在期望值附近。

如果找到某种装置以完全代替图 1-1 中人所完成的全部职能,那么人就可以不直接参与控制,这就成为自动控制了。图 1-2 所示是水池水位自动控制系统的一种简单形式。图中用浮子代替人的眼睛,作为测量水位高低之用;另用一套杠杆机构代替人的大脑和手的功能,作为计算误差和执行控制之用。杠杆的一端由浮子带动,另一端则连向进水阀门。当用水量增大时,水位开始下降,浮子也随之降低,通过杠杆的作用,进水阀

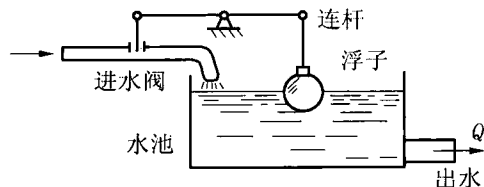


图 1-2 简单的水位自动控制系统

门往上提，开度增大，进水量增加，使水位能回至期望值附近。反之，若用水量变小，水位及浮子上升，进水阀关小，减少进水量，使水位自动下降至期望值附近。整个过程是在无人直接参与下进行的，所以是自动控制过程。其工作步骤可归纳为：

(1) 用连杆的高度标定好水位的期望值。

(2) 当水位超过或低于期望值时，其水位误差被浮子检测出来，并通过杠杆作用于进水阀，从而产生控制作用。

(3) 按减小误差的方向控制进水阀门的开度。

图 1-2 所示的系统虽然可实现自动控制，但由于结构简陋而存在较大的缺点，主要表现在被控制的水位高度将随着出水量的变化而变化。出水量越多，水位就越低，偏离期望值就越远，即误差越大。也就是说，控制的结果，总存在着一定范围的误差值。产生这种现象的原因可解释如下：当出水量增加时，为了使水位基本保持恒定不变，就得开大进水阀门，使较多的水流进水池以作补充。要开大进水阀，唯一的途径是浮子要下降得更多，这意味着控制的结果水位要偏离期望值而降低了。于是整个系统将在较低的水位建立起新的平衡状态。

为克服上述的缺点，可在原系统中增加一些设备而组成较完善的自动控制系统，如图 1-3 所示。这里，浮子仍是测量元件，连杆起着比较作用，它将期望水位与实际水位两者进行比较，得出误差，并以运动的形式推动电位器的滑块作上下移动。电位器输出电压的高低和极性充分反映出误差的性质(大小和方向)。电位器输出的微弱电压经放大器放大后用控制直流伺服电动机，其转轴经减速器降速后拖动进水阀门，作为施予系统的控制作用。

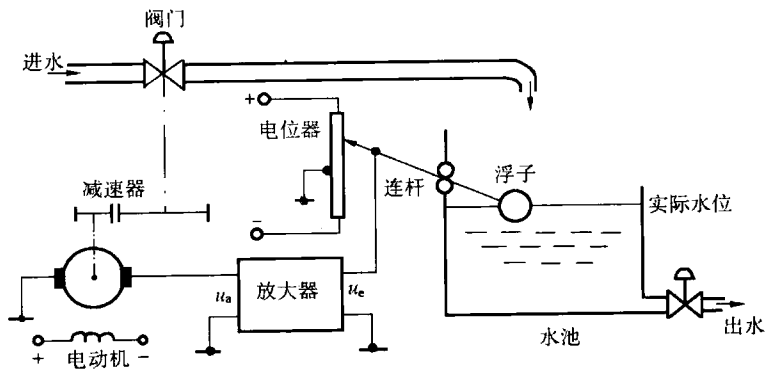


图 1-3 较完善的水位自动控制系统

在正常情况下，实际水位等于期望值，此时，电位器的滑块居中， $u_e = 0$ 。当出水量增大，浮子下降(如图 1-3 所示)，它带动电位器滑块向上移动，输出电压 $u_e > 0$ ，经放大成 u_a 后控制电动机作正向旋转，以增大进水阀门的开度，促使水位回升。只有当实际水位回复到期望值时，才能使 $u_e = 0$ ，控制作用才告终止。

可见，本系统的优点是：无论出水量多或少，自动控制的结果总是使实际水位的高度恒等于期望值，不致出现误差，从而大大提高了控制的精度。

上述的自动控制和人工控制是极为相似的。自动控制系统只不过是把某些装置有机地

组合在一起，以代替人的职能而已。图 1-3 中的浮子相当于人的眼睛，连杆和电位器类似于大脑，电动机相当于人手等等。由于这些装置负担着控制的职能，通常称之为控制器。任何一个控制系统，都是由被控对象和控制器两大部分所组成的。

二、开环控制系统

控制系统从信号传送的特点或系统的结构形式来看，可分为开环控制系统和闭环控制系统两大类。图 1-4 所示的他激直流电动机转速控制系统就是一种开环控制系统。它的任务是控制直流电动机以恒定的转速带动负载工作。系统的工作原理是：调节电位器 R_w 的滑块，使其给定某个参考电压 u_r 。该电压经电压放大和功率放大后成为 u_a ，再送往电动机的电枢，作为控制电动机转速之用。由于他激直流电动机的转速 n 与电枢电压 u_a 成正比(对同一负载而言)，因此，当负载转矩 M_c 不变时，只要改变给定电压 u_r ，便可得到不同的电动机转速 n 。换言之， u_r 与 n 具有一一对应的函数关系。

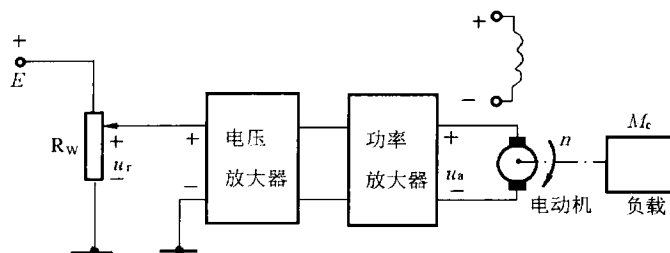


图 1-4 直流电动机转速开环控制系统

在本系统中，直流电动机是被控对象，电动机的转速 n 是被控量。若把全系统作为整体来看，电动机转速 n 是被控对象中需要严加控制的物理量，称为系统的输出量或输出信号。 n 值的大小由参考电压 u_r 所决定， u_r 是原因， n 是结果，通常把参考电压 u_r 称为系统的输入量或输入信号。

就图 1-4 而言，只有输入量 u_r 对输出量 n 的单向控制作用，而输出量 n 对输入量 u_r 却没有任何影响和联系，即系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路，所以称这种系统为开环控制系统。

开环直流电动机转速控制系统可用图 1-5 所示的方块图表示。图中用方块代表系统中

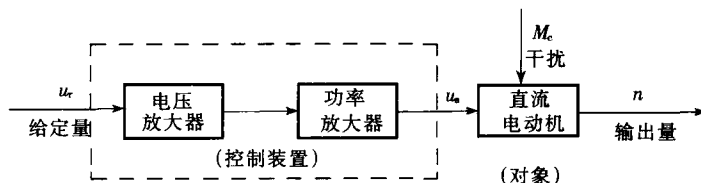


图 1-5 直流电动机转速开环控制系统方块图

具有相应职能的元部件；用箭头表示元部件之间信号的传递方向。电动机负载转矩 M_c 的任何变动，均会构成对输出量 n 的影响。换言之，对恒速控制系统来说，作用于电动机

轴上的阻力矩 M_c 将对系统的输出起到破坏作用，这种作用称之为干扰或扰动，在图 1-5 中用一个作用在电动机上的箭头来表示。

开环控制系统的精度，主要取决于 u_r 的标定精度以及控制装置参数的稳定程度，系统没有抵抗外部干扰的能力，故控制精度较低。但由于系统的结构简单、造价较低，故在系统结构参数稳定、没有干扰作用或所受干扰较小的场合下，仍会大量使用。

三、闭环控制系统

开环控制系统精度不高和适应性不强的主要原因是缺少从系统输出到输入的反馈回路。欲提高控制精度，就必须引入反馈环节，将输出量测出来，经物理量的转换后再反馈到输入端，使输出量对控制作用有直接影响。引入反馈回路的目的是要实现自动控制，提高控制质量。

在图 1-4 所示的直流电动机转速开环控制系统中，加入一台测速发电机，并对电路稍作改变，便构成了如图 1-6 所示的直流电动机转速闭环控制系统。

图 1-6 中，测速发电机由电动机同轴带动，它将电动机的实际转速 n (即系统的输出量) 测量出来，并转换成电压 u_f ，再反送到系统的输入端，与给定值电压 u_r (即系统的输入量) 进行比较，从而得出电压 $u_e = u_r - u_f$ 。由于该电压能间接地反映出误差的性质 (即大小和正负方向)，通常称之为偏差信号，简称偏差。偏差 u_e 经放大器放大成 u_a 后，作为电枢电压控制电动机转速 n 之用。

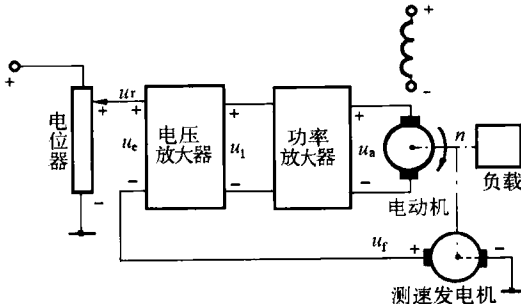


图 1-6 直流电动机转速闭环控制系统

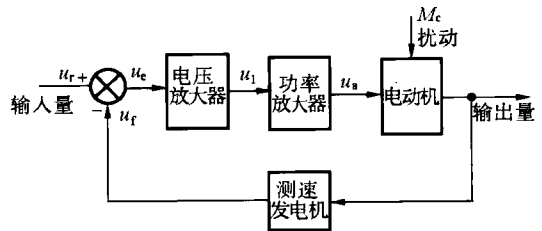
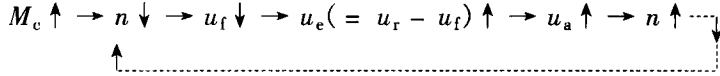


图 1-7 直流电动机转速闭环控制系统方块图

直流电动机转速闭环控制系统可用图 1-7 的方块图来表示。通常，把从系统输入量到输出量之间的通道称为前向通道；从输出量到反馈信号之间的通道称为反馈通道。方块图中用符号“ \otimes ”表示比较环节，其输出量等于各个输入量的代数和。因此，各个输入量均须用正负号表明其极性。图中清楚地表明：由于采用了反馈回路，致使信号的传送路径形成闭合环路，使输出量反过来直接影响控制作用。这种通过反馈回路使系统构成闭环，并按偏差的性质产生控制作用，以求减小或消除偏差 (从而减小或消除误差) 的控制系统，称为闭环控制系统，或称反馈控制系统。

闭环控制系统具有很强的纠偏功能，对干扰具有良好的适应性。就图 1-6 而论，设系统原已处在某个给定电压 u_r 相对应的转速 n 状态下运行，若一旦受到某些干扰 (如负载转矩突然增大) 而引起转速下降时，系统就自动地产生如下的调整过程：



结果，电动机的转速降落得到自动补偿，使被控量 n 基本保持恒定。

由于闭环控制系统采用了负反馈回路，故系统对外部或内部干扰(如元部件参数变动)的影响不甚敏感。这样，就可以选用不太精密的元件构成较为精密的控制系统。但是，闭环控制系统也有它的缺点：由于采用反馈装置，导致设备增多，线路复杂。也正由于反馈通道的存在，对于一些惯性较大的系统，若参数配合不当，控制过程可能变得很差，甚至出现发散或等幅振荡等不稳定的情况，故在闭环控制系统中，稳定性始终是一个突出的问题，也是本书所要研究的重点问题之一。

必须指出，对主反馈而言，只有按负反馈原理组成的闭环控制系统才能实现自动控制。若采用正反馈，将使偏差越来越大，不仅无法纠正偏差，反而导致系统无法工作。

四、自动控制系统的特征和定义

由于闭环控制系统具有很强的自动纠偏能力，控制精度较高，因而在工程实际中获得广泛的应用。通常所说的自动控制系统就是指闭环控制系统。在工程实际中，按照偏差控制的闭环系统种类繁多，尽管它们所完成的任务不同，具体结构千差万别(如水位控制和转速控制)，但是，从检出偏差到利用偏差进行控制，从而减小或消除偏差这一控制过程却是相同的。归纳起来，自动控制系统的特征有：

(1) 在结构上，系统必须具有反馈装置，并按负反馈的原则组成系统。采用反馈，就可对被控制量不断地检测，并将其变换成与输入量相同的物理量，再反馈到输入端，以便与输入量进行比较。采用负反馈的目的是要求得偏差信号。

(2) 由偏差产生控制作用。具体而言，系统必须按照偏差的性质(大小、方向)进行正确的控制，故系统中必须具有执行纠偏任务的执行机构。控制系统正是靠放大的偏差信号来推动执行机构，以便对被控对象进行控制的。于是，不管什么原因引起被控量偏离期望值而出现误差时，相应的偏差信号便随之出现，系统必然产生相应的控制作用，以便纠正偏差。

(3) 控制的目的是力图减小或消除偏差，使被控制量尽量接近期望值。

根据上述自动控制系统的三个特征，可以对自动控制系统下一个较为准确的定义：即所谓自动控制系统，是一个带有反馈装置的动力学系统。系统能自动而连续地测量被控制量，并求出偏差，进而根据偏差的大小和正负极性进行控制，而控制的目的是力图减小或消除所存在的偏差。

第三节 自动控制系统的组成

一、基本组成部分

自动控制系统根据被控对象和具体用途的不同，可以有各种不同的结构形式。但是，从工作原理来看，自动控制系统通常是由一些具有不同职能的基本元部件所组成的。图

1-8 是一个典型自动控制系统的职能框图，简称方块图。图中的每一个方块，代表一个具有特定功能的元件。可见，一个完善的自动控制系统通常是由测量反馈元件、比较元件、放大元件、校正元件、执行元件以及被控对象等基本环节所组成的。通常，还把图中除被控对象外的所有元件合在一起，称为控制器。

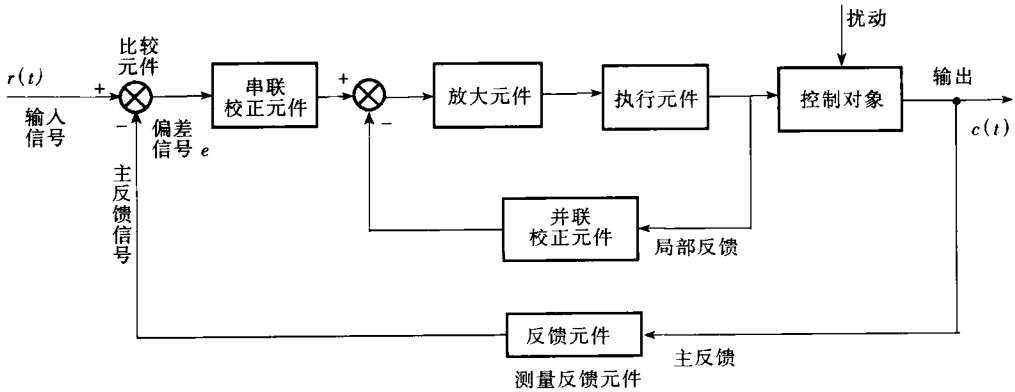


图 1-8 典型自动控制系统的方块图

图 1-8 所示各元件的职能如下：

测量反馈元件——用以测量被控量并将其转换成与输入量同一物理量后，再反馈到输入端以作比较。

比较元件——用来比较输入信号与反馈信号，并产生反映两者差值的偏差信号。

放大元件——将微弱的信号作线性放大。

校正元件——按某种函数规律变换控制信号，以利于改善系统的动态品质或静态性能。

执行元件——根据偏差信号的性质执行相应的控制作用，以便使被控量按期望值变化。

控制对象——又称被控对象或受控对象，通常是指生产过程中需要进行控制的工作机械或生产过程。出现于被控对象中需要控制的物理量称为被控量。

二、自动控制系统中常用的名词术语

系统：自动控制系统是由被控对象和自动控制装置按一定方式联结起来的，以完成某种自动控制任务的有机整体。

输入信号：系统的输入信号是指参考输入，又称给定量或给定值，它是控制着输出量变化规律的指令信号。

输出信号：系统的输出信号是指被控对象中要求按一定规律变化的物理量，又称被控量，它与输入量之间保持一定的函数关系。

反馈信号：由系统(或元件)输出端取出并反向送回系统(或元件)输入端的信号称为反馈信号。反馈有主反馈和局部反馈之分。

偏差信号：它是指参考输入与主反馈信号之差。偏差信号简称偏差。