



普通高等教育“十二五”规划教材
机械类专业系列教材

机械控制工程基础

林海鹏 主编
姜 华 董金波 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材
机械类专业系列教材

机械控制工程基础

主 编 林海鹏
副主编 姜 华 董金波
编 写 任思璟 王金波 徐益民
主 审 刘春生



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要介绍机械控制工程的基本原理和基本知识,以及 MATLAB 软件在控制系统分析与设计中的应用。主要内容包括系统数学模型的建立,控制系统的时域分析、频域分析、稳定性分析,控制系统的校正,线性离散控制系统及直流电动机调速系统的分析与设计实例。在阐述基本理论的同时,应用机械与电气实例来说明一些基本理论和基本方法,将所学的基本知识加以应用。本书共分 8 章,除第 1 章外,各章均有 MATLAB 示例,加强了应用 MATLAB 语言进行控制系统的计算机辅助分析,增强了教材的先进性和实用性。

本书内容精练,概念清晰,章节连贯,重点突出,且各章均配有一定量的例题和习题,易于自学。在编写时更多地结合机械工程实际,为学生运用控制理论解决工程的实际问题打下基础。

本书不仅适用于高等工科院校机械类及其他近机类专业的本科生使用,同时可作为成人教育和继续教育的教材,也可供有关教师与工程技术人员作为参考书使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械控制工程基础 / 林海鹏主编. —北京: 中国电力出版社, 2012.7

普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5123-3342-0

I. ①机… II. ①林… III. ①机械工程—控制系统—高等学校—教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 169884 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 7 月第一版 2012 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15 印张 366 千字

定价 27.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

近年来,随着现代科学技术的发展,机械与控制已融为一体,自动控制技术在机械工程领域起着越来越重要的作用。机械控制工程的理论和方法已成为学生和科技工作者分析问题和解决问题的有效手段。学习掌握自动控制技术的基本概念、基本原理和基本方法,并将其应用于工程实践,有助于提高学生分析和解决工程实际问题的能力。

本书是为高等院校机械工程类和其他近机类专业的本科生(兼顾大专生)编写的教材。在教材编写过程中,结合多年的教学经验,参考大量的有关书籍和文献,在注重系统性的同时,本着“少而精”的原则,力求在讲清机械控制工程的基本概念的前提下,突出重点。为更多地结合机械工程实际,以帮助读者领悟如何应用控制理论来解决机械工程的实际问题,在编写过程中引入了大量机械工程中的典型实例,并根据经典控制论提出问题、分析问题、解决问题,以培养学生将经典控制论用于机械工程中的能力。

本教材在编写过程中,突出了以下特色:

(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,加强实践性与应用性,结合实例进行讲解。

(2) 突出系统性。本教材作为机械工程类和其他近机类专业本科生的技术基础课教材,注重教材内容的合理划分与衔接,层次分明,重点突出,各高校可以根据不同需要选择使用。

(3) 结构体系合理,内容新颖。基本理论阐述精练,深入浅出,公式推导力求详尽,以便于自学。

(4) 充分利用现代计算机工具。采用基于 MATLAB 交互式软件进行控制系统的计算机辅助分析。为便于学生的学习与理解,在语句之后都做了相应的注释,有利于培养学生应用计算机辅助分析和设计控制系统的能力。

(5) 以直流电动机调速系统为例详细地介绍了控制系统设计与分析的方法及过程。

本书由黑龙江科技学院林海鹏担任主编,姜华、董金波担任副主编,参加本书编写的还有任思璟、王金波、徐益民。其中第 1、2、3 章由董金波编写,第 4、5 章由姜华编写,第 6、7、8 章由林海鹏编写,任思璟、王金波、徐益民参与了 MATLAB 程序的编写与调试,并进行了文稿的录入整理、校对及习题的编写工作。

本书由黑龙江科技学院刘春生教授主审,并提出了宝贵的意见和建议,在此表示感谢。

本书提供电子课件,可联系编者索取,邮箱 linhaipengxu@126.com。

因编者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2012 年 2 月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 自动控制系统的基本概念	2
1.3 控制理论在机械工程中的应用	8
习题	9
第 2 章 控制系统的数学模型	11
2.1 控制系统的微分方程	11
2.2 控制系统的传递函数	15
2.3 系统方框图及其等效变换	22
2.4 闭环控制系统的传递函数	28
2.5 信号流图与梅森 (Mason) 公式	31
2.6 系统的状态空间模型	34
2.7 MATLAB 在系统数学模型中的应用	39
习题	42
第 3 章 控制系统的时域分析法	45
3.1 时间响应及典型输入信号	45
3.2 系统响应性能指标	47
3.3 一阶系统的时域分析	49
3.4 二阶系统的时域分析	51
3.5 高阶系统	58
3.6 稳态误差分析与计算	59
3.7 MATLAB 在时域分析中的应用	66
习题	69
第 4 章 控制系统的频域分析法	71
4.1 频率特性概述	71
4.2 典型环节的频率特性	73
4.3 开环频率特性曲线的绘制	82
4.4 闭环控制系统频率特性的分析	91
4.5 闭环控制系统性能分析	93
4.6 MATLAB 在系统频域分析中的应用	96
习题	98
第 5 章 控制系统的稳定性分析	100
5.1 系统稳定性的基本概念	100

5.2	系统稳定的条件	101
5.3	Routh (劳斯) 稳定判据	103
5.4	胡尔维茨 (Hurwitz) 稳定判据	108
5.5	Nyquist (乃奎斯特) 稳定判据	109
5.6	对数频率 (Bode) 稳定判据	115
5.7	系统的相对稳定性	118
5.8	MATLAB 在系统稳定性分析中的应用	121
	习题	123
第 6 章	控制系统的校正	125
6.1	系统校正概述	125
6.2	常用的校正装置及其控制特性	128
6.3	串联校正	141
6.4	反馈校正	160
	习题	166
第 7 章	线性离散控制系统	168
7.1	离散控制系统概述	168
7.2	信号的采样与保持	170
7.3	Z 变换和 Z 反变换	174
7.4	脉冲传递函数	182
7.5	线性离散控制系统的性能分析	192
7.6	离散控制系统的设计与校正	202
7.7	MATLAB 在离散控制系统中的应用	207
	习题	210
第 8 章	直流电动机调速系统的分析与设计	213
8.1	直流电动机调速系统动态数学模型的建立	213
8.2	直流电动机调速系统动态性能及稳态误差分析	218
8.3	直流电动机调速系统的稳定性分析	224
8.4	直流电动机调速系统的综合与校正	227
附录 A	常用函数拉普拉斯变换和 Z 变换对照表	232
附录 B	常用拉普拉斯变换的定理表	233
	参考文献	234

第1章 绪 论

1.1 概 述

在科学技术飞速发展的今天,自动控制技术及理论已经成为现代化社会不可缺少的组成部分。自动控制技术及理论已经广泛地应用于机械、冶金、石油、化工、农业、电力电子、航空航天、核反应堆等各个学科领域。近年来,控制学科的应用范围还扩展到交通管理、生物医学、生态环境、经济管理、社会科学和其他许多社会生活领域,并为各学科之间的相互渗透起了促进作用。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,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。

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。学习和研究自动控制理论是为了探索自动控制系统中变量的运动规律和改变这种运动规律的可能性和途径,为建立高性能的自动控制系统提供必要的理论根据。

自动控制理论的产生可以追溯到18世纪英国第一次技术革命,1765年瓦特(James Watt)为控制蒸汽机速度设计的离心调节器,是自动控制领域的第一项重大成果。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不稳定问题,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)提出了一种相当简便的方法,根据对稳态正弦输入的开环响应,确定闭环的稳定性。自从1948年诺伯特·维纳出版了著名的《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》一书以来,控制论的思想和方法已经渗透到了几乎所有的自然科学和社会科学领域。维纳把控制论看作是一门研究机器、生命社会中控制和通信的一般规律的科学,更具体地说,是研究动态系统在变化的环境条件下如何保持平衡状态或稳定状态的科学。第二次世界大战结束后,钱学森对于迅速发展起来的控制与制导工程技术,曾做过深入地观察与研究。钱学森曾对制导控制系统进行研究,并取得了一定的进展,成为此类研究工作的先驱。因此,诺伯特·维纳的《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》与钱学森火箭制导的工程问题是相通的。钱学森将诺伯特·维纳《控制论——关于在动物和机器中控制和通讯的科学》的思想引入自己熟悉的航空航天系统的导航与制导系统,从而形成一门新学科,即工程控制论。《工程控制论(engineering cybernetics)》的问世,很快引起了世界科学界的关注。科学界认为,《工程控制论》是这一领域的奠基式的著作,是维纳控制论之后的又一个辉煌的成就。《工程控制论》吸引了大批数学家和工程技术专家从事控制论的研究,形成了控制科学在20世纪50年代和60年代的研究高潮。庞特里亚金的极大值原理、卡尔曼的能控能观性定理和递推滤波器等,都是在这一时期产生的。

由于具有多输入和多输出的现代设备变得越来越复杂，所以需要大量方程来描述现代控制系统。而古典控制理论只涉及单输入、单输出系统，对于多输入、多输出系统就无能为力了。

19世纪60年代，数字计算机的出现为复杂系统的时域分析提供了可能。因此，利用状态变量、基于时域分析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，20世纪50年代中期，空间技术的发展迫切要求解决更复杂的多变量系统、非线性系统的最优控制问题（例如火箭和宇航器的导航、跟踪和着陆过程中的高精度、低消耗控制）。实践的需求推动了控制理论的进步，同时，计算机技术的发展也从计算手段上为控制理论的发展提供了条件，适合于描述航天器的运动规律，又便于将计算机求解的状态空间描述成为主要的模型形式。

从1960年到1980年，不论是确定性系统的最佳控制，还是随机系统的最佳控制，以及复杂系统的自适应控制，都得到了充分的研究。现代控制理论主要利用计算机作为系统建模分析、设计乃至控制的手段，适用于多变量、非线性、时变系统。现代控制理论在航空航天、制导与控制中创造了辉煌的成就，使人类迈向宇宙的梦想变为现实。

为了解决现代控制理论在工业生产过程应用中所遇到的被控对象精确状态空间模型不易建立、合适的最优性能指标难以构造、所得最优控制器往往过于复杂等问题，科学家们经过不懈努力，近几十年来不断提出一些新的控制方法和理论，例如自适应控制、模糊控制、预测控制、容错控制、鲁棒控制、非线性控制和大系统、复杂系统控制等，大大地扩展了控制理论的研究范围。目前，控制理论还在向更纵深、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。

1.2 自动控制系统的基本概念

所谓自动控制，就是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置（简称控制器）使被控对象（如生产过程或生产设备等）的某些物理量（简称被控量）准确地按照预期规律运行。实现上述控制目的，由相互制约的各部分按一定规律组成的具有特定功能的整体称为自动控制系统。例如，温度控制系统保持恒温；水位控制系统保持水位恒定；焊接机器人可按工艺要求焊接流水线上的各个机械部件；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等。所有这些系统都有一个共同点，即它们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，例如电压、位移等，也可以是数字量。一般说来，如何使被控制量按照给定量的变化规律而变化，这就是控制系统所要解决的基本任务。

下面介绍自动控制系统如何实现对这些物理量的自动控制。

1.2.1 自动控制系统工作原理

首先，研究水位控制系统这个例子。实现水位控制有两种方法：人工控制和自动控制。图1-1(a)所示为人工控制水位保持恒定的供水系统。当水位在给定位置且流入、流出量相等时，它处于平衡状态。当流出量发生变化或水位给定值发生变化时，就需要对流入量进行必要的控制。在人工控制方式下，操作者用眼看水位情况，用脑比较实际水位与期望水位的差值，并根据经验做出决策，确定进水阀门的调节方向与幅度，然后用手操作进水阀门进

行调节，最终使水位等于给定值。只要水位偏离了期望值，操作者便要重复上述调节过程。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并用以纠正偏差的过程。

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，那么这样一个人工调节系统就可以变成自动控制系统了。图 1-1 (b) 所示为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，用来测量水位高、低；用一套杠杆机构代替人的大脑和手的功能，用来进行比较、计算偏差并实施控制。杠杆的一端由浮子带动，另一端则与进水阀门相连。当用水量增大时，水位开始下降，浮子也随之降低，通过杠杆的作用将进水阀门开大，使水位回到期望值附近；反之，若用水量变小，水位及浮子上升，进水阀关小，水位自动下降到期望值附近。整个过程中无需人工直接参与，控制过程是自动进行的。

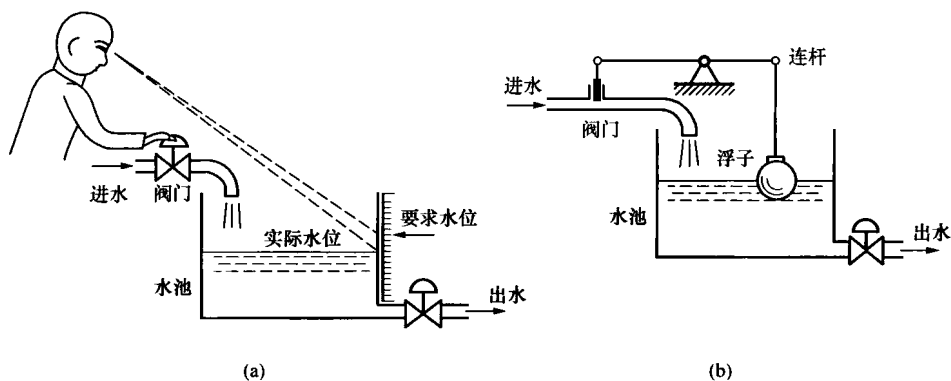


图 1-1 水位控制系统

(a) 人工控制的水位系统；(b) 水位自动控制系统

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，误差越大。控制的结果，总存在着一定范围的误差值。这是因为当出水量增加时，为了使水位基本保持恒定不变，就得开大阀门，增加进水量。要开大进水阀，唯一的途径是浮子要下降得更多，这意味着实际水位要偏离期望值更多。这样，整个系统就会在较低的水位上建立起新的平衡状态。

为克服上述缺点，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 1-2 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，得出偏差，同时推动电位器的滑臂上、下移动。电位器输出电压反映了偏差的性质（大小和方向）。电位器输出的微弱电压经放大器放大后驱动直流伺服电动机，其转轴经减速器后拖动进水阀门，对系统施加控制作用。

在正常情况下，实际水位等于期望值，此时，电位器的滑臂居中， $u_c = 0$ 。当出水量增大时，浮子下降，带动电位器滑臂向上移动， $u_c > 0$ ，经放大后成为 u_a ，控制电动机正向旋转，以增大进水阀门开度，促使水位回升。当实际水位回复到期望值时， $u_c = 0$ ，系统达到新的平衡状态。

可见，该系统在运行时，无论何种干扰引起水位出现偏差，系统都要进行调节，最终总是使实际水位等于期望值，大大提高了控制精度。

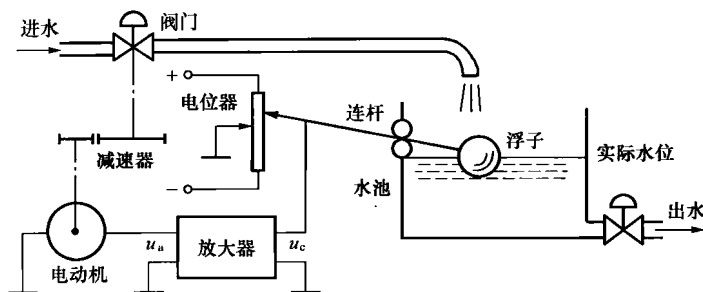


图 1-2 水位自动控制系统

由此例可知，上述人工控制系统和自动控制系统极为相似，自动控制系统只不过是把这些装置有机地组合在一起，以代替人的职能而已。图 1-2 中的浮子相当于人的眼睛，对实际水位进行测量；连杆和电位器类似于大脑，完成比较运算，给出偏差的大小和极性；电动机相当于人手，调节阀门开度，对水位实施控制。它们具有一个共同的特点，就是都要检测偏差，并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。在自动控制系统中，这一偏差是通过反馈建立起来的。

1.2.2 开环控制与闭环控制

按照有无反馈测量装置，控制系统分为两种基本形式，即开环控制系统和闭环控制系统。

1. 开环控制系统

如果系统的输出量与输入量之间不存在反馈通道，这种控制方式称为开环控制系统。在开环控制系统中，不需要对输出量进行测量，也不需要将输出量反馈到系统输入端与输入量进行比较。

对于一个控制系统，首先要明确哪一个量是被控制量。例如，机床的转速，飞机飞行的高度，火炮的方位角等。应该根据实际的工程需要来确定被控制量。

对于某个实际物体，如被控制量转速是机床的转速，被控制量温度是恒温箱的温度。这个被控制量所在的实际物体称作被控制对象。

为了使被控制量产生变化，需要有一个装置对被控对象施加作用，这个装置称作执行装置或者执行元件。例如，机床上装有电动机，电动机带动机床的旋转轴转动，使转速发生变化；电热丝产生热量，使恒温箱内的温度发生变化等。

执行元件的作用往往需要较大的能量，因此，需要有一个放大器向执行元件提供能量。这样，被控制量、被控对象、执行元件、放大器之间的作用关系可以用图 1-3 来表示。

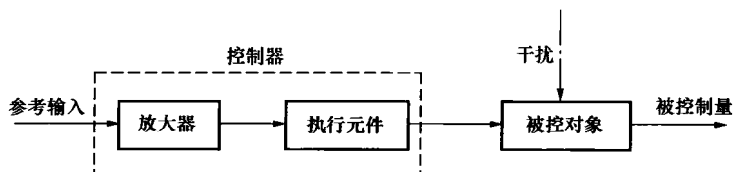


图 1-3 开环控制系统

按图 1-3 即构成了一个简单的控制系统，被控制量能够按照参考输入给出的变化规律变化，这样的系统称为开环控制系统。

开环控制系统的特点：

(1) 被控量对于控制作用没有任何影响，输出不影响输入。对输出不需测量，通常较易实现。

(2) 结构简单，所用的元器件少，成本低，系统一般也容易稳定。

(3) 组成系统的元件精度高，系统精度才能高，成本也随之增加。

(4) 系统没有自行消除或减小误差的功能。

但是，对被控对象施加作用的不仅仅是执行元件，往往还会有干扰作用在被控对象上，如图 1-3 中的虚线表示。干扰的作用也会使被控制量产生变化。例如，机床在切削过程中，加大进给量会使转速下降；强风和发射的后坐力会使高射炮的俯仰角和方位角变化，因此，被控制量不能完全按照控制指令给出的规律变化，可能会出现偏差。

然而，在开环控制系统中，如果被控制量出现偏差，开环控制系统不具有纠正偏差的功能。因此，在干扰和元件性能改变的影响下，会产生误差，使得控制精度降低，这是开环控制系统的一个严重的缺点。

2. 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，也称为反馈通道。如果系统的输出量与输入量之间存在反馈通道，即输出量对控制作用有直接影响，则把具有这种控制方式的系统称为闭环控制系统。

若要提高控制精度，必须把输出端的信息反馈到输入端，形成反馈信号（反馈信号可以是输出信号本身，也可以是输出信号的函数或导数）。输入信号和反馈信号之差，称为偏差，偏差加到控制器上，以一定的控制规律产生控制作用，逐步减小以至消除这一偏差，使系统的输出量超于期望值，从而实现所要求的控制性能。换句话说，“闭环”这个术语的含义，就是应用反馈作用来减小系统偏差。

闭环控制系统的特点：

(1) 输出影响输入，通过闭环控制系统的作用，能自动地消除或削弱干扰信号对被控制量的影响，使系统达到较高的控制精度。故闭环控制系统具有良好的抗扰动性能。

(2) 利用低精度元件可组成高精度系统。

(3) 与开环控制系统比较，闭环控制系统的结构比较复杂，构造比较困难。

(4) 由于闭环控制系统存在反馈信号，利用偏差进行控制，如果设计得不好，将会发生超调、振荡，使系统无法正常和稳定地工作。故闭环控制系统的稳定性很重要。

(5) 控制系统的精度与系统的稳定性之间常常存在矛盾。

闭环控制系统如图 1-4 所示。由于在系统的输入端将参考的输入和反馈信号相减，所以又称为闭环负反馈控制系统。

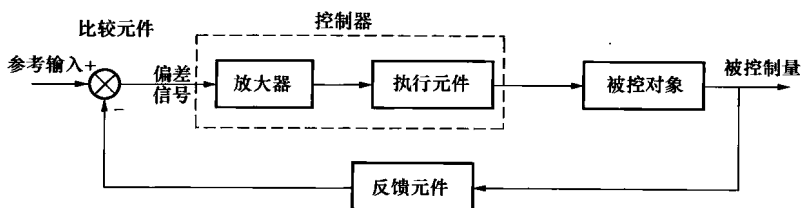


图 1-4 闭环控制系统

对于闭环负反馈控制系统可能会出现不稳定现象，或者在某些方面不能满足设计者和使用者的要求，这样，常常会在闭环负反馈控制系统中增加串联校正环节和局部反馈，如图 1-5 中虚线所示，以改善闭环负反馈控制系统的性能。

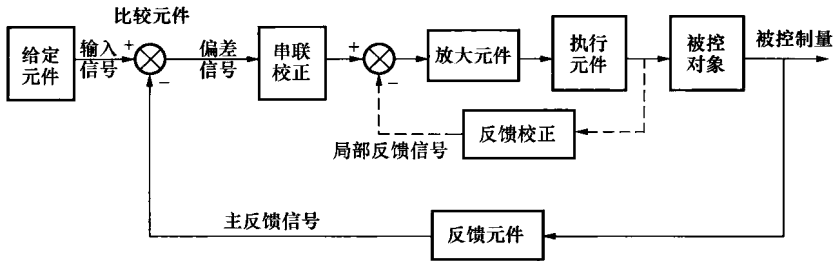


图 1-5 闭环负反馈控制系统

闭环控制系统适用于反应快、精度高、动作复杂的场合。闭环控制系统的设计计算也比较复杂，本书将重点研究闭环控制系统。

1.2.3 闭环控制系统的基本组成

图 1-5 所示的闭环控制系统表示了这些元件在系统中的位置和其相互间的关系。由图可看出，一个典型的闭环控制系统应该包括给定元件、反馈元件、比较元件、放大元件、执行元件及校正元件等。

(1) 给定元件。主要用于产生给定信号或输入信号，例如调速系统中的给定电位计。

(2) 反馈元件。测量被控制的物理量或输出量，如果这个物理量是非电量，一般再转换为电量，例如，调速系统中的测速电动机。

(3) 比较元件。用来比较输入信号与反馈信号之间的偏差，可以通过电路实现，也叫比较环节。例如，旋转变压器、机械式差动装置、运算放大器和电桥等。

(4) 放大元件。对偏差信号进行信号放大和功率放大的元件，用来驱动执行元件去控制被控对象，例如，电压放大器、伺服功率放大器等。

(5) 执行元件。直接对控制对象进行操作的元件，例如执行电动机、液压马达等。

(6) 被控对象。控制系统所要操纵的对象，例如机床、工作台等，它的输出量为系统的被控制量。

(7) 校正元件。也称校正装置，用以稳定控制系统，提高性能，主要有反馈校正和串联校正两种形式。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的则用计算机。

1.2.4 自动控制系统的分类

自动控制系统应用范围很广，种类繁多，它们的结构类型和所完成的任务也各不相同。下面介绍几种常用的分类方法。

1. 按系统输入信号变化规律来分

(1) 恒值控制系统。给定值为恒定的控制系统称为恒值控制系统，也称自动调节系统。这种系统的任务是保证无论在任何扰动下，使被控参数（输出）保持恒定的、希望的数值。在过程控制系统中，一般都要求将过程参数（如温度、压力、流量、液位和成分等）维持在工艺给定的状态。例如，稳压电源、恒温控制箱。对于这类系统，分析重点在于克服扰动对

被控量的影响。

(2) 程序控制系统。若给定值随时间变化有一定的规律,且为事先给定了的时间函数,则称这种系统为程序控制系统。例如,耐火材料生产中的炉温程序升温、间隙生产的化学反应器温度控制以及机械加工中的数控机床等均属于此类系统。

恒值控制系统可认为是程序控制系统的特例。

(3) 伺服系统。给定信号是一个未知函数,要求被控量随给定量的变化而变化的控制系统称为伺服系统,又称为随动控制系统。这种系统的任务是在各种情况下保证系统的输出以一定精度跟随参考输入的变化而变化,即要求输出量能够准确、快速地复现给定量。例如,火炮自动跟踪系统、导弹发射架控制系统、雷达天线控制系统以及轮船位置控制系统等都是典型的伺服系统。

2. 按描述系统的数学模型来分

(1) 线性控制系统。若组成控制系统的元件都具有线性特征,则称这种系统为线性控制系统。这种系统的输入与输出间的关系,一般用微分方程、传递函数来描述,也可以用状态空间表达式来表示。线性系统的主要特点是具有齐次性和适用叠加原理。

(2) 非线性控制系统。在控制系统中,至少有一个元件具有非线性特征,则称该系统为非线性控制系统。非线性系统一般不具有齐次性,也不适用于叠加原理,而且它的输出响应与其初始状态有很大的关系。严格地说,绝对的线性特征控制是不存在的,因为所有的物理系统和元件在不同的程度上都具有非线性特性。为了简化对系统的分析和设计,在一定条件下,可以对某些非线性特性作线性化处理。这样,非线性系统就近似为线性系统,从而可以用分析线性系统的理论和方法对它进行研究。

3. 按系统传输信号的性质来分

(1) 连续控制系统。当系统中各组成环节的输入、输出信号都是时间的连续函数时,称此类系统为连续控制系统。连续系统的运动状态或特性一般用微分方程来描述。模拟式的工业自动化仪表以及用模拟式仪表来实现自动化的过程控制系统都属于连续系统。

(2) 离散控制系统。在控制系统各部分的信号中只要有一处是时间 t 的离散信号,则称这种系统为离散控制系统。显然,脉冲和数码都属于离散信号。计算机控制系统就是一种常见的离散控制系统,也称作数字控制系统。离散控制系统的运动状态或特性一般用差分方程来描述,其分析研究方法也不同于连续系统。

1.2.5 控制系统的基本要求

自动控制应用的场合不同,对系统性能的要求也不同。但从控制工程的角度出发,对每个控制系统却有共同的要求,一般可归纳为稳定性、快速性和准确性。

1. 稳定性

稳定性是保证控制系统正常工作的首要条件,是控制系统的重要特征。稳定性指控制系统偏离平衡状态后,自动恢复到平衡状态的能力。如果系统在扰动信号作用下输出偏离了平衡状态,在扰动去除后,系统的输出能够最终回到原先的平衡状态,则系统是稳定的;反之,如果系统的输出发生增幅振荡或单调增长现象,则系统是不稳定的。不稳定的系统是不能工作的。

2. 快速性

快速性指控制系统的输出量和输入量之间产生偏差时,系统消除这种偏差过程的快速程

度。快速性是在稳定性的前提下提出的，它是衡量控制系统性能的又一个重要指标。快速性好的系统，既要求过渡过程时间短，又要求过程平稳，振荡幅度小。

3. 准确性

准确性指在调整过程结束后输出量与给定量之间的偏差，或称为稳态精度。这也是衡量系统工作性能的重要指标，一般用稳态误差来衡量。稳态误差的大小反映了系统控制的精确程度。稳态误差值越小的系统，说明系统的控制精度越高，稳态特性越好。

综上所述，对控制系统的基本要求是在稳定的前提下，系统要稳、准、快。

在实际中，由于控制对象的具体情况不同，每类控制系统对稳、准、快的要求各有侧重，例如，调速系统对稳定性要求严格，而随动系统对快速性要求较高。

值得注意的是，即使对于同一系统，体现稳、准、快这三个要求也是相互制约的。提高响应的快速性，可能会引起系统的强烈振动，降低了系统的稳定性；改善系统的稳定性，则又可能会使控制过程时间延长，反应迟缓以及精度变差；提高系统的稳态精度，则可能会引起系统稳定性变差，过渡过程时间延长。如何分析和解决这些矛盾，将是本书要研究的主要问题。

1.3 控制理论在机械工程中的应用

随着机械工程日益迫切的现代化要求及控制技术的进一步发展，近年来控制理论在机械制造工业中的应用越来越广泛。目前，控制理论在机械制造领域中在以下几个方面应用最为活跃：

1. 机械制造生产过程自动化方面

现代生产对机械制造生产过程的自动化提出了越来越多、越来越高的要求，一方面是所采用的生产设备与控制系统越来越复杂，另一方面是所要求的经济指标越来越高，这就必然导致“自动化”与“最优化”、“可靠性”的组合，从而使机械制造生产过程的自动化技术从一般的自动化机床、自动生产线发展到数控机床、多微机控制设备、柔性自动生产线乃至设计、制造、管理一体化的计算机集成制造系统。

2. 加工过程的研究方面

由于生产效率越来越高，如高速切削、强力切削日益广泛应用；同时，加工质量特别是加工精度越来越高， $0.1\mu\text{m}$ 精度级、 $0.01\mu\text{m}$ 精度级乃至 nm 精度级都已出现，加工过程的动态响应不容忽视，这就要求把加工过程当作动态过程加以研究。

3. 产品及设备的设计方面

产品与设备的设计已经开始突破以往的经验设计、试凑设计及类比设计的束缚。在充分考虑产品和设备的动态特性条件下，探索建立数学模型，采用计算机进行优化设计，甚至采用人工智能技术及人工神经网络技术。

4. 动态参数或过程的测试方面

以往的测量一般是建立在静态基础之上的几何量的测量，现在则是以控制理论为基础，建立在动态基础上的测试技术，如测量动态位移、振动、噪声等。从基本概念、测试方法、测试手段到测试数据的处理方法，无不同控制理论息息相关。

总而言之，控制理论及计算机技术同机械制造技术相结合，将使机械制造领域中的试验、研究、设计、制造及管理等方面发生巨大的变化。

习 题

- 1.1 什么是自动控制系统？自动控制系统的基本组成有哪些？
- 1.2 什么是开环控制系统？什么是闭环控制系统？各有什么特点？
- 1.3 试列举一些开环控制和闭环控制的例子，并说明其工作原理。
- 1.4 对控制系统的基本要求是什么？

1.5 采用离心调速器的蒸汽机转速自动控制系统如图 1-6 所示。说明系统的工作原理，并指出系统中的被控对象、被控量和给定量，画出系统的职能方框图。

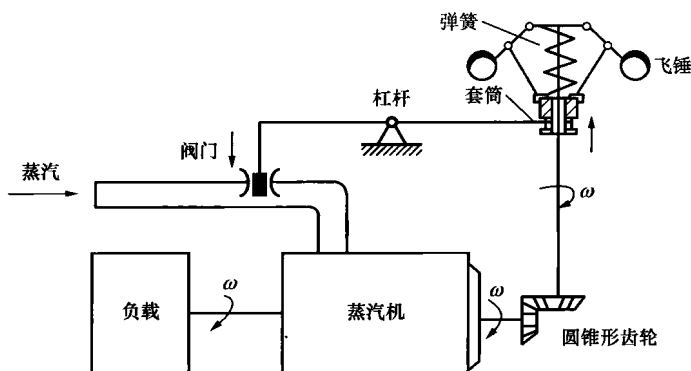


图 1-6 蒸汽机转速自动控制系统

1.6 图 1-7 是仓库大门自动开关控制系统原理示意图。试说明系统自动控制大门开、闭的工作原理，并画出系统职能方框图。

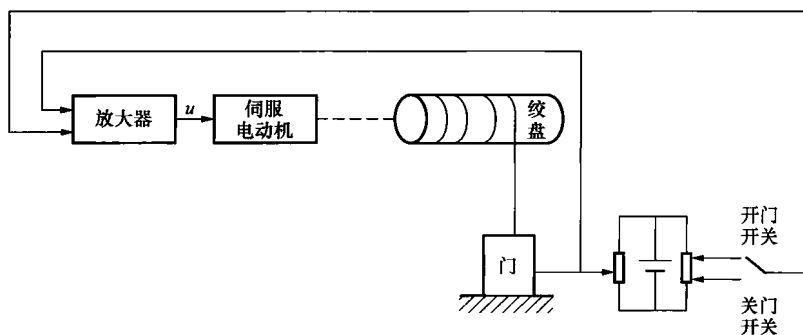


图 1-7 大门自动开关控制系统

1.7 图 1-8 为一自动调压系统。当负载电流 i_F 变化时，发电机的电枢绕组压降也随之改变，造成端电压不能保持恒定。为了补偿这个影响，把电阻 R_F 上的压降经放大后的电压 u_1 负反馈到输入端，与 u_f 比较使 i_f 随之变化，以补偿电枢压降，使端电压维持不变。试指出系

统的输入量、输出量、扰动量和控制对象，并画出系统职能方框图。

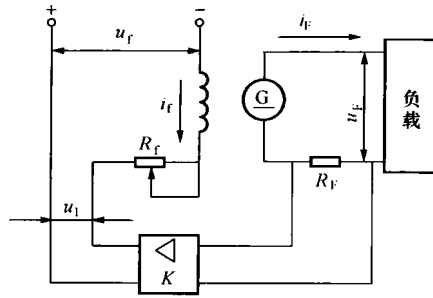


图 1-8 自动调压系统

第2章 控制系统的数学模型

对于一个控制系统,在输入作用下有什么样的运动规律,不仅要了解其稳态情况,更重要的是了解其动态过程。如果将物理系统在信号传递过程中的这一动态特性用数学表达式描述出来,就得到组成物理系统的数学模型。物理系统的数学模型是描述系统输入、输出变量以及内部各变量之间关系的数学表达式。控制系统的数学模型既是分析系统的基础,又是综合设计系统的依据。

控制系统数学模型的建立可采用解析法和实验法。解析法是根据系统和元件所遵循的物理、化学定律,列写出变量间的数学表达式来建立数学模型的。用解析法建立数学模型时,对其内部所体现的运动机理和物理规律要十分清楚,要抓住主要矛盾,忽略次要矛盾,力求所建立的数学模型合理化。实验法是根据实验数据来建立数学模型的,即人为地在系统上加上某种测试信号,用实验所得的输入和输出数据来辨识系统的结构、阶次和参数,这种方法也称为系统辨识。

数学模型有多种形式。时域中常用的数学模型有微分方程、差分方程和状态方程;复域中有传递函数、结构图;频域中有频率特性等。本章只研究微分方程、传递函数、系统的方框图、信号流图和状态方程等数学模型的建立及应用。

2.1 控制系统的微分方程

系统微分方程是描述控制系统动态性能的一种数学模型。用解析法推演系统的数学模型的前提是对系统的作用原理和系统中各元件的物理属性有着深入的了解。

2.1.1 线性系统微分方程的建立

控制系统是由各元件组成的,因此,首先要建立反映各元件输入量与输出量之间关系的微分方程。列写系统微分方程式的一般步骤如下。

(1) 根据系统或元件的工作原理,确定输入量和输出量。

(2) 根据基本的物理、化学等定律,列写出系统中每个元件的输入量与输出量的微分方程式,常用的定律:牛顿第二定律、能量守恒定律、基尔霍夫定律等。

(3) 在所有元件的方程中消去中间变量,从而求得描述系统输入量与输出量关系的微分方程式。

(4) 将微分方程标准化,即将与输入量有关的各项放在等号右侧,与输出量有关的各项放在等号左侧,并按降幂排列。

1. 机械系统

机械系统的分析中,通常使用三种理想化的要素:质量、弹簧和阻尼器。利用这三个要素可以方便地描述各种形式的机械系统。

机械系统指的是存在机械运动的装置,它们遵循物理学的力学定律。机械运动包括直线运动(相应的位移称为线位移)和转动(相应的位移称为角位移)两种。