

普通高等教育“十三五”规划教材



机械控制工程基础

王洁 刘慧芳 主编



普通高等教育“十三五”规划教材

机械控制工程基础

主 编 王 洁 刘慧芳
副主编 梁 全 高翼飞
参 编 孟新宇 王 剑 谢 群 钦兰云



机械工业出版社

本书系统阐述了经典控制理论的基本原理及其在机械工程自动控制系统中的应用。全书共 11 章，主要介绍了机械工程控制系统的基本概念、拉普拉斯变换、控制系统的数学模型，分析了线性时不变系统的时间响应、频率特性、稳定性、稳态误差及根轨迹，阐述了控制系统的设计校正方法和 MATLAB 分析方法，并以两个机械工程实例说明控制理论在机械工程中的实际应用。

本书重点突出、科学系统，在讲清楚基本概念的基础上，淡化数学推证，增强工程背景，突出方法论，编写体系符合教学规律，好教易学。

本书可作为高等院校机械类各专业的本科生教材，也可作为相关工程技术人员学习经典控制理论的参考书目。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械控制工程基础/王洁, 刘慧芳主编. —北京: 机械工业出版社, 2017. 9

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-57856-7

I. ①机… II. ①王… ②刘… 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 (2017) 第 210767 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 蔡开颖 责任编辑: 蔡开颖 李超 刘丽敏

责任校对: 樊钟英 封面设计: 张静 责任印制: 张博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14 印张·343 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-57856-7

定价: 35.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

前 言

控制概念的萌生和控制理论的应用始于机械工程，随着科学技术的进步与发展，控制理论在机械工业的应用越来越广泛、越来越深入。控制理论提供的辩证方法，使人们从整体上来认识和分析机械系统，并改进机械系统，以满足生产实际的需要。

控制理论中运用了大量的数学知识，使很多学生在学习过程中感到抽象和难以理解，影响了学习兴趣和学习效果；同时因为抽象，也很难将控制理论与工程实际联系起来。本书将从以下几个方面解决这些问题：

(1) 淡化数学推证 从直观的物理概念出发分析问题、解决问题，不苛求严格的数学推证，突出方法论。

(2) 突出系统性 系统阐述经典控制理论的主要内容，力求完整、系统，强调各知识点之间的内在联系和相互衔接。

(3) 强调实用性 在讲解每个知识点后，列举多个例题，力求全面，并附有思考题与习题，巩固所学知识，使学生在了解基本概念和基本知识的前提下，掌握基本方法。

(4) 突出工程背景 列举了两个机械工程实例，从系统建模、时域分析、频域分析到根轨迹、系统校正，使理论与实际紧密结合，增加教材的针对性和实用性。

(5) 增强先进性 专门用一章介绍控制系统的 MATLAB 分析方法，使学生能使用先进的方法和手段完成控制系统的分析与应用。

本书共 11 章，包括：绪论、拉普拉斯变换、控制系统的数学模型、控制系统的时间响应、控制系统的误差分析、控制系统的频域分析、控制系统的稳定性、控制系统的根轨迹分析、控制系统的综合与校正、控制系统的 MATLAB 分析、机械工程控制理论在工程实际中的应用。本书可按 32~56 学时编排教学内容。

本书由王洁和刘慧芳担任主编，梁全和高翼飞担任副主编。参加编写的人员还有：孟新宇、王剑、谢群和钦兰云。全书由王洁修改定稿。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者



目 录

前 言	
第 1 章 绪论	1
1.1 控制理论的发展与应用	1
1.2 控制系统的基本结构和工作原理	3
1.3 自动控制的基本方式	5
1.4 对控制系统的基本要求	9
思考题与习题	10
第 2 章 拉普拉斯变换	12
2.1 复数和复变函数	12
2.2 拉普拉斯变换简介	13
2.3 典型时间函数的拉普拉斯变换	16
2.4 拉普拉斯反变换	18
2.5 拉普拉斯变换在工程中的应用	21
思考题与习题	22
第 3 章 控制系统的数学模型	23
3.1 系统的微分方程	23
3.2 系统的传递函数	31
3.3 系统框图及其简化	40
3.4 系统信号流图及梅森公式	48
3.5 相似原理	52
思考题与习题	54
第 4 章 控制系统的时间响应	60
4.1 时间响应的组成及主要性能指标	60
4.2 一阶系统时域分析	63
4.3 二阶系统时域分析	67
4.4 二阶系统的性能指标	72
4.5 高阶系统时域分析	75
思考题与习题	77
第 5 章 控制系统的误差分析	80
5.1 稳态误差的基本概念	80
5.2 与输入有关的稳态偏差	82
思考题与习题	90
第 6 章 控制系统的频域分析	94
6.1 频率特性概述	94
6.2 频率特性的极坐标图	99
6.3 频率特性的对数坐标图	105
6.4 频域性能指标	113
6.5 最小相位系统	114
思考题与习题	116
第 7 章 控制系统的稳定性	118
7.1 系统稳定性的基本概念及稳定条件	118
7.2 代数稳定性判据	119
7.3 几何稳定性判据	126
7.4 系统的相对稳定性	135
思考题与习题	137
第 8 章 控制系统的根轨迹分析	140
8.1 根轨迹概述	140
8.2 根轨迹的绘制方法	142
8.3 利用根轨迹法进行系统性能分析	149
思考题与习题	149
第 9 章 控制系统的综合与校正	151
9.1 概述	151
9.2 控制系统的串联校正	152
9.3 PID 校正	169
9.4 并联校正	175
思考题与习题	181
第 10 章 控制系统的 MATLAB 分析	183
10.1 控制系统数学模型的 MATLAB 描述	183
10.2 时间响应 MATLAB 分析	188
10.3 频率特性 MATLAB 分析	194
10.4 稳定性 MATLAB 分析	196
10.5 根轨迹 MATLAB 分析	198
10.6 系统校正 MATLAB 分析	201
思考题与习题	203
第 11 章 机械工程控制理论在工程实际中的应用	205
11.1 数控机床直线运动工作台位置控制系统	205
11.2 阀控对称液压缸位置闭环控制系统	211
思考题与习题	219
参考文献	220

绪 论

▶ 1.1 控制理论的发展与应用

近几年，自然科学的高速发展一方面使得科学不断分化，分支科学越来越多，各种新的学科如雨后春笋般地相继出现；另一方面，各学科之间又不断地相互渗透，呈交叉及由分化走向统一的趋势。以系统论、信息论、控制论为代表的科学方法论，是 20 世纪以来至今最伟大的成果，是这个时代要求的结果。它是从自然科学研究中总结出来的一种科学方法，但它不限于自然科学，而是包括自然科学、社会科学和思维科学在内的共同的方法论，是认识世界和改造世界的统一的方法，对科学研究、领导决策和各项工作都具有很强的指导性。

1.1.1 机械工程控制基础的研究内容

机械工程控制基础是应用“控制论”的原理和方法，来研究在机械工程系统中应用的科学。关于“控制论”，人们并不陌生。根据维纳（N. Wiener，1893 年生，美国人，数学家，哲学家）的定义，人们关于“控制论”的较公认的说法是：“控制论”是以研究各种系统共同存在的控制规律为对象的一门科学。

“控制论”就是要揭示包括机器、生物、社会在内的各种不同的控制系统的共同规律，是研究各种系统共同控制规律的科学，是方法论。

控制论产生的基础：来源于人们的社会实践活动，有它产生的实践基础和理论基础。例如：人类很早以前就发明了利用水的势差和风的流动作为能源的各种装置，像“风磨漏斗”、利用齿轮传动自动指示方向的“指南车”以及近代瓦特为控制蒸汽机的速度而设计的“蒸汽机的调节器”，如图 1-1 和图 1-2 所示。19 世纪以来，随着电子技术的发展，出现了以电信号传递信息为主的控制过程，如冰箱、空调、无人驾驶飞机、数控机床、炼钢生产线等。

控制论中涉及的“系统”一词来源于人类长期的社会实践，存在于自然界、人类社会以及人类思维描述的各个领域，早已为人们所熟悉。究竟什么是系统呢？往往不同的人或同一个人不同的场合会对它赋予不同的含义。这里，采用钱学森给出的对系统的描述性定义：系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合的具有特定功能的有机整体。

定义指出了系统的三个基本特征：第一，系统是由若干元素组成的；第二，这些元素相互作用、相互依赖；第三，元素间的相互作用使系统作为一个整体共有特定的功能。

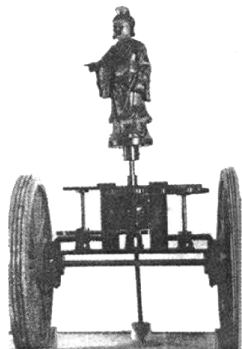


图 1-1 指南车复原模型

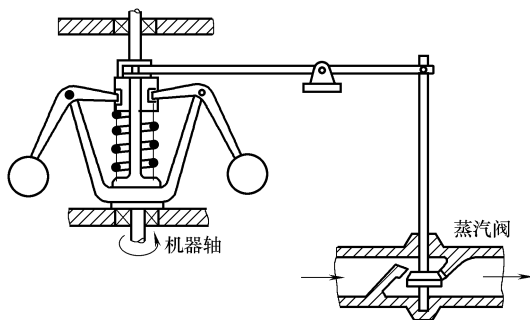


图 1-2 蒸汽机离心调速器

一个较大系统之内可能包括若干个较小的子系统。不仅系统的各部分之间存在非常紧密的联系，而且系统与外界之间也存在一定的联系。系统与外界之间的联系如图 1-3 所示，其中，输入为外界对系统的作用，它包括给定的输入和干扰；输出为系统对外界的作用。系统可大可小，可繁可简，甚至可“实”可“虚”，完全由研究的需要来确定。



图 1-3 系统及其与外界的联系

1.1.2 控制理论的历史与发展

维纳在 1948 年出版了《控制论——或关于在动物和机器中控制和通讯的科学》一书，对第二次世界大战以来的科学成果和发展进行总结奠定了控制论的基础，并快速渗透到许多科学领域，大大推动了近代科学技术的发展。他通过大量的研究发现，除了工程上的许多系统是利用自动控制的原理以外，还有许多生物、经济、社会等系统也都存在着控制的情况，本质上都是通过信息的传递、处理与反馈来进行控制。1954 年，钱学森运用控制论的思想和方法，首创了“工程控制论”，并把它推广到其他领域，继而出现了“生物控制论”“经济控制论”和“社会控制论”等。

随着科学技术的进步，特别是信息科学的进步，人们更多的信息传递对生产和生活产生了很大的影响，但是也不要忘记，社会的生产和生活资料还是主要靠制造业完成的，并且是各个系统的相互配合。

控制论按其发展的进程和研究方法，可分两个阶段：第一阶段是 20 世纪 40~50 年代，该时期为经典控制论发展时期。经典控制论以传递函数为基础，研究单输入、单输出一类控制系统的分析与设计问题。对线性定常系统，这种方法是成熟有效的。

第二阶段是 20 世纪 60~70 年代，该时期为现代控制论发展时期，现代控制论以状态空间法为基础，研究多输入、多输出一类控制系统的分析与设计问题。

第三阶段是 20 世纪末全今，控制论向着“大系统论”和“智能控制论”发展。“大系统论”是用控制和信息的观点研究大系统的结构方案、总体设计中的分析方法和协调问题；“智能控制论”，是研究与模拟人类活动的机理，以使控制系统具有仿人智能的工程控制和信息处理功能，实现具有高度复杂性、高度不确定性的系统，满足人们对其越来越高的要求。



智能控制技术是一个方兴未艾的领域，特别适用于在实际工程中存在一些无法用数学模型来描述的复杂系统控制问题，虽然还处于初级阶段，但近年来发展比较快，并在实际工作中得到了广泛应用，随着人类智能的不断发展，智能控制系统也将不断发展。

但也必须指出经典控制论是基础，现代控制论、智能控制论都是在此基础上发展起来的。时至今日，经典控制论在大多数实际工程中仍然是极为重要的，相当多的工程问题用它解决还是非常有效的，经典控制论仍不失为解决工程实际问题的基本方法。

▶ 1.2 控制系统的基本结构和工作原理

1.2.1 控制的概念与表达形式

(1) 控制 是指根据某种原理或方法使被控对象的被控量按照预期运动规律变化的操作过程。

(2) 信息 是指能表达一定含义的信号，包括消息、情报、密码和图像等。

(3) 输入 是指系统接收到的对其状态或被控量有影响或控制作用的信息。对控制系统而言，它又可分为控制输入、参考输入或给定量。控制输入是期望输出的函数（如恒温炉控制系统中的整定电压），当函数关系等于1时，控制输入就等于期望输出（如人工控制恒温炉系统向人脑输入的期望炉温值）。

(4) 输出 是指系统表现出来的受输入影响或控制的状态。输出也是一种信息，又常称为响应。对控制系统而言，输出就是被控量。输入和输出的概念也可用于子系统组成的组成部分。

(5) 干扰 是指对系统的输出产生不利影响的信息。由系统内部参数变化引起的干扰称为内扰。由系统外部环境、负载或能源变化产生的干扰称为外扰。外扰也可以认为是一种输入。若系统有几个输入，则根据讨论的需要，除了认定是输入的以外，其余的就都可以当作是干扰。

(6) 反馈 是指输出的全部或一部分，直接或经过转换后返回传递到输入端，再向系统输入的信息。反馈是输出的函数，并与输入的量纲相同，经常是为达到某种控制目的而特意设置的。反馈是与输入相比较而得到的，可以是局部反馈，也可以是全局反馈。

由于系统本身固有的内在相互作用而形成的反馈，往往不易被察觉，这类反馈称为内在反馈（固有反馈），如图1-4所示的动力滑台铣削过程。以名义进给量 Y 为输入，径向切削力 $f(t)$ 为输出。从其系统原理图上看，似乎不存在反馈，则在深入分析后便知，由 $f(t)$ 及其反作用引起的动力滑台-刀具-工件的弹性变形 $X(t)$ 就是一种固有反馈，因为影响 $f(t)$ 的实际切削厚度 A 在数值上等于 $Y-X(t)$ ，即影响输出 $f(t)$ 的不仅有输入 Y ，而且还有由输出 $f(t)$ 经过转换后反馈回来的 $X(t)$ 。这一点在画出切削系统原理框图后便可清楚地显示出来。由于切削过程中存在着这种固有反馈，所以在一定条件下将导致径向切削力持续周期变化，从而引起所谓的切削过程自激振动，使加工表面质量恶化。本例主要是为了说明固有反馈的概念，因此做了较大程度的简化，对切削过程固有反馈较完善的分析请参阅有关文献。

1.2.2 控制系统的基本组成及框图

由动力滑台铣削过程的例子可以看出，人们关心的是控制系统信号间的关系而不是控制



系统的物理构造或几何关系。为了简明地反映控制系统各部分之间的关系，通常采用“框图”形式。这里，控制器和被控对象分别用一个方框来代表，而与它们有关的信号按因果关系的不同分别用不同指向的有向信号线来代表。于是图 1-4 所示的自动控制系统便可表示为图 1-5 所示的框图形式。对一个方框而言，箭头指向它的信号称为它的输入信号，而箭头离开它的信号称为它的输出信号。因此，被控对象的输入信号是控制量信号和干扰信号，而其输出信号是被控制量信号；控制器的输入信号是被控制量信号，而其输出信号是控制量信号。若把整个自动控制系统看成一个方框（如点画线所示），则给定信号和干扰信号是它的输入信号，被控制信号为其输出信号。

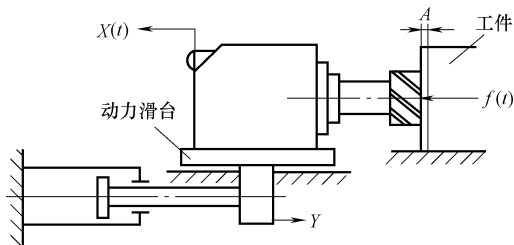


图 1-4 动力滑台铣削过程

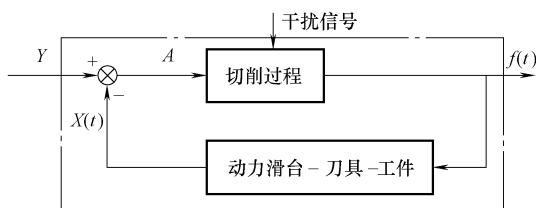


图 1-5 切削系统原理框图

为了组成一个自动控制系统，必须包含以下几个基本元件：

- (1) 给定元件 控制系统中主要用于产生给定信号（输入信号）的元件。
- (2) 比较元件 对被控制量与控制量进行比较，并产生偏差信号，如幅值比较、相位比较、位移比较等环节。比较元件在多数控制系统中是和测量元件或线路结合在一起的。
- (3) 放大元件 对比较微弱的偏差信号进行变换放大，使其具有足够的幅值和功率，如电流放大、功率放大、电气-液压放大等。
- (4) 执行元件 接收放大元件送来的控制信号并产生动作，去改变被控制量，使被控制量按照控制信号的变化规律而变化。
- (5) 校正元件 为了使系统正常工作，需要在系统中加进能消除或减弱上述振荡以及提高系统性能的一些元件，把这类元件称为校正元件。
- (6) 反馈元件（测量元件） 用于测量被控制量（输出量），并将被控制量转换成另外一种便于传送的物理量。反馈元件的反馈与输出量之间有确定的函数关系。

测量元件的精度直接影响控制系统的精度，因此，应尽可能采用精度高的测量元件和合理的测量线路。

- (7) 被控制量 表征被控对象运动规律或状态的物理量。实质上是系统的输出量。

实践证明，按反馈原理由上述基本元件简单组合起来的控制系统往往是不能完成既定任务的。这是因为在系统内部既有控制作用的因素，又有反控制作用的因素。例如：由于在系统中有干摩擦、死区及惯性等因素的存在，所以当控制信号作用到系统之后，在系统的输出端并不能马上得到反应，而只有当偏差信号大到一定程度时系统才有输出。又由于惯性的作用，系统在反应控制信号过程中还有可能产生振荡，甚至会使系统的正常工作遭到破坏。因此，校正元件可以加在由偏差信号至被控制信号间的前向通道内，也可以加在由被控制信号至反馈信号间的局部反馈通道内。前者称为串联校正，后者称为反馈校正。在有些情况下，为了更有效地提高系统的控制性能，可以同时应用串联校正和反馈校正。



一个典型闭环（反馈）控制系统的框图如图 1-6 所示。一般来说，尽管闭环控制系统的控制任务各不相同，使用元件的结构和动力形式也有不同，单就其信号的传递、变换的功能来说，都可以抽象成这个典型闭环控制系统的框图，它构成了控制系统的基本组成。

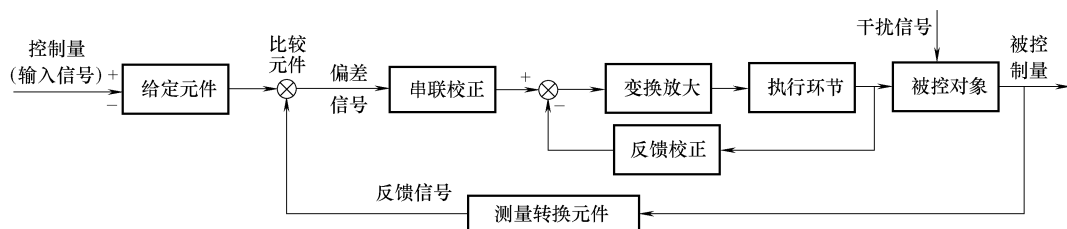


图 1-6 典型闭环（反馈）控制系统的框图

1.3 自动控制的基本方式

1.3.1 控制的常见形式

在生产过程中，为了维持正常的工作条件，常需要将设备中的某些参数以一定的精度维持在某一个数值，或使它们按一定的规律变化。下面介绍一个物理量的控制过程。

在生产过程中，常需要控制加热炉的炉温，如图 1-7 所示。由图中可以看出，炉子通过电加热器加热而达到所要求的温度，加热器由电源供电。电源经过一个控制开关控制流过加热器中的电阻。如果控制开关（给定元件）的位置确定了，那么与此相应通过加热器（执行元件）的电流也是确定的，炉子的温度（被控对象）也就确定了，控制开关的不同位置对应炉子的不同温度。如果希望炉子的温度为某一数值，只要将控制开关置于某一特定位置就可以了。

应该看到，用上述方法来对温度等物理量进行控制是很不理想的，因为在任何具体物理系统中，都存在着所谓“干扰”作用，它破坏了压力、转速、温度等物理量的实际值和希望值之间的对应关系，而且干扰的出现是无法预计的。例如：电源电压受电网影响、保温炉周围环境温度变化、保温炉冷热工件的进出等外界干扰，都会使得炉内温度调节出现变化，导致调节的实际值与希望值的对应关系遭到破坏，这些都称为干扰作用。

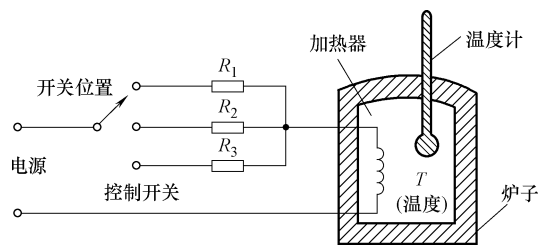


图 1-7 炉温控制

另外一个物理量的控制如图 1-8 所示。图 1-8a 所示是人工手动控制水位变化，系统由容器、入口管道、出口管道、控制阀门、水位显示计等部分组成。为了维持水位达到要求，要求工人根据水位显示计的变化调节控制阀门的开闭程度，进而调节容器内的水位高度。

被要求的水位高度是在工人头脑中的理想值，是系统的控制量，或者称为输入量；水位显示计是测量元件，其测量值称为反馈量（或称为反馈信号）。阀门的开闭程度是被控制量，对任意一个控制系统来说，被控制量是极为重要的物理量。依据工人用眼观察水位情

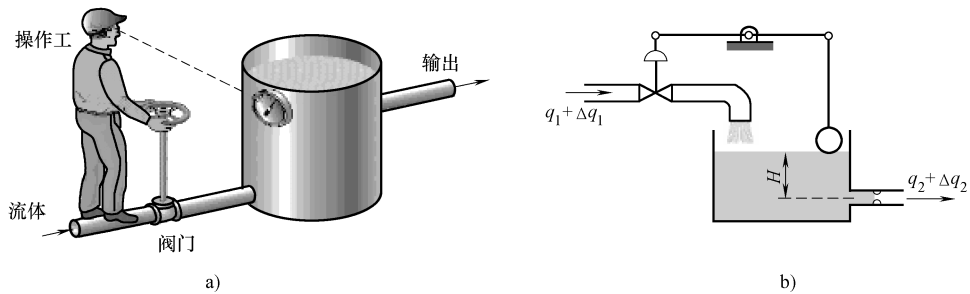


图 1-8 水位的两种控制方式
a) 人工手动控制 b) 自动控制

况，用脑比较水位（反馈量）与给定数值（输入量）之差，这个差值称为偏差量（或称为偏差信号）。通过手操作阀门的开闭方向和幅度（输出量），经过反复操作过程，实现水位给定值（输入量）的稳定，整个水位系统达到了一个平衡状态，可以维持水位的高低。

而所有妨碍控制量对被控制量按要求正常控制的因素被定义为系统的干扰量（或称为干扰信号，如进出口管道的压力、测量误差等）。假如入口管道的压力变大引起流量加大，水位上升快，系统输入量与反馈量的偏差加大，工人手工调节减小阀门开闭程度，入口管道的流量减小并逐步将系统参数恢复到原来的状态，从而完成一个新的平衡控制过程。

图 1-8b 所示是自动控制水位变化，随着容器出口液体流量的变化，液面高度变化会反映在浮球的高度 H 上，液面高度 H 是被控制量，由于液面高度是通过浮球装置检测的，所以浮球装置是测量装置。通过杠杆作用，调节入口管道控制阀门的开闭程度，进而调节入口管道流量跟随出口管道流量的变化，进而使液面高度 H 保持在一个设定值上。这个控制过程是将杠杆设备替代工人，实现自动控制。这两个控制例子的框图如图 1-9 和图 1-10 所示。

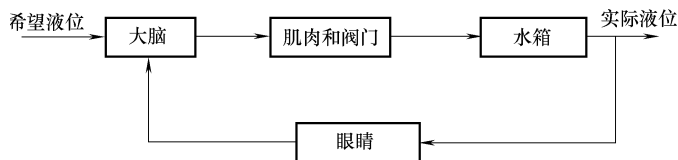


图 1-9 人工控制液位

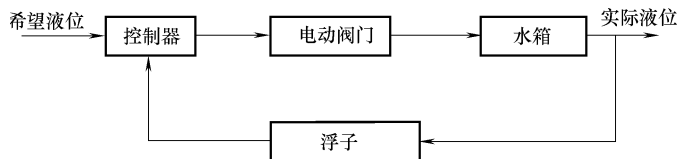


图 1-10 自动控制液位

在上面两个例子中，电炉加热是开环控制，容器水位控制是闭环控制。这两种控制形式在生产实践中经常遇到。

1.3.2 对系统的分类形式

1. 开环控制

若系统的被控制量对系统的控制作用没有影响，输入与输出之间没有反馈回路，则此系



统称为开环控制系统。如图 1-11 所示。系统信息传递没有形成闭合回路，被控量不对控制作用产生影响，所以结构相对简单、维护容易、成本低、不存在稳定性问题。原则上，被控量的控制精度取决于系统各环节的精度，多用于系统结构参数稳定和扰动信号较弱的场合，如自动售货机、自动报警器、自动流水线等。系统的精度取决于控制器及被控对象的参数稳定性，并且没有抗干扰能力。因此，开环系统对元器件要求较高、抗干扰能力差，无法自动补偿系统干扰对被控量带来的影响，如图 1-12 所示的电动机拖动系统，图 1-13 所示为其框图。

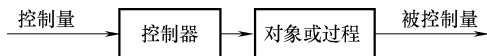


图 1-11 开环控制系统

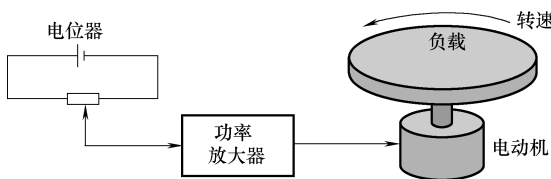


图 1-12 电动机拖动系统



图 1-13 电动机拖动系统结构框图

2. 闭环系统

凡是系统的被控制信号对控制作用有直接影响的系统都称为闭环控制系统。输入量与输出量之间有反馈回路，如图 1-14 所示。

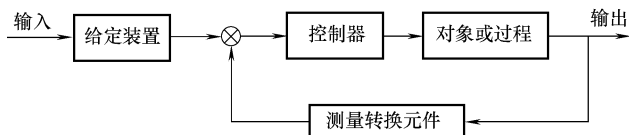


图 1-14 闭环控制系统

一个闭环控制系统的工作过程大体上可分为以下几个步骤：

- 1) 测量被控制量的实际值。
- 2) 将实际值与给定值进行比较，求出偏差的大小与方向。
- 3) 根据偏差的大小与方向进行控制以纠正偏差。

简单地讲，闭环控制系统的工作过程就是一个“检测偏差并用以纠正偏差”的过程。因此，闭环控制系统的控制精度一般比开环控制系统的要高，如图 1-15 所示的带速度反馈的电动机拖动系统，图 1-16 为其框图。

按反馈的作用不同，还可以将反馈分为正反馈和负反馈。其中，凡能使系统的偏差的绝对值增大的反馈，就称为正反馈；而能使系统的偏差的绝对值减小的反馈，则称为负反馈。

在闭环控制系统中，需要对被控制信号不断地进行测量、变换并反馈到系统的控制端与控制信号进行比较，产生偏差信号，实现按偏差控制。由于采用了闭环控制系统，使得系统的被控制信号对外界干扰和内部参数变化不敏感，即闭环控制系统抗干扰能力强，

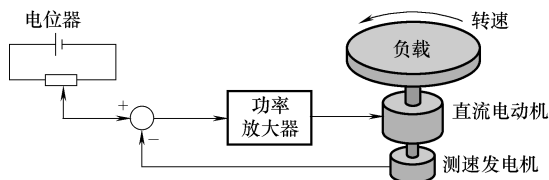


图 1-15 带速度反馈的电动机拖动系统

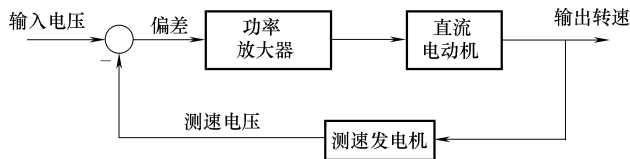


图 1-16 有反馈的电动机拖动系统框图

而开环控制系统则做不到这一点。

从系统的稳定性来考虑，开环控制系统容易解决，而闭环控制系统的稳定性始终是一个重要问题，外界干扰或闭环控制系统的超调会造成系统振荡甚至不稳定。闭环系统也存在着响应滞后的现象，对干扰作用经过一段时间之后才能逐渐反映出来，且结构复杂、维护不易。

3. 复合控制

闭环控制和开环控制相结合的一种控制方式是复合控制。它是在闭环控制的基础上增加一个干扰信号的补偿控制，以提高控制系统的抗干扰能力。复合控制系统框图如图 1-17 所示。

增加干扰信号的补偿控制作用，可以在干扰对被控制量产生不利影响的同时，及时提供控制作用以抵消此不利影响。纯闭环控制则要等待该不利影响反映到被控制信号之后才引起控制作用，对干扰的反应较慢；但如果没有反馈信号回路，只按干扰进行

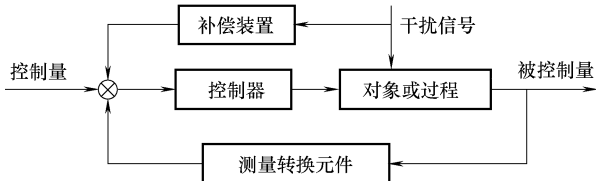


图 1-17 复合控制系统框图

补偿控制时，从干扰信号来看，则只有顺馈控制作用，控制方式相当于开环控制，被控制量又不能得到精确控制。两者的结合既能得到高控制精度，又能提高抗干扰能力，因此获得广泛的应用。当然，采用这种复合控制的前提是干扰信号可以测量到。例如：上述容器水位控制系统的干扰信号即进出管道的流量信号，便是可测量到的。

物料加热控制系统就是一个典型的复合控制系统，如图 1-18 所示。进入加热炉的物料流体在燃烧的燃油加热下，温度得到提升，温度控制器通过阀门调节燃油流量供应，稳定地控制加热炉温。然而，由于物料流动在受到管道压力和流量波动的影响，通过加热炉后所带走的热量也在变化，导致加热炉温不能够保持稳定。为了提前了解进入加热炉的流量数据，实现稳定控制炉温，必须考虑到流体的干扰波动。

这里受控对象是加热炉，被控量是温度，干扰是燃油压力的波动及流体流量的改变；控制部件是燃油管道阀门，测量元件是温度传感器和流量检测器。图 1-19 所示为物料加热控制系统框图。

自动控制系统的种类很多，它们的性能和控制任务也各不相同。工程上，为了研究控制系统的共性规律，一般自动控制系统按照输出的变化规律可以分为以下三种：

(1) 恒值控制系统 在外界作用下，系统的

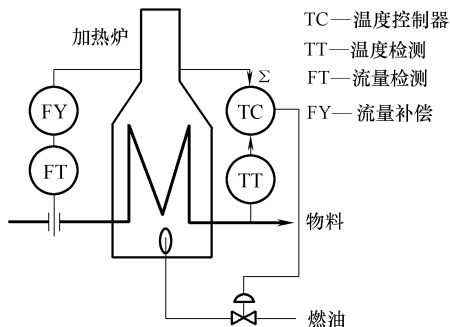


图 1-18 物料加热控制系统

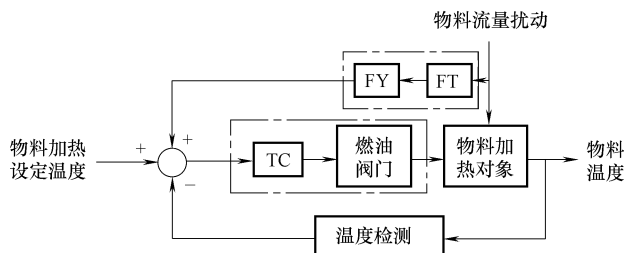


图 1-19 物料加热控制系统框图

输出仍能基本保持为常量的系统，也称为镇定系统或自动调节系统。

(2) 随动控制系统 在外界的作用下，系统的输出能跟踪输入在广阔范围内按事先不知道的时间函数变化的系统，也称同步随动系统。

(3) 程序控制系统 在外界的作用下，系统的输出按预定程序变化的系统。

另外，广义系统还可根据是否满足叠加性而分为线性系统和非线性系统；根据系统中信号或变量是否全是连续量而分为连续系统和离散系统（或模拟系统和数字系统）；根据系统中信号或变量是否全是确定值而分为确定性系统和随机系统；根据系统的功能可分为温度控制系统、速度控制系统等。

还有其他一些分类方法，这里就不一一列举了。

1.4 对控制系统的基本要求

对各类自动控制系统性能的基本要求是：系统的被控信号应该迅速准确地按输入信号的变化而相应变化，且尽量减少任何干扰信号的不利影响。为了满足这个基本要求，机械控制系统形式很多，但对它们的要求可以归纳为稳、准、快三个方面。

稳定性：因闭环控制存在反馈，系统又存在惯性，当系统参数匹配不当时，则会引起振荡而导致系统发散或不能恢复到平衡状态，丧失工作能力。故保持系统稳定，是系统工作的首要条件。

准确性：调节过程结束后输出量与给定量之间的偏差，也称静态精度。例如：数控机床的控制精度越高，则其加工的零件精度也越高。

快速性：在系统稳定的条件下，当系统的输出量和输入量之间产生偏差时，消除这种偏差过程的快速程度，既包括输出所经历的过渡过程时间长短，也包括输出在过渡过程初始阶段的反应速度。

由上述可知，在系统应满足的基本要求中，稳定性是系统正常工作的前提条件，是反馈系统最基本的要求；过渡过程的平稳性（相对稳定性）和响应的快速性反映了系统在过渡过程中的性能，可称为系统的动态品质、动态性能或瞬态响应性能；稳态精度（准确性）反映了系统在过渡过程结束时的性能，可称为系统的稳态品质或稳态性能。又因为稳定性、快速性以及准确性都可以说是用来表征系统的过渡过程即动态过程的，所以有时也可认为它们都是系统的动态性能。

不同的系统对稳、准、快这三个方面的要求各有侧重。例如：自动调节系统对稳态精度的要求很高，而随动系统对快速性要求高，特别是初始响应速度要快。同一个系统的稳、



快、准这三个方面的性能是相互制约的。提高了响应的快速性，可能会引起过渡过程产生强烈的振荡，改善了过渡过程的平稳性，又可能会使系统的反应迟钝，甚至稳态精度也变差。

各种自动控制系统为了完成特定的任务，必须具备一定的性能。当然，一个性能优良的机械工程自动控制系统绝不是机械和电子设备的简单组合，必定是对整个系统进行仔细分析和精心设计的结果。自动控制理论为机械工程自动控制系统分析和设计提供理论依据和方法。这将是本书所要讨论的重点。



思考题与习题

- 1-1 机械工程控制基础的研究对象和任务是什么？
- 1-2 试举几个开环与闭环自动控制系统的例子，画出它们的框图，并说明它们的工作原理，讨论其特点。
- 1-3 控制系统的基本要求是什么？
- 1-4 闭环自动控制系统是由哪几个环节组成的？各个环节在系统中起什么作用？
- 1-5 图 1-20 所示为恒温箱的温度控制系统，试分析这个系统的自动调温过程并说明这个系统的输出量、输入量、控制量和扰动量各是什么。

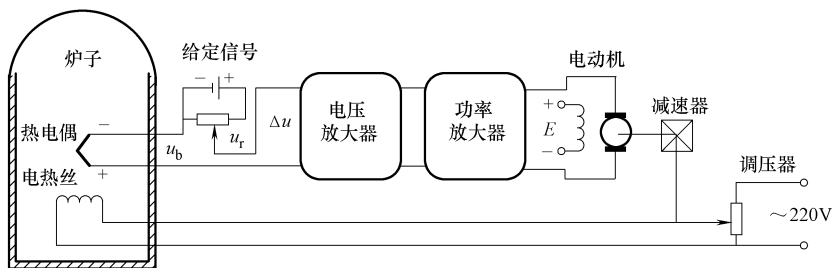


图 1-20 题 1-5 图

- 1-6 图 1-21 所示为液面控制系统，试分析该系统的工作原理，并在系统中找出控制量、扰动量、被控量、控制器和被控对象。
- 1-7 电加热器如图 1-22 所示，为了保证温度的恒定，由温控开关接通或断开电加热器

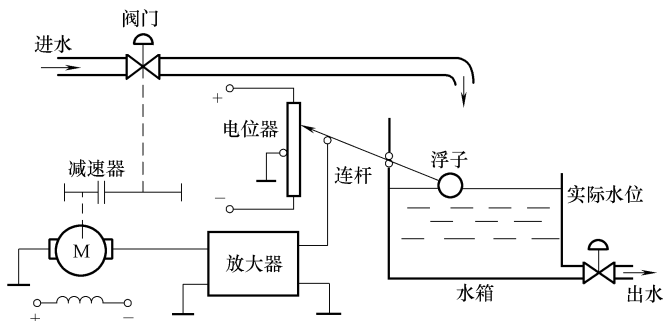


图 1-21 题 1-6 图



的电源。在使用热水时，水箱中流出热水并补充冷水。试说明该系统的工作原理并画出系统的框图。

1-8 分析图 1-23 所示大门自动开启装置的工作原理并绘制系统功能框图。

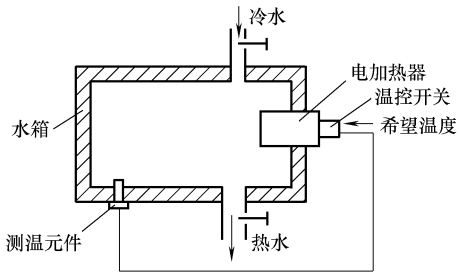


图 1-22 题 1-7 图

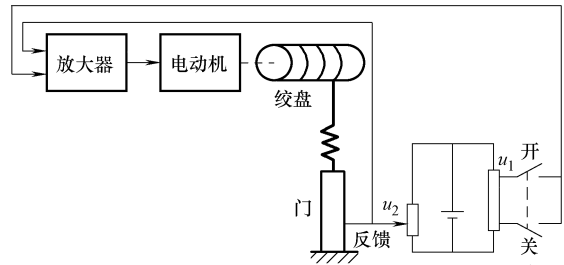


图 1-23 题 1-8 图

1-9 图 1-24 所示为瓦特式速度调节器，试标注出运转关键参数，说明其工作原理并画出框图。假设负载没有变化。

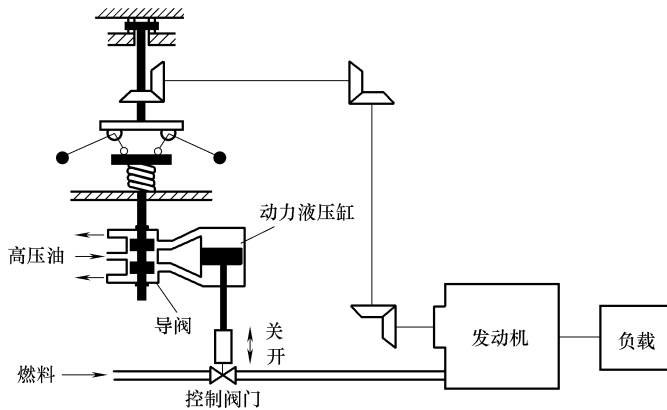


图 1-24 题 1-9 图

拉普拉斯变换

拉普拉斯变换是一种基本的工程数学变换,是将自动控制系统从时域分析引入频域分析的数学基石,也是求解线性系统微分方程的有效手段。本章在简要复习复数和复变函数的基础上,主要介绍拉普拉斯变换的概念、典型时间函数的拉普拉斯变换、拉普拉斯变换的性质、拉普拉斯反变换的方法及拉普拉斯变换在控制工程中的应用。

▶▶ 2.1 复数和复变函数

1. 复数

复数 s 由实部 σ 和虚部 ω 构成,即 $s = \sigma + \omega j$, 其中 $j = \sqrt{-1}$ 。两个复数相等,必须实部和虚部同时分别相等。若两个复数的实部相等,虚部符号相反且绝对值相等,则这两个复数称为共轭复数。例如: $s_1 = \sigma + \omega j$ 与 $s_2 = \sigma - \omega j$ 即为共轭复数。

复数可以用以下四种方法表示:

- (1) 点表示法 一个复数 $s = \sigma + \omega j$ 对应复平面上的点 (σ, ω) 。
- (2) 向量表示法 向量的长度 $l = |s| = \sqrt{\sigma^2 + \omega^2}$, 俯角 $\theta = \arctan \frac{\omega}{\sigma}$ 。
- (3) 三角表示法 $s = l \cos \theta + j l \sin \theta$, 其中 l 为向量 s 的长度,而 θ 为向量 s 的俯角。
- (4) 指数表示法 $s = l e^{j\theta}$, 这是根据三角表示法和欧拉公式 $e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$ 得到的。

例 2-1 将复数 $s = 1 + 2j$ 和 $s = -1 + 3j$ 用指数表示法表示出来。

解 复数 $s = 1 + 2j$ 用指数表示法表示为: $s = \sqrt{5} e^{j \arctan 2}$

复数 $s = -1 + 3j$ 用指数表示法表示为: $s = \sqrt{10} e^{j(\pi - \arctan 3)}$

2. 复变函数

以复数 $s = \sigma + \omega j$ 为自变量,按照某一确定法则构成的函数 $G(s)$ 称为复变函数,如 $G(s) = s^2 + 1$ 。

例 2-2 复变函数 $G(s) = s^2 + 1$, 当 $s = \sigma + \omega j$ 时,求 $G(s)$ 的实部和虚部。

解 $G(s) = s^2 + 1 = (\sigma + \omega j)^2 + 1 = (\sigma^2 - \omega^2 + 1) + 2\sigma\omega j$, 则 $G(s)$ 的实部 $\operatorname{Re}[G(s)] = \sigma^2 - \omega^2 + 1$, $G(s)$ 的虚部 $\operatorname{Im}[G(s)] = 2\sigma\omega$ 。