

高职高专机电类专业规划教材

机械控制工程基础

安林超 司尧华 程雪利 主编

JIXIE KONGZHI
GONGCHENG JICHU



化学工业出版社

高职高专机电类专业规划教材

机械控制工程基础

安林超 司尧华 程雪利 主编
马霄 副主编

JIXIE KONGZHI
GONGCHENG JICHU



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍机械工程领域中自动控制的基本理论及其应用方法。

全书共 6 章, 主要内容包括绪论、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析、控制系统的频域分析、控制系统的稳定性分析、控制系统的综合与校正。本着基本够用的原则, 重点是强调基本概念的分析掌握以及控制理论在工程实践中的应用。

本书适用于应用性高等院校机械工程专业, 也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械控制工程基础/安林超, 司尧华, 程雪利主编. —北京:
化学工业出版社, 2011. 7

高职高专机电类专业规划教材

ISBN 978-7-122-11243-9

I. 机… II. ①安…②司…③程… III. 机械工程-控制系
统-高等教育-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 085048 号

责任编辑: 高 钰

文字编辑: 闫 敏

责任校对: 战河红

装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 283 千字 2011 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书是为适应我国高等职业技术教育的发展形势，根据教育部制定的《高等职业教育机械类人才培养目标及规格》要求编写的。

本课程为技术基础课，教学总时数为 48 学时，其中 6 个实验学时。教材经内容的取舍，适用范围为 40~54 学时的课程。本书主要适于应用性高等院校机械工程专业学生使用。本书在编写过程中，本着内容全面、重点突出、实用性强及基本理论“适度”、“够用”的原则，在阐明原理的基础上，更加注重理论在工程实践中的应用。

本课程应达到的教学目的及要求是：学习运用经典控制理论的基本原理及方法，对机械工程中自动控制问题进行初步的分析与研究；结合后续课程的学习，能对机械工程中的控制系统进行改良以及初步设计。

全书内容概括：第 1 章主要介绍控制系统的基本概念；第 2 章介绍控制系统的数学模型，重点是传递函数的概念和推导方法；第 3 章介绍控制系统时间响应及稳态误差分析；第 4 章介绍控制系统的频率特性分析，讨论了控制系统的 Nyquist 图和 Bode 图；第 5 章讨论了控制系统的稳定性，主要包括 Bode 判据、Nyquist 判据及相对稳定性问题；第 6 章介绍了控制系统的综合与校正，重点讨论了 PID 调节器的原理和设计方法。

本书由安林超、司尧华、程雪利任主编，马霄任副主编，参加编写的还有陈芳、杨用增。安林超编写第 1 章；司尧华编写第 5 章；程雪利编写第 6 章；马霄编写第 3 章和附录 A、B；陈芳编写第 4 章；杨用增编写第 2 章。全书由安林超统稿。

本书由太原理工大学廉自生教授担任主审，廉教授在百忙之中为本书审稿，并提出许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。本书在编写过程中得到了许多兄弟院校同行专家的支持和帮助，在此对兄弟院校的同行专家表示感谢。

限于编者水平有限，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

编者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 控制工程概述	1
1.1.1 控制系统的基本概念	1
1.1.2 控制理论的发展简史	2
1.2 控制系统的工作原理及组成	3
1.2.1 机械控制系统实例	3
1.2.2 控制系统组成	5
1.3 控制系统的分类	6
1.3.1 按反馈情况分类	6
1.3.2 按输入信号变化规律分类	7
1.3.3 按系统的数学描述分类	7
1.3.4 按系统内部的信号特征分类	8
1.4 控制系统的基本要求	8
1.5 本课程的性质、任务及学习方法	10
1.5.1 课程性质	10
1.5.2 课程任务	10
1.5.3 学习方法	11
本章小结	11
习题	11
第 2 章 控制系统的数学模型	13
2.1 控制系统的微分方程	13
2.1.1 概述	13
2.1.2 控制系统微分方程的建立	15
2.1.3 非线性系统的线性化	17
2.2 传递函数	20
2.2.1 传递函数的定义	20
2.2.2 传递函数的特点	20
2.2.3 传递函数的求法	21
2.2.4 典型环节的传递函数	22
2.2.5 控制系统的传递函数	29
2.3 系统传递函数的方框图及其简化	30
2.3.1 方框图的基本概念	30
2.3.2 绘制方框图的步骤及方框图的特点	31
2.3.3 方框图的连接方式	33
2.3.4 方框图的简化	34
2.4 控制系统信号流图和梅逊公式	37

2.4.1 信号流图	37
2.4.2 梅逊公式	39
2.5 典型物理系统的微分方程和传递函数	41
2.5.1 机械系统	41
2.5.2 电气系统	44
2.5.3 液压系统	46
本章小结	47
习题	48
第3章 控制系统的时域分析	51
3.1 时间响应以及典型输入信号	51
3.1.1 基本概念	51
3.1.2 时间响应的组成	52
3.1.3 典型输入信号	52
3.2 一阶系统的时域分析	54
3.2.1 一阶系统的数学模型	54
3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应	55
3.2.3 一阶系统的单位斜坡响应	56
3.2.4 一阶系统的单位脉冲响应	57
3.2.5 响应之间的关系	57
3.3 二阶系统的时域分析	57
3.3.1 二阶系统的数学模型	58
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	59
3.3.3 二阶系统的单位脉冲响应	62
3.4 瞬态响应的性能指标及计算示例	63
3.4.1 瞬态响应的性能指标	63
3.4.2 二阶系统计算示例	65
3.5 控制系统稳态误差分析	69
3.5.1 基本概念	69
3.5.2 稳态误差的计算	71
3.5.3 输入信号作用下的稳态误差与系统的关系	72
3.5.4 干扰引起的稳态误差和系统的总误差	74
3.5.5 提高系统稳态精度的措施	76
本章小结	76
习题	77
第4章 控制系统的频域分析	80
4.1 频率特性的基本概述	80
4.1.1 频率响应	80
4.1.2 频率特性	81
4.1.3 频率特性的求取方法	83
4.1.4 频率特性的物理意义和数学本质	83
4.2 频率特性的极坐标图	84
4.2.1 引言	84
4.2.2 典型环节的极坐标图	85

4.2.3 开环系统的极坐标图的绘制	90
4.3 频率特性的对数坐标图	94
4.3.1 引言	94
4.3.2 典型环节的对数坐标图	96
4.3.3 绘制 Bode 图的一般步骤	101
4.3.4 由对数坐标图确定系统的传递函数	102
4.4 频域性能指标与时域性能指标之间的关系	106
4.4.1 闭环频率特性及其性能指标	106
4.4.2 二阶系统时域响应与频域响应的关系	107
4.4.3 一般系统时域响应与频域响应之间的关系	108
4.5 最小相位系统	110
4.5.1 最小相位系统的定义	110
4.5.2 最小相位系统的特点	110
4.6 频率实验法估计系统的数学模型	111
4.6.1 频率实验法一般步骤	111
4.6.2 频率实验法应用举例	112
本章小结	113
习题	114
第 5 章 控制系统的稳定性分析	116
5.1 控制系统稳定的条件	116
5.1.1 稳定性的基本概念	116
5.1.2 系统稳定的条件	116
5.2 代数稳定判据	117
5.2.1 胡尔维茨 (Hurwitz) 稳定判据	118
5.2.2 劳斯 (Routh) 判据	119
5.3 频域稳定判据	123
5.3.1 奈奎斯特 (Nyquist) 稳定判据	123
5.3.2 对数稳定判据	126
5.4 系统的相对稳定性	129
5.4.1 相位裕量	129
5.4.2 幅值裕量	130
5.5 根轨迹简介	131
5.5.1 根轨迹	132
5.5.2 根轨迹作图法则	132
5.5.3 计算机直接求根作根轨迹	134
本章小结	135
习题	135
第 6 章 控制系统的综合与校正	138
6.1 系统校正的基本概念	138
6.1.1 系统的性能指标	138
6.1.2 校正的概念	139
6.1.3 校正的分类	140
6.2 校正方法和校正装置的设计	141

6.2.1 超前校正	142
6.2.2 滞后校正	147
6.2.3 滞后-超前校正	150
6.2.4 PID 调节器	152
6.2.5 反馈校正	157
本章小结	159
习题	159
附录 A 拉普拉斯变换	162
A.1 基础知识	162
A.1.1 复数、复变量和复变函数	162
A.1.2 复数的表示方法	162
A.1.3 复变函数的概念	163
A.1.4 两个重要定理	163
A.1.5 映射定理	164
A.2 拉普拉斯变换的数学基础	165
A.2.1 拉普拉斯变换的概念	165
A.2.2 典型函数的拉普拉斯变换	166
A.3 拉普拉斯变换定理	169
A.3.1 实微分定理	169
A.3.2 终值定理	169
A.3.3 初值定理	170
A.3.4 实积分定理	170
A.3.5 复微分定理	170
A.3.6 延时定理	171
A.3.7 位移定理	171
A.3.8 卷积定理	171
A.4 拉普拉斯反变换	172
A.4.1 概述	172
A.4.2 部分分式展开	173
A.4.3 含有多重极点的 $F(s)$ 的部分分式展开	174
附录 B 常用时间函数拉普拉斯变换	176
参考文献	177

第 1 章 绪 论

当前, 机械工程领域一个新的发展方向是综合运用控制理论、微电子学、计算机技术及机械工程等学科方面的理论与技术来提高生产效能及质量并推出新的产品。

“机械控制工程”是一门技术学科, 也是一门边缘学科。它是研究用控制理论的基本原理来解决机械工程中的实际技术问题的学科。随着工业生产及科学技术的不断发展, 这门学科越来越显示出它的重要性。

控制理论之所以在机械工业中受到重视, 不仅是因为自动化技术的快速发展, 而且控制理论与信息科学、系统科学也密切相关。尤其重要的是控制理论提供了辩证的方法, 不但从局部, 而且从整体上来分析与认识一个机械系统, 进而去改进一个机械系统, 以满足实际生产的需要。

1.1 控制工程概述

1.1.1 控制系统的基本概念

在学习控制理论之前, 定义一些概念或术语是非常必要的。

(1) 系统 在工程中, 系统通常定义为用以完成一定任务的一些部件的组合。实际上系统的概念相当广泛, 不仅仅限于物理系统, 还可用于抽象的动态现象, 因此, “系统”一词应当理解为包含了物理学、生物学、经济学等方面的系统。

(2) 被控变量和操作变量 被控变量是一种被测量和被控制的量值或状态。操作变量是一种由控制器改变的量值或状态, 进而影响被控变量的值。被控变量通常是系统的输出量。控制意味着对系统的被控变量值进行测量, 并且使操作变量作用于系统, 以修正或限制测量值(实际输出值)与期望值的偏离。

(3) 反馈控制 反馈控制是这样的一种控制: 对系统的被控变量进行适时检测并不断地直接或经过中间变换传递后(全部或部分)返回到系统中(通常是输入端), 力图减小系统输出量与某种参考输入量之间的偏差。如果反馈量与输入量极性相反, 则称“负反馈”, 如果极性相同, 则称“正反馈”。不加说明的反馈通常指负反馈。控制系统通常指负反馈控制系统。

(4) 对象 它可能是一台设备(多数由一些机器零件有机地组合在一起), 其作用是完成一种特定的操作。本书中称任何被控物体(如一种机械装置、一个加热炉或一辆汽车)为一个对象。

(5) 扰动 对系统输出量产生不利影响的信号称为扰动, 如果扰动产生在系统的内部称为内部扰动; 反之, 如果扰动产生在系统的外部则称为外部扰动。

(6) 过程 过程为人为的或自然发生的连续进行的运动状态, 这种运动状态由一系列受控制的动作和一直进行到某一特定结果或目标的有规则的运动构成, 或简单来说, 任何被控

制的运动状态就称为过程。

(7) 方框图 控制系统一般由多个元件或环节构成,在控制工程中,常用方框图表示元件或环节在系统中的功能。方框图是元件或环节的功能的信号(能量)流向的表示,以指向它的箭头表示输入信号,以离开它的箭头表示输出信号,将表示元件或环节功能的传递函数或文字写到方框内,构成方框图单元。控制系统的方框图由方框图单元构成。

1.1.2 控制理论的发展简史

18世纪,詹姆斯·瓦特(James Watt)为控制蒸汽机速度而设计的离心调节器是自动控制领域的第一项重大成果。1922年,迈纳斯基(Minorsky)研制出船舶操纵自动控制器,并证明了如何从描述系统的微分方程中确定系统的稳定性。1932年,奈奎斯特(Nyquist)提出了基于开环系统对正弦输入信号的稳态响应而确定闭环系统的稳定性方法。1934年,黑曾(Hezen)提出了用于位置控制系统的伺服机构的概念,讨论了可以精确跟踪变化的输入信号的继电式伺服机构。

自动控制理论是研究自动控制共同规律及应用的技术科学。它是在第二次世界大战期间为满足军事领域对高性能军事装备系统(如火炮定位系统、雷达跟踪系统)要求的环境中产生的,是在第二次世界大战后的生产自动化、计算机技术和相关科学技术发展的基础上进一步完善和发展的。1948年,控制理论创始人维纳(N. Wiener)发表《控制论——关于动物和机器中控制和通信的科学》奠定了控制理论的基础,这就是经典的控制理论。维纳发现机器和生命系统都有一个共同特点,即通过信息的传递、处理和反馈来进行控制,亦即控制理论所具有的信息、反馈与控制三要素,这就是控制理论的中心思想。另外,频率响应法和根轨迹法是古典控制理论的核心。根轨迹法是由伊凡斯(Evans)在20世纪40年代末到50年代初提出并完善的。1954年,我国科学家钱学森发表了《工程控制论》这一经典名著,为控制工程这门学科奠定了完整的理论基础。控制理论建立后,迅速渗透到多个学科领域,大大推进了近代科学技术的发展并派生出许多新的边缘学科。

以传递函数为基础的古典控制理论主要研究单输入单输出线性定常系统的分析和设计问题。用古典控制理论设计的系统是稳定的,并且或多或少满足一组适当的性能要求,在一般情况下是令人满意的,但不是某种最佳意义上的最佳系统。从20世纪50年代末,控制系统的设计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一种最佳系统。

但是由于具有多输入多输出的非线性时变系统的出现,需要大量的微分方程描述现代控制系统,古典控制理论就显得无能为力了。20世纪60年代初期,随着现代数学应用新成果的推出和数字计算机的出现,为复杂系统的时域分析提供了可能性,自动控制理论跨入了一个新阶段——利用状态变量、基于时域分析的现代控制理论。现代控制理论研究高性能、高精度、多变量、变参数的多输入、多输出系统的最优控制问题,从而适应了现代设备日益增加的复杂性需要,同时也满足了军事、空间技术和工业应用领域对精度、质量和成本方面的严格要求。

从1960年至1980年期间,无论是确定系统的最佳控制,还是随机系统的最佳控制,乃至复杂系统的自适应和学习控制,都得到了充分的研究,从1980年到现在,现代控制理论的进展集中于鲁棒控制及相关的课题。

20世纪末至今,控制理论向着“大系统理论”和“智能控制理论”方向发展,并扩展到非工程系统,诸如生物系统、经济系统和社会系统,进而产生了“生物控制论”、“经济控制论”和“社会控制论”,并且控制理论正在与模糊数学、分形几何学、混沌理论、人工智

能、神经网络、遗传算法等学科交叉、渗透和结合，并不断发展并派生出新的学科。

必须指出的是，古典控制理论是基础，现代控制理论和智能控制理论等都是在此基础上发展起来的。时至今日，用古典控制理论解决许多工程实际问题仍然是行之有效的，从而不失为解决工程实际问题的基本方法。

1.2 控制系统的工作原理及组成

1.2.1 机械控制系统实例

(1) 温度控制系统 图 1-1 是由人工控制的恒温箱，其控制过程如下：人工通过测量元件（温度计）观察出恒温箱的温度，与所希望的温度值进行比较，得到实际温度与希望温度偏差的大小与方向，据此来调节调压器，进行箱温的控制。例如，当箱温低于所希望值时，向右旋转调压器的触头，增加电阻丝的电流，使箱温上升到希望值。反之，当箱温高于所希望值时，向左旋转调压器的触头，以减少电阻丝的电流，使箱温下降回到希望值。这种控制称为人工定值控制。人在这种控制中的作用是观测、求偏差及纠正偏差，或简称为“求偏与纠偏”。将以上人工的作用由一个自动控制器来代替，于是一个人工调节系统就变成一个自动控制系统。

图 1-2 是恒温箱的自动控制系统。在这个系统中，图 1-1 中的温度计由热电偶代替，并增加了电气、电机及减速器等装置。在这个系统中，热电偶测量出的电压信号 V_2 是与箱内温度成比例的，因此，选取电压 V_1 代表箱温的给定信号，并使 V_2 能够反馈回去与 V_1 进行比较，当外界干扰引起箱内温度变化时，则产生了温度的偏差信号 $\Delta V = V_1 - V_2$ ，经电压及功率放大后，控制电机的旋转速度及方向，又经传动机构及减速器使调压器的触头移动，使加热电阻丝的电流增加或减小，直至箱内温度达到给定值为止。这时偏差信号 $\Delta V = 0$ ，电机停止转动，完成控制任务。就这样，箱内温度经自动调节，经常保持在给定值上，这个给定温度通过设定 V_1 来得到。

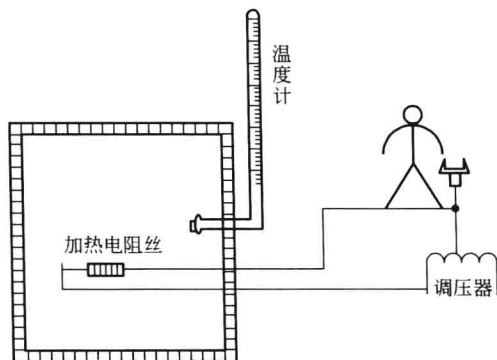


图 1-1 人工控制的恒温箱

将以上人工控制系统与自动控制系统对比，可以看出：

- ① 测量 前者靠操纵者的眼睛，而后者由热电偶输出 V_2 来测量。
- ② 比较 前者靠操纵者的头脑，而后者靠比较电路。
- ③ 执行 前者靠操纵者的手，而后者由电机等完成执行作用。

为了便于对一个自动控制系统进行分析以及了解其各个组成部分的作用，经常把一个自动控制系统画成方框图的形式。

恒温箱系统的方框图如图 1-2 所示。图中方框表示系统的各个组成部分；带直线箭头代表信号作用的方向；在其上的标注表示对方框的输入及输出物理量； $\otimes$ 代表比较元件。热电偶是置于反馈通道中的测量元件。从系统的方框图可以明显地看出系统是有反馈的。反馈就是指将输出量（或通过测量元件及其他）返回输入端，并与输入量进行比较，比较的结果

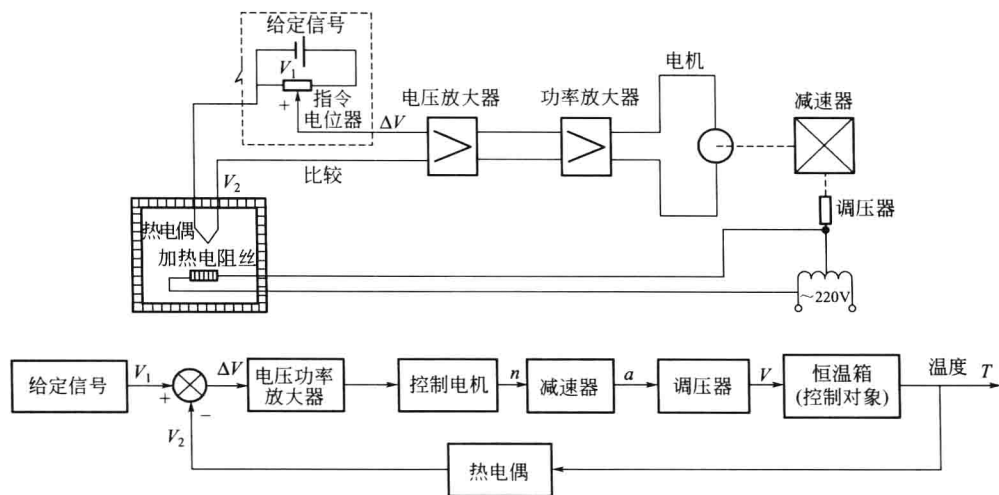


图 1-2 恒温箱的自动控制系统及其方框图

称为偏差。

(2) 液位控制系统 液位控制系统如图 1-3 所示，系统工作原理分析如下：系统的工作任务是使水箱中的水位高度保持在设定值，因此取水位实际高度 h 为被控量（输出），以水位给定高度 h_r 为输入。可以通过调节阀的开度大小控制进水量的大小，以补充因出水而引起水位高度的下降。调节阀的开度大小是由杠杆机构控制的。当出水量大于进水量时，水位实际高度变低，浮球可将水位实际高度检测出来，经与给定水位高度比较后得到正偏差，该偏差即驱动杠杆机构增大调节阀的开度，使进水量增加，水位实际高度上升。反之，当出水量小于进水量时，水位实际高度变高，浮球检测的水位实际高度与给定水位高度比较后得到负偏差，驱动杠杆机构减小调节阀的开度，使进水量减少，水位实际高度下降。当出水量等于进水量时，浮球检测的水位实际高度与给定水位高度比较后偏差为零，驱动杠杆机构保持调节阀的开度不变，水位实际高度也不变。

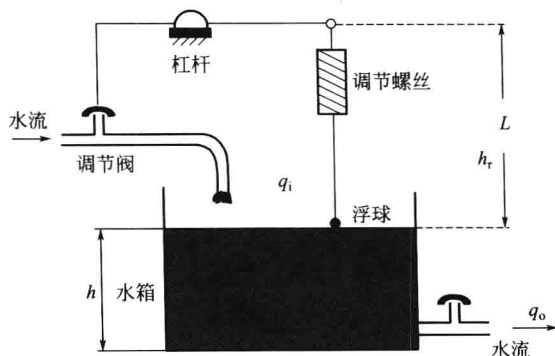


图 1-3 液位控制系统

液位控制系统的方框图如图 1-4 所示。

分析本例时有两点需要注意：一是系统的输入输出量是由控制系统的任务决定的，由于本系统的被控量是水位高度，被检测的也是水位高度，因此将其确定为输出量，输入量也相应地确定为水位给定高度。从控制意义上讲，进水量和出水量并不是本系统的输入和输出

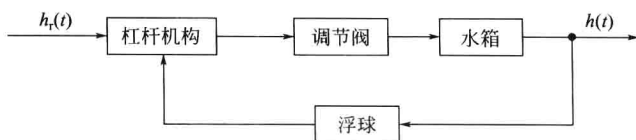


图 1-4 液位控制系统的方框图

量。实际上，出水量可视为是一种外扰作用，而进水量是本系统的一个中间变量。二是本系统的给定值、检测值都不是电量，控制装置也不是电装置或计算机，而是机械装置。它具有简单、方便、成本低、可靠性好等优点，可以用在控制性能要求不高的场合。

实际上，一个自动控制系统的物理实现形式可以是各种各样的。但在有较高控制性能和功能要求的现代机电装备控制系统中，通常控制装置是电装置，或包含计算机控制系统；检测装置是传感器及二次仪表电路，完成非电物理量的检测，并转换成电量；而传动与执行装置是机械、电动、液压、气动等形式的。

1.2.2 控制系统组成

在上述两种自动控制系统都具有反馈控制环节。利用反馈原理构成的自动控制系统称为反馈控制系统。特别强调，这里的反馈是指来自被控变量（输出信号）的反馈，系统内部固有的反馈作用在工程上一般不能称为反馈控制。

（1）开环控制和闭环控制 根据有无反馈控制环节，控制系统可分为开环控制系统、闭环控制系统和半闭环控制系统。

如果系统只是根据输入量对输出量进行控制，输出端和输入端不存在反馈回路，系统的输出量对系统的控制不产生任何影响，这样的系统称为开环控制系统。简单来说，开环控制系统就是没有反馈控制的系统。开环控制系统的输出量仅受输入量的控制，如果由于某种扰动使输出量偏离输出量的原始值，其没有自动纠偏能力，要进行补偿，必须借助人工改变输入量，所以开环控制系统的控制精度较低。如果组成系统的元件特性和参数值比较稳定，受外界干扰较小，这种控制系统可以保持一定的精度。其最大的优点是系统简单，一般都能可靠地工作，因此对精度要求不高时可以采用开环控制系统。

闭环控制系统是输出端和输入端存在反馈，输出量对控制过程产生直接影响的系统。在工程上闭环控制系统、反馈控制系统或负反馈控制系统是同一概念。闭环控制系统的突出优点是控制精度高，只要被控制变量的实际值偏离给定（期望）值，闭环控制就会产生控制作用来减小这一偏差。

闭环控制系统也有其缺点，由于该系统是靠检测偏差来纠正偏差的，并且实际工作过程中总会存在偏差，再加上控制元件或负载的惯性，若参数配量不当，容易引起振荡，使系统不稳定而无法正常工作。闭环控制系统中的控制精度和稳定性始终是一对矛盾，必须合理解决。而开环控制系统不存在不稳定问题，但其付出的代价是控制精度差。

如果控制系统的反馈信号不是直接从系统的输出端引出，而是间接取自中间的测量元件，则称为半闭环控制系统。其性能介于开环控制系统和闭环控制系统之间。目前大多数数控机床都采用这种半闭环控制的进给伺服控制系统。

（2）闭环控制系统的构成 一个比较完整的闭环控制系统的功能方框图如图 1-5 所示，它由给定元件、反馈元件、比较元件、放大元件、执行元件及校正元件等构成，作用如下。

① 给定元件 它的作用是给出与被控变量的期望值相对应的模拟量值或系统的输入量

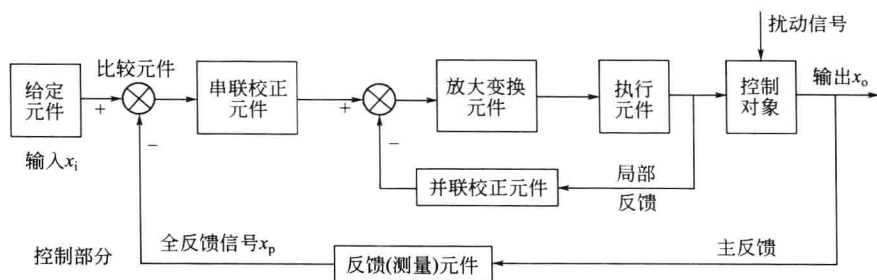


图 1-5 闭环系统的功能方框图

(信号)。

② 反馈元件 反馈元件又称为测量元件，其作用是检测系统的被控制量或输出量，产生主反馈信号。通常，系统的被控物理量（输出信号）为非电量信号，为便于传输和控制，反馈元件将被测的非电量信号转换成电量信号来作为主反馈信号。例如，测速发电机常作为控制系统的测量元件，它将被测的转速信号变换为电压信号。

必须指出，在机械、液压等系统中存在着内在反馈。这是一种缺少专用反馈元件的信息反馈，是系统内部各参数相互作用而产生的反馈信息流（如作用力与反作用力之间直接形成的反馈）。内在反馈回路由系统动力学特性确定，它构成的闭环系统是一个动力学系统，而不是通常意义上的反馈控制系统。例如，机床工作台低速运行等自激振荡现象都是由具有内在反馈的闭环系统产生的。

③ 比较元件 它的作用是接受输入信号和反馈信号并进行比较而产生偏差信号。常用的比较元件有机械差动装置、电桥电路、差动放大器等。

④ 放大元件 它的作用是将比较元件给出的偏差信号进行放大，以推动执行元件控制被控对象。常见的放大元件有电压放大器、功率放大器、电液伺服阀、电气比例伺服阀等。

⑤ 执行元件 它的作用是直接推动被控对象，使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有电动机、液压（气动）马达、液压（气）缸等。

⑥ 校正元件 校正元件又称为校正装置或补偿元件，使系统结构或参数便于调整而获得良好的静态特性而加入的元件，可分为串联校正元件和并联校正元件。前者是串联在系统的前向通路中的，后者是与反馈回路并联的。常见的校正元件多为电气元件。

尽管一个控制系统是由许多起着不同作用的元件构成的，但从总体来看，比较元件、放大元件、执行元件和反馈元件共同起着控制作用，而其余部分就是控制对象。因而一个控制系统也可以说成仅由控制部分（装置）和被控对象两部分组成。

1.3 控制系统的分类

1.3.1 按反馈情况分类

根据有无反馈作用，工业上用的控制系统可分为两类：开环控制和闭环控制。

(1) 开环控制系统 如果系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路，输出量对系统的控制作用没有影响，这样的系统称为开环控制系统。图 1-6 所示为数控机床的开环控制系统，由于没有反馈回路，所以是一个开环控制系统，系统的输出量仅受输入量的控制。

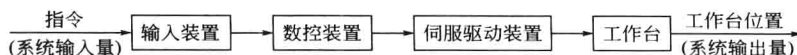


图 1-6 数控机床的开环控制系统

开环控制系统用一定输入量产生一定的输出量，如果由于某种干扰作用使系统输出量偏离原始值，它没有自动纠正的能力。要进行补偿，得再借助人工作改变输入量，所以开环系统的控制精度较低。如果组成系统的元件特性、参数比较稳定，外界干扰影响较小，则用开环控制可保证一定的精度。开环控制系统的优点是系统简单，对于要求不高的系统可采用这种控制方式。

(2) 闭环控制系统 如果系统的输出端和输入端之间存在着反馈回路，输出量对控制过程产生直接影响，这种系统称为闭环控制系统。图 1-2 所示的恒温箱自动控制就是闭环控制系统。在闭环控制系统中，闭环控制的作用就是利用反馈来纠正偏差的，所以反馈控制系统必是闭环控制系统。

1.3.2 按输入信号变化规律分类

按输入信号的运动规律来分类，可将控制系统分为以下三种类型。

(1) 恒值控制系统（又称自动调节系统） 这种系统的特点是给定量（参考输入量）是一个恒值，控制任务是尽量消除干扰的影响，使被控量以一定的准确度保持在期望值上。在生产过程中，控制温度、湿度、压力、流量、电压、电流、频率、速度等的自动控制系统多为恒值控制系统。

(2) 程序控制系统 程序控制系统的特点是给定量按预先设定的规律（或程序）变化（即输入量为随时间变化的已知函数）。机械制造业中的数控机床就是一个典型的程序控制系统。

(3) 随动系统（又称自动跟踪系统） 这类控制系统的输入量是预先未知的随时间任意变化的函数，系统的任务是使输出量以尽可能小的误差跟随输入量的变化。例如，雷达自动跟踪系统、火炮自动瞄准系统、电信号记录仪等都属于这类系统。

1.3.3 按系统的数学描述分类

按照系统元件的反应特性或描述系统动态特性的数学模型来分类，可将控制系统分为如下一些类型。

(1) 线性系统和非线性系统 如果组成系统的所有元件的输入-输出特性具有线性关系，则这种系统称为线性系统；反之，只要系统中有一个其输入-输出特性呈非线性关系的元件，则这样的系统称为非线性系统。线性系统的运动规律可用微分方程或差分方程来描述，而非线性系统的运动规律只能用非线性微分方程或非线性差分方程来描述。

在工程实际当中，严格来说，一切系统都是非线性系统。但另一方面，又有许多系统的非线性特性并不很强，把它们当做线性系统来处理，结果与实际差别不大，此时为便于研究，一般将其当做线性系统。

(2) 连续系统和离散系统 若系统中各元件的输入量和输出量均为时间 t 的连续函数，则称这类系统为连续系统。反之，只要系统中有一个信号是脉冲序列或数字编码，则这样的系统称为离散系统。离散系统的特点是，在特定的离散瞬时 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ ，信号是时间的函数，而在所有两相邻离散瞬时之间信号无意义。描述连续系统运动规律的数学模型是微分方程，而描述离散系统运动规律的数学模型是差分方程。

(3) 定常系统和时变系统 如果组成系统的所有元件的参数不随时间的进程而变化，那

么描述系统运动规律的数学模型（微分方程或差分方程）中的各个系数也不会随时间的进程而变化，这样的系统称为定常系统。工程实际中的系统，绝大多数是定常系统，但也有少数这样的系统，其组成元件的参数（哪怕只有一个）是随时间的延续而变化的，从而导致描述系统动态特性的数学模型中的某个（或某些）系数是时间 t 的函数，这种系统称为时变系统。运载火箭就是时变系统中的一例，它的质量（惯性）随时间的延续而变化。

（4）单输入单输出系统和多输入多输出系统 单输入单输出系统（又称单变量系统）指的是只有一个输入量和一个输出量的系统。而多输入多输出系统（又称多变量系统）指的是具有多个输入量和多个输出量的系统（包括有一个输入多个输出的系统和有多个输入一个输出的系统）。单变量系统的运动规律可用一个微分方程或一个差分方程来描述，而多变量系统的运动规律需用称为状态空间方程的互相耦合的一组一阶微分方程或差分方程来描述。

值得指出的是，以上这四种分类方法表面上看起来各有各的含义，各自孤立存在，其实不然，它们反映的是同一事物的不同侧面。一个系统，不论它是恒值控制系统还是随动控制系统，或是程序控制系统，它都可以既是线性的、又是连续的、同时还是定常的和单变量的，这样的系统可称为单变量线性定常连续系统。同理，还有单变量线性时变连续系统、多变量线性定常离散系统等组合称法，这里就不一一列举了。

1.3.4 按系统内部的信号特征分类

按系统内部的信号特征分类，控制系统可分为连续控制系统和离散控制系统。

（1）连续控制系统 系统中各部分传递的信号都是连续时间变量的系统称为连续控制系统。当然，在连续控制系统中根据系统能否用线性微分方程描述又可分为线性控制系统和非线性控制系统。

（2）离散控制系统（又称数字控制系统） 某一处或数处的信号是脉冲序列或数字量传递的系统称为离散控制系统。在离散控制系统中，数字测量、放大比较等部件一般由微处理机实现，计算机的输出经 D/A 转换加给伺服放大器，然后再去驱动执行元件。或由计算机直接输出数字信号，经数字放大器后驱动数字式执行元件。

此外，按系统组成元件的物理性质又可分为电气控制系统、机械控制系统、液压控制系统、气动控制系统和机电控制系统等。

1.4 控制系统的基本要求

通过前面的讨论，我们知道自动控制系统有许多不同的类型，属于同一类型的不同系统，其结构组成也因控制对象和控制任务及控制方式的不同而千差万别。系统不同，其性能也就不同，这便是系统的特殊性。另一方面，不论什么样的系统，其总功能是使输出量按输入量和控制律规定的方式变化，因此一定存在某些基本性能，这些性能是所有系统为实现总功能必须具备的基本条件，这便是系统的普遍性。作为研究自动控制技术共同规律的一门学科，自动控制理论研究的内容不是系统的特殊性，而是系统的普遍性。现在基于系统的普遍性原则，谈谈控制系统应具备的基本性能。

控制系统应具备的基本性能可概括为稳定性、快速性和准确性。

（1）稳定性 只有闭环控制系统才会有稳定性问题，而稳定是一个闭环控制系统正常工作的先决条件。前面已经谈到，闭环控制系统的实质是“检测偏差用以减小偏差”，因此可

以对稳定性作这样的工程理解：一个系统如果不能做到“减小偏差”，甚至“放大偏差”，那么它就是不稳定的。

稳定性的表述是：系统受到内部或外部扰动作用后，将产生运动，各物理量将偏离其平衡工作状态，如果在这些扰动作用消失后，系统各物理量能回到原平衡工作状态，则称该系统是稳定的，否则就是不稳定的。

稳定性的严格数学定义有着其缜密的数学理论，但我们也可以直观地从系统标准响应曲线中判定系统稳定与否。在图 1-7 中，响应曲线是收敛的，因而该系统是稳定的。在图 1-8 中，响应曲线是发散的，显然该系统是不稳定的。

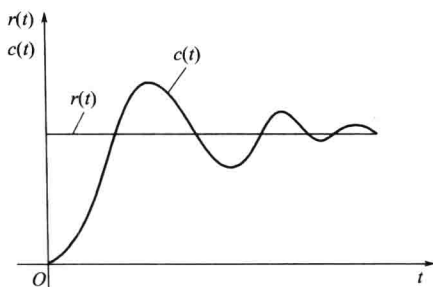


图 1-7 稳定系统的动态过程

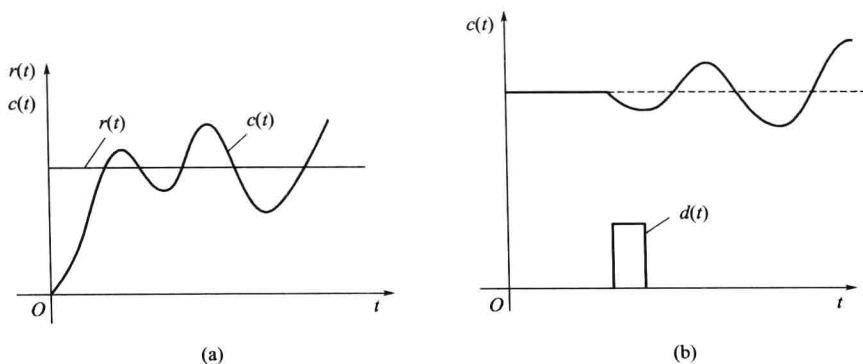


图 1-8 不稳定系统的动态过程

显然，不稳定的系统是无法正常工作的。一个工程控制系统如果不稳定，轻则产生剧烈振荡，重则损毁机器，这是很危险的。

(2) 快速性 理想的控制系统，其被控量（输出）与给定值（输入）应时时相等。但是，由于机械运动部分质量、惯量的存在，电路中储能元件的存在以及物理装置功率的限制，使得控制系统的被控物理量难以瞬时响应输入量的变化。所以，当给定值变化时，被控量不可能立即等于给定值，而需要经过一个过渡过程，即动态过程。

快速性表明了系统输出 $c(t)$ 对输入 $r(t)$ 响应的快慢程度。系统响应越快，说明系统的输出复现输入信号的能力越强。快速性通过过渡过程时间 t_s 长短来表征，如图 1-9 所示。过渡过程时间越短，表明快速性越好。

(3) 准确性 准确性是由系统的稳态精度来衡量的，它是指系统过渡过程结束后进入到稳态的过程中，此时输入给定值与输出响应的稳态值的差值大小，称为系统的稳态误差 e_{ss} ，如图 1-10 所示。