



# 控制理论基础

李训经 雍炯敏 周 渊 著

高等教育出版社

t2

023/  
L35

# 控制理论基础

李训经 雍炯敏 周渊 著

高等教育出版社

## 内容简介

本书主要讲述控制论这一学科的理论基础及控制问题的来源与形成过程。全书分八章,包括:受控对象的数学描述;控制系统的分析;线性系统的能控性和能观性;线性系统的实现;不变性原理与干扰解耦;控制系统最优调节器的设计;受干扰系统的线性二次最优控制。

本书可以作为数学类专业本科高年级或研究生教材,也可以作为控制方向的教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

控制理论基础/李训经,雍炯敏,周渊著. —北京:  
高等教育出版社, 2002.7  
ISBN 7-04-011166-7

I. 控… II. ①李…②雍…③周… III. 控制论  
—高等学校—教材 IV. 0231

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 041791 号

### 控制理论基础

李训经 雍炯敏 周渊 著

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街55号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100009	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
传 真	010-64014048		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京市朝阳区北苑印刷厂

---

开 本	850×1168 1/32	版 次	2002年7月第1版
印 张	10.75	印 次	2002年7月第1次印刷
字 数	240 000	定 价	16.30元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
§1.1 自动控制的意义和作用 .....	3
§1.2 自动控制系统的构成 .....	7
习题 .....	8
<b>第二章 受控对象的数学描述</b> .....	11
§2.1 状态空间分析方法 .....	11
一、贮槽液位的动态方程 .....	11
二、阻容电路 .....	15
三、二阶阻容电路 .....	17
四、双液位系统 .....	18
§2.2 传递函数和传递矩阵 .....	26
一、传递函数与频率特性 .....	26
二、串联和并联环节的传递函数 .....	34
三、典型环节 .....	42
四、传递矩阵 .....	47
§2.3 离散控制系统的差分方程 .....	50
一、受控对象动态方程的离散化 .....	51
二、线性差分方程的解 .....	58
三、稳定性的代数条件 .....	67
§2.4 $Z$ -传递函数和 $Z$ -传递矩阵 .....	69
§2.5 受控对象方程的参数辨识 .....	74
习题 .....	80

<b>第三章 控制系统的分析</b> .....	89
§3.1 一阶系统 .....	89
§3.2 二阶系统 .....	95
§3.3 离心调速器 .....	100
§3.4 稳定性的代数判据 .....	111
§3.5 一次近似定理 .....	120
§3.6 稳定性的频率判据 .....	122
§3.7 多项式族的稳定性判据 .....	127
习题 .....	132
<b>第四章 线性系统的能控性和能观性</b> .....	137
§4.1 线性系统的能控性 .....	137
§4.2 能控性与能稳性 .....	146
§4.3 线性系统的能观性与能检性 .....	156
§4.4 状态渐近估计器和调节器的设计 .....	165
习题 .....	171
<b>第五章 线性系统的实现</b> .....	177
§5.1 系统的外部表示 .....	177
§5.2 线性系统的实现 .....	184
§5.3 最小实现 .....	192
习题 .....	197

<b>第六章 不变性原理与干扰解耦</b> .....	199
§6.1 常系数线性常微分方程组 .....	199
一、初等变换与常系数线性微分方程的解 .....	201
二、 $A(D)$ 的典则性与模方阵群 $M_n$ .....	203
三、例题 .....	215
§6.2 不变性原理 .....	219
§6.3 干扰解耦问题 .....	224
§6.4 $(A, B)$ - 不变子空间 .....	226
§6.5 干扰解耦问题的解 .....	230
习题 .....	249
<b>第七章 控制系统最优调节器的设计</b> .....	253
§7.1 控制系统的镇定 .....	253
§7.2 控制装置的参数选择 .....	254
§7.3 平方可积函数及其 Fourier 变换 .....	260
一、平方可积函数 .....	260
二、Fourier 变换 .....	263
§7.4 线性二次最优调节器的设计 .....	265
一、问题的正确提法 .....	265
二、动态规划方法 .....	268
三、代数 Riccati 方程 .....	270
四、最优反馈调节器 .....	282
§7.5 跟踪给定值问题 .....	294
习题 .....	297

<b>第八章 受干扰系统的线性二次最优控制</b> .....	303
§8.1 问题的提法 .....	303
§8.2 上值 Riccati 方程 .....	307
§8.3 下值 Riccati 方程 .....	314
§8.4 一维的情形 .....	322
习题 .....	326
<b>参考文献</b> .....	329

# 第一章 绪 论

人类对自然界的逐步认识始终伴随着人类的诞生和发展。同时，人类还不断地力图改变自然界的某些事物，以改善自己的物质生活和文化生活。可以说，人类最基本的活动就是：**认识世界和改造世界**。在一定的意义下，这种改造也就是对客观世界的“控制”。因此，控制广泛地存在于人类生活之中，人们改造世界的活动本质上属于“控制论”的范畴！

两千多年前中国发明的指南车和七百年前中国发明的水运仪象台，也许是最早的自动控制装置。但它们并未能得到广泛的应用，也未能导致相应理论的产生。在18世纪下半叶，蒸汽机和棉花加工机的广泛使用推动了产业革命。蒸汽机是大工业普遍应用的第一种动力机械。它取代了在生产中作为动力提供者的人或动物，成为大工业迅速发展的推动力，导致了产业革命。蒸汽机的核心是瓦特的离心调速器，它是一个保证蒸汽机正常运转的自动控制装置。离心调速器的设计和使用是第一项被广泛应用的自动控制技术。

在19世纪中叶，人们发现离心调速器变得不太可靠了。它促使工程师和科学家们寻找产生这种危机的原因和摆脱危机的出路。到了19世纪后半期，英国科学家 J. C. Maxwell 和俄国工程师 J. Vyshnegradskii 关于调速器的研究就是为了满足这种需要。他们的研究表明，技术进步使离心调速器变得更灵敏了，而这正是离心调速器变得不可靠的根源，他们还指出了摆脱危机的技术途径。由此引发了自动控制理论的研究，推动了自动控制技术的发展。



自动控制技术和通讯技术的发展,控制和通讯方面的理论在 20 世纪有了一系列成果,终于在 20 世纪 40 年代末,数学家 N. Wiener 和其他科学家一起创立了控制论科学. N. Wiener 的经典著作《控制论》于 1948 年出版.我国科学家钱学森对控制论原理在工程控制系统中的广泛应用进行了总结,他的专著《工程控制论》于 1954 年问世,宣告了工程控制论这门技术科学的诞生.

随着自动控制技术、航天技术、计算机技术等现代技术的发展,而数学和物理学也具备了相应的基础,从而在 20 世纪 60 年代形成了现代控制理论,它的标志是三个里程碑工作的诞生,即: L. S. Pontryagin 的最大值原理, R. Bellman 的动态规划原理和 R. E. Kalman 的线性系统一般理论(能控性、能观性、能稳性和调节器设计等)及递推滤波理论.它们的作者在 1960 年莫斯科召开的国际自动控制联合会第一届世界大会上分别作了大会报告.

控制理论是控制系统的理论基础,它处在数学、计算机科学和工程学交叉发展的前沿,它在以自动化、计算机、机器人等为代表的新技术革命中发挥着重要的作用.值得一提的是控制理论的研究成果曾在美国 Apollo 登月计划实施中起过实质性的作用.

从控制论科学的形成和发展来看,它起始于技术发展的需求,即从解决工程实践中的技术问题开始的.控制工程的科学总结就是工程控制论.目前,控制理论的原理和方法的应用领域已经远远超出了工程技术的范畴,它在生物、生态、医学、经济、金融和社会学等方面都有广泛的应用.可以说,控制理论是一门很具生命力的学科.

## §1.1 自动控制的意義和作用

以蒸汽机为代表的动力机械在大工业的广泛应用，使原来仅靠人或动物的体力情形下认为不可能的事情变成了现实，导致了工业革命。这是 18 世纪的事情。为了使动力机械能按人们的意愿进行运转，人们必须对它们施行种种操纵：使机械的动作开始或停止，或者使它按一定的顺序动作，或者使它维持某种状态，或者根据外部情况改变它的状态等等，这种种操纵称为控制。例如，维持蒸汽机的转速恒定和室内温度恒定等，都需要操纵某些装置，这种操纵就是控制。又如，为保证某种商品的价格维持在一定的水平范围内，就需要根据市场的情况，增加或减少它的生产和供应，这种安排也是控制。其实，人类在生活中对某种自然现象施加的改造，就是对它的一种控制。

控制理论研究的对象是系统。例如，一部蒸汽机是一个系统，一个加热炉是一个系统，一个工厂是一个系统，某种产品的生产和销售过程是一个系统，等等。

若根据某个给定的指令操纵系统的某个物理量（称为受控量），使之发生变化，则我们就称这些指令是控制。这里所说的指令是指一种信息，而不是指使系统动作的能源。如果所说的指令是由某种机械或仪表来实现的，而不是直接由人们给定的，我们称这种控制为自动控制。为说明自动控制问题，我们举几个例子。

### 例 1.1 液位控制系统

水箱、贮液槽、锅炉等系统的工作都要求保持液位的一定高度。我们知道锅炉是把水加热变为蒸汽从而产生动力或热能的，为保证锅炉正常工作，必须随时测量其水位的高度。当水位低于一定

高度时就加大进水流量以提高锅炉的水位；反之就减小或关闭进水流量以减慢水位升高速度甚至降低水位。这里受控量是锅炉的水位，操纵是根据水位的高度开大或关小进水阀门，这就是控制作用。水位的给定高度是根据工艺要求来确定的，称为受控量的给定值。显然，锅炉水位是受蒸汽的使用量和压力等等因素的影响而变化的。

在这类系统中，为保证水位能维持在给定值附近，需要有测量水位高度的装置，还需要把测量值与给定值进行比较，并根据比较结果进行判断，从而采取控制措施。如果这些都是由某种机械或仪表来进行的，并不需要人的直接参予，这就是自动控制。

自然，如果控制作用不适当，水位不可能维持在给定值附近。例如，如果控制的进水阀门开启过小，水位不可能升高到给定值附近；反之，如果控制的进水阀门开启过大，水位很可能远远超过给定值。由此可见，控制作用是否选得恰当是一个十分重要的问题，控制理论就要研究这类问题。

### 例 1.2 加热炉温度控制

在冶金、化工和各种工业企业中，加热炉的温度控制是十分重要的。根据工艺要求，各种加热炉的控制要求也不尽相同，例如均热炉、退火炉等。人们往往要求炉膛温度开始按某种曲线上升，到一定温度后维持一定时间，然后降温。在这里人们要求炉膛温度跟踪一条给定的曲线。在该系统中，受控量是炉膛温度。因此需随时测量炉膛温度，并与给定温度比较，这是决定控制作用的依据。测量温度一般是用热电偶或热电阻，其测量精度可以在千分之五之内，控制手段一般是控制加热炉的进口燃料的多少。有些企业把对测量结果与给定曲线的比较来确定控制作用的工作，交由操作工

人进行，这是人工控制。现代化企业要求上述工作由仪表或计算机进行，以构成炉温的自动控制系统。家用的空调器和冰箱，都是典型的温度自动控制装置，其控制手段是开关压缩机的电源。

### 例 1.3 离心调速器

蒸汽机正常运转的基本要求是维持其转速的恒定。离心调速器是利用离心力来测量和调节蒸汽机转速的：当蒸汽机的转速过高时，它带动某种机械装置使进入蒸汽机的蒸汽量减小，以降低转速；反之，使蒸汽量增大，以提高转速。这样，离心调速器就完成了蒸汽机转速的自动控制。

从上述的例子看出，在现代化的工业生产中，自动控制系统是大量存在的，在有些情况下它甚至是某些动力机械的必要组成部分。它利用机械、仪表或计算机来代替人们的逻辑判断以及操纵作用。在石油化工系统和冶金工业系统中大量存在着的自动控制系统保证了生产的正常运行。

但是，自动控制系统有时会出现工作不正常的情况，这就要求人们分析其原因，改进自动控制系统的设计方法。瓦特的离心调速器的使用，在 18 世纪后期和 19 世纪上半叶，获得了人们预期的效果。因此，对它的理论研究并没有迫切需求，而仅要求对其工艺进行不断地改进。但是，到 19 世纪中叶，瓦特的离心调速器常常不能获得预期的效果，产生了工作不正常的情形，于是，人们提出了研究离心调速器运动规律的需求。由此产生了 Maxwell 和 Vyshnegradskii 的研究工作，开始了对自动控制理论的研究。在第三章中，我们将会比较详细地介绍这一工作，以使读者了解自动控制理论产生的根源，并认识自动控制理论对于自动控制技术的指导作用。

关于自动控制系统以及相应控制的分类, 由于原则不同而有不同的分类。

根据受控量的目标值是固定的还是随时间变化的, 人们把相应的自动控制系统分为恒值控制系统和随动控制系统两类。而相应系统中的控制分别称为恒值控制 (或自动调整) 和随动控制 (或自动跟踪)。例 1.1 中的液位控制和例 1.3 中的转速控制是恒值控制; 例 1.2 中加热炉的温度控制以及仿形机床、数控机床的控制是随动控制。

根据自动控制的基本动作原理, 可以将控制分为开环控制和闭环控制 (或称反馈控制) 两类。根据控制要求和外部干扰的情况, 设计一系列控制指令, 对受控量进行控制, 称为开环控制。这种方案的特点是不管控制作用的后果, 而仅仅根据预期的结果来进行控制。例如为控制直流电动机的转速, 可以先找出电流大小与转速的关系, 然后调整电流的大小, 使它所对应的转速就是所给定的目标值。这种控制方法就是开环控制。它看起来很简单, 但是找到电流与转速的关系并不简单; 同时, 由于电源电压或电机负荷波动的影响, 用这种方法严格控制电机的转速是十分困难的。另一类是闭环控制。例 1.3 中的离心调速器和例 1.1 中的液位控制, 都是根据受控量与目标值的偏差来决定控制作用, 以减小偏差。这种根据受控量即系统的输出量的变化来决定控制作用的方法就是闭环控制或反馈控制。显然, 反馈控制的基本原理是根据受控量的偏差来决定控制作用, 以减小受控量与给定值的偏差, 而并不关心引起偏差的原因。

自然, 还可以根据系统的特性将控制系统分为线性系统与非线性系统, 确定性系统和随机系统, 定常系统和时变系统等等。总之, 由于标准不同, 分类也就不同。

## §1.2 自动控制系统的构成

自动控制系统的基本结构如下图

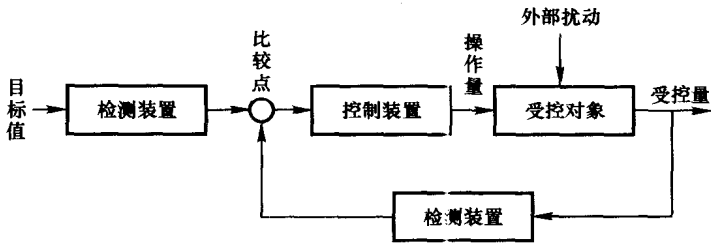


图 1.1

这里受控对象是指系统中完成预定工作的那部分，如蒸汽机、加热炉、贮液槽等等。系统的受控量是我们所关心的物理量，如蒸汽机的转速、加热炉的温度、贮液槽的液位等等。受控量由检测装置进行检测，并变换成适当的形式，与目标值的检测值进行比较，得出受控量与目标值的偏差。把偏差的信息送到控制装置，经过必要的运算产生控制的操作量。操作量是作用到受控对象的，用以减小受控量与目标值的偏差。

在上述方框图中，还标出了外部扰动，它对受控对象也是有影响的。受控量是在外部干扰和控制作用的共同影响下变化的。

显然，对于一个具体的自动控制系统来说，受控对象是研究的客体，它是由特定的工艺及其他条件决定的，自动控制的设计者只能对它认识而不能任意改变。检测装置、比较装置和控制装置是控制系统设计人员处理的部分，是需要设计研究的。我们知道，检测装置是可以千差万别的，例如离心调节器利用离心力测量蒸汽机

的转速；又如液位可以用浮球或 U 形管压力计进行测量；温度可以用热电偶或热电阻进行测量。这些都是工程技术问题，对此，我们不进行详细讨论。

如果不讨论检测装置，则自动控制系统的基本结构如下图

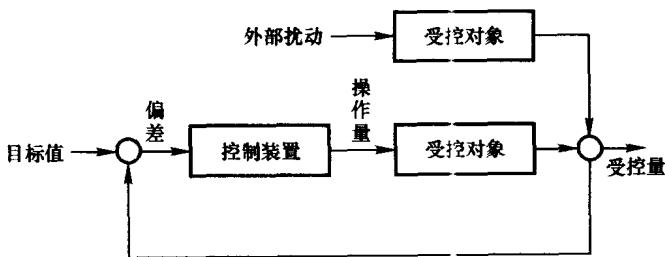


图 1.2

在这个框图中，我们分别列出了外部扰动和操作量(控制作用)对受控对象的作用，并且认为受控量的变化由它们的叠加作用来决定。

## 习题

1. 试举一些日常生活中控制过程的例子。
2. 试分析空调机的控制过程和原理。
3. 举出实例说明对同一个受控对象采用开环控制和闭环控制所产生的效果是不同的。
4. 试举出在生物、医学、经济学、社会学等非自动控制领域中的控制系统之例，并用来说明恒值控制和随动控制，开环控制和

闭环控制等概念.

5. 对照自动控制系统的基本结构图 (图 1.1), 举出一个控制系统的实例, 画出它所对应的结构图并且解释构成系统的每一个组成部分的具体内容与作用.



