

# 机械控制工程基础

JIXIE KONGZHI GONG CHENG JICHU

● 曾荣芳 编 ● 北京理工大学出版社



# 机械控制工程基础

曾荣芳 编

北京理工大学出版社

## 内容简介

本书主要内容是线性控制理论。它包括：系统(过程)的数学模型；系统(过程)在时域、频域内的性能分析；机械工程系统(机械制造过程)控制及性能分析举例。

本书的主要特点是：通过充实的工程实例，本着深入浅出、循序渐进的认识规律，论述机械控制的基本理论和方法。

本书主要是为高等学校机械制造工艺及设备专业本科学学生编写，也可供有关工程技术人员参考。

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

太原机械学院印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 13.125印张 294千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷

ISBN7-810103-161-3/TH·23

印数 3000册 定价 2.60元

## 前 言

《机械控制工程基础》是近几年来在机械制造工艺及设备专业新开设的一门专业理论基础课。为适应当前科学技术迅速发展的新形势，为满足本专业的教学实际需要，编者根据本课程教学大纲要求，结合自己几年来的教学实践，编写了本教材。

本书在编写中力求保持内容的完整性和系统性。全书共分九章：第一章主要介绍工程系统的基本概念；第二章至第四章介绍系统的数学模型；第五、六章讲系统的响应特性；第七章介绍系统的稳定性分析；第八章介绍系统的设计与校正；第九章简要的介绍机械工程系统及过程的动态性能分析与控制。由于本书的使用对象是非自控专业的学生和工程技术人员，所以在该书编写过程中，精心选择了有代表意义的机、电、液等不同类型的例题，启发并引导学生学习和领会“工程控制理论”的基本理论和方法，从而使理论紧密联系实际，尽量做到消除非自控专业学生在学习控制理论时普遍具有的抽象感。几年来的教学实践表明：本书的内容编排较好的达到了预期的目的。

本教材是按40~60学时编写的。在学习本课程之前，学生应具有足够的数学、力学、电学、液压流体力学、计算机语言等方面基础知识。书中的第三章内容可视学生先修数学情况灵活安排；第九章是在学完前八章基础上供学生自学的内容。

本书的前身《控制工程基础》，曾于1983年5月印刷，

经三届学生使用。现在的《机械控制工程基础》是在原书的基础上修改、补充而成。本书的初稿经全国机床学研究会理事、太原工业大学机械系教授徐侠和全国机械控制工程研究会理事、太原工业大学机械系副教授陈雪瑞审阅。在本书编写过程中还得到了本单位的领导和同志们的大力支持，并取得了青年教师任建平同志的具体协助。在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，不足乃至错误之处，敬请读者批评指正。

编者

1986.9.于太原

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
§ 1.1 控制工程概述.....	1
§ 1.2 机械控制工程的主要内容及其实例.....	5
§ 1.3 工程控制系统的基本概念和特征.....	19
<b>第二章 工程系统及过程的数学模型</b> .....	24
§ 2.1 机械元件及系统微分方程的建立.....	25
§ 2.2 电气元件及网络微分方程的建立.....	37
§ 2.3 液压系统微分方程建立举例.....	43
§ 2.4 工程系统的相似性.....	49
§ 2.5 系统的线性化数学模型.....	53
§ 2.6 建立系统数学模型的一般方法.....	61
<b>第三章 拉普拉斯变换及其在控制工程中的应用</b> .....	64
§ 3.1 拉普拉斯变换.....	64
§ 3.2 拉氏变换的主要定理.....	68
§ 3.3 拉氏反变换的基本方法.....	76
§ 3.4 用拉氏变换法解常系数线性微分方程.....	82
<b>第四章 系统和过程的传递函数</b> .....	87
§ 4.1 传递函数的定义和性质.....	87
§ 4.2 典型环节及其传递函数.....	93
§ 4.3 系统的函数方框图及其传递函数.....	111
§ 4.4 机械系统和机械加工过程的传递函数.....	125
§ 4.5 多变量系统和传递矩阵.....	135
<b>第五章 系统的时间响应分析</b> .....	143
§ 5.1 时间响应和典型输入信号.....	143

§ 5.2	脉冲输入时间响应	145
§ 5.3	阶跃输入时间响应	154
§ 5.4	斜坡输入时间响应	159
§ 5.5	系统的瞬态响应分析	162
§ 5.6	系统的误差分析	175
§ 5.7	用数字计算机求解系统的时间响应	194
<b>第六章</b>	<b>系统的频率响应分析</b>	<b>210</b>
§ 6.1	频率响应的基本概念	211
§ 6.2	频率特性的极坐标图	219
§ 6.3	频率特性的对数坐标图	230
§ 6.4	频率特性的对数幅-相图	250
§ 6.5	系统的闭环频率特性	252
§ 6.6	用数字计算机求解系统的频率响应	263
§ 6.7	系统频率响应的性能指标	267
§ 6.8	频率特性的实验测定	268
<b>第七章</b>	<b>系统的稳定性分析</b>	<b>276</b>
§ 7.1	线性系统稳定的必要条件和充分条件	277
§ 7.2	劳斯-霍尔维茨判据	280
§ 7.3	奈魁斯特稳定判据	288
§ 7.4	对数频率特性的稳定性判据	303
§ 7.5	稳定性储备和条件稳定系统	308
§ 7.6	有时延的线性控制系统稳定性分析	313
<b>第八章</b>	<b>控制系统的设计与校正</b>	<b>317</b>
§ 8.1	系统动态设计基础	318
§ 8.2	控制系统的校正	333
§ 8.3	串联校正装置的设计	343
§ 8.4	并联校正装置的设计	353
<b>第九章</b>	<b>机械工程系统及过程的动态性能分析与控制</b>	<b>361</b>
§ 9.1	机械系统中的机械控制作用	361
§ 9.2	提高滚齿机中蜗轮副传动精度的机械反馈控制系统	381

§ 9.3	数控机床进给随动系统的运动平稳性分析	389
§ 9.4	磨削过程中表面波纹度产生机理的频率响应分析	400
附录一	常用函数拉普拉斯变换表	403
附录二	函数方框图运算法则	406
附录三	各种机械网络示意图及其相应的传递函数	408
附录四	具有简单传递函数的环节的极坐标图	411



# 第一章 绪 论

## § 1.1 控制工程概述

### 1.1.1 工程控制论和机械控制工程

控制工程或工程控制均源于钱学森先生的专著《工程控制论》。这是从控制论派生出来的一门新型技术科学，它是研究控制论在工程技术中应用的科学，因此，工程控制论是跨控制论与工程技术理论之间的边缘性学科。它研究的对象是工程控制系统（包括控制过程），它研究的内容主要是系统的动态分析和动态优化的方法。

这里需要指出的是，工程控制论是一门技术科学而不是工程技术。它与自动控制与伺服系统等虽有密切的联系，但也有严格的区别。控制工程是理论，是用以指导自动控制技术的实现、伺服系统的设计……。而后者，则是应用前者的理论解决某些工程实际问题的具体技术措施。还要特别强调指出：工程控制论并不局限于研究自动控制技术的基础理论，它所涉及的范围、内容是非常广泛而深刻的，即使某些非自动控制的、即由人工来操纵的工程系统，也必须服从工程控制论所指出的规律和方法进行操纵或控制才能更有效、更合理地运行。也就是说，工程控制论所研究的问题是具有普遍意义的工程技术的控制理论问题。当然，工程控制论也必须受工程技术实践的检验，才能证明它是正确的、有生命的。随着现代工业的发展，能源、化工、机械等工业领域都对工程控制论提出了范围更广、内容更深刻、更复杂的理

论问题，促使工程控制论向更深入的方向发展。

作为工程控制论的一个分支——机械工程控制论则是以控制理论研究机械工程技术人员的一个学科，它也称之为机械控制工程。

当代机械工业生产技术的发展，一方面表现为产品技术性能参数的进一步提高，在产品和附件的规格方面则向大型、超大型和微型方向发展，在生产方式上专业化大量生产和多品种小批量生产都产生了重大变革，其目的在于以最高的效率、最低的成本、取得最优质量的产品；另一方面，设计理论、科学实验、制造技术与计算机科学技术、现代控制理论相结合，逐步实现计算机辅助设计、辅助科学实验、辅助制造等，这就有可能在更广泛的基础上实现产品设计和制造过程的全面优化控制。因此，以研究机械技术问题为对象的机械控制工程，就成为当前机械工程领域内颇有前途的一个跨控制论与机械工程之间的边缘性学科。

在实现我国四个现代化的伟大斗争中，机械工业担负着为国民经济各部门提供高质量的、先进的、成套技术装备的重要任务。同时，机械工业也为发展基础科学和新技术提供各种技术装备。而科学技术的发展又不断地改变着机械工业的面貌。掌握控制工程的基础知识，其目的不仅在于了解机械工业自动化的基础理论，更重要的是学会用控制论的观点和方法去揭示机械动力系统和生产过程的动态性能，并指出改进或控制其性能的更有效的途径和方法，从而把过去在机械工程研究方面长期停留在经验性认识阶段提高到深入的理性认识阶段；把过去某些不能反映客观规律的纯几何观点以及静力学观点逐步提高到动力学观点，这就使我们对机械动力系统和机械生产过程的认识和分析更合乎客观实际。因

此，也就使我们有可能在这一理论指导下不断地改造机械工业和推动机械工业迅速发展。

### 1.1.2 控制理论发展简述

早在一千多年以前，我国劳动人民就先后发明了铜壶滴漏计时器、自动定向指南车以及天文仪器等自动控制装置，这对当时社会发展起了很大的促进作用。在欧洲，直到十八世纪产业革命以后，蒸汽机飞球调速器、液面控制及温度控制等自动化技术也先后在生产中得到了应用。然而，所有这些，在当时的历史条件下都仅仅停留在实践的水平上。

在本世纪中期，尤其是二次世界大战中，由于电子技术、火炮控制技术、航空技术的迅速发展以及战后生产自动化水平的提高和高速电子计算机的出现，都极大地促进了控制论这门科学的形成。大约在本世纪三十年代，美国数学家N·维纳参加了由生理学家罗森普鲁斯主持的一年一度的科学方法讨论会，在这个会上，各门专家“思路交锋”，孕育了控制论的胚胎。而后，由数理逻辑学家、生理学家、神经解剖学家等不同学科的专家共同创立了一门科学理论，这就是控制论。它集中表现在1948年美国数学家N·维纳发表的“控制论——或关于动物和机器中控制和通讯的科学”这部奠基性著作上。此后，1954年我国钱学森先生发表了他的专著“工程控制论”，这便是工程控制论的基础。直至六十年代，由于现代生产逐渐趋向于实现最佳控制，因此，又出现了“现代控制理论”或“现代控制工程”，这就把控制论提到了一个新的高度。

从这一简单历史过程可见，工程控制问题是从生产实践中产生并逐渐上升为理论，同时，它也体现了一种多学科的

横向联系。正是由于各种学科的发展和相互渗透，才使我们有可能用统一的观点和可能的数学工具去研究控制问题的一般规律，也只有在这时，源于生产技术的控制论萌芽才形成一门独立的科学。

从当代科学技术发展中可以看出：各学科之间互相联系、互相渗透，不断形成一些边缘性学科，同时也不断酝酿着或出现了新的理论上和技术上的重大突破，从而推动着当今科学技术的飞速发展。众所周知，在本世纪发生的技术革命中，有很多技术上的突破。如激光技术、原子能技术、计算机技术……；同时也有促使人类认识客观世界产生飞跃的理论上的突破。正如钱学森先生在他的“工程控制论”（修订版）序言中所写：“……二十世纪上半叶的三大伟绩是相对论、量子论、控制论。也许可以称它们为三项科学革命，是人类认识客观世界的三大飞跃”。这些理论上和技术上的突破，深刻地体现了当代科学技术发展的特点。而“控制论”则自然地在当今的科学领域内占据着重要的地位。

在人类社会，人类一切有目的的行动，都是为了控制自然，并借以完成超出人们力所能及的任务。如果说早年发明的蒸汽机、内燃机等动力机械代替或部分代替了人的体力；工具机、仪器仪表代替或部分代替了人的行为和行动；那么，现代出现的“控制机”则代替或部分地代替了人的观察、分析、判断和决策的功能，从而使人的视野更加开阔，行动更加灵活，分析判断更加准确，以至使人们的许多希望和梦想变成了现实。所有这一切都是紧紧地与最年轻的多科性学科——“控制论”联系在一起的。所以，人们认为“控制论”是当今最有前途的科学领域之一，而它的发展前途又似乎是无可限量的。

## § 1.2 机械控制工程的主要内容

### 及其实例

#### 1.2.1 机械控制工程的主要内容

以机械工程技术为对象的控制论问题均属机械控制工程所研究的问题。如同其它技术科学一样，机械工程学的主要任务之一就是要了解、掌握机械工程系统和机械生产过程的内部矛盾规律，即系统和过程的动态特性；要研究其内部的信息传递、变化规律以及受到外加作用时的反应，从而决定控制它们的手段或策略，以便使之达到人们所期望的最佳状态。这些也正是机械控制工程研究的主要内容。可见，机械控制工程的研究对象是机械工程控制系统（包括控制过程），它的研究内容主要是机械工程系统（过程）的动态分析和动态优化的方法。

#### 1.2.2 机械控制工程的实例

在机械工程技术领域及生产实践中，应用机械工程控制理论分析、研究并解决有关理论与实际生产问题的实例是很多的。归纳起来，大致有以下几个方面。

##### 一、应用反馈控制的机、电、液系统

1、蒸汽机飞球调速系统 蒸汽机飞球调速系统是工业中最早应用反馈控制的机械系统，如图1-1。要求蒸汽机在额定转速 $n_0$ 下运行，对应于 $n_0$ 的转速，离心飞球有一定的位置，杠杆也有相应的位置，因此，控制输入蒸汽量的阀门其开度也是一定的。若蒸汽机的负载增加其转速下降时，通过

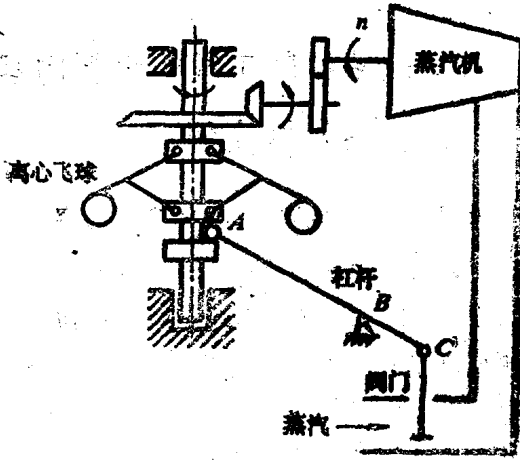


图1-1 蒸汽机飞球调速系统

齿轮传动，离心飞球的转速也下降，故飞球位置下移，通过杠杆的作用使通气阀门开度增加，输入蒸汽量增加，于是，蒸汽机的转速又上升到接近其额定转速 $n_0$ ；当蒸汽机负载减小引起转速升高时，其调速过程与上述相反。所以，通过具有速度反馈的飞球调速系统的调节作用，可以使蒸汽机的转速在变动负载下基本保持不变。该系统的控制作用框图如图1-2。

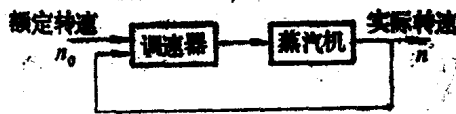


图1-2 蒸汽机飞球调速系统控制作用框图

2、控制工作台位置的机、电、液反馈控制系统 图1-3是控制工作台位置的机、电、液反馈控制系统的工作原理图。采用该控制系统的目的是控制工作台位置，使之按照指

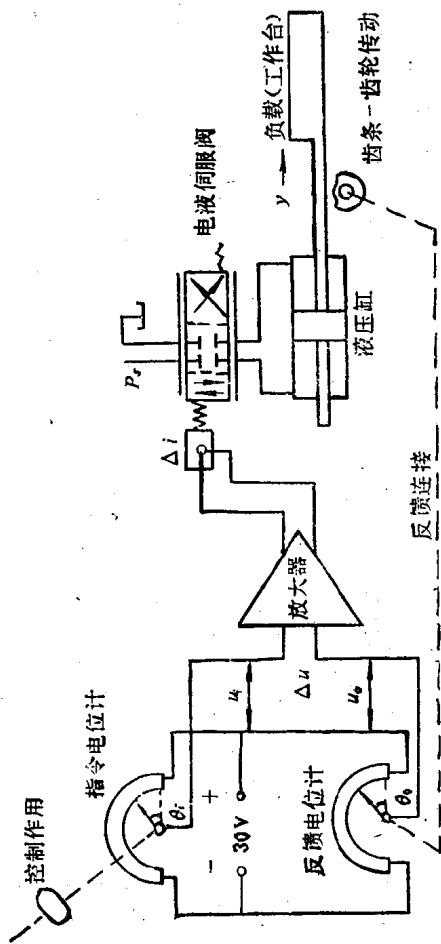


图1-3 控制工作台位置的机、电、液反馈控制系统

令电位器给定的规律变化。操作者转动指令电位器的滑臂，滑臂的转角 $\theta_i$ 转换成控制电压 $u_i$ 。被控制的工作台位置由反馈电位器检测，并转换成电压 $u_0$ 。当工作台实际位置与指令信号给定的位置有偏差时，通过由两个电位器接成的桥式电路得到偏差电压 $\Delta u = u_i - u_0$ 。当指令电位器的滑臂处于零位时，即 $\theta_i = 0, u_i = 0$ ，则工作台处于静止状态，反馈电位器亦处于零位，即 $\theta_0 = 0, u_0 = 0$ ，这时偏差电压 $\Delta u = u_i - u_0 = 0$ ；若加指令信号 $\theta_i$ ，即将指令电位器的滑臂转动，例如，移到图示位置，并假设此时输入电压 $u_i = 15\text{V}$ ，而在工作台改变位置之前的瞬间，反馈电压 $u_0 = 0$ ，所以，偏差电压 $\Delta u = 15\text{V}$ 。该偏差电压经放大并转换成电流信号，并以此控制电液伺服阀，伺服阀便输出具有一定压力的液压油至液压缸，从而通过活塞带动工作台移动，而工作台的移动又通过齿条-齿轮机构传至反馈电位器的滑臂，并产生转角 $\theta_0$ 。当 $\theta_0 = \theta_i$ 时，即 $u_0 = u_i$ 时，偏差电压 $\Delta u = 0$ ，伺服阀恢复零位，活塞亦停止移动，工作台达到了指令信号所规定位置。如果指令电位器滑臂继续转动，则工作台的位置也跟随其变化。所以，上述系统亦称位置随动系统。该系统的控制作用框图如图1-4。

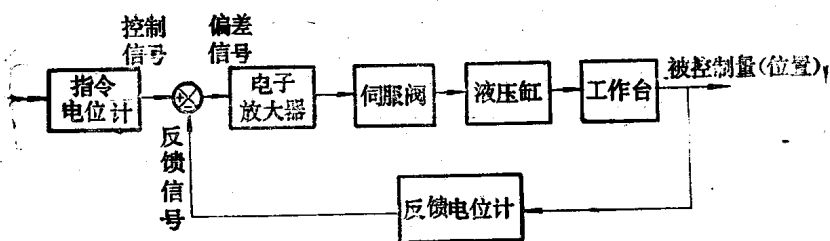
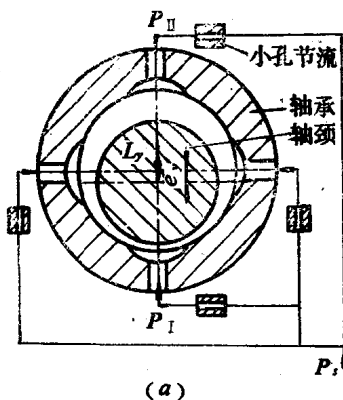


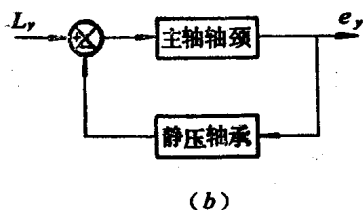
图1-4 控制工作台位置的机、电、液反馈控制系统的控制作用框图



3、薄膜反馈式径向静压轴承 采用薄膜反馈径向静压轴承，可以有效的提高静压轴承的负载刚度。图1-5 (a)是通过小孔节流供油的静压轴承工作原理图。 $P_0$ 是供油压力，轴颈上施加 $y$ 向负荷力 $L_y$ 后，相对于轴承在 $y$ 向偏移量为 $e_y$ ，这时下油腔压力增为 $P_{II}$ ，上油腔压力降为 $P_I$ ，



上下油腔压力差所产生的恢复力 $R_y$ 与负荷力 $L_y$ 平衡，对应于这一系统的控制作用框图如图1-5 (b) 所示。可见 $e_y$ 与 $L_y$ 之间是一个由轴颈与轴承组成且具有反馈联接的闭环控制系统。



为了提高静压轴承的负载刚度，采用如图1-6 (a) 所示的薄膜可变节流代替图1-5 (a) 中的小孔节流。在图1-5 (a) 方案中恢复力完全是靠轴颈偏移而产生的，而在图1-6 (a) 方案中，只要轴颈稍有偏移，则由此引起上下油腔的压力差就足以

使薄膜产生变形，因而又进一步增大了上下油腔压力差。可见，恢复力 $R_y = P_{II} - P_I$ 主要是由薄膜补偿作用产生的，所以，在相同负载力 $L_y$ 作用下具有薄膜可变节流供油的静压轴承其负载刚度显著提高，这主要是由于薄膜补偿提供了一个高增益的反馈通道，使轴颈在外载作用下的偏移量