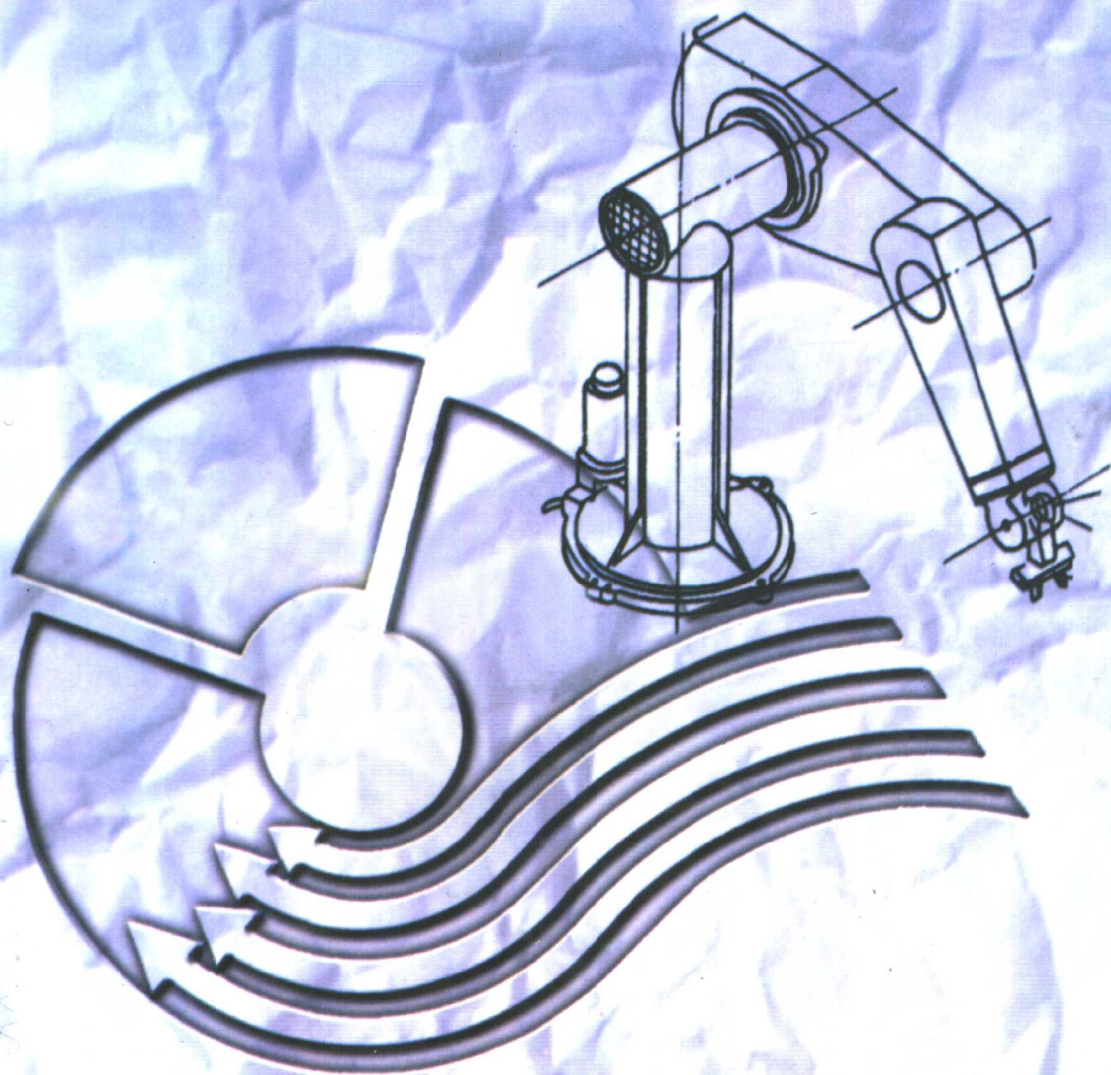


# 机械工程控制基础

(修订本)

陈康宁(主编) 王馨 李天右 简林柯 刘明远



西安交通大学出版社

# 机械程控制基础

(修订本)

陈康宁(主编) 王 馨

李天石 简林柯 刘明远

西安交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书介绍控制理论的基本原理及基本知识与其在机械工程中的应用。内容包括拉氏变换数学方法;系统的数学模型,系统的瞬态响应与误差分析,系统的频率特性,系统的稳定性,控制系统的校正与设计和控制系统的计算机仿真与辅助设计等,每章后备有思考题和习题。

适于机械类包括机电一体化工程和机械电子工程等专业大学本科生用作教材,也可供有关专业工程技术人员参考。

(陕)新登字 007 号

### 机械工程控制基础

(修订本)

陈康宁(主编) 王 馨

李天石 简林柯 刘明远

责任编辑 早 雪

责任校对 郭丽芳

\*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市兴庆南路 25 号 邮政编码:710049 电话:(029)2668315)

西安兰翔印刷厂印装

各地新华书店经销

\*

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:14 字数:339 千字

1997 年 11 月第 1 版 2002 年 3 月第 5 次印刷

印数:14501~18500

ISBN 7-5605-0935-5/TH·45 定价:13.50 元

---

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)2668357,2667874

# 前 言

由于现代科学和计算机技术的迅速发展,控制理论应用于机械工程的重要性日益明显,并取得了很大的发展。机械工程控制论所提供的理论和方法,愈来愈多地成为科技工作者分析和解决问题的有效手段。它是机械工程类专业的重要理论基础之一。

本书作为一门技术基础课教材,力求在阐明机械工程控制论的基本概念、基本知识和基本方法的基础上,密切结合机械工程实际,同时注重机、电结合,以便沟通与加强数理基础和专业知识之间的联系,为将控制理论应用于工程实际打下基础。

全书共 8 章:第 1 章绪论,是对本门学科作概要介绍;第 2 章拉普拉斯变换的数学方法,是本书必需的数学基础;第 3 章系统的数学模型,介绍运用力学、电学基础对系统建模的方法以及传递函数、方块图、信号流图、状态方程等重要概念;第 4 章至第 6 章分别为系统的瞬态响应与误差分析、频率特性和稳定性,它们是在已知系统数学模型的前提下分别从不同角度对系统进行分析;第 7 章机械工程控制系统的校正与设计,介绍各种校正方式和方法,使系统满足性能指标要求;第 8 章控制系统的计算机仿真与辅助设计,介绍各种算法实现、系统仿真、频率特性、根轨迹和系统的校正等。

本书是在王馨和陈康宁主编的“机械工程控制基础”一书基础上修订编写的。原书有 7 章,其中王馨编写第 1,2,3,5 章;陈康宁编写第 4,6,7 章。为了适应科学技术的发展,尤其是计算机科学已深入到各个工程领域,使学生对机械控制工程有一个较为全面的了解,在原书的基础上进行编写并改编成 8 章。其中简林柯编写了第 3 章的 3-7 和第 4 章的 4-4 节,并对这两章进行修改;李天石编写了第 5 章的 5-3、5-4 节和第 8 章,并对第 5 章进行修改;刘明远编写了第 6 章的 6-5 节;陈康宁编写了第 1 章,对第 2,6,7 章进行修改,并对全书进行统编(实际上本书是我们专业有关同志多年来教学实践和集体劳动的成果)。在本书的编写过程中引用了书后有关文献中的材料和思想,谨向这些文献的作者表示谢意。

限于编者的水平,书中的缺点和错误在所难免,恳切希望读者和专家批评指正。

编者

1997.6

## 主要符号一览表

$s$	复数变量( $s = \sigma + j\omega$ )	$e(t)$	时域误差函数
$t$	时间变量	$e_{ss}$	稳态误差
$j$	虚单位( $j = \sqrt{-1}$ )	$t_r$	上升时间
$e$	自然对数的底	$t_p$	峰值时间
$L(\ )$	拉普拉斯变换	$t_s$	调整时间
$L^{-1}(\ )$	拉普拉斯反变换	$X(s)$	} 系统输入
		$R(s)$	
$k$	弹簧常数	$Y(s)$	} 系统输出
		$C(s)$	
$m$	质量	$E(s)$	$s$ 域误差函数
$J$	转动惯量	$G(s)$	传递函数
$B$	粘性阻尼系数	$H(s)$	反馈传递函数
$\zeta$	阻尼比	$N(s)$	干扰信号
$K$	系统增益	$M_p$	超调量
$\omega_n$	无阻尼自然频率	$M_r$	谐振峰值
$\omega_d$	阻尼自然频率	$\omega_r$	谐振频率
$\omega_T$	转角频率	$\theta$	相位角
$\omega_c$	截止频率	$\gamma$	相位裕量
$\omega_e$	幅值穿越频率	$K_g$	幅值裕量
$\omega_\phi$	相位穿越频率	$\rho$	液体质量密度
$\omega$	频率(rad/s)	$q$	电荷
$T$	时间常数	$i, I$	电流
$\delta(t)$	单位脉冲函数	$e, E$	电势
$1(t)$	单位阶跃函数	$R$	电阻
$t$	单位斜坡函数	$C$	电容
$g(t)$	单位脉冲响应函数 (或权函数)	$L$	电感

# 目 录

## 第 1 章 绪论

- 1-1 机械工程控制论的基本含义 ..... (1)
- 1-2 机械工程系统中的信息传递、反馈以及反馈控制的概念 ..... (2)
- 1-3 机械控制的应用实例 ..... (6)
- 1-4 本课程特点及内容简介 ..... (8)
- 复习思考题 ..... (8)

## 第 2 章 拉普拉斯变换的数学方法

- 2-1 复数和复变函数 ..... (9)
- 2-2 拉氏变换与拉氏反变换的定义 ..... (10)
- 2-3 典型时间函数的拉氏变换 ..... (11)
- 2-4 拉氏变换的性质 ..... (14)
- 2-5 拉氏反变换的数学方法 ..... (21)
- 2-6 用拉氏变换解常微分方程 ..... (24)
- 复习思考题 ..... (25)
- 习题 ..... (26)

## 第 3 章 系统的数学模型

- 3-1 概述 ..... (28)
- 3-2 系统微分方程的建立 ..... (29)
- 3-3 传递函数 ..... (35)
- 3-4 方块图及动态系统的构成 ..... (41)
- 3-5 信号流图与梅逊公式 ..... (49)
- 3-6 机、电系统的传递函数 ..... (52)
- 3-7 系统的状态空间描述 ..... (62)
- 复习思考题 ..... (69)
- 习题 ..... (69)

## 第 4 章 系统的瞬态响应与误差分析

- 4-1 时间响应 ..... (74)
- 4-2 一阶系统的时间响应 ..... (76)
- 4-3 二阶系统的时间响应 ..... (79)
- 4-4 高阶系统动态分析 ..... (82)

4-5 瞬态响应的性能指标 .....	(84)
4-6 系统误差分析 .....	(89)
复习思考题 .....	(96)
习题 .....	(97)

## 第5章 系统的频率特性

5-1 频率特性 .....	(99)
5-2 频率特性的对数坐标图(伯德图) .....	(104)
5-3 频率特性的极坐标图(乃奎斯特图) .....	(113)
5-4 对数幅-相图(尼柯尔斯图) .....	(121)
5-5 最小相位系统的概念 .....	(122)
5-6 闭环频率特性与频域性能指标 .....	(124)
5-7 系统辨识 .....	(134)
复习思考题 .....	(145)
习题 .....	(146)

## 第6章 系统的稳定性

6-1 稳定性 .....	(149)
6-2 劳斯-胡尔维茨稳定性判据 .....	(152)
6-3 乃奎斯特稳定性判据 .....	(157)
6-4 系统的相对稳定性 .....	(167)
6-5 根轨迹法 .....	(170)
复习思考题 .....	(177)
习题 .....	(178)

## 第7章 机械工程控制系统的校正与设计

7-1 控制系统的性能指标及校正方式 .....	(181)
7-2 控制系统的串联校正 .....	(183)
7-3 反馈和顺馈校正 .....	(192)
7-4 PID校正器的设计 .....	(196)
复习思考题 .....	(202)
习题 .....	(202)

## 第8章 控制系统的计算机仿真与辅助设计

8-1 连续系统时域特性的数字仿真 .....	(204)
8-2 连续系统频率特性的数字仿真 .....	(209)
8-3 连续系统根轨迹的数字仿真 .....	(213)
复习思考题 .....	(216)

## 参考文献

# 第 1 章 绪 论

“机械控制工程”是一门技术科学,它是研究“控制论”在“机械工程”中应用的科学。这是一门跨“控制论”与“机械工程”技术理论领域的边缘学科。机械工程控制论是一门新兴学科,大量的问题,从概念到方法,从定义到公式,从理论的应用到经验的总结,都需要进一步的探讨。本章着重介绍机械工程控制论的基本含义及其有关的几个重要概念;列举机械工程控制论的一些应用实例;并且对本门课程的学习特点及内容作简要说明。

## 1-1 机械工程控制论的基本含义

### 1. 控制论

相对论、量子论和控制论被认为是 20 世纪上半叶的三大伟绩,称为三项科学革命,是人类认识客观世界的三大飞跃。控制论是第二次世界大战中在电子技术、火力控制技术、航空自动驾驶、生产自动化、高速电子计算机等科学技术迅速发展的基础上形成的。它抓住一切通讯和控制系统所共有的特点,站在一个更概括的理论高度揭示了它们的共同本质,即通过信息的传递、加工处理和反馈来进行控制,这就是控制论的中心思想。

控制论是一门既与技术科学又与基础科学紧密相关的边缘科学。实践证明,它不仅具有重大的理论意义,而且对生产力的发展、生产率的提高、尖端技术的研究与尖端武器的研制,以及对社会管理等方面都发生了重大的影响。因此,控制论在它建立后很短时期内便迅速渗透到许多科学技术领域,大大推动了近代科学技术的发展,并从中派生出许多新型的边缘学科。例如,生物控制论——运用控制论研究生命系统的控制与信息处理;经济控制论——研究经济计划、财贸信贷等经济活动及其控制;社会控制论——运用控制论研究社会管理与社会服务;工程控制论——控制论与工程技术的结合等。

控制论从解决生产实践问题开始,反过来又大大促进了生产技术,从而派生出“工程控制论”这一新型的技术科学。1954 年,钱学森同志发表了他的专著《工程控制论》(英文版),首先奠定了“工程控制论”的基础。这里应强调指出,工程控制论是一门技术科学,不是工程技术,它与“自动控制”、“伺服机”等既有密切的联系,而又是有所区别的。前者是指导实现“自动控制”技术、“伺服机构”设计的基本理论;而后者则是运用“工程控制论”中的基本理论以解决某些工程实际问题的具体技术措施。它研究的主要是工程设计中的具体细节。另外,工程控制论并不局限于研究自动控制及伺服机技术的基本理论,而后者往往是实现前者的某些最重要的或必须的具体措施或手段。但是,工程控制论的内容、范围和所涉及的问题要比“自动控制”、“伺服机”等工程技术要深刻而广泛得多。我们将看到,即使某些非自动控制的,即由人来控制的工程系统,也必须服从工程控制论所指出的规律或思想方法进行控制(或操作)才能更有效地运转。当然,反过来说,一切工程控制论又必须经受工程实际的检验,才能证明它们是正确的,是有生



命力的。

## 2. 机械工程控制论

现代工业生产趋向于实现最佳控制,亦即要求利用最少的能源与原材料消耗,使成本最低,取得最大的经济成效、最高的生产率和最好的产品质量等等。因此,能源、国防、运输、机械、化工、轻工等各个工业生产领域都对工程控制论提出了范围极其广大、内容极其深刻而复杂的理论性问题,促使工程控制论不断向更深入的方向发展。正如《工程控制论》这部专著再版前言中指出的:“无论学习工程控制论的读者或者研究工作者,都至少应该熟悉一个具体领域中的工程实际问题,这样才能对这一学科中的基本命题、方法和结论有深刻的理解”。因为在工业生产以及交通运输等各个领域,机械系统(包括流体系统)、机械生产过程是最为广泛存在的,所以,有必要建立以研究机械工程技术问题为主要对象的“机械工程控制论”或简称“机械控制工程”这样一门技术科学。

机械工程控制论是研究以机械工程技术为对象的控制论问题。具体地讲,是研究在这一工程领域中广义系统的动力学问题,也就是研究系统及其输入、输出三者之间的动态关系。例如,在机床数控技术中,调整到一定状态的数控机床就是系统,数控指令就是输入,而数控机床有关的运动就是输出。

正如前述,所研究的系统是广义系统,这个系统可大可小、可繁可简;完全由研究的需要而定。例如,研究一个机械系统(电液振动台、机床、坦克等等),一个机械生产过程(切削加工、锻压加工、铸造、热处理过程等等)均可作为一广义系统来研究。

因此,就系统及其输入、输出三者之间的动态关系而言,机械控制工程主要研究并解决如下几个方面的问题:

(1) 当系统已定,并且输入知道时,求出系统的输出(响应),并通过输出来研究系统本身的有关问题,即系统分析。

(2) 当系统已定,且系统的输出也已给定,要确定系统的输入应使输出尽可能符合给定的最佳要求,即系统的最优控制。

(3) 当输入已知,且输出也是给定时,确定系统应使得输出尽可能符合给定的最佳要求,此即最优设计。

(4) 当输入与输出均已知时,求出系统的结构与参数,即建立系统的数学模型,此即系统识别或系统辨识。

(5) 当系统已定,输出已知时,以识别输入或输入中的有关信息,此即滤波与预测。

从本质上看,问题(1)至(3)都是已知系统与输入求输出,问题(4)是已知系统与输出求输入,问题(5)是已知输入与输出求系统。

本书主要是以经典控制理论来研究问题(1),同时也以适当篇幅来研究其他问题。

### 1-2 机械工程系统中的信息传递、反馈以及反馈控制的概念

控制论的一个极其重要的概念就是信息传递、反馈以及利用反馈进行控制。无论是机械工程系统(包括流体系统)以及过程或生物系统或社会经济系统都存在有信息的传递与反馈,并可利用反馈进行控制以使系统按一定“目的”进行运动。

## 1. 信息及信息的传递

在科学史上,控制论与信息论第一次把一切能表达一定含义的信号、密码、情报和消息概括为信息概念,把它列为与能量、质量相当的重要科学概念。

“机械工程”是所有技术科学中发展最早、最古老的一门科学,然而引用“信息”这个概念还是比较晚的,如果不把50年代初建立“工程控制论”时期所涉及的天、火箭等机械系统算在的话,正式引用这个概念进行分析研究问题的时间不会早于50年代末或60年代初。而这与其它技术科学,例如电子科学、计算机科学等相比,早已是古典的概念了。机械工程科学领域早期所涉及的问题主要是纯几何的、静力学的或者是到达平衡状态的稳定运动。然而,随着工业生产以及科学技术不断的发展,机械工程科学面临着许多高精度、高速度、高压、高温的复杂问题,这就必然要涉及系统或过程的动态特性(或动力特性)、瞬态过程以及具有随机过程性质的统计动力学特性等等。这就显示出机械工程科学与控制论所研究的问题的相似性。事实上,机械系统中的应力、变形、温升、几何尺寸与形状精度、表面粗糙度以及

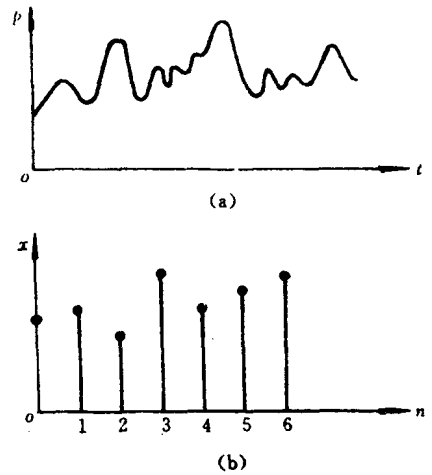


图 1-1 流体压力及工件尺寸点图  
(a)流体压力;(b)尺寸点图

流量、压力等等,与电子系统用以表达其状态的电压、电流、频率一样,也是表达机械系统或过程某一状态的信号、密码、情报或消息,只不过是信息的运载介质不同罢了。我们观察图1-1(a)是某一液压系统的流体压力变化记录;图1-1(b)是机械加工一批零件按顺序排列的工件尺寸点图。它们分别与电子系统的电压信息以及电脉冲序列或时间序列没有什么不同,同样都是包含了系统或过程的某些特性的信息。

所谓信息传递,是指信息在系统及过程中以某种关系动态地传递,或称转换。如图1-2所示机床加工工艺系统,将工件尺寸作为信息,通过工艺过程的转换,加工前后工件尺寸分布有所变化,这样,研究机床加工精度问题,可通过运用信息处理的理论和方法来进行。

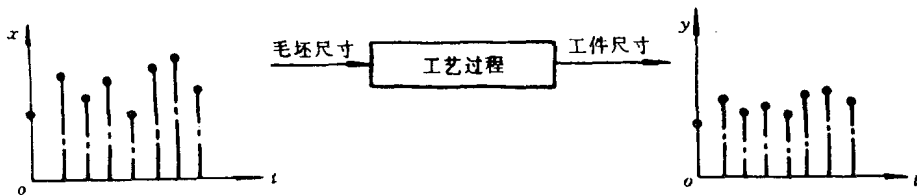


图 1-2 工艺过程中信息的传递

同样,采用控制论和信息论处理信息的概念和方法,如传递函数、频率特性以及系统识别、状态估计与预测、故障诊断等等,可研究机械工程系统及过程中信息的传递关系并揭示其本质,这也说明机械控制工程有其广阔的应用和发展前景。

## 2. 反馈及反馈控制

(所谓信息的反馈,就是把一个系统的输出信号不断直接地或经过中间变换后全部或部分

地返回、再输入到系统中去。如果反馈回去的讯号(或作用)与原系统的输入讯号(或作用)的方向相反(或相位相差 $180^\circ$ )则称之为“负反馈”;如果方向或相位相同,则称之为“正反馈”。

人类最简单的活动,如走路或取物都利用了反馈的原理以保持正常的动作。人抬起腿每走一步路,腿的位置和速度的信息不断通过人眼及腿部皮肤及神经感觉反馈到大脑,从而保持正常的步法;人手取物时,手的位置与速度信息不断反馈到人脑以保证准确而适当地抓住待取之物。人若失去上述这类反馈控制作用或者反馈不正常,就会手足颤动而显示病态,其它动物也是一样,并且在一切生物系统、社会及经济系统也都存在或利用上述反馈控制的作用,以维持正常的机能。

人们早就知道利用反馈控制原理设计和制造机器、仪表或其它工程系统。我国早在北宋时代(1086年~1089年)就发明了具有反馈控制原理的自动调节系统——水运仪象台。通常我们都把具有反馈的系统称之为闭环系统。例如,我们日常用的最古老而简单的贮槽液面自动调节器(图1-3)就是一个简单的闭环系统。浮子测出液面实际高度 $h$ 与要求液面高 $H_0$ 之差推动杠杆控制进水阀门放水,一直到实际液面高度 $h$ 与要求液面高 $H_0$ 相等时,关闭进水阀。它的信息作用、传递关系可由图1-4表示。在这里反馈信息为实际液面高 $h$ ,经与期望液面高 $H_0$ 相比较形成一个闭环系统。

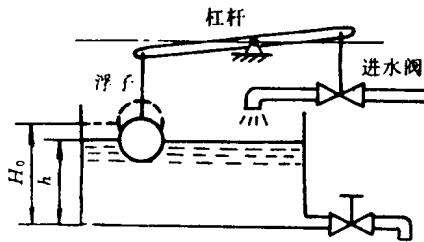


图 1-3 液面自动调节器

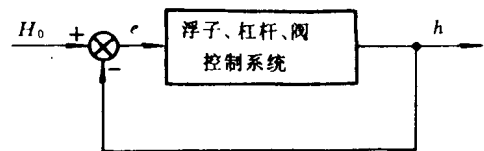


图 1-4 液面控制信息传递

应当特别指出,人们往往把反馈闭环系统局限于自动控制系统,或者仅从表面现象来判定某些系统为开环(即无反馈)或闭环系统,这就大大限制了控制论的应用范围。我们知道,人们往往利用反馈控制原理在机械系统或过程中加上一个“人为”的反馈,从而构成一个自动控制系统。例如上述液面自动调节系统以及其它所谓“自动控制系统”都人为地外加反馈。但是,在许多机械系统或过程中,往往存在的相互耦合作用构成非人为的“内在”的反馈,从而形成一个闭环系统。例如机械系统中作用力与反作用力的相互耦合从而形成内在反馈。又如在机械系统或过程(如切削过程)中自激振动的产生,也必是存在有内在的反馈使能量在内部循环,促使振动持续进行。这样的例子举不胜举。因而,很多机械系统或过程从表面上看是开环系统,但经过分析可以发现它们实质上都是闭环系统。但是,必须注意从动力学的而不是静力学的观点,从系统而不是孤立的观点进行分析,才能揭示系统或过程的本质。

为了说明内在反馈的情形,观察图1-5的具有二个自由度的机械系统。从表面看虽然是一个开环系统。但是,当我们把它的动态微分方程列出后便可知:

当质量 $m_2$ 有一小位移 $x_2$ ,使质量 $m_1$ 产生相应的位移 $x_1$ ,其动力方程为

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 = k_2 x_2 \quad (1-1)$$

而 $x_1$ 又反过来影响质量 $m_2$ 运动,其动力方程为

$$m_2 x_2 + k_2 x_2 = k_2 x_1 \quad (1-2)$$

信息量  $x_1$  与  $x_2$  的传递关系式(1-1)和式(1-2)可以表示如图 1-6 所示的闭环系统。

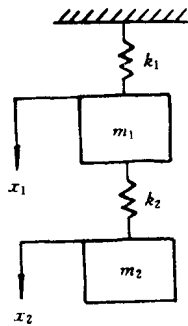


图 1-5 两自由度机械系统

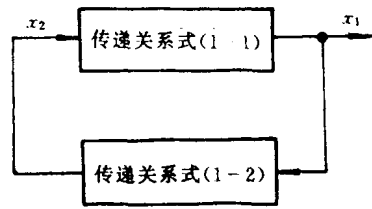


图 1-6 信息传递关系

从这个简单的实例可以看到,机械工程系统及过程中广泛存在着内在的或外加的反馈,有关实例我们将在下一节及本书有关章节中介绍。

### 3. 系统及控制系统

一般定义一个系统,是指完成一定任务的一些部件的组合。在控制工程中所指的系统是广义的。广义系统不限于上面所指的物理系统(如一台机器);也可是一个过程(如切削过程,生产过程);同时,一些抽象的动态现象(如在人一机系统中研究人的思维及动态行为),也可以把它们视为广义系统去进行研究。

所谓控制系统,是指系统的输出,能按照要求的参考输入或控制输入进行调节的。控制系统的分类方式很多,这里仅按系统是否存在反馈,将系统分为开环系统和闭环系统。

开环系统:系统的输出量对系统无控制作用,或者说系统中无反馈回路的,称开环系统。例如洗衣机,它按洗衣、清水、去水、干衣的顺序进行工作,无须对输出信号即衣服的清洁程度进行测量;又如简易数控机床的进给控制,输入指令,通过控制装置和驱动装置推动工作台运动到指定位置,而位置信号不再反馈。这些都是典型的开环系统。开环系统的方框图如图 1-7 所示。

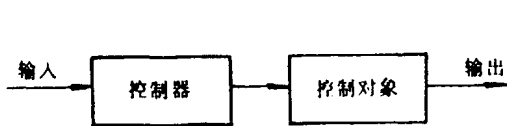


图 1-7 开环系统

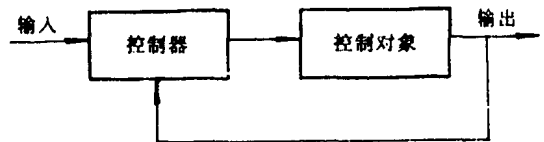


图 1-8 闭环系统

闭环系统:系统的输出量对系统有控制作用,或者说,系统中存在反馈的回路,称为闭环系统。如前面介绍的液面调节器和以工作台的位置作为系统输出,通过检测装置进行测量,并将该信号反馈,进而控制工作台运动位置的 CNC 机床的进给系统,均属于闭环系统。闭环系统的方框图如图 1-8 所示。

### 1-3 机械控制的应用实例

如同其它技术科学一样,机械工程科学的主要任务之一就是要掌握、了解机械工程系统或过程的内部矛盾规律,也就是系统或状态的动态特性。要研究其内部信息传递、变换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和策略,以便使之达到人们所预计的最佳状态或最理想的状态。

这也正是“机械控制工程”或“机械工程控制论”的主要内容。大多数自动控制系统、自动调节系统以及伺服机构都是应用反馈控制原理控制某一个机械刚体(例如机床工作台、振动台、炮身或火箭体等等),或是一个机械生产过程(例如切削过程、锻压过程、冶炼过程等等)的机械控制工程实例。

#### 例 1-1 液压压下钢板轧机

图 1-9 是一台反馈控制的液压压下钢板轧机原理图。由于钢板轧制速度及精度要求愈来愈高,现代化轧钢机已用电液伺服系统代替了旧式的机械式压下机构。图中工作辊的辊缝信息  $h_x$  或钢板出口厚度信息  $h$ (或者  $h_x$  与  $h$  两者兼有)由检测元件 3 测出并反馈到电液伺服系统 2 中,发出控制信号驱动油缸 1,以调节轧制辊缝  $h_x$ ,从而使钢板出口厚度  $h$  保持在要求公差范围内。

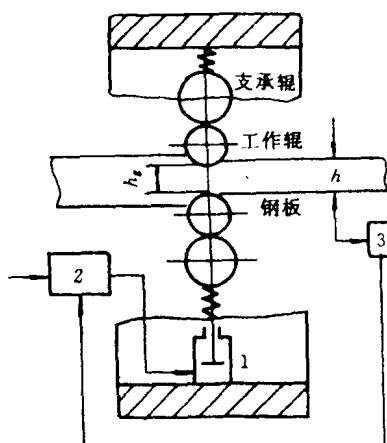


图 1-9 液压压下(钢板厚度自动控制)钢板轧机原理图

为了使上述钢板轧机伺服系统能发挥其高灵敏度、高精度的优良特性,必须应用机械控制工程有关理论进行分析、综合。

#### 例 1-2 静压轴承

图 1-10 是一个薄膜反馈式径向静压轴承。当主轴受到负荷  $W$  后产生偏移  $e$ ,因而使下油腔压力  $P_2$  增加  $\Delta P$ ,上油腔压力  $P_1$  减少  $\Delta P$ 。这样,与之相通的薄膜反馈机构的下油腔压力增加  $\Delta P$ ,上油腔压力减少  $\Delta P$ ,从而使薄膜向上变形弯曲。这就使薄膜下半部高压油输入轴承的流量增加,而上半部减少,轴承主轴下部油腔产生反作用力  $R(R=2\Delta P \cdot A, A$  为油腔面积)与负荷  $W$  相平衡以减少偏移量  $e$ ,或完全消除偏移量

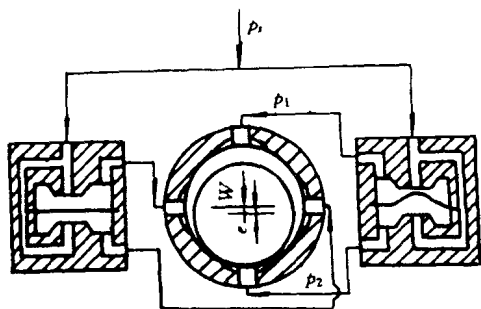


图 1-10 薄膜反馈式径向静压轴承

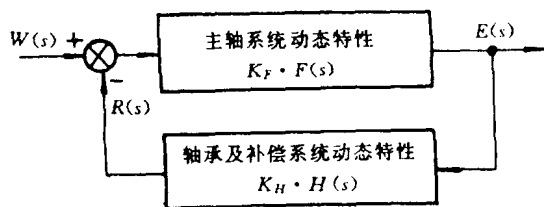


图 1-11 静压轴承信息传递

$e$ (即达到无穷大刚性)。上述有关静压轴承内部信息传递关系可以由图 1-11 表示为一个闭环系统。利用控制论有关动态特性分析理论,即可对轴承的设计与分析提供更有有效的途径。

### 例 1-3 工业机器人

图 1-12 所示工业机器人要完成将工件放入指定孔中的任务,其基本的控制方块图如图 1-13 所示。其中,控制器的任务是根据指令要求,以及传感器所测得的手臂实际位置和速度反馈信号,考虑手臂的动力学,按一定的规律产生控制作用,驱动手臂各关节,以保证机器人手臂完成指定的工作并满足性能指标的要求。

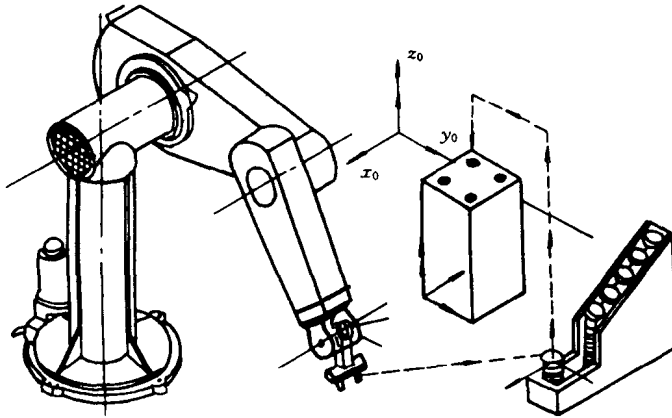


图 1-12 工业机器人完成装配工作

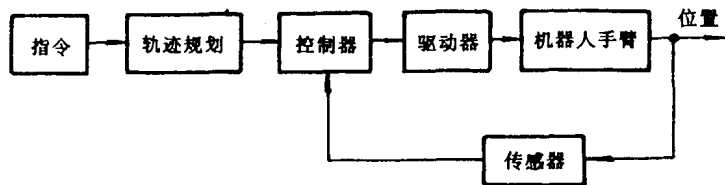


图 1-13 工业机器人控制方块图

### 例 1-4 车削过程分析

图 1-14 所示的车削过程,往往会产生自激振动,这种现象的产生与切削过程本身存在内部反馈作用有关。当刀具以名义进给  $x$  切入工件时,由切削过程特性产生切削力  $P_c$ ,在  $P_c$  的作用下,又使机床-工件系统发生变形退让  $y$ ,从而减少了刀具的实际进给量,刀具的实际进给量变成  $a = x - y$ 。上述的信息传递关系可用图 1-15 的闭环系统来表示。这样,对于切削过程的动态特性,切削自激振动的分析,完全可以应用控制理论有关稳定性理论进行分析,从而提出控制切削过程、抑制切削振动的有效途径。

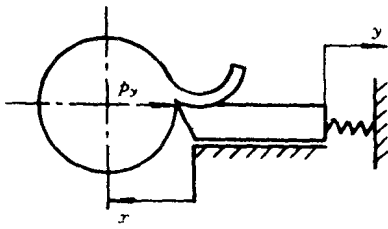


图 1-14 车削过程

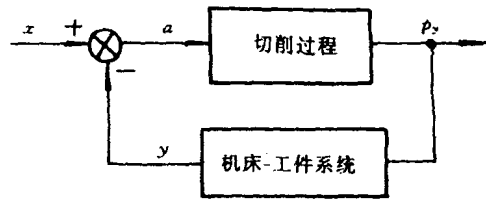


图 1-15 车削过程信息传递

## 1-4 本课程特点及内容简介

机械工程控制基础是控制论与机械工程技术理论之间的边缘学科,侧重介绍机械工程的控制原理,同时密切结合工程实际,是一门技术基础课程。

本课程内容较抽象,概括性强,而且涉及知识范围广。学习本门课要有良好的数学、力学、电学和计算机方面的基础,还要有一定的机械工程方面的专业知识。

学习本课程不必过分追求数学论证上的严密性,但应充分注意数学结论的准确性与物理概念的明晰性。既要抽象思维,又要注意联系专业,学会用广义系统动力学的抽象来解决专业实际问题,为开拓分析与解决问题的思路打下初步基础。

要重视实验,重视习题,要独立完成作业。这有助于对基本概念的理解与基本方法的运用。

### 复习思考题

1. 控制论的中心思想是什么?
2. 机械工程控制论的研究对象及任务是什么?
3. 什么是信息及信息的传递? 试举例说明。
4. 什么是反馈及反馈控制? 试举例说明。
5. 日常生活中有许多闭环和开环控制系统,试举例说明。

## 第 2 章 拉普拉斯变换的数学方法

拉普拉斯变换简称拉氏变换,是分析研究线性动态系统的有力数学工具。通过拉氏变换将时域的微分方程变换为复数域的代数方程,这不仅运算方便,使系统的分析大为简化,而且在经典控制论范畴,直接在频域中研究系统的动态特性,对系统进行分析、综合和校正,具有很广泛的实际意义。本章在简要地复习有关复数和复变函数的概念以后,着重介绍拉氏变换的定义;一些典型时间函数的拉氏变换;拉氏变换的性质以及拉氏反变换的方法。最后,介绍用拉氏变换解微分方程的方法。在学习中应注重该数学方法的应用,为后续章节的学习奠定基础。

### 2-1 复数和复变函数

#### 1. 复数的概念

复数  $s = \sigma + j\omega$ , 其中  $\sigma, \omega$  均为实数, 分别称为  $s$  的实部和虚部, 记作

$$\sigma = \operatorname{Re}(s), \omega = \operatorname{Im}(s)$$

$j = \sqrt{-1}$  为虚单位。两个复数相等时, 必须且只须它们的实部和虚部分别相等, 一个复数为零, 它的实部和虚部均必须为零。

#### 2. 复数的表示法

##### (1) 点表示法

对任一复数  $s = \sigma + j\omega$  与实数  $\sigma, \omega$  成一一对应关系, 故在平面直角坐标系中, 以  $\sigma$  为横坐标(实轴), 以  $j\omega$  为纵坐标(虚轴), 复数  $s = \sigma + j\omega$  可用坐标为  $(\sigma, \omega)$  的点来表示, 如图 2-1 所示。实轴和虚轴所在的平面称为复平面或  $s$  平面, 这样, 一个复数就对应于复平面上的一个点。

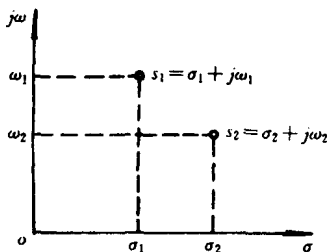


图 2-1 复数的点表示法

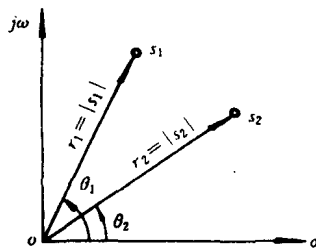


图 2-2 复数的矢量表示法

##### (2) 向量表示法

复数  $s$  还可用从原点指向点  $(\sigma, \omega)$  的向量来表示, 见图 2-2。向量的长度称为复数  $s$  的模或绝对值:



$$|s| = r = \sqrt{\sigma^2 + \omega^2}$$

向量与  $\sigma$  轴的夹角  $\theta$  称为复数  $s$  的幅角, 即

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega}{\sigma}$$

### (3) 三角表示法和指数表示法

由图 2-2 可看出

$$\sigma = r \cdot \cos\theta \qquad \omega = r \cdot \sin\theta$$

因此, 复数的三角表示法为

$$s = r(\cos\theta + j\sin\theta)$$

利用欧拉公式:  $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$ , 故复数  $s$  也可用指数表示为

$$s = r \cdot e^{j\theta}$$

### 3. 复变函数、极点与零点的概念

有复数  $s = \sigma + j\omega$ , 以  $s$  为自变量, 按某一确定法则构成的函数  $G(s)$  称为复变函数,  $G(s)$  可写成

$$G(s) = u + jv$$

$u, v$  分别为复变函数的实部和虚部, 在线性控制系统中, 通常遇到的复变函数  $G(s)$  是  $s$  的单值函数, 对应于  $s$  的一个给定值,  $G(s)$  就唯一地被确定。

**例 2-1** 有复变函数  $G(s) = s^2 + 1$ , 当  $s = \sigma + j\omega$ , 求其实部  $u$  和虚部  $v$ 。

**解:**

$$\begin{aligned} G(s) &= s^2 + 1 = (\sigma + j\omega)^2 + 1 \\ &= \sigma^2 + j \cdot 2\sigma\omega - \omega^2 + 1 \\ &= (\sigma^2 - \omega^2 + 1) + j \cdot 2\sigma\omega \end{aligned}$$

$$\therefore \quad u = \sigma^2 - \omega^2 + 1 \quad v = 2\sigma\omega$$

若有复变函数

$$G(s) = \frac{K(s - z_1)(s - z_2)}{s(s - p_1)(s - p_2)}$$

当  $s = z_1, z_2$  时,  $G(s) = 0$ , 则称为  $z_1, z_2$  为  $G(s)$  的零点, 当  $s = 0, p_1, p_2$  时,  $G(s) = \infty$ , 则称  $0, p_1, p_2$  为  $G(s)$  的极点。

## 2-2 拉氏变换与拉氏反变换的定义

### 1. 拉氏变换

有时间函数  $f(t), t \geq 0$ , 则  $f(t)$  的拉氏变换记作:  $L[f(t)]$  或  $F(s)$ , 并定义为

$$L[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-st} dt \quad (2-1)$$

$s$  为复数,  $s = \sigma + j\omega$ , 称  $f(t)$  为原函数,  $F(s)$  为象函数。若式(2-1)的积分收敛于一确定的函数值, 则  $f(t)$  的拉氏变换  $F(s)$  存在, 这时  $f(t)$  必须满足:

- ① 在任一有限区间上,  $f(t)$  分段连续, 只有有限个间断点, 如图 2-3 的  $ab$  区间。
- ② 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $f(t)$  的增长速度不超过某一指数函数, 即满足