

机械工程

控制基础

王馨·陈康宁·编著

西安交通大学出版社

全国高等教育自学考试学习用书

机械工程控制基础

王 馨 陈康宁 编 著

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书介绍经典控制理论的基本原理及其在机械工程中的应用。内容包括拉普拉斯变换的数学方法;机械工程系统的数学模型;系统的瞬态响应与误差分析;频率特性;稳定性以及机械工程控制系统的校正与设计。每章后备有思考题和习题,全书后附有各章习题答案。

本书可作为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教材,也可供有关专业教师及工程技术人员参考。

(陕)新登字007号

机械工程控制基础

王 馨 陈康宁 编著

责任编辑 潘瑞麟

西安交通大学出版社出版

西安交通大学轻版印刷厂印装

陕西省新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 12.625 字数:325 千字

1992 年 12 月第 1 版 1995 年 3 月第 3 次印刷

印数:8001—12000

ISBN7-5605-0535-X/TH·31 定价:7.50 元

前 言

自 1979 年于北京召开的全国首届“机械控制工程教学研讨会”决定将“机械控制工程”(或“机械工程控制基础”)课程列入机械类一些专业的教学计划以来,在各高等院校同行们及机械工程领域的科技人员共同努力下,控制理论在机械工程中的应用,无论从深度还是广度上都取得了很大的发展。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必不可少的手段。特别是近年来以高精度、高效率和高效益为特征的现代化生产的迅速发展,高新技术的不断开发和推广,加上计算机技术的普及,又为机械工程控制理论开辟了更加广阔的前景。

本书作为一门技术基础课教材,适用于机械工程类,包括机电一体化工程及机械电子工程等有关专业大学本科的教学。全书力求在阐明经典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。通过本门课程的学习,将为学生把经典控制理论应用于工程实际以及进一步深入学习现代控制理论打下基础。

本书适用的教学时数为 40~60 学时。全书共有七章:第一章绪论,是对本门学科的概要介绍;第二章拉普拉斯变换的数学方法,为学习后续章节所必需的数学基础;第三章机械工程系统的数学模型,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、信号流图等重要概念和方法;第四章至第六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,将介绍有关的概念、性能指标和分析方法;第七章机械控制系统校正与设计,介绍各种校正方式以及如何选择适当的校正环节和方法,使系统满足性能指标的要求。各章都配有思考题和习题,以帮助学习时抓住要点并且通过作习题更好地掌握基本概念和方法。全书后附有习题答案供参考。

本书是在我校油印出版的《机械控制工程》讲义和 1986 年机械工业出版社出版的阳含和教授主编的专著《机械控制工程》上册的基础上编写的,最早的讲义是根据阳含和教授于 1978 年为研究生和青年教师开设的“机械控制工程”讲座听课笔记,经何钺、杨公仆、万德安、孔祥利和本书编者等同志分工整理后编写的,在我校流体传动与控制、机制、机械学、应用力学等专业本科生教学中使用,并经过两次修改(刘明远同志也参加了修改)。该讲义共有十章,上述的专著共有十二章,内容偏多,部分实例偏难,为了适应大学本科生教学的需要,根据教学大纲的要求,于 1990 年再次将讲义删改编写成七章,其中王馨编写第一、二、三、五、六章;陈康宁编写第四、七章,在我校有关专业试用过三届。本书是在对上述七章内容作修改后定稿的,其中王馨编写第一、二、三、五章;陈康宁编写第四、六、七章。此外,硕士研究生康正九同志协助进行题解和整理答案工作。由上述过程可见,本书的出版是和阳含和教授生前的指导以及他关于建立本门学科的远见卓识分不开的,也是我们专业有关同志多年来教学实践和集体劳动的成果。

还应感谢我校液压及机控教研室的杨林森、宗芳云及其他同志们在本书编写、修改及出版过程中所做的工作和给予的鼓励和支持。

西安交通大学

王馨 陈康宁

1992 年 8 月

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	$F(s)$	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
ζ	阻尼比	$N(s)$	干扰信号
K	系统增益	M_p	超调量
ω_n	无阻尼自然频率	M_r	谐振峰值
ω_d	阻尼自然频率	ω_r	谐振频率
ω_T	转角频率	θ	相位角
ω_c	截止频率	γ	相位裕量
ω_b	幅值穿越频率	K_g	幅值裕量
ω_ϕ	相位穿越频率	ρ	液体质量密度
ω	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

前言	3-4
主要符号一览表	5
第一章 绪论	6
§ 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	(7)
复习思考题	(8)
第二章 拉普拉斯变换的数学方法	9
§ 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	(15)
§ 2-5 拉氏反变换的数学方法	(22)
§ 2-6 用拉氏变换解常微分方程	(25)
复习思考题	(27)
习题	(27)
第三章 机械工程系统的数学模型	29
§ 3-1 概述	(29)
§ 3-2 系统微分方程的建立	(30)
§ 3-3 传递函数	(37)
§ 3-4 方块图及动态系统的构成	(44)
§ 3-5 信号流图与梅逊公式	(51)
§ 3-6 机、电系统的传递函数	(54)
复习思考题	(64)
习题	(64)
第四章 系统的瞬态响应与误差分析	68
§ 4-1 时间响应	(68)
§ 4-2 一阶系统的时间响应	(70)

§ 4-3 二阶系统的时间响应	(73)
§ 4-4 三阶和高阶系统的时间响应	(77)
§ 4-5 瞬态响应的性能指标	(78)
§ 4-6 系统误差分析	(83)
复习思考题	(91)
习题	(91)
第五章 系统的频率特性	
§ 5-1 频率特性	(94)
§ 5-2 频率特性的对数坐标图(伯德图)	(100)
§ 5-3 频率特性的极坐标图(乃奎斯特图)	(108)
§ 5-4 闭环频率特性与频域性能指标	(115)
§ 5-5 最小相位系统的概念	(119)
§ 5-6 系统辨识	(120)
复习思考题	(133)
习题	(134)
第六章 系统的稳定性	
§ 6-1 稳定性	(135)
§ 6-2 劳斯-胡尔维茨稳定性判据	(138)
§ 6-3 乃奎斯特稳定性判据	(143)
§ 6-4 系统的相对稳定性	(154)
复习思考题	(158)
习题	(158)
第七章 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	(161)
§ 7-2 控制系统的串联校正	(163)
§ 7-3 反馈和顺馈校正	(172)
§ 7-4 PID 校正器的设计	(177)
复习思考题	(182)
习题	(183)
习题答案	(184)

第一章 绪论

作为学习本门课程的入门引导,本章着重介绍机械程控制论的基本含义及其有关的几个重要概念;列举机械程控制理论的一些应用实例;最后对本门课程的学习特点及内容作简要介绍。

§ 1-1 机械程控制论的基本含义

“机械程控制论”或称“机械控制工程”,它是研究“控制论”在机械工程中应用的一门技术科学。

一、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”的两个核心是信息论和反馈控制,其中反馈控制的概念早在 1868 年麦克斯威尔发表的“论调速器”一文中已提出来了。第二次世界大战期间及战后,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,在这基础上,总结有关学科的研究成果并加以提高形成了“控制论”,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。首先创立这门学科的是数学家、信息理论家诺伯特·维纳(Norbert Wiener)(1894~1964 年),他于 1948 年发表了“控制论”(Cybernetics),其副标题是“或关于动物和机器中的控制与通讯”(“Or Control and Communication in the Animal and the Machine”)。维纳通过比较研究发现,在机器系统与生命系统甚至社会、经济系统都具有一个共同特点,即通过信息的传递、加工处理并利用反馈来进行控制,这也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学科。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,控制论在它建立后的短短时期内便迅速渗透到许多科学技术领域,并从而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;还有工程控制论——控制论与工程技术的结合等。

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”等既有密切的联系又是有区别的。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。并且,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,虽然后者往往是实现前者的某些最重要的或必需的具体措施或手段,但是工程控制论的内容、范围及所涉及的问题要比“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受到工程实际的检验,才能证明它们是正确的,是有生命力的。

二、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、最好的产品质量等等。因此,在能源、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。另一方面,如《工程控制论》这部专著再版前言中指出:“无论学习工程控制论的读者或是研究工作者,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,研究系统及其输入、输出三者之间的动态关系。

机械工程控制论主要研究并解决两方面问题:

1. 研究系统的动态特性、内部信息传递的规律及其受到外加作用后的反应,从而决定如何控制一个机械系统(如机床、机器人、电液振动台、坦克、火炮等),使其按某一规律运动;或控制一个机械生产过程(如切削加工、锻压加工、铸造、热处理过程等),使其达到预期的技术经济指标,这些都是以机械工程技术为对象的控制论问题。

2. 对于某些机械工程中的问题,例如机械振动、噪声、加工精度等,应用控制论的观点和思想方法有可能揭示出它们的本质,并指出有效的途径和方法对它们进行控制。不仅如此,还可应用控制论所提供的理论和科学分析手段及方法,例如传递函数、频率特性、最优控制理论和方法以及信息处理、预测和滤波理论、系统辨识理论和方法等,帮助解决或纠正机械工程科学过去不曾解决或不完善的理论与实践问题;把机械工程过去停留在经验性阶段的认识提高到理论性阶段;把过去某些不能反映客观规律的纯几何观点以及静力学的孤立的形而上学观点逐步提高到动力学观点,以及系统地分析问题的更合乎客观规律的观点。

§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的传递、反馈以及利用反馈进行控制的概念。无论是机械工程系统(包括机器及流体系统)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使系统按一定“目的”进行运动。

一、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”这个概念还是比较迟的,如果不把 50 年代初建立“工程控制论”时期所涉及的航天、火箭等机械系统算在内的话,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,而这在其它技术科学领域中,例如电子科学、计算机科学等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,它们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散有所变化,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。

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。

图 1-1 流体压力及工件尺寸点图

(a) 流体压力曲线; (b) 尺寸点图

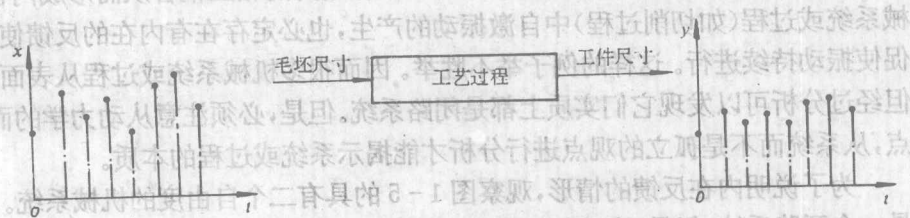


图 1-2 工艺过程中信息的传递

二、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

地返回到输入端,再输入到系统中去。如果反馈回去的信号(或作用)与原系统的输入信号(或作用)的方向相反(或相位相差 180°)则称为“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、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路系统。例如,我们日常用的最古老而最简单的贮槽液面自动调节器(图1-3)就是一个简单的闭路系统。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 h 与要求液面高 H_0 相等时,关闭进水阀。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 相比较形成一个闭路系统。

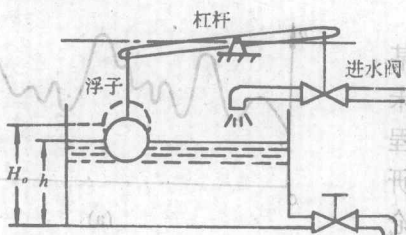


图 1-3 液面自动调节器

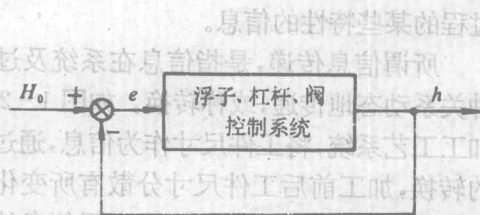


图 1-4 液面控制信息传递

应当特别指出,人们往往把反馈闭路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路(即无反馈)或闭路系统,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,往往存在内在的相互耦合作用构成非人为的“内在的”反馈,从而形成一个闭路系统。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,也必定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路系统,但经过分析可以发现它们实质上都是闭路系统。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。从表面上看虽然是一个开路系统,但是,当我们把它的动态微分方程列出后可知:

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 的运动,其动力方程为

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 = k_2 x_1 \quad (1-2)$$

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 所示的闭路系统。

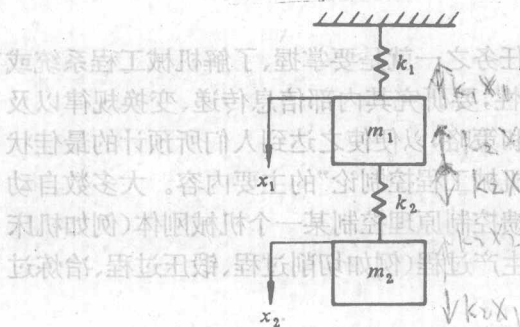


图 1-5 两自由度机械系统

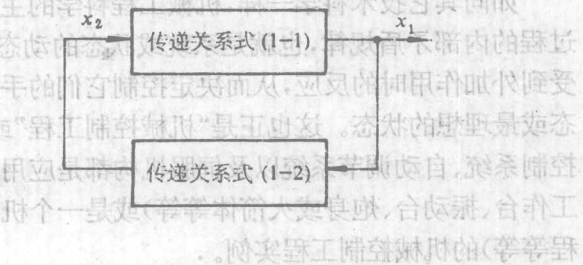


图 1-6 信息传递关系

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其它有关章节中介绍。

三、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称作系统。在控制工程中所指的系统是广义,广义系统不限于上面所指的物理系统(如一台机器);也可以是一个过程(如切削过程,生产过程);同时,它还可以是一些抽象的动态现象(如在人-机系统中研究人的思维及动态行为),可把它们视为广义系统去进行研究。

控制系统 系统的可变输出,能按照要求由参考输入或控制输入进行调节的,称作控制系统。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:

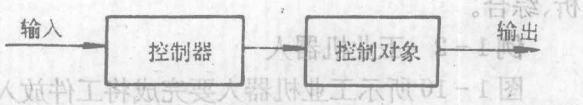


图 1-7 开环系统

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、清衣、去水、干衣的顺序进行工作,无需对输出信号即衣服的清洁程度进行测量,就是一个开环系统。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,该位置信号不再反馈,也是典型的开环系统。图 1-7 表示开环系统的方框图。

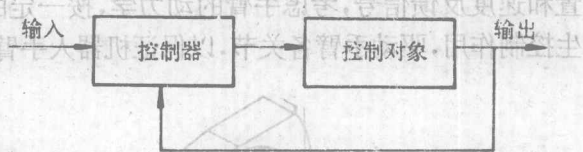


图 1-8 闭环系统

闭环系统 系统的输出量对系统有控制作用,或者说,系统中存在反馈回路的,称闭环系统。如有恒温控制的空调系统、机器人、大多数 CNC 机床的驱动系统等都属于闭环系统。采用闭环控制的 CNC 机床的进给系统中,工作台的位置作为系统输出,通过检测装置测量运动位置,并将该信号反馈,进而控制运动位置本身。图 1-8 为闭环系统的方框图。

§ 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,现代化轧钢机已经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_r 或钢板出口厚度信息 h (或者 h_r 与 h 两者同时)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_r ,从而使钢板出口厚度 h 保持在要求公差范围内。

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 工业机器人

图 1-10 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 1-11 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。

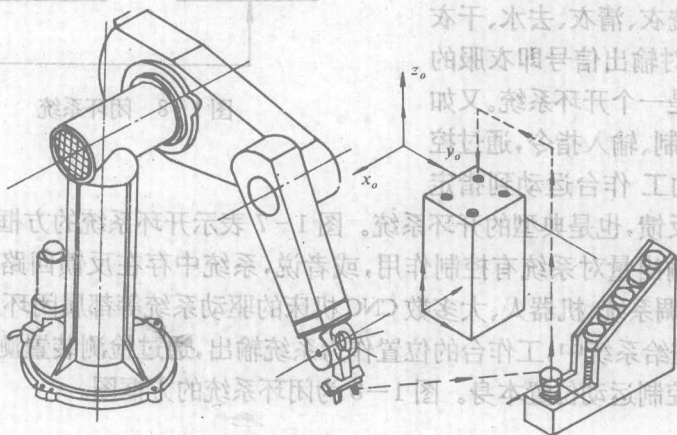
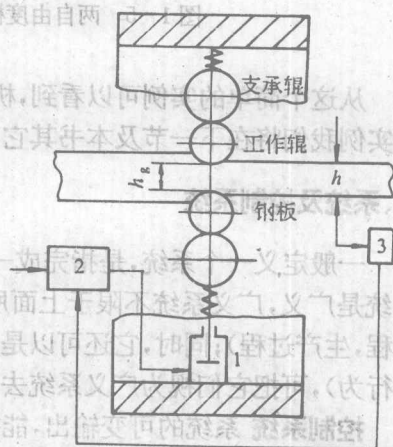


图 1-10 工业机器人完成装配工作

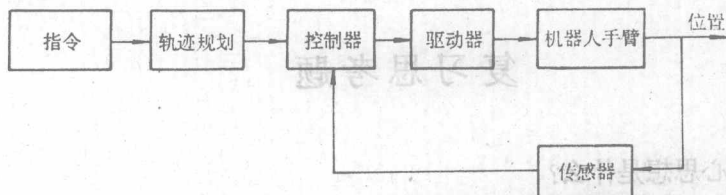


图 1-11 工业机器人控制方块图

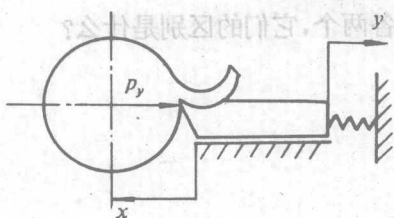


图 1-12 车削过程

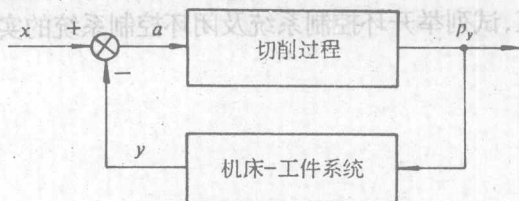


图 1-13 车削过程信息传递

例 1-3 车削过程分析

图 1-12 所示的车削过程,往往会产生自激振动,这种现象的产生就和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_y ,在 P_y 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,刀具实际进给量 $a = x - y$ 。上述信息传递关系可用图 1-13 闭路系统来表示。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,并从而提出控制切削过程、抑制切削振动的有效途径。

§ 1-4 本课程特点内容简介

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、电学方面的基础,还要有一定的机械工程方面的专业知识。

本课程的内容涉及经典控制论范畴的基本知识,主要包括以下几方面:

1. 数学工具方面 第二章拉普拉斯变换的数学方法。
2. 系统建模方面 第三章机械工程系统的数学模型。
3. 系统分析方面 有三章内容,其中
 - 第四章 系统的瞬态响应与误差分析;
 - 第五章 系统的频率特性;
 - 第六章 系统的稳定性。
4. 系统的校正与设计方面 第七章机械工程控制系统的校正与设计。

在上述各章后面都有习题。学生除认真独立地完成作业外,还需进行有关实验,以理解和运用基本概念和基本方法。

复习思考题

- 一、控制论的中心思想是什么?
- 二、机械工程控制论的研究对象及任务是什么?
- 三、什么是信息及信息的传递? 试举例说明。
- 四、什么是反馈及反馈控制? 试列举一个反馈控制的实例。
- 五、试列举开环控制系统及闭环控制系统的实例各两个,它们的区别是什么?

图 1-13 开环控制系统示意图

图 1-15 闭环控制系统示意图

图 1-17 机械系统示意图

本章内容要点

本章主要介绍控制论的基本概念、控制系统的组成、控制系统的分类、控制系统的分析、控制系统的综合、控制系统的仿真、控制系统的实验等。本章是学习本课程的基础,也是学习本课程的关键。本章共分六节,第一节介绍控制论的基本概念,第二节介绍控制系统的组成,第三节介绍控制系统的分类,第四节介绍控制系统的分析,第五节介绍控制系统的综合,第六节介绍控制系统的仿真和实验。

第一节 控制论的基本概念

控制论是研究控制系统的普遍规律的科学。控制系统的组成包括被控对象、控制器、执行机构和反馈环节。控制系统的分类包括开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。控制系统的分析包括稳定性分析、稳态误差分析和动态性能分析。控制系统的综合包括控制器的设计和参数整定。控制系统的仿真包括数学模型仿真和计算机仿真。控制系统的实验包括系统辨识和系统验证。

第二节 控制系统的组成

控制系统的组成包括被控对象、控制器、执行机构和反馈环节。被控对象是控制系统的核心,控制器是控制系统的灵魂,执行机构是控制系统的执行机构,反馈环节是控制系统的反馈环节。

第三节 控制系统的分类

控制系统的分类包括开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。开环控制系统的特点是结构简单、成本低、但精度低。闭环控制系统的特点是精度高、抗干扰能力强,但结构复杂、成本高。复合控制系统的特点是结合了开环和闭环的优点,具有高精度和强抗干扰能力。

第四节 控制系统的分析

控制系统的分析包括稳定性分析、稳态误差分析和动态性能分析。稳定性分析是控制系统的核心,稳态误差分析是控制系统的精度分析,动态性能分析是控制系统的响应速度分析。

第五节 控制系统的综合

控制系统的综合包括控制器的设计和参数整定。控制器的设计包括PID控制器的设计和现代控制理论的控制器的设计。参数整定是控制系统的优化过程,常用的方法有试凑法和优化算法。

第六节 控制系统的仿真和实验

控制系统的仿真包括数学模型仿真和计算机仿真。数学模型仿真是控制系统的理论分析,计算机仿真是控制系统的实际验证。控制系统的实验包括系统辨识和系统验证,是控制系统的实际应用。

第二章 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

一、复数的概念

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

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

$j = \sqrt{-1}$ 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, 必须它的实部和虚部均为零。

二、复数的表示法

1. 点表示法

对任一复数 $s = \sigma + j\omega$ 与实数 σ, ω 成一一对应关系, 故在平面直角坐标系中, 以 σ 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 (σ, ω) 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。

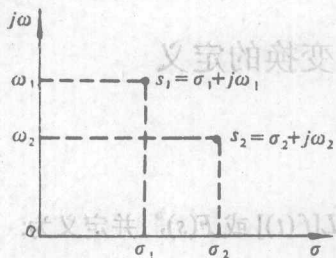


图 2-1 复数的点表示法

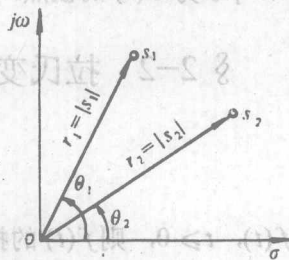


图 2-2 复数的矢量表示法

2. 向量表示法

复数 s 还可用从原点指向点 (σ, ω) 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。