

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

机电工程控制基础

机电一体化系列教材

机电工程控制基础

JIDIAN GONGCHENG KONGZHI JICHU

机械电子工程专业专科与相近专业本科适用

杨克冲 司徒忠 主编

华中理工大学出版社

11273

日
版
社

TP273
Y19

内容简介

机电一体化系列教材

机电工程控制基础

(机械电子工程专业专科与相近专业本科适用)

主编 杨克冲 司徒忠

华中理工大学出版社

(鄂)新登字第10号

图书在版编目(CIP)数据

机电工程控制基础/杨克冲等 主编
武汉:华中理工大学出版社, 1997.4
ISBN 7-5609-1442-x

I. 机…
II. ①杨… ②司…
III. 机械工程-控制系统
IV. TH11

机电一体化系列教材
机电工程控制基础

(机械电子工程专业专科与相近专业本科适用)

主编 杨克冲 司徒忠
责任编辑: 叶翠华 胡兵

*

华中理工大学出版社出版发行
(武昌喻家山 邮编:430074)
新华书店湖北发行所经销
华中理工大学出版社照排室排版
华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:13 字数:308 000
1997年4月第1版 1997年4月第1次印刷
印数:1-4 000

ISBN 7-5609-1442-x/TH·82

定价:11.50元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 简 介

本书是为大学的机电一体化专业的专科(一般为3年)和非机电专业的本科,学习机械工程控制的基础理论的需要而编写的。编写方法上以系统的稳定性、准确性、快速性的阐述贯穿全书,内容安排从时域法和频域法两方面展开,并注意它们之间的区别和联系。

本书力求在讲清控制理论基本概念的前提下,更多地结合机械工程实际,以帮助读者逐步学会应用控制理论来解决问题。

本书还可供机械工程类专业,特别是机械制造工程类专业的大学生作为教材,也可供有关教师与科技人员参考。

序

机电一体化是一项将机械、电子、计算机、信息处理及自动控制等多种技术融为一体并综合运用的复合技术,近年来国内外在科技和生产领域都非常重视这一技术的研究和应用。我国用以设计开发了一些机电一体化产品和制造系统,使机械工业的振兴目标“三上一提高”(上品种、上质量、上水平、提高经济效益)实现了新的飞跃。

当今世界上国与国之间的竞争,说到底是在经济实力的竞争,而经济实力的竞争主要又是科学技术的竞争。

党中央、国务院《关于加速科学技术进步的决定》明确提出:“科教兴国,是指全面落实科学技术是第一生产力的思想,坚持教育为本,把科技和教育摆在经济、社会发展的重要位置,增强国家的科技实力及向现实生产力转化的能力,提高全民族的科技文化素质,把经济建设转移到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来,加速实现国家的繁荣昌盛。”“科技人才是第一生产力的开拓者,是社会主义现代化建设的骨干力量。为适应社会主义现代化建设的需要,提高经济、科技在国际上的竞争力,必须充分发挥现有科技人员的作用,培养造就千百万年轻一代科技人才,建设一支跨世纪的宏大科技队伍。”

近年来,我国有关高等院校为主动适应教育要面向现代化、面向世界、面向未来的需要,积极致力于培养机械技术与电子技术有机结合的机电一体化人才,改造原有相关专业,修订教学计划,国家教委决定增设“机电控制及自动化”专业。

随着教学改革的深入发展,必须更新教学内容和教学方法,编写出版作为师生进行教学活动重要依据的、符合专业培养目标和教学计划要求的教材。华中理工大学机械学院已率先陆续编写出版了本科专业用的机电一体化系列教材。为适应专科层次的教学需要,在华中理工大学出版社的积极倡导支持下,湖北工学院机械工程系邀请华中理工大学、武汉交通科技大学、武汉水利电力大学、武汉纺织工学院、武汉汽车工业大学、长沙铁道学院、广东工业大学、郑州工学院等11所院校的代表,于1995年1月共同商讨编写出版专科专业用机电一体化系列教材,成立了编审委员会,全面负责该系列教材编写出版的组织协调工作。经过这次会议和其后的几次会议的认真讨论和协商,决定结合各院校的教学需要,第一批编写机械制造基础、机电工程控制基础、机电传动与控制、工程测试基础、数控技术、单片机原理与接口技术、工业机器人以及CAD/CAM基础等八门课程的教材,由各院校代表推荐并确定了学术水平较高、教学经验丰富的教师分工编写,由华中理工大学出版社出版。

该系列教材的编写是依据各院校代表提出并经讨论综合修订的教学大纲,遵循保证基础、联系实际、反映现代、便于教学的原则。为保证书稿质量,决定实行各书主编负责制;聘请中科院院士华中理工大学校长杨叔子教授和湖北工学院院长

宋尔涛教授为编委会顾问;聘请华中理工大学熊有伦(中科院院士)、廖效果、黄奇蔡、卢文祥、邓星钟教授,武汉交通科技大学刘守善、陈定方教授,湖北工学院宋尔涛教授分别担任各书的主审。

该系列教材适用于普通高等学校机电一体化有关专科专业和非机械类本科各专业,也可供函授大学、夜大学、广播电视大学、职工大学以及成人高等教育自学考试等有关专业使用,对广大工程技术人员和企业管理干部及职工自学机电一体化知识与技术也是一套较为适用的参考读物。

经过全体编审和出版人员的共同努力,这套系列教材的第一批八本书陆续出版了。在编审和出版过程中,得到了湖北工学院教务处处长何全国副教授、机械系原系主任张建钢副教授及办公室负责同志,华中理工大学出版社领导及有关编辑的指导和支持;各参编院校的有关负责同志和工作人员,特别是参加编写的教师,做了大量的工作,付出了辛勤的劳动,给予了积极有效的支持和帮助。在此,谨向他们致以衷心诚挚的感谢。

由于编写的时间紧,编者的水平和经验有限,这次出版的八本书难免存在一些缺点和不足之处,恳请同行专家、学者和广大读者不吝指教,提出宝贵的批评和修改意见,为进一步提高该系列教材的质量而共同努力。

机电一体化专科系列教材编委会主任 席宏卓

1996年9月

前 言

本书是为大学的机电一体化专业的专科(一般为3年)和非机电专业的本科“机电工程控制基础”(或称“机械工程控制基础”、“控制工程基础”)这门课编写的教材。

现代的机械设备日趋庞大,复杂程度愈来愈高,运转速度愈来愈快,而对其工作精度与平稳性的要求又不断提高,因此各种机械设备的“动态性能”问题,变得日益突出。为适应这种形势的需要,许多机械设备的设计与研究已经从静态发展到动态,而且提出了从设计、制造、运行与维修诸方面“全方位地解决动态问题”的策略。因此,运用各类动态模型对机械系统进行动态设计、动态试验与动态分析,乃是我们正在培养的未来的机械工程师所必须具备的基础知识与基本业务技能。

本书作为一门技术基础课教材,阐述控制理论的基本原理,使读者学会以动力学的基本观点对待机械工程系统;能够从整体系统的角度,研究系统中信息的传递、反馈以及反馈控制的动态行为。具体地讲,应能初步学会结合工程实际,应用经典控制论中的理论和方法,解决以下两方面的问题:

第一,控制一个机械或机电一体化系统或过程,使之按预定的规律运动或达到预定的技术经济指标,以求实现最佳控制;

第二,对机械工程中出现的问题,诸如振动、噪声、精度、灵敏度等,能够以控制论的观点和方法来处理,即用控制论所提供的一系列理论和手段进行科学分析,找出问题的本质和有效的解决办法。

本书着重阐述了经典控制理论,特别是其中的频域法,即在系统传递函数的基础上,着重阐述了系统的频率特性及其应用。为了适应分析和设计数字系统及计算机控制系统的需要,本书编入了有关线性离散系统的内容。书中附录的计算机辅助分析部分是为了加深对基本理论的理解,同时也使读者通过在微型计算机上的仿真实验,对数字仿真有所了解。本书的教学时数为40~60学时,根据不同专业要求和教学时数情况选取有关章节进行讲授。

为便于自学,各章后附有较多的习题,并另有习题题解,供教师备课及选题参考。

本书由杨克冲、司徒忠主编。参加编写工作的有(按姓氏笔画为序):广东工业大学司徒忠(第四章)、广东五邑大学刘经燕(第二章)、武汉交通科技大学邢配源(第五章)、武汉纺织工学院许建国(第七章)、华中理工大学杨克冲(第一章、附录)、武汉纺织工学院陈明辉(第六章)、广东工业大学查晓春(第三章)、武汉汽车工业大学赵燕(第八章)、华中理工大学王俊峰(计算机辅助分析程序)。最后由杨克冲对全书进行统稿和整理。

本书在编写过程中得到了各院校有关领导的大力支持和帮助,特别是湖北工学院的领导精心组织了这一机电一体化系列教材。我国机械工程控制论的创始人之一,中国科学院院士杨叔子教授十分关心这一教材的编写和出版,本书的许多内容正是取材于他编著的《机械工程控制基础》(1993年,第三版,华中理工大学出版社),在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,难免有不当之处,恳请读者不吝指教。

编者
1996.3

主要符号说明

m 质量	n 单独使用时一般表示转速
c 粘性阻尼系数	ω 角速度
k 弹簧刚度	T 时间常数或时间
R 电阻	τ 延迟时间或时间
C 电容	ω_n 无阻尼固有频率
L 电感	ω_d 有阻尼固有频率
K 增益或放大系数	ω_T 转角频率
$f(t)$ 外力	ω_g 相位交接频率
$L[\]$ Laplace 变换	ω_c 增益交接频率或剪切频率
$F[\]$ Fourier 变换	ω_b 截止频率
$x_i(t)$ 输入(激励)	ω_r 谐振频率
$X_i(s)$ $L[x_i(t)]$	ξ 阻尼比
$x_o(t)$ 输出(响应)	M_r 相对谐振峰值
$X_o(s)$ $L[x_o(t)]$	M_p 超调量
$X_i(j\omega)$ $F[x_i(t)]$	K_g 增益裕度
$X_o(j\omega)$ $F[x_o(t)]$	γ 相位裕度
$\delta(t)$ 单位脉冲函数	u 一般表示电压
$u(t)$ 单位阶跃函数	i 一般表示电流
$r(t)$ 单位斜坡函数	$\epsilon(t)$ 偏差
$\omega(t)$ 单位脉冲响应函数	$E(s)$ $L[\epsilon(t)]$
$G(s)$ 传递函数或前向通道传递函数	$e(t)$ 误差
$G(j\omega)$ 频率特性	$E_1(s)$ $L[e(t)]$
$H(s)$ 反馈回路传递函数	φ, θ 一般表示相位
$H(j\omega)$ 反馈回路频率特性	j 印为正体字时表示 $\sqrt{-1}$
$B(s)$ 闭环系统反馈信号	$x^*(t)$ $x(t)$ 采样后的时间序列
$G_K(s)$ 系统的开环传递函数	f_s 采样频率
$G_B(s)$ 系统的闭环传递函数	$Z[\]$ Z 变换
$G_K(j\omega)$ 系统的开环频率特性	$X(z)$ $Z[x(t)]$
$G_B(j\omega)$ 系统的闭环频率特性	$G(z)$ 离散系统的传递函数(或称脉冲传递函数)
$n(t)$ 干扰信号	
$N(s)$ $L[n(t)]$	

目 录

前言	(i)
主要符号说明	(iii)
第一章 绪论	(1)
§ 1.1 系统及其模型	(1)
§ 1.2 反馈	(3)
§ 1.3 机械工程控制论的研究对象	(6)
§ 1.4 自动控制系统工作原理及其组成	(8)
习题	(12)
第二章 Laplace 变换	(13)
§ 2.1 Laplace 变换和反变换	(13)
§ 2.2 常用函数的 Laplace 变换	(15)
§ 2.3 Laplace 变换的性质	(17)
§ 2.4 Laplace 反变换	(24)
§ 2.5 卷积	(31)
§ 2.6 用 Laplace 变换解微分方程	(34)
习题	(36)
第三章 系统的数学模型	(38)
§ 3.1 数学模型的基本概念	(38)
§ 3.2 系统的动态微分方程	(39)
§ 3.3 系统的传递函数	(46)
§ 3.4 系统的传递函数方框图及其简化	(59)
§ 3.5 相似原理	(64)
习题	(66)
第四章 时间响应分析	(70)
§ 4.1 时间响应及其组成	(70)
§ 4.2 典型输入信号	(71)
§ 4.3 一阶系统	(73)
§ 4.4 二阶系统	(74)
§ 4.5 高阶系统	(83)
§ 4.6 稳态误差的分析与计算	(85)
习题	(91)
第五章 频率特性分析	(94)
§ 5.1 频率特性概述	(94)
§ 5.2 幅相频率特性	(98)
§ 5.3 频率特性的对数坐标图	(105)
§ 5.4 闭环频率特性	(114)
§ 5.5 频率特性的特征量	(115)

§ 5.6 最小相位系统和非最小相位系统	(116)
习题	(118)
第六章 系统的稳定性	(120)
§ 6.1 系统稳定性的基本概念	(120)
§ 6.2 Routh-Hurwitz 稳定判据	(121)
§ 6.3 Nyquist(乃奎斯特)稳定判据	(126)
§ 6.4 系统的相对稳定性	(133)
习题	(138)
第七章 系统的校正原理	(140)
§ 7.1 系统的性能指标	(140)
§ 7.2 系统的校正	(142)
§ 7.3 相位超前校正	(143)
§ 7.4 相位滞后校正	(146)
§ 7.5 相位滞后-超前校正	(149)
§ 7.6 PID 校正器	(151)
§ 7.7 反馈校正	(152)
习题	(153)
第八章 线性离散系统初步	(154)
§ 8.1 概述	(154)
§ 8.2 信号的采样与复原	(157)
§ 8.3 Z 变换与 Z 反变换	(160)
§ 8.4 离散系统的传递函数	(165)
§ 8.5 线性离散系统的稳定性分析	(171)
§ 8.6 离散控制系统在机械工程中的应用	(174)
习题	(178)
附录 控制系统的计算机辅助分析	(179)
参考文献	(195)

第一章 绪 论

机械工业是国民经济中重要的基础工业。发展机械工业是发展国民经济一项关键性的战略措施。历史清楚地表明,忽视机械工业,特别是其中的制造业,将极大地制约一个国家工业的发展,甚至制约整个经济的发展。为了更快地发展机械工业,就必须研究机械制造技术的现状与动向。

当前,机械制造技术发展的一个明显而主要的动向是越来越广泛而深刻地引入控制理论。尽管从历史的发展上看,这还是初步的,从技术的总体上看,这还是局部的,但从发展的现状与前途上看,却是最活跃、最深刻、最富有生命力的。

为什么控制理论刚一进入机械制造领域,就表现得如此富有生命力,并获得引人注目的进展呢?从根本上来讲,其原因是,当代生产与科学技术的发展同这个领域内人们的传统思想方法与由此所采用的分析与解决问题的方式之间发生了尖锐的矛盾,而控制理论以它本身固有的辩证方法顺应了广大机械制造工作者渴望冲破形而上学的思想方法,推动这一领域的生产与学科向前发展的愿望。

控制理论不仅是一门极为重要的学科,而且也是科学方法论之一。控制理论在工程技术领域中体现为工程控制论,在同机械工业相应的机械工程领域中体现为机械工程控制论(本书称为机电控制工程)。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,都急需进一步探讨。本书主要涉及经典控制理论的主要内容及其应用。

§ 1.1 系统及其模型

一、系统

学会以“系统”的观点分析、处理客观对象,是科学技术发展的需要,也是人类在认识论与方法论上的一大进步。随着生产的发展,人们的生产工具、生产设备、产品与工程结构均变得愈来愈复杂,这种复杂性主要表现在其内部各组成部分之间,以及它们与外界环境之间的联系变得愈来愈密切,以至于其中某个地方的一点变化,可能会引起一连串的反应而波及全局。在这种情况下,孤立地研究各个部分,已不能满足要求,而必须将有关的部分联系起来,作为一个有机的整体加以考察、分析与处理。这个有机的整体,称为“系统”。“系统”是由相互联系、相互作用的若干部分构成,它是具有一定运动规律的一个整体。在自然界、社会界、工程界中,存在着各式各样的系统,任何一个系统莫不处于同外界(即同其他系统)相互联系之中,也莫不处于运动之中。系统由于其内部相应的机制,又由于其同外界相互的作用,就会有相应的行为、响应或输出。外界对系统的作用和系统对外界的作用,分别以“输入”及“输出”表示。一般的“系统”可以用图 1.1.1 的框图表示。

组成系统的各个部分,可以是元件,也可以是下一级的系统,后者称为“子系统”;而整个系

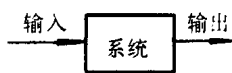


图 1.1.1 系统框图

统又可以是上一层系统的子系统。必须注意，一个系统的特性并不能看成是组成它的元件或子系统的特性的简单总和。比起元件或子系统的特性来，系统特性要复杂得多，丰富得多。要了解一个系统，不仅需要知道组成它的各个部分，而且必须了解各部分之间的关系以及它们所组成的

系统。为说明这一点，以图 1.1.2 所示的简单系统为例。这一系统由两个元件——质块 m 与弹簧 k ——组成。图中 m 表示质块的质量， k 表示弹簧刚度。若孤立地考察这两个元件，其特性均十分简单：质块的加速度 $\ddot{y}(t)$ 与受到的力成正比，即牛顿第二定律；弹簧的变形 $y(t)$ 与受到的力成正比，假定弹簧是线性的。可是两者构成如图 1.1.2 所示的系统以后，质量受外力 $f(t)$ 的作用，质量位移为 $y(t)$ ，系统的动力学方程为：

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{y}(t) + ky(t) &= f(t) \\ y(0) = y_0, \dot{y}(0) &= \dot{y}_0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1.1)$$

这一动力学方程表现出来的性质却要复杂得多。例如系统在一个初始位移 y_0 或初始速度 \dot{y}_0 的作用下，会开始作“简谐振动”，即质块 m 按照正弦或余弦规律作往复运动，这是由于质块与弹簧两者结合在一个系统中相互作用而造成，分别研究两个元件，无论如何也引不出这一结论。

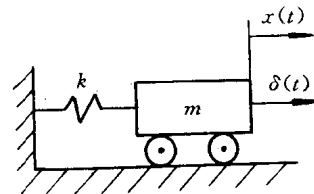


图 1.1.2 质块弹簧简单系统

二、机械系统

以实现一定的机械运动、输出一定的机械能以及承受一定的机械载荷为目的的系统，称为机械系统。这是一类广泛存在的系统，例如各种工作机械、机床、动力设备、交通运输工具以及某些工程结构等均是机械系统。

机械系统的输入与输出，往往又分别称为“激励”与“响应”。机械系统的“激励”一般是作用在系统上的力，即载荷。而“响应”则一般是系统的变形或位移。有时为方便起见，亦将系统的基础或某个部分的位移或变形视为激励，而另外部分的位移、变形或应力视为响应。

一个系统的激励，如果是人为地、有意识地加上去的，往往又称为“载荷”或“控制”，而如果是偶然因素产生的，无法加以人为控制，则称为“扰动”。

三、静态模型与动态模型

模型是人们研究系统、认识系统与描述系统的一种工具。这里所说的“模型”是指一种用数学方法描述的抽象的理论模型，用来表达一个系统内部各部分之间，或系统与其外部环境之间的关系，故又称为“数学模型”。

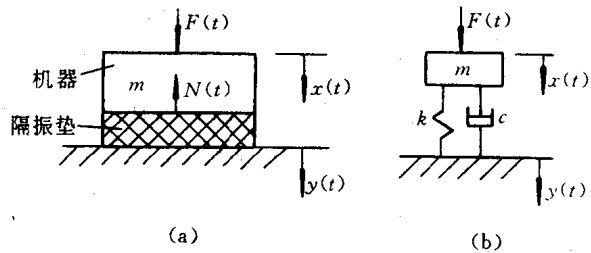


图 1.1.3 机器与隔振垫系统

例 1 图 1.1.3(a) 表示一台机器放在隔振垫上。将机器简化为一刚性质块，设其质量为 m 。设质块在铅垂方向的位移为 $x(t)$ ，从静态平衡位置开始计算质块的位移。作用在质块上的外力记为 $F(t)$ ，而隔振垫对机器的支反力记为 $N(t)$ ，取机器为脱离体，按牛顿第二定

律，有

$$m\ddot{x}(t) = F(t) - N(t) \quad (1.1.2)$$

一般而言,垫子的支反力 $N(t)$ 与机器移动的位移 $x(t)$ 及速度 $\dot{x}(t)$ 有关,即

$$N(t) = f(x, \dot{x})$$

此式一般为非线性函数,但当 x, \dot{x} 均较小时,可按 Taylor 级数展开,而仅取其一次项,

$$N = f(0,0) + \frac{\partial f(0,0)}{\partial x} x + \frac{\partial f(0,0)}{\partial \dot{x}} \dot{x} + \dots \quad (1.1.3)$$

式中

$$\frac{\partial f(0,0)}{\partial x} = \left. \frac{\partial f(x, \dot{x})}{\partial x} \right|_{x=0, \dot{x}=0} \quad \frac{\partial f(0,0)}{\partial \dot{x}} = \left. \frac{\partial f(x, \dot{x})}{\partial \dot{x}} \right|_{x=0, \dot{x}=0}$$

记

$$\frac{\partial f(0,0)}{\partial x} = k \quad \frac{\partial f(0,0)}{\partial \dot{x}} = c \quad (1.1.4)$$

而 $f(0,0)$ 表示一恒力,鉴于此恒力对运动无影响,可略去不计。可将式(1.1.3)写成

$$N \approx kx + c\dot{x}$$

此式右边两项分别表示一个弹性力与一个粘性阻尼力,代回式(1.1.2),即得到运动方程

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (1.1.5)$$

结果为一个二阶常系数线性非齐次常微分方程,其中 $F(t)$ 是激励, $x(t)$ 是响应。它是图 1.1.3 (a) 所示系统的一个数学模型,该系统可近似地表示为图 1.1.3 (b)。即以一弹簧和阻尼器近似代表隔振垫的作用。

此模型以作用在机器上的力 $F(t)$ 为激励,机器的振动位移 $x(t)$ 作为响应。有时需要分析在地基振动 $y(t)$ 的激励下,通过隔振垫传到机器上的位移 $x(t)$ 。在这种情况下,应该以 $y(t)$ 为激励,而以 $x(t)$ 为响应,取机器为脱离体,按牛顿第二定律,得

$$c[\dot{y}(t) - \dot{x}(t)] + k[y(t) - x(t)] = m\ddot{x}(t)$$

整理,得

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = cy(t) + ky(t) \quad (1.1.6)$$

此式即为其数学模型。

式(1.1.5)所表示的是系统的动态模型,当系统运动很慢时,有 $\dot{x} \approx 0, \ddot{x} \approx 0$, 于是该式简化为

$$x(t) \approx F(t)/k \quad (1.1.7)$$

这是一个静态模型,相当于载荷 $F(t)$ 作用在弹簧末端,引起变形 $x(t)$, 可看作一弹簧秤模型。

静态模型反映系统在恒定载荷或缓变载荷或系统平衡状态下的特性;而动态模型则用于研究系统在迅变载荷或系统不平衡状态下的特性。这两类模型有很大不同,后者在形式上比前者要复杂得多,内涵要丰富得多。静态模型的系统现时输出仅由其现时输入所决定,而动态模型的系统现时输出是由其以前的输入的历史决定的。静态模型一般以代数公式描述,而且往往以齐次线性函数描述;而动态模型则需要以微分方程,或其离散形式——差分方程来描述。总之,与静态模型比较,动态模型具有十分奇特的,往往是出人意料之外的特性,学完本课程后才会有更深入的体会。

§ 1.2 反 馈

反馈是机械工程控制论中一个最基本、最重要的概念,是工程系统的动态模型或许多动态

系统的一大特点。反馈是指一个系统的输出,部分或全部地被反过来用于控制其输入,称为系统的反馈。系统及其输入、输出之间之所以有动态关系,就是由于系统本身有着信息的反馈,如图 1.2.1 所示。

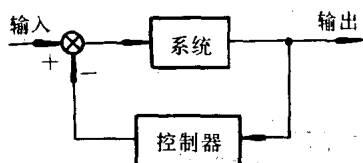


图 1.2.1 反馈

一、机械工程中的反馈控制

例 2 数控机床工作台的驱动系统。一种简单的控制方案是根据控制装置发出的一定频率和数量的指令脉冲,驱动步进电机,控制工作台或刀架的移动量,而对工作台或刀架的实际移动量不作检测,其工作原理图如图 1.2.2(a) 所示。这种控制方式简单,但问题是从驱动电路到工作台这

整个“传递链”中的任一环的误差均会影响工作台的移动精度或定位精度。为了提高控制精度,采用图 1.2.2(b) 所示的反馈控制,以检测装置随时测定工作台的实际位置(即其输出信息);然后反馈送回输入端,与控制指令比较,发现工作台实际位置与目的位置之间的误差,决定控制动作,达到消除误差的目的。

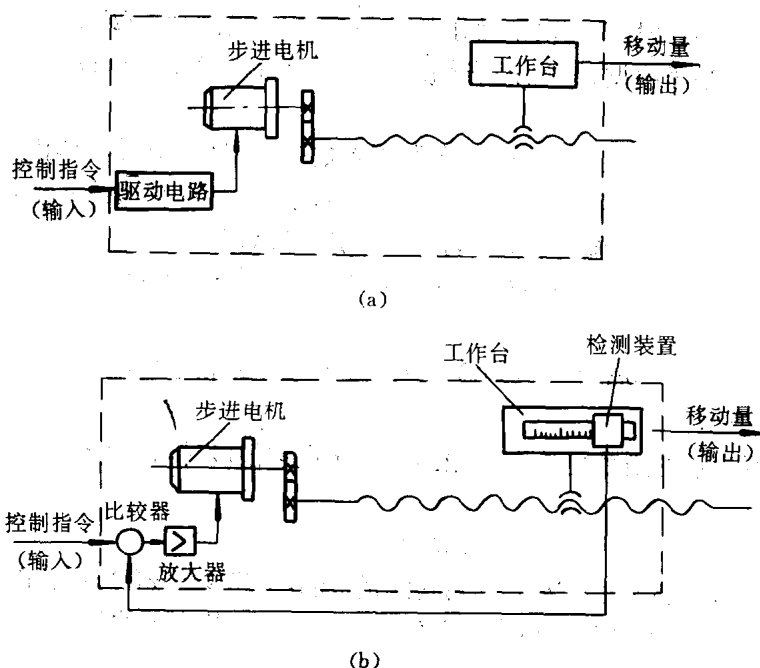


图 1.2.2 两种控制方式

(a)开环系统; (b)闭环系统

例 3 图 1.2.3 所示为一个薄膜反馈式径向静压轴承。图(a)是其结构示意图,图(b)是其框图。当主轴受到负荷 W 后,产生偏移 e ,因而使轴承下油腔压力 p_2 增加,轴承上油腔压力 p_1 减小,这样,与之相通的薄膜反馈机构的下油腔压力亦随之增加,上油腔压力则减小,从而使薄膜向上产生弯曲变形,因此薄膜下半部高压油输入轴承的通道扩大,液阻下降,从而使轴承下部压力上升。而基于同一理由,轴承上半部压力减小,于是轴承下半部油腔产生反作用力,与负荷相平衡,以减少偏移量 e ,甚至完全消除偏移量 e ,即达到“无穷大”的支承刚度。

以上只是为了说明方便,才将各因素间影响的因果关系按一定的顺序讲述,但不应该将此过程想象为先由于载荷引起一个偏移量 e ,然后薄膜反馈机构中的薄膜产生一个向上的凸度

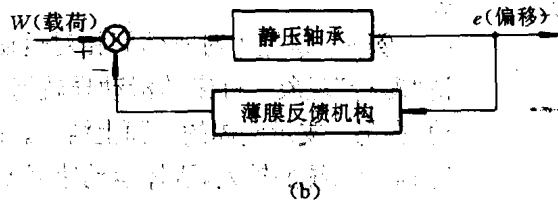
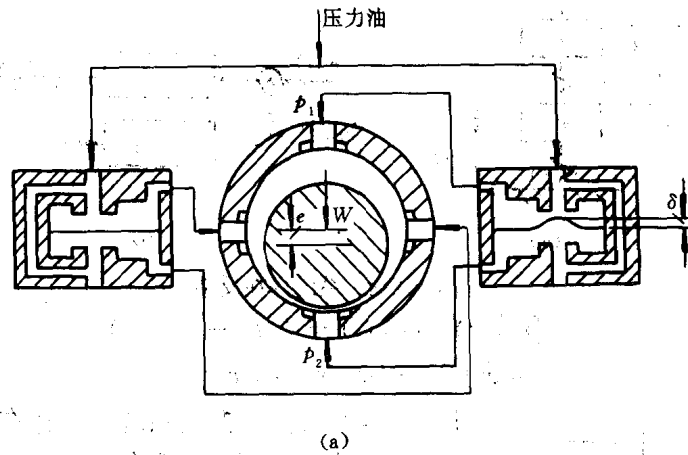


图 1.2.3 静压轴承薄膜反馈控制系统

δ , 而后者又引起轴承上下油腔的压力差 Δp , 将轴颈推回原处, 这才消除偏移量 e 。事实上, 整个调节补偿过程是连续进行的, 当载荷 $W(t)$ 波动时, 所有的参量 $e, p_1, p_2, \Delta p, \delta$ 等均在相互影响、相互制约中连续变化。载荷 $W(t)$ 的任何波动, 都引起原有平衡关系的破坏, 又引起控制器 (即反馈机构) 中薄膜的凸度变化, 而后者立即改变轴承中上、下油腔的压力差, 使之在新的条件下达到新的平衡。这又是一个典型的动态过程, 此过程只有以动态模型才能有效地加以描述。

二、机械系统的内在反馈

在工程技术领域中, 越来越多地采用自动控制系统, 在这种系统中, 往往有着“反馈控制”, 正如上两例中的反馈, 均是人们为达到一定的控制目的, 有意设计的。事实上, 除了上述人为的反馈以外, 机械系统中还广泛地存在着各种自然形成的反馈, 称为“内在反馈”。内在反馈反映系统内部各参数之间互为因果的内在联系关系, 其存在与特性对系统的动态性能有非常敏锐的影响, 而且往往很难加以控制。因此, 分析和处理系统中的内反馈问题, 往往成为机械系统动态特性研究中的关键问题。以下通过两个例子说明内在反馈现象。

例 4 图 1.2.4(a) 所示的两个自由度的系统, 其运动方程为

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) + m\ddot{x}_1(t) + kx(t) = F(t) \\ m_1\ddot{x}_1(t) - kx(t) + k_1x_1(t) = 0 \end{cases}$$

式中, $x(t)$ ——质块 m 相对于 m_1 的振动位移;

$x_1(t)$ —— m_1 相对于固定基础的振动位移。

现将其运动方程改写为如下形式:

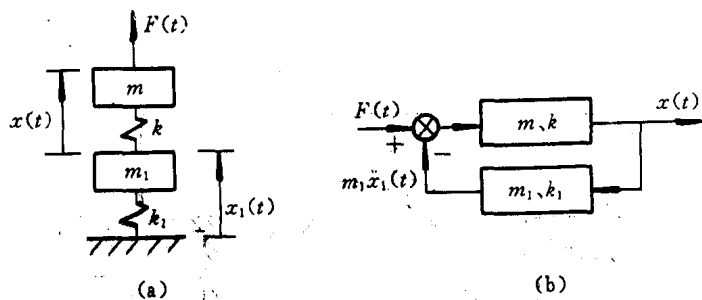


图 1.2.4 系统内在反馈

$$\begin{cases} m\ddot{x}(t) + kx(t) = F(t) - m\ddot{x}_1(t) \\ m_1\ddot{x}_1(t) + k_1x_1(t) = kx(t) \end{cases}$$

可以看出,两自由度振动系统之间存在图 1.2.4(b)所示的反馈关系。其中并没有明显的人为反馈,但内在反馈确实存在。

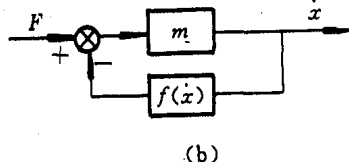
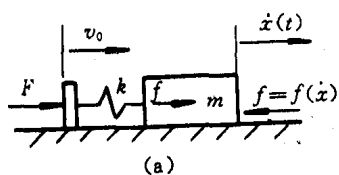


图 1.2.5 摩擦力速度特性引起的反馈

例 5 摩擦力对刚体间相对运动的均匀性的影响,即所谓“爬行”现象。机床的滑动导轨副可看成是一个刚体被驱动,在另一支承刚体的表面上滑动。此时驱动力 F 或驱动速度 v_0 为系统的输入,刚体运动速度 $\dot{x}(t)$ 为其输出,此输出通过摩擦系数的速度特性又影响作用在刚体上的摩擦力 $f(\dot{x})$,从而形成内在反馈。图 1.2.5(a)为系统示意图,其中弹簧 k 表示驱动链的刚度。所形成反馈系统的框图如图 1.2.5(b)所示。

§ 1.3 机械工程控制论的研究对象

机械工程控制论是研究控制理论在机械工程领域中应用的学科。控制理论在机械工程中的应用一般可分为三类。

一、研究机械工程技术中广义系统的动力学问题

例如图 1.1.2 所示质量-弹簧-阻尼系统的动力学方程

$$\begin{aligned} m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) &= F(t) \\ x(0) &= x_0, \quad \dot{x}(0) = \dot{x}_0 \end{aligned}$$

令 $p=d/dt$,则上式化为

$$(mp^2 + cp + k)x(t) = F(t)$$

在上例中, $F(t)$ 为系统的输入(或激励), $x(t)$ 为系统的输出(或称系统对输入的响应), $mp^2 + cp + k$ 为算子,它由系统本身的结构与参数所决定,代表与外界无关的系统本身固有特性。显然, $x(t)$ (它就是微分方程的解)是由系统的初始状态(微分方程的初始条件)、系统的固有特性以及输入所决定的,它代表系统的动态历程。

由上面的简单介绍可知,工程控制论所要研究的问题,在机械制造领域中是极其广泛的。