

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

机电一体化系列

机械程控制基础 (第三版)

获国家级优秀教学成果二等奖
获全国高等学校机电类专业优秀教材一等奖

JIXIE GONGCHENG KONGZHI JICHU

杨叔子 杨克冲 等编著

华中理工大学出版社

机械工程控制基础

(第三版)

杨 叔 子 杨 克 冲 编 著
刘 经 燕 王 治 藩

MD15/20

华中理工大学出版社

内 容 简 介

本书是为适应机制专业、机电一体化专业的本科大学生、函授大学生、夜大学生及工程技术人员学习机械工程控制的基础理论的需要而编写的。结合机械工业的实际及其发展,本书着重讨论了经典控制理论中的频域法,对系统辨识问题也作了较系统的阐述。本书内容包括机械工程控制的基本概念、传递函数、时间响应分析、频率特性分析、系统稳定性判据、系统性能与校正、系统辨识、控制系统的计算机辅助分析等。

本书力求在讲清机械工程控制的基本概念的前提下,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实际问题。

本书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。

机械工程控制基础

杨叔子 杨克冲 等编著

责任编辑 黎秋萍

*

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

湖北省安陆市印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:352 000

1984年3月第1版 1993年3月第3版 1999年5月第21次印刷

印数:141 001—146 000

ISBN 7-5609-0760-1/TH·67

定价:16.00元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行科调换)

第三版前言

“衷心藏之，何日忘之”，在我执笔写第三版前言之际，《诗经》中的这两句诗自然涌上心头。我们要再次衷心感谢兄弟院校有关教师与学生以及所有读者的信任与支持，衷心感谢出版社与有关领导部门以及有关同志的关心与鼓励。本书自1984年3月初版与1988年6月再版以来，11次印刷，发行近9万册，仍然供不应求；而且还于1990年获中南地区高校出版社优秀图书一等奖，1992年获国家机械电子工业部优秀教材一等奖。这一切，特别是各方面给我们提出的宝贵意见，是对我们的真挚关心、有力支持与巨大鼓舞。饮水怎能不思其源？！

考虑到本书修订再版后的这段时间里科学技术的发展与我们的科研进展，我们感到书中的某些部分应作增、删与修改。因此，在杨克冲、刘经燕、谢月云、桂修文4位同志与我共同进行讨论的基础上，由杨克冲同志执笔进行修改，并由杨克冲同志与我一起最后定稿。主要修改情况如下：(1)对第一、二、四、五、七章作了一些增删；(2)对各章均作了少量修改；(3)对习题作了一些增删与修订，并对原内部出版的题解作了相应修改。

我应指出，杨克冲同志不仅在本次修改中承担了全部执笔修改任务，做了许多有创见的工作，而且在本书的成书与完善过程中做出了出色的贡献，从一定角度上讲，没有他的努力，就没有本书的第二版、第三版。还应指出，刘经燕同志自始至终参加了本书的成书与完善工作，提供了大量教学实践所反映的情况与由此而产生的重要意见；谢月云同志、桂修文同志近几年承担本课教学工作，他们两位对本书的完善十分关心，并积极参与，为本书的完善作出了重要的贡献；还有，远在英国之王治藩同志与调往广州的梅志坚同志，他们对本书的成书与完善所起的重要作用，我们也是不能忘怀的。对于在本书成书前后，对成书作出了巨大贡献的我校胡庆超、熊有伦与师汉民教授，在此，再次表示衷心的感谢。

在本书第三版问世时，我们深深怀念已故的西安交通大学阳含和教授，永远铭记他在“机械工程控制”学科的建立上所作的开拓性贡献，永远感激他在我国机械控制工程研究学会的创立上所起的巨大作用，永远珍惜他在本书成书与完善中所给予的宝贵指导与他对作者们的殷切期望。

尽管本书已作了两次修改，以第三版出现，然而，“人孰无过”？书孰无错？何况，作者水平有限，精力有限，时间有限，书中的错误与不妥在所难免。“嚶其鸣矣，求其友声。”殷切希望广大读者拨冗相助，不吝指教，我们仍将不胜感激。

杨叔子

1993年1月于华中理工大学

杨叔子：教授，博士生导师，华中理工大学校长，中国科学院院士

第二版前言

本书自1984年3月初版发行后,蒙全国四十余所高等院校有关专业采用,两次印发近三万册,仍然供不应求,这使我们受到很大的鼓舞.不少兄弟院校的有关教师乃至学生,就本书的系统、内容、习题等方面提出了许多宝贵意见,这使我们获得极深的教益.特别是,西安交通大学、天津大学、浙江大学、北京机械工业管理学院、成都科技大学、湖南大学、武汉工学院、武汉工业大学、长沙国防科技大学、中国人民解放军信息工程学院、太原重型机械学院等高校的机械工程系的有关教师,对本书的编写工作与本书出版后的使用情况一直十分关心.在此,我们谨向一切有关同志致以衷心的感谢!

根据三年来的教学实践与本门学科的发展情况,我们原拟对本书作一次重大的修改,但由于时间紧迫,愿望难以实现,只能有重点地作了较大的修改,主要情况如下:

(1) 对书中涉及的某些基本概念与知识,如反馈,闭环,动态特性,传递函数,时间响应的组成等,作了更深入的分析与论述;

(2) 对一些在目前所起作用不大的内容,如Nichols图,Nichols图线等,予以删除;

(3) 在附录中增加了计算机数字仿真实例.

至于原书中一些论述不十分妥切乃至不当之处,自然作了修改.

本书的修改是在原有编者加上谢月云、梅志坚同志的集体讨论的基础上,由杨克冲同志主要执笔,由杨叔子同志最后定稿的.本书附录在杨克冲、刘经燕同志参加下,主要由梅志坚同志执笔,并由杨叔子、杨克冲同志定稿.修改后的本书,错误与不妥仍在所难免,编者仍切望读者不吝指教,以利于编者的提高,以利于本书的下一次修改工作.

编者

1987年12月于华中工学院

前 言

本书是为高等院校的机械工程类专业,特别是机械制造工程类专业的“机械工程控制基础”(或称“控制工程基础”)这门课编写的教材。

由于现代科学技术的迅速发展,将控制理论应用于机械工程的重要性日益明显,这就导致了“机械工程控制论”这门学科的产生与发展。实际上,这门学科既是一门广义的系统动力学,又是一种合乎唯物辩证法的方法论,它对启迪与发展人们的思维与智力有很大的作用。作为一门课程,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的教材,力求在阐明机械工程控制论的基本概念、基本知识与基本方法的基础上,紧密结合机械工程实际,特别是结合机械制造工程实际,以便沟通与加强数理基础与专业知识之间的联系。

本书着重阐述了经典控制理论,特别是其中的频域法,即在系统的传递函数的基础上,着重阐述了系统的频率特性及应用。同时,考虑到系统数学模型的重要性与实际系统的复杂性,特地编写了“系统辨识”一章。在这章中,除了详细介绍了经典控制理论中的系统辨识方法以外,还以相当篇幅介绍了现代控制理论的系统辨识中的差分模型与数理统计学的时间序列中的 ARMA 模型。本书吸收了我院有关同志与编者在教学与科研中的成果。本书不包括数学基础部分(例如“积分变换”),因为这些数学基础已见诸我国统编的工程数学教材。本书的教学时数为 40~60 学时。

本书是在我院 1982 年为机械制造工艺与设备专业编写的《机械工程控制基础》讲义的基础上改写的。我们对原讲义的体系、内容与论述方法作了不少变动与修改。原讲义是由杨叔子、胡庆超、杨克冲、刘经燕同志集体讨论,分工执笔写成的,胡庆超同志承担了大部分的编写工作。本书是由杨叔子、杨克冲、刘经燕、王治藩同志集体讨论,分工执笔写成的(第一章由杨叔子同志执笔,第二、七章由王治藩同志执笔,第三、四章由刘经燕同志执笔,第五、六章由杨克冲同志执笔),最后由杨叔子、杨克冲两同志定稿。实际上,本书是我院有关同志的集体劳动成果,胡庆超、师汉民、熊有伦等同志在开设与改进本门课程中,在本书的成书过程中,都付出了辛勤的劳动。编者对这些同志表示衷心的感谢。

值得提出的是,1983 年 7 月举行的有 16 所高等院校参加的中南地区高校机械工程控制研究会对本书的编写起了很大的鼓励与促进作用。编者对这次会议的与会者,特别是对武汉工学院的宋尔涛同志、容一鸣同志,深表感谢。还应提出,在开设本门课程中,我们得到西安交通大学阳含和、王馨等同志多方面的帮助,得到我院自动控制系费奇、邓聚龙等同志的许多帮助。在原讲义的编写中,我们主要参考了哈尔滨工业大学李友善同志的《自动控制原理》(上册)一书与西安交通大学阳含和同志、清华大学张伯鹏同志为他们本校有关专业编写的《控制工程基础》的讲义初稿。在此一并深表感谢。

限于编者的水平,加上本课程是新开设的课程,许多问题还有待探讨,因此,本书中的谬误与不妥之处在所难免。编者切望读者不吝指教,提出批评建议,我们由衷地欢迎与感激。

编者

1984 年 2 月于华中工学院

主要符号说明

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

目 录

第三版前言	(I)
第二版前言	(II)
前言	(III)
主要符号说明	(IV)
第一章 绪论	(1)
§ 1.1 机械工程控制论的研究对象与任务	(1)
§ 1.2 反馈	(3)
§ 1.3 系统的几种分类	(6)
§ 1.4 控制系统的基本要求	(10)
§ 1.5 机械制造的发展与控制理论的应用	(11)
§ 1.6 控制理论发展的简单回顾	(14)
§ 1.7 本课程的特点与学习方法	(15)
第二章 传递函数	(17)
§ 2.1 系统的微分方程及其列写	(17)
§ 2.2 传递函数	(24)
§ 2.3 典型环节的传递函数	(29)
§ 2.4 系统的传递函数方框图及其简化	(42)
§ 2.5 物理系统传递函数推导的典型实例	(46)
§ 2.6 相似原理	(52)
第三章 时间响应分析	(59)
§ 3.1 时间响应及其组成	(59)
§ 3.2 典型输入信号	(61)
§ 3.3 一阶系统	(62)
§ 3.4 二阶系统	(65)
§ 3.5 高阶系统的响应分析	(75)
§ 3.6 δ 函数在时间响应中的作用	(77)
第四章 频率特性分析	(84)
§ 4.1 频率特性概述	(84)
§ 4.2 典型环节的频率特性的极坐标图(Nyquist 图)	(90)
§ 4.3 Nyquist 图的一般形状	(96)
§ 4.4 典型环节频率特性的对数坐标图(Bode 图)	(100)
§ 4.5 闭环频率特性	(110)
§ 4.6 频率特性的特征量	(115)
§ 4.7 最小相位系统和非最小相位系统	(116)
第五章 系统的稳定性	(119)
§ 5.1 系统稳定性的初步概念	(119)
§ 5.2 Routh(劳斯)稳定判据	(123)
§ 5.3 Nyquist(乃奎斯特)稳定判据	(130)

§ 5.4 系统的相对稳定性	(145)
第六章 系统的性能分析与校正	(152)
§ 6.1 系统的性能指标	(152)
§ 6.2 时域的性能指标	(152)
§ 6.3 频域的性能指标	(159)
§ 6.4 综合性能指标(误差准则)	(161)
§ 6.5 系统的校正	(163)
§ 6.6 相位超前校正	(164)
§ 6.7 相位滞后校正	(169)
§ 6.8 相位滞后-超前校正	(172)
§ 6.9 反馈校正	(174)
§ 6.10 顺馈校正(或称顺馈补偿)	(179)
§ 6.11 关于系统校正的一点讨论	(181)
第七章 系统辨识	(184)
§ 7.1 单位脉冲响应的估计	(184)
§ 7.2 Bode 图与 Nyquist 图的估计	(187)
§ 7.3 频率特性的离散 Fourier 变换求法	(193)
§ 7.4 系统辨识的差分方程法	(197)
§ 7.5 机械系统辨识实例	(204)
附录 控制系统的计算机辅助分析	(210)
主要参考文献	(224)

第一章 绪 论

机械工业是国民经济中重要的基础工业. 马克思曾作过深刻的分析:“大工业必须掌握它特有的生产资料,即机器的本身,必须用机器生产机器. 这样,大工业才建立起与自己相适应的技术基础,才得以自立.”历史清楚地表明,发展机械工业是发展国民经济的一项关键性的战略措施. 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了控制理论. 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,这却是最活跃、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,并获得了引人注目的进展呢? 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. 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 机械工程控制论的研究对象与任务

工程控制论实质上是研究工程技术中广义系统的动力学问题. 具体地说,它研究的是工程技术中的广义系统在一定的外界条件(即输入或激励,包括外加控制与外加干扰)作用下,从系统的一定的初始状态出发,所经历的由其内部的固有特性(即由系统的结构与参数所决定的特性)所决定的整个动态历程;研究这一系统及其输入、输出三者之间的动态关系.

现考察一个十分熟悉的例子. 图 1.1.1 与图 1.1.2 分别表示同一个质量-阻尼-弹簧单自由度系统在不同输入时的情况. 图中, m, c, k 分别表示质量,粘性阻尼系数,弹簧刚度. 对图 1.1.1 所示的系统而言,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:

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

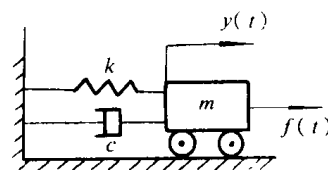


图 1.1.1

对图 1.1.2 所示的系统而言,支座受位移 $x(t)$ 的作用,质量位移为 $y(t)$,系统的动力学方程为:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) &= c\dot{x}(t) + kx(t), \\ y(0) = y_0, \quad \dot{y}(0) &= \dot{y}_0. \end{aligned} \right\} \quad (1.1.2)$$

令 $p = d/dt$, 则方程(1.1.1)与方程(1.1.2)分别化为

$$(mp^2 + cp + k)y(t) = f(t)$$

和 $(mp^2 + cp + k)y(t) = (cp + k)x(t)$.

$mp^2 + cp + k$ 为方程(1.1.1)与方程(1.1.2)左端的算子,它由系统本身的结构与参数所决定,反映了与外界无关的系统本身的固有特性.

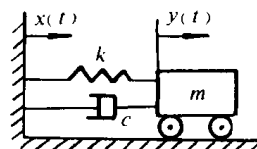


图 1.1.2

1 与 $cp + k$ 分别为方程(1.1.1)与方程(1.1.2)右端的算子,反映了系统与外界的关系.毫无疑问,系统本身的结构与参数是要影响这一算子的,亦即系统发生改变,这一算子一般也会发生改变.

$y(0)$ 与 $\dot{y}(0)$ 分别为质量的初位移与初速度,这就是在输入作用于系统之前系统的初始状态.显然,此系统在任何瞬间的状态完全可以由质量的位移 $y(t)$ 与速度 $\dot{y}(t)$ 这两个变动着的状态(即状态变量)在此瞬间的取值来刻画.因为 $y(t)$ 在此瞬间的取值代表了位移的情况; $\dot{y}(t)$ 在此瞬间的取值代表了 $y(t)$ 在此瞬间的变化趋势(速度)的情况,从而这两个状态变量就描绘了此系统的动态历程.

在上例中, $f(t)$ 与 $x(t)$ 称为系统的输入(或激励), $y(t)$ 称为系统的输出(或系统对输入的响应).显然, $y(t)$ (它就是微分方程的解)是由系统的初始状态、系统的固有特性、系统与输入之间的关系以及输入所决定的;也可说它代表了系统在一定外界条件下的动态历程.因为,知道 $y(t)$,就知道 $\dot{y}(t)$,就知道 $y(t)$ 与 $\dot{y}(t)$ 在任何瞬时的取值.在这里须强调一下,对于例中的系统,仅知道 $y(t)$ 在某一瞬时的取值,还不足以刻画该系统在此瞬时的状态.

对上例,需要研究的问题可归纳为以下三类:

第一类,当系统(即 m, c, k)与输入 $f(t), x(t)$ 已知时,求输出 $y(t)$.这个问题属理论力学的动力学的研究范畴;

第二类,当系统(即 m, c, k)与输出 $y(t)$ 已知时,求输入 $f(t), x(t)$;

第三类,当系统的输入 $f(t), x(t)$ 与输出 $y(t)$ 已知时,求系统的 m, c, k .

研究这三类问题就是研究系统的动态历程,研究系统及其输入、输出三者之间的动态关系.

对于一般线性系统,其动力学方程可用高阶线性微分方程表示如下:

$$\left. \begin{aligned} a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_1 \dot{y} + a_0 y \\ = b_m x^{(m)} + b_{m-1} x^{(m-1)} + \dots + b_1 \dot{x} + b_0 x; \\ y(0) = y_0, \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0, \dots, \\ y^{(n-1)}(0) = y_0^{(n-1)}. \end{aligned} \right\} \quad (1.1.3)$$

$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0$ 为方程(1.1.3)左端的算子,它反映了系统本身的固有特性;

$b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0$ 为方程(1.1.3)右端的算子,它反映了系统与外界之间的关系;

$y(0), \dot{y}(0), \dots, y^{(n-1)}(0)$ 为系统在受外界作用前的初始状态, $y(t), \dot{y}(t), \dots, y^{(n-1)}(t)$ 为刻画系统动态历程的状态变量;

$y(t)$ 为系统的输出; $x(t)$ 为系统的输入.

在此应指出:系统的初始状态也可视为一种特殊的输入,即“初始输入”或“初始激励”.其实,输入的结果就是改变系统的状态,并使系统的状态不断改变,这是力学中所讲的强迫运动;而当系统的初始状态不为零时,即使无输入,系统的状态也会不断改变,这是力学中所讲的自

由运动。(所谓系统的状态为零,就是指系统处于平衡位置。)从使系统的状态不断发生改变这点来看,将系统的初始状态视为“初始输入”,是十分合理的。

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为广泛的。例如,在现代测试技术中,应充分注意到,某一仪器应调整到什么状态方能保证在给定的外界条件下,获得精确的测量结果。在这里,调整到一定状态的仪器本身是系统,外界条件是输入,测量结果是输出。显然,这里所研究的问题是系统及其输入、输出三者之间的动态关系。又例如,在机床数控技术中,所要解决的问题是,数控机床接受指令后,机床的有关运动应符合要求,这仍然是前述三者之间的动态关系问题。

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,甚至可“实”可“虚”,完全由研究的需要而定。譬如说,当研究某一产业集团或某一机器制造厂应如何调整产品生产以适应市场变化的需要时,那么,此集团或此厂就是一个广义系统,市场情况是输入,产品生产情况是输出;当研究此厂的某台机床在切削加工过程中的动力学问题时,切削加工过程本身是一广义系统;当研究此台机床所加工的工件的某些质量指标时,这一工件本身可作为一广义系统;而当研究此台机床的操作者在加工过程中的作用时,操作者本身或操作者的思维等则可作为一广义系统。

由以上分析可知,就系统及其输入、输出三者之间的动态关系而言(如图 1.1.3 所示),工程控制论(包括机械工程控制论)的内容大致可归纳为如下五个方面:

(1) 当系统已定、输入已知时,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,此即系统分析问题;

(2) 当系统已定时,确定输入,且所确定的输入应使得输出尽可能符合给定的最佳要求,此即最优控制问题;

(3) 当输入已知时,确定系统,且所确定的系统应使得输出尽可能符合给定的最佳要求,此即最优设计问题;

(4) 当输出已知时,确定系统,以识别输入或输入中的有关信息,此即滤波与预测问题;

(5) 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问题。

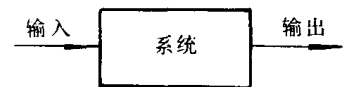


图 1.1.3

本书主要是以经典控制理论来研究问题(1);同时,也以适当篇幅来初步研究问题(5)。因为系统的数学模型是研究系统的极为重要的基础与前提,而对工程技术中的大量系统,主要只能用试验方法(包括观测方法)获得系统的输入与输出,然后建立数学模型来进行研究。“系统辨识”就是解决这一问题的。此处还应强调,正如第二章所述,本书所研究的系统是定常线性系统这一最基本的系统。

§ 1.2 反 馈

本节将阐明机械工程控制论中一个最基本、最重要的概念——反馈。将系统的输出,部分或全部地返回到输入,称为系统反馈。系统之所以有动态历程,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。

系统就是元素按一定规律(当然包括统计规律)的集合。系统,一是要有元素,二是要有元素之间按一定规律的联系。联系的实质就是信息的传输与交换。系统之所以表现出处于运动状态之中,就是因为元素之间有着联系,有着信息传输与交换;就是因为反映系统情况的状态变

量之间有着联系,有着信息传输与交换.正是这些信息的传输与交换,才使状态变量发生变化,形成系统的动态历程,形成系统及其输入、输出三者之间的动态关系.这正是“外因是变化的条件,内因是变化的根据,外因通过内因而起作用”这一唯物辩证观点的体现.系统本身信息的反馈就是系统处于运动状态的内因.

以图 1.1.1 所示的单自由度系统为例,现将方程(1.1.1)中的第一式改写为如下三种形式:

$$ky(t) = f(t) - m\ddot{y}(t) - c\dot{y}(t); \quad (1.2.1)$$

$$c\dot{y}(t) = f(t) - m\ddot{y}(t) - ky(t); \quad (1.2.2)$$

$$m\ddot{y}(t) = f(t) - c\dot{y}(t) - ky(t), \quad (1.2.3)$$

并按上三式作出能表示出系统本身信息传输与交换的方框图[见图 1.2.1 中(a),(b),(c)].

图 1.2.1(a)表示了式(1.2.1). $f(t)$ 作用在弹簧 k 上,弹簧产生位移 $y(t)$;而 $y(t)$ 又使质量 m 与阻尼 c 运动,产生惯性力 $-m\ddot{y}(t)$ 与阻尼力 $-c\dot{y}(t)$;反馈作用到弹簧 k 上,使弹簧位移产生相应的变化.这里,质量 m 对位移 $y(t)$ 起着二阶微分反馈的作用;阻尼 c 则起着一阶微分反馈的作用.这种信息传输与交换反复循环,使系统处于运动状态.图 1.2.1(b)与图 1.2.1(c)分别表示了式(1.2.2)与式(1.2.3).对它们也可作类似的分析.显然,微分方程中输出函数及其导函数项之间的关系就是系统状态变量间的反馈关系.

若将方程(1.1.1)改写为状态方程,即一阶微分方程组,则可进一步阐明反馈的物理本质.

若令 $y_1 = y, y_2 = \dot{y} = \dot{y}$,则方程(1.1.1)可化为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2; \\ \dot{y}_2 &= -\frac{k}{m}y_1 - \frac{c}{m}y_2 + \frac{f}{m}. \end{aligned} \right\} (1.2.4)$$

将上式改写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} f. \quad (1.2.5)$$

如令

$$\dot{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{c}{m} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix},$$

则式(1.2.5)化为:

$$\dot{Y} = AY + Bf. \quad (1.2.6)$$

式(1.2.6)就是现代控制理论中的状态方程. y_1, y_2 (即位移、速度)这两个状态变量用来刻画系

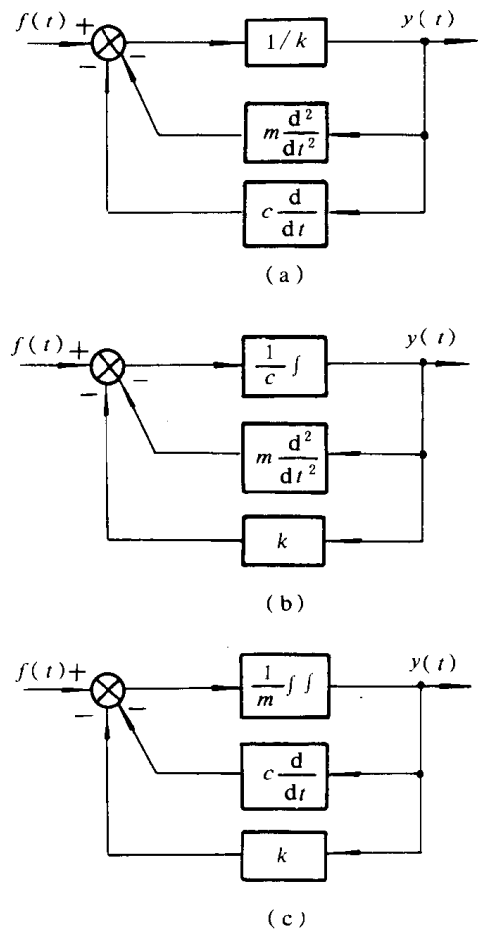


图 1.2.1

统的动态情况。

现将状态方程表示为方框图 1.2.2。从图中可清楚看出：对于输出 y_1 而言， y_2 就是输入；对于 y_2 而言， y_1 通过 k/m 这一环节而作为输入之一。这就是 y_1 与 y_2 间信息的交互作用。另外， y_2 通过 c/m 这一环节而作为其自身的输入之一，这就是 y_2 本身信息的交互作用。这些都是反馈。在这一单自由度系统中，这种信息交换过程是以能量为载体，并伴随着能量过程的。 y_1 与 y_2 的交互作用就是弹簧所具有的位能 $\frac{1}{2}ky_1^2$ 与质量所具有的动能 $\frac{1}{2}my_2^2$ 之间的相互转换； y_2 本身的交互作用就是阻尼消耗能量的过程。如图所示，质量受力 f 这一输入的作用，产生加速度 f/m 这一输出，经过瞬间的积分，产生速度 y_2 ，改变质量所具有的动能。这时， y_2 一方面将经过瞬间积分，引起位移 y_1 ，改变弹簧所具有的位能；一方面由于阻尼的作用直接引起能量的消耗。这两方面又都有反馈作用，因为它们改变质量的加速度，改变质量的动能。如果没有外力的作用，没有能量的输入， y_1, y_2 将不断减小，形成减幅振荡这种动态历程。

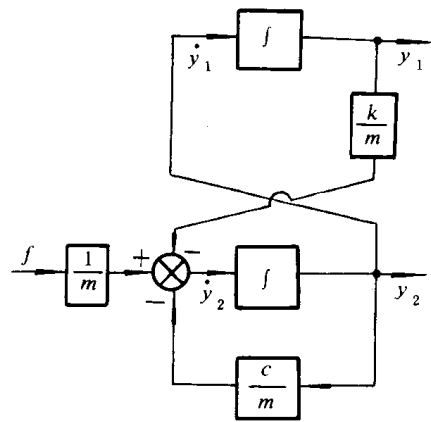
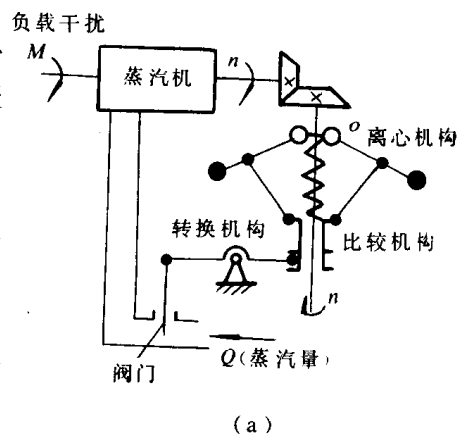


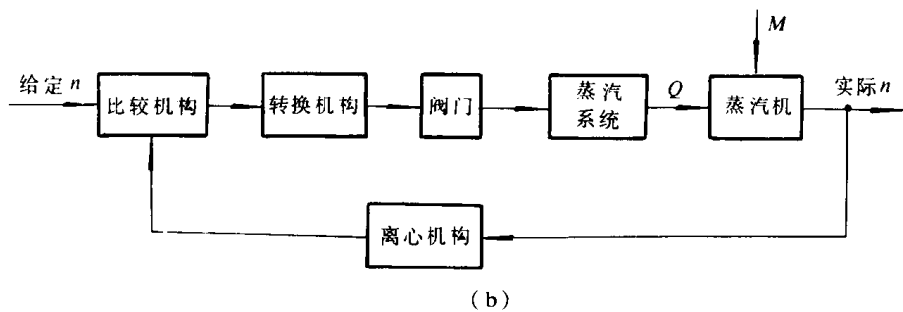
图 1.2.2

状态方程的矩阵 A 表达了系统的结构与参数，表达了系统的固有特性。矩阵 A 的主对角元素反映了状态变量本身的交互作用情况。非主对角元素反映了状态变量之间的交互作用情况。

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”。这里的“反馈控制”与上例所讲的“反馈”不尽相同，这种反馈是人为增加的。蒸汽机离心调速器调速问题是机械动力学的典型问题之一，现以



(a)



(b)

图 1.2.3

它为例来对这种反馈加以说明。如图 1.2.3 所示，由离心机构、比较机构、转换机构等组成的离心调速器，调节进入蒸汽机的蒸汽量 Q ，使得蒸汽机在工作负荷（输出轴扭矩 M ）不同时，输出

(输出轴转速 n) 保持不变. 例如, 当外界负荷变化使 M 减小时, 由于蒸汽带入的功率未变, 输出轴转速 n 上升, 而 n 一上升, 离心机构就以 o 点为支点进一步张开, 使比较机构的滑套上升, 通过转换机构的杠杆, 使调节阀的阀门下降, 减小 Q , 使 n 下降逐渐趋向原值 (给定值); 反之, 当外界负荷变化使 M 加大时, n 下降, 此时, 离心调速器可使 n 回升并逐渐趋向原值. 显然, 蒸汽机输出轴的转速 n 通过离心调速器调节蒸汽量 Q , 进而调节 n 本身. 这就是转速 n 本身的交互作用或反馈. 因此, 从蒸汽机与离心调速器所组成的系统来看, 这种反馈同上例中的反馈在本质上都是信息传输与交换, 没有区别. 但从具体形式上看, 则有以下两点不同.

(1) 对于蒸汽机而言, 离心调速器是附加的反馈控制装置, 其目的在于抵抗由于负荷变化这一干扰所引起的输出轴转速的变化. 因此, 有时这种反馈称为外反馈, 而上例中的反馈称为内反馈. 这个“外”是对蒸汽机这一被控对象而言的, 若对蒸汽机与离心调速器所组成的系统而言, 仍然是“内”.

(2) 对于本例而言, 蒸汽带来的能量主要用来带动负荷, 而通过离心调速器进行反馈控制的能量是很少的, 这与图 1.2.1 所示的反馈回路的情况不同. 一般讲来, 在自动控制系统中, 流经反馈回路的能量同用来驱动工作机构或工作对象的能量相比是很少的; 但在一般物理系统中, 就不尽然了.

综上所述, 反馈是工程控制论中一个具有关键作用的概念, 也可以说, 它是研究广义系统动力学的基本立足点. 控制论的中心思想就是“反馈控制”. (其实, “反馈控制”这一概念早在 1868 年, J. C. Maxwell 在“论调节器”一文中就提出来了. 控制论的创造人 N. Wiener 为了纪念这篇论文, 选择了“Cybernetics”这一词来命名利用反馈进行控制以期达到一定“目的”的研究领域. 因为调节器的拉丁语为 governor, 而 governor 又是从希腊语“κυβερνητης”错误引伸而来的, 实际上后者的拉丁字为“Cybernetics”, 原意为“掌舵人”, 现在都译为“控制论”.)

显然, 一个系统的动力学方程可以写成微分方程, 这一事实就揭示了系统本身状态变量之间的联系, 也就体现了系统本身存在着反馈; 而微分方程的解就体现了由于系统本身反馈的存在与外界对系统的作用的存在而决定的系统的动态历程. 可以说, 系统的微分方程是系统本身的反馈与外界对系统的作用这两者的一种数学体现形式, 系统的动态历程是这两者存在的结果. 表示系统本身固有特性的微分方程左端算子就表示系统本身的反馈情况, 是系统这一客观事物的内因. 由上述可知, 反馈、动态历程与微分方程三者就是这么紧密相联的. 在下节与以后有关章节中, 还可以看到反馈在自动控制系统中具有极为重要的作用.

§ 1.3 系统的几种分类

由前所述可以推论出, 应用工程控制论来解决工程技术问题时的基本观点有二, 一是要承认所研究的对象是“系统”; 二是要承认这个系统按照“外因是变化的条件, 内因是变化的根据”的辩证规律处于“运动”或“动态历程”之中.

为研究、分析或综合问题方便起见, 可对有关系统从不同角度加以分类.

1. 对广义系统可按反馈情况分

(1) 开环系统——当一个系统以所需的方框图表示而没有反馈回路时, 称之为开环系统. 对自动控制系统而言, 在方框图中, 更是没有任何一个环节的输入受到系统输出的反馈作用. 例如, 数控机床进给系统采用开环系统时, 其方框图如图 1.3.1 所示. 在此系统中, 输入装置、控制装置、伺服驱动装置和工作台这四个环节的输入的变化自然会影响到工作台位置即系统的

输出.但是,系统的输出并不能反过来影响任一环节的输入,因为这里没有任何反馈回路.

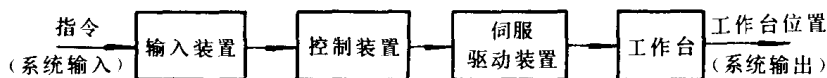


图 1.3.1

(2)闭环系统——当一个系统以所需的方框图表示而存在反馈回路时,称之为闭环系统.对自动控制系统而言,在方框图中,任何一个环节的输入都可以受到系统输出的反馈作用.控制装置的输入受到输出的反馈作用时,该系统就称为全闭环系统,或简称为闭环系统.例如,数控机床进给系统采用闭环系统时,其方框图如图 1.3.2 所示;系统的输出通过由检测装置构成的反馈回路后,也成为控制装置的输入之一.显然,系统的输出同控制装置的输入有交互作用,因而影响到驱动装置与工作台的输入.

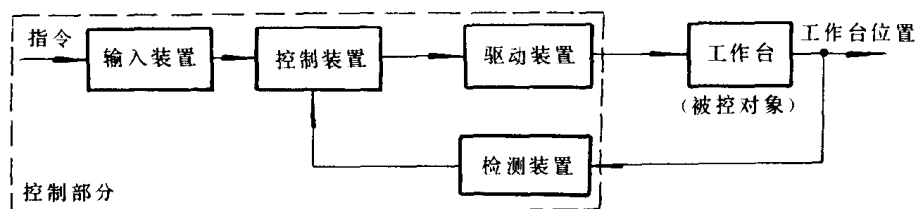


图 1.3.2

其实,在图 1.2.3 所示的由蒸汽机与离心调速器组成的系统中,离心机构就是检测装置,对输出转速 n 进行检测;比较机构与转换机构就是控制装置,它通过阀门对作为能量源的蒸汽进行流量控制.显然,此时给定转速 n 的指令由调整比较机构的套筒位置而实现.

正因为闭环系统的输出可作为反馈信息来改变有关环节的输入,进而改变输出的本身,以获得高精度的输出,所以,大量的自动控制系统都采用闭环系统.

2. 对自动控制系统还可按输出变化规律分

(1)自动调节系统——在外界干扰作用下,系统的输出仍能基本保持为常量的系统.例如,蒸汽机与离心调速器系统就是自动调节系统,它基本上能保持输出转速不变.又如图 1.3.3 所

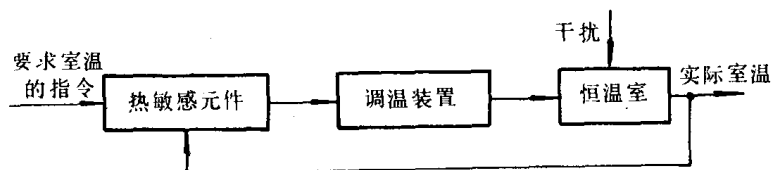


图 1.3.3

示的恒温调节系统,实际室温为其输出.当恒温室受到某种干扰致使室温偏离给定值时,热敏感元件将发生作用,接通电路,开动调温装置,直至室温回到给定值时为止.此时,室温给定值即要求室温的指令,由调整热敏感元件而实现.显然,这类系统是闭环系统,其输入即为与输出给定值相应的某物理量:在蒸汽机与离心调速器系统中是比较机构的套筒的调整位置;在恒温

调节系统中是热敏感元件的调整状态。

(2) 随动系统——在外界条件作用下,系统的输出能相应于输入在广阔范围内按任意规律变化的系统.例如,炮瞄雷达系统就是随动系统.飞机的位置是输入,高射炮的指向是输出,高射炮的指向随飞机位置的变动而变动.又如,电液伺服马达、液压仿形刀架等都是这类系统.如图 1.3.4 所示的单边随动阀控制的液压仿形刀架,当工件靠模形状使杠杆的触头向左运动时,杠杆机构就带动随动阀向右运动,随动阀与阀体(也是刀架)之间的阀口增大,右油腔压力下降,阀体向左运动;当工件靠模形状使杠杆的触头在弹簧作用下向右运动时,随动阀向左运动,阀体向右运动;在这两种情况下,阀体的运动带动杠杆机构,将使阀口大小趋向复原,此即阀体跟随工件靠模形状而运动.显然,工件靠模形状是输入,刀架仿形运动是输出,阀体本身(即油缸体、刀架本身)构成反馈回路,系统是闭环的。

(3) 程序控制系统——在外界条件作用下,系统的输出按预定程序变化的系统.例如,图 1.3.1 与图 1.3.2 所示的数控机床进

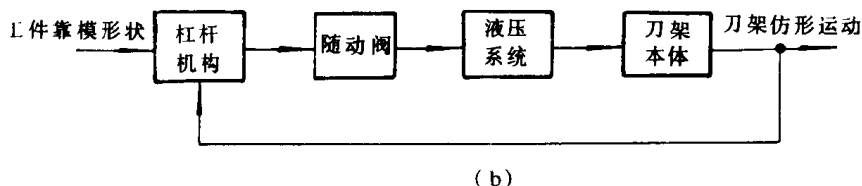
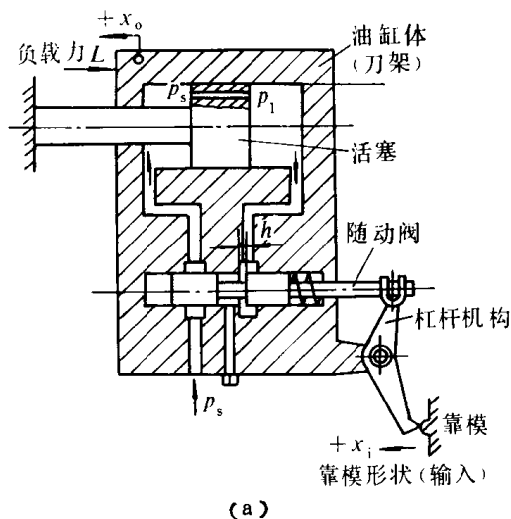


图 1.3.4

给系统就是程序控制系统.显然,程序控制系统可以是开环系统,也可以是闭环系统。

由上可知,一个闭环的自动控制系统主要由控制部分和被控部分组成.控制部分的功能是接受指令信号和被控部分的反馈信号,并对被控部分发出控制信号.被控部分的功能则是接受控制信号、发出反馈信号,并在控制信号的作用下实现被控运动。

图 1.3.5 是一个典型闭环控制系统的框图.该系统的控制部分由以下几个环节组成:

给定环节——它是给出输入信号 x_i 的环节,用于确定被控对象的“目标值”(或称给定值),给定环节可以用各种形式(电量、非电量、数字量、模拟量等)发出信号.例如,数控机床进给系统的输入装置就是给定环节。

测量环节——它用于测量被控变量,并将被控变量转换为便于传送的另一物理量(一般为电量).例如,用电位计将机械转角转换为电压信号,用测速电机将转速转换成电压信号,用光栅测量装置将直线位移转换成数字信号等.前述例中的工作台位置检测装置、离心机构、热敏感元件、杠杆机构均为这类环节.一般说来,测量环节是非电量的电测量环节。

比较环节——在这个环节中,输入信号 x_i 与测量环节发出来的有关被控变量 x_o 的反馈量 x_b 相比较,并得到一个小功率的偏差信号 ϵ , $\epsilon = x_i - x_b$.如幅值比较,相位比较,位移比较