



高等院校应用型本科
智能制造领域「十三五」规划教材



机械工程 控制基础

JIXIE GONGCHENG
KONGZHI JICHU

主编 代春香 李 敏 郭丽红



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



高等院校应用型本科智能制造领域“十三五”规划教材

机械控制基础

主 编 代春香 李 敏 郭丽红
副主编 王 蕊 叶仁虎



华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书是根据本科机械专业人才培养目标,总结近年来的教学改革与实践,参考经典控制理论资料编写而成的。内容包括机械工程控制的基本概念、系统的数学模型、时间响应分析、频率特性分析、系统的稳定性分析、系统的性能指标与校正、离散系统分析等,并配例题讲解、MATLAB 运用于系统的分析解题示例及习题,可以更好地帮助读者理解相关内容。

本书可供本科院校的机械工程类专业,特别是机械设计制造、自动化、机电类专业等作为教材使用,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程控制基础/代春香,李敏,郭丽红主编. —武汉:华中科技大学出版社,2018.8
高等院校应用型本科智能制造领域“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5680-4454-7

I. ①机… II. ①代… ②李… ③郭… III. ①机械工程-控制系统-高等学校-教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 176704 号

机械工程控制基础

Jixie Gongcheng Kongzhi Jichu

代春香 李 敏 郭丽红 主编

策划编辑:余伯仲

责任编辑:戢凤平

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉市籍缘印刷厂

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:15.5

字 数:379千字

版 次:2018年8月第1版第1次印刷

定 价:44.80元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

本书是为本科院校的机械工程类专业的“机械工程控制基础”“自动控制理论”等课程编写的教材。书中介绍了控制系统的基本概念和有关的名词术语,并详细介绍了控制系统的组成、工作原理以及分析方法。在各知识点后,通过例题讲解了其在实际系统中的分析运用,以帮助学生更容易理解相关知识点。本书除了进行数值解的相关计算,还通过 MATLAB 软件进行了数值解验证和图形的绘制等,便于加强数理基础与专业知识间的联合运用。本书有如下特点:

(1) 在每章内容编排上,由基本到简单组合再到综合,循序渐进,由浅入深,既照顾了大多数读者,又照顾了学有余力、想进一步学习深造的读者;同时也便于教师根据教学要求和学时取舍内容。

(2) 篇幅紧凑,内容精简,以课程基本要求为主,对基本概念、原理的叙述简明准确,便于掌握;不过分追求理论体系的严谨,例如简化公式推导,贯彻“以应用为目的”的原则等。

(3) 例题和习题尽量选取生活和工程实际中常见的、易理解的题目,有利于学生解题能力的培养。例题的分析和解题过程叙述详尽,思路清晰。

本书由四川大学锦城学院代春香、武昌工学院李敏和四川大学锦城学院郭丽红担任主编,由武汉华夏理工学院叶仁虎和华南理工大学广州学院王蕊担任副主编。全书共 7 章,其中郭丽红编写第 1 章,叶仁虎编写第 2 章,王蕊编写第 3 章,李敏编写第 4 章和第 7 章,代春香编写第 5 章和第 6 章。全书由代春香、李敏、郭丽红进行统稿。

本书在编写过程中,得到了有关领导和同事们的大力支持,引用了部分同类教材中的资料、图表和例题,在此表示衷心感谢。因编者水平有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

2018 年 5 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 控制系统的分类	(2)
1.2.1 研究对象与任务	(2)
1.2.2 系统的分类	(4)
1.2.3 系统及其模型	(6)
1.3 控制系统的基本原理	(8)
1.3.1 自动控制理论	(8)
1.3.2 反馈控制理论	(9)
1.3.3 反馈控制系统的组成	(9)
1.3.4 控制系统的基本要求	(11)
1.4 控制系统的示例	(11)
1.5 控制系统的分析与设计工具	(12)
1.5.1 MATLAB 概述	(12)
1.5.2 控制系统工具箱	(12)
1.5.3 MATLAB 辅助分析与设计	(13)
本章小结	(17)
习题	(17)
第 2 章 控制系统的数学模型	(18)
2.1 傅里叶变换与拉普拉斯变换	(18)
2.1.1 傅里叶变换	(18)
2.1.2 拉普拉斯变换	(20)
2.2 控制系统的微分方程	(31)
2.2.1 概述	(31)
2.2.2 列写微分方程的一般方法	(32)
2.2.3 非线性微分方程的线性化	(35)
2.2.4 相似原理	(37)
2.3 控制系统的传递函数	(38)
2.3.1 传递函数	(39)
2.3.2 传递函数的零点、极点和放大系数	(40)
2.3.3 系统的状态空间模型	(42)
2.3.4 典型环节的传递函数	(45)
2.4 控制系统的传递函数方框图及其简化	(52)

2.4.1	传递函数方框图的组成和绘制	(52)
2.4.2	传递函数方框图的等效变换和简化	(58)
2.5	考虑扰动的控制系统的传递函数	(63)
2.5.1	系统开环传递函数	(63)
2.5.2	主令输入 $x_1(t)$ 作用下系统的闭环传递函数	(64)
2.5.3	干扰 $n(t)$ 作用下系统的闭环传递函数	(64)
2.5.4	系统的总输出	(65)
2.6	基于 MATLAB 建立数学模型	(65)
2.6.1	基于 MATLAB 建立系统的传递模型	(65)
2.6.2	基于 MATLAB 建立系统的零极点增益模型	(66)
2.6.3	基于 MATLAB 建立系统的状态空间模型	(67)
	本章小结	(68)
	习题	(68)
第3章	控制系统的时间响应分析	(73)
3.1	时间响应及其组成	(73)
3.1.1	时间响应	(73)
3.1.2	时间响应的组成	(73)
3.2	系统的时域性能指标	(74)
3.2.1	典型输入信号	(74)
3.2.2	动态过程和稳态过程	(77)
3.2.3	动态性能和稳态性能	(77)
3.3	一阶系统的时域分析	(78)
3.3.1	一阶系统的数学模型	(78)
3.3.2	一阶系统的单位阶跃响应	(79)
3.3.3	一阶系统的单位脉冲响应	(80)
3.3.4	一阶系统的单位斜坡响应	(81)
3.3.5	一阶系统的单位加速度响应	(81)
3.4	二阶系统的时域分析	(82)
3.4.1	二阶系统的数学模型	(82)
3.4.2	二阶系统的单位阶跃响应	(83)
3.4.3	二阶系统的单位脉冲响应	(88)
3.4.4	二阶系统的计算举例	(89)
3.5	高阶系统的时域分析	(91)
3.5.1	高阶系统的单位阶跃响应	(92)
3.5.2	闭环主导极点及其动态性能分析	(93)
3.6	系统误差分析与计算	(94)
3.6.1	系统的误差和偏差	(94)
3.6.2	系统的误差计算	(95)

3.6.3 系统的类型	(96)
3.6.4 系统的稳态误差和稳态偏差	(96)
3.7 基于 MATLAB 的系统时间响应分析	(101)
3.7.1 基于 MATLAB 的时间响应	(101)
3.7.2 基于 MATLAB 的瞬态性能指标	(105)
本章小结	(107)
习题	(108)
第 4 章 控制系统的频率特性分析	(112)
4.1 频率特性概述	(112)
4.1.1 频率特性的基本概念	(112)
4.1.2 频率特性的求法及几何表示	(113)
4.1.3 频率特性的特点和作用	(115)
4.1.4 频率特性的图示方法	(116)
4.2 频率特性的 Nyquist 图	(117)
4.2.1 Nyquist 图及其一般物理意义	(117)
4.2.2 Nyquist 图的一般形状	(118)
4.3 频率特性的 Bode 图	(122)
4.3.1 Bode 图概述	(122)
4.3.2 典型环节的 Bode 图绘制	(122)
4.3.3 绘制系统 Bode 图的步骤与实例	(127)
4.4 频率特性的相关参数	(130)
4.5 最小相位系统和非最小相位系统	(131)
4.6 基于 MATLAB 的频率特性分析	(132)
4.6.1 基于 MATLAB 绘制 Nyquist 图	(132)
4.6.2 基于 MATLAB 绘制 Bode 图	(133)
4.6.3 基于 MATLAB 求系统的频域指标	(135)
本章小结	(136)
习题	(136)
第 5 章 控制系统的稳定性分析	(139)
5.1 系统稳定性概述	(139)
5.1.1 系统不稳定现象	(139)
5.1.2 系统稳定的定义和条件	(140)
5.1.3 系统稳定性的扩展	(142)
5.2 劳斯稳定判据	(143)
5.2.1 线性系统稳定的必要条件	(143)
5.2.2 劳斯稳定判据	(144)
5.2.3 劳斯判据的特殊情况	(147)
5.2.4 劳斯稳定判据的应用	(151)

5.3	Nyquist 稳定判据	(152)
5.3.1	Nyquist 稳定判据数学基础	(152)
5.3.2	Nyquist 稳定判据	(154)
5.3.3	开环含有特殊环节时的 Nyquist 分析	(156)
5.3.4	Nyquist 判据的相关说明及应用举例	(157)
5.4	Bode 稳定判据	(160)
5.4.1	Bode 图和 Nyquist 图的对应分析	(160)
5.4.2	穿越的概念	(161)
5.4.3	Bode 判据	(162)
5.4.4	条件稳定系统	(162)
5.5	系统的相对稳定性	(163)
5.5.1	相位裕度	(163)
5.5.2	幅值裕度	(164)
5.5.3	Bode 稳定判据举例	(165)
5.5.4	影响系统稳定性的主要因素	(169)
5.6	闭环系统的频域性能指标	(169)
5.6.1	由开环频率特性估计闭环频率特性	(169)
5.6.2	闭环系统的频域性能指标	(170)
5.6.3	时域指标与频域指标的关系	(171)
5.7	基于 MATLAB 的系统稳定性分析	(173)
5.7.1	基于 MATLAB 求解系统的特征根	(173)
5.7.2	基于 MATLAB 求系统的频域参数和判定相对稳定性	(174)
	本章小结	(175)
	习题	(175)
第 6 章	系统的性能指标与校正	(178)
6.1	系统的设计与校正问题	(178)
6.1.1	系统的性能指标	(178)
6.1.2	系统带宽的确定	(180)
6.1.3	校正的概念及分类	(181)
6.1.4	基本控制规律	(183)
6.2	串联校正	(186)
6.2.1	频率特性法校正设计	(186)
6.2.2	串联超前校正	(186)
6.2.3	相位滞后校正	(190)
6.2.4	相位滞后-超前校正	(193)
6.3	PID 校正	(196)
6.3.1	PID 控制规律	(196)
6.3.2	PID 调节器设计	(197)

6.4 反馈校正	(198)
6.4.1 位置反馈校正	(198)
6.4.2 速度反馈校正	(199)
6.5 基于 MATLAB 设计系统校正	(200)
本章小结	(202)
习题	(202)
第 7 章 离散系统分析	(205)
7.1 离散控制系统概述	(205)
7.1.1 采样控制系统与数字控制系统	(205)
7.1.2 A/D 转换器与 D/A 转换器	(206)
7.1.3 离散控制系统的特点	(208)
7.2 信号的采样与采样定理	(208)
7.2.1 信号采样	(208)
7.2.2 采样定理	(209)
7.2.3 采样的保持	(211)
7.3 离散控制系统的数学模型——差分方程	(212)
7.3.1 线性常系数差分方程	(213)
7.3.2 差分方程的解法	(214)
7.4 离散控制系统的传递函数	(215)
7.4.1 脉冲传递函数的定义与求解	(216)
7.4.2 脉冲传递函数的建立	(217)
7.5 离散控制系统分析	(221)
7.5.1 离散控制系统稳定性分析	(221)
7.5.2 离散控制系统动态性能分析	(224)
7.5.3 离散控制系统稳态性能分析	(226)
7.6 基于 MATLAB 的离散系统分析与校正	(228)
7.6.1 连续系统的离散化	(229)
7.6.2 离散系统的单位阶跃响应	(229)
7.6.3 离散系统的频域响应	(230)
本章小结	(231)
习题	(232)
参考文献	(234)

第1章 绪 论

1.1 概述

在公元前 1400—公元前 1100 年,中国、埃及和巴比伦出现的自动计时漏壶应该是最早的自动控制的实例。公元 132 年左右,中国的张衡发明了水运浑象仪,研制出自动测量地震的候风地动仪。公元 235 年中国的马钧研制出用齿轮传动的自动指示方向的指南车。在 18 世纪,瓦特(J. Watt)发明的蒸汽机离心调速器就是一个有名的控制装置。由于该调速器在工作中可能会出现振荡,这个问题引起人们对控制装置稳定性的研究,从而产生经典的控制理论。

第一次工业革命促进了自动控制理论的发展。

麦克斯韦(J. C. Maxwell, 1868 年)研究了调速器的稳定性,发表论文《论调速器》,提出反馈控制的思想及简单的稳定性判别方法。劳斯(E. J. Routh, 1884 年)、赫尔维茨(A. Hurwitz, 1895 年)提出了完整的线性系统稳定性的代数判据。李雅普诺夫(A. M. Lyapunov, 1892 年)提出了系统稳定性一般理论,这是早期的控制理论的发展(约 1900 年)。

经典控制理论发展(1900—1950 年)主要有:美国米罗斯基(N. Minorsky, 1922 年)研制出的伺服结构,提出 PID 控制方法;荷维塞德(Heaviside, 1923 年)提出系统设计的算子法;美国布莱克(H. S. Black, 1927 年)提出放大器性能的负反馈方法;伯德(H. Bode, 1938 年)以及奈奎斯特(H. Nyquist, 1940 年)提出频率响应法,建立了系统的频率响应理论;伯德(H. Bode)提出了系统稳定性不同的几何判据;艾文斯(W. R. Evans, 1950 年)提出根轨迹法。

美国 MIT 的维纳(N. Wiener, 1942 年)研究随机过程的预测,提出 Wiener 滤波理论,发表《控制论》一书(1948 年),它标志着控制论学科的诞生。贝尔实验室的香农(C. Shannon, 1938 年)提出继电器逻辑自动化理论,随后,发表专著《通信的数字理论》(1948 年),奠定了信息论的基础。

经典的控制理论是以传递函数理论为基础,通过时域、频域分析,研究单输入、单输出的常系数线性系统的特性和设计的理论。它在工程实际中得到广泛的应用,大大提高了工业、国防等领域的自动化水平。但它也存在明显的不足,因此,20 世纪 60 年代又出现了现代控制理论。现代控制理论是研究多输入、多输出的系统控制问题,包括时变参数、分布参数、非线性系统等的分析和设计问题的理论,它的研究方法主要是状态空间法。

在现代控制理论的发展中做出重要贡献的人有:蓬特里亚金(Л. С. Понтрягин, 1956 年,提出极大值原理)、贝尔曼(R. I. Bellman, 1957 年,提出动态规划理论)、卡尔曼(R. E. Kalman, 1960 年,提出滤波理论)等。此外,还有最优控制理论、系统识别理论、模糊控制理论、智能控制理论等。

第二次世界大战以后,控制理论在工程技术领域中得到广泛应用,发展成工程控制论。1954年,钱学森出版了《工程控制论》一书,为工程控制技术学科奠定了基础。

1952年,美国 MIT 研制出第一台数控机床。1954年美国 George Devol 研制出第一台工业机器人样机。1957年,苏联成功发射世界上第一颗人造地球卫星(Sputnik)。

1.2 控制系统的分类

1.2.1 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。

现考察一个我们十分熟悉的例子。图 1-1 和图 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 分别表示质块质量、黏性阻尼系数、弹簧刚度。对图 1-1 所示的系统而言,质块受外力 $f(t)$ 的作用,质块位移为 $y(t)$,系统的动力学方程为

$$\begin{aligned} m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) &= f(t) \\ y(0) &= y_0 \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0 \end{aligned} \quad (1-1)$$

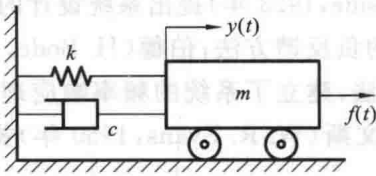


图 1-1 质量-阻尼-弹簧单自由度系统(1)

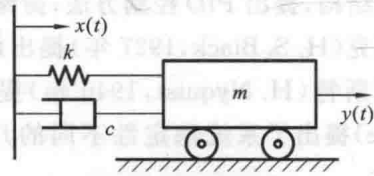


图 1-2 质量-阻尼-弹簧单自由度系统(2)

对图 1-2 所示的系统而言,支座受位移 $x(t)$ 的作用,质块位移为 $y(t)$,系统的动力学方程为

$$\begin{aligned} m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) &= c\dot{x}(t) + kx(t) \\ y(0) &= y_0 \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0 \end{aligned} \quad (1-2)$$

令 $p = d/dt$,则方程(1-1)和方程(1-2)分别化为

$$(mp^2 + cp + k)y(t) = f(t) \quad (1-3)$$

$$(mp^2 + cp + k)y(t) = (cp + k)x(t) \quad (1-4)$$

$mp^2 + cp + k$ 为方程(1-3)与方程(1-4)左边的算子,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。

$cp + k$ 分别为方程(1-3)与方程(1-4)右边的算子,它反映了系统与外界之间的关系。毫无疑问,系统本身的结构与参数一般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 $\dot{y}(0)$ 分别为质块的初位移与初速度,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均完全可以由质块的位移 $y(t)$ 与速度 $\dot{y}(t)$ 这两个变动的状态(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,从而在系统已确定的情况下,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及输入所决定的,也可以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 $\dot{y}(t)$,也就知道 $y(t)$ 与 $\dot{y}(t)$ 在任何瞬时的取值。在这里需强调一下,对于上例中的系统,仅知道 $y(t)$ 在某一瞬时的取值,还不足以刻画系统在此瞬时的状态。上例中需研究的问题可归纳为以下三类:

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

第二类,当系统参数(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,求系统参数 m, c, k 。

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:

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \cdots + a_1 \dot{y} + a_0 y = b_m x^{(m)} + b_{m-1} x^{(m-1)} + \cdots + b_1 \dot{x} + b_0 x \quad (1-5)$$

$$y(0) = y_0 \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0 \quad \cdots \quad y^{(n-1)}(0) = y_0^{(n-1)}$$

方程(1-5)左边的算子可写为 $a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \cdots + a_1 p + a_0$,它反映了系统本身固有的特性;

方程(1-5)右边的算子可写为 $b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \cdots + b_1 p + b_0$,它反映了系统与外界之间的关系;

$y(0), \dot{y}(0), \cdots, y^{(n-1)}(0)$ 为系统在受外界作用前的初始状态, $y(t), \dot{y}(t), \cdots, y^{(n-1)}(t)$ 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或激励,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,系统的状态不会改变。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,数控机床接收指令后,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（甚至包括现在所谓的“虚拟企业”或“企业动态联盟”）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，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；当研究此集团或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，控制基础在研究工程系统、输入和输出之间的动态关系时，可将其大致归纳为以下五个方面。

- (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，即系统分析问题。
- (2) 当系统已定时，确定输入，且所有确定的输入应使得输出尽可能符合给定的最佳要求，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，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，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，建立系统的数学模型，即系统辨识问题。

1.2.2 系统的分类

1. 开环控制系统和闭环控制系统

系统按反馈情况可分为开环控制系统（简称开环系统）和闭环控制系统（简称闭环系统）。

(1) 开环系统。

一个系统以所需的方框图表示时没有反馈回路，称为开环系统。对自动控制系统而言，开环系统在方框图中就是没有任何一个环节的输入受到系统输出的反馈作用。开环控制系统输入与输出间不存在反馈，输出量对系统的控制无影响，精度取决于系统各部分的标准精度以及工作中元件和参数的稳定程度。其特点是成本较低，结构简单，易维修，稳定性较好；但精度低，易受环境变化的干扰影响。

(2) 闭环系统。

控制系统的输出与输入间存在着反馈通道，即系统的输出对控制作用有直接影响的系统，称为闭环系统。闭环控制系统是在开环控制系统的基础上引入人工干预过程演变而来的。

闭环控制系统由于有反馈环节的存在，因此其精度较高，可及时减小干扰引起的偏差；但其成本较开环控制系统有所增加，结构也较复杂，稳定性也比开环系统差。在工业与国防等要求较高的应用领域，绝大多数控制系统采用闭环控制。实际中对要求简单且精度较高的控制任务，可将开、闭环控制结合起来一起应用，从而得到经济效益好、性能好的控制系统。

上述开环控制系统和闭环控制系统是极其相似的。执行机构类似于人手,测量装置相当于人眼,控制器类似于人脑。另外,它们还有一个共同的特点,就是都要检测偏差,并用检测到的偏差去纠正偏差。可见,没有偏差便没有调节过程。在自动控制系统中,这一偏差是通过反馈建立起来的。反馈是指输出量通过适当的测量装置将信号的全部或一部分返回输入端,使之与输入量进行比较,比较的结果为偏差。如前所述,基于反馈的“检测偏差用以消除偏差”的原理又称为反馈原理。利用反馈原理组成的系统称为反馈控制系统。

2. 恒值控制系统、随动系统和程序控制系统

在生产中应用最多的闭环系统,往往要求被控制量保持在恒定的数值上。但也有系统要求输出量按一定规律变化。按照输出变化规律,可将系统分为如下三种类型。

(1) 恒值控制系统。

恒值控制系统的输入量是一个恒定值,一经给定,在运行过程中就不再改变(但可定期校准或更改输入量)。这种控制系统的任务是保证在任何扰动作用下系统的输出量为恒定值,如恒温控制箱、稳压电源。

(2) 随动系统。

随动系统又称为伺服系统,这种控制系统输入量的变化规律预先不确定。当系统的输入量发生变化时,要求输出量迅速、平稳地随着输入量变化,并且能排除各种干扰因素的影响,准确快速地复现控制信号的变化规律。控制指令可以由操作者根据需要随时发出,也可以由目标物或相应的测量装置发出。例如机械加工中的仿形机床、武器装备中的火炮自动瞄准系统以及导弹自动跟踪系统均属于随动系统。

(3) 程序控制系统。

这种控制系统的输入量不为恒定值,但其变化规律是预先给定的。可将输入量的变化规律预先编制程序,由程序发出控制命令,在输入装置中再将控制指令转换为控制信号,经过全系统的作用,使控制对象按照指令要求运动。例如数控机床的进给系统。

3. 线性系统和非线性系统

自动控制系统按其主要元件的特性方程式的输入输出特征,可以分为线性系统和非线性系统。

(1) 线性系统。

组成系统的元器件的特性均为线性(或基本为线性),能用线性微分方程描述其输入与输出关系的系统称为线性系统。线性系统满足叠加原理。

(2) 非线性系统。

系统中只要有一个元器件的特性不能用线性方程描述,该系统即为非线性系统。描述非线性系统的常微分方程中,输出量及其各阶导数不完全是一次的,或者有的输出量导数项的系数是输入量的函数。非线性系统不能用叠加原理,其时间响应的特征与初始状态有很大关系。对非线性系统的理论研究远不如线性系统那样完整,一般只能满足于近似的定性描述和数值计算。

应当指出的是,任何物理系统的特性,精确地说都是非线性的,但是在误差允许范围内,可以将非线性特性线性化,近似地用线性微分方程来描述,这样就可以按照线性系统来处理。非线性系统的瞬态特性与其初始条件有关。从这一点来看,它与线性系统有很大的区

别。例如当偏差的初始值很小时,非线性系统的瞬态过程是稳定的,而当偏差的初始值较大时,则可能变为不稳定。线性系统的瞬态过程则与初始条件无关。

4. 连续系统和离散系统

按照自动控制系统中的信号传递方式,也可将自动控制系统分为连续控制系统和离散控制系统。

(1) 连续控制系统。

系统中各个参量的变化都是连续进行的,是时间的连续函数(也称模拟量)。

(2) 离散控制系统。

系统中某一处或数处的参量是脉冲序列或数码的形式,这种信号是离散的,即数值上和时上不连续。计算机控制系统就属于离散控制系统,也称作数字控制系统,如图 1-3 所示。

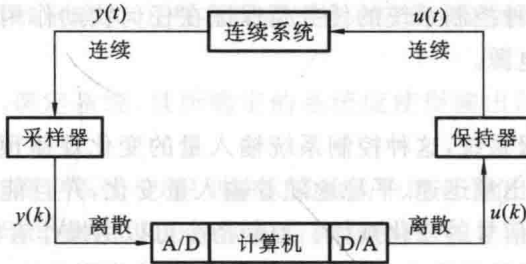


图 1-3 数字控制系统

计算机数字控制系统的给定量、反馈量和偏差量都是数字量。一般来说,同样是闭环控制系统,数字控制的精度高于连续控制,这是因为数码形式的控制信号远比模拟控制信号的抗干扰能力强。目前在要求控制精度高的场合,大量使用数字控制系统。

1.2.3 系统及其模型

1. 系统

学会以“系统”的观点认识、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,生产工具、生产设备、产品与工程结构变得愈来愈复杂,这种复杂性主要表现在其内部各组成部分之间、它们与外界环境之间的联系变得愈来愈密切,以至于其中某部分的一些变化可能会引起连串的反应而波及全局,即“牵一发而动全身”。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认识、分析与处理。这个有机的整体称为“系统”。我们所研究的“系统”就是由相互联系、相互作用的若干部分构成的,而且是一个有一定的目的或一定的运动规律的整体。其实在自然界、社会上或工程中,存在着也只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。

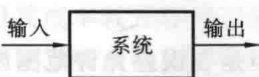
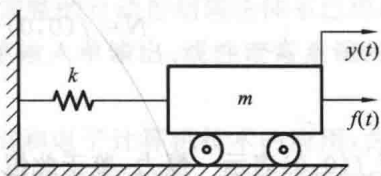


图 1-4 系统的方框图

系统由于其内部相应的机制,又由于其同外界相互的作用,因而有相应的行为、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 1-4 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。相比元件或子系统的特性，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 1-5 所示的 $m-k$ 简单系统为例。这一系统由两个元件组成， m 表示质块的质量， k 表示弹簧的刚度。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；假定弹簧是线性的，弹簧的变形 $y(t)$ 与受到的力成正比，即胡克定律。可是两者构成如图 1-5 所示的系统以后，质块受外力 $f(t)$ 的作用，质块位移为 $y(t)$ ，系统的动力学方程为

图 1-5 $m-k$ 简单系统

$$\begin{aligned} m\ddot{y}(t) + ky(t) &= f(t) \\ y(0) &= y_0 \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0 \end{aligned} \quad (1-6)$$

这一动力学方程表现出来的性质比两个元件各自的性质要复杂得多。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，会开始做“简谐振动”，即质块按照正弦或余弦规律做往复运动。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的，分别研究两个元件，无论如何也得出这一结论。

2. 机械系统

以实现一定的机械运动、承受一定的机械载荷为目的，由机械元件组成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”（excitation）与“响应”（response）。机械系统的“激励”一般是指外界对系统的作用，如作用在系统上的力，即载荷等，而“响应”则一般是系统的变形或位移等。

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“控制”，而如果该激励是因偶然因素产生，一般无法完全人为控制，则称为“扰动”（disturbance）。

3. 静态模型与动态模型

模型是研究系统、认识系统与描述系统、分析系统的一种工具。这里所说的“模型”（model），是指一种用数学方法所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”。

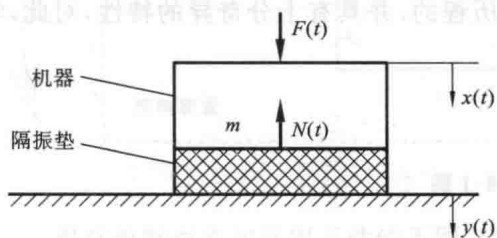


图 1-6 机器与隔振垫系统(1)

图 1-6 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 。设质块在铅直方向的位移为 $x(t)$ ，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

$$m\ddot{x}(t) = F(t) - N(t) \quad (1-7)$$

一般而言，隔振垫的支反力 $N(t)$ 与机器移

动的位移 $x(t)$ 及速度 $\dot{x}(t)$ 有关, 即 $f(x, \dot{x})$ 一般为非线性函数, 但当 x, \dot{x} 均较小时, 可按泰勒级数展开, 且仅取其一次项, 则有

$$N = f(0, 0) + \left. \frac{\partial f(x, \dot{x})}{\partial x} \right|_{\substack{x=0 \\ \dot{x}=0}} x + \left. \frac{\partial f(x, \dot{x})}{\partial \dot{x}} \right|_{\substack{x=0 \\ \dot{x}=0}} \dot{x} + \dots \quad (1-8)$$

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

而 $f(0, 0)$ 表示一恒力, 鉴于此恒力对系统运动变化规律无影响, 故可将式(1-8)写成

$$N = kx + c\dot{x} \quad (1-9)$$

此式右边两项分别表示一个弹性力与一个黏性阻尼力, 代回式(1-7), 即得到运动方程

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

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 1-6 所示系统的一个数学模型。

该系统可近似地以图 1-7 表示。

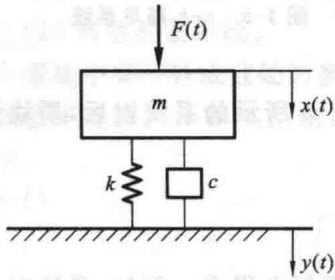


图 1-7 机器与隔振垫系统(2)

此模型以作用在机器上的力 $F(t)$ 作为激励, 机器的振动位移 $x(t)$ 作为响应。有时需要分析在地基振动位移 $y(t)$ 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

$$c[\dot{y}(t) - \dot{x}(t)] + k[y(t) - x(t)] = m\ddot{x}(t) \quad (1-10)$$

整理得

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

式(1-10)为系统的动态模型。当系统运动很慢时, 即

$$\dot{x} \approx 0 \quad \ddot{x} \approx 0$$

于是式(1-10)简化为

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

这是系统的静态模型, 即胡克定律, 相当于载荷 $F(t)$ 作用在弹簧上, 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作用下或在系统平衡状态下的特征, 而动态模型则用于研究系统在迅变载荷作用下或在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还要受其以前输入历史的影响。静态模型一般以代数公式描述, 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, 动态模型是描绘系统的动态历程的, 并具有十分奇异的特性, 对此, 学完课程后才会有更深入的体会。

1.3 控制系统的基本原理

1.3.1 自动控制理论

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。它的发展初期, 是以反馈理论为