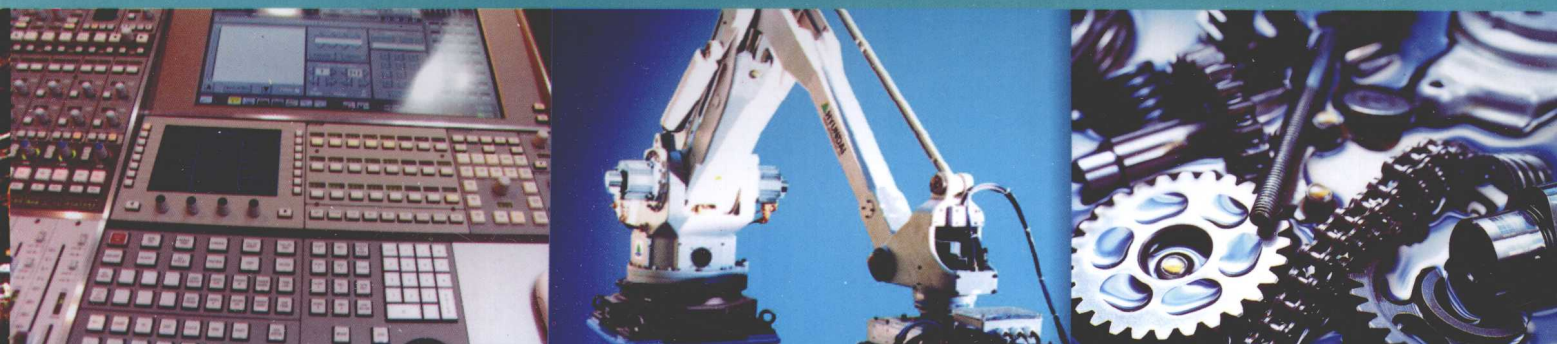




面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century
普通高等学校机械设计制造及其自动化专业新编系列教材

机械控制工程基础

(第2版)



主编 钟毓宁



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

普通高等学校机械设计制造及其自动化专业新编系列教材
教育部高等教育面向 21 世纪课程教材

机械控制工程基础

(第 2 版)

钟毓宁 主编

武汉理工大学出版社

内容提要

本书着重介绍了工程上广泛应用的经典控制论原理及其应用,包括控制系统的数学模型建立、时域分析、频域分析、误差分析、综合与校正,同时介绍了采样控制系统的初步知识和典型的控制实例倒立摆系统。且书末附录还有拉普拉斯变换、 z 变换、MATLAB简介等内容。

本书以高性能的数值计算和可视化软件 MATLAB 为工具,阐述机械控制基础知识,对于课程学习起到事半功倍的效果。

本书可供全国普通高等院校机械工程类专业、测控技术及仪器专业作为教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械控制工程基础/钟毓宁主编. —2版. —武汉:武汉理工大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-5629-3293-2

I. 机… II. ①钟… III. 机械-控制系统 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 165487 号

出版者:武汉理工大学出版社

武汉市:武昌珞狮路 122 号 邮编:430070

<http://www.techbook.com.cn> 理工图书网

印刷者:武汉理工大印刷厂

发行者:各地新华书店

开 本:880×1230 1/16

印 张:11.25

字 数:372 千字

版 次:2001 年 7 月第 1 版 2010 年 8 月第 2 版

印 次:2010 年 8 月第 8 次印刷

印 数:17501—20500 册

定 价:18.00 元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

普 通 高 等 学 校
机械设计制造及其自动化专业新编系列教材
编 审 委 员 会

顾 问:陈心昭 王益群 蔡 兰 束鹏程 孙宗禹
洪迈生

名誉主任:杨叔子

主 任:张福润 高鸣涵

副 主 任:杨海成 李永堂 周彦伟 杨明忠

委 员:(按姓氏笔画顺序排列)

王建中	王贵成	王益群	司徒忠	刘玉明
吕 明	许明恒	孙宗禹	孙树栋	朱喜林
陈心昭	李永堂	李 言	李杞仪	陈作柄
杨叔子	杨明忠	陈奎生	陈统坚	严拱标
杨海成	张福润	束鹏程	罗迎社	周彦伟
洪迈生	钟志华	赵 韩	钟毓宁	陶文铨
夏 季	高鸣涵	殷国富	董怀武	曾志新
韩荣德	傅祥志	谭援强	蔡 兰	魏生民

总责任编辑:刘永坚 田道全

秘 书 长:蔡德明

出版说明

高等学校的教材建设向来是学科建设和教学改革的重要内容,其对教学过程和教学效果的重要影响是教育界所公认的。但教材建设与教学需要之间的矛盾永远存在也是一个客观的事实。正因为如此,教材建设才具有永恒的意义。特别是在这世纪交替的时期,中国的高等教育所面临的两个重大变革——高等学校本科专业目录调整和高等学校管理体制及布局结构调整,都对高校的教材建设提出了更高的要求。随着专业的合并,新专业的专业面拓宽,原有老专业的教材明显不能适应新专业的教学要求;调整后高校规模扩大,招生人数增加,对教材的需求也随之激增。在新的专业目录中,机械设计制造及其自动化专业与原有专业目录有了较大的变化,涵盖了原有的9个专业。相应的专业业务培养目标、教学要求、课程设置、学时数要求、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化。为适应新专业的培养目标和教学要求,武汉理工大学出版社在经过全面、细致和深入调研的基础上,组织编写了这套面向全国普通高等学校的新的系列教材。

本套教材面向全国普通高等学校,在保证内容要反映国内外机械学科最新发展的基础上,以满足一般院校的本科专业教学要求,实现专业的业务培养目标为基本原则。遵照全国高校机械工程类专业教学指导委员会制订的专业培养方案和教学计划设置课程体系,突出“系列”的特色,首批编写、出版的21种教材可基本满足一般院校本科教学需要。编写中强调各门课程之间的联系和衔接,强调教材整体风格的统一和协调,力求在加强基础、协调内容、适当降低难度、努力拓宽知识面向、适应科技发展、更新内容并大力引入多媒体教学手段等方面取得进展,以形成特色,更好地满足不同学校的教学需求。

本套教材集中了全国30多所著名大学的专家、教授和中青年教学骨干,分别担任系列教材的主编、主审和参编,组成了一个阵容强大、结构合理的编审委员会。特别是第二届全国高校机械工程类专业教学指导委员会主任委员杨叔子院士欣然出任编审委员会名誉主任,更增加了编审委员会的权威性。正是由于编委会成员务实、高效的工作,全体编审人员高度的责任心和严谨的治学精神,本套教材才能有这样短的时间内完成编写、出版的任务。杨叔子院士亲自为系列教材作序,更使全套教材光彩倍增!但我们深知,院士为一套教材作序,在国内是十分少见的,这充分体现了杨院士对教学改革及教材建设的热切关注和积极支持。这既是杨院士对编委会此前工作的鼓励和肯定,同时也是对编委会今后工作的指导和鞭策。我们一定不会辜负杨院士以及全国众多院校师生的期望。本套教材首期21种出齐后,一方面我们将在使用教材的广大师生提出意见和建议的基础上不断修订和完善,同时还将根据学校教学改革和课程设置的需要及时增补新的教材,使这套教材真正成为既能满足学校当前教学需要,又能起到推动专业教学内容和课程体系改革作用的一套精品教材。

武汉理工大学出版社

2001.6

序

20 世纪,人类文明达到了前所未有的高度。由于相对论、量子论、基因论、信息论等科学技术成就的取得,现在人类在物质领域已深入到基本粒子世界,在生命科学领域已深入到分子水平,在思维科学领域则主要是数学和脑科学的巨大进步。科学技术的迅猛发展,促使科学技术综合化、整体化以及人文和科技相互渗透、相互融合的趋势加速。

近 20 年来,我们在经济战线上坚持市场取向的改革,实行以公有制为主体、多种所有制经济共同发展的基本经济制度,进行经济结构的战略性调整,推动两个根本性转变以及全方位、多层次、宽领域的对外开放,致使我国的经济体制也发生了巨大的变革。随着社会主义市场经济体制的建立和不断完善,社会对人才需求的多样性、适应性要求不断增强。

在人类即将跨入 21 世纪的时候,我国高等教育战线在教育要“面向现代化,面向世界,面向未来”的思想指引下,开展了起点高、立意新、系统性强、有组织、有计划、有步骤的教学改革工程。伴随着教学改革不断深入,素质教育的观念、大工程的观念、终身教育以及回归工程的观念日益深入人心,人们对拓宽本科教育口径、加强和扩展本科教育共同基础的要求日益强烈。

1998 年 8 月,教育部正式颁布了新的普通高等学校本科专业目录,专业总数由原来的 500 多种减少至 249 种。新专业目录的颁布,突破了传统的、狭隘的专业教育观念,拓宽了人才培养工作的视野,为人才培养能较好地适应科学技术和社会进步的需要创造了条件。许多学校也都以专业调整、改造和重组为契机,大力调整人才知识、能力和素质结构,拓宽基础,整合课程,构建新的专业平台,柔性设置专业方向,不断深化人才培养模式的改革。

教材建设是学校的最基本建设之一。教学改革的深入发展必然要求有相适应的教材。为适应新的专业培养目标和教学要求,组织编写出版供“机械设计制造及其自动化”新专业的教学用书,特别是系列教材就显得十分迫切和重要了。武汉理工大学出版社的领导和编辑们为改变目前国内已出版的机械类专业教材普遍存在的内容偏深、知识面偏窄的倾向,决定面向全国普通高等学校机械工程类专业的学生出版一套系列教材,这是一个非常好的决策。他们的这一决定也得到了全国几十所院校机械工程系的领导和众多专家、教授的积极响应和大力支持,并提出了许多建设性的意见,其中一些教授如合肥工业大学校长陈心昭教授、燕山大学校长王益群教授、江苏理工大学校长蔡兰教授、西安交通大学副校长束鹏程教授、西北工业大学常务副校长杨海成教授等还非常乐意地承担了该系列教材的主编、主审及编审委员会工作。

编写教材除了应该具有针对性外,还应努力编出特色。根据武汉理工大学出版社

和教材编审委员会的决定,该系列教材将完全按照第二届全国高校机械工程类专业教学指导委员会提出的机械设计制造及其自动化宽口径专业培养方案中所设置的课程来编写,这就保证了该套教材可以具有课程体系新、专业口径宽、改革力度大的特点,并可以满足不同院校办出各自专业特色的需要。

按照教材编审委员会的规划,该套教材首批将推出 21 种,包括机械工程概论、画法几何及机械制图、画法几何及机械制图习题集、机械原理、机械设计、理论力学、材料力学、工程热力学、工程材料、机械制造技术基础、材料成型基础、工程测试、数控技术、机械工程控制基础、液压与气压传动、机械 CAD/CAM、机械工程项目管理、机电系统设计、现代设计方法、精密与特种加工、机械工程专业英语等,涵盖了机械设计制造及其自动化专业的主要专业基础课和部分专业选修课而形成系列,因而可以较好地满足该专业的教学需要。也正是由于是系列教材,各门课程之间的联系和衔接在教材的策划、组织和编写过程中,都可开展充分的讨论和进行仔细的协调,因此有利于保证整套教材风格统一,内容分配合理,既相互呼应,又避免不必要的重复。

我殷切地希望,这套教材在加强基础、协调内容、适当降低难度、努力拓宽知识面向、适应科技发展、更新内容和大力引入多媒体等现代教育技术手段上取得进展,真正成为能满足普通高等学校本科生需要的优秀教学用书,在众多的机械类专业教材中,争芳斗艳,别具特色。

按照武汉理工大学出版社的计划,这套系列教材首批将在 2001 年秋季全部出齐。金无足赤,人无完人,书无完书。我相信,在读者的关心与帮助下,随着这套教材的不断发行、应用与改进,必将促进机械设计制造及其自动化专业教学用书质量的进一步提高,推动机械类专业教学内容和课程体系改革的进一步深入。

只木独秀难成林,千紫万红才是春!

面向 21 世纪,希望无限,谨为之序。

中国科学院院士、华中科技大学教授 **杨叔子**
全国高校机械工程类专业教学指导委员会主任委员

2000 年 11 月 18 日

第 2 版前言

本书自 2001 年 7 月初版发行后,入选教育部高等教育面向 21 世纪课程教材,7 次印刷 17500 册。在此,我们衷心感谢兄弟院校有关教师和学生以及所有读者的信任与支持,衷心感谢武汉理工大学出版社与有关领导部门的关心与鼓励。

根据 9 年来的教学实践与本门学科的发展情况,并本着加强对学生创新能力和实践能力的培养的宗旨,在原主编王益群教授和武汉理工大学出版社领导的鼓励下,湖北工业大学省级精品课程《控制工程基础》教学组在集体讨论的基础上,与部分原有编者一起对本书重点地作了较大的修改,主要情况如下:

- (1)在第 1 章中对信息、系统和控制相关的基本概念与知识,作了更深入的分析与论述;
- (2)在第 2 章和第 6 章中增加了例题和习题,补充了有关论述;
- (3)增加了第 8 章倒立摆系统,加强了控制理论的工程应用阐述和实验说明;
- (4)更新了附录 MATLAB 有关知识内容和书中程序;
- (5)配套出版主要内容包含多媒体课件和习题解答的光盘。

本书的修改由钟毓宁教授负责,参加修改工作的有钟毓宁(第 1 章)、廉自生(第 2 章、第 6 章)、谭跃刚(第 4 章、第 5 章)、张业鹏(第 3 章)、王选择(第 7 章)、徐巍(第 8 章和本书多媒体课件)、翟中生(附录和程序)、李伟(习题解答)。全书由钟毓宁教授最后定稿。

因编者水平有限,错误与不妥仍在所难免,恳请读者指正。

编者

2010 年 7 月 19 日

第 1 版前言

本书是普通高等学校机械设计制造及其自动化专业新编系列教材之一,全书以介绍工程上广泛应用的经典控制论为主,并简要介绍采样控制系统初步和计算机辅助分析的基本概念。全书共分 7 章,包括绪论、控制系统的数学模型、控制系统的时域分析、控制系统的频域分析、控制系统的误差分析、控制系统的综合与校正、采样控制系统初步。

编写本书时,力求做到以下三点:

(1)在阐述上力求内容精简,重点突出,浅显易懂,并有所创新。

(2)理论结合工程实践,注重反映培养机械工程师所需具备的基础知识与基本业务技能。本书以典型机械的控制系统为研究对象,阐述控制理论的基本原理的同时,编入了一些控制系统分析与设计的实例。

(3)为便于教师讲授和学生学习,充分利用现代计算机工具,突出教材特色。本书以高性能的数值计算和可视化软件 MATLAB 为工具,阐述了基于 MATLAB 进行控制系统的计算机辅助建模、计算机辅助时域分析与频域分析、计算机辅助设计的方法,并列举了较多的实例。这些内容使得讲授和学习控制论知识容易得多,对于课程学习可起到事半功倍的效果。

本书由王益群教授、钟毓宁教授主编,参加编写工作的有王益群(第 1 章)、廉自生(第 2 章、第 6 章)、谭跃刚(第 4 章、第 5 章)、张业鹏(第 3 章)、彭源(第 7 章)、钟毓宁(附录)。全书由王益群、钟毓宁统稿。

为便于学习,每章后均附有习题。本书适于机械工程类本科大学生使用,也适于工程技术人员参考。因编者水平有限,恳请读者批评指正。

编者

2001 年 1 月 20 日

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 机械控制工程概述	(1)
1.2 信息与信息方法	(2)
1.2.1 信息的定义	(2)
1.2.2 信息的一般特征	(2)
1.2.3 信息方法	(3)
1.3 系统与同构理论	(3)
1.3.1 系统	(3)
1.3.2 机械系统	(4)
1.3.3 同构理论	(4)
1.4 反馈与反馈控制	(4)
1.4.1 反馈	(4)
1.4.2 反馈机制	(5)
1.4.3 反馈控制	(5)
1.5 反馈控制系统	(6)
1.5.1 开环控制与闭环控制	(6)
1.5.2 闭环控制系统的构成	(6)
1.5.3 自动控制系统按输出变化规律的分类	(7)
1.6 对控制系统性能的基本要求	(8)
本章小结	(8)
习题	(8)
2 控制系统的数学模型	(9)
2.1 控制系统的微分方程	(9)
2.1.1 线性系统与非线性系统	(9)
2.1.2 线性系统微分方程的列写	(10)
2.1.3 系统非线性微分方程的线性化	(12)
2.2 传递函数	(14)
2.2.1 传递函数的定义	(14)
2.2.2 传递函数的常见形式	(14)
2.3 传递函数方块图	(15)
2.3.1 控制系统的基本连接方式	(15)
2.3.2 扰动作用下的闭环控制系统	(17)
2.3.3 方块图的绘制	(17)
2.3.4 方块图的变换	(18)
2.3.5 方块图的简化	(19)
2.4 典型环节的传递函数	(21)
2.4.1 比例环节	(22)
2.4.2 惯性环节	(23)
2.4.3 微分环节	(24)
2.4.4 积分环节	(26)

2.4.5 振荡环节	(26)
2.4.6 延时环节	(28)
本章小结	(29)
习题	(29)
3 控制系统的时域分析	(33)
3.1 时间响应与典型输入信号	(33)
3.1.1 时间响应及其组成	(33)
3.1.2 典型输入信号	(34)
3.2 一阶系统的时间响应	(36)
3.2.1 一阶系统的数学模型	(36)
3.2.2 一阶系统的单位阶跃响应	(36)
3.2.3 一阶系统的单位脉冲响应	(37)
3.3 二阶系统的时间响应	(37)
3.3.1 二阶系统的数学模型	(37)
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	(38)
3.3.3 二阶系统的单位脉冲响应	(39)
3.4 高阶系统的时间响应	(40)
3.4.1 高阶系统的时间响应分析	(40)
3.4.2 高阶系统的简化	(41)
3.5 控制系统的动态性能指标	(41)
3.5.1 瞬态响应的性能指标	(41)
3.5.2 时间响应的实验方法	(45)
3.6 控制系统的稳定性	(45)
3.6.1 稳定性的基本概念	(45)
3.6.2 线性系统稳定的充要条件	(46)
3.6.3 Routh-Hurwitz 稳定判据	(47)
3.7 计算机辅助时域分析	(51)
本章小结	(53)
习题	(54)
4 控制系统的频域分析	(55)
4.1 频率特性的基本概念	(55)
4.1.1 频率响应	(55)
4.1.2 频率特性	(56)
4.1.3 频率特性的求取方法	(56)
4.1.4 频率特性分析法的特点	(58)
4.2 频率特性的图形表示方法	(59)
4.2.1 极坐标图(Nyquist 图)	(59)
4.2.2 对数频率特性图(Bode 图)	(60)
4.2.3 典型环节的频率特性图	(61)
4.3 控制系统的频率特性图	(64)
4.3.1 系统的开环频率特性图	(64)
4.3.2 闭环系统的频率特性图	(69)
4.3.3 闭环频率特性图与开环频率特性图的对应关系	(70)
4.4 控制系统稳定性的频域判据	(71)
4.4.1 幅角原理	(71)
4.4.2 基于极坐标图的奈奎斯特判据	(72)

4.4.3 基于 Bode 图的奈奎斯特判据	(75)
4.5 控制系统的相对稳定性	(77)
4.5.1 相位裕量	(77)
4.5.2 增益裕量	(77)
4.6 闭环系统性能的频域分析	(79)
4.6.1 系统动态性能的频域指标	(79)
4.6.2 系统的频域指标与时域指标之间的关系	(80)
4.6.3 根据频率特性图分析系统的时域动态性能	(82)
4.7 计算机辅助频域分析	(82)
4.7.1 频率特性的极坐标图	(82)
4.7.2 频率特性的 Bode 图	(83)
本章小结	(84)
习题	(85)
5 控制系统的误差分析	(88)
5.1 误差的概念	(88)
5.2 系统的类型	(90)
5.3 静态误差	(91)
5.3.1 静态误差系数和静态误差的计算	(91)
5.3.2 干扰输入作用下的静态误差	(93)
5.3.3 复合控制系统的误差分析	(95)
5.4 动态误差	(96)
本章小结	(98)
习题	(99)
6 控制系统的综合与校正	(100)
6.1 系统校正概述	(100)
6.1.1 校正的概念	(100)
6.1.2 校正的分类	(100)
6.2 控制系统的串联校正	(101)
6.2.1 相位超前校正	(101)
6.2.2 相位滞后校正	(104)
6.2.3 相位滞后-超前校正	(106)
6.2.4 PID 校正器	(108)
6.2.5 三种串联校正的比较	(111)
6.3 控制系统的并联校正	(111)
6.3.1 反馈校正	(111)
6.3.2 顺馈校正	(114)
本章小结	(115)
习题	(115)
7 采样控制系统初步	(117)
7.1 概述	(117)
7.2 信号的采样与采样定理	(118)
7.2.1 信号的采样	(118)
7.2.2 采样定理	(118)
7.2.3 保持器	(119)
7.3 z 变换	(120)

7.3.1	z 变换的定义	(120)
7.3.2	z 变换的性质	(121)
7.3.3	z 反变换	(122)
7.4	差分方程	(123)
7.5	脉冲传递函数	(124)
7.5.1	脉冲传递函数的定义	(124)
7.5.2	脉冲传递函数 $G(z)$ 的求法	(124)
7.5.3	串联环节的脉冲传递函数	(125)
7.5.4	并联环节的脉冲传递函数	(125)
7.5.5	闭环系统的脉冲传递函数	(126)
7.6	采样控制系统的分析	(127)
7.6.1	采样控制系统稳定性	(127)
7.6.2	采样系统的动态性能	(129)
7.6.3	采样控制系统的稳态性能	(131)
本章小结		(131)
习题		(132)
8	倒立摆系统	(133)
8.1	倒立摆简介	(133)
8.1.1	倒立摆的分类	(133)
8.1.2	倒立摆的特性	(134)
8.1.3	倒立摆的控制目标及控制方法	(135)
8.2	直线一级倒立摆	(135)
8.2.1	直线一级倒立摆系统的数学模型	(136)
8.2.2	直线一级倒立摆系统分析	(138)
8.2.3	直线一级倒立摆应用示例	(139)
8.3	直线二级倒立摆建模简介	(142)
本章小结		(146)
附录 A 拉普拉斯变换		(148)
附录 B z 变换		(150)
附录 C MATLAB 语言及控制系统分析工具简介		(152)
C.1	MATLAB 语言简介	(152)
C.1.1	MATLAB 语言的基本使用方法	(152)
C.1.2	MATLAB 语言程序设计	(154)
C.2	控制系统工具箱简介	(156)
C.2.1	工具箱函数简介	(156)
C.2.2	控制系统模型	(156)
C.2.3	控制系统的时域分析	(157)
C.2.4	控制系统的频域分析	(157)
C.2.5	控制系统的稳定性分析	(158)
C.3	SIMULINK 简介	(158)
C.3.1	连接与建模	(158)
C.3.2	仿真与分析	(159)
参考文献		(161)

1 绪 论

1.1 机械控制工程概述

机械控制工程是研究“控制论”在机械工程中应用的科学。

控制论是在第二次世界大战中电子技术、武器火力技术、航空自动驾驶等科学技术的发展,以及大战后在生产自动化、电子计算机的实践基础上,总结有关科学的成果形成和发展的。控制论创始人维纳(N. Wiener)1948年发表《控制论——关于动物和机器中控制和通讯的科学》一文奠定了控制论的基础,维纳发现,机器系统、生命系统甚至社会和经济系统都有一个共同的特点,即通过信息的传递、加工处理和反馈来进行控制,亦即控制论所具有的信息、反馈与控制三要素,这就是控制论的中心思想。控制论建立之后迅速渗透到许多科学领域,大大推动了近代科学技术的发展并派生出许多新的边缘学科。1954年我国学者钱学森运用控制论的思想和方法,首创了“工程控制论”。把控制论推广到其他领域,继而出现了“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”——运用控制论研究经济运行与发展问题;“社会控制论”——运用控制论研究社会管理与社会服务问题。随着科学技术的进步,特别是计算机科学的发展,控制论无论在三要素的内涵上,还是在其深度与广度上,都在迅速发展着,变化着,实践证明,它不仅具有重大的理论意义,而且对生产的发展,尖端技术的研究以及社会管理的进步都产生了重大影响。在人类社会逐步进入信息社会的今天,亦要注意一个基本的事实,即社会的生产资料与生活资料主要还是要靠制造业来完成,而机械控制工程是制造技术的支撑学科之一。现代工业生产,趋于实现最佳控制,即要求利用最少的能源、材料、成本取得最高的生产效率和产品质量,此目标的实现,其基础是机械系统、电气系统、计算机系统的相互配合与协调工作,为此,这就要结合机械系统来阐述工程上共同遵循的基本控制规律,即“机械控制工程基础”。

控制论按其发展的进程和研究方法,可分三个阶段:第一阶段是20世纪40~50年代,该时期为经典控制论发展时期。经典控制论以传递函数为基础,研究单输入、单输出一类控制系统的分析与设计问题。对线性定常系统,这种方法是成熟有效的。

第二阶段是20世纪60~70年代,该时期为现代控制论发展时期,现代控制论以状态空间法为基础,研究多输入、多输出一类控制系统的分析与设计问题。

第三阶段是20世纪末至今,控制论向着“大系统论”和“智能控制论”发展。“大系统论”是用控制和信息的观点研究大系统的结构方案、总体设计中的分析方法和协调问题;“智能控制论”是研究与模拟人类活动的机理,以使控制系统具有仿人智能的工程控制和信息处理功能,实现具有高度复杂性、高度不确定性的系统,满足人们对其越来越高的要求。

必须指出的是,经典控制论是基础,现代控制论、智能控制论都是在此基础上发展起来的,时至今日,经典控制论在大多数实际工程中仍然是极为重要的。相当多的工程问题用它解决还是非常有效的,经典控制论仍不失为解决工程实际问题的基本方法,因此本书将主要结合机械系统介绍经典控制理论。

学习机械控制工程基础要解决两个问题,一是如何分析某个给定控制系统的工作原理、稳定性和过渡过程品质;二是如何根据工程需要进行控制系统的设计。前者是系统分析,后者是综合与设计。无论解决哪类问题,都必须具有控制论知识,同时要以系统的而不是孤立的、动态的而非静态的观点来处理问题,才能达到预期的效果。

1.2 信息与信息方法

1.2.1 信息的定义

信息是比较抽象的。一般说来,信息可以界定为由信息源(如自然界、人类社会等)发出的被使用者接受和理解的各种信号。作为一个社会概念,信息可以理解为人类共享的一切知识,或社会发展趋势以及从客观现象中提炼出来的各种消息之和。信息并非事物本身,而是表征事物之间联系的消息、情报、指令、数据或信号。

从纯客观的角度,信息表征信息源客体(事物)存在方式和运动状态的特性。对于工程控制系统而言,往往使用系统的一系列参数来反映系统的运动状态和方式。通过传感系统测试系统参数获取的物理信号只是信息变换为容易处理和被理解的一种形式。进一步,撇开对象的具体运动形态和物理信号的具体类型,在数学上可以将运动信息统一用数学模型和变量来表达。

现代科学认为:物质、能量、信息是物质世界的三大支柱,是科学史上三个最重要的基本概念,而这三者之间存在着密切的联系。物质运动的动力是能量,而信息是关于物质运动状态的特征,只要有运动的事物,就需要有能量,也就会存在信息。

对于工程系统而言,物质使系统具有形体,能量使系统具有力量,而信息则使系统具有“灵魂”。

下面以机械工程中自动化轧钢的实例来说明上述结论。自动化轧钢过程如图 1.1 所示。被轧制的钢锭在高温状态下进入轧机,经过多次轧压,最后达到所要求的形状和尺寸。在这一过程中,由 γ 射线测厚仪测量钢板尺寸;压磁式测力计测量轧制力。测量得到的信息通过通信系统进入计算中心;计算中心对轧制过程中的位移和力参数进行分析和计算,获得调节参数,再由控制系统根据调节参数调整轧辊的位置。显然,如果只有钢锭、加热炉、轧机、电机等,而没有由检测系统传送的信息(钢锭、轧辊运动的状态和方式),是不可能实现自动化轧钢过程的,更谈不上得到高质量的板材。

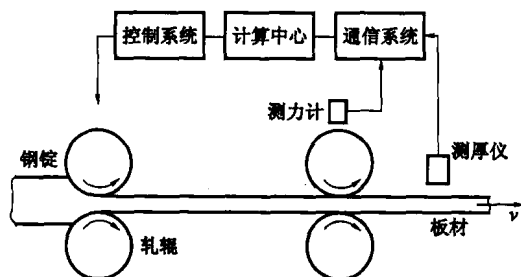


图 1.1 自动化轧钢系统

1.2.2 信息的一般特征

(1)可识别。信息可以通过人的感官直接识别,也可以通过各种探测工具间接识别。

(2)可转换。信息可以从一种形态转换成另一种形态,如语言、文字、图像、图表等信号形式;也可以转换成计算机代码及广播、电视等电信号,而电信号和代码又可以转换成语言、文字、图像等。

(3)可传递。信息的传递是与物质和能量的传递同时进行的。人与人之间的信息传递依靠语言、表情、动作;社会信息的传输借助报纸、杂志、广播;工程中的信息则可以借助机械、光、声、电器件等。

(4)可加工处理。人脑就是最佳的信息处理器。人脑的思维功能可以进行决策、设计、研究、写作、改进、发明、创造等多种信息处理活动。计算机也具有信息处理功能。

(5)可多次利用(无损耗性)。信息具有一定的实效性和可利用性,并且信息具有扩散性和可存储性,因此可共享。

(6)在流通中扩充。信息经过处理后,可以其他形式和方式再生成信息。输入计算机的各种数据文字等信息可用显示、打印、绘图等方式再生成信息。

(7)主客体二重性。信息是物质相互作用的一种属性,涉及主客体双方;信息表征信源客体存在方式和

运动状态的特性,所以它具有客体性,绝对性;但接收者所获得的信息量和价值的大小,与信宿主体的背景有关表现了信息的主体性和相对性。

(8)信息的能动性。信息的产生、存在和流通,依赖于物质和能量,没有物质和能量就没有能动作用。信息可以控制和支配物质与能量的流动。

1.2.3 信息方法

信息概念具有普遍意义,它已经广泛地渗透到各个领域,信息科学是具有方法论性质的一门科学。信息方法具有普适性。所谓信息方法就是运用信息观点,把事物看做是一个信息流动的系统,通过对信息流程的分析和处理,达到对事物复杂运动规律认识的一种科学方法。它的特点是撇开对象的具体运动形态,把它作为一个信息流过程加以分析。信息方法着眼于信息,揭露了事物之间普遍存在的信息联系,对过去难于理解的现象从信息观点作出了科学的说明。

1.3 系统与同构理论

1.3.1 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。

系统是由两个或两个以上的要素组成的具有整体功能和综合行为的统一集合体,即系统就是由相互联系、相互作用的若干部分构成,而且有一定目的或一定的运动规律的一个整体。系统具有以下属性:

(1)系统的整体性:即非加和性。体现在三个方面:a.整体的性质不是要素具备的;b.要素的性质影响整体;c.要素性质之间相互影响。系统中各要素不是孤立地存在着,每个要素在系统中都处于一定的位置上,起着特定的作用。要素之间相互关联,构成了一个不可分割的整体。要素是整体中的要素,如果将要素从系统整体中割离出来,它将失去要素的作用。系统不是各部分的简单组合,它有统一性,各组成部分或各层次的充分协调和连接,提高系统的有序性和整体的运行效果。

(2)系统的相关性:系统中相互关联的部分或部件形成“部件集”,“集”中各部分的特性和行为相互制约和相互影响,这种相关性确定了系统的性质和形态。

(3)系统的功能性和目标性:大多数系统的活动或行为可以完成一定的功能,但不一定所有系统都有目的,例如太阳系或某些生物系统。工程系统都是确定或把握系统的目的来设定其功能,并采取相应的手段去实现的。系统遵循结构功能原则:a.要素不变时,结构决定功能。b.结构、要素都不同也可以有相同的功能。如人脑系统和计算机系统在部分功能上相似。利用这一原则,可以设计各种仿真系统。c.同一结构可能有多种功能。

(4)系统的层次性和相对性(有序性):由于系统的结构、功能和层次的动态演变有某种方向性,因而使系统具有有序性。一般系统论的一个重要成果是把生物和生命现象的有序性和目的性同系统的结构稳定性联系起来,也就是说,有序能使系统趋于稳定,有目的才能使系统走向期望的稳定系统结构。

(5)系统的复杂性和随机性:物质和运动是密不可分的,各种物质的特性、形态、结构、功能及其规律性,都是通过运动表现出来的,要认识物质首先要研究物质的运动,系统的动态性使其具有生命周期。开放系统与外界环境有物质、能量和信息的交换,系统内部结构也可以随时间变化。一般来讲,系统的发展是一个有方向性的动态过程。

(6)系统的适应性:一个系统和包围该系统的环境之间通常都有物质、能量和信息的交换,外界环境的变化会引起系统特性的改变,相应地引起系统内各部分相互关系和功能的变化。为了保持和恢复系统原有特性,系统必须具有对环境的适应能力,例如反馈系统、自适应系统和自学习系统等。

根据系统的属性分析,在自然界、社会界、工程中,存在着也只存在着各式各样的系统,任何一个系统都处于同外界(即同其他系统)相互联系之中,也都处于运动之中。系统由于其内部相应的机制,以及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 1.2 的框图表示。对大量的工程系统,主要用试验方法(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。

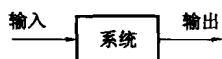


图 1.2 系统的框图

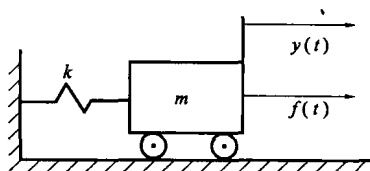


图 1.3 $m-k$ 系统

以图 1.3 所示的简单系统为例说明认识系统应注意的问题。这一系统由质块 m 与弹簧 k 两个元件组成。图中 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 $y(t)$ 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 $y(t)$ 则与受到的力成正比,即虎克定律。可是对于系统而言,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

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{y}(t) + ky(t) &= f(t) \\ y(0) &= y_0 \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0 \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

这一动力学方程表现出来的性质却比两个元件各自的性质复杂得多。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 m 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,如果只分别研究两个元件,无论如何也得不出这一结论。

1.3.2 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,由机械零件组成的系统,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”与“响应”。机械系统的“激励”一般是外界对系统的作用,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”,而如果是偶然因素产生且一般无法完全人为控制的,则称为“扰动”。扰动是一种对系统的输出量产生相反作用的信号。如果扰动产生在系统的内部,称为内扰;如果扰动产生在系统外部,则称为外扰。外扰可视为系统的输入量。

1.3.3 同构理论

尽管机器与生物在本质上有着天壤之别(有着无生命与有生命的差别),但从机器控制的动作和人的有目的行为过程来看,他们有着相当确切的功能“同构性”,即在实现机器动作和人的行为过程中,无一例外的经过了测试、决策和执行三个基本环节。因此,控制系统可以采用抽象出来的方块图来描述,详细见后面的闭环控制系统构成方块图说明。

另外,系统模型本质上没有区别,也就是“同构”。对不同的物理系统(环节)可用形式相同的微分方程与传递函数来描述,即可以用形式相同的数学模型来描述。一般称能用形式相同的数学模型来描述的物理系统(环节)为相似系统(环节),称在微分方程或传递函数中占相同位置的物理量为相似量。所以,这里讲的“相似”,只是就数学形式而不是就物理实质而言的。由于相似系统(环节)的数学模型在形式上相同,因此,可以用相同的数学方法对相似系统加以研究;可以通过一种物理系统去研究另一种相似的物理系统。特别是现代电气、电子技术的发展,为采用相似原理对不同系统(环节)的研究提供了良好条件。在数字计算机上,采用数字仿真技术进行研究,非常方便有效。

1.4 反馈与反馈控制

1.4.1 反馈

反馈是控制论中一个最基本、最重要的概念,也是工程系统的动态模型或许多动态系统的一大特点。控