



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



新工科卓越工程师教育培养计划电气信息类专业系列教材

自动控制原理

(第三版)

● 主编 吴怀宇



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



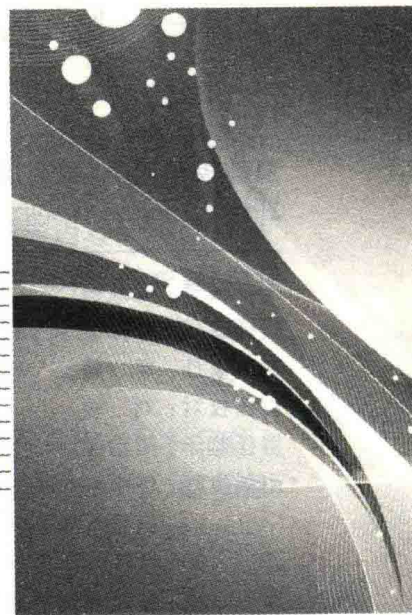
新工科卓越

信息类专业系列教材

自动控制原理

(第三版)

主 编	吴怀宇	曾庆山	王仁明	朱清祥
副主编	谭建豪	张 燕	胡立坤	张俊敏
	熊 凌	常雨芳		
	王后能			



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书是根据教育部高等学校自动化类专业“自动控制原理”课程教学大纲和高等工程教育认证标准的要求编写的。全书从高等工程教育对人才培养的新要求出发,讨论了经典控制理论的基本概念、基本原理和基本方法,尝试将“新工科”和高等工程教育认证的内涵特征融入控制系统建模、分析与综合,致力于培养学生的创新意识、实践动手能力和解决复杂工程问题的能力。

全书共九章和两个附录。九章内容包括:绪论,线性控制系统的数学模型,控制系统的时域分析,根轨迹法,控制系统的频域分法,控制系统的校正与设计,非线性控制系统,离散控制系统和直流电动机控制系统分析与综合。两个附录包括: Matlab/Simulink 在控制系统分析与综合中的应用实例,自动化领域重要学术期刊、会议及文献检索工具。

本书可作为自动化类、电气工程类、电子信息类、仪器仪表类等相关专业的大学生教材,也可供从事控制理论与控制工程研究、设计和应用的科技工作者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/吴怀宇主编.—3版.—武汉:华中科技大学出版社,2017.8
ISBN 978-7-5680-3333-6

I. ①自… II. ①吴… III. ①自动控制理论-高等学校-教材 IV. ①TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 204936 号

自动控制原理(第三版)

Zidong Kongzhi Yuanli

吴怀宇 主编

策划编辑:王红梅

责任编辑:余涛

封面设计:秦茹

责任校对:刘竣

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:23.5

字数:569千字

版次:2017年8月第3版第1次印刷

定价:45.00元



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

第三版前言

本书第二版自2012年8月出版以来,一直受到广大读者、兄弟院校师生的喜爱与关注。本书第三次修订,源于以下几个重要背景。

其一,2010年6月,教育部试点实施“卓越工程师教育培养计划”(简称卓越计划),卓越计划具有企业深度参与培养过程,学校按照国家工程认证通用标准和行业标准培养工程人才,强化培养学生工程能力和创新能力的要求和特点。

其二,2016年6月2日,在吉隆坡召开的国际工程联盟大会上,全票通过了我国加入《华盛顿协议》的转正申请。由此,我国成为第18个《华盛顿协议》正式成员。这标志着我国高等工程教育质量在国际上得到认可,加快了我国工程教育国际化步伐。今后,通过中国工程教育专业认证协会(CEEAA)认证的中国大陆工程专业本科学位将得到美、英、澳等所有该协议正式成员国的承认。

其三,2017年2月18日,教育部在复旦大学召开“综合性高校工程教育发展战略研讨会”,第一次公开提出“新工科”概念,并发布了有关新工科的十点共识,即“复旦共识”,初步提出了新工科的内涵特征、新工科建设与发展的路径选择等内容。2017年4月18日,教育部在天津大学举行“工科优势高校新工科建设研讨会”,形成了“新工科建设行动路线图”,即“天大行动”。2017年6月1日,清华大学召开工科发展研讨会,制定并启动“强化工科优势行动计划”。

正是基于以上背景要求,《自动控制原理》第三次修订试图从课程性质与目标定位、课程内容与教学要求、基本概念与核心概念、系统分析与综合等关键问题入手,探索融合启发式、探究式、讨论式等多样化的“教”与“学”的学习方式,试图融入“新工科”和高等工程教育认证的若干内涵特征。例如,运用工程数学和工程科学原理识别、分析和表达典型控制系统问题;将数学、工程知识和现代计算工具应用于解决复杂控制系统问题,包括理论分析、设计实验与解释数据等;通过拓展复杂控制系统的分析与综合训练,着力培养学生自主学习、团队协作与沟通的意识和能力等。总之,希望通过本次修订,使《自动控制原理(第三版)》教材的内容更有助于培养学生的创新意识、实践动手能力和解决复杂工程问题的能力。

本次主要修改和增补内容说明如下。

在1.1节,增补了与自动控制技术发展相关的最新科技进展;将第二版1.3节合并到1.2节中,便于读者更加系统和完整地理解自动控制系统基本组成;将第二版1.5节

合并到 1.3 节中,并增加了有界输入、有界输出稳定和李雅普诺夫稳定性的定义,使读者易于系统地理解自动控制系统的基本要求。在 2.3.2 节,增补了比较点和引出点移动解决方案的说明,使读者易于理解和接受;在 2.4 节,增补了信号流图与方框图应用范围的比较,便于读者了解并熟悉信号流图与方框图的不同特点。在 4.3 节,重写了常规根轨迹绘制规则的内容;在 4.5.2 节,重写了基于根轨迹的系统稳态性能分析的内容。在 5.3.3 节,将开环对数幅频特性低频段特点与系统型别关系纳入到“开环对数频率特性曲线”这一节中,有助于读者全面地理解绘制过程及特性。将第二版 6.2 节调整到 6.2.4 节;考虑到利用根轨迹法进行校正在实际工程应用中很少涉及,删除了第二版 6.5 节根轨迹法串联校正。在 7.3 节,增补了相平面分析法的发展历程;在 7.3.2 节,增补了解析法和等倾斜线法的优点分析;在 7.3.3 节,增补了非线性系统相平面分析与线性系统相平面分析的不同特点。删除了第二版 8.6 节“最少拍无差离散控制系统设计”部分。新增了第 9 章“直流电动机控制系统分析与综合”,借助 Matlab/Simulink 数值计算工具对典型直流电动机控制系统进行了仿真分析、设计、验证和比较,更有助于提高读者分析和解决复杂工程问题的综合能力。扩充了每一章的思考题和控制工程综合练习题。将原来分布在各章最后一节的 Matlab/Simulink 软件工具在控制系统分析与综合中的应用实例集中于附录一,学习难度从入门到提高,便于读者循序渐进地学习和掌握。新增了附录二,介绍了自动化领域代表性的学术期刊、会议以及国际三大文献检索数据库,供读者查阅和参考。

本书第三版由吴怀宇主编,参与本次修订的有湖南大学谭建豪,郑州大学曾庆山,三峡大学王仁明,长江大学朱清祥,武汉科技大学熊凌,河北工业大学张燕,广西大学胡立坤,中南民族大学张俊敏,武汉工程大学王后能,湖北工业大学常雨芳;武汉科技大学郑秀娟协助补充和校对了部分内容。需要特别指出的是,国家杰出青年基金获得者、武汉科技大学柴利教授,华北电力大学韩璞教授,江汉大学钱同惠教授、刘霞教授,中国地质大学贺良华教授,东华理工大学罗先喜教授及其他很多友人都给予了大力支持和热情帮助。此外,本书第三版内容中仍然包含第一版和第二版诸多参编者的辛勤劳动成果。在本书出版之际,请允许我向所有对于本书撰写、修改、出版与选用提供过帮助与支持的同志们表示衷心的感谢!

本书修订得到了教育部“自动控制原理”国家级精品资源共享课程(教高厅函[2016]54号)、第一批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材(教高函[2012]21号)、“控制理论与应用核心课程”国家教学团队(教高函[2009]18号)和“自动控制原理”国家级精品课程(教高函[2008]22号)等国家教学质量工程项目的资助,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有缺点与错误,恳请各界读者和广大师生进一步批评和建议。

编者

2017年8月

第二版前言

本书第一版自 2007 年 9 月出版以来,已在多所工科院校使用,并根据需要重新印刷多次,得到了兄弟院校同行专家和老师们充分肯定和大力支持。近几年来,自动控制、电气工程和电子信息技术的飞速发展给“自动控制原理”课程赋予新的内涵,相关专业在教学实践中对学生加强基础、拓宽专业和培养能力提出了新的要求,这些都促使本课程的内容和体系不断地进行着调整和改革。因此,编者感到有必要在第 1 版的基础上进行修订。

本次修订保持了原有的体系结构和简明的风格,吸收了国内外同类教材的优点;同时,融入了编者在教学和科研过程中积累的一些新的体会和成果。主要修改和补充内容说明如下。

在 1.1 节,增补了与自动控制技术发展相关的最新科技进展;在 1.2 和 1.3 节,修改了相关的控制系统方框图,使实际物理系统与自动控制系统建立了一一对应关系,便于读者加深对自动控制系统组成要素的直观理解;在 2.4 节,引入了一个直流电动机转速闭环控制系统的建模实例,进一步巩固从典型环节到控制系统的分析与建模的综合训练;在 3.2.2 节,增补了三种典型输入信号与系统输出响应关系表,使动态性能指标的表述更直观、易读;将第一版 5.3.4 节中的例题合并到 5.4.1 节中,使开环幅相频率特性曲线绘制的讲解更加系统和完整;重写了奈奎斯特稳定判据这一部分的内容,使读者易于理解和接受;在 6.1 节,强调了控制系统校正的概念;在 7.1.1 节,增补了线性系统与非线性系统特性比较表,便于读者快速了解并熟悉线性系统与非线性系统的不同特点;将第一版 7.2.3 节中的“组合非线性环节的描述函数”调整到 7.2.2 节,并增补了“自持振荡分析”内容;删除了第一版 8.3.3 节中 z 变换定理的证明,避免了与“信号与系统”课程内容的重复;引用了部分新版参考文献,新增了部分重要参考文献;修改和补充了部分习题;更正了第一版中图表、文字和计算中的一些错误和不妥之处。

参加本次修订的有吴怀宇、刘霞、谢勤岚、宋立忠、熊凌、廖家平、朱清祥、易天元,吴怀宇、廖家平任主编。

借此次修订再版之际,对一直给予本书出版、再版以关怀和支持的“21 世纪电气信息学科立体化系列教材”编委会的各位专家、教授表示由衷的感谢。对读者的支持谨致深深的谢意。

本书的修订得到了教育部“自动控制原理”国家精品课程(教高函[2008]22 号)、

“控制理论与应用核心课程”国家教学团队(教高函[2009]18号)等建设项目的资助,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2012年8月

第一版前言

本书是为适应应用型本科电子信息科学类、仪器仪表类、电气信息类、自动控制类及电机类各专业的教学需要而编写的。

在当今的社会生活中,自动控制技术已经广泛应用于工农业生产、交通运输、航空航天和国防建设等各个领域,自动化控制装置无所不在。特别是计算机技术的迅猛发展,使得一些高要求的控制方法得以实现,自动控制技术迅速普及。可以说,自动控制技术对科学技术现代化发展作出了重要贡献。

自动控制原理是自动控制技术的理论基础,是自动化及其相关专业的基础课。随着自动控制技术在各个行业的广泛渗透,“自动控制原理”已经成为众多不同专业背景学生的必修或者选修科目,其重要性可见一斑。

一般来说,控制理论分为以单输入单输出系统为研究对象的经典控制理论和以多输入多输出系统为研究对象的现代控制理论。经典控制理论是控制理论的基础,其理论与现代控制理论相通。考虑到实际工程的需要以及相当一部分院校另外开设有“现代控制理论”课程的情况,本书只讲述经典控制理论。如果读者想学习现代控制理论的相关内容,可参阅相关书籍。

本书的主要特点是:注重基本理论与基本概念的阐述,语言文字力求通俗易懂,增加实例说明,使读者更好地理解 and 掌握本书内容;各章中都结合书本内容介绍了运用 Matlab 分析与设计自动控制系统的基本方法,使读者较容易掌握 Matlab 在控制工程方面的应用,从而满足 21 世纪科技发展的需要。希望本书的出版有助于提高读者的理论联系实际的能力,为进一步学习相关知识打好坚实的理论基础。

参与本书编写工作的有:武汉科技大学吴怀宇(编写第 1 章),江汉大学刘霞(编写第 2 章),中南民族大学谢勤岚(编写第 3 章),海军工程大学宋立忠(编写第 4 章),武汉科技大学熊凌(编写第 5 章),湖北工业大学廖家平(编写第 6 章),长江大学朱清祥(编写第 7 章),武汉工程大学易天元(编写第 8 章)。本书经所有参编作者的商讨,由吴怀宇负责编写大纲的制定,并负责全书的组织和定稿。

本书在编写过程中参考了国内外大量专著、教材和文献(见参考文献),在此,本书编著者谨向有关著作者致以衷心的感谢!

对于本书中存在的错误和不足之处,恳请读者批评指正。

21 世纪电气信息学科立体化系列教材
《自动控制原理》编写组

2007 年 2 月

1 绪论	(1)
1.1 控制理论的形成与发展	(1)
1.1.1 自动控制理论阶段	(2)
1.1.2 现代控制理论阶段	(6)
1.1.3 智能控制理论阶段	(6)
1.2 自动控制系统的基本概念	(9)
1.2.1 手动控制与自动控制系统	(9)
1.2.2 自动控制系统的基本环节	(12)
1.2.3 自动控制系统的基本变量	(13)
1.2.4 开环控制系统	(13)
1.2.5 闭环控制系统	(14)
1.2.6 复合控制系统	(15)
1.3 自动控制系统性能的基本要求	(16)
1.3.1 稳定性	(16)
1.3.2 动态特性	(18)
1.3.3 静态特性	(20)
1.4 自动控制系统的分类	(21)
1.4.1 线性系统与非线性系统	(21)
1.4.2 连续系统与离散系统	(22)
1.4.3 恒值系统与随动系统	(23)
1.4.4 单变量系统与多变量系统	(23)
1.4.5 确定性系统与不确定性系统	(23)
1.4.6 集中参数系统与分布参数系统	(23)
1.5 教学内容与要求	(23)
1.5.1 教学内容	(23)
1.5.2 教学要求	(24)
本章小结	(25)
本章习题	(25)
2 线性控制系统的数学模型	(26)
2.1 微分方程描述法	(26)
2.2 传递函数描述法	(31)
2.2.1 传递函数的定义	(31)

2.2.2	传递函数的基本性质	(31)
2.2.3	典型环节的传递函数	(32)
2.3	方框图描述法	(35)
2.3.1	方框图的定义	(35)
2.3.2	方框图的等效变换	(37)
2.4	信号流图描述法	(41)
2.4.1	信号流图的定义与基本术语	(42)
2.4.2	信号流图的基本性质	(42)
2.4.3	信号流图的绘制	(43)
2.4.4	信号流图的梅森公式	(44)
2.5	控制系统的典型传递函数	(45)
2.5.1	系统的开环传递函数	(45)
2.5.2	系统的闭环传递函数	(46)
2.5.3	系统的误差传递函数	(46)
	本章小结	(47)
	本章习题	(48)
3	控制系统的时域分析	(52)
3.1	典型输入信号	(52)
3.2	线性定常系统的时域响应与性能指标	(53)
3.2.1	线性定常系统的时域响应	(53)
3.2.2	控制系统时域响应的性能指标	(54)
3.3	一阶系统的时域响应	(55)
3.3.1	一阶系统的单位阶跃响应	(55)
3.3.2	一阶系统的单位脉冲响应	(56)
3.3.3	线性定常系统的重要特性	(56)
3.4	二阶系统的时域响应	(57)
3.4.1	二阶系统的数学模型	(57)
3.4.2	二阶系统的单位阶跃响应	(58)
3.4.3	二阶系统的时域响应的性能指标	(60)
3.4.4	二阶系统的单位脉冲响应	(66)
3.5	高阶系统的时域响应	(66)
3.5.1	高阶系统单位阶跃响应	(66)
3.5.2	闭环主导极点	(68)
3.6	线性定常系统的稳定性	(69)
3.6.1	控制系统稳定性的概念与条件	(69)
3.6.2	线性定常系统稳定的充分必要条件	(69)
3.6.3	劳斯稳定判据	(70)
3.6.4	劳斯判据的特殊情况	(71)
3.6.5	赫尔维茨稳定判据	(73)
3.6.6	稳定判据的应用	(74)

3.6.7	相对稳定性和稳定裕度	(75)
3.7	系统的稳态误差	(76)
3.7.1	误差及稳态误差的基本概念	(76)
3.7.2	系统稳态误差的计算	(78)
3.7.3	动态误差系数	(82)
3.7.4	改善系统稳态精度的途径	(83)
	本章小结	(86)
	本章习题	(87)
4	根轨迹法	(90)
4.1	根轨迹的基本概念	(90)
4.2	根轨迹方程	(91)
4.3	常规根轨迹绘制规则	(93)
4.4	广义根轨迹及其绘制	(101)
4.4.1	参数根轨迹	(101)
4.4.2	零度根轨迹	(103)
4.5	控制系统的根轨迹分析	(106)
4.5.1	基于根轨迹的系统稳定性分析	(106)
4.5.2	基于根轨迹的系统稳态性能分析	(106)
4.5.3	基于根轨迹的系统动态性能分析	(107)
4.5.4	增加开环零、极点对根轨迹的影响	(108)
	本章小结	(109)
	本章习题	(109)
5	控制系统的频域分析	(111)
5.1	频率特性的基本概念	(111)
5.1.1	线性系统的频率响应和频率特性	(111)
5.1.2	用图形表示频率特性	(113)
5.2	典型环节的频率特性	(115)
5.2.1	比例环节的频率特性	(116)
5.2.2	积分环节的频率特性	(116)
5.2.3	微分环节的频率特性	(118)
5.2.4	惯性环节和一阶微分环节的频率特性	(119)
5.2.5	振荡环节和二阶微分环节的频率特性	(122)
5.2.6	时滞环节的频率特性	(126)
5.3	系统开环频率特性	(127)
5.3.1	开环幅相频率特性曲线	(127)
5.3.2	开环对数频率特性曲线	(133)
5.3.3	最小相位系统和非最小相位系统	(137)
5.4	控制系统的频域稳定性判据	(139)
5.4.1	幅角原理	(139)
5.4.2	奈氏判据	(140)

5.4.3	奈氏判据在伯德图中的应用	(146)
5.5	控制系统的相对稳定性	(147)
5.5.1	相位裕量	(148)
5.5.2	增益裕量	(148)
5.5.3	开环对数频率特性与相对稳定性的关系	(150)
5.6	控制系统的闭环频率特性	(155)
5.6.1	开环频率特性与闭环频率特性的关系	(156)
5.6.2	等 M 圆图和等 N 圆图	(156)
5.6.3	尼柯尔斯图线	(159)
5.6.4	非单位反馈系统的闭环频率特性	(162)
5.7	频域性能指标与时域性能指标的关系	(162)
5.7.1	开环频域指标和时域性能指标的关系	(162)
5.7.2	闭环频域指标与时域性能指标的关系	(164)
	本章小结	(166)
	本章习题	(167)
6	控制系统的校正与设计	(169)
6.1	控制系统校正的概念	(169)
6.2	常用校正装置及其特性	(172)
6.2.1	超前校正装置	(172)
6.2.2	滞后校正装置	(173)
6.2.3	滞后-超前校正装置	(174)
6.2.4	PID校正装置	(175)
6.3	采用频率法进行串联校正	(178)
6.3.1	超前校正设计	(179)
6.3.2	滞后校正设计	(180)
6.3.3	滞后-超前校正设计	(182)
6.3.4	按系统期望频率特性进行校正	(184)
6.3.5	PID校正	(187)
6.4	反馈校正及其参数确定	(189)
	本章小结	(193)
	本章习题	(193)
7	非线性控制系统	(197)
7.1	非线性系统概述	(197)
7.1.1	典型非线性特性	(197)
7.1.2	非线性系统的基本特征	(199)
7.1.3	非线性系统的分析方法及应用	(201)
7.2	描述函数法	(202)
7.2.1	描述函数法的基本概念	(202)
7.2.2	典型非线性特性的描述函数	(203)
7.2.3	用描述函数法分析非线性系统的稳定性	(208)

7.3	相平面法	(211)
7.3.1	相平面的基本概念	(211)
7.3.2	相轨迹的绘制	(212)
7.3.3	相平面分析	(214)
	本章小结	(223)
	本章习题	(223)
8	离散控制系统	(226)
8.1	离散系统的基本概念	(226)
8.1.1	离散控制系统	(226)
8.1.2	离散控制系统的特点	(229)
8.1.3	离散控制系统的研究方法	(229)
8.2	信号的采样与保持	(229)
8.2.1	采样过程及其数学描述	(229)
8.2.2	采样定理	(231)
8.2.3	信号的复现与零阶保持器	(232)
8.2.4	采样周期的选择	(234)
8.3	z 变换理论	(235)
8.3.1	z 变换的定义	(235)
8.3.2	z 变换方法	(236)
8.3.3	z 变换基本定理	(240)
8.3.4	z 反变换	(243)
8.4	离散控制系统的数学模型	(245)
8.4.1	差分方程	(246)
8.4.2	脉冲传递函数	(247)
8.4.3	差分方程和脉冲传递函数的关系	(256)
8.5	离散控制系统的分析	(257)
8.5.1	离散控制系统的稳定性	(257)
8.5.2	离散控制系统的稳态误差	(261)
8.5.3	离散控制系统的动态性能分析	(263)
	本章小结	(267)
	本章习题	(267)
9	直流电动机控制系统分析与综合	(270)
9.1	直流电机简介	(270)
9.2	直流电动机模型及特性分析	(271)
9.2.1	直流电动机模型	(271)
9.2.2	直流电动机模型特性分析	(272)
9.3	直流电动机闭环控制系统的时域分析	(274)
9.3.1	基于调速模型讨论闭环控制与开环控制的优劣	(274)
9.3.2	基于位置模型讨论 PID 闭环控制	(277)
9.4	直流电动机闭环控制系统的频域分析	(291)

9.5 直流电动机位置与速度控制系统综合	(293)
9.5.1 直流电动机位置控制系统的根轨迹综合	(293)
9.5.2 直流电动机位置控制系统的频域综合	(302)
9.6 直流电动机离散控制系统分析	(312)
9.7 直流电动机离散控制系统综合	(315)
9.7.1 利用连续域离散化方法综合控制系统	(315)
9.7.2 利用最小拍设计方法综合控制系统	(318)
9.8 直流电动机非线性反馈控制系统综合	(324)
9.8.1 非线性速度反馈校正改善动态品质	(324)
9.8.2 前向通道加入非线性环节改善动态品质	(326)
9.8.3 用非线性切换方式改善滞后(PD)校正	(328)
本章小结	(329)
附录1 Matlab/Simulink 在控制系统分析与综合中的应用实例	(330)
附录2 自动化领域重要学术期刊、会议及文献检索工具	(358)
参考文献	(360)

绪 论

1.1 控制理论的形成与发展

近几十年来,自动控制技术(automatic control technology)迅猛发展,在工农业生产、交通运输、航空航天、国防建设、经济管理、生物工程等几乎所有科学和技术领域得到了广泛的应用。在工农业生产领域,自动化技术的发展从早期的机械转速、位置的控制到工业过程中的温度、压力、流量、张力等不同物理量的控制;在航海领域,从远洋巨轮、“雪龙号”极地考察船、“辽宁舰”航母到深海载人潜水器的控制,自动化技术都发挥了重要的作用。

在航海领域,2016年9月20日,“雪龙号”第七次完成北极科考任务。2017年1月13日,辽宁舰与多艘驱逐舰、护卫舰组成的航母编队,顺利完成了跨海区训练和试验任务。深海潜水器包括载人作业型和载人探险型两种。其中,载人作业型深海潜水器具有水下观察和作业能力,主要用来执行水下考察。1964年,美国的“阿尔文号”载人潜水器可以下潜到4500 m的深海。2012年6月24日,中国“蛟龙号”载人潜水器下潜深度达到7020 m,创造了中国载人深潜新的历史纪录。载人探险型深海潜水器下潜能力强,但活动范围有限。2012年3月26日,由澳大利亚工程师打造的“深海挑战者号”单人潜水艇下潜深度超过10000 m。

在航空航天领域,从飞机自动驾驶、精确导弹制导、人造卫星到2016年12月19日“神舟十一号”与“天宫二号”自动交会对接与返回控制,再到2013年12月14日发射的“嫦娥三号”探测器登陆月球,2003年6月10日发射的“勇气号”、2003年7月7日的“机遇号”和2011年11月26日的“好奇号”探测器登陆火星的控制,随着科学技术和社会经济的不断发展,自动控制已经介入许多学科,渗透到各个工程领域。

此外,自动控制技术也渗入人们日常生活的方方面面。2005年雪铁龙公司首次研发了自动泊车入位系统,实现了汽车自动停入车位,随后丰田、奥迪、奔驰、大众等公司纷纷跟进;2009年以来,特斯拉和Google公司研制的无人驾驶汽车实现了自动车道保持、自动变更车道和自动泊车等功能。2014年百度公司生产的小度机器人,集成了自然语言理解、智能交互、语音视觉等多种人工智能技术,能以自然的方式与用户进行信息、服务、情感的交流。2014年8月,天津市投入使用的电力智能巡检机器人负责变电站的设备巡检工作,实时回传清晰的设备视频、图片、红外成像测温视频、数据,自动读

取设备表计,开展远程巡视、特殊巡视,自动生成巡检报告和历史数据趋势曲线。2016年3月,谷歌研制的人工智能系统阿尔法围棋(AlphaGo)以总比分4比1战胜了来自韩国的围棋世界冠军李世石,显示出人工智能的强大力量。2016年9月,深圳机场采用智能安保机器人执行日常巡逻防控任务,开展24小时不间断自主巡逻,通过前后左右四个移动高清数字摄像头实现民航安检前置、移动人像识别功能,并将相关图像信息回传公安大数据后台进行人员分析、实时预警。2017年4月,人工智能“冷扑大师”向六位华人顶尖德州扑克牌手发起挑战,开启共30小时为期5天的人机对决,人工智能完胜。2017年4月,申通快递采用机器人分拣系统,实现流水线分拣到自动装袋的过程,能根据包裹地址识别路径,自动充电,每天至少分拣20万个快递,极大地节省了人工成本。

因此,自动控制技术不仅成为最有发展前途的科学技术之一,而且是现代化社会中不可或缺的组成部分。

所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用外加设备或控制装置使生产过程或被控对象中的某一物理量或多个物理量自动地按照期望的规律去运行或变化的技术。这种外加的设备或装置就称为自动控制装置。

自动控制理论(automatic control theory)是研究自动控制共同规律的技术学科,主要阐述自动控制的基本原理、自动控制系统的分析和设计方法等内容。控制理论的发展与人类科学技术的发展密切相关,在近代已迅速地发展成为一门内涵极为丰富的新兴学科。控制理论的产生和发展划分为三个阶段:自动控制理论(也称经典控制理论)阶段、现代控制理论阶段和智能控制理论阶段。

1.1.1 自动控制理论阶段

1. 自动装置的发明与应用

自古以来,人类就有创造自动装置以减轻或代替人劳动的想法,他们凭借生产实践中积累的丰富经验和对反馈概念的直观认识,发明了许多闪烁控制理论智慧火花的杰作。

水时钟是古代埃及人发明的一种计时装置,它出现于公元前1400年,至今开罗博物馆还珍藏着水时钟的实物。水时钟在中国又称为漏壶、漏刻或漏滴,历代形制不一,有一种是用4个铜壶,由上而下互相叠置而成,上面3个壶底有小孔,最上一壶装满水后,水即逐渐流入以下各壶,最下一壶(称为受水壶或箭壶)内装一直立浮标,上刻时辰,水逐渐升高,浮标也随之上升,通过标记即可知道时辰。图1-1(a)所示的是1745年建造的铜壶漏刻,现存于北京故宫博物院。公元前3世纪中叶,亚历山大里亚城的斯提西比乌斯(Ctesibius)首次在受水壶中使用了浮子(phellosive tympanum),注入的水通过圆锥形的浮子节制,这种节制方式已含有负反馈(negative feedback)的思想。

天文钟是中国人发明的另一种计时装置。有史料记载,汉武帝太初年间(公元前104—公元前101年)由落下闳发明了世界上最早的天文观测仪器——浑天仪。东汉时期的天文学家张衡制造了世界上最早的以水为动力的观测天象的机械计时器——漏水转运浑天仪,它是世界机械天文钟的先驱。北宋时期(公元1086—1092年),苏颂和韩公廉利用漏滴、齿轮机械、水力推动等原理在开封建造了世界上第一座装有擒纵器的自鸣机械天文钟——水运仪象台,如图1-1(b)所示。它是集观测天象的浑仪、演示天象

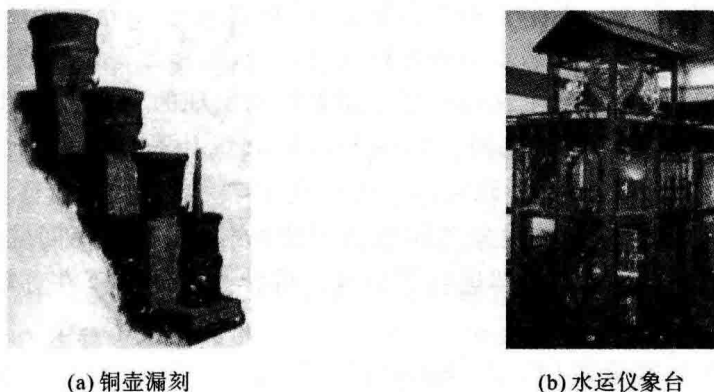


图 1-1 中国人发明的自动装置

的浑象、计量时间的漏刻和报告时间的机械装置于一体的综合性观测仪器，每天仅有 1 s 的误差。其中，结构精巧的擒纵器是后世钟表以及所有自动机械装置的起源。擒纵器是机械钟表的灵魂，它能对动力轮做周期性的控制和放纵，使其产生匀速转动。英国剑桥大学教授李约瑟 (Joseph Needham) 博士在 1956 年 3 月份英国《Nature》杂志上发表的《Chinese Astronomical Clockwork》一文中指出了“*The Chinese chronometer is the direct ancestor of the chronometer of Middle Age in Europe*”。水运仪象台本质上是一个按被调量的偏差进行控制的闭环非线性自动控制系统，这是中国科学家对人类计时科学的伟大贡献，在世界钟表史上具有极其重要的意义。

1642 年，法国物理学家帕斯卡 (B. Pascal) 采用与钟表类似的齿轮传动装置，发明了第一台机械式十进制加法器，解决了自动进位这一关键问题，也第一次确立了计算器的概念，因此他被公认为是制造机械计算机的第一人。1657 年，荷兰科学家惠更斯 (C. Huygens) 应用伽利略 (G. Galilei, 1564—1642) 的理论设计了钟摆，在他的指导下，年轻的钟匠考斯特 (S. Coster) 成功地制造了第一个摆钟。1675 年，惠更斯又用游丝取代了原始的钟摆，这样就形成以发条为动力、以游丝为调速机构的小型钟，同时也为制造便于携带的袋表创造了条件。1765 年，俄国人普尔佐诺夫 (I. Polzunov) 发明了浮子阀门式水位调节器，用于蒸汽锅炉水位的自动控制。1788 年，瓦特 (James Watt, 1736—1819) 发明了蒸汽机，此后他给蒸汽机添加了一个节流控制器即节流阀，它由一个离心调节器操纵，用于调节蒸汽流，以便确保引擎工作时速度大致均匀，在当时这是反馈调节器最成功的应用。

古代劳动人民发明的各种自动装置不胜枚举。正是这些构思奇异的自动装置的发 明与应用，推动和促进了人们对这些自动装置的基本原理和设计技术做更深入的探索和研究。

2. 稳定性理论的建立

英国物理学家牛顿 (I. Newton, 1642—1727) 是第一个关注动态系统稳定性的人。1687 年，在他的著作《Mathematical Principles of Natural Philosophy》中，对围绕引力中心做圆周运动的质点进行了研究。在牛顿创立引力理论之后，法国数学家拉格朗日 (Joseph Louis Lagrange, 1736—1813) 和拉普拉斯 (Pierre-Simon Laplace, 1749—1827) 在证明太阳系的稳定性问题方面做了相当大的努力。1773 年，24 岁的拉普拉斯证明了行星到太阳的距离在一些微小的周期之内是不变的。1868 年，英国物理学家麦克斯韦