



“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
现代机械工程系列精品教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材



# Fundamentals of Control Engineering

# 控制工程基础

第④版

燕山大学 孔祥东 姚成玉 © 主编



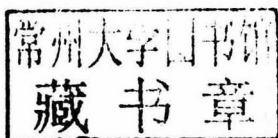
机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目  
现代机械工程系列精品教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 控制工程基础

第4版

主 编 孔祥东 姚成玉  
参 编 艾 超 李建雄 王跃灵  
      方一鸣 王洪斌  
主 审 杨华勇 焦宗夏



机械工业出版社

本书由燕山大学液压专业与自动化专业合作编写,由华中科技大学李培根院士作序,并由浙江大学杨华勇院士和北京航空航天大学焦宗夏教授主审。

本书此次修订按照打造新工科精品教材的要求,以“培养新素养、形成新能力”为牵引重构课程边界,按教学实践积累总结和新工科要求重塑课程知识点,按与时俱进的时代特征要求提供多媒体教学内容,使内容更为优化,更切合时代需求。本书主要介绍控制工程中分析和综合线性定常系统的时域与频域的理论和方法,内容包括绪论、数学模型、时域分析、频域分析、综合与校正。

本书融入有针对性的例题,并精选习题,附有 MATLAB/Simulink 软件在控制工程中的应用实例、实践项目工程教学案例、控制系统的分析与综合以及习题参考答案。

本书配有 PPT 教学课件(www.cmpedu.com)和微信公众教学资源(登录方法见封底勒口)。微信公众教学资源包括教学课件、习题详解、扩展阅读等内容,以便于学习与交流互动。

本书适于作泛机械类工科专业的教材,也可供有关科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

控制工程基础/孔祥东,姚成玉主编.—4版.—北京:机械工业出版社,2019.1

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系列精品教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-60951-3

I. ①控… II. ①孔… ②姚… 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(2018)第 216964 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:刘小慧 责任编辑:刘小慧 陈文龙 刘丽敏

责任校对:樊钟英 封面设计:张静

责任印制:孙炜

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2019 年 5 月第 4 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13.75 印张·323 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-60951-3

定价:39.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-68326294

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

# 序 言

2017年2月,教育部发布了“新工科”计划。在“新工科”计划推进之际,孔祥东教授等即推出了基于创新教育新思想和新方法的力作——《控制工程基础》(第4版)书稿,令人欣喜。

华中科技大学和燕山大学两校在液压专业等诸多学科有着广泛的学术交流。燕山大学作为河北省、教育部、工业与信息化部、国防科工局四方共建的全国重点大学,在与控制工程相关的流体传动与电液伺服控制技术、工业自动化控制理论与技术等研究领域具有国际先进水平。燕山大学是国内首批加入工程教育改革的高校之一。作为教育部选定的两所高校之一,燕山大学的工程教育专业认证接受了《华盛顿协议》国际专家的观摩考察,支撑了我国正式加入《华盛顿协议》,体现了其工程教育实力。本书是在传承前3版教材基础上的再创新,契合了工程教育的改革方向。

课程和教材是专业知识结构和体系的基础。控制工程基础是为泛机械类工科专业开设的学科基础课,也是学科交叉课,是研究如何控制各种被控对象或系统使其动态和稳态性能达到期望性能的工程基础理论和技术。控制工程基础的重要性在于它的基础性,其大量的概念、方法、原理和理论,对于泛机械类工科专业的后续课程和控制工程的许多学科分支,都具有十分重要的作用。控制科学的应用和影响已经遍及国民经济的各个领域,大到航空航天、航海、高铁,小到家电、3C、网络通信,而贯穿其中的系统、动态、协调之思想和方法更丰富了方法论。在实际工程中,机电液技术被广泛应用,机器设备的运行离不开机械本体、电液传动与控制系统(类比于人之骨骼、肌肉与神经系统),这就需要泛机械类工科学生具备一定的机电液多学科的空间感乃至大工程观。本书的一大特色正是将自动控制技术与机电液系统相结合,研究工程系统自动控制问题的基础理论和技术。

燕山大学编写的《控制工程基础》教材,自第1版出版以来已近30年,已为多所高校采用并广受好评。这些教学实践,为提高和改善本书的质量,特别是使本书的安排和编写更加符合泛机械类工科学生的认识规律,处理好抽象性和直观性,以及数学方法和工程概念间的关系,提供了重要的帮助。以孔祥东教授为带头人的机电液一体化国家级教学团队,在轧机厚控系统、压机控制系统、电液比例与伺服控制系统等领域完成了多项国家、省部级重大课题和工程项目,其所形成的工程视角和学术思考,为教材的顶层设计和边

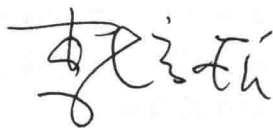
界再设计提供了基础。本书以大学泛机械类工科为背景，系统且有重点地阐述了分析和综合线性定常系统的时域、频域理论和方法，并适应科技的发展，更新了教材知识内容，重构了课程知识体系。

本书体现了关联、启发教学设计的思想。如将梅逊公式并入“2.4 框图及其简化”一节中，删除了信号流图，使得框图等效变换与梅逊公式呈并列且递进关系，直接由框图使用梅逊公式，可以化繁为简，以问题为导向；同时，知识点之后留有启发思考和分析总结内容，并关联后续章节，如框图特征式全文协调、引申出特征方程等。又如在“3.5 稳定性及其劳斯稳定判据”一节中，注意稳定性定义与后续课程内容如李雅普诺夫稳定性的关联协调，通过判定系统的稳定性和开环稳定性，将概念模糊、学生疑问之处解析清楚。将劳斯表列写方法用图示化方法给出，并对两种特殊情况进行分析总结，内容编写以学生为视角，将启发、引申、关联穿插其中，简练而有特色，读之宛若师生互动。

本书第3版出版至今已有10年。10年间，以全球化、网络化为代表的一系列颠覆性技术的发展，使得教育、学习、信息共享的方式都发生了深刻的变化。今天，智能手机已广为普及，大学生可以随时利用智能手机上网。本书推出适应网络化与新媒体特征的教学课件、微信公众教学资源，用以同步辅助教学，与学生交互，切合智能手机时代的信息获取与学习特征，便于学生随时查询和学习课程内容，进行扩展阅读，反馈问题，使碎片知识、查询式学习成为正式学习的良好补充，这是本书所提供的与时俱进的创新教学模式。总之，本书的编写团队对于教材、教学内容及教学方法进行了诸多新的尝试，这是难能可贵的。

如何构建工科新的教材体系及新的教材，体现基础知识、工程知识与前沿知识的交融，并兼具凝炼固化与改进开放，且充分利用现代科技的多元、交互、易学、易传播的特点，这都有待工程教育工作者的探索与实践，甚至社会科技力量的参与和创新，正所谓“独行快，众行远”。本书的出版，对更新该门课程知识、改善教学教材现状将起到积极的作用。

工程改变世界，科技创造未来，工程教育决定着人类的今天，更关系到人类的未来。最后，希望学习和使用本书的同学们，在学习过程中不断超越，为成为创新型卓越的工程人才奠定基础；也希望使用本书的教师们为探索新的教学方法、重塑工程教育文化做出自己的贡献！



华中科技大学教授

2018年10月

# 第4版前言

本书第3版荣获中国机械工业科学技术奖三等奖。本书前3版分别于1989年、2000年、2008年出版，累计30余印次，深受高校师生与读者的好评、支持和肯定。本书自第3版出版以来，我们得到了兄弟院校师生反馈的许多宝贵建议。为打造精品教材，编者在教学一线与科研实践中不断思考和总结。适逢教育部推出以培养未来多元化、创新型卓越工程人才为目标的“新工科”计划，以适应新科技革命、新产业革命和新经济发展背景下对工程教育的新需求。为此，我们根据“新工科”计划并在教学实践积累总结的基础上，对本书进行了边界再界定和内容再修订。

本次修订的内容主要有以下几个方面：

**(1) 按培养新素养、形成新能力的要求确定课程边界** 控制工程基础是为泛机械类工科专业开设的学科基础课，也是学科交叉课，其大量的概念、方法和原理，对于泛机械类工科专业的后续课程和控制工程的许多学科分支，都具有十分重要的基础作用。基于此，本书设计总学时为32~40学时（授课28~36学时，实验4学时），主要针对经典控制理论中的线性定常系统，阐明控制工程的模型、分析和控制三个基本问题。全书共分5章，内容包括绪论、数学模型、时域分析、频域分析、综合与校正。

**(2) 按教学实践积累、总结和“新工科”要求重塑课程知识点** 本书编写团队涵盖了机械、液压和自动化等专业的教师，具有丰富的教学与科研经验，在总结第3版以来的教学规律和经验，汲取兄弟院校教学实践中的建议和意见，尤其是在“新工科”对工程教育的改革方向和要求的基础上，对全书重新编排和调整，对各章内容进行更新和凝炼，对核心知识点进行凸显和关联，对例题和习题进行修改和精炼，新增课程“工程实践项目教学案例”和“控制系统的分析与综合工程实例”，并有MATLAB/Simulink软件在控制工程中的应用实例和习题参考答案。

**(3) 按与时俱进的时代特征要求提供多媒体教学内容** 为切合新媒体时代的信息获取与学习特征，本书配有PPT教学课件（请使用本书的老师到机械工业出版社教育服务网 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 下载）；同时，本书配套微信公众平台教学资源（有教学课件、习题详解、扩展阅读等内容，登录方法见封底勒口），用于同步辅助教学，便于教学互动、各校互联、反馈改进，方便学生随时查

询和学习课程内容,进行延伸关联阅读,使碎片式、查询式学习与正式学习相互补充,有利于进行大数据反馈分析并持续改进,提升教学与教材质量。

本书由燕山大学孔祥东教授、姚成玉教授担任主编。第1~2章、附录B由孔祥东教授和艾超副教授编写,第3章和附录A由姚成玉教授编写,第4章由王跃灵博士后和王洪斌教授编写,第5章及附录C由李建雄副教授和方一鸣教授编写。各章教学课件和习题详解由各章编者完成。全书由孔祥东教授、姚成玉教授统稿。研究生陈立娟为本书部分内容的编写给予了帮助。

衷心感谢华中科技大学前校长、中国机械工程学会第十一届理事会理事长、教育部机械类教学指导委员会主任委员(2013~2017年)、中国工程院院士李培根教授为本书作序。

衷心感谢浙江大学机械工程学院院长、中国工程院院士杨华勇教授和北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院院长、长江学者特聘教授焦宗夏担任本书主审。

本书是在前3版基础上进一步改进和更新完成的,这里向不再参与本次编写但具有历史性贡献的编者——东北重型机械学院/燕山大学王益群、李久彤、韩德才、高英杰、焦晓红、祁晓野、权凌霄和西安交通大学的阳舍和、杨公仆、王馨等以及前3版的主审东北大学周士昌、西安交通大学史维祥、北京航空航天大学王占林、上海交通大学范崇托等表示崇高的敬意。

燕山大学焦晓红教授审阅了本书部分章节,东北大学段洪君、湖南师范大学金耀、武汉轻工大学严清华、北京信息科技大学陈秀梅、同济大学靳文瑞、湘潭大学张大兵、内蒙古工业大学孟瑞锋、河北科技大学陈继荣、河北科技师范学院陈春明等兄弟院校的任课教师,以及燕山大学李慧剑、刘爽、李峰磊、刘志新、贺有智、杨晟刚、罗小元、马镨、唐英干等教师提出了许多宝贵意见或修订建议,在此一并表示衷心的感谢。

衷心感谢机械工业出版社责任编辑刘小慧老师多年来对本书第3、4版工作的支持和帮助。

本书难免有漏误和不足,敬请读者批评指正。

联系方式:邮箱 control@ysu.edu.cn, 电话 13930358822(QQ 微信同号)。

编者

2018年10月

# 第3版前言

本书在《控制工程基础》第2版(王益群、孔祥东主编,机械工业出版社,2000)的基础上重新修订编写,是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书在编写过程中结合编者近几年的教学改革经验、科研积累以及读者的反馈意见,并广泛参考了国内外同类教材和相关文献,从教学、考研及工程实用性需求等角度出发,力求做到使教材内容概念表达准确、知识结构调整合理、教学安排层次清晰,并进一步突出“控制工程基础”的主要特点。

本书主要介绍工程中广为应用的经典控制理论和现代控制理论中系统分析与综合的基本方法。全书共分十章:前六章属于经典控制理论中的线性定常连续控制系统问题,阐明了自动控制的三个基本问题,即模型、分析和控制;第七章和第八章分别为非线性系统及采样控制系统;第九章为现代控制理论基础;第十章为典型控制系统的分析与设计实例。

本书主要在以下几个方面进行了删改和补充:

(1) **调整知识构成体系** 增加了在工程中经常应用的根轨迹法;增添了现代控制理论内容,如第九章“现代控制理论基础”;突出机电系统作为主要控制对象,适当增加了工程控制系统实际应用的例子,如第十章“典型控制系统的分析与设计实例”等;精简了部分章节的内容。

(2) **调整章节结构体系** 在本书经典控制理论部分中,以时域分析、根轨迹法、频率分析为主线,将原来独立成章的“控制系统的稳定性分析”和“控制系统的误差分析和计算”进行拆分,融入上述主线中,使知识构成和结构体系更加合理,也便于学习和阅读。

(3) **调整增添例题、习题** 对不够典型且已陈旧的例题和习题进行了删减,增加了与工程应用结合紧密、具有代表性的例题和习题。部分习题附有参考答案。

(4) **集中介绍软件应用** 在附录“基于 MATLAB 的控制系统设计”中作为专题来论述 MATLAB 和 Simulink 软件在控制工程中的应用,便于读者查阅。

使用本书讲授课程约需 50 学时,实验约需 6 学时。凡有“\*”号的章节,属加深拓宽的内容,各学校可根据教学时数安排酌情讲授。

本书由燕山大学孔祥东教授、王益群教授主编。参加编写工作的有

孔祥东教授(第一章、第二章)、高英杰教授(第三章、第五章)、姚成玉副教授(第四章、附录、习题及答案)、方一鸣教授(第六章、第七章、第八章)、王洪斌教授(第九章、第十章)。全书由孔祥东、王益群教授统稿,姚成玉副教授协助整理。研究生权凌霄、谷彦鹏、赵琳琳、李萍等为本书部分章节的文字和绘图工作给予了帮助。

本书由北京航空航天大学王占林教授、上海交通大学范崇托教授主审。燕山大学王跃灵、刘爽、魏立新副教授等提出了许多宝贵意见。在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中缺点和错误之处在所难免,欢迎读者批评指正。  
联系方式: control@ysu.edu.cn。

编者

2007年5月

## 第2版前言

根据全国高校机械工程教学指导委员会1998年武汉会议的决定,我们修订了这本适应教学计划40~50学时的“控制工程基础”教材。

本书是在原《控制工程基础》(王益群、阳含和主编,机械工业出版社,1989)统编教材的基础上,结合编者近些年教改实践和计算机技术的普及重新编写而成的。

本书以介绍工程上广为应用的经典控制论为主,以使读者能够学会信息处理和系统分析与综合的基本方法。在编写时,力求重点突出,使读者对经典控制论有较全面的了解。考虑到近些年计算机应用的推广和求解手段的进步,还简要介绍了计算机采样控制系统和控制系统计算机辅助分析的基本方法,以使读者建立起这方面的基本概念。

全书共分九章,包括绪论、数学模型、时域响应分析、频域响应分析、稳定性分析、误差分析、系统的综合与校正、非线性系统和计算机采样控制系统等。有“\*”号的章节为加深拓宽的内容,可根据需要选讲。

本书在论述上力求做到概念准确、层次清晰、深入浅出、易教易学,适当结合机、电、液方面编入一些易于理解的例题和习题。本书适于作机械设计制造及其自动化、材料成型与控制工程专业及其他非电类专业的教材,也可供有关科技人员参考。

本书由燕山大学王益群教授、孔祥东教授主编。参加编写工作的有王益群(第一章)、孔祥东(第二章、第四章、第五章)、李久彤(第三章)、高英杰(第六章、附录)、焦晓红(第七章、第八章)、方一鸣(第九章)。

本书由西安交通大学史维祥教授主审。2000年4月在秦皇岛燕山大学召开了本书的审稿会,西安交通大学、北京航空航天大学、燕山大学和机械工业出版社的有关专家出席了会议并提出了许多宝贵意见,在此,对上述单位及有关专家表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中如有不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2000年5月

# 第1版前言

根据全国高等学校工科机电类 1986~1990 年教材编审、出版规划, 全国流体传动及控制教材编审组于 1983 年 12 月和 1984 年 12 月先后两次在西安开会, 起草并通过了本书的教学大纲。1986 年 10 月在南京召开的流体传动及控制专业教材编审组会议上, 根据加强基础、增强适应性的精神, 对本书的编写内容又做了进一步讨论。本书就是按照上述会议所通过的大纲, 结合编者多年的教学实践编写而成的。

本书以介绍工程上广为应用的经典控制论为主, 以期读者能够学会信息的处理和系统的分析和综合, 为学习专业课程和进一步学习控制理论打下基础。鉴于频域法是经典控制论的核心, 故在阐述上以频域法为主线展开, 同时还介绍了瞬态分析法、根轨迹法、控制系统的非线性分析等, 力求重点突出, 使读者对经典控制论有较全面的了解。考虑时延环节在工程上广泛存在, 故设置了一章介绍时延控制系统分析。又因多数院校在大学本科教学中未单独设置现代控制理论课程, 故又设置了现代控制理论概述一章。书中凡有“\*”号的章节, 属加深拓宽的内容, 各校可视具体情况进行适当增减。

本书在论述上力求做到概念准确、层次清晰、深入浅出、精讲多练, 适当结合机、电、液方面编入一些易于理解的例题和一定数量的习题, 以加深对基本概念的理解。本书适于作流体传动及控制专业及其他机械类专业的教材, 也可供有关科技人员参考。

本书由东北重型机械学院(秦皇岛分校)王益群教授和西安交通大学阳含和教授主编。阳含和教授生前对本书的编写大纲提出过精辟、有益的见解。参加编写工作的有东北重型机械学院(秦皇岛分校)王益群(第三章、第四章、第八章、附录)、李久彤(第五章、第六章)、韩德才(第九章、第十章、第十一章)、西安交通大学杨公仆(第一章、第七章)、王馨(第二章)。

本书由东北工学院周士昌教授主审。1988 年 8 月在秦皇岛燕山大学(东北重型机械学院分校)召开了审稿会, 东北工学院、北京理工大学、太原工业大学、甘肃工业大学、沈阳工业大学的代表参加了会议并提出许多宝贵意见。燕山大学徐征明教授审阅了本书的部分章节, 编者和宋维公教授进行过讨论, 祈晓野同志在计算机应用方面给予了积极的帮助。在此, 对上述单位及有关人员一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限, 书中缺点和错误在所难免, 恳请广大读者批评指教。

编者

1988 年 10 月

# 目 录

序言	
第4版前言	
第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 控制系统的基本概念 .....	3
1.2.1 控制系统的工作原理 .....	4
1.2.2 开环控制系统与闭环控制系统 .....	5
1.2.3 闭环控制系统的基本组成 .....	6
1.2.4 控制系统的基本类型 .....	7
1.2.5 对控制系统的基本要求 .....	8
1.3 控制工程基础的主要任务与知识体系 .....	9
1.3.1 主要任务 .....	9
1.3.2 知识体系 .....	9
本章小结 .....	10
习题 .....	10
<b>第2章 控制系统的数学模型</b> .....	11
2.1 控制系统的微分方程及线性化方程 .....	11
2.1.1 机械系统的微分方程 .....	11
2.1.2 电气系统的微分方程 .....	14
2.1.3 液压系统的线性化微分方程 .....	16
2.1.4 机电液系统的相似性 .....	18
2.2 拉普拉斯变换及反变换 .....	19
2.2.1 拉普拉斯变换及其运算法则 .....	19
2.2.2 拉普拉斯反变换及其计算方法 .....	23
2.3 传递函数及基本环节的传递函数 .....	30
2.3.1 传递函数 .....	30
2.3.2 基本环节的传递函数 .....	32
2.4 框图及其简化 .....	35
2.4.1 框图组成及连接方式 .....	35
2.4.2 框图等效变换 .....	39
2.4.3 梅逊公式 .....	42
本章小结 .....	46
习题 .....	46
<b>第3章 控制系统的时域分析</b> .....	51
3.1 控制系统的时间响应及性能指标 .....	51
3.1.1 典型输入信号 .....	51
3.1.2 时间响应概述 .....	54
3.1.3 瞬态性能指标 .....	56
3.1.4 稳态性能指标 .....	58
3.2 一阶系统的时域分析 .....	58
3.2.1 一阶系统的数学模型 .....	58
3.2.2 一阶系统的时间响应 .....	59
3.2.3 一阶系统的瞬态性能指标 .....	61
3.3 二阶系统的时域分析 .....	62
3.3.1 二阶系统的数学模型 .....	62
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应 .....	63
3.3.3 欠阻尼二阶系统的瞬态性能指标 .....	66
3.4 高阶系统的时域分析 .....	72
3.5 稳定性及其劳斯稳定判据 .....	73
3.5.1 稳定性的概念 .....	73
3.5.2 线性定常系统稳定的充要条件 .....	74
3.5.3 劳斯稳定判据 .....	75
3.6 稳态误差分析与计算 .....	82
3.6.1 误差的定义 .....	82
3.6.2 稳态误差的基本概念 .....	83
3.6.3 稳态误差的计算 .....	85
3.7 根轨迹法 .....	89
3.7.1 根轨迹的基本概念 .....	89
3.7.2 幅值条件和相角条件 .....	90
3.7.3 根轨迹的绘制 .....	91
本章小结 .....	95
习题 .....	95

<b>第4章 控制系统的频域分析</b> .....	98	5.2.2 PID 参数整定方法 .....	146
4.1 频率特性的基本概念 .....	98	5.3 串联校正 .....	148
4.2 频率特性图形表示法 .....	102	5.3.1 相位超前校正装置 .....	149
4.2.1 Nyquist 图 .....	102	5.3.2 相位滞后校正装置 .....	150
4.2.2 Bode 图 .....	108	5.3.3 相位滞后-超前校正装置 .....	153
4.2.3 最小相位系统 .....	118	5.3.4 串联校正装置的设计 .....	155
4.3 几何稳定判据 .....	120	5.4 反馈校正 .....	162
4.3.1 奈氏判据 .....	120	5.4.1 反馈的作用 .....	163
4.3.2 对数判据 .....	122	5.4.2 反馈校正装置的设计 .....	163
4.4 相对稳定性 .....	123	5.5 复合校正 .....	166
4.4.1 相角裕度和幅值裕度 .....	123	5.5.1 按给定量反馈补偿控制器的	
4.4.2 相对稳定性的计算与分析 .....	125	设计 .....	166
4.5 闭环频率特性 .....	128	5.5.2 按扰动量前馈补偿控制器的	
4.5.1 由开环频率特性估计闭环频率		设计 .....	170
特性 .....	128	本章小结 .....	170
4.5.2 闭环系统的频域性能指标 .....	129	习题 .....	171
4.5.3 系统辨识的概念 .....	130	<b>附 录</b> .....	175
本章小结 .....	134	附录 A MATLAB/Simulink 软件在控制	
习题 .....	135	工程中的应用实例 .....	175
<b>第5章 控制系统的综合与校正</b> .....	139	附录 B 阀控缸位置闭环控制系统实践	
5.1 概述 .....	139	项目工程教学案例 .....	185
5.1.1 校正的概念和实质 .....	139	附录 C 转速反馈直流调速控制系统的	
5.1.2 控制系统的性能指标 .....	140	分析与综合 .....	192
5.1.3 校正方法 .....	142	<b>习题参考答案</b> .....	201
5.1.4 校正方式 .....	142	<b>参考文献</b> .....	207
5.2 基本控制规律及 PID 参数整定 .....	143		
5.2.1 基本控制规律及其作用 .....	144		



# 第1章

## 绪论

### 1.1 概述

控制论(Cybernetics)是研究生物、机器等各种系统控制和调节规律的科学,是由信息论的先驱、控制论的奠基人维纳(Wiener)提出的。控制论不仅是一门极为重要的科学,而且也是一门卓越的方法论,横跨基础科学、技术科学和社会科学等学科,具有普遍适用于各门科学和各个领域的思想和方法。将控制论推广到工程技术领域,产生了工程控制论;将控制论推广到生物系统、经济运行及社会治理等领域,产生了生物控制论、经济控制论、社会控制论等。

工程控制论是研究机器设备和工程系统自动控制问题的技术科学。控制论、工程控制论是在早期自动控制理论的基础上发展起来的。工程控制论通常也被理解为自动控制理论(Automatic Control Theory),而自动控制理论通常简称为控制理论。所谓自动控制,就是在没有人直接参与的情况下,采用控制装置使被控对象(如机器设备的运行或生产过程的进行)的某些物理量(如力、位移、速度、温度、电压、电流、压力、流量等)在既定精度范围内按照给定的规律变化。自动控制是人类在认识世界和劳动创造过程中发展起来的。有了自动控制,人类可以从笨重、重复性的劳动中解放出来,从事更富创造性的工作。自动控制技术广泛应用于工业、农业、国防等领域和家电、网络通信、汽车等产品中,人类生活已一时一刻也离不开它。自动控制技术是当代发展迅速、引人瞩目的高新技术之一,是推动新技术革命和新产业革命的关键核心技术。

控制工程基础(Fundamentals of Control Engineering),也称控制理论基础,主要阐述的是工程控制论的基础理论。在实际工程中,机械、电气、液压和自动控制技术被广泛应用。机器设备的服役运行类似人体机能的运转,离不开机械本体(类似骨骼)、机械电气流体传动(类似肌肉)与控制系统(类似神经系统),这就需要研究机器设备和工程系统自动控制的基础理论(即控制理论基础)。

控制理论的诞生源于解决工程问题的需要，实际生产需求和工业进步促进了控制理论的发展，而控制理论的发展反过来又推动了工业的进步。控制理论的发展与工业的进步互为促进，经历了四个历史阶段，如图 1-1 所示。

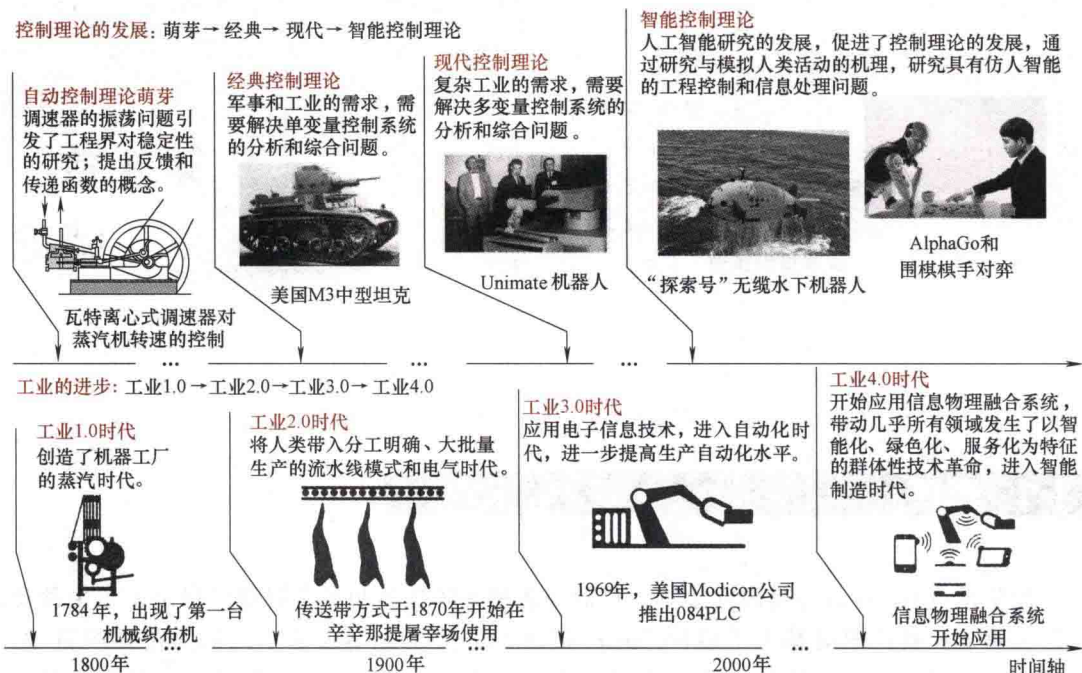


图 1-1 控制理论发展与工业进步的历史进程

## 第一阶段：自动控制理论萌芽（18 世纪末~20 世纪 30 年代）

自动控制理论的产生可追溯到 18 世纪的第一次工业革命，此时工业进入工业 1.0 时代——蒸汽时代，通过水力和蒸汽机实现工厂机械化。1769 年瓦特发明了蒸汽机离心式飞锤调速器，用来自动调节蒸汽机的转速。调速器的振荡问题引发了工程界对系统稳定性的讨论；1868 年麦克斯维发表了讨论这种反馈系统稳定性问题的论文《论调节器》；1877 年劳斯 (Routh) 和 1895 年赫尔维茨 (Hurwitz) 分别提出了代数稳定判据；1892 年李雅普诺夫 (Lyapunov) 提出了系统稳定性判定方法。19 世纪末~20 世纪上半叶，电机引发了第二次工业革命，使人类进入了电气时代，即工业 2.0 时代。工业生产中广泛应用各种自动调节装置，促进了对控制系统的分析和综合研究。针对电子管放大器失真的问题，1927 年布莱克引入了反馈的概念，使人们对自动控制系统中反馈控制的结构有了更深刻的认识。至此，自动控制理论发展为一门新兴学科的前提条件已经基本具备，此后，自动控制理论历经了经典控制理论、现代控制理论和智能控制理论发展阶段。

## 第二阶段：经典控制理论（20 世纪 30~50 年代）

经典控制理论产生于工业 2.0 时代的成熟期。第二次世界大战期间，为了解决防空火力控制系统和飞机自动导航系统等军事技术问题，各国科学家设计出各种精密的自动调节装置。在拉普拉斯 (Laplace) 变换基础上的传递函数、劳斯和赫尔维茨提出的代数稳定判据和 1932 年奈魁斯特 (Nyquist) 提出的判别稳定性的奈氏判据、1948 年伊万斯 (Evans)

提出的根轨迹法等,奠定了适用于单变量控制系统的经典控制理论(又称古典控制理论)的基础。1945年,维纳把反馈的概念推广到生物等一切控制系统,并在1948年出版了《控制论——关于在动物和机器中控制和通信的科学》一书,奠定了控制论这门学科的基础。控制论的原理和方法被运用于工程技术领域,形成了工程控制论,1954年,钱学森总结了控制理论的研究成果并出版了《工程控制论》。

### 第三阶段:现代控制理论(20世纪50~70年代)

20世纪下半叶,信息技术、自动化技术引发了第三次工业革命,人类进入工业3.0时代,社会生产从电气化、半自动化向自动化转变,劳动生产率再次大飞跃。复杂工业过程和航天技术的自动控制问题,都是多变量控制系统的分析和综合问题,迫切需要解决,但经典控制理论的直接应用遇到了困难,需要新控制方法的出现。这期间计算机技术和空间技术有了巨大进步,1960年卡尔曼(Kalman)提出的状态空间法、能控性、能观性,加之系统稳定性的李雅普诺夫判定方法等,标志着适用于多变量控制系统的现代控制理论的诞生。现代控制理论可有效解决多变量控制问题,并逐渐形成了最优控制、自适应控制等多个重要分支。

### 第四阶段:智能控制理论(20世纪70年代~至今)

智能控制理论产生于工业3.0时代向工业4.0时代的过渡阶段。随着工业进步,人们开始将人工智能引入自动控制系统中,控制理论因此向着智能控制理论的方向发展。智能控制理论是运用人工智能的概念和方法,来解决复杂被控对象的建模和系统的控制、优化等问题,具体来说就是运用神经网络、迭代学习、模糊控制等理论方法以及由知识库、数据库、学习机、推理机等组成的智能决策单元来解决复杂控制问题。控制理论的发展助推了工业4.0时代的到来。在当前的工业4.0时代,新一轮科技革命和产业变革正在孕育兴起,全球科技创新呈现新的发展态势和特征,开始应用信息物理融合系统(Cyber-Physical Systems, CPS),以智能制造为核心,信息技术、生物技术、新材料技术、新能源技术广泛渗透,带动几乎所有领域发生了以智能化、绿色化、服务化为特征的群体性技术革命,这是新一轮的工业革命,由此,美国提出了“先进制造国家战略计划”,德国发布了“工业4.0”战略,我国提出了“中国制造2025”战略。这对控制理论的发展提出了更高的要求,对控制理论的应用提供了更广阔的空间。

从控制理论的发展历程可以看出,经典控制理论、现代控制理论、智能控制理论适应于不同的控制问题,且在当下并存应用、各具特色、相辅相成,其中,经典控制理论是基础,现代控制理论、智能控制理论是经典控制理论的延伸和拓展。同时,控制理论的发展反映了人类社会由机械化(工业1.0)到电气化(工业2.0),再到自动化(工业3.0),继而走向全面实现数字化、网络化和智能化(工业4.0)时代。

## 1.2 控制系统的基本概念

在各种机器设备和生产过程中,常常要求某些物理量(如力、位移、速度、温度、电压、电流、压力、流量等)保持恒定或者按照给定的规律变化,这就要求控制系统进行控

制和调整，以减小或消除系统参数摄动和外界扰动的影响。下面介绍控制系统如何实现这些物理量的自动控制。

### 1.2.1 控制系统的工作原理

#### 1. 恒温系统的人工控制与自动控制

首先研究恒温系统，实现恒温控制有两种办法：人工控制和自动控制。

图 1-2 所示为人工控制的恒温控制箱。人们可以通过调压器改变加热电阻丝的电流，以达到控制温度的目的。箱内温度是由温度计检测的。人工控制过程可归结如下：

- 1) 观测由检测元件(温度计)测出的恒温箱温度(被控制量)。
- 2) 与要求的温度值(期望值)比较，得出偏差的大小和方向。
- 3) 根据偏差的大小和方向再进行控制：当恒温箱温度高于所要求的给定温度值时，就调节调压器，使电流减小，温度降低；若温度低于给定温度值，则调节调压器，使电流增加，温度升高。

因此，控制的过程就是检测、求偏差、再控制，以纠正偏差的过程。简单地讲就是“检测偏差用以纠正偏差”的过程。如果用控制器等装置实现人的“检测偏差用以纠正偏差”的职能，就是自动控制系统。

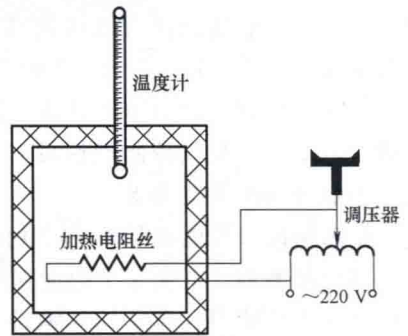


图 1-2 人工控制的恒温箱

图 1-3 所示为恒温箱自动控制系统。图中，恒温箱的温度是由给定信号电压  $u_1$  控制的。当外界因素引起箱内温度变化时，作为检测元件的热电偶，把温度转换成对应的电压信号  $u_2$  并反馈回去与给定信号  $u_1$  相比较，所得结果即为温度的偏差信号  $\Delta u = u_1 - u_2$ ，再经过电压、功率放大后，用以改变电动机的转速和方向，并通过传动装置移动调压器动触头。当温度偏高时，动触头向着降低输出电压减小电流的方向移动，反之则加大电流，直到温度达到给定值为止。即只有在偏差信号  $\Delta u = 0$  时，电动机才停转。这样就实现了自动控制。而所有这些装置便组成了一个自动控制系统。

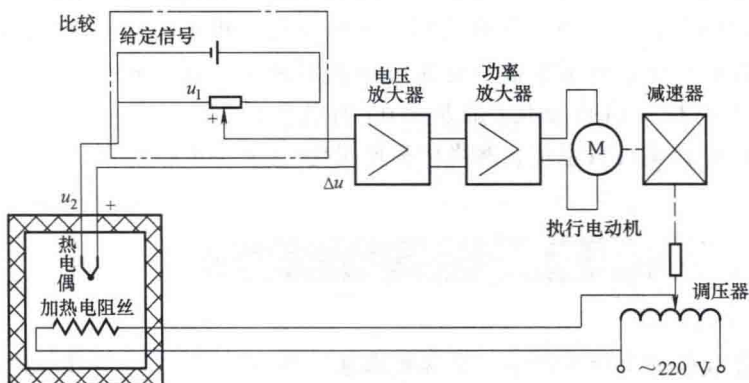


图 1-3 恒温箱自动控制系统