



全国高职高专教育精品规划教材

自动控制原理及应用

■ 主编 孙 梅 王彦良



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

全国高职高专教育精品规划教材

自动控制原理及应用

主 编 孙 梅 王彦良
副主编 金毅仁 张华龙 刘长国
主 审 姜长鸿



北京交通大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书是全国高职高专教育精品规划教材,是依据教育部《高职高专教育基础课程教学基本要求》和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》编写的。本书紧密结合当前高职高专教学改革的需要,既注意学习、吸收有关院校高职高专教育课程改革的成果,又尽量反映作者长期教学所积累的经验与体会,精选内容,简化公式的推导,着力贯彻高职高专教育“以应用为目的”,“以必需、够用为度”的原则,体现了高职高专教育的特色。

本书主要介绍经典控制理论的基本内容。主要内容有:自动控制系统概述,自动控制系统的数学模型,时域分析法,频域分析法,自动控制系统的校正,自动控制系统的工程设计实例。各章配有小结和大量习题,时域分析法和频域分析法配有 MATLAB 仿真分析。

本书可作为高职高专院校电气、自动化及机电类各专业的教材,也可作为成人高校相关专业的教材或从事自动控制方面工作的工程技术人员参考书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理及应用/孙梅,王彦良主编. —北京:北京交通大学出版社,2007.5
(全国高职高专教育精品规划教材)

ISBN 978-7-81123-022-2

I. 自… II. ①孙… ②王… III. 自动控制理论-高等学校:技术学校-教材 IV. TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 046240 号

责任编辑:史鸿飞

出版发行:北京交通大学出版社

电话:010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编:100044

印刷者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:14 字数:322 千字

版 次:2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-81123-022-2/TP·340

印 数:1~3 000 册 定价:22.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

全国高职高专教育精品 规划教材丛书编委会

主任：曹 殊

副主任：朱光东（天津冶金职业技术学院）

何建乐（绍兴越秀外国语学院）

文晓璋（绵阳职业技术学院）

梅松华（丽水职业技术学院）

王 立（内蒙古建筑职业技术学院）

文振华（湖南现代物流职业技术学院）

叶深南（肇庆科技职业技术学院）

陈锡畴（郑州旅游职业学院）

王志平（河南经贸职业学院）

张子泉（潍坊科技职业学院）

王法能（西安外事学院）

邱曙熙（厦门华天涉外职业技术学院）

逯 侃（步长集团 陕西国际商贸职业学院）

委员：黄盛兰（石家庄职业技术学院）

张小菊（石家庄职业技术学院）

邢金龙（太原大学）

孟益民（湖南现代物流职业技术学院）

周务农（湖南现代物流职业技术学院）

周新焕（郑州旅游职业学院）

成光琳（河南经贸职业学院）

高庆新（河南经贸职业学院）

李玉香（天津冶金职业技术学院）

邵淑华（山东德州科技职业学院）

宋立远（广东轻工职业技术学院）

孙法义（潍坊科技职业学院）

刘爱青（山东德州科技职业学院）

颜 海（武汉生物工程学院）

出版说明

高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分，其根本任务是培养生产、建设、管理和服务第一线需要的德、智、体、美全面发展的应用型专门人才，所培养的学生在掌握必要的基础理论和专业知识的基础上，应重点掌握从事本专业领域实际工作的基础知识和职业技能，因此与其对应的教材也必须有自己的体系和特点。

为了适应我国高职高专教育发展及其对教育改革和教材建设的需要，在教育部的指导下，我们在全中国范围内组织并成立了“全国高职高专教育精品规划教材研究与编审委员会”（以下简称“教材研究与编审委员会”）。“教材研究与编审委员会”的成员所在单位皆为教学改革成效较大、办学实力强、办学特色鲜明的高等专科学校、成人高等学校、高等职业学校及高等院校主办的二级职业技术学院，其中一些学校是国家重点建设的示范性职业技术学院。

为了保证精品规划教材的出版质量，“教材研究与编审委员会”在全国范围内选聘“全国高职高专教育精品规划教材编审委员会”（以下简称“教材编审委员会”）成员和征集教材，并要求“教材编审委员会”成员和规划教材的编著者必须是从事高职高专教学第一线的优秀教师和专家。此外，“教材编审委员会”还组织各专业的专家、教授对所征集的教材进行评选，对所列选教材进行审定。

此次精品规划教材按照教育部制定的“高职高专教育基础课程教学基本要求”而编写。此次规划教材按照突出应用性、针对性和实践性的原则编写，并重组系列课程教材结构，力求反映高职高专课程和教学内容体系改革方向；反映当前教学的新内容，突出基础理论知识的应用和实践技能的培养；在兼顾理论和实践内容的同时，避免“全”而“深”的面面俱到，基础理论以应用为目的，以必需、够用为尺度；尽量体现新知识和新方法，以利于学生综合素质的形成和科学思维方式与创新能力的培养。

此外，为了使规划教材更具广泛性、科学性、先进性和代表性，我们真心希望全国从事高职高专教育的院校能够积极参加到“教材研究与编审委员会”中来，推荐有特色的、有创新的教材。同时，希望将教学实践的意见和建议，及时反馈给我们，以便对出版的教材不断修订、完善，不断提高教材质量，完善教材体系，为社会奉献更多更新的与高职高专教育配套的高质量教材。

此次所有精品规划教材由全国重点大学出版社——北京交通大学出版社出版，适应于各类高等专科学校、成人高等学校、高等职业学校及高等院校主办的二级技术学院使用。

全国高职高专教育精品规划教材研究与编审委员会

2007年1月

总 序

历史的年轮已经跨入了公元 2007 年,我国高等教育的规模已经是世界之最,2005 年毛入学率达到 21%,属于高等教育大众化教育的阶段。与此相对应的是促进了高等教育举办者和对人才培养的多样化。我国从 1999 年高校扩大招生规模以来,经过了 8 年的摸索和积累,当我们回头看时,发现在我国高等教育取得了可喜进步的同时,在毕业生就业方面,部分高职高专院校的毕业生依然稍显不足。近几年来,与本科毕业生相比较,就业率落后将近 20 个百分点,不得不引起我们的思考与重视。

是什么导致高职高专院校的学生就业陷入困境?是什么破坏了高职高专院校的人才培养机制?是哪些因素使得社会给高职高专学生贴上了“压缩饼干”的标签?经过认真分析、比较,我们看到各个高职高专院校培养出来的毕业生水平参差不齐,能力飘忽不定,究其根源,不合理的课程设置、落后的教材建设、低效的教学方法可以说是造成上述状况的主导因素。在这种情况下,办学缺乏特色,毕业生缺少专长,就业率自然要落后于本科院校。

新设高职类型的院校是一种新型的专科教育模式,高职高专院校培养的人才应当是应用型、操作型人才,是高级蓝领。新型的教育模式需要我们改变原有的教育模式和教育方法,改变没有相应的专用教材和相应的新型师资队伍的现状。

为了使高职院校的办学有特色、毕业生有专长,需要建立“以就业为导向”的新型人才培养模式。为了达到这样的目标,我们提出“以就业为导向,要从教材差异化开始”的改革思路,打破高职高专院校使用教材的统一性,根据各高职高专院校专业和生源的差异性,因材施教。从高职高专教学最基本的基础课程,到各个专业的专业课程,着重编写出实用、适用高职高专不同类型人才培养的教材,同时根据院校所在地经济条件的不同和学生兴趣的差异,编写出形式活泼、授课方式灵活、引领社会需求的教材。

培养的差异性是高等教育进入大众化教育阶段的客观规律,也是高等教育发展与社会发展相适应的必然结果。也只有使在校学生接受差异性的教育,才能充分调动学生浓厚的学习兴趣,才能保证不同层次的学生掌握不同的技能专长,避免毕业生被用人单位打上“批量产品”的标签。只有高等学校培养有差异性,毕业生才能够有特色,才会在就业市场具有竞争力,才会使高职高专的就业率大幅提高。

北京交通大学出版社出版的这套高职高专教材,是在教育部“十一五规划教材”所倡导的“创新独特”四字方针下产生的。教材本身融入了很多较新的理念,出现了一批独具匠心的教材,其中,扬州环境资源职业技术学院的李德才教授所编写的《分层数学》,教材立意很新,独具一格,提出以生源的质量决定教授数学课程的层次和级别。还有无锡南洋职业技术学院的杨鑫教授编写的一套《经营学概论》系列教材,将管理学、经济学等不同学科知识融为一体,具有很强的实用性。

此套系列教材是由长期工作在第一线、具有丰富教学经验的老师编写的，具有很好的指导作用，达到了我们所提倡的“以就业为导向培养高职高专学生”和因材施教的目标要求。

教育部全国高等学校学生信息咨询与就业指导中心择业指导处处长
中国高等教育学会毕业生就业指导分会秘书长
曹 殊 研究员

前 言

本书是依据教育部《高职高专教育基础课程教学基本要求》和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》编写的。

高等职业技术教育培养的是生产一线的应用型人才，落脚点是技术应用，不求理论的系统 and 完整，只求必需、够用。所以，在编写此书时，我们力求做到理论联系实际，对学生应掌握的基本理论和基本方法尽可能阐述深透，物理概念论述清楚，而对公式的数学推导过程则删繁就简，注重实用，取材上尽量与工程设计相结合，以期让学生对自动控制原理的应用和对实际系统的分析、调试有一个完整的概念。

为适应不同专业的需要并有利于读者自学，每章均安排了一定数量的例题和习题，使读者能进一步巩固所学的基本理论知识和结合具体实例加以应用。每章的小结系统地归纳了该章的基本概念和应掌握的重点。在时域分析法和频域分析法中加入了 MATLAB 软件分析，把系统特性曲线描述得更形象、直观。附录部分列出了学习自动控制原理所必需的数学和物理基础，以方便读者学习。

本书建议讲授 60~70 学时，各校教师在教学时，可以根据具体情况对教材的内容进行适当的取舍。

本书由吉林师范大学应用工程学院孙梅副教授和辽阳职业技术学院王彦良副教授担任主编。孙梅编写第 5、6 章，王彦良编写第 1、4 章及附录 A 至附录 C，廊坊职业技术学院张华龙编写第 3 章，第 2 章由王彦良和三联职业技术学院金毅仁共同编写。吉林师范大学应用工程学院刘长国老师对本书的文字处理和绘图做了大量的工作。

本书由长春工业大学姜长鸿教授主审，在审阅过程中提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心感谢。

因编写时间仓促，加上编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者
2007 年 3 月

目 录

第 1 章 自动控制系统概述	(1)
1.1 控制理论的发展史	(1)
1.1.1 控制理论的起源	(1)
1.1.2 经典控制理论	(1)
1.1.3 现代控制理论	(3)
1.1.4 智能控制理论	(4)
1.2 自动控制和自动控制系统	(4)
1.2.1 自动控制的定义及系统组成	(4)
1.2.2 闭环控制系统的方框图	(5)
1.2.3 开环控制和补偿控制	(6)
1.3 控制系统的分类	(7)
1.4 对控制系统的基本要求	(8)
1.4.1 对闭环自动控制系统的稳定性要求	(8)
1.4.2 对闭环自动控制系统的静特性要求	(8)
1.4.3 对闭环自动控制系统的动特性要求	(9)
1.5 自动控制系统的分析与设计	(9)
1.5.1 控制系统的分析	(9)
1.5.2 控制系统的设计	(10)
1.6 自动控制系统实例	(10)
本章小结	(12)
习题	(12)
第 2 章 自动控制系统的数学模型	(15)
2.1 控制系统的微分方程	(15)
2.1.1 建立微分方程式的一般步骤	(15)
2.1.2 建立控制系统微分方程举例	(15)
2.2 控制系统的传递函数	(18)
2.2.1 传递函数的定义	(18)
2.2.2 典型环节及其传递函数	(19)
2.3 控制系统的结构图	(21)
2.3.1 结构图的定义及基本组成	(21)
2.3.2 结构图的绘制步骤	(21)
2.3.3 结构图的基本连接方式	(23)
2.3.4 结构图的等效变换及简化	(23)

2.4 信号流程图及梅逊增益公式	(30)
2.4.1 信号流图的定义及绘制方法	(30)
2.4.2 梅逊增益公式及其应用	(31)
本章小结	(34)
习题	(34)
第3章 时域分析法	(37)
3.1 控制系统时间响应性能指标	(37)
3.1.1 典型输入信号	(37)
3.1.2 控制系统的时域性能指标	(40)
3.2 一阶系统的时域分析	(41)
3.2.1 一阶系统的数学模型	(41)
3.2.2 一阶系统的单位脉冲响应	(41)
3.2.3 一阶系统的单位阶跃响应	(41)
3.2.4 一阶系统的单位速度响应	(42)
3.2.5 线性定常系统时间响应的性质	(42)
3.3 二阶系统的时域分析	(43)
3.3.1 二阶系统的数学模型	(43)
3.3.2 二阶系统的单位阶跃响应	(44)
3.3.3 欠阻尼二阶系统的动态性能指标计算	(48)
3.3.4 二阶系统性能的改善	(52)
3.4 高阶系统的时域分析	(54)
3.5 稳定性分析	(55)
3.5.1 稳定的概念	(55)
3.5.2 稳定的充分必要条件	(56)
3.5.3 劳斯稳定判据	(58)
3.6 误差分析和计算	(63)
3.6.1 稳态误差的基本概念	(63)
3.6.2 稳态误差的计算	(64)
3.6.3 给定作用下的稳态误差	(65)
3.6.4 扰动引起的稳态误差和系统总误差	(70)
3.7 应用 MATLAB 进行时域分析	(71)
本章小结	(75)
习题	(75)
第4章 频域分析法	(78)
4.1 频率特性	(78)
4.1.1 频率特性的基本概念	(78)
4.1.2 频率特性与传递函数的关系	(79)
4.1.3 频率特性的数学式表示方式	(79)
4.1.4 频率特性的图形表示方式	(80)

4.2 典型环节的频率特性·····	(82)
4.3 控制系统的开环频率特性·····	(88)
4.3.1 开环极坐标图·····	(88)
4.3.2 开环波特图·····	(91)
4.3.3 最小相位系统与非最小相位系统·····	(93)
4.4 奈奎斯特稳定判据·····	(94)
4.4.1 基本内容·····	(94)
4.4.2 极坐标图下的应用·····	(98)
4.4.3 波特图下的应用·····	(99)
4.5 稳定裕量与控制系统的相对稳定性·····	(102)
4.5.1 相位稳定裕量·····	(103)
4.5.2 幅值稳定裕量·····	(103)
4.5.3 相对稳定性分析·····	(103)
4.6 闭环频率特性·····	(104)
4.7 控制系统的频率特性分析·····	(107)
4.7.1 用开环频率特性分析系统的性能·····	(107)
4.7.2 用闭环频率特性分析系统的性能·····	(108)
4.7.3 开环频域指标与闭环频域指标的关系·····	(108)
4.8 应用 MATLAB 进行频域分析·····	(108)
本章小结·····	(113)
习题·····	(114)
第5章 自动控制系统的校正 ·····	(117)
5.1 校正及校正装置简介·····	(117)
5.1.1 校正的基本概念及校正方法的分类·····	(117)
5.1.2 校正装置简介·····	(118)
5.2 串联校正·····	(118)
5.2.1 串联超前校正·····	(118)
5.2.2 串联滞后校正·····	(123)
5.2.3 串联滞后—超前校正·····	(126)
5.3 反馈校正·····	(130)
5.3.1 反馈校正的原理·····	(130)
5.3.2 反馈校正方法的应用·····	(130)
5.4 复合校正·····	(133)
5.4.1 按扰动顺馈补偿的复合校正·····	(133)
5.4.2 按输入顺馈补偿的复合校正·····	(134)
本章小结·····	(135)
习题·····	(135)
第6章 自动控制系统的工程设计实例 ·····	(139)
6.1 工程设计方法·····	(139)

6.1.1 系统固有频率特性的确定	(139)
6.1.2 系统预期频率特性的确定	(141)
6.1.3 校正装置的设计	(144)
6.2 转速、电流双闭环直流调速系统	(147)
6.2.1 系统的组成	(147)
6.2.2 系统的静态分析	(148)
6.2.3 系统的动态分析	(150)
6.3 工程设计举例	(153)
6.4 系统分析与调试	(157)
6.4.1 自动控制系统的分析步骤	(157)
6.4.2 自动控制系统的调试方法	(159)
6.4.3 自动控制系统的维护使用	(160)
本章小结	(161)
习题	(162)
附录 A 自动控制的数学基础	(164)
附录 B 自动控制的物理基础	(178)
附录 C 自动控制的软件基础	(191)
参考文献	(212)

第 1 章 自动控制系统概述

从 20 世纪 40 年代末期开始,随着人们对仿生学、信息科学、系统科学、计算机技术的不断认识,特别是对自动控制系统的研究,逐渐形成了以古典控制理论为主要内容的控制科学,其应用领域从军事逐渐转入到工业生产、民用电子产品等领域,时刻影响着人类的社会生活。

反馈控制是自动控制中广泛采用的控制形式,也是古典控制理论研究的主要内容,它涉及如何将传感器与判断、比较、执行等器件组合在一起,取代人工而实施对被控对象的自动控制。作为学习的理论先导,本章主要介绍自动控制系统的一些基本原理与概念。

1.1 控制理论的发展史

1.1.1 控制理论的起源

控制理论是对生物行为的理性总结,控制理论中最重要的原理是反馈调节原理。英文的控制论“Cybernetics”,在拉丁语、希腊语中是“舵手”的意思。长久以来,在自然界中的人类生产、生活乃至其他生物活动中,控制理论得到了广泛应用。为了实现或达到某种目的,人们自觉不自觉地利用反馈调节原理,例如,船上的人为了到达理想的彼岸,一方面要努力地划桨,更重要的是掌好舵,每当船的方向偏离了前进的方向时,就要求掌舵人及时地调整航向;为了人的自身安全,人们对其周围的各种信息实时地进行着反馈,当眼睛看到了什么物体飞向自己,或当耳朵听到了什么声响,或当身体感到了温度发生了变化时,人的大脑就会对各种传感器反馈的信息进行分析比较,然后采取各种相应的措施保护自己;为了实现把一个物体从一个地方移动到另一个地方,人们总是不断地用眼睛察看物体的位置,将位置信息不断地反馈给大脑,并与目的位置进行比较,大脑根据比较后的差距来调节物体的位置,直到达到要求的位置为止;在生产水平十分落后的原始社会,狩猎者通常使用石块、木棒、竹竿等工具进行狩猎,当狩猎者看到猎物之后,尽可能地接近猎物(动物也同样利用反馈调节原理来保护自己),根据猎物运动的速度、方向,计算出投掷或使用狩猎工具的力量、速度、方向与时机,达到击中猎物的目的。动物之间的捕杀,同样也在利用反馈原理。

控制论的英文解释为:对信息在机器、大脑和神经系统中的传递和控制的研究。控制论就是研究动物(包括人类)和机器内部的控制和通信的一般规律的学科,它注重研究上述过程的数学关系,而不涉及过程内部的物理、化学、生物或其他方面的现象。

1.1.2 经典控制理论

经典控制理论是在 20 世纪 40 年代酝酿形成,而于 20 世纪 50 年代以后才得到蓬勃发展

的。新兴学科控制论的奠基人维纳从 1919 年就已经萌发控制论的思想, 1940 年他提出了数字电子计算机设计的 5 点建议, 后来计算机的问世证明了他的设计思想是正确的。二次大战期间, 维纳参加了火炮自动控制的研究工作, 他把火炮自动打飞机的动作与人狩猎的行为做了对比, 并且发现了极重要的反馈概念。他认识到, 稳定活动的方法之一是把活动的结果所决定的一个量, 作为信息的新的调节部分, 再反馈回控制仪器中, 这就是负反馈。即使驾驶一辆车的人类活动, 都是由负反馈调节着。人们不是按着固定的模式来操纵车上的驾驶盘, 而是发现靠左了, 就向右边做一个校正, 反之亦然。因此他认为, 目的性行为可以用反馈来代替, 把目的性行为这个生物所特有的概念赋予机器。于是, 维纳等于 1943 年发表了《行为、目的和目的论》, 加上火炮自动控制研制的成功, 这些成为控制论萌芽的重要标志。1948 年, 维纳所著《控制论》的出版, 标志着这门学科的正式诞生。

20 世纪 50 年代以后, 一方面, 火炮及导弹控制技术极大地发展, 数控、电力、冶金自动化技术突飞猛进, 另一方面, 控制理论也日渐成熟。1954 年, 我国科学家钱学森在美国运用控制论的思想和方法, 首创了工程控制论, 把控制论推广到工程技术领域。

为了考查由机器装置构成的系统实现其功能的质量, 尽可能地采用数量的方法。在电子计算机处于萌芽状态的年代, 经典控制论采用微分方程、传递函数、频率特性等数学模型来描述系统, 借助拉普拉斯变换、根与系数关系、Bode 图等数学手段, 形成了时域分析法、根轨迹分析法、频率法等分析方法, 由于学时数的限制, 除根轨迹分析法外, 其他方法是本教材主要介绍的内容。

中国有句成语叫“南辕北辙”, 讲的是如果控制不好方向, 反其道而行之, 无论如何让马匹跑得多快, 也是不能到达目的地的。即使是当今社会, 一辆加满了油的崭新汽车, 如果对信息利用不好, 得不到好的控制, 同样不能把乘客载到目的地。现在人们已经认识到, 在自然界中, 除了物质、能量两个要素之外, 还有一个重要的要素就是信息。

目前, 控制论、系统论、信息论作为边缘性学科, 在自然科学中占有重要的一席之地, 之所以称之为边缘性学科, 就是因为它们不同于传统的数学、物理学、化学、生物学、天文学、地学等专一学科, 而是处于这些学科的交叉边缘地带, 这 3 大理论之间既相互联系又相互区别。

把相互联系、相互作用以实现某个特定功能的有机整体称为系统, 把外界对系统的作用称为输入, 而把系统对外界的作用称为输出。系统论的观点认为, 系统的功能并不是构成系统的元部件的功能的简单叠加。显然, 人的功能并不是人脑、眼睛、耳朵、鼻子、手脚及身躯功能的简单叠加, 人的思想决定了人的行为; 作为由机器设备构成的系统也同样如此, 吊车的功能, 一定不是钢架、钢丝绳、电动机的功能的简单叠加; 系统性能的优劣在于构成系统的元部件的质量与协调, 质量都是最好的元部件, 组装不好、不能协调工作, 同样达不到最好的性能。系统的性能、价格、可靠性、兼容性问题, 确实应当作为系统工程来加以研究, 这一点对于从事理工类工作的人来说是应当知道的。

对信息的理解各有不同, 把有用的消息、数据、信号称为信息, 也可以把用以消除不确定性的东西称为信息。自然界中的物质、能量是产生信息的来源, 信息可以被传递、存储、变换、加工、处理。认识论、矛盾论是对社会科学的伟大贡献, 而控制论、系统论、信息论是对自然科学的伟大贡献。在社会科学中, 一个事物的发生、发展、变化, 直至消亡, 事物的这些现象本身是人们对事物的认识, 之所以会有这样的过程, 是事物之间的矛盾运动的结果。

果；在自然科学中，一个装置之所以能够实现其功能，是因为整个装置构成了一个系统，输入与干扰作为信息，通过装置对信息进行传递、存储、变换、加工与处理，利用信息对被控制对象实施了控制，使输出信息与输入信息相一致。因此，控制论、系统论、信息论揭示了自然科学中如何理解具有更广泛意义的认识论、矛盾论等社会科学的哲学统一性。

1.1.3 现代控制理论

“现代控制理论”是在“经典控制理论”的基础上，于20世纪60年代以后发展起来的。在后续的介绍中会知道，系统的传递函数与频率特性之间存在对应的关系，经典控制理论中对于单输入、单输出系统极为有效，至今仍在广泛成功地应用。但传递函数、频率特性对处于系统内部的变量不便描述，且忽略了初始条件的影响，故经典控制理论中的数学模型不能包含系统的所有信息，因而限制了对现代工程系统的分析与设计，为此引发了对现代控制理论的研究。

现代控制理论主要内容是以状态空间法为基础，研究多输入、多输出、变参数、非线性、高精度、高效能等控制系统的分析和设计问题。最优控制、最佳滤波、系统辨识、自适应控制等理论都是这一领域主要的研究课题。为了与经典控制理论相区别，把采用状态空间这一数学模型来描述、分析和设计系统的理论，称为现代控制理论。

尽管任何实际系统都含有非线性因素，但在一定条件下，许多系统可用线性模型充分地表示其特性，加之数学上处理线性系统又较为方便，故现代控制理论中的线性系统理论部分首先得到研究和发展，并在工程上已出现许多性能优良的控制系统。

为了实现有约束的最优控制，现代控制理论引进目标函数，运用动态规划理论和极大值原理获得目标函数为极值的最优控制解。

由于实际系统的复杂性，人们往往很难(或不可能)从基本的物理定律出发直接推导出系统的数学模型，这就需要利用可以测量的系统输入和输出数据，来构造系统内结构及参数的估计，并研究估计的可靠性和精度等问题，这就是系统辨识的任务。

当实际系统受到的外界干扰和系统模型误差被看作随机噪声时，把这类系统称为随机系统。近年来，在非线性滤波、随机极大值原理、随机最优控制综合等方面已有新的进展。人们为了寻求能够实际应用并且性能良好的控制算法，由“分离思想”和“必然等价思想”发展了自适应控制的理论和方法。在科学研究和工程实践中，自适应算法已经成为一种非常有效的重要方法。

一般地，系统的数学模型与实际系统存在着参数或结构等方面的差异，而人们设计的控制规律大多都基于系统的数学模型，因此，控制系统的性能好坏很大程度上取决于模型的精确性。现代控制理论可以解决多输入、多输出控制系统的分析和控制设计问题，但其分析与综合方法也都是在取得控制对象数学模型基础上进行的，而数学模型的精确程度对控制系统性能的影响很大，往往由于某种原因，对象参数发生变化使数学模型不能准确地反映对象特性，从而无法达到期望的控制指标。为了解决这个问题，自适应控制、鲁棒控制的研究便成为控制理论的研究热点。

对现代控制理论的学习与研究，需要较强的数学、计算机基础，一般作为本科生、研究生的学习对象。

1.1.4 智能控制理论

现代工程技术、生态或社会环境等领域的研究对象往往是十分复杂的系统, 对这类系统难以用常规的数学方法来建立准确的数学模型, 需要用学习、推理或统计意义上的模型来描述实际系统, 这就导致了智能控制的研究。1985年8月在美国纽约 IEEE 召开的智能控制专题讨论会, 标志着智能控制作为一个新的学科分支正式被控制界公认。

智能控制不同于经典控制理论和现代控制理论, 它研究的主要目标不仅仅是被控对象, 同时也包含控制器本身。控制器不再是单一的数学模型, 而是数学解析和知识系统相结合的广义模型, 是多种知识混合的控制系统。在处理复杂系统控制问题时, 传统控制方法对于复杂性、不确定性、突变性所带来的问题得不到有效的解决。近年来, 越来越多的学者已意识到在传统控制中加入逻辑、推理和启发式知识的重要性, 把传统控制理论与模糊逻辑、神经网络、遗传算法等人工智能技术相结合, 充分利用人的控制知识对复杂系统进行智能化控制, 逐渐形成了智能控制理论的较完整的体系。

智能控制的理论和主要技术内容包括: 模糊逻辑控制、模糊预测控制、神经网络控制、专家控制、学习控制、基于知识的分层控制设计及遗传算法等。

智能控制的主要目标是使控制系统具有学习和适应能力。在工程技术领域, 智能控制理论主要应用于机器人、机器手等方面。目前, 智能控制理论虽然取得了不少研究成果, 基于模糊推理的系统建模、神经网络模型、参考自适应控制、神经网络内模控制、神经网络非线性预测控制、混沌神经网络控制等方面已有不少重要研究成果, 但智能控制的理论体系还有待于进一步的发展和完善, 一般作为研究生、博士生的学习、研究对象。

1.2 自动控制和自动控制系统

1.2.1 自动控制的定义及系统组成

自动控制系统就是采用各种装置, 按照一定的方式组合在一起, 实现预定的功能的整体。自动控制与人工控制的主要区别是, 自动控制是指没有人的直接参与, 而是由各种物理设备实现的控制。从系统论的角度出发, 任何系统都有输入、输出, 为了让自动控制系统实现预定的功能, 人们总是用一个物理的装置实现输入, 它往往是现实世界中某种物理量, 它随时间变化的规律是事先规定好了的; 而系统的输出, 往往也是现实世界中的某种物理量, 是被控制的对象中的某种物理量。因此, 一般而言, 系统的输入与输出可能并不是同一个物理量。例如, 转角随动系统中, 系统的输入一般是一个设定的角度, 系统的输出也是一个角度, 输入、输出是同一个物理量; 但温度控制系统, 系统的输入可以是一个设定的反映电压、电流等电量的刻度, 通常就称系统的输入是电压或电流, 而系统的输出是温度。从信息论的角度出发, 系统的输入是一种信息, 系统的输出又是另一种信息, 自动控制系统就是一个信息传递、变换、加工、处理的装置。

为了今后讨论问题, 把系统的输入即给定用 $r(t)$ 表示, 把系统的输出即被控量用 $c(t)$ 表示, 它们都是时间的函数, 在自动控制系统中, 往往存在干扰, 它也是一种输入, 今后用 $n(t)$ 表示。自动控制系统的任务就是在干扰 $n(t)$ 存在的条件下, 尽量使系统的输出等于输

人,用数学表达式来描述,就是: $c(t) \equiv r(t)$ 。

自动控制系统就构成原理可能是电子的、机电的、液压的、机械的、气动的等,一般按照闭环负反馈调节原理工作,概括起来,一般由如下基本环节组成。

1. 被控对象

被控对象是指要进行控制的设备,控制系统所控制的就是被控对象中的某个物理量,也就是系统的输出。对直流电机转速控制系统,直流电机就是被控对象,被控量是电机的转速;以天然气为能源的锅炉温度控制系统,锅炉就是被控对象,而锅炉的温度为被控量。

2. 执行机构

执行机构由传动装置及调节机构组成,它直接作用于被控对象,直接或间接地调节或改变被控量。电机、阀门等可作为执行机构,执行机构相当于人手的功能部件。

3. 检测装置

检测装置即传感器,用来测量被控量,并将被控量转换成与给定量相同的物理量,以便于在输入端进行比较。检测装置的精度与性能优劣,直接影响控制的质量。检测装置相当于人眼睛的功能部件。

4. 给定装置

给定装置用于产生被控量的给定值,也就是系统的输入,其物理量可能是与被控量的物理量相同,也可能不同。为简化起见,给定装置可由电位器实现。

5. 比较环节

比较环节将检测装置的输出与给定值进行比较,得到偏差 $e(t)$ 。比较环节相当于人脑的功能部件。其物理实现与被控对象、被控量可能有关,对电量的比较,可以采用运算放大器、电桥等。比较所得的偏差,往往功率小或控制质量等原因,不能直接作用到执行机构,通常要经过放大、校正环节。

6. 校正环节

校正环节一般具有放大能力,以便能驱动执行机构动作,然而,仅按偏差的比例控制,往往控制的效果或质量并不理想,当系统的稳定性、静特性、动特性不能同时达到要求时,就要对偏差信号做各种处理,如在工业生产控制中广泛采用PID控制。校正环节相当于人脑的对信号处理的功能部件。

1.2.2 闭环控制系统的方框图

一般闭环控制系统的方框图如图1-1所示,之所以称为闭环控制,是因为系统中的信息构成了闭合形式。闭环控制的优点是既可以克服外部干扰对输出的影响,又可以克服被控对象参数变化对输出的影响。

大多数人都有过学骑自行车的经历,刚开始时,一骑上车,由于掌握不好平衡,人就可能摔下来,这时的系统是一个不稳定的闭环系统,不能说这时的系统不是一个闭环系统,因为人的眼睛时刻看着自己在车子上的姿态,并且人的身体对重心的感觉时刻在反馈着,人脑时刻将反馈信息与稳定地保持人在车上的要求相比较,问题的关键是在校正环节上。人脑具有自学习能力,人在多次的练习中发现一定的车速、及时地调整车把来控制方向,可以达到人在车上保持平衡的目的,校正环节就是来解决如何利用比较后的偏差(误差)来实现控制的环节,显而易见的是,人脑会根据重心在中心的左、右偏差方向来决定车把的左、右调整方