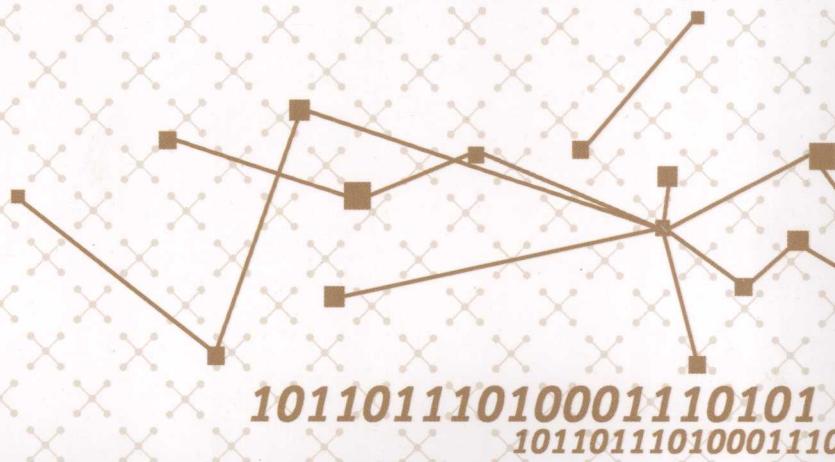




“十二五”国家重点图书出版规划项目
中国科学技术大学 精品教材



丛 爽 / 著

智能控制系统 及其应用

Intelligent Control Systems and
Their Applications

中国科学技术大学出版社

014009187

TP273
699



“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国科学技术大学 精品 教材



1011011101000111010
10110111010001

从 爽 / 著

Intelligent Control Systems and Their Applications

智能控制系统 及其应用

中国科学技术大学出版社

TP273
699



北航

C1695590

内 容 提 要

智能控制理论是继经典控制理论和现代控制理论之后出现的一个先进的控制理论。它是在众多学科不断发展以及交叉应用的基础上发展成长起来的，并且还在不断成长。本书主要内容包括：人工神经网络、模糊逻辑推理系统、模糊神经网络、进化算法和群智能优化算法及其应用五大部分。作者在介绍神经网络理论与模糊集合理论的基础上，对人工神经网络与模糊逻辑控制系统的工作原理、设计方法及其应用，以及两者之间的相互关系和相互结合，进行了较深层次上的理论分析与综合，并结合进化算法在控制系统中的建模与控制的各种实际应用以及群智能优化算法及其在中国旅行商问题中优化的应用，使读者能够从中了解和掌握运用模糊神经系统的理论与技术，以及运用智能优化理论与技术进行实际系统设计的方法。

本书选材新颖，材料翔实，系统性强，通俗易懂。既有理论分析与综合，又有实际系统的设计与应用。本书既可作为高校自动化专业、机械专业、电力电气专业、计算机科学与应用专业及其他相关专业的研究生教学用书，也可供从事智能科学、系统科学、计算机科学、应用数学、自动控制等领域研究的广大科技人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能控制系统及其应用/丛爽著. —合肥：中国科学技术大学出版社，2013.8

(中国科学技术大学精品教材)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-312-03302-5

I . 智… II . 丛… III . 智能控制—控制系统—高等学校—教材 IV . TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 189754 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号, 230026

<http://press.ustc.edu.cn>

合肥市宏基印刷有限公司印刷

全国新华书店经销

开本：787 mm×1092 mm 1/16 印张：17.75 插页：2 字数：443 千

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

定价：33.00 元

总序

2008年,为庆祝中国科学技术大学建校五十周年,反映建校以来的办学理念和特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

五十周年校庆精品教材系列于2008年9月纪念建校五十周年之际陆续出版,共出书50种,在学生、教师、校友以及高校同行中引起了很好的反响,并整体进入国家新闻出版总署的“十一五”国家重点图书出版规划。为继续鼓励教师积极开展教学研究与教学建设,结合自己的教学与科研积累编写高水平的教材,学校决定,将精品教材出版作为常规工作,以《中国科学技术大学精品教材》系列的形式长期出版,并设立专项基金给予支持。国家新闻出版总署也将该精品教材系列继续列入“十二五”国家重点图书出版规划。

1958年学校成立之时,教员大部分来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。虽然现在外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。入选精品教材系列的绝大部分是基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他们在带回先进科学技术的同时,也把西方先进的教育理念、教学方法、教学内容等带回到中国科学技术大学,并以极大的热情进行教学实践,使“科学与技术相结合、理论与实践



相结合、教学与科研相结合”的方针得到进一步深化,取得了非常好的效果,培养的学生得到全社会的认可。这些教学改革影响深远,直到今天仍然受到学生的欢迎,并辐射到其他高校。在入选的精品教材中,这种理念与尝试也都有充分的体现。

中国科学技术大学自建校以来就形成的又一传统是根据学生的特点,用创新的精神编写教材。进入我校学习的都是基础扎实、学业优秀、求知欲强、勇于探索和追求的学生,针对他们的具体情况编写教材,才能更加有利于培养他们的创新精神。教师们坚持教学与科研的结合,根据自己的科研体会,借鉴目前国外相关专业有关课程的经验,注意理论与实际应用的结合,基础知识与最新发展的结合,课堂教学与课外实践的结合,精心组织材料、认真编写教材,使学生在掌握扎实的理论基础的同时,了解最新的研究方法,掌握实际应用的技术。

入选的这些精品教材,既是教学一线教师长期教学积累的成果,也是学校教学传统的体现,反映了中国科学技术大学的教学理念、教学特色和教学改革成果。希望该精品教材系列的出版,能对我们继续探索科教紧密结合培养拔尖创新人才,进一步提高教育教学质量有所帮助,为高等教育事业作出我们的贡献。

侯建国

中国科学技术大学校长
中国科学院院士
第三世界科学院院士

前　　言

智能控制系统、理论及应用是继自动控制原理和现代控制工程之后兴起的先进控制理论及技术。人工神经网络和模糊逻辑系统是智能控制系统发展、研究和应用的关键理论与技术内容。在最近的十几年中,人们已经看到模糊逻辑和神经网络以各自的优势进行相互渗透,所形成的模糊神经系统在各种优化技术的配合下,其应用在数量和种类上都得到迅速增长,其范围涉及各行各业。模糊神经系统在智能控制系统的概念和设计中不断产生重要影响。

智能进化算法是一系列搜索技术包括遗传算法、进化规划、进化策略、遗传编程等所组成的全局优化算法。与传统的基于微积分的方法和穷举法等优化算法相比,进化计算是一种具有高鲁棒性和广泛适用性的全局优化方法,具有自组织、自适应、自学习的特性,能够不受问题性质的限制,有效地处理传统优化算法难以解决的复杂问题。尤其在解决模糊神经系统的参数自适应调整以及智能控制系统的参数优化中起着重要的作用。群智能优化算法包括粒子群算法、蚁群算法、人工鱼群算法、人工免疫算法等同样具有全局优化的算法。旅行商问题是一个典型的组合优化问题,可以看成许多工程领域复杂优化问题的抽象形式。如系统控制、人工智能、模式识别和生产调度等,因此以旅行商问题作为检验群智能优化算法求解方法的优劣对解决复杂工程优化问题具有重要的参考价值。

作者曾在2001年出版了《神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用》一书,并一直作为中国科学技术大学自动化系“智能系统”研究生课程的教材。为了能够将最新的研究成果融入到研究生的课程中,作者在该书的基础上,增加了近年来模糊神经网络和智能优化算法研究所取得的新成果,写成本书——关于人工神经网络、模糊逻辑推理系统,以及智能优化算法及其应用的书籍。与原书相比,本书在前后章节的衔接上强调相互之间的联系和系统性,注重分析各种不同理论和方法之间的相关性,讲究概念和思路的清晰,强调了实际应用实例,重点增加了智能优化算法及其应用部分。

全书共分13章,系统地介绍了前向神经网络,包括感知器网络、自适应线性元件、反向传播网络和径向基函数网络的基本概念和理论,各种高效率的神经网络的学习算法,包括基于标准梯度下降的方法和基于数值优化方法的网络训练算法,并进行了前向网络的数值性能对比。在递归神经网络中,介绍了各种递归神经网络,重点介绍了全局反馈递归网络和自组织竞争网络。在神经网络在智能控制系统的应用中,给出了利用人工神经网络进行直接正向模型建立、逆模型建立以及系统中控制的应用。在介绍模糊理论基础之后,专门详细给出了模糊控制器的设计方法,包括输入变量和输出变量的确定、论域的确定、模糊化和解模糊化方法、模糊控制规则和模糊逻辑推理,并给出有关模糊控制系统应用的具体实例。在模糊神经网络的基本理论方面的介绍包括模糊神经系统的构成、原理以及与其他函数之间的相互关系。在模糊神经系统的应用方面包括基于自适应神经模糊推理系统的非线性电机系

系统的建模和神经模糊建模平台的设计与应用。智能进化算法的介绍包括标准遗传算法及其改进算法、遗传编程、进化策略及其性能对比。在进化算法的应用中,介绍了模糊神经网络和遗传算法相结合的控制策略,以及基于遗传算法和单纯形法在直流电机参数辨识中的应用。本书还专门介绍了基于感知范围的鱼群优化算法、人工免疫算法、粒子群优化算法,以及不同蚁群优化算法在中国旅行商问题应用中的性能对比。另外还专门将进化策略与蚁群算法相融合以及粒子群与模拟退火的混合算法应用到旅行商问题的求解中。在所给出的许多代表性的应用实例中,都进行了较深层次的理论分析与综合,对研究生以及相关的科技人员了解和掌握智能控制策略与方法,解决实际复杂系统的控制与优化问题具有指导意义。

本书取材新颖,内容深入浅出,便于自学与应用,既可作为高校自动化专业、机械专业、电力电气专业、计算机应用专业及其他相关专业的研究生教学用书,也可供从事智能科学、系统科学、计算机科学、应用数学、自动控制等领域研究的广大科技人员阅读。

本书的主体框架基于已发表的学术论文，在此，本书作者对论文的合作者表示感谢，他们是：梁艳阳、冯春时、邓科、贾亚军和冯先勇。

本人才疏学浅，对于疏漏不妥之处，恳请读者斧正。

丛 爽

2013年3月

目 次

(6)	第一章 智能控制概述	1.1.8
(8)	第二章 前向神经网络	2.1.8
(10)	第三章 网络训练优化算法及其性能对比	3.2.8
(12)	附录 A 参考书目	1.3.8
(18)	附录 B 习题	2.3.8
(20)	附录 C 课后讨论题	3.3.8
总序		(i)
前言		(iii)
第1章 概述		(1)
1.1	自动控制系统及其理论的发展历程	(1)
1.2	智能控制系统及其理论	(6)
1.2.1	智能控制理论	(7)
1.2.2	智能控制系统的功能特点	(10)
1.2.3	智能控制技术的应用	(10)
1.3	智能控制与传统控制的比较分析	(11)
1.3.1	传统控制的特点与不足	(11)
1.3.2	智能控制与传统控制的关系	(11)
1.4	智能优化算法	(12)
1.5	本书内容	(14)
第2章 前向神经网络		(17)
2.1	感知器网络	(20)
2.1.1	感知器的网络结构及其功能	(20)
2.1.2	感知器权值的学习规则与训练	(22)
2.2	自适应线性元件	(25)
2.2.1	自适应线性神经元模型和结构	(26)
2.2.2	W-H 学习规则及其网络的训练	(27)
2.3	反向传播网络	(28)
2.3.1	反向传播法网络模型与结构	(28)
2.3.2	BP 算法	(29)
2.3.3	BP 网络的设计	(31)
2.3.4	BP 网络的限制与不足	(32)
2.4	径向基函数网络	(33)
2.4.1	径向基函数网络结构	(33)
2.4.2	网络训练与设计	(35)
2.4.3	广义径向基函数网络	(36)
第3章 网络训练优化算法及其性能对比		(37)
3.1	基于标准梯度下降的方法	(38)

3.1.1	附加动量法	(38)
3.1.2	自适应学习速率	(39)
3.1.3	弹性 BP 算法	(40)
3.2	基于数值优化方法的网络训练算法	(40)
3.2.1	拟牛顿法	(41)
3.2.2	共轭梯度法	(42)
3.2.3	Levenberg-Marquardt 法	(42)
3.3	前向网络的数值性能对比	(43)
3.3.1	非线性函数的逼近	(43)
3.3.2	逼近非线性直流电机的输入/输出特性	(45)
第 4 章 递归神经网络		(47)
4.1	各种递归神经网络	(47)
4.1.1	全局反馈型递归神经网络	(48)
4.1.2	前向递归神经网络	(50)
4.1.3	混合型网络	(57)
4.1.4	小结	(57)
4.2	全局反馈递归网络	(59)
4.2.1	海布学习规则	(61)
4.2.2	正交化的权值设计	(62)
4.2.3	离散型反馈网络的稳定点与稳定域	(65)
4.3	连续型霍普菲尔德网络	(72)
4.3.1	对应于电子电路的网络结构	(73)
4.3.2	霍普菲尔德能量函数及其稳定性分析	(75)
4.3.3	能量函数与优化计算	(77)
4.4	自组织竞争网络	(79)
4.4.1	网络结构	(79)
4.4.2	竞争学习规则	(81)
4.4.3	竞争网络的训练过程	(82)
4.5	科荷伦自组织映射网络	(84)
4.5.1	科荷伦网络拓扑结构	(85)
4.5.2	网络的训练过程	(86)
4.5.3	科荷伦网络的应用	(87)
第 5 章 神经网络在智能控制系统中的应用		(90)
5.1	直接正向模型建立	(90)
5.2	逆模型建立	(91)
5.3	系统中的控制	(92)
5.3.1	监督式控制	(92)
5.3.2	直接逆控制	(93)

5.4 BP 网络结构、参数及训练方法的设计与选择	(93)
5.4.1 BP 网络的设计	(94)
5.4.2 采用自适应学习速率与固定学习速率的比较	(98)
5.4.3 改进算法的性能比较	(99)
5.5 具有 PID 特性的神经网络非线性自适应控制	(100)
5.5.1 NLPIDC 的结构	(101)
5.5.2 NLPIDC 的输入/输出关系	(101)
5.5.3 NLPIDC 的权值调整公式	(102)
5.5.4 NLPIDC 闭环控制系统的稳定性分析	(103)
5.5.5 NLPIDC 的实时在线控制策略步骤	(105)
5.5.6 基于 ADAMS 和 Matlab 的三级倒立摆镇定控制仿真平台	(106)
5.6.7 NLPIDC 在三级倒立摆镇定控制中的应用	(108)
第 6 章 模糊理论基础	(110)
6.1 基本概念与术语	(110)
6.2 模糊集合及其隶属函数	(113)
6.2.1 模糊集合的定义	(113)
6.2.2 模糊集合的表示方法	(114)
6.2.3 模糊集合的并、交、补运算	(115)
6.2.4 模糊集合的隶属函数	(115)
6.3 模糊逻辑	(117)
6.3.1 二值逻辑、多值逻辑和模糊逻辑	(117)
6.3.2 模糊逻辑的基本运算	(117)
6.3.3 模糊关系和模糊矩阵	(119)
6.3.4 模糊语言及其算子	(122)
6.4 模糊规则与模糊推理	(125)
6.4.1 模糊“如果-那么”规则	(125)
6.4.2 模糊逻辑推理	(126)
第 7 章 模糊控制器的设计方法	(133)
7.1 精确与模糊控制的事例	(133)
7.1.1 采用精确的非模糊求解方法	(133)
7.1.2 模糊方法	(136)
7.2 模糊逻辑控制过程	(137)
7.3 输入变量和输出变量的确定	(138)
7.4 论域的确定	(139)
7.5 确定模糊化和解模糊化方法	(140)
7.5.1 模糊化方法	(141)
7.5.2 解模糊判决方法	(143)
7.6 模糊控制规则	(144)

7.7 模糊逻辑推理	(146)
7.7.1 合成模糊推理法	(146)
7.7.2 结论是线性函数的模糊推理方法	(155)
7.8 量化因子及比例因子的选择	(156)
第8章 模糊控制系统的应用	(158)
8.1 速度模糊控制器的设计	(159)
8.2 三种控制器的设计与性能比较	(162)
8.2.1 控制算法的描述	(163)
8.2.2 结果的对比	(165)
8.3 变参数双模糊控制器	(166)
8.3.1 变参数双模糊控制器	(167)
8.3.2 仿真实验验证	(169)
8.3.3 小结	(170)
第9章 模糊神经网络	(172)
9.1 引言	(172)
9.2 模糊系统的关系式	(173)
9.3 采用神经网络直接实现的模糊系统	(174)
9.4 Sugeno 模糊推理法	(175)
9.5 B 样条模糊神经网络	(176)
9.5.1 B 样条函数及其网络	(176)
9.5.2 B 样条模糊神经网络控制器的设计	(179)
9.6 径向基函数神经网络	(180)
9.7 小结	(182)
第10章 模糊神经系统的应用	(183)
10.1 基于 ANFIS 的非线性电机系统的建模	(183)
10.1.1 ANFIS 的结构	(183)
10.1.2 混合学习算法	(184)
10.1.3 基于 ANFIS 的非线性电机系统建模	(185)
10.1.4 辨识模型的验证	(186)
10.2 神经模糊建模平台的设计与应用	(189)
10.2.1 建模方法的选择	(189)
10.2.2 模型输入变量个数的辨识	(190)
10.2.3 模糊规则个数的辨识	(191)
10.2.4 实际建模中需要考虑的几个问题	(191)
10.2.5 其他功能	(192)
10.2.6 应用实例	(193)
第11章 进化算法	(197)
11.1 标准遗传算法	(198)

11.1.1 遗传算法的基本特点	(198)
11.1.2 遗传算法的基本操作	(199)
11.1.3 遗传算法的设计步骤	(201)
11.1.4 遗传算法的实质	(203)
11.1.5 小结	(203)
11.2 进化算法的分析及其性能对比	(204)
11.2.1 进化算法基本原理	(204)
11.2.2 遗传算法	(204)
11.2.3 遗传编程	(205)
11.2.4 进化策略	(206)
11.2.5 进化规划	(206)
11.3 进化算法的性能对比	(207)
11.3.1 编码策略	(207)
11.3.2 选择方法	(208)
11.3.3 遗传算子	(209)
11.4 遗传编程中一种改进的 GROW 算法	(211)
11.4.1 改进的 GROW 方法	(212)
11.4.2 多样性的量度	(213)
11.4.3 回归实验	(213)
11.4.4 实验结果及分析	(214)
第 12 章 进化算法的应用	(217)
12.1 模糊神经网络和遗传算法相结合的控制策略	(217)
12.2 基于遗传算法和单纯形法的直流电机参数辨识	(223)
12.2.1 直流电机非线性模型及其待辨识参数	(223)
12.2.2 基于遗传算法和单纯形法的非线性系统参数辨识	(224)
12.2.3 系统参数辨识及其结果验证	(226)
12.2.4 小结	(229)
第 13 章 智能优化算法及其应用	(230)
13.1 基于感知范围的鱼群优化算法	(230)
13.1.1 标准人工鱼群算法	(230)
13.1.2 生物系统中的鱼群模型	(231)
13.1.3 新鱼群算法描述	(232)
13.1.4 新鱼群算法的实施步骤	(233)
13.1.5 测试函数的对比实验及其结果分析	(233)
13.1.6 作用力权重因子的线性变化策略	(235)
13.1.7 小结	(236)
13.2 人工免疫算法	(237)
13.2.1 基于相似性矢量距的选择概率计算方法	(237)

13.2.2	一种改进的抗体相似性及抗体浓度表示方法	(239)
13.2.3	免疫疫苗的引入及算法求解旅行商问题步骤	(240)
13.2.4	改进算法求解 TSP 问题基本步骤	(241)
13.2.5	对比实验及其结果分析	(242)
13.2.6	小结	(243)
13.3	不同蚁群优化算法在 CTSP 中的性能对比	(244)
13.3.1	蚁群优化算法的框架	(244)
13.3.2	CTSP 关于蚁群优化算法的描述	(245)
13.3.3	蚂蚁系统	(245)
13.3.4	精华蚂蚁系统	(246)
13.3.5	基于排列的蚂蚁系统	(247)
13.3.6	最大-最小蚂蚁系统	(248)
13.3.7	蚁群系统	(248)
13.3.8	5 种 ACO 算法的 CTSP 实验及其结果分析	(249)
13.3.9	小结	(252)
13.4	基于进化策略与蚁群算法的融合算法求解旅行商问题	(252)
13.4.1	进化策略求解 TSP 问题	(252)
13.4.2	蚁群算法求解 TSP 问题的基本描述	(253)
13.4.3	进化策略与最大-最小蚂蚁算法的融合	(254)
13.4.4	中国 31 个省会城市 TSP 问题的求解	(255)
13.5	粒子群与模拟退火的混合算法求解 TSP 问题	(258)
13.5.1	基本粒子群算法	(258)
13.5.2	带有突变的粒子群优化算法	(260)
13.5.3	模拟退火算法	(261)
13.5.4	粒子群与模拟退火混合算法	(261)
13.5.5	混合算法求解中国旅行商问题实验及其结果分析	(263)
13.5.6	小结	(264)
	参考文献	(265)

第1章 概述

自从美国科学家维纳(N. Wiener)于20世纪40年代创立“控制论”以来,控制科学已经经历了经典控制理论和现代控制理论两个阶段。随着控制科学的不断发展,人们对控制系统性能的要求也不断提高。在处理复杂系统控制问题时,面对控制系统的复杂性、不确定性、突变性所带来的问题,国内外控制科学界一直都在探索新的控制理论,逐步形成了智能控制理论。为了适应不同技术领域和社会发展对控制科学提出的新要求,越来越多的学者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较完整的体系。

在讨论智能控制理论之前,有必要对经典控制理论和现代控制理论的内容、特点及其与智能控制理论之间的关系作一了解。

1.1 自动控制系统及其理论的发展历程

现代社会中的各个领域都在广泛地采用自动控制理论及其技术,在卫星的运行、导弹的制导和飞机的驾驶中,自动控制系统一直起着极其重要的作用。“自动控制”是指采用某种控制装置使机器设备或生产过程自动地按照事先给定或设计出的规律进行运行,使一个或数个物理量,如:电压、电流、速度、温度、流量等,能够在一定的精度范围内按照给定的规律变化。如果将工作的机器设备称为“被控对象”,将表征其工作状态的物理量称为“被控量”,将给定的规律称为“命令信号(或参考输入)”,则“控制”的任务又可概述为:采用适当的外加控制策略使被控对象的被控量等于参考输入。这个任务如果由人来完成,则称为“人工控制”;如果靠自动装置承担,即在没有人的直接参与下,利用控制装置自动操纵被控对象,使被控量保持恒定或按一定规律变化,则称为“自动控制”。由自动控制装置与被控对象组成的系统称为“自动控制系统”。自动控制的基本原理是通过在整个控制系统中引入“负反馈”形成“反馈控制系统”来完成系统控制任务的。通常,将系统检测出来的输出信号送回到系统的输入端,并与参考输入信号比较的过程称为“反馈”。若反馈信号与输入信号相减,则为负反馈;若相加,则为正反馈。在反馈控制系统中,如果给定的输入量保持常量或者随时间

缓慢变化,而系统的基本任务是在有扰动的情况下,使实际的输出变量保持期望的数值,这类系统被称为“自动调节系统”。如果系统的期望输入是随时间变化的函数,控制的目标是使系统的输出变量跟踪期望的输入信号,这类系统被称为“自动跟踪系统”。事实上,除了反馈控制外,对不同的被控过程的自动控制方式可以是不同的。这种实现自动控制的方式就是控制系统的类型。在实际应用中,存在着大量不同的控制方法与系统类型,并且可以通过不同的角度来得到各种不同的分类方法。比如反馈控制系统又称为“闭环控制系统”,这是因为系统的输出信号对控制作用有直接的影响。系统输出量对其控制作用没有影响的系统被称为“开环控制系统”。开环控制系统既不需要测量部件(或子系统)对输出量进行测量,也不需要将它反馈到系统的输入端与输入量进行比较。因此对应于每一个给定的输入量,系统产生一个输出量与之对应,系统的精度只取决于系统前向通道中控制器的作用。在实际系统中,如果各个部件(或子系统)的输入/输出特性都是线性的,或可以线性化的,这样的系统又称为“线性控制系统”。线性系统的性能可以用线性微分方程描述,并可以使用叠加原理。当系统中含有非线性特性的部件(或子系统)时,所组成的系统则称为“非线性控制系统”。非线性系统不能采用叠加原理。经典的分析非线性系统的工程方法有相平面法和描述函数法。

经典(或古典)控制理论(1935~1950年)的建立过程中有以下著名的历史事件。1940年,美国的奈奎斯特(Nyquist)提出对系统性能进行分析的频率响应法。美国泰勒(Taylor)仪器公司的金戈(Ziegler)和尼柯尔斯(Nichols)于1942年提出比例-微分-积分(PID)参数的最佳调整法。美国麻省理工学院(MIT)的维纳通过研究随机过程的预测,于1942年提出维纳滤波理论,并于1948年发表《控制论》一书,标志着控制论学科的诞生。1938年在贝尔(Bell)实验室,在波德(Bode)领导的火炮控制系统研究小组工作的香农(Shannon)提出继电器逻辑自动化理论。随后他于1948年发表专著《通信的数字理论》,奠定了信息论的基础。1948年,美国的艾旺斯(Evansy)提出根轨迹法。这一时期多本有关控制的经典名著相继问世,其中包括:1942年史密斯(Smith)的《自动控制工程》,1945年波德的《网络分析及反馈放大器》,麦考(MacColl)的《伺服机构的基本理论》,以及1954年钱学森的《工程控制论》。

经典控制理论研究的主要对象为线性、定常、时不变系统，主要研究单输入/单输出系统的控制问题，它是基于被控系统的数学模型来进行系统分析、综合及控制器设计的。所以，系统模型的建立或已知是控制器设计的最基本的要求或前提。对于一般的线性系统都是根据机理建模，系统的动力学方程为微分方程，通过将系统方程的输出与输入变量之比的拉普拉斯变换所获得的传递函数作为系统的数学模型，将系统的微分方程转换为多项式代数方程，然后对系统的传递函数进行分析与综合。分析系统的基本方法主要是频率法，其最大的特点是不需要求解系统的微分方程就可以判断出被控系统的特性，如系统的稳定性和收敛性等，从而形成了一套系统控制理论及其分析方法。这些由当时世界上的聪明人所想出的聪明的、简单易行的系统分析方法，在当时计算机不普及的情况下发挥了巨大的作用。由经典控制理论中的超前-滞后补偿控制方法所发展出来的 PID 控制器设计方法至今在控制系统的理论设计与实际的应用中，仍然发挥着极其重要的作用。

自 20 世纪 50 年代进入现代控制理论的发展阶段后,先后提出和发展出重要的理论与技术,其中有影响的事件包括:苏联的庞特里亚金(Pontryagin)于 1956 年发表《最优过程数

学理论》，提出了极大值原理；美国的贝尔曼(Bellman)于1957年发表著名的《动力学规划》，建立了最优控制的基础；世界第一颗人造地球卫星 Sputnik 由苏联于1957年发射成功；美国的久瑞(Jury)于1958年发表《采样数字控制系统》，建立了数字控制及数字信号处理的基础；国际自动控制联合会(IFAC)于1957年成立，中国为其发起国之一，第一届学术会议于1960年在莫斯科召开；美籍匈牙利人卡尔曼(Kalman)于1960年发表了《控制系统理论》等论文，引入状态空间法分析系统，提出可控性、可观性、最佳调节器和卡尔曼滤波等概念，奠定了现代控制理论的基础；苏联“东方”1号飞船于1961年载着加加林(Gagarin)进入人造地球卫星轨道，从此开始了人类宇航时代；美国的查德(Zadeh)于1963年发表了《线性系统：状态空间法》，并于1965年提出了模糊集合和模糊控制的概念；苏联于1966年发射了“月球”9号探测器，首次在月面软着陆成功；3年后，美国“阿波罗”11号把宇航员阿姆斯特朗(Armstrong)送上月球；瑞典阿斯特鲁姆(Aström)于1967年提出了最小二乘辨识，解决了线性定常系统参数估计问题和定阶方法，6年后，他又提出了自动调节器，建立自适应控制的基础，阿斯特鲁姆于1993年获得 IEEE 的最高荣誉奖；英国的罗森布劳克(Rosenbrock)于1970年发表《状态空间和多变量理论》；加拿大的沃海姆(Wonham)于1974年发表《线性多变量控制：几何法》；美国的麦卡特(Merchant)于1969年提出计算机集成制造的概念；日本 Fanuc 公司于1976年研制出由加工中心和工业机器人组成的柔性制造单元；美国的布劳凯特(Brockett)于1976年提出用微分几何研究非线性控制系统；加拿大的詹姆斯(Zames)于1981年提出 H₂ 鲁棒控制设计方法；美国“哥伦比亚”号航天飞机于1981年首次发射成功；意大利的伊斯道瑞(Isidori)于1985年出版了《非线性控制系统》一书；美国的布瑞森(Bryson)和何毓琦于1969年发表《实用最优控制》；1983年，何毓琦、曹希仁等提出离散事件系统理论。

现代控制理论是在经典控制理论基础上，于20世纪60年代以后发展起来的。建立基础是状态空间法，研究对象包括单变量系统和多变量系统，以及定常系统和时变系统；基本的分析和综合方法是时域方法，各类系统数学模型的建立和分析涉及现代数学的多个分支。它通过将经典控制理论中的高阶常微分方程转化为一阶微分方程组，使其扩展适用于描述多变量控制系统，并通过状态空间法来描述系统，开发出揭示系统内部结构特性的理论，如可控性、可达性、可观性等，从而奠定了现代控制理论的基础，并提出了状态观测器和卡尔曼滤波器，它在随机控制系统的分析与控制中得到广泛应用；由庞特里亚金等人提出最大值原理，深入地研究了最优控制问题；由贝尔曼提出的动态规划广泛用于各类最优控制问题。

经典控制理论与现代控制理论已经形成了一整套系统控制理论体系，发展出来许多由独立的系统控制原理所形成的控制理论与方法，其中包括：PID 控制、最优控制、自适应控制、辨识与估计理论、鲁棒控制、预测控制、 μ 综合等，这些都成为了系统控制理论丰富的独立的理论分支。

在系统控制理论中，一般根据物理或化学定理，采用机理建模，通过线性微分方程来描述系统输入/输出之间的关系。但微分方程的求解运算相当复杂，大量高阶、复杂的微分积分运算常常是无法求得函数解析解的。所以经典控制理论引进了数学方法中的拉普拉斯变换，将“微分”与“积分”运算转换为“乘法”与“除法”运算，把微分方程变成容易计算和分析的代数方程，并且提出了大量的系统分析理论，在不需要对系统方程求解的情况下，只需要对

系统参数进行简单的分析和计算,就可以获得表征系统内部特性的判断与结论,从而大大地简化了系统分析的复杂性。这些正是经典控制理论对系统控制理论的最大贡献所在。在数学模型及其特性分析上,经典控制理论采用的是传递函数:初始状态为零时,系统用微分方程的输出与输入的拉普拉斯变换之比来描述,传递函数虽然反映的只是系统的一个整体的外部特性,但通过人们创立和开发的一些系统分析方法,可以了解系统的内部结构及其整体特性,并同时通过对表征系统外部整体特性参数的调整,来达到对系统特性进行一定程度改进以及控制性能提高的目的。比如通过计算传递函数分母构成的特征方程根的正负性,就可以根据劳斯判据来确定出系统的稳定性;根据根轨迹法就可在一定程度上调节系统的稳定性等等。对于现代工程系统中日趋复杂和精度要求趋高的情况来说,不仅要了解系统的输入/输出关系,而且还需要了解系统内部特征,因为具有相同传递函数的系统也可能有不同的内部结构。现代控制理论采用的是将微分方程的输入与输出转变为系统的状态空间来描述系统,其优点表现在除了能够对多输入/多输出系统进行分析与控制外,还可以借助于计算机,采用向量矩阵等数学工具来处理问题,减轻对设计者经验的依赖。

自动控制理论发展早期的经典控制理论,主要用于工程技术中的各类控制问题,尤其是生产过程、航空航天技术、通信技术、武器控制等方面。现代控制理论发展之后,自动控制理论的概念方法广泛用于交通管理、生态环境、生物和生命现象研究、经济科学和社会系统等各个领域。可以说自动控制的应用领域遍及众多的科技和生活方面,但这并不意味着后来的理论就替代了前面的理论。现代控制理论是经典控制理论的拓展和补充,二者在其相应领域起着不可替代的作用。在实际应用中,经典控制理论和现代控制理论都有其合适的应用场合。经典控制理论研究对象虽然主要局限于单输入、单输出、线性、定常、时不变的系统数学模型(这是十分理想的一个系统模型,与现实系统有一定的差别),不过对于现实中相当多的实际问题,尤其是一些简单被控系统,在一定的情况下,如在某个工作点附近,还是可以采用这种理想模型来近似的。在其基础上所进行的分析和应用,在一定的条件下是有效和具有一定参考价值的。现代控制理论由于改变描述系统数学模型的方法,采用状态空间法而不是传递函数,从而使其研究对象的范围扩展了许多,不但包含了经典控制理论所能研究的线性问题,还包括了很多经典控制理论解决不了的线性和非线性问题;不但能研究定常系统,还能研究非定常系统;不但能解决单输入、单输出问题,还能解决多输入、多输出问题。

在控制方法上,虽然经典控制理论只有一个PID控制方法,但由于其参数的物理意义明确,参数调整方便、简单,理论成熟,应用起来方便可靠。如果需要解决的问题相对简单,经典控制理论能满足系统精度要求,那么采取经典控制理论求解就比较直接,可以节省很多经济成本。所以,当需要解决单输入/单输出线性系统的控制问题时,采用经典控制理论还是比较方便和实际的,尤其是兵器、航空、航天等大系统,更是倾向应用相对成熟的经典控制理论。但是对于多输入/多输出系统的控制问题,经典控制理论则明显力不从心,此时就需要采用现代控制理论,如鲁棒控制、最优控制等控制理论来解决问题。总之,在实际应用中应当根据被控系统本身所具有的特点、环境情况、控制性能要求以及需要解决问题的复杂程度来决定采用何种控制理论。

以上所提的经典控制理论和现代控制理论都是建立在被控系统的数学模型之上的,换一句话说,这些理论可以对系统进行控制器设计的前提是:必须知道或者建立被控系统的数学