

Intelligent Control and Its Applications in Power Systems

# 智能控制及其在 电力系统中的应用

王占山 关焕新 编著



东北大学出版社  
Northeastern University Press

# 智能控制及其在 电力系统中的应用

王占山 关焕新 编著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 王占山 关焕新 2015

### 图书在版编目 (CIP) 数据

智能控制及其在电力系统中的应用 / 王占山, 关焕新编著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2015. 10

ISBN 978 - 7 - 5517 - 1097 - 8

I. ①智… II. ①王… ②关… III. ①智能控制—电力系统 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 243489 号

## 内容简介

本书对智能控制在电力系统中的应用及电力系统中需要智能控制解决的问题进行了介绍, 主要对智能控制的基本概念以及神经网络、模糊逻辑和遗传算法在电力系统中的应用进行了介绍, 同时针对智能电网、多智能体方法和云计算在与智能电网和现代电网结合中所遇到的一些需要智能控制解决的问题进行了介绍, 既凸显了智能控制在电力系统应用中的特色, 又对新形势下电力系统中的智能控制问题进行了探索, 期望达到拓宽技术视野、活跃创新思想、提高创新能力的目的。

本书既可作为电力科研、电气自动化技术及电力系统领域的工程技术人员和研究人员的参考书, 也可供高等院校电气工程、自动化类的教师、高年级本科生和研究生参考。

---

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024 - 83687331 (市场部) 83680267 (社务部)

传真: 024 - 83680180 (市场部) 83680265 (社务部)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www. neupress. com

印刷者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印张: 22

字数: 549 千字

出版时间: 2015 年 10 月第 1 版

印刷时间: 2015 年 10 月第 1 次印刷

组稿编辑: 刘乃义

责任编辑: 汪彤彤

封面设计: 刘江旸

责任校对: 文浩

责任出版: 唐敏智

---

ISBN 978 - 7 - 5517 - 1097 - 8

定 价: 48.00 元

# 前 言

电力系统是指由发电、变电、输电、配电、用电等设备和相应的辅助系统,按规定的技术和经济要求组成的,将一次能源转换为电能并输送和分配到用户的统一系统。电力系统还包括为保证其安全可靠运行的继电保护和安全自动装置、调度自动化和通信等相应的辅助系统。进入 21 世纪以后,我国的电力系统面临着新的发展机遇和挑战。机遇主要是经济的健康发展对电能的需求旺盛,技术发明和创新方兴未艾;挑战主要是国家可持续发展的战略要求发展电力要合理利用一次能源,减少对环境的污染,用最新的科学技术成就改造传统的电能生产和运行管理方式,最大限度地节约能源,确保供电安全可靠和提高经济效益。

智能电网技术是提高现代电网生存性的根本策略之一,包括智能输电网、智能配电网和微型电网的同步建设、发展和实现。“智能民用”和“环保智能”的思想将对智能电网最终取得预期的节能效益、环保效益以及改变能源消费结构和减少对传统化石燃料的依赖具有重要影响,由此对解决新能源发展和接入大电网的安全与经济以及智能配电网与用户端信息系统等问题提供新的研究思路。

目前,我国电网已经成为世界上最复杂的人造工业网络之一,确保我国超大规模电网的安全稳定性、显著提高其运行可靠性成为电力科技工作必须实现的最高目标。有鉴于此,应用先进的智能控制理论和复杂系统理论,探索电力系统灾变的统计规律,分析大停电事故的内在原因及形成机理并寻找有效的灾变预防途径,以及将这些理论应用到现代电网的发展规划和安全对策中,成为具有重大现实意义的科学问题。

电力系统的运行和演化受到内外两种因素的制约:一是运行因素的制约,主要包括电力系统的功角稳定性、电压稳定性和频率稳定性,对稳定性产生重要影响的潮流分布和发电机、负载的动态行为,以及电力控制系统的动态响应等;二是电力系统演化因素的制约,主要指网络建设和系统升级,尤其是高一级电压电网的出现将引起系统结构的重大变化,这将是研究电网发展战略的核心。在这两种因素的作用下,电力系统总是处于持续的非平衡状态,而又由于系统内部因素之间的相互作用,进一步自发地驱使系统运行至一种自组织临界稳定的状态。当系统处于这种自组织的临界状态时,任意微小的扰动都可能引发意想不到的后果,甚至引发连锁事件并最终导致灾变,即大停电事故的发生。电力系统大停电的整体动态行为虽然可能是由表征系统处于临界状态的不稳定结构产生的,然而识别动态系统的不稳定性却是当前非线性科学领域的难题。即使将电力系统的大停电视为自组织临界现象的爆发,迄今也不能建立具体表征电力系统大停电过程的非线性数学方程,但可以通过观测电力系统大停电的时间序列数据,用功率谱分析方法反演电力系统在发生大停电时的动力特征,探讨自组织临界现象在大停电中的作用,从而为预测各种模型的停电事故提供宝贵的信

息。当然,这要依赖于大停电过程中观测数据的数量和质量。幂律分布关系是描述极端事件发生概率的一种行之有效的宏观评估方法,常用的有两种:代数幂律关系和概率密度函数为幂函数的关系,二者的共同特点是双对数坐标系下均成线性关系。由于大停电的发生在时间分布上是离散和不均匀的,其规模和能量也是离散和不均匀的,因此,应用复杂网络的幂律特性可以掌握现代电网的动态行为以及研究大电网的发展战略和安全对策。

我国大电网发展战略规划必须突破以往单纯地走根据 GDP 增长目标确定电力增长的弹性系数从而决定电力增长目标的老套路,以及重数量轻结构、重输电轻配电的简单粗放的思维模式,而要从国家能源战略的大框架来研究我国电力发展结构调整的战略目标。同时,随着电网复杂性的增加和脆弱性的扩散,电网发展将会进入安全敏感期,并面临向低碳经济模式转变的挑战等。世界正处于关于能源产生、交易和消耗方面的革命边缘,未来电网所涉及的问题是如何彻底改造现有的电网,使之成为清洁能源有效流动的主干网,可以灵活方便地提供接入,成为能够集中各种能源的高效网络。以用户消费为终点的传统价值链将结束,一个可接纳分布式能源(主要包括分布式发电、储能和电动汽车)的新价值链正在形成。未来电力系统的负荷将随着发电的变动而调整,未来电力消费者和电力生产者的界限将逐渐模糊,这些将使得电力系统的规划、建设、运行都更加经济和环保。

随着世界性能源危机的逼近和人类对能源需求的不断增长,人们对新能源给予了希望。同时,为了优化利用资源和保护环境,智能电网应运而生。因此,将一些电网互联成更大的系统仍将是现代电网的发展趋势。但是,从世界范围来看,目前电网间实施同步互联的发展趋势已经受到安全、经济和环境等条件的制约。同步电网规模越大、电压越高、电压等级越多,复杂性网络特征就越明显,脆弱性扩散就越严重,发生连锁性大停电事故的概率就越大,一旦发生事故,后果将十分严重。为了减小同步电网的规模,以降低复杂性和脆弱性,一种方法是采用电网分割技术,减小同步电网的规模;另一种方法是实现大电网间的异步互联来解决同步电网所存在的问题,目前,大电网间的异步互联已成为电网发展的主流。

对于电网发展来说,并非只是对传统发展模式的修补升级就能适应上述变化,而是要求对电力传输技术与运行方式进行重大变革。新技术、新设备、新方法的出现,如电力电子技术、FACTS 技术、第三代电网操作系统 GOS3.0(即新一代的分布式智能控制系统)和分布式能源,以及基于电压源换流器的新型直流输电技术(VSC-HVDC)、高温超导输电等,将会提高现有电网的效率、电能质量和安全性,特别是可以发展一种新的电网体系结构,而完全没有必要采用传统而“笨重”的特高压交流输电技术。这将为国家提供一个有安全保障的、全新的、在电力传输和市场运营方面都具有高效率、高质量的现代化电网。

针对上述电力问题,基于智能控制的方法为其提供了一种可行的方案。众所周知,智能是基于人们对客观事物的认识由浅入深、滚动地发展的,模拟人对客观对象或特定环境的响应与行为,以此构成的自适应系统、自学习系统、自组织系统等构成了完成不同功能和特性的智能控制系统。正是由于智能控制系统具有拟人智能化的运作模式,优胜劣汰的选择机制,多目标的优化过程,复杂环境的学习功能,对复杂任务具有分析、调控、决策的能力等特点,人们期望在大规模电力系统等复杂对象上,寻找不需要建立数学模型的控制方案,研究能够按照操作人员的智力、经验及意识发布指令的控制器,能够实现实时性与容错性好、鲁棒性高的优化控制系统,由此拉开智能控制及其应用研究的帷幕。按照当下 IEEE 智能学会

的定义,智能控制主要包括神经网络、模糊逻辑和进化计算三大类。目前,基于神经网络、模糊逻辑、进化计算(如遗传算法、粒子群算法等)等智能方法的电力系统相关问题的研究已经开展多年,成果和应用卓有成效。特别是智能电网概念的提出,为智能控制的研究内容和发展都提供了很多契机,同时也给智能控制的优势发挥提供了更宽的舞台,并已开始渗入到电力系统领域及以外的众多学科。

编写本书的目的,首先是介绍智能控制对当代电力系统发展的促进作用,以及新形势下的电力系统对智能控制的需求和提出的新课题,由此对我国电力系统的若干技术热点和新的生长点进行分析和预测,以期达到拓宽技术视野、激发创新意识和提高创新能力的目的。旨在以可持续发展的角度来认识电力系统的发展,强调智能控制在电力系统中的应用以及在智能电网中的重要作用,强调创新是电力发展的动力。其次,通过查阅大量最新的科技文献,本书尽量反映当下的最新技术成果,如智能电网、多智能体技术以及云计算等新的理念和技术等。再次,针对每一种智能控制方法在电力系统中的应用,本书尽量给出完整的论述,使得读者对智能控制如何与电力系统中的相关问题进行结合有一个完整的认识。最后,本书各章之间的关系既相互联系,又相对独立,具有可阅读性。总之,本书较为详尽地阐述了神经网络、模糊逻辑和遗传算法的相关理论以及电力系统的相关知识,将二者紧密地结合到了一起,并将前者应用到后者的领域中以解决实际问题,形成了较为系统的知识体系。

在编写过程中,我们学习和参考了国内外相关方面的很多专著和论文,并引用了这些文献中的很多重要内容。在参考文献中列出了作者姓名和著作名称,以示尊敬和致谢。全书的各章由两位编著者共同完成。最后由两位编著者共同审读。

本书在编写过程中,第一作者的硕士研究生张恩林、周达开、马东升和赵永彬分别负责第2章~第5章的部分文字材料的录入工作,硕士研究生蔡超和褚夫飞负责书中部分图形的绘制和公式的校对,在此对他们的辛劳工作表示感谢。

本书的出版得到了国家自然科学基金(No. 61074073, No. 61473070, No. 61433004)、中央高校基本科研业务费(No. N130504002, No. N130104001)、流程工业综合自动化国家重点实验室项目(2013ZCX01)的资助,在此表示感谢。

由于水平有限,遗漏和不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

王占山(东北大学) 关焕新(沈阳工程学院)

2015年1月

# 目 录

<b>第 1 章 绪 论</b> .....	1
1.1 智能与人工智能 .....	1
1.2 人工智能与计算智能 .....	4
1.3 智能控制与自动控制理论 .....	5
1.4 智能控制简要发展历程 .....	8
1.5 电力系统概述 .....	15
1.6 电力系统中的控制理论 .....	16
1.7 基于智能控制的其他电力系统问题 .....	21
1.8 电力系统未来展望 .....	42
<b>第 2 章 神经网络在谐波检测和负载分配中的应用分析</b> .....	44
2.1 神经网络基础 .....	44
2.2 前向神经网络在有源电力滤波器中的应用 .....	60
2.3 Hopfield 神经网络在谐波检测系统的应用 .....	92
2.4 Hopfield 网络在经济负荷分配中的应用 .....	100
<b>第 3 章 神经网络在故障选线中的应用分析</b> .....	107
3.1 小电流接地故障选线现状及评价 .....	108
3.2 基于故障暂态和稳态特征信息的融合选线研究 .....	114
3.3 基于神经网络的融合选线方法 .....	122
3.4 基于神经网络的融合选线方法改进 .....	126
<b>第 4 章 模糊控制的应用分析</b> .....	134
4.1 模糊控制的基本原理 .....	135
4.2 T-S 模糊控制理论基础 .....	139
4.3 查询表式模糊控制在电力系统稳定器和 SVC 中的应用 .....	144
4.4 T-S 模糊控制在电力系统中的应用 .....	152
<b>第 5 章 遗传算法的应用分析</b> .....	200
5.1 遗传算法的特性及适用范围 .....	200

5.2	电力系统无功优化 .....	202
5.3	无功优化常用数学模型 .....	216
5.4	基于遗传算法的无功优化的应用 .....	226
<b>第6章</b>	<b>应用智能电力网络系统 .....</b>	<b>238</b>
6.1	智能电网概述 .....	238
6.2	统一坚强智能电网 .....	247
6.3	智能电网工程探索 .....	264
6.4	智能配电网 .....	267
6.5	分布式发电与智能电网 .....	269
<b>第7章</b>	<b>多智能体及其应用 .....</b>	<b>273</b>
7.1	智能体基础知识 .....	273
7.2	多智能体系统的概念与结构 .....	276
7.3	多智能体系统的协作和协调 .....	278
7.4	多智能体技术对电力系统的影响 .....	282
7.5	基于多智能体模型的电力系统阻尼控制器的性能评价 .....	285
7.6	基于多智能体的多机电力系统稳定性分散协同鲁棒控制器设计 .....	293
<b>第8章</b>	<b>云计算及其应用 .....</b>	<b>304</b>
8.1	云计算基础知识 .....	305
8.2	云计算构建未来电力系统的核心计算平台 .....	309
8.3	电力系统智能云 .....	316
8.4	基于智能云的数字化变电站实例 .....	319
8.5	电力系统云计算研究的挑战 .....	320
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>323</b>



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 智能与人工智能

### 1.1.1 智能的含义

众所周知，人类是具有智能的。这是因为人类能记忆事物，能有目的地进行一些活动，能通过学习获得知识，并能在后续的学习中不断地丰富知识，还有一定的能力运用这些知识去探索未知的东西，去发现，去创新。

粗略地讲，智能是个体有目的的行为、合理的思维，以及有效地适应环境的综合能力。也可以说，智能是个体认识客观事物和运用知识解决问题的能力。

按照上述描述，人类个体的智能是一种综合能力。具体来讲，可以包含如下八个方面：

- ① 感知与认识客观事物、客观世界和自我的能力；
- ② 通过学习取得经验与积累知识的能力；
- ③ 理解知识，运用知识和经验分析、解决问题的能力；
- ④ 联想、推理、判断、决策的能力；
- ⑤ 运用语言进行抽象、概括的能力；
- ⑥ 发现、发明、创造、创新的能力；
- ⑦ 实时、迅速、合理地应付复杂环境的能力；
- ⑧ 预测、洞察事物发展、变化的能力。

那么，如何使类似于计算机这样的设备去模拟人类的这些能力呢？这就是人工智能所研究的问题。

### 1.1.2 人工智能 (Artificial Intelligence, AI)

人工智能是计算机科学、控制论、信息论、神经生理学、心理学和语言学等多种学科相互渗透交叉而发展起来的一门综合性新学科，其诞生可追溯到 20 世纪 50 年代中期。1956 年夏天，在美国的达特茅斯大学，由青年数学助教麦卡锡 (J. McCarthy) 与他的三位朋友明斯基 (M. Minsky, 哈佛大学的青年数学家和神经学家，后为麻省理工学院教授)、罗切斯特 (N. Lochester, IBM 公司信息研究中心负责人) 和香农 (C. E. Shannon,

贝尔实验室信息部数学研究员) 共同发起, 邀请 IBM 公司的莫尔 (T. More) 和塞缪尔 (A. Samuel), MIT 的塞弗里奇 (O. Selfridge) 和所罗门夫 (R. Solomonff), 以及 RAND 公司的诺维尔 (A. Newell) 和卡内基工科大学的西蒙 (H. A. Simon) 等人参加了夏季学术讨论班, 历时两个月。这十位学者都是在数学、神经生理学、心理学和计算机科学等领域中从事教学和研究工作的学者。他们在会上第一次正式使用了人工智能这一术语, 从而开创了人工智能这一研究方向。人工智能研究怎样让计算机模仿人脑从事推理、设计、思考、学习等思维活动, 以解决和处理较复杂的问题。简单地说, 人工智能就是研究如何让计算机模仿人脑进行工作。可以将研究人工智能的目的归纳为两个方面: 一是增加人类探索世界、推动社会前进的能力; 二是进一步认识自己。

由于人类对自己的大脑确实知之甚少, 因此, 自从“人工智能”一词诞生以来, 人们从不同的出发点、方法学以及不同的应用领域出发, 进行了大量的研究。正是由于存在这些不同, 因此导致对人工智能有几种不同的认识, 也就形成了不同的学术流派。比较有代表性的包括符号主义 (或者叫作符号/逻辑主义) 学派、联结主义 (或者叫作并行分布处理) 学派、进化主义 (或者叫作行动/响应) 学派。

### (1) 物理符号系统

人们常讲, 计算机世界就是数据处理世界, 而数据是从现实世界中抽象出来的信息世界的形式化描述的结果。当然, 这种形式化系统的不同, 会导致数据世界的不同。所以, 信息是现实在人脑中的反映, 而数据则是信息的一种表现形式。习惯上, 人们用一系列的基本符号以及组合这些符号的一些规则去表达一些信息和行为。这些基本符号以及组合这些符号的规则就是所谓的物理符号系统。

物理符号系统是 Newell 和 Simon 在 1967 年提出的假说, 该假说认为, 一个物理系统表现智能行为的充要条件是它有一个物理符号系统。这就是说, 物理符号系统需要由一组称为符号的实体组成, 它们都是物理模型, 可以在另一类称为符号结构的实体中作为成分出现, 以构成更高级别的系统。

在这里, 人们希望通过抽象, 用一系列物理符号及其相应的组成规则, 来表达一个物理系统的存在和运行。传统的人工智能技术就是以物理符号系统为基础的。在这里, 问题必须经过形式化处理后才能被表达、处理。

要想实现对事物的形式化描述, 第一步必须对其进行适当的抽象。然而, 在抽象中, 需要舍弃一些特性, 同时保留一些特性。但是, 世界的千差万别要求物理符号系统能较好地去表达人们要求的全部, 从一定意义上讲, 这与抽象又存在一定的矛盾。因为为了形式化所进行的抽象有时需要舍弃大量的信息, 而这将导致经过形式化处理后的系统难以表达出物理系统的完整面貌。更严重的是, 有时还会使其失去物理系统的本来面貌。在现实世界中, 这种问题有许多。实际上, 在某些情况下如果勉强对它们进行形式化处理, 一方面会导致面目全非, 另一方面可能会因为过于复杂等问题, 使得系统难以具有良好的结构。称此类问题是难以形式化的。这是物理符号系统所面临的困难。

由此也可以看出, 物理符号系统对全局性判断、模糊信息处理、多粒度的视觉信息处理等是非常困难的, 这就使得人们去探求对此类问题的新的处理方法。

### (2) 联结主义观点

为了研究智能, 在现代神经科学的研究成果的基础上, 人们提出了另一种观点, 认为

智能的本质是联结机制。神经网络是一个由大量简单的处理单元组成的高度复杂的大规模非线性自适应系统。虽然按此说法来刻画神经网络未能将其所有的特性完全描述出来，但它却从四个方面出发，力图最大限度地体现人脑的一些基本特征，同时使得所得的人工神经网络具有良好的可实现性。人工神经网络力求从以下四个方面去模拟人脑的智能行为：物理结构，计算模拟，存储与操作，训练。

实际上，虽然人类很早就对神经网络进行了研究，然而真正广泛地将其作为人工智能的一项新的技术来研究还是近几十年的事。这种努力在 20 世纪 60 年代受到挫折后，停顿了近 20 年。后来，人们发现传统的人工智能技术要在近期取得大的突破还较为困难，同时加上人们在生物神经网络和人工神经网络方向研究的进展，重新唤起了人们对用人工神经网络来实现人工智能的兴趣，希望通过共同的努力，尽快构造出一个较为理想的人工智能系统。

为此，许多方面的科学家分别从各自的学科入手，交叉联合，进行研究。所以说，人工神经网络理论是许多学科共同努力的结果。这些学科主要包括神经科学、生物学、计算机科学与技术、生理学、数学、工程、心理学、哲学、语言学等。

### (3) 两种模型的比较

物理符号系统和人工神经网络系统从不同的方面对人脑进行模拟，其差别见表 1.1。

表 1.1 物理符号系统和人工神经网络系统的差别

项目	物理符号系统	人工神经网络
处理方式	逻辑运算	模拟运算
执行方式	串行	并行
动作	离散	连续
存储	局部集中	全局分布

物理符号系统从人的心理学的特性出发，去模拟人类问题求解的心理过程。所以它擅长模拟人的逻辑思维，可以将它看作思维的高级形式。而在许多系统中，一些形象思维的处理需要用逻辑思维来实现，这就导致了该系统对图像处理类问题的处理效率不高。

作为联结主义观点的人工神经网络，它是从仿生学的观点出发，从生理模拟的角度去研究人的思维与智能的，擅长对人的形象思维的模拟，这是人类思维的低级形式。从目前的研究结果看，这种系统的非精确性的特点，使得它对以逻辑思维为主进行求解的问题的处理较为困难。图 1.1 给出了两种系统与人类思维形式的对应比较。

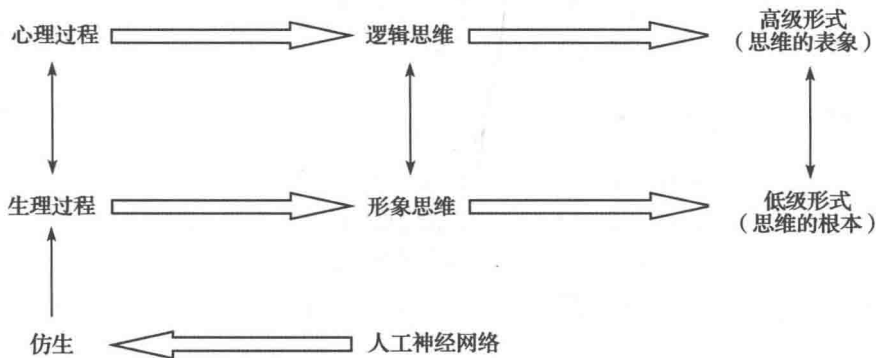


图 1.1 两种模型的模拟对照

这两种观点导致了两种不同的人工智能技术：基于物理符号系统的传统的人工智能技术和基于联结主义观点的人工神经网络技术。这两种技术的比较见表 1.2。从表 1.2 中可以看出，这两种技术导致处理问题的方法不同，使得相应系统的开发方法和适应对象有着很大的差别。按照这一分析，传统的人工智能方法和人工神经网络的方法并不是完全可以互相取代的，它们应该有着不同的应用面。

表 1.2 两种人工智能技术的比较

项目	基于物理符号系统的 传统的人工智能技术	基于联结主义观点的 人工神经网络技术
基本实现方式	串行处理，由程序实现控制	并行处理，对样本数据进行多目标学习，通过人工神经元之间的相互作用实现控制
基本开发方法	设计规则、框架、程序，用样本数据进行调试（由人根据已知的环境去构造一个模型）	定义人工神经网络的结构原型，通过样本数据，依据基本的学习算法完成学习——自动地从样本数据中抽取内涵（自动适应应用环境）
适应领域	精确计算，符号推理，数值计算	非精确计算，模拟处理，感觉，大规模数据并行处理
模拟对象	左脑（逻辑思维）	右脑（形象思维）

## 1.2 人工智能与计算智能

计算智能是信息科学与生命科学、认知科学等不同学科相互交叉的产物。它主要借鉴仿生学的思想，基于人们对生命体智能机理的认识，采用数值计算的方法去模拟和实现人类的智能。计算智能的主要研究领域包括神经计算、模糊计算、进化计算和蚁群计算等。

### 1.2.1 计算智能的概念

目前，计算智能尚没有一个统一的形式化的定义，人们使用较多的是美国科学家贝兹德克（J. C. Bedeck）从计算智能系统的角度所给出的定义：如果一个系统仅处理低层的数值数据，含有模式识别部件，没有使用人工智能意义上的知识，且具有计算适应性、计算容错性、接近人的计算速度和近似于人的误差率这四个特性，那么它是计算智能的。

从学科范畴来看，计算智能是在神经网络、进化计算及模糊系统这三个领域的发展相对成熟的基础上形成的一个统一的学科概念。其中，神经网络是一种对人类智能的结构模拟方法，它使用人工神经网络系统去模拟生物神经系统的智能机理；模糊计算是一种对人类智能的逻辑模拟方法，它使用模糊逻辑去模拟人类的智能行为；进化计算是一种对人类智能的演化模拟方法，它使用进化算法去模拟人类智能的进化规律。

从贝兹德克对计算智能的定义和上述计算智能学科范畴的分析，可以看出以下两点：第一，计算智能借鉴仿生学的思想，基于生物神经系统的结构、进化和认知，对自然智能进行模拟；第二，计算智能是一种以模型（计算模型、数学模型）为基础，以分布、并

行、仿生计算为特征去模拟生命体和人类的智能。

这样,对计算智能可作如下解释:计算智能是借鉴仿生学的思想,基于对生命体的结构、进化、行为等机理的认识,以模型(计算模型、数学模型)为基础,以分布、并行和仿生计算为特征去模拟生命体和人类的智能。

1992年,贝兹德克在 *Approximate Reasoning* 学报上首次提出了“计算智能”的概念。1994年6月底至7月初,IEEE在美国佛罗里达州的奥兰多市召开了首届国际计算智能大会(World Congress on Computational Intelligence, WCCI'94)。会议第一次将神经网络、模糊系统和进化计算这三个领域合并到一起,统称为智能系统,并由此形成了“计算智能”这个统一的学科范畴。

### 1.2.2 计算智能与人工智能之间的关系

目前,在计算智能与人工智能的关系方面有两种不同的观点:一种观点认为计算智能是人工智能的一个子集;另一种观点认为计算智能和人工智能是不同的范畴。

第一种观点的代表人物是贝兹德克。他把智能和神经网络都分为计算的、人工的和生物的三个层次,人工智能包含了计算智能,而生物智能包含了人工智能,即计算智能是人工智能的一个子集。

第二种观点的代表人物是艾波哈特(R. C. Berhard),他认为虽然人工智能与计算智能之间有重合,但计算智能是一个全新的学科领域,无论是生物智能还是机器智能,计算智能都是最核心的部分,而人工智能则是外层。

事实上,计算智能和传统的人工智能只是智能的两个不同层次,都有自身的优势和局限性,相互之间只应该互补,而不能取代。纠结的原因在于:传统的人工智能只是在知识层次上展开大量的探索性工作,如神经网络在数据分类、函数逼近方面,模糊逻辑在专家经验方面等。随着人工智能的大发展,目前的情形是:神经网络和模糊系统的研究必须结合基本性能分析,如稳定性、逼近性能评估等严格的理论推证。这样,关于人工智能的认识层次有了很大的提升,关注的着眼点也开阔起来。例如,开始关注人工智能的计算行为、推理行为、学习行为等。盖凡天下大势,分久必合,合久必分,人工智能的发展也概莫能外。可以确切地说,人工智能孵化了计算智能和学习智能,但作为一个新的学科分支,人工智能必然有其自身的特点和内在规律。不论计算智能和学习智能是人工智能的一部分,还是人工智能发展的一个新阶段,人工智能的发展都离不开这些计算智能和学习智能分支的发展。人工智能是一个大的学科,除了计算智能和学习智能外,还会有认知智能、行为智能等。不论怎样说,大量实践证明,只有将计算智能和人工智能很好地结合起来,才能更好地模拟人类智能,才是智能科学技术发展的明智之举。

## 1.3 智能控制与自动控制理论

自动控制理论是自动控制科学的核心。控制理论经过数十年世界范围的发展,研究成果已十分丰富,其中一些研究经过不断发展完善已经成为成熟的独立学科,还有一些研究经过一段时间的繁荣昌盛,大大促进了控制理论的发展,完成了历史的使命,但现在看其

本身的理论及应用价值确实是有限的。当前，控制理论已渗透到几乎所有的工程技术领域，新的问题、专题及学科分支大量涌现，五彩缤纷，但也会使人有目不暇接、无所适从之感。当前，高新技术的发展提出了形形色色的新问题，难度大，亟待解决。面对这些新问题，现有的控制理论常常显得无能为力，使得一些问题甚至等不及理论上的准备与指点，已在实际中用各种技术手段着手加以解决。

经典控制理论的最主要的特点是：线性定常对象，单输入单输出系统，完成镇定任务。即使对这些极简单的对象，对象描述及控制任务在理论上也尚不完善，从而促使现代控制理论不断发展。

### 1.3.1 现代控制理论的发展

现代控制理论中首先得到透彻研究的是多输入多输出线性系统，其中特别重要的是刻画控制系统本质的基本理论的建立，如可控性、可观性、实现理论、典范型、分解理论等，使控制由一类工程设计方法提升为一门新的学科。同时，为满足从理论到应用，在高水平上解决很多实际中所提出的控制问题的需要，还发展了非线性系统、最优控制、自适应控制、辨识与估计理论、卡尔曼滤波、鲁棒控制等学科分支。

现代控制理论的发展，与其他学科一样，依赖于工业、科学、技术提出来的越来越高的要求。“现代控制理论”这一名称是在1960年卡尔曼的著名文章发表后出现的。而在此之前，钱学森教授在20世纪50年代就已经出版了专著《工程控制论》，并为当时几乎所有的论文以突出的形式加以引用。工程控制论，从广义上讲，是控制学科最具远见卓识的科学预见与理论，现代控制理论只是其中一个分支。

控制理论的进一步发展，可简要介绍如下。

① 其他动态系统的研究，如非线性系统、时变系统、随机系统、分布参数系统、大规模系统以及不确定系统等。非线性系统，其基础是李雅普诺夫理论，这一最普遍的原理起着重要的作用。时变系统方面，对“时变”的本质认识有了提升：一则随外界环境运动而变，二则自身参数内部运动变化，进而关于时变系统的研究已转入到不确定系统和自适应系统。大规模系统，当考虑了系统的内部信息结构时，称组成系统的各部分为子系统，系统就被称为大系统。这种考虑是期望用子系统及其关联的性质对大系统的性质作出某些判断，提供较简化的但常常保守的、一般化的分析方法。不确定系统，一方面是对相当多的实际系统的数学描述，但更重要的是在理论上为自适应控制、鲁棒控制等多个独立的学科间架起桥梁。

② 控制任务的多样化。经典和现代控制理论的任务在于寻求（反馈）控制，使得闭环系统稳定，这就是通称的镇定问题。但随着近现代工业的发展，工程技术不断地提出新的控制任务，它们远远不可能用镇定来概括，必须发展新的概念、理论与方法，实现与时俱进。如：由车间调度控制诞生了离散事件动态系统理论，化工过程、电力输配过程要求实现监控、预警和远动，机器人工业的各种跟踪操作和装配任务等。这些都远远超出了镇定的范畴。

### 1.3.2 复杂系统与智能控制

从对新兴学科或者概念的提出的一般过程来看，首先是提出概念、计划和研究内容，

并发表相关的见解和成果,并允许大家在各自的领域和认知层次对这一概念有不同的诠释。但似乎经过了若干年之后,已取得了这样的共识:新兴学科的定义及内容没有必要再进行争论,只要所研究的问题含义明确,那么获得的任何成果对学科的形成与发展都是有益的。复杂系统和智能控制的发展过程就是这样。

复杂系统通常是针对研究的对象而言的,可具有如下几方面的特征。

① 复杂对象:难以用常规数学工具建模并研究的对象。

② 复杂任务:镇定、调节、跟踪、同步、协同等任务。

③ 复杂环境:经典和现代控制理论通常假设对象是孤立的、自由的,但实际上却常常是开放的、受到外部环境制约的。这时,环境对控制过程的影响非常巨大。

通常可将具有上述三个特征的系统称为复杂系统。复杂系统在对象、环境及任务这三个方面中至少有一个是复杂的。解决这类系统的控制问题,必须跳出建立在简化的理想数学模型基础上的现代控制理论的框架,真正面对系统的复杂性,提出新的概念和模型,探索新的方法和手段。

对智能控制的理解,差异性很大。智能控制的最初想法是解决复杂系统的控制问题,这类问题同时融合了专家智能、有限的对象信息和各种信号采集方法,是一种典型的人、机、设备和通信之间的协同作用。到目前为止,智能控制也没有一个统一的定义,但智能控制作为控制理论的一个发展阶段,它包含异于传统控制的新内容,这是大家所共识的。综合现有的观点,对智能控制的研究途径有了一个初步的认识,即从分解复杂任务、感知复杂环境、控制复杂对象入手,研究和发​​展复杂系统智能控制的具有共性的基础理论和方​​法。

在现有的许多专业化学科与工程中,一方面针对特定对象的具体复杂性,综合运用智能控制策略,力求实现具体的复杂系统的智能控制;另一方面,针对更为抽象的一般智能控制原理,如“拟人”与“拟社会”原理、分解集结原理、递阶控制(层次递阶与时序递阶)原理、智能控制体系结构等,展开深入的研究。可以说当今智能控制研究存在着两种趋势:一种是分别从“现代控制理论”和“人工智能”这两个基地走向智能控制;另一种是分别从“专业化学科与工程”和“一般原理”这两个基地走向智能控制。不论从哪种趋势来看,从前一个基地出发进行智能控制的研究都是非常重要的和切实可行的。

综合现有的智能控制研究现状及发展趋势来看,研究复杂系统的智能控制,要综合运用控制理论、运筹学、人工智能、信息科学、计算机科学、网络学等最新成果,并加以发展和创新。智能控制的发展将需要并促进各相关学科中新的理论及技术手段的产生和发展,如感知环境的信息采集、数据处理与融合,以及实时处理和​​控制所必需的​​计算技术及实现手段的研究等,特别是将引起众多学科的相互交叉、渗透与融合。从现有的智能控制的研究状况可以看出,智能控制并不像最优控制那样,是一个有相当系统化理论的单一学科,而是包含若干学科的一个领域的统称,正如现代控制理论包括线性系统理论、最优控制、系统辨识和状态估计理论四大方面一样。因此,作为控制理论的一个发展阶段,智能控制的研究应当是多侧面的,每个从事有关研究的人员都可以以当前的研究为基地和出发点,脚踏实地地进行复杂系统智能控制的研究,为其发展作出自己的贡献。

智能控制的研究方兴未艾,它的研究范围及人们对它的认识也在不断发展之中,如经典控制理论和现代控制理论一样,它的建立是一个历史时期的任务。随着历史的发展,有

生命机体的适应机制、信息作用交互机制等的相关知识,将为人类本身在创建和谐社会、和谐自然及和谐心灵的历程中广为借鉴和应用,并在人类群体的生活、生产、再生活和再生产的循环往复中得到越来越多的应用,进而发挥出科学技术的更大威力。

## 1.4 智能控制简要发展历程

智能控制作为一个新的学科分支被社会公认,其标志是PRI、IEEE于1985年8月在美国纽约召开的智能控制专题会。智能控制原理和智能控制系统的结构这一提法成为这次会议的主要议题。这次会议决定在IEEE控制系统学会下设立一个IEEE智能控制专业委员会,这标志着智能控制这一新兴学科研究领域的正式诞生。从1987年开始,每年都举行一次国际研讨会,探讨智能控制的一些新进展和开拓的新领域。智能技术在国内也受到了广泛重视,中国自动化学会等于1993年8月在北京召开了第一届全球华人智能控制与智能自动化大会。如果从19世纪J. C. Maxwell分析蒸汽机的稳定性算起,自动控制实践和理论的发展至今已有近两百年的历史。一百多年以来,自控理论经历了传统控制理论和智能控制两个阶段。按照目前流行的观点,前者为低级阶段,后者为高级阶段。传统理论又分为经典控制理论和现代控制理论两个部分。历史实践证明:从传统控制理论到智能控制阶段,是自控理论的一次大飞跃。事实上,把自控理论的高级阶段命名为智能控制阶段,而没有称之为智能控制理论,是由一定的历史条件决定的。

以频域法为主导研究单变量系统动态特性的经典控制理论,走过了长达百年的漫长发展道路。经典控制理论是以H. Nyquist稳定判据和W. R. Evans根轨迹法为两大分支的系统理论,N. Wiener在总结前人研究和实践的基础上,出版了《控制论——或关于在动物和机器中控制和通信的科学》一书,阐明了经典控制理论的一般方法,这标志着经典控制理论已经成熟。从那时到现在,在经典控制理论指导下的负反馈调节实践,渗透到了社会生产的各个领域,为工业自动化发挥了巨大的作用,直到现在还长盛不衰。

随着空间技术的发展,产生了描述系统动态过程的状态空间法,这种方法既能处理多输入和多输出系统,也适用于非线性时变系统。Bellman于1957年提出了动态规划,R. E. Kalman于1959年发表了关于卡尔曼滤波器的论文,1961年庞特里亚金发现了极大值原理。状态空间法、动态规划、卡尔曼滤波、极大值原理构成了现代控制理论的基石。现代控制理论的基本内容可以概括为五个问题:最优控制,最优估计,随机最优控制,动态系统辨识,适应控制。

现代控制理论突破了经典控制理论的局限,它具有三个鲜明的特征。第一,采用时域的状态空间方法,包括线性系统、最优控制、系统辨识、随机控制等主要分支。第二,伴随着Von Neumann型计算机的发展而发展,以各种语言设计计算程序为主要设计手段。如迭代算法,解决了经典控制理论无法解决的单变量复杂关系的数值解问题;递推算法,成为计算机在线控制系统的基础。第三,系统设计和综合基于控制对象的数学模型,且模型的精度对控制指标性能的影响很大。

时至今日,现代控制理论的发展并未终止,其中最引人注目的有三个发展方向:其一,大系统理论,使用信息论观点探讨各种大系统的结构方案、总体设计中的分解和协



调；其二，自适应控制，为适应控制对象在运行过程中因扰动而引起的参数或数学模型变化，要求控制规律相应地发生变化；其三，鲁棒控制和  $H_{\infty}$  设计理论，把控制对象参数的变化事先纳入到系统设计中，使得设计出来的控制器在控制过程中不改变自己的参数和结构，在输入信息或系统参数发生有限扰动时，系统仍然正常运行。这些发展方向都离不开系统建模。

现代控制理论在实践上的应用远没有经典控制理论广泛和深入，这方面的原因有三个：其一，越来越多的经典控制理论中行之有效的办法已渗透到现代控制理论内部，如零点极点配置和频域方法，于是人们常常把这一部分卓有成效的运用功劳记到前者头上；其二，现代控制理论虽然解决了系统的能观、能控及多输入多输出，但这种解决结果用途不广，原因是多数多输入多输出系统的数学模型难以建立，或建模不精确；其三，许多生产过程需要专业技术人员的知识经验及思维分析，现代控制理论无能为力。

寻找不需要建立数学模型的控制方案，研究能够按照操作人员的智力、经验及意识发布指令的控制器（含辨识器），拉开了智能控制的帷幕。从 20 世纪 60 年代开始至今天，自控学者们发现，有多种学科可以用于自控领域。先后引进的主要代表学科依次是：① 20 世纪 60 年代引进了开创于 1956 年的人工智能技术，典型代表是 F. W. Smith 提出的采用性能模式识别学习最优控制方法；② 20 世纪 70 年代引进了首创于 1965 年的模糊集理论，典型代表是 Mamdani 在 1974 年设计的基于模糊语言描述控制规则的模糊控制器，1979 年 Mamdani 又成功研制出自组织模糊控制器；③ 20 世纪 80 年代引进了研究工作始于 1965 年的专家系统技术，出现了一大批以知识库和知识推理为核心部分的过程控制专家系统；④ 20 世纪 90 年代引进了开始于 1943 年的人工神经网络科学。这些学科后来被统称为智能学科。值得一提的是，各智能学科的学者们为寻找应用领域付出了艰苦的努力。由此可见，智能控制的提出是智能学科应用的结果，即针对已有的工业系统如何对其进行性能的提升和设计改造。

经典控制理论和现代控制理论都是建立在控制对象的精确的数学模型上的控制理论。经典控制理论在时域和频域上解决了单输入单输出线性系统的镇定问题；现代控制理论主要针对多变量系统从理论上解决了系统的可观、可控、稳定性，以及许多复杂系统的控制。但是，由于实际中的许多复杂系统都具有非线性、时变性、变结构、不确定性、多层次、多因素等特点，难以建立精确的数学模型，进而难以实施有效的控制，不适合高层决策问题等，因此，世界各国控制理论界都在探索新一代的控制理论去解决复杂系统的控制问题，以适应社会对自动化的要求。造成这类结果的原因主要有：① 现代控制理论依赖于理想化的数学模型；② 设计方法数学化，控制算法理想化；③ 缺乏人类思维的智能化。基于以上原因，控制理论逐步走向智能化，由此逐渐形成较为完善的智能控制的思想。近年来，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，从要解决问题领域的知识出发，充分利用熟练操作者的丰富经验、思维和判断能力，对上述复杂系统进行控制，逐步形成了基于知识不依赖于精确数学模型的智能控制理论的雏形。

智能或称人工智能是基于人们对客观事物的认识由浅入深、滚动地发展的，模拟人对客观对象或特定环境的响应与行为。以此构成的系统，有自适应系统、自学习系统、自组织系统、自诊断系统、自修理系统。智能控制系统的另一个类型是，基于知识工程和启发式的推理机制建立的专家系统、模式识别系统和自然语言理解系统。这类系统对复杂的任