

# 控制科学与技术的发展及其思考

郑南宁 贾新春 袁泽剑

(西安交通大学人工智能与机器人研究所 西安 710049)

(E-mail: nnzheng@mail.xjtu.edu.cn)

**摘 要** 简要介绍了控制科学的发展状况;讨论了传统控制理论在解决实际问题中的一些局限性以及控制科学当前面临的挑战;阐述了控制科学与人工智能和认知科学等新兴学科的结合将对处理复杂系统和社会经济中的一些重大课题提供有价值的科学理论和方法;强调了控制科学的进一步发展仍然要依赖于重大需求导向,使其在我国信息化带动工业化和现代化的进程中发挥重要的作用。

**关键词** 经典控制,智能控制,人工智能,智能信息处理

**中图分类号** TP18

## A SURVEY OF CONTROL SCIENCE AND TECHNOLOGY

ZHENG Nan-Ning JIA Xin-Chun YUAN Ze-Jian

(Institute of the Artificial Intelligence and Robotics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(E-mail: nnzheng@mail.xjtu.edu.cn)

**Abstract** In this paper, the development of control science is briefly introduced, and the limitations of traditional control theory and the challenge that control science faces are discussed. It is shown that integrating control science with artificial intelligence and cognitive science will provide valuable theories and methods for solving some important and knotty problems in complex systems and social economy. To insist on the demand-driven policy for further developing control science and technology will play an increasingly important role in the process of promoting and accelerating Chinese information industrialization and driving industrialization and modernization by informatization.

**Key words** Classical control, intelligence control, artificial intelligence, intelligence information processing

## 1 控制科学与技术的发展状况

控制科学与技术 在 20 世纪的人类科技进步中起到了举足轻重的作用,为解决当今社会

的许多挑战性问题产生了积极的影响,提供了科学的思想方法论;为许多产业领域实现自动化奠定了理论基础,提供了先进的生产技术和先进的控制仪器及装备.特别是数字计算机的广泛使用,为控制科学与技术开辟了更广泛的应用领域.

回顾近百年来的工程技术的发展,可以看到,20世纪的控制科学与技术是在实践的重大需求驱动下快速发展的,它经历了若干重要的发展时期,如20世纪初的Lyapunov稳定理论和PID控制律概念;20年代的反馈放大器;30年代的Nyquist与Bode图;40年代维纳的控制论;50年代贝尔曼动态规划理论和庞特里亚金极大值原理;60年代卡尔曼滤波器、系统状态空间法、系统能控性和能观性;70年代的自校正控制和自适应控制;80年代针对系统不确定状况的鲁棒控制;90年代基于智能信息处理的智能控制理论.中国控制科学界的许多学者为控制理论和技术的发展也做出重要的贡献<sup>[1,2]</sup>.随着计算机科学、网络 and 智能信息处理技术的进步,以及社会生产力发展的强烈需求,在如何解决日益增加的复杂系统、网络系统、多传感器信息融合、生物、基因、量子计算、社会经济与生态等重大问题上,控制科学和自动化领域的研究者在21世纪初面临着更大的、更为迫切的挑战.

近30年来,控制科学在非线性和分布参数系统控制、系统辨识、随机与自适应控制、鲁棒控制、离散事件系统和混合系统、智能控制等研究方向上取得了许多重要进展.在21世纪初的十几年,这些方向仍将是控制科学发展的主要研究方向<sup>[1,2]</sup>,它们之间的交叉与结合,将形成许多应用性更强的重要研究方向.

非线性控制是控制理论中一个重要的研究分支<sup>[3]</sup>,目前在方向的一些研究成果已应用于机器人、直升机与电力系统控制等实际控制工程中<sup>[4~8]</sup>.可以预见,非线性控制理论的进一步发展,将对多机器人系统协调操作与大型网络稳定安全为背景的非线性系统的控制工程等产生重大影响.混沌系统作为非线性系统的重要组成部分,在混沌生成、混沌抑制、混沌同步化、混沌通讯应用以及混沌信息编码等方面已经取得一些突破性的进展<sup>[5~7]</sup>.这些研究成果将对复杂系统的深入研究提供了有意义的借鉴.

自20世纪70年代开始,国内外学者开始重视分布参数系统的研究.分布参数系统是无穷维系统,一般由偏微分方程、积分方程、泛函微分方程或抽象空间中的微分方程所描述<sup>[9,10]</sup>.我国学者在细长体弹性振动系统的建模和振动控制、振动系统的谱分析、能控性和反馈镇定、一般无穷维系统的极大值原理、人口系统控制、人口预测和控制等方面都做出了重要贡献.

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,这就需要利用可以量测的系统输入和输出数据,来构造系统内部结构及参数的估计,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.20世纪90年代,线性系统辨识理论趋于成熟,而非线性系统的辨识仍处于发展阶段.近10年来,系统辨识领域有3个热点研究方向:基于鲁棒控制的数学模型要求的鲁棒辨识,基于特殊信号驱动下的系统辨识<sup>[11]</sup>和基于智能信息处理的非线性系统辨识<sup>[12,13]</sup>.

当实际系统受到的外界干扰和系统模型误差被看作为随机噪声时,我们把这类系统称为随机系统<sup>[14]</sup>.近年来,在非线性和随机滤波、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<sup>[15]</sup>.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,而我们设计的控制律大多都是基于系统的数学模型,为了保证实际系统对外界干扰、系统的不确定性等有尽可能小的敏感性,导致了研究系统鲁棒控制问题.近年来,对非线性系统的鲁棒适应控制<sup>[16]</sup>的研究已成为一个热点方向.人工神经网络方法、滑动模(sliding-mode)方法及鲁棒控制方法的结合可以设计出对一大类连续时间非线性系统稳定的自适应控制律<sup>[17]</sup>.20世纪80年代出现的 $H^\infty$ 设计方法和变结构控制(滑摸控制)推动了鲁棒控制理论的发展<sup>[18,19]</sup>.现在,系统 $H^\infty$ 范数已成为系统的重要性能指标<sup>[20]</sup>.如何有效利用过程信息来降低系统的不确定性,是鲁棒控制研究的重要内容.由于许多控制问题可归结为线性矩阵不等式(LMI)的研究,20世纪90年代中期出现了关于LMI的控制软件工具.近几年,非线性系统、时滞饱和系统、时滞故障系统的鲁棒综合控制问题已经成为新的热点研究方向<sup>[21~25]</sup>,而且已经有不少应用事例,例如,核反应堆的温度跟踪鲁棒控制、导弹系统的鲁棒自适应最优跟踪设计、机器人操作的鲁棒神经控制<sup>[26~29]</sup>.

系统的状态随离散事件发生而瞬时改变,不能用通常的动态方程来描述,一般称这类系统为离散事件动态系统(DEDS)<sup>[30]</sup>.对它的研究始于20世纪80年代初.目前已发展了多种处理离散事件系统的方法和模型,例如有限状态马尔科夫链、Petri网、排队网络、自动机理论、扰动分析法、极大代数法等.其理论已经应用于柔性制造系统、计算机通信系统、交通系统等.离散事件系统的研究虽然取得较大进展,但还没有一套完整的理论体系来评价离散时间系统模型与实际对象的差异.离散事件动态系统自然延伸就是混合动态系统.

包含离散事件动态系统(DEDS)和连续变量动态系统(CVDS)、两者又相互耦合作用的系统称为混合动态系统(HDS).关于混合系统最早的文献出现在1966年<sup>[31]</sup>.1979年瑞典人Cellier<sup>[8]</sup>首先引入混合系统结构的概念,把系统分为离散、连续和接口3个部分.1989年Golli<sup>[32]</sup>针对计算机磁盘驱动器模型引入混合系统的概念,把连续部分和接口部分结合起来进行研究.虽然混合系统的研究取得了一些成果,但仍处于发展阶段,其理论和应用研究仍是未来几年的研究热点.最近,混合系统的离散监督控制、离散时间混合系统的最优控制有了一些新的突破<sup>[13,33]</sup>,并且混合控制理论已逐步应用于电力系统的电压安全控制和机器人协调控制等领域<sup>[34,35]</sup>.

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.智能控制的主要目标是使控制系统具有学习和适应能力.现在,智能控制理论虽然取得了不少研究成果,但智能控制的理论体系还不够成熟.最近,基于模糊推理的系统建模<sup>[36]</sup>、神经网络模型参考自适应控制、神经网络内模控制<sup>[37]</sup>、神经网络非线性预测控制、混沌神经网络控制<sup>[38]</sup>等方面已有不少重要研究成果.智能控制理论有着广泛的应用,例如,基于神经动态规划的直升机的镇定控制<sup>[39]</sup>和航天轨道操作器的基于知识的分层控制<sup>[40]</sup>等.模糊推理、神经网络和遗传算法均具有模拟人类思维结构和方式的特点,将三者结合是智能控制研究的主要方向之一<sup>[26,41]</sup>.

## 2 传统与现代控制理论的局限性

传统控制器都是基于系统的数学模型建立的,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,这正是传统控制的本质.现代控制理论可以解决多输入、多输出(MIMO)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.20世纪80年代由加拿大学者 Zames 等人创始的  $H^\infty$  控制理论是鲁棒控制理论的重要发展.但这些方法本质上还是没有摆脱基于数学模型的定量化思想.传统控制,包括经典反馈控制、现代控制理论等,在应用中遇到不少难题.机理建模所不可避免的模型误差将导致估计器工作效果时好时坏,难以设计可靠、稳定的控制系统.

## 2.1 传统控制理论面临的问题

### 1) 控制对象的复杂性

传统控制理论的思想是建立在精确数学模型基础上的,然而对实际应用中的非线性、时变性、不确定性和不完全性的系统,一般无法获得精确的数学模型.对含有对象复杂性和不确定性的控制过程,很难用传统数学建模方法来解决建模问题.

### 2) 控制方法和手段单一性

在研究一个实际的控制对象时,为了得到理论上性能良好的控制器,经常提出一些比较苛刻的假设,然而这些假设在应用中往往与实际情况不相吻合.

根据现有的理论和技术描述复杂的控制过程会出现片面性、单一性,建立的模型有可能与实际过程相差甚远.

传统的控制对象往往局限于单一的、有确定的物理规律的系统.对于复合型系统,传统的控制方法就显得力不从心.

### 3) 无法满足控制性能的高要求

通常,控制系统需要具有所期望的控制精度、稳定性及动态性能.为了提高系统性能,传统控制系统可能变得相当复杂,从而使得系统的可靠性与其它系统性能成为不可调和的矛盾.

控制系统能够处理数值的、符号的、定性的、定量的、确定的和模糊信息等各类信息,即要求控制系统具有多层次的信息处理结构.传统的控制方法是很难做到这一点的.

## 2.2 现代控制理论面临的问题

### 1) 控制对象与控制对象所处的环境的变化

随着计算机网络技术普及与发展,基于网络的远程控制受到人们的关注.在网络环境下存在延时、数据的丢失、数据时序或序的变化及数据的非等间隔采样,使得网络环境的控制变得十分复杂和困难.同时,网络自身的安全与控制也是一个十分重要和非常棘手的问题.

不同性质、不同控制对象组合而成的混杂系统还缺乏理论支持和相应的技术手段.

多任务、多机器人的协调控制问题.

### 2) 理论问题

由于复杂系统的建模、稳定性与系统设计缺乏理论支撑和指导,有必要综合应用其它学科,如数学、信息科学、系统科学与认知科学的最新进展来建立一个解决复杂性问题的完整理论.

### 3) 控制要求

具有多种信息或传感信息的综合能力;具有自学习和自适应能力,能够自主调整控制结构;高可靠性;控制系统本身应该具有良好的控制特性;在出现故障和意外时,能及早进行自我故障诊断及排除.

现代控制系统应该具有良好的容错性和鲁棒性.

在一些情况下需要构造一个合理的人机协作的控制系统.

基于上述问题,控制科学界多年来一直在探索着新的方法,寻求更加符合实际的“发展轨迹”.近十年来,人工智能学科新的进展给人们带来了希望.由于得益于计算机科学技术和智能信息处理的高速发展,智能控制逐渐形成一门学科,并在实际应用中显示出强大的生命力.与此同时,许多控制学科领域的工作者也开始认识到,在许多系统中,复杂性不只是表现在高维性上,更多的则是表现在系统信息的模糊性、不确定性、偶然性和不完全性上.能否用人工智能的人工神经网络、模糊逻辑推理、启发式知识、专家系统等理论去解决难以建立精确数学模型的控制问题一直是我們十多年來追求的目标.

### 3 智能信息处理技术和控制科学的交融与结合

随着许多复杂的社会经济与生态问题和全球网络信息安全问题的出现及对许多复杂系统“涌现”机理的研究,许多科学家对传统的控制理论与非线性分析、随机系统、统计学习、人工智能、认知科学等学科的结合产生了极大兴趣,特别是将人工神经网络、模糊逻辑、遗传计算、专家系统、混沌和其它常规信号信息处理相结合,在新的层次上实现控制的自适应和反馈.

20世纪70年代,傅京孙教授提出把人工智能的直觉推理方法用于机器人控制和学习控制系统,并将智能控制概括为自动控制和人工智能的结合.傅京孙、Glorioso和Sardi等人从控制理论的角度总结了人工智能技术与自适应、自学习和自组织控制的关系,正式提出了建立智能控制理论的构想.1967年,Leondes和Mendel首次正式使用“智能控制”一词.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的处理方法,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.

经验主义和理性主义的模型与解释在很大程度上影响着人类的认知过程.人的经验是在多次的“反馈”过程中逐步积累.因此,对于智能和控制的关系,应该合理地发挥经验的作用,从进化的角度把智能活动看成动态发展的过程,即实现控制系统的“反馈”应是动态、分层、综合的过程.智能信息处理技术为“反馈”提供了更“聪明”的实现形式.

长期以来,人们在信息处理中的认知模型和基于感知的智能化信息处理研究领域做了不少工作,取得了很大进展,但其水平距人们所期望的还相差甚远.这主要是由于所使用的方法与人脑的认知信息处理过程有着重大差别,如频谱分析方法、句法分析和传统的人工智能方法等不具有开放性、动态性和灵活性等智能信息处理方法所应有的特征,因而它们只在特殊的应用领域内取得有限的成功.

事实上,人类的许多科学成就都来自对自然界中相应事物的观察和深入研究,例如人类由鸟类的飞行得到启发从而发明了飞机.同样,对信息的加工处理和智能控制系统的设计,

自然界也给我们提供了一个非常完美的范例——人脑. 因而智能信息处理系统的研究与发展需要借助于对大脑认知功能深入全面的研究. 人对外部世界的认知过程, 本质上是一个多传感信息的融合过程. 人脑通过对多通道信息的相互监督(self-supervision)完成学习, 从而获得对外部事物的知识; 通过对多传感信息的融合, 实现对目标的识别与理解; 并可以根据已有知识对各传感器实行控制. 这种前馈和反馈过程的完美结合, 使人脑具有极高的智能水平, 即使在噪声环境下或传感信息不可靠时, 人脑也能有效地完成其智能活动. 这为构造智能系统提供了完美的典范. 自从人工智能形成一个学科以来, 科学家们遵循着一条明确的指导思想, 即研究和总结人类思维的普遍规律, 并用计算机模拟它的功能实现. 正如飞机并不是简单模拟鸟而发明的, 因此智能信息处理系统的研究也不应该机械照搬人脑认知模式.

### 3.1 智能控制系统的基本功能特点

1) 容错性. 对复杂系统(如非线性、快时变、复杂多变量和环境扰动等)能进行有效的全局控制, 并具有较强的容错能力.

2) 多模态性. 定性决策和定量控制相结合的多模态组合控制.

3) 全局性. 从系统的功能和整体优化的角度来分析和综合系统.

4) 混合模型和混合计算. 对象是以知识表示的非数学广义模型和以数学模型表示的混合控制过程, 人的智能在控制中起着协调作用, 系统在信息处理上既有数学运算, 又有逻辑和知识推理.

5) 学习和联想记忆能力. 对一个过程或未知环境所提供的信息, 系统具有进行识别记忆、学习, 并利用积累的经验进一步改善系统的性能和能力.

6) 动态自适应性. 对外界环境变化及不确定性的出现, 系统具有修正或重构自身结构和参数的能力.

7) 组织协调能力. 对于复杂任务和分散的传感信息, 系统具有自组织和协调能力, 体现出系统的主动性和灵活性.

### 3.2 智能控制的主要研究分支

#### 1) 模糊逻辑控制

传统的控制问题一般是基于系统的数学模型来设计控制器, 而大多数工业被控对象是具有时变、非线性等特性的复杂系统, 对这样的系统进行控制, 不能仅仅建立在平衡点附近的局部线性模型, 需要加入一些与工业状况有关的人的控制经验. 这种经验通常是定性的或定量的, 模糊推理控制正是这种控制经验的表示方法, 这种方法的优点是不需要被控过程的数学模型, 因而可省去传统控制方法的建模过程, 但却过多地依赖控制经验. 此外, 由于没有被控对象的模型, 在投入运行之前就很难进行稳定性、鲁棒性等系统分析. 近年来, 一些研究者在模糊控制模式中引入模糊模型的概念, 出现了模糊模型. 模糊模型易于表达结构性知识, 成为模糊控制系统研究的关键问题<sup>[42~44]</sup>. 最近, 模糊控制理论成功地应用于飞行器的优化跟踪设计和产品加工过程<sup>[28,45]</sup>.

#### 2) 模糊预测控制

预测控制是为适应复杂工业过程控制而提出的算法, 它突破了传统控制对模型的束缚, 具有易于建模、鲁棒性好的特点, 对于解决大滞后对象控制问题是一条有效的途径. 模糊建模是非线性系统建模的一个重要工具, 也是复杂工业过程控制中广泛使用的方法. 把预测控制和模糊推理相结合<sup>[46]</sup>是很有吸引力的研究方向之一.

### 3) 神经网络控制

神经网络控制是研究和利用人脑的某些结构机理以及人的知识和经验对系统的控制。一般地,神经网络控制系统的智能性、鲁棒性均较好,它能处理高维、非线性、强耦合和不确定性的复杂工业生产过程的控制问题。显示了神经网络在解决高度非线性和严重不确定性系统的控制方面具有很大潜力。虽然神经网络在利用系统定量数据方面有较强的学习能力,但它将系统控制问题看成“黑箱”的映射问题,缺乏明确的物理意义,不易把控制经验的定性知识融入控制过程中。近来,在神经网络自适应控制<sup>[47]</sup>、人工神经网络阈函数的数字设计<sup>[48]</sup>、新的混合神经网络模型<sup>[49]</sup>等方面都有一些重要进展,如应用于机器人操作过程神经控制<sup>[28]</sup>、核反应堆的载重操作过程的神经控制<sup>[50]</sup>。近年来,神经网络、模糊推理、各种特殊信号的有机结合,还导致了一些新的综合神经网络的出现。例如,小波神经网络<sup>[51]</sup>、模糊神经网络<sup>[46,52]</sup>和混沌神经网络<sup>[38]</sup>的出现,为智能控制领域开辟了新的研究方向。

### 4) 基于知识的分层控制设计

对于复杂控制对象,单一地采用传统控制不能获得理想的系统性能,这时需要智能的控制策略。分层控制恰好体现了这一思想,底层采用传统的控制方法,高层采用智能策略协调底层工作,这就是基于知识的分层控制设计。这种控制设计理论已经应用到机器人、航天飞行器等领域<sup>[53~55]</sup>。

## 3.3 模糊推理和神经网络在控制中应用的区别

1) 模糊控制是基于规则的推理,神经网络则需要大量的数据学习样本。在有足够的系统控制知识情况下,基于模糊规则控制较好;如果系统有足够的各态遍历的学习样本,应用神经网络通过学习可得到满意的控制器。

2) 模糊映射在系统中是集合到集合的规则映射,神经网络则是点到点的映射。模糊逻辑容易表达人们的控制经验等定性知识,而神经网络在利用系统定量数据方面有较强的学习能力。

3) 神经网络控制将系统控制问题看成“黑箱”的映射问题,缺乏明确的物理意义,因而控制经验的定性知识不易融入控制中。模糊控制一般把对被控对象看作是“灰箱”。

## 4 控制理论的完善与控制技术的发展

自从美国科学家维纳于 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,并进入智能控制理论这一重要发展阶段,尽管还不够成熟。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总有些力不从心。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,我们必须发展新的控制模式。国内外控制科学界都在探索新的控制理论,以解决各类复杂系统的控制问题。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<sup>[56,57]</sup>。

控制科学所面临的挑战问题。

1) 高度自主的复杂工程系统的设计与控制。我们面临的复杂系统是一个由多个子系统构成,每个子系统本身都可能是一个复杂的、具有高度自主性的系统,需要有效地协调这些

子系统的行为. 所设计的工程系统不仅有很高的复杂度, 而且同时还要能在人监督最少的情况下运行良好, 表现出高度自主的行为.

2) 智能控制与基于人类行为的智能化信息处理. 智能控制方法是对传统控制方法的扩展和提高, 也是设定和完成控制目标时实现高自主度所必需的, 在不确定条件下的规划、大量数据的处理中, 进行有效的复杂过程控制.

3) 复杂工业系统的故障快速处理、系统重构与修复, 复杂环境中仿人机器人的设计和制造, 社会系统中的重大事变(战争、自然灾害、金融危机)的应急指挥和组织系统都存在着如何适应外部世界不确定性的动态变化问题. 人类的行为特征充分反映了对外界环境的反应能力. 研究基于人类行为特征的信息处理原理和方法, 即研究系统在不确定性动态环境中的反应能力和对外界事物充分感知的能力<sup>[58]</sup>.

4) 学习控制系统. 学习是自动化系统一直追求的目标. 它是指系统能够根据环境或目标改变其行为. 学习控制系统应能够在受控过程发生变化时修改控制规律.

5) 综合智能处理方法. 目前, 人们在自适应、监督与迭代式设计等方面做了大量的研究和开发工作. 由于将人工智能技术引入到控制领域中, 可用来处理其它一些学习特征, 如估计、聚类、重构、推理、创造、删除等功能, 特别是需要综合人工智能中的多种技术来实现上述系统功能<sup>[59, 60]</sup>.

6) 复杂系统的理论体系的形成. 复杂系统的主要特征归纳为: 系统动力学模型的不确定性、测量信息的粗糙性和不完整性、动态行为或扰动的随机性、离散层次和连续层次的混杂性、系统动力学的高度非线性、状态变量的高维性和分布性、子系统及层次多样性和各子系统间的强耦合性、部分子系统的无法建模性等. 复杂系统控制在规模上、复杂性及灵活性上将大大突破传统的自动控制在概念和方法上的局限性. 它要求控制系统对被控对象的动力学模型要有“学习”和“识别”能力, 对环境和扰动的变化要有“适应”和“鲁棒”能力.

一般地, 提高系统的智能度主要有两种途径: 一是在基于古典精确逻辑的基础上, 通过增加并行度来加快系统的演化速度, 从而提高系统的智能; 二是开发新的高智能的逻辑形式. 前者, 主要是考虑计算速度, 这同样有两种途径, 一方面在原有算法基础上开发相应的并行算法; 另一方面是设计出高效且具有高并行度的新型算法. 后者, 主要是从系统本身出发来提高它的智能度, 其主要手段是通过对人或高等动物以及自然界的研究中得到一些启示, 并应用于新系统的设计中. 综合智能信息处理将以神经网络并行分布处理和基于专家系统等人工智能符号逻辑推理为两种重要的基本方式, 并与模糊逻辑、进化计算、混沌动力学、信号处理与变换等方法综合集成, 特别是软计算(神经网络、模糊逻辑和概率推理)、不确定性推理与自组织及仿生计算等.

## 5 结束语

20 世纪以来, 控制科学与工程对近代世界技术文明的许多成就做出了巨大贡献, 发展了许多研究方法和开创了交叉科学, 它是现代技术科学的思想基石和方法学. 控制科学与工程的历史是辉煌的, 但我们应该面对客观世界的现实, 更加积极地、严谨地开拓和创造未来. 控制科学在解决 21 世纪的社会复杂问题以及跨学科问题方面具有不可替代的重要作用, 也是能够提供最适当、最聪明方法的学科领域之一. 今后的控制科学方法需要



以一种集成的方式来考虑系统以及相关的设计要求. 将控制科学与其它领域密切结合, 解决我国经济与社会发展中基础技术科学、工业、农业、能源、国防、乃至国家安全所涉及的控制与自动化的重大基础理论问题, 带动社会全面信息化和工业化的一些关键技术的发展.

复杂系统和智能系统的研究是 21 世纪控制科学发展的主要方向, 宋健院士在北京 IFAC 大会上所做的“智能控制——跨越世纪的目标”的报告, 在一定程度上指明了今后控制科学发展的方向. 控制科学的发展面临着严峻问题与挑战, 又存在良好发展机遇. 为了解决面临的难题, 第一要把传统的控制科学的研究进一步深化、综合化, 重视控制硬件、软件和智能信息处理方法的结合, 实现控制系统的智能化; 第二要大力推进控制科学与计算机科学、信息科学、系统科学以及人工智能的有机结合, 为控制科学的发展提供新思想、新方法和新技术; 第三要以重大需求为导向推动控制科学与技术的更高层次的发展, 使控制科学与技术在我国以信息化带动工业化和社会经济的快速健康发展中发挥重要作用.

### 参 考 文 献

- 1 Bennett S. A brief history automatic control. *IEEE Control Systems*, 1996, **16**(3):17~25
- 2 陈翰馥, 郭 雷. 现代控制理论的若干进展及展望. *科学通报*, 1998, **43**(1):1~7
- 3 Isidori A. *Nonlinear Control Systems*. Berlin: Springer-Verlag, 1989
- 4 Huang C Q, Wang X G, Wang Z G. A further result of the nonlinear mixed  $H_2/H_{\infty}$  tracking control problem for robotic system. *Journal of Robotic Systems*, 2002, **19**(1):25~36
- 5 Carroll T L. Using the cyclostationary properties of chaotic signals for communication. *IEEE Trans. Circuits and Systems I*, 2002, **49**(3): 357~362
- 6 Williams C. Chaotic communications over radio channels. *IEEE Trans. Circuits and Systems I*, 2001, **48**(12): 1394~1404
- 7 Tang S, Chen H F *et al.* Message encoding and decoding through chaos modulation in chaotic optical communications. *IEEE Trans. Circuits and Systems I*, 2002, **49**(2):163~169
- 8 Cellier F E. *Combined continuous/discrete system simulation by use of digital computer: Techniques and tools*. Zurich, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 1979
- 9 Bensoussan A, Prato G D, Delfour M C *et al.* *Representation and Control of Infinite Dimensional Systems*, Volumes 1 and 2. Boston: Birkhauser, 1992
- 10 Li S J, Yu J Y, Zhu G T. Stabilization of high eigenfrequencies of a beam equation with generalized viscous damping. *SIAM J. Control and Optimization*, 1999, **37**(6): 1767~1779
- 11 Zhiwen Z, Leung H. Identification of linear systems driven by chaotic signals using nonlinear prediction. *IEEE Trans. Circuits and Systems I*, 2002, **49**(2): 170~180
- 12 Siettos C I, Bafas G V, Boudouvis A G. Truncated Chebyshev series approximation of fuzzy systems for control and nonlinear system identification. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, **126**(1): 89~104
- 13 Liu R H, Zhang Q, Yin G. Asymptotically optimal controls of hybrid linear quadratic regulators in discrete time. *Automatica*, 2002, **38**(3): 409~419
- 14 Chen H F, Guo L. *Identification and Stochastic Adaptive Control*. Boston: Birkhauser, 1991
- 15 Landau I D, Lozano R, M'Saad M. *Adaptive Control*. London: Springer, 1998
- 16 Han H, Su C-Y. Robust fuzzy control of nonlinear systems using shape-adaptive radial basis functions. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, **125**(1): 23~38
- 17 Ge S S, Wang Cong. Adaptive NN control of uncertain nonlinear pure-feedback systems. *Automatica*, 2002, **38**(4): 671~682
- 18 Zhou K, Doyle J C, Glover K. *Robust and Optimal Control*. Englewood, Cliffs: Prentice-Hall, 1996
- 19 Byrnes C I, Priscoli F D, Isidori A. *Output Regulation of Uncertain Nonlinear Systems*. Boston: Birkhauser, 1997

- 20 Bolzern P, Colaneri P *et al.* Guaranteed  $H_{\infty}$  robustness bounds for Wiener filtering and prediction. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2002, **12**(1):41~56
- 21 Raffaella D S, Alberto I. On the output regulation for linear systems in the presence of input saturation. *IEEE Trans. Automatic Control*, 2001, **46**(1): 156~160
- 22 Yong Y C, Zongli L, Tingshu H. Stability analysis of linear time-delay systems subject to input saturation. *IEEE Trans. Circuits and Systems I*, 2002, **49**(2): 233~240
- 23 Liu D, Molchanov A. Criteria for robust absolute stability of time-varying nonlinear continuous-time systems. *Automatica*, 2002, **38**(4): 627~637
- 24 Niculescu S-I, Verriest E I, Dugard L, Dion J-D. Stability and robust stability of time-delay systems: A guided tour. In: *Stability and Control of Time-Delay Systems*. Eds. London: Springer-Verlag, 1997, **228**
- 25 Jia Xinchun, Zheng Nanning. Reliable grading robust stabilization for uncertain time-varying system Via dynamic compensater. *Progress on Natural Science(Chinese)*, 2002, **12**(9):60~67
- 26 Chang W, Jin B P, Young H J, Chen G. Design of robust fuzzy-model-based controller with sliding mode control for SISO nonlinear systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, **125**(1): 1~22
- 27 Sampath V, Palanki S, Cockbum J C, Corriou J-P. Robust controller design for temperature tracking problems in jacketed batch reactors. *Journal of Process Control*, 2002, **12**(1): 27~38
- 28 Uang H-J, Chen B-S. Robust adaptive optimal tracking design for uncertain missile systems: A fuzzy approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, **126**(1): 63~87
- 29 Barambones O, Etxebarria V. Robust neural control for robotic manipulators. *Automatica*, 2002, **38**(2): 235~242
- 30 Balemi S, Kozák P, Smedinga R. *Discrete Event Systems: Modeling and Control*. Boston: Birkh-auser, 1993
- 31 Witsenhausen H S. A class of hybrid-state continuous-time dynamic systems. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1966, **11**(6): 665~683
- 32 Golli A, Varaiya P. Hybrid dynamic systems. In: *Proc. of the 28th IEEE Conference on Decision and Control*, Tampa, Florida, USA, 1989. 2708~2712
- 33 Moor T, Raisch J, O'Young S. Discrete supervisory control of hybrid systems based on l-complete approximations. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 2002, **12**(1):83~107
- 34 Popovic D H, Hill D J, Wu Q. Optimal voltage security control of power systems. *International Journal of Electrical Power and Energy System*, 2002, **24**(4): 305~320
- 35 Egerstedt M, Hu X. A hybrid control approach to action coordination for mobile robots. *Automatica*, 2002, **38**(1): 125~130
- 36 Oh S-K, Pedrycz W, Park B-J. Hybrid identification of fuzzy rule-based models. *International Journal of Intelligent Systems*, 2002, **17**(1):77~103
- 37 Hunt J, Sbarbaro D. Neural networks for nonlinear internal model control. *IEE PROC. Control Theory and Applications*, 1991, **138**(5): 431~438
- 38 李耀勇,郑南宁.对处于混沌状态的神经网络的控制. *计算机学报*,1998, **21**(增刊):142~146
- 39 Enns R, Si J. Apache helicopter stabilization using neural dynamic programming. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2002, **25**(1): 19~25
- 40 Goulet J F, De Silva C W, Modi A K, Misra A K. Hierarchical knowledge-based control of a deployable orbiting manipulator. *Acta Astronautica*, 2002, **50**(3):139~148
- 41 Venkat A N, Gudi R D. Fuzzy segregation-based identification and control of nonlinear dynamic systems. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2002, **41**(3): 538~552
- 42 Rojas I, Gonzalez J, Rojas F, Damas M, Fernandez F J, Pomares H. A two-stage approach to self-learning direct fuzzy controllers. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2002, **29**(3): 267~289
- 43 Yi J Q, Yubazaki N, Hirota K. A new fuzzy controller for stabilization of parallel-type double inverted pendulum system. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, **126**(1): 105~119
- 44 Siettos C I, Bafas G I, Boudouvis A G. Truncated Chebyshev series approximation of fuzzy systems for control and

- nonlinear system identification. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, **126**(1): 89~104
- 45 Kuo H C, Wu L J. Fuzzy control of a heat-bending system. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **120**(1~3): 186~201
- 46 Yin H, Wong S C, Xu J, Wong C K. Urban traffic flow prediction using a fuzzy-neural approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2002, **10**(2): 85~98
- 47 Huang S N, Tan K K, Lee T H. Adaptive motion control using neural network approximations. *Automatica*, 2002, **38**(2): 227~233
- 48 Basterretxea K, Tarela J M, Del Campo I. Digital design of sigmoid approximator for artificial neural networks. *Electronics Letters*, 2002, **38**(1): 35~37
- 49 Gao L, Lonev N W. New hybrid neural network model for prediction of phase equilibrium in a two-phase extraction system. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2002, **41**(1):112~119
- 50 Khajavi M N, Menhaj M B, Suratgar A A. A neural network controller for load following operation of nuclear reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 2002, **29**(6):751~760
- 51 Wai R-J, Chang J-M. Intelligent control of induction servo motor drive via wavelet neural network. *Electric Power Systems Research*, 2002, **61**(1): 67~76
- 52 Jurado F, Ortega M, Cano A, Carpio J. Neuro-fuzzy controller for gas turbine in biomass-based electric power plant. *Electric Power Systems Research*, 2002, **60**(3): 123~135
- 53 Goulet I F, De Silva C W, Modi V I, Misra A K. Hierarchical knowledge-based control of a deployable orbiting manipulator. *Acta Astronautica*, 2002, **50**(3):139~148
- 54 De Silva, C W, MacFarlane A G J. Knowledge-based control approach for robotic manipulators. *International Journal of Control*, 1988, **50**(1):249~273
- 55 Goulet J F. Intelligent hierarchical control of a deployable manipulator[M S Thesis]. Department of Mechanical Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1999
- 56 李少远,席裕庚,陈增强,袁著祉. 智能控制的新进展. 控制与决策, 2000, **15**(1):1~5
- 57 郑南宁. 认知过程的信息处理和新型人工智能系统. 中国基础科学, 2000, **8**: 9~18
- 58 Karny M, Nagy I, Novovicova J. Mixed-data multi-modelling for fault detection and isolation. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2002, **16**(1): 61~83
- 59 Guijarro B B, Alonso B A, Fontenla R O. Intelligent analysis and pattern recognition in cardiocographic signals using a tight coupled hybrid system. *Artificial Intelligence*, 2002, **136**(1): 1~27
- 60 Lau H C W, Ip R W L, Chan F T S. An intelligent information infrastructure to support knowledge discovery. *Expert Systems with Applications*, 2002, **22**(1):1~10

**郑南宁** 教授,中国工程院院士.研究领域为智能信息处理、机器人视觉与模式识别等.

**贾新春** 教授,1988年获中科院系统科学研究所硕士学位.研究领域为鲁棒控制、智能信息处理、广义系统等.

**袁泽剑** 博士研究生.研究领域为智能信息处理、机器人视觉与模式识别等.