

中国智能控制 40 年

蔡自兴^{1,2}

1. 中南大学智能系统与智能控制研究所, 长沙 410083

2. 湖南省自兴人工智能研究院, 长沙 410116

摘要 介绍了智能控制的发展历程, 概括了中国智能控制基础研究、学术研究和科技研究的成果, 总结了国内智能控制教育、教学和人才培养概况, 指出了中国智能控制的存在问题, 提出了发展智能控制的建议。

关键词 智能控制; 中国智能控制开发; 自动控制

人工智能的产生与发展, 促进了自动控制向着它的当今最高层次——智能控制(intelligent control)发展。智能控制代表了自动控制的最新发展阶段, 也是应用人工智能实现人类脑力劳动和体力劳动自动化的一个重要领域^[1]。

自动控制在发展过程中既面临严峻挑战, 又存在良好发展机遇。为了解决自动控制面临的难题, 一方面要推进控制硬件、软件和智能技术的结合, 实现控制系统的智能化; 另一方面要实现自动控制科学与人工智能、计算机科学、信息科学、系统科学和生命科学等的结合, 为自动控制提供新思想、新方法和新技术, 创立自动控制的交叉新学科——智能控制, 并推动智能控制的发展^[2-3]。

智能机器(intelligent machine)是能够在各种环境中自主地或交互地执行各种拟人任务(anthropomorphic tasks)的机器。拟人任务即仿照人类执行的任务。智能控制是驱动智能机器自主地实现其目标的过程。或者说, 智能控制是一类能够独立地驱动智能机器实现其目标的自动控制^[3-4]。

为了聚焦研究目前国际上公认的“智能控制”, 本

文讨论范围局限于讨论基于人工智能理论和生物智能机理的控制, 既不包括“广义智能控制论”, 也不涉及与智能控制相关但有所区别的“智能系统”、“智能化系统”、“智能检测”以及一般的“智能自动化”等领域。

结合笔者自身经历, 介绍国内外智能控制的简要发展历程, 概括中国智能控制基础研究、学术研究和科技研究取得的成果。

1 智能控制发展过程

智能控制是一门具有强大生命力和广阔应用前景的新型自动控制科学技术, 它采用各种智能化技术实现复杂系统和其他系统的控制目标。从智能控制的发展过程和已取得的成果来看, 智能控制的产生和发展正反映了当代自动控制的发展趋势, 是历史的必然。

智能控制第一次思潮出现于 20 世纪 60 年代, 智能控制的早期开拓者们提出和发展了几种智能控制的思想和方法。20 世纪 60 年代中期, 自动控制与人工智能开始交接。1965 年, 著名的美籍华裔科学家 Fu 等^[5](傅京孙, 美籍华人)首先把人工智能的启发式推理规则用

收稿日期: 2018-07-07; 修回日期: 2018-08-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60234030); 国家自然科学基金重大专项(90820302)

作者简介: 蔡自兴, 教授, 研究方向为人工智能、智能控制和智能机器人学, 电子信箱: zxcai@csu.edu.cn

引用格式: 蔡自兴. 中国智能控制 40 年[J]. 科技导报, 2018, 36(17): 23-39; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.17.004

于学习控制系统,1971年Fu^[6]又论述了人工智能与自动控制的交接关系,由于他的重要贡献,已成为国际公认的智能控制的先行者和奠基人^[7]。

20世纪60年代中期至70年代中期,中国未能加入早期国际智能控制研究行列。1978年3月,全国科学大会在北京召开,发出“向科学技术现代化进军”的号召,迎来了中国科学的春天^[8]。

随着人工智能和机器人技术的快速发展,智能控制的研究出现一股又一股新的热潮,并获得持续发展。各种智能控制系统,包括专家控制、模糊控制、递阶控制、学习控制、神经控制、进化控制、免疫控制和智能规划系统等已先后开发成功,并被应用于各类工业过程控制系统、智能机器人系统和智能制造系统等。

20世纪70年代中期,Feigenbaum牵头的专家系统开发获得成功,在20世纪七八十年代世界范围内取得可观的经济效益^[9]。1983年Hayes等^[10]提出专家控制系统。1986年,Åström等^[11]发表了“专家控制”的相关论文。在20世纪七八十年代,中国的专家控制和专家规划系统开发蓬勃发展,出现不少成果^[12-14]。

模糊控制是智能控制的又一活跃研究领域。Zadeh^[15]于1965年发表了他的著名模糊集合(fuzzy sets)论文,为模糊控制开辟了新的领域。此后,国内外对模糊控制的理论探索和实际应用两个方面,都进行了广泛研究,并取得一批令人感兴趣的成果^[16-22]。

Saridis对智能控制系统的分类和智能递阶控制做出杰出贡献。他将智能控制发展道路上的最远点标记为智能控制,其团队建立的智能机器理论采用“精度随智能降低而提高”(increasing perception with decreasing intelligence, IPDI)原理和三级递阶结构,即组织级、协调级和执行级,这些思想成为智能递阶控制的基础^[23-24]。智能递阶控制思想对各类智能控制系统具有普遍的指导作用^[25-26]。

Pitts等^[27]于1943年提出一种“似脑机器”(mindlike machine)的神经网络模型。20多年来,基于神经网络控制的理论和机理已获进一步开发和应用^[28]。以神经控制器为基础的神经控制系统已在非线性和分布式控制系统及学习系统中得到不少成功应用,中国的神经控制研究与应用成果令人瞩目^[29-32]。

20世纪80年代以来,中国学者先后提出一些新的智能控制理论、方法和技术。周其鉴等^[33-34]于1983年发表了关于仿人控制的论文,之后又发展为仿人智能控

制专著^[35]。吴宏鑫等^[36-38]提出的“航天器变结构变系数的智能控制方法”和“基于智能特征模型的智能控制方法”等,为智能控制器的设计开拓了一条新的道路。蔡自兴等^[39-42]于2000年提出和开发了进化控制系统和免疫控制系统,把源于生物进化的进化计算机制与传统反馈机制相结合,用于控制可实现一种新的控制——进化控制;而把自然免疫系统的机制和计算方法用于控制,则可构成免疫控制^[43-46]。进化控制和免疫控制是两种新的智能控制方案,推动了智能控制研究进入新世纪以来向新的领域发展。

单一智能控制往往无法满足一些复杂、未知或动态系统的控制要求。20世纪90年代以来,特别是进入21世纪以来,各种智能控制互相融合,“取长补短”构成众多的“复合”智能控制,开发某些综合的智能控制方法来满足现实系统提出的控制要求。所谓“智能复合控制”指的是智能控制方法与其他控制方法(经典控制和现代控制)的集成,也包括不同智能控制技术的集成。仅就不同智能控制技术组成的智能复合控制而言,就有模糊神经控制、神经专家控制、进化神经控制、神经学习控制、专家递阶控制和免疫神经控制等。以模糊控制为例,就能够与其他智能控制组成模糊神经控制、模糊专家控制、模糊进化控制、模糊学习控制、模糊免疫控制及模糊PID控制等智能复合控制^[47-48]。

“多真体系统”(multi-agent system, MAS)是一种分布式人工智能系统,能够克服单个智能系统在信息资源、时空分布和系统功能上的局限性,具备并行、分布、交互、协作、适应、容错和开放等优点,因而在20世纪90年代获得快速发展,并在21世纪以来得到日益广泛的应用。在这种背景下,分布式智能控制系统也应运而生,成为智能控制的一个新的研究领域^[49-50]。

随着网络技术的快速发展,网络已成为大多数软件用户的交互接口,软件逐步走向网络化,为网络服务。智能控制适应网络化趋势,其用户界面已逐步向网络靠拢,智能控制系统的知识库和推理机也逐步与网络接口交接。与传统控制和一般智能控制不同的是,网络控制系统并非以网络作为控制机理,而是以网络为控制媒介;用户对受控对象的控制、监督和管理,必须借助网络及其相关浏览器和服务器来实现。无论客户端在什么地方,只要能够上网就可以对现场设备及其受控对象进行控制与监控。智能控制系统与网络系统的深度融合而形成的网络智能控制系统,是当今

智能控制的一个新的研究和应用方向,已成为21世纪智能控制的一个新亮点^[51-55]。

进入21世纪以来,智能控制在更高水平上复合发展,并实现与国民经济的深度融合。特别是近年来,各先进工业国家竞相提出人工智能、智能制造和智能机器人的发展战略,为智能控制的发展提供了前所未有的发展机遇。中国政府发布的《中国制造2025》《新一代人工智能发展规划》和《机器人产业发展规划2016—2020》等国家重大发展战略,为智能控制基础研究及其在智能制造、智能机器人、智能驾驶等领域的产业化注入活力^[56-59]。

2 中国智能控制科技成果

1967年,Leondes等^[60]首次正式使用“智能控制”一词。这一术语的出现要比“人工智能”晚11年,比“机器人”晚47年。可见国际开始研究智能控制的时间较晚。相对于人工智能和机器人学,中国的智能控制研究虽然起步晚于智能控制的发源地美国,但自国际智能控制学科诞生后,就基本上保持紧密跟踪状态,许多研究与国际智能控制前沿研究保持同步,并有所创新。

2.1 形成智能控制学科

随着智能控制新学科形成的条件逐渐成熟,1987年1月,在美国费城由IEEE控制系统学会与计算机学

会联合召开了智能控制国际会议(International Symposium on Intelligent Control, ISIC)^[61]。这是有关智能控制的第一次国际学术盛会,中国学者与来自美国、欧洲、日本及其他国家和地区的代表出席了这次学术盛会。提交大会报告和分组宣读的论文及专题讨论,显示出智能控制的长足进展。这次会议及其后续影响表明,智能控制作为一门独立学科已正式登上国际学术和科技舞台。

自20世纪90年代以来,国内对智能控制的研究进一步活跃起来,相关学术组织不断出现,学术会议经常召开。已成立了一些关于智能控制的学术团体,如中国人工智能学会智能控制与智能管理专业委员会及智能机器人专业委员会,中国自动化学会智能自动化专业委员会等。与智能控制相关的刊物,如《模式识别与人工智能》《智能系统学报》和《CAAI Transaction on Intelligence Technology》(《智能技术学报》)期刊等先后创刊。这些情况表明,智能控制作为一门独立的新学科,已在中国建立起来了。1993年由中国学者组织召开的首届“全球华人智能控制与智能自动化大会”,后修改更名为“智能控制与自动化世界大会”(World Congress on Intelligent Control and Automation, WCICA),至今已举行13届,说明在中国已经形成智能控制学科,而且对国际智能控制的发展起到很大的促进作用^[62-63]。表1简要介绍了历届智能控制与自动化世界大会的情况。

表1 历届智能控制与自动化世界大会情况

Table 1 Situations of all previous WCICA

序号	大会名称	召开时间	举行地点
1	第1届全球华人智能控制与智能自动化大会	1993年8月26—30日	北京
2	第2届全球华人智能控制与智能自动化大会	1997年6月23—27日	西安
3	第3届全球智能控制与智能自动化大会	2000年6月28日—7月2日	合肥
4	第4届全球智能控制与智能自动化大会	2002年6月10—14日	上海
5	第5届全球智能控制与智能自动化大会	2004年6月15—19日	杭州
6	第6届全球智能控制与智能自动化大会	2006年6月21—23日	大连
7	第7届全球智能控制与智能自动化大会	2008年6月25—27日	重庆
8	第8届智能控制与智能自动化世界大会	2010年7月7—9日	济南
9	第9届智能控制与智能自动化世界大会	2011年6月21—25日	台北
10	第10届智能控制与智能自动化世界大会	2012年7月6—8日	北京
11	第11届智能控制与智能自动化世界大会	2014年6月27—30日	沈阳
12	第12届智能控制与智能自动化世界大会	2016年6月12—15日	桂林
13	第13届智能控制与智能自动化世界大会	2018年7月4—8日	长沙

此外,还举办了中国智能自动化学术会议、全国智能控制专家讨论会等,交流智能控制和自动化的研究成果。在其他相关会议上,也有反映国内智能控制、模糊控制、神经控制及其应用研究成果的论文发表。例如,在1994年举行的第二届智能控制专家讨论会上,就有一批大会报告以及其他一些优秀的科技论文宣读,内容十分丰富,反映出中国智能控制的蓬勃发展^[64]。又如,在中国智能自动化学术会议上,也有颇具影响的智能控制报告和论文发表^[65-66]。

2.2 基础理论与方法研究颇具特色

中国的智能控制研究在跟踪国际发展步伐的同时,也创造了具有中国特色的智能控制研究成果。智能仿人控制、基于智能特征模型的智能控制方法、生物控制论、神经学习控制、智能控制四元结构理论、免疫控制系统、多尺度智能控制等是这些成果的突出代表。

2.2.1 基于智能特征模型的智能控制方法

吴宏鑫及其团队在智能控制理论与方法上取得了创新成果,他们提出的“航天器变结构变系数的智能控制方法”和“基于智能特征模型的智能控制方法”等,为复杂航天器和工业过程智能控制器的设计开拓了一条新的道路^[36-38]。此外,还在交会对接和空间站控制等方面进行了创新研究。其理论方法已应用于“神舟”飞船返回控制、空间环境模拟器控制、卫星整星瞬变热流控制和铝电解过程控制等控制系统。

2.2.2 多学科、多层次、系统化的智能控制方法

王飞跃是国际上较早进入智能控制领域研究的学者之一。他采用多学科、多层次、系统化的研究方法,从交叉性的角度探索智能控制,从结构、过程、算法和实现方面建立了一个解析和完备的智能控制理论,并应用于许多工程中的复杂系统的控制和管理。例如,代理控制方法(agent-based control)、智能指挥与控制体系、智能交通系统、智能空间和智能家居系统以及综合工业自动化等领域^[67-68]。他主持的“智能控制理论与方法的研究”获得2007年国家自然科学奖二等奖。此外,王飞跃还提出了“平行控制”思想,是一种从学习控制发展到智能控制的学习控制方法论,将实际系统与人工系统相结合,用人工系统的计算实验完善实际系统优化控制策略,帮助实现对复杂系统的有效控制^[69]。

2.2.3 智能控制系统和生物控制论研究

涂序彦也是较早进入智能控制领域研究的学者。1976年他在国内率先开展了智能控制研究,1980年主

持研制的“模糊控制器”等智能控制器,多次获河北省科技进步奖。1986年承担国家自然科学基金项目“智能控制系统”,提出“多级自寻优智能控制器”“多级模糊控制”和“产生式自学习控制”等新方法,还将智能控制应用于冶金等生产过程^[70-71]。撰写了《生物控制论》专著,推动了国内生物控制论研究^[72]。

2.2.4 模拟人的控制行为与功能的仿人智能控制

仿人控制(human-simulated control)综合了递阶控制、专家控制和基于模型控制的特点,实际上可以把它看作一种混合智能控制。仿人控制的思想是周其鉴等于1983年正式提出的,现已形成了一种具有明显特色的控制理论体系和比较系统的设计方法^[33-35]。仿人控制的基本思想是在模拟人的控制结构的基础上,进一步研究和模拟人的控制行为与功能,并把它用于控制系统,实现控制目标。

2.2.5 智能控制四元交集结构理论

智能控制的学科结构理论体系是智能控制基础研究的一个重要课题。自1971年傅京孙提出把智能控制作为人工智能和自动控制的(二元)交接领域之后,萨里迪斯和蔡自兴分别提出三元交集结构^[29]和四元交集结构^[73-74]。这些智能控制学科结构思想,有助于对智能控制的进一步深刻认识。蔡自兴于1987年提出的四元智能控制结构(图1),认为智能控制是自动控制(AC或CT)、人工智能(AI)、信息论(IT或IN)和运筹学(OR)四个子学科的交集。智能控制四元交集结构理论成果,已被收入了《中国大百科全书》^[75]。

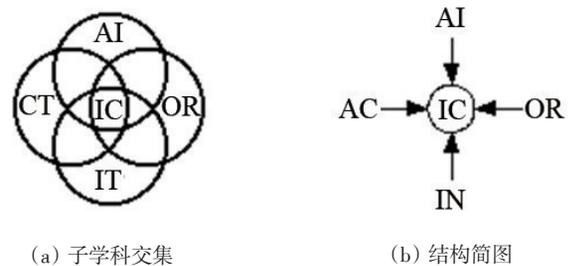


图1 智能控制的四元结构

Fig. 1 Four-element structure of intelligent control

2.2.6 开发钢铁工业神经学习控制系统

吕勇哉对国际智能控制做出重要贡献。1989年因把专家系统和知识工程用于工业控制而获美国仪器学会UOP技术奖。1996年和1995年发表在美国《Iron and Steel Engineer》杂志的论文《Meeting the challenge

of intelligent system technologies in the iron and steel industry》《Integrated neural system for coating weight control of hot dip galvanizing line》先后获得美国钢铁工程师协会的 Kelly 最优论文奖。后者是世界上第一个用于热浸镀线的神经学习控制系统。1998 年他因“对工业系统建模与智能控制的贡献”而当选 IEEE Fellow^[76-77]。

2.2.7 智能制造过程的多尺度智能控制

李涵雄提出智能制造是个多尺度复杂性和不确定性的过程^[78]。一个工厂通常拥有一个以上包含不同过程的生产线。每个过程可能集成多种机器或装备组合。整个制造过程可视为递阶结构,从底层的机器控制,到中层的监督控制和生产调度,再到高层的企业管理。对于不同层级的特性与动力学差异需要不同的连续和离散控制作用。

制造过程具有很多不同类型的装备与系统,集成为展现多尺度动态特性的递阶结构系统。制造控制是一种多尺度建模与控制(multiscale modeling and control)任务,涉及底层过程的智能传感、系统离线的优化设计、在线多变量过程控制和高层决策的智能学习等。该领域的系统性工作应当采用自底向上的方法逐步建立起来,从动态建模到系统设计、过程控制和智能监控,再到全厂管理控制。这个开发任务将是一个长期的挑战。

2.2.8 纳米机器人控制取得新的突破

纳米操作机器人是一种纳米级空间操作的机器人,中国在该领域的研究已取得突破^[79-80]。中国科学院沈阳自动化研究所微纳米课题组利用纳米操作机器人在单分子病毒三维可控操作方法研究方面取得最新科研成果。2005 年,中国科学院沈阳自动化研究所建立了国内第一台纳米操作机器人系统,并在此基础上率先开展了与生命科学相交叉的前沿科学研究,在单分子病毒三维操作方面的应用正是该研究的代表。针对该问题,纳米课题组以基于 AFM 的纳米操作机器人为基础,研究了针对腺病毒的三维空间操作控制方法。实验结果表明,利用基于局部扫描技术的三维操作策略,不仅能够实现对病毒分子在三维空间中的自由操作,还能根据设计构筑出全病毒分子的三维纳米结构,这不仅为病毒浸染细胞过程的实时检测迈出了坚实一步,同时为发展基于病毒分子的新型三维纳米电子器件提供了技术途径。

2.3 专著论文发表丰硕

国际上,美国等国家较早开展智能控制研究,中国也保持同步,出版了一批智能控制专著和论文汇编。其中在 2000 年前出版的有代表性的专著包括:(1) 1993 年出版的《Intelligent control: aspects of fuzzy logic and neural nets》,主要介绍模糊逻辑基础和模糊控制,几乎没有神经控制的内容^[81];(2) 1996 年出版的《Industrial intelligent control: Fundamentals and applications》,主要介绍智能控制基础知识及控制系统建模、估值、优化、故障与诊断,只用很少篇幅(一章)简要介绍神经网络自适应控制、模糊逻辑控制和专家控制等^[82];(3) 1997 年出版的《Intelligent control: Principles, techniques and applications》,是国际上首部全面系统地介绍智能控制各种系统的工作原理、基本技术及其应用的英文专著^[83];(4) 1999 年出版的《Intelligent control based on flexible neural networks》,全书介绍神经网络基本知识和自校正控制,局限于神经网络基础和少量神经网络控制的例子^[84]。后 2 部专著由吕勇哉和蔡自兴完成。

如同这个时期出版的其他智能控制专著一样,除了《Intelligent control: Principles, techniques and applications》外,上述专著局限于介绍模糊逻辑和神经网络的基础知识,只着重讨论了逻辑控制或神经控制,未能全面系统地介绍智能控制的各个研究与应用领域。至于智能控制论文汇编,如《Introduction to Intelligent control and autonomous control》《Intelligent control systems: Theory and applications》《Intelligent control systems using soft computing methodologies》,都是许多智能控制研究者学术论文的汇编,也发挥了重要的参考作用^[85-87]。

中国学者在智能控制研究开发和应用的基础上,发表了许多以智能控制为主题的论著。这些著作总结和交流了智能控制研究成果,对智能控制的进一步研究起到重要的指导作用。自 1987 年人工智能著作开禁以来,全国已编著出版了近 100 部智能控制专著和教材。表 2 列出国内智能控制专著的部分代表作,在一定程度上反映出中国智能控制的研究成果,对中国智能控制研究和国内外学术交流起到重要作用。

中国学者在国内发表的与智能控制相关的论文数以万计,仅从维普资讯中文期刊服务平台查询到的“智能控制”相关论文,据不完全统计 2004 至今可达 28780 篇。

表2 智能控制专著代表作出版情况

Table 2 Some monograph publications of intelligent control in China

序号	专著名称	作者	出版社	出版年份
1	智能控制	蔡自兴	电子工业出版社	1990
2	智能控制系统及其应用	王顺晃, 舒迪前	机械工业出版社	1995
3	模糊控制原理与应用	褚静, 等	机械工业出版社	1995
4	Intelligent control: Principles, techniques and applications	Cai Zixing	World Scientific Publisher	1997
5	智能控制导论	罗公亮, 秦世引	浙江科学技术出版社	1997
6	智能信息处理和智能控制	边肇祺, 郑大钟, 阎平凡, 李衍达, 等	浙江科学技术出版社	1997
7	智能控制——基础与应用	蔡自兴	国防工业出版社	1998
8	机器人的智能控制方法	王灏, 毛宗源	国防工业出版社	2002
9	仿人智能控制	李祖枢, 肖亚庆	国防工业出版社	2003
10	基于网络环境的智能控制	周祖德	国防工业出版社	2004
11	从复杂到有序: 神经网络智能控制理论新进展	李翔	上海交通大学出版社	2006
12	网络控制系统	张庆灵, 邱占芝	科学出版社	2007
13	工业智能控制技术与应用	孙彦广	科学出版社	2007
14	未知环境中移动机器人导航控制理论与方法	蔡自兴, 贺汉根, 陈虹	科学出版社	2009
15	复杂网络控制系统动力学及其应用	方建安, 唐漾, 苗清影	科学出版社	2011
16	智能控制在变频传动系统中的应用	曾允文	机械工业出版社	2012
17	Key techniques of navigation control for mobile robots under unknown environment	Cai Zixing, et al	Science Press	2016

下面给出一部分值得一提的具有代表性的智能控制论文或者大会报告。

1980年, 涂序彦等编著出版《生物控制论》专著, 研究生理调节系统、神经系统控制论、人体经络控制系统^[70]。

1981年, 蒋新松在《自动化学报》上发表《人工智能及智能控制系统概述》综述论文^[88]。

1983年, 周其鉴、柏建国等在国际会议上发表仿人控制设计的论文, 提出仿人智能控制的思想^[33]。

1989年, 张钟俊等在《信息与控制》上发表《智能控制与智能控制系统》的综述论文, 得到广泛引用^[74]。

1991年, 蔡自兴等在中国人工智能学会第7届学术大会上作了《智能控制研究的进展》大会报告^[89]。

1993年8月, 杨嘉墀和戴汝为在第一届全球华人智能控制与智能自动化大会上作《智能控制在国内的进展》的大会报告, 全面总结了我国智能控制在理论方法研究、控制系统设计和实际应用各方面的进展^[90]。

1995年, 杨嘉墀发表了《中国空间计划中智能自主控制技术的发展》论文^[91]。

1999年, 宋健在国际自动控制联合会(IFAC)第14

届世界大会开幕式上作了《Intelligent control: A goal exceeding the century》的报告, 对智能控制的最高目标、研究途径和注重创新等给予富有远见的指导^[92]。

1999年吴宏鑫等提出基于智能特征模型的智能控制, 2005年又提出组合自适应模糊控制方法, 并用于航天器和月球探测车的控制^[93-94]。

此外, 张明廉等^[95]、李洪兴等^[96]、李祖枢等^[97]研究了多级倒立摆的平衡与摆起的自稳定智能控制理论与方法。

2.4 科技研究成果显著

在过去40年, 特别是近20年来, 中国广大智能控制科技工作者对智能控制进行了多方面研究, 取得不俗的科技研究成果。表3示出了2000—2017年国家自然科学奖、技术发明奖和科技进步奖及吴文俊人工智能科学技术奖(简称吴文俊奖)中涉及智能控制奖项的统计。

2.5 应用研究成果

如果说中国智能控制的理论基础研究开展还不够广泛深入, 那么其应用研究就比较普遍, 应用领域也比较广泛, 举例简介智能控制在一些行业的应用状况。

表3 2000—2017年智能控制获奖项目统计

Table 3 Award-winning projects of intelligent control in China

序号	获奖项目名称	获奖人员代表	第一获奖单位	获奖类别与等级/获奖年份
1	智能控制理论与方法的研究	王飞跃	中国科学院自动化研究所	国家自然科学基金二等奖/2007
2	混沌反控制与广义 Lorenz 系统族的理论及其应用	陈关荣,吕金虎,等	香港城市大学	国家自然科学基金二等奖/2008
3	仿生机器鱼高效与高机动控制的理论与方法	谭民,侯增广,等	中国科学院自动化研究所	国家自然科学基金二等奖/2017
4	基于神经网络逆的软测量与控制技术及其应用	戴先中,孙玉坤,等	东南大学	国家技术发明二等奖/2009
5	铝电解系统智能控制系统及推广应用	冷正旭,李劫,等	中国铝业公司	国家科技进步二等奖/2004
6	机器人焊接空间焊缝质量智能控制技术及其系统研究	吴林,陈善本,等	哈尔滨工业大学	国家科技进步二等奖/2004
7	混合智能优化控制技术及应用	柴天佑,马鸿烈,等	东北大学	国家科技进步二等奖/2006
8	带钢轧机运行安全保障和生产环节智能控制	熊诗波,杨洁明,等	太原理工大学	国家科技进步二等奖/2006
9	大型高精度铝合金构件制备重大装备智能控制技术及应用	桂卫华,喻寿益,等	中南大学	国家科技进步二等奖/2007
10	大型多用途智能控制试验机研制及系统化与产业化	张建民,张建卫,等	天水红山试验机有限公司	国家科技进步二等奖/2009
11	空调器舒适性智能控制技术研究及产业化	王友宁,屈治国,等	青岛海尔空调器有限公司	国家科技进步二等奖/2015
12	矿山超大功率提升机全系列变频智能控制技术与装备	谭国俊,涂兴子,等	中国矿业大学	国家科技进步二等奖/2017
13	构建信息科学理论基础,创新人工智能核心理论	钟义信	北京邮电大学	第1届吴文俊奖成就奖/2011
14	创建人工智能系统新理论,开拓人工智能系统新技术	涂序彦	北京科技大学	第2届吴文俊奖成就奖/2012
15	网络化智能控制与调度方法及其应用	王万良	浙江工业大学	第2届吴文俊奖科技进步一等奖/2012
16	模糊系统的概率表示与空间四级倒立摆的控制	李洪兴	大连理工大学	第2届吴文俊奖创新一等奖/2012
17	拓展知识工程核心理论,创新分布智能理论基础,构建智能科学理论体系	史忠植	中国科学院计算技术研究所	第3届吴文俊奖成就奖/2013
18	拓展智能科学理论,创新智能科学教育,推动智能科学发展	蔡自兴	中南大学	第4届吴文俊奖成就奖/2014
19	城市污水处理过程智能优化控制关键技术及应用	乔俊飞	北京工业大学	第6届吴文俊奖科技进步一等奖/2016
20	一类欠驱动机器人系统的轨迹规划与跟踪控制	方勇纯,孙宁,张雪波	南开大学	第6届吴文俊奖自然科学二等奖/2016

2.5.1 在过程控制和智能制造中的应用

从20世纪80年代开始,智能控制在石油化工、航空航天、冶金、轻工等过程控制中获得迅猛的发展。除了上面讨论过的航空航天领域外,在石油化工领域将神经网络和优化软件与专家系统结合,应用于炼油厂的非线性工艺过程控制,有效地提高生产效率,节约生

产成本^[98-99]。在冶金领域,采用模糊控制的高炉温度控制系统,可有效提高炉内温度控制精度,进而提高钢铁冶炼质量^[100-102]。随着《中国制造2025》的贯彻执行,中国在智能制造领域的控制必将获得快速发展。

2.5.2 在机器人控制中的应用

目前,智能控制技术已经应用到机器人技术的许

多方面。基于多传感器信息融合和图像处理的移动机器人导航控制与装配、机器人自主避障和路径规划、机器人非线性动力学控制、空间机器人的姿态控制等^[103-106]。近年来,智能服务机器人、智能医疗机器人、无人驾驶车辆、物流机器人和其他专用智能机器人已获得快速发展和广泛应用;其中,人机合作控制、非结构环境中导航与控制、分布式多机器人系统控制、类脑机器人控制与决策以及基于云计算和大数据的网络机器人决策与控制等技术正在得到大力开发与应用。用智能控制技术武装机器人,将极大推动机器人行业的发展,提高机器人的智能化程度和行业水平^[107-108]。

2.5.3 在智能电网控制中的应用

智能控制对电力系统的安全运行与节能运行方面具有重要的意义。在电网运行的过程中,将智能控制技术应用于电网故障检测、测量、补偿、控制和决策系统中,能够实现电网的智能化,提高电网运行效率。采用模糊逻辑控制技术能够及时发现电网中的安全隐患,提高智能电网应急能力,增强电网的可靠性、抗干扰能力,保证智能电网系统的稳定运行。将专家控制系统应用于电网规划,可以充分利用电力专家的经验 and 知识,不断优化电网的规划质量,提高电网优化效率^[109-111]。

2.5.4 在现代农业控制中的应用

先进设备在中国农业中的应用不断增加,农业生产过程的智能化程度也越来越高。将智能控制技术应用于农事操作过程中,能够调节植物生长所需的温度、肥力、光照强度、CO₂浓度等环境因素,实现对植物生长因素的精准控制,实现规模化的发展和农业最大利益。同时建立农业数据库,使生产者能够大面积、低成本、快速准获取农业信息,根据市场确定农产品数量,实现农业数据处理的标准化与智能化^[112-113]。

2.5.5 智能交通控制与智能驾驶

智能交通是一种新型的交通系统或装置,是人工智能技术与现代交通系统融合的产物。智能交通系统需要具备对驾驶环境和交通状况的全面实时感知和理解的能力,其中具备自主规划与控制以及人机协同操作功能的智能车辆是实现未来智能交通系统的关键。对自动驾驶车辆或者辅助驾驶车辆来说,利用环境感知信息进行规划决策后需要对车辆进行控制,例如对路径的自动跟踪,此时性能优良的控制器成为了智能车辆必不可少的部分,成为智能车辆的关键^[114]。

中国在智能驾驶领域取得不少研究成果。例如,2011年7月14日,国防科技大学、中南大学、吉林大学联合开发的自主车辆,完成了中国首次长距离(长沙至武汉)高速公路自动驾驶实验,实现了在密集车流中长途安全驾驶,创造了中国无人车自动驾驶的新纪录,标志着中国无人车在复杂环境识别、智能行为决策和控制等方面实现了新的突破,达到世界先进水平^[115]。2012年7月,军事交通学院研制的JJUV-3实验车完成天津-北京城际高速公路的自动驾驶实验,具备跟车行驶和自主超车能力。2015年12月,百度无人驾驶车在国内首次实现了城市、环路及高速道路混合路况下的全自动驾驶^[114]。

此外,智能控制在智能安防、智能军事、智能指挥、智能家电、智慧城市、智能教育、智能管理、社会智能、智能军事和智能经济等领域,也已在中国获得日益广泛的应用。

3 中国智能控制教育与人才培养

智能控制教育和人才培养是智能控制学科发展、科学研究与产业应用的重要基础。自20世纪80年代中期开始,中国部分高校开设了智能控制课程。经过30多年的推广、提升与发展,现在中国大部分重点高校的智能科学与技术、自动化/自动控制、机械电子工程等专业都开设了智能控制类的本科生和研究生课程。有些课程的教学与教改取得有益经验,已成为国家级精品课程和国家级精品资源共享课程等。表4给出中国已出版的主要智能控制教材情况。其中,蔡自兴所著《智能控制》是1988年由国家教育部计算机与自动控制教材编审委员会招投标、胡保生主审和评审通过,并于1990年由电子工业出版社正式出版的全国统编教材,也是中国首部智能控制系统教材,同时是国际上首部系统全面介绍各种智能控制系统的专著^[3]。李士勇等^[116]编著的《模糊控制和智能控制理论与应用》则是中国首部智能控制研究生教材。这些智能控制课程和智能控制教材对于中国智能控制学科建设、科技知识传播和人才培养起到不可或缺的重要作用。

表5示出了入选国家级质量工程的智能控制类相关精品课程名单^[117]。这些课程仅是全国质量工程国家级课程很小的一部分。例如,国家教育部2016年7月15日公布第一批国家级精品资源共享课2686门,其中,

本科教育课程 1767 门, 高职教育课程 759 门, 网络教育课程 160 门^[18]。而智能控制类课程虽然榜上有名, 但只有 3 门, 约占 0.1%。不过, 这些智能控制类课程来之不

易, 已在改革中不断发展壮大, 并对全国智能控制教学发挥了重要的示范与辐射作用。

“全国智能科学与技术教育暨教学学术会议”自

表 4 智能控制教材代表作

Table 4 Some representative teaching materials of intelligent control in China

序号	著作名称	作者	出版社	出版年
1	智能控制(全国统编教材)	蔡自兴	电子工业出版社	1990
2	模糊控制和智能控制理论与应用	李士勇, 夏承光	哈尔滨工业大学出版社	1990
3	智能控制理论与方法	李人厚	西安交通大学出版社	1994
4	智能控制系统——模糊逻辑、专家系统、神经网络控制	王耀南	湖南大学出版社	1996
5	智能控制理论与技术	孙增圻, 张再兴, 邓志东	清华大学出版社, 广西科学技术出版社	1997
6	智能控制技术	易继锴, 侯媛彬	北京工业大学出版社	1999
7	人工智能控制	蔡自兴	化学工业出版社	2005
8	智能控制基础理论及应用	张化光, 孟祥萍	机械工业出版社	2005
9	智能控制	李少远, 王景成	机械工业出版社	2005
10	智能控制基础	韦巍, 何衍	清华大学出版社	2006
11	智能控制理论及应用	王耀南, 孙炜	机械工业出版社	2006
12	智能控制原理与应用	蔡自兴	清华大学出版社	2007
13	智能控制导论	蔡自兴	中国水利水电出版社	2007
14	智能控制理论及应用	韩力群	机械工业出版社	2007
15	网络控制系统与应用	关守平, 周玮, 尤富强	电子工业出版社	2008
16	网络控制技术	谢昊飞, 李勇, 王平, 张军	机械工业出版社	2009
17	智能控制技术	罗兵, 甘俊英, 张建民	清华大学出版社	2011
18	智能控制导论	蔡自兴	中国水利水电出版社	2013
19	智能控制	李士勇, 李研	清华大学出版社	2016
20	柔性智能控制	刘丽	西安交通大学出版社	2017

表 5 国家级和部分省部级智能控制课程或项目

Table 5 Some courses and projects of intelligent control enrolled in national and provincial level in China

序号	获奖项目/课程名称	主持人	学校名称	批准年份
1	全国工科电子类专业优秀教材一等奖/智能控制	蔡自兴	中南大学	1996
2	国家级精品课程/智能控制	蔡自兴	中南大学	2006
3	国家级精品课程/智能控制基础	师黎	郑州大学	2006
4	全国双语教学示范课程/智能控制基础	师黎	郑州大学	2007
5	国家级教学团队/智能科学与技术教学团队	何新贵	北京大学	2008
6	国家级教学团队/智能科学基础系列课程教学团队	蔡自兴	中南大学	2008
7	国家级精品资源共享课程/智能控制	蔡自兴	中南大学	2016
8	国家级精品资源共享课程/智能控制基础	师黎	郑州大学	2016
9	国家级精品资源共享课程/楼宇智能化技术	牛云陞	天津中德职业技术学院	2016

2003年以来已举办12次,是中国人工智能教育与教学领域具有特色和权威的学术盛会,对于人工智能及其相关学科的教育教学、学科建设和人才培养发挥了关键作用^[119-120]。这个系列会议的一个重要内容就是智能控制教育、教学和教改成果。

2005年首次在北京大学开设的智能科学与技术专业,已发展到全国55所大学,仅这些大学的“智能”专业每年就培养大约3000名智能科学技术专业人才。据估计,近30年来,全国高校已培养人工智能和智能控制等相关学科的硕士和博士数以千计,本科毕业生数以万计。这些高层次的智能科技人才是中国发展人工智能和智能控制的最为宝贵的财富,必将成为中国智能科技跨越式发展的中坚力量。

4 中国智能控制研发中存在的问题

中国智能控制在发展过程中出现如下问题。

1) 研究以跟踪为主,创新不够。

在智能控制的发展过程中,中国智能控制科技工作者在模糊控制、递阶控制、专家控制、神经控制、多真体(MAS)控制、网络控制等领域都能够紧跟国际发展潮流,但自主创新成果尚不够多,国际影响力有待提高。在仿人控制、进化控制和免疫控制等领域,中国学者虽然提出相关思想,为这些领域的开创与发展做出贡献,但跟进力度不足,国际影响需要进一步扩大。国内重复研究的多,创造性研究的少,停留于实验成果的多,能够在工程上应用的少。需要各方面共同努力,尽快转变这一局面。

2) 缺乏更高水平的研究成果。

从前面列出的智能控制科学技术研究成果可以看出,中国智能控制研究虽然已取得一大批值得庆贺的成果,但缺乏更高级别的奖项。在国家科学技术奖中,智能控制研究所获奖项均为国家级二等奖,还没有实现国家级一等奖零的突破。在这些二等奖奖项中,又是以科技进步奖为主,自然科学奖和技术发明奖成果较少。在吴文俊人工智能科技奖中,智能控制研究奖项的科技水平也有需要进一步提高。由此可见,中国智能控制研究的整体水平有待提高,不仅要向更高的国家科技水平前进,而且要努力攀登智能控制研究的国际高峰。

3) 服务国民经济重大战略不够。

中国智能控制研究与应用的整体水平不够高的原因,除了研究力度不够和缺乏创新驱动外,还与服务国民经济重大战略不够有关。需要将智能控制的研究、开发和应用与国民经济的重大战略对接,在服务国家重大需求中寻找发展机遇。现在,人工智能出现蓬勃发展的大好形势,国家制定了一系列重大发展战略,特别是《中国制造2025》和《新一代人工智能发展规划》^[56-57]。智能控制应该也能够在这些国家战略框架内占有一席之地,谋求与人工智能取得同步发展。

4) 产业化规模和核心技术有待扩大。

中国智能控制产业已建立了初步基础,但如同人工智能产业一样,中国的智能控制产业的规模还不够大,关键核心科技的创新能力还不够强,自主知识产权也不够多。

5) 急需培养各层次智能控制人才问题。

中国智能控制已有一批领军人才,但不够多,特别是中青年科技骨干有待迅速锻炼成长,需要从国家发展战略角度有计划地培养智能控制各个专业和行业的高素质人才,各层级的人才一个也不能少。

6) 值得高度重视学风问题。

长期以来,在智能控制教材和课程建设中出现一些不正之风;教材抄袭、评优送礼、弄虚作假时常可见。这些做法有失学术公平公正,违背科学道德,不利智能控制学科健康发展,令人痛心。

5 发展中国智能控制的对策建议

根据中国智能控制的发展历史与现状以及发展机遇和存在问题,现就发展中国智能控制问题提出如下建议,供研究和决策参考。

1) 打牢智能控制科技基础。

中国智能控制的科技基础要进一步打牢。一方面要加强智能控制理论基础和方法研究,实现智能控制某些基础和理论研究的突破,为智能控制应用建立可靠基础;另一方面,要建立一批国家级智能控制技术与产业研发基地,为智能控制产业化提供技术保障。

2) 加大国家政策支持力度。

建议在现有国家发展战略的基础上,为智能控制提供相应的政策支持。例如,在《新一代人工智能发展

规划》中,专题提供发展我国智能控制的规划;在《中国制造 2025》中考虑智能控制对智能制造的作用和发展策略;在《机器人产业发展规划(2016—2020)》中重点部署智能机器人的控制发展规划。需要把握当前大好机遇,出台鼓励政策,加大政府经费支持力度,吸引社会金融资本投入。

3) 抓住发展机遇实现产业化。

在上述国家发展战略的大力支持下,智能控制产业要主动发力,与智能制造、智能机器人等产业密切融合,在服务国民经济发展过程中壮大自身,大力推进智能控制的产业化。智能制造、智能机器人、智能交通、智能家居、智能电网、电动汽车、智能建筑、智能电网、智慧农业及食品加工等行业都需要开发与应用各种智能控制系统,是智能控制的广阔用武之地。

4) 培养智能控制各级人才。

智能控制教育是智能控制科技和产业发展以及高素质人才培养的根本保证。中国现有的自动化、智能科学与技术、机电工程等专业和控制科学与工程等学科已为国家培养了一批智能控制科技人才,但远未能满足智能控制科技和产业发展的需要。需要在人工智能、智能科学与技术、控制科学与工程等一级学科下,设立智能控制二级学科,培养足够数量的智能控制高素质人才。此外,要建立职业技术学院和技工学校,对口培养智能控制中层科技人员和技术工人,全面保证智能控制产业发展的需求。要特别鼓励民间教育机构开办培训机构,培养智能控制人才。

5) 加强国际科技学术交流。

“智能控制与自动化世界大会”已成为国内外智能控制科技与学术交流的重要平台,每届大会都吸引大批海外学者和师生参加。此外,中国每年有众多的智能控制工作者走出国门参加与智能控制相关的国际学术会议,也有一定数量的学者出国参加智能控制国际合作研究。不过,中国智能控制的国际交流总体上有待加强。有必要加强与国外的智能控制科技合作,共同研究智能控制的基本理论与方法,开发重要的智能控制应用系统。同时,充分利用国内开放的环境,邀请国外高层智能控制专家来华进行合作研究,促进中国智能控制整体水平的进一步提升。

6) 成立智能控制学术组织。

迄今为止,国内智能控制学术和产业组织只有中国人工智能学会智能控制与智能管理专业委员会及中

国自动化学会智能自动化专业委员会,还没有一个单一的智能控制学术组织。为适应智能控制科技和产业发展需要,应当筹备成立智能控制学会或智能控制专业委员会,并加强联合,创造条件建立中国智能控制产业联盟,为推动中国智能控制产业的发展服务。

7) 创办全国智能控制刊物。

国内还没有一份公开出版的智能控制的科技学术刊物,有必要创造条件,筹备出版《智能控制》之类的期刊,报道与宣传国内智能控制研究开发成果,为国内外智能控制科技与学术交流服务。

8) 加强智能控制科学普及。

在已有成绩的基础上,进一步加强智能控制科普工作,包括建立各级智能控制科普基地,鼓励智能控制科普创作,出版智能控制科普作品和科普杂志,举行智能控制系统和智能机器人科普竞赛,举办智能控制夏令营和冬令营活动,普及智能控制知识,培养广大青少年对智能控制科技的兴趣,为中国智能控制的发展培养大批后备军。

6 结论

结合笔者自身经历回顾智能控制在国内外的发展过程,归纳中国智能控制的科学研究和科技教育的代表性成果,指出中国智能控制的存在问题,提出发展中国智能控制的建议,可供研究与决策参考。

智能控制已成为自动控制的一个新的里程碑,发展成为一种日趋成熟和日臻完善的控制手段,并获得日益广泛的应用。作为人工智能的一个重要研究与应用领域,智能控制同人工智能一道已进入一个前所未有的大好发展新时期,走上发展的康庄大道。

要认真学习与贯彻习近平总书记对发展中国人工智能的指示,紧密对接《新一代人工智能发展规划》和《中国制造 2025》等国家战略,不失时机地大力发展中国的智能控制科技与产业,高度重视智能控制人才培养,迎头赶超智能控制国际先进水平,为建设中国成为制造强国和智能强国做出历史性贡献^[12]。

参考文献(References)

- [1] 蔡自兴, 张钟俊. 智能控制的若干问题[J]. 模式识别与人工智能, 1988(2): 45-51.
Cai Zixing, Zhang Zhongjun. Some issues on problems of intelli-

- gent control[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1988(2): 45–51.
- [2] Levis A H, Marcus S I, Perkins W R, et al. Challenges to control: A collective view[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1987, 32(4): 275–285.
- [3] 蔡自兴. 智能控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 1990.
Cai Zixing. *Intelligent control*[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 1990.
- [4] 蔡自兴. 智能控制[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2004.
Cai Zixing. *Intelligent control*[M]. 2nd ed. Beijing: Electronics Industry Press, 2004.
- [5] Fu K S, Walts M. A heuristic approach to reinforcement learning control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1985, 10(4): 390–398.
- [6] Fu K S. Learning control systems and intelligent control systems: An intersection of artificial intelligence and automatic control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1971, 16(1): 70–72.
- [7] 模式识别拓荒者是一位中国人[EB/OL]. [2018–08–24]. <http://wap.sciencenet.cn/blog-951291-1130920.html?mobile=1>.
Pattern recognition pioneer is a Chinese[EB/OL]. [2018–08–24]. <http://wap.sciencenet.cn/blog-951291-1130920.html?mobile=1>.
- [8] 袁振东. 1978年全国科学大会: 中国当代科技史上的里程碑[J]. *科学文化评论*, 2008, 5(2): 37–57.
Yuan Zhendong. 1978 National Science Conference: Milestone in the history of science and technology in contemporary China[J]. *Science & Culture Review*, 2008, 5(2): 37–57.
- [9] Felgenbaum E A. The art of artificial intelligence: Themes and case studies of knowledge engineering[C]//International Joint Conference on Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1977: 1014–1029.
- [10] Hayes–Roth F, Waterman D A, Lenat D B. Building expert systems[M]. Boston: Addison–Wesley Longman Publishing Co. Inc., 1983.
- [11] Åström K J, Anton J J, Arzen K E. Expert control[J]. *Automatica*, 1986, 22(2): 277–286.
- [12] Cai Z X, Fu K S. Robot planning expert systems[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway NJ: IEEE, 1986: 1973–1978.
- [13] Cai Z X. An expert system for robot transfer planning[J]. *Journal of Computer Science & Technology*, 1988, 3(2): 153–160.
- [14] Wang Y N, Tong T S, Zhang J, et al. Real–time expert intelligent control system REICS[J]. *Algorithms and Architectures for Real–Time Control*, 1992, 25(20): 307–312.
- [15] Zadeh L A. Fuzzy sets[C]//Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, & Fuzzy Systems. River Edge: World Scientific Publishing Co. Inc., 1996: 394–432.
- [16] Zadeh L A. A rationale for fuzzy control[M]//Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems. River Edge: World Scientific Publishing Co. Inc., 1996: 123–126.
- [17] Karray F. Intelligent control: Fuzzy logic applications[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1995, 10(1): 113–114.
- [18] Liu Y M. A generation of fuzzy category and constructions of invertible elements in the fuzzy category[J]. *Journal of Sichuan University*, 1978(4): 117–122.
- [19] 应明生. 多值逻辑 Lukasiewicz–Tarski 系统的函数保核完备性[J]. *计算机学报*, 1989(4): 307–309.
Ying Mingsheng. The functional kernel–preserving completeness of Lukasiewicz–Tarski’s multi–valued logic system[J]. *Chinese Journal of Computers*, 1989(4): 307–309.
- [20] 李士勇. 模糊控制与智能控制理论和应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
Li Shiyong. *Fuzzy control and intelligent control: Theory and applications* [M]. Haerbin: Haerbin Institute of Technology, 1990.
- [21] 唐少先, 蔡自兴. 定向干扰下的一类模糊控制系统的鲁棒性[C]//夏天长. 第一届全球华人智能控制与智能自动化大会论文集. 北京: 科学出版社, 1993: 918–923.
Tang Shaoxian, Cai Zixing. Robustness of a kind of fuzzy control system under directed disturbance[C]//Xia Tianzhang. Proceedings of the first world Chinese congress on intelligent control and intelligent automation. Beijing: Science Press, 1993: 918–923.
- [22] Wang L X. Adaptive fuzzy systems and control: Design and stability analysis[M]. Englewood Cliffs: Prentice–Hall Inc., 1994.
- [23] Saridis G N. Toward the realization of intelligent controls[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1979, 67(8): 1115–1133.
- [24] Saridis G N. On the Revised Theory of Intelligent Machines [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems. Piscataway NJ: IEEE, doi: 10.1109/IROS.1989.637883.
- [25] Rovere L A, Otaduy P J, Brittain C R, et al. Hierarchical control of a nuclear reactor using uncertain dynamics techniques [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Intelligent Control. Piscataway NJ: IEEE, 1988: 713–718.
- [26] 郭晨, 朱绍庐, 赵永生. 工业锅炉的仿人递阶智能控制[C]//夏天长. 第一届全球华人智能控制与智能自动化大会论文集. 北京: 科学出版社, 1993: 459–464.
Guo Chen, Zhu Shaolu, Zhao Yongsheng. Humanoid hierarchical intelligent control of industrial boiler[C]//Xia Tianzhang. Proceedings of the First Global Conference world Chinese congress on Intelligent Control and Intelligent Automation of China. Beijing: Science Press, 1993: 459–464.

- [27] Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity[M]//Neurocomputing: Foundations of Research. Boston: MIT Press, 1988: 115–133.
- [28] Hopfield J J, Tank D W. Computing with neural circuits: A model[J]. Science, 1986, 233(4764): 625–633.
- [29] 冯纯伯, 刘延年. 神经网络控制的现状及问题[J]. 控制理论与应用, 1994(1): 103–106.
Feng Chunbo, Liu Yannian. The present situation and problems of neural network control[J]. Control Theory & Applications, 1994(1): 103–106.
- [30] 李耀勇, 郑南宁. 对处于混沌状态的神经网络的控制[J]. 计算机学报, 1998, 21(增刊1): 142–146.
Li Yaoyong, Zheng Nanning. Controlling the chaotic neural network[J]. Chinese Journal of Computers, 1998, 21(Suppl 1): 142–146.
- [31] 徐丽娜. 神经网络控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
Xu Lina. Neural network control [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003.
- [32] 李翔. 从复杂到有序: 神经网络智能控制理论新进展[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2006.
Li Xiang. From complexity to order: New progress of neural network intelligent control theory[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University press, 2006.
- [33] Zhou Q J, Bai J G. An intelligent controller of novel design [C]//Proceedings of Multinational Instrumentation Conference. Beijing: China Instrument Society, 1983: 137–149.
- [34] 周其鉴. 仿人智能控制器[J]. 中国仪器仪表, 1993(2): 5–9.
Zhou Qijian. Humanoid intelligent controller[J]. China Instrumentation, 1993(2): 5–9.
- [35] 李祖枢, 肖亚庆. 仿人智能控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
Li Zushu, Xiao Yaqing. Human simulated intelligent control [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004.
- [36] 吴宏鑫, 余四祥. 航天器智能控制的研究和设计[J]. 航天控制, 1992(4): 63–70.
Wu Hongxin, Yu Sixiang. Research and design of spacecraft intelligent control[J]. Aerospace Control, 1992(4): 63–70.
- [37] 吴宏鑫, 王迎春. 基于智能特征模型的智能控制及应用[J]. 中国科学(技术科学), 2002, 32(6): 805–816.
Wu Hongxin, Wang Yingchun. Intelligent control and application based on intelligent feature model[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2002, 32(6): 805–816.
- [38] 吴宏鑫, 胡军, 解永春. 航天器智能自主控制研究的回顾与展望[J]. 空间控制技术与应用, 2016, 42(1): 1–6.
Wu Hongxin, Hu Jun, Xie Yongchun. Spacecraft intelligent autonomous control: Past, present and future[J]. Aerospace Control and Application, 2016, 42(1): 1–6.
- [39] Cai Z, Xiang Z, Li M. A novel intelligent control method—evolutionary control[C]//Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway NJ: IEEE, 2002, 1: 387–390.
- [40] 蔡自兴, 周翔, 李枚毅, 等. 基于功能/行为集成的主式移动机器人进化控制体系结构[J]. 机器人, 2000, 22(3): 169–175.
Cai Zixing, Zhou Xiang, Li Meiyi, et al. Evolutionary control architecture for autonomous mobile robot based on function/behavior integration[J]. Robot, 2000, 22(3): 169–175.
- [41] Zou X B, Cai Z X. Evolutionary path planning method for mobile robot based on approximate Voronoi boundary network [C]//2002 International Conference on Control and Automation. Piscataway NJ: IEEE, 2002: 135–136.
- [42] Yasunobu S, Yamasaki H. Evolutionary control method and swing up and stabilization control of inverted pendulum[C]//IFSA World Congress and, Nafips International Conference, 2001. Piscataway NJ: IEEE, 2001, 4: 2078–2083.
- [43] Cai Z X, Gong T. Analysis on robustness of intelligent systems based on immunological mechanisms[C]//First China–Japan International Workshop on Internet Technology and Control Applications. Beijing, China, 2001: 56–61.
- [44] Wang B, Wang S A, Zhuang J A. A distributed immune algorithm for learning experience in complex industrial process control[C]//Proceedings of the Second International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Piscataway NJ: IEEE, 2003: 2138–2141.
- [45] Li M Y, Cai Z X. Immune evolutionary path planning with instance learning for mobile robot under changing environment [C]//Proceedings of Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway NJ: IEEE, 2004: 4851–4854.
- [46] Cai Z X, Gong T. Natural computation architecture of immune control based on normal model[C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Piscataway NJ: IEEE, 2006: 1231–1236.
- [47] Li C. Adaptive and robust composite control of coordinated motion of space robot system with prismatic joint[C]//Proceedings of Fourth World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway NJ: IEEE, 2002: 1255–1259.
- [48] 蔡自兴. 智能控制原理与应用[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2014.
Cai Zixing. Intelligent control principles and applications[M]. 2th edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [49] Jennings N R, Bussmann S. Agent-based control systems: Why are they suited to engineering complex systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2003, 23(3): 61–73.
- [50] 文敦伟. 面向多智能体和神经网络的智能控制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2001.
Wen Dunwei. Research on intelligent control for multi-agent and neural network[D]. Changsha: Central South University,

- 2001.
- [51] Bemporad A, Heemels M, Johansson M. Networked control systems[M]. New York: Springer, 2010.
- [52] 谢昊飞, 李勇, 王平, 等. 网络控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- Xie Haofei, Li Yong, Wang Ping, et al. Network control technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2009.
- [53] Yüksel S, Basar T. Stochastic networked control systems: Stabilization and optimization under information constraints[M]. Basel: Birkhäuser, 2013.
- [54] Yu Q C, Chen B, Cheng H H. Web based control system design and analysis[J]. IEEE Control Systems Magazine, 24(3): 45-57.
- [55] Fadlullah Z M, Tang F, Mao B, et al. State-of-the-art deep learning: Evolving machine intelligence toward tomorrow's intelligent network traffic control systems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2432-2455.
- [56] 国务院关于印发《新一代人工智能发展规划》的通知[A/OL]. (2017-07-08)[2018-03-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm.
- Notice of the State Council on printing and distributing the "New generation of artificial intelligence development plan" [A/OL]. (2017-07-08)[2018-03-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm.
- [57] 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知[A/OL]. (2015-05-08)[2018-03-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- Notice of the State Council on printing and distributing the "Made in China 2025"[A/OL]. (2015-05-08)[2018-03-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [58] 三部门关于印发《机器人产业发展规划(2016—2020年)》的通知[A/OL]. (2016-04-27)[2018-03-31]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-04/27/content_5068437.htm.
- Notice of the 3 ministries and commissions on printing and distributing the "Development plan of robot industry 2016-2020"[A/OL]. (2016-04-27)[2018-03-31]. http://www.gov.cn/xinwen/2016-04/27/content_5068437.htm.
- [59] Jin L, Li S, Yu J, et al. Robot manipulator control using neural networks: A survey[J]. Neurocomputing, 2018, 285: 23-34.
- [60] Leondes C T, Mendel J M. Artificial Intelligent Control[R]. Los Angeles: McDonnell-Douglas Astronautics Co., 1967: Tech Report 4336.
- [61] Meystel A, Luh Y S. Proceedings IEEE workshop on intelligent control[C]. Piscataway NJ: IEEE Computer Society Press, 1987.
- [62] 夏天长. 第一届全球华人智能控制与智能自动化大会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1993.
- Xia Tianzhang. Proceedings of the first world Chinese congress global conference on intelligent control and intelligent automation for Chinese[C]. Beijing: Science Press, 1993.
- [63] 谈自忠. 第二届全球华人智能控制与智能自动化大会论文集[C]. 西安: 西安交通大学出版社, 1997.
- Tan Zizhong. Proceedings of the second world Chinese congress global conference on intelligent control and intelligent automation for Chinese[C]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 1997.
- [64] 孙增圻. 第二届全国智能控制专家讨论会论文集[C]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- Sun Zengxi. Proceedings of the second national symposium on intelligent control[C]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.
- [65] 李衍达, 汤跃忠. 智能控制和智能自动化[C]//中国智能自动化学术会议暨智能自动化专业委员会成立大会论文集. 北京: 中国自动化学会, 1995: 14-17.
- Li Yanda, Tang Yuezhong. Intelligent control and intelligent automation[C]//Proceedings of China Intelligent Automation Conference and Intelligent Automation Specialized Committee Conference. Beijing: China Automation Society, 1995: 14-17.
- [66] 孙富春, 孙增圻, 文献忠. 网络控制[C]//2001年中国智能自动化会议论文集. 北京: 中国自动化学会, 2001: 42-50.
- Sun Fuchun, Sun Zengxi, Wen Xianzhong. Network control [C]//Proceedings of China Intelligent Automation Conference 2001. Beijing: China Automation Society, 2001: 42-50.
- [67] 王飞跃. 指控 5.0: 平行时代的智能指挥与控制体系[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 107-120.
- Wang Feiyue. CC 5.0: Intelligent command and control systems in the parallel age[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(1): 107-120.
- [68] 刘志杰, 欧阳云呈, 王飞跃, 等. 分布参数系统的平行控制: 从基于模型的控制到数据驱动的智能控制[J]. 指挥与控制学报, 2017, 3(3): 177-185.
- Liu Zhijie, Ouyang Yuncheng, Wang Feiyue, et al. Parallel control of distributed parameter systems: From model based control to data driven intelligent control[J]. Journal of Command and Control, 2017, 3(3): 177-185.
- [69] 王飞跃, 魏庆来. 智能控制: 从学习控制到平行控制[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(7): 939-948.
- Wang Feiyue, Wei Qinglai. Intelligent control: from learning control to parallel control[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(7): 939-948.
- [70] 左敏, 曾广平, 涂序彦. 基于平行进化的机器人智能控制研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(8): 202-206.
- Zuo Min, Zeng Guangping, Tu Xuyan. Study on intelligent robot control based on parallel evolution[J]. Computer Simulation, 2011, 28(8): 202-206.
- [71] 孙浩, 涂序彦. 钢铁生产智能控制技术[J]. 冶金动力, 2004

- (4): 93-96.
- Sun Hao, Tu Xuyan. Intelligent control technology for iron and steel production[J]. Metallurgical Power, 2004(4): 93-96.
- [72] 涂序彦. 生物控制论[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- Tu Xuyan. Biological cybernetics[M]. Beijing: Science Press, 1980.
- [73] 蔡自兴. 智能控制的结构理论[C]//中国人工智能学会计算机视觉与智能控制首届学术年会论文集. 北京: 中国人工智能学会, 1989: 29-32.
- Cai Zixing. Structural theory of intelligent control[C]//Proceedings of the First Annual Conference on Computer Vision and Intelligent Control Society of the Chinese Society of Association for Artificial Intelligence. Beijing: Chinese Association for Society of Artificial Intelligence, 1989: 29-32.
- [74] 张钟俊, 蔡自兴. 智能控制与智能控制系统[J]. 信息与控制, 1989, 18(5): 30-39.
- Zhang Zhongjun, Cai Zixing. Intelligent control and intelligent control systems[J]. Information and Control, 1989, 18(5): 30-39.
- [75] 张钟俊, 蔡自兴. 智能控制[M]//中国大百科全书(自动控制与系统工程). 北京: 中国大百科全书出版社, 1991: 587-588.
- Zhang Zhongjun, Cai Zixing. Intelligent control[M]//Encyclopedia of China (Automatic Control and Systems Engineering). Beijing: China Encyclopedia Press, 1991: 587-588.
- [76] 叶文, 吕勇哉. 智能控制中的机器学习方法[J]. 信息与控制, 1993, 22(3): 129-132.
- Ye Wen, Lv Yongzai. Machine learning approaches in intelligent controls[J]. Information and Control, 1993, 22(3): 129-132.
- [77] 梁军, 吕勇哉. 轧钢加热炉混合智能控制系统[J]. 钢铁, 1996(增刊1): 113-117.
- Liang Jun, Lv Yongzai. Hybrid intelligent control system for rolling furnace[J]. Steel, 1996(Suppl 1): 113-117.
- [78] Li H X, Si H T. Control for intelligent manufacturing: A multi-scale challenge[J]. Engineering, 2017(3): 608-615.
- [79] 纳米机器人可控操作技术获新突破[EB/OL]. (2014-01-10). <http://www.eepw.com.cn/article/215409.htm>.
- Nano robot controllable operation technology gets new breakthrough[EB/OL]. (2014-01-10). <http://www.eepw.com.cn/article/215409.htm>.
- [80] 纳米技术能攻克癌症吗? 中国研发纳米机器人, 可进入身体瓦解肿瘤[EB/OL]. (2017-11-22)[2018-06-30]. <http://mini.eastday.com/mobile/171122051351618.html>.
- Can nanotechnology conquer cancer? China's research and development of nanoscale robots can enter the body to disintegrate tumors[EB/OL]. (2017-11-22)[2018-06-30]. <http://mini.eastday.com/mobile/171122051351618.html>.
- [81] Harris C J, Moore C G, Brown M. Intelligent control: Aspects of fuzzy logic and neural nets[J]. World Scientific, 1993, 266(1/2): 294-299.
- [82] Lu Y Z. Industrial intelligent control: fundamentals and applications[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [83] Cai Z X. Intelligent control: Principles, techniques and applications[M]. Singapore: World Scientific Publishers, 1997.
- [84] Teshnehlab M, Watanabe K. Intelligent control based on flexible neural networks[J]. Automatica, 2002, 38(3): 564-565.
- [85] Antsaklis P J, Passino K M. An introduction to intelligent and autonomous control[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [86] Gupta M M, Sinha N K. Intelligent control systems: Theory and applications[M]. Piscataway NJ: IEEE Press, 1996.
- [87] Zilouchian A, Jamshidi M. Intelligent control systems using soft computing methodologies[M]. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [88] 蒋新松. 人工智能及智能控制系统概述[J]. 自动化学报, 1981, 7(2): 148-156.
- Jiang Xinsong. A general survey of artificial intelligence and intelligent control system[J]. Acta Automatica Sinica, 1981, 7(2): 148-156.
- [89] 蔡自兴, 刘巧光. 智能控制研究的进展[C]//中国人工智能学会第7届学术大会论文集. 北京: 中国人工智能学会, 1992: 507-514.
- Cai Zixing, Liu Qiaoguang. Advances in intelligent control research[C]//Proceedings of the Seventh Conference of the Chinese Association for Society of Artificial Intelligence. Beijing: Chinese Association for Society of Artificial Intelligence, 1992: 507-514.
- [90] 杨嘉墀, 戴汝为. 智能控制在国内的进展[C]//夏天长. 第一届全球华人智能控制与智能自动化大会论文集. 北京: 科学出版社, 1993: 1-7.
- Yang Jiayuan, Dai Ruwei. Progress in intelligent control in China[C]//Xia Tianzhang. Proceedings of the First world Chinese Global Chinese Congress on Intelligent Control and Intelligent Automation. Beijing: Science Press, 1993: 1-7.
- [91] 杨嘉墀. 中国空间计划中智能自主控制技术的发展[C]//秦化淑. 中国控制会议论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1995: 1-5.
- Yang Jiayuan. Development of intelligent autonomous control technology in China's Space program[C]//Qin Huashu. Proceedings of China Control Conference. Beijing: China Science and Technology Press, 1995: 1-5.
- [92] 宋健. 智能控制——超越世纪的目标[J]. 中国工程科学, 1999, 1(1): 1-5.
- Song Jian. Intelligent control: Beyond the goal exceeding of the century [J]. Engineering Sciences, 1999, 1(1): 1-5.
- [93] 吴宏鑫, 解永春, 李智斌. 基于对象特征模型描述的智能控制[J]. 自动化学报, 1999, 25(1): 9-17.
- Wu Hongxin, Xie Yongchun, Li Zhibin. Intelligent control

- based on description of plant characteristic model[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(1): 9-17.
- [94] 王佐伟, 吴宏鑫. 一种组合自适应模糊控制方法及其在月球探测车上的应用[J]. *宇航学报*, 2005, 26(1): 1-6.
Wang Zuwei, Wu Hongxin. A combined adaptive fuzzy control method and its application on lunar rover [J]. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(1): 1-6.
- [95] 张明廉, 郝健康, 何卫东, 等. 拟人智能控制与三级倒立摆[J]. *航空学报*, 1995, 16(6): 654-661.
Zhang Minglian, Hao Jiankang, He Weidong, et al. Human-imitating intelligent control and triple inverted-pendulum[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 1995, 16(6): 654-661.
- [96] 李洪兴, 苗志宏, 王家银. 四级倒立摆的变论域自适应模糊控制[J]. *中国科学(技术科学)*, 2002, 32(1): 65-75.
Li Hongxing, Miao Zhihong, Wang Jiayin. Variable universe adaptive fuzzy control for four stage inverted pendulum[J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2002, 32(1): 65-75.
- [97] 李祖枢, 陈庆春. 力矩受限单摆的摆起倒立控制——仿人智能控制在非线性系统中的应用[J]. *控制理论与应用*, 1999, 16(2): 225-229.
Li Zushu, Chen Qingchun. The control for swinging up of a pendulum under limited torque—An application of human simulated intelligent control in nonlinear system[J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(2): 225-229.
- [98] 王和琴, 张分电, 李延利, 等. 普光气田酸气加热炉智能控制系统的构建与优化[J]. *天然气工业*, 2013, 33(9): 110-114.
Wang Heqin, Zhang Fendian, Li Yanli, et al. Building and optimizing an intelligent control system of a sour gas heating furnace in the Puguang Gas Field, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(9): 110-114.
- [99] 王维多, 孟德智. 智能控制在油品调合中的应用研究[J]. *中国化工贸易*, 2015(35): 287-287.
Wang Weiduo, Meng Dezhi. Application of intelligent control in oil blending [J]. *China Chemical Trade*, 2015(35): 287-287.
- [100] 柴天佑, 荣莉, 马庆云. 智能控制技术在我国的轧钢炉窑控制中的应用[J]. *冶金自动化*, 2000, 24(1): 7-11.
Chai Tianyou, Rong Li, Ma Qingyun. Application of intelligent control technology in reheating furnaces control for rolling process[J]. *Metallurgical Industry Automation*, 2000, 24(1): 7-11.
- [101] 吴敏, 曹卫华, 陈鑫. 复杂冶金过程智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Wu Min, Cao Weihua, Chen Xin. Intelligent control of complex metallurgical processes[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [102] 赵文宏, 黄文君, 褚健, 等. 修正环型纳米级超精密抛光机智能控制系统的实现[J]. *机电工程*, 2003, 20(3): 38-41.
Zhao Wenhong, Huang Wenjun, Chu Jian, et al. Realizing method of intelligent controlling system of ultraprecision planarization machine with conditioning ring at nanometer level [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2003, 20(3): 38-41.
- [103] 陈卫东, 郑涌, 蔡鹤皋, 等. 神经网络自适应的机器人位置/力混合控制系统[J]. *模式识别与人工智能*, 1995(3): 243-247.
Chen Weidong, Zheng Yong, Cai Hehao. Neural network adaptive hybrid position/force control system of robot [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1995(3): 243-247.
- [104] 黄心汉, 吕遐东, 王敏. 面向微装配机器人的TSB分级智能控制结构[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2004(增刊1): 72-75.
Huang Xinhan, Lv Xiadong, Wang Min. TSB hierarchical intelligent control structure for micro-assembly robots [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2004(Suppl 1): 72-75.
- [105] 杨雨, 曹志强, 谭民, 等. 未知环境下基于意图推理的多机器人编队控制[J]. *高技术通讯*, 2011, 21(8): 842-847.
Yang Li, Cao Zhiqiang, Tan Min, et al. Multi-robot formation control in unknown environments based on intention reasoning[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2011, 21(8): 842-847.
- [106] Wang T M, Tao Y, Liu H. Current researches and future development trend of intelligent robot: A review[J]. *International Journal of Automation & Computing*, 2018, 15(5): 521-542.
- [107] 蔡自兴. 中国机器人学40年[J]. *科技导报*, 2015, 33(21): 23-31.
Cai Zixing. Robotics in China daring during the past 40 years[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(21): 23-31.
- [108] 蔡自兴, 翁环. 探秘机器人王国[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
Cai Zixing, Weng Huan. Uncovering secrets of the Quest robot kingdom[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [109] 唐杰, 罗安, 欧剑波, 等. 配电静止同步补偿器的模糊自适应PI控制策略[J]. *电工技术学报*, 2008, 25(2): 120-128.
Tang Jie, Luo An, Ou Jianbo, et al. Voltage control strategy of D-STATCOM based on fuzzy-PI controller[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 25(2): 120-128.
- [110] 张桂东, 张波, 肖文勋, 等. 电化学加工高效节能高频开关电源及智能化系统[J]. *电源学报*, 2011(1): 31-37.
Zhang Guidong, Zhang Bo, Xiao Wenxun, et al. Efficient energy saving high-frequency switched-mode power supply and intelligent system with electrochemical processing[J]. *Journal of Power Supply*, 2011(1): 31-37.
- [111] 罗安. 电能质量治理和高效用电技术与装备[M]. 北京: 中

- 国电力出版社, 2014.
- Luo An. Power quality control and efficient power consumption technology and equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [112] 柳平增, 毕树生, 薛新宇, 等. 基于物联网的农业生产过程智能控制系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(9): 2154-2156.
- Liu Pingzeng, Bi Shusheng, Xue Xinyu, et al. Research on intelligent control system of agricultural production process based on Internet of things[J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(9): 2154-2156.
- [113] 邓璐娟, 张侃谕, 龚幼民. 智能控制技术在农业工程中的应用[J]. 现代化农业, 2003(12): 1-3.
- Deng Lujuan, Zhang Kanyu, Gong Youmin. Application of intelligent control technology in agricultural engineering[J]. Modernizing Agriculture, 2003(12): 1-3.
- [114] 蔡自兴. 智能车辆感知、建图与目标跟踪技术[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- Cai Zixing. Intelligent vehicle perception, mapping and target tracking technology[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [115] 无人驾驶车顺利从长沙至武汉 自主超车 67 次[EB/OL]. (2011-07-26)[2018-06-30] <http://news.sohu.com/20110726/n314512981.shtml>.
- Self driving car successfully overtook 67 times from Changsha to Wuhan [EB/OL]. (2011-07-26)[2018-06-30] <http://news.sohu.com/20110726/n314512981.shtml>.
- [116] 李士勇, 夏承光. 模糊控制和智能控制理论与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
- Li Shiyong, Xia Chenguang. Fuzzy control and intelligent control theory and application[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1990.
- [117] 教育部财政部关于立项建设 2008 年国家级教学团队批准通知文件[A/OL]. [2016-05-28]. http://www.gov.edu.cn/s78/A08/gjs_left/files/moe_1623/s3849/201606/t20190601_93906.html.
- Ministry of Education's Ministry: Of finance's approval document on national construction teaching team in 2008[A/OL]. [2016-05-28]. http://www.gov.edu.cn/s78/A08/gjs_left/files/moe_1623/s3849/201606/t20190601_93906.html.
- [118] 教育部办公厅关于公布第一批“国家级精品资源共享课”名单的通知[A/OL]. [2016-07-01]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s5664/s7209/s6872/201607/t20160715_271959.html.
- Notice of the general office of the Ministry of Education on announcing the first batch of list of "state level boutique resources sharing courses"[A/OL]. [2016-07-01]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s5664/s7209/s6872/201607/201607-15_271959.html.
- [119] 王万森. 创新智能教育, 培养时代需求的智能科技人才[J]. 计算机教育, 2011(15): 1.
- Wang Wansen. Innovating intelligent education and cultivating intelligent talents of science and technology[J]. IT Education, 2011(15): 1.
- [120] 钟义信, 蔡自兴. 2010 年全国智能科学技术课程教学研讨会论文集[C]. 北京: 中国智能学会, 2010.
- Zhong Yixin, Cai Zixing. Proceedings of the 2010 national symposium on intelligent science and technology course[C]. Beijing: China Intelligent Society, 2010.
- [121] 习近平眼中的人工智能[EB/OL]. (2018-05-17)[2018-05-30]. <http://news.cctv.com/2018/05/17/ARTIMPxB5DqSVBe5-DqSVpvYlzIScJm180517.shtml>.
- Artificial Intelligence in Xi Jinping's view[EB/OL]. (2018-05-17)[2018-05-30]. <http://news.cctv.com/2018/05/17/ARTIMPxB5DqSVBe5-DqSVpvYlzIScJm180517.shtml>.

40 years of intelligent control in China

CAI Zixing

1. Center for Intelligent System and Intelligent Control, Central South University, Changsha 410083, China
2. Hunan ZIXING Academy of Artificial Intelligence, Changsha 410116, China

Abstract In this paper the development process of intelligent control at home and abroad is reviewed. The achievements of basic, academic and technological researches in China are summarized. The general situation of education, teaching and personnel training of intelligent control in China is discussed. The existing problems of intelligent control in China are addressed and the suggestions for intelligent control research and development in China are proposed as well.

Keywords intelligent control; intelligent control development in China; automatic control ●



(责任编辑 刘志远)