第 47 卷 第 2 期　　自 动 化 学 报　　Vol. 47, No. 2
2021 年 2 月　　ACTA AUTOMATICA SINICA　　February, 2021

自动化学科面临的挑战

孙长银 [1]　吴国政 [2]　王志衡 [2]　丛 杨 [2,3]　穆朝絮 [4]　贺 威 [5]

摘　要　本文分析了控制理论与应用、模式识别与智能系统、导航制导与控制、系统科学与工程、人工智能与自动化交叉等领域的发展现状. 结合科技发展、国内国际研究前沿和新兴领域对自动化科学技术的需求, 提出重点发展智能控制理论和方法、高性能作业机器人、信息物理系统、导航与控制技术、重大装备自动化技术、自主智能系统和人工智能驱动的自动化技术优先领域, 加强数据驱动控制理论、人工智能基础理论研究, 进一步发展人机协同、跨域融合的智能自动化, 为实现国家社会的全面信息化智能化提供理论和技术保障.

关键词　自动化科学技术, 机器人, 信息物理系统, 导航制导与控制, 装备自动化, 自主智能系统, 人工智能

引用格式　孙长银, 吴国政, 王志衡, 丛杨, 穆朝絮, 贺威. 自动化学科面临的挑战. 自动化学报, 2021, **47**(2): 464−474

DOI　10.16383/j.aas.c200904

On Challenges in Automation Science and Technology

SUN Chang-Yin[1]　WU Guo-Zheng[2]　WANG Zhi-Heng[2]　CONG Yang[2,3]　MU Chao-Xu[4]　HE Wei[5]

Abstract　This paper analyzes the current development of automation science and technology, including fields of control theory and application, pattern recognition and intelligent system, navigation guidance and control, system science and engineering, as well as the interdisciplinary research of artificial intelligence and automation. Combining with the requirements of science and technology development, domestic and international research frontiers, and emerging technologies, the priority areas and specific research directions are put forward to develop intelligent control theory and methodology, high performance robot, cyber-physical system, navigation and control technology, equipment automation technology, autonomous intelligent system and artificial-intelligence-based automation. It is expected to establish the theory framework of data-driven control and artificial-intelligence-based automation. With the intelligent automation of human-machine cooperation and multi-technology integration, it will provide theoretical and technical support for the realization of comprehensive intelligent society.

Key words　Automation science and technology, robot, cyber-physical system, navigation guidance and control, equipment automation technology, autonomous intelligent system, artificial intelligence

Citation　Sun Chang-Yin, Wu Guo-Zheng, Wang Zhi-Heng, Cong Yang, Mu Chao-Xu, He Wei. On challenges in automation science and technology. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(2): 464−474

随着大数据、云计算、物联网、5G 等信息技术的飞速发展, 自动化科学技术极大地提高了生产效率, 有力支持了信息产业和全球经济社会的发展. AlphaGo 系列人工智能围棋、仿生机器人、混合智能、载人航天、智能制造、智慧医疗、智慧城市等新兴技术的涌现, 不断冲击着人们生产和生活的方式.

自动化科学技术是以物理系统、信息系统及有人参与的信息物理系统为研究对象, 以设计、构建、分析和评价自动或自主运行系统为手段, 以辅助、替代和延伸人的体力或脑力劳动, 并借以提高人类认识世界和改造世界的能力为目的的系统理论与技术. 其主要研究范围包括: 控制理论与技术, 系统建模理论与仿真技术, 导航、制导与控制技术, 检测技术与装置, 模式识别与智能系统, 机器人与无人系统控制技术, 生物系统分析与调控, 以及面向对象和任务的自动或自主运行系统的设计、实现和维护管理技术等[1−2].

自动化科学技术的发展, 将对我国社会经济发展和国防安全发挥至关重要的作用. 未来几年, 根

收稿日期 2020-10-29　录用日期 2020-11-05
Manuscript received October 29, 2020; accepted November 5, 2020
国家自然科学基金 (61942301) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61942301)
本文责任编委 邓方
Recommended by Associate Editor DENG Fang

1. 东南大学自动化学院 南京 210096　2. 国家自然科学基金委员会信息科学部 北京 100085　3. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 沈阳 110016　4. 天津大学电气自动化与信息工程学院 天津 300072　5. 北京科技大学自动化学院 北京 100083

1. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096　2. Department of Information Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085　3. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016　4. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072　5. School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

据我国自动化科学技术的现状, 结合人工智能等新兴技术和智能制造、国防军工等国家需求, 自动化科学技术的发展路径大致可概括为: 1) 鼓励和发展具有原创性的基础理论和方法, 大力支持从无到有的研究问题, 明显提高自动化理论与技术水平; 2) 在自动化科学与技术的一些应用基础研究领域, 研究在国际上具有引领性作用的自动化系统设计与实现方法, 在部分领域达到世界领先, 推动我国相关产业的改造升级; 3) 大力发展和支持与基础工业、国防以及高端技术装备密切相关的自动化系统与关键技术等.

本文结合十三五期间自动化学科的发展规划[3], 概述了我国自动化学科的发展现状, 指出了未来几年优先发展的学科领域和可能产生重要突破的研究方向及科学问题, 提出了一些保障学科发展的措施和建议.

1 自动化学科发展态势分析

1.1 自动化学科的特点

自动化科学技术不仅研究系统的信息获取与处理、分析与建模、优化与控制, 更重要地还要综合运用控制科学、系统科学、人工智能、计算机与通信等领域不断发展着的理论与技术, 研究面向复杂对象和任务的自动或自主智能运行系统的设计和实现技术, 以使系统的状态、行为、性能及功能等满足人们的预期目标. 同时, 自动化学科的发展与物理、生物、材料等多学科交叉融合, 互相促进和支持, 具有系统性、智能性和交叉性的鲜明特征[4].

自动化科学技术从系统的角度来解决问题, 对社会进步产生重大影响. 例如, 集合计算机视觉、语音识别、机器翻译等技术于一体的机器人, 已在多种场景下实现商业应用; 我国自主研发的北斗卫星导航系统, 已为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航服务等.

自动化科学技术与医疗、化工、先进制造等各个领域交叉融合, 推进了自动化学科的理论技术与各行业领域的协同发展. 例如, 信息物理系统是高水平智能制造、高水平社会服务和国防现代化的重要支撑技术, 它通过融合感知、控制、智能更新等技术于一体, 实现物理对象的大规模信息感知、计算和自动控制, 应用前景非常广泛.

自动化科学技术与其他学科共同发展进步, 并与材料、生物、数学等基础学科交叉形成新领域, 派生出大量的新概念、新构思、新技术和边缘学科, 如量子导航、微纳制造、生物信息学等. 多学科发展、交叉研究给自动化学科带来了新的活力和重大创新机遇.

现阶段, 自动化学科基础研究蓬勃发展, 相关新兴技术领域方兴未艾, 对经济和社会发展的创新驱动作用越来越重要, 自动化程度已成为国防、工业、农业以及社会生活现代化的显著标志.

1.2 自动化学科发展现状

在国家的大力引导和支持下, 经过 “十三五”期间的发展, 自动化学科在理论和应用方面取得了一批优秀成果, 并逐渐形成了各领域优势互补的良性循环, 促进了控制理论与应用、模式识别与智能系统、导航制导与控制、系统科学与工程、人工智能与自动化交叉等领域的创新与发展.

控制理论与应用是自动化学科能够长远发展的核心基础与源动力. 近年来, 控制理论与应用研究的对象与控制算法方面, 呈现出从单一模型到包含耦合、级联等关系的复杂模型, 从单目标控制到多目标优化、调度和协调, 从基于模型的研究向数据化、群体化与智能化方向发展. 在多智能体协作、自适应控制、网络控制系统、数据/事件驱动控制、智能控制等一些新兴研究方向上, 取得了许多重要研究进展, 如高阶线性多智能体系统一致性控制、网络资源优化控制、网络控制系统态势感知等[1, 5].

模式识别与智能系统的发展, 与认知科学、信息科学、神经科学及计算机科学的发展密切相关, 并逐渐形成了理论创新与应用高度集成的发展趋势. 近年来, 半监督学习、弱/无监督学习、深度学习、数据降维、多特征抽取等新技术不断涌现, 模式识别、机器学习、计算机视觉、语音和语言信息处理、脑机交互等领域研究与应用取得了显著的进步[6]. 国内科研机构和高校在神经生物信息处理、统计学习、流形学习、立体视觉匹配和三维重建等方面取得了一些优秀研究成果, 国内研发的人脸识别、指纹识别、手写汉字识别、语音识别、机器翻译等应用技术处于国际领先水平.

导航制导与控制是一个学科交叉性强、理论与工程实践高度结合的研究领域, 对国家安全、国防和国民经济建设具有重要意义. 目前, 我国在惯性导航、卫星导航、组合导航、航空航天飞行控制、空间探测等研究领域已经达到国际先进水平, 如北斗卫星导航系统在轨卫星已突破 50 颗, 天宫二号空间站顺利在轨运行, 神州系列载人飞船的成功发射与返回, 嫦娥四号月背探测, 标志着我国航空航天控制技术跻身世界强国之列. 然而, 在一些相关技术领域, 如视觉/惯性组合导航系统、精确制导技

术、新型武器装备研制、导航与探测器件开发、拦截技术等方面仍需进一步加强相关核心技术的研发与创新能力.

系统科学与工程在大量系统科学理论研究和系统工程实践积累的基础上, 逐渐强调物理、信息与社会空间的融合, 注重系统间的相互协作; 强调个体行为与群体行为间的关系, 实现对群体行为的诱导与调控[7]; 更加强调人类社会的网络化, 研究不同形态的实际网络, 如社会网络、经济网络、电力网络和生物网络. 我国近年来针对实际复杂系统, 开展了生产计划调度、系统结构与架构体系、物流与资源优化决策、系统仿真技术及应用等多方面的研究和实践[8]. 随着物联网等新兴技术的发展, 未来系统科学与系统工程的研究, 将更为关注具有人机物协同特征的实际复杂系统, 为推进我国诸多领域的应用发展提供方法指导.

在人工智能与自动化交叉领域, 以神经网络为基础的深度学习, 以感知、交互、协作、竞争为特征的群体智能等方向取得了重要进展. 在相继出现的智能驾驶、智慧医疗等热点应用的驱动下, 以人为中心、人在环路的智能计算、类脑智能等研究把机器智能作为人类智能的有效延伸和拓展, 成为自动化领域人工智能技术研究前沿[9]. 在面对大数据、网络化和实时交互等复杂现实问题时, 研究方法呈现出多领域联合驱动的模式, 综合集成多个领域的研究成果, 如运动控制、智能感知决策、导航和避障、视听觉信息处理、自然语言理解、机器学习算法、认知信息处理、高性能计算、自主防御等, 使得机器与人能够交互理解并能更好地服务于人[10−11].

1.3 学科发展趋势和目标

2015 年, 国务院提出推进智能制造, 实施制造强国战略, 以满足经济社会发展和国防建设对重大技术装备的需求为目标, 强化工业基础能力. 2017 年,《新一代人工智能发展规划》提出要把大数据驱动知识学习、跨媒体协同处理、人机协同增强智能、群体集成智能、自主智能系统作为人工智能的发展重点. 2020 年, 中央部署推进包括 5G 基础及应用、轨道交通、新能源、数据中心、人工智能和工业互联网等新型基础设施建设[12]. 三大规划中均以自动化为主要理论基础, 自动化科学技术已然成为支撑我国“新基建”大布局中最为核心和重要的技术之一.

信息技术的迅速发展, 推进了国际社会各领域向数字化、网络化、智能化加速跃升, 自动化领域的科学研究必须迅速调整方向并加快发展, 助力提升国家竞争力、维护国家安全. 促进自动化科学技术和国家建设深度融合, 为构建数据驱动、人机协同、跨域融合、共创分享的智能社会提供理论、方法和技术, 是自动化学科 “十四五”乃至中长期发展的重要目标.

2 自动化学科优先发展领域

2.1 智能控制理论和方法

传统控制理论大多关注单个对象的建模与控制, 而控制系统的一个发展趋势是系统规模越来越大, 系统各部分相互关联和耦合. 传统控制过程通常在一个时间上只控制一个进程, 而现在可能存在大量的进程相互作用需要调控. 各类控制系统在不断变化的环境中运行, 温度、负荷、设备、材料特性等各种因素都在随时间变化, 且这些变化常常难以精确掌握. 系统不确定性既源自于系统内部, 也来自于系统外部, 而且大多数情形是多种不确定性耦合在一起. 涉及的系统类型也很多, 如随机系统、不确定系统、参数系统、神经网络系统、数据驱动系统、有限信息系统、多尺度系统、混杂系统、复杂网络等. 系统结构也更为复杂、工作环境更加开放和不确定, 控制任务对于实时性、控制精度和自主能力等方面有了更高的要求, 还需要面对各种资源的优化利用, 亟需融合非线性控制、自适应控制、智能控制、稳定性理论、最优化理论、人工智能及数据处理等方面的理论和方法, 建立智能控制的新理论和新方法[3, 13].

从控制对象、控制方法、资源优化和控制效率等角度出发, 图 1 简要描述了当前控制理论和方法中存在的主要问题, 可行的解决方法和热点研究方向. 包括:

1) 自适应控制理论和方法. 对于时变、不确定、环境开放、非线性等条件下的被控系统, 研究其模型—数据混合驱动的自适应控制理论和方法, 进行系统闭环性能分析和设计, 实现基于模型的智能自适应控制.

2) 数据驱动控制理论和方法. 研究环境变化、结构和参数变化、控制目标变化的复杂系统控制问题, 通过对系统数据的采集、更新和迭代学习, 获得具有适应能力的数据驱动控制器, 保证系统控制的稳定性、鲁棒性和自适应性, 建立数据驱动控制理论和方法.

3) 基于学习的优化理论和方法. 通过对复杂系统控制过程、控制任务、多媒体信息的训练、学习和反馈, 实现复杂系统过程优化、任务优化和资源优化, 建立复杂系统基于学习的优化控制理论和方法.

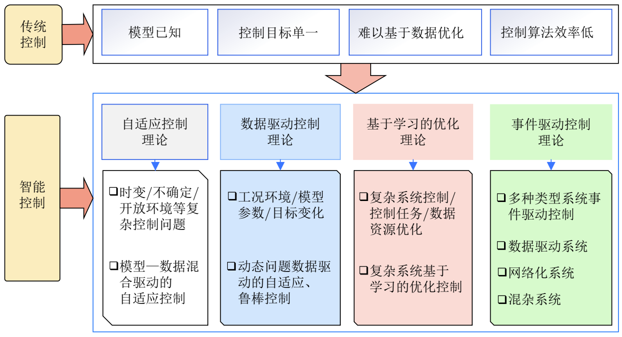

图 1　智能控制理论研究方向

Fig. 1　Research directions of intelligent control theory

4) 事件驱动控制理论和方法. 研究数据驱动系统、网络化系统、混杂系统等多种类型系统的事件驱动控制理论和方法, 减小计算和通讯等资源成本, 提高控制效率.

智能控制理论和方法是一个飞速发展的研究方向, 尽管其理论体系还远没有经典控制那样成熟和完善, 但已经成为自动化学科最重要的理论研究方向之一. 探索智能控制理论和特定背景的应用研究, 夯实自动化学科的理论基础, 对推动我国自动控制技术跻身世界前列, 具有重要意义.

2.2　高性能作业机器人

机器人是多种自动化技术和智能技术的集成平台, 在国民经济与国防安全等领域具有重要地位. 在国防安全方面, 机器人技术将推动无人机、无人武器的发展, 提高无人侦察、无人值守、无人作战打击能力. 在近海、深海、极地和外太空等环境中, 机器人是实现极端环境活动和资源发现利用的有效工具. 在医疗健康方面, 机器人将在医疗诊断、康复辅助、助老助残中发挥重要作用. 在制造业方面, 机器人正在成为新工业革命的切入点和重要增长点, 将影响全球制造业格局. 近年来, 我国在智能机器人研发和应用方面取得了长足进步, 工信部、发改委、财政部联合提出《机器人产业发展规划 (2016−2020)》, 科技部连续发布 "智能机器人" 重点专项, 持续推进我国机器人技术和相关产业快速健康发展. 但与美国、日本等发达国家相比, 我国在前沿基础理论、核心零部件、国际技术标准和总体发展体系等方面存在短板和不足[14].

未来几年, 在仿生、控制、智能等方面, 自动化学科建议开展面向特定任务的高性能作业机器人原创性理论及关键技术研究, 初步建立高性能智能作业机器人共性技术体系, 为后续产品化奠定基础. 图 2 概述了高性能作业机器人主要发展方向和关键技术. 具体研究方向包括:

1) 仿生机器人. 生物运动机理研究并设计仿生运动机构; 灵巧作业机构的建模与控制; 灵活轻巧、刚柔耦合的仿生机器人设计和控制; 灵活隐蔽的微型仿生机器人.

2) 特种机器人. 设计面向各种特定任务的高性能作业机器人; 设计应对开放、未知环境和多种任务的高性能机器人, 提高其通用性与鲁棒性.

3) 智能决策技术. 研究机器人面向复杂环境的感知与理解、行为优化及技能学习方法, 提升机器人的智能化水平; 研究机器人智能决策与控制技术, 实现机器人高效智能决策和稳定自主运动; 机器人安全行为准则及安全保障机制, 确保机器人安全可靠的行为方式.

4) 人机共融技术. 人与机器人的双向信息传递、语义表达及实时认知方法; 生机电相融合的交互方法; 人机协同高效决策与控制技术; 人与机器人互操作技术.

5) 以仿生机器人、人机共融机器人、服务机器人为具体对象, 在国际技术标准、软件框架和硬件平台等方面取得突破性成果.

2.3　信息物理系统

以物联网、车联网和工业互联网等为代表的信息网络技术快速发展, 信息空间、社会空间和物理空间深度融合, 衍生出信息物理系统. 信息物理系统中的计算通信单元与物理对象可以通过网络高度耦合, 其所孕育的新技术、新应用将从根本上改变人类社会的生产和生活方式. 就像互联网重塑人与信息的关系一样, 信息物理系统将重塑人与工程系统的关系[15]. 美国总统科技顾问委员会曾将信息物理系统列为未来重点研究的八大信息技术之首, 德国、英国、法国、日本等国都在工业信息物理融合系统相关方向展开战略布局和技术研发. 目前, 我国工业企业数字化、网络化、信息化程度整体不高, 难以实现企业级综合智能管控以满足智能化生产、智

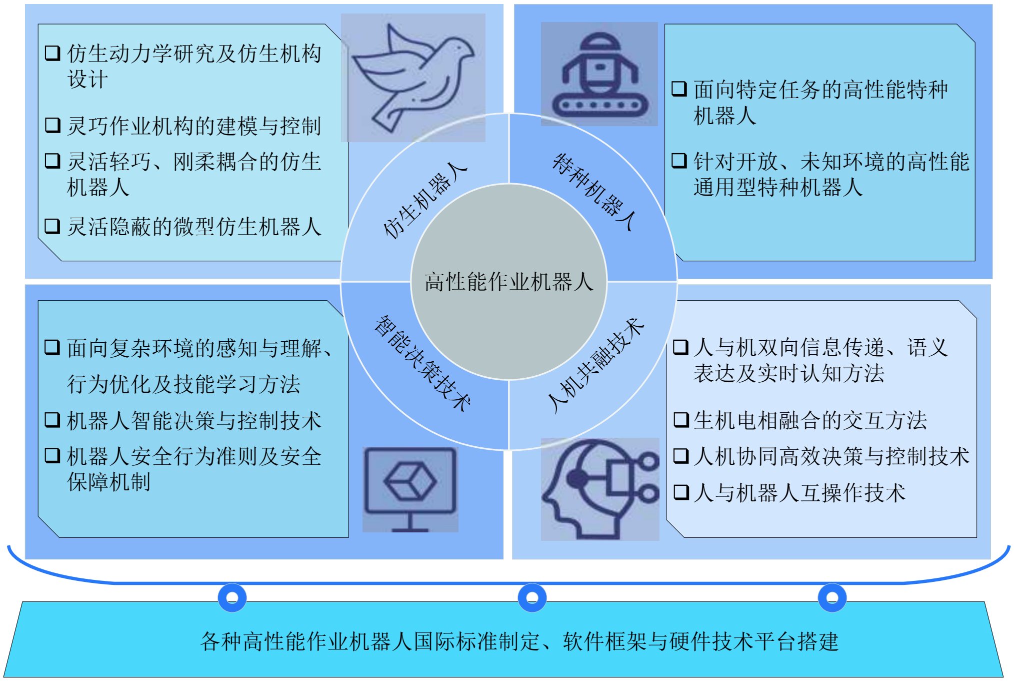

图 2　高性能作业机器人主要发展方向和关键技术

Fig. 2　Development directions and key technologies of high performance robots

慧工厂的需要. 物理系统与信息空间的高度融合, 给信息获取、通信、计算和控制带来诸多挑战, 给自动化科学技术带来深刻变革[16].

研究信息物理系统中资源优化调度、通信与控制协同优化、网络攻击防御、实时监控和评估等问题, 融合建模、优化与控制的理论和方法, 以构建安全、高效的信息物理系统为目标. 图 3 展示了未来几年建议的信息物理系统主要研究方向, 具体包括:

1) 信息物理系统构建及控制. 工业物联网大规模、实时、可靠的优化调度技术; 综合信息物理系统时、空、频、能等多维动态特性和耦合性, 建立感知、传输、控制一体化系统模型和跨域协同优化与控制方法; 通信资源、计算资源、控制能力等受限情况下高效的分布式优化与控制策略; 基于边缘计算和边云协同的分布式智能控制方法.

2) 信息物理系统安全. 通信干扰、虚假数据注入、隐私窃听等攻击的信息物理系统实时检测方法、攻击防御方法、弹性控制理论与方法; 信息物理系统隐私保护的设计与分析; 信息物理系统安全事件的时空关联性快速分析与溯源; 信息安全与控制安全的协同设计与验证, 实现信息物理系统综合安全.

3) 信息物理系统演化. 基于数字孪生技术, 实现信息物理系统高保真的数字化表征、状态监控和预测、运行状态评估技术; 研究孪生系统与实体信息物理系统的全方位深层次融合; 基于孪生系统及实体信息物理系统的多模态信息, 实现虚实系统持续交互式学习、自主更新和进化.

发展信息物理系统构建、信息获取与处理、信息安全分析、系统监控和评估等适用于大规模信息物理系统的前沿基础理论, 并在工业系统、智能交通系统、能源系统、医疗系统等方面进行应用研究, 结合智能制造发展战略, 推进信息化与工业化深度融合, 促进工业信息物理系统理论和技术突破, 实现人、设备与产品的实时联通、精确识别、有效交互与智能调控, 满足国家安全和经济社会发展的需求.

2.4　导航与控制技术

近年来, 在载人航天、对地观测、大型飞机、导航与位置服务等国家重大需求的牵引下, 导航制导与控制技术发展十分迅速[17]. 深空探测是继地球卫星、载人航天之后, 我国空间技术领域的又一重要发展阶段. 深空探测飞行器飞行距离更远、运行时间更长、任务环境更复杂. 对于月球背面探测、火星转移和捕获探测等, 仅依赖地面测控网进行导航与控制, 在精度、实时性和可靠性等诸多方面受到限制. 深海运载平台和深海潜器主要涉及深海环境下的大范围导航与控制, 考虑深海环境的复杂性、可用导航资源少和运载体长时间工作等特点, 惯性信息、海洋环境与海洋地球物理场信息以及声学信息将成为其自主导航的主要信息源. 此外, 开放环境下的车辆和人员定位导航主要依赖卫星导航手段,

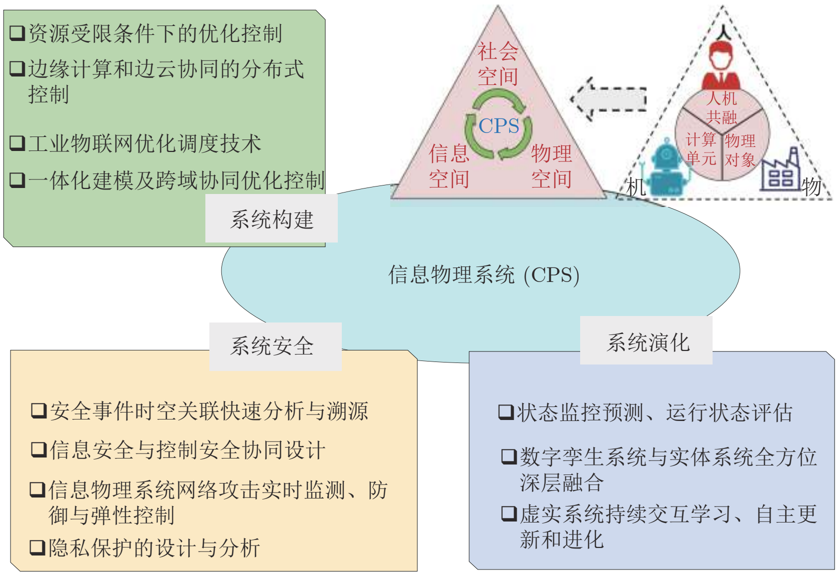

图 3　信息物理系统主要研究方向

Fig.3　Research directions of cyber-physical systems

但在高楼遮挡路面、隧道、室内停车场、商场、交通枢纽、展会等环境下, 由于信号受到遮挡或电磁干扰, 无法提供可靠的导航服务. 实时获取开放环境下车辆、机器人和人员在移动过程中的位置、方向、速度等信息, 并在此基础上实现车辆的自动/辅助驾驶、人员的高效疏导, 是体现城市信息化和治理水平的重要方面.

导航制导与控制技术关系到国家安全和国民经济建设, 属于基础性、战略性和前沿性的军民两用高新技术. 图 4 简要描述了我国导航制导与控制领域的重要进展和未来的发展趋势. 具体的研究方向包括:

1) 深空深海运动体和运载平台的自主导航与控制技术. 深空深海运载平台长时间高精度自主导航与控制; 环境交互下的深空深海仿生器基础控制理论和实现方法; 大范围高动态条件下飞行器导航制导和控制; 大型复杂挠性航天器稳定及机动控制; 行星和小行星等定点着落导航制导和控制.

2) 新型导航方法与技术. 量子精密测量与量子导航原理与技术; 超高灵敏原子惯性测量技术; 基于量子效应的原子陀螺仪惯性导航技术; 仿生导航原理与技术; 组合导航理论和方法; 有限信息下自主导航与控制方法.

3) 开放环境下多源信息融合定位导航的基础理论和方法. 云端—终端数据交互融合协同导航理论与方法; 基于多源异构信息融合的导航理论与方法; 开放环境下定位导航及控制技术.

深空深海和开放环境的导航制导与控制问题研究, 将显著提高我国高精度高可靠性导航与控制领域的基础研究水平, 解决不确定环境下导航与探测领域的技术难点, 为推进我国航空航天、海洋战略、城市治理的跨越式发展奠定坚实基础.

2.5　重大装备自动化技术

重大装备指技术难度大、关联面广、成套性强、对国计民生具有重大影响, 需要跨部门、跨行业、跨地区组织, 才能完成的重大成套技术装备, 或是规模庞大且直接关系人的生命安全及国家安全的重要运动体装备, 对国民经济和综合国力具有非常重要的战略意义. 比如, 以航空发动机、无人船舶等为代表的重大装备, 在交通运输、航空航天、海洋探测等方面为国民经济的提升和国防安全提供了重要保障.

智能化控制系统是重大装备的技术保障和核心支撑部分, 具有不可替代的作用. 一些重大装备工作在多参数、非线性、复杂和极端环境下, 对装备的安全运行和维护提出了很大的挑战[18]. 同时, 部分重大装备核心技术受制于人, 依赖国外. 因此, 研发具有自主知识产权的重大装备智能控制和智能维护技术, 是促进我国经济健康发展和维护国家安全的科技保障. 对于我国重大装备智能控制和智能维护技术方面存在的一些问题, 建议的具体研究方向包括:

1) 重大装备高精度与安全运行控制. 面向动力学、振动和控制问题的高速、高效、高精度控制器设计; 面向灵活、高效和经济性的重大装备集群一体化智能管理理论; 重大装备的通信网络安全架构、安全通信机制、电磁兼容等信息安全技术; 数据驱

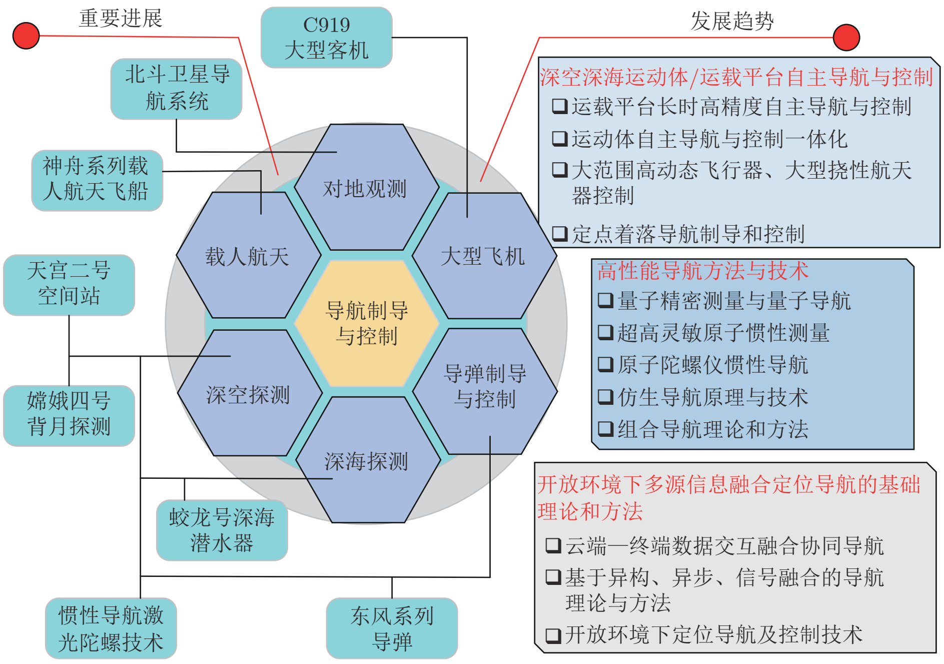

图 4　导航制导与控制领域的重要进展及发展趋势

Fig. 4　Important progress and trend of navigation, guidance and control

动的重大装备决策与控制技术; 重大装备控制任务、可靠性任务、信息安全任务协同设计的理论与方法.

2) 重大装备故障诊断与智能维护. 重大装备智能维护和容错控制基础理论与关键技术; 重大装备的性能耦合分析技术; 数据驱动的重大装备故障处理与预防技术; 基于数据的重大装备智能视情维护与自愈技术; 重大装备降级运行与智能更新理论与技术; 重大装备寿命预测与健康评估技术.

图 5 概述了重大装备智能控制与维护中主要的研究内容. 针对我国国防、制造业等多个领域的国家重大装备需求, 凝练与自动化学科相关的科学问题和关键技术, 提高自主创新能力, 实现重要装备的自动化技术自主可控.

2.6　自主智能系统

自主智能系统是自动化和人工智能技术的最佳载体, 是各种先进算法验证与应用平台, 其基础理论研究创新将成为未来自动化和人工智能领域发展的核心动力, 在国民经济与国防安全等领域具有重要地位. 例如, 在民用领域, 自主智能系统广泛应用于智能交通中的多无人车协同路径规划, 提升智慧城市道路利用率, 缓解城市拥堵; 在工业应用、商业管理及应急救援等领域的需求量也呈现出快速增长的趋势; 在国防领域, 多个作战单元与其他作战系统协调作战, 防空导弹系统同时拦截多个目标, 无人机、无人车及无人武器的发展将有效提高作战能力. 目前, 我国在自主智能系统和群体智能系统的大规模应用方面, 缺乏前瞻性理论支撑和关键技术突破. 因此, 必须重视自主智能系统的基础理论与应用研究, 实现从机器人到自主智能系统, 从个体智能到群体智能的跨越[19−20].

从自主无人系统、人机混合、集群协同、安全技术和技术验证平台等方面出发, 图 6 展示了自主智能系统的总体发展思路. 具体研究内容如下:

1) 自主无人系统理论与技术. 多传感器信息融合的无人系统智能感知与自主学习; 无人系统学习演化与自主决策; 无人系统动态建模、智能感知、自主运动与避障; 动态目标识别与特定任务决策; 环境未知、信息不完全、通信受限下无人系统智能感知与决策理论和方法; 复杂场景无人平台的主动感知、快速决策和精确控制.

2) 人机混合自主智能系统. 开放环境下人机结合的态势感知方法与技术; 人机交互的特征提取与表示方法; 人机融合高效推理与交互操作; 人机混合智能增强、人在回路技术.

3) 集群自主智能系统. 可表达、可计算、可解释的群体智能方法; 集群系统信息交互、多目标优化决策; 集群系统协同与自主结构变换; 无人系统集群优化和集群智能; 对抗、强干扰环境下的集群系统协同控制理论; 非完全信息条件下集群系统协同、博弈等动态演绎方法.

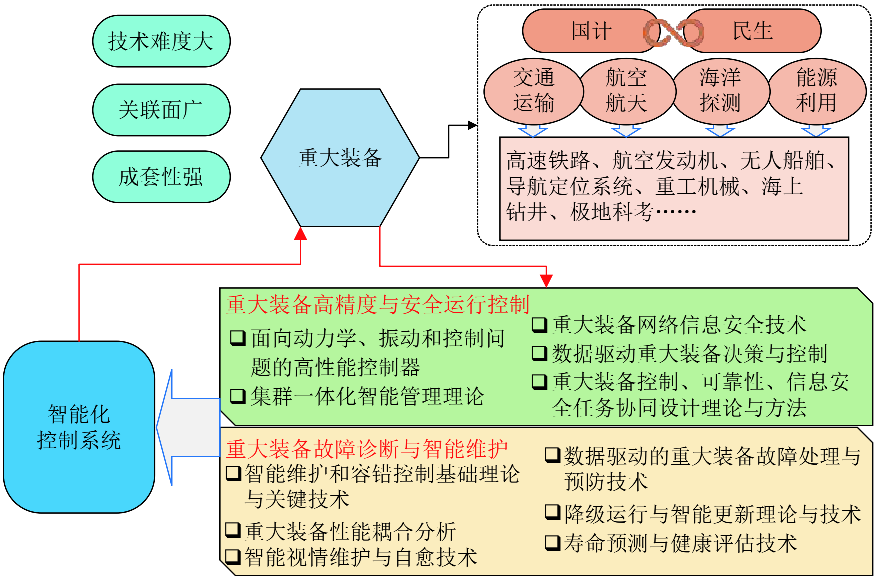

图 5 重大装备智能控制与维护

Fig. 5 Intelligent control and maintenance of automatic equipments

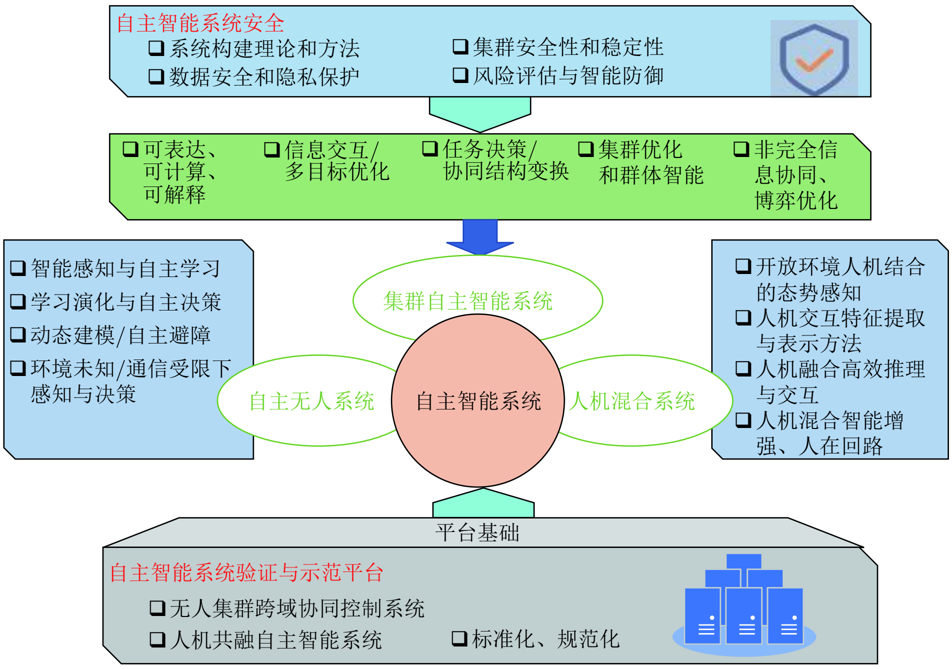

图 6 自主智能系统的总体发展思路

Fig. 6 Development strategy of autonomous intelligent systems

4) 自主智能系统安全. 安全可信自主智能系统构建理论和方法; 自主智能系统数据安全和隐私保护; 自主智能系统集群的安全性和稳定性; 安全风险评估与智能防御; 决策计算全程可测可控, 达到攻击者进不去、非授权者重要信息拿不到、窃取保密信息看不懂、系统和信息改不了的安全效果.

5) 研制 "无人集群跨域协同控制系统" 与 "人机共融自主智能系统" 等技术验证和示范平台; 发展自主智能系统的国家标准、自主芯片、标准软硬件接口和操作系统等.

自主智能系统的研究将大力推进科技与经济的快速发展, 引领智能产业和智能经济的发展. 我国在相关领域的研究取得了长足的进步, 但在顶级人才、前沿基础理论、技术标准、软硬件平台和总体发

展体系等方面仍然存在不足, 需要进一步加大投入, 充分调动国内外的优势资源, 争取获得跨越式发展.

2.7 人工智能驱动的自动化

近年来, 人工智能研究范围不断拓宽, 已涵盖了模式识别、自然语言理解、认知科学等多个重要分支, 研究内容已经从信息处理、知识表示等发展到机器智能, 包括机器感知、机器思维、机器学习、机器行为等, 并在不断更新和扩展[10]. 以深度学习为代表的感知和认知, 以及以强化学习为代表的行为决策和控制是人工智能驱动自动化技术的典型代表, 二者结合能够构成机器智能决策的闭环. 国际上已经出现了一些有显示性的成果[21−22], 如波士顿动力公司与美国国防部合作, 开发了多款仿生机器人, 能够实现快速平稳移动、跳跃甚至翻滚, 具有相当好的灵活性和稳定性. 人工智能的核心理论和基础算法, 通过与应用系统相结合, 可有效提取数据信息、自主学习决策和优化, 提高控制效率, 进而建立具有不同功能的智能系统.

当前通用人工智能方法尚未成熟, 深度学习等人工智能方法可解释性不高, 这也是人工智能理论实际应用困难的根本原因之一. 另外, 由于实际问题差别很大, 如实际问题连续性、不完全信息、感知信息不确定性、决策状态约束性、多个体协调复杂性等, 使得人工智能理论和方法, 难以直接推广到更广泛的对象, 如工业互联网、流程工业中, 需要基于人工智能理论开发相应的智能算法. 图 7 展示了人工智能和自动化交叉领域的若干前沿研究方向, 其核心关键问题是人工智能理论驱动的智能感知、控制与决策方法, 以及算法设计、系统研发与应用. 需要在语音识别、自然语言处理、机器视觉等智能感知领域开展深入研究, 还应在深度强化学习理论、不完全信息博弈对抗、多智能体协调控制、鲁棒决策与控制、神经网络架构搜索与优化、类脑计算等领域积极布局, 以期取得突破性的研究成果.

总体来说, 我国在语音识别、机器视觉、机器翻译等领域已取得显著进展, 但我国对机器学习核心算法的掌握程度仍然较低, 在人工智能核心算法创新、人工智能系统的设计与研发等方面, 还需要与发达国家进行技术合作, 缩小差距, 促进人工智能理论和方法在自主运动体、智能电网、医疗、军事等系统中的应用, 扩展人工智能技术的应用边界.

3 学科发展的保障措施

未来几年, 为促进我国自动化科学技术的持续发展, 吸引更多的科技工作者投身自动化领域研究, 提升我国自动化学科的地位和国际影响力, 建议从学科发展、基金资助、需求导向、人才培养、科研平台等方面做出努力.

1) 为保持学科优势领域的发展趋势, 同时加大对薄弱学科领域的资助力度, 鼓励开展交叉学科研究, 促进自动化学科各领域均衡协调发展. 自动化学科在注重理论研究的同时, 以重大国家需求为牵

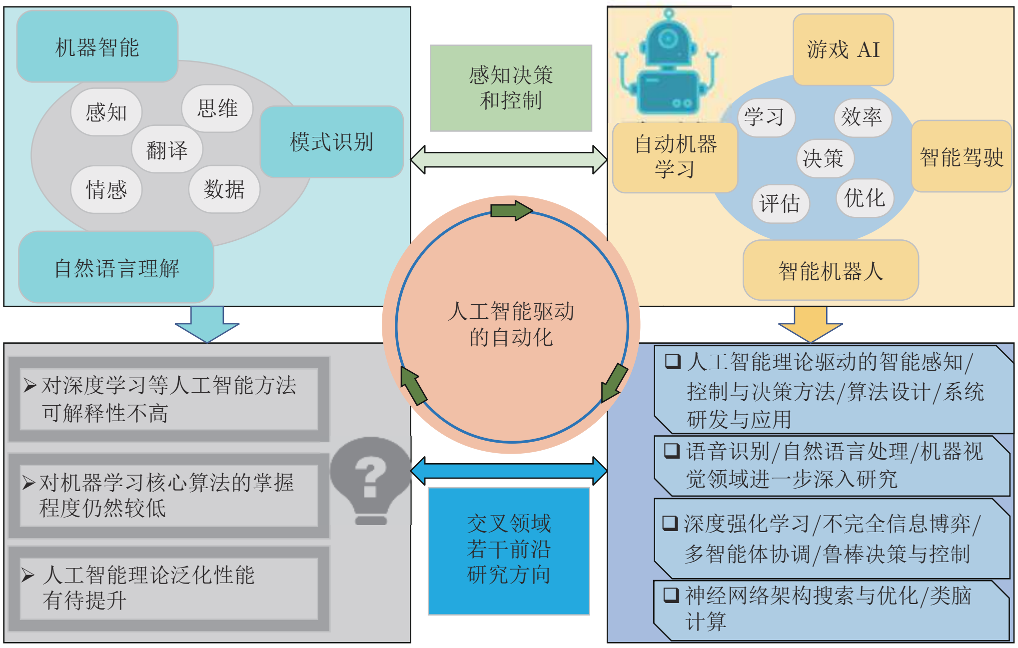

图 7 人工智能和自动化交叉领域若干前沿研究方向

Fig. 7 Cutting-edge research directions in automation with AI

引, 凝炼共性科学问题, 鼓励自动化系统的研发与成果转化, 实现自动化学科持续蓬勃发展.

2) 发挥自然科学基金人才培养作用, 激发科技人才的创新活力, 完善青年人才资助计划. 适度调整项目经费使用范围与比例, 适当增加青年基金、优秀青年基金、杰出青年基金的资助率. 进一步修订学科申请代码, 推进以自动化学科为主的交叉学科发展, 拓宽自动化学科研究范畴, 提升学科影响力. 进一步加强基金资助内容审核, 避免对相似研究内容的重复资助, 提高资助效率.

3) 引导建立公共开放的自动化科研与实验验证平台. 由于缺乏统一的标准化实验平台, 各研究工作彼此独立难以快速集成和相互共享, 重复开发实验平台浪费了大量人力物力. 建立标准化的基础支撑平台, 如群体智能科研支撑平台、人工智能开源软硬件平台、人工智能基础数据平台等. 为实现理论创新、技术和系统集成提供条件, 促进理论研究成果的共享和应用.

4 结论

遵循自动化学科发展所具有的需求牵引和学科交叉的特点, 未来自动化科学技术研究将更加注重解决复杂系统、网络系统、多传感器信息融合、生物信息系统、社会治理系统等重大问题. 注重系统各个部件协同感知并进行协调控制, 在理清个体行为与群体行为间关系的基础上, 实现对群体协作、竞争、进化、演化行为的调控. 加强研究如具有人机物协同特征的工业系统、作战系统、交通系统、电力系统、生物系统和社会系统. 自动化科学技术将与其它相关理论技术密切结合, 解决新兴技术快速发展带来的自动化领域前沿科学问题.

5 说明

本文所著观点及内容参考国家自然科学基金委员会十四五及中长期发展规划. 所著观点为笔者观点, 仅供参考.

References

1 Wang Cheng-Hong, Song Su, Liu Yun-Gang. The more and more important effort of scientfic foundation on the subject of control theory and applications. *China Basic Science*, 2010, **12**(6): 38−42
(王成红, 宋苏, 刘允刚. 国家自然科学基金与我国控制理论与控制工程学科的发展. 中国基础科学, 2010, **12**(6): 38−42)

2 China Automation Association. 2016-2017 development report of control science and engineering. Beijing: China Science and Technology Press, 2018
(中国自动化学会. 2016-2017 控制科学与工程学科发展报告. 北京: 中国科学技术出版社, 2018)

3 Chai Tian-You. Development directions of automation science and technology. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(11): 1923−1930
(柴天佑. 自动化科学与技术发展方向. 自动化学报, 2018, **44**(11): 1923−1930)

4 Bao Wei-Min, Qi Zhen-Qiang, Zhang Yu. Thoughts on the development of intelligent control technology. *Scientia Sinica Informationis (in Chinese)*, 2020, **50**(08): 1267−1272
(包为民, 祁振强, 张玉. 智能控制技术发展的思考. 中国科学: 信息科学, 2020, **50**(08): 1267−1272)

5 Wu Guo-Zheng. Analysis of the status and trend of the development of China's automation discipline from F03 funding of NSFC. *Acta Automatica Sinica*, 2019, **45**(9): 1611−1619
(吴国政. 从 F03 项目资助情况分析我国自动化学科的发展现状与趋势. 自动化学报, 2019, **45**(9): 1611−1619)

6 Deng Fang, Song Su, Liu Ke, Wu Guo-Zheng, Fu Jun. Data and research hotspot analyses of national natural science foundation of china in automation field. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(2): 377−384
(邓方, 宋苏, 刘克, 吴国政, 付俊. 国家自然科学基金自动化领域数据分析与研究热点变化. 自动化学报, 2018, **44**(2): 377−384)

7 Arenas A, Diaz-Guilera A, Kurths J, Moreno Y, Zhou C. Synchronization in complex networks. *Physics Reports*, 2008, **468**(3): 93−153

8 Qian Feng, Du Wen-Li, Zhong Wei-Min, Tang Yang. Problems and challenges of smart optimization manufacturing in petrochemical industries. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(6): 893−901
(钱锋, 杜文莉, 钟伟民, 唐漾. 石油和化工行业智能优化制造若干问题及挑战. 自动化学报, 2017, **43**(6): 893−901)

9 He W, Li Z, Chen C L P. A survey of human-centered intelligent robots: Issues and challenges. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, **4**(4): 602−609

10 Zheng Nan-Ning, Liu Zi-Yi, Ren Peng-Ju, Ma Yong-Qiang, Chen Shi-Tao, Yu Si-Yu, et al. Hybrid-augmented intelligence: Collaboration and cognition. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, **18**: 153−179

11 Sun Chang-Yin, Mu Chao-Xu. Important scientific problems of multi-agent deep reinforcement learning. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(7): 71−79
(孙长银, 穆朝絮. 多智能体深度强化学习的若干关键科学问题. 自动化学报, 2020, **46**(7): 71−79)

12 Li Xiao-Hua. New infrastructure construction and policy orientation for a smart society. *Reform*, 2020, **315**(5): 34−48
(李晓华. 面向智慧社会的 "新基建"及其政策取向. 改革, 2020, **315**(5): 34−48)

13 Burdet E, Osu R, Franklin D W, Milner T E, Kawato M. The central nervous system stabilizes unstable dynamics by learning optimal impedance. *Nature*, 2001, **414**(6862): 446−449

14 Ding Han, Yang Xue-Jun, Zheng Nan-Ning, Li Ming, Lai Yi-Nan, Wu Hao. Tri-Co Robot: A Chinese robotic research initiative for enhanced robot interaction capabilities. *National Science Review*, 2017, **5**(6): 799−801

15 China Electronics Standardization Institute. White paper: Cyber-physical system [Online], available: http://www.cesi.cn/201703/2251.html, January 1, 2017
(中国电子技术标准化研究院. 信息物理系统白皮书 [Online], available: http://www.cesi.cn/201703/2251.html, 2017 年 1 月 1 日)

16 Wang Fei-Yue, Zhang Jun, Zhang Jun, Wang Xiao. Industrial internet of minds: Concept, technology and application. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(9): 1606−1617
(王飞跃, 张军, 张俊, 王晓. 工业智联网: 基本概念、关键技术与核心应用. 自动化学报, 2018, **44**(9): 1606−1617)

17 Sun Chang-Yin, Mu Chao-Xu, Zhang Rui-Min. Terminal sliding mode control of hypersonic aircrafts. Beijing: Science Press, 2014
(孙长银, 穆朝絮, 张瑞民. 高超声速飞行器终端滑模控制技术. 北京: 科学出版社, 2014)

18 Yang Hao, Jiang Bin, Zhou Dong-Hua. Review and perspectives on fault tolerant control for interconnected systems. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(1): 9−19
(杨浩, 姜斌, 周东华. 互联系统容错控制的研究回顾与展望. 自动化学报, 2017, **43**(1): 9−19)

19 Chen Jie. Foundational research on intelligent group system for social governance. *The 252nd Shuang-Qing Symposium of National Natural Science Foundation of China*, 2020
(陈杰. 面向社会治理的智能群系统基础研究. 国家自然科学基金委员会第 252 期双清论坛, 2020)

20 Wu Jun, Xu Xin, Wand Jian, He Han-Gen. Recent advances of reinforcement learning in multi-robot systems: A survey. *Control and Decision*, 2011, **26**(11): 1601−1610
(吴军, 徐昕, 王健, 贺汉根. 面向多机器人系统的增强学习研究进展综述. 控制与决策, 2011, **26**(11): 1601−1610)

21 Sutton R S, Barto A G. Reinforcement learning: An introduction. Cambridge MA: MIT Press, 1998

22 Silver D, Huang A, Maddison C, et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, 2016, **529**(7587): 484−489

孙长银 东南大学自动化学院教授. 主要研究方向为智能控制与优化, 强化学习, 神经网络, 数据驱动控制.
E-mail: cysun@seu.edu.cn
(**SUN Chang-Yin** Professor at the School of Automation, Southeast University. His research interest covers intelligent control and optimization, reinforcement learning, neural networks, data-driven control.)

吴国政 博士, 国家自然科学基金委员会信息科学部三处处长. 主要研究方向为人工智能. 本文通信作者.
E-mail: wugz@nsfc.gov.cn
(**WU Guo-Zheng** Ph. D., director of Division 3 in the Department of Information Sciences, National Natural Science Foundation of China. His main research interest is artificial intelligence. Corresponding author of this paper.)

王志衡 博士, 国家自然科学基金委员会信息科学部三处项目主任. 主要研究方向为自动化.
E-mail: wangzh@nsfc.gov.cn
(**WANG Zhi-Heng** Ph. D., program director of Division 3 in the Department of Information Sciences, National Natural Science Foundation of China. His main research interest is automation.)

丛 杨 中国科学院沈阳自动化研究所研究员, 目前为国家自然科学基金委员会信息科学部三处流动项目主任. 主要研究方向为计算机视觉, 智能视频处理, 机器学习, 机器人伺服.
E-mail: congyang@nsfc.gov.cn
(**CONG Yang** Professor at the Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He is currently a non-permanent program director in the Department of Information Sciences, National Natural Science Foundation of China. His research interest covers computer vision, intelligent video processing, machine learning, robot servo.)

穆朝絮 天津大学电气自动化与信息工程学院教授. 主要研究方向为强化学习, 自适应学习系统, 智能控制和优化.
E-mail: cxmu@tju.edu.cn
(**MU Chao-Xu** Professor at the School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University. Her research interest covers reinforcement learning, adaptive and learning systems, intelligent control and optimization.)

贺 威 北京科技大学自动化学院教授. 主要研究方向为机器人学, 振动控制和智能控制系统.
E-mail: weihe@ieee.org
(**HE Wei** Professor at the School of Automation and Electrical Engineering, University of Science and Technology Beijing. His research interest covers robotics, vibration control and intelligent control systems.)