

自动化科学与技术发展方向

柴天佑^{1,2,3}

摘要 本文结合中国自动化科学与技术的发展状况和中国绝大多数大学设有自动化专业的现状,借鉴自动化科学与技术发展历程中的成功经验,结合国家社会经济发展和国家安全对自动化系统的未来需求,以生产制造系统、重要运载工具和人参与的信息物理系统为主要对象,以自动化系统的发展方向——智能自主控制系统、智能优化决策系统和智能优化决策与控制一体化系统的愿景功能为目标,以研究实现愿景功能的建模、控制与优化新算法和新的自动化系统的设计方法和实现技术以及结合重大应用领域开展的应用研究为主线,提出了自动化科学与技术的发展方向,并结合新兴应用领域对自动化科学与技术的需求与挑战,提出了未来自动化科学与技术的发展方向。

关键词 智能自主控制系统, 智能优化决策系统, 智能优化决策与控制一体化系统, 人参与的信息物理系统, 人工智能驱动的自动化

引用格式 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

DOI 10.16383/j.aas.2018.c180252

Development Directions of Automation Science and Technology

CHAI Tian-You^{1,2,3}

Abstract This paper takes into account the current status of automation science and technology development as well as the existing automation undergraduate programs in many Chinese universities at the moment; while lending from the successes in automation science and technology developmental history combined with future demands for automation systems to aid in the economic development and national security of China; taking manufacturing systems, important vehicles and cyber-physical and human system as research objects, this paper proposes that the future of automation systems be directed towards transforming into intelligent autonomous control system, intelligent optimal decision-making system and integrated system of intelligent optimal decision-making and control. With a research focus geared towards practical application, new algorithms of modeling, control and optimization for the prospective functions of the developing automation systems with subsequent design of methods and implementation techniques for new automation systems are taken as development directions of automation science and technology. Finally, this paper proposes that the future direction for development in the field of automation science and technology should be based on the current challenges and requirements that have emerged in new areas of application.

Key words Intelligent autonomous control system, intelligent optimal decision-making system, integrated system of optimal decision-making and control, cyber-physical and human system, artificial intelligence driven automation

Citation Chai Tian-You. Development directions of automation science and technology. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(11): 1923–1930

收稿日期 2018-04-25 录用日期 2018-07-05

Manuscript received April 25, 2018; accepted July 5, 2018

国家自然科学基金 (61550002), 中国科协学科方向预测及技术路线图 (2015XKYL03), 中国工程院互联网 + 行动计划战略研究 2035 (2018-ZD-02), 中国工程院、国家自然科学基金委员会 “2014 年度中国工程科技中长期发展战略研究” (2014-ZCQ-03, L1422028) 资助

National Natural Science Foundation of China (61550002), Subject Direction Prediction and Technology Roadmap, Chinese Science and Technology Association (2015XKYL03), Internet + Action Plan Strategy Research 2035, Chinese Academy of Engineering (2018-ZD-02), 2014 Medium and Long-term Development Strategy Research of Chinese Engineering Science and Technology, Chinese Academy of Engineering, National Natural Science Foundation of China (2014-ZCQ-03, L1422028)

本文责任编辑 刘向杰

Recommended by Associate Editor LIU Xiang-Jie

1. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110819
2. 国家冶金自动化工程技术研究中心 沈阳 110819 3. 自动化研究中心 沈阳 110819

1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for

自动化技术在人类生产、生活与管理进程中起到了不可替代的作用. 自动化技术广泛应用于制造业, 使以机械装备制造等为代表的离散工业制造过程和以石油、冶金、材料等重要原材料工业和电力等能源工业为代表的流程工业过程实现了自动化, 显著提高了产品质量和生产效率. 自动化技术广泛应用于制造企业的经营管理和生产管理中, 使企业的资源计划和制造过程管理的效率显著提高, 成为提高企业竞争力的核心技术^[1-2]. 自动化技术在航空、航天、轨道交通、汽车、海洋运载工具的导航、制导与控制、机器人的控制与运动轨迹的规划中发挥着

Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819
2. National Engineering Research Center of Metallurgy Automation, Shenyang 110819 3. Research Center of Automation, Shenyang 110819

不可取代的作用^[3]。

正如文献 [4] 所指出的, 处处可见作为自动化技术的重要组成部分的控制技术, 控制技术在几乎所有的主要技术革命中都发挥了重要作用。例如, 从蒸汽机到高铁、辅助驾驶汽车、高性能飞机, 从火箭到航天器, 从有线电话到手机, 从照相机到神经影像, 从敏捷制造到机器人, 从医疗设备到远视手术等, 控制技术在上述技术革命中对提升系统性能如速度、效率、可靠性和稳定性以及减少能源消耗、成本和废物排放等方面发挥了不可取代的作用。

当前, 发达国家将智能制造作为提升制造业整体竞争力的核心高技术。美国智能制造领导联盟提出了实施 21 世纪“智能过程制造”的技术框架和路线^[5]。德国针对离散制造业提出了以智能制造为主导的第四次工业革命发展战略, 即“工业 4.0”计划^[6]。英国宣布“英国工业 2050 战略”, 日本和韩国先后提出“T-Japan 战略”和“制造业创新 3.0 战略”。面对第四次工业革命带来的全球产业竞争格局的新调整, 为抢占未来产业竞争制高点, 我国宣布实施“中国制造 2025”。

智能制造的关键是实现制造流程智能化, 这就需要将人工智能技术与制造流程的控制系统、管理系统和制造流程的物理资源深度融合与协同。迄今为止, 人工智能技术还没有统一的、明确的界定。文献 [7] 指出, AI (Artificial intelligence) 不是单一技术, 而是应用于特定任务的技术集合。文献 [8] 指出, 虽然对 AI 的界定并不明确且随时间推移不断变化, 但 AI 的研究和应用多年来始终秉持一个核心目标, 即使人的智能行为实现自动化或复制。人工智能技术的涵义是通过机器智能延伸和增强人类的感知、认知、决策、执行等功能, 增强人类认识世界与改造世界的能力, 完成人类无法完成的特定任务或比人类更有效地完成特定任务。

2016 年 10 月, 美国白宫发布了《美国国家人工智能研究与发展策略规划》, 谋划美国未来的人工智能发展。2017 年 7 月, 中国国务院印发《新一代人工智能发展规划》, 人工智能正式成为我国国家战略。2018 年 3 月 1 日, 美国国际战略研究所发布报告《美国机器智能国家战略报告》, 提出了机器智能技术对国防、经济、社会等方面的广泛影响和发展战略。

美国国家情报委员会在 2030 年全球趋势 (Global Trend 2030) 中, 从经济、社会发展角度提出了未来四大重要技术, 其中, 自动化和制造技术为第二大重要技术; 华盛顿邮报网站 (2013.5.24) 给出了驱动未来经济的 12 种颠覆性技术, 其中, 知识性工作的自动化列为第二种颠覆性技术。由此可见, 自动化科学与技术已经成为社会经济发展、国家安

全、使人类生活变得越来越美好的不可取代的技术。

然而, 自动化科学与技术, 特别是控制科学与技术, 没有像通讯和计算机技术那样得到社会的理解和支持。为此, 国外学者组织了多次专题讨论会, 出版了研究报告, 旨在论证系统与控制在大多数应用领域中信息和通信技术的核心, 提出了新的研究方向, 希望得到基金资助机构的优先考虑和支持^[4, 9-11]。虽然这些研究报告对控制理论的发展起到了积极的促进作用, 但并没有使系统与控制在资助机构优先资助的领域。我国负责自动化科学与技术发展的部门曾多次组织国内学者开展自动化学科发展和优先资助领域的战略研究, 出版了研究报告, 阐明自动化科学与技术的重要性和优先资助的研究方向^[12-13]。这些研究报告对自动化学科的发展起到了积极的促进作用。虽然与国外相比, 我国有负责自动化科学与技术发展的基金资助机构与资助经费, 但是自动化科学与技术在国家社会经济发展和国防安全中发挥的作用却不如通讯、计算机等其他信息科学和技术那样明显, 获得的资助经费也少于通讯、计算机等其他信息科学和技术。

自动化科学与技术始终围绕着建模、控制与优化三个基本科学问题开展研究, 它所形成的核心基础理论—建模、控制、优化理论和方法具有“使能”性。因此, 大多数工程技术与工程管理专业都将建模、控制与优化理论和方法作为该专业基础的必修课。国外大学一般不设立自动化专业, 从事系统与控制的教授主要在其他工程专业讲授控制理论课程。而在我国, 大多数大学设有自动化专业, 但从事控制理论研究的学术带头人多, 从事自动化系统技术研究的学术带头人少, 而且重传统控制理论, 轻自动化系统技术。

上述研究报告主要根据理论的发展提出研究方向, 然而, 自动化科学与技术的建模、控制、优化理论与方法是通过与应用领域的实际对象结合, 研制具有动态特性分析、预测、控制与优化决策功能的自动化系统来体现其在人类认识世界和改造世界活动中发挥的不可替代的作用。

特别是, 当今国际上信息科学与技术的重要研究方向是 Cyber-Physical Systems (CPS)。美国国家科学基金会在 2008 年提出, CPS 是计算资源与物理资源的紧密融合与协同, 使得系统的适应性、自治力、效率、功能、可靠性、安全性和可用性远超过今天的系统^[14]。计算资源主要指自动化 (建模、控制、优化)、计算机、通讯, 物理资源主要是指 CPS 的研究对象所涉及的领域知识。研究目标是研制实现未来需求功能的系统。智能手机、IBM 的同声传译系统、AlphaGo 等智能技术系统是典型的 CPS。CPS 是多学科交叉的产物, 是当今信息技术条件下

的自动化系统. 创造未来需求的新功能的系统已成为信息科学与技术的研究目标.

为了使中国的自动化专业在国家社会经济发展和国家安全中发挥不可取代的作用, 本文以智能自主控制系统、智能优化决策系统和智能优化决策与控制一体化系统作为未来需求的自动化系统发展方向, 以生产制造系统和重要运载工具为主要对象, 以实现上述系统的愿景功能为目标的系统理论与技术研究为主线, 提出了自动化科学与技术的发展方向, 结合新兴应用领域对自动化科学与技术的需求与挑战, 提出了未来自动化科学与技术的发展方向.

1 自动化科学与技术的定义与特征

自动化的界定并不明确, 且随时间推移不断变化, 但自动化的研究和应用多年来始终秉持一个核心目标: 研制系统代替人或辅助人去完成人类生产、生活和管理活动中的特定任务, 减少和减轻人的体力和脑力劳动, 提高工作效率、效益和效果. 由于我国大多数大学都设有自动化专业, 科技部和国家自然科学基金委员会都设有专门部门负责自动化科学与技术的发展, 因此, 有必要从学术和专业的角度对自动化科学与技术给出定义. 百度对自动化的定义如下: 广义的自动化, 是指在人类的生产、生活和管理的一切过程中, 通过采用一定的技术装置和策略, 使得仅用较少的人工干预甚至做到没有人工干预, 就能使系统达到预期目的的过程, 从而减少和减轻了人的体力和脑力劳动, 提高了工作效率、效益和效果. 由此可见, 自动化涉及到人类活动的几乎所有领域, 因此, 自动化是人类自古以来永无止境的梦想和追求目标.

自动化科学与技术主要以工业装备为代表的固定物体、运载工具为代表的运动体以及人参与的信息物理系统为研究对象, 以替代人或辅助人来增强人类认识世界和改造世界的能力为目的, 综合运用控制科学与工程、系统科学与工程、信息与通信工程、计算机科学与技术、数学与人工智能等学科知识和所涉及对象的领域知识, 研究具有动态特性仿真与分析、预测、控制与优化决策功能的自动化系统设计方法和实现技术的一门工程技术学科.

自动化科学与技术具有如下明显的特征:

1) 交叉性

自动化科学与技术是具有明显交叉性的学科. 自动化科学与技术的理论基础 (建模、控制、优化理论与方法) 的建立是由数学、物理、计算机科学、以及研究对象所涉及的领域学科交叉形成. 所研制的自动化系统涉及到控制科学与工程、系统科学与工程、信息与通信工程、计算机科学与技术、数学、人工智能等学科知识和所涉及对象的领域知识. 工程

技术专家、数学家、经济学家和物理学家等都对该领域的发展做出了贡献.

2) 使能性

自动化科学技术的核心理论基础是动态系统的建模、控制与优化的理论与方法, 核心技术基础是具有动态特性仿真与分析、预测、控制与优化决策功能的系统设计方法与实现技术.

自动化科学技术的使能性表现在其动态系统建模理论与方法所提供的动态特性建模与参数估计方法有助于其他学科在研究对象的机理基础上建立动态数学模型、进行动态特性仿真与分析的研究; 控制理论与方法所提供的反馈、前馈、预测、自适应控制器设计方法和思想以及控制系统性能分析方法有助于机械、电气与电子、化工与冶金等其他学科领域涉及的控制系统设计与分析的研究; 优化理论与方法所提供的静态与动态优化决策理论与方法有助于其他学科领域涉及的系统优化运行和优化决策的研究.

3) 系统性

系统性是自动化科学与技术的重要特征. 自动化科学与技术总是从“系统”的角度来分析与研究所涉及到的研究对象的动态建模、控制和优化决策. 特别是反馈控制, 通过反馈机制改善了被控对象的动态特性, 形成的反馈控制系统可以达到预期的目的. 自动化科学与技术的建模、控制、优化理论与方法是通过具有动态特性分析、预测、控制与优化决策功能的系统来体现在人类认识世界和改造世界活动中发挥的不可替代的作用. 今天, 大型而复杂的物理系统与越来越多的分布式计算单元相结合用以监测、控制、管理和优化决策. 物理系统的各个元素通过物质、能量或动量的交换而相互联系, 而控制和管理与优化决策系统的各个单元则通过通信网络相互联系. 例如, 智能电网、水资源控制与管理系统、交通管理与指挥系统、智能工厂、智慧城市、智慧医疗等. 只有对这种人参与的信息物理系统进行建模、预测、控制和优化决策的深入研究, 才有可能更好地设计监测、控制、管理和优化决策系统, 才能实现节能减排, 有效地改善人类的生活.

4) 广泛性

通过以上对自动化科学与技术的交叉性、使能性和系统性的分析, 可以看到自动化科学与技术还具有广泛性的特征.

自动化科学技术的研究对象具有广泛性. 研究对象可以是固定的物体, 如以机械制造工业为代表的离散工业和以原材料工业为代表的流程工业中的生产制造装备、建筑设施等; 研究对象可以是移动的物体, 如航天航空器、轨道交通与汽车、陆运运动体、机器人等; 研究对象也可以是人参与的信息物理

系统,如企业管理系统、交通管理系统、生物系统、社会管理与经济系统。

自动化科学与技术的应用领域具有广泛性。采用自动化科学与技术所研制的自动化系统广泛应用到工业、农业、军事、科学研究、交通运输、商业、医疗、服务和家庭等各个领域,涉及到人类的生产、生活和管理的一切过程。

自动化科学与技术针对同一研究对象所研究的自动化系统的功能具有广泛性和多样性。例如,针对工业过程研究动态特性建模可以实现工业过程的动态特性仿真与分析;研究过程控制可以实现工业过程的输出跟踪工艺所确定的设定值;研究过程运行优化可以实现表征工业过程的加工产品的质量、效率、消耗等运行指标的优化控制;研究由不同工业过程组成的全流程生产线的协同优化控制可以实现生产线生产指标的优化控制;研究企业经营决策、计划调度的管理与优化决策可以实现企业的综合生产指标优化;研究生产工况的建模可以实现异常工况的监控与自愈控制。

2 自动化科学与技术的发展历程

很久以前,大自然就发现了反馈。它创造了反馈机制并且在各个层次利用这些机制,它是机体平衡和生命的核心^[11]。反馈控制系统最早出现在风车上。当时发明的离心调速器就是一种反馈控制系统,其目的是使风车保持恒定转速运行^[15]。为了使织布机和其他机器保持恒定转速,1788年,詹姆斯·瓦特成功地改造了离心调速器。离心调速器是一个比例控制器,因此会产生稳态误差。后来的调速器加入了积分作用^[15-16],从此调速器成了蒸汽机不可分割的一部分。蒸汽机与调速器的广泛应用推动了第一次工业革命。如何设计一个稳定的调速器成为一个极富挑战的科学难题。麦克斯韦(Maxwell)开始了调速器的理论研究^[17]。麦克斯韦推导出三阶线性微分方程来描述调速系统,同时发现可以通过闭环系统特征方程的根确定系统的稳定性。紧接着,数学家劳斯和赫尔维茨建立了一般线性系统的稳定性判据^[18-19]。上述工作奠定了控制理论的基础。

19世纪初,Sperry发明了陀螺驾驶仪,应用于船舶驾驶^[16,20-21]。陀螺驾驶仪可以调整控制器参数,也可以设置目标航向。该控制器是一个典型的PID控制器。PID控制不仅广泛应用于上述领域,而且应用于电力工业,使传送带于1870年开始在辛辛那提屠宰场使用,推动了基于劳动分工和以电为动力的大规模生产,形成了第二次工业革命。如何选择PID控制器参数使控制系统具有良好的性能的研究吸引了大量的工程师和科学家,直到1942年,Ziegler Nichols建立了PID参数的整定方法^[22]。

为了解决长途电话的失真问题,贝尔实验室的Harold Black工程师发明了负反馈放大器^[23]。不稳定或“啸叫”常常出现在反馈放大器的试验中。因此,长途电话通信的技术挑战带来了反馈回路的稳定性问题。1932年,亨利·奈奎斯特(Harry Nyquist)开始研究这个问题,建立了“奈奎斯特判据”^[24]。1943年,贝尔实验室的伯德领导的小组设计M9火炮指挥控制系统,采用了伯德发明的设计反馈控制系统的工具—Bode图^[25]。上述成果奠定了经典控制理论的基础。

50年代末到60年代初,航天技术的发展涉及到大量的多输入多输出系统的最优控制问题,用经典控制理论已难以解决。数字计算机的出现使得亨利·庞加莱(1875~1906)的状态空间表述方法可以作为被控对象的数学模型和控制器设计与分析的工具。于是产生了以极大值原理、动态规划和状态空间法为核心的现代控制理论^[26]。然而,现代控制理论难以应用于工业过程。工业过程往往是由多个回路组成的复杂被控对象,难以用精确数学模型描述。大规模工业生产的需求、计算机和通讯技术的发展催生了一种专门的计算机控制系统—逻辑程序控制器(PLC)。1969年,美国Modicon公司推出了084 PLC^[27]。该控制系统可以将多个回路的传感器和执行机构通过设备网与控制系统连接起来,可以方便地进行多个回路的控制、设备的顺序控制和监控。1975年,Honeywell和Yokogawa公司研制了可以应用于大型工业过程的分布式控制系统(DCS)^[28]。以组态软件为基础的控制软件、过程监控软件的广泛应用使得生产线的自动化程度更高,推动了第三次工业革命。

在工业过程控制中,现有的控制理论和控制系统的设计方法的研究集中在保证闭环控制回路稳定的条件下,使被控变量尽可能地跟踪控制系统的设定值。从工业工程的角度看,自动控制或者人工控制的作用不仅仅是使控制系统输出很好地跟踪设定值,而且要控制整个生产设备(或过程)的运行过程,实现运行优化,即使反映产品加工过程的质量、效率的运行指标尽可能高,反映消耗的运行指标尽可能低。工业过程的运行优化需求使得实时优化(RTO)和模型预测控制(MPC)广泛应用于可以建立数学模型的石化工业过程。对于难以建立数学模型的冶金工业过程,高技术公司针对具体的工业过程开发了工艺模型进行开环设定控制,数据驱动的智能运行优化控制技术的研发受到工业界和学术界的广泛关注^[29-32]。

大规模的工业生产迫切需要生产企业的管理高效化。自动化技术开始应用于企业管理。20世纪60年代初计算机财务系统问世,从此人工的管理方式

开始逐渐被计算机管理系统代替. 20 世纪 60 年代末 70 年代初, 财务系统扩充了物料计划功能, 发展成为物料需求计划系统 (Material Requirements Planning, MRP). 20 世纪 70 年代末 80 年代初, MRP 系统中增加了车间报表管理系统、采购系统等, 于是发展成为 MRP II. 但是 MRP II 不能配置资源, 因此配置资源计划系统 (Distribution Resource Planning, DRP) 出现了, 单一功能的制造过程管理系统 (如质量管理体系) 也相继出现. 到 20 世纪 80 年代末 90 年代初, MRP II 逐渐演变为企业资源计划 (Enterprise Resource Planning, ERP), DRP 演变为供应链管理 (Supply Chain Management, SCM), 而车间层应用的专业化制造管理系统演变成集成的制造执行系统 (Manufacturing Execution System, MES)^[33-34]. ERP 和 MES 广泛应用于生产企业, 显著提高了企业的竞争力.

3 自动化科学与技术面临的挑战与发展方向

纵观自动化科学与技术发展史, 给我们如下启示: 1) 自动化科学与技术的产生和发展来自人类改造自然的实际需求; 2) 自动化科学与技术的产生和发展源于控制科学与工程; 3) 实际需求与实现技术推动了控制系统的出现与发展; 4) 控制系统的设计与性能分析的需求产生和推动了控制理论的发展, 控制理论的发展对控制系统的设计与性能分析起到了重要推动作用; 5) 以工业系统为代表的固定物体、以船舶、飞行器、火炮为代表的运动体的控制系统的设计与性能分析推动了控制理论的形成与发展.

经过改革开放, 中国的自动化科学与技术取得了巨大发展, 主要体现在控制理论与控制工程、系统工程、导航、制导与控制、检测技术与装置、模式识别与智能系统、机器人等方面以及在社会经济发展、国家安全等方面的诸多应用研究. 基础研究已达到国际先进水平, 在自动化科学与技术的国际顶级期刊 IEEE 汇刊与 IFAC 会刊发表的论文数量与质量显著提高. 特别是结合国家在智能制造、航天、轨道交通等领域的重大需求开展的自动化科学与技术研究取得了一批推动上述领域科技进步并产生重要国际影响的学术成果. 总体上来看, 基础研究还处于跟跑与同跑阶段, 缺乏领跑的研究成果, 在国家社会经济发展和国防安全中发挥的作用不如其他信息科学和技术那样明显.

中国的社会经济与国家安全进入了快速发展阶段, 人们在生产、生活与管理中提出了更高的要求. 国家实施的智能制造、互联网+、大数据、新一代人工智能等重大发展战略对自动化科学与技术的发展提出了新的要求. 移动互联网、云计算、大数据应用技术和人工智能技术的突破性发展促使工程技术人员

与研究将以自动化、计算机、通讯为主的计算资源与以研究对象为主的物理资源深度融合与协同, 使研究的系统在适应性、自治力、效率、功能、可靠性、安全性和可用性方面远超过今天的系统.

为了适应国家发展的需求和人们在生产、生活与管理中的新要求, 今天关键的基础设施系统如工业系统、交通系统、能源系统、水资源系统、生物系统、医疗系统、通讯系统等正在向网络化、智能化方向发展, 这就对控制系统和管理与决策系统提出了新的要求. 控制系统正在向智能自主控制系统的方向发展, 管理与决策系统正在向智能优化决策系统和智能优化决策和控制一体化系统方向发展.

面向生产制造过程的智能自主控制系统的愿景功能是: 智能感知生产条件变化, 自适应决策控制回路设定值, 使回路控制层的输出很好地跟踪设定值, 对运行状况和控制系统的性能进行远程移动与可视化监控和自优化控制, 使生产制造系统安全、可靠、优化与绿色运行^[35].

面向生产制造企业的智能优化决策系统和智能优化决策与控制一体化系统主要是制造全流程智能协同优化控制系统和智能优化决策系统. 智能协同优化控制系统的愿景功能是: 智能感知运行工况的变化, 以综合生产指标的优化为目标, 自适应决策智能自主控制系统的最佳运行指标; 优化协同生产制造全流程中的各工业过程 (装备) 的智能自主控制系统; 实时远程与移动监控与预测异常工况, 自优化控制, 排除异常工况, 使系统安全优化运行, 实现制造流程全局优化. 智能优化决策系统的愿景功能是: 实时感知市场信息、生产条件和制造流程运行工况; 以企业高效化和绿色化为目标, 实现企业目标、计划调度、运行指标、生产指令与控制指令一体化优化决策; 远程与移动可视化监控决策过程动态性能, 自学习与自优化决策; 人与智能优化决策系统协同, 使决策者在动态变化环境下精准优化决策.

面向航天器、汽车、陆用武器等重要运载工具的智能自主控制系统的愿景功能是: 快速准确感知环境信息, 识别环境的不确定性和多样性任务, 使被控对象成为智能自主体, 能够修正自己的行为以适应环境的不确定性, 自主决策与自主控制, 实时安全可靠地完成任.

面向运载工具的智能决策系统和智能决策与控制一体化系统是多智能体协同控制系统和导航与制导一体化控制系统. 多智能体协同控制系统的愿景功能是: 感知整个群体区域环境信息, 自主学习, 协同优化决策, 自主协同运行, 快速、可靠、安全地完成总体目标任务. 导航与制导一体化控制系统的愿景功能是: 快速感知环境信息, 融合多元异构信息, 自主产生精确导航信息, 自动为制导系统给出导航

信息, 制导与控制系统使被控运载工具快速、准确地跟踪导航信息, 准确、迅速、安全可靠地到达目的地。

为了实现生产制造过程未来需求的自动化系统的愿景功能, 需将生产制造过程的自动化系统发展为五大系统: 1) 制造过程智能自主控制系统; 2) 制造全流程智能协同优化控制系统; 3) 智能优化决策系统; 4) 智能安全运行监控与自优化系统; 5) 工业过程虚拟制造系统。由五大系统构成两层结构的现代集成制造系统, 即智能优化决策系统和制造流程智能化控制系统, 取代由 ERP、MES 和 PCS (DCS) 组成的三层结构集成制造系统。制造流程智能化控制系统由生产制造过程智能自主控制系统和制造全流程智能协同优化控制系统组成。智能安全运行监控和自优化系统和制造过程虚拟制造系统保证构成两层结构的两大系统安全可靠优化运行。

为了实现运载工具未来需求的自动化系统的愿景功能, 需将运载工具自动化系统发展为三大系统: 1) 智能自主控制系统; 2) 多智能体协同控制系统; 3) 导航制导一体化控制系统。

以实现上述系统的愿景功能为目标, 开展上述新系统理论与系统实现技术的研究以及在智能制造、机器人、航天航空、高铁等重大应用领域的应用研究, 将会成为对我国社会经济发展和国家安全做出重要贡献的自动化科学与技术的发展方向。

目前, 复杂制造全流程中的工况识别、运行控制和 ERP 与 MES 中的决策仍然依靠知识工作者。知识工作者依靠数据、文本、图像等信息和经验进行工况识别、运行控制和决策, 难以实现离散工业产品个性定制的高效化和流程工业的高效化与绿色化^[36]。然而, 大数据驱动的人工智能技术取得了革命性进步。自动化科学与技术本质上是数学模型驱动的人工智能技术。大数据驱动的人工智能技术与自动化科学技术的结合必将产生人工智能驱动的自动化。大数据、移动互联网、云计算为人工智能驱动的自动化开辟了新途径。人工智能驱动的自动化必将在智能制造中发挥更重要的作用。

自动化技术不仅在航空、航天、轨道交通、汽车、海洋运载工具的导航、制导与控制、机器人的控制与运动轨迹的规划中发挥着不可取代的作用, 而且开始应用于交通系统、能源系统、水资源系统、生物系统、医疗系统、通讯系统等关键基础设施系统的安全监控与管理中。如同企业管理系统, 上述系统本质上是人参与的信息物理系统。要使这些关键基础设施系统安全、可靠、高效和绿色地运行, 必须开展这类系统的建模、仿真、预测和控制与优化决策理论与技术的研究。这必将推动自动化科学与技术的发展。

信息技术的发展促进了智能工厂、智能电网、智

能交通、智慧城市等人参与的信息物理系统以及量子通讯、微纳制造和生物系统的发展。实现上述新兴领域的检测、控制、管理和优化决策对已有的建模、控制、优化理论和技术提出了挑战。因此, 应将未来发展的自动化科学与技术作为发展方向, 开展下列研究:

- a) 人工智能驱动的自动化;
- b) 新一代网络化与智能化管控系统;
- c) 人参与的信息物理系统中的自动化科学与技术;
- d) 新兴应用领域 (量子通讯、微纳制造和生物系统) 中的自动化科学与技术。

开展上述自动化科学与技术发展方向的研究必须攻克下列挑战的科学难题:

- a) 机理不清的具有综合复杂性的动态系统建模;
- b) 具有综合复杂性的被控对象的高性能控制;
- c) 多冲突目标、多冲突约束、多尺度的复杂动态系统优化决策与控制一体化;
- d) 在大数据、移动通讯、云计算环境下, 网络化与智能化的自动化系统的设计与实现技术^[37-39]。

回顾自动化科学与技术的发展历程, 我们清楚地看到, 只有结合重大需求, 采用 CPS 思想, 即将自动化 (建模、控制、优化)、计算机和通讯技术等计算资源与研究对象的物理资源紧密融合与协同, 以系统的未来需求的愿景功能为目标, 研究实现未来需求的愿景功能的建模、控制和优化的新算法和研究采用大数据应用技术、移动通讯、云计算等新一代信息技术研制新的自动化系统的设计与实现技术, 并结合重大应用领域开展应用研究才有可能解决上述科学难题。由于我国的社会经济发展和国家安全对自动化科学与技术有重大需求, 我国大多数大学都设有自动化专业, 有国际上最大的自动化科学与技术的研究队伍, 国家又有专门负责自动化科学与技术发展的部门和专项科研经费, 因此, 我国广大的从事自动化科学与技术的研究人员完全有可能做出对中国社会经济发展和国家安全有重要影响、引领自动化科学与技术发展的研究成果。

4 结论

本文以创造未来需求新功能的自动化系统为自动化科学与技术的研究目标, 以国家社会经济发展和国家安全对自动化系统的未来需求为导向, 提出生产制造过程未来需求的自动化系统为下列五大系统: 1) 制造过程智能自主控制系统; 2) 制造全流程智能协同优化控制系统; 3) 智能优化决策系统; 4) 智能安全运行监控与自优化系统; 5) 工业过程虚拟制造系统; 提出运载工具未来需求的自动化系统为

下列三大系统: 1) 智能自主控制系统; 2) 多智能体协同控制系统; 3) 导航制导一体化控制系统。

以实现上述系统的愿景功能为目标, 研究建模、控制和优化的新算法, 研究采用移动通讯、云计算、人工智能技术等新一代信息技术的新的自动化系统的设计方法和实现技术, 并结合重大应用领域开展应用研究将成为自动化科学与技术的发展方向。

由于人参与的信息物理系统如智能工厂、智能电网、智能交通、智慧城市等和量子通讯、微纳制造和生物系统等新兴领域对自动化科学与技术提出了新的需求与挑战, 因此, 下列研究: 1) 人工智能驱动的自动化; 2) 新一代网络化与智能化管控系统; 3) 人参与的信息物理系统中的自动化科学与技术; 4) 新兴应用领域(量子通讯、微纳制造和生物系统)中的自动化科学与技术, 将成为未来自动化科学与技术的发展方向。

在上述发展方向做出对国家社会经济发展和国家安全有重要贡献、引领自动化科学与技术发展的研究成果, 需要一大批从事研究、设计、开发、运营未来需求的自动化系统的创新人才。这就需要重新审视和考虑现行的自动化专业人才培养模式、研究经费资助机制、评价机制等, 并进行必要的改革。

致谢

本论文得以完成, 得到了中国自动化学会自动化学科发展路线图项目组的多名专家学者的支持和帮助, 谨致以诚挚的谢意。

References

- Jms-Jounela S L. Future trends in process automation. *Annual Reviews in Control*, 2007, **31**(2): 211–220
- Chai Tian-You, Jin Yi-Hui, Ren De-Xiang. Contemporary Integrated Manufacturing System Based on Three-layer Structure in Process Industry. *Control Engineering of China*, 2002, **9**(3): 1–6
(柴天佑, 金以慧, 任德祥. 基于三层结构的流程工业现代集成制造系统. *控制工程*, 2002, **9**(3): 1–6)
- Kehoe B, Patil S, Abbeel P. A Survey of Research on Cloud Robotics and Automation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, **12**(2): 398–409
- Lamnabhi-Lagarigue F, Annaswamy A, Engell S. Systems and control for the future of humanity, research agenda: Current and future roles, impact and grand challenges. *Annual Reviews in Control*, 2017, **43**: 1–64
- Smart Manufacturing Leadship Coalition. *Implementing 21st century smart manufacturing*, 2011, 6
- Federal Ministry for Education and Research. Grasp the future of German manufacturing industry and put forward proposals for implementing “industry 4.0” strategy (Chinese version). 2013, 9
(德国联邦教育研究部. 把握德国制造业的未来, 实施“工业 4.0”攻略的建议(中文版). 2013, 9)
- Executive Office of the President U.S. Artificial Intelligence, Automation and the Economy. 2016
- Executive Office of the President, National Science and Technology Council, Committee on Technology, U.S. Preparing for the Future of Artificial Intelligence. 2016
- Murray, R. M. Control in an information rich world: Report of the panel on future directions in control, dynamics and systems. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2003
- Samad T, Annaswamy A. The impact of control technology: Overview, success stories, and research challenges. *IEEE Control Systems Society*, 2011, **31**(5): 26–27
- Kumar P R. Control: A perspective. *Automatica*, 2014, **50**(1): 3–43
- Zhang Bo, Zheng Ying-Ping. Automation science and technology: its role and trends in the development of modern information society. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(S1): 18–22
(张钹, 郑应平. 从现代信息科技发展看自动化学科的使命和发展趋势. *自动化学报*, 2002, **28**(S1): 18–22)
- Wang Chen-Hong. Thinking about several problems of basic science in automation domain. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(S1): 165–170
(王成红. 关于自动化领域中若干基础科学问题的思考. *自动化学报*, 2002, **28**(S1): 165–170)
- Cyber-physical systems. Program Announcements and Information. The National Science Foundation, 4201 Wilson Boulevard, Arlington, Virginia 22230, USA. 2008-09-30. Retrieved 2009-07-21.
- Mayr O. Zur Frühgeschichte der Technischen Regelungen. *R. Massachusetts: MIT Press*, 1970
- Bennett, S. A History of Control Engineering 1800-1930. *Technology and Culture*, 1979, **25**(9): 224
- Maxwell J C. On governors. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1998, **16**(2): 270–283
- Routh E J. A treatise on the stability of a given state of motion: particularly steady motion. *London: Macmillan*, 1877
- Hurwitz A. On the conditions under which an equation has only roots with negative real parts. *Mathematische Annalen*, 1964, **46**: 273–284
- Hughes T P, Sperry E. Inventor and Engineer. *Baltimore: Johns Hopkins Press*, 1971
- Mindell D A. Between human and machine: feedback, control, and computing before cybernetics. *Baltimore: Johns Hopkins Press*, 2002

- 22 Blickley G J. Modern control started with Ziegler - Nichols tuning. *Control Engineering*, 1990, **11**: 11–17
- 23 Black H S. Stabilized feedback amplifiers. *Bell System Technical Journal*, 1934, **13**(1): 1–18
- 24 Nyquist H. Regeneration theory. *Bell System Technical Journal*, 1932, **11**(1): 126–147
- 25 Bode H W. Network analysis and feedback amplifier design. New York: Van Nostrand, 1945
- 26 Kalman R. On the general theory of control systems. *IRE Transactions on Automatic Control*, 1959, **4**(3): 110
- 27 Morley D. Programmable controllers: How it all began. *In-tech*, 2008
- 28 Strothman J. M and C Technology History More than a century of measuring and controlling industrial processes. *In-tech*, 1995, **42**(6): 52–78
- 29 Engell S. Feedback control for optimal process operation. *Journal of Process Control*, 2007, **17**(3): 203–219
- 30 Darby M L, Nikolaou M, Jones J, Nicholson D. RTO: An overview and assessment of current practice. *Journal of Process Control*, 2011, **21**(6): 874–884
- 31 Chai Tian-You. Operational Optimization and Feedback Control for Complex Industrial Processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1744–1757
(柴天佑. 复杂工业过程运行优化与反馈控制. *自动化学报*, 2013, **39**(11): 1744–1757)
- 32 Chai Tian-You, Qin S. Joe and Wang Hong. Optimal Operational Control for Complex Industrial Processes. *Annual Reviews in Control*, 2014, **38**(1): 81–92
- 33 Chai Tian-You, Zheng Bing-Lin, Hu Yi. Current Research Situation and Development of Manufacturing Execution Systems. *Control Engineering of China*, 2005, **12**(6): 505–510
(柴天佑, 郑秉霖, 胡毅. 制造执行系统的研究现状和发展趋势. *控制工程*, 2005, **12**(6): 505–510)
- 34 Hakason B. Execution-driven manufacturing management for competitive advantage. *MESA White Paper*, 1997, 5
- 35 Chai Tian-You. Industrial process control systems: research status and development direction. *Scientia Sinica Informationis*, 2016, **46**(8): 1003–1015
(柴天佑. 工业过程控制系统研究现状与发展方向. *中国科学: 信息科学*, 2016, **46**(8): 1003–1015)
- 36 Yolanda Gil, Mark Greaves, James Hendler and Haym Hirsh. Amplify Scientific Discovery with Artificial Intelligence. *Science*, 2014, **346**(6206): 171–172
- 37 Chai Tian-You. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 641–649
(柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战. *自动化学报*, 2009, **35**(6): 641–649)
- 38 Chai Tian-You, Ding Jin-Liang, Yu Gang and Wang Hong, Integrated Optimization for the Automation Systems of Mineral Processing. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, **11**(4): 965–982
- 39 Chai Tian-You. The challenge of intelligent manufacturing process to artificial intelligence. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, to be published
(柴天佑. 制造流程智能化对人工智能的挑战. 中国科学基金. 待发表)



柴天佑 中国工程院院士, 东北大学教授. IEEE Fellow, IFAC Fellow, 欧亚科学院院士. 主要研究方向为自适应控制, 智能解耦控制, 流程工业综合自动化理论、方法与技术.

E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn

(**CHAI Tian-You** Academician of Chinese Academy of Engineering, professor at Northeastern University, IEEE Fellow, IFAC Fellow, and academician of the International Eurasian Academy of Sciences. His research interest covers adaptive control, intelligent decoupling control, as well as theories, methods and technology of integrated automation of process industry.)