

· 专题:双清论坛“面向双碳目标的自动化和智能化理论与技术” ·

面向双碳目标的自动化和智能化理论与技术*

柴天佑^{1,2,*} 钱锋³ 管晓宏^{4,5} 丁进良¹ 堵威³
徐占伯⁴ 杨涛^{1,2} 刘克⁶ 何杰⁶ 宋苏⁶
赵瑞珍⁶ 王志衡⁶ 刘屹^{6,7}

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. 东北大学 国家冶金自动化工程技术研究中心,沈阳 110819
3. 华东理工大学 信息科学与工程学院,上海 200237
4. 西安交通大学 智能网络与网络安全教育部重点实验室,西安 710049
5. 清华大学 智能与网络化系统研究中心,北京 100084
6. 国家自然科学基金委员会 信息科学部,北京 100085
7. 华南理工大学 自动化科学与工程学院 广州 510641

[摘要] 基于国家自然科学基金委员会第324期双清论坛,本文针对面向双碳目标高耗能工业低碳运行与多介质能源协同减碳调控的国家重大需求,围绕低碳工业智能化和多能互补协同智能调控的自动化与智能化系统理论、关键技术及面向应用层面的基础性问题,分析了面向双碳目标的自动化和智能化的现状与发展趋势。在低碳工业智能化方面,聚焦工业生产全流程碳排放智能建模方法,低碳工业生产全流程数字化网络化智能化,流程工业低碳绿色制造,制造业异质能源综合利用与优化调控;在多能互补协同智能调控方面,聚焦研究多介质能源转化,多介质能源供给协同调控,多能互补与源储荷调控,能源“源—网—荷—储”一体化决策与综合安全,零碳智慧能源系统的结构化变革,城市智慧能源管控。围绕上述内容,讨论了面临的挑战,给出了凝练的科学问题与主要研究方向,提出了相关的政策建议。

[关键词] 双碳目标;工业智能;高耗能流程工业;多介质能源;低碳运行;协同智能调控

当前,新一轮科技革命和产业变革加快兴起,全球制造业格局正在发生重大调整,主要工业国均将制造业作为经济振兴的重中之重,全球制造业在整合重组优化中不断开辟新方向,迈向高端化。我国是世界第一大制造业国家,也是全球最大的能源消费国和碳排放国,人均碳排放量超过世界平均水平,其中能源供给、钢铁、建材和石化行业碳排放量占全国碳排放比重分别约为41%、15%、13%和5%。我国制造业的发展面临着一系列亟待解决的问题。尤其是区域碳排放基数大,粗放和重型化的产业结构、化石能源为主的能源结构尚未根本性转变,经济发



柴天佑 东北大学教授,中国工程院院士,IEEE Life Fellow,IFAC Fellow。主要研究方向为复杂工业生产过程控制、优化、综合自动化与智能化和基于新一代信息技术的优化决策与控制一体化工业智能系统。发表IFAC会刊和IEEE汇刊论文共计210余篇。承担国家973计划(两期)、863计划、支撑计划、高技术产业化示范工程项目、国家自然科学基金重大项目、中国工程院重大战略咨询项目等国家级重大科研项目10余项。以第一完成人获国家自然科学奖二等奖、国家技术发明奖二等奖、国家科技进步奖二等奖共5项。

展与碳排放高度耦合,制造业尚未转型至资源高效

收稿日期:2024-01-14;修回日期:2024-08-03

* 本文根据国家自然科学基金委员会第324期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: tychai@mail.neu.edu.cn

本文受到辽宁辽河实验室自主科研项目(LL23ZZ-05-01)和辽宁省重点研发计划项目(2023JH26、10200011)的资助。

利用和绿色低碳发展阶段。

党的二十大报告指出,要积极稳妥推进碳达峰碳中和,立足我国能源资源禀赋,逐步转向碳排放总量和强度“双控”制度,推进工业、建筑、交通等领域清洁低碳转型,深入推进能源革命,加快规划建设新型能源体系,确保能源安全。习近平总书记在中共中央政治局第三十六次集体学习中提出,“要推动能源技术与现代信息、新材料和先进制造技术深度融合,探索能源生产和消费新模式”“要下大气力推动钢铁、有色、石化、化工、建材等传统产业升级,加快工业领域低碳工艺革新和数字化转型”。《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》指出,要深入实施智能制造和绿色制造工程,发展服务型制造新模式,推动制造业高端化、智能化、绿色化。改造提升传统产业,推动石化、钢铁、有色、建材等原材料产业布局优化和结构调整,完善绿色制造体系。由此可见,实现双碳目标具有重要的战略意义。

制造业是“能耗”和“排碳”大户,其中钢铁、水泥、石化等工业节能降碳被列入《工业领域碳达峰实施方案》。《2021 年中国人工智能助力“双碳”目标达成白皮书》明确指出,“人工智能相关技术减碳贡献占比将逐年提升,至 2060 年将至少达到 70%,减碳总量将超过 350 亿吨”。这表明产业界已经意识到自动化和智能化理论与技术是实现双碳目标的重要手段。

碳排放旨在生产、运输、使用及回收产品时所产生的温室气体排放。实现双碳目标,在技术上其本质为生产系统、能源供需、以及多核算主体的博弈优化。相关技术涉及到构建多能互补的综合评价体系;通过机理—数据—知识联合驱动动态建模,实现精度和可解释性并重;且依托设备强算力,实现数据与知识驱动的设备控制—协同优化—动态调控一体化。在管理模式方面,双碳目标所面临的挑战主要为双碳国家战略下,企业利润和节能减排同等重要,甚至暂时损失部分利润。因此,生产与能源两大系统紧密协同迫在眉睫。为此,就如何依托自动化和智能化理论与技术的发展,助力双碳目标是目前学术界的一大重要研究主题。

本期“双清论坛”紧密围绕“面向双碳目标的自动化和智能化理论与技术”这一主题,着眼国际学术前沿,研讨主题领域的国内外研究现状,围绕低碳工业智能化、多能互补协同智能调控等方面进行了热烈讨论和充分交流,进一步凝练了科学问题、形成了初步共识,并提出了政策建议。以下分别从工业生

产全流程碳排放智能建模,预测与溯源,低碳工业生产全流程数字化、网络化、智能化,流程工业绿色低碳智能制造,制造业异质能源综合利用与智能优化调控,多介质能源转化机制与特性表征,多介质能源供给协同调控与优化,零碳转型导向下的多能互补与源储荷自主调控,能源“源—网—荷—储”一体化智能决策与综合安全,零碳智慧能源系统的结构化变革,城市智慧能源管控等方面进行概述和分析。

1 面向双碳目标自动化和智能化的现状与发展趋势

1.1 低碳工业智能化

1.1.1 工业生产全流程碳排放智能建模方法

生产全流程指原料经过包含多个连续的物理加工与化学反应过程,经过物质流、能量流和信息流相互作用转化为产品的生产过程。碳排放与三流相互作用密切相关。三流相互作用机理复杂,难以建立动态模型;反映质量、效率、能耗与物耗的生产指标与运行指标难以在线测量;同时,原料成分波动大,导致动态特性频繁变化;此外,某些工业过程具有强非线性、强耦合、频繁的未知干扰、动态特性变化、反应机理不清、难以建立数学模型^[1]。到目前为止,国际上还没有形成实现面向碳排放的工业生产全流程的建模、预测与溯源方法。这不仅导致现有生产过程能耗物耗高、产品质量不稳定,而且难以满足低碳化的国家目标。

目前,工业生产全流程的碳排放预测方法主要包括清单分析法和投入产出法等;工业生产全流程的碳迁移路径追踪和碳足迹溯源分析主要以机理和数据融合的方式实现。美国环境保护局建立了融合模型可对后续一个或多个年份特定工业的碳排放量进行预测。国家电网基于电力大数据测算碳排放建立了电—碳分析模型。国内学者还研究了工艺机理、过程数据与经验知识协同驱动的建模方法。面向碳排放的工业生产全流程动态特性分析与建模需要与人工智能技术相结合。采用大数据驱动的人工智能技术,从人的经验和工业生产过程碳排放大数据中提炼形成知识,并与机理模型相结合,形成较为精确的工业生产全流程碳排放智能建模方法,是生产全流程碳排放预测的发展方向。

1.1.2 低碳工业生产全流程数字化、网络化、智能化

数字化、网络化、智能化是改造传统制造业并使其实现低碳转型的重要手段。工业生产全流程将原

料加工为成品材料,是信息流、能源流和物质流交互作用的结果。数字化是指将信息流、能源流和物质流用数字的形式表示。网络化是指采用先进的通信技术,包括移动互联网,将生产全流程涉及到的人、物理系统,包括生产装备、能源动力设备、运输设备等和生产管理与控制的信息化系统连接起来,形成一个网络化系统,实现反映信息流、能源流和物质流交互过程的数据采集、数据资源的共享和互联互通。智能化是指采用工业人工智能、工业自动化与信息化技术,在工业生产全流程数字化网络化的基础上,实现生产全流程低碳运行的智能感知、识别、运行决策与工业过程控制一体化与全局优化,即碳排放尽可能低,产品质量和效率尽可能高,生产成本尽可能低。当前,数字化赋能企业低碳转型集中体现在三个方面。(1) 搭建数字化平台,进行碳数据管理,实现数据归集、整理、转化、计算与互联互通,动态衡量与分析历史和当前碳排放水平,并基于此对未来状态进行预测和管控,为将碳排放权作为企业资产加以管理与运营奠定基础;(2) 利用数字化手段提升企业精细化管理水平、流程与决策效率,提高资源或资产利用率、运营敏捷性,优化成本模型,实现提效降耗;(3) 开发数字化解决方案,促进产业链协同和循环经济发展。例如,利用接入物联网的智能传感器、基于区块链的验证和数据共享平台贯穿整个价值链的协同与合作,让价值链上各参与者围绕统一的减排目标与指标优化业务流程,合理配置资源,降低从原物料到成品的全程碳排放,并实现产品碳足迹的全程可追溯。工业和信息化部《“十四五”智能制造发展规划》中指出,到2025年规模以上制造业企业大部分实现数字化、网络化,重点行业骨干企业初步应用智能化;到2035年更要实现全面普及数字化、网络化,基本实现智能化。欧洲钢铁企业安赛乐米塔尔的超低碳炼钢(Ultra-low CO₂ Steelmaking, ULCOS)项目预期在2050年前实现每吨粗钢碳排放减少百分之五十。东北大学研究大数据与机理分析相结合的工业碳排放智能预测与溯源,重大耗能设备的低碳运行智能控制,以及端边云协同的工业智能系统技术等来促进节能减碳^[2-4]。新一代信息技术驱动的工业智能系统技术为工业生产全流程低碳运行开辟了新的途径。

1.1.3 流程工业低碳绿色制造

以石化、钢铁、建材为代表的流程制造业是我国国民经济的支柱和基础产业。我国流程制造业规模均居世界第一,同时流程制造行业作为典型的高耗

能、高排放行业,碳排放量占全国碳排放比重超过40%,是实现“双碳”目标的主战场。以钢铁生产为例,我国钢铁工业形成了以长流程为主的流程结构,其中长流程比例约占90%,而电炉短流程的比例仅为10%左右。流程能源消耗总量的70%以上,碳排放约占企业直接排放量的60%以上。2022年我国钢铁行业碳排放总量约为18.23亿吨,约占全国碳排放总量的15%,仅次于电力行业。

为实现流程工业低碳绿色制造,构建生产过程碳排模型、提高生产资源和能源利用效率、优化资源和能源配置、采用数字化手段提高管理和决策水平是目前最具潜力的手段之一^[5,6]。田涛等依据PAS2050、ISO14067等国际标准,建立了石化过程不同产品的碳足迹核算模型,并提出石化行业开展产品碳足迹评价的方法和典型应用^[7]。贾翌等针对炼油工业,采用作业成本法构建了碳排放性质传递计算方法和模型,实现了生产全流程单组分碳排放量的准确计算^[8]。近年来,西门子、ABB、霍尼韦尔等企业利用数字化和自动化技术提升流程制造过程能源利用效率。西门子公司开发了生产全流程仿真优化与管理平台,基于数字孪生的生产流程建模与仿真技术,减少产品在生产过程中的原材料和能源消耗^[9]。ABB公司提出了AbilityTM智慧能源管理解决方案,基于“能源路由器”设计理念,将“源—网—荷—储—端”进行全范围连接、分析优化及控制管理^[10]。霍尼韦尔公司提出并开发了互联工厂解决方案、安全及生产管理信息化平台等一系列助力实现碳中和目标的创新技术^[11]。华东理工大学围绕流程工业低碳运行的技术,结合乙烯、炼油、水泥等流程制造,从工艺/装备设计、生产制造过程智能调控、二氧化碳资源化利用等角度提出了不同的创新方法^[12,13]。全流程智能优化调控将朝着感知、识别、决策与控制一体化与计算资源(全流程智能优化调控将朝着感知)和物理资源(工业场景的领域知识等)紧密融合与协同来研发低碳运行的工业智能系统方向发展。

1.1.4 制造业异质能源综合利用与优化调控

综合能源系统是通过整合多种能源资源,实现多异质能源子系统之间的协调规划、优化运行、协同管理、交互响应和互补互济,在满足多元化用能需求的同时,有效提升能源利用效率,进而促进能源可持续发展的新型一体化能源系统^[14]。综合能源系统被认为是未来能源系统的主要形态,能有效提升综合能源利用率和灵活性,为能源升级和变革提供重

要途径,对于构建新型系统,推动我国“双碳”战略目标的实现具有重要支撑作用。欧洲苏黎世理工学院 M. Geidl 教授提出能源集线器模型^[15]。国内研究团队提出不确定性环境下的多能源系统低碳优化方法,提升了系统低碳运行水平^[16]。未来,异质能源综合利用的发展方向主要有:基于耦合交互机制的异质多能负荷联合预测,低碳异质多能源系统多主体自抗扰与故障自愈,考虑多重不确定性的异质多能源系统能量优化,以及综合能源需求响应与柔性资源高效低碳利用等。面对全流程智能优化调控,传统工控软件开始向支撑大数据与智能化方向转型与升级。制造业全过程智能优化调控将朝着控制和决策与领域知识有效融合、全方位支撑工业大数据与人工智能算法、工业互联网与可靠运行控制有效结合的方向发展。

1.2 多能互补协同智能调控

1.2.1 多介质能源转化

目前,我国低碳发展的主要举措之一是能源结构的低碳化转型,从能源结构发掘低碳的途径,形成新的能源系统形态。低碳异质多能源系统被认为是未来能源系统的主要形态,能有效提升综合能源利用率和灵活性,为能源升级和变革提供重要途径,对于构建新型电力系统,推动我国“双碳”战略目标的实现具有重要支撑作用。北京工业大学潘家华教授^[17, 18]表示,从高碳化石能源切换到零碳可再生能源,是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革。当前研究包括:用户侧大数据分析实现供能优化、分布式储能参与的动态能量平衡、考虑多能源系统不确定性和低碳运行的需求以及不确定性环境下的多能源系统低碳优化方法等。为支撑新一代电力能源系统的变革,亟需将能量管理系统(Energy Management System, EMS)协同管理的对象,由纯电变革为电/热/冷/气等综合能源系统,发展新一代综合能量管理系统(Integrated Energy Management System, IEMS),发展趋势聚焦在低碳异质多能源系统自治运行与协同能量优化,以及多能流综合能量管理等方面。

1.2.2 多介质能源供给协同调控

能源系统的低碳化转型与发展是应对气候、环境、能源问题的共同解决方案。按照不同能源条件和用能对象,采用多介质能源相互补充的方式协同调控,能够有效缓解供需矛盾,合理保护自然资源,促进生态环境良性循环^[19]。在源侧,聚焦新能源场站多能多目标协同调控机制^[20],考虑新能源发电的

不确定性以及不同设备在响应特性、经济性等方面的差异,开展发电机理与知识驱动相融合的新能源场站多尺度、多目标协同优化调控的关键科学问题研究,促进清洁能源的消纳,减少弃风、弃光、弃水等现象^[21];在荷侧,借助多能源及配套市场协同联动交易机制,构建涵盖供电、供气、供冷、供热的多能源联合交易模式^[22],基于多能源之间的互补性和可替代性,开展多能源及配套市场下的协同交易研究^[23],能够满足用户对多介质能源的不同需求,有效提高用能可靠性和经济性;在能源存储方面,挖掘多介质能源的代替性和互补性,开展抽水、压缩空气、机械储能、电化学储能、储热等多种储能方式的协同规划,降低储能成本提高多能源运行效率;此外,在多介质能源传输过程中进行协同调度与优化,能够充分利用多介质能源系统传输容量及天然气、供热管道储能能力,提高能源传输能力。针对多介质能源供给协同调控,国内外学者开展了深入研究。美国爱达荷国家实验室针对核能、可再生能源、化石能源(碳捕集)等多介质能源供给,多介质能源用户共存,热、电、化学等多种储能应用场景中的供给协调优化调度问题^[24],提出了一系列框架和算法。上海电力大学从综合能源韧性提升角度出发,将韧性理念贯彻规划和运行调度全流程,通过多环节协调以最小代价实现综合能源系统整体韧性提升^[25]。东北大学针对含多类型分布式能源微电网开展了大量研究,从降低化石能源消耗和二氧化碳排放等方面出发,考虑风能与光伏之间的强互补能力,研究了多能源调度运行策略,提高可再生能源的消纳能力^[26]。

1.2.3 多能互补与源储荷调控

双碳背景下,新型电力系统具有高比例新能源、多类型分布式储能、海量灵活资源三大特征,开展以新能源为主体的零碳转型建设十分必要。目前主要研究围绕在多能互补与源储荷自主调控^[27, 28]。低碳异质多能源系统是未来能源系统主要形态,需求侧灵活资源正在愈来愈多地参与多能源系统的自治运行与协同能量优化,且有待进一步形成技术标准体系和适应于大面积推广的工程建设规范。目前亟需建立相关标准体系,研究多能交互机制、多能系统故障、源网荷多重不确定分析,多时间尺度优化调度,低碳柔性资源高效利用等问题;研究变速恒频抽水蓄能技术,解决多模式下机组的宽范围高效运行,大功率、高效率、高可靠的 AC-AC 电力变换;研究多尺度多方位变速柔性抽水蓄能等技术。

1.2.4 能源“源—网—荷—储”一体化决策与综合安全

构建以新能源为主体的新型能源电力系统是支撑“双碳”目标的重要途径^[29]。但是,考虑到新型能源电力系统高比例可再生能源并网、高比例电力电子化所带来的强不确定性、弱可控性、源网荷储协同互动、交直流混联输电以及柔性、生产与消费兼具等不同于传统能源电力系统的特征,传统基于机理模型的方法难以适用,继续开发面向未来低碳场景数据驱动的电力系统智能调度与控制方法^[30]。华东理工大学借助工业互联网、大数据、人工智能、5G通信等现代信息技术,分析“源—网—荷—储”多维度、跨时空交互机理,研究智能联合调度和稳定支撑技术,设计一体化协同控制激励机制,保障电力系统在高比例可再生能源接入情况下的灵活、高效、稳定运行。此外,为实现低碳化目标,电能占终端能源消费比重将不断提升,电力安全对经济社会的安全性就越重要。但随之而来的可再生能源本身的随机性、波动性,以及电力电子化导致电网本身惯量降低,安稳性下降。如何解决新型能源电力系统的综合安全问题成为需要考虑的重要问题。

1.2.5 零碳智慧能源系统的结构化变革

以光伏、风电、水力发电为代表的可再生能源大规模并入能源系统势在必行。然而,传统能源电力系统结构下,一次能源均转化成电能接入电网,由于尚无直接的大规模、经济储能技术,电力系统必须满足实时供需平衡,对高不确定可再生能源的利用造成根本性挑战。储能技术能够实现能源电力供需的实时平衡,解决可再生能源不确定性造成的弃风、弃光、弃水问题。因此,非传统的分布式能源系统结构将不同于传统能源电力系统结构,以传统电源+分布式可再生新能源+储能+氢能燃料电池组成的零碳能源系统将在未来能源电力系统中扮演重要作用^[31, 32]。西安交通大学研究供需随机匹配的多时间尺度多能协同运行优化、含氢多能源供应链协同规划与分布式优化、以及多能转换关键装备和系统调控与稳定性等,通过能源网—算力网—通信网的协同优化,满足建筑、园区、交通等终端能源需求,为实现我国双碳目标提供重要技术路径。

1.2.6 城市智慧能源管控

大型城市能源供给系统耦合电、气、热、冷等多种供能和电网、热网、气网、交通网等多种用能形式^[33],不同能源之间通过能源转换单元,已形成互动、互补、互助的多介质综合能源系统。国内传统能

源企业和市场化能源企业积极布局,在冶金、化工、电力、交通、建筑等行业积极开展探索,研发能源管理系统。在化工领域,针对化工园区这一用能大户,通过开展绿电化工园区用能互动示范,挖掘电力重化工耦合系统供需互动机理,通过风光储氢集成构网供电,实现电—热—氢—物质流耦合调控和绿电智能微电网可靠供电;在交通领域,电动汽车具备源、荷特性及快速响应的特点,可以参与大规模可再生能源消纳,通过与电网的灵活互动有效减少传统机组的碳排放,通过综合灵活运行的碳捕集—电转气系统和电动汽车充分消纳风电并网协同互济^[34],能够兼顾综合能源系统低碳经济调度时系统内多主体的优化运行及收益公平分配;在建筑领域,利用物联网、人工智能、能源管理软件等先进技术,通过实时监测、数据采集、精准控制等手段^[35],并与市电、储能设备等能源载体实现互联互通,实现了建筑综合能源的柔性调控和高效管理。在电力方面,随着光伏发电成本的下降,平价上网政策的实施以及中东部地区基本全额消纳的电力系统条件^[36],城市分布式光伏发电以“全民光伏”的形式在迅速增长。加之储能电池成本的快速下降,“光伏+储能”、大规模储能、综合能源系统等以局部电网、微电网、虚拟电厂等多种组网形式在城市电网中快速发展,使城市电网呈现多种组网形式并存的特点。国内外学者在城市综合能源相关的多元能源建模^[37]、系统规划设计^[38]、运行管理^[39]、效益评估^[40]等关键技术演技方面已取得一定研究成果,并在冶金、化工、电力、交通、建筑等行业开展探索。

尽管国内外学者已经围绕低碳工业智能化和多能互补协同智能调控做了一些工作,但是仍未形成系统和全面的面向双碳目标的自动化和智能化理论与技术,流程工业仍面临众多待解决的挑战。

2 面向双碳目标的自动化和智能化面临的挑战

2.1 低碳工业智能化面临的挑战

2.1.1 面向碳排放工业生产全流程智能建模、预测与溯源

要实现工业生产全流程的智能建模,需要精确、可靠的碳排放数据作为支撑。然而,重点用能单位的能耗在线监测、碳计量标准化以及自然环境的碳汇量数据的采集与分析缺乏准确性与实时性;不同层级的低碳综合能源系统生产过程差异较大,建模方法和要素不相同;多时空尺度的不同碳排放目标

也为工业全流程碳排放智能建模带来挑战。从碳足迹追踪与溯源的角度,重点用能单位生产流程长以及设备级联耦合等特点为碳足迹的准确定位和追踪带来挑战;多种化学反应动态耦合交互,反应机理复杂,碳在反应过程中形态各异,具有显著的多相、多尺度特性,不同形态的交错使得碳足迹溯源困难。

2.1.2 低碳工业生产全流程数字化、网络化、智能化

传统流程工业向低碳工业生产全流程数字化的转型主要存在以下挑战:首先,传统流程工业普遍存在自动化水平落后,信息集成度低,缺乏数字化赋能的基础;其次,流程工业制造业的碳排放管理难以统筹,能耗计量点多且分散、能源介质种类多,导致通过人工获取的能耗计量不及时、效率低,无法对数据进行有效分析,缺乏优质的工业过程监测数据;最后,流程工业产品的生命周期管理与碳足迹追踪的分析评价缺乏统一标准、数据准确性较差,难以建立闭环的数字化评价体系。同时,由于缺乏信息化、智能化建设的标准体系,生产全流程中的各个碳排放节点之间难以实现互联互通,数据共享和流转不畅,难以实现多源、异构、海量的生产数据和碳排放数据融合;现有的自动化工业控制系统、企业管理系统存在数据孤岛,难以向具备实时碳排放感知、预测、溯源能力的智能化系统的转型。

2.1.3 流程工业低碳绿色智能制造

流程工业具有多样性,不同生产装置碳排放特点不同。首先,钢铁生产以长流程为主,烧结和高炉转炉生产是碳排放核心环节;石化行业碳排放量比较集中且单个排放源排放量大且强度较高;水泥行业碳排放主要来源于原料在煅烧过程中分解产生的大量二氧化碳排放以及生产能耗排放,如何针对不同流程的过程特性设计节碳减碳智能制造方案是需要重点关注的问题。其次,流程行业中关键设备碳排放量大,如何突破关键设备的能耗与碳排智能感知技术,建立碳排放动态演化过程的数字孪生技术以及开放环境下能耗与碳排智能预测技术,建立低碳运行的多层次多尺度决策控制一体化设计方法,形成智能化的决策优化一体化设计方法,是实现重大耗能设备的低碳高效运行的关键。第三,由于流程制造过程的复杂性,单一领域或单一工业过程的碳减排往往收效甚微。如何突破全产业链碳排放过程智能数据采集与智能感知,建立面向全产业链碳排放机制认知与碳足迹监控及碳排放预测,形成面向低碳制造的多基地、多流程全产业链协同决策及

考虑效益—质量—碳排等指标的全流程运行优化调控方法,实现全产业链中的资源、能源等生产要素并实现协同调控是流程工业低碳绿色制造的又一挑战。

2.1.4 制造业异质能源综合利用与智能优化调控

第一,工业能源系统与生产系统耦合度高,且存在发生与消耗的不确定性,导致多种能源单独管控,难以实现大幅度节能,如何协调能源系统的碳排放与生产系统的效率和质量等生产指标冲突是一大挑战。第二,全流程优化调控需要决策与控制一体化优化和人机协作的工业软件,但目前尚缺少生产全流程高精度建模、工艺参数优化决策与控制一体化的关键核心技术,多冲突、多层次、多约束、多工序全流程智能优化调控是一大挑战。第三,流程工业过程由于碳排放监测统计和估算方法的数据滞后性大,大边界开放环境碳排放全息感知难,各种数据的时空分辨率低等原因,控制品质难以得到保证,实现低碳强约束下的高碳排工序精准稳定控制是一大挑战。

2.2 多能互补协同智能调控面临的挑战

2.2.1 多介质能源转化机制与特性表征

随着低碳异质多能源系统成为未来能源系统的主要形态,如何实现多种异质能源子系统间的多能协同成为提高系统综合能源效率的重中之重,系统中固有的多介质能源转换机制与特性表征主要面临五大难点:(1)多能源交互机制复杂,多能源系统存在复杂的耦合交互关系;(2)多能系统的协同优化、业务流程全控制依赖信息系统的可靠运行;(3)源荷存在多重不确定性,可再生能源出力的不确定性与多能负荷变化的随机性,给多能源系统的能量协同优化运行带来挑战;(4)多时间尺度优化调度困难,低碳异质能源的供用能设备有着复杂的多主体特性与多时间尺度惯性;(5)低碳柔性资源高效利用难,各主体协调互动性不足、需求侧大量的灵活可控资源未充分挖掘与利用的问题,导致分布式能源利用效率不高。

2.2.2 多介质能源供给协同调控与优化

当前在多介质能源耦合建模、效益评估、协同规划与优化运行方面已有一些研究,但对电、热、气、冷等能源形式之间的转换机理特性认知不足,存在多能互补品位匹配不合理等问题。多介质能源供给协同调控与优化涉及源荷双侧的多种能源形式的平衡,但源侧风、光等能源具有较强的随机性和波动性,用户侧对多种能源的需求动态变化难以准确预测。因此,源荷双侧不确定性的叠加,给多介质能源的供需平衡带来巨大挑战。此外,多介质能源供给

协同调控与优化有着更为典型的复杂系统特性,能量转换单元可能涉及燃料转化、动力、制冷热泵、储能和低温余热利用等多个环节,非线性特征显著,主动调控难度尤为突出。除上述技术挑战外,多介质能源协同调控与优化涉及电网、发电、石油、天然气、热力和设备制造等多个行业,尚未制定统一的行业标准,多能源交易机制尚不健全。

2.2.3 零碳转型导向下的多能互补与源储荷自主调控

零碳转型导向下,进行多能互补与源储荷自主调控,节能减碳将成为硬约束,对传统能源系统的更新迭代带来新的科学挑战:(1)高精度统一建模技术存在困难;(2)多能互补系统性能动态评估体系,多能流及系统拓扑动态变化,超越单一设备评价,构建系统级的动态评估体系;(3)大规模系统的高效求解与在线计算面临挑战;(4)多时空尺度系统协同优化与装备动态调控一体化,高比例新能源并网、高比例电力电子化,传统基于机理模型的方法难以适用一体化调控场景。

2.2.4 能源“源—网—荷—储”一体化智能决策与综合安全

由于新型能源电力系统的结构性变革,传统方法已不再适用,能源“源—网—荷—储”一体化智能决策与综合安全面临如下科学挑战:(1)新型能源电力系统动态行为多样化、稳定机理复杂化、运行场景随机化、分布式设备规模化;(2)能源电力系统服务对象的不确定性问题;(3)为提升安全可靠评估精准性面临的多源信息融合难题;(4)源荷两端不确定性条件下的系统安全稳定经济运行问题;(5)信息物理社会耦合下多维度安全风险应对问题。

2.2.5 零碳智慧能源系统的结构化变革

氢能引入能源系统后,将会大大增加能源系统运行的复杂性,能源系统的结构化变革面临如下挑战:(1)风、光等可再生能源以及氢、电、冷、热等多种能源介质在各能源子系统中具有不同形式的输入与输出,构成了具有复杂拓扑结构的关联网络化系统;(2)多种能源需求与多能源供需系统的运行与决策存在着双向关联,难以通过现有的优化方法实现多能供需的实时匹配。

2.2.6 城市智慧能源管控

城市能源供给系统耦合电、气、热、冷等多种供能和用能形式,供给介质多元,时空分布广泛,相互转换、耦合机理机制复杂。为实现对城市能源系统

的智慧管控,亟需突破多介质能源供需建模和数字孪生关键方法及核心技术。天然气和电力供需的特点给城市天然气采销一体化智能决策和智能电网协同调控带来巨大挑战。电力供应的随机性,城市居民多元化,用电需求变化,对多源互补输入、多元协同输出的跨时间尺度动态特性建模带来挑战。城市能源供给系统耦合多种供能和用能形式,对多种能源的耦合、转换和利用,对综合能源进行监控、分析、预测和能源网运行状态的全景感知和准确预测带来挑战。

为了解决上述挑战,本期双清论坛总结和提炼了以下主要研究方向和科学问题,以形成面向双碳目标的自动化和智能化理论与技术。

3 主要研究方向

3.1 低碳工业智能化

3.1.1 工业生产全流程碳排放智能建模、预测与溯源

低碳工业智能化的关键是实现工业生产全流程碳排放的感知、识别、运行决策与过程控制集成优化。由于将原料加工为成品材料的工业生产过程是信息流、能源流和物质流交互作用的结果,即原料进入生产全流程,在信息流和能源流的作用下,经过物理化学反应,将原料加工为成品材料。加工过程中产生的碳排放受三流交互过程的影响,与三流之间的因果关系不清。碳排放过程是因果关系不清、机理不清、模型结构和参数未知、变化的非线性动态系统,因此,碳排放检测难,预测与溯源难。传统流程工业碳排放在线监测、碳计量标准化以及自然环境的碳汇量数据的采集与分析缺乏准确性与实时性,碳足迹难定位,亟待在以下方面开展研究:碳排放与生产过程变量因果关系不清的复杂工业动态系统的碳排放智能建模;碳足迹准确定位、追踪与解析,碳排放的在线检测与全息感知;机理分析和工业大数据相结合的碳排放智能预测和溯源。

3.1.2 低碳工业生产全流程数字化网络化智能化

工业生产全流程是人参与的信息物理系统。人指从事运行工况识别、运行管理与决策的生产管理、工程技术和生产操作人员。信息系统由工业过程控制系统、制造执行系统和资源计划系统组成。物理系统由生产全流程的各种生产设备、能源动力和物料运输设备组成。人参与的信息系统产生运行工况识别、运行决策和控制的信息流,作用于能源动力设备产生能源流,进而作用于生产设备与运输设备,使

原料形成物质流,并按生产工艺和配方通过物理化学反应进行变化,形成产品。原料加工为产品的过程是信息流、能源流和物质流交互作用的过程。三流交互过程是因果关系不清的复杂工业系统,识别和决策往往依靠人的经验和知识。当生产条件频繁变化时,人难以及时准确的识别和决策,造成碳排放高。低碳工业生产全流程数字化网络化智能化的主要目标就是将在生产过程中的感知、识别、决策与控制的智能行为复制与实现自动化,从而实现智能优化。其关键是低碳工业生产全流程数字化、网络化、智能化。为此,需要开展下列研究:(1)利用对象信息模型打造数字工厂,建立重大耗能装备及全流程碳排放的数字孪生并用于低碳运行优化调控与决策;(2)利用端边云协同架构和数据驱动技术,研制跨时空、多尺度碳排放可视化分析软件和智能优化调控软件,实现全流程智能化生产模式。

3.1.3 流程工业低碳绿色智能制造

流程工业低碳绿色制造就是将新一代信息技术,包括工业人工智能、工业互联网和工业元宇宙与工业自动化与信息化技术深度融合和协同,将流程工业自动化与信息化变革为工业智能化,实现流程工业高端化智能化绿色化。为此,需要开展下列研究:

(1)典型流程工业的碳排放机制和表征碳流动轨迹溯源;(2)面向重大耗能设备低碳高效运行的智能化决策优化一体化设计方法构建;(3)碳排放约束下全产业链资源、能源等生产要素的优化配置与协同调控。

3.1.4 制造业异质能源综合利用与智能优化调控

低碳工业的能源系统是综合能源系统。该系统将通过电、热、冷、气等多种能源互联互通和源—网—荷—储一端协同实现异质能源综合利用和生产全流程智能优化调控。为此,需要开展下列研究:

(1)高碳排工序数字孪生精准建模方法;(2)低碳强约束下的高碳排工序精准稳定控制;(3)流程工业过程工艺参数的多冲突目标跨时空动态优化决策机制与多目标高维度多工序参数协同优化方法;(4)多工序碳排放动态耦合的模型化表达;(5)融合多目标与多层次博弈的全流程优化决策;(6)全流程多工序的实时协同优化;(7)单一运营主体下多能流系统跨层级、跨区域的生产运行与能源供需动态匹配博弈;(8)多个运营主体下主体内自律与主体间协同的合作与非合作博弈。

低碳工业智能化的主要研究方向见图 1。

3.2 多能互补协同智能调控

3.2.1 多介质能源转化机制与特性表征

清洁低碳安全高效的新型能源体系,为能源系统带来了结构化变革,以高碳化石能源为主的工业能源系统开始向低碳异质多能源系统发展。为了使多介质新型能源系统安全可靠应用于生产制造过程,需开展下列研究:(1)基于耦合交互机制的异质多能负荷联合预测;(2)低碳异质多能源系统多主体自抗扰与故障自愈;(3)考虑多重不确定性的异质多能源系统能量优化;(4)综合能源需求响应与柔性资源高效低碳利用。

3.2.2 多介质能源供给协同调控与优化

多介质新型能源系统含有风、光等能源。该能源具有强的随机性和波动性,给多介质能源的供需平衡带来挑战。为了使多介质新型能源系统为生产制造过程提供高质量的能源,需开展下列研究:(1)多介质能源转换过程的行为特性的精确表征和模拟;(2)信息—异质能源耦合网络系统自主运行调控与协同优化控制;(3)以“双侧随机性”和“双高”特性为典型特征的新型电力系统的高效稳定运行;(4)多行业、市场、领域中的多介质能源系统协同减碳。

3.2.3 零碳转型导向下的多能互补与源储荷自主调控

零碳转型导向下进行多能互补与源储荷自主调控成为节能减碳的重要方向。由于生产制造过程是信息流、能源流和物质流三流交互的过程,为了保证高质量生产,要求能源流稳定可靠,需实现多能互补与源储荷自优化调控。为此,需开展下列研究:(1)“源—网—荷—储”多维度、跨时空交互机制,时间空间环境深度耦合源储荷自主调控方法;(2)机理和知识驱动相融合的多层次、多尺度、多目标“源网”融合协同优化控制技术;(3)面向双碳目标的工业多能流协同运行与控制一体化,实现双碳导向、产能协同、多能耦合、闭环调控。

3.2.4 能源“源—网—荷—储”一体化智能决策与综合安全

多介质新型能源系统应用于工业生产制造过



图 1 低碳工业智能化主要研究方向

程,需实现“源—网—荷—储”全局优化决策和安全运行。为此,需开展下列研究:(1) 有限样本下低碳能源电力系统智能优化决策的性能底线要求与决策结果的可解释性;(2) 考虑多能互补与供需随机匹配的建筑低碳能源电力系统运行优化;(3) 极端场景下低碳能源电力系统智能优化决策的信息物理安全监测与鲁棒优化;(4) 考虑多源信息语义转化与时空信息关联耦合机理的智能电网安全可靠评估。

3.2.5 零碳智慧能源系统的结构化变革

零碳能源系统除风、光等可再生能源,引入氢能,成为风、光、氢、电、冷、热等多种能源介质组成的具有复杂拓扑结构的关联网络化系统。为了使其应用于新型工业能源系统,需实现多能供需的实时优化匹配。为此,需开展下列研究:(1) 信息流和氢—电二次能源及多种能源流网络间的时空多尺度耦合、动态转换关系的机理和数据模型、智能性设计;(2) 多能耦合信息物理融合能源系统安全经济设计和运行的控制优化理论与方法;(3) 多能转换关键装备和系统的高能效调控与稳定性;(4) 包含氢能供需链的多能互补协调规划,分布式能源系统市场的设计与博弈分析。

3.2.6 城市智慧能源管控

城市能源供给系统耦合电、气、热、冷等多种供能和用能形式,随着风、光再生能源的应用,对城市能源系统的管控带来了挑战。建立城市智慧能源管控系统是实现节能减排的关键。为此,需开展下列研究:

(1) 城市多介质能源供给的能量流—信息流—价值流—碳排放表征;(2) 碳排约束下的城市多介质新能源系统智能化管理与决策;(3) 新能源广泛接入情况下的城市电网系统稳定运行和优化调控;(4) 针对电、气、热、冷等多种能源形式的区域能源网一体化管控。多能互补协同智能调控的主要研究方向见图2。



图2 多能互补协同智能调控主要研究方向

4 结语

本文在分析面向双碳目标的自动化与智能化现状、发展趋势、面临的挑战的基础上,提出了面向双碳目标的自动化和智能化理论与技术的主要研究方向——低碳工业智能化和多能互补协同智能调控。开展面向双碳目标的自动化和智能化理论与技术的研究对实现我国工业双碳目标具有重要意义。该研究涉及基础理论研究、关键技术突破、工程实施与示范应用多个方面,亟需加强政策支持、研发投入,加快推动该领域的发展。建议将工业互联网与工业人工智能技术和工业自动化与信息化技术相结合,研发重大耗能设备、生产全流程和工业产业链节能减排低碳运行的自动化和智能化技术,建立工业低碳运行的智能化管理与自动化技术体系,实现工业节能减排低碳运行。实现上述目标需建立政、产、学、研深入协同合作研究机制和培养跨学科从事研究的创新人才。

致谢 秘书组成员李铭禄、陈积明、钟伟民、韩红桂、邓方、蒋朝辉、梁超、刘行健、刘瑞军等为本期论坛的成功召开做出了重要贡献,深表谢忱。

参 考 文 献

- [1] 柴天佑,丁进良. 流程工业智能优化制造. 中国工程科学, 2018, 20(4): 51—58.
- [2] 柴天佑,刘强,丁进良,等. 工业互联网驱动的流程工业智能优化制造新模式研究展望. 中国科学:技术科学, 2022, 52(1): 14—25.
- [3] Yang T, Yi XL, Lu SW, et al. Intelligent manufacturing for the process industry driven by industrial artificial intelligence. *Engineering*, 2021, 7(9): 1224—1230.
- [4] Chai TY, Li MY, Zhou Z, et al. An intelligent control method for the low-carbon operation of energy-intensive equipment. *Engineering*, 2023, 27: 84—95.
- [5] Ke J, Price L, Ohshita S, et al. China's industrial energy consumption trends and impacts of the Top-1000 Enterprises Energy-Saving Program and the Ten Key Energy-Saving Projects. *Energy Policy*, 2012, 50: 562—569.
- [6] Zhou Y, Zhou HJ, Xu CM. Exploration of hydrogen sources for the low-carbon and green production in the steel industry in China. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(2): 1073—1077.
- [7] 田涛,朱明璋,姜晔. 石化产品碳足迹评价研究与实践. 油气与新能源, 2022, 34(5): 100—108.
- [8] 贾翌,施大鹏. 炼油过程碳排放量化模型构建及汽油质量升级碳排放测算. 石油炼制与化工, 2021, 52(5): 98—102.

- [9] 姚扬, 张正. 西门子中国碳中和白皮书. (2021-11-01)/[2024-07-30]. <https://www.siemens.com/cn/zh/company/sustainability/whitepaper.html>.
- [10] ABB公司. AbilityTM智慧能源管理解决方案. (2023-10-01)/[2024-07-30]. <https://library.e.abb.com/public/d900e779117d437da005121ca635c965/P8-9.pdf>.
- [11] 霍尼韦尔. 智慧能源管理解决方案. (2023-10-01)/[2024-07-30]. <https://www.honeywell.com.cn/content/dam/honcn/documents/218/>.
- [12] Hu GH, Li XX, Liu XY, et al. Techno-economic evaluation of post-combustion carbon capture based on chemical absorption for the thermal cracking furnace in ethylene manufacturing. *Fuel*, 2023, 331: 125604.
- [13] Hu G, Xu L, Zhao L, et al. Uncertainty analysis of NO_x and CO emissions in industrial ethylene cracking furnace using high-precision sparse polynomial chaos expansion. *Combustion Science and Technology*, 2024, 196(2): 195—222.
- [14] Collins S, Deane J, Poncelet K, et al. Integrating short term variations of the power system into integrated energy system models: A methodological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 839—856.
- [15] Geidl M, Andersson G. Optimal power flow of multiple energy carriers. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(1): 145—155.
- [16] 王盛, 丁一. 考虑多能互补和负荷不确定性的区域综合能源系统优化定容与资产利用效率分析. *全球能源互联网*, 2019, 2(5): 426—432.
- [17] Klemm C, Vennemann P. Modeling and optimization of multi-energy systems in mixed-use districts: A review of existing methods and approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135: 110206.
- [18] Heendeniya C, Sumper A, Eicker U. The multi-energy system co-planning of nearly zero-energy districts-Status-quo and future research potential. *Applied Energy*, 2020, 267: 114953.
- [19] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架. *电力系统自动化*, 2017, 41(09): 2—11.
- [20] Jia J, Li H, Wu D, et al. Multi-objective optimization study of regional integrated energy systems coupled with renewable energy, energy storage, and inter-station energy sharing. *Renewable Energy*, 2024, 225: 120328.
- [21] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 61—69.
- [22] Xi Y, Fang J, Chen Z, et al. Optimal coordination of flexible resources in the gas-heat-electricity integrated energy system. *Energy*, 2021, 223: 119729.
- [23] Oskoueï MZ, Mirzaei MA, Mohammadi-Ivatloo B, et al. A hybrid robust-stochastic approach to evaluate the profit of a multi-energy retailer in tri-layer energy markets. *Energy*, 2021, 214: 118948.
- [24] Integrated Energy Systems. *Integrated Energy Systems*. [2024-07-15]. <https://ies.inl.gov/SitePages/Home.aspx>.
- [25] 任洪波, 张宇晨, 吴琼, 等. 面向韧性提升的综合能源系统规划与运行调度研究综述. *电力系统自动化*, <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20240604.1438.010>.
- [26] 王睿, 孙秋野, 张化光. 微电网的电流均衡/电压恢复自适应动态规划策略研究. *自动化学报*, 2022, 48(2): 479—491.
- [27] Meyabadi A, Deihimi M. A review of demand-side management: reconsidering theoretical framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 367—379.
- [28] Guelpa E, Verda V. Demand response and other demand side management techniques for district heating: a review. *Energy*, 2021, 219: 119440.
- [29] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 11—24.
- [30] 徐占伯, 周春翔, 吴江, 等. 基于边云协同的建筑能源系统分布式供需协同优化. *中国科学: 信息科学*, 2023, 53(3): 517—534.
- [31] Liu JH, Xu ZB, Wu J, et al. Optimal planning of distributed hydrogen-based multi-energy systems. *Applied Energy*, 2021, 281: 116107.
- [32] Dong XX, Wu J, Xu ZB, et al. Optimal coordination of hydrogen-based integrated energy systems with combination of hydrogen and water storage. *Applied Energy*, 2022, 308: 118274.
- [33] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战. *电力系统自动化*, 2022, 46(8): 189—207.
- [34] 吴佳琦, 张谦, 黄耀宇, 等. 计及电动汽车的综合能源系统多主体协同低碳经济调度. *电力系统自动化*, 2024, 48(12): 36—47.
- [35] Rostamnezhad Z, Mary N, Dessaint LA, et al. Electricity consumption optimization using thermal and battery energy storage systems in buildings. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2023, 14(1): 251—265.
- [36] 中华人民共和国发展改革委员会. 清洁能源消纳行动计划(2018-2020年). [2024-07-30]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201812/W020190905495739358481.pdf>
- [37] 郜捷, 宋洁, 王剑晓, 等. 支撑中国能源安全的电氢耦合系统形态与关键技术. *电力系统自动化*, 2023, 47(19): 1—15.
- [38] 陈胜, 张景淳, 卫志农, 等. 面向能源转型的电-气-氢综合能源系统规划与运行. *电力系统自动化*, 2023, 47(19): 16—30.
- [39] Chen S, Wang CF, Zhang ZW. Multitime scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network considering multiple correlation of renewable energy sources. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(6): 5614—5625.

- [40] Lonis F, Tola V, Cau G. Assessment of integrated energy systems for the production and use of renewable methanol by water electrolysis and CO₂ hydrogenation. *Fuel*, 2021, 285: 119160.

Theory and Technology of Automation and Intelligence for Dual Carbon Target

Tianyou Chai^{1, 2*} Feng Qian³ Xiaohong Guan^{4, 5} Jinliang Ding¹ Wei Du³
Zhanbo Xu⁴ Tao Yang^{1, 2} Ke Liu⁶ Jie He⁶ Su Song⁶
Ruizhen Zhao⁶ Zhiheng Wang⁶ Yu Liu^{6, 7}

1. *Northeastern University, State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Shenyang 110819*
2. *Northeastern University, National Engineering Technology Research Center for Metallurgical Industry Automation, Shenyang 110819*
3. *East China University of Science and Technology, School of Information Science and Engineering, Shanghai 200237*
4. *Xi'an Jiaotong University, Ministry of Education Key Lab for Intelligent Networks and Network Security, Xian 710049*
5. *Tsinghua University, Center for Intelligent and Networked Systems, Beijing 100084*
6. *Department of Information Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*
7. *School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641*

Abstract Based on the 324th Shuangqing Forum, aiming at the national major needs on low-carbon operation of high-energy-consuming industries and coordinated carbon reduction regulation of multi-media energy toward dual carbon target, this paper focuses on the automation and intelligence system theory, key technologies and application-oriented basic issues of low-carbon industrial intelligence and multi-energy complementary coordinated intelligent regulation, and analyzes the current status and development trends of automation and intelligence for dual carbon goals. For low-carbon industrial intelligence, this paper focuses on intelligent modeling methods for carbon emissions throughout the entire industrial production process, digitalization, networking, and intelligence of the entire low-carbon industrial production process, low-carbon green manufacturing in process industries, and comprehensive utilization and optimal regulation of heterogeneous energy in manufacturing. For multi-energy complementary coordinated intelligent regulation, this paper focuses on multi-media energy conversion, multi-media energy supply coordinated regulation, multi-energy complementarity and source-storage-load regulation, energy “source-grid-load-storage” integrated decision-making and comprehensive safety, structural changes in zero-carbon smart energy systems, and comprehensive energy management and control in cities. Around the above topics, the challenges are discussed, the concise scientific problems and main research directions are given, and relevant policy suggestions are provided.

Keywords dual carbon target; industrial intelligence; high energy-consuming process industry; multi-medium energy; low-carbon operation; coordinated intelligent regulation

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: tychai@mail.neu.edu.cn