

中国自动化学会通讯

COMMUNICATIONS OF CAA

第 2 期

2025 年 02 月

第46卷 总第257期

主办：中国自动化学会

<http://www.caa.org.cn>

E-mail: caa@ia.ac.cn

京内资准字2020-L0052号

2025 跨界融合 · 创新未来

中国自动化与人工智能科普大会

暨创新人才贯通式培养研讨会

新 AI 与新时代的人才与培养 / 王飞跃 P008

AI 赋能下的天文科学教育 / 刘继峰 P015

智能时代之下的人才需求及发展趋势 / 齐红威 P020



扫描二维码
关注官方微信



扫描二维码
关注官方微博



中国自动化学会通讯

Communications of CAA



主管单位 中国科学技术协会
主办单位 中国自动化学会
编辑出版 中国自动化学会办公室



关注官方微信



关注官方微博

主 编 | 郑南宁 CAA 理事长、中国工程院院士、
西安交通大学教授

副 主 编 | 王飞跃 CAA 监事长、中国科学院自动化
研究所研究员

杨孟飞 CAA 副理事长、中国科学院院士、
中国空间技术研究院研究员

陈俊龙 CAA 副理事长、欧洲科学院院士、
华南理工大学教授

编 委 | (按姓氏笔画排列)

丁进良 王 飞 王占山 王兆魁 王庆林
王 坛 邓 方 石红芳 付 俊 吕金虎
乔 非 尹 峰 刘成林 孙长生 孙长银
孙彦广 孙富春 阳春华 李乐飞 辛景民
张 楠 张 俊 陈积明 易建强 周 杰
赵千川 赵延龙 胡昌华 钟麦英 侯增广
姜 斌 祝 峰 高会军 黄 华 董海荣
韩建达 谢海江 解永春 戴琼海

刊名题字 | 宋 健

地 址 | 北京市海淀区中关村东路 95 号

邮 编 | 100190

电 话 | (010) 8254 4542

传 真 | (010) 6252 2248

E-mail: caa@ia.ac.cn

http://www.caa.org.cn

印刷日期 | 2025 年 2 月 28 日

发行对象 | 中国自动化学会会员及自动化领域科技工作者

本刊声明

◆ 为支持学术争鸣, 本刊会登载学术观点彼此相左的不同文章。来稿是否采用并不反映本刊在学术分歧或争论中的立场。每篇文章只反映作者自身的观点, 与本刊无涉。

主编的话



郑南洋

当今时代，人工智能正以前所未有的速度重塑世界，成为推动社会进步的关键力量。它不仅推动了各行业的智能化转型，也为科普教育带来了新的机遇和挑战。科普教育作为提升全民科学素养的重要手段，其核心在于“连接”与“赋能”，通过将高端科研资源转化为通俗易懂的内容，激发公众对科技的兴趣，尤其是青少年的创新意识。与此同时，人工智能的发展促使教育模式从传统模式向智能化、个性化转变，强调跨学科素养、创新能力以及终身学习的重要性。在此背景下，如何构建适应未来需求的创新人才培养体系，推动人工智能教育的科学化与系统化发展，已成为教育界、科研界和产业界共同关注的重要课题。

为积极响应国家关于科技、教育、人才一体化发展的战略部署，1月11—12日，2025中国自动化与人工智能科普大会暨创新人才贯通式培养研讨会在北京召开。大会聚焦大中小学贯通式培养模式与人工智能教育的科学化、系统化发展，旨在推动高端科研资源的科普化，助力全民科学素质提升，为我国教育强国与创新型国家建设注入新动力。本期专刊重点分享了中国自动化学会监事长、中国科学院自动化研究所研究员、澳门科技大学特聘教授王飞跃的“新 AI 与新时代的人才与培养”，中国青少年科技教育工作者协会天文科学教育专业委员会主任刘继峰的“AI 赋能下的天文科学教育”，以及中国自动化学会联邦数据与联邦智能专业委员会主任、数据堂（北京）科技股份有限公司 CEO 齐红威的“智能时代之下的人才需求及发展趋势”等 3 篇专题文章。

在此，我们向所有贡献稿件的专家学者表示衷心的感谢！未来之路，任重道远，让我们携手共进，以创新为翼，以融合为桥，共同推动我国创新人才培养迈向新高度！



专题 / Column

- 004 在 2025 中国自动化与人工智能科普大会上的
致辞（内容节选）/ 郑南宁
- 005 在 2025 中国自动化与人工智能科普大会上的
致辞（内容节选）/ 杨孟飞
- 005 在 2025 中国自动化与人工智能科普大会上的
致辞（内容节选）/ 牛晓莉
- 007 在 2025 中国自动化与人工智能科普大会上的
致辞（内容节选）/ 赵崇海
- 008 新 AI 与新时代的人才与培养 / 王飞跃
- 015 AI 赋能下的天文科学教育 / 刘继峰
- 020 智能时代之下的人才需求及发展趋势 / 齐红威

观点 / Viewpoint

- 026 王飞跃：警惕商业学术警察，支持 eLife 生态
变革
- 029 黄华：构建真正包容、普惠、可持续的全球 AI
治理体系需要各国共同努力

学术前沿 / Academic Frontier

- 033 电力设施多模态精细化机器人巡检关键技术及
应用 / 张辉 杜瑞 钟杭 曹意宏 王耀南
- 055 基于高阶控制障碍函数的多固定翼无人机鲁棒
避障安全编队跟踪控制 / 付俊杰 林潇坤 温广辉



学会动态 / Activities

- 069 16 名 CAA 会员晋级为学会高级会员
070 CAA 会员权益大解析：想你所想，享你所想

形势通报 / Voice

- 072 教育强国建设规划纲要（2024—2035 年）
078 国家重点研发计划资金管理办法
085 中国科学技术协会全国学会会员管理若干规定

党建强会 / Party Building

- 087 进一步全面深化改革中的几个重大理论和实践问题



- 091 “以党的自我革命引领社会革命”的理论内涵与实践要求
094 中国自动化学会一届二十一次党委工作会议召开

《中国自动化学会通讯》“科学与艺术”栏目征稿启事

为了进一步探索科学与艺术的融合之美，展现自动化、信息与智能科技领域工作者的多元智慧与人文情怀，2025 年《中国自动化学会通讯》正式推出全新栏目——“科学与艺术”。我们希望通过文字的力量，打破学科壁垒，让科学的严谨与艺术的灵动在字里行间相互辉映，为读者呈现一个充满想象力与创造力的精神世界。

一、征稿主题

本次征稿以“科学与艺术”为主题，围绕科学与艺术的交融、碰撞展开创作。征稿方向包括但不限于：

科学探索中的艺术灵感；
艺术创作中的科学思维；
自动化技术与艺术的结合；
科学与艺术在日常生活中的体现；
对科学与艺术融合的思考与展望。

二、征稿要求

1. 体裁：诗歌、散文。

2. 内容：作品需为原创，主题鲜明，内容健康，富有真情实感，能够体现科学与艺术的融合之美；如作品体裁为诗歌，需附上相应的诗歌释义。

三、投稿须知

请将稿件发送至学会邮箱 caa@ia.ac.cn，邮件主题及附件命名格式为：“科学与艺术征文 + 作者姓名 + 作者单位”。邮件正文中请附上作者的姓名、单位、联系方式及个人简介。

所有来稿经过专家评审后将在《中国自动化学会通讯》“科学与艺术”专栏及学会新媒体平台刊登。

四、联系方式

联系人：曹老师
联系电话：010-61943113
邮箱：caa@ia.ac.cn

《中国自动化学会通讯》编辑部

2025 年 2 月 28 日

在 2025 中国自动化与人工智能科普大会上的致辞 (内容节选)

文 / 中国自动化学会理事长 郑南宁



中国工程院院士，中国自动化学会会士、理事长，西安交通大学教授郑南宁致辞

当今，自动化与人工智能技术正以惊人的速度改变着世界，几乎人类社会的每个领域都因此焕发出新的生机。然而，正是在这个飞速发展的时代，我们更需要通过科普的方式，将科技的力量和知识传递给大众，让更多人能够理解并积极参与到这场变革中来。科普的意义在于“连接”。它将复杂的科学技术转化为简单

生动的语言，让公众理解并接触前沿技术；它缩短了科学家与公众之间的距离，搭建起一座沟通的桥梁，激发青少年对科学的热爱和兴趣，并引导社会对科学技术的理性认知。科普的价值在于“赋能”。科学知识的普及是提升全民科学素养的基础，只有当公众充分理解科学技术，我们的社会才能更加从容地应对技术变革

带来的机遇和挑战。

当前，受到一些科幻作品和媒体渲染的影响，社会上有些人对 AI 产生了过高的期待或过度的恐惧。因此，我们迫切需要通过科普工作，引导公众理性认识 AI 技术，帮助人们正确理解其 AI 的潜力与局限，从而减少不必要的误解和恐惧。同时，AI 的发展也带来了隐私保护、算法公平等一系列重要问题。科普有助于公众更好地理解这些问题的本质，从而推动合理的技术监管与政策制定。

各位同仁，今天的大会不仅是一次关于自动化与人工智能领域科普创新与发展的深刻讨论，也是一份我们对未来社会的承诺。让我们携手共进，推动中国自动化与人工智能领域的发展，提升社会公众的科学素养，普及 AI 知识，培养出更多具备国际竞争力的科技人才，为实现中华民族科技强国的伟大目标贡献智慧和力量！○

在 2025 中国自动化与人工智能科普大会上的致辞（内容节选）

文 / 中国自动化学会副理事长 杨孟飞



中国科学院院士，中国自动化学会会士、副理事长，中国空间技术研究院研究员杨孟飞致辞

当前，自动化与人工智能蓬勃发展，智能化与自主化程度不断提高，自主决策与自适应能力增强，与物联网、大数据和云计算融合越来越深，应用领域不断拓展和深化，人机协作更加紧密。然而新技术带来便利的同时，数据隐私、就业结构变化等问题也随之而来。

面对复杂挑战，创新人才至关重要。本次大会聚焦科普教育与人才贯通培养，意义重大。尤其在自动化与人工智能教育领域，要为学生创造丰富且多元的实践机会，切实提升他们的创新思维与实际应用能力，使其成长为能够驾驭未来科技浪潮的栋梁之材。

未来，希望我们抓住机遇，通过跨领域合作，推动自动化与人工智能技术创新发展。相信通过大家的努力，能让这些技术更好地服务社会。○

在 2025 中国自动化与人工智能科普大会上的致辞（内容节选）

文 / 中国科学院大学党委常委、副校长 牛晓莉

当前，新一轮科技革命和产业变革正在加速推进，人工智能、大数据、量子通信等前沿科技不断取得突破，为国家发展带来了前所未有的机遇和挑战。在全球化和信息化快速发展的大背景下，世界各国之间的竞争愈发激烈，科技实力和人才素质已经成为衡量一个国家竞争力的关键指标。同时，面对传统行业的转型升级需求、新兴产业的快速发展趋势以及社会治理现代化的要求，科学技术进步与高质量教育的支撑显得尤为重要。

中国科学院大学（简称“国科大”）成立于1978年，是一所以科教融合为办学模式、研究生教育为办学主体、精英化本科教育为办学特色的创新型大学。国科大以服务国家战略需求为导向，深入实施科教融合发展战略，致力于抢占科技制高点、实现高水平科技自立自强，培养德才兼备的未来科技领军人才。建校40余年来，我们为国家输送了23万余名硕士博士毕业生，他们中绝大部分成为我国教育科技领域的中坚力量。近五年，我校在自动化及人工智能领域已累计培养出8千余名优秀专业人才，可以说为相关领域的发展做出了自己的贡献。

近年来，国科大紧密围绕国家战略需求，持续深化教育综合改革，启动实施“一特区两工程”，创建国家拔尖创新人才培养专区、基础与前沿交叉学科贯通培养工程以及急需紧缺领域博士培养工程，全面推动教育科技人才一体发展。



中国科学院大学党委常委、副校长牛晓莉致辞

在深入实施急需紧缺领域博士培养工程方面，国科大打破学科专业壁垒，以超常规方式快速培养人工智能、集成电路等相关领域的急需紧缺人才，注重交叉学科的课程设计，全面提升学生的创新能力与实践能力。在深入实施基础与前沿交叉学科贯通培养工程方面，国科大开展“本—博”贯通培养，一体建设课程、教学、教材体系，整合优化毕业设计、论文开题等环节，强化数

理支撑和科研训练。

国科大不仅注重培养学生的创新能力，更将科学家精神和家国情怀植根大学文化的传承，培育学生胸怀天下、服务国家的使命意识和责任担当。“春分工程·青少年科普专项行动”，是国科大在2018年春分日启动的一项社会责任项目。项目依托国科大科教融合学院的师生力量，以科普报告、科技指导、科普展演等形式，提升青少年科学素养，助

力中小学科学教育。成立6年来，学生讲师团规模突破千人，为北京市100余所中小学开展科普报告1.7万余场，受益人次超58万。“春分工程”科普团队获得多项奖励，入选2023科普中国年度科普人物（团队）。

我校人工智能学院联合多方力量共同发起“全国中小学人工智能探究性学习训练营”（简称“AI探学营”），这一公益教育项目已连续举办五期，累计吸引全国超过1.2万名中小學生报名，最终选拔出510名学员进入营地，让他们近距离感受科技探索的魅力，进一步激发中小学生对科技和人工智能的热爱，树立科技报国的理想。

未来，国科大将继续致力于创新科技人才贯通式培养模式的探索和实践，致力于青少年科学素质的培养，也希望本次大会成为一个思想碰撞、智慧共享的盛宴，为推动我国自动化与人工智能领域的科普教育以及创新人才的培养，注入新的活力! ○

在 2025 中国自动化与人工智能科普大会上的致辞 (内容节选)

文 / 中国青少年科技教育工作者协会副理事长 赵崇海



中国青少年科技教育工作者协会副理事长兼秘书长赵崇海致辞

在习近平总书记关于教育的重要论述和党的二十届三中全会精神的科学指引下，我国教育事业取得了历史性成就和显著变化。特别是教育、科技、人才一体化发展的国家战略，为我们指明了前进的方向。面对全球科技竞争的新态势，自动化和人工智能作为引领未来的战略性技术，其重要性日益凸显。因此，如何在新时代背景下，探索出一条符合中国国情的人工智能教育路径，成为摆在我们面前的一项重

大课题。

本次大会聚焦于“创新人才贯通式培养模式”与“自动化与人工智能教育的科学化、系统化、标准化、规范化发展”，旨在通过深入理论研讨和实践探索，为我国人工智能教育体系的构建贡献智慧与力量。相信通过贯通式的人才培养模式，可以有效打破学段壁垒，实现知识、技能与素养的连续传递与升华，为培养具有国际竞争力的人工智能领域创新后备人才奠定坚实基础。

中国青少年科技教育工作者协会专注于为广大的青少年科技教育工作者提供全方位服务，旨在提升青少年的科学素养并培育科技创新领域的未来人才，我们针对青少年科技教育工作者专业成长，搭建了学术交流平台、培训认证平台、科普研学平台、科技竞赛平台，并围绕青少年科学教育举办丰富多彩的活动，并拥有《中国科技教育》专业期刊。此次与自动化协会的携手合作，是发挥专业学会学科优势和我们协会专业优势和渠道优势的一次积极尝试。我们将认真总结此次活动的经验，以期与更多兄弟学会建立合作关系，共同推动青少年科技教育事业的发展。

各位同仁，科技创新事业呼唤科技创新人才，我们每一位科技教育工作者都肩负着培养创新人才的使命。站在新的历史起点上，让我们攻坚克难、携手并进、勇攀高峰，以实际行动践行国家战略，为推动我国自动化与人工智能教育事业的高质量发展和创新人才培养贡献自己的力量！

新 AI 与新时代的人才与培养

文 / 中国科学院自动化研究所 复杂系统管理与控制国家重点实验室 王飞跃

【导读】2025 年 1 月 11 日 -12 日，由中国自动化学会、中国青少年科技教育工作者协会联合主办的 2025 中国自动化与人工智能科普大会暨创新人才贯通式培养研讨会在中国科学院大学玉泉路校区礼堂隆重举行。此次会议以“跨界融合·创新未来”为主题，聚焦大中小学贯通式培养模式与人工智能教育的科学化、系统化发展，吸引了来自全国高校、科研院所、中小学校等专家学者、师生代表共计 500 余人现场参会，有效汇聚了领域产学研优质资源，为推动我国教育强国与创新型国家建设贡献了力量。

本次大会共设 3 场大会报告和 4 个专题会议，邀请中国自动化学会监事长、中国科学院自动化研究所研究员、澳门科技大学特聘教授王飞跃作题为“新 AI 与新时代的人才与培养”的大会报告，报告介绍了在人工智能技术迅猛发展的新时代，各种人工智能和机器学习方法与技术正重塑各行业生产模式与工作方式，为社会带来巨大机遇与挑战。社会对人才需求发生转变，未来人才需具备跨学科综合素质、创新能力及扎实专业知识与技能，以适应 AI 时代需求。教育体系亟待改革，传统模式应与 AI 深度融合，培养学生的数据思维、算法意识、编程能力，强化批判性思维、创造力和团队合作等关键能力。同时，推广终身学习理念，鼓励全程学习新知识、新技能，紧跟技术与社会需求变化。



中国自动化学会会士、监事长，中国科学院自动化研究所研究员，澳门科技大学特聘教授王飞跃作大会报告

人工智能的时代像一场风暴般袭来，但正如莎士比亚在其《暴风雨》一剧中所言，“凡是过往，皆为序章”，我们应该正确认识未来的变革。

一、什么是 AI?

早在去年底，“人工智能”便开始演化为更复杂的形态——AI 代理（AI Agent），成为 Agentic Intelligence，尽管其缩写与传统的“老”AI 相同，但其内涵已发生了转变。尽管这一转变尚未完全被业界充分理解和消化，

但未来已显，这一“旧”AI 可能会进一步发展成新的“Autonomous Intelligence”，新 AI，即自我驱动的自主智能，与机器人技术相结合（AIR，就是 AI 加机器人 Robotics，英文空气之意），变得无处不在，仿佛空气一般，逐渐凸显人工智能的真正本质：知识自动化。

这一发展趋势使得我们重新回到了当年提出“人工智能”这一概念的奠基者身上。1992 年，他曾亲口对我解释道：“你从事的是自动化，我也从事自动化，我

做的是智能的自动化 (Automation of Intelligence)。”这一表述不仅揭示了人工智能的核心内涵,还指出了知识自动化在未来技术演进中的重要地位。正如我们在自动化学会 50 周年大会上所提出的口号:“做知识自动化的先锋”,这并不是意味着新的 AI 概念的出现会取代原来的 AI 理念,而是强调它们的平行发展与融合。无论新老 AI (自主智能、代理智能、人工智能) 如何演变,它们在推动技术进步和实际应用中的作用同样不可或缺,需要协同平行,一起携手推动智能化时代的到来。

新社会如何发展,是我们面临的重要课题。在我从事人工智能研究的 40 多年里,绝大多数时间是试图构建可解释的智能技术,但我现在意识到,智能本质上是不可完全解释的。从字面上来看,智能的定义依然模糊,加上再多的人工形容词都无法彻底解释它的内涵与本质,否则哲学的存在便失去了意义。然而,人工智能的不可解释性并不意味着它无法被治理。事实上,治理正是我们未来发展的核心议题。未来的主要职业或许就是治理工作——治理数字人、治理机器人。新文科将融合新工科、新理科,形成复杂性科学与技术,变成一门跨学科的新领域,专注于理解和应对复杂性问题的挑战。

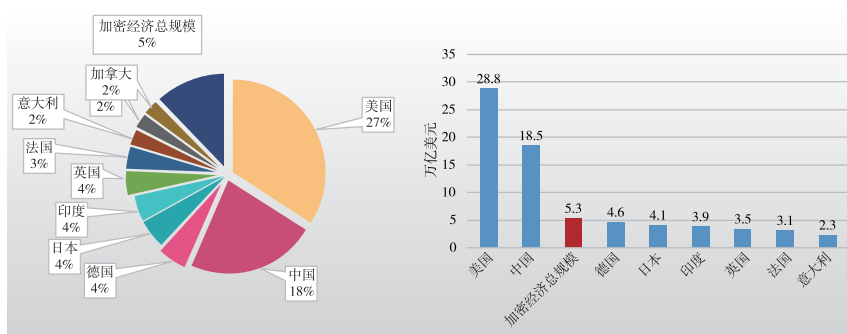


图1 新世界的“黑客”经济规模

这一时代的治理将面临三种不同的世界——物理世界、心理世界和人工世界,它们相互交织、互为依赖,因此,三者的治理必须平行推进,不能偏废。在这一背景下,美国时常提到的多元化、公平与包容理念,尽管其出发点良好,但极化成政治正确,在实践中让世界变得更加。我们必须综合考虑物理世界、心理世界和人工世界的协调发展。因此,我们中国在提出智能化采矿和工业发展战略时,特别强调人类伦理、社会责任和生态可持续性 (ERS)。

以“黑客”现象为例,回顾历史,在农业社会,还有许多土匪占山为王,但警察少之又少;在工业社会,土匪消失,但街头的小混混和黑帮仍然存在,人少多了,可警察数目大大增加。随着科技发展,未来的社会几乎没有黑帮,而是数目更少的“黑客”犯罪,但社会治理的队伍将更加庞大。

目前另一种合法的“黑客”力量正在迅速增长,他们的经济

规模已经超越了许多传统经济体,仅次于中国和美国,这就是正在迅速崛起的新型“数字游民”。如图1所示,其背后有一群不依赖传统教育、不参与传统工作、不使用传统货币、不交传统税费、没有固定老板和 CEO 的去中心化组织。数字游民的生活方式,低成本、高效率的自我治理,正迅速扩展到各个领域,几乎没有受到传统社会规则的约束。

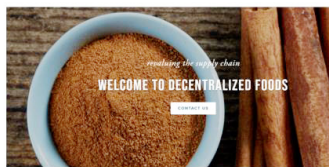
如果这种现象继续发展下去,社会将面临极为严峻的挑战:这些数字游民会不再遵守我们的规则甚至法律,利用加密技术掩盖他们的活动,这种“黑客”行为会使得我们的治理能力面临空前考验。人工智能,尤其是像 ChatGPT 等先进工具,将成为他们实现自我组织和运维的最有效工具,变革人类社会,从衣食住行开始,如图2所示。如果我们不进行相应的变革,未来将是新旧世界之间的对抗。这种变革不仅仅是技术的革新,还是社会结构和治理方式的革命。



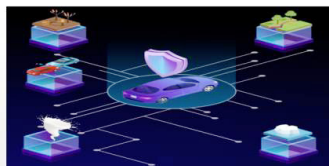
衣：MetaFactory，一个数字商品的众筹平台，用于创建社区拥有的品牌，最初重点是时尚/服装



住：USP，一个去中心化房地产交易市场



食：Decentralized Foods，去中心化食品供应链



行：InsureFi，基于数字货币的汽车保险

图2 “新”世界正在变革衣食住行

我们从大前年开始对这一现象进行调研，首先从港澳地区入手，随后与新加坡进行对话，现在这一趋势已经在全球范围内逐渐被接纳，并且在许多国家是合法的。在南美，许多年轻人已经习惯于不使用传统货币，而是依靠自己的数字钱包进行交易，打车、购物、住宿等都通过数字货币完成，且货币兑换十分便捷。

所有的人工智能技术，无论是大模型、Sora，还是即将出现的AI代理，都可以从系统智能的角度进行思考。所有问题的讨论应当从可持续性角度出发。我们与联合国开发计划署（UNDP）合作，致力于将这一议题纳入社会科普范畴。大模型的出现使得社会知识基础设施发生了变化，不再依赖图书馆、大学教授或课堂教学。未来，所谓的专业知识将不再是必须专门学习的内容，而是成为一种科学素养和科技常识，

所有人都应该具备。不学就会，不会就问将成新范式：如果无法掌握，可以通过提问来解决。

例如，我曾多次使用豆包，它的回答往往比我自己更为准确。类似的智能工具在中国也逐渐崛起，改变了我们的学习方式。在当前的课堂教学中，教师与学生的时间往往被浪费，教授的内容远不如学生通过智能工具获得的信息更有价值。我们是否应该改变科普方式和专业知识的教学方法？如果继续沿用传统的教学模式，这不仅仅是浪费时间，更可能对学生的身心 and 智力产生负面影响。因此，我们必须认真考虑并采取行动进行改变，因为世界正在发生变化。

二、智能科技带来的社会变革

NVIDIA 三年前提出，人工智能技术将使效率在十年内提高1000倍，网络上甚至有说法认为

会达到1万倍，最近有说法认为是10万倍。尽管具体的提升倍数难以确定，但这一预测值得我们深刻思考。元宇宙、大模型、区块链、智能合约、工业5.0等概念，可以有不同的名称，但其核心目标是平行企业的建设。英伟达在其四层工业元宇宙中，所有大厂都在参与，重点是实现平行制造与平行生产，如图3所示。近期在CES的演讲中，有公司提出要将自己转型为数字人，尽管有诸多机器人公司仍在研发人形机器人，但他们的目标是将这一理念实现。今年年底，如果这些目标能够达成，届时我们可能不再谈论大模型，而是将焦点转向AI代理和数字人。如果某些企业还未完成大模型的研发，那他们将很快面临下一步的挑战。变化之迅猛，我们必须留出空间来面对未来五年内的高度不确定性。美国的观点是，中国渴望确定性，而他们则提出“喂给”中国模糊性、不确定性，将其作为战略武器。我们应当向学生普及明确的不断更新迭代的时代观念，帮助他们理解这些变化是否合理正确，回归到基础，真正加强科学教育的根基。

在全球范围内，DeSci和CeSci（分布自主科学与集中规划科学）都已经展现出巨大的规模和执行力，但我们不能忘记，人工智能的起步需要多样性。在多



图3 NVIDIA的秘密：工业元宇宙 OMNIVERSE

样性中，深度学习、AlphaGo 等一系列创新涌现出了 ChatGPT 等突破性技术。美国的支持主要来自民间资本的推动，这也使得某些国家在技术竞争中被绑架。因此，我们必须深思熟虑，理解这一局势的复杂性。

许多人认为数字游民（不是网络上定义的那种）是不务正业，但我认为他们将成为未来科技的生产力的主力。我们在谈论大模型时，应当关注更深远的大模型，这是卡尔·波普尔的三个世界模型理论——物理世界、心理世界

和人工世界，如图4所示。随着人工智能的发展，数据已成为与石油矿藏相提并论的资源。在开发物理世界时，我们经历了第一次轴心时代，人性的大觉醒催生了大批哲学家，最终迎来了全球化的第一波浪潮。随后进入第二轴心时代，人类理性的大觉醒让我们见证了从牛顿到爱因斯坦的科学革命，并从工业时代步入信息时代。如今，这一进程已接近尾声，人工智能的开发成为主流，标志着智能的第三波“正和”全球化的到来。

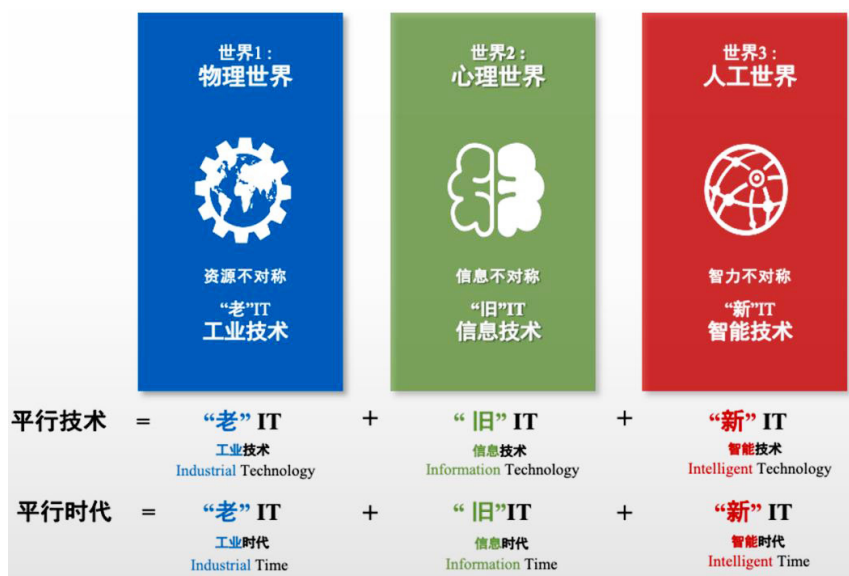


图4 三个 IT 技术与卡尔·波普尔三个世界理论

许多西方国家企图建立“新的”全球化秩序，但没有中国的全球化是无法实现的，因为中国占全球人口的四分之一。这次全球化的重点是开发人工世界，最大特征是“无中生有”——人工智能技术是“你可以拥有，我也可以拥有”，其经济的边际效应由递减转向递增，意味着使用越多，效益越好。从根本上，这次全球化的特点是包容共赢，这也是我们对人工智能技术的应有认知，它为人类走向更美好的未来提供了保障。

在这三个世界的框架下，我们需要三种不同类型的人类。希望未来生物性的人类不超过5%，而80%以上将是数字人，15%以下是机器人。由于人类和机器人都要碳排放，我们要避免“踩在同胞的头上”成就自己，而是应该通过与机器人和数字人的合作，让他们为人类提供服务。数字人可以参与计算实验，机器人可以辅助物理实验，这种“平行科学”模式将在未来得到广泛应用。在中国，针对人口的下降，一些实验室和研究机构已经研究虚拟人口与实际人口如何结合，探索通过数字人和机器人填人力缺口，支持科学研究和技术进步，造福人类。

三、未来教育、工作与生活的变革

未来的某一天，生活将变

得更加美好，科技和人工智能将带来前所未有的便捷，如图5所示。早晨（AM）有20小时以上，由自主模式（Autonomous Modes）主导，机器人和数字人将自动完成我们需要的工作；接下来进入下午PM，3小时以下，由平行模式（Parallel Modes）主导，通过人类的远程控制和云端指导，机器人和数字人将执行任务，直至晚上。夜晚EM（Evening Mode），我们将进入专家/应急模式（Expert/Emergency Mode），不超过1小时，机器人和数字人将提供有力支持，让人类能够更轻松地应对突发状况。

技术的革新本应让我们生活更好，但目前，过度劳累却使人类的生活质量下降。有人声称每天工作12小时、一周7天的007或996工作模式，正逼近人类的极限。不同于机器人的工作方式，人类也有自己的独特价值，机器人和数字人则各自承担其职能。理想的

未来是，工作时间缩短，工作日减少，让人们能够享受更多的生活和健康。希望我们不再庆祝“996的1024蚂蚁节”，而是庆祝“1023幸福节”，早10上班，下午2点下班，每周工作3天，享受智能技术带来的改善，让我们有更多时间陪伴家人，感受生命。

未来，人工智能和大模型将不仅定义数字人的角色，还将改变知识产权的核心——“场景”，通过将案例分析升华为“场景工程”，推动从理论到实践的转变。人类的管理系统和计算机系统将合二为一，形成智能化的H2OS（Human and Organization Operating Systems）。这一切将为我们迈向智能未来提供坚实的技术基础。

根据初步计算，虽然无法达到NVIDIA所预言的效率提升1000倍，但若按5%的人类劳动与15%的机器人、80%的数字人比例来算，至少能够提升效率

960倍。如果人类的比例降低至1%，效率提升将达到5万倍。这一转型的途径应是可行的，但关键问题是如何培养适应这一变革的人才。

关于教育，变革几乎是无可避免的趋势。上个月，我了解到美国有地方推出了“无界学园”计划，如图6所示，每天仅需2小时，全由AI进行教学，起初我对这一点持怀疑态度，但随着可汗学院等教育大模型的引入，认为这种模式的完善可能构建未来教育的方向。三十年前，我曾结合公立、私立和家庭学校进行试点，希望利用推动教育改革，让教育如同山间流下清冽的小溪，滋养学生的心田，而非过度“卷”成绩。我们在智能化教育领域早在20世纪末就开始规划，2014年成立了智慧教育研究所，设立了智航教育基金，推出iSTREAMS和iCDIOS，并在全国范围内设立了30所智航学校。这些学校通过人工智能、机器人、无人机等技术的引入，激励学生进行创新、跨学科学习。

未来的教育应当鼓励学生通过实践和动手操作学习，而不是一味追求课本知识。这种“干中学，学中干”的核心理念，在全国多个地区得到了实践，尤其在疫情期间，我们将3D打印技术与社会制造结合，进一步推动教育的多样性。我们的目标是将虚拟

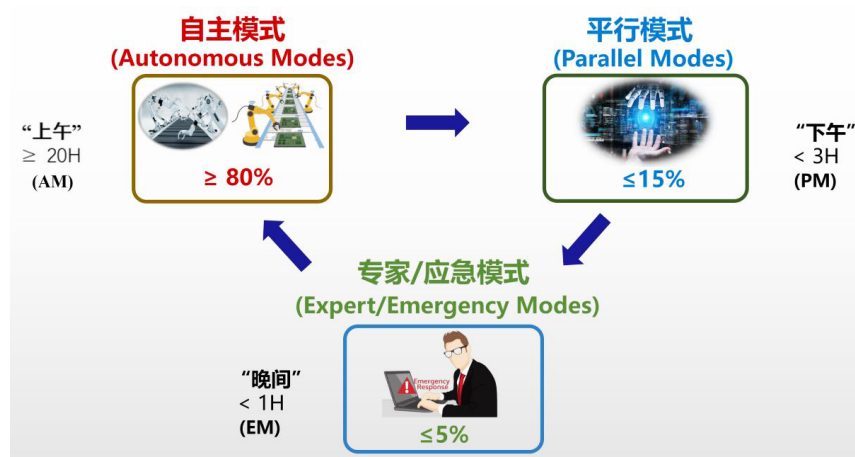


图5 智能的一天：三个世界，三种模式



图6 无界学园

教育与人工智能相结合，以实际行动推动教育理念的革新。它不仅仅要注重学生的知识学习，更要强化学生的综合能力，包括创新精神、多学科合作和国际化视野。同时，还必须确保教育的安全性、个性化以及资源的可持续性利用。通过这些努力，我们为中国独特的教育模式奠定基础，为未来的全球教育体系提供借鉴。

四、智能教育与跨学科科研

教育和学术方法的深刻变革首先必须关注知识的精简与高效利用，考虑到人类大脑的有限记忆容量与计算能力，教育应避免过早过度填充信息，防止学生的认知能力被消耗殆尽。与此相对，学术活动应当鼓励学生的自主探索，摒弃传统考试形式，代之以以竞赛为核心的评估机制。竞赛不仅能考察学生的专业知识，还能培养其在团队合作中的交流、沟通、组织、执行与调度能力，这些能力在未来的工作中至关重要。

进一步地，教育应实现人机结合与知行合一，如图7所示。未来的教育环境应体现虚实结合，学生与数字化资源共同参与学习，采用一对一的个性化教育方式。这种模式能够为学生提供持续的学习支持，数字化助手将陪伴学生整个学习生涯，突破时间与空间的限制。

同时，教育与科研应朝着跨学科、复杂性科学方向发展，如图8所示。未来的科研将不再是单一领域的探索，而是人类科学家、机器人科学家与数字科学家并行合作。通过数字化工具与机器人技术，科学家

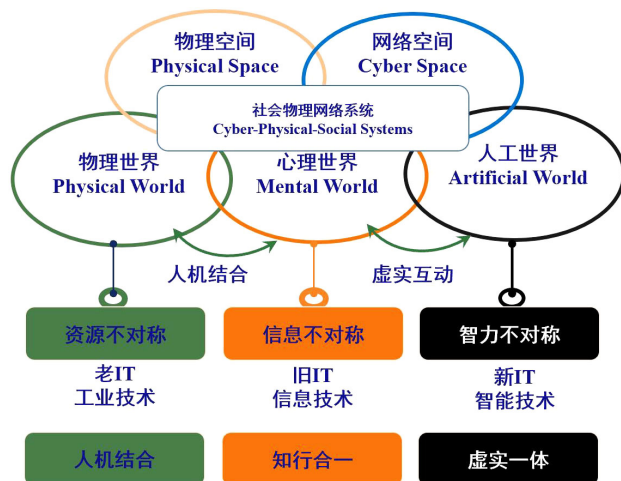


图7 未来的学习和研究途径：人机结合，知行合一，虚实一体

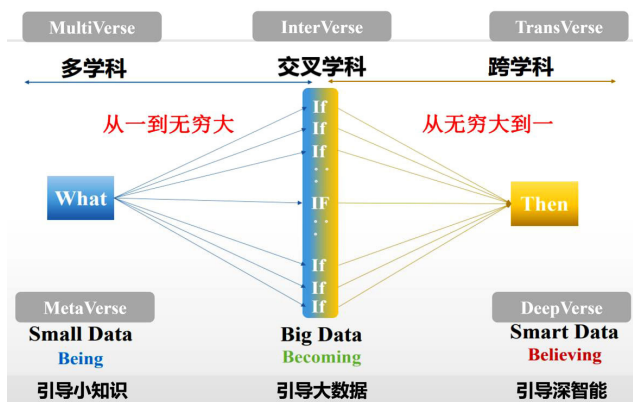


图8 未来新文科新理科新工科：基于学科交叉的元学科

能够快速生成并验证研究方案，大大提升研究效率与创新能力。

此外，对于学科的分类也应进行重新思考。文科的角色将更加突出，其与工科、理科的界限逐渐模糊，治理学科将在未来变得尤为重要。最后，个人的学术追求应从功利主义中解放出来，追求科研的真正乐趣与意义，从SCI到SCE，避免“卷文化”对学术研究的负面影响。

未来教育的目标是重视学生的个性化发展，推动学科间的交叉融合，强调知识的深度与内涵，最终通过平行科学与人机协作实现科学与社会的共同进步。○

* 本文根据作者所作报告速记整理而成

作者简介



王飞跃教授, 1990 年获美国伦塞利尔理工学院 (RPI) 计算机与系统工程博士学位。1990 年起在美国亚利桑那大学先后任助教授、副教授和教授, 机器人与自动化实验室主任, 复杂系统高等研究中心主任。曾任中国科学院自动化研究所副所长, 现为中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任。

王教授是智能控制、智能机器人、无人驾驶、智能交通等领域早期开拓者之一。自上世纪 80 年代起, 师从机器人和人工智能领域开拓者 G. N. Saridis 和 R. F. McNaughton 教授, 开展智能控制、机器人、人工智能和复杂系统的研究与应用工作, 提出并建立了智能系统的协调结构和理论、语言动力学理论、代理控制方法、复杂系统的 ACP 方法等。现已完成 “Advanced Studies of Flexible Robotic Manipulators:

Modeling, Design, Control and Application”、“Autonomous Rock Excavation: Intelligent Control Techniques and Experimentation”、“Advanced Motion Control and Sensing for Intelligent Vehicles”、“Advances in Computational Intelligence: Theory and Applications”、《社会计算》、《智能汽车》、《智能轮胎》、《区块链理论与方法》、《Parallel Services——Intelligent Systems of Digital Twins and Metaverses for Services Science》、《Parallel Population and Parallel Human: A Cyber-Physical Social Approach》、《汽车自动驾驶性能测试的智能方法与技术》等十多本学术专著, 皆为相关领域的首部学术著作。自二十一世纪初, 发起并开拓了社会计算、社会制造、平行智能、平行控制、平行管理、平行艺术、知识自动化等新的研究领域。

王教授现任智能科学与技术学报、IEEE 智能车汇刊 (IEEE Trans. on Intelligent Vehicles) 主编。1996 创办 Int’l J. of Intelligent Control and Systems 和 World Scientific Series on Intelligent Control and Intelligent Automation, 2019 年创办《智能科学与技术学报》。曾任

IEEE 计算社会系统汇刊 (IEEE Transactions on Computational Social Systems)、自动化学报、IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica (自动化学报英文刊)、IEEE 智能交通系统汇刊 (IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems)、国际智能控制与系统杂志和 IEEE 智能系统 (IEEE Intelligent Systems) 主编及多份 IEEE 以及其它国际期刊主编、副主编或编委。曾任 IEEE 智能交通系统学会主席 (2005–2007 年)、旅美科协主席 (2005 年)、北美竺可桢教育基金会会长 (2007–2008 年)、中国自动化学会副理事长兼秘书长 (2008–2018 年)、IEEE 射频识别理事会 (IEEE Council on RFID) 主席 (2019–2021)、IEEE SMC 学会副主席。现任中国自动化学会监事长。2003 年起先后当选 IEEE、INCOSE、IFAC、ASME 和 AAAS 等国际学术组织 Fellow。2007 年获国家自然科学二等奖和 ACM 杰出科学家称号, 2014 年获 IEEE 诺伯特·维纳奖, 2024 年获 IEEE CRFID Emily Sopensky 卓越服务奖、IEEE SMC Lotfi A. Zadeh 开拓奖和 2025 IEEE 交通技术奖。

AI 赋能下的天文科学教育

文 / 中国青少年科技教育工作者协会天文科学教育专业委员会 刘继峰

【导读】2025 年 1 月 11 日 - 12 日，由中国自动化学会、中国青少年科技教育工作者协会联合主办的 2025 中国自动化与人工智能科普大会暨创新人才贯通式培养研讨会在中国科学院大学玉泉路校区礼堂隆重举行。此次会议以“跨界融合·创新未来”为主题，聚焦大中小学贯通式培养模式与人工智能教育的科学化、系统化发展，吸引了来自全国高校、科研院所、中小学校等专家学者、师生代表共计 500 余人现场参会，有效汇聚了领域产学研优质资源，为推动我国教育强国与创新型国家建设贡献了力量。

本次大会共设 3 场大会报告和 4 个专题会议，邀请中国青少年科技教育工作者协会天文科学教育专业委员会主任刘继峰作题为“AI 赋能下的天文科学教育”的大会报告，报告展示了在人工智能技术的快速发展的背景下天文 AI 大模型的训练成果，探讨其对科学教育、尤其是天文学方向的科学教育的推动作用，并以天文 A1 学习社区为例思考基于天文学研究范式的全链条人才培养思路，引领天文学教育与天文科学闭环发展。



中国青少年科技教育工作者协会天文科学教育专业委员会主任刘继峰作大会报告

从儿童时期开始，许多人对星空产生好奇，常常提出诸如“星星为什么有不同的颜色”、“宇

宙中到底蕴藏着什么”以及“是否存在其他生命”等问题。这种自然的探索欲望与数十万年前我们祖先在山洞中仰望星空时的原始好奇心相连，是人类天生的兴趣。正因为如此，天文学被视为启发科学教育的理想起点，能够激发青少年对自然世界的探索热情。

一、天文科学教育面临的困境

在中国科学技术协会和中国青少年科技工作者协会的指导下，我们曾利用世界最大的射电望远镜——中国“天眼”，将其 1% 的时间分配给青少年进行科学观测，如图 1 所示。通过这一实践活动，

我们收到了 3000 多份观测报告，其中不乏一些优秀的观测方案，约 300 项被评为杰出。这一过程对于科学教育的推动作用显著，展示了前沿科研设备如何激发青少年的创新思维和科研兴趣。然而，由于中国“天眼”的稀缺性，这一资源远不能满足全国青少年对科学教育的需求。中国拥有 25 万所中小学，每年接纳上亿的学生，要让每个孩子，尤其是偏远地区和山区的孩子，都能接触到科学教育资源，仍然面临巨大的挑战。

在尝试解决这一问题的过程中，天文观测设备的不足是一个根本性难题。大型天文设备的数



图1 青少年FAST观测方案征集活动

量极为有限,资源的分配远远无法满足全国范围内的需求。而且,天文学家的数量也严重不足。中国14亿人口中,职业天文学家的数量仅为约3000人,这与美国相比差距甚远——美国人口约3亿,职业天文学家却有2万名。如果所有天文学家都投身于青少年科学教育领域,依然无法满足全国范围内的需求,这构成了教育普及的巨大困境。此外,即便有天文学家愿意参与到这一事业中,也经常是基于个人兴趣和短期热情提供帮助,难以形成长期稳定的专业支持。因此,依赖天文学家单独推进青少年科学教育的模式显然很难持续。

为了解决这些问题,我们不仅需要依靠科学家和科研设备,还应探索其他创新的方式,例如通过现代科技手段如虚拟现

实(VR)、增强现实(AR)等技术,将天文知识带入课堂,让偏远地区的学生也能够通过网络平台接触到前沿的科学内容和科研方法。此外,天文学的教育不应仅限于让学生复现现有的科学知

识,更应激发他们的创新思维,引导他们参与到科学探索的过程中,培养他们的科学素养和实践能力。

二、AI 赋能天文科学教育

科学教育的实施,尤其是在天文等专业领域,面临着诸多挑战。正如刚才所提到的,尽管我们具备先进的技术和内容资源,并且可以利用现代科技手段提供辅助,教育的主体依然是中小学的教师。然而,具备足够能力进行科学教育的教师数量非常有限。常常有这种调侃,要求一名语文老师去教授天文课程,显然是过于苛刻的要求。每位教师都有自己擅长的领域,要求他们具备全面的科学知识并不现实。这一现实问题凸显了科学教育在实践中的困境,尽管我们怀有很好的初

衷,但要解决这些困难仍然面临巨大的挑战。

然而,技术的发展,尤其是AI的崛起,为我们提供了全新的解决路径。如今,AI在知识问答、文档整理、辅助阅读和学习陪伴等领域的应用已经非常成熟,这意味着它能够为我们科学教育中提供强有力的支持。AI不仅能促进教育发展,它还能助力科学研究,这也是我作为一名职业天文学家,今天在此讨论AI在教育中应用的原因。AI将科学研究和教育有效地结合成一个闭环,这种全新的模式为天文学科学教育的发展带来了巨大的可能性。

在过去的两年里,我们开展了与AI结合的科研和教育实践。天文学,作为一个数据量极大的学科,其研究涉及到大量观测与仿真数据。我们从很早开始就与自动化研究所合作,探索机器学习和深度学习技术的应用,力图利用人工智能为天文学科研提供新的突破。随着技术的积累和进步,尤其是年轻学生的积极参与,我们取得了显著的进展。在这一过程中,我们开发了“Star Whisper”人工智能系统,并取得了令人满意的成绩。同时,还推出了面向天文学科的科学基座大模型“AstroOne”,如图2所示,并与之江实验室合作开发了增强训练模型,用于加速文献阅读和跨领域研究。通常情况下,教师在某

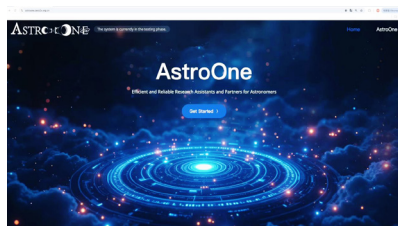


图2 AstroOne

一领域内会专注于自己的研究方向,若要进行跨学科研究,往往需要借助其他教师的帮助。通过“AstroOne”,研究人员可以输入相关关键词,快速筛选并整理跨领域的科研成果,这为科研工作带来了显著的推动作用。

在2023年,“Star Whisper”在工信部信通院的大模型排行榜中综合排名第二。尽管这些学生的

专业背景是天文学,但他们在投身这一项目后,凭借着对天文学的热爱和强烈的动力,取得了非常好的成果。“Star Whisper”不仅可以作为问答助手,帮助学生解答天文学相关问题,而且已经逐渐发展为一个学习社区,如图3所示。通过这一平台,全国范围内的学生,尤其是研究生群体,都能够通过它进行学习和互动。除此之外,Star Whisper还能够构建天文学知识图谱,进行文献推荐和归纳总结,使得学生可以高效地进行相关资料的检索和学习。

以往中小学生在从事科研时,通常需要联系大学教师或天文台

专家来解答他们的问题并协助完成各种科研任务。而现在,借助于Star Whisper,学生们无需依赖这些传统途径就能开始自己的科研探索。Star Whisper的另一项创新功能是智能化的望远镜操作。许多学校配备了望远镜,但由于操作要求较为专业,通常很难要求每位教师都具备使用望远镜的能力。我们将Star Whisper作为基础平台,结合望远镜的智能化应用,使其能够通过自然语言交互完成一系列任务,包括检验观测条件、开机、定向、调焦以及初步数据处理。这使得望远镜的使用变得更加简单和智能,能够逐步向学生提供他们所需的科学数据。

此外,Star Whisper还能够赋能天文科学教育,打破知识的壁垒,不仅能够将网上的各种资源整合起来,还能利用虚拟天文台的概念,将历史上中国天眼等大型天文观测站的数据进行共享,如图4所示。尽管无法直接调用中国天眼进行实时观测,学生依然能够通过访问过往的数据,获得科学的指导。例如,当学生所在地区天气不好,无法观测时,Star Whisper可以推荐其他地方的观测资源,使学生们能够继续进行科学探索。人工智能的介入大大降低了对职业天文学家的依赖,尤其是在中小学阶段,职业天文学家数量有限,且大部分愿意指导学生的天文学家资源更为



图3 Star Whisper



图4 Star Whisper 星语

稀缺。通过人工智能的辅助，学生们能够在缺乏大量专业教师指导的情况下，依然能够进行高质量的科学探索。

在这种新的教育模式下，教师不必成为职业科学家，也不必对天文学有深刻的专精。教育的主体应当是学生，他们通过对 AI 的使用获得课题和指导，能够自主进行探索，教师则更多地扮演辅助角色，记录学生的过程和成长。这样一来，教师的角色转变为指导者，而不再是知识的唯一传授者。这种方式在不对现有教育体系造成巨大冲击的同时，逐步实现了教育资源的充分利用，打通了教育链条。

为了推动这一模式的实施，我们在国科大成立了天文 AI 学习社区，设立了知识平台和课程体系，并开展了科创活动，鼓励学生自主探索。此外，我们还重视硬件的标准化，组建了标准化工作组，推动各类教具和望远镜的规范化生产，使得这些设备更易于在学校中普及和使用。在此过程中，我们还成立了观测基地工作组，提供远程和现场的技术支持，确保设备的正常运作。为了增强学生的探索动力，我们与北师大合作开展师资培训，并通过中学生天文知识竞赛和大学生天文创新大赛等活动，激发学生的成就感和探索欲望。通过这些举措，我们期望能够打破传统的教育模式，实现科学教育资源的共享和优化。

三、AI 信息化平台

在天文科学教育体系中，AI 信息化平台是核心。这个平台不仅能够为中小學生提供丰富的教育资源，还能帮助他们进行自我驱动的科研探索。通过这个平台，学生可以访问天文云课堂、天文知识库等教育资源，所有内容都是免费的。平台的内容不仅包括最前沿的天文专家课程，还会提供 AI 初级辅导，辅导内容涉及科研的进阶方向。AI 工具的使用，如圆桌工具、教室工具等，也将通过这个平台提供给学生，帮助

他们在科研过程中进行更有效的学习和探索，如图 5 所示。

我们特别强调“一人一 AI”的理念，如图 6 所示。每个学生将拥有一个永久的 ID，AI 将伴随他们的成长过程，提供持续的学习支持。通过 AI 的陪伴，学生不仅能从中获取知识，同时也能将自己的探索行为反馈给 AI，帮助 AI 在实践中不断优化。这种互动不仅为学生提供了个性化的成长路径，还通过成就驱动激发他们的兴趣，促进他们的创新和创造力。

此外，平台的另一重要功能是学习社区的建设。以“高等天文



图 5 天文 AI 学习社区



图 6 社区功能架构 -AI 直播间 / 一人一 AI

学学习社区”为例，如图7所示，其推动了从单向的知识传输向双向互动的课堂转变。在这个过程中，学生与教师、专家之间形成了更加紧密的合作，学生能够参与到前沿科学问题的解答中。这种互动不仅帮助学生深化对科学问题的理解，还通过探索性的方式，培养学生独立思考和解决问题的能力。

从2022年开始，如图8所示，天文科学教育联盟逐步建设，2023年成立了多个工作组，逐步完善科研教育内容。到2024年，Star Whisper和AstroOne两大AI模型已经投入使用，这两者通过持续对抗优化，共同促进了天文AI技术的发展，推动着教育平台

的完善。到2025年，平台能够向更多学校开放，支持科研人员和学生的共同探索。而在2026年，我们计划建设国际化平台，向全球推广天文科学教育和科研资源。

教育的动力不仅来自学生的自主探索，也来源于科研人员的参与。科学家通过推动教育，不仅能够推动科学研究的发展，还能形成教育和科研的良性循环。在第四次工业革命的浪潮中，科学教育尤其是从青少年阶段开始的以塑造思维为重点的科学教育，将是提升人类能力的关键。希望通过我们的努力，能够让天文学赋能科学教育，为第四次工业革命的成功奠定基础。

我们希望通过建设AI驱动的

教育平台，打破传统的教育界限，帮助中小學生实现自我驱动的科研探索，让天文学成为每个人都可以接触和学习的学科。○

* 本文根据作者所作报告速记整理而成

作者简介



刘继峰，中国青少年科技教育工作者协会天文科学教育专业委员会主任。长期从事恒星和致密天体的多波段观测及数据挖掘等研究并取得多项优秀成果，两次入选“中国十大科技进展新闻”，获国家杰出青年基金、首届“新基石”研究员项目等支持，曾获科技部“中青年科技创新领军人才”、“全国优秀科技工作者”，北京市科学技术奖自然科学奖一等奖等，首届腾讯“科学探索奖”等。长期从事天文教育工作，致力于天文学高等教育与科学教育贯通和人工智能赋能天文教育等工作。



图7 高等天文学学习社区

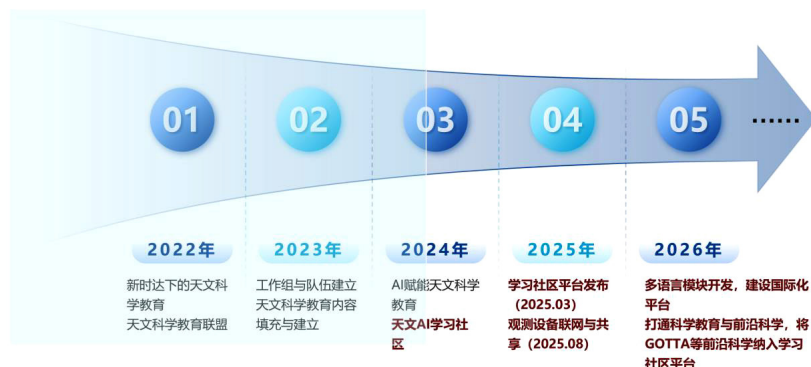


图8 天文科学教育联盟发展时间路线

智能时代之下的人才需求及发展趋势

文 / 数据堂（北京）科技股份有限公司 齐红威

导读：2025年1月11日-12日，由中国自动化学会、中国青少年科技教育工作者协会联合主办的2025中国自动化与人工智能科普大会暨创新人才贯通式培养研讨会在中国科学院大学玉泉路校区礼堂隆重举行。此次会议以“跨界融合·创新未来”为主题，聚焦大中小学贯通式培养模式与人工智能教育的科学化、系统化发展，吸引了来自全国高校、科研院所、中小学校等专家学者、师生代表共计500余人现场参会，有效汇聚了领域产学研优质资源，为推动我国教育强国与创新型国家建设贡献了力量。

本次大会邀请中国自动化学会联邦数据与联邦智能专委会主任、数据堂（北京）科技股份有限公司CEO齐红威作题为“智能时代之下的人才需求及发展趋势”的报告，报告介绍了随着人工智能，尤其是大模型的快速普及，人类的工作、生活和娱乐方式正经历翻天覆地的变化。在大模型推动下的元宇宙时代，人类将和智能体共存，这一趋势促使我们主动或被动地调整学习方式，进而引发了对人才需求的新变化。报告还探讨未来可能需要的几种人才类型，包括数据工程师、大模型训练师等角色。



中国自动化学会联邦数据与联邦智能专业委员会主任、数据堂（北京）科技股份有限公司CEO齐红威作大会报告

在这个全新的时代，人类与智能人、数字人共同共生，迎

来了元宇宙的本质。四年前，当数据堂意识到传统数据处理模式即将失去竞争力时，他们迅速布局，决定成立一家公司专注于数字人技术，提供虚拟员工和数字员工服务。尽管当时这一需求还难以想象其发展速度，但短短三年多的时间，这一愿景已然成为现实。

一、智能时代

如今，智能办公的场景已经初步实现，某公司内部分员工已被大模型替代。例如，过去5人的翻译团队负责将数据翻译成日文、英文和韩文，然而自从大模型的引入后，4名翻译人员已不再

需要，翻译过程也从传统的人工翻译变成了仅需1块钱3分钟就能完成的自动化过程。这种变化使得数据基础工作得到了极大的提升和优化，虚拟员工和具身员工的角色逐渐替代了人工。

同样，智能家居的变革正在悄然发生，尤其是具身智能技术的应用。在未来的家庭中，除了传统的家庭成员外，机器人将成为日常生活的重要组成部分，承担诸如打扫卫生、做饭等任务。如今，这些场景已经在一定程度上实现，未来的家庭将迎来更多“数字成员”，智能家居将成为生活的常态。

从这些变革可以看出，数字人和智能技术正在快速改变我们的工作和生活方式。这不仅仅是一个未来的设想，而是已经开始实现的趋势，预示着智能与人类的深度融合。

随着智能技术的快速发展，我们的生活和工作方式正经历前所未有的变革。如今，银行中的导引机器人已开始为顾客提供服务，未来将在银行看到的不再是人类员工，而是完全由机器人替代的服务窗口。甚至，去银行办理业务可能不再需要亲自到场，所有操作都能通过虚拟平台完成。

例如，在为物流公司提供数据支持的过程中，机器狗已经进入研发阶段，未来它将帮助老年人或行动不便者进行购物，搬运重物等任务。智能化的制造业已经不再是未来的梦想，尽管不同领域的智能化程度各异，但其核心技术和应用已经逐步实现。在智能驾驶领域，过去被认为遥不可及的目标如今已经成为现实。智能司机将不仅仅是自动驾驶系统，它可能会进一步发展成具备人类司机能力的机器人，承担更多复杂的驾驶任务。

在智能时代，企业界和政府之间的交流越来越多地围绕元宇宙、数字交换、大模型和数据要素展开。元宇宙不仅仅是虚拟世界的延伸，它代表了虚拟与现实的共生共存，已经逐步融入我们

现实的社会形态。数字经济，虽然传统上与元宇宙是两个独立的概念，但随着技术的发展，二者之间的界限逐渐模糊。数字经济的核心在于通过智能技术替代传统人力，从而实现全产业链的智能化转型与升级。尤其在面临人口出生率严重下降和经济增长新动力的需求时，数字经济成为推动社会发展的重要引擎。

与此同时，数据作为智能化的核心要素，正逐步成为产业转型的关键所在。数据的个性化和精准化处理是实现智能化转型的重要前提，除了算力的支持，数据的质量和管理将决定人工智能系统的最终效果。因此，未来的智能时代不仅是技术的革命，更是数据、算力和创新的深度融合。

这些趋势显示，智能技术正在改变我们生活的方方面面，从银行到购物，从制造到智能交通，整个社会正在迈向一个人机共生、虚实融合的新时代。

二、Web 发展

从互联网的早期发展到如今的智能时代，我个人认为经历了三波重要的变革，如图 1 所示。首先是 Web1 时代，它的核心在于将人和内容连接起来。回顾我大学毕业时，互联网刚刚起步，还是拨号上网的时代，人们依赖 PC，通过浏览器或搜索引擎实现人与信息的连接。接着是 Web2

时代，即移动互联网时代，核心逻辑转向将人和人连接起来，这一时期手机成为了主要的连接工具，操作系统如安卓和 iOS 主导了移动端的发展，同时 APP 的兴起使得线上社交、购物等活动更加普及。

而如今，我们已经步入了 Web3 时代，本质上是将虚拟人、智能人连接起来的时代。在这一时代的基础设施中，手机仍然是其中的重要代表物，但随着物联网的发展，车载设备、家居系统等将成为新的连接工具。操作系统也逐步从传统的移动系统向物联网系统转型，像鸿蒙操作系统便是物联网环境下的核心系统之一。与此并行，大模型的出现进一步重塑了智能应用的生态。通过大模型架构，垂直领域的应用可以更加高效地部署，从而实现智能技术的普及和落地。

以 ChatGPT 为例，其深刻改变了人工智能应用的门槛。传统的人工智能开发需要自己准备算力、数据，并且每个领域的算法都需要量身定制。而在大模型的支持下，人工智能应用的复杂度显著降低，工作量减少，效果却大幅提升，如图 2 所示。过去在训练模型时，需要大量的数据和时间，而现在，只需要整理领域数据，大模型就能快速适应并输出高质量的结果。这大大缩短了人工智能的部署周期和成本，使



图1 Web 发展历程

得人工智能更加容易在各个领域落地。

百度推出的飞桨平台也是基于这种趋势，其可以降低人工智能开发的门槛。然而，尽管飞桨为专业人士提供了强大的工具，仍然面临较高的使用门槛。随着百度推出文心一言，在大模型的基础上，许多复杂的专业技术变得不再是必需的，用户可以专注于数据整理和领域应用，这大大简化了人工智能开发的流程，使得其应用效果在效率和准确度上都有显著提升。

三、智能时代的人才培养与数据驱动的变革

传统的人才教育本质上是培养专业人才以服务社会，涵盖科研、教育、管理、销售等各个领域，人与人之间的服务和协作构成了传统社会的基本运作模式。然而，在智能时代，这一模式正在发生深刻的变化。我们需要培养的新人才不仅是服务人类的专

业人才，更是支持大模型开发和应用的数字化人才，这些新人才将使大模型替代人类执行越来越多的工作，尤其是服务性的工作。这一趋势已经在现实中逐步显现，大模型和人工智能时代带来了

新型人才的迫切需求，尤其是在数据生产和智能系统的支持方面，如图3所示。

在当前的人工智能发展中，尤其是在大模型的训练过程中，数据是至关重要的资源。然而，国内在算力方面面临一定困难，尤其是在受到国际技术制约的情况下，最为困难的却是数据的获取和处理。虽然豆包 AI 可以生成图片，但其中的文化背景、细节设计等仍然存在局限，尤其是中文场景和中国文化背景的数据量远远不足，导致生成内容无法真实反映中国的文化特色。这暴露出一个重要问题：人工智能的训



图2 大模型下的人工智能



图3 智能时代的人才需求趋势

训练数据本质上是双重的，既包括现有数据的处理，又包括对未来新数据的生产。随着大模型在未来两到三年内面临数据量枯竭的问题，我们亟需通过创新方式产生新的训练数据。

这种新的数据生产方式，尤其是面向大模型的应用，正在深刻影响着科研领域。例如，许多科研人员已经意识到，学生写论文不再仅仅是为了展示给人类审阅，而是为了生成大模型所需的训练素材。如今，学生们的论文写作已经开始依赖大模型，而教师在修改学生论文时，实际上是在与各类大模型进行博弈，通过调整和优化数据内容，让大模型能够更好地理解和辅助人类的知识创造，如图4所示。

随着大模型技术的应用逐渐普及，数据的生产和管理方式也发生了转变。过去，许多国内大模型公司主要依赖互联网开源数据，这些数据通常质量不高，价格低廉。然而，随着大模型技术的快速发展，越来越多的公司开始专注于高质量的文献、期刊、专利等数据的采集与处理，尤其是图文对和视文对的多模态数据。此类数据需要专业人员的介入与确认，甚至需要撰写专门的内容以满足大模型的训练需求。

以自动驾驶为例，华为问界的自动驾驶技术已超越80%的司机水平，但其核心仍然依赖于大

规模的数据训练，尤其是泊车数据和高质量的语音识别数据等，如图5所示。人工智能应用虽然已取得显著进展，但仍然离不开人工对数据的确认和整理，尤其是在智能安防、智能制造、医疗等领域，数据标准和处理模式已经发生改变，但仍需要部分人工介入进行数据修正和验证。

此外，随着人工智能技术特别是大模型技术的快速应用，新的需求也随之而来，尤其是在人工智能的评测方面。尽管互联网企业能够通过一定的标准评估人工智能技术的能力，但对于传统

行业、政府部门、金融、电力等领域而言，如何评估人工智能的能力、性能和安全性，尤其是防范伪造和确保系统的可用性，已成为亟待解决的难题。因此，人工智能评测成为了当前一个非常重要且迫切的需求，如图6所示，如何建立完善的评测体系，确保人工智能的应用能够在不同领域中安全、有效地落地，是未来的关键挑战之一。

智能时代带来了人才教育、数据生产和技术应用的深刻变革。在这一过程中，培养能支撑大模型发展的新型人才，以及构建适



图4 人工智能数据生产的人才需求

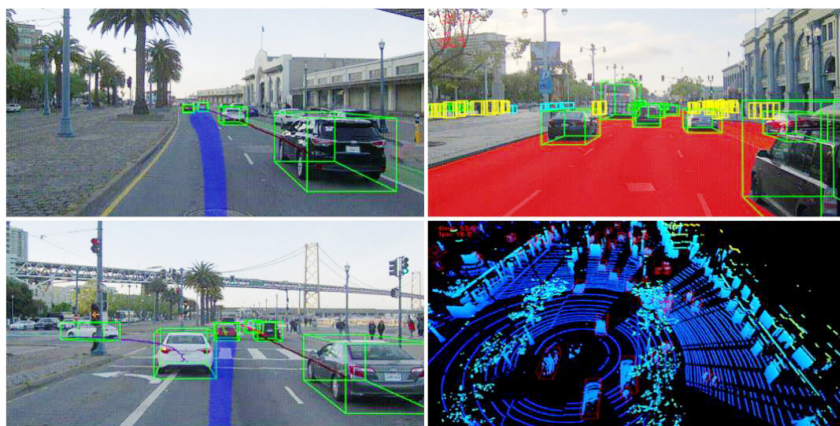


图5 自动驾驶中的数据要素

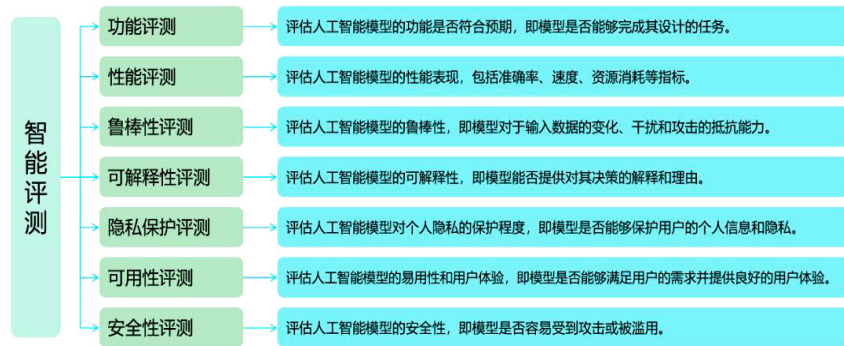


图6 人工智能技术评测需要体系化的机制和方法

应大数据和智能技术需求的数据生产体系，将是未来社会发展的核心任务。同时，人工智能的评测体系也亟待建立，以保证技术的可用性和安全性，推动智能技术在各行各业的稳步落地。

四、人工智能大模型应用评测与产业机会

在过去的几年中，人工智能特别是大模型的应用和发展进入了一个急速的增长阶段。三年前，我们偶然开始进行大模型评测，最初以数据生产为核心，随着需求的不断增加，我们逐步转向了更加综合性的评测工作。尤其是在去年，评测的需求开始迅速增加，不仅在商业领域，也涉及了更多公益性质的项目，例如教育、政务和法律领域的应用评测。

目前，大模型的评测有一个明显的趋势：许多评测集中在使用相对简单的考题来测试模型的能力，导致许多大模型都能够取得高分，如图7所示。但这并未反映出大模型在复杂领域中的真

正能力，特别是对于那些涉及高专业性、实务性问题的领域。例如，在做政务、教育和法律的领域评测时，政务领域的评测分数普遍在60-70分之间，教育领域的评分也大致在80-90分之间，法律的评测结果同样没有达到理想水平。

在大模型快速发展的过程中，“最后一公里”的问题逐渐显现，这个“最后一公里”指的是将大模型真正应用到各个行业、领域和场景中的关键一步。目前，大模型应用的速度和效果已经远远超出了预期，但如何将这些大模型真正地结合到具体的行业场景

中，依然是亟待解决的问题。尤其是在国内，未来能够在通用大模型领域生存下来的企业可能不超过三家，这也促使我们必须更加重视在特定领域做好大模型的服务和细化应用。大模型的领域化是一个必然趋势，随着行业数据的不断积累与场景化应用，通用大模型将逐渐向领域化大模型转型，带来新的产业机会。

随着大模型的成熟与普及，很多以往普通甚至不起眼的行业和应用场景正在变得充满了创业机会。例如，百度和中卫慧通提供的乡镇服务应用中，通过大模型的能力，解决了乡镇领导在服务老百姓过程中面临的难题，如图8所示。通过构建知识库并将其与大模型结合，他们实现了虚拟乡长的服务，这种虚拟乡长能够解答95%以上的群众问题，而剩下的只有人工介入。通过大模型的加持，传统上需要大量人工处理的服务工作，如今变得更加高效和便捷。这类场景化应用的





图8 中卫慧通与百度联合打造村长 Copilot 智能助手

落地，极大地降低了行业门槛，普通人只需了解行业和数据，便可在大模型的框架下快速创建出具备专业能力的虚拟助理。

同样，在医疗领域，面对复杂的医疗考试和辅导需求，大模型也在发挥巨大的作用，如图9所示。以医疗考核为例，原本需要大量专业人员辅导的过程，依托大模型的辅助，极大地提高了辅导的效率和准确性，帮助专业人员解决了许多原本无法高效解决的难题。

智能时代，尤其是大模型的

加持，正在为普通人提供前所未有的创业机会。无论是医疗、教育，还是政务、客服等领域，大模型的应用都正在加速替代传统的人工服务。通过对特定领域数据的整合与大模型的应用，即使是没有人工智能技术背景的人，也能借助现有的大模型平台开展创新，解决具体行业的实际问题。

总结来说，大模型在行业应用中的成熟与普及，不仅推动了技术的创新和服务模式的变革，也为企业和创业者提供了丰富的机会。尤其是在数据生产、行业

场景化应用和智能服务的加速落地过程中，新的产业和商业模式将不断涌现，带来更加高效、便捷和智能的生活与工作方式。○

* 本文根据作者所作报告速记整理而成

作者简介



齐红威，数据堂（北京）科技股份有限公司创始人&CEO，正高级工程师，中国科学院自动化研究所人工智能方向博士，中国科学院计算技术研究所博士后，斯坦福大学访问学者，中国自动化学会联邦数据与联邦智能专委会主任，北京市高层次创新创业人才，《中共中央、国务院关于构建数据基础制度更好发挥数据要素作用的意见》起草人之一，国家知识产权局“数据知识产权”专家组成员。获得北京市科技进步二等奖、中国自动化学会科技进步一等奖、中国电子学会科技进步二等奖。



图9 医考自助练习，答疑

王飞跃：警惕商业学术警察，支持 eLife 生态变革

关于著名期刊 eLife “不拒稿”审稿的“新闻”^[1]，早有所闻，但一直不知其详。近来科睿唯安官宣将取消其影响因子，许多同事问我的看法。为此，我看了 eLife 处理稿件的“五步”过程，深感赞同，不失为变革科研与科技出版生态的有益尝试，与我们自己关于分布式自主出版的相关研究和 AI3.0（AI 指 Academic Intelligence，学术智能）在许多方面是重合的，值得广大科研工作者的支持。特别是 eLife “既不支持影响因子这样模糊的期刊评价指标，也不想要影响因子”的态度，彰显科学本色，更值得学界认真反思和大力支持。借其所言，我们不能再借一个“模糊的指标”内卷我们的科研，我们必须变革科技共同体的生态，特别是科研成果发表的生态！

对于影响因子之类的 SCI（Science Citation Index）衍生物，简单地将其戏言为“Stupid Chinese Idea”已不再具有黑色幽默感。开始我曾认为这类指标有一定的用途，但很快认识到其弊大于利，可能“异化”科研生态、产生重大负面影响，还于

2007 年为中国计算机学会论坛做了“SCI：谁的悲哀”的报告，还记录成文发表^[2]，婉转地表示自己的担心。虽然这是一个有些晚的认识过程，相对于“异化”的速度有些慢，然而我的立场是一贯的：反对以学刊之因子论文章之质量，反对以引用之多少评学者之水平。直到 2017 年，在加拿大参加 IEEE 的主编论坛（PoE）上，听了科睿唯安代表的报告之后，第一次知道这个公司，我也第一次意识到 SCI 之流所含的巨大且合法的商业利益，从影响因子到大学排名，再到中学生报考大学到大学招聘博士生，一个巨大的失控的灰色产业链正在兴起。对此我十分担心，并公开向与会的国际同行表达了自己的不安和建议：如此下去，必然导致学术活动的异化加剧，产生意想不到的后果，而 IEEE 作为一个公益性非盈利的专业组织，不应为任何第三方盈利公司的商品站台，更不应直接在其期刊网页上显示一个私营谋利公司之影响因子的信息。

今天频繁出现的期刊“On Hold”网络热点新闻，涉事主编

的无奈“抗争”，假论文作坊借机无底线的助流引流行为，加上“eLife 事件”，更让我意识到在 SCI 衍生的巨大经济利益和相应的商业化学术投机腐败之外，一种更加可怕的学术异化现象可能加速涌现：商业学术“警察化”！各盈利公司为其经济利益，必须维护其“指标商品”的“权威性”，就像奢侈品公司必须对仿制品打假一样，必然出手打击由其“指标商品”所催生的各种学术投机行为。

学术投机和学术腐败行为在这些“指标商品”的助力之下，近来愈演愈烈，加上“论文工厂”、“引用公司”等黑色产业的助燃，更加可怕，连新兴的发表渠道，如一直向善、良性至少中性的 Arxiv 也已被一些投机者系统地异化为引用操纵工具。这些行为必须打击，并受学术共同体的谴责。问题是一些“指标商品”公司并没有，也没有能力和公信力，以经济规律和职业规范对投机行为进行治理，反而主要从低成本维护其产品和商业利益的立场进行强制干预，自然就出现饶毅教授所描述的现象：“一群自己

毫无科学见识、因为没有发表过重要结果而在科学界失业、或者本来就不是科学界的人，居然扳指头做幼儿园算术就可以影响世界科学界，在某些地方影响还很大，这是科学的悲哀还是地方或机构的悲哀？”。特别是西方极端“白左”政治的介入，加上“不会骑马的骑兵队长”（马斯克语）的“勇敢”指挥，更使得这些“商业学术警察”的“执法”方式粗暴，而且无视已具有相对经济实力但有助于其盈利之生态的组织化投机出版公司（其行为学界皆知，极大地加剧学术不端行为，形成黑色论文产业链甚至黑暗生态），选择性“执法”。如此下去，不但是“商业学术警察化”，或许更可怕的学术“黑手党”化将出现。目前社会媒体上出现的形形色色“黑论文”产业借机“引流”之乱象，不顾道德底线甚至无端个人攻击为其“论文中介”和“论文写作”公司借机变相打广告，应该引起广大科技工作者的关注。任由其发展下去，将毁掉我们已知的科技生态。作为一个科技工作者，真心希望我们不要进入一个未知的“网暴化”或“黑手党”的全球学术时代。

以“Letter”为例，这本是科学从伊始至今的一种有效的学术思想、学术观点、学术信息的交流方式，今天却变成了一种有效且“公开”操纵“影响因

子”的工具，而且许多当今“权威”的期刊之所以“权威”就是靠此起家，生产“指标商品”的公司对此也心知肚明，几乎不进行任何治理。以至现在许多刊物以“Letter”形式发表学术“论文”，背离“Letter”之本意，并让“Letter”占其页面从50%甚至到90%以上，严重地歪曲了实际的“影响因子”数值。原因很简单：在计算影响因子的简单除法中，“Letter”不入分母，但其得到的引用数计入分子，客观上让“Letter”成为减少分母扩大分子的“杠杆”，如同操纵股市的金融杠杆，操纵影响因子的简单且有效的工具。

对此，生产“指标商品”的公司首先应认识到这是一种正常的商品市场行为，不可再完全以学术行为对待，因为他们已把学术商品化了，不可再完全以学术的形式和低成本手段来处理这些投机行为。其次，他们必须加大投入，治理其产品，比如，主动且精准地区别“Letter”和正规的科技论文，为传统和真正的“Letter”留一条“生路”，而不是目前的不回应不通知，单向、直接、粗暴处理。再次，加大投入修改其计算影响因子公式的研究与努力，不断迭代，消除投机的作用。例如，不再计入“Letter”的被引效应，彻底消除靠“Letter”有意无意进行投机的行为及其效果。

从1994年筹办智能控制杂志写下自己人生第一篇“Letter”，至今我单为IEEE的期刊就写了上百篇“Letter”，而且从来不一审，都是直接发编辑部，接着排版、校核（Proofreading），十分简单，是期刊与学者之间双向交流的有效方式。然而，眼下“Letter”的各式变种，令人目不暇接，许多已失去其直接“交流”的非正规论文之本色，甚至令人痛心的沦落为识不清、认不得、说不明的影响因子之操作工具。

对于“Letter”的乱象，学术共同体是时候进行治理了，但这应该是一个过程，特别要关注那些对此已付出努力的尝试，尤其是年轻学者的尝试。而且，不应由商业公司以单向粗鲁，甚至先入为主，不与被调查方有任何交流而处理，不但不合学术传统，更不合社会行为规范。当同事告我有些私企为其所谓的“高被引”学者像FBI一样建档立案，专人负责，成为各种大学排榜机构的支撑商业资料和一些大学的招聘依据，让我更加担心：难道这些私企真成了科研工作者背后的“大老板（Big Boss）”，不但有裁决学者发表论文的警察式“执法权”，甚至还有决定其能否从事科研的“生杀大权”？眼下的eLife事件，说明连期刊可能也难以幸免，我们必须警惕这一苗头和趋势。

在此，我希望不论中国还是其他国家，在此科技已成为社会发展无可否认的关键与核心动力的时代，必须有自主的科技评价体系，不可受一些商业公司的主导甚至垄断，否则追求利润的资本天性加上复杂的商业生态，会给我们在意想不到的时刻带着意想不到的严重后果。

今年恰好是 SCI 出现的“甲子之年”纪念，我们必须在承认 Garfield 创办“科学信息研究所 (ISI)”公司，用一己之力推动 SCI 理念并成功变革了文献计量学之历史性贡献的同时，不但要对其效用“祛魅”，还要对其在当下国际形势中更大的潜在“危害”有所认识。中国过去四十年的改革开放，不但大大地改善了国民的生活，也使参与其中的西方资本家和投资者获得巨大的回报。但这些人没有把其部分所得利润合理地分配给相应的西方国民，导致一些西方国家“生锈带”区域丛生，还催生出极端新政客以及《乡下人的悲歌》中所描述的现象。最初，他们还把这些归于自身的问题，但现在已完全“甩锅”于中国。

这一教训，不可忘记，更不可在科技出版和更广的国际学术交流中再现，冲击人类的科学共同体。当我们花了巨大的科研经费写成论文放入西方一些私企的数据库后，又花巨款从其数据库

中把论文取出，使 ISI 这一挂着研究所外衣的公司从上世纪九十年代几乎破产到目前成长为影响巨大的世界性大企业^[4]，且带动起一批相关“学术”商家和机构。这一蝶变，中国科研工作者功不可灭。问题是，这些私企是如何利用和分配其利润的？特别当我们一些写论文的方式已使一些西方传统学者无法再写下去，我们一些办杂志的方式也使一些西方学术机构无法办下去，任由发展下去，他们会不会像对待自由贸易和产业迁移一样把“锅”甩给我们？让我们在“被赚坑了钱还帮人数钱”的过程中，又成为“破坏”国际学术出版与交流甚至科学共同体生态的“替罪羊”？这已经不再是“科学家与商人之间，我们支持谁？”如此简单的问题了^[3]。对此，我们必须认真思考并以应对，消除出现这种局面的可能性。

我们正处于一个大变革的时代，科学论文和科技期刊将变得越来越重要。论文将成为新世界重要的新“粮食”，即“喂养”诸如“大模型”之类新社会知识基础设施的“粮食”。科技工作者写论文就是历史上的农民种田，而杂志就是生长收获玉米、小麦、水稻等各种“粮食”的“农田”，极其重要，必须尽心培育和尽力护养，使其造福人类，而不是成为一些私企手中的“垄断”商品。

希望最近的乱象只是暂时的，也希 SCI 催生的各种其它“指标商品”，如 Citescore、Google Scholar (GS) 等能够充分发展与公平竞争，使相应的市场良性化。不过，去年访欧时发现连 GS 亦已被“浓缩”为“打击 (即 HIT: H 指数、单篇高引数、总引数)”之器，开始失其完整描述之初衷，信息不精准再加异化，令人担忧。无论如何，根除学术投机行为的根本，不在这些商业学术“警察”，还是必须坚持“不以刊论文，不以引评人”的原则，支持 eLife 的变革科技生态的努力，加快分布式加密去中心化科技出版与评价的研发，从技术上打破商业学术垄断行为。

祝愿 SCI 早日变成 SCE++: Slow (慢，静下心来)，Causal (漫，去掉功利)，Enjoying (愉悦、享受)、Elegant (格调、品味)，Easy (轻松、简洁)……让我们 SCE++ 般地从事科研活动，把“I”换成“E”，把那些垃圾般的论文“Litter”清掉，化为有益于学术交流的“Letter”，把非人的内卷 Involution 消除，让自然的进化 Evolution 主导^[5]。一句话，维护人类的尊严，推动人类的福祉。○

致谢：本稿 2024 年 11 月完成，非常感谢数位同事的补充材料和修改意见。

参考文献:

- [1] 饶毅, "祝贺主编: 可以少评审忽悠和造假文章," *CareerEngine*, 2024 年 10 月 31 日. <https://posts.careerengine.us/p/6722cc06fc996a73d-cfacfb9>.
- [2] 王飞跃, "SCI: 谁的悲哀?", "中国计算机学会 (CCF)", 2007 年 12 月 22 日. <https://www.ccf.org.cn/c/2008-01-14/613625.shtml>.
- [3] 饶毅, "不能被赚坑了钱还帮人数钱: 科学家与商人之间, 我们支持谁?", "微信公众平台", 2024 年 11 月 2 日. <https://mp.weixin.qq.com/s/wbJTTcVRvzlHpX-3eQqpHWg>.
- [4] 穆蕴秋, 江晓原.SCI 和影响因子: 学术评估与商业运作——Nature 实证研究之三 [J]. 上海交通大学学报 (哲学社会科学版), 2015, 23 (05): 68-80.DOI: 10.13806/j.cnki.issn1008-7095.2015.05.009.
- [5] 王飞跃, "建立自主评价体系, 保障我国科技安全," 环球时报, 2024 年 12 月 13 日. <https://hqttime.huanqiu.com/share/article/4KdJe1qRCwP>.

黄华: 构建真正包容、普惠、可持续的全球 AI 治理体系需要各国共同努力

当地时间 2 月 11 日, 人工智能行动峰会在法国巴黎闭幕。当天, 包括法国、中国、印度、欧盟在内的 61 个签署方共同发布《关于发展包容、可持续的人工智能造福人类与地球的声明》(巴黎人工智能宣言), 承诺将以“开放”“包容”和“道德”的方式开发这项技术, 但美国、英国拒绝签署。美英拒绝签署的原因是什么? 以 DeepSeek 为代表的新技术崛起, 为何会让部分发达国家感觉到威胁? 以下是中国自动化学会副秘书长、北京师范大学人工智能学院院长黄华和复旦大学中国研究院副研究员刘典的采访内容。

DeepSeek 等新技术崛起打破了部分发达国家在 AI 领域的长期垄断

记者: 如何评价近年来中国在人工智能领域取得的成绩? 以 DeepSeek 为代表的新技术崛起, 为何会让部分发达国家感觉到威胁?

黄华: 近年来, 中国政府高度重视 AI (人工智能) 发展, 通过政

策支持和资金投入推动技术创新应用, 取得了显著成绩。

一是技术研发取得长足进步, 典型代表就是 DeepSeek, 其在算力优化、低能耗运行、开源策略等方面取得显著成效, 性能和性价比获得了国际认可。此外, 中国在 AI 方面的高水平论文和专利数量上位居全球第一, 表现出强大的创新实力。

二是产业规模不断扩大, AI 技术在金融、政务、医疗、交通等多个领域的渗透率显著提升, 推动了传统产业的数字化转型, 提升了众多行业的智能化水平。

三是人才培养和开源生态建设取得显著进展, 相关教育和培训体系不断完善, 魔搭、百度飞桨、华为 AI Gallery、OpenI 启智等社区涵盖了从深度学习框架、模型库到开发者工具和学习资源, 并提供了丰富的支持和交流平台, 有效支撑了人才培养、科学研究和产业发展需求。

四是积极参与全球 AI 治理, 推动全球合作。作为人工智能技术新兴大国, 中国是最早呼吁重视人

工智能发展、加强全球治理的国家之一。

刘典：DeepSeek 等新技术的崛起让部分发达国家感到威胁，主要是因为打破了其在 AI 领域的长期垄断。过去，这些发达国家在 AI 技术上处于领先地位，从中获得了巨大利益。DeepSeek 的出现表明中国有能力开发自己的先进 AI 技术、产品，与它们展开平等竞争。

此外，新技术的崛起还可能改变全球 AI 市场格局，影响这些发达国家传统 AI 巨头的市场地位和利益。在国家竞争力日益依赖 AI 技术的背景下，中国 AI 技术的进步也使这些发达国家担心自己在这关键领域的相对衰落。

记者：美国、英国拒绝签署巴黎人工智能宣言，背后的原因是什么？

黄华：美英两国此举，反映了其在全球人工智能治理中的复杂立场和战略考量，可能有以下三方面原因。

一是维护技术主导权与市场利益。美国试图通过保持技术垄断和宽松监管环境巩固其全球 AI 领导地位，避免国际规则限制其企业的竞争优势。英国则以宣言“不符合国家利益”为由拒绝签署，可能意在维护与美国的技术合作纽带，避免因规则分歧损害本国产业利益。

二是安全与意识形态顾虑。

美国将 AI 技术竞争视为地缘政治博弈的一部分，英国则以宣言“未充分解决国家安全问题”为由拒绝，可能担忧国际规则限制其技术自主性。

三是对监管路径的分歧。宣言提出的“透明算法”“伦理安全”等原则可能被个别国家视为对技术开发的束缚，美国主张以市场驱动和技术优先替代严格监管，而其他签署方则强调平衡创新与安全。

刘典：这种拒绝签署的行为在一定程度上反映了对国际规则“合则用、不合则弃”的态度。这种态度可能导致全球 AI 治理体系的不稳定和不确定性。

在宣言签署上的观念冲突表明，不同国家对 AI 发展和治理的理解和期望存在差异。一些国家更关注 AI 的潜在风险和社会影响，希望通过宣言加强监管；而另一些国家则更看重 AI 带来的经济效益和创新机会，担心过度监管会阻碍 AI 的发展。

美国主导的 AI 技术霸权阻碍发展中国家参与全球治理

记者：有观点认为，美国试图通过拒绝多边协议维护其 AI 领域“规则制定者”地位，进而巩固技术垄断优势，您对此怎么看？美国近年来主要通过哪些手段强化科技霸权？

黄华：美国此举本质上是其科技霸权战略的延续。这一策略

既反映了美国对技术主导权的焦虑，也体现了其通过单边手段巩固全球影响力的意图。

据我观察，美国强化科技霸权的主要手段有以下几种：

技术出口管制与供应链武器化。如拜登政府颁布新规，限制先进 AI 芯片对华出口，试图遏制中国 AI 发展；以国家安全为由，限制外国企业收购美国科技公司，并对华为等中国企业实施制裁，将其列入实体清单，切断技术合作。

专利壁垒与知识产权垄断。如美国利用知识产权优势攫取高额利润。当前，美国对 AI 算法、数据标准等核心领域设置专利壁垒，限制他国技术迭代。

打压外国企业与人才竞争。如美国将华为、中芯国际等一大批中国高科技企业列入制裁清单，限制其获取技术、市场和资本；缩短中国留学生签证期限，打压在美华人学者，削弱竞争对手的科研能力。

将科技议题意识形态化。美国将技术问题与“民主”“人权”挂钩，如污蔑中国 AI 技术“威胁自由价值观”，并借此拉拢盟友组建技术联盟；通过“清洁网络”计划排除中国 5G 技术，推动“数字铁幕”等。

记者：美国主导的 AI 技术霸权对发展中国家参与全球治理会造成哪些阻碍？

刘典：美国主导的 AI 技术霸

权可能在多个方面阻碍发展中国家参与全球治理。

在数据资源分配方面，美国等发达国家拥有更先进的数据收集和处理技术，控制着大量高质量数据资源，而发展中国家难以获得足够的数据来支持自身 AI 发展。

在算法伦理标准方面，存在“西方中心主义”的规则倾向，西方的伦理标准和价值观在规则制定中被更多强调，而发展中国家的关切和需求则被忽视。例如，一些算法可能存在对发展中国家不利的偏见。

在跨境数据流动方面，美国可能设置各种障碍，如数据本地化要求和严格的数据安全审查，限制发展中国家获取和使用跨境数据进行 AI 开发。

黄华：美国主导的 AI 技术霸权对发展中国家参与全球治理的阻碍，主要体现在技术垄断、规则主导权争夺以及资源分配失衡等方面。这种霸权不仅加剧了全球技术鸿沟，还可能通过“西方中心主义”的规则设计限制发展中国家自主发展空间。

美国将 AI 技术竞争视为零和博弈，通过出口管制、专利壁垒等手段维护霸权，而非推动包容性合作。美国以“国家安全”为名限制技术扩散，但其定义的“安全”实质是维持自身技术优势。这种政策忽视了发展中国家通过技术合作实现发展的正当需求。

构建包容、普惠、可持续的全球 AI 治理体系需要各国共同努力

记者：在此次峰会上，中方明确表示，国际社会应携手倡导智能向善，深化创新合作，强化包容普惠，完善全球治理，共同构建人类命运共同体。中国应如何推动国际社会打破 AI 领域霸权垄断？

刘典：首先，中国应加强与其他国家的技术合作，分享自身在 AI 领域的技术成果和经验，帮助其他国家提升 AI 发展能力，共同抵制个别国家的垄断。

其次，中国应积极参与国际 AI 规则的制定，提出自己的观点和建议，争取使规则更加公平合理。例如，在数据治理、算法伦理和知识产权保护等问题上，中国可以发挥引领作用。

此外，中国还可以通过举办国际 AI 论坛和会议，搭建交流平台，促进各国在 AI 领域的对话与合作，增进相互理解和信任。

黄华：一方面是强化国际合作与共识。支持联合国在 AI 治理中发挥核心协调作用，倡导 AI 技术的开放、包容、透明和可持续发展。通过多边对话和协商，制定公平合理的 AI 发展规则，避免由少数国家或科技巨头主导。

另一方面是推动技术共享开源与合作发展。支持开源 AI 模型和技术平台的发展，鼓励企业、

科研机构 and 开发者在全球范围内开展合作，促进技术交流和资源共享，特别是帮助发展中国家提升 AI 能力，缩小技术差距。

记者：您对构建真正包容、普惠、可持续的全球 AI 治理体系有何建议？中国智慧和方案可能在哪些领域为世界提供新选择？

黄华：构建真正包容、普惠、可持续的全球 AI 治理体系需要各国共同努力。

首先是明确目标宗旨。全球 AI 治理体系应确保 AI 技术的安全性、可靠性、可控性和公平性，推动 AI 技术造福人类，助力构建人类命运共同体。

其次是凝聚原则共识。各国有权根据国情自主选择技术发展和治理方案，反对利用 AI 技术干涉他国内政。既要鼓励 AI 技术创新，又要将安全意识和监管措施贯穿 AI 发展的全生命周期。促进各国在 AI 开发和利用方面的权利平等、机会平等、规则平等，减少技术壁垒，缩小智能鸿沟。

第三是坚持以人为本。全球 AI 治理应以尊重人类权益为前提，以促进人类可持续发展为动力，以提高人类共同福祉为目标。

第四是坚守智能向善。AI 技术应符合和平、发展、公平、正义、民主、自由的全人类共同价值。同时，推动 AI 技术在伦理和法规方面的标准化，确保其与全

球共同价值观相一致。

第五是防范应对安全风险。推动数据依法有序跨境流动，探索构建全球性数据共享机制。消除算法偏见，支持建立兼顾发展中国家利益的 AI 安全风险评估框架。

刘典：中国强调在 AI 治理中平衡技术创新与安全伦理，提出“以人为本、智能向善”的治理理念，既注重技术的快速发展，又兼顾伦理风险和社会影响，避免了单一的“创新优先”或“伦理优先”模式。通过这种平衡策略，中国为全球 AI 治理提供了更具综合性和适应性的思路。

此外，中国智慧和方案还可可在多个领域为世界提供新选择。例如，在数据治理方面，中

国可以分享自身在数据安全和隐私保护方面的经验；在算法伦理方面，中国可以提出符合发展中国家利益的伦理准则；在国际合

作方面，中国可以倡导建立更加公平合理的国际 AI 合作框架，促进各国共同发展。○

来源：中央纪委国家监委

作者简介



黄华，北京师范大学教授、博导，中国自动化学会副秘书长；国家杰出青年基金和中国青年科

技奖获得者、万人计划科技创新领军人才入选者。主要从事可视媒体智能计算的研究工作，先后主持国家自然科学基金重点项目、国家重点研发计划等科研项目，发表 CCF A 类论文 50 余篇，授权国家发明专利 60 余项，部分成果在国防、工业、互联网等领域得到应用。



关于开展 2025 年度 CAA 科学技术奖励推荐工作的通知

为贯彻落实科学发展观，发现和激励科技创新人才，推动自动化、信息与智能科学领域的技术进步与创新，促进青年人才成长和中国自动化科学技术事业的发展，中国自动化学会现开展 2025 年度 CAA 科学技术奖励推荐与评选工作。

一、推荐奖项类别、推荐对象及名额

2025 年度 CAA 推荐奖包括 CAA 自然科学奖、CAA 技术发明奖、CAA 科技进步奖、CAA 科技成就奖、CAA 青年科技奖五个奖项。

推荐对象及推荐名额详见附件 1《中国自动化学会科学技术奖励管理办法》。

二、推荐渠道

按照《中国自动化学会科学技术奖励管理办法》的规定，2025 年 CAA 科学技术奖实行个人联名推荐及单位推荐制，原则上各子奖项每人推荐项目数量不得超过 2 项，满足如下条件之一的为有效推荐。

详情请查看：<https://www.caa.org.cn/article/192/5168.html>

电力设施多模态精细化机器人巡检关键技术及应用

文 / 张辉 杜瑞 钟杭 曹意宏 王耀南

摘要：电力设施巡检对于加快电网基础设施智能化改造和智能微电网建设，提高电力系统互补互济和智能调节能力的需求具有重要作用。近年来，智能巡检机器人开始在电力巡检中广泛应用，在提高电力设施巡检效率和准确性、提升安全性、降低成本和促进电力智能化发展等方面发挥关键作用。本文从电力巡检机器人的智能感知和导航技术出发，重点介绍目标检测、语义分割、自主导航等共性关键技术的国内外发展现状。然后以可见光红外双光融合、可见光图像和点云数据融合、声纹和可见光融合为例，阐述电力场景多模态数据融合方式。并进一步介绍电力部件精准分割和异物检测、线路点云杆塔倾斜检测、输电线路覆冰多模态检测和电力架空线路缺陷分析及台账异常检测等电力设施多模态机器人相关案例。最后探讨电力设施多模态精细化机器人巡检关键技术的发展趋势和所面临的挑战。

电力巡检在保障电力系统稳定运行中具有重要作用。如图 1 所示，全国的用电量呈现出稳步上升的态势，电力巡检对于确保我国面对用电量持续增长挑战时的电力供应安全、稳定和高效至关重要。随着电力行业加速转型升级，为了使巡检工作变得更加高效和准确，应对人工巡检耗时耗力且难以到达高山江河等巡检盲区的挑战，智能巡检机器人在电力巡检中得到广泛应用。电力巡检机器人具有提高巡检效率、准确

性、安全性，降低成本和促进电力智能化发展的关键作用。

电力设施精细化多模态机器人巡检是一项集成多种感知技术、机器人技术和人工智能的综合性技术，旨在提高电力系统的运行安全、稳定性和效率。该领域涵盖了地面机器人、空中机器人（无人机）、自主水下机器人等多种类型的机器人系统，它们通过集成视觉、声音、热成像等多模态感知技术，对电力设施进行自动化、智能化的检测与评估。世界各国高度重视电力巡检机器人的发展，例如美国自上世纪 80 年代起开始研发电力巡检机器人，并逐步推广应用，而欧盟和日本也在近年推出了促进电力行业中人工智能应用的具体目标和计划。我国也发布了《智能能源行动计划》和《“十四五”通用航空发展专项规划》，提出了加快电力行业智能化改造与推进能源数字化转型的目标和措施，其中包括智能电网建设、能源大数据平台建设等。

智能感知是实现电力设施巡检的基础关键技术，

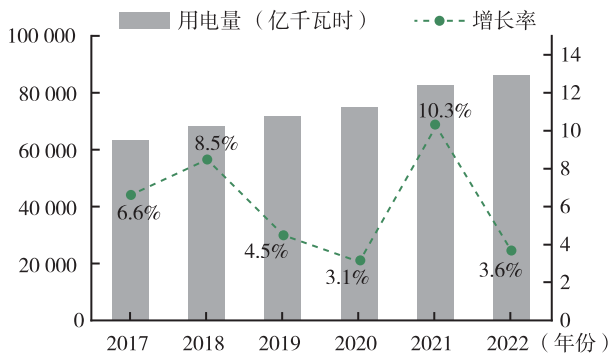


图 1 近年全国总用电量趋势（单位：亿千瓦时）

可以嵌入到电力设施巡检机器人中,以实现电力设备的定位和分类,这可以进一步被认为是机器人传感、自动导航和自主检查的基础。智能感知通过激光雷达、可见光相机、多光谱相机和红外相机等成像设备进行数据采集,并对采集到的目标场景数据进行语义理解和状态感知,记录当前场景的巡检结果。例如,变电站红外图像精准检测任务中,需要对无人机采集到的变电站电流互感器、断路器和隔离开关等部件进行检测。在准确得到电力部件在图像中的位置信息后,利用温度解译对相关电力部件进行分析,根据是否出现温度异常判断电力设施是否存在潜在过热等危险。通过这种巡检方式,可以在出现故障前提前感知潜在风险,及时采取相应措施,避免过热产生电力故障甚至严重的火灾,有效防范了电力故障,减少了人工巡检的主观干扰,提升了巡检准确性,降低了人力成本。目前,深度学习和大数据技术的快速发展使得电力场景的智能巡检得到广泛应用。智能巡检前期通过机器人摄像头、激光雷达等设备采集数据,并送入目标检测或语义分割模型进行训练,训练好的模型就可以在很多巡检任务上取得显著性优越结果。同时,在成本和安全性上也实现了对人工巡检的压倒性胜利。

然而,在实际应用中,复杂多变的环境给机器人带来了语义理解的难度,并且由于数据采集本身的局限性,单一模态的数据难以对巡检场景实现精准数据表征,巡检结果往往较为粗糙。例如,仅使用可见光模态的情况下,恶劣的天气、较差的照明或低对比度会降低视觉传感器的图像质量,而杂乱的背景、极端的遮挡或密集的物体可能会降低基于视觉图像的语义分割方法的性能;而只使用红外模态完成场景理解后进行温度解译,会由于红外图像的分辨率低导致电力部件检测的精度不高,影响后续温度分析的准确性;对于点云模态,在杆塔或导线检测任务中,仅有坐标信息而缺乏颜色和纹理信息会由于难以区分背景与前景而影响检测性能。因此,开展电力设施的多模态精细化智能化机器人巡检势在必行。通过多模态数据融合,电力巡检机器人可以利用不同数据模态间的互补性,构建出更精准、更全面、更一致的精细化智能感知模型,提升特征表达的信息量和判别性,为电力业务实施提供更加准确、高效、灵活的业务辅助报告。

1 电力设施多模态机器人巡检研究现状

20 世纪 80 年代,日本学者开始了变电站巡检机器人的研究

工作,并取得了有价值的研究成果。日本中部电力公司研制尺寸为宽 1.3m、长 1.4m、高 1.7m 的地下管道巡检机器人,对 275kV 的地下管网内的多种模态数据进行巡检,包括温度、湿度、水位、超声和彩色视频图像等,实时反映地下管道的运行情况。这款机器人通过电池供电,能够连续工作 2.5 小时,并且能在变电站设定的充电点进行充电。20 世纪 90 年代,日本四国电力公司和东芝公司等研究机构设计了一种适用于 500kV 变电站的巡检机器人 BIG MOUSE,这种机器人携带温度计和摄像机来检测设备是否正常运行,但需要预先在变电站安装轨道。21 世纪初期,加拿大魁北克水电研究院(IREQ)开发了一款配备四轮的检测机器人,如图 2(a)所示。该机器人整合了红外热成像和可见光成像系统来巡查变电站的设备,它还配备了一个后台监控系统,允许操作员能够实时从电脑后台监控机器人的工作状态。然而,在那个时期,由于 SLAM(Simultaneous localization and mapping)技术和多传感器数据融合导航技术还未充分发展,这款机器人主要依赖遥控操作,限制了它的自主操作能力。在此之后,新西兰研制的电力巡检机器人开始采用 GPS 定位,在语音交互和激光避障等功能上实现了多模态信息处理。



(a) 魁北克水电研究院变电站巡检机器人



(b) 国家电网红外全方位视觉导航巡检机器人

图2 电力设施多模态机器人巡检案例

2002年,国家高新技术研究发展计划(863计划)开始支持输配电机器人技术方面的研发,包括其原型机的研发和工业应用的开发。国家电网开发了为500kV变电站设计的移动机器人,如图2(b)所示,该机器人装备可见光和红外摄像头以及方向性麦克风。国家电网电力机器人实验室的官方网站回顾了这些得到国家研发计划支持的机器人项目的发展历程。自2005年起,第一代国家电网智能巡检机器人开始被用于巡检任务。国家电网智能巡检机器人前部配有两个独立的驱动轮,后部装有两个全向轮。自2008年以来,国家电网智能巡检机器人开始在Linux操作系统下使用软件架构控制,这一架构提升了机器人的性能和稳定性,使得实现复杂的控制算法成为可能。国家电网智能巡检机器人被设计用于在变电站内进行巡检任务,负责收集关键的检查数据。这些数据随后被传送至数据中心,由专门的分析团队负责处理和分析。为了有效导航并执行任务,国家电网智能巡检机器人

配备了多种导航技术,包括磁性导航、视觉导航以及GPS与航位推算组合的方式,从而确保在各种环境下均能高效、准确地完成预定路径的巡检。在到达预设的停止点时,机器人会停下并旋转其搭载的云台,以捕捉并记录图像和温度信息。这些关键信息随即被传回数据中心,用于进一步的分析,以确保变电站的安全和高效运行。

早期的电力设施机器人巡检主要集中在变电站,依赖于固定轨道的导航系统,对变电站设备的多源信息进行监测。随着导航技术、SLAM技术和机器视觉的发展,电力设施机器人巡检研究重点也趋向于无轨化智能巡检。例如飞行机器人根据杆塔的位置规划飞行路径,需要事先为多个塔杆目标的巡检顺序规划出一条或多条最优路径,在避障的前提下,解决多目标巡检问题。此外,视觉感知作为电力人工智能的主要分支,为机器人多模态巡检奠定深厚的技术基础,感知算法的优劣也成为了巡检机器人的研究重点。为此,本文将综述电力设施多模态精细化机器人巡检中的导航和感知关键技术及相关应用。首先,本文将从电力场景的2D视觉感知和3D感知入手,分别总结机器人巡检在2D和3D场景下典型的目标检测和语义分割任务;随后,介绍高精度定位导航和SLAM技术对机器人巡检的重要性;之后,阐述多模态机器人巡检中不同数据模态间的融合方法,为多模态机器人巡检做出更完备的数据表示;接下来,分析电力设施多模态巡检的相关实施案例,以及在电力设施精细化机器人巡检中起到的重要作用;最后,列举发展趋势和挑战,为后续多模态精细化机器人巡检提供清晰的研究思路。

2 电力设施巡检感知和导航关键技术

智能机器人巡检感知技术是指机器人搭载摄像头和计算机等硬件设备,通过图像获取和图像处理与分析来感知周围环境。图像获取利用摄像头等设备获取周围环境的图像信息,而图像处理与分析则是对这些

信息进行处理和分析，提取出有用的特征和信息。其中，目标检测和语义分割是图像处理与分析的主要任务，旨在帮助巡检机器人更加准确地识别目标物体，

例如设施缺陷和损坏等，从而提高巡检的准确性和效率。如表 1 和图 3 所示，现有的巡检场景主要包括 2D 和 3D 场景。

表 1 电力设施机器人巡检智能感知关键技术

场景	技术	电力检测任务	代表方法
2D	目标检测	常用于可见光模态，输出电力设备缺陷的位置和类型信息	Faster R-CNN、YOLO 系列、SSD、RetinaNet 等
	语义分割	常用于红外模态，输出电力设备缺陷的热故障区域	U-Net、SegNet、DeepLab 系列等
3D	目标检测	常用于激光点云，检测电力导线三维位置	PointNet 系列、SESS 等
	语义分割	常用于激光点云，输出杆塔点区域	PointNet 系列、DGCNN 等

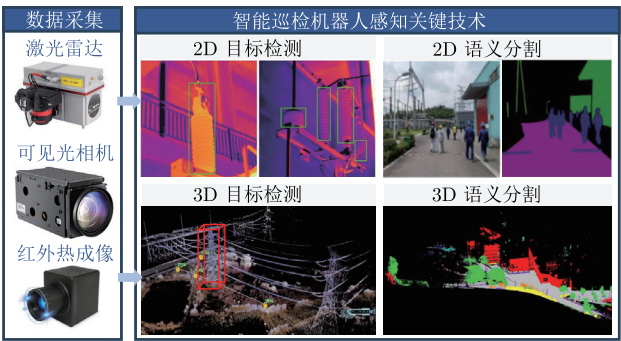


图 3 智能巡检机器人感知关键技术

2.1 电力设施机器人巡检 2D 感知技术

2.1.1 2D 目标检测

2D 目标检测作为机器人视觉感知的核心任务，旨在从二维图像中识别并定位各类物体，精确地确

定其位置和尺寸。适用于电力设施机器人巡检中精准定位目标设施或缺陷的位置。早年基于机器学习方法的 2D 目标检测算法，需要手工提取目标特征，然后训练分类器对目标进行分类和定位，如支持向量机（SVM）、随机森林（RF）等。早在 2005 年，何洪英等就基于支持向量机对高压绝缘子污秽等级进行红外热像检测。这些算法通常受到手工特征提取的限制，难以适应复杂的场景和不同尺度的物体。近年来，深度学习的发展为 2D 目标检测带来了革命性的进展，标志性的算法如图 4 所示。在此基础上，以 Transformer 为基本组件的 DETR 系列方法也成为了现有主流目标检测研究趋势。在具体技术方面，基于 Transformer 和卷积神经网络（CNN）的方法对图像

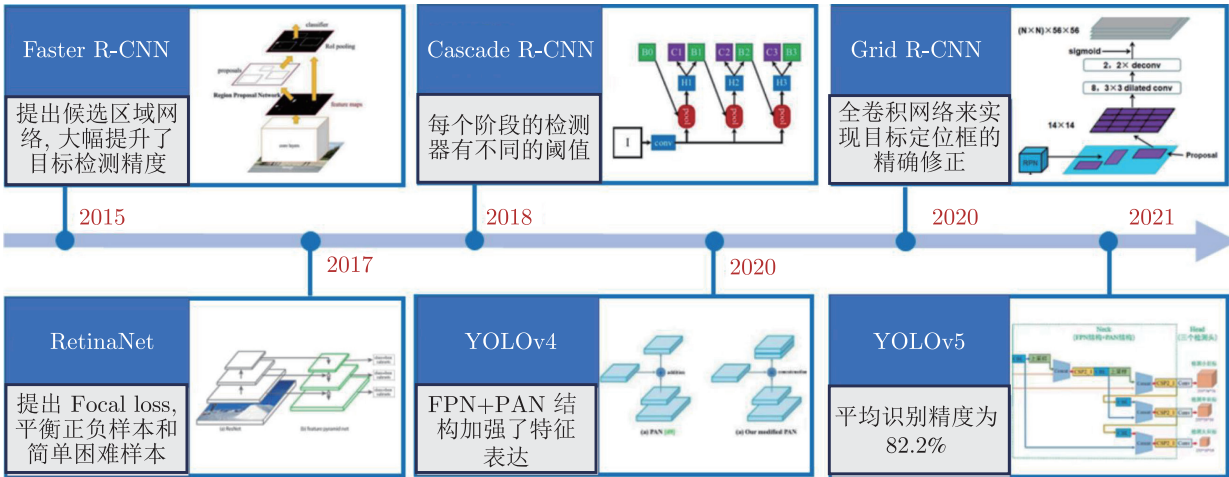


图 4 典型 2D 目标检测网络

进行特征提取，并在特征图上进行检测和定位。常见的基于深度学习的 2D 目标检测算法大体上分为两种：

1) 两阶段目标检测算法：两阶段目标检测算法通过分为生成候选框和目标分类与定位的双阶段流程，实现精确的物体检测。此类算法首先识别出图像中潜在目标的候选区域，随后对这些区域进行分类和位置精调。代表性的两阶段算法包括基于区域的卷积神经网络系列，如 R-CNN、Fast R-CNN、Faster R-CNN 等，以及基于金字塔特征的级联卷积神经网络算法，如 Cascade R-CNN 等。

2) 一阶段目标检测算法：一阶段目标检测算法直接从输入图像提取特征，通过单个卷积神经网络预测目标位置和类别。这种算法以简洁的网络结构和高速的检测能力为优，尽管在精度上可能略有不足。一阶段算法中，基于锚点的方法尤为流行，它在各个位置生成多种尺寸和比例的预定义锚点，通过分类和回归进行

目标检测。常见的一阶段目标检测算法包括 YOLO (You only look once)、SSD (Single shot detector)、RetinaNet 等。

现有的 2D 目标检测技术在电力设施巡检上已经开展了一些研究。例如，Yi 等提出一种新颖的补丁自纹理学习网络 (PSTL-Net)，通过结合自纹理学习模块 (STLm) 和补丁感知空间注意模块 (PSAM)，可以有效地实现输电线路的检测过程，在振动锤、鸟巢类、缺失绝缘子和悬垂线夹等目标上表现良好；Liu 等提出一种用于电力线组件检测的基于图的关系引导网络，该网络利用区域、图像和类别的相关性，实现了电力线组件的检测。虽然 2D 目标检测技术手段也趋近于成熟，但在电力设施巡检上仍然存在一些限制。例如，在输电线路长尾分布下对于小样本类别检测效果不佳，高分辨率下难以准确感知细微缺陷 (如销钉缺失)，DETR 等先进模型受计算资源限制难以部署到巡检机器人或无人机上。

2.1.2 2D 语义分割

相较于目标检测的对象识别和定位，语义分割侧重于对图像进行像素级别的分类和细致分割，旨在识别图像中所有区域的类别。这一技术在自动驾驶、医疗影像处理等领域有着广泛应用。如表 2 所示，2D 语义分割主要分为传统方法和深度学习方法。传统 2D 语义分割包括基于阈值的方法、基于边缘检测的方法和基于图割的方法。基于阈值的方法通过设置阈值将图像中像素的亮度或颜色分为不同的类别，然而，对于具有复杂背景和变化光照的图像，这种方法具有局限性。基于边缘检测的方法通过检测图像中物体的边缘来分割不同的区域，该方法依赖于边缘的准确性，当图像中存在较多的干扰线条或背景噪声时，该方法效果不佳。基于图割的方法通过将图像分割成图形结构，把分割问题转化为最小割问题，该方法对于物体形状复杂、背景变化的图像分割效果较好，但对于大规模的图像分割，计算复杂度较高。

表 2 2D 语义分割技术分类

方法	分类类型	方法类型	原理或用途
传统方法	原理	基于阈值的方法	根据灰度值大小不同，设定阈值完成分割
		基于边缘检测的方法	对图像边缘线条进行检测
		基于图割的方法	利用图形结构最小割分割图像
深度学习方法	用途	多尺度信息融合	增加感受野，提高分割结果精度
		无监督语义分割	减少大量人工标注成本
		实时语义分割	节省计算资源，加快推理时间

深度学习快速发展给 2D 图像语义分割技术带来了重大的创新和应用。基于深度学习的语义分割主要分为单网络结构和多网络结构。目前,卷积神经网络是主流的基础网络结构,它通过编码器与解码器的结合来实现语义分割。在单网络结构中,U-Net 和 SegNet 是两个比较经典的结构,已经成功应用于医学影像分割和自然场景图像分割等领域。例如,在医学影像领域,U-Net 已经广泛应用于 MRI 和 CT 图像的肿瘤分割等任务中,取得了显著的效果;而在自然场景图像领域,SegNet 则被用于道路、车辆和行人的分割。对于在电力机器人巡检上的应用,主要包括变电站设备漏油检查、变电站设备准确的红外热图像实例分割等。

实现技术方面,多尺度信息融合是一种在语义分割中提高精度的常用方法,主要思想是通过在网络中增加多个分支或使用多个卷积核尺度来提取和融合不同尺度的特征。例如,DeepLab 通过 ASPP 融合多尺度信息。在此基础上,DeepLab v3+ 采用 ASPP 模块来融合不同尺度的特征,同时使用空洞卷积增加感受野,提高分割结果精度。

2D 语义分割对于像素分类精度有着较高要求,因此带来了大量的人工标注成本。无监督 2D 语义分割方法通过未标注数据进

行训练,避免了对大量人工标注数据的需求。常见的无监督分割方法包括基于聚类技术,例如 K-means 聚类和谱聚类等。这些方法将图像像素聚类,把相似像素分配至相同类别以实现分割。另外,还包括基于生成模型的方法,如生成对抗网络(GAN),这些方法使用未标注数据进行训练,生成一组特征向量,然后将这些特征向量用于后续的语义分割任务。弱监督 2D 语义分割结合了少量标注数据和大量未标注数据。此方法以少量标注数据为基础初始化标签,再通过标签传播技术将标签扩展至未标注数据,获得初步分割结果。随后,利用这些结果和有限的标注数据来训练模型,以提高分割精度。代表性算法如 Semi-supervised Random Walk,这些方法有效地利用了有限的标注资源,提高了分割效率和准确性。

实时 2D 语义分割是一项对实时性要求较高的任务,可应用于电力机器人巡检时的边缘端部署。为实现实时语义分割,通常采用轻量级网络结构、硬件加速和分布式计算等技术。ESPNet 等轻量级实时语义分割网络得到了广泛应用。ENet 以其轻量级设计而突出,保持高精度的同时实现实时处理速度,针对实时应用进行优化,有效平衡了速度与精度。ICNet 基于金字塔结构,具

有高效的多尺度处理能力,在减少计算量的同时提高分割精度。ESPNet 是一种基于分离卷积的网络,在保持较高精度的同时大大减少了计算量。此外,GPU 加速和分布式计算也可以帮助加速语义分割算法,从而实现实时 2D 语义分割。

尽管语义分割技术已应用到部分电力场景中,但在某些复杂环境下仍然性能受限。例如,广泛分布的配网线路背景跨越山区、湖泊、平原、林地等地貌,难以实现准确的电力部件分割。此外,单一模态的无监督和弱监督方法也难以在电力场景中保持较高准确率以节省人工标注成本,在这种情况下,如何利用不同模态数据的互补性信息实现多模态数据精准场景理解,是未来电力巡检的主要研究方向。

2.2 电力设施机器人巡检 3D 感知技术

3D 目标检测技术相比 2D 目标检测技术,可以在更复杂环境下提供更加真实的场景信息,在三维空间中对待检测目标精准识别和定位。如图 5 所示,在智能巡检机器人运行过程中,利用点云和体素等常见 3D 模态,可以对物体进行完整性检测和形态分析,提高机器人的巡检效率和精度。

2.2.1 3D 目标检测

3D 目标检测是指在 3D 数据表征下对目标进行识别和定位,

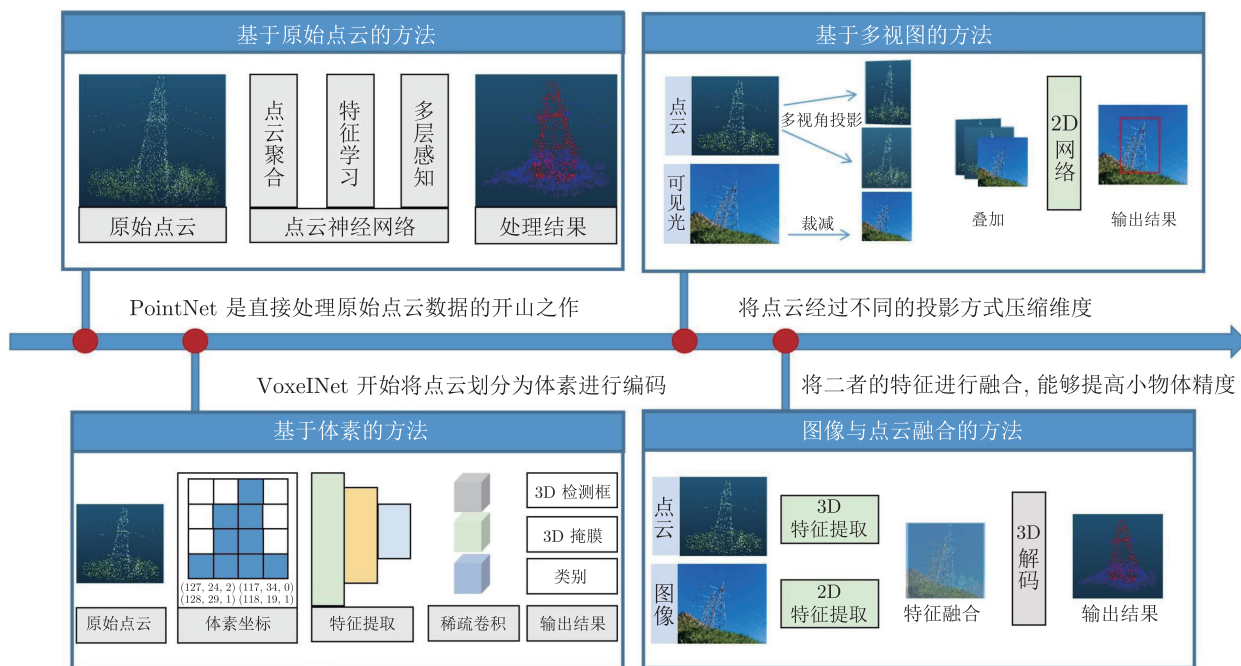


图5 3D点云检测和分割方法

可用于架空线路杆塔和导线检测任务,为后续智能分析提供精细化的基础。在数据表征上,主要分为基于点云的检测方法和基于体素的检测方法。1) 基于点云的方法:主要是通过将三维场景转化为点云数据,使用算法模型处理点云数据,实现对待测物体的检测和识别。Maturana 和 Scherer 提出一种基于 Frustum 的 3D 目标检测方法,通过利用 RGB 图像和点云数据融合,结合 2D 和 3D 的数据表征,实现了对目标物体的精细化检测。Charles 等提出基于 PointNet 的 3D 目标检测方法,使用神经网络直接处理点云数据,提高了检测的精度和速度。同年,Charles 等在 PointNet 的基础上进一步提出基

于 PointNet++ 的 3D 目标检测方法,设计多级特征提取和聚合网络,更大程度上提升目标检测的效率和准确性。在数据处理方面,Zhao 等提出一种半监督自我集成的 3D 目标检测方法 (SESS),旨在利用未标记数据和增强学习检测的性能。Shi 等提出在网络中的 3D 局部感受野池化层和局部信息聚合机制,实现对点云数据精细感知和全局信息的整合。

2) 基于体素的 3D 目标检测方法:将三维空间划分为多个体素网格,并将每个体素的特征作为输入,通过网络模型对每个体素进行分类和回归来实现目标检测。Zhou 和 Tuzel 采用体素卷积神经网络的方法,预测每个体素的对象分类和对象边界框,实现

目标检测。Ouyang 等把点云数据投影到二维鸟瞰图,将其体素化,快速实现目标检测。Shi 等提出一种联合点云和体素的三维目标检测方法,将点云数据转化为等距的体素,然后采用自适应体素表示来处理同尺度目标。Dong 等利用三维卷积来学习点云特征表示,采用多层 3D 锚点设计来提高检测准确率。Shi 等提出 PV-RCNN++ 目标检测方法,采用点云中心距离采样和体素空间采样策略提高检测效率,并采用 RoI 对齐模块和 Mask Head 模块来进一步提高检测准确率。

2.2.2 3D 语义分割

3D 语义分割基于三维数据将点云或体素中的每个点或体素分配到相应的语义类别中,需要

从点云或体素中提取出特征，如颜色、形状等，然后使用深度学习模型对这些特征进行分类和分割，从而实现对点云或体素中各个部分的语义理解和识别。目前，主流的3D语义分割模型包括 PointNet、PointNet++、DGCNN 等，PointNet++ 广泛应用于点云语义分割方法，采用点云金字塔结构，联合局部和全局特征实现高效语义分割。同时，Rand-LA-Net 等一些研究基于3D注意力机制，增强点云特征的表征能力。PointGNN 和 PointASNL 采用图神经网络对点云数据建模。

在电力设施机器人巡检方面，3D 目标检测和语义分割主要针对于输电线路杆塔和电力线的提取，以确定电力设施精确的3D坐标位置。Li 等提出一种基于图卷积网络的方法，使用线路结构约束算法来识别各个电力线路，基于多项式的算法重建电力走廊，并从激光雷达（LiDAR）点云中提取电力线和杆塔。具体来说，Jeong 等提出了不仅可以实时认知输电线路及其环境，还可以通过将激光雷达测量的点云数据与无人机的飞行信息相结合来估计垂度的方法。实时环境认知解决了体素化映射的坐标变换和概率下采样问题，从而保证有限的硬件需求，并引入稳健的随机样本共识来有效提取输电线路点云数据，从而

准确估计垂度。Munir 等引入了重建高压输电线路导体束中的巨大间隙方法，使用3D体素网格将电源线检索为跨度点，通过将跨度点分成几个段来生成束掩膜，二分图利用来自这些掩膜的束位置信息将具有宽间隙的束段连接起来，最后再次对线束进行分割，形成导体掩膜，以便利用基于图像的算法和概率提取子导体。针对输电线路附近植被对电力杆塔提取干扰的问题，Huang 等提出一种使用随机森林分类器并结合平滑颜色特征的分类方法，消除了靠近塔腿的植被的错误分类点，在点云中精准提取输电线路塔架。

一些方法通过融合多种传感器数据，探索了多模态3D语义分割，例如 SAT3D，这成为了电力设施多模态精细化巡检的基础。但目前的多模态感知场景仍然受限，如何在电力设施精细化机器人巡检领域，实现更准确的语义分割和目标检测，还有待进一步的研究和探索。

2.3 智能巡检机器人导航关键技术

2.3.1 高精度自主导航定位技术

智能巡检机器人的关键科学问题之一是实现高精度的自主导航定位技术。早期的巡检机器人通常依赖于固定轨道的导航系统，这种系统虽然易于控制且准确性高，但因其显著的性能局限和高

造价而难以广泛应用或实现高度智能化。

目前，无轨导航控制技术主要包括全球导航卫星系统（GNSS）和惯性导航系统等。GNSS 导航技术包括美国全球定位系统（GPS）和中国北斗导航等，其原理是利用 GNSS 卫星对巡检机器人进行定位。然而，由于电力巡检环境中存在复杂的电磁分布、时钟误差以及通信干扰等因素，对卫星导航的可靠性产生了一定制约，难以在狭小区域实现精准导航。

激光导航技术基于激光进行定位和导航，它主要由激光发射器、反射系统、光电检测组件、数据收集与传输单元构成。该技术通过反射系统发射激光，当遇到标志物时，标志上的反射装置会将激光信号及其携带的数据经过光电转换装置处理，并将反射信号返回。随后，数据采集系统会解读这些信息，并将其发送至处理器进行分析。通过比较这些数据与已知标志的位置，可以精确计算出传感器与标志间的相对位置及方向，进而确定设备的具体位置，实现精准导航。尽管激光测距在分辨率上有显著优势，但其性能易受环境因素干扰，如何有效去除采集信息中的噪声成为一大挑战。同时，激光导航的探测范围受限，仅依赖激光进行定位导航面临一定的难度。

惯性导航通过电子罗盘和里程计等设备提供相对定位，但易受到磁场干扰，存在累积误差问题。因此，开发智能巡检机器人时，不仅要选择合适的导航技术，还需解决各种技术限制，如电磁干扰、环境干扰、累积误差等问题，以实现准确、可靠的自主导航定位能力。

2.3.2 定位与地图构建关键技术

SLAM 技术是巡检机器人地图构建的关键技术，机器人 SLAM 需要标识环境特征在相应坐标系中的位置，以建立准确的环境模型。另一方面，需要利用准确的环境地图来对机器人进行准确的自我定位和校正。在电力设施机器人巡检领域，各种地图模型发挥着不可或缺的作用，为机器人提供精准的环境信息和导航能力。栅格地图通过简单的二维网格形式直观地反映环境的占用情况，适用于初步的环境感知和障碍物避让。特征地图利用几何元素精确描述环境特征，如墙面、树木位置等，对于需要高度准确性的定位和细节识别尤为重要。拓扑地图通过节点和弧线展现环境的结构关系，适合于路径规划和导航，尤其是在结构明确的环境中。混合地图结合尺度和拓扑的优势，提供一个既包含具体尺度信息又具备清晰拓扑结构的综合地图模型，增强了机器人

对环境的整体理解和灵活应对能力。这些地图模型的综合应用，为电力设施的自动化巡检提供了强大的支持，使机器人能够更加高效、安全地完成巡检任务。

SLAM 技术的引入显著提高了巡检机器人在复杂电力设施环境中的自主导航能力。电力设施，如变电站、输电线路等，往往分布在地形复杂、环境多变的区域。SLAM 技术通过实时收集周边环境信息，并利用这些信息进行精确的自我定位和环境地图的构建，从而确保机器人能够在这些复杂的环境中准确无误地进行巡检，极大地降低了人工巡检的安全风险和劳动成本。其次，SLAM 技术还能够提高巡检的效率和质量。通过精确的定位与地图构建，机器人能够有效规划巡检路线，减少重复或遗漏区域，确保巡检的全面性。同时，配合高精度的传感器，机器人可以在巡检过程中实时检测并记录下电力设施的运行状态和潜在问题，提供更加准确、详细的数据支持，便于运维人员及时进行维护与决策。

此外，SLAM 技术还具有良好的可扩展性。随着技术的进步，SLAM 系统可以集成更多高级功能，如障碍物识别与避障、复杂任务的自主规划与执行等，进一步扩展机器人巡检的应用场景和能力，提升电力设施的运维效率和智能化水平。因此，SLAM 技

术不仅能够提升巡检的安全性、效率和质量，还为电力设施的智能化运维开辟了新的可能性，是未来电力设施自动化巡检技术发展的关键。

3 电力设施多模态精细化巡检关键技术

3.1 可见光红外双光融合技术

在电力设施巡检中，单一传感器所获取的图像通常只具备某一方面的信息，无法满足精细化巡检需求，因此图像融合技术应运而生。图像融合是从不同模态的图像中提取互补信息，并对其聚合，以生成更丰富、更有意义的特征表示。如图 6 所示，红外图像主要依靠物体自身的热辐射进行成像，可以突出背景中隐藏的热目标，其不受光照条件、天气的影响，但对比度较低，纹理细节不丰富；可见光图像通过反射可见光进行成像，纹理细节和对比度更适合人类的视觉感知，但在烟雾、夜间等条件下的成像效果较差。为了更好获取待巡检电力设施的温度表征，实时、准确研判电力设施温度异常，多模态精细化检测往往将两者融合后获得一幅既有可见光图像边缘、又有红外热辐射目标细节信息的互补融合图像。图像融合也可以看作是一种增强技术，旨在将不同类型传感器获得的图像组合在

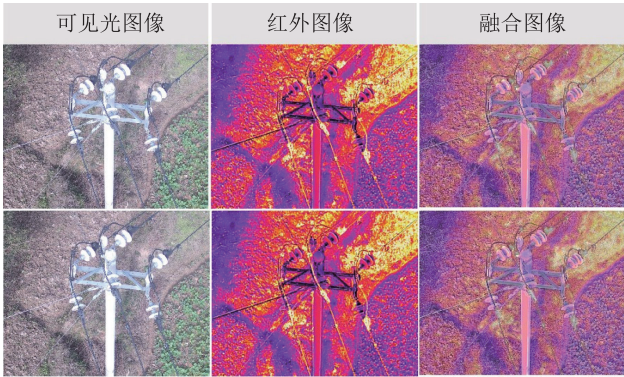


图6 电力设施红外和可见光融合图像

一起，生成一幅鲁棒或信息丰富的图像，以促进后续处理或帮助决策。融合方法的关键是有效的图像信息提取和适当的融合原理，这允许从源图像中提取有用的信息并将其集成到融合图像中，而不会在过程中引入任何伪影。随着目标检测与识别、军事监视等应用需求的不断提高，红外图像与可见光图像融合技术成为该领域研究的热点。在安防领域，红外与可见光融合图像可以准确识别黑暗环境、化妆打扮、佩戴眼镜等条件下的人脸，为商业应用、公安执法等提供便利需求；在军事领域，红外与可见光融合图像可以实现恶劣环境下隐藏目标的识别与跟踪；在智能交通领域，红外与可见光融合图像应用于行人检测、车辆识别与车距检测、道路障碍物分类；在农业生产领域，红外与可见光融合图像可应用于水果的成熟度检测、植物的病态检测等。近几十年来，大量红外图像与可见光图像融合方法相继被提出，并在实际应用中得到推广。如表3所示，红外图像与可见光图像双光融合方法大体上可以分为：

1) 基于多尺度变换的方法。通过分辨率分解方法，基于变换域的图像融合方法可获取一系列包含不同层次的子图像，以保留更多的图像细节信息。多尺度变换是应用最为广泛的基于变换域的融合方法，具体可以分为金字塔变换、小波变换和非下采样多尺度多方向几何变换等方法。其中，金字塔变换将图像分解成不同尺度且呈金字塔状的子带图像进行融合。拉

普拉斯金字塔（Laplacian pyramid, LP）变换在图像融合上取得了很好的效果，比率低通金字塔等融合方法同样被应用到可见光和红外图像上。小波变换的概念最早由 Grossmann 和 Morlet 于 1984 年提出，近年来，小波变换被应用于多频图像分解动态融合策略，实现了高频超声图像与低频超声图像的有效融合，获得细节增强、整体图像质量更好的融合图像。

2) 基于稀疏表示的方法。Yang 和 Li 提出基于稀疏表示（Sparse representation, SR）图像融合方法，其重点在于过完备字典的构造和稀疏系数分解算法。过完备字典的构造方式主要有两种：基于数据模型和基于学习算法的过完备字典。基于数据模型的过完备字典是利用特定的数学模型进行构建的，该方法虽然高效但难以应对复杂数据，可利用基于联合学习策略的平稳小波多尺度字典和由过完备离散余弦字典与基函数相结合的混合字典来解决此问题。而基于学习算法的过完备字典是通过训练样本集的方式构造的，常用的有基于最优方向法（Method of optimal directions, MOD）字典和奇异值分解的稀疏字典训练（Kernel singular value decomposition, K-SVD）字典。

稀疏系数分解算法中，匹配跟踪（Matching pursuit, MP）算法利用原子向量的线性运算，从训练好的过完备字典中选择最佳线性组合的原子以表征图像信息，但其迭代结果只是次优。正交匹配追踪（Orthogonal matching pursuit, OMP）算法在 MP 算法基础上进行改进，经 OMP 算法处理后的原子组合都已处于正交化状态。在精度要求相同的情况下，OMP 算法的计算效率高于 MP 算法。此外，为解决 OMP 算法和 MP 算法融合规则设计难的问题，同步正交匹配追踪（Synchronous ortho-gonal matching pursuit, SOMP）算法基于 OMP 算法进行了原子集的改进，其可从不同的源图像中分解出相同子集的字典，从而简化图像融合规则设计，在图像融合领域得到广泛应用。

稀疏表示与传统多尺度变换的图像融合方法相比有两大区别：一是多尺度融合方法一般都是基于预先设定的基函数进行图像融合，这样容易忽略源图像某些重要特征；而基于稀疏表示的融合方法是通过学习超完备字典来进行图像融合，该字典蕴涵丰富的基原子，有利于图像更好的表达和提取。二是基于多尺度变换的融合方法是利用多尺度的方式将图像分解为多层图像，再进行图像间的融合，因此，分解层数的选择就尤为关键。

3) 基于神经网络的方法。神经网络在图像融合的应用始于脉冲耦合神经网络 (Pulse coupled

neural network, PCNN) 模型。与其他神经网络模型相比, PCNN 模型在图像处理和融合领域具有独特的优势, 它能够模仿生物视觉系统中的脉冲耦合机制, 从而在图像信息的提取和融合过程中展现出卓越的性能; 与其他传统的神经网络模型相比, PCNN 更加注重图像的空间信息与邻域像素之间的相关性, 这使得它在处理复杂的图像融合任务时表现得更加优越。通过利用这种独特的脉冲耦合机制, PCNN 可以有效地捕捉到图像中的重要特征和细节, 从而提高融合图像的质量和精度。

基于深度学习的图像融合方

法渐渐成为图像融合领域的主要研究方向, 但其在异源图像融合的研究上还处于一个初步发展的水平。深度学习方法是将源图像的深度特征作为一种显著特征用于融合图像的重建, 卷积神经网络是目前最常用的图像融合深度学习方法。Li 等、Ren 等都提出一种基于预训练的 VGG-19 (Visual geometry group-19) 网络, 以提取源图像的深层特征, 获得较好的融合效果。2019 年, Ma 等首次将端到端的生成对抗网络模型用于解决图像融合问题, 避免了传统算法手动设计复杂的分解级别和融合规则, 并有效保留源图像信息。

表 3 可见光红外双光融合方法分类

方法	优点	缺点
基于多尺度变换的方法	多层次子图像保留了更多图像细节信息	基于预先设定的基函数进行图像融合, 易忽略源图像部分重要特征
基于稀疏表示的方法	超完备字典蕴涵丰富的基原子, 有利于图像更好的表达和提取	难以应对复杂图像融合
基于神经网络的方法	避免了传统算法手动设计复杂的分解级别和融合规则, 并有效保留源图像信息	对计算资源需求较大, 暂未大量应用

在技术上, 电力设施多模态精细化机器人巡检主要基于深度学习模型, 利用可见光图像和红外图像的特征级融合提取巡检目标的多模态特征, 再利用解码器用于具体下游任务。这是因为直接使用图像级的融合难以有一个统一的特征提取器能够同时从不同层面提取可见光和红外的高级

互补性特征。因此在电力场景的多模态双光融合中, 往往设计一个对称双分支网络, 分别提取两个模态的判别性特征, 然后在不同层级特征上进行多尺度融合。简单的拼接和相加通常不能高效地利用多模态特征的独特性, 因此在特征融合上, 大部分技术方法是利用一个模态去引导另一个

模态挖掘出与此模态的一致性特征, 在获得一致性特征后, 多模态的互补性则得以体现。例如在变电站全天候检测中, 当天气恶劣导致能见度下降时, 红外模态可以在一方面反映设备的温度特性, 同时多样的温度分布也使得电力设备呈现清晰的轮廓。在这种情况下, 低分辨率的红外图像

则为能见度下降的可见光图像提供了互补性信息，保持电力设施多模态精细化机器人巡检的准确性和全面性。

3.2 可见光图像和点云融合关键技术

为了实现更加准确、全面的巡检任务，可见光图像和点云数据的多模态融合技术被广泛应用于巡检机器人中。如图 7 所示，当可见光图像和点云数据同时获取时，它们提供了不同的信息，并且可以互相补充。可见光图像提供了物体的外观信息，可以对物体进行分类、定位和识别等；而点云数据提供了物体的三维形状信息，可以对物体的几何形状进行分析和建模。

可见光图像和点云数据融合的关键技术包括以下几个方面：1) 多传感器标定：巡检机器人通常配备多个传感器，传感器标定是多模态融合的前提，需要将多个传感器的坐标系进行统一，并且确定它们之间的相对位置和姿态；2) 传感器数据预处理：将

不同传感器采集的数据进行配准、校正和滤波等预处理操作，使得它们具有一致的参考坐标系和数据精度；3) 特征提取：针对可见光图像和点云数据，分别提取它们的特征信息，比如颜色、纹理、形状等，为后续的数据融合提供依据；4) 数据配准和融合：由于采集的可见光图像和点云数据来自不同的传感器，需要对其进行数据配准处理，将可见光图像和点云数据对应起来，以便后续进行数据融合。数据融合算法是实现可见光图像和点云数据融合的核心技术，将不同传感器采集的数据进行融合，构建一个综合的三维模型，可以提高数据的准确性和综合分析能力，从而实现对电力设备和线路等的全面检测和监测。

近年来，由于对可见光图像和点云多模态融合关键技术的研究愈发成熟，该技术在国内外电力智能巡检机器人上的应用也愈发广泛。例如，在电力设备巡检方面，2020 年，中国南方电网公

司与华为公司合作推出了智能巡检机器人，如图 8 所示，配备了可见光相机和激光雷达等多个传感器，可以使用可见光摄像头和 3D 激光扫描仪等传感器对高压设备进行全面的模态精细化巡检，包括设备表面的绝缘破损、内部电路板腐蚀等问题；在输电线路巡检方面，2021 年，美国智能制造公司 Locus Robotics 推出一款名为“Hemisphere”的电力输电线路巡检机器人，配备了可见光相机和激光雷达等多个传感器，通过多模态融合技术，可实现对输电线路潜在的表面缺陷和杆塔倾斜沉降等问题进行全面巡检和故障检测。2022 年，中国大唐集团公司推出了名为“鸟瞰者”的火电厂巡检机器人，配备了可见光相机、激光雷达和红外相机等多个传感器，可以自主导航对火电厂进行全面检测，包括烟囱、冷却塔等。从以上国内外的实际应用可知，可见光图像和点云多模态融合技术可以将不同传感器的数据进行融合和处理，提高数

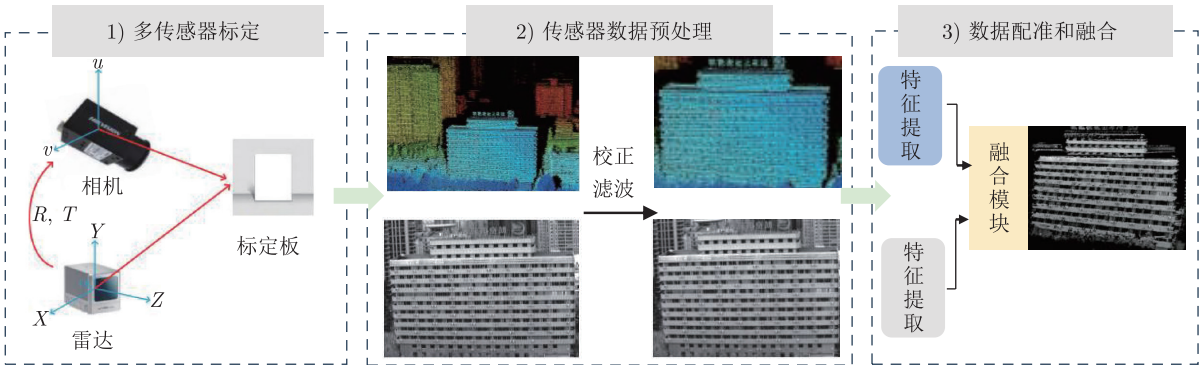


图 7 点云和可见光融合流程

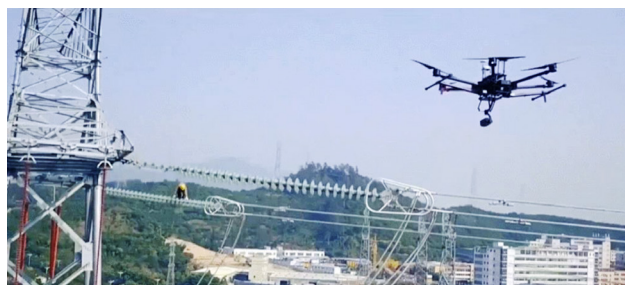


图8 中国南方电网巡检机器人

据的综合分析和识别能力,从而实现机器人巡检中准确感知多模态的能力。

3.3 声学 and 光学图像融合相关技术

音频数据与图像数据的融合应用在工业领域面向个别较为特殊的零部件异常检测中具有广泛的潜力。在电力设备巡检任务中,如整流变压器、直流换流阀等电力设备的特殊性,只能通过声纹信号进行运行状态检测。但现阶段仍存在声纹信号难以与待检设备进行对应等问题,构建面向电力设备可见光与声纹的多模态信息融合算法,完成待检设备与声纹信号匹配是现阶段电力设备巡检研究的重要趋势。

基于声模态与可见光融合的研究最早出现在生物特征识别领域,Brunelli 和 Falavigna 最早提出在匹配层上进行人脸与语音的融合识别,其使用概率框架组合线索来确定最可能的身份,取得了较高的识别率。在生物特征识别的基础上,Noda 等提出一个基于深

度神经网络(DNN)的模型,通过将音频和视频信号融合在一起实现语音识别,该模型采用自编码器和条件随机场来提高识别的准确性和稳定性。实验结果表明,与仅使用音频或视频信号进行语音识别相比,音视频信号融合的认可效果更好。基于声纹与图像、视频特征多模态融合的方法在传媒领域同样起到了一定的作用,如张玉珍等融合多模态信息来检测足球视频精彩事件,通过从视频中抽取音频、图像、字幕等特征实现足球视频精彩事件检测。在医疗领域,Xu 等提出一种融合语谱图和视频数据用于帕金森病检测的新方法,该方法基于深度卷积对抗生成网络,实现了语谱图和图像数据的有效融合与数据增强,结果表明该方法在检测帕金森病方面具有高准确性。

电力场景下,声纹信号常用来诊断变压器的运行状态,而多数多模态方法通常针对语音数据和图像数据的融合,但是由于电力设施产生的音频数据可能因可理解度较低和背景噪声等因素而难以直接分析,导致面向电力工业的音频与可见光数据的有效融合研究相对较少。此外,电力设施的监测通常要求高度的准确性和效率,这进一步强调了开发高效融合方法的重要性。随着更多面向电力的多源开放数据库的普及,声学 and 光学图像融合相关技术对于多模态精细化电力巡检有着较强的研究价值。图9为声学 and 光学融合流

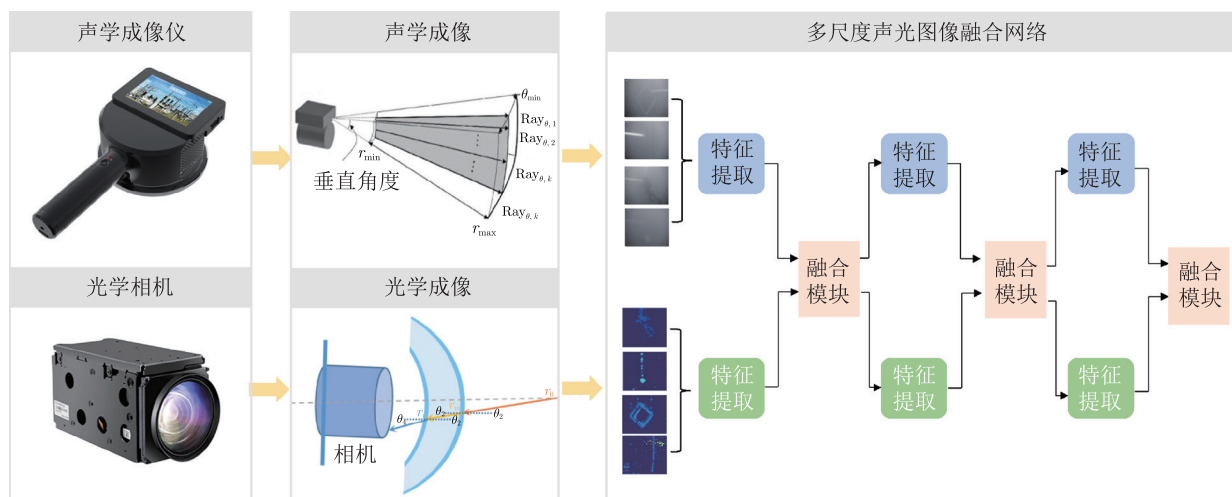


图9 声学图像和光学图像融合流程

程，由于数据的异构性，融合主要体现在特征层面。声学成像和光学成像后的数据通常利用不同层级的特征提取器进行浅层、中层和高层特征的融合。这里的融合是通过融合模块的注意力等方式引导两个模态互相学习，融合后的特征再输入到下一层级的特征提取器中。下一层级的特征提取器在更进一步的特征提取后，再进行本层级的融合。通过这种在多个尺度下进行模态间信息交互的方式，可以保留多模态的独立性，并且互补性更全面，加强电力设施不同类别缺陷特征表示，提升巡检效率和准确性。

4 电力设施多模态精细化机器人巡检应用

电力设施多模态精细化机器人巡检技术采用了多种数据来源以实现 对输电线路、变电站及其他电力设施的全面检测和评估。主要采用可见光、激光点云和红外热成像等数据形式。其中，可见光利用高清晰度的可见光相机捕获电力设施的高分辨率图像。

这些图像能够提供关于设施表面状态的直观信息，如腐蚀、结构损伤、异物侵入等。可见光成像是识别视觉特征和表面问题的基础技术，对于常规检测和日常维护至关重要。激光点云能够精确地反映被检测对象的几何形态和空间位置。LiDAR 技术在电力巡检中主要用于评估线路走廊的植被覆盖情况、塔架的结构稳定性以及线路间距离的测量，有助于防止植被侵扰和确保传输线路的安全运营。红外热成像能够检测设备产生的热量分布，从而识别过热部件或异常升温情况，这通常预示着潜在的故障或性能下降。在电力系统中，红外热成像技术被广泛用于监测变压器、断路器、接头以及其他关键设备的热态性能，是预防性维护和故障早期诊断的重要手段。多模态巡检技术充分利用以上多源数据的互补性，在输电线路部件和塔架进行精细化巡检。几种电力设施多模态精细化巡检相关应用典型案例如表 4 所示。

4.1 电力部件精准分割和输电线路异物检测

4.1.1 电力部件精准分割
电力部件分割是电力设施多模态精细化巡检最常见的应用，其主要目的是实现对电力设备图像中各个部件的自动化检测、分类和识别，研究对象主要包括架空输电线路、变电站等。通过电力部件分割，可以快速精准识别电力设备存在的问题和隐患，例如设备表面的腐蚀、漏电等。此外电力设备维护和保养的人力成本较高，电力部件分割可以实现自动化检测和识别电力设备。电力部件分割技术还可以用于实现自动化巡检，例如可以通过对绝缘子进行语义分割来准确定位可能存在的绝缘子破损和断裂风险。在规模较大的电力场景下，实现电力设备自动化巡检可以提高巡检效率和准确性。总之，通过电力部件分割技术，可以实现对电力设备的快速、精准检测和识别，提高电力设备的安全性和维护保养效率，减少人力和时间成本。

架空输电线路作为电力系

表 4 电力设施多模态精细化巡检应用

典型案例	融合模态	方法原理
电力部件精准分割	可见光 + 红外	结合可见光的高分辨率和红外图像的温度特性，实现高精度部件分割
输电线路异物检测	可见光 + 点云	结合可见光的高分辨率和点云的形态特征，充分识别线路异物
线路杆塔倾斜检测	可见光 + 点云	结合可见光的颜色信息和点云的位置信息，准确分割杆塔，实现倾斜度检测
线路覆冰多模态检测	可见光 + 点云	结合可见光的颜色信息和点云的位置信息定位电力线，通过坐标计算覆冰厚度
台账异常检测	可见光 + 点云	通过可见光实现台账目标识别，利用点云构建数字孪生网络以实现台账校准

统中至关重要的组成部分，是电力远距离运输的主要方式。许刚和李果基于 U-Net 的航空电力线图像语义分割网络进行改进研究，包括数据集增强方法、色彩空间和损失函数的选择，并得出两套最佳组合。然后采用传统通道范数和提出的联合显著度指标对不同色彩空间的网络模型进行稀疏正则化，并采用网络剪枝大幅降低网络参量和运算量。左安全等结合电力线特点，使用轻量级 PP-LCNet 替换原始主干网络 Xception，有效减少了参数量，并提高了预测速度；然后对 ASPP 模块增加空洞卷积分支和级联卷积以减少漏分割现象，同时将空洞卷积分支改为瓶颈结构以减少参数量，并利用 BAM 减少了背景分割错误。Mao 等提出的轻量级双目语义分割模型从双目图像中分割线路相关缺陷。Wang 等提出一种用于输电线路及其附件语义分割的图像处理框架，使用一种基于矩阵的线段连接算法来加速检测框架，并构造背景滤波器和人工轮廓线段特征生成器来提高检测性能。Yang 等提出一种基于注意力融合的深度分割网络，实现了端到端的输电线路分割。唐小煜等提出优化后的基于 U-Net 的模型来获取绝缘子区域掩膜图像，实现绝缘子的识别与提取。Yu 等提出一种基于纹理和形状的有源轮廓模型，用于在杂

乱背景下分割绝缘子，将形状约束合并到基于纹理的活动轮廓模型中，以捕捉绝缘体边界。Tang 等在原始 U-Net 模型架构中，将多尺度特征与注意力机制和残差学习相结合并应用，并使用注意力模块来实现特征增强，改进绝缘子语义信息和细节纹理的提取。Han 等提出多目标实例分割的 TAD-D-SOLO 高精度实例分割算法，克服了广泛使用的对象检测和语义分割方法的不足，通过将构成残差结构中的可变形卷积网络与 Transformer 模块合并，解决了边缘拟合差和识别缺失的问题。

为了充分发挥多模态针对电力部件分割中的有效性，消除单一模态带来的数据限制，一些方法把可见光和红外图像融合作为精准分割的基础，通过模态间的互补性突破模态的限制。以红外图像和可见光图像为例，红外图像虽能提供关键的温度信息，但其相对较低的空间分辨率可能导致设备分割的不准确性，进而影响后续的温度分析和解释。相反，尽管可见光图像通常拥有较高的分辨率，但会受到光照变化等影响，在光照敏感场景发挥欠佳，难以应用在全天候监测场景中。并且由于可见光图像缺乏温度信息，无法在热故障检测中发挥作用。针对输电线路在极端天气下因能见度下降所导致的电力

部件分割精度降低的问题，Choi 等提出一种新的多模态图像特征融合模块，利用可见光和红外图像来提高输电线路检测性能。具体而言，提出一个多分支特征提取块，其次是一个通道注意力块。多分支特征提取块使用多个分支提取每个模态输入的代表性特征，引入通道收缩因子，将每个模态的特征图作为输入，并提取通道描述符的底层上下文信息。多分支特征提取块的输出被联合聚合到通道注意力块中的注意力向量。最后，注意力向量重新校准所提出模块的每个输入特征。同时为了减少由于插入模块而导致的额外参数的数量，通道注意力块使用了具有通道收缩因子的 2D 卷积核代替全连接层。这种方法解决了直接对电力场景多模态数据简单全局平均池化所带来的空间信息被消除的问题，并且减少了大量与每个输入特征向量的通道数成比例的附加权重参数。在 U-Net 和 UMFNet 上验证以上模块，最终通过多模态方法在提出的输电电力线数据集上将部件分割的平均交并比分别提升至 78.01% 和 86.51%。

上述方法的研究对象仅仅是输电线路中的电力线，尽管取得了较为不错的巡检结果，但是当面对任务更加复杂的其他部件分割时，表现上还存在一定的差距。这主要是由于巡检机器人在巡检

过程中会受到角度变化和与不同电力设备距离的影响,因此难以从获取的图像中提取足够的上下文信息。此外,各种电力设备之间巨大的尺度差异进一步增加了高精度对象分割的难度。针对这些问题,Xu 等基于双空间图的交互网络,通过可见光图像和红外热图像的协同工作,实现高压输电线路和变电站场景中电力设备的全天时间语义分割。该网络模型首先提出基于双空间图的跨模态特征融合策略,从全局和语义的角度融合多模态高层特征。特征图中的像素被聚类,并根据语义信息投影以构建顶点和图模型。通过内部图与跨图的交互,有效地提取了丰富的上下文信息,并很好地缓解了巨大的模态差异所造成的干扰。在以上多模态特征表示的基础上,提出多任务解码器协同实现语义分割和边缘检测。低层特征被集成为权重图,以恢复空间细节和边界信息。同时,边缘信息显式地转换为语义特征,以提取更微妙的线索和抑制背景噪声,从而实现高精度分割。最终,该网络模型在提出的变电站和高压输电线路实现了 67.86% 和 78.94% 的平均交并比。其中变电站包括隔离开关、绝缘子、变压器等部件,高压输电线路包括输电塔、水平绝缘子、柱式绝缘子和挡板等部件。尽管该模型在高压输电线路和变电站上都取得

了良好的机器人多模态巡检结果,但是图卷积的方式仍然造成大量的计算,并且特征融合主要集中在高层,忽略了低层特征融合,可能会错过一些重要信息和提示。

为了解决电力部件分割中大量人工精细化标注所造成的人工成本高的问题, Ma 等提出一种基于热图像引导的样本掩膜自动标注方法。通过可见光和红外图像对之间的异质像素配准算法,利用红外图像前景分割结果指导可见光图像中电气设备样本掩膜的提取。该方法仅采用了图像级标签弱监督,实现了对样本掩膜的自动标注,大大提高了效率,降低了成本。具体而言,该方法首先利用具有全局搜索能力的进化算法获得初始参数,搜索局部最优解来实现红外图像和可见光图像的配准。然后利用显著性检测、距离变换和 GrabCut 算法,实现了红外图像由粗到精的分割。最后通过一个渐进优化模型的分割实例,利用全连接的条件随机场(CRF)约束到边界的损失,以指定每个对象的精细详细边界,并解决了分割的电气设备具有复杂结构的困难。此外,该方法还探讨了自适应学习技术,以解决可见光和红外图像对之间的分辨率差异的问题,提高泛化能力。最终在变电站、变电柜、绝缘子和变压器上分别取得了 56.2%、51.5%、75.0% 和 89.0% 的平均

准确率。该方法的提出是弱监督在多模态电力设施巡检的一次深入探索,可有效解决电气设备像素级标注成本高的问题,并且具有提供相对准确的掩膜注释和成本较少的优点。但是在针对输电和配电复杂多变的背景及尺度较小的目标上,还有一定的局限性。

4.1.2 输电线路异物检测

输电线路异物检测是在多模态机器人拍摄图像基础上,利用深度学习目标检测等技术检测输电线路悬挂异物。相比于传统人工检测而言,其利于节省人工成本,并提高异物实时检测率,从而大大减小由异物附着而导致的输电线路事故发生概率。

由于人工成本、维护难度和环境复杂等原因,人工巡检难以满足如今输电线路安全运行状态监测的需求,因此国内输电线路巡检大多采用无人机、机器人等设备代替人工工作,并结合图像处理技术实现异物检测。基于输电线路异物检测的图像识别技术又可分为传统特征提取方法和基于深度学习的方法两个类别。传统特征提取方法,例如 SIFT 特征提取方法,需要经过构建 DOG 尺度空间、关键点定位与搜索、方向赋值等步骤,方法提取特征点少,实时性不高,检测精度低。随着深度学习的不断发展,其在输电线路异物检测中的应用不断增加。图 10 为电力设施精准目

标检测框架,在该框架下,网络提取异物、变电站设施等感兴趣区域目标,通过多尺度特征图融合增强对应特征,在检测头中共享权重层,并输出目标的类别、位置以及其他限制条件。例如异物的类型,诸如风筝、气球、鸟巢等,以及异物所在输电线路的位置。主流检测方法如YOLO、Faster R-CNN、meta R-CNN等通过卷积神经网络提取图像特征,并生成候选框进行分类与回归,实现输电线路异物检测。基于深度学习的输电线路异物检测方法检测精度高、实时性强,能够很好满足工业异物检测要求。目前,采用智能目标检测技术对输电线路图像中的异物进行检测,已成为我国智能电网领域的研究热点。

基于机器视觉的输电线路异物检测是通过对由多模机器人拍摄的输电线路异物图像或视频进

行分析和处理,从而实现对输电线路异物的检测。例如,对于输电线路中鸟巢的检测,Jiang等提出一种能够利用SSD对输电线路鸟巢进行识别的方法,采用HSV颜色空间滤波器对检测区域进行滤波,并验证了该方法在输电线路中鸟巢检测的可行性。

4.2 电力线路点云多模态精细化检测

电力设施多模态精细化巡检在点云上的相关应用主要体现在电力线路中的电力线和杆塔上,相比于2D图像上的目标检测任务和语义分割任务,更加关注目标的类别和状态信息(有无缺陷)。点云数据通常侧重于体现目标的精准位置关系,因此点云主要用于测量电力线和杆塔上的3D位置变化,从而完成语义理解,得出巡检结果。一般点云是由坐标组成的点集,根据点的位置可以识别出位置的形状,但当场景复

杂时,往往单一模态的点云无法根据结构区分出前景和背景,特别是当电力线路背景复杂且被植被所包围时。因此多模态精细化巡检至关重要,这里的多模态通常体现在点云数据和可见光数据的融合。在采集阶段,激光雷达融合了点云的坐标信息和可见光信息,为每一个点分配颜色属性,为后续点云精细化检测奠定了良好的数据基础。

4.2.1 线路杆塔倾斜检测

电力线路主要是由电力线、杆塔以及杆塔附件组成。其中杆塔是电力线路中最基础的元件,在支撑电力线运行过程中不仅要承受自身和导线的垂直载荷,还需要承受电力线架空后的张力载荷,长期处于自然力、重力等外力作用下,杆塔地基容易发生形变,导致杆塔倾斜,甚至倒塔断线,使供电线路陷于瘫痪,造成重大经济损失。传统的电力线路

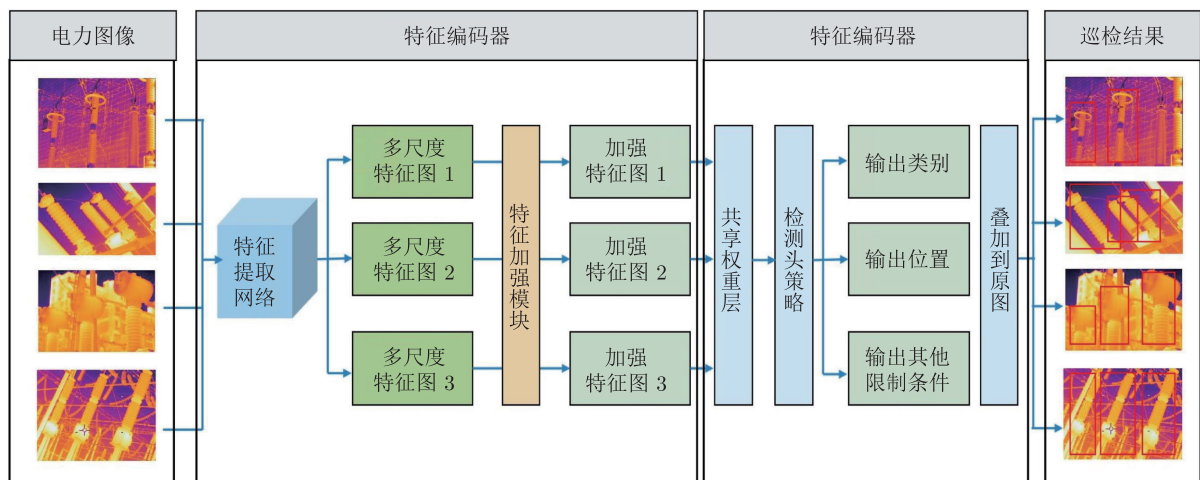


图10 电力设施精准目标检测框架

杆塔倾斜度测量方法主要有铅垂法、平面镜法、经纬仪法。这些方法不仅实现难度大、施工强度大、测量效率低，而且不能适应现代电网的安全运行和可持续发展。随着中国智能电网的高速发展，智能数字化处理技术广泛应用于电力行业，因此基于深度学习开展线路杆塔倾斜检测成为了研究主流。

数据采集利用 LiDAR 的高频率脉冲能部分地穿透植被，获取高压线下的地形信息，能解决人工和传统航测中存在植被遮挡的问题，是目前杆塔精确定位和重建的有效工具。通过激光雷达实时扫描输电线路现场场景建立实时输电线路三维点云。

具体实施方式如图 11 所示，针对杆塔倾斜的检测与防护，主要涉及杆塔识别和倾斜检测两个环节。首先杆塔识别是利用机载 LiDAR 点云自动确定杆塔的中心位置，以便进行后续的激光点云数据分析和缺陷诊断。这个过程

通常用深度学习模型通过 3D 语义分割或目标检测对多模态点云完成。在提取出杆塔区域、确定杆塔每个点的三维坐标后，根据坐标执行相应算法（如最小二乘法）实现杆塔倾斜度的计算。一些相关的案例在杆塔识别和杆塔倾斜上有着较好应用。在杆塔识别方面，Li 等提出通过垂直投影的点云密度和高程变化来探测杆塔点云，识别杆塔位置。沈小军等提出将长距离电力线路点云划分为多个小距离尺度空间组，利用子空间高程差异和点云密度特征实现复杂地形条件下的杆塔定位与电力线提取。此外，为应对杆塔点云提取算法对地面起伏较为敏感以及地面点难以剔除的问题，直接处理原始点云数据实现杆塔提取的轻量级网络被提出，通过神经网络对体素空间特征训练，实现精确提取。在倾斜检测方面，芦竹茂等通过拟合塔身结构来计算杆塔中心线，进而计算杆塔倾

斜率。徐梁刚等提出基于杆塔塔身分层投影提取中轴点的激光点云杆塔倾斜检测算法，结果与实测值对比偏差小于 0.90‰。应斌等开展了基于北斗高精度定位技术的输电铁塔滑坡监测试点应用，实现了杆塔形变量监测和地质灾害预警，提升了巡检效率和精益化管理水平。

4.2.2 线路覆冰多模态检测

输电线路覆冰多模态检测是指基于可见光与激光点云融合的多模态数据，通过多模态 3D 目标检测技术实现输电线路覆冰检测。具体而言，针对我国输电线路覆冰检测人工巡检方式存在效率低、人工安全无法保障、持续周期时间长等问题，近年来，国内外利用巡检机器人与视觉结合的方式来实时检测输电线路覆冰情况，当线路覆冰超出阈值时进行预警。这种方法大大减少了人工使用量，提高了检测效率，并大大缩短了线路覆冰处理周期，加强了输电安全。

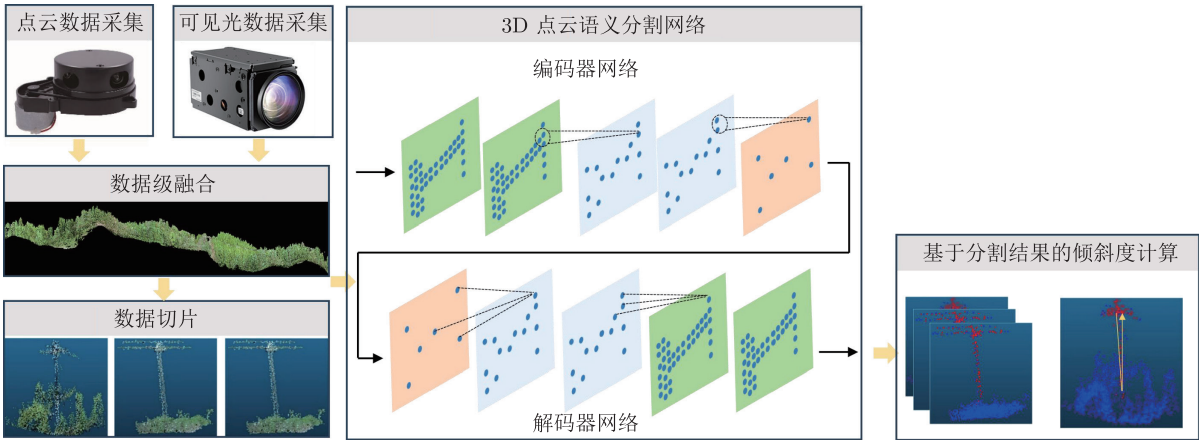


图 11 基于可见光和点云的杆塔倾斜检测流程图

与输电线路杆塔倾斜检测方法类似,具体实施方案依然需要通过对线路多模态点云进行 3D 目标检测,识别出电力线路的位置,再通过计算电力线的厚度来实现覆冰前后的探测,比对前后电力线厚度的变化,来精准识别线路是否覆冰以及覆冰厚度。实施方案的核心在于 3D 目标检测方法。多模态 3D 目标检测方法是采集到的线路实时图像提供的颜色、语义特征信息与输电线路点云提供的 3D 结构信息进行融合,即利用主干网络中的点云算子提取点云特征,通过基于采样的点和特征预测 3D 框来准确标注出导线的位置关系,从而实现输电线路覆冰检测。以 Point-GNN 为例,文献提出一种基于图神经网络的激光雷达点云目标检测方法,通过固定半径的近邻图对点云进行有效编码来预测图中每个顶点所属的对象类别和形状,从而实现三维目标检测。在算法层面,主流的多模态 3D 目标检测算法包括 PointFusion 和 EPNet 等。以 EPNet 为例,使用融合模块在不

同尺度特征图上用语义特征来增强对应的点特征,以获取更多的可辨别特征的表示,再利用特征细化网络提取紧凑的全局特征,送入到两个级联的子网络进行分类和回归,从而实现多模态 3D 目标检测。如图 12 所示,在完成覆冰检测后,除冰机器人还能采用无线控制、融合敲击振动与碎冰等技术,实现机器人自主上下线、线路覆冰的旋转击碎和碾压脱落等工作。

4.3 电力架空线路缺陷分析及台账异常检测

输变电台账管理作为实行设备状态检修的基础,是电力技术管理的一项基础内容,其管理水平的高低直接关系到变电运行管理、设备管理、安全管理及检修校验管理等一系列输变电管理工作是否可以顺利开展。现有大部分配电网在台账治理和校核上多采用人工进行,时间周期长且效果不好。而电力设施多模态机器人配合数字孪生技术、三维点云重建技术等新兴技术,则可以有效代替人工进行配电网台账治理和校核过程,同时相较于传统的人工台账治理及校核而言,它具有稳定性好、持续工作时间长、精度和效率高等优点。

目前我国电力架空线路仍面临维护难、管理难,运行维护电力架空线路的风险大、成本高等一系列问题,需研制面向电力架空线路巡检的智能电力巡检机器

人,并配合新兴技术建成新一代的电力线路台账拓扑,实现电力架空线路数字化管理、智能化检测与监测。针对这一重大需求,国家电网湖南省电力有限公司电力科学研究院联合湖南大学团队,研制了数字孪生化的三维电力架空线路缺陷分析及台账异常检测系统,如图 13 所示。该系统从电力架空线路相关数据的三维点云重建、电力架空线路主要部件和元素语义分析深度神经网络研发、三维台账拓扑的异常检测技术开发入手,对包括电力架空线路的三维模型数据、地形地貌数据、材料属性数据等电力架空线路立体环境进行三维点云结构重建,并对数据进行预处理和清洗,去除无用信息和异常数据,创建高精度的电力架空线路数字孪生体。并设计一种基于迁移学习配合大规模预训练模型的深度神经网络模型,利用深度学习对电力架空线路三维点云拓扑进行语义分析,识别线路中的主要部件和元素,建立语义关系。设计电力架空线路缺陷分析算法,利用语义分析结果进行缺陷检测和定位,分析缺陷类型、程度和可能的影响。解决了长期以来电力架空线路人工检测难度大、缺陷识别率低等问题,提高了电力架空线路的维护效率和准确性,减少运维风险和成本。该系统依托湖南省大数据平台汇集样本 50000 余张,



图 12 带电除冰机器人

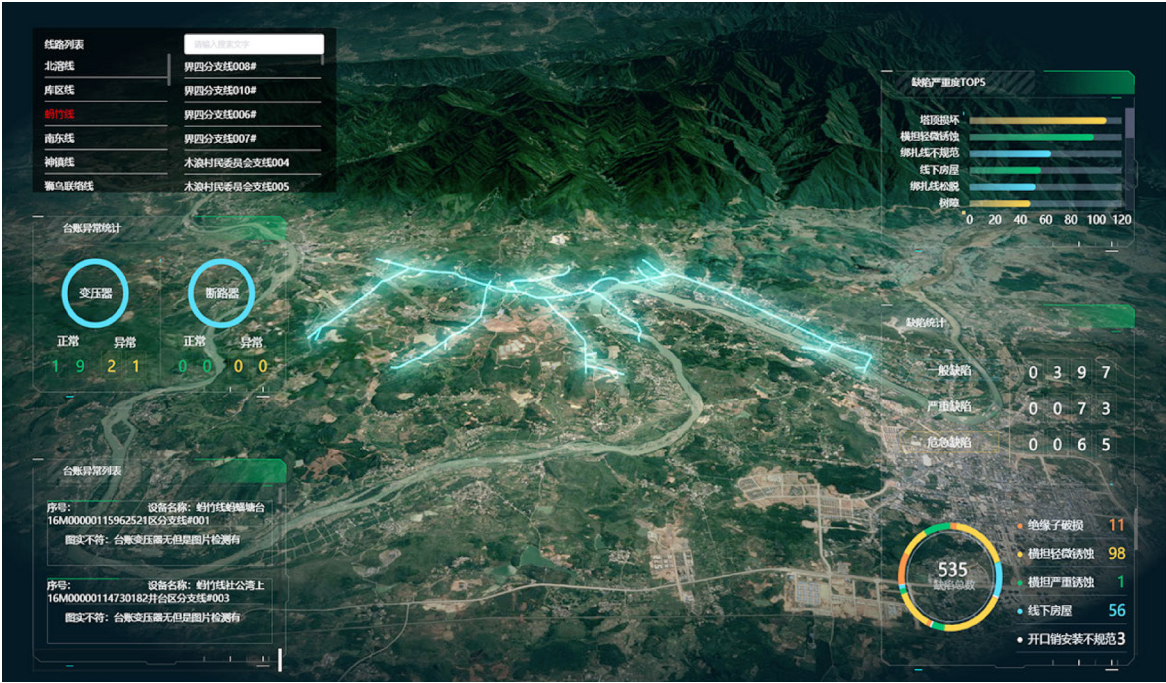


图 13 电力架空线路缺陷检测及三维台账拓扑数字孪生体

累计支撑线路 2000 余公里，发现严重及以上缺陷 600 多个，实现了工单驱动、自主巡航、缺陷在线识别和录入的全流程线上化闭环。

5 现有技术挑战与未来发展趋势

5.1 现有技术挑战

电力设施多模态精细化机器人巡检的应用旨在整合来自不同传感器的数据（如可见光、激光点云、红外热成像等），以提高故障检测的准确性和效率。尽管这一技术具有显著的优势，但在实际应用过程中也面临着多种挑战和局限性：1）尽管目前红外和可见光图像能够实现不同模态间的配准，但是在更多源的情况下，例如在融合非视觉数据（如源荷

数据）与视觉数据的任务中，还存在着较大的空间和时间分辨率差距，这就要求在数据融合过程中进行精确的校准和同步，以确保数据的一致性和准确性，这是后续电力多模态数据发展的重大挑战。2）多模态巡检产生的数据量巨大，对巡检机器人数据存储、传输和处理能力提出了较高要求，尤其是在实时或近实时处理需求的场景中。轻量化多模态巡检策略消除了因处理多模态数据造成的模型参数量和计算量爆炸问题，完成了机器人边缘端部署，对未来多模态巡检机器人的应用至关重要。3）多模态数据缺陷稀少且表征不统一，例如多模态机器人巡检中，不同的缺陷在不同数据下的表征形式不同，并且样本稀

少，如何构建统一的数据增强策略、消除风格迁移和扩散模型等数据增强方式带来的分布不一致问题，是全面应用多模态精细化机器人巡检亟待解决的问题。4）多模态机器人巡检通常需要昂贵的设备和技术支持，这可能限制其在资源有限场景下的应用。例如，激光点云的采集需要较高的成本，这对多模态巡检机器人的推广带来了重大挑战。

5.2 未来发展趋势

5.2.1 多模态精细化机器人巡检技术集成

多模态感知和多源融合技术作为机器视觉领域中重要且具有挑战性的问题，随着研究的不断深入，图像融合领域已经发生了巨大的变化，针对异源、多尺度、

不同平台的图像在算法处理和实际应用上都有了一定发展。为满足多模态精细化机器人巡检需求的多样性和精度,采用多模态巡检技术集成不同传感器(如光学、红外、声学等)实现对电力设施的全方位、多尺度检测是电力设施巡检技术的重要发展方向之一。而其中的挑战主要集中在传感器数据融合策略研究、环境因素对传感器性能影响的补偿方法以及实时性能优化等方面。

5.2.2 巡检机器人自主学习及智能决策

电力线路巡检过程中存在大量不同种类的故障类型及复杂情况,例如线路老化、设备损坏、短路、过载等。面对此类复杂情况,以往人工作业环境中需要由组成的团队来完成。而随着人工智能领域的不断发展与增强,新一代人工智能技术由以往的简单、单一任务处理工具逐渐发展成为具备“感知-决策-控制”闭环特征的复杂场景多任务处理系统,而在动态环境中构建机器人的感知-决策-控制协同作业机制来替代以往需要群体性团队人工作业完成复杂任务具有重要意义。基于该方向的研究将赋予电力巡检机器人强大的环境适应能力,使得电力设施多模态精细化机器人具备在各种复杂环境下稳定工作的能力,从而应对复杂电力输变电环境中(如高压线路、变电

站等高风险场景)待检目标异质化和多样化干扰因素的挑战。

5.2.3 电力设施多模态大规模预训练模型

随着电力设施多模态精细化巡检的发展,电力场景巡检业务精度和效率得到了极大提升,然而仍存在着巡检数据量大、标注难度高等问题。因此,面向海量电力场景数据开展电力设施多模态精细化巡检的大规模预训练模型成了未来发展趋势。尽管现有多模态大模型在文本和视觉等模态上有着优越表现,但是针对电力设施精细化巡检的大规模预训练还面临着数据格式差异大、难以获取统一标准电力巡检数据等挑战。

6 结束语

随着国家提出加快电网基础设施智能化改造和智能微电网建设,提高电力系统互补互济和智能调节能力的战略需求,电力设施巡检有着重要的战略意义。本文首先对智能巡检机器人的共性关键技术(如目标检测、语义分割、高精度自主导航、定位与地图构建等)进行了综述,然后介绍了电力设施多模态精细化机器人巡检中多模态数据融合方式,最后介绍了电力设施多模态巡检机器人应用的相关案例,并探讨了电力设施多模态精细化机器人巡检面临的挑战和未来发展趋势。

现有多模态技术可以在部分

任务上充分利用多种模态的互补性和一致性。例如,在可见光和红外图像融合的电力部件分割任务中,结合可见光图像的纹理信息和红外图像的温度分布信息,可以更准确地识别和定位故障点,如过热组件等。并且这种融合有助于减少误报率,通过同时考虑温度异常和可见损伤,提供更全面的故障诊断。此外,对于室外电力设施的巡检,特别是在光照条件变化大的环境下,这种融合方法可以提供更稳定和可靠的检测结果。但是这种方法在融合过程中需要精确对齐图像,并处理不同分辨率和尺度的问题,增加了处理的复杂度。可见光与点云数据融合可以应用在输电线路杆塔倾斜和覆冰检测中,点云数据能够提供电力设备和基础设施的精确三维空间信息,与可见光图像融合后,可以实现对设备形态和表面状况的全面评估。并且这种方法特别适用于评估设备的空间位置、结构稳定性和植被侵扰等问题,对于规划维护和防灾减灾具有重要意义。但是由于点云数据量通常很大,处理和融合这些数据需要较高的计算资源和专业的数据处理技术。将点云数据与可见光图像精确配准也是一大挑战,需要精确的校准和高效的算法来保证数据的一致性。

未来的电力设施多模态精细化机器人巡检研究方向主要体现

在技术集成、自主学习与智能决策能力、大规模预训练模型的开发等方面。首先，多模态感知和多源数据融合技术的进步，为电力设施提供了全方位和多尺度的监测手段，满足检测需求的多样性和精度要求。其次，随着人工智能技术的发展，新一代人工智能技术的出现使得能够处理复杂场景和多任务的系统，特别是在在

动态环境下构建的感知-决策-控制协同作业机制，为替代传统的人工团队作业提供了可能。这种进步不仅提升了电力巡检机器人的环境适应能力，也使得电力设施巡检在高风险场景下面对异质化和多样化干扰因素的挑战时能够稳定工作。最后，面对电力设施多模态精细化巡检数据量大和标注难度高的问题，开发大规模预训

练模型成为了未来发展的趋势。

综上，电力设施多模态精细化机器人巡检通过综合不同类型的数据来提供更全面和准确的电力设备状态评估，但同时也面临数据处理复杂性、成本和技术挑战。未来的研究和技术开发需要着重解决这些问题，以进一步提升多模态融合技术的应用效率和可靠性。○

来源：自动化学报

作者简介



张 辉 湖南大学机器人学院教授。主要研究方向为机器视觉，图像处理和机器人控制。

E-mail: zhanghuihby@126.com



杜 瑞 湖南大学机器人学院博士研究生。2020 年获得湘潭大学硕士学位。主要研究方向为机器视觉，图像处理。本文通信作者。

E-mail: durui@hnu.edu.cn



钟 杭 湖南大学机器人学院副教授。分别于 2013 年、2016 年和 2020 年获得湖南大学电气与信息工程学院自动化科学专业学士、硕士和博士学位。主要研究方向为航空机器人，多机器人系统，视觉伺服，视觉导航和非线性控制。

E-mail: zhonghang@hnu.edu.cn



曹意宏 湖南大学机器人学院博士研究生。2021 年获得湖南师范大学硕士学位。主要研究方向为计算机视觉。

E-mail: caoyihong@hnu.edu.cn



王耀南 中国工程院院士，湖南大学电气与信息工程学院教授。1995 年获得湖南大学博士学位。主要研究方向为机器人学，智能控制和图像处理。

E-mail: yaonan@hnu.edu.cn

基于高阶控制障碍函数的多固定翼无人机鲁棒避障安全编队跟踪控制

文 / 付俊杰 林潇坤 温广辉

摘要：在多固定翼无人机编队跟踪控制问题中，系统地处理输入饱和约束、外界输入扰动以及无人机间避障安全约束存在着挑战。针对这些挑战，本文提出了一种基于高阶控制障碍函数方法的分布式鲁棒避障协同编队控制律。首先，在不考虑避障约束的情况下，设计了一种满足输入和速度约束的多固定翼无人机标称鲁棒编队跟踪控制律。该标称控制律基于滑模控制方法，能够在有界输入扰动影响下实现精准的编队跟踪控制。然后，针对无人机之间的避障要求以及无人机与障碍物之间的避障要求，分别设计了考虑输入约束的改进高阶控制障碍函数，并基于不变集理论，推导了存在外界输入扰动情况下的线性控制输入避障约束条件。最后，基于标称编队跟踪控制律和鲁棒控制输入避障约束条件，为各固定翼无人机构造了一个局部二次规划问题，并通过求解该问题得到最终的鲁棒避障安全编队跟踪控制律。仿真实例表明，本文设计的控制律相较于不考虑外界输入扰动的控制律而言可以有效地处理扰动，相较于基于势函数方法的控制律而言减轻了系统产生的震颤并且更好地处理了无人机的速度约束，相较于基于分布式 MPC（模型预测控制）方法的控制律而言在计算时间方面有了显著提升。上述结果验证了所设计控制律的创新性和有效性。

随着感知、通信和计算技术的发展，无人机系统在多个行业中发挥了重要作用。常见的无人机类型包括旋翼无人机、固定翼无人机和混合翼无人机。旋翼无人机具有悬停能力，但速度较低；固定翼无人机速度快、覆盖范围广，在军事领域如情报收集、侦察和战斗，以及非军事领域如灾难管理、搜索和救援、新闻报道、航运等任务中具有应用优势。相比于单无人机系统，多无人机编队在区域搜索和目标跟踪任务中效率更高且系统更具鲁棒性。综

上，研究多固定翼无人机编队控制问题具有重要的现实意义。

与一般的线性和非线性多智能体系统相比，固定翼无人机的动力学具有特殊性。固定翼无人机是欠驱动系统，在运动中受到非完整约束。文[5]指出，无法通过连续时不变状态反馈控制律来稳定此类系统。当空速过低时固定翼无人机存在失速危险，因此它还受到最小线速度约束。同时无人机驱动能力受限，导致存在输入饱和约束。因此，多固定翼无人机编队控制比传统多智能

体系统更复杂。文[6]提出了一种非线性控制方法，增加了对外界干扰的自适应能力，但假设飞行速度为定值，忽略了速度约束。文[7]提出了一种极简控制策略，使用少量传感器来实现基本功能。文[8]基于矢量场概念开发了路径跟踪控制律。文[9]构造了控制李雅普诺夫函数（CLF）集合来生成控制律。文[10]提出了利用相对速度条件和参考速度设计间距控制器以完成控制任务。尽管文[7-10]能处理部分固定翼无人机系统的动力学约束，但尚

未系统性地处理输入饱和、外界扰动及避碰安全约束。

对于各类实际无人机编队情形,运动过程中的避碰安全性是保证系统正常运行的基本要求。相关学者对多无人机避碰问题已进行了广泛研究。文[14]提出了一种基于信息构造速度障碍物的方法,从而实现了多无人机系统避碰。文[15]提出了动态窗口方法,该方法起初主要针对静态障碍物,但是其后续改进版本的适用范围更加广泛。文[16]提出了一种结合虚拟结构方法、引领者-跟随者方法和人工势场方法的针对多架固定翼无人机的实时编队控制和避障算法。文[17]进一步提出了基于改进人工势场法的多无人机系统避碰方法。势函数类方法仅依赖当前相对位姿采取避碰动作,容易产生震颤现象,进而影响避碰控制性能。此外,该类方法难以显式处理无人机自身的输入及状态约束。模型预测控制(MPC)方法是一种基于模型的最优控制策略。文[18]采用了分布式MPC方法,提供了一种基于相邻无人机信息避免碰撞的策略。基于MPC的方法虽能够处理输入及状态约束下的避碰控制问题,但需要每个时刻在线求解开环优化问题,对于无人机计算能力要求较高,可能无法满足实时运行要求。总的来说,现有的多无人机避碰编队控制方法仍难以处理复杂智能体动力学约束、个体输入及状态约束以及有限计算能力约束等实际约束。

近年来,控制障碍函数(CBF)方法被越来越多地应用到非线性系统的约束控制问题。CBF方法的思想是构造一个与状态约束相关的安全集,通过设计控制器,使安全集具有前向不变性,从而确保状态始终满足约束。它能显式处理状态和输入饱和约束,计算量小且设计灵活。文[20]首次将CBF用于无人机避碰控制,文[21]将CBF拓展至多机器人系统的协同避碰情形。Nguyen与Sreenath提出了指数控制障碍函数(ECBF),以处理高相对阶约束;Xiao等开发了高阶控制障碍函数(HOCBF),从而处理更复杂的约束并提高鲁棒性。这些方法已广泛应用于无人车

和四旋翼无人机的避碰控制,但尚未针对输入和速度约束下的多固定翼无人机编队跟踪控制问题提供解决方案。

基于以上分析,本文针对同时存在输入约束、速度约束以及避障安全约束的带有不确定输入扰动的多固定翼无人机系统编队跟踪控制问题,提出一种新的基于HOCBF的避障安全编队跟踪控制律,从而保证系统在输入扰动的影响下能够满足输入约束、速度约束以及避障安全约束。

1 预备知识

1.1 图论

一个包含 n 个节点的有向图 G 由节点集 $V=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 和边集 E 组成,记为 $G=\{V, E\}$ 。定义 $N_i=\{p_j | (p_j, p_i) \in E\}$ 为顶点 p_i 的邻居集合。若边 $(p_i, p_j) \in E$ 意味着 $(p_j, p_i) \in E$,则称图 G 为无向图。如果在有向图 G 中存在一个节点,它有到达其他所有节点的有向路径,那么称图 G 包含一棵有向生成树,并且称这个节点为该有向生成树的根。与图 G 对应的邻接加权矩阵定义为 $A=[a_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$,其中,若 $p_j \in N_i$,则有 $a_{ij} > 0$;反之,则有 $a_{ij} = 0$ 。将度矩阵定义为

$$D_g = \text{diag}(d_{g1}, d_{g2}, \dots, d_{gn}) \quad (1)$$

其中, $d_{gi} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$,则与图 G 对应的拉普拉斯矩阵定义为 $L = D_g - A$ 。

不失一般性,规定领航者对应的节点为 p_0 ,跟踪者对应的节点集为 $V=\{p, p, \dots, p\}$,跟踪者间的通信图记为 G 。定义有向图 $G=\{\bar{V}, \bar{E}\}$,其中 $\bar{V}=V \cup \{p_0\}$, $\bar{E}$ 为节点集 $\bar{V}$ 对应的边集。令 $A_0 = \text{diag}(a_{10}, a_{20}, \dots, a_{n0})$,有如下引理:

引理 1: 如果图 $\bar{G}$ 包含一棵以领航者为根的有向生成树,则存在一个正向量 η ,使得矩阵 $\Psi = \frac{1}{2}(\text{diag}(\eta_1, \eta_2, \dots)H + H^T \text{diag}(\eta_1, \eta_2, \dots))$ 为正定矩阵,其中 $H = L + A_0$, L 为对应于图 G 的拉普拉斯

矩阵。

1.2 基于高阶控制障碍函数的不变集控制方法

定义 1 (K 类函数): 如果一个利普希茨连续函数 $\alpha: [0, a) \rightarrow [0, \infty)$ ($a > 0$) 是严格单调递增的, 并且满足 $\alpha(0) = 0$, 则称函数 α 为 K 类函数。

考虑如下的非线性系统:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$, $\mathbf{f}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, $\mathbf{g}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times q}$ 是已知的非线性局部利普希茨连续函数, $\mathbf{u} \in U \subset \mathbb{R}^q$ 为控制输入 (其中 U 为控制允许集)。对于系统 (2), 有如下定义:

定义 2 (前向不变性): 对于系统 (2) 的解 $\mathbf{x}(t)$, 如果初值 $\mathbf{x}(t_0) \in C \subset \mathbb{R}^n$, 能够保证 $\mathbf{x}(t) \in C (\forall t \geq t_0)$, 那么就称集合 C 对于系统 (2) 来说具有前向不变性。

对于一个相对阶为 m 的连续可微函数 $h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, 给出一个约束集合 $\{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n | h(\mathbf{x}) \geq 0\}$ 。在本文中函数 h 的相对阶也称为约束的相对阶。

对于约束函数 h , 可以定义一个函数序列 $\psi_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} (i \in \{1, 2, \dots, m\})$

$$\psi_0(\mathbf{x}) = h(\mathbf{x}), \quad \psi_i(\mathbf{x}) = \dot{\psi}_{i-1}(\mathbf{x}) + \alpha_i(\psi_{i-1}(\mathbf{x})) \quad (3)$$

其中 $\alpha_i(\cdot) (i \in \{1, 2, \dots, m\})$ 为 K 类函数。

进一步定义一个与式 (3) 相对应的集合序列 $C_i (i \in \{1, 2, \dots, m\})$:

$$C_i = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n | \psi_{i-1}(\mathbf{x}) \geq 0\} \quad (4)$$

定义 3: 如式 (3) 所示定义函数集合 $\psi_i: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} (i \in \{0, 1, \dots, m\})$, 如式 (4) 所示定义集合序列 $C_i (i \in \{1, 2, \dots, m\})$ 。如果存在一组可微的 K 类函数 $\alpha_i(\cdot) (i \in \{1, 2, \dots, m\})$, 满足:

$$\sup_{\mathbf{u} \in U} [L_f^m h(\mathbf{x}) + L_g L_f^{m-1} h(\mathbf{x})\mathbf{u} + S(h(\mathbf{x})) + \alpha_m(\psi_{m-1}(\mathbf{x}))] \geq 0 \quad (5)$$

其中, $\mathbf{x} \in \bigcap_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} C_i$, L_f 与 L_g 代表李导数, $S(\cdot)$ 表示剩余的李导数且其最高相对阶为 $m-1$, 那么就称

函数 $h: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 是系统 (2) 的一个相对阶为 m 的高阶控制障碍函数。

给定一个高阶控制障碍函数 h , 可以在状态 $\mathbf{x}$ 处定义如下的控制集:

$$K_{\text{HOCBF}}(\mathbf{x}) = \{\mathbf{u} \in U | L_f^m h(\mathbf{x}) + L_g L_f^{m-1} h(\mathbf{x})\mathbf{u} + S(h(\mathbf{x})) + \alpha_m(\psi_{m-1}(\mathbf{x})) \geq 0\} \quad (6)$$

定理 1: 给定一个满足定义 3 的高阶控制障碍函数 $h(\mathbf{x})$, 相应的集合序列 $C_i (i \in \{1, 2, \dots, m\})$ 由式 (4) 定义。若 $\mathbf{x}(0) \in \bigcap_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} C_i$, 则任意利普希 $\mathbf{u}(\mathbf{x}(t)) \in K_{\text{HOCBF}}(\mathbf{x}(t)) (\forall t \geq 0)$ 能够使得集合 $\bigcap_{i \in \{1, 2, \dots, m\}} C_i$ 为系统 (2) 的前向不变集。

1.3 问题描述

考虑一组运行在同一高度的由 N 个固定翼无人机构成的跟踪者集群。固定翼无人机的动力学简化为如下非完整约束系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \cos \theta_i \\ \dot{y}_i &= v_i \sin \theta_i \\ \dot{v}_i &= a_i + \delta_{a_i} \\ \dot{\theta}_i &= \omega_i + \delta_{\omega_i} \end{aligned}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

其中, 向量 $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i]^T \in \mathbb{R}^2$ 为无人机 i 的平面笛卡尔坐标, v_i 为线速度, θ_i 为航向角, 控制输入 a_i 为线加速度, ω_i 为角速度, $|\delta_{a_i}| \leq \delta_a^m$ 和 $|\delta_{\omega_i}| \leq \delta_\omega^m$ 分别为线加速度扰动和角速度扰动。假设固定翼无人机存在如下运动速度和控制输入约束:

$$\begin{aligned} 0 < v_{\min} \leq v_i(t) \leq v_{\max} \\ |a_i(t)| &\leq a_m \\ |\omega_i(t)| &\leq \omega_m \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $v_{\min}, v_{\max}, a_m, \omega_m$ 为给定常数。

存在一个领航者固定翼无人机, 其动力学模型为

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= v_0 \cos \theta_0, \quad \dot{y}_0 = v_0 \sin \theta_0 \\ \dot{v}_0 &= a_0, \quad \dot{\theta}_0 = \omega_0 \end{aligned} \quad (9)$$

其中 v_0 为领导者线速度, 未知控制输入 a_0 为线加速度, ω_0 为角速度, 且线速度和未知控制输入分别满足 $|a_0(t)| < a_m - \delta_a^m, |\omega_0(t)| < \omega_m - \delta_\omega^m, v_{\min} < v_0^{\min} \leq$

$$v_0(t) \leq v_0^{\max} < v_{\max o}$$

给出关于领航者-跟踪者多固定翼无人机集群通信图的如下假设。

假设 1: 在任意时刻, 通信图 $\bar{G}$ 包含一棵以领航者为根节点的有向生成树。

编队跟踪控制是为所有的跟踪者设计一种分布式控制律, 使得固定翼无人机间达到期望的编队队形, 并跟随领航者运动。对于每一个跟踪者固定翼无人机 i , 定义相对于领航者的编队跟踪误差为

$$\begin{aligned} e_i^x &= x_0 - x_i - d_i^x, & e_i^y &= y_0 - y_i - d_i^y \\ e_i^v &= v_0 - v_i, & e_i^\theta &= \theta_0 - \theta_i \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{d}_i := [d_i^x, d_i^y]^T$ 表示固定翼无人机 i 与领航者的期望相对位置 ($\mathbf{d}_i = [0, 0]^T$)。进而, 受限固定翼无人机集群 (式 (7) (9)) 的编队跟踪控制问题就可以表示为 “为每个跟踪者无人机设计控制输入 $[a_i, \omega_i]^T$, 使其满足运动线速度和控制输入约束 (8), 且所有跟踪者固定翼无人机的编队跟踪误差趋于 0”, 即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [e_i^x(t), e_i^y(t), e_i^v(t), e_i^\theta(t)]^T = [0, 0, 0, 0]^T \quad (11)$$

此外, 考虑到实际应用中固定翼无人机集群的安全性需求, 要求在编队形成过程中以及编队飞行过程中, 所有固定翼无人机均不与其他无人机或者环境中的障碍物发生碰撞。具体的, 假设 D_s 表示两个固定翼无人机之间的最小安全距离, 则无人机之间的避障条件可以表示为 $\|\Delta \mathbf{p}_{ij}(t)\| \geq D_s$ ($t \geq 0$), 其中 $\Delta \mathbf{p}_{ij}(t) = \mathbf{p}_i(t) - \mathbf{p}_j(t)$ 。若任意固定翼无人机 i 与静态障碍物 O_l ($l = 1, 2, \dots, N_o$, N_o 为静态障碍物的数量) 安全距离记为 D_{sl} , 则无人机 i 与静态障碍物 O_l 之间的避障条件为 $\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}(t)\| \geq D_{sl}$, 其中 $\Delta \mathbf{p}_{iO_l}(t) = [x_i(t) - x_{O_l}, y_i(t) - y_{O_l}]^T$ 。

本文将基于高阶控制障碍函数方法设计满足速度和输入约束的多固定翼无人机避障编队跟踪控制律。设计过程将分为以下 3 个步骤: 首先在不考虑避障约束的情况下设计满足速度和输入约束的标称编队跟踪

控制律; 然后基于高阶控制障碍函数推导在速度和输入约束下固定翼无人机实现避障的控制输入约束条件; 最后, 利用标称编队跟踪控制律和控制输入避障约束条件, 构建局部二次规划问题, 进而得到最终的避障编队跟踪控制律。

2 标称编队跟踪控制律

设计不考虑避障约束的多固定翼无人机标称编队跟踪控制律时, 由于领航者信息仅能被部分跟踪者得到, 所以首先为每个跟踪者设计一种仅基于局部信息的分布式有限时间收敛观测器, 用来得到与领航者相关的 $e_i^x, e_i^y, v_0, a_0, \theta_0$ 和 ω_0 信息。然后, 提出一种基于所设计观测器的标称编队跟踪控制律, 并证明其能够实现编队跟踪控制目标 (11), 且经过有限时间后该控制器也满足速度与输入约束 (8)。

2.1 分布式有限时间观测器的设计

假设 2: 领航者的线加速度的 1 阶导数与角速度的 1 阶导数有界。即:

$$|\dot{a}_0(t)| \leq b_m, \quad |\dot{\omega}_0(t)| \leq \rho_m \quad (12)$$

令每一个跟踪者都维护一个虚拟领航者, 该虚拟领航者的位置、线速度、线加速度、航向角以及角速度分别记为 $(\hat{x}_i^0, \hat{y}_i^0), \hat{v}_i^0, \hat{a}_i^0, \hat{\theta}_i^0, \hat{\omega}_i^0$ 。然后, 定义 $\hat{e}_i^x$ 与 $\hat{e}_i^y$ 为

$$\hat{e}_i^x = \hat{x}_i^0 - x_i - d_i^x, \quad \hat{e}_i^y = \hat{y}_i^0 - y_i - d_i^y \quad (13)$$

其中 $\hat{e}_i^x$ 与 $\hat{e}_i^y$ 分别用来估计式 (11) 中的编队跟踪误差 $e_i^x(t)$ 和 $e_i^y(t)$ 。

对每个跟踪者无人机 i , 考虑如下所示的观测器:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{e}}_i^x &= \hat{v}_i^0 \cos \hat{\theta}_i^0 - v_i \cos \theta_i - \\ &\alpha \operatorname{sgn} \left(\sum_{j=0}^N a_{ij} [(\hat{e}_i^x - \hat{e}_j^x) + (x_i - x_j) + d_{ij}^x] \right) \end{aligned} \quad (14a)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{e}}_i^y &= \hat{v}_i^0 \sin \hat{\theta}_i^0 - v_i \sin \theta_i - \\ &\alpha \operatorname{sgn} \left(\sum_{j=0}^N a_{ij} [(\hat{e}_i^y - \hat{e}_j^y) + (y_i - y_j) + d_{ij}^y] \right) \end{aligned} \quad (14b)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{v}}_i^0 &= -\beta_{v1} \left| \sum_{j=0}^N a_{ij}(\hat{v}_i^0 - \hat{v}_j^0) \right|^{1/2} \times \\ &\quad \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^N a_{ij}(\hat{v}_i^0 - \hat{v}_j^0) \right) + \hat{a}_i^0 \end{aligned} \quad (14c)$$

$$\dot{\hat{a}}_i^0 = -\beta_{v2} \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^N a_{ij}(\hat{v}_i^0 - \hat{v}_j^0) \right) \quad (14d)$$

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\theta}}_i^0 &= -\beta_{\theta1} \left| \sum_{j=0}^N a_{ij}(\hat{\theta}_i^0 - \hat{\theta}_j^0) \right|^{1/2} \times \\ &\quad \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^N a_{ij}(\hat{\theta}_i^0 - \hat{\theta}_j^0) \right) + \hat{\omega}_i^0 \end{aligned} \quad (14e)$$

$$\dot{\hat{\omega}}_i^0 = -\beta_{\theta2} \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^N a_{ij}(\hat{\theta}_i^0 - \hat{\theta}_j^0) \right) \quad (14f)$$

其中, $[d_{ij}^x, d_{ij}^y]^T = \mathbf{d}_i - \mathbf{d}_j$, $\hat{e}_0^x = 0$, $\hat{e}_0^y = 0$, $\hat{v}_0^0 = v_0$, $\hat{\theta}_0^0 = \theta_0$ 。有以下定理:

定理 2: 在假设 1 和 2 成立的条件下, 对于领航者-跟踪者固定翼无人机集群 (式 (7) (9)), 基于所设计的分布式观测器 (14), 当观测器参数满足:

$$\beta_{v2} \geq \frac{b_m}{\rho}, \quad \beta_{v1} \geq \left(\frac{2(\gamma_0 + \gamma_1) + 1}{\lambda_1(\Psi)} \right)^{1/2} \beta_{v2}^{1/2}$$

$$\beta_{\theta2} \geq \frac{\rho_m}{\rho}, \quad \beta_{\theta1} \geq \left(\frac{2(\gamma_0 + \gamma_1) + 1}{\lambda_1(\Psi)} \right)^{1/2} \beta_{\theta2}^{1/2}$$

其中 $\Psi = \frac{1}{2}(\text{diag}(\eta_1, \eta_2, \dots) \mathbf{H} + \mathbf{H}^T \text{diag}(\eta_1, \eta_2, \dots))$ 满足引理 1, $0 < \rho < 1$, $\gamma_0 = \frac{1+3\gamma_1}{1-\rho}$, $\gamma_1 = (1+\rho) \cdot \max\{\eta_i\}$ 时, 存在有限时间 T , 使得对 $\forall t \geq T$, 有:

$$\begin{aligned} \hat{e}_i^x(t) &= e_i^x(t), & \hat{e}_i^y(t) &= e_i^y(t) \\ \hat{v}_i^0(t) &= v_0(t), & \hat{\theta}_i^0(t) &= \theta_0(t) \\ \hat{a}_i^0(t) &= a_0(t), & \hat{\omega}_i^0(t) &= \omega_0(t) \end{aligned}$$

为证明定理 2, 考虑如下引理 2 和引理 3:

引理 2: 对于通信图满足假设 1 的由 N 个跟踪者和 1 个领导者构成的多智能体系统, 若领导者的 1 维位置变量 f 具有有界的 2 阶导数, 且 l 为 $|f|$ 的上界, 则对于如下形式的分布式观测器:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{p}}_i &= \hat{q}_i - k_1 |y_i|^{1/2} \text{sgn} y_i \\ \dot{\hat{q}}_i &= -k_2 \text{sgn} y_i \\ y_i &= \sum_{j=0}^N a_{ij}(\hat{p}_i - \hat{p}_j) + b_i(\hat{p}_i - f) \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, N$, 若参数 k_1, k_2 满足:

$$k_2 \geq \frac{l}{\rho}, \quad k_1 \geq \left(\frac{2(\gamma_0 + \gamma_1) + 1}{\lambda_1(\Psi)} \right)^{1/2} k_2^{1/2} \quad (16)$$

其中, $\Psi = \frac{1}{2}(\text{diag}(\eta_1, \eta_2, \dots) \mathbf{H} + \mathbf{H}^T \text{diag}(\eta_1, \eta_2, \dots))$ 满足引理 1, $0 < \rho < 1$, $\gamma_0 = \frac{1+3\gamma_1}{1-\rho}$, $\gamma_1 = (1+\rho) \cdot \max\{\eta_i\}$, 则分布式观测器 (15) 的观测误差会在有限时间内收敛到 0, 即经过有限时间, $\hat{p}_i(t) = f(t)$, $\hat{q}_i(t) = \dot{f}(t)$, $\forall i = 1, 2, \dots, N$ 。

引理 3: 对于通信图满足假设 1 的由 N 个跟踪者和 1 个领导者构成的多智能体系统, 设 $\hat{r}_i(t)$ 为第 i 个智能体对领导者 1 维位置 $r_0(t)$ 的估计值, 且满足

$$\begin{aligned} \dot{\hat{r}}(t) &= -\alpha \sum_{j=0}^N a_{ij}(t)(\hat{r}_i(t) - \hat{r}_j(t)) - \\ &\quad \beta \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^N a_{ij}(t)(\hat{r}_i(t) - \hat{r}_j(t)) \right) \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\hat{r}_0(t) = r_0(t)$, $|\dot{\hat{r}}_0(t)| \leq r_b$, $\alpha \geq 0$, $\beta > r_b$, 则

存在 $T_f = \frac{\max_i |\hat{r}_i(0) - r_0(0)|}{\beta - r_b}$, 使得对于 $\forall t \geq T_f$, $\hat{r}_i(t) = r_0(t)$ ($i = 1, \dots, N$) 成立。

定理 2 证明: 由引理 2 和定理 1 条件可知, 存在有限时间 t_1 , 使得 $\forall t \geq t_1$,

$$[\hat{v}_i^0(t), \hat{a}_i^0(t)] = [v_0(t), a_0(t)] \quad (18)$$

同时存在有限时间 t_2 , 使得 $\forall t \geq t_2$, 有:

$$[\hat{\theta}_i^0(t), \hat{\omega}_i^0(t)] = [\theta_0(t), \omega_0(t)] \quad (19)$$

定义 $\tilde{e}_i^x(t) = \hat{e}_i^x(t) - e_i^x(t)$, $\tilde{e}_i^y(t) = \hat{e}_i^y(t) - e_i^y(t)$ 。令 $T_0 = \max\{t_1, t_2\}$, 则对于任意 $t \geq T_0$, 有:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{e}}_i^x(t) &= -\alpha \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^N a_{ij}(\tilde{e}_i^x(t) - \tilde{e}_j^x(t)) \right) \\ \dot{\tilde{e}}_i^y(t) &= -\alpha \text{sgn} \left(\sum_{j=0}^N a_{ij}(\tilde{e}_i^y(t) - \tilde{e}_j^y(t)) \right) \end{aligned}$$

由引理 3 可知, 对于 $\forall t \geq T_0 + \frac{\max_i |\hat{e}_i^P(T_0) - e_i^P(T_0)|}{\alpha}$, 有 $\hat{e}_i^P(t) = e_i^P(t)$ 成立, 其中 $P = x, y, i = 1 \cdots N$ 。进而可得, 存在有限时间 T , 使得对 $\forall t \geq T$, 有:

$$\begin{aligned}\hat{e}_i^x(t) &= e_i^x(t), & \hat{e}_i^y(t) &= e_i^y(t) \\ \hat{v}_i^O(t) &= v_0(t), & \hat{\theta}_i^O(t) &= \theta_0(t) \\ \hat{a}_i^O(t) &= a_0(t), & \hat{\omega}_i^O(t) &= \omega_0(t)\end{aligned}$$

2.2 标称编队跟踪控制律设计

基于 2.1 节每个跟踪者对领航者信息的观测值, 可将协同编队跟踪问题转化为本地跟踪问题。对于每个跟踪者无人机 i , 作如下变量变换:

$$\begin{bmatrix} x_{ei} \\ y_{ei} \\ \theta_{ei} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_i^x \\ e_i^y \\ e_i^\theta \end{bmatrix} \quad (20)$$

则有

$$\begin{aligned}\dot{x}_{ei} &= v_0 \cos \theta_{ei} - v_i + (\omega_i + \delta_{\omega_i}) y_{ei} \\ \dot{y}_{ei} &= -(\omega_i + \delta_{\omega_i}) x_{ei} + v_0 \sin \theta_{ei} \\ \dot{\theta}_{ei} &= \omega_0 - \omega_i - \delta_{\omega_i}\end{aligned} \quad (21)$$

首先考虑如下基于无人机运动学模型的编队跟踪控制律:

$$\begin{aligned}v_i &= v_0 + \phi_i, & \dot{\phi}_i &= -\phi_i + \frac{\alpha_1 x_{ei}}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}} \\ & & & + \frac{k_3 v_0 \left(y_{ei} \cos \frac{\theta_{ei}}{2} - x_{ei} \sin \frac{\theta_{ei}}{2} \right)}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}} + \\ & & & (\delta_{\omega}^m + \varepsilon_{\omega}) \operatorname{sgn}(\sin \frac{\theta_{ei}}{2})\end{aligned} \quad (22)$$

其中, $\alpha_1, k_3, \varepsilon_{\omega} > 0$ 。

引理 4 (Barbalat 引理): 如果标量函数 $V(x, t)$ 有下界, $\dot{V}(x, t)$ 半负定, $\dot{V}(x, t)$ 对时间 t 是一致连续的, 那么就有 $\lim_{t \rightarrow +\infty} \dot{V}(x, t) = 0$ 。

引理 5: 对固定翼无人机集群 (式 (7) (9)), 在控制律 (22) 的作用下, 领航者-跟踪者系统可以实现编队跟踪控制, 即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [e_i^x(t), e_i^y(t), e_i^v(t), e_i^\theta(t)]^T = [0, 0, 0, 0]^T$$

证明: 取如下李雅普诺夫函数:

$$V = k_3 \left(\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2} - 1 \right) + 8 \sin^2 \frac{\theta_{ei}}{4} + \frac{k_3 \phi_i^2}{2\alpha_1} \quad (23)$$

易得 $V \geq 0$, 且其对时间的导数满足

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \frac{-k_3 v_0 [x_{ei}(1 - \cos \theta_{ei}) - y_{ei} \sin \theta_{ei}] - k_3 x_{ei} \phi_i}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}} + \\ & 2 \sin \frac{\theta_{ei}}{2} \left[\frac{-k_3 v_0 \left(y_{ei} \cos \frac{\theta_{ei}}{2} - x_{ei} \sin \frac{\theta_{ei}}{2} \right)}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}} - \right. \\ & \left. (\delta_{\omega}^m + \varepsilon_{\omega}) \operatorname{sgn}(\sin \frac{\theta_{ei}}{2}) - \delta_{\omega_i} \right] + \\ & \frac{k_3 \phi_i}{\alpha_1} \left(-\phi_i + \frac{\alpha_1 x_{ei}}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}} \right) \\ & \leq -\frac{k_3 \phi_i^2}{\alpha_1} - 2\varepsilon_{\omega} \left| \sin \frac{\theta_{ei}}{2} \right| \leq 0\end{aligned} \quad (24)$$

由引理 4 可得 $\lim_{t \rightarrow +\infty} \dot{V}(x, t) = 0$, 进而可得

$$t \rightarrow \infty \text{ 时, } \phi_i \rightarrow 0, \theta_{ei} \rightarrow 0 \quad (25)$$

由控制律 (22) 可得

$$t \rightarrow \infty \text{ 时, } v_i \rightarrow v_0 \quad (26)$$

同时, 再次对变量 ϕ 利用引理 4 可得

$$t \rightarrow \infty \text{ 时, } x_{ei} \rightarrow 0 \quad (27)$$

注意到 $v_{\min} < v_0(t) < v_{\max}$, 由式 (23) 可得

$$t \rightarrow \infty \text{ 时, } y_{ei} \rightarrow 0 \quad (28)$$

证毕。

基于所设计的线速度控制律和角速度控制律, 进一步考虑无人机动力学系统, 通过设计线加速度, 实现在有限时间内 $v_i = v_0 + \phi_i$ 。考虑滑模面:

$$s_i = v_i - v_0 - \phi_i \quad (29)$$

并提出如下线性加速度控制输入:

$$a_i = a_0 - \phi_i + \frac{\alpha_1 x_{ei}}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}} - (\delta_a^m + \varepsilon_a) \operatorname{sgn} s_i \quad (30)$$

引理 6: 当滑模面 s_i 由式 (29) 所定义、且跟踪者无人机的线加速度满足式 (30) 时, 滑模变量 s_i 在有限时间内收敛到 0, 即经过有限时间, $v_i = v_0 + \phi_i$ 成立。

证明: s_i 对时间的导数为

$$\begin{aligned}\dot{s}_i &= a_i + \delta_{a_i} - a_0 - \dot{\phi}_i \\ &= a_i + \delta_{a_i} - a_0 + \phi_i - \frac{\alpha_1 x_{ei}}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}}\end{aligned}\quad (31)$$

取李雅普诺夫函数:

$$V_{s_i} = \frac{1}{2} s_i^2 \quad (32)$$

V_{s_i} 对时间的导数为

$$\begin{aligned}\dot{V}_{s_i} &= s_i \dot{s}_i \\ &= s_i \left(a_i + \delta_{a_i} - a_0 + \phi_i - \frac{\alpha_1 x_{ei}}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}} \right) \\ &= s_i \left(a_0 - \phi_i + \frac{\alpha_1 x_{ei}}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}} - (\delta_a^m + \varepsilon_a) \operatorname{sgn} s_i + \right. \\ &\quad \left. \delta_{a_i} - a_0 + \phi_i - \frac{\alpha_1 x_{ei}}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}} \right) \\ &= s_i (\delta_{a_i} - (\delta_a^m + \varepsilon_a) \operatorname{sgn} s_i) \\ &= -\varepsilon_a |s_i| + s_i \delta_{a_i} - \delta_a^m |s_i| \\ &\leq -\varepsilon_a |s_i| < 0, \quad s_i \neq 0\end{aligned}\quad (33)$$

进一步可得 s_i 在有限时间内收敛到 0, 即在有限时间内, $v_i = v_0 + \phi_i$ 成立。

根据引理 5 与引理 6, 结合分布式有限时间观测器式 (14), 最终可提出标称编队跟踪控制律如下:

$$\begin{aligned}a_i &= \hat{a}_i^0 - \hat{\phi}_i + \frac{\alpha_1 \hat{x}_{ei}}{\sqrt{1+\hat{x}_{ei}^2+\hat{y}_{ei}^2}} - (\delta_a^m + \varepsilon_a) \operatorname{sgn} \hat{s}_i \\ \omega_i &= \hat{\omega}_i^0 + \frac{k_3 \hat{v}_i^0 \left(\hat{y}_{ei} \cos \frac{\hat{\theta}_{ei}}{2} - \hat{x}_{ei} \sin \frac{\hat{\theta}_{ei}}{2} \right)}{\sqrt{1+\hat{x}_{ei}^2+\hat{y}_{ei}^2}} + \\ &\quad (\delta_\omega^m + \varepsilon_\omega) \operatorname{sgn} \frac{\hat{\theta}_{ei}}{2}\end{aligned}\quad (34)$$

其中, $\hat{s}_i = v_i - \hat{v}_i^0 - \hat{\phi}_i$, $\hat{\phi}_i = -\hat{\phi}_i + \frac{\alpha_1 \hat{x}_{ei}}{\sqrt{1+\hat{x}_{ei}^2+\hat{y}_{ei}^2}}$ 。

定理 3: 若假设 1 和 2 成立, 则在标称编队跟踪控制律 (34) 作用下, 领航者-跟踪者固定翼无人机集群 (式 (7) (9)) 可以实现编队跟踪运动, 并且通过选择合适的控制律参数 $\alpha_1, k_3, \varepsilon_a, \varepsilon_\omega$, 经过有限时间后, 标称编队跟踪控制律 (34) 满足速度与输入约束 (8)。

证明: 由定理 2 可知, 分布式观测器 (14) 将在

有限时间内实现观测误差收敛。因此经过有限时间后, 控制律 (34) 退化为

$$\begin{aligned}a_i &= a_0 - \phi_i + \frac{\alpha_1 x_{ei}}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}} - (\delta_a^m + \varepsilon_a) \operatorname{sgn} s_i \\ \omega_i &= \omega_0 + \frac{k_3 v_0 \left(y_{ei} \cos \frac{\theta_{ei}}{2} - x_{ei} \sin \frac{\theta_{ei}}{2} \right)}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}} + \\ &\quad (\delta_\omega^m + \varepsilon_\omega) \operatorname{sgn} \frac{\theta_{ei}}{2}\end{aligned}\quad (35)$$

其中, $s_i = v_i - v_0 - \phi_i$, $\dot{\phi}_i = -\phi_i + \frac{\alpha_1 x_{ei}}{\sqrt{1+x_{ei}^2+y_{ei}^2}}$ 。

进而由引理 6 可知, 当滑模变量经过有限时间收敛后, 控制律 (35) 等价于控制律 (22)。然后由引理 5 可知, 固定翼无人机集群可实现编队跟踪控制。并且, 当控制律经过有限时间退化为式 (22) 时, 对于跟踪者无人机 i 有

$$\begin{aligned}v_0^{\min} - \alpha_1 &\leq v_i \leq v_0^{\max} + \alpha_1 \\ |\omega_i| &\leq |\omega_0| + |k_3 v_0| + \delta_\omega^m + \varepsilon_\omega\end{aligned}\quad (36)$$

由式 (35) 进一步可得

$$|a_i| \leq |a_0| + 2\alpha_1 + \delta_a^m + \varepsilon_a$$

由于注意到 $|a_0(t)| < a_m - \delta_a^m$, $|\omega_0(t)| < \omega_m - \delta_\omega^m$, $v_{\min} < v_0^{\min}$, $v_0^{\max} < v_{\max}$, 因此可以通过选择合适的控制律参数 $\alpha_1, k_3, \varepsilon_a, \varepsilon_\omega$, 使得跟踪者无人机满足速度约束与输入约束 (8)。

注 1: 标称编队跟踪控制律 (34) 利用符号函数项实现未知领导者输入和有界输入扰动下的鲁棒编队跟踪控制。为减小控制输入震颤, 可将符号函数替换成边界层函数, 实现近似编队跟踪控制。

3 基于高阶控制障碍函数的避障编队控制 (Obstacle-avoidance formation control based on higher-order control barrier functions)

3.1 基于高阶 CBF 的避障条件

令 $z_i = [x_i, y_i, v_i, \theta_i]^T$, $i = 1, \dots, N$ 。首先考虑固定翼无人机 i 与固定翼无人机 j 之间的避碰问题。两个固定翼无人机之间的避碰条件可以表示为

$\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\| \geq D_s$, 其中 $\Delta \mathbf{p}_{ij} = \mathbf{z}_i - \mathbf{z}_j$, D_s 表示安全距离。因此, 无人机 i 相对于无人机 j 的避碰安全集合可以表示为

$$S_{ij} = \{\mathbf{z}_i \in \mathbb{R}^4 | h_{ij} \geq 0\}$$

其中 $h_{ij} = \|\Delta \mathbf{p}_{ij}\| - D_s$ 。注意到 h_{ij} 是一个相对阶为 2 的可微函数, 因此, 需要构造合适的 HOCBF 对控制输入进行约束。

基于 h_{ij} 定义如下系列函数 ψ_l^{ij} ($l = 0, 1$):

$$\begin{aligned} \psi_0^{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j) &= h_{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j) \\ \psi_1^{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j) &= \dot{\psi}_0^{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j) + k_4 \psi_0^{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j) \end{aligned} \quad (37)$$

其中 k_4 是一个正常数。

定义如下与式 (37) 中函数对应的集合序列:

$$\begin{aligned} C_1^{ij} &= \{\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j \in \mathbb{R}^4 | \psi_0^{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j) \geq 0\} \\ C_2^{ij} &= \{\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j \in \mathbb{R}^4 | \psi_1^{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j) \geq 0\} \end{aligned} \quad (38)$$

结合式 (7) (9) (37), 有:

$$\begin{aligned} &\psi_1^{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j, t) \\ &= v_i \frac{\Delta \mathbf{p}_{ij}^T}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|} \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} - v_j \frac{\Delta \mathbf{p}_{ij}^T}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|} \begin{bmatrix} \cos \theta_j \\ \sin \theta_j \end{bmatrix} + \\ &\quad k_4 (\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\| - D_s) \\ &= \frac{v_i}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|} [(x_i - x_j) \cos \theta_i + (y_i - y_j) \sin \theta_i] - \\ &\quad \frac{v_j}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|} [(x_i - x_j) \cos \theta_j + (y_i - y_j) \sin \theta_j] + \\ &\quad k_4 (\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\| - D_s) \end{aligned}$$

定义

$$\theta_{ji}^d = \text{atan2}(y_j - y_i, x_j - x_i)$$

atan2 函数返回的是从原点到点 $(x_j - x_i, y_j - y_i)$ 的向量与 x 轴正向之间的角度。满足 $|\theta_i - \theta_{ij}^d| \leq \pi$, $|\theta_j - \theta_{ji}^d| \leq \pi$, 有

$$\psi_1^{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j, t) = v_i \cos(\theta_i - \theta_{ij}^d) + v_j \cos(\theta_j - \theta_{ji}^d) + k_4 (\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\| - D_s) \quad (39)$$

为了保证 HOCBF 条件 (5) 在固定翼无人机最小速度和输入约束下的可行性, 考虑 $\psi_1^{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j, t) \geq 0$ 成立的一个充分条件:

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_1^{ij} &= v_i(1 - |\theta_i - \theta_{ij}^d|) + v_j(1 - |\theta_j - \theta_{ji}^d|) + \\ &\quad k_4 (\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\| - D_s) \geq 0 \end{aligned}$$

其中用到了如下事实:

$$\cos x \geq 1 - |x| \quad (|x| \leq \pi)$$

然后, 考虑 HOCBF 条件:

$$\psi_2^{ij}(\mathbf{z}_i, \mathbf{z}_j, t) = \dot{\psi}_1^{ij} + k_5 \psi_1^{ij} \geq 0$$

将式 (39) 代入, 上述条件可写为

$$\begin{aligned} &(a_i + \delta_{a_i})(1 - |\theta_i - \theta_{ij}^d|) - \\ &\quad v_i \text{sgn}(\theta_i - \theta_{ij}^d)(\omega_i + \delta_{\omega_i} - \dot{\theta}_{ij}^d) + \\ &\quad (a_j + \delta_{a_j})(1 - |\theta_j - \theta_{ji}^d|) - \\ &\quad v_j \text{sgn}(\theta_j - \theta_{ji}^d)(\omega_j + \delta_{\omega_j} - \dot{\theta}_{ji}^d) + \\ &\quad k_4 v_i \frac{\Delta \mathbf{p}_{ij}^T}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|} \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} - k_4 v_j \frac{\Delta \mathbf{p}_{ij}^T}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|} \begin{bmatrix} \cos \theta_j \\ \sin \theta_j \end{bmatrix} + \\ &\quad k_5 v_i(1 - |\theta_i - \theta_{ij}^d|) + k_5 v_j(1 - |\theta_j - \theta_{ji}^d|) + \\ &\quad k_4 k_5 (\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\| - D_s) \geq 0 \end{aligned} \quad (40)$$

其中,

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{ij}^d &= \frac{(\dot{y}_i - \dot{y}_j)(x_i - x_j) - (x_i - \dot{x}_j)(y_i - y_j)}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|^2} \\ &= \frac{v_i[(x_i - x_j) \sin \theta_i - (y_i - y_j) \cos \theta_i]}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|^2} + \\ &\quad \frac{v_j[(y_i - y_j) \cos \theta_j - (x_i - x_j) \sin \theta_j]}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|^2} \\ &= \frac{v_i}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|} \sin(\theta_i - \theta_{ij}^d) + \frac{v_j}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|} \sin(\theta_j - \theta_{ji}^d) \end{aligned}$$

同时 $\dot{\theta}_{ji}^d = \dot{\theta}_{ji}^d$ 。考虑到输入扰动上界, 式 (40) 成立的一个充分条件为

$$\begin{aligned} &a_i(1 - |\theta_i - \theta_{ij}^d|) - \delta_a^m(1 - |\theta_i - \theta_{ij}^d|) - \\ &\quad v_i \text{sgn}(\theta_i - \theta_{ij}^d)(\omega_i + \delta_{\omega_i}^m \text{sgn}(\theta_i - \theta_{ij}^d) - \dot{\theta}_{ij}^d) + \\ &\quad a_j(1 - |\theta_j - \theta_{ji}^d|) - \delta_a^m(1 - |\theta_j - \theta_{ji}^d|) - \\ &\quad v_j \text{sgn}(\theta_j - \theta_{ji}^d)(\omega_j + \delta_{\omega_j}^m \text{sgn}(\theta_j - \theta_{ji}^d) - \dot{\theta}_{ji}^d) + \\ &\quad k_4 v_i \frac{\Delta \mathbf{p}_{ij}^T}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|} \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} - k_4 v_j \frac{\Delta \mathbf{p}_{ij}^T}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|} \begin{bmatrix} \cos \theta_j \\ \sin \theta_j \end{bmatrix} + \\ &\quad k_5 v_i(1 - |\theta_i - \theta_{ij}^d|) + k_5 v_j(1 - |\theta_j - \theta_{ji}^d|) + \\ &\quad k_4 k_5 (\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\| - D_s) \geq 0 \end{aligned} \quad (41)$$

易得在 $k_4 + \frac{v_{\max} - v_{\min}}{D} + \delta_{\omega}^m + \frac{2(1+\pi)\delta_a^m}{v_i} < \omega_m$, $\delta_a^m < a_m$ 的条件下, 总存在如下可行控制输入:

$$\begin{aligned} a_i &= -\delta_a^m \operatorname{sgn}(v_i - \frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}) \\ \omega_i &= -\left(k_4 + \frac{v_{\max} - v_{\min}}{D_s} + \delta_{\omega}^m + \frac{2(1+\pi)\delta_a^m}{v_{\min}}\right) \cdot \\ &\quad \operatorname{sgn}(\theta_i - \theta_{ij}^d) \\ a_j &= -\delta_a^m \operatorname{sgn}(v_j - \frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}) \\ \omega_j &= -\left(k_4 + \frac{v_{\max} - v_{\min}}{D_s} + \delta_{\omega}^m + \frac{2(1+\pi)\delta_a^m}{v_{\min}}\right) \cdot \\ &\quad \operatorname{sgn}(\theta_j - \theta_{ji}^d) \end{aligned}$$

使得式 (41) 成立。令

$$\begin{aligned} c_{ij} &= v_i \operatorname{sgn}(\theta_i - \theta_{ij}^d) \dot{\theta}_{ij}^d - \delta_a^m (1 - |\theta_i - \theta_{ij}^d|) - \\ &\quad \delta_{\omega}^m v_i + k_4 v_i \frac{\Delta \mathbf{p}_{ij}^T}{\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\|} \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} + \\ &\quad \frac{k_5}{2} v_i (1 - |\theta_i - \theta_{ij}^d|) + \frac{k_5}{2} v_j (1 - |\theta_j - \theta_{ji}^d|) + \\ &\quad \frac{k_4 k_5}{2} (\|\Delta \mathbf{p}_{ij}\| - D_s) \\ \mathbf{E}_{ij} &= [-1 + |\theta_i - \theta_{ij}^d|, v_i \operatorname{sgn}(\theta_i - \theta_{ij}^d)] \\ \mathbf{u}_i &= [a_i, \omega_i]^T \end{aligned}$$

则条件 (41) 可以被分配到固定翼无人机 i 与固定翼无人机 j , 表示为

$$\mathbf{E}_{ij} \mathbf{u}_i \leq c_{ij}, \quad \mathbf{E}_{ji} \mathbf{u}_j \leq c_{ji}$$

注意到, 对于满足条件

$$\begin{aligned} \|\Delta \mathbf{p}_{ij}\| &> D_s + \frac{2(\delta_a^m + a_m)(\pi - 1)}{k_4 k_5} + \\ &\quad \frac{2v_{\max} \left(\omega_m + \delta_{\omega}^m + \frac{v_{\max} - v_{\min}}{D_s} \right)}{k_4 k_5} + \\ &\quad \frac{2[k_4 + k_5(\pi - 1)]v_{\max}}{k_4 k_5} \end{aligned}$$

的无人机 j , 式 (41) 自然成立。因此, 每个无人机 i 可只考虑与周围有限距离内属于邻居集合 N_i^c 的无人机构建避碰约束条件。

接下来考虑固定翼无人机 i 与障碍物之间的避障条件。固定翼无人机 i 与静态障碍物 O_l 之间的避障条件可表示为 $\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\| \geq D_{sl}$, 其中 $\Delta \mathbf{p}_{iO_l}^T = [x_i - x_{O_l}, y_i - y_{O_l}]$,

$l = 1, 2, \dots, N_o, N_o$ (N_o 表示静态障碍物的数量), D_{sl} 表示安全距离。类似地, 固定翼无人机 i 的避碰安全集合可以表示为

$$S_{iO_l} = \{\mathbf{z}_i \in \mathbb{R}^4 | h_{iO_l} \geq 0\}$$

其中 $h_{iO_l} = \|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\| - D_{sl}$ 。同样, h_{iO_l} 是一个相对阶为 2 的可微函数。构造如下系列函数 $\psi_k^{iO_l}$ ($k = 0, 1$):

$$\begin{aligned} \psi_0^{iO_l}(\mathbf{z}_i) &= h_{iO_l}(\mathbf{z}_i) \\ \psi_1^{iO_l}(\mathbf{z}_i) &= \dot{\psi}_0^{iO_l}(\mathbf{z}_i) + k_4 \psi_0^{iO_l}(\mathbf{z}_i) \end{aligned} \quad (42)$$

定义与式 (42) 中的函数对应的如下集合序列:

$$\begin{aligned} C_1^{iO_l} &= \{\mathbf{z}_i \in \mathbb{R}^4 | \psi_0^{iO_l}(\mathbf{z}_i) \geq 0\} \\ C_2^{iO_l} &= \{\mathbf{z}_i \in \mathbb{R}^4 | \psi_1^{iO_l}(\mathbf{z}_i) \geq 0\} \end{aligned} \quad (43)$$

结合式 (7) (9) (42), 有:

$$\begin{aligned} \psi_1^{iO_l}(\mathbf{z}_i, t) &= v_i \frac{\Delta \mathbf{p}_{iO_l}^T}{\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\|} \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} + k_4 (\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\| - D_{sl}) \\ &= \frac{v_i}{\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\|} [(x_i - x_{O_l}) \cos \theta_i + \\ &\quad (y_i - y_{O_l}) \sin \theta_i] + k_4 (\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\| - D_{sl}) \end{aligned}$$

定义 $\theta_{iO_l}^d = \operatorname{atan2}(y_i - y_{O_l}, x_i - x_{O_l})$, 满足 $|\theta_i - \theta_{iO_l}^d| \leq \pi$ 。那么, 有:

$$\psi_1^{iO_l}(\mathbf{z}_i, t) = v_i \cos(\theta_i - \theta_{iO_l}^d) + k_4 (\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\| - D_{sl})$$

为了保证在固定翼无人机最小速度和有界控制输入约束下 HOCBF 条件 (5) 的可行性, 考虑使得 $\psi_1^{iO_l}(\mathbf{z}_i, t) \geq 0$ 成立的一个充分条件:

$$\tilde{\psi}_1^{iO_l} = v_i (1 - |\theta_i - \theta_{iO_l}^d|) + k_4 (\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\| - D_{sl}) \geq 0$$

进而, 可得到 HOCBF 条件:

$$\psi_2^{iO_l}(\mathbf{z}_i, t) = \dot{\tilde{\psi}}_1^{iO_l} + k_5 \tilde{\psi}_1^{iO_l} \geq 0$$

上述条件可进一步写为

$$\begin{aligned} &(a_i + \delta_{a_i})(1 - |\theta_i - \theta_{iO_l}^d|) - \\ &\quad v_i \operatorname{sgn}(\theta_i - \theta_{iO_l}^d)(\omega_i + \delta_{\omega_i} - \dot{\theta}_{iO_l}^d) + \\ &\quad k_4 v_i \frac{\Delta \mathbf{p}_{iO_l}^T}{\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\|} \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} + k_5 v_i (1 - |\theta_i - \theta_{iO_l}^d|) + \\ &\quad k_4 k_5 (\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\| - D_{sl}) \geq 0 \end{aligned} \quad (44)$$

其中,

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_{iO_l}^d &= \frac{v_i \sin \theta_i (x_i - x_{O_l})}{\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\|^2} - \frac{v_i \cos \theta_i (y_i - y_{O_l})}{\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\|^2} \\ &= \frac{v_i}{\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\|} \sin(\theta_i - \theta_{iO_l}^d)\end{aligned}$$

考虑到输入扰动上界, 式 (44) 成立的一个充分条件为

$$\begin{aligned}&a_i(1 - |\theta_i - \theta_{iO_l}^d|) - \delta_a^m(1 - |\theta_i - \theta_{iO_l}^d|) - \\ &v_i \operatorname{sgn}(\theta_i - \theta_{iO_l}^d)(\omega_i + \delta_\omega^m \operatorname{sgn}(\theta_i - \theta_{iO_l}^d) - \dot{\theta}_{iO_l}^d) + \\ &k_4 v_i \frac{\Delta \mathbf{p}_{iO_l}^T}{\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\|} \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} + k_5 v_i(1 - |\theta_i - \theta_{iO_l}^d|) + \\ &k_4 k_5 (\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\| - D_s) \geq 0\end{aligned}$$

在 $k_4 + \delta_\omega^m + \frac{2(1+\pi)\delta_a^m}{v_{\min}} < \omega_m$ 成立的条件下, 总存在如下可行控制输入:

$$\begin{aligned}a_i &= -\delta_a^m \operatorname{sgn}(v_i - \frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}) \\ \omega_i &= -\left(k_4 + \delta_\omega^m + \frac{2(1+\pi)\delta_a^m}{v_{\min}}\right) \operatorname{sgn}(\theta_i - \theta_{iO_l}^d)\end{aligned}$$

使得条件 (45) 成立。

令:

$$\begin{aligned}c_{iO_l} &= v_i \operatorname{sgn}(\theta_i - \theta_{iO_l}^d) \dot{\theta}_{iO_l}^d - \delta_a^m(1 - |\theta_i - \theta_{iO_l}^d|) - \\ &\delta_\omega^m v_i + k_4 v_i \frac{\Delta \mathbf{p}_{iO_l}^T}{\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\|} \begin{bmatrix} \cos \theta_i \\ \sin \theta_i \end{bmatrix} + \\ &k_5 v_i(1 - |\theta_i - \theta_{iO_l}^d|) + k_4 k_5 (\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\| - D_{sl}) \\ \mathbf{E}_{iO_l} &= [-1 + |\theta_i - \theta_{iO_l}^d|, v_i \operatorname{sgn}(\theta_i - \theta_{iO_l}^d)] \\ \mathbf{u}_i &= [a_i, \omega_i]^T\end{aligned}$$

则条件 (45) 可以表示为

$$\mathbf{E}_{iO_l} \mathbf{u}_i \leq c_{iO_l}$$

类似的, 对于满足条件:

$$\begin{aligned}\|\Delta \mathbf{p}_{iO_l}\| &> D_s + \frac{(\delta_a^m + a_m)(\pi - 1)}{k_4 k_5} + \frac{v_{\max}(\omega_m + \delta_\omega^m)}{k_4 k_5} + \\ &\frac{[k_4 + k_5(\pi - 1)]v_{\max}}{k_4 k_5}\end{aligned}$$

的障碍物 O_l , 式 (45) 自然成立。因此, 每个无人机 i 可只考虑与周围有限距离内障碍物集合 N_i^O 内的障碍

物构建避碰约束条件。

3.2 基于鲁棒 HOCBF 的避碰编队跟踪控制

为实现鲁棒避碰编队跟踪控制, 对于每个跟踪者无人机, 利用上述与其他无人机及环境障碍物间的避碰输入约束条件, 在保证避碰前提下尽可能少地修改标称编队跟踪控制律, 来实现避碰安全编队跟踪控制。由于注意到基于 HOCBF 的避碰条件 (41) (45) 为关于控制输入的线性约束, 因此可以构造如下 OP (二次规划) 问题, 使得实际控制输入与标称编队跟踪控制在二范数意义下误差最小:

$$\mathbf{u}_i^* = \arg \min_{\mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^2} J(\mathbf{u}_i) = \|\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_{i,\text{nom}}\|$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{E}_{ij} \mathbf{u}_i \leq c_{ij}, \quad j \in N_i^c \quad (46a)$$

$$\mathbf{E}_{iO_l} \mathbf{u}_i \leq c_{iO_l}, \quad O_l \in N_i^O \quad (46b)$$

$$\begin{aligned}&[v_i - \frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}, 0] \mathbf{u}_i \\ &\leq -\left|v_i - \frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right| \delta_a^m + \frac{k_6}{2} h_i\end{aligned} \quad (46c)$$

$$|a_i| \leq a_m \quad (46d)$$

$$|\omega_i| \leq \omega_m \quad (46e)$$

其中, $k_6 > 0$, $\mathbf{u}_i = [a_i, \omega_i]^T$, $i = 1, \dots, N$, $\mathbf{u}_{i,\text{nom}}$ 由式 (34) 给出。式 (46c) 基于控制障碍函数 $h_i = \left(\frac{v_{\max} - v_{\min}}{2}\right)^2 - \left(v_i - \frac{v_{\max} + v_{\min}}{2}\right)^2$, 保证了在满足初始条件 $v_{\min} \leq v_i(0) \leq v_{\max}$ 的情况下, 固定翼无人机在运动过程中始终满足运动速度约束。

记 $C_i = (\bigcap_{j=0}^{N_i^c} C_{ij}) \cap (\bigcap_{l=1}^{N_i^O} C_{iO_l})$, 其中 $C_{ij} = C_1^{ij} \cap C_2^{ij}$, $C_{iO_l} = C_1^{iO_l} \cap C_2^{iO_l}$ 。可得出定理 4。

定理 4: 给定带有速度和输入约束的多固定翼无人机系统 (式 (7) (9)), 对于无人机 $i = 1, \dots, N$, 如果初始状态满足 $\mathbf{z}_i(0) \in C_i$ 且 $v_{\min} \leq v_i(0) \leq v_{\max}$, 并且控制输入始终由 OP 问题 (46) 给出, 则多固定翼无人机系统在运动过程中不会发生碰撞, 同时始终满足速度与输入约束 (8)。

证明: 由于在 $\mathbf{z}_i(0) \in C_i$ 和所有固定翼无人机的控

制输入满足分布式 HOCBF 约束 (46a) 和 (46b) 的条件下, $C_i (i = 1, \dots, N)$ 为前向不变集, 因此, 多固定翼无人机系统将在运动过程中始终保持无碰撞。此外, 由于控制输入满足约束 (46c) ~ (46e), 因此无人机运动过程中始终满足速度与输入约束 (8)。证毕。

注 2: 若每个无人机运动过程中每个时刻只需避开一架其他无人机或一个障碍物, 即条件 (46a) (46b) 中每个时刻仅包含一个约束, 则由 3.1 节分析可知, 当前时刻一定存在可行控制输入满足避障约束条件及速度和输入约束条件, 即 QP 问题 (46) 一定有解。当在某一时刻, 固定翼无人机 i 需同时与多个对象构建 HOCBF 避障约束条件, 且这些避障约束条件发生冲突时, 无人机 i 对应的 QP 问题 (46) 可能无解。在这种情况下, 无人机 i 将采取减速和保持航向动作, 以最大可能地避免碰撞。随着无人机运动位置的改变, 若 QP 问题 (46) 在下一时刻恢复有解, 则多无人机系统可继续进行避障编队跟踪控制^[32]。

图 1 给出了在本文所设计的分布式避障编队跟踪控制策略下, 每架无人机的避障编队控制框架。

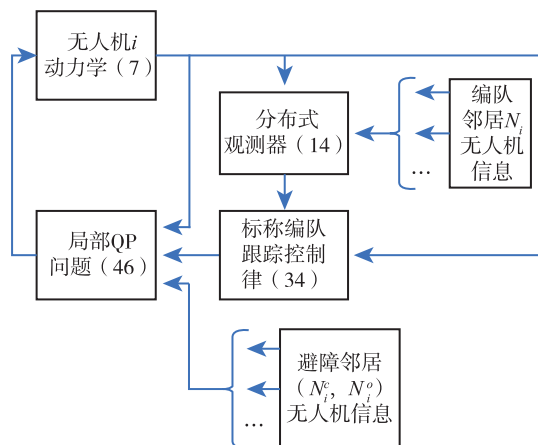


图 1 基于 CBF 的分布式避障编队跟踪控制框架

4 仿真实验 (Simulation experiments)

通过仿真实验验证所提出的鲁棒避障安全编队跟踪控制律的有效性。仿真实验在便携式电脑上基于 Matlab 软件运行。计算机操作系统为 Windows11, 64 位,

处理器为 Intel i7-13700H, 2.40GHz, 内存为 16GB。

考虑由 1 个领航者和 5 个跟随者构成的固定翼无人机集群。假设所有的无人机在同一水平高度飞行, 且无人机间通信图对应的邻接矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

跟踪者和领航者间通信关系对应的矩阵 $\mathbf{A}_0 = \text{diag}(1, 1, 0, 0, 0)$, 无人机的输入约束为

$$|a_i| \leq 6 \text{ m/s}^2, \quad |\omega_i| \leq 3 \text{ rad/s}$$

即, $a_m = 6 \text{ m/s}^2$, $\omega_m = 3 \text{ rad/s}$ 。线速度约束为

$$0.5 \text{ m/s} \leq v_i \leq 3 \text{ m/s}$$

即 $v_{\min}=0.5\text{m/s}$, $v_{\max}=3\text{m/s}$ 。理想编队队形由向量 $\mathbf{d}_0=[0,0]^T$, $\mathbf{d}_1=[6,-6]^T$, $\mathbf{d}_2=[6,6]^T$, $\mathbf{d}_3=[12,12]^T$, $\mathbf{d}_4=[12,0]^T$, $\mathbf{d}_5=[12,-12]^T$ 给出。考虑基于 QP 的避障安全编队跟踪控制律 (46), 标称控制律由式 (34) 给出。基于注 1, 利用边界层函数替换符号函数以减小控制律 (34) 可能导致的震颤。

由定理 1, 观测器参数取为 $\alpha=4$, $\beta_1=2$, $\beta_2=2$ 。假设输入扰动为 $\delta_{a_i}=0.5\sin t$, $\delta_{\omega_i}=0.1\cos t$, 其中 $i=1,2,\dots,5$, 则扰动上界可取为 $\delta_a^m=0.5$, $\delta_\omega^m=0.5$ 。假设每个固定翼无人机占据面积近似为半径 2m 的圆形, 空间中障碍区域近似为半径为 3m 的圆形。每个固定翼无人机的初始线速度设置为 $v_{\min}=1.2\text{m/s}$, 方向角设为 $\theta=0\text{rad}$, 初始位置及障碍区域分布如图 2 所示。

图 3 展示了在基于鲁棒 HOCBF 的避障编队跟踪控制律下多固定翼无人机的运行轨迹。从图中可以看出固定翼无人机集群成功完成了编队跟踪控制任务, 同时能够在编队过程中实现障碍物避碰。

图 4 给出了在基于鲁棒 HOCBF 的避障编队跟踪控制律下, 每个固定翼无人机的速度和控制输入变化

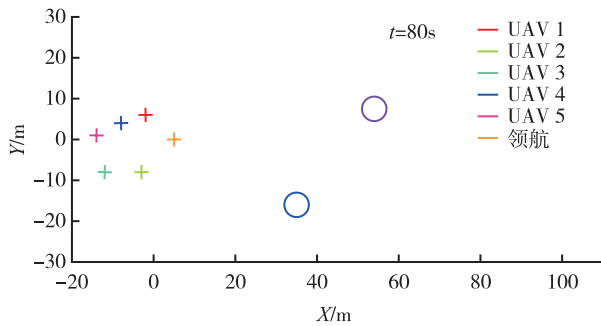


图 2 固定翼无人机集群仿真环境和初始状态

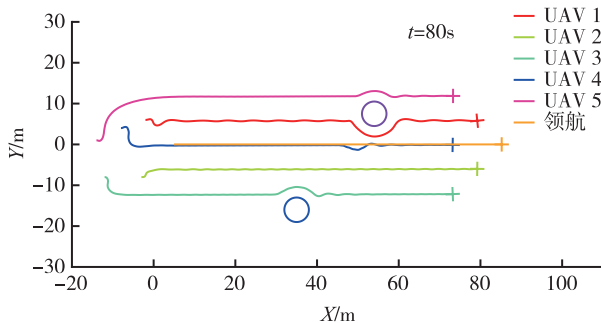


图 3 基于所提出的鲁棒 HOCBF 避障编队跟踪控制律实现编队跟踪控制的结果

曲线。可以看出，编队跟踪控制过程中所有固定翼无人机均满足速度与控制输入约束。

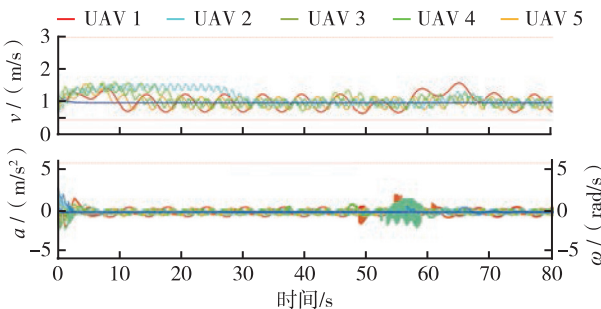


图 4 在所提出的基于鲁棒 HOCBF 的避障编队跟踪控制律下固定翼无人机的速度和控制输入（线加速度和角速度）

图 5 展示了在所设计的基于鲁棒 HOCBF 的避障编队跟踪控制律下，每个固定翼无人机在运动过程中与其最近距离对象之间的最小间隔。从图中可以看出，每一个固定翼无人机在运动过程中都成功实现与其他无人机以及环境障碍间的避碰。

图 6 展示了在分布式观测器（14）下相关观测变量与真实值的观测误差收敛情况，可以看出所有观测误差都在有限时间内收敛到 0。

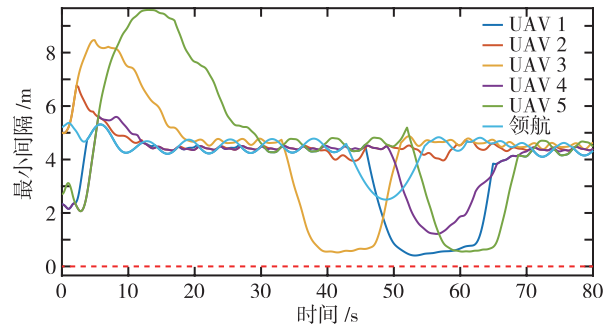


图 5 在所提出的基于鲁棒 HOCBF 的避障编队跟踪控制律下每个固定翼无人机与其最近距离对象之间的最小间隔

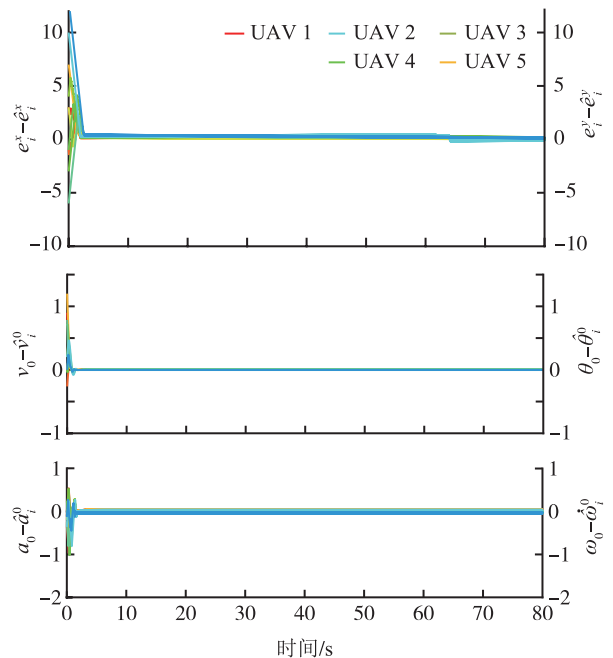


图 6 观测器收敛情况

此外，将本文方法与文 [33] 中的不考虑外界扰动的基于 HOCBF 的避障控制方法进行对比，相关仿真实验结果如图 7、8 所示。可以看出，由于缺乏对于外界输入扰动的鲁棒性，文 [33] 中的避障编队跟踪控制律无法保证固定翼无人机运动过程中的安全性，固定翼无人机在编队运动过程中与环境障碍物产生了碰撞。

同时，本文还与文 [34] 中基于势函数方法的编队跟踪控制律进行了比较。从图 9、10 可以看出，虽然对比方法可以保证智能体不发生碰撞，但是当智能体接近障碍物时会产生较严重的震颤现象，这是由于该方法仅利用排斥力进行避障，缺乏预测性。另外，图 11 说明无人机在避障运动过程中，控制输入超出

输入约束范围, 不满足输入饱和约束。

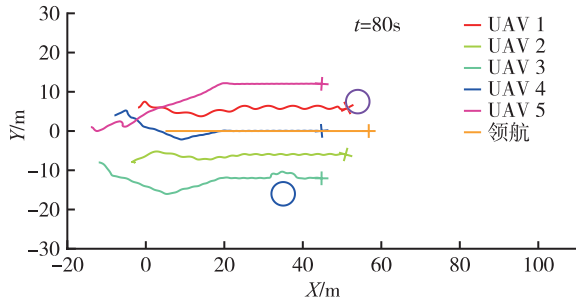


图7 不考虑外界扰动的基于 HOCBF 的避障编队跟踪控制律下多固定翼无人机的编队跟踪控制结果

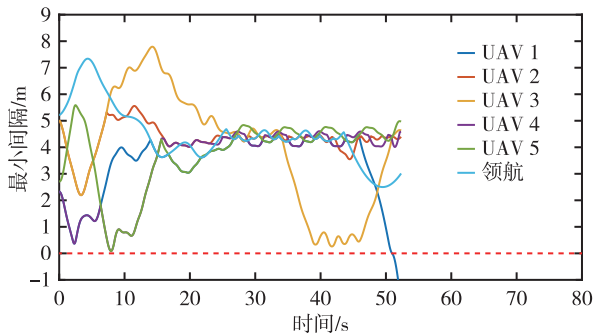


图8 不考虑外界扰动的基于 HOCBF 的避障编队跟踪控制律下各固定翼无人机与其最近距离对象之间的最小间隔

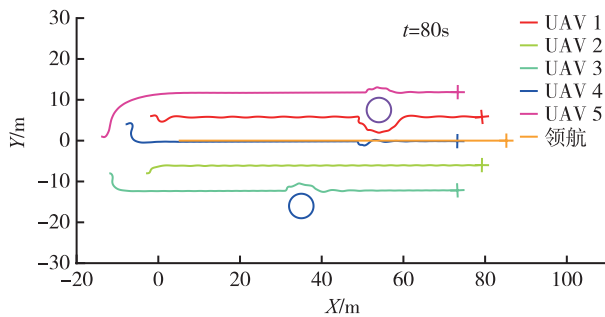


图9 基于势函数的避障编队跟踪控制律下多固定翼无人机的编队跟踪控制结果

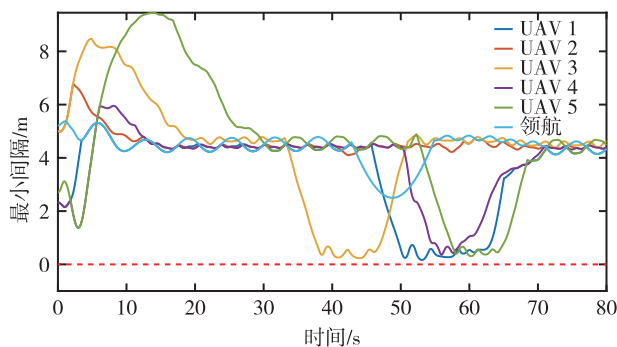


图10 基于势函数的避障编队跟踪控制律下各固定翼无人机与其最近距离对象之间的最小间隔

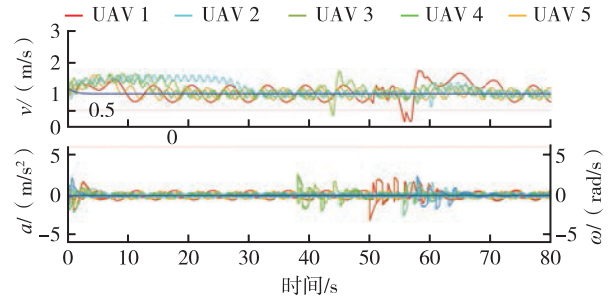


图11 基于势函数的避障编队跟踪控制律下固定翼无人机的速度和控制输入(线加速度和角速度)

模型预测控制(MPC)是另一类当前广泛使用的多智能体系统避障安全编队控制方法。图12~14为将本文方法与文[35]中的基于分布式MPC的鲁棒避碰方法的仿真比较结果。可以看出,文[35]方法可以保证固定翼无人机在运动过程中满足输入饱和约束与速度约束,并可防止无人机与无人机之间、无人机与障碍物之间发生碰撞。然而,文[35]方法的仿真计算时间为5219.0 s,远远超过本文方法的47.6 s,体现出该方法计算量大、实时性较差,难以应用于计算能力受限的无人机集群系统。

表1总结了仿真实验中各类编队跟踪控制方法的实验结果。从表1可以看出,本文所提出的基于鲁棒HOCBF的避障编队跟踪控制律能够保证在多固定翼无人机编队跟踪控制过程中无人机与无人机之间、无人机与障碍物之间不发生碰撞,同时可以保证每一个无人机始终都满足速度约束和输入饱和约束,并且具有较小的计算量,体现出较大的实际应用潜力。

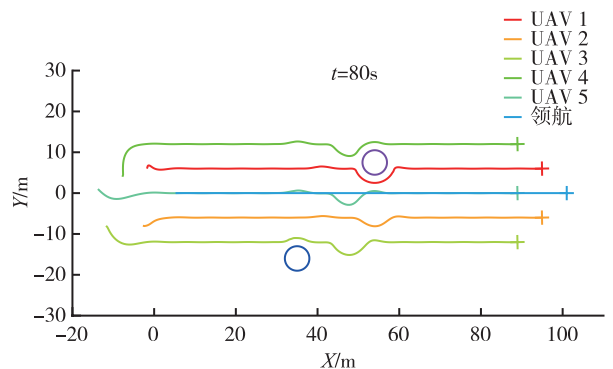


图12 基于分布式MPC的鲁棒避障编队跟踪控制律下多固定翼无人机的编队跟踪控制结果

表 1 不同控制律性能比较

控制律	能否避障	是否满足速度约束和输入饱和约束	计算时间 /s
基于鲁棒 HOCBF 的避碰编队跟踪控制律（本文）	是	是	47.6
基于不考虑扰动的 HOCBF 的避碰编队跟踪控制律	否		
基于势函数的避碰编队跟踪控制律	是	否	72.1
基于 MPC 的避碰编队跟踪控制律	是	是	5219.0

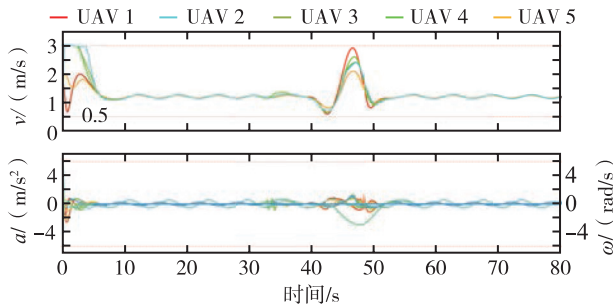


图 13 基于分布式 MPC 的鲁棒避障编队跟踪控制律下固定翼无人机的速度和控制输入（线加速度和角速度）

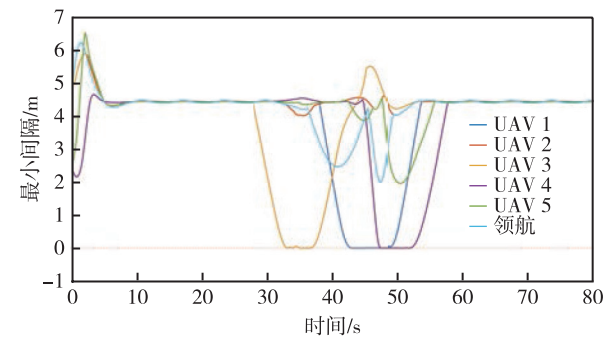


图 14 基于分布式 MPC 的鲁棒避障编队跟踪控制律^[35]下各固定翼无人机与其最近距离对象之间的最小间隔

5 结论

研究了同时带有输入和最小运动速度约束的多固定翼无人机鲁棒避碰安全编队控制问题。克服了只适用于线性多智能体及未考虑动力学约束的非线性多智能体的传统编队控制方法的局限性，进一步发展了协同编队控制理论。基于滑模控制思想设计了一种考虑不确定性扰动的基于观测器的标称编队跟踪控制律，

实现了在速度和输入约束下的标称编队跟踪控制。然后基于高阶控制障碍函数方法构造了鲁棒避障约束条件，并基于该约束条件为每个跟踪者无人机构造了一个局部 OP 问题，求解满足避障安全约束的编队跟踪控制律，实现了输入及速度约束下的多固定翼无人机系统鲁棒避障安全编队跟踪控制。仿真实验表明，相比于不考虑外界扰动的方法，所提出的方法能够有效地处理外界输入扰动，降低其对系统的影响；相比于势函数等方法，所提出的方法能够显式处理动力学约束，更好地满足无人机的速度约束；相比于分布式模型预测控制方法，所提出的方法大大缩短了计算时间。在后续工作中，将会基于本文提出的方法进行相关实验验证。○

来源：机器人

作者简介

付俊杰（1989—），男，博士，副教授。研究领域：分布式协同控制，协同优化与决策，多智能体强化学习。

温广辉（1983—），男，博士，教授。研究领域：分布式控制理论与控制工程，网络群体智能，分布式优化、智能决策与博弈。

16 名 CAA 会员晋级为学会高级会员

2024 中国自动化学会第四季度晋级高级会员 16 位，祝贺晋级的各位高级会员！

2024 年第四季度高级会员名单
(以姓名首字母排序)

序号	真实姓名	工作单位	技术职称	研究领域
1	毕 敬	北京工业大学	教授	计算机科学，数据科学与大数据计算
2	陈昌鑫	中北大学	副教授	自动化，自动化检测技术与装置
3	范保杰	南京邮电大学	教授	模式识别与智能系统
4	付俊杰	东南大学	副教授	自动化，控制理论与技术
5	李永福	重庆邮电大学	教授	自动化，控制系统与应用
6	李自成	武汉工程大学	教授	自动化，控制系统与应用
7	彭 鑫	华东理工大学	研究员	自动化，控制理论与技术
8	汪六三	中国科学院合肥物质科学研究院	副研究员	光学和光电子学，光学信息获取、显示与处理
9	王 珠	中国石油大学（北京）	副教授	系统辨识与智能控制
10	徐礼胜	东北大学	教授	自动化，控制系统与应用
11	杨 震	北京工业大学	教授	计算机科学，网络与系统安全
12	殷国栋	东南大学	教授	自动化，控制系统与应用
13	张海涛	华中科技大学	教授	控制科学与工程
14	张文安	浙江工业大学	教授	自动化
15	赵进慧	浙江水利水电学院	教授	电子学与信息系统，探测与成像
16	周华成	中南大学	教授	自动化，控制理论与技术

学会秘书处 供稿

CAA 会员权益大解析：想你所想，享你所想

1. 中国自动化学会简介

中国自动化学会是我国最早成立的国家一级学术群众团体之一，是发展我国自动化、信息与智能科技事业的重要社会力量，伴随着自动化科学技术的蓬勃发展，中国自动化学会的组织机构也越来越专业化、科学化、规范化。学会现有 8 万余名个人会员，300 余家团体会员，67 个专

业委员会，12 个工作委员会，30 个省、市级学会，15 个学生分会，10 个所属期刊，61 家科普教育基地，覆盖了我国自动化、信息与智能科技领域的各个层面。

中国自动化学会荣获中国科协党建工作先进学会、全国科协系统先进集体、全国学会期刊出版工作优秀单位、优秀扶贫学会等多项荣誉，多次入选中国科协学会能力提升与改革工程支持学

会。2021 年，被民政部授予“全国先进社会组织”称号。

2.CAA 会员权益

A 个人认证

中国自动化学会专属唯一会员编号

中国自动化学会专属电子版会员证

B 成长激励

个人会员成长机制：预备会

CAA 会员专享

类型	CAA 会员专享	周期	免费 / 优惠
会议 / 活动	中国自动化大会	每年一届	享受至少 20% 注册费优惠
	国家新质生产力与智能产业发展会议	每年一届	享受至少 20% 注册费优惠
	国家智能车发展论坛	每年一届	享受至少 20% 注册费优惠
	中国自动化与人工智能教育大会	每年一届	享受至少 20% 注册费优惠
	中国认知计算与混合智能学术大会	每年一届	享受至少 20% 注册费优惠
	国家机器人发展论坛	每年一届	享受至少 20% 注册费优惠
	国家工业软件大会	每年一届	享受至少 20% 注册费优惠
	CAA 各专委会学术会议	逾两百场	可免费 / 部分优惠参与
	CAA 企·话沙龙	举办多期	免费报名参加
专家讲座	“CAA 会士面对面”系列讲座	每月一期	免费参加
	CAA 云讲座	每月多期	免费参加
	CAA 科普大讲堂	每月多期	免费参加
	“我和优博有个约会”系列讲座	每月一期	免费参加
	钱学森国际杰出科学家系列讲座	举办多期	免费参加
	CAA 青年菁英系列论坛	举办多期	免费参加
刊物	《中国自动化学会通讯》	月刊	免费获得纸质刊 / 电子刊
	《自动化学报》	月刊	免费获得纸质刊 / 电子刊
	《自动化学报（英文版）》	月刊	免费获得纸质刊 / 电子刊
	《信息与控制》	双月刊	免费获得纸质刊 / 电子刊
	《机器人》	双月刊	免费获得纸质刊 / 电子刊

续表

类型	CAA 会员专享	周期	免费 / 优惠
刊物	《模式识别与人工智能》	月刊	免费获得纸质刊 / 电子刊
	《电气传动》	月刊	免费获得纸质刊 / 电子刊
	《自动化博览》	月刊	免费获得纸质刊 / 电子刊
	《智能科学与技术学报》	双月刊	免费获得电子刊
	The International Journal of Intelligent Control and Systems	季刊	免费获得电子刊
在线资源	CAA 数字图书馆	实时	免费浏览
	CAA 云学院	实时	免费浏览
特色会员活动	每年举办十余次特色会员活动	每年多期	免费参加
赛事	全国青少年劳动技能与智能设计大赛	每年一次	免收一年会费
	中国机器人大赛暨 ROBOCUP 机器人世界杯中国赛	每年一次	免收一年会费
	全国大学生智能汽车竞赛	每年一次	免收一年会费
	全国智能制造虚拟仿真大赛	每年一次	免收一年会费
	汇川杯”全国智能自动化创新大赛	每年一次	免收一年会费
	ABB 杯智能技术创新大赛	每年一次	免收一年会费
	“信捷杯”全国大学生智能制造创新大赛	每年一次	免收一年会费
	“天翼云息壤杯”高校 AI 大赛	每年一次	免收一年会费
	中国工业智能挑战赛	每年一次	免收一年会费
继续教育	助力考研、一站式研究生招生平台	实时	免费浏览
工作推荐	热门企业、高校、研究机构岗位推荐	实时	免费浏览
志愿者工作机会	每年提供不低于 5000 小时的志愿者工作岗位，分布于学会秘书处、各分支机构、专委会，近千场线上、线下活动。		

员→普通会员→高级会员→会士

中国自动化学会专属入会认证
终身会员机制上线

会员积分制度上线，CAA 见证您的每一次成长

推荐好友入会得积分

C 专业成长

选择加入 67 个技术方向专业委员会，12 个工作委员会，15 个学生分会

会员优惠参会，与一线大咖面对面交流

智能车、机器人等各项大赛等你来战

免费在线阅读中国自动化学会通讯、不定期邮寄自动化学报中英文版等期刊

有机会免费获得《控制科学与工程学科发展报告》《自动化学科路线图》等图书

D 奖励机制

打造多层次科技奖励，完善人才培养工作路线图，打通人才培育、服务和举荐体系

E 公共服务

优先获得团体标准、科技成果评价、工程教育培训、技术咨询等系列服务

F 知识获取

数字图书馆全站资源免费获得（2000+ 视频资源……）

优惠或免费参加学会或其所属分支机构举办的学术活动

有机会申请中国自动化大会

资助参会名额

G 定向服务

CAA 会员服务小秘书在线解答您的疑问

CAA 新会员沙龙为您解疑答惑，扩宽交流圈

海外会员交流圈

预备会员可申请加入 CAA 志愿者团队、15 个学生分会，参与 CAA 成长历程

PS 额外（重磅）福利

2025 重磅推出众多学会周边产品，将不定期派发，加入学会即可有机会获得：豪华办公套装、鼠标垫、手机支架、指甲剪套装、双肩包、保温水杯……

学会秘书处 供稿

教育强国建设规划纲要（2024—2035 年）

一、总体要求

坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深入贯彻党的二十大和二十届二中、三中全会精神，全面贯彻习近平总书记关于教育的重要论述，深刻领悟“两个确立”的决定性意义，坚决做到“两个维护”，坚持教育优先发展，全面贯彻党的教育方针，坚定不移走中国特色社会主义教育发展道路，坚持社会主义办学方向，全面把握教育的政治属性、人民属性、战略属性，落实立德树人根本任务，为党育人、为国育才，全面服务中国式现代化建设，扎根中国大地办教育，加快建设高质量教育体系，培养德智体美劳全面发展的社会主义建设者和接班人，加快建设具有强大思政引领力、人才竞争力、科技支撑力、民生保障力、社会协同力、国际影响力的中国特色社会主义教育强国，为建设社会主义现代化强国、全面推进中华民族伟大复兴提供有力支撑。

工作中要做到：坚持党对教育事业的全面领导，突出促进公平、提高质量，强化战略引领、

支撑发展，深化改革创新、协同融合，坚持自主自信、胸怀天下。正确处理支撑国家战略和满足民生需求、知识学习和全面发展、培养人才和满足社会需要、规范有序和激发活力、扎根中国大地和借鉴国际经验的关系，全面构建固本铸魂的思想政治教育体系、公平优质的基础教育体系、自强卓越的高等教育体系、产教融合的职业教育体系、泛在可及的终身教育体系、创新牵引的科技支撑体系、素质精良的教师队伍体系、开放互鉴的国际合作体系，实现由大到强的系统跃升。

主要目标是：到 2027 年，教育强国建设取得重要阶段性成效。各级教育普及水平持续巩固提升，高质量教育体系初步形成，人民群众教育获得感明显提升，人才自主培养质量全面提高，拔尖创新人才不断涌现，关键领域改革取得实质性进展，教育布局结构与经济社会和人口高质量发展需求更加契合，具有全球影响力的重要教育中心建设迈上新台阶。到 2035 年，建成教育强国。党对教育事业全面领导的制度体系和工作机制系统完备，高质量教育体

系全面建成，基础教育普及水平和质量稳居世界前列，学习型社会全面形成，人民群众教育满意度显著跃升，教育服务国家战略能力显著跃升，教育现代化总体实现。

二、塑造立德树人新格局，培养担当民族复兴大任的时代新人

（一）加强和改进新时代学校思想政治教育。坚持不懈用习近平新时代中国特色社会主义思想铸魂育人，加强习近平总书记关于教育的重要论述的学理阐释。实施新时代立德树人工程，坚持思政课建设与党的创新理论武装同步推进，加快构建以习近平新时代中国特色社会主义思想为核心内容的课程教材体系，把学校思想政治教育贯穿各学科体系、教学体系、教材体系、管理体系，融入思想道德、文化知识、社会实践教育，确保广大学生始终忠于党、忠于国家、忠于人民、忠于社会主义，坚定马克思主义信仰、中国特色社会主义信念、中华民族伟大复兴信心。开好讲好“习近平新时代中国特色社会主义思想概论”课，系统完善中小学思政课程课程标准，整体优化设计

高校思政课课程方案，推进大中小学思政课一体化改革创新。打造一批“大思政课”品牌。推动理想信念教育常态化制度化，加强社会主义核心价值观教育。加强党史、新中国史、改革开放史、社会主义发展史教育。深化爱国主义、集体主义、社会主义教育，开展中国共产党人精神谱系教育。坚定文化自信，加强社会主义先进文化、革命文化和中华优秀传统文化教育，分学段有序融入思想政治教育。加强铸牢中华民族共同体意识教育。完善党政领导干部进校园开展思想政治教育长效机制，开展教育系统党员教育基本培训。增强学校基层党组织政治功能和组织功能，发挥战斗堡垒作用。

（二）加强党的创新理论体系化学理化研究阐释和成果应用。深入阐释党的创新理论科学内涵和实践要求，建强马克思主义理论学科，构建学科体系、学术体系、话语体系。全面推动党的创新理论研究成果转化为相应的学科方向和课程教材，将新时代伟大变革成功案例及其蕴含的道理学理哲理融入学校思想政治教育。

（三）拓展实践育人和网络育人空间和阵地。统筹推动价值引领、实践体验、环境营造，探索课上课下协同、校内校外一体、线上线下融合的育人机制。组织学生体验感悟新时代生动实践和伟大成就，增加实践教学比重，

充分发挥红色资源育人功能，支持学生参加红色研学之旅。推动思想政治工作和信息技术深度融合，打造网络思想政治教育特色品牌，加强青少年学生网络安全意识、文明素养、行为习惯等教育，塑造有利于青少年健康成长的网络空间和育人生态。

（四）促进学生健康成长、全面发展。深入实施素质教育，健全德智体美劳全面培养体系，加快补齐体育、美育、劳动教育短板。落实健康第一教育理念，实施学生体质强健计划，中小学生每天综合体育活动时间不低于2小时，加强校园足球建设，有效控制近视率、肥胖率。推进学校美育浸润行动。实施劳动习惯养成计划，提升学生动手实践能力、解决复杂问题能力和社会适应能力。普及心理健康教育，建立全国学生心理健康监测预警系统，分学段完善服务工作机制。加强宪法法治教育、国家安全教育、国防教育。深入实施青少年学生读书行动。

（五）打造培根铸魂、启智增慧的高质量教材。落实教材建设国家事权，体现党和国家意志。加强新时代马克思主义理论研究和建设工程重点教材建设。推进思政课教材建设。深入总结新时代伟大实践，推出“中国系列”原创教材，打造自主教材体系。开发一批基础教育科学教材，打造一批职业教育优质教材，建设一批本科和研究生

一流核心教材，遴选引进一批理工农医学科前沿优质教材。加快推进教材数字化转型。完善教材管理体制，健全国家、地方、学校、出版单位分级分类负责机制。完善教材建设相关表彰奖励制度。规范教辅材料和课外读物管理。

（六）推广普及国家通用语言文字。实施国家通用语言文字普及攻坚和质量提升行动。提高全民语言文化素养。健全语言文字规范标准体系，建设新型国家语料库。开展语言国情国力调查。加强网络空间语言文字规范引导。深入实施国家语言文化传承发展系列工程。加强与港澳台语言文化交流。

三、办强办优基础教育，夯实全面提升国民素质战略基点

（七）健全与人口变化相适应的基础教育资源统筹调配机制。深入实施基础教育扩优提质工程。探索逐步扩大免费教育范围。建立基础教育各学段学龄人口变化监测预警制度，优化中小学和幼儿园布局。提高教育公共服务质量和水平，提升普惠性、可及性、便捷性，加强近期和中长期教育资源统筹配置。建立“市县结合”的基础教育管理体制，因地制宜打通使用各学段教育资源，加强跨学段动态调整和余缺调配，扩大学龄人口净流入城镇教育资源供给。支持人口20万以上县（市、区、旗）办好一所达到标准的特殊教育学校，鼓

励有条件的地区建设十五年一贯制特殊教育学校。加强专门学校建设和专门教育工作。

（八）推动义务教育优质均衡发展和城乡一体化。加强义务教育学校标准化建设，逐步缩小城乡、区域、校际、群体差距。促进学校优秀领导人员和骨干教师区域内统筹调配、交流轮岗。有序推进小班化教学。提升寄宿制学校办学条件和管理水平，办好必要的乡村小规模学校。推动符合条件的农业转移人口随迁子女义务教育享有同迁入地户籍人口同等权利，健全留守儿童、残疾儿童关爱体系和工作机制，健全控辍保学常态化机制。持续做好国家乡村振兴重点帮扶县教育人才“组团式”帮扶工作。深入开展县域义务教育优质均衡督导评估，有序推进市域义务教育优质均衡发展。

（九）促进学前教育普及普惠和高中阶段学校多样化发展。稳步增加公办幼儿园学位供给，落实和完善普惠性民办幼儿园扶持政策。支持有条件的幼儿园招收2至3岁幼儿。统筹推进市域内高中阶段学校多样化发展，加快扩大普通高中教育资源供给。探索设立一批以科学教育为特色的普通高中，办好综合高中。深入实施县域普通高中振兴计划。

（十）统筹推进“双减”和教育教学质量提升。巩固校外培训治理成果，严控学科类培训，规

范非学科类培训。坚持依法治理，加强数字化、全流程管理。强化学校教育主阵地作用，全面提升课堂教学水平，加强对学习困难学生的辅导。压减重复性作业，减少日常考试测试频次。提高课后服务质量，丰富服务内容。加强科学教育，强化核心素养培育。

四、增强高等教育综合实力，打造战略引领力量

（十一）分类推进高校改革发展。实施高等教育综合改革试点。按照研究型、应用型、技能型等基本办学定位，区分综合性、特色化基本方向，明确各类高校发展定位，支持理工农医、人文社科、艺术体育等高校差异化发展。建立分类管理、分类评价机制，在办学条件、招生计划、学位点授权、经费投入等方面分类支持。根据不同类型高校功能定位、实际贡献、特色优势，建立资源配置激励机制，引导高校在不同领域不同赛道发挥优势、办出特色。

（十二）优化高等教育布局。统筹中央部门所属高校和地方高校发展。加大高水平研究型大学建设力度，加快推进地方高校应用型转型。支持部省合建高校加快发展，优化省部共建高校区域布局。新增高等教育资源适度向中西部地区、民族地区倾斜。完善对口支援工作机制。鼓励国外高水平理工类大学来华合作办学。

支持高校改善学生宿舍等办学条件。有序扩大优质本科教育招生规模，扩大研究生培养规模，稳步提高博士研究生占比，大力发展专业学位研究生教育。

（十三）加快建设中国特色、世界一流的大学和优势学科。围绕中国式现代化的本质要求，自主科学确定“双一流”标准，聚焦优势学科适度扩大“双一流”建设范围。完善质量、特色、贡献导向的监测评价体系，健全动态调整和多元投入机制，加大资源配置力度。建立科技发展、国家战略需求牵引的学科设置调整机制和人才培养模式。实施一流学科培优行动，推动学科融合发展，超常布局急需学科专业，加强基础学科、新兴学科、交叉学科建设，支持濒危学科和冷门学科。深化博士研究生教育改革，打造具有全球影响力的博士研究生教育，不断提升自主培养、吸引集聚高层次人才的能力。

（十四）完善拔尖创新人才发现和培养机制。着力加强创新能力培养，面向中小学生实施科学素养培育“沃土计划”；面向具有创新潜质的高中学生实施“脱颖计划”等。在战略急需和新兴领域，探索国家拔尖创新人才培养新模式。深化新工科、新医科、新农科、新文科建设，强化科技教育和人文教育协同，推进理工结合、工工贯通、医工融合、农工交叉，建强国家卓越工程师学

院、国家产教融合创新平台等，深入实施国家卓越医师人才培养计划。打造一流核心课程、教材、实践项目和师资团队。

（十五）构建中国哲学社会科学自主知识体系。聚焦中国式现代化建设重大理论和实践问题，以党的创新理论引领哲学社会科学知识创新、理论创新、方法创新，构建以各学科标识性概念、原创性理论为主干的自主知识体系。实施习近平新时代中国特色社会主义思想研究、中国特色哲学社会科学研究重大专项，加快自主知识体系构建步伐，覆盖哲学社会科学所有一级学科。完善以实践为导向的法学院校教育培养机制。推进哲学社会科学创新平台和创新团队建设，加强全国重点马克思主义学院建设，建好高校哲学社会科学实验室。

五、培育壮大国家战略科技力量，有力支撑高水平科技自立自强

（十六）实施基础学科和交叉学科突破计划。强化高水平研究型大学国家基础研究主力军和重大科技突破策源地作用，提高基础研究组织化程度，建立科技创新与人才培养相互支撑、带动学科高质量发展的有效机制。打造校企地联合创新平台，加强重大科技基础设施、科技资源库建设，打造一流科技领军人才和创新团

队，实现基础学科突破，引领学科交叉融合再创新。

（十七）促进青年科技人才成长发展。大力弘扬科学家精神，营造鼓励探索、宽容失败的良好环境。培养造就一批高水平师资和学术大师。

（十八）提高高校科技成果转化效能。依托国家大学科技园打造高校区域技术转移转化中心，加强与各类技术转移转化平台和高新园区等的协同，搭建校企联合研发、概念验证、中试熟化等平台，建强技术转移转化等专业人才队伍。打造高端成果交易会、大学生创新大赛等品牌。

（十九）建设高等研究院开辟振兴区域发展新赛道。面向中西部、东北等地区布局建设高等研究院，促进高水平高校、优势学科与重点行业和头部企业强强联合，以需求定项目、以项目定团队，构建人才培养、科学研究和技术转移为一体的产教融合科教融汇新样本。

六、加快建设现代职业教育体系，培养大国工匠、能工巧匠、高技能人才

（二十）塑造多元办学、产教融合新形态。深入推进省域现代职业教育体系新模式试点，落实地方政府统筹发展职业教育主体责任。建强市域产教联合体、行业产教融合共同体，优化与区域发展相协调、与产业布局相衔接

的职业教育布局。推动有条件地区将高等职业教育资源下沉到市县。鼓励企业举办或参与举办职业教育，推动校企在办学、育人、就业等方面深度合作。健全德技并修、工学结合育人机制，在产业一线培养更多大国工匠。

（二十一）以职普融通拓宽学生成长成才通道。支持普通中小学开展职业启蒙教育、劳动教育。推动中等职业教育与普通高中教育融合发展。加强优质中等职业学校与高等职业学校衔接培养。加强教考衔接，优化职教高考内容和形式。鼓励应用型本科学校举办职业技术学院或开设职业技术专业。稳步扩大职业本科学校数量和招生规模。

（二十二）提升职业学校关键办学能力。优化实施高水平高等职业学校和专业建设计划，建设一批办学特色鲜明的高水平职业本科学校。加快推动职业学校办学条件全面达标。实施职业教育教学关键要素改革，系统推进专业、课程、教材、教师、实习实训改革，建设集实践教学、真实生产、技术服务功能于一体的实习实训基地。

（二十三）优化技能人才成长政策环境。加大产业、财政、金融、就业等政策支持，新增教育经费加大对职业教育支持。积极推动职业学校毕业生在落户、就业、参加招录（聘）、职称评聘、晋升等方面与普通学校毕业生享受同等待遇。落实“新八级工”制度，以技

能水平和创造贡献为依据，提高生产服务一线技能人才工资水平。弘扬劳模精神、劳动精神、工匠精神，形成人人皆可成才、人人尽展其才的良好环境。

七、建设学习型社会，以教育数字化开辟发展新赛道、塑造发展新优势

（二十四）提升终身学习公共服务水平。构建以资历框架为基础、以学分银行平台、以学习成果认证为重点的终身学习制度。加强教育资源共享和公共服务平台建设，建设学习型城市、学习型社区，完善国家开放大学体系，建好国家老年大学。加强学习型社会数字基础设施建设，建好国家数字大学。完善和加强继续教育、自学考试、非学历教育等制度保障，建设人人皆学、处处能学、时时可学的学习型社会。

（二十五）实施国家教育数字化战略。坚持应用导向、治理为基，推动集成化、智能化、国际化，建强用好国家智慧教育公共服务平台，建立横纵贯通、协同服务的数字教育体系。开发新型数字教育资源。建好国家教育大数据中心，搭建教育专网和算力共享网络。推进智慧校园建设，探索数字赋能大规模因材施教、创新性教学的有效途径，主动适应学习方式变革。打造世界数字教育大会、世界数字教育联盟、全球数字教育发展

指数、数字教育权威期刊等公共产品，推动优质慕课（大型开放式网络课程）走出去。

（二十六）促进人工智能助力教育变革。面向数字经济和未来产业发展，加强课程体系改革，优化学科专业设置。制定完善师生数字素养标准，深化人工智能助推教师队伍建设。打造人工智能教育大模型。建设云端学校等。建立基于大数据和人工智能支持的教育评价和科学决策制度。加强网络安全保障，强化数据安全、人工智能算法和伦理安全。

八、建设高素质专业化教师队伍，筑牢教育强国根基

（二十七）实施教育家精神铸魂强师行动。推动教育家精神融入教师培养培训全过程，贯穿课堂教学、科学研究、社会实践各环节，构建日常浸润、项目赋能、平台支撑的教师发展良好生态。加强教师队伍思想政治工作，加强教师党组织建设，发挥党员教师先锋模范作用。坚持师德师风第一标准，健全师德师风建设长效机制，严格落实师德失范“零容忍”。

（二十八）提升教师专业素质能力。健全教师教育体系，扩大实施国家优秀中小学教师培养计划，推动高水平大学开展教师教育，提高师范教育办学质量。加强义务教育班主任队伍建设。完善高水平职业教育教师培养培训

和企业实践制度，提升“双师型”教师队伍建设水平。面向全球聘任高水平师资，加强教师培训国际交流合作，健全高校教师发展支持服务体系。强化教师全员培训，完善国家、省、市、县、校分级研训体系。

（二十九）优化教师管理和资源配置。完善国家教师资格制度和教师招聘制度。优化各级各类学校师生配比，统筹做好寄宿制学校、公办幼儿园教职工编制配备。优化中小学教师“县管校聘”管理机制。深化教师考核评价制度改革。优化教师岗位结构比例。鼓励职业学校教师与企业高技能人才按规定互聘兼职。制定高校工科教师聘用指导性标准。深入实施国家银龄教师行动计划。推动博士后成为高校教师的重要来源。

（三十）提高教师政治地位、社会地位、职业地位。保障教师课后服务工作合理待遇，优化教师工资结构，落实完善乡村教师生活补助政策。强化高中、幼儿园教师工资待遇保障，完善职业学校教师绩效工资保障制度，推进高校薪酬制度改革。维护教师职业尊严和合法权益，减轻教师非教育教学任务负担，落实社会公共服务教师优先政策，做好教师荣休工作。加大优秀教师选树表彰和宣传力度，让教师享有崇高社会声望、成为最受社会尊重的职业之一。

九、深化教育综合改革，激发教育发展活力

（三十一）深化教育评价改革。各级党委和政府要树立正确政绩观，树立科学的教育评价导向，防止和纠正“分数至上”等偏差。有序推进中考改革。加快扩大优质高中招生指标到校，开展均衡派位招生试点。深化高考综合改革，构建引导学生德智体美劳全面发展的考试或考核内容体系，重点强化学生关键能力、学科素养和思维品质考查。深化研究生学术学位和专业学位的分类选拔，加强科研创新能力和实践能力考查。推进信息技术赋能考试评价改革。深化高校人才评价改革，破除人才“帽子”制约，突出创新能力、质量、实效、贡献导向，科学认定标志性成果。完善义务教育优质均衡推进机制。引导规范民办教育发展。

（三十二）完善人才培养与经济社会发展需要适配机制。坚持总体适配、动态平衡、良性互动，完善人才需求预测预警机制，探索建立国家人才供需对接大数据平台，加强分行业分领域人才需求分析和有效对接，定期编制发布人才需求报告和人才需求目录。开展就业状况跟踪调查，强化就业状况与招生计划、人才培养联动，加强就业质量监测和评价反馈。超前布局、动态调整学科专

业，优化办学资源配置，完善学生实习实践制度。加快构建高校毕业生高质量就业服务体系，促进高校毕业生高质量充分就业。

（三十三）提升依法治教和管理水平。健全教育法律法规规章，研究编纂教育法典。完善学校管理体系，健全学校章程实施保障机制，落实学校办学自主权。坚决惩治学术不端行为及学术腐败，完善师生科研诚信和作风学风教育培训机制。完善督政、督学、评估监测教育督導體系，健全国家、省、市、县教育督导机构。构建校园智能化安防体系，完善学生欺凌和暴力行为早发现、早预防、早控制机制，加强防溺水、交通安全等教育，完善校园安全纠纷多元化解机制和安全风险社会化分担机制。

（三十四）健全教育战略性投入机制。各级政府要加大财政投入力度，建立预算拨款和绩效激励约束机制，确保财政一般公共预算教育支出逐年只增不减，确保按在校学生人数平均的一般公共预算教育支出逐年只增不减，保证国家财政性教育经费支出占国内生产总值比例高于4%。完善各级各类教育预算拨款制度，合理确定并适时提高相关拨款标准和投入水平，建立学生资助标准动态调整机制。逐步提高预算内投资用于教育的比重。优化完善教育领域相关转移支付。搭建高校、企业、社会深度融合的协同育人经费筹措合作机制。发挥各

级教育基金会作用，引导规范社会力量投入和捐赠教育。完善非义务教育培养成本合理分担机制。完善覆盖全学段学生资助体系。完善教育经费统计体系。优化教育支出结构，强化经费监管和绩效评价。

（三十五）构建教育科技人才一体统筹推进机制。加强主管部门定期会商，共同做好政策协调、项目统筹、资源配置。完善科教协同育人机制，加强创新资源统筹和力量组织。强化教育对科技和人才的支撑作用，教育布局和改革试点紧密对接北京、上海、粤港澳大湾区等国际科技创新中心建设，对接区域科技创新中心建设、国家高水平人才高地和吸引集聚人才平台建设，提升国家创新体系整体效能。

十、完善教育对外开放战略策略，建设具有全球影响力的重要教育中心

（三十六）提升全球人才培养和集聚能力。加强对出国留学人员的教育引导和服务管理。改革国家公派出国留学体制机制，加强“留学中国”品牌和能力建设，完善来华留学入学考试考核。鼓励支持选拔优秀人才到国际知名高校、研究机构研修，扩大中外青少年交流，实施国际暑期学校等项目。提升高等教育海外办学能力，完善职业教育产教融合、校企协同国际合作机制，深耕鲁班工坊等品牌。支持更多国家开展中文教学。

（三十七）扩大国际学术交流和教育科研合作。支持高水平研究型大学发起和参与国际大科学计划、建设大科学装置、主持重大国际科研项目，推动建设高水平高校学科创新引智基地、国际合作联合实验室。高质量推进国际产学研合作。积极参与开放科学国际合作。

（三十八）积极参与全球教育治理。深化同联合国教科文组织等国际组织和多边机制合作。建立教育创新合作网络，支持国际STEM（科学、技术、工程、数学）教育研究所建设发展。支持国内高校设立教育类国际组织、学术联

盟，打造具有国际影响力的学术期刊、系列指数和报告。设立区域全面经济伙伴关系国际教育合作区。实施中国教育品牌培育计划。

十一、加强组织实施

建设教育强国，必须完善党委统一领导、党政齐抓共管、部门各负其责的教育领导体制。全面推进各级各类学校党的建设，牢牢掌握党对学校意识形态工作领导权，落实意识形态工作责任制，深入推进党风廉政建设和反腐败斗争，将党风政风、师德师风、校风学风建设作为评价学校领导班子办学治校水平的重要内

容，维护教育系统政治安全与和谐稳定。充分发挥中央教育工作领导小组统筹协调、整体推进、督促落实作用，推动解决教育强国建设中的重大问题，加强教育强国建设的监测评价。各级党委和政府要切实扛起教育强国建设的政治责任，把推进教育强国建设纳入重要议事日程，结合实际抓好本规划纲要贯彻落实。要营造全社会共同关心支持教育强国建设的良好环境，加强宣传和舆论引导，健全学校家庭社会协同育人机制，形成建设教育强国强大合力。○

来源：新华社

国家重点研发计划资金管理办法

第一章 总 则

第一条 为规范国家重点研发计划（以下简称重点研发计划）资金管理和使用，提高资金使用效益，根据《中华人民共和国预算法》及其实施条例等国家有关财经法律制度以及中央财政科研经费管理有关政策要求，结合重点研发计划管理工作实际，制定本办法。

第二条 重点研发计划应当多元化筹措资金，资金来源分为

中央财政资金和其他来源资金，其他来源资金包括地方财政资金、单位自筹资金、金融资本以及其他社会资金。

中央财政资金支持方式包括前补助、后补助等，具体支持方式在项目申报指南中予以明确。

第三条 本办法主要规范中央财政安排的采用前补助支持方式的重点研发计划资金管理和使用，后补助支持方式的资金按照中央财政科技计划后补助有关规

定执行。从其他渠道获得的资金应当按照国家有关财务制度和相关资金提供方的具体使用管理要求，统筹安排和使用。

第四条 重点研发计划资金管理和使用遵循集中财力、突出重点、权责对等、遵循规律、讲求绩效的原则。

第五条 重点研发计划按照重点专项、项目分层次管理。重点专项是重点研发计划组织实施的载体，项目是重点专项实施的

基本单元,可根据需要下设一定数量的课题。重点专项实行概预算管理,项目实行预算管理。

第六条 重点研发计划资金实行分级管理、分级负责。

财政部建立重点研发计划中央财政资金全过程审核把关和管理机制,负责重点专项预算管理。

科技部统筹相关重点专项任务布局与资源配置,负责重点专项资金的监督评估、动态调整和总体验收评价等工作。

主责单位对其负责组织实施的重点专项资金管理负总责,委托并指导专业机构做好项目资金分配、拨付、过程监管等具体管理工作,建立加强资金监督管理的工作机制,并对专业机构、承担单位(包括项目承担单位、课题承担单位和课题参与单位,下同)开展资金管理和使用的监督工作。

专业机构受主责单位委托开展相关重点专项资金具体管理工作,对项目资金使用情况实行动态监管。

承担单位是项目资金管理使用的责任主体,负责项目资金的日常管理和监督工作。

项目(课题)负责人是项目资金使用的直接责任人,对资金使用的合规性、合理性、真实性和相关性负责。

第七条 科技部、财政部、相关主管部门、主责单位等应加强对重点研发计划相关财政资金

的绩效管理,强化绩效目标管理,认真开展绩效评价并加强评价结果应用。

第二章 重点专项概预算管理

第八条 重点专项概算是对实施周期内实施重点专项任务所需总费用的事前估算,是重点专项预算安排的重要依据。重点专项概算包括总概算和年度概算。

第九条 主责单位根据重点专项的目标和任务,依据专项实施方案和相关要求组织编制重点专项概算,报财政部、科技部。专业机构根据主责单位要求配合做好概算编报工作。

第十条 重点专项概算应当包括收入概算和支出概算,确保收支平衡。

重点专项收入概算包括中央财政资金概算和其他来源资金概算。主责单位在编制收入概算时,应当统筹考虑多元化资金来源,对中央财政资金和地方财政资金、单位自筹资金、金融资本以及其他社会资金等其他来源资金进行一体化配置。

重点专项支出概算包括支出总概算和年度支出概算。主责单位应当在充分论证、科学合理分解重点专项任务基础上,综合考虑任务相关性、配置适当性和经济合理性等,按照任务级次和不同研发阶段编列支出概算。

第十一条 科技部对概算与

实施方案一致性进行审核。财政部、科技部委托相关机构对重点专项中央财政资金概算进行评估。根据评估结果,结合财力可能,财政部核定并向主责单位批复重点专项中央财政资金总概算和年度概算,抄送科技部、专业机构。

第十二条 中央财政资金总概算一般不予调整。重点专项任务目标发生重大变化等导致中央财政资金总概算确需调整或终止执行的,主责单位在履行相关任务调整审批程序后,报财政部审批。总概算不变,重点专项年度间重大任务调整等导致年度概算需要调整的,由主责单位提出申请,经科技部审核后,按程序报财政部审批。

第十三条 主责单位指导专业机构根据项目任务部署、组织实施进度、预算执行情况以及重点专项概算等,提出年度重点专项预算安排建议。专业机构对其负责管理的重点专项预算安排建议进行汇总后,按部门预算申报程序报财政部。无部门预算申报渠道的专业机构,通过科技部报送。

加强预算安排与任务实施进度衔接,在总概算和概算周期不变的前提下,重点专项任务部署完成后,年度预算安排可延后不超过2年。

第十四条 财政部结合科技部意见,在分年度概算限额内,结合财力可能等核定各重点专项年度预算,按照预算管理要求向

专业机构下达重点专项中央财政资金预算（不到具体项目预算），并抄送科技部。专业机构应当同步向主责单位报告相关重点专项年度预算。

主责单位应当建立重点专项项目预算分配审核机制，对专项下设项目的资金额度、资金构成、支持方式等进行科学决策，加强与项目申报指南编制工作的衔接。中央财政资金应当聚焦重点专项关键研发任务，重点支持市场机制不能有效配置资源的公共科技活动，避免财政资金安排分散重复。对于以科技成果产品化、工程化、产业化为目标任务，并且具有量化考核指标的项目，原则上应当采取后补助方式予以支持。

第十五条 重点专项中央财政资金预算一般不予调剂，因概算变化等确需调剂的，由专业机构提出申请，按程序报财政部批准，并抄送科技部。

第十六条 在重点专项实施周期内，由于年度任务调整等导致专业机构当年未下达给项目承担单位的资金，可以结转下一年度继续使用。由于重点专项因故终止等原因，专业机构尚未下达的资金，按规定上缴中央财政。

第十七条 主责单位会同专业机构按年度编制重点专项执行情况报告（含资金管理使用情况），于每年12月底前报送科技部；执行期5年及以上的重点专项，于专

项实施中期年份报送中期执行情况报告（含资金管理使用情况）。

第十八条 重点专项执行期结束后，主责单位会同专业机构对重点专项实施情况（含资金管理使用情况）进行总结，于专项执行期结束6个月内形成总结报告报科技部。

科技部会同财政部组织开展重点专项总体验收评价（含资金管理使用情况），重点专项总体验收评价情况将作为专项滚动实施、新设专项遴选主责单位和专业机构等方面的重要参考。

第三章 项目资金开支范围

第十九条 重点专项项目资金由直接费用和间接费用组成。

第二十条 直接费用是指在项目实施过程中发生的与之直接相关的费用。主要包括：

（一）设备费：是指在项目实施过程中购置或试制专用仪器设备，对现有仪器设备进行升级改造，以及租赁外单位仪器设备而发生的费用。计算类仪器设备和软件工具可在设备费科目列支。应当严格控制设备购置，鼓励开放共享、自主研制、租赁专用仪器设备以及对现有仪器设备进行升级改造，避免重复购置。

（二）业务费：是指在项目实施过程中消耗的各种材料、辅助材料等低值易耗品的采购、运输、装卸、整理等费用，发生的测试

化验加工、燃料动力、出版/文献/信息传播/知识产权事务、会议/差旅/国际合作交流等费用，以及其他相关支出。

（三）劳务费：是指在项目实施过程中支付给参与项目的研究生、博士后、访问学者和项目聘用的研究人员、科研辅助人员等的劳务性费用，以及支付给临时聘请的咨询专家的费用等。

项目聘用人员劳务费开支标准，参照当地科学研究和技术服务业从业人员平均工资水平，根据其在项目研究中承担的工作任务确定，其由单位缴纳的社会保险补助、住房公积金等纳入劳务费科目开支。

支付给临时聘请的咨询专家的费用，不得支付给参与本项目及所属课题研究和管理的有关人员，其管理按照国家有关规定执行。

第二十一条 间接费用是指承担单位在组织实施项目过程中发生的无法在直接费用中列支的相关费用。主要包括：承担单位为项目研究提供的房屋占用，日常水、电、气、暖等消耗，有关管理费用的补助支出，以及激励科研人员的绩效支出等。安排绩效支出要合理合规、公开公平，符合国家事业单位绩效工资有关管理制度规定。

第四章 项目预算编制与审批

第二十二条 重点专项项目

预算由收入预算与支出预算构成。项目预算由课题预算汇总形成。

(一) 收入预算包括中央财政资金和其他来源资金。对于其他来源资金,应当充分考虑各渠道的情况,并提供资金提供方的出资承诺,不得使用货币资金之外的资产或其他中央财政资金作为资金来源。

(二) 支出预算应当按照资金开支范围编列,并对各项支出的主要用途和测算理由等进行说明。

第二十三条 项目实行两轮申报的,预申报环节时,项目申报单位提出所需资金预算总额;正式申报环节时,专业机构综合考虑重点专项概算、项目任务设置、预申报情况以及专家建议等,组织指导项目申报单位编报预算。

项目实行一轮申报的,按照正式申报环节要求组织编报预算。

第二十四条 项目申报单位应当按照政策相符性、目标相关性和经济合理性原则,科学、合理、真实地编制预算,对设备费、业务费、劳务费预算应当据实编制,不得简单按比例编制。

对仪器设备购置、参与单位资质及拟外拨资金进行重点说明,并申明现有的实施条件和从单位外部可能获得的共享服务。直接费用中除50万元以上的设备费外,其他费用只提供基本测算说明,不需要提供明细。

第二十五条 结合承担单位

信用情况,间接费用实行总额控制,按照不超过课题直接费用扣除设备购置费后的一定比例核定。具体比例如下:

(一) 500万元及以下部分为30%;

(二) 超过500万元至1000万元的部分为25%;

(三) 超过1000万元以上的部分为20%。

第二十六条 间接费用由承担单位统筹安排使用。承担单位应当建立健全间接费用的内部管理办法,公开透明、合规合理使用间接费用,处理好分摊间接成本和对科研人员激励的关系。绩效支出安排应当与科研人员在项目工作中的实际贡献挂钩。承担单位可将间接费用全部用于绩效支出,并向创新绩效突出的团队和个人倾斜。

课题中有多个单位的,间接费用在总额范围内由课题承担单位与参与单位协商分配。承担单位不得在核定的间接费用以外,再以任何名义在项目资金中重复提取、列支相关费用。

第二十七条 专业机构合并项目评审和预算评审,在项目评审时同步开展预算评审,不得将预算编制细致程度作为评审预算的因素,不得简单按比例核减预算。

第二十八条 预算评审应当按照规范的程序和要求,坚持独立、客观、公正、科学的原则,

对项目以及课题申报预算的政策相符性、目标相关性和经济合理性进行评审。评审专家应当满足相关回避要求。

第二十九条 主责单位负责批复项目立项和预算,并组织专业机构与项目承担单位签订项目任务书(含预算)。项目立项后,专业机构应当按任务书约定、项目实施进展和任务完成情况及时向项目承担单位拨款。

项目任务书(含预算)是项目和课题预算执行、综合绩效评价和监督检查的依据,应当以项目申报书和评审结果为基础,突出绩效管理,明确项目考核目标、考核指标及考核方法,明晰各方责任,明确课题承担单位和参与单位的资金额度,包括其他来源资金和其他配套条件等。

第三十条 重点研发计划可根据项目特点,采取经费包干制管理方式,由主责单位在项目申报指南中明确。

实行经费包干制的项目,项目申报单位应当本着科学、合理、规范、有效的原则申请资助额度,无需编制具体项目预算。

项目负责人在承诺遵守科研伦理道德和作风学风诚信要求、资金全部用于与本项目研究工作相关支出的基础上,自主决定经费使用,按照本办法第二十条规定的开支范围列支,无需履行调剂程序。对于承担单位为项目研

究提供的房屋占用,日常水、电、气、暖等消耗,有关管理费用的补助支出,由承担单位根据实际管理需要,在充分征求项目负责人意见基础上合理确定。对于激励科研人员的绩效支出,根据实际科研需要和相关薪酬标准自主确定。项目执行期满后,项目负责人应当编制项目资金决算,经承担单位审核后报专业机构。

承担单位应当制定内部管理规定,对包干制项目经费使用范围和标准、相关主体经费管理使用责任、违规行为惩戒措施等进行规定。

第五章 项目预算执行与调剂

第三十一条 专业机构应当按照国库集中支付制度规定,根据不同类型科研项目特点、研究进度、资金需求等,合理制定经费拨付计划,在项目任务书签订后30日内,向项目承担单位拨付首笔项目资金。首笔资金拨付比例充分尊重项目负责人意见,结合重点专项年度预算情况确定。

第三十二条 项目承担单位应当根据项目负责人意见,及时向课题承担单位拨付资金。课题承担单位应当按照研究进度,及时向课题参与单位拨付资金。课题参与单位不得再向外转拨资金。

逐级拨付资金时,项目承担单位或课题承担单位不得无故拖延资金拨付,对于出现上述情况

的单位,专业机构可采取约谈、暂停项目后续拨款等措施。

第三十三条 承担单位应当严格执行国家有关财经法规、财务制度和内部控制制度,切实履行科研项目资金管理法人主体责任,正确行使项目资金管理使用自主权,建立健全项目资金内部管理制度和报销规定,明确内部管理权限和审批程序,完善内控机制建设,强化资金使用绩效评价,提高财务信息化水平,确保资金使用安全规范有效。项目资金使用中属于政府采购范围的,应当按照政府采购法律制度规定执行。

第三十四条 承担单位应当全面落实科研财务助理制度。每个课题应当配有相对固定的科研财务助理。科研财务助理所需人力成本费用(含社会保险补助、住房公积金),可由承担单位根据情况通过科研项目经费等渠道统筹解决。

科研财务助理应当熟悉重点研发计划项目和资金管理政策,以及承担单位科研管理制度,为科研人员编制和调剂项目预算、报销经费、开展项目综合绩效评价等提供专业化服务。

第三十五条 承担单位应当将重点研发计划项目资金纳入单位财务统一管理,对中央财政资金和其他来源资金分别单独核算,确保专款专用。按照承诺保证其他来源资金及时足额到位,并用于本项目支出。

第三十六条 承担单位应当建立完善信息公开制度,在单位内部公开项目立项、主要研究人员、资金使用(重点是间接费用、绩效支出、外拨资金、结余资金使用等)、大型仪器设备购置以及项目研究成果等情况,接受内部监督。对于涉密项目,按照保密管理有关规定执行。

第三十七条 承担单位应当严格执行国家有关支出管理制度。对应当实行公务卡结算的支出,按照中央财政科研项目使用公务卡结算的有关规定执行。对于设备、大宗材料、测试化验加工、劳务、专家咨询等费用,原则上应当通过银行转账方式结算。

第三十八条 在项目实施过程中,承担单位因科研活动实际需要,邀请国内外专家、学者和有关人员参加由其主办的会议等,对确需负担的城市间交通费、国际旅费,可在会议费等费用中报销。对国内差旅费中的伙食补助、市内交通费和难以取得发票的住宿费可实行包干制。对野外考察、心理测试等科研活动中无法取得发票或者财政性票据的,在确保真实性的前提下,可按实际发生额予以报销。

第三十九条 重点研发计划项目资金管理使用不得存在以下行为:

- (一) 编报虚假预算;
- (二) 未对重点研发计划资金

进行单独核算；

（三）列支与本项目任务无关的支出；

（四）未按规定执行和调剂预算、违反规定转拨重点研发计划资金；

（五）虚假承诺其他来源资金；

（六）通过虚假合同、虚假票据、虚构事项、虚报人员等弄虚作假，转移、套取、报销重点研发计划资金；

（七）截留、挤占、挪用重点研发计划资金；

（八）设置账外账、随意调账变动支出、随意修改记账凭证、提供虚假财务会计资料等；

（九）使用项目资金列支应当由个人负担的有关费用和支付各种罚款、捐款、赞助、投资，偿还债务等；

（十）其他违反国家财经纪律的行为。

第四十条 项目在研期间，年度剩余资金结转下一年度继续使用。

中央财政资金预算确有必要调剂时，应当按照以下调剂范围和权限，履行相关程序：

（一）项目预算总额调剂，由项目承担单位向专业机构提出申请，专业机构审核评估并报主责单位同意后，按有关规定批准。

（二）项目预算总额不变、课题间预算调剂，变更课题承担单位、课题参与单位，由项目承担

单位或课题承担单位逐级向专业机构提出申请，专业机构审核评估后，按有关规定批准。

（三）课题预算总额不变、课题参与单位之间预算调剂的，由项目承担单位审批，报专业机构备案；课题预算总额不变、设备费预算调剂的，由课题负责人或参与单位的研究任务负责人提出申请，所在单位统筹考虑现有设备配置情况和科研项目实际需求，及时办理审批手续。

（四）除设备费外的其他直接费用调剂，由课题负责人或参与单位的研究任务负责人根据科研活动实际需要自主安排。承担单位应当按照国家有关规定完善内部管理制度。

（五）课题间接费用预算总额不得调增，经课题承担单位与课题负责人协商一致后，可调减用于直接费用；课题间接费用总额不变、课题参与单位之间调剂的，由课题承担单位与参与单位协商确定。

对于项目其他来源资金总额不变、不同单位之间调剂的，由项目承担单位自行审批实施，报专业机构备案。

第四十一条 项目承担单位应当按规定于每年11月底前将汇总审核后的项目年度执行情况报告（含财务执行情况）报送专业机构。报告内容应当真实、完整，账表一致，并及时报告发生的重大财务事件或影响项目正常执行

预算的情况。项目执行不足3个月的，可在下年度一并上报。

第四十二条 项目实施过程中，行政事业单位使用中央财政资金形成的资产属于国有资产，应当按照国家有关国有资产管理的规定执行。企业使用中央财政资金形成的资产，按照企业财务与资产管理相关规章制度执行。

承担单位使用中央财政资金形成的知识产权等无形资产的管理，按照国家有关规定执行。

使用中央财政资金形成的大型科学仪器设备、科学数据、科技资源等，按照规定开放共享。

第四十三条 项目或课题因故撤销或终止，项目承担单位或课题承担单位应当及时清理账目与资产，编制财务报告及资产清单，报送专业机构。专业机构组织清查处理，确认并回收结余资金，按要求统筹用于重点研发计划后续项目支出；实施期结束的，按原渠道退回。已购物资、材料及仪器设备处置收入，按照国家有关规定执行。

第六章 项目综合绩效评价

第四十四条 项目执行期满后，项目承担单位应当及时组织课题承担单位清理账目与资产，如实编制课题资金决算。

第四十五条 主责单位组织专业机构严格依据项目任务书（含预算），在项目执行期满6个月内进行综合绩效评价。

第四十六条 项目实施期满后，课题承担单位应当聘请会计师事务所，开展结题财务审计。结题财务审计报告是项目综合绩效评价的重要依据。涉密课题另有规定的，按照有关规定执行。

创新能力和潜力突出、创新绩效显著、科研诚信状况良好的承担单位按程序认定后，可不再开展结题财务审计，其出具的项目资金决算报表，作为项目综合绩效评价的依据。承担单位对决算报表内容的真实性、完整性、准确性负责，专业机构适时组织抽查。

第四十七条 项目承担单位组织课题承担单位完成项目综合绩效评价材料的准备工作后，向专业机构提出申请。

第四十八条 项目综合绩效评价应当核定各课题的中央财政资金结余，由主责单位下达项目综合绩效评价结论。其中，资金使用出现严重违法违规问题的，给予取消项目评优资格、收回项目或课题资金、项目综合绩效评价不予通过等处理。

中央财政结余资金占中央财政预算比例超过30%的项目（课题），承担单位应当说明结余资金产生原因。主责单位在重点专项年度执行情况报告、中期执行情况报告、总结报告中进行专门披露分析，对承担单位用好结余资金进行跟踪指导。科技部、财政部对科研项目结余资金规模大、沉淀时间长

的承担单位，给予针对性指导，盘活存量资金，提高资金使用效益。

第四十九条 课题承担单位应当在项目综合绩效评价完成后一个月内及时办理财务结账手续。

课题完成任务目标并通过项目综合绩效评价的，结余资金留归承担单位使用，统筹用于科研活动直接支出。承担单位应当优先考虑原项目团队科研需求，对原项目团队两年内仍未使用完的结余资金，承担单位应当加大结余资金盘活力度，在单位内部统筹使用。承担单位应当加强结余资金管理，健全盘活机制，加快使用进度，在国家科技管理信息系统中按年度报送结余资金使用情况。

课题未完成任务目标，或项目未通过综合绩效评价的，结余资金由专业机构收回，按要求统筹用于重点研发计划后续项目支出。

第七章 监督检查

第五十条 科技部、财政部、主责单位和业机构应当根据职责和分工，建立健全覆盖资金管理使用全过程的资金监督管理机制，并将监督结果作为总体验收评价、综合绩效评价、资金拨付等工作的重要参考。

加强审计监督、财会监督与日常监督的贯通协调，增强监督合力。加强信息共享，避免交叉重复，减轻科研人员负担。

第五十一条 科技部、财政

部应当加强重点研发计划资金监督，运用国家科技管理信息系统等信息技术手段，采取专项督查、随机抽查、举报核查等方式，对资金管理使用情况以及主责单位、专业机构、承担单位等落实重点研发计划资金管理有关要求履职尽责情况进行监督，并将资金管理使用情况纳入关键节点考核、总体验收评价等工作。

第五十二条 主责单位对相关重点专项资金管理使用开展监督，对专业机构、承担单位资金管理工作进行监督，将资金管理和监督情况纳入重点专项年度执行情况报告、中期执行情况报告和项目综合绩效评价等工作。

专业机构对承担单位项目资金管理使用开展日常监督，动态监管承担单位资金管理使用情况，对监督中发现问题较多的承担单位，采取警示、指导和培训等方式，加强对承担单位的事前风险预警和防控，督促落实整改要求。

第五十三条 承担单位应当按照本办法和国家相关财经法规及财务管理规定，完善监督制约机制，动态监管资金使用并实时预警提醒，加强支撑服务条件建设，提高对科研人员的服务水平，建立常态化的自查自纠机制，确保项目资金安全。

项目承担单位应当加强对课题承担单位和参与单位的指导和监督，积极配合有关部门和机构

的监督检查工作。

第五十四条 承担单位、项目负责人、课题负责人等出现第三十九条有关情形的，主责单位、专业机构等依照有关规定，视情况轻重采取责令整改、约谈、通报批评、暂停项目拨款、终止项目执行、收回项目结余资金、追回已拨资金、阶段性或永久限制项目承担者项目申报资格等措施，并将有关结果向社会公开。涉嫌犯罪的，移送有关机关处理。

第五十五条 财政部、科技部、相关主管部门、主责单位、专业机构及其相关工作人员，以及会

计师事务所、咨询评审专家等主体在重点研发计划资金管理中，存在违反规定安排资金或其他滥用职权、玩忽职守、徇私舞弊等违法违规行为的，依法责令改正，对负有责任的领导人员和直接责任人员依法给予处分；涉嫌犯罪的，依法移送有关机关处理。

第五十六条 经本办法第五十四条、第五十五条规定作出正式处理，存在违法违规且造成严重后果或恶劣影响的责任主体，依法依规对其严重失信行为实行追责和惩戒，纳入信用记录管理，并共享至全国信用信息共享平台。

第八章 附 则

第五十七条 管理要求另有规定的重点专项按有关规定执行。本办法由财政部、科技部负责解释。

第五十八条 本办法自发布之日起施行。《国家重点研发计划资金管理办法》（财科教〔2016〕113号）、《国家重点研发计划资金管理办法》（财教〔2021〕178号）同时废止。○

来源：中华人民共和国财政部、中华人民共和国科学技术部

中国科学技术协会全国学会会员管理若干规定

会员是学会的组织主体。针对当前中国科协主管业务全国学会、协会、研究会（以下简称全国学会）会员管理工作中的突出问题，进一步加强规范管理，作出以下规定。

一、坚持正确导向。坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，紧紧围绕实现我国高水平科技自立自强、建设科技强国的需要，准确把握本学科本领域科技工作者的结构变化和群体特点，按照国家需要、学术为先、会员为本、

管理规范、规模适度、结构合理的总体要求，全面规范全国学会使命和组织建设，加强会员管理和服务，引导会员积极践行社会主义核心价值观，弘扬科学精神和科学家精神，树立家国情怀，弘扬优良学风，恪守学术道德，共同营造充满活力、风清气正的创新生态。

二、落实管理责任。全国学会理事会承担会员管理主体责任，秘书长承担第一责任，日常工作由秘书处负责。理事会应当将秘书长每年一次专项报告会员发展、会籍

核查和服务情况纳入理事会会议议程，相关情况列入年检材料。健全会员分类管理机制，按照学术资历、专业贡献、社会影响等维度，合理设置会员层级类型和相应的人审核、会费缴纳、会员证制发、会籍管理、会员退出等全流程管理规程。规模较大的全国学会原则上要设立专门的会员工作部门，配备专职工作人员。完善信息公开机制，依法依规公开会员名单、会费标准、服务项目、会费收支等信息，接受会员、监管部门及社会

监督。

三、严明资格条件。坚持德才兼备标准，明确不同类型会员在学科专业、学历学位、学术成就、单位资质等方面的门槛条件。全国学会个人会员应是本学科及相关领域具有一定学术造诣的科技人才，一般应当具有副高级以上职称或博士学位；可吸纳少量在本学科及相关领域具有较高管理水平的工作者。学生会员应是本学科及相关领域有较大潜力，身处科研一线的硕士、博士研究生。外籍会员应是本学科及相关领域有较高造诣，与我国友好，愿意与全国学会联系、交流和合作的外籍科技人才。单位会员应是本学科及相关领域社会公认的代表性高校、科研院所、科技型企业、新型研发机构及社会团体。严禁发展与本学科领域无关的人员或单位入会，严禁吸纳国家机关为单位会员，严禁将会士、荣誉会员等会员类型与人才“帽子”挂钩。

四、规范准入程序。严格依法依规健全会员入会审核机制，明确入会流程、申请材料、审核时限、告知承诺等事项。严格会员资格审查，核准核实其工作经历、职称职务、学术业绩、学术道德等，切实把好学术关和学风关，确保会员发展质量。经审核符合要求的，准予入会；不符合要求的，要及时告知申请对象。严禁降低条件标准“拉人头”“无门槛入会”“零审核入会”“交钱就能入会”，坚决防止

会员规模盲目无序扩张。

五、完善退出机制。明确会员退出条件和程序，对于自愿退会的，经确认后退会；对于无正当理由不按时缴纳会费、长期不按要求参加学会相关活动的，应视为自动退会；对于不再符合会员资格条件的，要及时清退；对存在学术造假、借会员资格在科技评价中违规谋利等不端行为的，一经发现由理事会或业务主管单位公告除名；有其他违反中国科协章程和全国学会章程规定以及损害学会声誉行为的，视情节轻重给予通报批评、暂停会员资格直至除名。会员如涉及违法违规行为的，秘书处要依据相关规定及时处置。学生会员自毕业之日起，其学生会员资格自行失效。会员退会、会员资格失效或被除名的，要及时取消会籍并发布公告，宣告其在全国学会的职务和权利义务一并终止。

六、加强会籍管理。建立健全会员信息动态数据库，按照中国科协制定的统一编码规则，进行统一登记、统一编号、统一发放会员证书、统一发布公告，实施全周期管理。会员证应当载明会员名称、类型、资格有效期等信息。要结合年检、换届等工作定期开展会籍核查，确保会员信息的准确性与有效性。全国学会不得委托分支机构直接发展会员，由分支机构推荐的会员应由全国学会统一审核认定、统一进行会籍管理。

七、规范会费管理。会费应主要用于为会员服务。全国学会应当结合学会运行实际，科学制定会费标准和档次，制定或修改会费标准应召开会员（代表）大会并以无记名投票的方式表决通过。会费标准和会费收支情况应向全体会员公开，会费标准不得浮动。对于列入会费保障的基本服务项目，不得另行向会员收取费用。严禁采用收费“返成”“抽成”“分成”等不正当方式吸收会员、收取会费，严禁向同一会员多头重复收取会费，严禁将会费标准与学会职务挂钩。

八、提升服务实效。学会必须秉持以会员为中心的服务理念，持续优化会员服务体系，加大会员服务投入，不断创新和丰富会员服务产品，满足会员发展进步需求。加强对科技领军人才、青年科技骨干、海外科技人才的吸纳力度，通过技能培训、学术研讨、资源对接等方式，主动搭建沟通交流渠道。建立健全会员意见反馈机制，积极回应会员的建议、意见和诉求，维护会员合法权益，提升会员对学会的认同感和归属感，使学会成为广大科技工作者的坚实后盾和温馨家园。

经中国科协常务委员会授权，针对全国学会违反本规定的行为，由中国科协书记处及时进行处理。

本规定自印发之日起施行。○

来源：中国科学技术协会

进一步全面深化改革中的几个重大理论和实践问题

党中央举办这次省部级主要领导干部学习贯彻党的二十届三中全会精神专题研讨班，是为了进一步统一思想和行动，推动全会精神更好贯彻落实。下面，我就进一步全面深化改革中的几个重大理论和实践问题，讲一些意见。

一、新时代全面深化改革取得历史性成就

党的十八届三中全会开启了新时代全面深化改革、系统整体设计推进改革新征程，开创了我国改革开放全新局面，具有划时

代意义。新时代全面深化改革取得了重大实践成果、制度成果、理论成果，举世瞩目，影响深远。

新时代全面深化改革取得重大实践成果。我们向改革要动力，以改革激活力、聚合力。新发展理念是在改革中形成的，影响和制约高质量发展的思想观念和体制机制弊端是在改革中破除的，经济发展质的有效提升和量的合理增长也是在改革中逐步实现的。正是通过全面深化改革，我国经济实力、科技实力、综合国力跃上了新台阶，国内生产总

值从2012年的54万亿元增长到2023年的126万亿元，经济总量占世界经济的比重由11.3%上升到18%左右，稳居世界第二位，对世界经济增长的年均贡献率超过30%；人均国内生产总值达到12680美元。科技创新能力显著提升，进入创新型国家行列。我们打赢脱贫攻坚战，历史性地解决了绝对贫困问题；建成世界上规模最大的教育体系、社会保障体系、医疗卫生体系，推动全体人民共同富裕迈出坚实步伐，人民生活品质不断提高，人民群众的获得感、幸福感、安全感不断增强。正是通过全面深化改革，我国在法治建设、生态文明建设、国家安全建设、国防和军队建设等领域均取得了重大成果。

新时代全面深化改革取得重大制度成果。我们把全面深化改革的总目标确立为完善和发展中国特色社会主义制度、推进国家治理体系和治理能力现代化，着力固根基、扬优势、补短板、强弱项，持续巩固和发展我国社会主义制度的显著优势，提高制度竞争力。我们不断丰富和拓展制度内容、优化制度结构、完善制



图1 2024年10月29日，省部级主要领导干部学习贯彻党的二十届三中全会精神专题研讨班在中央党校（国家行政学院）开班。中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在开班式上发表重要讲话。

度体系，我国根本制度、基本制度、重要制度更加完善，特别是把党的领导制度确立为国家的根本领导制度，系统完备、科学规范、运行有效的制度体系日渐成熟定型。我们强化制度执行，着力把制度优势转化为国家治理效能。这些都不仅是为当下计，更是为国家长治久安谋。

新时代全面深化改革取得重大理论成果。新时代全面深化改革是在我国改革进入攻坚期和深水区的背景下谋划并推进的，呈现出涉及范围广、触及利益深、攻坚难度大、关联性联动性强等突出特点。我们在改革中不断推进理论创新，科学把握改革面临的时与势、危与机，及时总结新鲜经验，不断深化对改革的规律性认识，形成关于全面深化改革的一系列新思想、新观点、新论断。比如，强调改革必须坚持党的领导；强调改革必须坚持以人民为中心；强调改革必须坚持守正创新，既不走封闭僵化的老路，也不走改旗易帜的邪路；强调改革必须坚持完善和发展中国特色社会主义制度、推进国家治理体系和治理能力现代化的总目标；强调改革必须坚持问题导向；强调必须坚持以经济体制改革为牵引；强调必须在法治轨道上推进改革；强调必须把顶层设计和摸着石头过河结合起来；强调必须正确处理改革发展稳定的关

系，等等。全会《决定》明确的“六个坚持”的重大原则，就是从这些新思想、新观点、新论断中凝练出来的。这些理论成果，为进一步全面深化改革提供了重要遵循。

总之，新时代全面深化改革是我国改革开放历史进程中最壮丽的篇章之一，为全面建成小康社会、续写“两大奇迹”提供了强大动力和制度保障，也为新征程进一步全面深化改革提供了坚实基础和宝贵经验。

二、进一步全面深化改革必须坚持守正创新

坚持守正创新是进一步全面深化改革必须牢牢把握、始终坚守的重大原则。守正和创新是辩

证统一的，只有守正才能保证创新始终沿着正确方向前进，只有持续创新才能更好地守正。

改革不是改旗易帜。我多次讲，我们的改革是有方向、有原则的。坚持党的全面领导、坚持马克思主义、坚持中国特色社会主义、坚持人民民主专政，以促进社会公平正义、增进人民福祉为出发点和落脚点，这些都是管根本、管方向、管长远的，体现党的性质和宗旨，符合我国国情，符合人民根本利益，任何时候任何情况下都不能有丝毫动摇。因此，我们要坚持完善和发展中国特色社会主义制度、推进国家治理体系和治理能力现代化的改革总目标，始终朝着总目标指引的方向前进，该改的坚决改，不该改的不改。



图2 2024年12月19日上午，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在澳门特别行政区行政长官贺一诚陪同下，来到横琴粤澳深度合作区考察。这是习近平在横琴天沐琴台展示厅澳门新街坊项目展区前，同居住在这里的市民代表亲切交谈。

新时代新征程党和国家的中心任务是以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业，进一步全面深化改革必须紧紧围绕这一中心任务来进行。我们要以一往无前的胆魄和勇气，顺应时代发展新趋势、实践发展新要求、人民群众新期待，大力推进理论创新、实践创新、制度创新、文化创新以及其他各方面创新，为中国式现代化提供强大动力和制度保障。

要突出经济体制改革这个重点。坚持社会主义市场经济的改革方向，着眼充分发挥市场在资源配置中的决定性作用、更好发挥政府作用，加快构建全国统一大市场，加快健全宏观经济治理体系；坚持和落实“两个毫不动摇”，为各种所有制经济发展提供公平公正的法治环境；坚决破除影响和制约高质量发展的体制机制弊端，完善与新质生产力更相适应的生产关系，塑造发展新动能新优势；坚决打通影响和制约全面创新的卡点堵点，统筹推进教育科技人才体制机制一体改革，牢牢掌握新一轮科技革命和产业变革的战略主动。

要全面协调推进各方面改革。中国式现代化的内涵十分丰富，进一步全面深化改革也必然是全方位的。全会《决定》坚持系统思维，在统筹推进“五位一体”总体布局、协调推进“四个

全面”战略布局框架下谋划和部署改革举措，不仅突出了经济体制改革的内容，也全面涵盖了民主、法治、文化、社会、生态文明、国家安全、国防和军队建设等方面的体制机制创新以及党的建设制度改革，要全面贯彻落实，力求形成整体效能，既不能单打一，也不能顾此失彼。

三、坚持用科学方法指导和推进改革

改革是一项系统工程，需要处理好方方面面的关系，需要讲求科学方法。全会《决定》对此提出了明确要求，我再强调几点。

一是坚持改革和法治相统一。改革和法治如鸟之两翼、车之两轮，相互依存、缺一不可。要以改革之力完善法治，进一步深化

法治领域改革，不断完善中国特色社会主义法治体系。进一步拓展法治作用空间，更好发挥法治在排除改革阻力、巩固改革成果中的积极作用。善于运用法治思维和法治方式推进改革，维护法治权威，做到重大改革于法有据。坚持法律面前人人平等，平等保护公民、法人和其他组织合法权益，不能搞选择性执法，更不能搞法外开恩。

二是坚持破和立的辩证统一。改革是一个破旧立新的过程，破是手段，立是目的。进一步全面深化改革，要坚持以制度建设为主线，更应突出破立并举、先立后破。各项改革举措都要充分论证、精心设计，深入开展风险评估，把握好时度效。该立的积极主动立起来，而且要立得稳、立



图3 2024年10月15日至16日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在福建考察。这是16日上午，习近平在中国（福建）自由贸易试验区厦门片区考察时，同综合服务大厅窗口工作人员亲切交流。

得住，行得通、真管用；该破的在立的基础上及时破、坚决破、彻底破，在破立统一中实现改革蹄疾步稳。不能未立先破，留下制度真空，让人无所适从，造成无序和混乱。

三是坚持改革和开放相统一。进一步全面深化改革和高水平对外开放是相辅相成、相互促进的。改革越深入，对开放的水平要求就越高；开放水平越高，对改革的促进作用就越大。要稳步扩大制度型开放，主动对接国际高标准经贸规则，深化外贸、外商投资和对外投资管理体制改革的，营造市场化、法治化、国际化一流营商环境。实施自由贸易试验区提升战略，鼓励首创性、集成式探索，打造开放层次更高、辐射作用更强的改革开放新高地。

四是处理好部署和落实的关系。“一分部署，九分落实”。全会《决定》作出的部署主要是从大的方面考虑的，很多举措是战略性、前瞻性、方向性的，落实中需要制定切实可行的具体措施。改革方案的设计，必须把握客观规律，充分发扬民主，顺应社会期盼，注重各项改革举措的协调配套，增强改革取向的一致性，防止和克服本位主义。要建立健全责任明晰、链条完整、环环相扣的工作机制，强化跟踪问效，

推动改革举措落实落细落到位，防止重文件制定、轻督促落实等现象，防止“沙滩流水不到头”。

领导干部特别是高级干部担负着推进改革的重要职责。要增强政治责任感、历史使命感，以攻坚克难、迎难而上的政治勇气，直面矛盾问题不回避，铲除顽瘴痼疾不含糊，应对风险挑战不退缩，奋力打开改革发展新天地。要善于运用科学的方法推进改革，系统布局、谋定而动，避免盲动、进退失据等现象。

四、营造进一步全面深化改革的良好氛围

广泛凝聚共识、充分调动一切积极因素，对顺利推进改革十分重要。要切实做好改革舆论引导工作，唱响主旋律、传递正能量。

要正确理解和解读全会《决定》精神。全会召开3个多月来，各地区各部门通过多种形式和途径深入学习贯彻全会精神，兴起了学习热潮。接下来，要乘势而进，在深入学习、准确理解、全面把握上下功夫，加强对全会《决定》提出的一些重大理论观点的研究和阐释，特别是加强面向基层和群众的宣传、解读，及时澄清、驳斥各种误读和歪曲，引导全社会正确理解党中央的战略

考量，正确理解各项改革举措的现实意义、目标指向，以凝聚共识，筑牢全党全社会共抓改革的思想基础、群众基础。

要合理引导改革预期。要看到，改革是利益格局调整的过程，不可能同时满足所有人的利益诉求。要引导干部、群众增强大局意识，正确对待改革中的利益关系调整和个人利害得失。改革也是一个渐进的过程，不可能一蹴而就、一下子把所有问题都解决，不能急于求成、好高骛远，不要把调子起高、胃口吊高，而是要实事求是，一切从实际出发，稳扎稳打，积小胜为大胜。还要看到，改革是人民群众自己的事业，要全体人民共同参与，团结一致攻坚克难。改革过程中，要坚持以人为本，以实绩实效和人民群众满意度检验改革，真正让人民群众在改革中不断增强获得感、幸福感、安全感。

要把握正确舆论导向。形成舆论合力，加强正面宣传，把改革取得的历史性成就讲充分讲清楚，善于用群众身边小故事讲好改革大道理。持续关注和回应社会关切，及时解疑释惑。有力批驳错误言论，澄清是非、以正视听。○

来源：《求是》

“以党的自我革命引领社会革命”的理论内涵与实践要求

“一个饱经沧桑而初心不改的党，才能基业常青；一个铸就辉煌仍勇于自我革命的党，才能无坚不摧。”回顾中国共产党一百多年的峥嵘岁月，回首新中国筚路蓝缕、改天换地的伟大历程，中华民族之所以迎来了从站起来、富起来到强起来的伟大飞跃，一个重要原因就是我们党始终不渝地坚持以自我革命引领伟大社会革命。党的二十届三中全会提出，“保持以党的自我革命引领社会革命的高度自觉，坚持用改革精神和严的标准管党治党，完善党的自我革命制度规范体系，不断推进党的自我净化、自我完善、自我革新、自我提高，确保党始终成为中国特色社会主义事业的坚强领导核心”，深刻总结了我们党领导革命、建设和改革的历史经验，有力揭示了我们党长期执政的客观规律，精辟概括了我们党善于应变局、育新机、开新局的核心密码。

1. 勇于自我革命是党的最鲜明品格和最大优势

党的自我革命本质就是党把自身作为革命的主客体，通过自我批判以实现“净化、完善、革新、提高”，完成理想性与现实性的辩证统一。党的自我革命就是党作为革命主体在思想意识层面的自我反思与在行为活动层面的自我扬弃、革故鼎新的过程，蕴含着马克思主义的鲜明品格，实现了主观与客观、精神与物质、应然与实然的高度契合。马克思主义政党建设历程表明，自我革命是无产阶级政党的内在要求。作为以马克思主义为指导思想的

无产阶级先锋队，中国共产党有着先进的阶级属性和鲜明的基本特征，从诞生之日起就“没有任何同整个无产阶级的利益不同的利益”，坚决地“为工人阶级的最近的目的和利益而斗争”，是本阶级中“最坚决的、始终起推动作用的部分”，“代表运动的未来”。这样一个志向高远、毫无私利、斗争坚决的无产阶级政党，要始终如一地保持初心，矢志不移地牢记使命，就“必须绝对保持党的纪律”和彻底恪守党的规矩，永葆先进性、纯洁性，增强凝聚力、战斗力，时刻以刀刃向内的胆识、坚韧不拔的意志和果断决绝的行动，铲除顽瘴痼疾、

祛除沉疴积弊，扎实推进党的自我革命。

革命性是马克思主义政党的基本属性和鲜明品格。无产阶级政党只有不断进行向内的自我批判和革新，才能实现自身的发展、完善和强大，更好地引领社会革命。《中国共产党章程》明确宣告“党除了工人阶级和最广大人民群众的利益，没有自己特殊的利益”。这表明，我们党除了国家、民族、人民的利益之外，过去、现在、将来都不会有任何属于自己的特殊利益。“壁立千仞，无欲则刚”，一个毫无私利的政党才有勇气进行最彻底的自我革命，一个胸怀万世、着眼全局的政党才

能义无反顾地推进社会革命。自我革命是中国共产党作为马克思主义政党的“独有的政治品格”，“勇于自我革命是中国共产党区别于其他政党的显著标志”，是我们党跳出治乱兴衰历史周期率的第二个答案。正是由于具备自我否定和自我扬弃的革命襟怀、底气 and 行动自觉，始终保持自我净化、自我完善、自我革新、自我提高的警醒和状态，中国共产党才能历经百年沧桑依然风华正茂，才能屡经坎坷磨难而愈发朝气蓬勃。

“备豫不虞，为国常道。”中国共产党是在内忧外患中孕育诞生的，是在饱经磨难中成长壮大的，是在攻坚克难的社会革命中愈挫愈强的。我们党领导全国各族人民取得的每一项辉煌成就、赢得的每一场社会革命的胜利，都与党进行自我革命、增强自身先进性与战斗力直接相关。社会主义发展史有力证明，先进的马克思主义政党是在自我革命中锻造出来的；中国共产党百余年奋斗史充分印证，我们党在任何时期和阶段都坚持发扬自我革命精神，始终保持直面矛盾的态度和勇气。从八七会议、遵义会议到延安整风，从党的七届二中全会提出的“两个务必”，到党的十一届三中全会的拨乱反正，再到党的十八大以来开启的全面从严治党新征程……党的历史就是一部党持续进行自我警示、自我革命、

自我超越的奋斗历史。敢于直面自身挑战、勇于革除自身毒瘤、善于解决自身问题，是我们党永葆健康肌体、不断增强生机活力的关键所在，是我们党始终成为中国革命、建设和改革的坚强领导核心的重要法宝和政治优势。

2. 党的自我革命与社会革命辩证统一、互促共进

社会革命的本质是勇于自我革命的中国共产党团结和带领全国各族人民谋求民族复兴的伟大社会实践；党的自我革命是为更好承担社会革命的重任而不断进行自我批判扬弃的提升过程。党的自我革命与社会革命是辩证统一、互促共进的关系，党的自我革命以社会革命为主题主线，始终围绕社会革命展开运行，在社会革命中经受淬炼并自觉推进理论和实践创新，进而引领伟大社会革命。

习近平总书记强调，“我们要居安思危，时刻警惕我们这个百年大党会不会变得老态龙钟、疾病缠身。对党的历史上走过的弯路、经历的曲折不能健忘失忆，对中外政治史上那些安于现状、死于安乐的深刻教训不能健忘失忆”，并深刻指出“要以伟大自我革命引领伟大社会革命，以伟大社会革命促进伟大自我革命”。“引领”和“促进”从辩证唯物主义的视域深刻印证了自我革命和

社会革命的关系，党通过自我革命保持自身先进性、纯洁性，从而带动社会向着实现全面建成社会主义现代化强国目标乃至共产主义方向前进。因此，党的自我革命对社会革命具有方向指引和行进保障的重大意义。社会革命发展过程中会不断出现新状况、提出新课题，以此促进党在不断应变局、育新机、开新局过程中进一步全面深化改革，进行自我完善和提高，以更好胜任引领社会革命的职责。因此，社会革命对党的自我革命具有牵引作用。党的自我革命和社会革命统一于中国特色社会主义的伟大实践，统一于中华民族伟大复兴的宏伟征程。

中国共产党带领全体人民向着实现第二个百年奋斗目标进军，全面建成社会主义现代化强国，推动历史发展和社会进步，必须协调处理好党的自我革命与社会革命的关系。首先，坚持不懈推进党的自我革命。只有练就过硬的自我革命本领，党才能更加有力地组织和领导社会革命，才能更加有效地承担起推动社会进步的历史责任。党的自我革命包括政治、思想、组织、作风、纪律等子系统的革命，目标是为中国人民谋幸福、为中华民族谋复兴，为人类谋进步、为世界谋大同，推动人类社会进步和世界发展繁荣。其次，社会革命是党的

自我革命的目的、归宿和评判标准。党的自我革命成效如何，最终要看它能否成功地引领社会革命，社会革命是考察和检验党的自我革命成败的重要试金石。因而，社会革命内在地要求党的自我革命理论和实践不断与时俱进、发展创新，以党自身的先进性引领社会革命稳步推进。最后，党的自我革命和社会革命目标共同指向强国建设和民族复兴伟业。在实现伟大梦想过程中，我们党必须适应新形势新任务的要求，始终保持自我革命的精神和定力，不断推进国家治理体系和治理能力现代化，进一步全面深化改革，以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴。

3. 保持以党的自我革命引领社会革命的高度自觉

作为一个长期执政的马克思主义政党，我们党要始终保持先进性、纯洁性，其重要途径就是树立问题导向、坚持刀刃向内，把准政治方向、整肃行为作风、优化组织架构，以自我革命的精神革故鼎新、强筋壮骨，提升党的凝聚力、向心力和战斗力，为推进伟大社会革命提供坚实的组织支撑、强大的思想保障，奠定坚实的政治基础。新征程上，我们必须继续发扬彻底的革命精神，勇于进行自我革命，把党建设得更加坚强有力，努力把新时代坚

持和发展中国特色社会主义这场伟大社会革命进行好。

加强党的政治建设，为社会革命把准政治方向。习近平总书记强调：“讲政治，是我们党补钙壮骨、强身健体的根本保证，是我们党培养自我革命勇气、增强自我净化能力、提高排毒杀菌政治免疫力的根本途径。”党的政治建设是党的根本性建设，决定党的自我革命的效果，决定社会革命的政治方向。在实践中，全党上下要始终把政治建设放在首位，坚定执行党的政治路线，严格遵守政治纪律和政治规矩，深刻领悟“两个确立”的决定性意义、坚决做到“两个维护”，在政治立场、政治方向、政治原则、政治道路上同以习近平同志为核心的党中央保持高度一致，不断强化政治忠诚，坚定政治信仰，保证社会革命沿着正确方向稳步前行。

加强党的思想建设，为社会革命提供精神动力。思想建设是党的自我革命的引擎与先导，是伟大社会革命的思想引领与精神支持。当前，思想文化多元多样多变更加凸显、交流交融交锋日益频繁，这就要求用马克思主义中国化时代化最新成果武装全党，用习近平新时代中国特色社会主义思想凝心铸魂，引导全党自觉从思想上正本清源、固本培元，推动全党始终保持统一思想、统一意志、统一行动，特别是要

推动理想信念教育常态化制度化，坚决抵御各种错误思潮，筑牢信仰之基、补足精神之钙，修好中国共产党人的“心学”，坚守中国共产党人共同精神家园，筑牢社会革命的思想基础。

加强党的组织建设，为社会革命提供组织保障。我们党拥有全世界最为庞大、上下贯通、执行有力的组织体系，这是其他政党不具备的重大政治优势。置身新时代、面对新任务，要以党的组织建设带动党员干部队伍建设，坚持党管干部原则，优选忠诚、干净、担当的好干部，完善正向激励体系，优化惩戒淘汰机制，为助推社会革命锻造政治强、信念坚、本领高、作风硬的党员干部队伍。

加强党的作风建设，为社会革命营造风清气正的良好氛围。党的作风建设是党的自我革命的重要内容和内在要求，是伟大社会革命的动力源泉和坚实基础。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央把解决“四风”等作风问题作为全面从严治党的切入点和突破口，以刀刃向内的自我革命精神整治各种不正之风，大力倡导和弘扬党的优良作风。当前和今后相当长的时期，要以严的基调强化正风肃纪，不断健全作风建设长效机制，大力弘扬党的光荣传统和优良作风，确保党员干部履职尽责、担当作为，以好作风好形象推动形成狠

抓改革落实的良好局面。

加强党的纪律建设，为社会革命提供坚强纪律保障。纪律是管党治党的“戒尺”，加强纪律建设是全面从严治党的治本之策。纪律严明是我们党自成立以来就保持的政治优势，加强纪律建设是马克思主义政党的光荣传统，是我们党永葆生机活力的宝贵历史经验。要把党纪学习教育摆在更加重要的位置，引导党员干部学纪、知纪、明纪、守纪，真正把纪律规矩转化为政治自觉、思想自觉、行动自觉，以严明纪律不断增强党的创造力凝聚力战斗力。

以加强党的制度建设贯穿党的各项建设，为社会革命提供稳定的机制保障。党的十八大以来，我们党推动形成比较完善的党内法规制度体系，做到管党治党有规可依、有章可循。要坚持制度治党、依规治党，以党章为根本，以民主集中制为核心，以新时代新形势新任务新课题为导向，与时俱进修订完善党内法规制度，形成总结—沉淀、反思—纠偏的长效机制；健全党统一领导、全面覆盖、权威高效的监督体系，推进政治监督具体化、精准化、常态化，发挥政治巡视利剑作用，保障党内监督常态化长效化；落实全面从严治党政治责任，用好问责利器，压实推动社会革命的主体责任。○

来源：光明日报

中国自动化学会一届二十一次党委工作会议召开



图1 线下参会代表

2025年2月17日，中国自动化学会以线上线下相结合的形式召开一届二十一次党委工作会议。会议由中国自动化学会党委书记、理事长郑南宁院士主持。

会上，各位委员围绕学会换届工作、2026 IFAC World Congress Plenary and Semi-Plenary Speaker 候选人等议题进行审议。委员们积极发言，对

中国自动化学会的各项工作提出了宝贵的意见和建议。

党委书记郑南宁院士在总结发言中指出，中国自动化学会作为推动我国自动化、信息与智能科技领域发展的重要社会力量，要以更高站位践行科技报国使命，以全球视野谋划高端学术交流平台建设，通过完善学术共同体建设、深化国际科技合作、培育战略科技力量等举措，将学会打造成为具有全球影响力的学术高地，为我国实现高水平科技自立自强作出历史性贡献。○

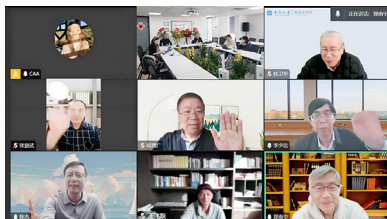


图2 线上参会代表

学会秘书处 供稿



2025中国自动化大会

2025 China Automation Congress

以智赋能 掌控未来

主办单位：中国自动化学会 承办单位：哈尔滨工程大学

会议日期：2025年9月26-28日

中国自动化大会是由中国自动化学会主办的国内最高层次的自动化、信息与智能科学领域的大型综合性学术会议。2025 中国自动化大会由中国自动化学会主办、哈尔滨工程大学承办，将于 2025 年 9 月 26-28 日在哈尔滨召开，旨在为全球自动化、信息与智能科学领域的专家学者和产业界的同仁提供展示创新成果、展望未来发展的高端学术平台，加强不同学科领域的交叉融合，引领自动化、信息与智能科学与技术的发展。

2025 中国自动化大会

征文范围

本次大会设多个特色论坛，征文领域 30 多种。热忱欢迎全国各高等院校、科研院所和企事业单位中从事相关领域研究的科技工作者积极投稿，特别希望征集能反映各单位研究特色的学术论文或长摘要(summary)。

论文投稿要求

1. 来稿未曾公开发表过，具备真实性和原创性。请勿涉及国家秘密。
2. 凡投稿论文被录用且未作特殊声明者，视为已同意授权出版。
3. 中英文论文篇幅均限制 4-6 页。

长摘要投稿要求

1. 长摘要需包括研究背景和意义、主要研究工作、实验或仿真、结论以上所有内容。
2. 长摘要论文将被收录进论文集，但不进 IEEEXplore、EI、CNKI 等检索，已发表成果也可以投稿。
3. 长摘要长度不超过 4 页。
4. 长摘要论文注册费与普通论文相同。

征文方向（包括但不限于）

a 基础研究

1. 复杂系统与非线性控制方法
2. 多智能体协同理论与技术
3. 无人自主与协同控制技术
4. 故障诊断与系统运行安全

5. 智能信息融合与处理

6. 模式识别与人工智能

7. 运筹与决策

8. 数据驱动建模与控制

9. 网络系统控制

b 前沿探索

10. 系统建模、分析与仿真

11. 自主控制、规划与决策

12. 脑机融合与混合智能技术

13. 图形图像与智能识别

14. 机电液一体化自动化控制

15. 具身智能机器人

16. 数据分析与大数据挖掘

17. 信息 - 物理 - 人系统

c 交叉融合

18. 自主无人系统

19. 新概念无人系统与平台

20. 人工智能及其在无人系统的应用

21. 人机交互技术

22. 自动化与控制教育

23. 医疗器械控制

24. 智慧城市建设

d 工程应用

25. 智能环境感知技术

26. 智能导航与定位技术

27. 智能通信与组网技术

28. 先进传感与仪器仪表

29. 精密仪器与测量技术

30. 嵌入式系统与计算机控制

31. 智能电力与电气技术

32. 工业自动化技术

33. 数字孪生技术及应用

34. 船舶与交通系统控制

35. 其它

会议程序

1. 主旨报告

2. 特邀报告

3. 平行会议

4. 博士生论坛

5. Workshop

更多精彩内容敬请期待

论文出版

大会将出版 CAC2025 论文集(U 盘版)。2013 年以来的历届会议英文论文全部被 IEEEXplore 收录，并被 EI 检索。经过专家评审，本届大会部分优秀论文将被推荐到 IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica、Digital Communications and Networks、《自动化学报》、《智能科学与技术学报》和《哈尔滨工程大学学报》等国内外 SCI/EI 收录权威期刊发表。

时间节点

投稿开始时间：2025.02.01

征稿截止日期：2025.05.01

录用通知日期：2025.08.01

论文终稿日期：2025.08.15





中国自动化学会

中国自动化学会(Chinese Association of Automation, 缩写CAA)于1961年成立,是我国最早成立的国家一级学术团体之一,是中国科学技术协会的组成部分,是发展我国自动化科技事业的重要社会力量。学会现有个人会员8万余人,团体会员单位300余个,专业委员会67个,工作委员会12个,30个省、自治区、直辖市设有地方学会组织,覆盖了我国自动化科学技术领域的各个层面。

中国自动化学会在改革中求发展,不断加强群众组织力、学术引领力、社会公信力和国际影响力。近年来,中国自动化学会重点从学术交流与应用推广、组织建设与会员服务、科技评估与人才评价、课题研究与决策支撑、科学普及与继续教育等方面开拓创新,推动中国自动化科学和事业的发展 and 壮大,成为连接政府、产业、学术、科研、会员的重要纽带,致力于成为国内外有影响力的现代科技社团。

学会品牌学术活动

- 中国自动化大会 ·国家新质生产力与智能产业发展会议 ·中国认知计算与混合智能学术大会
- 中国自动化与人工智能教育大会 ·国家智能车发展论坛 ·国家机器人发展论坛 ·国家智能制造论坛
- 国家工业软件大会 ·中国控制会议 ·中国过程控制会议 ·青年学术年会 ·青年菁英系列活动
- 智能自动化学科前沿讲习班 ·钱学森国际杰出科学奖系列讲座 ·会士面对面系列讲座
- CAA云讲座 “我和优博有个约会”系列讲座 ·CAA科普大讲堂 ·CAA“企·话”沙龙
- CAA线上圆桌派 ·CAA青帆计划

学会奖励奖项

- CAA科技进步奖 ·CAA自然科学奖 ·CAA技术发明奖 ·CAA青年科技奖
- CAA科技成就奖 ·CAA青年人才托举工程 ·CAA研究生论文工程
- CAA教育教学成果工程

学会主办期刊

- 中国自动化学会通讯 ·自动化学报 ·IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica
- 信息与控制 ·机器人 ·模式识别与人工智能 ·电气传动 ·自动化博览
- The International Journal of Intelligent Control and Systems



官方微信



官方微博

地址:北京市海淀区中关村东路95号自动化大厦

网址:<http://www.caa.org.cn/>

电话:010-62522472

传真:010-62522248

邮箱:caa@ia.ac.cn

邮编:100190