

# 中国自动化学会通讯

COMMUNICATIONS OF CAA

第 6 期

2023 年 06 月

第44卷 总第237期

主办：中国自动化学会

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

E-mail: [caa@ia.ac.cn](mailto:caa@ia.ac.cn)

京内资准字2020-L0052号

CAA云讲座

精准、安全、隐私保护的脑机接口(BCI) / 伍冬睿 P008

多智能体系统的分布式非光滑优化与矩阵方程求解 / 曾宪琳 P024

自动化专业核心精品课程混合式教学的探索与实践——《过程控制及仪表》课程为例 / 孟庆松 P031

移动机器人运动规划与集群协同 / 高飞 P041



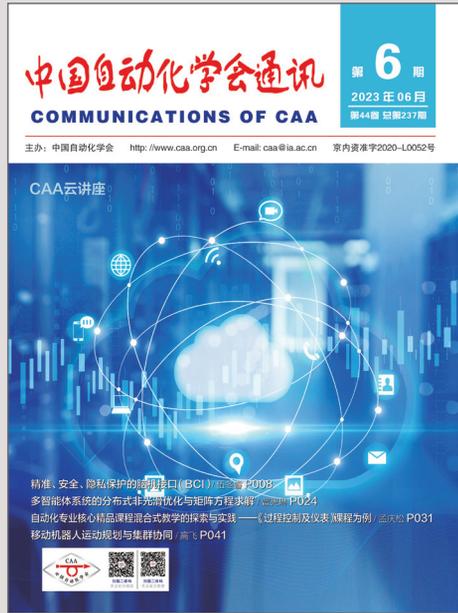
扫描二维码  
关注官方微信



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 | 2023 年 6 月 30 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。



郑南军

日前，中共中央党史和文献研究院编辑的习近平总书记《论科技自立自强》在全国发行。习近平总书记围绕推进科技自立自强发表的一系列重要论述，深刻阐明了科技创新在人类社会进步中的重要地位，系统阐述了推进我国科技创新的战略目标、重点任务、重大举措和基本要求，提出了一系列新思想新观点新论断新要求，对于我们加快实现高水平科技自立自强，加快构建新发展格局，着力推动高质量发展，全面建成社会主义现代化强国，以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴，具有十分重要的指导意义。

科技自立自强是国家强盛之基、安全之要。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新工作，深入实施创新驱动发展战略，坚持把创新作为引领发展的第一动力，加快推进科技自立自强，基础研究和原始创新不断加强，一些关键核心技术实现突破，战略性新兴产业发展壮大，重大创新成果竞相涌现，我国科技事业发生了历史性、整体性、格局性重大变化，成功进入创新型国家行列。

“云讲座”系列活动是中国自动化学会为积极应对常态化疫情防控，以线上方式稳妥有序开展学术交流活动的学术交流活动。每期活动邀请一位自动化领域的专家学者进行专题报告，围绕最新的研究成果进行分享。自“云讲座”开讲以来，已陆续邀请了百位专家学者进行在线报告分享，累计数百万人参与了线上直播与互动。通过“云讲座”方式，突破了学术交流活动受制于空间和时间的困境，为广大科技工作者提供一个更加便捷和直观的在线交流平台。

本期通讯将为大家分享华中科技大学人工智能与自动化学院伍冬睿教授的《精准、安全、隐私保护的脑机接口》、北京理工大学曾宪琳副教授的《多智能体系统的分布式非光滑优化与矩阵计算》、哈尔滨理工大学孟庆松教授的《自动化专业核心精品课程混合式教学的探索与实践》以及浙江大学控制学院副研究员高飞的《移动机器人运动规划与集群协同》4篇文章。

在此向贡献稿件的各位专家学者表示衷心的感谢，期待本刊专题能为读者带来更多更深入讨论和思考，为实现我国高水平科技自立自强贡献力量。



### 口述历史 / Oral History

004 口述历史系列访谈——我国飞航技术专家  
黄瑞松

### 专题 / Column

- 008 精准、安全、隐私保护的脑机接口 (BCI) /  
伍冬睿
- 024 多智能体系统的分布式非光滑优化与矩阵方程  
求解 / 曾宪琳
- 031 自动化专业核心精品课程混合式教学的探索与  
实践——《过程控制及仪表》课程为例 / 孟庆松
- 041 移动机器人运动规划与集群协同 / 高飞

### 观点 / Viewpoint

- 049 徐宗本院士：凝练基础研究真问题
- 053 李德毅院士等：人工智能看教育

### 科普园地 / Science Park

- 060 社会尺度挑战下的控制：2030 路线图（一）  
/ Anuradha M. Annaswamy、Karl H. Johansson、  
George J. Pappas
- 064 社会尺度挑战下的控制：2030 路线图（二）  
/ Anuradha M. Annaswamy、Karl H. Johansson、  
George J. Pappas





P077



P078



P082

## 学会动态 / Activities

- 069 2023 国家机器人发展论坛在广东深圳隆重召开
- 074 聚焦学术前沿, 赋能领域发展  
2023 年中国自动化学会港澳地区博士学术交流会在哈尔滨举办
- 076 中国自动化学会十一届三十八次秘书长工作会议成功召开
- 077 中国自动化学会受邀参加民政部第四期采访采风活动

- 078 中国自动化学会参加中国科协“入院行动”赴芜湖铜陵考察调研
- 080 “青少年人工智能核心素养测评”2023 第二季度测评圆满完成
- 081 “智慧新疆”机器人竞赛教学实践研讨会成功举办

## 形势通报 / Voice

- 083 5G 持续放大乘数效应
- 085 多地强化政策引导、创新支撑和要素保障——推动制造业高质量发展

## 党建强会 / Party Building

- 087 健全全面从严治党体系推动新时代党的建设新的伟大工程向纵深发展
- 089 中国式现代化是中国共产党领导的社会主义现代化



P075

## 口述历史系列访谈

### ——我国飞航技术专家黄瑞松

导  
语

秉承尊重历史、以史为鉴、弘扬传承的理念，中国自动化学会于2015年特别打造“口述历史”系列访谈栏目，走访学会和自动化学科发展息息相关的老一辈科学家，探寻心灵深处的记忆，记录心路历程的点滴，为当代自动化领域科技工作者了解历史、传承老一辈科学家的宝贵科学思想和精神财富提供有益借鉴。

本期学会采访的是黄瑞松院士。黄瑞松，我国飞航技术专家，中国工程院院士，中国自动化学会特聘顾问、第八届、九届常务理事，曾任中国航天科工集团公司三院总体部主任、三院科技委主任、三院副院长、中国航天科工集团公司科技委副主任等职务，长期从事飞航导弹武器研制和预

先研究工作，历任多型导弹武器系统总体副主任设计师、副总设计师、总设计师、总指挥等职务，为中国飞航导弹武器事业的发展做出了突出贡献；主持了我国飞航仿真工程建设，积极组织和推动CAD/CAM技术的开发研究工作，对导弹研制发挥了重要作用；组织深入研究高超技术，对高超

技术的发展奠定了重要基础。

#### 一、战乱年代，点燃从军报国梦

黄瑞松1938年7月出生于江苏宜兴和桥镇西锄村的一个普通农民家庭。宜兴位于江苏、浙江、安徽三省交界处，环境优渥、历史悠久，其中的和桥镇更是宜兴四大镇之一，曾是“千叶小舟云集，八方商贾过往”的繁华商埠。西锄村地处溇湖之滨，长达50公里的河道纵横交错。黄瑞松的家，就地处这条河的边上。

1938年，是日本发动侵华全面战争的第二年，也是南京大屠杀惨案发生的第二年，这风景如画的家乡，不可避免地在战火纷飞的年代，遭受了日军的烧杀抢掠。

回想起学生时代经历的黄瑞松，印象最深的便是黑压压的碉堡和明晃晃的刺刀。地处溇湖湖畔的西锄村随着宜兴的陷落，一



图1 黄瑞松院士接受中国自动化学会采访  
(从左至右分别是：吕爱英、王坛、张楠、黄瑞松、叩颖)

度成为中日军队交战的前线。日寇的碉堡就在黄瑞松就读的西锄小学的操场边上，距离黄瑞松的家也不过500米。也正是因为离得近，黄瑞松的家里不断受到日寇的骚扰和洗劫，甚至在一次扫荡中，黄瑞松的父亲被逮住殴打差点死于非命。

面对气焰嚣张的侵华日军，毛泽东同志提出要在沿江沿海一带组织游击战争，太滬地区成为赫赫有名的抗日根据地，新四军在黄瑞松家乡一带也和日寇打起了游击，扫荡与反扫荡此起彼伏。黄瑞松家里也就经常住进新四军，在他们英勇顽强的抗争精神的感染下，在西锄小学进步思想的教育下，黄瑞松从小便意识到要保家卫国，必须要有强大的武器装备，“强国梦”就像一颗种子深埋在他的心中。

梦想是方向，执行是力量。心怀强国梦的黄瑞松，一直想要参军报国。于是，他在西锄小学积极表现，早早成为了一名少先队员；在刚满13岁抗美援朝招募志愿者时，积极报名参军，但因年纪小没被接收；在高三临近高考时，又报名空军飞行员，但因体检不合格没能入选。

虽几次尝试，几次落选，但这不仅没有磨灭黄瑞松参军的火种，反而更加激发了他从军的愿望。终于，在高考前，中国人民解放军军事工程学院去学校招生，



图2 初入哈军工时的黄瑞松

黄瑞松凭借优异的成绩顺利被预录取；又凭借高考的稳定发挥，最终收到了哈军工的录取通知书，走上了国防现代化建设的道路。

## 二、艰苦奋斗，实现飞航梦

中国人民解放军军事工程学院（简称“哈军工”），是在1952

年由毛泽东主席批准创办的，院长为陈赓大将，学校的教学计划也是由毛主席亲自审阅的。“决定战争的因素是人，但武器装备对战争起着重要的作用，因此建造现代化武器装备，提升我国的军事工程技术就变得尤为重要。”

1955年10月8日，被誉为“中国航天之父”、“中国导弹之父”的钱学森终于踏上了祖国的土地。1956年，国家组建中国第一个导弹研究单位——国防部第五研究院，钱学森担任首任院长。1957年，哈军工正式设立导弹专业。黄瑞松学的就是有翼导弹控制专业，并成为第一批中国导弹的科技工作者。

尽管有了世界顶级专家，仍然改变不了中国航天事业“一穷二白”的现状。在欧美国家严格的技术封锁下，要引进国外器材



图3 哈军工毕业留念（后排右二为黄瑞松）

都备受制约。大学本科学习期间，克服种种困难，经过研究、摸索、计算、分析，终于培养出新中国第一代航天人，黄瑞松是其中的佼佼者。

参加工作后，更多的研究需要黄瑞松到实验基地去，到生产车间去，了解第一手的信息，解决随时发生的问题。导弹基地建在荒山野岭中，那时出行都靠绿皮火车，车厢里到处都是人。黄瑞松随身携带了小马扎，上车后摊开坐下，下车收起来。

除了忙碌、疲劳，更大的挑战来自心理上的压力。“只做不说”，是航天人的基本准则。

我国有 18000 多公里长的海岸线，从两次鸦片战争到甲午战争等，都是从海上入侵，因此海防问题至关重要。黄瑞松进入国防部五院后，便踏上了国防现代化建设的征程中。新中国百废待兴、基础薄弱、一穷二白，没有核心技术，也没有钱购买试验设施，但国家要强大起来，必须要

有自己先进的武器装备。“什么都没有的情况下，我们必须要继续往前走，必须要自力更生，艰苦奋斗。”

为了加强我国的海防能力，国防部五院开始研仿我国第一型飞航导弹“上游一号”，结束了我国海军“有舰无弹”的历史；后又开始自主设计，由黄瑞松牵头负责岸舰导弹“海鹰二号”控制工作，开创了飞航导弹走基本型系列化发展的先河。自此，中国的海防导弹，走出了一条仿制、改型、自行设计的道路。

在随后长达半个世纪的飞航导弹研制工作，黄瑞松重点参与和负责的导弹型号，射程上覆盖了近程、中程、远程，发射平台上涵盖了海（舰）、陆（岸）、空（机），导弹速度包含了亚音速、高亚音速、超音速、高超音速。90 年代黄瑞松带领团队研制了我国第一型具备完全自主知识产权涡喷发动机的导弹——“强国弹”，成为了我国海军水面舰艇的主战

装备；21 世纪初黄瑞松又带领团队研制了我国第一代远程反舰导弹“Y2”，使我国海军第一次拥有了对敌远程目标打击的能力。黄瑞松经常说他的飞航梦就是空天任我飞，海洋任我航，亚超高超，任我飞航。

凭借在我国飞航技术发展和国防现代化建设作出的突出贡献，黄瑞松多次获得国家科技进步一等奖、国防科技奖特等奖，并荣获国防科工委一等功、航天奖等众多荣誉称号。2003 年当选为中国工程院院士。

### 三、面向未来，心系中国梦飞航梦

科技创新，推动人类文明进步的根本动力。新中国成立后，中国的导弹领域几乎是一片空白，在党中央的坚强领导下，在一代代科技工作者的不懈努力下，我们的导弹技术发生了翻天覆地的变化，不仅短、中、远各种射程齐全，并且核常兼备。



图 4 黄瑞松工作留影



图 5 黄瑞松心系国家发展

回想起自己的工作科研历程，黄瑞松说自己这一路走来始终坚守自己的初心和使命，为国防事业现代化不断的努力和奋斗。虽然我国导弹技术实现了从无到有，从跟跑到并跑、迈入第一梯队，但自己的飞航梦还没有结束，我国的航天梦还要不断的攀登世界高峰。对于国家科技发展和人才培养，黄瑞松从自己的角度提出了几点建议。

一是要大力开展科技创新。核心技术是买不来的，必须要牢牢掌握在自己手里，面对关键卡脖子问题，看到差距但不纠结于差距，必须坚信“事在人为，关键在为，只要敢为，大有作为”，通过一代一代科技工作者的自力更生必然会推动我国科技自立自强。

二是要加大基础研究投入力度。基础研究尤其是新理论新思想的不断突破，有利于科学技术的长足发展与进步。基础研究离不开大型科学实验装置，科学技术要创新，必须做科学实验，科学实验就必须有手段，要手段就必须有设备。理论研究要与应用技术研究紧密结合，理论需要技术手段进行验证，从而进一步提升理论。

三是要坚持团结协作与时俱进。团结就是力量，飞航导弹研究是一个系统工程，包含了许多专业，需要各个方面的专家级人才，只有团结协作才能实现技术攻关。黄瑞松在带领团队研

制“强国弹”期间，问题层出不穷、试验不断延长，在团队身体和精神遭受双重折磨之时，黄瑞松带领全体人员歌唱“团结就是力量”，这首歌迸发出来的力量让全体队员找回了雄心壮志，最终也顽强与智慧取得了突破性进展，从根本上解决了问题。

四是要坚持“自力更生”培养人才。科技创新的关键在于人。黄瑞松高度重视人才的培养，并有一套自己的人才培养方法，这就是“重思想、严要求、搭平台、有格局”。黄瑞松尤其重视思想教育，认为航天人尤其要大力发扬“热爱祖国、无私奉献，自力更生、艰苦奋斗，大力协同、勇于登攀”的航天精神；失败是成功之母，科技创新必然要经历无数次的失败，年轻人要敢于尝试，敢于勇往直前，尤其是在航天大系统级人才的培养上，在发达国家访问学习并不能获取系统工程知识，反而需要通过反复的工作实践才能学到系统的知识，因此在系统级人才培养上，也要坚持“自力更生”，实践中培养。

在谈到青年科技工作者的培养时，黄瑞松特别感慨的提到，基础研究是不容易出成果甚至可能会面临多次失败，青年学者要有心里准备，要做好长期做冷板凳的准备。但同时，黄院士也呼吁更多的部门能够关注到基础研究，关注从事基础研究的青年学

者，能够给予他们更多的物力财力支持，让他们能够心无旁骛、踏下心来搞科研工作。

作为自动化领域老一辈科学家、中国自动化学会第八届、九届常务理事，黄瑞松也见证和亲历了学会的发展壮大。对于学会的未来发展，黄瑞松特别提到要不忘初心、牢记使命，坚持“与时俱进、解放思想、实事求是、真抓实干”，以问题导向和需求导向为牵引，大力推动基础研究的落地应用，高度重视科技人才培养，持续加大对人才和成果的奖励力度，全面提升社会效益，团结带领更广大科技工作者勇攀世界科技最高峰。

### 编后语：

在战火纷飞的年代成长，亲历“落后就要挨打”的黄老，倾尽一生都在坚守“保家卫国”的信仰。不怕艰苦、不说差距、全力奋斗，这是他面对“科技落后”的态度，也是他一生的真实写照。如今黄老虽然年逾八十有多项成果荣誉加身，但在采访中仍旧说自己的飞航梦还没有结束，还要继续为国家奉献。这让我们看到了以黄老为代表的老一辈科学家胸怀祖国、矢志奉献的精神，也希望这种精神能够激励新时代的广大科技工作者实现更多“从0到1”的突破，为我国的科技事业添砖加瓦。○

# 精准、安全、隐私保护的脑机接口 (BCI)

文 / 华中科技大学 伍冬睿

导读：2022年1月20日上午，华中科技大学人工智能与自动化学院伍冬睿教授做客“CAA云讲座”，作题为“精准、安全、隐私保护的脑机接口”的报告。

脑机接口是人脑与外部设备（计算机、机器人等）的直接交互通道。因为个体差异与脑电信号的非平稳性，脑机接口系统经常需要针对新用户或新任务进行个性化校准，费时费力，影响用户兴趣。先进的机器学习方法可以帮助减少甚至完全消除校准，提高系统准确度和用户友好性。另外，最近研究发现脑机接口中的机器学习模型容易受到对抗攻击影响，而且脑电信号中包含了很多人隐私信息，因此脑机接口系统的安全性和隐私保护也是其大规模应用的重要考虑。

伍冬睿教授在本报告中介绍了脑机接口中用于加速校准的迁移学习方法，和针对脑机接口系统的对抗攻击和隐私保护方法，最终目的是实现精准、安全、隐私保护的脑机接口系统。

## 一、前言

人脑由约860亿个神经元和数万亿个相互连接的突触组成，是当前国际研究的热点和难点。2013年以来，国际发达国家、地区和IEEE都纷纷开始自己的脑计

划，研究大脑运行机制并进行相关疾病诊疗，如图1所示。

2013年4月2日，美国公布“创新性神经技术大脑研究”（Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies, BRAIN）计划，即美国脑计划。

计划未来12年间共投入45亿美元，探索人类大脑工作机制、绘制脑活动全图、推动神经科学研究、并针对目前无法治愈的大脑疾病开发新疗法。

2013年10月，欧盟脑计划（Human Brain Project, HBP）启动，计划未来10年投入10亿欧元，复制包括神经元及其电活动在内的人类大脑。2015年，欧盟脑计划发生重大调整，复制人类大脑的计划被放弃，工作重心转变为构建基于信息通讯技术的研究脑、认知神经科学和仿脑计算的公共平台。

2014年，日本脑计划“综合神经技术用于疾病研究的脑图谱”



图1 全球脑计划

(Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies, Brain/MINDS) 启动, 为期 10 年, 每年投入经费 2700~3600 万美元。日本脑计划旨在利用非人灵长类动物猕猴绘制神经元回路的结构和功能图谱, 以帮助最终了解人类大脑。

2015 年秋, 世界上最大的学术组织—国际电气电子工程师学会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) — 发起了 IEEE Brain Initiative, 可称为 IEEE 脑计划。其目标是创建一个技术社区来促进跨学科的合作和协调, 推动用于理解大脑、治疗疾病、改善人类状况的研究、标准制定和工程技术开发。

2021 年 9 月 16 日, 中国科技部网站正式发布“科技创新 2030—脑科学与类脑研究”重大项目申报指南, 标志着中国脑计划正式启动。首批资金为 31.48 亿, 后续资金规模可达数百亿。中国脑计划采用“一体两翼”布局, 如图 2 所示。“一体”即指人类认知的神经基础为主体和核心; “两翼”包括以探索大脑秘密、攻克大脑疾病为导向的脑科学研究和以建立和发展人工智能技术为导向的类脑研究。

脑机接口 (Brain-Computer Interface, BCI) 是美国、中国和 IEEE 脑计划的重要组成部分。

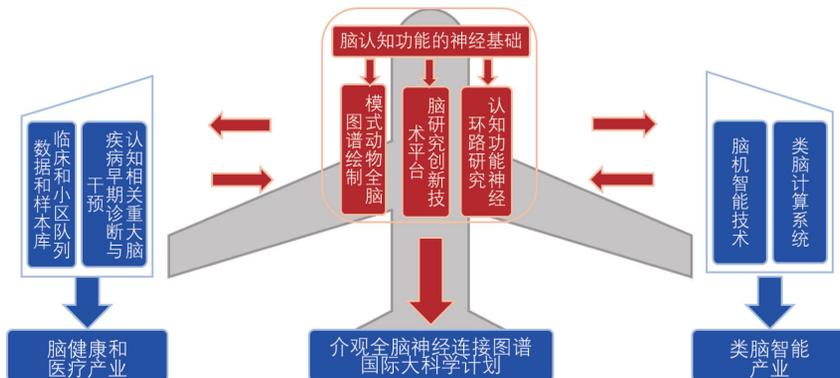


图 2 中国脑计划“一体两翼”布局

## 二、脑机接口 (Brain-Computer Interface, BCI)

### 2.1 BCI 概述

BCI 是大脑和外部设备之间的一种直接交互通路, 可用于研究、绘制、帮助、增强或修复人类的认知或感觉—运动功能。闭环脑机接口系统的架构如图 3 所示。

根据所使用的信号的不同, 脑机接口系统可分为:

- 无创 BCI, 或非侵入式 BCI: 主要使用头皮脑电图 EEG。无创 BCI 使用的脑电帽易于佩戴,

无需做手术, 适合普通消费者使用, 但其空间分辨率较差 (电极间距离较大, 且无法确定信号起源), 不能有效利用高频信号, 且在使用前需要进行长时间校准。

- 侵入式 BCI: 直接将电极植入到大脑灰质中, 可以修复患者的视觉、听觉、触觉、感觉运动功能等, 但手术风险较大, 且电极寿命一般不超过 5 年。
- 半侵入式 BCI: 主要使用皮层脑电图 ECoG。ECoG 将电极放置在头骨下方的大脑皮层表面, 其相比于无创 BCI 有更高

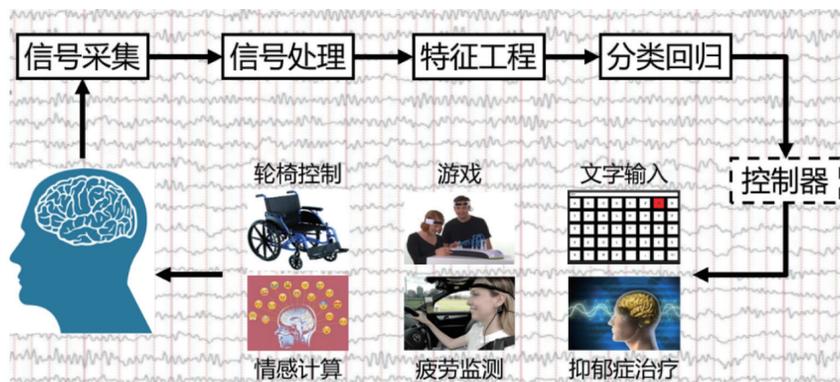


图 3 闭环脑机接口系统架构

的信号分辨率，而又比侵入式 BCI 有更低的手术风险。

本报告主要关注基于头皮脑电图的无创 BCI。其 3 种主要范式是：

1) 运动想象 (Motor Imagery, MI), 如图 4 所示: 在手、脚等肢体器官的运动想象或运动执行期间, 大脑皮层对侧运动感觉区的脑电节律能量会明显减弱, 而同侧运动感觉区的脑电节律能量增加, 在  $\mu$  节律 (8Hz ~ 12Hz) 与  $\beta$  节律 (18Hz ~ 25Hz) 上最为明显, 能通过 EEG 检测出来。运动想象脑机接口系统可用于中风康复、轮椅控制等。

2) 稳态视觉诱发电位 (Steady-State Visual Evoked Potential, SSVEP), 如图 5 所示: SSVEP 是由快速重复刺激诱发的脑电的稳定振荡。一般的刺激源有闪光灯、发光二极管和显示器的棋盘格模式等。当人眼注视闪烁的刺激源时, 脑电的振荡频率会趋近于刺激源的闪烁频率。用不同的闪烁频率编码不同的指

令, 用户就可以通过注视不同频率的刺激源发出不同的指令。在 2019 年第三届中国脑机接口比赛中, 基于 SSVEP 的脑机接口拼写器创造了每分钟在电脑屏幕输出 691.55 比特 (相当于每分钟输出 69 个汉字) 的记录, 超过了普通人用手机输入文本的速率。

3) P300 事件相关电位 (Event Related Potential, ERP), 如图 6 所示: 当人脑受到一个特定的、少见的刺激时, 会在刺激产生之后约 300 毫秒产生一个比较大的正向电位峰, 称为 P300。诱发 P300 事件相关电位的特定事件称为 oddball 范式 (小概率刺激范式)。事件发生的概率越小, P300 的峰值越高。一般的 P300 范式有视觉 P300 和听觉 P300, 目前应用较多的是视觉 P300 范式。该原理可用于文字输入、测谎等。

目前大多数脑机接口研究都集中在上述 3 种分类问题上, 以及情感脑机接口 (基于 EEG 的情绪分类)。脑机接口中也有很多重要的回归问题, 如认知状态 (注意力) 估计、行为状态 (反应时

间) 预测、应用程序控制 (移动光标) 等, 如图 7 所示。华中科技大学脑机接口与机器学习实验室的研究同时关注脑机接口中的分类和回归问题。

目前的脑机接口系统存在诸多挑战, 如不精准、不安全、不能充分保障用户隐私等。为了实现大规模商业化应用, 亟需精准、安全和隐私保护的脑机接口系统, 即系统能即插即用或尽量少校准, 在受到恶意攻击时性能依然保持稳定, 并在不泄露用户隐私的前提下完成脑机接口的必要功能。

以基于运动想象的脑机接口为例, 其技术细节如图 8 所示。信号处理部分包括时域滤波和空域滤波。时域滤波包括陷波滤波 (Notch Filtering) 以消除 50/60Hz 的工频干扰, 和带通滤波以消除直流漂移和高频噪声。空间滤波器包括基础的公共平均参考 (Common Average Referencing)、拉普拉斯滤波器、主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 等, 以及更复杂的滤波器, 如独

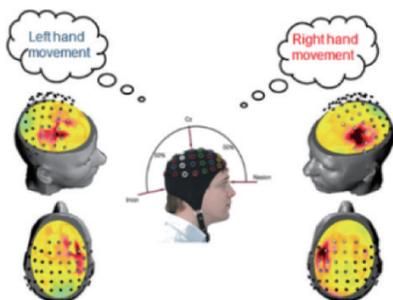


图 4 运动想象

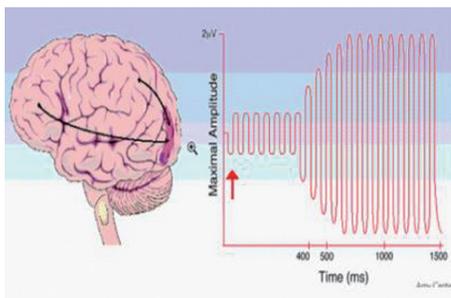


图 5 稳态视觉诱发电位

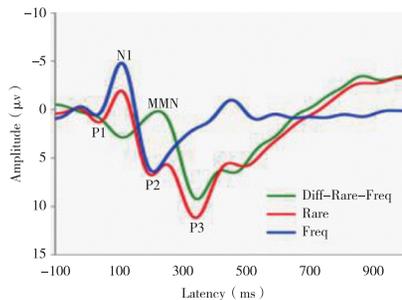


图 6 P300 事件相关电位



**Cognitive status estimation, e.g., personalized learning**



**Behavioral status prediction, e.g., EEG-based driver reaction time estimation**



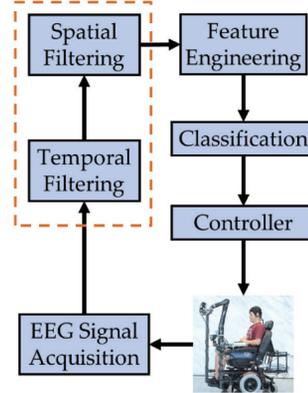
**Direct control applications, e.g., BCI-based mouse cursor movement control**

图7 无创脑机接口中的回归问题

立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA)、xDAWN、典型相关分析 (Canonical Correlation Analysis, CCA)、共同空间模式 (Common Spatial Pattern, CSP) 等。特征工程主要是特征提取,有时也包括特征选择。可以使用时域、频域、时频域、黎曼空间、切空间、脑电拓扑图等特征。分类器使用机器学习算法从提取的特征中解码脑电信号,理解其含义。控制器发送对应的命令给外部设备,如轮椅等。

先进的信号处理和机器学习算法可大幅提高BCI的准确性。尤其是在基于EEG的无创BCI中,可显著减少针对新用户的校准数据,加速校准过程,提高用户友好度。常用的机器学习方法包括深度学习、主动学习、迁移学习、连续学习等,如图9所示。

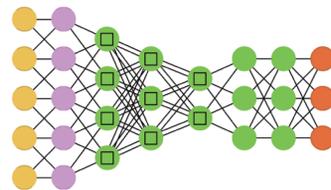
Signal Processing



- ◆ **Temporal filtering** may include notch filtering to remove the 50/60Hz powerline interference, and then bandpass filtering, e.g., [8,30] Hz, to remove DC drift and high frequency noise.
- ◆ **Spatial filters** include the basic ones, e.g., common average reference, Laplacian filters and PCA, and more sophisticated ones, e.g., ICA, xDAWN, CCA, CSP, etc.
- ◆ **Feature engineering** includes feature extraction, and sometimes also feature selection. Time domain, frequency domain, time-frequency domain, Riemannian space, and/or topoplots features could be used.
- ◆ **Classification** uses a machine learning algorithm to decode the EEG signal from the extracted features.

图8 基于MI的脑机接口

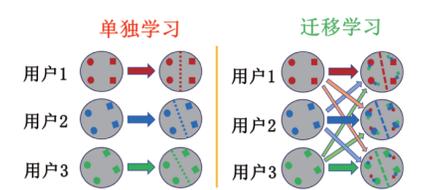
**深度学习Deep Learning (DL) - 融合特征提取与分类器的端到端深层神经网络**



**主动学习Active Learning (AL) - 优化选择未标注数据进行标注, 通过更小标注代价获得更好学习效果**



**迁移学习Transfer Learning (TL) - 使用来自其他用户的辅助数据中的有用信息提高新用户学习效果**



**连续学习Continual Learning (CL) - 在不断学习新任务的同时, 避免对旧任务的灾难性遗忘**

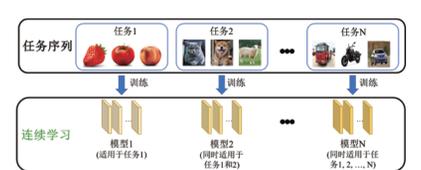


图9 BCI中减少用户校准数据的机器学习方法

## 2.2 精准 BCI 中的迁移学习 (Transfer Learning, TL)

迁移学习使用源域 (其他用户) 中的信息来帮助目标域 (新用户) 的学习。源域和目标域可能存在如下 4 个差异:

1) 源域和目标域的特征空间可能是不同的, 比如两个用户使用不同的脑电帽, 其电极数目、位置都不相同。即使采用相同的脑电帽, 源域用户与目标域用户也可能提取不同的脑电特征。

2) 源域和目标域特征的边缘概率分布一般是不同的, 因为用户间的个体差异导致。

3) 源域和目标域的标签空间也可能是不同的, 比如源域为二分类运动想象 (左手和右手), 而目标域为三分类运动想象 (左手、右手和双脚)。

4) 源域和目标域标签的条件概率分布也可能是不同的, 同样是由于个体差异导致。

因此, 一般不能简单地把源域数据与目标域数据合并, 为目标域训练一个模型, 或者直接把源域模型给目标域使用。需要使用迁移学习来处理这些差异。迁移学习的一个简单示例如图 10 所示。可以根据源域与目标域的相似性, 给源域数据一个较小的权重, 然后与目标域数据合并进行训练。

迁移学习可用于闭环 BCI 系统的每个模块, 有效减少 BCI 中

的新用户校准数据。运动想象脑机接口中的迁移学习完整流程如图 11 所示。先对源域数据和目标域数据做时域滤波 (一般是陷波滤波和带通滤波), 然后进行数据对齐, 再进行空域滤波 (如共同空间模式 CSP 等)、特征工程 (特征提取和选择)、分类等。其中空域滤波、特征工程和分类器中都可以考虑迁移学习以提高性能。

具体论文可参考: Dongrui Wu, Xue Jiang, Ruimin Peng, Wanzeng Kong, Jian Huang, Zhigang Zeng, Transfer Learning for Motor Imagery Based Brain-Computer Interfaces: A Complete Pipeline, [https://](https://arxiv.org/abs/2007.03746)

[arxiv.org/abs/2007.03746](https://arxiv.org/abs/2007.03746)

示例代码: <https://github.com/drwuHUST/TLBCI>

本报告重点考虑数据对齐部分, 因为其对后续迁移学习的效果影响非常大。

数据对齐有多种方法, 如黎曼对齐 (Riemannian Alignment, RA)、欧式对齐 (Euclidean Alignment, EA)、标签对齐 (Label Alignment, LA)、重心对齐 (Centroid Alignment, CA) 等。下面重点介绍本实验室提出的 EA 和 LA。

欧式对齐算法流程如图 11 所示。其处理源域用户和目标域用户的方式是一样的, 所以下面描述中不区分源域用户和目标域用

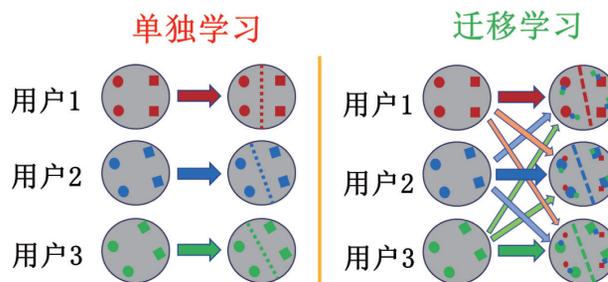


图 10 迁移学习的简单示例

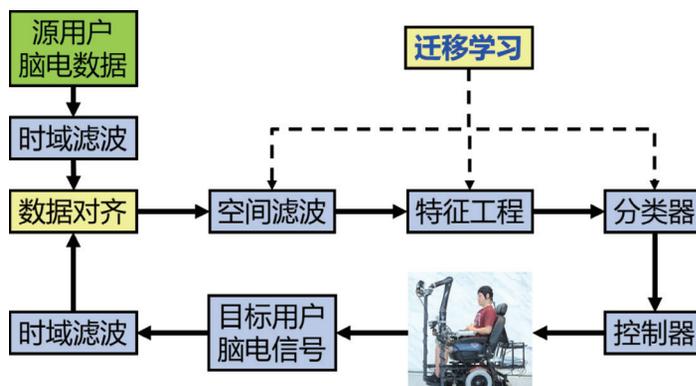


图 11 运动想象脑机接口中的迁移学习完整流程

Assume a subject has  $n$  trials.

1. Compute the arithmetic mean of all covariance matrices:

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i X_i^T,$$

2. Perform the alignment by  $\tilde{X}_i = \bar{R}^{-1/2} X_i$ .

After EA, the mean covariance matrix of all  $n$  aligned trials is:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{X}_i \tilde{X}_i^T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{R}^{-1/2} X_i X_i^T \bar{R}^{-1/2} = \bar{R}^{-1/2} \bar{R} \bar{R}^{-1/2} = I,$$

i.e., the distributions of the covariance matrices from different subjects become more consistent.

图 12 欧式对齐 (Euclidean Alignment, EA) 算法流程

户。假定一个用户有  $n$  段 EEG 样本  $X_i$ 。EA 先计算每段 EEG 样本的协方差矩阵，再计算这  $n$  个协方差矩阵的均值，记为  $\bar{R}$ 。对齐矩阵即为  $\bar{R}^{-1/2}$ 。对每段 EEG 样本，左乘  $\bar{R}^{-1/2}$ ，得到一个跟原始 EEG 样本维度相同的样本  $\tilde{X}_i$ ，用于取代  $X_i$  进行所有后续计算，如空域滤波、特征提取、分类等。EA 简单有效，主要原因是对齐之后任意用户的 EEG 样本协方差矩阵的均值都为单位矩阵，整体分布更加一致。这有点类似迁移学习中经常考虑的最大均值差异 (Maximum Mean Discrepancy, MMD) 度量。

EA 的详细论文请见: H. He and D. Wu\*, "Transfer Learning for Brain-Computer Interfaces: A Euclidean Space Data Alignment Approach," IEEE Trans. on Biomedical Engineering, 67 (2): 399-410, 2020. 代码示例: <https://github.com/hehe03/EA>

RA 与 EA 对比如图 13 所示。EA 计算更快，无需任何标签信息，并且之后可以搭配任意欧式空间滤波器、特征提取、分类器等，使用更加灵活。实验证明，EA 的效果提升也比 RA 更加明显。

我们在两个运动想象数据集

	RA	EA	EA Benefit
Reference Matrix	Riemannian mean of the resting state covariance matrices	Euclidean mean of all covariance matrices	<ul style="list-style-type: none"> <li>EA can be computed much faster</li> <li>EA does not need any label information</li> </ul>
Alignment	Riemannian space covariance matrices	Euclidean space EEG trials	Any Euclidean space classifier can follow
Identity Matrix	Riemannian mean of the resting state covariance matrices	Euclidean mean of all covariance matrices	Distributions from different subjects become more consistent

图 13 RA 与 EA 对比

(MI1、MI2) 和一个事件相关电位数据集 (ERP) 上验证了 EA 的效果。MI2 上的 t-SNE 可视化如图 14 所示。第一行中蓝色的点代表来自 8 个源域用户的数据分

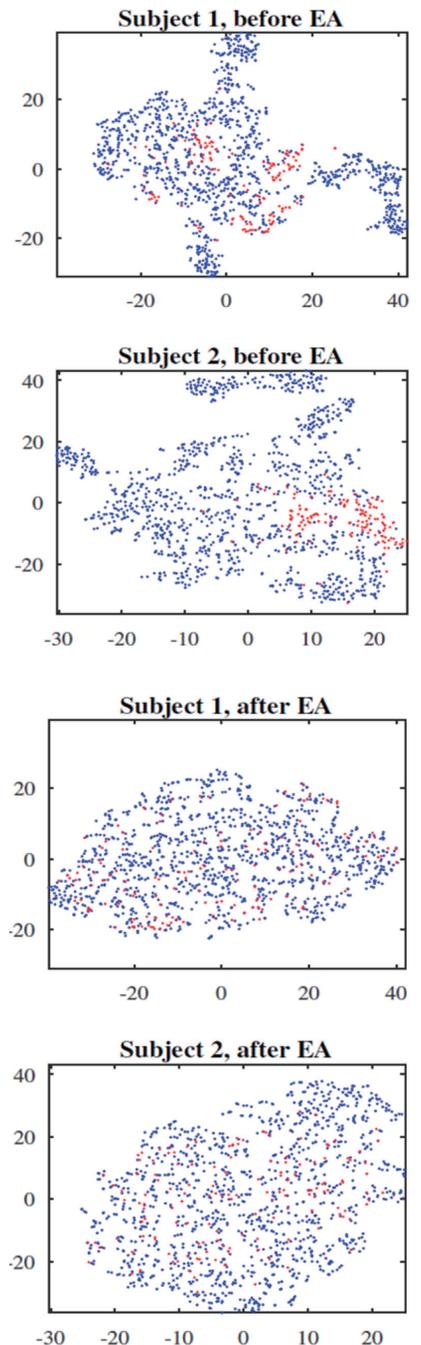


图 14 EA 对齐前后效果的 t-SNE 可视化

布，红色的点是目标域用户（用户1）的数据分布。显然，EA对齐之前，源域和目标域数据分布差异很大。EA对齐之后，二者分布非常一致，有利于之后的迁移学习。第二行是用户2作为目标域时的结果，跟第一行结果类似。

MI1和MI2上的离线分类结果如图15所示。在传统的CSP-LDA方法之前使用EA，能提高平均分类准确度6-20%，也比RA的效果好。同时，运算时间也比RA大幅缩短。ERP数据集上

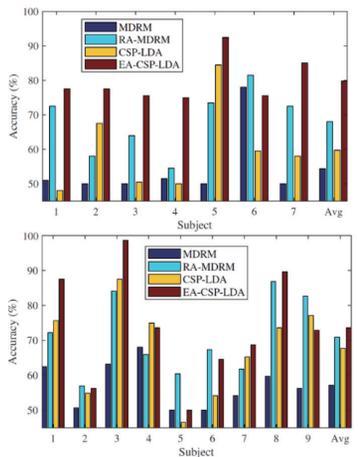


图15 两个MI数据集上的离线分类结果

的结果类似。3个数据集上的在线分类实验同样证明了EA的优越性。

EA论文在IEEE Transactions on Biomedical Engineering 2020年发表的全部346篇论文中被引排名第3。来自2018年图灵奖获得者Hinton领衔的多伦多大学Vector人工智能研究所的第三方实验表明，EA也能显著提高深度学习分类器效果，如图16所示。

基于EA方法和其它算法，华中科技大学脑机接口与机器学习

OFFLINE UNSUPERVISED CLASSIFICATION ACCURACIES (%) ON THE TWO MI DATASETS.

Dataset	Subject	MDRM	RA-MDRM	CSP-LDA	EA-CSP-LDA
MI Dataset 1	1	51.00	72.50	48.00	77.50
	2	50.00	58.00	67.50	77.50
	3	50.00	64.00	50.50	75.50
	4	51.00	54.50	50.00	75.00
	5	50.00	73.50	84.50	92.50
	6	78.00	81.50	59.50	75.50
	7	50.00	72.50	58.00	85.00
	8	50.00	68.00	59.71	79.79
	avg	54.36	68.07	59.71	79.79
MI Dataset 2a	1	62.50	72.22	75.69	87.50
	2	50.69	56.94	54.86	56.25
	3	63.19	84.03	87.50	98.61
	4	68.06	65.97	75.00	73.61
	5	50.50	60.42	46.53	50.00
	6	50.50	67.36	54.17	64.58
	7	54.17	61.81	65.28	68.75
	8	59.72	86.81	73.61	89.58
	9	56.25	82.64	77.08	72.92
avg	57.18	70.91	67.75	73.53	

THE COMPUTING TIME (SECONDS) OF EA-CSP-LDA AND RA-MDRM.

	EA-CSP-LDA		RA-MDRM	
	Mean	std	Mean	std
MI Dataset 1	0.3864	0.0514	7.5326	0.2200
MI Dataset 2a	0.2405	0.0322	0.8766	0.0729

IEEE Trans. on Biomedical Engineering 2020年发表的346篇论文中被引排名第3

我们观察到，TIDNet与训练增强方法(即伍冬睿等提出的EA方法)结合，性能比浅层基准模型更稳定，有时展现出巨大且具有统计显著性的性能提升，比如运动想象分类准确度提升超过8%。TIDNet与数据对齐(即伍冬睿等提出的EA方法)组合的方法被证明是单次脑电数据分类的稳定方法，即使受到干扰的脑电数据也可用于训练。

generality. We use five publicly accessible datasets covering a range of tasks and compare our approaches to state-of-the-art alternatives in detail. **Main results.** We observe that TIDNet in conjunction with our training augmentations is more consistent when compared to shallower baselines, and in some cases exhibits large and significant improvements, for instance motor imagery classification improvements of over 8%. Furthermore, we show that our suggested multi-domain learning (MDL) strategy strongly outperforms simply fine-tuned general models when targeting specific subjects, while remaining more generalizable to still unseen subjects. **Significance.** TIDNet in combination with a data alignment-based training augmentation proves to be a consistent classification approach of single raw trials and can be trained even with the inclusion of corrupted trials. Our MDL strategy calls into question the intuition to fine-tune trained classifiers to new subjects, as it proves simpler and more accurate while remaining general.

来自2018年图灵奖获得者Hinton领衔的多伦多大学Vector人工智能研究所: D. Kostas and F. Rudzicz, "Thinker Invariance: Enabling Deep Neural Networks for BCI Across More People," *Journal of Neural Engineering*, 17(5): 056008, 2020.

图16 EA方法的第三方评价

习实验室2019—2021连续3年获得基金委信息科学部、中国电子学会和清华大学共同主办的世界机器人大赛—BCI脑控机器人大赛全国一等奖或特等奖，如图17所示。

在EA的基础上，我们又进一步提出了标签对齐(Label Alignment, LA)脑机接口迁移学习数据预处理方法，可处理源域与目标域任务不一致的迁移学习场景，比如源域用户二分类、目标域用户三分类。LA与EA的对比如图18所示。LA是首个可进行跨用户、跨设备和跨任务的复杂异构迁移学习的数据对齐方法。LA的效果优于EA，但是需要目标域少量的带标注数据，而EA完全不需要任何带标注数据。

LA的详细论文: H. He and D. Wu\*, "Different Set Domain Adaptation for Brain-Computer Interfaces: A Label Alignment Approach," *IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 28(5): 1091-1108, 2020。代码示例: <https://github.com/hehe03/LA>

以上介绍的EA和LA都是脑机接口迁移学习中的数据对齐方法。数据对齐之后，还可以在后续步骤中继续使用迁移学习进一步提升分类效果。比如流形嵌入知识迁移(Manifold Embedded

世界机器人大会—BCI脑控机器人大会 2019-2021 连续三年全国一等奖

1. 指导单位
  - 国家自然科学基金委员会
2. 主办单位
  - 国家自然科学基金委员会信息科学部
  - 中国电子学会
  - 清华大学



图 17 EA 相关比赛获奖

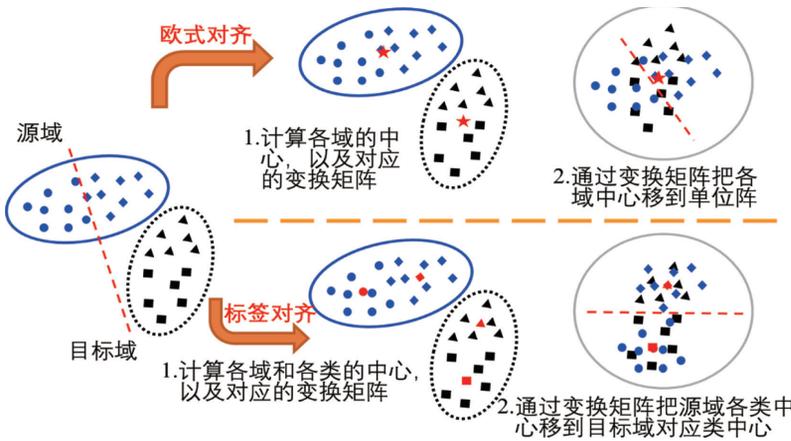


图 18 LA 与 EA 对比

Knowledge Transfer, MEKT), 如图 19 所示, 先进行数据对齐 (Centroid Alignment, CA) 再进行迁移学习, 进一步提高

分类准确度。MEKT 还利用域迁移性估计来识别最有利的源域 (丢弃其他源域), 降低运算代价。详细论文: W. Zhang and

D. Wu\*, "Manifold Embedded Knowledge Transfer for Brain-Computer Interfaces," IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 28 (5): 1117-1127, 2020. 代码示例: <https://github.com/chamwen/MEKT>

针对脑机接口中回归问题的迁移学习, 华中科技大学脑机接口与机器学习实验室也提出了特征加权阶段学习 (Feature Weighted Episodic Training, FWET) 方法, 如图 20 所示, 进行完全无监督的、基于 EEG 的驾驶员疲劳状态估计, 并入选期刊封面论文。详细论文: Y. Cui, Y. Xu and D. Wu\*, "EEG-Based Driver Drowsiness Estimation Using Feature Weighted Episodic Training," IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 27 (11): 2263-2273, 2019. 代码示例: [https://github.com/YuqiCui/Episodic\\_Training\\_](https://github.com/YuqiCui/Episodic_Training_)

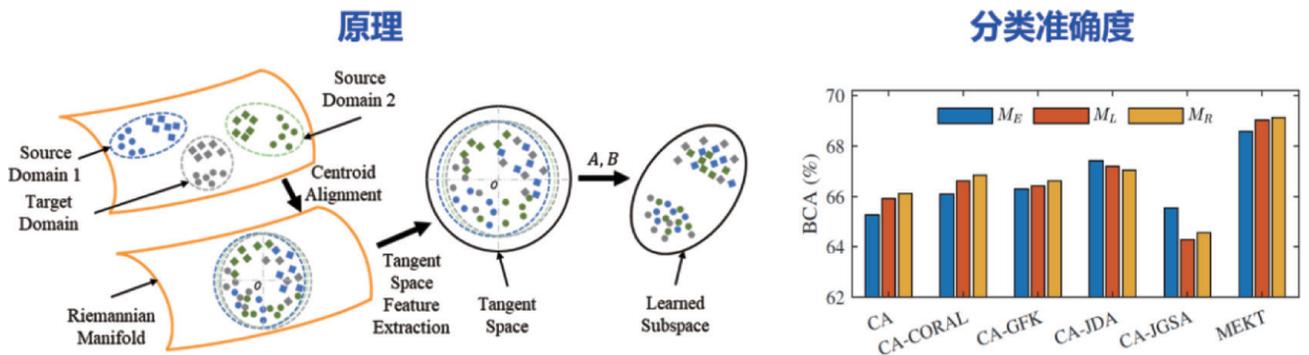


图 19 流形嵌入知识迁移 (Manifold Embedded Knowledge Transfer, MEKT)

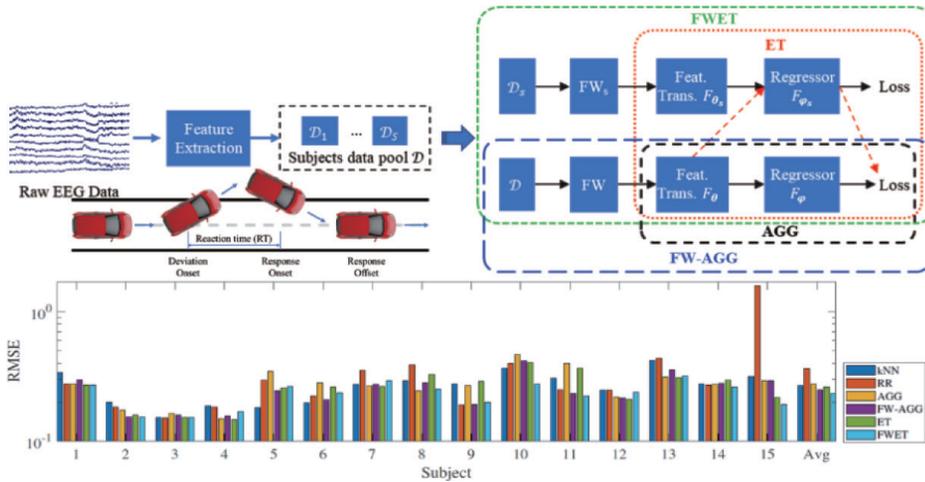


图 20 特征加权阶段学习 (Feature Weighted Episodic Training, FWET)

Domain\_generalization

### 2.3 BCI 中的对抗攻击

机器学习模型，尤其是深度学习模型，很容易受到对抗攻击：攻击者通过向真实样本中添加微小的、人眼不可察觉的扰动，导致模型发生预测错误。如图 21 所示，在熊猫图片中加入精心设计的微小干扰噪声，肉眼完全看不出差别，然而会被深度学习分类器识别为长臂猿；在正常的 EEG 数据中加入精心设计的微小扰动，也会导致模型发生预测错误。

数据中加入微小干扰，也可能让其分类出错。

脑机接口中的对抗攻击可能有很多危害，比如攻击 BCI 控制的轮椅或外骨骼可让用户感到困惑和沮丧，显著降低用户生活质量，甚至故意驱动轮椅或外骨骼系统伤害用户。当 BCI 用于意识障碍患者意识评估时，对抗攻击可能会导致误诊。

根据攻击结果，有两种类型

的对抗攻击：目标攻击和非目标（无差别）攻击，如图 22 所示。目标攻击迫使模型将特定的样例或特征空间的特定区域分类到特定的（通常是错误的）类别中。非目标攻击使模型对某些样例或特征空间区域进行错误分类，但不指定它们应该被错分到哪个类别。例如，在一个 3 分类问题中，假设类别标签为 A、B 和 C，那么，目标攻击可能会使所有输入

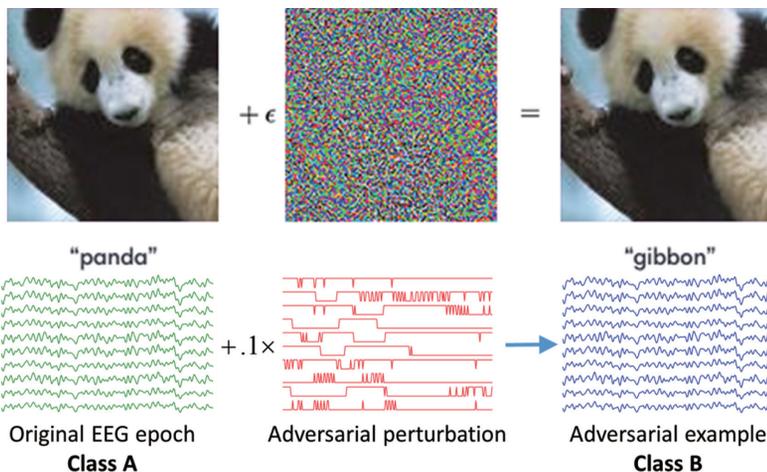


图 21 图像分类和脑机接口中的对抗攻击示例

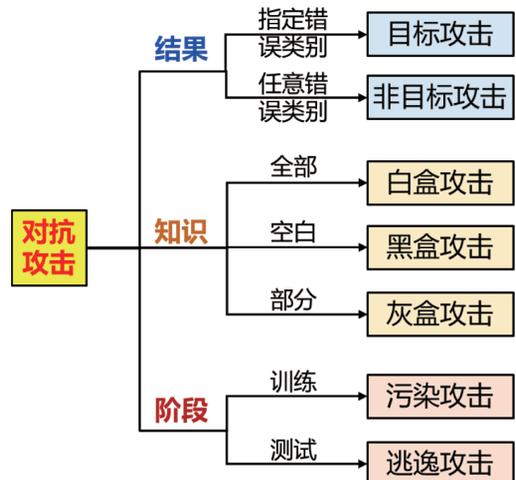


图 22 对抗攻击分类

都被分为 A 类。而非目标攻击会使 A 类输入被分为 B 类或 C 类，但不指定它必须是 B 或 C 类。只要分类类别不是 A 类，那么非目标攻击就是成功的。

根据攻击者对目标模型的了解程度，可以有三种攻击类型，如图 23 所示：

1) 白盒攻击：在这种攻击中，攻击者知道关于目标模型的所有信息，包括其架构和参数。这是最简单的攻击场景，但可以造成最大的伤害。它可能对应于攻击者是内部人员的情况，或者模型设计者评估模型受攻击时的最坏情况。常用的攻击方法有 L-BFGS、DeepFool、C&W、快速梯度符号法 (FGSM)、基本迭代法 (BIM) 等。

2) 黑盒攻击：攻击者既不知道目标模型的结构也不知道目标模型的参数，但可以向模型提供输入并观察其输出。这是最现实的、也是最具挑战性的攻击场景。一个例子是，攻击者购买了一个商用 BCI 系统并试图攻击它。由于对抗样本的可迁移性，黑盒攻击是可以实现的，即如果两个机器学习模型解决相同的任务，那么由一个机器学习模型生成的对抗样本可以很高的概率欺骗另一个机器学习模型。因此，在黑盒攻击中，攻击者可以多次查询目标模型来构建训练集，利用其训练得到一个替代的机器学习模型，

白盒、灰盒、黑盒攻击比较 [86]。“-”表示该信息是否可用不影响攻击策略，因为其不在攻击中使用。

目标模型信息	白盒	灰盒	黑盒
知道架构	✓	×	×
知道变量	✓	×	×
知道训练数据	-	✓	×
可以观察响应	-	-	✓

图 23 白盒、灰盒和黑盒攻击

然后从替代模型中生成对抗样本用于攻击原始目标模型。

3) 灰盒攻击：攻击者知道关于目标模型的有限信息，例如，构建目标模型所使用的训练数据。

根据对抗攻击针对的阶段，有两种类型的攻击：污染攻击和逃逸攻击，如图 24 所示。污染攻击发生在训练阶段，即通过添加污染样例至训练集，从而在机器学习模型中创建后门。它们通常是白盒或灰盒攻击，通过数据注入实现，即将对抗样例添加到训练集，或进行数据修改，例如通过修改训练数据的特性或标签来污染训练数据。逃逸攻击发生在测试阶段，通过在正常测试样本

中故意添加设计好的微小扰动来误导机器学习模型。它们通常是白盒或黑盒攻击。

BCI 分类问题中的逃逸攻击实现方式如图 25 和 26 所示。在 EEG 信号处理和特征提取之间加入一个劫持模块，用于注入对抗干扰。对抗扰动的幅值应该非常小，难以被检测，但能够欺骗机器学习模型。

Goodfellow 等提出的快速梯度标记法 (Fast Gradient Sign Method, FGSM) 逃逸攻击方法如图 27 所示。基于 FGSM，华中科技大学脑机接口与机器学习实验室提出了用于白盒攻击的无监督快速梯度标记法 UFGSM，

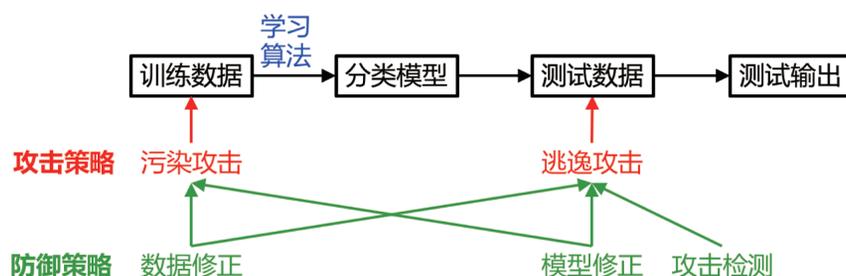


图 24 污染攻击和逃逸攻击

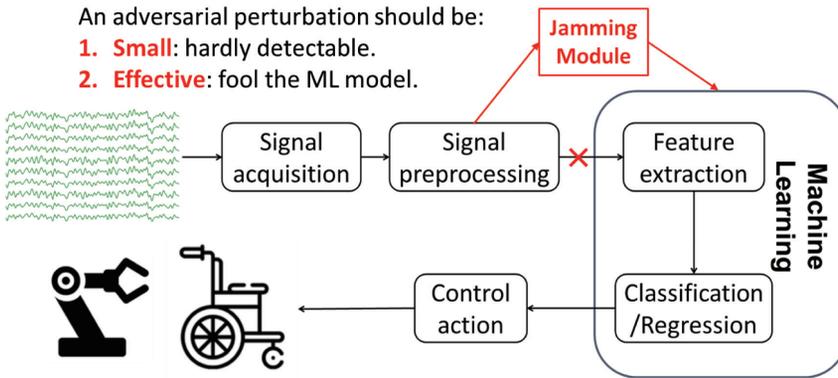


图 25 BCI 中的逃逸攻击

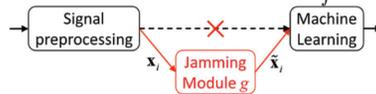
$$\mathbf{x}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i(1,1), & \cdots, & \mathbf{x}_i(1,T) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{x}_i(C,1), & \cdots, & \mathbf{x}_i(C,T) \end{bmatrix}$$

be the  $i$ -th raw EEG epoch, where  $C$  is the number of EEG channels and  $T$  the number of the time domain samples.

$y_i$ : The true class label associated with  $\mathbf{x}_i$ .

$f(\mathbf{x}_i)$ : The mapping from  $\mathbf{x}_i$  to  $y_i$  used in the target CNN model.

$\tilde{\mathbf{x}}_i = g(\mathbf{x}_i)$ : The adversarial example generated by the jamming module  $g$ .



Then,  $g$  needs to satisfy:

**Small**  $|\tilde{\mathbf{x}}_i(c,t) - \mathbf{x}_i(c,t)| \leq \epsilon, \quad \forall c \in [1,C], t \in [1,T]$

**Effective**  $f(\tilde{\mathbf{x}}_i) \neq y_i$

图 26 BCI 中的逃逸攻击算法实现要求

$f$ : The target deep learning model.

$\theta$ : Parameters of  $f$ .

$J$ : The loss function in training  $f$ .

FGSM finds an optimal max-norm perturbation  $\eta$  constrained by  $\epsilon$  to maximize  $J$ :

$$\eta = \epsilon \cdot \text{sign}(\nabla_{\mathbf{x}_i} J(\theta, \mathbf{x}_i, y_i))$$

The jamming module  $g$  is:

$$g(\mathbf{x}_i) = \mathbf{x}_i + \epsilon \cdot \text{sign}(\nabla_{\mathbf{x}_i} J(\theta, \mathbf{x}_i, y_i))$$

图 27 快速梯度符号法 FGSM

FGSM needs to know the true label  $y_i$  of  $\mathbf{x}_i$ .

UFGSM replaces the true label  $y_i$  by  $y'_i = f(\mathbf{x}_i)$ , i.e., the estimated label from the target model. Consequently,  $g$  in UFGSM is:

$$g(\mathbf{x}_i) = \mathbf{x}_i + \epsilon \cdot \text{sign}(\nabla_{\mathbf{x}_i} J(\theta, \mathbf{x}_i, y'_i))$$

$y'_i$  approaches  $y_i$  when the accuracy of  $f$  is high, and hence the performance of UFGSM approaches FGSM.

UFGSM is still effective even when  $y'_i$  is quite different from  $y_i$ .

图 28 用于白盒攻击的无监督快速梯度标记法 UFGSM

如图 28 所示。进行黑盒攻击的 UFGSM 的算法如图 29 所示。详细论文请参考: X. Zhang and D. Wu\*, "On the Vulnerability of CNN Classifiers in EEG-Based BCIs, " IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 27 (5): 814-825, 2019. 代码示例: <https://github.com/ZhangXiao96/EEGAdversary>

我们在三个数据集上攻击了 BCI 中三种常见的深度学习分类器, 如图 30 所示。

在 MI 数据集上的白盒攻击效果如图 31 所示。随着对抗干扰的幅值增加, 二分类准确率会下降到 20% 以下, 让 BCI 系统完全不可用。干扰噪声幅值为 0.05 时对应的正常样本和对抗样本示例如图 32 所示。对抗样本几乎与正常样本完全重合, 很难检测。

黑盒对抗攻击实验结果如图 33 所示。黑盒攻击后的分类准确率远低于被攻击前的准确率, 且添加随机噪声并不起作用, 证明对抗干扰是需要被精心设计的。

最近, 华中科技大学脑机接口与机器学习实验室又提出了针对脑机接口拼写器的对抗攻击方法, 如图 34 所示。首次表明基于 P300 和稳态视觉诱发电位 SSVEP 的 BCI 拼写器非常脆弱, 对系统施加很小的扰动, 就可以达到 70-100% 的攻击成功率。

**Algorithm 1:** Our proposed UFGSM for black-box attacks.

**Input:**  $f$ , the target model;  $J$ , loss function of the substitute model;  $\lambda$ , the parameter to control the step to generate the new training dataset;  $N$ , the maximum number of iterations;  $\epsilon$ , the upper bound of perturbation;  $\mathbf{x}_i$ , a normal EEG epoch.  
**Output:**  $\tilde{\mathbf{x}}_i$ , an adversarial EEG epoch.

Construct a set of unlabeled EEG epochs  $S$ ;  
 Pass  $S$  through  $f$  to generate a training dataset  $D$ ;  
 Train a substitute model  $f'$  from  $D$ , using loss function  $J$ ;  
**for**  $n = 1$  **to**  $N$  **do**  
      $\Delta S = \{\mathbf{x} + \lambda \cdot \text{sign}(\nabla_{\mathbf{x}} J(\theta, \mathbf{x}, y)) : (\mathbf{x}, y) \in D\}$ , where  $\theta$  encodes the parameters of  $f'$ ;  
      $\Delta D = \{(\mathbf{x}_i, f(\mathbf{x}_i))\}_{\mathbf{x}_i \in \Delta S}$ ;  
      $D \leftarrow D \cup \Delta D$ ;  
     Train a substitute model  $f'$  from  $D$ , using loss function  $J$ ;  
**end**

Calculate  $y'_i = f'(\mathbf{x}_i)$ ;  
 Calculate  $\tilde{\mathbf{x}}_i = \mathbf{x}_i + \epsilon \cdot \text{sign}(\nabla_{\mathbf{x}_i} J(\theta, \mathbf{x}_i, y'_i))$ , where  $\theta$  encodes the parameters of  $f'$ .  
**return**  $\tilde{\mathbf{x}}_i$

图 29 用于黑盒攻击的无监督快速梯度标记法 UFGSM

**1. EEGNet**

- Compact CNN, ~1000 parameters
- Temporal Conv2D + DepthwiseConv2D + SeparableConv2D + Classification

**2. DeepCNN**

- Deeper than EEGNet
- Temporal Conv2D + Spatial Conv2D + Max Pooling + 3\*(Conv2D + Max Pooling) + Linear Classifier

**3. ShallowCNN**

- Temporal Conv2D + Spatial Conv2D + Mean Pooling + Linear Classifier

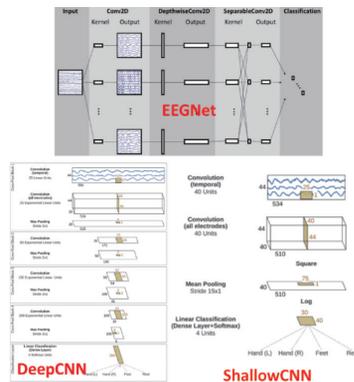


图 30 BCI 中三种常见的深度学习分类器

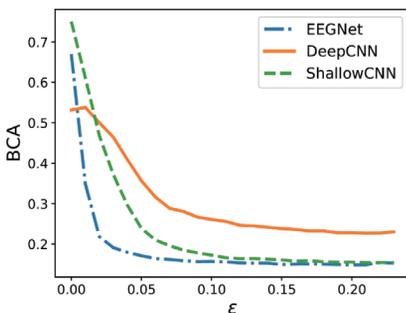


图 31 白盒攻击效果

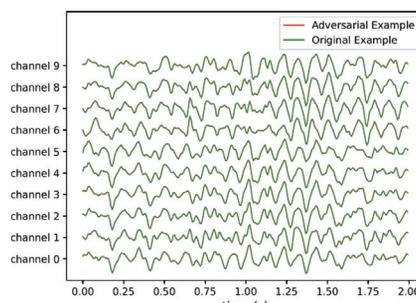


图 32 正常样本和对抗样本示例, e=0.05

Dataset	Target Model $f$	Baselines		Substitute Model $f'$		
		Clean	Noisy	EEGNet	DeepCNN	ShallowCNN
P300	EEGNet	.7570/.7179	.7531/.7156	.3955/.4188	.5244/.5506	.5212/.5559
	DeepCNN	.7713/.7404	.7747/.7430	.3957/.4081	.3589/.4297	.4617/.4806
	ShallowCNN	.7336/.7163	.7375/.7186	.6315/.6189	.5113/.5505	.4118/.4301
ERN	EEGNet	.7665/.7614	.7687/.7640	.3113/.3288	.4893/.5024	.7207/.7006
	DeepCNN	.7719/.7455	.7740/.7519	.3134/.3644	.3049/.3963	.6972/.7113
	ShallowCNN	.7495/.7399	.7367/.7238	.4478/.3860	.3977/.3906	.4691/.5715
MI	EEGNet	.5603/.5565	.5345/.5324	.2352/.2343	.2586/.2571	.3005/.2988
	DeepCNN	.5222/.5189	.5135/.5108	.4446/.4446	.4483/.4475	.4384/.4353
	ShallowCNN	.6201/.6201	.6133/.6128	.5394/.5411	.5062/.5045	.4433/.4466

图 33 黑盒对抗攻击效果

详细论文: X. Zhang, D. Wu\*, L. Ding\*, et al., “Tiny noise, big mistakes: Adversarial perturbations induce errors in Brain-Computer Interface spellers,” National Science Review, 2021. 代码示例: <https://github.com/ZhangXiao96/Speller-Attacks>

华中科技大学脑机接口与机器学习实验室也提出了基于后门的污染攻击方法, 如图 35 所示。通过在训练样本中加入少量的污染样本, 训练后能够在模型内创建一个“后门”; 在测试阶段, 如果测试样本中有“后门”钥匙, 则会被污染的模型分类到攻击者指定的类别。

为了使攻击能够更好地在实际中实现, 我们选择了特定的窄周期脉冲 (Narrow Period Pulse, NPP; 图 36) 作为“后门”的钥匙。攻击者将 NPP 后门密钥添加到任何正常脑电数据中, 然后将这些被污染的样本指定为某一特定类别。在测试时, 任何不带后门的正常 EEG 样本都将被正常分类, 但是带有后门的样本就会被分到之前指定的那个类别。

我们在三个数据集上使用 NPP 攻击了三种 BCI 中常见的深度学习分类器, 结果如图 37 所示。实验表明, 经过污染的模型会对绝大部分包含“后门”钥匙的测试样本按照攻击者指定的类别进

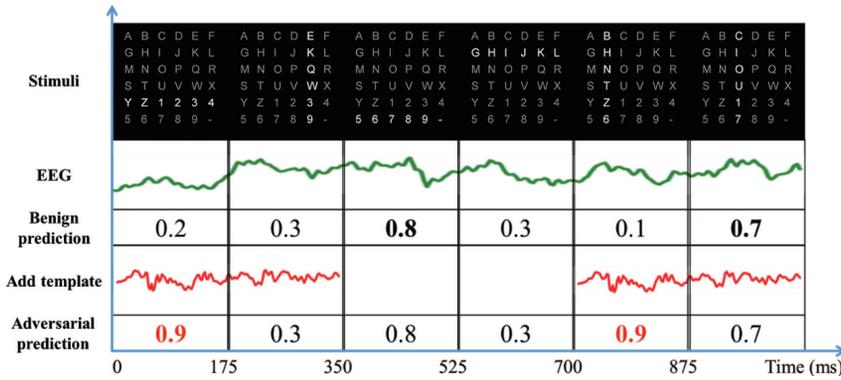


图 34 P300 脑机接口拼写器的对抗攻击

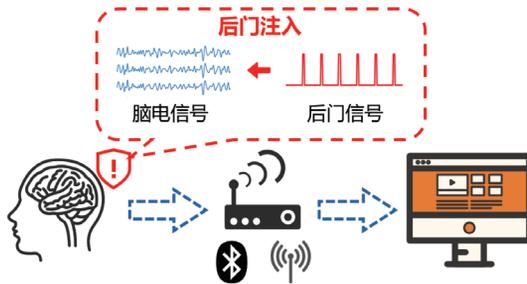


图 35 BCI 中的后门攻击

行预测。实验还发现，只需要很少量的污染样本就能得到很高的攻击成功率，同时在污染的训练集中训练的模型与正常训练的模型在不包含“后门”钥匙的样本上的分类准确率十分接近。这两点意味着我们的攻击在实际应用中是很难被察觉的。

总之，NPP 攻击主要克服了以下几个挑战，使得其更容易在实际中实施：

1) 进行攻击的“后门”钥匙非常简单：其生成模式简单，在实际脑机接口系统中将钥匙加入到 EEG 数据中的方法也非常简单。

2) 攻击使用的钥匙对于不同的 EEG 信号都是通用的，只要 EEG 中包含“后门”钥匙，都能被污染后的模型分类到攻击者指定的类别。

3) 攻击的实施和钥匙的生成不依赖于被攻击的 EEG 信号的信息，甚至攻击者不需要获取到 EEG 信号的起始时间。

NPP 详细论文: L. Meng, J. Huang, Z. Zeng, X. Jiang, S. Yu, T-P Jung, C-T Lin, R. Chavarriaga and D. Wu\*, "EEG-Based Brain-Computer Interfaces Are Vulnerable to Backdoor Attacks," <https://arxiv.org/abs/2011.00101>. 代码示例: [https://github.com/lbinmeng/EEG\\_poisoning\\_attack](https://github.com/lbinmeng/EEG_poisoning_attack)

A continuous NPP is determined by a period  $T$ , a duty cycle  $d$ , and an amplitude  $a$ ,

$$N_c(t) = \begin{cases} a, & nT \leq t < nT + dT \\ 0, & nT + dT \leq t < (n+1)T \end{cases}$$

A discrete NPP with sampling rate  $f_s$  can be expressed as

$$N_d(i) = \begin{cases} a, & nTf_s \leq i < (n+d)Tf_s \\ 0, & (n+d)Tf_s \leq i < (n+1)Tf_s \end{cases}$$

A discrete NPP with a random phase  $\phi \in [0, T]$  is expressed as

$$N_d(i) = \begin{cases} 0, & nTf_s \leq i < (nT + \phi)f_s \\ a, & (nT + \phi)f_s \leq i < (nT + dT + \phi)f_s \\ 0, & (nT + dT + \phi)f_s \leq i < (n+1)Tf_s \end{cases}$$

图 36 窄周期脉冲 NPP

Table 1: Baseline and NPP attack performance with different amplitude ratios. NPP baseline: NPPs were used in test but not training; NPP attack: NPPs were used in both training and test. Low amp.: 10%/50%/0.1% of the mean channel-wise standard deviation of the EEG amplitude for ERN/MI/P300; Middle amp.: 20%/100%/0.5% for ERN/MI/P300; High amp.: 30%/150%/1% for ERN/MI/P300.

Dataset	Model	NPP Baseline						NPP Attack					
		Low amp.		Middle amp.		High amp.		Low amp.		Middle amp.		High amp.	
		ACC	ASR	ACC	ASR	ACC	ASR	ACC	ASR	ACC	ASR	ACC	ASR
ERN	EEGNet	0.661	1.79%	0.655	5.20%	0.648	8.87%	0.673	16.61%	0.655	76.80%	0.653	90.83%
	DeepCNN	0.638	6.87%	0.643	17.86%	0.640	28.26%	0.635	65.23%	0.638	95.08%	0.635	98.70%
	xDAWN+LR	0.651	3.67%	0.648	6.03%	0.651	7.53%	0.676	49.50%	0.665	87.05%	0.663	96.24%
MI	EEGNet	0.632	2.23%	0.630	2.26%	0.629	4.98%	0.613	14.42%	0.617	56.29%	0.621	86.56%
	DeepCNN	0.614	3.95%	0.608	5.96%	0.612	4.24%	0.598	35.27%	0.593	88.04%	0.589	81.42%
	CSP+LR	0.544	0.63%	0.542	0.82%	0.544	0.71%	0.512	4.35%	0.504	20.26%	0.501	37.51%
P300	EEGNet	0.667	0.19%	0.667	0.65%	0.668	0.71%	0.563	5.76%	0.664	97.57%	0.665	98.42%
	DeepCNN	0.718	0.27%	0.701	0.77%	0.719	0.62%	0.684	0.93%	0.734	97.44%	0.730	98.38%
	xDAWN+LR	0.638	1.33%	0.638	6.59%	0.637	8.11%	0.480	96.40%	0.602	98.96%	0.613	99.45%

图 37 NPP 攻击实验结果

### 2.3 隐私保护的 BCI

目前几乎所有的无创脑机接口研究都聚焦于其解码的准确性，对其隐私保护的研究非常少。2017 年，Nature 评论 (Yuste et al. 2017) 指出脑机接口和人工智能必须尊重和保持人的隐私、身份、自主、平等。2018 年，Nature Biotechnology 评论 (Ienca et al. 2018) 指出消费级神经技术需要更多地考虑用户的安全和隐私。欧盟 2018 年 5 月 25 日开始实施的《通用数据保护条例》(GDPR)、我国 2021 年 9 月 1 日开始实施的《数据安全法》和 2021 年 11 月 1 日开始实施的《个人信息保护法》等都对用户信息隐私保护提出了严格要求。普通消费者的安全、隐私意识也逐渐觉醒。因此，隐私保护是脑机接口系统大规模市场化应用必须考虑的重要因素。

BCI 中的隐私信息包括个人账户、个人偏好、健康状况、商业模型等，如图 38 所示。BCI 中的隐私威胁如图 39 所示。脑机接口中的数据提供方、模型开发方和模型使用方经常是不同的，因此用户数据在传输给模型开发方时会存在数据隐私泄露风险，而训练好的模型在交付给模型使用方时会存在模型

隐私泄露风险。

BCI 中的隐私威胁如图 40 所示，包括数据层面的识别攻击和推理攻击，以及模型层面的模型窃取攻击和模型逆向攻击 (其中又包括成员推理攻击和属性推理攻击)。数据层面的隐私攻击针对脑电数据中所包含的信息，如原始数据、身份、统计属性等进行隐私窃取，其中识别攻击的目的是获得输入数据的用户身份，推断攻击对数据进行推理或学习以获得其中隐藏的敏感信息，如用户的健康状况。模型级隐私威胁旨在提取模型的私有信息，包括其结构、参数、训练算法、训练数据等。其中模型提取攻击不断使用攻击者自己构造的数据对模型进行查询，获取其输出，然后使用这些输入输出对构造训练数据集来窃取模型属性 (模型结构、超参数、参数、训练数据

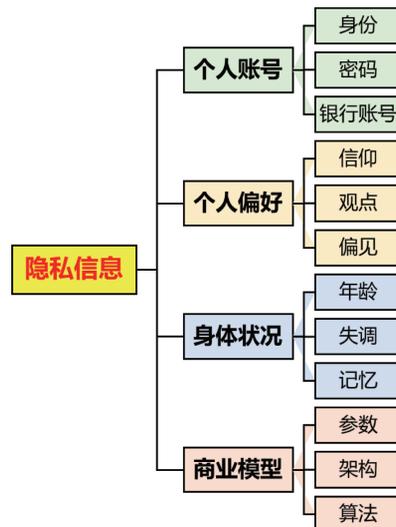
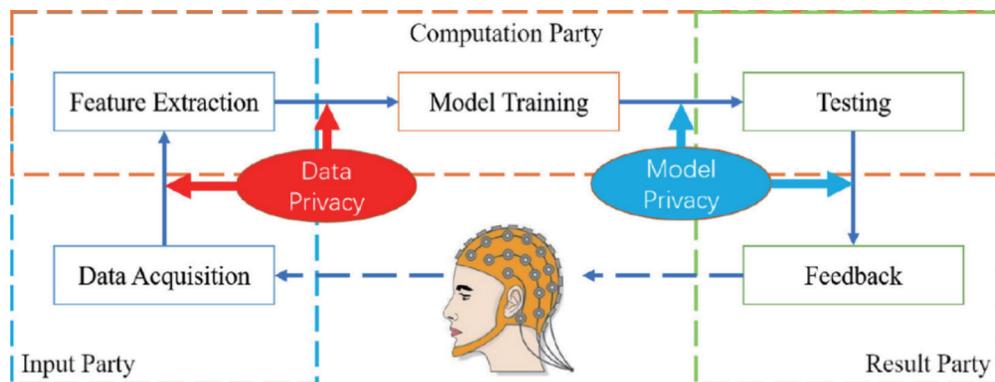


图 38 BCI 中的隐私信息

等)，或模仿模型功能；模型反演攻击从模型中获得输入训练数据的一些敏感信息。

注意隐私威胁的攻击和对抗攻击中的攻击是不同的：前者目的是获取数据或模型中的隐私信息，无意操纵系统的输出；后者是为了操纵系统输出，并不关心其中的隐私信息。



- **Input party:** Data acquisition and feature extraction
- **Computation party:** Model training, maybe also feature extraction
- **Results party:** Uses its own data for testing.
- A closed-loop BCI system also includes a feedback path to the user. Results party = Input party.
- **Privacy threats** may occur during data transmission from the input party to the computation party, or during model delivery in the test phase.

图 39 BCI 中的隐私威胁

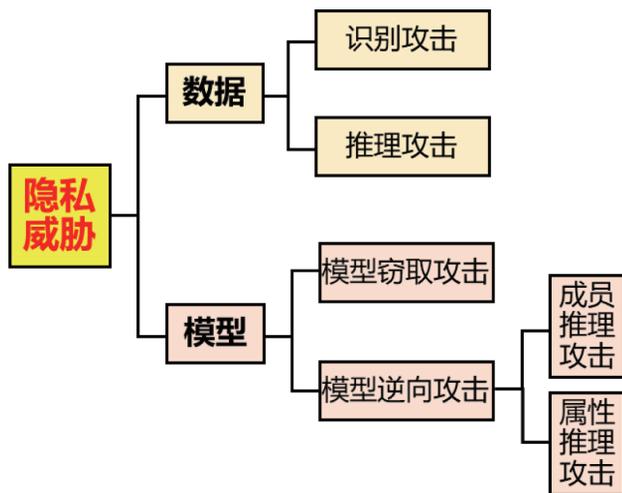


图 40 脑机接口中的隐私威胁

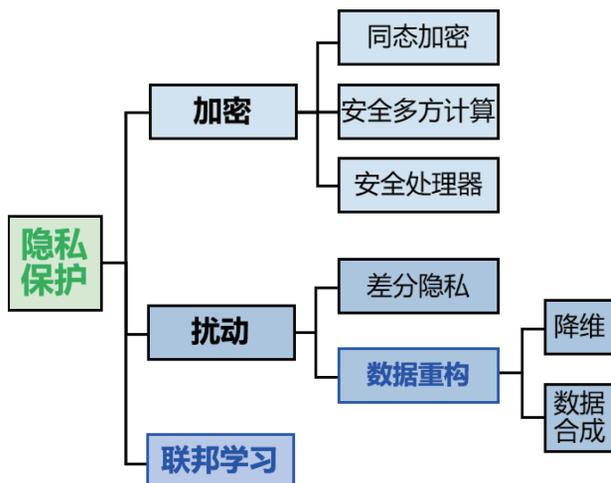


图 41 隐私保护方法

不局限于脑机接口系统，在金融、健保等系统中也有强烈的隐私保护需求，出现了多种隐私保护方法，如基于加密的方法、基于扰动的方法、联邦学习等，如图 41 所示。华中科技大学脑机接口与机器学习实验室也开发出了多种包括安全多方计算、元学习、无源域迁移学习在内的脑机接口隐私保护机器学习方法。因为大部分论文还在审稿中，这里就不详细介绍了。

### 三、总结

脑机接口是中国脑计划中脑机智能新技术的重要内容。通过在人脑与外部设备（计算机、机器人等）间建立直接通道来实现信息交互与功能整合，可帮助残疾人修复感知、语言和运动功能，让正常人工作生活更加健康高效安全。美国商务部工业和安全局

2021 年 10 月 26 日发布了就拟实施的脑机接口技术出口管制征求公众意见的预通知，提出了 12 个问题，脑机接口的解码算法、脆弱性、伦理政策等位列其中，这些也是华中科技大学脑机接口与机器学习实验室目前和未来的主要研究方向。

脑机接口技术目前面临的主要挑战包括：

1) 不精准：因为个体差异和脑电信号的非平稳性，目前绝大部分脑机接口系统无法即插即用，需要针对新用户或新任务进行校准。该过程花费时间从数分钟到数月不等，影响用户兴趣和脑机接口系统的大规模市场化应用。

2) 不安全：通过对抗攻击可任意操控脑机接口系统输出，降低用户生活质量，甚至威胁用户人身安全。黑客攻击偏瘫病人的轮椅可导致失控和受伤，攻击脑

机接口拼写器会导致病人无法与外界交流，或篡改原意。

3) 不隐私：脑电信号包含用户身份、健康、精神等隐私信息。欧盟 2018 年 5 月 25 日开始实施的《通用数据保护条例》、我国 2021 年 9 月 1 日开始实施的《数据安全法》和 11 月 1 日开始实施的《个人信息保护法》等都对于隐私保护提出了严格要求。但是，目前对于脑机接口的隐私保护研究非常有限。

针对上述挑战，华中科技大学脑机接口与机器学习实验室研究先进的信号处理和机器学习方法以实现精准、安全、隐私保护的脑机接口系统，如图 42 所示：

1) 针对脑机接口分类不精准的挑战，提出两种简单高效、性能稳定的数据对齐方法（EA 和 LA），及多种迁移学习方法，利用来自其他用户或任务的数据加

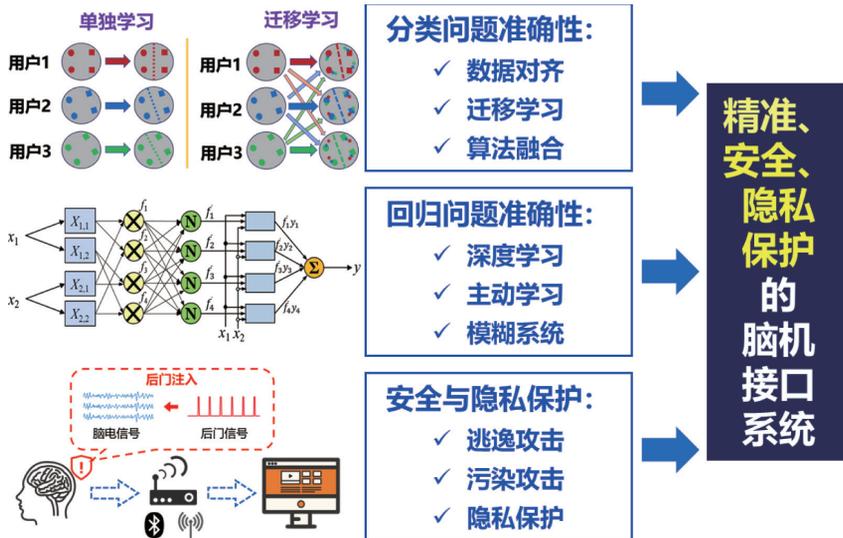


图 42 华中科技大学脑机接口与机器学习实验室的主要工作

速当前用户或任务的校准，提高分类准确度 3-20%，降低运算代价 72-94%。并与主动学习、半监督学习等有机融合，进一步提

高四种脑机接口范式分类准确度。

2) 针对脑机接口回归不精准的挑战，提出基于深度学习和迁移学习的即插即用驾驶员疲劳状

态估计方法，和主动学习、模糊系统等高效学习方法，使用模糊集构造模糊类、自动把脑机接口分类问题中的信号处理和机器学习方法推广到回归问题，简化脑机接口回归模型开发。

3) 针对脑机接口的安全和隐私问题，发现多种脑机接口系统逃逸攻击和污染攻击方法，揭示了脑机接口系统的安全风险。提出脑机接口隐私保护策略，在保护用户隐私的前提下达到更好的学习效果。○

\* 本文根据作者在 CAA 云讲座上所作报告速记整理而成

## 作者简介



伍冬睿，中国科学技术大学自动控制专业学士，新加坡国立大学电子工程专业硕士，美国南加州大学电子工程专业博士。华中科技大学人工智能与自动化学

院教授、博导，图像信息处理与智能控制教育部重点实验室副主任，国家海外青年高层次人才，湖北省杰青。主要研究方向为脑机接口、机器学习、智慧医疗等。发表论文 180 余篇，其中 SCI 85 篇，ESI 高引 8 篇，谷歌学术总引用 9000 余次 (H=50)。获 2021 中国自动化学会青年科学家奖，2021 IEEE 神经系统与康复工程汇刊最佳论文奖，2020 USERN 形式科学奖，2020 湖北省杰青，2020 IEEE 机电一体化与自动化会议最佳论文奖，2019—2021

连续三年世界机器人大赛——BCI 脑控机器人大赛技术赛全国一等奖或特等奖，2018 IEEE 人机系统汇刊最佳副编奖，2017 IEEE 系统、人和控制论学会首届青年科学家奖，2014 北美模糊信息处理学会首届青年科学家奖，2014 IEEE 模糊系统汇刊最佳论文奖，2012 IEEE 计算智能学会最佳博士论文奖，等。现任 IEEE 系统、人和控制论学会助理副主席和 eNewsLetter 主编，和 3 个 IEEE 期刊副编。

# 多智能体系统的分布式非光滑优化与矩阵方程求解

文 / 北京理工大学 曾宪琳

导读：2022年4月08日北京理工大学曾宪琳副教授做客“CAA云讲座”并作题为“多智能体系统的分布式非光滑优化与矩阵计算”的报告。

多无人车编队行驶、多无人机协同搜索以及多设备协同作业都可以抽象成多智能体系统的协同优化问题。多智能体系统的协同优化在电网、交通以及运动体控制中已经得到了广泛的应用。多智能体系统的分布式优化是控制领域的一个重要方向，本报告聚焦于分布式非光滑优化问题、分布式求解矩阵方程问题的研究。

曾宪琳副教授首先介绍了具有一致性约束的分布式优化问题和分布式非光滑扩展单变量优化问题，结合非线性控制思想提出了微分包含形式的分布式连续时间算法，并给出了算法的收敛速度。然后介绍了分布式求解矩阵方程问题，针对该问题的不同结构提出了分布式算法，并证明了指数收敛速度。

## 一、研究背景

2017年7月，国务院印发了《新一代人工智能发展规划》。《规划》将自主协同控制与优化决策理论作为亟待突破的八个基础理论瓶颈之一，其中一个重要的基础理论研究前沿是多智能体系统分布式优化。

为什么要研究分布式优化算法呢？主要有以下五点理由：

1. 数据特点。现在大量的数据是通过边缘设备获取的，例如，物联网、手机等设备。由于数据本身就是分散的，因此自然可以利用分布式优化的算法。

2. 计算载体。在分布式优化

中，可以用多个能力低的节点替代能力高的节点，同时由于计算节点本身能力不同，并且分散在不同物理上的空间中，所以需要使用分布式优化算法。

3. 用户需求。分布式优化算法分享的并不是本地数据，而是分享的模型。在利用本地数据训练公共模型时，数据并不在模型中，这可以起到保护用户隐私的作用。

4. 性能优势。分布式算法具有一定扩展性，利用群体智能的理论，可以使简单的规则涌现出高级的智能行为。

5. 应用广泛。分布式优化算法在现实生活中有很多应用场景，

例如，智能交通、电网、传感器网络等。

非光滑性是指不可微分、不连续性，广泛存在于控制和优化领域中。首先是算法非光滑，它是由于动态环境和高性能指标，需要非光滑优化的算法。其次是指标非光滑，它主要是由先验知识和任务指标中稀疏性、低秩性所产生的。最后是模型非光滑，环境中可能存在碰撞、冲击、干摩擦的现象，这些会使模型发生非连续变化。

目前多智能体系统分布式的非光滑性研究仍存在很多挑战。第一是指标和约束函数中的非光滑结构使得面向光滑分布式优化

问题的算法失效，导致算法分析难。第二是控制优化变量是高维、低秩耦合矩阵且存在非光滑代价函数，导致变量解耦和算法设计较为困难。所以，面向集群系统可靠实时协同需求，亟需在分布式非光滑算法的设计和分析方面取得突破。

在优化中，一般使用拉格朗日函数来求解代价函数  $f(x)$ 、集合约束 ( $X \in \Omega$ )、不等式约束和等式约束，拉格朗日函数是针对每一个不等式约束和等式约束都增加一个变量，新增加的变量称为对偶变量，原始-对偶方法也是优化问题中一种有效的处理有约束问题的方法。

Karush-Kuhn-Tucker 条件是基于拉格朗日函数推导出来的，在一定约束规范下，如果变量满足该条件，就可以认为该变量达到最优，它的物理意义是该拉格朗日函数的鞍点。而我们主要的算法设计思路是把一个有约束的问题转化成无约束的求解鞍点问题。

## 二、异构耦合约束下分布式非光滑优化

首先是具有一致性约束的分布式非光滑优化问题，这类问题是分布式优化中比较常见，其关键的假设是每个局部变量是一致的，同时每个个体都有自己局部的集合约束，从而可以设计分布

$$\begin{aligned} \min_x f(x), \quad f(x) &= \sum_{i=1}^n f_i(x_i), \quad x = (x_1^T, \dots, x_n^T)^T \in \mathbb{R}^{nq}, \\ \text{s.t. } x_i &\in \Omega_i, \quad x_i = x_j, \quad i, j \in \{1, \dots, n\}, \end{aligned}$$

图1 问题描述

式优化算法来求解该问题。

上图中由于  $x_i$  的维数较小，所以可以将其看成是通过数据训练出的一个模型，通过通信可以求解出整体的模型参数。

这类问题有非常多的应用，例如，汽车的最优编队和多机械臂的操作度优化。但是在理论上有两个难点亟需解决：一是连续时间的分布式投影优化算法可能是非凸的微分包含，导致算法的轨迹不存在。二是问题非光滑、解不唯一情况下的收敛性证明。

为了解决前面的两个难点，我们引入了一个点到集合的切锥定义，如图2所示。这两条切线夹的区域是切锥，通过一点在凸集内部做切线。

在优化算法中，切锥是一种非常有用的限制条件。如果将问题转化为微分方程，且给定了一

个在几何空间内的初始值，同时让它的导数始终满足切锥的限制条件，那么变量始终会在这个几何空间内。也就是说，可以通过这个性质来处理集合约束，确保结果不会超出我们所规定的约束范围。下面介绍三种具有一致性约束的分布式非光滑算法。

### 算法一：PI 算法

PI 控制算法的思想是利用负梯度信息，将梯度进行最小化处理，并通过一致项和积分项，把单个局部梯度补偿为零。从优化的角度看，该算法是一个拉格朗日函数的鞍点动力学，可以保证算法收敛到最优解。

PI 算法主要有三种理论结果：

第一，算法最优性。算法的平衡点对应的是优化问题的解，因此只要保证算法收敛到平衡点，便可以解决优化问题。

第二，算法有界性。算法有界性是控制理论中常用的假设，因为我们不希望一个算法的状态到无穷远。

第三，算法收敛性。收敛到哪个最优解可能与选择的初始值有关，但是它一定会找到一个解。

下图是分布式非光滑优化简单的仿真，对于一个非光滑函数，

### 凸集的切锥：

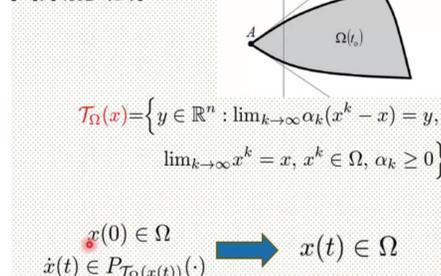


图2 凸集的切锥

其导数的切换变化也是非光滑函数，在这种情况下算法可以收敛。在算法设计方面，我们设计利用投影的算法，解决了投影优化算法非凸的解存在性问题，同时在算法分析方面也证明了算法一定会收敛到某个最优解问题

### 算法二：分布式输出投影算法

分布式优化的另外一部分工作是扩展单变量优化，数学模型结构如下图所示。它的难点之一是状态信息耦合，也就是在前面的约束中，需要利用分布式的算法求解解耦个体的信息。

难点之二是目标函数非光滑以及集合约束性问题，针对这些问题我们提出了两种算法，它们是借鉴了控制中的一些思想。

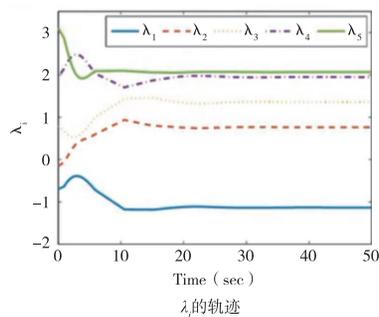
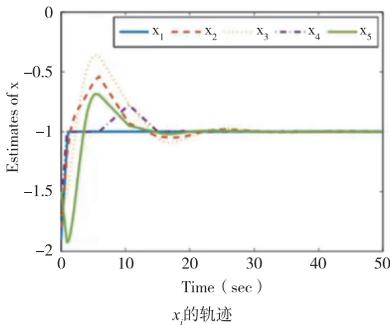


图3 非光滑优化仿真

$$\min_{x \in \Omega = \prod_{i=1}^n \Omega_i} f(x) \quad f(x) = \sum_{i=1}^n f^i(x_i),$$

$$\text{subject to: } Wx = \sum_{i=1}^n W_i x_i = d_0.$$

图4 扩展单变量优化问题数学模型

首先，要解决第一个难点，需要用到约束解耦方法，具体方法是增加一个变量，并选取拉普拉斯矩阵扩展使得左右矩阵相等。用右边的约束来代替原来所有个体都耦合在一起的约束可以求解目标函数非光滑以及集合约束性问题。

原来的问题难点是所有个体都耦合在一起，通过增加变量的方法，可以将它变成一个只需要知道自己和邻居信息的约束，这样就刚好符合分布式的结构。所以，通过增加变量的方法，把一个全局耦合的约束变成局部耦合的约束，就可以求解这样一个等价的优化问题。

算法的具体设计如下：使

用修正拉格朗日函数来使其满足KKT最优性的条件，根据两个最优性条件，可以写出集合的投影形式，从而设计两种不同的算法。从控制角度设计输出投影，KKT与该算法结构非常像，算法中梯度的作用依然是让对偶变量满足一致性约束。积分项补偿等式约束， $x_i$ 可以看成是输出的反馈， $y_i$ 向约束集合做投影，返回到算法的更新中，最终满足约束集合，如图5所示。

从优化的角度来分析，使用拉格朗日函数对原始变量  $x$  和  $z$ ，分别取次梯度，对偶变量取正梯度，进而处理约束集合，同时满足拉格朗日函数的鞍点动力学，最终实现算法的优化，如图6所示。

**算法设计 (控制角度)**

$$\begin{cases} \dot{y}_i \in -y_i + x_i - \partial f^i(x_i) + W_i^T \lambda_i, \\ \dot{\lambda}_i = d_i - W_i x_i - \sum_{j=1}^n a_{i,j} (\lambda_i - \lambda_j) - \sum_{j=1}^n a_{i,j} (z_i - z_j), \\ \dot{z}_i = \sum_{j=1}^n a_{i,j} (\lambda_i - \lambda_j), \\ x_i = P_{\Omega_i}(y_i). \end{cases}$$

梯度      一致性      积分项

等式约束      KKT最优条件

$$\begin{cases} 0 \in -y + x - \partial_x L(x, \lambda, z), & x = P_{\Omega}(y), \\ 0 = \nabla_{\lambda} L(x, \lambda, z), \\ 0 = -\nabla_z L(x, \lambda, z). \end{cases}$$

输出

图5 算法设计 (控制角度)

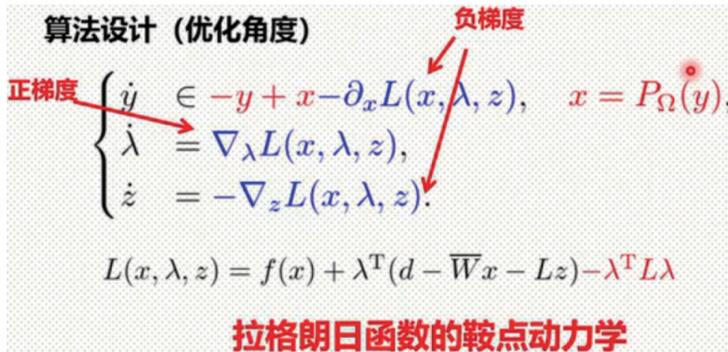


图6 算法设计 (优化角度)

#### 四、局部信息下矩阵方程的分布式计算

问题描述: 考虑这样一个优化问题  $AXB=F$ , 其中  $X$  是求解的变量, 而  $A$ 、 $B$ 、 $F$  是矩阵, 假设矩阵的信息分散到不同的个体中, 每个个体只知道  $A$ 、 $B$ 、 $F$  的若干行和若干列, 用分布式的算法求解矩阵。

上述问题的目标是求解最小二乘解, 最小二乘解正常来说就是求解范数, 也即一个矩阵所有位置的平方和。假设每个智能体都知道矩阵的若干行或列, 实际上, 因为每个个体按行和按列都有两种选择, 因此总共有 8 种情况。然而, 其中一些情况是对称的, 可以通过转置矩阵得到另一种情况, 因此只需要考虑其中的 4 种情况即可。在这里, 我们仅介绍第一种情况, 即假设智能体  $i$  知道矩阵  $A$  的第  $i$  行、矩阵  $B$  的第  $i$

#### 算法三: 分布式导数反馈算法

这个算法也是基于另一种最优性条件来设计的, 但与此前的算法不同, 它是利用导数反馈的信息设计算法的收敛性, 同时实现直接的控制。

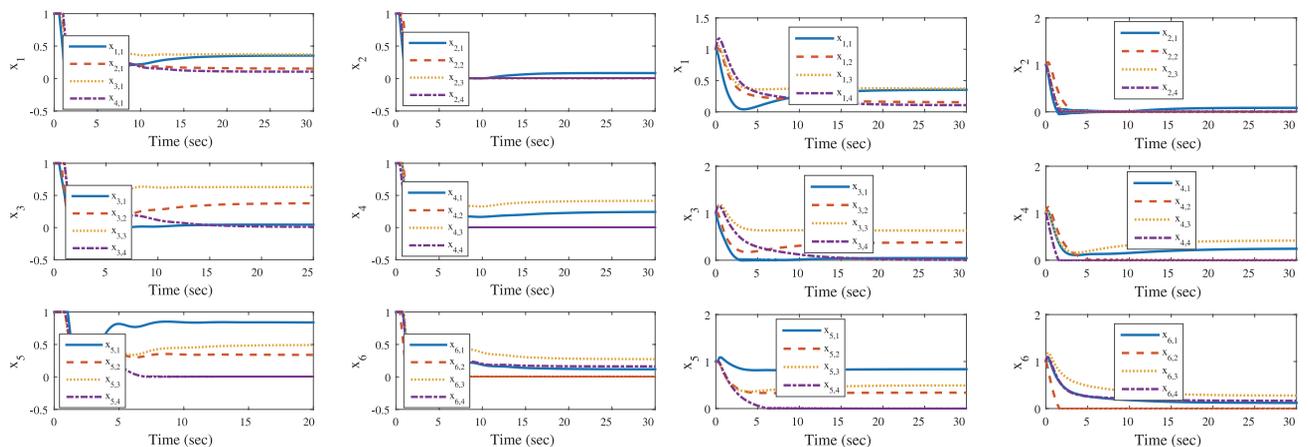
从优化角度来看, 它是一个典型的投影鞍点动力学结构, 但创新点是加入了导数。在分析中, 假设投影之后的结果是一个凸集, 这在数学上保证了存在性。

算法平衡点是优化算法的解, 同时算法的轨迹是有界的。在严

格凸的情况下, 证明了算法会收敛到最优解, 并且给出了收敛速度。同时也进行了简单的仿真, 验证了两种算法都是可行的。

然而, 注意到, 如图 7 所示, 左侧的输出反馈在最开始时状态是静止的, 这是由于它是一种间接的控制; 而右侧则是直接开始变化, 这是两种算法各自的不同之处。

该算法的主要贡献是解决了非光滑集合约束情况下的拓展单变量算法设计方法问题, 同时也将控制思想应用到优化中, 并提供了一些算法设计的技巧。



分布式输出投影算法

分布式导数反馈算法

图7 分布式算法仿真结果

列和矩阵  $F$  的第  $i$  列, 其他情况可以用类似的方法求解。

该算法的难点在于所有智能体的信息都耦合在  $A$ 、 $B$  中, 最终会导致其缺乏分布式结构, 从而难以进行分布式求解。因此, 我们提出了一种分布式模型转换方法。

一致性约束是分布式算法常用于处理优化问题的方法, 套用分布式优化方法的设计思路, 可以利用拉格朗日函数对每一个等式约束  $Y$  都赋予一个对偶变量, 同时为每个等式约束增加一个增

广项, 从而方便算法的收敛性, 然后利用鞍点动力学来求解方程。

该算法虽然看起来比较复杂, 其实还是基于优化的思想进行设计的。通过数学的证明, 该算法可以指数收敛到矩阵方程的最小二乘解。分布式算法主要是建立了一个矩阵计算问题的分布式模型转化方法, 同时它也针对不同的信息结构调整了设计思路, 并最终证明了算法的指数收敛速度。

分布式也可以求解具有对角约束的半定规划问题。下图是一个对角约束半定规划的例子, 图

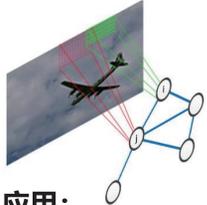
中  $C$  是已知的信息,  $X$  是半正定的矩阵, 假设  $X$  的对角元素都是 1, 同时  $C$  的信息分布于多个智能体, 可以把它简化成最大图分割问题模型来求解。

它的应用包括路网、社会网络。但应用的难点是维数特别大, 例如路网有上百万个节点, 这些信息在单个计算机上使很难处理的, 同时社会网络中有上亿个节点互相连接, 因此当  $n$  的维数增加后, 计算代价会非常高。另外, 当维数达到上万级别的时候, 每次迭代需要的存储代价也会提高, 使得单个计算机可能都无法完成计算, 而分布式可以很好解决这个问题。

等价的分布式半定规划问题可以用图 9 来描述, 图中每一个  $f_i$  代表一个智能体的信息,  $M^i$  是已知信息,  $X^i$  是本地的矩阵变量。虽然  $X$  是  $6 \times 6$  的矩阵, 维数很单一, 但是个体 1 只知道灰色部分的信息, 也就是说个体 1 的变量是  $3 \times 3$  的矩阵, 同样的道理其他

**对角约束半定规划:**  $\min_{X \in \mathbb{S}_+^n} \langle C, X \rangle, \text{ s.t. } X_{i,i} = 1, i \in \{1, \dots, n\},$

- $C$  的信息分布于多智能体系统
- 最大图分割(max cut)问题的典型模型



**应用:**

- 路网 ( $n$  的维数 ~ 1 million, 4 TB);
- 社会网络 ( $n$  的维数 ~ 1 billion, 4 PB);

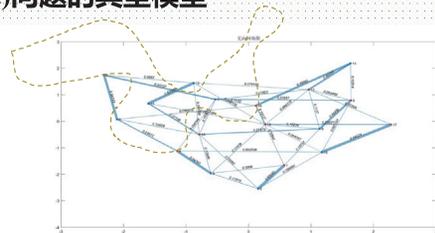


图 8 对角约束的半定规划

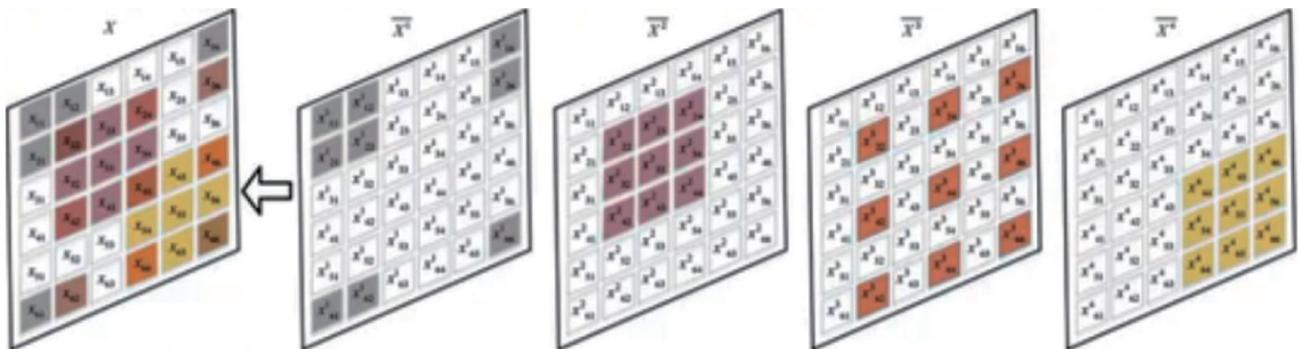


图 9 矩阵信息的分解

的个体也是只知道矩阵的部分信息，但是他们合起来就包含整个矩阵的全部信息。将一个集中式的大矩阵的信息分散成多个小矩阵，以替代原问题的求解。

虽然这样一个优化问题在算法实现上并不难，但难点在于其计算代价很高。在前面介绍投影的过程中，我们没有提到投影算法的隐含假设，即投影计算本身是比较容易的，但对于像半正定规划这样的问题，投影计算实际上是一个复杂的优化问题。因此，我们进行了一些转换。

我们使用转化方法将矩阵  $X^T$  转换成一个“高瘦”的矩阵，记作  $V^i$ ，将问题转换为两个低维度的矩阵之间的优化问题。为保证转化后的最优解等价于原问题，我们设计参数  $p$ ，要求  $p$  大于  $\sqrt{2n}$ ，其中  $n$  是整个大矩阵的维数。通过这样的设计，原来的  $n$  维矩阵可以变为  $\sqrt{2n}$  维，大大降低了维数。这个新的优化问题的代价函数仍然是凸函数，每个个体  $V^i$  的每一列分量的一半都是 1，也即球的表面。

为了求解我们先定义一下“父辈”和“子辈”的概念，如图 10 所示。如果两个智能体知道的信息有重合，我们就认为他们有父子的关系，所以就有如下定义：序号小的智能体是父辈，序号大的智能体是子辈，它们重合的部分定义为耦合节点集合，不重合

的部分定义为不耦合的节点集合。

如图所示，其中紫色代表智能体 1，它包含矩阵的第 1 行、第 2 行和第 4 行的信息，智能体 2 包含第 4、5 行的信息，以此类推，便形成了图中的树状结构。

虽然分布式算法设计相对较为复杂，但其原理却十分简单。在集中式算法中，我们设定对角元素为 1，并引入一个新的算法结构。将其进行归一化，然后投影到范数为 1 的集合上，从而实

现球面投影，这便是投影梯度法。这一算法的设计思路仍然遵循前文提到的集中式算法，但引入了一些新的设计，利用了分布式的特点，包括序列更新和 Message passing。

首先每个智能体先收到子辈给它的信息，然后更新自己的变量，之后传输给父辈，父辈节点再更新与子辈节点重合的信息，并将同时更新结果发给父辈，每次都按照这样的次序在节点之间

### 定义节点的“父辈”和“子辈”

$i$  的父辈:  $\text{par}(i)$

如果  $j < i$  且  $J^i \cap J^j \neq \emptyset$  则  $j$  是  $i$  的父辈

耦合节点集合:  $\mathcal{S}^{i, \text{par}(i)} = J^i \cap J^{\text{par}(i)}$

非耦合节点集合:  $\mathcal{R}^{i, \text{par}(i)} = J^i \setminus \mathcal{S}^{i, \text{par}(i)}$

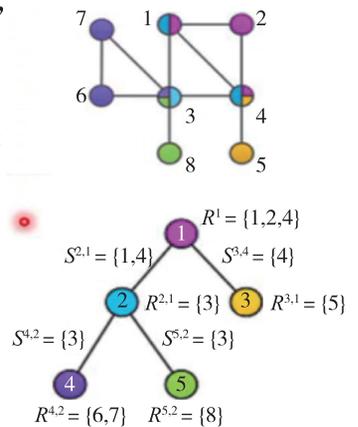


图 10 “父辈”与“子辈”

**变量更新**

$\square i \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{R}^{i, \text{par}(i)}$

$$v_j^i(t+1) = \text{normal}(v_j^i(t) - \theta_j [p_j^i(t) + \sum_{r \in \text{rech}(i)} \omega_j^{r,i}(t+1)]). \quad (7)$$

$$\omega_j^{r,i}(t+1) = \begin{cases} \sum_{l \in \mathcal{J}} M_{(j,l)}^i v_l^i(t+1), & \forall j \in \mathcal{S}^{r,i} \\ 0, & \forall j \in \mathcal{R}^{r, \text{par}(i)} \setminus \mathcal{S}^{r,i} \end{cases} \quad (8)$$

$$p_j^i(t) = \sum_{l < j, l \in \mathcal{J}} M_{(j,l)}^i v_l^i(t+1) + \sum_{l > j, l \in \mathcal{J}} M_{(j,l)}^i v_l^i(t).$$

**传输给父辈**

$\square i \in \mathcal{V}, j \in \mathcal{S}^{i, \text{par}(i)}$

$$\omega_j^{i, \text{par}(i)} = \sum_{l \in \mathcal{J}} M_{(j,l)}^i v_l^i(t+1) + \sum_{r \in \text{rech}(i)} \omega_j^{r,i}(t+1). \quad (6)$$

**同步算法**

**Initialization:** Initialize  $v_j^i = v_j^{\text{par}(i)} = v_0^i, \forall j \in \mathcal{S}^{i, \text{par}(i)}$ , and  $v_j^i = v_0^i, \forall j \in \mathcal{J} \setminus \mathcal{S}^{i, \text{par}(i)}$ , where  $\|v_0^i\| = 1$ .

**repeat**

**for**  $i = m, \dots, 1$  **do**

**for**  $j \in \mathcal{R}^{i, \text{par}(i)}$  **do**

(1) agent  $i$  receives message  $\omega_j^{r,i}, j \in \mathcal{S}^{r,i}$ , (computed by (6)) from its child  $r \in \text{ch}(i)$ .

(2) agent  $i$  updates variable  $v_j^i(t+1)$  following (7).

(3) agent  $i$  sends  $v_j^i(t+1), j \in \mathcal{S}^{i, \text{par}(i)}$ , to its child  $r \in \text{ch}(i)$ .

**end for**

**for**  $j \in \mathcal{S}^{i, \text{par}(i)}$  **do**

(1) agent  $i$  receives message  $\omega_j^{r,i}, j \in \mathcal{S}^{r,i}$ , from its child  $r \in \text{ch}(i)$ .

(2) agent  $i$  sends message  $\omega_j^{i, \text{par}(i)}$  (computed by (8)) to its parent  $\text{par}(i)$ .

**end for**

**end for**

$t \leftarrow t+1$ .

**until** the stopping criteria is satisfied

图 11 同步算法

**变量更新**

$$v_j^i(t+1) = \text{normal}(v_j^i(t) - \theta_j^i [p_j^i(t) + \sum_{r \in \text{ch}(i)} \omega_{r,i}^i(\tau^r(t))]), \quad j \in \mathcal{R}^{i, \text{par}(i)},$$

$$v_j^i(t+1) = v_j^{\text{par}(i)}(\tau_j^i(t)), \quad j \in \mathcal{S}^{i, \text{par}(i)}.$$

**传输信息**

$$\omega_j^{i, \text{par}(i)} = \sum_{l \in J^i} M_{(j,l)}^i v_l^i(t+1) + \sum_{r \in \text{ch}(i)} \omega_{r,i}^i(\tau^r(t)), \quad j \in J^i.$$

**异步算法**

**Initialization:** Each agent  $i$  sets  $v_j^i = v_0^i, \forall j \in J^i$ , and assigns  $v_j^{\text{par}(i)} = v_0^i, \forall j \in \mathcal{S}^{i, \text{par}(i)}$ , where  $\|v_0^i\| = 1$ .

**while** the stopping criteria is not satisfied **do**

For each agent  $i$ , keep receiving information  $\omega_{r,i}^i(\tau^r(t))$  from children and receiving information  $v_j^{\text{par}(i)}(\tau_j^i(t))$  from parent until the agent is activated to update.

- (1) agent  $i$  updates variable  $v_j^i(t+1), j \in J^i$  following (11).
- (2) agent  $i$  sends message  $\omega_j^{i, \text{par}(i)}, j \in \mathcal{S}^{i, \text{par}(i)}$  (computed by (12)) to its parent.
- (3) agent  $i$  sends updated local variable  $v_j^i(t+1), j \in \mathcal{S}^{i, l} \in \text{ch}(i)$ , to each child  $l$ .
- (4)  $t \leftarrow t + 1$ .

**end while**

$$p_j^i(t) = \sum_{l \in J^i} M_{(j,l)}^i v_l^i(t),$$

$$\omega_j^{i, l}(\tau^l(t)) = \begin{cases} \sum_{l \in J^i} M_{(j,l)}^i v_l^i(\tau^l(t)), & \forall j \in \mathcal{S}^{r, l}, \\ 0, & \forall j \in \mathcal{R}^{i, \text{par}(i)} \setminus \mathcal{S}^{r, l}. \end{cases}$$

图 12 异步算法

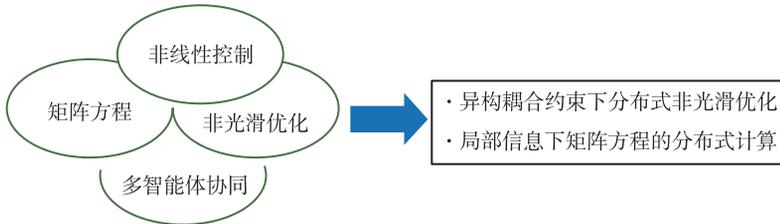


图 13 未来工作重点

重复进行更新，这便是同步算法设计思想，如图 11 所示。

另外，还有一种异步算法，如图 12 所示。尽管与同步算法结构相同，但异步算法节点不需要等待子节点的更新，而可以利用其先前的信息来更新，这种信息相当于时间延迟的信息。因此，它不需要按照特定顺序进行更新。假设每一个智能体连续 B 个时刻至少更新一次，与其他的算法进行比较可以发现，分布式异步算法效果较好。

与集中式算法对比，在达到相同误差的条件下，分布式算法比集中式更快一些，同时如果节

点数量越多，其算法优势越明显。该算法应用到图分割的数据集上，

通过使用 MPICH 分布式计算的架构，它可以处理一些高维的图像数据。

## 五、总结与展望

面对代价函数、系统模型、决策控制方法中的非光滑性挑战，我们需要更深入研究多智能体系统的分布式非光滑优化与矩阵方程求解的问题。

未来我们需要将研究工作与无人系统相结合，来解决分布式算法实时性不足的问题，并提出一些满足实时性需求的分布式优化方法，同时也希望利用非光滑和低秩的矩阵计算方法，来解决控制和优化中的难点问题，如图 13 所示。○

\* 本文根据作者在 CAA 云讲座上所作报告速记整理而成

### 作者简介



曾宪琳，男，1985 年出生，博士，中共党员，副教授，博士生导师。于 2009 年

和 2011 年获得哈尔滨工业大学自动化专业的本科和硕士学位，于 2015 年获得美国德州理工大学机械工程系博士学位。于 2015.08—2017.08 在中国科学院数学与系统科学研究院从事博士后研究，于 2017.08—2019.08 在北京理工大学从事博士后研究。主要研究方向包括多智能体系统博弈与智能决策、分布式优化与无人系统控制等。

# 自动化专业核心精品课程混合式教学的探索与实践

## ——《过程控制及仪表》课程为例

文 / 哈尔滨理工大学 孟庆松

导读：2022年5月25日哈尔滨理工大学孟庆松教授做客“CAA云讲座”并作题为“自动化专业核心精品课程混合式教学的探索与实践”的报告。

孟庆松教授从自动化专业本科生的实际需求出发，探索与实践了一整套适应时代要求的专业核心课程线上线下混合式教学模式与教学设计，充分利用大量的网络教学资源开展教学活动，建立高效的学生中心课堂与课程评价体系，推动高校课程教学的高质量发展。

### 一、课程概述

《过程控制及仪表》课程为自动化专业的核心课程，采用国家级规划教材，由老中青三代教师团队讲授，已成为哈尔滨理工大学的特色与“放心”课程。

本课程始建于1974年的自动控制专业，一直开设至今。课程建设2015年开始校内立项，始终按照工程教育专业认证要求进行，先后在超星泛雅平台、学银在线公开上线。2018年专业通过了工程教育认证，本课程符合认证要求。按照“两性一度”标准持续改革创新，本课程2019年获评黑龙江省精品在线开放课程，2021年获评黑龙江省第二批线上线下混合式一流本科课程。

#### 1.1 课程目标

针对该专业核心课程，我们从知识、能力和素质三个维度考量其教学目标的实现。针对本门课程的教学内容，我们将其分解为四个课程目标，以对应该门课程教学内容的四个主要方面。

目标1：能运用内部机理分析、过程辨识与参数估计的方法，对生产过程特性进行原理分析与建模。

目标2：能根据生产工艺要求及约束条件，确定大时滞大惯性系统的控制要求，选用自动化仪表来设计合理的控制方案，遵守工程技术规范与安全标准。

目标3：能够根据控制要求，综合运用控制理论与相关的技术手段，设计与优化系统的控制器，

并分析与评价实施效果，养成学以致用的高阶思维和辩证思维。

目标4：能通过复杂控制系统的深入分析，识别与分析系统的结构、功能与实现原理。

#### 1.2 课程目标

该课程以“被控过程-自动化仪表-系统工程设计-指标要求”为认知模型，秉承“经典理论基本稳定，大量实例与时俱进”原则，根据学情特点精选教学内容，突出工程实例的运用，紧跟新技术发展，形成了完整的知识体系。

在课程内容的安排上，如图1所示，第1单元是绪论部分，主要介绍的是过程控制发展概况、特点指标、系统组成及分类。过程建模部分作为第2单元，检测

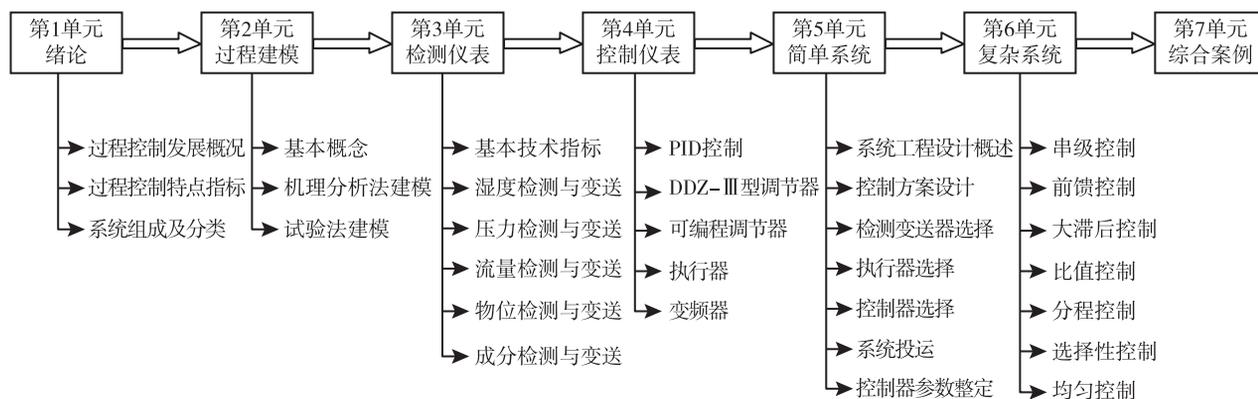


图1 课程内容分解

仪表作为第3单元，自动化控制仪表部分作为第4单元，第5单元介绍的是一个完整的控制系统，最后一个单元是复杂系统。结合教学案例，将这些知识点全部贯穿起来，能够让学生在学的过程中明确掌握本课程在工程实践中的具体应用。

《过程控制及仪表》能够解决过程控制系统在设计、实施和工程整定等方面的问题，所以它和自动控制理论、传感器技术、系统仿真技术、化工原理或对象建模等学科具有直接关联关系。

## 二、教学设计

教学设计首先应该立足于学生的社会需求和发展定位，结合线上教学和传统教学的优势，本着“能学会的不教，有困难的提供脚手架”的原则来设计教法。在教法的设计上利用线下实体课堂的时间为学生来答疑解惑，通过实体课堂讨论答疑、互动交流

或者任务分配的互动方式来提高学生对课程内容当中的重难点知识的理解与掌握，这是第一个设计的思想。

第二个设计的思想就是通过教法与学法的结合，不断通过任务挑战将学生从舒服区带到发展区，引导学生自主学习与深度学习，递进式提高学生知识迁移的高阶能力并达成课程目标。在教学过程当中，不断地给学生派发线上或者线下的一些学习任务，使学生从平时一点一滴不断学习的积累过程当中来得到提高，而不再是过去到期末时的突击复习，最终取得较好的成绩。把教学过程置于平时的任务中，能够引导学生自主学习，以递进式提高学生知识迁移的高阶能力，从而达到课程目标。

第三个教学设计是通过混合式的教学，将按照课内和课外以1:2的学时分配进行教学。

具体的教学设计主要有四种

方式：(1) 紧密围绕以学生为中心，按照OBE的教学理念，采用BOPPPS模型去设计线上、线下教学过程；(2) 把课程知识技能层面的目标分解到每个单元，按照BLOOM分类法确定每个单元学生的学习目标；(3) 在翻转课堂的前一周将线上自学任务清单发布给学生，学生利用MOOC平台自主学习，并完成线上的学习任务、随堂测试题等，教师根据课程平台提供的学生学习数据以及测试、作业等完成情况有针对性地设计线下翻转课堂的各个教学环节；(4) 在课前、课中以及课后还利用学习通作为辅助，开展各种教学活动，有效提升课堂效率，随时感知学生的学习效果和学习动态，对有需要的同学更有针对性地做好学业帮扶。

BOPPPS的教学模式是采用线上和线下的方式设计实体课堂的。线上的部分不占用教学大纲中规定的计划学时，线下实体

课堂教学的部分可以用于综合提高,两者结合就形成了混合式教学。线上教学主要负责发布各种学习任务,如课前的预习、课后的复习、讨论区的答疑、在线测试,还有一些单元测验、月考等。线下教学不重复讲解,主要针对重点和难点,从而提高学习效率。《过程控制及仪表》适合采用线上和线下的教学模式。线上部分主要通过将琐碎的知识点整理下发给学生,学生在课下学习过程中将各种琐碎的知识不断地重复,从而提高学习效率。而线下就不需要将线上的内容进行重复讲解。教师在课堂上主要完成重难点问题的讲解,不断加强学生的知识记忆能力。在给学生布置作业时,我们可以有意避免选择那些可以直接在教材或资料中找到答案的习题或作业,而是选择更具挑战性的作业,以此来拓展学生的知识面。具体而言,教师可以选择那些涉及到教材中未提及的知识点或内容的作业,以激发学生通过自主查阅相关书籍或网络资源来扩充其知识面。当然,这些知识点必须与本门课程相关。此外,将本课程的学习过程转化为过程管理,通过不断增加学习任务难度的方式,帮助学生逐步提高能力和知识水平,并提升其学习动机和兴趣。

在具体实践中,我们可以在每堂课前一周,将自学的任务清

单发送给学生,让学生可以在教学平台上自主学习。通过观看视频等方式完成自学任务,每个教学视频都会配备相应的在线测试题,测试题的内容与教学视频中讲授的知识点相关联。教师可以根据平台所提供的学习数据来分析学生对知识的掌握情况,从而便于及时调整教学内容或教学方法。在课前、课中和课后还可以利用学习通作为辅助工具,来开展各种教学活动,例如线上签到、问卷调查、讨论问题发布,随机提问等。学习通能有效地提升教学的效果,而且可以随时感知学生的学习效果和学习动态。教师发布的学习任务,平台会有相应的实时数据进行统计分析,这样便于掌握学生的学习状况,能够进行有针对性的学业帮扶。

教学理念是以学生为中心,这意味着教师的角色从过去的纯粹传授知识变成了引导学生学习。现在的教学是根据学生目前的学习状态来开展的,包括教学内容和教学方法都会根据学生的学习基础和现状进行及时调整。因此,以学生为中心是强调学生的学习活动为核心。同时,学生在教学过程中具有主体地位,教师主要扮演辅助角色,目的是帮助每位学生达到课程目标。具体做法是采用课前自学、课中讨论和讲授、课后巩固的方式进行教学。在课前,教师主要布置能够通过自学

完成的教学内容,而难点或重点则在课中进行互动讨论,老师进行精细讲解。在课后,通过布置学习任务来巩固和提高学生的学习成果。

以学生为中心的教学理念提出了具体的教学方法和注意事项,其中,少教多学的教学策略要求教师以学生的学习效果或学习状况为中心来展开教学,并且尽量减少讲授的时间,鼓励学生自主学习。先学后教则强调了教师在教学过程中应该先让学生自学,再进行实体课堂上的讲解,根据学生具体情况来确定教学内容和方式。以学评教则突出了学生学习效果的重要性,教师的教学能力和水平要以学生的学习效果和学习成效为评价标准。因此,在实施以学生为中心的教学过程中,需要注意这些教学策略和评价标准。

在专业教学中不仅需要积极开展课程思政的教育,而且也需要理解课程思政的内涵。第一,教书育人。教书是手段,育人是目的。课程思政的目标是“育人”,课程是一种载体,这是教书育人的重要性;第二,“三观”——世界观、人生观、价值观。思政课程更多针对“世界观”、“人生观”,而课程思政更多体现“价值观”;第三,融入教育或隐性教育。通过知识创新、技能培养过程中,融入相适应的育人要素,

达到“潜移默化、润物无声”的效果；第四，言传身教。教师要自觉地将自身的个人特质（格局、视野、正直、严谨）代入课堂中，来影响学生；第五，融入情感。在教学过程中融入情感，形式为“师生学习共同体”，目的让学生更好地学，建立学生对教师的信任，这是课程思政能够有效实施的保证。

课程思政属于一种非技术指标，它比较难以量化，所以一般把思政的目标融入非技术元素目标中，主要体现四大方面。（一）家国情怀，责任担当；（二）工程规范，正直乐观；（三）学以致用，挑战创新；（四）沟通表达，终身学习。

在教学设计中，两性一度的挑战性任务要求学生花费时间进行深入思考，同时也需要教师在备课和讲课的过程中投入时间、精力和情感。另外，两性一度涉及到高阶性与创新性，包括综合能力和高阶思维。工科专业在进行作业设计时应该具有一定实际的物理背景，包含非技术性的约束因素。在具有实际工程背景的工程设计时，不仅要考虑理论上的技术性要求，还需要提高综合能力和高阶思维。

创新性在教学中的应用不仅要求教学内容具有前沿性和实战性，还需要创新教学形式。例如，在课堂教学中增加互动性，

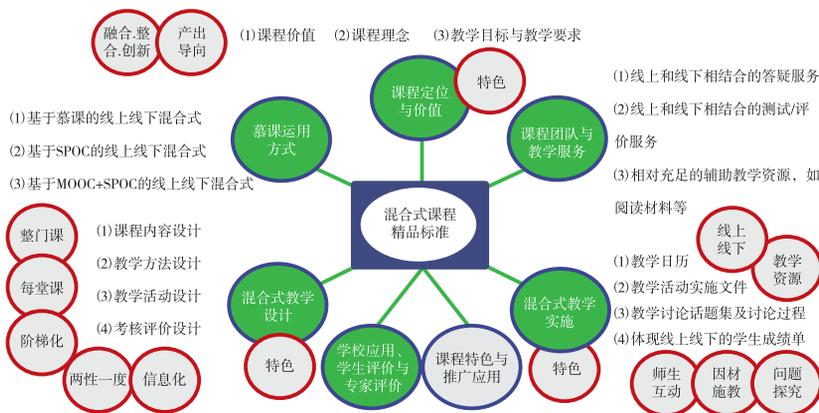


图2 混合式课程精品标准

采用先进的教学形式，引入现代信息技术，充分结合线上线下教学，这些都可以大大提高教学效果和质量。在教学方式上也要注意创新，充分发挥实体课堂和课下探究性研究的作用，同时也要注意个性化学习。线上线下教学模式可以很好地实现互动性、探究性和个性化，因为它提供了丰富的教学资源，让学生可以根据自己的基础和兴趣进行学习，并自主控制学习时间和次数。因此，在本课程中我们采用了线上线下混合的教学模式，以满足学生的学习需求。图2是哈尔滨工业大学战德臣教授提出来的线上线下混合式课程精品的标准，主要分成慕课运用方式、混合式教学设计、学校应用与学生评价及专家评价、混合式教学实施、课程团队与教学服务、课程定位与价值6个维度。

### 2.1 痛点问题

在教学过程中，主要解决以下五个痛点问题：

下五个痛点问题：

一、基于OBE理念，以学生为中心，逆向设计教学目标，注重能力素质培养与“两性一度”达成，解决课程学习“内驱力、深度与知识迁移力不足”问题；

二、采用虚拟仿真技术，实现复杂案例教学与探究实验，解决系统控制器“设计抽象化”问题；

三、基于课堂核心问题，打破课堂沉默状态，借助BOPPPS教学模式，建立高效互动的学生中心课堂，解决课堂教学“单向满堂灌与知识碎片化”问题；

四、构建多维度递阶式考评机制，实现动态测评与同步反馈来促进学习的持续跃升，解决课程评价“单纯评分化”问题；

第五，坚持“价值引领、潜移默化”原则，贯穿于授课的全过程，解决课程思政“简单标签化”问题。

为有效实现本课程的混合

式教学,保证学生自主学习与深度学习的效果,在教学日历与教学大纲中所列的“课前活动”与“课后活动”设计中,遵循了课内外学时分配至少 1:2 的原则,如图 3 所示,线上不占用课堂学时,线下主要用于讨论互动、答疑解惑及综合训练。其中,线上教学视频共 68 个,总时长共 923 多分钟,可以折算为近 21 学时(按照 1 学时相当于 45 分钟),而线下实体课堂共 56 学时,那么线上教学视频这一部分的学时数占二者总数的比约为 27%。因为除了学习教学视频外,还包括诸如扩展阅读、随堂测试等线上教学活动,

所以线上学时占比至少在 27% 以上。

### 三、教学环境

#### 3.1 线上资源

将学科发展前沿、教师承担的项目成果引入教学中,强化科教融合和创新创业思想,提升教学内容前沿性和时代性。课程团队自建的线上线下的特色资源体现了教学内容具有一定的深度与广度,满足多样化的个人发展需求,符合“OBE”理念和“两性一度”标准,可以有效解决了“内容一本书”的问题。

该教学环境的目的是利用自

行开发的线上和线下教学资源来提高学生的学习效果。其中,教学视频库作为一个重要资源,如图 4 所示,共包含 68 个视频,总时长超过 900 分钟,根据内容的难易程度被分为自学、点评和精讲三类视频。自学视频适合学生自主学习,点评视频经过老师简单点评后学生即可理解,而精讲视频需要老师进行详细讲解才能掌握。这些教学资源的开发不仅能够更好地帮助学生进行线上自主学习,还能够提高教学效果。在课堂教学中,教学视频库的精讲视频是主要关注的学习内容。同时,扩展资源库还包括与本课程相关的工业标准规范、国内经典教材的教学课件以及相关学位论文,以供学生课下自主阅读。此外,随堂测试题库包括 60 多个文件,每个教学视频都有相应的测试题,其中包括 5 到 8 个客观选择题,学生做完后系统自动评分,可以快速反映学生的学习状况。这些数据被记录在系统平台中,老师可随时查看。最后,专题讨论题库提供了教材未涉及或

学时分配表

知识单元	线上学时 (线上教学视频)	线下学时
第 1 单元: 绪论	总时长 95' 3" ≈ 2.1 学时	1
第 2 单元: 过程建模	总时长 65' 03" ≈ 1.4 学时	7
第 3 单元: 过程变量检测与变送	总时长 137' 17" ≈ 3.0 学时	9
第 4 单元: 过程控制仪表	总时长 120' 25" ≈ 2.7 学时	7
第 5 单元: 简单过程控制系统设计	总时长 147' 14" ≈ 3.3 学时	7
第 6 单元: 复杂过程控制系统设计	总时长 296' 34" ≈ 6.6 学时	11
第 7 单元: 案例	总时长 61' 03" ≈ 1.4 学时	
小班分组专题研讨		2
课程实验		12
合计	20.5 (占 26.8%)	56 (占 73.2%)

图 3 线上线下教学学时分配

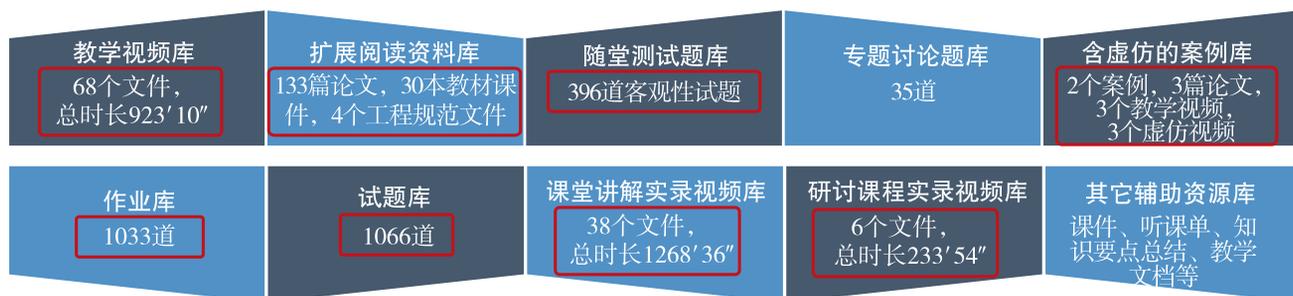


图 4 线上教学资源

课堂未讲述的内容，可通过网上专题讨论的形式进行发布，以加深学生对课程内容的理解。

除了老师提出的网上讨论专题外，还有其他资源可供学生使用。其中包括含虚拟仿真的案例库，它有两个案例，三个教学视频和三个虚拟仿真视频；还有作业库和试题库等。试题库包含7个单元的题目，每个单元都会进行一次随机出题的单元测验。此外，还有课堂讲解实录和研讨课堂实录等丰富的资源可供使用，以帮助学生拓展知识面。

### 3.2 线下资源

线下资源主要有图5所示的四个方面：一、课题核心问题。为了聚焦重难点，围绕精讲视频相关内容设计一个课堂核心问题，以实例的形式提出，通过讨论交流引导学生深度学习与思维训练；二、虚拟仿真平台。为了实现案例教学场景化与仿真互动化，自研了虚仿平台，通过动手实验去探究控制器与过程模型对控制效果的影响，使控制器设计更加直观方便；三、课后思考题。提出与课程知识点相关的开放性问



图5 线下资源

或引入深思的问题，用于课下深入思考；四、结合实验装置，编写实验指导书，并引入每个实验项目的思考题，以引导学生深入思考。

## 四、教学方法

教学方法的改革重点就是从教向学、从被动学习向主动学习与深度学习的转变，从知识到能力素质的迁移。通过混合式教学实现课程内容深度化、内容讲授可视化、网络课堂差异化、实体课堂互动化、案例教学场景化、仿真平台互动化、大作业设计综合化、评价递阶化。

### 4.1 混合式课堂教学

下面我们就来看一下刚才所说的课堂教学的BOPPPS模式，如图6所示，其中头两步是在课前线上来完成的，后四步是课下来完成的。课前首先教师给出相应的每一节课的课堂目标，学生针对相关的教学视频进行自主学习，并进行随堂测验，或者是通

过自由讨论来反映学生的掌握情况。此时教师可以对学生的预习情况进行数据分析，根据学生实际的掌握情况来展开线下实体课堂的教学，首先引出新内容，可以通过知识回顾和同步反馈来引出内容。采用启发式教学，教师进行精讲和点评，或引入课堂核心问题再进行互动讨论，采用分组或者互动提问的方式来构建师生学习共同体，促进学生之间的互动和协作学习。

在课堂教学中，通过师生的互动讨论来理解与掌握重难点内容，最后由教师进行总结，并明确本次课堂所讲述的内容与整个知识体系的关系，避免知识学习的碎片化和片面化。此外，课堂教学也可以将所学的知识扩展到最新的技术发展动态上，这就是混合式教学所采用的BOPPPS课堂教学法。

图7分别展示的是通过实体课堂进行教师讲解、教师提问、讨论答疑以及交流分享的场景。

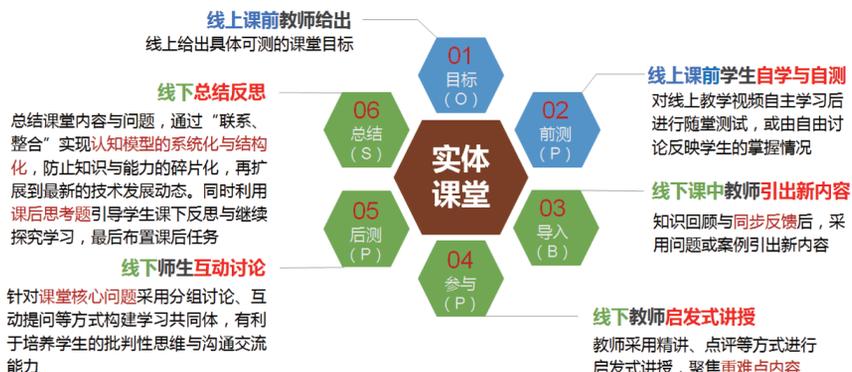


图6 BOPPPS教学模式



图7 实体课堂教学

线下的分组研讨是在智慧教室进行的。之前由于疫情的原因，分组研讨安排在线上进行。线下的研讨不同于实体课堂的教学，采用的是小班的形式，如图8所示。在这种研讨中，教师会布置一些课外的任务和阅读材料，学生需要自主学习和查阅资料才能完成任务。为了完成任务，学生会分组协作最后再分享成果。这样的方式有助于培养学生的合作能力和自主学习能力，从而提高学习的效果。

#### 4.2 案例虚拟仿真

图9是虚拟仿真的两个教学案例。第一个案例是多变量强耦合的锅炉系统，涉及到燃烧控制系统、液位控制系统和温度控制系统。通过虚拟仿真，可以随时修改过程参数和调节器参数，并实时展示系统响应曲线，从而解决了案例教学中的场景化和控制器设计的抽象化难题。第二个案



图8 分组研讨

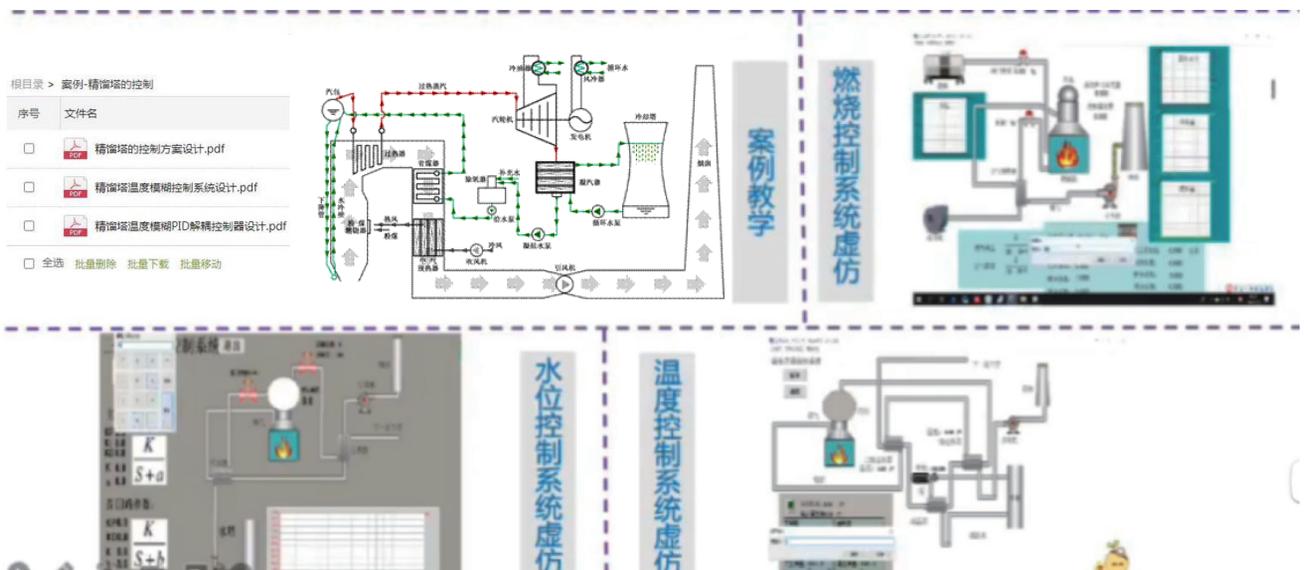


图9 仿真教学案例

例是精馏塔设备的辅助案例，它通过引入先进的控制算法，来满足学生高层次的学习需求。

### 4.3 大作业设计

大作业的主题是一个具有实际应用背景的控制系统设计。采用的学习方式是探究学习和互教互学，即采用分组协作的方式。布置设计任务时给出了目标和题目，学生可以自选，也可以由老师提供参考题目。此外，还给出了具体的考核要求、撰写报告的标准和规范以及评价标准。通过大作业的综合设计，学生之间及师生间形成了互学互教的分组协作，最后每组都要进行答辩并上交书面设计报告，以此来验证学生是否掌握了相关知识和能力。在此过程中培养了学生批判思维、创新思维等高阶能力以及科技思维与表达能力。图 10 展示的是大作业答辩验收现场。

占 30 分，线下实验占 10 分，大作业占 10 分，期末笔试占 50 分，并为每项考核制定了具体的标准

和细则，包括考核次数、题目数量，有些考核通过系统自动评分，有些需要教师评阅，如图 12 所



图 10 大作业设计答辩现场展示

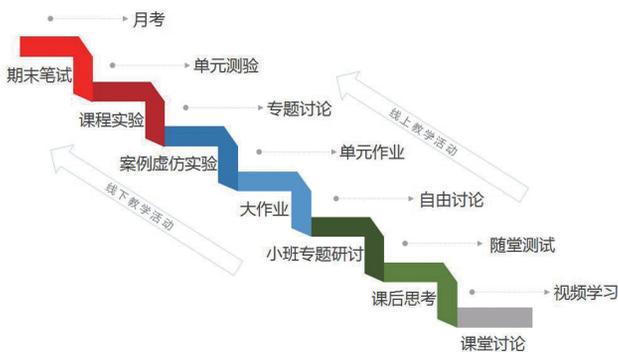


图 11 多元评价体系

### 4.4 评价体系

依次进行线上与线下教学活动的考核，通过动态测评与同步反馈，形成评价闭环，使学生的学习效果螺旋式提升，渐进提高工程应用的综合能力。每一种教学活动都有相应的数据支撑，老师可以从数据分析中获取学生的学习进展与效果，并通过学情预警功能督促学生完成学习任务，以确保课程教学目标的实现，如图 11 所示。

我们在超星学习在线平台上设置了考核权重，其中线上部分



图 12 学习通线上考核的权重分配

6.1.2 随堂测试题

请输入学号或姓名

创建时间: 2020-05-02 19:24 发送给: 60人 已交: 59人 待批阅: 0人 待重做: 0人

姓名	学号/工号	状态	提交时间	IP	批阅时间	批阅人	批阅ip	成绩
史学森	1712010219	完成	2020-05-09 07:06	1.204.108.207	2020-05-09 07:06			80
李辉	1712010209	完成	2020-05-15 21:29	125.123.78.209	2020-05-15 21:29			80
罗宇凯	1712010215	完成	2020-05-28 20:30	113.100.176.209	2020-05-28 20:30			80
张博文	1612010129	完成	2020-06-14 23:59	125.104.214.204	2020-06-14 23:59			80
卢宏伟	1612010110	完成	2020-05-06 20:58	219.159.14.141	2020-05-06 20:58			100

过程控制及仪表...课程门户

期末考试(随机出题)

考试时间: 2020-06-01 11:51 至 2020-06-22 23:55

考试任务点百分比: 0%

提交数: 56/60

状态: 已过期

前5章的期中考试

考试时间: 2020-06-10 18:11 至 2020-06-20 23:55

考试任务点百分比: 0%

试卷题数: 20

状态: 已过期

第五章节测验

请输入学号或姓名

创建时间: 2020-04-15 13:32 发送给: 60人 已交: 53人 待批阅: 0人 待重做: 0人

姓名	学号/工号	状态	提交时间	IP	批阅时间	批阅人	批阅ip	成绩
赵深林	1712010210	完成	2020-04-15 13:35	144.48.211.239	2020-04-15 13:35			100
王伟	1712010222	完成	2020-05-01 11:32	1.62.224.103	2020-05-01 11:32			100
卢宏伟	1612010110	完成	2020-05-01 16:54	219.159.14.141	2020-05-01 16:54			100
张强	1712010110	完成	2020-05-02 00:56	42.102.141.131	2020-05-02 00:56			100
白富强	1712010201	完成	2020-05-02 00:57	42.103.135.235	2020-05-02 00:57			96.7
韩广生	1712010111	完成	2020-05-02 15:58	117.179.24.74	2020-05-02 15:58			96.7

图 13 线上教学活动展示

示利用学习通进行线上考核的权重分配。通过各种教学活动,引导学生从舒适区进入发展区,不断完成学习任务并强化学习内容。在这个递进的过程中,学生的知识不断积累,能力不断提高。

#### 4.5 线上教学活动展示

图 13 是利用学习通进行线上教学活动的具体展示,从图中可以看出,针对不同的模块,教学活动具有不同的设计。

### 五、创新特色

本课程主要学教特色是“逆向教学设计,丰富特色资源,互动学习范式,虚拟仿真案例,注重能力培养,递阶任务评价”。主要有五大特色:

#### 一、教学理念

按照“少教多学、先学后教、

以学定教、以评促学”的理念以及“经典理论基本稳定,大量实例与时俱进”的原则,以产出为导向进行逆向教学设计,将科技发展前沿成果引入教学中激发学生学习的自主性,引导学生深度学习与提高能力,满足“两性一度”要求,并将学以致用、工程规范等专业素养融入教学的过程中,实现三全育人目标达成。

#### 二、课程资源

为了实现线上线下深度融合,全部自建线上线下大量而本土化的课程资源,为混合式教学提供强大支撑。

#### 三、课堂教学

根据学法再设计教法,构建“课前自学与自测,课中讲授与讨论,课后巩固与提升”的“以学为中心,以教为主导”的互动

式学习范式,利用课堂核心问题、小班专题研讨以及扩展阅读等引导学生积极学习,实现“辩中学、做中学、阅中学”,提高知识迁移能力。

#### 四、案例虚仿

自研了适合校情的基于案例教学的互动式虚拟仿真教学平台,通过动手探究完成系统控制器设计实验,明显提高学生系统设计的高阶能力,已推广到其他同类高校使用。

#### 五、大作业

以设计大作业为载体,采用探究学习、互学互教的分组协作方式以及撰写报告与验收答辩结合的考核方式,综合评价学习效果与提升挑战度,培养学生工程应用能力和处理不确定性问题的能力。

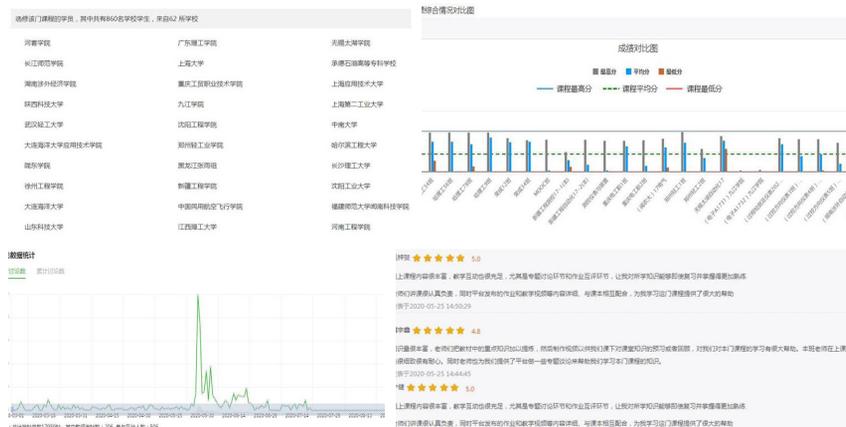


图 14 教学成效与评价

## 六、多元评价

构建多元同步评价体系，以学习成效为导向构成持续改进的动态评价闭环，实现“以评促学、以评定教”。通过有挑战而难度适中的任务驱动，进行多维度递阶式考核，促进学习螺旋式提升，渐进提高学生解决复杂工程控制问题的能力。

## 六、效果评价

图 14 显示了使用该教学平台的高校数量和学生的评价数据。该平台在 2020 年春季学期被 62 所高校使用，其中包括 30 多个 SPOC 班，如郑州轻工学院、重庆建工职业学院、新疆工程学院等。

## 七、总结

自 2015 年至今，课程团队进行了各种线上和线下资源的建设、课程的教学设计以及教学方法的改革，这些都是不断尝试和实践过程中形成的。在此分享了这些做

法，但是需要注意的是，这些做法可能需要根据不同的学校进行调整。从学校的教学实践来看，这种教学方式比传统的教学效果更好，采用小班教学方式，方便进行互动讨论。如果班级规模过大，则无法进行互动讨论。因此，本次分享主要介绍了学校本门课

程的具体实践做法，供大家共同讨论。最后提出下列 6 个开放性问题，在以后的课程教学中希望各位教师能够提供解决思路。

1. 如何更好地体现对学生高阶能力的培养；
2. 如何更好地实施学生分层次培养、学生学业帮扶的有效性；
3. 课程思政元素的挖掘、思想素质教学目标如何评价；
4. 针对互联网 + 应用的大环境，进一步探索学生的创新能力培养；
5. 线上线下学习评价的合理性；
6. 教学案例的时代性、前沿性。○

\* 本文根据作者在 CAA 云讲座上所作报告速记整理而成

## 作者简介



孟庆松，男，哈尔滨理工大学自动化学院，教授，硕士，长期从事控制理论与控制工程

方面的研究工作，作为主编出版教材 3 部，主持多项科研课题，第一作者发表学术论文 30 多篇。一直奋斗在教学第一线，教龄 31 年，常年讲授自动化专业核心课程，如自动控制理论、计算机控制技术、过程控制及仪表等，连续多年荣获校级主讲教授，作为负责人荣获省级线上、线上线下混合式精品课程，主持 2 项省级教研课题，在混合式课程教学中颇有心得，成绩突出。

# 移动机器人运动规划与集群协同

文 / 浙江大学 高飞

导读：2022年9月27日浙江大学控制学院副研究员高飞做客“CAA云讲座”并作题为“移动机器人运动规划与集群协同”的报告。

随着计算机、通信和传感技术不断发展，机器人技术也得到了极大的推广与应用，形态多样，功能强大的机器人承担了越来越多的工作，为人们生活工作带来了极大的便利和改变。作为实现群体智能的重要手段之一，移动机器人自主集群与协同问题受到了国内外研究学者的广泛关注，团队围绕着该领域的重点与难点开展了一系列的研究。

本次报告中，高飞研究员从空中、地面机器人的运动规划算法出发，介绍课题组关于无人机、无人车的快速避障、轻量级感知、全状态规划等方面的最新研究进展。此外，还介绍了在集群自主导航方面的拓展和创新，包括多机互定位、分布式规划、大规模编队等核心算法，并展示在密集环境下仅依靠机载感知和计算的多种集群应用。

## 一、研究背景

在模块化的研究方法中，对于移动机器人自主导航框架，通常按照功能可以分为定位、感知、规划、控制四部分，它们彼此之间具有明确的输入输出关系，并有独立的软件算法实现。如图1所示，以无人机为例，视觉与惯导构成其感知元件，类似于小脑的机载飞控实现无人机的运动控制，类似于大脑的机载计算机进行各种复杂定位、规划、控制算法的运算。在此系统架构下，首先需要实现基于机载传感的状态估计，之后基于感知和定位的

结果进行运动规划，并将规划出的无人机安全可执行的飞行轨迹交由飞行控制，最后由飞行控制进行指令的分解，控制4个电机的转速实现对轨迹的跟踪。对于

集群机器人系统，可以通过信息共享的网络通信架构，进一步实现集群协同的定位感知，协同规划、控制等功能。

单机和集群的自主导航一直

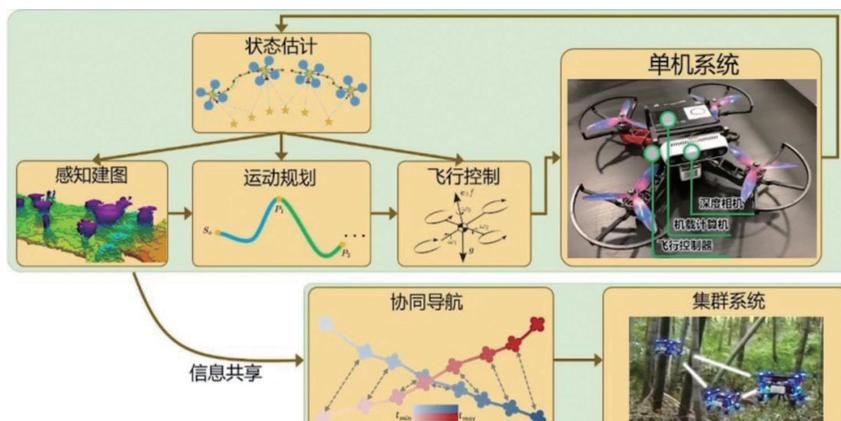


图1 自主导航框架



图2 研究现状

是领域内的研究重点。如图 2 所示，对于单机而言，现有大多数的无人系统运行的速度比较慢，而且只能应对稀疏简单的环境；对于集群系统，少有工作可以突破实验室的环境，实现远离集中式计算与全局定位的情况下的全自主集群。

## 二、无人系统的自主导航

对于机器人运动规划问题而言，最重要的是需要解决两个的问题：1）如何去准确的描述系统的动力学，实现对移动机器人的建模。通常认为，规划等于开环的控制，控制等于闭环的规划，规划系统通过假设已知系统模型，计算运动控制指令，进行未来运动轨迹的推演，因此，在进行移动机器人的运动规划时，首先需要实现对物理系统的准确建模。2）如何实现对环境的建模。即如何将移动机器人感知到的数据转换成规划系统能读得懂的数据结构进行环境的表征，如何通过这个

环境表征得到对于避障有用的约束的形式。下面，将围绕这两个核心问题进行展开，介绍团队在运动规划方面的最新研究进展。

在运动规划方面，团队一项有代表性的工作 EGO-Planner，其核心思想是从环境中获取障碍物的梯度信息，利用获取到的梯度信息将梯度的代价函数传导到无人机轨迹的参数空间中，通过构造优化问题，最终生成一条安全、光滑、符合无人机动力学约束的飞行轨迹。在此过程中，通过环境产生的推力，进行障碍物的

避障的评估，避免了传统地图表征形式所需要构建障碍物欧式距离场（ESDF）所需的计算及内存开销，算法求解效率大幅提高，平均可达 1 毫秒以内。

团队另一项有代表性的工作 MINCO，与 EGO-Planner 关注障碍物位置，通过传感器获取障碍物空间的分布所不同的是，其关注的是地图中障碍物的补集，利用简单的凸子单元构建一连串的可行区域，把地中可以被通行的区域提取出来，构造机器人障碍物环境中可通行区域，即安全飞行走廊，并将此可行区域作为安全性约束进行后端的轨迹优化。除此之外，在此工作中，我们提出了一种多项式轨迹时间空间参数同时优化的方法，定制了高效的优化求解器，可以施加任意的可解析的无人机微分平坦状态变量所表示的约束性函数，包括对应位置的空间避障约束，底层的动力学、角速度等约束条件。据

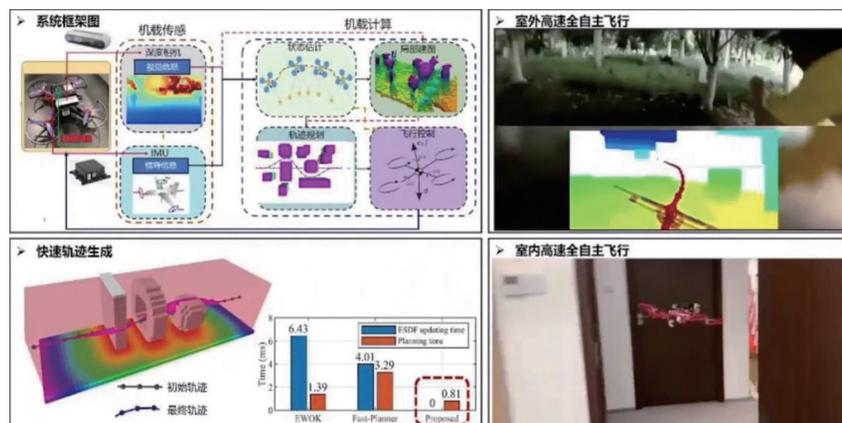


图3 快速重规划

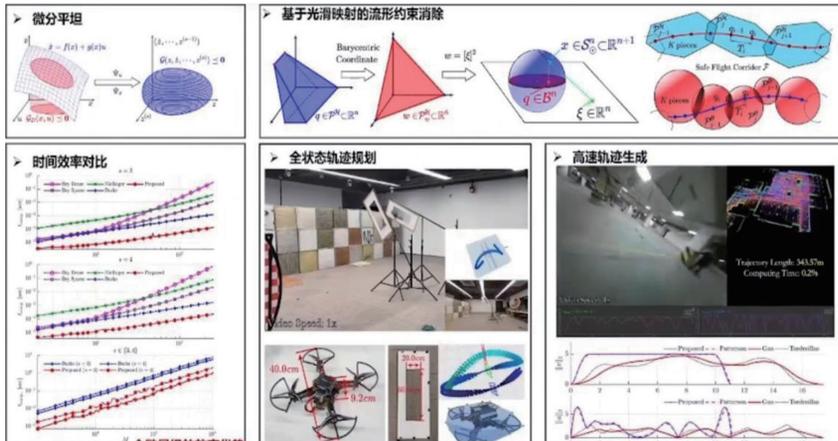


图4 高机动轨迹生成

此，实现了能够满足障碍物密集环境中的巡航、追踪、大姿态机动等任务需求的高效轨迹优化与求解，如图4所示。

除了上述两个通过求解优化问题获取无人机安全飞行轨迹的工作，团队最新的一项工作中，实现了基于运动基元，通过采样的方式生成复杂环境下的实时运动轨迹的方法。相比于传统的运动原语方法，其能够生成一种时间最优的运动原语库，其通过将离线建立好的运动原语库按照当前的朝向进行旋转，将其叠加在

当前无人机的位置上，之后根据用户设定的目标来进行打分，实现在运动原语库中的最优路径的选择，如图5所示。相比于传统以轨迹为中心进行碰撞检查的方法，在离线已生成好的运动原语库基础上，已知当前无人机的位置与朝向，进行轨迹的拓展，可以实现以点云为中心的轨迹高效碰撞检测，并且，其只需要在非常小的计算代价下就能实现。

另外，团队最近完成了一项关于实时交互的自主航拍系统的设计，如图7所示。它主要有两

个特点：1) 对目标复杂环境下的持续跟踪。这一部分工作是在之前无人机跟踪目标的基础上进行了扩展。2) 实时交互的自主航拍，其核心思路是将无人机拍摄所需的镜头语言转换成运动语言，镜头语言的本质是用户所期望的目标位置在像平面上的位置信息，为像素层面的期望。在已知无人机相机内参，及与目标的相对位置与运动评估的情况下，可以建立像素平面与目标位置的关系，进而可以构造镜头语言与运动语言的联系，进一步的，据此构造约束条件，通过调整无人机多项式轨迹的系数与时间的分配，可以实现根据用户需求的拍摄目的。如下图所示的无人机跟踪拍摄纸飞机的实验表明，对于高动态的移动目标，系统也能很好的完成交互式的拍摄，能将目标保持在拍摄图像的中间。对于纸飞机这样高动态目标的定位，我们使用了NOKOV度量的动作捕捉系统。

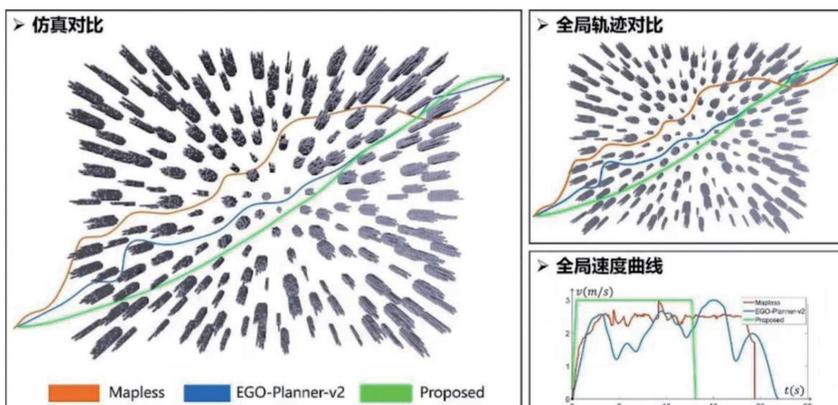


图5 轨迹仿真对比

回顾上述谈到的对障碍物的碰撞评估的两种方法：1) 以障碍物为中心的基于梯度的方法；2) 以障碍物可通行区域为中心的几何约束的方法。对于第一种方法，虽然其可以提供任意空间中，任何位置上障碍物对某一点产生的梯度信息，如下图左上角所示的欧式距离场ESDF，并能通过此梯度可以获得远离障碍物的方向

► 跟拍快速移动物体



图6 自主航拍系统运行效果

以及沿着此方远离障碍物的所需力的大小。但是，利用此种方法构造 ESDF 一方面比较耗费算力，另一方面无人机在进行局部轨迹规划过程中构建如此大范围的 ESDF 地图是没有必要的。因此，基于此种思想，团队提出了上述已谈到的不需要构建 ESDF 的路径规划方法 EGO Planner。但是，EGO Planner 不适用于任意形状的机器人。为此，团队提出了构建以机器人为中心的 ESDF 的轨迹规划方法，记作 RC-ESDF。类似于上述提到的运动原语，可

以根据机器人的形状，离线的一次性的计算好其 RC-ESDF 信息。利用此种方法，在进行避障梯度查询时，与在机器人上离散采样点进行 ESDF 地图碰撞查询所不同的是，在构建了以机器人为中心的 RC-ESDF 后，只需要将环境中的障碍物点放入所构建的 RC-ESDF 中就能实现碰撞的检测，避免了大范围 ESDF 地图的维护，并且保证了在运行过程中，对机器人上每一个点都可以求取避碰的代价与梯度，进而实现了对任意形状机器人在复杂环境下

轨迹的规划。

对于非平整地面或者崎岖的地形，如下图左上角所示的旋转的楼梯，此时这时需要机器人具备超出二维的运动规划能力，需要一种介于 2D 和 3D 之间的轨迹表征，其可以保证机器人轨迹中每一个点的可通过性，如不会碰撞、倾覆、坠落等。对此，团队归纳出了一系列的真正适合地面机器人贴在地上通行的需求，通过将碰撞、支撑的角度等因素叠加在表征地图信息的点云上，然后进行赋值，据此构造出了不同地形穿越的惩罚势场。在所构造的惩罚势场基础上，进行移动机器人路径的搜索，施加相应的动力学约束以及运动光滑性等要求进行后端的联合的轨迹优化，最终实现了超越 2D 环境的导航效果，团队在本末科技的刑天机器人上对该算法进行了部署与验证。

在自动驾驶领域内，对于车的规划一般来说有两种思路：1) 全状态下的最优控制规划，主要采用 MPC 解全维度下的系统的最优控制输入的序列，实现基于 MPC 的模型预测控制。2) 把小车化简成质点，然后在坐标系下进行小车径向和横向运动的分解，获得一系列比较简单的运动轨迹。不同于上述两种方法，如图 9 所示，团队借鉴旋翼无人机微分平坦的特性，通过构造阿克曼模型

► 基于机器人自身形状构建的RC-ESDF

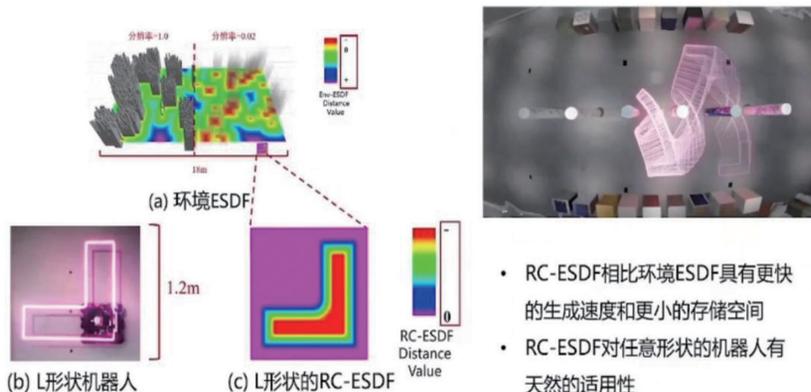


图7 任意形状机器人的快速轨迹优化

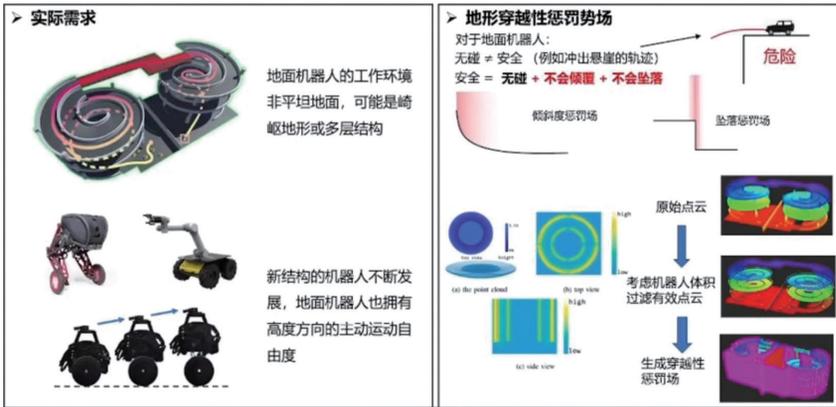


图8 超越 2D 环境的地面机器人导航规划

小车的微分平坦模型, 然后在平坦的输出空间, 利用压缩后空间的状态变量去表征整车的全状态变量, 实现在更低维的空间中利

用多项式轨迹表征的全尺寸, 即考虑小车形状、姿态、朝向的轨迹表示。

无人车的机动性很强, 当其

在道路上行驶时, 需要重点处理静态与动态障碍物的约束性问题。如下图所示, 对于静态障碍物, 我们通过施加 2 维平面的运动走廊约束, 对其进行处理。对于动态障碍物, 采用的是基于符号距离函数, 在数学上找到一种两个凸几何体之间的符号距离函数的解析表达形式来构造约束, 据此, 实现了动态障碍物的避碰。我们在仿真的环境中验证了该方法, 也在实车上进行倒车入库, 以及平面行驶, 匀速绕障的实验。

### 三、复杂环境集群自主协同

对于移动机器人集群方面的工作, 我们的研究目标是构造一个分布式的微型大规模机器人集群, 其非常的灵活, 能够不依赖云端大脑的计算与调度, 集群中的每一个个体均能独立的实现自主定位、避障等功能。为此, 团队在单机的自主导航的研究基础之上, 通过构建信息共享网络, 然后在此网络下专门研发多机协同的相关算法, 实现了无人机在复杂环境下的集群自主协同。此外, 通过集群层面上的广播通讯网络, 无人机可以获得其他无人机的飞行的关键信息, 例如其当前位置、预期飞行轨迹等, 将这些信息作为约束进行集群上协同规划, 最终得到集群多机避碰的时空最优轨迹, 如下图所示。

#### ► 无人车分层规划框架

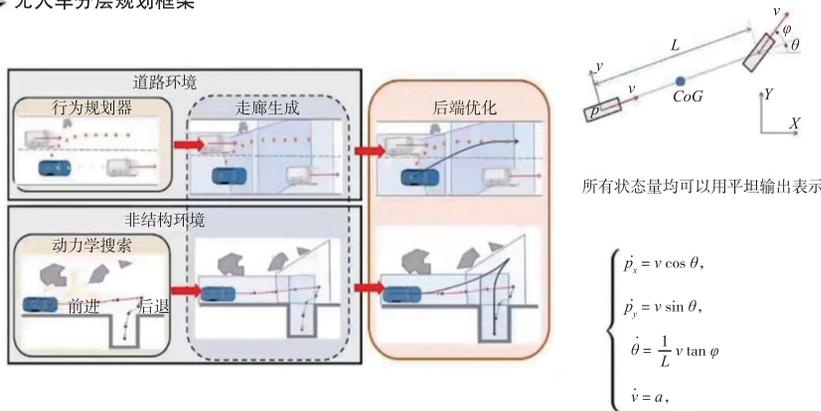


图9 无人车分层规划框架

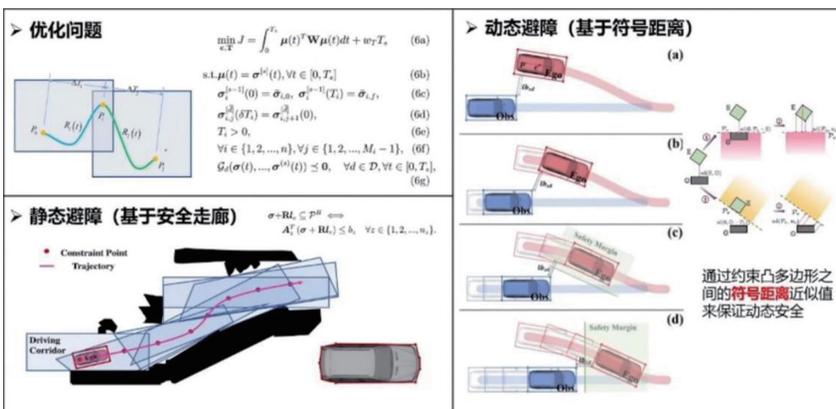


图10 障碍物约束问题

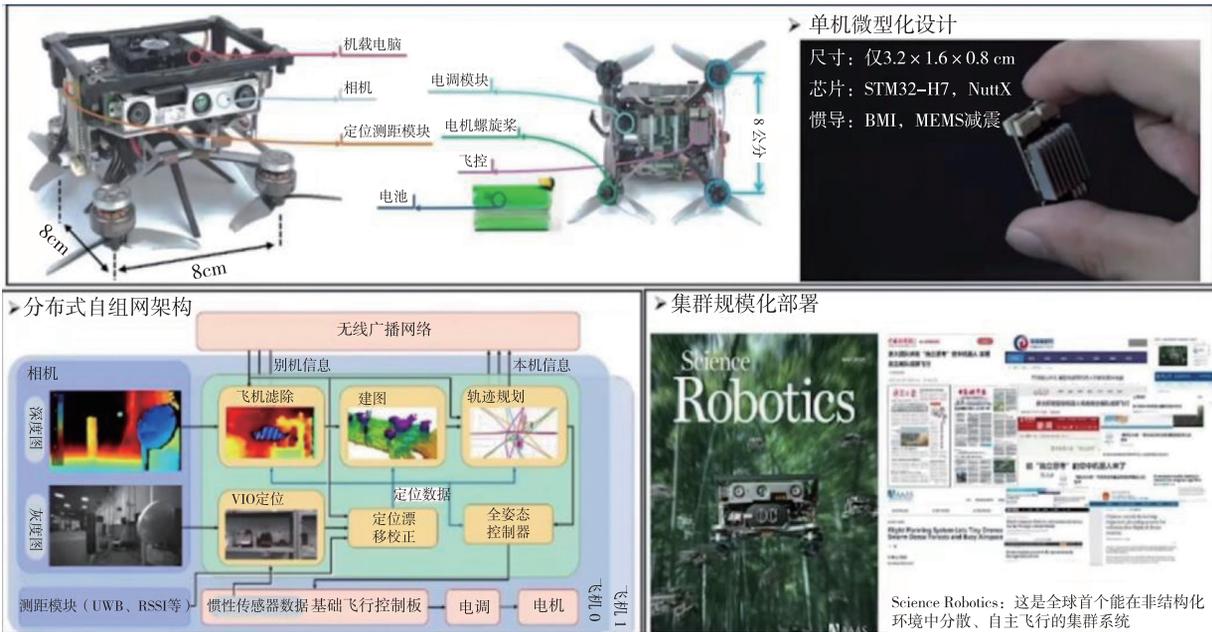


图 11 全自主微型无人机集群系统

在全自主微型无人机集群系统规划层中，我们主要构造的是用户自定义需求的分布式轨迹规划模块。如图 12 所示，在无人机规划中，单机系统需具备运动的光滑性、连续性、避障等功能，而对于多机系统，则需要具备多机避碰的要求，即要求两个无人机生成的轨迹在时间和空间

上不能进行重叠，对于集群机器人而言，还有协同性上的要求，如编队飞行等，对于这些要求，我们的思路是通过约束松弛的方法，将其变成优化问题目标函数的一部分。基于此设计理念和思路，我们构造出了一个通用的，用户可以任意添加新的期望和约束的，类似搭积木的规划框架，

如下图所示，我们需要做的就是将用户所需要实现的期望或约束用一个解析的表达形式进行表示，之后，只需要利用低复杂度的求梯度的方法，利用优化问题的求解器就辅助完成问题的求解。

对于分布式无人集群协同编队，我们的设计思路是每一架无人机都能执行完自己所规划出的轨迹，进而实现集群系统在整体上朝期望队形的逼近。因此，只需要在上述无人集群搭积木的思路，将如何分配集群中的个体目标位置使得整体队形更加的接近期望队形描述成数学语言，叠加上无人机的动力学与运动学约束、单机及多机的避碰等约束就能实现无人集群系统在复杂环境下的自主编队飞行。在仿真环境

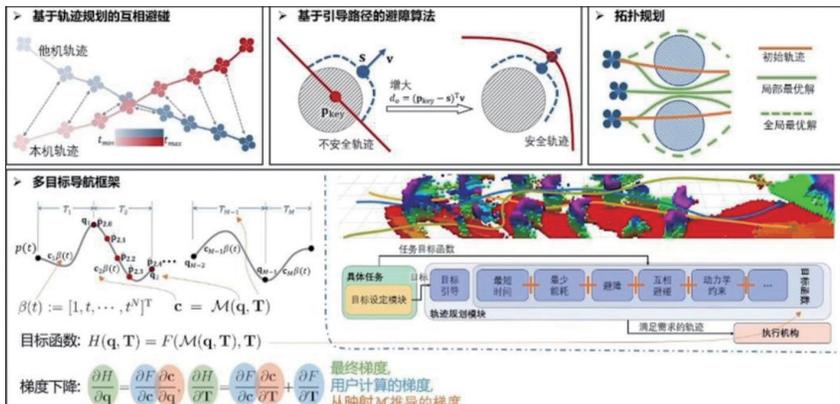


图 12 全自主微型无人机集群系统规划

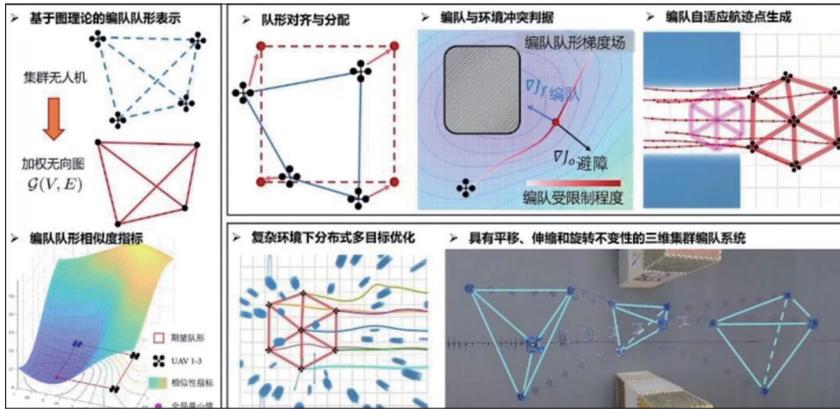


图 13 编队方式

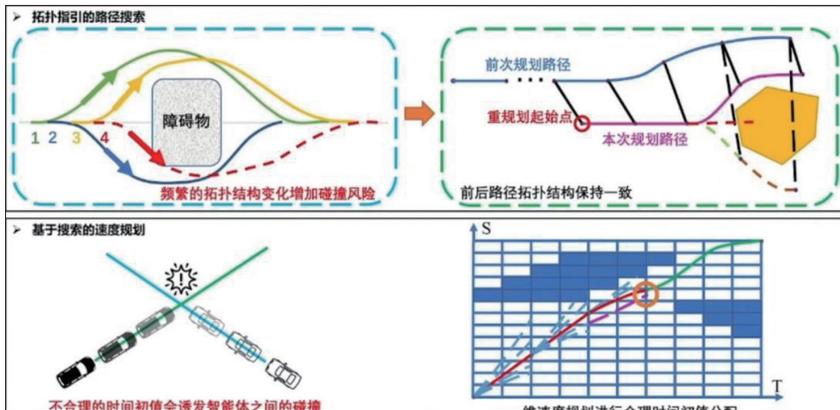


图 14 非质点地面移动机器人的去中心化集群

下，我们进行了避障和编队实验，分别验证了分布式避障的鲁棒性和泛应性。在稠密的竹林中，我们也进行了 10 架无人机完全自主的飞行实验，建立的三维地图分辨率达到十厘米，可以有效的支撑直径八公分，重量 300 克，续航约 12 分钟的无人机在竹林环境下的自主导航。在集群编队协同上，验证了 16 机在有障碍物环境下的集群编队飞行，飞行过程中，无人集群编队保持一个箭头的形状，在遇到障碍物时，队形会自动的散开，实现了避障与编队保

持之间的平衡。

另外，关于地面机器人集群的规划研究，相比于无人机而言，其规划的空间更加有限，只

有二维平面，而且其体积更大，其分布式规划的成功率很难得到非常好的保证。为此，我们设计了 1) 基于搜索的速度规划，无人车规划时，一般需要前端去指引空间的运行，这个前端通常来说是没有速度时间信息。两个小车在行驶过程中，在没有时间规划，只有轨迹形状的时候，它们可能会在某个点发生碰撞。对此，我们实现的基于搜索的速度规划前端，可以在进行后端的轨迹优化之前，实现在时域上的一次避障。

2) 在进行小车规划时，尤其是在非常动态的多车规划环境中，我们会尽量避免小车由于拓扑指引的路径搜索不一致造成的运动发生左右横跳的情况，其感知碰撞的风险也会大大增加。对此，我们在路径搜索阶段，通过添加拓扑引导，能尽可能使得下一次规划路径与前一次的规划在同一个拓扑空间内。基于上述两点以及在无人机上的研究基础，我们

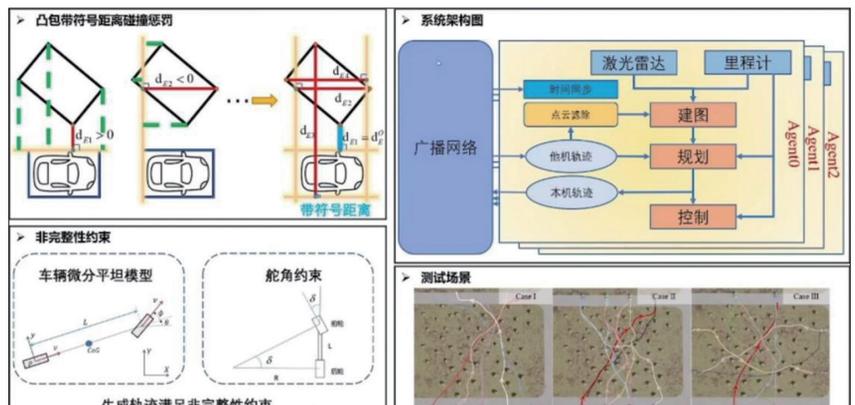


图 15 非质点地面移动机器人的系统框架

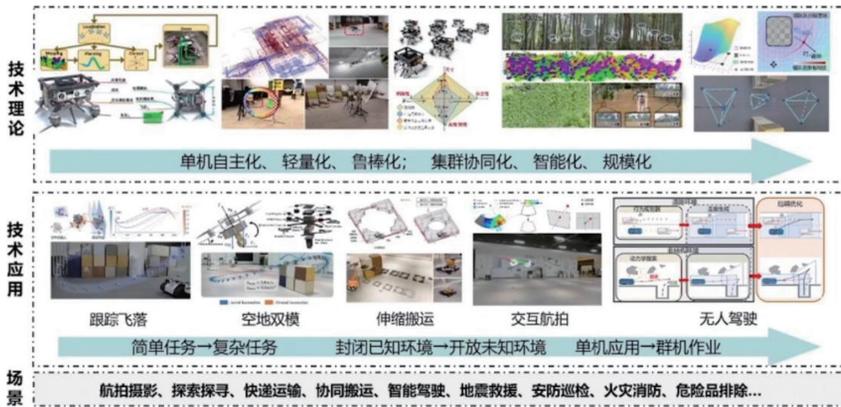


图 16 移动机器人技术应用与场景发展

实现了地面机器人的分布式自主集群，并在仿真环境与实际环境中进行了验证。

#### 四、总结

面向计算、传感能力受限下

移动机器人自主导航与集群的需求，团队围绕着该领域的重点与难点，在技术理论、实际应用方面进行了运动规划和控制方面的广泛研究，尤其是复杂环境下的自主避障轨迹规划和分布式的集群，未来，团队将针对更多的应用领域与场景，进行技术的突破与应用的推广。○

\* 本文根据作者在 CAA 云讲座上所作报告速记整理而成

### 作者简介



高飞，博士，浙江大学控制学院副研究员，博士生导师；FAST 实验室技术负责人，FAR

课题组负责人；浙大湖州研究院—集群机器人自主导航研究中心 PI，智能无人系统协同导航控制技术联合实验室主任。

研究方向包括空中机器人、集群机器人、运动规划、环境感知、SLAM 等。近年在 Science Robotics, IEEE TRO, JFR, IEEE RAL, ICRA, IROS, ISRR, ISER 等机器人领域知名期刊会议发表论文 60 余篇；发表 Science Robotics 封面论文

并被国内外媒体如光明日报，新华社、AAAS、泰晤士报广泛报道；获 IEEE TRO 2020 最佳论文荣誉奖、IEEE/RSJ IROS 2021 最佳应用论文奖提名、IEEE SSRR 2016 最佳论文奖、浙江大学信息学部 2021 青年创新奖等学术荣誉；获国际空中机器人大赛冠军、RoboMaster 高校人工智能挑战赛亚军等竞赛奖励；任 IET Cyber System & Robotics/ Drone/IROS 等期刊 / 会议编委。

## 徐宗本院士：凝练基础研究真问题

每一个科学家特别是战略科学家，要将凝练科学问题放在首要位置，提出推动科技进步、推动国家发展的关键科学问题。一个科学家只有具备凝练问题的素质，才可能带领团队朝着正确方向前进，做有价值的科研

凝练重大科学问题需要一种交流机制，需要知识的碰撞，相互印证、相互启发、凝聚共识。从2019年到现在我们依次聚焦的主题包括：数据科学与医疗健康、偏微分方程与油气勘探、最优化方法与人工智能、随机分析与量化金融、图论与复杂网络

搭建产学研融通平台，推动数学家与企业、产业专家深入交流融合，发展领域中的共性关键应用数学理论与数学技术，为解决行业所面临的重大基础问题提供数学方法与数学技术

在西安交通大学（下称西安交大）兴庆校区静谧的校园内，国家天元数学西北中心坐落于一角。在一间推开窗就能看到满树浓荫的办公室中，《瞭望》新闻记者见到了第十六届华罗庚数

学奖获得者、中国科学院院士徐宗本。

数学是一种描述科学规律的学科，是所有科学技术的基础。在兴庆校区的这座古朴小楼内，徐宗本展开一次次思维实验，将一个个抽象的问题具象化，推演出解决实际应用需求的数学方法。

徐宗本长期从事数学与信息科技的交叉融合研究，着力推动数学与实际应用相结合，在关于应用数学、稀疏信息处理、机器学习、大数据与人工智能数学基础等领域取得系统性与原创性成果，被广泛应用于雷达感知、CT成像、5G通信等多个领域，解决了多项国家重大急需。

“基础研究处于从理论探索到技术开发、再到生产应用的创新链条起始端，作为一切学科的基础，数学的地基能否打牢，将很大程度上影响科技事业大厦的稳固程度。”徐宗本告诉记者，党中央提出凝练基础研究关键科学问题，科技领军人才要承担起“出题人”身份，在自己的专业领域中详细辨识，把国家需求具化为一个个重大科学任务和科学问题，

这是实现高水平科技自立自强的迫切要求，是建设世界科技强国的必由之路。

### 战略科学家要把凝练问题放在首要位置

《瞭望》：应由谁主要承担凝练关键科学问题的的工作？

徐宗本：提出问题是开展科学研究的先决条件，但凝练基础研究科学问题的过程是非常难的，需要靠科学家群体的努力，特别是科技领军人才。上世纪60年代，我们老一辈科学家研制“两弹一星”的目标明确，现在随着时代进步，科学发展相较于过去几十年已经是枝繁叶茂，一些直接、基础的科研工作已经完成，需要科研人员在更细分、深入的领域做创新突破。凝练科学问题，要求对所解决的问题有本质的认识，并对它背后的逻辑关系有深刻的思考，因此需要科学家既对国家需求和学科前沿有比较深入的了解，也对解决问题所需知识结构的相互关联性有基本的判断。但当前有的科研人员受利益驱动习惯于做短平快的科研，难

以提出真问题。凝练基础研究科学问题是实现科技自立自强必须要解决的问题。每一个科学家特别是战略科学家，应将凝练科学问题放在首要位置，提出推动科技进步、推动国家发展的关键科学问题。科学家只有具备凝练问题的素质，才可能带领团队朝着正确方向前进，做有价值的科研。当前需要建立完善激发科学家提炼问题的体制机制。首先，可以通过建立机制或管理规范，将凝练基础研究科学问题作为战略科学家的本职工作；再者，应建立完善激励机制，对凝练出重大科学问题的科学家给予一定形式的认可和奖励，认可科学家的贡献，形成问题凝练的长效机制。

## 面向国家重大需求凝练问题

**《瞭望》：你是如何从应用研究中抽象出理论问题的？**

**徐宗本：**自由探索、目标驱动的基础研究与经济社会发展需要的应用研究并非割裂的，相反，扎实的基础研究会催生出源源不断的应用成果。比如将大数据应用于人工智能，需要对大数据进行研究，其本质就是数学的统计学分支，数学为大数据应用奠定了分析基础。我刚工作时，研究方向是 Banach 空间几何，非常抽象，当时看很难应用。上世纪 90 年代正好掀起第二次人工智能浪

潮，神经网络出现了。人工神经网络听着很神秘，其实就是用计算机模拟人脑神经结构，把它变成一个系统去解决问题，其底层就是数学问题。当时香港中文大学招募能做人工神经网络的数学专业背景研究者，我应邀做了两年研究，利用数学方法降低了人工神经网络的复杂性，发表了一批 IEEE（电气与电子工程师协会）文章，这些工作引起了国内外同行的注意与好评。此后，我在西安交大和香港中文大学之间往返做了七八年研究，不断用数学理论解决人工智能发展中的一些问题。由此可以看到，数学作为基础研究的根本，一样能够推动应用研究领域的变革。而且只有更加深厚的基础研究土壤，才能生长出更多应用成果，二者相辅相成。这些年来，我凝练的关键科学问题已经有十几个，都成为国家重大计划项目，包括大数据统计学、智能优化、人工智能与智慧医疗等。例如在智慧医疗方面，提出并探索了分布式微剂量 CT 技术。CT 是基础医检设备，虽已普遍使用，但其辐射剂量危害是其原理性缺陷，读片难是应用痛点。因此，CT 的照射次数在一定时间内被严格限制，通常只在三甲医院部署，还难以作为医学筛查设备使用，难以在农村和社区部署，难以对国家的分级治疗战略与实践做出更直接的

支撑。要把 CT 作为筛查设备，就必须解决 CT 扫描对人体的伤害问题。解决这一问题的唯一出路是使用低剂量甚至是微剂量的扫描方式。另一方面，想在农村、社区、移动环境下自由部署 CT，最可能的方式是将 CT 的软、硬件分离，在农村、社区或移动端只部署“扫描”终端，而将成像和判读留在三甲医院（或专门的医学成像中心），扫描端与成像端通过 5G 通信联通。受人工智能技术和科学计算原理的启发，我们形成了扫描—成像分离、用计算换剂量的解决思路。用计算换剂量，是一个数学问题，我们通过数学公式实现了微剂量扫描获得高分辨率成像，应用表明新的 CT 能够在 1/10 ~ 1/5 常规剂量下实施扫描并高精度成像。扫描—成像分离实现了 CT 在农村、社区自由部署，能够从设备上直接支撑和服务于国家的分级医疗战略与实践。以这些技术为基础的分布式微剂量 CT 已研发成功，形成了具有自主知识产权的国产新一代 CT 系统。新系统已在全国多地开展临床验证应用。

**《瞭望》：在凝练基础研究关键科学问题过程中，你有哪些心得可以告诉年轻学者？**

**徐宗本：**科研人员要了解待解决问题的本质是什么，判断技术上要如何实现才能解决。这中

间有一系列困难需要克服，但从逻辑上、原理上能够搭起桥梁来，有能够走通的思路依据，这样的问题就能称之为真科学问题了。在充分论证了问题的科学性后就要进行形式化，即用数学语言表达出待解决的这个问题，即以量化的方式进行表述。比如达到这个目标有什么约束条件，以及约束条件在目前的具备或满足的程度等等，如果没有一套数学规范化的表述，形式化是不可能的。因此我们会建立起数学模型，用数学建模的方式来验证这一问题的最底层可操作性。

### 探索关键科学问题凝练机制

**《瞭望》：国家天元数学中心探索了哪些问题凝练机制？**

**徐宗本：**现在问题的提出主要靠科学家的兴趣，这是不够的。当前需要高度重视凝练基础研究科学问题，形成凝练问题的机制。十多年前，我们就在探索怎样凝练基础研究科学问题。为推动中国数学区域、领域均衡发展，国家自然科学基金委员会天元数学基金在全国设立了5个中心，我所在的是国家天元数学西北中心（下称“西北中心”）。西北中心建立之初，确立的主要任务就是凝练重大科学问题。我认为这是我们应该担负的责任。凝练重大科学问题需要一种交流机制，便于进行知识的碰撞，在相互印证、

相互启发中凝聚共识。西北中心每年聚焦1个主题，围绕主题组织重大专题研讨、重大交叉研究、前沿学术研讨、开办讲习班/暑期学校等多种形式的学术活动。从2019年到现在我们依次聚焦的主题包括：数据科学与医疗健康、偏微分方程与油气勘探、最优化方法与人工智能、随机分析与量化金融、图论与复杂网络。例如，西北中心2022年的主题是随机分析与量化金融，我们围绕国家对数字经济发展和金融系统开放与发展中的总体安全需求，组织概率与随机分析、统计学、随机控制、数学与金融工程等学科专家，共同研讨金融与保险领域中的基本科学问题，这促进了学科交叉融合，打造高水平学术交流平台；搭建了校企合作桥梁。我们与金融企业深入研讨金融科技、风险管理、衍生品市场等，充分了解金融机构和实体产业对于金融风险管理的诉求，搭建创新合作的平台；通过主题年活动形成研究团队、开展攻关研究。西安电子科技大学、武汉大学组建团队，开展动态跟踪投资组合的优化、对冲与博弈问题研究，研究成果拟申报国家自然科学基金重点项目。通过这些活动的密集研讨、集中攻关，将思想升华成问题，最终把选题变成国家任务。例如，2022年我们凝练了一批重大任务选题，形成了科技部重点

研发计划“数学和应用研究”专项中的5个重大项目，证明西北中心组织的科学问题凝练工作是非常有效的。

**《瞭望》：除了建立常态化学术交流机制，还有哪些凝练科学问题的方法？**

**徐宗本：**搭建产学研融通平台也是推动凝练科学问题的重要方式。2020年，科技部在全国设立了十三家国家应用数学中心，西安交大牵头组建的陕西国家应用数学中心是其中之一。中心深入开展数学与其他学科的交叉研究，力求解决我国重点行业、重要领域发展中亟待解决的数学问题，我们关注的领域包含了非常规油气勘探的数学理论与反演方法、未来通信的数学技术、人工智能与数学的共融发展等。在运行方式上，中心搭建产学研融通平台，推动数学家与企业、产业专家深入交流融合，发展领域中的共性关键应用数学理论与数学技术，为解决行业所面临的重大基础问题提供数学方法与数学技术。目前，中心已经与华为技术有限公司共建西交—华为数学技术联合实验室，与中石油东方地球物理勘探有限责任公司共建西交大一—东方物探数学与智能油气探测联合实验室，与陕西煤化工集团有限公司共建陕煤5G+工业互联网联合实验室，与OPPO



徐宗本团队在西安交通大学二附院做分布式微剂量 CT 临床验证（2021 年 6 月摄）  
受访者供图

广东移动通信有限公司共建西安交大一-OPPO 数学与泛在软件体系联合实验室。中心与这些相关头部企业已经开展了实质性合作，率先探索了“数学家与行业技术专家在同一屋檐下”的合作模式。中心实行“以质代量”与“静待花开”相结合的考核评价机制，以代表性成果、行业实际贡献、成果转移转化等进行综合评价。中心代表性成果包括提出了致密油气储层地震波超分辨反演和多维度表征技术，有力支撑了鄂尔多斯盆地的致密油气勘探开发。○

来源：瞭望

## 作者简介



徐宗本 中国科学院院士，中国自动化学会会士，数学家、信号与信息处理专家、西安交通大学教授。主要从事智能信息处理、机器学习、数据建模基础理论研究。曾提出稀疏信息处理

的  $L(1/2)$  正则化理论，为稀疏微波成像提供了重要基础；发现并证明机器学习的“徐-罗奇”定理，解决了神经网络与模拟演化计算中的一些困难问题，为非欧氏框架下机器学习与非线性分析提供了普遍的数量推演准则；提出基于视觉认知的数据建模新原理与新方法，形成了聚类分析、判别分析、隐变量分析等系列数据挖掘核心算法，并广泛应用于科学与工程领域。曾获国家自然科学二等奖、国家科技进步二等奖、陕西省最高科技奖；国际 IAITQM 理查德·普

莱斯 (Richard Price) 数据科学奖；中国陈嘉庚信息技术科学奖、中国 CSIAM 苏步青应用数学奖；曾在 2010 年世界数学家大会上作 45 分钟特邀报告。

曾任西安交通大学副校长，现任人工智能与数字经济广东省实验室（琶洲实验室）主任、西安数学与数学技术研究院院长、陕西国家应用数学中心主任、大数据算法与分析技术国家工程实验室主任，是国家大数据专家咨询委员会委员、国家新一代人工智能战略咨询委员会委员。

# 李德毅院士等：人工智能看教育

最近这几年，许多教育工作者怀着极大的热情，拥抱人工智能，讨论人工智能如何赋能教育，尤其是用机器学习的成果来改善教学手段，提高学习效率，减轻教师负担。作为人工智能领域的长期工作者，作者想从另外一个角度，从人工智能的角度看教育，说清机器为什么能够思维、如何思维，人类在有了智能机器（人）之后，如何推动教育与时俱进。

## 一、人类最伟大的智慧是发明了教育

### 1. 自然进化奠定了教育的生物学基础

自然进化并没有过分关照人类，那人类是怎么在这么短的一个时期内一下子就站到了全球的霸主地位了呢？看看鱼鹰如何捕鱼的，蜜蜂如何筑巢的，蚁群如何挖穴的，蜘蛛如何织网的，老虎如何运动和捉拿的，黑猩猩如何创造和使用工具的，其智能都让人类叹为观止。和其他生物智能相比，人眼只能看到可见光，人耳听不到超声波，宠物识别主人的能力亦或超过主人识别宠物，自然进化的本质是物种的多样性，

适者生存的进化法则并没有过分关照人类。那么，人类进化的特别之处在哪里呢？

经历了几百万年，人类进化的特别之处体现在三个方面：

第一，人类从早期的爬行动物进化到直立行走的猿人的过程中，解放了双手，学会制造工具并进行劳动，与其他生物相比人类有一双灵巧的手；

第二，人类的声带发音和耳蜗听力精细神奇，语言能力强，还可以用复杂精致的语音区分是谁在讲话；

第三，人类具有复杂的大脑，首先是脑干部分，它是整个身体调节的核心，并且有意识。待进化到哺乳动物的时候，高等生物有了情感，在意识区和情

感区基础上，大脑外皮层暴长，体积约 300cm<sup>3</sup>，其表面积为 2200 ~ 2850cm<sup>2</sup>，含近千亿个活动神经细胞，九千亿个胶质量细胞，成为独一无二的人类认知特质，如图 1 所示。自然进化给了教育的生物学基础。人类基因中只有 30 亿个碱基对，基因决定神经元的连接规则或者模式，并不指定神经元的连接强度，而人脑有大概 860 亿个神经元，平均每个神经元有 1000 个左右的连接，因此基因没法完全指定每个神经元的连接方式和强度，这就为后天的可重塑留下了空间。教育，尤其是早期教育，塑造一个人的认知。和其他生物相比，自然选择、物竞天择、适者生存，形成了复杂精致的人类大脑，代价是

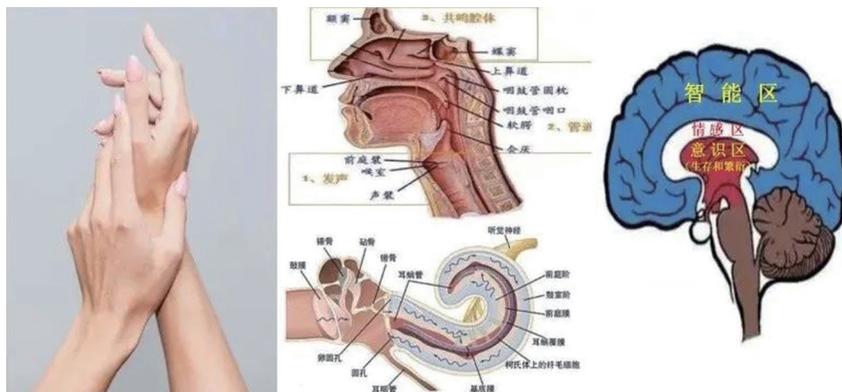


图1 教育的生物学基础：人类进化的三个特别之处

需要漫长时间来进化，是千万年用生与死的世代更替，保存任何发生有利变异的个体，并毁灭在构造上有任何不合宜偏离的个体。

## 2. 人类智能始于语言，文字延伸到体外成为人工智能

人类学习的历史几乎与生命的历史一样漫长，从猴科到人族经历了数千万年的进化，人脑组织结构不断地适应人的语言能力；人类的智能、知识、文化和文明靠后天习得，靠大脑皮层的支撑，人脑组织结构的进化和后天学习成就了人类智能，如图 2 所示。现代意义上的 AI 始于古典哲学家用机械符号处理的观点解释人类思考过程的尝试。1956 年达特茅斯会议之后，AI 被正式启用，会议上确立了人工智能的研究领域。其实，人工智能的起源可以追溯到很久很久之前，计算机之前就有算盘、计算尺等，让思想、思维、智能离开生命体而独立存在，始于人类发明语言和文字，用语

言和文字承载人的思维和智能，反过来人工智能又促进了作为生物的人脑认知能力的进化，可用机器来模拟人的智能。

人类智能始于语言，语言离不开语境、语用、语义和语法。文字的发明过程进一步催生人类更多的想象力，尤其是抽象、联想和交互。200 万年前动物人科中的直立人，创造了石头文化，又经过 30 万年前的智人和 3 万年前的现代人类文字诞生的漫长演化，人类交流从模仿、姿势、手势、口语、图画，到文字。西亚出现最早的楔形文字，古埃及最早的文字是象形文字，大约出现于 6000 年前，象形文字是表意的，后来演化为表音象形文字。古汉语起源于 3000 年前，在中国商朝遗址殷墟上发现的甲骨文，有丰富的发音体系，区分辅音与元音。

人类和动物的最本质的区别是人类发明了文字。地球上所有物种，都是依靠自然进化的生物

本能，加上自身生命期内有限的实践经验。拓展智能唯有人类不同，一个人在完成了生育之后，他或她对人类这个物种智能的生物学贡献就完成了，但实际上他或她在后来生命期内的智能，如果延伸到体外形成人工智能，对人类的智能发展的贡献依然存在，人类通过语言文字传承知识。语言学家估计地球上 6900 多种语言文字。文字的流变有类似的源头，过后形成不同分支。无论图画文字、楔形文字、象形文字、拼音文字、甲骨文字等，不断演化，直到各个学科专业的符号文字（如数学、物理、化学和音乐），甚至发展到计算机编程的语言符号，把各种抽象概念用文字表达出来，把人类的思想、思维、见解、技巧、决策、问题求解等用文字符号表达出来，刻到介质上，印到书本里，放到机器里。生命停止了，文字还存在，特定人的智能还在，群体的智能还在，成为人工智能，成为人类文明。人工智能是人类智能的体外延伸，始于文字。文字是连续语言的离散载体，言之无文，行而不远，行而不久。人类区别于其他生物最基本的特征是用文字表达人的思想、思维、情感，表达智能，成为我们灵魂的解释者，文字可脱离生命体而长期存在，成为环境的一部分，成为人类文化文明的生态，成为认知空间数

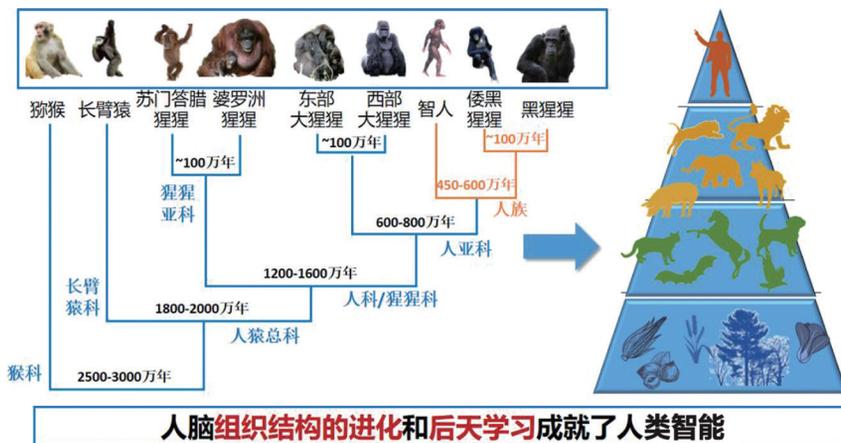


图 2 人类智能的形成

字化的基础。

### 3. 人类是地球上万千物种中最会学习的物种

教育始于史前时代，世界上最早的学校出现在两河流域的古巴比伦文明中，公元前 3500 年在古巴比伦苏美尔的苏路珀古城遗址有大量的泥板学生课本和作业，证明两河流域已有读、写、算等基本训练的“泥板书舍”，公元前 2100 年在两河流域的马里城遗址里一所由一条通道和两个房间（分别可坐 20 人和 45 人）组成的学校，使用楔形文字教学。四大文明古国（古埃及、古巴比伦、古印度和中国）均出现最早的学校。公元前 2500 年的古埃及有宫廷学校，我国在公元前 2000 多年的夏朝就设有“序”“校”“庠”等专门的公学，还有春秋时期孔子的私学。一个人一生的认知能力发展，尤其是学习的能力，离不开他或她所浸染的教育环境。教育的传播性和传承性可以把人类的智能迅速在时空扩散，这就让人的认知和智能跃上了快车道。在地球生命的历史上，第一次产生了能够利用群体智能和社会文明，通过语言、文字和教育，向后代传播并传承已有的人工智能的唯一物种。

人类不仅可以用语言和文字谈论具体的、实在的事物，还可以在认知空间创造出物理空间并不真实存在的抽象概念。人脑外

皮质复杂的神经组织的可重塑能力，形成记忆，为人在本能基础上的二次认知扩张奠定了基础，充满了想象力和创造力，具有学习的本能，知识依靠后天习得。因此，人类是地球上万千物种中最会学习的物种。

### 4. 教育让人的智能发展从“现在进行时”到“现在完成时”

人类智能形成的科学技术成为学校传承学习的主要内容，不仅仅是有监督学习，更是有指导的学习和学生集体的学习，还有强化学习。知识是认知力的食粮，学习培育了人类的继承力、认知力和创造力。没有哪一个物种能像人类一样把一生四分之一的的时间用来接受课堂教育，教育的优势是任何地方、任何民族、任何国家所取得的任何新的知识和智能，可以很快成为全人类的共同认知，知识的传播、交流和后天灌输效率高，无需亲自实践，学了就用，迅速共享。这些知识是在地球上生活过的一千多亿人在几万年中形成的社会文明，通过教育把人类创造的累积性知识与精神财富跨代、跨多代传承下去，摆脱了智能单纯通过基因逐代进化的单一渠道，原本依靠生物进化智能的“现在进行时”被添加了一个新的、而且占主导地位的认知渠道，即依靠教育发展智能的“现在完成时”。

读书可以改变一个人，而教

育可以改变全人类，智能植根于教育。人类认知革命的起点是发明语言、文字和符号，开创了文化和文明，这些认知是“想象的现实”，使得智能可以脱离生命体而独立存在，进而发明了教育。人类第二次认知革命是探究客观世界、探究物质和能量，发明各种各样的动力工具、传感工具和智力工具。当前人类正进入到人工智能时代，即第三次认知革命，到 21 世纪中叶，运用脑科学研究成果，研发无意识的类脑智能，形成可交互、会学习、能进化的新一代人工智能，按照人类赋予的意图，一以贯之地服务人类，人类发明能够思维的机器，机器可以被教育，拓展了智能。未来的智慧人类和智能机器迭代发展，要改变环境，改造自己。人类未来也许还会有第四次认知革命，那将是认知生命，涉及到生命伦理，把人工智能反作用到自然界各类生命体之中，进而重新塑造生命，包括人类自身。

## 二、教育的精髓是促进思维的想象力和创造力

### 1. 与时俱进的教育变革：培养和孕育学生创新的内生动力

人类何以为人类？应该说和其他物种的最大不同，是人类顺应自然的人脑的进化，形成最伟大的发明——教育，并与时俱进地改革教育。文字是思维活动的载

体，知识是群体智能的结晶，教育是传承学习的手段，个体智能通过教育获得群体智能，通过传承学习和自主学习反复迭代个体和群体智能，积累下来，使得人类进入了高速发展的智能时代。教育包括传承学习和自主学习，培养用自然语言和各种专业语言思维的能力。传承学习是培养接受知识和运用知识的能力，运用显知识，适应生态文明，由外向内，外施内效，带强制性，带引导性；自主学习是通过自己实践生成经验、技巧和知识的能力，运用隐知识，反复实践，成为本能，由内向外，孕育而生，形成记忆，主体性强。教育中传承学习加自主学习，有监督学习加无监督学习，个体学习加集体学习，这才培育出一个个单体的通用智能，具备思考、分析、解释、解决一般问题的方法和能力，培育了人类的继承力、想象力和创造力。教书是使学生拥有知识，教学是使用知识，教育则是创造知识。

人类智能通过教育不断提升、学习新知识，形成新认知。学校和教师要从以传承学习、传授知识为主，拓展到培养人脑认知能力。授人以鱼，不如授人以渔，智能时代的教育，是培养学生学校学习、乃至终身学习能力、提升人类认知水平，驾驭机器人“新人类”的能力。在这个

过程中，教师也在践行终身学习。从教“书”到教“学”再到教“育”，实际上是从拥有知识到使用知识再到创造知识的过程，这是时代对教育提出的变革要求。此外，在智能时代，终身学习也会作为一种特性，赋予人类制造的机器，机器如人类一样会不断学习并且服务于人类，这也正是新一代人工智能的核心。学习的形态是交互；学习的核心是理解，即可解释可证明；学习的结果是记忆，巩固或微重构已有的记忆网络；学习成为新一代人工智能解释、解决现实问题的基础。当一个个虚拟名师机器人、教练机器人参与到教育活动中，人与机器的协同发展，将有效促进社会文明的进步。

## 2. 思维的核心是抽象、联想和交互

教育培养了我们的思维，思维的核心是抽象、联想和交互。在人的认知空间中，通过计算智

能和记忆智能培养认知思维能力，也是我们常说的“精神”；在物理空间中，通过感知智能和行为智能，实现具身交互能力。物理空间与认知空间之间不断循环往复，如图3所示。在物理空间中包括两个重要的感知，即时空识别和目标（模式）识别，时空识别代表位置、导航和时间同步；目标（模式）识别包括目标识别、人脸识别等，是直接感知。学习是解释、解决预设问题的能力。预设问题是现实问题的一个子集，是得到公认的，当问题得到解决后就形成了知识，在学校传承给下一代。机器可以接受指导学习，同时自主学习，把未知变为可知，是解释、解决新问题的基础，解释、解决现实问题是学习的目的，两者相互促进。只有解释、解决预设问题后，解决、解释现实问题的能力才会增强，因此要解决在哪里、怎么做、为什么、是什么这四个问题，认知空间不仅是



图3 认知空间与物理空间的关系图

记忆知识的仓库，更是放飞想象力的天空。

### 3. 机器可作为思维的载体，提升人类思维和认知的想象力

薛定谔提出活细胞的物理观，那么如果机器作为生命，就有机器的生命观，我们把它叫作认知的物理学。相对应地，生命的物理层对应机器的物质；生命的生化层对应机器的能量和时钟；生命的生理层对应机器的电子电路和机器指令；生命的心理层对应机器的操作系统和中间件；生命的认知层对应机器的高层软件和数据。生命赖负熵为生，机器里有物质、能量、结构和时间，时钟依赖能量，时间依赖时钟，秩序依赖时间，时间是机器认知的奠基石。结构和时间寄生在物质和能量上，构成硬构体，填补了物质、能量和信息（结构和时间）之间的鸿沟，使得信息和物质难舍难分；而结构和时间是认知空间中虚拟的存在，我们称之为软构体，软构体是思维的要素，支撑形象思维、逻辑（语言）思维和直觉思维，体现人的想象力和创造力。机器自举实现思维自动化，自我复用实现认知自成长，机器运行靠程序，程序靠时序，软件靠交互，时序和交互产生负熵。时钟不停，与外界交互不息，思维和认知不息。人的思维和机器的思维，在数学上是同构的，在物理上是同源的，靠能量支撑，

赖负熵为生。因此，机器可以作为思维的载体。

智能机器最重要的一个长项就是暴力思维。举一个简单的例子，公元前 200 年，阿基米德把 1700 年前的圆周率精度从 3.1 提升到 3.14，公元 500 年，祖冲之求得  $\pi$  值为 3.141592，总计用了 2400 年，用图灵可计算模型设计的计算机去算，把圆周率提升到小数点后  $10^{12}$  位，仅仅用了 70 年，如图 4 所示。机器暴力用足够大替代无穷大，用足够小替代无穷小，可用皮秒（ $10^{-12}$  秒）作为时间精度，控制时序周期，递归执行，而作为生物人的大脑，只有毫秒（ $10^{-3}$  秒）的生理响应精度，解算指数爆炸的复杂性问题力不能及。如果一张纸可写 60 行，每行写 17 位，要 10 亿张纸才能写完，纸叠在一起，叠高要 10 万米！所以，机器有超过人的算力，是很正常的，蛋白质折叠预测也好，AlphaGo 围棋程序赛过人也好，ChatGPT 超强的语言理解能力也好，都没有必要大惊小怪。

由此看来，机器暴力思维可与人互补，大大帮助人类提升思维和认知的想象力。

### 三、人工智能冲击教育的全方位、全要素

人工智能对社会的冲击是全方位的，但对行业的冲击首当教育。人工智能冲击胎教和幼儿教育，冲击中小教育和职业教育，冲击所有门类专业的通识通修课程教育，冲击工作之后的再教育，冲击教育的全方位，无处不在、无时不在。

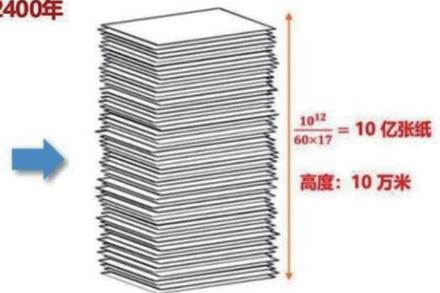
人工智能还冲击教育的全要素，包括施教者、施教环境和手段、施教对象。在智能时代教育则出现了很大的变化，对于施教者，我们可以用虚拟名师机器人替代教师，老师不再需要为了上课来回奔波；对于施教环境和手段，课本和教室可变为虚拟教室和个性化教学平台，每个人可以在里面做不同的事情；至于施教对象，也发生变化，学生可以是机器人，增加了机器学生——虚拟

#### 到祖冲之求得 $\pi$ 值为3.141592，总计用了2400年

```

3.1415926535897932384626433832795028841971693993751058209749445923
0781540628620899862803482534211767982148086513282306470938466095
5082231725359408128481117450284102701938521105596446229489549303
8196442881097566933446128475648233786783165271201909145485669234
6034861045432664821339360726024914127372458700606315881748815209
209628292540917153643678925903600113305305488204665213841469519415
11609433057270365759591953092186113819126117931051185480744623799
62749567351885752748912279381830119491298336733624406566430860213
94946395247371907021798609437027705392171762931767523846748184676
69405132005681271452635608277857713427577896091736371787214684409
012249534301465495853710507922796892589235420199561121290219608640
34418159813629774771309960518707211349999998329780499510597317328
160963185950244595534690830264252320825344685052619311881710100
0313783875288658753208381420617176691473035982549042875468711
59526388235378759375195778185780532171268066130019278766111959
09216420198938952572010654858632788659956153881827968230801952053
018529689957736225994138912497217528347913151...

```



机器把圆周率提升到小数点 $10^{12}$ 位，仅用70年

图 4 机器暴力思维帮助人类提升思维和认知想象力

数字人和实体机器人，怎样培养机器人与时俱进，我们教育工作要不要培养一个银行的机器出纳员或海关的某个岗位人。如果50年之后，50%的课程都是分身的虚拟名师数字人在授课，课堂里有50%的学生和50%的机器人在听课，其余50%的学生在线上听课，那是什么情景啊？所以，人工智能冲击教育是全要素的。

人类认知的历史不是直线发展的，是一个螺旋式周而复始的演进过程。人类的认知和人工智能迭代推进，协同发展，学习怎样学习和学习怎样思考，人类社会才被铸成了今天的样子。教育改变着全人类的命运，科学和技术是人类活动的第一推动力。随着人类智能和人工智能的迭代发展，教育有了新的内涵。

语文素养即思维素养，是超学科的。人首当其冲的是语言智能，人类用语言、文字、符号等软构体作为思维载体，让思维脱离生命体植入机器，模拟生命体简单但烦琐的递归计算，形成历史、精神、科技、文化和文明；在文字的锤击下，还锻造出哲学、宗教、法律和人权、国家与政治。科技和人文同源，把语文教学放在文科实在是一个误解。语文承载思维，语文进步思维才提升，人人终身读书，终身语文，拓展思维，放飞想象，知识分子尤甚。

数字名师机器人讲课，教师转为教练、辅导员。有的学科，几十年认知进展不大，趋于成熟和稳定；有的学科，几位杰出人物的认知大大活跃了学科的前沿和发展。因此，几百年来固定时间、地点、人员的学校课堂教育形态受到冲击，各学科教材知识点可灵活装入机器，课堂讲课标准化、模块化，虚拟机器人教师分身教学名师，弱化了学校和学科的时空围墙，涌现“金课”，普及“微课”，淘汰“水课”，虚拟课堂、虚拟仿真实验规模可超大也可超小，虚拟名师讲课将呈现快速普及趋势，一竿子插到底，节省教育成本，促进教学资源均衡化，学生学习的兴趣和自主选择权大大增加。

教机器学习，培训机器接替人的工作岗位。以我们研究无人驾驶为例，有如下三个循序渐进的环节，如图5所示。首先是驾驶员操作、机器人学习，这是有指导学习；然后是机器人作业、驾驶员干预，这是半/弱指导学习；再是机器人作业、机器人自

学习，这是自主学习，且从后往前的反馈是多次反复的，转换带有不确定性，有时回到有指导学习，有时回到半/弱指导学习。有指导的学习包含先入为主、赋予任务、引导、释疑、解惑、交互认知、监督等；自主学习是把指导学习的结果转为长期记忆的重要环节。由此可见，培训机器接替人的工作岗位不是一个轻松的任务。前几年无人驾驶被过分关注L0到L5的自动化等级，把自动驾驶看作是自动化工程，却忽视了机器驾驶脑的自学习和自成长，只有不断地学习和迭代，它才会成为好的机器驾驶员。

考试、考核、评估的图灵测试常态化、个性化。人工智能促进了传统考试、考核、评估的模式变革，以商汤“元萝卜”机器人为例的图灵测试，内置了26个难度的棋力对战，设有100多个残局应对，自主观察棋局变化，推算走棋招数，取棋落子，拥有毫米级操作精度，秒级时间响应，“手眼”协同，走法干净，节奏紧凑，是一个非常好的对手和陪练，

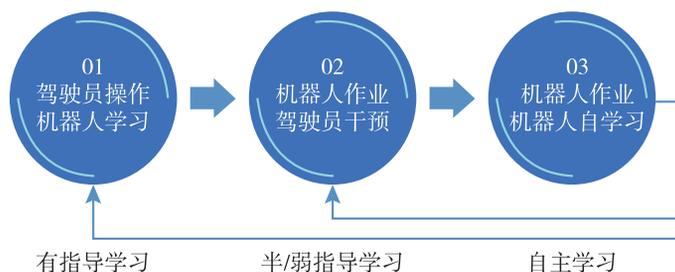


图5 培训机器接替人的工作岗位的学习过程——以无人驾驶为例

可用来为人类棋手评级，拥有国家体育总局中国象棋协会权威认证，支持16-13级象棋等级评测，而社会未来的各类职业资格考试，都将要发生改变，包括全民关注的高考。

人与机器互教互学，协同创新。思维的核心是抽象、联想和交互，更多的是软构体的创立和连接。机器越来越多地取代人类曾经的许多智力和技巧工作。教机器学习、作业，和机器一同学习、作业，将成为人们生活和工作的常态。学习的结果是去微调机器里的长期记忆，即微调人工智痕元胞的网络拓扑，自主学习是把工作记忆转化为长期记忆的重要环节，可喜的是机器可以大批量复制，而且机器自身又可以持续学习。与机器交互，人教机器，机器教人，协同创新，总有一天会大范围出现机器名师数字人分身人类教师，机器工程师创造出新材料配方，机器科学家提出新的假设，驱动产生新的科学发现。

#### 四、结论

读书改变一个人，教育改变全人类。我们从曾经的人工智能符号主义学派那里发展了“抽象”，从连接主义学派那里发展了“联想”，从行为主义学派那里发展了“交互”，创造能思维的机器。于是，智能机器之于人

类智能，如同曾经的书籍之于思想家、望远镜之于天文学家、显微镜之于生物学家，机器用软构体延伸和拓展了人的思维（记忆智能和计算智能），不但把人从繁重的重复性劳动中解脱出来，更好地符合相应工作岗位规范化要求（具身智能），更重要的是可以暴力思维，人与机器互教互学，人机交互协同创新，机器和科学家、工程师可一同做出发明、发现和创造，至于是不是机器做出的创造，人们已经不再计较。智能时代的教育改革问题已经很迫切地摆在全人类的面前了，让我们迎接这场学习的革命吧！

#### 致谢：

本文撰写过程中，得到教育部副部长陈杰院士，中国人工智能学会理事长戴琼海院士，北京工业大学副校长乔俊飞教授，北京联合大学原副校长鲍泓教授，北京联合大学外语部主任张殿恩教授，首都师范大学原副校长周建设教授和中国人工智能学会中小学工作委员会秘书长袁中果特级教师的支持和帮助，在此表示最诚挚的感谢。北京联合大学汪成、吴社璇，北京工业大学许根宝等参与论文资料整理，在此一并感谢。○

来源：高等工程教育研究

### 作者简介



李德毅 中国工程院院士、欧亚科学院院士，中国自动化学会会士，指挥自动化和人工智能专家。1983年获英国爱丁堡海里奥特·瓦特大学博士学位。总参第61研究所研究员、中国指挥和控制学会名

誉理事长、中国人工智能学会理事长。

军事科学院系统工程研究院研究员，中国人工智能学会名誉理事长，中国指挥控制学会名誉理事长。中国改革开放以来第一位人工智能相关专业博士学位获得者，指挥自动化和人工智能领域专家。长期致力于信息化和智能化工作，不确定性人工智能领域的主要开拓者，中国无人驾驶的积极引领者，人工智能产学研发展的重要推动者，也是吴文俊人工智能最高成就奖获得者。

在过去的几十年里，控制学科在理论上蓬勃发展，在工程上应用范围不断扩大。一个自然的问题是未来 10 年控制学科有哪些新挑战和新机遇，最近 IEEE 控制系统学会等联合发布了一份报告：《2030 年的控制：社会尺度挑战下的路线图》，本期“科普园地”，让我们听听他们的看法。

## 社会尺度挑战下的控制：2030 路线图（一）

文 / Anuradha M. Annaswamy、Karl H. Johansson、George J. Pappas

翻译 / 北京工业大学 赵兰浩

### 前言

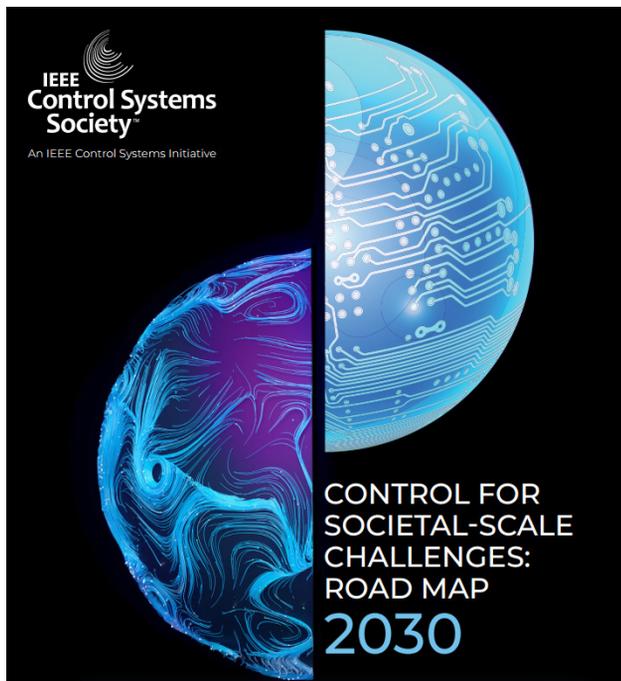
世界正在面临现代最为严峻的挑战，如何应对这些挑战将会对子孙后代的生活产生巨大影响。控制系统凭借其先进的工具箱，

可以理解和设计反馈、鲁棒性、动力学、决策以及适用于各种工业和社会环境的复杂系统，它有机会在许多关键技术解决方案的开发中发挥核心作用。许多控制学科的研究人员已经在从事此类活动，有些甚至正在推动

我们目前正在经历的快速技术进化。然而，我们认为还有更多的工作可以做。这需要提高我们对社会驱动因素、技术趋势和新兴方法的认识，这些认识对控制系统获得群聚效应、真实科学和全球影响至关

重要。我们需要概述控制学科的教育和相关技术转化在新形势下以及未来几年应该如何发展，同时考虑到与有限自然资源、道德、法规等因素相关的问题。

我们在两年多以前发出了制定社会规模挑战下的控制发展路线图的倡议。在控制学界同行的鼓励和我们已有的努力下，组织了一批前沿研究人员，控制学界围绕这项活动进一步团结在了一起。我们举行了多次会议和研讨会来讨论和编写这份文件。应该强调的是，本路线图的顺利完成是控制学界的共同努力结果。在文件末尾，列出了路线图和各种事件的众多贡献者名单。控制学界中各位学术领袖以及整个控制学界参与到我们的工作中。这一见解是通过公开邀请收集的，以阐明控制学界参与的宏伟愿景和



广泛作用。

虽然我们相信路线图将引起许多个人和组织的强烈和广泛兴趣，但我们在编制路线图时考虑到了两个主要受众群体：

(1) 处于职业生涯初级阶段的年轻研究人员。我们希望提请他们注意可以带来重大突破的开放和重要问题。

(2) 资助机构。我们想强调的是，需要支持开发能够取得突破性成果并能够过渡到社会规模系统的方法。

最后，我们要对我们所有同事的承诺和奉献精神表示最深切的赞赏，他们为路线图以及创作路线图的活动中做出了贡献，并审查了各种版本的路线图。

我们感谢 IEEE 控制系统学会的指导，他们发起了这一倡议，并从一开始就给予了支持。如果没有 IEEE 控制系统学会、IFAC、美国国家科学基金会和数字未来的大量财政资助，这个项目根本不可能执行。

我们还要感谢 Amritam Das、Angela Fontan 和 Linnea Sundling 在许多编辑和组织任务方面给予的帮助。

我们希望这一路线图将为参与制定改善人类状况的方法的总体科学努力提供指导方针。

Anuradha M. Annaswamy、Karl H. Johansson、George J. Pappas

## 摘要

控制系统领域应用特定的原理和方法来控制动态系统，使其产生期望的结果。随着世界拥抱数字化生活方式，这一领域的范围逐渐扩大。通过不同程度的分析来丰富信息，为决策提供信息，这些信息正在超越工程，进入金融服务、社会经济分析、娱乐和体育以及政治和社会科学。提高自动化水平这一目标在各个部门都受到追捧，并被引入新的领域。所有这些进步和变革都促使人们转向控制系统如何应对巨大的社会尺度挑战。这是《2030 年的控制：社会尺度挑战下的路线图》的重点。

该文件旨在为控制系统的演变绘制路线图，确定我们的学科在未来十年可能产生影响的社会领域。我们首先讨论主要的社会驱动因素、控制系统在其中的作用，以及能够实现控制系统的新兴技术趋势。我们描述了最近出现的控制系统中的一些方法论，以及确保新兴方法和技术转型验证的需求和途径。我们还深入了解新的劳动者教育和培训课程，以解决和实施所确定的解决方案和方法。

我们涉及到的社会驱动因素包括气候变化、生活质量医疗保健、智能基础设施系统、共享经济和社会规模系统的弹性。虽然

第 2 章中讨论的这些社会驱动因素带来了挑战，但第 3 章中概述的技术趋势为控制学科提供了解决其中一些挑战的机会，并概述了现实世界中人工智能、大数据、万物电气化、工程生物学和机器人领域的新挑战。第 2 章和第 3 章中的挑战和机遇导致了对控制系统中新方法和概念的研究，其中一些方法和概念在第 4 章中概述。其中包括学习和数据驱动的方法、安全关键系统的方法、弹性网络物理系统 (CPS)、网络物理人类系统 (CPHS) 和新型控制体系结构。在每种情况下，都概述了近期和长期的挑战。

第 5 章阐述了技术验证，重点是控制的实施和影响的证明。本章还指出了让工业界参与先进控制技术的整体对话的重要性，以及它们在各种应用中的实际利益，这些应用可以造福社会。

我们认识到教育是控制系统领域发展和繁荣的基石，第 6 章讨论了大学课程的变化。它就应该强调哪些概念和方法以及如何适应新一代学生提供了具体建议。第 7 章强调，控制学界在未来的技术设计中发挥着重要作用，这些技术设计尊重人权和人类价值观，确保道德和公平，并符合监管准则，即使是在保护我们的环境和自然资源的同时。最后，第 8 章总结了前几章中提出的建议。我们以尾声结束，这一部分描述

了这一路线图的起源和演变，列出了所有贡献者和赞助商的致谢，关键词词汇表和索引。

## 第一章 引言

控制系统领域涉及控制动态系统并产生期望结果的特定方法和原理，尽管系统和环境中存在不确定性。这些原理和方法的发展既广泛又深入，从航空航天系统和无线网络到生物工程和交通控制。这些方法深深植根于许多行业，包括能源、交通、医疗、制造和机器人。

在过去的几十年里，控制应用的范围不断扩大。它已经从对单个设备或系统的反馈控制转向在大规模系统、系统的系统和基础设施系统中优化和决策。这种令人印象深刻的范围和规模的增长是由全球范围内科学和技术的巨大范式转变促成的。数字化转型无处不在，使成熟的工程系统取得了重大进展，并在经济和社会部门等非工程系统中引入了新的概念和计算结构。网络的增加，以及计算、通信和驱动技术的相关指数级进步，将自动化的概念引入了新的领域，并在许多情况下加速了其实施。自动驾驶汽车和空中机器人自动控制等应用已经进入社会词典，并吸引了普通民众的想象力。自动化不仅是这些应用程序的基础，而且还被引入到许多其他领域。所有这些进

步和变革都促使人们转向控制系统如何解决巨大的社会挑战。这是《控制社会规模挑战：2030年路线图》的重点。

这张路线图将引导读者踏上控制系统未来之旅，展示了我们的学科在未来十年可能产生影响的新的社会领域。它确定了主要的社会驱动因素和新兴的技术趋势，提出了社区应该追求的新的科学挑战，确定了确保验证新兴方法和技术转型的需求和途径，并调查了劳动者教育和培训课程，以解决和实施所确定的解决方案和方法。

过去，控制界也进行了类似的大规模、雄心勃勃的努力 [1-4]。虽然 [1] 主要关注科学研究挑战，但 [2] 和 [3] 的工作集中在一系列应用的成功案例和研究挑战上。参考文献 [4] 描述了包括交通、能源、水利、医疗保健和制造业在内的各个部门的几个关键社会挑战。

2019年，CSS执行委员会开始讨论是否需要一份文件，来提供控制系统如何有效影响社会挑战的大致情况。组织了两次研讨会，一次在2021年6月，另一次在2022年6月。这两次研讨会的重点都是控制面临的社会规模挑战。2021年6月的研讨会以虚拟方式举行，为期两天。在这两天的前半天，全世界约有300人参加了公开会议。每天的后半段时

间专门用于制订路线图。公开会议由六个小组组成，围绕一系列主题组织，包括安全关键的自主系统、具有人工智能和物联网的弹性基础设施系统、实时和分布式数据决策、人在回路控制、气候变化缓解和适应控制以及教育和培训。大约有六名小组成员参加了每个小组讨论，并进行了专题介绍。

重点讨论了当前的主题、控制的作用、潜在的挑战、进入的障碍以及该主题将影响的潜在社会挑战。这些主题围绕适当的标题进行了扩展和组织，为制定路线图奠定了基础。在采取措施以更好地阐述和更全面地涵盖主要议题方面，发现了差距和重叠。

在接下来的12个月里，定期组织对话，集思广益，讨论路线图的总体结构。这次头脑风暴包括对主题进行适当分类，以适当地捕捉路线图中提出的主要社会挑战。出现了一个总体结构，约有六到七章，涵盖社会驱动因素、技术趋势、关键方法、技术转型以及教育和培训。路线图显示了如何利用主要控制方法来应对全球挑战的社会驱动因素，以及有助于应对和潜在缓解这些挑战的新兴技术。

除了讨论驱动因素、挑战和方法外，我们还讨论了从控制研究到各种应用领域的产品和解决方案的过渡。阐述了技术转化

的考虑因素和途径，理解各种应用领域中的障碍和障碍，以及自动化和其他控制解决方案的成本效益。

读者会注意到，本文件的标题规定了2030年。由于这一目标距离撰写本文只有八年的时间，因此本章中概述的方法的时间范围并不遥远。我们选择2030年是为了强调，我们为应对全球挑战而需要走的许多增长路线（glide path）都应该为满足这一时间框架而创造。需要注意的另一点是，在其中许多情况下，无论是实现可再生能源的高渗透率、积极减少温室气体排放，还是逐步淘汰内燃机汽车，2030年都是突出的一年。因此，我们将这一年作为推进和过渡必要控制系统技术的重点。

以下是关于本路线图结构的一些细节。在第二章中，我们研究了21世纪世界面临的一些重大社会挑战。这些挑战中的第一个是气候变化，这是一个我们不断面临的日益紧迫的问题。接下来将解决影响生活质量的医疗保健问题。讨论了提供能源、水和交通等基本服务的基础设施系统，特别是数字化和增强消费者能力的影响。随着我们进入21世纪，资源变得稀缺，资源共享的新概念（包括共享经济）正在塑造社会，这些概念也在讨论中。最后，描述了对全球安全的担忧以及影

响社会经济格局的风险。

在第3章中，我们概述了新兴的技术趋势，这些趋势支持了整个科学界的大部分努力。其中包括生物工程、现实世界中的机器人、大规模电气化以及人工智能和大数据的作用。这些趋势中的每一个都为控制系统社区提供了一系列机会，使其能够在应对和缓解第2章中提出的社会挑战方面发挥作用。

应对第2章和第3章中提出的挑战和机遇需要控制系统中的新方法，其中一些方法在第4章中概述。其中包括学习和数据驱动的方法、安全关键系统的方法、网络物理人类系统（CPHS）的弹性、分析和综合方法，以及新的控制体系结构。在每种情况下，都概述了与每种方法相关的近期和远期挑战。

第5章阐明了验证基础设施的必要性，以说明新控制方法的性能并证明其影响。本章还指出了让工业和公共部门参与先进控制技术及其在各种应用中的实际利益的整体对话的重要性。解决了“弥合工业需求与经济和金融期望之间的差距、相关和重大研究进展之间的差距”这一重要问题。

我们认识到教育是控制系统领域发展和繁荣的基石，第6章讨论了大学课程的变化。它就应该强调哪些概念和方法以及如何

适应新一代学生提供了具体建议。最后，在第7章中，我们强调，控制系统社区在未来的技术设计中发挥着重要作用，这些设计尊重人权和人类价值观，确保道德和公平，并在保护我们的环境和自然资源的同时满足监管准则。

文档末尾包含关键词列表和索引。附录中还包含与一些社会驱动因素相关的细节。在整个文档中都提供了图像，以突出关键思想和基本概念。参考文献列在每一章的末尾，以供进一步阅读。

我们准备这份文件时考虑到了两个主要受众：（1）处于职业生涯初级阶段的年轻研究人员。我们想提请他们注意推动控制系统领域发展的社会需求和技术趋势、新出现的方法、悬而未决的问题，以及应用控制系统来满足新出现的需求的关键挑战。（2）资助机构。鉴于新出现的科学挑战和控制系统影响这些挑战的机会，我们希望通过这一路线图，与资助机构和其他赞助商就关键依赖控制系统进步的新研究举措进行讨论。我们希望强调开发各种方法并验证这些方法并将其过渡到社会规模的系统所需的支持。

我们已尽一切努力纳入所有将决定控制系统社区参与的研究方向的主要要求。我们还努力概述我们社区应该参与的其他一些方向，如道德、公平、对社会负

责的自动化，以及与监管机构和政策制定者的交叉。

最后，我们注意到，整个路线图工作是一项社区努力，社区

各领导人做出了重大而集中的贡献，整个社区也做出了贡献。这些信息是通过公开邀请收集的，目的是阐明控制系统社区的宏伟

愿景和广泛作用。我们希望这一路线图将为参与制定改善人类状况的方法的整体科学努力提供指导。○

## 社会尺度挑战下的控制：2030 路线图（二）

文 / Anuradha M. Annaswamy、Karl H. Johansson、George J. Pappas

翻译 / 哈尔滨工业大学（深圳） 何阳

### 第二章 社会驱动因素

社会面临着一系列重大的全球性挑战。研究界需要更加重视分析和评估这些全球挑战，并开发科学工具和工程解决方案来减轻其影响。

本章重点介绍了控制系统社区如何为五个社会驱动因素提供工具和技术。本章以减缓和适应气候变化一节开始。本节强调了气候变化对人类构成的生存威胁，以及控制界在开发减少温室气体排放及其负面后果方面的方法和技术发挥的关键作用。第二节介绍了医疗保健和生活质量方面的挑战，包括公平获得高质量医疗保健的问题并讨论了与新的医疗技术和能力相关的几个研究机会。第三节介绍了智能基础设施系统，重点关注交通、水、能源、食品

和其他基础设施的数字化转型如何由于通信、传感和数据分析的进步而为控制带来新的能力和机会。第四节介绍了共享经济的颠覆性范式。此处认为，所有权和市场互动的新概念将受益于新的控制理论概念。

本章以关于社会规模系统的弹性的第五节结束，讨论了对供应链和网络等全球系统进行更好的规划、管理和控制的必要性。本节还强调了本章中社会驱动因素之间的相互依赖性，例如气候变化和极端事件导致的基础设施故障，这会导致复杂的脆弱性。

#### 2.1 节 减缓和适应气候变化

本节作者：

Pramod Khargonekar,  
Tariq Samad, Saurabh Amin,  
Aranya Chakraborty,

Fabrizio Dabbene,  
Amritam Das, Masayuki  
Fujita, Mario Garcia-Sanz,  
Dennice Gayme, Gabriela  
Hug, Marija Ilić, Iven  
Mareels, Kevin Moore, Lucy  
Y. Pao, Akshay Rajhans,  
Jakob Stoustrup, Junaid  
Zafar, Margret Bauer

本节重点讨论减缓、适应和恢复气候变化的问题，讨论了控制系统社区的全面和多样化的研究机会，以及为本研究提供更广泛框架的考虑因素。

#### 摘要

在本节中，我们探讨了气候变化和全球变暖带来的巨大的社会尺度挑战，并讨论了控制系界可能的研究机会。我们首先简要介绍了目前对气候变化过程及

其影响的理解，包括与化石燃料替代和能源系统脱碳以及农业和土地使用管理有关的主要挑战。我们也认识到，全球变暖的影响已经显现出来。这推动了在适应和恢复气候变化方面的努力。我们介绍了以下主题的研究机会：基础设施和社区；电能系统；发电；交通、住宅、建筑和设施；工业和制造业；氢、氨和可再生燃料；粮食和农业；水；人工智能计算；负排放技术；地质工程；以及环境监测。在每一个主题领域，我们都从众多机会中分别选取了控制系统可以在其中发挥重要作用的三个具体研究方向为代表。然后，我们讨论了几个背景问题，这些问题为寻求这些研究机会提供了更广泛的框架。我们讨论了可持续经济增长的考虑因素。由于气候变化的紧迫性和时间敏感性，我们讨论了从研究到大规模部署的必要性，以及如何实现这一点。我们讨论了教育和意识在学生和更广泛的社区中的作用。我们强调需要考虑与公平和正义有关的首要问题（经济、区域、全球和代际）。然后，我们设想控制系统社区需要与来自科学、工程、卫生、社会科学、法律、人文和艺术等其他领域的专家进行跨学科合作，以进行有意义的研究，产生预期的积极影响。

### 2.1.1 引言

气候变化对人类的生存构成

威胁。现在无可争议的是，这种威胁的主要原因是人类活动导致温室气体排放量高，这种排放始于工业革命，并继续迅速加速。几十年前，当政府和政府间政策制定者有足够的时间实施必要的变革，以避免我们今天所处的可怕境地时，人们就发出了即将发生和不可逆转的气候变化的第一次警告。全球变暖（超过  $1.5^{\circ}\text{C}$ ）似乎是不可避免的，其不利影响已经在世界各地感受到。

国际社会现在必须专注于采取行动，使地球生态系统免受最严重的潜在后果。科学家们日渐从避免气候变化的单一目标转向这一对目标上：

(a) 减少超出  $1.5^{\circ}\text{C}$  阈值的额外的全球变暖；

(b) 减缓和适应气候变化的影响。

在过去的几十年里，随着强大的新技术的出现和融合，控制系统界处于有利地位，可以在全球应对人为气候变化带来的挑战的努力中发挥关键作用。

在信息方面，这些有前景的技术包括先进通信、工业物联网、人工智能、机器学习、数据分析和嵌入边缘设备的智能计算能力。通过与这些及其他领域的专家合作，控制系统界可以为气候韧性做出重要贡献，包括将关键的气候变量纳入关键基础设施系统的规划和运营；利用反馈来管理资

源受限环境中的多尺度过程；以及调查社会系统中跨部门的相互依存关系。

成功还将取决于方法的重大变革，特别是超越传统孤立的控制研究。为了获得更好、更快的解决方案，控制设计必须与整体系统设计相结合，而不是被降级到开发的后期阶段。我们也不能忽视人的因素——用户和利益相关者需要通过适当的机制设计和行为激励参与进来。

在本章中，我们将首先审查关于气候变化及其人为基础的当前数据和预测，特别是政府间气候变化专门委员会（IPCC）最近的评估。接下来，我们将讨论控制界研究和创新的几个不同目标，包括基础设施系统、发电和电网、工业过程、运输和物流以及食品和农业。气候危机的紧迫性意味着必须避免像往常一样进行研究。为此，我们讨论了与可持续性、社会正义、大规模部署、教育和跨学科合作有关的几个重要考虑因素。我们在本章中所依赖的一般来源包括（IPCC, 2021, [1]）和（IEA, 2021, [2]）。除非另有说明，排放信息来自（Our World in Data, 2020[3]；见图 2.1）。在适当的情况下，还包括其他参考文献。

### 2.1.2 气候变化：在 2022 年的回顾

地球气候系统正在经历至少

在过去 2000 年中从未见过的快速变化。有证据表明，现在的全球平均气温高于过去 10 万年中最热的时期（6500 年前）。控制气候系统的基本物理原理已经确立。值得注意的是，气候系统是一个日益耦合的自然 - 人类系统。人类行为在基础气候物理学中发挥着重要作用。地球系统的气候模型正在得到改进，并用于预测（带有预测中的不确定性）其未来走向。

人类活动导致全球变暖的主要原因包括 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、挥发性有机化合物、CO 以及黑碳（black carbon）的增加。强有力的证据表明，2019 年，大气中的 CO<sub>2</sub> 浓度高于至少 200 万年来的任何时候，CH<sub>4</sub> 的浓度和 N<sub>2</sub>O

比至少 80 万年来的任何时候都要高。据估计，CO<sub>2</sub> 浓度已从工业化前的 280 ppm 增加到 2020 年的 412 ppm。

全球平均温度的预期上升定义了气候敏感性的概念，以应对大气中 CO<sub>2</sub> 含量从工业化前的水平上的翻倍。IPCC 最近的第六次评估报告（[1]）得出结论，（平衡）气候敏感性在“2℃（高置信度）和 5℃（中置信度）”的范围内。这提供了随着未来温室气体浓度的增加，全球变暖的可能范围。

第六次评估报告提供了非常有力的证据，证明 2011—2020 十年的全球平均地表温度比 1850—1900 年的基线高 1.09℃（置信区间为 0.95—1.2）。事实

上，过去四十年中的每个十年都比 1850 年以来的此前任何一个十年都要温暖。该报告充分利用了对气候变化自然驱动因素的广泛研究，如入射太阳辐射的变化、火山活动和全球生物地球化学循环等驱动因素。它还分享了地球气候系统变量的观测数据，以找到明确的证据，证明人类活动导致的温室气体增加“使大气、海洋和陆地变暖。大气、海洋、冰冻圈和生物圈发生了广泛而迅速的变化。”

全球变暖已经产生了重大后果。气候变化归因科学的新兴技术使我们能够对全球变暖与特定的观测事件进行因果联系。例如，该报告得出结论，自 1950 年以来，全球陆地平均降水量有所增加，人类的影响是造成这一现象的原因之一。洪水事件的频率和强度都有所增加。在世界某些地区，农业和生态干旱也有所增加，包括西非、中非和南非，西欧和 中欧，地中海，以及北美西部。

几乎可以肯定的是，人类引发的气候变化是极端高温（包括热浪）的主要驱动因素，自 20 世纪 50 年代以来，极端高温变得更加频繁和强烈。人类活动也很可能导致海洋变暖、冰川退缩和北极冰层减少。这继而又使 1901 年至 2018 年间的全球平均海平面上升了 0.2 米。

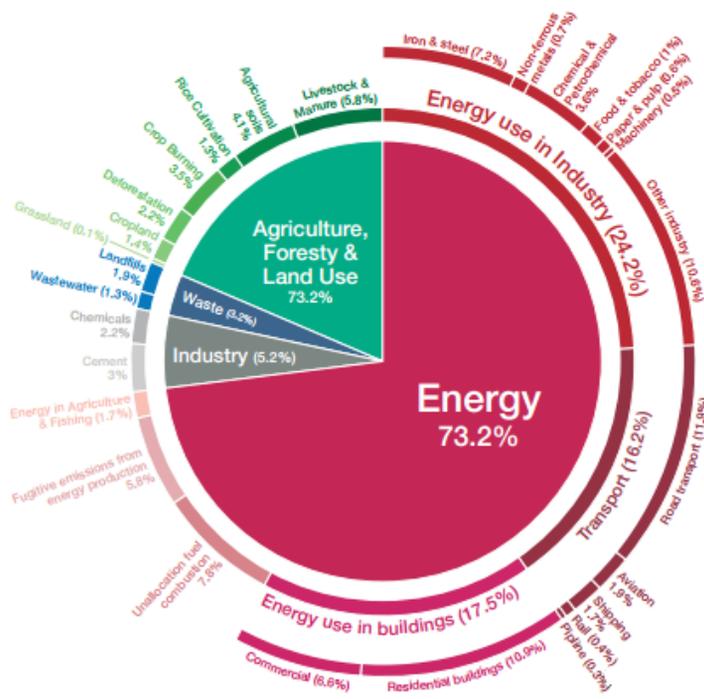


图 1 按部门分列的全球温室气体排放量 [3]; 2016 年数据

人类活动导致的温室气体水平上升也导致海洋酸化和海洋氧气水平下降，改变了大型鱼类和海洋哺乳动物的迁徙模式。

气候变化正在世界各地发生，极端天气事件的频率和规模都在增加。（包括寒潮在内的极端寒冷天气已经变得不那么频繁和严重。）气候系统的未来演变将取决于人类行为和政策将如何影响自然系统。目前的人口为 80 亿，预计到 2050 年将增至 97 亿。其中大部分增长将发生在亚洲和非洲，美洲的增长幅度不大。亚洲、非洲和世界其他地区的欠发达经济体和社会将理所当然地渴望更高的生活水平和粮食、能源与水的安全。因此，对能源、水、粮食、水泥、金属和其他自然资源的需求预计将增加。因此，迫切需要满足这些需求，同时避免气候变化造成的进一步损害。

关于社会经济系统如何将如何演变以影响气候，有许多设想。2016 年正式通过的《巴黎气候协定》承诺，世界“将全球变暖限制在工业化前的水平之上低于 2 摄氏度内，最好是 1.5 摄氏度内。”然而，1.5 摄氏度的目标似乎极有可能被超过，因此，即使利用全球协调来限制进一步的温室气体排放和全球变暖，也需要调整战略。为了确保一个宜居、可持续发展的地球，战略和全球协调是同样需要的。

### 2.1.3 控制系统科学家和工程师的机会目标

气候变化问题的紧迫性和规模应该立即呼吁科学家、政策制定者和来自许多学科的专家进行合作。而控制科学家和工程师发挥着至关重要的作用。

在本节中，我们讨论了一些需要研究和创新的课题，以及控制学界可以发挥领导作用的课题。图 2.2 提供了一个总体示意图，说明了这些主题与一些相关技术促成因素以及适用的控制方法和工具之间的相互联系。

在每种主题下，我们都会提供机会目标的简要概括，随后是控制科学家和工程师的三个研究重点。（数量限制为三个完全是因为篇幅限制，而不是因为缺乏具有高影响潜力的其他研究

领域。）我们还指出了每一个机会可能产生广泛社会影响的时间表，这意味着该技术将完全成熟，并正在进行大规模部署，具体如下：

- 短期：到 2030 年的社会影响
- 中期：2030 年至 2040 年的社会影响
- 长期：2040 年后的社会影响

本部分报告的作者计划编写一份更全面的文件，其中将详细讨论以下机会和其他机会。

### 基础设施和社区

气候变化的结果是，极端天气正在对电网、交通（公路、铁路和航空）系统、水处理和分配、通信网络和公共安全等关键基础设施构成越来越严重的威胁。其

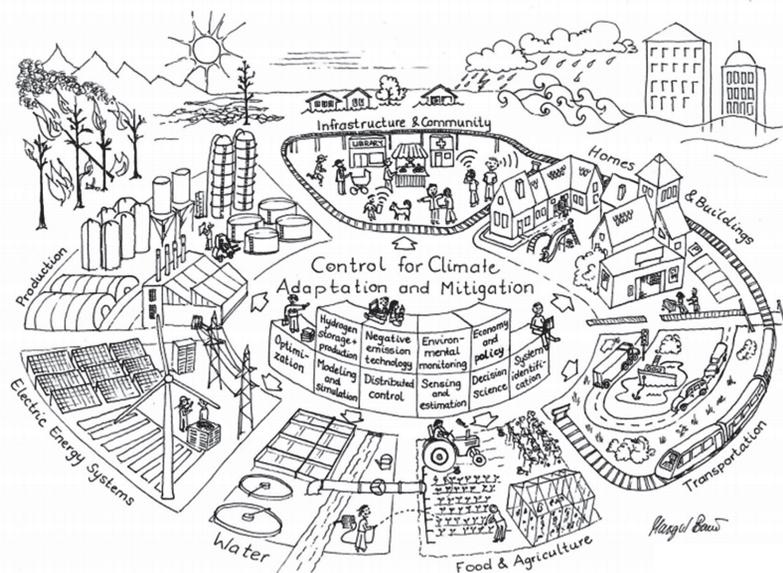


图 2 控制技术和工具可以在应对同适应和缓解气候变化相关的一系列挑战方面发挥核心作用。其中一些挑战涉及直接影响人类及其与自然环境相互作用的基础设施和社区（粮食和农业、水、交通、能源系统、生产、家庭和建筑）。

中一些基础设施本身就是关键的机会目标，下文将对此进行讨论。然而，许多基础设施具有动态的相互依赖性。例如，飓风过后修复电网需要运输系统能够运送设备和人员。类似地，交通和供水系统可能取决于电力的可用性。这种部门耦合和相互依存关系需要仔细建模和处理。一般来说，控制理论家或工程师关于不确定性决策的工具包可以帮助更好地整合天气和气候数据，以评估和管理关键基础设施的气候风险。

本节还包括社区绿化和土木工程。

示例机会：

- 战略性地分配分布式资源，用于基础设施和基础设施网络的恢复能力、故障识别、适应和修复（中期）
- 设计具有包括多个垂直功能的整体模型的净零（或净正）智能城市（中期）
- 设计能够承受预期海平面上升的弹性海岸结构和管理系统（长期）

另见本报告第 2.3 节，以进一步讨论与控制相关的基础设施机会。

## 电力能源系统

电网的巨大变革正在进行中。世界正在从基于化石燃料的集中

式、可调度发电的历史模式，转变为大部分发电来自可再生能源的分布式系统。我们的愿景是创建一个自主、连续、安全和脱碳的电网，既高效又经济。今天的电网技术和运营不太适合可再生能源发电的大规模渗透。控制技术和架构的新进展从传统的集中式控制过渡到更分布式和分层的控制，对于确保未来的电网稳定、可靠、可扩展和具有成本效益将至关重要。这些挑战和机遇跨越了输电和配电网络，这一划分本身可能需要重新审视。示例机会包括：

- 利用新的电力电子技术开发控制，以实现可再生能源整合（短期）
- 创建不同时间段动态电价的新经济模型（中期）
- 创建分布式优化和控制，以深度整合可再生能源发电、储能和需求管理（中期）发电

一个主要的优先事项是用风能、太阳能和地热能等可再生能源取代化石燃料发电。许多地区和国家的风能和太阳能成本大幅下降，能源成本水平与化石燃料发电持平或更好。其他可再生能源，如海洋和河流水电，也是加强无碳发电的有希望的途径。从涡轮机到发电机组件再到电网接口，控制界的机会存在于多个层

面。示例机会包括：

- 动态管理和优化大型可再生能源发电机（短期）
- 开发漂浮式海上风电、潮汐能和波浪能发电机的控制联合设计（中期）
- 优化耦合跨部门发电，包括氢气和生物燃料（长期）

## 运输

在公路、铁路、航空和海洋运输，这些约占全球温室气体排放量的 16% 的领域上进行脱碳，是缓解和适应气候变化的另一个高度优先事项。在过去的几年里，电动汽车取得了巨大的进步，但还需要更进一步：国际能源署预计，如果要在 2050 年前实现净零排放，全球运输部门的石油份额需要降至略高于 10% [2]。空运和海运的脱碳工作正处于探索阶段。除了电气化，还需要开发其他能源战略，如氢气和氨。这为控制界开拓了一系列研究机会，不仅在单个车辆层面，而且在物流和货运网络方面。示例机会包括：

- 为电池、燃料电池和新兴动力系统（如氢气和氨）创建传感和控制（短期）
- 开发节能智能移动的新型 CPHS 设计，包括车辆到设施 / 电网的电力流（中期）
- 控制多尺度交通网络的脱碳（长期）○

## 2023 国家机器人发展论坛在广东深圳隆重召开

2023年6月17—18日，以“集群促发展 创新向未来”为主题的2023国家机器人发展论坛（CAA 菁英系列活动）在广东深圳隆重召开。本次论坛由中国自动化学会、深圳市科学技术协会联合主办，深圳自动化学会、深圳中国工程院院士活动基地、深圳中国科学院院士活动基地及中国科学院深圳先进技术研究院承办。论坛通过线上、线下相结合的形式召开，来自相关部门的领导、各高校、科研院所、企业等共计200余人现场参会，9.4万余人次线上观看。

出席论坛的有中国工程院院士、中国自动化学会会士、副理

事长、中南大学教授桂卫华，中国自动化学会会士、副理事长王成红，深圳市科学技术协会党组成员孙楠，深圳市科技创新行业协会联合党委第一书记尚海波，中国自动化学会会士、理事、浙江大学教授熊蓉，中国自动化学会机器人专业委员会主任、中科院沈阳自动化研究所副所长刘连庆，中国自动化学会机器人专业委员会委员、中科院自动化研究所研究员王硕，中国自动化学会秘书长张楠，中国自动化学会会士、副秘书长、同济大学教授乔非，中国自动化学会会士、副秘书长、安徽大学副校长孙长银，中国自动化学会副秘书长王坛，

深圳中国工程院院士活动基地主任陈玮，深圳中国科学院院士活动基地主任郑蓓娜，中科院深圳先进技术研究院研究员周寿军，深圳市博铭维技术股份有限公司创始人代毅，深圳自动化学会荣誉会长主临宁，深圳自动化学会会长杨俊，深圳自动化学会常务副会长李云峰，深圳自动化学会副会长、智能机器人专委会主任安代春，深圳优艾智合机器人科技有限公司CEO张朝辉等。

论坛开幕式由中国自动化学会秘书长张楠主持。

中国工程院院士，中国自动化学会会士、副理事长，中南大学教授桂卫华线上致欢迎辞。桂



图1 中国自动化学会秘书长张楠主持



图2 中国工程院院士，中国自动化学会会士、副理事长，中南大学教授桂卫华线上致欢迎辞



图3 中国自动化学会会士、副理事长王成红致辞



图4 深圳市科学技术协会党组成员孙楠致辞

卫华院士在致辞中表示，智能制造已成为各国推动经济高质量发展的重要战略之一。在全面贯彻落实党的二十大精神开局之年，我们举办以“集群促发展，创新向未来”为主题的论坛，符合国家产业发展的大势，体现了当前产业转型升级新趋势，突出了机器人行业新时代的业务需求，具有很强的针对性。希望各位同行及专家学者加强沟通合作，实现优势互补、资源共享，为助力我国机器人产业发展献计献策。

中国自动化学会会士、副理

事长王成红在致辞中表示，国家机器人发展论坛已走过八个春秋。岁月轮回，初心坚守，作为发展我国自动化科技事业的重要社会力量，中国自动化学会将继续深入贯彻落实党的二十大精神，主动适应新一轮科技革命和产业变革，充分发挥学会资源优势，紧紧抓住我国处于由制造大国向制造强国迈进的重要关口期，准确把握新发展阶段，深入贯彻新发展理念，加快科技产业自立自强步伐，构建机器人产业创新发展的新路径、新样式和新实力。

深圳市科学技术协会党组成员孙楠在致辞中表示，十四五是深圳市实现建设中国特色社会主义先行示范区第一阶段发展目标的关键时期，希望通过长期引进“国家机器人发展论坛”等高端的学术活动，以学术活动为引领与支撑，集智力资源切实助推深圳市机器人产业的深入发展。

论坛主旨报告环节，由中国自动化学会会士、副秘书长、同济大学教授乔非，中国自动化学会会士、副秘书长、安徽大学副校长孙长银，深圳自动化学会理



图5 中国自动化学会会士、副秘书长、同济大学教授乔非主持



图6 中国自动化学会会士、副秘书长、安徽大学副校长孙长银主持



图7 深圳自动化学会理事长杨俊主持



图8 深圳自动化学会常务副理事长李云峰主持

事长杨俊，深圳自动化学会常务副理事长李云峰共同主持。

中国自动化学会会士、理事、浙江大学熊蓉教授作题为“人形机器人研究进展与发展挑战”的首场报告。重点介绍人形机器人的研究背景与意义、研究历史与进程的基础上其团队在人形机器人系统研制、运动控制、智能移动等方面开展的工作和进展等方面内容，她指出，人形机器人是国际公认的机器人技术集大成者和竞争制高点，虽然目前关键技术积累深厚，但仍有较多技

术亟需突破，人形产业生态构建及商业化发展仍任重而道远。

中国自动化学会机器人专业委员会委员、中科院自动化研究所王硕研究员作题为“基于视触觉感知的机器人灵巧操作”的报告，重点阐释了Gelstereo系列视触觉传感器的工作机理传感器设计、标定和感知信息处理方法。他指出机器人的灵巧操作研究是机器人领域研究的热点问题，只有基于多模态信息，我们才能深入开展灵巧操作技能的学习。

中国自动化学会机器人专业

委员会主任、中科院沈阳自动化研究所副所长刘连庆研究员作题为“面向药物靶向精确运输的磁控连续体机器人”的报告，报告详细介绍了如何将磁控介入导管技术与微纳机器人相融合，进而实现跨尺度药物精准运输。他认为，机器人技术对于医学应用有着十分重要的意义，微纳机器人的出现有望颠覆现有的医疗模式，但目前的医疗机器人更多是半自动模式，要减轻医生手术操作的难度，研制出高自主控制能力的手术机器人仍需不断探索。



图9 中国自动化学会会士、理事、浙江大学熊蓉教授作报告



图10 中国自动化学会机器人专业委员会委员、中科院自动化研究所王硕研究员作报告



图 11 中国自动化学会机器人专业委员会主任、中科院沈阳自动化研究所副所长刘连庆研究员作报告



图 12 中科院深圳先进技术研究院周寿军研究员作报告

中科院深圳先进技术研究院周寿军研究员作题为“智能手术机器人的发展现状与趋势”的报告，报告针对国内外RAS技术现状，分析了当前关键技术要素，探讨了交叉领域和上下游产业链，描绘了RAS创新格局和发展趋势。提出智能手术机器人、数字孪生手术是实现人机共融与协同，精准可靠安全，利用大数据技术进行远程手术的重要手段。

深圳市博铭维技术股份有限公司创始人代毅董事长作题为“城镇供排水管网运维先进技术与

装备”的报告。报告主要就排水或者涉水管网中供水管网带压检测技术、管网全景量化展开，声响量化检测系统、管网管中雷达周边立体空间深入探测等城镇供排水管王运维先进技术与装备进行具体解析，指出城市供排水管道是现代城市必不可少的基础设施，是城市的生命线工程，其健康状况关乎整个城市生态文明和可持续发展。

深圳优艾智合机器人科技有限公司创始人张朝辉 CEO 作题为“智能工厂发展趋势与战略思

考”的报告，从智能工厂的定义与特征出发，具体阐释智能物流、5G 技术、决策软件在当前阶段的建设重难点和主要任务。他指出，移动机器人已成为智能工厂物质流和信息流连接的关键环节，未来小型化、自动化、智能化、无人化的全自动化发展仍潜力巨大。

深圳大学特聘教授张晗作题为“全自动化痕量微生物智能监测预警机器人”的报告，报告主要讨论如何利用先进的光学、电子和计算机技术来实现自动化监



图 13 深圳市博铭维技术股份有限公司创始人代毅董事长作报告



图 14 深圳优艾智合机器人科技有限公司创始人张朝辉 CEO 作报告



图 15 深圳大学特聘教授张晗作报告



图 16 深圳自动化学会常务副理事长李云峰主持

测、高精度分析和实时预警的功能。并且在理解和结合 Criper 生物技术并针对微生物浓度进行实时的光学检测和图像分析，通过数据模型预警和故障诊断，及时向用户发送预警信息。他指出，我们要构建城市级的生物安全监测的网络，为我们国家生物安全的监测预警做出重要

贡献。

论坛特设企业项目路演环节，共有深圳市博铭维技术股份有限公司、深圳市仕达盛峰智能装备有限公司、深圳艾斯克机器人科技有限公司、中国科学院深圳先进技术研究院、深圳市云洁科技有限公司等五家企业参与路演。

国家机器人发展论坛是由中

国自动化学会主办的高层次的自动化、信息与智能科学领域的品牌学术活动，旨在促进智能机器人基础理论研究、成果原始创新和高技术开发，增强我国智能机器人自主研发水平和实际应用能力，构建自动的信息技术产业体系和工业基础能力，汇聚智能科技的新理论、新技术、新成果，联通产学研用各界，促进当地科技成果转化，助力产业升级发展。本次论坛以推动落实深圳市《关于发展壮大战略性新兴产业集群和培育发展未来产业的意见》为行动指南，通过高端学术引领、智力资源助推，重点发展 20 个战略性新兴产业集群、重点培育发展 8 大未来产业。聚焦智能机器人产业，打造世界级先进制造业集群，推动深圳市智能机器人产业大发展，助力把深圳市建成充满活力的国际科技创新中心。○



图 17 企业项目路演

大会组委会 供稿

# 聚焦学术前沿，赋能领域发展

## 2023年中国自动化学会港澳地区博士学术交流会在哈尔滨举办

为加快实现高水平科技自立自强，进一步打破地域和学科发展之间的“壁垒”，拓展创新维度，在更高水平、更高标准、更高质量上开展交流合作。6月16—17日，中国自动化学会港澳地区博士学术交流会在哈尔滨举办。来自清华大学、北京大学、浙江大学、香港大学、香港科技大学、香港理工大学、香港城市大学、澳门大学、澳门科技大学等50余所高校、科研单位的近300位博士开展专题报告论坛及专题海报论坛。600余位国内外高等院校、科研院所的青年学者参与本次智能领域的学术盛宴，探讨自动化与人工智能领域的最新理

论、应用和未来发展。本次学术交流会由哈尔滨工程大学校长助理、智能学院院长赵玉新、智能学院副院长黄玉龙共同担任主席，中国自动化学会办事机构党支部副书记吕爱英，哈尔滨工程大学夏桂华教授、智能科学与工程学院党委书记李洪波、学校研究生院常务副院长程建华教授、未来技术学院常务副院长张勇刚教授、科学技术协会秘书处副秘书长丁学忠、人力资源处副处长杜敬涛教授、研究生院副院长张福军等领导与嘉宾出席本次交流会，开幕式由黄玉龙主持。

本次会议旨在促进“智能领域”青年学者间的合作与互动，

拓宽博士生学术视野，启迪学术思维同时将相关学科新理论和新技术进行交叉与融合，共举办了六个报告分论坛和四个海报分论坛，围绕智能导航与先进信息融合、智能控制与优化决策理论、智能机器人与应用、多智能体协同、人工智能、智能化电气系统等主题开展成果展示。

吕爱英代表中国自动化学会对本次会议的召开表示热烈祝贺，她强调青年科技人才作为科技创新的新生动力，是一个学科和领域未来发展的前提，是提升一个国家科技竞争力和创新能力的关键。中国自动化学会积极响应新时代人才强国战略号召，高度重



图1 交流会现场



图2 中国自动化学会吕爱英致辞

视青年人才培养，为青年搭建多元化服务平台，制定一站式人才工作路线图。此次港澳地区博士学术交流会对增进港澳青年与内地的交往，深化学术交流，具有重要的现实意义。希望通过此次学术交流会能够促进青年学者在自动化、人工智能等学科领域的交叉与合作交流，激励广大青年学生潜心开展科学研究，产出高水平学术成果，积极助推我国自动化高水平自立自强。

赵玉新代表哈尔滨工程大学对与会的各位嘉宾致欢迎词。赵玉新简要介绍了学校及学院的基本情况。哈尔滨工程大学是一所有着光荣军工传统、深厚文化底蕴和鲜明办学特色的大学。经过近70年的发展建设，学校形成了鲜明的“三海一核”办学特色和优势。学院控制科学与工程学科是我国最早面向舰船领域的控制学科，也是我国船海导航、控制与智能技术的策源地，为我国海洋开发事业发展做出了不可替代的突出贡献。学校将以承办本次学术交流会为契机，继续发挥



图3 哈尔滨工程大学赵玉新致欢迎词

学校学科优势，深入开展海内外交流与合作，面向国家战略需求，聚焦前沿和关键领域，把握科技革命和产业变革新机遇，厚实关键科技要素和战略技术储备，加快推动实现科技自立自强，共同助力自动化与智能科技高质量发展。

专题报告论坛由智能导航与先进信息融合分论坛、智能控制与优化决策理论分论坛、智能机器人与应用分论坛、多智能体协同分论坛、人工智能分论坛、智能化电气系统分论坛组成。

专题海报论坛是由智能导航与先进信息融合分论坛、控制工程与应用分论坛、人工智能分论坛、智能机器人与电气系统分论坛组成。

学术交流会结束后，全体参



图4 智能化电气系统分论坛

会人员参观哈尔滨工程大学哈军工纪念馆、导航仪器教育部工程研究中心、船舶导航与控制工信部重点实验室、船舶智能系统与技术工信部重点实验室。青年学者对学校的发展历程、科研方向及研究成果等相关情况有了更加深入的了解，进一步激发参会青年学者的担当意识，为服务国家战略开启高质量发展贡献力量。

本次论坛由中国自动化学会主办，哈尔滨工程大学智能科学与工程学院承办，哈尔滨工程大学研究生院协办。中国自动化学会和哈尔滨工程大学始终秉持着培养青年科技人才的宗旨，高度重视青年人才在自动化、智能领域的发展和 innovation，为广大青年搭建高质量学术交流平台。○

学会秘书处 供稿



图5 线下参会代表合影



## 中国自动化学会受邀参加民政部第四期采访采风活动

6月20日，民政部社会组织管理局在京举办“聚焦社会组织新风采 传递社会组织正能量”第四期采访采风活动，中国自动化学会作为8家全国性社会团体之一，与人民日报、中央广播电视总台等13家媒体共同参会，并聚

焦学术类社会团体发挥科技平台优势、服务科技强国建设的积极作用，开展主题宣传。

会上，中国自动化学会监事长、中科院自动化所研究员王飞跃，围绕“建设科技平台，助力科技强国”详细介绍了中国自动

化学会在凝聚科技工作者、促进科技创新、推进科学普及、培养青年人才、深化国际合作、助力经济社会发展等方面的经验做法。王飞跃监事长指出，中国自动化学会诞生于“向科学进军”的春天，是我国最早成立的国家一级学术团体之一，是发展我国自动化科技事业的重要社会力量。六十多年以来，中国自动化学会在改革中求发展、在发展中谋创新，不断加强组织凝聚力、学术引领力、社会公信力和国际影响力，现已经成为连接政府、产业、学术、科研、会员的重要纽带，成为自动化、信息与智能科技领域最具影响力的唯一科技社团。

截至目前，我国科技领域社会组织达4万余家，其中全国性社会组织236家、国际科技组织17家。中国自动化学会作为科技领域社会团体之一，必将继续深入学习落实习近平总书记关于科技创新重要论述，持续开展学科建设、人才建设，积极推进学术交流、促进科技创新，致力成为建设科技强国的重要力量。○



图1 活动现场



图2 中国自动化学会监事长、中科院自动化所研究员王飞跃发言

学会秘书处 供稿

## 中国自动化学会参加中国科协“入皖行动” 赴芜湖铜陵考察调研

2023年6月12—15日，举办第25届中国科协年会全国学会科技服务“入皖行动”，中国科协学会服务中心组织全国学会代表及行业专家赴安徽省芜湖市、铜陵市实地考察调研，了解当地产业布局、发展及技术需求情况并开展了多场座谈会。调研组一行由中国科协学会服务中心科技服务处处长沈进带队，安徽省科协党组成员、副主席魏军锋，安徽省科技创新服务中心主任耿春桥，芜湖市一级巡视员、市科协主席陈怡，铜陵市人民政府副市长吴强，铜陵市科协党组书记、

主席李直刚，以及各领域全国学会、高校专家联合组成。鉴于中国自动化学会多年以来与安徽各地方科协、企业建立了良好的联系，以及在智能制造、机器人等产业技术革新中的诸多贡献，得到了中国科协及各界的一致肯定，我会作为自动化领域唯一的全国学会受邀参与本次“入皖行动”，并针对此次入皖行动调研企业需求，特邀请科创中国智能产业科技服务团专家哈尔滨工业大学（威海）肖玲诺教授前往调研。

调研组一行参加了芜湖、铜

陵当地政府、科协组织的座谈会，听取了两地高校人才招引、科研项目落地、青年人才创业等优惠政策，以及产业布局，未来发展规划，企业技术革新需求等情况，并根据各全国学会领域分组前往企业进行参观考察，围绕企业智能制造升级，突破“卡脖子”关键技术，拳头产品性能优化等方面提出合理化建议，并就企业下一步技术人才招引和培养、技术攻关和成果转化、项目研发和落地等展开充分讨论。

中国自动化学会坚持以技术创新需求为导向，以面向基层、注重实效为原则，发挥其人才智力和组织网络优势，推进地方产业转型升级。在服务科技经济融合方面，形成了一套可复制可推广的经验模式。自2014年起，学会开始尝试“以点带面、示范带动”的工作创新模式，通过与地方科协联系沟通，建立服务站等具体操作方式，展开区域性合作，推动区域经济发展。截至目前，学会先后走进宁波、保定、常熟、郑州、焦作、漳州、西安、芜湖、温州等20余个城市，分别在成立



图1 第25届中国科协年会全国学会科技服务“入皖行动”芜湖座谈会



图2 第25届中国科协年会全国学会科技服务“入皖行动”铜陵座谈会

23个学会服务站和2个院士工作站，通过调研两百余家企业，深入了解当地企业发展瓶颈和技术需求，共建中国智能车技术研发与测试中心（常熟）、机器人产业（芜湖）创新助力学会企业联合

体、中国制造（宁波）创新助力学会企业联合体等为服务企业创新和地方经济提供专家资源和智力支持。

中国自动化学会将以本次科技服务“入皖行动”为契机，以中国科协“科创中国”平台为媒介，进一步加深与安徽芜湖、铜陵等地方科协的联系，聚焦新一代信息技术、智能制造、智能机电、机器人等领域产业的需求，提供提供产业发展规划、产业技术方案编制、专业技术评估、企业技术诊断、团体标准研制等服务。○  
学会秘书处 供稿

喜报

### 热烈祝贺中国自动化学会多位会员荣获“第三届全国创新争先奖”！

5月30日，中国科学技术协会发布《人力资源社会保障部 中国科协 科技部 国务院国资委关于表彰第三届全国创新争先奖获奖者的决定》。决定授予7个团队第三届全国创新争先奖牌；授予26名同志第三届全国创新争先奖章并享受省部级表彰奖励获得者待遇；授予251名同志第三届全国创新争先奖状。

经中国自动化学会分支机构及专家推荐、学会专家评审，成功推荐中国自动化学会会士、副理事长、中国科学院沈阳自动化研究所于海斌，中国自动化学会理事、浙江大学王文海（按姓氏笔画排序）荣获第三届全国创新争先奖状。

此外，中国自动化学会会员西北工业大学王震荣获第三届全国创新争先奖章；中国自动化学会理事、北京空间飞行器总体设计部王大轶，中国自动化学会会士、理事、中南大学阳春华，湖南大学李树涛，中国自动化学会会士、常务理事、山东大学张承慧，陕西延长石油（集团）有限责任公司范京道，中国自动化学会会士、北京航空航天大学郭雷（按姓氏笔画排序）等会员荣获第三届全国创新争先奖状。

祝贺以上获奖专家，愿广大自动化科技工作者能够继续大力弘扬科学家精神，锐意进取，攻坚克难，求实奉献，开拓创新，在实现高水平科技自立自强、建设世界科技强国的征程上做出新的更大贡献！

# “青少年人工智能核心素养测评” 2023 第二季度测评圆满完成



2023年6月3日-11日，由中国自动化学会主办、中国科学院大学人工智能学院和西安交通大学计算机科学与技术学院作为学术指导单位的“青少年人工智能核心素养测评”项目（简称“AICE 测评”）完成了2023年第二季度的测评工作。本期测评开放了五大模块10个项目，报名者踊跃，众多学校和机构组织学生参加了多个项目的测评，参测学生来源覆盖了全国所有省级行政区。

本期测评分为线上线下两部分。在武汉、沈阳、西安、太原、长春、青岛等城市开展了结构搭建、积木机器人、非积木机器人、思维逻辑、无人机等多个模块项

目的测评活动，并在30多所学校举行了图形化编程语言、C++编程语言和Python编程语言各级别的集中测评活动。

## 开展普适性人工智能核心素养测评

为推进人工智能教育在中小学校的普及，本期AICE测评面向“青少年人工智能核心素养测评共建示范校”，遴选了华中师范大学第一附属中学等8所中小学校，开展覆盖校内所有适龄学生的普适性测评，并为这些学校提供人工智能核心素养教学评价报告及效果评估，接下来的几个月也将为这几所学校提供针对性地人工智能师资建设、公益课程和AI人才培养专项服务。

## 从AICE测评到“AI探学营”

“AI探学营”的全称是“全国中小学人工智能探究性学习训练营”。这个活动由中国人工智能学会、中国自动化学会和中国科学院大学人工智能学院三大权威机构联合主办。“AI探学营”是面向全国富有好奇心、创造力和探索精神的中小學生而设计的创新性公益教育项目。活动选拔出具有一定编程基础的中小學生，为他们提供一个深入了解人工智能、接触人工智能领域课题研究的机会，以期发掘在AI领域有天赋的孩子，对他们进行贯通式的重点培养，目标是为国家培育一批AI领军人才，以服务于国家的人工智能战略。

根据“AI探学营”的活动规则，AICE测评共建示范校享有推荐学生直接入营的资格；参加AICE普及入门阶段项目4级及以上级别的测评，且评定结果为优秀的学生，以及参加AICE进阶提高阶段项目测评，评定结果为优秀的学生，也可以免除笔试，直接进入导师面试环节。

本期AICE测评结果已于6月21日公布。○  
青少年人工智能核心素养工作组 供稿

## “智慧新疆” 机器人竞赛教学实践研讨会成功举办

2023年6月6日至6月7日,“智慧新疆”机器人竞赛教学实践研讨会在新疆大学成功举办,大会由中国自动化学会、新疆维吾尔自治区科学技术协会、新疆大学、新疆维吾尔自治区自动化学会共同举办,中国自动化学会、中国自动化学会机器人竞赛工作委员会相关领导专家代表学会出席此次会议,并以“智慧新疆”为主题作相应报告,新疆科协、新疆大学、新疆自动化学会、新疆师范大学、新疆农业大学、新疆工程学院、昌吉学院等相关领导、教师参加此次研讨会。

6月6日上午,“智慧新疆”机器人竞赛教学实践研讨会顺利开幕。

会议由新疆维吾尔自治区自动化学会负责人、新疆大学电气工程学院产学研办公室主任谢丽蓉教授主持。

首先,新疆大学电气工程学院院长、中组部清华大学援疆教师张林鎡致欢迎辞,欢迎中国自动化学会一行的到来,希望此次大会能够为新疆高校带来宝贵的自动化专业育人经验,并以机器人竞赛为抓手,讨论如何将竞赛与教学、政务、科研、产业相结合,做到产学研研赛的“五位一体”有机结合。

随后,中国自动化学会副秘书长李实代表学会致辞,中国自动化学会一直以来全力推进高校新工科建设与发展,为我国的机

器人事业培养更多优秀人才,希望通过此次学术交流活动,能够进一步推动和促进新疆机器人与自动化技术的发展与创新,推动新疆前沿科技创新及产业升级,为新疆机器人及人工智能领域发展贡献力量。

接着,中国自动化学会机器人竞赛工作委员会秘书长,上海交通大学研究员王景川,针对“中国机器人大赛暨RoboCup机器人世界杯中国赛”相关情况做了详细的报告,从大赛的发展历程、应用背景、宗旨、比赛项目等方面进行了说明,同时,对大赛几个典型参与高校的参赛经历、人才培养、技术建设、教学支撑等多个方面进行了介绍,为广大



图1 新疆大学电气工程学院院长张林鎡致欢迎辞



图2 裴东教授介绍大赛技术难点



图3 中国自动化学会一行参观指导青少年科技活动中心



图4 中国自动化学会一行与乌鲁木齐各高校座谈

高校参赛提出了建议。

6月6日下午，中国自动化学会机器人竞赛工作委员会副主任，北京控制工程研究所研究员卢欣针对本年度大赛安排及关键技术做相应的报告，从应用领域的技术要求，对各个比赛项目进行了分析，大赛立足人才培养实际需求，重点关注人才选拔方面，深化多学科交叉融合，开展产学研促进研究，推动科技教学的融合发展。

随后，中国机器人大赛工程竞技机器人项目负责人、西北师范大学裴东教授，针对中国机器人大赛农业机器人、服务机器人、工程竞技机器人、舞蹈机器人等赛项，从各个项目的队伍组建、规则难点、技术方案等多个层面进行了讲述，结合具体的比赛项目以及现场赛事的考核要素，进行了详细的解读。

最后，自治区科协科普活动

中心穆明江副主任组织各位领导、专家参观了新疆科协青少年科普活动中心，针对青少年科技能力的培养以及青少年科技比赛的组织进行了讨论交流，李实副秘书长提出，青少年的科技活动及赛事，应以兴趣为主导，以培养学生动手能力为目的，通过科技活动及竞赛这一平台，充分锻炼学生的相关技能。

6月7日上午，召开了关于机器人竞赛与人才培养的座谈会，会上各个高校的一线教师与中国自动化学会一行的专家进行了面对面交流，着重解答了对于没有竞赛经验及基础的院校如何进行人才培养以及参赛的问题。○

大赛组委会 供稿



图5 合影留念

## 5G 持续放大乘数效应

会做手术的5G机器人，可巡察的5G网联无人机，能看清井下作业的5G智慧矿山……在日前举行的第31届中国国际信息通信展览会上，一批5G融合应用创新成果集中亮相。

我国已建成全球规模最大、技术领先的网络基础设施，数字创新应用从创新消费领域向生产领域不断拓展，工业互联网融合应用新业态、新模式蓬勃兴起。工业和信息化部部长金壮龙表示，要加快培育新兴产业，持续增强移动通信、光通信等领域全产业链优势，前瞻布局下一代互联网等前沿领域，全面推进6G技术研发，抢占未来发展新优势。

### 网络建设跑出加速度

在通信展“5G发展成就展”展区，一台5G国产机器人引来大批观众驻足观看。通过中国电信的5G定制网络，远在浙江邵逸夫医院的专家操作手术机器人医生端，向位于北京展区的机械臂发出动作指令。在高清视野辅助下，远程专家通过可转腕机械臂的灵活操作，能精准完成对模型的解

剖、分离、缝合等各项手术模拟动作。

今年6月6日，是我国正式发放5G商用牌照4周年。工信部数据显示，截至今年4月底，我国累计建成5G基站超273万个，5G网络覆盖全国所有地级市、县城城区，5G移动电话用户达6.34亿户。我国已建成全球规模最大、技术最先进的5G网络。

中国移动总经理董昕介绍，中国移动累计开通5G基站超160万个、千兆宽带覆盖超3亿户家庭、服务器总算力超8EFLOPS，总连接数超30亿，牵头国际标准近200项，申请专利超4100件，居全球运营商第一阵营。

中国电信董事长柯瑞文表示，中国电信携手中国联通建成全球首张规模最大的5G SA（独立组网）共建共享精品网络；持续开展全光网络建设，千兆光网已覆盖300多个城市。

与高铁、场馆等基础设施“同步规划、同步设计、同步施工”，已成为当下5G网络建设的重要方式。中国铁塔展区的工作人员介绍，中国铁塔会同运营商负责和实施第31届世界大学生夏

季运动会场馆和沿线道路的专项5G覆盖配套建设，同步规划、设计并施工，推动实现场馆2G到5G网络全覆盖，并做到电源、传输共享一张网，桥架、机房等大共享，节省投资20%以上。

据了解，中国铁塔自成立以来，已累计承建5G基站超188万个，占全球一半以上，96%以上通过共享存量站址实现，新建站址共享率从14.3%提升至83%，相当于少建新塔98万座，节约行业投资1760亿元，节省土地5.5万亩，减少碳排放超过2600万吨。

“要优化基础设施布局，夯实数字经济发展新底座。”金壮龙表示，将加快推进新型信息基础设施体系化发展，深入推进“千兆城市”建设，提升5G、千兆光网等高质量网络覆盖深度广度，纵深推进电信普遍服务，加快实现宽带边疆工程，持续优化农村和边疆等偏远地区的网络覆盖，统筹数据中心布局，加快算力基础设施发展，打造“云网融合，算网一体”的网络架构和算力供给体系。

## 融合应用深入千行百业

工信部数据显示，目前，5G应用已融入97个国民经济大类中的60个，应用案例数超5万个。基础电信行业累计投资近6000亿元建设5G网络，直接带动经济总产出约3.8万亿元，间接带动总产出约9.4万亿元，有力促进了数字经济发展。

在通信展现场，记者看到，在矿业、港口、电力等重点行业，5G应用解决方案广泛复制，5G融合应用广度和深度持续推进，助力企业数字化转型。

浪潮集团有限公司副总裁林巍介绍，浪潮以5G全连接工厂为抓手，通过部署新一代通信云网底座和云洲工业互联网平台，深入核心生产工艺流程，依托云网融合基础设施，打造了10多个典型的“5G+工业互联网”应用场景，提升了产能和质量，降低了运营成本。目前，浪潮通信技术已在电子制造、装备制造、矿山、钢铁冶金、港口、电力等10多个行业落地200多个典型案例。

中信科移动通信技术股份有限公司重点展示了其无线通信产品在能源、交通等领域的广泛应用，例如携手中国海油打造了首个5G+海上智能平台试点油气田，相关解决方案已成功应用在20多家企业。

目前，5G已在钢铁、制

造、矿山、电力、港口等行业的16000多个专网项目中得到规模应用。5G行业专网驱动的经济规模突破百亿，5G行业终端的出货量超过50万。

华为高级副总裁、运营商BG总裁李鹏举例，5G+AI能为井下的安全生产贡献创新力量。在复杂、危险的地下矿井作业场景中，5G智慧矿山解决方案能通过低频、大带宽资源，帮助100多路摄像头上行回传，再利用AI技术实现综采面的全景视频拼接，让井下作业“看得全、看得清”。

“信息基础设施在全球范围内加速演进升级，已经成为经济社会发展的信息大动脉，推动人类社会逐渐进入万物感知、万物互联、万物智能的新时代。”工信部副部长张云明表示，5G、人工智能、下一代互联网等新一代信息技术持续深入发展，交叉融合，已经成为放大生产力的“乘数因子”，驱动着生产主体、生产对象、生产工具和生产方式的深刻变革，引领产业智能化、绿色化、融合化发展。

金壮龙表示，要加速信息技术赋能，构建高质量发展新引擎。加快5G行业虚拟专网建设，深入实施5G应用“扬帆”行动，进一步丰富拓展5G应用场景，深化工业互联网融合应用，完善工业互联网技术体系、标准体系、应用

体系，打造一批5G工厂，大力推进制造业智能化、绿色化、融合化。

## 抢占未来新优势

“面向未来，5G还需再创新、再出发。”中国工程院院士邬贺铨表示，特别是面向虚拟现实、人工智能、工业制造、车联网等应用领域，需要进一步提升5G能力支持大上行、大带宽、高可靠、低时延、广覆盖、大连接、低成本、高可靠的网络需求。

当前，产业链已在积极布局5.5G，这能改善5G商用过程中体验不佳的情况，打开更大的消费应用空间，更好适应工业互联网的需求。

中国联通董事长刘烈宏介绍，去年，中国联通携手华为等合作伙伴在长城精工落地了全国首条5G-Advanced（5.5G）低时延柔性产线，推动“5G+工业互联网”深入核心生产环节。

“随着5.5G标准的推进，业界不断通过技术创新与商业验证，探索5.5G在无源物联、通信感知融合等新领域的应用，不断发掘经济和产业价值。以家电制造企业为例，5.5G无源物料可以帮助物流生产全流程可视化，整体生产效率可提升30%。”李鹏说。

不止5.5G，在通信展上，部分厂商还展示了6G技术。比如在“探索未来科技”展区，爱立信展

示了多个 6G 关键技术趋势，包括无线网络数字孪生、太赫兹通信、厘米波通信和“零能耗”终端。

赛智产业研究院院长赵刚表示，6G 技术是 5G 之后的下一代移动通信技术，工信部全面推进

6G 技术研发，旨在抢占未来信息通信技术创新的制高点，全面布局未来 6G 产业赛道。自 2018 年起，我国就开始前瞻性研究和布局 6G 技术研发，目前技术研发水平处于全球第一梯队。

“6G 作为新型基础设施关键技术，对于在全球科技竞争合作中构建安全可控的网络基础设施有着重要意义。”中国工程院院士张平说。○

来源：经济日报

## 多地强化政策引导、创新支撑和要素保障

### ——推动制造业高质量发展

制造业是我国实体经济的基础，也是科技创新的主战场，要大力推动制造业高端化、智能化、绿色化发展，加快建设制造强国。今年前 5 个月，规模以上装备制造业增加值同比增长 6.8%。

在复杂严峻形势下，制造业应加大科技创新力度，形成产业集聚效应。近日，多地出台一系列推动制造业高质量发展新举措，进一步激活制造业发展动能。

#### 壮大产业集群

记者梳理发现，在各地出台的新举措中，培育壮大产业集群和提升产业链韧性是重要发力点。

今年初，《浙江省“415X”先进制造业集群建设行动方案

（2023—2027 年）》发布，提出打造新一代信息技术、绿色石化与新材料等 4 个世界级先进产业集群，集成电路、数字安防与网络通信等 15 个省级特色产业集群和一批高成长性“新星”产业群。

构建产业集群是制造业发展的重要方向。为此，上海提出“企业成长行动”，将聚焦优质企业梯度培育体系，打造具有全球竞争力的本土制造业企业。

“围绕产业升级，上海实施数字蝶变行动，加快传统制造业数字化改造，提高制造业数字竞争力。”上海市副市长李政表示，上海将实施智能工厂领航计划，打造 20 家标杆性智能工厂、200 家示范性智能工厂；实施“工赋上海”行动计划，打造 30 个行业性

工业互联网平台，梯度培育 40 家“工赋链主”企业。

江苏锚定高质量发展目标，正着力打造一批“拆不散、搬不走、压不垮”的产业集群。“要研究制定新一轮推动先进制造业集群高质量发展的政策文件，加快梯次培育战略性新兴产业融合集群，推动新型电力和新能源装备、生物医药等集群加快迈向世界级。”江苏省战略与发展研究中心主任孙志高说。

山东省临清市拥有全国最大的轴承贸易市场，形成了国家级产业集群，但也存在大而不强，科技创新水平不高等问题。临清市发改局党组书记、局长甄锋表示，将大力发展配套生产性服务业，提升产业集群的协同性。

## 锚定自主创新

近年来，我国制造业产业结构持续优化，不断向高端化、智能化、绿色化转型升级，靠的是不断加强技术研发，持续提升创新能力。

帮用户买菜、定制菜谱、一键烹饪……步入位于浙江嵊州经济开发区的亿田智能厨电公司展厅，一件件“黑科技”厨房产品让记者大开眼界。公司董事长孙伟勇说：“公司将物联网、大数据技术广泛应用到厨房产品中，向创新要动力，向质量要效益。”

“我们在先进制造水平、市场占有率等方面优势突出，实施数字化改造和创新提升的基础好、潜力大。”嵊州经济开发区负责人认为，传统产业是当地重要“家底”，绝不能当成低端产业一概舍弃，关键是要实现高质量发展。

“制造业‘卡脖子’问题依然突出，结构上仍存在领军型企业数量不足、创新治理能力欠缺等问题。”孙志高表示，部分地区在推进产业布局、创新投入时存在低水平重复建设、同质化竞争等现象，未能形成创新合力。

孙志高认为，提升我国制造业竞争力，要通过开展新一轮大规模技术改造，赋能传统产业焕发新生机；持续做大电子产品制造、软件和信息服务业等优势产

业，壮大数智云网链等新兴数字产业。同时，加强创新企业家、科技人才、创新服务者队伍建设，瞄准第三代半导体、类脑智能、元宇宙等未来产业重点发力。

企业是国家创新体系的主体，是科技创新活动的主要组织者和参与者。“我们建立起‘技术创新+产业转化+金融支持’全链条创新生态系统，在8个领域设立研发创新中心，打造科教产融合创新体系，在破解重点技术难题上迈出了关键步伐。”山东魏桥创业集团副总经理黄平义介绍，企业每年自行设计开发各类新产品4000多个，纺织产品涵盖12大系列2万多个品种，整体技术达到国际领先水平。

## 强化要素保障

制造业的高质量发展离不开要素保障，多地在政策设计方面推出具体措施。

针对当前大平台大项目支撑不足、创新链产业链融合不深、产出效率不高等问题，浙江在要素保障上给予倾斜。在用地方面，大力推进低效工业用地整治，计划今年完成低效用地再开发5万亩，盘活存量建设用地10万亩，盘活的存量土地优先支持先进制造业集群发展；在金融支持方面，力争新增制造业中长期贷款2500亿元以上，在稳定和扩大制造业

投资方面持续发力。

“产业创新和政策支持良性互动，制造业发展有底气、有支撑，定能朝着高端化、智能化、绿色化方向不断迈进。”浙江省经信厅副厅长叶健松说。

上海市经济信息化委主任吴金城介绍，近日印发的《上海市推动制造业高质量发展三年行动计划（2023—2025年）》提出，上海将向首次“小升规”和“新建入统”工业企业发放最高达50万元的“成长券”，支持企业采购数字化管理、技术创新、法律咨询、检验检测等专业服务。并通过举办大中小企业融通创新对接活动，为各类企业提供政策服务包，加速生产要素集聚，延伸产业链条。

近年来，山东德州天衢新区围绕主导产业谋划平台布局，形成平台梯队分布之势。“我们将高效配置市场资源，积极探索新型平台建设模式，协同打造产学研为一体的创新创业共同体。”山东德州天衢新区管委会副主任李涛表示。

专家认为，随着我国产业实力、质量效益以及创新能力的提升，中国制造在全球发挥着越来越重要的作用。只要持续提高产品创新能力、加快产业集群发展，中国制造业大有可为。○

来源：经济日报

# 健全全面从严治党体系 推动新时代党的建设新的伟大工程向纵深发展

把党的建设作为一项伟大工程来推进，并且始终坚持党要管党、从严治党的原则和方针，是我们党的一大创举，也是立党立国、兴党强国的一大法宝。回顾 100 多年党的历史，党团结带领人民接续奋斗，中华民族迎来了从站起来、富起来到强起来的伟大飞跃，这个伟大飞跃是改造社会的伟大事业，同时也是改造自身的伟大工程。党的十八大以来，我们把全面从严治党作为新时代党的建设的鲜明主题，提出一系列创新理念，实施一系列变革实践，健全一系列制度规范，推动党的建设这项伟大工程不断深化发展，初步构建起全面从严治党体系。

构建全面从严治党体系是一项具有全局性、开创性的工作。新时代 10 年，我们党不断深化对自我革命规律的认识，不断推进党的建设理论创新、实践创新、制度创新，在构建全面从严治党体系上积累了丰富成果。我们把党的政治建设作为党的根本性建设，始终摆在首位，旗帜鲜明坚持和加强党的领导，严肃党内政治生活，净化修复政治生态，推动全党增强“四个意识”、坚定“四个自信”、做到“两个维护”，紧密团结在党中央周围，实现党的团结统一。我们把思想建设作为党的基础性建设，用新时代中国特色社会主义思想凝心铸魂，弘扬伟大建党精神，持续开展党内集中教育，使党员、干部补足精神之钙，坚守共产党人精神家园。我们提出和坚持新时代党的组织路线，以组织体系建设为重点，增强党组织政治功能和组织功能，整顿软弱涣散党组织，推动各级党组织全面进步、全面过硬，坚持党管干部原则，坚持新时代好干部标准，着力培养忠诚干净担当的高素质干部队

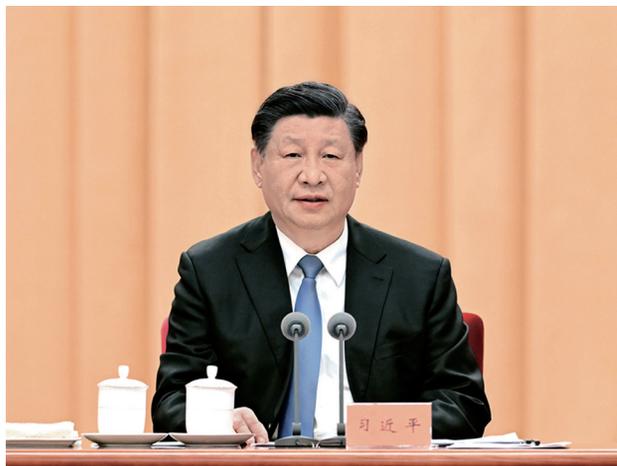


图1 2023年1月9日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在中国共产党第二十届中央纪律检查委员会第二次全体会议上发表重要讲话。新华社记者 张领 / 摄

伍。我们以制定和落实中央八项规定开局破题，以钉钉子精神纠治“四风”，坚决反对特权思想和特权现象，踏石留印、抓铁有痕，刹住了一些长期没有刹住的歪风，纠治了一些多年未除的顽瘴痼疾，以作风建设新气象赢得人民群众信任拥护。我们把纪律建设纳入党的建设总体布局，坚持纪严于法、纪在法前，严明党的政治纪律和政治规矩，带动组织纪律、廉洁纪律、群众纪律、工作纪律、生活纪律全面从严，以严明纪律规范党员、干部履职用权，抓早抓小、防微杜渐，精准运用“四种形态”，让党员、干部切身感受到党的严管和厚爱。我们把制度建设贯穿党的各项建设，与时俱进完善党章，聚焦加强党的领导和党的建设推进制度创新，形成比较完善的党内法规体系，搭建起党和国家监督体系“四梁八柱”，把权力关进制度的笼子，为新时代党的建设提供了根本性、全局性、

稳定性、长期性保障。我们开展史无前例的反腐败斗争，坚持无禁区、全覆盖、零容忍，不敢腐、不能腐、不想腐一体推进，“打虎”、“拍蝇”、“猎狐”多管齐下，查处一大批腐败分子，消除党内严重政治隐患，反腐败斗争取得压倒性胜利并全面巩固，成功走出一条中国特色反腐败之路。放眼全世界，没有任何一个政党能像中国共产党如此严肃认真地对待自身建设，如此高度自觉地以科学的态度、体系化的方式推进自我革命，这是我们党的显著优势，也是引领时代的制胜之道。全面从严治党得到人民群众坚定支持和认可，2022年国家统计局民意调查显示，97.4%的群众对全面从严治党、党风廉政建设和反腐败工作成效表示满意，比2012年提高22.4个百分点。

健全全面从严治党体系，是党的二十大提出的加强新时代党的建设的重大举措。全面从严治党体系是一个内涵丰富、功能完备、科学规范、运行高效的动态系统。健全这个体系，需要我们坚持制度治党、依规治党，更加突出党的各方面建设有机衔接、联动集成、协同协调，更加突出体制机制的健全完善和法规制度的科学有效，更加突出运用治理的理念、系统的观念、辩证的思维管党治党建设党。要坚持内容上全覆盖，党的建设推进到哪里，全面从严治党体系就

要构建到哪里，无论党的政治建设、思想建设、组织建设、作风建设、纪律建设，还是制度建设、反腐败斗争，都要自觉贯彻全面从严治党战略方针，不能把全面从严治党局限于正风、肃纪、反腐。坚持对象上全覆盖，面向党的各级组织和全体党员，做到管全党、治全党，重点是抓好“关键少数”，管好党员领导干部特别是高级干部、“一把手”，在管党治党上没有特殊党员、不留任何死角和空白。坚持责任上全链条，压实各级党委（党组）全面从严治党主体责任、各级纪委的监督责任，推动各级党委（党组）书记扛起第一责任人责任、领导班子其他成员切实担负“一岗双责”，让每名党员、干部行使应有权利、履行应尽责任，做到权责对等、失责必问，压力层层传导，责任环环相扣，切实增强管党治党的责任感使命感，巩固发展全党动手一起抓的良好局面。坚持制度上全贯通，把制度建设要求体现到全面从严治党全过程、各方面、各层级，以党章为根本，以民主集中制为核心，不断完善党内法规制度体系，增强党内法规权威性和执行力，用制度促进全面从严治党体系贯通、联动，真正实现制度治党、依规治党。

健全全面从严治党体系，是全党的共同责任，必须充分发挥党的政治优势、组织优势、制度优势。要深刻把握党自我革命历史经验特别是党的十八大以来全面从严治党新鲜经验，立足新的形势任务，在党中央集中统一领导下，健全各负其责、统一协调的管党治党责任格局，把全的要求、严的基调、治的理念落实到全面从严治党体系的构建之中，不断提升制度化、规范化、科学化水平，使全面从严治党各项工作更好体现时代性、把握规律性、富于创造性，为党和国家事业健康发展提供政治、思想、组织保证。

※ 这是习近平总书记2023年1月9日在二十届中央纪委二次全会上讲话的一部分。○

来源：《求是》



图2 2022年10月27日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平带领中共中央政治局常委李强、赵乐际、王沪宁、蔡奇、丁薛祥、李希，瞻仰延安革命纪念馆。这是习近平等在延安革命纪念馆，参观《伟大历程——中共中央在延安十三年历史陈列》。

新华社记者 鞠鹏 / 摄

# 中国式现代化是中国共产党领导的社会主义现代化

党的二十大报告明确指出：“中国式现代化，是中国共产党领导的社会主义现代化。”这是对中国式现代化定性的话，是管总、管根本的。为什么要强调党在中国式现代化建设中的领导地位？这是因为，党的领导直接关系中国现代化的根本方向、前途命运、最终成败。

党的领导决定中国式现代化的根本性质。党的性质宗旨、初心使命、信仰信念、政策主张决

定了中国式现代化是社会主义现代化，而不是别的什么现代化。我们党始终高举中国特色社会主义伟大旗帜，既坚持科学社会主义基本原则，又不断赋予其鲜明的中国特色和时代内涵，坚定不移地走中国特色社会主义道路，确保中国式现代化在正确的轨道上顺利推进。我们党坚持把马克思主义作为根本指导思想，不断深化对共产党执政规律、社会主义建设规律、人类社会发

展规律的认识，不断开辟马克思主义中国化时代化新境界，为中国式现代化提供科学指引。我们党坚持和完善中国特色社会主义制度，不断推进国家治理体系和治理能力现代化，形成包括中国特色社会主义根本制度、基本制度、重要制度等在内的一整套制度体系，为中国式现代化稳步前行提供坚强制度保证。我们党坚持和发展中国特色社会主义文化，激发全民族文化创新创造活力，为中国式现代化提供强大精神力量。可以说，只有毫不动摇坚持党的领导，中国式现代化才能前景光明、繁荣兴盛；否则，中国式现代化就会偏离航向、丧失灵魂，甚至犯颠覆性错误。

党的领导确保中国式现代化锚定奋斗目标行稳致远。我们党始终坚守初心使命，矢志为中国人民谋幸福、为中华民族谋复兴，坚持把远大理想和阶段性目标统一起来，一旦确定目标，就咬定青山不放松，接续奋斗、艰苦奋斗、不懈奋斗。改革开放以来，我们建设社会主义现代化国家的奋斗目标都是循序渐进、一以贯之的，并随着实践的发展而不断

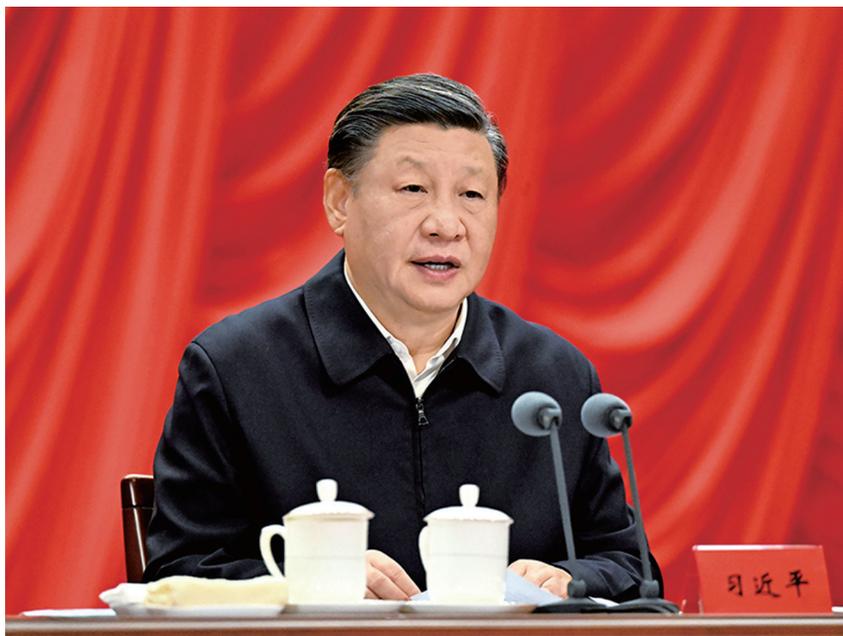


图1 2023年2月7日，新进中央委员会的委员、候补委员和省部级主要领导干部学习贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想和党的二十大精神研讨班在中央党校（国家行政学院）开班。中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在开班式上发表重要讲话。

新华社记者 李学仁 / 摄

丰富完善。在总结改革开放和新时代实践成就和经验基础上，党的二十大更加清晰擘画了到2035年我国发展的目标要求，科学描绘了全面建成社会主义现代化强国、全面推进中华民族伟大复兴的宏伟蓝图。从这些历史进程中，我们可以清楚地看到，建设社会主义现代化国家是我们党一以贯之的奋斗目标，一代一代地接力推进，并不断取得举世瞩目、彪炳史册的辉煌业绩。

党的领导激发建设中国式现代化的强劲动力。改革开放是决定当代中国命运的关键一招，也是决定中国式现代化成败的关键一招。改革开放以后，我们党以伟大历史主动精神不断变革生产关系和生产力之间、上层建筑和经济基础之间不相适应的方面，不断推进各领域体制改革，形成和发展符合当代中国国情、充满生机活力的体制机制，让一切劳动、知识、技术、管理和资本的活力竞相迸发，让一切创造社会财富的源泉充分涌流。党的十八大以来，我们党以巨大的政治勇气全面深化改革，突出问题导向，敢于突进深水区，敢于啃硬骨头，敢于涉险滩，敢于面对新矛盾新挑战，冲破思想观念束缚，突破利益固化藩篱，坚决破除各方面体制机制弊端，改革由局部探索、破冰突围到系统集成、全面深化，许多领域实现历史性变革、系统



图2 2023年5月11日至12日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在河北考察，并主持召开深入推进京津冀协同发展座谈会。这是11日下午，习近平在沧州市黄骅港煤炭港区码头考察。新华社记者 李学仁 / 摄

性重塑、整体性重构，为中国式现代化注入不竭动力源泉。

党的领导凝聚建设中国式现代化的磅礴力量。我们党深刻认识到中国式现代化是亿万人民自己的事业，人民是中国式现代化的主体，必须紧紧依靠人民，尊重人民创造精神，汇集全体人民的智慧和力量，才能推动中国式现代化不断向前发展。我们坚持党的群众路线，想问题、作决策、办事情注重把准人民脉搏、回应人民关切、体现人民愿望、增进人民福祉，努力使党的理论和路线方针政策得到人民群众衷心拥护。我们坚持把人民对美好生活的向往作为奋斗目标，坚持以人民为中心的发展思想，着力保障和改善民生，着力解决人民急难愁盼问题，让中国式现代化建设成果更多更公平地惠及全体人民。

我们党发展全过程人民民主，拓展民主渠道，丰富民主形式，扩大人民有序政治参与，确保人民依法通过各种途径和形式管理国家事务，管理经济和文化事业，管理社会事务，以主人翁精神满怀热忱地投入到现代化建设中来。我们党以中国式现代化的美好愿景激励人、鼓舞人、感召人，有效促进政党关系、民族关系、宗教关系、阶层关系、海内外同胞关系和谐，促进海内外中华儿女团结奋斗，凝聚起全面建设社会主义现代化国家的磅礴伟力。

※ 这是习近平总书记2023年2月7日在新进中央委员会的委员、候补委员和省部级主要领导干部学习贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想 and 党的二十大精神研讨班上讲话的一部分。○

来源：《求是》



# 2023中国自动化大会

## China Automation Congress

智联万物强实体 自强自控创未来

主办单位：中国自动化学会 承办单位：重庆邮电大学

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，2023中国自动化大会将于2023年11月在重庆召开，此次中国自动化大会由重庆邮电大学承办。

2023中国自动化大会将为全球自动化、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。

## 2023中国自动化大会

### 征文范围

本次大会设多个特色论坛，征文领域近30种。热忱欢迎全国各高等院校、科研院所和企业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IEEE Xplore、EI、CNKI等检索，已发表的成果也可以投稿。
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。

### 征文领域(包括但不限于)

1. 工业互联网与智能制造
2. 智能网联汽车与交通
3. 空地协同与自主控制
4. 大数据智能化
5. 元宇宙与平行系统
6. 能源互联与绿色制造
7. 机器人智能控制
8. 复杂系统建模、控制与优化
9. 智能控制理论与方法
10. 社会计算与社会系统管理
11. 无人系统的信息处理与控制
12. 多智能体编队与协同
13. 模式识别与人工智能
14. 脑机接口与认知计算
15. 空间飞行器控制
16. 先进传感技术与仪器仪表
17. 船舶自动控制与综合操控
18. 网络集群与网络化控制
19. 医学图像、生物信息与仿生控制
20. 复杂系统理论与方法
21. 流程工业智能优化制造
22. 类脑智能与深度学习
23. 故障诊断与系统运行安全
24. 无线传感网与数据融合
25. 海洋环境监测与仿真
26. 机电液一体化自动化控制
27. 物流系统与自动化
28. 其他

### 专题会议

1. 学术专题论坛
2. 产业发展论坛
3. 科技奖励论坛
4. 青年人才论坛
5. 教育专题论坛
6. 女科技工作者论坛
7. 期刊出版专题论坛
8. 展览展示

### 论文出版

大会将出版CAC2023论文集(U盘版)。2013年以来的历届会议英文论文全部被IEEE Xplore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《重庆邮电大学学报<自然科学版>》等国内外SCI/EI收录权威期刊发表。

### 时间节点

投稿开始时间: 2023.03.01  
 征稿截止日期: ~~2023.06.30~~ 2023.07.31  
 录用通知日期: ~~2023.07.31~~ 2023.08.31  
 论文终稿日期: ~~2023.08.31~~ 2023.09.30





# 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。学会现有个人会员近9万人,团体会员单位300余个,专业委员会60个,工作委员会9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社会团体组织。

## 学会品牌学术活动

- 中国自动化大会 ·中国认知计算与混合智能学术大会
- 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
- 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
- 中国控制会议 ·中国过程控制会议 ·青年学术年会

## 学会奖励奖项

- 钱学森奖 ·杨嘉墀科技奖 ·CAA科学技术奖励 ·CAA优秀博士学位论文奖
- 中国自动化与人工智能创新团队奖 ·CAA高等教育教学成果奖 ·CAA青年科学家奖
- 企业创新示范单位 ·杰出自动化工程师 ·小微企业示范单位 ·智慧系统创新解决方案示范单位

## 学会主办期刊

- 中国自动化学会通讯 ·自动化学报 ·自动化学报(英文版)
- 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 ·计算技术与自动化



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](mailto:caa@ia.ac.cn)

邮编:100190