

# 中国自动化学会通讯

COMMUNICATIONS OF CAA

第 1 期

2025 年 01 月

第46卷 总第256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

恭贺新春

国家主席习近平发表二〇二五年新年贺词 /P005

中国科协主席万钢、中国科协党组书记贺军科发表 2025 年新年贺词 /P007

中国自动化学会理事长郑南宁院士发表 2025 年新年贺词 /P008

中国自动化学会监事长王飞跃教授发表 2025 年新年贺词 /P010

岁序更新 共赴新程——致全体会员的一封信 /P011



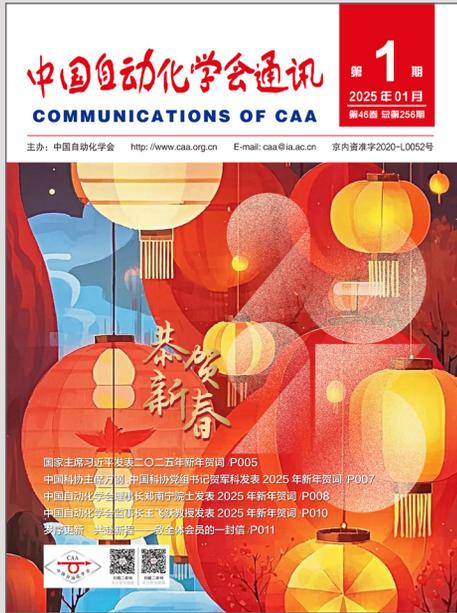
扫描二维码  
关注官方微信



扫描二维码  
关注官方微博



中国自动化学会通讯  
Communications of CAA



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



关注官方微信



关注官方微博

主 编 | 郑南宁 CAA 理事长、中国工程院院士、西安交通大学教授

副 主 编 | 王飞跃 CAA 监事长、中国科学院自动化研究所研究员

杨孟飞 CAA 副理事长、中国科学院院士、中国空间技术研究院研究员

陈俊龙 CAA 副理事长、欧洲科学院院士、华南理工大学教授

编 委 | (按姓氏笔画排列)

丁进良 王 飞 王占山 王兆魁 王庆林

王 坛 邓 方 石红芳 付 俊 吕金虎

乔 非 尹 峰 刘成林 孙长生 孙长银

孙彦广 孙富春 阳春华 李乐飞 辛景民

张 楠 张 俊 陈积明 易建强 周 杰

赵千川 赵延龙 胡昌华 钟麦英 侯增广

姜 斌 祝 峰 高会军 黄 华 董海荣

韩建达 谢海江 解永春 戴琼海

刊名题字 | 宋 健

地 址 | 北京市海淀区中关村东路 95 号

邮 编 | 100190

电 话 | (010) 8254 4542

传 真 | (010) 6252 2248

E-mail: caa@ia.ac.cn

http://www.caa.org.cn

印刷日期 | 2025 年 1 月 31 日

发行对象 | 中国自动化学会会员及自动化领域科技工作者

### 本刊声明

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

## 主编的话



郑南军

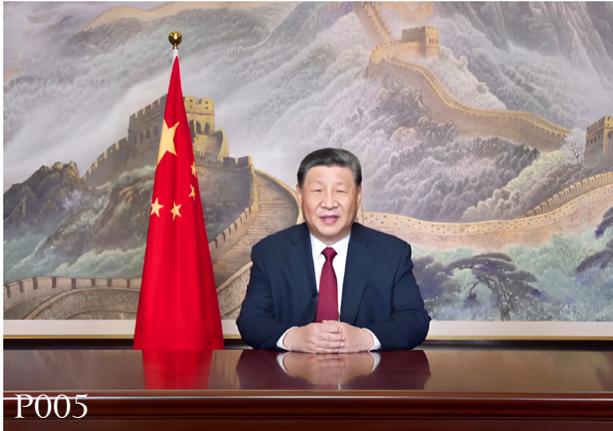
岁序更新，华章初展。2024年，是新中国成立75周年，也是实现“十四五”规划目标任务的关键一年。这一年，中国自动化学会稳步推进各项工作有序开展，收获满满。充满希望的2025年已经到来，首先向长期以来关心和支持《中国自动化学会通讯》发展的编委、学者、读者，以及广大会员和各界人士，致以新年的诚挚感谢与美好祝福！

新岁启新程，新年绘新景！2025年，学会将继续锚定服务国家战略的时代命题，坚定不移地走高质量发展之路。我们将始终面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求，把自动化科技创新摆在更加突出的战略地位，加强原创性、引领性科技攻关，奋勇攀登世界科技高峰。

新的一年，《中国自动化学会通讯》作为学会的重要窗口，将继续致力于为学界搭建高质量的学术成果展示和交流平台，不断激发创新创造活力，推动科技创新成果源源不断涌现，持续践行《中国自动化学会通讯》的使命与担当。

新的一年，《中国自动化学会通讯》拓展视野，探索科学与人文的融合之美，正式推出全新栏目——“科学与艺术”。我们以中国自动化学会会员的诗歌、散文为媒介，在优美的文字中展现科学的严谨与艺术的灵动，带领广大读者领略人类智慧的无限可能。这不仅是对科技前沿的探索，更是对科学精神与人文情怀的深度交融，期待与您一同开启这场独特的思想之旅。

科技期刊既是科技成果的载体和传播者，也是科技强国的重要推动者。《中国自动化学会通讯》将继续坚守办刊宗旨，以更加昂扬奋进的姿态，团结引领广大自动化领域的专家学者和科技工作者，办好品牌期刊，推动学科发展，在建设科技强国的征程上作出新的更大贡献！



### 科学与艺术 / Science & Art

004 破晓前的远航 / 岚山

### 专题 / Column

- 005 国家主席习近平发表二〇二五年新年贺词
- 007 中国科协主席万钢、中国科协党组书记贺军科发表 2025 年新年贺词
- 008 中国自动化学会理事长郑南宁院士发表 2025 年新年贺词
- 010 中国自动化学会监事长王飞跃教授发表 2025 年新年贺词
- 011 岁序更新 共赴新程——致全体会员的一封信

### 观点 / Viewpoint

- 012 王耀南院士：数字人与机器人，更加“通情达理”
- 015 李德毅院士：人工智能看哲学
- 022 姜斌：胸怀航天强国梦想 勇攀航天科技高峰

### 学者风采 / Scholars

- 027 赵春晖：科研是一场漫漫长跑，慢热型科研人员如何寻找适合自己的节奏

### 科普园地 / Science Park

- 032 Nature Physics 信息热力学经典综述：通往信息的物理本质 / Juan M. R. Parrondo, Jordan M. Horowitz & Takahiro Sagawa





042 人类智能如何从大脑中涌现？大脑精细模拟重塑 NeuroAI 范式 / 杜凯

### 学会动态 / Activities

- 056 共筑自动化科技工作者之家，中国自动化学会会员中心正式成立
- 058 2025 中国自动化与人工智能科普大会暨创新人才贯通式培养研讨会在京成功举办
- 062 大模型技术赋能教育研讨会在京圆满结束
- 064 高端科研资源科普化研讨会在京成功举行
- 067 2025 “CAA 科普百人团 - 科技教育乡村行”活动合作备忘录签约仪式圆满完成
- 068 2025 中国自动化与人工智能科普大会名师工作坊展示示范性科普课程
- 070 中国自动化学会空间及运动体控制专业委员会换届会议成功召开

### 党建强会 / Party Building

- 072 以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业
- 082 构建提升一体化国家战略科技体系和能力

### 形势通报 / Voice

- 085 中华人民共和国科学技术普及法
- 089 制造业企业数字化转型实施指南



在浩瀚无垠的人类文明宇宙中，科学与艺术犹如璀璨星辰，共同编织着人类智慧的壮丽画卷。科学，以严谨的逻辑和无尽的探索精神，不断拓展着我们对自然界的认知边界；艺术，以丰富的情感和无限的创意，滋养着我们的精神世界，赋予生活以色彩和灵魂。2025年《中国自动化学会通讯》正式推出全新的栏目——“科学与艺术”。我们将以中国自动化学会会员创作的诗歌、散文为媒介，带领广大读者在优美的文字中领略科学的严谨与艺术的灵动，感受人类智慧的无限可能。

## 破晓前的远航

文 / 岚山

北方高空 有道永恒之光  
宛若烛火 在寂夜里守望  
当夕阳沉入 那梦的故乡  
北极星静静指引我们远航

是你 唤醒沉睡的力量  
冲破樊篱 让希望悄然绽放  
得以走向 理想的殿堂  
旧日追寻 已化作微尘飞扬

万千生灵 在我们心中回荡  
悲喜交织 让我们谦卑仰望  
当超凡力量 照亮天穹苍茫  
方懂何为善良 又何为坚强

是你 带我们历经沧桑  
理想之光 抚慰深埋的忧伤  
得以叩开尘封的心窗  
坚守未知世界之向往

北方高空 有道永恒之光  
宛若烛火 在寂夜里守望  
北极星闪耀不灭光芒  
指引我们破晓前的远航

(岚山是中国自动化学会一位资深会员的笔名)

释

意

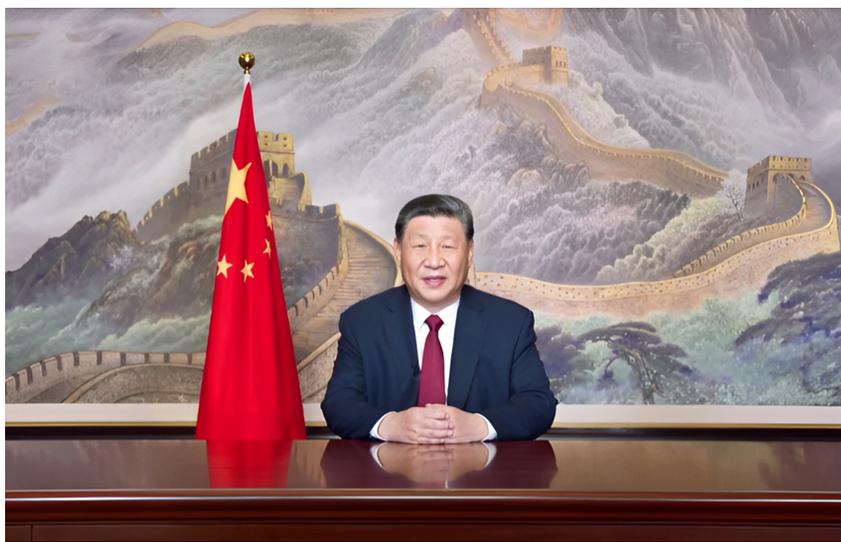
《破晓前的远航》是一首充满精神追求与人文关怀的诗歌，具有浓厚的哲思和情感力量，表达了对理想、信念与希望的追寻与坚守，呈现出浪漫主义与励志精神交织的整体格调。意象优美，情感真挚，具有很强的艺术感染力。

诗歌围绕“远航”这一主题，表现了对理想的执着追求与对未来的坚定向往，充满了正能量。诗中通过“北极星”“永恒之光”“烛火”等意象，将理想、希望与引导象征化。这些意象不仅具象生动，还具有深刻的隐喻意义，让读者感受到一种精神上的召唤与慰藉。诗中对“希望”“善良”和“坚强”的深层思考，读来并非只是空洞的赞美，而是对人性和生命历程的低声吟唱与向往。

作者将哲理融入诗意，表达了一种超越自我、追寻真理的哲学思考，如“方懂何为善良，又何为坚强”，让人从情感的起伏中反思人生的意义，以及对生命、理想与人性的深刻思考。

诗句整齐，语言优美，押韵自然（如“守望-远航”和“绽放-飞扬”等），朗朗上口，便于吟诵。尤其是结尾的首尾呼应，让诗歌结构更加完整，同时加强了主题的表达。○

## 国家主席习近平发表二〇二五年新年贺词



新年前夕，国家主席习近平通过中央广播电视总台和互联网，发表二〇二五年新年贺词。

新年前夕，国家主席习近平通过中央广播电视总台和互联网，发表了二〇二五年新年贺词。全文如下：

大家好！时间过得很快，新的一年即将到来，我在北京向大家致以美好的祝福！

2024年，我们一起走过春夏秋冬，一道经历风雨彩虹，一个个瞬间定格在这不平凡的一年，令人感慨、难以忘怀。

我们积极应对国内外环境变化带来的影响，出台一系列政策“组合拳”，扎实推动高质量发展，我国经济回暖向好，国内生产总

值预计超过130万亿元。粮食产量突破1.4万亿斤，中国碗装了更多中国粮。区域发展协同联动、积厚成势，新型城镇化和乡村振兴相互融合、同频共振。绿色低碳发展纵深推进，美丽中国画卷徐徐铺展。

我们因地制宜培育新质生产力，新产业新业态新模式竞相涌现，新能源汽车年产量首次突破1000万辆，集成电路、人工智能、量子通信等领域取得新成果。嫦娥六号首次月背采样，梦想号探秘大洋，深中通道踏浪海天，南极秦岭站崛起冰原，展现了中国人逐梦星辰大海的豪情壮志。

今年，我到地方考察，看到大家生活多姿多彩。天水花牛苹果又大又红，东山澳角村渔获满舱。麦积山石窟“东方微笑”跨越千年，六尺巷礼让家风代代相传。天津古文化街人潮熙攘，银川多民族社区居民亲如一家。对大家关心的就业增收、“一老一小”、教育医疗等问题，我一直挂念。一年来，基础养老金提高了，房贷利率下调了，直接结算范围扩大方便了异地就医，消费品以旧换新提高了生活品质……大家的获得感又充实了许多。

巴黎奥运赛场上，我国体育健儿奋勇争先，取得境外参赛最好成绩，彰显了青年一代的昂扬向上、自信阳光。海军、空军喜庆75岁生日，人民子弟兵展现新风貌。面对洪涝、台风等自然灾害，广大党员干部冲锋在前，大家众志成城、守望相助。无数劳动者、建设者、创业者，都在为梦想拼搏。我为国家勋章和国家荣誉称号获得者颁奖，光荣属于他们，也属于每一个挺膺担当的奋斗者。

当今世界变乱交织，中国作为负责任大国，积极推动全球治

理变革，深化全球南方团结合作。我们推进高质量共建“一带一路”走深走实，成功举办中非合作论坛北京峰会，在上合、金砖、亚太经合组织、二十国集团等双边多边场合，鲜明提出中国主张，为维护世界和平稳定注入更多正能量。

我们隆重庆祝新中国成立 75 周年，深情回望共和国的沧桑巨变。从五千多年中华文明的传承中一路走来，“中国”二字镌刻在“何尊”底部，更铭刻在每个华夏儿女心中。党的二十届三中全会胜利召开，吹响进一步全面深化改革的号角。我们乘着改革开放的时代大潮阔步前行，中国式现代化必将在改革开放中开辟更加广阔的前景。

2025 年，我们将全面完成“十四五”规划。要实施更加积极有为的政策，聚精会神抓好高质量发展，推动高水平科技自

立自强，保持经济社会发展良好势头。当前经济运行面临一些新情况，有外部环境不确定性的挑战，有新旧动能转换的压力，但这些经过努力是可以克服的。我们从来都是在风雨洗礼中成长、在历经考验中壮大，大家要充满信心。

家事国事天下事，让人民过上幸福生活是头等大事。家家户户都盼着孩子能有好的教育，老人能有好的养老服务，年轻人能有更多发展机会。这些朴实的愿望，就是对美好生活的向往。我们要一起努力，不断提升社会建设和治理水平，持续营造和谐包容的氛围，把老百姓身边的大事小情解决好，让大家笑容更多、心里更暖。

在澳门回归祖国 25 周年之际，我再到濠江之畔，新发展新变化令人欣喜。我们将坚定不移贯彻“一国两制”方针，保持香

港、澳门长期繁荣稳定。两岸同胞一家亲，谁也无法割断我们的血脉亲情，谁也不能阻挡祖国统一的历史大势！

世界百年变局加速演进，需要以宽广胸襟超越隔阂冲突，以博大情怀关照人类命运。中国愿同各国一道，做友好合作的践行者、文明互鉴的推动者、构建人类命运共同体的参与者，共同开创世界的美好未来。

梦虽遥，追则能达；愿虽艰，持则可圆。中国式现代化的新征程上，每一个人都是主角，每一份付出都弥足珍贵，每一束光芒都熠熠生辉。

河山添锦绣，星光映万家。让我们满怀希望，迎接新的一年。祝祖国时和岁丰、繁荣昌盛！祝大家所愿皆所成，多喜乐、长安宁！○

来源：新华社

通

知

## 关于征集 2025 年中国自动化学会团体标准项目的通知

各相关单位：

为深入贯彻《国家标准化发展纲要》、《关于推动中国科协学会团体标准化工作提质升级的若干意见》等文件精神，紧密围绕战略性新兴产业，瞄准未来产业布局，加快推动科技成果转化成为团体标准，扩大满足产业创新需求的高质量团体标准供给，中国自动化学会（以下简称学会）根据《中国自动化学会标准化工作管理办法》，现面向全行业公开征集团体标准制修订项目提案，详情请查看：<https://www.caa.org.cn/article/192/5127.html>

# 中国科协主席万钢、中国科协党组书记贺军科 发表 2025 年新年贺词

律转鸿钧，新元肇启。值此 2025 新年到来的美好时刻，我们谨代表中国科学技术协会，向全国科技工作者致以节日的问候和诚挚的祝福！



中国科协主席万钢



中国科协党组书记贺军科

过去的一年，党的二十届三中全会扬起进一步全面深化改革、推进中国式现代化的航帆，全国科技大会发出 2035 年建成科技强国的时代强音。冲锋号吹响，新征程启航，激励着广大科技工作者紧密团结在以习近平总书记为核心的党中央周围，在实现高水平科技自立自强进程中奋勇争先。

在迈向科技强国的征途上，中国的每一步都踏出了坚实回响，每一刻都闪耀着创新光芒。PCT 国际专利申请量连续 5 年位居全球第一，研发人员总量继续保持世界第一，拥有 26 个全球百强科技创新集群……一项项成就，标注着科技创新的中国高度，为全球科技发展注入强劲动力。

## 增志气，我们挺直脊梁、勇攀高峰

量子探微、生命探源、物质探秘、空间探幽，“拉索”确认首个超级宇宙线源，自研水冷磁体创造世界纪录，科学研究不断向极宏观拓展、向极微观深入、向极端条件迈进、向极综合交叉发力，将我们的认知边界一次次地推向前沿。全球最大海上风力发

电机组下线，自主研发 F 级重型燃气轮机顺利点火，嫦娥六号月背采样，神舟天舟逐梦浩瀚宇宙，梦想号探秘大洋，深中通道连接南北，中国高铁纵横神州，南极秦岭站崛起冰原，一个个国之重器的雄伟身姿，见证着中国科技的坚实步伐。人工智能广泛应用、类脑芯片深度创新、基因技术加速迭代、新能源汽车行稳致远，新质生产力愈发具象生动，驱动经济社会高质量发展。

## 有才气，我们无愧时代、书写华章

教育科技人才一体化步伐越来越快，新修订的科普法用法治之盾为科学普及筑牢坚实防线，科学家精神在科技界和全社会更加深入人心，一大批矢志报国的科技工作者破茧成蝶、鱼跃而上。在国家实验室、在科研院所、在研究型大学、在科技领军企业，科技工作者们争分夺秒破解知识密码和技术难题，每一次数据跳动，都是人类智慧与自然法则的对话，每一丝灵感火花，都可能点燃科技发展的燎原烈焰。岁岁年年，他们生生不息的奋斗身影，总让人心怀激荡、心生景仰。

## 聚人气，我们放眼世界、笃定前行

创新浪潮洪波涌起，离不开高水平开放合作护航。在“三大倡议”引领下，中国国际科技合作的“朋友圈”越扩越大。从“一带一路”到“金砖+”，再到二十国峰会；从科研人员培训，到技术项目援建，再到大科学计划与大科学工程合作；从雅万高铁，到秘鲁钱凯港，再到一大批“中国园”“中国城”遍地开花……中国与伙伴国家携手，为全球可持续发展注入新动力。一场场科技学术交流、一项项创新成果转移，中国以高度开放的姿态，直面全球性挑战，展现了构建人类命运共同体的责任与担当。

新年曙光照亮了科技强国梦想。未来十年，嵌含着科技革命和产业变革的大潮浩荡，承载着一代中华儿女接续发愤图强的青春印记，镌刻着一个东方大国自立自强的奋斗足迹，投射着一个古老民族追求复兴的集体记忆。

面向未来，科协组织使命光荣、重任在肩。我们将充分发挥桥梁纽带作用，大力弘扬科学家精神，坚定创新自信，把爱国之情、报国之志融入创新创造，不断拓展科学之疆域，深挖技术之潜能，繁荣科学文化，提升全民科学素质，汇聚建设科技强国的磅礴力量。

大道至简，实干为要。让我们携手共进，创造无愧时代、不负人民的新业绩！○

来源：中国科协

# 中国自动化学会理事长郑南宁院士 发表 2025 年新年贺词



中国工程院院士、中国自动化学会理事长、西安交通大学教授郑南宁

律回春渐，新元肇始。值此辞旧迎新之际，中国自动化学会向自动化、信息与智能科技领域的相关学者、工程技术人员的各界同仁致以新年最诚挚的祝福和问候，向学会所属各分支机构、期刊编辑部、省级自动化学会以及关心学会事业发展的科研院所、企事业单位、媒体等社会各界人士表示由衷的感谢。

2024 年是中华人民共和国成立 75 周年，也是全面贯彻党的二十大精神和党的二十届三中全会精神的关键之年。这一年，学会砥砺前行，成果斐然，始终

坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为引领，奋力谱写新时代自动化高水平科技自立自强的新篇章。

这一年，我们以政治忠诚为根基，推进党建工作走深走实。学会进一步夯实理事会党委、办事机构党支部、分支机构党的工作小组三级党组织体系建设，开展系列党课活动、主题党日活动以及百名科学家讲党课等活动，以 CAA 党员先锋队为主力，以 CAA 科普下基层、CAA 智航助教为品牌，以会员活动和品牌学术会议为抓手，积极传达党的政策主抓和科技创新政策。尤其是我们重磅发布了“胸怀祖国、自立自强、协同创新、追求卓越”的自动化人精神，激励广大科技工作者在新时代、新征程中奋勇前进。

这一年，我们立足学会职责使命，分类分级精准服务会员。通过开展 CAA 青年菁英访谈录、CAA 青年风采展、CAA “企·话”沙龙、“科技女孩”项目以及成立学生分会等，以多种形式团结凝聚广大会员，

积极推进云讲座、科普大讲堂、会士面对面、我和优博有个约会、线上圆桌派、CAA 青帆计划等线上活动，实现对会员的分类分级精准服务。

**这一年，我们始终以专业价值服务大局，提升社会公共服务能力。**学会以智能制造产业科技服务团和智能产业科技服务团为抓手，聚焦苏豫两省产业链发展困境，助力传统企业升级；携手中国钢研发布冶金流程优化大模型；完善科技成果评价机制，完成 72 项科技成果评价；大力推动团标工作，成立标准化工委，批准发布标准 6 项，立项研制标准 17 项，启动重大科技项目与标准化工作联动机制、立项研制智能网联汽车和智能驾驶两个系列 12 项团体标准，为行业标准化发展贡献力量。

**这一年，我们坚持人才评价制度改革，加大人才培养举荐力度。**学会建立三位一体的人才工作机制，打通人才培育服务和举荐体系，召开 2023 年度科学技术奖励大会，2024 年表彰 124 项科技成果，18 位青年人才，评价 49 篇学位论文、58 项教育教学成果。依

托中国科协人才托举项目，支持 16 名优秀青年人才，目前学会已累计支持 92 位青年人才茁壮成长。

**这一年，我们坚持深耕精品学术会议，引领学科高质量发展。**学会紧扣时代发展主题，聚焦新质生产力，重磅设立国家新质生产力与智能产业发展会议，积极发挥中国自动化大会、国家工业软件大会等影响力，召开中国自动化与人工智能教育大会、中国认知计算与混合智能学术大会等系列会议，受众人数突破 5,000 万人次；培育 IJICS, JAS 影响力因子突破 15；突出学科战略引领，精心组织 2024 年控制科学与工程发展研究报告，完成中国自动化产业发展报告、中国自动化技术发展报告的组稿工作。

**这一年，我们坚持以科学普及及彰显使命担当，促进全面素养提升。**创办科普百人团科技教育乡村行系列公益活动，联动 CAA 科普大讲堂和智能趣微课以及多样化科普活动，推进城乡教育资源的均衡发展，开展全国青少年劳动技能与智能设计大赛等多项领域系列赛事活动，举办 AI 探学营活动，实施青少年人工智能核

心素养模型及评测，积极打造未来科学家摇篮，为增进青年学生学习自动化信息与智能科学的兴趣发挥了重要作用。

**这一年，我们坚持以国际化战略促发展，提升学会国际影响力。**成功承办了第四届 IEEE 数字孪生和平行智能国际会议，邀请 11 位国外知名科学家来华讲座，分享学科最新发展；积极参与全球科技治理，推荐中国科学家在国际模式识别协会等国际组织担任重要领导职务，提升学会在国际舞台的影响力。

时代催奋进，创新鼓征帆。2025 的新的一年，中国自动化学会将继续紧扣高质量发展使命，不断弘扬学术创新的精神，不忘初心，开拓进取，以更加饱满的热情、更加坚定的信念、更加务实的作风，以高水平科技自立自强谱写服务全面建设社会主义现代化国家的新篇章，为党和国家、人民作出中国自动化学会更大的贡献。

祝我们伟大祖国山河锦绣、国泰民安，祝愿学会全体会员和各界朋友新年快乐、身体安康、阖家幸福！

# 中国自动化学会监事长王飞跃教授 发表 2025 年新年贺词



中国自动化学会监事长、中国科学院自动化所研究员、澳门科技大学特聘教授王飞跃

时光如梭，新岁开启！在崭新的 2025 年即将到来之际，中国自动化学会向全体会员、广大自动化、信息与智能科技领域的科技工作者致以诚挚问候！向学会所属各分支机构、期刊编辑部、省级自动化学会以及关心学会事业发展的科研院所、企事业单位、媒体等社会各界人士表示由衷的感谢。

回望过去的一年，中国自动化学会在党的全面领导下，深入贯彻落实党的二十大精神，坚持民主立会、规范治会的原则，取得了丰硕的成果。我们坚守初心，勇担使命，为推动我国自动化事业的发展贡献了智慧和力量。

在过去的一年里，我们坚持民主立会，不断深化治理结构改革。按照“集体领导、民主集中、会议决定”的原则，学会理事会建立集体领导与个人分工相结合的工作机制，制定 CAA 工作例会议事规则。2024 年学会有序召开理事会、常务理事会、正副理事长秘书长工作会、党委会、监事会等系列会议，通过五级例会制度形成位阶有序的议事规则，保证了学会工作的民主化和制度化，2024 年共形成决议 40 余项，为学会的发展指明了方向。

在过去的一年里，我们不断加强分支机构规范管理。持续完善分支机构管理系统、年度考核和评优机制，严格按照“秘书长工作会议 - 常务理事（学术组）常务理事会”三级创建审核流程，积极推动分支机构的发展与优化。截至目前，学会共有 67 个专业委员会，12 个工作委员会，30 个省级自动化学会。学会组织架构不断优化，力量持续壮大。

在过去的一年里，“智慧学会”建设取得显著进展。学会不断打造一体化数字化平台，提升

联通能力。开拓科技成果鉴定和团体标准数字化平台，开发学会自主投审稿系统，筹建中国自动化学会 App，持续优化会员服务系统、学术会议系统、分支机构管理系统、期刊采编系统、奖励系统、组织管理系统和科研动态系统。不断完善 CAA 数字图书馆 / CAA 一站式研究生招生平台、CAA 云学院，官网、微信等融媒体矩阵影响力持续扩大，学会数字化服务水平迈上新台阶。

回首过去，我们秉持初心、砥砺前行；展望未来，我们惟励新、勇毅前行。在新的一年里，我们将继续坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为引领，聚焦国家发展战略和行业需求，充分发挥学会的人才优势和资源优势，为推动我国自动化、信息与智能科技领域的发展贡献更大的力量。

旧岁将暮，新春将至，祝愿伟大祖国繁荣昌盛！祝愿智能产业蓬勃壮大！祝愿广大会员和自动化、信息与智能科学领域的科技工作者新年快乐！幸福安康！

# 岁序更新 共赴新程

## ——致全体会员的一封信

日迈月征，朝暮轮转。感谢每一位自动化人的坚定陪伴，让CAA走过了一个蓬勃绚烂的2024。

**这一年，CAA坚守初心，回顾历史进程、言约旨远。**“胸怀祖国、自立自强、协同创新、追求卓越”的自动化人精神，将激励所有自动化人在科技创新的道路上勇毅前行、永不止步。

**这一年，CAA与您携手，共赴山海、聆听学术清音。**古都北京、海滨青岛、沪上之畔……CAA紧扣时代发展主题，创设国家新质生产力发展会议、中国自动化与人工智能教育大会，持续扩大中国自动化大会、国家工业软件大会影响力，来自五湖四海的万余位科技工作者在一场场盛绽的学术会议中相聚，创新的观点、蓬勃的思想，如涌流之泉为学术蓬勃发展注入涓涓活水。

**这一年，CAA矢志研思，构筑学术高地、传播科普知识。**突

出学科战略引领，继续开展2024年控制科学与工程发展研究工作，启动人工智能领域创新资源图谱绘制、教育大模型技术路线图梳理工作；支撑引领科技原始创新，推动科技期刊集群化和国际化发展；创设“科普百人团一科技乡村行”高端科普公益活动，足迹遍布内蒙古、西藏等十余个省市地区，持续开展以全国青少年劳动技能与智能设计大赛为核心的系列赛事，不断拓展自动化、信息与智能科学传播边界。

**这一年，CAA服务国家战略，提供公共服务、助力产业升级。**依托产业服务团、决策咨询团、高端智库团，助力传统企业升级、推动地方产业发展；加大力度开展团体标准研制，推动水平评价工作，持续开展CAA企·话系列沙龙讲座，为国产化自主可控保驾护航。

**这一年，CAA突出青年人才培养，发挥青年人才主力军作用。**

持续强化对青年人才的培养力度，以CAA青年科技奖和青年人才托举项目为抓手，打造CAA青年人才蓄水池，通过优化培养机制、创新创造平台，支持青年人才潜心研究，助力青年人才成为未来科技领军人物。

**这一年，CAA进贤进能，广纳四海之才，九州俊彦。**初心不改不断完善会员发展与服务机制，持续拓宽CAA学生分会覆盖面，有序推进CAA云讲座、会士面对面、青年菁英论坛、我和优博有个约会等线上活动，真正实现对会员的分类分级精准服务，赢得了更广泛科技工作者的支持。

踏遍万水千山，途经四季更迭。CAA与您一起迎接在时光中款款而来的2025年。新的一年，愿您踏歌而行、乘风而往，所行皆坦途、所思皆顺遂。

CAA将一直与您春秋共度，臻于至善。○

## 王耀南院士：数字人与机器人，更加“通情达理”

近年来，人工智能发展迅猛，大模型、强化学习、超图计算和情感计算等新技术不断取得突破，引领了从工具化到智能化再到情智化的跃迁。这一趋势不仅驱动着产业升级，更催生了新一代具有情智兼备特征的智能体。

党的二十大报告提出，“以国家战略需求为导向，集聚力量进行原创性引领性科技攻关，坚决打赢关键核心技术攻坚战。”具有情智兼备特征的智能体，即能够感知环境，进行学习和推理，并能通情达理地采取行动、实现特定目标的自主系统。情智兼备的数字人和机器人作为人工智能的重要发展方向，正逐步成为科技创新的前沿。它们不仅代表了人工智能向更加人性化、智能化的方向发展，也为智能体与人类的深度互动提供了新机遇。

### 情智兼备 认知与情感的完美融合

情智兼备融合了认知智能和情感智能，代表了全新的智能演进方向。这样的智能体不再是冰冷的计算机程序，而是具有情感、理解和关怀的存在，能够与人类建立更加亲密和深入的联系。认知智能让机器人具备如人一般思考和解决问题的本领，而情感智能则赋予了机器人进行情绪识别、情感表达和情感共鸣的能力。例如，在心理健康辅导中，情智兼备的智能体可以通过语音语调分析和表情识别来感知用户的情绪波动和心理状态。

从数字人与机器人的科研进展来看，国际上的头部科技企业和

知名高校在多模态情感识别、情感生成与交互、情感计算专用芯片与硬件方面已经有了一定的突破。例如，谷歌和微软研究团队开发了多模态情感识别系统，表现出色；麻省理工学院和斯坦福大学正在积极开展跨学科合作，结合心理学、神经科学和计算机科学，深入研究情感计算的理论和应用；谷歌的 Gemini 模型等已经在情感生成方面取得了显著进展。

国内在情感计算算法方面也取得了显著进展，特别是在多媒体信息处理、语音和文字情感识别等领域。许多研究机构 and 高校，如清华大学、哈尔滨工业大学及厦门大学等，正在构建大规模的情感数据集，支持情感计算

模型的训练和优化，研发面向多类开放场景的情感计算方法及工具。国内的科技公司，如科大讯飞和小米，相继推出了具有情感交互功能的智能客服机器人；百度和阿里巴巴等公司开发了多模态情感识别系统，在实际应用中提供高效的情感识别和生成服务。此外，还有一些初创公司和研究团队也正在探索情智兼备技术在教育和医疗领域的应用，开发出情感教育助手和陪伴机器人，提升用户的满意度和服务质量。

### 三大挑战 情绪感知、个性化分析与仿生化交互

尽管我国在情感智能领域

取得了众多进展，但在实现“情智兼备数字人与机器人”的过程中，仍有三大难题亟待解决。

一是多模态情绪感知能力。人类情感的感知是通过多个感官的交织与互动实现的，然而目前的数字人或机器人往往只能依赖单一感官（如语音或面部表情）进行情感识别，在多模态数据的高效融合、多源异构数据一致性和时间同步方面还存在挑战。如何实现跨模态情感表达的整合，如何在有限的资源下平衡模型复杂度和准确性仍是一个难点。

二是个性化情智分析能力。人的情感表达具有个体差异，同样的表情或语句在不同个体、不同语境下的解读可能存在本质区别。因此，人工智能需要具备个性化情智分析能力，能够根据个体差异进行精准识别，避免情感误读。随着大模型、强化学习和超图计算等新技术的涌现与进步，人工智能显著提升了复杂数据分析能力，能够提供更加个性化的情感沟通功能。

三是仿生化情感交互能力。要让数字人、机器人像人类一样与他人进行情感互动，人工智能不仅需要识别情感，还要以自然、流畅的方式表达情感。目前，尽管语音识别和生成技术已有突破，但机器人与人类的情感交流仍显生硬，缺乏深度情感

的表达。为突破这一瓶颈，人工智能需要在情感数据处理的基础上，结合肢体动作、面部表情等多维度的表达，形成更加自然的情感交互。

### 突破之路 多技术协同发展是关键

在通往情智兼备的数字人和机器人研究中，多学科的研究和跨领域的技术研发起着至关重要的作用。情智兼备不仅要求机器人具备情感感知能力，还需通过多种技术手段实现情感的生成与表达，形成情感识别与反馈的闭环。要实现这一目标，多个技术领域必须协同发展，其中情感生成与表达、情感识别与反馈、多模态情感感知技术是关键。

情感生成与表达，让智能体更具人情味。情感生成与表达是指数字人和机器人通过特定方式表现出情感反应的能力。这一过程不仅仅是模拟人类的语音语调，还包括通过面部表情、肢体动作等多种方式进行情感的外化。在这方面，情感合成技术尤为重要。通过调节语调、语速、音量等参数，语音合成器能够生成带有情感色彩的声音。例如，当机器人要表达高兴的情绪时，其语调和语速会明显提高，而在表达悲伤时，语调和语速则会相应降低。这种情感化的语音生成技术，使机器人能够在与人类的

互动中表现出更加自然和富有情感的反应。

情感识别与反馈，能精准捕捉并回应人类情感。情感识别技术使得机器人能够准确地捕捉人类的情感信号，并基于这些信号做出合适的情感反馈。自然语言处理技术的应用，让数字人、机器人能够理解和生成自然语言，从对话内容的分析中找出情感的线索。通过对用户的语言结构、语气以及关键词的分析，机器人不仅能够判断出用户的情绪，还能够适时地提供情感支持。例如，当用户遇到问题时，机器人能够通过语言和语气的变化，表达出关切与安慰。

多模态情感感知，让情感识别更加全面准确。通过结合语音、图像等多种感知数据，人工智能可以获得更加精准的情感信息。例如，通过同步分析用户的语音语调与面部表情，机器人能够从多个维度捕捉到情感的细节。这样的信息融合极大地提高了情感识别的准确性和可靠性，为情感反馈提供了更为全面的数据支持。结合多模态感知数据，构建更为复杂的情感模型是当前研究重点。例如，当用户的面部表情和语音语调一致时，系统可以识别出用户的愉悦情绪；而当面部表情和语音语调呈现愤怒时，系统能够迅速判断用户的情绪变化并应对。

## 应用前景

### 医疗护理、教育与企业服务

情感智能技术的广泛应用前景令人期待，特别是在医疗护理、教育和企业服务等领域，已展现出巨大的潜力。

在医疗护理领域，情智兼备的机器人在照护老年人、孤独症患者等方面具有极大的优势。通过面部表情识别与语音分析技术，机器人有望实时感知患者的情感变化，为其提供情感支持，帮助缓解孤独感和焦虑感。在孤独症患者的干预中，情智兼备的机器人可以通过互动游戏等方式帮助患者提高社交能力，促进情感认知。一个典型案例是日本软银公司的 Pepper 机器人在养

老院中的应用。Pepper 不仅能够进行基础的护理工作，还可以与老人进行情感互动，通过讲故事、聊天和做游戏等方式，提高老人的情感体验，实现更人性化的养老陪伴。

在教育领域，虚拟教师通过情感智能技术，能够识别学生的情感状态，动态调整教学内容和方式。例如，当学生表现出困惑或疲倦时，虚拟教师可以通过增加互动环节或安排休息时间来激发学生的学习兴趣。通过情感分析，虚拟教师可以保持学生的高参与度。美国的一些学校已经开始使用情感智能虚拟教师进行在线教学。这些虚拟教师能够通过面部表情和语音分析，实时了解学生的情绪状态，调整教学策

略，提高学习效率。

在企业服务领域，情感智能技术的应用能够显著提升客户体验和满意度。通过分析客户的情感状态，企业能够精准调整服务策略。例如，在客户咨询中，机器人可以根据客户的情感反馈，来调整语气和服务态度。

未来，随着技术的不断发展与突破，情智兼备的数字人和机器人将不再是科幻小说中的存在，而将成为现实生活中的重要伙伴。随着跨学科合作的深入，情智兼备机器人将进一步缩短智能体与人之间的情感距离，推动社会各领域的智能化进程，为人类生活带来更温暖、更智能的服务。○

来源：人民日报

## 作者简介



王耀南，中国工程院院士，机器人技术与智能控制专家，湖南大学教授、博士生导师，现任机器人视觉感知与控制技术国家

工程实验室主任。任中国自动化学会会士、中国计算机学会会士、中国人工智能学会会士、中国图象图形学学会理事长、全国智能机器人创新联盟副理事长、中国自动化学会常务理事、中国人工智能学会监事、教育部科技委人工智能与区块链技术委员会委员、湖南省自动化学会理事长等。曾任国家 863 计划智能机器人领域主题专家、欧盟第五框架国际合作重大项目首席科学家。长期从事机器人感知与控制技术

及工程应用研究和教学科研工作，以第一完成人获国家技术发明二等奖 1 项、国家科技进步二等奖 3 项、省部级一等奖 11 项。发表 IEEE 等 SCI 论文 200 余篇，出版著作 15 部，获国家发明专利 80 余项。入选德国洪堡学者。培养出博士 70 余名，荣获全国高等学校优秀骨干教师、全国五一劳动奖章、全国先进工作者、全国创新争先奖、湖南省抗击新冠疫情先进个人等荣誉称号。

## 李德毅院士：人工智能看哲学

摘要：本文探讨哲学和神学、科学之间的关系，探讨智慧和智能的关系；认为哲学不是科学，也不是科学的科学，哲学反映人类求知的渴望，体现在怀疑和批判的氛围中沉淀起来的人类文明，成为科学的生态和信仰，哲学是科学的先导，人工智能受惠于哲学，也助推哲学。大自然进化了人脑的记忆能力，时间是人类认知的奠基石，人的思维和机器的思维，数学上同构，物理上同源，都赖负熵为生，智能机器和人一样可以思维，可以学习，人的想象力和创造力源自思维中的抽象、联想和交互能力。人体和智能机器里的物质和能量是物理层面的真实存在，结构和时间是认知层面的抽象思维，结构和时间寄生在物质和能量上，构成硬构体，机器里的信息是大量的软构体，体现了想象的世界，可以寄生在硬构体或者其他软构体之上，有虚有实，虚实结合，可自举和自我复用，总是存在下一个时间周期，使得机器能再去“思考”，其秩序显示出维持自身思维和产生有序事件的能力。物质和精神、硬构体和软构体、形而下和形而上，是一枚硬币的两个面。人工智能越发达，人的智能更发达，相互依赖，迭代发展，无尽的认知导致无尽的创造。

要说哲学从哪里来、到哪里去，还得从古哲学谈起。古代哲学和科学并没有严格的区分，人类丰富的想象力导致在很长时间的巫术、宗教、神学之后，才有了哲学，哲学家首先是直觉敏锐的思想家，而后才有了科学，可以说科学是在一片有害的丛林——巫术和迷信的丛林——中发芽成长的，这片愚昧想象的丛林固然对人类的进步有过积极的意义，但也一再地对知识的幼苗加以摧残。到了文艺复兴时期，科学才逐渐地和哲学分道扬镳，算术、几何学、测量学、力学、运动学、动力学、物理学等迅速发展起来。

所以，以前的哲学家常常也是数学家、物理学家，交织在一起，直到现在，研究生读博士学位，还被统称为哲学博士学位（Ph.D），英文里的哲学这个词“philosophy”源自于希腊语，“philo”是爱，“ophia”是智慧。

我年青时对毛主席的《矛盾论》、《实践论》和《人的正确思想是从哪里来的》等著作读过一遍又一遍，非常崇拜毛泽东哲学思想。我曾经认为，哲学是关于心灵和宇宙的全部学问，至高无上。后来，我又多次参加哲学班学习，用历史和科学的眼光读书，看哲学，产生了很多新的认识。原来

的科班高等教育，学哲学言必称希腊，一般不会在哲学课堂上谈毛泽东著作，都去读苏格拉底、柏拉图、亚里士多德、笛卡尔、莱布尼茨、康德的哲学，也不会提到东方圣人孔子和王阳明。科学让我们越来越明白这样一个真理：受人的感官、环境和活动范围的限制，人的感知远不具有充分实在性，宇宙的力量和个人的愿望和幸福原本是不相干的，物理世界是不是就是人们认知的那个样子，无从可知。在高等生物诞生之前，宇宙早已经存在，人类的文明史存在约1万年，有文字记载的只有五千多年，如果把

地球的历史 45 亿年比作一天，单细胞微生物存在 35 亿年，相当于 18 小时，智人存在 50 万年，才相当于 10 秒，人类文明史只相当于 0.2 秒。将来如果没有人类，其它生物和宇宙照样可以存在。这样一来，眼界开阔了许多。

笛卡尔说，我思故我在，指的是认知空间；套用笛卡尔的说法，你我思不思，它都在，指的是物理世界。哲学是人类在自己的认知空间里理解物理世界。

## 一、哲学不是科学，也不是科学的科学

哲学长期处于泛灵论的混沌状态，有人认为哲学是所有学科的顶端，但一直没有明确的研究对象。哲学原本是超越实用目的，纯思辨的，形而上的，是“没有用”的学问；而数学、物理学、化学、生命科学、医学、植物学、动物学、人类学、环境科学、社会科学、文学、史学、美术、音乐，等等都有明确的研究对象，要解释、解决实际问题，唯独哲学没有，哲学不是谋生的一技之长，学哲学的大学毕业生常常找不到工作就是证明。科学和技术重在学以致用，并不断开辟新的学科领域。所以，严格地说来，哲学不是科学中的一个分支学科，这是很多人的共识，当然也有人未必同意。

科学是学科的总称，本质上

是分科而学。科学总是在向真理逼近，逼近的过程中不断积累，还会有曲折，学科之间有交叉，更有断裂和鸿沟，也就是说，科学自身还留下了一大堆未知的学科和学科划分问题，例如在中国教育界，争论智能科学是不是一级学科的问题很久了，到现在才有共识。但是如果把学科用物质科学、生命科学和社会科学三个大筐来装，智能学科哪个筐都放不进去，可能应该是零级学科，数学亦然。有人说哲学是科学的高阶。速度的速度是加速度，动力学是运动学的高阶，知识的知识是元知识，哲学实际上承受不起科学的这种高阶作用。随着人类知道的越多，不知道的似乎更多，哲学重在学以致知，唯真是求。

## 二、哲学是科学的先导，人工智能受侮于哲学，也助推哲学

也许说，哲学是科学的先导，文化和文明是哲学的先导，比较确切。哲学是对科学的启蒙，可能会为未来的新学科做点铺垫，设点边界和前提。

有人说哲学的根本命题是“我是谁？我要什么？我去哪里？”这样的三个问题正在被科学分解为许多专门学科去研究，随着科学和技术的飞快发展，科学家和工程师们对先哲的话也未必当真，哲学到底是科学底部的大本营，

还是科学的最高峰，其实很难说。研究所有对象之间抽象关系的，不是哲学，普遍认可的倒应该是科学，尤其是数学。哲学家常常用逻辑的方法、数学的思维方法去论证哲学问题，数学成了科学的皇后。数学的真，也体现在它的严密逻辑，正所谓无逻辑不数学。这也解释了为什么古希腊的数学家大多都是哲学家，古希腊哲学乃至西方哲学，都建立在严密的逻辑演绎推理之上。长期以来东西方科学家和工程师们仰望天空，脚踏实地，步步为营，越来越多的学科诞生了，到了现代，科学、技术和工程逐步吞占了哲学的地盘，宇宙被天体物理学取代了，哲学的原子论被物质科学、物理、化学取代了，逻辑学被数学取代了，意识和心灵被神学、宗教学、生命科学、人类学取代了，宇宙观、人生观、价值观、伦理学被政治学、经济学、社会学取代了，大学的哲学系几乎被政治系或者人文学院取代了，智能被思维科学、神经科学、认知科学、人工智能取代了。至今似乎没有哪一个学科，等着要哲学来为它做概括和总结。于是，曾经的哲学老了，霍金甚至说“哲学已死”，就像一颗洋葱，被一层一层地剥去外皮后，原来里面空空如也，有人只好说哲学是无为而治，在科学面前，哲学似乎成为一种信仰了。要说哲学仍然是

科学的先导，但能够“导引”的东西其实并不多。总之，科学的发展使得人们对哲学不再神秘和崇拜，倒是人工智能需要哲学的启蒙，如何学以致用，让智能机器能够延伸人对智能的渴望，提升想象力，通过学习、通过不断地与人交互，教机器学习，训练机器思考，使得机器的认知可以和人的想象力对齐、使命对齐，认知可以自成长。

### 三、哲学反映人类求知的渴望，无尽的认知导致无尽的创造

大自然赋予人类的是渴望多于智慧，是人类在生存和繁衍中被物竞天择，适者生存，自然进化逼出来的，“求知”“求真”和“求美”是人类天生的欲望。当人类对世间万物发出疑问时，思想就产生了；当人类对自身的思想发出疑问、进行反思时，哲学就产生了，我思故我在，思即是我。

#### 1. 自然进化奠定了人类丰富想象力的生物学基础

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，其具身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。那么，人类进化的特别之处在哪里呢？

经历了千万年的人类进化，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，创造了许许多多的硬构体；其次，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；更重要的，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  $300\text{ cm}^3$ ，其表面积为  $2200\sim 2850\text{ cm}^2$ ，含近千亿个活动神经细胞，自然进化了人脑的记忆能力，时间是人类认知的奠基石，人类具有了丰富想象力和创造力的生物学基础——硬构体。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，没有哪个神经元是孤独的，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。以上三个方面的进化，就为后天

人类的语言学习、想象力发展和可重塑留下了空间，创造出许许多多的软构体。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，代价是需要漫长时间来进化，是千万年用生与死的世代更替。“求知”“求真”和“求美”中的抽象、联想和交互能力，来自早期人类进化中的模仿，尤其是依靠暴力增长的大脑皮层，渐渐地人类的想象力越来越发达，成为人类特有的具身智能，并和意识等生命体的特质剥离开来，延伸到体外单独存在，拓展成为人工智能。

#### 2. 想象力源自思维过程中的抽象、联想和交互能力

人类进化过程中，最早存在的肢体语言和模仿学习都是形象思维，常常以视听觉交互认知方式表现出来。更重要的是，自然进化了人脑的记忆能力，人类创造的各种各样的、简单或复杂的图形、文字和符号，可以通过学习，成为人脑里的长期记忆，抽象、联想和交互成为思维的核心。于是，在认知空间里，可通过计算智能和记忆智能完成逻辑思维，也是我们常说的“理性精神”；在物理空间里，通过感知智能和行为智能实现具身交互。物理空间与认知空间之间不断循环往复。在物理空间中包括两个重要的感知，即时空识别和模式识

别，时空识别代表位置、导航和时间同步；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，被形式化了，通过教育传承给一代又一代。机器可以接受指导学习，也可以自主学习，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，认知空间不仅是记忆知识的仓库，更是放飞想象力的天空。

回顾人类在石器时代和农耕时代发明的工具有物质和结构，结构直接寄生在物质上，形成硬构体。人类抽象能力是去粗取精，去伪存真，使得具有一般性和普遍性，形成人们在认知空间的抽象。例如，我们能够轻松地识别不同人在纸上写出的千差万别的字母结构 A，在认知空间用指称概念“椅子”去穷尽物理空间存在的实体椅子。离开了物质，结构不可能在物理空间独立存在。把原始的石块做成今天的刀子，花费的时间是以数十万年计的，物理空间的结构和物质难舍难分。可见，硬构体绝不能简单等同于

物质，寄生在物质上面的结构不可或缺，它是人类特有的想象力的体现。农耕时代的工具不是机器，更不是生命，人类借用它延伸人的体力。

到了工业时代，机器里增加了“能量”要素。物质、结构和能量构成“动力机器三要素说”。结构直接寄生在物质和能量上，形成硬构体，能量让它们动起来。例如，1657年荷兰钟表制造师科斯特制造出了第一个摆钟，就是依靠物质、能量和结构来维持运转的。工业时代人类借用动力机器，延伸或者拓展了人的体力，人类变得十分地强大起来，但是机器不会思维，智能时代的机器则不同了，我们提出智能时代“认知四要素说”。在物质、能量、结构的基础上增加了一个新要素：时间。时间不是物理世界的客观存在，宇宙里没有绝对时间，人脑神经元组织奠定了形成不同时长记忆的生物学基础，人类自己发明了时间的概念。

机器认知和人的认知同构，人体里和机器里都有物质、能量、结构和时间。物质和能量是物理层面的真实存在，结构和时间是认知层面的抽象思维，用结构表达物质在空间的拓扑形态和形变，用时间表达物质的运动与变化、以及能量的流动与传递，宇宙中并不存在时间，人们主观地定义一年就是地球围绕太阳公转一圈。

宇宙里只有运动和变化，没有绝对时间，把结构和时间寄生在物质和能量上成为硬构体，机器里的信息是大量的软构体，如同人在认知空间里表现出来的思维和精神，它们寄生在硬构体或者已有的其他软构体之上，能自我引导，即自举，能自我复用，即递归。时间让机器里有了活动的秩序，于是有了思想，思维才能够“活动”起来。机器的秩序显示出维持自身和产生有序事件的能力，体现在认知和行为两个方面。

### 3. 机器认知的自成长

忽视认知机器可交互、会学习、自成长的机理，就失去了理解认知机器的最重要的钥匙。人脑用三个记忆分区表达不同的时间间隔的记忆，记忆的不相容原理导致记忆区的分工，导致抽象和联想，抽象带来分类或者聚类，联想带来类比或者迁移，人类通过抽象和联想理解过去和现在，想象未来。否则人类就不会有时间的概念，也就没有了历史和文明，只能和其它许多生物一样永远活在当下。记忆先于计算、约束计算。人的思维和机器的思维，数学同构，物理同源，都赖负熵为生。归根到底，都是依靠能量实现迭代和递归，思维是可以自举的，认知是迭代递增的，是递归执行的。

于是，四要素的机器可以作为思维的载体。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。软构体寄生在硬构体上，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，机器赖负熵为生。认知的机器由四个要素组成：物质、能量、结构和时间。结构和时间寄生在物理空间的物质和能量上，构成硬构体；认知空间里的软构体，寄生在硬构体或者已有的其他软构体之上，具有层次性，构成丰富的、多尺度的概念、消息、信息和知识，通过联想，可以形成类比，还可以在物理空间去验证。例如，我们日常对话中的每一次表达都是一次联想，思维不停地跳跃，剔除任何不相关的表面细节，抽象出构架精髓—软构体，并进行关联，或者类比，这就是思维的奥秘，思即是我。

#### 四、人工智能要用人的智慧助推机器的想象力

##### 1. 消除人的精神的神秘性

人的认知和机器的认知，都赖负熵维持秩序。认知机中有感知，有认知，有行为，可交互，会学习，自成长，只有记忆才能维持认知的连续性，计算并不是认知的唯一活动，记忆优先计算。认知的机器里可植入一个体现自然进化的“幼儿认知核”的硬构

体，在其上寄生有丰富的、多尺度的软构体，形成思维，机器的秩序显示出维持自身和产生有序事件的能力，用软构体精确调控物质和能量，协同有序地工作，通过交互实现对机器具身行为的控制，根据特定领域工作岗位的要求，对认知机进行常态化、多样化的图灵测试和训练，自编程，自纠错，自完善，在交互和迭代中释放和拓展人的智能。一方面，认知机配置的传感器和思维的速度将不再困囿于生命体的生化参数的极值，通过多通道跨模态感知，进行暴力计算和暴力思维。另一方面，人有丰富的想象力和创造力，可以通过实时交互，控制机器实现使命对齐，认知的机器没有意识，要让人发挥人的智慧，机器发挥机器的智能，用记忆去约束计算，各智其智，智人之智，兼容并包，完善多元认知。人的智能和机器智能互补，以超自然进化速度形成迭代的智能，这也部分消除了人的精神的神秘性，尤其是人类对机器意识的担忧，人类借用能认知的机器，延伸或者扩展人的智力，并渗透到动力机器中去，人类到了回答认知的机器如何创造新思维的时候了。

人类发明了认知的机器，和我们对话交流，人工智能辅助人们数学证明，工程设计和文字书写，如用 Word、PowerPoint、

EXCEL 等一系列办公工具，辅助人们生成各种文档，我们都已经习以为常，现在到了人工智能辅助人们内容生成的时候了，如 ChatGPT。GPT 和 WORD、PowerPoint、EXCEL 等一系列智力工具之间可以自动转换，迭代发展，大大释放和拓展了人类的脑力劳动。

人工智能的飞速发展正深刻地改变着人类的生产方式、生活方式以及思维方式，没有哪门学科比人工智能更需要和哲学打交道。过去的人工智能学者对于来自哲学界关于意识和存在的批评，曾经不屑一顾，认为不过是一些外行话，不痛不痒。人工智能研究智能和意识的剥离，研究认知的形式化、思维的基本模式、智能的自成长，认知的机器可以有自纠错的智能，但没有反省自己的意识。例如，图灵就发出天问“机器能思维吗？”想用机器来替代人的思维。冯友兰在《中国哲学史新编》的全书绪论中说：“哲学是人类精神的反思，反过来以自己为对象而思之。”也就是说哲学是研究人是如何自省的，就是以自己的思维为对象而认识之，只要思维或者认知的高阶（思维的思维、认知的认知）弄清楚了，就可以制造出一台思维的机器来，这正是目前在努力做的新一代人工智能：研发可交互、会学习、自成长的认知机器。在人类无法

解释无机物如何自发转化为生命之前，把机器人格化、拟人化，硬生生地赋予机器以意识、情感、信仰、生命和道德要求，讨论机器会不会说谎，有没有自己的困惑，懂不懂诗歌、美丽、浪漫和爱情，只能是人类自作多情而已。

曾经对忒修斯之船进行的灵魂拷问“我是谁”，如同希望雕塑活过来，只是人类的自寻烦恼。把船结构寄生在物质上，形成的忒修斯之船是个硬构体，是二要素构成的一种运输工具，不再是一堆纯物质材料，工具需要维修，防止老化。如果在船上安装上柴油或者汽油发动机、甚至依靠核动力，形成物质、能量、结构三要素组成的机器，忒修斯之艇航行时，就可以大大释放和拓展人的体力，但这条忒修斯之艇依旧没有思维能力，不知道下一步往哪里走，因为机器里没有时间。如果在艇上有了时钟，有了时间，具备物质、能量、结构和时间四要素，能够感知周边环境，有了定位传感器，有了机器驾驶脑等软构件，这条艇就成了会思维的机器，能思考下一步该做什么，有了抽象、联想和交互的能力，可自动到达目的地，这条无人驾驶的忒修斯之艇就有了智能。即使有了可交互、会学习、自纠错的智能，实现了认知的自成长，但依然没有自我反省的意识，不是人工生命，不必对它发出灵魂

的拷问，这就如同当今也不必对ChatGPT发出灵魂拷问一样，它们都没有意识。

## 2. 否定比肯定更具有普遍性

无论哪个学科，对任何学术结论的刨根问底，最终总会归于一些无法证明的、最基本的假设，也就是公理作为框架或者边界，确保自治。公理通常是一些显而易见、符合人们直觉的假设，它们是该学科的基石。也就是说，学科的真理性都是相对的，边界越宽泛，真理性越普遍。我们要认知的自然界并不是静静地、一成不变地、实实在在地存在着，而是生成着、运动着、变化着、消逝着、转换着。因此，哥德尔的不完备性定理对哲学有着特别的贡献，它告诉我们，否定比肯定更具有普遍性，人类认知的局限性或不完备性，所有形式系统的不完备性，必然根源于它的创造者的不完备性。任何专业学科，数学也好，诗歌也好，音乐也好，都需要自然语言作为它的背景语言，人类用于思维的自然语言未必严格自治，但弱统一，哪怕是脑裂。自然语言是人类思维的载体，是所有学科语言的元语言，包括数学在内。自然语言不是完备的，没有明确的边界，语境、语用、语法和语义都有不确定性。也许有一天，整个科学的边界就是根据哲学来设定，没有哪门学科比人工智能更需要和哲学打交

道，并与时俱进地用自然语言扩大人类的认知边界，把人们已经普遍认可的对话图灵测试常态化，推向具身图灵测试常态化，如无人驾驶汽车。这就是我们所处的智能时代。

哲学是人学、智慧学。人们常说的三观，宇宙观是天体物理，浩瀚星球，相互作用，可以被认知；生命观是自然进化，物竞天择，适者生存；价值观是人类社会，我为人人，人人为我，人权平等，命运共通。三观是信仰，不是科学。也许有人会有疑问，既然所有的数学结论都建立在不能证明的公理上，那是否说明数学不是科学，而是一种信仰？数学毫无疑问是科学，数学正是从哲学的高度认识到，严谨的推理一定要基于更基本的结论，而这些结论应当是已经被证实的，或者作为公理默认正确的。数学中的一些基本公理正是数学大厦坚实的地基，承认无法证明的公理体系，这自然是一种信仰。数学在给定的公理体系下追求真理，不断揭示新的关系，探索新的问题，寻找新的解决方法。从某种意义上讲，这就是一种信仰，就如同许多科学家都坚定地认为，这个浩瀚的宇宙是可以被认识、被解释的。这也是一种信仰，无法被证明。

哲学触及灵魂，知道我们还有不知道的，才激起人类对求知

的渴望，体现人类在怀疑和批判的氛围中沉淀起来的人类文明，成为生态和信仰，哲学的内涵常常是人赋予的，不固定，所以有太多的流派，各知其知，难以统一，也无需统一。五年一次的世界哲学大会，总是各说各话，多数都在“哲学”前面加上定语，如马克思主义哲学、维特根斯坦哲学、语言哲学、分析哲学、系统哲学、工程哲学、人工智能哲学、东方哲学等，非常发散，是认知螺旋中的硬构体和软构体的相互作用。哲学不同学派要趋同、收敛，比科学难得多，哲学的价值并不在于达成共识，而在于为人类提供探索的自由和多元的思考，自然进化造就了人类的抽象、联想和交互能力，这是人类想象力的根源，无尽的认知导致无尽的想象，无尽的想象导致无尽的创造，神学家创造出神明主宰宇宙，哲学家用哲理启迪人的思维，数学家发明数学解释世界，人工智能学家剥离生命意识，发明机器智能，并努力渗透到动力机器里去，艺术家用作品激励人类的真善美，都是人类的想象和创造，小小地球装不下。

400 万年来的人类进化，形成基因优势，脱离野蛮，发明工具；300 万年来人类形成语言优势；6000 年前人类发明文字和教育，形成文化文明优势，成为第一次认知革命；最近 500 年来利

用物质和能量，发明机器，形成科技优势，解放了人的体力，大大扩展了人类活动的物理空间，成为第二次认知革命；最近 100 年来发明更多的传感器和智能机器，解放人的智力，形成智能优势，人类进入第三次认知革命。物质、能量、结构和时间是人类认知的四个核心要素，也是机器认知的四个核心要素，认知的机器里增加了更多的软构体。

人类认知的历史，就是在渴望的驱动下，不懈追求认知的确定性而又不时显现认知的不确定性的历史。人类这个物种在宇宙里一代代长期进化下去，固然不是靠某一代人、几代人自身主观努力就能够改变的，也很难预测、改变和决定自身的进化方向，但是人类已经发生并继续推进着的人类文明，已经发生并继续推进着的农业革命、工业革命和认知革命，它们并行发展，此起彼伏，石器时代和农耕时代人类发明的工具，还不是机器；工业革命时代人类发明的机器，还不会思维；今天我们已经可以发明可交互、会学习、自成长的认知机器了。人类智能和人工智能的迭代发展，使得人类能够以超自然进化的速度，从野蛮走向文明，从早先的“觅食者”跃升为“种植者”“劳动者”“建设者”，今天又将进一步跃升为“创造者”。

人类长期以来的一个梦想就

是用机器替代、延伸人的体力和脑力，拓展人类的体能和智能，无敌于天下，无畏于圣人，这就是我们身处的智能时代。人类文明的发展，哲学的发展，应该让人发挥人的智慧，机器发挥机器的智能，各智其智，智智与共，用人的智慧培育机器想象力和创造力，用机器暴力思维的成果反馈人类，迭代发展。○

来源：科学与社会

## 作者简介



李德毅，中国工程院院士，中国自动化学会会士，人工智能和指挥自动化专家，主要从事计算机工程、不确定性人工智能、数据挖掘、知识发现和智能驾驶领域的研究。1944 年 11 月出生于江苏省泰州市。1983 年毕业于英国爱丁堡 Heriot-Watt 大学，获博士学位。

## 姜斌：胸怀航天强国梦想 勇攀航天科技高峰

习近平总书记指出，探索浩瀚宇宙，发展航天事业，建设航天强国，是我们不懈追求的航天梦。党的二十大对加快建设航天强国作出重要部署，党的二十届三中全会对推进新型工业化、因地制宜发展新质生产力、推动包括航空航天在内的战略性新兴产业发展作出系统部署，为我国航天科技实现高水平自立自强指明了前进方向。面对新任务新要求，高校作为科技第一生产力、人才第一资源、创新第一动力重要结合点，必须勇担立德树人和科技创新使命，全面提高人才自主培养水平，切实强化国家战略科技力量，奋力打造助力航天事业高质量发展的人才高地和创新高地。

### 一、深刻理解建设航天强国的重大意义

党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央在领导推进新时代中国特色社会主义事业进程中，高度重视和关心航天事业发展，高瞻远瞩作出建设航天强国的重大战略部署。高校作为中国航天事业的重要推动力量之一，必须准确把握习近平总书记关于航天事业重要论述的核心要义，深刻理解建设航天强国的重大意义。

**航天事业代表着国家综合实力。**航天事业是现代科学技术的集大成者，是国家工业整体水平的集中体现。新时代新征程，我国航天事业自立自强、自主创新，走出了一条具有中国特色的航天发展道路，包括成功发射载人飞

船、开展月球和火星探测、成功发射多种用途卫星等，大大增强了我国的综合国力和国际影响力。中国航天作为国家战略安全体系的重要组成部分，通过自主发展和创新超越，极大提升了我国国防实力，推动国防事业发展，为安邦定国提供了坚实保证。

**航天事业关系着人民生活福祉。**随着航天事业蓬勃发展，通信卫星让天地互通、世界互联，远程通信、远程教育、远程医疗等服务越发便捷；北斗系统的广泛应用为大众出行、智慧物流、远洋运输、精准农业等领域提供精准定位导航。航天高水平科技成果的转化应用，为人民生活福祉和经济社会发展提供了重要支撑。当前，随着我国重复使用运载火箭试验成功，商业航天迸发出了极

大的创新活力，展示出巨大的市场规模潜力。未来，高频次的商业发射逐渐成为发展趋势，密集的火箭发射将带动商业卫星数量实现指数级的提升。商业航天将以高科技、高效能、高质量为特征，加快推动生产力的革新发展，为发展新质生产力提供强劲动能。

**航天事业引领着科技创新发展。**当前，科技创新成为战略全局中的“支撑力量”、大变局中的“关键变量”，谁牵住了科技创新这个“牛鼻子”，谁就能占领先机、赢得优势。习近平总书记深刻指出，航天科技是科技进步和创新的重要领域，航天科技成就就是国家科技水平和科技能力的重要标志。航天科技取得的创新成果极大鼓舞了中国人民的创新信念和信心，为全社会创新创造提

供了强大激励。航天事业的蓬勃发展，将加快促进形成以高技术产业为先导、基础产业和制造业为支撑、信息化产业为引领的创新发展格局，加速一批高新技术的创新应用、信息通信技术的革新演变，对我国加快实现高水平科技自立自强有着重要引领支撑作用。

**航天事业凝聚着宝贵精神财富。**习近平总书记指出，我国航天事业创造了以“两弹一星”、载人航天、月球探测为代表的辉煌成就，走出了一条自力更生、自主创新的发展道路，积淀了深厚博大的航天精神。中国航天自1956年起步以来，始终逐梦星辰大海，不断创造新的历史。“嫦娥”揽月、“祝融”探火、“北斗”组网、“天宫”遨游星辰，一系列重大工程圆满实施的背后，是一批批科技工作者迎难而上的接续奋斗，是一个个关键核心技术的奋勇突破。波澜壮阔的航天事业奋斗历程，孕育形成了“两弹一星”精神、载人航天精神、探月精神、新时代北斗精神，纳入了中国共产党人精神谱系。这些由一代代航天人在伟大征程中凝结形成的精神品格，是中华民族的宝贵精神财富，将为我们推进强国建设、民族复兴伟业注入坚定的信心信念，提供强大的精神指引，带来不竭的奋进动力。

站在新的历史起点上，我们要深入贯彻落实习近平总书记关

于航天事业的重要论述和重要指示批示精神，锚定建设航天强国的宏伟目标，勇攀科技高峰，不断提升自主可控的创新发展能力、引领前沿的科学探索研究能力，着力培养更多拔尖创新人才，产出更多原创性引领性科技创新成果，为加快推动新型工业化和航天事业高质量发展提供强劲动能。

## 二、高校要加快推动航天领域教育科技人才一体化发展，为航天强国建设提供坚实有力支撑

党的二十大报告提出，坚持把发展经济的着力点放在实体经济上，推进新型工业化，加快建设制造强国、质量强国、航天强国、交通强国、网络强国、数字中国，并首次对教育、科技、人才进行一体化统筹部署。教育、科技、人才是国家强盛之根基，同时也是中国式现代化的基础性、战略性支撑。高校作为教育、科技、人才“三位一体”的重要交汇点，是拔尖创新人才培养的主阵地、基础研究的主力军和重大科技突破的策源地，在加快推进新型工业化、加速推动航天事业发展上肩负着重要使命责任。高校要坚持牢记航天强国梦想，弘扬伟大航天精神，充分发挥自身在学科建设、人才培养、科学研究、文化传承与创新等方面的优势，在勇攀航天科技高峰中挺膺担当，加快推动航天领域教育科

技人才一体化发展，为谱写航天强国建设新篇章提供坚实支撑。



高校要加快推动航天领域教育科技人才一体化发展，为航天强国建设提供坚实有力支撑。图为南京航空航天大学打造的“御风园”航空航天教育教学实践基地，集纳航空航天器实物。南京航空航天大学供图

**高校服务支撑航天强国建设要坚持学科建设引领。**航天事业发展既受到传统航空航天类专业深化发展的驱动，同时也受到伴随新一轮科技革命发展创建的新兴专业的深刻影响。高校要坚持自身鲜明办学特色，根据世界科技前沿方向、航天科技演变趋势和行业发展内在要求，增强学科建设的整体考量与前瞻部署，高标准统筹好相应的学科布局，不断强化基础学科，动态调整新设一批前沿学科、交叉学科，努力实现航天领域前沿技术学科专业要素的全覆盖。要通过学科资源的进一步整合优化，不断突出服务国家重要战略需求的指向性，健全以学科自身建设成效、服务国家战略成果为导向的政策供给、资源配置体系，激励航天领域的学科在承担大项目、凝聚大团队、构筑大平台、培育大成果上下功夫，做到“特色更特、优势更优、

水平更高”，以学科高质量内涵式发展有效助力航天强国建设。

**高校服务支撑航天强国建设要坚持人才第一资源。**高校要坚持“为党育人、为国育才”的初心使命，扎实落实立德树人根本任务，不断增强航天领域人才自主培养的战略主动，努力培育更多拔尖创新一流人才。要坚持思政引领，积极打造接触航天、探索航天、认同航天、归属航天的特色思政育人成长链，充分依托总师院士公开课、航天教育教学基地实景研学等创新培养方式，引导学生厚植航天报国的情怀，持续增强对祖国航天事业的认同感、归属感。要与时俱进革新教育教学理念，一体推进一流专业、一流课程、一流教材建设，充分结合航天型号任务工程领域研究，强化实践应用型人才培养。要更加注重实践育人，以航天创新实验室、航天企业为载体，不断深化科教融合、产教融汇，构建全方位校企协同育人共同体，积极塑造航天特色实践育人服务区。要坚持开放引进和精准培育并重，持续加大人才引育力度，深入实施新时代人才工程计划，加快拓宽海外引才平台链路，更加注重“引进来”和“走出去”的有机结合，着力培养造就一流科技领军人才和创新团队，引导广大人才把论文和科技成果应用到航天国防科技装备上。

**高校服务支撑航天强国建设**

**要坚持科技自主创新。**党的十八大以来，我国航天科技实现跨越式发展，自主创新能力显著增强。大火箭、北斗导航、高分卫星等重大成果竞相涌现，航天人才队伍不断壮大，展示了我国实现科技自立自强的决心和勇气。高校要坚持创新驱动发展，在助力航天事业发展中走好科技自立自强这条必由之路，不断强化有组织科研的顶层谋划，扎实推动科技创新和产业创新深度融合，更好地将科技势能转变为发展动能，奋力打造发展新质生产力、推进新型工业化、服务支撑航天强国的重要阵地。要面向行业、立足行业、深入行业，充分发挥高水平科技创新平台的支撑作用，联合行业单位积极建设打造航天领域国家级重点实验室，高站位、高标准建设好国家级科研平台，突出大平台、大团队在人才资源、研究能力、硬件设施等条件上的优势。要瞄准航天科技发展前沿和国家航天发展重大战略需求，精心谋划重大科技创新和标志性科研成果，超前布局基础性、前瞻性、颠覆性原始创新项目，超前培育重大项目、重大成果、重大平台，在前沿技术和“卡脖子”难题上不断求索，努力解决重大关键技术难题，构筑形成覆盖基础研究和应用基础研究、型号预研、关键技术攻关、装备研制的全链条航天科技创新体系。要牢

牢坚持以基础研究为本，加大支持科技创新中的“自由探索”，鼓励从基础研究的新概念、新原理、新方法出发进行探索，提升培育扶持力度，同时要加强推动理工交叉融合，使“需求牵引”和“自由探索”能够实现上下对接、有效协同，进而释放更多的创新活力，加快培育发展新质生产力。

**高校服务支撑航天强国建设要坚持深度开放融合。**高校服务航天强国建设，要以更加开放、自信、主动的姿态，持续提升开放办学水平。要面向经济社会发展重大需求，持续深化与行业产业的战略合作，聚焦区域发展、行业需求、民生福祉，着力打造政产学研用多方融合的高层次合作交流平台，不断深化产教融合、科教融汇，加速航天技术成果转化，提高航天科技成果转化效能，塑造更多发展新动能新优势；要不断解放思想，多维度拓展国际合作交流渠道，积极引进海外高水平办学教育资源，坚持走出国门淬炼一流，认真汲取世界一流航天院校的发展经验；要深入参与航天领域国际创新，推动高水平中外联合人才培养，着力培养具有全球竞争力的航天复合型人才、产出具有国际影响力的航天科技成果、形成具有鲜明中国特色的航天发展优势，不断提升我国航天领域的国际影响力和知名度。

**高校服务支撑航天强国建设**

**要坚持文化传承创新。**高校校园文化是社会主义先进文化的重要组成部分，校园文化建设对于促进优秀文化传承和思想文化创新、进一步增强“四个自信”具有十分重要的意义。在服务支撑航天强国建设中，必须坚持以习近平文化思想为引领，大力弘扬“两弹一星”精神、载人航天精神、探月精神、新时代北斗精神，持续强化校园文化建设，厚植红色基因、军工文化的育人沃土，建设打造以爱国主义的民族精神和改革创新的时代精神为核心的文化理念、文化价值、文化场馆、文化氛围，进一步加强师生对于中华文化、中国精神的高度认同，不断提升伟大航天精神的引领力、凝聚力、塑造力、辐射力。要充分发挥好行业资源优势，运用好航天教育教学基地等平台载体的育人功效，面向社会高质量做好航天科普服务工作，传播弘扬航天工作者追逐梦想、勇于探索、协同攻坚、自主创新、勇攀高峰的主流价值观，引导鼓励师生自觉做伟大航天精神的传承者、践行者和弘扬者，为建设航天强国、以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴凝聚强大精神力量。

### 三、南京航空航天大学在服务航天强国建设中的实践探索

南京航空航天大学（以下简称“南航”）作为航空航天民航特

色鲜明的高水平研究型大学，在70多年办学历程中始终坚持“为党育英才、为国铸重器”的初心使命，为国家航空航天事业培养输送20万余名高级专门人才，涌现出以嫦娥、天问等型号总师为典型代表的一大批航天领域杰出人才，自主设计研发了“天巡一号”微小卫星，深度参与了我国航天领域诸多重要型号的研发攻关任务，为国家航天事业发展作出了重要支撑。

**胸怀“国之大者”，厚植航天强国梦想。**回溯办学历程，南航始终坚定地选择与祖国同向同行。在航天强国建设历史使命的感召下，南航坚持自立自强、自主创新的发展道路，逐步凝练形成了以航天为重要支撑之一的“三航”办学特色。早在1959年，南航就探索开展了高空探索火箭（南航六号）的研制工作，并设置发展了遥控遥测、电子、无线电等相关专业。得益于学科专业的蓬勃发展，南航飞行器总体结构设计、进气道设计、复合材料等方面的研究成果在导弹、火箭、卫星等航天领域中均得到了重要运用。为突出航天特色，南航于2006年成立航天学院。后期为进一步推动航天特色的建设与发展，南航将原高新技术研究院微小卫星研究中心、仿生结构与防护研究所划转至航天学院。2018年，南航聘请“人民科学家”叶培建院士担任航

天学院院长，在其带领下，航天学院走上了发展快车道，服务航天强国建设的能力进一步增强。

**聚焦行业发展，强化拔尖人才培养。**在“培养什么人”上，作为行业特色鲜明的高水平研究型大学，南航坚持以培养服务航天强国建设等国家战略急需的拔尖创新人才为己任，为航天领域输送了一大批科技领军人才，其中包括“北斗三号”卫星系统总设计师、“嫦娥三号”“嫦娥四号”“天问一号”探测器总设计师、我国首颗电磁监测卫星（张衡一号）工程总设计师、中国载人航天工程空间应用系统总设计师等。在“怎样培养人”上，南航从生源选拔、培养过程、输送出口等人才培养全链条出发，构建起以红色基因、蓝色梦想为内核的理想信念教育体系，打造由航天领域院士、高层次人才和行业领军人才讲授的“强国逐梦·大师引航”系列前沿课、总师公开课等，持续激发学生投身航天强国建设的使命情怀；积极打造“国防企业面对面”等实践育人品牌，组织师生深入航天院所等国防军工单位实习实践，零距离、面对面与重器总师、大国工匠对话，在工程实践实训中不断强化系统思维和创新的能力，加快培养一批以工程应用能力为主导的拔尖创新人才。

**面向战略需求，矢志核心技术攻关。**南航坚持“四个面向”，

以有组织科研服务支撑高水平科技自立自强。经过多年自主创新研发，学校于2011年成功发射“天巡一号”卫星，成为国内第四家有能力和研制卫星的高校。以重大科研平台建设为抓手，牵头建设航空航天结构力学及控制国家重点实验室，与上海宇航系统工程研究所、北京空间机电研究所等多家航天研究所建立联合实验室，先后获批深空星表探测机构技术、空间光电探测与感知工信部重点实验室以及江苏省微小卫星态势感知与操控技术创新平台，不断强化航天领域关键核心技术攻关。南航深度参与了“天问”探火工程、“嫦娥”探月工程、载人航天工程、小行星探测等一系列重要航天型号任务的研制工作，超声电机、着陆缓冲机构设计、多机器人协同装配、飞行器运行监测及健康评估等一批技术成果在空间站建设、长征系列火箭研制、通信导航与卫星等工程中成功运用，为国家航天主战场提供了有力支撑，在航天领域先后获得国家级奖励2项、省部级各类成果奖15项，获评“探月工程嫦娥四号任务突出贡献单位”。

**锚定未来方向，深化对外开放合作。**南航坚持强化战略导向，以深度开放融合助力航天事业发展。深入推进南航六合国际创新港建设，努力打造以航天领域高技术产业为代表的孵化集聚地和

科技成果转化示范基地；不断强化与航天院所合作，与中国航天科技集团、中国航天科工集团在内的30余家大型央企签署战略合作协议，聘请一大批航天工程总师专家来校担任兼职教授和兼职博导，充分助力航天领域高水平人才培养和青年师资成长。在商业航天等新兴领域，学校与四川省眉山市人民政府签订战略合作协议，参与共建智能感知与大模型应用联合实验室，在创新平台、成果应用、人才引进等方面加强科教融合、产教融汇，着力拓展新领域新赛道、产出新动能新成果。学校坚持开放办学，深度融入共建“一带一路”教育行动，强化与航天领域世界名校的战略合作，与乌克兰国立航空航天大学成立“中乌班”，与俄罗斯萨马拉国立大学开展联合办学，聚力培养航天领域国际复合型人才。

面向未来，南航将以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深入学习贯彻党的二十大和党的二十届三中全会精神，坚决践行“为党育英才、为国铸重器”的初心使命，从学科建设、人才培养、科技创新、开放合作、文化引领等方面协同发力，为航天事业发展源源不断提供科技创新的源头活水，供给更多高水平拔尖创新人才，为航天强国建设贡献更多智慧力量。○

来源：新型工业化

## 作者简介



姜斌，南京航空航天大学党委副书记、校长，教授，博士生导师。教育部长江学者特聘教授，直升机动力学全国重点实验室主任，IEEE Fellow，国际系统与控制科学院院士，中国自动化学会会士，亚太人工智能学会会士。长期从事故障诊断和容错控制及其飞控和高铁应用领域研究工作，在智能故障诊断、故障预测、健康管理和容错控制等研究中取得国内外同行公认的研究成果，担任IEEE南京分部控制系统分会主席，亚太人工智能学会南京分会主席，IEEE Trans. on Cybernetics、IEEE Trans. on Neural Network and Learning Systems、IEEE Trans. on Industrial Informatics和《宇航学报》等14种国内外重要期刊副主编/编委。

# 赵春晖：科研是一场漫漫长跑，慢热型科研人如何寻找适合自己的节奏

## 塑料成型和血糖变化，有着一样的规律

2009年，控制理论与控制工程博士毕业的赵春晖，在香港科技大学攻读博士后时，正琢磨着进行职业生涯第一次大胆的领域切换：去美国加州大学圣塔芭芭拉分校研究糖尿病。

这个跨界在外人看来匪夷所思，但赵春晖知道，这并不会让她的研究偏离原有路径。

一切要从控制科学的特点讲起。

比起“控制”这个词在生活中的普遍应用，“控制科学”是干什么的，好像不那么容易讲清楚。2000多年前，李冰父子利用对流量的控制所修建的都江堰，就是世界上最早的自动控制装置之一。

这门所谓的万金油学科也有很多分支。目前已在浙江大学控制科学与工程学院担任教授多年的赵春晖打了个比方：她从事的过程监控研究，就像医生给人看病，通过各种各样的检查化验指标，结合自己的经验，对病情做出判断。赵春晖做研究时也需要

对要分析的对象或者系统做“望闻问切”，通过实时采集的数据做分析和判断，辅助系统平稳运行。

在赵春晖决定赴美研究糖尿病的时刻，这个关于看病的讲法似乎不完全是个比喻了。

赵春晖把那次机会形容为“无心栽花”的结果。美国的导师研究领域很多，她原本没有特别明确要去做什么。线上面试中，赵春晖讲起自己的“间歇过程”研究，她熟悉的对象是注塑机，就是一种把塑料原材料制作成各种成品的成型设备。这种机器的工作过程是典型的间歇过程：原料按照预先设定好的加工顺序转化为一个或一批产品，并通过过程循环往复获得更多同种产品的加工过程。

对面的导师敏锐发现，这个过程和血糖的周期性变化颇有共通之处。人一天中会吃早中晚三顿饭，可能会遵循一些活动或者运动的模式，每个工作日中血糖可能呈现出比较规律的变化模式，每一天都是一个广义上重复的过程，这让人一天中的血糖变化具备了“间歇过程”的特性。

这样，赵春晖跳入了一个全新的领域。自那以后，她还做过多次领域切换，比如她曾发现关于交通拥堵的预测恰如对几小时后血糖水平的预测，本质上是对持续数据的未来预测，这让她做了智能交通方向的探索。打开她的课题和专利列表，你会被五花八门的关键词震慑住，智能发电、卷烟生产、芯片封装、智慧电梯、“人工胰脏”……其实背后是赵春晖抓住核心问题的共性，在“控制”范围内，不断跳出舒适圈的努力。这些努力也带给她了一个又一个的肯定：国家基金委优秀青年基金获得者（2014年），中国自动化学会青年女科学家奖（2015年），国家基金委杰出青年基金获得者（2021年），浙江省青年科技英才奖（2021年），中国自动化学会会士（2023年），中国青年女科学家奖（2023年）……

## “不管未来是否明确，先赶紧准备起来”

表面看来，赵春晖的每一次研究领域转化都丝滑平稳，但困难迷茫并非不存在。

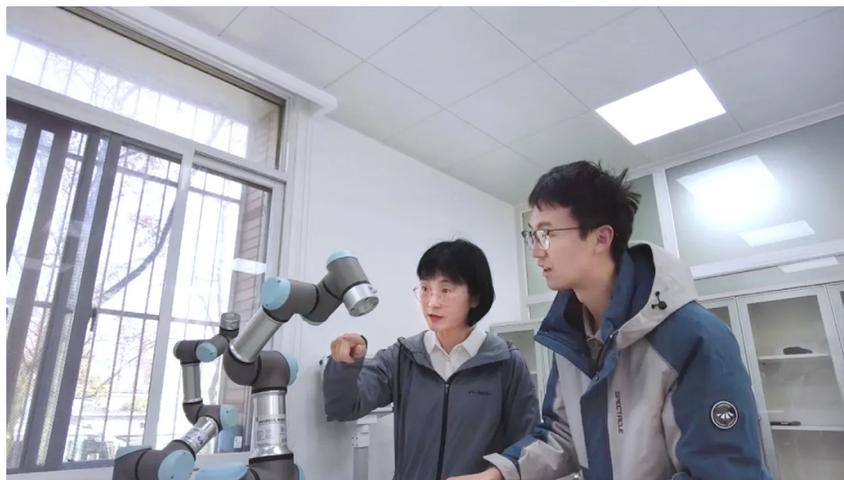


图1 在实验室调试

2010年去美国加州大学圣塔芭芭拉分校之前，“心里其实也在嘀咕，到底能不能转变过去？当时博士刚毕业一年多，还是有些忐忑的，觉得对象切换得好像有点儿大，会不会导致我什么都研究不出来。”

最让人挠头的是英文术语，糖尿病-diabetes、胰脏-pancreas、高血糖-hyperglycemia、低血糖-hypoglycemia……医学专业英文词汇数量多，拼写又复杂，医学生掌握起来尚且不容易，更别说她这个纯粹的外行。

“但是我最大的一个优点就是不管未来如何不明确，都会赶紧准备起来，虽然我进入状态慢，但是会慢慢深入做扎实。所以那段时间我每天都在看糖尿病领域的科研文档，做笔记。”

记笔记是赵春晖的强项，从高中整理难点、错题起，她就是“烂笔头”力量的绝对拥趸。博士

期间为了学习英文论文写作，赵春晖积累了很多厚厚的笔记。看到好句子，记下来；看到不同的表达方式，记下来；所有可能有用的素材，全都分门别类整理好。250个英文单词的摘要，她要剖开仔细分析，“人家为什么写得这么好？我们的摘要到底差在哪

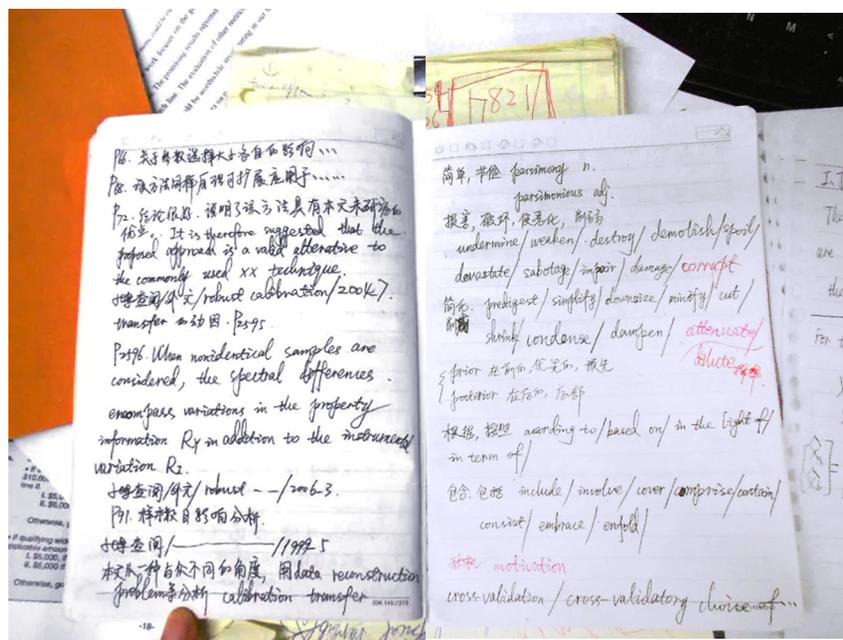


图2 赵春晖博士阶段做的英文论文写作笔记

儿？我把它分成几部分分析，这里开门见山点出了要研究的问题，那里点出来他的创新手段，最后给了个什么结论，让人有读的欲望”。

直到现在，赵春晖依然保持着记笔记的习惯，听报告或者开会的时候听到好的研究工作以及受到启发灵光一闪，立刻记在笔记上。“翻着纸质的笔记，我会有一种莫名的满足感。我的学生们更擅长做电子笔记，我现在还是无法适应，这可能是我的固执和坚持吧。”

因为这种近乎强迫症的努力，赵春晖很少让周围的人失望，她是很多老师口中“最好的学生”“拼命三娘”，老师们有好的机会时，都会想到她。也因此，经过当年香港博士后导师高福荣

老师推荐，赵春晖结束了在美国一年半的博后经历，入职了浙江大学。报到时正好是2012年元旦，那年春节，赵春晖也是在办公室度过的，入职第一年就成功申请拿到了国家自然科学基金面上项目。

在浙大，记笔记的技艺得到延展发挥。赵春晖个人主页的类目分类和信息呈现可能是最全的了，也像是一个贴满索引的、方便学生查阅的笔记本。除了“个人简介”“科研项目”“教学与课程”等基本分页外，还设有“本科生纳新通知”“我的学生”“算法开源”“News!!!”等个人风格十足、信息量巨大的个性信息分页。

29岁博士毕业，3年海外博士后经历，回国以特聘研究员身份入职浙大，35岁成为浙大教授，赵春晖始终觉得自己是属于“比较笨”的那类人，科研慢热型，

刚开始可能不如其他人反应迅捷，“不过我会专注去干一件事，投入时间和精力慢慢地深入思考，反复揣摩，最后可能就做得比别人要深一些”。

### “我们控制的学生， 要善于在工业领域发挥所长”

作为工科的一个分支，控制学科是一门综合性学科，既要研究人们利用信息技术实现有目的的行为的一般原理和方法，也要解决很多实际需求和问题，和企业打交道是典型特色，把学生派到企业、让学生直接和企业打交道也是常见做法。

但赵春晖觉得学生经验有限，很难明白企业的需求，“这个过程需要老师冲在前面”。她把自己视为桥梁，先用通俗易懂的语言沟通清楚企业的需求，再“翻译”成学生能够理解的学术问题，让他们明白企业需求的解决是属于

回归、分类等有监督学习问题还是其他分支。“这个凝练的过程，就是老师发挥衔接作用的地方。”

一开始，她自己理解企业的语言也并不顺利。刚回国时，双方互相听不懂对方在说什么，语言不在一个频道上。但是赵春晖慢慢摸到了技巧，关于看病的比喻再次帮上了忙：“他们不知道故障诊断研究领域中的学术术语，我就用医生看病来比拟，大数据建立的模型就类似一名优秀的医生脑子里存的丰富经验和知识，通过病人化验的多个指标进行综合分析判断；溯源分析就是寻找根本的发病原因；如果通过数据分析发现设备有问题，根据问题的严重性，分为继续带病运行和需要停产检修，我就讲是病人需要先观察定期复查还是已经严重到需要开刀动手术。”

在人工智能风潮猛烈的现在，各个领域都对其应用充满遐



图3 赵春晖与学生进行企业调研 | 图片由赵春晖提供



图4 赵春晖指导学生 | 图片由赵春晖提供

想，赵春晖则冷静地表示，工业领域的人工智能其实一直存在瓶颈。“很多人戏称深度学习是当代的‘炼金术’，尤其是应对工业对象这样复杂的系统，深度学习没有可靠的理论作为支撑，东试西试试，有时候可能歪打正着。工业智能的研究不能用这种思维，你要去看设备的运行机理和特性，分析发生了什么变化，为什么会导导致模型出问题。”她举了一个智能发电的例子。

7年前，赵春晖有一个和能源集团合作的项目，主攻燃煤发电设备监控的研究。当时，在燃煤发电领域国际国内已经有了很多智能监控软件，但是厂家拿过来用始终效果不佳，频繁出现误报漏报。

赵春晖带着学生去做现场调研，把主流的监控软件都分析了一遍。拆开算法的“黑箱”之后，他们找到不少问题。比如，一套国外引进的知名软件，默认电厂使用的煤以及发电负荷都是比较均质稳定的，但国内的实际情况是，燃烧的煤来自天南海北，内蒙古、山西、陕西……煤种差异很大，这就导致了“输入”端的不同。再加上，国内煤电会跟随用电负荷的变化，频繁改变发电机的出力，具有典型的深度频繁变负荷问题。国外监控软件是面向国外的情况研发的，没有考虑到中国的情况，直接照搬过来使用，就会出现频繁报警。

她原有关于间歇过程的研究基础再次发挥了作用。她发现不管发电设备运行状态如何呈现时间上无序的非平稳变化，本质上是受控制系统的影响随着负荷指令在有限的工作状态区间内变化。她找到了时间无序变化中的规律和条件驱动的本质，提出了“条件驱动多模式”的建模方案。虚警的问题解决了，这个项目也为赵春晖后续与其他电厂合作奠定了基础。

人工智能、大数据时下火热，越来越多的学生喜欢学习数据分析方法。尤其是在杭州这个互联网氛围浓厚的城市，学生不可避免地会被“大厂”的高回报吸引，但赵春晖觉得，“我们控制的学生”，在工业领域，才能更好地发挥自己的所长。她经常跟学生传达的一个观点是，控制学科的学生更擅长做专业化门槛较高的工业大数据分析。这是因为，互联网大数据可以不考虑为什么，但工业大数据一定要考虑为什么，且一定要弄清楚为什么；而这个为什么实际上依据的就是工业领域的知识。这种领域知识，控制的学生更容易理解和灵活运用到数据分析任务中。

赵春晖希望学生能了解自己的优势，脚踏实地。厚积薄发，在哪个行当都是如此。“所有的付出都会有回报，还没有显现的话，可能是还没有遇到机会，或者说回报可能还没有那么显著，没被

注意到。”

## 她是很多老师口中“最努力的学生”

赵春晖的经历，似乎是“努力就有回报”这个信条最好的诠释。

她出生在山东农村，是家中的姐姐，下面还有一个弟弟。那个年代，村民们对自己的孩子都有一种朴素的想法，“考出去，吃公家饭”。虽然家庭条件不好，但是需要为学习出钱出力时，父母从来没有犹豫。读高中时，赵春晖得到了父母用家里原本留着买家畜的钱换来的随身听。

“也不知道为什么，我从小要强的意识比较强烈”，从记事起，她什么都要做得好，学习也要好，每个阶段的目标都是当时目之所及的最高点。小学的时候，她的目标是考上师范类中专；到了初中，她的目标是上高中考大学；上了大学以后她又要读博，出国深造做博士后……“每次当你进入一个新的阶段，你在那个氛围中就自然而然会往更好的方向去努力去发展。大概是这么一种不断更新自己的目标不断成长的过程吧。”

这个上升的过程中当然不会只有个人的努力。在她看来，她的逻辑表达能力是在初中阶段奠定的，那时语文老师常常把她的作文当作范文，让她备受鼓励；



图5 赵春晖在湖州工控院办公室工作

博士生导师常常用一整个下午的时间与她讨论研究思想、修改论文，影响了她如今做科研、做导师的严谨风格；获得浙大的教职，则是源自博士后阶段导师的认可与推荐……

现在，轮到赵春晖自己变成那个帮助学生们上升的人，她努力影响着一批又一批学生。她有一个女博士生，毕业后跟着男友去了人生地不熟的地方开启新生活，赵春晖嘱咐她“一定要注意

人格的完整性和独立性，双方相互成就，而不能一味为另一半服务和迷失自我，要在工作中努力成长，独当一面”。

赵春晖也是这么做的。女性科学家好像总避免不了被问到生活和工作如何平衡的问题，赵春晖说，实话实说，一个人是没法实现二者的平衡的，在一个家庭中，必然要有人做出牺牲，主动多分担，才能实现另一个人的生活和工作“平衡”。赵春晖的另一半“也是博士，综合能力很强”，但他放弃了职业上升的机会，主动承担照顾家庭和孩子的主要责任，支持赵春晖的工作，她才能心无旁骛地投入科研中。○

来源：果壳公众号

## 作者简介



赵春晖，浙江大学求是特聘教授，国家杰青，中国青年女科学家奖获得者，中国自动化学会

会士、IET Fellow。面向工业应用领域的统计机器学习和数据挖掘研究，已在国际权威期刊上发表一作/通讯高水平SCI研究论文230多篇，1作出版3本专著，2本十四五规划大数据教材，授权发明专利60余项。担任国家自然科学基金委杰青项目负责人。主持国家自然科学基金、国家重点研发计划、省级项目和企业合作项目等科研项目20余项。曾获教育部自然科学一等奖、中国自动化学会自然科

学一等奖等多项省部级和学会奖励。获得中国青年女科学家奖、中国自动化学会会士、浙江省首届青年科技英才奖、中国自动化学会首届青年女科学家奖等十余项学术荣誉奖项。担任Journal of Process Control的Senior Editor、Control Engineering Practice、Neurocomputing等三本国际期刊和《自动化学报》、《控制与决策》等三本国内期刊的编委。

# Nature Physics 信息热力学经典综述： 通往信息的物理本质

文 / Juan M. R. Parrondo, Jordan M. Horowitz & Takahiro Sagawa

## 摘要

从本质上讲，热力学第二定律是概率性的，因为其表述需要对系统状态进行概率描述。这引发了关于第二定律客观性的问题：例如，它是否依赖于我们对系统的了解？一个多世纪以来，大量努力致力于将信息引入热力学，并评估操纵信息的熵和能量成本。最近，这一具有历史意义的理论探索在信息于小尺度下被操纵的实际情境中体现出来，例如分子与细胞生物学、人工纳米装置或量子计算。在本文中，我们介绍了一个基于随机热力学 (stochastic thermodynamics) 和涨落定理 (fluctuation theorems) 的信息热力学新理论框架，回顾了一些最新的实验结果，并概述了该领域的前沿发展状况。

## 引言

在热力学第二定律被发现后不久，詹姆斯·克拉克·麦克斯韦 (James Clerk Maxwell) 通过一个思想实验阐释了该定律的

概率特性，这个实验后来被称为麦克斯韦妖 (Maxwell's demon)。他提出，如果有一种聪明的生物——即妖——掌握了气体中粒子的速度和位置的信息，那么这个妖可以将高速、高能粒子从冷库 (cold reservoir) 转移到热库 (hot reservoir)，这表面上违反了热力学第二定律。

麦克斯韦妖首次揭示了熵与信息之间的关系——表明通过使用信息，可以放宽第二定律对系统与其环境之间能量交换施加的限制。然而，鲁道夫·克劳修斯 (Rudolf Clausius)、开尔文勋爵 (Lord Kelvin) 和马克斯·普朗克 (Max Planck) 对第二定律的表述中并没有提及到信息。调和这两种图景需要完成两个独立的任务。首先，我们必须完善第二定律，使其明确纳入信息的因素。其次，我们必须阐明信息的物理本质，使其以物理实体而非抽象概念的形式进入第二定律。这样，测量、擦除、复制和反馈等信息操作就可以被视为具有热力学代价的物理操作。

第一项任务由里奥·西拉德 (Léo Szilárd) 部分完成，他设计了一个简化版本的麦克斯韦妖。西拉德的妖利用一比特信息 (即一个无偏的“是/否”测量结果) 来实施一个循环过程，从温度为  $T$  的热库中以功的形式提取大小为  $kT \ln 2$  的能量，其中  $k$  为玻尔兹曼常数。这表明妖使用的信息与从单一热库中可提取功之间存在定量关系。

为解决第二项任务所做的努力多种多样。莱昂·布里渊安 (Léon Brillouin) 在某些特定情况下量化了测量的代价；马里安·斯莫鲁霍夫斯基 (Marian Smoluchowski) 和理查德·费曼 (Richard Feynman) 则证明，涨落现象会阻止自主妖对第二定律的表面违背。此外，罗尔夫·兰道尔 (Rolf Landauer)、查尔斯·贝内特 (Charles Bennett) 和奥利弗·彭罗斯 (Oliver Penrose) 证明，测量可以在零熵增的情况下实现——尽管测量擦除需要付出能量代价。贝内特随后研究了信息处理的若干热力学方

面, 包括压缩、算法复杂性、逻辑可逆性和校对过程。

尽管信息在热力学中的研究历史悠久, 过去十年间, 由于涨落定理和随机热力学的应用, 该领域取得了显著进展。这些研究为信息热力学提供了一个通用框架, 既澄清又推广了以往的研究结果。与这一理论进展并行的是技术的进步, 它带来了操控小型涨落系统的新实验技术。因此, 过去的思想实验, 如麦克斯韦妖和西拉德引擎 (Szilárd's engine), 现在正在实验室中得以实现, 使得对信息操作的一些基本预测得到了验证。

本文旨在补充现有综述文献, 呈现最近发展与实验的最新概述, 同时为分析信息系统热力学所使用的主要思想与理论工具提供基本介绍。在回顾西拉德引擎后, 我们将讨论如何将信息纳入第二定律的精确表述中, 随后继续分析记忆存储与信息处理的物理实现。

## 西拉德引擎

从历史上看, 有关信息热力学的许多研究都集中于 1929 年西拉德的循环引擎上。在西拉德的原始构想中, 引擎的工作物质是一箱体积为  $V_0$  的单分子气体 (图 1a), 浸没在温度为  $T$  的热库中, 并由外部实体 (external agent) 或“妖”进行操控。妖首

先快速地在箱体中间插入一个隔板, 将其分成两半, 从而启动一个循环。妖随后测量分子被困在隔板的哪一侧, 并执行一个从体积  $V_{0/2}$  到  $V_0$  的可逆膨胀, 从而提取功  $W_{\text{ext}}=kT\ln 2$ 。通过移除隔板, 循环完成。其净效应是从单一热库中提取能量并完成一个循环过程, 这表面上违反了普朗克对第二定律的表述。

西拉德引擎的一些方面乍看之下似乎很模糊: 分子不会施加平滑变化的压力, 而是产生随机强度的撞击, 这使得人们质疑在计算功时理想气体定律的适用性。测量的作用也不明确, 因为压力本身似乎可以揭示分子的位置。仔细的分析已澄清了这些问题。此外, 任何经历相空间分裂的系统都可以用作“工作物质” (working substance)。例如, 西拉德引擎最近已经在实验室中实现, 所使用的系统不是单分子气体, 而是胶体布朗粒子和单电子。归根结底, 使西拉德引擎能够运转的是信息与熵之间的一种基本关系, 这种关系专门适用于一类非平衡状态, 接下来我们将讨论这一点。

## 信息与第二定律

当我们获取关于具有微观状态  $x$  的物理系统的新信息时, 我们将统计状态从  $\rho(x)$  更新为  $\rho(x|m)$ , 其中  $m$  表示新的信

息, 例如测量结果或用于准备状态的方法。例如, 在西拉德引擎中, 测量后统计状态  $\rho(x|m)$  被限制在箱子的左半部分或右半部分。一般来说, 即使测量前的状态  $\rho(x)$  处于平衡状态, 更新后的状态  $\rho(x|m)$  仍然是非平衡的。信息将系统推离平衡, 而表面上无需付出能量代价。因此, 信息热力学可以被视为非平衡热力学的一个分支, 处理一类特殊的状态和过程。该理论的起点是对熵定义的扩展, 以适应这类特殊的非平衡状态。

香农熵 (Shannon entropy) 的物理意义。非平衡状态的熵定义多年来一直存在争议。尽管平衡态热力学熵在某些非平衡情境中得到了成功应用, 但对于一般非平衡状态, 如何定义具有物理意义的熵仍不明确。香农熵 (或量子情况下的冯·诺依曼熵) 已被广泛使用, 但在这些情况下, 它往往被宽泛地视为等同于热力学熵。然而, 最近随机热力学的发展严格表明, 在某些情境下, 香农熵具有明确的物理意义; 具体而言, 它决定了与一个或多个热库耦合的系统的非平衡过程的能量学特性。

在信息论中, 具有概率密度  $\rho(x)$  的随机变量  $X$  的香农熵定义为:  $H(X)=-\sum_x \rho(x)\ln \rho(x)$ 。当  $X$  表示物理系统的微观状态时, 我们可以将香农熵乘以玻尔兹曼

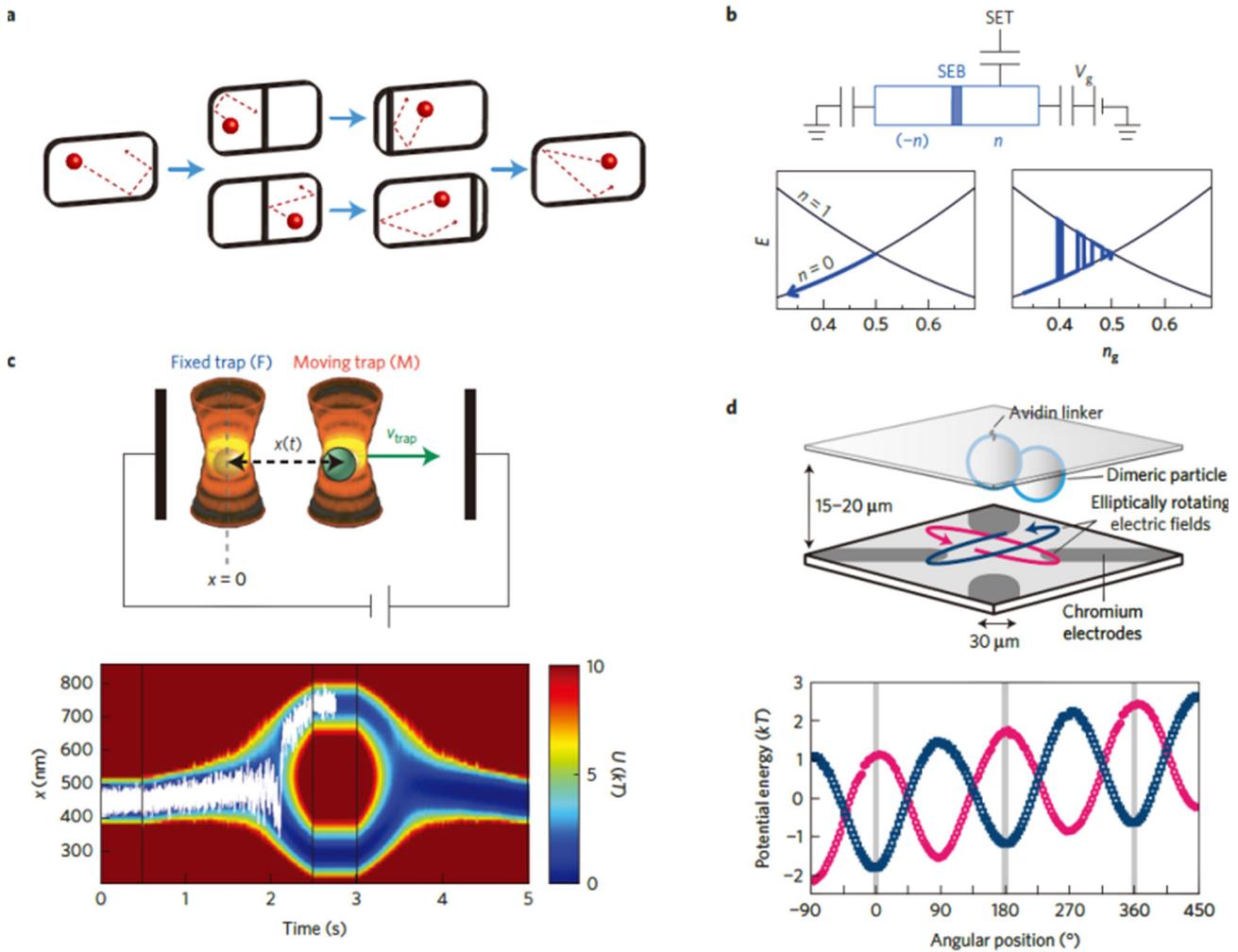


图1 西拉德引擎及近期的实验实现。a. 在原始的西拉德引擎中，隔板被插入包含单个分子的箱子中，箱子被温度为  $T$  的热库包围。箱子中含有分子的那一半被测量到后，隔板被移动，执行等温膨胀以提取功。b. 使用单电子盒 (single-electron box) (SEB) 进行的实验实现，由门电压  $V_g$  控制并通过单电子晶体管 (single-electron transistor, SET) 监测。上图显示了实验装置。下图展示了盒子的能级，其大小取决于电子数 ( $n=0, 1$ )，是归一化门电压  $n_g$  的函数。当电子数  $n$  被测量到时， $n_g$  被快速改变，能量下降 (左图)，然后缓慢返回初始值 (右图)。在这个过程中，由于  $n_g$  仅在缓慢变化时引起  $n$  的热激发，因此产生了净功输出。c. 使用胶体粒子 (colloidal particle) 和两个光学阱 (optical traps) 的实验实现。上图显示了实验装置：一个阱固定在位置  $x=0$ ，另一个则以速度  $v_{\text{trap}}$  水平移动。由两个电极产生的可控静电场使粒子偏向某个阱。下图显示了影响粒子的势阱的等高线图，该过程中，移动的阱被移动然后回到初始位置。粒子的轨迹以涨落的白线形式呈现。西拉德循环通过在过程的中间测量粒子所在哪个阱，并在过程的后半段偏置该阱来实现。d. 使用旋转胶体粒子 (rotating colloidal particle) 的实验实现。上图显示了实验装置，其中两个粒子附着在一块盖玻璃上。一个粒子被视为旋转布朗粒子，并由四个电极产生的电场控制。下图显示了有效势能的两种形状，它们是正弦势能和恒定扭矩的叠加。当粒子的位置被测量到处于跨越势能最小值后的上坡方向时，势能从一种形状切换到另一种形状。

常数，作为非平衡熵的候选表达式

$$S(\rho) = kH(x) = -k \sum_x \rho(x) \ln \rho(x) \quad (1)$$

我们将  $S(\rho)$  和  $H(X)$  都称为香农熵，因为它们本质上是用不同单位测量的相同量。然而，保留这

两个符号及其各自的具体依赖关系是有益的，它们分别是热力学和信息论中的标准表示。

对于经典平衡态  $\rho_0(x) = e^{-\beta H_0(x)} / Z_0$ ，香农熵与平衡熵相符，其中  $H_0(x)$  是哈密顿量， $\beta = 1/(kT)$  (其中  $T$  是温度)，而  $Z_0$  是配分函数。在这种情况下，我们

恢复了自由能  $F=E-TS$  的热力学关系，其中自由能  $F(\rho_0) = -kT \ln Z_0$ ，平均内能  $E = \langle H_0 \rangle_{\rho_0}$ ，以及香农熵  $S(\rho_0)$ 。我们可以进一步定义一个非平衡自由能，用于描述与热浴接触且哈密顿量为  $H_0$  的系统的一般统计状态

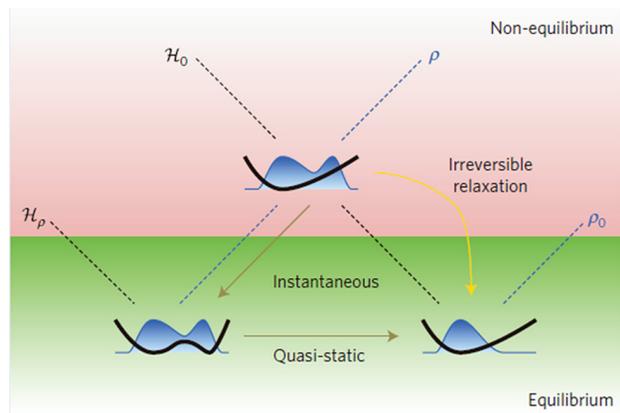
$$F(\rho; H_0) \equiv \langle H_0 \rangle_{\rho} - TS(\rho) \quad (2)$$

可以证明，在非平衡等温过程中的香农熵及其相关的非平衡自由能，与其在平衡态时对应的熵和自由能是类似的。在此，“等温”意味着系统与温度为  $T$  的热库接触，尽管系统本身可能没有明确的温度。如框 1 所示，平均而言，为了等温地将系统从一个任意状态驱动到另一个状态，所需的最小功只是两个状态之间非平衡自由能的差  $\Delta F$ 。相对于这一最小值的多余功是耗散的或不可逆的功， $W_{\text{diss}}$ 。

我们还可以将熵增量定义为系统中香农熵的增加，加上热库中热力学熵的增加（见框 1 和参考文献 23, 26–28）。

$$T\Delta S_{\text{tot}} = W_{\text{diss}} \equiv W - \Delta F \geq 0 \quad (3)$$

这是第二定律在非平衡态等温过程的推广，并为发展信息热力学提供了基本工具。



### 框 1. 非平衡自由能

一个简单的论证，如图所示，有助于阐明非平衡自由能的物理意义。该论证比较了两种等温过程

的能量特性，这两种过程将系统从非平衡状态  $\rho$  驱动到平衡状态  $\rho_0 = e^{-\beta H_0} / Z_0$ 。第一种是自发的、不可逆的弛豫过程，其中热量  $Q_{\text{relax}} = \langle H_0 \rangle_{\rho_0} - \langle H_0 \rangle_{\rho}$  从热库传递到系统，且不涉及功的产生。第二个过程由外部实体驱动，该外部实体瞬时地将哈密顿量从初始值  $H_0$  变化到  $H_0 \equiv -kT \ln \rho$ ，然后以准静态和等温的方式将哈密顿量恢复到  $H_0$  的初始值。完成这个过程所做的功  $W_{\text{driv}}$  是执行淬火 (quench) 所需的功  $\langle H_0 \rangle_{\rho} - \langle H_0 \rangle_{\rho_0}$ ，加上将哈密顿量可逆地恢复到初始值  $H_0$  的功，这可以表示为平衡自由能的差异  $F(\rho_0) - F(\rho)$ 。因此，

$$\begin{aligned} W_{\text{driv}} &= \langle H_0 \rangle_{\rho} - \langle H_0 \rangle_{\rho_0} + F(\rho_0) - F(\rho) \\ &= F(\rho_0) - F(\rho; H_0) \end{aligned}$$

可以证明，这个功是所有可能的等温过程驱动系统从  $\rho$  到  $\rho_0$  所需的最小功。换句话说， $-W_{\text{driv}}$  是从非平衡状态  $\rho$  中提取的最大功。因此，给定哈密顿量  $H_0$ ，非平衡自由能在平衡状态  $\rho_0$  时达到最小值。这意味着，对于任何统计状态  $\rho$ ，都有  $F(\rho; H_0) \geq F(\rho_0)$ 。这个过程在非平衡情况下起着与平衡热力学中可逆过程相同的作用。它在操作上是可逆的，也就是说，如果驱动过程在时间上反转，系统将沿着完全相同的统计状态序列反向行进，且能量特性—— $W_{\text{driv}}$  和  $Q_{\text{driv}}$ ——是相等且方向相反的。它还使提取的功最大化。

在这个可逆过程中，总熵增量  $\Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_{\text{sys}} + \Delta S_{\text{res}}$ ，定义为系统中香农熵变化  $\Delta S_{\text{sys}} = S(\rho_0) - S(\rho)$  和热库中熵变化  $\Delta S_{\text{res}} = -Q_{\text{driv}} / T$  的总和，其总和的值为零，从热库传递到系统的热量为  $Q_{\text{driv}} = \langle H_0 \rangle_{\rho_0} - \langle H_0 \rangle_{\rho} - W_{\text{driv}}$ 。

相比之下，不可逆的自发弛豫过程的熵增量为：

$$\begin{aligned} \Delta S_{\text{tot}} &= S(\rho_0) - S(\rho) + \frac{Q_{\text{relax}}}{T} \\ &= \frac{F(\rho_0) - F(\rho; H_0)}{T} \geq 0 \end{aligned}$$

换句话说，在不可逆过程中，熵增量为正，这意味着自由能的减少被浪费了，也就是说没有功被提取。

## 框 2. 互信息

在信息论中，两个随机变量  $U$  和  $V$  之间的互信息定义为：

$$I(U;V) = \sum_{u,v} \rho(u,v) \ln \frac{\rho(u,v)}{\rho(u)\rho(v)} = H(U) + H(V) - H(U,V)$$

互信息总是非负的、对称的，并且仅当  $U$  和  $V$  统计独立时才为零。当我们将其重新表达为以下形式时，它的意义变得显而易见：

$$I(U;V) = H(U) - H(U|V) = H(V) - H(V|U)$$

其中：

$$H(U|V) = -\sum_{u,v} \rho(v)\rho(u|v) \ln \rho(u|v)$$

是条件熵。回想一下， $H(U)$  衡量了我们对  $U$  的不确定性，而  $H(U|V)$  衡量了在已知  $V$  的条件下我们对  $U$  的不确定性。由此可知，互信息量化了在获知  $V$  时，我们对  $U$  的不确定性减少量，反之亦然。因此，我们可以宽泛地说，互信息是对相关性的一个衡量指标。一个重要的特殊情况是，当  $U$  明确决定  $V$  时（例如无误测量（error-free measurements）的情形），此时  $H(V|U) = 0$  且  $I(U;V) = H(V)$ 。

互信息（Mutual information）与第二定律。我们现在可以解决构建信息热力学的第一个任务：评估测量导致的非平衡自由能变化。当系统的统计状态从  $\rho(x)$  变为  $\rho(x|m)$  时，系统香农熵的变化  $S(\rho(x|m)) - S(\rho(x))$ ，在概率为  $p_m$  的所有可能结果的平均，可以写成：

$$\Delta S_{\text{meas}} = k(H(X|M) - H(X)) = -kI(X;M)$$

其中  $H$  是等式（1）中的香农熵， $I$  是系统微观状态  $X$  和测量结果  $M$  之间的互信息（见框 2）。

为了将这一观察结果转化为关于自由能的陈述，我们集中讨论那些不影响哈密顿量或系统微观状态的测量。结果是，测量不改变平均能量，而非平衡自由

能增加了：

$$\Delta F_{\text{meas}} = \sum_m p_m F(\rho(x|m); H) - F(\rho(x); H) = -T\Delta S_{\text{meas}} = kTI(X;M) \quad (4)$$

由于互信息是正值，测量（或信息获取）总是增加自由能，从而增加可等温提取的功。如方程（3）所示，这一增加必须伴随着功的产生。阐明这个功的来源是我们的第二个任务，并将在下一节中讨论。现在，我们的讨论仅限于测量对系统和周围环境之间能量传递的影响。

我们现在可以很容易地看出如何修正第二定律以使信息变得清楚明白。具体来说，考虑一个由一组外部参数  $\lambda$  表征的系统，这些参数由“妖”进行调节。起初，这些参数固定为  $\lambda=A$ ，系统处于温度为  $T$  的正则平衡态。随后，“妖”在时间间隔  $[0, \tau]$  内改变外部参数，并在某个中间时刻  $t_{\text{ms}}$  进行测量，利用测量得到的信息设计一个外部参数协议（protocol） $\lambda^m(t)$ ，其仅依赖于测量结果  $m$  且在  $t \geq t_{\text{ms}}$  时生效。注意到测量会引起自由能的增加（方程（4）），我们可以应用方程（3）来得到反馈过程的第二定律：

$$W - \Delta F \geq -kTI(X(t_{\text{ms}}); M) \quad (5)$$

其中， $W$  是对系统所做的平均功， $\Delta F$  是非平衡自由能的平均变化。注意，功和自由能的变化都依赖于测量结果  $M$ ，并且方程（5）仅对得到测量结果  $M$  后的平均值有效。在一个循环过程中，若  $\lambda^m(\tau) = \lambda^m(0) = A$  对所有  $m$  都成立，并且系统被允许弛豫回到平衡态，则  $\Delta F = 0$ ，并且  $W \geq -kTI(X(t_{\text{ms}}); M)$ 。这意味着我们可以提取一部分功，平均后，其量与测量中获得的信息成正比。对于无误差的测量， $M$  的值由  $X$  直接决定，即互信息就等于测量的香农熵  $I(X(t_{\text{ms}}); M) = H(M)$ （见框 2）。值得注意的是，西拉德引擎可以达到这一极限，因为  $M$  代表着左或右，概率均为  $1/2$ ，因此  $H(M) = \ln 2$ 。

涨落定理：包含信息的热力学第二定律（方程（5））对系统的平均行为设定了限制。然而，如果将

涨落考虑在内，这个不等式可以转化为等式。假设重复依赖于测量的协议  $\lambda^m(t)$  多次，每次都从平衡态初始化，进行测量并执行反馈。热涨落会使系统每次在其相空间中描绘出不同的微观轨迹  $\gamma = \{x(t)\}$ 。我们将轨迹和结果  $m$  的联合概率表示为  $P(r, m)$ 。这种情景被称为正向（反馈）过程。

涨落定理将正向过程与其时间反向过程进行比较，后者是通过反转驱动协议（driving protocol）而得到的。识别这种反向过程的难点在于如何选择反向协议，因为协议  $\lambda^m(t)$  在  $t_{ms}$  之后依赖于测量结果  $m$ 。文献中提出的解决方案在操作上是可行的，并提供了一个有用的描述功和信息涨落的定理。其核心思想是从正向过程中结果的概率密度  $p_m$  中随机选择  $m$ ，然后简单地运行对应协议的完全反向过程  $\tilde{\lambda}^m(t) = \lambda^m(\tau - t)$ ，无需进行测量。

详细的涨落定理将  $P(r, m)$  与反向过程中观察到反向轨迹  $\tilde{\gamma} = \{x^*(\tau - t)\}$  的概率  $\tilde{P}(\tilde{\gamma}, m)$  进行比较，其中 \* 表示动量反向：

$$\frac{P = (\gamma, m)}{\tilde{P} = (\tilde{\gamma}, m)} = e^{\beta(w - \Delta F) + I} \quad (6)$$

这里， $w$  是沿轨迹  $\gamma$  对系统所做的随机功，同时引入了一个依赖于轨迹的互信息：

$$I(\gamma, m) = \ln \frac{p(m | x(t_{ms}))}{p_m}$$

其在  $\gamma$  和  $m$  下的平均后结果为互信息，即  $\langle I \rangle = I(X(t_{ms}); M)$ （见框 2）。

方程（6）中的详细涨落定理将底层微观动力学的基本时间反演对称性与热力学联系起来。基于这一关系，可以容易地推导出带有反馈的各种涨落定理。例如，积分涨落定理为：

$$\langle e^{-\beta(w - \Delta F) - I} \rangle = 1 \quad (7)$$

这一结果已通过由单电子组成的西拉德引擎的实验验证。将詹森不等式（Jensen's inequality）应用于方程（7），即可得到不等式（5）。

方程（6）表明，如果反馈过程与其反向过程不可区分——换句话说，如果过程是可逆的，那么不等式（5）可以在单个轨迹层面上达到极限。这一观察结果提供了一种通用方法，用于设计最优的反馈协议：通过找到在反向运行时看起来像反馈过程的过程。特别要提到的是，反向过程必须在测量后准备好正确的相应状态。如果能够找到这样的反向过程，通过反转它，就可以得到最优反馈协议。这种制备方法已被用于设计多粒子西拉德引擎的最优协议。其中一个版本的制备方法类似于框 1 中描述的最优功协议，其他可逆协议则被用于可反馈控制谐振子模型中。

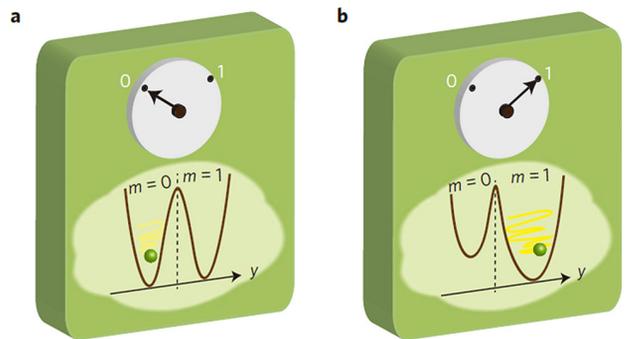


图 2 一个存储器的玩具模型。一个布朗粒子可以被稳定的囚禁在位置坐标为  $y$  的双势阱的左阱或右阱中，分别表示一个比特的介观信息态  $m=0$  和  $m=1$ 。这个存储器可以是对称的（a）或不对称的（b）。

### 信息的物理本质

存储与兰道尔原理：乍一看，信息是一个抽象的量，与其物理实现方式无关。然而，当我们进行测量时，结果必须记录在某种物理系统中，无论是写在纸上还是存储在计算机的硬盘中。这一观点最早由西拉德提出，但兰道尔用他的名言将其表达得最为简洁：“信息是物理的。”

为了构建一个存储器，一个系统必须具有多个可区分的“信息状态”来存储信息。为了实现可靠且不衰退的信息存储，这些状态必须具有较长的寿命，对环境噪声具有鲁棒性，并在相同的外部约束下得以实现。从统计力学的角度来看，这些要求意味着一个具

有微观状态  $y$  的系统若要作为存储器，则其哈密顿量  $H(y)$  下必须具有多个不同的亚稳态。换句话说，各态遍历性 (ergodicity) 必须是破缺的——或者在存储可靠的时间尺度上是有效破缺的。在实践中，这意味着其相空间  $\Gamma$  被分割为多个遍历区域  $\{\Gamma_m\}$ ，每个区域对应一个信息状态  $m$ 。这种遍历性的丧失可以通过集体坐标中的相变来实现，例如在标准磁存储中，小型铁磁畴的磁化；或者通过提高分隔微观自由度的高自由能屏障来实现，例如在单电子存储或 DNA 碱基配对中。

存储器的统计状态由处于其遍历区域之一的概率  $p_m$  表征。进一步假设存储器在局部平衡态下运行，那么在给定信息状态  $m$  的条件下，该概率是相空间中与  $m$  相配的区域  $\Gamma_m$  上的正则分布。该分布具有平均能量  $E_m$  和香农熵  $S_m$ 。存储  $M$  的非平衡自由能可以用这些量表示为：

$$F(M) = \langle H \rangle_\rho - TS(\rho) = \sum_m p_m F_m - kTH(M) \quad (8)$$

其中， $F_m = E_m - TS_m$  是相应状态的自由能。这里存储器的熵  $S(\rho)$  被分解为各个信息态中的香农熵， $H(M) = -\sum_m p_m \ln p_m$ ，和他们各自内部熵  $S_m$  的平均值。

这种装置的一个直观示例是图 2 中描述的单比特存储器玩具模型。存储器由一个布朗粒子和一个双势阱组成。当势垒远高于热运动能量时，粒子将在任一势阱中停留较长时间。因此，粒子位于左侧或右侧势阱可以分别作为比特的稳定信息状态“0”和“1”。图 2a 中的对称势使得  $F_0 = F_1$ 。另一种情况是图 2b 中的不对称势，此时  $F_0 \neq F_1$ ，两个势阱的平均能量和相空间体积不同。

现在我们假设，在对存储器进行任何操作后，其过程始终以相同的初始哈密顿量  $H(y)$  结束。在这种情况下，唯一相关的状态是信息状态，并且操作存储器及其存储信息的能量学特征应该仅用术语  $p_m$  来表达。

特别是，将存储器的统计状态从分布为  $p_m$  的  $M$  改变为分布为  $p'_m$  的  $M'$  所需的平均功，可以根据第二定律 (3) 表示为：

$$W \geq \Delta F \equiv F(M') - F(M) \quad (9)$$

对于对称的存储器，根据方程 (8)，这仅与信息内容的变化有关，即  $W \geq kT (H(M) - H(M'))$ 。

一个著名的特殊情况是兰道尔原理，它限制了在对称存储器中重置 (或擦除) 一个随机比特所需释放的热量。重置存储是指，无论初始条件如何，所有信息状态  $m$  都被驱动到一个预选的标准状态，例如  $m=0$ ，即  $p'_0=1$ ，而所有其他的  $p'_m=0$ 。对于对称的存储器，根据方程 (9)，执行这一“归零”操作所需的最小功为  $W_{\text{reset}} \geq kTH(M)$ ，因为  $H(M')=0$ 。对于一个随机比特， $p_0=p_1=1/2$ ，我们得到了兰道尔的原始限制，该限制已通过图 2 中玩具模型存储器的实验实现得到了验证。对于不对称存储器， $\Delta F_{\text{reset}}$  不一定等于  $-kTH(M)$ ，广义兰道尔原理为：

$$W_{\text{reset}} \geq \Delta F_{\text{reset}} \quad (10)$$

当重置过程在热力学上是可逆时，等号成立。这并不与重置的逻辑不可逆性相矛盾，后者意味着信息状态的熵  $H(M)$  减少。对于有限时间内的擦除操作，当无法达到方程 (10) 的极限时，一些模型研究在阐明效率权衡方面取得了成效。同样，可以使用积分涨落定理在轨迹层面上分析这一限制。

与“归零”相反的过程是通过增加存储器的无序性来提取功。例如，一个具有低香农熵的  $N$ -比特对称存储器可以被置于一个新的高熵状态  $M'$ ，从而提取功的量为  $kT (H(M') - H(M))$ 。这种将有序存储器用作“燃料”的方式最初由 Bennett 提出，但最近被 Mandal 和 Jarzynski 通过一个显式模型实现。这一进展推动了针对这类有序存储器的新理论框架的建立，这些存储器现在被称为信息库，与热库或化学库等其他热力学储库享有平等的地位。

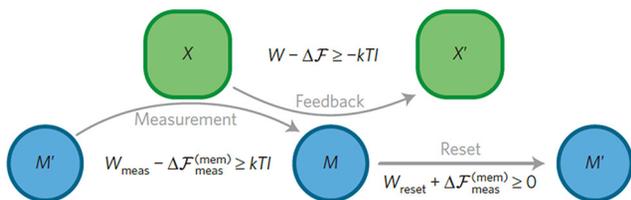


图3 测量、反馈和重置的示意图。测量是一种将存储器从  $M' \rightarrow M$  改变, 获取关于系统  $X$  的信息  $I$  的热力学过程。在反馈过程中, 系统在存储器固定的情况下做  $X \rightarrow X'$  演化, 利用关联来提取功  $-W$ 。

最后, 存储器通过与  $X$  无关的协议重置为初始状态  $M'$ 。

## 测量的代价

我们现在讨论信息热力学的第二个任务, 即理解第二定律中互信息的起源 (方程 5)。为此, 我们将研究的系统  $X$  和一个存储器  $XM$  作为一个联合超系统  $X$ , 并分析其在测量和反馈两个热力学过程中的能量学, 如图 3 所示。进一步的简化假设是, 存储器和系统仅在执行测量和反馈操作时进行相互作用——否则, 系统的总哈密顿量为  $H(x, y) = H_{\text{sys}}(x) + H_{\text{mem}}(y)$ 。利用互信息的定义 (见框 2), 当没有交互能量时, 复合系统的非平衡自由能 (方程 8) 可以简单地表示为:

$$F(XM) = F(X) + F(M) + kTI(x; M) \quad (11)$$

从这个方程中可以轻松获得测量和反馈的能量学特征。

第一步是在固定  $X$  的情况下, 进行一次依赖于  $X$  的测量, 并对其存储器进行演化。因此, 系统的非平衡自由能不会受到影响, 但测量会在两个系统之间建立关联, 从而产生信息。为了与前面章节的符号保持一致, 我们分别称测量前后存储器的状态为  $M'$  和  $M$ , 其中  $p_m$  是结果  $M$  的分布。如果系统和存储器在测量前后没有相互作用, 我们可以应用方程 (11), 并得到联合系统在测量过程中的非平衡自由能变化:

$$\Delta F_{\text{meas}}^{(\text{tot})} = \Delta F_{\text{meas}}^{(\text{mem})} + kTI(X; M) \quad (12)$$

其中,  $\Delta F_{\text{meas}}^{(\text{mem})}$  是存储器自由能的变化。方程 (3) 中的第二定律表明, 方程 (12) 给出的自由能增加需要做功:

$$W_{\text{meas}} \geq \Delta F_{\text{meas}}^{(\text{mem})} + kTI(X, M) \quad (13)$$

在一个具有对称存储器且无误差测量的特殊情况下,  $-\Delta F_{\text{meas}}^{(\text{mem})} = kT\Delta H(M) = kTI(X; M)$ , 因此有可能在执行测量时不做功, 即  $W_{\text{meas}} \geq 0$ 。

在  $X$  和  $M$  建立了关联后, 我们现在可以通过反馈从系统中提取存储在信息中的自由能作为功。具体来说, 我们以依赖于存储器的方式驱动系统, 同时保持存储器固定。假设反馈后不再存在任何剩余关联, 根据方程 (11), 非平衡自由能的变化为:

$$\Delta F_{\text{fb}}^{(\text{tot})} = \Delta F - kTI(X; M) \quad (14)$$

其中,  $\Delta F$  是系统自由能变化对测量结果  $M$  取平均值后得到的结果, 与方程 (5) 相同。最后, 应用第二定律 (方程 3) 到方程 (14), 我们可以得到反馈过程中平均功  $W$  的方程 (5)。

归根结底, 在反馈过程中用于提取功的信息, 是通过存储器在测量的过程中提供的——这意味着信息并非免费的。如果我们从整个测量 - 反馈循环的角度来看功和自由能, 这一点会变得显而易见。将两个不等式 (5) 和 (13) 相加可得:

$$\Delta W_{\text{meas}} + W \geq \Delta F_{\text{meas}}^{(\text{mem})} + \Delta F$$

互信息被抵消了。从这个全局视角来看, 我们只是利用功将自由能添加到存储器中, 而这些自由能又被系统取出。

现在, 让我们回忆一下, 熵增是由联合系统的功与非平衡自由能变化之差给出。因此, 方程 (13) 和 (5) 中的不等式等价于熵增非负这一事实。在这个意义上, 麦克斯韦妖在分别应用于测量和反馈过程时, 与第二定律是相符的。此外, 如果方程 (13) 和 (5) 中的等号分别成立, 则测量和反馈过程在热力学上是可逆的。这种可逆的测量和反馈协议通过一个信息引擎模型得到了明确的验证。

仅这一论证就充分阐明了为什么麦克斯韦妖不违背第二定律。然而, 我们通常希望在反馈之后将存储

器重置回其初始状态  $M$  (图 3), 以便能够在另一个反馈循环中再次使用。重置的代价由广义兰道尔原理 (方程 10) 给出, 其中  $\Delta F_{\text{reset}}^{(\text{mem})} = -\Delta F_{\text{meas}}^{(\text{mem})}$ 。因此, 操作存储器 (即进行测量和重置) 的功为:

$$W_{\text{meas}} + W_{\text{reset}} \geq kTI(X; M)$$

这表明处理信息所需的基本功仅由互信息决定, 并且与存储器的结构无关。这个表达式总结了为调和西拉德引擎与第二定律所提出的主要解决方案: 能量的消耗可以表现在测量过程中或存储器的还原过程中, 这取决于循环的设计。

### 动态信息流

到目前为止, 我们已经讨论了系统和具有稳定信息状态的存储器之间的相互作用, 并看到起作用的是互信息。然而, 任何一对关联系统都可以共享互信息, 即使其中一个并不是稳定的存储器。在这种情况下, 它们的动态演化不仅会导致能量在它们之间流动, 还会导致信息的流动。我们可以通过将两个交互系统  $X$  和  $Y$  的第二定律  $\dot{S}_{\text{tot}}^{XY} = \dot{S}_{\text{tot}}^X + \dot{S}_{\text{tot}}^Y$  分解为  $X$  的熵增  $\dot{S}_{\text{tot}}^X$  和  $Y$  的熵增  $\dot{S}_{\text{tot}}^Y$  来精确定义这一概念, 如下所示:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{tot}}^X &= \dot{S}(\rho(x)) + \dot{S}_{\text{res}}^X - k\dot{I}^X \geq 0 \\ \dot{S}_{\text{tot}}^Y &= \dot{S}(\rho(y)) + \dot{S}_{\text{res}}^Y - k\dot{I}^Y \geq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $\dot{S}_{\text{res}}^X$  和  $\dot{S}_{\text{res}}^Y$  是每个子系统环境储库中熵变化的速率。对于等温过程, 它们是热量项  $\dot{S}_{\text{res}}^X = -\dot{Q}^X / T$ 。新量  $\dot{I}^X$  和  $\dot{I}^Y$  分别是由于  $X$  和  $Y$  中的涨落导致的互信息  $I(X; Y)$  的变化速率。这些项代表了两个系统之间的信息动态流动, 方程 (15) 描述了它们对热力学的影响。

通过这些不等式应用于逐步的测量和反馈协议 (如上一节中讨论的协议), 我们可以得出等效的公式。从这个角度来看, 可以将这种对第二定律的分解视为麦克斯韦妖的动态版本。然而, 我们还可以分析其他更具动态性的情景, 例如感知或监测未知的涨落信号。

### 展望、扩展与前景

我们已经对与单个热库接触的系统中的存储器、反馈过程和信息流的热力学进行了基本介绍。我们在此勾勒的框架也已应用于许多更普遍的情景。对于重复的测量和反馈, 许多分析已在平均熵减少和使用涨落定理方面有所讨论。在这些分析中, 起作用的是互信息的广义形式——转移熵, 它仅捕获每次测量中获得的新信息。在此, 热力学成本取决于我们是选择将每次新测量记录在同一存储器中, 还是记录在不同的存储器中, 从而允许具有多个交互系统的更复杂的动力学。除了等温控制之外, 还推导出了适用于打破了细致平衡的反馈系统的涨落定理。

关于量子测量和反馈的热力学也有大量研究, 包括量子西拉德引擎。在这方面, 人们已经得到了第二定律和用于测量与反馈的涨落定理的量子广义形式, 从而能够在此场景下对纠缠和量子不和谐进行一致的描述。

我们在此主要关注麦克斯韦妖的信息方面。然而, 麦克斯韦妖的原始表述也可以被视为是一种无需明显能量消耗即可进行状态间转变的系统。这种方法最初由 Smoluchowski 和 Feynman 探索, 他们考虑了一种能够通过棘轮机制校正热涨落的自主麦克斯韦妖的可能性。然而, 这种实现方式仅在系统可以被保持在非平衡状态时才有效, 例如存在两个不同的热浴或高自由能化学储库。在 Feynman 的分析之后的数年间, 这些构造——现在被称为非平衡布朗棘轮——已作为一种新型的运输机制被广泛研究。在某些情况下, 转变中的偏向性可以用信息的术语来解释, 例如在化学开关中, 其转变依赖于分子复合物中轮烷环的位置。最近, 利用随机热力学分析了一个打破细致平衡的通用麦克斯韦妖。然而, 有趣的是, 转变的简单偏向性不足以决定系统的热力学。我们已经表明, 相同的偏向性和相同的动力学可以由化学燃料或麦克斯韦妖引发, 但其热力学却截然不同。值得注意的是,

这个例子中的妖能够以比化学燃料少得多的熵增来实现相同的偏差。

信息与热力学之间的相互作用体现在超越反馈引擎和存储器的现象中。生物系统在分子或细胞层面上执行多种信息处理，其涨落和能量传递的量级与热能相当。一个例子是将信息从 DNA 复制到新 DNA（复制）或 RNA（转录），这一过程通常称为共聚反应。共聚反应展示了一些有趣的热力学现象，例如与过程精确性相关的熵力的出现。此外，在某些热力学代价下，这种精确性可以通过校对得以提高，例如在众多动力学的校对机制中所体现的

那样，这些机制展现了精确性与耗散之间的权衡，并具有生物学意义。例如，这种权衡的优化可能决定了转录的动力学。另一个与信息可能相关的生物学例子是在感知和预测中的能量特性。生物体必须感知并适应其环境，最近的研究表明，这种感知适应过程需要能量来获取关于环境的信息。另一方面，环境适应的鲁棒性需要最小的信息量。一旦生物体获得了关于环境的信息，准确预测其未来涨落可能至关重要，而完成这一任务的最小功由预测信息决定。

即使到现在，关于信息与热力学的一些基本问题仍在争论

中，例如热力学和心理学时间之矢的一致性问题。我们相信，我们距离完全理解信息的物理本质还有若干步的距离。第一，有必要统一现有的理论框架，并研究适用于一般过程的综合理论。第二，我们需要验证诸如共聚反应和校对等其他现象是否可以在这一统一框架内进行分析。第三，我们必须回到麦克斯韦对第二定律的原始关注点，并尝试在一个通用的信息物理理论的框架下解决统计力学中的基本问题，例如宏观世界的出现以及熵的主观性问题。○

来源：Nature Physics

通

知

## 2025 “CAA 云讲座” 等您来分享!

2025 “CAA 云讲座” 报告人火热征集中!

新年伊始，万象更新。

“CAA 云讲座” 精彩继续，现征集线上报告人，欢迎广大科技工作者踊跃报名，让我们在云端相会!

1. 学会秘书处指派专人对接报告人，提供直播平台，并负责直播活动宣传推广；
2. 报告人需自行准备报告内容和直播用的设备（笔记本电脑即可）；
3. 报告内容需为当前科技前沿热点，主题包括但不限于：机器人、智能车、智能制造、工业互联网、区块链、深度学习、人工智能、网络与大数据、智慧城市、数字孪生技术、模式识别与机器感知、传感器与智能仪表、机器人与智能系统、生物信息学、具身智能……
4. 报告时长建议为 60 分钟左右，可根据报告内容进行适当调整。

详情请查看：<https://www.caa.org.cn/article/192/5115.html>

# 人类智能如何从大脑中涌现？ 大脑精细模拟重塑 NeuroAI 范式

文 / 杜凯

## 1 背景

### 1.1 GPT 的启发

在人工智能领域，构建能模拟甚至超越人类智能的系统一直是科技发展的终极目标。随着技术的进步，我们已经开始尝试探索意识的生命基础——这不仅是科技的挑战，更是对人类文明的一次深刻洞察。

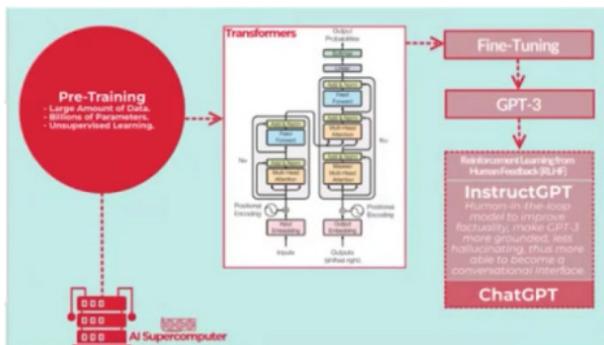
最新的进展中，特别是在大型语言模型如 GPT-3 的开发上，我们看到了人工智能如何接近这

一挑战。GPT-3 模型拥有超过 1750 亿个参数，并且在大规模的数据集上进行了预训练，在多种自然语言处理任务上展示了类似人类的智能水平。这些成果揭示了一个关键的科学启发：“more is different”。当系统的规模达到一定程度时，它的行为不仅仅是组件行为的简单叠加，而是能够自发地涌现全新的性质，表现出质的不同。

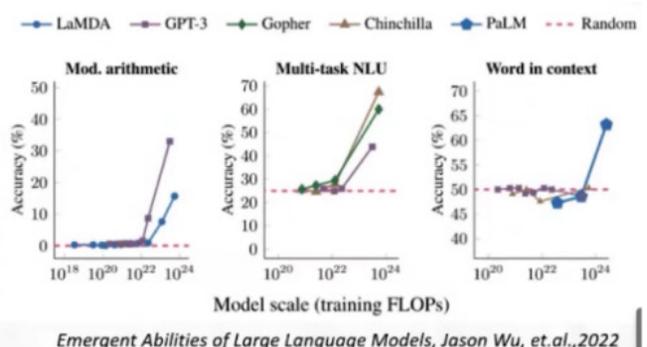
生成式 AI 的另一个关键启发是规模法则。规模法则描述了模

型性能（如语言理解和生成能力）随着模型大小（即参数数量）的增加而提高，性能可以通过这一关系进行预测。这是因为更大的模型可以从更多的数据中学习更复杂的模式，从而在各种任务上表现更好。

在人脑和意识的层面，规模法则是否在人脑中起作用？智能是否是涌现的？能否通过这种方式模拟人类的意识？这些问题需要进一步思考和验证。



➤ >175 billion parameters, tremendous amount of training data  
Achieving human-level intelligence



The intelligence is **NOT pre-defined**, but appears to be spontaneously **“emerged”** from the network with sufficient large size.

图1 大语言模型中的涌现能力。| 来源: Emergent Abilities of Large Language Models [2022] Jason Wei Yi Tay William Fedus et al.

## Inspiration from Generative AI: Scaling Law

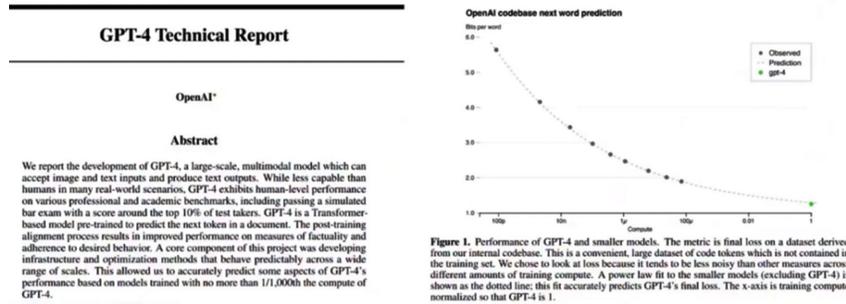


图2 生成式 AI 的规模法则

### 1.2 进化中的启示

从进化的角度来看，随着生物体的进化，神经系统的规模和

复杂性逐步增加，不仅体现在整个神经网络的规模扩展上，也体现在单个神经元的结构和功能复

## Single Neuron Complexity

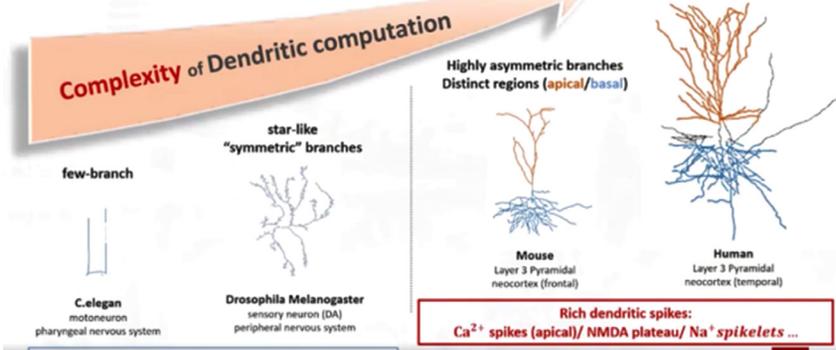


图3 从进化中得到的启示：单个神经元复杂度的变化

## Hints from Evolution: Wiring

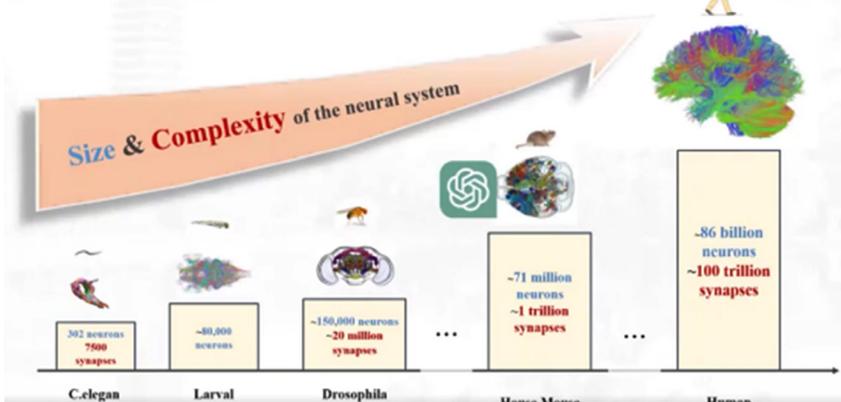


图4 从进化中得到的启示：网络规模变化

杂性的演变上。对于理解人类意识的产生以及如何人工智能中模拟类似的智能，这些进化的启示具有重要的参考价值。复杂的神经网络结构和单个神经元的复杂计算能力可能是高级智能和意识形成的重要基础。

### 1.3 大脑建模的两条路径

从神经元的复杂性角度出发，大脑建模有两条不同的路径：人工神经网络路径和真实神经元模拟路径。

#### 人工神经网络路径

人工神经网络路径的核心理念是将神经元简化为一个点，用简单的数学模型来模拟神经元的输入输出行为，然后通过大量的连接形成一个神经网络。这种方法抽象了神经元的复杂结构，只保留其核心的计算功能。早期的麦卡洛克-皮茨神经元、感知器、以及现代的深度神经网络（如 LSTM、Transformer 等）都属于这一路径。

#### 真实神经元模拟路径

真实神经元模拟路径是采取一种还原论的方法，将大脑中的神经元精细地模拟，保留每一个神经元的物理和生物特性，力图再现生物神经元的真实行为。例如，H-H 模型（Hodgkin-Huxley Model）和浦肯野细胞的多仓室模型（Multi-Compartmental Model of a Purkinje Cell）都是试图从生物学角度精确模拟神

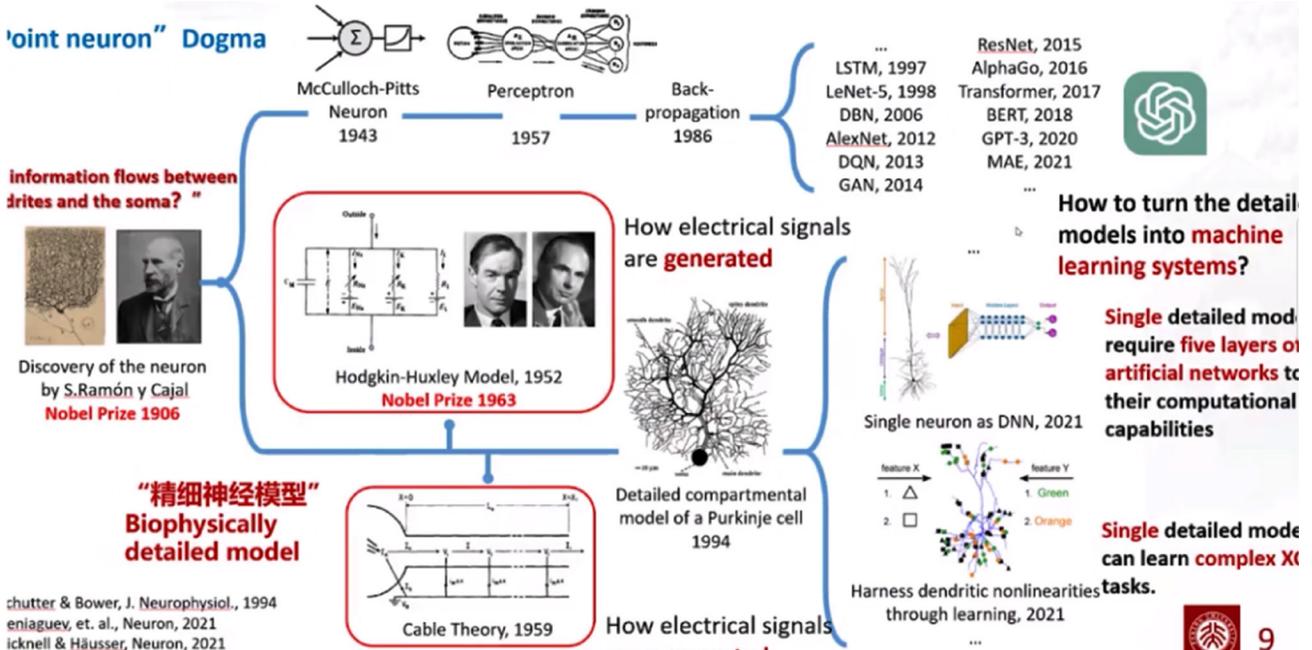


图5 大脑建模的两条路径 | An active membrane model of the cerebellar Purkinje cell II. Simulation of synaptic responses. E. Schutter, J. Bower

神经元内部的电信号生成和传递的模型。这些模型详细描述了神经元各部分（如树突、轴突、胞体）的电特性和化学行为。精细的生物物理神经元模型不仅仅是对神经元的生物学再现，它们实际上可以直接作为一个机器学习系统。这些模型中蕴含的复杂非线性动力学和信号处理能力，使其能够执行复杂的计算任务。

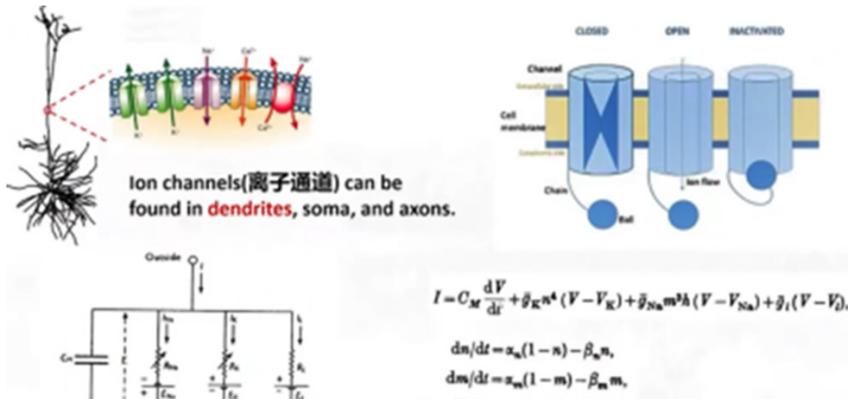


图6 H-H模型

## 2 精细模型的理论基础

### 2.1 大脑精细模型本质上是基于偏微分方程的数学系统

H-H 模型由霍奇金和赫胥黎在 1952 年提出，主要用于描述神经元的电信号生成。这个模型通过一组微分方程计算膜电位的变化，解释了神经元中的离子通道

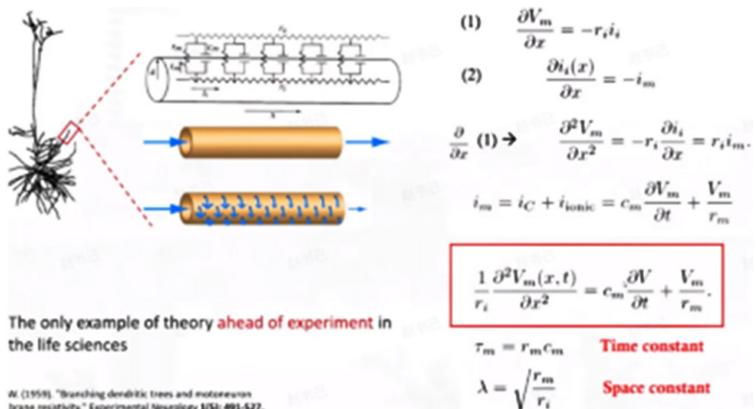


图7 电缆理论 (Cable theory)

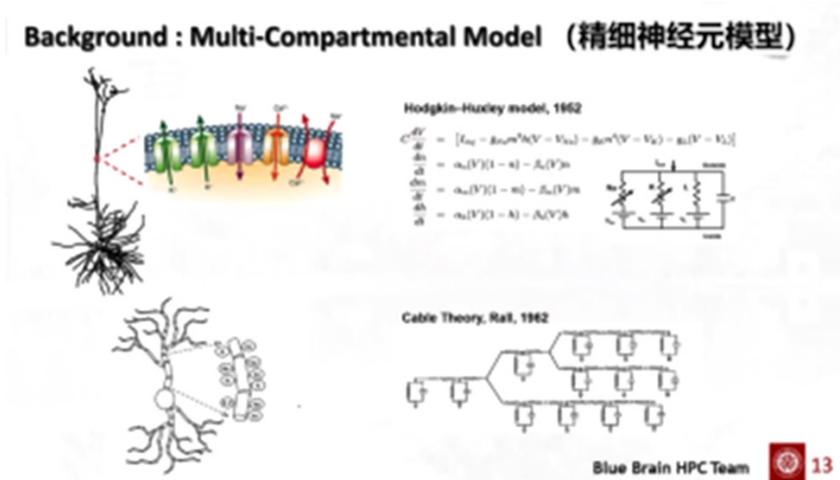


图8 精细神经元模型 | A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerves [1952] A. L. Hodgkin & A. Huxley. Branching dendritic trees and motoneuron membrane resistivity. [1959] W. Rall

(如钠通道和钾通道)如何通过控制电流流动来产生动作电位。电缆理论(cable theory)由Rall在1959年提出,基于偏微分方程描述了电压在电阻和电容作用下的时空变化特性,主要用于描述神经信号沿树突和轴突的传播。神经元的树突和轴突可以被视为一条电缆,电流在其内部传播时会因电阻和电容的作用而逐渐衰减。电缆理论是生物学领域少数理论先于实验验证的领域之一,通过理论推导可以得出有关神经元电活动的时间和空间基本性质,这些理论预测通过后续的实验得到了验证;精细神经元模型结合了H-H模型和电缆理论,利用偏微分方程精确描述神经元内部复杂的电信号产生与传播过程,进一步发展为一种包含复杂树突和

离子通道的精细模型。

这些模型共从微观的离子通道活动到宏观的电信号在神经元结构中的传播,再到整体的精细模拟,为理解神经元的电活动提供了不同的层次角度。这些理论工具对深入理解神经计算机制和生物神经网络的复杂性具有重要意义,也为现代人工智能系统的

设计和优化提供了宝贵的灵感。

## 2.2 单个神经元由于丰富的离子通道和树突结构能够执行复杂的计算

神经元的树突在信息处理中具有重要作用。树突不仅仅是被动接收信号的结构,它们具有非常复杂的计算功能,可以通过特定的生物物理机制对输入信号进行处理,实现多种逻辑和非线性操作:

### 被动滤波 (Passive Filtering)

树突的被动特性使得大部分信号会在树突上传播时被滤除。这意味着树突能够选择性地衰减远端的信号,使得只有特定强度的信号能够被有效的从树突远端传递到胞体。这对于噪声过滤和信号选择有重要意义。

### 逻辑运算 (Logical Operations)

兴奋性和抑制性输入之间的交互作用可以实现复杂的逻辑操

## Dendritic computation(树突计算理论)

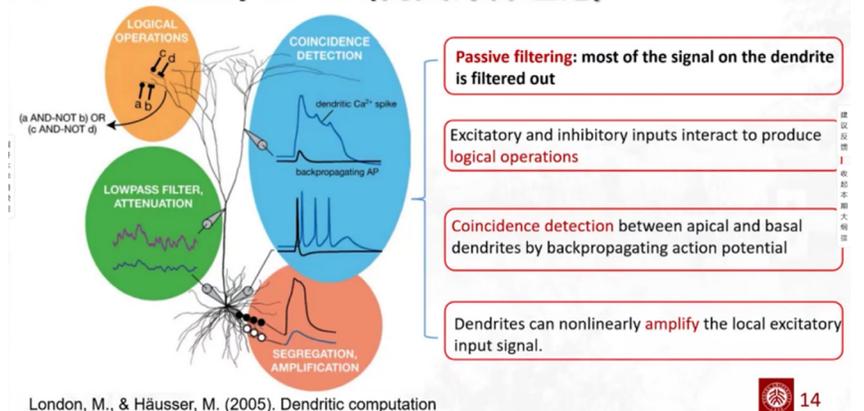


图9 树突计算理论

作。树突通过不同的输入信号组合和整合，能够执行类似逻辑门的功能，从而对输入信号做出更复杂的处理。这使得神经元可以通过树突进行特定信息的计算和选择，赋予神经元更强的选择性和处理能力。

### 重合检测 (Coincidence Detection)

树突可以检测顶树突和基树突之间的信号同步性，即重合检测 (Coincidence Detection)。这种机制是通过反向传播的动作电位 (backpropagating action potential) 来实现的。当顶树突同时受到刺激时，反向传播的动作电位会使这些信号的强度增加，从而增强神经元对多个输入同步出现的敏感性。这种重合检测对时间同步信息的处理尤为重要，在感知和记忆过程中发挥关键作用。

### 信号放大 (Amplification)

树突还可以非线性地放大局部的兴奋性输入信号，从而对特定的输入做出放大响应。这种非线性放大使得数量较少的兴奋性突触信号也能够对神经元的整体反应产生显著影响。

树突具有丰富的信号处理能力，使得神经元可以对输入信号进行复杂的局部处理。基于树突处理不同输入信号的方式对树突的信息处理能力进行分类，可以分为4类：

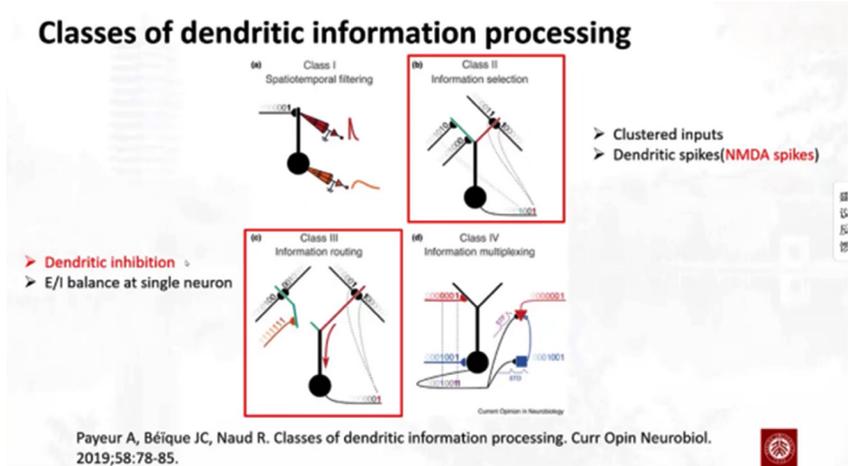


图10 树突信息处理的分类 | classes of dendritic information processing. Alexandre PayeurJean-Claude Béique et al.

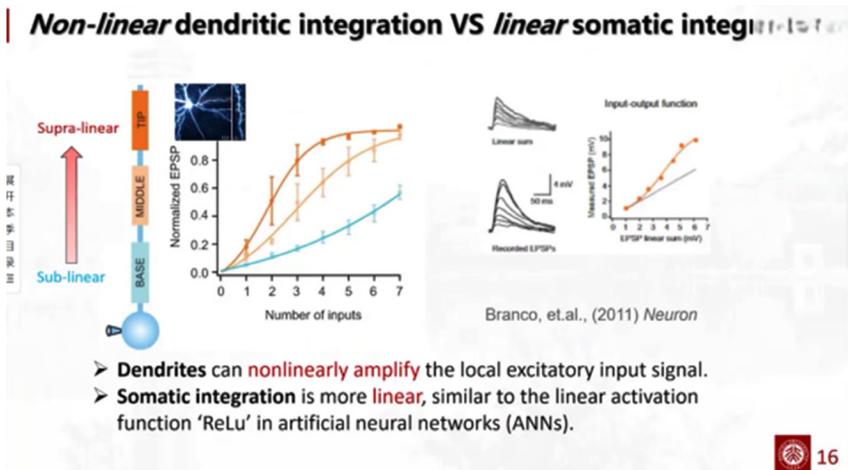


图11 非线性树突整合 vs 线性胞体整合 | classes of dendritic information processing Alexandre PayeurJean-Claude Béique et al.

### 时空滤波 (Spatiotemporal Filtering)

树突能够对输入信号进行时空上的滤波，使信号在传输过程中根据其时间和空间特性进行衰减或放大。

### 信息选择 (Information Selection)

树突能够通过集群输入和树突尖峰 (如 NMDA 尖峰) 来执行信息选择，选择性地放大或传递

某些输入信号，从而对重要信号进行特定响应。

### 信息路由 (Information Routing)

树突具备信息路由的能力，可以由抑制性突触来决定不同输入信号的传输路径，以便进行特定的处理。

### 信息多路复用 (Information Multiplexing)

树突可以实现信息多路复用，

同时处理来自不同来源的信号，这些信号可能包含不同的信息类别，从而使单个神经元具备对多种输入进行整合处理的能力。

从信息整合的角度来看，细胞体通常对输入信号进行线性整合，类似于人工神经网络中的 ReLU 激活函数。线性整合意味着输入信号的影响是简单的相加关系，最终的输出与输入呈线性相关。而树突能够对局部的兴奋性输入信号进行非线性放大，这种放大是非线性的，意味着多个输入信号的组合效果并不仅仅是其线性加和，而是可能通过叠加产生增强的响应或者减弱的响应。树突的非线性整合和细胞体的线性整合结合起来，使得神经元可以对输入信号进行细致且多样化的处理，同时保持整体的稳定性。

### 2.3 大脑精细模型能独立生成新理论，是与实验科学平行的理论体系

中棘神经元 (medium spiny neurons, MSNs) 在纹状体远端突触激活后，观察到了树突脉冲的形成，这些树突脉冲可能与大脑对特征的编码密切相关 (Plotkin et al 2011)。这些脉冲是由于突触输入特别是 NMDA 受体的激活和电压依赖性钙通道的作用，这些元素共同作用产生了再生性电位变化，即树突平台电压。这种现象与 Du 等人的精细神经元模型的结果高度一致 (Du et al

2017)。

Du 等人在精细模型中发现，树突远端位置的抑制性输入对树突平台电压的影响与时间有很强的关联性。这种现象被称为“时序性抑制”。如果抑制性输入的时间与 NMDA 受体的激活非常接近，那么只会产生很小的分流效应 (shunting effect)；而如果时间上相差较大，则可能完全抑

制掉整个树突平台电压。这种现象表明树突的活性反应对抑制性输入的时序非常敏感。之后斯坦福实验室通过在同一个树突上激活兴奋性和抑制性突触，验证了这种时序性抑制的效果。

这一现象产生的机理是什么？传统上被认为主要是由于分流抑制 (shunting inhibition)，即抑制性输入通过增加膜电导，使得

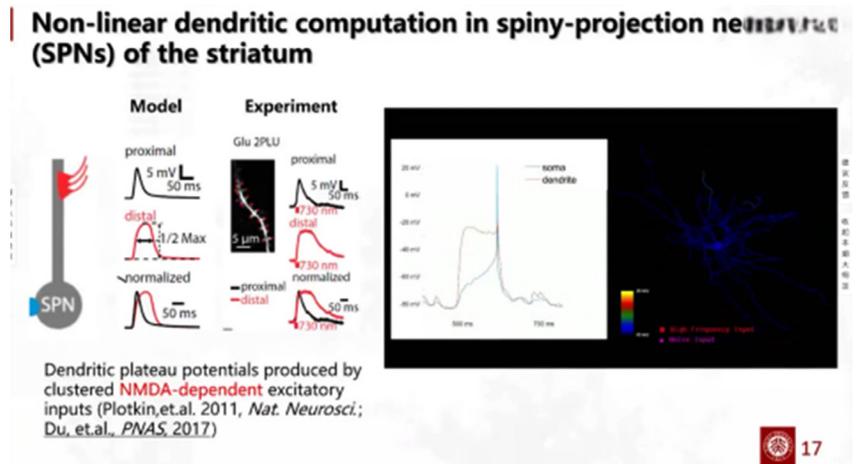


图 12 纹状体中棘神经元非线性树突计算。| Synaptically driven state transitions in distal dendrites of striatal spiny neurons [2011] Joshua L. Plotkin/Michelle DayD. Cell-type-specific inhibition of the dendritic plateau potential in striatal spiny projection neurons [2017] Kai Du Yu-Wei Wu J. Kotaleski et al.

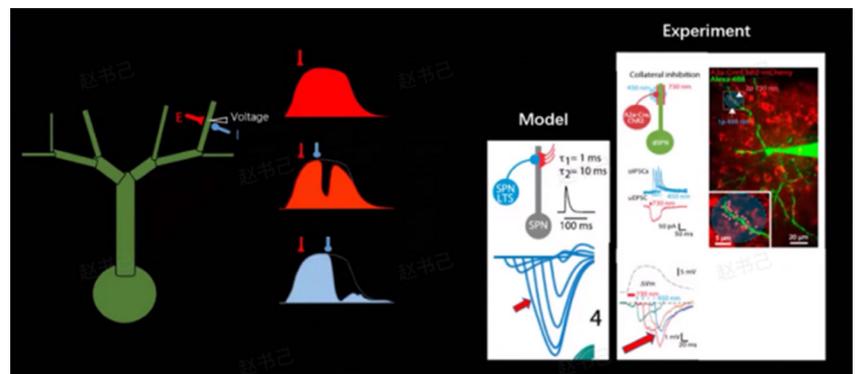


图 13 电缆理论对时序性抑制的预测。| Synaptically driven state transitions in distal dendrites of striatal spiny neurons [2011] Joshua L. Plotkin/Michelle DayD. Cell-type-specific inhibition of the dendritic plateau potential in striatal spiny projection neurons [2017] Kai Du Yu-Wei Wu J. Kotaleski et al.

Model prediction on NMDA  $Mg^{2+}$  block-dependent mechanism

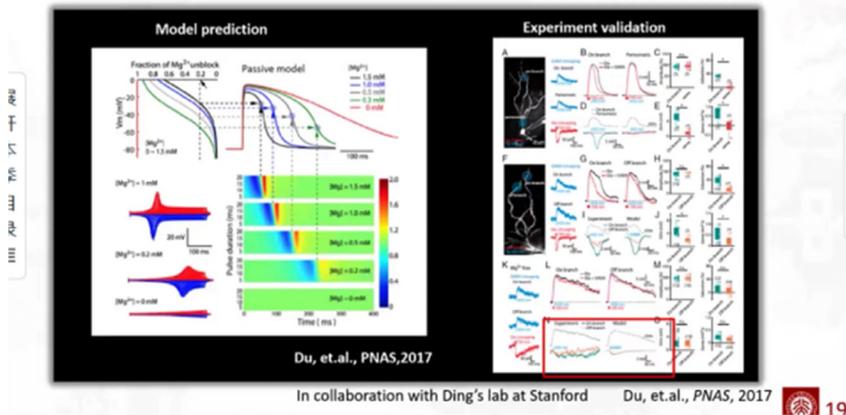


图 14 基于 NMDA 镁离子阻滞机制的模型预测 | Cell-type-specific inhibition of the dendritic plateau potential in striatal spiny projection neurons [2017] Kai DuYu-Wei WuJ. Kotaleski et al. Timed Synaptic Inhibition Shapes NMDA Spikes, Influencing Local Dendritic Processing and Global I/O Properties of Cortical Neurons. [2017] Michael DoronG. Chindemildan Segev et al.

Timed-inhibition also exists in cortical pyramidal neurons

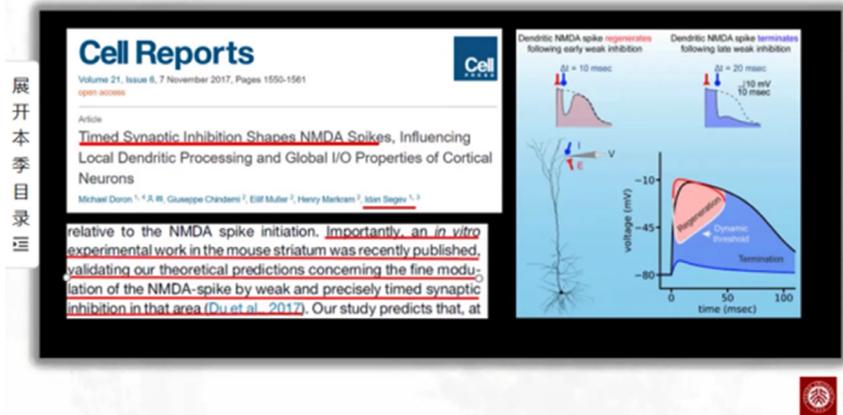


图 15 时序性抑制在皮层锥体神经元中同样存在。 | Cell-type-specific inhibition of the dendritic plateau potential in striatal spiny projection neurons [2017] Kai DuYu-Wei WuJ. Kotaleski et al. Timed Synaptic Inhibition Shapes NMDA Spikes, Influencing Local Dendritic Processing and Global I/O Properties of Cortical Neurons. [2017] Michael DoronG. Chindemildan Segev et al.

兴奋性输入引起的电位变化被削弱。然而，在精细神经元模型中发现，这一现象的产生与 NMDA 受体的镁离子阻滞 ( $Mg^{2+}$  block) 有关。具体来说，NMDA 受体通道在镁离子阻滞下具有电压依赖

性，当神经细胞的膜电位变得足够负时，镁离子会从 NMDA 受体的通道中移除，从而允许钙离子和其他离子流入神经元，引发树突平台电位的产生。这种过程使得树突的活性反应对时间上的抑

制性输入非常敏感。模型中进一步发现，如果移除 NMDA 的镁离子阻滞 (NMDA  $Mg^{2+}$  block)，则时序性抑制现象就不会再出现。这意味着镁离子阻滞是时序性抑制产生的关键因素。

实验也验证了这一模型预测，当去掉镁离子阻滞时，时序性抑制的现象确实消失了。这进一步支持了在树突水平上，NMDA 受体及其镁离子阻滞在时序性抑制中的关键作用，而不仅仅是简单的分流抑制机制。后来的研究在理论上证明了时序性抑制在皮层锥体神经元中同样存在。

3 与人工智能的关系和启示

3.1 与人工智能的关系

反向传播 (backpropagation) 是用于神经网络的主要训练方法，通过反馈连接来传播误差信号，从而更新权重，以提高网络性能。反向传播在机器学习取得了显著的成功，但在生物学上实施具有挑战性，因为大脑中的反馈机制与人工网络的反馈机制并不完全相同。Timothy 等人提出了一种假设，即树突平台电压、前向传递、后向传递以及动作电位的反向传播，可能共同作用来形成一种类似反向传播的学习机制。文章提出了一种称为“神经梯度活动差异 (NGRAD)”的框架，认为大脑可以通过反馈连接来计算有效的突

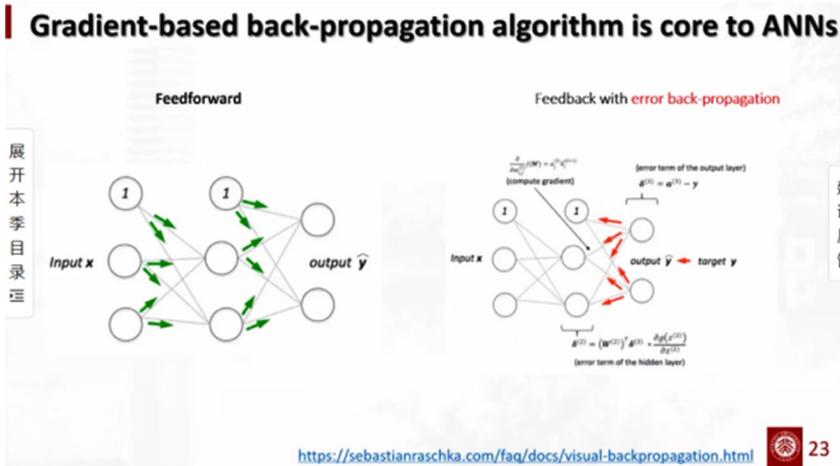


图16 梯度反向传播算法是人工神经网络的核心。| Backpropagation and the brain [2020] Timothy P. Lillicrap Adam SantoroGeoffrey Hinton et al.

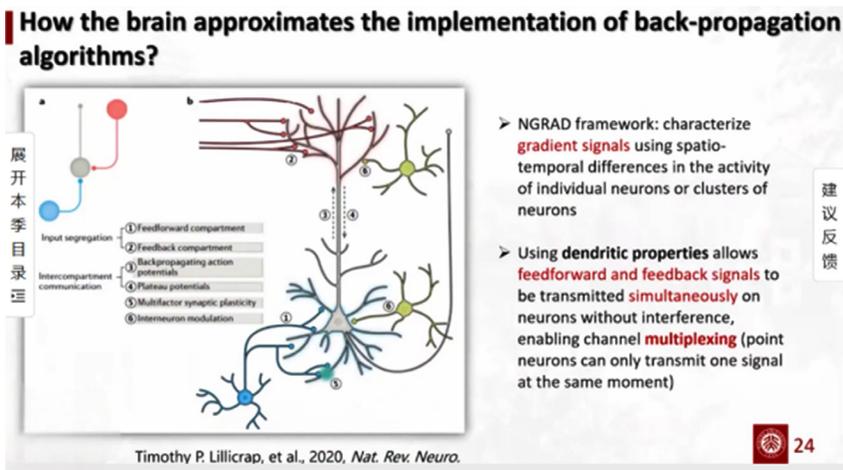


图17 大脑中学习算法的假设。| Backpropagation and the brain [2020] Timothy P. LillicrapAdam SantoroGeoffrey Hinton et al.

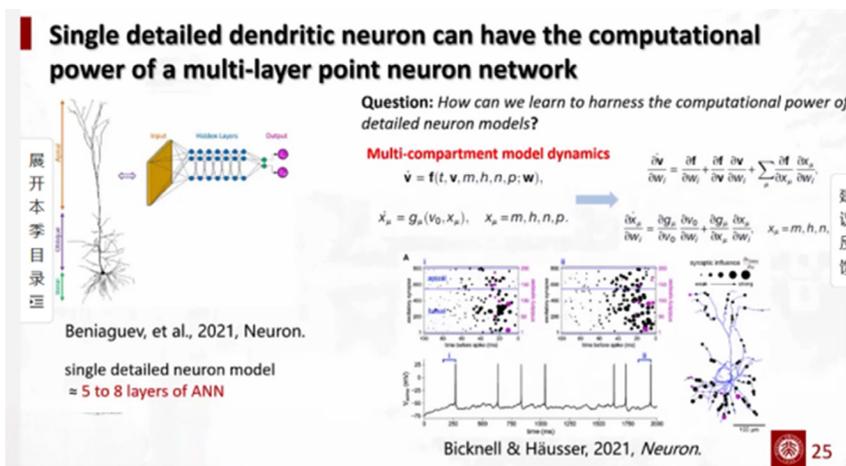


图18 单个神经元有强大的计算能力。| Single cortical neurons as deep artificial neural networks [2021] David Beniaquev

触更新，这些更新类似于反向传播的误差信号。

### 3.2 单个神经元有强大的计算能力和逻辑推理能力

Beniaquev 等人在 2021 年发表于 *Neuron* 期刊的一项研究表明，单个精细建模的神经元可以具有相当于 5 到 8 层人工神经网络的计算能力。这意味着，单个生物神经元通过其复杂的多区室结构 (multi-compartment dynamics)，能够处理类似于多层人工网络的复杂输入和输出关系，具有强大的计算能力。经过梯度训练，一个精细神经元就可以做“异或”推理 (XOR reasoning)，展现了单个神经元上强大的逻辑推理能力。

虽然单个神经元具有非常复杂和强大的计算能力，但是当把这些单个神经元扩展到大规模网络时，研究者需要权衡模型的复杂性与网络的可扩展性。研究的未来方向是结合复杂的详细神经元模型和大规模的神经网络，引入新的特性和更复杂的行为，以更好地模拟生物大脑的功能。

## 4 大规模精细模拟的核心挑战与解决办法

### 4.1 大脑精细模拟的核心挑战

精细神经元模拟目前面临计算效率低、硬件限制和工具链不足等多方面挑战。尽管如 Blue Brain Project 和 Allen Institute

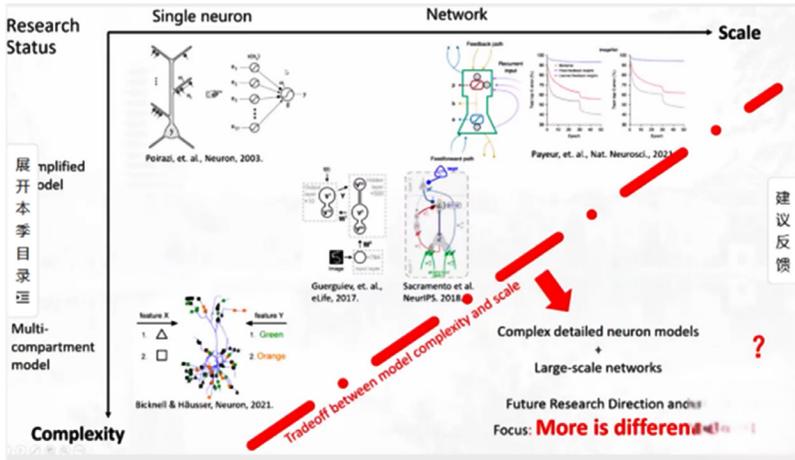


图 19 模型复杂性与规模的研究进展。| Single cortical neurons as deep artificial neural networks [2021] David Beniaguev

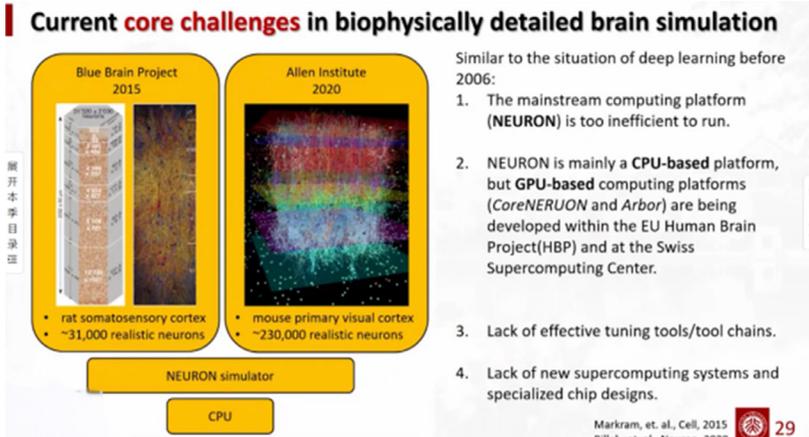


图 20 目前大脑精细模拟的核心挑战。| Software for Brain Network Simulations: A Comparative Study [2017] Ruben A. Tikiđji-Hamburyan Vikram Narayana Tarek A. El-Ghazawi et al.

### Classic Simulators in Neuroscience

- **NEURON**
  - Most popular, based on CPU platform
  - Designed for dendritic neurons, but **NOT** for point neurons!
- **CoreNEURON**
  - Most advanced, supporting **single GPU**
- **GENESIS**
  - Classic simulation tool since 1989.

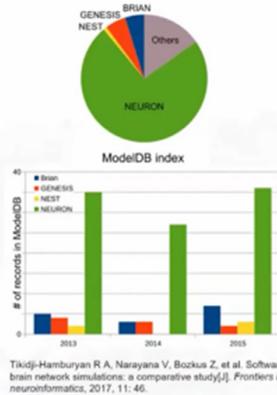


图 21 当前主流的大脑模拟工具。| Software for Brain Network Simulations: A Comparative Study [2017] Ruben A. Tikiđji-Hamburyan Vikram Narayana Tarek A. El-Ghazawi et al.

等项目在推进大规模神经元模拟上取得了进展，但现有的计算平台和硬件能力远不能满足复杂的生物神经元模型的需求。这种局限类似于深度学习在 2006 年之前面临的瓶颈，未来可能需要开发基于 GPU 的计算平台以及专门的超算和芯片设计，以更好地支持神经科学领域的大规模模拟和计算。

### 4.2 计算效率提升 – 传统方法

精细神经元模型在模拟时仿真速度慢，这与它模拟神经元的方式和底层的计算方法密切相关。精细神经元模型使用差分法进行电压迭代计算，这种方法计算复杂且需要处理大量的耦合关系，导致仿真需要逐步迭代多个区段，计算复杂性呈指数增长。

电缆理论在多区室神经元模型中通过数值方法计算，通过将树突和轴突分段，结合离散化的差分方法来模拟电信号在神经元内的传播。为了高效解决这种数值计算中的复杂耦合问题，可以使用海因斯矩阵，有助于将复杂的偏微分方程组转化为稀疏线性方程组，从而可以使用更高效的数值方法来求解。计算复杂度可以从  $O(N^3)$  降低为  $O(2N)$ 。

海因斯方法是用来高效求解多区室神经元模型中的伪三对角矩阵的数值方法。由于神经元树突和轴突的分叉，矩阵中存在一些零散的非零元素，使得它不再是一个标准的三对角矩阵，而是“伪三对角矩阵”，利用这种矩阵的稀疏性，可以减少计算量。但是在使用高斯消元法消除的过

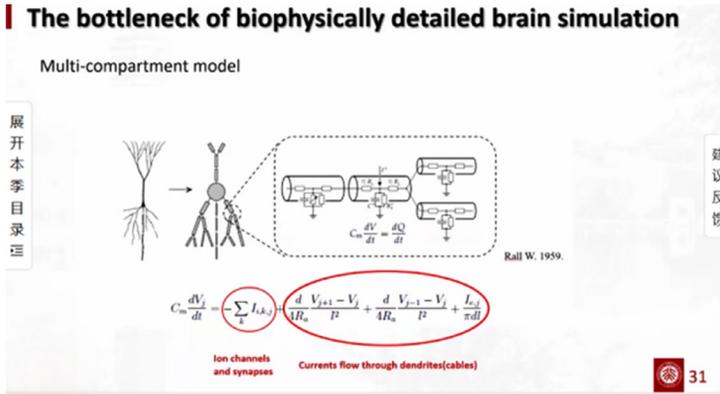


图 22 精细神经元模拟的瓶颈

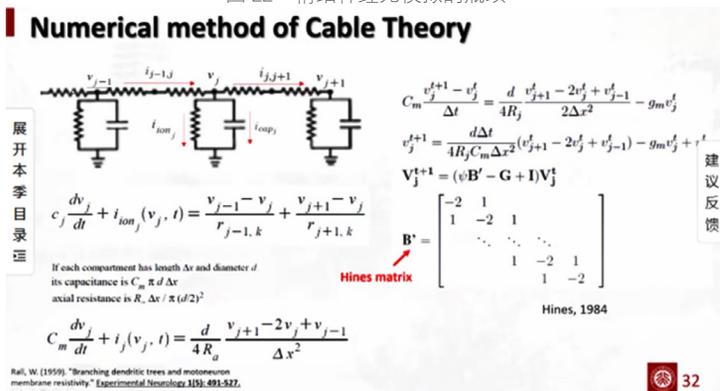


图 23 电缆理论的数值方法

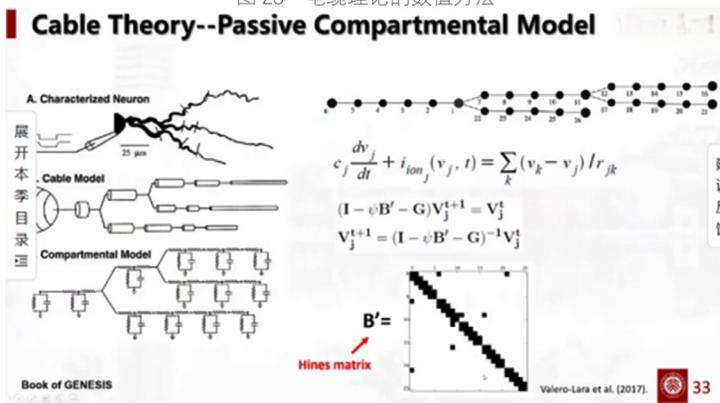


图 24 电缆理论中的海因斯矩阵

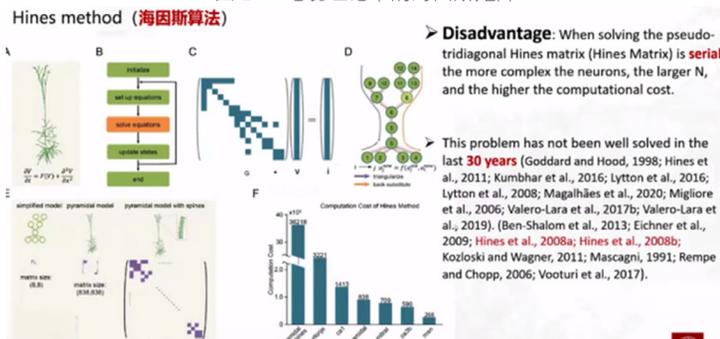


图 25 海因斯算法行与行之间会有依赖关系

程中，行与行之间会产生依赖关系，导致求解过程必须是串行的，无法实现高效的并行化。

### 4.3 计算效率提升 - 并行化方法

为解决这个问题，Du 等人提出了树突分层调度方法 (Dendritic Hierarchical Scheduling)。该算法从最深的节点进行计算，该节点对其它节点的依赖程度最低。从数学上可以证明这种算法的效率是最高的。该算法既有海因斯算法同样的算法复杂度，又可以通过 GPU 进行并行运算。基于这个算法的分析发现，求解不同树突形态的神经元会有一个计算上界，在计算时最多 16 个线程就足够了，这在数学上把求解电缆理论方程的运算效率提高了 10 倍左右。

在实际操作时，对显存的优化至关重要。电缆理论中的区室 (compartment) 需要高效地按照一定类别存储在显存中，而不是随机排列，以最大化计算性能并减少存取延迟。

DHS+GPU 的优化方法相较于传统的 NEURON 计算引擎在神经元仿真中有了明显的性能提升，相对于使用传统 CPU 的 NEURON 计算引擎，计算效率提高了高达 1000 倍；与当前的高效仿真引擎 CoreNEURON 相比，DHS+GPU 的速度提高了约 10 倍。

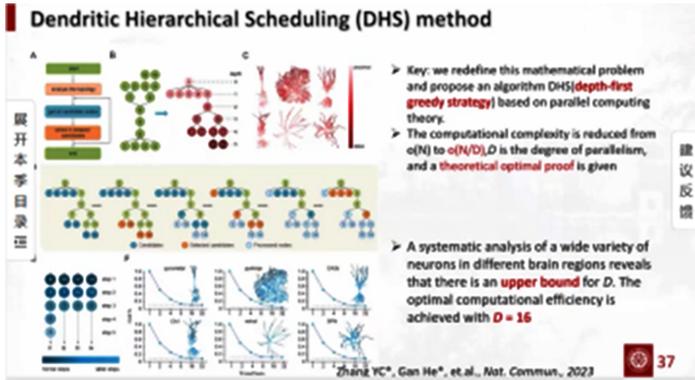


图 26 树突分层调度方法

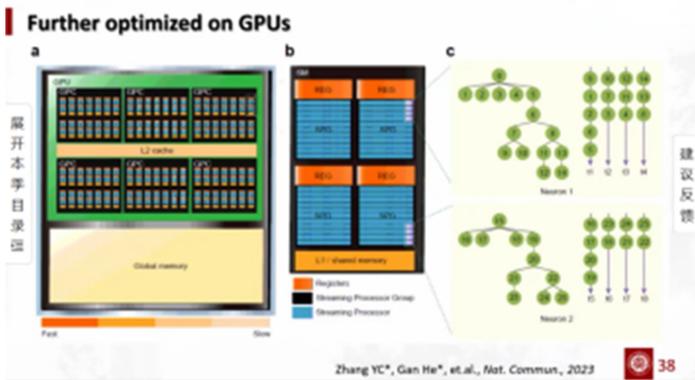


图 27 GPUs 显存上的优化

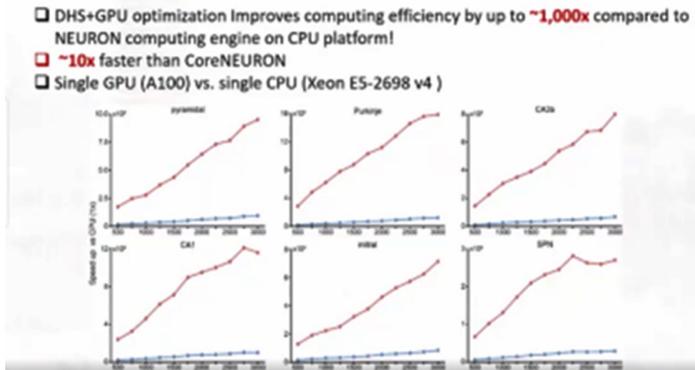


图 28 深度分层调度方法与传统方法的比较

## 5 精细模型的应用

一方面，精细神经元模型可以用于大脑模拟，DHS 方法极大的提高了大脑模拟的效率。Du 等人用 8 块 GPU 模拟了小鼠基底核脑区的纹状体中 5 万个精细神经元，极大的降低了计算资源；另一方面，可以构建基于精细神经元的人工智能模型，解决深度学习任务。

为了测试基于精细神经元的类脑模型的鲁棒性，Zhang 等人给输入的图片添加对抗攻击噪声，发现其鲁棒性显著高于传统的人工神经网络模型。

基于精细神经元的类脑模型为什么鲁棒性会更好？作者实验发现，当前馈连接全部投到最远端时鲁棒性比全部投到胞体附近明显更强，表明输入对树突上的位置比较敏感，因此猜测这可能是由于树突的滤波作用。

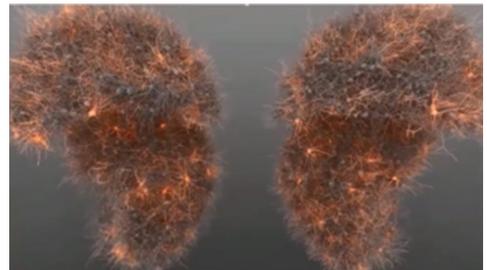


图 29 小鼠大脑模拟

## 6 展望：如何构建人类智能？

目前认为构建未来通用人工智能的方式有两种：bottom-up 和 top-down。

Top-down 是通过简化和抽象，将神经元的

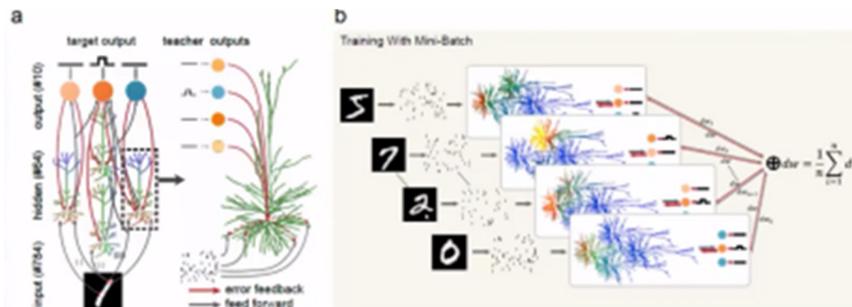


图 30 基于精细神经元的类脑模型

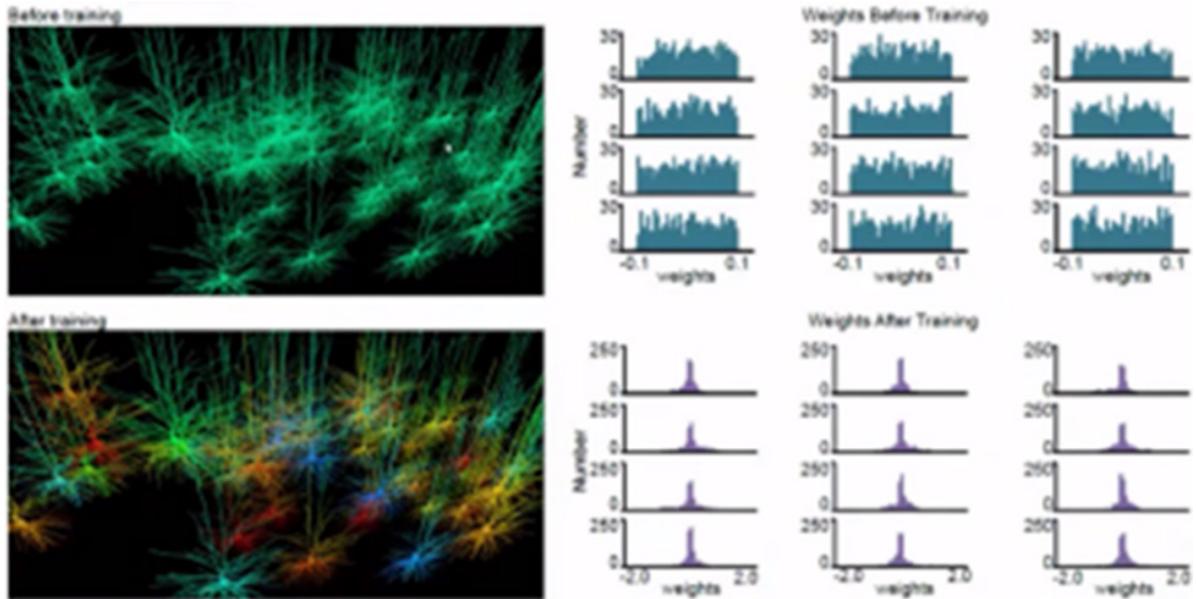


图 31 类脑模型的神经元激活

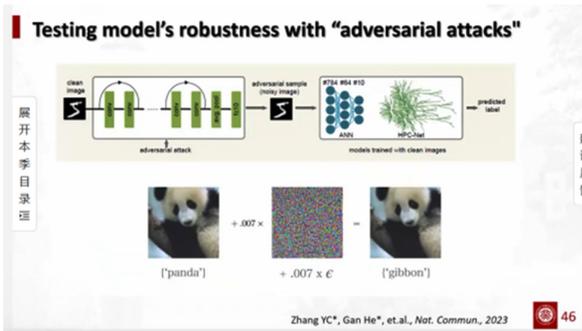


图 32 利用对抗攻击测试类脑模型的鲁棒性

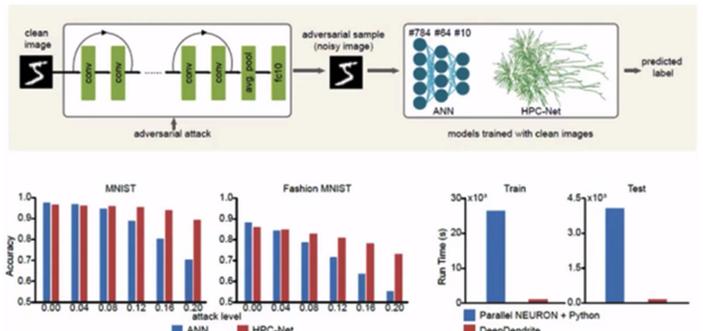


图 33 对抗攻击测试的效果

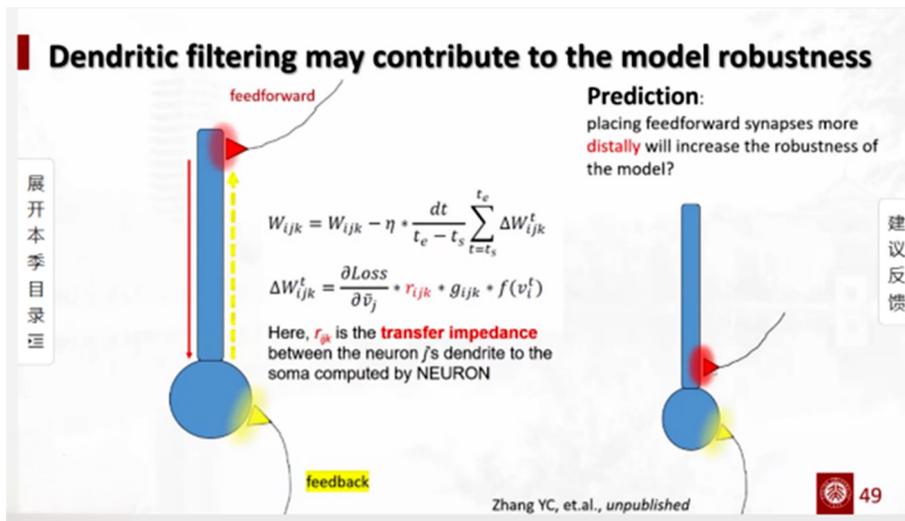


图 34 模型鲁棒性可能由于树突的滤波作用

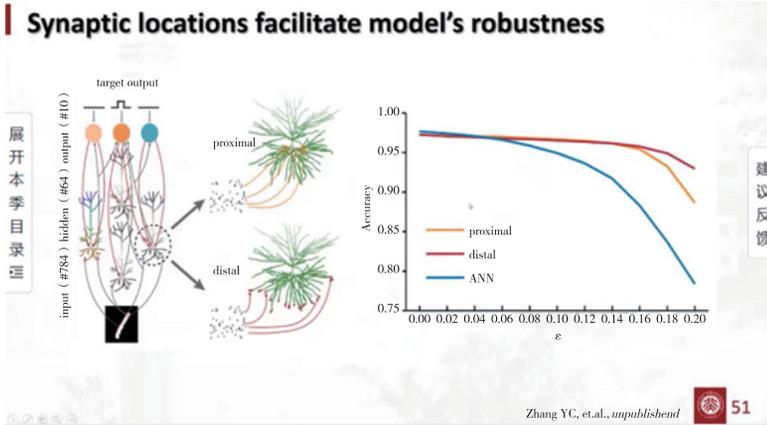


图 35 突触位置对模型鲁棒性的促进作用

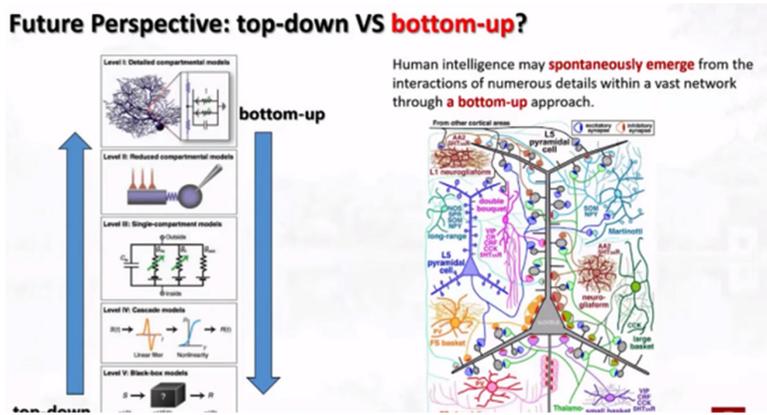
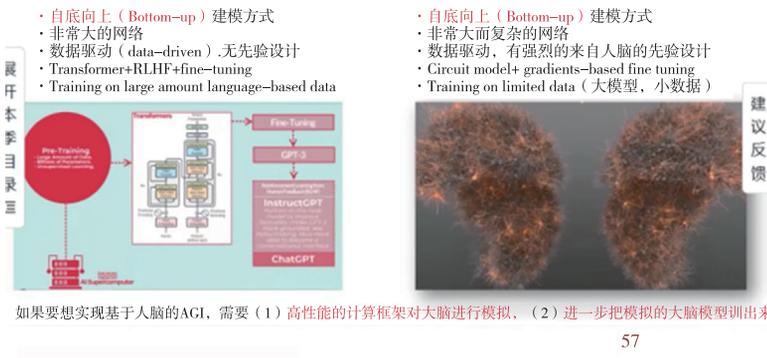


图 36 top-down vs bottom-up? | Modeling Single-Neuron Dynamics and Computations: A Balance of Detail and Abstraction [2006] A. HerzT. GollischD. Jaeger et al. The Diversity of Cortical Inhibitory Synapses [2016] Y. KubotaF. KarubeY. Kawaguchi et al.

### 大语言模型 VS 精细大脑模型



如果要想实现基于人脑的AGI, 需要 (1) 高性能的计算框架对大脑进行模拟, (2) 进一步把模拟的大脑模型训练出来

图 37 大语言模型 vs 精细大脑模型? | Modeling Single-Neuron Dynamics and Computations: A Balance of Detail and Abstraction [2006] A. HerzT. GollischD. Jaeger et al. The Diversity of Cortical Inhibitory Synapses [2016] Y. KubotaF. KarubeY. Kawaguchi et al.

复杂生物细节逐渐简化为功能模块，直至形成非常简化的黑箱模型。深度学习模型在图像识别、语音识别、自然语言处理等领域取得了巨大成功，其性能甚至超过了人类。这表明，通过适当的抽象和简化，可以实现高度复杂的功能，类似于生物神经系统中的认知任务。这为 top-down 路径提供了一定的证据支持。但是这种简化模型与大脑神经元差别巨大，目前的研究手段无法从生物学或物理理论角度解释其智能行为的出现，其演化方向也是不可控的。

Bottom-up 是通过精细地模拟神经元和它们之间的复杂交互，试图通过大量神经元的相互作用来涌现出智能。这种方法重视每一个生物细节，从基本的神经元行为，到树突、突触、复杂网络连接等，通过不断增加层次的细节来实现高层功能。这一路径认为复杂的拓扑结构及其多样的突触连接可能是智能形成的基础。智能并非通过逐步简化和抽象直接构建，而是通过许多低层次神经元和回路的相互作用而自然涌现出来的。

讲者认为通过精细大脑模型有可能实现基于人脑的通用智能。精细大脑模型与大语言模型的设计逻辑一样，形式上满足规模法则，都是数据驱动。精细神经元模型强大的计算能力和逻辑推理能力使得其拥有更大的潜力。但是想要实现基于精细大脑模型的人脑智能，面临着很多挑战。一方面需要高性能的计算框架对大脑进行模拟，另一方面需要高效的训练方法。○

来源：集智俱乐部

# 共筑自动化科技工作者之家， 中国自动化学会会员中心正式成立



图1 参会代表合影



图2 会议现场

为深化中国自动化学会会员服务，汇聚各方智慧全方位服务产业生态，建设有温度的自动化领域科技工作者之家，2025年1月15日，中国自动化学会在北京卫星大厦举行会员中心成立暨新春茶话会。来自中国科协，北京科协，中国自动化学会分支机构、期刊编辑部及省级自动化学会，全国高校、科研院所、企业单位，金融界、法律界和会议服务界的30余位代表齐聚一堂，共同见证中国自动化学会会员中心的成立，并借新春之际共话发展、共叙情谊。

在开幕式环节，中国工程院院士、中国自动化学会理事长、

西安交通大学教授郑南宁，中国自动化学会副理事长、中国科学院自动化研究所研究员侯增广分别致辞。

郑南宁理事长在致辞中指出，会员中心是学会与广大会员之间沟通的桥梁和纽带，通过为广大会员提供更加便捷、高效服务的平台，进一步促进学术交流、技术合作和人才培养，推动自动化学科的繁荣发展。相信在会员中心的助力下，中国自动化学会将为

广大会员创造更多价值，为自动化技术的发展贡献更大力量。

侯增广副理事长在致辞中表示，会员中心成立将竭诚为大家提供优质的服务，提供更便捷、更高效的资源和支持，将通过丰富多彩的学术活动，搭建沟通合作的桥



图3 中国工程院院士、中国自动化学会理事长、西安交通大学教授郑南宁致辞



图4 中国自动化学会副理事长、中国科学院自动化研究所研究员侯增广致辞



图5 中国自动化学会秘书长张楠介绍学会会员服务体系

梁，共同探索自动化技术的未来，共同应对行业面临的挑战。

中国自动化学会秘书长张楠从学术会议、会员活动、团体标准、科技成果评价、继续教育、科技奖励、人才培养与举荐等方面详细介绍了中国自动化学会的会员服务体系。中国自动化学会作为我国自动化、信息与智能科技领域的国家级学会，积极响应科技强国号召，通过成立会员中心，提升会员服务品质，提高会员服务能力，助力我国自动化事业高水平自立自强。

在与会嘉宾的共同见证下，中国工程院院士、中国自动化学会理事长、西安交通大学教授郑

南宁揭牌，标志着中国自动化学会会员中心正式成立。

在新春茶话会环节，与会嘉宾围绕会员中心的未来发展、精准服务会员等议题展开了讨论和交流，分享了许多宝贵经验做法和建议。

本次活动由中国自动化学会副秘书长赵延龙和王坛共同主持。

中国自动化学会自1961年成立以来，已经发展为一个拥有8万余名个人会员、300余家团体会员的现代科技社团，汇聚了强有力的智力资源和产业资源，是推动自动化、信息与智能科技领域发展的生力军。随着揭牌仪式的顺利举行，中国自动化学会会员中心正式成立

了，它将伴随新年的脚步开启全新的征程。会员中心作为中国自动化学会广大会员的温馨之家，饱含着自动化人的坚守和热爱，在这里不仅可以感受到中国自动化学会的温暖服务，还可以畅谈科技未来、分享梦想收获。

未来，中国自动化学会会员中心将深化服务新内容，探索服务新方向，洞察服务新机遇，进一步深化政、产、学、研、用、金、服合作，力争将会员中心打造成凝聚会员、人才培养、产学研融合的三维立体、有效高质、服务赋能的平台，成为技术创新和产业进步的引擎，为推动自动化科技的繁荣发展贡献智慧和力量。○

学会会员中心 供稿



图8 中国自动化学会会员中心



图6 揭牌仪式



图7 活动主持

# 2025 中国自动化与人工智能科普大会暨创新人才贯通式培养研讨会在京成功举办



图1 2025 中国自动化与人工智能科普大会暨创新人才贯通式培养研讨会现场

2025 年 1 月 11 日 -12 日，2025 中国自动化与人工智能科普大会暨创新人才贯通式培养研讨会在中国科学院大学玉泉路校区礼堂隆重举行。此次会议由中国自动化学会、中国青少年科技教育工作者协会联合主办，中国科学院大学人工智能学院、中国青少年科技教育工作者协会人工智能普及教育专业委员会、中国自动化学会智慧教育专业委员会、中国自动化学会普及工作委员会承办。大会以“跨界融合·创新未来”为主题，共设 3 场大会报告和 4 个专题会议，聚焦大中小学贯通式培养模式与人工智能教

育的科学化、系统化发展，吸引了来自全国高校、科研院所、中小学校等专家学者、师生代表共计 500 余人现场参会，有效汇聚了领域产学研优质资源，为推动我国教育强国与创新型国家建设贡献了力量。

中国工程院院士，中国自动化学会会士、理事长、西安交通大学教授郑南宁；中国科学院院士，中国自动化学会会士、副理事长，中国空间技术研究院研究员杨孟飞；中国青少年科技教育工作者协会副理事长兼秘书长赵崇海；中国科学院大学副校长牛晓莉；中国自动化学会会士、监

事长，中国科学院自动化研究所研究员，澳门科技大学特聘教授王飞跃；中国自动化学会会士、副理事长，中国钢研科技集团有限公司原党委副书记张剑武；中国自动化学会会士、副理事长，青岛科技大学副校长，上海交通大学教授李少远；中国自动化学会会士、副理事长，中国科学院自动化研究所研究员侯增广；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，西安交通大学人工智能学院执行院长、教授辛景民；中国科学院大学人工智能学院执行院长肖俊；中国青少年科技教育工作者协会人工智能普及教育专业委员会主任，北京航空航天大学计算机学院院长、教授王蕴红；中国自动化学会副秘书长、武汉大学教授张俊；中国自动化学会副秘书长王坛；中国青少年科技教育工作者协会天文科学教育专业委员会主任、中国科学院国家天文台台长、中国科学院大学天文与空间科学学院副院长刘继峰；中国自动化学会联邦数据与联邦智能专业委员会主任、数据堂（北京）科技股份有限公司 CEO 齐红威；



图2 中国自动化学会会士、副理事长，青岛科技大学副校长，上海交通大学教授李少远主持



图3 中国工程院院士，中国自动化学会会士、理事长，西安交通大学教授郑南宁致辞

《教育家》杂志副总编王湘蓉等出席会议。

大会开幕式由李少远教授主持。中国工程院院士，中国自动化学会会士、理事长，西安交通大学教授郑南宁；中国科学院院士，中国自动化学会会士、副理事长，中国空间技术研究院研究员杨孟飞；中国科学院大学副校长牛晓莉；中国青少年科技教育工作者协会副理事长兼秘书长赵崇海分别致辞。

郑南宁院士指出自动化与

人工智能技术正以惊人的速度改变着世界，几乎人类社会的每个领域都因此焕发出新的生机。正是在这个飞速发展的时代，我们更需要通过科普的方式，将科技的力量和知识传递给大众，让更多人能够理解并积极参与到这场变革中来。科普的意义在于“连接”，科普的价值在于“赋能”，科学知识的普及是提升全民科学素养的基础，只有当公众充分理解科学技术，我们的社会才能更加从容地应对技术变革带来的机

遇和挑战。

杨孟飞院士指出，本次大会聚焦科普教育人才共同培养，意义重大，尤其在自动化与人工智能教育领域，要为学生创造丰富且多元的实践机会，解决现实问题，切实提升他们的创业思维 and 实际运营能力，使其成为能够驾驭未来科技浪潮的栋梁之材。

牛晓莉副校长指出，在全球化和信息化快速发展的大背景下，世界各国之间的竞争愈发激烈，科技实力和人才素质已经成



图4 中国科学院院士，中国自动化学会会士、副理事长，中国空间技术研究院研究员杨孟飞致辞



图5 中国科学院大学副校长牛晓莉致辞

为衡量一个国家竞争力的关键指标。国科大一直以服务国家战略需求为导向，深入实施科教融合发展战略，致力于为抢占科技制高点、实现高水平科技自立自强，培养德才兼备的未来科技领军人才。与此同时，国科大也在持续开展拔尖创新人才贯通式培养模式的探索和实践。致辞中牛晓莉副校长希望本次大会进一步推动我国自动化与人工智能领域的科普教育以及创新人才培养工作。

赵崇海副理事长在致辞中指出，当下科学教育迎来最佳发展时机，中国青少年科技教育工作者协会多年来长期专注于青少年科技教育工作者队伍素养的精进提升，并广泛开展面向青少年的科技教育实践，搭建起涵盖面向师生的多元交流、研习及实践平台。致辞中赵崇海副理事长期望借此大会为契机，深度探索多元合作模式，为人工智能科普事业添砖加瓦，贡献力量。

在大会主题报告环节，中国自动化学会会士、监事长，中国科学院自动化研究所研究员，澳门科技大学特聘教授王飞跃为大家作了题为“新 AI 与新时代的人才与培养”的报告。王飞跃教授指出，在人工智能技术迅猛发展的新时代，各种人工智能和机器学习方法与技术正重塑各行业生产模式与工作方式，为社会带来巨大机遇与挑战。社会对人才需



图6 中国青少年科技教育工作者协会副理事长兼秘书长赵崇海致辞

求发生转变，未来人才需具备跨学科综合素质、创新能力及扎实专业知识与技能，以适应 AI 时代需求。教育体系亟待改革，传统模式应与 AI 深度融合，培养学生的数据思维、算法意识、编程能力，强化批判性思维、创造力和团队合作等关键能力。同时，推广终身学习理念，鼓励全程学习新知识、新技能，紧跟技术与社会需求变化。

中国青少年科技教育工作者协会天文科学教育专业委员会主任、中国科学院国家天文台台长、中国科学院大学天文与空间科学学院副院长刘继峰作了题为“AI 赋能下的天文科学教育”的报告。



图8 中国青少年科技教育工作者协会天文科学教育专业委员会主任、中国科学院国家天文台台长、中国科学院大学天文与空间科学学院副院长刘继峰作大会报告



图7 中国自动化学会会士、监事长，中国科学院自动化研究所研究员，澳门科技大学特聘教授王飞跃作大会报告

报告展示了天文 AI 大模型的训练成果，并深入探讨了其对科学教育尤其是天文学方向科学教育的推动作用。刘继峰台长以天文 AI 学习社区为例，探讨了基于天文学研究范式的全链条人才培养思路，旨在引领天文学教育与天文科学闭环发展。

中国自动化学会联邦数据与联邦智能专业委员会主任、数据堂（北京）科技股份有限公司 CEO 齐红威作了题为“大模型之下的人才需求及发展趋势”的报告。齐红威总经理指出随着人工智能，尤其是大模型的快速普及，人类的工作、生活和娱乐方式正经历翻天覆地的变化。在大模型



图9 中国自动化学会联邦数据与联邦智能专业委员会主任、数据堂（北京）科技股份有限公司 CEO 齐红威作大会报告



图 10 中国自动化学会科普教育基地授牌仪式



图 11 中国自动化学会团体标准《青少年人工智能核心素养测评》发布

推动下的元宇宙时代，人类将和智能体共存，这一趋势促使我们主动或被动地调整学习方式，进而引发对人才需求的新变化。报告还探讨了未来可能需要的几种人才类型，包括数据工程师、大模型训练师等角色。

大会期间举行了中国自动化学会科普教育基地授牌仪式，各获牌单位涵盖多元教育科研主体，它们将借助自身优势开展智能机器人展览、编程体验营等丰富活动助力青少年科技启蒙；重磅发布中国自动化学会团体标准《青少年人工智能核心素养测评》，为

全国中小学人工智能教学和评价提供了重要的参考依据和体系化的指导，帮助一线课程教学教研更具针对性、科学性和严谨性，同时遵循国家人工智能基础人才培养和科技强国战略目标要求，为青少年阶段人工智能核心素养基础建立提供参考标准和辅助支持。

此次大会特别设置了“新时代的创新人才培养”高峰对话环节，由《教育家》杂志副总编王湘蓉主持，王飞跃、张剑武、李少远、侯增广、刘继峰、齐红威等六位专家围绕“人工智能教

育”“创新人才培养”“贯通式人才培养”等话题进行了深度探讨，为新时代创新人才的培养方向提供了诸多宝贵的思路与见解。

此外，高端科研资源科普化研讨会、大模型技术赋能教育研讨会也陆续在大会期间举行，十余名专家学者分享科普、教育领域最新成果，共话创新人才培养发展；“创新人才培养”全国青少年劳动技能与智能设计大赛说明会，全面深入地解读了包括 AIGC 技术应用在内的 17 赛项的规则、流程、评价标准及机制；名师工作坊特邀北京市第二中学高级教师高凯、北京市第十一学校教师郑子杰两位教师深入探讨如何将人工智能引入中学科学教学，助力学生核心素养培养，推动教学实践的深度变革。

中国自动化与人工智能科普大会暨创新人才贯通式培养研讨会是中国自动化学会全面落实《全民科学素质行动计划纲要 2021-2035》的一次有力实践。此次大会的成功举办切实发挥了“转换器”的关键效能，推动了高端科研资源科普转化，精准赋能科普工作者与科技教师群体，整合产学研多方优势资源，打通科普与创新人才培育之间的梗阻，为我国科技教育事业的高质量发展铺就坚实道路，更为迈向科技强国筑牢根基。○

学会秘书处 供稿



图 12 “新时代的创新人才培养”高峰对话

## 大模型技术赋能教育研讨会在京圆满结束

2025年1月11日下午,由中国自动化学会主办,中国自动化学会智慧教育专业委员会、中国自动化学会普及工作委员会承办的大模型技术赋能教育研讨会,在中国科学院大学玉泉路校区顺利召开。中国自动化学会副秘书长、武汉大学教授张俊发表致辞;华中师范大学教授余新国,中国自动化学会智慧教育专委会副主任委员、西安交通大学教授、大数据算法与分析技术国家工程实验室大数据算法测试与示范应用中心主任田锋,中国科学技术大学认知智能全国重点实验室教授、人工智能与数据科学学院副院长刘淇,中国自动化学会智慧教育专业委员会副秘书长、华中师范大学教授、国家数字化学习工程

技术研究中心副主任孙建文四位专家分别作主题报告。

会议由孙建文教授主持,张俊副秘书长致辞。张俊副秘书长在致辞指出,教育,乃民族之基,社会之梯。大型语言模型和深度学习等前沿技术,为教育变革提供了前所未有的机遇。中国自动化学会始终坚守在推动教育进步的前沿阵地,举办“大模型技术赋能教育研讨会”,旨在汇聚教育技术专家、教育工作者及科技企业代表,共同研讨大模型技术在教育中的应用机遇与挑战,分享成功案例,搭建合作桥梁,以高瞻远瞩的视野、开放包容的心态参与讨论,共同为教育事业贡献智慧与力量。

余新国教授作了题为“大模型与知识流技术共建数学解答大

脑”的报告,报告指出结合大模型与传统解答技术的互补性,通过网络化的数学解答技术联结,构建数学解答大脑,可以实现从解答算法研究向解答大脑研发的飞跃。聚焦解答大脑关键环节有四大核心方法:一是基于状态转移理论和透视分析方法构建数学解答网络;二是赋予数学解答网络思考与决策能力,使其进化为解答大脑;三是研发解答大脑进化方法,包括提升转移技术能力和集成新解答算法;四是构建基于解答大脑的数学教育服务系统。

田锋教授作“结合大模型的混合增强智能赋能教育案例”主题报告,在报告中回顾并总结教育技术发展历史,指出教师、学生、机器智能的优势与缺点;提



图1 中国自动化学会副秘书长、武汉大学教授张俊致辞



图2 华中师范大学教授余新国作报告



图3 中国自动化学会智慧教育专委会副主任委员、西安交通大学教授、大数据算法与分析技术国家工程实验室大数据算法测试与示范应用中心主任田锋作报告



图4 中国科学技术大学认知智能全国重点实验室教授、人工智能与数据科学学院副院长刘淇作报告

出师-机-生复合主体混合增强智慧教育理论，介绍了结合大模型的情景理解、智能导学、科学评价等核心关键技术研究进展，以及基于这些技术研制的平台。

刘淇教授作题为“认知智能赋能数字教育：技术探索与应用实践”的报告，报告指出大数据和人工智能的发展驱动着教育的数字化转型日益加速，尤其是以大模型为代表的认知智能技术有望革新教学理念、转变教学模式，真正实现教育教学过程的数智重塑。报告围绕学习者的认知能力诊断、教学资源的知识理解、学

习路径的自适应生成等关键研究问题，探讨了认知智能赋能数字教育的技术路径与系统集成案例。

孙建文教授作“教育大模型塔式构建法”的报告，指出大模型已成为当前“人工智能+教育”融合创新的重要驱动力量，但如何构建真正懂教育的大模型仍面临诸多挑战。首先从教育场域出发，分析了教育大模型发展的内在诉求与关键挑战；其次，基于经典教育理论“经验之塔”，探索性提出教育大模型塔式构建法，通过充分吸收教育领域抽象经验、观察经验与实践经验，促进大模型知行合一；然

后，通过典型应用案例初步验证了塔式构建法的有效性；最后，对教育大模型未来趋势进行了展望。

本次研讨会还动员多位教育领域的专家现场进行了积极的发言与讨论，分享真知灼见与宝贵经验。无论是成功案例的展示，还是所遇到的困难和挑战，都将成为我们共同学习与进步的宝贵资源。研讨会期间，大会还组织了一系列专题讨论和工作坊活动，旨在让嘉宾们深入了解大模型技术的最新进展和前沿趋势，共同探讨如何将这些先进技术应用于实际教育工作中。

学会秘书处 供稿



图5 中国自动化学会智慧教育专业委员会副秘书长、华中师范大学教授、国家数字化学习工程技术研究中心副主任孙建文作报告



图6 合影留念

## 高端科研资源科普化研讨会在京成功举行

2025年1月11日,由中国自动化学会、中国青少年科技教育工作者协会共同主办的“2025中国自动化与人工智能科普大会暨创新人才贯通式培养研讨会”在京盛大召开。专题会议“高端科研资源科普化研讨会”于11日下午隆重举行。会议旨在汇聚各方智慧与力量,深入探讨高端科研资源科普化的有效路径,推动科研成果的广泛传播与青少年科技素养的全面提升,为创新型国家建设提供有力支撑。

研讨会由《中国科技教育》杂志副主编黄锦华主持,中国自动化学会副理事长、中国科学院自动化研究所研究员侯增广和中国科学院大学人工智能学院执行院长、教授肖俊先后发表致辞。

侯增广研究员指出,科普工

作是连接科技与青少年的桥梁,是激发大众科学兴趣、培养创新人才的摇篮。因此要积极整合科普资源,创新科普形式,努力将深奥的科技知识转化为生动有趣的科普内容,让青少年在轻松愉快的氛围中感受科技的魅力。

肖俊教授表示,高端科研资源的科普化对于提升全民科技素养、推动创新型国家建设具有深远意义。为了实现这一目标,必须加强科研与教育的深度融合,充分发挥高校与科研机构在人才培养与科研创新方面的优势,依托现代科技手段如人工智能、大数据等拓展科普传播渠道,打造多元化的科普平台。同时,还需提升科普内容的科学性、精准性、趣味性与互动性,让科普真正走进公众生活。他呼吁广大科研人

员要走出实验室,积极投身科普事业,为我国教育和科技的发展贡献自己的力量。

随后,会议进行了“CAA科普百人团-科技教育乡村行”活动合作备忘录签约仪式。侯增广副理事长和中国科协白家庄办公区党委副书记、纪委书记,中国科协农村专业技术服务中心副主任郑明杰分别代表中国自动化学会和中国科协农村专业技术服务中心,共同签署了活动合作备忘录。此次签约标志着中国自动化学会与中国科协农村专业技术服务中心将携手开展科普活动,通过组织专家团队深入乡村学校、社区,开展科普讲座、实验演示、科技体验等活动,为乡村青少年提供优质的科普资源,拓宽他们的科学视野,激发他们的创新思



图1 《中国科技教育》杂志副主编黄锦华主持



图2 中国自动化学会副理事长、中国科学院自动化研究所研究员侯增广致辞



图3 中国科学院大学人工智能学院执行院长、教授肖俊致辞



图4 “CAA 科普百人团 - 科技教育乡村行”活动合作备忘录签约仪式



图5 中国自动化学会理事、中国自动化学会普及工作委员会主任、复旦大学教授张军平作专题报告



图6 中国青少年科技教育工作者协会人工智能普及教育专业委员会委员，北京大学智能学院研究员袁晓如作专题报告

维，助力乡村科技教育的发展。

主题报告环节，五位教授和科技教育专家登台分享高端科研资源转化为科普教育的经验和思考。

中国自动化学会理事、中国自动化学会普及工作委员会主任、复旦大学教授张军平作了题为“人工智能科普经验分享”的报告。他指出，人工智能正处于第三次热潮，但普通民众对其了解并不深入，甚至经常被一些伪AI的Up主误导。为了更好地科普人工智能，他从科普书、短视频、线上线下讲座等方面分享了自己的经验。张教授还强调，科普工作者要不断更新自己的知识储备，紧跟人工智能的最新发展动态，以确保科普内容的科学性与前沿性。

中国青少年科技教育工作者协会人工智能普及教育专业委员会委员、北京大学智能学院研究员袁晓如以“可视化看中国”为题进行了分享。袁晓如在报告中指出，在社会飞速数字化、智能化的当下，可视化技术能够帮助

学者和大众透过纷繁复杂的数据，直视内在规律。他从数据入手，通过专门构建的交互可视化，带领听众回顾中国浩大历史长河中的重彩瞬间；展示了如何从数据角度，通过新的视角和手段解析人文历史，理解当下。他强调，可视化不仅是一种技术手段，更是一种思维方式。

中国科学院自动化研究所副研究员刘希未作了题为“高端科研资源科普化实践探索”的报告，他指出，国家推动科技、教育、人才一体化战略，强调高端科研资源在服务科技创新的同时，还需落地基础教育一线，以培养未来的创新型人才。刘希未副研究员详细介绍了中国自动化学会开展的一系列品牌活动，包括制定人工智能核心素养测评标准、举办人工智能探究性学习训练营、推动科普百人团科技教育乡村行、发起青少年人工智能创新后备人才培养工程教科课题、研发中小学人工智能示范课程、组织AI辅导师培训等。他强调，面向未

来，大模型、生成式人工智能等新一代人工智能技术在教育中的应用仍然面临着诸多新问题与挑战，需要持续探索与应对。

北京市海淀区教师进修学校信息技术中心主任钟建业以“中小学人工智能师资建设的机遇与挑战”为题作了分享。钟建业主任结合调研数据分析了海淀区中小学人工智能课程开设的现状以及中小学人工智能师资的现状，指出了当前师资队伍建设中存在的问题与不足，并分享了海淀区中小学人工智能师资建设的一些具体做法和思考，包括加强师资培训、建立师资交流平台、开展教学研讨活动等，以提升教师的专业素养与教学能力，更好地适应人工智能教育的发展需求。

中国人民大学附属中学信息技术教研组长武迪作了题为“人工智能项目式培养与成果分享”的报告，从一线教师的角度分享了中学生AI项目实践的经验与思考。她介绍了中国人民大学附属中学开展的AI项目式培养模式，



图7 中国科学院自动化研究所副研究员刘希未作专题报告



图8 北京市海淀区教师进修学校信息技术与技术中心主任钟建业作专题报告



图9 中国人民大学附属中学信息技术教研组长武迪作专题报告

强调项目式学习能够让学生在真实情境中应用所学知识，培养他们的创新思维、实践能力与团队合作精神。随后武迪博士分享了学生在 AI 项目中取得的一些成果案例，如足球赛场智能检测、智能小厨星等，并总结了项目式培养过程中的一些心得体会，为与会者提供了有益的借鉴。

主题交流环节由《光明少年》杂志主编宋欣园主持。首都师范大学教授、教育部高中信息技术课程标准专家组成员、教育部义务教育信息科技课程标准专家组成员樊磊；中国自动化学会副秘书长、武汉大学教授张俊；中国青少年科技教育工作者协会人工智能普及教育专业委员会主任，北京航空航天大学计算机学院院长、教授王蕴红；中国青少年科技教育工作者协会人工智能普及教育专业委员会主任、北京大学智能学院研究员袁晓如；全国政协委员、澳门培正中学校长高锦辉；中国人民大学附属中学朝阳学校副校长，中国人民大学附属

中学信息技术特级教师、正高级教师袁中果六位嘉宾围绕“高端科研资源科普化路径”“跨学科融合”“如何搭建合作平台，促进科研与科普的深度融合”等议题展开了深入的讨论。

最后，会议进行了青少年人工智能创新后备人才培养工程（以下简称“工程”）年度总结。在过去的一年中，该工程通过组织学生培养、教师发展、教学科研、基地建设、科普公益等活动，推动了青少年人工智能核心素养

的提升，也促进了创新人才的选拔和培育。

作为一次汇聚智慧、分享实践的盛会，本次研讨会为科研资源科普化提供了全新的思路与方法，也为教育界与科技界的合作搭建了重要平台。未来，随着更多高端科研资源的有效转化与普及，科普事业将在全民科学素养提升与创新人才培养方面发挥更加重要的作用。○

学会秘书处 供稿



图10 “高端科研资源科普化路径”圆桌讨论

## 2025 “CAA 科普百人团 - 科技教育乡村行” 活动合作备忘录签约仪式圆满完成

2025年1月11日-12日，备受瞩目的2025中国自动化与人工智能科普大会暨创新人才贯通式培养研讨会在京隆重举行。此次大会不仅汇聚了国内自动化与人工智能领域的顶尖专家和学者，还吸引了众多对科学普及与创新人才培养充满热情的各界人士。大会期间，“CAA 科普百人团 - 科技教育乡村行”活动合作备忘录签约仪式隆重举行，此次签约仪式标志着中国自动化学会与中国科协农村专业技术服务中心将携手合作，共同开启一段旨在提升乡村青少年与科技教师科学素养的科普活动之旅。

中国自动化学会会士、副理事长，中国科学院自动化研究所研究员侯增广，以及中国科协白家庄办公区党委副书记、纪委书记，中国科协农村专业技术服务中心副主任郑明杰，分别代表中国自动化学会和中国科协农村专业技术服务中心签署了活动合作备忘录。此次签约正式启动了2025年“CAA 科普百人团 - 科技教育乡村行”活动。



图1 《中国科技教育》杂志副主编黄锦华现场主持

为深入贯彻落实《全民科学素质行动规划纲要（2021—2035年）》精神，积极响应国家乡村振兴战略，基于双方在乡村振兴与教育合作领域所奠定的坚实基础，2025年“CAA 科普百人团 - 科技教育乡村行”活动将充分整合中国自动化学会和中国科协农技中心的优质科普资源，共同组织由自动化与人工智能领域知名专家、学者、一线科技教师组成的“CAA 科普百人团”以及大学生志愿者，深入乡村中小学学校，开展一系列丰富多彩的科普活动。

据悉，该活动将聚焦国家乡村振兴重点帮扶县，依托“科普百人团”专家资源，组织招募大学生志愿者队伍，设计开发多课时体系化的支教课程并组织开展



图2 侯增广副理事长和郑明杰副主任签约合影

培训，确保志愿服务的专业性与实效性。活动将采取“专家科普讲座 + 大学生实地支教”的创新模式开展，2025年计划组织超过100场次科普讲座、项目制课程、动手实践等多种形式的科普活动，为基层普及自动化与人工智能等前沿科技知识，激发乡村中小学生的的好奇心、想象力、探求欲，培育具备科学家潜质、愿意献身科学研究事业的青少年群体。

双方代表领导均表示，将以此此次签约为契机，进一步加强双方在科普领域的合作与交流，共同推动乡村科技教育的发展。我们期待在双方的共同努力下，这一活动能够取得圆满成功，为乡村青少年点亮科技之光，照亮他们通往科学殿堂的道路。○

学会秘书处 供稿

# 2025 中国自动化与人工智能科普大会名师工作坊 展示示范性科普课程

2025 年 1 月 11 日 -12 日，由中国自动化学会和中国青少年科技教育工作者协会联合主办的“2025 中国自动化与人工智能科普大会暨创新人才贯通式培养研讨会”在北京圆满召开。本次大会聚焦产学研资源融合，致力于探索大中小学贯通式培养模式，推动人工智能教育的科学化、系统化、标准化和规范化发展。其中，作为大会的重要环节，两个平行的“名师工作坊”于 12 日上午成功举办，吸引了众多教育界人士参与。

本次名师工作坊以“人工智能融入中学科学教育的创新实践”为主题，特邀高凯老师和郑子杰

老师两位深耕一线教学、在人工智能教育领域具有卓越成就的名师举办工作坊，分享自己的课程研发和教学经验，讲解成熟的课程案例，为参会教师带来了启发与借鉴。

## 高凯：人工智能教学的多元载体实践

来自北京市第二中学的高凯老师是北京市骨干教师、全国十佳科技教师、全国高级科技辅导员，还是中国自动化学会科学普及专委会副秘书长、中国青少年科技工作者协会人工智能专委会和机器人专委会的委员。高凯老师曾获全国教学成果二等奖，曾

在各级各类报刊杂志发表文章 50 余篇，主编书籍 5 本。

高凯老师以“人工智能教学的多元载体实践”为主题，展示了如何通过多样化的教学载体，将人工智能知识深度嵌入教学实践。他结合实际案例，生动展现了如何激发学生的学习兴趣与创造潜能，并为参会者提供了丰富的教学思路。作为全国十佳科技教师，高老师的分享既具操作性，又充满前瞻性，赢得了在场教师的高度评价。

在工作坊里，高凯老师讲解和演示了两个教学项目，其一是“强化学习无人车体验”这是一个具有可视化功能的人工智能实验，



图 1 高凯老师进行“人工智能教学的多元载体实践”工作坊教学



图 2 高凯老师指导参与教师实操

以平台中的无人车为载体，教师自主设计无人车行驶的策略和奖励函数，利用平台提供的算力进行强化学习。在工作坊中教师能够看到无人车进行机器学习和迭代的过程。

高凯老师演示的第二个项目是“图像识别技术探究高楼阻尼器设计的要素”，这是一个将人工智能技术和物理学科实验相结合的探究实验项目，利用图像识别技术检测“高楼”的晃动，并自主设计实验为“高楼”增加阻尼器。通过改变阻尼器的重量、位置、摆长等参数来获取实验数据，根据图像得出相应的实验结论。

这两个体验典型的人工智能实验项目，为现场的老师们拓展了人工智能课程设计的思路。

### 郑子杰：如何在中学科学教育中融入 AI 元素

郑子杰是北京市十一学校的数学教师和人工智能课程教师，

是北京大学信号与信息处理专业的博士。攻读博士期间的主要研究方向有分布式计算中的资源分配、优化论与博弈论、机器学习算法在通信领域的应用等，期间发表论文 40 余篇。郑老师参与开发的人工智能普及课程“人工智能技术与应用”在 2021 年 4 月被认定为北京市第一批普通高中特色课程。他还是第一届国际人工智能奥林匹克（IOAI）中国国家队领队，以及 IOAI 国际科学委员会成员。

在工作坊里，郑子杰老师以“如何在中学科学教育中融入 AI 元素”为题，分享了他多年实践经验。他详细讲解了如何在科学课程中设计 AI 教学环节，融入 AI 的思想方法，让学生在实践中掌握未来所需的关键能力。

郑老师的演示和分享分为 4 个模块，前两个模块是人工智能的发展简史，以及区分人工智能赋能教育和人工智能教育；在第

三个模块，郑老师突出阐释了机理驱动和数据驱动；在第四个模块，郑老师基于 AI4S TEEN Cup 的组织、题目设计和选手参赛的情况，分别以数学、物理、化学、生物四个案例作为载体，分享如何将“数据驱动”的 AI 核心思想方法融入到中学的科学问题的解决中。

郑子杰老师的工作坊为一线教师将人工智能引入中学科学教学提供了具体可行的教学策略，受到了与会者的热烈欢迎。

这两场平行工作坊的现场气氛都十分热烈，参会教师不仅获得了关于人工智能教育的宝贵经验，还与专家和同行进行了深度交流，共同探讨人工智能教育的新路径。未来，随着产学研更多方向资源与智慧的注入，人工智能教育必将在中学课堂中焕发更加夺目的光彩。○

学会秘书处 供稿

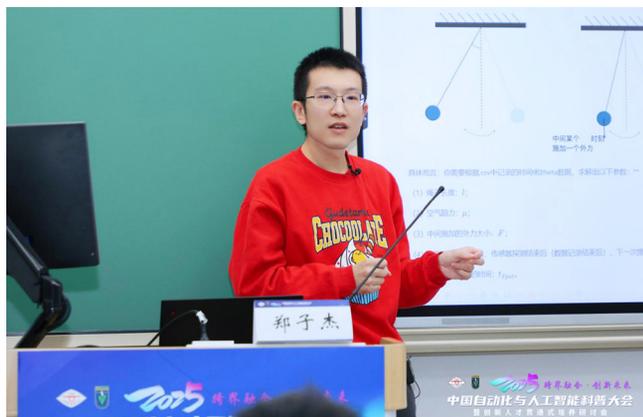


图 3 郑子杰老师进行“如何在中学科学教育中融入 AI 元素”工作坊教学



图 4 郑子杰老师指导参与教师实操

# 中国自动化学会空间及运动体控制专业委员会换届会议成功召开

2025年1月5日，中国自动化学会空间及运动体控制专业委员会换届会议在北京成功召开。中国自动化学会秘书长张楠，中国自动化学会理事、北京控制工程研究所解永春研究员，专委会候选负责人及候选委员60人出席会议。会议由解永春研究员主持。

首先，中国自动化学会张楠秘书长致辞，她对第九届中国自动化学会空间及运动体控制专业委员会的工作给予了高度评价，指出在过去五年里，在全体委员的共同努力下，专委会在组织建设、学术交流、智库建设、期刊发展、科普宣传等方面都取得了丰硕的成果，形成了以全国空间及运动体控制技术学术委员学术会议为代表的品牌学术会议，建立全国首批科学家精神教育基地，《空间控制技术与应用》期刊影响因子逐年升高，感谢第九届全体委员的辛勤付出。之后，张楠秘书长代表中国自动化学会宣读了对空间及运动体控制专业委员会换届的批复，希望新一届的专委会再接再厉，在新的起点上实现

新的突破，为我国科技创新贡献新的力量。希望专委会能够充分发挥各委员及其所在单位的优势，紧密团结，凝心聚力，加强协作，积极探索创新，共同推动我国空间及运动体控制领域的创新发展。

随后，第九届专委会秘书长解永春研究员作第九届专委会工作报告，从学术交流、科普活动、智库建设、期刊发行、人才举荐、国际交往及国际任职等方面对第九届专委会工作进行总结并对第十届专委会换届筹备情况进行了汇报。

接下来，解永春理事主持了换届选举环节，共选举产生66位专委会委员，包括主任委员1人、副主任委员4人、秘书长1人。北京控制工程研究所李永研究员当选主任委员，哈尔滨工业大学吴立刚教授、国防科技大学罗亚中教授、西北工业大学周军教授、北京航天自动控制研究所侯雄研究员当选副主任委员，北京控制工程研究所李意研究员当选秘书长。60名委员来自40余家高等院校、科研院所，具有广泛的代表性。

第十届中国自动化学会空间及运动体控制专业委员会主任委员李永研究员代表新一届专委会对当选的负责人及委员表示祝贺，并对中国自动化学会的大力支持表示感谢。他表示，在学会的引领与指导下，专委会将以更高的标准、更严的要求，在党建、学术会议、前沿论坛、科学普及等工作方面持续发力，推动空间及运动体控制领域产学研合作交流迈向新高度。与会代表为专委会的发展积极建言献策。他们结合自身专业领域与行业经验，提出了一系列宝贵且富有前瞻性的意见和建议，共同为专委会的未来发展绘制蓝图。

本次换届会议的成功召开，标志着中国自动化学会空间及运动体控制专业委员会在新的征程上迈出了坚实的一步。相信在中国自动化学会的领导下，新一届专委会将团结协作，积极进取，为推动空间及运动体控制技术的发展、促进学术交流与合作贡献更多力量。○

CAA空间及运动体控制专业委员会 供稿

## 第十届中国自动化学会空间及运动体控制专业委员会名单

主任委员：李 永

副主任委员（按姓氏笔画排序）

吴立刚 罗亚中 周 军 侯 雄

秘 书 长：李 意

委 员（按姓氏笔画排序）

万自明 马 天 王 平 王 斑 王学锋 卢晓东 伊国兴 刘 切 刘 辉 刘 磊 刘向东  
刘丽霞 刘利军 刘铸永 汤 亮 孙立宁 李 彬 李 爽 李明涛 李超勇 李鹏飞 李群智  
杨 帆 杨志红 吴立刚 吴志刚 吴益飞 吴敬玉 何 俊 何立火 沈 强 张 尧 张 涛  
张 强 张 鑫 张秀云 张海博 张景瑞 陈庆伟 邵晋梁 罗亚中 郑敏华 赵 辉 钟 睿  
侯 健 洪文兴 姚 娜 莫宏伟 贾英宏 高 瑞 高陈强 高晓颖 郭 毓 郭延宁 黄 河  
康建兵 程月华 谢安桓 蔡远利 廖宇新 谭天乐 魏春岭



### 中国自动化学会青年菁英系列活动（CAA Yes）征集通知

2021年，时值中国自动化学会六十周年华诞之际，中国自动化学会面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求、面向人民生命健康，创设中国自动化学会青年菁英系列活动（CAA Youth e-Summit，简称CAA YeS），旨在为广大青年菁英提供分享自动化、信息与智能科学领域最新研究进展和一线科研动态的学术交流平台。

2025，岁序更新，新篇启航。中国自动化学会现面向学会各理事单位、会员单位、省级自动化学会、分支机构、科普教育基地及学会会员、科技工作者广泛征集CAA YeS系列活动承办单位，具体要求如下：

#### 1 活动形式

1. 活动举办形式灵活，线上线下均可；活动内容可为主题报告、座谈交流等多种形式；
2. 每期CAA YeS活动至少包含2位来自企业的青年科技工作者；
3. CAA YeS活动需提前向中国自动化学会报备，由学会统一编号，受中国自动化学会统一管理；
4. 活动应以一线青年科技工作者为对象举办，紧贴科技前沿热点方向，为青年科技工作者提供良好交流平台。

#### 2 申请方式

各申办单位填写附件申请表，并提交至学会邮箱 [caa@ia.ac.cn](mailto:caa@ia.ac.cn)，邮件主题“CAA YeS 申请 + 申请人 / 申请单位”。

#### 3 联系方式

联系人：屈老师；联系电话：15901363512；电子邮箱：[caa@ia.ac.cn](mailto:caa@ia.ac.cn)

# 以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业

党中央决定举办这次新晋中央委员会的委员、候补委员和省部级主要领导干部学习贯彻新时代中国特色社会主义思想研讨班，目的是促进高级干部带头深入学习贯彻新时代中国特色社会主义思想和党的二十大精神，进而推动全党全国人民把思想统一到新时代中国特色社会主义思想和党的二十大精神上来，把力量凝聚到实

现党的二十大确定的目标任务上来。

党的二十大精神内容极为丰富，我在不同场合作过一些阐述、提了一系列学习贯彻要求。我认为，概括提出并深入阐述中国式现代化理论，是党的二十大一个重大理论创新，是科学社会主义的最新重大成果。所以，我今天就围绕如何认识和推进中国式现代化，讲几点意见。

## 一、中国式现代化是我们党领导人民长期探索和实践的重大成果

具有5000多年文明历史的中华民族，长期走在世界前列。明朝后期开始实行闭关锁国政策，错失工业革命、科技革命机遇，中国在内部矛盾和西方现代化浪潮冲击下逐渐走向衰落。1840年鸦片战争成为“压倒骆驼的最后一根稻草”，中国逐步沦为半殖民地半封建社会，遭受前所未有的劫难。为了摆脱落后挨打、任人宰割的悲惨命运，中国人民奋起反抗，仁人志士苦苦求索，进行民族复兴的各种尝试，洋务运动试图“师夷长技以制夷”，戊戌变法试图通过改良来图强，孙中山先生领导辛亥革命试图以资产阶级共和国、振兴实业等方案来实现现代化，但都以失败告终。探索中国现代化道路的重任，历史地落在了中国共产党身上。

在半殖民地半封建社会，要实现现代化是不可能的。在新民主主义革命时期，我们党团结带领人民，浴血奋战、百折不挠，经过北伐战争、土地革命战争、

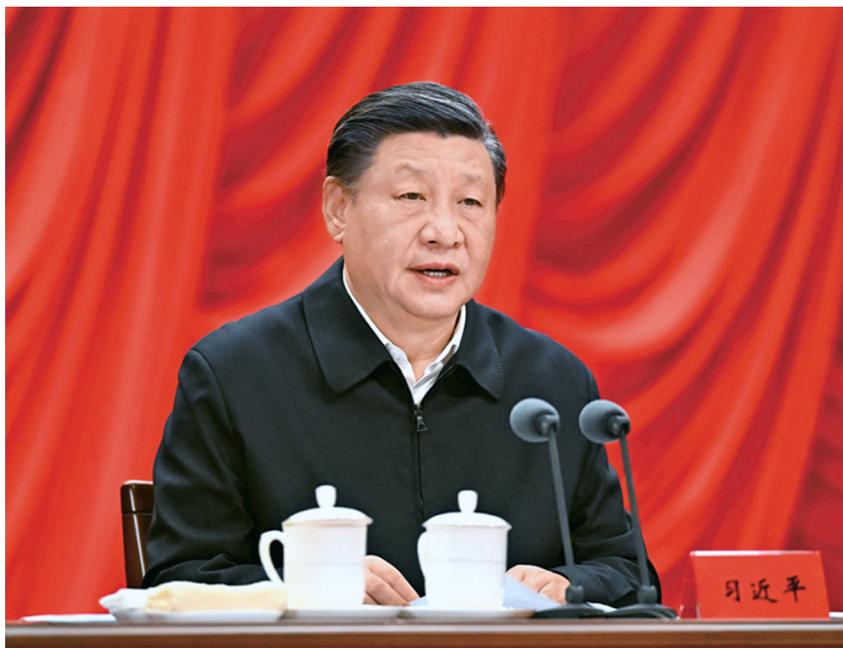


图1 2023年2月7日，新晋中央委员会的委员、候补委员和省部级主要领导干部学习贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想和党的二十大精神研讨班在中央党校（国家行政学院）开班。中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在开班式上发表重要讲话。

新华社记者 李学仁 / 摄

抗日战争、解放战争，推翻帝国主义、封建主义、官僚资本主义三座大山，建立了人民当家作主的中华人民共和国，实现了民族独立、人民解放，为实现现代化创造了根本社会条件。

新中国成立后，我们党团结带领人民进行社会主义革命，消灭在中国延续几千年的封建制度，确立社会主义基本制度，实现了中华民族有史以来最为广泛而深刻的社会变革，为现代化建设奠定根本政治前提和制度基础。当时，我国一穷二白，连日用的煤油、火柴、铁钉都称为洋油、洋火、洋钉。为尽快改变这种落后状况，我们党进行了艰辛探索，提出努力把我国建设成为一个具有现代农业、现代工业、现代国防和现代科学技术的社会主义强国。经过实施几个五年计划，我国建立起独立的比较完整的工业体系和国民经济体系，特别是取得了“两弹一星”等国防尖端科技突破，党在社会主义革命和建设中取得的独创性理论成果和巨大成就，为现代化建设提供了宝贵经验、理论准备、物质基础。

改革开放和社会主义现代化建设新时期，我们党作出把党和国家工作中心转移到经济建设上来、实行改革开放的历史性决策，开启了中国式现代化的新长征。如何缩小我国同西方发达国家在经济科技发展水平上的巨大差距，

如何赶上时代、加快实现现代化？我们党一开始就保持着清醒的头脑，并没有像一些发展中国家那样亦步亦趋地跟在西方国家后面简单模仿，而是强调从中国实际出发，走自己的现代化道路。为加快推进社会主义现代化，我们党坚持党的基本路线不动摇，大力推进实践基础上的理论创新、制度创新、文化创新以及其他各方面创新，实行社会主义市场经济体制，实现了从生产力相对落后的状况到经济总量跃居世界第二的历史性突破，实现了人民生活从温饱不足到总体小康、奔向全面小康的历史性跨越，为中国式现代化提供了充满新的活力的体制保证和快速发展的物质条件。

党的十八大以来，我们党在已有基础上继续前进，坚持问题导向，围绕解决现代化建设中存在的突出矛盾和问题，全面深化

改革，不断实现理论和实践上的创新突破，成功推进和拓展了中国式现代化。10年来，我们在认识上不断深化，创立了新时代中国特色社会主义思想，实现了马克思主义中国化时代化新的飞跃，为中国式现代化提供了根本遵循。我们进一步深化对中国式现代化的内涵和本质的认识，概括形成中国式现代化的中国特色、本质要求和重大原则，初步构建中国式现代化的理论体系，使中国式现代化更加清晰、更加科学、更加可感可行。我们在战略上不断完善，作出到本世纪中叶把我国建成富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化强国“两步走”的战略安排，明确“五位一体”总体布局和“四个全面”战略布局，深入实施科教兴国战略、人才强国战略、乡村振兴战略等一系列重大战略，为中国式现代化提供



图2 2024年12月19日晚，庆祝澳门回归祖国25周年文艺晚会在澳门东亚运动会体育馆举行。中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平观看演出。晚会最后，习近平同全场观众一起高唱《歌唱祖国》。新华社记者 丁林 / 摄

坚实战略支撑。我们在实践上不断丰富，推进一系列变革性实践、实现一系列突破性进展、取得一系列标志性成果，特别是消除了绝对贫困问题，全面建成小康社会，推动党和国家事业取得历史性成就、发生历史性变革，为中国式现代化提供了更为完善的制度保证、更为坚实的物质基础、更为主动的精神力量。

总之，中国式现代化是我们党领导全国各族人民在长期探索和实践中历经千辛万苦、付出巨大代价取得的重大成果，我们必须倍加珍惜、始终坚持、不断拓展和深化。

## 二、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，党的领导直接关系到中国式现代化的根本方向、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，



图3 2024年10月17日至18日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在安徽考察。这是17日下午，习近平在合肥滨湖科学城察看安徽省重大科技创新成果集中展示。新华社记者 谢环驰 / 摄

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。

### **三、中国式现代化是强国建设、民族复兴的康庄大道**

一个国家选择什么样的现代化道路，是由其历史传统、社会制度、发展条件、外部环境等诸多因素决定的。国情不同，现代

化途径也会不同。实践证明，一个国家走向现代化，既要遵循现代化一般规律，更要符合本国实际，具有本国特色。中国式现代化既有各国现代化的共同特征，更有基于自己国情的鲜明特色。党的二十大报告明确概括了中国式现代化5个方面的中国特色，深刻揭示了中国式现代化的科学内涵。这既是理论概括，也是实践要求，为全面建成社会主义现代化强国、实现中华民族伟大复兴指明了一条康庄大道。

康庄大道并不等于一马平川。要把中国式现代化5个方面的中国特色变为成功实践，把鲜明特色变成独特优势，需要付出艰巨努力。

**第一，人口规模巨大的现代化。**这是中国式现代化的显著特征。人口规模不同，现代化的任务就不同，其艰巨性、复杂性就不同，发展途径和推进方式也必然具有自己的特点。现在，全球进入现代化的国家也就20多个，总人口10亿左右。中国14亿多人口整体迈入现代化，规模超过现有发达国家人口的总和，将极大地改变现代化的世界版图。这是人类历史上规模最大的现代化，也是难度最大的现代化。

超大规模的人口，既能提供充足的人力资源和超大规模市场，也带来一系列难题和挑战。光是解决14亿多人的吃饭问题，就是一个不小的挑战。还有就业、分

配、教育、医疗、住房、养老、托幼等问题，哪一项解决起来都不容易，哪一项涉及的人群都是天文数字。我们想问题、作决策、办事情，首先要考虑人口基数问题，考虑我国城乡区域发展水平差异大等实际，既不能好高骛远，也不能因循守旧，要保持历史耐心，坚持稳中求进、循序渐进、持续推进。

**第二，全体人民共同富裕的现代化。**这是中国式现代化的本质特征，也是区别于西方现代化的显著标志。西方现代化的最大弊端，就是以资本为中心而不是以人民为中心，追求资本利益最大化而不是服务绝大多数人的利益，导致贫富差距大、两极分化严重。一些发展中国家在现代化过程中曾接近发达国家的门槛，却掉进了“中等收入陷阱”，长期陷于停滞状态，甚至严重倒退，一个重要原因就是没有解决好两极分化、阶层固化等问题。

中国式现代化坚持发展为了人民、发展依靠人民、发展成果由人民共享，在推动全体人民共同富裕上取得重要进展，特别是党的十八大以来打赢脱贫攻坚战，使近1亿农村贫困人口脱贫。现在，我们已经形成促进全体人民共同富裕的一整套思想理念、制度安排、政策举措。要在推动高质量发展、做好做大“蛋糕”的同时，进一步分好“蛋糕”，着力解决好就业、分配、教育、医疗、

住房、养老、托幼等民生问题，构建三次分配协调配套的制度体系，规范收入分配秩序，规范财富积累机制，依法引导和规范资本健康发展，逐步扩大中等收入群体、缩小收入分配差距，让现代化建设成果更多更公平惠及全体人民，坚决防止两极分化。实现共同富裕是一个长期任务，必须久久为功，咬定青山不放松，不断取得新进展。

**第三，物质文明和精神文明相协调的现代化。**既要物质富足、也要精神富有，是中国式现代化的崇高追求。物质贫困不是社会主义，精神贫乏也不是社会主义。西方早期的现代化，一边是财富的积累，一边是信仰缺失、物欲横流。今天，西方国家日渐陷入困境，一个重要原因就是无法遏制资本贪婪的本性，无法解决物质主义膨胀、精神贫乏等痼疾。

中国式现代化既要物质财富极大丰富，也要精神财富极大丰富、在思想文化上自信自强。要坚持两手抓、两手硬，促进物质文明和精神文明相互协调、相互促进，让全体人民始终拥有团结奋斗的思想基础、开拓进取的主动精神、健康向上的价值追求。要顺应人民日益增长的精神文化需求，建设具有强大凝聚力和引领力的社会主义意识形态，加强理想信念教育和“四史”宣传教育，培育和弘扬社会主义核心价

值观，发展社会主义先进文化，推出更多优秀文艺作品，不断丰富人民精神世界，提高全社会文明程度，促进人的全面发展。

**第四，人与自然和谐共生的现代化。**尊重自然、顺应自然、保护自然，促进人与自然和谐共生，是中国式现代化的鲜明特点。近代以来，西方国家的现代化大都经历了对自然资源肆意掠夺和生态环境恶性破坏的阶段，在创造巨大物质财富的同时，往往造成环境污染、资源枯竭等严重问题。我国人均能源资源禀赋严重不足，加快发展面临更多的能源资源和环境约束，这决定了我国不可能走西方现代化的老路。

中国式现代化坚持可持续发展，坚持节约优先、保护优先、自然恢复为主的方针，坚定不移走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路，为实现中华民族永续发展开辟了广阔前景。要牢固树立和践行绿水青山就是金山银山的理念，坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理，推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展，加快发展方式绿色转型，提升生态系统多样性、稳定性、持续性，积极稳妥推进碳达峰碳中和，以高品质的生态环境支撑高质量发展。

**第五，走和平发展道路的现代化。**坚持和平发展，在坚定维护世界和平与发展中谋求自身发

展，又以自身发展更好维护世界和平与发展，推动构建人类命运共同体，是中国式现代化的突出特征。西方国家的现代化，充满战争、贩奴、殖民、掠夺等血腥罪恶，给广大发展中国家带来深重苦难。中华民族经历了西方列强侵略、凌辱的悲惨历史，深知和平的宝贵，决不可能重复西方国家的老路。

中国式现代化坚持独立自主、自力更生，依靠全体人民的辛勤劳动和创新创造发展壮大自己，通过激发内生动力与和平利用外部资源相结合的方式来实现国家发展，不以任何形式压迫其他民族、掠夺他国资源财富，而是为广大发展中国家提供力所能及的支持和帮助。我们要始终高举和平、发展、合作、共赢旗帜，奉行互利共赢的开放战略，不断以中国新发展为世界提供新机遇。积极参与全球治理体系改革和建

设，践行真正的多边主义，弘扬全人类共同价值，推动落实全球发展倡议和全球安全倡议，努力为人类和平与发展作出更大贡献。

新中国成立特别是改革开放以来，我们用几十年时间走完西方发达国家几百年走过的工业化历程，创造了经济快速发展和社会长期稳定的奇迹，为中华民族伟大复兴开辟了广阔前景。实践证明，中国式现代化走得通、行得稳，是强国建设、民族复兴的唯一正确道路。

#### 四、中国式现代化创造了人类文明新形态

中国式现代化，深深植根于中华优秀传统文化，体现科学社会主义的先进本质，借鉴吸收一切人类优秀文明成果，代表人类文明进步的发展方向，展现了不同于西方现代化模式的新图景，是一种全新的人类文明形态。中

国式现代化作为科学社会主义的最新重大成果，在国际上引起广泛关注。

**中国式现代化为全球提供了一种全新的现代化模式。**由于世界现代化进程是从西方资本主义国家开始的，当今世界的发达国家也主要是欧美国家和深受西方文明影响的资本主义国家。这就给人们一种错觉，似乎现代化就是西方化、西方文明就是现代文明。实际上，世界文明是多样的，世界上既不存在定于一尊的现代化模式，也不存在放之四海而皆准的现代化标准。中国式现代化，打破了“现代化=西方化”的迷思，展现了现代化的另一幅图景，拓展了发展中国家走向现代化的路径选择，为人类对更好社会制度的探索提供了中国方案。

中国式现代化是对西方式现代化理论和实践的重大超越。资本主义文明是建立在资本主义剥



图4 2024年9月5日上午，国家主席习近平在北京人民大会堂出席中非合作论坛北京峰会开幕式并发表主旨讲话。这是开幕式前，习近平同出席峰会的外方领导人集体合影。新华社记者 饶爱民 / 摄

削制度基础上的，它无法克服和消除文明下的野蛮本性。从根本上讲，生产资料私有制和社会化大生产之间的矛盾，是资本主义制度无法克服的固有矛盾，尽管资本主义制度和西方现代化模式也在不断演变，但其骨子里的资本至上、弱肉强食、两极分化、霸道强权的本性没有任何改变，其弊端愈益明显。中国式现代化中蕴含的独特世界观、价值观、历史观、文明观、民主观、生态观等及其伟大实践，是对世界现代化理论和实践的重大创新。

**中国式现代化为广大发展中国家提供了全新选择。**实现现代化是世界各国人民的权利和必然选择，关键是找到符合国情、符合人类社会规律的发展道路。第二次世界大战结束到上世纪90年代初期，一些发展中国家不顾国情和历史条件，全盘照搬西方模式，结果水土不服，绝大多数陷入经济长期停滞、社会政治动荡的困境。“道路选择”困扰着许多发展中国家。中国式现代化的初步成功实践和取得的显著成就，新时代以来“东升西降”、“中治西乱”的鲜明对比，使广大发展中国家看到了新的希望，有了新的选择。中国式现代化，是我们为如何唤醒“睡狮”、实现民族复兴这个重大历史课题所给出的答案，是选择自己的道路、做自己的事情。我们无意也没有输出中国式

现代化、“中国模式”，但中国式现代化为广大发展中国家独立自主迈向现代化树立了典范，必然会成为一些发展中国家所借鉴。

## 五、推进中国式现代化需要处理好若干重大关系

推进中国式现代化是一个系统工程，需要统筹兼顾、系统谋划、整体推进，正确处理好一系列重大关系。这里我重点强调6个方面。

**一是顶层设计与实践探索的关系。**党的二十大报告深刻阐述了中国式现代化的中国特色、本质要求和重大原则，是对推进中国式现代化的最高顶层设计。中国式现代化是分阶段、分领域推进的，实现各个阶段发展目标、

落实各个领域发展战略同样需要进行顶层设计。进行顶层设计，需要深刻洞察世界发展大势，准确把握人民群众的共同愿望，深入探索经济社会发展规律，使制定的规划和政策体系体现时代性、把握规律性、富于创造性，做到远近结合、上下贯通、内容协调。同时，推进中国式现代化是一个探索性事业，还有许多未知领域，需要我们在实践中去大胆探索，通过改革创新来推动事业发展，决不能刻舟求剑、守株待兔。各地区各部门要结合各自具体实际开拓创新，特别是在前沿实践、未知领域，鼓励大胆探索、敢为人先，寻求有效解决新矛盾新问题的思路 and 办法，努力创造可复制、可推广的新鲜经验。



图5 2024年6月18日至19日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在青海考察。这是18日下午，习近平在果洛西宁市民族中学高一（1）班观摩“新时代、新家乡”主题思政课。新华社记者 鞠鹏 / 摄

**二是战略与策略的关系。**战略与策略是我们党领导人民改造世界、变革实践、推动历史发展的有力武器。正确运用战略和策略，是我们党创造辉煌历史、成就千秋伟业、战胜各种风险挑战，不断从胜利走向胜利的成功秘诀。推进中国式现代化，必须把这一成功秘诀传承好、运用好、发展好。要增强战略的前瞻性，准确把握事物发展的必然趋势，敏锐洞悉前进道路上可能出现的机遇和挑战，以科学的战略预见未来、引领未来。增强战略的全局性，谋划战略目标、制定战略举措、作出战略部署，都要着眼于解决事关党和国家事业兴衰成败、牵一发而动全身的重大问题。增强战略的稳定性，战略一经形成，就要长期坚持、一抓到底、善作善成，不要随意改变。做到这些，需要我们提高政治站位，树立世界眼光，胸怀“国之大者”，把历史、现实、未来贯通起来，把中国和世界连接起来，增强战略思维能力，使我们制定的战略符合实际、行之有效，为中国式现代化提供强大的战略支撑。策略为战略实施提供科学方法。实施战略的环境条件随时都在发生变化，每时每刻都会遇到新情况新问题，这就需要我们把握战略的原则性和策略的灵活性有机结合起来，灵活机动、随机应变、临机决断，在因地制宜、因势而动、顺势而

为中把握战略主动。

**三是守正与创新的关系。**守正创新是我们党在新时代治国理政的重要思想方法。守正才能不迷失方向、不犯颠覆性错误，创新才能把握时代、引领时代。中国式现代化的探索就是一个在继承中发展、在守正中创新的历史过程。在推进中国式现代化新征程上，首先要守好中国式现代化的本和源、根和魂，毫不动摇坚持中国式现代化的中国特色、本质要求和重大原则，坚持党的基本理论、基本路线、基本方略，坚持党的十八大以来的一系列重大方针政策，确保中国式现代化的正确方向。同时，要把创新摆在国家发展全局的突出位置，顺应时代发展要求，着眼于解决重大理论和实践问题，积极识变应变求变，大力推进理论创新、实

践创新、制度创新、文化创新以及其他各方面创新，不断开辟发展新领域新赛道，塑造发展新动能新优势。积极营造崇尚创新、鼓励创新、勇于创新的浓厚氛围，让创新在全社会蔚然成风。各级领导干部要加快转变不适应创新发展要求的思想观念、思维方式、行为方式和工作方法，真正成为创新的引领者、推动者。

**四是效率与公平的关系。**中国式现代化既要创造比资本主义更高的效率，又要更有效地维护社会公平，更好实现效率与公平相兼顾、相促进、相统一。要坚持和完善社会主义基本经济制度，毫不动摇巩固和发展公有制经济，毫不动摇鼓励、支持、引导非公有制经济发展，充分发挥市场在资源配置中的决定性作用，更好发挥政府作用。构建全国统一大



图6 2024年3月18日至21日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在湖南考察。这是19日上午，习近平在常德河街考察。新华社记者 谢环驰 / 摄

市场，深化要素市场化改革，建设高标准市场体系，营造市场化、法治化、国际化营商环境，持续优化劳动、资本、土地、资源等生产要素配置，着力提高全要素生产率。加快建立以权利公平、机会公平、规则公平为主要内容的社会公平保障体系，保证人民平等参与、平等发展权利。深入推进司法体制改革，努力让人民群众在每一项法律制度、每一个执法决定、每一宗司法案件中都感受到公平正义。破除阶层固化的体制机制障碍，畅通社会上升通道。健全基本公共服务体系，提高公共服务水平，增强均衡性和可及性，扎实推进共同富裕取得更为明显的实质性进展。

**五是活力与秩序的关系。**在现代化的历史进程中，处理好这对关系是一道世界性难题。中国式现代化应当而且能够实现活而不乱、活跃有序的动态平衡。要深化各方面体制机制改革，充分释放全社会创造潜能，鼓励科学家、企业家、文艺家等各方面人才特别是青年人才创新、创造。积极发展党内民主，保障党员权利，采取切实有效措施解决不愿担当、不敢担当、不善担当等问题，充分调动广大党员干部干事创业的积极性。加强社会舆论引导，形成劳动创造财富、实干创造业绩、奋斗创造幸福的正确导向，防止轻视劳动、不劳而获、

一夜暴富、坐享其成、消极躺平等不良思想滋长蔓延，充分激发全社会创造活力。统筹发展和安全，贯彻总体国家安全观，健全国家安全体系，增强维护国家安全能力，坚定维护国家政权安全、制度安全、意识形态安全和重点领域安全。提高公共安全治理水平，完善社会治理体系，提升社会治理效能。发展全过程人民民主，正确处理新形势下人民内部矛盾，努力把矛盾纠纷化解在基层、化解在萌芽状态，教育引导人民群众通过理性合法途径表达利益诉求、维护合法权益。强化社会治安整体防控，依法严惩群众反映强烈的各类违法犯罪活动，确保人民安居乐业。

**六是自立自强与对外开放的关系。**推进中国式现代化，必须坚持独立自主、自立自强，坚持把国家和民族发展放在自己力量的基点上，坚持把我国发展进步的命运牢牢掌握在自己手中。要加快构建新发展格局，实现内部可循环，并依托我国超大规模市场优势吸引全球资源要素，增强国内国际两个市场两种资源联动效应。维护好经济安全特别是粮食安全、能源安全、产业链供应链安全。健全新型举国体制，强化国家战略科技力量，以国家战略需求为导向，集聚力量进行原创性引领性科技攻关，坚决打赢关键核心技术攻坚战。不断扩大

高水平对外开放，提升贸易投资合作质量和水平，稳步扩大规则、规制、管理、标准等制度型开放，推动共建“一带一路”高质量发展，优化区域开放布局，实施自由贸易试验区提升战略，扩大面向全球的高标准自由贸易区网络，深度参与全球产业分工和合作，维护多元稳定的国际经济格局和经贸关系，拓展中国式现代化的发展空间。

## 六、推进中国式现代化必须进行伟大斗争

敢于斗争是我们党与生俱来的政治基因和百年淬炼的鲜明品格。我们党依靠斗争创造辉煌历史，更要依靠斗争开辟光明未来。推进中国式现代化，是一项前无古人的开创性事业，必然会遇到各种可以预料和难以预料的风险挑战、艰难险阻甚至惊涛骇浪，必须增强忧患意识，坚持底线思维，居安思危、未雨绸缪，敢于斗争、善于斗争，通过顽强斗争打开事业发展新天地。历史反复证明，以斗争求安全则安全存，以软弱退让求安全则安全亡；以斗争谋发展则发展兴，以软弱退让谋发展则发展衰。这就是我反复强调必须发扬斗争精神的道理所在。

**要保持战略清醒，对各种风险挑战做到胸中有数。**现在，我国发展进入战略机遇和风险挑战

并存、不确定难预料因素增多的时期，需要应对的风险挑战、防范化解的矛盾问题比以往更加严峻复杂。从国际看，世界百年未有之大变局加速演进，世纪疫情影响深远，逆全球化思潮抬头，单边主义、保护主义明显上升，世界经济复苏乏力，乌克兰危机未解且影响外溢，世界进入新的动荡变革期。从国内看，我国改革发展稳定面临不少深层次矛盾躲不开、绕不过，更好统筹疫情防控和经济社会发展任务艰巨，经济发展面临需求收缩、供给冲击、预期转弱三重压力，影响社会稳定的风险隐患大量存在，各种“黑天鹅”、“灰犀牛”事件随时可能发生。从党内看，党内一些深层次问题尚未根本解决，一些老问题反弹回潮的可能始终存在，稍有松懈就会死灰复燃，并且新的问题还在不断出现，党面临的“四大考验”、“四种危险”将长期存在，特别是党风廉政建设和反腐败斗争还面临不少顽固性、多发性问题，党的自我革命永远在路上，管党治党一刻也不能放松。对这些风险挑战、矛盾问题，我们头脑要特别清醒，始终保持箭在弦上的备战姿态，切不可麻痹大意、高枕无忧。

**要保持战略自信，增强斗争的底气。**底气来自哪里？来自我国越来越厚实的家底，更来自坚定的理想信念、执着的真理追求，



图7 2023年12月14日至15日，中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在广西考察。这是14日上午，习近平在南宁市良庆区蟠龙社区考察时，同社区各族群众亲切交流。新华社记者 燕雁 / 摄

对党的初心使命的始终坚守。面对围堵、遏制、打压，我们应理直气壮地进行斗争，因为我们始终站在历史正确的一边，站在人类文明进步的一边，推动建设持久和平、普遍安全、共同繁荣、开放包容、清洁美丽的世界，为维护世界和平和地区稳定发挥建设性作用，走的是人间正道，干的是正义事业。而霸权主义、强权政治、单边主义、保护主义违背时代潮流，不得人心、失道寡助。面对改革发展稳定中的矛盾和问题，我们要迎难而上、攻坚克难，因为我们的事业从来就是在解决矛盾中前进的，只有逢山开路、遇水架桥，以一往无前的精神破除一切障碍，扫除一切拦路虎，才能推动事业行稳致远。同样，面对党内存在的突出问题，我们要敢抓敢管、严管严治，因

为全面从严治党是自我革命的伟大实践，是保持马克思主义政党先进性纯洁性的根本途径，只有严格要求、严格教育、严格管理、严格监督，才能保持党的团结统一、确保党始终充满生机活力。

**要保持战略主动，增强斗争本领。**高级干部要有很强的风险洞察力、预见力，也就是要有草摇叶响知鹿过、松风一起知虎来、一叶易色而知天下秋的能力。现在，各种风险隐患关联度高、联动性强、传导快，稍有不慎就可能产生“蝴蝶效应”，小风险就会演变成大风险，局部风险就会演变成全局性风险，经济社会风险就会演变成政治风险。因此，对各领域各方面的风险隐患，我们脑子里要有一幅全景图，经常分析研判，对潜在的风险要有科学预判，备足工具箱，下好先手棋，

打好主动仗。不能只关心关注自己分管部门和地方的风险隐患，而忽视其他领域的风险隐患，更不能满足于当下无事，而对长期积累的风险隐患不知不觉或者后知后觉。一旦出现风险，就要见事早、行动快，靠前指挥，当断则断、当机立断，不能让小事拖大、大事拖炸。要讲究斗争策略，原则问题不让步，同时注重战术运用，见招拆招，必要时主动出击、先发制人，积极塑造于我有利的斗争态势。加强能力提升，让领导干部特别是年轻干部在游泳中学会游泳，经受严格的思想淬炼、政治历练、实践锻炼、专业训练，在严峻复杂的斗争中经风雨、见世面、壮筋骨、长才干。注重在严峻复杂斗争中考察识别干部，为敢于善于斗争、敢于担当作为、敢抓善管不怕得罪人的干部撑腰鼓劲，看准的就要大胆使用。

推进中国式现代化是一个长期任务，还有许多东西需要我们深化认识。要进一步加强理论研究和实践探索，使我们的认识、政策、举措更加符合客观规律，从而逐步进入中国式现代化建设的“自由王国”。○

来源：求是

## 构建提升一体化国家战略科技体系和能力

世界科技强国竞争，比拼的是国家战略科技力量。近年来，我国持续加强国家战略科技力量建设，取得一系列新成效，也面临新形势新挑战。为此，需加快提升一体化国家战略科技体系和能力，为科技强国建设提供有力支撑。

持续加强国家战略科技力量建设。我们党和国家历来高度重视国家战略科技力量建设。习近平总书记强调，“国家实验室、国家科研机构、高水平研究型大学、科技领军企业都是国家战略科技力量的重要组成部分，要自觉履行高水平科技自立自强的使命担当”。在国家创新体系中，国家战略科技力量是体现国家意志、服务国家需求、代表国家水平的科技中坚力量，是促进高质量发展、维护国家安全的重要战略支撑。

党的十八大以来，党中央坚持把科技创新摆在国家发展全局的核心位置，以前所未有的力度强化国家战略科技力量建设，战略性创新平台体系不断完善，战略性资源空间布局不断优化，战略科技力量能力不断提升，战略科技任务取得重大突破，推动我国科技事业实现

跨越式发展。

**不断完善战略性创新平台体系。**加强科技基础能力建设，在建设和投入运行一批国家重大科技基础设施，中国“天眼”、全超导托卡马克核聚变实验装置、散裂中子源等一批设施处于国际领先水平，并不断提高开放共享水平。面向集成电路、生物育种、先进高分子材料和智能制造等重点领域，布局建设一批国家技术创新中心、国家产业创新中心、国家工程研究中心等产业创新平台，建设一批概念验证中心、新型研发机构、产业创新研究院、众创空间、孵化器、加速器，推动产学研协同创新、大中型企业融通创新，促进科技成果高效转移转化。

**不断优化战略性资源空间布局。**加快打造创新高地，初步形成“3个国际科技创新中心+N个综合性国家科学中心”的创新空间布局。北京、上海、粤港澳大湾区和南京跻身全球科技创新集群前10位。北京国际科技创新中心建设成果丰硕，怀柔综合性国家科学中心加快建设，在空间科学、物质科学、能源科学等领域建设一批高能级科创平台，人工智能、量子

信息、生命健康等技术长板不断做强。上海具有全球影响力的科技创新中心建设成绩斐然，张江综合性国家科学中心建设集中度、显示度不断提升，正在加速形成国内最大、国际领先的光子与微纳电子重大科技基础设施集群，集成电路、人工智能、生物医药3大产业的创新高地建设进展迅速。粤港澳大湾区国际科技创新中心建设成效初显，大湾区综合性国家科学中心建设顺利起步，5G等领域的产业优势显现。安徽合肥综合性国家科学中心聚焦能源、信息、生命、环境等领域，加快高能级科创平台建设，原始创新能力不断提高。西安综合性国家科学中心建设迈出坚实步伐，强化“基础研究—技术攻关—成果转化—科技金融—人才支撑”的全链条创新体系。

### 不断提升战略科技力量能力。

国家实验室加快建设，组织实施重点领域产学研用协同攻关，聚集培养高水平人才和创新团队。国家重点实验室体系加快优化重组，体系化科技创新能力不断强化。中国科学院着力抢占科技制高点，解决了一大批重大科技问题，突破了一大批关键核心技术，取得了一大批原创成果。“双一流”建设扎实推进，高水平研究型大学基础研究和人才培养能力显著提升。部分重点行业领域科技领军企业数量不断壮大、创新能力不断增强。据欧盟委员会发

布的《2024年欧盟工业研发投入记分牌》，我国有579家企业进入全球前2000家研发公司榜单，上榜企业数量稳居全球第二位。

推动重大战略科技任务攻关取得重大突破。基础研究和应用基础研究取得重大原创性成果。铁基超导材料、量子反常霍尔效应、多光子纠缠等研究世界领先，中微子振荡、干细胞等研究取得原创性突破，二氧化碳人工合成淀粉实现“技术造物”，“悟空”“墨子”“慧眼”“太极一号”等系列科学实验卫星成功发射。战略高技术领域迎来新跨越。载人航天和探月工程取得系列重要成果，北斗导航提供全球精准服务，深地探测、载人深潜、国产航母等加快进入世界先进行列。创新驱动引领高质量发展取得新成效。系统掌握高铁建造成套技术，C919大飞机实现商飞，移动通信、特高压输变电、煤炭清洁高效利用、超超临界燃煤发电、新型核电、杂交水稻等世界领先，生物育种、新药创制、绿色低碳技术助力粮食安全和健康中国、美丽中国建设。科技创新和产业创新深度融合。智能机器人、增材制造、激光制造、高性能装备等技术有力推动“中国制造”加快迈向中高端。集成电路、人工智能、语音识别等新兴产业蓬勃发展，太阳能光伏、风电、新型显示、半导体照明、先进储能、新能源汽车等产业规模位居世界前列。

国家战略科技力量建设面临新形势。当前，全球新一轮科技革命和产业变革深入发展，为国家战略科技力量建设提供了前所未有的机遇，也面临着竞争加剧等一系列挑战。

总体来看，科技创新基础前沿发展态势可以用5个“新”来概括。一是新特点。科学研究聚焦人类未知领域，向极宏观拓展、向极微观深入、向极端条件迈进、向极综合交叉发力，不断突破人类认知边界，在加速孕育革命性理论突破的同时，推动前沿技术集中涌现，引发链式变革。二是新范畴。基础研究从对自然物、自然界的观察、测量、分析，拓展到对人造物、人造世界的研究，技术科学领域不断扩展。基础前沿科学问题更多来源于全球共同挑战、国家战略和经济社会需求，需求驱动更加显著。科技创新更加直接服务于经济社会发展，解决产业创新发展的关键问题。三是新范式。人工智能驱动的科学成为继实验科学、理论分析、数值模拟、数据科学后的新科研范式，人工智能技术正全面渗透从实验设计、数据处理到问题发现、技术研发，再到成果转化、应用扩散的全过程，加速赋能生命科学、物理学、化学、材料科学等科技创新各领域，助力科学家提出新假设、获得新发现、测试新理论、预测复杂行为，极大地提升了科研效率与创新能力。四是新模式。科技创新组织模式正发

生深刻变迁，“有组织性”凸显。基础研究以科学目标为导向、以自由探索为发现规律的根本形式、以科学家为主导，同时，研究选题、研究过程、研究手段工具的有组织性以及不同研究主体的协调性、协同性增强。从实施主体看，要依托战略科技力量部署战略科技任务，有组织推进战略导向的体系化基础研究、前沿导向的探索性基础研究、市场导向的应用性基础研究，促进重大科技攻关与突破。五是新博弈。美国、欧盟等纷纷聚焦量子信息、生命科学、空天海洋等关键和新兴技术领域开展前瞻布局，不断激发新态势、塑造新格局、催生新赛道、创造新模式，标志着全球科技竞争进入新的“斯普特尼克时刻”，基础研究成为大国博弈新战场，抢占未来制高点趋于白热化。

加强国家战略科技力量建设的重点任务。中国式现代化要靠科技现代化作支撑，实现高质量发展要靠科技创新培育新动能。要锚定2035年建成科技强国的战略目标，加强国家战略科技力量建设的顶层设计和统筹规划，优化定位布局，进一步凸显科技的战略先导地位，进一步发挥好科技的根本支撑作用，构建一体化国家战略科技体系和能力，提升整体效能。

**一是完善现代化国家实验室体系。**在重大创新领域组建一批突破型、引领型、平台型国家实验室，重组优化全国重点实验室，

形成结构合理、运行高效的现代化国家实验室体系。发挥国家实验室重大科技创新组织者作用，构建关键核心技术攻关的高效组织体系。加强跨学科、跨领域的协同创新，推动国家实验室与高校、科研机构及企业的紧密合作，形成开放共享的创新网络。

**二是优化现代国家科研机构体系。**根据国家科技创新战略部署，优化科研机构布局，明确定位和任务。以国家战略需求为导向，加快建设原始创新策源地，加快突破关键核心技术，努力抢占科技制高点。用好绩效评价工具，引导科研机构坚守国家使命任务，加快建设世界一流科研机构。建立动态调整机制，让科研机构布局随着国家需求、前沿学科领域的变化而不断优化。加强跨学科、跨领域合作交流，形成优势互补、资源共享的创新格局。

**三是建设高水平研究型大学。**加快建设中国特色、世界一流的高水平研究型大学和优势学科，强化同国家战略目标、战略任务的对接，全面提高人才自主培养质量。调整优化学科专业设置，形成特色鲜明的学科体系。加强师资队伍建设，构建跨学科科研团队，提升整体科研实力。统筹推进人才培养和科技创新，加强基础前沿探索和关键核心技术协同攻关，培养更多杰出创新人才。

**四是培育壮大科技领军企业。**

完善创新型企业梯度培育体系，优化科技型中小企业、高新技术企业、科技领军企业、世界一流企业等梯次培育路径。在企业全生命周期不同发展阶段，给予研发资金、税收优惠、政府采购、创新服务等精准支持。建设跨领域、大协作、高强度的产业创新基地，推动重点领域项目、基地、人才、资金等一体化配置，加快提升我国产业基础能力和产业链现代化水平。支持科技领军企业更好发挥市场需求、集成创新、组织平台等优势，牵头组建创新联合体，推动产学研协同创新、大中小企业融通创新。营造良好创新创业环境，激发创新型企业的创新活力，打通从科技强到企业强、产业强、经济强的通道。

**五是强化国家战略科技力量协同。**推进科技创新部门协同、央地协同，形成优势互补、协同合作的现代化国家战略科技力量体系。结合区域优势和资源禀赋，统筹综合性国家科学中心、国际/区域科技创新中心等各类高能级科创平台建设，科学合理布局国家战略科技力量建设，打造区域创新高地，引领形成现代化国家创新体系。鼓励和规范发展各类创新连接组织、新型研发机构，发挥我国超大规模市场作用，加强创新资源统筹和力量组织，推动科技创新和产业创新融合发展，提升国家创新体系整体效能。○

来源：学习时报

# 中华人民共和国科学技术普及法

(2002年6月29日第九届  
全国人民代表大会常务委员  
会第二十八次会议通过 2024  
年12月25日第十四届全  
国人民代表大会常务委员  
会第十三次会议修订)

## 第一章 总 则

**第一条** 为了实施科教兴国战略、人才强国战略和创新驱动发展战略，全面促进科学技术普及，加强国家科学技术普及能力建设，提高公民的科学文化素质，推进实现高水平科技自立自强，推动经济发展和社会进步，根据宪法，制定本法。

**第二条** 本法适用于国家和社会普及科学技术知识、倡导科学方法、传播科学思想、弘扬科学精神的活动。

开展科学技术普及(以下简称科普)，应当采取公众易于接触、理解、接受、参与的方式。

**第三条** 坚持中国共产党对科普事业的全面领导。

开展科普，应当以人民为中心，坚持面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求、面向人民生命健康，培育和弘扬创新文化，推动形成崇尚科

学、追求创新的风尚，服务高质量发展，为建设科技强国奠定坚实基础。

**第四条** 科普是国家创新体系的重要组成部分，是实现创新发展的基础性工作。国家把科普放在与科技创新同等重要的位置，加强科普工作总体布局、统筹部署，推动科普与科技创新紧密协同，充分发挥科普在一体推进教育科技人才事业发展中的作用。

**第五条** 科普是公益事业，是社会主义物质文明和精神文明建设的重要内容。发展科普事业是国家的长期任务，国家推动科普全面融入经济、政治、文化、社会、生态文明建设，构建政府、社会、市场等协同推进的科普发展格局。

国家加强农村的科普工作，扶持革命老区、民族地区、边疆地区、经济欠发达地区的科普工作，建立完善跨区域科普合作和共享机制，促进铸牢中华民族共同体意识，推进乡村振兴。

**第六条** 科普工作应当践行社会主义核心价值观，弘扬科学精神和科学家精神，遵守科技伦理，反对和抵制伪科学。

任何组织和个人不得以科普为名从事损害国家利益、社会公共利益或者他人合法权益的活动。

**第七条** 国家机关、武装力量、社会团体、企业事业单位、基层群众性自治组织及其他组织应当开展科普工作，可以通过多种形式广泛开展科普活动。

每年9月为全国科普月。

公民有参与科普活动的权利。

**第八条** 国家保护科普组织和科普人员的合法权益，鼓励科普组织和科普人员自主开展科普活动，依法兴办科普事业。

**第九条** 国家支持社会力量兴办科普事业。社会力量兴办科普事业可以按照市场机制运行。

**第十条** 科普工作应当坚持群众性、社会性和经常性，结合实际，因地制宜，采取多种方式。

**第十一条** 国家实施全民科学素质行动，制定全民科学素质行动规划，引导公民培育科学和理性思维，树立科学的世界观和方法论，养成文明、健康、绿色、环保的科学生活方式，提高劳动、生产、创新创造的技能。

**第十二条** 国家支持和促进科普对外合作与交流。

**第十三条** 对在科普工作中做出突出贡献的组织和个人，按照国家有关规定给予表彰、奖励。

国家鼓励社会力量依法设立科普奖项。

## 第二章 组织管理

**第十四条** 各级人民政府领导科普工作，应当将科普工作纳入国民经济和社会发展规划，为开展科普工作创造良好的环境和条件。

县级以上人民政府应当建立科普工作协调制度。

**第十五条** 国务院科学技术行政部门负责制定全国科普工作规划，实行政策引导，进行督促检查，加强统筹协调，推动科普工作发展。

国务院其他部门按照各自的职责分工，负责有关的科普工作。

县级以上地方人民政府科学技术行政部门及其他部门在同级人民政府领导下按照各自的职责分工，负责本地区有关的科普工作。

**第十六条** 行业主管部门应当结合本行业特点和实际情况，组织开展相关科普活动。

**第十七条** 科学技术协会是科普工作的主要社会力量，牵头实施全民科学素质行动，组织开展群众性、社会性和经常性的科普活动，加强国际科技人文交流，支持有关组织和企事业单位开

展科普活动，协助政府制定科普工作规划，为政府科普工作决策提供建议和咨询服务。

**第十八条** 工会、共产主义青年团、妇女联合会等群团组织应当结合各自工作对象的特点组织开展科普活动。

## 第三章 社会责任

**第十九条** 科普是全社会的共同责任。社会各界都应当组织、参加各类科普活动。

**第二十条** 各级各类学校及其他教育机构，应当把科普作为素质教育的重要内容，加强科学教育，提升师生科学文化素质，支持和组织师生开展多种形式的科普活动。

高等学校应当发挥科教资源优势，开设科技相关通识课程，开展科研诚信和科技伦理教育，把科普纳入社会服务职能，提供必要保障。

中小学校、特殊教育学校应当利用校内、校外资源，提高科学教育质量，完善科学教育课程和实践活动，激发学生对科学的兴趣，培养科学思维、创新意识和创新能力。

学前教育机构应当根据学前儿童年龄特点和身心发展规律，加强科学启蒙教育，培育、保护好奇心和探索意识。

**第二十一条** 开放大学、老年大学、老年科技大学、社区学

院等应当普及卫生健康、网络通信、智能技术、应急安全等知识技能，提升老年人、残疾人等群体信息获取、识别和应用等能力。

**第二十二条** 科学研究和技术开发机构、高等学校应当支持和组织科学技术人员、教师开展科普活动，有条件的可以设置专职科普岗位和专门科普场所，使科普成为机构运行的重要内容，为开展科普活动提供必要的支持和保障，促进科技研发、科技成果转化与科普紧密结合。

**第二十三条** 科技企业应当把科普作为履行社会责任的重要内容，结合科技创新和职工技能培训面向公众开展科普活动。

鼓励企业将自身科技资源转化为科普资源，向公众开放实验室、生产线等科研、生产设施，有条件的可以设立向公众开放的科普场馆和设施。

**第二十四条** 自然科学和社会科学类社会团体等应当组织开展专业领域科普活动，促进科学技术的普及推广。

**第二十五条** 新闻出版、电影、广播电视、文化、互联网信息服务等机构和团体应当发挥各自优势做好科普宣传工作。

综合类报纸、期刊、广播电台、电视台应当开展公益科普宣传；电影、广播电视生产、发行和播映机构应当加强科普作品的制作、发行和播映；书刊出版、

发行机构应当扶持科普书刊的出版、发行；综合性互联网平台应当开设科普网页或者科普专区。

鼓励组织和个人利用新兴媒体开展多种形式的科普，拓展科普渠道和手段。

**第二十六条** 农村基层群众性自治组织协助当地人民政府根据当地经济与社会发展的需要，围绕科学生产、文明健康生活，发挥农村科普组织、农村学校、基层医疗卫生机构等作用，开展科普工作，提升农民科学文化素质。

各类农村经济组织、农业科研和技术推广机构、农民教育培训机构、农村专业技术协（学）会以及科技特派员等，应当开展农民科技培训和农业科技服务，结合推广先进适用技术和科技成果转化应用向农民普及科学技术。

**第二十七条** 城市基层群众性自治组织协助当地人民政府利用当地科技、教育、文化、旅游、医疗卫生等资源，结合居民的生活、学习等需要开展科普活动，完善社区综合服务设施科普功能，提高科普服务质量和水平。

**第二十八条** 科技馆（站）、科技活动中心和其他科普教育基地，应当组织开展科普教育活动。图书馆、博物馆、文化馆、规划展览馆等文化场所应当发挥科普教育的作用。

公园、自然保护地、风景名

胜区、商场、机场、车站、码头等各类公共场所以及重大基础设施的经营管理单位，应当在所辖范围内加强科普宣传。

## 第四章 科普活动

**第二十九条** 国家支持科普产品和服务研究开发，鼓励新颖、独创、科学性强的质量科普作品创作，提升科普原创能力，依法保护科普成果知识产权。

鼓励科学研究和技术开发机构、高等学校、企业等依托现有资源并根据发展需要建设科普创作中心。

**第三十条** 国家发展科普产业，鼓励兴办科普企业，促进科普与文化、旅游、体育、卫生健康、农业、生态环保等产业融合发展。

**第三十一条** 国家推动新技术、新知识在全社会各类人群中的传播与推广，鼓励各类创新主体围绕新技术、新知识开展科普，鼓励在科普中应用新技术，引导社会正确认识和使用科技成果，为科技成果应用创造良好环境。

**第三十二条** 国家部署实施新技术领域重大科技任务，在符合保密法律法规的前提下，可以组织开展必要的科普，增进公众理解、认同和支持。

**第三十三条** 国家加强自然灾害、事故灾难、公共卫生事件等突发事件预防、救援、应急处

置等方面的科普工作，加强应急科普资源和平台建设，完善应急科普响应机制，提升公众应急处理能力和自我保护意识。

**第三十四条** 国家鼓励在职业培训、农民技能培训和干部教育培训中增加科普内容，促进培育高素质产业工人和农民，提高公职人员科学履职能力。

**第三十五条** 组织和个人提供的科普产品和服务、发布的科普信息应当具有合法性、科学性，不得有虚假错误的内容。

**第三十六条** 国家加强对科普信息发布和传播的监测与评估。对传播范围广、社会危害大的虚假错误信息，科学技术或者有关主管部门应当按照职责分工及时予以澄清和纠正。

网络服务提供者发现用户传播虚假错误信息的，应当立即采取处置措施，防止信息扩散。

**第三十七条** 有条件的科普组织和科学技术人员应当结合自身专业特色组织、参与国际科普活动，开展国际科技人文交流，拓展国际科普合作渠道，促进优秀科普成果共享。国家支持开展青少年国际科普交流。

**第三十八条** 国家完善科普工作评估体系和公民科学素质监测评估体系，开展科普调查统计和公民科学素质测评，监测和评估科普事业发展成效。

## 第五章 科普人员

**第三十九条** 国家加强科普工作人员培训和交流,提升科普工作人员思想道德品质、科学文化素质和业务水平,建立专业化科普工作人员队伍。

**第四十条** 科学技术人员和教师应当发挥自身优势和专长,积极参与和支持科普活动。

科技领军人才和团队应当发挥表率作用,带头开展科普。

鼓励和支持老年科学技术人员积极参与科普工作。

**第四十一条** 国家支持有条件的高等学校、职业学校设置和完善科普相关学科和专业,培养科普专业人才。

**第四十二条** 国家完善科普志愿服务制度和工作体系,支持志愿者开展科普志愿服务,加强培训与监督。

**第四十三条** 国家健全科普人员评价、激励机制,鼓励相关单位建立符合科普特点的职称评定、绩效考核等评价制度,为科普人员提供有效激励。

## 第六章 保障措施

**第四十四条** 各级人民政府应当将科普经费列入本级预算,完善科普投入经费保障机制,逐步提高科普投入水平,保障科普工作顺利开展。

各级人民政府有关部门应当

根据需要安排经费支持科普工作。

**第四十五条** 国家完善科普场馆和科普基地建设布局,扩大科普设施覆盖面,促进城乡科普设施均衡发展。

国家鼓励有条件的地方和组织建设综合型科普场馆和专业型科普场馆,发展数字科普场馆,推进科普信息化发展,加强与社区建设、文化设施融合发展。

省、自治区、直辖市人民政府和其他有条件的地方人民政府,应当将科普场馆、设施建设纳入国土空间规划;对现有科普场馆、设施应当加强利用、维修和改造升级。

**第四十六条** 各级人民政府应当对符合规划的科普场馆、设施建设给予支持,开展财政性资金资助的科普场馆运营绩效评估,保障科普场馆有效运行。

政府投资建设的科普场馆,应当配备必要的专职人员,常年向公众开放,对青少年实行免费或者优惠,并不得擅自改为他用;经费困难的,政府可以根据需要予以补贴,使其正常运行。

尚无条件建立科普场馆的地方,应当利用现有的科技、教育、文化、旅游、医疗卫生、体育、交通运输、应急等设施开展科普,并设立科普画廊、橱窗等。

**第四十七条** 国家建设完善开放、共享的国家科普资源库和科普资源公共服务平台,推动全

社会科普资源共建共享。

利用财政性资金设立的科学研究和技术开发机构、高等学校、职业学校,有条件的应当向公众开放科技基础设施和科技资源,为公众了解、认识、参与科学研究活动提供便利。

**第四十八条** 国家鼓励和引导社会资金投入科普事业。国家鼓励境内外的组织和个人设立科普基金,用于资助科普事业。

**第四十九条** 国家鼓励境内外的组织和个人依法捐赠财产资助科普事业;对捐赠财产用于科普事业或者投资建设科普场馆、设施的,依法给予优惠。

科普组织开展科普活动、兴办科普事业,可以依法获得资助和捐赠。

**第五十条** 国家依法对科普事业实行税收优惠。

**第五十一条** 利用财政性资金设立科学技术计划项目,除涉密项目外,应当结合任务需求,合理设置科普工作任务,充分发挥社会效益。

**第五十二条** 科学研究和技术开发机构、学校、企业的主管部门以及科学技术等相关行政部门应当支持开展科普活动,建立有利于促进科普的评价标准和制度机制。

**第五十三条** 科普经费和组织、个人资助科普事业的财产,应当用于科普事业,任何组织和

个人不得克扣、截留、挪用。

## 第七章 法律责任

**第五十四条** 违反本法规定，制作、发布、传播虚假错误信息，或者以科普为名损害国家利益、社会公共利益或者他人合法权益的，由有关主管部门责令改正，给予警告或者通报批评，没收违法所得，对负有责任的领导人员和直接责任人员依法给予处分。

**第五十五条** 违反本法规定，克扣、截留、挪用科普款物或者骗取科普优惠政策支持的，由有关主管部门责令限期退还相关款

物；对负有责任的领导人员和直接责任人员依法给予处分；情节严重的，禁止一定期限内申请科普优惠政策支持。

**第五十六条** 擅自将政府投资建设的科普场馆改为他用的，由有关主管部门责令限期改正；情节严重的，给予警告或者通报批评，对负有责任的领导人员和直接责任人员依法给予处分。

**第五十七条** 骗取科普表彰、奖励的，由授予表彰、奖励的部门或者单位撤销其所获荣誉，收回奖章、证书，追回其所获奖金等物质奖励，并由其所在单位或

者有关部门依法给予处分。

**第五十八条** 公职人员在科普工作中滥用职权、玩忽职守、徇私舞弊的，依法给予处分。

**第五十九条** 违反本法规定，造成人身损害或者财产损失的，依法承担民事责任；构成违反治安管理行为的，依法给予治安管理处罚；构成犯罪的，依法追究刑事责任。

## 第八章 附 则

**第六十条** 本法自公布之日起施行。○

来源：全国人民代表大会常务委员会

# 制造业企业数字化转型实施指南

制造业数字化转型是运用数字技术对制造业研发生产全流程和产业链供应链各环节进行改造升级和价值重塑的过程，是制造业高质量发展的关键路径。制造业企业是制造业数字化转型的主体，为贯彻落实《制造业数字化转型行动方案》，为企业数字化转型提供指引，系统提升企业转型水平，促进实体经济和数字经济

深度融合，加快推进新型工业化，特制定本指南。

## 一、总体要求

推动制造业企业数字化转型是一项系统工程，要以企业发展实际为出发点、以解决企业痛点难点问题为目标、以提升全要素生产率为导向、以场景数字化为切入点，综合考虑技术成熟度、

经济可行性、商业模式可持续性，精准识别数字化转型优先领域和重点方向。深化新一代信息技术融合应用，加快产业模式和企业组织形态变革，提升企业核心竞争力，促进形成新质生产力。

坚持整体谋划，分步实施。遵循“规划—实施—评估—优化”持续改进的管理方法，制定企业数字化转型规划，明确转型方向

和目标，由点及面、由浅及深、由易及难分步推进数字化转型。

坚持问题导向，系统推进。聚焦需求侧共性问题找准转型切入点，分行业构建体系化的数字化转型场景图谱，明确推进路径，提升通用工具产品供给能力，以场景转型之“和”形成企业整体转型之“解”。

坚持需求导向，分类施策。立足大中小企业发展实际和个性化转型需求，明确不同类型企业的数字化转型重点和策略，形成差异化的转型实施方案，引导大中小企业协同转型和融通发展。

坚持市场主导，政府引导。充分发挥市场在资源配置中的决定性作用，引导数字化要素向制造业企业集聚，以规模化应用畅通供需循环。更好发挥政府引导作用，强化标准、人才、产融等政策保障，形成转型推进合力。

## 二、分步组织实施

### （一）制定转型规划

企业综合利用两化融合管理体系、数字化转型成熟度、智能制造成熟度、中小企业数字化水平评测等参考标准开展评估诊断，系统梳理企业自动化、信息化基础条件，准确摸清企业数字化发展实际情况，识别转型痛点需求和应用场景，开展投入产出测算和风险评估，明确转型目标和方向。结合系统工程（MBSE）方

法论编制规划方案，体系化设计数字化转型的目标愿景、任务框架、系统架构、技术路线、标准体系、实施任务、投入预算和保障条件，建立分阶段子任务和实施项目清单，为下一步组织实施提供清晰明确的方向内容。

### （二）组织落地实施

企业系统加强组织和条件保障，结合条件设置首席信息官（CIO）、首席数据官（CDO）等岗位，组建专门的数字化转型队伍，持续加大数字化投入。引导全员强化数字化理念，持续提升互联网思维、大数据思维，推动基于数据的产品创新，优化产品数据服务。按需遴选外部服务商，强化软件开发商、自动化集成商、平台服务商的深度整合，形成系统实施推进合力。高标准推进项目实施，深度介入外包开发过程，强化过程监督、质量管控和知识产权保护，推动数字化项目与企业业务更好适配融合，充分运用新一代信息技术提高精益管理能力、提升运营效率，不断优化数字化转型实施效果。

### （三）开展成效评估

企业以经营目标改善和业务流程优化为导向，开展转型绩效评价，聚焦营收增长率、利润率、研发周期、生产运营效率、库存周转率、客户满意度等指标，梳理总结转型目标达成情况，提出优化改进方向。开展数字化能力

评价，聚焦系统易用性、标准符合性、数据质量水平等指标，梳理总结存在的问题，提出改进措施。成效评估可采用自评或第三方评价等方式，企业参与评估人员应涵盖企业管理者、各业务部门责任人以及一线技术工人。

### （四）推进迭代优化

企业根据数字化成效评估结果，针对转型实施中的短板和不足，迭代解决方案版本，强化安全防护，优化实施效果。立足自身战略定位和业务发展方向，进一步制定下一阶段数字化转型目标和任务，统筹推进场景数字化改造和业务数字化升级，持续强化全流程精益管理水平，实现数字化转型的螺旋式提升。

## 三、聚焦场景突破

### （一）强化研发设计云端协同

引导企业开展云端研发设计，按需订阅产品设计、仿真模拟等软件服务，提升产品仿真效率，降低软件运维成本。推动企业开展协同研发设计，特别是鼓励以高端装备为代表的制造业企业建设协同设计平台，强化设计协同，鼓励配套零部件企业使用平台，缩短产品设计周期。鼓励企业探索智能研发新应用，开发“人工智能+”研发设计软件，构建设计模型、仿真模型等数据集，开展模型训练，发展创成式设计、实时仿真等创新应用，加速新产品

研发。

### （二）推动生产过程智能转型

引导企业开展生产全过程的透明化管理，鼓励部署基于工业互联网平台的订单管理、设备管理、质量管理等轻量化工业APP，提升生产过程的数字化管控能力。引导流程工业企业部署先进控制系统（APC）、实时优化控制系统（RTO），推广基于数字孪生的生产决策管控应用，通过贯通数字主线提升生产工艺、装备调参、物料平衡等生产作业的智能化水平。引导离散工业企业实施基于模型的系统工程，基于工业互联网平台打通设计、排程、加工、检测等数据流转，发展“人工智能+”外观设计、排程排产、缺陷检测等新模式，通过模型传递持续提升生产效率和产品质量。鼓励企业基于实时数据开展节能降耗、减碳环保、安全生产等领域探索实践，以数字化提升企业绿色化、安全化水平。

### （三）加速运维服务模式创新

引导企业在客户管理、售后服务等领域率先应用生成式人工智能技术，降低服务成本、提高服务效率。鼓励企业开展存量设备管理优化，实时采集分析设备运行数据，探索推动人工智能在设备运维场景落地，开发实时监测、运行优化、自动告警和预测性维护等应用，保障设备的高效运行和安全稳定。鼓励企业挖掘

设备和产能潜在价值，基于工业互联网平台共享设备信息和闲置产能，发展融资租赁、供应链金融、共享制造等增值服务。创新基于数据的产品服务化、工程服务化和知识服务化等服务模式，推动企业向产业链价值链高端跃升。

### （四）促进经营管理流程优化

引导集团型企业建设统一的经营管理平台，开展端到端的流程重构和组织优化，实现基于平台的跨层级、跨企业协同管理。引导企业基于人工智能、大数据等技术重构和集成商业智能（BI），通过办公自动化（OA）、企业资源计划（ERP）、客户关系管理（CRM）等不同业务信息系统，开展经营数据汇聚和经营分析模型应用，实现基于模型的智能决策。鼓励企业通过数字化手段优化财务管控流程，通过财务系统与业务系统集成，实现业务活动全流程资金及时响应。

### （五）提升供应链弹性和韧性

引导企业构建基于工业互联网平台的多级供应商采购管理系统，基于模型优化供应资源结构，及时备份关键供应节点，保障供应持续稳定。基于数字化平台开展订单全流程跟踪，基于数据优化仓储布局和出入库管理，基于模型算法设计优化供应物流网络，实现订单精准配送和准时交付。全维度绘制客户画像，开展产品

全流程信息追溯，实时响应客户产品维保需求，提升售后服务水平和交付质量。利用大数据建模构建供应链风险预测分析和评估诊断模型，基于模型对供应链风险精准识别和应急防控。

### （六）探索跨场景集成优化

引导行业龙头企业绘制重点行业、重点产业链数字化转型场景图谱，推动产业链环节的模块化表达，引导企业开展跨场景数据、模型流转应用探索，带动上下游工具打通、数据互连、模型互认，建立功能完备的产品工具体系，实现跨场景环节的协同优化。引导企业开展产品全生命周期管理，构建基于模型的系统工程（MBSE）方法开展产品模型在需求、设计、分析、验证等集成管理，提高产品设计、生产、运维一体化管理水平。鼓励企业基于数据和模型重塑业务系统、创新商业模式，打通用户需求和企业产能、研发设计和售后服务之间的数据流，发展大规模定制化生产、产品全生命周期管理等新模式。引导企业开展工业操作系统转型升级，提升工业操作系统产业链供应链安全和韧性水平。

## 四、强化分类推进

### （一）行业龙头企业引领“链式”转型

行业龙头企业充分发挥引领带动作用，以提高产业链协作效

率和供应链一体化协同水平为导向，增强产业链供应链竞争力，带动上下游企业协同转型。建设面向行业或产业集群的工业互联网平台，开发标准化、模块化、解耦化的数字工具，打造贯通工具链、数据链、模型链的数字底座。引导上下游企业开放制造能力、设计创意、专业知识，推动订单协同、研发协同和服务协同，提升社会制造资源配置效率。鼓励龙头企业强化产业链供应链安全预警分析，提升风险联动预测和协同处置能力，增强产业链供应链韧性和风险防范能力。

### （二）大型企业加速“整体”转型

大型企业坚持系统思维、创新引领，制定转型整体规划，推进全流程、全场景、全链条数字化转型。建设工业互联网平台，提升数据采集、知识沉淀、业务打通、生态搭建等能力，实现数据驱动的智能生产决策和运营深度优化。创新组织管理模式，推动管理架构从科层制向柔性组织转变，构建网络化、扁平化、开放化的新型组织体系，探索基于实时数据的动态管理、透明管理，加快企业管理模式变革。创新业务模式，构建研发设计、生产制造与供应链协同的制造体系，探索用户个性需求与设计制造精准对接的机制创新，推动面向质量追溯、设备健康管理、产品增值

服务的服务化转型，培育新的业务增长点。

### （三）中小企业实施“梯次”转型

中小企业坚持因“企”制宜、重点突破，评估转型潜在价值和可行性，明确转型优先级。专精特新“小巨人”企业等基础较好的中小企业应加强关键业务系统部署应用，围绕产品数字孪生、设计制造一体化、个性化定制等复杂场景开展系统化集成改造，提升企业竞争力。省级专精特新中小企业、规上工业中小企业应以需求迫切的场景为突破口，实施重点场景深度改造。小微企业应考虑自身资源条件限制，开展普惠性上云用数赋智，积极上云上平台，充分利用工业互联网平台的云化研发设计、生产管理和运营优化等订阅式产品服务，实现业务系统向云端迁移，提升企业经营水平。强化与龙头企业的标准适配、信息共享、业务协同，全面融入产业链供应链。

## 五、强化政策保障

### （一）加强组织落实

工业和信息化部、国务院国资委、全国工商联加强工作协同，充分发挥两化融合相关管理机制作用，统筹推进各项工作。各地相关主管部门积极开展指南宣贯，结合实际制定出台配套政策，先行探索场景数字化转型试点，打

好政策“组合拳”。鼓励行业协会、科研院所等加强联合，挖掘行业转型需求和典型应用案例，推动制造企业与软件开发商、自动化集成商、平台服务商等基于图谱实现精准对接。

### （二）加大政策支持

有关主管部门要充分发挥现有专项资金作用，推动金融机构创新符合企业转型需求的金融产品和服务，带动地方政府、创投机构及其他社会资金，加大对制造业企业数字化转型领域支持力度。鼓励地方依托制造业新型技术改造城市试点、中小企业数字化转型城市试点，开展制造业数字化转型图谱建设、标准制定、设备更新、首版次软件培育、供需对接等工作，为制造业企业数字化转型提供政策资金支持。实施制造业企业科技成果应用拓展工程，着力提升产业链韧性和安全水平。

### （三）健全标准体系

鼓励各类标准化组织、科研院所、骨干企业等编制制造业数字化转型标准体系，制定产业链数字化场景编码索引，围绕基础性、典型场景、解决方案等方面，梳理关键亟需标准清单，明确推进路线图和时间表，强化数字化转型标准供给，促进数字化解决方案的标准化适配和规模化复制。支持各地开展数字化转型“标准+”工作站、“标准周”、标

准化宣贯会等活动，推动一批成熟易用的数字化转型标准发布实施，推广数据管理能力成熟度评估模型（DCMM）等国家标准应用，以国家标准引领传统产业优化升级。

#### （四）完善服务支撑

鼓励行业龙头企业联合数字化转型服务商等主体，打造标准化、低成本、可复用的解决方案，形成服务商资源池。加快培育一批深耕行业的专业软件开发商、自动化集成商和平台服务商，探索孵化一批提供数据确权、流通交易、收益分配、安全治理等服务的数据商和第三方专业服务机构，开展服务商分类分级评价规范标准研制及贯标。依托创新中心、公共服务平台等，建设一批“创新实验室+公共服务平台”的制造业数字化转型服务载体，打造线上线下协同、“省-市-县”多级联动、全链条转型服务贯通的数字化转型服务体系。

#### （五）加强试点推广

树立数字化转型企业标杆，聚焦技术实力强、业务模式优、管理理念新、质量效益高的行业龙头企业、独角兽企业、专精特新中小企业和高新技术企业，打造一批“数字领航”企业。开展

国有企业数字化转型试点企业建设，探索形成一批可复制可推广的数字化转型路径。制定发布重点行业、重点产业链数字化转型场景图谱参考指引，基于场景图谱开展数字化转型通用工具及典型案例遴选，聚焦物料数字化、工具数字化、数字化“中间件”、数字化边缘节点、数字化企业管理软件等方向，选择一批技术领先、通用性强、标准化程度高的数字化通用工具和产品，为制造业企业数字化转型提供工具支撑，通过标准化工具产品加速制造业企业数字化转型。

#### （六）强化数据驱动

鼓励龙头企业建设高质量工业数据语料库，支撑工业人工智能训练和应用推广，挖掘工业数据潜在价值。推进国家工业互联网大数据中心建设，建立多级联动的国家工业基础大数据库、行业数据库，推进产品主数据标准建设，打造工业数据空间，推动数据便捷高效流通。

#### （七）加强安全保障

健全工业企业网络安全管理制度，深入实施工业互联网安全分类分级管理，建立健全定级防护、评估评测、监测预警、信息通报、成效评价等工作机制，指

导企业落实《工业控制系统网络安全防护指南》相关要求，开展重要工业控制系统识别认定，构建工控安全评估体系。督促企业落实《数据安全法》《工业和信息化领域数据安全管理办法（试行）》等法律政策要求，加强重要数据识别与备案，做好数据分类分级保护和安全风险评估，强化风险监测预警和应急处置能力，切实提升工业数据安全防护水平。

#### （八）建设人才队伍

指导制造业企业开展全面数字素养技能提升行动，强化复合型人才培养，为数字化转型提供有力支撑。深化产教融合，支持数字化转型领域“新工科”专业建设，建立校企联合培养机制，鼓励企业积极参与，持续壮大专业技术型和复合型人才队伍。探索建立数字化转型人才需求预测和信息服务平台，搭建人才供需桥梁，促进人才高质高效匹配和顺畅有序流动。健全数字化转型领域人才评价机制，充分调动和激发人才队伍的积极性和创造性，营造良好的人才发展环境。○

来源：工业和信息化部



# 2025中国自动化大会

2025 China Automation Congress

以智能 掌控未来

主办单位：中国自动化学会 承办单位：哈尔滨工程大学

会议日期：2025年9月26-28日

中国自动化大会是由中国自动化学会主办的国内最高层次的自动化、信息与智能科学领域的大型综合性学术会议。2025 中国自动化大会由中国自动化学会主办、哈尔滨工程大学承办，将于 2025 年 9 月 26-28 日在哈尔滨召开，旨在为全球自动化、信息与智能科学领域的专家学者和产业界的同仁提供展示创新成果、展望未来发展的高端学术平台，加强不同学科领域的交叉融合，引领自动化、信息与智能科学与技术的发展。

## 2025 中国自动化大会

### 征文范围

本次大会设多个特色论坛，征文领域 30 多种。热忱欢迎全国各高等院校、科研院所和企事业单位中从事相关领域研究的科技工作者积极投稿，特别希望征集能反映各单位研究特色的学术论文或长摘要 (summary)。

### 论文投稿要求

1. 来稿未曾公开发表过，具备真实性和原创性。请勿涉及国家秘密。
2. 凡投稿论文被录用且未作特殊声明者，视为已同意授权出版。
3. 中英文论文篇幅均限制 4-6 页。

### 长摘要投稿要求

1. 长摘要需包括研究背景和意义、主要研究工作、实验或仿真、结论以上所有内容。
2. 长摘要论文将被收录进论文集，但不进 IEEEXplore、EI、CNKI 等检索，已发表的成果也可以投稿。
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。

### 征文方向 (包括但不限于)

#### a 基础研究

1. 复杂系统与非线性控制方法
2. 多智能体协同理论与技术
3. 无人自主与协同控制技术
4. 故障诊断与系统运行安全

5. 智能信息融合与处理

6. 模式识别与人工智能

7. 运筹与决策

8. 数据驱动建模与控制

9. 网络系统控制

#### b 前沿探索

10. 系统建模、分析与仿真

11. 自主控制、规划与决策

12. 脑机融合与混合智能技术

13. 图形图像与智能识别

14. 机电液一体化自动化控制

15. 具身智能机器人

16. 数据分析与大数据挖掘

17. 信息 - 物理 - 人系统

#### c 交叉融合

18. 自主无人系统

19. 新概念无人系统与平台

20. 人工智能及其在无人系统的应用

21. 人机交互技术

22. 自动化与控制教育

23. 医疗器械控制

24. 智慧城市建设

#### d 工程应用

25. 智能环境感知技术

26. 智能导航与定位技术

27. 智能通信与组网技术

28. 先进传感与仪器仪表

29. 精密仪器与测量技术

30. 嵌入式系统与计算机控制

31. 智能电力与电气技术

32. 工业自动化技术

33. 数字孪生技术及应用

34. 船舶与交通系统控制

35. 其它

### 会议程序

1. 主旨报告

2. 特邀报告

3. 平行会议

4. 博士生论坛

5. Workshop

更多精彩内容敬请期待

### 论文出版

大会将出版 CAC2025 论文集 (U 盘版)。2013 年以来的历届会议英文论文全部被 IEEEXplore 收录，并被 EI 检索。经过专家评审，本届大会部分优秀论文将被推荐到 IEEEE/CAA Journal of Automatica Sinica、Digital Communications and Networks、《自动化学报》、《智能科学与技术学报》和《哈尔滨工程大学学报》等国内外 SCI/EI 收录权威期刊发表。

### 时间节点

投稿开始时间：2025.02.01

征稿截止日期：2025.05.01

录用通知日期：2025.08.01

论文终稿日期：2025.08.15





# 中国自动化学会

中国自动化学会( Chinese Association of Automation, 缩写CAA)于1961年成立,是我国最早成立的国家一级学术团体之一,是中国科学技术协会的组成部分,是发展我国自动化科技事业的重要社会力量。学会现有个人会员8万余人,团体会员单位300余个,专业委员会67个,工作委员会12个,30个省、自治区、直辖市设有地方学会组织,覆盖了我国自动化科学技术领域的各个层面。

中国自动化学会在改革中求发展,不断加强群众组织力、学术引领力、社会公信力和国际影响力。近年来,中国自动化学会重点从学术交流与应用推广、组织建设与会员服务、科技评估与人才评价、课题研究与决策支撑、科学普及与继续教育等方面开拓创新,推动中国自动化科学和事业的发展 and 壮大,成为连接政府、产业、学术、科研、会员的重要纽带,致力于成为国内外有影响力的现代科技社团。

## 学会品牌学术活动

- 中国自动化大会 ·国家新质生产力与智能产业发展会议 ·中国认知计算与混合智能学术大会
- 中国自动化与人工智能教育大会 ·国家智能车发展论坛 ·国家机器人发展论坛 ·国家智能制造论坛
- 国家工业软件大会 ·中国控制会议 ·中国过程控制会议 ·青年学术年会 ·青年菁英系列活动
- 智能自动化学科前沿讲习班 ·钱学森国际杰出科学奖系列讲座 ·会士面对面系列讲座
- CAA云讲座 “我和优博有个约会”系列讲座 ·CAA科普大讲堂 ·CAA“企·话”沙龙
- CAA线上圆桌派 ·CAA青帆计划

## 学会奖励与评价

- CAA科技进步奖 ·CAA自然科学奖 ·CAA技术发明奖 ·CAA青年科技奖
- CAA科技成就奖 ·CAA青年人才托举工程 ·CAA研究生论文工程
- CAA教育教学成果工程

## 学会主办期刊

- 中国自动化学会通讯 ·自动化学报 ·IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica
- 信息与控制 ·机器人 ·模式识别与人工智能 ·电气传动 ·自动化博览
- The International Journal of Intelligent Control and Systems



官方微信



官方微博

地址:北京市海淀区中关村东路95号自动化大厦

网址:<http://www.caa.org.cn/>

电话:010-62522472

传真:010-62522248

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

邮编:100190