

# 中国自动化学会通讯

COMMUNICATIONS OF CAA

第12期

2024年12月

第45卷 总第255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

## 交叉融合 智控未来

### 第2届中国自动化学会 博士学术交流会

全驱系统控制理论—诞生背景、发展现状及应用进展 / 段广仁 P006

人工智能发展前沿 / 何友 P011

船舶智能化智能技术在船舶行业的应用与前景 / 夏桂华 P015

工业互联网赋能有色冶金智能制造关键技术与应用 / 阳春华 P019



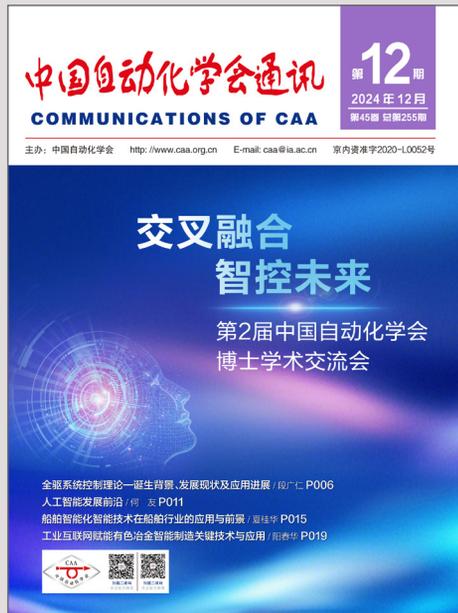
扫描二维码  
关注官方微信



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

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 | 2024 年 12 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



关注官方微信



关注官方微博

### 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

在新时代的征程上，科技创新已成为国家发展的核心驱动力。为贯彻落实习近平新时代中国特色社会主义思想 and 党的二十大精神，把自动化领域科教事业发展融入建设国家战略科技力量和推进科技自立自强的历史使命和责任中，中国自动化学会携手哈尔滨工程大学，于2024年9月24-26日在哈尔滨隆重举办“第二届中国自动化学会博士学术交流会”。此次盛会不仅是学术交流的盛会，更是青年学者展现才华、碰撞思想的舞台。

本次会议以“交叉融合，智控未来”为主题，旨在搭建一个高起点、高水平、高质量的学术交流平台，促进自动化、人工智能等学科领域的交叉融合，激发青年学者的创新活力，强化专业建设，加强基础性、前沿性和战略性研究布局，为实现科技高水平自立自强贡献智慧和力量。大会汇聚国内外自动化领域的专家学者、博士生和行业精英，通过主题报告、圆桌论坛等多种形式，分享研究成果，探讨学术前沿，交流创新思想。这不仅是一次知识的盛宴，更是一次智慧的碰撞，一次创新的启迪。

本期专刊聚焦“第二届中国自动化学会博士学术交流会”，为大家特别分享了中国自动化学会副理事长、青岛科技大学副校长、上海交通大学教授李少远，哈尔滨工程大学党委副书记、校长宋迎东的大会开幕式致辞，重点介绍了中国科学院院士、哈尔滨工业大学教授段广仁的“全驱系统控制理论—诞生背景、发展现状及应用进展”，中国工程院院士、中国自动化学会监事何友的“人工智能发展前沿”，哈尔滨工程大学教授夏桂华的“船舶智能化智能技术在船舶行业的应用与前景”和中国自动化学会理事、中南大学教授阳春华的“工业互联网赋能有色冶金智能制造关键技术与应用”4篇专题文章。

在此，我们向所有贡献稿件的专家学者表示衷心的感谢！期待未来能继续携手，共同推动自动化与人工智能领域的创新发展！



### 专题 / Column

- 004 在 2024 第二届中国自动化学会博士生学术交流会上致辞（内容节选）/ 李少远
- 005 在 2024 第二届中国自动化学会博士生学术交流会上致辞（内容节选）/ 宋迎东
- 006 全驱系统控制理论—诞生背景、发展现状及应用进展 / 段广仁
- 011 人工智能发展前沿 / 何友
- 015 船舶智能化智能技术在船舶行业的应用与前景 / 夏桂华
- 019 工业互联网赋能有色冶金智能制造关键技术与应用 / 阳春华

### 学者风采 / Scholars

- 022 谭铁牛院士——中国虹膜识别往事：从讨不来的图像说起



### 观点 / Viewpoint

- 027 郑南宁院士：扎实推进人才强校战略  
为中国特色、世界一流大学提供人才支撑
- 028 王耀南院士：大模型推动新一轮科技革命和产业变革
- 031 何积丰院士：普通人如何驾驭 AI 巨浪

### 科普园地 / Science Park

- 033 因果涌现：用因果量化复杂系统中的涌现 / 王志鹏 张江 刘凯威
- 059 物理学遇见机器学习：深度学习的下一个突破可能来自统计物理学 / 涂豫海

### 学会动态 / Activities

- 069 探索人形机器人未来：2024 世界智能制造大会——人形机器人技术与发展专题活动在南京隆重举行



P071



P076

072 《2024 控制科学与工程学科发展报告》  
中期汇报会顺利召开

073 CAA 线上圆桌派——“火箭科普大家聊”  
活动成功举办

074 中国自动化学会新能源与储能系统控制  
专业委员会成立大会成功召开

### 学生分会 / Student Branch

076 中国自动化学会华南理工大学学生分会  
成立大会成功召开

078 CAA 中南大学学生分会成功举办“CAA 进校  
园——小学站”第二期科普宣讲活动

080 CAA 重庆大学学生分会“知行相随，硕博同  
行”博硕论坛顺利举办

081 CAA 中南大学学生分会成功举办  
CAA 青帆计划第十五期活动

082 CAA 浙江工业大学学生分会成功举办 CAA  
青帆计划第 16 期“学生论坛—科研就业竞赛”  
活动

083 CAA 中南大学学生分会成功举办  
CAA 青帆计划第 17 期活动

### 党建强会 / Party Building

085 充分发挥党的政治建设的统领作用

087 知识产权赋能新质生产力发展的三重维度

### 形势通报 / Voice

090 可信数据空间发展行动计划（2024—2028 年）

093 标准提升引领原材料工业优化升级行动方案  
（2025—2027 年）



P079



P080

# 在 2024 第二届中国自动化学会博士生学术交流会上致辞（内容节选）

文 / 中国自动化学会副理事长、青岛科技大学副校长 李少远



中国自动化学会作为我国自动化领域最具影响力的学术团体之一，做出了很多开创性工作，特别是近年来，在自动化和人工智能领域内创设了多个国家级别的学术会议，这其中就包含本次博士生学术交流会。

近年来，围绕人工智能、自动化事业的发展，中国自动化学会不仅致力于推动基础理论研究和关键技术研究，积极搭建产学研用创新平台，还致力于促进博士、硕士学位论文课题的产出、

成果的形成及结果的推广，都取得了显著成效。

今天举办中国自动化学会第二届博士生学术交流会，不仅是为了分享已有的学术成果，更在于深入探讨成果

产出的过程以及解决问题的主要思路。控制科学与工程作为自动化领域的重要分支，其发展直接关系到我国工业、农业、国防等各个领域的核心力量，所产生的学位论文成果，对推动国家的基础研究乃至工业应用都起到非常关键的作用。在攻读学位和撰写论文过程中，同学们可能会面临各种各样的问题，这要求我们始终将个人发展与国家需求紧密结合，以积极的态度解决问题。

展望未来，中国自动化学会

将继续秉承初心，聚焦自动化领域的核心技术，参与解决关键技术问题，加大科技创新力度，推动产学研深度融合，为我国经济社会发展贡献更大力量。同时，积极响应国家人才强国战略，优化人才培养机制，为自动化领域培养更多具有国际视野和创新能力的关键人才。

本次博士生学术交流会已经引起了诸多学校和专家学者的广泛关注和浓厚兴趣。区别于其他学术会议，本次学术交流会特别为硕士和博士生群体提供一个高质量的交流平台，旨在促进学术成果的交流和问题解决思路的探讨。这是一次敢为人先的尝试，希望大家能够在这一平台上深入交流、相互启发，分享智慧的成果，产生更多的灵感，为中国的科技进步和经济发展注入新的活力。○

# 在 2024 第二届中国自动化学会博士生学术交流会上致辞（内容节选）

文 / 哈尔滨工程大学校长 宋迎东



哈尔滨工程大学是一所有着光荣军工传统、深厚文化底蕴和鲜明办学特色的大学，前身是创建于 1953 年中国人民解放军军事工程学院陈赓大将任首位院长，学校经历了哈军工、哈察院、哈工程“三个哈”的阶段，在 70 余年的办学历程中形成了鲜明的“三海一核”办学特色。现已发展成我国传播工业、海军装备、海洋开发、核能应用领域重要的人才培养和科学研究基地。

2023 年 9 月 7 日，习近平总书记视察学校并知识，哈尔滨工程大学要发扬哈军工优良传统，紧贴强国、强军需要，抓好教育、科技人才工作，为建设教育强国、

科技强国、人才强国再立新功。总书记的重要指示精神为学校办学治校提供了根本遵循，也为学校自动化与人工智能领域特色发展指明了方向。

哈尔滨工程

大学智能科学与工程学院始建于哈军工的海军工程系，1970 年成立自动控制系、1998 年建立自动化学院，2020 年更名为智能科学与工程学院。学院现设有自动化、人工智能、机器人工程等六个国家一流的专业，拥有控制科学与工程三个一级学科，水下智能技术交叉学科以及电子信息工程硕博博士学位。学校的导航、制导控制学科为国家重点学科，也是首批国防重点学科。控制科技与工程在全国高校最先一轮的学科评估中获评 A 类，全国高校并列第六，是我国最早面向建材领域的控制学科，也是我国全海导航控制与

智能技术的策源地，支撑学校成为全海领域国家级突出贡献奖唯一的获奖高校，为我国海洋开发事业和开放建设发展作出了突出贡献。

中国自动化学会是我国最早成立的国家一级学术团组织，为我国自动化信息与智能科技事业做出了重要贡献。本次中国自动化学会博士生学术交流会由中国自动化学会与哈尔滨工程大学、智能科技与工程学院联合主办。旨在促进自动化与人工智能领域青年学子间的交流与合作，拓展青年学者学术视野和学术思维，促进相关学科新理论和新技术的交叉融合。

我们相信，本次博士生学术交流会一定会给我们带来精彩的思想碰撞和创新的智慧火花，同时学校将以本次学术交流为契机，深入挖掘在自动化与智能科技领域的发展前景，厚实关键科技要素和战略技术储备，深化与海内外学者的合作交流，发现科技革命和产业变革新机遇，为自动化与智能科技高质量发展，实现科技自立自强贡献智慧力量。○

# 全驱系统控制理论—诞生背景、发展现状及应用进展

文 / 哈尔滨工业大学 段广仁

导读：段广仁院士受邀在 2024 中国自动化学会博士学术交流会中作题为“全驱系统控制理论—诞生背景、发展现状及应用进展”的大会报告。今天控制工程界的繁荣不代表控制理论正在蓬勃发展，因为早期提出的一些理论方法，如 PID 调节、线性系统设计方法等，还有很大的应用空间。但只靠已有的这些理论方法显然无法满足日益复杂的控制工程发展需求。

今天的控制理论境况究竟如何呢？众多的事实说明，经过百年的辉煌今天的控制理论体系已经光辉不在，已经陷入了困境：“从 1990 年中期开始，关于多变量非线性系统反馈设计问题的研究就几乎出现了完全的停滞”；“控制已死，要重生就要等待类似于耶稣使拉萨路复活的那种奇迹发生。”

重生的机会何在？——“不会来自对现有成熟理论的拓展！”控制理论走出困境需要建立一个全新的理论体系。本报告从全驱系统方法的诞生背景、优越性和研究现状出发，介绍了全驱系统模型对原始系统的作用机理，并对全驱系统理论的学术成果及实际性应用展开了具体的介绍。

## 一、引言

全驱系统控制理论体系的突破，彻底克服了传统状态空间方法在面对复杂非线性、时变性、时值特性以及非完整性等方面的种种局限，成功解决了许多复杂系统中的鲁棒镇定问题。这一突破不仅标志着控制理论领域的一个重大进步，特别是在高维、非线性系统的处理上，展现出了显著的优势。具体来说，这种新兴的控制理论体系使得鲁棒自适应控制、最优控制、预测控制、跟踪控制、抗干扰控制以及离散时间系统控制等多种复杂控制问题

得到了系统化的解决，引起了学术界、工程界广泛的关注与讨论。

全驱系统方法被誉为控制学科中最具建设性与原创性的成果之一，它提出的全新理论框架不仅为许多研究者提供了深刻的思考和探索方向，而且也激发了大量相关领域学术论文的发表和讨论。在这一过程中，十篇开创性系列论文不仅为高阶全驱系统理论的研究奠定了坚实的基础，而且推动了该理论在实践中的进一步发展。这些研究成果在理论深度和应用广度上都具有极高的重要性，因此迅速吸引了学术界和工程界的高度关注。

高阶全驱系统的成功应用，既

解决了多个复杂的控制问题，也展现了其在不同领域中的巨大应用潜力。这些先驱性的研究成果不仅推动了全驱系统理论在控制学科中的进一步发展，也深化了我们对控制系统复杂性与不确定性问题的理解。随着这些研究的不断推进，全驱系统理论的应用范围不断扩大，涉及到的学科领域也越来越广泛。这些理论的传播与应用，必将进一步促进对控制理论与工程技术的深刻认知，从而为未来的科技创新与跨学科发展奠定了坚实的理论基础。

全驱系统的成功应用及其在各个领域中的不断发展，不仅为现

代控制学科的发展提供了全新的视角，而且也未来科学研究与技术创新提供了重要的理论依据。可以预见，随着全驱系统控制理论不断完善与深化，它将对整个控制学科乃至其他相关领域产生深远的影响，推动控制理论与技术向更高水平发展。

## 二、全驱系统的定义与应用现状

全驱系统并不是一个新兴的术语，事实上，这个概念已经存在了相当长的时间，并且在机械系统的分析与设计过程中被广泛应用。无论是在工业生产、机器人技术，还是在自动化控制领域，全驱系统的概念和应用都占据了重要地位。

从宏观上看，机械系统通常可以划分为两大类：全驱系统和欠驱系统。这两类系统的划分标准主要依据系统的自由度数量与执行机构的数目。简单来说，系统的自由度数量指的是系统可以独立运动的方式或方向，而执行机构则是用来产生控制力的部分。区分这两类系统的关键标准就在于，系统的自由度数量与控制执行机构的数量是否匹配。如果系统的自由度数量与控制执行机构的数量完全相同，那么该系统就被归类为全驱系统。

全驱系统的一个显著特点是，它能够通过精确的控制设计，确保系统每个自由度都能够被单独控制。显而易见，全驱系统具有与其控制设计紧密相关的独特优势。因

为在这种情况下，控制系统设计相对简单且直接，能够更加高效地对系统的每个部分进行精确的控制。通过合理的设计和优化，闭环控制系统通常能够有效地转化为线性定常系统，这使得全驱系统的控制在理论和实践中都具有较高的可操作性、稳定性和可预测性。

然而，现实情况往往并非如此简单，许多机械系统在实际应用中并不能明确划分为全驱系统或欠驱系统。在处理那些自由度与执行机构数量不完全匹配的复杂非线性系统时，控制设计问题变得尤为棘手。这些复杂系统通常具有多样化和难以预测的动力学行为，且这些行为往往不是线性、定常的，因此难以简单地通过常规的控制方法进行有效管理。

如何在此类系统中实现有效的控制设计，仍然是控制理论中的一个核心挑战，尤其是在面对那些高度非线性、时变性或信息不完全的系统时，传统的全驱系统控制方法可能难以直接应用，甚至可能导致系统失控或性能下降。此外，全驱系统本身在实际工程应用中相对稀少，这是因为其要求系统的自由度和执行机构数量恰好匹配，而这一点在许多复杂的机械系统中往往难以实现。

现实中，许多系统的设计往往会受到物理、经济等多方面的限制，导致无法满足全驱系统的严格要求。全驱系统的“全驱”特性本

质上是一种物理上的固有属性，通常是难以通过单纯的物理手段加以改变的。换句话说，这种特性不是系统可以随意调整的参数，而是设计过程中必须考虑的基本条件。

然而，从数学的角度来看，是否可以通过改进现有的数学模型和控制理论，创造出更多的全驱系统或使现有系统具备类似全驱系统的特性，成为了一个值得深入探讨的重要问题。通过优化和完善数学模型、引入更为先进的控制理论与算法，人们有可能在更广泛的复杂系统中实现类似全驱系统的控制效果，从而推动全驱系统在更大范围的应用和推广。例如，通过引入自适应控制、鲁棒控制或智能控制等先进方法，有望在一些高维复杂系统中实现更加稳定的控制表现。

因此，如何在理论和数学框架上进一步扩展全驱系统的定义和应用，成为了当前控制理论研究中的一个重要方向。这一研究不仅能够为解决更广泛的控制问题提供潜在的突破口，而且还可能为未来的工程应用带来革命性的改变，尤其是在机器人、自动化生产、航空航天等高科技领域，如何有效地管理复杂系统的自由度，依然是技术进步中的一个关键挑战。

人们所熟知的状态空间的方法最早由欧拉应用于求解微分方程系统的响应问题，最初是为了描述和解决系统中状态的变化与演化。欧拉通过这一方法，成功地将复杂

的动态系统转化为可以求解的数学形式，为后来的控制理论奠定了基础。进入 19 世纪，1892 年，野格沃夫进一步发展了这一方法，针对当时的状态问题提出了解决方案，揭示了“状态的无知本性质”这一关键概念，为状态空间方法的广泛应用提供了理论支持。随着时间的推移，状态空间方法逐渐被引入到控制理论中，成为分析和设计控制系统的重要工具。

然而，尽管状态空间方法在许多线性系统的控制中表现出色，但当它应用于非线性系统时，往往显得不够灵活和高效，因为状态空间方法在面对非线性特性时会遇到不少计算和理论上的困难，处理起来并不方便。与此不同，全驱系统方法正是由于其特别强调状态和控制变量的关系，具有显著的优势。它不仅关注系统的状态，还能够直接与控制变量进行交互，并在这些模型中实现控制变量的解耦。通过这一方法，研究者可以直接从模型中提取和调整控制变量，从而简化控制问题的求解过程。因此，全驱系统方法特别适合处理非线性系统的控制问题，能够有效克服传统状态空间方法在非线性和环境下的局限性，为非线性控制提供了一种更加高效和直观的解决方案。

### 三、广义全驱系统的理论扩展

全驱系统方法理论的核心思想在于将原本较为简化的全驱系统

模型进行扩展和推广，使其能够适应更加复杂且具有非线性特征的系统。从数学的角度来看，这种扩展不仅仅是对原有模型的简单修改或变换，更是对全驱系统在理论上的深入理解和广泛应用的一次重大提升。通过这种扩展，全驱系统的适用范围得到了显著拓展，使其能够应对更加复杂的实际问题和多变的应用场景。因此，这一扩展的理论可以被称作广义全驱系统，它不仅突破了传统模型的限制，还为新的理论发展提供了可能。

全驱系统的形式多种多样，具体可以划分为不同的类型，其中既包括仿射形式的全驱系统，也包括非仿射形式的系统。仿射形式的全驱系统具有一些鲜明且显著的特点，最为突出的是它们在结构上具有较高的统一性和一致性。这种统一性体现在，每个系统中的点在其整个框架内所承担的角色和所发挥的作用是相对相同的，彼此之间并无显著差异。在仿射系统中，各个状态之间的转换过程是线性且可以通过精确的数学模型来进行预测的，因此在某些特定应用中，它们能够提供非常可靠和可控的系统行为。这也是仿射全驱系统的核心特性之一，保证了系统在动态变化过程中能够保持一定的规律性。

除了仿射形式，全驱系统还可以细分为单阶系统和多阶系统。在这两种不同的系统形式中，它们在理论分析和实际应用中展现出明

显的差异。单阶系统通常较为简单，因为它们的控制策略和数学建模相对直观，可以通过传统的常规方法直接进行分析、建模和求解。这样的系统在处理较为简单的控制任务时具有优势，可以快速实现预期的效果。

然而，对于更为复杂的多阶系统来说，其结构涉及到多个动态层次，因此在控制设计和系统优化中往往需要更加复杂的算法和方法来应对。这种复杂性使得多阶系统的控制算法通常需要较高的数学技术和计算能力，才能有效地实现稳定性和性能优化。理解这些不同类型的全驱系统之间的差异，对于在实际应用中进行系统建模、分析以及优化控制具有重要的理论意义。特别是在涉及多层次、多维度的实际问题时，如何根据系统的具体复杂性选择和设计合适的控制策略，已成为理论研究和工程实践中的一个重要课题。

当需要为一个具体的系统建立数学模型时，首先要依赖于物理定律。物理定律不仅是自然界普遍适用的规律，同时也为系统建模提供了坚实的基础框架。通过这些物理定律，工程师和研究人员能够从系统的基本物理特性出发，逐步推导出描述系统行为的微分方程、差分方程，或者是介于两者之间的混合型方程。这些方程通常能够准确地表达系统的动态特性，并且是系统建模过程中最初始、最基本的数

学模型。传统的方法通常是从原始的物理模型出发，结合具体的实验和理论分析，推导出系统的状态空间模型。这个过程通常会通过数学手段将系统的物理行为转换为一个高维度的状态空间模型，在该模型中，系统的动态特性通过状态变量加以描述，并为后续的分析与设计提供了重要的理论依据和工具。

然而，在这一过程中，许多人在建立模型时往往忽视了一种另外的思路，那就是通过消元转化的方法对系统进行等价变换。这一思路可以作为一种非常有效的建模和分析策略，通过对原始系统的等价变换，不仅能够简化复杂的系统模型，还能够一定程度上去除系统中的非线性特性，使得系统模型变得更加易于处理。通过这种变换，可以将原本复杂、非线性的系统模型转化为更为简洁、清晰的全驱系统形式。全驱系统是一类线性系统，其动态行为通常更加稳定且容易预测。

因此，这种变换不仅具有深刻的理论意义，帮助我们更好地理解系统的内部机制，而且在实际操作中也具有非常重要的应用价值。因为通过这一等价变换，系统的控制问题变得更加简洁，避免了直接处理复杂非线性问题时可能遇到的种种挑战。特别是在实际的工程应用中，面对复杂的多变量、高维度的系统，采用这一方法能够极大地提高设计的可操作性和实用性。控

制设计人员可以在更简洁的模型基础上，采用经典的控制理论和现代控制方法，如PID控制、最优控制等，来设计适合该系统的控制器。而且，由于系统的复杂性已经大大降低，这使得控制系统的稳定性分析和性能评估变得更加容易。

此外，在等价变换的过程中，通过同胚变换可以将原始系统的复杂性和非线性特征转化为一种可以有效处理的全驱系统形式。这种转化为后续的控制设计提供了更为简洁和直观的数学结构，使得分析和优化过程更加高效。通过这种变换，控制系统的设计框架得到了简化，研究人员和工程师可以更清晰地理解系统的动态行为，进而开发出更加精准和可靠的控制算法。更重要的是，采用这种方法不仅能够有效提高控制系统的设计效率，还能够增强控制系统的鲁棒性和稳定性，特别是在面对外部干扰或者系统不确定性时，能够提供更加稳健的控制性能。

因此，这一过程在实际应用中扮演着至关重要的角色。尤其是在处理复杂、高维度的非线性系统时，通过等价变换可以显著简化设计流程，帮助设计人员更好地理解系统的本质特征，提高设计的准确性和可靠性。同时，这一方法不仅仅局限于理论分析，它在工程实践中也有着广泛的应用前景，能够有效地提升系统性能，使得控制系统在实际操作中更加高效、稳定。

#### 四、全驱系统方法的发展现状

2020年，世界上第一篇关于全驱系统方法的论文发表在《自动化学报》上，这篇论文是一个系列的开端，整个系列共包括三篇论文。这项创新研究不仅在国内引起了广泛关注，而且国际上也取得了显著进展——国际上第一篇关于全驱系统方法的论文于同年在《国际系统科学杂志》上发表，该系列论文总数达到10篇之多，涵盖了全驱系统方法在多种应用场景下的拓展与实现。截止到目前，基础科学中心的项目组已经在SCI期刊上发表了234篇高水平论文，其中包括《Automatica》期刊上发表的8篇、《SCIENCE CHINA Information Sciences》上的14篇、《自动化学报》英文版上的3篇，此外，还在IEEE汇刊上发表了61篇论文。该领域的第一个成果无疑是最具说服力的——即线性系统状态空间的能控充要条件被证明可以转化为一个高阶全驱系统的形式，这一发现为全驱系统理论的进一步发展奠定了坚实的基础。

非线性系统领域也是一样，目前我国在非线性系统领域的成果屈指可数，除了最为基础的Lya-punov方法之外，严格反馈系统的研究成为了非线性控制领域中的一个关键主题。无论是自适应控制、滑模控制等先进方法的研究，还是其他与严格反馈系统相关的课

题，几乎所有的相关研究都集中于如何通过全驱系统的方法来解决这些问题。目前，许多传统的非线性系统理论中的重要结果，特别是那些涉及到能控性、稳定性等核心问题的研究成果，都已经被全驱系统所泛化和覆盖。这不仅表明全驱系统方法在非线性和系统理论中的重要性，也证明了它作为一种新的控制方法对现有理论的深刻影响和巨大贡献。

## 五、全驱系统方法的展望

在短短四年的时间里，全驱系统经历了从无到有、从小到大、从弱到强的全过程，走过了一个快速成长的轨迹。它在国内外研究者的共同努力和推动下，得到了飞速发展和广泛应用。全驱系统的诞生并非是通常所理解的某个单一的成果，也不仅仅是某篇论文的简单结

论。它是一个完整的、系统性的理论框架，是一个具有深刻内涵和广泛应用前景的技术体系，与状态空间方法一样，属于一个独立的整体体系，而不仅仅是某个具体的结构或子模块。自 2021 年首次提出以来，全驱系统的发展超出了许多人最初的预期。分析其原因，首先可以归结于状态空间方法在某些领域的研究遇到了瓶颈，迫切需要一种新的方法来突破现有的局限；另一方面，全驱系统方法本身具备诸多优势，能够有效克服传统方法的不足，提供更为精准和高效的解决方案，因此在各个领域得到了迅速的推广和应用。

最近，全驱系统控制理论项目荣幸地入选了 2023 年高等学校十大科技进步奖，这一殊荣不仅标志着该领域在科研和应用方面的巨大突破，也彰显了其在技术创新和

理论发展的重要地位。刘国平教授将全驱系统模型成功应用于预测控制领域，凭借深入的研究和创新性的工作，取得了一系列显著的成果。至今，刘教授已经发表了 30 多篇相关学术论文，涵盖了预测控制的多个关键问题，极大地推动了这一领域的进展。与此同时，周东华教授与姜斌教授也在全驱系统方法的应用方面作出了杰出贡献，特别是在故障诊断问题的处理上取得了丰硕的成果。两位教授通过深刻的理论分析与实践探索，推动了全驱系统在故障诊断领域的广泛应用，相关研究成果已在包括《Automatica》在内的多个国际顶级期刊上发表，得到了广泛的学术认可和高度评价。○

\* 本文根据作者所作报告速记整理而成

## 报告人简介



段广仁，中国科学院院士、IEEE/IET/CAA Fellow，国家

杰青，长江学者，1991 年破格晋升哈尔滨工业大学教授，现为哈尔滨工业大学控制理论与制造技术研究中心名誉主任。他还是国家自然科学基金委创新群体项目重大项目和基础科学中心项目负责人，现任中央军委科技委、国防科技工业专家组成员，国务院学科评议组控制科学与工程学科召集人；教育部科技委信息学部第五，第六和第八届委员，中国自动化学会全驱系统理论与应

用专业委员会主任。

段广仁院士获得国家自然科学二等奖两项（第一名），发表 SCI 论文 500 多篇，出版英文著作三部，译注一部。一部中文著作获得两级国家级奖项，培养全国百篇优秀博士论文学者两人、一名学生成长为国家优秀青年科学基金获得者、拔尖人才、CAA Fellow、长江学者、国家杰出青年基金获得者和中国工程院院士。

# 人工智能发展前沿

文 / 海军航空大学 何 友

导读：何友院士受邀在 2024 中国自动化学会博士学术交流会中作题为“人工智能发展前沿”的大会报告。人工智能（Artificial Intelligence, AI）是计算机科学的一个分支，致力于开发可以模拟或增强人类智能的系统和算法。随着技术的飞速发展，人工智能正逐步融入各行各业，以前所未有的速度改变着世界，成为人类社会发展的主要驱动力。本报告将从人工智能发展简述、人工智能应用突破、人工智能发展前沿、从现实到元宇宙以及人工智能全球发展新格局几个方面来展开，探讨未来技术创新与社会责任之间的平衡，推动人工智能朝着更安全、透明和可持续发展的方向发展。

## 一、引言

人工智能的研究与应用历经六十余年，已从最初的理论探索发展成为推动全球技术与产业变革的重要驱动力。从“深蓝”战胜国际象棋冠军，到 AlphaGo 攻克围棋，再到 ChatGPT 和 AlphaFold 的问世，人工智能在各领域的渗透不断刷新人类对智能的理解。本次专题报告梳理了人工智能的发展历程、理论前沿、产业现状及全球发展格局，为未来人工智能的发展研究提供参考。

## 二、人工智能发展简述

1956 年夏季美国达特茅斯学院召开的首次人工智能研讨会，这也被人们认为是人工智能的起点。1997 年，IBM 的“深蓝”

击败国际象棋冠军卡斯帕罗夫。2011 年，超级计算机“沃森”在《危险边缘》中击败两名最成功的人类选手。2016 年，AlphaGo 战胜围棋冠军李世石，引发全球关注。2022 年，ChatGPT 实现与人类对话相仿的能力，支持邮件、代码、论文等生成任务。2024 年，Open AI 推出文生视频大模型 Sora，可根据文本生成逼真的短视频。

人工智能的发展经历了从理论奠基到技术革新的多个阶段，逐步从概念探索走向实际应用。早期以逻辑推理和算法研究为核心，逐渐发展为知识驱动的专家系统。深度学习作为人工智能的重要分支，经历了从理论萌芽到广泛应用的快速发展历程，其进步主要依赖于算法创新、计算能

力提升和数据规模的扩大。深度学习的崛起得益于两大关键技术：一个是多层人工智能形成网络组成的特征学习能力，通过增加网络深度，提升模型对复杂特征的表达能力。另一个则是逐层训练优化：解决了深层网络的梯度消失问题，使训练更加高效，推进了人工智能算法模型产品的落地。这些技术成就使得深度学习算法逐步取代传统算法，广泛应用于人脸检测、目标识别、语音合成等领域，与机电技术、控制技术、感知技术和自动算法都产生了紧密的联系。随着计算能力提升和数据驱动的崛起，机器学习成为 AI 的关键方法，最终因深度学习技术的突破迎来了现代 AI 的繁荣。

预测大模型作为深度学习的

核心进展之一，已在自然语言处理、计算机视觉和多模态学习等领域取得显著成果。2024年5月，OpenAI发布了GPT-4O模型，具备处理文本、音频和图像等多种模态数据的能力，实现了全能全知的特性。2024年6月，阿里云发布了开源大语言模型Qwen2，在代码和数学能力上有了显著提升，并在各大基准测试中取得了优异成绩。2024年9月，OpenAI发布了O1大模型预览版，能够像人类一样通过推理逐步解决问题，并解释其推理过程。2024年9月，腾讯发布了新一代万亿参数级大模型“混元Turbo”，采用混合专家架构，通过针对性地调用领域专家模型来解决复杂任务。

预测大模型作为预训练模型的高级形式，其成功得益于多种学习形式的引入与融合，其中对比学习、掩膜学习和生成式学习是核心方法。这些学习形式各有特点，它们共同推动了预训练模型的能力扩展和应用深化。

对比学习是一种无监督学习方法，通过区分图像视角或图像本身学习数据表征。对比学习无需人工标注，可适用于大规模数据处理任务。2020年初，Google与Facebook分别提出的SimCLR和MoCo均在大规模数据集上取得了接近或超过监督学习的

表现。

掩膜学习是一种自监督学习方法，通过在训练数据中有意遮盖部分信息，训练模型预测被遮盖的内容，从而使模型学习到输入数据的潜在模式和上下文关系。2021年11月，Facebook提出MA1视觉掩膜学习范式，在Magican数据集上实现了80.8%的识别精度，超越了当时的监督学习方法。MA1范式不仅专注于图像识别，还推动了视觉和语言学习的融合与协同发展，为多模态学习提供了全新思路。

根据机器学习的模型、先验概率应用形式大体可以分为生成模型和判定模型两类。判定模型从历史数据中总结出犯错误最少的位置作为决策的边界、测算了预测数据的标签。而生成模型根据各类型下数据的分布，比较不同类型下生成该数据的概念，它侧重生成新的数据。2014年，Ian Goodfellow提出了生成对抗网络的概念。这种方法结合了生成模型和判定模型，使两者相互对抗进而相互优化，从而不需要人工标注的部件的学习，催生了一类新的学习模式。

预训练模型的学习模式各具特点，但它们都为预训练模型的成功提供了关键支持，并通过融合不断推动预训练技术向更通用、更高效的方向发展。

### 三、人工智能应用突破

近年来，人工智能技术取得了显著突破，广泛应用于各行各业，推动了社会和经济的深刻变革。2024年，OpenAI推出了文成视频模型Sora，通过计算机视觉技术和大语言模型生成长达一分钟的高质量视频。Sora能够理解用户提示并生成连贯的内容，但在复杂物理现象和因果关系的准确模拟方面仍存在局限。2023年1月，DeepMind推出BLIP-2模型，利用强化学习和课程学习在阅读理、情报检索等任务中表现出色。其开发的通用智能体Agent通过统一网络完成604项任务，其中450项达到或超过专家水平，展现通用人工智能的初步潜力。2023年，中国华大智造团队发布EvoPlay博弈模型，借鉴围棋自博弈策略探索蛋白质突变空间，成功模拟并优化蛋白功能变化，为生物技术研究提供重要工具。2020年神经负磁场(NeRF)通过视角信息重建三维物体；2022年苹果的Newman框架实现3-10秒内快速重构人物动作和场景，广泛应用于影视制作；2023年，法国和俄罗斯团队开发的高速三维模拟技术进一步提升了3D建模的平滑性和精确性，成为三维重建的新标杆。

人工智能在多领域的突破性

应用表明，真正快速融入技术创新和实际应用，推动各行业向智能化转型。然而，技术进步的同时，也面临伦理与安全的挑战，如何实现技术与社会的平衡发展仍是未来的关键议题。

#### 四、人工智能发展前沿

近年来，自动驾驶技术作为人工智能的前沿领域，涵盖了数据采集、定位感知、认知理解、决策规划等复杂环节。其核心发展方向包括硬件升级与大模型优化。2023年，中国上海AI实验室联合团队提出了“以路径规划为导向的自动驾驶通用大模型”，这一感知决策一体化技术开创了以全局任务为目标的自动驾驶新模式。同年8月，特斯拉展示了完全自动驾驶系统FSD，这一端到端AI驾驶系统由神经网络主导99%的决策，提升了动态场景下的反应能力。自2021年起，天津港采用智能水平运输机器人实现全流程自动化作业，成为全球领先的自动化集装箱码头之一。目前，该技术正向城市客运、出租车等开放环境推广，自动驾驶正在深刻改变人类的出行方式。

类脑传感器的动态视觉相机模仿生物视觉系统，仅在变化时触发信号，大幅提升效率。这种超高动态应用能够捕捉子弹轨迹等快速变化的细节，避免过曝问题。2023年9月，国际空间站首

次利用新型神经相机，以每秒10万亿帧的速度观测雷暴和闪电，为研究其形成机制提供了重要数据，相关研究已产生大量成果。

随着人工智能在军事领域应用的不断拓展，为武器系统、战术装备和决策支持带来了重大变革。智能型武器的远程精准打击、AI辅助装备的广泛应用、商业化AI作战工具、借助AI提升作战效率与协作能力、空战AI智能体的突破等等，人工智能技术在军事领域的不断创新，不仅改变了传统作战模式，还推动了军事实力的现代化，为未来战争形态的演进提供了重要支撑。

#### 五、从增强现实、虚拟现实、混合现实到元宇宙

元宇宙的概念最早由尼尔·斯蒂芬森在1992年的小说《雪崩》中提出，描述了一个虚拟与现实融合的平行世界。疫情的推动进一步加速了线上虚拟互动的发展，增强现实（AR）、虚拟现实（VR）和混合现实（MR）技术正不断搭建虚拟与现实的桥梁。

2021年被称为元宇宙元年，同年Facebook更名为Meta，推出首个元宇宙平台“平行世界”，用户可通过虚拟形象参与购物、社交、游戏等活动。2024年2月，Meta发布混合现实超级应用，与联想、微软等公司合作，推动硬

件生态多样化，为元宇宙的包容性和丰富性奠定基础。随着底层硬件和技术的不断升级，元宇宙生态逐步完善，并衍生出更多应用场景。

人工智能的快速发展为科学预测提供了新工具，进一步推动了从元宇宙到科学领域的跨越式进步。DeepMind于2018年推出的AlphaFold模型，解决了困扰科学界50年的蛋白质结构预测问题。2024年发布的AlphaFold3进一步模拟了分子相互作用，极大地加速了药物研发。华为的盘古气象大模型及GraphCast系统突破传统预测精度，中国上海实验室发布的“风鸟”模型首次在多任务、高分辨率天气预测中超越DeepMind模型。2024年DeepMind的AlphaGeometry在解决几何问题上接近奥数金牌水平；2023年PRIMO方法显著提升了黑洞图像的清晰度，为天文学研究提供了新的视角。同年，DeepMind通过图神经网络模型发现了220万个新的材料晶体结构，其效率是传统方法的十倍，为新材料研发带来了巨大推动力。

从元宇宙的构建到科学研究的突破，人工智能正展现出多领域融合发展的潜力，为未来社会带来无限可能。

#### 六、人工智能全球发展新格局

人工智能在全球范围内的产

业布局呈现中美两强格局。美国 AI 产业基础层和技术层实力强劲，英伟达、高通等企业在芯片和硬件产品领域占据主导地位，IBM、谷歌和亚马逊等则专注于技术研发。中国则以 AI 国家队和创业独角兽为核心，应用层在安防、教育等领域表现突出，但在芯片和传感器等基础硬件方面仍有待加强。

截至 2023 年 6 月，美国拥有 131 家 AI 独角兽企业，中国紧随

其后有 108 家。在人才方面，中国总量庞大，但高端人才储备和吸引力略逊于美国。近年来，中国通过设立人工智能学院等措施，加强人才培养以缩小差距。

通用模型发布和基础大模型研发上，美国目前仍然处于领先地位，2023 年发布了 109 个基础大模型，而中国仅发布 20 个。中美在 AI 技术开源项目上的影响力差距也在扩大，这表明中国在技

术研究和国际合作方面仍需努力。

人们现在社会发展已经迈入了机器化时代、电气化时代、信息化时代，正在经历向人工智能发展的变迁。前面中国主要是旁观者和跟随者，今天国家创新战略结合市场和强大的国力，使我国有机会成为新时代的推进者。○

\* 本文根据作者所作报告速记整理而成

## 报告人简介



何友，中国工程院院士，1997 年毕业于清华大学留学德国，中共十七大代表，第十二届全国政协委员、全国优秀教师，曾任多个学术组织的会职。国家自然科学基金委信息学部咨询专家委员会委员、中国人工智能学会副理事长兼智能融合专业委员会主任委员、中国航空学会名誉副理事长兼信息融合分会主任委

员、中国指挥与控制学会监事长等。

主要研究领域有智能感知与融合、智能技术与应用等。以第一完成人获国家科技进步二等奖四项，国家教学成果一等、二等奖各一项。先后入选国家百千万人才工程，获何梁何利基金科学与技术进步奖、求是工程奖、山东省科学技术最高奖等。

## 第 23 届国际航空航天控制会议征文通知



由国际自动控制联合会、中国自动化学会联合主办，哈尔滨工业大学和北京控制工程研究所联合承办，微小型航天器快速设计与智能集群全国重点实验室、复杂系统控制与智能协同全国重点实验室、空间智能控制技术全国重点实验室等实验室协办，段广仁院士、曹喜滨院士、李永研究员担任大会主席的第 23 届国际航空航天大会将于 2025 年 8 月 2 日 -8 月 6 日在哈尔滨举行。

详情请查看：[https://mp.weixin.qq.com/s/sjbExaDatuPiA\\_rbQC8hZA](https://mp.weixin.qq.com/s/sjbExaDatuPiA_rbQC8hZA)

# 船舶智能化智能技术在船舶行业的应用与前景

文 / 哈尔滨工程大学 夏桂华

导读：夏桂华教授受邀在 2024 中国自动化学会博士学术交流会中作题为“船舶智能化智能技术在船舶行业的应用与前景”的大会报告。智能船舶是综合运用感知、通信、控制、人工智能等先进信息技术，具备复杂环境及自身感知、智能决策、控制等多级别自主能力，实现比传统船舶更加安全、经济、环保、高效的新一代船舶，是当前各造船强国与航运科技领域的高新技术。船舶数字技术是支撑船舶实现不同智能级别的技术基础，网络技术是其保障。哈尔滨工程大学近十年来在船舶数字与智能技术开展了探索工作，完成了船舶水动力性能的数值水池、船舶航行性能模拟、船舶航行态势智能感知、船舶自主航行、船舶数字孪生等研究工作；利用人工智能技术，对船舶主要性能进行了快速预报，并开展了实船试验并得到了应用。

## 一、引言

目前，全球贸易运输主要依靠船舶，而当前船舶存在以下几个主要问题：人力成本上升，以及海上事故中 70% 由人为因素造成。在此背景下，伴随人工智能工具的发展，船舶行业提出了智能化、自主化、无人化和少人化的需求，进而推动了智能船舶的发展，使未来的船舶更加经济、环保、安全和高效，被称为新一代智能船舶。

国际海事组织（IMO）对智能船舶进行了分类，将其分为四个等级：

1. 自动数据辅助决策。
2. 船员在船上的远程遥控。
3. 无船员情况下的远程遥控。

4. 完全自主操作，与现阶段智能车辆类似。

IDOL 作为一个特殊的国际组织，负责对船上设备进行规则认证，所有设备必须符合其标准才能被应用。该组织在 2020 年提出了自主船舶相关规则，包括远程操控、火灾压制处理、风险评估以及检验规则等。这些规则为行业发展提供了指导方向。

国际海事组织在 2020 年设定了到 2028 年实现自主航行的目标，尽管目标较为激进，但在今年 5 月于英国召开的会议上，经过广泛讨论，最终将强制实现远洋船舶自主化的截止时间推迟至 2032 年 1 月 1 日。这一决策对各大造船强国产生了重要影响。中国作为全球第一造船大国，手持

订单占全球 90%，在接下来与日韩、欧洲和美国的竞争中，如何实现可持续发展，并解决船舶智能化和自主化的问题，已经提上议程。

为了应对上述挑战，我国工信部也在全力布局关于智能航运操作方面的工作，目前由哈尔滨工程大学牵头制订未来国家的发展计划。在船舶数字化和智能化的推进中，数字化是基础，通过力学、磁学等模型理论，并融合专家智慧，系统性地编制了高效的软件，可以实现各类系统的虚拟实验。在这一过程中，数字孪生技术成为研究的重要方向。

## 二、船舶数字化与数字孪生技术

船舶智能化的基础是船舶的

数字化和自动化，而数字孪生技术是这一过程中的重要组成部分。数字孪生的概念最早由美国麦克教授于2012年提出，并在2011年美国空军首次应用于飞机结构的监测中。近年来，数字孪生技术迅速发展，美国Gartner咨询公司连续三年将其列为十大颠覆性技术之一。

数字孪生的本质在于通过虚拟信息结构，从微观到宏观全面描述潜在或实际的物理产物。它可以从原子级别的微观结构到几何级别的宏观描述，涵盖潜在或物理成品的全面信息。在最佳状态下，数字孪生能够使物理成品的任何信息通过数字体的方式展现。

哈尔滨工程大学在船舶领域的研究中也引入了这一技术，并给出了明确的定义：数字孪生是基于物理模型和运行数据构建的模拟物理体结构和性能的数字体，通过物理体与数字体的信息迭代和交互，满足特定需求，从而实现物理体与数字体的同步和优化。具体来说，数字孪生不仅是物理体的呈现，还包括实时信息的交互和管理，最终形成了数字孪生体。

构建数字孪生可以实现远程操控和健康检测等多方面的管理，现在许多港口将数字化称为数字孪生，而实际上，数字化只是物理体的数字表现，只有与物理体之间形成交互，才能称之为孪生

体。整个领域的定义目前还未完全统一。

本报告将数字孪生的发展分为三个阶段：

1. 前期：即识别器阶段，将物理体转换为数字体。

2. 成长期：通过物理体和虚拟体之间的信息交互和迭代，使虚拟体逐步逼近实体。

3. 虚构式应用阶段：虚拟体全面支持各种复杂功能的实现。

在数字孪生领域，中国的发展速度并不落后于其他国家。2020年，国家发改委将数字孪生列为七大新一代数字技术之一，科技部、军科委和自然科学基金委等多家机构也相继布局并支持了多个相关项目。目前，数字孪生技术已在电力、城市、交通、医疗、军事和装备等多个领域取得重要进展。

在传统数字孪生方面，中国也取得了显著成绩。2023年，哈尔滨理工大学研发了国内首艘数字孪生科研试验船。2024年，哈尔滨工程大学在此基础上研发了无人编队操作系统，基于数字孪生的UOS系统可以实现编队控制，显著提高编队效率，优化编队设计，实时监控任务执行、环境重构等功能。目前，这套系统已在海上实际使用。

在国际上，美国国防部2018年提出的国防数据工程计划推动了全球数字化的迅速发展，并将

其作为提升潜艇和舰艇作战中心数字化水平的国家战略。美国通过数字联盟进行了封闭式研究，构建了数字“林肯”系统，包括数字化环境、测试和交互系统，其目标明确，即确保设备在交互中的可靠性，保障网络运行安全，并降低人员操作风险。其五大数字孪生系统分别用于数字化战场、装备数字化、区域及全球指挥系统的数字化建设，从而为战法研究提供了真实的数字推演环境。

挪威作为传统的海事大国也在船舶自主化领域取得了重要进展。2022年，围绕挪威科技大学的合作项目中，哈尔滨工程大学承担了政府合作项目，建立了数字孪生的远程自主船支持中心。然而，由于西方的干扰，合作被迫于2022年终止。尽管如此，通过前期的合作与交互，双方在船舶数字化领域的研究仍保持了同步发展。

在船舶数字化技术和数字孪生技术的基础上，提出了一个新的概念，称为船舶数字智能体，其内涵是研究如何将船舶总体系统、关键设备、功能与性能进行数字化、网络化和自动化，形成理论方法和应用的新领域。

### 三、智能船舶研究进展

在智能船舶的研究方面，主要集中在以下几个方面：

1. 总体技术：通过感知、决

策和控制三大系统构建了智能船舶的整体技术框架，目标是实现自主航行和作业，最终实现少人化和无人化。

2. 感知系统：重点研究了海上环境的感知技术，特别是海上目标检测与实体识别。目标是在船舶上能够看到比船长更清晰的环境。目前，海上目标检测的准确率在最佳情况下仅能达到 97%，这方面仍需努力弥合。

3. 航行决策：智能化和自动化的避碰决策在实现自主航行中至关重要。在目标检测的基础上，当前在静态目标避障方面取得了一定的应用，但在多动态目标的规划方面，理论和实践之间仍有较大差距。

4. 靠泊技术：自主靠泊是实现智能船舶的重要环节，涉及船舶感知、靠泊优化和精确控制。在船舶靠泊过程中，精准性要求极高，尤其是在大多数船舶仍需拖轮辅助的情况下，实现自主化的难度很大。

5. 航迹跟踪控制：国外研究已取得一定成果，尽管在产品上中国的自动舵与外国相比仍有差距，尤其是在高海况下的低能耗控制技术方面。如果能耗较高，产品竞争力就会受到影响。

6. 船岸协同控制：自主航行需要实现船舶与岸基的协同控制，涵盖协同感知、协同决策和协同控制等方面。目前已完成实验型

的岸基协同控制，但与实际应用仍有较大差距，这也是当前的研究热点。

7. 数字孪生应用平台：开发了船舶数字孪生基础软件平台，目标是实现物理船和数字船的实时同步和信息交互，通过在线学习和迭代进化提升数字孪生模型的精度。为研究这套软件专门制造了实验船“海豚 1 号”，并在此基础上开展了多项实验，解决了模型修正、环境孪生等多个问题。通过机器学习，实现了航行模型的不断进化，使实验船的阻力估算精度提高了 5%。

在实际应用中，研发了用于验证感知、决策和控制系统的“海豚 1 号”实验船，并实现了环境感知、自锁航行、健康检测和远程操控等功能。自 2023 年首次航行以来，该实验船受到了国内外的广泛关注，并成为国内外同行参观的重要对象。

#### 四、未来发展方向

未来智能船舶的发展以实现无人化为目标，主要包括自主航行、自主靠泊、自主作业和船岸一体化等方面。为实现这一目标，未来需解决如下几方面的问题：

1. 数字化：将船舶的结构、系统、设备及环境全面数字化。

2. 网络化：构建高效、高速的网络，实现船内、船岸的通信与协同。

3. 智能化：提高对海洋环境和船舶运行状态的感知能力，实现健康管理。

在实现“三化”融合的基础上，还需深入开展以下关键技术的研究：

1. 总体技术：无人船在设计上与传统船舶有所不同，这需要对船舶的总体设计、总配置进行重新研究，并对关键设备进行冗余设计，确保可靠性。未来的船舶总体设计需要考虑无人环境下的各项要求，包括设备布置、性能优化和风险分析等。

2. 感知技术：需要进一步发展多元信息融合协同的感知技术，包括多传感器融合和海洋环境信息的融合，实现精确的实时监测。尤其是在近海环境下，通过船岸协同实现更高效的感知，类似于无人驾驶车辆的车路协同系统。

3. 决策与控制：需要构建感知决策的在线学习系统，通过实时学习和决策模型的精准模拟，将船长的经验智慧转化为人工智能能力，从而实现更自主、更智能的航行和健康管理。

4. 多层异构机器人协同作业：无人船需要完成诸多作业，包括装卸货、维护等操作，这些任务需要多种专用机器人协同完成。提出了多层次、异构的机器人群体智能协同作业的概念，无人船可以携带多种类型的专用机器人，

共同完成海上作业。未来，这一方向将为机器人研究提供更多应用场景。

5. 航行的三维重构与船岸一体化数字孪生：船岸一体的数字孪生是实现智能船舶远程控制的关键。通过实时的三维重构，可以从船长视角、上帝视角观察船舶的运行状态，实现更精确的控

制。这项技术需要通过船上设备和岸基系统的实时协作来完成。

## 五、结语

船舶智能化是国家造船行业转型升级的必然趋势，也是提高我国造船业国际竞争力的重要途径。当前中国在智能船舶与数字孪生领域的研究已达到国际先进

水平，但与老牌造船强国相比，我国在技术积累方面仍有差距。希望各位专家、学者携手合作，共同推动我国船舶行业的智能化发展，为中国从造船大国迈向造船强国贡献力量。○

\* 本文根据作者所作报告速记整理而成

## 报告人简介



夏桂华，哈尔滨工程大学教授，博士生导师。长期致力于船舶与海洋工程领域数字与

智能技术研究工作，开创了大型船舶复杂系统仿真验证评估新领域，为解决某国家重大工程总体方案设计优化、顶层指标确定、关键系统性能验证等技术难题作出突出贡献；主持研发多型船舶重要装备，为我国装备技术发展作出重要贡献；主持研发“中国数值水池”1.0，解决了船舶工业CAE软件一体化架构、基础求解器解决方案、数据标准等技术难题，持续主持推进了我国船舶工业软件发

展。主持首艘数字孪生智能科研试验船“海豚1”，实现船岸一体全自主航行。获省部级以上科技进步奖11项，其中国家科技进步二等奖2项、省部级科技进步一等奖4项以及国家教学成果二等奖；发明专利授权57项，软著17项，论文90篇。获得何梁何利基金科学与技术奖、某工程突出贡献奖、国防科技工业杰出人才奖以及全国优秀科技工作者、船舶设计大师等称号。



## 2024 中国自动化学会科学技术奖评审结果公告

根据《中国自动化学会科学技术奖励管理办法》，中国自动化学会组织召开了中国自动化学会科学技术奖励评审会，评审结果于2024年12月11日至17日在中国自动化学会官网予以公示，公示期间无异议。详情请查看：<https://www.caa.org.cn/article/192/5054.html>

# 工业互联网赋能有色冶金智能制造关键技术与应用

文 / 中南大学 阳春华

导读：阳春华教授受邀在 2024 中国自动化学会博士学术交流会中作题为“工业互联网赋能有色冶金智能制造关键技术与应用”的大会报告。有色冶金流程工业是国民经济的支柱产业，新时期下高端化、绿色化、智能化发展需求迫切。工业互联网是全面连接工业系统全要素、全产业链、全价值链的底座，是有色冶金流程工业智能制造的关键基础设施。本报告首先分析工业互联网赋能流程工业智能制造面临的挑战，然后，从工业过程精准控制、物质流 - 生产链协同调控、智能模型库构建等方面汇报智能制造系统关键技术以及工业互联网平台应用探索；最后汇报大模型等新兴技术背景下工业互联网未来发展的一些思考。

## 一、引言

中南大学有着完备的有色冶金学科链，其中多个学科在国际排名第一。依托这一学科优势，研究团队长期致力于有色金属自动化与智能化的研究与实践。在全球经济版图中，有色金属行业不仅是国民经济的支柱性产业，更是新技术、新材料及新兴产业发展的基石。尽管面临复杂多变的经济环境，有色金属行业依然展现出强劲的盈利能力，成为国家实体产业与供应链安全的关键战略节点。然而，在双碳目标与资源环境保护的双重压力下，行业的转型升级显得尤为迫切。在此背景下，工业互联网与智能制造的深度融合为有色冶金行业带来了前所未有的发展机遇。

## 二、工业互联网：智能制造的核心支撑体系

工业互联网，作为智能制造的核心支撑体系，为有色金属行业的智能化转型升级提供了坚实的平台基础。其本质在于通过构建一个横向平台化、互联互通的架构及安全可信的运行环境，实现智能化、高效化的协同决策。工业互联网通过沉淀工业知识与模型，有效利用平台上的海量分层信息，实现实时的数据分析、精准的执行操作与科学的决策制定，从而解决工业生产过程中面临的复杂性和不确定性难题。

## 三、有色冶金智能制造：挑战与机遇

有色冶金旨在利用有色金属

资源生产出高质量的金属产品。该过程中，有色金属将在多种炉窑和反应器中经历复杂的物理化学反应，以提纯主金属并逐步分离多种伴生金属。这一过程极具挑战性，主要体现在以下几个方面：

方法层面：有色冶金过程功能复杂，反应构成多样，且原料来源复杂多变，容易引起生产工况的波动。这导致高效转化和精准调控变得困难，对调控策略的研究提出了高要求。如何在复杂多变的反应体系中实现精准调控，成为有色冶金智能制造面临的重要挑战。

模型层面：目前，有色冶金行业的技术方法和有用知识大多沉淀在工人的头脑中，而数据则分散在工厂内部。这导致技术方

法在数字系统和计算机系统中缺乏沉淀，模型跨场景高效开发困难。如何将这些技术方法和知识数字化、模型化，并在工业互联网平台上实现共享和赋能，成为有色冶金智能制造亟需解决的问题。

应用层面：工业现场配置了大量的BCS系统、PLC系统等，这些系统来源于不同的企业和国家，采用不同的工业通信协议。这导致系统集成度低、互联协同性差、跨生态兼容性差等问题。同时，新的智能技术和方法在工业现场应用时，往往需要进行大量的现场设置和实验验证，缺乏便捷的验证测试环节。这限制了智能化技术在有色冶金行业的应用和推广。

#### 四、团队创新：破解难题，引领转型

针对上述挑战，中南大学的研究团队在有色冶金过程的精准控制、湿法冶金反应器及冶炼过程物质流转换等方面取得了显著创新成果。

##### （一）精准控制方法

有色冶金过程的精准控制：针对大型炉窑中反应范围的优化与转化效率的精准控制问题，团队建立了基于关键场的复杂耦合反应体系精细化解析模型，以及持续进化学习下的宏观和微观协同反应气氛精准控制策略。这些方法的应用突破了动态炉况下有色冶金炉窑大范围载域的控制难

题，实现了反应氛围的最优控制和高效转化。

湿法冶金反应器：湿法冶金反应器是实现主金属和多种伴生金属分离的关键设备。为了实现深度分离，团队提出了湿法冶金多反应器分离进程的协同调控方法。该方法通过协同调控不同工序中的反应器，实现了主金属和伴生金属的高效分离。

大规模物质流的高效协同：冶炼过程涉及大规模物质流的生产流程。为了保证物质流在生产链中的紧凑流转，团队发明了供应链、生产链目标协同的一体化优化方法，并提出了连续生产和批次生产多作业模式下作业任务和生产时序协同的生产要素动态调度方法。这些方法的应用实现了物质流与生产链的高效协同，提高了生产效率。

##### （二）模型开发与应用架构

为了实现模型的沉淀和共享，团队提出了基于工业互联网的智能模型开发与应用架构。该架构包括数据层、模型集成开发环境、模型库以及基于模型库的应用、服务与开发。团队着重于语言模型的建设，通过建库方法将共性知识与基础方法沉淀为标准化的语言模型，这些模型具有可重构、可移植与可重用的特性，大大提高了对于有色冶金炉窑控制策略开发的效率和质量。

此外，团队还构建了集成开

发环境与有色冶金语言模型的知识图谱，建立了模型搜索、模型审核、模型评价和推荐于一体的全生命周期综合管理平台，以支持语言模型的开发与应用。在数据汇聚方面，团队采用了多种工业网络协议，并通过自动动态可重构的工业网关实现协议的自动解析。这些平台的建设为模型的高效管理和应用提供了有力支持，为验证与测试新的算法与模型，团队在实验室搭建了沉浸式的智能工厂验证平台。

#### 五、应用案例：成果显著，行业引领

团队分别在其铜冶炼与锌冶炼过程中应用了上述技术成果。

在江西铜业集团，团队构建了工业互联网架构，并研发了供应链一体化优化系统、多作业模式优化调度系统与过程控制异常检测系统，实现了多作业模式下物质流与生产链的高效协同。这些技术的应用显著提升了关键装备的作业效率，降低了综合能耗，并提高了金属回收率，使企业成为智能制造的世界级示范企业。

在湖南株冶集团，团队为其锌冶炼的智能工厂进行了总体规划，通过构建异构系统互联集成的平台，实现了数据的互融共享与系统的互联集成。在此基础上，团队开发了一系列智能化系统，包括采购生产协同、供应链的一

体化系统；数字孪生和智能监控系统以及冶炼过程中的运行优化系统，颠覆了传统的被动值守模式，显著提升了企业的生产效率与技术指标。

## 六、未来展望：工业大模型引领新变革

尽管工业互联网与智能制造在有色冶金行业取得了显著成果，

但仍面临诸多挑战。随着大模型技术的兴起与发展，团队正积极探索其在工业领域的应用潜力。然而，大模型与小模型的协同决策机制、模型在变化场景中的自学习能力以及工业大模型的可信辩证与测试平台构建等问题仍需深入研究与解决。

对于青年学者与学生而言，深入探索人工智能新方法

与互联网技术真正赋能行业应用，不仅要拥抱新的技术，还需要对该行业，尤其是行业中现存的问题有深刻的理解与认知。只有实现技术与行业的深度融合，才能用技术推动行业的高质量发展，开启智能制造的新纪元。○

\* 本文根据作者所作报告速记整理而成

### 报告人简介



阳春华，中南大学教授，校

学术委员会副主任 / 信息学部主任、国家杰青、IEEE Fellow、中国自动化学会会士、新世纪百千万人才国家级人选，“工业智能与系统”教育部重点实验室主任、全国高校黄大年式教师团队负责人。长期从事复杂工业过程控制、智能制造系统技术研究，出版学术专著3部，发表SCI论文200余篇，授权国家发明专利100余项，获第三届全国

创新争先奖、国家技术发明二等奖1项、国家科技进步二等奖3项。担任《IEEE Trans.on Industrial Electronics》、《IEEE/ASME Trans. Mechatronics》等期刊编委。兼任国际自动控制联合会IFAC TC6.2副主席，中国自动化学会女科技工作者工作委员会主任委员，中国有色金属学会自动化学术委员会主任委员等。

喜报

### 热烈祝贺中国自动化学会两位专家荣获2024年度何梁何利基金奖

2024年12月3日，何梁何利基金2024年度颁奖大会在北京举行。本年度何梁何利基金奖共授予56位科技工作者，其中授予1人“科学与技术成就奖”，33人“科学与技术进步奖”，22人“科学与技术创新奖”。

热烈祝贺中国自动化学会会士/理事、中南大学教授阳春华获得何梁何利基金“科学与技术进步奖”（奖项类别：电子信息技术奖），中国自动化学会会员、深圳大学教授高明忠获得何梁何利基金“科学与技术创新奖”（奖项类别：青年创新奖）。详情请查看：<https://mp.weixin.qq.com/s/XkchQwSbnJef7tiEKa7KGO>

## 谭铁牛院士——中国虹膜识别往事： 从讨不来的图像说起

日前，中国科学院院士谭铁牛在向《中国科学报》回顾他带领团队攻克虹膜图像获取与识别技术那段历史时，提到了一段难以忘怀的往事。

他说，如果不是被国外同行“刺激”，自己或许不会那么坚定地要从零开始做虹膜识别。

1999年，是谭铁牛放弃英国雷丁大学终身教职、举家回国的第二个年头。当年，谭铁牛计划在国内继续开展模式识别研究，其中包括他在数年前就看好的方向——虹膜识别。

在早些时候，欧美国家就已经开展了这一方向的研究，进展也更快一些。谭铁牛便想从国外购买一台虹膜图像获取设备，先研究虹膜图像识别算法，加快追赶步伐。

他没想到这一想法竟遭到拒绝，外方给出的理由是这类设备对中国禁售。于是，他退而求其次询问对方：“能否提供一些图像？”得到的答复更让他大跌眼镜：“可以给你几张，但多了不行。”

实实在在地尝到“关键核心技术是要不来、买不来、讨不来的”苦涩后，谭铁牛决定从零做起，自主

研发。中国虹膜识别技术20多年的自主创新之路，由此悄然开启。

### “要革命就得彻底”

时间回到1993年。当时谭铁牛已是雷丁大学一位小有名气的模式识别专家，凭借出色的科研成果被提升为高级研究员。偶然间，他读到英国剑桥大学教授约翰·道格曼（John Daugman）利用人眼虹膜特征对人员进行识别的一篇文章，非常感兴趣，并展开了深入思考。

相比人脸和指纹等其他生物特征，瞳孔和眼白之间的那一圈虹膜太特殊了。生物遗传学家已经证明，每个人的虹膜都是特有的，它具有丰富、多样的纹理，自胎儿发育形成后直至死亡都不会改变。这种唯一性和极强的稳定性，是天然的身份识别特征。

“即便是双胞胎，也能利用虹膜识别技术分辨出来。”谭铁牛说，相较指纹识别与人脸识别，虹膜识别具有伪造难度高、适用性广、误识率低等优点。他还想到，中国人口众多、流动性大，虹膜识别技术未来可能对社会发

展和国家安全有重要影响。

渐渐地，想要做虹膜识别的种子在谭铁牛心里扎下了根。

1996年，谭铁牛当选为英国机器视觉与模式识别学会执行理事，成为该学会有史以来第一位非英国国籍理事。就在这一年，谭铁牛作出了回国的决定。起因是中国科学院拟在模式识别学科引入一位学科带头人，他郑重思考后递交了申请书并如愿入选。

随后，谭铁牛夫妻向雷丁大学提交了放弃终身教职的辞职信并卖掉房产、汽车等家当，准备回国。对此，有朋友很是不解，建议他“留条退路”。他却半开玩笑地说：“要革命就得彻底！”

回国后，谭铁牛全身心投入到中国科学院自动化研究所（以下简称自动化所）的新工作中。虹膜识别，这个在他心中有千钧重的研究方向，很快开启了。

### 第一关是“成像”

虹膜识别的第一关是“成像”，就是捕捉人眼虹膜图像，并清楚地拍摄下来。

环状的虹膜区域小且颜色暗

沉，要拍清楚并不容易。虽然虹膜与眼白的边界形状基本不变，但瞳孔大小会随着进入眼睛光线的多少而变化，虹膜因此也会发生形变。这给虹膜图像获取与识别带来了很大挑战。

谭铁牛擅长图像识别算法研究，但对成像硬件并没有涉猎，当时国内也没有现成设备。国外求购受阻后，他决定带领团队自主研发虹膜成像设备。

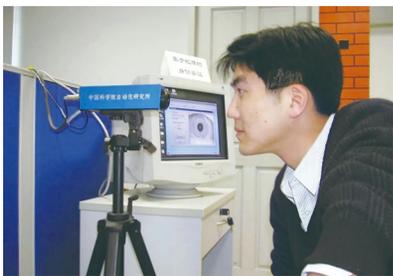


图1 我国自主研发的第一台虹膜识别设备

研发的难度可不小——东方人种的眼睛相对较小，虹膜纹理特征不如西方人种和非洲人细腻丰富，这无疑对成像提出更高要求。此外，依靠可见光通常无法拍摄出纹理清晰的虹膜图像，需要利用特殊波段的光照进行拍摄。

“这是第一道坎，也是最大挑战。”谭铁牛说，如果图像拍不清楚，就无法进行正确识别，“必须从头设计虹膜相机或虹膜成像仪”。

要“攒”一台这样的设备，涉及光学、机电、工程等方面的知识与技能。没有经验可以借鉴，一切都要摸索着干。

那段时间，谭铁牛经常把自

己关在实验室，用自己的眼睛做实验。他记不清尝试了多少次——经常一手扶着相机，一手扯着电线连接电路，不断调整光线和照明设备，然后贴近观察拍摄出来的图像。

“很多时候绊住脚的并不是理论问题，而是技巧和窍门。”谭铁牛说，为了清楚拍摄虹膜的细节纹理，他们在摄像头前安装了电控的红外主动照明光源；为了有效消除虹膜上光源的高光反射点，他想到使用毛玻璃环来遮挡，以减少虹膜图像的噪声……功夫不负有心人，就这样一点点调试，谭铁牛团队终于搞定了“初代”虹膜图像获取装置。

图像获取还只是第一步，如何判断拍摄的图像是否来自活体、如何提高图像分辨率、如何快速精准定位虹膜区域、如何刻画虹膜图像特征等问题，都是虹膜识别技术创新路上的“拦路虎”。

困难吓不倒英雄汉。他们集思广益，一步步设法进行活体检测、提出基于定序测量的虹膜图像特征表达方法、利用算法优势赋予机器智能化实现虹膜成像便捷化……2000年，谭铁牛研究团队开发出国内第一套虹膜识别核心算法和原型系统，对外宣告掌握了虹膜识别系统核心知识产权，打破了欧美国家的技术封锁。

更重要的是，第一代虹膜图像获取装置的成功研制，实现了



图2 具有视觉反馈交互能力的双目虹膜识别系统

虹膜图像实验数据从无到有的历史性突破，为虹膜识别算法研究搭建了基础性实验平台。有了设备，他们很快在保护好个人隐私并获得知情同意的前提下，采集了一定规模的虹膜数据，用于识别算法的研究和验证。

2003年，谭铁牛和学生马力、王蕴红等人在国际电子电器工程师学会（IEEE）旗下刊物《模式分析与机器智能汇刊》发表论文，介绍了他们基于虹膜纹理分析的个人身份识别系统研究工作。这篇论文被引用的次数迄今已超1440次，充分彰显了这篇文章的重要性和影响力。

值得一提的是，这篇论文与谭铁牛10年前看到的道格曼的那篇论文发表于同一期刊。这是该期刊时隔10年之久第二篇系统介绍虹膜识别技术的文章。

“可见，当时这个领域的研究者有多么少。”谭铁牛说。

## 从被动求人到掌握主动权

论文发表后，还发生了一段小插曲。

在介绍虹膜识别系统的这篇论文中，谭铁牛团队对图像获取装置的设计做了简要介绍。但为了保护虹膜相机的知识产权，他们在论文插图中对拍摄的图像进行了“抹除瞳孔”的预处理——在拍摄的图像中，反光点位于瞳孔区，“行家”能从反光点推测出拍摄的灯光排布等设计窍门。

抹除瞳孔和反光点的操作丝毫不影响图像的可用性，因为数据区都在虹膜位置，但这给了一些人找碴儿的机会。有国外教授专门发表评论文章，认为处理后的数据不能用于虹膜识别算法的测试，呼吁同行停止使用这些数据，改由欧美国家主导的数据。

谭铁牛团队据理力争，在同一期刊发表文章，回应并驳斥了“经处理数据无法使用”的谬论。这让谭铁牛意识到，要尽快建立属于自己的虹膜图像数据库。

“这是一个从被动走向主动的过程。”谭铁牛说，有了自己的数据，就不必再去求人；况且，虹膜识别技术事关个人身份安全与国家安全，必须掌握主动权。

在此后的研究活动中，谭铁牛团队特别注重图像数据的保存和归集。他们把研究中用到的虹膜图像集中起来建立了一个“CA-SIA 虹膜图像数据库”（CASIA 是自动化所的英文缩写），并开放给全球的研究团队使用。

自动化所模式识别实验室研究

员、中国科学院大学人工智能学院岗位教授孙哲南告诉记者，这个数据库自 2003 年有了雏形之后，20 年来经过不断更新和完善，已经成为一个拥有 6 个子集、超过 5000 名采集对象、数万组标准图片的大规模数据集，是目前国际上公开共享的最大规模的虹膜数据库。

它同时也是目前使用最广泛的虹膜图像数据库。截至现在，已有来自 180 多个国家和地区的 1.6 万多个科研团队申请使用。谭铁牛自信地说：“全球虹膜识别方面的论文，估计有 80% 以上使用了我们数据库的图像。”

今昔对比，谭铁牛分外感慨：“当初我们想从国外要一些虹膜图像都要不到，现在我们建立的数据库已成为学科研究领域最标准、最权威的数据库。我们掌握了主动权，改写了被动求人的历史，开放共享图像库展现了我们的大国担当和包容胸怀。”

## “不能让技术只停留在实验室”

孙哲南是谭铁牛培养的我国虹膜识别领域第二位博士。他不仅见证并参与了 CASIA 数据库的建立与完善，还是虹膜识别技术从稚嫩走向成熟的亲历者。

20 多年里，课题组从只能采集一只眼睛的虹膜，到在采集设备中加入冷光镜、利用人机交互完成双眼虹膜采集；从最初只能眼睛贴着设备采集，到改进成像镜头的设计及目标检测算法，将采集距离延长到 3 米甚至更远；从一次只能处理一个虹膜识别对象，到研发和利用“光场成像技术”“液体镜头”等系列技术，实现多人虹膜识别……时间的河，载着他们这只奋进的小船一步步到达成功的彼岸。

一批深入虹膜识别领域的青年才俊迅速崭露头角。马力是谭铁牛回国后培养的国内虹膜识别领域



图3 自动化所科研团队实现多人虹膜识别

第一个博士研究生，参与了第一代虹膜识别设备的自主研发，并通过开展合作，拓展了虹膜识别在移动端的市場应用。2011年加入自动化所的侯广琦，在远距离虹膜识别设备和动物虹膜识别方面做了许多建设性工作，后来参与了“虹星科技”的创业和孵化。

2005年底，谭铁牛凭借“虹膜图像获取与识别技术”项目获得国家技术发明奖二等奖。孙哲南记得，在这之后，向他打听这项技术的人慢慢多起来。其间，他还接待了一个“煤老板”。

原来，这家煤矿企业一直在使用虹膜识别设备对煤矿工人进行身份识别，只是设备和技术都从日本公司进口。他们听说自动化所有人在研究虹膜识别技术，于是慕名而来。

虹膜识别技术是煤矿企业的“心头好”。矿工的出入井核验是矿山管理当中一个薄弱环节。上



图4 基于虹膜识别的煤矿工人考勤设备

完班矿山工人们脸和手都黑乎乎的，指纹和人脸几乎无法辨别，但虹膜识别不存在这些问题。

“日本公司卖给他们的设备太贵了。”孙哲南回忆说，对方迫切想要使用国产替代方案，减少这方面的成本。

彼时，谭铁牛早就萌生了孵化虹膜识别技术的想法：“不能让技术只停留在实验室。”

在自动化所的支持下，2006年，掌握具有完全自主知识产权的虹膜识别技术的企业“中科虹霸”宣告成立。2007年，中科虹霸的技术设备在黑龙江龙煤集团落地应用，开启了中国虹膜识别

技术的产业化之路。

中科虹霸总经理马力介绍，目前虹膜识别技术已经覆盖金融领域、出入境管理、宠物（动物）身份识别等多个行业。基于自动化所虹膜识别技术的中科虹霸产品迅速赢得市场认可，还出口到亚洲、欧洲、非洲相关国家和地区。2018年，世界粮食计划署和联合国难民署采用该所虹膜识别技术，为中东地区300多万难民提供物资和现金服务。

孙哲南告诉记者，虽然虹膜识别技术实现了落地应用，但与人脸识别等相比，在成本和易用性上还有进步空间，未来发展“需要耐心和信心”。

## “我们等待了30年”

在模式识别领域摸爬滚打了数十年，有件事让谭铁牛一直耿耿于怀，这件事也是傅京孙40年前一项未竟的事业。



图5 2018年，世界粮食计划署和联合国难民署合作，采用自动化所的虹膜识别技术为中东地区300多万难民提供物资和现金服务。自动化所供图

傅京孙创办了《模式分析与机器智能汇刊》，在全球模式识别领域享有盛誉。他长期致力于模式识别基础及应用研究，是国际上该学科的主要组织者和领导人。1973年，他以大会主席身份，组织召开首届国际模式识别会议（ICPR）。1984年，傅京孙怀着对祖国的朴素感情，力主1988年第9届ICPR由中国主办，在北京举行。由于其在国际模式识别领域的巨大声望，此事在当年已成定局。但不幸的是，1985年4月29日，傅京孙突发心脏病在美国逝世。

据曾在美国普渡大学访学时受傅京孙指导的中南大学教授蔡自兴记述，傅京孙去世后，国际模式识别学术界立即“掉转马头”

取消了中国的主办权。

“傅京孙先生离世后，中国在国际模式识别界的话语权受到了很大影响。”谭铁牛暗下决心，“一定要争回这口气。”

时间来到2010年，中国虹膜识别技术及产品已经名声在外。凭借在虹膜等生物特征识别、图像理解与视频分析等方面的学术成就，谭铁牛于2010年当选为国际模式识别学会副主席；2012年，谭铁牛经票选成为IEEE生物识别理事会主席。

“这是我国模式识别研究国际影响力不断攀升的印证。”谭铁牛觉得，“找回场子”的时机到了。

2014年，第22届ICPR在瑞典斯德哥尔摩举行。按照惯例，

大会要确立2018年第24届ICPR的主办方和举办地。会上，谭铁牛将“中国·北京”的方案带到了议事桌上。

那次会上的竞办演讲，差不多是他控制时间最精准的一次：限时10分钟，他讲了9分50秒。后来，经过国际模式识别学会理事会几十位理事的无记名投票，北京拿到了2018年的主办权。

“那一刻，我们等待了30年。”谭铁牛感叹道。

这些年来，谭铁牛一直牢记自主创新的重要性、自身实力对于话语权的关键性。“没有这些，我们不可能在这个领域取得今天的地位。”他说。○

来源：中国科学报

## 报告人简介



谭铁牛，中国科学院院士，中国自动化学会会士、常务理事，英国皇家工程院外籍院士、发展中国家科学院（TWAS）院

士、巴西科学院外籍院士。

主要从事图像处理、计算机视觉和模式识别等人工智能领域的研究。出版编著和专著10余部，在主要的国内外学术期刊和国际学术会议上发表论文600多篇，获得授权发明专利100多项。曾获国家自然科学二等奖、国家技术发明二等奖和国家科技进步二等奖各1项，2022年获国际模式识别领域最高奖—傅京孙奖。先后担任多个国内外学术刊物的主编或编委，包括《自动化学报》（主编），IEEE Transactions on

Pattern Analysis and Machine Intelligence, Pattern Recognition, Pattern Recognition Letters 和 Machine Intelligence Research（主编）。曾担任中国图像图形学学会、中国计算机学会、中国自动化学会和中国人工智能学会等多个国家一级学会的理事长或副理事长以及国际模式识别学会（IAPR）第一副主席、IEEE生物识别理事会（IEEE Biometrics Council）主席等。先后当选中共十六大、十七大、十八大和十九大党代表。

# 郑南宁院士：扎实推进人才强校战略 为中国特色、世界一流大学提供人才支撑

导语：为深入学习贯彻全国教育大会精神，以高质量党建引领高校扎根中国大地为党育人、为国育才，实现高质量发展，教育部思想政治工作司、教育部宣传教育中心、中国教育报刊社、中国教育电视台、全国高校思想政治工作网联合策划推出《“加强高校党建 建设教育强国”大家谈》专栏。该专栏共分七期，分别聚焦把牢方向、铸魂育人、思政创新、人才强校、科研报国、战斗堡垒、先锋模范等主题，希望与广大读者共同回答好“教育强国、党建何为”的时代课题。

第四期聚焦“人才强校，探索拔尖创新人才培养新路径”，刊载南开大学、同济大学、厦门大学、山东大学、武汉大学、西安交通大学6所高校的特色做法和典型经验。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讲述西安交通大学围绕“双一流”建设目标，实施“领军学者计划”和“青年拔尖人才支持计划”，创新人才管理模式，扎实推进人才强校战略。

## 中国自动化学会理事长郑南宁院士：

我们党在百年奋斗历程中，始终重视培养人才、引领人才、成就人才，团结和支持各方面人才，为党和人民事业建功立业。



建校128年以来，西安交通大学形成了兴学强国、艰苦创业、崇德尚实、严谨治学的优良传统，以及起点高、基础厚、要求严、重实践的办学特色。建立了思政引领，品行养成、知识传授、能力培育、思维创新“五位一体”的育人模式，建立了“通识教育+

宽口径专业教育”本-硕-博贯通的人才培养模式，特别是在当前高等教育改革的新时期，西安交通大学找准科教融汇、产教融合的结合点，构建了产教深度融合的专业型人才培养模式，积极探索创新人才培养新路径。○

来源：中国教育报

# 王耀南院士：大模型推动新一轮科技革命和产业变革

海量的应用场景、超大的市场规模，人工智能领域正迎来一场由 AI 大模型引领的爆发式发展。

AI 大模型在千行百业落地过程中会带来哪些新的可能性？具身智能如何成为人工智能的下一个浪潮？就 AI 大模型领域热点问题，《瞭望东方周刊》近日专访了中国工程院院士、中国图像图形学学会理事长、湖南大学教授、机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心主任王耀南。

## AI 处于“孩童期”

**《瞭望东方周刊》：以 AI 大模型为代表的新一轮人工智能技术浪潮汹涌澎湃，AI 大模型这一轮发展对培育发展新质生产力有怎样的重要意义？**

**王耀南：**技术革命性突破、生产要素创新配置、产业深度转型升级，这三个因素催生了新质生产力。培育发展新质生产力，具体特征就是高科技投入、高效能、高质量，重点是要摆脱现在传统产业存在的问题，即摆脱传统经济增长方式（增长效率低），摆脱传统生产力发展路径（高耗能、产品质量不高）。

多模态大模型正助力新质生产力的培育和发展。

推进数字经济高质量发展，核心在于“人工智能 + 行动”，即推动人工智能赋能各行各业，帮助各行各业摆脱增长效率低和高能耗等问题，最终实现生产力三要素的跃升：劳动者跃升为更高素质的劳动者，培养出战略人才、应用型人才等；劳动资料跃升为更高技术含量的劳动资料，通过新一代信息技术、先进制造技术、工业互联网、工业软件、AI 大模型等，产出先进制造的优质产品；劳动对象跃升为更广范围的劳动对象，深度融合到生产的各个方面，开辟如战略性新兴产业、未来产业等新赛道。

作为新一轮产业变革的核心驱动力，人工智能将进一步释放历次科技革命和产业革命所积蓄的巨大能量。

**《瞭望东方周刊》：如何理解当前人工智能发展的程度和水平？**

**王耀南：**经过数十年演进，人工智能各方面都取得了突出成绩。特别是在移动互联网、大数据、超级计算、传感网、脑科学等新理论、新技术以及经济社会

发展强烈需求的共同驱动下，人工智能加速发展，呈现出深度学习、跨模态、人机协同、自主操控等新特征，但坦白说，目前人工智能还处于发展的“孩童期”。

回顾人工智能的螺旋式发展史，可以看出其经历了大起大落三次迭代：第一次是 20 世纪 50 年代的计算机智能时代，特点是重视逻辑，忽略知识；第二次是 20 世纪 70 年代感知智能时代，特点是重视知识，学习不足；第三次自 20 世纪 80 年代到现在，特点是走向认知智能。

2017 年，谷歌提出基于自注意力机制的神经网络结构 Transformer 架构，奠定了大模型预训练算法架构的基础；2018 年 OpenAI 和谷歌分别发布 GPT-1 和 BERT 大模型，预训练大模型成为自然语言处理的主流；2022 年，OpenAI 推出 ChatGPT，其拥有强大的自然语言交互与生成能力；2023 年，OpenAI 多模态预训练大模型 GPT-4 发布，其具备多模态理解与多类型内容生成能力；2024 年，OpenAI 发布视频生成大模型 Sora，提出时空碎片概念。

当前, AI大模型热潮主要由语言大模型相关技术引领。语言大模型通过在海量无标注数据上进行大规模的预训练, 让模型学习大量知识, 并进行微调, 指定的回调, 从而获得面向多任务的通用求解能力。大模型从过去的单一的自然语言处理能力和文本解答能力, 走向了图像视频语音的融合化、多模态的能力。Transformer架构是目前语言大模型采用的主流架构, 大模型的多模态生成能力进一步成熟。

从发展进程看, AI大模型并不是终点, 今天的语言大模型也只是人工智能的一个过渡神经网络推理模型, 未来我们还有很多工作要做。

## 具身智能大发展

**《瞭望东方周刊》: 当前热议最多的多模态、人机协同、巡视开放和自主操控等特征, 是人工智能发展的前沿体现。具身智能如何借助AI大模型的发展变得更加智能化?**

**王耀南:** 人工智能的三大基石, 即模型算法、算力、数据, 其中模型算法是核心, 主要应用领域包括计算机视觉、自然语言处理、智能机器人等。

回顾过去人工智能发展取得的成绩, 主要体现在计算机视觉、自然语言处理、工业智能机器人等方面。

在计算机视觉中, 过去人工智能更多作用在目标检测、目标

跟踪、虚拟现实和三维重建, 通常都采用小的模型算法、小的模型来解决相关领域的问题。今天AI大模型大大提升了语音识别、文字识别、机器翻译和信息检索等能力, 因此在计算机视觉领域出现了不少视觉大模型的技术突破。

智能机器人是当下热点。业界普遍认为, 2024年可以称为“AI大模型+人形机器人元年”。

具身智能是实现思考、感知、行动三个空间有机智能融合的机器或系统, 既具有人机交互与自然语言理解的能力, 又可以通过感知、认知、决策能力与时空环境及对象进行实时校准互动, 协助机器人作出决策、完成行动任务。

“具身智能”这一概念, 最早是1950年由英国科学家图灵提出的, 然而真正引起广泛重视却是因为近年来AI大模型的发展与应用。过去, 人形机器人发展非常缓慢。我们没有多模态模型, 用小模型, 一个模型解决一个问题, 编好一些固定程序, 通过小脑芯片控制机器人的抓取、行走、搬运等单一动作。现在, 通过多模态大模型训练学习迭代(大脑芯片), 可以实现人形机器人与环境的交互、理解、判断、规划等, 机器人的自主性得到很大提升, 应用场景也在不断拓展。

未来, 人类更需要服务机器人, 而服务机器人最重要的能力

就是与人类交互, 要实现语言、视觉、动作、图像、视频等全方位的交互, 多模态大模型的发展将极大助力这些目标的实现。

**《瞭望东方周刊》: 机器人之外, AI大模型还有哪些典型应用场景?**

**王耀南:** 人工智能产业生态的三层基本架构为: 基础底座技术支撑、人工智能技术、人工智能应用。其中, 基础资源层主要是计算平台和数据中心, 属于计算智能; 技术层主要通过机器学习建构, 开发面向不同领域的模型算法和技术, 包含感知智能和认知智能; 应用层主要是实现人工智能在不同场景下的应用。

第一步是模型架构, 第二步是训练, 第三步才是测试应用。我们研究多模态大模型、跨模态大模型, 最关键的是这些模型不能落地到实际场景。

比如, 应用到科学领域。AI大模型+5G技术, 可以赋能基础数学、通信工程、电子科学、数据科学等多学科交叉领域, 提供更多科研和就业创业机会。

具体到AI+生物科研领域, 由Google DeepMind和Isomorphic Labs研究团队推出的革命性AI模型ALPHAFOLD3, 以前所未有的精确度预测了所有生命分子(蛋白质、DNA、RNA、配体等)的结构和相互作用, 有助于改变人类对生物世界和医药研发的理解, 进而开启人工智能细胞生物学的新时代。

再如，多模态大模型推动智能网联汽车产业迅速发展，尤其是在环境感知、传感器融合、规划决策、地图构建定位、V2X 通信、车辆控制等方面；在智能无人机方面，有助于更高效地完成测绘、救援等任务，形成真正的具身智能无人系统；在智能水下机器人方面，有助于为航行器提供位置、航向、深度、速度和姿态等信息，满足无人自主导航、长时间科考工作、高精度定位、实时准确导航等需求；在智慧能源领域，有助于建设更加开放、共享的能源信息平台，提高能源生产和利用效率，实现能源的优化决策和广域协调。

AI 大模型 + 制造业是一个特别值得关注的重要应用场景。智能制造是融合信息与通信技术、人工

智能技术、自动化技术、现代企业管理技术等多个大领域的全新制造模式。AI 大模型通过对传统生产制造全流程、全要素、各环节的赋能改造，将极大推动提质增效和降本降耗，助力制造业高质量发展。

### 科技竞争新高地

《瞭望东方周刊》：基于 AI 大模型的未来发展趋势，您对我国人工智能产业有哪些建议？

王耀南：首先，我对具身智能的发展充满信心。AI 大模型的一个发展趋势就是在具身智能机器人领域实现重大突破。

随着技术不断进步、应用场景不断拓展，具身智能将在各个领域发挥越来越重要的作用。未来的具身智能人形机器人将更加智能、高

效、安全、可靠，会逐渐成为人类生活中不可或缺的一部分。

开发人形机器人的过程，其实就是用开源大模型软件、算法来推动整个机器人产业发展的过程。从现在起，中国企业要为未来人形机器人发展搭建一个大模型数智底座，这个底座包括机器人硬件和软件，要从计算智能、感知智能、认知智能、决策智能、行为智能走向具身智能，真正实现 AI 大模型与通用机器人的深度融合。

人工智能发展趋势是从计算智能（能存会算）到感知智能（能听会说、能看会认），再到认知决策智能（能理解、会思考），我们要明确，未来要走的道路，依然是基于大数据、大模型驱动的新一代 AI 技术方向。

### 报告人简介



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，机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心主任。任

中国科协委员、中国图象图形学会理事长、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、全国智能机器人创新联盟副理事长、国家自然科学基金委员会专家咨询委员、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等。曾任国家 863 计划智能机器人领域专家、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教学科研工作，成果获国家

技术发明二等奖 1 项、国家科技进步二等奖 4 项、何梁何利基金科学与技术进步奖、国际 IEEE 机器人与自动化领域“工业应用最高奖”，省部级一等奖 12 项。发表国际 IEEE 等 SCI 论文 200 余篇，出版机器人感知与智能控制等著作 15 部，获国家发明专利 90 余项，培养博士 80 余名。荣获国家百千万工程人才、德国杰出洪堡学者、全国高等学校优秀教师、全国五一劳动奖章、全国先进工作者、全国创新争先奖、全国教材建设先进个人等荣誉称号。

人工智能发展过程中所面临的困难和挑战还有很多。比如，怎样在提高 AI 大模型训练算力的前提下降低能耗？如何开发出计算效率高的计算架构芯片？怎样解决现有 AI 大模型的可解释性、安全性和可靠性？怎样让 AI 大模型在遇到各种复杂干扰时，仍能保证稳定运行？如何保障数据安全，如何在数据挖掘、数据分析、数据安全隐私以及数据提取方面找到解决方案，等等。

眼下，通用大模型、行业大模型、端侧大模型如雨后春笋般涌现，下一步大模型产业应用落地将进一步提速。总体来看，作为新一代人工智能产业的核心驱动力，AI 大模型正在广泛赋能我国经济社会的多个领域，助力打开迈向通用人工智能的大门，推动新一轮科技革命和产业变革。但同时，产业发展越成熟，问题也会暴露更多，要在应用中发现不足，一起努力。○

来源：瞭望东方周刊

## 何积丰院士：普通人如何驾驭 AI 巨浪

随着人工智能火爆全球，大模型正在重塑我们的工作、学习和生活方式。从智能手机的语音助手到智能家居的自动化控制，再到工作中的数据分析和决策支持，AI 的应用无处不在。在这场由 AI 引领的技术革命中，普通人如何智慧地应用 AI 大模型，实现个人潜能的最大化，成为当下备受瞩目的话题。近日，中国科学院院士、上海华科智谷智能研究院院长何积丰在 Bilibili 超级科学晚会上表示，在 AI 发展过程中，千万不要忘记人类的核心角色，“AI 技术是我们的助手，而不是代替人类创造新世界的未来”。

### AI 从概念到现实

了解 AI 的历史脉络对于把握其未来发展趋势至关重要。何积丰指出，AI 的概念并非今日新创。早在 20 世纪 50 年代，随着计算机技术的诞生，人们便开始探索如何使计算机表现得更像人类。1956 年，“人工智能”概念首次被提出。

进入 20 世纪 60 年代，AI 的研究重点转向了专家系统、自然语言处理和图像处理。1962 年，世界上第一个聊天机器人——医疗机器人的诞生，标志着“人机对话”的序幕被拉开。这个简单的程序虽然只有 200 行代码，却开启了 AI 在模拟人类交

流方面的新篇章。20 世纪 70 年代被认为是 AI 的反思发展期。由于当时计算机的内存和计算速度限制，AI 的发展并未达到预期，研究成果和进展相对缓慢。直到 20 世纪 80 年代，随着大量资金的涌入，AI 迎来了第二次发展高潮。尤其是 1984 年启动的 CYC 项目，旨在将人类所有的常识数字化，构建一个超级百科全书式的数据库。近年来，随着阿尔法狗在围棋领域的胜利，AI 技术真正走进了大众视野，成为热议话题。

### AI 带来的重塑与突破

人工智能不仅是技术的革命，更是人类智慧的延伸。何积丰指出，当前，AI 已经深入到我们生活的各个领域，带来了前所未有的便利和惊喜。但正如硬币有正反两面，AI 对人类生活的影响是复杂的。随着人工智能技术的不断进步，AI 改变了传统的工作模式，过去需要人类耗费大量时间和精力完成的任务，如今 AI 机器已能够高效地完成。从客户互动、数据分析到资料收集和检索，再到文书书写，AI 效率远超人类。近日，北京大学国家发展研究院与智联招聘联合发布了《ChatGPT 如何影响我们的工作？——AI 大模型对我国劳动力市场潜在影响研究》报告，报告基

于智联招聘的数据和求职者问卷调查，结合生成式人工智能技术，为2087个标准化的“DWA（详细工作任务）”被大语言模型人工智能所影响的程度进行评分。研究结果显示，过去五年中国新增职位的“人工智能影响指数”和“大语言模型影响指数”均呈下降趋势，前者从2018年1月的0.7下降至2023年4月的0.68，后者从2018年1月的0.85下降至2023年4月的0.252。这表明新增岗位逐渐集中于那些不容易被人工智能技术所替代的岗位。DWA是工作任务中的最小单元，可简称为工序，每个工作任务通常由多个工序组成。例如，领导做出决策的过程就包括熟悉信息、比较不同优化指标等多个工序。如果某项工序在保持质量不变的情况下，借助AI能够减少50%以上的时间，那么这项工序就可以被AI替代，即“暴露于AI”。OpenAI与宾夕法尼亚大学联合发布的研究报告，调查了

生成式人工智能技术对美国劳动力市场的潜在影响。调查结果显示，80%的劳动力将至少有一项工序暴露于AI，而19%的劳动力甚至有超过一半的工序可以由AI来完成。例如，企业行销工作、软件设计工作等，AI技术能够显著减少研究与设计时间，改进产品的模拟与测试。何积丰指出，AI技术的广泛应用，使工作效率得到了大幅提升，人们可以花费更多时间专注于更高层次的规划与工作。AI技术的普及也并不意味着人类将失去工作。相反，未来的职场将更加注重发现与解决问题的能力、创造力、批判性思维，以及主动学习和获取新技能的能力。这些能力将成为职场人士必备的核心素养，也是当前教育体系中亟须培养的重点。AI不仅在重复性工作中表现出色，在创意性领域也展现出巨大潜力。通过深度学习和大数据分析，AI为用户提供个性化的内容推荐，并能参与到音乐创作、视频制作中，

还能通过社交媒体优化用户社交体验。在家庭生活方面，AI技术让智能家居成为可能。通过智能物联网，我们能够一键控制家中的灯光、空调、窗帘和音响等设备。

### 普通人如何用好AI

未来，随着大模型技术的发展，AI将继续发挥其巨大潜力，进入生活的方方面面，推动产业的升级和转型，成为引领科技进步和社会变革的关键力量。面对这样的发展趋势，普通人如何适应AI时代？何积丰表示，持续学习是核心。提高自己的专业水平，专精自己的优势和专业领域。提高自己的产出和效率，思考如何将AI技术应用到自己的专业中。接触更多的人和行业，不断接收新信息，拥抱新变化，拓展自己的视野。在这个过程中，要以开放的心态看待AI技术的到来，相信它将为我们带来更加美好的未来。○

来源：中国信息化周报

### 报告人简介



中国科学院院士，中国自动化学会会士，著名计算机软件科学家。现任华东师范大学终身教授、软件学院院长，中国科学院信息学部常委会副主任，上海市科协副主席，国家可信嵌入式软件工程技术研究中心首席科学家，上海市高可信计算重点实验室主任。华东师范大学第七届学术委员会委员，第一届学科建设与科学研究委员会主任

委员。主要从事计算机软件理论及应用研究，针对软件的复杂性、正确性和可靠性等问题开展系统性的研究。担任国家自然科学基金委重大研究计划、科技部973计划、863计划主题项目首席科学家，领衔国家自然科学基金委创新研究群体。出版英文专著2部，在国际期刊和会议上发表论文160余篇，他引4000余次。

# 因果涌现：用因果量化复杂系统中的涌现

文 / 王志鹏 张 江 刘凯威

## 1. 历史

### 1.1 相关概念的发展

因果涌现理论是一种试图用基于因果的定量研究方法，从现象学的角度回答什么是涌现这一问题的理论，因此因果涌现的发展与人们对涌现和因果等概念的认识和发展密切相关。

#### 1.1.1 涌现

涌现一直是复杂系统中的一个重要特性，是许多关于系统复杂性，以及宏微观之间关系讨论的核心概念。涌现可以简单理解为整体大于部分之和，即整体上展现出构成它的个体所不具备的新特性。尽管学者们在各个领域都指出存在涌现的现象，如鸟类的群体行为，大脑中的意识形成，以及大语言模型的涌现能力，但目前还没有对这一现象普遍认可的统一理解。以往对涌现的研究大多停留在定性的阶段，如 Bedau et al 对涌现进行了分类研究，即将涌现分为名义涌现、弱涌现与强涌现。

- 名义涌现可以理解能被宏观层级所拥有，而微观层次没有的属性和模式，例如若干像素构成的圆这一形状就是一种名义涌现。
- 弱涌现是指宏观层面的属性或过程是通过单个组件之间以复杂相互作用的方式产生的，或者弱涌现也可以被理解为原则上能够被计算机模拟的特性。由于计算不可约性原理，弱涌现特性即使能够被模拟，但仍然不能轻易地简化为微观层面的属性。对于弱涌现来说，其模式产生的原因可能来自微观和宏观两个层面，因此，涌现的因果关系可能与微观因果关系并存。

- 而对于强涌现来说存在很多的争论，它指的是宏观层面的属性，原则上不能简化为微观层面的属性，包括个体之间的相互作用。此外，Jochen Fromm 进一步将强涌现解释为向下因果的因果效应。向下因果关系是指从宏观层面向微观层面的因果力。然而，关于向下因果关系本身的概念存在许多争议。

由这些早期研究可以看出，涌现与因果有着天然的深刻联系。

#### 1.1.2 因果及其度量

所谓的因果就是指事件彼此之间的相互影响。因果不等于相关，这体现为，不仅当 A 发生时 B 会发生，而且如果 A 不发生，则 B 也不发生。人们只有通过干预事件 A，从而考察 B 的结果，才能探测 A 与 B 是否存在着因果关系。

随着近年来因果科学得到了进一步的发展，使得人们可以用数学框架来量化因果，因果描述的是一个动力学过程的因果效应。Judea Pearl 利用概率图模型来描述因果相互作用。Pearl 用不同的模型来区分并量化了三个层次的因果关系，这里我们比较关注因果阶梯中的第二层：对输入分布做干预。此外，由于发现的因果关系背后的不确定性和模糊性，测量两个变量之间的因果效应程度是另一个重要问题。许多独立的历史研究已经解决了因果关系测量的问题。这些测量方法包括休谟的恒定连接概念和基于值函数的方法，Eells 和 Suppes 的概率性因果度量，以及 Judea Pearl 的因果度量指标等。

#### 1.1.3 因果涌现

如前所述，涌现和因果是相互联系的。具体来

说，联系存在于以下方面：一方面，涌现可以理解因果效应的一种，刻画了复杂系统中各组成部分之间复杂的非线性相互作用；另一方面，涌现出的特性也会对复杂系统中的单个个体产生因果作用。此外，以往人们习惯于将宏观因素归因为微观因素的影响，但是宏观涌现出来的模式，往往无法找到微观的归因，所以也就无法找到对应的原因。由此可见，涌现与因果存在着深刻的联系。再者，虽然我们有了对涌现的定性分类，然而却无法定量的刻画涌现的发生。因此，我们可以借助因果来定量刻画涌现的发生。

2013年，美国理论神经生物学家 Erik Hoel 尝试将因果引入涌现的衡量，提出了因果涌现这一概念，并且使用有效信息 (Effective Information, 简称 EI) 来量化系统动力学的因果性强弱。因果涌现可以描述为：当一个系统在宏观尺度相较其在微观尺度上具有更强的因果效应的时候，就产生了因果涌现。因果涌现很好的刻画了系统宏观和微观状态之间的区别与联系，同时把人工智能中的因果和复杂系统中的涌现这两个核心概念结合起来，因果涌现也为学者回答一系列的哲学问题提供了一个量化的视角。比如，可以借助因果涌现框架讨论生命系统或者社会系统中的自上而下的因果特性。这里的自上而下因果指的是向下因果 (downward causation)，表示存在宏观到微观的因果效应。例如，壁虎断尾现象，当遇到危险时，壁虎不管自己的尾巴怎样，直接将它断掉。这里整体是因，尾巴是果，那么就存在一个整体指向部分的因果力。

### 1.2 早期量化涌现工作

早期已经有一些相关的工作尝试对涌现进行定量的分析。Crutchfield 等提出的计算力学理论考虑了因果态，该方法是在状态空间划分的基础上展开相关概念讨论的，与 Erik Hoel 的因果涌现理论存在着很大的相似性。而 Seth 等人则提出了 G-emergence 理论利用格兰杰因果关系来量化涌现。

### 1.2.1 计算力学

计算力学理论试图用定量的框架来表述涌现的因果规律，即如何从一个随机过程中构造一种粗粒化的因果模型，从而使得这个模型可以产生已观测的随机过程的时间序列。

这里的随机过程可以用  $\bar{S}$  表示，基于时间  $t$  可以将随机过程分为两个部分，时间  $t$  前的过程  $\bar{S}_t$ ，以及时间  $t$  后的过程  $\bar{S}'_t$ 。计算力学将所有可能的历史过程  $\bar{S}_t$  形成的集合记作  $\bar{S}$ ，所有未来的过程  $\bar{S}'_t$  形成的集合记作  $\bar{S}'$ 。

计算力学的目标是建立一个模型，希望以一定的准确度对观察到的随机序列进行重建和预测。然而，序列的随机性使我们无法获得完美的重建，因此，我们需要一个粗粒化的映射来捕获随机序列中的有序结构。这个粗粒化映射可以用一个划分函数  $\eta: \bar{S} \rightarrow \mathcal{R}$  来刻画，该函数可以将  $\bar{S}$  划分为相互排斥的若干子集 (所有的互斥子集形成全集)，形成的集合记为  $\mathcal{R}$ 。

计算力学将任意的子集  $R \in \mathcal{R}$  看作是一个宏观状态。对于一组宏观状态集合  $\mathcal{R}$ ，计算力学使用香农熵定义了指标  $C_\mu$ ，用来衡量这组状态的统计复杂性。其中：

$$C_\mu(\mathcal{R}) \triangleq - \sum_{\rho \in \mathcal{R}} P(\mathcal{R} = \rho) \log_2 P(\mathcal{R} = \rho)$$

可以证明，当使用一组状态构建预测模型时，这组状态的统计复杂性就近似等价于预测模型的大小。

此外，为了使宏观状态集在预测性和简约性之间取得最佳平衡，计算力学定义了因果等价的概念，如果  $P(\bar{S} | \bar{S}) = P(\bar{S} | \bar{S}')$ ，则  $\bar{S}$  和  $\bar{S}'$  是因果等价的，这种等价关系可以将所有的历史过程划分为等价类，并将它们定义为因果态。历史过程  $\bar{S}$  的所有因果态可以被一个映射  $\epsilon(\bar{S})$  刻画，这里  $\epsilon: \bar{S} \rightarrow 2^{\bar{S}}$  是一个将历史过程  $\bar{S}$  映射成因果态  $\epsilon(\bar{S}) \in 2^{\bar{S}}$  的函数。

进一步，我们可以将两个因果态  $S_i$  和  $S_j$  之间的因果转移概率记为  $T_{ij}^{(S)}$ ，它类似于一个粗粒化后的宏观动力学。而一个随机过程的  $\epsilon$ -machine 被定义为有序对  $\{\epsilon, T\}$ ，这是一种模式发现机器，可以通过学习

$\epsilon$  和 T 函数来实现预测。这相当于定义了所谓的涌现因果的识别问题，这里的  $\epsilon$ -machine 就是一个尝试发现数据中的涌现因果的机器。

计算力学可以证明，通过  $\epsilon$ -machine 得到的因果态具有最大可预测性、最小统计复杂度以及最小随机性这三个重要特性，并验证了其在某种意义上是最优的。此外，作者引入了一种分层机器重构算法，可以从观测数据中计算因果态和  $\epsilon$ -machine。尽管该算法可能并不适用于所有场景，但作者以混沌动力学、隐马尔科夫模型和元胞自动机为例，给出了数值计算结果和相应的机器重构路径。

虽然原始的计算力学没有给出涌现的明确定义和定量理论，但是随后一些研究人员进一步推进了该理论的发展，Shalizi 等在自己的工作中讨论了计算力学与涌现的关系，如果过程  $\bar{S}'$  比过程  $\bar{S}$  具有更高的预测效率，那么过程  $\bar{S}'$  发生了涌现，其中一个过程的预测效率  $e$  被定义为其过剩熵与其统计复杂度之比  $\left( e = \frac{E}{C_\mu} \right)$ ， $e$  是一个介于 0 到 1 之间的实数，我们可以把它看作是存储在过程中的历史记忆的一部分。在两种情况下， $C_\mu = 0$ ，一种是这个过程是完全统一和确定的；另一种是它是独立同分布的，在这两种情况下都不可能有任何有趣的预测，所以我们设  $e=0$ 。同时作者解释说，涌现可以被理解为一个动力学过程，在这个过程中，一个模式获得了能适应不同环境的能力。

因果涌现框架与计算力学存在很多相似之处，所有历史过程  $\bar{S}$  可以看作是微观状态，所有  $R \in \mathcal{R}$  对应宏观状态，函数  $\eta$  可以理解为一种可能的粗粒化函数，因果态  $\epsilon(\bar{S})$  是一种特殊状态，它至少可以与微观状态  $\bar{S}$  具有相同的预测能力，因此， $\epsilon$  可以理解为一种有效的粗粒化策略，因果转移 T 对应于有效的宏观动力学。最小随机性特征表征了宏观动力学的确定性，在因果涌现中可以用有效信息衡量。

### 1.2.2 G-emergence

G-emergence 理论是 Seth 于 2008 年提出的，

最早从因果的角度对涌现进行定量化的研究之一，基本思想是用非线性格兰杰因果来量化复杂系统中的弱涌现。

具体来说，如果我们使用二元自回归模型进行预测，当只存在两个变量 A 和 B 时，自回归模型存在两个等式，每个等式对应其中一个变量，每个变量的当前时刻值都是由它自身和另外一个变量在滞后一定时间范围内的数值构成。另外，该模型还会计算残差，这里残差可以理解为预测误差，可以用来衡量每一个等式的格兰杰因果效应程度（称为 G-causality）。B 作为 A 的格兰杰因（G-cause）的程度通过两个残差方差之比的对数来计算，其中一个是在省略 B 时 A 的自回归模型的残差，另一个是全预测模型（包含了 A 和 B）的残差。此外，作者还定义了“G 自主性（G-autonomous）”的概念，表示一个时间序列的过去值可以预测自身的未来值的度量，可以用类似 G-causality 的方式来刻画这种自主预测的因果效应强度。

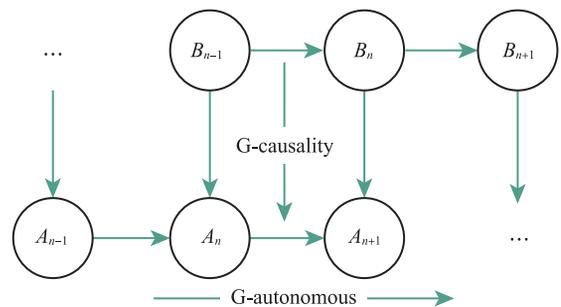


图 1

如上图所示，我们可以基于上述 G-causality 中的两个基本概念来判断涌现的发生（这里是基于格兰杰因果的涌现的衡量，记作 G-emergence）。如果把 A 理解为宏观变量，B 理解为微观变量。发生涌现的条件包含两个：1) A 是关于 B 的 G-autonomous；2) B 是 A 的 G-cause。其中 G-emergence 的程度是通过 A 的 G-autonomous 的程度与 B 的平均 G-cause 的程度的乘积来计算的。

Seth 提出的 G-emergence 理论首次尝试使用因果度量来量化涌现现象，然而，作者使用的因果关系是格兰杰因果，这不是一个严格的因果关系，同时度量的结果也取决于所使用的回归方法。除此之外，该方法的度量指标是根据变量而不是动力学定义的，这意味着结果会依赖于变量的选择。这些都构成了 G-emergence 理论的弊端。

因果涌现框架与前面提到的 G-emergence 也有相似之处，两个方法的宏观状态都需要人工选择。此外，需要注意的是，上述的一些定量量化涌现的方法往往没有考虑真正的干预式因果。

### 1.2.3 其他定量刻画涌现的理论

此外，也存在一些其他的涌现定量理论，主要有两种方法被广泛讨论。一种是从无序到有序的过程来理解涌现，Moez Mnif 和 Christian Müller-Schloer 使用香农熵来度量有序和无序。在自组织过程中，当秩序增加时就会出现涌现，通过测量初始状态和最终状态之间的香农熵的差异来计算秩序的增加。然而，该方法存在的缺陷是：它依赖于抽象的观察水平以及系统的初始条件。为了克服这两种困难，作者提出了一种与最大熵分布相比的度量方法。受 Moez Mnif 和 Christian Müller-Schloer 工作的启发，参

考文献建议使用两个概率分布之间的散度来量化涌现。他们将涌现理解为在所观察到的样本基础上的一种意想不到的或不可预测的分布变化。但该方法存在计算量大、估计精度低等缺点。为了解决这些问题，文献进一步提出了一种使用高斯混合模型估计密度的近似方法，并引入马氏距离来表征数据与高斯分量之间的差异，从而得到了更好的结果。此外，Holzer 和 de Meer 等人提出了另一种基于香农熵的涌现测量方法。他们认为一个复杂的系统是一个自组织的过程，在这个过程中，不同的个体通过通信相互作用。然后，我们可以根据代理之间所有通信的香农熵度量与作为单独源的香农熵总和之间的比率来测量涌现。

另一种方法是从“整体大于部分之和”的角度来理解涌现的，该方法从交互规则和主体的状态来定义涌现，而不是从整个系统的总体来进行统计度量。具体地说，这个度量需要使两项相减。第一项描述了整个系统的集体状态，而第二项代表了所有组成部分的单个状态的总和。该度量强调涌现产生于系统的相互作用和集体行为。

### 1.3 基于有效信息的因果涌现理论

历史上，第一个比较完整而明确的利用因果来定义涌现的定

量理论当属 Erik Hoel, Larissa Albantakis 以及 Giulio Tononi 三人提出的因果涌现理论。该理论针对马尔科夫链定义所谓的因果涌现为：粗粒化后的马尔科夫链比原始的马尔科夫链具有更大的因果效应强度的现象。这里，因果效应强度是通过有效信息来衡量的，该指标是对互信息指标的一种改造，主要差别是将  $t$  时刻的状态变量进行了 do 干预，干预成了均匀分布（或最大熵分布）。有效信息指标早在 2003 年就被 Giulio Tononi 在研究整合信息论的时候提出，作为 Giulio Tononi 的学生 Erik Hoel 将有效信息应用到马尔科夫链中，提出了基于有效信息的因果涌现理论。

### 1.4 基于信息分解的因果涌现理论

此外，2020 年，Rosas 等从信息理论视角出发，提出一种基于信息分解的方法来定义系统中的因果涌现，基于协同信息或者冗余信息来定量的刻画涌现。所谓的信息分解是分析复杂系统中各个变量复杂相互关系的一种新方法，通过对信息进行分解，用信息原子来表示每个部分信息，同时借助信息晶格图将每个部分信息投射到信息原子中，其中协同信息以及冗余信息都可以用对应的信息原子来表示。该方法建立在 Williams 和 Beer 等提出的多元信息非负分解理论的基础之

上,文中使用部分信息分解(PID)将微观态和宏观态的互信息进行分解。然而,PID框架只能分解关于多个源变量和一个目标变量之间的互信息,Rosas扩展了该框架,提出整合信息分解方法 $\Phi$ ID来处理多个源变量和多个目标变量之间的互信息,作者基于分解后的信息提出了两种因果涌现的定义方法。

### 1.5 近期工作

Barnett等人基于转移熵,通过判断宏观动力学与微观动力学进行解耦来判断涌现的发生,因而提出了动力学解耦的概念。也就是,将涌现刻画为,宏观的变量与微观的变量相互独立,没有因果关系,这也可以看做是一种因果涌现现象。

2024年,张江等人基于奇异值分解,提出了一套新的因果涌现理论。该理论的核心思想是指出所谓的因果涌现其实等价于动力学可逆性的涌现。给定一个系统的马尔科夫转移矩阵,通过对它进行奇异值分解,将奇异值的 $\alpha$ 次方的和定义为马尔科夫动力学的可逆性度量 $\left(\Gamma_\alpha \equiv \sum_{i=1}^N \sigma_i^\alpha\right)$ ,这里 $\sigma_i$ 为奇异值。该指标与有效信息具有高度的相关性,也可以用于刻画动力学的因果效应强度。根据奇异值的谱,该方法可以在不显式定义粗粒化方案的条件下,直接定义所谓清晰涌现(clear emergence)和模糊涌现(vague emergence)的概念。

## 2. 因果涌现的量化

接下来,我们重点介绍几种利用因果度量来量化涌现现象的研究。

### 2.1 几种因果涌现理论

对于如何定义因果涌现是一个关键问题,有几个代表性工作,分别是Hoel等提出的基于有效信息的方法、Rosas等提出的基于信息分解的方法、张江等人基于奇异值分解提出了一套新的因果涌现理论以及一些其他的理论。

#### 2.1.1 Erik Hoel的因果涌现理论

Hoel等于2013年提出因果涌现理论,下图是对该理论的一个抽象框架,其中,横坐标表示时间,纵坐标表示尺度(Scale)。该框架可以看成是对同一个动力系统在微观和宏观两种尺度上的描述。其中, $f_m$ 表示微观动力学, $f_M$ 表示宏观动力学,二者通过一个粗粒化函数 $\phi$ 相连。在一个离散状态的马尔科夫动力系统中, $f_m$ 和 $f_M$ 都是马尔科夫链,对 $f_m$ 进行马尔科夫链的粗粒化,就可以得到 $f_M$ 。 $EI$ 是有效信息的度量。由于微观态可能具有更大的随机性,这导致微观动力学的因果性比较弱,所以通过对每一个时刻的微观态进行合理的粗粒化,就有可能得到因果性更强的宏观态。所谓的因果涌现,就是指当我们对微观态进行粗粒化的时候,宏观动力学的有效信息会增加这一现象,并且宏观态与微观态的有效信息之差被定义为因果涌现的强度。

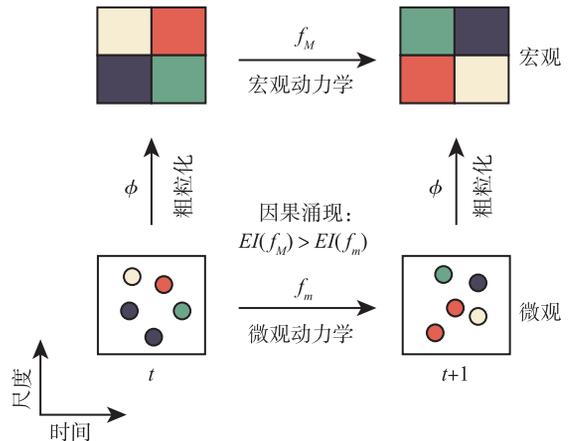


图2

##### 2.1.1.1 有效信息

有效信息( $EI$ )最早由Tononi等人在整合信息论的研究中提出。在因果涌现研究中,Erik Hoel等人将这种因果效应度量指标用于量化一个因果机制的因果性强弱。

具体来说, $EI$ 的计算为:使用干预操作对自变量做干预,并考察在这一干预下,因果变量之间的互

信息，这种互信息就是有效信息，即因果机制的因果效应度量。

在马尔科夫链中，任意时刻的状态变量  $X_t$  都可以看作是原因，而下一时刻的状态变量  $X_{t+1}$  就可以看作是结果，这样马尔科夫链的状态转移矩阵就是它的因果机制。因此，针对马尔科夫链的  $EI$  的计算公式如下所示：

$$EI(f) \equiv I(X_t, X_{t+1} | do(X_t) \sim U(\mathcal{X})) \equiv I(\tilde{X}_t, \tilde{X}_{t+1}) \\ = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij} \log \frac{N \cdot p_{ij}}{\sum_{k=1}^N p_{kj}}$$

其中  $f$  表示一个马尔科夫链的状态转移矩阵， $U(\mathcal{X})$  表示状态变量  $X_t$  取值空间  $\mathcal{X}$  上的均匀分布。 $\tilde{X}_t, \tilde{X}_{t+1}$  分别为把  $t$  时刻的  $X_t$  干预为均匀分布后，前后两个时刻的状态。 $p_{ij}$  为第  $i$  个状态转移到第  $j$  个状态的转移概率。从这个式子不难看出， $EI$  仅仅是概率转移矩阵  $f$  的函数。进行干预操作是为了使得有效信息能客观衡量动力学的因果特性而不受原始输入数据的分布影响。

有效信息可以拆解为确定性和简并性两部分，还可以通过引入归一化从而消除状态空间规模大小的影响。关于有效信息的详细信息请参看词条：有效信息。

为了消除状态数对有效信息的影响，可以定义有效系数概念，公式如下所示：

$$Eff(f) = \frac{EI}{\log_2 N}$$

其中  $N$  表示状态的数量。

### 2.1.1.2 因果涌现度量

我们可以通过比较系统中宏微观动力学的有效信息大小来判断因果涌现的发生：

$$CE = EI(f_M) - EI(f_m)$$

其中  $CE$  为因果涌现强度。如果宏观动力学的有效信息大于微观动力学的有效信息（也就是  $CE > 0$ ），那么我们认为在该粗粒化基础上宏观动力学具有因果涌现特性。

进一步， $CE$  可以拆解成两项之和， $CE = \Delta I_{Eff} + \Delta I_{Size}$ ，其中  $\Delta I_{Eff} = (Eff(f_M) - Eff(f_m)) \cdot \log_2(M)$ ， $\Delta I_{Size} = Eff(f_m) \cdot (\log_2(M) - \log_2(m))$ ，其中  $M$  和  $m$  分别表示宏微观的状态大小，由于粗粒化后的宏观状态减小了， $\Delta I_{Size}$  一定小于 0，为了能发生因果涌现，就要使得  $\Delta I_{Eff}$  的增加大于  $\Delta I_{Size}$  的降低。

### 2.1.1.3 马尔科夫链实例

在文献中，Hoel 给出一个含有 8 个状态的马尔科夫链的状态转移矩阵 ( $f_m$ ) 的例子，如下面左图所示。其中前 7 个状态之间等概率转移，最后一个状态是独立的，只能转变为自身的状态。

对该矩阵的粗粒化为如下操作：首先，将前 7 个状态归并为一个宏观状态，不妨称为 A，并且将  $f_m$  中前 7 行的前 7 列的概率数值加总再除以 7，从而得到宏观态 A 到 A 的状态转移概率，并对  $f_m$  矩阵的其它

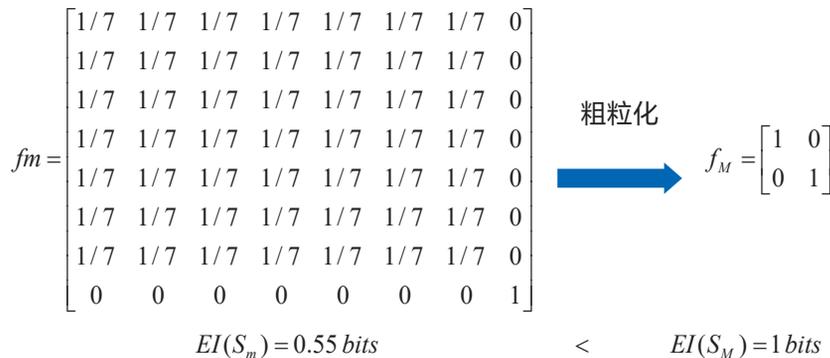


图 3

数值保持不变。这样归并后的新的概率转移矩阵如右图所示，记为  $f_M$ 。这是一个确定的宏观马尔科夫转移矩阵，即系统的未来状态完全可以由当前状态决定。此时  $EI(f_M) > EI(f_m)$ ，系统发生了因果涌现。

然而，对于更一般的马尔科夫链和更一般的状态分组，这种简单的将概率平均化的操作并不都是可行的，这是因为归并后的概率转移矩阵有可能不满足马尔科夫链的条件（如矩阵的行并不满足归一化条件，或元素数值超出区间范围）。关于什么样的马尔科夫链和状态分组可以得到一个可行的宏观马尔科夫链，请参考本词条后面的马尔科夫链的约简一节，或参看马尔科夫链的粗粒化这一词条。

2.1.1.4 布尔网络实例

另一个文献中的例子是一个

布尔网络中发生因果涌现的例子。如图所示，这是一个含有 4 个节点的布尔网络，每个节点有 0 和 1 两种状态，每个节点与另外两个节点相连，遵循相同的微观动力学机制（a 图）。因此，该系统一共含有十六个微观状态，它的动力学可以用一个  $16 \times 16$  的状态转移矩阵（c 图）表示。

对该系统的粗粒化操作分为两步，第一步是对布尔网络中的节点进行聚类，如下图 b 所示，将 A 和 B 进行合并得到宏观节点  $\alpha$ ，C 和 D 进行合并得到宏观节点  $\beta$ ；第二步，将每一个分组中的微观节点状态映射为归并后的宏观节点状态，这一映射函数如下图 d 所示，其中所有包含 0 的微观节点状态都转变为宏观节点的 off 状态，而微观的 11 状态转变为宏观的 on 状态。这样，我们可以得到一个新的宏观的布尔网

络，并根据微观节点的动力学机制得到宏观布尔网络的动力学机制，根据这个机制就可以得到宏观网络的状态转移矩阵（如 e 图所示）。

通过对比，我们发现宏观动力学的有效信息大于微观动力学的有效信息（ $EI(f_M) > EI(f_m)$ ），该系统发生了因果涌现。

2.1.1.5 连续变量中的因果涌现

进一步，在一文中，Hoel 等人提出了因果几何理论框架，试图将因果涌现理论推广到具有连续状态的函数映射与动力系统之中，该文章对随机函数映射定义了  $EI$ ，同时还引入了干预噪音和因果几何的概念，并将这一概念与信息几何进行了对照和类比。刘凯威等人又进一步给出了随机迭代动力系统的精确解析的因果涌现理论。

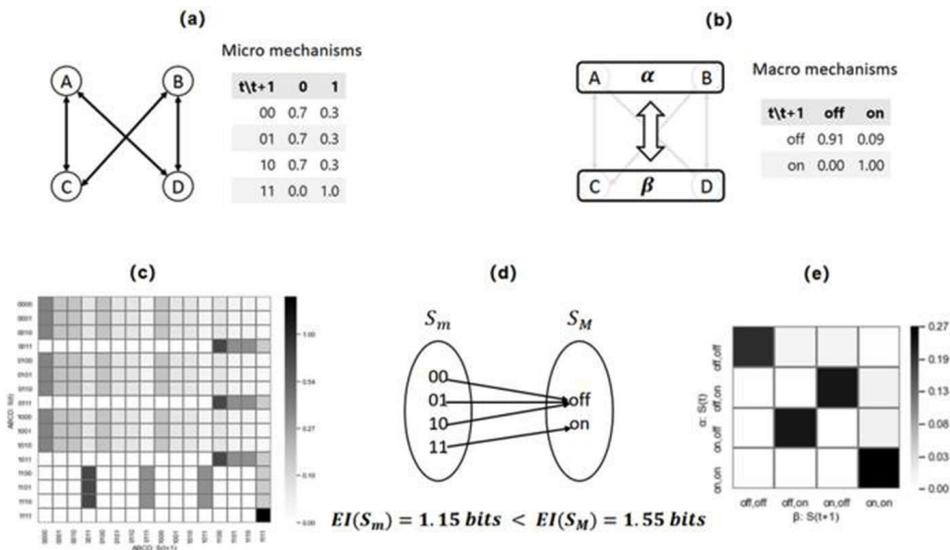


图 4

2.1.2 Rosas 的因果涌现理论

Rosas 等从信息分解理论的视角出发，提出一种基于整合信息分解定义因果涌现的方法，并将因果涌现进一步区分为：因果解耦（Causal Decoupling）和向下因果（Downward Causation）两部分。其中因果解耦表示当前时刻宏观态对下一时刻宏观态的因果效应，向下因果表示上一时刻宏观态对下一时刻微观态的因果效应。因果解耦和向下因果的示意图如下图所示，其中微观状态输入为  $X_t(X_t^1, X_t^2, \dots, X_t^n)$ ，宏观状态是  $V_t$ ，它由微观态变量  $X_t$  粗粒化而来，因而是  $X_t$  的随附特征（Supervenience）， $X_{t+1}$  和  $V_{t+1}$  分别表示下一时刻的微观和宏观状态。

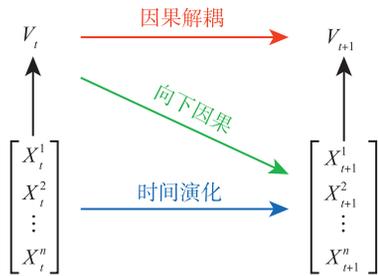


图 5

2.1.2.1 部分信息分解

该方法建立在 Williams 和 Beer 等提出的多元信息非负分解理论的基础之上，该文使用部分信息分解（PID）将微观态和宏观态的互信息进行分解。

不失一般性，假设我们的微观态为  $X(X^1, X^2)$ ，即它是一个二维的变量，宏观态为  $V$ ，则二者之间的互信息可以被分解为四个部分：

$$I(X^1, X^2; V) = Red(X^1, X^2; V) + Un(X^1; V | X^2) + Un(X^2; V | X^1) + Syn(X^1, X^2; V)$$

其中  $Red(X^1, X^2; V)$  表示冗余信息，是指两个微观态  $X^1$  和  $X^2$  重复地给宏观态  $V$  提供的信息； $|Un(X^1; V | X^2)$  和  $|Un(X^2; V | X^1)$  表示特有信息，是指每一个微观态变量单独给宏观态提供的信息； $Syn(X^1, X^2; V)$  表示协同信息，是指所有微观态  $X$  联合

在一起给宏观态  $V$  提供的信息。

2.1.2.2 因果涌现定义

然而，PID 框架只能分解关于多个源变量和一个目标变量之间的互信息，Rosas 扩展了该框架，提出整合信息分解方法  $\Phi$ ID 来处理多个源变量和多个目标变量之间的互信息，还可以用来分解不同时刻间的互信息，作者基于分解后的信息提出了两种因果涌现的定义方法：

1) 当特有信息  $Un(V_t; X_{t+1} | X_t^1, \dots, X_t^n) > 0$ ，表示当前时刻的宏观态  $V_t$  能超过当前时刻的微观态  $X_t$  给下一时刻的整体系统  $X_{t+1}$  提供更多信息，这时候系统存在着因果涌现；

2) 第二种方法绕开了选择特定的宏观态  $V_t$ ，仅仅基于系统当前时刻的微观态  $X_t$  和下一时刻的微观态  $X_{t+1}$  之间的协同信息定义因果涌现，当协同信息  $Syn(X_t^1, \dots, X_t^n; X_{t+1}^1, \dots, X_{t+1}^n) > 0$ ，系统发生了因果涌现。

值得注意的是，对于方法一判断因果涌现的发生需要依赖宏观态  $V_t$  的选择，其中方法一是方法二的下界。这是因为， $Syn(X_t; X_{t+1}) \geq Un(V_t; X_{t+1} | X_t)$  衡成立。所以，如果  $Un(V_t; X_{t+1} | X_t)$  大于 0，则系统出现因果涌现。然而  $V_t$  的选择往往需要预先定义粗粒化函数，因此无法回避 Erik Hoel 因果涌现理论的局限。另外一种自然的想法就是使用第二种方法借助协同信息来判断因果涌现的发生，但是协同信息的计算是非常困难的，存在着组合爆炸问题。因此，第二种方法基于协同信息的计算往往也是不可行的。总之，这两种因果涌现的定量刻画方法都存在一些弱点，因此，有待提出更加合理的量化方法。

2.1.2.3 具体实例

$$P_{X_{t+1}|X_t}(x_{t+1} | x_t) = \begin{cases} 0 & \text{if } x_{t+1}^1 \neq \bigoplus_{j=1}^n x_t^j, \\ \frac{\gamma}{2^{n-2}} & \text{if } x_{t+1}^1 = \bigoplus_{j=1}^n x_t^j \text{ and } \bigoplus_{j=1}^n x_{t+1}^j = \bigoplus_{j=1}^n x_t^j, \\ \frac{1-\gamma}{2^{n-2}} & \text{otherwise.} \end{cases}$$

第一项
第二项

文中作者列举了一个具体的例子（如上式），来说明什么时候发生因果解耦、向下因果以及因果涌现。该例子是一个特殊的马尔科夫过程，这里， $pX_{t+1} | X_t (x_{t+1} | x_t)$  表示动力学关系， $X_t = (x_t^1, \dots, x_t^n) \in \{0, 1\}^n$  为微观态。该过程的定义是通过检查前后两个时刻的变量  $x_t$  和  $x_{t+1}$  的取值，也就是判断  $x_t$  的所有维度加和模 2 是否与  $x_{t+1}$  的第一个维度相同来确定下一时刻状态  $x_{t+1}$  取不同数值概率的：如果不同，则概率取 0；否则再判断  $x_t, x_{t+1}$  在所有维度上是否都有相同的加和模 2 值，如果两个条件都满足，则取值概率为  $\gamma/2^{n-2}$ ，否则取值概率为  $(1-\gamma)/2^{n-2}$ 。这里  $\gamma$  为一个参数， $n$  为  $x$  的总维度。

实际上，如果  $\sum_{j=1}^n x_t^j$  是偶数或者 0 时  $\oplus_{j=1}^n x_t^j := 1$ ，反之  $\oplus_{j=1}^n x_t^j := 0$ ，因此  $\oplus_{j=1}^n x_t^j$  的结果是  $X$  整体序列的奇偶性，而第一个维度则可以看作是一个奇偶校验位。 $\gamma$  实际上表示  $X$  序列某两个位产生了突变，并且该突变却能够保证整体序列的奇偶性不变，以及序列的奇偶校验位也符合序列整体的实际奇偶性的概率。

因而该过程的宏观态可以就看做是整个序列所有维度和的奇偶性，该奇偶性的概率分布是微观态的异或计算的结果。 $x_{t+1}^1$  是一个特殊的微观态，它始终与上一时刻序列的宏观态保持一致。因此，当第二个判断条件中只有第一项成立时该系统发生向下因果条件，只有第二项成立时系统发生因果解耦，两项同时成立时则称系统发生因果涌现。

### 2.1.3 基于奇异值分解的因果涌现理论

Erik Hoel 的因果涌现理论存在着需要事先指定粗粒化策略的问题，Rosas 的信息分解理论并没有完全解决该问题，因此，张江等人进一步提出了基于奇异值分解的因果涌现理论。

#### 2.1.3.1 马尔科夫链的奇异值分解

给定一个系统的马尔科夫转移矩阵  $\mathbf{P}$ ，我们可以对它进行奇异值分解，得到两个正交且归一化矩阵  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$ ，和一个对角阵  $\mathbf{\Sigma} : \mathbf{P} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T$ ，其中  $\mathbf{\Sigma} = \text{diag}(\sigma_1,$

$\sigma_2, \dots, \sigma_N)$ ，其中  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \sigma_N$  为  $\mathbf{P}$  的奇异值，并且按照从大到小的顺序排列， $N$  为  $\mathbf{P}$  的状态数量。

#### 2.1.3.2 近似动力学可逆性与有效信息

我们可以将奇异值的  $\alpha$  次方之和（也称为矩阵的  $\alpha$  阶 Schatten 范数）定义为马尔科夫链的近似动力学可逆性度量，即：

$$\Gamma_\alpha \equiv \sum_{i=1}^N \sigma_i^\alpha$$

这里， $\alpha \in (0, 2)$  为一个指定的参数，它起为了让  $\Gamma_\alpha$  能够更多地反映确定性还是简并性这样一种权重或倾向性。通常情况下，我们取  $\alpha=1$ ，这可以让  $\Gamma_\alpha$  能够在确定性与简并性之间达到一种平衡。

此外，文献中作者证明了  $EI$  与  $\Gamma_\alpha$  之间存在着一种近似的关系：

$$EI \sim \log \Gamma_\alpha$$

而且，在一定程度上可以用  $\Gamma_\alpha$  替代  $EI$  对马尔科夫链的因果效应程度进行度量。因此，所谓的因果涌现也可以被理解为一种动力学可逆性的涌现。

#### 2.1.3.3 无需粗粒化的因果涌现量化

然而，该理论的最大价值在于无需粗粒化策略，就可以直接量化涌现。如果  $\mathbf{P}$  的秩为  $r$ ，即从第  $r+1$  个奇异值开始，奇异值都为 0，则我们称动力学  $\mathbf{P}$  存在着清晰的因果涌现（Clear Causal Emergence），并且因果涌现的数值为：

$$\Delta \Gamma_\alpha = \Gamma_\alpha (1/r - 1/N)$$

如果矩阵  $\mathbf{P}$  满秩，但是对于任意给定的小数  $\epsilon$ ，存在  $r_\epsilon$ ，使得从  $r_{\epsilon+1}$  开始，所有的奇异值都小于  $\epsilon$ ，则称系统存在着程度的模糊的因果涌现（Vague Causal Emergence），且因果涌现的数值为：

$$\Delta \Gamma_\alpha(\epsilon) = \frac{\sum_{i=1}^r \sigma_i^\alpha}{r} - \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i^\alpha}{N}$$

总结来看，该量化因果涌现的方法的好处在于，它可以不依赖于具体的粗粒化策略，因而可以更

加客观地量化因果涌现。该方法的缺点是，若要计算  $\Gamma_a$ ，需要事先对  $\mathbf{P}$  进行 SVD 分解，因而计算复杂度为  $O(N^3)$ ，比  $EI$  的计算复杂度高。而且， $\Gamma_a$  不能显式地分解为确定度和简并度两个分量。

2.1.3.4 具体实例

作者给出了四个具体马尔科夫链的例子，该马氏链的状态转移矩阵如图所示。我们可以对比该马氏链的  $EI$  和近似动力学可逆性（图中的  $\Gamma$ ，即  $\Gamma_a=1$ ）。对比图 a, b，我们发现对于不同的状态转移矩阵， $EI$  降低的时候， $\Gamma$  也同步降低。进一步，图 c 和 d 是对比粗粒化前后的效果，其中图 d 是对图 c 状态转移矩阵的粗粒化（将前三个状态归并为一个宏观态）。由于宏观状态转移矩阵图 d 是一个确定性系统，因此，归一化后的  $EI$ ， $eff \equiv EI/\log N$  和归一化后的  $\Gamma : \gamma \equiv \Gamma/N$  都达到了最大值 1。

2.1.4 动力学解耦 (Dynamic independence)

动力学解耦 (Dynamic Independence) 是一种

刻画粗粒化后的宏观动力学状态独立于微观动力学状态的方法<sup>[40]</sup>，其核心思想是，尽管宏观变量是由微观变量组成，但在预测宏观变量未来状态时，只需要依赖宏观变量历史信息，而不需要微观历史提供额外的信息，这种现象就被作者称为动力学解耦，它是另一种对涌现进行量化的手段，此时的宏观动力学称为涌现动力学。动力学解耦概念中的独立性、因果依赖性 etc 可以通过转移熵 (Transfer Entropy) 进行量化。

2.1.4.1 动力学解耦的量化

转移熵是测量两个随机过程之间有向（时间不对称）信息转移量的一种非参数统计量。过程  $X$  到另一个过程  $Y$  的转移熵可定义为：在已知  $Y$  过去值的情况下，了解  $X$  的过去值所能减少对  $Y$  未来值不确定性的程度，公式如下所示：

$$T_t(X \rightarrow Y) = I(Y_t; X_t^- | Y_t^-) = H(Y_t | Y_t^-) - H(Y_t | Y_t^-, X_t^-)$$

其中， $Y_t$  表示  $t$  时刻的宏观变量， $X_t^-$  和  $Y_t^-$  分别表示  $t$  时刻之前的微观和宏观变量。 $I$  为互信息， $H$  为香

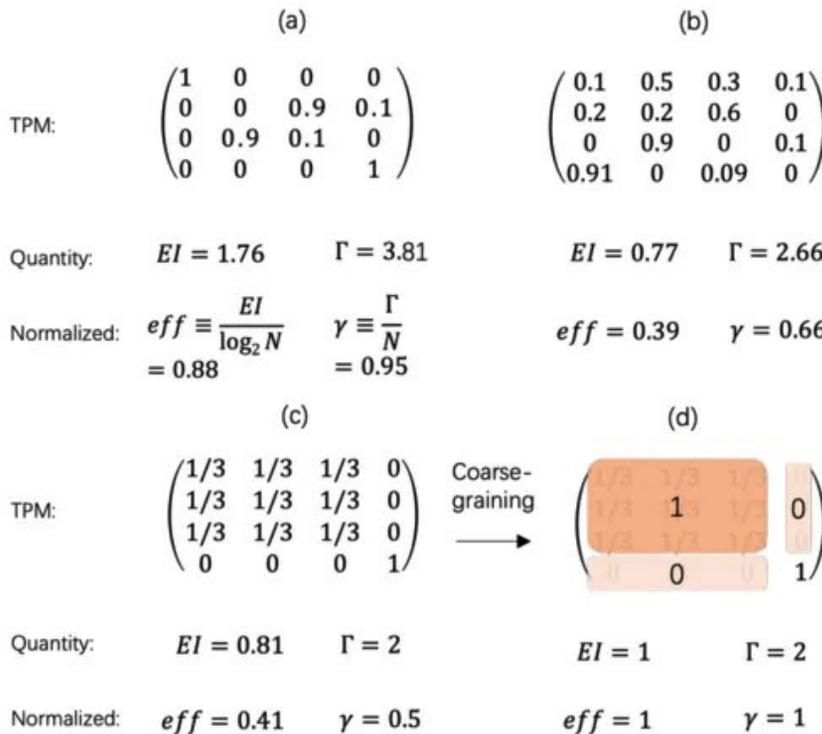


图 6

熵。当且仅当时间  $t$  从  $X$  到  $Y$  的转移熵  $T_t(X \rightarrow Y) = 0$  时,  $Y$  相对于  $X$  动力学解耦

动力学解耦的概念可以被广泛适用于多种复杂动态系统, 包括神经系统、经济过程和进化过程。通过粗粒化方法, 可以将高维微观系统简化为低维宏观系统, 从而揭示出复杂系统中的涌现结构。

文中, 作者在线性系统中进行了实验验证, 实验流程是: 1) 使用线性系统生成参数与规律; 2) 设定粗粒化函数; 3) 得到转移熵的表达式; 4) 优化求解最大去耦合的粗粒化方法 (对应最小转移熵)。这里的优化算法可以使用转移熵作为优化目标, 然后使用梯度下降算法来求解粗粒化函数, 也可以使用遗传算法来优化。

#### 2.1.4.2 实例

文中举了一个线性动力系统的例子, 其动力学是一个向量自回归的模型, 通过使用遗传算法对不同的初始条件进行迭代进化, 能使得系统的动力学解耦程度也逐渐增加, 同时发现不同的粗粒化尺度会影响优化到动力学解耦的程度, 实验发现只有在某些尺度下能达到动力学解耦, 而在其他尺度则不行, 因此尺度的选择也很重要。

### 2.2 几种因果涌现理论比较

我们可以从是否考虑因果、是否需要指定粗粒化函数, 适用的动力学系统以及定量化指标这几个不同的维度, 对比上述四种不同的定量化因果涌现理论, 得到下表:

不同定量化涌现理论比较

方法	是否考虑因果	是否涉及粗粒化	适用的动力学系统	度量指标
Hoel 的因果涌现理论	动力学因果, $EI$ 定义引入了 do 干预	需要指定粗粒化方法	离散马尔科夫动力学	动力学因果: 有效信息
Rosas 的因果涌现理论	用互信息刻画的相关性近似	基于协同信息判断时不涉及粗粒化, 基于冗余信息计算则需要指定粗粒化方法	任意动力学	信息分解: 协同信息或冗余信息
基于可逆性的因果涌现理论	动力学因果, $EI$ 与近似动力学可逆性等价	不依赖于具体的粗粒化策略	离散马尔科夫动力学	近似动力学可逆性: $\Gamma$
动力学解耦	格兰杰因果	需要指定粗粒化方法	任意动力学	动力学独立性: 转移熵

### 3. 因果涌现的识别

前面已经介绍了一些通过因果度量和其他信息论指标来量化涌现的工作。然而, 在实际应用中, 我们往往只能收集到观测数据, 而无法得到系统的真实动力学。因此, 从可观测数据中辨别系统是否发生了因果涌现是一个更为重要的问题。下面介绍两种因果涌现的识别方法, 包括基于 Rosas 因果涌现理论的近似方法 (基于互信息近似的方法和基于机器学习的方法) 和我国学者提出的神经信息压缩 (NIS, NIS+) 方法。

#### 3.1 基于 Rosas 因果涌现理论的近似方法

Rosas 的因果涌现理论包含了基于协同信息的量化方法和基于特有信息的量化方法, 其中第二种方法可以绕开多变量的组合爆炸问题, 但是依赖粗粒化方法和宏观态变量  $V$  的选择。为了解决这个问题, 作者给出了两种解决方案, 一种是通过研究者指定一个宏观态  $V$ , 另一种是基于机器学习的方法, 通过最大化  $\Psi$ , 让系统自动学习到宏观态变量  $V$ 。下面我们分别介绍这两种方法:

##### 3.1.1 基于互信息近似的方法

Rosas 的因果涌现理论虽然已经给出了因果涌现的严格定义, 但在计算中涉及到很多变量的组合爆炸

问题，因此难以将该方法应用于实际系统。为了解决这个问题，Rosas 等绕开了特有信息和协同信息的精确计算，而提了一种只需要计算互信息的近似公式，并推导出一个判定因果涌现发生的充分条件。

作者们基于互信息提出了三个新指标， $\Psi$ ， $\Delta$  和  $\Gamma$  可以分别用于识别系统中的因果涌现、因果解耦和向下因果，三种指标的具体计算公式分别如下所示：

· 判断因果涌现的指标：

$$\Psi_{t,t+1}(V) := I(V_t; V_{t+1}) - \sum_j I(X_t^j; V_{t+1}) \quad (1)$$

其中  $X_t^j$  表示第  $j$  维  $t$  时刻的微观变量， $V_t$ ； $V_{t+1}$  分别代表两个连续时间的宏观状态变量。Rosas 等人定义，当  $\Psi > 0$  时，系统发生涌现；但是当  $\Psi < 0$ ，我们不能确定  $V$  是否发生涌现，这是因为该条件仅仅是因果涌现发生的充分条件。

· 判断向下因果的指标：

$$\Delta_{t,t+1}(V) := \max_j \left( I(V_t; X_{t+1}^j) - \sum_i I(X_t^i; X_{t+1}^j) \right)$$

当  $\Delta > 0$  时，宏观状态  $V$  对微观变量  $X$  存在向下因果。

判断因果解耦的指标：

$$\Gamma_{t,t+1}(V) := \max_j I(V_t; X_{t+1}^j)$$

当  $\Delta > 0$  且  $\Gamma = 0$  时，系统发生因果涌现且存在因果解耦。

所以我们可以使用  $\Psi$  来识别因果涌现的发生，是因为  $\Psi$  又是特有信息的下界，我们有如下关系：

$$Un(V_t; X_{t+1} | X_t) \geq I(V_t; V_{t+1}) - \sum_j I(X_t^j; V_{t+1}) + Red(V_t, V_{t+1}; X_t)$$

由于  $Red(V_t, V_{t+1}; X_t)$  为非负数，所以我们可以据此提出一个充分非必要条件：当  $\Psi_{t,t+1}(V) > 0$ 。

总结来看，该方法因为是基于互信息的，所以计算比较方便，且对系统的动力学没有马尔科夫性的假设和要求。但是，该理论也存在很多缺点：1) 该方法提出的三个指标： $\Psi$ ， $\Delta$  和  $\Gamma$  只是基于互信息的

计算而没有考虑因果；2) 该方法得到的仅仅是发生因果涌现的充分条件；3) 该方法依赖宏观变量的选择，而不同的选择会对结果造成不同的显著影响；4) 当系统具有大量冗余信息，或具有许多变量时，该方法的计算复杂度就会很高，同时由于  $\Psi$  为近似计算，因此这会让高维系统存在非常大的误差，而且还非常容易得到负值，从而无法判断是否有因果涌现发生。

为了验证猕猴运动有关的信息是其皮层活动的一个涌现特征，Rosas 等做了如下实验：基于猕猴的皮质脑电图 (ECoG) 作为微观动力学的观测数据。为了得到宏观态变量  $V$ ，作者们选择了用动作捕捉 (MoCap) 得到的猕猴肢体运动轨迹的时间序列数据，其中 ECoG 和 MoCap 分别由 64 个通道和 3 个通道的数据构成的。由于最原始的 MoCap 数据不满足随附特征的条件独立假设，因此，他们利用偏最小二乘和支持向量机算法，推断出与预测猕猴行为有关的编码在 ECoG 信号中的那部分神经活动，并推测该信息是潜在神经活动的涌现特征。最后，作者们基于微观状态和计算所得的宏观特征，验证了因果涌现的存在。

### 3.1.2 基于机器学习的方法

Kaplanis 等人基于表示机器学习 (Representation learning) 的理论方法，用算法通过最大化  $\Psi$  (即公式 1) 而自发学习到宏观态变量  $V$  变量。具体的，作者们使用神经网络  $f_\theta$  来学习将微观输入  $X_t$  粗粒化成宏观输出  $V_t$  的表示函数，同时使用神经网络  $g_\phi$  和  $h_\zeta$  来分别学习  $I(V_t; V_{t+1})$  和  $\sum_i I(V_{t+1}; X_t^i)$  等互信息的计算，最后该方法通过最大化两者之间的差 (即  $\Psi$ ) 来优化神经网络。该神经网络系统的架构图如下图 a 所示。

图 b 展示了一个 toy 模型实例，微观输入  $X_t(X_t^1, \dots, X_t^6) \in \{0, 1\}^6$  存在 6 个维度，每个维度存在 0 和 1 两种状态， $X_{t+1}$  是  $X_t$  的下一时刻输出，宏观态为  $V_t = \oplus_{i=1}^5 X_t^i$ ，其中  $\oplus_{i=1}^5 X_t^i$  表示微观输入  $X_t$  前 5 个维度加和模 2 的结果，前后两个时刻的宏观态存在  $\gamma$  概率相等 ( $p(\oplus_{j=1..5} X_{t+1}^j = \oplus_{j=1..5} X_t^j) = \gamma$ )，微观输入的

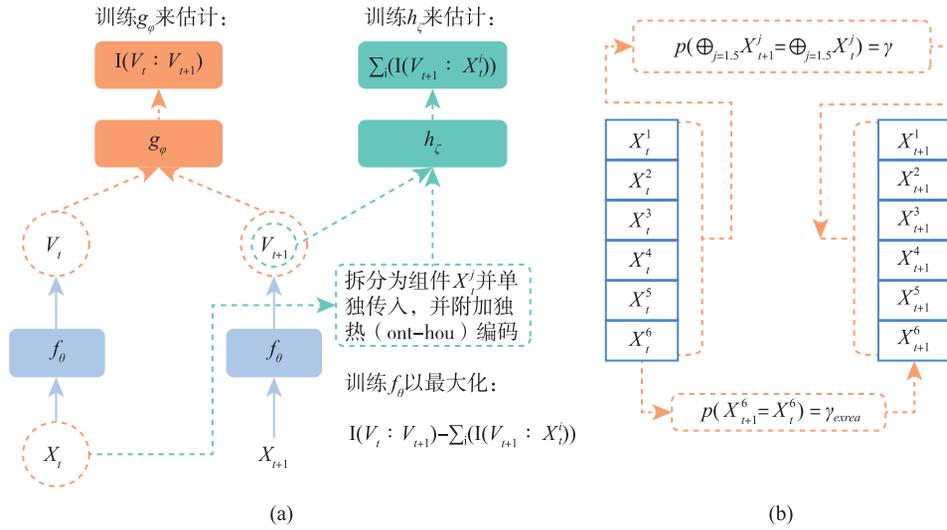


图 7

前后两个时刻的第 6 个维度以  $\gamma_{extra}$  概率的可能性相等 ( $p(X_{t+1}^6 = X_t^6) = \gamma_{extra}$ )。

结果表明，在图 b 所示的简单例子中，通过图 a 构建的模型最大化  $\Psi$ ，实验发现学习出来的  $\Psi$  和真实的 groundtruth  $\Psi$  近似相等验证了模型学习的有效性，该系统能够正确地判断出因果涌现的发生。但是该方法也存在着难以应对复杂多变量情形的问题，这是因为图中的右侧的神经网络数量是正比于宏微观变量对的数量，因此微观变量数（维度）越多，则神经网络的数量就会成比例增长，这会导致计算复杂度的提升。此外，该方法仅在很少的案例上进行测试，因此尚无法规模化。最后，更主要的是，因为网络计算的是因果涌现的近似指标，且得到的是涌现的充分非必要条件，所以上述近似算法的各种弊端会被此方法继承。

### 3.2 神经信息压缩方法

近年来，新兴的人工智能技术已经攻克一系列重大难题，同时机器学习方法配备了各种精心设计的神经网络结构和自动微分技术，可以在巨大的函数空间中逼近任何函数。因此，张江等尝试基于神经网络提出一种基于数据驱动的能够从时间序列数据中识别因果涌现的方法，该方法能自动提取有效的粗粒化策略和宏观动力学，克服了 Rosas 方法的种种不足。

在该工作中，输入的是时间序列数据 ( $X_1, X_2, \dots, X_T$ )，且  $X_t \equiv (X_t^1, X_t^2, \dots, X_t^p)$ ， $p$  表示输入数据的维数。作者假设，这组数据是由一个一般的随机动力系统产生：

$$\frac{dX}{dt} = f(X(t), \xi)$$

其中  $X(t)$  是微观状态变量， $f$  是微观动力学， $\xi$  表示系统动力学中的噪音，可以建模动力系统随机特性。但是， $f$  是未知的。

所谓的因果涌现识别问题是指这样的一个泛函优化问题：

$$\max_{\phi, f_q, \phi^\dagger} \mathcal{J}(f_q), s.t. \begin{cases} \|\hat{X}_{t+1} - X_{t+1}\| < \epsilon, \\ \hat{X}_{t+1} = \phi^\dagger(f_q(\phi(X_t))). \end{cases} \quad (2)$$

这里， $J$  为维度平均的  $EI$ （参见有效信息词条）， $\phi$  为粗粒化策略函数， $f_q$  为宏观动力学， $q$  为粗粒化后的宏观态维度， $\hat{X}_{t+1}$  是整个框架对  $t+1$  时刻的微观态的预测，这一预测是将  $t+1$  时刻的宏观态预测  $\hat{Y}_{t+1}$  进行反粗粒化操作 ( $\phi^\dagger$  为反粗粒化函数) 得到；这里  $\hat{Y}_{t+1} \equiv f_q(Y_t)$  为动力学学习器根据  $t$  时刻的宏观态  $Y_t$  对  $t+1$  时刻宏观态的预测，其中  $Y_t \equiv \phi(X_t)$  为  $t$  时刻的宏观态，它是对  $X_t$  进行粗粒化  $\phi$  而得来。最后，

将  $\hat{X}_{t+1}$  与真实的微观态数据  $X_{t+1}$  进行求差比较，即得到微观的预测误差。

整个优化框架如下图所示：

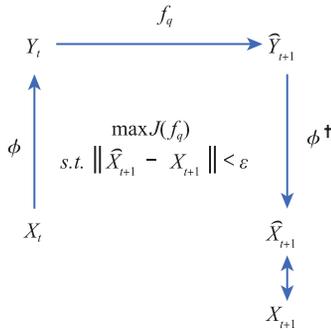


图 8

这一优化问题的目标函数为  $EI$ ，它是函数  $\phi, f_q, \phi^\dagger$  的泛函（这里宏观维度  $q$  是超参），因此较难优化，我们需要使用机器学习的方法来尝试解决。

### 3.1.1 NIS

为了识别系统中的因果涌现，作者提出一种神经信息压缩器（Neural Information Squeezer, NIS）神经网络架构，该架构基于一种编码器 - 动力学学习器 - 解码器框架，即模型由三个部分构成，分别用于对原始数据进行粗粒化得到宏观态、拟合宏观动力学和反粗粒化运算（将宏观态配合随机噪声解码为微观态）。其中，作者们用可逆神经网络（INN）构建编码器（Encoder）和解码器（Decoder），分别近似对应粗粒化函数  $\phi$  和反粗粒化函数  $\phi^\dagger$ 。之所以采用可逆神经网络是因为我们可以简单倒置该网络就可以得到反粗粒化函数（即  $\phi^\dagger \approx \phi^{-1}$ ）。该模型框架可以看成是一个神经信息压缩器，将包含噪声的微观态数据置入一个狭窄的信息通道，压缩成宏观态，丢弃无用的信息，从而使得宏观动力学的因果性更强，之后再解码成微观状态的预测。NIS 方法的模型框架如下图所示：

具体的，编码器函数  $\phi$  由两部分构成：

$$\phi \equiv \chi \circ \psi$$

其中  $\psi$  为一个可逆函数，由一个可逆神经网络

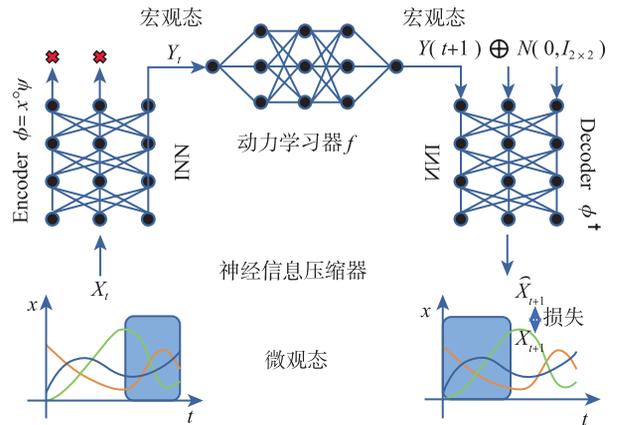


图 9

来实现， $\chi$  为投影函数，即去除  $p$  维向量中的后  $p-q$  个维度分量，这里  $p, q$  分别为微观态和宏观态的维度。 $\circ$  为函数的合成操作。

解码器为函数  $\phi^\dagger$ ，它定义为：

$$\phi^\dagger(y) \equiv \psi^{-1}(y \oplus z)$$

这里  $z \sim N(0, I_{p-q})$  为一个  $p-q$  维随机向量，服从标准正态分布。

然而，如果我们直接优化维度平均的有效信息会存在着一定的困难，文章并没有直接优化公式 1，而是采用了一种取巧的方法。为了解决这个问题，作者将优化过程分为两个阶段，第一个阶段为在给定宏观尺度  $q$  的情况下最小化微观态预测误差，即  $\min_{\phi, f_q, \phi^\dagger} \|\phi^\dagger(Y(t+1)) - X_{t+1}\| < \epsilon$  并得到最优的宏观态动力学  $f_q^*$ ；第二阶段为搜索超参  $q$ ，使得有效信息  $J$  能够最大化，即  $\max_q \mathcal{J}(f_q^*)$ 。实践证明，这种方法可以有效地找到宏观动力学和粗粒化函数，但是并不能真正地事先使  $EI$  最大化。

除了能基于时序数据自动识别因果涌现，该框架还有很好的理论性质，其中有两个重要定理：

**定理一：**神经信息挤压器的信息瓶颈，即对于任意的双射  $\psi$ 、投影  $\chi$ 、宏观动力学  $f$  以及高斯噪声  $z_{p-q} \sim N(0, I_{p-q})$ ，

$$I(Y_t; Y_{t+1}) = I(X_t; \hat{X}_{t+1})$$

恒成立，这意味着，编码器丢弃的所有信息实际上都是与预测无关的噪声信息。

**定理二：** 对于一个训练好的模型， $I(X_t; \hat{X}_{t+1}) \approx I(X_t; X_{t+1})$ ，因此，综合定理一和定理二，我们可以得到对于一个训练好的模型：

$$I(Y_t; Y_{t+1}) \approx I(X_t; \hat{X}_{t+1})$$

### 3.2.1.1 与经典理论的比较

NIS 框架与前面章节中提到的计算力学框架存在很多相似之处，NIS 可以被视为一种  $\epsilon$ -machine。计算力学中的所有历史过程构成的集合  $\bar{S}$  可以被看作是微观状态，所有  $R \in \mathcal{R}$  表示宏观状

态，函数  $\eta$  可以理解为一种粗粒化函数， $\epsilon$  可以理解为一种有效的粗粒化策略， $T$  对应于有效的宏观动力学。最小随机性指标特征表征了宏观动力学的确定性，在因果涌现中可以用有效信息替代。当整个框架训练充分的时候，可以精确地预测未来的微观状态时，编码的宏观状态收敛到有效状态，而有效状态可以被视为计算力学中的因果态。

同时 NIS 框架与前面提到的 G-emergence 理论也有相似之处，例如，NIS 同样采用了格兰杰因果的思想：通过预测下一个时间步的微观状态来优化有效的宏观状态。然而，这两个框架

之间有几个明显的区别：a) 在 G-emergence 理论中，宏观状态需要人工选择，而 NIS 则是通过自动优化粗粒化策略来得到宏观状态的；b) NIS 使用神经网络来预测未来状态，而 G-emergence 使用自回归技术来拟合数据。

### 3.2.1.2 计算实例

NIS 作者在弹簧振子模型中进行了实验，结果如下图所示，图 a 展示下一时刻通过编码的结果与通过宏观动力学的迭代结果线性重合验证了模型的有效性，图 b 展示了学习到的两个动力学和真实的动力学同样重合，进一步验证了模型的有效性，图 c 是模型多步预测的效果，预测和真实的

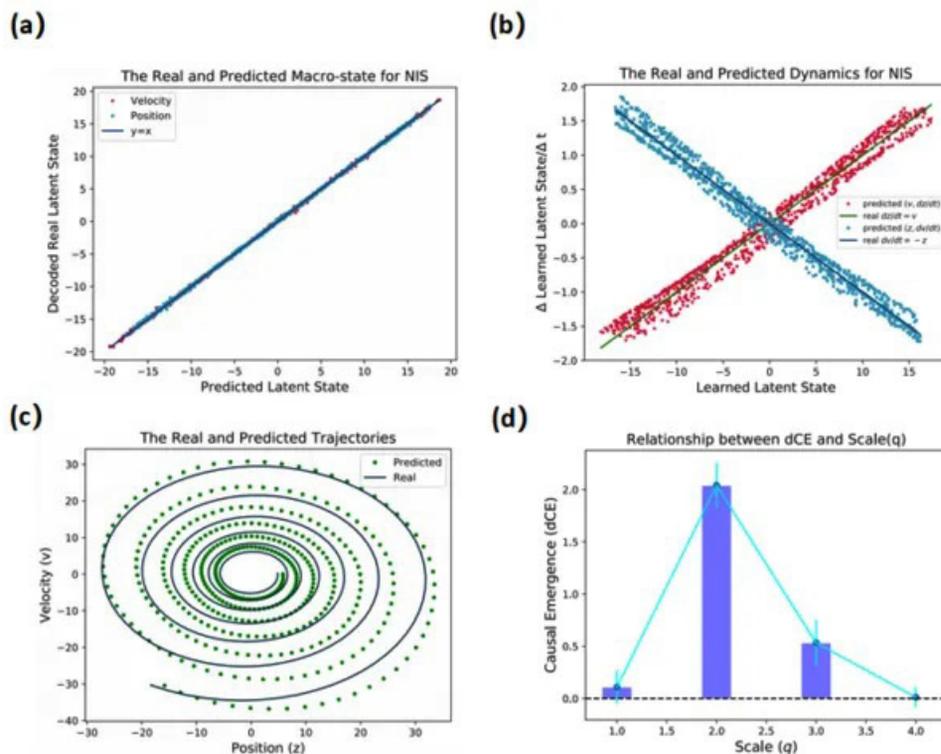


图 10

曲线很接近，图 d 展示了不同尺度下的因果涌现大小，发现在尺度为 2 时因果涌现最显著，对应了真实的弹簧振子模型也只需要两个状态（位置和速度）就可以描述整个系统。

3.2.2 NIS+

NIS 虽然率先提出了对 EI 进行优化，从而在数据中辨识因果涌现的方案，但是该方法存在一些不足：作者将优化过程分为两个阶段，但是并没有真正的最大化有效信息，即公式 1。因此，杨明哲等人进一步改进该方法，提出了 NIS+ 方案，通过引入反向动力学以及重加权技术，借助变分不等式将原始的最大化有效信息转换成最大化其变分下界来直接优化目标函数。

3.2.2.1 数学原理

具体地，根据变分不等式和逆概率加权方法，公式 2 所给出的带约束的优化问题可以转变为如下不带约束的最小化问题：

$$\min_{\omega, \theta, \tilde{\theta}} \sum_{i=0}^{T-1} w(x_i) \|y_i - g\theta'(y_{t+1})\| + \lambda \|\hat{x}_{t+1} - x_{t+1}\|$$

其中  $g$  是反向动力学，它可以通过神经网络来近似，并通过宏观态的数据对  $y_{t+1}, y_t$  训练得到。 $w(x_i)$  为逆概率权值，具体计算方式如下所示：

$$w(x_i) = \frac{\tilde{p}(y_i)}{p(y_i)} = \frac{\tilde{p}(\phi(x_i))}{p(\phi(x_i))}$$

其中  $\tilde{p}(y_i)$  是目标分布， $p(y_i)$  是数据的原始分布。

3.2.2.2 工作流与模型架构

下图展示了 NIS+ 的整个模型框架，图 a 是模型的输入：时间序列数据，可以是轨迹序列、连续图像序列以及脑电时间序列数据等；图 c 是模型的输出，包括因果涌现的程度、宏观动力学、涌现模式以及粗粒化策略；图 b 是具体的模型架构，区别于 NIS 方法，增加了反向动力学和重加权技术两部分。

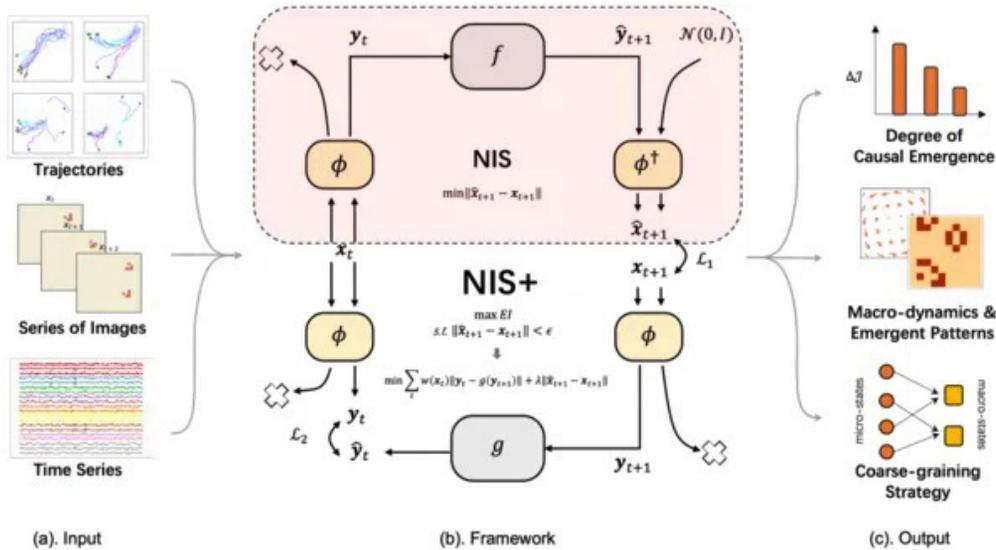


图 11

3.2.2.3 实例分析

文章对不同的时间序列数据集进行了实验，包括疾病传播动力系统模型 SIR 动力学、鸟群模型（Boids 模型）和元胞自动机：生命游戏所生成的数

据，以及真实人类被试的脑神经系统 fMRI 信号数据，这里我们选择鸟群和脑信号分别实验进行介绍说明。

下图为 NIS+ 学习 Boids 模型的群集行为的实验结果。（a）和（e）给出了不同条件下鸟群的实际和预

测轨迹。具体来说，作者将鸟群分为两个组，并且比较了在不同噪声水平 ( $\alpha$  分别为 0.001 和 0.4) 下的多步预测结果，在噪音比较小时预测很好，在噪音比较大时预测曲线会发散。(b) 展示了多步预测的平均绝对误差 (MAE) 随着半径  $r$  的增加而逐渐上升。(c) 展示了不同维度 ( $q$ ) 下的因果涌现度量  $\Delta J$  与预测误差 (MAE) 随着训练 epoch 的变化，作者发现在宏观态维度  $q = 8$  时因果涌现最显著。(d) 为宏观变量对微观变量

进行归因分析，得到的显著性图，直观地描述了学习得到的粗粒化函数。其中，每个宏观维度可以对应到每只鸟的空间坐标 (微观维度)，颜色越深表示关联度越高。这里用橙色点突出了每个宏观状态维度最大关联所对应的微观坐标，这些归因显著性值是使用积分梯度 (Integrated Gradient, 简称 IG) 方法得到的。横轴表示 16 只鸟在微观状态下的  $x$  和  $y$  坐标，纵轴表示 8 个宏观维度。淡蓝色的虚线区分了不同个体 Boid 的坐标，

而蓝色实线分隔了两个鸟群。(f) 和 (g) 表示不同噪声水平下因果涌现度量  $\Delta J$  和归一化误差 MAE 的变化趋势，(f) 表示外部噪声的变化 (即观测噪音加入到微观数据) 对因果涌现的影响，(g) 表示内在噪声 (用  $\alpha$  表示，通过修改 Boids 模型的动力学加入) 对因果涌现的影响。在 (f) 和 (g) 中，水平线表示违反公式 1 中误差约束的阈值。当归一化 MAE 大于阈值 0.3 时，约束遭到破坏，结果不可靠。

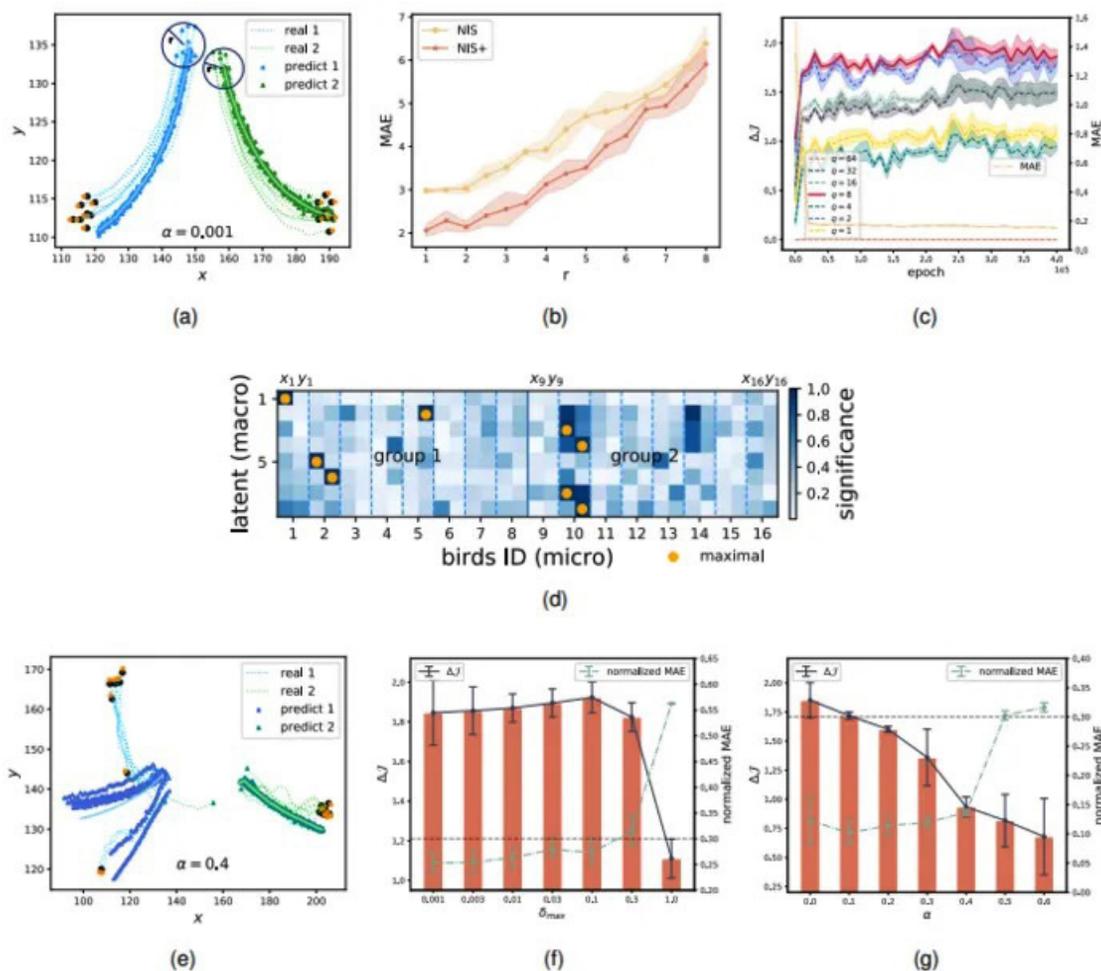


图 12

这组实验表明，NIS+ 可以通过最大化 EI 来学习宏观状态和粗粒化策略。这种最大化增强了模型对超出训练数据范围情况的泛化能力。学习到的宏观状态有效地识别了平均群体行为，并且可以使用梯度积分方法将其归因于个体位置。此外，因果涌现的程度随外在噪声的增加而增加，而随内在噪声的增加而减少。这一观察结果表明，模型通过粗粒化可以消除外在噪声，而不能削减内在噪声。

脑实验是基于真实的 fMRI 数据，该数据通过对 830 个人类被试做了两组实验得到。第一组是让被试执行看一段电影短片的视觉任务记录完成，第二组实验是让他们处于静息态下记录完成。由于原始维度比较高，作者们首

先通过使用 Schaefer atlas 方法对原始的 14000 维数据降维到 100 个维度，每个维度对应一个脑区。之后，作者们通过 NIS+ 学习这些数据，并提炼出 6 个不同宏观尺度下的动力学，图 a 展示了不同尺度下的多步预测误差结果，图 b 展示了在静息态和看电影视觉任务中 NIS 与 NIS+ 方法在不同宏观尺度上 EI 的对比。作者们发现在视觉任务中，宏观态维度在  $q=1$  时因果涌现最显著，通过归因分析发现视觉区发挥的作用最大（图 c），与真实的场景保持一致。图 d 展示了脑区归因的不同视角图。而在静息态下，1 个宏观维度不足以预测微观时间序列数据，因果涌现最大的维度是表现在 3-7 维之间。

这些实验表明 NIS+ 不仅可

以辨识数据中的因果涌现、发现涌现的宏观动力学和粗粒化策略，而且另外的实验还表明，NIS+ 模型还能够通过 EI 最大化而增加模型的分外泛化能力。

## 4. 应用

本小节主要讲解因果涌现在各个复杂系统中的潜在应用，包括：生物系统、神经网络、脑神经系统、人工智能（因果表示学习、基于世界模型的强化学习、因果模型抽象）以及在一些其他的潜在应用（包括意识研究和中国古典哲学）等。

### 4.1 复杂网络中的因果涌现

2020 年，Klein 和 Hoel 改进马尔科夫链上量化因果涌现的方法以应用到复杂网络中，作者借助随机游走子来定义网络中

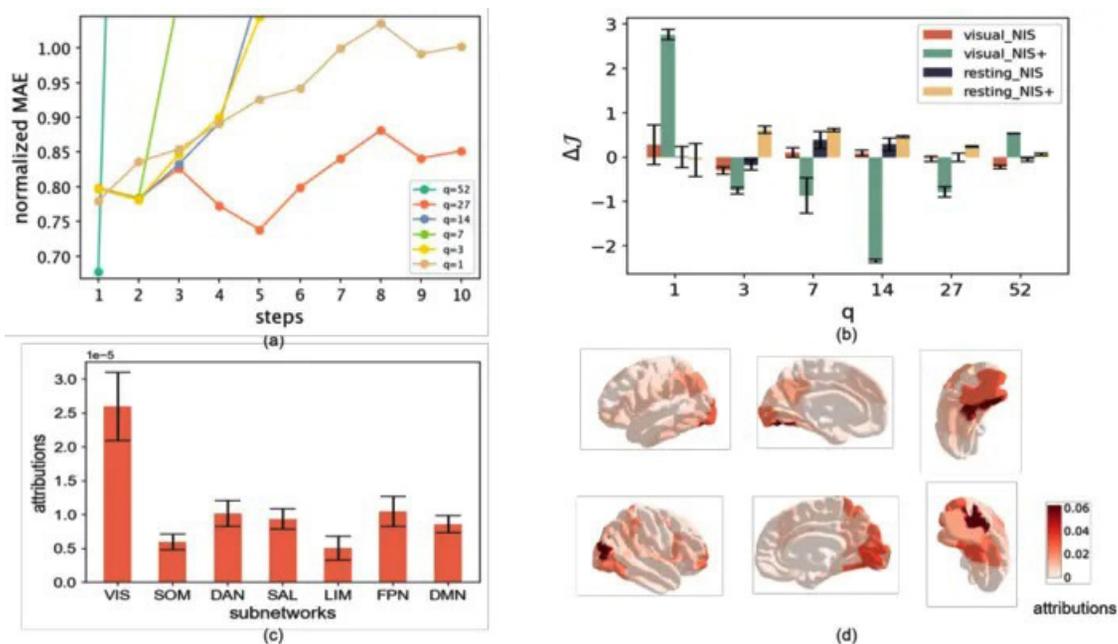


图 13

的马尔科夫链，将随机游走子放在节点上等价于对节点做干预，然后基于随机游走概率定义节点间的转移概率矩阵。同时作者将有效信息与网络的连通性建立联系，连通性可以通过节点的出边和入边的权重的不确定性来表征，基于此定义复杂网络中的有效信息。详细方法可以参考复杂网络中的因果涌现。

作者在随机网络 (ER)、偏好依附网络模型 (PA) 等人工网络以及四类真实网络中进行了实验比较，发现：对于 ER 网络来说，有效信息的大小只依赖于连接概率  $p$ ，并且随着网络规模的增大会收敛到数值  $-\log_2 p$ 。同时一个关键发现表明，EI 数值存在一个相变点，该相变点近似在网络的平均度 ( $\langle k \rangle$ ) 等于  $\log_2 N$  的位置出现，同样对应于 ER 网络随着连接概率增加而出现巨连通集团的相变点位置，超过该相变点随机网络结构不会随着其规模的增加而包含更多的信息。对于偏好依附模型网络来说，当网络度分布的幂律指数  $\alpha < 1.0$  时，有效信息的大小会随着网络规模的增加而增大；当  $\alpha > 1.0$  时，结论相反； $\alpha = 1.0$  刚好对应的无标度网络则是增长的临界边界。对于真实网络来说，作者们发现，生物网络因为具有很大的噪音，所以有效信息最低。然而，我们可以通过有效的粗粒化去除这些噪音，这就

使得生物网络相比于其他类型网络能够展现出更显著的因果涌现现象；而因为技术类型网络是更稀疏、非退化，因此，平均效率更高，节点关系也更加具体，所有有效信息也最高，但是难以通过粗粒化来增加因果涌现度量。

在该文章中，作者使用贪婪算法来粗粒化网络，然而对于大规模网络来说，这种算法效率很低。随后，Griegenow 等提出了一种基于谱聚类的方法来识别偏好依附网络中的因果涌现。相比贪婪算法以及梯度下降算法，谱聚类算法的计算时间更少，同时找到的宏观网络的因果涌现也更加显著。

#### 4.2 在生物网络上的应用

进一步，Klein 等人将复杂网络中的因果涌现方法扩展到了更多的生物网络中。前文已经指出，生物网络具有更大的噪音，这使得我们很难理解其内部的运作原理，这种噪音一方面来自系统的固有噪音，另一方面是由于测量或观察引入的。Klein 等进一步探索了生物网络中的噪音、简并性和确定性三者之间的关系以及具体含义，得出了一些有趣的结论。

例如，基因表达网络中的高确定性可以理解为一个基因几乎肯定会导致另一个基因的表达。同时生物系统在进化过程中也普遍存在高简并性现象。这两个因素共同导致，目前人们尚不清楚应该在何种尺度上分析生物系统

才能更好理解它们的功能。Klein 等分析了超过 1800 个物种的蛋白质相互作用网络，发现宏观尺度的网络具有更小的噪音和简并性，同时与不参与宏观尺度的节点相比，组成宏观尺度网络中的节点更具有弹性。因此，生物网络为了适应进化的要求，需要演化出宏观尺度以提高确定性来增强网络弹性以及提高信息传输的有效性。

Hoel 等在文章中借助有效信息理论进一步研究了生物系统中的因果涌现。作者将有效信息应用到基因调控网络上，以识别最能提供信息的心脏发育模型从而控制哺乳动物的心脏发育。通过量化酿酒酵母基因网络的最大联通集团中的因果涌现，文章揭示了富有信息的宏观尺度在生物学中是普遍存在的，以及生命机制本身也经常运行在宏观尺度上。该文章也为生物学家提供了一种可计算的工具体来识别最具有信息的宏观尺度，并且可以在此基础上建模、预测、控制和理解复杂的生物系统。

Swain 等在文章中探索了蚁群的交互历史对任务分配和任务切换的影响，使用有效信息研究噪音如何在蚂蚁之间传播。结果发现，蚁群之间历史交互程度影响任务的分配，并且具体交互中蚂蚁群体的类型决定了交互中的噪音。此外，即使当蚂蚁切换功能群时，蚁群涌现出来的凝聚力

也能保证群体的稳定，同时不同功能蚁群在维持蚁群凝聚力方面也发挥着不同的作用。

### 4.3 在人工神经网络上的应用

Marrow 等人在文章中尝试将有效信息引入神经网络，来量化和跟踪训练过程中神经网络因果结构的变化，其中有效信息用于评估节点和边对每层下游目标的因果的影响程度，这里每层神经网络的有效信息  $EI$  定义为：

$$I(L_1; L_2 | do(L_1 = H^{max}))$$

这里的  $L_1$  和  $L_2$  分别表示连接神经网络的输入和输出层，这里将输入层整体  $do$  成均匀分布，然后计算因果之间的互信息。有效信息可以被分解为灵敏性和简并性，这里的灵敏性定义为：

$$\sum_{(i \in L_1, j \in L_2)} I(t_i; t_j | do(i = H^{max}))$$

这里  $i, j$  分别代表输入层和输出层的任意神经元组合， $t_i$  和  $t_j$  分别表示输入和输出层中的神经元在神经网络机制不变的条件下，干预  $i$  为最大熵分布后的状态组合。也就是说，如果干预输入神经元  $i$  为均匀分布，则输出神经元也会发生改变，那么这一数值即度量二者之间的互信息。

这里应该区别于有效信息的定义，这里是对输入层中的每一个神经元分别进行  $do$  干预，然后将每两个神经元计算出来的互信息进行累加作为灵敏性的定义，简并性通过有效信息与灵敏性的差得到，定义为：

$$I(L_1; L_2 | do(L_1 = H^{max})) - \sum_{(i \in L_1, j \in L_2)} I(t_i; t_j | do(i = H^{max}))$$

通过观察模型训练过程中的有效信息，包括灵敏性和简并性的变化，就可以知道模型的泛化能力，从而帮助学者更好的理解和解释神经网络的工作原理。

### 4.4 在脑神经系统上的应用

脑神经系统是一个涌现的多尺度复杂系统，Luppi 等人基于整合信息分解，揭示了人类意识的协同工作空间。作者构建了脑认知的三层架构，包括：

外部环境、具体的模块以及协同全局空间。大脑的工作原理主要包括三个阶段：第一个阶段负责将来自多个不同模块的信息收集到工作空间中，第二个阶段负责在工作空间中整合收集到的信息，第三个阶段负责将全局信息广播到大脑的其他部分。作者在三类不同静息态的 fMRI 数据上进行实验，包括 100 个正常人、15 个参与麻醉实验的被试者（包括麻醉前、麻醉以及恢复三种不同状态）以及 22 个慢性意识障碍（DOC）的被试者。该文章使用整合信息分解得到协同信息和冗余信息，以及使用修正后的整合信息值  $\Phi_R$ ，来计算每两个脑区之间的协同和冗余值，从而得到每个脑区发挥更大作用的因素是协同还是冗余。同时，他们对比有意识人的数据，发现无意识人的整合信息发生显著降低的区域都属于协同信息发挥更大作用的脑区，同时发现整合信息显著降低的区域都属于 DMN（Default Mode Network）这样的功能区，从而定位到对于发生意识具有显著作用的脑区。

### 4.5 在人工智能系统上的应用

因果涌现理论与人工智能领域也存在着非常强的联系，这体现为：首先，因果涌现识别问题的机器学习解决方案其实就是一种因果表示学习的应用；其次，有效信息的最大化等技术也有望应用到因果机器学习等领域。

#### 4.5.1 因果表示学习

因果表示学习是人工智能中的一个新兴领域，它试图将机器学习中的两个重要领域：表示学习和因果推断结合起来，尝试结合各自的优势，自动提取数据背后的重要特征和因果关系。基于有效信息的因果涌现识别可以等价于一种因果表示学习任务。从数据中识别因果关系的涌现，等价于学习数据背后的潜在因果关系与因果机制。具体来说，我们可以把宏观状态看成因果变量，宏观动力学类比为因果机制，粗粒化策略可以看作是一个从原始数据到因果变量的编码过程或表示（Representation），有效信息可以理解为对机制的因果效应强度的衡量。

由于这两者存在很多相似之处，这就使得两个领域的技术和概念可以相互借鉴。例如，因果表示学习技术可以应用于因果涌现识别，反过来，学习到的抽象因果表征可以被解释为一种宏观状态，从而增强因果表示学习的可解释性。但是两者也存在显著

差异，主要包括两点：1) 因果表示学习假设其背后存在一个真实的因果机制，数据是由这个因果机制产生的，然而宏观层面涌现出的状态和动力学之间可能并不存在“真正的因果关系”；2) 因果涌现中的粗粒化后的宏观状态是一种低维的描述，然而因果表

示学习中并没有这个要求。从认识论的视角看，两者并不存在差异，因为两者所做的都是从观察数据中提取有效信息的，从而获得具有因果效应更强的表征。

为了更好地对比因果表示学习和因果涌现识别任务，我们列出了下表：

因果表示学习与因果涌现识别的比较

对比	因果表示学习	因果涌现识别
数据	由真实生活中某些因果机制产生的原始数据宏观状态	微观状态的观测（时间序列）
隐变量	因果表征	宏观状态
因果机制	因果机制	宏观动力学
数据和隐变量之间的映射	表征	粗粒化函数
因果关系优化	预测损失，解纠缠	$EI$ 最大化
目标	寻找原始数据的最优表示，以确保通过表示可以实现独立的因果机制	寻找一个有效的粗粒化策略以及具有强因果效应的宏观动力学

#### 4.5.2 有效信息在因果机器学习中的应用

因果涌现能够在分布外场景中增强机器学习的性能， $EI$  中引入的 *do* 干预捕获了数据生成过程中的因果依赖性，抑制了虚假相关，从而补充了基于关联的机器学习算法，建立了  $EI$  与分布外泛化 (Out Of Distribution, 简称 OOD) 的联系。由于有效信息的通用性，因果涌现可以应用于监督机器学习来评估特征空间  $X$  与目标空间  $Y$  之间的因果关系强度，从而提高从原因 (特征) 到结果 (目标) 的预测准确性。值得注意的是，对观测值从  $X$  到  $Y$  的直接

拟合足以满足具有 i.i.d. 假设的常见预测任务，这意味着训练数据和测试数据是独立同分布的。然而，如果样本是从训练分布之外抽取的，就必须学习一个从训练到测试环境的泛化表示空间。由于人们普遍认为因果关系的泛化性优于统计相关性，因此，因果涌现理论可以作为表征空间中嵌入因果关系的标准。因果涌现的发生揭示了目标的潜在因果因素，从而产生了一个关于分布外泛化的鲁棒表示空间。因果涌现可能为基于因果理论的分布外泛化提供一个统一的表征度量。 $EI$  也可以看作是分布外泛化的基于重加

权的去偏技术的一种信息论抽象。此外，我们猜想，分布外泛化可以在最大化  $EI$  的同时实现， $EI$  可能会在原始特征抽象的中期阶段达到顶峰，这与 OOD 泛化的思想一致，即少即是多。理想情况下，当因果涌现发生在  $EI$  的峰值处，所有非因果特征被排除，因果特征被揭示，从而产生最具信息量的表示。

##### 4.5.2.1 因果模型抽象

在复杂系统中，由于微观状态往往存在噪音，人们需要将微观状态进行粗粒化才能得到噪音更小的宏观状态，使得宏观动力学的因果性更强。同样对于解释

各类数据的因果模型也一样，由于原始模型过于复杂，或者计算资源受限，所以人们往往需要得到更加抽象的因果模型，并且保证抽象的模型尽可能保持原始模型的因果机制，这就是所谓的因果模型抽象（Causal Model Abstraction）。

因果模型抽象属于人工智能的一个子领域，它特别在因果推理和模型可解释性方面发挥着重要的作用，这种抽象可以帮助我们更好地理解数据中隐藏的因果机制，以及变量之间的相互作用。因果模型抽象通过评估一个高层次模型尽可能模拟一个低层次模型的因果效应的优化来实现。如果高层次模型能够概括低层次模型的因果效应，我们称这个高层次模型是低层次模型的因果抽象。

因果模型抽象讨论的也是因果关系与模型抽象（可以看成粗粒化过程）之间的相互作用。因此，因果涌现识别与因果模型抽象存在很多相似之处，可以把原始的因果机制理解为微观动力学，抽象出来的机制理解为宏观动力学。在神经信息压缩框架中（NIS），研究者对粗粒化策略和宏观动力学进行了限制，要求宏观动力学的微观预测误差要足够小以排除平凡解。这个要求也类似于因果模型抽象中希望抽象后的因果模型与原始模型要尽可能相似。但是两者也存在一些不同：

1) 因果涌现识别是对状态或数据进行粗粒化，而因果模型抽象是对模型进行粗粒化操作；2) 因果模型抽象中考虑了混肴因子，然而这一点却被因果涌现识别的讨论所忽略。

#### 4.5.2.2 基于世界模型的强化学习

基于世界模型的强化学习假设强化学习主体内部存在一个世界模型，从而可以模拟智能主体所面对环境的动力学。世界模型的动力学可以通过智能体与环境的相互作用来学习，从而帮助智能体对不确定的环境做出计划和决策。同时为了表示复杂的环境，世界模型一定是对环境的粗粒化描述，一个典型的世界模型架构总是包含一个编码器和一个解码器。

基于世界模型的强化学习与因果涌现识别也存在很多相似之处。世界模型也可以被视为一种宏观动力学，环境中的所有状态可以看作是宏观状态，这些可以看成是压缩后的，忽略了无关信息的状态，能捕捉环境中最重要的因果特征，以便智能体可以做出更好的决策。在规划（Planning）过程中，智能体也可以使用世界模型来模拟真实世界的动力学。

两个领域之间的相似性和共同特征可以帮助我们将一个领域的思想和技术借鉴到另一个领域。

例如，具有世界模型的智能体可以将复杂系统作为一个整体来进行交互，并从相互作用中获得涌现的因果规律，从而更好的帮助我们做因果涌现识别任务。反过来，最大化有效信息技术也可以被用于强化学习，使世界模型具有更强的因果特性。

## 4.6 其它潜在应用

除了上述应用领域之外，因果涌现理论对于其它重要问题还可能存在着巨大的潜在应用价值，例如它对于意识问题的研究以及在中国古典哲学的现代科学解释方面有一定的前景。

### 4.6.1 意识研究

首先，因果涌现理论的提出就与意识科学研究存在着巨大的联系，这是因为因果涌现理论的核心指标有效信息最早就是 Tononi 在研究意识的定量理论整合信息论中提出来的。后经过改造，才被 Erik Hoel 应用到了马尔科夫链上，并提出因果涌现概念。因此，从这个意义上说，有效信息其实是定量意识科学的副产品。

其次，因果涌现作为复杂系统中的重要概念在意识科学的研究中也起着重要的作用。例如，在意识领域中，一个核心问题是意识究竟是一个宏观尺度的现象还是微观尺度的现象？至今，尚没有直接证据表明意识发生的尺度是多大。因果涌现的深入研究，特别是结合脑神经的实验数据，

有可能回答意识现象的发生尺度问题。

再次，因果涌现有可能回答自由意志 (Free will) 问题。人有没有自由意志？我们做出的决定真的是我们意志的自由选择吗？还是有可能它仅仅是一种幻觉？事实上，如果接受因果涌现概念，并承认宏观的变量会对微观变量产生因果力，那么人们所有的决策其实都是脑系统自发完成的，而意识仅仅是对这一复杂决策过程进行了某种层面的解释，因而自由意志是一种涌现出的向下因果。这些问题的回答都有待因果涌现理论的进一步研究。

#### 4.6.2 中国古典哲学

与西方科学、哲学不同，中国古典哲学保留了一套完整而不同的对宇宙进行解释的理论框架，这包括阴阳、五行、八卦，也包括占卜、风水、中医等，并能对宇宙中的各类现象进行完全独立的解释。长久以来，东西方两套哲学始终难以融合。因果涌现思想有可能提供一套新的解释，从而弥合东西方哲学的冲突。

根据因果涌现理论，一套理论的好坏取决于因果性的强弱，也就是  $EI$  的大小。而不同的粗粒化方案会得到完全不同的宏观理论 (宏观动力学)。很有可能，在面对同样的复杂系统研究对象的时候，西方的哲学、科学体系给出的是一套比较具体而微观的因

果机制 (动力学)，而东方哲学则给出了一套更加粗粒化的宏观因果机制。根据因果涌现理论，或者是 Yurchenko 提出的因果等价原理 (Causal Equivalence Principle)，这二者完全有可能是相互兼容的。也就是说，对于同样一组现象，东西方按照不同的两套因果机制，都能够做出正确的预测，甚至是干预手段。当然，也有可能某类问题或现象中，更加宏观尺度的因果机制更具有解释力度或得出好的方案，有的问题或现象，则更加有利于更微观的因果机制。

例如，就用东方哲学中的五行概念来说，我们完全可以将五行理解成万事万物的五种宏观态，而五行的相生相克关系就可以被理解为是这五种宏观态彼此之间的一种宏观因果机制。那么，从万事万物中提炼出五行这五种状态的认知过程，就是一种粗粒化过程，它依赖于观察者的类象能力。因此，五行理论就可以看作是对万事万物进行抽象的因果涌现理论。同样地，我们还可以将因果涌现的概念应用到更多领域，包括中医、占卜、风水等。这些应用的共同点将会是，它的因果机制相对于西方科学更加简单，也有可能因果性更强，但是得到这种抽象的粗粒化过程则更加复杂，更加依赖于有经验的抽象者。这就解释了为什么东

方哲学都强调实践者自身的修为，这是因为，这些东方哲学理论将巨大的复杂性和计算量都放到了类象思维上。

## 5. 批判

纵观历史，关于因果关系和涌现的本体论和认识论方面一直存在长期的争论。

例如，Yurchenko 就在文献中指出”因果“(causation)这一概念往往是模糊的，应区分为原因 (cause) 和理由 (reason) 两种不同的概念，它们分别符合本体论和认识论的因果。其中，原因 (cause) 指的是充分导致结果的真实原因，而理由 (reason) 则仅仅是观察者对结果的解释。理由可能没有真正的原因那么严格，但它确实提供了一定程度的可预测性。同样，关于因果涌现的本质也存在争论。

因果涌现是否是一种独立于特定观察者而存在的真实现象？这里需要强调的是，对于 Hoel 的理论，不同的粗粒化策略可以导致不同的宏观动力学机制与不同的因果效应度量结果 ( $EI$ )。本质上，不同的粗粒化策略可以代表不同的观察者。Hoel 的理论通过干预将涌现与因果关系联系起来，以定量的方式引入了因果涌现的概念。Hoel 的理论提出了一个消除不同粗粒化方法影响的方案，即  $EI$  最大化。能够让  $EI$

最大的粗粒化方案就是唯一客观的方案。因此，对于给定的一组马尔科夫动力学，只有使  $EI$  最大化的粗粒化策略和相应的宏观动力学才能被认为是客观的结果。然而，当最大化  $EI$  的解不唯一的时候，也就是存在多种能够让  $EI$  最大化的粗粒化方案时，就会导致该理论的困难，一定程度的主观性就无法避免。

Dewhurst 对 Hoel 的理论进行了哲学上的澄清，认为它是认识论的，而不是本体论的。这表明，Hoel 的宏观因果仅仅是一种基于信息论的因果解释，而不涉及“真正的因果”。这也引起了对均匀分布假设的质疑（参见有效信息词条），因为没有证据表明它应该优于其他分布。

除此之外，Hoel 的  $EI$  计算以及因果涌现的量化，依赖于两个已知的前提因素：（1）已知的微观动力学；（2）已知的粗粒化方案。然而，在实践中，人们很少能够同时获得这两个因素，特别是在观察性研究中，这两个因素可能都是未知的。因此，这一局限性阻碍了 Hoel 理论的实际适用性。

同时有人指出，Hoel 的理论忽略了对粗粒化方法的约束，某些粗粒化方法可能导致歧义。此外，一些对状态的粗粒化操作和对时间的粗粒化操作的组合并不表现出可交换性，例如假定  $A_{m \times n}$  是对状态进行粗粒化操作（将  $n$  个状态合并为  $m$  个状态），这里的粗粒化策略是使得宏观状态转移矩阵有效信息最大的策略， $(\cdot) \times (\cdot)$  是时间粗粒化操作（将两个时间步骤合并为一个）。这样  $A_{m \times n} (TPM_{n \times n})$  就是对一个  $n \times n$  的  $TPM$  做粗粒化，粗粒化过程就简化为矩阵  $A$  与矩阵  $TPM$  的乘积。

那么，空间粗粒化和时间粗粒化的可交换性条件，就是如下等式：

$$\begin{aligned} & A_{m \times n} (TPM_{n \times n}) \times A_{m \times n} (TPM_{n \times n}) \\ &= A_{m \times n} (TPM_{n \times n} \times TPM_{n \times n}) \end{aligned} \quad (3)$$

左边表示的是先对连续两个时间步的状态做粗粒化，再将两个时间步的动力学  $TPM$  乘到一起，得到一

个两步演化的转移矩阵；方程右边表示先将两个时间步的  $TPM$  乘到一起，得到微观态的两步演化，再用  $A$  做粗粒化得到宏观的  $TPM$ 。该等式的不满足表明某些粗粒化操作会导致宏观状态的演化与微观系统演化后的粗粒化状态存在差异。这意味着需要对粗粒化策略添加某种一致性的约束，例如马尔科夫链可聚类的条件（lumpable），参见马尔科夫链的粗粒化词条。

然而，如文献中指出，通过在连续变量空间中最大化  $EI$  的同时考虑模型的误差因素，上述问题可以得到缓解。

不过，虽然机器学习技术促进了因果关系与因果机制的学习，以及对涌现属性的识别，但重要的是通过机器学习获得的结果是否反映了本体论的因果关系和涌现，或者它们仅仅是一种认识论现象？这一点则尚无定论。尽管机器学习的引入不一定能解决围绕本体论和认识论因果关系和涌现的争论问题，但它可以提供有助于减轻主观性的依赖。这是因为机器学习主体可以被视为一个“客观”的观察者，对因果关系和涌现做出判断，这种判断是独立于人类观察者的。然而，唯一解的问题在这一方法中仍然存在。机器学习的结果是本体论还是认识论的？答案是，结果是认识论的，其中认识主体是机器学习算法。然而，这并不意味着机器学习的所有结果都是无意义的，因为如果学习的主体得到了良好的训练，并且定义的数学目标得到了有效的优化，那么结果也可以被认为是客观的，因为算法本身是客观的，且透明的。结合机器学习方法可以帮助我们建立观察者的理论框架，并研究观察者与相应的被观察复杂系统之间的相互作用。

## 6. 相关研究领域

存在一些相关研究领域与因果涌现理论联系比较紧密，这里我们重点介绍与动力学模型约简、动力学模态分解以及马尔科夫链的简化三个相关领域的区别和联系。

## 6.1 动力学模型约简

因果涌现的一个重要的指标就是粗粒化策略的选取，而如果在微观模型已知的时候，对微观态的粗粒化就等价于对微观模型进行模型约简 (Model Reduction)。模型约简是控制论中的一个重要子领域，Antoulas 就曾经写过相关的综述文章。

模型约简，就是要将高维的复杂系统动力学模型进行化简、降维，用低维的动力学来描述原系统的演化规律，这一过程其实就是因果涌现研究中的粗粒化过程。对大尺度动力系统的近似方法主要有两大类，即基于奇异值分解的近似方法和基于 Krylov 的近似方法。前者基于奇异值分解，后者基于矩匹配。虽然前者具有许多理想的性质，包括误差界，但它不能应用于高复杂度的系统。另一方面，后者的优势在于它可以迭代实现，因此适用于高维度的复杂度系统。将这两种方法的优势相结合，就产生了第三类近似方法，即称为 SVD/Krylov 的方法。两种方法都是基于粗粒化前后输出函数的误差损失函数来对模型约简效果做评价的，因此，模型约简的目标就是寻找能使误差最小的约简参数矩阵。

一般情况下基于模型约简前后输出函数的误差损失函数可以用来判断粗粒化参数，这一过程

默认了系统约简的过程会损失信息量，因此误差最小化是判断约简方法有效性的唯一方法。但是如果从因果涌现角度考虑，有效信息会因为降维而增大，这也是因果涌现研究中的粗粒化策略和控制论中的模型约简最大的不同。当动力系统是随机系统的时候，直接计算损失函数会因为随机性的存在，导致其稳定性无法保证，因而约简的有效性也会无法准确测量。而本身就是基于随机动力系统的有效信息和因果涌现指标，一定程度上可以增加评判指标的有效性，使对随机动力系统的控制研究更加严谨。

## 6.2 动力学模态分解

除了动力学模型约简之外，动力学模态分解也和粗粒化有着密切的联系。动力学模态分解 (Dynamic Mode Decomposition, DMD) 模型的基本思想是直接从数据中得到流场中流动的动态信息，根据不同频率的流场变动寻找数据映射。该方法基于把非线性无穷维动力学转化为有穷维的线性动力学的方式，并采用了 Arnoldi 方法以及奇异值分解降维的思想，借鉴了 ARIMA、SARIMA 以及季节模型等许多时间序列的关键特征，被广泛的使用在数学、物理、金融等领域。动态模式分解按照频率对系统进行排序，提取系统的本征频率，从而观察不同频率的流动结构对

流场的贡献，同时动态模式分解模态特征值可以对流场进行预测。因为动态模态分解算法具有理论的严密性、稳定性、简易性等优点。在不断应用的同时，动态模态分解算法也在原有基础之上不断被完善，如与 SPA 检验结合起来，以验证股票价格预测对比基准点的强有效性以及通过联系动态模态分解算法和光谱研究的方式，模拟股票市场在循环经济当中的振动模式等。这些应用均能够有效地采集分析数据，并最终得到结果。

动力学模式分解，属于利用线性变换同时对变量、动力学、观测函数进行降维的方法。这种方法是另一种与因果涌现中粗粒化策略相近的，将误差最小化作为主要目标来进行优化的方法。模型约简和动力学模式分解虽然都和模型粗粒化十分接近，但是它们都没有基于有效信息的优化，本质上都是默认了一定程度上的损失信息，同时也不会增强因果效应的。在文献中，作者们证明了其实误差最小化解集包含了有效信息最大化的最优解集，因此如果要优化因果涌现，可以先最小化误差，在最小误差的解集中寻找最佳的粗粒化策略。

## 6.3 马尔科夫链的简化

马尔科夫链的简化 (或叫做马尔科夫链的粗粒化) 也和因果涌现有着重要的联系，因果涌现

中的粗粒化过程本质上就是马尔科夫链的简化。马尔科夫过程的模型简化是状态转移系统建模中的一个重要问题，它是通过将多个状态合并成一个状态以降低马尔科夫链的复杂度。

做简化的意义主要有三点，第一，我们在研究一个超大规模系统的时候，并不会关注每一个微观状态的变化。因此，在粗粒化中我们希望能过滤掉一些我们不感兴趣的噪声和异质性，而从微观尺度中总结出一些中尺度或宏观尺度的规律；第二，有些状态的转移概率非常相似，所以可以被看成同一类状态，对这种状态做聚类（也称为对状态做划分，即 Partitioning），从而得到新的更小的马尔科夫链可以减少系统表示的冗余性；第三，在用到马尔科夫决策过程的强化学习里，对马尔科夫链做粗粒化可以减少状态空间的大小，提高训练效率。在许多文献中，粗粒化（coarse-graining）和降维（dimension reduction）是等价的。

其中，对状态空间做粗粒化有硬分组（Hard Partitioning）和软分组（Soft Partitioning）两种。软分组可以看作是把微观状态打散重构出一些宏观状态的过程，并允许微观态的叠加而得到宏观态；而硬分组则是严格的微观态分组，把若干个微观状态分成一个组，不允许重叠和叠加（参见马尔科夫链的

粗粒化）。

马尔科夫链的粗粒化不仅要对状态空间做，也要对转移矩阵做，也就是根据状态的分组简化原转移矩阵以得到新的更小的转移矩阵。除此之外，还要对状态向量做约简。因此，一个完整的粗粒化过程需要同时考虑状态、转移矩阵、状态向量的粗粒化。于是，这就引出了一个新的问题，即状态分组得到的新马尔科夫链中的转移概率应该如何计算？同时，归一化条件是否能够得到保证？

除了这些基本保证之外，我们通常还要求对转移矩阵的粗粒化操作应该与转移矩阵是可交换的，这一条件能够保证经过粗粒化后的状态向量再经过粗粒化的转移矩阵（相当于宏观动力学）的一步演化，是等价于先对状态向量进行一步转移矩阵演化（相当于微观动力学），之后再行粗粒化的。这就同时为状态分组（状态的粗粒化过程）以及转移矩阵的粗粒化过程提出了要求。这一可交换性的要求，就导致人们提出了马尔科夫链可聚类性的要求。

针对任意的状态硬划分，我们可以定义所谓的可聚类性（lumpability）的概念。可聚类性（Lumpability）是一种对聚类的衡量，这个概念最早出现在 Kemeny, Snell 在 1969 年的有

限马尔科夫链（Finite Markov Chains）中。可聚类性（Lumpability）就是一个数学条件，用来判断“对于某一种硬分块的微观状态分组方案，是否对微观状态转移矩阵是可约简的”。不管状态空间按照哪一个硬分块方案做分类，它都有对应后续的对转移矩阵和概率空间的粗粒化方案。

假设对马尔科夫状态空间  $A$  给出了分组方法  $A=\{A_1, A_2, \dots, A_l\}$ ，这里  $A_i$  是状态空间  $A$  的任意一个子集，且满足  $A_i \cap A_j = \Phi$ ， $\Phi$  表示空集。 $s^{(t)}$  表示系统在  $t$  时刻的微观状态，微观状态空间为  $S=\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$  且微观状态  $s_i \in A$  都是马尔科夫状态空间中的独立元素，设微观状态  $s_k$  到  $s_m$  的转移概率为  $p_{s_k \rightarrow s_m} = p(s^{(t)} = s_m | s^{(t-1)} = s_k)$ ，微观状态  $s_k$  到宏观状态  $A_i$  的转移概率为  $p_{s_k \rightarrow A_i} = p(s^{(t)} \in A_i | s^{(t-1)} = s_k)$ ，则可聚类的充分必要条件为，对于任意一对  $A_i, A_j$ ，每一个属于  $A_i$  的状态  $s_k$  的  $p_{s_k \rightarrow A_j}$  都是相等的，即：

$$p_{s_k \rightarrow A_j} = \sum_{s_m \in A_j} p_{s_k \rightarrow s_m} = p_{A_i \rightarrow A_j}, \forall s_k \in A_i \quad (4)$$

关于具体的粗粒化马尔科夫链的方法，请参考马尔科夫链的粗粒化。○

来源：集智俱乐部

# 物理学遇见机器学习：深度学习的下一个突破可能来自统计物理学

文 / IBM 沃森研究中心研究员 涂豫海

## 1. 机器学习与蛋白质折叠问题

在根据序列确定蛋白质结构方面，AlphaFold 及其后续版本的表现堪称机器学习解决重要物理问题的典范。这是一个在生物物理学领域研究了多年的问题，该领域的研究者积极参与了一个被称为结构预测关键评估（the Critical Assessment of Structural Prediction, CASP）的两年一度的竞赛，其中各种方法都会与已知但尚未公布的数据进行对比评估。一个重要的里程碑是 AlphaFold 在 2018 年竞赛的总排名中位列第一，并在 2020 年再次重复了这一成就。到 2022 年第十五届 CASP 竞赛时，大多数参赛者都在其方法中采用了某种基于 AlphaFold 的理念。该方法已经变得如此普遍，以至于这个词已经开始被用作动词，例如“Can we AlphaFold our way out of the next pandemic?”（我们能否用 AlphaFold 摆脱下一次大流行？）。本期特刊中 Park 等人的论文为如何在现代计算系统上有

效地使用 AlphaFold2 提供了一个实用指南。

从蛋白质折叠应用的历史中可以获得一些有趣的启示。我和 Terry Sejnowski 两人在 20 世纪 80 年代末都在加州大学圣地亚哥分校（UCSD），当时他做了一个论文报告，是关于使用神经网络研究球状蛋白的二级结构。他的算法性能相当平庸，我们中的许多人在离开那次讲座时都在想，为什么有人会放弃传统的生物化学方法，而青睐我们现在称之为机器学习的方法。那么，从那时到 2018 年这 30 年间发生了什么？似乎有四个因素在起作用。

首先，用于解决这个问题的计算能力以几乎难以想象的速度增长。例如，1985 年左右的 Cray 2 超级计算机作为那个时代最快的计算机，运算速度达到 1.9 千兆浮点运算每秒（gigaflops）；而现在这大约相当于 iPhone 4 的计算能力。当下最先进的超级计算机运算能力已达到  $10^9$  千兆浮点运算每秒。在当时完全无法实现的计算，现在已变得轻而易举。关于

内存容量也可以举出类似的数据。可以说，如果相关研究人员未能获得这些计算能力，那么研究进展将会受到极大阻碍。

硬件改进是必要的，但还不够。第二个因素是各种机器学习技术的发明，从而能够从现有数据中学习预测模型。由于未能认识到 Minsky 和 Papert 在感知机研究中提出的著名的“否定性”（no-go）结论的严重局限性，神经网络领域在 20 世纪 80 年代仍处于低迷期。那时，人们才刚刚意识到带有隐藏层的“深度网络”可能开创新局面，这一进展始于玻尔兹曼机（Boltzmann machine）等结构的出现，并在随后发展出了反向传播训练算法。如今，transformer 架构、自编码器和对抗网络等理念已经彻底改变了人们对机器学习过程的理解。就 AlphaFold 的例子而言，transformer 理念似乎是绝对必要的。Martin 等人的论文讨论了 transformer 如何与更一般的机器学习概念相结合，这些概念可以追溯到 Hopfield 联想记忆模型。

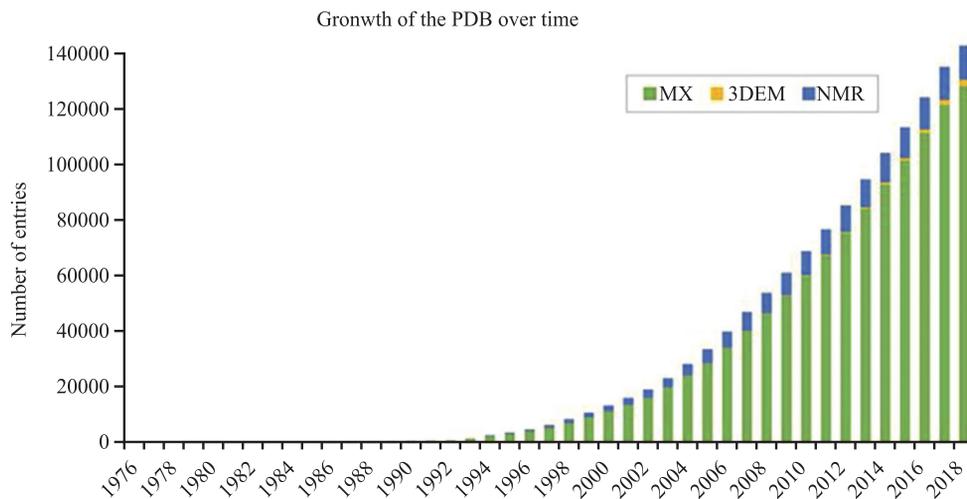


图1 2019年蛋白质数据库(PDB)核心档案库增长报告。每个柱状图的总高度表示累计发布的结构总数,柱状图中不同颜色代表不同的实验技术(MX(大分子晶体学)-绿色、3DEM(三维电子显微镜)-黄色、NMR(核磁共振)-蓝色)。引自参考文献。

下一个因素是训练所需的数据可用性。蛋白质数据库(PDB)成立于1971年,用于存储蛋白质结构信息。同样,可供所有研究人员使用的结构数据量出现了爆炸性增长。结构数量大约每6到8年翻一番;到2024年初,PDB数据库已超过20万个结构,相比之下1990年仅有约1000个结构;参见图1。但这并不是唯一重要的数据来源。正如Martin等人的文章所述,蛋白质折叠领域的许多进展源于这样一个认识:通过比较不同生物体中同一蛋白质的序列,可以获得有关接触图谱(contact map)的重要信息。接触图谱是一种矩阵表示,显示了沿主链相距较远的残基在折叠结构中可能在三维空间中靠近的概率。这里的核心思想源于直接耦合分析(direct coupling analysis,

DCA)等算法的研究,即,从一个物种到另一个物种的演化过程中,一对接触的残基必须共同进化以维持这种接触。因此,对相关进化的观察可以帮助识别这些接触。得益于测序领域令人惊叹的技术进步,过去十年中比较基因组学数据呈现出海啸般的增长。

最后一个,可能也是最有兴趣的因素,这个问题对机器学习研究的未来发展有着重要影响。问题是:过去三十年使用传统技术对蛋白质折叠进行的大量理论研究,到底有多重要?更简单地说,如果在一个平行宇宙中,在AlphaFold时代之前没有人关注蛋白质折叠计算,我们现在的研究进展会落后多少?当然,这个问题不可能有确切答案,但我们认为理论研究确实是当前进展得以实现的重要推手。我们已经提到,使用比较基因组学数

据的想法就源于理论研究群体。一个同样重要的想法是将结构数据编码到标准生物物理模型中,这种方法既利用了物理洞见又运用了测量信息。此外,由氨基酸序列预测蛋白质结构作为蛋白质折叠在工程应用方面的进步,不应与最小阻挫(minimal frustration)、折叠漏斗(folding funnel)等概念所带来的蛋白质折叠理论进步混为一谈。这些概念的重要性是全局的,在其他的背景下也有应用,包括分子水平和细胞水平。而且,即使从纯实用的角度来看并非必需,拥有“人类可理解的”方法有时也是很好的。

这一研究方向当前面临哪些挑战?首先是那些不存在唯一结构的系统,在这些系统中,折叠问题转化为寻找一个结构集合以及与之相伴随的结构之间转换

的动力学。这类系统包括内在无序蛋白质 (intrinsically disordered proteins) 以及基因组折叠。另一个方向涉及生物分子相互作用的研究, 其中 Alpha-Multimer 的纯机器学习方法在许多应用中尚未被证明足够可靠。Lupo 等人的论文试图通过应用语言模型来更好地对齐蛋白质-蛋白质界面处相关的相互作用序列, 以解决这个问题。此外还应当注意到 T 细胞受体对抗原的识别问题, 这种抗原识别是适应性免疫系统的关键组成部分。在这方面, 最近的研究则通过使用语言模型来解决这个问题, 与之竞争的还有混合方法, 这类方法整合了结构数据但也因此会受到结构数据缺乏的限制。

## 2. 机器学习的扩展

生物物理学是探索机器学习应用的一个自然途径。与物理学的其他许多领域不同, 大多数与生命世界相关的实验系统都极其复杂, 因此从第一性原理建立模型的能力相当有限。以分子尺度之上的一个例子来说, 不可能有任何第一性原理模型能够恰如其分地处理细胞集体运动所涉细胞机制的全部复杂性。这里没有纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程可以来救场, 因此人们自然会思考, 是否可以用纯数据驱动模型来有效替代手工

构建的模型。研究者们正在多个细胞运动实验系统中积极研究该问题, 当然, 许多生物医药领域的工作也在深入研究该问题, 例如数字病理学方面的工作。值得注意的是, 我们可以尝试通过机器学习来推导出更好的手工模型 (参见文献 38); 但目前尚不清楚为什么这样做会比直接使用学习到的神经网络预测结果更好。

比起上述情况, 或许更令人惊讶的是, 机器学习方法正在渗透到那些名义上具有可靠计算框架的物理系统研究中。Yu 和 Wang 的论文很好地总结了这些系统。一种观点认为, 即使在有第一性原理模型可用的情况下, 机器学习也可以加速计算。Kochkov 等人就持有这种观点, 他们明确关注前面提到的用于流体动力学的纳维-斯托克斯方程。也许在那些原则上可知但可能过于复杂而难以实现的物理问题中, 这种方法会更有说服力; 气候模拟器中的云模型可能就是这样一个例子。总体上看, 在结合传统建模的可解释性与机器学习的泛化能力方面, 似乎还有很大的进步空间。

如果我们关注于某个非常具体的物理系统的模型, 为获得有意义的结果, 通常必要的大规模计算是可以承受的; 并且, 随着计算能力持续指数增长, 这变得越来越容易。然而, 正如 King 等

人在本期关于材料组装的论文中所强调的那样, 当任务是设计新事物时, 这会变得困难得多。这个挑战需要一个迭代过程, 即在微观尺度上选择相互作用, 并最终在更大尺度上产生某种功能性行为。这个迭代过程通常涉及某种功能性度量 (measure) 的梯度下降, 但作为收敛过程的一部分, “正向” 问题必须被计算多次。正如该论文所讨论的, 这个问题可以通过机器学习的思想得到极大改善, 包括自动微分的概念, 它能够将大尺度误差 “反向传播” 到微观自由度的必要改变中。当然, 这个思想原本是神经网络模型中训练隐藏层的算法核心, 但现在, 这个理念可以自动应用于任何大规模计算。

当人们思考机器学习及其在物理学中的应用时, 弦论可能不会立即浮现在脑海中。然而, 弦论研究者们正在积极探索机器学习方法是否有用。当然, 弦论试图构建一个 “万物理论”, 通过存在于 11 维空间中的 “弦” (一维延展的量子对象) 来解释所有基本粒子及其相互作用。机器学习被用来寻找方法将这个 11 维空间压缩到我们体验的 4 维世界。寻找合理的紧致化是一个非常困难的计算问题, 而这可以通过机器学习的理念得到改善。谁知道呢?

在机器学习与物理学 (ML-Physics) 交叉领域, 还有最后一

个正在研究的方向。一些研究组正在尝试使用机器学习方法从数据中自动发现新方程；想象一下，利用行星数据来尝试同时学习牛顿运动定律和引力的平方反比定律。这个想法在 Yu 的论文中有简要概述，并提供了相关参考文献。我们可以将这项努力视为试图最终将理论物理学家用其人工智能版本取代。不过在机器能够观察天体物理数据并发现正确的理解框架是四维时空中的黎曼几何之前，我们对自己的工作还不用担心。

### 3. 物理能为机器学习做什么？

当然，机器学习的影响远不止于推进物理科学。深度学习神经网络 (Deep learning neural network, DLNN) 模型在图像识别、机器翻译、游戏等领域取得了一连串快速而巨大的成功，而且正如我们已经讨论过的，甚至解决了蛋白质折叠这样长期存在的重大科学挑战。无论好坏，像 ChatGPT 这样的最新生成模型正从根本上改变着我们这个时代的社会、经济和政治格局。

然而，最近深度学习神经网络令人难以置信的成功产生了一个副作用，即人们为了追求快速、狭隘的应用驱动型发展，而忽视了其理论动机和基础。这正在逐渐导致越来越多的次优实践，包括在缺乏理论指导的优化和正则

化步骤 (optimization and regularization procedure) 所涉及的大量超参数上耗费大量计算和时间进行调优，对高精度编码参数的低效利用，对昂贵标记数据的低效利用，最终结果缺乏可重复性，以及滥用这项强大技术的可能性。发展过参数化连接主义机器学习模型 (如深度学习神经网络) 的理论基础，将有助于避免此类问题，从而简化其优化过程，并实现用更少数据训练出稳健模型。同时，规范性理论提供的预测可以指导改进未来的架构和训练范式。

人工神经网络 (Artificial neural network, ANN) 模型源于统计物理学和神经科学这两个自然科学学科的结合。从本质上讲，人工神经网络描述了一组高度抽象的“神经元”在网络中通过自适应方式相互作用而产生的涌现 (集体) 行为，这种网络与大脑中的真实神经网络有某些相似之处。模型动力学使人工神经网络能够进行关联和学习。从历史上看，统计物理学和神经科学在人工神经网络的创立和早期发展中都发挥了开创性作用。McCulloch 和 Pitts 在 1943 年为生物神经网络建模首次引入线性-非线性人工神经元以及神经元之间的突触权重，这至今仍是现代深度学习神经网络的基本构建块。统计物理学在 80 年代末和 90 年

代人工神经网络的初期发展和理论理解中也发挥了重要作用，推动了诸多关键发展，包括 Hopfield 模型、玻尔兹曼机以及自旋玻璃 (spin-glass) 理论的神经网络应用等。

现在有什么不同？在基本层面上，没有太大变化，McCulloch-Pitts 神经元仍然是所有深度学习算法的基本构建块，线性求和与非线性激活仍然是单个神经元层面的基本计算过程。然而，规模却有着巨大的差异。正如在前面蛋白质折叠背景中所讨论的，我们现在拥有海量数据来训练大型人工神经网络模型；反过来，这些模型可以通过使用大量参数来吸收大型数据集中的信息。这些大模型的架构比 Rosenblatt 的原始感知器模型复杂得多，例如，对现代大语言模型 (large language model, LLM) 来说 transformer 架构至关重要。当然，这些大型人工神经网络的性能远远超出了我们基于观察单个神经元所形成的预期。

这让我们想起 P. W. 安德森 (Anderson) 的著名论断：“多者异也” (More is different)，他提出整个系统不仅仅是其各个部分的总和，系统中各个部分的相互作用可以产生涌现 (不同的) 行为。安德森这句名言激励了几代物理学家研究复杂多体系统的涌现行为，我们也想用它作为口

号，号召物理学家们来研究出现在（有时）庞大但始终具有良好结构的人工神经网络中的迷人涌现行为——学习（learning）。这些研究需要回答一些普遍性问题：学习如何从神经元相互作用中产生，深度学习神经网络究竟学到了什么，以及它们是否能够泛化所学到的知识。

确实，我们认为深度学习的下一个突破可能来自于基于统计物理学概念和方法建立的坚实理论基础。这将与不断推出的更先进的深度学习神经网络算法相辅相成，这些算法将加快物理和生物世界的科学发现步伐。这两个相互关联的新兴研究主题——基础理论和复杂应用——将极大地推进科学和人工智能技术的发展。在下文中，我们将在深入探讨几个可能取得进展的有前景的方向之

前，先介绍描述机器学习过程的一般框架。我们的讨论将简要概述本特刊中与这些方向相关的已发表论文。

### 3.1 机器学习的中心法则

在 Ambrose 等人所著的《学习如何运作？》（*How learning works?*）一书中，学习被定义为“一个导致变化的过程，这种变化源于经验，并增加了提高未来表现和学习能力的潜力”。虽然这本书是在人类（学生）学习的背景下写成的，但这个简明的学习定义同样可以用来描述机器学习。在图 2 中，我们展示了机器学习（如基于神经网络的深度学习）的关键组成部分和 workflows，我们称之为机器学习的“中心法则”。机器学习过程的目标是学习一个能够捕捉观测数据所代表的外部世界内在属性的模型。该模

型具有特定的结构，即函数形式，并由其参数（在神经网络模型中称为权重）来参数化。遵循 Ambrose 等人给出的定义，在学习过程的训练阶段，模型中的参数会发生变化，这种变化源于对经验（或者机器学习所说的训练数据）的训练。一旦经过训练，我们可以通过训练后模型在未见过的测试数据上的表现，以及训练后模型是否为未来学习形成了良好的基础（起点）来评估其学习质量。

图 2 所示的机器学习工作流程立即提示了机器学习中的两个重要问题。第一个问题关注学习动力学（learning dynamics）。具体来说，给定训练数据时，模型的参数如何变化？通常的学习过程是通过最小化损失函数来进行的，损失函数刻画了模型对训练数据的拟合程度。从一组初始

## The “Central Dogma” of Machine Learning

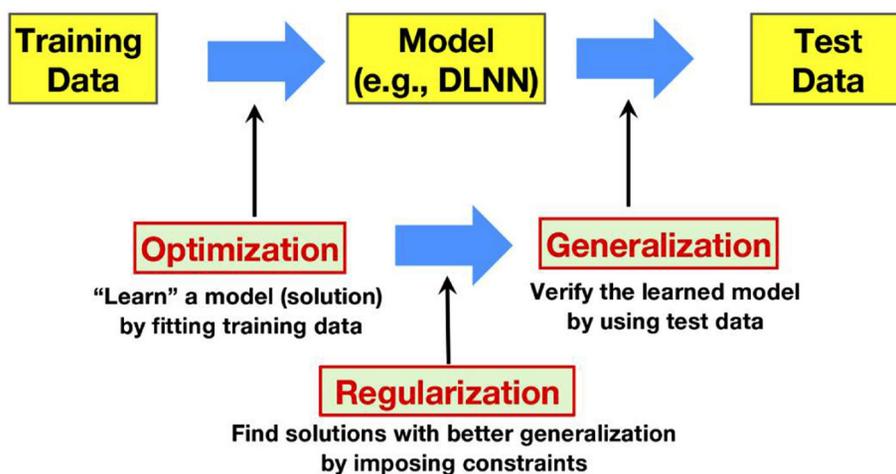


图 2 机器学习中主要步骤和工作流程的说明。用红色突出显示的是可能通过基于物理的方法解决的三个方向。

参数值开始，参数在损失函数的指导下在高维参数空间中迭代更新，直到达到最小值。模型在这样的最小值处的参数构成了问题的一个解。优化过程，即参数更新序列，可以被视为以更新步为时间的学习动力学。第二个问题处理泛化问题。通常，深度学习神经网络是过参数化的。因此，拟合训练数据这一问题有许多可能的解（最小值）。问题在于哪个解具有更好的泛化性，即在训练过程未使用的测试数据上表现更好。如果我们知道什么类型的解具有更好的泛化能力，一个相关的问题是我们可以使用什么正则化项（除了损失函数之外）来推动系统朝着那些更具可泛化性的解发展。在接下来的两节中，我们将更详细地深入探讨这两个一般性问题，并强调这些方向上的一些最新发展。

### 3.2 随机学习动力学：从涨落的损失景观上滚落

人工神经网络中的一般优化策略包括通过跟随损失函数的梯度来更新权重，这种方法称为梯度下降（gradient descent, GD）。鉴于深度学习神经网络的前馈架构，梯度下降可以通过反向传播（back-propagation）高效实现。然而，如果使用在所有训练数据上取平均的损失函数，梯度下降对大型数据集来说在计算上将是不可行的。为了规避大数据集问题，可利用随机梯度下降（stochastic gradient descent, SGD）方法代替梯度下降，该方法在每次迭代时会随机选择一个样本子集（小批量），并用其更新权重。值得注意的是，随后人们发现随机梯度下降对于在深度学习神经网络中找到更具泛化能力的解同样至关重要。

然而，尽管深度学习取得了巨大成功，但我们仍未充分理解，随机梯度下降为什么能在高维非凸损失函数（能量）景观中有效地学到好的解决方案。随机性似乎是随机梯度下降的关键，但这也使其更难理解。幸运的是，许多物理和生物系统都包含这样的随机元素，例如布朗运动和随机生化反应。并且我们已经开

发出了强大的工具，来理解具有多个自由度的随机系统中的集体行为。事实上，统计物理学和随机动力系统理论中的概念和方法最近已被用于研究深度学习神经网络中的随机梯度下降动力学、损失函数景观及它们之间的关系。

为了展示这种基于物理学的方法在理解深度学习神经网络方面的实用性，我们简要描述一个研究随机梯度下降学习动力学的理论框架，及从中获得的一些有趣见解。我们首先将基于随机梯度下降的学习过程视为一个随机动力系统。像神经网络（neural network, NN）特别是深度神经网络（deep neural network, DNN）这样的学习系统具有大量（ $N$ ）的权重参数  $w_i$  ( $1, 2, \dots, N$ )。对于监督学习（supervised learning），我们有  $M$  个训练样本，每个样本都有一个输入  $\bar{X}_k$  和一个正确输出  $\bar{Z}_k$ ，其中  $k=1, 2, \dots, M$ 。对于每个输入  $\bar{X}_k$ ，学习系统会预测一个输出  $\bar{Y}_k = G(\bar{X}_k, \bar{w})$ ，其中输出函数  $G$  取决于神经网络的架构和其权重  $\bar{w}$ 。学习的目标是找到权重参数以最小化预测输出和正确输出之间的差异，这种差异由整体损失函数（或能量函数）刻画：

$$L(\bar{w}) = M^{-1} \sum_{k=1}^M d(\bar{Y}_k, \bar{Z}_k) \quad (1)$$

其中  $d(\bar{Y}_k, \bar{Z}_k)$  是  $\bar{Y}_k$  和  $\bar{Z}_k$  之间的距离度量。这里，一个典型的距离度量是交叉熵。

具体来说，随机梯度下降中第  $t$  次迭代的权重  $w_i$  ( $1, 2, \dots, N$ ) 的变化由下式给出：

$$\Delta w_i(t) = -\alpha \frac{\partial L^{\mu(t)}(\bar{w})}{\partial w_i} \quad (2)$$

其中  $\alpha$  是学习率， $\mu(t)$  表示第  $t$  次迭代使用的随机小批量。大小为  $B$  的小批量  $\mu$  的小批量损失函数（minibatch loss function, MLF）定义为：

$$L^{\mu}(\bar{w}) = B^{-1} \sum_{l=1}^B d(\bar{Y}_{\mu_l}, \bar{Z}_{\mu_l}) \quad (3)$$

其中  $\mu_l$  标记随机选择的  $B$  个样本。

在这里，我们引入小批量损失函数系综 (ensemble)  $\{L^\mu(\vec{w})\}$  这个关键概念，即一个能量景观的系综，每个景观来自于一个随机小批量。整体损失函数  $\{L^\mu(\vec{w})\}$  只是小批量损失函数的系综平均： $L \equiv \langle L^\mu \rangle_\mu$ 。随机梯度下降噪声来自小批量损失函数与其系综平均之间的变化： $\delta L^\mu \equiv L^\mu - L$ 。通过采用连续时间近似并保留方程 (2) 中的一阶时间导数项，我们得到随机梯度下降的随机偏微分方程如下：

$$\frac{\partial \vec{w}}{\partial t} = -\alpha \frac{\partial L}{\partial \vec{w}} + \vec{\eta}(\vec{w}) \quad (4)$$

其中时间  $t$  和本研究中的所有时间尺度都以小批量迭代时间  $\Delta t = 1$  为单位来度量。连续时间极限相当于考虑远大于  $\Delta$  的时间尺度，例如，一轮 (epoch) 的时间是  $M/B (>> 1)$ 。方程 (4) 类似于统计物理学中的朗之万方程 (Langevin equation)。第一项  $-\alpha \frac{\partial L}{\partial \vec{w}}$  是由整体损失函数  $L$  支配的确定性梯度下降，类似于物理学中的能量函数。第二项是随机梯度下降噪声项  $\vec{\eta} \equiv -\alpha \nabla_{\vec{w}} \delta L^\mu(\vec{w})$ ，其均值为零  $\langle \vec{\eta} \rangle = 0$ ，等时协方差矩阵为

$$C_{ij}(\vec{w}) \equiv \langle \eta_i \eta_j \rangle = \alpha^2 \times \left\langle \frac{\partial \delta L^\mu}{\partial w_i} \frac{\partial \delta L^\mu}{\partial w_j} \right\rangle_\mu \quad (5)$$

该矩阵明确依赖于  $\vec{w}$ ，其给出了一种复杂形式的乘性噪声。对于给定的网络架构，学习动力学因此可以映射为一个“学习粒子”的随机运动，该粒子的坐标是网络的权重。特别地，随机梯度下降学习算法对应于学习粒子在涨落的能量景观中的下降过程，其由朗之万方程 (方程 2) 支配，包含一个确定性梯度下降项和一个噪声项，其中噪声项的协方差矩阵由方程 5 给出。

随机梯度下降学习动力学中最不寻常和最有趣的部分来自噪声项。正如 Chaudhuri 和 Soatto 首次指出的，与平衡物理系统中噪声强度由热温度给定的情况不同，随机梯度下降动力学是高度非平衡的，因

为随机梯度下降噪声既不是各向同性的也不是均匀的。从其定义来看，随机梯度下降噪声依赖于损失景观本身。其中最有趣的一个发现是随机梯度下降噪声的协方差矩阵与损失函数的 Hessian 矩阵高度相关：它们的特征方向高度对齐，且相应的特征值高度相关。特别是，在损失景观中较陡峭的方向上 (Hessian 矩阵中较大的特征值)，随机梯度下降噪声也更大。这导致在所有方向上权重方差与损失景观平坦度之间存在稳健的反比关系，这与平衡统计物理学中的涨落 - 响应关系 (fluctuation - response relation, 又称爱因斯坦关系) 相反。

越来越多的经验证据支持这样一个观点：“好的” (可泛化的) 解存在于损失函数的平坦 (浅) 极小值处；然而，对于基于随机梯度下降的算法如何在高维权重空间中找到这些平坦极小值，我们仍然知之甚少。在随机学习动力学框架内获得的“反爱因斯坦关系”表明，随机梯度下降充当了一个依赖于景观的退火算法。随机梯度下降的有效温度随着景观平坦度而降低，因此系统倾向于寻找平坦的极小值而非尖锐的极小值。正如最近一篇使用福克 - 普朗克方程 (Fokker-Planck equation) 研究随机梯度下降学习动力学权重分布的论文所示，随机梯度下降在有效损失函数中引入了一个依赖于平坦度的项，该项使系统倾向于更平坦的极小值。

神经网络模型中的一个重要类别是生成模型，它们能够通过对现有样本的训练来生成新的样本。一个著名的早期例子是生成对抗网络 (generative adversarial network, GAN) 模型，已经有工作使用随机动力系统方法对其学习动力学进行了研究。事实上，一些最成功的生成模型，如基于扩散的模型，都起源于物理学，并因此为基于物理学的研究提供了广阔空间。在本特刊中，Zdeborova 等人从自旋玻璃的视角对不同生成模型进行了全面比较，这为理解这些强大生成模型的能力和局限性提供了理论见解。

### 3.3 泛化：高维的祝福与诅咒

物理学中的大多数问题都是过度约束的（或欠参数化的）。例如，在一个具有  $N$  个氨基酸的蛋白质折叠问题中，即使我们只考虑对的相互作用能量，也有  $\sim N^2$  个约束，远高于  $\sim 2N$  个自由度（即一维链上氨基酸的独立坐标）。通常，

一个过度约束的问题具有唯一解。这种情况如图 3A 所示，其中能量景观具有唯一的最小值，对应于折叠蛋白质的天然结构。通过最小化整体能量函数来解决过度约束的问题，例如从头算起的蛋白质折叠问题是一个众所周知的难题。另一方面，深度学习神经网络是过参数化的。参数（权重）的数量远大于数

据中的内部自由度。深度学习神经网络中拥有大量参数的优势在于它使找到解（损失景观中的最小值）相对容易。然而，参数空间高维性的诅咒在于存在许多解（损失函数的最小值），如图 3B 所示。因此，重要的问题变成了哪一个解对测试数据表现更好，即哪个解具有更好的泛化能力。

#### Landscape and Solutions

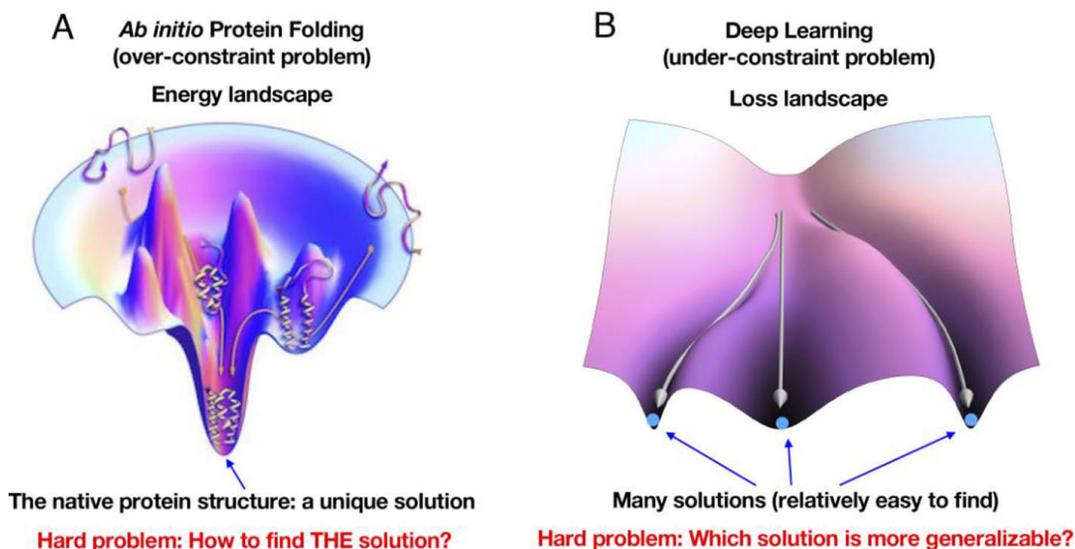


图 3 过度约束和约束不足问题中景观和解的差异。(A) 蛋白质折叠（一个过度约束的问题）中的自由能景观，其中存在一个唯一的全局最小值，这通常很难找到。该图片采用自 Dill 和 Maccallum。(B) 过参数化（约束不足）深度学习模型中的损失景观，其可以具有多个全局最小值。挑战在于找出哪个解具有更好的泛化能力。

确实，泛化是机器学习中最重要的问题之一。考虑到深度学习神经网络中使用的庞大参数（权重）数量，这个问题变得更加紧迫。已经有很多工作基于各种理论和实证驱动的复杂度度量（VC 维、参数范数、锐度（sharpness）、路径范数等）对深度学习神经网络的泛化性进行

了研究。正如 Jiang 等在最近的综述中总结的那样，经验证据表明基于锐度的度量与泛化之间存在强相关性，而许多其他（理论驱动的）度量，如基于范数的度量，并不能作为泛化的可靠指标。即使对于基于锐度的度量，我们也不理解它们为什么以及在预测泛化方面有效。此外，基于

Dinh 等人指出的深度学习神经网络中的一般标度不变性，最近有研究工作对仅使用损失景观锐度来确定泛化的有效性提出了质疑。确实，对深度学习神经网络中泛化的全面理解仍然难以捉摸。泛化中的一个关键问题是确定解的哪些性质决定了其泛化能力。回答这个问题的困难在于，

虽然学习是由训练损失引导的，但泛化性能是由测试损失评估的，而在无法获取测试损失景观的情况下很难取得理论进展。最近，有工作通过使用数据变化和权重参数变化之间的等价性（对偶性）来解决这个问题。一般思路是，如果训练数据（ $x$ ）和测试数据（ $x'$ ）之间的输入变化等价于从解的权重（ $W$ ）到新权重（ $W'$ ）的变化，我们就可以使用这种对偶关系将输入空间中的分布映射到权重空间中，在那里我们可以评估泛化损失。值得注意的是，在任意密集连接层（densely connected layer）中都能找到这种精确对偶关系的无限族。通过使用具有最小权重变化的“最小”对偶关系，泛化损失可以被分解为权重空间中解的损失函数 Hessian 矩阵的不同特征方向上的贡献。这些贡献的形式揭示了泛化的两个不同决定因素——一个由损失景观的锐度支配，另一个对应于由训练数据和测试数据之间相对差异的协方差加权的解范数。从这项研究获得的主要见解之一是，泛化由这两个决定因素的乘积决定，这解决了 Dinh 等人提出的关于平坦度的困惑。

在约束不足（或过参数化）的学习系统（如深度学习神经网络）中，正则化（regularization）是添加到损失函数中的一个重要组成部分，目的是将系统推

向具有更高泛化能力的解。然而，尽管正则化很重要，但它们通常是基于对更具泛化能力的解应具有什么特性的一些直觉。从影响泛化损失的两个贡献因素（锐度和大小）的角度来看，随机梯度下降和权重衰减作为两种有效正则化方案的能力背后的机制变得清晰。显然，基于底层系统的特性（例如物理系统中的对称性和守恒定律）和 / 或影响解的泛化能力的某些一般因素来设计正则化方案，将成为一个有趣的未来研究方向。

作为过拟合的极端情况，深度学习神经网络甚至可以“记忆”所有训练样本，即使它们的标签被替换为纯噪声。这种过拟合（记忆化）解没有泛化能力。值得注意的是，深度学习神经网络避免了过拟合，其测试误差遵循所谓的“双下降”（double descent）曲线。随着模型容量（复杂度）的增加，测试误差在开始时遵循常规的 U 形曲线，先下降，然后在模型达到零训练误差时的插值阈值附近达到峰值。然而，当模型容量超过这个插值阈值时，它再次下降，测试误差在过参数化区域（参数数量远大于样本数量）达到其（全局）最小值。通过使用简单模型，人们在理解这种双下降行为方面取得了快速进展。例如，对于过参数化的简单两层网络，在线性可分数据上

使用带泄漏的 ReLU 激活函数时，已有工作证明了优化和泛化性得以确保。这一结果随后被扩展到使用 ReLU 激活函数的 2 层网络和使用平滑激活函数的 2&3 层网络。神经正切核（Neural Tangent Kernel, NTK）将大型（宽）神经网络与核方法联系起来，使用 NTK 的方法表明，在过参数化区域，泛化误差以幂律方式  $N_p^{-1/2}$ （其中  $N_p$  为参数数量）向平台值下降。在简单的合成学习模型（synthetic learning models）中，如具有岭回归（ridge regression）损失函数的随机特征模型，双下降行为已经得到解析证明。这一解析结果已经通过使用副本方法（replica method）扩展到其他合成学习模型（例如随机流形模型）和更一般的损失函数。

事实上，在大语言模型等大模型中，最令人兴奋的实证发现之一是，当模型规模和数据规模按比例一起增加时，泛化损失会随着它们的增加而持续下降，呈现出明显的幂律依赖关系。物理学家很自然地就被幂律所描述的行为吸引，并开发出重整化群理论等强大工具来解释临界现象中的标度律（scaling law）。因此，我们认为理解大型复杂学习系统中泛化对数据规模和模型规模的“幂律”依赖关系，是对物理学家最具吸引力且极其重要的研究方

向之一。在本特刊中，Bahri 等人研究了这种“标度律”背后可能的起源，并为不同的标度区域提供了一个分类法。

### 3.4 真实神经网络和真实神经元的启发

如我们上述所言，人工神经网络受益于两个自然科学学科，即神经科学和统计物理学。然而，除了体现在 McCulloch - Pitts 神经元和分层前馈神经网络（感知器）架构中的最初神经科学启发之外，深度学习神经网络并没有包含太多神经科学的见解。尽管本特刊主要关注物理学和机器学习之间的交叉对话，但我们对神经科学产生的新需求比以往任何时候都更大。深度学习的几个具体架构限制方面可能会从更深入的神经科学原理中受益。例如，深度学习的成功主要局限于具有静态数据集的静态任务，而且还需要大量明确标记的数据。由于许多研究人员已经注意到生物大脑极其适应动态环境中的动态任务，我们认为更好地理解大脑如何执行动态任务将带来新的概念，从而推动机

器学习在此类任务上性能的提高。通过探索真实大脑计算与深度学习神经网络算法和架构之间的主要差异，可能会产生新的脑启发的算法。在本特刊中，Haim Sompolinsky 等人从表征和泛化的角度对人工神经网络和大脑神经网络进行了新颖的观点阐述和深入比较。

除了表征和泛化之外，我们列出人工网络和大脑网络的另外两个差异，希望能够激发未来的工作，因为它们都可以用前面章节概述的基于物理学的方法进行研究：

大脑使用局部学习规则并且很少受监督。首先，深度学习神经网络主要关注监督学习，即对给定输入模式有明确标注正确输出的情况，而大脑似乎很少进行监督学习。相反，理论和实验数据表明，神经学习主要采用无监督学习（unsupervised learning）、时间预测性学习（temporal-predictive learning）和强化学习（reinforcement learning, RL）技术。在算法层面，深度学习神经网络的学习通过反向

传播实现，这是一个全局学习规则，而大脑中的学习是通过赫布规则（Hebbian rule）等局部学习规则实现的。

大脑具有高度动态性并持续与环境互动。大多数深度学习神经网络使用静态前馈架构，或者具有导向稳态的弛豫特性。相比之下，大脑表现出复杂的动态行为（例如，不同的大脑节律 / 振荡），这是由大量循环连接实现的。此外，当前的深度学习神经网络几乎完全致力于静态的纯感知任务，而大脑的首要目的是在与环境的持续感知 - 行动循环中产生行为。

如本特刊中 Chklovskii 等人所述，从神经科学获得的新启发也可以来自单个神经元层面。作者们引入概念将神经元作为其环境反馈的控制器，这是远超传统 McCulloch - Pitts 神经元的功能。这种创新方法不仅解释了此前看似无关的各种实验发现，还可能为创建更复杂的、受生物启发的人工智能系统指明方向。○

来源：PANS 杂志

# 探索人形机器人未来：2024 世界智能制造大会 ——人形机器人技术与发展专题活动在南京隆重举行



图1 大会现场

2024年12月20日，2024世界智能制造大会——人形机器人技术与发展专题活动在南京举办。本次专题活动由中国自动化学会承办，南京信息工程大学自动化学院、南京邮电大学自动化学院、北京长兴动力机器人科技有限公司、北京度量科技有限公司、龙芯中科技术股份有限公司、沈阳新松机器人自动化股份有限公司协办，吸引了来自人形机器人产业链的近30家企业代表、高校及科研院所专家学者共150余人参加。

专题活动由中国自动化学会青年工作委员会副主任委员，南京

信息工程大学自动化学院院长、教授葛泉波主持。中国自动化学会会士、理事，东南大学自动化学院副院长、首席教授李世华致辞。

李世华教授表示，人形机器人集人工智能与机器人技术之大成，象征着科技进步，更是未来智能社会的關鍵力量。中国自动化学会作为推动我国自动化事业发展的重 要社会力量，

肩负着推动科技进步与履行社会责任的双重使命，我们将积极联合行业内的高校、科研院所和企业，共同制定行业标准，以确保人形机器人技术的稳健发展，并深入挖掘其在医疗、教育、家庭服务等众多领域的创新应用潜力。

在主旨报告环节中，加拿大工程院、加拿大工程研究院院士，香港理工大学教授张丹为大家带来了题为“广义并联机器人的创新设计与人形机器人”的报告。张丹教授先从传统串联机器人与并联机器人的定义及区别讲起，阐述了各自优点和缺点；进而提出广义并联机器人（Generalized Parallel Robot）的概念、改进方法，即广义并联机器人的创新；最后阐述了广义并联



图2 中国自动化学会青年工作委员会副主任委员，南京信息工程大学自动化学院院长、教授葛泉波主持

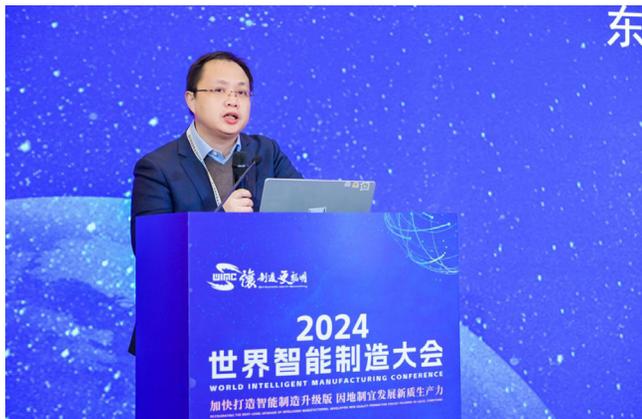


图3 中国自动化学会会士、理事，东南大学自动化学院副院长、首席教授李世华致辞

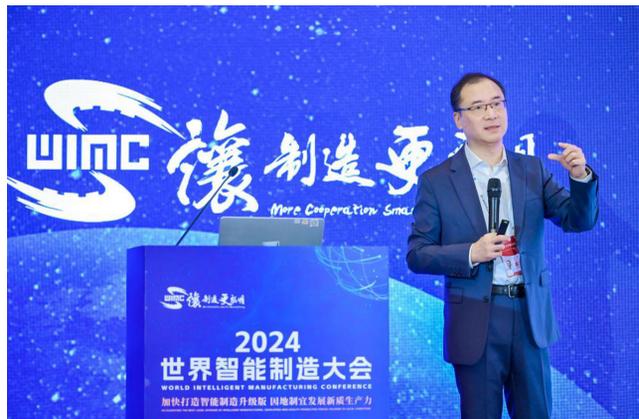


图4 加拿大工程院、加拿大工程研究院院士，香港理工大学教授张丹作报告

机器人在腿部、手臂、抓手上的应用，以及如何提升机器人灵活性和稳定性。

中国自动化学会会士、理事，浙江大学求是特聘教授，浙江人形机器人创新中心首席科学家熊蓉作了题为“人形机器人智能感控关键技术研究”的报告。熊蓉教授首先从人形机器人的发展背景讲起，阐明人形机器人是机器人领域的技术制高点、具备类人智能和形态以适应人类环境；进而讲述人形机器人技术与面临挑

战情况，如核心零部件的性能提升、智能感控技术的发展等；最后阐述了具身智能的研究，数据驱动的感知、决策、规划、控制，语言、视觉与行为的融合等。

河海大学教授、江苏省产业技术研究院智能制造技术研究所所长骆敏舟作了题为“基于电液伺服的人形机器人关键技术研究”的报告。骆敏舟教授首先从电液伺服技术的优势讲起，如适用于野外复杂环境、高功率密度和快速响应；进而阐述了技术

路线与研究进展，如轻量化设计与3D打印技术、高速高压的斜向柱塞泵研发等；最后阐述了未来应用与挑战，如电液伺服技术在军事、农业等领域的应用前景、需解决的技术难题与市场化挑战等。

浙江大学副教授、硕士生导师 Anjan Kumar Tula（安简·库玛·图拉）作了题为“推进产品设计：机器学习、相似性指数和优化技术”的报告。图拉教授先从设计平台的概念讲起，强调硬件在



图5 中国自动化学会会士、理事，浙江大学求是特聘教授，浙江人形机器人创新中心首席科学家熊蓉作报告



图6 河海大学教授、江苏省产业技术研究院智能制造技术研究所所长骆敏舟作报告



图7 浙江大学副教授、硕士生导师 Anjan Kumar Tula 作报告



图8 北京长兴动力机器人科技有限公司副总经理袁骐作报告

机器人开发中的重要性；进而阐述了产品设计的挑战和解决方案，包括性质预测模型和分子设计选择算法；分享关于机器学习模型在产品中的应用及其改进等。

北京长兴动力机器人科技有限公司副总经理袁骐作了题为“从航空装备到具身智能”的报告。袁骐副总经理先从公司背景及其在航空装备领域的成就讲起；进而阐述了公司进军智能机器人行业的原因及其优势，描述公司在具身智能方面的发展规划和产品设计；最后强调新材料和新技术在机器人行业中的应用。

高峰对话环节由中国自动化学会智能制造系统专委会副主任委员、俄罗斯自然科学院院士、东南大学教授李新德主持，围绕“人形机器人产业发展现状”“人形机器人产业发展瓶颈和突破点”“未来人形机器人产业形态、模式及不同产业的布局”三个核心话题展开深入讨论。参与高峰

对话的嘉宾有：中国自动化学会会士、理事，浙江大学求是特聘教授，浙江人形机器人创新中心首席科学家熊蓉，中国自动化学会自主指令系统技术与应用专委会（筹）副主任委员、龙芯中科技术股份有限公司副总裁杜安利，中科深谷科技发展有限公司副总裁沈培友，南京集萃人形机器人科技有限公司总经理吕自贵，北京度量科技有限公司华东区总经

理迟昊。

本次人形机器人技术与发展专题活动的成功举办，为人形机器人领域的专业人士提供了一个交流合作的重要平台，促进了技术创新与产业发展的深度融合。相信在各方的共同努力下，人形机器人技术将不断取得突破，产业规模将持续扩大，为人类社会的发展带来更多福祉。○

学会秘书处 供稿



图9 高峰对话环节

# 《2024 控制科学与工程学科发展报告》 中期汇报会顺利召开

为进一步推动《2024 控制科学与工程学科发展报告》编纂工作，汇总当前编写进展，交流编写经验，2024 年 12 月 13 日，中国自动化学会以线上形式召开《2024 控制科学与工程学科发展报告》中期汇报会。中国自动化

学会监事长、中国科学院自动化研究所研究员王飞跃，中国自动化学会副理事长王成红，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，以及来自高校科研院所和青托代表共 70 余人参加会议。

会上，各专题报告负责人就报告大纲和撰写进度进行了详细汇报。针对撰写过程中遇到的难点与瓶颈问题也进行了深入交流与探讨，为后续报告撰写明确了重点与方向。

中国自动化学会副理事长王成红强调，各专题撰写人要具备全球视角，紧跟学科国际发展趋势，通过对理论研究、技术创新、成果产出及应用推广的对比分析，揭示国内外差异，提炼共性与特性，为未来发展提供科学依据和实践指导。

下一步，学会将进一步加强《2024 控制科学与工程学科发展报告》编纂工作的组织与管理，建立更加紧密的协作机制。同时将组织专家团队对各专题报告进行细致审阅，提出建设性意见，帮助各专题组完善报告内容，提升报告质量，为学科发展贡献力量。

会上，各专题报告负责人就报告大纲和撰写进度进行了详细汇报。针对撰写过程中遇到的难点与瓶颈问题也进行了深入交流与探讨，为后续报告撰写明确了重点与方向。

中国自动化学会监事长、中国科学院自动化研究所研究员王飞跃指出，应提升专题报告的广度与深度，要全



部分线上参会代表

学会秘书处 供稿

# CAA 线上圆桌派

## ——“火箭科普大家聊”活动成功举办

CAA 线上圆桌派是中国自动化学会面向学生会会员、广大青年科技工作者及社会公众打造的访谈系列活动，以“讨论+互动”模式，在轻松愉快的氛围中与各界人士深度交流，解答学习、工作、生活中的迷茫与问题，了解自动化前沿科技发展，多元化展现科技工作者风采。

2024年12月17日，为增强公众对航天科技的理解与关注，激发年轻一代对科学探索的热情，为中国航天事业的进一步发展贡献智慧与力量，中国自动化学会特开展第8期线上圆桌派——“火箭科普大家聊”。活动邀请到西

北工业大学航天学院副教授李易、北京航天自动控制研究所系统方案研究室制导组副组长张家铭，以及顶尖的火箭爱好者团队勘云工造的叶一夏和瞿凇，与大家共同探讨可回收火箭和火箭研发与制造中的技术难点。

活动通过腾讯会议、CAA 会议小程序、CAA 官方视频号、bilibili 官方账号、知乎账号、抖音及微博官方账号等平台全程直播，约3万人次线上观看。

活动中，与会的青年科技工作者们纷纷表示将传承航天精神，始终保持对火箭研发与制造的热忱。勘云工造的总负责人叶一夏

和西北工业大学副教授、星辰探空俱乐部创始人李易分享交流了他们在火箭制造方面的工程积累，强调了团队协作、动手能力和技术传承的重要性。北京航天自动控制研究所系统方案研究室制导组副组长张家铭深入剖析了可回收火箭的弹道规划和姿态控制的技术难点，为与会者提供了宝贵的技术指导。勘云工造成员瞿凇则对火箭发动机、燃料和火箭结构设计进行了高度凝练的讲解，帮助大家更好地理解火箭的核心技术。此外，朱帅臣围绕流体力学以及爱好者如何进入航空航天领域发表了自己的看法，激励航空航天爱好者在该领域不断探索创新。大家一致表示，将积极推动航天科技的创新与发展，为我国航天事业的进步贡献自己的力量。

本次活动充分展现了当代青年航空航天工作者的精神面貌与责任担当，为自动化、信息及智能科学领域内广大青年科技工作者的科研工作开展提供了有益借鉴。○



CAA 线上圆桌派——“火箭科普大家聊”活动

学会秘书处 供稿

# 中国自动化学会新能源与储能系统控制专业委员会成立大会成功召开

2024年12月20-21日，中国自动化学会新能源与储能系统控制专业委员会第一届学术年会暨算力-电力-控力融合发展高端论坛在山东大学召开。中国工程院院士邬江兴，中国工程院院士、中国自动化学会副理事长于海斌，中国工程院院士、山东大学校长李术才，山东大学常务副校长吴臻出席会议。

李术才在会议致辞中表示，成立中国自动化学会新能源与储能系统控制专业委员会，对于推动行

业技术创新、突破关键技术瓶颈、促进产业高质量发展具有重要意义。山东大学将积极应对能源发展新形势新任务，锚定国家能源战略，充分发挥学科优势和平台作用，围绕构建清洁低碳能源体系、破解新能源和储能关键技术难题、培养高水平专业人才等重点任务，加强协同创新、深化产教融合，打造引领行业技术进步新引擎，建设中国能源产业转型升级新高地，为推动能源革命提供有力支撑，为实现“双碳”目标、建设

美丽中国作出新的山大贡献。

中国自动化学会副理事长王成红表示，山东大学牵头成立中国自动化学会新能源与储能系统控制专业委员会恰逢其时，意义深远，期待各方为新能源与储能系统控制领域发展贡献智慧与力量。

中国自动化学会秘书长张楠宣读成立批复。经表决，中国自动化学会常务理事、山东大学控制科学与工程学院院长张承慧当选中国自动化学会新能源与储能系统控制专业委员会第一届委员



合影留念

会主任委员。专委会将充分发挥高校、科研院所和企业的优势，搭建高水平学术交流平台，围绕新能源与储能系统控制关键技术开展研究，促进产学研用深度融合，为我国能源绿色低碳转型提供有力支撑。

21日上午，中国自动化学会新能源与储能系统控制专业委员会揭牌仪式举行。邬江兴院士、于海斌院士、吴臻、王成红、张承慧、中国机械工业联合会秘书长宋晓刚、哈尔滨理工大学党委书记赵琳、清华大学教授梅生伟、南京工程学院副校长赵文祥、山东理工大学校长李玉霞、中国计

量大学副校长王斌锐、天津大学教授贾宏杰见证揭牌。

吴臻表示，山东大学愿与各位一道，携手探索算力-电力-控力融合发展新路径，促进重大前沿技术和颠覆性技术快速涌现、深度应用，推动学校信息学科建设融合发展升级，为服务支撑高水平科技自立自强作出更多山大贡献。

在算力-电力-控力融合发展高端论坛上，邬江兴院士、于海斌院士、张承慧教授、中国航天科技集团赵元富研究员分别以“创新微网架构助力构建智能绿色能源体系”“计算通信控制科学融合”“大容量新能源系统控制技术

发展与展望”“航天集成电路技术发展”为题作主旨报告。

来自全国高校、科研院所近200位专家学者参加会议。

新能源与储能系统控制专业委员会，是中国自动化学会(CAA)围绕新能源和储能领域的控制理论与应用而设立的分支机构。专委会汇聚各方智慧和力量，致力于共同攻克新能源与储能系统控制领域的关键技术难题，促进科技成果转化与应用，为我国新能源与储能产业的高质量发展提供强有力的技术支撑和人才保障。○

CAA 新能源与储能系统控制专委会 供稿

### 新能源与储能系统控制专业委员会委员名单

主任委员：张承慧

副主任委员（按姓氏笔画排序）：

蔡旭 贾宏杰 李建林 李武华 李曦 梅生伟 张兴

秘书长（按姓氏笔画排序）：

李珂

副秘书长（按姓氏笔画排序）：

陈来军 马铭遥 穆云飞 孙波 邢兰涛

委员（按姓氏笔画排序）：

陈来军 陈明华 陈武 陈晓娇 陈忠言 程美红 邓瑞龙 丁磊 丁月民 丁肇豪 杜贵平  
杜雄 付承桂 公铮 郭方洪 郭小强 胡存刚 胡攀攀 胡顺全 皇甫宜耿 黄连生 霍群海  
李飞 李奇 李守翔 凌睿 刘伟 刘骁康 刘旭东 马俊鹏 马锺 马铭遥 马睿  
马昕 孟锦豪 穆云飞 秦伟 任其广 帅智康 宋冬然 孙波 孙凯 孙铭阳 孙向东  
孙尧 汤奕 唐欣 汪飞 汪洪亮 汪玉洁 王高武 王辉 王瑞琪 王宇 魏中宝  
吴红飞 吴卫民 邢兰涛 邢相洋 熊瑞 徐海亮 严毅 杨德昌 杨欢 杨文 杨勇  
姚文利 于东升 于建斌 张关关 张萌 张品佳 张艺明 张永峰 仇志华 赵晋斌 周兴锋  
朱翀 朱善迎 邹见效

## 中国自动化学会华南理工大学学生分会 成立大会成功召开

2024年12月6日下午，中国自动化学会（CAA）华南理工大学学生分会成立大会在华南理工大学五山校区笃行楼506会议室成功召开。中国自动化学会副理事长王成红研究员，国家自然科学基金委信息学部原处长宋苏研究员，华南理工大学自动化科学与工程学院党委书记郑文杰、院长丛杨教授、党委副书记申宏宇、教工第一党支部书记刘乙奇教授、研究生辅导员李旺出席了本次会议。参加会议的还有学生会会员代表60余名。大会由申宏宇副书记主持。

会议伊始，王成红副理事长致开幕辞。他首先对中国自动化学科的发展进行了深入回顾，强调了中国自动化学会成立学生分会的初衷，鼓励华南理工大学学子充分利用CAA学生分会这一新平台，加强学术交流与创新实践。同时也对CAA华南理工大学学生分会未来的发展寄予厚望。

丛杨院长代表学院致辞，介绍了华南理工大学自动化科学与工程学院为培养高层次人才所作出的努力和成就，并希望通过中国自动化学会华南理工大学学生分会加深与中国自动化学会的合

作，鼓励学生们积极参与学生分会组织的各类活动，夯实专业根基，将自动化科学技术应用于解决实际问题，让科技成果惠及更广泛的人民群众。

在中国自动化学会华南理工大学学生分会执行委员会选举阶段，叶梓晴同学作为CAA华南理工大学学生分会筹备委员会委员宣读了CAA华南理工大学学生分会组织架构和工作计划。根据CAA华南理工大学学生分会第一届执行委员会选举办法，经无记名投票，大会选举产生了第一届CAA华南理工大学学生分会执行委员会成员，由总监票人刘乙奇教授宣读选举结果。随后，申宏宇副书记宣读了CAA华南理工大学学生分会指导委员会和执行委员会拟任名单。

选举结束后，王成红副理事长代表中国自动化学会向CAA华南理工大学学生分会授牌、授旗，刘乙奇教授代表CAA华南理工大学学生分会接受牌匾和会旗。王成红副理事长和宋苏研究员为CAA华南理工大学学生分会指导委员会与执行委员会成员颁发聘书。



合影留念

CAA 华南理工大学学生分会第一届指导委员会名单

任职	姓名	单位	职称 / 职务
顾问	丛 杨	华南理工大学自动化科学与工程学院	教授、院长
顾问	刘乙奇	华南理工大学自动化科学与工程学院	教授
顾问	李 旺	华南理工大学自动化科学与工程学院	辅导员

CAA 华南理工大学学生分会第一届执行委员会名单

任职	姓名	单位	职称 / 职务
当任主席	叶梓晴	华南理工大学自动化科学与工程学院	硕 2024 级
候任主席	翁佳玮	华南理工大学自动化科学与工程学院	博 2024 级
执委	李 玮	华南理工大学自动化科学与工程学院	博 2024 级
执委	李嘉龙	华南理工大学自动化科学与工程学院	硕 2024 级
执委	何宇森	华南理工大学自动化科学与工程学院	硕 2024 级
执委	周奕希	华南理工大学自动化科学与工程学院	硕 2024 级
执委	詹正圣	华南理工大学自动化科学与工程学院	本 2022 级

仪式完毕，郑文杰书记致闭幕辞，她首先向当选的老师 and 同学们表示热烈祝贺并向关心和支持本次大会的师生、嘉宾表示衷心的感谢。她相信，在中国自动化学会的指导与支持下，CAA 华南理工大学学生分会定能为全校会员学子搭建起青年学生交流、学习、成长、展现自我的平台，激发广大青年会员的科学热情和创新潜能，为国家尤其是粤港澳大湾区的高质量发展注入不可替代的“自动化力量”。

至此，本次大会圆满闭幕，中国自动化学会华南理工大学学

生分会正式成立。未来，中国自动化学会华南理工大学学生分会将紧密团结在中国自动化学会和华南理工大学的周围，积极开展学术交流，营造良好的科研氛围，推动科研成果转化，为自动化事业的发展作出新的贡献。

活动当天，还举办了 CAA 华南理工大学学生分会第一期“智汇论坛”，邀请刘乙奇教授作学术报告。“针对规模大、流程长、工序多、物理化学反应机理复杂的污水处理流程，智能预测、建模、控制方法有着广阔的应用前景。”刘乙奇教授用通俗易懂的语言为

在场的学生会会员们分享了团队在污水处理软测量、预测控制建模、可靠性分析等领域上的研究成果。

CAA 华南理工大学学生分会“智汇论坛”是 CAA 华南理工大学学生分会创立的学术报告系列活动，论坛每期邀请不同领域专家学者分享学术成果，旨在为会员们提供了解学术前沿知识的良好平台，帮助会员们打开学术思路、提升科研能力。○

CAA 华南理工大学学生分会 供稿

# CAA 中南大学学生分会成功举办 “CAA 进校园——小学站” 第二期科普宣讲活动

中国自动化学会始终积极践行关于科技创新与科学普及的重要理念，聚焦科技服务乡村人才振兴，大力开展“CAA 科普百人团”“CAA 科普大讲堂”等系列活动，在科技普及的道路上不断迈进。为进一步提升学会影响力，担当学生分会的社会责任，推动“CAA 先锋行动”，拓展科普活动的辐射范围，让自动化技术的魅力深入小朋友们的心田，CAA 中南大学学生分会勇于创新，积极开展“CAA 进校园——小学站”科普宣讲活动，致力于为孩子们开启一扇通往科学世界的大门，播撒科学的种子。结合控制工程学科的特色与优势，我们将专业知识转化为生动有趣、易于理解的形式，带入小学课堂，着力培养孩子们的思维能力与动手实践能力。

2024 年 12 月 11 日下午，CAA 中南大学学生分会携手长沙市中南大学附属小学成功举办“CAA 进校园——小学站”第二期科普宣讲活动。此次活动以“探索电磁奥秘，领略磁悬浮魅力”为主题，旨在将电磁学与磁

悬浮技术等自动控制类学科的基础知识生动地呈现在中小学课堂上，点燃孩子们对科学的热情之火，激发他们勇于探索未知的精神力量。

活动筹备期间，CAA 中南大学学生分会邀请了中南大学自动化学院青年志愿者协会以及有过丰富经验的主讲同学，为本次科普宣讲活动进行人员培训，为主讲、助教同学深度剖析教案内容以及 PPT 的讲解技巧，巧妙运用趣味科普演示与电磁感应互动小实验，将原本抽象晦涩的理论知

识转化为直观有趣、引人入胜的学习体验。同时，CAA 中南大学学生分会积极与中南大学附属小学密切沟通协作，全力确保活动的每一个环节都能顺利推进，为孩子们打造一场难忘的科学盛宴。

12 月 11 日下午，志愿者们齐心协力，将实验器材、教学道具等物资安全搬运至活动场地，并认真调试设备，确保 PPT、视频等教学材料能够完美呈现。随后，在主讲人郭伊扬、赵张羽、钱子盈同学的精彩引领下，一场别开生面的科普课堂正式拉开帷幕。



图 1 授课现场



图2 合影留念



图3 参与活动的分会成员合影留念

课堂上，钱子盈老师以生活中常见的电磁现象为切入点，如磁悬浮列车的神奇工作原理，巧妙地引出电磁与磁悬浮的主题。她通过生动形象的讲解、直观有趣的实验演示，以及与孩子们的积极互动，让孩子们在轻松愉快的氛围中深入了解电磁学的基本概念与磁悬浮技术的奇妙之处。孩子们被这些神奇的科技现象深深吸引，纷纷踊跃举手提问，课堂互动氛围热烈非凡。

在互动环节，孩子们分组协作，每组都配备了精心准备的实验器材，兴致勃勃地开始动手制作简易磁悬浮列车小装置。他们全神贯注地拼装材料，仔细观察实验过程

中的每一个细微现象，并在老师们的耐心指导下，成功完成了一个个充满创意的实验作品。当看到自己亲手制作的磁悬浮装置在空中稳定悬浮时，孩子们的脸上绽放出灿烂的笑容，那是收获知识与成功的喜悦，是对科学探索充满热情与期待的生动体现。

活动结束后，孩子们纷纷表示，通过这次科普宣讲活动，他们对电磁与磁悬浮有了更为深刻、全面的认识，对科学的兴趣也如星星之火般迅速蔓延。此次活动不仅为孩子们打开了一扇窥探科学奥秘的窗户，更在他们幼小的心灵深处种下了一颗热爱科学、勇于探索的种子。愿这颗种子在

未来的日子里，在知识的阳光雨露滋润下，生根发芽，茁壮成长，绽放出绚丽多彩的科技之花。

展望未来，CAA中南大学学生分会将始终坚守“致知、求实”的精神高地，不断开拓创新，砥砺前行，为推动我国自动化科技事业的蓬勃发展贡献更多的智慧与力量。同时，我们也热切期盼更多的青少年能够满怀热情地加入到科技探索的宏大队伍中来，让我们携手并肩，共同为孩子们的美好未来添砖加瓦，助力他们在科学的浩瀚星空中追逐梦想，扬帆远航！

CAA 中南大学学生分会 供稿

## CAA 重庆大学学生分会 “知行相随，硕博同行” 博硕论坛顺利举办

为更好地培养学生科学研究的素养，提升求职规划与技巧，2024年11月28日晚上7点，CAA重庆大学学生分会在虎溪校区信息大楼A316会议室举办“知行相随，硕博同行”博硕论坛暨“师兄师姐去哪了”就业经验分享会，此次活动邀请了2024年博士、硕士国家奖学金获得者和求职经历丰富的毕业生作为嘉宾，180余名研究生参加线下活动。

博士生蔡力以“科研经验心得体会交流与分享”为题，从科研是什么入手，结合自身硕博学习经历详细介绍了做好科研需要具备的能力以及自己的心得体会，在深入浅出地讲解过程中向同学们介绍了常用的阅读文献、管理文献的基本科研工具，研究生新生阅读不同论文的顺序、精读与略读之间的区别和联系，以及如何从阅读文献中提取创新点的科研技巧，最后寄语同学们“待到秋来九月八，我花开尽百花杀”。

博士生贾亚辉结合自身的经历向同学们介绍硕博阶段可以申请的基金项目，包括国家级大学生创新创业训练计划、国家自然科学基金

青年学生基础研究项目、中国科协青年人才托举工程博士生专项计划，以及CSC公派留学的评选标准和时间节点。针对科研的创新点和论文撰写的方式方法，贾亚辉

建议同学们要多阅读文献，他强调良好的表达能力与专业术语运用能力一定是建立在文献阅读量充足的基础之上。最后，贾亚辉鼓励大家在研究生阶段勇于迈出第一步，多去尝试，敢于争取。

硕士生王美淇结合自己的竞赛参赛经历，向大家分享自己备战过程、现场比赛的随机应变能力和抗压能力的培养，鼓励同学们能够全过程参与一个竞赛项目，培养自己的科研能力，磨炼自己的心智。除此之外，王美淇鼓励大家多阅读文化典籍以提升人文素养、逻辑思维能力和语言表达能力。

硕士生赵腾从“早决定、早规划、多思考、多努力”出发，介绍了自己兼职辅导员和学生工作的经历以及求职的经历和经验；



合影留念

通过一份研究生就业问卷调查结果，指引同学们进行自身优、劣势客观评估。最后以硬件工程师和项目经理两个职位为例，详细分析用人单位在招聘过程中对应聘学生的重点考察内容，以及学生应如何提前做准备。赵腾鼓励同学们结合自身优势，提早进行职业规划，多思考，多努力。

在四位同学分享结束后，与会同学与主讲人积极互动，主讲人针对不同的问题给予充分详实的解答。与会同学表示通过分享会，对于如何规划自己的科研学习以及未来的就业有了更加清晰的认识。此次活动展示了中国自动化学会对学生发展的深切关怀和对人才培养的高度重视。○

CAA 重庆大学学生分会 供稿

# CAA 中南大学学生分会成功举办 CAA 青帆计划第十五期活动

“CAA 青帆计划”是中国自动化学会为 CAA 学生会量身打造的集学术交流、技能提升和职业发展于一体的互动平台。每期活动邀请来自高校、科研院所、企业等专家学者，以“报告 + 对话互动”的形式，开展一系列线上线下学术交流和经验分享活动，助力每一位学生会会员为未来的学术和职业生涯打下坚实基础。

CAA 青帆计划·第十五期“科创赋能·智汇未来”数模竞赛经验分享由中国自动化学会主办，中国自动化学会中南大学学生分会与中南大学自动化学院研究生会联合承办，活动于 2024 年 12 月 15 日圆满举行。本次活动旨在通过分享数学建模竞赛的宝贵经验，激发学生的创新思维和实践能力，为未来的科研和竞赛活动打下坚实基础。

活动邀请三位在数学建模领域取得卓越成绩的中南大学研究生作为主讲人，他们分别是越铂淳同学（博士研究生）、余雪倩同学（硕士研究生）和史代双同学（硕士研究生）。这些主讲人不仅分享了他们在“华为杯中国研究

生数学建模竞赛”中的获奖经验，还深入探讨了赛事介绍、赛题分析、论文撰写以及获奖技巧等多个方面。

越铂淳同学作为 2022 年、2023 年国家二等奖和 2024 年国家一等奖（华为专项二等奖）的得主，详细讲解了“华为杯”中国研究生数学建模大赛的参赛经验。他从赛事介绍、赛题分析与讲解、论文撰写以及获奖技巧四个方面进行了深入的分享，特别强调了团队合作的重要性和选题的策略。

余雪倩同学则带来了“从零开始的数模竞赛指南”，她结合自己的获奖经历，为初学者提供了如何准备数学建模比赛、选择合适的赛题以及提高获奖机会的实用建议。她的分享不仅涵盖了团队组建、分工合作，还包括了如何从往年优秀论文中学习思路和方法。

史代双同学则从大赛介绍、经验分享等方面，详细介绍了“华为杯”研究生数学建模竞赛的背景和参赛策略。他强调了竞赛获奖的好处，包括技能提升、评

优优先、评奖学金以及简历实习等，并分享了赛题分析、数据处理、模型建立和论文写作的宝贵经验。

活动中，参与者积极提问，与分享人进行了深入的互动和讨论。问题涉及了如何在遇到难题时调整策略、数学建模论文的篇幅和内容侧重点、如何在竞赛中合理安排时间、以及如何选择与队友有效交流等实际问题。分享人以其丰富的实战经验，为参与者提供了切实可行的建议。

本次活动的成功举办，不仅为学生会员们提供了一个学习和交流的平台，还激发了学生们对数学建模的热情，增强了他们解决实际问题的能力。CAA 中南大学学生分会表示，将继续举办此类活动，以促进学术交流和科技创新，培养更多具有创新精神和实践能力的人才。同时学会将持续关注学生的科研竞赛需求，提供更多针对性的辅导和支持，助力学子们追梦未来。

祝愿每个奔跑在追梦路上的我们，都能够收到奋斗的馈礼! ○

CAA 中南大学学生分会 供稿

## CAA 浙江工业大学学生分会成功举办 CAA 青帆计划第 16 期“学生论坛—科研就业竞赛”活动

“CAA 青帆计划”是中国自动化学会专为 CAA 学生会员设计的综合性互动平台，旨在促进学术交流、提升专业技能和支持职业发展。每期活动邀请来自高校、科研机构及企业的专家学者，通过“报告+对话互动”的形式，组织一系列线上线下的学术交流与经验分享活动，帮助学生会员为未来的学术和职业道路奠定坚实基础。

第 16 期“CAA 青帆计划”活动由中国自动化学会主办，CAA 浙江工业大学学生分会承办，旨在帮助 CAA 学生会员提供丰富的学术与职业发展资源，分享科研、升

学与就业的宝贵经验，搭建高效的交流与合作平台。CAA 浙江工业大学学生分会“学生论坛—科研就业竞赛”活动于 12 月 17 日下午 13:30 线下圆满举行。

活动邀请到了浙江省优秀博士论文获奖者周嘉俊博士，2020 级本科生江悦（已保研至浙江大学），2022 级硕士王斌（签约领跑汽车）以及 2022 级硕士李竹光（签约海康威视）分别从科研、竞赛和招聘经验展开分享。

周嘉俊同学为浙江工业大学网络空间安全研究院助理研究员、计算机学院流动站博士后，博士学位论文获 2023 年度浙江省优秀

博士论文，入选 2024 年度中国指挥与控制学会博士学位论文激励计划。他为初学者提供了如何转入研究生角色、选择合适的研究方向的实用建议。他的分享不仅涵盖了确定研究思路、积累学术成果，还包括了如何从往年优秀论文中学习思路和方法，从而构建适合自己的研究框架。

王斌同学为浙江工业大学信息工程学院电子信息专业 22 级硕士研究生，已签约领跑汽车（中国智能电动汽车制造商）智控测试助理工程师岗。因为工作关系，王斌同学以视频的方式分享了自己求职的经验，他强调了多面试、广投简历的重要性，一方面是收集更多信息，了解行业发展、岗位情况、工作状态；另一方面是慢慢习惯“向上”对话的模式，避免面试时过度紧张。

李竹光同学为浙江工业大学信息工程学院控制科学与工程专业 22 级硕士研究生，已签约海康威视（全球智能物联网解决方案和大数据服务的领军企业）固件开发工程师岗。他从四个步骤分享找工作的诀窍，首先是获取工



合影留念

作的信息渠道，其次是整理自己的研究成果与技能进行简历投递，再提前准备面试和笔试，最后进入签约环节，详细介绍了自己就业面试的经历与经验。

江悦同学为浙江工业大学信息工程学院智能科学与技术专业学士，现保研至浙江大学，本科期间获中国机器人大赛寻宝游决赛全国一等奖、浙江省高数竞赛一等奖等。江悦同学从自身经历出发分享了她的竞赛保研故事，详细介绍了竞赛的目的和参赛策略，从

自身能力提升、培养团队合作能力，到竞赛获奖对后续学习工作的重要性等几个方面进行了深入的分享。

活动中，参与者积极提问，与分享人进行了深入的互动和讨论。问题涉及了在遇到研究难题时如何解决，在几年研究生活中如何合理安排时间，以及如何与老师有效交流等实际问题。分享人以其丰富的科研经验，为参与者提供了切实可行的建议。

本次活动的顺利举办，为学

生会员提供了宝贵的学习和交流机会，不仅激发了他们的科研热情，还提升了实践能力和问题解决能力。CAA 浙江工业大学学生分会表示，未来将继续组织类似活动，推动学术探讨与科技创新，培养更多富有创造力和实干精神的人才。同时，中国自动化学会将密切关注学生的科研竞赛需求，提供更有针对性的支持，助力学子迈向更广阔的未来。○

CAA 浙江工业大学学生分会 供稿

## CAA 中南大学学生分会成功举办 CAA 青帆计划第 17 期活动

“CAA 青帆计划”是中国自动化学会为 CAA 学生会量身打造的集学术交流、技能提升和

职业发展于一体的互动平台。每期活动邀请来自高校、科研院所、企业等专家学者，以“报告 + 对

话互动”的形式，开展一系列线上线下学术交流和经验分享活动，助力每一位学生会会员为未来的学术和职业生涯打下坚实基础。

CAA 青帆计划第 17 期“领航计划——留学二三事”由中国自动化学会主办，CAA 中南大学学生分会、中南大学自动化学院承办，12 月 18 日上午，活动采用线上直播的形式在学会视频号与小程序等平台同步开展，线上全平台观看 1 万余人次。

活动邀请了四位正在或将在美国、中国香港、英国、新加坡



图 1

留学的同学，各自从留学选择、申请准备、心态调整、留学生活等多领域展开分享。主讲人不仅分享了他们留学的原因、留学申请的准备和自己留学生活的片段，还对未来的留学生涯进行了展望。

梁天源同学从赴美国留学的前期准备、申请心态、生活方式和录取后的心态几个方面进行了介绍，依次为大家解答了关于选择科研或实习的纠结、各所高校是否申请和如何抉择的问题，同时分享了自己为适应美国生活所做的准备工作，帮助同学们了解了更多赴美信息。

何婧怡同学紧接着分享了中国香港的留学现状、香港大学的申请条件和自己在香港大学的生

活。描述了中国香港地区是否属于留学、如何为中国香港留学做准备以及中国香港的生活方式与教学方式和内地的差异，解答了许多同学们十分关切的问题。

接下来，多所高校录取资格的获得者江晨同学分享了自己的留学申请经验。讲述了自己为何要出国留学和怎么选择留学地点，同时简述了雅思的备考指南，为直播间的同学们带来了良好的启迪。

最后，马昕希同学分享了留学的学业背景、留学准备中的实践和工作、个人择校原因和未来留学生活的计划，从多方面、多角度完整地汇报了自己留学方面的经验，为同学们查缺补漏、梳

理脉络，完成了本次留学经验分享会的收尾。

活动中，线上的同学们积极留言提问，与分享人进行了深入的互动和讨论。问题涉及了上述留学方面的各种问题。分享人一一耐心解答，为同学们提供了宝贵的经验与可行的建议。

此次讲座为广大大意留学深造的同学提供了宝贵的经验参考，展现了CAA中南大学学生分会对学生会员发展的深切关怀和对人才培养以及未来发展的高度重视。同时，中国自动化学会也将持续关注学生的学业发展需求，提供更多针对性的辅导和支持，助力学子们追梦未来。○

CAA 中南大学学生分会 供稿

通

知

## 关于开展 2024 年度 CAA 科技成就奖（创新团队）推荐工作的通知

为奖励在自动化与人工智能领域得到公认的优秀研究团队，激励相关领域的创新团队在科学研究、技术发明或社会服务等方面作出突出成就和重要贡献，推动持续创新能力和成果转化能力以及社会进步，中国自动化学会开展 2024 年度 CAA 科技成就奖（创新团队）奖励推荐工作。详情请查看：<https://mp.weixin.qq.com/s/5wUPUICpjkudS-mFrjwYRQ>

## 充分发挥党的政治建设的统领作用

政治引领是现代政党的重要功能。政党通过教育、宣传等方式传播政治理念、政治主张，用先进的思想引领其他社会成员，增强政治认同，最大限度地巩固和扩大政党的社会基础。党的十八大以来，习近平总书记多次强调要加强政治引领。深入学习领会这些重要论述，有助于不断增进对中国共产党领导和中国特色社会主义的政治认同、思想认同、理论认同、情感认同，不断夯实新时代党执政的群众基础，不断扩大强国建设、民族复兴的政治力量。

2018年7月3日，习近平总书记在全国组织工作会议上强调，基层党组织要在贯彻落实中发挥领导作用，强化政治引领，发挥党的群众工作优势和党员先锋模范作用，引领基层各类组织自觉贯彻党的主张，确保基层治理正确方向。党的力量来自组织，党的全面领导、党的全部工作要靠党的坚强组织体系去实现。基层党组织是党的主张的宣传者、党的决定的贯彻者、基层治理的领导者、团结群众的动员者、改革发展的推动者，强化政治引领是基层党组织的核心职能，贯穿围绕中心、建设队伍、服

务群众的基层党组织工作中。基层党组织中的每个党员干部要强化党的意识和组织观念，自觉做到思想上认同组织、政治上依靠组织、工作上服从组织、感情上信赖组织。基层党组织要扎根广大人民群众，充分发挥领导作用和党员干部的先锋模范作用，将全心全意为人民服务的根本宗旨，体现在切实维护人民群众利益的实际行动上。

2022年4月26日，习近平总书记在主持召开中央财经委员会第十一次会议时强调，加强党中央对经济工作的领导，要重视政治引领、纲举目张，重视统筹发展和安全，重视科学制定战略策略，重视实践创新、理论创新，重视远近结合、标本兼治，重视狠抓落实。马克思主义认为，经济是政治的基础，政治是经济的集中反映。经济工作从来都不是抽象的、孤立的，只有从讲政治的高度做经济工作才能真正把工作做好，只有善于用政治眼光观察和分析经济社会问题才能真正把问题看透，工作起来才能更有预见性和主动性。当前，国际形势严峻复杂，国内改革发展稳定任务艰巨繁重。党员干部更应立足于中华民族伟大复兴战略全局和世

界百年未有之大变局，不断提高政治判断力、政治领悟力、政治执行力，心怀“国之大者”，深刻领会什么是党和国家最重要的利益、什么是最需要坚定维护的立场，不断提高把握新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局的政治能力、战略眼光、专业水平，敢于担当、善于作为，把党中央关于经济工作的各项决策部署落到实处。

2023年1月9日，习近平总书记在二十届中央纪委二次全会上指出，新征程上，全面从严治党要更好发挥政治引领和政治保障作用，更好推进党和国家事业发展，必须把促进全党牢记“三个务必”、践行党的宗旨作为根本指向，把从严管理监督和鼓励担当作为高度统一起来，从而锻造更为坚强的领导力量，凝聚更为广泛的奋斗力量。全面从严治党的政治引领和政治保障作用，充分体现了全面从严治党的统领地位和牵引作用。党的十八大以来，我们党坚持以科学理论引领筑牢全党理想信念，以“两个维护”引领保障党的团结统一，以伟大自我革命引领推动伟大社会革命，以正风肃纪引领推进反腐败斗争。管党治党宽松软状况得

到根本扭转，反腐败斗争取得压倒性胜利并全面巩固，党在革命性锻造中更加坚强。新征程上，为更好推进党和国家事业发展，各级党委要牢牢扛起全面从严治党主体责任，自觉当好全面从严治党的领导者、推动者、执行者，把党建设成为始终走在时代前列、人民衷心拥护、勇于自我革命、经得起各种风浪考验、朝气蓬勃的马克思主义执政党。

2023年3月6日，习近平总书记在看望参加全国政协十四届一次会议的民建、工商联界委员时强调，要加强思想政治引领，引导民营企业和民营企业正确理解党中央关于“两个毫不动摇”、“两个健康”的方针政策，消除顾虑，放下包袱，大胆发展。民营经济是推进中国式现代化的生力军，是高质量发展的重要基础，是推动我国全面建成社会主义现代化强国、实现第二个百年奋斗目标的重要力量。党的十八大以来，在习近平新时代中国特色社会主义思想科学指引下，民营经济的规模实力、创新水平、国际竞争力和社会贡献持续提升。同时，民营企业和民营经济人士在数量、层次和结构上都发生了很大变化，加之受国际国内环境发生深刻复杂变化的影响，民营经济人士的思想更加多元、价值观念和利益诉求日趋多样。面对新形势，要切实加强对民营企业和民营企业家的思想政治引领工作，以理

想信念教育为总抓手，以凝聚政治共识、增强思想认同为首要任务，以企业家精神教育为主线，引导民营经济人士做爱国敬业、守法经营、创业创新、回报社会的典范。

2023年6月26日，习近平总书记在同团中央新一届领导班子成员集体谈话时指出，共青团要把加强对广大团员和青年的政治引领摆在首位，努力培养社会主义建设者和接班人，源源不断为党输送健康有活力的新鲜血液。加强对广大团员和青年的政治引领，是确保中国青年毫不动摇坚持中国特色社会主义群团发展道路、成为社会主义建设者和接班人的必然要求。听党话、跟党走是共青团坚守的政治生命，党有号召、团有行动是共青团员的政治信念。党旗所指就是团旗所向，这形成了共青团区别于其他青年组织的根本特质。加强对广大团员和青年的政治引领，就要着力用党的初心使命感召青年、用党的光辉旗帜引领青年、用党的优良作风塑造青年，铸牢对党忠诚的政治品格；就要着力引领青年学习贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想，带领青年感悟蕴含其中的理论魅力和实践伟力，最广泛地把青年团结起来、组织起来、动员起来，立报国强国大志向，做挺膺担当奋斗者，展现青春作为、贡献青春力量。

2024年9月20日，习近平总书记在庆祝中国人民政治协商

会议成立75周年大会上，提出了我们党关于加强和改进人民政协工作的10条重要思想，强调坚持把加强思想政治引领、广泛凝聚共识作为人民政协工作的中心环节。人民政协是中国共产党把马克思列宁主义统一战线理论、政党理论、民主政治理论同中国具体实际相结合、同中华优秀传统文化相结合的伟大成果，是中国共产党领导各民主党派、无党派人士、人民团体和各族各界人士在政治制度上进行的伟大创造，是中国共产党领导的多党合作和政治协商的重要机构。政治协商、民主监督、参政议政是人民政协的主要职能。加强思想政治引领、广泛凝聚共识体现在政治协商中，就是要把党的政策和主张宣传给各党派团体和各界人士，使之接受、支持党的政策主张，并最终转化为政治自觉、思想自觉和行动自觉；体现在民主监督中，就是要围绕党和国家的大事、要事、关键事，引导政协委员发现问题、反映问题，建诤言、建真言，为党和国家的事业发展保驾护航；体现在参政议政中，就是要引导政协委员聚焦党的总目标总任务，落实高质量发展要求，积极建言献策，把更多的智慧和力量凝聚到强国建设、民族复兴的伟大实践中。○

来源：学习时报

# 知识产权赋能新质生产力发展的三重维度

知识产权是创新驱动发展的基本保障，也是关系一国科技创新能力提升的有效治理工具。习近平总书记强调，“创新是引领发展的第一动力，保护知识产权就是保护创新”，“新质生产力的显著特点是创新，既包括技术和业态模式层面的创新，也包括管理和制度层面的创新。必须继续做好创新这篇大文章，推动新质生产力加快发展”，“全面建设社会主义现代化国家，必须更好推进知识产权保护工作”。这些重要论述，深刻揭示了知识产权保护与新质生产力发展之间的内在联系。把创新摆在我国现代化建设全局的核心位置，不断完善知识产权制度，着力提升知识产权保护水平，将知识产权制度优势更好转化为治理效能，对于加快发展新质生产力、全方位推动高质量发展具有重要意义。

## 1. 强化知识产权保护制度功能，激发科技创新动力与活力

加强知识产权保护，既是完善产权制度的重要内容，又是激活科技创新动能的必要举措。党的十八大以来，以习近平同志为

核心的党中央坚持把科技创新摆在国家发展全局的核心位置，高度重视科技创新法律制度建设，不断完善科技创新领域立法，推进专利法、著作权法、反不正当竞争法以及科学技术进步法、促进科技成果转化法等一系列法律法规的修订完善，为促进科技创新发展、激发全社会创造活力提供了坚实法治保障。党的二十届三中全会明确了“继续完善和发展中国特色社会主义制度，推进国家治理体系和治理能力现代化”的进一步全面深化改革总目标，提出“完善产权制度，依法平等长久保护各种所有制经济产权，建立高效的知识产权综合管理体制”。以制度建设为主线，加快完善知识产权制度，构建支持全面创新的体制机制，能够为新质生产力发展提供良好土壤。

科技创新是发展新质生产力的重要动能。习近平总书记指出：“新质生产力主要由技术革命性突破催生而成。科技创新能够催生新产业、新模式、新动能，是发展新质生产力的核心要素。”这意味着要面向国家战略和经济社会发展现实需要，加强基础研究，

推进科技创新特别是原创性、颠覆性技术创新；以关键共性技术、前沿引领技术、现代工程技术、颠覆性技术创新为突破口，充分发挥新型举国体制优势，打好关键核心技术攻坚战，持续提升原始创新能力，培育发展新质生产力的新动能。

更好发挥知识产权激励保障作用，激发各类主体创新创造活力，能够为推进新质生产力发展提供强大动力。当前，世界百年变局加速演进，新一轮科技革命和产业变革深入发展，科技革命与大国博弈相互交织，高技术领域已成为国际竞争的最前沿和主战场。要清醒看到，我国原始创新能力还相对薄弱、一些关键核心技术受制于人的局面尚未根本改变，必须加强新领域新赛道制度供给，建立健全知识产权保护制度，破除体制机制障碍，抢占科技竞争和未来发展制高点，提升自主创新水平。重点聚焦大数据、人工智能、量子技术等领域知识产权问题，尽快完善专利权、著作权等保护规则，为催生新产业、新模式、新动能蓄势赋能。加强对科技创新成果的知识产权

保护，更好支撑关键核心技术攻关，助力实现高水平科技自立自强。对生物制药、基因、种业、中医药等投入大、周期长的技术实行更严格保护，及时修订完善植物新品种保护条例等专门立法，夯实支持全面创新的基础性制度。

## **2. 发挥知识产权治理工具作用，推动有为政府和有效市场更好结合**

知识产权作为国家重要战略性资源，是推进国家治理体系和治理能力现代化的核心要素。习近平总书记指出，“知识产权保护工作关系国家治理体系和治理能力现代化，关系高质量发展，关系人民生活幸福”。纵观知识产权制度创设、变革和发展历史，凡属科技进步和经济繁荣的国家，都有着相对完备的知识产权保护制度体系。党的二十届三中全会紧扣推进中国式现代化这个主题，擘画了深化经济体制改革的战略举措。处理好政府和市场的关系是经济体制改革的核心问题，也是发展新质生产力的体制机制命题。知识产权是培育新质生产力的催化剂、高质量发展的加速器，发挥着不可或缺的制度供给和技术供给双重功能。加快推进知识产权转化运用、促进科技成果转化，是推动科技创新和产业创新深度融合的有效路径，是新形势下加快高水平科技自立自强、因地制

宜发展新质生产力的重要举措。

新质生产力需要市场与政府共同培育和驱动。习近平总书记强调：“发展新质生产力，必须进一步全面深化改革，形成与之相适应的新型生产关系。”这就需要理顺生产力和生产关系、经济基础和上层建筑之间的关系。发展新质生产力，既需要政府超前规划引导、科学政策支持，又需要市场机制调节、企业等微观主体不断创新；既需要深化经济体制、科技体制等方面改革，着力打通束缚新质生产力发展的堵点卡点，又需要深化要素市场化改革，创新生产要素配置方式，让各类先进优质要素向新质生产力加快聚集。

知识产权是科技成果向现实生产力转化的桥梁，切实发挥知识产权治理工具作用，推动有为政府和有效市场更好结合，才能进一步破除制约新质生产力发展的体制机制障碍。习近平总书记强调，“只有严格保护知识产权，才能完善现代产权制度、深化要素市场化改革，促进市场在资源配置中起决定性作用、更好发挥政府作用”，这一重要论述科学阐明了加强知识产权保护对于推动有为政府和有效市场更好结合的重要作用。正确认识和把握严格保护知识产权与防止权利滥用的关系，既着力提升知识产权保护水平，又严厉打击垄断协议、滥用市场支配地位、恶意侵权诉讼

等滥用知识产权行为；提高恶意抢注、囤积、倒卖商标等行为违法成本，防止“僵尸商标”现象，营造公平有序的市场化法治化营商环境。加快研究构建数据知识产权保护规则，完善数据产权保护制度，促进数据要素向新质生产力畅通流动；进一步深化职务科技成果权属制度改革，创新人才参与知识产权分配的方式，全面激发人才创新创造活力、科技成果转化动力。

## **3. 释放知识产权国际协调效用，不断扩大高水平对外开放**

知识产权保护是国际社会长期关注的焦点和热点，形成我国参与知识产权国际竞争合作的制度性新优势，不仅能为我国企业开拓国际市场提供有力支撑，也将为世界知识产权事业发展注入新动力。例如，我国在改革开放之初，就开始建立知识产权制度，并积极加入相关国际公约、融入国际规则体系，持续提升知识产权保护水平，为打造对外开放新格局提供了必要保证。党的十八大以来，我国深入推进知识产权强国建设，推动知识产权事业取得历史性成就，走出了一条中国特色知识产权发展之路。习近平总书记指出，“知识产权保护工作关系国家对外开放大局，只有严格保护知识产权，才能优化营商环境、建设更高水平开放型经济新体制”。加强知识产权法

治保障，也是深度参与全球知识产权治理、扩大高水平对外开放的必然要求。

高水平对外开放是发展新质生产力的必要条件。习近平总书记强调，“要不断扩大高水平对外开放，深度参与全球产业分工和合作，用好国内国际两种资源”，“为发展新质生产力营造良好国际环境”。加快发展新质生产力，就要不断扩大高水平对外开放，稳步扩大规则、规制、管理、标准等制度型开放，不断增强我国在区域乃至全球经贸格局中的话语权，主动塑造有利外部环境。

统筹推进知识产权国际合作与竞争，开创高水平对外开放新局面，有利于为发展新质生产力

营造良好国际环境。在全球经贸摩擦加剧背景下，知识产权国际规则正迎来新一轮的深刻调整 and 变化。习近平总书记指出，“要统筹推进知识产权领域国际合作和竞争”，“要坚持人类命运共同体理念，坚持开放包容、平衡普惠的原则，深度参与世界知识产权组织框架下的全球知识产权治理”。正确处理知识产权国内法与国际法关系，既强调知识产权法治不能脱离本国发展实际，防止“盲目跟进”发达国家保护标准，又加强知识产权国际交流合作，推进完善知识产权国际保护规则。在知识产权保护国际谈判中，要敢于斗争、善于斗争，决不放弃正当权益，切实维护国家

利益；坚持共商共建共享，推动完善知识产权及相关国际贸易、国际投资等国际规则和标准，引导和推动全球知识产权治理体系向着更加公正合理方向发展。深化区域性知识产权合作，加强同共建“一带一路”国家的知识产权法律协作，倡导知识共享和信息流通；拓展知识产权合作范围，全面扩大审查授权、跨境执法、争端解决等方面对外合作，促进知识产权保护 and 贸易便利化，助力我国企业“走出去”。讲好中国知识产权故事、提供中国方案，积极融入全球知识产权治理体系，奋力开创高水平对外开放新局面，为发展新质生产力营造良好国际环境。○

来源：光明日报



## 热烈祝贺中国自动化学会监事长王飞跃教授荣获 IEEE SMC Lotfi A. Zadeh 开拓奖!

根据 IEEE 系统、人、控制论学会 (SMCS) 公告，中国自动化学会监事长、中国科学院自动化研究所研究员、澳门科技大学特聘教授王飞跃荣获扎德开拓者奖 (IEEE SMCS Lotfi A. Zadeh Pioneer Award)!

此奖系 IEEE SMCS 学会所设最高奖项，创立于 2014 年，以纪念模糊逻辑和计算智能的创始人与开拓者，控制理论状态方程方法和离散数字控制 Z 变换的开创者之一，已故美国加州伯克利大学教授 Lotfi A. Zadeh。王飞跃教授因在基于模糊逻辑与推理的智能系统方面的开拓性贡献以及在平行驾驶与平行测试和智能交通方面的开创性应用 (For pioneer contributions in fuzzy logic/reasoning based intelligent systems with groundbreaking applications in parallel driving/testing and intelligent transportation) 而获此奖，是第五位荣获此奖的国际学者。

此前，王飞跃教授曾荣获 IEEE Norbert Wiener Award 和 IEEE CRFID Emily Sopensky Meritorious Service Award.

详情请查看：[https://mp.weixin.qq.com/s/dmE74a7VQn8n-2f-ZmOw\\_w](https://mp.weixin.qq.com/s/dmE74a7VQn8n-2f-ZmOw_w)

# 可信数据空间发展行动计划（2024—2028年）

可信数据空间是基于共识规则，联接多方主体，实现数据资源共享共用的一种数据流通利用基础设施，是数据要素价值共创的应用生态，是支撑构建全国一体化数据市场的重要载体。为引导和支持可信数据空间发展，促进数据要素合规高效流通使用，加快构建以数据为关键要素的数字经济，制定本行动计划。

## 一、总体思路与目标

以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻落实党的二十大和二十届二中、三中全会精神，完整准确全面贯彻新发展理念，着力推动高质量发展，统筹发展和安全，以深化数据要素市场化配置改革为主线，以推动数据要素畅通流动和数据资源高效配置为目标，以建设可信可控、互联互通、价值共创的数据空间为重点，分类施策推进企业、行业、城市、个人、跨境可信数据空间建设和应用，为充分释放数据要素价值，激发全社会内生动力和创新活力，构建全国一体化数据市场提供有力支撑。到2028年，可信数据空间运营、技术、生态、标准、安全等体系取得

突破，建成100个以上可信数据空间，形成一批数据空间解决方案和最佳实践，基本建成广泛互联、资源集聚、生态繁荣、价值共创、治理有序的可信数据空间网络，各领域数据开发开放和流通使用水平显著提升，初步形成与我国经济社会发展水平相适应的数据生态体系。

## 二、实施可信数据空间能力建设行动

（一）构建数据空间可信管控能力支持可信数据空间运营者构建接入认证体系，保障可信数据空间参与各方身份可信、数据资源管理权责清晰、应用服务安全可靠。引导可信数据空间运营者建立空间资源使用合约和合作规范，利用隐私计算、使用控制、区块链等技术，优化履约机制，提升可信数据空间信任管控能力。推动可信数据空间运营者构建空间合约和履约行为存证体系，提升数据资源开发利用全程溯源能力，保障可信数据空间参与各方权益，保护数据市场公平竞争。

（二）提高数据空间资源交互能力引导可信数据空间运营者提供数据标识、语义转换等技术服务，

推动可信数据空间参与各方通过数据资源封装、数据资源目录维护等手段，实现数据产品和服务的统一发布、高效查询、跨主体互认。引导可信数据空间运营者加强协作，统一目录标识、身份认证、接口要求，实现各类数据空间互联互通，促进跨空间身份互认、资源共享、服务共用。

（三）强化可信数据空间价值共创能力面向共性应用场景，支持可信数据空间运营者部署应用开发环境，为参与各方开发数据产品和服务创造条件。指导可信数据空间运营者建立共建共治、责权清晰、公平透明的运营规则，探索构建动态数据价值评估模型，按照市场评价贡献、贡献决定报酬的原则分配收益。支持可信数据空间运营者与数据开发、数据经纪、数据托管、审计清算、合规审查等数据服务方开展价值协同和业务合作，打造可信数据空间发展的良好生态。三、开展可信数据空间培育推广行动

（四）积极推广企业可信数据空间支持国有企业和龙头企业建设企业可信数据空间，构建多方互信的数据流通利用环境，协同上下游企业开放共享高质量数据资源，打

造数字化供应链，提高计划、采购、生产、交付、运维等全流程协同效率。探索融合人工智能模型，提升企业数据洞察力和业务创新能力。引导龙头企业与物流、金融、信息科技等生产性服务平台加强协作，强化数据空间专业化服务能力，提高价值共创能力。对面向中小企业发展需求，提供普惠便利数据服务的企业可信数据空间予以重点支持。

**（五）**重点培育行业可信数据空间支持建设重点行业可信数据空间，创新共建共治共享的数据使用、收益分配、协同治理等机制，促进产业链端到端数据流通共享利用，支撑人工智能行业模型跨域研发应用，推动产业链由链式关系向网状生态转变。在科技创新领域，面向新药研制、新材料研发，推动基础科学数据集、高质量语料库汇聚，促进人工智能驱动的科研范式创新应用。在农业农村领域，以育种研发、农业生产、农产品追溯等典型场景为重点，促进多源涉农数据融合创新和流通应用，提升预警、监管、治理和决策水平。在工业领域，以装备、新能源汽车、能源等行业应用为重点，促进工业数据资源高效对接、跨域共享、价值共创，提高产业生态整体竞争能力。在服务领域，大力培育金融保险、商贸物流、医疗健康、气象服务、时空信息、碳足迹管理类行业可信数据空间，赋能一二三产业融合发展。

**（六）**鼓励创建城市可信数据空间支持有条件的地区开展城市可信数据空间建设，围绕城市规划建设、交通出行规划、医疗健康管理、重点人群服务保障、生态保护修护等典型场景，发挥公共数据资源的引领作用，推动公共数据、企业数据、个人数据融合应用，构建城市数据资源体系，支撑城市建设、运营、治理体制改革。鼓励因地制宜建设产业数据专区，探索建立分建统管、跨域协同的数据空间运营模式，打造城市级可信数据流通服务生态链，加快城市全域数字化转型。鼓励城市群加强协作，推动各类可信数据空间的数据资源高效流通共享、数据产品和服务协同复用、数据产业生态互促共进，支撑城市群数字一体化发展。

**（七）**稳慎探索个人可信数据空间研究制定个人数据开发利用政策文件，在切实保护个人数据合法权益的基础上，建立健全个人数据确权授权和合规利用机制。条件成熟时，在国家法律法规、充分尊重个人意愿、保护个人权益的前提下，稳慎探索个人可信数据空间建设试点，通过制度创新和技术创新，提供依场景授权许可的个人数据转移流动和开发利用服务。数据管理机构应会同相关部门加强监管，指导和规范个人数据依法合理有效利用。

**（八）**探索构建跨境可信数据空间建立高效便利安全的数据跨境

流动机制，支持自由贸易试验区出台实施数据出境管理清单（负面清单），构建数据跨境传递监控、存证备案、出境管控等能力体系。结合数据出境管理清单、重要数据目录等工作机制，提供合规指引、跨境申报咨询等服务，降低企业数据跨境成本和合规风险。探索跨国科研合作、供应链协同、企业管理等应用场景下的数据跨境便利化机制。

#### 四、推进可信数据空间筑基行动

**（九）**制订推广可信数据空间关键标准强化可信数据空间标准化工作，加快参考架构、功能要求、运营规范等基础共性标准研制，积极推进数据交换、使用控制、数据模型等关键技术标准制定。组织开展贯标试点，发挥标准化引领作用，推广标准应用示范案例和样板模式，引导可信数据空间规范发展。

**（十）**开展可信数据空间核心技术攻关组织开展使用控制、数据沙箱、智能合约、隐私计算、高性能密态计算、可信执行环境等可信管控技术攻关，推动数据标识、语义发现、元数据智能识别等数据互通技术集成应用，探索大模型与可信数据空间融合创新。推动可信数据空间资源管理、服务应用、系统安全等技术工具和软硬件产品研发，支持打造可信数据空间系统解决方案，培育一批数据技术和产品服务商。依托现有开源平台推动可信数据空间技术开源，建立多方参

与的创新孵化机制，提升技术创新研发和扩散转化效率。

**(十一)** 完善可信数据空间基础服务支持建设可信数据空间共性服务体系，降低可信数据空间建设和使用门槛。加快建设数据高速传输网，推动全国一体化算力网建设，支持可信数据空间多主体灵活传输数据资源的需求。提升数据跨区域管控云服务能力，实现数据可控可管可计量。

**(十二)** 强化可信数据空间规范管理建立健全可信数据空间合规管理指引，明确可信数据空间参与各方的基本要求和责权边界，防范利用数据、算法、技术等从事垄断行为。探索开展可信数据空间备案管理，动态发布备案名录。可信数据空间参与各方须遵守网络安全法、数据安全法、个人信息保护法等法律规定，落实数据分类分级保护、动态感知、风险识别、监测预警、应急处置、治理监管等要求，建立可信数据空间安全管理体系。按照国家标准，引导和规范第三方开展可信数据空间核心能力评估。

**(十三)** 拓展可信数据空间国际合作依托中欧、二十国集团、金砖国家、上海合作组织等多边框架，探索建立可信数据空间对话合作机制，形成发展共识。积极参与国际标准化组织（ISO）、国际电信联盟（ITU）、国际电工协会（IEC）等标准化组织活动，加强标准国际协调，牵头或参与制定相关

国际标准，推动我国可信数据空间技术标准、运营规则和认证体系的全球适用。面向“一带一路”等区域合作平台，推动可信数据空间国际合作示范项目建设，探索国内外数据空间互联互通。

## 五、保障措施

**(十四)** 加强统筹联动国家数据主管部门会同相关部门，加强统筹协调，探索跨部门联合管理模式，共同推进各项工作落实落地。各地区要把可信数据空间推广应用作为促进数据“供得出、流得好、用得好、保安全”的重要举措，结合本地区发展基础和特色优势，组织实施好相关可信数据空间建设运营工作，推动政策落地见效。

**(十五)** 加大资金支持统筹利用各类财政资金，加大可信数据空间制度建设、关键技术攻关、项目试点、应用服务等方面的资金支持。鼓励地方统筹利用多渠道资金，支持可信数据空间繁荣发展。引导创业投资基金等社会资本加大对可信数据空间投入力度，鼓励投早投小。在依法合规、风险可控的前提下，鼓励有条件的金融机构与可信数据空间运营者合作建立基于数据的增信体系，创新符合数据要素发展特征的金融产品和服务。

**(十六)** 加强人才培养支持和指导高等院校、职业学校加强可信数据空间相关专业建设。强化校企联合培养，鼓励企业与高校、科研

院所共建实验室、实习实训基地，加强可信数据空间技术开发、数据分析、数据合规、数据服务等专业人才培养。完善可信数据空间项目孵化、资金扶持、技术指导、市场对接等创新创业服务体系，营造良好氛围，激发创新创业主体活力。

**(十七)** 加强标杆引领加强全国可信数据空间应用推广工作，打造一批数据资源丰富、数据价值凸显、商业模式成熟、产业生态丰富的可信数据空间标杆项目，遴选一批可信数据空间典型应用场景和解决方案。建立完善可信数据空间发展引导体系，健全成效评估工作机制，组织开展可信数据空间动态监测评估，加强监测评估结果反馈运用，促进可信数据空间建设和应用水平迭代发展。

**(十八)** 推动交流合作充分发挥产业联盟、标准化组织、行业协会等引导作用，促进可信数据空间制度规则、技术研发、能力构建、运营推广、市场服务等方面的交流与合作。引导建立可信数据空间治理行业自律机制，防范前沿技术应用风险。组织编制可信数据空间系列知识读本，围绕政策制度、标准规范、技术应用、标杆案例等，广泛开展宣贯培训。鼓励开展多种形式的可信数据空间对接活动，推进跨空间、跨域的数据产品和服务交流共享。○

来源：国家数据局

# 标准提升引领原材料工业优化升级行动方案 (2025—2027年)

原材料工业是支撑国民经济发展的基础性产业，是产业基础再造的主力军和工业绿色的主战场。标准在原材料工业发展中发挥着基础性、引领性作用。经过多年发展，我国原材料工业已经建立起较为完善的标准体系，标准供给质量持续提升，为产业转型升级、创新成果转化、产业链供应链保障能力建设等提供了较好支撑。面向发展新质生产力、推进新型工业化的新要求，我国原材料工业在标准管理协同、标准供给水平、标准实施效果等方面仍有较大提升空间。为贯彻落实《国家标准化发展纲要》《“十四五”原材料工业发展规划》《新产业标准化领航工程实施方案（2023—2035年）》等要求，以标准提升引领原材料工业供给高端化、结构合理化、发展绿色化、产业数字化、体系安全化发展，特制定本方案。

## 一、总体要求

以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻党的二十大和二十届二中、三中全会精

神，深入落实全国新型工业化推进大会部署，完整准确全面贯彻新发展理念，统筹发展和安全，坚持系统推进、继承创新、分级实施、开放共享的原则，按照“缺标补标、低标提标、优标转标、有标贯标”的思路，加快构建引领原材料工业高质量发展的标准体系，以数字化转型、绿色低碳、新材料产业壮大为着力点，加快关键急需标准研制；以筑牢保障人身健康和生命财产安全、生态环境安全底线为立足点，建设协调统一的强制性国家标准，推进推荐性国家标准、行业标准协调配套；以需求牵引和标杆带动为切入点，强化标准实施应用，为促进原材料工业优化升级，加快发展新质生产力，推进新型工业化，建设制造强国提供有力支撑。

到2027年，引领原材料工业更高质量、更好效益、更优布局、更加绿色、更为安全发展的标准体系逐步完善，标准工作机制更加健全，推动传统产业深度转型升级、新材料产业创新发展的标准技术水平持续提升。

——**标准体系更加优化。**完成石化、化工、钢铁、有色金属、

建材、稀土、黄金等行业的标准评估及优化，分行业构建支撑原材料工业高质量发展的标准体系。

——**标准供给能力大幅提升。**发布并实施200项以上数字化转型、100项以上新材料领域以及100项以上绿色低碳标准，推动10项以上强制性国家标准立项。制修订500项以上基础通用和质量提升类标准。

——**标准实施应用不断深化。**面向数字化转型、绿色低碳、新材料等原材料重点领域，遴选300项以上标准应用优秀案例和100项以上典型场景。

## 二、主要任务

（一）**开展标准体系优化建设。**分行业开展原材料工业标准体系评估，推进现有标准体系优化升级。聚焦高端化、智能化、绿色化发展需要，以优化存量标准为目标，废止一批已被替代、产品或技术已被淘汰、标准实施效果差，内容不具备可操作性，不再适用的标准；整合一批标准化对象相似、标准颗粒度过细过小、标准技术内容交叉重复或标

准分类尺度不一的标准；修订一批适用范围不能覆盖新材料产品、绿色低碳等新工艺、数字化转型等新技术以及技术内容不适应市场需求，与上下游标准不配套的标准；制定一批符合数字化转型、节能降碳等最新产业政策要求、行业技术创新和产业发展趋势的标准。合理布局材料交叉领域标

准制定，建立完善新材料标准体系，加强国家标准、行业标准、团体标准、企业标准的系统性、协同性。

**（二）加快数字化转型标准研制。**围绕研发设计、生产制造、经营管理、数据安全和装备智能化发展需要，持续完善原材料重点行业智能制造标准体系。开展

大数据、云计算、人工智能等信息技术与原材料工业深度融合相关标准制修订。面向采选、冶炼、加工、管网优化、窑炉控制等典型场景，加快基础共性、关键技术和细分行业应用标准研制。制定石化化工、钢铁、有色金属、建材等重点行业数字化转型水平与成效评估标准。

### 专栏1 数字化标准提升工程

石化化工行业。重点研制基础共性、关键数据和模型技术、关键应用技术等数字化领域标准，优先制修订炼化、现代煤化工、化肥、轮胎、氯碱、精细化工及化工新材料等细分领域数字化转型诊断评估标准，鼓励制定数据安全标准。

钢铁行业。重点研制基础共性、智能装备、智能车间、智能工厂、数字化绿色化协同、产业链协同以及人工智能等新一代信息技术应用标准，优先制修订智慧矿山、智能工厂、智能检测、协同降碳、数字化平台、数据安全等关键技术标准。

有色金属行业。重点研制基础共性、智能采选、冶炼、加工工厂等标准，优先制修订数据采集、数据交互、数据安全、数字化平台、智能装备、生产工艺优化、智能检测等关键技术标准。

建材行业。重点研制基础共性、智能装备接口、智能矿山、智能工厂、智慧园区等标准，优先制修订智能服务、智能赋能技术、集成互联等标准。

到2027年，发布并实施200项以上数字化转型标准。

**（三）推进绿色低碳标准建设。**聚焦低碳技术、碳减排、绿色产品等方面，坚持标准引领、有序提升，推动原材料重点行业大规模设备更新，引导传统产业改造提升。开展电炉短流程炼钢、氢冶金等低碳工艺以及相关技术装备、管理评价等标准研制，鼓励绿电—绿氢—石化、煤化工耦合技术标准预研。重点研制石化化工、钢铁、有色金属、建材等行业重点排放单位碳排放核算方法，钢铁、电解铝、

水泥、尿素、氢等重点产品碳足迹核算规则等碳达峰碳中和标准，对实施效果好的团体标准按程序采信为行业标准或国家标准。加快绿色建材、生物基材料等新型绿色产品标准及绿色工业园区、绿色工厂、绿色产品评价通则制修订，持续推进绿色工厂、绿色产品评价标准研制。

**（四）加强新材料产品标准培育。**围绕推动重点产业链高质量发展，突出应用场景和产业研发紧密

结合，同步推进关键标准研制实施。强化产业链协同创新，鼓励跨行业应用，制定一批通用性强的重点先进基础材料标准。坚持应用牵引，围绕生物医药、船舶及海洋工程、新能源等重点领域，加快推动一批创新成果转化成为关键战略材料标准。聚焦前沿材料产业化重点发展指导目录，利用国内超大规模市场条件下制定标准技术响应速度快、标准研制效率高等优势，开展前沿新材料标准研制。

## 专栏 2 绿色化标准升级工程

石化化工行业。重点制修订废弃化学品处置及综合利用，大宗废盐废酸、废旧塑料、废旧轮胎等废弃物资源化利用，生物基材料、绿色制造、节能节水等标准。

钢铁行业。重点制修订电弧炉短流程炼钢、氢冶金、极致能效、近终形轧制、二氧化碳回收与利用等标准。

有色金属行业。重点制修订有色金属、稀土及黄金领域绿色高效开采、再生原料、工业固废或副产品资源化利用等标准。

建材行业。重点制修订单位产品能耗限额、“六零”示范工厂评价、绿色建材评价、工业固废等资源综合利用等标准。

到 2027 年，发布并实施 100 项以上绿色低碳标准。

## 专栏 3 新材料标准创新工程

先进基础材料。重点开展海洋工程用钢、特种装备用钢、钢结构建筑用钢、高温合金、耐蚀合金、先进铝镁铜钛镍等有色金属、特种焊接材料、高性能树脂、高性能合成橡胶、功能性膜材料、电子化学品、可降解材料、先进无机非金属材料、超韧陶瓷材料、高性能纤维及制品、高性能纤维复合材料等先进基础材料标准制修订。

关键战略材料。重点开展超高纯金属及合金靶材 / 蒸发料、形状记忆合金、高端聚烯烃、电子气体分离膜材料、电池膜材料、光学膜材料、光伏用膜材料、生物基新材料、特种涂料、特种胶黏剂、新型催化剂、高端试剂、稀土储氢材料、稀土磁性材料、稀土光功能材料、反光釉料、新能源复合金属材料、新能源电池材料等关键战略材料标准制修订。

前沿新材料。重点开展超材料、超导材料、单 / 双壁碳纳米管、二维半导体材料、负膨胀合金材料、高熵合金、高性能气凝胶隔热材料、金属有机氢化物、金属基单原子合金催化材料、量子点材料、先进光学晶体材料、先进 3D 打印材料、液态金属、固态电池材料等前沿新材料标准制修订。

**（五）夯实行业标准化安全质量基础。**加强基础共性、关键技术、先进工艺、试验方法等基础通用标准研制，鼓励企事业单位开展国家级标准样品和标准物质、计量校准技术规范研发，不断完善原材料工业基础标准群。强化质量标准建设，系统推进产品使用说明书、质量追溯、质量分级、质量控制能力等标准研制，支持企业建立生产过程控制和质

量管控体系。围绕人身健康和生命财产安全、生态环境安全以及社会经济管理等重点领域，加强钢铁、有色金属、建材等行业安全生产类强制性国家标准研制，开展特种玻璃、危化品、矿产品等领域安全技术类强制性国家标准制修订，筑牢产业安全发展基础。在行业标准研制过程中统筹考虑安全生产等内容，与现行的安全生产国家标准、行业标准相

协调。

**（六）强化标准实施应用。**以用户需求为牵引，持续畅通反馈渠道，加强标准贯标推广和实施应用效果的跟进评估，探索遴选一批标准应用的优秀案例和典型场景。强化标准与政策规划的有机衔接和协同，在行业规范条件、新材料首批次应用、平台建设等政策举措中积极采用先进适用标准。研究制定重点标准实施指引，

#### 专栏4 原材料标准筑基工程

**基础通用。**聚焦流程型行业共性技术，加强基础共性标准，新技术、新工艺、新产品、新方法标准，以及装备、工程建设等相关标准研制。

**质量提升。**推动原材料工业产品和装备相关标准的升级换代，提升产品供给质量，促进用材结构升级。开展轮胎、涂料、装饰装修材料等产品使用说明书标准研制。推进水泥、安全玻璃、防水卷材、轮胎、化肥等重点产品质量追溯标准，合成橡胶、轴承钢等基础产品质量分级标准，建材企业质量控制能力分级标准制修订。研究制定涂层剂、聚氨酯树脂等挥发性有机物含量限值强制性国家标准，建立低（无）挥发性有机物含量产品标识制度。

**本质安全。**在原材料标准中积极落实安全生产等要求，推动立项一批涉及人身健康和产品安全相关的强制性国家标准，加快退敏爆炸物、特种玻璃、涂料等安全技术规范，铝加工（深井铸造）等安全规范，石墨和萤石有害物质限量，航空轮胎等强制性国家标准研制进度，守牢产业发展底线。

到2027年，推动10项以上强制性国家标准立项，制修订500项以上基础通用和质量提升类标准。

加大标准应用力度，引导企业在生产经营活动中落实相关标准要求，提升管理和工艺水平。鼓励企业建设标准化公共服务基础设施，完善标准服务网络，打造一批标准引领高质量发展的先导型、创新型标杆企业，更好带动先进标准实施应用。

### 三、保障措施

**（一）加强组织领导。**完善原材料工业标准化工作协调机制，加强上下游衔接和工作协同，充分发挥各行业标准化初审机构、各相关标委会在体系维护、标准研制和宣贯实施等环节的作用。

完善原材料工业标准化技术组织协作体系，研究建立新材料标准化统筹机制，及时解决标准制修订和实施中的问题。有关行业协会、地方工业和信息化主管部门、重点企业等要加强协作，合力推进各项任务实施落地。

**（二）加大资源投入。**加强对原材料工业标准化工作的经费支持，推动科研和产业化专项加大对数字化转型、绿色低碳、新材料、质量安全等领域标准研究的支持力度。支持地方加大标准化工作力度，鼓励重点企业提高标准化相关经费投入，积极引导社会资本向标准化领域汇聚。

**（三）强化人才建设。**提升标准化从业人员的专业化水平，培养一批既懂原材料工业又懂标准、具有全球化视野的复合型标准化人才。完善原材料工业标准化人才培训体系，面向重点行业开展专题培训。鼓励标准化研究机构积极引进原材料领域标准化高端人才。支持企业将标准化人才纳入职业能力评价和激励范围，优化标准化人才梯队。建立原材料工业标准化工作专家库，强化对标准化工作的决策支持。○

来源：工业和信息化部科技司、原材料工业司



# 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64个,工作委员会11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、课题研究及决策支撑、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壮大,成为连接政府、产业、学术、科研、会员的重要纽带,致力于成为国内外有影响力的现代社会团体组织。

## 学会品牌学术活动

- 中国自动化大会 ·中国认知计算与混合智能学术大会 ·中国自动化与人工智能教育大会
- 国家智能车发展大会 ·国家机器人发展大会 ·国家智能制造大会 ·国家工业软件大会
- 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
- 中国控制会议 ·中国过程控制会议 ·青年学术年会

## 学会奖励奖项

- 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论文卓越行动工程 ·CAA青年托举工程
- CAA教育教学成果评价 ·CAA科学普及成果

## 学会主办期刊

- 中国自动化学会通讯 ·自动化学报 ·自动化学报(英文版)
- 信息与控制 ·机器人 ·模式识别与人工智能 ·电气传动
- 自动化博览 ·国际智能控制与系统学报(英文)



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