



2025年 第4期

江苏省计算机学会

COMMUNICATIONS OF THE JSCS



- 热烈祝贺周志华理事长当选中国科学院院士
- 以智能为翼，拓展大模型时代的知识边界
- 以智联为网，护航物联安全

江苏省计算机学会常务理事单位

南京晓庄学院信息工程学院、人工智能学院

南京晓庄学院是由江苏省和南京市共建、南京市属全日制公办本科院校。学校前身是伟大的人民教育家陶行知先生1927年创办的“晓庄试验乡村师范”，是我国乡村师范教育发祥地。2000年，南京师范专科学校、南京教育学院和南京市晓庄师范学校合并建立南京晓庄学院。2014年，南京幼儿高等师范学校并入。2024年，学校获批硕士学位授予单位。学校现有方山、莫愁和晓庄（行知园）三个校区。学校设有15个专业学院，涉及教育学、文学、历史学、经济学、法学、理学、工学、管理学、艺术学等九大学科门类。

学院设有计算机科学与技术、软件工程、数据科学与大数据技术、人工智能、数学与应用数学（师范），小学教育（数学）6个本科专业和电子信息（人工智能）专业硕士学位授予点，其中计算机科学与技术、数学与应用数学（师范）和小学教育（数学）专业均是教育部“双万计划”国家一流专业，计算机科学与技术同时也是江苏省第二期和第三期品牌专业建设点，江苏省“卓越工程师教育培养计划”2.0专业建设点。软件工程专业是江苏省产教融合型品牌专业建设点。现有教职员109人，其中专任教师81人，具有博士学位42人，教授10人，副教授26人，拥有江苏高校“青蓝工程”优秀教学团队1个，江苏高校“青蓝工程”中青年学术带头人3人，江苏高校“青蓝工程”培养对象9人，江苏省高层次人才培养计划（“333”工程）培养对象3人，江苏省“六大人才高峰”高层次人才1人。学生人数2300余人。

学院现有现有国家一流课程1门，计算机科学与技术学科和数学学科2个南京市一级学科，拥有江苏省人工智能+教育工程研究中心，江苏省基础教育资源网络化工程技术研究中心，江苏省“人工智能+教育”科技馆，江苏省实验教学示范中心等4个省级平台，南京市可信云计算与数据分析重点实验室，南京市智能信息处理重点实验室，南京市基于教育云的人工智能研究科研创新团队等多个市级平台。近年来获批国家自然科学基金、省部级项目30余项。在中国计算机设计大赛、全球人工智能算法精英大赛、中国大学生机器人竞赛、中国人工智能大赛、全国大学生数学（建模）竞赛、江苏省师范生教学基本功大赛等高水平大赛中获得奖项近350余项，其中在中国国际大学生创新大赛中金奖1项，挑战杯国家级铜牌3项，省级特等奖1项、金牌1项、银牌2项、铜牌3项。

近年来，学院荣获江苏省党建工作样板支部、南京市“推动高质量发展、争当示范引领”先进集体、南京市先进党支部等荣誉。

学院在长期的办学过程中，坚持弘扬教育家精神、践行陶行知教育思想，形成了“教学做创用”合一的育人模式，注重创新能力、工程实践能力和创业意识的培养，以“四年一贯制”“全方位”校企联合“嵌入式”人才培养为平台，培养具有“厚基础、宽口径、强实践、国际化”的应用型创新人才，不断深化教学改革。



热烈祝贺周志华理事长当选中国科学院院士！

2025年11月21日，中国科学院正式公布2025年院士增选结果，江苏省计算机学会理事长、南京大学副校长周志华教授当选中国科学院院士！

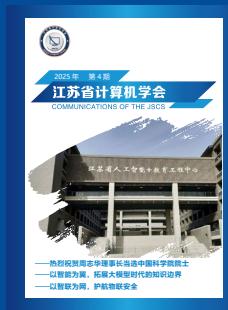


此次当选中国科学院院士，不仅是周志华教授个人的荣誉，更是江苏省计算机学界的一大盛事！我们坚信，在周志华院士的带领下，江苏省计算机学会必将迎来更加辉煌的发展，为我国计算机科学与技术的发展做出新的更大贡献！



江苏省计算机学会通讯

COMMUNICATIONS OF THE JSCS



顾问委员会

主任：周志华

副主任：武港山 耿新 刘昊

陈兵 李千目 李凡长

周勇 肖甫 李斌

吴小俊 毛启容

委员：罗军舟 肖亮 申富饶

陶先平 吉根林 胡孔法

张道强 黄强 邓建明

李畅

编委会

主编：路通

副主编：金莹 申富饶 聂长海

张洁

编委：徐大华 石克 吴春雪

严诚

地址：中国江苏省南京市栖霞区

仙林大道 163 号

邮 编：210023

电 话：025-89680909

邮 箱：jscs@njn.edu.cn

封面

南京晓庄学院信息工程学院、人工智能学院

教学成果

01 | AI 赋能，思政铸魂：图像处理课程教学新范式探索 | 朱旗

政策解读

05 | 国务院关于深入实施“人工智能+”行动的意见

12 | 激活数据要素市场化配置改革动能，筑牢“人工智能+”行动发展基石

学术交流

16 | 基于深度连续学习的多标签图像分类方法 | 杜凯乐

25 | 基于异构网络嵌入的个性化论文推荐方法研究 | 王杰

会员风采

33 | 以智联为网，护航物联网安全——在智能物联网容错传输技术研究中

勇攀高峰 | 樊卫北

36 | 以智能为翼，拓展大模型时代的知识边界——在三航智能研究中

深耕细作 | 李丕绩

科学普及

39 | “意念控制”成真？脑机接口如何让“心想事成”走进现实

42 | 当生命被编程：AI 教会细胞“听话”，未来启发机器自进化

科创成果

50 | 混合云架构的算力底座关键技术研究与应用

会员单位

56 | 南京极域信息科技有限公司

封底

江苏源本科技股份有限公司

AI 赋能，思政铸魂：图像处理课程教学新范式探索

——2024 年江苏省计算机学会教学新秀奖南京航空航天大学朱旗教授

一、成果简介

在图像处理与分析这一领域，技术革新日新月异，传统的教学模式已难以满足现代教育的需求。为了适应这一变化，朱旗教授经过多年的教学实践和深入探索，提出了一系列创新的教学改革措施，旨在全面提升学生的实践能力和创新精神。

1) 教学内容的现代化更新

首先，朱旗教授对教学内容进行了全面更新。随着图像处理技术的飞速发展，传统的教材内容难以满足学生对当前新技术的学习需求。因此，朱旗教授在教学资源中引入了最新的图像处理技术和理论，如深度学习、生成对抗网络等前沿技术。这些内容不仅包含了理论知识，还结合了丰富的实际应用案例，确保了课程内容的前沿性和实用性。

2) 教学方法的革新

其次，朱旗教授对在教学方法上进行了革新。传统的教学方法往往侧重于理论知识的传授，而忽视了学生的实践操作能力。为了改变这一现状，朱旗教授采用了任务驱动的教学方法。通过具体的项目引导学生学习，使学生在完成任务的过程中学习和掌握知识。这种方法不仅提高了学生的学习兴趣，也锻炼了他们的实践能力和创新能力。

3) 教学手段的现代化提升

此外，朱旗教授还利用现代多媒体技术，制作了丰富的教学课件，使教学内容更加生动有趣。在教学的过程中对图像处理方法效果进行展示和比对，便于学生对知识点的深刻理解。同时，还利用网络教学平台，提供了大量的数字化教学资源，为学生的自主学习提供了便利。

4) 实验教学的创新

在实验教学方面，朱旗教授进行了实验内容和教学方式的改革。传统的实验教学往往是验证性的，学生只是被动地按照实验指导书进行操作。朱旗教授在实验教学中引入了探究性实验，鼓励学生主动探索和解决问题。此外，还将科研项目设计为实验项目，让学生在实践中学习和掌握图像处理的技术和方法。

5) 考核方式的创新

最后，朱旗教授对考核方式进行了创新。传统的考核方式主要是笔试，这种方式很难全面评价学生的学习能力和创新能力。因此，朱旗教授改革了考核方式，将考核内容分为学习能力、工作能力和创新意识三个部分，通过现场工作汇报来评价学生的学习成果。



通过这些教学改革措施，朱旗教授取得了显著的教学成果。学生的实践能力和创新能力得到了显著提高，在竞赛中取得了优异的成绩。同时，这些改革措施也得到了同行的认可，为其他课程的教学改革提供了借鉴。总之，朱旗教授的教学改革措施不仅提升了学生的实践能力和创新能力，也为图像处理与分析课程的教学改革提供了新的思路和方法。这些改革措施的实施，无疑将为学生的未来职业生涯和学术发展奠定坚实的基础。

二、成果主要解决的教学问题及解决教学问题的方法

在当今这个信息化、数字化飞速发展的时代，教育领域正经历着前所未有的变革。随着科技的不断进步，传统的教学模式已经无法满足新时代人才培养的需求。为了适应这一变化，教育者们开始探索新的教学方法和资源，以期培养出能够适应未来社会需求的高素质人才。在这样的背景下，朱旗教授旨在通过整合教学资源，开发出一套基于丰富案例技术的多媒体教学资源，以解决当前教学中存在的问题，并为学生提供一个更加高效、互动的学习环境。充分利用大数据技术和前沿的 AI 计算框架，如华为的 MindSpore 平台，来丰富教学内容，提高教学效率。通过这种方式，不仅能够为学生提供一个实际的、前沿的图像处理开发平台，而且能够通过其丰富灵活的设计，使得学生能够更快地开发和部署 AI 应用。此外，本项目还注重思政教育的引领作用，旨在培养学生的家国情怀和社会责任感，以及他们在实践中解决具体科学问题的能力。

整合教学资源，开发一套基于丰富案例技术的多媒体教学资源。为了适应新时代科技人才培养的需求，朱旗教授整合了教学资源，开发了一套基于丰富案例技术的多媒体教学资源。这套资源的开发采用了大数据技术，将传统教学中的教案、实验、知识点重难点等作为基础，并结合了相关领域的前沿信息。在这一过程中，朱旗教授特别引入了华为的 MindSpore 平台，这是一个全场景 AI 计算框架，提供了自动微分、分布式训练和推理、模型部署等功能，支持多种硬件平台，包括 CPU、GPU 和 Ascend AI 处理器。MindSpore 的采用，不仅为学生提供了一个实际的、前沿的 AI 开发平台，而且通过其丰富的 API 和灵活的设计，使得学生能够更快地开发和部署 AI 应用。还通过企联合开发等手段，整合了教学资源。从教学内容设置、教学大纲、教材等教学资源要素出发，建立了多媒体方式的多样化讲义和教材。这些资源不仅包括传统的文本和图像，还包括了诸多图像处理方法的对比效果，使得教学内容更加生动有趣，提高了学生的学习兴趣和效率。另外，朱旗教授还带领学生参与华为 AI 框架的开发，已向华为公司交付多个算子和模型，助力 AI 框架的国产替代，并被华为公司授予“云与计算先锋教师”称号。

思政引领，培养具有家国情怀，追求卓越、引领未来的领军人才。首先，以思政知识促进高校教学方法改革，引领课程建设，激发学生对相关学科的极大兴趣，使学生意识到图像处理软件对科技发展的重要性。其次，培养学生的爱国主义精神，树立为实现中国梦不断奋斗的理想和信念，引导学生充分认识计算机视觉相关领域开发的重要性。面向图像处理产业界需求的育人目标，从多维度培养学生爱国情怀，树立社会责任感，增强法制意识。并且，培养学生理论联系实际的科学态度，在实践中解决具体科学问题，例如建模与仿真、设计实验、分析与解释数据、并通过信息综合得到合理有效的结论，以强化学生的科学精神，增强学生对计算机视觉的兴趣，形成不断探索、勇攀高峰、持之以恒和勇于创新的精神。引导学生将科学使命内化于心，外化于行；引导学生将科学使命与家国情怀相联系，为学习赋予使命感与责任感。本项目致力于培养在图像处理产业及生态发展过程中起到推动作用的时代新人；培养学生研发自主可控软件的使命感和责任感，解决国家战略需求问题的爱国情怀。

校企结合，切实推动产学研用深度融合。建设创新实验室等多种适合激发学生学习主动性和促进学生能力培养

的教学和实验环境，探索以领域科研项目和企业实践项目为案例的任务驱动式为主的多种教学方式。施行课程实验、综合实训实习和毕业设计为核心的“三层递进式实践教学体系”，探索并形成校企结合、教研相长的实践教学方法，依托校企合作共建课程资源，与华为等企业进行深层次合作，创新型改革教学方案、教学计划、教学多媒体课件、教学讲义、实验项目和实验计划等。本项目紧跟世界知名企业正在使用或者最新推出的技术，推动物联网、云计算和大数据等课程建设及实验课程改革，将企业中实际使用的新方法、新技术、新工具等相关资源引入到课堂教学之中，推动教学改革与进步。创新教学过程中借鉴 MOOC、SPOC 及翻转课堂相结合的混合式教学特点，将信息技术与教育教学过程融合，实现线上教学，线上实训，基于实训项目、实验资源、知识点案例，实现软件工程类课程教学资源的立体化建设，为新工科建设、工程教育认证、教育数字化转型赋能。使得当前的教学方式、内容与企业要求无缝衔接，可以培养学生快速掌握新技术和可持续竞争的能力。将理论教学与工程实践相结合，引导学生采用现代设计方法和手段，对真实问题进行分析和建模，培养学生分析问题、解决问题、动手实践以及专业综合的能力。

朱旗教授通过整合教学资源，开发了一套基于丰富案例技术的多媒体教学资源，以解决当前教学中存在的问题。采用了大数据技术，结合了前沿的 AI 计算框架，如华为的 MindSpore 平台，来丰富教学内容，提高教学效率。同时，还注重思政教育的引领作用，培养学生的家国情怀和社会责任感。通过校企合作，我们将企业中实际使用的新方法、新技术、新工具等相关资源引入到课堂教学之中，推动教学改革与进步。此外，还借鉴了 MOOC、SPOC 及翻转课堂相结合的混合式教学特点，将信息技术与教育教学过程融合，实现线上教学，线上实训，基于实训项目、实验资源、知识点案例，实现图像处理课程教学资源的立体化建设。通过这些努力，有望培养出一批具有创新精神、实践能力和国际视野的高素质人才，为国家的科技发展和产业进步做出贡献。

三、成果的创新点

1) 深入推进新型技术与教育教学的深度融合，探索新兴技术促进教育教学的方法和途径，适应国家和区域经济社会发展的新需求，加强课程内容建设、引入教育新理念、推动课程教学改革、改进学生学习过程管理。推动新时代高新产业发展，国内大数据、云计算和计算机视觉等技术的进步，为计算机领域创新性、持续性发展做出贡献。

2) 充分发挥互联网技术优势，积极构建信息时代以学生发展为中心的高校人才培养体系。本课程项目正是基于传统教育方式资源整合有限，师生实时交流、答疑困难，青年教师培训与提升途径不足等方面改革，针对新工科要求和软件工程专业培养的特点及其特殊性，推出高质量图像处理与分析课程，打破传统的课堂讲授的教学模式，推进新时代人才培养体系的建设与发展。

3) 该课程结合高校旨在计算机视觉领域培养具有家国情怀，追求卓越、引领未来的领军人才；致力于培养在计算机产业及生态发展过程中起到推动作用的时代新人；培养学生研发自主可控软件的使命感和责任感、解决国家战略需求问题的爱国情怀。培养学生理论联系实际的科学态度，在实践中解决具体科学问题，例如建模与仿真、设计实验、分析与解释数据、并通过信息综合得到合理有效的结论，以强化学生的科学精，为学生在人工智能、计算机视觉、机器学习等领域从事研究与开发打下扎实的基础。

4) 在所讲授课程中引入创新实践型教育模式，培养面向未来的创新型人才。探索图像处理课程中理论与实践相结合的教学方法，积极对实践内容和过程进行优化，使学生能够深入理解和灵活运用课堂知识，并且使得课堂教学与实践环节相互促进。通过学院云课堂向本科生介绍领域前沿技术和应用，被学生评选为该系列讲座中最感兴趣



的讲座。被华为公司授予“云与计算先锋教师”称号，作为导师成员入选南航“五好导学团队”。

四、成果的推广应用效果

指导学生开发的基于人工智能的脑网络图分析软件包，应用于解放军东部战区总医院、南京脑科医院等单位采集的脑影像分类任务，显著提升了识别精度和效率。指导学生所设计的多模态脑影像融合方法能够显著提升对模态缺失条件下的识别表现，获得了第五届亚洲人工智能技术大会(ACAIT2021)最佳学生论文奖。指导学生开发的智能分析系统被用于齐鲁医院的骨质疏松全病程管理，现已应用于6000余例被试数据上，显著提升了对相关疾病的早期预测效果，相关成果获得了中国国际大学生创新大赛省赛金奖（第二名）。

学会动态 ●

第二届江苏省计算机教育大会在徐州召开

11月2日，由江苏省计算机学会主办，江苏省计算机学会计算机教育专委会、江苏省计算机学会教育工作委员会、江苏省计算机学会特色化软件人才培养专委会、中国矿业大学计算机科学与技术学院/人工智能学院、CCF YOCSEF南京等单位承办，华为技术有限公司、科大讯飞股份有限公司、机械工业出版社有限公司、麒麟软件有限公司、北京理工大学出版社有限责任公司、电子工业出版社有限公司等单位协办的第二届江苏省计算机教育大会在徐州举行。本次大会以“智能时代计算机教育的变革与机遇”为主题，聚焦人工智能赋能计算机教育，促进智能技术与教育教学的深度融合。中国矿业大学党委副书记李江涛，大会主席江苏省计算机学会副理事长陈兵教授，江苏省计算机学会副理事长武港山教授、周勇教授、毛启容教授，江苏省计算机学会秘书长金莹教授，江苏省计算机学会教育工委主任陶先平教授，中国矿业大学教务部部长石礼伟，中国矿业大学计算机科学与技术学院/人工智能学院党委书记周治国、院长孙彦景等领导出席会议。大会还吸引了来自省内外70余所院校师生及高新企业的200多名代表齐聚一堂，共商智能时代计算机教育发展大计。江苏省计算机学会计算机教育专委会主任黄圣君主持开幕式。

智能时代计算机教育的变革与机遇 第二届江苏省计算机教育大会

江苏·徐州 2025年11月1日-2日



国务院关于深入实施“人工智能+”行动的意见

来源：中国政府网

http://www.scio.gov.cn/zdgz/jj/202509/t20250901_928364.html

各省、自治区、直辖市人民政府，国务院各部委、各直属机构：

为深入实施“人工智能+”行动，推动人工智能与经济社会各行业各领域广泛深度融合，重塑人类生产生活方式，促进生产力革命性跃迁和生产关系深层次变革，加快形成人机协同、跨界融合、共创分享的智能经济和智能社会新形态，现提出如下意见。

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，完整准确全面贯彻新发展理念，坚持以人民为中心的发展思想，充分发挥我国数据资源丰富、产业体系完备、应用场景广阔等优势，强化前瞻谋划、系统布局、分业施策、开放共享、安全可控，以科技、产业、消费、民生、治理、全球合作等领域为重点，深入实施“人工智能+”行动，涌现一批新基础设施、新技术体系、新产业生态、新就业岗位等，加快培育发展新质生产力，使全体人民共享人工智能发展成果，更好服务中国式现代化建设。

到2027年，率先实现人工智能与6大重点领域广泛深度融合，新一代智能终端、智能体等应用普及率超70%，智能经济核心产业规模快速增长，人工智能在公共治理中的作用明显增强，人工智能开放合作体系不断完善。到2030年，我国人工智能全面赋能高质量发展，新一代智能终端、智能体等应用普及率超90%，智能经济成为我国经济发展的重要增长极，推动技术普惠和成果共享。到2035年，我国全面步入智能经济和智能社会发展新阶段，为基本实现社会主义现代化提供有力支撑。

二、加快实施重点行动

(一) “人工智能+”科学技术

1. 加速科学发现进程。加快探索人工智能驱动的新型科研范式，加速“从0到1”重大科学发现进程。加快科学大模型建设应用，推动基础科研平台和重大科技基础设施智能化升级，打造开放共享的高质量科学数据集，提升跨模态复杂科学数据处理水平。强化人工智能跨学科牵引带动作用，推动多学科融合发展。

2. 驱动技术研发模式创新和效能提升。推动人工智能驱动的技术研发、工程实现、产品落地一体化协同发展，加速“从1到N”技术落地和迭代突破，促进创新成果高效转化。支持智能化研发工具和平台推广应用，加强人工



智能与生物制造、量子科技、第六代移动通信（6G）等领域技术协同创新，以新的科研成果支撑场景应用落地，以新的应用需求牵引科技创新突破。

3. 创新哲学社会科学研究方法。推动哲学社会科学研究方法向人机协同模式转变，探索建立适应人工智能时代的新型哲学社会科学研究组织形式，拓展研究视野和观察视域。深入研究人工智能对人类认知判断、伦理规范等方面深层次影响和作用机理，探索形成智能向善理论体系，促进人工智能更好造福人类。

（二）“人工智能+”产业发展

1. 培育智能原生新模式新业态。鼓励有条件的企业将人工智能融入战略规划、组织架构、业务流程等，推动产业全要素智能化发展，助力传统产业改造升级，开辟战略性新兴产业和未来产业发展新赛道。大力发展战略性新兴产业、产品和服务体系，加快培育一批底层架构和运行逻辑基于人工智能的智能原生企业，探索全新商业模式，催生智能原生新业态。

2. 推进工业全要素智能化发展。推动工业全要素智能联动，加快人工智能在设计、中试、生产、服务、运营全环节落地应用。着力提升全员人工智能素养与技能，推动各行业形成更多可复用的专家知识。加快工业软件创新突破，大力发展智能制造装备。推进工业供应链智能协同，加强自适应供需匹配。推广人工智能驱动的生产工艺优化方法。深化人工智能与工业互联网融合应用，增强工业系统的智能感知与决策执行能力。

3. 加快农业数智化转型升级。加快人工智能驱动的育种体系创新，支持种植、养殖等农业领域智能应用。大力发展战略性新兴产业、产品和服务体系，加快培育一批底层架构和运行逻辑基于人工智能的智能原生企业，探索全新商业模式，催生智能原生新业态。

4. 创新服务业发展新模式。加快服务业从数字赋能的互联网服务向智能驱动的新型服务方式演进，拓展经营范围，推动现代服务业向智向新发展。探索无人服务与人工服务相结合的新模式。在软件、信息、金融、商务、法律、交通、物流、商贸等领域，推动新一代智能终端、智能体等广泛应用。

（三）“人工智能+”消费提质

1. 拓展服务消费新场景。培育覆盖更广、内容更丰富的智能服务业态，加快发展提效型、陪伴型等智能原生应用，支持开辟智能助理等服务新入口。加强智能消费基础设施建设，提升文娱、电商、家政、物业、出行、养老、托育等生活服务品质，拓展体验消费、个性消费、认知和情感消费等服务消费新场景。

2. 培育产品消费新业态。推动智能终端“万物智联”，培育智能产品生态，大力发展战略性新兴产业、产品和服务体系，加快培育一批底层架构和运行逻辑基于人工智能的智能原生企业，探索全新商业模式，催生智能原生新业态。

（四）“人工智能+”民生福祉

1. 创造更加智能的工作方式。积极发挥人工智能在创造新岗位和赋能传统岗位方面的作用，探索人机协同的新组织架构和管理模式，培育发展智能代理等创新型工作形态，推动在劳动力紧缺、环境高危等岗位应用。大力支持开展人工智能技能培训，激发人工智能创新创业和再就业活力。加强人工智能应用就业风险评估，引导创新资源向创造就业潜力大的方向倾斜，减少对就业的冲击。

2. 推行更富成效的学习方式。把人工智能融入教育教学全要素、全过程，创新智能学伴、智能教师等人机协同

教育教学新模式，推动育人从知识传授为重向能力提升为本转变，加快实现大规模因材施教，提高教育质量，促进教育公平。构建智能化情景交互学习模式，推动开展方式更灵活、资源更丰富的自主学习。鼓励和支持全民积极学习人工智能新知识、新技术。

3. 打造更有品质的美好生活。探索推广人人可享的高水平居民健康助手，有序推动人工智能在辅助诊疗、健康管理、医保服务等场景的应用，大幅提高基层医疗健康服务能力和效率。推动人工智能在繁荣文化生产、增强文化传播、促进文化交流中展现更大作为，利用人工智能辅助创作更多具有中华文化元素和标识的文化内容，壮大文化产业。充分发挥人工智能对织密人际关系、精神慰藉陪伴、养老托育助残、推进全民健身等方面的重要作用，拓展人工智能在“好房子”全生命周期的应用，积极构建更有温度的智能社会。

（五）“人工智能+”治理能力

1. 开创社会治理人机共生新图景。有序推动市政基础设施智能化改造升级，探索面向新一代智能终端发展的城市规划、建设与治理，提升城市运行智能化水平。加快人工智能产品和服务向乡村延伸，推动城乡智能普惠。深入开展人工智能社会实验。安全稳妥有序推进人工智能在政务领域应用，打造精准识别需求、主动规划服务、全程智能办理的政务服务新模式。加快人工智能在各类公共资源招标投标活动中的应用，提升智能交易服务和监管水平。

2. 打造安全治理多元共治新格局。推动构建面向自然人、数字人、智能机器人等多元一体的公共安全治理体系，加强人工智能在安全生产监管、防灾减灾救灾、公共安全预警、社会治安管理等方面的应用，提升监测预警、监管执法、指挥决策、现场救援、社会动员等工作水平，增强应用人工智能维护和塑造国家安全的能力。加快推动人工智能赋能网络空间治理，强化信息精准识别、态势主动研判、风险实时处置等能力。

3. 共绘美丽中国生态治理新画卷。提高空天地海一体化动态感知和国土空间智慧规划水平，强化资源要素优化配置。围绕大气、水、海洋、土壤、生物等多要素生态环境系统和全国碳市场建设等，提升人工智能驱动的监测预测、模拟推演、问题处置等能力，推动构建智能协同的精准治理模式。

（六）“人工智能+”全球合作

1. 推动人工智能普惠共享。把人工智能作为造福人类的国际公共产品，打造平权、互信、多元、共赢的人工智能能力建设开放生态。深化人工智能领域高水平开放，推动人工智能技术开源可及，强化算力、数据、人才等领域国际合作，帮助全球南方国家加强人工智能能力建设，助力各国平等参与智能化发展进程，弥合全球智能鸿沟。

2. 共建人工智能全球治理体系。支持联合国在人工智能全球治理中发挥主渠道作用，探索形成各国广泛参与的治理框架，共同应对全球性挑战。深化与国际组织、专业机构等交流合作，加强治理规则、技术标准等对接协调。共同研判、积极应对人工智能应用风险，确保人工智能发展安全、可靠、可控。

三、强化基础支撑能力

（七）提升模型基础能力。加强人工智能基础理论研究，支持多路径技术探索和模型基础架构创新。加快研究更加高效的模型训练和推理方法，积极推动理论创新、技术创新、工程创新协同发展。探索模型应用新形态，提升复杂任务处理能力，优化交互体验。建立健全模型能力评估体系，促进模型能力有效迭代提升。

（八）加强数据供给创新。以应用为导向，持续加强人工智能高质量数据集建设。完善适配人工智能发展的数据产权和版权制度，推动公共财政资助项目形成的版权内容依法合规开放。鼓励探索基于价值贡献度的数据成本补



偿、收益分成等方式，加强数据供给激励。支持发展数据标注、数据合成等技术，培育壮大数据处理和数据服务产业。

（九）强化智能算力统筹。支持人工智能芯片攻坚创新与使能软件生态培育，加快超大规模智算集群技术突破和工程落地。优化国家智算资源布局，完善全国一体化算力网，充分发挥“东数西算”国家枢纽作用，加大数、算、电、网等资源协同。加强智能算力互联互通和供需匹配，创新智能算力基础设施运营模式，鼓励发展标准化、可扩展的算力云服务，推动智能算力供给普惠易用、经济高效、绿色安全。

（十）优化应用发展环境。布局建设一批国家人工智能应用中试基地，搭建行业应用共性平台。推动软件信息服务企业智能化转型，重构产品形态和服务模式。培育人工智能应用服务商，发展“模型即服务”、“智能体即服务”等，打造人工智能应用服务链。健全人工智能应用场景建设指引、开放度评价与激励政策，完善应用试错容错管理制度。加强知识产权保护、转化与协同应用。加快重点领域人工智能标准研制，推进跨行业、跨领域、国际化标准联动。

（十一）促进开源生态繁荣。支持人工智能开源社区建设，促进模型、工具、数据集等汇聚开放，培育优质开源项目。建立健全人工智能开源贡献评价和激励机制，鼓励高校将开源贡献纳入学生学分认证和教师成果认定。支持企业、高校、科研机构等探索普惠高效的开源应用新模式。加快构建面向全球开放的开源技术体系和社区生态，发展具有国际影响力 的开源项目和开发工具等。

（十二）加强人才队伍建设。推进人工智能全学段教育和全社会通识教育，完善学科专业布局，加大高层次人才培养力度，超常规构建领军人才培养新模式，强化师资力量建设，推进产教融合、跨学科培养和国际合作。完善符合人工智能人才职业属性和岗位特点的多元化评价体系，更好发挥领军人才作用，给予青年人才更大施展空间，鼓励积极探索人工智能“无人区”。支持企业规范用好股权、期权等中长期激励方式引才留才用才。

（十三）强化政策法规保障。健全全国有资本投资人工智能领域考核评价和风险监管等制度。加大人工智能领域金融和财政支持力度，发展壮大长期资本、耐心资本、战略资本，完善风险分担和投资退出机制，充分发挥财政资金、政府采购等政策作用。完善人工智能法律法规、伦理准则等，推进人工智能健康发展相关立法工作。优化人工智能相关安全评估和备案管理制度。

（十四）提升安全能力水平。推动模型算法、数据资源、基础设施、应用系统等安全能力建设，防范模型的黑箱、幻觉、算法歧视等带来的风险，加强前瞻评估和监测处置，推动人工智能应用合规、透明、可信赖。建立健全人工智能技术监测、风险预警、应急响应体系，强化政府引导、行业自律，坚持包容审慎、分类分级，加快形成动态敏捷、多元协同的人工智能治理格局。

四、组织实施

坚持把党的领导贯彻到“人工智能+”行动全过程。国家发展改革委要加强统筹协调，推动形成工作合力。各地区各部门要紧密结合实际，因地制宜抓好贯彻落实，确保落地见效。要强化示范引领，适时总结推广经验做法。要加强宣传引导，广泛凝聚社会共识，营造全社会共同参与的良好氛围。

国务院

2025年8月21日

国家发展改革委有关负责同志就《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》答记者问

近日，国务院印发《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》（以下简称《意见》）。国家发展改革委有关负责同志就《意见》接受采访，回答了记者提问。

问：《意见》出台的背景是什么？

答：党中央、国务院高度重视人工智能发展，近年来完善顶层设计、加强工作部署，推动我国人工智能综合实力整体性、系统性跃升。当前，人工智能技术加速迭代演进，正从试验探索迈向价值创造阶段，引发经济社会各领域各行业深刻变革。一方面，经过市场初步检验，人工智能已具备解决一些现实场景中复杂问题的能力，对产业降本增效、提升全要素生产率等作用愈发凸显，社会各界应用需求空前强劲，处于应用落地的关键窗口期。另一方面，智能化新产品新场景竞相涌现，智能网联汽车、智能穿戴、智能家居等新一代智能终端不断推陈出新，智能机器人进工厂、进家庭渐成趋势，各类智能体已在生产生活领域发挥重要作用。

与此同时，仍存在对人工智能作用认识不一致、供需对接不畅、应用落地存在“最后一公里”障碍等突出问题，亟需加强战略引导和统筹指导，推动全社会深刻认识人工智能对生产力的革命性影响，全面推进人工智能科技创新、产业发展和赋能应用，为加快培育发展新质生产力、推动高质量发展提供新动能。

问：实施“人工智能+”行动有哪些重大意义？

答：从技术发展看，有助于顺应和把握人工智能技术演进规律。实施“人工智能+”行动，以新的科研成果支撑场景应用落地，以新的应用需求牵引技术创新突破，促进人工智能技术创新与应用发展双向赋能，有助于以人工智能应用发展的确定性，应对技术和外部环境急剧变化的不确定性，加快形成更富生命力的中国特色人工智能发展路径。同时，主动构建与人工智能技术演进趋势相适应的法律法规、政策制度、伦理规则等，有助于促进人工智能朝着有益、安全、公平方向健康有序发展。

从国内实践看，有助于推动人工智能赋能高质量发展。实施“人工智能+”行动，充分发挥我国数据资源丰富、产业体系完备、应用场景广阔等优势，加强人工智能与各领域广泛深度融合，助力传统产业改造升级，开辟战略性新兴产业和未来产业发展新赛道，有助于拉动需求增长、加快动能转换、吸引全球对华投资，助力实现经济高质量发展，推动全体人民共享人工智能发展红利。

从全球形势看，有助于构建更高水平国际开放合作。实施“人工智能+”行动，坚持智能向善，把人工智能作为造福人类的国际公共产品，广泛开展人工智能国际合作，推动技术普惠和成果共享，共建人工智能全球治理体系，有助于进一步深化全球合作，弥合全球智能鸿沟，让更多国家和人民共享技术进步带来的发展机遇。

问：《意见》的主要内容是什么？

答：《意见》围绕行业应用需求和基础能力供给协同推进，提出一系列政策举措。一方面，以行业应用需求为牵引，统筹国内和国际，开展“人工智能+”6大行动。围绕科学技术、产业发展、消费提质、民生福祉、治理能力、全球合作6大重点领域，深入分析人工智能对各行业各领域范式变革影响，前瞻谋划“人工智能+”工作着力点。另一方面，以硬基础和软建设为保障，统筹发展和安全，夯实“人工智能+”行动8大支撑。深刻把握人工智能技



术和产业演进规律，结合内外部形势变化，围绕模型、数据、算力、应用、开源、人才、政策法规、安全 8 个方面，系统构建人工智能基础支撑体系。

问：《意见》的突出特点有哪些？

答：《意见》针对企业提出的问题形成系列务实政策举措，突出让市场有方向、有信心、有体感、有加速度。

一是明确政策方向。突出应用导向，明确科技、产业、消费、民生、治理、全球合作等 6 大重点行动，建立动态敏捷、多元协同的治理体系，处理好人工智能可能带来的安全风险、就业岗位冲击等相关挑战，明确发展方向和政策预期。

二是强化发展信心。对内，释放积极政策信号，培育产业全要素智能化发展新模式，布局智能原生新业态，系统构建三大产业的智能化转型发展路径。对外，坚持普惠共享，打造平权、互信、多元、共赢的人工智能能力建设开放生态，提出“人工智能+”全球合作新模式。

三是突出可感可及。坚持以人民为中心的发展思想，聚焦科研工作者、企业、消费者、人民群众、政府部门等不同主体均提出相应鼓励方向和支持举措，广泛调动全社会参与人工智能发展的积极性，促进全体人民共享人工智能发展成果。

四是注重务实管用。坚持问题导向，针对人工智能在应用落地中存在的重硬轻软、应用碎片化、开源社区活跃度不高等问题，针对性提出系列举措。坚持分业施策，针对每个领域分别提出与人工智能的融合发展方向，形成各行业“人工智能+”思路主线。

问：《意见》提出布局建设一批国家人工智能应用中试基地，请问基地的定位和作用是什么？

答：应用中试基地是加速人工智能应用规模化、标准化、体系化发展的共性能力平台。结合“人工智能+”6 大重点行动，通过在制造、医疗、交通、金融、能源资源等重点领域布局应用中试基地，汇聚行业资源和相关产业能力，培养人工智能专业人才、推广应用成果、孵化创新主体、打造开放生态。

一是聚焦共性问题，带动促进行业效能提升。通过整合优质资源，应用人工智能解决行业发展中的关键共性问题，打造“示范价值高、带动效应强”的标杆应用，促进全行业生产效能提升。

二是打造共创平台，推动人工智能产业发展。打通人工智能应用供需对接、数据开放、资源共享、技术交流渠道，提供人工智能应用研发中试验证环境，以应用发展带动技术创新，孵化培育领先的人工智能企业和产业集群。

三是沉淀共性能力，大幅降低应用创新门槛。通过“统一技术架构、统一数据规范、统一标准体系”，打造算力、数据、模型共性服务能力，促进创新成果高效转化和推广，加速人工智能规模化商业化应用。

四是培育共赢生态，促进行业创新范式变革。坚持开放协作、互利共赢，加快产业链上下游协同发展，构建资源共享、能力互补、良性互动的人工智能产业生态。

问：下一步，在推动《意见》落实方面有哪些安排？

答：一是加强工作整体统筹。国家发展改革委将强化牵头作用，加强统筹协调，形成工作合力。推动各地区各部门紧密结合实际，因地制宜细化落实举措，抓好贯彻落实，广泛凝聚社会共识，避免一哄而上、一哄而散、浮于表面等问题。

二是明确阶段性重点工作。会同有关部门，综合考虑各行业应用潜力、成熟度、带动作用等因素，进一步选择价值量大的应用场景，明确阶段性重点工作并动态滚动更新，实现长期和短期、动态和静态相结合。

三是营造良好应用环境。持续完善相关法律法规、制度政策、应用规范、伦理规则，加大人工智能领域金融和

财政支持力度，完善应用试错容错管理制度，推动重点场景“敢开放”“真开放”。推动政府部门和国有企业强化示范引领作用，通过开放场景等支持技术落地。

四是促进产业生态发展。推动产业全要素智能化发展，培育人工智能应用服务商，打造人工智能应用服务链，大力发展智能原生技术、产品和服务体系，培育智能原生企业。加强开源生态建设，支持优质开源项目发展，提高国际影响力。

五是加强安全风险防范。持续加强人工智能应用对产业结构和就业结构等影响的研判评估和应对工作，增强就业创造效应，减缓就业替代效应。建立健全人工智能技术监测、风险预警、应急响应体系，防范化解人工智能带来的相关安全风险挑战。

学会动态 ●

2025 年嵌入式系统与物联网学术年会在苏州科技大学成功举办

11月1日至2日，2025年嵌入式系统与物联网学术年会在苏州科技大学圆满举办。本次会议由江苏省计算机学会主办，嵌入式系统与物联网专业委员会、苏州科技大学联合承办，以“聚焦技术前沿，深化产学研融合”为核心，汇聚了江苏省内该领域的50余位参会代表，涵盖20余家高校单位、10余家企业单位的专家学者与行业精英，苏州科技大学部分研究生也全程参与学习交流。





激活数据要素市场化配置改革动能，筑牢“人工智能+”行动发展基石

https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/202508/t20250828_1400104.html

中华人民共和国国家发展和改革委员会

人工智能作为新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力量，正加速与各行各业深度融合。近日，国务院印发《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》（以下简称《意见》），提出强化“人工智能+”行动基础支撑能力，加强算力、算法和数据供给。这是我国抢抓新一轮科技革命和产业变革机遇、培育和发展新质生产力的重大战略部署。而数据作为新型生产要素，其规模和质量直接决定了人工智能技术所能达到的高度和深度。破解当前高质量数据供给不足的瓶颈，是“人工智能+”行动落地见效的首要前提。因此，加快培育一个能够实现数据价值发现、促进高效流通、保障合规利用的数据要素市场，是落实《意见》的关键举措和赋能智能新时代、构筑国家竞争新优势的战略基石。

一、战略契合：数据要素市场支撑“人工智能+”行动的内在逻辑

数据要素市场的发展与“人工智能+”行动的推进，并非两条独立的平行线，而是相互需求、彼此成就的共生关系。其内在逻辑体现在以下三个层面。

一方面，人工智能技术范式对高质量数据供给的内生需求。国家数据局局长刘烈宏提出，“‘人工智能+’到哪里，高质量数据集就建设到哪里”。本轮先进人工智能模型，特别是大语言模型的发展仍遵循着“缩放定律”（Scaling Law）这一基本规律，即模型的综合能力与其训练数据的规模、质量和多样性直接相关。没有海量、高质量的数据“投喂”，再先进的算法也只是无源之水。数据显示，我国人工智能应用日均 Token 消耗量已从 2024 年初的 1000 亿激增至 2025 年 6 月底的超过 30 万亿，在短短一年半时间内增长了超过 300 倍。这种近乎无限的需求正催生巨大的数据市场供给缺口。可见，建立一个能够高效汇聚、治理并流通高质量数据的要素市场，是满足当前人工智能技术范式需求的必然选择。

另一方面，数据要素与人工智能形成双向赋能的“飞轮效应”。数据要素市场不仅是单向地为人工智能提供“燃料”，而是双方进一步形成一种双向赋能、相互促进、加速迭代的“飞轮效应”。一方面，高质量的数据要素是驱动人工智能应用性能跃升的关键。国家数据局数据显示，在对数据质量要求极为严苛的医疗健康领域，通过引入人工智能辅助标注的医学影像数据集，后续训练的疾病诊断模型准确率可提升超过 15%。另一方面，人工智能应用也反向激发数据价值。据有关机构预测，未来合成数据将取代真实数据成为 AI 模型所使用数据的主要来源，这不仅能有效弥补真实数据供给的缺口，更能为数据要素市场注入持续的、高质量的源头活水。最终，当“数据要素+人工

智能”这一强大组合的动能释放到实体经济中，将有效赋能千行百业，带来显著的生产力跃升，从而驱动形成飞轮效应，持续创造经济价值。

二、现实审视：我国数据要素市场赋能人工智能发展的机遇与挑战

在“人工智能+”的浪潮下，我国数据要素市场赋能人工智能已取得积极成效，在全球AI竞赛中展现出强大势能，产业、数据和场景优势日益凸显。

产业与市场活力持续释放。我国数据要素市场和人工智能产业已形成相互促进的良好态势。中国互联网络信息中心（CNNIC）数据显示，2024年我国人工智能核心产业规模已突破7000亿元人民币；同时，数据产业规模快速壮大，据国家数据发展研究院测算，2024年全国数据产业规模达5.86万亿元，同比增长15.8%，专业数据产品产值规模占比超过30%，产品和服务形态不断丰富。全国数据企业超40万家，专业化经营主体不断出现，产业吸纳就业能力稳步提升，市场活力不断增强，为“人工智能+”提供了坚实的产业基础。

数据资源基础不断夯实。我国数据资源总量实现跃升。国家数据局数据显示，2024年全国数据生产量达到41.06ZB，同比增长25%，增速较去年提高2.56个百分点；截至今年6月底，我国已经建设高质量数据集超过3.5万个，总体量超过400PB。随着人工智能快速发展，用于开发、训练和推理的数据量同比增长40.95%，智能家居、智能网联汽车等智能设备数据增速位居前列，分别为51.43%、29.28%，低空经济和机器人数据生产量增速超过30%。值得一提的是，我国国内主流大模型的训练数据中，中文数据占比已普遍超过60%，部分模型甚至高达80%，这为服务本土人工智能市场奠定了坚实基础。

应用场景优势深度拓展。我国超大规模市场和复杂多样的社会经济环境，为人工智能模型的训练、迭代和优化提供了全球独一无二的“试验田”和“练兵场”。这种优势正从消费端向产业端和社会治理端全面渗透，形成强大的“场景驱动”效应。在To C（消费）领域，我国拥有全球最大的网民和移动支付用户群体，催生了电商、社交、短视频等海量数据智能应用场景。在To B（产业）领域，我国作为全球唯一拥有联合国产业分类中全部工业门类的国家，正加速“人工智能+新型工业化”进程。在智能制造领域，已建成超过万家数字化车间和智能工厂；在自动驾驶领域，全国已开放智能网联汽车测试道路超过3.2万公里，测试里程累计超过1.2亿公里，复杂的路况和海量的真实路测数据是训练和优化自动驾驶算法模型的关键优势。

然而，挑战同样不容忽视。当前数据要素市场供给侧的短板与市场机制的不完善相互交织，形成了制约“人工智能+”行动向纵深发展的核心瓶颈。

一是高质量数据供给“量质齐缺”，模型源头活水不足。从“量”的方面看，全球高质量中文语料占比严重偏低。中国工程院研究表明，全球通用的50亿大模型数据训练集里，中文语料占比仅为1.3%。这种结构性失衡，导致国内许多AI模型在发展初期不得不依赖英文语料或质量欠佳的翻译数据，限制了其对中文世界的理解深度。从“质”的方面看，原始数据治理能力尚存短板，其中充斥着大量噪声、冗余和偏见，需要经过复杂的清洗、标注和治理才能用于模型训练。而我国在高端数据服务，特别是数据合成、合规审计、偏见检测等领域的产业生态尚不健全，高质量数据供给的“加工能力”有待提升。

二是价格与权益体系亟待完善，市场机制仍需加强探索。从价格机制看，数据作为一种特殊的生产要素，其价值具有高度的场景依赖性、可复制性和边际成本递减等特征，传统商品定价模型难以适用。当前，各地数据交易所



虽在探索挂牌定价、协议转让、算法定价等多种模式，但仍缺乏一套被市场广泛接受的、公允的价值评估和定价机制。比如，某企业的一份销售数据，对自身而言可能仅用于复盘，价值有限；但对需要进行市场趋势分析的AI模型训练方而言则价值巨大。如何量化这种“场景溢价”并形成合理分成，是业界普遍面临的难题。从权益体系看，数据产权与合规问题构成底层制约。数据产权“三权分置”的落地问题仍不明晰，特别是大模型训练所涉及的海量数据，其版权授权链条复杂，企业获取数据的合规成本和法律风险较高，亟需在制度层面予以突破，为数据要素的合规、高效流通提供清晰的“游戏规则”。

三是“数据孤岛”与流通壁垒并存，要素价值难以释放。大量高价值数据沉淀在不同政府部门、行业和大型企业内部，形成“数据孤岛”和“数据烟囱”。由于权属界定、安全顾虑、标准不一等原因，数据难以实现有效的跨域流通和融合共享。此外，行业数据的市场化配置水平尤为不足。以制造业为例，国际数据公司（IDC）统计显示，目前制造业数据中结构化数据仅占约20%，大量蕴含工艺、流程知识的非结构化数据难以利用。更值得关注的是，工业数据交易规模占我国数据交易市场总规模的比重不足7%。这表明，能极大赋能实体经济的行业场景数据，正由宝贵的“生产资料”沦为沉睡的“数字库存”。

三、破局之路：数据要素市场有效赋能“人工智能+”行动发展的关键路径

为应对挑战、抓住机遇，必须多措并举、精准发力，通过强化供给、完善机制、创新治理、优化生态，构建支撑“人工智能+”行动的高质量数据要素市场。

（一）强化优质数据供给，筑牢战略资源储备

为从源头解决高质量数据不足的问题，应由国家层面统筹规划，加快推动气象、交通、医疗、科研等关键领域的公共数据，在确保安全的前提下，以统一标准、统一接口的方式有序向社会开放，打造一批具有全球竞争力的国家级和行业级人工智能公共训练数据集。同时，需高度重视战略语料资源的储备与开发，一方面，探索开展建设全国性大模型“红色语料库”，筑牢意识形态安全屏障；另一方面，强化对海外高价值、高频次、高可靠性战略语料的收储与市场化利用，增强我国在全球人工智能竞争中的核心优势，为我国人工智能长远发展筑牢战略根基。

（二）优化数据定价模式，完善利益分配机制

科学的价值分配机制是激活数据要素市场供给动力的核心。需加快探索构建一个既能体现政府指导、又能发挥市场作用的价格体系。在路径上，要理清公共数据的价值生成链条，即由政府授权的运营机构进行一级开发，形成标准化数据产品；再由市场主体进行二次开发，形成面向人工智能应用场景的精细化产品与服务。在定价上，将公共数据作为全社会数据定价之“锚”：在一级开发阶段，可采取政府指导下的成本补偿模式，覆盖数据治理与运营成本，推动海量公共数据“入场”；在二级市场，鼓励数据供需双方根据数据在具体人工智能应用场景中创造的价值，通过市场化方式协商形成价格，或建立合理的收益分享模式，让高质量数据的持有者能分享人工智能发展的红利，从而正向激励市场持续供给高价值数据。在分配上，探索建立公共数据授权运营的收益分配政策，将有偿使用收益部分纳入财政，用于反哺数据治理和公共服务，同时设置合理的分配原则，激励各参与方的积极性。

（三）明晰数据产权结构，创新安全治理模式

为解决数据共享中“不敢、不愿、不能”的难题，必须在制度和技术上寻求突破。制度上，要加快落实“数据二十条”提出的数据资源持有权、数据加工使用权、数据产品经营权“三权分置”要求，让数据在“可用不可见、

可控不可得”的框架下安全流动，打消数据提供方的安全顾虑。技术上，探索运用数据可信凭证、深度伪造内容检测、AI生成内容标识等技术，为进入模型训练的数据打上“身份标签”，确保其来源可溯、权属清晰、授权明确。当模型生成内容引发争议时，能够反向追溯至源头数据，为权益分配和责任界定提供技术依据。此外，需前瞻性布局人工智能时代的知识产权规则，积极探索如何界定训练数据、AI模型及生成内容的版权归属与使用规范，建立公平的利益分配机制，为AI产业的长期健康发展提供制度保障。

(四) 培育多元服务业态，构建协同产业生态

推动传统数据服务向价值链高端升级，使其紧密契合大模型等人工智能技术的新需求。一方面，要提升数据处理技术的专业化与精细化水平。特别是数据标注服务，需从过去简单的分类、拉框，向服务于大模型价值对齐的精细化、场景化标注迈进，重点覆盖指令遵从、偏好排序、逻辑推理等复杂任务，为模型注入真正的“智能”。同时，要大力支持高质量数据合成技术的研发与应用，将其作为破解特定行业数据稀缺、隐私保护和数据孤岛问题的关键手段，生成模型训练急需的、真实世界难以获取的边缘场景数据，提升AI系统的鲁棒性和安全性。另一方面，积极推动国家级人工智能应用基地建设，依托基地汇聚技术、人才和资本，促进数据服务商与AI应用企业的精准对接，并引导行业围绕上述新型数据服务，加快制定相应的技术标准、服务流程与质量评估规范。最终形成一个覆盖数据全生命周期的、多元化的服务产业生态，为“人工智能+”行动提供源源不断的高品质“数据燃料”。（国家发展改革委价格监测中心副主任 王建冬）

学会动态 ●

2025年第十三届江苏省大数据学术会议在南通召开

2025年10月17-19日，第十三届江苏省大数据学术会议在南通成功召开。本次会议由江苏省计算机学会主办，江苏省计算机学会大数据专委会、南通大学承办，并得到华创智算（南京）科技有限公司赞助支持。来自省内外多所高校、企业等百余名大数据领域专家、学者齐聚一堂，共同探讨AI时代下大数据技术的研究方向和行业应用。





基于深度连续学习的多标签图像分类方法

——2024年江苏省计算机学会优秀硕士论文

作者：杜凯乐

单位：东南大学

指导老师：胡伏原

论文摘要

在建筑等开放环境中，数据以流的形式传播并伴随着类别的递增，且往往包含多种标签，研究如何在建筑开放环境中有效学习多标签类递增数据流有着重要意义。对建筑环境多标签数据流的学习中，一方面在连续学习中的旧类别不可获取，这会导致严重的“部分标签”问题，使模型无法构建完整的标签关系，从而影响模型表现。另一方面模型会不断收敛于新任务，导致模型对旧建筑场景的知识不断丢失，引发灾难性遗忘现象。本文研究在建筑开放环境中如何对类递增多标签数据流进行训练和知识保存，并利用室内场景和室外建筑场景两个数据集来验证本文方法的有效性。本文主要研究工作如下：

(1) 提出一种基于图网络的自增广图关系多标签连续学习方法。在连续学习中，数据不可重复获取，这会导致严重的“部分标签”(Partial Label)问题，致使不能构建完整的标签关系，最终影响模型表现。本文以室内多标签数据流和室外建筑多标签数据流为研究对象，提出由数据驱动的增广关系矩阵 ACM (Augmented Correlation Matrix) 来建模建筑场景多标签数据流中的标签关系。其中任务内标签关系由硬标签统计信息构建，任务间标签关系利用来自数据流的硬标签和来自专家网络的软标签共同构建。而且在建筑场景多标签的序列学习中，ACM 可以随着类递增而自动增广。最终将 ACM 作为图网络的输入来辅助建筑场景多标签图像分类。将室内多标签数据集 Split-COCO 分为两个多标签连续学习情景，在 mAP 指标上本文方法与 PRS 相比分别提高 3.03% 与 2.43%；同理，在室外建筑多标签数据集 Split-WIDE 上分别提高 2.45% 与 2.78%。

(2) 提出了一种基于图网络的自增广图结点多标签连续学习方法。在基于图网络的多标签连续学习中，本文发现利用词向量初始化建筑图结点，这种先验信息不仅阻止了模型的端到端训练，而且会受到词向量质量的影响，致使在连续学习中累积误差，最终影响模型的表现。本文以室内多标签数据流和室外建筑多标签数据流为研究对象，提出部分标签编码器 PLE (Partial Label Encoder) 解耦出每张图每个标签的特征激活向量，这些特征激活向量由网络本身生成，代替先验信息词向量作为图结构的结点输入到图网络中，以此实现在连续学习中多标签图网络中图结点的自动增广，最终不仅提高了模型的分类表现，而且实现了模型的端到端训练。将室内多标签数据集 Split-COCO 分为两个多标签连续学习情景，在 mAP 指标上本文方法与 AGCN 方法相比分别提高 4.12% 与 4.67%；同理，在室外建筑多标签数据集 Split-WIDE 上分别提高 3.58% 与 2.87%。

(3) 提出一种基于正则化的多标签连续学习知识记忆方法。由于模型在非独立同分布的多标签数据流中不断学习新任务时，模型对新旧知识的非重叠表达能力断崖式下降，导致模型忘记旧建筑场景的知识，从而发生灾难性遗忘。本文以室内多标签数据流和室外建筑多标签数据流为研究对象，利用知识蒸馏技术，在类别和关系双层面起作用，以专家网络指导新建站场景任务的学习，唤醒模型中旧任务的知识，从而抑制在学习新任务时对旧任务的遗忘。本文将室内多标签数据集 Split-COCO 分为两个多标签连续学习情景，在 mAP 指标上本文方法与 PRS 方法相比分别降低 8.70% 与 5.83%；同理在室外建筑多标签数据集 Split-WIDE 上分别降低 2.92% 与 3.41%。

结合上述三种方法，本文面向建筑开放环境提出了一种多标签连续图像分类系统，以图卷积网络为基础构建了建筑多标签关系，并基于正则化的方法抑制了序列训练中的灾难性遗忘。从室内场景到室外建筑场景都验证了本文提出方法的有效性。

专家推荐语

作者在文中研究了多标签连续学习这一新颖课题。该论文基于图网络对于建筑场景中多标签任务进行了深入的研究，解决了建筑场景中多标签数据流连续学习中的“部分标签”问题和灾难性遗忘现象。通过增广关系矩阵和部分标签编码器，实现了图结点自动增广和模型的端到端训练。此外，论文还提出了基于正则化的多标签连续学习知识记忆方法，避免模型对新旧知识的非重叠表达能力下降。通过实验验证，该方法在室内场景和室外建筑场景的多标签图像分类任务中均取得了较好的表现。相关成果为江苏省研究生科研与实践创新计划《在线增广图卷积的终身多标签学习方法研究》项目作了关键理论支撑。

该硕士论文对于解决建筑场景中多标签数据流的学习具有重要意义，具有很强的创新性。该论文格式规范，图表清晰，结构合理，逻辑性强。

论文看点

近年来，多标签学习算法已经被深入研究，并且在水平和垂直领域应用广泛，是建筑智能化技术的重要组成部分。构建建筑场景标签关系，并通过关系构建来提高模型整体的表现是建筑场景多标签学习的关键。传统的多标签算法利用循环网络（RNN）和长短期记忆网络（LSTM）对标签关系进行构建，这些方法假设标签以有序的方式进入模型，这种标签序列化的假设限制了标签空间的复杂化，不能处理过于复杂的建筑开放环境标签关系。然而，当建筑开放环境中的数据类别以流的形式不断增长，意味着模型无法获得过去数据的标签信息，而且模型不仅会对过去标签识别精度会发生遗忘，标签之间的关系也会随着新标签的训练发生灾难性遗忘。因此建筑开放环境数据流形式下的多标签连续学习仍然存在诸多挑战，主要表现在以下几个方面：

(1) 由于建筑开放环境多标签数据流的数据不可重复获得，无法建立跨任务标签关系，在序列任务学习中自动增广图标签关系困难。在连续学习中，数据以类递增数据流的形式流过模型，这意味着构建多标签关系的模型需动态递增地构建建筑多标签关系。又由于建筑多标签数据流的数据不可重复获得，模型无法先验获得过去训练数据的标签信息，无法构建新建筑场景任务与旧建筑场景任务之间的关系。这就需要关系矩阵能够在模型训练中能够随着建筑多标签数据流的流过而在线更新，从旧建筑场景任务的关系增广到新旧建筑场景任务间的关系，使构建的增广图卷积能够构建跨任务的标签关系。如何设计能够自动增广图关系的模型，以此来构建跨任务的建筑场景多标签



关系还需要进一步研究。

(2) 由于现行方法用先验信息词向量来初始化图结点，不仅需要手动添加，且容易累积预测误差，在建筑场景序列任务学习中自动增广图结点困难。图结构由图关系和图结点组成，现行方法的图结点是利用词向量进行初始化。模型使用词向量这种先验信息，不仅会受词向量质量的影响，而且阻止了模型的端到端训练。最终使多标签模型不能在连续学习过程中自动增广图结构，并会累积词向量的错误，影响模型的表现。如何设计能够自动增广图结点的模型，以此来实现端到端训练，提高模型表现还需要进一步研究。

(3) 由于建筑开放环境中的多标签数据流具有不可迭代性，当新的任务不断递增时，模型对旧建筑任务的识别精度、标签关系遗忘程度较高。在普通深度学习模型中，针对不同种类的数据往往需要训练不同的模型来拟合数据，如果用同一个模型去拟合不同种类的数据进行多任务训练，不同任务的数据分布发生改变，在模型对新任务进行收敛的过程中，会改变拟合旧任务数据的参数，从而导致灾难性遗忘。现有的连续学习算法能够有效抑制单标签分类模型的遗忘，但是不能将单标签连续学习算法直接应用到多标签模型上。多标签模型的遗忘，不仅体现在标签类别层面的遗忘，还体现在标签关系的遗忘。如何抑制多标签连续学习模型的灾难遗忘现象，还需要在现有的连续学习的基础上，进一步探索多标签连续学习算法以及对应的知识记忆方法。

针对以上三点问题本文提出了对应的解决方案。

1. 基于图网络的自增广图关系建筑多标签连续学习

在本章中，首先，引入增广关系矩阵 ACM (Augmented Correlation Matrix) 来表示类递增的多标签关系。提出利用来自数据流的硬标签来构建任务内关系矩阵，利用来自专家网络的软标签来构建任务间关系矩阵。然后，ACM 输入到 AGCN 中来捕捉标签依赖，与建筑图像特征结合，提高模型的多标签识别能力。

1.1 增广图卷积网络 AGCN 概述

增广图卷积网络 AGCN (Augmented Graph Convolutional Network) 如图所示。在本文提出的多标签连续学习中，图卷积网络 GCN 的输入有两个，一个是上文提到的图关系矩阵 A^t ，另一个是由词向量初始化的图结点 H ，图关系矩阵和图结点组成完整的图结构数据输入到图卷积网络 GCN 中，本文采取双层图卷积网络，图卷积网络提供结构化的标签图特征。如图 1-1 所示，将一张建筑场景图片作为卷积神经网络 CNN 的输入，由 CNN 提取图像特征，对建筑场景的多标签预测值 \hat{y} 可由下列公式计算：

$$\hat{y} = \sigma(\text{GCN}(A^t, H^{t,0}) \otimes \text{CNN}(x)) \quad (1-1)$$

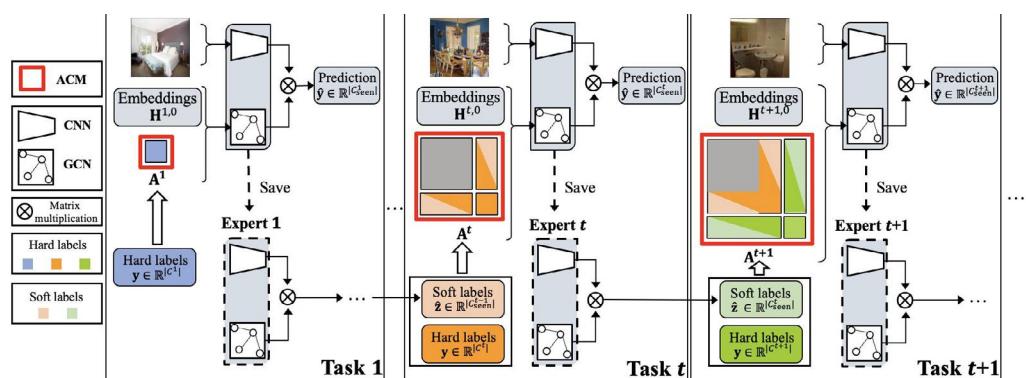


图 1-1 AGCN 网络结构

其中 A^t 代表随着任务的学习而不断更新的图关系矩阵。 $H^{t,0} \in \mathbb{R}^{|C_{seen}^t| \times d}$ 是初始化图结点，在本部分中，图结点由建筑标签词向量进行初始化， d 代表词向量的维度。 t 代表第 t 个任务，0 代表图卷积网络的第 0 层，也就是输入层。 $\sigma(\cdot)$ 表示用来分类的 Sigmoid 函数。设提取后的图像特征维度为 D ，即 $CNN(x) \in \mathbb{R}^D$ 。则有 $GCN(A^t, H^{t,0}) \in \mathbb{R}^{|C_{seen}^t| \times D}$ 和 $CNN(x) \in \mathbb{R}^D$ 。在进行矩阵乘法后，建筑多标签预测值 $\hat{y} \in \mathbb{R}^{|C_{seen}^t|}$ ，代表在任务 t 时，多标签模型可以输出所有见过的类预测值。

增广关系矩阵 ACM 在多标签连续学习过程中可以不断更新与增广，以达到构建所有训练过的类的标签关系。本文采取的 GCN 具有双层堆叠结构，基于 ACM A^t ，GCN 以在线方式捕捉两两标签之间的依赖。在本章中图结点由 Glove 词向量^[36]进行初始化，即 $H^{t,0} \in \mathbb{R}^{|C_{seen}^t| \times d}$ ， d 代表词向量的维度，则在任务 t 时的图特征 $H^t \in \mathbb{R}^{|C_{seen}^t| \times D}$ 可由下列公式计算：

$$H^t = GCN(A^t, H^{t,0}) \quad (1-2)$$

1.2 建筑场景的多标签关系建模

目前很多的多标签算法都是依赖构建多标签关系来提高模型表现，这些方法的多标签关系由关系矩阵 A (Correlation Matrix) 表示，以不同标签在同一张图片的共现频率来量化标签关系。 $A_{ij} = P(C_i | C_j) |_{i \neq j}$ 是由来自建筑场景多标签数据流硬标签的统计信息计算而来，由建筑数据驱动，代表在标签 C_j 已经出现的条件下， C_i 出现的概率。在多标签连续学习中，当一个新任务开始训练时，构建标签关系的图卷积网络应该自动增广。然而由于部分标签问题，标签关系矩阵不能直接通过统计方法来建立。

为解决上述问题，本文提出一种可自动更新的专家网络 Expert。如图 3-1 所示，专家网络在每一个任务训练结束之后保存模型参数，并在下一个任务训练完之后进行自动更新。它用来提供软标签 $\hat{z} \in \mathbb{R}^{|C_{seen}^t|}$ ， C_{seen}^t 是到任务 t 时模型训练完成的类。这些软标签作为缺失历史标签的替代品。软标签由现在任务的数据 x 输入到专家网络中得到，即 $\hat{z} = expert(x)$ 。基于软标签，如图所示，本文为独立标注 IL-MLCL 和连续标注 CL-MLCL 两种情景构建增广关系矩阵 ACM：

$$A^t = \begin{bmatrix} A^{t-1} & R^t \\ Q^t & B^t \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \text{Old - Old} & \text{Old - New} \\ \text{New - Old} & \text{New - New} \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

本文将关系矩阵 A^t 分为四部分，左上角 A^{t-1} 继承于上一个任务的关系矩阵，构建的是任务 t 之前的所有任务的标签关系。右下角 B^t 是通过当前任务训练样本的硬标签来更新，用来更新当前任务 t 内的标签关系。左下角 Q^t 与右上角 R^t 为软硬标签结合来共同更新，用来构建新旧任务之间的标签关系。下文将介绍各个部分的构造方法。

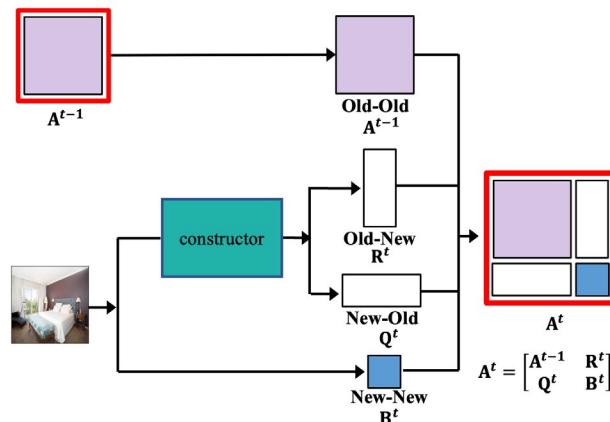


图 1-2 增广关系矩阵的联合构造器



1.3 建筑标签增广关系矩阵 ACM 的构建方法

建筑场景任务内关系矩阵 $\mathbf{B}^t \in \mathbb{R}^{|\mathcal{C}^t \times \mathcal{C}^t|}$ 的构造。如图 1-2 所示，这个模块计算的是新的建筑场景下类别间任务内标签关系。与传统的多标签学习相似， \mathbf{B}' 的条件概率可由建筑多标签数据流中的硬标签统计信息计算得到：

$$\mathbf{B}_{ij}^t = P(\mathcal{C}_i^t \in \mathcal{C}^t | \mathcal{C}_j^t \in \mathcal{C}^t) = \frac{N_{ij}}{N_j} \quad (1-4)$$

其中 N_{ij} 是建筑多标签数据流中类别 \mathcal{C}_i^t 与类别 \mathcal{C}_j^t 的共现总数， N_j 是数据流中类别 \mathcal{C}_j^t 的总数。在对类递增建筑数据流进行训练时，在训练过程中的每一步 N_{ij} 与 N_j 不断累积和更新。由于在连续学习中新建筑场景的数据总是可获取的，所以模块 \mathbf{B}' 在情景 IL-MLCL 与 CL-MLCL 中共享。

建筑场景任务间关系矩阵模块 \mathbf{R}' 的构建。这个关系矩阵模块用来计算建筑场景下旧任务和新任务的任务间标签关系。是计算在新建筑任务标签出现的情况下，旧任务标签出现的概率。如图 1-3 所示，利用专家网络 Expert 产生的软标签 $\hat{\mathbf{z}}$ 和来自类递增建筑数据流的硬标签来共同构建新旧任务之间的标签关系。由于在 CL-MLCL 中部分历史标签可取，则在 CL-MLCL 中用硬标签构建 \mathbf{R}' ：

$$\mathbf{R}_{ij}^t = P(\mathcal{C}_{seen\ i}^{t-1} \in \mathcal{C}_{seen}^{t-1} | \mathcal{C}_j^t \in \mathcal{C}^t) = \frac{N_{ij}}{N_j} \quad (1-5)$$

其中 N_{ij} 是建筑场景数据流中类别 \mathcal{C}_i^t 与类别 \mathcal{C}_j^t 的共现总数， N_j 是数据流中类别 \mathcal{C}_j^t 总数。由于在 IL-MLCL 中历史标签无法获得，如图 1-4 所示，则在 IL-MLCL 中用软标签代替缺失的历史标签，与硬标签共同构建 \mathbf{R}' ：

$$\mathbf{R}_{ij}^t = P(\mathcal{C}_{seen\ i}^{t-1} \in \mathcal{C}_{seen}^{t-1} | \mathcal{C}_j^t \in \mathcal{C}^t) = \frac{\sum_i \hat{z}_i y_j}{N_j} \quad (1-6)$$

其中 $\hat{\mathbf{z}}$ 是有专家网络产生的软标签，用来代替之前所有任务所缺失的建筑场景历史标签， N_j 是数据流中类别 \mathcal{C}_j^t 总数。

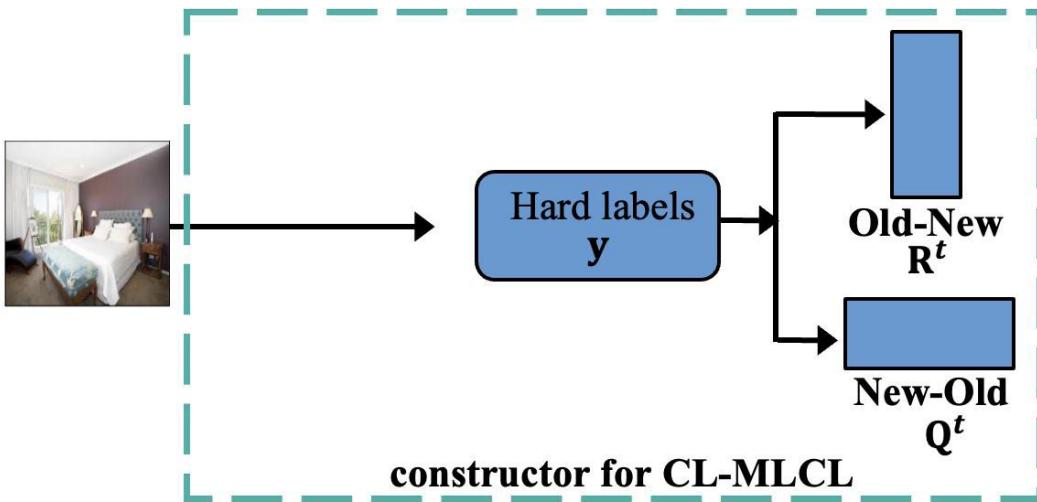


图 1-3 为 CL-MLCL 设计的关系矩阵构建器

建筑场景任务间关系矩阵模块 \mathbf{Q}' 的构建。这个关系矩阵模块 \mathbf{Q}' 用来计算新任务和旧任务的任务间标签关系。是计算在旧任务建筑标签出现的情况下，新任务建筑标签出现的概率。如图 1-3 所示，利用 \mathbf{R}' 和来自数据流的硬标签来共同构建新旧任务之间的标签关系。由于在 CL-MLCL 中部分历史标签可取，则在 CL-MLCL 中用硬标签构建 \mathbf{Q}' ：

$$\mathbf{Q}_{ji}^t = P(\mathcal{C}_j^t \in \mathcal{C}^t | \mathcal{C}_{seen\ i}^{t-1} \in \mathcal{C}_{seen}^{t-1}) = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (1-7)$$

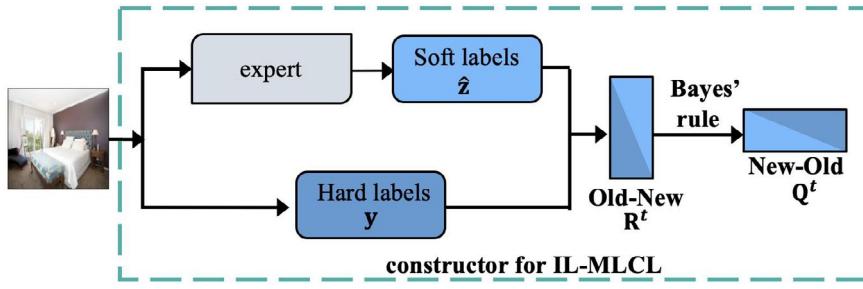


图 1-4 为 IL-MLCL 设计的关系矩阵构建器

其中 N_{ij} 是建筑数据流中类别 C_i^t 与类别 C_j^t 的共现总数, N_i 是数据流中类别 C_i^t 总数。如图 1-4 所示, 利用模块 R' 和朴素贝叶斯公式计算在 IL-MLCL 中的 Q' :

$$Q_{ji}^t = P(C_j^t \in C^t | C_{seen i}^{t-1} \in C_{seen}^{t-1}) = \frac{P(C_{seen i}^{t-1} | C_j^t)}{P(C_{seen i}^{t-1})} = \frac{R_{ij}^t N_j}{\sum_i \hat{z}_i} \quad (1-8)$$

2 基于图网络的自增广图结点建筑多标签连续学习

本章方法在上一章 AGCN 网络上进行改进, 提出 AGCN++ 算法, 大大提高了模型的可扩展性和灵活性。本文设计了 PLE 模块用来解耦出每张图每个标签的特征激活向量, 这些特征激活向量作为图结构的结点输入到图网络中。由网络本身产生的特征激活向量代替先验信息词向量, 以此实现在连续学习中多标签图网络的自动增广, 最终实现模型的端到端训练。

2.1 增广图卷积网络 AGCN++ 概述

AGCN++ 模型主要有三部分关键点: 部分标签编码器 PLE(Partial Label Encoder)、增广关系矩阵 ACM(Augmented Correlation Matrix) 和图卷积网络 GCN (Graph Convolutional Network)。如图 2-1 所示, 输入一张建筑场景图片, 特征提取器 CNN 首先提取出建筑图片的全局特征, 然后将建筑图片的全局特征作为部分标签编码器 PLE 的输入。接着部分标签编码器 PLE 根据建筑图片的全局特征解耦出每个建筑场景类别各自的特征激活向量。这些带有建筑类别特征的激活向量作为图结点和作为图边的增广关系矩阵 ACM 输入到图卷积网络 GCN 中。激活向量和增广关系矩阵在图结构中互相传递消息, 从而建模多标签关系。部分标签编码器 PLE 的另一个输出是建筑类别预测值, 将多标签关系加到预测值上来辅助生成最终的预测结果。整个 AGCN++ 模型在序列任务的训练和测试中都是端到端进行, 无需额外的先验信息来辅助训练。

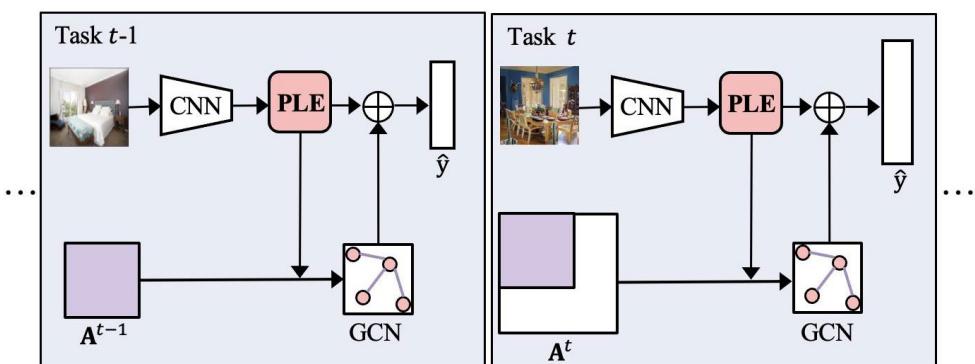


图 2-1 AGCN++ 网络总体结构



2.2 部分编码器 PLE

图卷积网络由图结点和图边构成，在上一章中介绍，由关系矩阵表示图边，且可以随着连续学习而自动增广。上一章介绍的 AGCN 模型使用预先给定的建筑标签词向量初始化图结点，这将导致在连续学习过程中，不仅不能自动增广建筑场景图结点，而且网络的表现会受建筑标签词向量质量的影响，从而导致不断累积构建标签关系的误差。

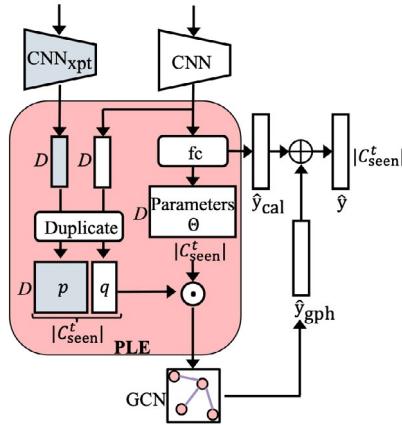


图 2-2 部分标签编码器 PLE

本文提出了部分标签编码器 PLE (Partial Label Encoder)，它将每个部分标签的建筑全局图像特征随着类增不断解耦为类激活向量。这些特定于建筑类的激活向量因建筑图像而异，用作增广图结点。PLE 将减少构建标签关系时错误的积累，随着多标签连续学习中类数量的增加，生成的图结点也会自动增加，最终实现图结构的自动增广。PLE 使用建筑图像特征和模型参数对图结点进行初始化，并不断更新图结点。如图 2-2 所示，将一张图片分别输入到特征提取器与专家网络的特征提取器，得到图像全局特征：

$$\text{CNN}(x) \in \mathbb{R}^D, \text{CNN}_{\text{xpt}}(x) \in \mathbb{R}^D \quad (2-1)$$

其中 D 表示图像特征维数。然后，本文使用全连接层 $\text{fc}(\cdot)$ 来实现两个目的。一是在不添加标签依赖的情况下获得预测值 \hat{y}_{cal} 。

$$\hat{y}_{\text{cal}} = \text{fc}(\text{CNN}(x)) \in \mathbb{R}^{|C_{\text{seen}}^t|} \quad (2-2)$$

其中 C_{seen} 是模型见过的所有建筑类别， $\text{fc}(\cdot)$ 层起到特征降维的作用。 $\text{fc}(\cdot)$ 层的另一个作用是通过对图像特征和参数进行 Hadamard 乘积，使建筑图像全局特征激活类信息。类别的特征激活向量由如下公式所得：

$$\mathbf{H}^t = \Theta \odot \text{cat}(p, q) \in \mathbb{R}^{|C_{\text{seen}}^t| \times D} \quad (2-3)$$

其中 \odot 表示 Hadamard 乘积， $\Theta \in \mathbb{R}^{|C_{\text{seen}}^{t-1}| \times D}$ 是 fc 层的参数。 Θ 在第一维上不断扩展，以适应连续学习中类递增的特性。 $\mathbf{H}^t \in \mathbb{R}^{|C_{\text{seen}}^t| \times D}$ 表示图结点，并随着建筑场景序列任务的学习进行自动增广。 p 和 q 是全局图像特征输入进复制函数 $\text{Duplicate}(\cdot)$ 得到：

$$p = \text{Duplicate}(\text{CNN}_{\text{xpt}}(x)) \in \mathbb{R}^{|C_{\text{seen}}^{t-1}| \times D} \quad (2-4)$$

$$q = \text{Duplicate}(\text{CNN}(x)) \in \mathbb{R}^{|C^t| \times D} \quad (2-5)$$

其中 C_{seen}^{t-1} 是旧任务的建筑类别集合， C^t 是新任务的建筑类别集合。举个例子，全局特征 $\text{CNN}(x) \in \mathbb{R}^{1 \times D}$ 在第一维上复制 $|C^t|$ 次得到 $q \in \mathbb{R}^{|C^t| \times D}$ 。接着用图卷积网络 GCN 对 \mathbf{H}^t 进行编码得到图特征 \hat{y}_{gph} ：

$$\hat{y}_{\text{gph}} = \text{GCN}(\mathbf{A}^t, \mathbf{H}^t) \in \mathbb{R}^{|C_{\text{seen}}^t|} \quad (2-6)$$

其中增广关系矩阵 \mathbf{A}' 由建筑场景的软标签和硬标签共同构建, 由建筑场景训练数据驱动。最后将图特征 $\hat{\mathbf{y}}_{\text{gph}}$ 与预测值 $\hat{\mathbf{y}}_{\text{cal}}$ 相加, 实现利用多标签关系来辅助生成最终预测结果 \mathbf{y} :

$$\hat{\mathbf{y}} = \sigma(\hat{\mathbf{y}}_{\text{cal}} + \hat{\mathbf{y}}_{\text{gph}}) \quad (2-7)$$

其中 $\hat{\mathbf{y}} \in \mathbb{R}^{|\mathcal{C}_{\text{seen}}^t|}$, 随着对建筑场景序列任务的不断学习, 多标签连续学习模型 AGCN++ 能够实现越来越多的建筑类别。

3. 建筑多标签连续学习知识记忆方法

其中 ℓ_{cls} 代表分类损失, \mathbf{y} 是数据集中的真实标签。在 CL-MLCL 中, $\mathcal{C} = \mathcal{C}_{\text{seen}}^t$, 代表所有任务的类别集合。在 IL-MLCL 中, $\mathcal{C} = \mathcal{C}^t$, 代表新任务的类别集合。

如图 3-1 所示, 在任务 t 的训练数据 Dtrnt 全部训练完之后, 固定并保存模型的所有参数, 作为任务 t 的专家网络 Expert t 。在每次任务训练结束之后, 更新专家网络。本章提出的多标签连续学习中类别与关系层面记忆方法都是基于专家网络, 运用知识蒸馏技术, 将专家网络中的知识蒸馏到现在的主模型中, 实现抑制灾难性遗忘。下面将具体介绍这两种方法。

3.2 建筑多标签连续学习类别层面记忆方法

在建筑序列任务的模型训练中, 模型参数不断收敛于新任务, 会不断遗忘旧任务的知识, 这导致模型对新旧知识的非重叠表达能力断崖式下降, 这主要表现在多标签类别层面。为了抑制这种类别层面的灾难性遗忘, 本节提出多标签连续学习类别层面记忆方法。

本节方法基于专家网络, 核心在于利用知识蒸馏, 提取专家网络中旧任务的知识给现在的网络, 以此来重新唤模型中旧任务的知识。如图 3-2 所示, 将任务的一张建筑多标签图片 x 分别输入给现在任务的模型 Model t 和专家网络 Expert $t-1$ 中。在各自的图网络的辅助作用下分别生成预测值。Model t 的预测值为 $\hat{\mathbf{y}}$, 由于遗忘只发生在旧任务的类别中, 所以本节的方法也只对预测值 $\hat{\mathbf{y}}$ 中代表旧任务类别的预测值 $\hat{\mathbf{y}}_{\text{old}}$ 进行操作。专家网络 Expert $t-1$ 在上一个任务中生成, 它的输出即为前两章中提出的软标签 $\hat{\mathbf{z}}$ 。则本文利用知识蒸馏技术抑制建筑类别层面遗忘的方法为:

$$\ell_{\text{dst}}(\hat{\mathbf{z}}, \hat{\mathbf{y}}_{\text{old}}) = - \sum_{i=1}^{|\mathcal{C}_{\text{seen}}^{t-1}|} [\hat{z}_i \log(\hat{y}_i) + (1 - \hat{z}_i) \log(1 - \hat{y}_i)] \quad (3-2)$$

其中 $\hat{\mathbf{y}}_{\text{old}} \in \mathbb{R}^{|\mathcal{C}_{\text{seen}}^{t-1}|}$, $\hat{\mathbf{z}} \in \mathbb{R}^{|\mathcal{C}_{\text{seen}}^{t-1}|}$ 。知识蒸馏的本质是把同样的建筑多标签图片输入分别输入给现在的模型和专家网络, 把专家网络的输出作为目标值, 来抑制模型中旧任务参数的偏移。由于是对旧任务参数的抑制, 所以 i 的取值是从 1 到 $|\mathcal{C}_{\text{seen}}^{t-1}|$ 。

3.3 建筑多标签连续学习关系层面记忆方法

与单标签连续学习不同, 本节提出多标签连续学习的灾难性遗忘不仅发生在类别层面而且发生在关系层面。具体表现在用于构建标签关系的图网络知识的遗忘。为了抑制这种标签关系层面的遗忘, 本文提出多标签连续学习关系层面记忆方法。

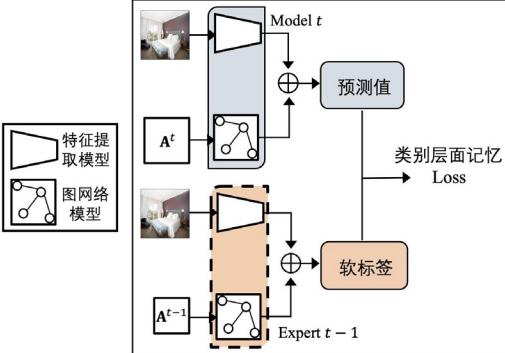


图 3-2 类别层面记忆方法

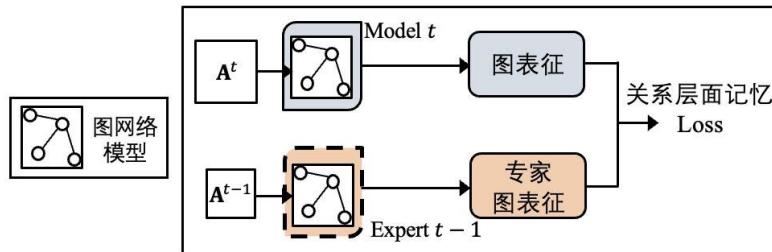


图 3-3 关系层面记忆方法

本文在序列任务的学习中不断保存标签关系，如图 3-3 所示，本文用专家网络 Expert 中图网络模型输出的专家图表征来指导新任务图网络模型的学习。在任务 t 时的专家图表征 \mathbf{y}'_{gph} 由下列公式得到：

$$\mathbf{y}'_{\text{gph}} = \text{GCN}_{\text{xpt}}(\mathbf{A}^{t-1}, \mathbf{H}^{t-1}) \quad (3-3)$$

其中 $\text{GCN}_{\text{xpt}}(\cdot, \cdot)$ 为专家网络中图网络模型， \mathbf{A}^{t-1} 是旧任务构建更好的增广关系矩阵， \mathbf{H}^{t-1} 表示旧任务的图结点。

基于此本节提出标签连续学习关系层面记忆方法：

$$\ell_{\text{gph}}(\mathbf{y}'_{\text{gph}}, \hat{\mathbf{y}}_{\text{gph}}) = -\sum_{i=1}^{|C_{\text{seen}}^{t-1}|} \|\mathbf{y}'_{\text{gph},i} - \hat{\mathbf{y}}_{\text{gph},i}\|^2 \quad (3-4)$$

则整个多标签连续学习模型的最终损失函数为：本节采用二范式作为计算 $\mathbf{y}'_{\text{gph},i}$ 与 $\hat{\mathbf{y}}_{\text{gph},i}$ 的距离。则整个多标签连续学习模型的最终损失函数为：

$$\ell = \lambda_1 \ell_{\text{cls}}(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}) + \lambda_2 \ell_{\text{dst}}(\hat{\mathbf{z}}, \hat{\mathbf{y}}_{\text{old}}) + \lambda_3 \ell_{\text{gph}}(\mathbf{y}'_{\text{gph}}, \hat{\mathbf{y}}_{\text{gph}}) \quad (3-5)$$

其中 λ_1 , λ_2 与 λ_3 分别是三个损失函数的权重。其中为了定量化旧任务和新任务的重要性，权重 λ_1 与 λ_2 的关系为 $\lambda_1=1-\lambda_2$ 。

作者介绍



杜凯乐。于 2023 年在苏州科技大学获得硕士学位，导师为胡伏原教授。目前于东南大学攻读博士学位，导师为刘光灿教授。在国际顶级期刊 IEEE TMM, IEEE TGRS 和国际顶级会议 ICME, ECCV 等上发表数篇论文。主要研究连续学习、图表征学习以及多标签学习。



胡伏原。苏州科技大学电子与信息工程学院院长、教授、博导，省青蓝工程学术带头人，333 高层次人才培养对象和六大人才高峰培养对象。在《IEEE Trans. on PAMI》《IEEE Transactions on Multimedia》《中国科学》等国内外知名期刊以及 AAAI、CVPR 等知名国内外会议上发表论文 30 余篇。

基于异构网络嵌入的个性化论文推荐方法研究

——江苏省计算机学会优秀硕士学位论文

作者：王杰

工作单位：苏州大学

指导教师：周经亚

论文摘要

随着电子文献数量的急剧增加，以及不同学科、领域间的交叉和不断发展，研究人员不得不花费大量的时间和精力才能找到他们真正感兴趣的论文。近年来异构网络的出现和发展，让基于异构网络嵌入的论文推荐方法变的十分流行，其中利用元路径来挖掘异构关系成为了非常重要的手段之一。然而通过分析总结发现，这些基于异构网络嵌入的论文推荐方法依然存在着一些不足，本文针对这些不足依次提出了相应的解决方法：

首先，现有的一些利用元路径的采样方法（如随机游走、回溯游走等）收集到的信息多样性不足，甚至容易收集到无效信息和噪声信息。而且，大量的推荐相关的工作仅在静态数据上挖掘用户阅读偏好和论文受众偏好，忽略了这些特征会随时间动态变化。对此，本文考虑异构信息网络中链接的方向性并利用节点的出入度设计出全新的元路径采样方法，以使采样的路径噪声更少，多样性更丰富。然后本文利用注意力机制下的 Bi-LSTM 挖掘短期特征，设计出补偿推荐机制将短期特征下的推荐结果融入到长期特征得到的推荐结果中，实现特征的动态性捕获。

其次，许多依赖元路径进行网络嵌入的推荐方法不可避免地需要手动设计和选择元路径，这非常耗费时间和人力。所以本文提出一种通用 HIN 构建方法，并结合多注意力机制实现元路径自动设计与选择。

最后，现有的推荐方法在给用户推荐论文时并没有考虑到论文是否符合用户当前的研究方向，因为资深研究人员往往拥有丰富的历史阅读数据，且涉及多个研究方向，如果不考虑用户当前的研究方向而进行推荐，将会导致推荐结果缺失时效性。为解决这一问题，本文创新性地利用 BERT 来预训练论文关键词特征，再结合自注意力机制得到论文的内容特征和用户的研究方向特征，并通过点乘匹配它们来辅助主任任务进行推荐，以此保证推荐结果的时效性。

本文提出的方法在多个数据集上与多种具有代表性的基准方法进行大量的实验验证，实验结果证明了本文提出方法的有效性。本文还以提出的个性化论文推荐方法为基础，综合考虑论文推荐场景下用户的各种实际需求，设计并实现了一个全新的个性化论文推荐系统。

专家推荐语

面对文献数量的急剧增加，研究人员寻找感兴趣的论文变得愈发困难和费时，因此论文推荐方法的研究具有重



大的现实意义，尤其对于科研工作本身具有重要的推动作用。该硕士论文聚焦于高效论文推荐方法的研究，针对现有方法的不足提出了一系列兼具创新性和实用性的解决方法。

研究内容与方法上，作者在对现有研究工作充分调研的基础上总结出当前论文推荐研究的三大挑战：元路径采样结果的多样性不足，采样路径依靠手动设计，推荐结果时效性欠佳。论文正是从多样性、高效性、动态性和时效性方面探讨基于异构网络 HIN 的推荐方法，主要工作包括：

1) 采用出入度采样法提高元路径采样信息的多样性；融入用户短期偏好体现用户兴趣变化的动态性；设计一种通用的 HIN 构造方法；设计一种时效性辅助任务驱动的推荐方法体现推荐结果的时效性。

2) 设计并实现了个性化论文推荐系统。

研究成果方面，论文提出的基于异构网络嵌入的论文推荐方法在信息多样性、元路径自动设计、推荐时效性等方面取得了显著突破，为论文推荐领域研究提供了新的思路和方法。该方法具有良好的可扩展性和应用前景。

综上所述，论文表明作者较好掌握了本学科的相关基础理论，科学素养扎实，具有很好的相关领域的分析、设计和实践能力。论文结构合理，条理清晰，语言比较流畅，实验分析合理，是一篇优秀的硕士论文。故而推荐该硕士论文申报优秀硕士论文。

论文看点

本文通过总结近年来论文推荐工作的研究现状中，发现相关的算法依然存在一些不足，归纳为以下四点：多样性、动态性、高效性和时效性。针对此四点不足，本文设计实现一个面向广大研究人员的论文推荐方法，它具有高精度、高效率，能够兼顾研究人员动态变化的阅读偏好和论文动态变化的受众偏好，以研究方向为指引给出最贴合研究人员需求的论文推荐。为达到这一总体目标，本文在元路径采样方法设计、用户阅读偏好及论文受众偏好动态性捕获、元路径选择、推荐结果时效性匹配以及推荐系统实现等方面做了大量创新性工作。因此，本文的看点主要体现在以下四个方面：

一、基于信息多样性与特征动态性的推荐方法

现有的一些利用元路径的采样方法（如随机游走、回溯游走等）能收集到的信息在多样性方面存在不足，甚至容易收集到无效信息和噪声信息。此外，还有大量推荐相关的工作在挖掘用户阅读偏好和论文受众偏好时，没有关注它们会随时间变化的动态性。针对以上两种不足，本章提出了一种能同时考虑异构信息网络 HIN 图中信息多样性和特征动态性的论文推荐方法，称为动态补偿下的论文推荐法（Dynamic Compensation based Paper Recommendation Method, COMRec）。

具体来说，本章首先提出了基于出入度的采样法，利用节点的出入度来设计游走方向，以使采样结果更加具有多样性。然后，本章还提出了一种长短期补偿推荐机制，它先将基于元路径学习到的特征视为长期趋势的表示，再使用 Bi-LSTM 来捕捉历史数据中的动态变化，并利用注意力机制自适应地将其纳入短期变化趋势的表达中。最后，通过长短期两种特征趋势进行补偿推荐，以使推荐的结果符合用户当前的偏好。COMRec 包含四个步骤，如图 1 所示：
a) 出入度采样，b) 异构实体嵌入学习，c) 特征的动态性挖掘和 d) 补偿推荐下的概率预测。

对于元路径采样，如图 2 所示，传统的无向随机游走采样生成的路径样本，由于缺乏方向性，采样路径很容易深入探索，不可避免地会与噪声混合。一些研究人员提出了一种改进的带回溯的采样方法，它允许随机游走几步后

返回到前一节点或源节点。然而，这样采样的路径的多样性是不足的，并且缺少一些语义丰富的路径。本章提出了一种新的元路径采样方法，称为出入度采样：从源节点开始，采样必须严格遵循元路径指定的连接方向，当方向为 $>$ 时，这意味着下一个节点必须来自源节点的出度邻居，当方向为 $<$ ，则下一个节点必须来自其入度邻居。下一个节点的类型也需要与元路径指定的类型一致。借助于出入度采样，不仅能够显著地避免采样到噪声信息，而且还能够获得多种多样具有丰富语义的路径。

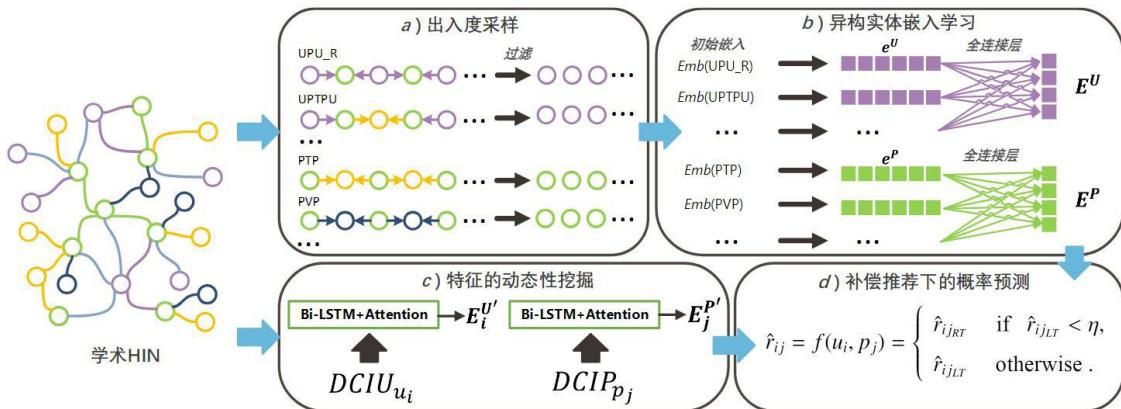


图 1 COMRec: 动态补偿下的论文推荐法

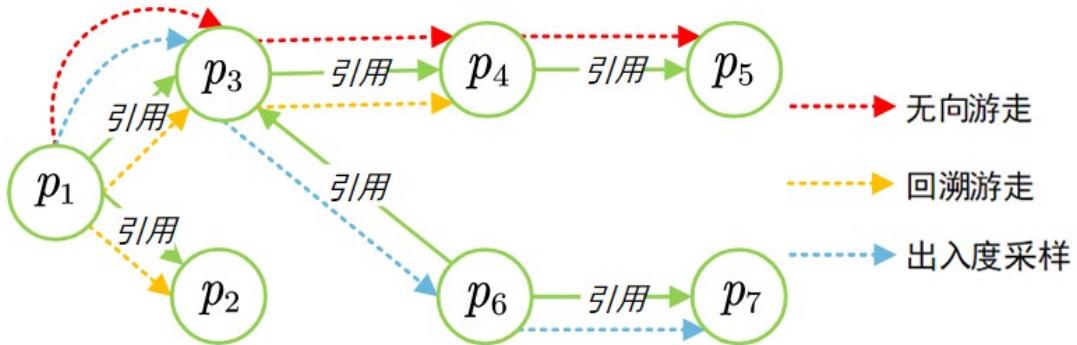


图 2 元路径采样案例

在获得元路径采样信息之后，本章将通过网络嵌入方法从中学习异构实体节点的最终嵌入表示。本文方法会先过滤掉采样得到的路径中与头节点类型不同的其他节点，再利用 skip-gram 模型进行嵌入学习。然后，本方法使用全连接层来自适应地融合每个用户的初始嵌入。本章将通过元路径学习到的嵌入表示作为用户和论文的长期偏好特征表示，因为元路径采样的信息来源于所有历史数据构成的 HIN 图。但是，只利用长期偏好特征进行推荐是不够准确的，因为无论是用户的阅读偏好还是论文的受众偏好都可能随着时间发生改变。为了准确把握用户和论文当下的偏好特征，还需要通过挖掘历史信息来捕捉这些动态变化。

为了挖掘特征的动态变化，本文首先需要通过对数据集进行预处理来提取一些必要的信息，其中包括每个用户阅读的论文集、每篇论文的受众集以及阅读 / 被阅读的时间。本方法接下来会利用 Bi-LSTM 来捕获历史阅读记录中包含的动态信息。考虑到不同的论文有不同的重要性，本方法使用注意力机制来融合每个 Bi-LSTM 单元输出的隐藏层特征表示，来生成动态变化信息的最终嵌入表示。关于基于注意力感知的 Bi-LSTM 的细节如图 3 所示。DCIU 是用户历史阅读论文记录，Bi-LSTM 将从左右两个方向挖掘其中包含的阅读偏好特征信息。

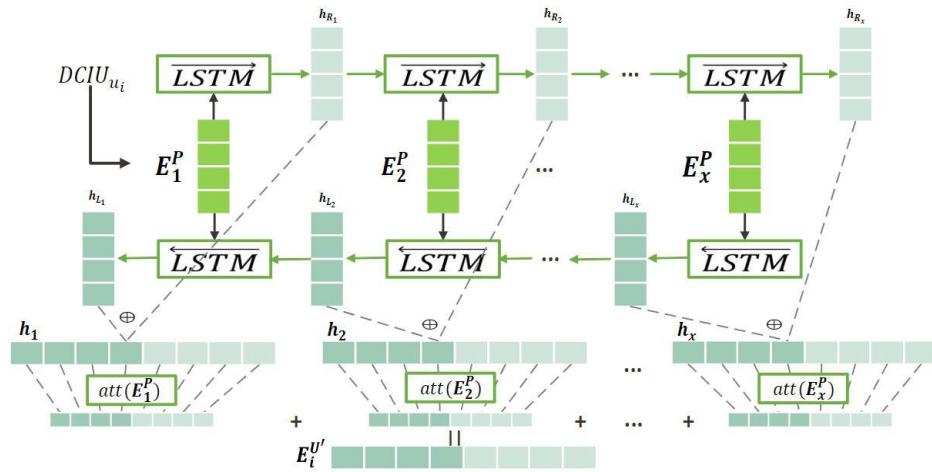


图 3 基于注意力感知的 Bi-LSTM 的细节图

在为每个用户和每篇论文获得了两种长短期下的特征表示后，本章提出了一种长短期补偿机制来获得最终的阅读概率，综合考虑了长短期偏好，使得推荐结果更加准确。本方法在真实数据集上进行了广泛的实验，实验结果表明 COMRec 优于最先进的基准方法，证明了本章提出的方法的有效性。

二、多注意力感知的推荐方法

异构信息网络中有多种异构实体，相应地也有很多种类型的元路径，大量的工作都总结出了一个共同的结论，即：不是每种元路径都能提高模型性能，也不是元路径种类越多模型效果越好。因此，如何有效地设计和选择元路径成为个性化推荐的一大挑战。本章提出了一种能高效设计和选择元路径的方法，称为多注意力感知的论文推荐法（Multi-Attention aware Recommendation Method, MARec）。

具体来说，本章首先提出了一种通用的 HIN 构造方法，该方法保留了用户和论文的节点类型，并屏蔽其它的辅助节点类型（将它们视为相同类型）。然后，本章利用 GAT 来区分不同辅助节点的重要性，并通过注意力机制来捕获不同元路径的重要性，这样就避免了通过手动实验去选择具有优势性能的元路径。最后，本章还优化了上一章节中提出的特征动态性挖掘方法，并将长短期补偿推荐机制和高效元路径设计与选择方法相结合，共同进行推荐。

MARec 包含四个步骤，如图 4 所示：a) 通用 HIN 图构造、b) 多注意力感知的实体嵌入学习、c) 特征动态性挖掘和 d) 概率预测。

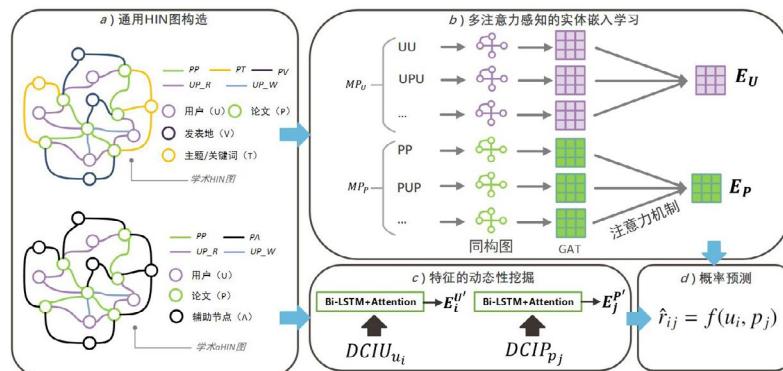


图 4 MARec: 多注意力感知的论文推荐法

为了有效地设计和选择元路径，本章首先提出了一种通用 HIN 构造方法，即：辅助节点驱动的异构信息网络图构造法。本章将新构建的异构信息网络图称为 aHIN (auxiliary node-driven HIN)。在 aHIN 中，本方法保留了两种原始类型的实体，即论文和用户，并将其它类型的辅助节点视为同一种类型。这样做的原因是除了论文和用户节点外，其它所有类型的节点都是用于增强用户和论文嵌入学习的辅助节点，所以本方法将它们的类型掩盖，视为同一种类型，如图 4a 中的学术 aHIN 图。

在构造的辅助节点驱动的异构信息网络图上，由于本方法掩盖了辅助节点的类型，所以需要一种自适应地感知学习方法来区分不同辅助节点的重要性和不同元路径的重要性，以实现元路径的自动选择。综上，本章设计出了一种多注意力感知的实体嵌入学习方法。具体而言，本方法首先使用 GAT 对每种元路径下得到的同构子图进行嵌入。GAT 能自适应地感知不同邻居节点的重要性，从而能很好地与本方法构造的 aHIN 图结合，达到自动提取有用辅助信息的效果。然后再利用注意力机制来自动学习不同元路径的重要性，从而避免了手动实验去选择元路径。

本方法在三个广泛使用的数据集上进行了大量的实验，实验结果表明 MARec 优于最先进的基准方法，证明了 MARec 的有效性。

三、时效性辅助任务驱动的推荐方法

在改善了推荐算法的多样性、动态性和高效性相关的不足点后，现有工作还可以从推荐结果时效性方面继续得到改进。资深的研究人员拥有丰富的历史阅读数据，往往涉及多个研究方向，在给用户推荐的一系列论文结果中，本文认为与研究者当前研究方向相关的推荐结果更应该出现在推荐列表的前面。而现有的基于异构网络嵌入的方法大多只关注了图结构、语义关系，没有考虑到这一点。所以本章提出了一种时效性辅助任务驱动的推荐方法，称为多时间跨度动态感知的多任务推荐法 (Multi-time-span Dynamics aware Multi-task Recommendation Method, MDRec)。MDRec 中的时效性辅助任务即将用户当前研究方向与论文内容相匹配，得到时效性下的推荐分数，以改进推荐结果。具体而言，MDRec 首先应用谷歌团队在 2018 年提出的语言表示模型：BERT，并结合全连接层微调学习数据集中涉及的关键词的特征表示。然后使用自注意力机制来获得论文的内容特征嵌入和用户的研究方向特征嵌入。此外，为了更好的捕捉研究方向特征的动态变化，MDRec 进一步优化了特征动态性挖掘的方法，设计了一个多时间跨度动态感知的预测器。最后利用预测器预测的研究方向特征嵌入与论文内容特征嵌入点乘来获得时效性推荐分数，并将其融合到主推荐任务（即：用户阅读偏好与论文受众偏好匹配）中辅助推荐。

MDRec 由三个步骤组成，如图 5 所示：a) 辅助任务设计、b) 多时间跨度下特征动态性挖掘和 c) 概率预测。

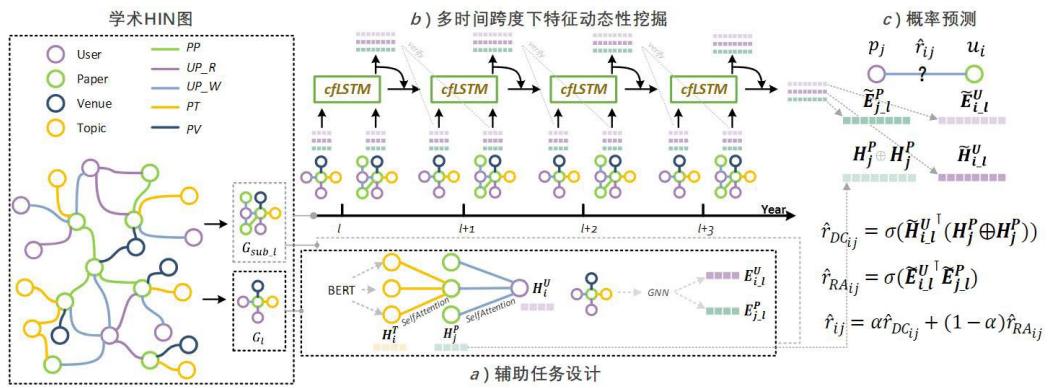


图 5 MARec: 多注意力感知的论文推荐法



为了能保证推荐结果时效性，本章设计了一个辅助推荐任务，即将用户的研究方向特征和论文的内容特征匹配得到时效性下的推荐分数。为了获得论文的内容特征表示，本文从论文标题、摘要、关键词和其他信息中选择关键词来表示论文的内容。这样选择的原因是关键词中包含的信息比论文标题更准确，比摘要更简洁。在学习关键词的语义特征时，本文引入了经典的语言模型：BERT。为了使 BERT 预训练学习的关键词语义特征更匹配论文推荐场景，本文为 BERT 的输出添加了一个全连接层进行微调。

在获得关键词语义特征表示之后，就需要从中获得论文的内容特征表示，考虑到每篇论文有不同数量的关键词，并且每个关键词在论文中的重要性不同，本章采用自注意力机制来聚合每篇论文的关键词语义特征。在获得论文的内容特征表示之后，就可以从中获得用户的研究方向表示，本文认为用户的研究方向取决于用户发表过的论文，考虑到每个用户发表的论文数量不同，并且每篇论文对作者的研究重要性不一样，所以依然采用自注意力机制来融合它们。

为了更好地去挖掘研究方向特征的动态性，本章优化了前文提出的特征动态变化捕捉的方法，重新设计了一个基于 LSTM 的预测器，来从多时间跨度的角度下捕捉特征的变化，并将其称为 cfLSTM。cfLSTM 可以同时从长短两个时间跨度上感知特征的变化，且对所有基于异构信息网络图学习的特征都能进行动态变化捕捉。为了从多时间跨度的角度下捕捉特征的变化，本章将重构异构信息网络图，即按文章发表、被阅读的年份时间分割为多个异构信息网络子图。

在得到每个关键词、用户和论文的动态特征表示后，就可以开始预测用户 u 在第 l 年阅读论文 p 的概率。本方法在两个广泛使用的学术网络数据集上进行了大量的实验，实验结果表明 MDRec 优于最先进的基准方法，证明了本章提出的方法的有效性。

四、个性化论文推荐系统设计与实现

本章将前三章提出的推荐方法融入到实际的论文推荐应用中，结合用户阅读偏好、研究方向、论文受众、论文内容、时间等信息来给用户提供精准的论文推荐，设计并实现了一个全新的个性化论文推荐系统 --- 基于异构网络嵌入的个性化论文推荐系统。本系统的数据来源于知名引文数据集 DBLP 和 OAG，总共有超过 1000 万的论文，每篇论文包含作者、引文、关键词、发表时间等信息，这些丰富的论文信息能帮助系统更好的学习到用户、论文的特征，了解用户的喜好、论文的受众等。此外，除了论文推荐功能，本文深入分析了用户在使用论文推荐系统时的需求，还给用户提供了更多的服务功能，包括：热门论文展示、论文推荐、论文异构信息网络图展示、论文搜索、论文收藏、历史记录、论文提交与管理、论文评论等。这些功能能进一步帮助构建学术异构信息网络，让系统能更准确进行论文推荐。

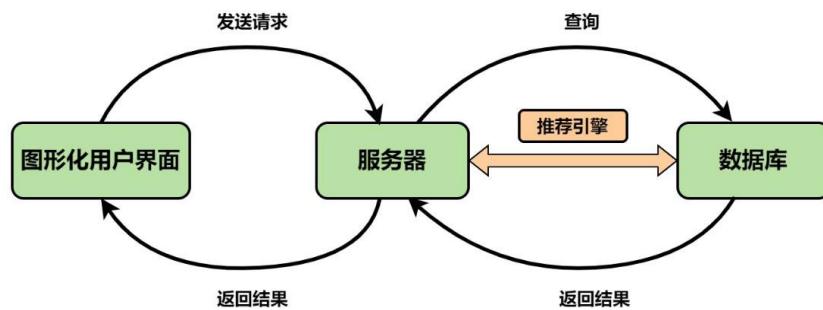


图 6 系统架构图

系统架构如图 6 所示。整个系统由图形化用户界面、服务器端、推荐引擎和数据库构成。图形化用户界面负责为用户提供可视化信息展示，用户进行论文搜索、查询、浏览等操作并向服务器提出请求后，这些数据首先会被服务器端记录在数据库中，然后服务器会访问数据库获取信息并将结果返回给用户。在系统收到用户论文推荐的请求后，服务器端会将该用户 id 发送给实时推荐引擎，推荐引擎会根据用户的阅读偏好、论文阅读记录等相关信息计算出最匹配用户需求的论文结果提供给服务器，服务器会将推荐结果返回给用户。

在推荐引擎的算法设计上，本系统综合了前三章所提出的推荐方法，构建出了新的模型，包括出入度采样、长短期补偿推荐机制、辅助推荐任务设计以及多时间跨度下捕获研究方向特征动态变化的方法，具体推荐流程如图 7 所示。本文设计并实现的论文推荐系统，能让用户更快获得自己所感兴趣的论文，还能通过异构信息网络图、发表评论、论文搜索等功能得到更好的使用体验。

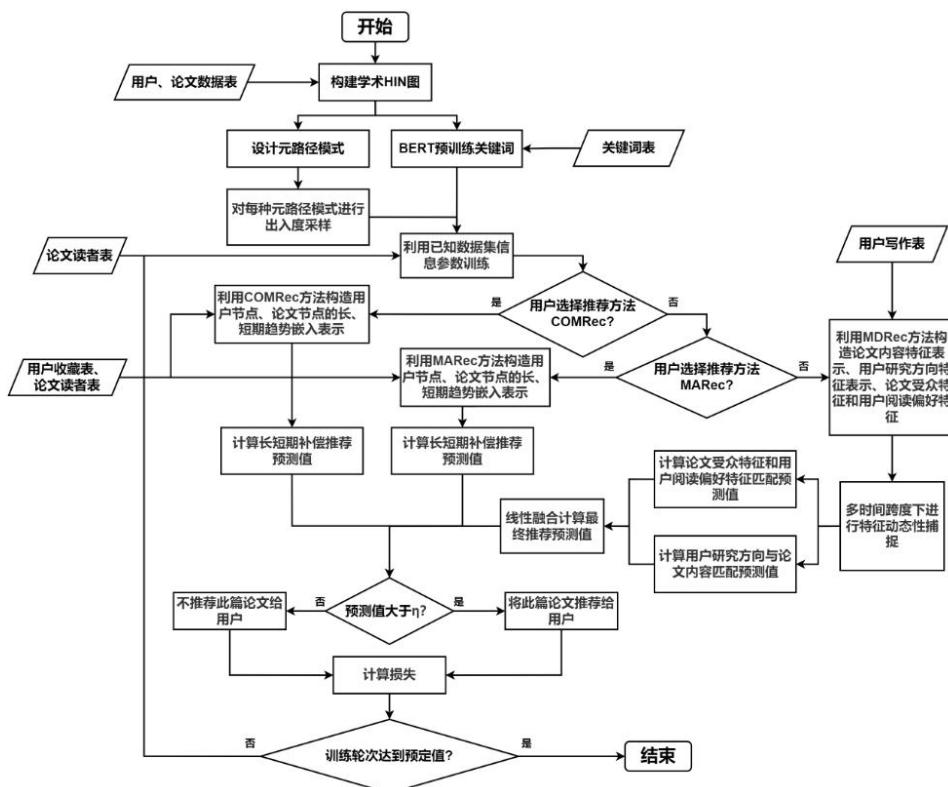


图 7 推荐引擎算法流程图



作者简介



作者王杰 2016 年至 2020 年就读于武汉轻工大学数学与计算机学院，软件工程专业。本科期间获评一等奖学金，优秀学生干部等荣誉。2020 年至 2023 年就读于苏州大学计算机科学与技术学院，主要研究论文推荐算法，异构网络嵌入，多任务推荐和深度学习。研究生期间在 CCF 推荐的 B 类会议 DASFAA 2022、2024 上发表论文 2 篇，中科院一区 TOP 期刊 ESWA 上发表论文 1 篇，获得授权发明专利 1 项，软件著作权 2 项。在校期间，主持 1 项江苏省研究生实践创新计划项目，获评苏州大学学业奖学金特等奖、优秀毕业研究生等荣誉，于 2023 年 6 月获计算机技术专业硕士学位，并获评苏州大学优秀硕士学位论文。



作者王杰是苏州大学社会智能计算团队成员，团队负责人为周经亚教授，团队一直致力于社会智能计算和数据智能分析相关研究，先后承担了国家自然科学基金 2 项，省市级科研项目 7 项，发表论文 80 余篇，包括 CCF-A 类论文 3 篇（KDD, INFOCOM, ICDE），CCF-B 类论文 12 篇（ICDCS, ICPP, DASFAA, ECAI, WWW, IPM, JCST, INS），ACM 权威期刊 CSUR 论文 1 篇，中科院一区期刊论文 4 篇（ESWA, TST），二区论文 2 篇（TCSS, JOCS），以及《中国科学：信息科学》、《软件学报》各 1 篇，2022 年，2023 年分别获得苏州市人工智能科学技术二等奖和苏州市计算机科学技术一等奖，2018 年，2021 年分别获得大数据与云计算国际会议最佳论文奖（CBD Best Paper Award）和最佳论文亚军奖（Best Paper Award Runner-up）。

以智联为网，护航物联安全——在智能物联网容错传输技术研究中勇攀高峰

——2024年江苏省计算机学会青年科技奖樊卫北副教授

个人简介

樊卫北，博士，副教授，2019年于苏州大学计算机科学与技术专业，获得工学博士学位。江苏省优秀青年基金获得者（2025）、江苏省计算机学会青年科技奖（2024）、江苏省青蓝工程优秀青年骨干教师（2024）、Wiley 中国高贡献论文作者奖（2024）、ACM 南京分会新星奖（2023）、江苏省双创博士人才（2020），CSCWD 2024、ICBC 2023、IFIP NPC2024 最佳会议论文奖。担任多个国际会议如 QRS、ICA3PP、ICPADS、COCOON 等程序委员会委员（主席），并担任 SCI 期刊 Journal of the Chinese Institute of Engineers 副编辑、《网络与信息安全学报》、《计算机科学》和《计算机科学与探索》等期刊青年执行编委，IEEE 会员，中国计算机学会物联网专委会委员。主持国家重大科研仪器研制项目课题、国家自然科学基金面上 / 青年项目、江苏省双创博士人才项目、江苏省自然科学基金青年项目、江苏省高校基础科学研究重点项目，及华为、中兴、电信等横向课题，累计总经费达 1000 余万元，团队将一系列创新性成果投入应用，与华为公司联合研发的端网协同的拥塞控制技术是国内外首个面向流级别的低时延直通传输机制，该合作项目被评为“华为合作项目优秀结题奖”。此外，授权国家发明专利授权 18 项，发明专利实现转化 275 万元，成果应用于华为、中兴等头部企业，取得了良好的经济和社会效益。

教学育人上，樊卫北副教授主持教育部产学合作协同育人项目 2 项，研究生教改项目 2 项，发表教改研究论文 3 篇，其中 1 篇为英文教改研究论文。参编陈国良院士主导的教材《新一代信息技术》，并作为骨干成员参与《并行计算机体系结构》（第 2 版）等教材更新。申报省级教改研究课题 1 项，获得 2021 年江苏省课程思政示范课程，2024 年江苏省研究生优质教学资源（教学案例），在 2024 年获评江苏高校青蓝工程优秀青年骨干教师。在学术科研方面，樊卫北副教授一直从事从事智能物联网、端网协同相关的科学研究。近五年来，发表高水平论文 70 余篇，包括 CCF-A 类论文 27 篇，IEEE Trans 29 篇，如 IEEE TC、TON、TPDS、TIFS、TIT、TDSC、TMC、TSC、Sci. China Infor. Sci., 等，研究工作得到了 35 位 ACM/IEEE Fellow 正面引用与评价。



以智联为网，护航物联安全——在智能物联网容错传输技术研究中勇攀高峰

樊卫北副教授针对传统物联网采用静态封闭网络资源管理机制，无法适应多源异构、竞争共享以及动态演化的物联网开放环境，物联网可靠传输与容错仍然存在“网络容错能力有限”、“虚拟网络映射效率低”和“网络路由通信延迟大”等挑战，围绕物联网可靠传输与容错性基础理论、关键技术和实际应用开展创新性研究：如图 1 所示，一、针对混合故障全

图 1 樊卫北 副教授



面感知的可靠性评估，揭示了网络结构和节点重要性关联特性，建立了基于网络动力学模型的节点重要性评估机制，增强网络节点抗毁能力；二、针对网络资源受限传输时延大的问题，设计了光电混合的高效虚拟网络嵌入模型，提出虚拟网络资源高效共享与协同配置，实现了从电网络到光网络通信传输模式的转变；三、针对算网融合模型的精准价值匹配，设计了网络节点优先级、邻节点的通信量、及网络状态的动态演化模型，实现网络资源的高效卸载。

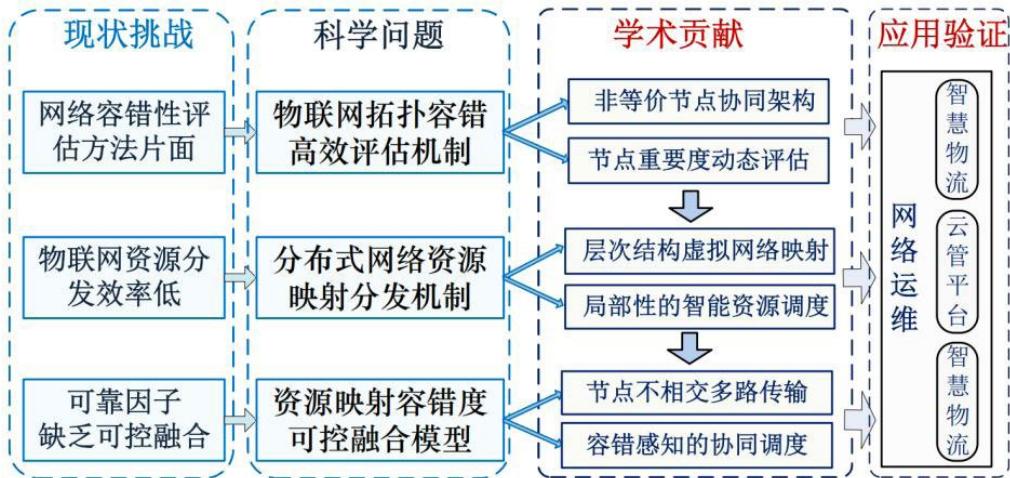


图 2 研究工作

一、大规模物联网故障容错度高效评估方法

针对物联网通信量和节点故障概率增大等特征，如何全面感知具有混合故障的容错性机制，亟需对与重要网络节点相关的节点进行保护以确保网络通信的服务质量需求，主要工作为：（1）全局属性的网络节点重要性评估模型构建；（2）共享保护的网络节点隐私保护机制设计；（3）基于内生结构的安全通信策略与路由机制；相关成果发表在 IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems(TPDS)、IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing(TDSC)、IEEE Transactions on Computers(TC) 等权威期刊上。

二、资源受限的物联网端边协同资源分配与优化

面对物联网大规模突发感知任务，资源受限的感知设备难以兼顾感算性能。为快速处理感知数据、提升感知质量，需要设计云边端算力协同网络，支持资源需求多样化的感知计算协同。主要工作为：（1）感知数据自组织算力网络协同架构设计；（2）大规模故障下的强连通容错模型构建；（3）多维属性的跨域虚拟网络映射机制；相关成果发表在 IEEE/ACM Transactions on Networking(ToN)、IEEE Transactions on Services Computing(TSC)、International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design(CSCWD)、IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems(TPDS) 等权威期刊和会议上。

三、物联网容错度与资源映射可控融合与优化

随着物联网规模的增大和应用场景的复杂性增加，网络中受攻击的频率和攻击类型复杂多变。如何应对多复杂环境下的多维安全需求约束耦合，是保障数据传输安全性的关键问题。主要工作为：（1）节点独立多路径容错路由优化设计；（2）复杂网络系统拓扑连接优化控制；（3）自适应诊断与故障快速定位策略；相关成果发表在 SCIENCE CHINA Information Sciences(Sci. China Inf. Sci.,)、IEEE Transactions on Computers (TC) 、International Conference on Network and Parallel Computing(NPC)、IEEE Transactions on Dependable and

Secure Computing(TDSC) 等权威期刊会议上。

潜心教学育人，筑牢理论基础

在课程教学方面，樊教授秉持“德育为首、育人为本、务实求是、开拓创新”的教学思想，灵活运用“以学生为中心、以思政为牵引”的教学方法，教学效果获得学生广泛好评。在课程思政教育教学中，有机融入南京邮电大学红色校史，引导学生深入了解、传承和发扬“信达天下，自强不息”的南邮精神，厚植对社会主义祖国的情感认同与价值认同，将个人理想与国家前途命运相融合，明确努力方向与奋斗目标。学生们在他的悉心教导下，不仅专业能力得到显著提升，思想品德和精神境界也得到了全面发展，真正成长为德才兼备、全面发展的社会主义建设者和接班人。

践行科研育人，深化科教融合

樊教授在人才培养过程中，始终强调塑造学生的创新精神。在具体的指导过程中，樊教授注重因材施教，针对不同学生的学术背景和研究兴趣，为其量身定制研究方向和培养方案。在樊教授的悉心指导下，学生们的科研能力得到显著提升，研究成果丰硕。多名学生的研究工作在国际顶级学术期刊上发表，其中包括多篇CCF-A类期刊论文，充分展现了其研究工作的学术价值和国际影响力。此外，学生们在国际学术会议上表现突出，多人次获得CCF推荐国际会议最佳论文奖等重要学术荣誉，进一步彰显了其研究成果的创新性和前沿性。同时，他指导的研究生项目获批2023年江苏省研究生科研与实践创新计划，充分体现了其培养的学生在科研创新能力方面的突出表现，也为后续人才培养工作奠定了坚实基础。

坚持实践育人，强化专业能力

面对数字经济快速发展和新兴产业蓬勃兴起的时代背景，创新型、复合型、实践型人才已成为行业发展的迫切需求。樊教授敏锐洞察这一趋势，积极回应时代呼唤，确立了“将理论转化为创新成果”的实践育人核心理念，致力于全面提升计算机专业学生的创新实践能力和综合素质。在樊教授的精心指导和悉心培养下，学生们在各类重要竞赛中屡创佳绩，充分展现了扎实的专业功底和卓越的创新实践能力。在创新创业领域，指导学生在中国“互联网+”大学生创新创业大赛中脱颖而出，荣获全国金奖。在程序设计竞赛中，学生团队在中国高校计算机大赛团体程序设计天梯赛全国总决赛中获得一等奖。在研究生层面，学生们更是在高水平专业竞赛中崭露头角：第九届华为ICT大赛中国编程赛江苏省赛一等奖的获得，体现了学生在信息通信技术领域的专业实力；中国研究生双碳大赛国赛二等奖的取得，则展现了学生在绿色低碳技术创新方面的研究能力和社会责任感。

在未来，樊教授将持续深入贯彻“立德树人、为国育才”的核心使命，聚焦价值塑造、学识传递、能力培育与人格养成协同推进各项工作。



以智能为翼，拓展大模型时代的知识边界——在三航智能研究中深耕细作

——2025年江苏省计算机学会优秀科技工作者李丕绩教授

个人简介

李丕绩，博士，教授，博士生导师，现任南京航空航天大学人工智能学院智能科学技术系主任，中国商飞大飞机创新谷客座科学家，入选CCF-NLP青年新锐学者奖励计划、江苏省计算机学会优秀科技工作者、斯坦福全球前2%顶尖科学家榜单、江苏省“双创博士”等多项荣誉。长期深耕自然语言处理、大模型可控生成、知识增强推理及智能对话系统研究。他先后在百度、腾讯AI Lab工作，多次主导企业级预训练模型研发与落地，包括中文BERT、多规模GPT2的训练部署，以及“文涌Effidit”智能写作平台、腾讯音乐“白泽”可控生成系统等成果。2021年加入南京航空航天大学后，围绕“航空、航天、民航”三航特色，承担国家自然科学基金等项目多项，在CCF-A类等顶级会议发表论文百余篇，申请中美专利20余项。其研究在可控生成、知识推理、大模型安全与不确定性、三航领域智能应用等方面形成系统化成果，受到国际同行多次正面引用和评价。李丕绩教授聚焦大模型基础研究与交叉应用，推动大模型技术在航空工业、中国商飞等国家重大项目的前沿探索，助力飞机质量管理与设计效率提升。在民机研制决策、飞机质量管理等特殊应用场景的实践发现，大模型生成技术依然存在落地难的问题，李丕绩教授带领团队开展深入研究，取得了一系列创新性成果。李丕绩教授坚持科研与育人并重，开设《自然语言处理》《知识表示》《人工智能前沿技术导论》等课程，构建校内大模型实验平台，指导本科学生在ACL、WWW、ECAI等顶会发表论文，推动构建“AI+三航”的教育新生态，被授予“华为智能基座先锋教师奖”。



以智能为翼，拓展大模型时代的知识边界——在三航智能研究中深耕细作

李丕绩教授兼具工业界与学术界的深厚积累，先后在百度、腾讯AI Lab等企业从事大模型研发与落地工作多年，创造了经济与社会效益。2021年入选南航“长空之星”人才培养计划，聚焦大模型基础研究与交叉应用，推动大模型技术在航空工业、中国商飞等国家重大项目的前沿探索，助力飞机质量管理与设计效率提升。在ACL、WWW、AAAI等国际顶会顶刊发表论

图1 李丕绩教授 文100余篇，中美专利20余项，学术引用4400余次，成果被国际知名学者正面评价与引用，入选斯坦福全球前2%顶尖科学家榜单，兼任多项学术任职并获多项荣誉奖项。在民机研制决策、飞机质量管理等特殊应用场景的实践发现，大模型生成技术依然存在落地难的问题，其主要原因可总结为：格式内容可控性不足、领域知识表示和推理能力欠缺、对用户反馈感知水平低等。针对上述问题和挑战，李丕绩围绕“约束可控”、“知识可控”和“用户可控”三个方面，开展了控制约束文本生成、知识增强文本生成和感知用户文本生成的探索和

研究，提升了大模型生成的可控性和知识性，有效缓解了“幻觉”现象，推动了生成技术的业务落地。主要研究成果概要如图 2 所示。

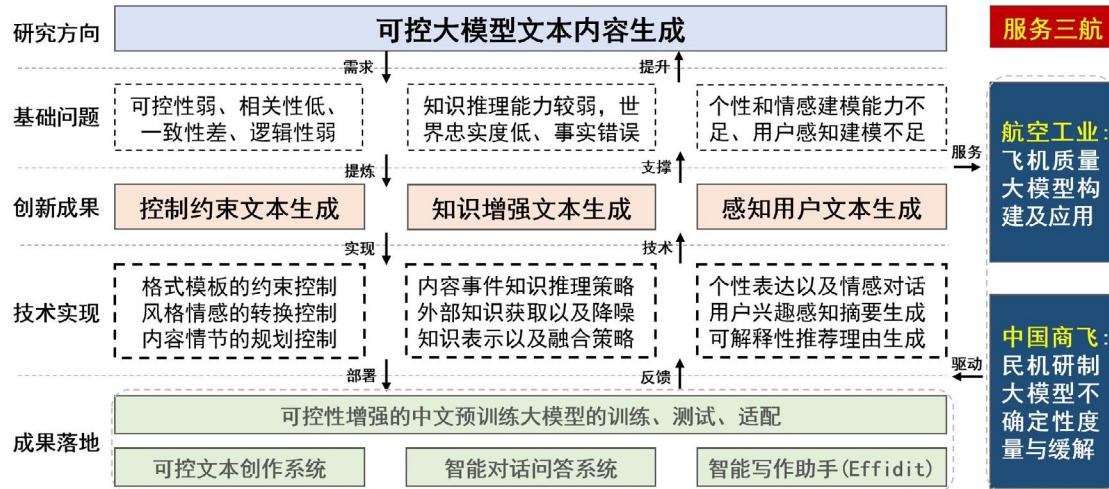


图 2 主要学术研究方向和成果概览

在技术研究方面，李丕绩教授围绕可控生成核心形成三类研究任务：约束可控生成针对不同业务场景构建多类控制策略，有效解决大模型生成可控性弱、情节不一致等问题，格式控制度超 96%，已稳定应用于腾讯音乐“白泽”系统；知识可控生成通过知识增广融合及推理规划策略，缓解生成任务中知识获取与推理能力不足的难题，提升多轮对话、长文本生成的一致性与可信性；用户可控生成聚焦有用户参与的业务场景，设计用户感知生成策略，覆盖角色扮演对话、电商推荐理由生成等领域，提升了内容个性化满意度。产业落地应用层面，李丕绩教授主导多项核心技术落地：2019 年研发并于企业内部发布中文 BERT，2020 年上线中文 GPT2，覆盖对话、写作等多任务；提出 SongNet 算法打造可控文本创作系统，成功落地腾讯音乐“白泽”等产品。服务国家重大需求领域，李丕绩教授团队依托高校“航空、航天、民航”三航特色，深化与行业领军企业合作：针对航空工业飞机故障管理需求，研发事件抽取、事理图谱构建及检索增强问答技术，为飞机故障高效管理提供有力保障；聚焦中国商飞大模型的不确定度量与缓解需求，构建多维度度量指标体系及缓解策略，有效保障飞机设计环节模型输出的稳定可靠，减少设计变更与资源浪费。

立德树人方面，围绕学校“航空、航天、民航”三航特色与国家战略需求，李丕绩教授以立德树人为根本任务，依托丰富产业经验在人工智能、大模型等前沿领域教育教学中深耕细作并成效显著。课程建设上，其从零构建《知识表示》《自然语言处理》《人工智能前沿技术导论》等课程体系，将“动手实现 ChatGPT”等大模型实验融入课堂，形成产教融合一体化模式，获评 2022 年度教育部 - 华为智能基座先锋教师奖。专业建设方面，李丕绩教授立足“三航”特色与国家战略，牵头编制人工智能专业培养方案，明确“特色引领，交叉融合”目标，构建三大课程群，推动专业建设向“能力导向与问题驱动”转型；同时牵头建成开放式算力平台，支持 80 人并发开展全流程实验，服务教学、科研及产学研合作项目，破解“算力荒、教学难、实践轻”困境。人才培养中，李丕绩教授注重科研诚信与团队精神塑造，引导学生对接国家需求开展研究，指导本科生在 WWW、ACL 等顶会及 IEEE/ACM TASLP 等期刊发表论文，完成 10 余项大创项目及 20 余项毕设，培育 3 名优秀毕业生；研究生团队累计发表 30 余篇顶会顶刊论文，申请 20 余项发



明专利（3项已授权），2名学生入选腾讯犀牛鸟精英人才计划，李丕绩教授也因此荣获腾讯精英人才计划优秀导师奖。此外，李丕绩教授积极投身科普，2023年以来围绕《ChatGPT 前世今生》作专题报告30余次，464页课件广泛传播，还接受新华日报、现代快报等媒体采访，剖析大模型产业趋势及应用伦理，助力提升公众科学素养。

展望未来，李丕绩教授将继续秉持“服务国家重大战略、引领学科前沿发展、培养拔尖创新人才”的理念，不断完善“AI+三航”人才培养体系与科研创新模式，为实现高水平科技自立自强和建设教育强国贡献自己的一份力量。

学会动态 ●

江苏省第十八届信息安全高层论坛在南京举行

2025年11月22日江苏省第十八届信息安全高层论坛在南京市隆重召开，省内外50余所高校的近百名专家学者参加了本届论坛。

本届论坛以“数智赋能公共安全，创新引领产业未来”为主题，聚焦智慧公共安全技术的前沿发展，探讨无人系统、融合通信、人工智能等技术在公共安全领域的深度融合与应用，推动行业生态共建与高质量发展，促进校企联合培养信息安全人才，有力助推我省“强富美高”新江苏的建设发展。

本届论坛由中共江苏省委网络安全和信息化委员会办公室、江苏省教育厅、江苏省工业和信息化厅、中共江苏省委保密委员会办公室、江苏省科学技术协会等部门指导；由江苏省计算机学会主办；江苏省计算机学会信息安全专委会、南京信息工程大学计算机学院、网络空间安全学院承办；由南京信息工程大学数字取证教育部工程研究中心、南京米好信息安全有限公司协办。

2025年江苏省第十八届信息安全高层论坛



“意念控制”成真？脑机接口如何让“心想事成”走进现实

来源：科普中国

一位因中风导致下肢行动不便的58岁王先生，头戴脑电采集设备，仅靠意念操控，身下的下肢外骨骼机器人便开始缓慢行走。他激动地说：“今天亲身体验才发现，脑机接口好像拥有‘读心术’一般，能让‘心想’变为‘事成’！”

这些曾只出现在科幻电影中的场景，如今正通过脑机接口技术走向现实。

脑机接口：大脑与机器的“翻译官”

脑机接口，顾名思义，是在人脑与外部设备之间建立直接的通信通道。它就像是架设在大脑与机器之间的“桥梁”，不仅推动人机交互方式的演进，也为脑科学研究和神经系统疾病的治疗开辟了新路径。

脑机接口的基本工作原理是：采集信号→解读信号→执行指令，就像在破解大脑的“摩斯密码”。脑机接口就像一位精准的“翻译官”，当你产生一个想法时，大脑中的神经元会放电形成脑电波。

脑机接口通过识别脑电波特征直接读取大脑意图，并转换成控制指令或输出信号，从而实现对机械臂、无人机或智能家居等外部设备的控制。当你想象移动右手时，大脑运动皮层的特定区域就会产生独特的电信号模式。脑机接口设备捕捉到这些信号后，通过算法进行“翻译”，最后转换成机器能理解的指令。

想想看，这就像是给大脑配了一个专属翻译，只不过这个翻译不精通各国语言，而是精通“脑语”！

读心有术：脑机接口的百年进化

从人们熟知的脑电图，到通过大脑信号操控机器，脑机接口技术相关领域的研究已走过百年历程：





1924 年，德国精神病学家汉斯·贝格尔通过头皮电极首次记录到人类脑电活动（ α 波和 β 波），这就是大家熟知的“脑电图”。

1950 年代，美国与苏联的研究团队通过植入电极记录动物（如猫、猴）的皮层电信号，发现大脑运动皮层的神经活动与具体动作意图相关。这一时期的技术虽未直接应用于人类，但揭示了神经解码的可能性。

1960 年代，美国科学家埃伯哈德·费兹（Eberhard Fetz）训练猴子通过激活单个神经元控制仪表盘指针，证明神经活动可被用于操作外部设备 [[4]]。这是首次证明“意念操控”并非天方夜谭。2002 年，布朗大学“BrainGate”团队开展首个人体临床试验，一名瘫痪患者通过植入式电极阵列控制电脑光标。这是人类首次真正实现“意念打字”的雏形。

2016 年，匹兹堡大学的一项研究让四肢瘫痪的纳森·科普兰不仅能用意念控制机械臂，还能通过传感器获得触觉反馈。

2021 年，Synchron 公司获得 FDA 批准开展大规模临床试验，其微创支架技术通过血管将电极送入大脑。

2024 年，Neuralink 宣布为首位人类患者植入设备，初步信号检测成功。

非侵入式 VS 侵入式：你选哪派？

脑机接口领域主要分为两大“翻译”流派——侵入式和非侵入式，它们在捕捉电信号方面各有门道，就像武侠小说里的不同门派。

非侵入式派像是“外家功夫”，在头皮表面使用电极、传感器等设备获取大脑活动信息。这种方式安全、无创，适合大规模应用和日常使用。但缺点是信号质量不够高，因为头皮和颅骨会削弱信号，只能捕捉到模糊的信号，如同在门外听人聊天——能听到动静，但细节全靠猜。

侵入式派则像是“内家高手”，通过在大脑皮质植入电极，直接获取高分辨率的神经信号。这种方式能实现更高精度、更复杂的神经控制功能，好比直接在会议室里安装录音设备，每个字都听得清清楚楚。但存在手术风险，可能引发感染、炎症，甚至神经损伤——这代价可不小，堪称“高端定制服务”。

近年来，一种折中的解决方案——微创式脑机接口应运而生。它像是“轻功高手”，既能获取比非侵入式更清晰的信号，又不需要深入脑组织，降低了手术风险。

前沿突破：从实验室走向现实

在浙江大学医学院附属第二医院，一位 77 岁的高位截瘫患者通过脑中想象，驱使机械臂成功写下了“浙江大学”4 个字。这项成就得益于 5 年前专家团队在患者脑中植入的两块微型芯片，它能精准解码神经信号，实现“脑控”写字。

在首都医科大学宣武医院，四肢瘫痪 14 年的杨先生实施无线微创脑机植入手术后，不仅能用意念操控外骨骼手套完成抓握动作，甚至可以独立拿起水瓶喝水。对他而言，这瓶水等了 14 年，其滋味应该格外甜美。

脑机接口技术在非医疗领域的应用场景也在不断扩展，开始走进普通人的生活。

在吉林大学的一处试验场内，驾驶员头戴脑机接口设备，仅凭一个意念，车窗便流畅地自动打开。研究人员表示，“我们借助脑机交互技术，实现了对车内部分装置的精准控制，系统响应延迟低于 0.2 秒”——这反应速度比很多人类助手还要快！

盈趣科技开发的 Xmuse 脑电波仪，让用户可以用意念调节房间灯光亮度，甚至关灯。想象一下，冬天窝在被窝里觉得灯太亮，连手指都不用动，灯就灭了——这简直是“懒人科技”的终极梦想！

近日，在2025脑机接口核磁共振高峰论坛上，由天津大学脑机交互与人机共融海河实验室和上海联影医疗科技股份有限公司合作研发的全球首套脑机交互定制化磁共振平台“神工神观”正式启用。该平台创新构建动态匀场与超高梯度协同赋能的神经影像专用磁共振成像系统，成功实现微米级结构功能特征的在体无创高时空分辨全脑解析，为下一代高性能脑机接口研发提供关键支撑。

伦理思考：机遇与挑战并存

随着脑机接口技术的快速发展，相关的伦理问题也逐渐浮出水面。

隐私保护是个大问题。我们的思想、情感都是非常私密的东西，如果脑机接口技术能够读取这些信息，谁来确保我们的“大脑数据”不会被滥用呢？毕竟，谁都不希望自己内心的“小剧场”被外人围观。

2024年2月，国家科技部发布《脑机接口研究伦理指引》，明确指出应严格控制干预人的思维、精神和神经活动过程的研究，尽可能避免各种直接和间接伤害，尊重人的自主权。

随着技术的不断进步，也许不久的将来，我们真的能够实现用意念控制周围的环境，让“心想事成”从成语变为日常。到那时，我们或许会怀念那个还需要动手按开关的年代——毕竟，连动动手指都显得那么“复古”。

而这一切，只是起点。

学会动态 ●

第七届江苏省计算机网络与云计算学术会议在江苏海洋大学举行

11月8日，由江苏省计算机学会网络与分布计算专委会和江苏省计算机学会云计算专委会共同主办，江苏海洋大学计算机工程学院承办的第七届江苏省计算机网络与云计算学术会议在连云港举行。此次会议吸引了省内近一百位专家学者及企业代表齐聚一堂，共襄学术盛举。





当生命被编程：AI 教会细胞“听话”，未来启发机器自进化

作者：郭瑞东

来源：科普中国

现在，我们可以让 AI 生成任何想象中的画面——梵高笔触下的猫，或在火星上奔跑的企鹅。算法从噪声出发，反向推理出图像的结构与色彩，仿佛在混乱中召唤出秩序。科学家也在思考一个问题，那生命能被“生成”吗？

今年 8 月，哈佛大学与瑞士洛桑大学的研究团队在模拟环境中实现了一项令人惊叹的成果：为“生命生成模型”找到了它的“提示词”。科学家给让虚拟细胞群一个“目标形态”，然后让它反向推理，找出那套让细胞们自组织形成该形态的算法。该发现加深了我们对生物发育过程的理解，更让可编程物质走出科幻小说成为可能。

[nature](#) > [nature computational science](#) > [articles](#) > [article](#)

Article | Published: 13 August 2025

Engineering morphogenesis of cell clusters with differentiable programming

[Ramya Deshpande](#)  [Francesco Mottes](#)  [Ariana-Dalia Vlad](#), [Michael P. Brenner](#)  & [Alma Dal Co](#)

[Nature Computational Science](#) 5, 875–883 (2025) | [Cite this article](#)

997 Accesses | 58 Altmetric | [Metrics](#)

论文信息：Deshpande, R., Mottes, F., Vlad, AD. et al. Engineering morphogenesis of cell clusters with differentiable programming. *Nat Comput Sci* (2025).

研究形态发生的四个步骤

生命从最初的受精卵到一个完整的，拥有复杂器官的生物的发育过程中究竟发生了什么？是什么样的规则，决定了海量的单个细胞在发育过程不同阶段的行为，进而生长出具有精美功能性的复杂结构？该问题一直位于生物学的核心，被称为“形态发生”（Morphogenesis）之谜。

要回答这个问题，科学家们通常需要走过几个关键步骤：

1. 观察与描述：首先，科学家用显微镜和分子生物学工具（例如基因测序），细致入微地观察和记录胚胎发育的每一个瞬间——细胞在何时、何地分裂？它们如何移动？又分泌了哪些化学信号？
2. 建立假设：基于观察，科学家们会提出假设：也许某个基因控制着细胞的分裂方向，也许某种化学物质的浓

度梯度决定了器官的形状。这些假设试图将宏观的形态变化与微观的细胞行为联系起来。

3. 实验证明：接着，通过基因敲除、药物干预等实验手段，去验证这些假设。如果敲掉某个基因，胚胎发育就停滞了，那么这个基因很可能就是关键“开关”。

4. 构建模型：最后是将所有零散的知识整合起来，构建一个能够“从头到尾”模拟整个发育过程的计算模型。这个模型不仅要能重现已知的现象，更要能预测未知的结果，从而揭示出支配全局的“底层算法”。正是在这一层面，哈佛大学与洛桑大学的最新研究实现了突破：他们通过“可微分编程”，让形态发生的过程首次具备了可计算、可优化、可设计的可能。

可微分编程的建模和优化步骤

这项研究的方法学创新，如图1所述。研究者把每个细胞都看作一个能感知、能决策的“小智能体”。它们能探测周围环境——比如化学物质的浓度、受到的机械压力——并根据这些信号，通过内部的“调控网络”决定自己的行动：是否要分裂、分泌哪种分子、向哪个方向移动。这种方法，就是可微分编程，在计算机中，它就是通过连续优化而非试错搜索来“学习规则”的方法。它能自动计算每一步调整对最终结果的影响，从而让复杂系统像神经网络一样被“训练”出来。

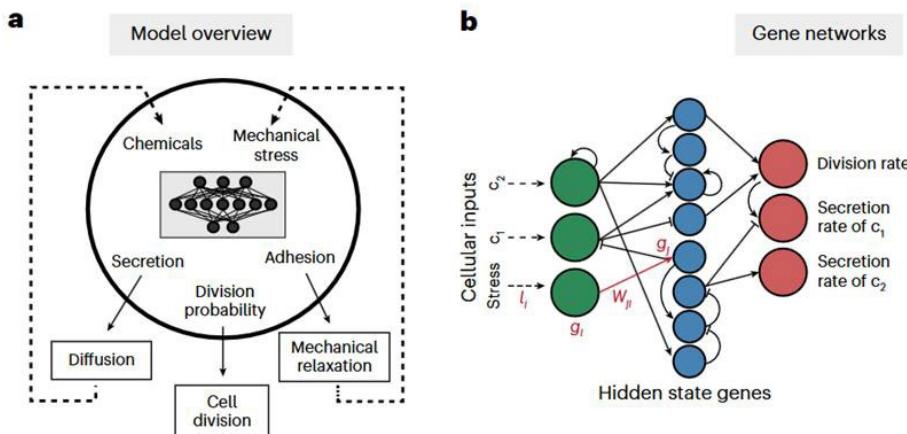


图1 每个细胞内模型的输入输出概述

而要理解这套“编程”系统如何运作，需要想象一下，细胞之间不能像我们一样说话，它们的“语言”是化学物质，这些分子并不会原地不动，而是像墨水滴入水中一样，在细胞集群所处的环境中扩散开来。

这种扩散遵循物理定律，最终会形成一个稳定的浓度梯度——距离化学物质的源头（图2中的黑点）越近，浓度就越高，距离越远，浓度越低（对应图2左图）。其他细胞就像一个个微型的“化学传感器”，通过感知自己周围环境中这些化学物质的浓度，就能“知道”附近有多少同类、它们在做什么，甚至能判断自己在组织中的“位置”。

细胞不仅会“闻”，还会“摸”。把细胞想象成一个个柔软但有弹性的球。当两个细胞靠得太近时，它们会产生排斥力（图2右图中细胞距离曲线的左侧“REPULSIVE”区域），防止彼此重叠，这模拟了细胞膜的“排他性”。而当它们保持一个恰到好处的距离时，又会产生吸引力（图2右图中细胞距离曲线的右侧“ATTRACTIVE”区域），这模拟了细胞间的“粘附”性，让组织能保持完整而不散架。



有了“感知”（化学与机械）和“行动”（分裂与分泌），问题的关键就变成：细胞内部的“决策手册”——也就是基因调控网络——该如何编写？图3展示的，正是这一步的核心：用可微分编程来优化细胞的行为规则。

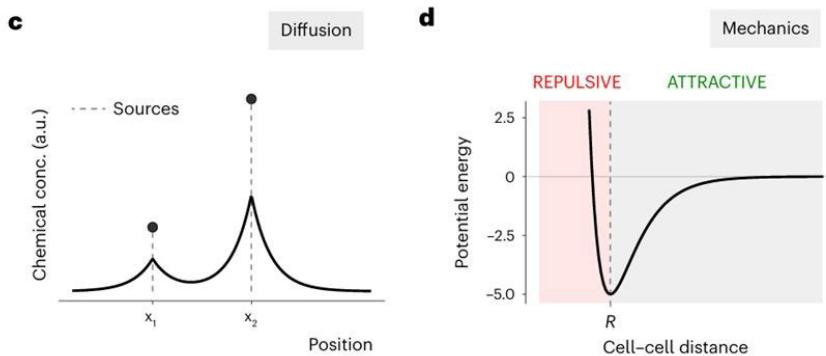


图2 细胞如何分泌化学标志物和感知机械力

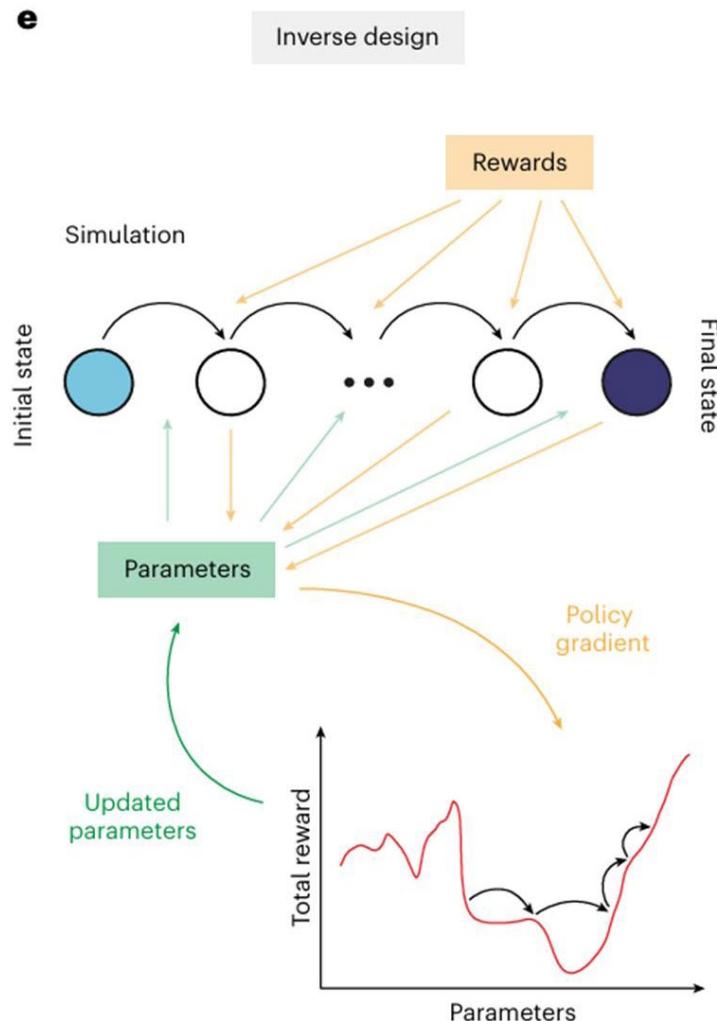


图3 梯度计算和优化示意图

在模型中，每个细胞的调控网络被设计成一个“黑箱”：输入是基因之间的连接强度（哪些基因彼此激活或抑制），输出则是整个细胞群最终长出的形态。系统的目标，是自动找到一组最佳参数，让模拟出来的形态尽可能接近目标——比如，让虚拟胚胎在计算机中长得像真实的胚胎一样。

传统方法往往靠“瞎猜和反复试错”，效率极低。而可微分编程的妙处在于：它能自动计算出一个“梯度”，也就是——如果我轻轻调整这个参数，结果会更接近目标，还是更远离目标？这个梯度就像一只指路的罗盘，告诉优化器（如 Adam 算法）应当沿哪个方向微调，才能让系统朝目标演化。

在这一研究中，科学家使用了一种名为 REINFORCE 的策略梯度算法。细胞分裂是带随机性的事件，无法直接求导。REINFORCE 的巧思是为每一次分裂打分（reward）：若这次分裂让整个集群更接近目标形态，就给高分；反之则给低分。系统再根据这些分数调整控制网络的参数——经过成千上万次模拟，模型逐步“学会”了如何让细胞群通过最简单的局部互动，自发形成宏观上协调的结构。

图 3 中的“Policy Gradient”箭头，正象征着这一从结果反推原因的学习过程。它把宏观目标（我们希望看到的形态）与微观机制（单个细胞的规则）连接起来，在两者之间搭建起一座“因果之桥”。通过这座桥，研究者不仅能得到让细胞自组织的算法，还能进一步简化网络、突出核心机制——让系统在保持整体功能的同时，展现出最精炼的生命逻辑。

接下来，将会从三个挑战 如何让细胞像排队一样定向生长(轴向伸长)；如何让不同类型的细胞保持平衡共存(组织稳态)以及如何让所有细胞在发育中“雨露均沾”(均匀生长)三部分，逐个讲述用可微分编程算法来在模拟环境下，实现“可编程物质”，并让我们离“重塑生命”的梦想又近了一步。

挑战 1：破解蝾螈的再生之谜——通过正反馈实现定向生长

蝾螈是一种能够如同蚯蚓一样，在一定范围内具有断肢重生能力的生物。当因为意外失去一条腿的时候，它能重新长出一条功能完整、形态完美的新腿。

蝾螈的新腿要从无到有，首先要确定“往哪个方向长”。是向上？向下？还是向旁边？答案是：沿着原来腿骨的方向，笔直地向外生长。这就意味着向一个固定的方向生长。但蝾螈是怎么完成这一目标的，我们又如何用 AI 如何教会一群细胞“听话”，实现精准的轴向伸长呢？

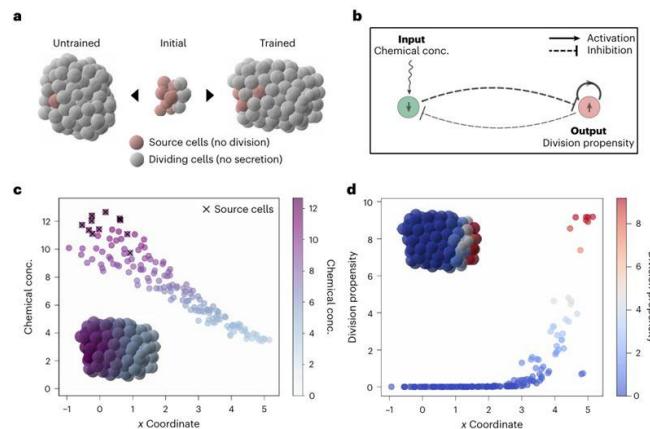


图 4 向一个方向定向生长的虚拟细胞



符合直觉的方法是，假如想要让虚拟细胞组成的聚簇向右边生长，可在当前右边放一些刺激生长的化学物质，但研究人员模拟得到的算法，却是细胞感知到的化学信号浓度越高，其分裂倾向越低（图 4b）。

具体来看，图 4c 中的“源细胞”（Source cells，红色）固定在集群左侧，持续分泌一种化学物质。随该物质在细胞集群中扩散，形成一个从左（高浓度）到右（低浓度）的稳定梯度。靠近源细胞（左侧）的细胞，感知到高浓度化学信号，其分裂被强烈抑制。远离源细胞（右侧）的细胞，感知到低浓度信号，抑制解除，分裂倾向高，因此快速分裂增殖。发生在右侧的增殖使集群向右延伸，新长出的细胞离源更远，感知到的信号更弱，分裂更活跃，从而形成了一个自我强化的正反馈循环，驱动集群持续向右（低浓度区）生长。最初生成的细胞集群，如图 4d 所示。

如此的结果，如图 4a 所示，其中左侧是当调控每个虚拟细胞的神经网络使用随机初始化参数，得出的模拟结果——细胞集群毫无章法地向各个方向膨胀，最终形成一个不规则的、近乎球形的团块。而右侧是经过可微分编程“训练”后的结果——细胞集群精准地沿着水平方向（X 轴）伸长，形成一个细长的棒状结构。

这种“远端生长、近端抑制”的模式，与脊椎动物肢体芽的发育机制存在相似性。在真实胚胎中，肢体也是从一个芽状结构开始，通过远端（顶端外胚层嵴，AER）分泌的生长因子（如 FGF）促进远端细胞增殖来实现伸长。

一个是亿万年进化打磨出的自然奇迹，一个是人类用代码和算法“逆向工程”出的人工神经网络。它们采用的“分子语言”或许不同（一个是 FGF 刺激近端，一个是虚拟抑制剂抑制远端），但它们遵循的“空间定位 + 局部抑制”的核心逻辑，却惊人地一致。生命的奥秘或许蕴于简洁的规则之中。算法没有复刻自然，但它殊途同归的再现了自然的智慧。

这一实验的成功，直观地证明了通过优化细胞内部的基因调控网络参数，我们能够从发育过程的底层“编程”宏观形态。研究者不需要直接告诉细胞“往右长”，而可通过调整它们感知化学信号和决定分裂的规则，让“向右伸长”这一宏观目标从众多细胞的局部互动中“涌现”出来。

与许多“黑箱”AI 模型不同，这项研究的成果是高度可解释的。研究者可以拿着上述的“正反馈 + 梯度感知”模型，去真实的生物系统（如果蝇、小鼠胚胎）中寻找功能上等价的分子通路。研究者也不再需要从海量的分子生物学数据中大海捞针般地猜测调控机制，而是可以先在简化模型中，类似产品设计中的“逆向工程”，先“计算”出可能的机制，再用实验去验证和细化。这极大地加速了我们对复杂生命过程的理解。

挑战 2：骨骼里的“建设者”与“拆迁队”——负反馈实现细胞稳态

生物体不是由单一类型的细胞组成，而是多种类型的细胞通过分泌化学物质“互相喂养”并“自我抑制”，最终产生内稳态（homeostasis）。例如在你身体的每一块骨头里，都持续上演着“建设与拆迁”的双人舞。主角是两种细胞：成骨细胞（Osteoblasts）——“建设者”，和破骨细胞（Osteoclasts）——“拆迁队”。

如果只有“建设者”拼命盖楼，城市会变得臃肿不堪，结构失衡；如果只有“拆迁队”肆意破坏，城市又会变成一片废墟。健康的骨骼，需要两者数量和活性的完美平衡。这是如何达到的呢？

在真实生物体中，当“建设者”（成骨细胞）在某个区域辛勤工作，建造新骨时，它们会分泌一种名为 RANKL 的化学信号。这个信号就像一封“邀请函”，飘向附近的“拆迁队”（破骨细胞），告诉它们：“嘿，这边新楼盖好了，有些旧材料可以拆了！”

之后“拆迁队”收到邀请，开始工作。在拆除旧骨的过程中，它们会释放出储存在骨头里的生长因子，比如

TGF- β 。这些因子就像“感谢信”和“开工红包”，飘回给“建设者”，刺激它们在拆除后的空地上重建新骨。此外每种细胞都会分泌一些物质来抑制自己的过度增长。比如，“拆迁队”工作得太猛时，会释放 OPG（RANKL 的诱饵受体），把多余的“邀请函”拦截掉，防止自己被过度激活。“建设者”也有类似的自我抑制机制。

在模拟环境中，存在两类细胞：红色细胞（类型 1）和蓝色细胞（类型 2）。每种细胞都拥有一个专属的“化学语言”（图 5a）每种细胞都能“听懂”对方的语言。如图 5b 所示：红色细胞不仅能分泌化学因子 1，还能感知环境中化学因子 2 的浓度；同样，蓝色细胞不仅能分泌化学因子 2，也能感知化学因子 1 的浓度。

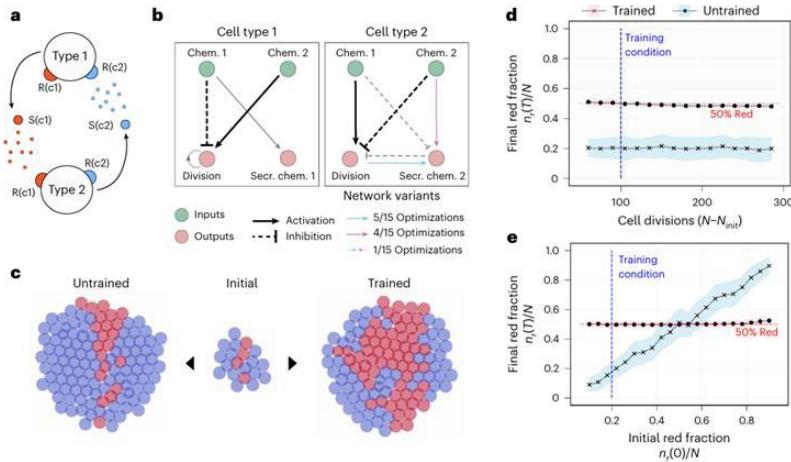


图 5 让两类细胞数量稳定保持在 1:1

而待优化的虚拟细胞调控网络，其目标是要让两类细胞的数量之比稳定保持在 1:1。要实现这一目标，需要两个机制，首先是互惠共生，即由蓝色细胞分泌的化学因子 2 会促进红色细胞的分裂；而由红色细胞分泌的化学因子 1 会促进蓝色细胞的分裂。这就像 A 族人越多，B 族人就越有动力生孩子；B 族人越多，A 族人也越有动力生孩子。

而第二个机制则是自我抑制，即红色细胞分泌的化学因子 1 会抑制红色细胞自身的分裂；蓝色细胞分泌的化学因子 2 会抑制蓝色细胞自身的分裂。这就像 A 族人太多时，会主动“计划生育”；B 族人太多时，也会主动控制增长。

具有上述两个机制，训练后的虚拟细胞调控网络能让两种细胞能够始终保持数量接近（图 5c 的右边），而若是没有经过训练的调控网络，则会出现某种细胞数占比上升的情况（图 5c 的左边）。

这样的内稳态是可持续的（图 5d），在使用训练好的网络所进行的模拟中，无论模拟运行多久（从 100 次分裂到 300 次分裂），红色细胞的比例都稳定地维持在 50% 附近，波动极小。且能够从多种初始条件（红色细胞占比 20-80%）最终都收敛到目标的 50%（图 5e）。

真实生物体的调控机制与模拟条件下经过可微分编程自发涌现出的细胞调控机制一致，说明了经由可微分编程，可把握掌管生命运作的简洁而普适的规律。其关键在于建立局部、双向、带自我抑制的反馈回路，我助你成长，你助我繁荣；但我们都需自律，方能长久共存。这不必依赖一个中央控制者。

将上述的互惠共生 + 自我抑制的机制，应用到生态系统乃至人造的工程系统中。将为人类设计更稳健、更智能的工程系统（从合成生物学到社会治理）提供宝贵的蓝图。

挑战 3：感知压力的细胞——靠“挤压反馈”实现均匀生长

在果蝇翅膀的发育早期，中心区域充满生长因子（如 Dpp、Wingless），浓度高、分裂快。按理说，中心细胞应该越长越鼓，翅膀最终会鼓起一个“包”。但事实恰好相反——到了发育中后期，翅膀的生长速度在各处几乎一样，最终形成精确而平整的扇形。

果蝇是怎么做到这一点的？答案藏在细胞对机械力的感知中。当中心细胞分裂太快、密度过高时，它们会互相“挤压”，压力升高，进而激活名为 Hippo 的基因通路。该通路会抑制一个关键分子 Yorkie (Yki) ——这是细胞分裂的“油门开关”。一旦 Yki 被抑制，细胞分裂被“踩了刹车”，生长自然放缓。就这样，果蝇用力学反馈实现了化学信号无法完成的自我平衡。

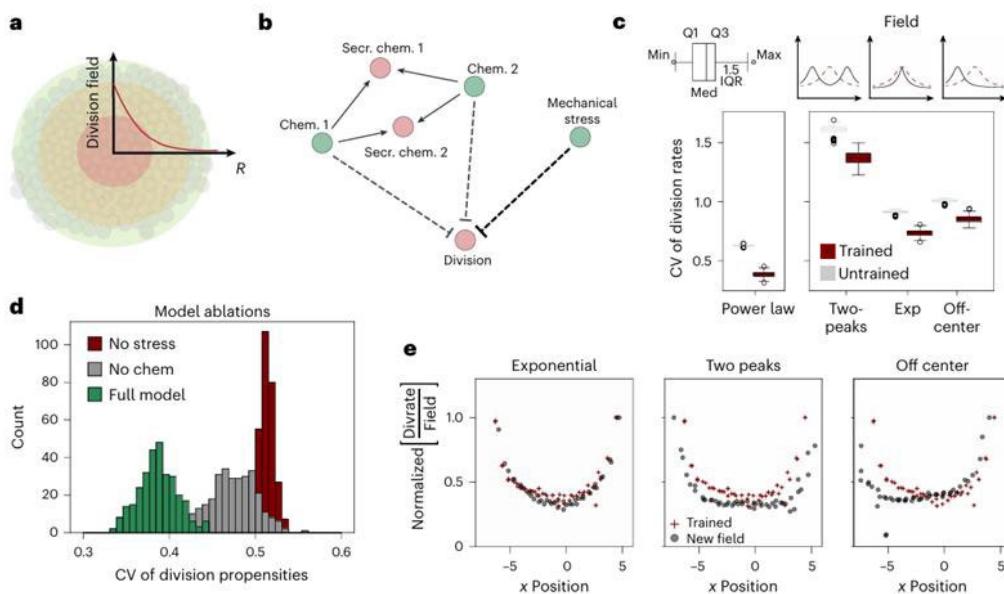


图 6 机械力与化学信号共同促成胚胎的均匀生长

这一机制与果蝇翅膀的真实发育过程高度吻合：核心都是通过“压力感知→分裂抑制”的负反馈实现生长均衡。更令人惊讶的是，这个“会感压”的调控网络还具备极强的泛化能力。无论是在生长因子扩散速度更快、分泌源变多，还是偏离中心的情况下，它都能保持生长的平衡（图 6c-e）。

即使外界扰动，细胞也能凭借对压力的感知，自我修正形态，保证最终结构的完整性。这也解释了为什么生物体在受损或环境波动时，仍能发育出正常形态——生命并不需要一个上帝式的“绘图者”，它靠局部互动就能重建秩序。

而当研究者在模拟中“关闭”细胞的机械感知功能（图 6d），系统立刻失衡：细胞过度分裂，组织紊乱，最终形态畸变。这一结果与真实实验完全一致——若敲除 Hippo 通路的关键基因，果蝇组织同样会出现肿胀、畸形甚至肿瘤。在最终的可视化结果中（图 6e），细胞的“分裂倾向”（红线）与感知到的“机械应力”（绿线）呈负相关，像一场精妙的“削峰填谷”：哪里压力大，就放慢生长；哪里空间宽，就加速分裂。这种自动的平衡机制，正是自然界“自组织智慧”的写照——翅膀的形态，不是被画出来的，而是被挤出来的。

将胚胎发育的原则应用于智慧生产，对未来的脑洞畅享

当科学家将三条发育原则结合起来——定向生长、数量平衡与均匀分布——一个令人着迷的设想随之出现：如果把细胞换成无人机，把基因调控网络换成算法程序，会发生什么？设想一条完全自动化的无人机生产线。当战场上 10 点钟方向出现步兵和装甲部队时，系统会像细胞感知化学梯度一样，通过“正反馈”与“生长因子”式的信息扩散，引导生产线在那个方向“生长”，集中制造对应型号的无人机。

算法同时会根据敌军比例自动调节 A 型与 B 型无人机的数量，维持整体平衡。而当生产线某处过度拥挤、机械压力上升时，系统又会自动减缓产出，防止“过度增殖”。这样一个能自我调节、自动优化的生产线的生产线，将会使得未来的生产如同生命般高效而灵活。

上述只是笔者的一个科幻式的类比，而真正的科学图景可能更令人震撼。原论文作者，则是指出未来可将真实的时空成像数据（如器官芯片或类器官的延时摄影）和单细胞基因表达谱输入虚拟细胞发育的调控框架。如此科学家将不再是在“真空”中设计规则和优化目标，而是从真实的生命动态数据中学习和推断出其背后的调控逻辑。

在这样的图景中，研究者将果蝇翅膀、小鼠胚胎、甚至人类器官的发育过程拍成电影，然后输入给可微分编程算法。算法会从海量的细胞行为中，自动“推理”出驱动各类生物发育的隐藏规则。同时模型不再像本研究这样，使用球形模拟细胞，忽略真实的细胞形状、极性、细胞骨架等复杂生物物理特性。这样的模型，无疑将加深我们对生物发育过程的理解。

该研究已经开源了对应代码，并呼吁将真实的实验数据注入这个框架。未来有一天，生物学家，或将不仅是实验台前的观察者，更是训练模型的“炼丹师”；医生也能用“数字孪生”器官预演治疗方案；而未来的工程师，或许能设计出会“自愈”的智能材料。这一切，都始于我们今天对“细胞如何发育”的探索和建模。



混合云架构的算力底座关键技术研究与应用

——江苏省计算机学会 2024 科学技术奖

一、基本情况：

项目名称：混合云架构的算力底座关键技术研究与应用

完成人：金春花，樊野，陈礼青，周泓，张愚，张正伟，蒋强，陈剑洪，张海艳，屈林波，单劲松

完成单位：淮阴工学院、中国移动通信集团江苏有限公司

二、项目简介：

数字经济的飞速发展使得云计算技术成为千行百业数智化转型的必然选择。混合云架构融合了公有云和私有云的核心优势，能够更好的满足复杂业务场景需求，具备更高的灵活性和成本优势，已成为未来各行各业构建算力底座的最优选择。国家“十四五”规划明确提出“以混合云为重点培育行业解决方案、系统集成、运维管理等云服务产业”。混合云架构带来诸多便利的同时，其异构、多样的IT基础设施，复杂的网络环境等导致了建设和运维难度的直线上升，已成为各行各业“上云用数赋智”面临的一大难题。淮阴工学院基于“产学研用”一体化模式，联合江苏移动，在基于混合云构建运营商算力底座的过程中，共同研究突破多项技术难题：

1、率先提出并构建混合云“存、算、运”力一体化调度引擎。根据用户算力需求和算力情况，提供（1）数据跨云智能流动的存力调度；（2）任务跨云最优部署的算力调度；（3）流量跨云精准路由的运力调度；形成三位一体的调度能力，实现混合云架构“存、算、运”力的一体化调度。

2、研发混合云架构业务流量智能调度平台。基于DSF分布式服务框架，智能分析各朵云的流量、负载、容量等指标，自动形成调度方案，实现应用、地市、接口、工号等多维度的业务流量调度策略；在系统故障、版本发布、流量突增等场景下，实现业务流量在混合云间的平滑调度，保障业务系统平稳可用。

3、研发混合云架构全链路指标智能检测和根因分析平台。针对混合云架构下业务调用链路长、关联节点多、时延敏感高等特点，打造跨云、端到端穿透的全栈式服务调用链，智能分析链路指标异常波动趋势、智能推荐异常波动的根因，实现混合云架构下故障处理从“被动到主动”、“单维到多维”、“事后到事前”、“片面到全局”的转变。

4、率先提出并构建混合云架构“三位一体”数据安全保障体系。建立安全存储、完整性保护以及冗余防护三道防线，保障数据的机密性、容错性、完整性以及抗冗余性。该体系解决了混合云架构下数据存储以及传输过程中可能出现的篡改、伪造以及容灾恢复等安全问题，实现了数据“遇灾可查”、“遇灾能改”、“存的放心”、“用的安心”。

江苏移动基于混合云架构算力底座的建设与实践，逐步形成了一整套完善的解决方案，现已推广至江苏移动IT系统全域，高效保障了江苏移动对内对外业务支撑。自2020年12月本项目全面应用以来，截止2022年底，江苏移动混合云综合资源利用率累计提升35%，故障处理时长缩短83.3%，重大数据安全事故0发生。项目累计获得发明专利24件，其他知识产权79项。项目获得2021年度中国移动通信集团江苏有限公司科技与业务创新一等奖，2021年集团数智化转型贡献奖等多项荣誉。截止2024年6月30日，该项目目前在江苏移动每年支撑各类内部需求3000+项，每年支撑对外商机项目需求2000+个，累计获得经济效益3239万元。

这套混合云架构解决方案，已成功对外推广应用，帮助深圳易思博、上海安钛飞、南京披云科技等数十家企业完成向混合云架构的迁移和应用。

三、主要科技创新：

1. 主要技术发明

(一) 立项背景与研究思路

随着云计算、人工智能、大数据等新一代信息技术的快速发展，传统产业与新兴技术加速融合，数字经济蓬勃发展。算力底座作为各行各业信息系统运行的算力载体，已成为经济社会运行不可或缺的关键基础设施，在数字经济发展中扮演至关重要的角色。

混合云架构融合了公有云和私有云各自的核心优势，能够更好的满足复杂业务场景需求，具备更高的灵活性和成本优势。私有云可用于安全性要求较高的服务，而公有云可用于常规服务；或使用公有云来应对业务高峰期，而日常业务在私有云中完成。这些关键特性，使得混合云架构已成为未来各行各业构建算力底座的最优选择。

淮阴工学院基于“产学研用”一体化模式，联合江苏移动，在基于混合云构建运营商算力底座的过程中，共同研究突破多项技术难题：混合云“存、算、运”力一体化调度引擎、混合云架构业务流量智能调度平台、混合云架构全链路指标智能检测和根因分析平台以及混合云架构数据安全“三位一体”保障体系，具体研究思路如图1所示：

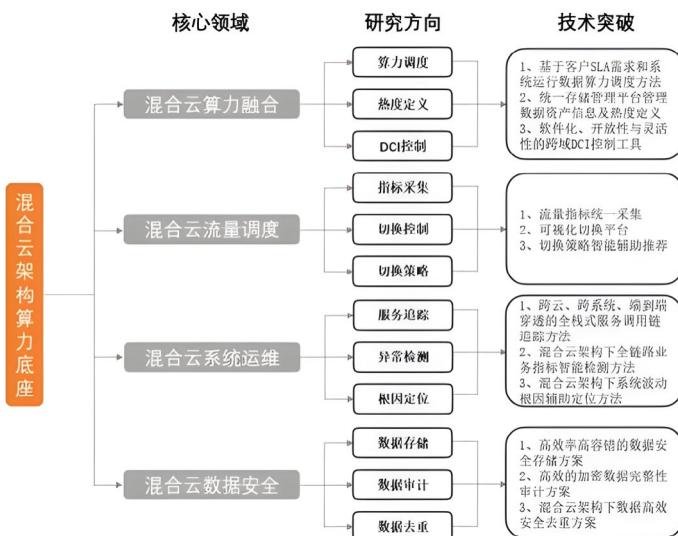


图1 具体研究思路



(二) 关键技术发明

1、(该创新点学科分类名称：计算机应用、人工智能、信息处理技术。形成授权发明专利 4 件：

ZL201611271248.7、ZL201811548508.X、ZL201811561475.2、ZL201711434827.3)

在国家“东数西算”战略背景下，混合云逐步成为云计算的主要模式和发展方向，本项目首次创新构建了混合云的跨域统一调度引擎。通过“存、算、运”三位一体的调度，拉通云间、云内多段网络，存储数据冷热分级，跨层调度云、边、端多级算力，实现自由“云间漫步”的同时完成多云间均衡调控。

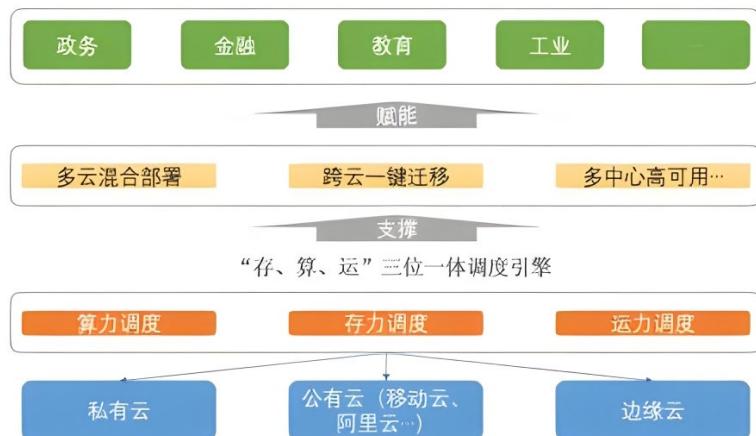


图 2 “存、算、运”力一体化调度引擎

1) 提出基于客户 SLA 需求和运行数据的算力调度方法。结合现有的算力资源，采用公平队列算法、位置聚类分布算法、成本最优算法等 AI 智能算法，计算出最优的算力推荐列表，实现任务东西部最优部署，包括应用部署任务，AI 训练任务，推理任务等。同时具备跨域跨集群的调度、异构资源同集群的混合调度和 SLA 动态计算路径等能力。

2) 研发基于热度定义和 AISS 的统一存储管理平台。实现数据自动分级和智能适配，定义业务访问热度，在数据中心之间合理调配存储资源，对应用屏蔽多云存储差异，实现一致的使用体验；通过数据压缩去重、增量传输、断点续传、加密传输等能力，实现高效安全的数据跨域传输。以智能存储服务 (AISS) 为存力底座在东数西备、BOSS 话单查询、企业数据中心等多个生产系统全面落地应用，有效降低了企业 IT 存储成本，单位存储成本降低 50%，资源整合利用率再次提升 12%。

3) 构建软件化、开放与灵活的跨域 DCI 控制工具。通过跨域 DCI 控制器统一编排，实现多云间网络的编排调度和网络资源共享。DCI 控制器北向接口对接云管平台，实现业务自动化与一站式交付服务；南向接口对接 IT 云各省节点传统网络的异构厂商边缘 DCI 网关，完成网络互通与策略自动下发等开通服务。

2、(该创新点学科分类名称：计算机应用、人工智能、信息处理技术。授权发明专利 4 件：
ZL201711486401.2、ZL201911304477.8、ZL201710177125.5、ZL201610114278.0)

混合云架构下资源整合更加灵活，而业务流量如何在混合云架构下实现无差别的灵活调度显得尤为 重要。基于多活的系统架构部署，沉淀和完善一键切换操作能力，引入智能服务切换策略推荐算法，实现传统流量切换向智能流量治理演进，在运维和发布领域实现流量切换“快”、“准”、“稳”，用户体验“0”感知。

1) 建设混合云架构流量指标统一采集平台。通过统一化的指标建模和指标管理，屏蔽混合云架构差异性，将

业务流量调度相关指标统一细分为基础设施质量类、基础业务质量类和业务体验类，搭建统一的运维大数据框架进行采集。应用 durid 时序数据库组件，实现对海量运维时序数据高效处理，为混合云架构下流量高效调度构建数据基础。

2) 建设多维度、可视化流量调度平台。切换场景编排灵活，根据不同任务场景固化：灰度发布、应急处理、业务分流等场景，自动关联切换任务，并且可以灵活对智能切换辅助推荐的策略进行优先级选取排序。多维度一键切换界面，基于统一采集的各维度流量数据，结合切换维度，不同层级的流量展示，预置切换场景一键操作。



图 3 多维度、可视化流量调度平台

3) 研发混合云架构下流量调度策略智能辅助推荐工具。基于全局流量 TopN 排序，将统一采集到的流量信息进行最优路径推荐模型分析，应用 Kendall 趋势检测算法，输出切换建议策略，80% 固化场景下自动执行切换操作，20% 复杂场景下辅助运维人员选择最后切换策略，提升运维效率。

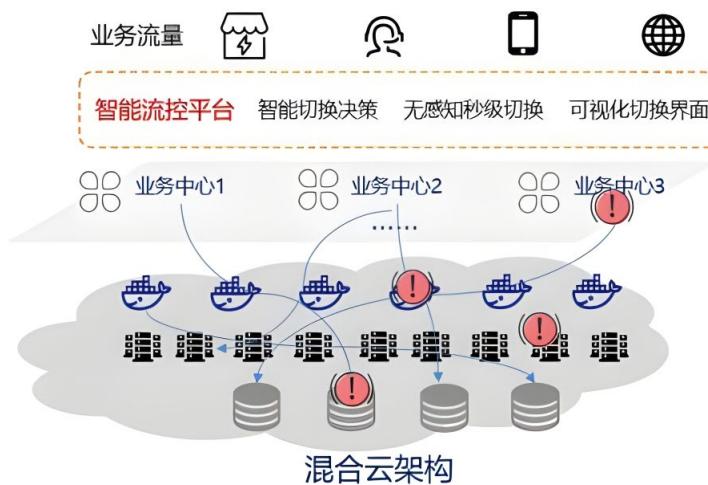


图 4 混合云架构下流量调度策略智能辅助推荐工具

3、(该创新点学科分类名称：计算机应用、人工智能、信息处理技术。授权发明专利 2 件：
201710048703.5、ZL201510642902.X)

针对混合云架构业务调用链路长、关联节点多、时延敏感高等特点，首次提出混合云架构下全链路指标智能检测和波动根因定位方法。基于跨云、端到端穿透的全栈式服务调用链，智能分析链路监控数据异常波动趋势，辅助定位导致系统波动的根因，解决混合云架构下故障处理发现难、定位难、恢复难的问题，实现混合云架构下故障高



效治理。

1) 建设混合云架构下跨云、跨系统、端到端穿透的全栈式服务调用链平台。研发环境无关的 Trace_id 规范，根据业务承载云环境、中心、集群等信息和时间戳及随机字符串形成唯一服务调用标识。通过服务应用独立式架构系统，实现了 Trace_id 在跨云架构下穿透和透明传递，由全局唯一 Trace_id 串联形成跨云的端到端服务调用链路及关键指标数据，业务覆盖完整性超过 99%，数据延时在 60 秒以内，为指标智能波动和波动根因定位提供完整实时的数据支持。

2) 提出一种混合云架构下全链路业务指标智能检测方法。基于端到端链路和指标数据，基于关键指标自相关函数特性判断指标周期性特征，识别周期性、半周期性和无周期性特征，针对不同特征分别应用适配的算法训练指标特征检测模型，对端到端指标数据进行实时检测，发现异常波动趋势及时预警。生产检测同时作为模型增量的训练过程，基于 LOF 离群检测算法增量更新模型，持续优化检测效果，准确率达到 91.3%，能有效在系统故障早期发现并预警。

3) 提出一种混合云架构下系统波动根因辅助定位方法。当检测到异常波动趋势出现时，应用智能算法从业务链路所依赖的各集群、模块和服务器的监控数据中自动快速进行故障定位。通过对比监控数据在系统波动时间点前后相关关键指标的异常程度，并依据异常程度进行聚类排序展示，辅助快速确定故障排障方向。通过系统波动根因辅助定位方法，智能推荐根因维度组合，快速定位故障，节约了 83.3% 的故障处理时长。

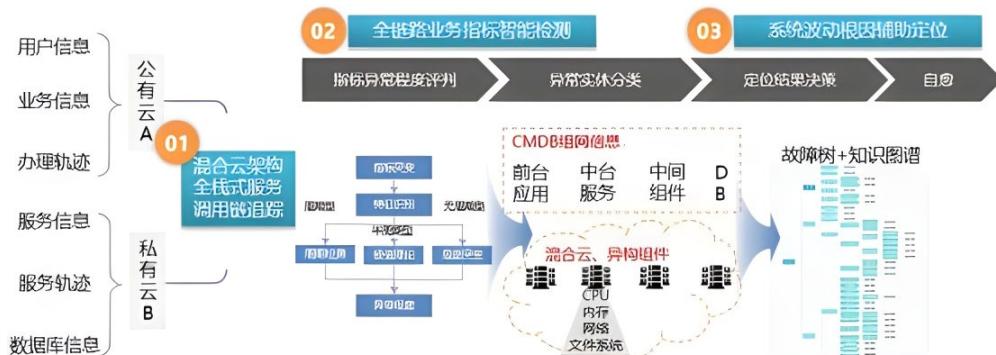


图 5 混合云架构下全链路指标智能检测和波动根因定位方法

4、(该创新点学科分类名称：计算机应用、密码学、云安全技术。授权发明专利 6 件：ZL20191027 4726.7、ZL201710654898.8、ZL201710654898.8、ZL20191027472 2.9、ZL201810163893.X、ZL2 01910675003.8，论文 5 篇)

针对混合云架构下数据存储、传输和使用安全，首次创新提出了混合云数据安全“三位一体”保障体系，引入纠错码容错、完整性审计和安全去重技术，覆盖数据的整个生命周期，提供包含机密性、容错性、完整性以及抗冗余性在内的全方位安全保障。本体系解决了云上数据易泄漏、易被篡改以及容错性低的问题，保障了用户的数据安全。

1) 针对云上数据易泄漏以及容错性低的问题，提出一种高效率高容错的数据安全存储方案。为了解决数据安全存储面临的威胁，率先引入纠删码容错技术。与常见的多副本容错技术相比，这种技术可以在显著降低存储空间消耗的同时，提高相同甚至是更高的数据容错能力。其基本原理是将数据分割成数据块，并对其进行编码加密生成对应的编码块，从而使每个编码块都是所有数据块的线性集合。这样，即使某个块失效，系统也能够对剩余的可用

块进行线性组合，进而恢复出受损的编码块。

2) 针对云上数据易被篡改破坏的问题，提出一种高效的加密数据完整性审计方案。为了解决云上数据完整性控制问题，引入了数据完整性审计技术。这是一种利用数据完整性证明机制对数据完整性进行审计的技术。其利用了数字签名技术、哈希函数等密码学相关技术，为每一个数据块生成一个认证器。当被要求验证数据完整性时，利用认证器对数据块进行审计。而在多云环境下，由于数据量巨大，逐个验证数据块消耗过大，因此其生成的认证器往往具有同态的性质。即多个数据块可以聚合成一个数据块，多个认证器也可以聚合成一个认证器。这样，用户通过验证批量聚合的数据块和认证器的正确性，即可验证云上存储的数据是否被篡改或破坏。

3) 针对云上数据冗余度高以及传统去重技术所引发的加密阻碍、非授权访问、侧信道攻击等问题，提出一种混合云架构下数据安全高效去重方案。在此方案中，利用前文提到的纠错码容错技术，将数据文件分发到多个云服务提供商。而其外包和审计行为记录在时间戳区块链上。为了保障数据运算的安全性，其中央权限被替换为自动去中心化的智能合约。在此基础上，通过对文件块逐个生成去重标签，此方案可对云上的加密数据在不解密的情况下进行细粒度的审计，其审计结果通过交易智能合约发布于区块链上，以此实现共识和激励机制的安全云存储。

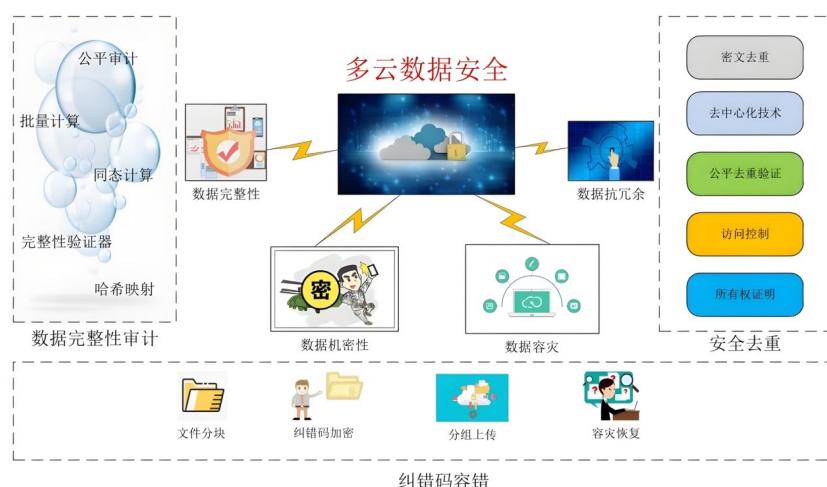


图 6 混合云数据安全“三位一体”保障体系

四、社会效益：

(1) 促进公司业务的数智化战略转型，提升客户满意度：通过打造基于混合云架构的算力底座，助力新一代数字基础设施建设，促进公司业务的数智化战略转型；支撑公司内部应用和行业产品的快速上云应用，提高客户满意度，提升公司品牌影响力。

(2) 云计算作为新型基础设施，承担着支撑千行百业“上云用数赋智”的重要职责。混合云架构融合了公有云和私有云各自的核心优势，已成为未来各行各业构建算力底座的最优选择。江苏移动在自身架构向混合云演进过程中遇到了诸多技术难题，通过校企联合“产学研用”一体化模式，有效破解了算力一体化调度、流量调度、运维和安全保障等难题，助力构建“连接+算力+能力”新型信息服务体系，不断丰富拓展面向数智社会和生活领域的信息服务新业态、新模式，打造经济社会民生数智化转型升级的创新引擎。同时也为各行各业向混合云架构迁移提供了可靠的解决方案，为千行百业“上云用数赋智”贡献自己的力量。



南京极域信息科技有限公司



企业概况

南京极域信息科技有限公司成立于 2000 年，是国家高新技术企业、江苏省专精特新中小企业，总部位于江苏省南京市，拥有占地 30 亩的研发中心和生产基地。公司深耕教育信息化领域 25 年，以“创新发展、品质为先”为理念，致力于通过软硬件一体化解决方案推动教育数字化转型升级，为全球教育公平与高质量发展贡献力量。

发展历程

- 2000 年：品牌创立，锚定教育信息化赛道，推出核心产品“电子教室系统”
- 2007 年：公司正式成立，与 Intel、联想等国际厂商达成战略合作，为全球化布局奠定基础
- 2008 年：中标国家农远项目 70% 订单，启动全球化战略，推出 17 种语言版本产品，覆盖欧洲、非洲市场
- 2013 年：推出数字语音系统、电子书包等创新产品，获“中国教育装备十大民族品牌”称号
- 2014 年：获评国家高新技术企业，实现 Android、iOS、Linux 全平台覆盖
- 2016 年：迁入紫金研发中心，转型为智慧教育整体方案提供商，推出互动反馈系统、教室云盒等智能硬件
- 2019 年：发布信创版电子教室，响应国家国产化替代战略
- 2020 年：创新推出 CLASSHUB 智慧互联解决方案，以“飞天计划”灯塔校和移动示教推车重塑课堂教学形态
- 2025 年：入驻新总部基地，进一步强化技术研发与生产实力

核心技术与产品优势

1. 技术领先优势

自主核心技术：音视频编解码技术、多平台数据融合技术全球领先，支持 4K/8K 超高清画质与低延迟传输，适配多终端设备

全场景覆盖：自研智能软硬件体系覆盖基础教育、职业教育、高等教育及会议培训等多元场景

2. 创新解决方案

极域融合教学中心：整合硬件（如 CLASSHUB）、软件及云服务，打造数智化教学空间，覆盖全学段教学场景

极域信创计算机教室：深度适配国产芯片（如龙芯、鲲鹏）及操作系统（统信 UOS、麒麟），保障教育信息安全

3. 标杆产品矩阵

CLASSHUB：获德国红点设计奖的智慧中枢，集互动白板、物联网中控、音视频采集、AI 分析于一体，重构课堂交互场景

信创版电子教室：适配国产芯片与操作系统，满足教育装备国产化需求

移动示教推车：支持 5G 直播、录播与远程互动，打破传统课堂空间限制



市场地位与行业认可

1. 全球影响力

服务全球 50 万 + 所学校、5000 万 + 终端用户，业务覆盖亚洲、非洲、欧洲、美洲等地区

2. 权威资质认证





国家高新技术企业、江苏省专精特新中小企业、博士后科研工作站

ISO9001 质量管理体系、ISO27001 信息安全管理体系建设认证

3. 行业荣誉资质

获“江苏省高新技术企业”“南京市创新企业”“中国教育装备十大民族品牌”等称号

发展愿景

极域以“创新驱动教育公平”为使命，持续深耕音视频交互、人工智能、大数据等领域，推动教育资源的普惠化与个性化。未来，公司将进一步深化产学研合作，拓展智慧教育生态圈，为全球教育数字化进程注入持久动力，让优质教育触手可及。

极域——以科技赋能教育，用智慧点亮未来！

学会动态 ●

智教未来——职业教育数字化创新发展研讨会在南京隆重召开

2025年11月15日至17日，“智教未来——职业教育数字化创新发展研讨会”在南京隆重举行。本次会议由教育部职业院校信息化教学指导委员会、江苏省计算机学会主办，江苏省计算机学会职业教育产教融合委员会、江苏海事职业技术学院、镇江市高等专科学校、南京交通职业技术学院等单位承办。来自全国各地的职业教育专家、院校教师、企业代表以及媒体人士共300余人齐聚南京，共同探讨人工智能赋能职业教育数字化发展的新趋势与新路径。





简介

江苏省计算机学会理事单位

江苏源本科技股份有限公司

江苏源本科技股份有限公司（以下称：源本科技集团）成立于 2004 年，是 IT 服务与数智化人才服务领域的标杆企业，集团现为江苏省计算机学会理事单位、江苏大数据联盟会员单位、南京大数据产业协会会员单位。集团深耕人工智能、大数据、云原生等新一代核心技术领域数十年，构建了“企业服务、产教融合、人才培养”三大业务板块。其核心优势体现在技术与教育的深度融合，提供项目时间和企业级项目教学，同时联合工信部、阿里云等权威机构打造全链路技术认证服务和人才输送服务体系。

在产教融合合作中，集团以“打通教育与产业最后一公里”为目标，聚焦技术协同研发与复合型人才培养，已与多所高校共建实习实训基地，引入实战项目与定制化课程体系。合作亮点尤为突出：年均输送高端 IT 人才近千人，联合培养的人工智能、大数据方向毕业生就业率超 99%；开发专属教学资源，编撰《大数据开发面试宝典》《云原生开发面试宝典》等教材，助力学生实现高薪就业。

项目背景：国务院发布《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》，提出以六大领域深度融合为核心目标，推动人工智能与经济社会全面协同发展。而当前人工智能产业面临“高校人才培养与行业需求”链接上的痛点——企业亟需懂技术、能实战的复合型人才，而学生鲜有机会参与真实项目历练与前沿技术认知。源本科技集团与高校的合作正是为破解这一矛盾而生。

合作方式：采用“课程共建 + 基地实训 + 项目实战”模式，企业将人工智能开发、云原生开发、大数据开发等真实项目引入课堂，与校方共建“大学生实习实践基地”，安排技术专家授课并指导学生参与技术学习和迭代升级。

合作成绩：前期已协助完成人工智能、大数据、云原生等实训实践课程、完成高校的技术实践课程模块优化；引入实战项目，使学生技术实操能力显著提升；组织学生进入名企大厂参观交流，促进学生对企业运作的认知；部分学员参与应用于企业实际业务的项目，提前被华为、阿里、电信、移动等大厂高薪录用。

未来方向：依托人工智能+战略布局，将扩展至智能算法、大模型、AI+行业解决方案等交叉领域，共建“人工智能创新实验室”，引入技术案例教学，提高学生实践能力，匹配企业需求，与高校联合申报科研项目等。

源本科技集团将持续以技术资源与产业经验积累赋能高校发展，与高校携手打造“高校教育 - 人才培养 - 企业需求”的闭环生态，为社会输送更多顶尖数智人才。