



2024年 第3期

# 江苏省计算机学会通讯

COMMUNICATIONS OF THE JSCS

—— 在“群体协同感知”科研路上的坚持与探索  
—— 在“智能审计”的科研道路上努力前行

# 江苏省计算机学会常务理事单位

## 江苏科技大学计算机学院

### 办学历史

计算机学院始建于1979年“镇江船舶学院”电子计算机专业，2008年成立江苏科技大学计算机科学与工程学院，2016年更名为计算机学院。经过40余年的建设与发展，计算机学院形成了完备的信息通信类人才培养体系和学术科研能力。学院下设5个系部、2个实验中心，物联网专业实验中心为江苏省实验示范中心，建有高性能计算、云计算、大数据等先进的实验平台。

### 师资力量

学院拥有一支高素质的师资队伍，有教职工102人，其中教授13人、副教授32人、博士56人、硕士生导师36人，博士生导师2人。学院有江苏省“青蓝工程”学术带头人3人，江苏省“333工程”培养人选4人，江苏省六大人才高峰2人，江苏省“优秀共产党员”1人，校教学名师2人，校“深蓝人才”3人。

### 学科建设

2023年11月计算机科学进入ESI排名全球前1%。目前学院拥有计算机科学与技术（江苏省十三五、十四五重点学科）、软件工程2个一级学科硕士点和自主增设的人工智能一级学科硕士点，以及计算机科学与技术（国家一流专业，通过国家工程教育专业认证）、软件工程（江苏省一流专业）、物联网工程（江苏省一流专业）、人工智能（全国首批）、信息安全五个本科专业。学院各类在校本科生1600余人，在校研究生400余人，留学生100余人。

学院重视科技创新工作，现有五个创新团队，重点围绕数据科学与知识工程、智能安全、人工智能及应用、物联网工程等，面向国防科技发展和地方经济建设开展科学研究。近3年，承担国家自然科学基金、省产学研等科研项目50余项，到账经费近5000万元，发表高水平学术论文200余篇，授权国家发明专利100余项。获得吴文俊奖人工智能科学技术奖三等奖1项、中国产学研合作创新成果奖1项、中国造船工程学会科学技术奖一等奖1项、江苏省科技进步三等奖1项、上海市科技进步二等奖1项，市厅级项目获奖数项。

### 办学成效

学院具有浓厚的崇尚科学、勇于创新的科技创新氛围。我院大学生的科技作品每年在包括全国“挑战杯”课外学术科技作品竞赛、“创青春”全国大学生创业大赛、中国“互联网+”大学生创新创业大赛、中国大学生计算机设计大赛、全国物联网设计大赛、“中国软件杯”全国软件设计大赛、“蓝桥杯”全国软件设计大赛、全国智能车设计大赛等在内的全国学科竞赛中，均获得全国奖项50余项，并在2020年首获中国“互联网+”大学生创新创业大赛全国银奖。

学院历年来为信息化领域输送了大量人才，每年均有毕业生加入腾讯，阿里巴巴，奇虎360，小米等优秀互联网公司，一些学生进入中船716所等国防科工院所参与国家信息化建设。同时学院还为北京大学，复旦大学，浙江大学，南京大学，哥伦比亚大学，早稻田大学等国内外知名高校输送了许多优秀的研究生。

### 升学就业前景

学院高度重视学生升学就业工作，每年均有大量毕业生前往知名高校升学深造或从事计算机相关岗位工作，学院近三年毕业生就业形势良好，近三年平均就业率为98.59%。其中选择继续求学深造的毕业生，保送或考取日本早稻田大学、美国俄勒冈州立大学、北京大学、复旦大学、浙江大学等国内外知名高校。

笃学明德承船魂，经世致用济沧海。江苏科技大学计算机学院践行与国家、民族同呼吸共命运的一贯宗旨，秉承江苏科技大学深厚的“船魂”精神，围绕建设江苏高水平大学的战略任务、“国内一流造船大学”的战略目标，致力于培育肩负“兴船报国”使命的新时代科技人才。





# 江苏省计算机学会通讯

COMMUNICATONS 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 李干目 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 游辉敏 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@nju.edu.cn

## 教学成果

01 | “321”教学实践体系的构建 | 郭立强

## 学生记者团专栏

08 | “链”接未来:区块链发展与应用 | 曹春杰教授访谈录

10 | 知识增强型大模型的前沿探索与技术突破 | 赵翔教授专访

13 | 打破桎梏:人工智能自动设计芯片的先锋 | 陈云霁主任专访

16 | 推进计算机教育改革的前沿实践 | 郭耀教授访谈录

## 政策解读

19 | 国家人工智能产业综合标准化体系建设指南(2024版)

## 学术交流

27 | 基于超图的在线社交网络多尺度表示学习 | 孙相国

35 | 容忍标记带噪数据的半监督学习 | 张震宇

## 会员风采

44 | 在“群体协同感知”科研路上的坚持与探索 | 吴巍炜

47 | 在“智能审计”的科研道路上努力前行 | 伍之昂

## 科学普及

49 | 人形机器人研究进展与发展挑战

57 | 数学工具降低并联机器人设计门槛

## 科创成果

60 | 面向企业用户的国产全生命周期碳足迹工业软件系统开发与应用



# “321” 教学实践体系的构建

——淮阴师范学院郭立强教授

## 一、成果简介

“321”教学实践体系的构建是以OBE教育理念为指导，着力强化“三个基本”，统筹“两个综合”，做好“一个拓展”，使学生能够学以致用，用理论知识指导实践。“321”教学实践体系的内容如图1所示，“三个基本”即基本理论、基本方法、基本技能，着眼于夯实学生的电子学基础；“二个综合”即理论与实践的综合以及线上与线下的综合，旨在培养学生数字电子技术的综合应用能力；“一个拓展”即知识与能力的拓展，达到提升学生创新能力的目的。



图1 “321”教学实践体系内容框架图

“321”教学实践体系改革传统的课程教学方法和手段，按照学习产出导向这一总思路，以课堂教学为主渠道、以深化教改为手段、以教改项目为依托、以培养学生实践创新能力、持续提高教学质量为目标，将学生主体与教师主导地位、混合式在线教学与创新课堂实验教学紧密结合，实现教学方法多样化，教学手段现代化，让学生在加强电子技术基础理论学习的同时实现理论与实践的统一。该教学成果的取得，促进了教学条件的建设和教师教学研究水平的提高，并在创新应用型人才的培养方面取得了显著成效，得到了广泛好评和推广应用。

## 二、成果主要解决的教学问题及解决教学问题的方法

### 成果主要解决的教学问题

计算机相关专业是面向系统开发和应用、软硬件结合的宽口径专业，同时与其他学科有着紧密的联系。目前，计

计算机大类专业课程主要以软件类课程为核心，以往电类基础课实验均以 EDA 仿真的形式进行授课。众所周知，计算机硬件是软件的载体，二者互相依存、缺一不可。脱离硬件的教学模式会使学生无法准确理解和把握知识点，提高实践和创新能力更无从谈起。

在课时量被大幅度地压缩、缺少硬件实验条件的前提下，如何打破课堂沉默状态，使计算机大类专业“电子技术”课堂焕发生机；如何将硬件实验引入课堂教学，较好的发挥课堂教学主阵地、主渠道和主战场作用，进而帮助学生打下坚实的电子学基础，是本成果中要着力解决的重点问题。

### 解决教学问题的方法

为了解决上述问题，我们对计算机专业的《电子技术基础》课程就教学模式、教学方法与手段、教材和混合式课程建设等方面进行了探索和改革，构建了“321”教学实践体系，在提高教学质量和创新人才培养方面取得了丰硕的教学成果。

#### 1、编写配套理论与实验教材，指导学生实践。

OBE 理念中要求学生具有解决复杂工程问题的能力。这一考核指标有两个要点：

首先，什么是复杂工程问题；其二，如何使学生具备解决复杂工程问题的能力。申请人编写了配套理论与实验教材，将“三个基本”有机结合起来。教材与实验开发板配合使用，便于学生将与本门课相关的工程问题以实验的形式进行开发设计，这回答了第一个问题。学生在开发板上，按照实验教材的要求搭建理论课上所讲到的趣味电子电路。例如，数字时钟、爆闪灯、双色流水灯、电子蜡烛、声光控制电路等等。在电路搭建与分析测试的过程中，锻炼了其分析、发现、解决问题的能力，这解决了第二个问题。本课程教材的建设可以帮助学生实现解决复杂工程问题能力这一重要评价指标，能够做到有抓手、可评价。

#### 2、建设混合式在线课，创新教学模式。

为了充分利用现代信息技术手段开展教学，申请人建设了混合式在线课程，主要应用于学生课前预习、课后复习和作业等环节。该在线课程教学资源丰富，包含有单元导学、微视频、课件、实验指导、测试题等栏目，对比较难的知识点都有微视频供学生观看学习。同时，在线课程设有“优秀作业展示”栏目来鼓励学生，起到良好的示范效应。“线上与线下的综合”较好地解决了教学课时有限、课后难点解答和资源共享等问题。学生访问量 3 万余次。图 2 是混合式在线课程网络截图。



图 2 混合式在线课程网络截图



### 3、自制趣味演示电路与教学仪器，营造趣味课堂。

首先，针对核心知识点研发教师教学演示类趣味电路六十余块。采用情景式教学方法，在学生注意力最集中的“课前三分钟”激发学生兴趣，给学生演示一些趣味性的电子制作，并通过多媒体课件中的自制 GIF 动画来设置相应的问题情境，把学生的注意力逐步引导到课堂教学上来，能够使学生对本堂课所要学习的知识产生浓厚的兴趣，将学习变成一种自我需要。图 3 是 2014 年至 2017 年期间制作的部分趣味演示电路，大部分电路都是采用面包板飞线焊接制作。

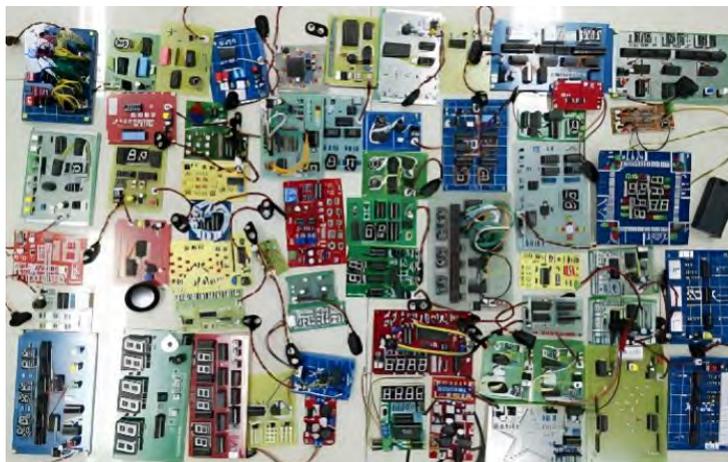


图 3 趣味演示电路（面包板）

从 2018 年开始又陆续设计开发了六十余块趣味电路，为了使电路的趣味性和演示性更好，将这些趣味电路做成标准的 PCB 产品，图 4 是部分趣味电路。

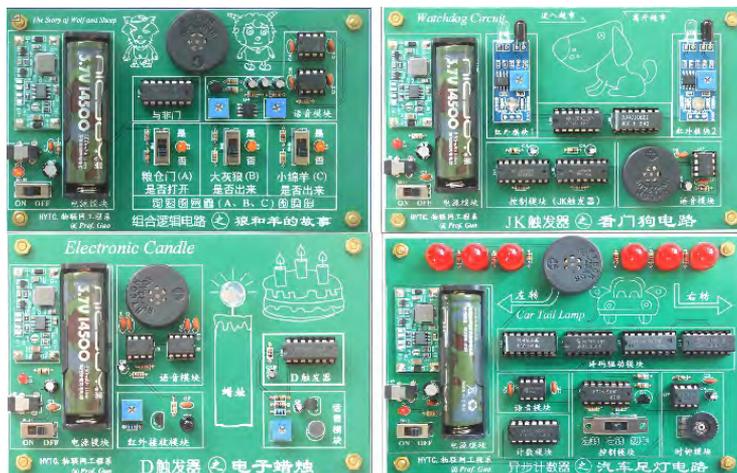


图 4 趣味演示电路（PCB 板）

其次，为了使课堂演示效果更清楚醒目，申请人研发并制作演示用教学仪器一套，如图 5 所示。该教学仪器尺寸为 60×40 厘米，集成了 13 个功能单元、大尺寸的 LED 和开关，配合芯片标识板使用。基于该教仪以及上述趣味电路申请了外围专利 12 项。同时，申请人获得了江苏省高校自制实验教学仪器先进个人荣誉称号。

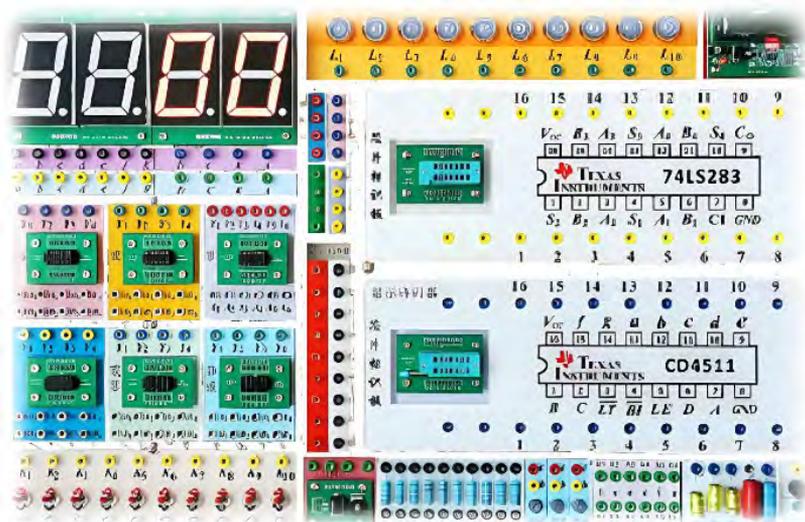


图 5 演示用教学仪器

#### 4、研发数字电子技术实验开发板，提升学生创新能力。

为了实现 OBE 教育理念，真正实现学生的学习产出导向，申请人在课堂教学中加大了实验教学的比例。为此，申请人设计开发了一款学生使用的便携式数字电子技术实验开发板，如图 6 所示。

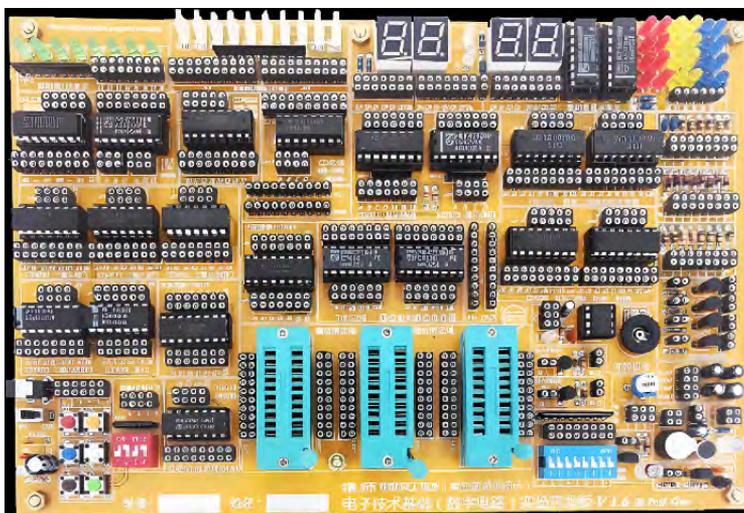


图 6 便携式数字电子技术实验开发板

很多趣味电路均可在该实验开发板上重复实现，便于学生对电路进行改进。通过该实验开发板，可以把相关的工程问题以实验的形式进行开发设计、电路搭建以及电路分析测试，使学生具备发现、分析和解决问题的能力，从而实现解决复杂工程问题能力这一重要评价指标，最终提升课堂教学质量。

本实验开发板具有可扩展性，对于有能力的学生可以进行难度较大的拓展实验，充分考虑到不同知识、能力学生的发展需要。此外，本实验开发板以电子套件的形式给学生，共计有 225 个元器件，这些元器件都要由学生分组焊接



完成，这一举措可以加强学生的动手实践能力，培养学生的创新能力与团队合作精神，实现了“两个综合”中的“理论与实践”的综合。

5、以大创项目和学科竞赛为抓手，提升学生创新能力。

课堂上，申请人注重将学科前沿知识与思政元素融入教学中，激发学生的学习热情。鼓励学生根据个人的兴趣爱好加入学科竞赛或教师科研项目。学生通过参加课外的研究性实验、学科竞赛和大创项目等科研活动，将课内理论和实验技能有机结合，有效地培养自身科研思维 and 创新能力，践行了“321”教学实践体系中“一个拓展”的要求。

“321”教学实践体系的构建本质上是强调“教与学融为一体，课内与课外融为一体，理论与实践融为一体”。让学生在加强电子技术基础理论学习的同时实现理论与实践的结合、提高学生用理论知识解决实际工程问题的能力。

### 三、成果的创新点

1、三位一体，有机融合，更新人才培养理念

构建适合于本课程的“321”教学实践体系，宏观上通过混合式在线课程、趣味电路引导、教学仪器演示、开发板的实验来最大限度地提升学生的产出。微观上将课程思政、学科前沿与课程内容进行有机融合，坚持价值塑造、知识传授和能力培养“三位一体”，实现立德树人教育根本任务。

2、理念先导，实践检验，完善人才培养体系

以OBE理念为指导，通过“321”教学实践体系将“线上学习与线下内化融为一体、理论学习与技能训练融为一体，课内学习与课外拓展融为一体”，在理论与实践的结合上总结、提炼，又反过来指导教学改革。既有科学依据和理论意义，又有实践检验，具有指导性、实用性、可操作性和推广价值。

多措并举，产出导向，改革人才培养模式

以产出为导向、多模式地创新人才培养教学实践体系。在日常教学的基础上，结合学科竞赛、大学生实践创新训练计划项目及教师的科研团队，有针对性的提升学生的综合分析、设计和创新思维能力，通过多种方式进行教学改革，以学生为中心，从点到面，产出导向，逐步改革人才培养模式。

### 四、成果的推广应用效果

“321”实践教学方法已推广应用到我院四个计算机类专业，在教学条件建设、教学研究水平和人才培养质量方面都取得了丰硕的成果。

1、促进了教学条件建设

(1) 制作电类基础课的多媒体课件，并设计制作了动画配合课件使用。在计算机科学与技术、物联网工程和大数专业得到了推广。

(2) 完成《电子技术基础(2)》混合式在线课程建设，访问量三万余次。在线课程的应用较好地解决了教学课时有限、课后难点解答和资源共享等问题。

(3) 申请人主讲的电子技术基础课程获批江苏省首批一流本科课程。

(4) 研发教师教学演示类趣味电路六十余块，提升了课堂教学的趣味性。

(5) 研发学生使用的便携式数字电子技术实验开发板。该实验开发板可以用作工程问题的实验载体，是教学过程中师生互动的良好的媒介，拓展了教学的深度和广度。该实验开发板获得第五届全国高等学校自制实验教学仪器设备创新大赛三等奖，证书见图 7。



图 7 便携式数字电子技术实验开发板获奖证书

## 2、提高了教学研究水平

(1) 在“321”教学实践体系的构建过程中，教师教学水平得到不断提高。申请人荣获第三届全国高校青年教师电子技术基础、电子线路课程授课竞赛全国总决赛一等奖；第五届全国高校教师自制实验教学仪器设备创新大赛三等奖；第三届江苏省本科高校青年教师教学竞赛一等奖；江苏省高校微课比赛一等奖；校青年教师评优课一等奖；校级教学标兵；校青年教师“十佳教学能手”；荣获“我最喜爱的老师”、“江苏省五一创新能手”、“江苏省技术能手”称号，部分证书见图 8- 图 9。



图 8 国家级课堂教学比赛一等奖证书



图9 第三届江苏省本科高校青年教师教学竞赛一等奖证书

(2) 申请人紧跟教学发展要求的新形势，紧紧围绕既定的教学目标，积极开展教学研究活动。在《电气电子教学学报》等权威期刊发表教学研究论文8篇，主持省部级教改项目4项，教学方法应用经验在我校教学沙龙进行了交流，受到同行专家的高度评价。

(3) 先后出版《电子技术基础简明教程》和《电子技术基础实验指导教程》二部教材，推动了应用型本科院校计算机相关专业电类基础课程的教材建设。目前相关教材在我校以及东南大学成贤学院、南京理工大学紫金学院和宿迁学院推广使用，获得师生的一致好评。

### 3、提升了人才培养质量

(1) 通过“321”教学实践，学生具有较强的动手能力和专业技能。学生在中国大学生计算机设计大赛和中国机器人竞赛等国家级竞赛屡获佳绩：学生获得省级以上获奖10项。

(2) 指导省级以上大创项目5项，显著提升了学生的创新能力和综合素质，学生发表EI论文2篇，省级期刊论文8篇、申请发明专利4项（授权2项），软件著作权7项。大创小组学生中的毕业论文获得江苏普通高校本专科优秀毕业设计（论文）二等奖1项，三等奖2项。

# “链”接未来：区块链发展与应用

## ——曹春杰教授访谈录

曹春杰，二级教授，博士生导师。现任海南大学网络空间安全学院院长，兼任教育部网络安全专业教指委委员、中国指挥控制学会智能调度专委会副主任委员、中国密码学会理事、密码与跨境数据安全海南省工程研究中心主任、海南商用密码协会会长。先后主持国家重点研发计划、军 863、国防预研、海南省重大科技计划等十余项重大重点项目，先后获得中国通信学会科学技术一等奖 1 项、二等奖 1 项，海南省科技进步一等奖 1 项，海南省高等教育教学成果一等奖 1 项。

在 5 月 26 日的 2024 年江苏省区块链学术年会上，曹春杰教授作了题为《区块链安全监管关键技术与应用》的报告，介绍了区块链在安全监管架构、业务合规和网络安全风险面临主要的安全挑战，以及实体关联与匿名数字身份识别、业务数据精细化监管与治理、智能合约及协议安全性分析与检测技术等关键技术，最后介绍了围绕海南区块链基础设施和区块链综合试点开展的应用情况。

在报告结束后，我们有幸采访到了曹春杰教授。

**Q1：在很多应用了区块链技术的系统中，区块链通常替代了传统单点服务器的角色。那么它的作用是什么？对比传统方案，它有什么优势？**

**曹春杰教授：**区块链在这些系统中的应用，解决了传统服务器中心化所带来的权威信任问题。通过区块链的分布式结构和多数表决的方法，建立了原本素不相识或没有信任关系的实体和个人之间的信任关系。这种信任是通过密码学保障实现的，类似于权威第三方的信任传递，但现在通过区块链系统实现，不需要传统的权威第三方。这种系统的好处在于，即使多方彼此不认识，也可以通过共识和共享达成信任关系。

**Q2：区块链技术在全球范围内受到广泛关注。您认为哪些行业或领域将最先受到区块链技术的影响，并从中受益？**

**曹春杰教授：**区块链作为价值互联网的一种表现形式，未来肯定会在价值传递和交易领域有重要应用。数据交易、数字资产交易等领域是区块链最有应用前景的方向。比如央行的数字人民币货币桥项目，就以区块链技术作为支撑，从而解决不同司法辖区互信和隐私保护的问题。

此外，元宇宙也将是区块链的重要应用场景。随着单点计算能力和网络带宽的增加，元宇宙会加速进入现实世界，



其社会运转体系、信任传递、价值流动和资金交易都需要区块链技术来支撑。

**Q3: 您认为目前推动区块链技术发展的主要驱动力是什么？目前区块链在实际应用中面临什么样的挑战？**

**曹春杰教授：**推动区块链技术发展的主要驱动力是应用场景的需求和实际需求。早期比特币和以太坊的发展非常快，因为它们有实际的需求。当前，区块链需要一个杀手级应用来驱动其发展。

在国内，区块链的应用更多以许可链或联盟链为主。这些应用需要明确的应用场景，如司法领域的共识和数据共享。这些场景虽然成功，但数量较少，难以快速驱动区块链的发展。技术上我们已经有了很多优化方案，但在广泛应用和推动产业发展上还缺乏动力，这是目前区块链技术面临的主要挑战。

**Q4: 海南区块链基础设施和综合试点取得了一些成果，您能否分享一些成功的经验？**

**曹春杰教授：**海南区块链的发展得益于政府的高度重视和政策支持。海南是国内最早支持区块链产业发展的地方之一，创建了国家区块链实验区，成立了区块链产业联盟。此外，海南区块链产业发展与实际需求紧密结合，如预付式消费场景的区块链应用，解决了老百姓在预付式消费中的维权难题。区块链打通了原本数据共享的壁垒，使各方互相不信任的实体能够在—个信任的平台上共享数据，实现了信用评价和风险预警等功能。通过区块链的信用评价和运营数据分析，能够提前预警商家的跑路风险，保障消费者的权益。

曹春杰教授在报告中介绍了区块链在安全监管架构、业务合规以及网络安全风险方面所面临的主要安全挑战，重点探讨了实体关联与匿名数字身份识别、业务数据精细化监管与治理、以及智能合约和协议安全性分析与检测等关键技术。

在采访中，曹春杰教授讲解了区块链在分布式信任机制、数据安全和去中心化方面的独特优势。曹春杰教授还讨论了区块链技术在金融、数据交易、数字资产管理以及元宇宙等领域的广泛应用，分享了海南区块链试点项目的成功经验，展示了区块链技术在实际应用中的潜力。

在区块链技术迅速发展的今天，安全监管已成为备受关注的重要课题。曹春杰教授的研究为这一领域的创新和发展提供了宝贵的思路，他的深入讲解为我们了解区块链技术的前沿发展提供了独特而有价值的视角。感谢曹春杰教授为我们带来如此精彩的报告，也感谢曹教授在采访中分享了他独到的见解！

# 知识增强型大模型的前沿探索与技术突破

## ——赵翔教授专访

赵翔，国防科技大学教授、博导。教育部高层次青年人才，湖南省科技创新领军人才，军队高层次青年科技英才，中国科协青年人才托举工程资助对象。从事大数据知识工程等方面的研究与应用，主持国家重点研发计划（青年科学家）、国家自然科学基金面上基金、湖南省杰出青年基金等重要科研项目 10 余项，出版专著 1 部，发表论文 100 余篇（ESI 高被引论文 2 篇，国际会议论文 4 项），申请专利 40 余项。湖南省科技创新团队骨干成员，获评省部级科技进步二等奖 1 项、全国一级学会科学技术一等奖和二等奖各 1 项。中国计算机学会杰出会员、信息系统专委副秘书长、大数据专家委员会、数据治理发展委员会、数据库专业委员会执委，中国管理科学与工程学会理事。

**Q1: 您的报告题目是“知识增强型大模型的概念、方法和技术”。请问知识增强型的大模型与传统大模型有何不同？它的核心概念和技术基础是什么？**

知识增强型大模型与传统大模型的主要区别在于它们如何处理和利用知识。传统大模型，也就是未经知识增强的大型语言模型，通常依赖于巨量未标注文本数据进行训练，学习到稠密的参数化隐式知识，能够生成连贯、多样化的文本，但往往在准确性、可解释性和知识时效性方面存在局限。相比之下，知识增强型大模型通过融入外部知识库，学习整合外部的显式知识，显著提升了上述的不足之处。

核心概念上，知识增强型大模型的关键在于“知识融合”。它不仅基于深度学习的自注意力机制和大规模参数量来学习语言模式，还额外利用了结构化或半结构化的知识库，如知识图谱、数据库等，以增强其生成内容的准确性和可靠性。这种融合方式确保模型能够获取并运用最新的、领域特定的知识，从而在生成文本时提供更为精确和具有深度的信息。

技术基础方面，检索增强生成是当前知识增强型大模型的主流技术路径。RAG 通过在生成过程中动态地从外部知识库检索相关信息，然后结合这些信息来生成回答或文本。此外，还有模块化 RAG 和多模态融合 RAG 等高级形式，它们通过模块化设计和多模态数据的整合，使得模型更加灵活和强大，能够处理文本、图像、代码等多种类型的数据，以及跨模态的复杂任务。通过这些技术，知识增强型大模型在保持大模型生成能力的同时，有效解决了知识时效性、可解释性、推理能力弱等问题，降低了微调成本，并且适应了更广泛的应用场景。

**Q2: 在结合知识图谱和预训练模型的过程中有哪些技术难点？您是如何克服这些难点的？**



在结合知识图谱和预训练模型的过程中，遇到的技术难点主要包括以下几个方面：

首先是结构化信息的非结构化。知识图谱中的信息高度结构化，而预训练模型通常处理的是非结构化文本数据。将结构化的三元组（实体 - 关系 - 实体）转换为模型可以理解的输入形式，同时保留其结构信息，是一个挑战。我们可以通过设计特定的编码机制，比如引入图神经网络来编码知识图谱结构，或者在 Transformer 架构中集成图注意力机制，以此来映射知识图谱的结构信息到连续的向量空间。

其次是知识噪声的问题，知识图谱中可能存在不准确或过时的信息，这些“噪声”可能会干扰模型学习。可以通过数据清洗、实体消歧和知识验证等手段来提高数据质量。同时，采用鲁棒性学习算法，允许模型在训练过程中对噪声有一定的抵抗能力。

在效率方面，知识图谱规模庞大，如何在生成过程中高效地检索和利用相关信息是一大难题。我们采用了检索增强生成框架，结合高效的向量索引和检索算法，以及针对特定任务的微调策略，确保模型能够即时、准确地获取所需知识。

此外，在可解释方面，虽然知识图谱本身具有较好的可解释性，但将其融入语言模型后，如何保持模型决策的透明度是一个挑战。可以尝试通过在模型设计中加入可解释性模块，比如使用注意力机制来突出显示哪些知识片段对生成内容有重要贡献，以及开发专门的可视化工具，帮助理解模型的决策逻辑。

**Q3: 您提到知识增强技术对于应对内容幻觉等潜在风险、提升模型的多方面性能指标至关重要。具体来说，知识增强技术是如何在这些方面起到作用的？**

知识增强技术对于提升大型语言模型的性能，起到了不可或缺的作用，尤其在应对内容幻觉等潜在风险方面。大语言模型自身的知识局限于训练时的数据集，而知识增强允许模型动态地从最新的知识库中获取信息，这样模型就能及时反映最新的知识状态，减少因知识过时导致的错误和幻觉现象。具体来说，通过融入知识图谱或外部知识库，当模型在生成文本时，能够引用或融合这些可靠知识，从而减少无依据的臆测或错误信息，降低幻觉的风险。

知识增强通过提供更广泛的背景知识，帮助模型在面对未见过的数据时，也能做出合理且准确的反应，从而提高了模型的泛化能力。相比于完全重新训练模型，通过检索增强生成等技术，模型可以在不修改内在参数的情况下，利用检索到的最新知识来辅助生成过程，显著降低模型维护和升级的成本。

**Q4: 在知识增强型大模型的研究和应用中，您认为未来的主要研究方向和挑战是什么？您对于知识增强型大模型的未来发展抱有何种期待或顾虑？**

在知识增强型大模型的研究和应用中，未来的主要研究方向和挑战可以从以下几个方面展开讨论。

1. 多模态知识融合。随着技术的发展，如何有效地将文本、图像、语音等多种模态的知识整合进大模型，实现真正跨模态知识增强的理解和生成，将是研究的重点。这要求模型能够理解不同模态之间的关联，并在生成时考虑模态间的相互影响。

2. 知识动态更新与个性化。建立高效的知识更新机制，确保模型能够即时吸收新知识，同时根据用户需求提供个性化知识服务，将是提升模型实用性和用户体验的关键。

3. 可解释性与信任度提升。提高知识增强大模型的可解释性，让用户能够理解模型决策背后的原因，增强模型的透明度和信任度，这对于模型的广泛接受和应用至关重要。

4. 高效检索与融合机制。研发更高效、精准的检索技术，以及如何在模型内部更好地融合模型自身的知识与检索到的知识，是提升响应速度和生成质量的核心挑战。

除了技术方面的困难，在数据方面同样也面临挑战。随着大模型技术不断发展，网络上各类虚假的 AI 生成内容也逐渐泛滥，如何避免这些虚假的生成内容成为信息来源？如何保证知识增强来源的全面性与可靠性？这些都是未来发展面临的难题。

赵翔教授对知识增强型大模型的深入研究，为我们打开了一扇了解人工智能新境界的窗口。赵教授不仅关注模型的准确性和可靠性，更着眼于提升模型的泛化能力和降低内容幻觉风险，他以对技术细节的敏锐洞察和对知识融合的深刻理解，站在大模型技术的最前沿，探索 AI 的未来式。我们期待在赵教授等专家的深刻钻研中，知识增强型大模型能够不断突破技术瓶颈，实现更高层次的智能化服务，为社会带来更高的价值。

## 学会动态 ●

### 第十三届江苏省计算机大会在宁隆重召开

2024年6月14日至6月16日，由江苏省科协指导，江苏省计算机学会、江苏省软件新技术与产业化协同创新中心主办，江苏省人工智能学会、江苏省软件行业协会、江苏省信息技术应用学会协办，东南大学承办的2024年第十三届江苏省计算机大会在南京市维景国际大酒店隆重召开。

大会以“计算促推新质生产力”为主题，邀请到包括中国科学院院士郑志明教授在内的一批高水平专家和学科带头人参会并做主旨报告，吸引了来自省内外高校、研究所以及企业在内800余名计算机科技工作者前来交流。本届大会充分展示了江苏省计算机领域的创新技术、创新思想、创新成果，推动高校技术、人才等创新要素向企业有序流动，实现产、学、研深度融合，加速更多的科技成果向生产力的转化，为新质生产力的形成和发展提供坚实有力支撑。



中国科学院院士郑志明教授





# 打破桎梏：人工智能自动设计芯片的先锋

## ——陈云霁主任专访

陈云霁，研究员，中科院计算所副所长，处理器芯片全国重点实验室主任，CCF 体系结构专委会主任。长期从事处理器芯片与人工智能的交叉研究，研制了国际首款深度学习处理器芯片（寒武纪 1 号），被 Science 杂志刊文评价为深度学习处理器的“先驱”和“引领者”。曾是龙芯 3 号 CPU 的主架构师之一。2019 年开设了国内首门智能计算系统课程。该课程已被国内百所高校采用，培养了学生 1.8 万人。2020 年编写的《智能计算系统》教材已重印 5 次，曾列京东大学教材排行版第二名。作为第一完成人，曾获国家自然科学基金二等奖（我国处理器芯片领域历史上唯一的国家自然科学基金奖）。获国家杰出青年科学基金、全国五一劳动奖章、中国青年五四奖章、何梁何利科技创新奖，被 MIT 技术评论评为全球 35 位杰出青年创新者。

图灵的博士导师阿隆佐·丘奇（Alonzo Church）在 1957 年提出了面向电路综合的丘奇问题（Church's Problem），即机器能否自动设计电路。这个问题被很多计算机和人工智能学者视为计算机科学的一个“圣杯”。然而，尽管业界在过去几十年中进行了大量探索，但机器只能设计出包含一千个门的玩具电路。

经过长期研究，陈研究员及其团队在这一问题上取得了突破，研制出了国际上首个由 AI 自动设计的 CPU 芯片“启蒙 1 号”。在 JSCC 2024 开幕式暨主题报告会上陈研究员进行了题为《启蒙 1 号：人工智能自动设计处理器芯片》的报告。该芯片包含超过 4,000,000 个逻辑门，其性能达到了 486 的水平。这一成果是对长期悬而未决的丘奇问题的一次重大突破，还为未来的处理器设计提供了新的思路。

通过此次报告，陈研究员不仅展示了他在人工智能与处理器芯片交叉领域的研究成果，也为与会者提供了宝贵的经验和借鉴。这次会议期间我们有幸采访到了陈研究员，就处理器芯片的问题进行探讨。

**Q1: 启蒙 1 号是国际上首个由 AI 自动设计的 CPU 芯片。您能简单讲述一下这个项目的研究过程吗？在实现这一突破的过程中，遇到了哪些主要挑战？这些挑战是如何克服的？**

陈云霁：

启蒙 1 号的研究历程实际上是一个漫长而曲折的过程。早在 20 多年前我们开始设计 CPU 时，在设计过程中意识到设计 CPU 是一项非常冗长、繁重且机械化的任务。因此，我们开始探索能否通过机器替代人类完成这一任务。我们在这漫长的历程中不断地围绕这个艰巨的目标进行尝试和探索。在当时这个想法看起来更像是天马行空，我们只能围绕着这个目标做一些周边的工作。

直到近几年，在长期积累的基础上，我们将传统的 BDD（Binary Decision Diagram）技术与一些新兴的技术如强

化学习结合，这一创新结合成为我们推动技术前进的关键一步。

这些艰苦的努力最终促成了启蒙 1 号的诞生，使其成为国际上首个由 AI 自动设计的 CPU 芯片。这不仅是技术的进步，也是团队多年来努力的结晶。

**Q2: 您最开始做这个相关研究的时候，人工智能并不像现在这么热潮，当时硬件和算力也非常有限，您当初为什么会想到去做这方面的研究？对于后来想从事这方面研究的学者，您有什么建议？**

**陈云霁：**

我选择从事这个研究领域，很大程度上是因为内心深处的兴趣驱动。从大学开始，我就对这个领域非常有兴趣。到了研究生阶段，我们开始进行 CPU 设计的工作，深刻感受到这个过程的冗长、繁重和重复性强，因此开始思考通过人工智能技术来改变这种现状。

我们走过了漫长的道路。当时也有一些客观因素影响。比如我本人从事芯片设计；而我的弟弟专注于人工智能算法，涉及演化算时间复杂度分析等。这促使我们自然而然地进行了交叉研究。如今，芯片与人工智能的结合已经成为学术界和工业界的热点话题，不论是面向人工智能的芯片，还是利用人工智能辅助设计芯片，都显得非常正常和自然。

然而，在十几、二十年前的中国，芯片设计并未受到足够重视，人工智能则被视为一个抽象、理论性的方向，且不被看好就业。将芯片设计和人工智能结合起来就像是冷门的二次方，兴趣驱动是我坚持走下去的重要动力，只有内心的激情才能支撑如此艰难的探索和尝试。

对于想从事这方面研究的学者而言，图灵奖获得者辛顿有一个很好的建议。他认为关键是要拥有自己理解世界的框架。当面对新的观点或事实时，我们应该思考它们如何融入自己的框架，如果不适合，也要勇于拒绝。这样能够培养出良好的科研直觉和科研品味。当然我们的初心和使命虽然是我们框架的底层基石，但也需要适度保持柔软，在实践中修正框架，而非固守不变。

**Q3: 您和您的团队研制的寒武纪一号被评价为深度学习处理器的先驱和引领者，您对于未来科学处理器的芯片发展有何展望？未来的研究重点和方向会在哪一部分？**

**陈云霁：**

我们做这块研究已经很长时间了，经历了这个领域从冷门变成热门。2013 年我们提出第一个深度学习处理器的体系结构，并将其发表在 A 类会议 ASPLOS 上，最近我们的论文获得了 ASPLOS 的最具影响力论文奖，被引用了 2000 次左右，全球五大洲 30 多个国家数百个机构都在跟踪。产业界如英伟达、华为等企业都引用过我们的论文或使用过我们的专利。

未来科学处理器芯片的发展还有很多可以做的事情。现在训练芯片基本上已经逼近了半导体工艺提供的峰值性能极限。比如 3 纳米、5 纳米的芯片面积上限基本上 800 平方毫米左右，增加晶体管数量越来越难。如何在同样的晶体管数量下提供更高的计算能力就成为了一个重要的方向，比如运算器的位宽，从一开始的 32 位到 16 位，甚至是 8 位，4 位。

同时，提升存储器的能力也是关键，因为数据搬运的能耗远大于计算的能耗，提升存储器的能力甚至走向存储计算一体是有道理的。训练芯片的发展潜力巨大，但我认为推理芯片的潜力更大。现在人工智能企业从大模型中赚到的钱非常困难，原因在于使用大模型的成本太高，全球的数据中心耗电量已经接近 1%。

假如大模型真的广泛应用到各行各业，使用量会增长 1000 倍甚至 10000 倍，计算量需求将远远超过训练。为了



降低能耗，我们必须让大模型推断的能耗降低 1000 倍甚至 10000 倍，这样大模型才能广泛应用到生活的方方面面。目前推断芯片的能效将决定大模型应用的广泛程度，推理芯片需要解决很多科学问题。

**Q4: 您开设智能计算系统课程的出发点是什么？对于目前国内在这个领域的培养有什么展望？**

**陈云霁：**

对于我来说，选择主动投身于教学，受父母师长的影响很大。我的母亲是一位中学教师，这种教育教学的基因深植于我的成长过程中。此外，我的导师胡伟武老师和陈国良院士也是教学名师，都非常特别重视教学，这对我产生了巨大的影响。因此，成为研究员后，我主动去国科大授课。

我曾教授过多门课程，包括并行计算和数字电路。随后，我开设了智能计算系统课程，主要是因为我国在人工智能人才培养方面存在明显的结构性问题。通常情况下，大家更加注重算法教学，而忽略了底层知识的重要性。这种“头重脚轻”的现象可能会导致我国信息产业和未来智能产业在不牢固的基础上发展。这从根本上说是一种教育问题。如果我们在系统软件和核心芯片方面受制于人，说明我们相关领域的人才匮乏，相应的课程也不够完备。因此，我开设了国内首个智能计算系统课程。

在教学中，我的理念与科研如出一辙：致力于解决社会、国家甚至人类迫切需要但尚未有人涉足的领域。学生通过学习这些课程，即使成绩不尽如人意，毕业后或进入职场也会感到与相关工作更加接近，具备从事相关产品研发的能力。

## 学会动态 ●

### 第二届全国高校计算机工程与应用发展论坛在陕西宝鸡召开

2024 年 7 月 30—8 月 3 日，第二届全国高校计算机工程与应用发展论坛暨 2024 师资能力提升研讨会在陕西省宝鸡市成功举办，本次论坛由江苏省计算机学会应用型高校计算机学科建设专家委员会、信息技术新工科产学研联盟计算机工程与应用工作委员会、陕西地方高校计算机联盟主办，宝鸡文理学院承办，青软创新科技股份有限公司协办。来自国内 50 余家单位 100 余位代表参加了本次论坛，本届论坛主题为“新质生产力背景下计算机教育”，旨在深入探讨新质生产力背景下的高校计算机类专业发展新路径，更好地促进专业建设、师资队伍建设和课程建设，提高人才自主培养质量，以高质量的计算机教育助力新质生产力的发展。



# 推进计算机教育改革的前沿实践

## ——郭耀教授访谈录

郭耀，北京大学计算机学院教授、副院长。主要研究方向包括操作系统、移动计算、隐私保护与系统安全等。主持和承担了国家重点研发计划、国家自然科学基金重点和面上项目、国家重点研发计划课题、863 等多项国家级科研项目。2021 年起，担任“101 计划”工作组秘书长和课程建设组负责人。曾获 ISSTA 2023 杰出论文奖、WWW 2020 最佳学生论文奖、UbiComp 2016 最佳论文提名奖、国家技术发明一等奖、电子学会技术发明特等奖、教育部科技进步一等奖、北京市教学成果一等奖等。

在第十四届江苏省计算机学科高峰论坛上，郭耀教授作了题为《“101 计划”：以课堂提升为导向的计算机专业教育教学改革实践》的报告，郭教授从计算机“101 计划”的建设规划和目标出发，着重介绍在工作组高校的努力下，“101 计划”项目开展过程中在核心课程体系建设、优秀教材建设、课堂观察与师资培训等教学改革任务中取得的阶段性成果，聚焦于“101 计划”的主要目标、规划和建设成果，对计算机一流专业建设的借鉴和推动作用，并探讨未来的工作思路与计划。

报告结束后，我们有幸采访到了郭耀教授。

**Q1:** 您的报告题目中提到以课堂提升为导向。请问课堂提升具体指的是什么？这一概念在计算机专业教育中有何重要意义？通过哪些途径和方法可以实现课堂提升这一目标？

**郭耀教授：**课堂提升指的是提高课堂教学的整体效果，目标是让教师教得更好，学生学得更好。在“101 计划”之前进行的一些计算机教育的改革，更多局限于对教材、课程大纲的改革，而我们希望教育教学改革最终能体现在教学效果的提升上。例如，我们成立了课堂提升组，通过课堂观察和专家反馈，帮助教师改进教学方法。此外，我们还组织了研讨会和培训等，帮助教师提高教学技能，使课堂更具活力，提升学生的注意力和参与度。

**Q2:** 请问开展“101 计划”的初衷是什么？通过这项计划，最终希望培养出什么样的人？

**郭耀教授：**“101 计划”是由北京大学访问教授、图灵奖获得者 John Hopcroft 教授发起的，John 的初衷是提升中国计算机教育的整体水平，包括普通高校和顶尖高校都有提升空间。具体来说，通过核心课程、核心教材、核心实践项目和核心师资的建设，探索一套有效的、能长期推行的本科教育提升方法，并推广到更多学科和学校。“101 计划”就是希望以计算机学科专业教学改革为抓手，从本科基础学生出发，从教育教学的基础要素和基本规律着手，汇聚国内计算机领域具有丰富教学经验与学术水平的教师和专家团队，充分借鉴国际先进资源和经验，着力培养未来



能够突破基础研究和应用的创新型领军人才，成为加强我国基础学科人才培养的突破口。

**Q3: “101 计划” 在实施过程中采取了哪些关键性的教育教学改革举措？**

郭耀教授：在实施过程中，我们采取了以下几项关键改革措施：

1. 核心课程建设：选定 12 门计算机专业的必修课，构建知识点体系，每门课分为 50 个左右的知识点，每个知识点约为一个学时，不同的知识点还设置了不同的能力要求，教师可以根据教学情况和教学需要选择知识点来构成一门课的内容。

2. 知识点教案建设：教案主要强调的是如何讲解知识点以及如何考察学生的掌握程度。考虑到教师教学风格的差异、讲解时切入点的不同以及所授课程知识点组成的不同，我们提供了不同版本的教案，教师可以自主选择，更好地进行教学。

3. 实践平台建设：建立了课程实践平台，涵盖 12 门核心课程，提供丰富的实践项目和实验案例。

4. 核心师资培训：组织核心师资培训活动，提高教师的教学能力和水平。

**Q4: 请问在接下来的阶段，您认为哪些方面是教育的重点？未来的工作将如何进一步提高计算机专业教育教学质量？**

郭耀教授：“101 计划”推行以来，已经取得了一些成果，如构建了核心课程体系知识图谱，成果汇编成“101 计划”白皮书、建设了高标准教材体系、建成实践项目集成平台、顶尖专家引领建设一流师资团队等等。后续的工作，一方面是核心要素的迭代升级，这是常态化建设，会一直做下去；另一方面是推广和落实，将“101”计划这些年形成的一套方案，能真正推广并落实到更多学校，将教学研讨形成一种机制，使得更多学校和教师参与其中，为构建人才培养体系提供支撑；再往后一些，也考虑向国际进行成功经验的推广。

## 学会动态

### “网络工程专业建设研讨会暨《计算机网络》出版 35 周年庆典”在宁举办

2024 年 7 月 19 日—21 日，由教育部高等学校计算机类专业教学指导委员会指导、江苏省计算机学会主办、电子工业出版社有限公司承办、南京云创大数据科技股份有限公司协办的“网络工程专业建设研讨会暨《计算机网络》出版 35 周年庆典”在江苏南京成功举办。来自全国 40 多所高校和企业的百余名教师和专家汇聚于此，以谢希仁教授编著的《计算机网络》一书出版 35 周年为契机，共同探讨新时代背景下计算机网络新技术的发展对人才培养的新要求，共享国家级一流专业、一流课程建设经验。



# 国家人工智能产业综合标准化体系建设指南（2024版）

来源：中华人民共和国工业和信息化部

为深入贯彻落实党中央、国务院关于加快发展人工智能的部署要求，贯彻落实《国家标准化发展纲要》《全球人工智能治理倡议》，进一步加强人工智能标准化工作系统谋划，加快构建满足人工智能产业高质量发展和“人工智能+”高水平赋能需求的标准体系，夯实标准对推动技术进步、促进企业发展、引领产业升级、保障产业安全的支撑作用，更好推进人工智能赋能新型工业化，工业和信息化部联合中央网信办、国家发展改革委、国家标准委共同发布《国家人工智能产业综合标准化体系建设指南（2024版）》。

## 一、产业发展状况

人工智能是引领新一轮科技革命和产业变革的基础性和战略性技术，正成为发展新质生产力的重要引擎，加速和实体经济深度融合，全面赋能新型工业化，深刻改变工业生产模式和经济发展形态，将对加快建设制造强国、网络强国和数字中国发挥重要的支撑作用。近年来，我国人工智能产业在技术创新、产品创造和行业应用等方面实现快速发展，形成庞大市场规模。伴随以大模型为代表的新技术加速迭代，人工智能产业呈现出创新技术群体突破、行业应用融合发展、国际合作深度协同等新特点，亟需完善人工智能产业标准体系。

## 二、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全会精神，认真落实中央经济工作会议和全国新型工业化推进大会部署要求，完整、准确、全面贯彻新发展理念，统筹高质量发展和高水平安全，加快赋能新型工业化，以抢抓人工智能产业发展先机为目标，完善人工智能标准工作顶层设计，强化全产业链标准工作协同，统筹推进标准的研究、制定、实施和国际化，为推动我国人工智能产业高质量发展提供坚实的技术支撑。

到2026年，标准与产业科技创新的联动水平持续提升，新制定国家标准和行业标准50项以上，引领人工智能产业高质量发展的标准体系加快形成。开展标准宣贯和实施推广的企业超过1000家，标准服务企业创新发展的成效更加凸显。参与制定国际标准20项以上，促进人工智能产业全球化发展。

坚持创新驱动。优化产业科技创新与标准化联动机制，加快人工智能领域关键共性技术研究，推动先进适用的科技创新成果高效转化成标准。



坚持应用牵引。坚持企业主体、市场导向，面向行业应用需求，强化创新成果迭代和应用场景构建，协同推进人工智能与重点行业融合应用。

坚持产业协同。加强人工智能全产业链标准化工作协同，加强跨行业、跨领域标准化技术组织的协作，打造大中小企业融通发展的标准化模式。

坚持开放合作。深化国际标准化交流与合作，鼓励我国企事业单位积极参与国际标准化活动，携手全球产业链上下游企业共同制定国际标准。

### 三、建设思路

#### (一) 人工智能标准体系结构

人工智能标准体系结构包括基础共性、基础支撑、关键技术、智能产品与服务、赋能新型工业化、行业应用、安全/治理等7个部分，如图1所示。其中，基础共性标准是人工智能的基础性、框架性、总体性标准。基础支撑标准主要规范数据、算力、算法等技术要求，为人工智能产业发展夯实技术底座。关键技术标准主要规范人工智能文本、语音、图像，以及人机混合增强智能、智能体、跨媒体智能、具身智能等的技术要求，推动人工智能技术创新和应用。智能产品与服务标准主要规范由人工智能技术形成的智能产品和服务模式。赋能新型工业化标准主要规范人工智能技术赋能制造业全流程智能化以及重点行业智能升级的技术要求。行业应用标准主要规范人工智能赋能各行业的行业应用，推动产业智能化发展提供技术保障。安全/治理标准主要规范人工智能安全、治理等要求，为人工智能产业发展提供安全保障。如图1所示。

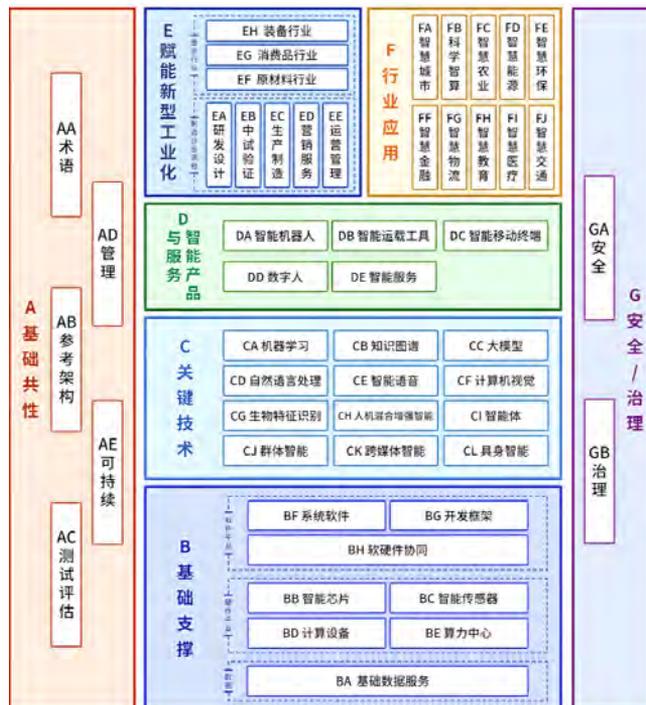


图1 人工智能标准体系结构图

## （二）人工智能标准体系框架

人工智能标准体系框架主要由基础共性、基础支撑、关键技术、智能产品与服务、赋能新型工业化、行业应用、安全 / 治理等 7 个部分组成，如图 2 所示。

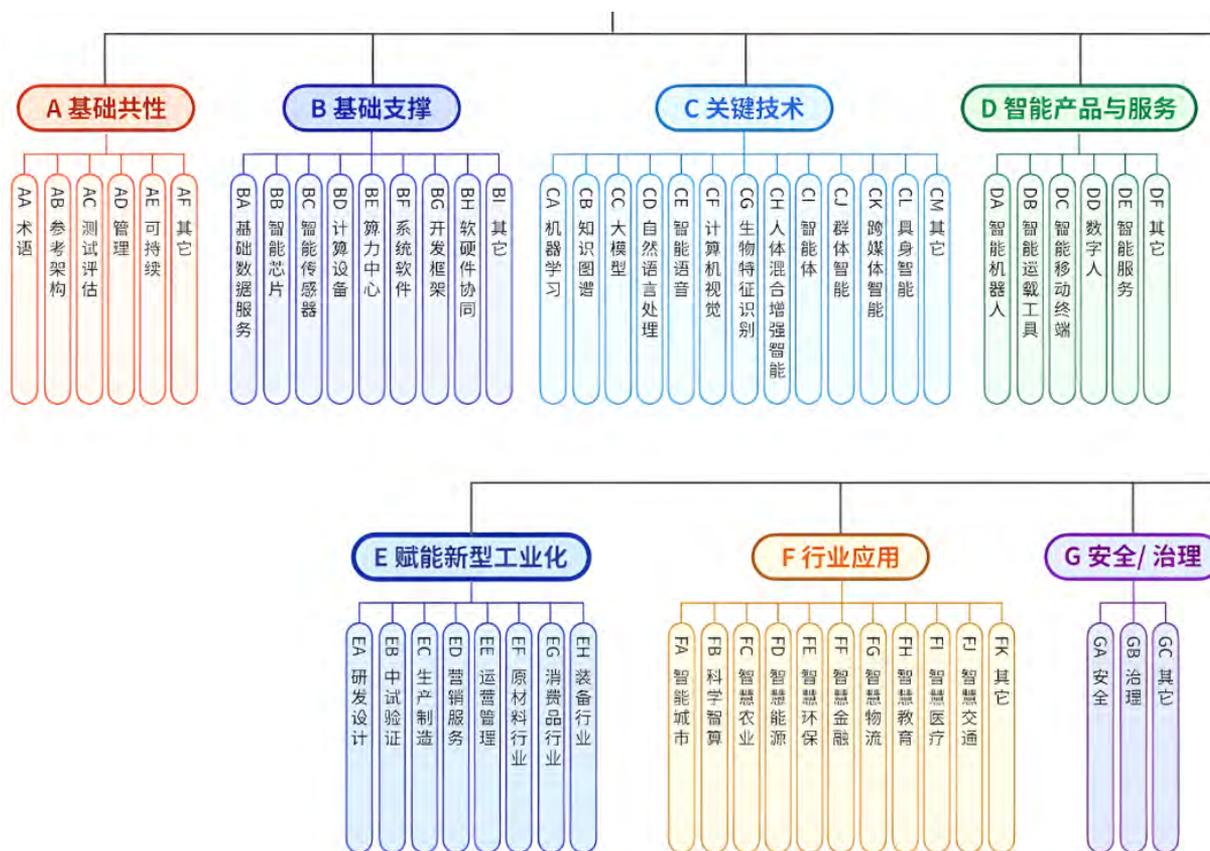


图 2 人工智能标准体系框架图

## 四、重点方向

### （一）基础共性标准

基础共性标准主要包括人工智能术语、参考架构、测试评估、管理、可持续等标准。

1. 术语标准。规范人工智能相关技术、应用的概念定义，为其它标准的制定和人工智能研究提供参考，包括人工智能相关术语定义、范畴、实例等标准。

2. 参考架构标准。规范人工智能相关技术、应用及系统的逻辑关系和相互作用，包括人工智能参考架构、人工智能系统生命周期及利益相关方等标准。

3. 测试评估标准。规范人工智能技术发展的成熟度、人工智能体系架构之间的适配度、行业发展水平、企业智能化能力等方面的测试及评估的指标要求，包括与人工智能相关的服务能力成熟度评估，人工智能通用性测试指南、评



估原则和等级要求，企业智能化能力框架及测评要求等标准。

4. 管理标准。规范人工智能技术、产品、系统、服务等全生命周期涉及的人员、组织管理要求和评价，包括面向人工智能组织的管理要求，人工智能管理体系、分类方法、评级流程等标准。

5. 可持续标准。规范人工智能影响环境的技术框架、方法和指标，平衡产业发展与环境保护，包括促进生态可持续的人工智能软件开源基础框架，人工智能系统能效评价，人工智能与资源利用、碳排放、废弃部件处置等标准。

## （二）基础支撑标准

基础支撑标准主要包括基础数据服务、智能芯片、智能传感器、计算设备、算力中心、系统软件、开发框架、软硬件协同等标准。

1. 基础数据服务标准。规范人工智能研发、测试、应用等过程中涉及数据服务的要求，包括数据采集、数据标注、数据治理、数据质量等标准。

2. 智能芯片标准。规范智能芯片相关的通用技术要求，包括智能芯片架构、指令集、统一编程接口及相关测试要求、芯片数据格式和协议等标准。

3. 智能传感器标准。规范单模态、多模态新型传感器的接口协议、性能评定、试验方法等技术要求，包括智能传感器的架构、指令、数据格式、信息提取方法、信息融合方法、功能集成方法、性能指标和评价方法等标准。

4. 计算设备标准。规范人工智能加速卡、人工智能加速模组、人工智能服务器等计算设备，及使能软件的技术要求和测试方法，包括人工智能计算设备虚拟化方法，人工智能加速模组接口协议和测试方法，及使能软件的访问协议、功能、性能、能效的测试方法和运行维护要求等标准。

5. 算力中心标准。规范面向人工智能的大规模计算集群、新型数据中心、智算中心、基础网络通信、算力网络、数据存储等基础设施的技术要求和评估方法，包括基础设施参考架构、计算能力评估、技术要求、稳定性要求和业务服务接口等标准。

6. 系统软件标准。规范人工智能系统层的软硬件技术要求，包括软硬件编译器架构和优化方法、人工智能算子库、芯片软件运行时库及调试工具、人工智能软硬件平台计算性能等标准。

7. 开发框架标准。规范人工智能开发框架相关的技术要求，包括开发框架的功能要求，与应用系统之间的接口协议、神经网络模型表达和压缩等标准。

8. 软硬件协同标准。规范智能芯片、计算设备等硬件与系统软件、开发框架等软件之间的适配要求，包括智能芯片与开发框架的适配要求、人工智能计算任务调度、分布式计算等软硬件协同任务的交互协议、执行效率和协同性能等标准。

## （三）关键技术标准

关键技术标准主要包括机器学习、知识图谱、大模型、自然语言处理、智能语音、计算机视觉、生物特征识别、人机混合增强智能、智能体、群体智能、跨媒体智能、具身智能等标准。

1. 机器学习标准。规范机器学习的训练数据、数据预处理、模型表达和格式、模型效果评价等，包括自监督学习、无监督学习、半监督学习、深度学习、强化学习等标准。

2. 知识图谱标准。规范知识图谱的描述、构建、运维、共享、管理和应用，包括知识表示与建模、知识获取与存储、

知识融合与可视化、知识计算与管理、知识图谱质量评价与互联互通、知识图谱交付与应用、知识图谱系统架构与性能要求等标准。

3. 大模型标准。规范大模型训练、推理、部署等环节的技术要求，包括大模型通用技术要求、评测指标与方法、服务能力成熟度评估、生成内容评价等标准。

4. 自然语言处理标准。规范自然语言处理中语言信息提取、文本处理、语义处理等方面的技术要求和评测方法，包括语法分析、语义理解、语义表达、机器翻译、自动摘要、自动问答、语言大模型等标准。

5. 智能语音标准。规范前端处理、语音处理、语音接口、数据资源等技术要求和评测方法，包括深度合成的鉴伪方法、全双工交互、语音大模型等标准。

6. 计算机视觉标准。规范图像获取、图像/视频处理、图像内容分析、三维计算机视觉、计算摄影学、跨媒体融合等技术要求和评价方法，包括功能、性能、可维护性等标准。

7. 生物特征识别标准。规范生物特征样本处理、生物特征数据协议、设备或系统等技术要求，包括生物特征数据交换格式、接口协议等标准。

8. 人机混合增强智能标准。规范多通道、多模式和多维度的交互途径、模式、方法和技术要求，包括脑机接口、在线知识演化、动态自适应、动态识别、人机协同感知、人机协同决策与控制等标准。

9. 智能体标准。规范以通用大模型为核心的智能体实例和智能体基本功能、应用架构等技术要求，包括智能体强化学习、多任务分解、推理、提示词工程，智能体数据接口和参数范围，人机协作、智能体自主操作、多智能体分布式一致性等标准。

10. 群体智能标准。规范群体智能算法的控制、编队、感知、规划、决策、通信等技术要求和评测方法，包括自主控制、协同控制、任务规划、路径规划、协同决策、组网通信等标准。

11. 跨媒体智能标准。规范文本、图像、视频、音频等多模态数据处理基础、转换分析、融合应用等方面的技术要求，包括数据获取与处理、模态转换、模态对齐、融合与协同、应用扩展等标准。

12. 具身智能标准。规范多模态主动与交互、自主行为学习、仿真模拟、知识推理、具身导航、群体具身智能等标准。

#### （四）智能产品与服务标准

智能产品与服务标准主要包括智能机器人、智能运载工具、智能移动终端、数字人、智能服务等标准。

1. 智能机器人标准。规范人工智能在机器人领域应用的技术要求，包括机器人智能认知、智能决策等标准。

2. 智能运载工具标准。规范智能运载工具感知、识别与预判、协同与博弈、决策与控制、评价等技术要求，包括环境融合感知、智能识别预判、智能决策控制、多模式测试评价等标准。

3. 智能移动终端标准。规范人工智能应用在移动终端领域的技术要求，包括图像识别、人脸识别、智能语音交互，以及智能移动终端涉及的信息无障碍、适老化等标准。

4. 数字人标准。规范数字人的外形、动作生成、语音识别与合成、自然语言交互等技术要求，包括数字人基础能力评估、多媒体合成渲染、基础数据采集方法、标识和识别方法等标准。

5. 智能服务标准。规范基于大模型、自然语言处理、智能语音、计算机视觉等人工智能技术提供的服务，包括模型即服务平台技术要求和评测方法等标准，以及面向特定场景的人工智能应用服务，如智能软件开发、智能设计、智



能防伪等标准。

#### （五）赋能新型工业化标准

赋能新型工业化标准主要包括研发设计、中试验证、生产制造、营销服务、运营管理等制造业全流程智能化标准，以及重点行业智能升级标准。

1. 研发设计标准。研制跨领域知识整合、新型设计模式生成、人机协同研发设计等标准。
2. 中试验证标准。围绕高精度、全流程仿真模型，研制智能虚拟中试标准，以及复杂工业场景新技术应用验证标准。
3. 生产制造标准。研制生产过程智能化、产线监测及维护等标准。
4. 营销服务标准。围绕营销服务效率提升，研制智能客服、数字人、商品三维模型标准，以及用户体验等标准。
5. 运营管理标准。围绕运营管理智能化能力提升，研制相关供应链管理、数据管理、风险管理等标准。

6. 重点行业智能升级标准。围绕原材料行业，开展大模型物联产线数据、优化在线监测调控和工艺改进等标准研制。围绕消费品行业，开展需求预测、个性化定制等标准研制。围绕装备行业，研制智能装备感知、交互、控制、协作、自主决策等标准。

#### （六）行业应用标准

开展智慧城市、科学智算、智慧农业、智慧能源、智慧环保、智慧金融、智慧物流、智慧教育、智慧医疗、智慧交通、智慧文旅等领域标准研究。

#### （七）安全 / 治理标准

安全 / 治理标准主要包括人工智能领域的安全、治理等标准。

1. 安全标准。规范人工智能技术、产品、系统、应用、服务等全生命周期的安全要求，包括基础安全，数据、算法和模型安全，网络、技术和系统安全，安全管理和服务，安全测试评估，安全标注，内容标识，产品和应用安全等标准。
2. 治理标准。结合人工智能治理实际需求，规范人工智能的技术研发和运营服务等要求，包括人工智能鲁棒性、可靠性、可追溯性的技术要求与评测方法，人工智能治理支撑技术；规范人工智能全生命周期的伦理治理要求，包括人工智能伦理风险评估，人工智能的公平性、可解释性等伦理治理技术要求与评测方法，人工智能伦理审查等标准。

## 五、保障措施

（一）完善组织建设。建立健全人工智能领域标准化技术组织，统筹产学研用各方、产业链各环节优势力量，协同推进人工智能标准建设，共同构建先进适用的人工智能产业标准体系。

（二）构建人才队伍。鼓励标准化研究机构培养和引进标准化高端人才，加强面向标准化从业人员的专题培训。鼓励企业、高校、研究机构等将标准化人才纳入职业能力评价和激励范围，构建标准化人才梯队。

（三）加强宣贯推广。指导行业协会、标准化技术组织、国家技术标准创新基地等，面向企业开展人工智能标准体系、重点标准的宣贯和培训，引导企业在研发、设计、生产、管理、检测等环节对标达标，持续提升标准助力产业高质量发展效能

# 基于超图的在线社交网络多尺度表示学习

——2023年江苏省计算机学会优秀博士论文奖

作者：孙相国

单位：东南大学计算机科学与工程学院

指导老师：刘波

## 论文摘要

在线社交网络的普及带来了互联网经济的繁荣，深刻影响着人们的生活。与其他网络数据不同，在线社交网络具有深厚的社会学内涵，用户的线上行为与其所在的网络环境紧密相关。由于用户感知能力不同，环境对用户的影响存在差异，因此多尺度表示学习成为提升服务质量的关键。当前的研究多集中在图神经网络上，但这些模型难以捕捉在线社交网络中复杂的高阶社会关系。因此，需要构建基于超图的多尺度网络表示学习框架。超图可以连接多个节点，自然支持多尺度表示，能够更好地表达环境信息，提升模型的表现能力。本文针对在线社交网络的稀疏性、异质性和动态性提出了一系列创新方法。首先，提出基于图元的多层次超图结构生成方法，通过超边膨胀算法，自动生成多层次超图结构，解决网络稀疏问题。其次，提出基于小波卷积的异质超图神经网络模型，通过将异质超图分解到多个语义空间中进行融合，兼容普通网络的分析。再次，提出基于对偶学习的动态超图表示模型，将对偶学习机制引入用户与环境的交互建模，构建多种时间粒度下的动态网络模型，增强超图对动态性研究的能力。最后，提出结合内容信息、传播结构和网络动态演化特质的异常信息检测框架，通过超边的子结构随机游走策略和自监督学习，提升异常信息检测的可靠性和准确性。本文的研究为在线社交网络的多尺度表示提供了超图视角的理论框架，提升了模型的表达能力，为相关领域的分析提供了理论基础与技术支持。相关研究工作已发表在 IEEE TKDE、SIGKDD、WWW、WSDM 等国内外一流期刊和会议上。

## 专家推荐语

本文展示了作者在在线社交网络表示学习领域的创新能力和深厚理论基础。论文针对在线社交网络的稀疏性、异质性和动态性挑战，提出了基于超图的多尺度表示学习方法，具有重要的理论和实践意义。作者提出了基于图元的多



层次超图结构生成方法，有效缓解了网络关系稀疏导致的表示问题，并通过小波卷积设计了异质超图神经网络模型，提升了多尺度学习能力。此外，论文还提出了基于对偶学习的动态超图表示模型，增强了对在线行为时间依赖性的处理能力。论文在异常信息检测中的应用展示了超图的强大潜力，通过自监督学习提升了检测的可靠性和准确性。总体而言，论文通过系统性的研究和多方面的创新，提出了一套完善的基于超图的多尺度在线社交网络表示学习框架。这项研究不仅在理论上具有重要的学术价值，同时在实践中展现了广泛的应用前景。对于从事在线社交网络、图神经网络和超图理论等相关研究的学者和从业人员来说，这篇博士论文是重要的参考文献，展示了其研究成果的实际价值，将对推动在线社交网络研究领域的发展起到积极的促进作用。

## 论文看点

1. 针对在线社交网络中的稀疏性问题，提出了基于超边膨胀的多层次超图结构感知方法。通过自动化生成多层次超图结构，解决了传统模型在稀疏网络下的表现不足，提高了网络表示的效果和下游数据分析的性能。
2. 针对社交网络的异质性，设计了基于小波卷积的异质超图神经网络模型。该模型通过将异质超图分解到多个语义空间并进行融合，兼容普通图和超图的分析，增强了多尺度学习能力，适应了多样化的关系类型和实体类型。
3. 针对在线社交网络的动态性，提出了基于对偶学习的动态超图表示模型。通过结合用户与环境的交互，构建多种时间粒度下的动态网络模型，增强了对在线行为时间依赖性的处理能力，为用户行为分析提供了新的方法。
4. 在异常信息检测应用中，通过元超边游走策略和自监督学习，提出了结合内容信息、传播结构和动态特质的异常信息检测框架。该框架显著提升了检测的可靠性和准确性，展示了多尺度超图表示在实际应用中的强大潜力。

### 研究点一：面向社交网络稀疏性的多层次超图结构感知

为了克服在线社交网络中二元关系的极度稀缺对超图结构的影响，本文提出了一个基于多层级超图和超图神经网络（HNNs）的模型框架。该模型框架通过超边膨胀逐层构建多层次超图结构，并利用超图神经网络对这些结构进行表示学习，从而更好地挖掘潜在的社会关系。

**图元驱动的超边初始化：**本文首先引入图元（graphlets）来进行初始超边构建。图元是从较大规模网络中导出的多个小规模连通图，每个图元在结构上彼此不同，代表了一种独特的局部结构。使用图元作为初始超边能够完整表达所有的子结构，超越成对关系，对社会关系预测具有重要作用。考虑到图元的数量庞大，本文仅选择五个节点以内的图元，并用一条超边表示每个图元。对于异质网络，本文根据元路径将原始网络分解为多个同质子网络，然后将每个子网络中的超图进行合并处理。通过现有高效的图元检测方法，可以在在线社交网络中挖掘这些图元。为了进一步优化超边结构，本文提出了三种超边膨胀方法：深度优先膨胀、宽度优先膨胀和混合膨胀。

**超边膨胀策略：**（1）深度优先膨胀（Depth-First Expansion）深度优先膨胀策略的核心思想是沿着超边路径行走，并有一定的可能性吞并另一条超边。具体来说，深度优先膨胀从一条超边开始，沿着与其连接的超边路径逐步扩展，直到达到预设的停止条件。每一步选择中，当前超边有一定的概率继续向前扩展，也有一定的概率终止膨胀。由于每条超边的膨胀过程是互相独立的，深度优先膨胀可以高效并行计算，适合处理大规模网络。详细的膨胀过程如下：从初始超边开始，选择相邻超边进行扩展。在每一步中，根据预设的进取程度决定是否继续扩展。当扩展过程达到停止条件时，记录最终的超边结构。（2）宽度优先膨胀（Breadth-First Expansion）宽度优先膨胀策略则首先从目标超边

的邻居超边中采样一些超边集合，然后将这些超边的节点添加到目标超边中，从而实现膨胀过程。具体来说，宽度优先膨胀为目标超边选取一定比例的邻居超边，并将这些邻居超边内的节点收纳到目标超边中。这样可以使目标超边在宽度上进行扩展，逐步扩大其规模。宽度优先膨胀的具体步骤包括：为目标超边选择一定比例的邻居超边。将这些邻居超边内的节点添加到目标超边中。记录膨胀后的超边结构。（3）混合膨胀（Hybrid Expansion）混合膨胀策略结合了深度优先膨胀和宽度优先膨胀的优点，首先为目标超边选择一定比例的邻居超边，然后为每个选中的邻居超边生成一个深度优先的超边路径，最后将这些选中的超边节点与目标超边的节点进行合并，完成膨胀更新。具体过程为：为目标超边选择一定比例的邻居超边。为每个选中的邻居超边生成一个深度优先的超边路径。将这些选中的超边节点与目标超边的节点合并，完成膨胀。通过这些膨胀策略，可以学习到数量可控的多层次超边结构，从而在局部学习和全局学习中实现较好的平衡点。

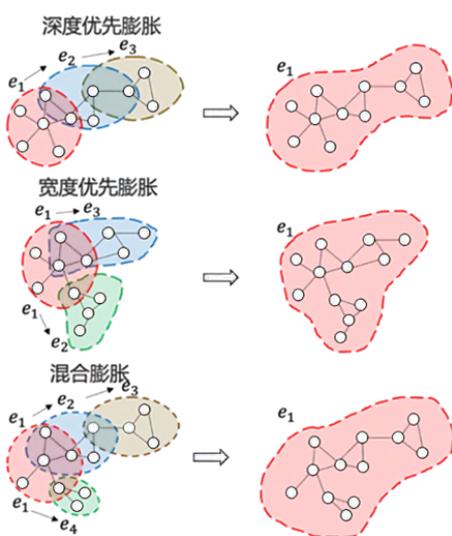


图 1 (左)：三种超边膨胀策略

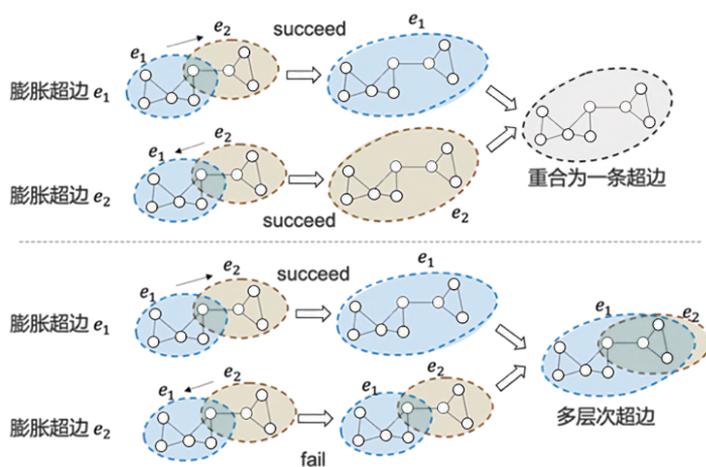


图 2 (右)：超边膨胀案例

**多层次超图表示：**在多层次超边的基础上，本文提出了一个超图神经网络模型（HNN），用于处理各个层次超图的表示。该模型通过节点聚合、超边融合和语义融合三个步骤，聚合不同节点的信息，得到节点的表示。（1）节点聚合（Node-level Aggregation）节点聚合指的是将目标节点周围的节点信息汇聚到目标节点中，使其获得邻域信息。利用节点层面注意力，可以学习同一个超边内节点间的关联。具体过程为：计算目标节点与其邻居节点的相似性。根据相似性权重，将邻居节点的信息汇聚到目标节点中。（2）超边融合（Hyperedge-level Fusion）超边融合指的是利用目标节点所在的超边信息更新节点信息。超边的层次性使得网络中很多节点同时属于多个超边，不同超边对同一个节点的影响不同，因此需要计算超边的隐含表示，为每个超边计算相应的权重，用于节点更新。具体过程为：计算每个超边的隐含表示。根据隐含表示的相似性，计算超边的权重。使用超边的权重更新节点的信息。（3）语义融合（Semantic-level Fusion）语义融合指的是对异质网络中多种语义信息构成的子图进行融合。通过对各种语义进行融合，可以反映出更全面的网络结构信息。具体过程为：将不同语义的子图表示进行分解。对每个子图表示进行独立学习。将各个子图表示进行融合，得到最终的节点表示。

### 研究点二：面向社交网络异质性的多语义超图节点表示

在现实场景中，网络中的简单关系和复杂关系往往同时存在，并且以简单关系构建的普通网络和以复杂关系构建的超图网络都具有异质性。超图的异质性比普通异质网络更加复杂多样，因此研究面向异质超图的节点表示成为提升在线社交网络表示能力的关键问题。本文提出了一种基于小波基的超图卷积网络模型，旨在解决异质超图节点表示问题。该模型通过两阶段的语义分解，将普通异质网络和异质超图网络分解为一系列的子图。随后，设计了一种基于小波基的超图卷积网络，用以替代传统卷积中的傅立叶基，从而提高计算效率，并通过语义融合得到异质超图的节点表示。

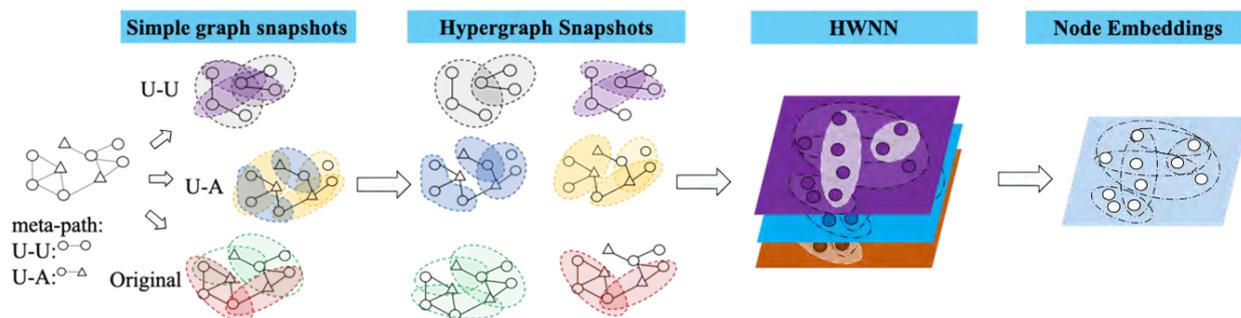


图 3：异质超图神经网络

**异质超图的两步分解与傅里叶卷积：**本文提出的两步分解方法首先根据预先指定的元路径对普通异质网络进行语义分解，从原始网络中抽取对应的普通子图。元路径是一系列特定的节点类型和边类型序列，用于指导语义分解过程。接下来，对每一个普通子图，再根据不同的超边类型进行一次异质超图的语义分解，将其表示为多个超图子图。每个节点在特定类型超图子图中的初始表示由一个投影矩阵进行变换，映射到相应的表示空间。例如，假设某节点在普通图中的初始特征为一个向量，这个向量通过特定类型超边的投影矩阵进行变换，得到该节点在超图子图中的特征表示。这个过程可以表示为：新的特征向量等于投影矩阵乘以原始特征向量。为了处理超图的结构信息，本文引入了超图的拉普拉斯矩阵。拉普拉斯矩阵是一个用于描述图结构的矩阵，反映了图中节点之间的连接关系。这个矩阵可以通过特征值分解来简化计算，从而在傅里叶变换的基础上进行信号和滤波器的卷积操作。傅里叶变换是一种将信号从时域转换到频域的方法，便于对信号进行处理和分析。

**基于小波基的超图卷积：**在信号处理领域中，小波基因其稀疏性和易于多项式近似的特点而被采用。小波基相比于傅里叶基更适合进行局部分析，并且在网络的多尺度表示中表现出色。本文提出用小波基替代傅里叶基，在超图上实现高效的小波基卷积。小波基的缩放值用于对复杂信号进行表示，通过多项式近似函数，进一步提升了计算效率，减少了对拉普拉斯矩阵分解的依赖。具体来说，小波基是一组函数，通过缩放和平移操作，可以用于表示信号的局部特征。在本文的模型中，小波基用于替代傅里叶基，进行信号的卷积操作。与傅里叶基不同，小波基能够捕捉信号的局部特性，适合处理超图中的多尺度信息。为了进一步提升计算效率，本文利用 Stone-Weierstrass 定理对小波基进行多项式近似。通过对热核矩阵进行多项式近似，可以有效减少计算过程中的残余项，从而简化计算。例如，假设热核矩阵的某一元素可以表示为特征值的指数函数，通过 Stone-Weierstrass 定理，可以将这个元素近似为一系列多项式项的和。这一近似过程显著减少了计算复杂度，使得模型在处理多个超图子图时更加高效。

### 研究点三：面向社交网络动态性的多粒度超图网络建模

社交网络的动态性给用户行为分析带来挑战。用户行为不仅受短期行为记录影响，还需考虑长期行为特质。此外，用户与环境的交互复杂，需要更细致的研究。本研究提出三个核心挑战：感知多尺度网络环境、模拟用户与环境的交互过程、结合多种时间粒度处理环境变化。旨在探讨用户与环境的双向交互过程，并提出一种面向社交网络动态性的多粒度超图网络建模方法，以提高用户行为预测的准确性。

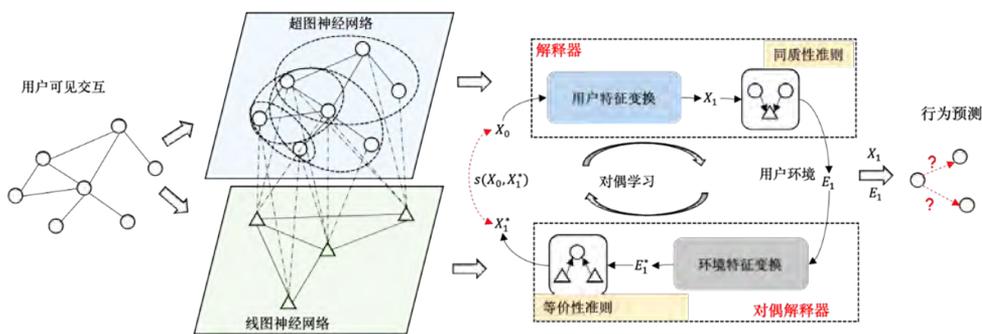


图4 利用超图对偶学习来模拟人与环境的交互作用

**多粒度超图网络模型：**在社交网络分析中，动态性是一个不可忽视的因素。为了捕捉用户行为的动态变化，本研究提出了多粒度超图网络模型。此模型突破了传统网络分析的局限，通过引入超图的概念，能够在不同粒度上对网络进行建模。超图是一种可以包含多个节点的边，称为超边，从而能够表示多个节点间的复杂关系。在社交网络中，超边可以代表一个群体或社区，其中的用户可能因为共同的兴趣或活动而形成紧密的联系。模型通过多层次超图发现用户所在的多尺度环境，利用超图的对偶学习框架建模用户与环境的双向交互。研究中提出了宏观和微观两个时间粒度。宏观时间粒度关注用户的长期行为模式和稳定的关系，使用超图来捕捉这些相对静态的特征。微观时间粒度则关注用户的短期行为变化，采用普通图结构进行建模，以捕捉用户行为的即时动态。

**对偶学习框架：**对偶学习框架是本研究的另一大创新点，它借鉴了自然语言处理中的对偶学习思想，将其应用于社交网络的用户与环境交互建模中。对偶学习通过设立两个互为逆过程的任务模型来实现自监督学习。在机器翻译中，这对应于将一种语言翻译到另一种语言，然后再翻译回原语言。在社交网络中，对偶学习体现为用户与环境的双向表示：用户如何表示其所在的环境，以及环境如何反映用户的特征。（1）用户与环境的双向交互：框架首先利用用户信息来建模用户所在的环境，然后反过来，利用环境信息来表达用户。这种双向交互的过程使得模型能够深入理解用户与环境之间的相互作用。（2）超图与线图的结合：在超图对偶学习中，研究者不仅关注超图本身，还引入了超图的线图来刻画超边（即环境）之间的交互作用。线图的构建允许模型学习不同环境之间的联系，进一步丰富了用户行为的上下文信息。（3）自监督学习的实现：通过最小化用户前后表示的差异，对偶学习框架实现了自监督学习。这意味着模型不需要外部的标注信息，而是通过内部的一致性约束来优化用户和环境的表示。

#### 研究点四：面向在线社交网络异常信息检测的超图应用实例

近年来，随着在线社交网络用户量的激增，各大线上平台也成为滋生潜在不法行为的温床。特别是网络谣言的传播，已经成为威胁在线社交网络安全的最大挑战之一，得到了学术界持续的关注。前述的超图结构学习、超图神经网络、以及动态超图建模的研究基础上，本文以在线社交网络中的异常信息检测为场景，探索超图的应用问题。

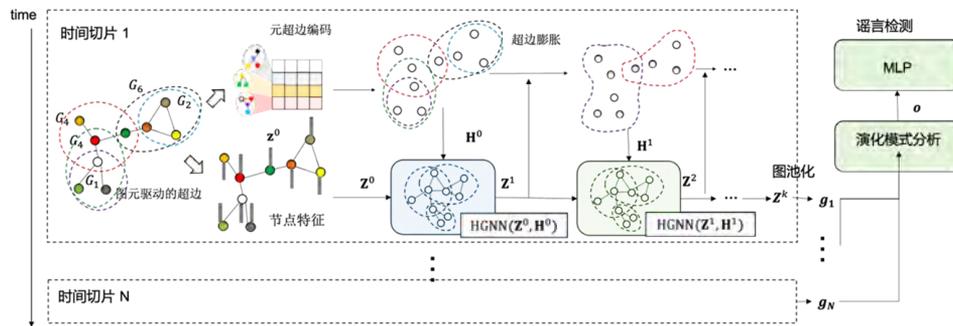


图5 本文提出的谣言检测框架

**基于超图的动态谣言检测：**本研究提出了一个新颖的、基于超图的谣言检测框架。具体地，本研究首先将动态传播网络按照时间节点切分成时序时间片，然后对每一个时间片，为其生成图级别的表示。这些图级别的表示融合了结构和内容信息，随后设计了一个动态注意力网络来学习动态特性。

(1) 动态传播网络的建模：动态传播网络（Temporal Propagation Network）被定义为一个时序图网络序列，其中每一个图切片表示网络中在特定时刻的状态。网络中的每一条边表示发生在时刻之前推文间的转发关系，刻画了用户间的信任关系。

(2) 基于自监督学习的基本子结构编码：为了对基本子结构进行有效的表示，本研究首先从每一个传播图中找到2-4个节点组成的图元，然后基于图元设计了元超边游走方法，保留不同图元间的关联关系。在这些子结构组成的路径上利用自监督学习得到元超边的表示。具体地，首先从给定的网络中快速找到图元实体。每一个图元实体用一条超边进行连接构成元超边。接下来，设计基于元超边的超图线图游走策略，从超图中生成由子结构构成的路径库，并通过自监督学习得到基本子结构的特征表示。

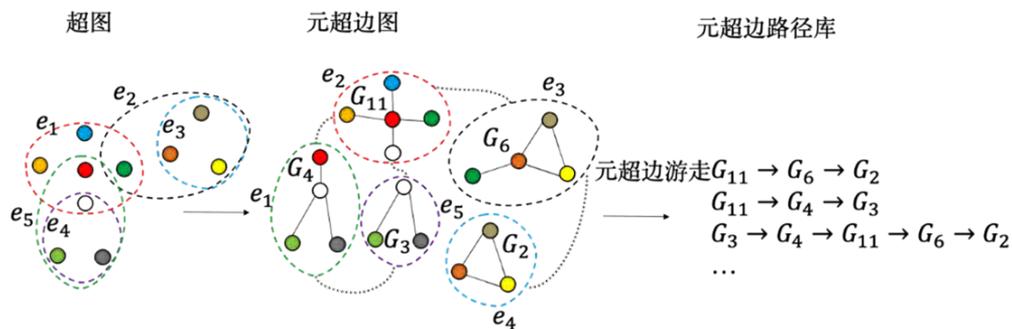


图6 基于元超边游走的元超边路径生成

(3) 基于超边膨胀的子结构聚合：受限于图元的规模，利用超边膨胀方法，将结构化表示从局部结构扩展到全局结构，生成更大范围的超边直至所有超边全部合并为一个，实现对图的结构表示进行“池化”操作。该方法可以有效地进行离线运算，以及并行计算。为了将结构和内容信息进行有机融合，本研究提出一个新颖的基于超图与普通图交互建模的图神经网络，对网络信息进行融合分析。假定在经历了L次超边膨胀后，一共生成了L+1个超图，通过超边注意力单元计算节点表示，并通过投影矩阵将节点表示和超边表示统一到同一个表示空间中，最终生成图级别的表示，支撑下游的图分类任务。

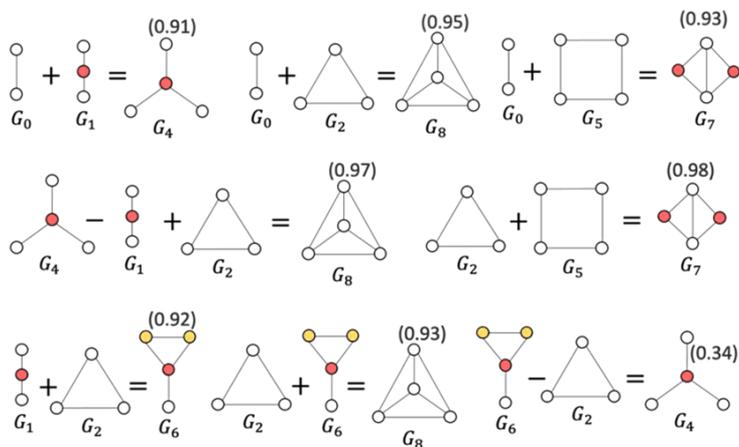


图7 学习到的元超边（子结构）向量

## 总结与展望

本文系统地探讨了在线社交网络（OSN）的多尺度表示学习，特别是超图的应用。超图能有效表示多尺度信息，克服传统二元图网络的局限性。具体贡献如下：

1. 多层次超图生成模型：提出从图元构建基础超边，再通过超边膨胀算法生成多层次超图，解决了传统图模型在稀疏网络中信息欠平滑的问题。
2. 异质超图神经网络模型：结合异质超图和小波基卷积操作，提出兼容普通图和超图的多语义节点表示方法，提升了异质网络中的节点表示能力。
3. 多粒度动态网络建模：通过超图与普通图的结合，引入对偶学习机制，研究动态环境中用户与环境的双向交互，提升用户行为预测效果。
4. 异常信息检测：针对在线社交网络中的异常信息传播，提出基于超图的多尺度表示学习框架，通过元超边游走策略和自监督学习，提升了异常信息检测的可靠性和准确性。

未来工作将进一步围绕社网络多尺度表示，探索超图生成策略优化、大规模数据的能力，以及扩展超图在更多应用场景中的应用等。

## 作者简介：





孙相国博士现任香港中文大学博后研究员（导师程鸿教授），中国人工智能学会 - 社会计算专委会执行委员，中国人工智能学会 2023 年度 " 社会计算青年学者新星 "（面向全球华人青年学者评选，仅 10 人）。他于 2022 年获得东南大学计算机博士学位（导师刘波教授），其博士学位论文获得江苏省优秀博士论文称号。他先后在微软亚洲研究院、杭州之江实验室等科研单位进行访问研究。于 2019 年至 2021 年赴澳大利亚昆士兰大学数据科学中心进行为期两年的联合博士培养，师从澳大利亚杰青阴红志教授。他广泛结合心理学、社会学，和计算机科学，完成了很多新颖的在线社交网络交叉学科研究工作，包括社交网络行为分析、网络异常检测、图学习等等。他在国际顶尖数据挖掘类会议和期刊如 SIGKDD、ICLR、TKDE、VLDB、TNNLS、TOIS、The Web Conference、WSDM、CIKM 等发表高水平论文 20 余篇。其中 CORE A \* 论文 18 篇，CCFA 类论文 15 篇，SCI 期刊论文 17 篇（包括 8 篇 IEEE Trans 系列顶尖期刊论文）。其中以第一作者身份发表于 KDD23 的工作获得“最佳研究论文奖”，是 KDD 自创立以来中国大陆以及港澳地区首次。孙相国博士担任《大数据挖掘与分析（英文）》、Journal of Social Computing 等期刊的青年副主编，同时也担任过多个国际顶尖会议期刊的审稿人和 PC member (SIGKDD, NeurIPS, TheWebConf, SIGIR, ICDE, VLDB, TNNLS, etc)。个人主页：<https://xgsun.mysxl.cn>

E-mail:xiangguosun@cuhk.edu.hk

## 指导老师：



刘波，东南大学教授，博士生导师，IEEE 会员，CCF 会员。研究兴趣包括在线社交网络、网络大数据智能处理与用户行为分析、网络舆情感知与分析、用户画像与推荐技术、自然语言处理与智能问答。主持或参与科研项目 29 项（主持 8 项，参与 21 项），其中主持完成国家自然科学基金项目 2 项、横向项目 4 项，主持在研国家自然科学基金面上项目 1 项，参与完成国家自然科学基金项目 6 项、省部级项目 7 项，作为技术骨干参与国家重点研发计划项目 2 项。申请国家发明专利 10 项。获得 2009 年度教育部科技进步奖一等奖 1 项。围绕科研工作，先后在国内外重要期刊和知名国际学术会议上发表论文 60 余篇，包括顶级国际会议 WWW 和顶级国际期刊 TON、TNNLS 等。申请国家发明专利 10 项（已授权 5 项），获批软件著作权 1 项。

bliu@seu.edu.cn

# 容忍标记带噪数据的半监督学习

——2023年江苏省计算机学会优秀博士论文奖

作者：张震宇

单位：南京大学

指导老师：姜远

## 论文摘要

半监督学习方法旨在利用大量无标记数据样本提升少量标记数据样本的学习性能。已有方法通常依赖于高质量的数据标记，并集中在批量学习场景，即提前收集数据样本后进行学习。然而，在现实任务中，数据的标记常常面临质量不稳定和不可靠的问题，这给数据标记带来了噪声。甚至，在许多实际应用中，数据以流的形式积聚到达，其质量、学习要素等可能因数据收集环境的不确定性而产生变化。因此，如何有效利用低质量数据标记，为批量和流式的半监督数据设计容忍标记噪声的学习方法，成为当前半监督学习研究的新挑战。

本文针对批量与流式半监督学习中的典型场景，设计了对应的容忍标记带噪数据的学习方法。针对数据批量收集的问题场景，本文通过利用无标记数据及其统计信息，降低了标记噪声对学习算法性能的影响。针对数据流式累积的问题场景，本文从无标记数据中提取辅助信息，在容忍标记噪声的同时有效地复用历史数据进行学习。本文通过理论分析证明了所提算法具备对各类标记噪声的容忍度，并在软件缺陷检测、图片流数据分类和跨语言新闻分类等实际应用中验证了所提方法的有效性和稳定性。

## 专家推荐语

传统机器学习方法的成功，特别是深度学习技术，通常依赖于大量具有准确监督信息的数据，即学习者能够观察到每个样本的准确标记，继而在大量准确标记的数据上进行模型训练。然而，在实际应用场景中，具有准确标记的训练数据往往难以获得。例如，在计算机辅助的医学影像分析中，医院作为学习者具有大量医学影像数据。由于专业医生的数量有限，大量医学影像没有被标注。同时，由于存在疲劳、疏忽等原因，医生的标注中可能存在错误标记，因此收集到的医学图像标记往往存在标记噪声。这类问题在实际应用中广泛存在，对这类问题的研究十分重要并且具有挑战。因此，发展能够应对标记缺失、标记带噪等弱监督数据的人工智能与机器学习技术，加深对这类问题的理论理



解,设计有效的学习方案,是当前人工智能与机器学习发展的关键之一。前人的研究主要集中在半监督学习。半监督学习算法在实际应用中取得了巨大的成功,例如基于标记指派的半监督支持向量机、基于分歧的方法、基于图的方法、基于经验风险最小化的半监督学习方法等等。这些方法通常假设标记数据是准确的,数据是批量收集的,因此当标记存在不准确的情况时,传统半监督学习算法可能会失效。作者针对上述问题,考虑了数据批量收集甚至是流式累积两种情况下标记带噪的问题,研究了对应的标记存在噪声的半监督学习问题。论文研究工作在学术论文发表方面,同样取得了丰硕成果。

## 论文看点

1、容忍单边标记噪声的半监督学习:对于数据存在单边标记噪声的批量半监督学习问题,本文利用准确的单边标记与大量无标记数据,提出了一种新颖的批量半监督学习算法 LIISP (os),降低了单边标记噪声的负面影响。理论分析证明了所提算法具有对单边标记噪声的容忍度。在软件缺陷检测等实际应用场景中,所提算法取得了更加准确稳定的实践性能。

2、容忍双边标记噪声的半监督学习:对于类别先验信息可知、数据存在双边标记噪声的批量半监督学习问题,本文利用类别先验信息,近似重构真实数据分布,提出了一种容忍双边标记噪声的批量半监督学习算法 LIISP (cp)。理论分析证明了所提算法有效地降低了标记噪声的负面影响。在一系列真实应用数据上的实验进一步验证了所提算法的有效性和稳定性。

3、容忍均匀标记噪声的定特征半监督学习:对于标记存在均匀噪声、数据特征空间固定的流式半监督学习问题,本文探索了流数据中的锚点,通过复用历史模型,提出了一种流式半监督学习算法 AdaStreams,提高了算法对标记噪声的容忍度。理论分析证明了所提算法在流数据环境中有效降低了标记噪声的负面影响。在图片流数据分类等任务上的实验验证了提出算法的有效性。

4、容忍均匀标记噪声的变特征半监督学习:对于标记存在均匀噪声、数据特征空间演变的流式半监督学习问题,本文设计了一种针对异质特征空间数据的差异度量,为这类问题提出了对应的半监督学习算法 EDM。理论分析证明了所提算法建立了针对两个异质特征空间的差异度量,同时对均匀标记噪声具有容忍度。在跨语言新闻分类等实际应用中,所提算法取得了更高的性能。

### 容忍单边标记噪声的半监督学习 LIISP (os)

在批式数据学习场景中,学习者事先收集数据并进行批量训练,然后将模型部署到测试环境中。本文研究了数据存在单边标记噪声的批量半监督学习问题:在批量收集的数据中,仅有少量数据具有标记,而大部分数据则缺少标记。同时,这些标记存在着单边噪声,即同一类别的样本标记以一定概率会被错误地标记为另一类别,而反之则不会。这种具有一定结构的标记噪声在现实应用中十分常见。举例来说,在软件缺陷检测任务中,工程师们会对代码文件进行检查以寻找软件系统中的缺陷代码。在这个任务中,未通过检查的代码样本被确知存在缺陷(准确的正类标记样本)。然而,由于软件系统的复杂性,已经通过检查的代码仍可能存在缺陷(具有单边噪声的负类标记样本)。因此,在软件缺陷检测任务中,标记存在单边噪声。与此同时,由于人力资源有限,软件系统中存在着大量代码样本无法全部检查,

这些样本的标记则是缺失的（无标记样本）。

针对这一学习问题，现有的相关研究主要集中在半监督学习和标记带噪数据学习领域。半监督学习旨在利用大量无标记数据提升有标记数据的学习性能。然而，当数据标记不准确时，标记噪声会导致学习的分类器过度拟合到错误标记上。标记带噪数据学习方法首先对标记噪声进行建模，然后尝试通过大量标记带噪数据来恢复潜在的无噪声分布，从而建立容忍标记噪声、在无噪声分布上具有良好泛化能力的分类器。然而，标记带噪数据学习方法通常需要大量的标记带噪数据，并且无法利用大量的无标记数据。因此，现实应用中亟需一种能够同时处理无标记数据和标记带噪数据的学习方法。

目前，在机器学习领域，对于同时存在无标记数据和标记带噪数据的学习问题还缺乏深入的研究。这类学习问题的挑战在于，简单地将半监督学习方法和标记带噪数据学习方法结合起来并不能很好地解决这些问题。针对标记带噪数据学习方法而言，一方面，标记带噪数据的数量可能不足以重新构建潜在的无噪声分布；另一方面，这类学习方法无法从无标记数据中获取标记信息，因而无法利用大量无标记数据来降低标记噪声带来的负面影响。而半监督学习方法则需要准确的数据标记才能够利用无标记数据提升标记数据的学习能力。一旦数据标记存在错误，这些错误标记会严重误导学习算法。举例来说，在基于图的半监督学习算法中，如果数据的标记不准确，那么错误的标记可能会进一步传播到无标记数据上，导致模型收敛至错误的结果。

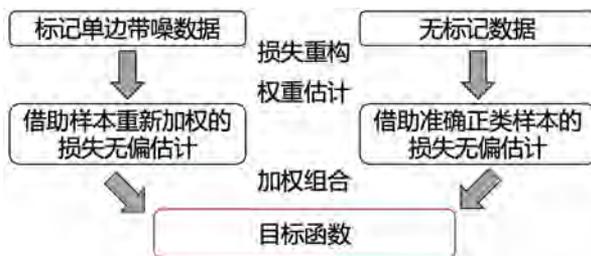


图 1: LIISP (os) 算法的设计方案

如果标记噪声任意出现，那么学习者很难设计有效的学习方法来降低错误标记所带来的负面影响。幸运的是，现实应用场景中的标记噪声往往具有与任务相关的特定结构。例如，在软件缺陷检测任务中，标记噪声通常是单边出现的。本文探索了这类问题中标记噪声的单边性质，通过降低单边标记噪声的负面影响，提出了有效的学习方法 LIISP (os)，在标记单边带噪数据和无标记数据同时存在的 learning 问题中取得了良好的实验效果。如图 1 所示，本文所提算法的核心思想是通过重要性加权的方式，重写标记单边带噪数据的真实损失，从而恢复分类器在潜在无噪声分布数据上的真实风险。受到正类数据与无标记数据学习的启发，本文所提算法从大量无标记数据和准确的单边标记中提取数据边缘分布信息，对标记单边带噪数据进行重新加权，从而设计了容忍单边标记噪声的批量数据半监督学习算法 LIISP (os)。本文从理论上证明了算法有效地利用了无标记数据与标记单边带噪数据，并且在现实应用场景上的实验验证表明，所提方法相较于前沿基准算法取得了显著且稳定的性能提升。

## 容忍双边标记噪声的半监督学习 LIISP (cp)

本文同时关注了类别先验信息已知的情况下，针对数据存在双边标记噪声的批量半监督学习问题展开研究：在学

学习者批量收集的数据中，仅有少量数据带有标记，并且存在双边噪声。对于其余大量数据，学习者只能获知它们的类别先验信息，而其标记则是缺失的。这类问题在现实应用任务中非常重要且普遍存在。举例来说，考虑社区医院的疾病筛查任务，在数据标记的收集过程中，由于设备的不稳定性，可能导致对健康人员和患病人员的误诊，从而产生标记噪声（双边标记噪声）。与此同时，大量社区居民可能未参与疾病筛查（无标记数据），医院只能通过官方统计机构获取相关疾病的发病率（类别先验信息）。

现有的相关研究领域主要包括半监督学习和标记带噪数据学习。然而，正如前文所述，简单地将半监督学习方法和标记带噪数据学习方法结合起来并不能很好地解决这个问题。特别是在标记存在双边噪声的情况下，学习者无法确定哪些样本的标签是准确的，哪些是错误的，因此学习算法很可能会过度拟合到被错误标记的样本上。幸运的是，在现实应用场景中，学习者可以探索与任务相关的先验信息。举例来说，在疾病筛查任务中，学习者可以通过官方统计机构获取相关疾病的发病率，即类别先验信息。通过结合类别先验信息与无标记数据，学习者可以设计算法来降低双边标记噪声带来的负面影响。



图 2: LIISP (cp) 算法的设计方案

本文提出了一种新颖的容忍双边标记噪声的批量半监督学习方法，利用可知的类别先验信息减轻了双边标记噪声造成的负面影响，并进一步提出了有效的学习算法，在同时存在双边标记噪声和无标记数据的学习问题中取得了良好的表现。如图 2 所示，提出算法的主要思想是通过重要性加权形式重写标记双边带噪数据的损失，以恢复分类器在潜在无噪声数据分布上的真实风险。受到已知类别先验的无标记数据学习的启发，本文利用已知的类别先验信息从大量无标记数据中提取边际分布，对标记双边带噪数据进行重新加权，从而在已知类别先验信息的情况下设计了容忍双边标记噪声的批量半监督算法 LIISP (cp)。本文从理论上证明了算法有效地利用了无标记数据与标记双边带噪数据，同时大量现实应用场景上的实验验证了提出的方法相对于基准算法取得了显著的性能提升。

## 容忍均匀标记噪声的定特征半监督学习 AdaStreams

本文进一步考虑了数据存在均匀标记噪声的定特征流式半监督学习问题：数据以流的形式不断累积，少量数据带有标记，而剩余的大量数据则没有标记。同时，由于数据标记的采集过程可能引入误差，观察到的标记往往带有类别相关的均匀噪声。在流式数据的学习场景中，数据不断累积，学习者需要在线更新模型并进行预测。这类学习场景非常重要，并且广泛出现在各种实际应用场景中。如图 3 所示，在环境监测任务或人体姿态检测任务中，传感器不断在线收集数据（无标记流数据）。由于数据标记的采集需要耗费人力物力，且标记采集环境存在不稳定性，因此有标记数据通常只占数据流的一部分，并且存在标记噪声（均匀标记噪声）。

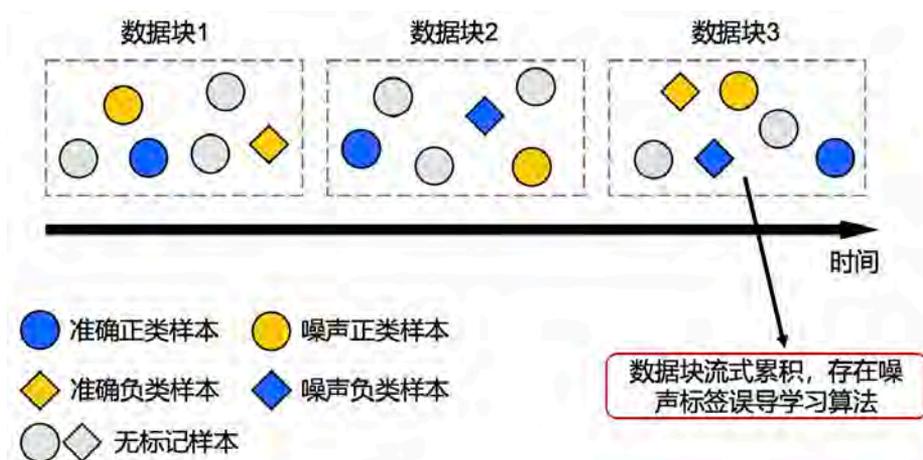


图 3: 针对定特征标记带噪半监督数据流的学习问题

关于这一学习问题，现有的相关方法通常涉及标记带噪数据的批量学习或依赖数据准确标记的流式数据学习。为避免学习算法过拟合到错误标记上，标记带噪数据学习通常需要预先获得噪声转换矩阵后进行训练，即学习者需要已知一类数据的标记被翻转为另一类的概率。尽管噪声转换矩阵可以通过批量数据进行估计，但准确估计噪声转移矩阵需要预先收集大量数据，这在数据流的学习场景中通常难以实现。当噪声转移矩阵未知且数据以流的形式不断累积时，传统的噪声转换矩阵估计技术往往难以直接应用，这给恢复潜在的无噪声数据分布的任务带来了挑战。流式数据学习方法通常依赖于样本的准确标记。这类方法或者会增量地维护一个模型，或者维护多个基分类器进行集成。如果学习者直接在标记带噪数据上增量更新模型，或者根据噪声标记建立基分类器并进行集成，那么数据标记的噪声将明显地降低学习器的性能。此外，一些研究考虑存在离群点的数据流学习问题，这类方法通常专注于清理离群点，并且无法探索数量远多于有标记数据的无标记数据。

目前，机器学习领域尚缺乏对存在均匀标记噪声的半监督数据流学习问题的深入研究。针对流数据中存在的标记带噪和标记缺失问题，本文工作旨在设计有效的学习方法，将标记带噪数据和无标记数据分布与潜在的无噪声数据分布进行对齐，以避免学习算法过度拟合到错误标记上。本文提出的方法通过估计噪声转换矩阵来消除均匀标记噪声的影响。为了估计噪声转移矩阵，以往的研究通常需要预先收集大量标记带噪数据，并通过批量学习的方式进行估计。例如，基于锚点假设的学习方法，或者基于锚点集合条件的学习算法。这些方法虽然能够估计噪声转移矩阵或区分标记准确数据与标记带噪数据，但通常需要预先收集大量的标记带噪数据才能准确估计噪声，因此直接应用于处理数据流学习问题的效果往往有限。

本文旨在设计有效的学习方法，从数量有限的标记带噪数据和大量无标记数据构成的数据流中估计噪声转换矩阵，以降低标记噪声的负面影响，并学习在潜在无噪声数据分布上具有泛化能力的分类器。这个问题非常具有挑战性，而直接采用批量学习的方法进行噪声转移矩阵估计并不能很好地适应数据流的学习场景。一方面，当数据以高吞吐量流数据的形式到达时，由于存储开销的限制，高通量数据无法完全存储在内存中，因此，批量学习方法只能探索部分数据，并且无法在线更新模型并实时预测。另一方面，这些学习方法无法从无标记数据中获得标记信息，因此无法利用无标记数据来辅助估计噪声转移矩阵。

本文提出了一种容忍均匀标记噪声的定特征半监督学习算法，即 AdaStreams。该算法利用多个基学习器和大量无标记数据来辅助估计噪声转移矩阵，从而恢复潜在的无噪声数据分布。本文引入并复用多个基分类器，从高吞吐量的数据流中提取有效信息，并自适应地更新学习模型以使其能够做出实时预测。所提方法的主要思想是利用多个基分类器辅助识别数据流中的锚点并自适应地估计噪声转移矩阵，进而将标记缺失和标记带噪的数据与潜在无噪声数据分布对齐，同时复用基分类器来辅助对数据流进行在线学习。本文从期望遗憾界的角度在理论上分析了提出的算法的有效性。对合成数据的分析验证了所提在线噪声转移矩阵估计方法的准确性。与多个前沿基准算法的对比以及在真实应用数据上的广泛实验验证了提出方法的优越性。

### 容忍均匀标记噪声的变特征半监督学习 EDM

本文进一步研究了变特征流式数据的半监督学习方法。具体而言，数据以数据流的形式不断累积，数据的标记存在噪声甚至缺失；与此同时，数据的特征空间随着时间的推移而演变，旧的特征会消失，新的特征会出现。这类学习任务在实际应用中广泛存在并且十分重要。例如，在环境监测系统中，部署传感器以收集数据是一种常见实践。每个传感器对应着数据特征的一个维度，所有传感器不断发送对应的信号，形成了无标记数据流。由于每个传感器的使用寿命有限，学习者需要使用新的传感器更换损坏了的旧传感器。因此，对应于旧传感器的特征（旧特征）消失，而对应于新传感器的特征（新特征）出现。类似的应用场景也出现在基于商品评分的可信赖用户挖掘问题中。由于隐私问题，学习者只能访问用户的评分记录，其中用户对每个商品的评分可以被视为该用户特征表示的一个维度。随着时间的推移，一些旧商品（旧特征）下架，而一些新的商品（新特征）上架，因此每个新用户的特征空间随着时间的推移而演变。



图 3：针对定特征标记带噪半监督数据流的学习问题

随着数据的特征空间发生演变，学习模型需具备对新特征空间下的数据进行预测的能力。现有的数据流学习方法主要关注固定特征空间内的学习问题，对于演变特征空间的数据流学习则缺乏深入的研究。为了利用来自旧特征空间的历史数据，弥合新旧特征空间之间的差异则至关重要。如果特征空间发生任意变化，学习者几乎很难建立新旧特征空间数据之间的关系，从而难以设计出针对这类学习问题的有效学习方法。幸运的是，在一些开创性工作中，他们观察到特征空间一般不会任意变化：在许多应用场景中，数据通常经历一个演变阶段，在此阶段旧特征和新特征同时存在。以环境检测系统为例，如图 4 所示，由于学习者通常已知传感器的电池寿命，因此可以在环境监测任务中提前布置一组新的传感器，以防止旧传感器彻底损坏。因此，开创性工作中提出通过基于演变阶段的数据学习映射矩阵，建立旧

特征空间和新特征空间之间的映射关系。通过将新特征空间的数据映射到旧特征空间上，学习者可以利用旧特征空间上的历史数据或分类器来辅助在新特征空间中学习分类器。

除了数据特征空间可能发生演变，数据的标记可能存在标记噪声甚至缺失。例如，在上述环境系统监测任务中，由于环境的不确定性，数据的标记可能会存在噪声，导致标记不再准确。与此同时，当特征空间发生演变后，学习者对新特征空间上的数据往往缺乏认知，因此这些数据可能缺少标记。学习者希望能够获得在新特征空间上具有良好泛化能力的分类器，实现模型的实时更新，并做出准确的预测。因此，在特征空间演变且标记带噪的数据流上，如何刻画分类器在新特征空间上的泛化误差是一个亟待研究的问题。

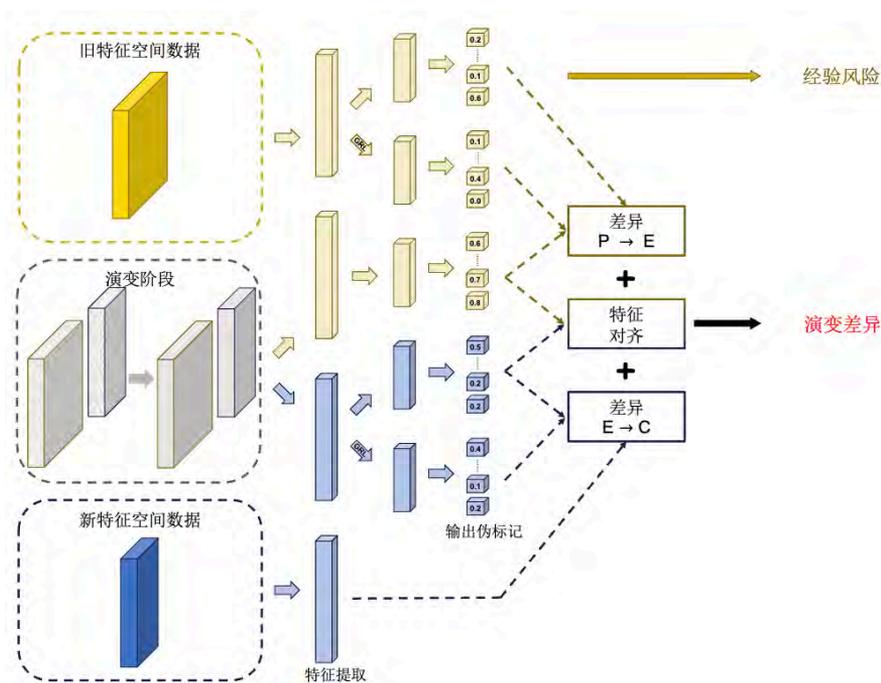


图 5: EDM 算法的设计方案

对于特征空间发生演变的流式带噪数据学习问题，目前尚缺乏具有泛化性能保障的学习算法。本文将此类实际应用中的学习问题形式化为存在类别相关标记噪声的变特征半监督数据流学习，其中数据标记存在类别相关的均匀标记噪声，数据的特征空间同时发生演变。对于这类问题，设计具有理论保证的有效算法具有挑战性，尤其是对分类器泛化能力的刻画。为了应对这一挑战，本文工作利用差异最小化技术建立对两个不同特征空间的差异度量，进而设计具有理论保证的学习算法。本文工作提出了一种新的差异度量，即演变差异，通过利用演变阶段的对齐数据作为桥梁，设计了对标记带噪变特征数据流的学习算法，如图 5 所示。基于所提出的演变差异，本文进一步推导了泛化误差分析，设计了容忍均匀标记噪声的变特征半监督数据流学习算法 EDM。对合成数据的分析验证了所提演变差异准确刻画了特征空间变化的标记带噪数据块之间的泛化差异。与多个前沿基准算法的对比和实际应用上的实验验证了提出方法的优越性和稳健性。



## 总结与展望

本文通过探索无标记数据，重构学习器在无噪声数据上的损失，以降低标记缺失、标记噪声的负面影响。对于批量数据学习场景，本文所提算法利用了单边准确标记或者类别先验信息，分别降低了单边标记噪声和任意标记噪声的影响；对于流式数据学习场景，本文通过探索无标记数据，在定特征数据流中找出锚点并估计出标记噪声，在变特征数据流中构建起新旧特征空间的差异度量，进而获得有效的学习器。针对文中所提四类典型的学习场景，本文给出的理论分析了学习器的泛化误差和期望遗憾界，较好地支撑了所提方法，验证了无标记数据和标记带噪数据的有效性。本文具体工作如下：

1) 对于数据存在单边标记噪声的批量半监督学习问题，本文利用准确的单边标记与大量无标记数据重构了无噪声数据分布信息，提出了 LIISP(os) 算法并给出了理论分析。

2) 对于类别先验信息可知、数据存在任意标记噪声的批量半监督学习问题，本文利用类别先验信息和大量无标记样本重构潜在分布，提出了 LIISP(cp) 算法并给出了理论分析。

3) 对于标记存在均匀噪声、数据特征空间固定的流式半监督学习问题，本文利用了数据流中的锚点，提出了基于模型复用的半监督学习方法 AdaStreams，并给出了理论分析。

4) 对于标记存在均匀噪声、数据特征空间变化的流式半监督学习问题，本文设计了能够衡量不同特征空间数据差异的度量准则，提出了 EDM 算法并给出了理论分析。

目前，机器学习领域对标记带噪的半监督学习的研究仍处于初步阶段，尤其是在开放环境中，学习要素往往不断变化，因此如何应对弱监督数据并设计相应的学习算法并给出理论分析，是一个亟待研究的重要课题。在未来的研究中，需要进一步设计有效的学习算法来处理现实应用中更加复杂的弱监督数据流学习问题。除此以外，对流式累积数据的弱监督学习要求模型能够在计算、存储、反馈等资源受限条件下能够进行带噪标记的识别处理以及对模型及时有效的更新，这需要进一步提升学习算法的学习能力并降低其计算复杂度。解决上述问题可以极大推动开放环境下弱监督学习的发展。

## 作者简介：



第一作者：张震宇，日本理化学研究所博士后，主要研究方向为机器学习与数据挖掘。

E-mail: zhen-yu.zhang@riken.jp



通信作者：姜远，南京大学人工智能学院教授，博士生导师，主要研究方向为机器学习与数据挖掘。

E-mail: jiangyuan@nju.edu.cn

## 学会动态

### 我省在海峡两岸暨港澳地区大学生计算机创新作品赛总决赛中获佳绩

在2024年（第十九届）海峡两岸暨港澳地区大学生计算机创新作品赛总决赛中，江苏省计算机学会推荐的作品全部获奖，创历史最佳成绩。其中本科组4个作品参加了在澳门理工大学举行的本科组决赛，在来自全国102支总决赛队伍中斩获一等奖1项、二等奖3项。高职组2个作品参加了在乐山职业技术学院举行的高职组决赛，在81支总决赛队伍中斩获一等奖1项、二等奖1项。

海峡两岸暨港澳地区大学生计算机创新作品赛是由全国高等学校计算机教育研究会和海峡两岸暨港澳地区大学生计算机创新作品赛组委会共同主办的赛事，这项赛事旨在激发青年大学生对科创的兴趣和热情，敢于创新、善于创新，为国家建设科技强国作出贡献。而江苏省计算机学会正是致力于全省计算机领域人才的培养和科技创新的发展，每年都会举办或参与全国、全省各类竞赛活动，并且也屡获佳绩。

祝贺江苏省计算机学会代表队在今年赛事中获得优异成绩！再接再厉，再创辉煌！





# 在“群体协同感知”科研路上的坚持与探索

——2023年江苏省计算机学会优秀科技工作者吴巍炜教授

## 个人简介

吴巍炜 东南大学计算机科学与工程学院教授、博导、东南大学教育部计算机科学拔尖学生培养基地负责人，入选“国家级青年人才计划”、江苏省杰出青年基金获得者，长期从事物联网智能感知、群智感知相关领域的研究。近年来在 JSAC、TMC、TSC、INFOCOM、RTSS、IJCAI、AAAI 等国际著名学术期刊和会议上发表学术论文 100 余篇，其中，CCF A 类 +IEEE/ACM Trans. 期刊 / 会议论文 40 余篇。主持国家重点研发项目课题、国家自然科学基金、省部级和企业产学研项目十余项。研究成果在中国兵器北方信息控制研究院集团、中兴通讯、西安地铁等企业应用。牵头成立东南大学-新纪元无人系统与人工智能联合研发中心，担任 IEEE Trans. on Consumer Electronics 的特邀编辑、国际学术会议 NCAA 2021 程序委员会共同主席等。曾获得 ACM 分会新星奖（江苏省共 2 人）、微软亚洲研究院“微软学者奖”等。



### 科研坚守，探索智能感知新境界

吴巍炜在“物联网智能感知”、“群智计算”、“无人系统”领域取得了显著的学术成就，入选“国家高层次青年人才”。近年来围绕物联网的群体协同感知，从“可信激励机制”、“移动感知群体协同”以及“数据汇聚智能融合”三个关键技术方向进行了深入研究，发表了 100 余篇高质量的学术论文，其中包括 40 篇 CCF A 类及 IEEE/ACM Trans. 期刊 /

会议论文。研究成果在中国兵器北方信息控制研究院集团、中兴通讯、西安地铁、江苏南钢等企业应用，获得了包括“ACM 新星奖”、微软亚洲研究院“微软学者奖”等多项荣誉。

**研以致用，助力产业智能化转型**

将科研成果应用于智慧城市建设和民族企业产业智能化，取得了显著的应用成效。在智慧城市建设中，其主持的国家重点研发计划课题“多源数据汇聚与智能协同处理”在西安地铁的应用，实现了异常事件检测准确率达到 98.0%，应急响应延迟时间显著减少。在江苏省地质测绘院的应用中，通过协同感知融合技术，实现了城市实景三维构建，总体作业时间减少 35%，执飞成本减少 25%。在产业智能化方面，吴巍炜利用群体协同技术在中兴通讯应用，设计了深度强化学习模型，显著提高了网络重路由计算效率。在北方信息控制研究院集团的应用中，通过数据优选与多径融合方法，实现了北斗路网更新准确率达到 92.3%，有效提高了路网更新时效性。

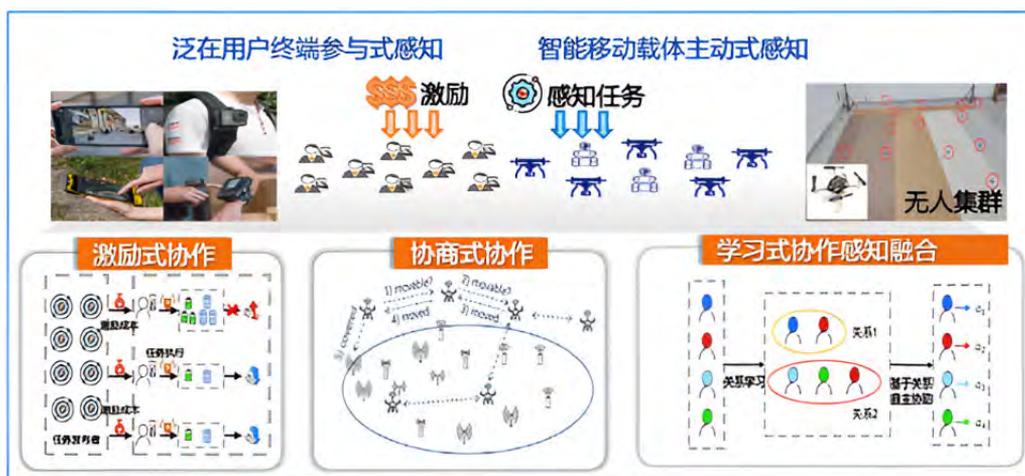


图 1. 物联网群体协同感知

**育人为先，培养创新思维与能力**



图 2. 课题组师生合影



吴巍炜坚持在人才培养中授人以渔，强调培养学生的创新思维与能力。他认为，学生的思维方式、努力和能力是决定其未来成就的关键要素。吴教授积极指导学生进行科研工作，合作指导的博士生在学术界取得了优异成绩，获得了包括江苏省优秀博士论文在内的多项奖励。他的学术著作和论文被国内外高校和研究机构引用，在人才培养和学术研究方面产生了良好影响。此外，他还担任了 IEEE Trans. on Consumer Electronics 的特邀编辑，以及多个国际学术会议的程序委员会委员，为物联网、人工智能领域的学术发展、人才培养、产研应用持续做出贡献。

## 学会动态

### 异构智算 稳定高效 | 联想算力基础设施创新技术品鉴会走进金陵

7月19日，由江苏省计算机学会和联想共同举办的创新技术品鉴会走进南京为与会嘉宾分享了AI时代给企业带来的机遇、挑战，并重点分享了联想高性能计算与智算解决方案赋能各类高校、制造业实现AI时代的智能化转型。同时展示了搭载英特尔®至强®6能效核处理器的联想问天WR5220G5，联想AI服务器WA5480 G3，液冷服务器SD650 V3，以及新一代服务器、存储、数据网络、边缘再到基础设施软件的AI算力基础设施新品。



# 在“智能审计”的科研道路上努力前行

——2023年江苏省青年科技奖获得者伍之昂教授

## 个人简介

伍之昂，博士，现任南京审计大学计算机学院教授，江苏省审计信息工程与技术协同创新中心主任。2009年在东南大学计算机科学与工程学院获得博士学位。研究领域为数据挖掘、机器学习、智能审计。主持国家自然科学基金项目3项、国家支撑计划子课题1项、江苏省重点研发计划产业前瞻与关键核心技术项目2项。在SIGKDD、Information Systems Research、INFORMS Journal on Computing、及IEEE/ACM Transactions等顶级学术会议和期刊上发表论文50余篇，1篇论文入选ESI高被引论文。排名第3获得教育部科技进步二等奖。担任ACM Nanjing Chapter副主席、中国计算机学会网络与数据通信专委会委员、中国自动化学会经济与管理专业委员会“数据挖掘与大数据SIG”委员等学术职务。





## 知行合一，研究成果付诸实际应用

在研究成果转化方面，伍之昂特别注重科研与实际应用的结合。他领导的团队围绕国家审计业务中的多个关键场景，如预算执行审计、医院审计和企业审计，研发了一系列业务导向的智能审计系统。这些系统已在江苏、广东、浙江和江西等省的 20 多家审计局成功部署，显著提高了审计效率和疑点发现的精确度，为区域经济健康发展和人工智能在审计领域的应用作出了重要贡献。

## 立德树人，精心培育优秀人才

伍之昂以严谨求实的科学精神和社会责任感培养学生，自 2012 年起指导了 30 多名博士和硕士研究生，并负责教授《Algorithms: Design & Analysis》等研究生课程。他还为非洲审计机构的留学生开设了《Intelligent Auditing》课程，并成功指导本科生团队在第 13 届“挑战杯”中国大学生创业计划国赛中获得铜奖。

## 学会动态

### 江苏省首届人工智能未来应用大赛赛前研讨会在宁召开

7 月 7 日至 8 日，江苏联合职业技术学院网络与软件专业建设指导委员会、江苏联合职业技术学院动漫与数媒专业建设指导委员会和江苏省计算机学会主办的第一届人工智能未来应用大赛赛前研讨会在南京财经高等职业技术学校顺利召开。网络与软件专指委主任委员、校长姚峰，南京大学教授、江苏省计算机学会秘书长金莹，南京政协委员、江苏凤凰智慧教育研究院总经理孙紫阳，动漫与数媒专指委副秘书长、南京财经分院信息艺术系主任张镭镭出席会议。专指委各成员学校约 100 余名骨干教师代表参加会议。



# 人形机器人研究进展与发展挑战

人形机器人，也被称为仿人机器人，是一类具有人类外形、模仿人类功能和智能的机器人。与其他机器人相比，它的区别在于拥有人类外形，包括双足、双臂和头部。这种外形使得人形机器人在人类的工作和生活环境中具有更强的通用性和适应性。它能够适应人类环境的不连续性，像人类一样使用自己创造的工具，从而能够实现人与机器人的无缝衔接和替换。此外，人形机器人的人类外形也更容易被人们接受，在人机交互过程中起到重要的作用。

## 一、研究背景与意义

人形机器人领域是机器人领域中一个重要的技术挑战点，甚至被称为国与国之间技术竞争的制高点。首先，它涉及到机器人的各个方面的关键技术以及这些技术的集成和融合。从系统角度看，人形机器人是一个高自由度的复杂系统。其制造、设计、建模和规划都涉及到许多问题，如驱动和传动的实现、感知与决策的融合，以及软硬件的有效融合等。

从运动的角度看，人形机器人是以脚为支撑点与地面进行间断性接触的。它的脚与地面接触的空间很小，时间也很短，这导致了稳定控制的时空域非常有限。同时，人形机器人面临建模的不准确性、地面的不平整性以及作业过程中各种位置干扰等问题，如图 1 所示，由于其本质上不稳定，从而在应用中面临着许多困难。上世纪 60 年代到本世纪 2015 年，学术界主要关注的问题都是围绕如何设计制造具有稳定运动能力的人形机器人展开研究。



图 1 人形机器人的技术难点



随着这些关键技术的逐步解决，我们目前的焦点已经扩展至如何将人形机器人应用于多样化的场景中。这与其他机器人技术的发展趋势相似，机器人需要应对各种不同的环境，并能够适应各种特定需求，另外，还需要具备通用性，能够在这种形态下执行各种任务。

总的来说，人形机器人给机器人技术的各个方面都带来了挑战，并推动了相关零部件和技术的发展。从电机、传动到液压器件，它对机器人领域和产业的发展起到了积极的推动和支持作用。

## 二、研究历史与进程

下面简要介绍一下整个人形机器人的发展历程，其发展历史如图 2 所示。第一台人形机器人诞生于 1969 年，由日本早稻田大学研制，它采用液压驱动，驱动部件庞大且重量较大，并且都放置在机器人的外部，采用的是静态行走方式，每步行走距离为 15 厘米，需要约 40 秒的时间。随后，许多研究机构开始进行人形机器人的研究。在 80 年代，出现了两个对当前发展起到了重要基础作用的团队。其中一家是本田公司，于 1986 年开始研究人形机器人，注重系统设计和动态运动方面的研究。2000 年，本田公司的研究取得了重要突破，推出了 ASIMO 人形机器人。ASIMO 能够以每小时 1.6 公里的速度行走，其研发过程中采用了直流电机和谐波减速器等关键技术，这对相关产业的发展起到了重要推动作用。另一个重要的团队是来自麻省理工学院（MIT）的 Marc Raibert 在 1986 年提出的动态行走理论。这一理论的提出为后来波士顿动力公司的成立以及其研发的四足和双足机器人打下了坚实的基础。这一阶段可以称为基础理论与系统形成的阶段。



图 2 人形机器人的研究历史

2000 年之后，人形机器人的研究取得了更多的进展。例如，ASIMO 等研究机构不断优化和改进机器人的行走速度，并引入了人机运动映射技术，使机器人能够执行更复杂的动作。同时，研究人员进一步结合智能技术，使机器人具备与人类进行交互的能力，例如为人端茶递物。自 2009 年起，波士顿动力公司开始致力于满足美军的需求，并在福岛核电站事故后开始研究高动态运动的人形机器人，以便执行特种任务。这一阶段研究领域形成了不同的技术流派，包括多种不同的平衡控制技术以及不同的驱动技术。这些技术的发展使得人形机器人的技术变得多样化且具有广泛的应用前景。在 2022 年特斯拉所发布的人形机器人，马斯克关于人形机器人方面的一系列的规划、布局，引起了世界的广泛

关注。

从上个世纪 90 年代开始，国防科技大学、北京理工大学以及其他高校、研究机构和企业也都积极投身于人形机器人领域的研究。浙江大学自 2006 年起着手研究人形机器人，并以踢足球的小型仿人机器人作为起点，积累相关技术，并成功将智能感知、定位、导航规划等能力融入其中。

2008 年至 2011 年期间，我们在国家“863”重点课题的支持下成功研制了一款能够与人或其他机器人进行乒乓球对打的仿人机器人，如图 3 所示。这款机器人具有成人大小，身高 1.65 米，重量 56 公斤。该项目的突破之处在于设计了轻量化的机械结构，并实现了 30 个自由度的高实时控制。针对乒乓球这种高速运动的飞行物体，浙大团队解决了在线准确识别定位和轨迹预测的问题，同时还实现了实时运动规划和全身平衡控制，以应对手臂大加速度带来的不稳定性。该成果在发布后引起了国内外广泛关注，包括国外知名媒体对其进行了报道和拍摄。此外，该成果还被收录进美国基金委向奥巴马政府提交的工作报告中，进一步彰显了其重要性和影响力。



图 3 浙江大学人形机器人研究

但是机器人打球的过程中，主要依靠下肢来进行平衡控制。由于行走速度仅达到 1.2 公里 / 小时，无法跟上快速打球的节奏。因此，从 2012 年开始，我们的研究重点转向如何提高机器人的行走速度，并使其能够在室内外不平整的地面以及各种未知扰动下行走。同时，还着重考虑了上肢运动的结合，为机器人的发展奠定了基础。

过去的 10 年时间里，浙大团队进行了大量的研究工作，包括驱动系统、传动系统、机构设计、控制方法以及运动学习和生成等方面。目前，机器人已经实现了 6.6 公里 / 小时的行走速度，可以在室内外不平整的地面上自主适应和适应大的外力扰动，能够上下 15 度的斜坡，并可以跳下 20 厘米高的台阶。

### 三、关键技术与进展

在人形机器人的技术发展中，我们按照系统集成、运动和未来作业需求的角度进行了划分，分别称为体能、技能和智能。在体能方面，我们探索了不同的技术路线，如图 4 所示。一种方法是采用直流电机 + 谐波减速器 + 弹性单元的组合，以实现高效的弹跳能力。然而，这种弹性元件的变化也带来了许多挑战。因此，在 2015 年之后，浙大团队开始采用四足机器人中常用的大间隙半径电机，通过力位的伺服控制来驱动机器人。



图 4 关节运动方式

在人形机器人的技能方面,我们重点关注它的稳定平衡运动能力,并进行了相关的研究工作。目前,主要有两种方法一种是传统的基于模型的方法,通过建立机器人的运动学和动力学模型,进行摆动腿的轨迹规划,进而开展平衡控制。除了传统的方法,另一种是采用学习的方法,如模仿学习和生成学习,来生成机器人的运动和控制策略。

稳定平衡控制是最核心的问题,在整个发展过程中涌现出多种方法,如图 5 所示,并都发挥了重要作用。其中,ASIMO 采用了 ZMP 判据的控制方法,密歇根大学等采用混杂零动态规划方法实现机器人状态在稳定平面上的控制, Marc Raibert 等人提出了虚拟模型的解耦控制方法。这些方法各有优缺点,前两者依赖于精确的动力学模型。

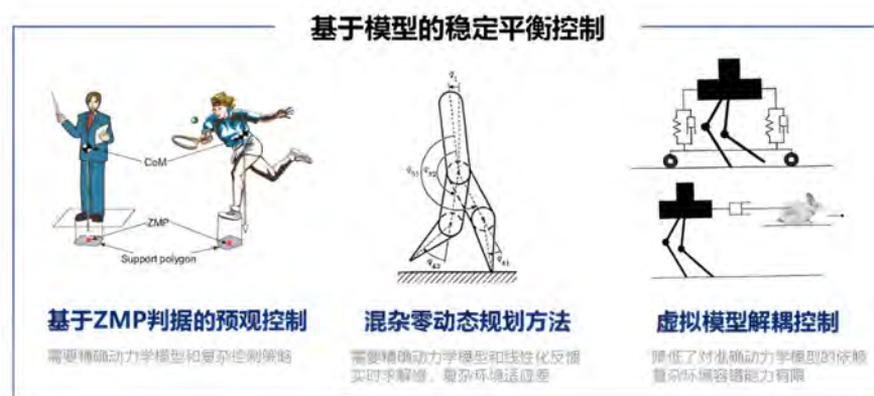


图 5 基于模型的稳定平衡控制

通过研究,我们发现虚拟模型控制方法在降低对精确模型依赖性方面取得了进展。然而,在复杂环境下,虚拟模型控制的容错性存在限制。因此,我们进行了相关研究,并借鉴人类保持平衡时的行为策略。与传统方法不同,人类在受到扰动时采用踮脚的方式来保持稳定,从而缩小了稳定域的范围。我们在理论上证明,只需保持在稳定域边界上即可实现稳定性,而不需要较大的稳定域和支撑域。进一步,基于虚拟模型的思想,我们提出了一种通过足部倾斜主动控制来增加稳定域的方法,如图 6 所示。在人形机器人上成功实现了该方法,并发表了高水平的论文。然而,人形机器人在多个虚拟模型的结合和协调方面存在一定限制,以及在不同场景下设计不同虚拟模型的通用性的挑战。

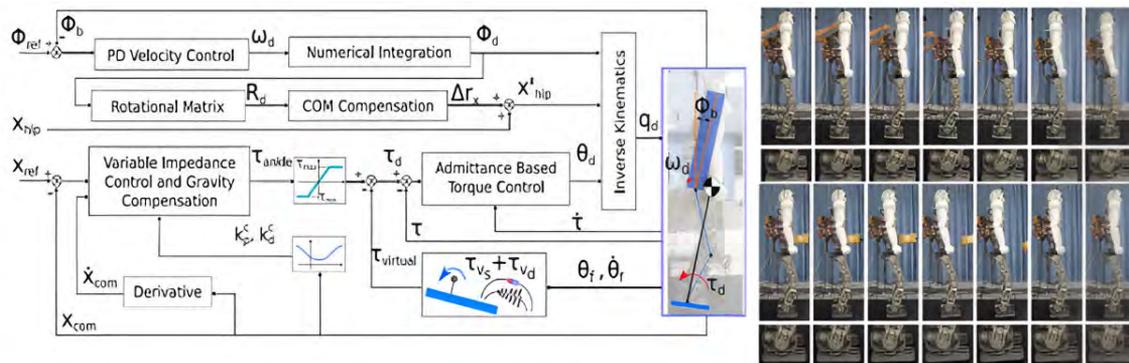


图 6 虚拟模型下主动欠驱动平衡控制

所以，采用模型预测控制和全身控制的方法可以提高人形机器人的动作稳定性和协调性，如图 7 所示。这种方法基于轨迹规划和刚体动力学建模，通过模型预测控制计算地面反作用力和力矩，并结合全身控制生成关节力矩。通过该集成控制策略，我们能够更准确地预测和调整机器人的运动，使其能够在复杂环境中实现稳定的运动和协调的动作。在仿真环境中已经实现了一些复杂动作，如跳跃和后空翻，但仍需要进一步提升关节力矩以实现更高水平的执行能力。我们将继续努力改进和优化控制方法，以进一步提升人形机器人的运动能力和执行复杂动作的能力。

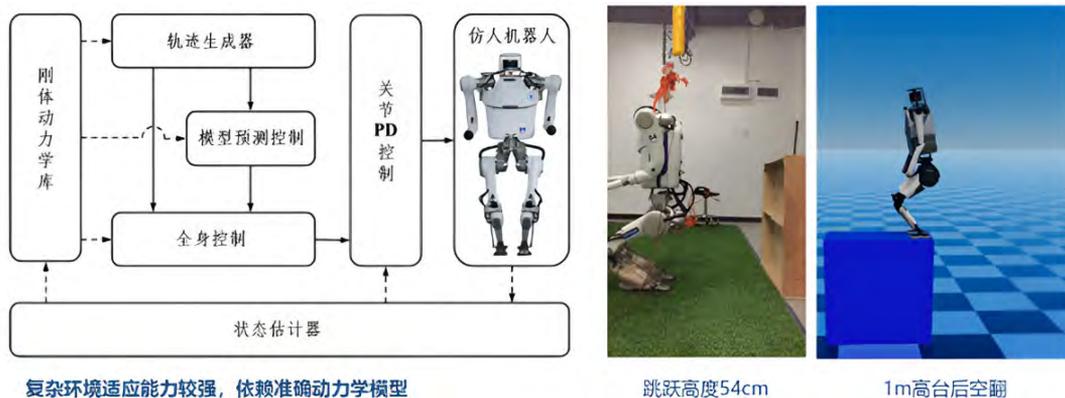


图 7 全身协调模型预测控制

此外我们有两项工作对研究机器人控制方法起到了关键作用。首先，我们致力于在线辨识动力学参数，以确保准确建立模型，适应机器人在运动过程中构型和动力学参数发生变化等复杂情况。引入随机变量后验概率估计的方法后，通过定义随机变量的向量空间以及相关的数据结构和投影运算，可以实现一种级连式的估计方法。对于每个关节模块，可以建立运动模型和等效辨识模型，并进行迭代运行。在单腿和双腿的情况下，包括腿部质量变化和外部负载变化等扰动，该方法的具有较好的有效性。

然而，仅仅依靠模型预测控制可能无法有效应对大扰动，因此，在 2009 年浙大团队提出了一种方法，如图 8 所示，通过建立速度与着地点之间的关系，将扰动转化为速度变化，并根据这些速度确定适当的着地点。将这一方法与之前的控制方法相结合，可以实现了在面对大幅扰动时的稳定平衡控制。

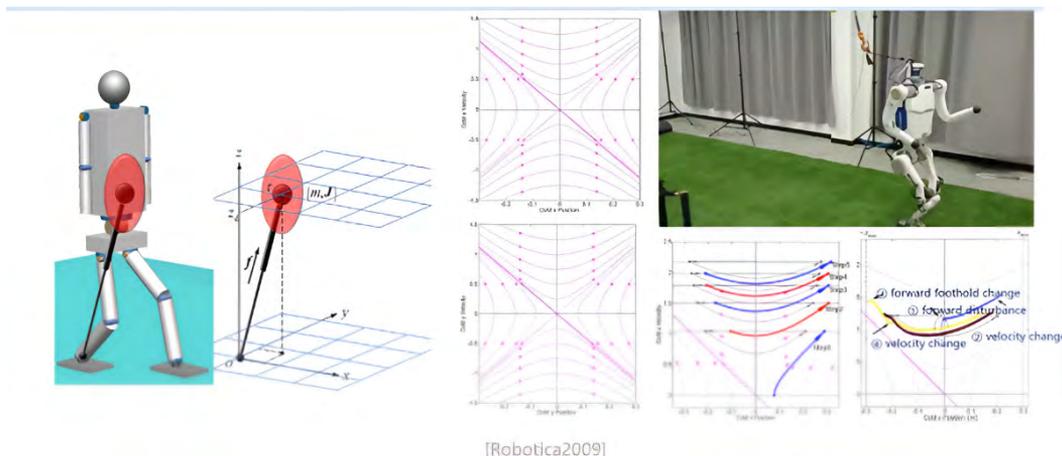


图 8 基于速度感知的动态落脚点规划

近年来，深度学习和强化学习的发展为人形机器人的平衡控制提供了新的方法，如图 9 所示。在国内外的研究中，人们致力于利用强化学习来实现人形机器人的平衡控制。例如，在四足机器人领域，苏黎世理工学院等机构开展了大量研究工作。在人形机器人领域，美国的 Oregon 州立大学等研究机构也进行了各种研究，包括提高机器人在不同地面上运动的鲁棒性，如转弯、上下台阶以及走梅花桩等动作。此外，研究人员还关注如何根据感知信息提升运动的准确性，并使机器人能够适应复杂的环境变化。这些研究都为入形机器人的平衡控制领域做出了重要贡献。



图 9 采用学习的稳定平衡控制

浙大团队之前研究了四足机器人步态学习，采用强化学习方法进行步态生成，并提出了一种步态生成网络，以整合各种步态，可根据机器人当前的状态选择适宜的步态。这一网络使机器人能够在面对未知环境时做出合适的步态选择，并通过综合多种步态以适应环境变化，从而在新环境中展示出灵活的行动能力。该研究为机器人应对各种挑战并在新环境中表现出优异的适应性提供了有益的探索和成果。

然而，在应用纯强化学习方法于人形机器人时，由于人形机器人具有相对较小的稳定时空域，这导致获得稳定案例和进行迭代学习的速度较慢。因此，我们提出了将模型方法与学习方法相结合的策略，如图 10 所示。通过采用启发式模型来规划摆动腿的运动，该模型对支撑腿的参数高度依赖，而对于参数依赖较强的情况，可以采用学习方法。通

过串并联混合的方法，加速了学习过程，并提高了对质量、扰动和噪声等因素的鲁棒性。然而，人形机器人仍然容易受到地面不平整等因素的影响。为此，需要引入了隐藏空间的学习，采用教师-学生模型，通过从一些优秀模型中学习隐藏空间的映射关系，可以进一步提升机器人稳定性。目前，浙大人形机器人已成功实现了在 15-18 厘米地形起伏的不同环境下稳定行走，并达到了 3 公里 / 小时的速度。

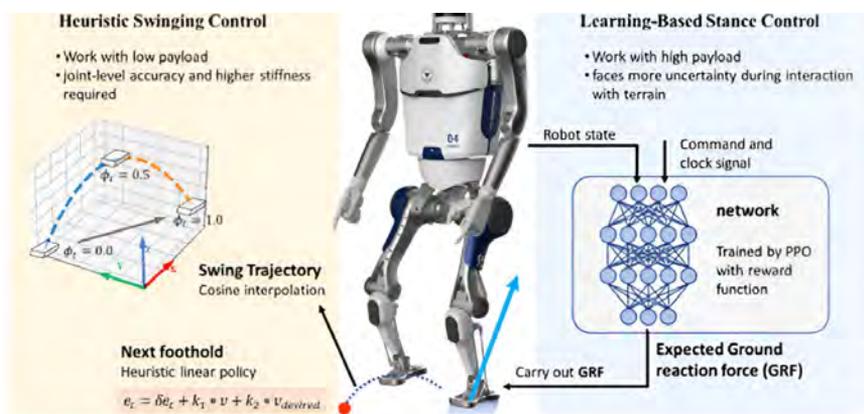


图 10 模型 - 学习混合的双足步行运动生成

此外，在运动学习和强化学习生成方面，浙大团队也做出了一定的贡献。通过图神经网络构建学习模型，并结合最优化搜索，在编码后的隐藏空间中寻找最佳匹配，之后进行最优化搜索，以实现大型动作序列的快速学习，如图 11 所示。结果显示，学习时间提升了 10-100 倍，同时动作相似性评估也有了显著提升。



图 11 隐空间优化的映射学习

此外，我们扩展了研究范围，将其应用于不同的结构中。对于包括动画角色在内的多样化动作，可以解决其在拓扑结构上的差异性。在与此相关的数字虚拟人研究中验证，能够成功地迁移至未曾接触过的拓扑结构，并在已有结构上实现更优秀的接触和穿模。进一步地，我们开始将动力学约束融入研究中，并在仿真环境中成功地将之前学习到的知识应用于新的结构中。

最后，我们还开展了智能移动和智能操作方面的研究。自 2003 年以来，浙大一直在这个领域进行研究，并在各

种机器人应用中进行了验证，包括工业机器人、无人驾驶车辆以及特殊环境。结合腿足机器人，团队还专注于以下方面的进一步研究：首先如何构建大范围全局一致的稠密高程地图，如图 12 所示；其次，为解决足式运动引起的震荡问题、足式运动所带来的计算资源限制，以及在特殊环境中纹理稀缺或传感器失效的情况下如何选择适合的传感器和传感器融合问题；以及如何规划落脚点。

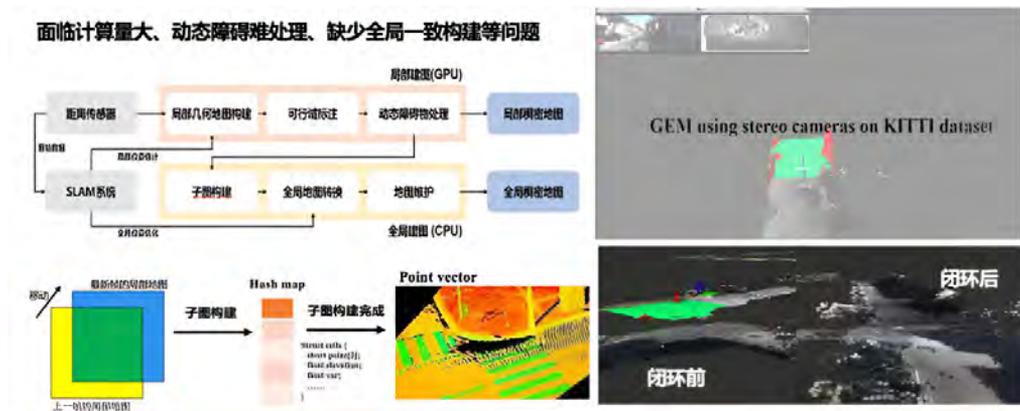


图 12 大范围全局一致稠密高程地图构建

在操作方面，聚焦于感知、力位控制、序列生成和语义动作生成等方面的研究，并探索如何将这些工作应用于人形机器人。总体而言，我们的下一步研究旨在实现智能操作和移动与人形机器人运动的综合。

#### 四、进展机遇与挑战

在当前的背景下，我国也在积极探索人形机器人技术与产业化发展。除了浙江大学，还有许多研究机构致力于人形机器人的研究，整体技术积累十分丰富，但仍有一些技术需要突破。与国际水平相比，在集成方面存在一定差距。具体需要突破的技术包括零部件方面，如关节的高力矩能力和灵巧手；智能感知、协同作业以及系统安全，包括机器人自身安全、交互安全和信息安全等方面；另外还有软硬件集成方面的挑战，需要实现高度融合、轻量化、稳定性和可靠性。这些都是需要进一步攻克的技术难题。

从产业链的角度来看，多年来机器人和汽车产业链为人形机器人的发展提供了基础。然而，与其他产业链相比，人形机器人的产业链更为复杂和长链条。如何实现在众多技术领域的紧密结合，并形成产学研用的协同机制，是一个重要的问题。

在人形机器人的研发方面，国外已经在控制器、仿真软件开发平台、大型训练平台和数据集等方面做了大量工作，形成了相对完善的生态体系。然而，我们在这方面的大部分研究仍然依赖国外平台，因此迫切需要建立自己的工具链和生态体系。

在人形机器人的产业化过程中，供应链管理和低成本制造是重要的考虑因素。然而，与此同时，如何确保人形机器人具备高性能，并应对其作为新型复杂系统所带来的制造工艺等挑战也是需要解决的问题。

自 2000 年开始机器人研究，并于 2006 年开始专注于人形机器人研究以来，浙大团队经历了人形机器人领域的高潮和低谷。尽管遇到了挑战，但我们仍在坚持不懈地推动我国在人形机器人技术和产业方面的发展。

## 数学工具降低并联机器人设计门槛



应用并联机器人创新设计与调控理论设计的机器人

如今，工业机器人已成为制造业的重要“劳动力”。相比于常见的串联机器人，并联机器人具有负载大、精度高、动态特性好、可重构能力强等优点，是航空航天、医疗健康等领域的核心装备。

但“好机构难综合、优性能难设计、高精度难调控”等科学难题提高了并联机器人设计与应用门槛，阻碍其发展。天津大学机械学院教授孙涛团队提出并联机器人创新设计与调控新理论，改变传统方法利用工程经验反复试错、迭代设计的流程，从发现数学新定律、揭示力学新机理、提出机构学新方法三个层面入手，提出高性能并联机器人发明、设计和调控的方法。“并联机器人创新设计与调控理论”项目日前荣获 2023 年度天津市自然科学奖特等奖。

实现并联机构拓扑简洁描述

机构是机器人的“基因”，直接确定了其功能，并且从本质上决定了机器人的性能。从机器人机构学角度分类，现有机器人主要分为串联和并联。

“串联机器人就像一个手臂，由各个关节串联在一起；并联机器人是把几个串联结构形成闭环结构，就像两只手或者多只手握在一起，由多条手臂共同完成一件事。”孙涛介绍，显然，一条手臂负载能力有限，但通过多条手臂的配合，



机器人则可以负载更多重量，从而实现更优性能的作业。

由于需要各个支链之间的配合，并联机器人的机构具有多闭环结构、多传递回路、多运动构态等特点，其机构综合一直是机构学和数学交叉领域的研究热点与难点问题。

“现有方法难以实现复杂多样并联机构拓扑的简洁描述和精准计算。这导致在综合过程中严重依赖设计人员的灵感和经验，制约了并联机器人的机构设计。”孙涛认为，这是一个不断试错的过程，有时候由于认知的局限性，很难设计出正确的机构。

孙涛带领团队从数学角度入手，耗费数年时间，深入研究机器人机构与数学表征、运算之间的关联，最终发现了表征连续运动的最简数学格式有限旋量及其四类运算定律，提出了并联机器人机构综合的有限旋量新理论，为机构拓扑的代数计算和连续运动的精准设计提供了数学工具。

“我们还提出了面向应用场景的机构综合理论。当灵感和经验可以用数学公式来表达时，一切就变得简单清晰了。”团队成员连宾宾举例说，比如需要综合一个加工机器人，应用机器人机构创新理论，提炼加工场景对机器人的运动需求，把运动参数代入公式中计算，就可以得到适合的机构拓扑，相当于并联机器人有了雏形。

#### 提升性能设计和精度调控水平

性能直接决定了机器人在服役环境中的作业能力。其优劣不但依赖机构拓扑，而且与机器人尺度参数密切相关。

“就像人一样，先天体质和高矮胖瘦等多重因素都会影响到人力气的大小。所以，我们设计并联机器人，既要考虑代表‘基因’的拓扑结构参数，也要考虑代表‘高矮胖瘦’的尺度参数。”孙涛介绍，由于并联机器人的拓扑类型多样、涉及到的参数数目庞大、目标性能耦合关系复杂，同步设计机器人的拓扑和尺度参数难度非常高。

“如何面向多维性能的需求提出拓扑和尺度参数的优选准则，是并联机器人设计的关键。”团队成员霍欣明说。

团队通过研究，利用所提出的数学工具建立并联机器人“拓扑—尺度—性能”的映射模型，根据不同场景对机器人性能的需求，提出多性能匹配的合作均衡方法，实现并联机器人拓扑和尺度的优选与设计。

并联机器人从设计到应用的首要问题是机器人的作业精度，其主要受零部件加工和装配偏差等几何误差、弹性变形等非几何误差影响。

“误差的辨识和补偿是调控机器人精度最直接最有效的手段。我们通过建立误差传递模型，揭示误差作用机理，建立误差补偿的等效运动控制模型，提出了并联机器人精度调控的在线补偿新机制，解决了并联机器人任意位姿下多源误差实时补偿的难题。”孙涛介绍。

#### 研制大模型降低使用难度

目前，并联机器人创新设计与调控理论，已经指导了加工、焊接、装配、手术康复等多种高性能并联机器人的创新设计与调控，推动了并联机器人在航空航天、汽车船舶、医疗健康等领域的应用。

孙涛举例：“比如我们创新设计的高刚度并联磨切一体加工机器人，已经在中国一汽、潍柴动力等 30 余家头部企业应用 300 台套，解决了多类型、多材质、多尺度铸造件高效加工的难题。”

“我们创新设计的高负重比并联对接装配机器人，应用于航天五院某低轨卫星舱板、某型飞机舱内单体的柔性装配，解决了中大型部组件装配难题。”团队成员宋轶民介绍说。

医疗健康领域也受益于这项创新理论。目前，国际首台可穿戴并联骨折手术与康复一体化机器人，已经在中国人

民解放军总医院、天津医院等开展模型或动物实验 100 例、临床试验 85 例，解决了骨折手术与康复脱节的临床难题。

“接下来，我们将进一步降低并联机器人的设计以及应用门槛。”孙涛介绍，“对于工程设计人员，目前这套理论的数学门槛还是比较高。为了向更多人推广这套理论，我们正在建立并联机构大模型。”

“未来，训练成熟的机构大模型可以根据用户的需求设计并联机器人，实现机构创新，优化并联机器人的性能。”孙涛说。

## 学会动态

### 第一届江苏省计算机系统能力培养教师发展论坛暨 JSCS 计算机系统结构专委会委员代表大会在扬州举办

后 PC 时代，系统能力培养的重要性已得到广泛认同。然而，切实提高学生计算机系统能力，关键在于教师自身系统能力和素质的持续提高。为此教育部实施了“101 计划”，以推进计算机专业教学改革为核心工作，致力于建立核心课程体系和核心教材体系，提升课堂教学质量和效果，培养出一批优秀的核心课程授课教师。为进一步推进“101 计划”，2024 年 5 月 25-26 日，由江苏省计算机学会主办，JSCS 计算机系统结构专业委员会、扬州大学共同承办，江苏省知识工程与智能服务工程研究中心、江苏省人工智能学会知识工程与智能服务专委会、扬州市计算机学会协办的“第一届江苏省计算机系统能力培养教师发展论坛”在扬州大学举行，共有 100 多名老师参加了会议，大会得到了华章出版社的赞助。论坛期间还召开了 JSCS 计算机系统结构专委会委员代表大会完成专委会换届工作。





# 面向企业用户的国产全生命周期碳足迹工业软件系统开发与应用

**项目名称：**面向企业用户的国产全生命周期碳足迹工业软件系统开发与应用

**完成单位：**江苏擎天工业互联网有限公司

**项目简介：**

随着各地区减排政策的逐步落地，政府政策层面和供应链准入等多方面都对企业产品碳足迹提出了要求。如国家生态环境部于今年6月4日发布《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》，提出“加强产品碳足迹核算能力建设”“强化产品碳足迹数据质量”等。但目前碳足迹核算与管理业务门槛较高，亟需开发适用于工业企业的信息化碳足迹核算平台，从建模方式、数据分配等方面降低企业用户使用门槛，继而进一步赋能产业链降碳。本系统面向企业用户端，自主开发了全生命周期碳足迹建模及核算软件系统，填补了面向工业应用的国产全功能全生命周期评价（LCA）软件的空白；同时，开发了兼容国际主流LCA软件的、布局逐步推进LCA软件国产化替代的标准化数据接口。

## 1. 研发面向工业应用的国产化全生命周期碳足迹建模核算平台

针对国内碳足迹工业软件空白的问题，创新性地研发了基于LCA的全生命周期碳足迹建模系统；满足了一个模型填报多套数据的需求；设计了图表化、多维度的碳足迹结果解析及展示页面。基于这些核心功能，形成了基于SaaS云服务方式的适用于工业企业的产品碳足迹建模及核算平台。

## 2. 设计适用于国内工业企业的自主可控LCA柔性建模能力

针对国内企业自主进行碳足迹建模与核算操作难度大、业务门槛高的问题，本系统针对工业企业实际使用场景进行优化，采用“预置基本模型—企业自主修改”的模式，解决国外软件学术化、使用门槛较高的问题，更适用于工业使用场景、建模快速高效。

## 3. 研发基于Leontief模型的碳足迹矩阵计算

针对碳足迹工业应用软件工作中多用户并发、数据请求量庞大、涉及多层供应链数据交互引用的一般性运算资源调度问题，本系统将Leontief模型应用于解决复杂条件下的碳足迹运算，将大型稀疏线性方程组转化为一组矩阵运算来求解问题，以提升计算效率和系统响应速度。

## 4. 开发兼容主流的标准碳足迹数据转化接口

针对国内本土碳足迹数据缺乏问题，基于国际主流碳足迹数据标准结构，开发兼容国际主流LCA软件数据格式的

标准数据转化接口，支持将不同 LCA 软件、不同版本数据库中的碳足迹模型数据及计算数据的一键转化。为逐步推动自研碳足迹软件对国外 LCA 软件的替代打下数据对接基础，实现本土碳足迹历史数据在自主可控环境下的有序、统一地存储、管理与再利用。

基于以上关键技术的研发及工程应用，已经完成或正在进行不同行业产品的碳足迹项目，包含电池、铝制品、钢铁制品、电解液、化工产品、芯片等产品，并通过了第三方认证；在电池法案及电池碳足迹领域，成为全球电池联盟（GBA）在中国的首批数字化合作伙伴，可参照 GBA 的电池护照概念验证；并于 2023 年与相关合作伙伴共同完成了首个正力新能电池数字产品护照（DPP）的 PoC 项目。

## 主要科技创新

随着各地区减排政策的逐步落地，政府政策层面和供应链准入等多方面都对企业产品碳足迹提出了要求。但目前碳足迹核算与管理业务门槛较高，亟需开发适用于工业企业的信息化碳足迹核算平台，从建模方式、数据分配等方面降低企业用户使用门槛，继而进一步赋能产业链降碳。生态环境部《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》提出“加强产品碳足迹核算能力建设”“强化产品碳足迹数据质量”，加快建立碳足迹管理体系，助力实现碳达峰碳中和目标。

本系统面向企业用户端，自主开发了全生命周期碳足迹建模及核算软件系统，填补了面向工业应用的国产全功能全生命周期评价（LCA）软件的空白；开发兼容国际主流 LCA 软件的数据接口，逐步推进对国内的 LCA 软件进行国产化替代。

具体创新点如下：

### 创新点一：研发面向工业应用的国产全生命周期碳足迹核算平台

简单高效的产品碳足迹工业软件体系的建设和开发关系到企业能否实现精准碳数据核算和高效碳排放管理，帮助企业摸清自身碳排放情况，继而赋能产业链减污降碳。本系统针对国内工业企业实际需求，研发了基于 SaaS 云服务方式的工业产品碳足迹建模及核算平台。

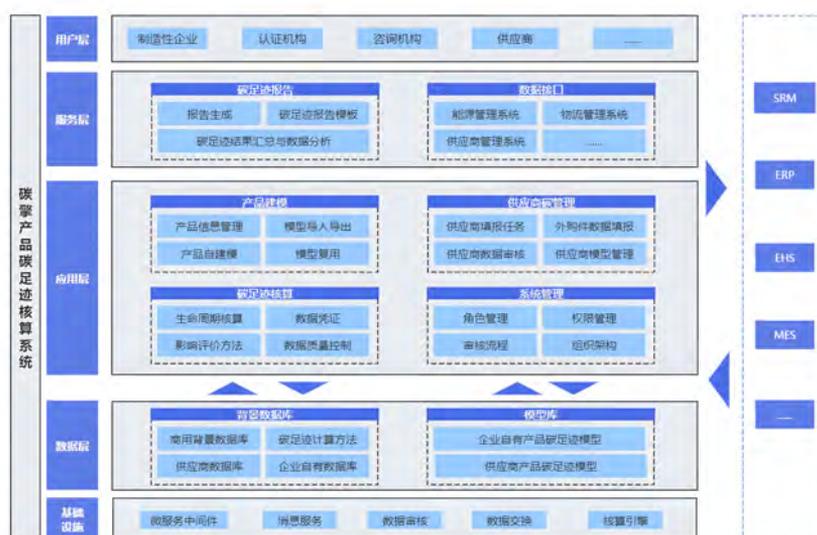


图 1 产品组织架构图

### (1) 基于 LCA 的全生命周期建模功能

针对国内碳足迹工业软件空白的问题,根据工业企业用户使用习惯,开发了基于 LCA 的全生命周期碳足迹建模系统,本系统不仅打破了国外 LCA 软件如 GaBi、Simapro 的垄断。同时,为提高办公效率,通过 SaaS 技术,支持多人协同在线建模,并一键生成报告、清册及数字碳标签。

### (2) 模型复用、数据质量控制功能

较国外传统 LCA 软件,系统支持一个模型填报多套数据,实现同产品不同年份不同批次或同系列不同产品等不同情景的分析比对,满足企业用户内部碳管理及节约成本的需求。另外,为保证数据质量,系统采用 DQI (Data Quality Indicator) 方法对原始数据从来源可靠性、样本完整性以及技术、时间和地域相关性五个方面进行评估,然后通过误差传导公式,实现数据质量从定性到定量的评价流程。

### (3) 图表化、多维度碳足迹结果解析功能

为企业进行碳足迹结果分析及产品绿色设计决策,本系统以多数据维度、多种图表化形式设计了对单一产品的碳排放结构透视分析及生命周期阶段分析功能,以及对多批次产品、量产产品与设计产品的碳排结构分析、低碳设计、能碳结构分析等功能模块。



图 2 碳足迹结果分析功能模块

## 创新点二：设计适用于国内企业的自主可控 LCA 柔性建模能力

功能全面、操作友好、符合工业应用逻辑的全生命周期核算软件的建设与开发有助于企业实现自主碳排放核算和碳信息管理。本系统基于工业企业碳管理经验不足、碳管理需求广泛等客观条件,设计并开发了 LCA 柔性建模功能,协助企业高效碳管理。

### (1) 基于行业调研的三级分类全生命周期碳足迹基础模型集

针对产品全生命周期建模复杂性问题,开发了基于行业调研的“行业—工艺—产品”三级分类全生命周期碳足迹基础模型集。企业可根据“产品类型—工艺路径”选择符合自身行业及产品类型、工艺规范的通用基础模型进行引用,并根据实际生产情况自助增加、修改本企业实际的原材料、化石燃料等排放过程。此方法以行业基础模型的通用性和

企业实际生产情况的特异性，不仅大幅降低企业用户预建模操作门槛，同时也准确反映企业生产过程碳排放组成。

(2) 图形化交互、自动化核算的碳足迹建模与核算功能

针对企业碳管理经验不足、自主碳管理业务门槛高等问题，开发了图形化模型修改、自动化碳足迹核算的功能。改善了企业自主模型修改及数据核算操作体验，降低企业用户自主使用难度。

**创新点三：研发基于 Leontief 模型的碳足迹矩阵计算**

碳足迹工业应用软件的建模、核算工作中存在多用户并发、数据请求量庞大等问题。此外，工业产品碳足迹数据的核算，尤其是涉及多层供应链数据追溯的一般情景下，存在大量包含输入输出数据的单元过程的互相引用关系。本系统为简化数据集之间的相互引用计算，将 Leontief 模型应用于复杂条件下的碳足迹运算，将大型稀疏线性方程组转化为一系列矩阵运算来求解问题，以提升计算效率和系统响应速度。

**创新点四：开发兼容主流的标准碳足迹数据转化接口**

由于缺乏能够充分体现国内先进生产服务技术水平的、得到国际广泛认可的本土碳足迹数据库，我国将长期面临新型碳贸易规则下的高额企业合规成本和碳减排努力任由别国定义的局面。为协助收集本地工业企业实景工艺排放数据，推动国内本土行业碳足迹数据库的建立，满足中国工业企业体现自身绿色生产工艺先进性的强烈需求，本系统基于对其他来源国内工业实景碳足迹数据的收集需要，开发了兼容国际主流 LCA 软件数据格式的标准数据转化接口。

兼容主流碳足迹数据的标准转化接口支持将不同 LCA 软件、不同版本数据库中的碳足迹模型数据及计算数据的一键转化，以此实现将积累于不同来源的碳足迹历史数据汇聚于自研碳足迹平台，为条件成熟时推动自研本土碳足迹软件对国外 LCA 软件的有效替代打下数据对接基础，实现本土碳足迹历史数据在自主可控环境下有序统一地存储、管理与再利用。

**推广应用情况**

本系统自 2021 年上线以来，持续服务化工、铝、钢铁、建材、电池、纺织、塑料及光伏等行业，如国内某头部乳业集团、某头部铝制造央企、某头部光伏制造集团等。通过系统完成产品全生命周期碳排放的计算，输出的结果和报告得到国内外权威第三方机构的认证。同时，在国际上，也成为 GBA（全球电池联盟）在中国的首批数字化合作伙伴，并在 2023 年上半年与相关合作伙伴共同完成了首个正力新能电池数字产品护照（DPP）。

**社会效益**

(1) LCA 软件的国产化

通过碳足迹核算 LCA 软件的全栈自研，为碳足迹 LCA 核算领域的技术国产化打下技术基础。并使最终实现本土碳足迹历史数据在自主可控环境下的有序、统一地存储、管理与再利用成为可能。

(2) 提高 LCA 软件使用效率

根据工业企业实际使用场景及用户习惯，采用模型库预置基础模型—企业自主修改的模式，解决碳足迹软件使用门槛较高的问题。另外，基于 SaaS 服务通过支持多用户在线建模，不仅满足协同办公的需求，也使供应链追溯更为简单，达到碳足迹结果更为精确。



## 简介

### 江苏省计算机学会常务理事单位

#### 江苏新大陆时代科技有限公司

江苏新大陆时代科技有限公司（以下简称：新大陆时代科技）是产教融合平台企业，依托新大陆科技集团世界领先的“芯 - 码 - 链 - 数 - 智 - 端”产业背景，面向人工智能、物联网、工业互联网、大数据、数字商业等战略性新兴产业和专业，与全国 2000 多所院校开展了各种形式的校企合作，与 20 多所院校建立校企产业学院，在校生已达 3 万余名。

新大陆时代科技凭借在数字技术相关职业领域的高度公信力和号召力，参与国家人才技能标准、教学标准、新职业标准制定及题库开发，是“物联网工程技术人员”、“大数据工程技术人员”等多项国家职业标准起草单位，“人工智能训练师”“区块链应用操作员”等国家职业技能等级认定题库开发单位。

#### 荣誉资质

教育部大学生校外实践教育基地

教育部首批全国职业教育教师企业实践基地

教育部全国职业院校技能大赛合作企业

中国职业技术教育学会物联网专业委员会常务理事单位

教育部产学合作协同育人合作企业

教育部就业育人项目指南通过企业

全国大学生物联网设计竞赛金牌合作企业

教育部 1+X 培训评价组织

工业和信息化职业教育教学指导委员会委员

中国电子学会物联网专家委员会产学研合作成员单位

技工院校高技能人才培养联盟校企合作重点单位

中国电子信息行业联合会物联网产教联盟（职教集团）副理事长单位

中华人民共和国第一届、第二届职业技能大赛组委会、世界技能大赛中国组委会高级合作伙伴