

# 中国自动化学会通讯

COMMUNICATIONS OF CAA

第 3 期

2023 年 03 月

第44卷 总第234期

主办：中国自动化学会 <http://www.caa.org.cn> E-mail: [caa@ia.ac.cn](mailto:caa@ia.ac.cn) 京内资准字2020-L0052号

## 聚焦两会 关注科技

中国自动化学会会士、常务理事谭铁牛院士：  
努力当好新时代教育改革排头兵 / P004  
中国自动化学会会士、监事钱锋院士：  
推进数实融合 赋能现代化产业体系 / P005  
中国自动化学会会士、常务理事王巍院士：  
加快建设国防军工领域复合型人才力量 / P006



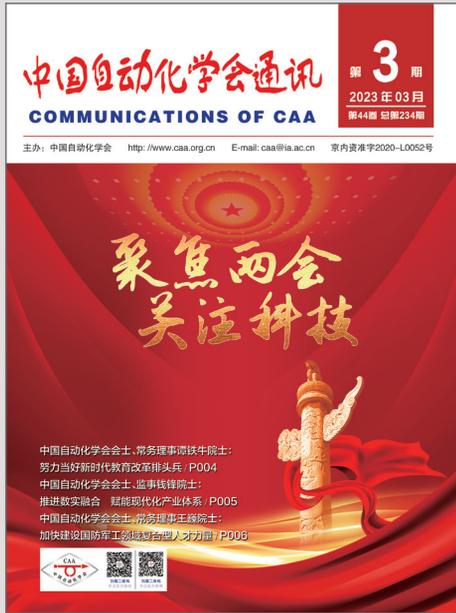
扫描二维码  
关注官方微信



扫描二维码  
关注官方微博



中国自动化学会通讯  
Communications of CAA



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

主 编 | 郑南宁 CAA 理事长、中国工程院院士、  
西安交通大学教授

副 主 编 | 王飞跃 CAA 监事长、中国科学院自动化  
研究所研究员

杨孟飞 CAA 副理事长、中国科学院院士、  
中国空间技术研究院研究员

陈俊龙 CAA 副理事长、欧洲科学院院士、  
华南理工大学教授

编 委 | (按姓氏笔画排列)

丁进良 王 飞 王占山 王兆魁 王庆林

王 坛 邓 方 石红芳 付 俊 吕金虎

乔 非 尹 峰 刘成林 孙长生 孙长银

孙彦广 孙富春 阳春华 李乐飞 辛景民

张 楠 张 俊 陈积明 易建强 周 杰

赵千川 赵延龙 胡昌华 钟麦英 侯增广

姜 斌 祝 峰 高会军 黄 华 董海荣

韩建达 谢海江 解永春 戴琼海

刊名题字 | 宋 健

地 址 | 北京市海淀区中关村东路 95 号

邮 编 | 100190

电 话 | (010) 8254 4542

传 真 | (010) 6252 2248

E-mail: caa@ia.ac.cn

http://www.caa.org.cn

印刷日期 | 2023 年 3 月 31 日

发行对象 | 中国自动化学会会员及自动化领域科技工作者



关注官方微信



关注官方微博

### 本刊声明

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



郑南军

3月13日，2023年全国两会圆满完成各项议程，在京落下帷幕。这是在全面贯彻落实党的二十大精神开局之年、踏上实现第二个百年奋斗目标新征程重要时刻召开的盛会，举国关注、举世瞩目，意义重大、影响深远。中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平在闭幕会上发表重要讲话并强调，从现在起到本世纪中叶，全面建成社会主义现代化强国、全面推进中华民族伟大复兴，是全党全国人民的中心任务。

两会期间，选举产生了新一届国家机构和全国政协领导人员，审议讨论政府工作报告和“两高”报告、审查计划报告和预算报告等，为新征程上以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴谋篇布局。在这场“春天的盛会”上，来自全国各地科技领域的代表委员们胸怀国之大者，不负人民重托，认真履职尽责，凝聚智慧力量，建真言、谋良策、出实招，为科技发展献计，描绘出我国科技高质量发展的美好新蓝图。

国务院政府工作报告指出，“过去五年极不寻常、极不平凡。”，我国经济社会发展取得举世瞩目的重大成就。亮眼“成绩单”的背后，离不开科技创新的强劲支撑。全社会研发经费投入强度从2.1%提高到2.5%以上，科技进步贡献率提高到60%以上……一项项数据折射出新时代我国深入实施创新驱动发展战略、加快实现高水平科技自立自强的最新成果。“基础研究”、“关键核心技术”、“科技创新”、“数字经济”、“专精特新”等关键词，成为与会代表委员和全社会关注的焦点。

2023年是全面贯彻党的二十大精神开局之年，站在新的历史起点上，把握大趋势、下好科技“先手棋”尤为重要。中国自动化学会在以习近平同志为核心的党中央领导下，坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深刻领悟“两个确立”的决定性意义，增强“四个意识”、坚定“四个自信”、做到“两个维护”，踔厉奋发、埋头苦干，沿着中国式现代化的康庄大道阔步前行！



### 专题 / Column

- 004 中国自动化学会会士、常务理事谭铁牛院士：  
努力当好新时代教育改革排头兵
- 005 中国自动化学会会士、监事钱锋院士：推进数  
实融合 赋能现代化产业体系
- 006 中国自动化学会会士、常务理事王巍院士：加  
快建设国防军工领域复合型人才培养
- 007 中国自动化学会会员郑庆华：坚持“两条腿走  
路”，打牢基础研究的基础
- 010 中国自动化学会会员朱松纯：像“两弹一星”  
一样发展通用人工智能

### 观点 / Viewpoint

- 011 张钹院士：基础科研不光要允许失败，还要经  
得起失败，“馊主意”也比没主意好

- 016 丁汉院士：发展自主可控工业软件没有捷径
- 019 关于《人民网》AI for Science 问答 /  
王飞跃 缪青海 张军平 郑文博 丁文文

### 学术前沿 / Academic Frontier

- 025 航天器威胁规避智能自主控制技术研究综述 /  
袁利 姜甜甜
- 039 机器人轨迹跟踪精度对铣削再生颤振的影响 /  
王琦珑 王伟 李博 郝大贤 负超
- 048 复杂制造系统建模与优化研究现状及展望 /  
于青云 赵慧 许佳 龚炜 李莉

### 科普园地 / Science Park

- 063 一篇适合新手的深度学习综述
- 072 深度学习优化背后包含哪些数学知识





P082



P083

## 学会动态 / Activities

- 080 发现“控制”之美，感悟“她”力量  
——CAA 三八女神节特别讲座成功召开
- 082 全国青少年劳动技能与智能设计大赛监事委员会第一次工作会议召开
- 083 沈阳市人力资源和社会保障局、沈阳市教育局  
一行来访中国自动化学会
- 084 智企慧业共话高质量发展——CAA 企业系列  
沙龙第一期在京成功召开
- 086 类 ChatGPT 的技术探究及企业应用模式探讨  
成功举办
- 088 “陶”出精彩与“泥”相约——中国自动化学  
会开展三八妇女节陶艺制作活动

## 形势通报 / Voice

- 089 李克强作政府工作报告  
2023年3月5日在第十四届全国人民代表大  
会第一次会议上
- 102 万钢同志在2023“科创中国”年度会议上的  
总结讲话

## 党建强会 / Party Building

- 105 习近平在中国共产党与世界政党高层对话上的  
主旨讲话——携手同行现代化之路
- 107 以高水平科技自立自强塑造高质量发展新优势  
——论学习贯彻习近平主席在十四届全国人大  
一次会议闭幕会上的重要讲话精神



P085



P088

## 中国自动化学会会士、常务理事谭铁牛院士：努力当好新时代教育改革排头兵



中国自动化学会会士、常务理事  
谭铁牛院士

今年的政府工作报告强调“深入实施‘强基计划’和基础学科拔尖人才培养计划”。中国科学院院士、南京大学党委书记、中国自动化学会会士、常务理事谭铁牛院士对此深有感触，他在接受光明日报记者专访时表示，不论是今年的政府工作报告，还是党的二十大报告提出的“教育、科技、人才是全面建设社会主义现代化国家的基础性、战略性支撑”，都体现了我们对现代化强国建设的规律性认识不断深化，没有教育强国、科技强国、人才强国，就不会有现代化强国。

教育是人才涌现的基础和科技发展的先导。在新时代新征程的背景下，高校应全面贯彻落实党的二十大精神，努力当好教育改革的排头兵。“2022年11月起，我校开展了全面贯彻落实党的二十大精神，加快建设‘第一个南大’大讨论。”谭铁牛委员介绍，在此基础上，学校启动实施了《南京大学“奋进行动”实施方案》。“奋进行动”包含拔尖创新人才培养、人才队伍建设、优化学科布局、加强有组织科研等16个专项行动，有力统筹教育、科技、人才工作，以“南大式奋进”支撑教育强国建设。

人才是增强国家综合国力、在日益严峻的国际竞争形势下争取主动权的重要战略资源。高校要围绕新时代人才培养的目标定位，通过聚焦构建拔尖创新人才培养体系、聚焦打造拔尖创新人才培养资源、聚焦营造拔尖创新人才成长生态等“三个聚焦”，不断提升人才自主培养质量。

“当前，我们比历史上任何时期都更接近中华民族伟大复兴的目标，也比历史上任何时期都更加渴求人才。要坚持党管人

才，不断加强对人才工作的政治引领，全方位支持人才、帮助人才，着力把党内党外、国内国外各方面优秀人才聚集到党和人民的伟大奋斗中来。”谭铁牛委员介绍，南京大学充分把握人才第一资源在强校兴国中的支撑作用，打造以“擎天计划”“腾飞计划”“跨越计划”“毓秀计划”为主体的全方位、全过程、全链条人才成长激励体系。通过着力实现高端引领、着力实现柔性引才、着力实现评价改革等“三个着力”锻造一支高峰突出、结构合理、支持精准、促进有力的人才队伍。

谭铁牛委员指出，高水平研究型大学是构成我国战略科技力量的重要组成部分，必须自觉履行高水平科技自立自强的使命担当。南京大学以建设中国特色世界一流的大学为目标，以“学科生态内涵式体系化创新、文理工医高质量融合式发展”为建设思路，通过加快推进高峰学科建设、加快优化交叉学科布局、加快推动薄弱学科跨越式发展等“三个加快”不断优化学科布局。

谭铁牛委员表示，面对我国

基础研究底层能力不足、前沿技术相对落后、关键核心领域被“卡脖子”、国际竞争空前激烈的复杂形势，科技创新已成为国家竞争与博弈的主要战场。高校必须充分发挥新型举国体制优势，加强有组织科研，全面加强创新体系建设，着力提升自主创新能力，为更高质量、

更大贡献服务国家战略需求作出部署。南京大学着眼加快实现科技自立自强目标，通过进一步强化科技攻关能力、进一步加强重大平台建设、进一步优化重大科技项目培育机制等“三个进一步”，推动学校承担国家重大任务和解决“卡脖子”问题的能力显著提升，服务国

家战略需求和经济社会发展的贡献更加凸显。

“我们将全面贯彻落实习近平总书记给南京大学留学归国青年学者回信重要精神，开拓进取，真抓实干，为中华民族伟大复兴贡献力量。”谭铁牛委员表示。○

来源：光明日报

## 中国自动化学会会士、监事钱锋院士：推进数实融合 赋能现代化产业体系

全国两会期间，全国政协委员、九三学社中央常委、上海市政协副主席、中国工程院院士、中国自动化学会会士、监事钱锋建议：推进数实融合，更好赋能现代化产业体系。

“当前我国推进数实融合面临一些关键领域核心技术受制于人、数字技术未深度融入实体经济、数据价值未得到充分释放等短板。”钱锋直言。

据介绍，2021年，我国制造业数字化渗透率为22%，全球平均水平为33%，德国、韩国、美国则分别为43.9%、43.6%、36%。我国不少制造企业对数字



中国自动化学会会士、监事 钱锋院士

技术的应用仅停留在办公、服务等环节，能够在产品全生命周期应用数据资源提升生产效率、降低成本消耗等的企业不多。

在新一轮科技革命和产业变革的趋势下，数实融合将为行业和企业装上赋能高质量发展的“产业大脑”，让产业链供应链更加健壮和强壮，为实体经济高质量发展插上“金翅膀”。钱锋在提案中表示，调研数据显示，数实融合的标杆企业劳动生产率、市场份额、营收将增加14%~85%，生产周期、订单交付周期将缩短56%~77%。“着力推进数实融合，对于我国加快建设现代化产业体系已经不是一道‘选择题’，而是一堂‘必修课’。”钱锋急迫地说。

对此，他建议，一是全力推进数实融合科技攻关，突破关键技术仍然受制于人的难题。二是大力推进数实融合应用示范，引导实体企业与数字经济深度融合，着力打造“智造新实体”，以“产业大脑”提升产业链供应链现代化水平。三是出台数实融合发展指导性文件，制定重点产业和领域数实融合分类指导原则，加快构建数据制度体系，以数据要素应用赋能数实深度融合。○

来源：中国科技网

## 中国自动化学会会士、常务理事 王巍院士：加快建设国防军工领域复合型人才培养



中国自动化学会会士、常务理事  
王巍院士

事业发展，人才为要。习近平总书记在中央人才工作会议上强调，综合国力竞争说到底还是人才竞争。人才是衡量一个国家综合国力的重要指标。当前，我国在国防军工领域人才培养和激励方面推出一系列重大规划，并采取了科学有效的管理办法，但仍存在一些问题。

对此，全国人大代表、中国自动化学会会士、中国科学院院士、航天科技集团研究发展部部长王巍从3个方面提出具体建议。“首先，要高度重视国防军工领域高层次人才培养的顶层设计、统筹规划；其次，要制定更加灵活、开放的人才政策，通过多种途径发现、挖掘、培育国防军工领域高层

次人才；还要不断加强和完善激励制度，为促进国防军工领域发展提供强大动力。”国防军工领域的科研院所如何在研究生教育上发挥更多作用？这也是王巍今年重点关注的一个问题。近10年来，我国研究生教育进入高速发展阶段，总体上每年报考人数和招生名额持续增加。但是，研究生毕业后理论知识体系和实践经验难以很快适应许多重要行业岗位要求等问题也越来越突出。当下，国防科技是对基础和前沿技术需求最为迫切的领域，需要有更多优秀人才参与进来，形成高水平人才储备。王巍建议应该在国防军工科研院所适当增加研究生招生名额。“在国防科技领域，既有能够体现国家意志、抢占科技战略制高点的重大任务，也有一批以院士为代表的强大师资力量，同时还拥有大量先进的研究试验设施，很多都是国家投入巨资新建的，性能指标先进，具备产生原创性成果的条件和基础。”王巍补充说，要能够积极探索研究生培养的质量与标准，加速培养一批既懂科学又懂工程的复合型人才队伍，满足国防现代化建设对人才培养的需求。○

来源：中国航天报

# 中国自动化学会会员郑庆华：坚持“两条腿走路”，打牢基础研究的基础



中国自动化学会会员 郑庆华

在今年的全国两会上，习近平总书记在参加江苏代表团审议时指出，“加快实现高水平科技自立自强，是推动高质量发展的必由之路。”

当前，新一轮科学革命和产业变革突飞猛进，科学研究范式发生深刻变革。切实加强基础研究，夯实科技自立自强根基，作为人才培养的“重镇”，大学义不容辞。

“可以说，大数据思维、大数据时代的科学研究范式，对基础研究人才培养、基础学科建设提出了前所未有的挑战。”同济大学校长郑庆华教授接受本报记者专访时剖析，挑战主要有三个方面：一是基础研究难度相较于过去更

高了，更多“无人区”的突破口往往出现在交叉领域，而非传统领域；二是应对国际科技竞争，面向前沿领域主动布局的迫切程度更高了；三是坚持目标导向和自由探索“两条腿走路”的系统统筹、集成要求更高了。

“归根结底，基础研究的基础，是人才。而人才培养，关键是要营造好的生态。”郑庆华直言，就教育而言，当务之急是要打造“不设天花板”的基础学科拔尖人才培养空间。要有识“千里马”的慧眼，要为“偏才怪才”提供机会，要有宽容失败的度量 and 静待花开的耐心，更要通过制度创新和政策激励形成磁吸效应，加强高层次基础学科人才储备，引导更多一线科研人员坐稳坐住“冷板凳”，勇攀高峰勇闯“无人区”，更好服务“国之所需”。

## 突破“卡脖子”难题，归根结底须在基础 research 上有突破

文汇报：世界已进入大科学时代，基础研究组织化程度越来越高。您是人工智能领域专家，可否结合您的研究经历和感悟谈谈，这些变化对科研工作提出哪

## 些新要求？

郑庆华：科学的主要任务是发现，而技术的主要任务是发明创造。科学发现是一切技术发明、产品设计、工程实现的基础。如果没有科学发现，我们就没有原始创新。

当今世界，国际形势风云变幻，我国对战略科技支撑的需求比以往任何时候更加迫切，而掌握核心技术的关键，就在于基础理论和基本原理。

就拿当下广受关注的 ChatGPT 来说，很多人惊叹新技术带来的新变革。要知道，作为大型语言模型，ChatGPT 的背后，有着数十年的基础研究积累，不仅需要强大的算力、算法支撑，还有来自全球各行各业的人提供数据。

以 ChatGPT 为切入点，我们可以把握当下人工智能领域的一种典型的研究范式：数据、算力、算法、知识——四个要素缺一不可，深度融合，由此构成新产品的“基座”。

有人可能会说，类似 ChatGPT 的开源，推动了全世界整体研究水平的进步。但这只是“硬币”的一面，另一面是，它也间接吸

引了全球用户智慧，在算法核心不变的情况下，用户的应用不断佐证、丰富着其应用场景。哪里的技术发展越快，相关资源就会汇聚，话语权也就会转向哪里。

坦率地说，直面国际科技竞争，这种凝聚力和科技话语权正是我们国家目前所急需的。而“卡脖子”难题要有突破，归根结底，须在基础研究上有突破。

大数据时代，科学研究的一个核心问题在于，要让碎片化知识加以整合、重构，使其融合，简单来讲，就是把珍珠串成珍珠项链的问题。当前，我们的研究难免顾此失彼，比如，有时过于注重算法，但忽视了对数据的标注、归纳，导致数据“躺”在库里，看得见、用不着。

所以，这也正是当前我们尤其强调基础研究要一体化推进、系统化思考的原因。因为，缺了当中任何一个环节，得出的结论都会有偏颇、不准确，这也是我们在推进基础研究时必须重视的一点。

## 情怀、责任、兴趣深度融合， 激发科研人才内生动力

**文汇报：加强基础研究，归根结底要靠高水平人才。作为大学管理者，您认为应该如何坚持目标导向和自由探索“两条腿走路”，更好地平衡学者的科研兴趣和国家的战略需求？**

**郑庆华：**基础研究需要思考

和发现，需要前瞻性、战略性、系统性的组织，需要长期稳定的支持。坦率地说，一个学者的研究，往往是循着个人的兴趣开始的；但有时候，仅靠一时兴趣难以形成持久的动力。

所以，我的观点是，要把科学家和科研工作者的情怀、责任和个人的研究兴趣深度融合，要把情怀、责任转化为持续研究的兴趣。

科学家既要有家国情怀，也要有荣誉感，要能够发现科学问题，回答科学问题，形成自己独到的见解。而大学要做的，应当是激发科研人才的内生动力，把“要我做”变成“我要做”，把“一时一事”变成“永恒持久”，而这也是科学研究最难的地方。

**文汇报：说到科学研究之难，您认为现在从事基础研究，难点主要在哪里？阻力又有哪些？**

**郑庆华：**在当下，从事基础研究真的不容易。甚至可以说，今天的基础研究比以往更难了！

个中难点在于：

其一，基础研究也很讲究时效性，谁先突破，话语权就掌握在谁手里，从国家层面而言，做好基础研究刻不容缓；

其二，一些表层的基础研究也被挖掘得差不多了，更多“无人区”的基础研究突破口往往出现在交叉领域。这就意味着依靠单个学科、个体做出创新更难了；

其三，过去几十年来，我们

似乎已经习惯了快速奔跑，希望早出成果、快出成果，用最小成本实现最大化的目标。但基础学科具有长期性、连续性的特点。在一个“点”上形成创新或重大突破，可能需要经过一代人、甚至几代人的持续努力，要在前人研究基础上不断深入挖掘才能发生。

确实，有的时候，大学和研究所作为科研组织单位，也缺少耐心、毅力。就像煮开水一样，有些项目刚刚有些眉目，温度上来一点，大家就急着揭开盖子，看看煮沸了没有。情况往往是，越着急，越不出来成果。

因此，对待基础研究，一定要有耐心，要允许、宽容失败。科学发现的成功概率很小，必须做好失败的准备。须知，并非只有成功才有价值，失败能够证明这条路不可行，同样有价值。

**文汇报：在强化基础导向研究，优化学科布局方面，同济大学有哪些新的部署？**

**郑庆华：**深入贯彻落实全国两会精神，面向世界科学前沿和国家重大需求，对接一流大学建设，同济大学将立足自身优势特色，凝练布局若干基础研究领域，遴选、集聚团队，创新机制，开展长期稳定支持和研究，争取在若干领域和方向上实现重点突破，抢占原始创新制高点。

比如，在夯实前沿交叉研究方面，同济将加强人工智能为代

表的智能科学技术与各学科的深度交叉，实现各学科赋能提升；同时，将围绕自主智能无人系统、智慧城市与可持续发展、深海科学与探测、干细胞与转化等领域，强化基础研究导向，引导和支持教师重视和加强重大工程项目中科学问题的凝练和研究，鼓励和支持教师对接国家战略需求、区域重大需求，并结合个人科研兴趣自主选题开展前沿原创研究。

同济还将重视并优先倾斜支持基础学科的前沿基础研究。加大前沿交叉研究的稳定性投入，形成新兴交叉基础研究领域，培育交叉研究创新团队，打造一批交叉研究平台，建立完善有利于长期稳定开展前沿交叉研究的评价考核机制。

## 让科研人员既能安心研究，也能体面生活

**文汇报：引导更多一线科研人员坐稳坐住“冷板凳”，大学可以做什么？如何做得更好？**

**郑庆华：**改善生态系统，落实到大学治理层面，我们的工作还有不少提升的空间，包括提供更加科学的评价指标体系、给予更包容的社会认同等。

要知道，单一考核评价体系 and 世俗观念，对从事基础研究的人来说最要害、最致命。每个学科自有其特点，尤其是基础学科，要对考核评价体系、评价办法、职称晋升以及科研自主等方面进

行根本性的调整。

对于真正有志于从事基础研究的人，大学和科研院所应该通过制度设计，保障其科研项目和经费，包括招研究生的指标以及实验设备等，这些保障非常必要。简言之，就是让科研人员既能够安心做研究，也能够体面地生活。

当然，给予自由、耐心等待，并不意味着不考核、不管理。但考核标准，应当从简单地量化指标，如专利数、经济效益等，转换为做了哪些实验、在这个过程中分析得出了什么，不管成与败，都是值得分享、报告的内容。

**文汇报：聚焦创新拔尖人才培养，您有哪些建议？**

**郑庆华：**天才是少数，可遇不可求，对更多青少年而言，后天引导很重要。从人才储备角度来说，培育青少年的科学思维，培养其科学兴趣，非常重要。所以，在基础教育阶段，我们要在教育“双减”中做好科学教育加法，强调 STEM（科学、技术、工程和数学）教育；到大学阶段，依然要重视数理化和工程能力的培养，为学生打造不设天花板的拔尖人才培养空间。

工程教育是推动科学技术进步，产业发展的硬实力和硬科技。过去没有力学、建筑学、数学等学科，但中国依旧创造了万里长城、都江堰、故宫等奇迹。因此，要重视理论研究和工程实践的结合，强调学生在实践实战中历练成长、提

升能力和素养。只有从重大工程应用中凝练出科学问题，才能在实际应用基础研究领域取得重大原创性进展。

就基础研究的人才培养而言，必须建立一套体系化的链条式体系。从招生选拔到培养方案再到学生的成长成才以及就业出口，每个环节环环相扣。

比如，在人才选拔方面，精准识才很重要。不妨试点设立专门通道，从高中一、二年级甚至初中生中，挖掘基础学科的“千里马”；不断总结各个高校二次选拔的经验，为真正热爱基础学科研究的“偏才”“怪才”提供机会。有统计表明，60% 多的诺奖得主，都曾经得到过诺奖得主的指导，或曾在其团队工作过。这就启示我们，在人才培养方面，必须加强基础学科教师的师资建设，在基础学科优秀教师政策吸引、经费支持、职称评定等各方面建立专门特殊通道，全面保障基础学科人才培养。

另外，我们的基础学科拔尖人才培养计划，目前更多侧重于本科环节，如何贯通本硕博发展渠道，也很重要。只有解决了本科生贯通培养问题、解决毕业后继续从事基础研究的就业问题，才能让选择了基础学科专业的学生专心致志、心无旁骛，由此为实现基础原创性突破提供源源不断的人才支撑。○

来源：文汇报

## 中国自动化学会会员朱松纯：像“两弹一星”一样发展通用人工智能



中国自动化学会会员 朱松纯

“通用人工智能是未来 10~20 年国际科技竞争的战略制高点，其影响力相当于信息技术领域的‘原子弹’。”

3月4日，全国政协十四届一次会议开幕，全国政协委员、中国自动化学会会员、北京通用人工智能研究院院长朱松纯在带来的一份提案中建议，我国要将发展通用人工智能提升到当代“两弹一星”的高度，抢占全球科技与产业发展制高点。

“半年前，中国很多专家认为通用人工智能是一个遥不可及的

目标，然而最近 ChatGPT 的出现让大众感到，通用人工智能似乎尽在眼前。”在朱松纯看来，通用人工智能将会在军事、产业、社会治理、认知对抗等诸多领域产生颠覆性影响，是各国争相布局的新兴战略领域。

“如果我国能率先实现真正的通用智能体，将成为国际科技竞争的‘胜负手’。”朱松纯说，因此，我国应加快通用人工智能战略布局。

根据公开报道，截至 2022 年美国微软公司已累计向 OpenAI

投资超过 30 亿美元，自今年起未来几年将继续投资 100 亿美元。而据一份可信的公开文件，美国近年来仅在通用人工智能方向就已投入超过 20 亿美元资助大学实验室。

“未来中美在人工智能领域的差距有可能持续拉大，希望引起国家的高度重视。”朱松纯说，我们需要从国家层面，来规划和组建自主可控的通用人工智能研发技术集群、产业集群和基金组成的全链路生态。

因此他建议，我国应将通用人工智能提升到当代“两弹一星”的高度，并由中央统筹部署，凝聚人才、科研、产业与资本的优势力量，规范发展路径，尽快出台我国通用人工智能发展路线图。他提出，要建立测试标准，规划底层的认知架构、核心算法、操作系统、编程语音、体系结构与芯片，形成“学研产用”的创新链条。○

来源：中国科学报

# 张钹院士：基础科研不光要允许失败，还要经得起失败，“馊主意”也比没主意好

「我们要造新灯塔，照亮新航道。」

这是清华大学人工智能研究院院长、中国科学院院士张钹教授，对任正非把基础研究比喻为灯塔的回应。

也是张钹教授给当前人工智能发展提出的新思路，因为新灯塔和新航道，正是他反复强调的第三代人工智能。

在纪念《中国科学》创刊 70 周年的专刊中，张钹教授以通信作者发出《迈向第三代人工智能》文章，指出是时候把第一代的知识驱动和第二代的数据驱动结合起来，通过利用知识、数据、算法和算力等 4 个要素，构造更强大的人工智能。

而在量子位的采访中，张钹教授进一步解释了发展第三代人工智能的重要性、紧迫性，特别是当前在基础科研方面遭遇“卡脖子”的中国。

张钹教授还进一步指出了基础科研和教育中的关键挑战。不仅有国家院士的忧思，还包含了对于人才培养制度的积弊除弊，每一个思考都振聋发聩。



中国自动化学会会士 张钹院士

为了更加完整展现张钹教授思考，我们以第一人称方式呈现本次采访，内容在不更改原意的基础上，进行了编辑。方便阅读的小标题，亦为后添加。

## 现在最关键是对 AI 发展现状的正确评估

当前全世界来讲，我们今后从信息科技走向智能化、走向人工智能的前景，无论从社会发展的角度，从经济发展的角度，大家都有共识。信息化网络化以后，未来就是智能化，这个大家没有太多分歧。

但最关键的问题是对发展现状的评估。

总体来讲，至少前一阶段，业界估计得过分乐观。这个也不是第一次，人工智能整个发展过程中，总体的估计总是乐观，乐观以后出问题了就低潮，低潮以后又乐观，再产生新东西。

本质是对人工智能的艰巨性认识不足，都以为说我们人的智力很强，既然过去信息技术发展得那么快，下一步搞智能化肯定也会是很快的。

这么想问题是没有顾及到，AI 要涉及到人的智能问题，这个

是一个很难的问题，我们自己对了解自己的了解，特别是对大脑的了解太少了，无知就无畏，往往很多东西就把它想得太简单了。

## 为什么讲第三代 AI? 因为中国有历史性机遇

这段时间，特别是在深度学习出现高潮后，新的乐观情绪又出来了。

在这种情况下，我在很多场合强调人工智能才刚刚开始，还处在初级阶段，我们的路还很远还很困难。

刚开始因为大多数人都很乐观，我也不宜去泼冷水，所以说得比较模糊，后来大多数人逐步认识到过去太乐观了，所以我也开始讲得更加明确。

现在提出第三代人工智能，非常明确地讲，我们的第一代、第二代 AI，都只是序幕，都还没到正戏正剧。

第三代人工智能才是这个正剧，这个正剧之于中国，机会也很明显。

第一，历史上看，就信息革命而言，它从二战前后开始，至今差不多有 80 年，我们有 40 多年没有参与其中。

所有关键的重要的贡献，都是外国人做的。计算机理论、计算机、晶体管、集成电路……一路下来，关键技术都是人家提出和掌握的，我们一直是后来者、

追赶者，追赶极为困难。

## 解决卡脖子就得“相互依赖”

如果我们一直是跟随者，能跟上就很不错了。现在的状态是基本跟得上，但有些关键技术，比如集成电路总是跟不上。

所以问题该怎么解？

我认为只有抓住新的技术革命，从一开始就是参与者，在当中做出关键贡献，不让技术完全掌握在别人手里，有几个关键技术我们作得最好。

比如拿光刻机来讲，这里头有上千道工序，有大量的工艺问题，材料问题，各种各样的问题……。任何一个国家都不可能掌握其中的所有技术，实际上，光刻机中的关键技术被荷兰、美国、德国和日本等许多国家分别掌握。遗憾的是我们中国不在其中，人家就能卡你。

为什么形成这个局面？

因为在发展过程中，你都不是参与者，你是旁观者，到现在才过来追赶，那就非常困难了。

问题不是要求我们去掌握所有技术，而是有一两项技术你是第一，别人就卡不了你。

真相是你中有我，我中有你，大家互相依赖罢了。日本人掌握了光刻胶技术，所有光刻胶都得跟他买，谁也不敢卡了。作为追赶者就很难做到这一点，必须是从头到尾的参与者。

这也是我为什么疾呼发展第三代人工智能。

因为第三代人工智能刚刚开始，我们在同一起跑线上。我们历史上错过了好多机会，现在有机会跟全世界在同一起跑线上，如果做好了，做大了，别人就卡不了我们。

另外，现在还有个误解，认为在深度学习上，我们跟国际在同一起跑线上，我要纠正一下这个想法。

不对的！

在深度学习上我们已经落后人家了。

深度学习从什么时候开始？1943 年开始，发展到今天已经有六七十年历史，我们跟别人不在一个起跑线上。

甚至现在乐观到认为深度学习我们领先，不可能的。深度学习在六七十年发展过程中，我数了一下，做出重要贡献的大概有 7-8 个国家，没有一个属于中国。

在这种情况下，你怎么可能跟人家在一个起跑线上？

好在第一代第二代人工智能已经过去了，那只是序幕，我们可以不去管它了。

## 冲击 AI 无人区，比搞两弹还难

过去错过的已经错过了，大部分的追赶任务可以留给企业去完成，科学研究应该在新航道（赛道）上下功夫，勇闯无人区。

我常说研究第三代人工智能，目标不明确，研究路线也大不清楚，可能比搞两弹还难，同时这方面我们还缺乏经验。

两弹很难，但目标非常明确，已经有人做出来了，是一个追赶的问题。

人工智能是一个无人区，你根本就不知道怎么做，全世界都不知道怎么做，是一项探索任务，所以需要完全不同的体制机制。

我们做追赶任务有很多经验，因为目标很明确，可以利用举国体制动员全国力量来完成。

但人工智能是无人区，目标不明确，路线也不清楚，怎么组织大家攻关？肯定要建立一个宽松的环境，让大家去自由探索，不可能从上到下做一个统一计划，第一步干什么、第二步干什么，那肯定难以成功。

无人区的探索，靠少数专家计划和具体安排也是不行的。

所以归根结底，我还是要强调，现在我们有一个非常好的机会，百年不遇，不容错过。

第一代、第二代人工智能已经过去了，我们要着眼未来，瞄准第三代人工智能。

### 我们该造新灯塔，照亮新航道

任正非把基础研究比作灯塔，这个比喻很好。他还说我们过去是照着美国人的灯塔去走的，跟着他照亮的路走，现在美国人的

灯塔要对中国关闭，怎么办？

我想说的是，美国灯塔管它亮不亮，我们都要在新的航道上造个新的灯塔，以照亮新的航道。

第三代人工智能，就是新的航道（或者赛道），也是新的希望，我们中国人奔向这个新航道，在这个新航道上有可能做出好成绩。

第一代第二代的旧航道，我们有些落伍，需要有人去追赶和落地。我们的着力点应该在新的航道上。

### 科研必须高举开放和国际化

但也要注意，造新灯塔、照亮新航道，发展第三代人工智能，不是只供我们自己使用，而是要照亮全世界，引领全世界共同启航。

美国人越讲断供，我们就越要高举科学无国界、坚持开放和国际化。他们要把我们剔出去，我们必须反其道而行之。

刚才也说了，解决卡脖子不是样样都自己搞、每一项自己都是第一，而应该相互依赖，共同发展，只要有一两项你是第一，你就有了话语权。

科学研究是全世界的共同事业，人类是命运共同体，特朗普政府在科技上想与中国脱钩，既不符合全人类的利益，也违背广大科技工作者的意愿，实际上也行不通。实际上，特兰普政府的

各种动作对科学界的影响并不大。

发展第三代人工智能必须高举开放和国际化，必须全世界团结起来，共同发展，以造福全人类。

我常跟年轻学生讲，搞研究要避免发明中国人才懂的词，一个词你用了，就得考虑英文怎么写，外国人看得懂看不懂，不然怎么跟你一起走？怎么引领全世界？

不要关起门来搞什么“中国的科学”，科学只有一种，不存在东方的科学，西方的科学。有东方的文化、西方的文化，但科学全世界就只有一种。所以在科学的基本表达上，就得让对方看懂。

我们写的“迈向第三代人工智能”的文章，已经在《中国科学》上发表了，很多同事和朋友看后，建议我们把这篇文章译为英文发表，这个建议很好，我们正在做。

### 第三代 AI 当前关键问题是算法

发展第三代人工智能，依靠知识、数据、算法和算力四个要素，这四个要素是什么关系？

发展第三代 AI 依靠的是两项资源，即知识和数据，通过算法与算力把这两个资源利用起来。知识、数据和算力资源我们都还可以。

而关键的问题是算法，因为目前所有原始的 AI 算法都是外国

## 迈向第三代人工智能

- 01 第一代人工智能-符号主义模型  
知识、算法、算力
- 02 第二代人工智能-亚符号模型  
数据、算法、算力
- 03 第三代人工智能-知识驱动与数据驱动结合  
知识、数据、**算法（理论与方法）**、算力

人弄的，算法从哪里来？从基础研究中来，因此发展第三代 AI 首先要抓基础研究。清华大学人工智能研究院在算法研究上取得一些进展，我们发布了“珠算”概率编程库，这是一个开源算法平台，其中有我们设计的新算法。

我反复强调要抓住这个处于同一起跑线的机会，多做出成绩，把生态建立起来，就不怕别人卡脖子，也有了话语权。

之前几年，大家对深度学习都很乐观，我讲的内容可能不容易被接受，现在慢慢很多人都能接受了。

因为多数人没有经历过 AI 发展的全过程，没有看到“全貌”，只是看到其中很小的一部分，因此很难看清楚。

我们从 1978 年就开始从事人工智能研究，经历过 70 年代到 80 年代的高潮，也体会到 90 年代的低谷，再到现在的重新高潮，经过 40 多年的风雨，才逐步搞清

楚 AI 的目标是什么，我们现在离目标还有多远等等。

符号主义虽然不成功，但它涉及到人工智能的核心问题。

深度学习尽管最初受神经科学的启发，但是后来发展出来的一套算法，完全是基于概率统计的传统信息处理方法，其所以获得成功，关键在于计算机算力的提高。现在大家把深度学习的所有功劳都归于人工智能，这其实是错觉。

大家应该注意到，第三代人工智能我们是把知识放在第一位，数据放在第二，算法放在第三位，算力放在最后，这个排序是经过仔细琢磨，不是随便排的。主要是强调“知识”在发展人工智能中的重要性。

网络时代数据量指数增长，计算机处理数据的能力远比人类强，所以将知识处理与数据处理结合起来，可以发挥人类与机器的共同作用。

最后，解决了资源问题，现在要回到利用资源的方法，即需要有好的算法。目前针对数据的算法比较多，知识处理的算法则很少，所以在我们研究院专门成立了一个叫知识智能的研究中心，就是想通过它加强处理知识的研究。目前在我国研究知识驱动方法的人很少，是我们的短板。以 2018 年国际人工智能联合大会 (IJCAI) 上发表的主要论文来看，与机器学习有关的论文，中国人发表的论文占 70% 左右，而与知识处理有关的论文，几乎没有我们的文章。我们建立的通用知识库也远比美国少。

### 基础科研需要全社会的生态

怎么解决短板和差距？就得从基础科研下功夫，不能急功近利，只往好发表论文的方向做文章，难的不好发文章的领域就不去下苦功夫。产生这个现象的一个重要原因就是我们还建立不起来全社会的生态。

好几年前我们曾经讨论过清华的博士培养要不要学外国一流大学搞高淘汰率？利用高淘汰率迫使学生去做高风险创新性大的课题。你不做这类课题，就不让你毕业，这样博士生的水平不就提高了吗。

我们讨论的结果是，我国目前还不具备这个条件。记得我曾举过我在美国伊利诺伊香槟分校

(UIUC) 访问时见过的一个例子。有位博士生做了8年, 没有毕业, 高高兴兴找工作去了, 竟然还有很多企业抢着要。我就问企业招聘人员, 为什么抢着给 offer?

人家说因为他有8年的工作经验了, 这就是需要的社会生态, 社会对“失败者”的宽容和理解。

设想一下一位清华博士生不能毕业被淘汰了, 会是什么后果? 首先他因此不容易找到工作, 至少不容易找到“好工作”, 不仅他本人有压力, 他的父母甚至爷爷奶奶也不能接受, 说明我们中国还没发展出这样的社会生态和共识。

我常常说, 科学研究是富国的事情、是富人的事情。最早的科学家是什么人? 要么贵族, 要么神父, 吃饱饭没事干了, 才去搞科学研究, 完全是兴趣导向的。出不出成果都不影响生活。

穷国或者穷人搞科学研究, 避免不了要讲效益。

但是实事求是讲, 我们现在有条件考虑这个问题了, 这么大的国家, 支持很少一部分人探索无人区, 不急于求成还是值得的。

### “傻主意”也比没主意好

我常常给学生开玩笑说, 我

不怕傻主意就怕大家没主意。

因为没主意就等于0, 没有任何东西。而“傻主意”? 如果有些合理成分, 那怕0.1合理, 自然比“0”主意好。即使“傻主意”不合理, 比如是个“负值”, 总之有个值, 我们可以从中汲取教训, 也比没主意强。我们现在的的问题是, 要求大家都要发表“正确”(共识)的好意见, 不大允许发表“不正确”(没有共识)的“傻”意见。

清华目前培养的学生(包括博士生)个个都很优秀, 平均水平很高, 与国际一流大学, 如MIT等学校的水平差不多。差距在于我们的最高水平与国际差距很大, 即缺乏出类拔萃的人才。我们教师队伍也存在类似现象, 即平均水平不错, 但缺乏国际级的大师。

科学研究的水平往往取决于它的最高水平, 跟木桶效应正好相反。

所以问题就变成了: 我们为什么出不了最高水平?

这个问题往深了讲是另一个话题, 今天不展开了。

当然这个问题也不能操之过急, 跟我们国家的发展阶段有关系, 需要有个过程, 需要我们国家实现全面的现代化。

## 基础科研不光要允许失败, 还要经得起失败

对学生的培养来讲, 提出问题能力比解决问题能力的培养更加重要。

我们之前人才培养不足的地方是, 只重视培养解决问题的能力。

我们培养博士生, 主要要求他们独立提出一个具有挑战性的问题, 然后去解决这个问题, 这样才算完成博士生的培养。问题的挑战性越大, 完成博士论文的水平越可能高, 但风险也越大。目前大多数学生都愿意做风险低的课题, 当然完成的论文质量就不会很高

产生这个现象主要原因是, 担心一旦失败了后果很严重, 就再也爬不起来了。

换句话讲, 我们还没有建立起一个“经得起失败”的完善科研生态系统, 让“失败者”在失败之后还能够有重新爬起来继续前进的机会, 有了这种生态, 才会有更多的人去闯无人区, 参与风险和困难很大的问题的探索。○

来源:《中国科学》

## 丁汉院士：发展自主可控工业软件没有捷径

第四次工业革命，将智能制造推向了潮头，工业软件的重要性也不断凸显。近年来，我国工业软件市场以超过 10% 的年均增速快速发展，部分领域国产软件市场占有率超过 50%，但研发设计类软件国外企业仍占主导地位。中国工业软件面临补足研发设计高端软件短板，破解部分领域“卡脖子”问题的挑战。在中国科学技术协会发布的 2022 重大问题难题中，发展自主可控的工业设计软件列为 10 大产业技术问题之一。

工业软件的研制高度依赖工业发展技术以及经验迭代累积，没有捷径可走。中国科学院院士、华中科技大学学术委员会主任丁汉带领团队聚焦航发、能源、船舶等行业复杂零件制造，历经 20 多年，在大量先进制造工艺、核心算法的基础上，研发了智能制造核心工业软件 CAM（计算机辅助制造）系统，在航空航天领域实现应用和部分替代，打破了国外软件的垄断地位。

2022 年初，在国家自然科学基金委的支持下，“机器人化智能制造”基础科学中心在华中科技大学成立，创建机器人化智能制

造理论体系，形成自主可控的核心工业软件、关键技术和重大装备等，成为中心的发展目标。

在航空航天、电子信息、生物医药等高端制造领域，工业设计软件已是不可或缺的基础性工具，为加快培育本土设计类软件，丁汉在接受《瞭望》新闻周刊记者专访时表示，亟需从战略层面将工业软件作为我国重要的战略资源进行长期支持、从战术层面推动构建产业生态、从人才层面优化人才培养引进机制，合力锻造出我国自主可控的工业软件。

### 【工业软件支撑智能制造】

**Q1：发展自主可控的工业软件有何意义？工业软件在智能制造中扮演什么角色？**

**丁汉：**工业软件是工业知识的复用。不同于计算机软件的“软件属性”，工业软件从本质上来讲还是工业品，是对制造业规律的数学表达，是以软件形态承载的大量工业技术及知识，包含工业领域知识、行业知识、专业知识、标准和规范等。需要通过科学的方法，如数学建模、软件工程方法等，经历充分的工业应

用锤炼和长期积累，以及良好的工业软件生态氛围，才能形成商品化的研发设计工业软件产品。

21 世纪以来，欧美发达国家将工业软件发展上升为国家战略，我国“十四五”软件和信息技术服务业发展规划，德国“工业 4.0”战略，美国《工业数字化转型白皮书》，欧盟的信息社会计划（IST）和尤里卡 ITEA 计划都对其进行了重点关注。

要成为工业强国，我们需要突破智能设计与仿真及其工具、制造物联与服务、工业大数据处理等高端工业软件核心技术，开发自主可控的高端工业平台软件和重点领域应用软件，推进自主工业软件体系化发展和产业化应用。

近十年，我国航空航天、能源化工、先进轨道交通等行业发展势头好，这些行业对大型复杂零件、构件制造的需求非常强烈。数控机床作为当代制造的主要装备，在实现复杂曲面零件高精度制造中扮演了十分重要的角色。然而，随着制造对象尺寸越来越大、产品结构越来越复杂、产品服务性能越来越高，现有制造模式面临重大挑战，难以满足生产

效率和品质需求，智能制造是解决上述问题的新模式新手段。

工业软件作为智能制造的大脑和神经，通过在制造过程中的环境感知、自主决策与自律适应，并融入人类智慧和知识经验，实现单机能工巧匠、多机分工协作、人机自然交互，达到数字化制造技术与机器人技术的深度交融，从而提高我国战略与支柱领域大型复杂零件、构件制造水平，带来制造技术的变革。

工业软件是推动制造业高质量发展的核心要素，是推进工业数字化转型的重要手段，也是智能制造的灵魂。没有工业软件的支撑，就不可能有数字化、网络化、智能化。

## 【二十载耕耘本土工业设计软件】

**Q2: 机器人化智能制造最内核的是工业软件。你们团队发展了哪些自主可控的工业软件?**

**丁汉:** 机器人化智能制造是将机器赋予“人”化。利用机器人灵巧、顺应和协同等特点，为不确定性、非结构化环境下的制造提供新模式。突破复杂曲面加工工艺，实现我国核心工业软件、工艺装备的自主可控，支撑大国重器高效高品质制造，是我们团队一直以来的信念和责任。

二十年来，我们聚焦航发、能源、船舶等行业复杂零件制造，

深入研究复杂曲面制造理论及工艺，逐步积累了先进的制造工艺、核心算法，先后突破了复杂曲面特征高效加工方法、薄壁结构自适应加工变形控制方法等核心加工工艺，研发了机器人化智能制造的核心CAM软件。

在细分领域，我们推出了围绕叶盘叶片等复杂曲面数控加工 TurboWorks / TurboCut 及大型曲面零件机器人化加工 HustRimCam 两款自主可控的工业软件，在核心功能点上与国外同类软件相当，部分特色算法甚至领先国外同行，打破了国外软件的垄断地位。其中，TurboWorks/TurboCut 主要应用于国内航空发动机的叶轮、叶盘、叶环、叶片等复杂曲面零件。HustRimCam 针对能源、船舶行业水轮机、螺旋桨等大型构件，均可独立完成零件全流程数控加工。软件中自适应加工、在线同步仿真、行程约束等特色技术能有效控制大型复杂零件加工变形，提升零件加工效率及品质。

CAM 软件需要具有易用性、稳定性、高计算效率和极丰富的工艺数据库，其研发具有较高的技术难度和较长的研发周期。我们自主研发的 CAM 软件当前提供的策略多元性、参数丰富性以及模型适用性等细节层面与国外软件相比尚有差距，亟需通过大量行业应用加速本土软件的迭代

升级。这一研发过程没有捷径可走，只能一步一个脚印，边研发，边迭代提高。

**Q3: 你对发展自主可控工业软件有哪些建议?**

**丁汉:** 近几年我国逐渐加强了对国产自主可控工业软件的支持力度，出台了一系列支持国产工业软件的政策，良性效应正逐渐显现。但发展自主可控工业软件，仍然面临挑战。

从产业链层面看，面临健全工业软件产业链的挑战。发达国家的软件公司构建了包括基础研究、技术开发、应用迭代等全产业链条，并通过持续投入、迭代开发和技术并购，已经形成了较高的核心技术，存在较高技术壁垒和产品用户黏性，使其他竞争者难以跻身产业链的某一环，实现反超。

从专业人才培养层面看，业界有句话“工业软件姓工不姓软”，从事工业软件的人才应具备工业和软件业复合专业背景，并愿意长期在这个领域耕耘投入，国内面临培养复合型人才的任务。

从市场层面看，国内高端制造业对应用国产工业软件缺乏足够的信心。工业软件是在实际应用中发展起来的，提供足够的应用空间，国产工业软件就有更多进步的机会。

走自主创新之路，掌握自主可控的智能制造工业软件，是解

决我国战略性领域关键零部件制造受制于人、实现制造业向高端跨越的必经之路。

首先，从战略层面将工业软件作为国家重要的战略资源进行长期支持。推动成立核心工业软件发展专项基金，利用国家重点研发计划、国家科技重大专项予以扶持，对重要工业软件如 CAD/CAM/CAE（计算机辅助设计/制造/工程）、CAPP（计算机辅助工艺过程设计）等，稳步推进国产替代，通过保险补贴、研发应用奖励补贴等政策，推动国产软件在各行业应用，全面提升我国自主可控工业软件发展水平。

第二，从战术层面推动构建产业生态，找到工业软件优势突破点，鼓励制造业对国产软件开放应用机会。在部分领域，比如中望二维 CAD、华天三维云 CAD、开目三维 CAPP 等一批工业软件，已经具备了一定程度的局部产业优势，可以这些优势点为基础，形成局部突破，促进一批重大项目立项和建设，系统总结一批优秀行业解决方案，在全行业推广应用。鼓励软件企业与工业企业、军工企业加强战略合作，通过并购股权、投资成立合资公司等，形成利益共同体，面向特定需求开展工业软件的技术研发、磨合和应用，给国产软件以试错和提升的机会，最终实现工业软件和制造业双赢。

第三，完善投融资机制。要大力支持符合条件的工业软件企业上市融资，创新投融资方式，支持企业通过知识产权质押融资、股权质押融资、科技及知识产权保险等手段获得商业贷款；充分发挥融资担保机构作用，为小微企业提供各种形式的融资担保服务；拓宽企业融资渠道，改善金融机构服务，加大对核心工业软件产业的中长期贷款支持力度，

扶持工业软件产业发展。

第四，完善人才培养和激励机制。依托国内高等院校，建立工业软件研究实验室，开展工业软件通用技术基础研究，鼓励国内科研院所、高校和企业开展联合培养，扩充行业后备人才；加快出台人才专项政策，鼓励企业制定股权分配、股票期权激励方案，解决行业人才成长发展后顾之忧，避免人才流失。

## 丁汉简介



丁汉，中国科学院院士，华中科技大学校学术委员会主任，国家数字化设计与制造创新中心主任机械电子工程专家。1989 年获华中科技大学工学博士学位。1993 年受德国洪堡基金会资助赴德国斯图加特大学进行客座研究，1997 年获国家杰出青年基金资助，2001 年受聘为上海交通大学长江学者特聘教授，2005 年和 2011 年两任“973”项目首

席科学家。2013 年当选为中国科学院院士。丁汉教授现任华中科技大学校学术委员会主任，国家数字化设计与制造创新中心主任，国家基金委共融机器人重大研究计划指导专家组组长。他长期从事机器人与数字制造理论与技术的研究，将机器人学和制造技术相结合：建立了复杂曲面宽行加工理论，揭示了刀具“空间运动—包络成形—加工误差”间的微分传递规律，提出了高速加工稳定性分析的全离散法，突破了叶轮叶片数字化智能化加工技术瓶颈，研究成果在中国航发、中航工业、中国中车得到重要应用，取得了显著的经济效益。先后获国家自然科学二等奖 1 项，国家教学成果一等奖 1 项，国家科技进步二等奖 2 项、三等奖 1 项。

## 【补齐复合型人才短板】

Q4: 对培养工业软件人才, 你有什么建议?

丁汉: 当前我国面临工业软件人才有可能“断供”的严峻现实, 亟需培养对零件制造工艺、加工装备以及大型软件架构开发熟悉的复合型人才。

创新高校院所工业软件人才培养机制。目前高校院所工业软件人才培养面临更新知识体系、与业界建立交流互通机制等问题。高校院所应建立与业界需求适时同步、学科交叉工 / 软兼备的人才培养体系, 建立普通人才高校订单式培养、高端人才校企乃至全产业链联合培养的模式, 建立高校、院所、企业人才互融互通的政策与渠道。

建立工业软件产业链用人机制。工业软件企业需要建立完善的培训体系和职业发展体系。重视人才的招聘和培养工作, 加强软件人才的一线工程化培训; 建立科学的晋升机制, 提供良好的研发环境, 让人才留得住, 有发展空间; 加强管理水平, 提高员工的待遇水平。2021年开始, 工业软件企业逐渐成为资本眼中的热门赛道, 应鼓励公司将股权、期权等作为跨国跨行业引人、留人的重要手段。○

来源:《瞭望》

## 关于《人民网》AI for Science 问答

文 / 王飞跃 缪青海 张军平 郑文博 丁文文

为贯彻落实国家《新一代人工智能发展规划》, 科技部会同自然科学基金委近期启动“人工智能驱动的科学” (AI for Science) 专项部署工作。

### 1. 什么是“人工智能驱动的科学”, 最大的亮点或者特色是什么?

人工智能驱动的科学 (AI for Science, AI4S) 主要是指应用正在兴起的智能科学与技术 (IST) 来促进和变革传统科学研究方法。AI4S 的当前特色是通过人工智能 (AI) 与机器学习和推理等方法处理和分析大量数据, 高效发现数据之间的关联, 帮助科学家克服“维数灾难”, 更快、更准地理解复杂的自然现象和社会现象。AlphaGo 和 ChatGPT 之后, 现有 AI 技术和成果表明, AI4S 能够帮助人类发现数据中隐藏的规律, 有效地助力科学家发现新的现象并提出新的假设。同时, AI 也可以用于创建模拟和预测模型, 引导探索, 使科学家能够测试理论并发现复杂系统的行为。

AI4S 虽然是最近才被广为关注, 特别是中国正成为焦点, 但

在国际上已通过各种各样针对的产品开发的 DAO (Decentralized Autonomous Organizations/Operations, 即分布式开放自主组织和运行) 和针对基础研究的 DeSci (Decentralized Science Movements, 即分布式开放科学运动) 蓬勃兴起, 特色就是利用 IST, 基于区块链和智能合约的数字组织和数字治理。实际上, AI4S 可追溯到 AI 的创始年代, 例如早期华人哲学家和数学家王浩利用原始的 IBM 计算机进行定理证明并催生计算复杂性科学, AI 创始人纽厄尔和司马贺于 1956 年提出的逻辑推理家 (Logic Theorist), 他们用今日看来简陋的机器, 几分钟就证明了罗素和怀德海费尽十余年心血在其三卷本数学巨著《数学原理》中包含的主要数学定理, 以至罗素闻之后感叹: 早知今日, 何必当初。近几年来, 在深度学习的大力推动下, AI4S 在数学、物理、生物、材料等领域更是取得了许多令人瞩目的重大进展, 简述如下:

在数学领域, 求解偏微分方程是流体力学、空气动力学、交通流建模等领域的共性难题。

2017年以来，科学家尝试使用机器学习、ResNet、seq2seq模型等技术求解偏微分方程，获得了更快更准的结果。DeepMind 2021年的工作，开发了基于机器学习的框架，用来引导数学家寻找新模式和证明新定理的直觉灵感。数学家和AI研究人员的合作带来了两项发现：一个是Knots理论，监督学习模型帮助找到了两种不同类型的数学结之间的新关系，从而导致了一个全新的定理；另一个是Kazhdan-Lusztig多项式的证明，这个问题已经提出40年之久，最终在AI的帮助下得以证明。该框架验证了人工智能如何帮助数学家的新范式。

在物理领域，除了实验数据采集、预处理和分析之外，人工智能方法还帮助科学家设计实验、优化参数。高能物理是最早引入人工智能辅助研究的领域之一。1990年代，粒子物理学界就组织了一系列高能核物理人工智能(AIHENP)研讨会，报道了使用神经网络和符号人工智能用于事件选择和微扰理论计算。2014年，人工神经网络赢得了ATLAS实验中识别希格斯玻色子的挑战。2015年，CERN成立了机器学习工作组来处理大型强子对撞机(LHC)产生的海量数据。AI方法的一些新进展，如生成对抗网络(GAN)，已被用于更快的事件和检测器模拟。最近，DeepMind

在Nature上发表了他们的工作：通过深度强化学习对托卡马克等离子体进行磁控制。2022年报告说，物理学家在通过使用基于包含多年实验收集的4,618个样本的数据集的神经网络，找到了质子中存在于隐内魅夸克(隐性内含粲夸克, Intrinsic Charm Quarks)的证据，这一发现可能会改变量子色动力学的教科书。

在生物医学领域，AlphaFold是继著名的AlphaGo之后人工智能领域的又一大成就。从2016年开始，DeepMind构建人工智能系统来挑战蛋白质结构3D预测任务，这对于揭示蛋白质的性质至关重要。AlphaFold基于大约100,000种已知蛋白质的序列和结构训练，增强了预测新蛋白质形状的能力，将预测误差缩小到原子尺度，而计算时间从数年缩减到数分钟，效率得到了显著提升。AlphaFold数据库中超过2亿个蛋白质结构预测已发布以供开放访问，这加速了科学研究，包括拯救生命的药物研究和有前途的发现。AlphaFold并不是唯一可以预测蛋白质结构的人工智能系统，RoseTTAFold、ProtENN也是AI4S杰出代表，生物界正在使用像AlphaFold这样的系统来改进医学、推进针对疑难疾病药物的发现。

在材料领域，人工智能改变了传统以实验和经验为主的材

料研发模式。2011年美国提出“材料基因组计划”(Materials Genome Initiative, MGI)，旨在解码材料的不同组成成分和性能的对对应关系，通过结合计算工具平台、实验工具平台和数字化数据(数据库和信息学)平台，借助高通量计算、大数据、人工智能等技术，有效整合现有的材料研究力量和设备，将高通量实验工具的效能发挥最大，以缩短材料研发周期和研发成本至少50%。2016年Nature发布了哈佛福德学院和普渡大学的研究成果，科研人员利用机器学习算法，用“失败”的实验数据预测了新材料合成，意味着机器学习将改变传统材料发现方式。通过整合元材料(Metamaterials)、虚拟材料、计算材料，平行材料正通过计算机建立“小材料，大模型”，利用机器学习和平行智能技术，根据所需要的性能预测和引导候选材料，从而加快新材料的研发速度和效率，降低研发成本，提高使用安全性、可靠性和经济性。

AI4S有以下亮点或特色：

首先，AI4S可以处理和分析大量的科学数据，克服“维数灾难”。牛顿正是在前人的研究和观测数据之上提出了万有引力定律，但当今海量的科学数据远超个人的能力和精力。AI技术可以有效地处理从实验、观测和模拟中获得的数据，并从中提取模式、趋势等

重要信息，帮助科学家发现新的现象和趋势，推进科学研究的进展，加速更多新时期“牛顿”的诞生。

其次，AI4S 可以提供高效的科学计算和模拟，这对于研究复杂的自然现象和系统至关重要。科学家可以使用 AI 技术来创建高度准确的模型，进行大规模并行模拟，使他们能够预测和测试新的假设，从而加速科研探索的迭代演进。

最后，AI4S 更加突出做为科学家的人之核心和关键的作用，强化交叉学科和新文科的主导性，直面其社会和生态效应，提倡人类命运共同体，这正是以 DAO 和 DeSci 为代表的新科学和开放运动的本源和实质诉求。这一点，似乎被许多注重技术的人士所忽略，但必须引起我们的深入思考和积极回应。

## 2. 从国际竞争、发展经济、技术储备等角度出发，开展这项工作对我们有何重要性？能带来哪些变革？

AI4S 能够提高科学研究的效率和准确性，帮助科学家在更短的时间内做出更多的发现和进展。AI4S 正加速推动科学研究的范式转移，一场改变世界格局的科学革命正在发生。

从国际竞争的角度看，AI4S 能够快速提高国家的科技实力，AI 和 Science 将相互促进，为各

国的科学研究提供更大的竞争优势，加速形成高科技壁垒。不能有效加速 AI4S 研究的国家，将在这场变革中掉队，最终处于十分被动的地位。从发展经济的角度看，AI4S 将加快各个学科领域的基础研究，促进行业应用，科学技术的进步势必会推动现有行业的发展、创造新的行业、新的就业机会。从技术储备的角度看，AI4S 助于建立和完善科学技术体系，提高技术储备和创新能力。

AIS 的良性发展，必须要有适应“新科学研究范式”的“新组织方式”和“新科研生态”。为此，我们提出的 HANOI 框架，这是一个包含人类 (Human)、人工世界 (Artificial World)、自然世界 (Natural World) 的有组织化的智能 (Organizational Intelligence) 研究范式，以 DAO 和 DeSci 为基础，同时为 AI4S 和 Science for AI (S4AI) 的研究提供公开、公平、公正的可持续性支持。

## 3. 专项部署工作，紧密结合数学、物理、化学、天文等基础学科关键问题，围绕药物研发、基因研究、生物育种、新材料研发等重点领域科研需求展开，本次专项部署工作结合的学科与围绕的领域有哪些考虑？

专项部署工作，紧密结合数学、物理、化学、天文等基础学

科关键问题，围绕药物研发、基因研究、生物育种、新材料研发等重点领域，希望 AI4S 的学科交叉特色，能够促使甚至迫使传统学科变革，加速迈向交叉化新学科大发展的时代。

以新材料研发为例，人工智能所带来的数据、算力和算法是“AI+ 材料科学”的三大技术核心。数据方面，原始数据主要来自高通量实验及高通量计算，经过多轮数据清洗，最终获得可建模的数据，并储存于数据库中。算力方面，GPU、云计算等资源为“AI+ 材料科学”提供了重要的计算支撑。随着高性能计算设备及云计算等科技的发展，算力已逐渐不再成为制约其发展的决定性因素。算法 (核心) 方面，使用人工智能技术的材料研发，能够在物性预测和新材料研发过程中，基于更强的数据分析能力，同时利用知识工程技术，根据人类知识经验自动优先选择最能提供实验合成和测试所需信息的化合物，简化材料科学家耗费在数据分析、大规模文献查阅和实验等工作上的时间。此外，机器学习已被证明可以有效加速材料的研发进程，通过机器学习获得的材料模型及机理，进而用于材料发现设计。材料模型建立在足够多且质量高的数据之上，建模步骤包括选择合适的算法，从训练数据中进行训练，进而做出准确的预测。

当前，一些新思想和新技术的出现，为 AI4S 范式创新带来了机遇。例如，由 Web3 和区块链及智能合约技术驱动的 DeSci 浪潮正在带来科学研究组织方式的变革。

随着人工智能研究进入快速迭代，人们呼吁建立新的研究机制来克服传统科学合作中的问题，例如缺乏透明度和信任等。DeSci 致力于为科学家创建一个开放、分布、透明和安全的网络，以共享数据、信息和研究成果，直接采用数字化、水平化治理，使科学家能够以更公开和公平的方式一起工作。开放分布自治组织（Decentralized Autonomous Organizations）和开放分布自治操作（Distributed Autonomous Operations）是 DeSci 的实现方式，为人工智能的创新和应用提供了新的组织形式。DAO 是一种通过代码运作，运行在区块链网络上的数字组织。DAO 通过智能合约进行数字化治理运维，这意味着 DAO 的成员拥有决策和执行行动的投票权，使其成为一个透明和公正的系统。为了应对上述挑战并利用新机遇，学术界基于 DAO 已经完成了一系列工作，我们也提出了 HANOI 框架，作为新时期助力 AI4S 研究的基础。目前，DeSci 已涌现成为世界范围的时代潮流，必须引起关注。

#### 4. 当前，我国人工智能领域呈现哪些发展特征？随着这项工作的开展落实，人工智能的新一轮风口是否来临？将产生哪些新的应用浪潮？

当前，人工智能领域的国际前沿发展，已经从以 AlphaGo 为代表的算法智能（Algorithmic Intelligence, AI）进入到以 Chat GPT 为代表的语言智能（Linguistic Intelligence, LI）阶段，正在加速进入想象智能（Imaginative Intelligence, II）新时代。未来，人类的科技想象能力将成为第一和最大的科技生产力，知识自动化必须成为社会发展的常态技术，这正是 AI4S 和 DeSci 等的本质和目的。我国人工智能领域的研究也符合这一发展特征，国内企业、实验室和高校等各方力量，正紧随国际前沿，力争保持处于第一梯队的态势。

人工智能将不再是过去单点替代的形式，而是真正融入到其他科学及其产业的研发、制造、供应链等各环节中，推动我国制造业的研发、工艺、流程等核心业务的高效创新。先进的制造技术使构建更复杂的多尺度特征成为可能，从而改变化合物性能，这取决于几何特征、制造技术和工艺参数。如面对新材料研发领域日趋激烈的同质化竞争，AI 技术在材料研发过程中带来的诸多底

层创新无疑也展现出巨大的价值。

应该说，“人工智能驱动的科学”（AI4S）专项部署工作，并不是催生新一轮风口，因为人工智能还没有进入低谷，而是又被新技术进展再次推向新的高峰。在 AI4S 方面，除了数学、物理和生物等领域之外，人工智能还被用于许多学科。来自 AI 和科学领域的科学家正在研究 AI4S 的前沿领域。正如我们所见，人工智能在科学研究中的角色随着深度学习的繁荣而发生了变化。早期，人工智能方法只是作为辅助工具，帮助分析实验数据。如今，人工智能方法已被视为更复杂任务的关键技术，包括定理证明、结构设计和知识发现。

尽管人们对像 AlphaGo、AlphaFold、ChatGPT 这样的进步感到兴奋，但在 AI4S 成为流行范例之前，我们还有很长的路要走。而且，教育必须先行，否则无法持续。首先，人工智能与各个科学学科之间的知识差距是显而易见的，研究人员必须有一个学习曲线来学习另一边的技能。而且，也许人工智能研究人员学习科学中特定领域知识的学习曲线更陡峭，因为建立一个全新背景的知识体系更加困难。相反，在大多数 AI4S 案例中，最受欢迎的工具是深度学习模型，它相对容易掌握。其次，目前还没有一个将人工智能与某一科学领域相结合的通用框架。然而，在

AI 领域，工具和平台已经很成熟并且易于使用，特别是 ChatGPT 之后，AI 的大众化前所未有。当然，在科学领域，也有许多在特定领域里广泛使用的成熟软件。无论如何，我们必须以“小问题、大模型”的理念，“小任务、大设计”的原则，利用 AI 开发并实施更多像 AlphaFold 和 ChatGPT 这样的智能系统来辅助科学研究。我们相信，弥合差距之各种各样的通用平台将在不久的将来出现，使 AI4S 成为科研的主流，使 S4AI 成为教育的主体。

## 5. 随着人工智能的快速发展，人们越来越担忧工作流失以及它对劳动力市场的影响，在缓解潜在的焦虑方面，您认为社会各界可以做什么？

随着人工智能技术的快速发展，特别是 ChatGPT 等大模

型在内容生成、艺术创作等领域的突破，加快了社会变革。确实有一些重复性的工作可能会被取代，这引起了不少人的担忧。然而，正像百年前的工业革命和半世纪前的信息产业革命展示的一样，作为群体的我们根本无需担心，历史和现实也不许我们担心，特别是担心也根本没有任何用途。工业革命机器没有取代农民，但让许多农民成为工人；信息革命计算机没有取代工人，但让许多工人成为软件工程师，尽管回归到新时代的码民；智能革命 AI 更不会让我们失业，而且，就像百年前的“杰文斯悖论”表明的：人工智能将需要更多的人工，为我们提供更多更好的工作。当然，为了缓解时下的民众焦虑和现实问题，社会各界可以采取以下措施：

首先，引导社会对人工智能的认知和理解。通过宣传舆论，

让人们认识到，电灯取代蜡烛、汽车取代马车、电动机取代蒸汽机，每一次技术革命都有很多行业消失，但同时创造出更多的行业，带来更多的机会。

其次，投资于新兴产业。人工智能里的机器学习、深度学习等的进展促进了新产业的诞生，社会各界可以投资于新兴产业，支持小企业和初创企业，以及鼓励创新和创业。这些产业需要更多的人才，有更多的就业机会，更好的生活待遇。

为社会全体提供人工智能驱动的专业及相关行业的教育、科普和培训，帮助人们获取新技能和知识，以适应新的工作、市场需求。实际上，AI4S 的基础和关键，是 AI for Education (AI4E) 和 Education for AI (E4AI)，变革当代的教学与教育，已成为刻不容缓的任务。○

## 参考文献：

- [1] 王飞跃，平行科学：可持续智能产业和智慧社会的基础与保障，QAI 技术报告，2014 年 10 月，青岛。
- [2] Q. Miao, M. Huang, Y. Lv and F.-Y. Wang, “Parallel Learning between Science for AI and AI for Science: A Brief Overview and Perspective,” in 2022 Australian & New Zealand Control Conference (ANZCC), Gold Coast, Australia, 2022, pp. 171–175.
- [3] 袁勇，王飞跃，“区块链技术发展现状与展望,” 自动化学报, vol. 42, no. 4, pp. 481–494, 2016, doi: 10.16383/j.aaas.2016.c16015.
- [4] 袁勇，王飞跃，区块链理论与方法，北京：清华大学出版社，2019。
- [5] 袁勇，王飞跃，区块链 + 智能制造：技术与应用，北京：清华大学出版社，2021。
- [6] S. Wang, W. Ding, J. Li, Y. Yuan, L. Ouyang and F.-Y. Wang, “Decentralized Autonomous Organizations: Concept, Model, and Appli-

- cations,” *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, vol. 6, no. 5, pp. 870–878, 2019, doi: 10.1109/TCSS.2019.2938190.
- [ 7 ] 丁文文, 王帅, 李娟娟, 袁勇, 欧阳丽炜, 王飞跃, “去中心化自治组织: 发展现状、分析框架与未来趋势,” *智能科学与技术学报*, vol. 1, no. 2, pp. 202–213, 2019.
- [ 8 ] 欧阳丽炜, 王帅, 袁勇, 倪晓春, 王飞跃, “智能合约: 架构及进展,” *自动化学报*, vol. 45, no. 3, pp. 445–457, 2019, doi: 10.16383/jaas.c180586.
- [ 9 ] S. Wang, L. Ouyang, Y. Yuan, X. Ni, X. Han and F. -Y. Wang, “Blockchain-Enabled Smart Contracts: Architecture, Applications, and Future Trends,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 49, no. 11, pp. 2266–2277, 2019, doi: 10.1109/TSMC.2019.2895123.
- [ 10 ] 王飞跃, “SciTS: 21 世纪科技合作的灯塔? ,” *科技导报*, No. 12, pp. 81, 2011.
- [ 11 ] F.-Y. Wang, “From AI to SciTS: Team Science and Research Intelligence,” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 2–4, 2011, doi: 10.1109/MIS.2011.49.
- [ 12 ] S. Hamburg, “Call to join the decentralized science movement,” *Nature*, 767 vol. 600, no. 7888, p. 221, 2021, doi: 10.1038/d41586-021-03642-9.
- [ 13 ] F.-Y. Wang, W. Ding, X. Wang, J. Garibaldi, S. Teng, R. Imre, C. Olaverri-Monreal, “The DAO to DeSci: AI for Free, Fair, and Responsibility Sensitive Sciences,” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 37, no. 2, pp. 16–22, 2022, doi: 10.1109/MIS.2022.3167070.
- [ 14 ] W. Ding, J. Hou, J. Li, C. Guo, J. Qin, R. Kozma; F.-Y. Wang “DeSci Based on Web3 and DAO: A Comprehensive Overview and Reference Model,” *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, vol. 9, no. 5, pp. 1563–1573, 2022, doi: 10.1109/TCSS.2022.3204745.
- [ 15 ] F.-Y. Wang, “The Metaverse of Mind: Perspectives on DeSci for DeEco and DeSoc,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 9, no. 12, pp. 2043–2046, 2022, doi: 10.1109/JAS.2022.106106.
- [ 16 ] W. Ding, J. Li, R. Qin, R. Kozma, F.-Y. Wang, “A New Architecture and Mechanism for Decentralized Science MetaMarkets,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023.
- [ 17 ] F.-Y. Wang, “Parallel Intelligence in Metaverses: Welcome to Hanoi!” *IEEE Intelligent Systems*, vol. 37, no. 1, pp. 16–20, Jan. 2022, doi: 10.1109/MIS.2022.3154541.
- [ 18 ] Q. Miao, W. Zheng, Y. Lv, M. Huang, W. Ding, F.-Y. Wang, “DAO to HANOI via DeSci: AI Paradigm Shifts from AlphaGo to ChatGPT,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 10, no. 4, pp. 887–897, 2023.
- [ 19 ] F.-Y. Wang, Q. Miao, X. Li, X. Wang, and Y. Lin, “What does ChatGPT say: The DAO from algorithmic intelligence to linguistic intelligence,” *IEEE/CAA J. Autom. Sinica*, vol. 10, no. 3, pp. 575–579, 2023, doi: 10.1109/JAS.2023.123486.
- [ 20 ] F.-Y. Wang, J. Yang, X. Wang, J. Li, and Q.-L. Han, “Chat with ChatGPT on Industry 5.0: Learning and decision-making for intelligent industries,” *IEEE/CAA J. Autom. Sinica*, vol. 10, no. 4, pp. 831–834, 2023.
- [ 21 ] J. Zhou, P. Ke, X. Qiu, M. Huang, J. Zhang, “ChatGPT: Potential, Prospects, and Limitations,” *Front Inform Technol Electron Eng*, 2023, doi: 10.1631/FITEE.2300089.
- [ 22 ] H. Du, S. Teng, H. Chen, J. Ma, X. Wang, C. Gou, B. Li, S. Ma, Q. Miao, X. Na, P. Ye, H. Zhang, G. Luo, F.-Y. Wang, “Chat with ChatGPT on Intelligent Vehicles: An IEEE TIV Perspective,” vol. 8, no. 3, pp. 2021–2029, March. 2023, doi: 10.1109/TIV.2023.3253281.
- [ 23 ] J. Zhang, J. Pu, J. Xue, M. Yang, X. Xu, X. Wang, F.-Y. Wang, “HiVeGPT: Human-Machine-Augmented Intelligent Vehicles With Generative Pre-Trained Transformer,” vol. 8, no. 3, pp. 2030–2038, March. 2023, doi: 10.1109/TIV.2023.3256982.
- [ 24 ] Y. Gao, W. Tong, E. Q. Wu, W. Chen, G. Zhu, F. -Y. Wang, “Chat with ChatGPT on Interactive Engines for Intelligent Driving,” vol. 8, no. 3, pp. 2039–2042, March. 2023, doi: 10.1109/TIV.2023.3252571.

# 航天器威胁规避智能自主控制技术研究综述

文 / 袁利 姜甜甜

**摘要:** 当前, 轨道空间日益拥挤、太空竞争不断加剧, 对航天器执行既定任务时的轨道威胁自主应对能力提出了新的挑战, 使得航天器智能自主控制技术迎来新的发展机遇。在调研分析了轨道威胁感知、自主决策规划、规避机动动作执行、自主控制系统架构相关研究进展的基础上, 总结提出了威胁规避智能自主控制面临的主要瓶颈问题, 并分析指出发展“感知-决策-执行”一体化控制是破解瓶颈难题的有效手段, 最后从一体化控制系统建模、设计、分析与验证多方面, 系统讨论了威胁规避智能自主控制需要重点关注的若干基础问题, 为未来航天器智能自主控制的理论研究和科技发展提供启发和参考。

**关键词:** 轨道威胁感知 自主决策规划 “感知-决策-执行”一体化 航天器智能自主控制

随着人类太空活动的日渐频繁, 轨道空间日益拥挤, 空间碎片数量持续增加, 给航天器在轨安全稳定运行带来严峻挑战。特别是, 2019 年以来“星链”(Starlink)、“一网”(OneWeb)等低轨巨型星座计划的持续推进与部署, 使得轨道空间密集程度呈现指数级增长趋势<sup>[1-2]</sup>, 碰撞风险激增, 太空安全事件频发。据美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 2020 年 8 月发布的报告, 国际空间站自 1999 年起共实施了 27 次避撞机动, 其中, 2 次躲避“风云一号 C”(FY-1C) 气象卫星 2007 年爆炸解体产生的碎片, 5 次躲避“宇宙-2251”(Cosmos 2251) 卫星和“铱星-33”(Iridium 33) 卫星 2009 年撞击产生的碎片<sup>[3]</sup>。2019 年 9 月 2 日, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA) 为避免“风神”(Aeolus) 气象卫星与“星链-44”(Starlink-44) 卫星的潜在碰撞风险(碰撞概率超过 1‰), 实施了规避机动操作<sup>[4]</sup>。2021 年 3 月 30 日, 美国第 18 太空监视中队(The 18th Space Control Squadron, 18 SPCS) 监测

到, “一网-0178”(OneWeb-0178) 卫星在升轨过程中与“星链-1546”(Starlink-1546) 存在很高的碰撞风险, 两颗卫星的距离只有约 57.9 米, 发生碰撞的可能性高达 1.3%, 之后美国太空探索技术公司(SpaceX) 关闭了 Starlink-1546 卫星的自动碰撞规避系统, 一网采取了主动规避碰撞措施<sup>[5]</sup>。2021 年 7 月 1 日和 10 月 21 日, 出于安全考虑, 中国空间站组合体在地面指挥控制下, 分别对向其主动接近的“星链-1095”(Starlink-1095) 卫星和“星链-2305”(Starlink-2305) 卫星实施了紧急避碰控制, 规避了碰撞风险。伴随着频繁发生的太空安全事件, 航天器执行既定任务时的威胁规避逐渐成为其日常操作中的一项常规任务。

与此同时, 太空竞争不断加剧, 新形态的轨道威胁不断涌现。太空作为与陆、海、空、网络空间等同时的作战疆域, 已成为大国角逐的战略制高点。美国针对未来太空战已进行 10 余次“施里弗”(Schriever) 系列演习<sup>[6]</sup>; “地球同步轨道空间态势感知计划”(Geosynchronous space situational awareness)

program, GSSAP) 卫星,“局部空间自主导航与制导试验”(Automated navigation and guidance experiment for local space, ANGELS) 卫星,以及“渐进一次性运载火箭次级有效载荷适配器增强型地球同步实验室试验”(Evolved expendable launch vehicle secondary payload adapter augmented geosynchronous laboratory experiment, EAGLE) 卫星携带的空间态势感知实验卫星 Mycroft 等形成了在轨监视和抵近侦察能力<sup>[7-11]</sup>,太空实战博弈方面优势明显。2014 年以来,GSSAP 卫星进行了数百次机动,以抵近侦察的方式对中国多颗商业卫星实施干扰<sup>[12]</sup>。

面对空间碎片/失效卫星碰撞、敌意卫星干扰等各类轨道威胁,常用的应对手段包括轨道机动、姿态机动、改变工作状态、拍照取证“溯源拒止”等。目前,通常采用“地面测定轨+遥测下传→威胁判定→决策规划→上注指令→在轨执行”的“星地大回路”威胁处置方式,威胁判定和决策规划均由地面人员完成。以 ESA 空间碎片办公室(Space Debris Office, SDO)提供的碰撞规避服务为例,在收到美国联合太空作战中心(Combined Space Operations Center, CSpOC)共享的交会数据(Conjunction data messages, CDMs)后,地面操作人员会进行交会事件检测和碰撞风险评估,并进一步对碰撞风险高的目标进行轨道确定、轨道和协方差演化分析等,给出规避决策和机动建议,以及考虑各种约束的避碰机动规划<sup>[13-14]</sup>。然而,这种严重依赖地面的威胁处置方式,存在窗口和弧段时空约束多、星地回路时间链条长、运维指控人为因素多等问题,导致威胁处置时效性差、运控压力大,往往对威胁反应“过钝”或“过度”,严重影响航天器在轨运行的安全性和业务的连续性,难以适应威胁数量持续增长、环境日益恶化的空间态势。

近年来,世界航天强国致力于发展面对轨道威胁的智能自主控制技术,能够自主感知威胁、自主制定

规避策略并自主完成规避动作。例如,美国 SpaceX 宣称,星链卫星装载了自动防撞软件,在收到美国 CSpOC 发布的潜在碰撞风险通知时,不需要人的参与,该软件将自行决定是否以及如何进行规避机动,并将信息返回给 CSpOC<sup>[15]</sup>。再如,为确保卫星及大型星群的安全运行,ESA 正在发展航天器自主防撞系统,可根据轨道编目情况,自动评估碰撞风险,给出通行/不通行的决策建议,并进行规避机动设计与执行<sup>[4, 16]</sup>;并在 2019 年召开的第一届国际轨道碎片会议(International Orbital Debris Conference, IOC)上,公开了碰撞风险评估和自动缓解方案(Collision risk estimation and automated mitigation, CREAM),目的是通过发展自主决策、规划以及规避机动执行等技术,在没有人为干预的情况下进行安全有效的碰撞规避<sup>[17]</sup>。

本文围绕航天器面对威胁规避任务的智能自主控制技术,首先对轨道威胁的感知、威胁规避决策规划、规避机动动作执行、自主控制系统架构与模型 4 个方面的研究现状进行了调研分析;在此基础上,结合航天器自身及其运行环境的特殊性,总结提出了航天器威胁规避智能自主控制技术面临的主要瓶颈问题,分析指出发展“感知-决策-执行”一体化控制是破解技术瓶颈的有效手段。最后,从一体化控制系统建模、设计、分析与验证多个方面,系统讨论了航天器威胁规避智能自主控制需要重点研究的若干基础问题。

## 1 轨道威胁自主规避的国内外研究现状

航天器面对威胁规避任务的智能自主控制,不同于传统“星地大回路”的任务模式,需要通过“感知-决策-执行”星上闭环,以及与人工智能、博弈论等相关技术的深度融合,赋予航天器面对未知不确定环境和复杂动态任务的感知、决策、执行等能力<sup>[12, 18-19]</sup>,进而实现航天器在没有人为干预的情况下,在复杂空间环境、既定任务、星上资源、轨道等约束条件下,以最小的代价,自主完成对空间碎片/失效卫星碰撞、

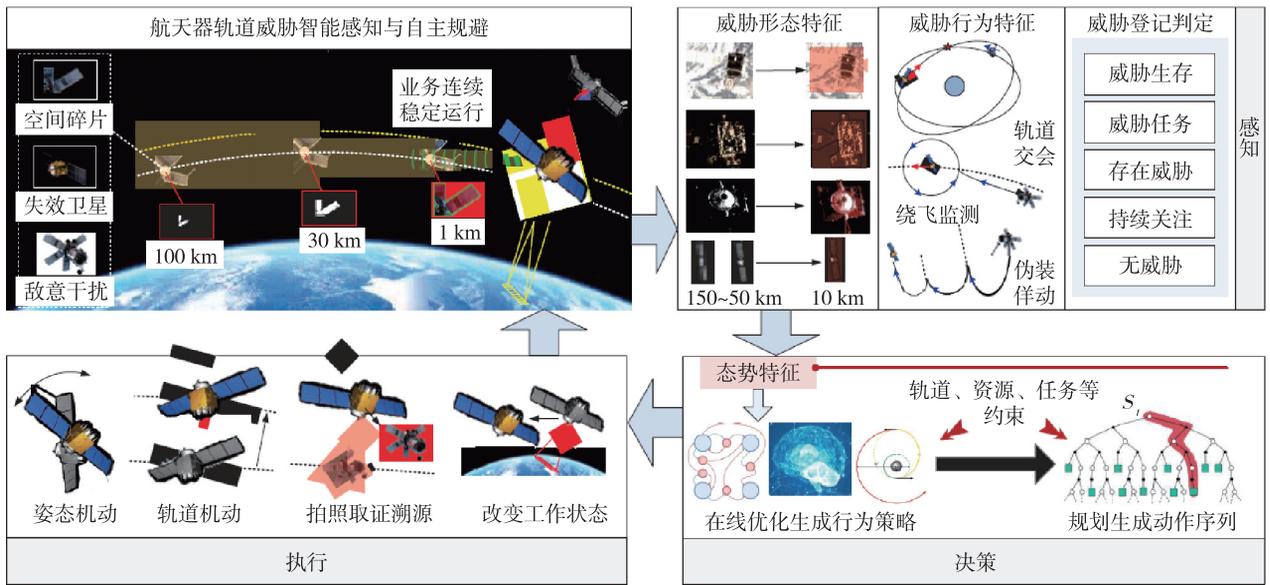


图1 面向轨道威胁的航天器“感知-决策-执行”星上闭环过程

故意卫星干扰等各类轨道威胁的探测、识别和风险评估，及时生成安全有效的规避策略和动作序列，并完成规避动作的高品质执行（见图1）。

上述过程涉及轨道威胁目标的感知、自主决策规划、规避机动动作执行，以及支撑“感知-决策-执行”星上闭环的智能自主控制系统架构等技术领域。本节围绕以上4个方面介绍航天器轨道威胁自主规避的国内外研究现状。

### 1.1 轨道威胁的感知

早在20世纪80年代，美国联合领导实验室（Joint Directors of Laboratories, JDL）就从信息融合角度提出了三层威胁评估模型，包括目标状态和属性估计、态势评估与威胁评估三个层级<sup>[20-21]</sup>。其中，目标状态和属性估计主要是获取目标运动、形态和辐射特性等信息；态势评估又可划分为态势元素提取（特征提取）、态势理解和未来状态预测三个环节<sup>[22]</sup>；威胁评估的重点在于推理对方意图和目的，产生定量的威胁能力评估，并量化判断对方对我方的威胁程度。

对于轨道空间，威胁感知包括利用可见光、雷达、红外等天基空间探测手段，辅以地基空间态势感

知系统，获取航天器运行轨道环境及目标的测量信息，进行目标运动状态和轨迹估计、异动行为（如抵近、绕飞、伴飞）检测、本体及载荷形态特征识别，得到威胁目标运动、形态等不同维度的特征要素，形成对威胁目标行为特征的完备表达；并综合目标运动特征、形态特征，以及历史行为特征等进行推理形成知识，给出威胁类型、行为意图、威胁等级的综合判定。其中，威胁类型、行为意图、威胁等级的综合判定侧重于对威胁态势的理解和认知。

轨道空间跨度大，威胁目标的测量距离从米级到千公里量级。当航天器与被观测目标距离较远时，基于光学观测的成像分辨率低，仅能获取目标的视线角信息。由于测距信息的缺失，仅测角无源定位跟踪存在观测几何差、系统可观测度低的问题，难以保证对目标运动状态的有效估计。对此，发展出多视线协同法、轨道机动法、相机偏置法、非线性动力学法等多类方法。通过多航天器的协同观测，利用对目标的多视线测量信息，可采用卡尔曼（Kalman）滤波及其改进方法给出目标运动状态的估计<sup>[23-24]</sup>。当协同观测条件难以保证时，可通过航天器轨道机动，利用其

累计一个时间序列上的观测量,实现基于单视线测量信息的相对导航<sup>[25]</sup>。文献<sup>[26-28]</sup>讨论了轨道机动对可观测性的影响,并给出了可观测性最优的轨道机动方案。然而,轨道机动往往会影响航天器业务的连续性,且会增加燃料消耗。Klein等<sup>[29]</sup>提出了相机偏置法,通过偏置安装相机,可在距离较近时获得较好的距离可观测度,但不适用于远距离探测。此外,通过引入J2地球非球形摄动、大气阻力摄动等因素,构建非线性相对轨道运动动力学模型,理论上可使线性模型中不完全可观的距离状态完全可观。沿着这一思路,提出了多种基于非线性动力学模型<sup>[30]</sup>的仅测角相对导航算法<sup>[31]</sup>,但存在求解复杂度高、实际性能难以保证等不足。

除轨道确定外,空间目标的变轨机动也是需要关注的威胁因素。Roberts等<sup>[32]</sup>提出了一种基于卷积神经网络(Convolutional neural networks, CN-N)的地球同步轨道(Geostationary earth orbit, GEO)卫星经度机动检测方法;文献<sup>[33]</sup>仅利用目标的视角角信息,给出了一种对测角信息进行多假设检验加权融合的轨道机动检测方法。实际工程中,轨道机动检测结果很大程度上受观测能力和目标机动特性的制约。在天基观测信息不完备、观测条件苛刻的情况下,如何选择轨道机动检测特征量、构建高效准确的检测模型,实现对非合作目标机动的快速准确检测,值得深入研究。

当航天器与威胁目标的相对距离较近时,可利用图像信息、深度点云信息等进行目标运动状态的估计。早期基于图像的非合作目标位姿估计方法,利用手工设计的关键点特征及其描述子(如尺度不变特征变换(Scale-invariant feature transform, SIFT)<sup>[34-35]</sup>、加速稳健特征(Speeded-up robust features, SURF)<sup>[36]</sup>、最大稳定极值区域(Maximally stable extremal regions, MSER)<sup>[37]</sup>以及二进制鲁棒独立的基本特征(Binary robust independent elementary features, BRIEF)<sup>[38]</sup>)或者线、边缘

等特殊特征<sup>[39-40]</sup>,通过场景和图像之间的透视变换,建立图像中的特征点与已知三维模型相应特征的对对应关系,利用非线性几何优化算法求解位姿参数<sup>[41]</sup>,存在具体特征描述在不同结构和物理特性航天器上的可扩展性差、对空间复杂光照环境的鲁棒性差,以及求解准确性依赖于先验位姿信息及特征匹配的准确度等不足。对此,近期发展出基于学习的位姿估计方法,尝试以端到端的方式学习2维图像空间和6维位姿空间之间的非线性变换,或是通过离散化姿态空间求解分类问题<sup>[42]</sup>,或是直接求解从输入图像到相对姿态的回归问题<sup>[43]</sup>,但此类方法在实际应用时的精度难以保证。最近,Sharma等<sup>[44]</sup>综合基于特征和基于学习的位姿估计方法的优势,提出了基于CNN的航天器姿态网络(Spacecraft pose net, SPN),能够在不需要先验位姿信息的情况下,以解耦的方式估计目标航天器的相对位置和姿态;同时,SPN还具备对姿态输出不确定性和目标中目标的姿态估计能力;文献<sup>[45]</sup>进一步考虑星载计算资源约束,提出了基于CNN的相对位姿估计算法,实现了在功率要求有限的小型卫星上的实时运行。此外,目前基于图像信息与点云信息的融合方法(如基于CNN的联合滤波器<sup>[46]</sup>、基于自监督模型的自适应融合机制<sup>[47]</sup>等),也可用于空间非合作目标运动状态的估计。

以上研究成果侧重于对空间目标运动特征的估计。当航天器面对抵近捕获、接近干扰等轨道威胁时,还需要对机械臂、载荷等典型部件的形态特征进行识别。经典的形态特征提取方法主要分为两类:利用Canny边缘检测<sup>[48]</sup>等处理规则几何特征的方法,以及利用Fast<sup>[49]</sup>、Harris<sup>[50]</sup>等角点检测处理不规则几何特征的方法。由于航天器载荷的形态复杂多样,且受目标运动及空间光照条件的影响,易出现目标局部过亮或过暗的情况,对形态的精准辨识提出了挑战。近年来,越来越多的学者考虑采用深度学习的方法进行空间目标的分类和部件特征提取。例如,李林泽等<sup>[51]</sup>提出将基于掩膜区域的卷积神经网络(Mask

region-based convolutional neural network, Mask R-CNN) 应用于空间非合作目标检测与识别, 并借鉴基于区域的全卷积网络 (Region-based fully convolutional networks, R-FCN) 和轻量头部基于区域的卷积神经网络 (Light-head R-CNN) 对其进行优化改进, 以提升算法的实时性。该方法虽然具备一定的迁移泛化能力, 但对实际任务中的复杂空间光照环境、章动和进动等因素考虑的较为理想。王柳<sup>[52]</sup>利用基于深度学习的 YOLO (You only look once) 模型对空间目标及其特征部件进行识别, 采用由两种卫星的三维模型生成的图像数据集进行训练, 测试了该模型对不同视角、距离以及遮挡条件下卫星及部件的识别精度。为更贴近空间真实环境, Chen 等<sup>[53]</sup>提出基于 R-CNN 的卫星部件检测算法。在 Mask R-CNN 的基础上, 结合密集连接卷积网络 (Dense convolutional network, DenseNet)、残差网络 (Residual network, ResNet) 和特征金字塔网络 (Feature pyramid networks, FPN) 构建新的特征提取结构, 并通过提供密集的连接增强各层之间的特征传播, 在利用模拟软件生成的不同角度、不同轨道高度、不同类型的卫星图像数据集上, 获得了较好的测试精度。由于航天任务特殊性, 空间真实图像样本少, 目前依赖于大规模训练样本的形态特征提取算法难以直接应用。此时可以考虑基于小样本学习的方法<sup>[54]</sup>, 在无标签数据情况下利用无监督学习训练模型, 然后迁移至小样本数据中强化相关模型, 但模型的复杂程度往往较高, 推理过程对算力的需求较高, 在轨应用面临挑战。

另外, 不同于大气层内散射光照条件, 轨道空间受平行光影响, 易出现目标局部过亮或过暗的情况, 可能造成无法连续提取目标的形态或行为特征。除利用位置姿态变化提取异动特征外, 当前人体异常监控、自动驾驶等领域利用局部形态变化提取行为特征的相关研究结果 (如文献<sup>[55-57]</sup>), 可为信息非完备情况下的威胁行为特征提取提供借鉴。

在威胁行为预判和威胁等级定量评价方面, 主要基于专家系统<sup>[58]</sup>、模板匹配<sup>[59]</sup>和贝叶斯网络推理<sup>[60]</sup>等方法, 进行不确定知识表示, 以及行为意图和威胁等级的推理, 但相关参数的设置过于依赖于经验知识, 影响预测的准确性。为弥补这方面的不足, 发展出了多种基于学习训练确定推理网络参数的方法<sup>[61]</sup>, 但往往需要大量的样本数据保证训练效果。为了降低对大规模样本数据的依赖, 文献<sup>[62-63]</sup>将数据样本和知识约束相结合, 通过引入推理网络参数的单调性约束、参数的取值范围和部分参数的大小关系约束, 给出了网络参数的学习算法。文献<sup>[64]</sup>将领域专家知识转化为不等式约束, 给出候选参数的约束空间, 提出了一种基于采样数据集和约束空间候选参数样本的网络参数学习算法。然而, 轨道威胁的先验知识十分有限, 而且往往只是态势元素之间关系的语义级表达, 无法直接转化为推理网络参数的相关约束, 因此语义知识引导下的小样本学习训练方法需要进一步研究。

## 1.2 威胁规避自主决策规划

航天器威胁规避自主决策规划是根据任务场景的感知结果, 在可能的规避方案中选择符合自身行为准则的最佳方案, 并形成序列化的姿态轨道机动动作。

对于空间碎片、失效航天器等非对抗性威胁的规避, 目前以基于预测控制或人工势场 (Artificial potential fields, APF) 的单边优化决策方法为主。例如, Wang 等<sup>[65]</sup>和 Weiss 等<sup>[66]</sup>均采用滚动时域控制 (Receding horizon control, RHC) 策略实现接近控制和交会对接中的碰撞规避, 其基本思路是首先对威胁状态进行在线辨识或预测, 然后基于预测状态计算有限步长内的代价函数之和, 并串行优化出最优动作序列, 最终只执行当前时刻所需的最优动作并以此类推; 文献<sup>[67-69]</sup>则基于预测的空间碎片演化模型, 建立以最小化碰撞概率为目标的规避策略求解算法; 文献<sup>[70-72]</sup>设计了基于人工势场的航天器碰撞规避策略, 具体将航天器的规避机动设计成在一种抽

象人造力场中的运动，其中目标点（或区域）对航天器产生吸引力场，而威胁则产生排斥力场，基于二者合力生成的运动轨迹即为航天器的规避轨迹；此外，Hamed 等<sup>[73]</sup>和 Zhu 等<sup>[74]</sup>还进一步将预测控制和人工势场两类方法相结合，基于 RHC 策略在线调整 APF 的排斥力场系数，实现燃料最优碰撞规避。

目前来看，在非对抗性威胁规避方面，预测控制类方法能取得较好的决策规划效果，但威胁状态预测和串行优化动作序列两大过程在空间环境和约束复杂时往往存在占用计算资源较多、计算耗时较长的问题，对星载计算机处理能力提出了较高的要求。且规避决策质量与预测精度高度相关，一旦预测失准，可能会对航天器的安全造成严重影响<sup>[75]</sup>；人工势场类方法的计算量相对较小，很适合无地面依托的星上自主在线决策情景，但往往存在局部极小点和目标不可达导致规避失效或规划轨迹振荡的问题，必须设计额外的策略（如附加力场<sup>[76]</sup>、虚拟障碍<sup>[77]</sup>等）或引入一些新的势场概念（如流函数<sup>[78]</sup>、扰动流体<sup>[79]</sup>等）以弥补这一缺陷。

对于具有机动变轨能力的对抗性威胁（如抵近捕获、绕飞干扰等）的规避决策，可描述为轨道追逃博弈问题<sup>[80]</sup>，其本质上属于双边规划问题，需要考虑对手与我方航天器相冲突的规划目标及其对应策略，使得决策模型更为复杂。目前，相应决策方法主要基于微分对策理论，其基本思路一般为首先建立航天器追逃博弈微分方程模型，继而构造并求解相应的 HJB（Hamilton-Jacobi-Bellman）偏微分方程或两点边值问题获得双边最优博弈策略<sup>[81]</sup>。例如，针对航天器零和博弈问题，Jagat 等<sup>[82]</sup>提出一种基于状态依赖黎卡提（Riccati）微分方程的非线性控制律，相较于传统线性二次型微分对策方法具有更好的控制效果；Li 等<sup>[83]</sup>针对高维两点边值问题求解困难的缺陷，提出一种降维策略求解方法，将博弈问题转化为一个四维非线性方程，并利用混合数值算法求解方程，提升了博弈轨迹的规划效率；文献<sup>[84-86]</sup>还从多航天器博

弈、脉冲推力等角度对基于微分对策理论的轨道追逃博弈方法进行了研究。

以上研究成果大多假设博弈双方知晓彼此的代价函数和相关系数矩阵，相应方法称为完全信息微分对策方法。然而，实际对抗中这些信息往往难以事先获取，此时追逃博弈问题就变成了不完全信息微分对策问题，这也是目前轨道追逃博弈领域的研究热点<sup>[81]</sup>。对此，一般采取“先预估，后求解”的研究思路，即先在完全信息情景下设计基于微分对策的博弈策略，再采用适当的估计器在线预估对手的未知信息，最终将估计参数输入策略中实现自适应轨道博弈。例如，文献<sup>[87-90]</sup>利用 Kalman 滤波、当前统计模型滤波和交互多模型等方法估计未知信息，并取得了不错的决策规划效果。

总体而言，在基于微分对策的航天器追逃博弈决策方面，目前对完全信息条件下方法的研究比较充分，已涵盖双方/多方博弈、连续机动/脉冲推力变轨等多种任务情景，而对不完全信息条件下的方法研究尚处于相对初级的阶段，主要存在两方面的问题：一是，微分对策方法普遍存在模型复杂、状态量多、寻求解析解困难的固有缺陷；二是，与上述预测控制类方法相同，不完全信息条件下的规划决策效果十分依赖估计器的性能，当估计结果失准或时间过长时会严重影响航天器的安全。针对这些问题，相关学者尝试将深度强化学习、深度学习等机器学习方法与微分对策方法相结合<sup>[91-93]</sup>，利用神经网络强大的非线性逼近性能、特征提取与学习能力，以及网络前向快速传播的特性，弥补传统基于微分对策的航天器追逃博弈方法中存在的缺陷，值得后续进一步关注。

此外，面向航天器在轨应用，必须考虑威胁规避决策行为的稳定性和可靠性问题。目前，引入决策环节的博弈闭环系统的稳定性、最优性理论研究还比较初步。文献<sup>[94]</sup>给出存在信息延迟情况下非合作博弈系统纳什均衡解的逼近策略，并证明了闭环系统的稳定性。文献<sup>[95]</sup>基于自适应控制设计博弈策略，并

证明了相应随机动态博弈闭环系统的全局稳定性。策略最优性的相关研究主要包括对完全信息微分博弈的最优性证明<sup>[82, 96]</sup>以及不完全信息下基于估计-博弈闭环系统最优性的定性讨论<sup>[89]</sup>。此外,时滞、随机、脉冲、Markov等混杂控制系统闭环性能分析<sup>[97]</sup>的相关研究也可为轨道威胁规避决策过程的性能评价提供思路和方法上的借鉴。

### 1.3 威胁规避机动动作执行

动作执行是解算执行机构指令并完成规避机动动作的实施,包括姿态控制、轨道机动和载荷操作,要确保航天器在非受控环境下对环境及其自身的变化做出适应性反应并满足控制要求。

对付不确定性并获得高品质的执行效果一直是航天器控制领域重点关注的问题。目前,针对传统的姿态控制、轨道机动,以及合作目标的交会对接控制,已经形成了一套比较成熟的理论和方法体系,发展出包括“比例-积分-微分”(Proportional-integral-derivative, PID)控制<sup>[98-102]</sup>、滑模变结构控制(Sliding mode control, SMC)<sup>[103-106]</sup>、 $H_2/H_\infty$ 鲁棒控制<sup>[107-109]</sup>、线性二次型调节器(Linear quadratic regulation, LQR)控制<sup>[110]</sup>、基于干扰观测器的鲁棒自适应控制<sup>[111-113]</sup>、自抗扰控制(Active disturbance rejection control, ADRC)<sup>[114-115]</sup>、自适应有限时间控制<sup>[116-117]</sup>、基于特征模型的智能自适应控制<sup>[118-120]</sup>等多类方法,可实现存在挠性振动、多源干扰、模型不确定性、控制输入受限、姿轨耦合等情况下的高精度、高稳定度的敏捷机动和快速安全交会。

上述方法的技术成熟度比较高,这里不再做详细论述。围绕威胁规避机动控制的及时、适度要求,本文重点关注航天器与威胁目标的避撞机动/安全接近控制的相关进展。避撞机动动作执行要求追踪航天器和目标航天器在接近过程中,为确保自身安全,相对位置应保持一定的安全距离、且姿态同步性满足指定要求(比如观测要求)。航天器构型复杂多样、机动过程中的姿轨耦合、快速响应要求高、执行机构带宽

约束等对避撞机动控制律设计提出了挑战。

由于人工势场方法的势场模型可方便地描述运动空间的拓扑结构,且利用势函数的负梯度可进行安全接近控制律设计,简单有效,便于分析,成为解决避撞机动控制问题广泛应用的技术<sup>[70, 121-127]</sup>。例如,文献<sup>[70, 121-122]</sup>将APF方法和SMC设计方法相结合,考虑接近过程的位置约束、空间环境摄动干扰和不确定性等因素,给出了保证有限时间收敛的相对位置和相对姿态鲁棒控制律,实现了无碰撞的相对位置姿态跟踪。文献<sup>[123-124]</sup>进一步考虑姿轨耦合,基于6自由度相对运动动力学方程,设计了终端滑模控制律,证明了有限时间的收敛性。考虑到航天器与目标距离较近时敏感器视场受限对相对位置和姿态信息测量的影响,Dong等<sup>[125]</sup>在势函数中引入路径约束和视角约束,基于对偶四元数(Dual quaternion, DQ)姿轨耦合模型,提出了类PD控制器设计方法,实现了交会对接末段姿轨耦合的安全接近避撞控制。此后,文献<sup>[126-127]</sup>进一步针对控制输入受限的情况,通过引入饱和函数和线性抗饱和补偿器等,给出了避撞机动的饱和控制律设计方法。文献<sup>[128]</sup>综合考虑系统不确定性和外部干扰,设计了无抖振的神经网络自适应滑模控制器,实现翻滚目标逼近的姿轨耦合跟踪控制。文献<sup>[129]</sup>考虑了带有可微分时变输入时延、执行器故障,以及存在外部扰动和目标航天器质量不确定性情况下的椭圆轨道航天器电磁交会控制问题,提出了基于中间观测器(Intermediate observer, IO)的自抗扰控制器,保证了追踪航天器与目标航天器相对位置的最终一致有界性。文献<sup>[130-131]</sup>针对相对运动测量失效或精度难以保证的情况,提出了基于图像视觉伺服的相对位姿耦合跟踪控制设计方法,实现了对空间翻滚目标的高精度安全接近控制。

以上研究结果将航天器的外形简化为球体,对运动空间约束的描述比较粗糙,往往需要一个较大范围的预设好的危险区域来确保机动控制的安全性。这会造成空间冗余现象,增加了禁飞区域面积,导致

航天器可能会采取一些不必要的机动,难以保证执行效率<sup>[132]</sup>。为更加准确地描述空间物体的外包络,文献<sup>[133]</sup>针对凸形航天器,提出了具有一定通用性的刚体势场描述模型,并针对空间非合作目标的安全接近问题开展了控制方法研究;针对非凸形航天器,进一步采用特定的终端几何构型进行约束描述,初步探索了非凸形航天器安全接近问题。Wang 等<sup>[134]</sup>在复杂航天器三维外形视觉重构的基础上,设计了基于混合高斯模型(Gauss mixture model, GMM)<sup>[135]</sup>的 GMM-APF 控制器,实现对复杂外形目标航天器的安全接近。

近年来,针对控制算法收敛的快速性要求,固定时间(Fixed-time control, FTC)的姿态轨道控制问题备受关注<sup>[136-137]</sup>。Chen 等<sup>[138]</sup>基于固定时间控制框架(如文献<sup>[139]</sup>),提出了基于混合高斯模型的固定时间控制律(GMM-FTC),保证了收敛时间不受初始相对位置偏差的影响,确保响应的快速性。Huang 等<sup>[140]</sup>针对非合作目标绕飞跟踪控制问题,建立了基于视线坐标系(Line of sight, LOS)和修正的罗德里格斯参数(Modified Rodriguez parameters, MRPs)的6自由度绕飞运动动力学方程,并设计了自适应固定时间非奇异终端滑模控制器,实现了对目标的绕飞和观测。Hu 等<sup>[141]</sup>提出了针对自由翻滚目标交会任务的固定时间时变滑模位置跟踪控制方法,实现位置跟踪误差的固定时间收敛,且所设计的滑模面提供了收敛时间调整规则的显式表达。

总体而言,围绕航天器规避动作执行的及时、适度要求,考虑目标航天器复杂外形、姿轨耦合同步、控制输入受限、快速收敛等因素,在传统基于时间的控制框架下(数据采样和控制律更新都是基于固定时间周期进行的),已经给出了一些解决方案。然而,碎片碰撞、敌意干扰等作为航天器执行既定任务时的随机事件,会触发不同控制策略之间的切换与更新,给闭环系统的稳定性及切换控制器的设计带来新的挑战。近年来,基于事件驱动的控制框架逐渐受到关注,

通过引入事件触发机制对控制策略的更新与否进行判断,可在确保随机事件触发下整个控制过程稳定的同时,有效节约通信和计算资源<sup>[142-146]</sup>。因此,基于事件/时间混合驱动系统的控制律设计,值得后续进一步关注。除此之外,无人机、机器人领域基于学习的智能控制方法(如文献<sup>[147-150]</sup>)在处理复杂动态不确定性方面展现出一定的优势,可为大尺度下复杂空间环境下的规避机动动作执行提供有益的借鉴和参考。

#### 1.4 自主控制系统架构与模型

“感知-决策-执行”闭环的控制系统架构涉及系统组成及其关联关系、信息流逻辑等多方面,决定了系统的总体性能。其模型是系统综合分析和优化设计的基础,是系统内在相互作用机理和演化规律的客观科学描述。

陆、海、空、天无人系统几十年的发展,出现了多种类型的自主控制系统架构。目前广泛应用的自主控制系统架构主要包括分层递阶式、反应式以及混合式<sup>[151]</sup>。分层递阶式架构最早由 Saridis<sup>[152]</sup>于1979年提出,是一种各功能模块间次序分明的串联结构,又称为“感知-规划-执行”(Sense-plan-action, S-P-A)架构,易实现高等级智能。反应式架构是由 Brooks<sup>[153]</sup>于1986年提出的一种分层并联结构,以并联形式布置决策规划的各模块,同步接收感知信息,具有“感知-动作”的分层并联结构特点,对环境适应性较强。上述两种架构的特点对比见表1。

结合上述两种架构的优点, Gat<sup>[154]</sup>最早提出了一种混合式架构,通过全局规划生成面向目标的分层递阶式行为,通过局部执行生成面向动作的反应式行为。此后,混合式架构的内涵不断丰富,发展出 AuRA (Autonomous robot architecture)<sup>[155]</sup>等形式。基于上述架构已构建多个航天器自主运行与任务管理系统,包括美国“深空1号”(Deep space 1, DS-1)远程智能体系统<sup>[156]</sup>、“地球观测1号”(Earth observing one, EO-1)自主航天器实验软件系统<sup>[157]</sup>以及中国“嫦娥四号”(Chang' E-4)

自主运行管理系统<sup>[158]</sup>等。近年来,部分学者融合多智能体(Agent)在自主性、交互性等方面的优势,提出了基于多Agent的混合式架构<sup>[159]</sup>,大致分为两类:1)将系统中分层递阶式模块、反应式模块以及硬件模块中的子模块抽象为Agent<sup>[160]</sup>;2)将Agent内部通过分层递阶式、反应式进行构建<sup>[161]</sup>。该架构广泛适用于非结构化动态环境,具有较好的开放性和灵活性。

在上述自主控制系统架构的启发下,面向未来空间任务对航天器智能自主控制技术的发展需要,文献<sup>[19]</sup>提出了一种“感知-决策-操控”星上闭环的系统结构,并引入健康管理模块,实现数据有效性判断、故障诊断和进化修复等。以此为基础,文献<sup>[12]</sup>进一步提出了“感知-演化-决策-执行”(Observation-evolution-decision-action, OEDA)星上闭环框架,其中,演化环节可通过对软硬件资源的自组织调配,实现角色切换,从而使航天器具备根据不同任务改变自身角色的能力,提升航天器执行任务的泛化能力。

另一方面,现有针对复杂系统的模型描述方法主要包括基于智能推理的方法、基于混杂系统模型的方法、基于非线性动力学的方法<sup>[163-164]</sup>等。其中,基于智能推理的方法可分为功能派<sup>[165-166]</sup>和结构派<sup>[167-168]</sup>,侧重于刻画系统的外部特性。基于混杂系统模型的方法包括混杂Petri网法<sup>[169]</sup>、混合逻辑法<sup>[170]</sup>等,在描述具有离散跳变与连续动态过程耦合特性的系统方面优势明显,可为航天器“感知-决策-执行”星上闭环智能自主控制系统建模提供理论和方法上的借鉴。

## 2 轨道威胁规避自主控制面临的主要瓶颈问题

目前,围绕空间碎片/失效卫星碰撞规避,以及绕飞干扰/抵近捕获等具有机动能力非合作目标的规避任务,在非合作目标相对运动估计、机动检测、形态特征识别、威胁等级评估,以及碰撞概率模型、规避策略设计、避撞机动与安全交会动作执行等方面已经形成了一定的技术积累;在支撑“感知-决策-执行”星上闭环的智能自主控制系统架构方面也有了比较初步的研究。然而,由于航天器自身及其运行环境的特殊性(见表2),要在复杂空间环境、资源严重受限等条件下实现对轨道威胁的及时、适度、自主应对,仍然面临如下三方面的主要瓶颈问题。

### 2.1 大时空尺度复杂空间环境下威胁行为特征的提取与融合

轨道空间跨度大,威胁目标的测量距离从米级到千公里级,且远距离成像分辨率低,甚至仅有视线方向测量<sup>[29-30]</sup>;空间目标轨道机动检测很大程度上自身受观测能力和目标机动特性的制约,观测信息不完备,观测量往往较为稀疏<sup>[33]</sup>。空间光照条件复杂,目标反射不均匀导致局部图像过亮或过暗,成像连续性差。轨道威胁目标探测的可见性随时间、空间、光照条件变化的差异性大,对目标的运动和形态测量信息不完备,再加上轨道目标图像样本少且分辨率普遍较低,给目标形态特征提取、异动行为检测带来挑战。此外,碰撞、抵近、绕飞等轨道威胁行为特征不明显,难以根据单一维度特征进行判定,并且威胁影响存续时间长(威胁产生、变化、消失的全生命周期),根据单一时刻特征难以判定。因此,需要综合目标形态、

表1 分层递阶式架构与反应式架构优缺点对比<sup>[162]</sup>

| 序号 | 架构类型    | 项目名称 | 描述   |
|----|---------|------|--|
| 1  | 分层递阶式架构 | 优势不足 | 易实现高等智能<br>缺乏实时性和灵活性,可靠性不高                 |
| 2  | 反应式架构   | 优势不足 | 实时性强<br>多控制回路对同一执行机构存在争夺冲突,系统可预测性差、缺乏高等级智能 |

运动甚至历史行为才能对威胁的类型、意图、等级给出准确判断。

### 2.2 业务连续与威胁规避冲突下的动态决策与在线规划

航天器轨道约束强，运行速度大，横向机动能力有限（典型卫星横向机动加速度最大约  $0.01\sim 0.05\text{m/s}^2$ ），规避机动的燃料消耗严重影响在轨寿命；通信、导航等任务对航天器的业务连续性要求苛刻，与威胁规避任务存在冲突，对姿态、轨道机动等规避动作的时机和力度要求高。因此，需要航天器综合最大化生存概率、最大化任务完成度、最小化燃料消耗等指标，在线求解复杂多目标多约束优化问题。

而且，空间碎片 / 失效卫星碰撞、绕飞干扰 / 抵近捕获等威胁行为不确定，航天器威胁规避是面向不确定威胁行为的动态博弈过程<sup>[80]</sup>。目前的博弈决策主要面向特定场景和相对确定的任务模式，虽然具有一定的泛化能力和鲁棒性，但在应对未知动态场景和不确定威胁行为时依然面临挑战。传统的决策求解过程不能根据场景变化自适应调节目标函数、约束、优化变量等要素，缺乏对相应搜索空间的动态调节能力，容易导致搜索维数过度等问题，无法实现计算资源受限情况下的快速在线决策，难以在轨应用。因此，面对决策过程的动态不确定性，为确保决策行为的稳定性和可靠性，需要根据威胁行为以及场景的变化自适

应调节优化目标和决策模型，并在资源受限情况下进行快速在线求解，给出合理有效的规避策略。

### 2.3 资源严重受限下快速应对威胁的智能自主控制系统设计

航天器受制于功耗、体积、质量、空间辐射等因素，星上敏感器、计算、存储等资源严重受限，加之其长期在轨运行且设备难以更换升级，星上资源受限问题尤为突出。然而，威胁规避任务中威胁目标具有随机性和动态不确定性，规避过程涉及目标运动状态估计、机动检测、形态特征识别、威胁等级评估、决策模型构建、规避策略设计、机动及交会动作执行等诸多环节，导致感知、决策和执行各功能模块的组成结构复杂，功能模块内部及模块之间的关联关系和信息流交互复杂。同时，面对威胁规避任务的实时快速应对要求，威胁精准感知和规避自主决策对资源的需求比较高，面临时间和资源的严重冲突。因此，要在资源严重受限条件下实现“感知-决策-执行”星上闭环，并确保系统的协调运行，一方面需要从系统的逻辑架构入手，系统地考虑感知、决策、执行各组成元素间的相互作用关系，构建多层级协调关联和信息共享机制，实现三者的有机共融和深度融合；另一方面，需要从信息物理深度融合的角度，建立面向时间 / 事件混合驱动系统的协调运行机制，统筹优化时空多域资源，消解时间和资源上的冲突，使系统总体性

表 2 航天器自身及其运行环境的特点

| 项目名称   | 特点描述  |
|--------|---|
| 硬件可维护性 | 服役周期长，“运载 + 维护”成本高，维修操作技术难度大，需要长时间以“不变的硬件”适应“多变的威胁”                                     |
| 星上资源   | 星上敏感器、计算、存储等资源严重受限（计算处理能力 $400\sim 1\,000$ 百万次 / 秒）<br>需要统筹优化软硬件资源，动态协调、消解冲突，降低对星上资源的依赖 |
| 光照条件   | 空间成像条件恶劣，目标反射不均匀导致局部图像过亮或过暗、成像连续性差；地影区导致不可观测弧段长；色彩单一、信息量有限                              |
| 威胁行为特征 | 交会、绕飞、伴动等威胁行为特征不明显，需要长期关注多类特征，给出综合判断  |
| 时间跨度   | 威胁影响存续时间长（威胁产生、变化、消失的全生命周期）   |
| 空间跨度   | 目标测量从米级到千公里量级，远距离时成像分辨率低、只有方位信息，且往往具有稀疏性  |
| 轨道约束   | 轨道速度大，横向机动能力弱（典型卫星横向机动加速度最大 $0.01\sim 0.05\text{m/s}^2$ ），变轨代价高                         |

能达到最优，降低对星上资源的依赖；进而缩短“感知-决策-执行”闭环的时间开销，提升动态应对不确定性威胁的处置能力。

综上，“感知-决策-执行”星上闭环需要充分考虑三者之间嵌套、耦合关系，进行一体化框架下的整体分析与设计，并通过在星上资源的动态调配消解冲突，形成“感知-决策-执行”一体化星上闭环的威胁规避智能自主控制系统（简称为“感知-决策-执行”一体化控制系统）。

### 3 威胁规避智能自主控制的若干基础问题

航天器“感知-决策-执行”一体化控制系统架构的示意图如图2所示。系统以航天器和环境目标组成的动态系统（“航天器+环境目标”）为被控对象，包含多个嵌套耦合的控制回路，比如：“测量-规划-执行”闭环以姿态、轨道测量信息为反馈量，完成轨道机动、姿态控制等动作执行，对应传统的“导航-制导-控制”回路；“感知-决策-执行”（也即“测量-态势判断和威胁行为预测-行为决策-动作规划-执行”）回路以包含威胁行为特征、属性及意图等的

态势特征作为反馈量，通过决策环节引入闭环回路的反馈机制，实现系统行为随场景变化和不确定性威胁行为的自主调整；进一步，在“感知-决策-执行”闭环回路中引入“资源分配和任务调度”模块，通过对资源约束和性能要求之间的统筹优化，以及星上受限资源的动态调配，消解事件响应冲突、时间和资源冲突等，保障航天器这类资源严重受限系统面对威胁规避复杂任务时的协调运行，实现控制系统对复杂动态任务的及时、适度、自主应对。

上述嵌套耦合的多层闭环控制回路通过指令下行、层间并联、层间反馈等方式有机地组织在一起，形成具有多层级联的混杂架构，支撑感知、决策、执行各层次及其内部功能模块之间的信息共享与深度融合。一体化控制系统中时间驱动和事件驱动相混合，针对系统运行节点间存在时间异步性、威胁事件触发具有随机不确定性，基于时间冲突、事件响应冲突消解机制进行多层嵌套控制和并发任务的协调，解决时空多域冲突，实现资源约束与性能要求之间的统筹优化，以及资源的动态调配。相比此前提出的 OEDA 闭环框架<sup>[12]</sup>，本文重点强调特定“角色”下以最小

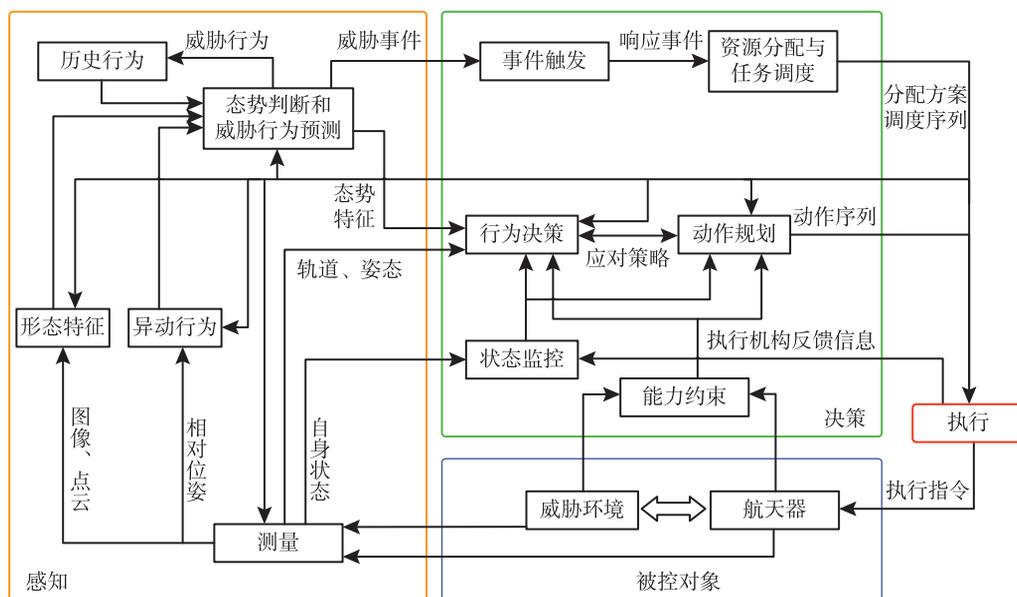


图2 航天器“感知-决策-执行”一体化控制系统逻辑架构示意图

的代价规避威胁，不再突出角色切换对应的“演化”环节，将“感知-决策-执行”闭环和“资源分配与调度”进行适度解耦，使系统框架层次、逻辑相对清晰，便于一体化系统建模、优化设计和综合分析。

综上所述，航天器“感知-决策-执行”一体化控制系统属于信息物理深度融合、时间/事件混合驱动、多层次多环路嵌套耦合的混杂动态系统，对一体化控制系统的研究涉及最优估计、图像识别、决策规划等多学科多领域。为确保一体化控制系统的行为稳定可控且满足预期目标，需要从系统科学的角度，探讨一体化控制系统的行为描述、反馈机制设计、闭环性能分析，以及系统行为的可信评价等方面需要重点关注的基础问题。

相比感知、决策，动作执行对应的航天器姿态轨道控制，发展相对成熟和完善。在一体化框架下，动作执行的能力模型作为决策环节的约束条件进入闭环，其面临的基础问题（如时间/事件混杂系统控制）在决策和一体化控制系统建模及协调运行机制方面也有进一步体现，本节不再做单独讨论。

下面，针对航天器威胁规避智能自主控制技术面临的瓶颈难题、面向在轨应用的实际需求，从“感知-决策-执行”一体化控制系统建模、轨道威胁感知、自主规避动态决策，以及自主行为可信评价 4 个方面，探讨需要重点解决的基础问题。

### 3.1 航天器“感知-决策-执行”一体化控制系统建模

建模是系统仿真验证、预测和综合分析的关键基础，要求能够深入和定量地描述系统行为的内在演化规律和因果关系。“感知-决策-执行”一体化控制系统多层次多环路嵌套耦合，时间/事件混合触发，组成元素之间的依赖、竞争、关联等作用关系复杂；系统行为的描述涉及最优估计、图像识别、决策规划等多学科多领域，系统状态包含威胁等级、形态特征、运动参数等多维度变量，单一数学语言无法恰当描述。

因此，如何抽象感知、决策和执行行为的特征要素，刻画“数据信息-状态特征-威胁判定-决策规划-动作执行”之间的内在关联特性，形成对各层级系统行为的简洁表达；如何描述并优化系统多层次多环路的串并联、反馈等关联形态，形成结构简明、性能可靠、开放灵活的一体化控制系统架构，建立多层次级联系统模型；采用何种性能指标衡量系统的协调运行能力，以及如何建立面向多层嵌套控制和并发任务的时间/事件冲突消解机制，实现系统内部资源和约束的自组织调整，是一体化控制系统建模需要解决的关键基础问题。

### 3.2 复杂空间环境下轨道威胁行为的融合感知

基于目标形态、运动、历史行为等多维度信息的融合感知，是破解大时空尺度复杂空间环境下探测目标可见性差异显著、测量信息不完备、威胁行为特征不明显所带来威胁精准感知难题的有效途径，其难点在于威胁行为与目标形态、运动特征等时空关联关系的表征与学习，涉及形态特征提取、异动特征学习、多模态特征融合推理等多个方面。

因此，采用何种特征量刻画轨道威胁的行为特征，并对大时空尺度变化下轨道威胁的历史行为进行表达；如何表征轨道异动行为与目标形态变化、运动状态之间的关联关系，以及采用何种机制进行关联关系的增量学习；采用何种模型对形态、运动、历史行为等特征进行综合推理，以及如何结合知识进行推理模型的小样本学习，构建多模态特征融合的威胁行为及等级推理网络，实现对威胁行为的准确判断，是轨道威胁融合感知需要重点解决的基础问题。

### 3.3 复杂多约束下威胁自主规避的动态决策

威胁规避决策要在星上资源严重受限的情况下，确保航天器执行既定任务的同时，以最小的代价实现对碰撞、干扰等威胁的及时有效应对，优化目标维度多、差异大、与约束条件的影响关系复杂，威胁目标行为不确定，自主规避决策要素多、决策空间大。

与此同时，碎片碰撞、故意干扰等作为航天器执

行既定任务时的随机事件，当满足一定触发条件时，会触发规避策略的动态更新，以及底层规避动作执行控制器的切换。事件触发条件、策略更新准则、控制执行过程中的切换不仅影响星上计算、存储、通信资源的消耗，还影响一体化闭环系统行为的稳定性。需要设计适合“感知-决策-执行”一体化控制系统的反馈机制，实现对动态场景下决策空间的自适应约减，满足在轨精准决策与轻量实现的要求；需要综合资源约束和稳定性要求设计恰当的事件触发条件、优化规避策略的更新准则、合适的控制器切换条件，确保资源受限条件下、闭环系统行为面向场景变化及威胁行为不确定时的稳定性和鲁棒性。

因此，如何根据任务要求、变化场景和威胁特征，并结合航天器自身能力确定威胁事件触发条件，选定初始决策模型；如何根据威胁态势的推演结果和感知结果在线调整决策模型的结构和参数、优化搜索空间，构建反馈机制对决策空间进行自适应约减，使模型复杂度和搜索空间因势而变，实现复杂动态决策问题的快速求解；如何对规避策略的最优性、鲁棒性，以及引入自适应决策过程的一体化控制闭环系统行为的稳定性进行分析和综合评价，建立决策过程性能评价的理论基础，是威胁规避自主决策需要进一步探讨的基础问题。

### 3.4 航天器智能自主行为的可信评价

智能自主系统其行为的可信评估是由理论方法研究转入工程实际应用并保证性能稳定的关键环节。航天器“感知-决策-执行”一体化智能自主控制系统对推理、学习等的应用带来智能可解释性、真实场景下性能稳定性、虚假关联有效区分等系统验证与评估的可信性问题，需要一套可信性评估理论与方法对系统能力边界和可回溯性进行衡量判定。

因此，如何建立“任务/环境-系

统状态-任务完成度/智能水平”之间的关系映射，并据此提炼一体化控制系统的关键特征，给出关键特征与能力关联度的准确刻画，构建系统的可验证性和可评价性准则；如何依据任务/环境和系统状态的关联关系设计完备的问题域和评价科目库，通过有限次测试实现对系统的可信性评价，是航天器智能自主行为可信评价需要解决的关键基础问题。

以上4个方面的基础问题既有独立性，又互为约束，其相互关系如图3所示。一体化控制系统建模研究系统行为的简洁描述方法和协调运行机制，形成一体化控制系统的表达模型，可为“感知-决策-执行”一体化控制系统的优化设计提供分析模型，通过一体化设计为感知、决策、执行环节提供功能要求、性能指标、设计约束等优化要素；同时可为系统自主行为的可信评价提供基础模型。威胁感知、规划决策研究满足任务要求的设计算法，为可信评价提供满足性能指标和资源约束的感知、决策算法。可信评价对系统自主行为的可信性和能力水平进行定量评估，反过来指导感知算法和决策算法的优化设计。

## 4 结束语

伴随着频繁发生的太空安全事件，航天器执行既定任务时的威胁规避逐渐成为其日常操作中的一项常规任务，对轨道威胁的自主规避能力提出了迫切发

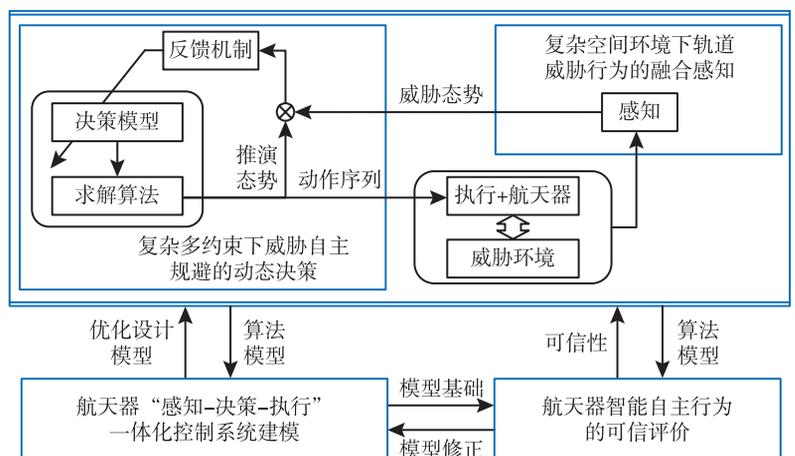


图3 4个方面基础问题之间的相互关系示意图

展需求。本文基于威胁目标感知、自主决策规划、规避动作执行、自主控制系统架构相关研究进展的调研分析，总结给出了轨道威胁规避智能自主控制所面临的主要瓶颈问题，分析指出发展“感知-决策-执行”一体化控制是实现航天器智能自主的有效手段。进一步围绕“感知-决策-执行”一体化控制系统建模、设计方法、行为评价等方面，提出需要重点加强“一体化控制系统建模、威胁行为的融合感知、威胁规避动态决策、自主行为可信评价”4个技术方向相关基础理论问题的研究，牵引未来航天器智能自主控制技术的创新发展。

展望未来，随着中国大规模星座计划的推进部署，航天器面对规避威胁任务的智能自主控制技术将成为确保星座安全稳定运行的重要使能技术。航天器“感知-决策

-执行”一体化控制系统架构的不断完善，感知、决策、执行等智能技术的不断发展及其工程实用化程度的不断提高，将颠覆“星地大回路”的传统任务模式，使航天器具备透彻感知理解、审时度势、合理

决策、精准执行的类人智能，从而实质性地提升航天器自主应对轨道威胁的能力，从根本上确保中国空间资产安全。○

来源：《自动化学报》

## 作者简介



**袁利** 中国空间技术研究院研究员。主要研究方向为航天器自主控制，鲁棒容错控制技术。



**姜甜甜** 北京控制工程研究所高级工程师。主要研究方向为航天器控制技术。本文通信作者。



### 祝贺学会会士谭铁牛院士、钱锋院士当选政协第十四届全国委员会常务委员，王巍院士当选第十四届全国人民代表大会常务委员会委员

近日，第十四届全国委员会常务委员名单以及十四届全国人大常委会委员名单公布。中国自动化学会会士、常务理事，南京大学党委书记谭铁牛院士；中国自动化学会会士、监事，九三学社中央常委，上海市政协副主席钱锋院士当选政协第十四届全国委员会常务委员。中国自动化学会会士、常务理事王巍院士当选第十四届全国人民代表大会常务委员会委员。详情请查看：<http://www.caa.org.cn/article/191/3536.html>

# 机器人轨迹跟踪精度对铣削再生颤振的影响

文 / 王琦珑 王伟 李博 郝大贤 贡超

摘要：针对工业机器人低轨迹精度导致的轨迹跟踪误差，分析了切削过程中动态切削厚度和时滞效应对轨迹跟踪误差的响应。考虑轨迹跟踪误差引起的加工底面过程阻尼增加现象，建立包含轨迹误差的动态切削力模型。通过铣削实验验证了该模型，发现了机器人轨迹跟踪误差引发的动态切削厚度变化、时滞效应以及过程阻尼增加等现象能够提高临界轴向切深，扩大铣削加工的稳定域，但会降低表面质量与尺寸精度。本文的理论模型解释了在机器人铣削实验过程中出现的颤振发生又逐渐消失的特殊现象，为提高机器人铣削效率及抑制铣削颤振提供了理论模型。

关键词：机器人 轨迹跟踪精度 高速铣削 颤振稳定性 过程阻尼

## 0 引言

铣削加工过程中存在的颤振现象，是影响铣削质量与效率的重要因素。颤振的发生会增加工件表面的粗糙度，影响加工质量，导致工件报废。保守的工艺参数虽然可以防止颤振的发生，但往往也无法发挥出机械的全部性能，无法让加工效率最大化。因此针对颤振稳定性的研究至关重要。

国内外学者已经进行了很多关于铣削稳定性影响因素的研究。Kaliński 等<sup>[1]</sup>认为减少颤振的方法之一取决于主轴转速的选择，并构建了不同位置点最佳主轴转速的映射图。Zatarain 等<sup>[2]</sup>使用子空间迭代法评估具有不规则螺距的铣刀的加工稳定性。Chao 等<sup>[3]</sup>提出了应用于 5 轴 CNC（数控机床）加工中心的自动调整刀具轴方向的方法，以避免沿刀具路径的颤动。Ozkirimli 等<sup>[4]</sup>提出了一种数值频域铣削稳定性求解方法，在零阶近似法（ZOA）中引入速度平均时间延迟项，通过对特征值问题的迭代求解，实现对各种刀具铣削稳定域的预测。Tunc 等<sup>[5]</sup>分析了过程

阻尼的非线性现象，深入研究了过程阻尼对多模式铣削系统的影响，得出了若模态过程阻尼不足，则不能抑制低频模态，从而导致铣削系统不稳定的结论。曹宏瑞等<sup>[6]</sup>提出了一种考虑变速主轴动态的预测高速铣削颤振稳定性的方法，利用高速主轴系统的动力学模型，通过仿真和实验系统地研究主轴和轴承的速度效应，发现具有速度效应的稳定区域明显向低速区域偏移。李鹏松等<sup>[7]</sup>考虑一类单自由度的非线性再生型颤振系统，分析时滞参数对稳定性的影响。邓聪颖等<sup>[8]</sup>提出了一种能够快速评估机床位置相关铣削稳定性的方法。万敏等<sup>[9-13]</sup>分析了铣削系统的多时滞效应，认为机床加工中的多时滞效应是由刀具跳动效应或螺旋角不均匀引起的。这些文献提出了一个统一的铣削颤振预测模型，证实了使用半离散法求解多时滞效应是有效的。

数控机床虽在铣削稳定性和加工质量上有着更好的表现，但对于大型构件的铣削加工任务，数控机床的成本高昂、灵活性差。铣削机器人则具备可扩展的工作空间，且在同等工作空间下其成本远低于数控机

床,为解决大型构件铣削难题提供了新的解决思路。然而,机器人串联构形导致的刚度较弱问题<sup>[14]</sup>使机器人绝对轨迹精度远低于数控机床,进而引起切削力和过程阻尼变化。在机床加工中可被忽略的轨迹跟踪误差是影响机器人加工质量的关键因素之一,其会对机器人铣削稳定性预测造成明显的影响。目前诸多学者对机器人加工误差、精度补偿和加工工艺等问题开展了研究<sup>[15-17]</sup>。对机器人铣削颤振的研究主要集中在机器人刚度、机器人动态行为和机器人铣削颤振机制。Tyapin等<sup>[18]</sup>基于静态模型估算切削力,并通过少量实验得到各关节刚度。王战玺等<sup>[19]</sup>认为机器人的低刚度是导致机器人铣削颤振的主要因素之一。Tunc等<sup>[20-21]</sup>研究了用于机器人铣削的六脚平台的动力学特性,发现其特性在不同的位置下发生变化。李静等<sup>[22]</sup>使用再生颤振理论分析颤振问题,考虑交叉传递函数并绘制了机器人稳定性 Lobe 图。郝大贤<sup>[23]</sup>利用再生颤振理论预测机器人高速铣削稳定域,验证再生颤振理论同样适用于机器人铣削,通过实验发现较短路径下机器人位姿对动态特性的影响很小。在机器人铣削领域,对轨迹跟踪误差的研究主要集中在分析产生轨迹跟踪误差的原因,包括动态切削力引起的关节弹性变形,关节传动机构间隙以及控制迟滞等因素<sup>[24]</sup>。在此基础上,针对不同原因,提出轨迹跟踪误差的补偿算法与控制策略,提高机器人加工精度<sup>[25-28]</sup>。但少有学者提及机器人的轨迹精度与机器人加工颤振之间的关系。

本文基于文<sup>[23]</sup>,研究了机器人高速铣削过程中的轨迹精度对加工稳定性的影响。测试了机器人的轨迹跟踪误差;分析了机器人轨迹跟踪精度对动态切削厚度和时滞效应的影响,讨论了轨迹精度与加工过程阻尼系数的关系;建立了考虑机器人轨迹精度的铣削动力学模型,利用改进的半离散方法求解了机器人铣削的稳定域,绘制了稳定性 Lobe 图;对机器人进行了铣削实验,通过实验验证了理论模型,并对实验中的现象进行了讨论。

## 1 机器人轨迹跟踪误差实验

不同于机床的高精度特点,机器人的本体结构导致其轨迹精度较差。研究轨迹精度对加工稳定性的影响,首先需要对机器人进行了轨迹精度实验,以获得机器人轨迹误差的参数。

选择一段较长的轨迹进行实验,分别沿基坐标系的 X 轴与 Y 轴移动 500mm,通过激光跟踪仪采集运动轨迹数据。将靶球固定在工具 TCP (工具中心点) 端,采用 Leica 激光跟踪仪进行测量,如图 1 所示。

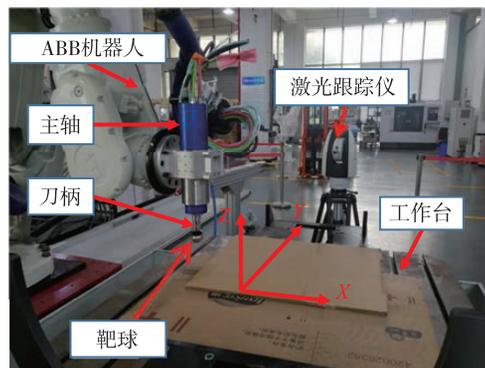


图 1 轨迹跟踪误差实验

设置激光跟踪仪采样频率为 1000Hz,通过 PolyWorks 软件进行记录。实验中观察得到机器人轨迹波动在 3 ~ 20Hz,设计一种带通滤波器,滤除测量过程中的趋势项和高频噪声。带通滤波器的阻带频率为 2Hz 时,通带频率为 3Hz。通带频率为 20Hz 时,阻带频率为 30Hz。

滤波后,机器人沿 X 轴方向运行时 Z 方向的轨迹误差如图 2 所示,轨迹误差幅度不超过 0.12mm。沿 Y 轴方向运行时 Z 方向的轨迹误差如图 3 所示,幅度不超过 0.02mm,两者的轨迹波动幅度相差很大。

对采集到的信号进行 FFT (快速傅里叶变换),如图 4、5 所示。当机器人沿 X 轴运动时,Z 轴方向误差出现明显的峰值,频率在 13Hz 左右,说明机器人在运行过程中误差波动比较明显。当机器人沿 Y 轴运动时,波动峰值并不明显。机器人轨迹误差波动的

特点是其幅值与周期随机器人的位姿而发生变化, 并且存在一定的随机性。由于机器人在一段较小的工作区域内, 其频率变化较小, 将其进行近似周期化。

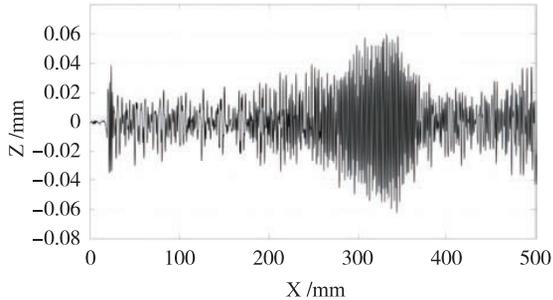


图2 机器人沿 X 轴运行时 TCP 点在 Z 轴方向上的波动

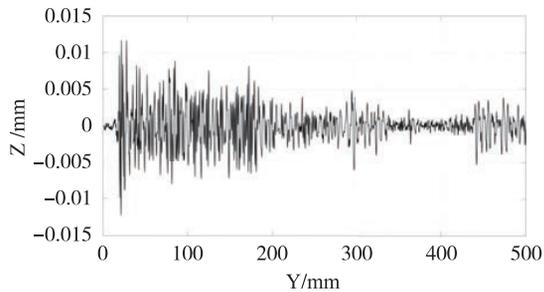


图3 机器人沿 Y 轴运行时 TCP 点在 Z 轴方向上的波动

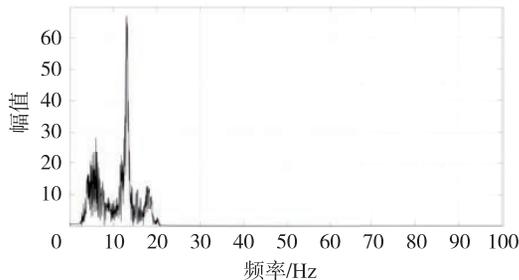


图4 滤波信号沿 X 轴的频谱

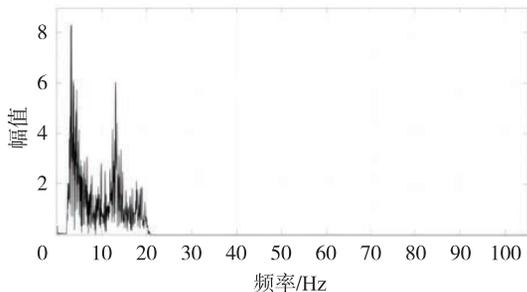


图5 滤波信号沿 Y 轴的频谱

同理采集机器人在 X 轴方向运行时 TCP 点在 Y 轴方向的误差波动, 以及机器人在 Y 轴方向运行时 TCP 点在 X 轴方向的误差波动, 如图 6、7 所示。机器人沿 X 轴方向的误差波动要远大于沿 Y 轴的波动, 影响加工过程中的动态切削厚度, 进而影响加工稳定性。为将系统简化, 下文在铣削力仿真时忽略 Y 轴方向的波动, 只考虑 X 轴方向的波动。

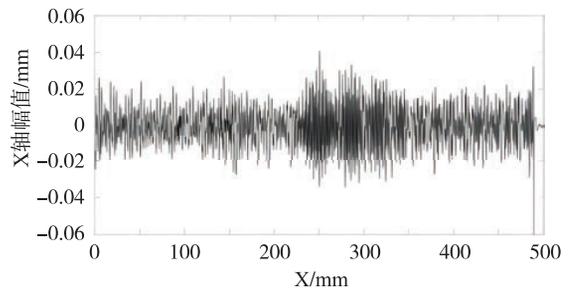


图6 机器人沿 Y 轴运行时 TCP 点在 X 轴方向上的波动

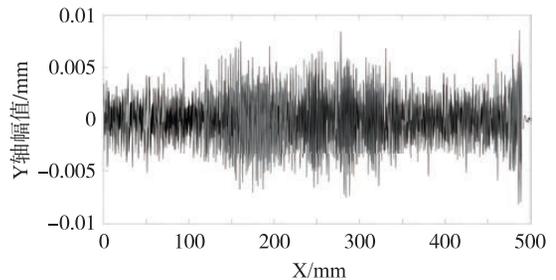


图7 机器人 X 轴运行时 TCP 点在 Y 轴方向上的波动

## 2 机器人铣削系统动力学模型及稳定性分析

机器人具有较高的轨迹误差会影响切削过程中的动态切削厚度和时滞效应。同时, 沿 Z 轴的波动会导致刀具与工件底面的过程阻尼增大, 影响加工稳定性。本节将机器人轨迹跟踪误差引入铣削力模型, 建立了新的系统动力学模型, 并分析颤振稳定性, 绘制了铣削稳定性 Lobe 图。

### 2.1 铣削力模型

如图 8 所示,  $XOY$  为工件坐标系, 进给运动沿 X 轴方向。  $X_1O_1Y_1$ 、  $X_2O_2Y_2$  分别定义为前一个切削位置和当前切削位置的刀具坐标系, 原点位于刀具中心。

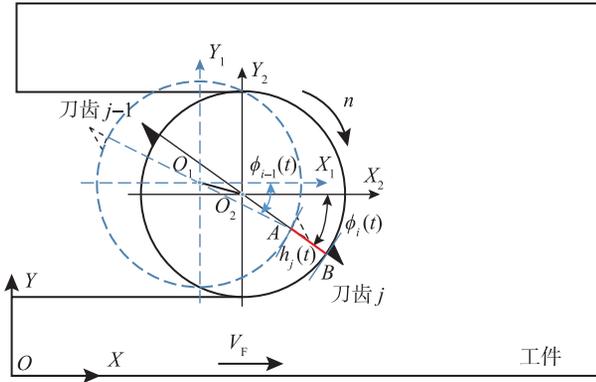


图 8 考虑机器人跟踪精度的铣削系统模型

将轨迹跟踪误差近似为周期为  $T_{er}$  的简谐函数，则考虑机器人轨迹误差条件下刀具 TCP 点位置的一般方程为

$$\begin{cases} x_{0er} = V_f t + e_x \sin(\omega_{ex} t + \theta_x) \\ y_{0er} = e_y \sin(\omega_{ey} t + \theta_y) \end{cases} \quad (1)$$

其中， $x_{0er}$ ， $y_{0er}$  为 TCP 点在  $XOY$  坐标系中的位置， $V_f$  为机器人的铣削进给速度， $e_x$ 、 $e_y$  分别为机器人沿  $X$  轴和  $Y$  轴方向的轨迹波动幅值， $\omega_{ex}$ 、 $\omega_{ey}$  分别为机器人在  $X$  轴、 $Y$  轴方向的误差波动角频率，受到轨迹误差波动周期的影响。 $\theta_x$ 、 $\theta_y$  为机器人在  $X$  轴、 $Y$  轴方向的相位角<sup>[29]</sup>。则考虑机器人轨迹误差影响条件下铣削过程中瞬时切屑厚度公式为

$$\begin{aligned} h(\phi_j) \approx & (x(t - \tau) - x(t)) \sin \phi_j(t) + \\ & (e_x \sin(\omega_{ex}(t - \tau) + \theta_x) - \\ & e_x \sin(\omega_{ex} t + \theta_x)) \sin \phi_j(t) + \\ & (y(t - \tau) - y(t)) \cos \phi_j(t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $\phi_j$  表示第  $j$  个刀齿的角位置， $\tau$  为切削周期。由于轨迹误差周期性波动会使刀尖轨迹叠加一个谐波振荡，未变形切削厚度的变化周期等于轨迹误差周期和主轴转速周期的最小公倍数。系统的时滞不再仅是铣削过程中铣刀通过频率的单时滞效应，也存在轨迹误差周期性波动引起的时滞效应。

实验中系统轨迹误差周期函数属于低频位移波动，观察到的波动周期通常在 20Hz 以内，一般情况

下频率远低于铣刀切削频率，则最大时滞周期  $T_m$  可以近似为  $T_{er}$ 。系统多时滞项  $N_m$  为系统轨迹误差周期与铣刀切削周期比值的取整：

$$N_m = [T_{er} / \tau] \quad (3)$$

其中， $[T_{er} / \tau]$  表示不超过  $T_{er} / \tau$  的最大整数。不考虑铣削轴向力，只考虑刀具受到的切向力和法向力，则在  $X$ 、 $Y$  方向的切削力为

$$\begin{cases} F_{x,j} = -F_{tj} \cos \phi_j - F_{rj} \sin \phi_j \\ F_{y,j} = +F_{tj} \sin \phi_j - F_{rj} \cos \phi_j \end{cases} \quad (4)$$

其中， $F_{tj} = K_t a h(\phi_j)$ ， $F_{rj} = K_r F_{tj}$ ， $a$  为轴向切深， $K_t$  和  $K_r$  分别为切向和径向切削力系数。

考虑多时滞效应影响的动态铣削力模型为

$$\mathbf{F}(t) = \begin{pmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{pmatrix} = \frac{1}{2} a K_t \sum_{l=1}^{N_m} \mathbf{H}_l(t) \Delta_{\text{sum}}(t) \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_l(t) = \begin{bmatrix} h_{l,xx} & h_{l,xy} & h_{l,xer} \\ h_{l,yx} & h_{l,yy} & h_{l,yer} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中  $\Delta_{\text{sum}}(t) = [\Delta_x \Delta_y \Delta_{er}]^T$  为系统动态位移， $\mathbf{H}_l(t)$  代表方向时变动态铣削力系数矩阵。

$$\begin{aligned} h_{l,xx} &= \sum_{j=0}^{N-1} -g_{l,j} [\sin 2\phi_j + K_r(1 - \cos 2\phi_j)] \\ h_{l,xy} &= \sum_{j=0}^{N-1} -g_{l,j} [(1 + \cos 2\phi_j) + K_r \sin 2\phi_j] \\ h_{l,yx} &= \sum_{j=0}^{N-1} g_{l,j} [(1 - \cos 2\phi_j) - K_r \sin 2\phi_j] \\ h_{l,yy} &= \sum_{j=0}^{N-1} g_{l,j} [\sin 2\phi_j - K_r(1 + \cos 2\phi_j)] \\ h_{l,xer} &= \sum_{j=0}^{N-1} -g_{l,j} [\sin 2\phi_j + K_r(1 - \cos 2\phi_j)] \\ h_{l,yer} &= \sum_{j=0}^{N-1} -g_{l,j} [\sin 2\phi_j + K_r(1 - \cos 2\phi_j)] \end{aligned} \quad (7)$$

其中， $g_{l,j}$  为单位阶跃函数，确定刀刃是否处于切削状态。

将过程阻尼因素引入系统模型需要确定过程阻尼系数。本文利用 Budak 等<sup>[30-31]</sup>提出的一种实用的过程阻尼辨识方法,通过公式估计系统阻尼系数。

$$c^p = \frac{K_d I}{A\pi} \quad (8)$$

其中,  $K_d$  为压痕系数,  $I$  为压痕体积。文<sup>[30]</sup>中通过实验获得的铝合金压痕系数  $K_d$  为 10000N/mm<sup>3</sup>。通过实验获得误差波动幅值、刀具几何参数后,就可以得出系统的阻尼系数。

将过程阻尼的影响考虑在内后,式(5)转换为

$$F(t) = \frac{1}{2} a K_t \sum_{l=1}^{N_m} H_l(t) \Delta_{\text{sum}}(t) - c_p \dot{q}(t) \quad (9)$$

$$c_p = \begin{bmatrix} c_x^p & \\ & c_y^p \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中,  $c_p$  为过程阻尼矩阵,  $c_x^p$ 、 $c_y^p$  分别为加工平面  $X$ - $Y$  上 2 个方向上的过程阻尼系数。

根据已知的  $Z$  方向轨迹误差幅度与频率,利用式(8)估算阻尼系数  $c^p$ 。分别选取误差波动幅值  $A=0, 0.02, 0.04$ mm, 得到  $c_p \approx 0, 10, 20$ N·s/m。结合实验获得的  $X$  轴方向的误差波动,绘制考虑机器人轨迹跟踪误差的铣削力图,如图 9 所示。

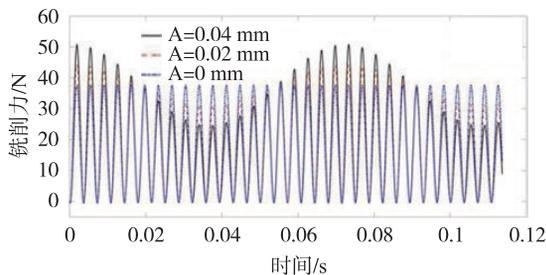


图 9 考虑机器人轨迹跟踪误差时的铣削力仿真结果

当误差波动幅值  $A=0$  时,即不考虑误差的情况,切削力处于简谐波动状态。考虑机器人轨迹误差后,切削力随轨迹误差波动发生周期性的变化。切削过程中切削力的最大幅值大于不考虑误差时的情况,且与误差波动的幅值正相关。通过仿真可以看出,即使是

在误差最大的情况下,机器人的轨迹误差波动并没有使加工中的刀具与工件发生脱离。这种周期性的波动也符合多时滞效应机理。

## 2.2 机器人铣削系统的动力学模型

针对机器人铣削系统,建议如下的动力学微分方程:<sup>[32-33]</sup>

$$M\ddot{q}(t) + (C + c_p)\dot{q}(t) + Kq(t) = \frac{1}{2} a K_t \sum_{l=1}^{N_m} H_l(t) \Delta_{\text{sum}}(t) \quad (11)$$

其中,  $M$  为系统的质量矩阵,  $C+c$  为阻尼矩阵,  $K$  为刚度矩阵,  $q(t)$  为系统的位移向量。将其简化成 2 自由度系统,则  $q(t) = [x(t) y(t)]^T$ ,  $F(t) = [F_x(t) F_y(t)]^T$ 。

如图 10 所示,改进的模型中加入了机器人轨迹跟踪误差  $\Delta_{er}(t)$ ,该误差受到机器人本体的影响,与转速无关。轨迹跟踪误差函数可以近似为周期函数,存在时滞特点,同样影响加工过程中动态切削厚度  $h(\phi_j)$  的变化。这种精度误差影响了再生颤振效应中整个动力系统的内外调制作用,抑制了再生颤振,提高了临界切深和铣削稳定域。在轨迹跟踪精度误差变大时,系统可能会出现发生颤振然后又消失的现象。

因此,在将轨迹跟踪误差导致的位移近似表示为周期函数的形式后,系统动力学模型可以转化为多时滞动力系统模型,进而在考虑轨迹跟踪误差条件下进行铣削稳定性预测。本文将使用改进的半离散法分析延迟数大于 1 的多时滞系统<sup>[10]</sup>。

## 2.3 稳定性分析

首先需要获得铣削系统的 FRF (频率响应函数)。使用单轴加速度计,对刀尖点进行锤击实验,具体实施方法参考文<sup>[22]</sup>。基于 LabVIEW 平台设计开发了一套集采集、分析于一体的软件,采集加速度和力锤信号,对模态实验数据进行处理后得到系统的 FRF 函数。通过 Levy 法辨识机器人铣削系统的模态参数,得到拟合 FRF 曲线,并将模态参数代入到模型中,分

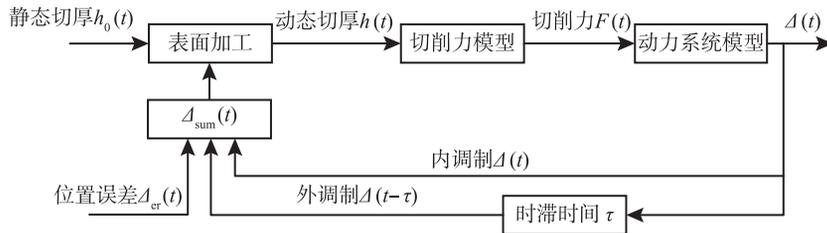


图 10 考虑位移误差时的再生颤振动力学模型方框图

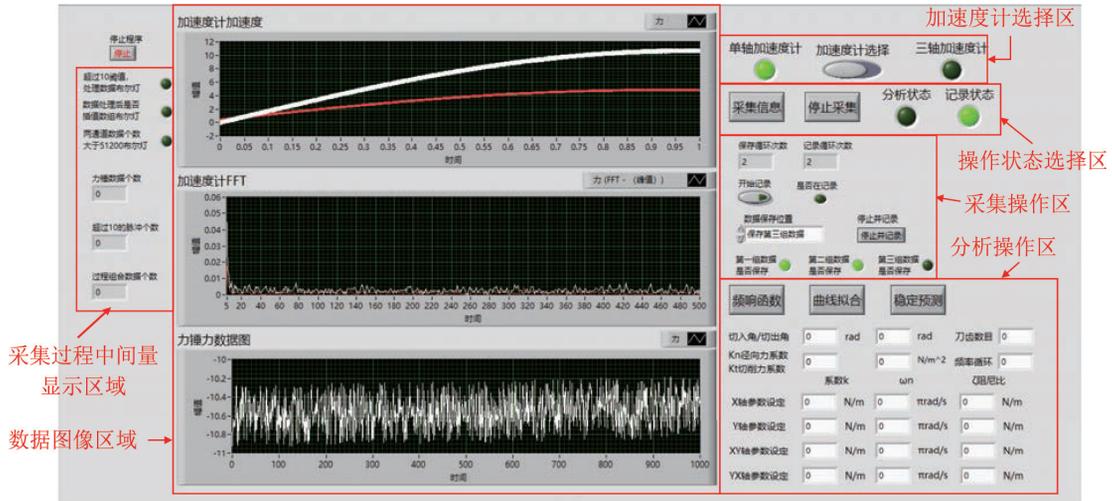


图 11 软件操作界面

析系统的稳定性。其操作界面如图 11 所示。

为了获得机器人铣削的稳定性 Lobe 图，首先规划机器人的铣削路径，获得加工路径上的轨迹误差数据。设计一段沿机器人基坐标系的 X 轴方向进行铣削的加工路径，如图 12 所示。沿 X 轴方向的铣削路径长度为 150mm，在该路径上机器人轨迹误差的波动在 0.02 ~ 0.04mm 之间。由于在小范围内进行加工，机器人的模态变化不明显，同时在高速稳定铣削过程中，机器人本体的低频模态很难被激励起来，因此忽略机器人位姿对高速铣削稳定性的影响<sup>[19]</sup>。

实验得到系统参数后将参数代入改进模型中。利用半离散法分析系统稳定性，选择误差波动幅值为 0mm、0.02mm 和 0.04mm 三种不同的情况，绘制系统的稳定性 Lobe 图，如图 13 所示。从图中可以看出，系统的误差波动幅值越大，系统的稳定域就越大。

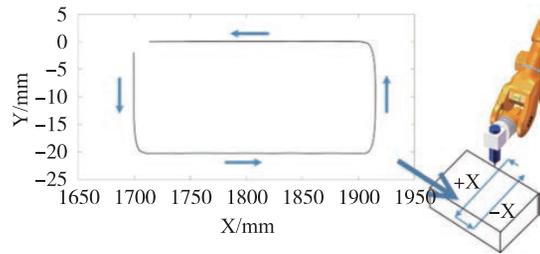


图 12 X-Y 平面上机器人加工轨迹

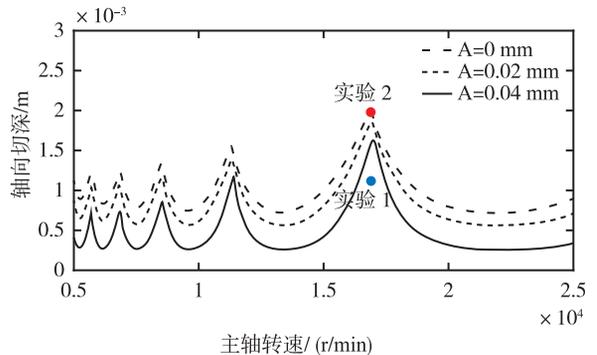


图 13 不同轨迹跟踪误差下的稳定性 Lobe 图

### 3 实验验证

根据仿真得到稳定性 Lobe 图后, 将通过铣削实验, 验证新模型的可行性。

#### 3.1 实验设计

选择 2 组实验参数进行实验, 如表 1 所示。

表 1 铣削参数

| 参数           | 实验 1           | 实验 2 |
|--------------|----------------|------|
| 轴向切深/mm      | 1              | 2    |
| 主轴转速/(r/min) | 16 700         |      |
| 工件材料         | 铝合金 6061       |      |
| 铣刀材料         | 聚晶金刚石刀头 + 合金刀杆 |      |
| 进给速度/(mm/s)  | 10             |      |

如图 13 所示, 选择实验 2 中所列铣削参数, 在  $A=0\text{mm}$  时, 预测结果为颤振; 在  $A=0.04\text{mm}$  时, 预测结果为稳定 / 颤振临界。选择实验 1 中所列铣削参数, 在不同的误差波动幅值下, 预测结果均为稳定。在实验中进行高速铣削, 以免加工过程中机器人的姿态变化对加工稳定性造成影响。

根据确定的 2 组试验参数, 进行铣削实验, 改变工件位置保证 2 组实验中机器人的运动轨迹一致, 如图 14 所示。在机器人手腕末端固定连接一个安装座, 靶球与加速度计固定在安装座上。在铣削过程中, 通过激光跟踪仪采集加工过程中机器人手腕处的位移数据, 三轴加速度计采集铣削过程中的加速度信号, 麦克风采集铣削过程中的声振信号。2 次槽铣加工后的铣削效果如图 15 所示。

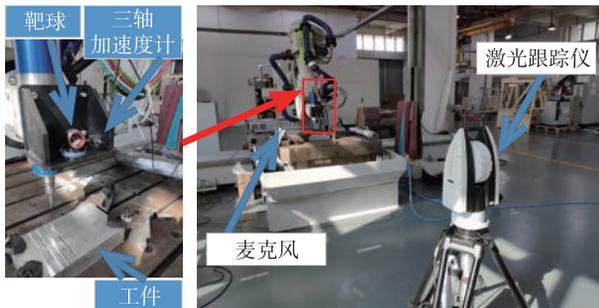


图 14 机器人铣削实验系统

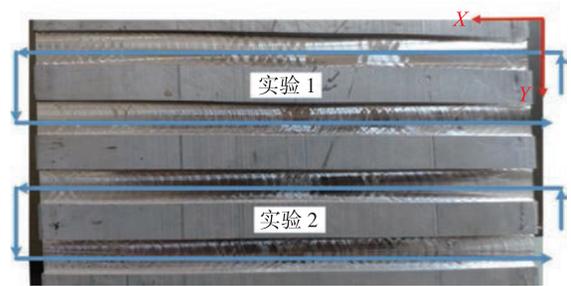


图 15 X-Y 平面槽铣结果

#### 3.2 实验结果及分析

对加工过程中采集到的振动与位移信号进行分析, 发现了一些与传统机床加工领域不同的特殊情况。

对采集的铣削轨迹沿 Z 轴方向的位移滤波后, 得到轨迹误差, 如图 16、17 所示。在图 16 中, 机器人沿 +X 轴方向进给时, 前半段的幅值波动较小, 后半段波动逐渐增大。在图 17 中, 机器人沿 -X 轴方向进给时, 幅值波动一直较大。

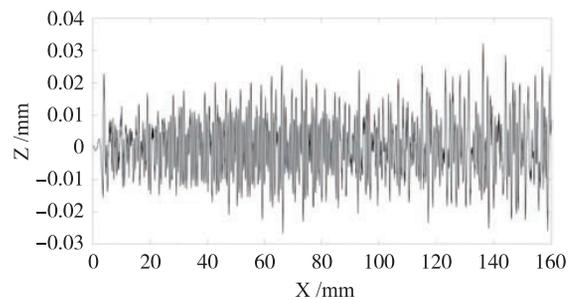


图 16 沿 +X 方向铣削时 Z 方向的位移波动

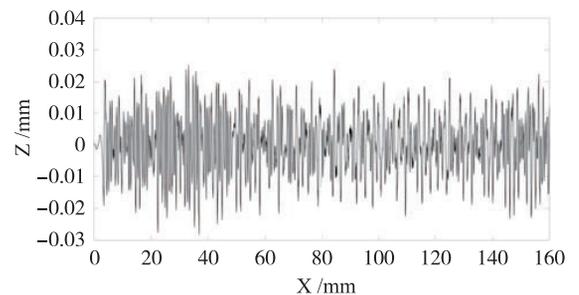


图 17 沿 -X 方向铣削时 Z 方向的位移波动

#### 实验 1: 沿 +X 和 -X 方向铣削

在实验 1 中, 加工过程中加速度计的时域信号与其对应的加工路径效果如图 18、19 所示。对加速度计的时域信号进行 FFT 变换, 得到加工过程中的

频谱图,如图 20 所示。其频谱在 +X 与 -X 方向基本相同。

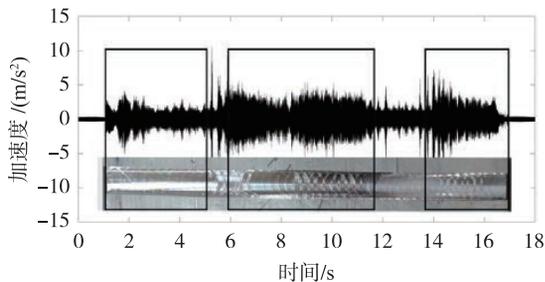


图 18 实验 1 中沿 +X 方向的加速度计信号与铣削结果

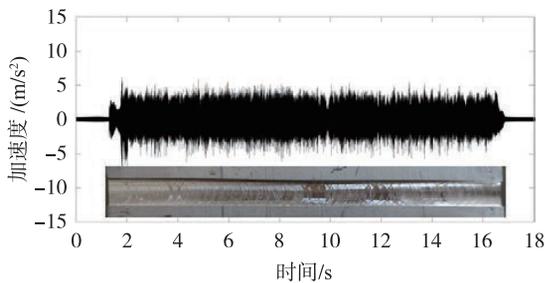


图 19 实验 1 中沿 -X 方向的加速度计信号与铣削结果

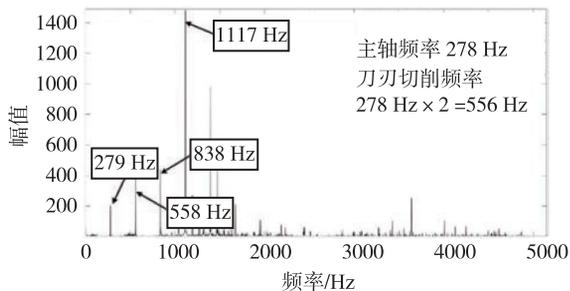


图 20 实验 1 中的加速度信号频谱图  
(+X、-X 方向结果基本相同)

从加速度计频谱图可以看出,在切深为 1mm 时,整个加工过程都是稳定的,没有出现颤振频率。

在实验中,机器人沿 X 轴正方向切削时,即使切削参数处于稳定域内,加速度计信号的幅值也是变化的。而沿 X 轴负方向切削时,速度计信号的幅值相对稳定。

造成这种现象的原因可能是由于引入了轨迹误差后,铣削过程中动态切削厚度的最大值增大,加工过程中的最大切削力也相应增大。这与 3.1 节中图 9 的时域仿真结果相一致。在加速度计信号上的表现

为加速度幅值相应增大。

实验 2: 沿 +X 和 -X 方向铣削

在实验 2 中,铣削路径上的加速度计信号如图 21、22 所示。

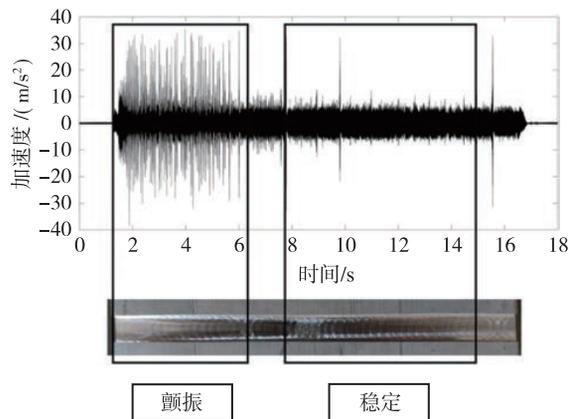


图 21 实验 2 中沿 +X 方向的加速度计信号与铣削结果

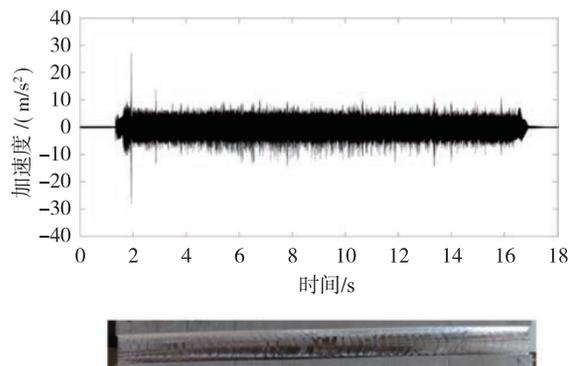


图 22 实验 2 中沿 -X 方向的加速度计信号与铣削结果

对加速度计的时域信号按照颤振部分和稳定部分进行 FFT 变换,得到实验 2 加工过程的频谱图,如图 23、24 所示。

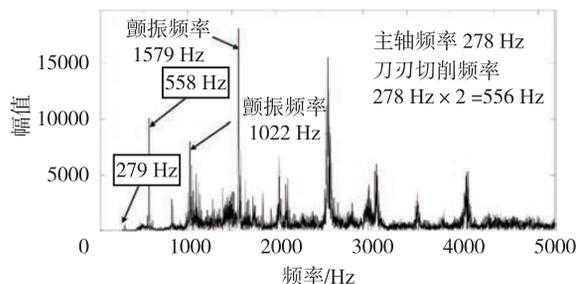


图 23 实验 2 中系统沿 +X 方向的颤振部分频谱图

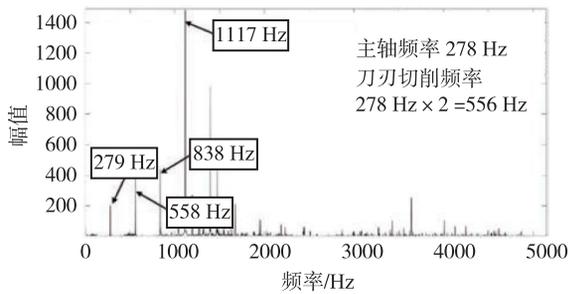


图 24 实验 2 中稳定铣削部分的频谱图

图 23 为实验 2 中颤振部分的频谱图，可以明显发现不属于刀具通过频率及其倍频的颤振频率，且颤振频率的幅值最大。说明加工过程中发生了明显的颤振。实验 2 中稳定加工部分的频谱如图 24 所示，没有出现颤振频率。其中稳定加工频谱图中幅值最大的振动频率 1117Hz 与 1396Hz 均为铣刀刀刃通过频率的倍频。

机器人在沿  $X$  轴正方向铣削的前半段，加速度幅值明显增大，发生了比较明显的颤振。而在  $X$  轴正方向铣削的后半段，这种明显的颤振又逐渐消失。沿  $X$  轴负方向铣削时，整个加工过程中都没有出现这种明显的颤振。

这种现象说明加工过程中的颤振稳定性与加工路径相关。引入轨迹误差波动后的改进模型可以解释这种现象，同时该现象也与机器人位姿改变而引起的模态变化相关。机器人轨迹跟踪误差会影响加工过程中的临界稳定切深，如图 13 所示。从图 16、17 可以分析得出，沿  $X$  轴正方向加工开始时轨迹误差幅值较小，系统切削参数处于不稳定域中，导致机器人加工的前半段发生了明显的颤振。而在机器人沿  $X$  轴正方向加工的后半段，由于误差波动的幅值扩大，系统的临界轴向稳定切深提高，切削参数处于稳定域内，颤振逐渐消失。机器人沿  $X$  轴负方向整条加工路径误差波动幅值均较大，加工过程中的切削参数一直处于稳定域内，没有发生明显颤振。

虽然机器人的精度误差会扩大铣削过程中的稳定域，但其是否存在一定的适用范围还需要进一步讨论。而且从实验中采集的数据看，当轨迹误差较大时，表面的刀痕也较明显，被加工零件表面质量并没有得到

提高。所以被加工工件表面的粗糙度不能成为判断机器人加工过程中是否发生颤振的直接依据。是否使用机器人轨迹跟踪误差来抑制机器人铣削加工过程中的再生颤振还需要进一步讨论。

## 4 结论

1) 建立了考虑轨迹精度误差的动态切削力和机器人铣削系统动力学模型。机器人的轨迹跟踪误差影响切削过程中的动态切削厚度和时滞效应，进而影响了再生效应中的反馈调制环节，抑制了再生颤振的发生。

2) 较高的机器人轨迹跟踪误差会引起刀具与被加工工件的底面发生划擦，为机器人加工过程提供更多的过程阻尼，进一步提高了稳定域。但同时也会造成表面质量与尺寸精度的下降。

3) 通过铣削实验，发现了机器人轨迹跟踪误差对颤振稳定性的影响规律。在铣削过程中，轨迹跟踪误差的波动影响了加工中的临界轴向切深，导致机器人铣削系统在某些加工路径上出现颤振发生又逐渐消失的特殊现象。

通过上述研究，阐释了机器人铣削加工中的颤振机理，指出了机器人与机床加工的区别。本文研究内容为抑制机器人铣削颤振提供了新的理论模型，同时可为大去除量的加工应用和高效加工应用提供工艺参数选择指导，提高机器人铣削加工效率。○

来源：《机器人》

## 作者简介

**王琦琰** (1988-), 男, 博士后。研究领域: 先进机器人技术。

**王伟** (1982-), 男, 博士, 副教授。研究领域: 机器人动力学。

**李博** (1997-), 男, 硕士生。研究领域: 先进机器人技术。

# 复杂制造系统建模与优化研究现状及展望

文 / 于青云 赵慧 许佳 龚炜 李莉

摘要：近年来，复杂制造系统及其自动化、智能化和定制化等优势在汽车制造、芯片制造、机器人等领域得到了广泛关注，其建模与优化问题也成为国内外的研究热点。本文首先介绍了复杂制造系统的研究现状和典型场景应用，比如设备管理、生产过程自动化和生产调度管理。紧接着汇总了常见的建模与优化方法以及所解决的实际工程问题，特别是深度学习、强化学习和合作博弈等方法在复杂制造系统建模与优化中的应用。最后，对复杂制造系统建模和优化问题进行了展望。

关键词：复杂制造系统 建模与优化 深度学习 强化学习 合作博弈

## 0 引言

复杂制造系统是集多种技术（供应链管理技术、信息交流技术、生产管理技术和物流控制技术）为一体的复杂系统，且其内部含有大量交互成分、大量复杂的结构和多种因素的扰动<sup>[1-4]</sup>。如何优化复杂系统的整体性能成为系统研究领域的重要问题，因为仿真技术能够仿真一个传统数学模型所无法描述的复杂系统，也可以精确描绘复杂系统的实际流程，从而确定影响复杂系统中各种活动的关键因素，所以该技术对于整个复杂制造体系任务策划、设计与实验等阶段都具有关键性的意义，被认为是目前最有效且已被广泛应用的解决途径之一<sup>[5-7]</sup>。

采用模拟方法来对复杂制造

过程展开研究，其主要问题在于对被研究的目标环境形成正确的仿真模式。复杂制造系统建模是一项具有挑战性的任务，目前常用的系统建模方法主要有物理建模、智能建模和数据建模<sup>[8]</sup>。物理建模是根据系统的工作原理，利用已有知识对系统动力学进行定义，建立精确的动态分析模型；主要优点是具有可解释性，不依赖于数据，允许在模型生命周期中保持对模型的完全控制<sup>[9]</sup>。根据问题的性质，物理建模又可以分为离散形式化建模与连续形式化建模两种，这两种形式化方法都是沿着时间轴对系统进行建模，突出系统在时间上的演化：离散形式化建模通过二分法对系统建模，将系统切割成小部分并定义其之间的联系；连续形式化常以微分方程来描述系统，用解析法或时

间离散化对问题进行求解<sup>[10-12]</sup>。

然而大多数基于物理的模型都是静态的，由于磨损或维护等不确定事件，实际复杂制造系统会随着时间的推移而发生动态变化。此外，基于物理模型要求模型贴合实际、需考虑到系统中可能发生的每个事件，这在工业环境中难以实现，任何认知偏差或不完整都会导致建模性能较差，因此可以采用智能建模或混合仿真的方法来建立精确的系统动态分析模型。智能建模的典型例子有基于 Petri 网和基于智能体的建模<sup>[13-19]</sup>。Petri 网作为一种系统描述和分析工具，已经被广泛应用于离散制造系统的建模和性能解析，它不仅能够定义制造系统的状态、事件和内部联系，并且能够建立系统的状态方程。马

建强<sup>[20]</sup>利用 Petri 网对实际制造车间建立了仿真模型,并在此基础上对调度问题进行了研究。基于智能体的建模技术能够将物理实体和逻辑实体抽象成智能体模型,并能够对个体之间的交互以及个体与周边环境之间的交互进行建模。ADEDIRAN 等<sup>[21]</sup>开发了一个基于 Agent 的模型来模拟流水车间,并研究制造流程中断和恢复策略,为制造生产活动提供了决策支持。混合仿真被定义为一种结合了两种或两种以上方法的建模方法(比如,离散事件仿真、基于 Agent 的仿真和系统动力学仿真<sup>[22]</sup>),通常被用于物料搬运系统和复杂制造系统的建模与仿真<sup>[23-24]</sup>。

在许多实际应用场景中(如生产调度),大数据处理环境下的复杂系统构建难、传统分析方式无法应用等问题日益凸显,因此基于大数据分析的模型和优化技术成为了复杂制造系统优化的研究热潮,其通过机器学习和深度神经网络等方法生成高质量模拟器用以取代常规分析方法,并通过智能算法和随机优化等方法挖掘最优/近优方法。袁明兰<sup>[25]</sup>设计了基于大数据分析船舶通信网络优化方法,有效提高了船舶通信系统的数据传输速度和成功率。林锋等<sup>[26]</sup>提出了一种基于大数据分析的酿酒工艺优化方法,提高了酿酒工艺的参数优化效果。尹树彬<sup>[27]</sup>融合了大数据分析技术

中的数据挖掘计算与建模优化计算,设计并实现了面向切削加工程序的建模与优化计算系统,为切削加工编程自动化带来了新思路。蔡培良等<sup>[28]</sup>运用了物联网与大数据挖掘技术,对卷烟包装材料的技术方法加以完善,提高了烟卷整丝率,使烟丝的物理性能和卷烟的感官品质得到了显著提高。基于数据分析的模型和优化技术是目前最先进的解决复杂优化问题的方法,不仅能够整合原始数据和机器学习所蕴含的知识,而且能够解决复杂优化难题(尤其是高维度多目标优化难题)中普遍存在的高维度灾难问题。基于数据的模型可以直接从数据中提取系统动态,主要优点是能充分利用数据的隐含知识,对方案进行验证和优化<sup>[29]</sup>。

本文就复杂制造过程建模与优化的研究现状、重点以及技术前沿等做出了总结,主要涉及复杂制造系统典型场景和基于数据的建模与优化方法研究现状等。最后,对复杂制造系统建模与优化问题进行了展望。

## 1 复杂制造系统典型场景

本节主要讨论典型复杂制造中具有共性的典型场景,其中包括:设备管理、生产过程自动化和生产调度管理等。

### 1.1 设备管理

在智能制造环境下,公司在

降低人工成本的同时,制造设备比例相应提高,导致制造设备的管理环节愈发重要。制造过程的数字化和智能化发展使得设备管理也趋于数字化、智能化、可视化<sup>[30]</sup>。

设备管理方法可以分为3类:事后维修、预防性维护、预测性维护。事后修复就是当仪器出现问题后的维修和恢复,通常发生在突发灾难性故障之后,没有采取任何提前保养措施<sup>[31]</sup>。在这种模式下,设备故障通常会造造成很严重的后果,因为任何一个元件出现故障都可能会影响到系统中的其他设备/环节,不仅提高了故障检测的复杂度和增加了维修成本,而且可能致使故障急修时间超过维修的常规时限。维修成本主要包括备件存储费用、技术人员费用和计划外停机带来的生产力损失,因此也是最昂贵的维修<sup>[32]</sup>。

预防性维护是根据系统或部件的平均使用寿命和预测失效率曲线(如图1所示)拐点出现的时间,以此来制定基于时间的周期性保养计划。该方法需要结合历史经验和参数,定期对系统和设备进行日常维护,以逐步降低故障率;通过计算系统/设备/部件的平均使用寿命,对易损部件进行维护/更新,使制造系统的设备稳定性维持平稳状态。因为是基于经验根据周期计算来预先安排维护行为,没有考虑部件或系统的实际运行状态,所以

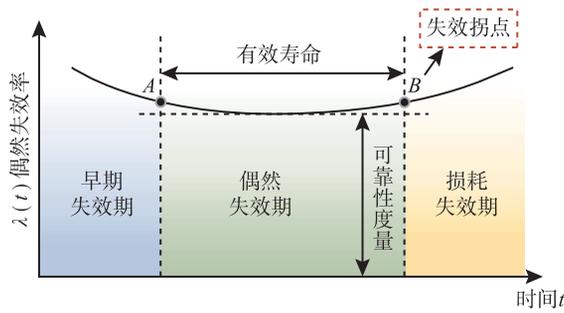


图1 失效率曲线

容易导致保养过剩或不足<sup>[33]</sup>。

预测性维护是指利用传感器对系统/设备的工作情况进行监测、对故障时间进行预判，及时对系统/设备进行维修/维护、减少无谓停工。预测性维护技术可实施的前提是设备故障的产生是由于设备损坏程度达到某临界点所造成的，或者是由于渐近式的设备老化所造成的。因为这种方法是基于部件或系统本身的运行状态来安排维护行为，所以也被称为状态维修或视情维修<sup>[34]</sup>。首先要确保能够无损地读取各项

参数值，不需要通过大量拆卸和组装；其次需要定义特征指标（阈值），根据所监测参数的运行趋势，判断是否需要进行维护行为（如图2所示）。

随着制造业技术的自动化、数字化、信息化程度日益提升，同时得益于海量大数据的累积以及人工智能科学技术的蓬勃发展，设备传感器产生的大量实时数据为数据驱动预测性维护的产生提供了便利条件。预测性维护与管理作为人工智能技术和企业大数据分析中的关键使用领域，其从

简单的设备管理和被动检测发展到主动预防和安全控制，能够显著减少设备/部件的故障率和宕机次数、增强设备的稳定性和持久性、减少工程维修成本、帮助企业实现降本增效<sup>[35-36]</sup>。

设备的良好管理和运转使得制造系统可以有效完成任务。近年来，制造系统的设备维护建模、设备维护成本和保养周期优化等也成为了设备维护研究的重点热门话题<sup>[37-39]</sup>。苏春等<sup>[40]</sup>通过对Monte-Carlo模拟与遗传算法的模拟，以可维修设备为目标，构建了对设备广义维护的优化模式。为保证装置的安全运行和降低产品的生产成本，王炳荣等<sup>[41]</sup>提出了基于设备维修龄的维修策略，以装置失效风险为主要因素，构建了产品计划与装置维护控制一体化模式。根据对废弃物收集与运送流程的动态分析，彭绪亚等<sup>[42]</sup>给出了一个

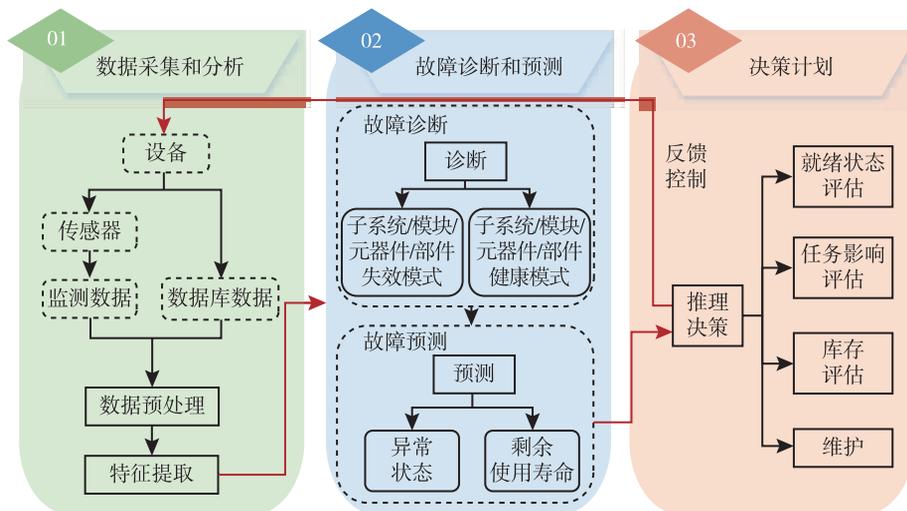


图2 预测性维护

以排队论为基础的转运站设施配置方案。席少辉等<sup>[43]</sup>根据大规模串联生产系统的设备优化选择问题,给出了一个基于大系统理论的优选方案,能够有效提升优选效果,从而降低大系统的寻优变量围堵。

## 1.2 生产过程自动化

生产过程自动化是指只需要少量人甚至不需要人直接参与操作,由制造设备甚至机器人来完成产品的全部或大部分加工的生产过程,生产过程自动化包括产品组装自动化和物流运输自动化等重要环节。基于数据的建模与优化方法是其关键支撑技术,例如利用强化学习算法训练数据可以用来解决一系列机器人控制问题,包括机械臂控制、移动机器人控制等。下面从产品组装自动化和物流运输自动化两方面阐述相关背景及其面临的问题和挑战<sup>[44]</sup>。

### 1.2.1 产品组装自动化

高效准确的产品自动化组装在复杂制造系统中至关重要,可以增加产品的品种、功能性能、制造和维护能力。工业机器人/机械臂可以用来完成这些基本的制造工作。插销组装是其中最重要的技术,适用于各种组装任务,包括航空部件组装、模具铸造部件组装和电子产品组装等<sup>[45]</sup>。

现有的机械产品组装作业主要是人工工序。产品组装中机械部件和模块的定位和紧固依赖于

操作人员的经验。对于简单的任务,工程师可以通过指示机器人遵循的所需关节角度配置系统方案。更复杂任务的方法会将物理建模嵌入到控制系统中,但这通常非常脆弱,因为许多现实世界的物理效应很难被准确捕捉。这使得最终产品的完成效率较低且差异性较大。尽管机器人可以不间断工作,使人类操作员从重复繁琐的组装任务中解放出来,但机器人主要依靠示教、复制或编程操作来实现简单的过程自动化,每项操作技能仍需要大量的时间来设计<sup>[46]</sup>。因此,必须使用自动化过程来提高产品组装的效率和准确性。这些机器需要被赋予更高水平的智能和控制策略以加强其自主技能。尤其是,在具有更小批量和更快工程周期的柔性制造中,需要设计快速强大的控制策略,从而应对系统的快时变性。

传统的控制器通常基于传感反馈来生成控制命令,性能很大程度上取决于参数设置,这可能导致其泛化能力有限。为了建模所有可能的系统行为,提高系统的泛化能力,控制器设计的主要挑战是设计适应性强但稳健的控制算法<sup>[47]</sup>。虽然标准控制方法被用于许多组装任务,但难以很好地完成具有显著适应性要求或密集视觉感知任务。在难以分析建模的复杂动态情景下,标准控制方法可能会遇到困难。其情景复

杂性主要体现在两个方面:

1) 机械臂性能经常受到系统非线性、传感器噪声和外部干扰的影响。如果噪声和干扰没有得到适当的修正,模型的不确定性会导致生产运行过程中的性能下降。当前大多数工厂往往对机械臂采用频繁的重新编程,这种手动的建模和调整非常昂贵<sup>[48]</sup>。即使基于模型的控制器最初性能良好,也可能随着时间的推移而退化。这种影响可能是由于机械臂的物理特性发生变化,例如齿轮磨损、伺服系统退化等。

2) 由于工业机器人处理复杂动态环境的能力非常有限,导致面临未知环境中不确定因素的工业机器人的自主适应能力较差。在复杂的组装任务中,这个问题尤为突出。对于环境动态、要求灵活、对象多样、动作类型复杂的组装任务,其组装过程中的不确定性尤为明显。

### 1.2.2 物流运输自动化

复杂制造系统的制造过程导致原材料、在制品以及最终产品在不同部门之间不可避免的流动。因此,制造系统需要物流运输系统来运输、管理和组织这些流程。自动导引车(AGV)作为一种柔性智能物流设备,具有很大的自由度,在物料和产品的柔性运输中发挥着至关重要的作用。AGV已在各种车间和仓库的物流操作中取得应用,包括材料供应和运输等,尤

其是在多品种、小批量、定制化的生产模式，但这带来了更多的物流任务和更高的实时性要求。在物联网、网络物理系统和多智能体等先进技术的支撑下，使用 AGV 进行协作运输可以显著提高效率并降低成本<sup>[49]</sup>。如何让多个 AGV 协同执行物料运输任务是复杂制造系统智能仓储中的重要课题。

AGV 物流运输第一个问题是如何进行机器人定位映射、路径规划和任务调度。首先，机器人必须知道其相对于周围环境的位置。其次，机器人需要地图来识别环境并相应地移动。最后，机器人需要找到执行给定任务的最优路径。传统方法往往采用集中控制方法，并将任务分配视为单个或多个机器人的路径规划问题。一方面，它对控制中心的计算能力和实时能力提出了极高的要求。另一方面，环境的随机性、复杂性和动态障碍会损害系统的稳定性和可扩展性。

AGV 物流运输的另一个问题是解决车辆之间的移动冲突。许多基于规则的策略经常用于处理 AGV 冲突，然而复杂制造系统中动态车间环境、大规模定制、复杂产品组装等多样化的生产特性带来了新的挑战。在这些生产模式中，不仅要考虑物料输送的效率，还要考虑经济性、时效性和安全性。这意味着车间的情况将更加复杂，单一的基于规则的策

略无法大幅提高生产性能<sup>[50]</sup>。因此设计复杂车间环境中涉及各种碰撞情况的 AGV 移动冲突解决方案，提高 AGV 的自适应决策能力，以应对交叉路口的各种碰撞情况，是一个亟待解决的问题。

### 1.3 生产调度管理

高端装备智能制造系统同时集成了物理资源和网络资源并将其整合到云端服务器，制造活动所产生的所有数据都可以通过大数据分析和云计算等方式间接作为系统建模的数据来源。先进的数据感知技术和通信技术能够助力实现制造物理空间与网络空间之间的高保真、实时同步<sup>[51]</sup>。面对制造业生产经营过程中的某些关键环节所普遍面临的“信息孤岛”问题，近年来相关企业和学术界相继研发了诸多类型的智能系统（专家管理系统、基于知识的管理系统和智慧辅助系统等），但针对生产过程的“全方位信息智能化”的研究开发工作，目前仍处于一种起步阶段。

从 20 世纪 90 年代开始，美国国家科学基金开始注重支持智能机器人的相关学术研究与产业研发，重点涉及多智能体协同计算、人工智能多线程应用、人工智能决策、智能化物流处理等<sup>[52]</sup>。2000 年，国际知名管理咨询机构 ARC 从现代科技角度入手，明确给出了构建数字化企业管理模式的新思路；美国国家标准和电子工艺研究

院于 2005 年发起了“智能加工系统（smart machining system, SMS）”研发项目；2016 年，美国工业互联网联盟搭建了智慧工厂云端测试环境，实现了企业之间生产任务的柔性匹配和动态调整，有效提升了各企业的产能利用水平<sup>[53]</sup>。

智能工厂制造技术中基于“人-信息-物理”智能体系技术的一些典型的运用案例主要有工业机器人智能协作、动态协同、生产过程闭环控制技术以及建立基于智能人机协同合作系统的智慧工厂技术等。其设计的主要技术思路为充分融合国内外新一代人工智能前沿技术，建立基于智慧厂房、智能工厂、智慧生产运营指挥中心系统和工业智慧云平台等智能系统平台和智能网络平台，完成企业智慧化排产、智能车间管理和企业智慧化运营管理等功能。通过网络技术对设备、流程与产品等进行实时监测，随时发现/预知故障因素并且及时排除故障，有效实现控制系统的运行与维护管理，促进制造系统性能的全面提升<sup>[54]</sup>。

运作管理的相关研究内容非常广泛，而生产调度是其中最基础和最核心的一部分。行为调度模式是现代制造业发展的大趋势之一，研究在操作者参与之下的基于机器学习效应的智能制造行为调度模型将成为智能制造行为调度理论的全新内核。和传统

制造业的运营模式比较,企业行为调度管理系统作为一个全新模式有着不同的特点与机制<sup>[55]</sup>。为此,有必要从学习效能的视角对学习动机和学习效果之间的相互关联、调度与影响机制、对调配方案的有限理性决定、对生产系统链下操作者角色学习机理和特征等角度展开研究:通过系统分析各种类型的学习效能因素及其对调配性能的影响,研究不同认知背景、不同禀赋、不同情境特征下的操作者对调配效率的影响途径、影响机制和价值内涵;并根据不同的学习效能机制以及对管理者的有限理性决策机制,通过构建清洗、加工、组装等不同工序的调度模型,勾勒出行动调节模型这一中国领域未来发展趋势下的全新管理形式的基本轮廓;将生产调度管理与行为经济学、人力资源管理 and 心理科学等相融合,力图在生产调度管理提出全新的理论与方式。

在当前的智慧工厂生产运行过程中,通常是基于完整的互联网智能化系统构建,以企业基础信息和企业资源规划为牵引,通过应用系统之间的数据交换与系统集成管理,完成软件系统之间的数据交换和企业信息资源共享,从多个方向对制造流程信息不断提升,以提高企业柔性控制体系的可信度与安全性。以航天示范制造车间为例,相关企业完

成了3条主线相结合的工作,具体涵盖了工艺数据、企业运行数据和生产计划,全面形成了基于智慧云服务的航天器智慧企业。通过SIMATIC方案和现代计算机技术、西门子公司实现了与传统企业管理信息化系统的全面深度数据融合,以及从工业传感器系统到现代企业管理平台和ERP应用系统之间的深度且全面的数据集成。娃哈哈集团作为碳酸饮料领域的“中国制造”模式的一个典型代表,目前已初步实现了中国智慧企业体系的建立,成功克服了几乎所有产品线上的大数据孤岛问题,完成了在公司系统内部的高效和精细化管理,解决了企业外部的供应链协同问题,进而促进企业整条产业链走向数字化、智能化和绿色化。

现实工业生产系统中的调度问题时常会被简化,但这种简化后的模拟通常都脱离了现实工业生产系统环境,因此缺乏准确且快速相应扰动的能力。工业生产调度优化问题是一种NP难问题,所以在实际工业生产系统中求解准确的最优解是不可能的。因此目前的研究趋势主要是将传统运筹学方法和现代计算智能方法结合起来以提高生产调度优化的效果。

## 2 基于数据的建模与优化方法研究现状

基于数据的建模与优化技术

在供应链、交通运输、医药、旅游、零售业等多个领域都得到了广泛的应用,涉及到了多种多样的信息模型和优化技术。本节重点探讨典型复杂制造系统中基于先进学习方法的建模和优化问题,内容主要包括:基于深度学习的设备管理、基于强化学习的生产过程自动化和基于合作博弈的生产运作管理及各种方法的实际应用。

### 2.1 基于深度学习的设备管理

由于智能制造在制造系统中的应用得以发展,制造设备也趋于数字化、智能化、可视化。针对设备管理中的建模和优化问题,传统的机器学习方法在设备健康管理领域已经取得了丰富的成果,但是由于其需要先验知识、泛化能力不足、难以分析复杂故障等局限性,促使工业界和学术界探索使用深度学习方法进行特征提取、逼近复杂模型、预测发展趋势以及准确识别设备健康状况。随着计算能力的提高和大量训练数据的标注,深度学习在许多科研领域均获得了突破性研究成果,如图片辨识、自然语言处理和语音识别等。此外,深度学习方法在设备管理领域也受到了广泛关注,并且取得了丰硕的研究成果。目前使用的深度学习模型主要包含循环神经网络、卷积神经网络和自动编码系统等,以及上述方法相互结合的混合模型。

### 2.1.1 基于循环神经网络的设备管理

如图3所示，RNN(recurrent neural networks)的内部状态可表现为动态时序行为(当前时刻的输出不仅依赖于当前时刻的输入，还依赖于之前时刻的输出)，是由节点定向连接成环的深层神经网络。因此RNN对于时序信息具有很好的处理功能，适于处理前后有关系的消息<sup>[56]</sup>。设备的传感器数据本质上正是时序数据，所以可以看到在设备管理领域基于RNN方法的研究成果较多。当对时序数据进行处理后，RNN可以利用信息流在同一层中传输不同的时序信息、通过记忆单元存储各个时间的数据，从而发现各个时间信息对数据的影响关系<sup>[57]</sup>。

因为梯度消失现象的存在，传统RNN模式在实际问题中很难解决问题的长程依赖性关系。如图4所示，作为RNN的新发展方式，长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)从某种意义上克服了梯度消失现象，能够预测时间序列中间隔较长的事件，因此在预测性维护领

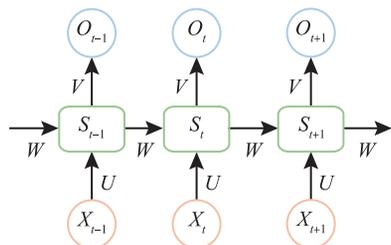


图3 RNN示意图

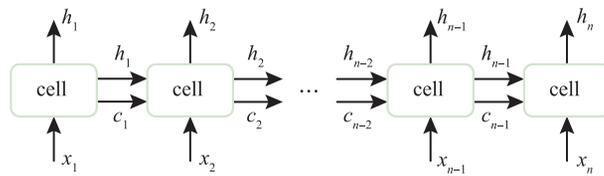


图4 单层LSTM示意图

域受到了广泛关注。作为LSTM的主要改进形态之一，双门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)结构相对更为简单，只有2个门控单元(重置门和更新门)，大大减少了运算复杂性，因而也获得了广泛应用。如图5所示，双向长短期记忆网络(bidirectional long short-term memory, BLSTM)也是LSTM的改进形式之一，在处理时间序列时可以同时考虑过去和未来的信息特征对当前时刻的影响。另外，在当前研究中也有针对GRU的双向改进双向门控循环单元。

XIA等<sup>[58]</sup>利用循环神经网络(RNN)精确估计机器的剩余使用寿命(RUL)，采用dropout技术和衰减学习率来提高学习效率；在深层结构中结合LSTM和经典神经网络，从序列数据中提取时间信息；多传感器数据中的时

序感知数据可以进行融合，并直接用作模型的输入；避免了传统方法中依赖先验知识和领域知识的手动特征提取。CHIU等<sup>[59]</sup>针对刀具RUL预测提出了一种具有全自动框架的RNN模型，通过减少输入数据字段的数量来修剪网络使模型本身保持不变，然后由所设计的框架自动建立轻量级的深度学习模型；在真实数据集PHM2010上的实验验证了所提出模型的低成本和高精度。

针对工程系统RUL预测难题，HUANG等<sup>[60]</sup>结合双向长短期记忆网络(BLSTM)和粒子滤波(PF)技术的优势，设计了一种融合深度学习的预测方法；用BLSTM网络来提取、选择和融合鉴别特征，用PF对系统状态进行预判、对退化模型的未知参数进行识别；该方法无需特定的特种工程领域知识，由BLSTM网

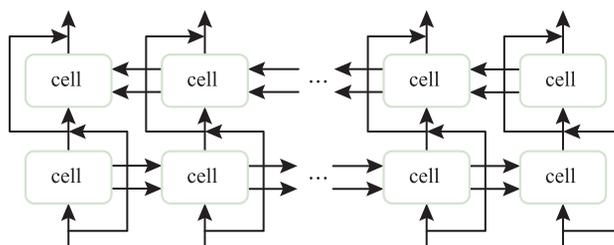


图5 单层BLSTM示意图

络获得的具有不确定性的预测测量值将以透明的方式由 PF 正确表示。LI 等<sup>[61]</sup>在基于 CNN 和 BLSTM 的 RUL 预测方法中引入了监督注意力机制,使得具有更显著退化特征的信息性数据可以集中用于预测,而具有非区别性特征的数据可以忽略;通过一个砂轮退化图像数据集验证了该方法的有效性。

WU 等<sup>[62]</sup>提出在进行 RUL 预测之前,采用基于随机森林的早期退化预警方法,然后将 LSTM 和 GRU 分别用于离子蚀刻机中冷却系统的 RUL 预测;通过 PHM 2018 数据集的实验结果表明门控循环单元 (GRU) 方法的性能更优。

针对长期预测问题,WANG 等<sup>[63]</sup>设计了一种带有局部特征提取功能的异构 GRU 混合估计方法;其局部特征提取方式是通过把专家知识融合到深度学习模式中实现的,进而能够获取输入序列中的隐含知识;在 GRU 模型结构中设计中间层以获得长期预测的内在关系;通过系统化特征工程和最优超参数搜索对所提模型进行优化。DENG 等<sup>[64]</sup>设计了一种集成 GRU 网络,将 PF 方法扩展到解析测量方程不可用的情况;所提出的 GRU-PF 混合方法将数据驱动模型和物理模型集成到粒子滤波网络中,以实现滚珠丝杠的 RUL 预测;该方法在预测

敏感性方面性能优越。由于测量噪声和模型参数的影响,深度学习方法的 RUL 结果通常相差很大。针对预测的不确定性,SHE 等<sup>[65]</sup>提出了一种基于 bootstrap 方法的 BGRU 预测模型,RUL 的置信区间可以通过 bootstrap 方法获得;通过 ABLT-1A 轴承数据验证了 RUL 预测不确定性对于实际生产和制造的现实意义。

### 2.1.2 基于卷积神经网络的设备管理

如图 6 所示,CNN( convolutional neural network ) 是一种前馈神经网络,通常包含 2 个结构层:卷积层和池化层。卷积层采用将多种卷积滤波器与输入数据分析进行逐点卷积生产特性信息,可对高维数据进行降维算法处理,从而具备了自动获得有效特征的能力优势。池化层即下采样层,对不同层次的信息进行采集,进一步减小信息范围,增加防坠落的泛化作用。CNN 的最大特点是融合了稀疏连接、加权共享、空间及时限上的降采样。通过卷积层与池化层逐层地对输

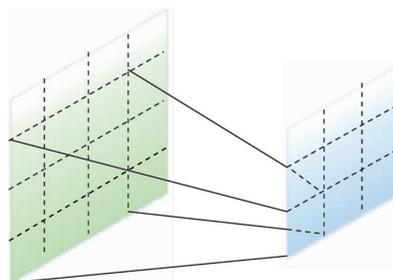


图 6 CNN 示意图

入信息进行交替处理,最后得到了输入信息的平移、翻转和缩放等不变的特征信息。

CNN 自提出以来被广泛应用于图像处理领域,近年来也被用于处理序列数据。WU 等<sup>[66]</sup>提出了一种基于多阶段 RUL 的联合分类回归方法:从原始数据中获取特征的训练样本集合,对系统健康特征进行划分,通过回归算法进行分级 RUL 预测并估计总体 RUL;与常规 CNN 等深度学习方法相比,该方法的预测精度能够提高约 6.5%。SONG 等<sup>[67]</sup>提供了一种可以表示权重序列数据的分布式注意力机制,首先分别对不同的工业传感器和时间量化步长进行了整体加权,然后通过具有共享权重信息的时间卷积算法模块对时间序列进行了特征抽取,最后使用 C-MAPSS 数据集检验了所提方法的准确度和效率。此外,胶囊网络 (Capsule Network, Caps-Net) 是由 GEOFFREY 提出的传统 CNN 的替代方法。QIN 等<sup>[68]</sup>提出一种慢变动态辅助时间 CapsNet 从测量值中同时学习慢变动态和时间动态,从而实现精确的 RUL 估计;在 CapsNet 中引入 LSTM 机制来捕获时间序列的时间相关性;分别通过飞机发动机和铣床数据集验证了该方法的优越性。

### 2.1.3 基于自动编码器的设备管理

如图 7 所示,AE ( Auto-

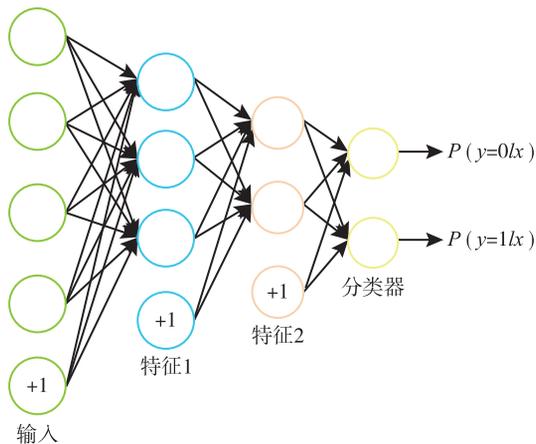


图7 AE示意图

Encoder) 主要由编码器和解码器构成，是一种典型的非监督神经网络模式。编码器通过编码对输入信息进行特征提取得到深度特征表示。解码器则利用解码功能进行深度特征表示，实现信息重构。堆栈自动编码器 (Stacked AutoEncoders, SAE) 是堆叠成多个 AE，再加以微调来训练整个模型。SAE 有两个最常见的改进形式：稀疏自动编码器 (Spares AutoEncoder) 和去噪自动编码器 (Denoise Auto-Encoder)。

Ren 等<sup>[69]</sup> 基于 AE 和全连接神经网络 (fully-connected network, FCN) 设计了一个针对滚动轴承的 RUL 预测框架：首先，通过时频小波变换联合特征的特征向量来描述滚动轴承退化过程；然后，采用车辆工程对信号特征进行自动检测和数据压缩；进而，使用深度 FCN 技术对滚动轴承 RUL 进行预测，实验表明，该方法能够取得较好的预测效果。

SUN 等<sup>[70]</sup> 通过稀疏自动编码器设计了一个深度迁移学习模式，使用了 3 种迁移策略，将从历史数据训练中得到的模型转移到新问题上，在没有训练监督信息的情况下对新目标做出了估计。SHI 等<sup>[71]</sup> 采用多维叠加稀疏自动编码器从原始振动信号的不同特征域中学习更多的特征，采用 1 维叠加稀疏自动编码器进行特征融合和更深层次的特征学习；引入改进的损失函数，提高学习能力；利用非线性回归函数来增强渐近式刀具磨损预测任务。

## 2.2 基于强化学习的生产过程自动化

生产过程自动化是通过传感技术、计算机技术和软件工程等相关技术来完成数据的采集和运算，并将结果输出到执行器以实现控制生产工艺过程，能够有效简化操作人员的监测和维护工作，提高制造系统运营效率和安全性。针对生产过程自动化中的建模和

优化问题，传统机理建模是基于某些特定简化和假设条件下进行的，并且需要对生产过程的物化特性、传输特性和动态特性有深刻的认识，导致相关的建模过程十分困难。传统的生产过程自动化优化方法一般是确定性优化方法 (例如牛顿法、梯度法以及直接搜索法)，具有收敛速度快、优化搜索方向确定等优点，但同时它也具有优化结果依赖初始值、不易确定最优初始值和优化函数要求高的缺点。采用传统建模优化方法已难以满足复杂生产过程自动化的建模优化。随着数据挖掘等智能理论方法的广泛应用，强化学习在无人驾驶、自然语言处理、金融贸易等诸多领域都取得了突破性进展。此外，在工业自动化领域，深度学习方法也受到了广泛关注，取得了丰富的研究成果。

强化学习是一种基于数据的交互式学习建模方法，适合解决复杂、动态、不确定环境下的策略制定问题。学习者通过与环境交互来学习，通过尝试去发现何种行为会产生最丰厚的收益<sup>[72]</sup>。学习者的行为不仅能够影响当下的收益，还能够影响随后的收益。强化学习会不断权衡试探 (选择过去未尝试的行为，使未来获得更好的机会) 和开发 (选择过去收益高的行为) 的收益，因此试错和延时收益是强化学习最重要的两个特点。

### 2.2.1 基于强化学习的产 品组装自动化

目前已有一些研究将强化学习应用于产品组装自动化中, 本文将这些研究分为两类, 一类是从强化学习算法本身出发, 通过改进强化学习方法来提高组装性能; 另一类是通过将强化学习方法和传统方法相结合, 来优化组装控制模型。

#### 1) 改进的强化学习方法

改进的强化学习方法包括深度强化学习、分层强化学习、元强化学习和动态目标深度强化学习等。

山东大学 LI 等<sup>[73]</sup> 基于深度强化学习方法, 解决复杂组装过程中存在的不确定性问题。在马尔可夫决策过程框架下, 组装过程用四元数序列表示。使用经过训练的分类模型作为奖励函数, 主要目标是识别组装过程是否成功。所提出的技能获取方法旨在使机器人获得组装技能。模型的输入是组装过程的接触状态, 输出是机器人动作。机器人可以根据当前状态调整自己的位置, 学习下一步的合适动作。机器人只需很少的先验知识即可通过自我学习完成组装。结果表明, 机器人具有通过技能获取进行复杂组装的能力。

清华大学 HOU 等<sup>[74]</sup> 提出了一种基于数据的分层强化学习方法来解决机器人组装中的高维连

续控制问题。分层强化学习的主要特点是可以学习对应于局部状态空间的分解子策略。该文作者首先设计了两个马尔可夫决策过程, 分别从相同的样本中学习高级别策略和低级别策略。在设计高级别策略时, 使用 Softmax 门控策略来确定与环境交互的低级别策略。通过从低级别的重放缓冲区中的离线 (off-policy) 样本学习较低级别策略, 采用选项价值网络导出的高级别策略来学习相应的低级别策略。

德国西门子公司 SCHOE-TTLER 等<sup>[75]</sup> 提出使用元强化学习方法来学习任务的潜在结构以解决工业机器人插入问题, 聚焦在两个部件, 即 Misumi E 型电连接器和轴上齿轮。为了获得适用于现实世界的通用元强化学习策略, 首先在模拟中设计一系列任务来反映现实世界的任务。其次, 在低保真模拟中执行元训练, 使用元学习来更新学习策略和改进任务嵌入性能, 以便快速适应新任务。最后将学习到的策略应用到现实世界中。

加拿大高等理工学院 KAMALI 等<sup>[76]</sup> 基于动态目标深度强化学习方法来解决远程操作应用中的机器人手臂运动规划问题。该方法直观地将人类手部运动实时映射到机器人手臂, 使用户能够通过手部动作平滑地控制机器人工具的位置和方向, 在 3D 虚拟现实环

境中监控其运动。该文作者设计了识别机器人嵌入式控制器的动态模型, 将该模型与机器人运动学和碰撞模拟器 RobotPath 相结合, 为训练深度强化模型提供了模拟环境。动态目标深度强化学习方法利用近端策略优化 (PPO) 算法进行深度强化学习, 以在每次迭代中观察到的机器人关节值和参考轨迹来训练策略网络。真实机器人上获得的结果表明, 所提出的硬件设置可用于工业机器人的平稳和安全的远程操作。

#### 2) 强化学习方法与传统方法相结合

还有部分研究通过将强化学习方法与传统控制方法相结合, 以提高组装性能。

美国伯克利大学 LUO 等<sup>[77]</sup> 通过深度强化学习方法解决将刚性栓钉插入直径较小的可变形孔中的组装问题, 该方法结合了强化学习方法镜像梯度下降策略搜索和传统的时变线性高斯控制器。机械臂传感器数据一方面用于集成到强化学习的策略学习过程中, 另一方面用于与神经网络耦合的控制器中。这使机器人能够学习丰富的组装任务, 而无需明确的关节扭矩控制方法。

德国西门子公司 SCHOE-TTLER 等<sup>[78]</sup> 主要解决具有低容差的复杂工业组装任务, 即具有视觉输入和不同自然奖励规范的工业插入问题。该问题涉及

复杂的接触动力学和摩擦,传统的控制方法往往会导致控制器脆弱和不准确,必须手动调整。通过将强化学习方法与经典控制器的先验信息相结合,可以学习出有效的插入策略,有助于组装任务的广泛自动化。

美国伯克利大学 LUO 等<sup>[79]</sup>通过优化操作空间力控制器以解决高精度组装问题。具体方法是将迭代线性二次高斯法(一种强化学习方法)与力/扭矩信息相结合,将力/扭矩传感器数据运用到由神经网络参数化的全局策略中。迭代线性二次高斯法可以在很少的数据样本下获得较高的性能。在决策过程中明确考虑力/扭矩信息可以产生更好的泛化结果。实验结果表明在高精度组装问题上,该文章提出的方法优于其他主流方法。

比利时鲁汶大学 PANE 等<sup>[80]</sup>提出了两种基于强化学习的补偿方法,以改善多自由度机器人手臂中反馈控制器的次优跟踪性能,具体做法是将补偿未建模像差的学习校正信号添加到现有标称输入中。补偿用一个连续的状态策略函数来实现,该函数由 Actor-Critic 算法构建。所提出的学习算法在 6 自由度工业机器人机械臂上进行评估,与比例-微分(PD)、模型预测控制(MPC)和迭代学习控制(ILC)相比,实验表明基于强化学习的方法响应速

度更快,并有相当大的精度提升。

## 2.2.2 基于强化学习的物流运输自动化

在物流运输自动化中,环境具有随机性、动态性和不确定性。为了应对该类属性,强化学习在机器人/智能体的任务调度、路径规划和动态避障等方面得到了广泛应用。

中国科学院沈阳自动化研究所 XUE 等<sup>[81]</sup>以最小化平均作业延迟和总制造时间为目标,提出了使用强化学习方法来解决流水车间多台 AGV 协作调度问题。每台 AGV 配备机械手且在固定轨道上运行,在机器之间对半成品进行输送。通过对状态特征、动态空间以及激励函数等进行界定,把流水车间调度问题表述为马尔可夫决策问题,从而提供了一个基于强化机器学习的调度方式:所有 AGV 均参与共享相关智能体的即时状态和相关作业的完整信息,从而了解整个流水线车间的决策。仿真结果表明,基于强化学习的方法在动态环境中性能比传统多智能体调度方法更好。

西北工业大学 LI 等<sup>[82]</sup>提出了分布式、灵活和自组织的 AGV 任务分配方案,设计了两种改进的多智能体强化学习算法,包括多智能体深度确定性策略梯度信息势场法(MADDPG-IPF)和多智能体双向协调网络信息势场法(BiCNet-IPF),以实现适应

不同场景的 AGV 之间的协调。为解决奖励稀疏问题,该文章提出了一种基于信息势场的奖励塑造策略,该策略提供逐步奖励并隐式引导 AGV 移动到不同的目标物料。

韩国成均馆大学 LEE 等<sup>[83]</sup>使用强化学习方法优化具有自动化物流的仓库环境下的移动机器人路径规划方案,构建了一个模拟环境来测试仓库环境中的路径导航,比较了两种基本的强化学习算法 Q-Learning 和 Dyna-Q 算法的算法性能。为尽量减少随机路径搜索,该方法在目标位置附近设置了较高的奖励值以减少低效探索,从而提高路径搜索精度并保持路径搜索时间。

菜鸟网络公司 ZHANG 等<sup>[84]</sup>提出了一种具有多步前进树搜索(MATS)策略的分布式多智能体强化学习(MARL)框架来解决动态多智能体路径查找问题,用于 AGV 取放包裹等仓储服务应用。该方法可很好地扩展到有大量智能体的真实世界环境中,且在线响应时间在可接受的水平内。

西北工业大学 HU 等<sup>[85]</sup>提出了一种结合强化学习和行为树的自适应交通避障控制模型,以解决离散制造车间的 AGV 系统中的效率、及时性和安全性问题。将 AGV 和交通指挥器等组件定义为相互自主协作的特定智能体,由行为树构建行为模型,枚举 AGV

交通控制中所有可能的状态。通过这种方法, AGV 能够从现有的可选策略中自适应地选择最优的基于规则的策略。

### 2.3 基于合作博弈的生产运作管理

传统的生产运作管理主要是以制造企业为研究对象, 以制造业的规划与管理为焦点。针对生产运作管理的建模和优化问题, 传统的数学规划建模存在求解困难、表达不直观的问题。常见的优化方法主要有启发式方法(遗传算法、粒子群算法、蚁群算法、禁忌搜索、模拟退火等), 具备运算量小、所需理论基础不高、更易量化和定性分析的特点, 但也同时存在着表现不平衡、无法确保最优解及过于依赖于实际问题的弊端。

并且由于生产调度中个体之间存在激烈冲突, 因此, 可以通过博弈理论的手段来解决。CURIEL<sup>[86]</sup>首次将博弈方法引入调度问题, 并结合合作博弈理论建立了博弈调度新范式: 在单一机器环境下的调度问题中, 加工工艺之间不具有生产约束, 以加权完工时间作为目标函数。在随后的 30 余年内, 学术界逐步产生了些许博弈理论在制造系统生产运作管理中的应用与研究; 在调度方案的制定方面, 通常是基于合作博弈理论进行展开。合作博弈强调的是团体理性的思想、是

通过双方/多方合作来增加合作各方的利益以及整个系统利益, 其能够体现效率和公正。在合作博弈理论中, 均衡是指博弈各方均接受的收益分配方式, 均衡的求解类型有很多, 但几乎针对每类具体问题都有专门定义的解。

早在 1838 年, AUGUSTIN 就阐述了“寡头竞争”问题, 它后来成为学术界认可的博弈论核心理念纳什均衡的最早期版本。基于此, 专家们对若干信息不充分的问题纷纷进行了探讨, 而这些问题也正是现代博弈论的研究基石。而进入了 20 世纪 60、70 年代后, 自博弈决策完美纳什平衡、完美贝叶斯纳什平衡、不充分信息博弈、动态博弈论等最新理论相继问世, 极大推动了博弈

论的发展, 使博弈论逐渐成为分析社会经济问题的有力手段, 并对决策者的合理均衡奠定了重要指导意义。典型博弈模型的基本要素主要有: 1) 博弈方即博弈事件中能够独自判断、独自行动并独自承受行为后果的个人或团体; 2) 博弈策略是指博弈各方在博弈过程中各种策略的集合; 3) 效益函数也指博弈的收益, 指博弈中各个策略执行后的结果; 4) 均衡是博弈的最终目标。

#### 2.3.1 基于合作博弈的生产调度基本模型

面向智能制造的生产调度问题, 其合作博弈的要素如表 1 所示。

如图 8 所示是一种最基本的生产合作模式结构图: 在生产调

表 1 生产调度合作博弈要素

| 博弈方  | 加工设备                   |
|------|------------------------|
| 策略集  | 调度排序                   |
| 效益函数 | 加工成本、加工时间等             |
| 均衡   | 基于纳什均衡、夏普利、帕累托等的最佳调度排序 |

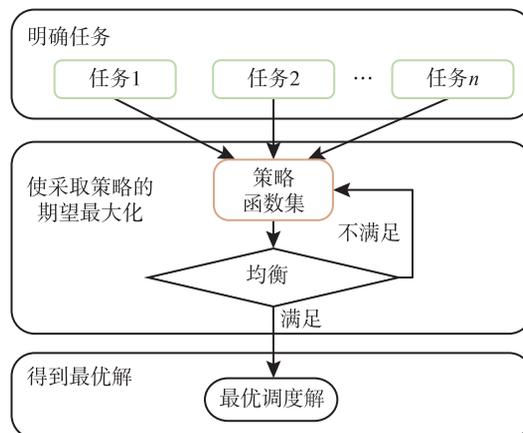


图 8 合作调度基本模型

度问题中，主要任务是面向不同加工工艺的设备的加工任务，相应的策略函数集是各种设备的加工次序，只有在满足加工设备任务分配均衡的情况下，才能实现生产调度任务的最优排序。基于合作博弈的调度目标是通过博弈论的手段将生产资源合理的分配给多个生产任务（目标）。如图8所示，现有的基于合作博弈思想的生产调度方法主要考虑到两方面的问题：1）采用优化排序方法实现生产调度优化问题；2）基于节约成本的理念，通过合作博弈方法探讨不同博弈方式间的协调关系。在智能制造生产系统中，与传统的调度不同，排序策略集中在动态环境下的实时调度，同时均衡方案的研究主要面向如何解决大规模数据下的模型求解。

### 2.3.2 基于合作博弈的生产调度研究现状

在基于合作博弈的调度策略方面，面对动态车间的调度问题，TIAN<sup>[87]</sup>提出了将合作博弈方案和滚动水平重调度策略相结合的混合调度模型，并验证了该方法在实际调度问题中的可行性和有效性。与其他动态博弈调度模型不同，YANG<sup>[88]</sup>提出了考虑平衡任务可靠性的调度模型，使用合作博弈的策略计算节点上速度分配策略的任务，通过实验分析证明了该模型有较好的优化结果。WANG<sup>[89]</sup>将多智能体模型和博

弈理论相结合，将调度策略根据系统的实时状态把任务优化分配给加工设备，有效实现大量实时数据下的制造车间调度问题。同样，解决大量实时数据下的生产调度，WANG<sup>[90]</sup>提出了一种基于多周期生产计划和博弈思想相结合的实时调度（MPPRS）方法，并通过实验案例验证该方法优于其他现有动态调度方案。

在调度均衡机制方面，面向优化工序配置、降低资源和能源消耗、降低生产成本等调度目标，ZHANG<sup>[91]</sup>构建了一种基于合作博弈的柔性车间调度动态优化模型，并设计开发数学模型构建、纳什均衡解、过程任务优化测量等关键技术，最后通过实际案例证明所提策略和方法的效率。基于此模型，ZHANG等<sup>[92]</sup>提出一种基于动态合作博弈的实时数据驱动多目标调度优化模型，并设计子博弈完美纳什均衡获得最优解。BASSO<sup>[93]</sup>提出使用近似博弈实现生产成本的稳定分配，并基于最大熵的方法对启发式寻优算法进行改进，提高了调度最优解的收敛速度。基于传统启发式算法的博弈学习模型在解决实际调度过程中复杂模型构造和庞大参数维度的问题时难以得到最优解，ZHANG<sup>[94]</sup>和ANANTH<sup>[95]</sup>将合作博弈理论和改进遗传算法相结合、设计了新型作业调度方法，通过非支配排序遗传方法（NSGA-II）来获

得Pareto最优解。针对多任务并行调度问题，XIAO<sup>[96]</sup>创新性地给出了一种基于生物地理学的扩展优化方法，将其与合作博弈调度模型相结合，通过与常规启发式方法做比较，验证了该算法可以实现更好的调度。

从目前的研究来看，合作博弈更加关注如何找到折中的调度方案，使各个博弈方都能够获取更大收益或者支出较少成本。在实时调度策略方面，现有研究主要将博弈理论和现有策略、框架（如多智能体系统）相结合实现有效实时调度；在调度进化策略方面，现有研究通过结合启发式算法寻求最优解，同时为解决复杂模型下不存在最优解、或难获得最优解的情况，一些学者提出近似解、或改进启发式算法提高收敛速度。

## 3 总结与展望

本文详细综述了基于数据的建模与优化方法在设备管理、生产过程自动化、运作管理这三个复杂制造系统典型场景中的研究现状。随着社会对智能制造的需求更加多元化，对复杂制造系统的灵活性、可靠性、可持续性等要求也越来越高。可以从复杂制造系统两个组成要素（即复杂系统与制造系统）出发明晰当前复杂制造系统所面临的研究挑战与未来的发展方向。

在复杂系统中，临界性是揭示复杂系统结构不稳定的重要概念和性质，而且越来越多的实证研究表明很多自然复杂系统工作在近临界态<sup>[97]</sup>。在复杂制造系统中，系统的韧性研究具有重要科学意义和实际工程应用价值。因此对于复杂制造系统的展望可以从复杂系统临界层面和制造系统韧性层面展开。

### 3.1 复杂制造系统建模与优化面临的挑战

随着系统复杂性的增加和高性能的要求，复杂系统近临界态日益成为研究的热点，特别是有关近临界系统演化行为模型、预测临界态发生规律、实现近临界态有效调控等问题。作为一类典型的复杂系统，复杂制造系统具备以下的复杂特征：系统层次的多样性、风险的随机性、动态行为的不确定性、状态参数的高度多维性、系统内部要素的非线性和高耦合性以及生产流程的复杂性等。从复杂系统临界角度分析，目前复杂制造系统在临界态建模、临界态预测、临界态调控优化三个方面面临着挑战。

1) 系统临界态建模问题。系统实现评估、预测、调整临界的前提是对系统临界的准确建模。目前对于复杂系统临界条件和近临界行为的研究侧重于系统的单参数调节，对真实系统的多维度复杂性考虑不足，难以用于实际

复杂系统的因果建模和分析。因此，如何对复杂制造系统的临界状态准确描述、对临界状态及时分析、对临界进行准确建模，构建复杂制造系统近临界演化的多参数和多维度模型是当前面临的一大挑战。

2) 系统临界态预测问题。复杂制造系统生产流程高度复杂、内部要素非线性且高度耦合、系统时刻处于动态变化中，且仅在少量人工协助下运转，可能存在大量潜在系统风险、关键设备故障或外部恶意攻击等。而现有理论并未针对复杂制造系统这些特有的系统状态和风险进行临界评估，也就无法针对特有风险制定应对策略。目前经典动力学分析方法过度依赖动力学方程和模型参数，难以用于实际复杂系统；基于传统机器学习的方法模型可解释性差、系统可靠性和鲁棒性无法保证；而复杂系统各层级风险评估的研究也以一种相对孤立的方式进行。因此，如何将复杂系统近临界态与系统风险评估相结合是当前研究的又一大挑战。

3) 系统临界态调控问题。复杂制造系统缺乏有效的危机管控平台和完善的理论方法，来发现潜在风险、预测设备故障、抵御外部攻击，并从危机中快速恢复。由于复杂系统的临界态非常复杂，经典的控制方法需要强大的感知和执行能力，其现有的理论框架

不适合相关的研究，导致经典控制方法不适用于复杂系统临界态调控。因此，复杂制造系统在利用临界态特点来实现系统调控和诱导干预方面仍然存在挑战。

### 3.2 复杂制造系统建模与优化的未来发展

近年来，复杂性科学作为一种新兴的交叉性学科在社会系统、金融系统、电力系统、计算科学中得到了广泛应用。其中，在解决各类复杂系统中的风险传播和连锁效应分析和控制的问题时，复杂性科学中的临界理论具有很广的适应性。但在复杂制造系统中，运用临界理论来解决系统风险传播预警和控制问题的研究还非常缺乏。基于此，未来有必要深入研究基于临界理论的复杂制造系统的风险传播预警和控制，将有助于更深刻地揭示复杂制造系统在内外部风险下的演化规律，为制造企业提供更加及时精准的预警，并且保障复杂制造系统的安全高效运营。将可能的3个发展方向归纳如下：

1) 复杂制造系统临界态演化多参数模型构建

复杂制造系统临界建模需要在建模前需要考虑对系统临界性和可靠性较为重要的关键数据，以刻画工厂设备间深层耦合关系，为临界精准建模提供数据支撑。复杂制造系统的临界态演化模型构建在关注个别关键参数的基础

上, 还需要结合系统真实复杂性, 可以利用动力学机制同时考虑多个影响因子构建近临界演化的多参数模型。接着可以进一步探索多相态跃迁的临界条件和形态以及暂态演变机理, 建立复杂制造系统近临界自组织演化的多维度理论框架。在模型的基础上还可以进行临界演化的高阶相互作用规律探究以及临界演化的跨尺度涌现机制研究, 以构建一套较为完整复杂制造系统在复杂系统临界层面的演化机理体系。

### 2) 考虑风险传播的复杂制造系统临界态预测

由于复杂制造系统面临制造环境随机因素和参数漂移等多种不确定性, 在对采集到的多变量状态数据进行数据预处理和特征提取后, 可以考虑采用高效的循环神经网络来预测复杂系统的临界态, 针对不确定因素可以采用

蒙特卡洛采样进行量化与管理, 进而提升临界态预测的准确性和鲁棒性。在风险评估与临界预测结合方面, 可以对系统内部近临界态相关风险因素进行识别, 对复杂制造系统进行多尺度脆弱性评估, 建立综合评估体系, 并利用层次分析、模糊理论等方法预测基于近临界态的风险传播趋势。进而分析系统结构、模块动态、功能特征与系统风险之间的关系。可以基于因果推断理论进行多层次元部件复杂设备的可解释韧性评估, 利用因果表示学习构建多模块、多层次、跨尺度的动态演化因果网络, 以刻画复杂设备多层次元部件的跨层次相互作用机理。

### 3) 基于复合学习机制的复杂制造系统调控

复杂制造系统决策优化是调控系统临界态的有效技术手段, 同时临界调控与决策优化具有竞

合特性, 有必要将二者协同考虑。机器学习和机理模型相结合是复杂系统临界态研究主要的方法之一, 在复杂制造系统的调控方面可以基于深度学习的复杂系统近临界态量测方法并制定操控策略。考虑到演化博弈中个体自更新策略的特点, 可以结合动态博弈方法或者自适应遗传算法来优化参数、解决动态环境下复杂制造系统生产需求 - 系统临界的策略选择问题, 以达到让复杂系统朝着期望方向演化的目的。对于典型攻击下复杂制造系统的恢复问题, 可以结合多智能体的方法来解决系统重构问题。同时, 还可以使用迁移学习与主动学习的方法对崩溃系统进行训练、建模并应用到其它系统中, 以增强系统韧性、提高系统应对未知攻击的能力。○

来源:《信息与控制》

## 作者简介

于青云 (1989-), 女, 博士。研究领域为复杂制造系统运作管理与优化。

赵 慧 (1991-), 女, 博士。研究领域为智能交通决策优化, 多智能体系统建模与仿真。

许 佳 (1987-), 女, 博士。研究领域为复杂系统健康管理、控制与优化。

深度学习 (DL, Deep Learning) 是机器学习 (ML, Machine Learning) 领域中一个新的研究方向, 它被引入机器学习使其更接近于最初的目标——人工智能 (AI, Artificial Intelligence)。深度学习使机器模仿视听和思考等人类的活动, 解决了很多复杂的模式识别难题, 使得人工智能相关技术取得了很大进步。本期“科普园地”栏目, 让我们一起走进“深度学习”。

## 一篇适合新手的深度学习综述

摘要: 深度学习是机器学习和人工智能研究的最新趋势之一。它也是当今最流行的科学研究趋势之一。深度学习方法为计算机视觉和机器学习带来了革命性的进步。新的深度学习技术正在不断诞生, 超越最先进的机器学习甚至是现有的深度学习技术。近年来, 全世界在这一领域取得了许多重大突破。由于深度学习正快速发展, 导致了它的进展很难被跟进, 特别是对于新的研究者。在本文中, 我们将简要讨论近年来关于深度学习的最新进展。

### 1 引言

「深度学习」(DL) 一词最初在 1986 被引入机器学习 (ML), 后来在 2000 年时被用于人工神经网络 (ANN)。深度学习方法由多个层组成, 以学习具有多个抽象层次的数据特征。DL 方法允许计算机通过相对简单的概念来

学习复杂的概念。对于人工神经网络 (ANN), 深度学习 (DL) (也称为分层学习 (Hierarchical Learning)) 是指在多个计算阶段中精确地分配信用, 以转换网络中的聚合激活。为了学习复杂的功能, 深度架构被用于多个抽象层次, 即非线性操作; 例如 ANNs, 具有许多隐藏层。用准确的话总结就是, 深度学习是机器学习的一个子领域, 它使用了多层次的非线性信息处理和抽象, 用于有监督或无监督的特征学习、表示、分类和模式识别。

深度学习即表征学习是机器学习的一个分支或子领域, 大多数数人认为近代深度学习方法是从小 2006 年开始发展起来的。本文是关于最新的深度学习技术的综述, 主要推荐给即将涉足该领域的研究者。本文包括 DL 的基本思想、主要方法、最新进展以及应用。

综述论文是非常有益的, 特

别是对某一特定领域的新研究人员。一个研究领域如果在不久的将来及相关应用领域中有很大的价值, 那通常很难被实时跟踪到最新进展。现在, 科学研究是一个很有吸引力的职业, 因为知识和教育比以往任何时候都更容易分享和获得。对于一种技术研究的趋势来说, 唯一正常的假设是它会在各个方面有很多的改进。几年前对某个领域的概述, 现在可能已经过时了。

考虑到近年来深度学习的普及和推广, 我们简要概述了深度学习和神经网络 (NN), 以及它的主要进展和几年来的重大突破。我们希望这篇文章将帮助许多新手研究者在这一领域全面了解最近的深度学习的研究和技术, 并引导他们以正确的方式开始。同时, 我们希望通过这项工作, 向这个时代的顶级 DL 和 ANN 研究者们致敬: Geoffrey

Hinton (Hinton)、Juergen Schmidhuber (Schmidhuber)、Yann LeCun (LeCun)、Yoshua Bengio (Bengio) 和许多其他研究学者，他们的研究构建了现代人工智能 (AI)。跟进他们的工作，以追踪当前最佳的 DL 和 ML 研究进展对我们来说也至关重要。

在本论文中，我们首先简述过去的研究论文，对深度学习的模型和方法进行研究。然后，我们将开始描述这一领域的最新进展。我们将讨论深度学习 (DL) 方法、深度架构 (即深度神经网络 (DNN)) 和深度生成模型 (DGM)，其次是重要的正则化和优化方法。此外，用两个简短的部分对于开源的 DL 框架和重要的 DL 应用进行总结。我们将在最后两个章节 (即讨论和结论) 中讨论深入学习的现状和未来。

## 2 相关研究

在过去的几年中，有许多关于深度学习的综述论文。他们以很好的方式描述了 DL 方法、方法论以及它们的应用和未来研究方向。这里，我们简要介绍一些关于深度学习的优秀综述论文。

Young 等人 (2017) 讨论了 DL 模型和架构，主要用于自然语言处理 (NLP)。他们在不同的 NLP 领域中展示了 DL 应用，比较了 DL 模型，并讨论了可能的未来趋势。

Zhang 等人 (2017) 讨论了用于前端和后端语音识别系统的当前最佳深度学习技术。

Zhu 等人 (2017) 综述了 DL 遥感技术的最新进展。他们还讨论了开源的 DL 框架和其他深度学习的技术细节。

Wang 等人 (2017) 以时间顺序的方式描述了深度学习模型的演变。该短文简要介绍了模型，以及在 DL 研究中的突破。该文以进化的方式来了解深度学习的起源，并对神经网络的优化和未来的研究做了解读。

Goodfellow 等人 (2016) 详细讨论了深度网络和生成模型，从机器学习 (ML) 基础知识、深度架构的优缺点出发，对近年来的 DL 研究和应用进行了总结。

LeCun 等人 (2015) 从卷积神经网络 (CNN) 和递归神经网络 (RNN) 概述了深度学习 (DL) 模型。他们从表征学习的角度描述了 DL，展示了 DL 技术如何工作、如何在各种应用中成功使用、以及如何对预测未来进行基于无监督学习 (UL) 的学习。同时他们还指出了 DL 在文献目录中的主要进展。

Schmidhuber (2015) 从 CNN、RNN 和深度强化学习 (RL) 对深度学习做了一个概述。他强调了序列处理的 RNN，同时指出基本 DL 和 NN 的局限性，以及改进它们的技巧。

Nielsen (2015) 用代码和例子描述了神经网络的细节。他还在一定程度上讨论了深度神经网络和深度学习。

Schmidhuber (2014) 讨论了基于时间序列的神经网络、采用机器学习方法进行分类，以及在神经网络中使用深度学习的历史和进展。

Deng 和 Yu (2014) 描述了深度学习类别和技术，以及 DL 在几个领域的应用。

Bengio (2013) 从表征学习的角度简要概述了 DL 算法，即监督和无监督网络、优化和训练模型。他聚焦于深度学习的许多挑战，例如：为更大的模型和数据扩展算法，减少优化困难，设计有效的缩放方法等。

Bengio 等人 (2013) 讨论了表征和特征学习即深度学习。他们从应用、技术和挑战的角度探讨了各种方法和模型。

Deng (2011) 从信息处理及相关领域的角度对深度结构化学学习及其架构进行了概述。

Arel 等人 (2010) 简要概述了近年来的 DL 技术。

Bengio (2009) 讨论了深度架构，即人工智能的神经网络和生成模型。

最近所有关于深度学习 (DL) 的论文都从多个角度讨论了深度学习重点。这对 DL 的研究人员来说是非常有必要的。然而，

DL 目前是一个蓬勃发展的领域。在最近的 DL 概述论文发表之后, 仍有许多新的技术和架构被提出。此外, 以往的论文从不同的角度进行研究。我们的论文主要是针对刚进入这一领域的学习者和新手。为此, 我们将努力为新研究人员和任何对这一领域感兴趣的人提供一个深度学习的基础和清晰的概念。

### 3 最新进展

在本节中, 我们将讨论最近从机器学习和人工神经网络 (ANN) 的中衍生出来的主要深度学习 (DL) 方法, 人工神经网络是深度学习最常用的形式。

#### 3.1 深度架构的演变

人工神经网络 (ANN) 已经取得了长足的进步, 同时也带来了其他的深度模型。第一代人工神经网络由简单的感知器神经层组成, 只能进行有限的简单计算。第二代使用反向传播, 根据错误率更新神经元的权重。然后支持向量机 (SVM) 浮出水面, 在一段时间内超越 ANN。为了克服反向传播的局限性, 人们提出了受限玻尔兹曼机 (RBM), 使学习更容易。此时其他技术和神经网络也出现了, 如前馈神经网络 (FNN)、卷积神经网络 (CNN)、循环神经网络 (RNN) 等, 以及深层信念网络、自编码器等。从那时起, 为实现各种用途, ANN

在不同方面得到了改进和设计。

Schmidhuber (2014)、Bengio (2009)、Deng 和 Yu (2014)、Goodfellow 等人 (2016)、Wang 等人 (2017) 对深度神经网络 (DNN) 的进化和历史以及深度学习 (DL) 进行了详细的概述。在大多数情况下, 深层架构是简单架构的多层非线性重复, 这样可从输入中获得高度复杂的函数。

### 4 深度学习方法

深度神经网络在监督学习中取得了巨大的成功。此外, 深度学习模型在无监督、混合和强化学习方面也非常成功。

#### 4.1 深度监督学习

监督学习应用在当数据标记、分类器分类或数值预测的情况。LeCun 等人 (2015) 对监督学习方法以及深层结构的形成给出了一个精简的解释。Deng 和 Yu (2014) 提到了许多用于监督和混合学习的深度网络, 并做出解释, 例如深度堆栈网络 (DSN) 及其变体。Schmidhuber (2014) 的研究涵盖了所有神经网络, 从早期神经网络到最近成功的卷积神经网络 (CNN)、循环神经网络 (RNN)、长短期记忆 (LSTM) 及其改进。

#### 4.2 深度无监督学习

当输入数据没有标记时, 可应用无监督学习方法从数据中提取特征并对其进行分类或标记。

LeCun 等人 (2015) 预测了无监督学习在深度学习中的未来。Schmidhuber (2014) 也描述了无监督学习的神经网络。Deng 和 Yu (2014) 简要介绍了无监督学习的深度架构, 并详细解释了深度自编码器。

#### 4.3 深度强化学习

强化学习使用奖惩系统预测学习模型的下一步。这主要用于游戏和机器人, 解决平常的决策问题。Schmidhuber (2014) 描述了强化学习 (RL) 中深度学习的进展, 以及深度前馈神经网络 (FNN) 和循环神经网络 (RNN) 在 RL 中的应用。Li (2017) 讨论了深度强化学习 (Deep Reinforcement Learning, DRL)、它的架构 (例如 DeepQ-Network, DQN) 以及在各个领域的应用。

Mnih 等人 (2016) 提出了一种利用异步梯度下降进行 DNN 优化的 DRL 框架。

vanHasselt 等人 (2015) 提出了一种使用深度神经网络 (deep neural network, DNN) 的 DRL 架构。

### 5 深度神经网络

在本节中, 我们将简要地讨论深度神经网络 (DNN), 以及它们最近的改进和突破。神经网络的功能与人脑相似。它们主要由神经元和连接组成。当我们说深度神经网络时, 我们可以假设

有相当多的隐藏层，可以用来从输入中提取特征和计算复杂的函数。Bengio (2009) 解释了深度结构的神经网络，如卷积神经网络 (CNN)、自编码器 (AE) 等及其变体。Deng 和 Yu (2014) 详细介绍了一些神经网络架构，如 AE 及其变体。Goodfellow 等 (2016) 对深度前馈网络、卷积网络、递归网络及其改进进行了介绍和技巧性讲解。Schmidhuber (2014) 提到了神经网络从早期神经网络到最近成功技术的完整历史。

### 5.1 深度自编码器

自编码器 (AE) 是神经网络 (NN)，其中输出即输入。AE 采用原始输入，编码为压缩表示，然后解码以重建输入。在深度 AE 中，低隐藏层用于编码，高隐藏层用于解码，误差反向传播用于训练。

#### 5.1.1 变分自编码器

变分自动编码器 (VAE) 可以算作解码器。VAE 建立在标准神经网络上，可以通过随机梯度下降训练 (Doersch, 2016)。

#### 5.1.2 多层降噪自编码器

在早期的自编码器 (AE) 中，编码层的维度比输入层小 (窄)。在多层降噪自编码器 (SDAE) 中，编码层比输入层宽 (Deng and Yu, 2014)。

#### 5.1.3 变换自编码器

深度自动编码器 (DAE) 可以是转换可变的，也就是从多层

非线性处理中提取的特征可以根据学习者的需要而改变。变换自编码器 (TAE) 既可以使用输入向量，也可以使用目标输出向量来应用转换不变性属性，将代码引导到期望的方向 (Deng and Yu, 2014)。

### 5.2 深度卷积神经网络

四种基本思想构成了卷积神经网络 (CNN)，即：局部连接、共享权重、池化和多层使用。CNN 的第一部分由卷积层和池化层组成，后一部分主要是全连接层。卷积层检测特征的局部连接，池层将相似的特征合并为一个。CNN 在卷积层中使用卷积而不是矩阵乘法。

Krizhevsky 等人 (2012) 提出了一种深度卷积神经网络 (CNN) 架构，也称为 AlexNet，这是深度学习 (Deep Learning, DL) 的一个重大突破。网络由 5 个卷积层和 3 个全连接层组成。该架构采用图形处理单元 (GPU) 进行卷积运算，采用线性整流函数 (ReLU) 作为激活函数，用 Dropout 来减少过拟合。

Iandola 等人 (2016) 提出了一个小型的 CNN 架构，叫做「SqueezeNet」。

Szegedy 等人 (2014) 提出了一种深度 CNN 架构，名为 Inception。Dai 等人 (2017) 提出了对 Inception-ResNet 的改进。

Redmon 等人 (2015) 提出

了一个名为 YOLO (You Only Look Once) 的 CNN 架构，用于均匀和实时的目标检测。

Zeiler 和 Fergus (2013) 提出了一种将 CNN 内部激活可视化的方法。

Gehring 等人 (2017) 提出了一种用于序列到序列学习的 CNN 架构。

Bansal 等人 (2017) 提出了 PixelNet，使用像素来表示。

Goodfellow 等人 (2016) 解释了 CNN 的基本架构和思想。Gu 等人 (2015) 对 CNN 的最新进展、CNN 的多种变体、CNN 的架构、正则化方法和功能以及在各个领域的应用进行了很好的概述。

#### 5.2.1 深度最大池化卷积神经网络

最大池化卷积神经网络 (MPCNN) 主要对卷积和最大池化进行操作，特别是在数字图像处理中。MPCNN 通常由输入层以外的三种层组成。卷积层获取输入图像并生成特征图，然后应用非线性激活函数。最大池层向下采样图像，并保持子区域的最大值。全连接层进行线性乘法。在深度 MPCNN 中，在输入层之后周期性地使用卷积和混合池化，然后是全连接层。

#### 5.2.2 极深的卷积神经网络

Simonyan 和 Zisserman (2014) 提出了非常深层的卷积神

神经网络 (VDCNN) 架构, 也称为 VGGNet。VGGNet 使用非常小的卷积滤波器, 深度达到 16-19 层。Conneau 等人 (2016) 提出了另一种文本分类的 VDCNN 架构, 使用小卷积和池化。他们声称这个 VDCNN 架构是第一个在文本处理中使用的, 它在字符级别上起作用。该架构由 29 个卷积层组成。

### 5.3 网络中的网络

Lin 等人 (2013) 提出了网络中的网络 (NetworkInNetwork, NIN)。NIN 以具有复杂结构的微神经网络代替传统卷积神经网络 (CNN) 的卷积层。它使用多层感知器 (MLPConv) 处理微神经网络和全局平均池化层, 而不是全连接层。深度 NIN 架构可以由 NIN 结构的多重叠加组成。

### 5.4 基于区域的卷积神经网络

Girshick 等人 (2014) 提出了基于区域的卷积神经网络 (R-CNN), 使用区域进行识别。R-CNN 使用区域来定位和分割目标。该架构由三个模块组成: 定义了候选区域的集合的类别独立区域建议, 从区域中提取特征的大型卷积神经网络 (CNN), 以及一组类特定的线性支持向量机 (SVM)。

#### 5.4.1 Fast R-CNN

Girshick (2015) 提出了快速的基于区域的卷积网络 (FastR-CNN)。这种方法利用

R-CNN 架构能快速地生成结果。FastR-CNN 由卷积层和池化层、区域建议层和一系列全连接层组成。

#### 5.4.2 Faster R-CNN

Ren 等人 (2015) 提出了更快的基于区域的卷积神经网络 (Faster R-CNN), 它使用区域建议网络 (Region Proposal Network, RPN) 进行实时目标检测。RPN 是一个全卷积网络, 能够准确、高效地生成区域建议 (Ren et al., 2015)。

#### 5.4.3 Mask R-CNN

何恺明等人 (2017) 提出了基于区域的掩模卷积网络 (Mask R-CNN) 实例目标分割。Mask R-CNN 扩展了 R-CNN 的架构, 并使用一个额外的分支用于预测目标掩模。

#### 5.4.4 Multi-Expert R-CNN

Lee 等人 (2017) 提出了基于区域的多专家卷积神经网络 (ME R-CNN), 利用了 Fast R-CNN 架构。ME R-CNN 从选择性和详尽的搜索中生成兴趣区域 (RoI)。它也使用 per-RoI 多专家网络而不是单一的 per-RoI 网络。每个专家都是来自 Fast R-CNN 的全连接层的相同架构。

### 5.5 深度残差网络

He 等人 (2015) 提出的残差网络 (ResNet) 由 152 层组成。ResNet 具有较低的误差, 并且容易通过残差学习进行训练。更深

层次的 ResNet 可以获得更好的性能。在深度学习领域, 人们认为 ResNet 是一个重要的进步。

#### 5.5.1 Resnet in Resnet

Targ 等人 (2016) 在 Resnet in Resnet (RiR) 中提出将 ResNets 和标准卷积神经网络 (CNN) 结合到深层双流架构中。

#### 5.5.2 ResNeXt

Xie 等人 (2016) 提出了 ResNeXt 架构。ResNext 利用 ResNets 来重复使用分割-转换-合并策略。

### 5.6 胶囊网络

Sabour 等人 (2017) 提出了胶囊网络 (CapsNet), 即一个包含两个卷积层和一个全连接层的架构。CapsNet 通常包含多个卷积层, 胶囊层位于末端。CapsNet 被认为是深度学习的最新突破之一, 因为据说这是基于卷积神经网络的局限性而提出的。它使用的是一层又一层胶囊, 而不是神经元。激活的较低级胶囊做出预测, 在同意多个预测后, 更高级的胶囊变得活跃。在这些胶囊层中使用了一种协议路由机制。Hinton 之后提出 EM 路由, 利用期望最大化 (EM) 算法对 CapsNet 进行了改进。

### 5.7 循环神经网络

循环神经网络 (RNN) 更适合于序列输入, 如语音、文本和生成序列。一个重复的隐藏单元在时间展开时可以被认为具有相同权

重的非常深的前馈网络。由于梯度消失和维度爆炸问题，RNN 曾经很难训练。为了解决这个问题，后来许多人提出了改进意见。

Goodfellow 等人 (2016) 详细分析了循环和递归神经网络和架构的细节，以及相关的门控和记忆网络。

Karpathy 等人 (2015) 使用字符级语言模型来分析和可视化预测、表征训练动态、RNN 及其变体 (如 LSTM) 的错误类型等。

J'ozefowicz 等人 (2016) 探讨了 RNN 模型和语言模型的局限性。

### 5.7.1 RNN-EM

Peng 和 Yao (2015) 提出了利用外部记忆 (RNN-EM) 来改善 RNN 的记忆能力。他们声称在语言理解方面达到了最先进的水平，比其他 RNN 更好。

### 5.7.2 GF-RNN

Chung 等 (2015) 提出了门控反馈递归神经网络 (GF-RNN)，它通过将多个递归层与全局门控单元叠加来扩展标准的 RNN。

### 5.7.3 CRF-RNN

Zheng 等人 (2015) 提出条件随机场作为循环神经网络 (CRF-RNN)，其将卷积神经网络 (CNN) 和条件随机场 (CRF) 结合起来进行概率图形建模。

### 5.7.4 Quasi-RNN

Bradbury 等人 (2016) 提出了用于神经序列建模和沿时间

步的并行应用的准循环神经网络 (QRNN)。

## 5.8 记忆网络

Weston 等人 (2014) 提出了问答记忆网络 (QA)。记忆网络由记忆、输入特征映射、泛化、输出特征映射和响应组成。

### 5.8.1 动态记忆网络

Kumar 等人 (2015) 提出了用于 QA 任务的动态记忆网络 (DMN)。DMN 有四个模块：输入、问题、情景记忆、输出。

## 5.9 增强神经网络

Olah 和 Carter (2016) 很好地展示了注意力和增强循环神经网络，即神经图灵机 (NTM)、注意力接口、神经编码器和自适应计算时间。增强神经网络通常是使用额外的属性，如逻辑函数以及标准的神经网络架构。

### 5.9.1 神经图灵机

Graves 等人 (2014) 提出了神经图灵机 (NTM) 架构，由神经网络控制器和记忆库组成。NTM 通常将 RNN 与外部记忆库结合。

### 5.9.2 神经 GPU

Kaiser 和 Sutskever (2015) 提出了神经 GPU，解决了 NTM 的并行问题。

### 5.9.3 神经随机存取机

Kurach 等人 (2015) 提出了神经随机存取机，它使用外部的可变大小的随机存取存储器。

### 5.9.4 神经编程器

Neelakantan 等人 (2015)

提出了神经编程器，一种具有算术和逻辑功能的增强神经网络。

### 5.9.5 神经编程器 - 解释器

Reed 和 de Freitas (2015) 提出了可以学习的神经编程器 - 解释器 (NPI)。NPI 包括周期性内核、程序内存和特定于领域的编码器。

## 5.10 长短期记忆网络

Hochreiter 和 Schmidhuber (1997) 提出了长短期记忆 (Long short-Short-Term Memory, LSTM)，克服了循环神经网络 (RNN) 的误差回流问题。LSTM 是基于循环网络和基于梯度的学习算法，LSTM 引入自循环产生路径，使得梯度能够流动。

Greff 等人 (2017) 对标准 LSTM 和 8 个 LSTM 变体进行了大规模分析，分别用于语音识别、手写识别和复调音乐建模。他们声称 LSTM 的 8 个变种没有显著改善，而只有标准 LSTM 表现良好。

Shi 等人 (2016b) 提出了深度长短期记忆网络 (DLSTM)，它是一个 LSTM 单元的堆栈，用于特征映射学习表示。

### 5.10.1 批 - 归一化 LSTM

Cooijmans 等人 (2016) 提出了批 - 归一化 LSTM (BN-LSTM)，它对递归神经网络的隐藏状态使用批 - 归一化。

### 5.10.2 Pixel RNN

van den Oord 等人 (2016b)

提出像素递归神经网络 (Pixel-RNN), 由 12 个二维 LSTM 层组成。

### 5.10.3 双向 LSTM

Wollmer 等人 (2010) 提出了双向 LSTM (BLSTM) 的循环网络与动态贝叶斯网络 (DBN) 一起用于上下文敏感关键字检测。

### 5.10.4 Variational Bi-LSTM

Shabanian 等人 (2017) 提出了变分双向 LSTM (Variational Bi-LSTM), 它是双向 LSTM 体系结构的变体。Variational Bi-LSTM 使用变分自编码器 (VAE) 在 LSTM 之间创建一个信息交换通道, 以学习更好的表征。

### 5.11 谷歌神经机器翻译

Wu 等人 (2016) 提出了名为谷歌神经机器翻译 (GNMT) 的自动翻译系统, 该系统结合了编码器网络、解码器网络和注意力网络, 遵循共同的序列对序列 (sequence-to-sequence) 的学习框架。

### 5.12 Fader Network

Lample 等人 (2017) 提出了 Fader 网络, 这是一种新型的编码器-解码器架构, 通过改变属性值来生成真实的输入图像变化。

### 5.13 超网络

Ha 等人 (2016) 提出的超网络 (Hyper Networks) 为其他神经网络生成权重, 如静态超网络卷积网络、用于循环网络的

动态超网络。

Deutsch (2018) 使用超网络生成神经网络。

### 5.14 Highway Networks

Srivastava 等人 (2015) 提出了高速路网络 (Highway Networks), 通过使用门控单元来学习管理信息。跨多个层次的信息流称为信息高速路。

#### 5.14.1 Recurrent Highway Networks

Zilly 等人 (2017) 提出了循环高速路网络 (Recurrent Highway Networks, RHN), 它扩展了长短期记忆 (LSTM) 架构。RHN 在周期性过渡中使用了 Highway 层。

### 5.15 Highway LSTM RNN

Zhang 等人 (2016) 提出了高速路长短期记忆 (high-Long short Memory, HLSTM) RNN, 它在相邻层的内存单元之间扩展了具有封闭方向连接 (即 Highway) 的深度 LSTM 网络。

### 5.16 长期循环 CNN

Donahue 等人 (2014) 提出了长期循环卷积网络 (LRCN), 它使用 CNN 进行输入, 然后使用 LSTM 进行递归序列建模并生成预测。

### 5.17 深度神经 SVM

Zhang 等人 (2015) 提出了深度神经 SVM (DNSVM), 它以支持向量机 (Support Vector Machine, SVM) 作为深度神经

网络 (Deep Neural Network, DNN) 分类的顶层。

### 5.18 卷积残差记忆网络

Moniz 和 Pal (2016) 提出了卷积残差记忆网络, 将记忆机制并入卷积神经网络 (CNN)。它用一个长短期记忆机制来增强卷积残差网络。

### 5.19 分形网络

Larsson 等人 (2016) 提出了分形网络即 FractalNet 作为残差网络的替代方案。他们声称可以训练超深度的神经网络而不需要残差学习。分形是简单扩展规则生成的重复架构。

### 5.20 WaveNet

van den Oord 等人 (2016) 提出了用于产生原始音频的深度神经网络 WaveNet。WaveNet 由一堆卷积层和 softmax 分布层组成, 用于输出。

Rethage 等人 (2017) 提出了一个 WaveNet 模型用于语音去噪。

### 5.21 指针网络

Vinyals 等人 (2017) 提出了指针网络 (Ptr-Nets), 通过使用一种称为「指针」的 softmax 概率分布来解决表征变量字典的问题。

## 6 深度生成模型

在本节中, 我们将简要讨论其他深度架构, 它们使用与深度神经网络类似的多个抽象层和表示层, 也称为深度生成模

型 (deep generate Models, DGM)。Bengio (2009) 解释了深层架构, 例如 Boltzmann machine (BM) 和 Restricted Boltzmann Machines (RBM) 等及其变体。

Goodfellow 等人 (2016) 详细解释了深度生成模型, 如受限和非受限的玻尔兹曼机及其变种、深度玻尔兹曼机、深度信念网络 (DBN)、定向生成网络和生成随机网络等。

Maaløe 等人 (2016) 提出了辅助的深层生成模型 (Auxiliary Deep Generative Models), 在这些模型中, 他们扩展了具有辅助变量的深层生成模型。辅助变量利用随机层和跳过连接生成变分分布。

Rezende 等人 (2016) 开发了一种深度生成模型的单次泛化。

### 6.1 玻尔兹曼机

玻尔兹曼机是学习任意概率分布的连接主义方法, 使用最大似然原则进行学习。

### 6.2 受限玻尔兹曼机

受限玻尔兹曼机 (Restricted Boltzmann Machines, RBM) 是马尔可夫随机场的一种特殊类型, 包含一层随机隐藏单元, 即潜变量和一层可观测变量。

Hinton 和 Salakhutdinov (2011) 提出了一种利用受限玻尔兹曼机 (RBM) 进行文档处理的深度生成模型。

### 6.3 深度信念网络

深度信念网络 (Deep Belief Networks, DBN) 是具有多个潜在二元或真实变量层的生成模型。

Ranzato 等人 (2011) 利用深度信念网络 (deep Belief Network, DBN) 建立了深度生成模型进行图像识别。

### 6.4 深度朗伯网络

Tang 等人 (2012) 提出了深度朗伯网络 (Deep Lambertian Networks, DLN), 它是一个多层次的生成模型, 其中潜在的变量是反照率、表面法线和光源。DLNis 是朗伯反射率与高斯受限玻尔兹曼机和深度信念网络的结合。

### 6.5 生成对抗网络

Goodfellow 等人 (2014) 提出了生成对抗网络 (generate Adversarial Nets, GAN), 用于通过对抗过程来评估生成模型。GAN 架构是由一个针对对手 (即一个学习模型或数据分布的判别模型) 的生成模型组成。Mao 等人 (2016)、Kim 等人 (2017) 对 GAN 提出了更多的改进。

Salimans 等人 (2016) 提出了几种训练 GANs 的方法。

#### 6.5.1 拉普拉斯生成对抗网络

Denton 等人 (2015) 提出了一种深度生成模型 (DGM), 叫做拉普拉斯生成对抗网络 (LAPGAN), 使用生成对抗网络

(GAN) 方法。该模型还在拉普拉斯金字塔框架中使用卷积网络。

### 6.6 循环支持向量机

Shi 等人 (2016a) 提出了循环支持向量机 (RSVM), 利用循环神经网络 (RNN) 从输入序列中提取特征, 用标准支持向量机 (SVM) 进行序列级目标识别。

## 7 训练和优化技术

在本节中, 我们将简要概述一些主要的技术, 用于正则化和优化深度神经网络 (DNN)。

### 7.1 Dropout

Srivastava 等人 (2014) 提出 Dropout, 以防止神经网络过拟合。Dropout 是一种神经网络模型平均正则化方法, 通过增加噪声到其隐藏单元。在训练过程中, 它会从神经网络中随机抽取单元和连接。Dropout 可以用于像 RBM (Srivastava et al., 2014) 这样的图模型中, 也可以用于任何类型的神经网络。最近提出的一个关于 Dropout 的改进是 Fraternal Dropout, 用于循环神经网络 (RNN)。

### 7.2 Maxout

Goodfellow 等人 (2013) 提出 Maxout, 一种新的激活函数, 用于 Dropout。Maxout 的输出是一组输入的最大值, 有利于 Dropout 的模型平均。

### 7.3 Zoneout

Krueger 等人 (2016) 提出

了循环神经网络 (RNN) 的正则化方法 Zoneout。Zoneout 在训练中随机使用噪音, 类似于 Dropout, 但保留了隐藏的单元而不是丢弃。

#### 7.4 深度残差学习

He 等人 (2015) 提出了深度残差学习框架, 该框架被称为低训练误差的 ResNet。

#### 7.5 批归一化

Ioffe 和 Szegedy (2015) 提出了批归一化, 通过减少内部协变量移位来加速深度神经网络训练的方法。Ioffe (2017) 提出批重归一化, 扩展了以前的方法。

#### 7.6 Distillation

Hinton 等人 (2015) 提出了将知识从高度正则化模型的集合 (即神经网络) 转化为压缩小模型的方法。

#### 7.7 层归一化

Ba 等人 (2016) 提出了层归一化, 特别是针对 RNN 的深度神经网络加速训练, 解决了批归一化的局限性。

## 8 深度学习框架

有大量的开源库和框架可供深度学习使用。它们大多数是为 Python 编程语言构建的。如 Theano、Tensorflow、PyTorch、PyBrain、Caffe、Blocks and Fuel、CuDNN、Honk、ChainerCV、PyLearn2、Chainer、torch 等。

## 9 深度学习的应用

在本节中, 我们将简要地讨论一些最近在深度学习方面的杰出应用。自深度学习 (DL) 开始以来, DL 方法以监督、非监督、半监督或强化学习的形式被广泛应用于各个领域。从分类和检测任务开始, DL 应用正在迅速扩展到每一个领域。

例如:

图像分类与识别, 视频分类, 序列生成, 缺陷分类, 文本、语音、图像和视频处理, 文本分类, 语音处理, 语音识别和口语理解, 文本到语音生成, 查询分类, 句子分类, 句子建模, 词汇处理, 预选择, 文档和句子处理, 生成图像文字说明, 照片风格迁移, 自然图像流形, 图像着色, 图像问答, 生成纹理和风格化图像, 视觉和文本问答, 视觉识别和描述, 目标识别, 文档处理, 人物动作合成和编辑, 歌曲合成, 身份识别, 人脸识别和验证, 视频动作识别, 人类动作识别, 动作识别, 分类和可视化动作捕捉序列, 手写生成和预测, 自动化和机器翻译, 命名实体识别, 移动视觉, 对话智能体, 调用遗传变异, 癌症检测, X 射线 CT 重建, 癫痫发作预测, 硬件加速, 机器人, 等。

Deng 和 Yu (2014) 提供了 DL 在语音处理、信息检索、目标

识别、计算机视觉、多模态、多任务学习等领域应用的详细列表。

使用深度强化学习 (Deep Reinforcement Learning, DRL) 来掌握游戏已经成为当今的一个热门话题。每到现在, 人工智能机器人都是用 DNN 和 DRL 创建的, 它们在战略和其他游戏中击败了人类世界冠军和象棋大师, 从几个小时的训练开始。例如围棋的 AlphaGo 和 AlphaGoZero。

## 10 讨论

尽管深度学习在许多领域取得了巨大的成功, 但它还有很长的路要走。还有很多地方有待改进。至于局限性, 例子也是相当多的。例如: Nguyen 等人表明神经网络 (DNN) 在识别图像时容易被欺骗。还有其他问题, 如 Yosinski 等人提出的学习的特征可迁移性。Huang 等人提出了一种神经网络攻击防御的体系结构, 认为未来的工作需要防御这些攻击。Zhang 等人则提出了一个理解深度学习模型的实验框架, 他们认为理解深度学习需要重新思考和概括。

Marcus 在 2018 年对深度学习 (Deep Learning, DL) 的作用、局限性和本质进行了重要的回顾。他强烈指出了 DL 方法的局限性, 即需要更多的数据, 容量有限, 不能处理层次结构, 无法

进行开放式推理，不能充分透明，不能与先验知识集成，不能区分因果关系。他还提到，DL 假设了一个稳定的世界，以近似方法实现，工程化很困难，并且存在着过度炒作的潜在风险。Marcus 认为 DL 需要重新概念化，并在非监督学习、符号操作和混合模型中寻找可能性，从认知科学和心理学中获得见解，并迎接更大胆的挑战。

## 11 结论

尽管深度学习 (DL) 比以往任何时候都更快地推进了世界的发展，但仍有许多方面值得我们去研究。我们仍然无法完全地理解深度学习，我们如何让机器变得更聪明，更接近或比人类更聪明，或者像人类一样学习。DL 一直在解决许多问题，同时将技术应用到方方面面。但是人类仍

然面临着许多难题，例如仍有人死于饥饿和粮食危机，癌症和其他致命的疾病等。我们希望深度学习和人工智能将更加致力于改善人类的生活质量，通过开展最困难的科学研究。最后但也是最重要的，愿我们的世界变得更加美好。○

来源：机器之心

---

# 深度学习优化背后包含哪些数学知识

深度学习中的优化是一项极度复杂的任务，本文是一份基础指南，旨在从数学的角度深入解读优化器。

一般而言，神经网络的整体性能取决于几个因素。通常最受关注的是网络架构，但这只是众多重要元素之一。还有一个常常被忽略的元素，就是用来拟合模型的优化器。为了说明优化的复杂性，此处以 ResNet 为例。ResNet18 有 11,689,512 个参数。寻找最佳参数配置，也就是在 11,689,512 维的空间中定位一个点。如果暴力搜索的话，可以把这个空间分割成网格。假设将每个维度分成十格，那么就要检查  $10^{11689512}$  (10 的 11689512 次方) 组可能的配置，对每一组配置都要计算损失函数，并找出损失最小的配置。

10 的 11689512 次方是一个什么概念？已知宇宙中的原子才只有  $10^{83}$  个，宇宙的年龄只有  $4.32 \times 10^{17}$  秒 (约 137 亿年)。如果从大爆炸开始，每秒检查  $10^{83}$  个原子，我们现在才检查了  $4.32 \times 10^{1411}$  个，远远小于上述网格可能的配置数。

所以优化器非常重要。它们就是用来处理这种难以理解的复杂性的。有了它，你就可以将训练网络的时间压缩在几天内，而不是数十亿年间。下文将从数学角度深入研究优化器，并了解它们是如何完成这一看似不可能的任务的。

## 1 优化的基础

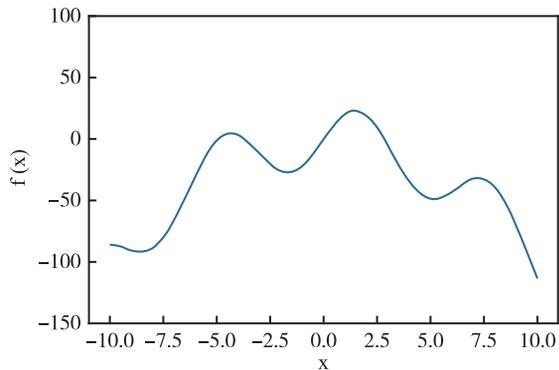
我们从简单的地方开始。假设要最大化单变量函

数。(在机器学习中,通常以最小化损失函数为目标,不过最小化就等同于最大化函数的负值。)

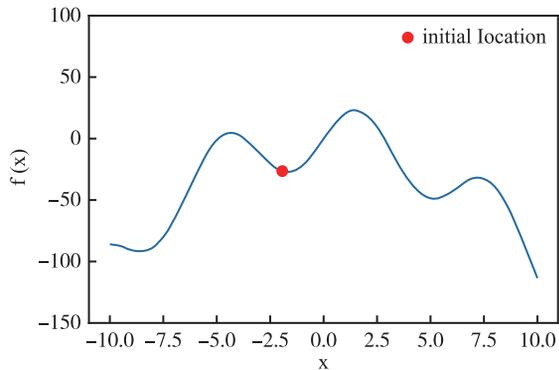
定义:

$$f(x) = 25 \sin(x) - x^2,$$

对函数作图:



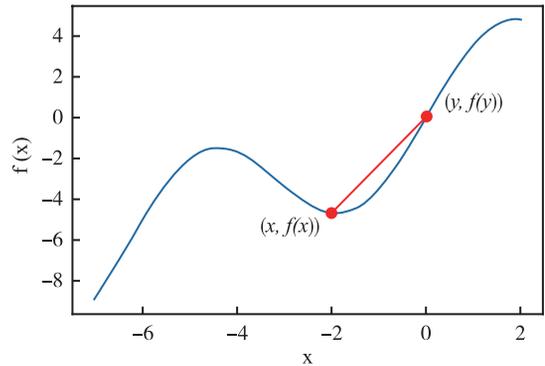
最直观的方法是将这条线划分成网格,检查每个点的值,然后选择函数值最大的点。正如引言中所说,这是不可扩展的,因此要找其他解决方案。将这条线想象成一座要爬到顶峰的山。假设位于红点处:



如果要到达山峰,该往哪个方向走?当然,应该向斜率增加的地方前进。这个概念对应的是函数的导数。在数学上,导数定义为:

$$\frac{df(x)}{dx} = f'(x) = \lim_{y \rightarrow x} \frac{f(x) - f(y)}{x - y}.$$

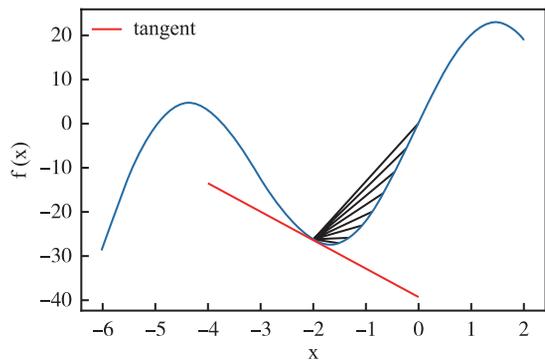
乍看之下,导数非常神秘,但它的几何意义非常简单。仔细看一下求导的点:



对任何  $x$  和  $y$ , 通过  $f(x)$  和  $f(y)$  的这条线定义为:

$$l(t) = \frac{f(x) - f(y)}{x - y}(t - x) + f(x).$$

一般而言,如果用  $at+b$  定义一条直线,那称  $a$  为这条线的斜率。这个值既可以是正值也可以是负值,斜率为正,直线向上走;斜率为负,直线向下走。绝对值越大,直线越陡。如果像导数定义中一样,让  $y$  越来越接近  $x$ , 那么这条线就会成为  $x$  处的切线。



在  $x = -2.0$  时,  $f(x)$  的切线和逼近线。

切线为:

$$t(y) = f'(x)(y - x) + f(x),$$

切线方向记为向量  $(1, f'(x))$ 。

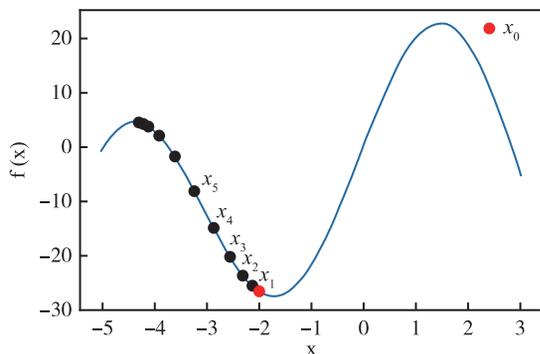
如果从  $x_0 = -2.0$  的位置开始登山,应该沿切线上升的方向前进。如果切线的斜率较大,可以大步迈进;如果斜率接近零,应该小步小步往上爬,以免越过峰值。如果用数学语言表示,我们应该用下面这种方式定义下一个点:

$$x_1 := x_0 + \lambda f'(x_0),$$

式中  $\lambda$  是个参数，设置前进的步长。这就是所谓的学习率。通常，后续步骤定义为：

$$x_{n+1} = x_n + \lambda f'(x_n).$$

正导数意味着斜率在增加，所以可以前进；而负导数意味着斜率在减少，所以要后退。可视化这个过程：



如你所见，这个简单的算法成功地找到了峰值。但如图所示，这并非函数的全局最大值。在所有的优化算法中，这都是一个潜在的问题，但还是有解决办法的。

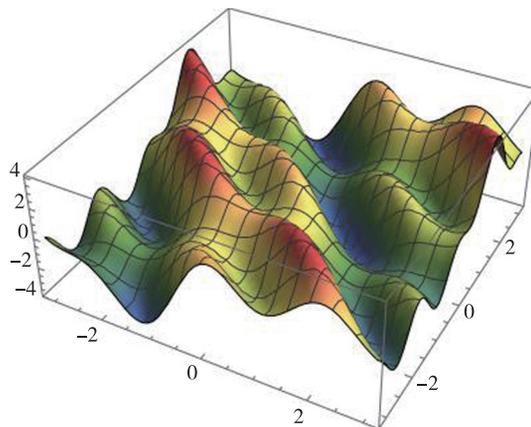
在这个简单的例子中，我们只最大化了单变量函数。这样虽然可以有效地说明这个概念，但在现实生活中，可能存在数百万变量，神经网络中就是如此。下一部分将会介绍，如何将这样简单的算法泛化到多维函数的优化。

## 2 多维优化

在单变量函数中，可以将导数视为切线的斜率。但遇到多个变量，则不能如此。先来看个具体的例子。定义函数：

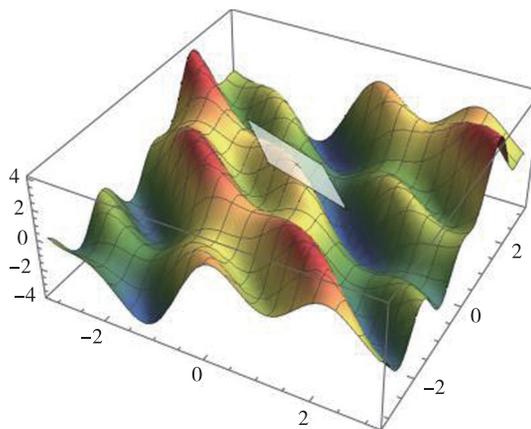
$$f(x, y) = \cos(3x + 2y) + \cos(2x + 4y) - 2 \sin(x + y),$$

这个函数将是这部分的 toy example。



对  $f(x, y)$  作图。

这是一个有两个变量的函数，图像是一个曲面。马上可以发现，这样很难定义切线的概念，因为与曲面上一个点相切的线有很多。事实上，可以做一个完整的平面。这就是切平面。



$f(x, y)$  在点  $(0, 0)$  处的切平面。

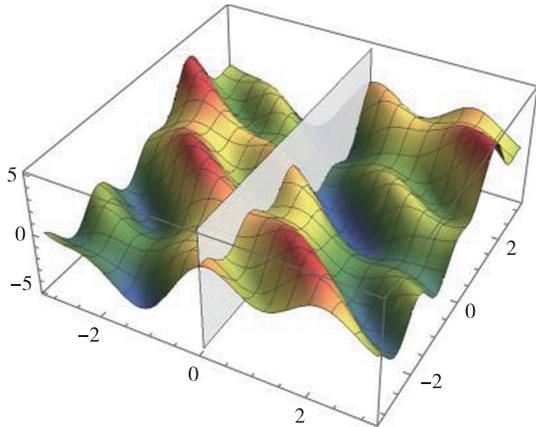
但切平面有两个非常特别的方向。以点  $(0, 0)$  处的切平面为例。对每一个多变量函数来说，先固定所有变量只取一个能动的变量，这样这个函数基本上就变成单变量函数了。示例函数变为：

$$f(x, 0) = \cos(3x) + \cos(2x) - 2 \sin(x)$$

和：

$$f(0, y) = \cos(2y) + \cos(4y) - 2 \sin(y).$$

可以用垂直于坐标轴的平面分割曲面，来可视化上面这两个函数。平面和曲面相交处就是  $f(x, 0)$  或  $f(0, y)$ ，这取决于你用哪个平面。



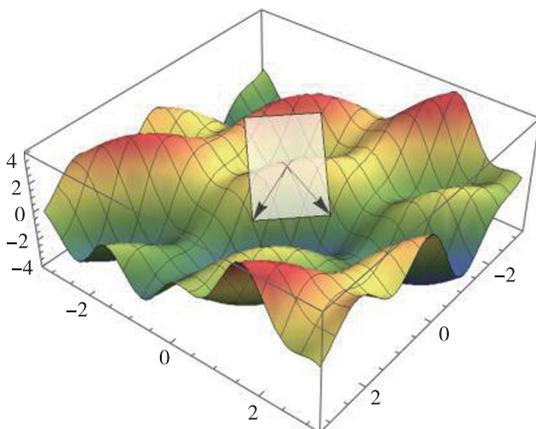
用垂直的平面切割曲面，可视化  $f(0, y)$ 。

对这些函数，就可以像上文一样定义导数了。这就是所谓的偏导数。要泛化之前发现峰值的算法，偏导数起着至关重要的作用。用数学语言定义：

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = f_x(x, y) = \lim_{x_0 \rightarrow x} \frac{f(x, y) - f(x_0, y)}{x - x_0},$$

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial y} = f_y(x, y) = \lim_{y_0 \rightarrow y} \frac{f(x, y) - f(x, y_0)}{y - y_0}.$$

每个偏导数表示切平面的一个方向。



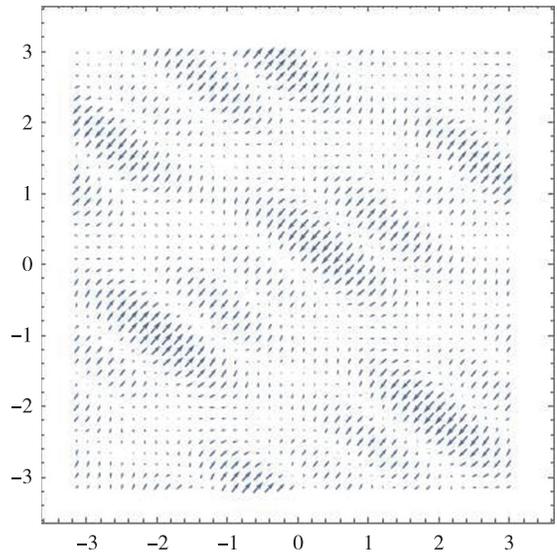
切平面上偏导数的方向。

偏导数的值是特殊切线的斜率。最陡的方向根据

梯度确定，定义为：

$$\nabla f(x, y) = \left( \frac{\partial f(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right).$$

注意，梯度是参数空间中的方向。可以轻松在二维平面中绘制出梯度，如下图所示：



$f(x, y)$  的梯度。

综上所述，发现峰值的算法现在成为：

$$\vec{x}_{n+1} = \vec{x}_n + \lambda \nabla f(\vec{x}_n),$$

这就是所谓的梯度上升 (gradient ascent)。如果要求函数最小值，就要沿负梯度的方向迈出一步，也就是下降最陡的方向：

$$\vec{x}_{n+1} = \vec{x}_n - \lambda \nabla f(\vec{x}_n).$$

这就是所谓的梯度下降 (gradient descent)，你可能会很频繁地看到它，因为在机器学习中，实际上是要最小化损失。

### 3 为什么梯度指向最陡的上升方向？

在这种情况下，要知道为什么梯度给出的是最陡峭的上升方向。为了给出精确的解释，还要做一些数学计算。除了用垂直于  $x$  轴或  $y$  轴的垂直平面切割曲面外，还可以用  $(a, b)$  任意方向的垂直平面切割曲

面。对于偏导数，有：

$$\begin{aligned}\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} &:= \frac{d}{dt} f(x + t, y) \\ \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} &:= \frac{d}{dt} f(x, y + t).\end{aligned}$$

可以将它们视为  $f(x, y)$  沿  $(1, 0)$  和  $(0, 1)$  方向的导数。尽管这些方向特别重要，但也可以任意规定这些方向。也就是说，假设方向为：

$$\vec{e} = (e_1, e_2),$$

这个方向的导数定义为：

$$\begin{aligned}\frac{\partial f(x, y)}{\partial \vec{e}} &:= \frac{d}{dt} f(x + e_1 t, y + e_2 t) \\ &= e_1 \frac{\partial f(x, y)}{\partial x} + e_2 \frac{\partial f(x, y)}{\partial y}.\end{aligned}$$

注意，最后一个等式就是方向向量和梯度的点积，这可能和高中几何课堂上遇到的点积是相同的。所以：

问题是，哪个方向的方向导数最大？答案是上升程度最陡峭的方向，所以如果要优化，得先知道这个特定的方向。这个方向就是之前提过的梯度，点积可以写作：

$$\begin{aligned}\vec{e} \cdot \nabla f(x, y) &= |\vec{e}| |\nabla f(x, y)| \cos \alpha, \\ \frac{\partial f(x, y)}{\partial \vec{e}} &= \vec{e} \cdot \nabla f(x, y).\end{aligned}$$

式中的  $|\cdot|$  表示向量长度， $\alpha$  是两向量间的夹角（这在任意维数上都是成立的，不只是二维）。显而易见，当  $\cos \alpha = 1$ ，即  $\alpha = 0$  时，表达式取最大值。这就意味着这两个向量是平行的，所以  $\vec{e}$  的方向和梯度方向是相同的。

## 4 训练神经网络

现在要从理论转战实践了，了解如何训练神经网络。假设任务是将有  $n$  维特征向量的图像分成  $c$  类。从数学角度看，神经网络代表将  $n$  维特征空间映射到  $c$  维空间的函数  $f$ ：

$$f: \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^c.$$

神经网络本身是参数化的函数。方便起见，将参数标记为  $m$  维向量：

$$\vec{w} \in \mathbb{R}^m.$$

为了表现出对参数的依赖，习惯记为：

$$f(\vec{x}, \vec{w}).$$

将神经网络的参数空间映射为实数。损失函数记为：

$$J(\vec{w}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L(f(\vec{x}^{(i)}, \vec{w}), \vec{y}^{(i)}),$$

式中的  $\vec{x}^{(i)}$  是观测值为  $\vec{y}^{(i)}$  的第  $i$  个数据点  $L$  是损失函数项。例如，如果  $J$  是交叉熵损失，则：

$$L(f(\vec{x}^{(i)}, \vec{w}), \vec{y}^{(i)}) = - \sum_{j=1}^c y_j^{(i)} \log f(\vec{x}^{(i)}, \vec{w})_j,$$

式中

$$\begin{aligned}\vec{y}^{(i)} &= (y_1^{(i)}, \dots, y_c^{(i)}) \\ f(\vec{x}^{(i)}, \vec{w}) &= (f(\vec{x}^{(i)}, \vec{w})_1, \dots, f(\vec{x}^{(i)}, \vec{w})_c).\end{aligned}$$

这看似简单，但难以计算。在真实世界中有数百万个数据点  $N$ ，更别说参数  $m$  的数量了。所以，一共有数百万项，因此要计算数百万个导数来求最小值。那么在实践中该如何解决这一问题？

随机梯度下降

要用梯度下降，得先计算：

$$\nabla_{\vec{w}} J(\vec{w}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \nabla_{\vec{w}} L(f(\vec{x}^{(i)}, \vec{w}), \vec{y}^{(i)}),$$

如果  $N$  很大，那么计算量就很大，而一般都希望  $N$  大一点（因为想要尽量多的数据）。可以化简吗？一种方式是忽略一部分。尽管这看起来像个不靠谱的方案，但却有坚实的理论基础。要理解这一点，首先注意  $J$  其实可以写成期望值：

$$\begin{aligned}J(\vec{w}) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L(f(\vec{x}^{(i)}, \vec{w}), \vec{y}^{(i)}) \\ &= \mathbb{E}_{\vec{p}_{\text{data}}} \left[ L(f(\vec{x}^{(i)}, \vec{w}), \vec{y}^{(i)}) \right],\end{aligned}$$

式中的  $\hat{p}_{\text{data}}$  是训练数据给出的（经验）概率分布。可以将序列写成：

$$\left\{ L(f(\bar{x}^{(i)}, \bar{w}), \bar{y}^{(i)}) \right\}_{i=1}^N$$

这样就成了独立同分布的随机变量。根据大数定律：

$$\begin{aligned} & \lim_{N \rightarrow \infty} \mathbb{E}_{\hat{p}_{\text{data}}} \left[ \nabla_{\bar{w}} L(f(\bar{x}^{(i)}, \bar{w}), \bar{y}^{(i)}) \right] \\ &= \mathbb{E}_{p_{\text{data}}} \left[ \nabla_{\bar{w}} L(f(\bar{x}^{(i)}, \bar{w}), \bar{y}^{(i)}) \right] \end{aligned}$$

式中  $p_{\text{data}}$  是真正的总体分布（这是未知的）。再详细点说，因为增加了训练数据，损失函数收敛到真实损失。因此，如果对数据二次采样，并计算梯度：

$$\nabla_{\bar{w}} L(f(\bar{x}^{(i)}, \bar{w}), \bar{y}^{(i)})$$

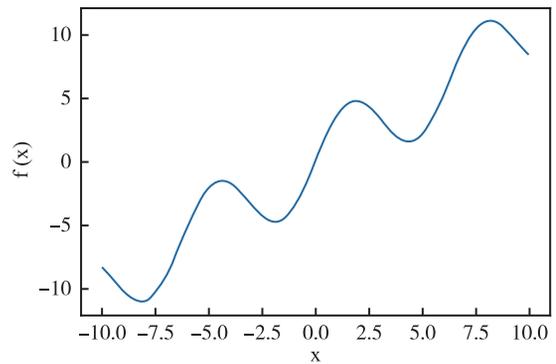
对某些  $i$ ，如果计算足够，仍然可以得到合理的估计。这就是所谓的随机梯度下降，记为 SGD (Stochastic Gradient Descent)。

我认为，研究人员和数据科学家能有效训练深度神经网络依赖于三个基础发展：将 GPU 作为通用的计算工具、反向传播还有随机梯度下降。可以肯定地说，如果没有 SGD，就无法广泛应用深度学习。与几乎所有新方法一样，SGD 也引入了一堆新问题。最明显的是，二次采样的样本量要有多大？太小可能会造成梯度估计有噪声，太大则会造造成收益递减。选择子样本

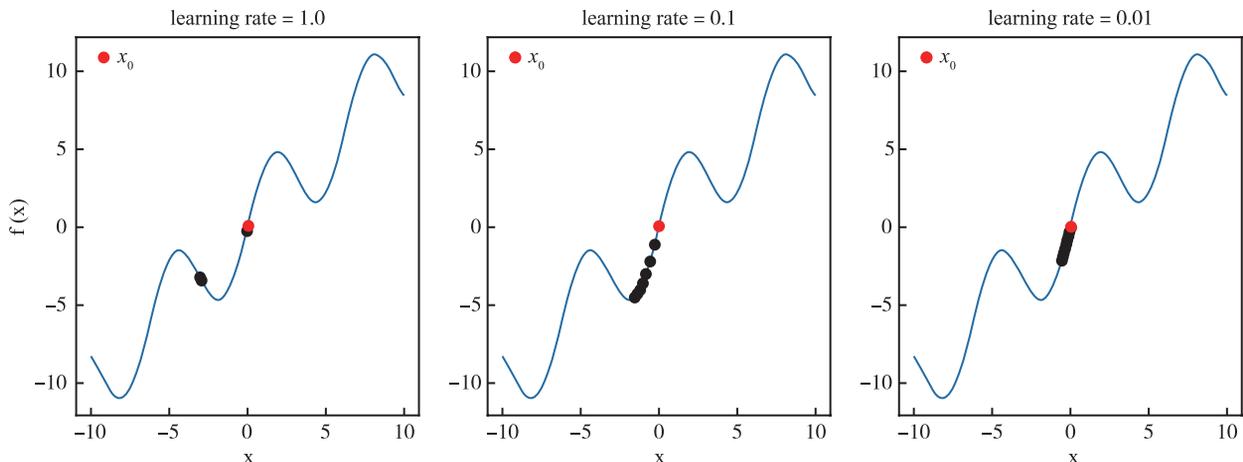
也需要谨慎。例如如果所有子样本都属于一类，估计值可能会相差甚远。但在实践中，这些问题都可以通过实验和适当随机化数据来解决。

## 5 改善梯度下降

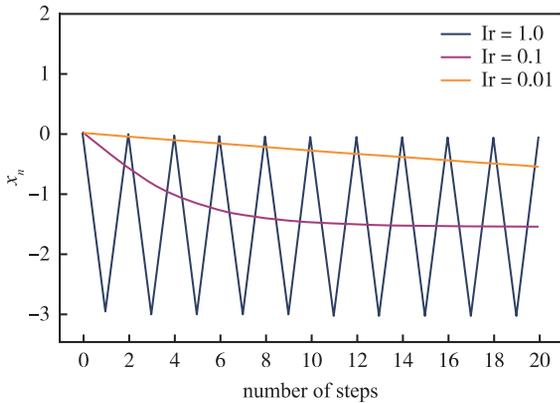
梯度下降（以及 SGD 变体）存在一些问题，因此这些方法在某些情况下可能会无效。例如，学习率控制着梯度方向上前进的步长。在这个参数上一般会犯两个错误。第一，步长太大，以至于损失无法收敛，甚至可能分散；第二，步长太小，可能因为前进太慢，永远都无法到达局部最小值。为了阐明这个问题，以  $f(x) = x + \sin x$  函数为例进行研究：



假设从  $x_0=2.5$  开始进行梯度下降，学习率  $\alpha$  分别为 1、0.1 和 0.01。



理解起来可能不够直观，所以对每个学习率的  $x-s$  绘图：



当  $\alpha=1$  时，图像在两点间震荡，无法收敛到局部最小值；当  $\alpha=0.01$  时，收敛得似乎很慢。在本例中， $\alpha=0.1$  似乎是合适的。那在一般情况下该如何确定这个值呢？这里的中心思想是，学习率不一定是恒定的。同理，如果梯度幅度很大，就应该降低学习率，避免跳得太远。另一方面，如果梯度幅度较小，那可能意味着接近局部最优值了，所以要避免超调（overshooting）的话，学习率绝对不能再增加了。动态改变学习率的算法也就是所谓的自适应算法。

最流行的自适应算法之一是 AdaGrad。它会累积存储梯度幅度和大小，并根据记录调整学习率。AdaGrad 定义了累积变量  $r_0=0$  并根据规则进行更新：

$$\vec{r}_{n+1} = \vec{r}_n + \nabla_{\vec{w}} J \odot \nabla_{\vec{w}} J,$$

式中的

$$\vec{u} \odot \vec{v} = (u_1 v_1, \dots, u_n v_n)$$

表示两个向量的分量乘积。将其用于度量学习率：

$$\vec{w}_{n+1} = \vec{w}_n - \frac{\lambda}{\delta + \sqrt{\vec{r}_{n+1}}} \nabla_{\vec{w}} J,$$

式中的  $\delta$  是为了保持数据稳定的数值，平方根

是根据分量取的。首先，当梯度大时，累积变量会很快地增长，学习率会下降。当参数接近局部最小值时，梯度会变小，学习率会停止下降。

当然，AdaGrad 是一种可能的解决方案。每年都会有越来越多先进的优化算法，来解决梯度下降相关的问题。但即便是最先进的方法，使用并调整学习率，都是很有好处的。

另一个关于梯度下降的问题是要确定全局最优值或与之接近的局部最优值。看前面的例子，梯度下降通常会陷入局部最优值。为了更好地了解这一问题和更好的解决办法，建议您阅读 Ian Goodfellow、Yoshua Bengio 和 Aaron Courville 所著的《深度学习》(Deep Learning) 第八章 (<https://www.deeplearningbook.org/>)。

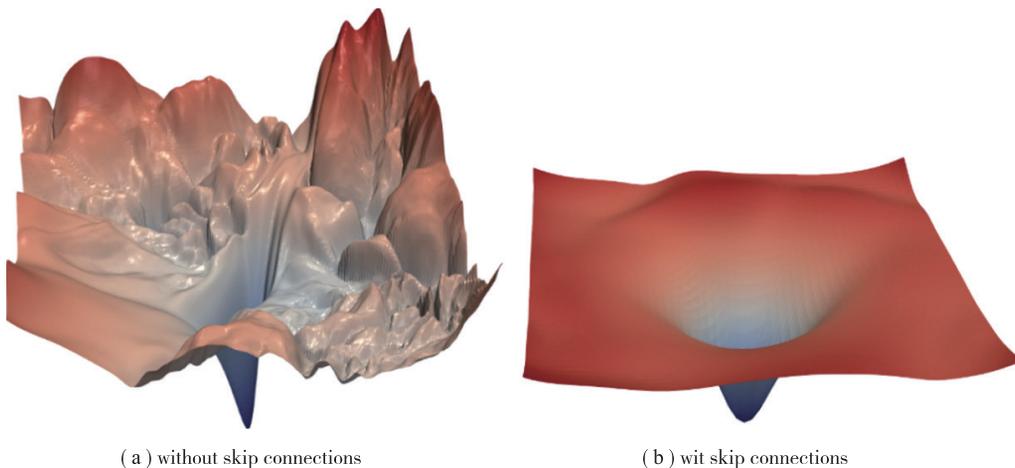
深度神经网络的损失函数什么样？

前面的例子只可视化了非常简单的玩具示例，比如  $f(x) = 25\sin x - x^2$ 。这是有原因的：绘制超过两个变量的函数图像很难。考虑到固有的局限性，我们最多只能在三个维度上进行观察和思考。但为了了解神经网络中的损失函数，可以采取一些技巧。Hao Li 等人发表的论文《Visualizing the Loss Landscape of Neural Nets》(<https://arxiv.org/pdf/1712.09913.pdf>) 就是有关这个的，他们选择两个随机方向，对二变量函数绘图，从而可视化损失函数。

$$\vec{w}_{n+1} = \vec{w}_n - \frac{\lambda}{\delta + \sqrt{\vec{r}_{n+1}}} \nabla_{\vec{w}} J,$$

（为了避免因尺度不变而引起的失真，他们还在随机方向中引入了一些归一化因素。）他们的研究揭示了在 ResNet 架构中，残差连接是如何影响损失，让优化变得更容易的。

无论残差连接做出了多显著的改善，我在这里主要是想说明多维优化的难度。在图中的第一部分可以看出，有多个局部最小值、峰值和平稳值等。好的



图像来源: Hao Li 等人所著《Visualizing the Loss Landscape of Neural Nets》  
( <https://arxiv.org/pdf/1712.09913.pdf> )。

架构可以让优化变得更容易,但完善的优化实践,可以处理更复杂的损失情况。架构和优化器是相辅相成的。

## 6 总结

我们在前文中已经了解了梯度背后的直观理解,并从数学角度以精确的方式定义了梯度。可以看出,对于任何可微函数,无论变量数量如何,梯度总是指向最陡的方向。从概念上来讲非常简单,但当应用在

有数百万变量的函数上时,存在着很大的计算困难。随机梯度下降可以缓解这个问题,但还存在陷入局部最优、选择学习率等诸多问题。因此,优化问题还是很困难的,需要研究人员和从业人员多加关注。事实上,有一个非常活跃的社区在不断地进行改善,并取得了非常惊人的成绩。○

来源: 机器之心

喜报  
X I B O  
R E P O R T

### 祝贺学会会员吕宜生担任 IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine 主编

中国自动化学会会员、中国科学院自动化研究所研究员吕宜生自 2023 年 1 月 1 日起担任 IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine (IEEE 智能交通系统杂志) 主编。该期刊由 IEEE 智能交通学会管理,是智能交通领域的国际著名 SCI 期刊,最新 SCI 影响因子为 5.293 (2022 年 6 月)。详情请查看: <http://www.caa.org.cn/article/191/3531.html>

# 发现“控制”之美，感悟“她”力量

——CAA 三八女神节特别讲座成功召开



图1 南京理工大学教授马倩主持



图2 浙江大学化工学院双专副院长赵春晖作报告



图3 龙芯中科技术股份有限公司副总裁杜安利作报告

2023年3月8日上午，由中国自动化学会主办的发现“控制”之美，感悟“她”力量——CAA三八女神节特别讲座成功召开，本次讲座旨在与众多女科技工作者共同探讨前沿学术动态，分享工作生活感悟、交流职业发展面临的机遇与挑战，共同发现“控制”之美，感悟最美“她”力量。

本次讲座在南京理工大学教授马倩主持下召开，浙江大学化工学院双专副院长赵春晖、龙芯中科技术股份有限公司副总裁杜安利、华为学术组织系统部部长潘秋菱、同济大学教授李莉、浙江大学特聘研究员董山玲出席并作报告。

第一位报告人浙江大学化工学院双专副院长赵春晖带来题为“面向工业数据智能的理论与应用科研历程”的分享。报告围绕工业数据智能理论与应用的研究，介绍了自己从博士毕业，到博士后，以及担任教职后的个人成长过程，并介绍自己的科研团队建设，如何从0到1组建团队，以及如何发展自己的课题组，分享了自己心得体会。

第二位报告人龙芯中科技术股份有限公司副总裁杜安利，她的报告题目是“自主“芯”架构·构建数字经济新生态”。报告阐述了贸易战落到根上是硬核技术的比拼，要实现制造强国战略必须掌握自主核心技术。中国工业行稳致远，离不开核心技术自主创新和产业自立自强，我们需要坚持自主研发，打破国外巨头的工业“垄断”，围绕自主芯片、自主操作系统等自主技术加速构建自主生态体系，以丰富的自主产品和解决方案服务企业数字化转型和产业高质量发



图4 华为学术组织系统部部长潘秋菱作报告



图5 同济大学教授李莉作报告

展,以安全稳定的能力赋能数字经济,助力建设数字强国。

第三位报告人华为学术组织系统部部长潘秋菱作了题为“加强开放多元的学术环境”的报告。她指出历史上,开放多元是早期欧洲大学的精神底色奠定了现代学术体系的基石。学会推动了现代研究型大学的诞生,开放的同行评审形成了学术评价的基础机制。学术组织是学术领域的重要阵地,具有保持开放性的动力,开放多元的学术环境为女性提供了更大的发展空间,她主张坚持多元理念,持续提升学术生态的开放性。

第四位报告人为同济大学教授李莉,报告题目为“人工智能时代控制技术应用与发展趋势”。控制科学作为20世纪最重要和发展最快的学科之一,对我国国民经济发展和国家安全发挥了重要作用。报告首先回顾了控制科学的发展历史,然后介绍自动控制在智能制造领域的应用情况和现状,最后展望人工智能时代背景下控制科学的发展趋势。

第五位报告人是浙江大学特聘研究员董山玲,她针对网络环境下普遍存在的系统结构或参数发生突然变化、外部噪音干扰、网络报告摘要:资源受限、数



图6 浙江大学特聘研究员董山玲作报告

据丢失等问题,介绍近几年关于网络化 Markov 跳变系统的控制与滤波研究工作,结合自身科研经历,分享心得和体会。

回首人类文明进步的征程,女性的身影从未缺席,巾帼逐梦,竞绽芳华。数以万计的女科技工作者,撑起科研领域的半边天,勇立时代发展的潮头。东风好作阳和使,逢草逢花报发生,本次特别讲座通过腾讯会议、CAA会议小程序、CAA官方视频号、学会微博官方账号、百家号、蔻享等平台全程直播,共计近3.2万人次在线观看直播。○

学会秘书处 供稿

## 全国青少年劳动技能与智能设计大赛监事委员会第一次工作会议召开

2023年3月6日，中国自动化学会在北京以线上线下的方式召开全国青少年劳动技能与智能设计大赛（简称 AILD）监事委员会第一次工作会议。中国自动化学会副理事长、AILD 监事委员会主任王成红，中国自动化学会秘书长、AILD 监事委员会副主任张楠以及监事委员会委员、大赛秘书处成员等 14 人参加了此次会议。会议由副主任张楠主持。

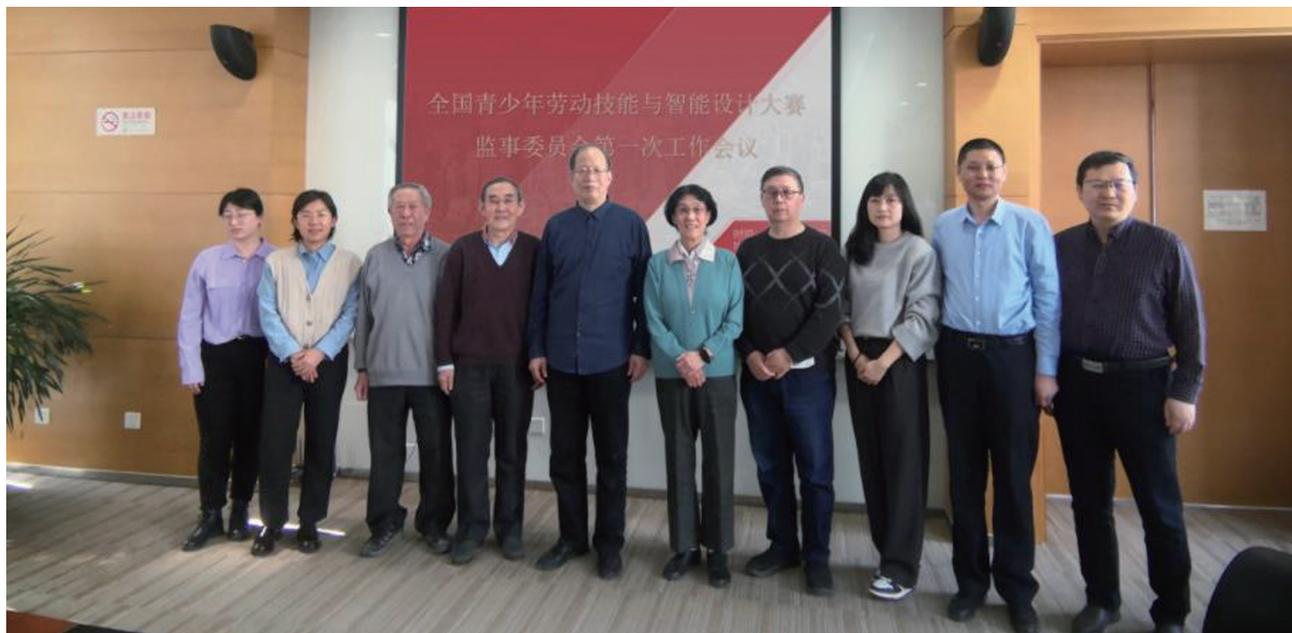
大赛秉承“人文引领、以劳育人、智能驱动、人才强国”的

大赛宗旨，由中国自动化学会主办，面向小学、初中、高中、中专、职高的在校学生，致力于培养青少年的家国情怀、多元思维、劳动技能、创新能力和综合素养。大赛于 2022 年 9 月进入教育部《2022—2025 学年面向中小学生的全国性竞赛活动名单》。

会上，大赛监事委员会就大赛管理制度、大赛运营流程及细则、大赛赛项设置、省赛承办单位以及大赛后续工作计划等五个方面进行了激烈讨论。会议最后，大赛监事

委员会主任王成红强调比赛要秉承“公正、公平、独立”的原则，对竞赛活动进行科学组织、规范实施和自我监管，完善赛事人才培养体系；同时，举办面对中小学生的赛事活动要注重学生的实践能力、思维能力与创新能力的融合培养，以赛促教、以赛促学，以赛促评，探索人才培养新途径，扎实做好新时代人才培养工作，为建设世界重要人才中心和创新高地做出一份贡献。○

学会秘书处 供稿



线下代表合影

## 沈阳市人力资源和社会保障局、沈阳市教育局一行 来访中国自动化学会

2023年3月21日，沈阳市人力资源和社会保障局事业单位培训教育处处长崔颖、沈阳市人力资源和社会保障局事业单位培训教育处副处长孙宁、沈阳市教育局基础教育二处三级调研员于晓晶一行来访中国自动化学会。中国自动化学会秘书长张楠、副秘书长王坛及秘书处相关负责同志进行接待。

会上，学会秘书处相关负责同志从多样化科普活动、自动化系列赛事、精准科技志愿服务等方面

介绍了学会科普体系及特色活动，重点就全国青少年劳动技能与智能设计大赛的定位目标、赛事宗旨、组织形式等方面进行了交流。

沈阳市人力资源和社会保障局事业单位培训教育处处长崔颖表示此次会面，加深了彼此了解，增进了相互信任，达成了许多重要共识，希望未来双方能进一步发挥学科优势，利用政府资源，加强在学术会议、人才培养等方面的合作交流，为现代创新型人才培养贡献一份力量。

全国青少年劳动技能与智能设计大赛以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，落实立德树人根本任务，秉承“人文引领、以劳育人、智能驱动、人才强国”的大赛宗旨，致力于培养和提高青少年的家国情怀、多元思维、劳动技能、创新能力和综合素质。该赛事于2022年9月进入教育部《2022-2025学年面向中小学生的全国性竞赛活动名单》。○

学会秘书处 供稿



参会代表合影

## 智企慧业共话高质量发展

### ——CAA 企业系列沙龙第一期在京成功召开

四季初始，佳期如许。2023年3月17日，在风和日暖万物生长的春天，由中国自动化学会主办，中信银行北京京城大厦支行

协办的第一期 CAA “企·话”沙龙在北京天坛祈年殿下举办。此次沙龙是中国自动化学会开拓会企合作新模式，在数字经济背景下，面向自动化与人工智能领域企业重启的线下活动，在推动自动化领域政产学研金服用深度融合、现代化产业体系建设方面具有积极意义。中国自动化学会秘书长张楠、中信银行北京京城大厦支行副行长毕振博出席沙龙并致辞。

开年第一期沙龙以“智企慧业共话高质量发展”为主题，旨在汇聚政产学研金服用等各界资源，探讨前沿科学问题和最新研究技术，破解企业发展技术难题，加快提升企业自主创新能力，为建设世界科技强国献才献智。活动共有来自阿里云、龙芯中科、飞腾、数据堂、华航唯实、美的、北京航天智造、朝元时代、度量科技、力控元通、中国恩菲、中科原动力、梅卡曼德、慧拓、智百会、机械工业出版社、中晟资本、中信建投证券、中信银行、天开高教园、中国科学院自动化研究所、北京工业大学、北京理工大学、中国社会科学院数量经



图1 张楠秘书长致辞



图2 毕振博副行长致辞



图3 “企·话”沙龙现场合影

济与技术经济研究所等25家企业、金融、高校、科研院所45位中高层代表应邀出席活动。

张楠秘书长在致辞中指出，学会一直致力于为自动化与人工智能及相关技术领域科技专家与企业建立沟通桥梁，加强技术、企业、人才和金融相结合，吸引高科技技术人才、团队、项目、技术落地，促进科技经济融合发展。未来，学会也将打造“ChatGPT”式服务模式，及时对接企业需求，倾力助跑企业发展。

毕振博副行长在致辞中表示，此次沙龙的成功举办体现了学会对国家产业政策和创新驱动战略的贯彻落实，有助于探讨金融赋

能科技发展新模式，为建设现代化产业体系提供有益借鉴。中信银行作为国家对外开放的重要窗口，可以为企业提供更全面的金融服务，建立差异化竞争优势，在行业迅猛发展的道路上，助力企业高质量发展。

在交流环节中，与会嘉宾围绕数字经济时代背景下自动化与人工智能及相关技术的发展现状、最新趋势、主要障碍和瓶颈等议题进行了深度交流和探讨，同时根据各自企业的实际情况在新模式、新技术上分享经验、交换意见。交流分享内容来源于各嘉宾日常工作所得的宝贵经验，皆是满满干货，十分有“料”！

此次沙龙活动，旨在通过搭建沟通交流平台，精准服务企业，为在座企业家开启了深化企业高质量发展新思路，提供了多方资源深度合作新方向。在共同为行业发展出谋划策的同时，学会也聆听到企业心声，未来学会将细分企业类型，有针对性的在科技成果转化合作、资源对接等方面提供更多更优质的交流平台，帮助企业解决创新发展过程中遇到的实际问题，不断提升发展韧劲和核心竞争力。我们诚邀更多的行业企业积极参与到CAA“企·话”沙龙活动中来！

学会秘书处 供稿

## 类 ChatGPT 的技术探究及企业应用模式探讨成功举办

为更好地探讨国际学术前沿研究、把握新一轮技术和产业变革先机，提升我国科技创新水平，由中国自动化学会主办，中国自动化学会联邦数据与联邦智能专委会（筹）承办的 CAA 云讲座“类 ChatGPT 的技术探究及企业应用模式探讨”于 2023 年 3 月 10 日以线上会议与直播结合的形式成功举办。

论坛特邀了微软中国资深 AI 解决方案架构师赵明杰、中科院自动化所副研究员朱贵波、鹏程盘古团队大模型算法工程师易泽轩作专题报告，线上线下同步观看近 1.7 万人次。中国自动化学会联邦数据与联邦智能专委会（筹）候任主任委员、数据堂公司 CEO 齐红威博士担任本次论坛主席，中国自动化学会联邦数据与联邦智能专委会（筹）候任副主任委员、北京市大数据中心数据管理部部长贾晓丰博士担任云讲座组织主席，报告主持人由齐红威、贾晓丰共同担任。

本次论坛由联邦数据与联邦智能专委会候任主任委员齐红威致欢迎词，齐红威指出成立中

国自动化学会联邦数据与联邦智能专委会（筹）的目的是为了推动联邦智能信息技术发展，解决联邦数据、联邦智能相关理论和技术研究中遇到的各类问题与挑战，并推动关键技术在实际场景中的应用。此次云讲座选题“类 ChatGPT 的技术探究及企业应用模式探讨”是缘于 OpenAI 发布的对话生成预训练模型 ChatGPT 展现出的能力令人印象深刻，吸引了工业界和学术界的广泛关注。这是首次在大型语言模型（large language model, LLM）内很好地解决如此多样的开放任务。为

了探讨类 ChatGPT 的模式在企业发展中的应用，特邀请企业和科研领域的专业人士，进行一次专题讲座，讲解 ChatGPT 的技术、模式，以及可能发展的商业模式，以便启发一线青年科技工作者的思路。联邦数据与联邦智能专委会（筹）特向三位特邀嘉宾表示衷心的感谢，期待借此次云讲座，加强工业界与科研院所的协作和交流，促进学会进一步高质量发展。

微软中国资深 AI 解决方案架构师赵明杰作了题为“ChatGPT 介绍”的报告，赵明杰从技术角



微软中国资深 AI 解决方案架构师赵明杰作报告

度全面地介绍了微软公司围绕大模型打造的包含 ChatGPT 在内一系列内容生成工具，并指出类 ChatGPT 内在的技术发展理念“Language is the Universal Interfere”，即人类自然语言会成为人工智能接入各领域的关键路径。赵明杰针对 ChatGPT 当前面临的各种问题，介绍了微软公司采用的应对方法和未来突破方向，并对微软公司接下去要发布的技术更新作了简要介绍。

中科院自动化所副研究员博士朱贵波作了题为“ChatGPT 和多模态大模型驱动领域变革”的报告，朱贵波博士指出“ChatGPT 的成功标志着人工智能从以专用小模型训练为主的‘手工作坊时代’迈入到以通用大模

型预训练为主的‘工业化时代’，成为人工智能发展重要分水岭”。朱贵波博士从基本原理、关键技术、行业应用以及发展趋势四个角度探讨了人工智能大模型、内容理解技术的发展。首先介绍了 ChatGPT 的基本原理、能力边界、关键技术实现路径。其次，介绍了非文本类单模态大模型、多模态大模型等发展现状、关键技术和部分研究进展。最后探讨了大模型在 AI4S、智能制造、自动驾驶、AIGC 等不同领域的技术应用和发展趋势。

鹏城实验室智能部的鹏程盘古团队的大模型算法工程师易泽轩做了题为“鹏程盘古大模型生态构建和持续演化”的报告，易泽轩梳理了盘古模型从大模型生

态构建到持续演化的重要经验。易泽轩主要介绍了鹏程盘古大模型的生态构建和持续演化过程中遇到的技术挑战与应对逻辑方法，首先从语料构建、下游任务评测等角度详细介绍了盘古模型的技术原理和模型性能，然后介绍了近年来鹏程盘古大模型的演化方向和持续演化依托的平台，最后对后 ChatGPT 时代中出现的资源受限、方向减少等挑战进行了应对方法总结。

最后，贾晓丰博士进行了总结发言，对三位嘉宾的精彩报告进行了回顾，对线上观看和参与讨论的专家、学者与同仁表达了感谢，并呼吁从业者要更多关注聚光灯背后的理论、方法、机理和趋势。○



### 关于征集 2023 中国自动化大会专题论坛的通知

中国自动化大会是由中国自动化学会主办的国内最高层次的自动化、信息与智能科学领域的大型综合性学术会议，2023 中国自动化大会将于 2023 年 11 月在重庆召开，此次中国自动化大会由重庆邮电大学承办。2023 中国自动化大会将为全球自动化、信息与智能科学领域的专家学者和产业界的同仁提供展示创新结果、展望未来发展的高端学术平台，加强不同学科领域的交叉融合，引领自动化、信息与智能科学与技术的发展。大会现面向自动化、信息与智能科学领域公开征集 2023 中国自动化大会 (CAC2023) 的专题论坛。详情请查看：<http://www.caa.org.cn/article/192/3583.html>

## “陶”出精彩与“泥”相约

——中国自动化学会开展三八妇女节陶艺制作活动



合影留念

阳春三月，春风送暖。在2023年“三八”国际妇女节来临之际，中国自动化学会秘书处特别组织了“‘陶’出精彩，与‘泥’相约”陶艺制作活动，共同感悟美好生活，陶冶艺术情操。

陶艺作为中华民族的传统工

艺，有着悠久的历史，承载着丰富的传统文化。在制作陶艺之前，学会秘书处成员首先观赏了陶艺作品，了解陶艺的由来、兴起和发展，领略中国传统非遗文化——陶艺的魅力。

在陶艺老师的指导下，大家

掌握了陶艺制作的基础知识和要领，经过揉、搓、压、捏、摔、粘、刻等过程，一件件造型独特、独具匠心的作品初步完成。从最开始的一块泥团到属于自己独一无二的作品，大家纷纷与自己的作品拍照留念。

陶艺是泥与火的艺术，一团泥，一炉火，深得材质外在之美，尽传精神内在之秀。此次活动不仅让大家对传统陶艺有了更加深入的了解和认识，也让大家在创造美、欣赏美、感受美的过程中，享受到了创作的乐趣。相信大家能够心怀这份创新创造的美好，以更充沛的精力与热情投入到自动化的事业中。○

学会秘书处 供稿



### 2023 中国自动化大会投稿系统正式开放！敬候您的来稿！

春风吹拂，疫情的寒冬悄然消融，自动化大会组委会又开启了新一届的筹备工作。2023 中国自动化大会拟定于 2023 年 11 月在重庆召开！投稿系统今日起正式开放！疫情后的第一场自动化领域行业盛会期待您的到来！带着为之奋斗过的成果，走向远方，与同路人一起畅谈吧！2023 中国自动化大会征稿火热进行中，敬候您的来稿！详情请查看：<http://www.caa.org.cn/article/192/3499.html>

# 李克强作政府工作报告

2023年3月5日在第十四届全国人民代表大会第一次会议上



3月5日，李克强代表国务院在十四届全国人大一次会议上作《政府工作报告》。新华社记者 饶爱民 摄

各位代表：

本届政府任期即将结束。现在，我代表国务院，向大会报告工作，请予审议，并请全国政协委员提出意见。

## 一、过去一年和五年工作回顾

2022年是党和国家历史上极为重要的一年。党的二十大胜

利召开，描绘了全面建设社会主义现代化国家的宏伟蓝图。面对风高浪急的国际环境和艰巨繁重的国内改革发展稳定任务，以习近平同志为核心的党中央团结带领全国各族人民迎难而上，全面落实疫情要防住、经济要稳住、发展要安全的要求，加大宏观调控力

度，实现了经济平稳运行、发展质量稳步提升、社会大局保持稳定，我国发展取得来之极为不易的新成就。

过去一年，我国经济发展遇到疫情等国内外多重超预期因素冲击。在党中央坚强领导下，我们高效统筹疫情防控和经济社会发展，根据病毒变化和防疫形势，

优化调整疫情防控措施。面对经济新的下行压力，果断应对、及时调控，动用近年储备的政策工具，靠前实施既定政策举措，坚定不移推进供给侧结构性改革，出台实施稳经济一揽子政策和接续措施，部署稳住经济大盘工作，加强对地方落实政策的督导服务，支持各地挖掘政策潜力，支持经济大省勇挑大梁，突出稳增长稳就业稳物价，推动经济企稳回升。全年国内生产总值增长3%，城镇新增就业1206万人，年末城镇调查失业率降到5.5%，居民消费价格上涨2%。货物进出口总额增长7.7%。财政赤字率控制在2.8%，中央财政收支符合预算、支出略有结余。国际收支保持平衡，人民币汇率在全球主要货币中表现相对稳健。粮食产量1.37万亿斤，增产74亿斤。生态环境质量持续改善。在攻坚克难中稳住了经济大盘，在复杂多变的环境中基本完成全年发展主要目标任务，我国经济展现出坚强韧性。

针对企业生产经营困难加剧，加大纾困支持力度。受疫情等因素冲击，不少企业和个体工商户

遇到特殊困难。全年增值税留抵退税超过2.4万亿元，新增减税降费超过1万亿元，缓税缓费7500多亿元。为有力支持减税降费政策落实，中央对地方转移支付大幅增加。引导金融机构增加信贷投放，降低融资成本，新发放企业贷款平均利率降至有统计以来最低水平，对受疫情影响严重的中小微企业、个体工商户和餐饮、旅游、货运等实施阶段性贷款延期还本付息，对普惠小微贷款阶段性减息。用改革办法激发市场活力。量大面广的中小微企业和个体工商户普遍受益。

针对有效需求不足的突出矛盾，多措并举扩投资促消费稳外贸。去年终端消费直接受到冲击，投资也受到影响。提前实施部分“十四五”规划重大工程项目，加快地方政府专项债券发行使用，依法盘活用好专项债务结存限额，分两期投放政策性开发性金融工具7400亿元，为重大项目建设补充资本金。运用专项再贷款、财政贴息等政策，支持重点领域设备更新改造。采取联合办公、地方承诺等办法，提高项目审批效率。全年基础设施、制造业投资分别增长9.4%、9.1%，带动固定资产投资增长5.1%，一定程度弥补了消费收缩缺口。发展消费新业态新模式，采取减免车辆购置税等措施促进汽车消费，新能源汽车销量增长93.4%，开展绿

色智能家电、绿色建材下乡，社会消费品零售总额保持基本稳定。出台金融支持措施，支持刚性和改善性住房需求，扎实推进保交楼稳民生工作。帮助外贸企业解决原材料、用工、物流等难题，提升港口集疏运效率，及时回应和解决外资企业关切，货物进出口好于预期，实际使用外资稳定增长。

针对就业压力凸显，强化稳岗扩就业政策支持。去年城镇调查失业率一度明显攀升。财税、金融、投资等政策更加注重稳就业。对困难行业企业社保费实施缓缴，大幅提高失业保险基金稳岗返还比例，增加稳岗扩岗补助。落实担保贷款、租金减免等创业支持政策。突出做好高校毕业生就业工作，开展就业困难人员专项帮扶。在重点工程建设中推广以工代赈。脱贫人口务工规模超过3200万人、实现稳中有增。就业形势总体保持稳定。

针对全球通胀高企带来的影响，以粮食和能源为重点做好保供稳价。去年全球通胀达到40多年来新高，国内价格稳定面临较大压力。有效应对洪涝、干旱等严重自然灾害，不误农时抢抓粮食播种和收获，督促和协调农机通行，保障农事活动有序开展，分三批向种粮农民发放农资补贴，保障粮食丰收和重要农产品稳定供给。发挥煤炭主体能源作用，

增加煤炭先进产能，加大对发电供热企业支持力度，保障能源正常供应。在全球高通胀的背景下，我国物价保持较低水平，尤为难得。

针对部分群众生活困难增多，强化基本民生保障。阶段性扩大低保等社会保障政策覆盖面，将更多困难群体纳入保障范围。延续实施失业保险保障扩围政策，共向1000多万失业人员发放失业保险待遇。向更多低收入群众发放价格补贴，约6700万人受益。免除经济困难高校毕业生2022年国家助学贷款利息并允许延期还本。做好因疫因灾遇困群众临时救助工作，切实兜住民生底线。

与此同时，我们全面落实中央经济工作会议部署，按照十三届全国人大五次会议批准的政府工作报告安排，统筹推进经济社会各领域工作。经过艰苦努力，当前消费需求、市场流通、工业生产、企业预期等明显向好，经济增长正在企稳向上，我国经济有巨大潜力和发展动力。

各位代表！

过去五年极不寻常、极不平凡。在以习近平同志为核心的党中央坚强领导下，我们经受了世界变局加快演变、新冠疫情冲击、国内经济下行等多重考验，如期打赢脱贫攻坚战，如期全面建成小康社会，实现第一个百年奋斗目标，开启向第二个百年奋斗目

标进军新征程。各地区各部门坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深刻领悟“两个确立”的决定性意义，增强“四个意识”、坚定“四个自信”、做到“两个维护”，全面贯彻党的十九大和十九届历次全会精神，深入贯彻党的二十大精神，坚持稳中求进工作总基调，完整、准确、全面贯彻新发展理念，构建新发展格局，推动高质量发展，统筹发展和安全，我国经济社会发展取得举世瞩目的重大成就。

——经济发展再上新台阶。国内生产总值增加到 121 万亿元，五年年均增长 5.2%，十年增加近 70 万亿元、年均增长 6.2%，在高基数基础上实现了中高速增长、迈向高质量发展。财政收入增加到 20.4 万亿元。粮食产量连年稳定在 1.3 万亿斤以上。工业增加值突破 40 万亿元。城镇新增就业年均 1270 多万人。外汇储备稳定在 3 万亿美元以上。我国经济实力明显提升。

——脱贫攻坚任务胜利完成。经过八年持续努力，近 1 亿农村贫困人口实现脱贫，全国 832 个贫困县全部摘帽，960 多万贫困人口实现易地搬迁，历史性地解决了绝对贫困问题。

——科技创新成果丰硕。构建新型举国体制，组建国家实验室，分批推进全国重点实验室重组。一些关键核心技术攻关取得

新突破，载人航天、探月探火、深海深地探测、超级计算机、卫星导航、量子信息、核电技术、大飞机制造、人工智能、生物医药等领域创新成果不断涌现。全社会研发经费投入强度从 2.1% 提高到 2.5% 以上，科技进步贡献率提高到 60% 以上，创新支撑发展能力不断增强。

——经济结构进一步优化。高技术制造业、装备制造业增加值年均分别增长 10.6%、7.9%，数字经济不断壮大，新产业新业态新模式增加值占国内生产总值的比重达到 17% 以上。区域协调发展战略、区域重大战略深入实施。常住人口城镇化率从 60.2% 提高到 65.2%，乡村振兴战略全面实施。经济发展新动能加快成长。

——基础设施更加完善。一批防汛抗旱、引水调水等重大水利工程开工建设。高速铁路运营里程从 2.5 万公里增加到 4.2 万公里，高速公路里程从 13.6 万公里增加到 17.7 万公里。新建改建农村公路 125 万公里。新增机场容量 4 亿人次。发电装机容量增长 40% 以上。所有地级市实现千兆光网覆盖，所有行政村实现通宽带。

——改革开放持续深化。全面深化改革开放推动构建新发展格局，供给侧结构性改革深入实施，简政放权、放管结合、优化服务改革不断深化，营商环境明

显改善。共建“一带一路”扎实推进。推动区域全面经济伙伴关系协定（RCEP）生效实施，建成全球最大自由贸易区。货物进出口总额年均增长 8.6%，突破 40 万亿元并连续多年居世界首位，吸引外资和对外投资居世界前列。

——生态环境明显改善。单位国内生产总值能耗下降 8.1%、二氧化碳排放下降 14.1%。地级及以上城市细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）平均浓度下降 27.5%，重污染天数下降超过五成，全国地表水优良水体比例由 67.9% 上升到 87.9%。设立首批 5 个国家公园，建立各级各类自然保护地 9000 多处。美丽中国建设迈出重大步伐。

——人民生活水平不断提高。居民收入增长与经济增长基本同步，全国居民人均可支配收入年均增长 5.1%。居民消费价格年均上涨 2.1%。新增劳动力平均受教育年限从 13.5 年提高到 14 年。基本养老保险参保人数增加 1.4 亿、覆盖 10.5 亿人，基本医保水平稳步提高。多年累计改造棚户区住房 4200 多万套，上亿人出棚进楼、实现安居。

经过多年精心筹办，成功举办了简约、安全、精彩的北京冬奥会、冬残奥会，为促进群众性冰雪运动、促进奥林匹克运动发展、促进世界人民团结友谊作出重要贡献。

新冠疫情发生三年多来，以

习近平同志为核心的党中央始终坚持人民至上、生命至上，强化医疗资源和物资保障，全力救治新冠患者，有效保护人民群众生命安全和身体健康，因时因势优化调整防控政策措施，全国人民坚忍不拔，取得重大决定性胜利。在极不平凡的抗疫历程中，各地区各部门各单位做了大量工作，各行各业共克时艰，广大医务人员不畏艰辛，特别是亿万人民克服多重困难，付出和奉献，都十分不易，大家共同抵御疫情重大挑战，面对尚未结束的疫情，仍在不断巩固统筹疫情防控和经济社会发展成果。

各位代表！

五年来，我们深入贯彻以习近平同志为核心的党中央决策部署，主要做了以下工作。

**（一）创新宏观调控，保持经济运行在合理区间。**面对贸易保护主义抬头、疫情冲击等接踵而来的严峻挑战，创新宏观调控方式，不过度依赖投资，统筹运用财政货币等政策，增强针对性有效性，直面市场变化，重点支持市场主体纾困发展，进而稳就业保民生。把年度主要预期目标作为一个有机整体来把握，加强区间调控、定向调控、相机调控、精准调控，既果断加大力度，又不搞“大水漫灌”、透支未来，持续做好“六稳”、“六保”工作，强化保居民就业、保基本民生、保

市场主体、保粮食能源安全、保产业链供应链稳定、保基层运转，以改革开放办法推动经济爬坡过坎、持续前行。

坚持实施积极的财政政策。合理把握赤字规模，五年总体赤字率控制在3%以内，政府负债率控制在50%左右。不断优化支出结构，教育科技、生态环保、基本民生等重点领域得到有力保障。实施大规模减税降费政策，制度性安排与阶段性措施相结合，疫情发生后减税降费力度进一步加大，成为应对冲击的关键举措。彻底完成营改增任务、取消营业税，将增值税收入占比最高、涉及行业广泛的税率从17%降至13%，阶段性将小规模纳税人增值税起征点从月销售额3万元提高到15万元、小微企业所得税实际最低税负率从10%降至2.5%。减税降费公平普惠、高效直达，五年累计减税5.4万亿元、降费2.8万亿元，既帮助企业渡过难关、留得青山，也放水养鱼、涵养税源，年均新增涉税企业和个体工商户等超过1100万户，各年度中央财政收入预算都顺利完成，考虑留抵退税因素，全国财政收入十年接近翻一番。推动财力下沉，中央一般公共预算支出中对地方转移支付占比提高到70%左右，建立并常态化实施中央财政资金直达机制。各级政府坚持过紧日子，严控一般性支出，中央部门

带头压减支出，盘活存量资金和闲置资产，腾出的资金千方百计惠企裕民，全国财政支出70%以上用于民生。

坚持实施稳健的货币政策。根据形势变化灵活把握政策力度，保持流动性合理充裕，用好降准、再贷款等政策工具，加大对实体经济的有效支持，缓解中小微企业融资难融资贵等问题。制造业贷款余额从16.3万亿元增加到27.4万亿元。普惠小微贷款余额从8.2万亿元增加到23.8万亿元、年均增长24%，贷款平均利率较五年前下降1.5个百分点。加大清理拖欠中小企业账款力度。人民币汇率在合理均衡水平上弹性增强、保持基本稳定。完全化解了历史上承担的国有商业银行和农村信用社等14486亿元金融改革成本。运用市场化法治化方式，精准处置一批大型企业集团风险，平稳化解高风险中小金融机构风险，大型金融机构健康发展，金融体系稳健运行，守住了不发生系统性风险的底线。

强化就业优先政策导向。把稳就业作为经济运行在合理区间的关键指标。着力促进市场化社会化就业，加大对企业稳岗扩岗支持力度。将养老保险单位缴费比例从20%降至16%，同时充实全国社保基金，储备规模从1.8万亿元增加到2.5万亿元以上。实施失业保险基金稳岗返还、留工

培训补助等政策。持续推进大众创业万众创新，连续举办8届全国双创活动周、超过5.2亿人次参与，鼓励以创业带动就业，加强劳动者权益保护，新就业形态和灵活就业成为就业增收的重要渠道。做好高校毕业生、退役军人、农民工等群体就业工作。使用失业保险基金等资金支持技能培训。实施高职扩招和职业技能提升三年行动，累计扩招413万人、培训8300多万人次。就业是民生之基、财富之源。14亿多人口大国保持就业稳定，难能可贵，蕴含着巨大创造力。

保持物价总体平稳。在应对冲击中没有持续大幅增加赤字规模，也没有超发货币，为物价稳定创造了宏观条件。下大气力抓农业生产，强化产销衔接和储备调节，确保粮食和生猪、蔬菜等稳定供应，及时解决煤炭电力供应紧张问题，满足民生和生产用能需求，保障交通物流畅通。加强市场监管，维护正常价格秩序。十年来我国居民消费价格涨幅稳定在2%左右的较低水平，成如容易却艰辛，既维护了市场经济秩序、为宏观政策实施提供了空间，又有利于更好保障基本民生。

**（二）如期打赢脱贫攻坚战，巩固拓展脱贫攻坚成果。**全面建成小康社会最艰巨最繁重的任务在农村特别是在贫困地区。坚持精准扶贫，聚焦“三区三州”等

深度贫困地区，强化政策倾斜支持，优先保障脱贫攻坚资金投入，对脱贫难度大的县和村挂牌督战。深入实施产业、就业、生态、教育、健康、社会保障等帮扶，加强易地搬迁后续扶持，重点解决“两不愁三保障”问题，脱贫群众不愁吃、不愁穿，义务教育、基本医疗、住房安全有保障，饮水安全也有了保障。贫困地区农村居民收入明显增加，生产生活条件显著改善。

推动巩固拓展脱贫攻坚成果同乡村振兴有效衔接。保持过渡期内主要帮扶政策总体稳定，严格落实“四个不摘”要求，建立健全防止返贫动态监测和帮扶机制，有力应对疫情、灾情等不利影响，确保不发生规模性返贫。确定并集中支持160个国家乡村振兴重点帮扶县，加大对易地搬迁集中安置区等重点区域支持力度，坚持并完善东西部协作、对口支援、定点帮扶等机制，选派干部人才和科技特派员，推动贫困地区加快发展和群众稳定增收。

**（三）聚焦重点领域和关键环节深化改革，更大激发市场活力和社会创造力。**坚持社会主义市场经济改革方向，处理好政府和市场的关系，使市场在资源配置中起决定性作用，更好发挥政府作用，推动有效市场和有为政府更好结合。

持续推进政府职能转变。完成国务院及地方政府机构改革。加快建设全国统一大市场，建设高标准市场体系，营造市场化法治化国际化营商环境。大道至简，政简易行。持之以恒推进触动政府自身利益的改革。进一步简政放权，放宽市场准入，全面实施市场准入负面清单制度，清单管理措施比制度建立之初压减64%，将行政许可事项全部纳入清单管理。多年来取消和下放行政许可事项1000多项，中央政府层面核准投资项目压减90%以上，工业产品生产许可证从60类减少到10类，工程建设项目全流程审批时间压缩到不超过120个工作日。改革商事制度，推行“证照分离”改革，企业开办时间从一个月以上压缩到目前的平均4个工作日以内，实行中小微企业简易注销制度。坚持放管结合，加强事中事后监管，严格落实监管责任，防止监管缺位、重放轻管，强化食品药品等重点领域质量和安全监管，推行“双随机、一公开”等方式加强公正监管，规范行使行政裁量权。加强反垄断和反不正当竞争，全面落实公平竞争审查制度，改革反垄断执法体制。依法规范和引导资本健康发展，依法坚决管控资本无序扩张。不断优化服务，推进政务服务集成办理，压减各类证明事项，加快数字政府建设，90%以上的政

务服务实现网上可办，户籍证明、社保转接等 200 多项群众经常办理事项实现跨省通办。取消所有省界高速公路收费站。制定实施优化营商环境、市场主体登记管理、促进个体工商户发展、保障中小企业款项支付等条例。改革给人们经商办企业更多便利和空间，去年底企业数量超过 5200 万户、个体工商户超过 1.1 亿户，市场主体总量超过 1.6 亿户、是十年前的 3 倍，发展内生动力明显增强。

促进多种所有制经济共同发展。坚持和完善社会主义基本经济制度，坚持“两个毫不动摇”。完成国企改革三年行动任务，健全现代企业制度，推动国企聚焦主责主业优化重组、提质增效。促进民营企业健康发展，破除各种隐性壁垒，一视同仁给予政策支持，提振民间投资信心。完善产权保护制度，保护企业家合法权益，弘扬企业家精神。

推进财税金融体制改革。深化预算管理体制改革，加大预算公开力度，推进中央与地方财政事权和支出责任划分改革，完善地方政府债务管理体系，构建综合与分类相结合的个人所得税制，进一步深化税收征管改革。推动金融监管体制改革，统筹推进中小银行补充资本和改革化险，推进股票发行注册制改革，完善资本市场基础制度，加强金融稳定

法治建设。

#### （四）深入实施创新驱动发展战略，推动产业结构优化升级。

深化供给侧结构性改革，完善国家和地方创新体系，推进科技自立自强，紧紧依靠创新提升实体经济发展水平，不断培育壮大发展新动能，有效应对外部打压遏制。

增强科技创新引领作用。强化国家战略科技力量，实施一批科技创新重大项目，加强关键核心技术攻关。发挥好高校、科研院所作用，支持新型研发机构发展。推进国际和区域科技创新中心建设，布局建设综合性国家科学中心。支持基础研究和应用基础研究，全国基础研究经费五年增长 1 倍。改革科研项目和经费管理制度，赋予科研单位和科研人员更大自主权，努力将广大科技人员从繁杂的行政事务中解脱出来。加强知识产权保护，激发创新动力。促进国际科技交流合作。通过市场化机制激励企业创新，不断提高企业研发费用加计扣除比例，将制造业企业、科技型中小企业分别从 50%、75% 提高至 100%，并阶段性扩大到所有适用行业，对企业投入基础研究、购置设备给予政策支持，各类支持创新的税收优惠政策年度规模已超过万亿元。创设支持创新的金融政策工具，引导创业投资等发展。企业研发投入保持两位数

增长，一大批创新企业脱颖而出。

推动产业向中高端迈进。把制造业作为发展实体经济的重点，促进工业经济平稳运行，保持制造业比重基本稳定。严格执行环保、质量、安全等法规标准，淘汰落后产能。开展重点产业强链补链行动。启动一批产业基础再造工程。鼓励企业加快设备更新和技术改造，将固定资产加速折旧优惠政策扩大至全部制造业。推动高端装备、生物医药、光电子信息、新能源汽车、光伏、风电等新兴产业加快发展。促进数字经济和实体经济深度融合。持续推进网络提速降费，发展“互联网+”。移动互联网用户数增加到 14.5 亿户。支持工业互联网发展，有力促进了制造业数字化智能化。专精特新中小企业达 7 万多家。促进平台经济健康持续发展，发挥其带动就业创业、拓展消费市场、创新生产模式等作用。发展研发设计、现代物流、检验检测认证等生产性服务业。加强全面质量管理和质量基础设施建设。中国制造的品质和竞争力不断提升。

#### （五）扩大国内有效需求，推进区域协调发展和新型城镇化。

围绕构建新发展格局，立足超大规模市场优势，坚持实施扩大内需战略，培育更多经济增长动力源。

着力扩大消费和有效投资。

疫情发生前，消费已经成为我国经济增长的主要拉动力。面对需求不足甚至出现收缩，推动消费尽快恢复。多渠道促进居民增收，提高中低收入群体收入。支持汽车、家电等大宗消费，汽车保有量突破3亿辆、增长46.7%。推动线上线下消费深度融合，实物商品网上零售额占社会消费品零售总额的比重从15.8%提高到27.2%。发展城市社区便民商业，完善农村快递物流配送体系。帮扶旅游业发展。围绕补短板、调结构、增后劲扩大有效投资。创新投融资体制机制，预算内投资引导和撬动社会投资成倍增加，增加地方政府专项债券额度，重点支持交通、水利、能源、信息等基础设施和民生工程建设，鼓励社会资本参与建设运营，调动民间投资积极性。

增强区域发展平衡性协调性。统筹推进西部大开发、东北全面振兴、中部地区崛起、东部率先发展，中西部地区经济增速总体高于东部地区。加大对革命老区、民族地区、边疆地区的支持力度，中央财政对相关地区转移支付资金比五年前增长66.8%。推进京津冀协同发展、长江经济带发展、长三角一体化发展，推动黄河流域生态保护和高质量发展。高标准高质量建设雄安新区。发展海洋经济。支持经济困难地区发展，促进资源型地区转型发展，鼓励

有条件地区更大发挥带动作用，推动形成更多新的增长极增长带。

持续推进以人为核心的新型城镇化。我国仍处于城镇化进程中，每年有上千万农村人口转移到城镇。完善城市特别是县城功能，增强综合承载能力。分类放宽或取消城镇落户限制，十年1.4亿农村人口在城镇落户。有序发展城市群和都市圈，促进大中小城市协调发展。推动成渝地区双城经济圈建设。坚持房子是用来住的、不是用来炒的定位，建立实施房地产长效机制，扩大保障性住房供给，推进长租房市场建设，稳地价、稳房价、稳预期，因城施策促进房地产市场健康发展。加强城市基础设施建设，轨道交通运营里程从4500多公里增加到近1万公里，排水管道从63万公里增加到89万公里。改造城镇老旧小区16.7万个，惠及2900多万家庭。

**（六）保障国家粮食安全，大力实施乡村振兴战略。**完善强农惠农政策，持续抓紧抓好农业生产，加快推进农业农村现代化。

提升农业综合生产能力。稳定和扩大粮食播种面积，扩种大豆油料，优化生产结构布局，提高单产和品质。完善粮食生产支持政策，稳定种粮农民补贴，合理确定稻谷、小麦最低收购价，加大对产粮大县奖励力度，健全政策性农业保险制度。加强耕地

保护，实施黑土地保护工程，完善水利设施，新建高标准农田4.56亿亩。推进国家粮食安全产业带建设。加快种业、农机等科技创新和推广应用，农作物耕种收综合机械化率从67%提高到73%。全面落实粮食安全党政同责，强化粮食和重要农产品稳产保供，始终不懈地把14亿多中国人的饭碗牢牢端在自己手中。

扎实推进农村改革发展。巩固和完善农村基本经营制度，完成承包地确权登记颁证和农村集体产权制度改革阶段性任务，稳步推进多种形式适度规模经营，抓好家庭农场和农民合作社发展，加快发展农业社会化服务。启动乡村建设行动，持续整治提升农村人居环境，加强水电路气信邮等基础设施建设，实现符合条件的乡镇和建制村通硬化路、通客车，农村自来水普及率从80%提高到87%，多年累计改造农村危房2400多万户。深化供销合作社、集体林权、农垦等改革。立足特色资源发展乡村产业，促进农民就业创业增收。为保障农民工及时拿到应得报酬，持续强化农民工工资拖欠治理，出台实施保障农民工工资支付条例，严厉打击恶意拖欠行为。

**（七）坚定扩大对外开放，深化互利共赢的国际经贸合作。**面对外部环境变化，实行更加积极主动的开放战略，以高水平开放

更有力促改革促发展。

推动进出口稳中提质。加大出口退税、信保、信贷等政策支持力度，企业出口退税办理时间压缩至6个工作日以内。优化外汇服务。发展外贸新业态，新设152个跨境电商综试区，支持建设一批海外仓。发挥进博会、广交会、服贸会、消博会等重大展会作用。推进通关便利化，进口、出口通关时间分别压减67%和92%，进出口环节合规成本明显下降。关税总水平从9.8%降至7.4%。全面深化服务贸易创新发展试点，推出跨境服务贸易负面清单。进出口稳定增长有力支撑了经济发展。

积极有效利用外资。出台外商投资法实施条例，不断优化外商投资环境。持续放宽外资市场准入，全国和自由贸易试验区负面清单条数分别压减51%、72%，制造业领域基本全面放开，金融等服务业开放水平不断提升。已设21个自由贸易试验区，海南自由贸易港建设稳步推进。各地创新方式加强外资促进服务，加大招商引资和项目对接力度。一批外资大项目落地，我国持续成为外商投资兴业的沃土。

推动高质量共建“一带一路”。坚持共商共建共享，遵循市场原则和国际通行规则，实施一批互联互通和产能合作项目，对沿线国家货物进出口额年均增长

13.4%，各领域交流合作不断深化。推进西部陆海新通道建设。引导对外投资健康有序发展，加强境外风险防控。新签和升级6个自贸协定，与自贸伙伴货物进出口额占比从26%提升至35%左右。坚定维护多边贸易体制，反对贸易保护主义，稳妥应对经贸摩擦，促进贸易和投资自由化便利化。

**（八）加强生态环境保护，促进绿色低碳发展。**坚持绿水青山就是金山银山的理念，健全生态文明制度体系，处理好发展和保护的关系，不断提升可持续发展能力。

加强污染治理和生态建设。坚持精准治污、科学治污、依法治污，深入推进污染防治攻坚。注重多污染物协同治理和区域联防联控，地级及以上城市空气质量优良天数比例达86.5%、上升4个百分点。基本消除地级及以上城市黑臭水体，推进重要河湖、近岸海域污染防治。加大土壤污染风险防控和修复力度，强化固体废物和新污染物治理。全面划定耕地和永久基本农田保护红线、生态保护红线和城镇开发边界。坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理，实施一批重大生态工程，全面推行河湖长制、林长制。推动共抓长江大保护，深入实施长江流域重点水域十年禁渔。加强生物多样性保护。完善生态

保护补偿制度。森林覆盖率达到24%，草原综合植被盖度和湿地保护率均达50%以上，水土流失、荒漠化、沙化土地面积分别净减少10.6万、3.8万、3.3万平方公里。人民群众越来越多享受到蓝天白云、绿水青山。

稳步推进节能降碳。统筹能源安全稳定供应和绿色低碳发展，科学有序推进碳达峰碳中和。优化能源结构，实现超低排放的煤电机组超过10.5亿千瓦，可再生能源装机规模由6.5亿千瓦增至12亿千瓦以上，清洁能源消费占比由20.8%上升到25%以上。全面加强资源节约工作，发展绿色产业和循环经济，促进节能环保技术和产品研发应用。提升生态系统碳汇能力。加强绿色发展金融支持。完善能耗考核方式。积极参与应对气候变化国际合作，为推动全球气候治理作出了中国贡献。

**（九）切实保障和改善民生，加快社会事业发展。**贯彻以人民为中心的发展思想，持续增加民生投入，着力保基本、兜底线、促公平，提升公共服务水平，推进基本公共服务均等化，在发展中不断增进民生福祉。

促进教育公平和质量提升。百年大计，教育为本。财政性教育经费占国内生产总值比例每年都保持在4%以上，学生人均经费投入大幅增加。持续加强农村义

务教育薄弱环节建设，基本消除城镇大班额，推动解决进城务工人员子女入学问题，义务教育巩固率由 93.8% 提高到 95.5%。坚持义务教育由国家统一实施，引导规范民办教育发展。减轻义务教育阶段学生负担。提升青少年健康水平。持续实施营养改善计划，每年惠及 3700 多万学生。保障教师特别是乡村教师工资待遇。多渠道增加幼儿园供给。高中阶段教育毛入学率提高到 90% 以上。职业教育适应性增强，职业院校办学条件持续改善。积极稳妥推进高考综合改革，高等教育毛入学率从 45.7% 提高到 59.6%，高校招生持续加大对中西部地区和农村地区倾斜力度。大幅提高经济困难高校学生国家助学贷款额度。深入实施“强基计划”和基础学科拔尖人才培养计划，建设 288 个基础学科拔尖学生培养基地，接续推进世界一流大学和一流学科建设，不断夯实发展的人才基础。

提升医疗卫生服务能力。深入推进和努力普及健康中国行动，深化医药卫生体制改革，把基本医疗卫生制度作为公共产品向全民提供，进一步缓解群众看病难、看病贵问题。持续提高基本医保和大病保险水平，城乡居民医保人均财政补助标准从 450 元提高到 610 元。将更多群众急需药品纳入医保报销范围。住院和门

诊费用实现跨省直接结算，惠及 5700 多万人次。推行药品和医用耗材集中带量采购，降低费用负担超过 4000 亿元。设置 13 个国家医学中心，布局建设 76 个国家区域医疗中心。全面推开公立医院综合改革，持续提升县域医疗卫生服务能力，完善分级诊疗体系。优化老年人等群体就医服务。促进中医药传承创新发展、惠及民生。基本公共卫生服务经费人均财政补助标准从 50 元提高到 84 元。坚持预防为主，加强重大慢性病健康管理。改革完善疾病预防控制体系，组建国家疾病预防控制中心，健全重大疫情防控救治和应急物资保障体系，努力保障人民健康。

加强社会保障和服务。建立基本养老保险基金中央调剂制度，连续上调退休人员基本养老金，提高城乡居民基础养老金最低标准，稳步提升城乡低保、优待抚恤、失业和工伤保障等标准。积极应对人口老龄化，推动老龄事业和养老产业发展。发展社区和居家养老服务，加强配套设施和无障碍设施建设，在税费、用房、水电气价格等方面给予政策支持。推进医养结合，稳步推进长期护理保险制度试点。实施三孩生育政策及配套支持措施。完善退役军人管理保障制度，提高保障水平。加强妇女、儿童权益保障。完善未成年人保护制度。健全残

疾人保障和关爱服务体系。健全社会救助体系，加强低收入人口动态监测，对遇困人员及时给予帮扶，年均临时救助 1100 万人次，坚决兜住了困难群众基本生活保障网。

丰富人民群众精神文化生活。培育和践行社会主义核心价值观。深化群众性精神文明创建。发展新闻出版、广播影视、文学艺术、哲学社会科学和档案等事业，加强智库建设。扎实推进媒体深度融合。提升国际传播效能。加强和创新互联网内容建设。弘扬中华优秀传统文化，加强文物和文化遗产保护传承。实施文化惠民工程，公共图书馆、博物馆、美术馆、文化馆站向社会免费开放。深入推进全民阅读。支持文化产业发展。加强国家科普能力建设。体育健儿勇创佳绩，全民健身广泛开展。

**（十）推进政府依法履职和社会治理创新，保持社会大局稳定。**加强法治政府建设，使经济社会活动更好在法治轨道上运行。坚持依法行政、大道为公，严格规范公正文明执法，政府的权力来自人民，有权不可任性，用权必受监督。推动完善法律法规和规章制度，提请全国人大常委会审议法律议案 50 件，制定修订行政法规 180 件次。依法接受同级人大及其常委会的监督，自觉接受人民政协的民主监督，主动接受

社会和舆论监督。认真办理人大代表建议和政协委员提案。加强审计、统计监督。持续深化政务公开。开展国务院大督查。支持工会、共青团、妇联等群团组织更好发挥作用。

加强和创新社会治理。推动市域社会治理现代化，完善基层治理，优化社区服务。支持社会组织、人道救助、社会工作、志愿服务、公益慈善等健康发展。深入推进信访积案化解。推进社会信用体系建设。完善公共法律服务体系。严格食品、药品尤其是疫苗监管。开展安全生产专项整治。改革和加强应急管理，提高防灾减灾救灾能力，做好洪涝干旱、森林草原火灾、地质灾害、地震等防御和气象服务。深入推进国家安全体系和能力建设。加强网络、数据安全和个人信息保护。持续加强社会治安综合治理，严厉打击各类违法犯罪，开展扫黑除恶专项斗争，依法严惩黑恶势力及其“保护伞”，平安中国、法治中国建设取得新进展。

各位代表！

五年来，各级政府认真贯彻落实党中央全面从严治党战略部署，扎实开展“不忘初心、牢记使命”主题教育和党史学习教育，弘扬伟大建党精神，严格落实中央八项规定精神，持之以恒纠治“四风”，重点纠治形式主义、官僚主义，“三公”经费大幅压减。

严厉惩处违规建设楼堂馆所和偷税逃税等行为。加强廉洁政府建设。政府工作人员自觉接受法律监督、监察监督和人民监督。

做好经济社会发展工作，没有捷径，实干为要。五年来，坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻党的基本理论、基本路线、基本方略。坚持以经济建设为中心，着力推动高质量发展，事不畏难、行不避艰，要求以实干践行承诺，凝心聚力抓发展；以民之所望为施政所向，始终把人民放在心中最高位置，一切以人民利益为重，仔细倾听群众呼声，深入了解群众冷暖，着力解决人民群众急难愁盼问题；坚持实事求是，尊重客观规律，坚决反对空谈浮夸、做表面文章、搞形象工程甚至盲目蛮干；以改革的办法、锲而不舍的精神解难题、激活力，激励敢于担当，对庸政懒政者问责。尊重人民群众首创精神，充分调动各方面积极性，进而汇聚起推动发展的强大力量。

各位代表！

过去五年，民族、宗教、侨务等工作创新完善。巩固和发展平等团结互助和谐的社会主义民族关系，民族团结进步呈现新气象。贯彻党的宗教工作基本方针，推进我国宗教中国化逐步深入。持续做好侨务工作，充分发挥海外侨胞在参与祖国现代化建设中

的独特优势和重要作用。

坚持党对人民军队的绝对领导，国防和军队建设取得一系列新的重大成就、发生一系列重大变革。人民军队深入推进政治建军、改革强军、科技强军、人才强军、依法治军，深入推进练兵备战，现代化水平和实战能力显著提升。坚定灵活开展军事斗争，有效遂行边防斗争、海上维权、反恐维稳、抢险救灾、抗击疫情、维和护航等重大任务，提升国防动员能力，有力维护了国家主权、安全、发展利益。

港澳台工作取得新进展。依照宪法和基本法有效实施对特别行政区的全面管治权，制定实施香港特别行政区维护国家安全法，落实“爱国者治港”、“爱国者治澳”原则，推动香港进入由乱到治走向由治及兴的新阶段。深入推进粤港澳大湾区建设，支持港澳发展经济、改善民生、防控疫情、保持稳定。贯彻新时代党解决台湾问题的总体方略，坚决开展反分裂、反干涉重大斗争，持续推动两岸关系和平发展。

中国特色大国外交全面推进。习近平主席等党和国家领导人出访多国，通过线上和线下方式出席二十国集团领导人峰会、亚太经合组织领导人非正式会议、联合国成立75周年系列高级别会议、东亚合作领导人系列会议、中欧领导人会晤等一系列重大外交活

动。成功举办上合组织青岛峰会、金砖国家领导人会晤、全球发展高层对话会、“一带一路”国际合作高峰论坛、中非合作论坛北京峰会等多场重大主场外交活动。坚持敢于斗争、善于斗争，坚决维护我国主权、安全、发展利益。积极拓展全球伙伴关系，致力于建设开放型世界经济，维护多边主义，推动构建人类命运共同体。中国作为负责任大国，在推进国际抗疫合作、解决全球性挑战和地区热点问题上发挥了重要建设性作用，为促进世界和平与发展作出重要贡献。

各位代表！

这些年我国发展取得的成就，是以习近平同志为核心的党中央坚强领导的结果，是习近平新时代中国特色社会主义思想科学指引的结果，是全党全军全国各族人民团结奋斗的结果。我代表国务院，向全国各族人民，向各民主党派、各人民团体和各界人士，表示诚挚感谢！向香港特别行政区同胞、澳门特别行政区同胞、台湾同胞和海外侨胞，表示诚挚感谢！向关心和支持中国现代化建设的各国政府、国际组织和各国朋友，表示诚挚感谢！

在看到发展成就的同时，我们也清醒认识到，我国是一个发展中大国，仍处于社会主义初级阶段，发展不平衡不充分问题仍然突出。当前发展面临诸多困难

挑战。外部环境不确定性加大，全球通胀仍处于高位，世界经济和贸易增长动能减弱，外部打压遏制不断上升。国内经济增长企稳向上基础尚需巩固，需求不足仍是突出矛盾，民间投资和民营企业预期不稳，不少中小微企业和个体工商户困难较大，稳就业任务艰巨，一些基层财政收支矛盾较大。房地产市场风险隐患较多，一些中小金融机构风险暴露。发展仍有不少体制机制障碍。科技创新能力还不强。生态环境保护任重道远。防灾减灾等城乡基础设施仍有明显薄弱环节。一些民生领域存在不少短板。形式主义、官僚主义现象仍较突出，有的地方政策执行“一刀切”、层层加码，有的干部不作为、乱作为、简单化，存在脱离实际、违背群众意愿、漠视群众合法权益等问题。一些领域、行业、地方腐败现象时有发生。人民群众对政府工作还有一些意见和建议应予重视。要直面问题挑战，尽心竭力改进政府工作，不负人民重托。

## 二、对今年政府工作的建议

今年是全面贯彻党的二十大精神、做好政府工作的开局之年。做好政府工作，要在以习近平同志为核心的党中央坚强领导下，以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻落实党的二十大精神，按照中央经济工作会议部署，

扎实推进中国式现代化，坚持稳中求进工作总基调，完整、准确、全面贯彻新发展理念，加快构建新发展格局，着力推动高质量发展，更好统筹国内国际两个大局，更好统筹疫情防控和经济社会发展，更好统筹发展和安全，全面深化改革开放，大力提振市场信心，把实施扩大内需战略同深化供给侧结构性改革有机结合起来，突出做好稳增长、稳就业、稳物价工作，有效防范化解重大风险，推动经济运行整体好转，实现质的有效提升和量的合理增长，持续改善民生，保持社会大局稳定，为全面建设社会主义现代化国家开好局起好步。

今年发展主要预期目标是：国内生产总值增长5%左右；城镇新增就业1200万人左右，城镇调查失业率5.5%左右；居民消费价格涨幅3%左右；居民收入增长与经济增长基本同步；进出口促稳提质，国际收支基本平衡；粮食产量保持在1.3万亿斤以上；单位国内生产总值能耗和主要污染物排放量继续下降，重点控制化石能源消费，生态环境质量稳定改善。

要坚持稳字当头、稳中求进，面对战略机遇和风险挑战并存、不确定难预料因素增多，保持政策连续性稳定性针对性，加强各类政策协调配合，形成共促高质量发展合力。积极的财政政策要加力提效。赤字率拟按3%安排。

完善税费优惠政策，对现行减税降费、退税缓税等措施，该延续的延续，该优化的优化。做好基层“三保”工作。稳健的货币政策要精准有力。保持广义货币供应量和社会融资规模增速同名义经济增速基本匹配，支持实体经济发展。保持人民币汇率在合理均衡水平上的基本稳定。产业政策要发展和安全并举。促进传统产业改造升级，培育壮大战略性新兴产业，着力补强产业链薄弱环节。科技政策要聚焦自立自强，也要坚持国际合作。完善新型举国体制，发挥好政府在关键核心技术攻关中的组织作用，支持和突出企业科技创新主体地位，加大科技人才及团队培养支持力度。社会政策要兜牢民生底线。落实落细就业优先政策，把促进青年特别是高校毕业生就业工作摆在更加突出的位置，切实保障好基本民生。

当前我国新冠疫情防控已进入“乙类乙管”常态化防控阶段，要在对疫情防控工作进行全面科学总结的基础上，更加科学、精准、高效做好防控工作，围绕保健康、防重症，重点做好老年人、儿童、患基础性疾病群体的疫情防控和医疗救治，提升疫情监测水平，推进疫苗迭代升级和新药研制，切实保障群众就医用药需求，守护好人民生命安全和身体健康。

今年是政府换届之年，前面

报告的经济社会发展多领域、各方面工作，今后还需不懈努力，下面简述几项重点。

**（一）着力扩大国内需求。**把恢复和扩大消费摆在优先位置。多渠道增加城乡居民收入。稳定汽车等大宗消费，推动餐饮、文化、旅游、体育等生活服务消费恢复。政府投资和政策激励要有效带动全社会投资，今年拟安排地方政府专项债券3.8万亿元，加快实施“十四五”重大工程，实施城市更新行动，促进区域优势互补、各展其长，继续加大对受疫情冲击较严重地区经济社会发展的支持力度，鼓励和吸引更多民间资本参与国家重大工程和补短板项目建设，激发民间投资活力。

**（二）加快建设现代化产业体系。**强化科技创新对产业发展的支撑。持续开展产业强链补链行动，围绕制造业重点产业链，集中优质资源合力推进关键核心技术攻关，充分激发创新活力。加强重要能源、矿产资源国内勘探开发和增储上产。加快传统产业和中小企业数字化转型，着力提升高端化、智能化、绿色化水平。加快前沿技术研发和应用推广，促进科技成果转化。建设高效顺畅的物流体系。大力发展数字经济，提升常态化监管水平，支持平台经济发展。

**（三）切实落实“两个毫不动摇”。**深化国资国企改革，提高

国企核心竞争力。坚持分类改革方向，处理好国企经济责任和社会责任关系，完善中国特色国有企业现代公司治理。依法保护民营企业产权和企业家权益，完善相关政策，鼓励支持民营经济和民营企业发展壮大，支持中小微企业和个体工商户发展，构建亲清政商关系，为各类所有制企业创造公平竞争、竞相发展的环境，用真招实策稳定市场预期和提振市场信心。

**（四）更大力度吸引和利用外资。**扩大市场准入，加大现代服务业领域开放力度。落实好外资企业国民待遇。积极推动加入全面与进步跨太平洋伙伴关系协定（CPTPP）等高标准经贸协议，主动对照相关规则、规制、管理、标准，稳步扩大制度型开放。优化区域开放布局，实施自由贸易试验区提升战略，发挥好海南自由贸易港、各类开发区等开放平台的先行先试作用。继续发挥进出口对经济的支撑作用。做好外资企业服务工作，推动外资标志性项目落地建设。开放的中国大市场，一定能为各国企业在华发展提供更多机遇。

**（五）有效防范化解重大经济金融风险。**深化金融体制改革，完善金融监管，压实各方责任，防止形成区域性、系统性金融风险。有效防范化解优质头部房企风险，改善资产负债状况，防止

无序扩张，促进房地产业平稳发展。防范化解地方政府债务风险，优化债务期限结构，降低利息负担，遏制增量、化解存量。

**（六）稳定粮食生产和推进乡村振兴。**一体推进农业现代化和农村现代化。稳定粮食播种面积，抓好油料生产，实施新一轮千亿斤粮食产能提升行动。完善农资保供稳价应对机制。加强耕地保护，加强农田水利和高标准农田等基础设施建设。深入实施种业振兴行动。强化农业科技和装备支撑。健全种粮农民收益保障机制和主产区利益补偿机制。树立大食物观，构建多元化食物供给体系。发展乡村特色产业，拓宽农民增收致富渠道。巩固拓展脱贫攻坚成果，坚决防止出现规模性返贫。推进乡村建设行动。国家关于土地承包期再延长30年的政策，务必通过细致工作扎实落实到位。

**（七）推动发展方式绿色转型。**深入推进污染防治。加强流域综合治理，加强城乡环境基础设施建设，持续实施重要生态系统保护和修复重大工程。推进能源清洁高效利用和技术研发，加快建设新型能源体系，提升可再生能源占比。完善支持绿色发展的政策和金融工具，发展循环经济，推进资源节约集约利用，推动重点领域节能降碳减污，持续打好蓝天、碧水、净土保卫战。

**（八）保障基本民生和发展社会事业。**加强住房保障体系建设，支持刚性和改善性住房需求，解决好新市民、青年人等住房问题，加快推进老旧小区和危旧房改造。加快建设高质量教育体系，推进义务教育优质均衡发展和城乡一体化，推进学前教育、特殊教育普惠发展，大力发展职业教育，推进高等教育创新，支持中西部地区高校发展，深化体教融合。深化医药卫生体制改革，促进医保、医疗、医药协同发展和治理。推动优质医疗资源扩容下沉和区域均衡布局。实施中医药振兴发展重大工程。重视心理健康和精神卫生。实施积极应对人口老龄化国家战略，加强养老服务保障，完善生育支持政策体系。保障妇女、儿童、老年人、残疾人合法权益。做好军人军属、退役军人和其他优抚对象优待抚恤工作。繁荣发展文化事业和产业。提升社会治理效能。强化安全生产监管和防灾减灾救灾。全面贯彻总体国家安全观，建设更高水平的平安中国。

进一步加强政府自身建设，持续转变政府职能，搞好机构改革，扎实推进法治政府、创新政府、廉洁政府和服务型政府建设，发扬实干精神，大兴调查研究之风，提高行政效率和公信力。

各位代表！

我们要以铸牢中华民族共同

体意识为主线，坚持和完善民族区域自治制度，促进各民族共同团结奋斗、共同繁荣发展。坚持党的宗教工作基本方针，坚持我国宗教中国化方向，积极引导宗教与社会主义社会相适应。加强和改进侨务工作，汇聚起海内外中华儿女同心奋斗、共创辉煌的强大力量。

我们要深入贯彻习近平强军思想，贯彻新时代军事战略方针，围绕实现建军一百年奋斗目标，边斗争、边备战、边建设，完成好党和人民赋予的各项任务。全面加强练兵备战，创新军事战略指导，大抓实战化军事训练，统筹抓好各方向各领域军事斗争。全面加强军事治理，巩固拓展国防和军队改革成果，加强重大任务战建备统筹，加快实施国防发展重大工程。巩固提高一体化国家战略体系和能力，加强国防科技工业能力建设。深化全民国防教育。各级政府要大力支持国防和军队建设，深入开展“双拥”活动，合力谱写军政军民团结新篇章。

我们要全面准确、坚定不移贯彻“一国两制”、“港人治港”、“澳人治澳”、高度自治的方针，坚持依法治港治澳，维护宪法和基本法确定的特别行政区宪制秩序，落实“爱国者治港”、“爱国者治澳”原则。支持港澳发展经济、改善民生，保持香港、澳门长期

繁荣稳定。

我们要坚持贯彻新时代党解决台湾问题的总体方略，坚持一个中国原则和“九二共识”，坚定反“独”促统，推动两岸关系和平发展，推进祖国和平统一进程。两岸同胞血脉相连，要促进两岸经济文化交流合作，完善增进台湾同胞福祉的制度和政策，推动两岸共同弘扬中华文化，同心共创复兴伟业。

我们要坚定奉行独立自主的和平外交政策，坚定不移走和平

发展道路，坚持在和平共处五项原则基础上同各国发展友好合作，坚定奉行互利共赢的开放战略，始终做世界和平的建设者、全球发展的贡献者、国际秩序的维护者。中国愿同国际社会一道落实全球发展倡议、全球安全倡议，弘扬全人类共同价值，携手推动构建人类命运共同体，维护世界和平和地区稳定。

各位代表！

奋斗铸就辉煌，实干赢得未来。我们要更加紧密地团结在

以习近平同志为核心的党中央周围，高举中国特色社会主义伟大旗帜，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精神，砥砺前行，推动经济社会持续健康发展，为全面建设社会主义现代化国家、全面推进中华民族伟大复兴，为把我国建设成为富强民主文明和谐美丽的社会主义现代化强国不懈奋斗！

来源：新华社

## 万钢同志在 2023 “科创中国” 年度会议上的总结讲话

同志们，朋友们：

刚才，我们听取了六位同志的工作汇报和经验介绍，发布了“科创中国”系列榜单，启动了金融伙伴计划，向优秀科技服务团授牌，颁发了第二十五届求是杰出青年成果转化奖。让我们再次向取得优异成绩的集体和个人表示祝贺！

2022 年是党和国家历史上具有非凡意义的一年，举世瞩目

的党的二十大胜利召开，描绘了全面建设社会主义现代化国家的宏伟蓝图。党的二十大报告指出，要着力推动“经济高质量发展取得新突破，科技自立自强能力显著提升，构建新发展格局和建设现代化经济体系取得重大进展”。中国科协积极贯彻落实党的二十大精神，以“科创中国”建设为抓手，为构建新发展格局贡献出了科协智慧、科协方案和科协

力量。

一是汇聚了创新驱动发展的生力军。聚焦“科创+产业”，集贤汇智、广聚英才，组建 492 支科技服务团，引领科技工作者服务产业一线，科协组织力多元化呈现，资源优势规模化扩展，协同效能结构化壮大。二是打造了创新创业活跃的城市群。“科创中国”试点建设踊跃争先、因地制宜，65 个试点城市和园区各具特

色的科创活动促进了创新资源的均衡分布与活化应用，实现成果转化落地千余项，试点城市的示范引领作用更为突出。三是形成了产学研协作的新枢纽。“会地合作”服务模式进一步延伸拓展、扎实落地，全国学会和地方科协集群化汇聚创新资源，搭建跨界主体互动交流的平台，夯实人才和技术下沉的有效载体。四是推动了技术服务交易的新变革。“科创中国”平台顺应信息时代潮流，汇聚千万量级的用户群体、百万量级的创新资源，线上线下一盘棋，精准对接技术供需，运营服务能力显著提升。

借此机会，我代表中国科协，向积极参与、大力支持“科创中国”建设的科技工作者和各界朋友，表示诚挚敬意和衷心感谢！

2023年是全面贯彻落实党的二十大精神开局之年，也是“科创中国”三年行动计划的收官之年。党的二十大为新一年“科创中国”建设指明了方向。我们必须在总结成绩的同时，深刻理解中国式现代化的内涵，牢牢把握新的形势要求，积极应对新的机遇挑战，坚持教育发展、科技创新、人才培养一体推进，原始创新、集成创新、开放创新一体设计，创新链、产业链、人才链一体部署，着力打造更深层次协同、更高质量合作的科技经济融合新生态，实现科教兴国战略、

人才强国战略、创新驱动发展战略的有效联动，持续激发高质量发展新动能。

## 一、坚持自立自强，打造人才引领驱动的新引擎

中国科协作为广大科技工作者的群众组织、国家科技创新体系的重要组成部分，在谋划和推进“科创中国”建设时，必须聚焦高水平科技自立自强的目标，持续增强科技工作者的使命感和创造力，加大力度涵养国家战略人才力量，集聚力量进行原创性引领性科技攻关。一要进一步强化人才引领力、资源统筹力和组织融通力。着力发挥科协系统融通专业领域、横跨行业门类、纵贯产业链条的人才高地优势，广泛吸纳各类国家战略科技力量，加速高能级的人才资源和技术要素系统化导入产业一线，打好关键核心技术攻坚战。二要把握当前科技创新的重要方向，加强科教融汇、产教融合。充分利用人工智能、大数据、区块链、Web3.0等发展机遇，不断完善平台的数据驱动和场景牵引功能，促进科学家、企业家、工程师良性互动，推动高校、院所、企业深化合作，联合开展前沿技术研发和应用推广。三要积极应对产业升级挑战，加快先导技术价值转化。深入总结我国制造业数控一代、智能一代等产业转型升级

的经验做法，坚持和完善深入基层、形成集群、发展园区、带动产业链的发展模式，加速创新要素聚变，开辟新领域，找到新赛道，制胜新赛道。

## 二、着力创新创业，培育科技经济融合的新格局

中央经济工作会议强调，要促进大众创业万众创新纵深发展，最大限度释放全社会的创新创造潜能。大众创业万众创新最重要的就是科技工作者尤其是青年科技人才创新创业，引领青年科技人员走上产业发展、经济发展的第一线。“科创中国”要聚焦国家战略性新兴产业和未来产业的重大部署，持续加快科技成果转化应用，不断强链、补链、延链，形成创新、创业、创投“铁三角”。一要切实服务广大科技型企业，推动企业主导的产学研合作。紧扣企业技术问题，积极提供技术改造、技术攻关、产品研发的解决方案，提升企业创新实力和就业承载能力。二要聚焦试点城市重点产业、特色产业，提升科技服务的匹配度和时效性。主动发现和聚集地方资源，推动特色发展，引导全国学会等设立技术转移中心、新型研发机构等实体机构，创新模式培育技术交易服务人才队伍，探索建立常态化、市场化服务机制。三要广泛吸纳商业银行、投资机构、证券交易

所等机构参与“科创中国”建设。助力金融资源精准投放，促进科创企业融资增信，着力推动“科技-产业-金融”良性循环。通过“科创中国”的聚集服务，降低中小微企业的科创投入风险，提高金融机构的投资成功率。推动金融机构增强科创投资意向，给予青年人更多创业机会，培养和激发青年创业者意志，创造更加融合开放的创新生态。四要着力推动科技创新和文化艺术的结合。自然科学和人文科学的结合是十分重要的领域，正在吸引各方资源的聚集。要大力弘扬科学家精神，带动整个科技领域学风、作风的转变。要在促进科技和产业结合的同时，推动科技和各地社会文化紧密结合。比如，通过研究人工智能在社会科学领域的规范、伦理、作为，促进科技和人文的结合；通过发展科幻产业，让科技与文学艺术相互渗透、协同发展。

### 三、强化共建共享，拓展融通开放协同的新空间

“科创中国”必须一如既往坚持协同合作的思维，发扬同舟共济、合作共赢的伙伴精神，促

进资源共建共享和资源优化配置，拓展科技领域合作的广度深度，融入全球创新网络。一要通过高水平的对内开放，促进各省市、各行业、各领域的融通。要全面落实中国科协与战略伙伴的合作框架，准确把握中国科协与有关国家部委、中央企业以及省份城市的合作需求，联合开展科创资源共享服务，发挥产学研协同纽带作用，打破部门界限、行业界限、地域界限，不断开辟科创合作的新通道。二要延伸拓展服务面向，协同推进乡村产业振兴。针对农业农村现代化的广阔空间，积极响应跨界协同新模式对乡村产业形态带来的深刻变化，探索建设“科创中国”乡村振兴产业顾问组等柔性创新组织，促进广大农户农民与先进技术联系更紧密、与广阔市场接轨更便捷，不断深化跨界融合，以柔性服务带动乡村产业创新。三要着力构建高水平对外开放合作平台。倡导开放科学理念，与全球科技界持续开展多层次、宽领域、建设性对话，在充分的面对面交流中，共同探寻合作的最大公约数，突破原有的技术描述和产业分割，深化基于技术迭代与产业应用的融合创

新，推进前沿性、国际化的技术标准供给，吸引国外创新机构参与“科创中国”品牌会议、技术路演等活动，鼓励更多优秀的先导技术、新锐企业、产业融通组织、创新创业人才参与“科创中国”系列榜单的遴选，努力建设具有全球竞争力的开放创新生态。

同志们！

新形势下的科创工作进入了新的格局，任重道远。很多未知需要我們继续探索，在试错中寻找新的方向。“科创中国”的三年建设过程，也是在不断地实践中寻找方向。今天到会的同志，都是“科创中国”的先行者、主力军。让我们携起手来，以科技创新作为提振发展信心、深化科技与经济融合、促进科技与文化交流的突破口，压紧压实各方责任，抓根本、求突破，努力完成“三年行动计划”任务目标，形成共促高质量发展合力，共同谱写“科创中国”新篇章，打造科协组织支撑中国式现代化的“新地标”。○

来源：中国科协办公厅

# 习近平在中国共产党与世界政党高层对话上的主旨讲话

## ——携手同行现代化之路

尊敬的各位政党领导人，女士们，先生们，朋友们：

很高兴同大家相聚，探讨“现代化道路：政党的责任”这一重要命题。人类社会发展进程曲折起伏，各国探索现代化道路的历程充满艰辛。当今世界，多重挑战和危机交织叠加，世界经济复苏艰难，发展鸿沟不断拉大，生态环境持续恶化，冷战思维阴魂不散，人类社会现代化进程又一次来到历史的十字路口。两极分化还是共同富裕？物质至上还是物质精神协调发展？竭泽而渔还是人与自然和谐共生？零和博弈还是合作共赢？照抄照搬别国模式还是立足自身国情自主发展？我们究竟需要什么样的现代化？怎样才能实现现代化？面对这一系列的现代化之问，政党作为引领和推动现代化进程的重要力量，有责任作出回答。在这里，我愿谈几点看法。

——我们要坚守人民至上理念，突出现代化方向的人民性。人民是历史的创造者，是推进现

代化最坚实的根基、最深厚的力量。现代化的最终目标是实现人自由而全面的发展。现代化道路最终能否走得通、行得稳，关键要看是否坚持以人民为中心。现代化不仅要看纸面上的指标数据，更要看人民的幸福安康。政党要锚定人民对美好生活的向往，顺应人民对文明进步的渴望，努力实现物质富裕、政治清明、精神富足、社会安定、生态宜人，让现代化更好回应人民各方面诉求和多层次需要，既增进当代人福祉，又保障子孙后代权益，促进人类社会可持续发展。

——我们要秉持独立自主原则，探索现代化道路的多样性。现代化不是少数国家的“专利品”，也不是非此即彼的“单选题”，不能搞简单的千篇一律、“复制粘贴”。一个国家走向现代化，既要遵循现代化一般规律，更要立足本国国情，具有本国特色。什么样的现代化最适合自己，本国人民最有发言权。发展中国家有权利也有能力基于自身国情

自主探索各具特色的现代化之路。要坚持把国家和民族发展放在自己力量的基点上，把国家发展进步的命运牢牢掌握在自己手中，尊重和支持各国人民对发展道路的自主选择，共同绘就百花齐放的人类社会现代化新图景。

——我们要树立守正创新意识，保持现代化进程的持续性。面对现代化进程中遇到的各种新问题新情况新挑战，政党要敢于担当、勇于作为，冲破思想观念束缚，破除体制机制弊端，探索优化方法路径，不断实现理论和实践上的创新突破，为现代化进程注入源源不断的强大活力。要携手推进全球治理体系改革和建设，推动国际秩序朝着更加公正合理的方向发展，在不断促进权利公平、机会公平、规则公平的努力中推进人类社会现代化。

——我们要弘扬立己达人精神，增强现代化成果的普惠性。人类是一个一荣俱荣、一损俱损的命运共同体。任何国家追求现代化，都应该秉持团结合作、共

同发展的理念，走共建共享共赢之路。走在前面的国家应该真心帮助其他国家发展。吹灭别人的灯，并不会让自己更加光明；阻挡别人的路，也不会让自己行得更远。要坚持共享机遇、共创未来，共同做大人类社会现代化的“蛋糕”，努力让现代化成果更多更公平惠及各国人民，坚决反对通过打压遏制别国现代化来维护自身发展“特权”。

——我们要保持奋发有为姿态，确保现代化领导的坚定性。现代化不会从天上掉下来，而是要通过发扬历史主动精神干出来。作为现代化事业的引领和推动力量，政党的价值理念、领导水平、治理能力、精神风貌、意志品质直接关系到国家现代化的前途命运。自胜者强。政党要把自身建设和国家现代化建设紧密结合起来，踔厉奋发，勇毅笃行，超越自我，确保始终有信心、有意志、有能力应对好时代挑战、回答好时代命题、呼应好人民期盼，为不断推进现代化进程引领方向、凝聚力量。

女士们、先生们、朋友们！

实现现代化是近代以来中国人民矢志奋斗的梦想。中国共产党100多年团结带领中国人民追求民族复兴的历史，也是一部不断探索现代化道路的历史。经过数代人不懈努力，我们走出了中国式现代化道路。

中国共产党第二十次全国代表大会提出，要以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴。中国式现代化是人口规模巨大、全体人民共同富裕、物质文明和精神文明相协调、人与自然和谐共生、走和平发展道路的现代化，既基于自身国情、又借鉴各国经验，既传承历史文化、又融合现代文明，既造福中国人民、又促进世界共同发展，是我们强国建设、民族复兴的康庄大道，也是中国谋求人类进步、世界大同的必由之路。我们将坚持正确的方向、正确的理论、正确的道路不动摇，不走改旗易帜的邪路。我们将始终把自身命运同各国人民的命运紧紧联系在一起，努力以中国式现代化新成就为世界发展提供新机遇，为人类对现代化道路的探索提供新助力，为人类社会现代化理论和实践创新作出新贡献。

中国共产党将致力于推动高质量发展，促进全球发展繁荣。我们将加快构建新发展格局，不断扩大高水平对外开放，持续放宽市场准入，让开放的大门越开越大。随着中国现代化产业体系建设的推进，我们将为世界提供更多更好的中国制造和中国创造，为世界提供更大规模的中国市场和中國需求。我们将坚定支持和帮助广大发展中国家加快发展，实现工业化、现代化，为缩小南

北差距、实现共同发展提供中国方案和中国力量。我们愿同各国政党一道，推动共建“一带一路”高质量发展，加快全球发展倡议落地，培育全球发展新动能，构建全球发展共同体。

中国共产党将致力于维护国际公平正义，促进世界和平稳定。中国式现代化不走殖民掠夺的老路，不走国强必霸的歪路，走的是和平发展的人间正道。我们倡导以对话弥合分歧、以合作化解争端，坚决反对一切形式的霸权主义和强权政治，主张以团结精神和共赢思维应对复杂交织的安全挑战，营造公道正义、共建共享的安全格局。世界不需要“新冷战”，打着民主旗号挑动分裂对抗，本身就是对民主精神的践踏，不得人心，贻害无穷。中国实现现代化是世界和平力量的增长，是国际正义力量的壮大，无论发展到什么程度，中国永远不称霸、永远不搞扩张。

中国共产党将致力于推动文明交流互鉴，促进人类文明进步。当今世界不同国家、不同地区各具特色的现代化道路，植根于丰富多样、源远流长的文明传承。人类社会创造的各种文明，都闪烁着璀璨光芒，为各国现代化积蓄了厚重底蕴、赋予了鲜明特质，并跨越时空、超越国界，共同为人类社会现代化进程作出了重要贡献。中国式现代化作为人类文

明新形态，与全球其他文明相互借鉴，必将极大丰富世界文明百花园。

女士们、先生们、朋友们！

“一花独放不是春，百花齐放春满园。”在各国前途命运紧密相连的今天，不同文明包容共存、交流互鉴，在推动人类社会现代化进程、繁荣世界文明百花园中具有不可替代的作用。在此，我愿提出全球文明倡议。

——我们要共同倡导尊重世界文明多样性，坚持文明平等、互鉴、对话、包容，以文明交流超越文明隔阂、文明互鉴超越文明冲突、文明包容超越文明优越。——我们要共同倡导弘扬全人类共同价值，和平、发展、公平、正义、民主、自由是各国人民的共同追求，要以宽广胸怀理解不同

文明对价值内涵的认识，不将自己的价值观和模式强加于人，不搞意识形态对抗。

——我们要共同倡导重视文明传承和创新，充分挖掘各国历史文化的时代价值，推动各国优秀传统文化在现代化进程中实现创造性转化、创新性发展。

——我们要共同倡导加强国际人文交流合作，探讨构建全球文明对话合作网络，丰富交流内容，拓展合作渠道，促进各国人民相知相亲，共同推动人类文明发展进步。

我们愿同国际社会一道，努力开创世界各国人文交流、文化交融、民心相通新局面，让世界文明百花园姹紫嫣红、生机盎然。

中国共产党将致力于加强政党交流合作，携手共行天下大道。

我们愿同各国政党和政治组织深化交往，不断扩大理念契合点、利益汇合点，以建立新型政党关系助力构建新型国际关系，以夯实完善全球政党伙伴关系助力深化拓展全球伙伴关系。中国共产党愿继续同各国政党和政治组织一道，开展治党治国经验交流，携手同行现代化之路，在推动构建人类命运共同体的大道上阔步前进。

女士们、先生们、朋友们！

人类社会现代化的征程难免遭遇坎坷，但前途终归光明。中国共产党愿同各方一道努力，让各具特色的现代化事业汇聚成推动世界繁荣进步的时代洪流，在历史长河中滚滚向前、永续发展！

谢谢大家！○

来源：新华社

## 以高水平科技自立自强塑造高质量发展新优势

### ——论学习贯彻习近平主席在十四届全国人大一次会议闭幕会上的重要讲话精神

习近平主席在十四届全国人大一次会议闭幕会上的重要讲话中指出，在强国建设、民族复兴的新征程，我们要坚定不移推动

高质量发展。要完整、准确、全面贯彻新发展理念，加快构建新发展格局，深入实施科教兴国战略、人才强国战略、创新驱动发

展战略，着力提升科技自立自强能力，推动产业转型升级，推动城乡区域协调发展，推动经济社会发展绿色化、低碳化，推动经

济实现质的有效提升和量的合理增长，不断壮大我国经济实力、科技实力、综合国力。讲话进一步明确科技自立自强作为我国现代化建设的基础性、战略性支撑作用。

加快实现高水平科技自立自强，是推动高质量发展的必由之路。进入新发展阶段，我国经济社会发展和民生改善比过去任何时候都更加需要科学技术解决方案。科技自立自强为统筹发展和安全提供坚强有力的“筋骨”支撑，创新为高质量发展提供源源不断的内生动力。只有把科技发展建立在自立自强的牢固根基上，以高水平科技自立自强塑造高质量发展新优势，才能真正以创新发展理念引领高质量发展实践，实现更高层次的内涵型增长。

我们要坚决打赢关键核心技术攻坚战，为高质量发展奠定安全基础。当前，国际环境错综复杂，全球产业链供应链面临重塑，不稳定性不确定性明显增加，世界进入新的动荡变革期。只有把关键核心技术掌握在自己手中，才能从根本上保障国家经济安全、国防安全和其他安全。近年来，载人航天、嫦娥探月、天问访火、

人造太阳、北斗导航、万米海试等重大突破让我国在深空、深海、深蓝等领域牢牢占据科技制高点，铁基超导、量子信息、干细胞等重量级成果在国际舞台产生重要影响，显著提升我国发展的独立性、自主性、安全性。

我们要面向国家重大需求和产业发展，强化科技创新的高水平供给能力，为建设现代化经济体系注入强劲动能。近些年，科技重大专项有效实施，填补一批科技领域战略性空白，有力支撑港珠澳大桥、川藏铁路等一批重大工程建设顺利实施。高性能装备、智能机器人、增材制造、激光制造等技术有力推动“中国制造”迈向更高水平，5G移动通信技术率先实现规模化应用。放眼未来，我们要围绕产业链供应链关键环节、关键领域、关键产品，布局“补短板”和“建长板”并重的创新链，培育催生新兴产业的增长点，促进产业链和创新链融合发展，以高水平的创新供给激发多层次的消费需求，在更多领域培育产业发展新动能。

我们要满足人民对美好生活的向往，让更多更好的科技创新成果为增进民生福祉提供有力保

障。当前，我国社会事业发展面临许多需要解决的现实问题。比如，农业方面，部分种源依赖进口，农产品种植和加工技术相对落后，一些地区存在农业面源污染、耕地重金属污染问题。比如，社会方面，我国人口老龄化程度不断加深，人民对健康生活的要求不断提升，生物医药、医疗设备等领域亟待科技进步。这些正是加快实现高水平科技自立自强的着力点和方向。

新征程是充满光荣和梦想的远征。今天，我们比历史上任何时期都更接近、更有信心和能力实现中华民族伟大复兴的目标，同时也必须准备经受风高浪急甚至惊涛骇浪的重大考验。加快实现高水平科技自立自强，也需广大科技界增强使命感和责任感，付出更为艰巨、更为艰苦的努力。让我们更加紧密地团结在以习近平总书记为核心的党中央周围，坚定历史自信，增强历史主动，凝心聚力，攻坚克难，以高水平科技自立自强为高质量发展提供新优势，为实现中华民族伟大复兴作出新的更大贡献。○

来源：科技日报



# 2023中国自动化大会

## China Automation Congress

智联万物强实体 自强自控制未来

主办单位：中国自动化学会

承办单位：重庆邮电大学

中国自动化大会是由中国自动化学会主办的国内最高层次的自动化、信息与智能科学领域的大型综合性学术会议，2023中国自动化大会将于2023年11月在重庆召开，此次中国自动化大会由重庆邮电大学承办。

2023中国自动化大会将为全球自动化、信息与智能科学领域的专家学者和产业界的同仁提供展示创新成果、展望未来发展的高端学术平台，加强不同学科领域的交叉融合，引领自动化、信息与智能科学与技术的发展。

## 2023中国自动化大会

### 征文范围

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

### 论文投稿要求

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

### 长摘要投稿要求

1. 长摘要需包括研究背景和意义、主要研究工作、实验或仿真、结论以上所有内容。
2. 长摘要论文将被收录进论文集，但不进IEEE Xplore、EI、CNKI等检索，已发表的成果也可以投稿。
3. 长摘要长度不超过4页。
4. 长摘要论文注册费与普通论文相同。

### 征文领域(包括但不限于)

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

### 专题会议

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

### 论文出版

大会将出版CAC2023论文集(U盘版)。2013年以来的历届会议英文论文全部被IEEE Xplore收录，并被EI检索。经过专家评审，本届大会部分优秀论文将被推荐到《IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica》、《Digital Communications and Networks》、《自动化学报》、《智能科学与技术学报》和《重庆邮电大学学报<自然科学版>》等国内外SCI/EI收录权威期刊发表。

### 时间节点

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





# 2023 中国智能车大会暨 国家智能车发展论坛征文通知

2023年7月1-3日 | 中国 广州南沙

中国智能车大会暨国家智能车发展论坛 (National Intelligent Vehicle Development Forum) 是国家自然科学基金委员会信息科学部和中国自动化学会于 2015 年创办的品牌学术活动,旨在推动我国人工智能基础研究领域重要里程碑计划——国家自然科学基金委员会重大研究计划“视听觉信息的认知计算”,有力促进了我国智能车基础理论研究、成果原始创新和高技术开发,增强我国智能车自主研发技术水平和实际应用能力,促进智能车技术产业化应用,推动其在能源、交通等领域的深入应用和产业转型升级。

2023 中国智能车大会暨国家智能车发展论坛将为促进智能车基础理论研究、成果原始创新和高技术开发提供开放互融的交流平台,增强我国智能车自主研发技术水平和实际应用能力,促进智能车技术产业化应用,推动其在能源、交通等领域的深入应用和产业转型升级。

## 组织机构:

### 主办单位:

国家自然科学基金委员会信息科学部  
中国自动化学会

### 承办单位:

广州市南沙区人民政府  
香港科技大学(广州)  
西安交通大学

### 协办单位:

中国自动化学会网联智能系统专业委员会  
中国自动化学会智能车工作委员会  
中国自动化学会车辆控制与智能化专业委员会

## 征文范围 ( 包括但不限于 )

1. 先进驾驶辅助系统;
2. 车辆安全;
3. 车辆环境感知;
4. 环保驾驶和节能车辆;
5. 防撞技术;
6. 行人保护;
7. V2I/V2V 通信;
8. 车联网;
9. 辅助移动系统;
10. 图像、雷达、激光雷达信号处理;
11. 通信和感知一体化技术;
12. 信息融合;
13. 协同定位、感知和认知技术;
14. 车辆控制;
15. 远程信息处理;
16. 人为因素和人机交互;
17. 电动和混合动力技术;
18. 新型接口和显示器;
19. 智能车辆软件基础设施;
20. 其他相关研究领域。

## 投稿须知:

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

## 论文出版:

大会将制作 CAAIV2023 电子版论文集,本次英文论文将被 IEEEXplore 收录。本届大会的优秀论文将有机会被推荐到《IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica》、《自动化学报》、《模式识别与人工智能》、《信息与控制》、《控制工程》等权威杂志。

## 时间节点:

投稿开始时间: 2023 年 2 月 15 日  
征稿截止时间: 2023 年 5 月 1 日  
录用通知日期: 2023 年 6 月 1 日  
论文终稿日期: 2023 年 6 月 15 日





# 中国自动化学会

中国自动化学会( Chinese Association of Automation, 缩写CAA)于1961年成立,是我国最早成立的国家一级学术团体之一,是中国科学技术协会的组成部分,是发展我国自动化科技事业的重要社会力量。学会现有个人会员近9万人,团体会员单位300余个,专业委员会60个,工作委员会9个,30个省、自治区、直辖市设有地方学会组织,覆盖了我国自动化科学技术领域的各个层面。

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

## 学会品牌学术活动

- 中国自动化大会 ·中国认知计算与混合智能学术大会
- 国家智能车发展论坛 ·国家机器人发展论坛 ·国家智能制造论坛
- 青年菁英系列活动 ·智能自动化学科前沿讲习班 ·钱学森国际杰出科学奖系列讲座
- 中国控制会议 ·中国过程控制会议 ·青年学术年会

## 学会奖励奖项

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

## 学会主办期刊

- 中国自动化学会通讯 ·自动化学报 ·自动化学报(英文版)
- 信息与控制 ·机器人 ·模式识别与人工智能 ·电气传动
- 自动化博览 ·计算技术与自动化



官方微信



官方微博

地址:北京市海淀区中关村东路95号自动化大厦

网址:<http://www.caa.org.cn/>

电话:010-62522472

传真:010-62522248

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

邮编:100190