

中国自动化学会通讯

COMMUNICATIONS OF CAA

第 8 期

2023 年 08 月

第44卷 总第239期

主办：中国自动化学会

<http://www.caa.org.cn>

E-mail: caa@ia.ac.cn

京内资准字2020-L0052号

纪念屠善澄院士 百年诞辰



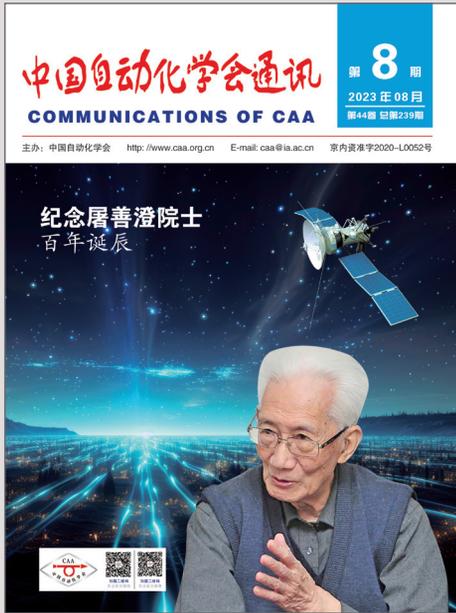
扫描二维码
关注官方微信



扫描二维码
关注官方微博



中国自动化学会通讯
Communications of CAA



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



关注官方微信



关注官方微博

主 编 | 郑南宁 CAA 理事长、中国工程院院士、
西安交通大学教授

副 主 编 | 王飞跃 CAA 监事长、中国科学院自动化
研究所研究员

杨孟飞 CAA 副理事长、中国科学院院士、
中国空间技术研究院研究员

陈俊龙 CAA 副理事长、欧洲科学院院士、
华南理工大学教授

编 委 | (按姓氏笔画排列)

丁进良 王 飞 王占山 王兆魁 王庆林
王 坛 邓 方 石红芳 付 俊 吕金虎
乔 非 尹 峰 刘成林 孙长生 孙长银
孙彦广 孙富春 阳春华 李乐飞 辛景民
张 楠 张 俊 陈积明 易建强 周 杰
赵千川 赵延龙 胡昌华 钟麦英 侯增广
姜 斌 祝 峰 高会军 黄 华 董海荣
韩建达 谢海江 解永春 戴琼海

刊名题字 | 宋 健

地 址 | 北京市海淀区中关村东路 95 号

邮 编 | 100190

电 话 | (010) 8254 4542

传 真 | (010) 6252 2248

E-mail: caa@ia.ac.cn

http://www.caa.org.cn

印刷日期 | 2023 年 8 月 31 日

发行对象 | 中国自动化学会会员及自动化领域科技工作者

本刊声明

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

主编的话



郑南军

2023年8月12日是我国自动控制技术专家、中国工程院院士、我国人造卫星工程开拓者之一、“863”计划航天领域专家委员会首席科学家、中国自动化学会创建人之一屠善澄诞辰一百周年纪念日，在这个特殊的时节，《中国自动化学会通讯》编辑部深切缅怀屠善澄院士。

1957年，屠善澄院士最早参与中国自动化学会的筹建，时任筹委会秘书，为学会的组建倾注了大量的精力与心血。在中国自动化学会第一次全国代表大会上，被推选为第一届学会理事会常务理事，并担任秘书长一职，他团结众多自动化领域的专家和科技工作者积极开展学术交流，为国家重要科技政策提供建议，建立地方性学会，普及自动化科学技术知识，为推动学会的发展做出了不懈的努力。

屠善澄院士还担负了学会与国际自动控制联合会（IFAC）早期的联络事务。在他和学会理事会的积极推动下，学会不仅成为代表中国的IFAC最早的会员国组织，更是促进我国自动化科学技术的交流与发展、提升中国国际学术影响力的重要平台。

最好的纪念是传承和弘扬，在屠善澄院士等老一辈科技工作者的影响之下，中国自动化学会也将以科学家精神引领时代风尚，紧密团结广大科技工作者，奋进新的长征，为建设世界科技强国、推进国家现代化贡献智慧力量。

本期专刊聚焦“纪念屠善澄院士百年诞辰”，为大家分享了“口述历史”栏目对屠善澄院士的访谈、中国自动化学会监事长王飞跃在纪念屠善澄先生诞辰100周年上的致辞、王迎春撰写的《怀念我的导师屠善澄先生》以及北京控制工程研究所胡军分享的《自适应预测制导方法与应用》报告。

《中国自动化学会通讯》编辑部再次向屠善澄院士表示崇高的敬意和深切的怀念！



专题 / Column

- 004 口述历史系列访谈
——我国人造卫星工程开拓者之一，中国工程院
院士屠善澄
- 007 纪念屠善澄先生诞辰 100 周年 / 王飞跃
- 008 怀念我的导师屠善澄先生 / 王迎春
- 010 自适应预测制导方法与应用 / 胡军

观点 / Viewpoint

- 018 周济院士：以智能制造和绿色能源为抓手 加快
推进新型工业化
- 020 乔红院士：类脑智能机器人研发前景广阔

科普园地 / Science Park

- 023 社会尺度挑战下的控制：2030 路线图（四）
/ Anuradha M. Annaswamy、Karl H. Johansson、
George J. Pappas
- 030 社会尺度挑战下的控制：2030 路线图（五）
/ Anuradha M. Annaswamy、Karl H. Johansson、
George J. Pappas

学术前沿 / Academic Frontier

- 037 建模与仿真服务化研究综述 / 张淼 许凯 彭勇
尹全军





P072



P073

056 基于微分同胚映射动态系统的接触任务运动规划与控制 / 杨尚尚 谢啸 高霄 段宝阁 肖晓晖

076 中国自动化学会“科创中国”智能产业科技服务团走进雄安新区

学会动态 / Activities

形势通报 / Voice

066 首届全国青少年劳动技能与智能设计大赛决赛在沈开幕

077 新产业标准化领航工程实施方案（2023—2035年）

068 CAA“企·话”沙龙—未来网络在沈阳成功召开

089 关于进一步加强论坛活动规范管理的通知

072 中国自动化学会十一届三十八次秘书长工作会议成功召开

党建强会 / Party Building

073 营运工程师学会一行来访中国自动化学会

091 加强基础研究 实现高水平科技自立自强

074 “新兴技术潮流驱动科技期刊产业变革”小型学术沙龙在京召开

093 习近平总书记论创新思维



P074



P076

口述历史系列访谈

——我国人造卫星工程开拓者之一，中国工程院院士屠善澄

编者按

2015年，中国自动化学会推出口述历史系列访谈栏目，在时任中国自动化学会副理事长兼秘书长王飞跃的带领下，秘书处拜访了屠善澄先生。

屠善澄，自动控制专家、国际宇航科学院院士，我国人造卫星工程开拓者之一，“863”计划航天领域专家委员会首席科学家，载人飞船的倡导者之一。他把自己的大半生都奉献给了中国人造地球卫星和载人航天工程，为我国航天事业的发展做出了卓越贡献。



图1 屠善澄院士

屠善澄院士是中国自动化学会创建人之一，连续担任学会两届理事会秘书长、常务理事。此外，他还担负了学会早期国际联络事务，为加强学会对外交流，促进我国自动化科学技术的发展做出了巨大贡献。

作为学会工作的重要参与者和学会发展的见证者，在采访中，除了早年求学和投身航天事业的经历外，年逾九旬的屠老更是饶

有兴致地回忆了他当年参与学会筹建等工作的情形，并分享了宝贵的学会工作经验，使我们获益良多。

一、海外求学，报效祖国

屠善澄出生在浙江嘉兴，和大部分浙江走出来的老院士一样，他的童年和少年也经历了抗战、沦陷和逃难，深深打上了时代的烙印。屠善澄于1945年毕业于上海大同大学电机工程系，为了不断深造，他选择到交通大学电机工程系（现西安交通大学电气工程学院）当助教，工作的同时弥补大学阶段所学知识的不足。1948年2月，屠善澄赴美国康奈尔大学电气工程系学习，并于1951年和1953年分别获得硕士、博士学位，期间还担任了该大学电气工程系讲师，毕业后还任助理教授三年。1956年，刚过

而立之年的屠善澄带着妻儿，满怀报国的雄心壮志，回到阔别8年的祖国，并立即投身于祖国的科学事业。

回国后，正值国家制定12年科学发展规划。原本打算把教学当成一生事业的屠善澄，面对几个大学的邀请，毅然选择了正处于筹备阶段的中科院自动化研究所，并参与了生产过程自动化和计算技术专业筹备组的工作。当时，我国计算机水平很低，无法满足实验项目的需要，屠老带领科技人员对国产电子管及极化继电器等元器件做了大量测试、筛选等工作，在此基础上研制出DMZ-2，DMZ-4电子模拟计算机，满足了我国当时电子模拟计算机的需求，为后来的多种电子模拟计算机包括J331巨型机的研制奠定了技术基础。

1958年，继前苏联发射了



图2 屠善澄院士语重心长寄语后人

第一颗人造卫星之后，毛泽东主席提出“我们也要搞自己的人造卫星”。当时，全国科学技术学会联合会（后和全国科学普及协会合并成全国科学技术协会）组织各学会宣传人造卫星，屠老代表中国自动化学会参加全国科联召开的各学会负责人会议，会上凭借他平时知识的积累，阐释了他所理解的人造卫星，从此，屠老被调任北京控制工程研究所，开始了对人造地球卫星控制系统的研究。35岁的屠善澄自学卫星控制技术，并在调查研究的基础上，编写了《关于人造地球卫星的控制问题》，提出了我国人造地球卫星的控制采用自旋稳定的方式起步，配合喷气或磁控作姿态调整，为后来我国发射的人造地球卫星控制系统提供了参考。抗美援朝时期，屠老还临危受命，参与了导弹的研制工作。

1965年，“651”计划发布，初步确立了卫星方案；1970年，我国第一颗人造卫星“东方红一号”发射成功。作为我国的首颗

人造卫星，“东方红一号”要求简单、可靠，采取的是自旋稳定的模式。而之后的“东方红二号”是一颗长寿命应用卫星，控制技术难度增大。屠老根据多年的研究成果和丰富的经验，提出了姿态控制方案，并和其他同事一起在解决卫星关键部件等问题上，成功研制出有中国特色的空间润滑系统，奠定了我国在空间润滑方面的研究基础。此外，屠老在参加1984年挽救两颗通信卫星中也做出了重要的贡献。在已发射的五颗通信卫星中，控制系统均未出现故障，因而当《试验通信卫星及微波测控系统》获国家级科技进步特等奖时，屠老成为排名第五的得奖者，也是控制系统唯一的获奖者。但每每谈及这些成就时，屠老总是谦虚地表示“航天是集体的智慧，我只是一个见证者和参与者”。

1986年，国家选取了生物技术、航天技术、自动化技术等7个领域的15个主题项目，作为我国今后发展高技术的重点，即我们熟知的“863计划”。第二年，屠老以首席科学家身份参加863计划航天领域专家组，主持航天领域的研究论证工作，和专家们共同勾勒出我国航天事业的总体蓝图，提出我国发展载人航天“三步走”，亲自起草了综合报告

中的《国外载人航天的发展道路和趋向》和《我国航天事业发展的新阶段》两章。1991年，屠老在综合报告的基础上发表了《关于发展我国载人航天的意义与作用》一文，提出在处理发展载人航天与应用卫星的关系时，两者应密切结合、相互补充的观点，同时指出载人与无人自动化相结合开发利用空间是今后的发展方向，为载人航天的技术发展、经济可行性论证和最终确立载人飞船项目提供了极其重要的依据。“863计划”的发起人之一杨嘉墀院士曾这样评价：“最后定下来的这个飞船方案，当然不是他（屠善澄）一个人定的，但是他作为专家委员会的首席科学家，最后拍板，功不可没”。

二、诲人不倦，育才树人

屠老长期担任中国科学技术大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学兼职教授，是国内首批博士生导师。在教学中数理推导严谨，表述精炼透彻，要求学生严格，深得学生的爱戴。特别是担任中国科技大学自动化系运动物体自动控制专业兼职教授时，他仍在百忙中亲自编写我国有关飞行体自动控制最早的教材之一——《飞行体自动控制》讲义。

提及他的学生，屠老非常自豪。“年轻人做得好时我就更高兴，青出于蓝而胜于蓝才是历史

发展的规律。”在他培养的本科生、研究生和博士生中，很多已经是自动化科技领域的工作骨干，或某一方面的学术带头人，肩负着我国航天事业的艰巨重任。直至今日，仍有不少学生经常拜访屠老，汇报工作进展，探讨科研问题。工作，依然是这位 92 岁高龄的老科学家的最大乐趣。

三、学会工作，意义深远

1957 年，屠老最早参与中国自动化学会的筹建，时任筹委会的秘书，他认真贯彻筹委会精神，为推动中国自动化学会成为较早组建的全国性学会倾注了大量的精力与心血。1961 年 11 月 27 日，在天津举行的中国自动化学会第一次全国代表大会正式宣告中国自动化学会的成立，会上屠老被推选为第一届学会理事会常务理事，并担任秘书长一职，直至 1980 年。在学会理事会的领导

下，他与常务理事共同协作，团结众多自动化领域的专家和科技工作者；积极开展学术交流，为国家重要科技政策提供建议；建立地方性学会，普及自动化科学技术知识，为推动学会的发展做出了不懈的努力。

屠老还担负了中国自动化学会与国际自动控制联合会（IFAC）早期的联络事务。采访中，屠老多次提到他代表学会出席 IFAC 筹委会、第一、第二届世界大会的情形。在他和学会理事会的积极推动下，中国自动化学会不仅成为代表中国的 IFAC 最早的会员国组织，更是促进我国自动化科学技术的交流与发展、提升中国国际学术影响力的重要平台。

此外，屠老还担任过学会控制理论专业委员会第一、二届副主任，第三届主任，为促进我国自动控制理论的发展发挥了积极的作用。

作为学会工作的重要参与者和学会发展的见证者，屠老在采访中反复谈及的话题就是“公平、公正”。他强调作为面向和服务全国自动化领域科技工作者的科技社团，公平公正是学会开展一切工作的基石，也是学会蓬勃发展的根本。当得知科技社团在建设创新型国家的进程中被赋予了更多更重要的使命时，屠老很是欣喜，但同时，他也对学会工作提出了更高的要求。他深切希望学会能抓住机遇，在加强自身组织建设、提升服务能力的同时，充分发挥人才资源和智力优势，进一步团结带领自动化领域广大科技工作者在促进科技创新和经济建设上发挥更大的作用。

编后语：

飞天是中华民族几千年的梦想，屠老不仅见证了中国飞天梦一步步走向现实，更为我国载人航天事业奉献了毕生的心血。屠老一直认为自己没啥特点，是个很平凡的人。借用他曾经在访谈中的一句话：在他看来，人生唯一的抱负是为人类、为国家做些好事情，并且自己做的每一件事情都在道义上讲得通。从屠老一步一步坚实的脚印中，我们看到了一位朴实无华却心系祖国发展的老科学家一生在抱负追求上的“恒力”与科研攻关上的“张力”，也渐渐读懂了他那平凡而又不平凡的人生。○



图 3 屠善澄院士接受中国自动化学会采访

纪念屠善澄先生诞辰 100 周年

文 / 中国自动化学会监事长 王飞跃教授

今天，我们怀着崇敬的心情相聚在一起，纪念屠善澄先生诞辰 100 周年，回顾他为我国航天事业和自动化事业作出的重要贡献，学习他高尚的品格风范。在此，我代表中国自动化学会向屠善澄先生表示崇高的敬意和深切的怀念。

屠善澄先生是我国自动控制领域的知名专家、国际宇航科学院院士，我国人造卫星工程开拓者之一，“863”计划航天领域专家委员会首席科学家，载人飞船的倡导者之一。他把自己的大半生都奉献给了中国人造地球卫星和载人航天工程，为我国航天事业的发展做出了卓越贡献。

屠善澄先生更是中国自动化学会的缔造者之一，早在 1957 年，时任筹委会秘书的屠善澄先生，认真贯彻筹委会精神，最早开始参与中国自动化学会的筹建工作，为推动中国自动化学会成为较早组建的全国性学会倾注了大量的精力与心血。在中国自动化学会正式成立后，屠善澄先生担任第一届学会秘书长，直

至 1980 年。在此期间，屠先生与常务理事共同协作，团结众多自动化领域的专家和科技工作者；积极开展学术交流，为国家重要科技政策提供建议；建立地方性学会，普及自动化科学技术知识，为推动学会的发展做出了不懈的努力。他还担负了中国自动化学会与国际自动控制联合会（IFAC）早期的联络事务，代表学会出席 IFAC 筹委会、第一、第二届世界大会。在屠先生和学会理事会的积极推动下，中国自动化学会不仅成为代表中国的 IFAC 最早的会员国组织，更是促进我国自动化科学技术的交流与发展、提升中国国际学术影响力的重要平台。

2015 年，中国自动化学会推出口述历史系列访谈栏目，当时我任中国自动化学会副理事长兼秘书长，有幸拜访了屠先生，访谈中屠先生对学会多年来取得的成就表示充分的肯定和高度的赞扬，也对学会工作提出了更高的要求。

令我意外惊喜的是，这次访

问发现屠先生正是我上世纪八十年代留美时同学加好友屠安博士的父亲。当时我恰好在美 NASA 的一个专注国际空间站的智能机器人中心工作，屠安曾讲过我的研究与其父母的工作很接近，没想到从自动化所、自动化学会、IFAC 国际交流，我们有许多密切的关联，也让我有了一个与众不同的角度去感受屠先生的实干精神与爱国情怀。

最好的纪念是传承和弘扬，特别是当前的国际形势下，屠善澄先生作为中国科技界的一面旗帜，终其一生都在践行以“爱国、创新、求实、奉献、协同、育人”为核心的科学家精神，是党和国家科技事业努力奋斗、建功立业的典范。在新时代，我们必须进一步弘扬科学精神、科学思想、科学方法、科学知识，以这种精神力量焕发时代的感召力和引领力。中国自动化学会也将以科学家精神引领时代风尚，紧密团结广大科技工作者，奋进新的长征，为建设世界科技强国、推进国家现代化贡献智慧力量。○

怀念我的导师屠善澄先生

文 / 北京控制工程研究所 王迎春

今年是我的导师屠善澄先生诞辰 100 周年，他离开我们已经 6 年了。时间一晃而过，25 年前我踏上求学之路到与他忘年交往的场景，尚历历在目。他的科学家精神、知识分子品格，以及谆谆教诲，使我无法忘怀、终身受用。回忆闸门打开，几个片段值得记录下来。

1998 年，我来北京报考 502 所的博士研究生，实事求是地说，当时考得一塌糊涂。在是否录取我的问题上，老师们有分歧。后来我才知道是屠先生挺身而出，力排众议：“这个学生，我收！因为在他身上，我看到了敢闯敢干、大胆表达的优点，一定能培养出来！”。就这样，我成为了屠先生和吴宏鑫老师联合指导的博士生。

刚开始，我多少有些害怕屠先生。一是因为我知道他是我国自动化界的权威，享有很高的国际声誉；二是我感觉自己给他的第一印象不是很好，并且当时他年事已高，也许不会亲自指导我。可是事实证明我错了，从制定培养计划到选择学习课程、课题开题，再到撰写论文，各个环

节，他都亲自指导并给出意见。自然而然地，我们的师生关系，越来越亲近。从那时起一直到我工作后，经常能够得到他的热情鼓励和悉心指点。

根据 502 所的研究生教学计划，每两周都要举行一次研究生的讨论会，每个学生都要发言，汇报自己近期的学习体会和研究心得。每次开会，吴老师主持，杨嘉骥先生和屠先生都会到场指导。每当我汇报自己的工作时，屠先生总是特别认真，经常对我不成熟的想法提出中肯的批评意见和改进措施，我从中受益匪浅。今天想起这些事情不能不佩服他的长者风范。

我博士论文的课题方向是铝电解过程控制，目的是要在实际生产过程中实现节能降耗，具有一定的挑战性。课题研究的瓶颈阶段，屠先生在听取现场情况汇报后，一针见血地指出：“这实质是能量守恒问题！应遵守科学定律，大胆创新，将 502 所自己提出的航天控制理论转化应用到铝电解的生产过程控制中，实现航天控制技术的推广落地。”这个

思路让我豁然开朗！在老师们的指导、参与和鼓励下，我这个并没有多少经验的博士生，另辟蹊径，彻底解决了上述问题。事实再次证明屠先生的主张是完全正确的。

在博士论文的撰写过程中，屠先生一再要求“理论推导要严谨应用验证要真实，用数据说话、有一说一、实事求是。”论文的每一章节，他都认真过目，提出修改意见。最终，我顺利通过了答辩，并被评选为航天科技集团公司优秀博士毕业生。

在读博期间，我的每一个微小突破和进步，都与屠先生的关心指导和教诲密不可分。能够不断向这样一位大师请教，是我人生中一大幸事。

博士研究生毕业后，我留在康拓公司工作。在参加工作的头几年，我每年都会去白石桥办公室找他聊天，其实就是向他请教。他在美国攻读的是电力专业，得知我们做电力系统安全保护产品，他全面、详实地讲了美国大停电的历史、美国电网的安全技术，对我的工作起到很多点拨作用。

后来我当选为康拓工控事业部的经理，带领团队一起工作。他第一时间用当时很时髦的“小灵通”给我打来电话，叮嘱到：王迎春同志（他喜欢这样称呼人），在管理上，一定要严格，宁肯现在得罪人、被人骂，也不要将来被人赶下台、再挨骂。

屠先生晚年，每逢中秋节或教师节，吴忠师兄、王颖和我，都会去他家看望先生及师母。每次我们都相谈甚欢，聊工作道生活，客厅里总是充满欢声笑语。记得有一次，我怕打扰他休

息，准备早点离开，就频频看表。他直接“批评”我“看表是不礼貌的表现”，并特意留我们在家吃饭。

屠先生常说，个人的命运要始终和国家的命运紧密相连，1956年回国后，他就把自己的一切和国家的发展联系起来，为中国航天事业的发展做出了自己的贡献。他家里有一幅文化学者王元化先生的题字意思是人要淡泊名利。问到出处，原来王元化先生是师母的表亲，文革中历经磨难，后期跑北京落实政策时，就

住在他家里。屠先生94年丰富的人生阅历，就如这幅字写的：对工作始终是科学严谨，实事求是，淡泊名利，不唯上不唯官。真正保持了科学家的初心！

今天问问自己，屠先生的高深学问我能学到几分？自知才疏学浅不敢乱比先辈，但是内心无限向往，只愿自己的辛勤耕耘能够告慰先生的在天之灵。○

王迎春

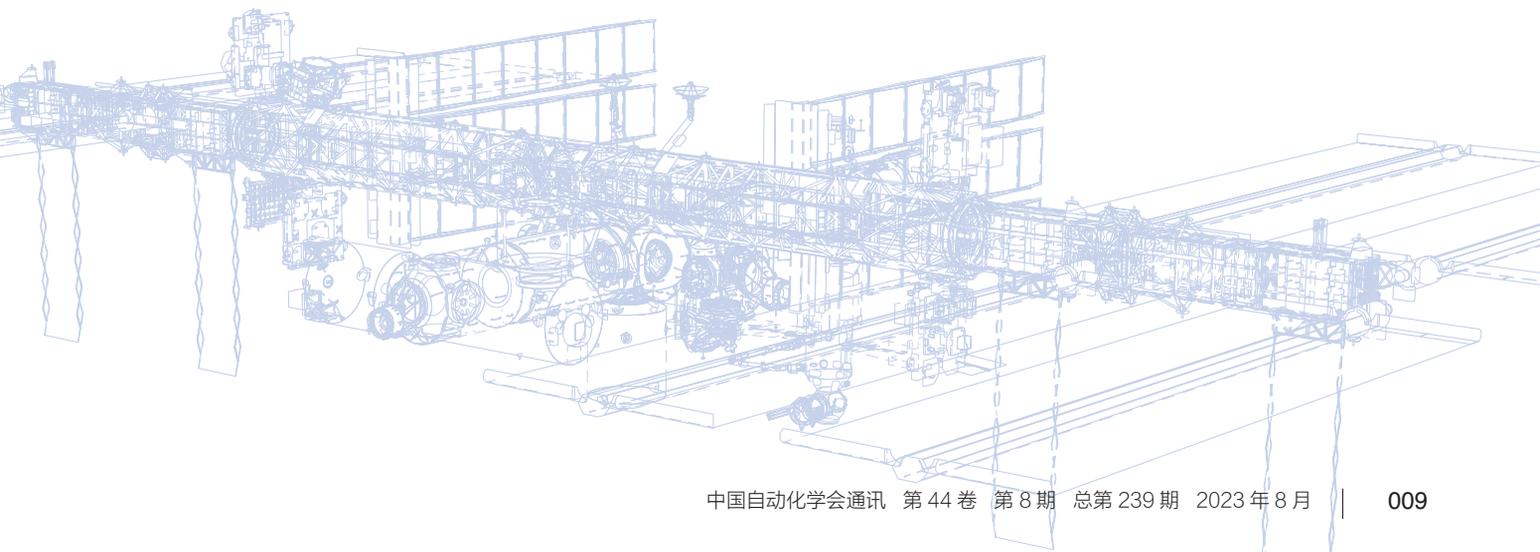
写于北京航天城

2023年8月10日晚

征 稿 通 知

2023 国家工业软件大会征稿延期至 9 月 10 日！敬候您的来稿！

2023 国家工业软件大会将于 2023 年 10 月 27-29 日在浙江湖州举办，大会以“工业软件·智造未来”为主题，着重总结交流研发设计类、生产制造类及经营管理类等三类工业软件及其核心算法与数学模型，进一步促进研究开发和推广应用，提高工业软件的核心竞争力，为工业软件的发展和应用提供更多的思路和启示。应广大科技工作者的强烈要求，2023 国家工业软件大会征稿延期至 9 月 10 日，征稿火热进行中，没来得及投稿的小伙伴们抓紧时间投稿啦！详情请查看：<http://www.caa.org.cn/article/192/4028.html>



自适应预测制导方法与应用

文 / 北京控制工程研究所 胡军

一、引言

1986年，作者跟随屠善澄先生踏入了硕士研究生阶段，当时，有幸成为北京控制工程研究所自动控制专业自适应控制方向的第二位研究生和航空航天部所属院所所在自适应控制领域的第二位学子。在此期间，得以受到吴宏鑫老师的亲自指导，作者才能取得后续的学术成果。

我的硕士论文研究工作专注于探究造纸过程水分和定量的控制问题。值得指出的是，造纸控制作为自校正调节器的发源地，是一个典型的大时延且频繁受扰的系统。在完成硕士课题过程中，作者初步领略了工业控制系统的运作方式以及其中所面临的挑战。

1989年到1990年，在北京控制工程研究所老三室工作期间，作者承接了吴宏鑫研究员与航空航天部五院511所签署的航天器瞬变热流多变量控制课题。这是一个典型的多变量、强耦合、高

动态且要求实现强跟踪控制的系统，物理上属于分布式系统且无法用数学模型完全描述。从物理角度分析从加热功率到温度变化，从温度变化到热流响应，考虑结构分布的耦合特性，作者与吴老师抽象出用多变量耦合二阶特征模型描述控制系统。为解决耦合控制问题，采用控制矩阵非对角元强行滞后一步的在线求解方法，引入加一阶惯性环节以实现广义对象柔化输出与柔化广义对象，同时提出逻辑积分输出的动态限制以应对快速跟踪与稳定需求。在实际真空环境下，控制结果超越了美国同类实验的精度，相关实验与曲线被记载在卫星工程丛中。1996年，作者的论文《航天器瞬变热流全系数自适应控制》因其贡献获得中国控制关肇直奖，这是北京控制工程研究所唯一一次获奖，这一系列工作不仅在学术界产生重要影响，也为作者个人职业生涯打下了坚实基础。

在老三室工作期间，作者还负责了北京航空航天大学505风

洞实验室的综合温度、流量和压力控制系统的研制。另外，也构建了一个完整的控制系统，包括硬件和软件部分，设计并焊接了一块电路板，还进行了测量系统的调试工作。

1993年，获得博士学位的时机恰逢中国载人航天（921）工程立项。在这个关键时刻，工程急需年轻人才参与技术攻关，特别是在载人飞船制导导航与控制分系统领域。于是，作者加入到了载人航天团队。

在参与载人航天工程任务的过程中，作者始终铭记自己是自适应控制领域毕业的研究生，将自适应控制用于航天器飞行任务，是屠先生、吴老师和作者的初心使命。虽然实现过程坎坷曲折，但初衷未曾忘却。

本文介绍源于工程任务并应用于工程任务而创立了自适应预测制导方法，这也是我国在航天控制领域第一次拥有完全原创的控制方法，致敬我的导师屠善澄先生。

本文根据2023.8.11北京控制工程研究所召开的屠善澄院士学术思想研讨会所做学术报告PPT改写而成

二、自适应预测制导方法

2.1 概述

航天器的制导方法主要分为跟踪标称轨迹的方法与预测校正制导的方法。其中,跟踪标称轨迹的制导方法建立在参数保持不变和小偏差摄动的假设基础上。这种方法的特点是实时计算量小、简单可靠,但设计师的离线参数选择和数学仿真的迭代设计工作量大。

标称轨迹制导方法在航天器制导技术发展初期得到了广泛应用。二十世纪六十年代至九十年代,美国、俄罗斯前苏联等国的设计中普遍采用了这种方法。在中国的载人飞船发展中,从SZ-1到SZ-11阶段,也采用了标称轨迹制导方法,为了克服气动参数相对标称参数较大的偏离或变化,提出基于气动参数估计的自适应纵向和自适应横向制导方法,以满足飞行任务的技术指标。

标称轨迹制导方法最大的问题是对初始条件的大偏差、动力学参数较大的变化适应性差,甚至不稳定。飞行任务中需要满足使用条件才能保证标称轨迹制导方法的可靠应用。2010年以来,伴随更复杂更高精度航天任务的需求以及计算工具的进步,各航天大国均在新的航天计划中引入预测制导方法。

预测校正制导方法的特点在

于每个制导周期内,计算机在线求解当前状态到终端状态的动力学方程,考虑终端状态误差、运动约束和控制约束,从而获得制导修正量。这种方法具有离线参数选择和数学仿真工作量大、适应大偏差和动力学参数变化能力强、制导精度高等优点。国外研究与应用方面,Apollo项目研究了局部近似解析校正方法但未得到应用,全数值预测和线性搜索校正方法影响较大但也未实际应用。局部数值预测校正正在Orion飞船的EFT-1地球轨道探索试验飞行任务和Artemis无人绕月任务中得到应用。国内研究与应用方面,1994至1998年,以型号任务为背景开展的研究形成基本的全数值自适应预测制导方法,2011—2014在型号研制过程中完善了全数值自适应预测制导方法,其应用早于国外,已有CE-5T、FS-1、CE-5、SZ-12/13/14/15等七次任务,成功应用了自适应预测制导方法。

自适应预测制导方法包括:自适应全数值轨迹预测、时变动态控制增益变换、基于一阶特征模型的自适应控制、约束预判与制导处理以及自适应预测双环制导等。

2.2 自适应全数值轨迹预测

自适应全数值轨迹预测解决的是轨迹预测的精度问题。

预测制导的先决条件是获得

从当前状态至终端的预测轨迹。基本原理是:从导航系统获取当前运动状态,按照当前至终端的制导控制剖面,解算动力学方程,得到未来的运动轨迹和终端状态。由于真实世界的动力学参数与预测所用的动力学参数不一致,甚至存在有较大偏差,动力学解算得到的预测轨迹与真实轨迹存在偏差。理论分析与数学仿真结果均表明依标称参数动力学得到的制导控制指令将导致终端状态偏离目标。在线实时估计动力学参数并自适应补偿预测方程中的动力学参数,是解决预测轨迹精度的有效方法。

物体的宏观运动规律服从牛顿第二定律,惯性坐标系下表达为 $\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \vec{g} + \vec{a}$, \vec{r} 是位置矢量; \vec{g} 是引力矢量,是位置矢量 \vec{r} 的函数; \vec{a} 是引力之外所有外力产生的加速度总和矢量,称之为比力,在复杂环境或复杂控制方式下, \vec{a} 与主动控制力、位置矢量 \vec{r} 、速度矢量 $\frac{d\vec{r}}{dt}$ 、环境参数(如大气密度)、以及飞行器质量、表面特征参数(如参考面积、参考长度)等紧密耦合。根据牛顿第二定律,给定初始运动状态条件下,持续实时测量 \vec{a} ,就可以持续解算出位置矢量 \vec{r} 和速度矢量 $\frac{d\vec{r}}{dt}$,这就是惯性导航原理;同样,给定初始运动状态条件下,按照当前至终端状

态规划的制导指令或主动控制力、按照物体与环境相互作用的动力学方程持续计算当前至终端的比力 \bar{a} ，就可以计算并预测未来的运动状态，这就是运动轨迹预测原理。当前时刻依据模型计算的比力表示为 \bar{a}_{model} ，实测比力表示为 \bar{a}_{real} ，比较 \bar{a}_{model} 与 \bar{a}_{real} 的各分量，得到物体与环境在各维度上的整体不确定性估计。

航天动力学的特点是模型结构已知，但实际对象的气动参数、参考面积、质量以及环境参数等相对设计使用的标称状态存在不确定性或变化，理论分析和实际仿真均表明：上述不确定性或变化会显著影响预测制导的精度。

例 1 旋成体航天器再入动力学

研究发现：所有模型参数，包括大气密度、阻力系数、升力系数、参考面积、质量（ ρ 、 C_D 、 C_L 、 S_{ref} 、 m ）等，都以乘除方式集中于气动阻力加速度和气动升力加速度的表达式中，

$$a_D = \frac{\rho C_D S_{ref}}{2m} v^2, \quad a_L = \frac{\rho C_L S_{ref}}{2m} v^2 = \frac{C_L}{C_D} \cdot \frac{\rho C_D S_{ref}}{2m} v^2$$

令 $B^+ = \frac{\rho C_D S_{ref}}{2m}$ ，称之为气动综合因子， $L/D = \frac{C_L}{C_D}$ 为升阻比，则

$$a_D = B^+ \cdot v^2, \quad a_L = \frac{C_L}{C_D} \cdot B^+ \cdot v^2 = (L/D) \cdot B^+ \cdot v^2$$

由于 v 来自导航计算，则所有模型参数的不确定性都反映在升阻比 L/D 和气动综合因子 B^+ 上。利用导航结果和加速度计实时测量，推导求得 a_D 、 a_L ，进而求得 L/D 和 B^+ ，取当前状态下标称的 $(L/D)_0$ 和 $(C_D)_0$ ，将大气密度、参考面积、质量等取当前状态下的标称值，解算得到当前运动状态下的标称 $(B^+)_0$ 。令

$$K_{L/D} = \frac{(L/D)}{(L/D)_0}, \quad K_{B^+} = \frac{(B^+)}{(B^+)_0}$$

由于姿态运动的耦合因素，两个比值受姿态运动的扰动，需通过低通滤波得到估计值，安排在短周期的导航系统中处理。最后得到

$$(L/D) = K_{L/D} \cdot (L/D)_0, \quad (B^+) = K_{B^+} \cdot (B^+)_0$$

例 2 面对称大升力体动力学 - 航天飞机、高超声速飞行器，一般升力体

$$a_{x1} = \frac{\rho v^2 C_A S_{ref}}{2m} = \frac{\rho C_A S_{ref}}{2m} v^2 = B_A^+ \cdot v^2$$

$$a_{y1} = \frac{\rho v^2 C_N S_{ref}}{2m} = \frac{C_N}{C_A} \cdot \frac{\rho C_A S_{ref}}{2m} v^2 = \frac{C_N}{C_A} \cdot B_A^+ \cdot v^2$$

$$a_{z1} = \frac{\rho v^2 C_Z S_{ref}}{2m} = \frac{C_Z}{C_A} \cdot \frac{\rho C_A S_{ref}}{2m} v^2 = \frac{C_Z}{C_A} \cdot B_A^+ \cdot v^2$$

由于 a_{x1} 、 a_{y1} 、 a_{z1} 可测， v^2 可计算，只要实时估计 B_A^+ 、 $\frac{C_N}{C_A}$ 、 $\frac{C_Z}{C_A}$ ，可以就把握了预测方程参数的准确性，考虑到 a_{x1} 、 a_{y1} 、 a_{z1} 的测量，受姿态的短周期运动的影响，在 B_A^+ 、 $\frac{C_N}{C_A}$ 、 $\frac{C_Z}{C_A}$ 的物理估计基础上，进行滤波估计。

例 3 月球软着陆

由于没有大气等其他扰动，用理论计算于实测之比直接估计 $a = Fc/m$ 的不确定性。

由上述例子看出，不同的例子，有不同的处理方法，由于位置动力学是三维的，估计的参数最多 3 个。上述根据模型计算和实测数据估计动力学参数的方法，可以显著提高轨迹预测的精度，称之为自适应全数值轨迹预测方法。

2.3 时变动态控制增益变换

预测制导的基本问题，是根据预测的终端偏差结果（预测偏差）求制导控制量。为此，就必须研究制导控制量是如何影响终端的偏差结果（预测偏差），也就是说要研究预测制导控制量对终端偏差的影响机理。由于预测制导给出的是从当前时刻到终端时刻的制导控制量，发现如下看似浅显但内涵深刻的规律：

预测制导控制量施加得越早，对终端偏差的影响越大；

预测制导控制量施加得越晚，对终端偏差的影响

越小。

为了解决预测制导问题，需要对这一规律进行量化描述。

以载人飞船返回再入为例。预测制导的思想是：根据轨迹预测得到的终端偏差产生制导指令，指令施加后根据最新得到的飞行状态和当前至终端的制导指令再次进行轨迹预测，得到终端偏差，产生新的制导指令，循环反复。

预测制导控制量对终端偏差的影响，除了与制导控制量大小和施加时刻有关外，还与当时的飞行状态、大气环境与气动参数等密切相关，一般性地研究预测制导控制量对终端偏差的影响是困难且办不到的，转而研究标称飞行状态下制导控制量对终端偏差的影响。这里，标称飞行状态指运动状态、动力学与环境参数都是标称的。

在标称飞行状态下，在标称制导起始时刻，施加幅值为 a 的制导控制量直至达到制导终止条件，通过数学仿真计算终端偏差；

在标称飞行状态下，在标称制导起始时刻 $+\Delta t$ ，施加幅值为 a 的制导控制量直至达到制导终止条件，通过数学仿真计算终端偏差；

在标称飞行状态下，在标称制导起始时刻 $+2\Delta t$ ，施加幅值为 a 的制导控制量直至达到制导终止条件，通过数学仿真计算终端偏差；

重复上述步骤，直至标称制导起始时刻 $+N\Delta t \geq$ 标称制导终止时刻。

在上述步骤中，分别计算终端偏差 $/a$ ，得到时变动态控制增益曲线，如图 1。

标称时变动态控制增益变换方法的思想是将制导控制增量和预测偏差的关系，看成一个时变动态系统的输入与输出，这样就将制导问题转化为控制问题。将上述得到的时变动态控制增益的倒数作为变换该函数到输入输出之间，则变换后的系统：标称情况，变换后的动态增益为 1；非标

称情况，变换后的动态增益不为 1，但相对变换前，动态增益的变化大为减小，这样就为所有预测制导方法的实现均创造了良好的条件。

变换后的动态系统，仍存在运动状态、大气密度、气动系数、面质比等偏离标称状态的不确定性，动态增益偏离 1 甚至有百倍的变化量；有限时间、控制量幅值受限条件下，为完成制导任务，优选自适应控制方法；考虑到标称状态下动态增益为 1，全系数自适应控制在系数初值选取方面，具有天然的优势。

标称飞行状态下通过数学仿真确定时变动态控制增益的方法，是一种构造性、普适性的方法。变换后的系统，成为标准的“脱任务化的”控制系统。可以说，时变动态控制增益的方法架起制导方案设计与控制方案设计的桥梁。所有应用自适应预测制导方法的实际工程与应用研究项目，无一例外采用这一方法，只是选

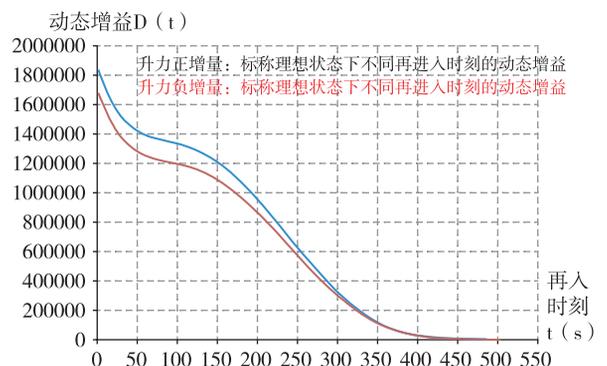
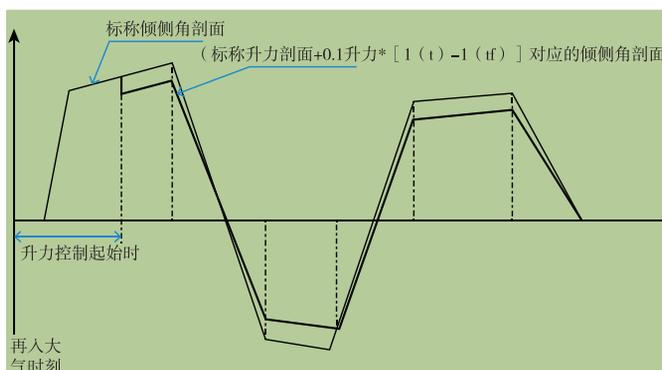


图 1 标称时变动态控制增益变换

择的控制输入、控制输出依据所研究的问题有所不同，例如实际飞行的嫦娥五号月地返回跳跃式再入、新一代载人飞船试验船大椭圆轨道高速再入、神舟飞船近地轨道高速再入，以及应用研究中的可重复使用运载器初始再入、末端能量管理、进场着陆，组合动力高超声速飞行器上升段、返回再入段的制导、火星大气捕获、火星进入的制导、月面软着陆的制导、高超声速飞行器俯冲阶段姿态控制等。

2.4 一种一阶特征模型的自适应控制方法

在 2.2 和 2.3 基础上，对输入 u 输出 y 关系建立特征模型，实时估计特征模型参数并实施自适应控制，可以进一步解决制导精度和参数鲁棒性问题。基于特征模型自适应制导律，每个预测制导周期仅进行一次自适应制导计算，由自适应控制系统的稳定性保证预测制导的收敛性。从 u 至 y ，是不能用数学模型描述的被控对象，2014 年以往特征模型自适应控制理论，二阶特征模型被认为是最低的，其理论研究充分且有实际应用。对预测制导，作者首先采用的也是二阶特征模型自适应控制，数学仿真结果表明其精度高于作为对比的无自适应能力的 PID 控制，效果是显著的，但优化的控制参数与一般二阶系统的选择有显著差别；2014 年，为了进一

步提高制导精度，对月球 - 地球轨道跳跃式再入返回的自适应预测制导律进行参数优化研究。在经过多轮参数尝试但效果不明显的情况下，以及一定还存在更好优化结果的信念驱使下，作者将变换后的预测制导输入 - 输出之间的二阶特征模型改为一阶特征模型，设计了对应的制导律。通过多种子多次的 10240 组蒙特卡洛仿真，相对二阶特征模型，基于一阶特征模型的制导律最大误差包络减小了 20~30%，综合控制精度显著提高，结合上述分析和控制参数的特点，表明用一阶特征模型更适合预测制导输入输出的描述。由于二阶特征模型的参数范围和一阶特征模型的参数范围并不存在包含关系，二阶特征模型及其闭环控制的性能不能靠参数估计退化为一阶特征模型及其闭环控制的性能，也就是说，对自适应进入 / 再入制导这一实际工程问题，靠参数估计和参数

优化，基于二阶特征模型的制导精度是无法达到基于一阶特征模型的制导精度。一阶特征模型及其控制律，具有设计工作量小，参数范围容易确定，参数调试工作量小，以及参数估计快的特点；可直接根据对象的稳定性确定参数的范围。由于是增量控制，故包含积分器。

2.5 约束预判与制导处理

制导问题的一般提法是：给定运动体的初始运动参数范围，要求将运动体引导到终端轨迹或终端运动状态，且满足过程中运动状态和控制的约束。前面讨论了除约束问题外的其他问题，本节讨论约束问题的处理。

约束问题的具体处理与具体问题相关。例如航天器再入过程的约束一般包括最大过载、最大动压、峰值热流等，终端要求也有更复杂的情况，如大升阻比飞行器末端能量管理终端要求航程、高度、动压、弹道倾角等的

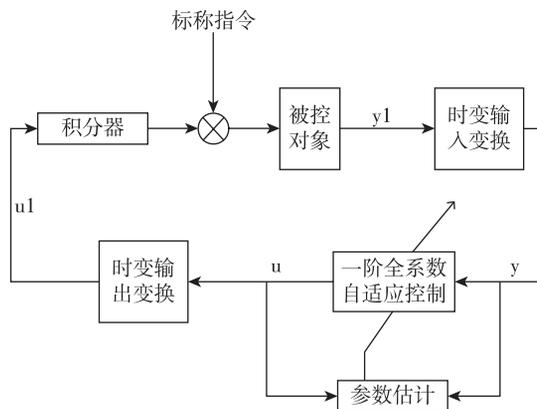


图 2 基于一阶特征模型的自适应制导

综合约束。以最大过载的控制或防范为例,说明约束预判和制导处理的原理。设飞行器轴向过载 n_x , 要求的最大过载 $n_{x,max}$, 设计 $n_{x,up}$ 是过载增加过程中接近 $n_{x,max}$ 的预警值, $n_{x,down}$ 是过载下降过程中远离 $n_{x,max}$ 的安全值。若预测中出现 $n_x \geq n_{x,max}$, 则: (1) n_x 增加过程中, 当 $n_x \geq n_{x,up}$ 时, 令倾侧角指令 $\gamma_{VT}^* = \gamma_{V,min}^*$, 对应最大允许升力; (2) n_x 下降过程中, 当 $n_x \geq n_{x,down}$ 时, 则令倾侧角指令 $\gamma_{VT}^* = \gamma_{V,min}^*$, 对应最大允许升力。因为从轨迹预测数据可预知全程所有运动、力学、热等参数, 故将过载约束的预判和闭环制导处理放在预测模型之中。更复杂的约束要求, 如大升力体末端能量管理与进场着陆, 大升力体发射段制导与再入段制导, 需根据实际情况处理。预测制导的副产品——预测轨迹为约束条件预判和制导预测处理提供了前提。

2.6 自适应预测双环制导

预测制导, 是可以单独执行任务的。

自适应预测双环制导方案, 并不是必然产生的, 而是沿着中国神舟载人飞船返回再入设计方案、以神舟飞船为背景开展的返回再入自适应预测制导研究, 以及嫦娥五号飞行试验器月地轨道以第二宇宙速度返回再入制导方案论证与设计的历史发展过程而

提出的。

在 1993—1994 年神舟载人飞船返回控制技术攻关过程中, 针对返回舱气动参数不确定性或变化严重影响返回控制精度指标完成的情况, 作者提出了基于升阻比在线估计的标称轨迹自适应纵向和自适应横向制导方法, 该方法应用于神舟一号至神舟十一号。

在返回控制技术攻关过程中, 攻关课题组也初步研究了理论上精度更高、适应能力更广但计算量大、工程实现广受质疑、世界上没有应用的预测制导方法。1996—1997 年, 作者基于科学技术研究的完整性, 针对攻关阶段研究不透彻的预测制导方法, 明知无缘载人航天一期、二期, 仍按型号标准深入研究, 形成以自适应弹道预测、标称时变动态控制增益变换和二阶特征模型自适应制导为主要特征的预测制导方案, 该方案的部分结果发表于 1998 年宇航学报。2011 年, 针对月地轨道跳跃式再入, 作者的学生, 嫦娥五号返回器的方案设计杨鸣、张钊、董文强等采用该方法, 相对国外预测校正算法获得了更好的数学仿真试验效果。由于标称轨迹自适应纵向和自适应横向制导方法在神舟载人飞船有成熟的应用, 工程上要求保留, 三位设计师平衡把握技术继承与创新, 将预测制导和标准轨迹制

导这两种不在同一轨线的方法结合起来, 提出以自适应预测制导为外环(制导周期 $N \cdot T$)、神舟载人飞船标称轨迹自适应纵向和自适应横向制导为内环(制导周期 T)的双环制导方案。双环制导是一种新型的制导体制。进一步的研究表明, 双环制导方案除了保留自适应预测制导的高精度、高平稳性以及过程与终端约束预判和制导处理的优势外, 内环标称轨迹自适应制导在外环制导周期内能够抑制动力学和环境变化引起的轨迹扰动, 有助于减小外环制导控制量的波动和弹道的平稳性, 还因其含过载直接测量量, 对导航误差的影响亦有减缓作用。2014 年 4 月作者在杨鸣等工作的基础上, 在对月地轨道跳跃式再入深入研究与仿真过程中, 提出将自适应预测校正制导中标称时变动态增益函数变换后的广义对象输入输出关系, 即预测制导模型由时变系数二阶特征模型改为时变系数一阶特征模型, 设计了相应的参数估计和自适应控制方案。相对原来的二阶特征模型, 基于一阶特征模型的制导律最大误差包络减小了 20%~30%。大量背靠背的仿真研究验证了预测制导应用一阶特征模型相对于应用二阶特征模型的误差最大包络减小了 20% 以上, 至此构成了嫦娥五号飞行试验器返回再入制导方案的主体。该方案继续应用于嫦

娥五号探测器,, 推广应用于新一代载人飞船试验船、空间站阶段神舟载人飞船等。

图3 给出自适应预测双环制导的结构框图。

图4 给出了自适应预测制导的发展历程。

三、工程应用与应用研究

3.1 工程应用

自2014年11月1日嫦娥五号飞行试验器首次在轨应用自适应预测制导方法, 实现月地返回轨道以第二宇宙速度跳跃

式再入, 开伞点509m, 创当时的世界记录。之后自适应预测制导先后应用于新一代载人飞船试验船(2020-05-08)、携带月岩月壤的嫦娥五号探测器返回器(2020-12-17)、空间站阶段神舟十二~神舟十五载人飞船

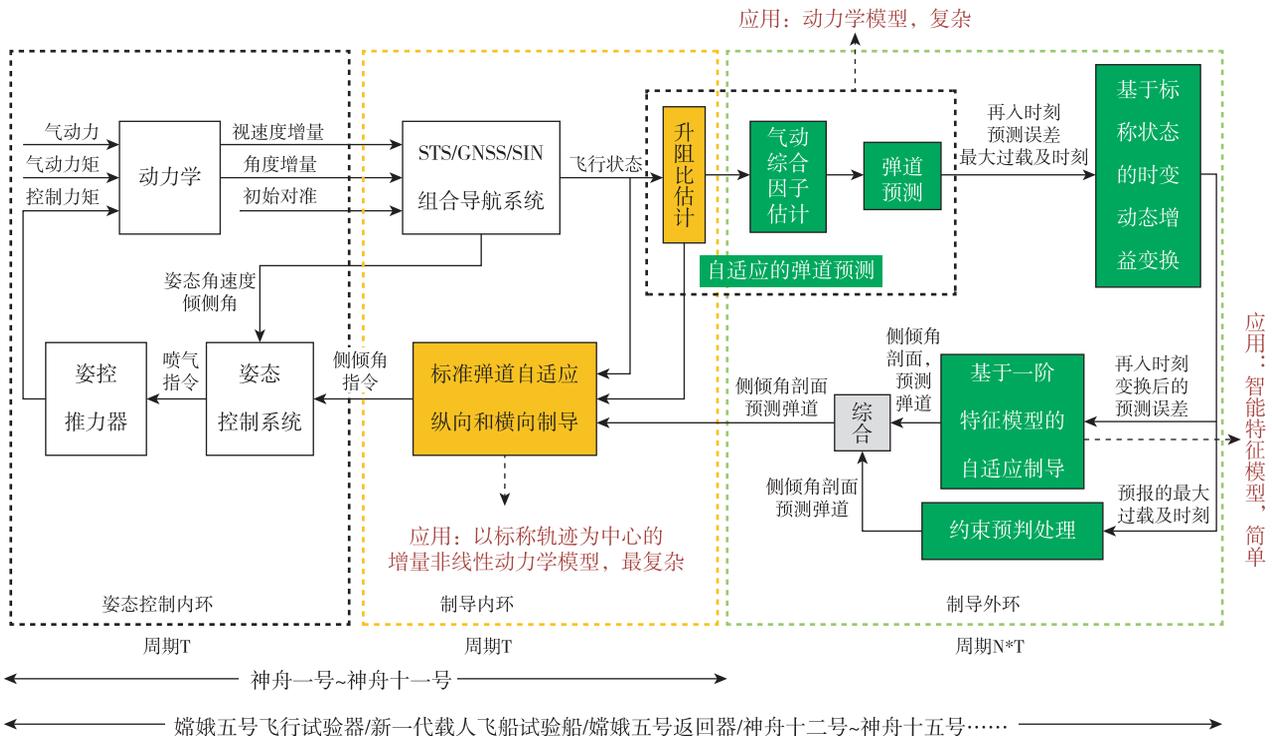


图3 自适应预测双环制导方法

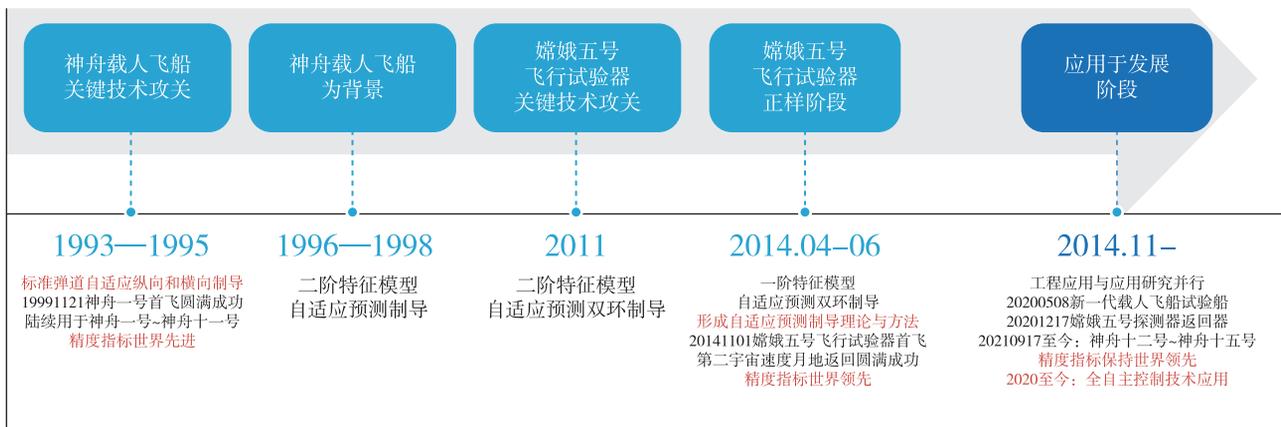


图4 自适应预测制导的发展历程

(20210917, 20220416, 20221204, 20230604)。第2节介绍的方法或技术,在上述七次国家级重大任务中得到实实在在的飞行验证。

表1给出七次工程应用的结果。

应用自适应预测制导的七次工程应用的开伞点精度,与未用自适应预测制导的神舟一号至神

舟十一号的开伞点精度放在一起比较,七次工程应用的精度位居前1~7位,统计精度提高了一个数量级,说明自适应预测制导在提高制导精度方面效果显著。

应用自适应预测制导的七次工程应用的开伞点精度,放在世界范围内比较,神舟十五号位列第一,嫦娥五号飞行试验器位列

第二,神舟十四号位列第三。说明自适应预测制导的控制精度国际领先。

神舟十四、神舟十五精度进入佳境,并非导航制导控制相对之前有改变,而是从SZ-14开始,对从20km制导终止高度至10km开伞高度这一停止制导的阶段进行了风速补偿。

表1 七次工程应用结果

	再入方式	再入航程 (km)		再入轴向过载峰值 (g)		开伞点 (km)		
		要求	实际	要求	实际	要求	实际	
嫦娥五号 飞行试验器 (#2)	跳跃式	5600 ~ 700	6654	<7	第一次: 4.72 第二次: 4.06	航向: <30 横向: <20	航向: 0.248 横向: 0.445	0.509km 世界第二
嫦娥五号 探测器			6500		第一次: 4.984 第二次: 3.973		航向: 0.6532 横向: 1.5769	
新一代载人飞船 试验船	直接式	1000~3000	1220	13~15	13.52	航向: <16 横向: <10	航向: 1.355 横向: 0.596	
神舟十二号载人 飞船		2300~2600	2456	<4	3.236	航向: <16 横向: <16	航向: 1.1988 横向: 0.9666	
神舟十三号载人 飞船			2460		3.17		航向: 1.64 横向: -0.58	
神舟十四号载人 飞船 (#3)			2488		3.132		航向: 0.47888 横向: 0.19865	0.519km 世界第三
神舟十五号载人 飞船 (#1)	2480		3.28		航向: 0.31932 横向: 0.13675		0.348km 世界第一	

3.2 应用研究

在应用研究领域,作者及其团队专注于典型任务的应用、推广与深入研究,包括:(1)旋转体气动控制相关,如火星进入、火星气动捕获;(2)大升力体控制,如初始再入、末端能量管理、进

场水平着陆,高超声速飞行器的发射段和再入段制导,高超声速飞行器利用气动舵的快速姿态控制;(3)真空环境下航天器控制,如月面软着陆。发表了相关论文。

在上述工程应用与应用研究中,自适应预测制导方法起着核

心作用,它是一种提炼本质特征的智能自主制导方法,整个方法具有内在的逻辑结构,提供了规范性和构造性的实现步骤,易于推广,容易为广大从事航天器制导导航与控制工作的设计师学习、掌握和应用。○

周济院士：以智能制造和绿色能源为抓手 加快推进新型工业化

工业绿色发展是生态文明建设的重要组成部分，更是新型工业化的内在要求和基本特征。推进工业绿色发展对于在新时代背景下推动产业体系优化升级，实现中国由工业大国向工业强国迈进具有重要意义。近日，中国工程院院士周济在 2023 工业绿色发展大会作了题为《绿色发展工业强国》的主旨发言。周济指出，要坚定不移以智能制造为主攻方向，以绿色能源为战略支撑，推进科技创新，实现我国工业高端化、智能化、绿色化发展，打造中国式现代化新的发展动力。

新型工业化是推进中国式现代化的战略选择

“习近平总书记强调，中国梦具体到工业战线就是加快推进新型工业化。”周济表示，推进新型工业化，是以习近平同志为核心的党中央从党和国家事业发展全局出发作出的重大战略部署，具有重大而深远的意义。

周济认为，新型工业化将

为我国实现中国式现代化提供物质基础和产业支撑，任重道远需主动作为。主要体现在以下四个方面：

第一，新型工业化是推进中国式现代化的战略选择。中国式现代化是人口规模巨大的现代化，是全体人民共同富裕的现代化。我国要在未来实现 14 亿人口共同富裕的中国式现代化，这是人类历史上前所未有的伟大事业。为中国式现代化提供强大的物质基础和产业支撑，这就决定了我国工业必须走出一条从来没有走过的新型工业化道路，才能完成如此艰巨而伟大的奋斗目标。这是人类历史上最大规模的高质量发展工业化，必须走一条新型工业化的道路。

第二，新型工业化是构建大国竞争优势的战略选择。党中央决定，要加快构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局。以内循环为主体、走和平发展道路的工业现代化前所未有，必须走一条新型工业化道路。同时我国要高举和平发展、合作共赢的旗帜，不断扩大高水平的对外开放，深度参与

全球产业分工和合作，要坚持基于规则、基于市场的全球化，大力倡导建设开放合作、互利共赢的全球产业体系，坚定维护全球产业链供应链的韧性和安全，全力推动支撑人类命运共同体的全球化。

第三，新型工业化是实现我国工业高质量发展的战略选择。高质量发展是我国工业发展的根本任务。要实现我国工业的高质量发展，必须走一条新型工业发展道路。新中国成立 70 余年、改革开放 40 余年以来，我国工业发展取得了伟大的历史性成就。但是，总体而言，我国工业化大而不强，整体仍处于全球产业链价值链的中低端。要加快中国制造向中国创造转变、中国速度向中国质量转变、中国产品向中国品牌转变，推动我国工业整体走向世界产业链的中高端。

第四，新型工业化是打造强国建设新动力的战略选择。世界迎来了新一轮科技革命和产业变革的历史性战略机遇，我国工业发展必须坚持科技是第一生产力、人才是第一资源、创新是第一动

力，把握战略机遇，加快推进新型工业化。

加快绿色低碳转型推进工业绿色化发展

周济表示，经过多年的奋斗，我国智能制造技术水平已经进入国际先进行列，绿色能源技术则实现了群体性的重大突破，已经整体处于世界领先水平，形成了智能制造和绿色能源这两个新一轮工业革命核心技术集群。要坚定不移以智能制造为主攻方向，以绿色能源为战略支撑，推进科技创新，实现我国工业高端化、智能化、绿色化发展，打造中国式现代化新的发展动力。

首先，要大力发展绿色能源产业。把绿色能源作为新型工业化的战略支撑，建立新型的清洁能源产业链，推动光伏、风电、动力电池、水电、核电、特高压输变电、智能电网、储能等绿色能源技术的突破和产业化，建设绿色电力系统。绿色能源成为国家经济社会发展的主力能源，将为我国实现制造业绿色化发展、实现碳达峰碳中和、实现中国式现代化作出基础性根本性的贡献。

其次，要深入推进节能减排、清洁生产。强化源头减量过程控制和末端治理相结合的系统节能

减排、清洁生产理念，全力推行贯穿全生命周期的工业产品绿色设计，推动工业企业特别是冶金、石化、建材、纺织、轻工等行业企业实施技术改造，助力其实现数字化转型、绿色化升级。

最后，要推进资源利用循环化转型。发展循环经济，坚持减量化、再利用、再循环的原则，

强化工业资源综合循环利用，推进原生资源高效化协同利用，推动可再生能源规模化、规范化、清洁化循环利用，促进生产和生活系统绿色循环连接，建立资源综合循环利用体系，全面提升资源综合循环利用水平。○

来源：人民邮电报

作者简介



周济，1946年出生，机械工程专家，1999年当选为中国工程院院士。1970年毕业于清华大学，1984年获美国纽约州立大学（布法罗）博士学位。曾任华中科技大学校长，湖北省省委常委兼省科技厅厅长，武汉市市长，教育部部长，中国工程院院长。

长期致力于机械设计、数控技术与智能制造的教学和研究工作，研究并组织实施了发展与推广应用数控、CAD和智能制造的技术路线；提出并实践了单调性分析优化、数控加工直接插补等算法理论；主持研制了华中I型数控系统以及优化设计、机械CAD等系列软件产品，广泛应用于机械、航空、航天、能源等行业，创造了显著的社会效益和经济效益。曾多次获得国家、省部级科技进步奖，发表论文200余篇，出版著作12本。

乔红院士：类脑智能机器人研发前景广阔

2022年8月17日，习近平总书记在沈阳新松机器人自动化股份有限公司考察时强调：“要不我待推进科技自立自强，只争朝夕突破‘卡脖子’问题，努力把关键核心技术和装备制造业掌握在我们自己手里。”机器人是现代产业体系的重要组成，其应用领域包括工业制造、智慧农业、航空航天、深海探索、医疗卫生、国防安全、教育服务等重要行业。目前，机器人与人工智能领域深度融合，成为经济社会智能化变革的重要引擎。通过借鉴人类的机理和行为，显著提高机器人性能，完成通用的、多样的任务，是机器人研究的挑战和机遇。

1 由行业专用走向类人通用

一般来说，机器人系统的目标是完成各类任务，具备学习能力，能够在特定环境中进行高质量互动。目前，大多数机器人系统以模拟人的行为或局部功能为出发点，面向特定任务开展结构设计和算法开发，使其能够代替人类完成相应操作，如分拣、焊接等。这些专用机器人系统在研发过程中，主要依靠定制化的控

制程序和大量精密的传感器，对新任务的学习能力、对未知环境的适应能力十分有限，往往只能应用于特定的、单一的任务。相比于这类机器人，人类作业的灵巧性、精密性和适应性更胜一筹。目前人类能完成的大量工作，比如电子用品的装配等，机器人还无法真正介入。

类脑智能机器人正是从人类思考、行为的源头出发，基于神

经科学对影响人类作业、运动、感知和决策等关键生物机理的研究，通过信息建模和机器人软硬件系统，建立起新型机器人系统。这种全新的机器人系统在外形、控制和智能等方面都与以往不同，可实现以往无法完成的多类新任务，引领机器人领域的变革。

和普通机器人相比，类脑智能机器人可以通过引入人的生物



图1 传统机器人

结构、驱动方式、控制方式和智能决策等机理，减少机器人与人类的差距，在灵巧作业、敏捷运动和泛化学习等能力上接近于人类。由于类脑智能机器人从生物机理研究和模拟出发，更容易与人自然交互，实现深层理解，帮助神经科学家取得更多神经科学研究成果。再加上类脑智能机器人采用类人机理和模型，拥有更好的可解释性和可靠性，既能保证与环境的自然交互，又能大幅减少计算和控制的能耗——人类大脑的功耗仅在 20 瓦左右，与现有人工智能算法的训练能耗相比几乎可以忽略不计。

2 多学科交叉融合成果初现 Career In Business

类脑智能机器人研发前景广阔，也仍面临诸多挑战。首先，类脑智能机器人的研究涉及神经科学、信息科学、材料科学和机械学等多学科知识，需要整合多种前沿科学成果并进行深度融合。其次，人类对自身的认识还远远不足。当前，人类大脑的开发还不足 5%，神经元连接多样且富有变化，很难精确建模。其三，类脑智能机器人的机械结构和算法架构与现有的机器人系统有本质的不同，实现智能认知、决策和灵巧操作并非易事。如何从人类

海量神经机制和复杂多样的行为模式中，找到对提升机器人认知、决策、控制以及人机协作等性能有帮助的关键机制；怎样跨越生物与信息的鸿沟，将神经机制进行信息化表达，形成可计算、可实现的软硬件系统，还需要很多艰辛的工作。

目前，类脑智能机器人在各方努力下已实现一系列技术突破并取得相应成果。在感知方面，基于人类大脑视觉皮层实现语义提取、概念形成和主动联想等机理，建立神经计算模型和信息处理算法，提升了机器人在复杂场景下的认知可靠性。在决策方面，研究通过模拟杏仁核—前额叶和海马体之间的神经机理和功能，实现机器人“精度—能效—速度”均衡的多样化决策能力。在控制方面，通过模拟运动控制的神经机理，提升机器人的作业精度和多任务学习能力。在系统本体方面，类脑智能机器人研究通过对肌肉骨骼系统的模拟，构建具有类人运动系统特性的新型机器人软硬件系统，实现机器人在有限传感精度下的灵巧、柔顺和高精度作业。目前，类脑智能机器人相关技术已在实际场景中获得初步应用，例如高精密传感器关键零部件的柔性装配、腹部超声检查的设备操控、户外开放场景中的低功耗自动驾驶等。

未来，类脑智能机器人研

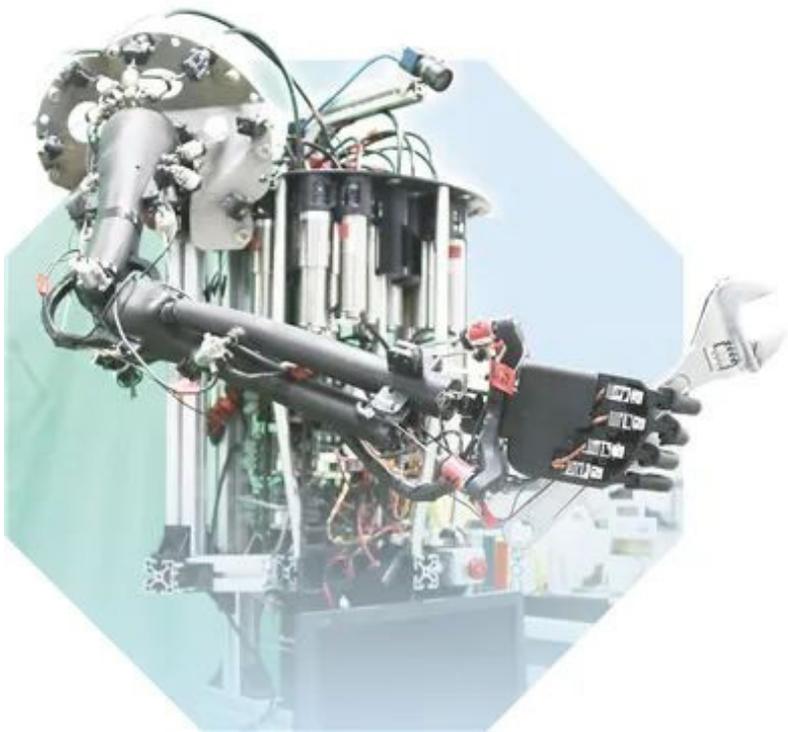


图2 我国自主研发的类脑智能机器人

究将在机器人通用性、智能性方面带来变革，特别是对完成精密性、柔顺性和与人互动性要求较高的任务具有重要意义。在市场份额巨大的电子器件装配中，类脑智能机器人系统更容易模拟人实现灵巧的高性能作业；在医疗服务行业，类脑智能机器人更容易“共情”，进行个性化接触和深度交流。

当前，我国在类脑智能机器人领域已经取得初步成果，科学家对人的不同脑区、器官、肌肉的神经机制进行了系统化深入研究。经过持续不断的创新与尝试，我国已自主研发了系统性模拟人体感知、决策、控制机理的类脑智能机器人系统，通过类脑芯片实现控制的机器人系统等，在国际同一领域占有重要地位。

3 将深刻改变社会生产生活

据统计，2022年，人工智能核心产业规模达到5080亿元，同比增长18%；我国工业机器人的年安装量在过去10年增长了11倍，稳居全球第一大工业机器人市场。类脑智能机器人的发展将深刻改变人们的生产生活，我们应主动谋划，提前布局，让技术发展和安全保障双线并行。

从技术发展角度来看，类脑智能机器人属于跨学科深度交叉融合领域，需要持续支持保障。机器人全链条发展过程中，要充

分利用我国人工智能和机器人应用范围广、社会认可度高、人才储备雄厚等特点，打造科学与技术融合的类脑智能机器人人才队伍，保障我国机器人领域的前瞻性和落地性，实现技术引领超越。

从技术安全性角度来看，类脑智能机器人通过融入人的内部机理，进一步缩小了与人的差距，能够更自然地与人交互，更容易与人工智能大模型结合。我们要针对人机交互安全、用户数据安全等问题，在算法设计、实现、应用等环节的透明性、可解

释性和可靠性方面，在数据收集、存储、使用等环节的安全性方面，加强审核评估，形成类脑智能机器人技术的安全阀。

通过多学科深度交叉，类脑智能机器人逐渐显示其突破现有技术瓶颈的巨大潜力，发展前景广阔。我国科研工作者在这条科研道路上持续开拓创新，取得丰硕成果，未来也将更进一步，力争形成技术引领，为国家重大需求服务，为人类福祉做出贡献。○

来源：人民日报

作者简介



乔红，中国科学院院士，中国自动化学会机器人智能专业委员会主任委员、中国科学院自动化研究所研究员，博士生导师，国际电子电气工程学会会士（IEEE Fellow），担任复杂系统管理与控制国家重点实验室副主任、九三学社中央科技委副主任，建立北京市机器人“手—眼—脑”融合智能研究与应用

重点实验室。乔红长期从事机器人理论与应用研究，在受人启发的机器人决策、感知、控制及结构设计方面做出了系统性、创造性的重要贡献。获国家自然科学基金二等奖、北京市科学技术一等奖、中国自动化学会技术发明一等奖，均排名第一。首次从中国内地当选并连任IEEE机器人与自动化学会管理委员会委员，现任全球IEEE奖励委员会委员、IEEE机器人先锋奖评选委员会委员、IEEE机器人与自动化学会Fellow提名委员会委员；受邀担任多种SCI期刊主编及编委。

在过去的几十年里，控制学科在理论上蓬勃发展，在工程上应用范围不断扩大。一个自然的问题是未来 10 年控制学科有哪些新挑战和新机遇，最近 IEEE 控制系统学会等联合发布了一份报告：《2030 年的控制：社会尺度挑战下的路线图》，本期“科普园地”，让我们听听他们的看法。

社会尺度挑战下的控制：2030 路线图（四）

文 / Anuradha M. Annaswamy、Karl H. Johansson、George J. Pappas

翻译 / 哈尔滨工业大学（深圳） 何阳

2.4 节 共享经济

本节作者：

Christos G. Cassandras,
Robert Shorten, Anuradha M.
Annaswamy

共享经济是一种颠覆性的范式，其基础是用基于共享 / 按需访问的机制取代传统的所有权概念。这门新兴学科的核心思想类似于许多系统论概念。因此，系统和控制概念和方法在管理共享资源和有效的市场设计方面发挥着重要作用。

摘要

共享经济是一种经济模式，它将当前经济从拥有（唯一拥有）资源转变为只有在需要时才能获得资源（共享）。虽然好处很多，但这种转变也带来了多重挑战和考虑，包括隐私、安全、保障、

公平、风险、市场扭曲和战略行为。控制理论方法非常适合解决其中的许多挑战，特别是那些涉及在总体（社会）和个人用户层面有效管理受限资源的挑战。我们认为，共享经济可以被视为一个反馈控制问题，在这个问题中，个体主体组成了工厂，控制则在主体之间分配受约束的资源。在这样的框架下，市场可以经过设计以便消费者可以使用交易控制等机制在对等环境中交换商品和服务。系统和组件级决策将通过系统组件之间协商的经济交易来做出。与保护隐私同时进行的共享服务的管理和设计，也是控制工程师熟悉的一个领域，其目标是开发基础设施和算法，以支持在社区中共享对象池。共享经济的一个独特特征是，通过使用新的合作控制工具和闭环系统中

建模人类行为，来设计社会契约，从而促进合规性的这一重要性。博弈论在开发合规机制方面发挥着明显的作用，包括访问控制和对抗性环境等方面。

2.4.1 引言

共享经济是一种经济模式，它从拥有资源转变为只有在需要时才能获得资源。这种转变是资源减少和这些资源成本上升的结果。这反过来又使得有必要接受循环性，将未被充分利用的资产货币化。它需要在商业运作方式、基础设施设计如何支持协同消费以及用户行为如何在个人和整体层面上适应等方面做出大量相应的改变（见图 1）。共享经济的例子在经济的各个部门都有：交通网络公司（如优步、Lyft）和车辆共享（如 Zipcar），服务业的点对点住宿平台（如

Airbnb、Vrbo)、小额贷款机构(如Sardex、Prosper)、合作共享办公室或产品存储空间,以及转售/交易平台(如eBay、Craigslist)。

在能源部门,通过灵活消费这一相当于负于载荷的概念,共享经济在电网基础设施和建筑基础设施之间产生,尽管是间接的。对等交易机制也出现在电能和热能网络之间,以确保供暖和电力资源充足。在电力与火车网络之间引入这种交易机制,以利用灵活消费的这同一概念,是有潜力的。这些新的经济范式吸引了人们对工业应用和更广泛的社会采用的兴趣,这是有充分证据的 [46, 47, 48, 49, 50, 51]。

共享经济的动机是多方面的。首先,许多消费者资源的使用率极低(例如,平均汽车使用率约为4%)。共享此资源以供按需使用可以显著降低持有成本,包括

保险和维护成本。在全球范围内,由于不断扩大的灰色社区和中产阶级,资源竞争十分激烈。面对这种压力,共享资源似乎是一种工具,可以在资源有限的情况下维持甚至提高生活水平。

从社会角度来看,减少某些资源的数量,如产生污染的车辆,可以有益于环境。值得注意的是,管理对共享资源的获取,而不是建造更高效设备,将是对抗全球变暖的核心支柱。William Jevons在19世纪注意到,开发新的、更高效的技术往往会刺激更多的总需求,抵消新技术的影响。我们城市的污染和对能源永不能满足的需求很容易成为这一效应的例子,至少在一定程度上是这样,这一效应被称为杰文斯悖论。例如,汽车是根据每台设备的排放系数进行评级的,这一现实忽略了这一效应的影响,使得主要技术提供商忽略其设备的总

体影响。使用控制理论来管理共享资产的访问是对抗杰文斯悖论影响的基本工具。

共享经济还提供了在不承担过高风险的情况下拥有(如汽车)或获得(如银行贷款)可能不可行或不实用的资源。同时,共享平台所固有的特征,例如评级和评论,有助于建立更强大的用户社区。这可以保持供应商和消费者的诚信,促进人际协作,甚至利用平台的影响力来帮助那些需要帮助的人(例如,Airbnb为受自然灾害影响的人协调免费住宿)。此外,技术发展极大地促进了共享经济,使无处不在的网络以及轻松访问协调资源共享和建立全新建设性关系的平台成为可能。

重要的是要认识到并明确共享经济(也称为合作消费)的运作与当前实践之间的根本差异。其中一个区别是,许多资源和服务不是集中创建的,而是通常由消费者生产的,这导致了生产消费者的出现 [52, 53, 48]。一个例子是停车位的使用:一个人把自己的车停放在停车位上,便是在消费;随后,这个人把车开走,便是在生产供其他人使用的资源。尽管联合生产和消费本身并不是什么新鲜事,但从交易量、参与人数以及共享资源的空间和时间粒度来看,目前的规模都是前所未有的。

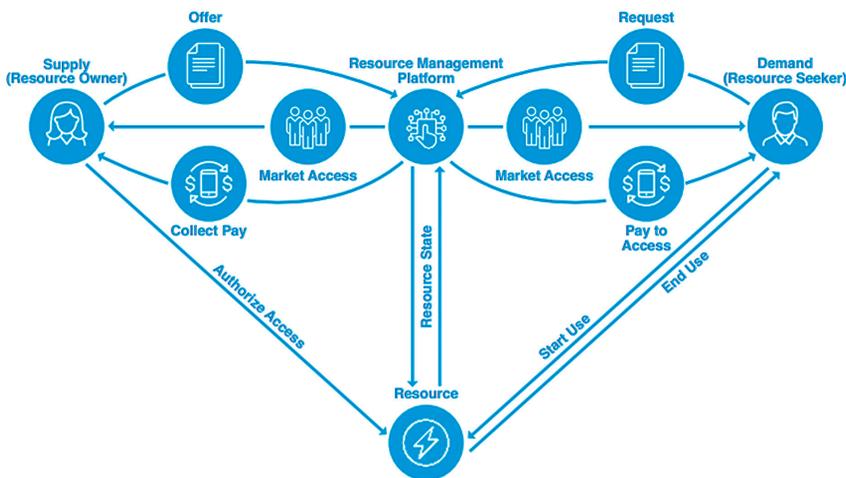


图1 共享经济系统概述

共享经济带来好处的同时也带来了许多挑战，其中许多问题可以通过控制系统社区非常熟悉的方法直接解决。这些挑战包括：

隐私、安全和安全：在信息共享所需的网络环境中，隐私和安全问题与 CPS 中已经广泛研究的问题类似。这些问题在共享经济的背景下占据了中心位置，由于多个所有者的存在，它们变得更加复杂。

市场扭曲：多重所有权的引入，以及对等市场等新机制，是一个复杂的系统问题。当对等市场在现有的传统市场中建立时，后者通常会经历新的短期干扰（即不稳定），如一些住房市场（由于 Airbnb）或城市交通（由于优步和 Lyft）所示。这种短期不稳定性可能需要分析和理解。

公平：由于共享经济在很大程度上依赖于通过网络技术获取信息，这可能会导致对各社会群体获得这项技术的公平性以及这项技术可能被操纵的方式的担忧。这一点以及能源正义等相关概念正变得越来越重要，可以通过系统和控制视角进行分析。此外，公平还包括在分配资源时尊重个体或群体的偏好。

风险：在许多方面，以共享取代所有权会带来更高风险。作为生产消费者，一个人面临着无法得到适当补偿的风险，或者资源被消费者损坏的风险。

风险的有效管理是共享经济中的一个关键问题。这包括个人和集体行为的风险，这些行为有可能将风险分散到生产消费者群体中。

博弈、共谋、合作和其他战略行为考虑：合作是共享的同义词，是构成有效共享经济支柱的多主体动态系统的基石。与此同时，多个所有者和生产消费者的存在带来了一些挑战，包括博弈、共谋和整体战略行为。所有这些方面都是多智能体动态系统的重要特征，必须进行研究。此外，必须在认识到所涉及的决策过程的时变性质的情况下进行研究。

尽管存在这些挑战，但很明显，推动共享经济出现的市场力量是不可抗拒的，许多大公司正在迅速采取行动，抓住机会开发新的共享服务。一个引人注目的例子是汽车制造商 Riversimple，其汽车零部件可能由不同的实体所有。

许多控制界熟悉的想法是这些市场力量的核心。控制论方法非常适合解决共享经济应用和商业模式中出现的许多挑战，特别是那些涉及在总体（社会）和个人用户层面有效管理受限资源的挑战。例如，反馈的使用是一种可以用来处理杰文斯悖论的工具。杰文斯悖论指的是，由于对某些资源的总需求增加，技术创新可能会导致意想不到的后果，从而抵消共享这些资源的影响^[54]

（有时也称为反弹效应）。

2.4.2 共享经济和共享经济中的控制

对共享经济的兴趣伴随着三个广泛领域的创新：新的商业模式、赋能技术和分析。随着新思想在这三个领域的出现，系统和控制理论将发挥作用。在非常基本的层面上，控制是共享经济系统设计的重要组成部分。共享受约束的资源涉及监管，其中可能存在额外的复杂性，例如确定设定点。有时，这些问题会引出全新的经典控制问题或者已有的经典问题但伴随着新的以人为中心的约束条件，这些约束条件对从业者来说可能不熟悉。

从根本上讲，控制的必要性有两个原因。首先，杰文斯悖论（新技术可以刺激需求以提高效率）表现在我们感兴趣解决的许多重要问题（如城市污染、温室气体排放，甚至贫困）上。在其他领域也可以很容易地找到这样的例子，解决杰文斯悖论的一种方法是将人类行为的综合效应作为正在设计的系统的一部分来管理。这涉及到承认这样一个事实，即资源总是受到限制且应该共享的，并且可以通过将共享视为一个组合的多级优化和控制问题来管理。例如，在车辆污染的情况下，总排放的安全水平可以被视为城市驾驶员之间共享的资源^[55, 56]。

从控制的角度来看，就新颖点而言，反馈回路的设计必须考虑到受控整体的以人为中心的约束，例如对资源的公平访问和个人用户的服务质量保障。一般来说，共享经济中出现的大多数问题都可以在这样一个框架中解决：在这个框架中，大量的个体，如人、汽车或机器，通常具有未知的目标，争夺有限的资源。挑战在于以不浪费的方式分配资源，为社会提供资源使用的最佳回报，并为争夺该资源的每个个体提供有保障的服务水平。该框架的主要问题是供需匹配，并以提供足够稳定性和弹性的方式进行匹配。

这就产生了一系列问题，原则上，这些问题最好用控制理论的方式来解决。首先，我们希望充分利用资源，这是一个监管问

题。第二，我们希望资源得到最佳利用。虽然这两个目标都与个体群体的聚合行为有关，但它们并不试图控制个体如何单独协调其行为以实现这种聚合效果。因此，第三个目标必须关注控制对智能体集群微观特性的影响。最终，第三个目标可以用捕获分配给单个个体的资源份额的（通常是随机的）过程的属性来表述。例如，我们可能希望每个个体在一段时间内平均获得公平的资源份额。在更基本的层面上，我们希望随着时间的推移，资源对每个个体的平均分配是一个稳定的量，它是完全可预测的，不依赖于初始条件，并且对进入系统的噪声不敏感。从控制的角度来看，挑战在于设计反馈机制，使得随机系统具有遍历性，并且不变测度可被成形以具有理想性质（整

体反馈控制问题的示意图见图 2）。

关于反馈控制系统的设计，后一个问题与控制个体之间资源分布的唯一不变测度（假设个体行为随机）有关。因此，用于部署在多智能体应用中的反馈系统的设计不仅必须考虑传统的调节和优化概念，还必须考虑关于该唯一不变测度存在的保证。这不是一项微不足道的任务，许多熟悉的控制策略，即使在非常简单的情况下，也不一定会产生具有所有三个特征的反馈系统^[57]。当考虑到双边市场的设计时，情况尤其如此。

最后，重要的是，非共享经济主体往往寻求优化其个人（自私）性能，而不考虑总体（社会）系统性能。换句话说，个体之间竞争资源，而不是像共享经济中那样合作。众所周知，合作最优解（最大化社会福利函数）比通过个人最优实现的均衡要好。这种差异通过所谓的无政府状态代价（Price of Anarchy）反映出来，在数据易于获得的情况下可以明确量化，例如在交通系统中^[58]。

2.4.3 控制在哪里可以发挥作用？

共享经济引发了许多系统和控制界非常感兴趣的问题。毕竟，共享既是对资源的监管，也是让社区（或代理池）公平地访问这种共享资源。在数学系统建设方

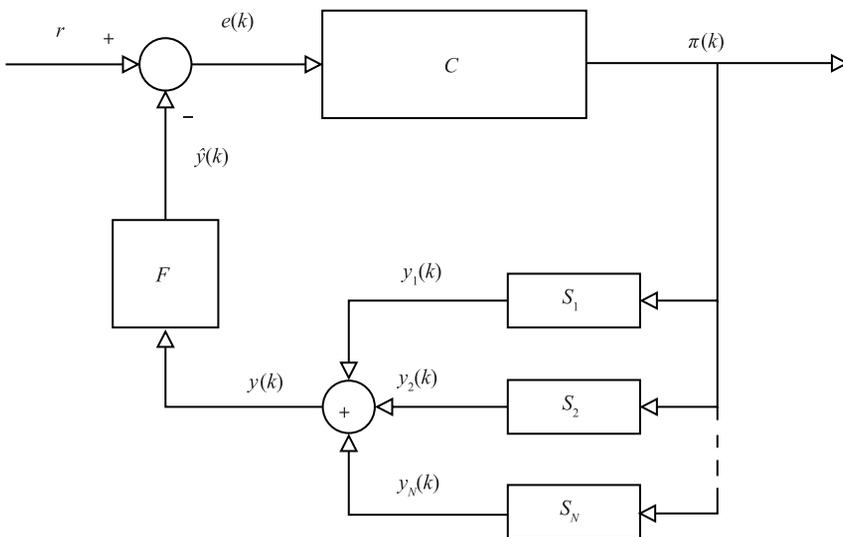


图 2 作为反馈控制问题的共享经济系统。
个体个体构成工厂，控制在个体之间分配受约束的资源^[57]。

面，已经出现了共享经济系统的几个不同方向，这些方向与控制理论和系统社区直接相关。我们列出了其中一些从系统和控制的角度来看可能不那么传统的。

对等市场设计：这种类型的共享经济系统出现在生产消费者市场的背景下，消费者可以在对等环境中交换商品和服务。对等市场的设计是应用机制设计、博弈论、分布式账本技术、共识、分布式优化算法、最优传输和稳定婚姻问题等思想的沃土。大多数控制工程师都熟悉此类市场的设计工作，许多人正在进行这项工作，特别是考虑到当代对共识问题的兴趣。^[59, 60]对等市场设计中的一个关键问题和前沿话题涉及数据的交换和共享。数据不同于其他共享资源，因为它很容易被复制和同步。尽管一些著名研究人员^[61, 62]最近的工作试图设计这样的市场，但仍有许多工作要做。这种数据共享和共享估值问题引起了业界的极大兴趣，也许是目前最紧迫的问题之一。它汇集了对等市场设计^[60]、分布式账本和经济学的思想，如Shapley价值^[63]。

交易控制：这种分布式控制策略是另一种新兴的工具，可以用来设计共享经济。因为消费者发挥着积极的作用，可以做出影响整个共享经济系统的决策，所以问题是消费者对基础设施的实

际信号做出反应。交易控制被广泛定义为一种机制，通过该机制，系统和组件级别的决策是通过系统组件之间协商的经济交易做出的^[64]。它正在智能电网^[65, 66]和智能城市基础设施^[67, 68]的背景下进行深入探索。考虑到交易控制提供了设计闭环系统的机会，需要适当设计底层交易的特定反馈机制。它还需要兼顾消费者的行为模式和基础设施管理者的经济目标。因此，在多个消费者和组织之间的合作与协调、动态流量设计、对参与底层交易的所有实体的约束以及与问题相关的多个时间尺度的动态建模和适应方面，仍有大量挑战需要解决。无论用于设计整体共享经济的市场结构（对等、双边、拍卖或其他）如何，多个利益相关者之间的潜在协调都可能通过经济交易进行，因此也可能通过交易控制进行。

共享服务的管理和设计：控制工程师非常熟悉的第二个新兴领域涉及旨在共享的产品和服务。在这里，基本思想是开发基础设施和算法，以支持社区中对象池的共享。设计共享服务的最基本元素是其规模和管理。在非常高的层面上，这里的关键问题涉及需要多少共享项目来向社区提供一定的服务质量（QoS）和/或哪些用户应该合作创建共享系统。

一方面，这种性质的问题通

常会归结为排队论中的经典问题，这是控制理论界所熟悉的，但有额外的约束^[69, 70]。首先，维度问题通常与供需统计数据相关联，在某些情况下，甚至会影响它们。当共享系统本身相耦合时，会出现额外的复杂性。

进一步的复杂性是共享的本质所固有的。例如，一个基本问题是确保所有代理在一段时间内平均接收到相等的QoS。这种性质的公平问题在网络和人工智能社区中很常见，但很少在控制中讨论，尽管它们与共识和优化有着明显的联系。随着开发算法来管理对共享资源的访问，特别是当对该资源的请求在其用户上同步时，会出现进一步的复杂性。用以管理这种性质的情况的定价策略，特别是在污染者付费（个性化定价）式模型的背景下，对控制学界来说是一个有趣的机会，尤其是在考虑到个性化干预的必要性时^[71]。

社会合同的管理和设计：合规问题和使用数字账本、数字伴侣和数字孪生等新技术砖块设计社会合同是共享经济系统设计的核心。合规性是指我们试图鼓励（而不是完全控制）代理商如何与其环境互动的情况。例如，在共享经济应用程序中，可能希望确保共享车辆在特定时间返回共享池。社会契约的另一个例子是要求塑料瓶在使用后返回销售点。

在德国和其他国家，瓶子存款被用来鼓励消费者遵守这一社会契约。然而，最低存款额不足以鼓励良好的行为，塑料瓶最终会被扔进垃圾箱。这有效地为任何愿意在公共垃圾箱中分类寻找被丢弃的瓶子的人创造了赏金。因此，执行这种社会契约并没有激励负责任的行为，而是激励其他人（他们往往属于社会中最弱势的群体）分类垃圾。通常，他们必须收集许多瓶子才能获得最低工资，而分拣生态系统成为了一种现代的剥削形式。在瓶子存放的例子中，执行机制是脆弱的。它创造了一种事实上的货币，任何人都可以兑换。它没有为存款设定足够高的价格来激励合规性。它也没有根据个人遵守程度对违规者实施差别处罚。

这种系统的另一个问题是，它们可能会受到资源丰富的邪恶行为者的攻击。任何有足够资源和不良意图的人都可以简单地通过简单地将许多塑料瓶倾倒在海洋中来攻击整个系统，从而增加每个人的存款。博弈论在开发合规机制方面发挥着重要作用，其中需要考虑参与者偏好的不确定性和变化、通过观察其他参与者的行为而做出的决策的变化以及参与者的集体行动。最终，通过使用具体的激励措施来实施这种遵守机制，以实现良好的平衡。最近，控制理论的思想已经成

为这些经典机制的替代方案，并为控制界提供了非常有趣的方向^[71]。

隐私保护：解决上述问题的主要障碍是无法将存款分配给个人。如果能够以保护隐私的方式做到这一点，我们就可以创建只有购买商品的人才能兑换存款的系统。我们还可以在差别处罚的基础上制定个性化干预措施，并能够相应地对不当行为的风险进行定价。然而，执行社会契约并促使人们为了更大的利益而遵守规则是一项微妙而复杂的任务。特别是，使用侵犯隐私的机制对行为进行微观管理是不可接受的，并可能导致中央权力机构侵犯个人权利的危险情况。那么，如何在保持社区优势的同时减轻风险呢？在这种情况下，一种具有巨大潜力的技术是分布式账本技术，尤其是当与控制理论相结合来管理群体行为时。在这些新的颠覆性技术的基础上实现安全的个性化控制策略，对于控制界来说，在几个非传统的应用领域可能具有巨大的价值。

闭环中的人类行为建模：在共享经济背景下，控制理论的一个重要机会是建模人类行为的集合，并设计用户推荐平台和用以协调他们的行为的算法^[57]。对人类行为集合的适当微观和宏观模型的需求对于控制设计至关重要。在这种情况下，会出现有趣的挑

战，因为这种集合的规模通常很大（比控制界通常解决的规模大得多），但通常不够大，无法作为流体处理。在许多情况下，这些系统还涉及大量人类在算法系统的帮助下进行交互。在此背景下出现的基本问题包括如何对此类系统进行建模，理解其均衡行为，并设计鲁棒的策略来优化其公平性和效率。

由于这些系统通常具有内在的随机性，因此确保它们产生“良好”的不变分布是很重要的。这需要合理公平的分配（例如，当给定地点供应短缺时，同一用户并不总是被拒绝使用自行车）。了解如何为这样的系统设计控制算法也是很重要的。此外，在共享系统中，消费者和生产者通常在预测的基础上并在软件代理的影响下做出决定。

然而，这种预测必须考虑到人们将根据这些预测采取行动这一事实，因为这些行动本身会影响预测^[72]。

这里值得一提的是人类行为的两种具体建模方法：效用理论^[73]和前景理论^[74, 75, 76]。人类的决策通常被认为是基于效用的内在函数的优化。当潜在问题（如随机冲击）存在重大不确定性时，建模框架需要是随机的，并采用对潜在结果和概率的扭曲感知。这些是前景理论^[74]中提出的原则，用于建模电力网络和共

享出行中的赋权消费者^[75, 76]。

将人类纳入闭环控制系统的挑战超出了共享经济的范畴，并出现在本报告的几个章节中，其中讨论了社会驱动因素和具体方法。是否应该开发人类行为的显式模型，而不是在不需要详细模型的情况下用于设计控制器的习得人类行为特征，还有待确定。

访问控制和对抗性设置：控制工程师的最后一个机会，也许是最大的机会，是与实现共享经济的技术平台相关的。区块链或其他分布式账本等技术使平台能够以可靠的方式进行点对点共享和资源交换，而无需集中式授权。它们还能够实现一系列个性化的信号策略，以实现大规模人类群体的调节。无论是在使用还是设计此类技术方面，控制学界都有巨大的机会。分布式账本在控制环境中的使用尚处于起步阶段，而且该技术本身大多基于控制理论概念（访问控制）。在这样的系统中实现访问控制的事实机制被称为工作证明（PoW）。这一机制现在正在让位于FPGA的进步。从控制的角度重新审视PoW类型的机制和此类账本的安全性可能会对此类系统的设计大有裨益。从系统理论的角度分析这些系统可以为控制设计提供保证^[77, 78, 79]。

2.4.4 长期挑战

在现代背景下，共享对许多

领域的企业来说是一种极具破坏性的模式。共享经济在对等移动和住宿市场的影响，以及专注于协作消费的初创公司的激增，证明了共享对我们日常生活的潜在影响。然而，尽管取得了成功，但随着共享经济的成熟，许多挑战仍有待解决。共享经济的一个备受讨论的副作用是，由于所谓的零工经济而出现的工人剥削和不良道德标准的可能性^[80]。虽然这无疑是一些共享经济企业不良行为的结果，但这也是由于技术、分析和商业模式的进步速度比共享经济系统提供监督的法律模式快得多。在这些新的经营方法的背景下，法律学者正在努力处理所有权、联邦和集体风险和保险、税收以及个人权利的新概念。共享经济的另一个不利方面来自可能出现的意外后果。例如，对等住宿模式提高了世界各地大城市的房地产价格和租金，以及中产阶级化。其他挑战包括共享网络物理对象（具有物理和数字足迹的设备），实现机器对机器的共享经济，以及实现人和机器都参与的共享经济。最后，值得注意的是，共享经济和循环经济^[81]有很多共同点。开发这些协同效应也可能是控制工程界的一项富有成效的努力。

对年轻研究人员的建议：

工程师通常处于制造更高效

设备的最前沿，但可能会忽视这些设备对经济消费的刺激。未来的商业模式将越来越多地寻求将经济增长与消费增长脱钩。在这种情况下，控制理论可以通过设计以有效和公正的方式控制资源访问的系统来提供很多东西。新一代的控制工程师必须扩展网络化多智能体系统设置，以捕捉动态资源共享环境中的智能体交互和协作。共享经济系统提出了一个反馈控制问题，其中控制器充当个体之间有限资源的智能分配器，这些个体努力将目前的竞争动态游戏转变为动态合作博弈，尊重所有参与者。在这种背景下，需要进行新的研究来探索共享经济系统，以解决共同设计技术和人类行为的问题。

对于资助机构：

资助机构应该认识到，有着精心设计的资源管理系统的共享经济至少是解决我们资源有限的社会可持续性问题 and 不受控制的资源利用对环境的影响的一种有希望的方式。总体研究目标应侧重于将已证明的动态系统反馈控制能力转化为有效资源管理的工具，并将资源使用方面的竞争转化为合作。这需要更好地理解如何在闭环系统环境中对人类行为进行建模，研究如何在这种环境中实现平衡，并设计鲁棒的策略来优化公平和效率，而这两者往往存在冲突。○

社会尺度挑战下的控制：2030 路线图（五）

文 / Anuradha M. Annaswamy、Karl H. Johansson、George J. Pappas

翻译 / 哈尔滨工业大学（深圳） 何阳

2.5 节 社会规模系统的弹性

本节作者：

Saurabh Amin、Henrik Sandberg、Jacqueliën Scherpen、Dawn Tilbury、Andrew Alleyne、Giacomo Como、Johan Eker、Frederick Leve、Nikolai Matni、George J.Pappas、Thomas Parisini、Emma Teling

在本节中，我们将解释控制系统社区如何准备在建立社会规模系统的弹性方面发挥关键作用。我们可以通过开发监测和决策工具来更好地规划、管理和控制关键基础设施，并促进可以从这些工具中受益的各个实体之间的协调，从而为这一使命做出贡献。

摘要

今天的社会规模系统面临着几个风险。其中包括疫情后不均衡的经济复苏、环境风险（气候行动失败、极端天气、自然资源危机）、技术风险（战略基础设施受到攻击、对数字系统失去信任）和社会风险（生计危机和公共卫生问题）。控制系统科学和工程

界可以引导政府和私营部门实体并与合作，将弹性纳入社会规模的系统。我们有能力为供应链、制造业、运输和能源基础设施等各个部门的中断提供有效和及时的管理工具。通过这样做，我们可以利用新兴的监管杠杆和原则性的数据驱动方法来限制干扰的负面影响。我们还可以考虑战略决策者的激励因素和影响网络系统中控制回路性能的相互依赖性。具体建议包括将气候科学的预测方法与适应和缓解气候变化的控制理论工具相结合；开发安全可靠的技术，实现关键供应链的自动化和监控；利用物联网、人工智能和云计算的进步，提高各个行业的效率和灵活性；通过开发结合技术防御和机构 / 监管要求的风险管理工具，提高对随机和对抗性干扰的抵御能力。

2.5.1 导言

随着政府、私营部门和社区在新冠肺炎疫情之后努力恢复，我们被提醒注意跨越人类文明的社会、经济、环境和技术层面的全球风险（五类 30 种全球风险的示例见图 1）。在近期（两三年），

我们预计不同经济部门的复苏轨迹将不均衡，大宗商品价格波动、通货膨胀上升和债务水平变化就是明证。从中期来看（三到五年），这种分歧预计将与极端天气事件、地缘政治紧张局势和贸易国之间的经济对抗相吻合。然而，从中长期（5 至 10 年）来看，最重大的风险被认为是环境风险，如气候行动失败、极端天气、生物多样性丧失和自然资源危机，以及社会风险，如社会凝聚力侵蚀、非自愿移民和生计危机。此外，诸如数字化造成的网络安全故障和不平等可能具有潜在的重大意义。

一方面，疫情的后果使应对气候行动、数字安全和关键系统恢复力等长期挑战所需的协调变得复杂。另一方面，对公共卫生危机的各种反应揭示了对管理此类风险的弹性改善因素的一些有价值的见解。风险管理应从政府平衡关键的权衡因素（例如，公共卫生与经济）开始，通过做出基于数据的决策来展示准备和响应能力，并促进公共和私营部门之间的有效沟通。然后，私营部

门应在多个层面（包括地方和国家层面）为有效和及时的应对措施做出重大贡献。这可以通过增强供应链弹性、重新配置制造业以满足关键需求以及在行业内实施负责任的行为准则来实现。之后，社区将发挥关键作用，帮助基层地方政府，提高对系统脆弱性的认识，并鼓励公众为建立韧性做出贡献。

在本章中，我们将解释控制系统社区如何准备在应对全球风险方面发挥关键作用。其中包括开发弹性，改进技术解决方案，以更好地规划和运营管理关键系统，并促进实施新政策和法规所需的协调和数据共享安排。

在过去的十年里，控制系统科学家和工程师在设计和运行社会规模的 CPHS 方面做出了重大努力。这有利于新兴的服务模式，并在几个领域创造了新的商业机会，包括数据访问和分析、能源管理（如建筑系统控制、需求响应）、汽车安全、大都市交通管理、环境和基础设施监测、可再生能源集成以及电网的弹性运行。然而，从全社会的角度来看，无处不在的连接性、可扩展性、可靠性、安全性、适应性和操作灵活性等总体目标仍然难以实现。

为了应对这些挑战，控制系统建模和分析方法需要以量化关键服务需求为基础。我们建立和设计控制的方法必须明确认识到

我们的社会规模网络面临的系统性漏洞，并有效利用新兴的监管杠杆以及原则性的数据共享和分析原则。

一个重要的交叉挑战是，传统上，控制系统设计被认为在很大程度上与系统操作者、管理者和用户等战略实体的经济激励脱节。在遗留系统（legacy systems）的背景下，控制工程师受益于明确的所有权结构，最多只能与监管机构和政策制定者进行有限的接触。然而，在数字化、数据驱动分析和人机交互的主流趋势下，这种控制和激励方案的松散耦合是无法持续的。值得注意的是，新的控制应用程序将需要更快的操作时间尺度、更大的空间互联性（通常跨越多个边界和管辖区）、许多混合的主动交互和异构组件。如果没有控制和激励的紧密耦合，我们的关键系统很可能会继续面临关键操作指标之间的冲突，如性能效率与稳健性以及故障与入侵。他们还将面临个人最优策略和社会最优策略之间的持续错位。重要的是要了解战略决策者的激励和机制如何影响激励的形成，这些激励解释了控制回路的保证（限制）和潜在的网络相互依赖性。我们认为，这一领域的进步将大大有助于在全球风险面前限制社会损失。

2.5.2 挑战和机遇

我们现在讨论控制系统社

区面临的关键挑战和机遇。围绕四个具有代表性的领域和相关风险，我们讨论了以下问题：控制系统技术如何有助于缓解和适应重大的全球风险？需要哪些具体的建模、分析和设计进步？在5到10年的时间范围内应该设定什么目标？在适当的时候，我们还提出了一个问题：控制系统技术当前/正在进行的部署是否会产生意想不到的后果，从而加剧这些风险？

气候变化和极端事件导致的基础设施故障

温度波动、飓风和热带风暴以及沿海洪水等极端事件正在日益威胁能源和交通系统等关键基础设施。由于全球气候变化，其破坏性潜力预计将在未来几十年进一步增加（见图 2.12，了解可能导致全球系统性危机的协同风险示例）。例如，当许多能源公用事业公司难以处理 2017 年飓风“哈维”、“伊尔玛”和“玛丽亚”的后果时，飓风导致关键基础设施受损的风险变得显而易见。基础设施系统天生对天气和气候变化很敏感，但是我们目前对这些关键系统面临的气候风险的了解非常有限。我们需要基础建模和控制设计工具来更好地规划、监控、响应以及适应这些风险。

了解几十年来气候变化对复杂的相互依存的基础设施系统的

影响尤为重要。整合可再生能源和分布式能源正在增加能源系统供应方的可变性。随着政府和行业追求雄心勃勃的脱碳目标，能源构成预计将进一步变化，尽管目前的输电和配电基础设施仍然压力过大（而且往往管理不善）。此外，新的电动汽车和低碳替代燃料（如生物柴油、氢气、非化石天然气）的持续部署预计将增加能源、交通和制造系统之间的相互依赖性。预计人为活动也会改变直接影响能源需求和供应的气象变量的分布和可变性。这些趋势导致的时空变异预计将随着季节和几十年的推移而演变，从而在能源系统规划和运营方面产生新的权衡。

控制系统界可以通过将气象学家和气候科学家开发的先进预测方法与不确定性下决策的控制理论工具相结合，领导气候 - 基础设施关系的跨学科工作。这些努力可以建立在设计电网等复杂网络运营的经验基础上，并有助于推进天气和气候数据的整合，以评估和管理气候风险。值得注意的是，传统的风险评估方法只考虑相对较小的一组（平均）天气数据。这限制了制定具有风险意识的长期基础设施更新规划（如输电扩建和发电容量扩建）和运营战略（如机组承诺和经济调度模型）的能力。面对不确定性，我们需要以建模和决策为基

础的基础设施 - 气候风险评估和管理的系统理论基础。

上述目标的实现可以通过开发一种数据驱动的方法来评估大规模网络中天气造成的损害，设计事前资源分配和事后响应 / 控制策略以快速恢复。特别是，控制理论工具可用于估计极端事件强迫的时空变异性，并预测其对基础设施的影响。我们还必须使用异构、多模态的数据，通过控制工具来检测和识别故障事件和主动响应。这将需要推进优化资源分配和响应操作的建模和计算工具，并开发用于资源分配、网络加固、微电网运行和快速恢复的系统工具。

还需要做更多的工作，将气候模型和模拟的高维时间序列数据系统地添加到耦合的基础设施 - 气候系统动力学中，并为关键产出和风险指标提供合理的不确定性界限。此外，我们需要为决策者开发有用的工具，说明气候风险的概率性质以及它们如何影响各种利益相关者（发电机、输电运营商、公用事业和客户）。这需要随机建模、动态优化和网络控制的思想来限制气候风险对基础设施系统的影响。最后，我们需要认识到政府和私营部门实体之间管理跨部门 / 组织数据共享的不同所有权结构和战略互动，以及实施提高弹性行动所需的个人激励措施。

全球网络的安全威胁

网络攻击一直被列为全球长期风险之首。由于嵌入式物联网和计算设备在我们的电网、车辆、医疗设备、建筑和许多其他我们经常互动的系统中的数字化和部署，它们尤其受到控制系统界的关注。众所周知，这种 CPS 具有巨大的积极影响：它们提高了安全性、效率和适应性，并增强了新兴服务模型的可靠性、可用性和自主权。

量化和管理 CPHS 的风险仍然是一个独特的挑战，尤其是在处理由同时攻击（安全故障）和同时故障（可靠性故障）引起的相关故障方面。由于与多个决策者的紧密网络物理交互和互动，使用可用的诊断信息来隔离任何特定故障的原因是极其困难的，或者至少是非常耗时的，而这些诊断信息通常是不完美和不完整的。本质上，CPHS 中的安全性和可靠性故障本质上是相互交织的。控制系统界处于有利地位，可以利用技术防御和制度手段来限制由于相互依赖的可靠性和安全故障而产生的风险。

降低安全和可靠性风险的技术手段包括 IT 安全工具，如身份验证和访问控制机制、网络入侵检测系统、补丁管理和安全认证。它还包括控制理论工具，如基于模型和数据驱动的检测和隔离，在一类攻击下保持闭环稳定性和

性能保证的鲁棒控制策略，以及限制相关故障影响的可重构控制策略。控制界已经认识到，安全工具的有效性可能受到速度、成本和可用性考虑的限制。例如，安全补丁更新的频率受到实时约束的限制，通用标准认证受到安全资源的限制。控制研究人员与政府和行业组织合作，制定了安全标准和建议，将特定于 IT 的安全防御与控制理论工具相结合。

实施安全和可靠性风险评估框架的一个重大挑战是开发数据驱动的随机 CPHS 模型，该模型考虑了相互依赖的可靠性和安全故障下的动力学。这里的关键挑战是将关注特定场景下动态的基本模型扩展到捕捉各种相关故障场景的复合模型，包括同时攻击、共模故障和级联故障。原则上，统计估计、基于模型的诊断、随机模拟和预测控制等技术可用于根据实时数据生成新的故障场景，综合作战安全策略，并在故障高度相关且信息不完善的环境中提供剩余风险的估计。

需要注意的是，仅基于技术的防御不足以确保对相关故障的恢复能力。特别是，私人方面缺乏对安全改进的激励，严重阻碍了实现社会期望的 CPHS 安全改进。由于个体参与者的利益冲突而导致的信息不足加剧了这一问题，他们的选择影响了 CPHS 风险。在信息不完整和不对称的环

境中，相关故障的社会成本通常超过单个参与者的损失，这些参与者的产品和服务影响系统运行，风险取决于他们的行动。相对于社会最优基准，个体参与者可能会在安全方面投资不足，这需要设计制度手段来重新调整个人激励措施，以进行足够的投资。尽管如此，我们对于统计上罕见事件（如极为相关的故障）的风险获取存在限制，这意味着即使在最好的技术防御和制度结构下，我们的关键社会基础设施也面临残余风险。面对这些残余风险，控制系统社区将需要设计和运行系统。这一点从有组织的能入侵关键控制系统的网络犯罪集团的出现，以及参与武装冲突的国家积极采用的网络战中可见一斑。

供应链中断

今天的供应链是复杂、相互关联且全球性的网络。它们包括生产商、运输和物流公司，以及储存、组装和分销大量产品以及提供差异化服务的实体。近年来，供应链已经全球化。这提高了生产国（特别是低收入国家）的生产力和收入水平。正在进行的供应链数字化转型大大提高了自动化、成本控制和服务质量水平。它还提高了交易的效率和及时性，同时改变了人类在制造厂、仓库和物流运营中的角色。

然而，同样显而易见的是，许多供应链已经变得更容易受到

干扰。全球疫情揭示了关键零部件和原材料的反复短缺（例如，半导体芯片短缺影响了许多行业的制造业）以及快速演变的消费者购买模式等问题。

值得注意的是，走向脆弱结构的运动已经酝酿了几十年。例如，许多公司减少了产能缓冲和经验丰富的人员，以满足消费者对低价的期望。为了降低成本并在艰难的市场中获得竞争优势，我们看到了大量的外包和离岸业务。这大大增加了对于发展中经济体的依赖，与此同时中国正在成为一个主要的制造业中心。这些只是 2011 年日本海啸、2008 年金融危机和 2003 年 SARS 疫情等带来众所周知的混乱背后的一些原因。

控制系统界在应对自然灾害和天气紧急情况（预计会随着气候变化而增加）、网络攻击、劳动力短缺 / 罢工和金融危机等事件时，处于提高全球供应链抵御能力的有利地位。以下是一些机会：

多样化供应链网络中的端到端可见性：控制工程师已经为物联网、机器人和自动化在各种生产和物流过程中的部署做出了贡献。通过借鉴设计大型监控系统的经验，我们的社区可以提供解决方案，以确保在不同的供应链网络中实现端到端的可见性，从垂直整合的行业到具有不同程度的离岸、外包和协作关系的行业。这里的挑战是，我们是否可以设

计监控系统，为不可预见的延迟或质量不合规等问题提供细粒度的警报。

识别干扰传播和薄弱环节：控制系统思维还可以为干扰如何在这些复杂网络中传播提供新的见解，并帮助利益相关者及时识别薄弱环节。这一点尤为重要，因为与气候相关的事件的规模和频率都在持续上升，其中许多事件正在造成供应链冲击。一个重要的步骤是利用供应链结构可见性的提高来确定供应商是否能够满足其当前生产计划和库存水平的需求。例如，David Simchi Levi 的研究表明，“生存时间”和“恢复时间”等指标在评估韧性方面非常有用。

建立冗余措施：来自分布式系统控制、随机优化和控制学习的最新发展的工具可以为在何处以及如何建立冗余措施（如备份容量和战略持有额外库存）提供有用的见解。需要注意的是，建立冗余通常成本高昂，但在供应链紧张时期，它可能会提供竞争优势并增加利润。控制系统界在设计和实施电网中的冗余措施方面有着悠久的历史。有一些有趣的相似之处和经验教训可以应用于供应链。

提高供应链敏捷性：保持供应链的敏捷性将使他们能够快速响应，并在输入之间进行替代，以应对中断。企业可以通过各种方式提高灵活性，包括识别瓶颈并迅

速解决，投资灵活的生产流程和通用制造线，以及与供应商保持长期合作关系。所有这些解决方案都需要在不确定性下做出决策，并有能力量化关键的潜在权衡。

与政府和公共部门接触：控制系统界可能会围绕政府和公共行业在促进韧性方面的作用进行对话。重要的是，公共部门在维持能源生产、气候安全、人员运输、关键原材料以及国家和国际供应等部门的投资水平方面发挥着至关重要的作用。在新冠肺炎大流行期间，世界各地政府在收集和传播信息以及确保关键商品供应方面的应对措施多种多样，凸显了及时协调干预的重要性。类似的机会在于提供关键的汇总信息，以帮助运营全球供应链的各个实体之间进行有效的规划和协调。

2.5.3 建议

网络分析——面对风险时的结构和动态

- 对网络物理网络中干扰的动态传播进行建模，并使用多模态数据来学习网络结构和动态（近期）
- 开发风险评估的定量方法，量化风险指标，并利用数据和模型。开发通用方法和特定于基础设施的分析，说明共模故障和基础设施之间的相互作用（近期）
- 了解罕见事件及其风险，以及建模和阻止级联风险和故障的方法（中期）
- 根据预算、激励和基础设施相互

作用的限制，最大限度地降低网络结构设计的风险。这可能涉及新设备和服务的分配以及部分基础设施升级（中期）

- 通过多个相互作用的子系统之间的协调来发展弹性控制，这些子系统可能由有自己目标和不完善信息的决策者操作（中期），包括完整性、可追溯性，以及对中断的恢复能力（中期）
- 开发基础理论，将大型复杂网络的分析方法与面对全球风险的战略规划和运营响应设计方法相结合（长期）
- 开发计算方法的基础知识，以解决全球供应链（包括能源系统）与不断变化的极端天气和气候（长期）

了解网络中的所有权结构和形成激励

- 在分布式控制和动态机制设计之间建立联系（近期）
- 了解如何共同设计激励和控制，以利用博弈论建模和控制学习与网络（例如，具有不确定参数的网络中的战略网络形成、学习和适应，以及网络的相互依赖性）（近中期）
- 考虑监管制度的差异，并以有助于部署技术的规模和鲁棒性的方式推动它们（中期）
- 学习如何建立网络和控制回路，以减轻意外后果。（中期）
- 了解如何仅控制网络的某些组件以及如何集成不同的组件

(中期)

- 定义组件之间的接口，并了解可信设计需要什么样的监管(中期)
- 分析替代信息和激励结构下CPHS风险管理的安全IT和控制理论防御和政策机制(长期)
- 在负责运营和管理关键系统的实体之间建立正式的互动渠道，即使他们位于不同的司法管辖区，也要协调对破坏性事件的有效应对(长期)
- 了解机构如何为恢复能力提供新的商业案例和新的风险分担方式，如保持安全的CPHS的最低法律责任水平，并激励漏洞发现、事件披露和保险工具，以改进有关风险的信息(长期)

监控、中断的早期评估和量化预测

- 了解潜在的网络状态，并基于异构数据快速识别相关事件(近期)
- 采用数据驱动的方法来利用和创建新的数据集以及与模型驱动框架的交叉点(近期)
- 了解执行器、控制的作用以及行为模型分析的机会(近期)
- 预测全球网络/供应链的大规模中断，并了解这些预测的局限性和不可能性。利用统计机器学习和最坏情况下确定性建模以及对开始和失败触发事件的检测的混合(中期)
- 成功部署计算工具，用于基于中

断的异构多源数据的分析驱动诊断模型(中期)

- 了解诊断和共享安排所需数据的所有权结构确保用于生成警报的数据的可信度所需的(中期)
- 探索数字商品、信息和货物的流动、计算和通信需求的安全监控、无人机机队之间的合作，以及依赖单一国家托管的云服务的风险(中期)
- 将利用过去网络中断数据和预警指标的诊断工具与最佳资源分配和网络控制策略的设计相集成(长期)
- 在中断事件之前和期间积极学习，并准确预测其对关键网络和服务的影响(长期)

网络上的非法、犯罪、对抗性行动

- 建立在网络安全和弹性控制方面的重要工作之上，并将范围扩大到相互依赖的系统(近期)
- 利用安全分配(博弈论)来破坏非法活动(近期)
- 在CPHS中设计蜜罐(近期)
- 纳入关键供应链以提高可信度(中期)
- 破坏非法供应链(人口贩运、自然资源、稀有矿物等)，并了解监控和检查技术和供应链网络控制，以消除非法流动(中期)
- 应用基础知识和工具，了解人类在CPHS中发起非法、犯罪和对抗行为的作用(长期)
- 评估AI/ML技术在创建新的攻

击载体中的作用，以及如何创建监管和激励框架来限制其有效性。此外利用国家政策和国际承诺，负责任地使用部署在关键系统中的数字技术(长期)

- 了解控制系统设计者和操作员需要在多大程度上接受培训，以识别此类行为(长期)

重新配置和调整，以建立弹性

- 确定将缓冲区放回系统和内存的位置，谁来买单，代价是什么，以及如何将失败本地化(例如，如果一家银行破产，世界其他地方不会跟着破产)(近期)
- 思考效率和韧性之间的权衡：是否存在帕累托曲线？供应商、消费者还是政府应该为韧性买单？(近期)
- 了解最近的例子如何影响制造业和供应链。例如，全球芯片短缺如何影响新车和二手车市场，这些市场如何适应，以及需求如何变化(近期)
- 考虑缓冲或重组，以及私营企业拥有缓冲的动机。当一家公司提供缓冲时，精益或准时制(JIT)公司必须在中断发生时支付大量费用(中期)
- 定义有关调整制造和物流以实施再利用和回收(循环经济)的问题，如工具、处置成本和体制结构，以及激励制造商将安全可靠的产品推向市场或在需要时召回/修复这些产品(中期)

- 评估和规划对涉及民族国家的网络冲突的全球应对措施，包括网络能力被部署为颠覆手段和造成人道主义困境的情况（长期）
- 理解为什么规模是一个挑战。确定如何在机制 / 激励设计和监管中使用电网等工程系统（例如，在可再生能源密集型电网中部署存储和多矢量能源系统规划中的脱碳战略），以实现规模（长期）
- 确定控制技术的方向，为风险管理创建商业案例（长期）
- 了解何时召开缩减全球经济的临时战略会议或等待崩溃（长期）

对年轻研究人员的建议：

为了在下一代社会基础设施中建立弹性，我们需要基础工具来了解中断下的网络动态，并检测 / 识别故障；设计控制和激励机制，以提高战略环境中的闭环性能；并实施最佳资源分配和动态响应策略。

对于资助机构：

刚刚起步或需要更多探索的领域包括全面和情境设计方法，以确保关键系统在面临新出现的风险（特别是技术、环境和社会风险）时的安全、信任和保障，以及强大的数据驱动机制，以在网络系统的各种中断中保持功能。○

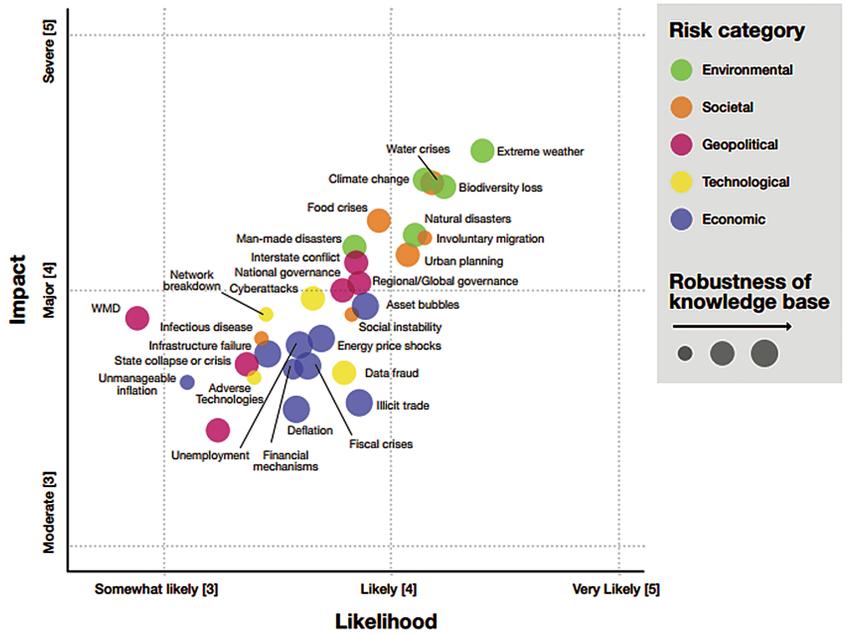


图 1

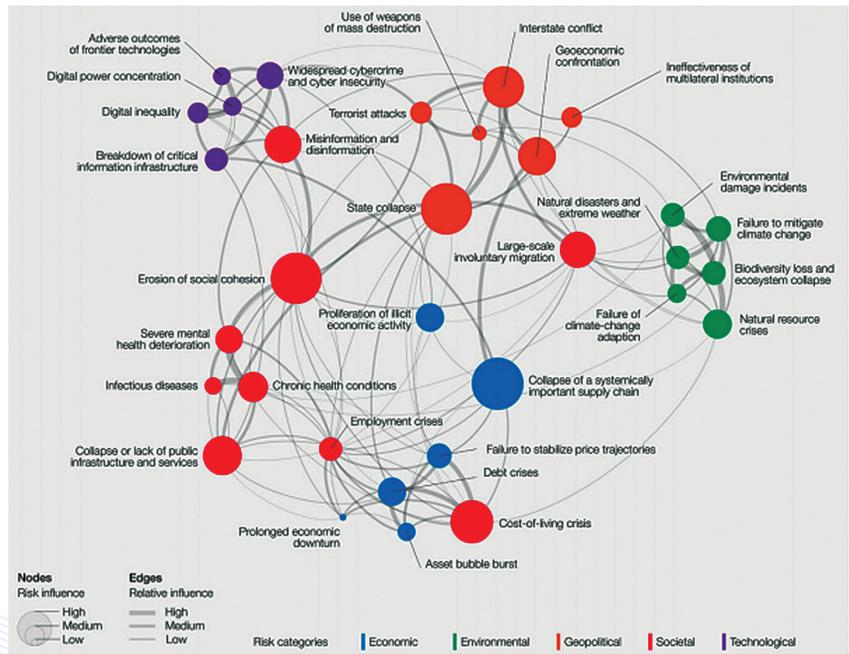


图 2

建模与仿真服务化研究综述

文 / 张淼 许凯 彭勇 尹全军

摘要：建模与仿真服务化是提升用户体验，支撑按需访问建模与仿真能力的有效手段。本文首先从建模与仿真服务的访问、开发以及运行与管理三个层面对建模与仿真服务化的概念进行辨析；并从服务的分类、抽象层级、基本元素和状态四个角度对建模与仿真服务的特征进行阐述。然后从基于网页的仿真、基于面向服务架构（Service oriented architecture, SOA）的仿真系统开发和服务化基础设施三个维度对建模与仿真服务化的发展历程进行梳理。在此基础之上，分析了基于云的建模与仿真服务化的构建原则、基本架构和应用模式，并从访问、开发以及运行与管理三个层面给出建模与仿真服务化相关的支撑技术。最后，从理论体系、关键技术和新兴技术三个方面给出进一步发展建模与仿真服务化的建议。

仿真技术伴随计算机技术的诞生而产生，至今已经发展了六十多年，并在国防经济生活中扮演着越发重要的角色。美国国会在2007年通过的487号决议中，明确将建模与仿真列为“国家核心技术”。2018年12月修订生效的美国新版高等教育法中，建模与仿真作为唯一一项具体技术被列入其中，并使用大量篇幅说明如何推动建模与仿真技术在大学教育中的普及^[1]。

然而，随着建模与仿真技术应用的不断深入，也面临着很多新的问题^[2-4]：1) 仿真系统的规模日益扩大，模型的粒度与功能也越发精细与复杂，需要更多的计算资源；2) 用户购买、操作和维护高性能计算机需要较大成本，容易造成浪费；3) 不同单位或机构开发的海量异构仿真资源难以高效共享与重用，降低系统开发效率；4) 仿真需求动态变化时，开发人员难以快速构建所需仿真应用；5) 仿真的领域性、专业性不断增加，用户难以简单方便地使用和访问。

云计算和面向服务架构（Service oriented architecture, SOA）技术的发展为上述问题的解决提供了一种新的思路^[5]。借助于虚拟化技术和“X即

服务”的计算模型，云计算能够为仿真用户提供近乎无限的计算资源和随时随地的便捷访问。同时，能够避免硬件上的巨大投入，降低仿真的应用门槛。基于SOA的仿真服务开发使得服务的实现与使用相分离，且服务自包含、松耦合、可重用的特性有助于仿真资源的高效共享与重用，进而提高开发效率，降低开发成本。

自Gustavsson等^[6]在2004年的秋季仿真互操作会议上首次提出面向服务仿真的概念以来，建模与仿真服务化便受到大量学者和从业人员的广泛关注。李伯虎等^[2]在网格仿真工作的基础上提出云仿真的概念^[7]。Fujimoto等^[3]则强调云计算、边缘计算对于解决仿真所面临瓶颈问题的巨大潜力。民用领域，建模与仿真服务化被应用在教育^[8]、交通^[9]、能源^[10]等多个行业并产生显著经济效益。特别地，建模与仿真服务化能够为国防及工业部门的仿真能力建设带来巨大推动作用，并受到世界军事强国或组织的广泛关注。

为改善信息、资源、能力的共享，促进互操作与联合作战，美国国防部在2007年以SOA为

支撑架构提出了网络中心服务战略，全球信息网格（Global information grid, GIG）则是该战略转型的重要标志^[11]。2012年，美军提出了云使能模块化服务框架（Cloud-enabled modular services, CEMS）^[12]以实现高效、模块化、可组合的仿真训练环境的快速构建。北约科技组织下的建模与仿真研究组（NATO modeling and simulation group, NMSG）则组建了多个专业的研究小组对建模仿真即服务（Modeling and simulation as a service, MSaaS）的概念、架构、技术、实现、应用等方面进行研究。其中MSG-136小组活动时间为2014年9月至2017年12月，并于2017年底发布了MSaaS参考架构^[13]；MSG-164小组活动时间为2018年2月至2021年2月，负责对MSaaS功能进行完善，实现并验证原型系统^[14]；MSG-195小组的目标则是使MSaaS架构成熟可用，预期活动时间为2021年至2024年。同期，美国国防部建模仿真协调办公室在2020年2月推出了国防建模与仿真参考架构来促进

国防部建模与仿真工作^[15]，同时指出，“对于很多建模与仿真应用而言，向云计算和SOA的迁移可以改善可访问性和敏捷性，同时降低运营和其他生命周期成本。”

考虑到建模与仿真服务化对国防和经济建设的巨大推动作用，很多学者基于特定的应用需求对其进行深入研究，并取得丰硕成果。然而，现有工作大多只针对建模与仿真服务化的某一侧面，如参考架构、实现方式、关键支撑技术等进行研究，没有形成对建模与仿真服务化完整的研究体系。另一方面，从仿真系统全生命周期考虑，一般涉及仿真用户、系统开发人员和系统运维人员。每类人员对建模与仿真服务化具有不同的需求，但现有研究缺乏对这些多样化需求的全面考量。尽管也存在一些文献^[16-20]尝试对建模与仿真服务化的研究进行梳理，但通常是针对特定问题场景或只从某个侧面对建模与仿真服务化进行阐述，研究的体系性仍存在欠缺。在表1中我们详细给出了本文研究与现有相关综述的异同点。

表1 与现有相关综述的异同

文献名称	发表时间	主要内容	与本文异同点
Modeling and simulation as a cloud service: A survey ^[16]	2013	首次给出MSaaS的服务模型，探讨MSaaS架构和部署模式，分析MSaaS可能面临的安全威胁，简要介绍服务组合技术	1) 本文同样对MSaaS的服务模型、架构、部署模式进行探讨；2) 该文缺乏对MSaaS发展历程的梳理，且对实现MSaaS所需的关键技术讨论较少
面向服务的建模与仿真技术综述 ^[17]	2013	对SOA与HLA、DEVS、MDA和云计算等规范或技术的结合进行研究，探讨基于SOA实现建模与仿真的服务化	1) 本文同样对SOA在仿真领域的应用进行深入探讨；2) 受限于当时的技术发展，该文缺乏对微服务、纳米服务等SOA新形态的介绍
Architectural design space for modeling and simulation as a service: A review ^[18]	2020	针对MSaaS的架构设计空间进行深入研究，给出MSaaS架构的分类标准，指出MSaaS架构需要具备的核心能力	1) 本文同样对MSaaS的架构进行探讨，并给出通用架构；2) 该文只综述了与MSaaS架构相关的工作，缺乏对MSaaS的相关概念、发展历程、支撑技术的讨论
Towards cloud-native simulations — Lessons learned from the front-line of cloud computing ^[19]	2021	阐述云计算范式的发展对仿真领域的影响，提出云原生仿真参考模型，分析微服务、纳米服务对云原生仿真的影响	1) 本文同样讨论了单体服务、微服务、纳米服务等技术对云原生仿真的影响；2) 该文缺乏对实现建模与仿真服务化所需技术的整体性阐述
网络化仿真及其发展趋势 ^[20]	2021	给出网络化仿真的含义与特征，阐述网络化仿真发展历程，探讨未来网络化仿真发展趋势	1) 本文同样对建模与仿真服务化的发展历程和未来趋势进行深入讨论；2) 该文对建模与仿真服务化发展历程的介绍不够全面，也没有给出关键的支撑技术

本文首先对建模与仿真服务化的背景知识进行介绍, 给出其基本概念和主要特征; 然后从访问、开发以及运行与管理三个角度对基于云的建模与仿真服务化的研究工作进行全面的梳理, 给出其演化逻辑; 之后从构建原则、基本架构和应用模式三个层面阐述建模与仿真服务化的内涵; 在此基础上, 从访问、开发以及运行与管理的角度给出建模与仿真服务化的关键支撑技术, 为仿真用户、开发人员、运维人员等不同类型人员提供参考; 最后, 对如何进一步提升建模与仿真服务化水平给出一些建议。

1 建模与仿真服务化背景知识

本节首先介绍建模与仿真服务化相关的概念, 给出服务的定义, 对服务与组件的关系进行辨析, 并从三个层面阐述建模与仿真服务化的含义。然后对建模与仿真服务的特征进行分析, 探讨了仿真服务的分类、抽象层级、组成元素和状态。

1.1 建模与仿真服务化基本概念

1) 服务定义。服务并不是一个新的概念, 很多学者和组织都给出了服务的定义。结构化信息标准推进组织将服务定义为^[21]“按照服务描述约定的接口、约束和策略访问一种或多种能力的机制”。开放团体(The open group)认为服务是“一种自包含的、具有特定输出的可重复黑盒逻辑表示”^[22]。也有学者从功能的角度考虑, 认为“服务”这一概念, 体现了常用软件组件的松耦合、可重用、可组合与可发现^[23-24]。

总的来说, 服务是一种可通过标准化的接口进行访问的、具有特定能力的逻辑表示, 具有独立、自包含、松耦合的特征, 可通过服务描述实现服务的发现、组合、集成与重用。

2) 服务与组件概念辨析。服务与组件是两个容易令人混淆的概念, 它们之间具有很多的相似之处, 如都可通过组合与集成实现系统的快速开发与资源重用。但它们之间也存在一些显著的差异。

对象管理组织的“建模语言规范”中, 将组件定义为“系统中一种物理的、可代替的部件, 封装并实现了一系列可用接口”。计算机百科全书的描述中, 组件是“系统中与语境有明显依赖关系的、独立、可组装软件实体”。Szyperski^[25]认为, 组件“是一个彼此独立, 且只基于定义好的方式进行通信的部署单元, 能够通过重部署支持动态场景”。文献^[26]则认为, 组件是仿真环境的结构分解, 服务则是仿真环境的功能分解, 一个服务所执行的功能可通过组件的方式实现。

综合上述对于组件的定义, 我们认为组件与服务主要在三个方面存在差异: a) 上下文依赖性。服务不依赖于上下文, 可进行独立的更新与替换, 组件则与上下文环境高度相关。b) 平台依赖性。服务是对功能更高级的抽象, 可使用任意编程语言实现, 而典型的组件技术则与具体的编程语言或平台相关(如DCOM只支持Windows)。c) 可发现能力。服务是服务描述和多个服务实现的组合^[24], 可基于标准化的服务描述实现服务的发现。组件更多强调系统在结构层面的拆分, 难以实现组件的快速发现。

3) 建模与仿真服务化。建模与仿真服务化是指以服务为中心构建模型与仿真系统, 其具有三个层面的含义: a) 面向服务的访问。主要强调用户可以基于浏览器或客户端在任何时间、任何地点方便快捷地访问所需的仿真服务, 允许用户基于标准化的仿真服务描述实现服务的发现与组合, 支持用户实现快速的定制化仿真。b) 面向服务的开发。基于面向服务架构(SOA)的软件思想开发仿真模型和仿真支撑环境, 通过对通用功能组件的服务化封装以及标准化的服务描述, 实现仿真服务的自包含、松耦合、可发现与可组合。c) 面向服务的运行与管理。建模与仿真服务往往以分布的方式在云数据中心等远端部署和执行, 这给仿真的运行与管理带来了很大挑战。具体而言, 面向服务的运行与管理可以从三个角度去考虑, 包括仿真应用的正确运行、仿真资源的高效管理、仿真过程

的安全可靠。

1.2 建模与仿真服务特征

1) 服务的分类。对于建模与仿真服务的表现形式,存在多种不同的理解。从应用模式的角度看,Cayirci等^[16]借鉴云计算服务的思想,将其分为建模即服务、模型即服务和仿真即服务。Liu等^[27]则将服务模式扩充为四种,增加了VV & A (Verification, validation & accreditation) 即服务。

从仿真资源的角度看,任何资源都可被封装为服务。根据美军建模与仿真资源库 (Modeling and simulation resource repository, MSRR) 对仿真资源的定义,与仿真相关的数据、元数据、算法、模型、仿真应用和工具集等不同类型的资源均属于仿真资源^[28]。事实上,利用虚拟化等手段,实装、模拟器等资源也可被封装为服务。

同时,服务可能拥有不同层级的分辨率^[29],可能是软件组件、已部署的应用,或是整个的系统。

2) 服务的抽象层级。根据服务与仿真架构、仿真平台及编程语言的关系,可将服务划分为四种抽象层级^[24]: a) 实现无关层级,是对服务最高级的抽象。服务包含与仿真架构和实现相独立的服务描述,可用于设计时的服务发现和组合。在该层级,本体语言(如基本对象模型)可用于描述仿真服务的需求规范,以辅助后续的软件开发。b) 仿真架构相关层级,服务包含架构依赖的服务描述。基于本体的服务描述可以被细化为仿真架构相关的描述,如高级体系架构 (High level architecture, HLA)、分布式交互仿真 (Distributed interactive simulation, DIS)、试验与训练使能体系结构 (Test and training enableing architecture, TENA), 或其他新型仿真架构。c) 服务平台相关层级。服务描述可被细化为与平台相关的格式,如网页服务描述语言 (Webservices description language, WSDL) 及其变种等。d) 实现相关层级。在该层级,服务基于特定编程语言或代码框架实现。

3) 服务的基本元素。基于北约对服务的描述,服务的基本元素包括属性、策略、功能以及接口^[24]。服务具有服务属性(如可用性),受服务策略约束(如服务必须在X天内提供),执行服务功能,并提供访问接口。

4) 服务的状态。服务可以是有状态或无状态的。无状态服务是无记忆的,不同的服务调用间彼此独立,输出只与输入有关,如路径规划服务。有状态服务则是有记忆的,输出不仅与输入有关,也与服务实例当前的状态有关,如模型服务。在仿真应用中,很多服务可能是有状态的^[30-31],这给服务调度、时间同步、数据管理等都引入了新的挑战。

2 建模与仿真服务化的发展与演化

建模与仿真服务化具有丰富的内涵。本节分别从基于网页的仿真、基于SOA的仿真系统开发和服务化计算基础设施三个角度对建模与仿真服务化在访问、开发以及运行与管理三个层面的发展脉络进行梳理。

2.1 基于网页的仿真

随着90年代初WWW的出现与发展,考虑到应用网页化的趋势,冬仿会议在1996年第一次开始了关于基于网页仿真 (Web based simulation, WBS) 的讨论^[32]。Wang和Wainer^[33-34]认为“在WBS中,仿真器及仿真环境位于远端服务器,用户通过浏览器和网页提供的资源与技术提交请求并获取所需的仿真资源。”

WBS本质是Web技术与分布式仿真技术的融合^[35-36],浏览器在建模与仿真的过程中扮演着重要的角色,或者只作为一个图形化接口,或者作为仿真引擎的容器^[37]。理论上,用户可在任何支持浏览器的设备上获取所需的建模与仿真服务。

相比于传统的仿真模式,WBS的优势包括^[33, 37]: 1) 易于使用; 2) 便于部署; 3) 跨平台; 4) 广泛可用; 5) 集成与互操作等。但也存在一些缺点,如: 1) 访问延迟; 2) 图形化能力受限; 3) 易受攻

击；4) 稳定性差等。

鉴于 WBS 是分布式仿真基于 Web 技术的一种应用模式，Web 技术的发展会对其设计、开发、运行以及用户的访问模式产生重大的影响。到目前为止，Web 技术的发展与演化主要经历了三个阶段^[37-38]，即 Web 1.0，Web 2.0 和 Web 3.0。这三个阶段不是基于某种技术而划分，而是基于应用理念而划分。表 2 总结了网页技术的发展对 WBS 的影响。

2.1.1 Web 1.0

Web 1.0 的时间跨度大约为 1996 年至 2004 年，主要特征是网页内容由少数人发布，用户只能通过浏览器读取或使用服务提供商提供的有限内容及服务，典型的例子是搜狐、雅虎等门户网站。相应的，该时期 WBS 所提供的功能也相对受限，比较典型的应用模式是将仿真应用整体地不做实质改变地迁移到远端的服务器上，仿真用户通过浏览器提交简单的服务请求，后端服务器在执行完相应计算任务后将结果返回给用户。

尽管该时期也有一些基于网页的仿真应用，很多是被创造出来以证明可以使用网页进行仿真，而不是因为需要使用网页进行仿真^[39]。同时，仿真应用开发、部署与执行的架构或模式并没有发生本质变化，仍然基于 DIS 或 HLA 实现分布式仿真的互联互通操作，没有为模型的组合、重用提供新的能力^[40]。

Wiedemann^[41]指出，WBS 当前不能简化仿真的建模过程，仍需要使用传统的仿真工具开发模型。事实上，该时期对于 WBS 的研究从 1996 年至 2000 年快速增长，从 2002 年之后便开始迅速下降^[34, 37]。很多学者将此归因于网页特征与基于网页的仿真的方法间存在失配。

总体而言，Web 1.0 阶段 WBS 的特征包括^[37, 39]：1) 为用户提供丰富的应用访问能力，可在任何支持浏览器的设备上获取仿真服务；2) 主要强调前端用户访问模式的变化，后端仿真应用的设计与部署与传统的分布式仿真相比没有本质区别；3) 仿真模型常基于组件化技术开发，能提升建模人员在模型开发和部署时的效率，但用户不能基于网页实现模型的自由组合与集成。

2.1.2 Web 2.0

Web 2.0 的时间跨度约为 2004 年至今，相比于 Web 1.0，Web 2.0 更加注重用户间的交互。从使用模式上看，用户可以自由地发布内容，在显著丰富互联网内涵的同时，也提升了前后端之间交互的能力及水平。更为重要的是，同时期出现的网页服务技术以及软件工程领域提出的面向服务架构 (SOA) 给 WBS 带来了新的活力。

该阶段对 WBS 的应用与研究也相对较多。部分学者^[42-44]将现有的仿真系统转化为网页服务，使得

表 2 网页技术的发展对 WBS 的影响

类别	时间跨度	主要特征	仿真应用情况	优点	缺点
Web 1.0	1996 ~ 2004	用户只能“读”取网站上的内容，“写”的能力受限	应用较少，更多的是证明可以基于网页实现仿真，而不是需要使用网页进行仿真	简化访问；降低对用户端设备的依赖	稳定性易受影响；图形化能力有限；用户对仿真的控制手段也相对匮乏
Web 2.0	2004 ~ 至今	用户间可以自由地交互，用户既可以“读”也可以“写”	应用领域大大扩展，并被吸纳到多种仿真标准，如 HLA Evolved	广泛访问；支持用户通过浏览器实现仿真服务的组合与集成	难以有效管理大量服务资源；无状态的网页服务难以保存模型状态
Web 3.0	未成熟	主要强调对用户数字资产的尊重与保护，核心技术是区块链	还处于探索阶段	促进仿真资源的共享；增强用户数据的隐私保护	核心的区块链技术仍面临伸缩性和吞吐率的问题；与仿真结合的研究较少

用户可以通过浏览器实现仿真的定义、提交、可视化以及结果分析。网页服务包含两个主要框架：基于简单对象访问协议（Simple object access protocol, SOAP）和基于 RESTful^[45]。其中，SOAP 是 WBS 的主流协议，有着大量的研究成果^[46-48]。然而，Arroqui 等^[49]的实验表明，RESTful 能够将网页服务所需带宽减少 24%。为此，Al-Zoubi 等^[50]提出了 RESTful 互操作仿真环境（RISE），并将该中间件应用于基于 DEVS 的地理信息系统仿真^[33]以及云上仿真资源的管理^[34]。

同时，研究人员也对基于网页的仿真框架和协议进行了深度的探索。美国海军研究生院等单位在 2004 年提出了扩展建模与仿真框架（Extensible modeling and simulation framework, XMSF）^[51]，利用一系列网页使能技术促进 HLA 在更大范围的互操作与重用。为进一步提升 HLA 对网页服务的支持，IEEE 在 2010 年发布了 HLA Evolved，通过在接口描述中增加对 WSDL 的支持，以及提供 WSPRC 组件，使得 HLA 从本质上具备了向 Web 跨平台扩展的能力^[52-53]。

总体来说，WBS 的内涵在该阶段得到了很大的拓展并取得丰硕的研究成果，但也面临一些问题。Web 2.0 阶段 WBS 的特征包括^[30, 54]：1）在强调用户基于浏览器的广泛可用性的同时，对后端仿真应用的设计与开发也提出了新的要求，如组件化设计，服务化封装；2）用户不仅可以访问远端的仿真服务，借助于标准化的服务描述，也可以利用相关工具实现仿真服务的按需组合与集成，获得定制化仿真的能力；3）难以进行有效的资源管理，尤其是当具有大量服务资源的时候；4）网页服务的无状态特性使得其难以保存模型的状态。

2.1.3 Web 3.0

与 Web 2.0 相比，Web 3.0 更难被定义，这在很大程度上是因为其仍处于发展的初级阶段。尽管 Web 3.0 在 2006 年即在 Zeldman 的一篇博客中被首次提

及^[55]，它的内涵以及所使用的关键技术仍存在较大争议。

在 Web 3.0 概念初期，主要强调网页的个性化、定制化和智能化，有时也称之为语义网络^[37]。部分学者^[56-58]尝试使用本体实现对仿真资源的描述，以促进资源的重用。随着互联网内容的增加以及区块链技术的发展，Web 3.0 也被赋予了新的含义，该阶段更加强调对用户数字资产的尊重与保护。对于建模与仿真领域而言，以区块链为底层支撑的 Web 3.0 也会带来很多机会与挑战：1）能够促进不同单位间仿真资源的共享；2）增强对用户数据隐私的保护；3）实现安全可靠的仿真资源管理。

2.2 面向 SOA 的仿真系统开发

建模仿真的服务化同样对仿真应用的开发提出了要求，软件工程领域的面向服务架构（SOA）则可以作为应用开发的指导思想。

SOA 并不是一种新思想，最早在 1996 年由 Gartner Group 提出。很多学者和组织都曾给出对 SOA 的定义。Liu 等^[29]认为“SOA 概念将服务的创建与使用相分离，并以简单的方式实现独立服务的灵活组合。”美国国防部建模仿真参考架构（Defense modeling and simulation reference architecture, DMSRA）^[15]则将 SOA 定义为“支持具有指定结果的可重复业务活动的逻辑表示的体系结构样式”。

总的来说，SOA 是一种与具体实现无关，用于构建大规模分布式软件系统的开发范式。它将应用的不同功能单元定义为服务，并通过标准的接口和描述实现服务间的松耦合、互操作和可重用。

SOA 包括服务提供者、服务请求者和服务代理三个角色，彼此之间通过发布、发现和绑定调用三种操作实现交互^[59]。将 SOA 应用于仿真系统开发的好处包括^[30, 54]：1）资源重用；2）易于集成与管理；3）更高的灵活性；4）降低成本。

本节以 SOA 在不同阶段的主流实现技术为线索，

对面向服务的仿真应用开发的发展过程进行梳理。表 3 比较了面向服务架构的不同实现技术。

2.2.1 组件技术

Davis 和 Tolk^[60]从语法、语义、语用、假设和有效性等五个方面,对基于组件的多分辨率建模和模型组合问题进行研究。Hofmann^[61]以军事仿真系统为例,从三个层面对如何将系统分解为组件进行了探讨。同时其指出,在分解过程中,最重要的是降低系统的复杂度,而不是组件重用。

在传统的分布式组件技术中,服务是一个可以通过编程接口访问的软件组件,用户使用分布式组件协议(如 CORBA)、分布式计算对象模型(DCOM、RMI、BOM、EJB 等)访问服务。史扬等^[4]基于 Java EE/EJB 组件规范构建了一个面向服务的作战仿真平台验证系统。Gustavson 等^[62]在 HLA Evolved 基础上提出了一个基于 SOA 的建模与仿真组合框架,以支持仿真运行前和运行过程中模型实例的动态聚合与解聚。然而,已有的技术大都与具体编程语言或平台相关(如 DCOM 只支持 Windows),程序与服务是紧耦合关系,这导致系统变得脆弱^[30, 54]。

为改进组件的重用性,一些学者尝试将 SOA 与基于组件的建模仿真范式离散事件系统规范(Discrete event system specification, DEVS)相结合。Mittal 等^[63]对 DEVS 统一过程(DEVS unifies process, DUNIP)进行了讨论,并使用 DEVSML^[64]框架提供不同语言实现的 DEVS 模型在 SOA 中间件上的组合能力。文献^[65-66]提出了一个服

从 SOA 的 DEVS 仿真框架,并对服务组合问题进行了研究。

2.2.2 网页服务

网页服务是网页技术与分布式组件技术融合的产物^[30]。在网页服务的技术标准中,WSDL 用于服务的发布,SOAP 用于服务间的交互,统一描述、发现与集成规范(Universal description discovery and integration, UDDI)用于服务的查找与定位。网页服务具有自包含、松耦合、相互独立且具有标准化描述的特征,通过将仿真系统以网页服务的形式进行开发、部署和执行,能够为用户提供更加强大的仿真应用与管理能力。

在很多文献中,SOA 常与网页服务一起使用,这是因为网页服务技术的成熟大大促进了 SOA 在企业中的应用。SOA 定义了服务如何相互理解以及如何交互,是一种模型架构;网页服务则是具体的实现方法,是 SOA 众多实现手段的一种。相比其他分布式技术,网页服务的优点包括^[54]: 1) 松耦合; 2) 自描述与自适应; 3) 实现无关; 4) 易于集成与移植。

何强等^[54]以网页服务作为实现技术,对基于 SOA 的仿真服务系统进行了研究。其中系统分为仿真服务层、仿真应用层以及仿真平台层,每一层以网页服务的形式对外提供接口,彼此之间通过 SOAP 协议进行通信。宋莉莉^[30]对仿真的互操作和模型的组合性进行了研究,以网页服务为基础提出了一种基于 SOA 的建模与仿真框架,并重点讨论了仿真服务的描述、匹配和选择技术。Park^[67]在其博士论文中对

表 3 面向服务架构的不同实现技术的对比

类别	技术 / 标准 / 架构	粒度	部署策略	可移植性	自动化部署	仿真应用情况	服务状态
组件技术	CORBA、BOM、DCOM 等	单体服务	虚拟机	一般	不支持	应用广泛	支持
网页服务	WSDL+SOAP+UDDI	单体服务	虚拟机	较好	支持	应用广泛	不支持
微服务	微服务架构	微服务	容器	较好	支持	发展阶段	支持
纳米服务	无服务器架构	函数	FaaS 平台	一般	支持	探索阶段	不支持

如何在松耦合资源（如志愿计算网络）中执行并行离散事件仿真（Parallel discrete event simulation, PDES）进行了研究，并提出了一个基于网页服务的主/从仿真架构，该架构能为错误容忍、负载均衡、时间同步等功能提供支持。

然而，考虑到分布式仿真的特殊性，仿真服务与商业领域的网页服务还存在一些差别^[30]，包括：1）仿真服务经常是有状态的，而网页服务一般是无状态的；2）仿真服务需要进行频繁的时间同步，网页服务没有这种需求；3）仿真服务通过底层运行支撑环境进行交互，网页服务通常直接利用 SOAP 等协议进行通信。

2.2.3 微服务

在基于组件和网页服务的 SOA 应用中，服务往往采用的是单体架构，处理请求的所有逻辑运行在唯一的进程中^[68]。这种体系结构下的系统缺乏独立性和灵活性，服务必须同时扩展和启停，不能满足系统快速迭代的要求。为克服上述挑战，微服务（Micro-service）架构已成为构建超大规模信息系统的新架构风格^[69]。

通过综合 Lewis 等^[68]和 Namiot 等^[70]对微服务的定义，可将其特点总结为：1）轻量级，只实现单一功能；2）独立开发；3）自动化部署；4）接口定义良好。总的来说，微服务是 SOA 的一种实现，但它要更加轻便、敏捷和简单。与传统 SOA 服务间的区别主要在于服务的粒度^[26]。在云计算环境下，微服务常采用容器这一轻量级虚拟化方式进行部署。

文献^[26]研究了仿真的容器化开发与部署以实现高效的海军训练，并对容器化改造时的经验教训进行了总结。其中，模型及仿真支撑服务（如 RTI 组件）以容器的方式部署于德国和爱尔兰的两个数据中心，地理分布的真实、虚拟和构造的仿真成员基于 HLA 实现互联。最终的测试结果表明，容器化能够促进 HLA 联邦的开发与管理，但在网络化环境下，Docker 使用的网络技术如 Weave 网络会延长数据的

传输链路，进而增大时延。Zhou 等^[10]介绍了一种基于微服务的电网仿真训练平台的开发方法，基于云计算技术实现仿真任务的高效协作。文献^[71-72]开发了一个基于微服务的动态编排器 MiCADO，为云上的仿真应用提供自动伸缩的计算资源。刘永奎等^[73]针对云制造场景提出了一种基于微服务架构的云制造调度仿真系统，支持对不同调度算法的性能进行测试与评估。Kecskemeti 等^[74]则提出了一种方法学，以指导如何将单一的大服务分解为多个微服务，以实现更好的弹性。

基于微服务和容器的开发与部署能够为仿真应用的管理带来诸多好处，但不能盲目选用。微服务上云的最佳方式是全新开发，对现有系统的微服务改造工作量很大。考虑到现有的大量基于单体服务架构的 SOA 应用，应谨慎地使用微服务。

2.2.4 纳米服务

微服务架构下，微服务以容器的方式部署于云中心。尽管微服务能带来很多灵活性，但也存在一些效率方面的问题。比如，必须保持至少一个容器在运行状态，以随时响应用户的请求，而这被认为是云计算范式下很重要的一类资源消耗^[75]。

基于该考虑，一种被称为无服务器计算（Serverless computing）的新型计算范式被提出。其使用函数即服务（Function as a service, FaaS）的概念和第三方支撑服务来替代服务器的管理与运维功能，同时基于时间复用的原则增加资源效率^[19]。在文献中，一般不对无服务器计算和函数即服务这两个概念做特殊区分。其中，“函数”也被称为纳米服务（Nanoservice），是更细粒度的服务，也可被归为微服务的一部分^[19, 24]。

相应的，对纳米服务实行统一管理的中间件也被称为 FaaS 平台。FaaS 平台本质上是一个事件处理系统，基于事件实现函数的调用^[76]。这一特性使之很适合基于事件的应用，如部分离散事件仿真系统。在 FaaS 平台中，函数只提供与服务、安全或计算高度相

关的功能，而传统上集中式服务器提供的功能都交由第三方服务，如身份认证、数据管理等^[19]。

由于无服务器计算还处于发展的初期，基于纳米服务实现仿真应用开发的工作也相对较少。Kritikos 等^[77]提出了一种基于无服务器计算范式的新型仿真服务架构 SimaaS，其通过无限制、并行化的函数调用实现仿真的加速，同时依赖多云平台实现仿真应用的跨云部署和自适应执行。Kratzke 等^[78]借鉴商业领域云原生应用的概念，提出了云原生仿真的架构并探讨了云原生仿真服务的发展趋势，重点讨论了微服务和纳米服务对仿真应用在开发与部署上的影响。Villamizar 等^[79]对单体、微服务和纳米服务的对比实验表明，纳米服务最多可减少 75% 成本。

总体而言，无服务器计算架构更加的分布与去中心化，更细粒度的服务也提升了服务的弹性、伸缩性和动态迁移能力。然而其也存在一些弊端^[15, 80]：1) 与数据的高度分离导致难以应对有状态服务；2) 安全层面面临更多的威胁；3) 把部分任务交给了客户端，增加了客户端复杂度。

2.3 服务化计算基础设施

仿真技术伴随计算机技术的发展而发展。要实现建模与仿真的服务化，还需要底层的计算基础设施提供高效的运行支撑和资源管理。本节主要以网格计算和云计算技术的发展为牵引，探究计算基础设施的变化对仿真的影响。表 4 总结了不同计算基础设施对仿真的影响。

2.3.1 网格计算

传统的仿真模式下，用户只能基于已有的软硬件

资源进行仿真，限制了仿真的规模。网格计算的出现则为大规模复杂系统的仿真提供了可能。网格计算利用虚拟组织 (Virtual organization) 的概念，将地理分散的资源集成为统一的计算基础设施。这种方式，能够显著改进仿真资源的管理、数据的访问、系统的安全和容错能力，进而受到了很多学者的关注^[30]。

Rycerz 等^[81]研究了如何基于开放网格服务架构 (Open grid service architecture, OGSA) 高效、容错地执行 HLA 仿真应用。在文献^[82-84]关于 HLA-Grid 的工作中，提出了“成员-代理-RTI”的体系结构以将 HLA 应用迁移到网格中，实现按需使用的 RTI 服务和仿真联邦的动态组合与集成。其中，成员代码在本地客户端执行，网格端则部署成员的代理及 RTI 服务。在执行时，成员通过服务化的 HLA API 调用 RTI 服务，成员代理则代表成员经由真实的 RTI 在网格端实现通信。

国内，Li 等^[85]在 2005 年提出了面向服务的仿真网格系统 Cosim-Grid，实现仿真的协作式开发以及高效的运行与管理。张卫^[86]对如何基于网格实现并行分布式仿真进行讨论，提出了一种分层的仿真网格架构，同时对 RTI 功能的服务化改造、服务描述和仿真资源管理等问题进行了重点研究。蔡楹^[87]则研究了如何将网格计算与云计算的理念相结合以对仿真提供支撑。

仿真网格能够为建模与仿真提供很多优势^[31]，如动态资源共享与自动化管理。然而，它也存在一些缺点，如资源由不同机构提供、主要针对大型科学应用等，这也是网格计算逐渐被云计算替代的部分原因。

表 4 不同计算基础设施的对比

类别	统一运维管理	远端访问	服务化	虚拟化	弹性扩展	使用成本	安全性
本地集群	不支持	不支持	不支持	不支持	较差	高	好
网格计算	支持	支持	支持	不支持	一般	低	一般
云计算	支持	支持	支持	支持	良好	低	一般

2.3.2 云计算

云计算被认为是网格计算、SOA 和虚拟化等技术融合的产物。与网格计算跨组织共享资源不同，云服务商通常是资源的唯一拥有者。对云计算最广泛接受的定义由美国国家标准技术研究院（NIST）给出。其中云计算具有五个基本特性（按需服务、广泛访问、资源池化、弹性可扩展、服务可计量），三种服务模式（基础设施即服务（IaaS）、平台即服务（PaaS）、软件即服务（SaaS））以及四个部署模型（公有云、私有云、社区云、混合云）^[15]。

基于云的仿真（以下简称云仿真）集成了基于网页的仿真和云计算技术以管理多种仿真资源并构建不同的仿真环境^[16]。Fujimoto 等^[3]认为，云计算为仿真带来的好处包括：1）降低用户成本；2）简化仿真的使用；3）便于仿真资源的管理与维护；4）云平台所具有的错误容忍和负载均衡能力。事实上，云计算被认为是解决当前和未来大规模仿真可能面临问题的关键技术^[3]，并且在学界和国防工业部门都受到了广泛关注。

并行仿真关注的是充分利用高性能计算资源对仿真加速，分布式仿真则更多关注的是地理分布仿真应用间的互联互通。为弱化并行仿真与分布式仿真间的差异，基于 DEVS 规范，Risco-Martín 等^[88]提出了一种云环境下统一的并行与分布式仿真架构模型，基于 XML 配置文件，无需修改应用代码即可实现仿真应用在物理机、虚拟机、容器上的灵活弹性部署。为更好地实现无人机的任务分配、轨迹设计，部分学者基于微服务和容器技术实现无人机仿真系统的云端高效部署。其中，Bordón-Ruiz 等^[89]采用了 DEVS 规范实现仿真模型的标准化开发，Matlekovic 等^[90]则利用 Kubernetes 容器部署平台实现服务的快速开发、更新和替换。美军联合参谋部下属的联合训练委员会开发了一个基于云的、网页使能的联合训练环境（Joint training tools, JTT）^[91]。英国陆军在其联合训练转型计划（CTPP）^[92]中，则重点对

VR、机器学习、云计算技术进行了研究。

然而，云平台也会为仿真的运行带来一些挑战^[93]，如：1）安全性挑战；2）云平台擅长提供不频繁、高带宽的数据传输，但仿真应用往往是高频、低带宽的通信；3）难以保证实时性。

3 基于云的建模与仿真服务化

实现建模与仿真的服务化是一个复杂的系统工程。从参与方的角度看，包括仿真用户、仿真开发人员、仿真运维人员以及计算资源提供方；从仿真生命周期的角度看，包括设计、开发、校验、部署、运行、管理、结果分析等；从仿真的类型看，又包括分析仿真、装备仿真和训练仿真。本节将从建模与仿真服务化的构建原则、基本架构和应用模式三个角度对其内涵进行阐述，为后续建模与仿真服务化的进一步发展提供一定的参考。

3.1 建模与仿真服务化原则

建模与仿真产品对于工业和国防部门具有很高的价值，因此，一个新的建模与仿真范式应该能够解决现有应用模式所面临的各种痛点问题^[15, 18]。

从仿真用户的角度看，应能支持大量用户使用浏览器等瘦客户端，基于各自的目的，同时且自发地访问各类建模与仿真相关的产品、数据和知识。从仿真开发的角度看，应提供标准化的开发工具和各类模板（如基于 MDA 的平台无关模型），同时支持通过服务的描述、发现和组合实现仿真资源的高效重用和仿真系统的快速集成。从仿真运行与管理的角度看，应提供自动化管理工具，实现仿真应用的正确运行、仿真资源的高效管理、仿真过程的安全可靠。

为实现上述能力，需要以恰当的方式将仿真应用部署于云端并通过网络实现远程的访问。然而，将仿真迁移到云端是一个缓慢的过程^[26]，需要充分考虑仿真应用和云数据中心的特点。

从仿真的角度看，不同类型的应用可能具有完全不同的需求。对于分析仿真而言，往往涉及复杂的模

型解算任务，需要尽可能快地返回仿真结果。对于装备仿真而言，由于实装的接入，具有非常高的实时性要求，可能需要使用裸金属服务器甚至将仿真任务下放到边缘侧执行^[94]。对于训练仿真而言，往往涉及大量地理分布的人员、装备，需要充分考虑网络传输时延对仿真性能的影响。

从云数据中心的角度看，建模与仿真服务化并不仅仅是将仿真应用的执行环境由指定的硬件换成云端的虚拟机。Kratzke 和 Siegfried^[19] 借鉴云原生应用^[95] 的概念，提出了四层的云仿真成熟度模型：云可用（Cloud ready）、云友好（Cloud friendly）、云弹性（Cloud resilient）和云原生（Cloud native）。对于云原生仿真应用而言，其应由小的、可独立部署和替换的仿真服务组成，且支持横向扩展^[19]。这意味着仿真应用需要分解成微服务或纳米服务以充分利用云平台弹性扩展和自动编排的能力。对于仿真应用而言，考虑到其紧耦合的特性，在分解时需要对应应用内部的工作机理进行细致的研究。

另一方面，云服务并不总是标准化的产品。Kratzke 等^[78] 对云计算标准的研究表明，只有一些核心组件，如虚拟化资源实例，是以标准化的方式提供。但对于负载均衡、消息队列、弹性扩展等用于构建云原生应用的“胶水”服务，不同的运营商往往采用不同的方案，为应用在云间的迁移带来困难。例如，Instagram 被 Facebook 收购后，花费了超过一年时间将部署于 AWS 云上的所有服务迁移到 Facebook 数据中心，期间还出现了服务的中断^[19]。这一特点给部分仿真应用，尤其是需要跨云的大型应用的设计、开发和部署带来了困难。

3.2 建模与仿真服务化架构

借鉴云计算的三种服务模型（IaaS、PaaS 和 SaaS），Cayirci^[16] 在 2013 年给出了建模仿真即服务（MSaaS）最为广泛接受的三种服务模型：建模即服务、模型即服务、仿真即服务，具体如图 1 所示。其中，MSaaS 层位于传统的云服务层之上，为用户提

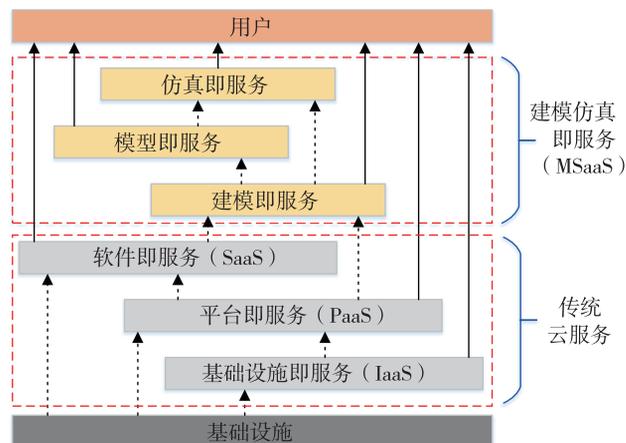


图 1 MSaaS 服务模型^[16]

供建模与仿真相关服务。

为对建模与仿真的服务化建设提供更加具体的指导，很多基于云的建模与仿真架构相继被提出，包括通用的^[2, 19, 96-97]，面向教育的^[8]，面向交通的^[9]，以及面向作战的^[98-100]。在当前公开存在的各种云仿真架构中，大多采用了分层的设计，且与 Cayirci 提出的 MSaaS 服务模型总体上保持一致^[18]。事实上，建模与仿真的服务化不单单是利用现有的云服务模型，还需要对云服务模型本身进行适应性改造。通过对现有架构的综合分析，我们给出了一个通用的云仿真架构，如图 2 所示。该架构共有五层，包括基础设施层、平台层、服务层、应用层和门户层。其中服务层与应用层一起，对应着 MSaaS 服务。安全隐私和技术标准则贯穿所有层级。

1) 基础设施层。用于提供仿真运行所需的基础硬件及相应虚拟化资源，包括计算资源、存储资源与网络资源。现有的云仿真架构都包含这一层。该层资源可由一个或多个云服务供应商提供。

2) 平台层。该层集成了传统云服务 PaaS 层的功能以及用于支撑仿真运行的功能。其包含两个子层以及数据存储服务。其中，基础平台子层的功能包括资源监视、资源管理、服务编排、任务调度等，可由商业的云平台中间件提供。同时，我们添加了仿真平台子层，其功能包括仿真交互、时间同步、实体迁移

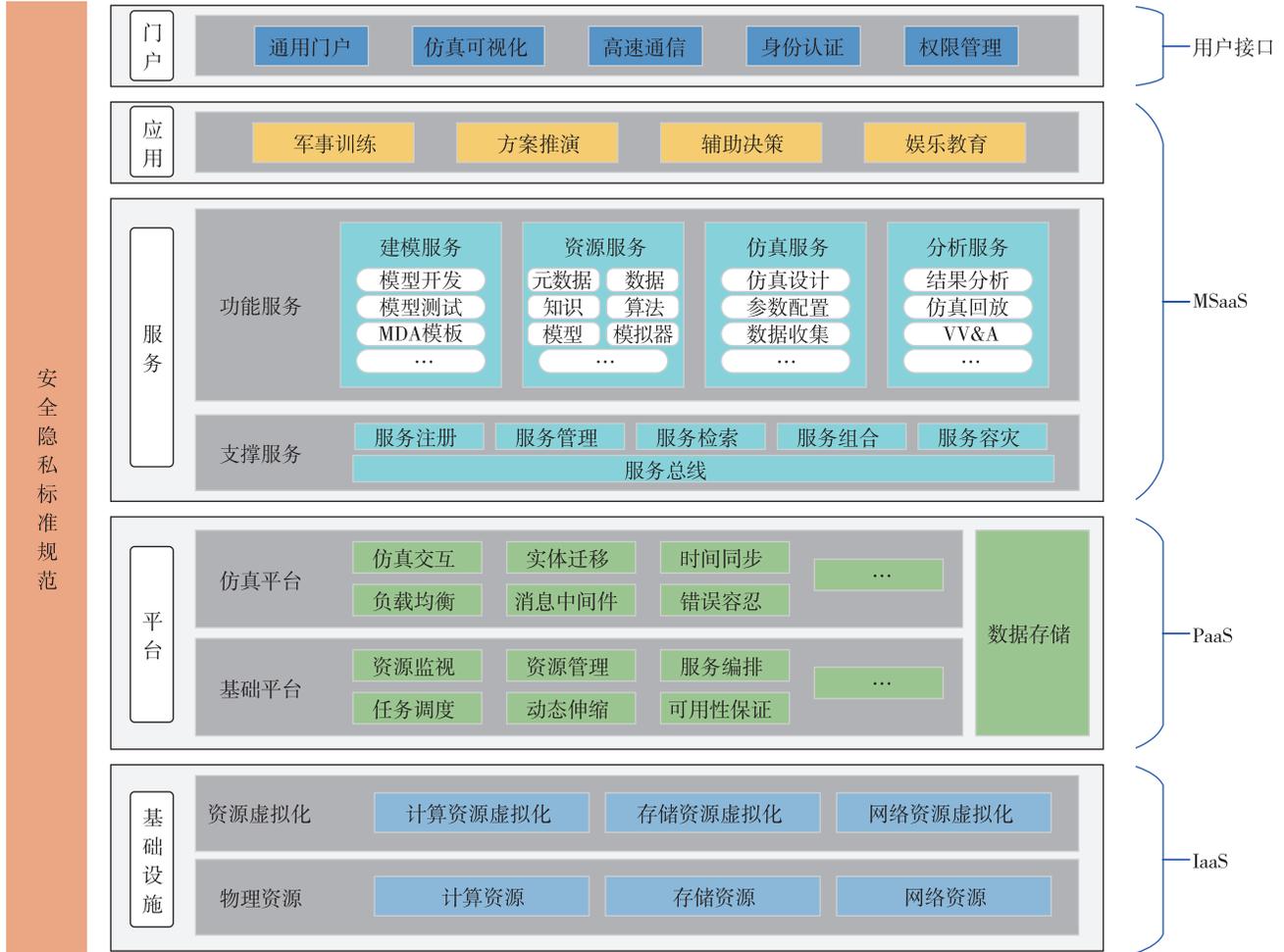


图2 建模与仿真服务化通用架构

等与仿真运行密切相关的基础服务。也有一些学者将这些功能都归入了服务层（李伯虎等^[2]，Liu等^[96]，齐和平等^[100]），但我们认为这些服务是所有仿真应用都需要共性支撑服务，应该作为平台层的一部分。

3) 服务层。该层的主要功能是对各类仿真资源和服务进行高效的管理与维护^[98]，是所有云仿真架构的核心层。与王会霞等^[99]和齐和平等^[100]所提架构不同的是，我们把服务的组合与集成放在了应用层，服务层只用于对各类服务的管理。服务可基于有无状态^[19]、部署形态^[8, 19, 97]（虚拟机，容器或FaaS平台）、粒度^[19]（单体服务、微服务、纳米服务）等进图2建模与仿真服务化通用架构行划分。我们基于功能类型将服务层分为了两个子层：功能服务子层和支

撑服务子层。

其中功能服务子层包含所有与建模和仿真相关的服务，具体又可分为建模服务、资源服务、仿真服务和分析服务。建模服务包括模型开发、模型测试、MDA模板服务等与建模相关的服务。资源服务则是将现有的各类仿真资源以服务化的方式封装而得到，包括（元）数据、知识、算法、模型、模拟器等。仿真服务用于支撑用户正确、高效地执行仿真，包括仿真设计、参数配置、数据收集等。分析服务则用于对仿真结果进行分析与评估，包括结果分析、仿真VV&A、仿真回放等。

支撑服务子层则用于提供对服务的高效管理，基于服务总线实现服务的注册、管理、检索、组合与容灾。

4) 应用层。主要为不同类型用户提供所需的建模仿真应用, 满足多种应用场景, 包括军事训练、方案推演、辅助决策、娱乐教育等。

5) 门户层。为用户访问建模仿真服务提供相应的工具与手段, 同时对用户进行管理。具体功能包括通用门户、人机交互、身份认证、权限管理以及资源开设等。

3.3 建模与仿真服务化应用模式

在建模与仿真服务化场景中, 用户能够在任何时间、任何地点, 在任何能够运行浏览器的设备上, 通过网页访问所需的仿真服务并获取仿真结果。其中, 浏览器也称为前端, 提供建模与仿真服务的云仿真平台也被称为后端, 如图 3 所示。



图3 建模与仿真服务化应用示意图

从应用的角度看, 建模与仿真即服务 (MSaaS) 模式下的典型应用流程可概括为^[2, 9, 13, 26]: 1) 用户在前端提交仿真需求; 2) 基于用户需求, 在后端执行仿真服务的搜索、发现、组合、集成以及自动化编排, 形成所需仿真应用; 3) 执行仿真, 并进行动态监视与管理; 4) 收集数据, 向用户反馈仿真结果。

根据建模与仿真服务的粒度和组合方式, MSaaS

也具有四种不同的部署形态^[16]: 1) 独立仿真应用, 通常以网页服务的方式提供, 一些军事组织选择使用私有云提供独立的作战模型, 如 JCATS (Joint conflict and tactical simulation) 和 JTLS (Joint theater level simulation)^[101]; 2) 仿真应用联邦, 多个独立的应用通过分布式云建立联邦; 3) 可组合仿真应用, 云不提供完整的应用, 而是提供软件 (功能) 模块, 如气象、光照等; 4) 自动组合仿真应用, 软件模块之间可实现自动的发现与组合。图 4 给出了第二和第三种云仿真部署形态的示例。

从运行的角度看, 仿真应用基于所涉及的实体规模被部署于单个 VM 或虚拟集群之上, 各个仿真成员之间通过可靠的有线网络进行交互。当仿真规模很大, 或某些资源只存在于特定的云数据中心时, 也需要考虑应用跨数据中心的运行与管理问题。

然而, 这种模式存在一个问题, 即用户与后端的距离很远, 导致数据的传输时延增大。特别地, 对于一些有较高实时性要求, 或者需要将仿真结果以可视化的形式反馈给用户的仿真应用而言, 在带宽和时延上面面临着巨大挑战。对于实时性问题, 一种可行的解决方案是利用边缘计算的思想^[94], 将与用户交互频繁的任务从仿真应用中解耦, 并部署在靠近用户的一侧^[98]。对于大量视频流的实时传输, 可借鉴云游戏中的解决方案^[102], 即在后端将逻辑计算与图形渲染的指令解耦, 传输时只传输图形渲染的相关指令, 而

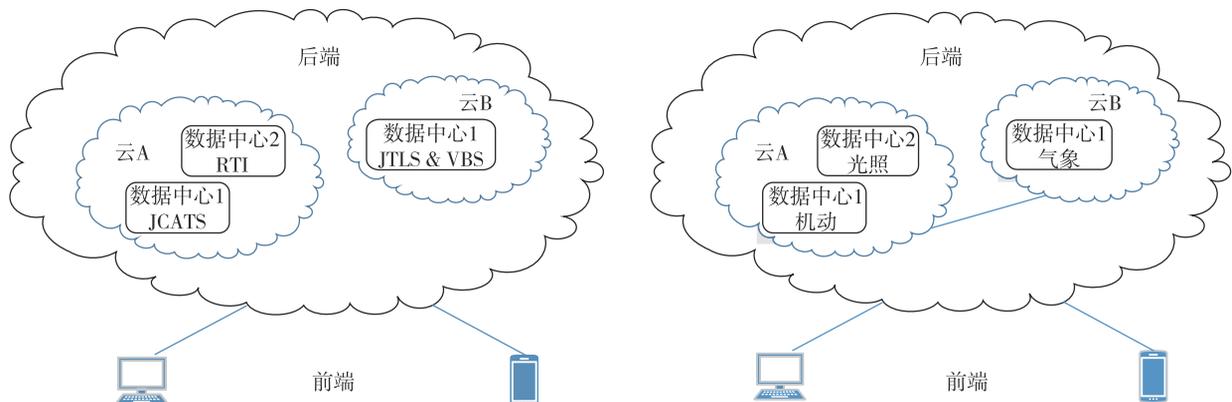


图4 云仿真部署形态示意图^[16]

将具体的渲染工作放在边缘端或者用户端。

4 关键支撑技术

尽管基于云的建模与仿真服务化能够带来很多好处，但将仿真应用迁移到云端仍是一个很缓慢的过程^[26]，也面临着很多挑战。本节将从访问、开发和运行与管理三个角度对基于云的建模与仿真服务化的关键支撑技术进行探讨，总体结构如图5所示。

4.1 用户访问相关技术

4.1.1 通用门户

通用门户技术是为用户提供各类建模与仿真服务的关键使能技术。它应具有四种能力：1) 支持用户在任何时间、任何地点以最小化的软硬件需求访问远端的建模与仿真服务，一种典型的解决方案是采用浏览器和网页技术；2) 支持多样化的输入设备^[2, 9]，如浏览器、触摸屏、物理传感器、逻辑传感器等；3) 能够提供丰富的工具，帮助用户实现仿真需求的确定，服务的检索、发现、组合与集成以及仿真的运行与分析；4) 支持不同的可视化组件部署方案，既能接收控制流实现本地的可视化渲染，也能直接接收视频流在本地进行解码和播放^[102-103]。

4.1.2 智能人机交互

良好的沉浸感是提升仿真应用效果的关键，而

现有的键盘 + 鼠标的方式与真实世界中用户的交互模式间存在着巨大鸿沟，降低了用户的体验。智能人机交互技术则利用最新的语音交互、手势识别、动作捕捉等人工智能技术，通过多模态的交互手段实现人机之间的自然交互。这种交互模式对于军事训练等需要用户实时参与的仿真应用而言具有非常重要的意义。其中，美军在2012年推出了陆军步兵训练系统(DSTS)^[104]，它是全球范围内首款完全沉浸式的班组虚拟训练系统。通过捕捉士兵的动作并实时地在虚拟环境中构建士兵的数字替身，DSTS能够实现虚实融合的高效训练。

4.1.3 高效网络通信

随着仿真模型变得更加复杂以及仿真规模的不断扩大，需要更大的带宽来传输仿真数据。同时，真实和虚拟仿真成员的加入也对数据传输时延提出了非常高的要求。以5G为代表的新一代网络通信技术则是解决该问题的一个可行方案^[105]。从网络基础设施的角度看，边缘节点分布广泛，因成本原因边缘到中心、边缘到边缘之间无法构建专线连接，而传统的Internet路由协议则容易导致丢包、网络拥堵等问题。为满足LVC(Live, virtual and constructive)仿真所需的高质量通信需求，可通过实时测量网络服务质量(Quality of service, QoS)，动态选择最优路

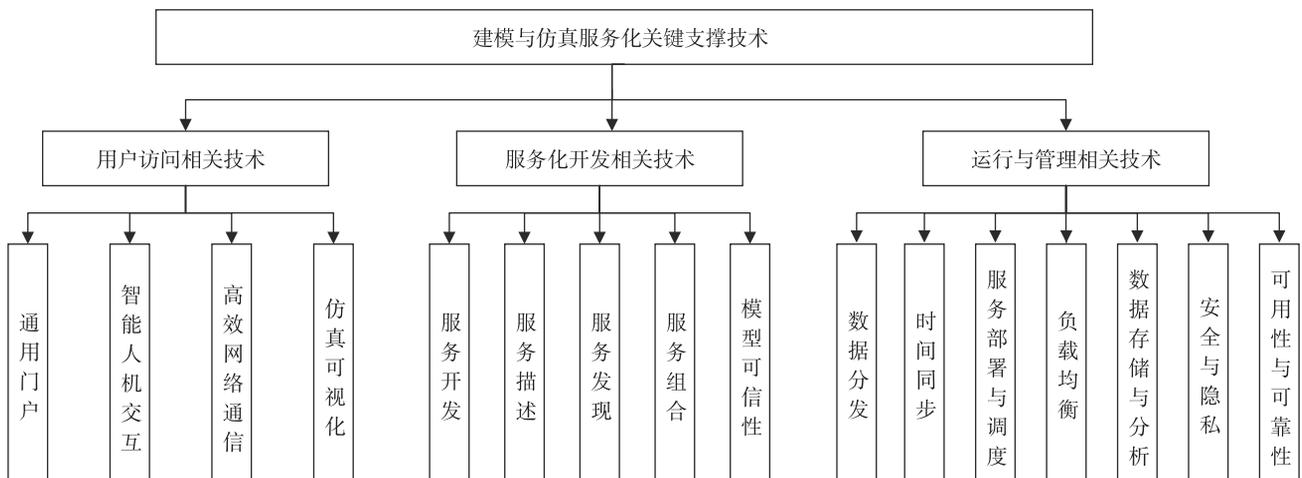


图5 建模与仿真服务化关键支撑技术

由策略^[106]。

4.1.4 仿真可视化

仿真的结果应该能够以可视化的方式实时向用户反馈,为用户提供良好、逼真的仿真体验。仿真可视化应该具有三个层面的特征:1)丰富的表现形式,支持以2D/3D、VR、AR等多种方式将仿真结果投射到用户视野前,提供各种类型的感官体验;2)多样的内容,利用统计学方法和工具提供各类图、表等可视化分析结果,为用户的下一步决策提供更好的支撑;3)逼真的画面,利用高效的渲染引擎生成高质量的多分辨率仿真场景,同时支持与用户的实时互动。

4.2 服务化开发相关技术

4.2.1 服务开发

服务的开发涉及两个层面的内容:旧有系统的服务化封装与改造以及新服务的构建。旧有系统的服务化改造并不是一个简单的问题,一般而言,有三种方法可供选择^[44]:1)适配器;2)重构;3)结合两种方法。对于从头开始开发仿真服务,则需要充分考虑云计算环境的特点。NASA在2018年的研究表明^[107]，“在所有情况下,基于NASA计算设施运行仿真的成本要比在AWS公有云上的成本少2~12倍”。Kratzke等^[19]将此结果归因于基于云的仿真应用需要遵循一种云原生的架构风格,如微服务或纳米服务等。考虑到传统的基于HLA的仿真应用大多采用单体部署的模式,需要对其进行更细粒度的改造。

4.2.2 服务描述

Hannay等^[24]指出,服务描述的内容包含三个部分:1)服务接口,描述服务的功能和操作,用于实现语法互操作;2)服务契约,其既在语义层面对接口的功能和操作进行详细说明,也对服务的非功能需求进行规范;3)服务模型,用于描述服务所支持的使用环境和上下文,用于实现语用互操作。服务可能具有不同的抽象层级、不同的表现形式以及不同的分辨率,需要在不同的层级对服务进行规范化的描述,为服务的发现与组合提供支撑。事实上,

可采用常用的资源描述方法对服务进行描述,包括^[108]:WSDL、网页服务资源框架(Web services resourceframework, WSRF)、本体语言、对象元模型等。例如,杜楠等^[108]采用对象元模型实现对各类LVC仿真资源的形式化描述和标准化封装,以服务的方式为用户提供LVC仿真资源。

4.2.3 服务发现

在设计、开发和执行仿真应用的过程中,需要搜索仿真和数据资产,实现仿真资源(服务)的高效重用。随着仿真资源的持续发展与建设,云仿真平台中存储的仿真服务的数量也不断增加,其所表现出的复杂性、异构性和动态性也为仿真服务的发现带来了巨大挑战。本质上,服务发现是以恰当的服务描述为基础,基于用户的功能和非功能需求寻找相匹配服务的过程^[109]。当服务被准确描述时,服务发现任务常被转换为文本匹配任务。现有服务发现方法可以粗略地划分为语法级服务发现和语义级服务发现^[110]。语法级服务发现主要关注语法层面的关键词匹配,通常结合多种信息检索信息。然而,当关键词数量不足或具有多种含义时,匹配的精准度会显著下降。语义级服务发现则同时结合了本体技术,通过提供形式化的服务描述克服上述问题。

现有的服务发现相关研究中,大多采用了语义级服务发现技术。为实现网页服务的快速发现与精准匹配,Huang等^[110]提出了一种基于卷积神经网络的语义级服务匹配算法。为更好地捕捉用户需求的特征,论文使用三种不同的方法从不同侧面对用户输入的关键词进行处理,生成多维特征。在构建神经网络时采用了多维相似度矩阵作为输入,实现更加精准的服务匹配。Al-Sayed等^[111]则提出了一种标准化的智能云服务发现框架,基于本体技术实现对云服务的功能和非功能特征的标准化语义描述。

基于服务的方法依赖于高度的标准化和自动化来充分发挥其优势,服务的发现则是其中的重要一环。事实上,北约MSG-136小组在其关于MSaaS架构

的研究中，重点关注了服务发现技术和服务组合技术，同时强调了有意义、可共享的服务元数据描述对服务发现的重要性^[112]。其中元数据被理解为描述服务能力的数据，能够实现对仿真服务的分类、发现、检索和评估，属于语义层级。MSG-136 小组主要基于元数据实现对建模与仿真服务的发现，包括三种类型：1) 发现元数据，包含描述服务的上下文和内容类型所需的最小信息；2) 使用元数据，描述在应用中访问、传输、理解和使用仿真服务所需的信息；3) 管理元数据，用于支持管理者对仿真服务进行管理，包括服务的标识符、版本数据等。在北约进行的关于容器化仿真服务的实验中^[113]，也验证了基于元数据实现仿真服务信息跨国共享的可行性。

4.2.4 服务组合

为促进建模与仿真资源的高效共享与重用，大量学者对模型互操作和仿真可组合问题进行了深入研究^[24, 27, 114]。理论层面，Page 等^[115]从可集成性、互操作性和可组合性三个维度对仿真互联问题进行了讨论，Tolk 等^[116]则定义了五个级别的仿真模型互操作，也被称为概念互操作模型等级 (LCIM)。该概念随后被扩展为七个等级^[117]：无互操作性、技术互操作、语义互操作、语法互操作、语用互操作、动态互操作和概念互操作。工程实践层面，Wang 等^[118]基于 HLA 对 LCIM 的工程实现方法进行研究，并指出 HLA 关注网络连通性及仿真模型间的语法和语义互操作性，对于可组合性的研究相对匮乏。

通过将建模与仿真资源封装为服务，服务组合技术能够有效缓解模型互操作和仿真可组合所面临的挑战。其中，服务组合是指基于某种目的对建模与仿真服务的编排，可以在不同抽象层级对组合进行描述。服务组合不仅可以大大降低仿真开发在人力、物力、时间等方面的成本，也能促进仿真的标准化建设，提升管理水平。在进行仿真服务的组合时，需要考虑功能和非功能两个角度。从功能角度看，主要强调组合的正确性（包含语法、语义、语用等层面）。非功能角

度则主要涉及 QoS，强调在多种选择下如何实现最优的组合。Zhao 等^[119]基于计算树逻辑 (Computation tree logic, CTL) 规范提出了一种自适应服务组合机制，以保证边缘计算场景下 IoT 服务的 QoS 动态变化时，组合服务间的兼容性。通过对功能需求和组合结构的抽象，论文将组合问题形式化为 CTL 规范。同时，论文构建了 QoS 依赖图来捕捉服务 QoS 的变化，实现动态 QoS 下的自适应服务组合。考虑到当前的服务组合算法往往只在组合质量、资源效率等特定方面优于其他算法，Deshpande 等^[120]则提出了一种组合算法选择框架，针对不同的应用需求选择最优组合算法。

北约 MSaaS 架构的核心问题便是仿真服务的组合。为实现仿真的互操作，不同仿真服务间必须遵循一致的仿真环境协议和仿真数据交换模型。考虑到仿真服务的异构性，MSaaS 使用了仿真飞地的概念。不同的仿真飞地可以遵循不同的仿真协议，如 DIS、HLA、TENA，同时支持面向服务的多种工业化标准，包括基于 SOAP 或 RESTful 的网页服务。每个飞地中的仿真成员可采用不同的数据交互模型，如 DIS 的 PDU、HLA 的 FOM、TENA 的 LROM 等。通过保证不同飞地所使用的数据交换模型的独立性、语义规范性和可组合性，MSaaS 可基于协议转换模块实现不同服务的高效组合^[121]。为验证服务机制的有效性，MSG-136 小组通过集成综合环境服务、路径规划服务和仿真引擎实现了一个简单的坦克机动案例，结果表明达到了预期目的^[113]。

4.2.5 模型可信性

只有在模型足够可信的情况下，我们才可以相信从模型和仿真中所获取的知识。对于模型可信性的评价，一般有两个指标：逼真度 (Fidelity) 和置信度 (Credibility)。其中逼真度用于反映模型与真实对象的相像程度；置信度则是根据仿真的具体目的和需求，评估一个模型可信程度的指标^[122]。对于不同的仿真需求，同一模型可能表现出不同的置信度。尽管当前

也有很多关于模型 / 服务可信性的研究^[114, 123]，但对于组合模型 / 服务的可信性研究还相对匮乏。李伟等^[124]从云仿真系统全生命周期角度出发，针对仿真资源可信度、仿真子系统可信度和仿真运行环境可靠性评估问题，建立了云仿真系统的可信度评估过程模型和云仿真系统可信度评估指标体系。其中的子系统即可认为是一种组合模型 / 服务。考虑到仿真服务的异构性和多样性以及服务组合的复杂性，仍需对模型的可信性进行更深入的研究。

4.3 运行与管理相关技术

4.3.1 数据分发

一方面，云数据中心通常为高带宽通信做出了很多优化，但对于需要频繁交换大量小消息的仿真应用而言，仍面临较高的网络延迟^[3, 125-126]。消息捆绑 (Message bundling)^[93]是解决该问题的可行方案，通过将多个小消息打包成大的消息块再统一发送，以部分消息的延迟增加为代价降低总的通信开销。然而这种方法往往是应用相关的，技术的有效性受捆绑周期、捆绑消息数量等参数的影响^[127]。另一方面，大规模分布式仿真涉及大量实体的交互，需要设计高效的兴趣管理机制以减少冗余消息的传输，提高网络效率。

4.3.2 时间同步

时间同步是保证并行与分布仿真结果正确性的重要手段，典型的方法包括乐观同步和保守同步。文献^[26]认为，有状态服务需要采用恰当的同步机制以最小化服务间状态的不一致性，而无状态服务则没有这种需求。D'Angelo 等^[128]和 Malik 等^[129]对云计算环境下基于乐观算法执行并行离散事件仿真进行了研究。鉴于计算资源比通信资源更加廉价以及云计算所固有的弹性，他们认为乐观同步算法相比保守同步是一个更好的选择。一种可行的提升乐观同步算法性能的方案是通过预测事件到达的时间^[130]或仿真成员推进的速度^[131]来控制仿真应用“乐观的程度”，进而减少事件回滚的数量。另一方面，Vanmechelen 等^[132]

也对云环境下保守时间同步算法的性能进行了分析。具体应该采用何种同步策略，应该根据应用的需求具体分析。

4.3.3 服务部署与调度

不同于常规计算应用，云环境下仿真服务的调度需要同时考虑节点的计算性能和节点间的网络传输带宽和延迟^[2]。不同的仿真服务间存在着动态的依赖关系，不同的节点间也有着相应的网络拓扑。部分学者将该问题建模为图划分问题，通过将耦合最为紧密的仿真任务划分到同一子图实现总体通信成本的最小化^[133-135]。然而，这类方法常常需要用户提供子图的个数。有些学者则将该问题建模为整数线性规划问题^[136]，并利用现有的求解器求解，但常常面临耗时过大的问题。尽管启发式方法能够提升时效性，但难以获取最优解^[137]。还有部分学者采用集成学习等方法对 PDES 仿真应用的资源需求进行预测^[138-139]，并基于预测结果实现云计算环境下更加精准高效的资源调度。然而，现有的预测模型大多只能在特定应用上取得较好效果，难以应对复杂多样的用户需求。事实上，该问题是一个 NP 完全的动态装箱问题，仍然需要进一步的探索。

4.3.4 负载均衡

并行与分布式仿真的时间推进速度不会超过最慢的仿真成员 / 逻辑进程 (Logical process, LP) 的推进速度，需要设计恰当的负载均衡机制实现仿真成员以相似的速度推进。特别的，对于采用乐观时间同步算法的仿真应用而言，不均衡的负载分布会产生大量的事件回滚^[140]。现有研究中，有学者基于对负载的预测提前执行负载的动态迁移^[141-142]，也有学者采用工作窃取的方法实现 LP 负载的自适应重分布^[143]。另一方面，考虑到事件的回滚可能产生无用的工作，CPU 周期数并不能准确衡量采用乐观同步算法的 LP 的负载。Lindén 等^[144]对 LP 的负载衡量指标进行研究，指出可行的指标包括：LP 推进的虚拟时间、墙钟推进时间、已处理或已确认的事件数、回滚事件

数等。

4.3.5 数据存储与分析

对于大规模 LVC 仿真而言, 安装在实兵或实装上的传感器会动态生成大量时序数据(设备状态、元数据和传感器读数等), 需要设计轻量级、分布式的边缘数据库实现对这类数据的高效与灵活管理。另一方面, 人工智能技术已经成为军事训练效能的倍增器, 如用于构建可敬的虚拟对手、可信的虚拟队友。边缘侧存储的数据则可以用于实现智能模型的训练与推理。考虑到边缘侧存在的资源受限、数据样本少、数据异构、数据隐私等问题, 可采用云边协同人工智能技术, 包括增量学习、联邦学习、联合推理等^[106]。

4.3.6 安全与隐私

云计算在带来诸多好处的同时, 其传输链路长、资源共享的特征也使得基于云的应用面临着巨大的安全与隐私风险。为保证云环境下仿真应用的安全与隐私, 很重要的一个侧面即是对仿真数据的管理。Che 等^[145]对云环境下仿真数据的管理问题进行了研究, 将云仿真的衍生数据分为五种类型, 同时提出了一个三层的云仿真平台数据管理框架。然而, 这种集中式的管理策略很容易遇到攻击。一种有前景的方法则是采用基于区块链的去中心化的数据管理范式, 其中, 数据以服务的形式发布, 区块链则作为数据存储的基础设施^[146]。通过这种方式, 数据拥有者具有对数据的完全控制权, 可以对数据的创建、收集、存储、分析、追踪等全生命周期进行管理。

4.3.7 可用性与可靠性

云仿真在运行时可能面临多种异常情况: 1) 用户与云中心漫长的网络链路可能存在不稳定或断联, 要求云中心能够正确执行相应仿真状态的保存与回退。2) 某个计算节点宕机, 需要提供高效的仿真成员或服务的迁移机制, 涉及仿真状态的保存、发送、接收与恢复^[2]。对于无状态服务, 可通过创建多个副本提升可用性^[106]。3) 某个仿真成员或服务本身出现异常, 需要管理中心能够迅速执行故障定位, 生成并保存相

应出错信息。

5 总结与展望

为更好地实现建模与仿真的服务化, 支撑随时随地、按需访问的建模仿真能力, 本文对建模与仿真服务化问题进行了概述, 给出了建模与仿真服务化的相关概念与内涵, 从访问、开发和运行与管理三个角度对其发展与演化的过程进行了梳理, 对基于云的建模与仿真服务化的构建原则、基本架构和应用模式进行了分析, 最后探讨了实现建模与仿真服务化的关键支撑技术。通过对现有建模与仿真服务化研究的梳理与总结, 我们得到以下启示:

1) 加强建模与仿真服务化理论体系建设。建模与仿真服务化具有丰富的内涵, 涉及使用、开发、运维等不同类型人员, 实装、模拟器、模型、数据、算法、工具等不同类型仿真资源, 网页技术、软件工程、计算机体系结构等不同技术体系, 具有复杂性、多样性、多领域性等特征, 需要构建从顶层架构到底层实现的完整理论体系, 为后续建模与仿真的服务化建设提供支撑和指导。

2) 强化关键技术攻关。建模与仿真服务化的实现需要突破大量关键技术, 包括智能人机交互、服务发现、服务组合以及安全与隐私保障等。一方面, 通过对上述关键技术问题进行抽象和形式化描述, 可以充分利用其他领域的研究成果, 加快研发进度。例如, 智能人机交互涉及大量语音动作识别等技术。另一方面, 要充分挖掘在建模仿真服务化语境下, 不同技术体现出的独特需求。

3) 关注新兴技术的影响。过去十年, 云计算、大数据、人工智能等技术的发展与应用为建模与仿真领域注入了新的活力。随着新兴技术的不断涌现, 智慧物联网^[147]、数字孪生^[147]、云边协同^[148]等技术也越来越多地被应用到仿真领域。在研究与实现建模与仿真服务化时, 需要充分挖掘这些新技术的潜力。○

来源: 自动化学报

作者简介



张淼 国防科技大学系统工程学院讲师。2022 年获得国防科技大学博士学位。主要研究方向为云仿真。

E-mail: zhangmiao15@nudt.edu.cn (ZHANG Miao Lecturer at the College of Systems Engineering, National University of Defense Technology. He received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2022. His main research interest is cloud simulation.)



许凯 国防科技大学系统工程学院讲师。2020 年获得国防科技大学博士学位。主要研究方向为行为建模，云仿真。

E-mail: xukai09@nudt.edu.cn (XU Kai Lecturer at the College of Systems Engineering, National University of Defense Technology. He received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2020. His research interest covers behavior modeling and cloud simulation.)



彭勇 国防科技大学系统工程学院副研究员。2011 年获得国防科技大学博士学位。主要研究方向为并行与分布式仿真，云仿真。本文通信作者。

E-mail: yongpeng@nudt.edu.cn (PENG Yong Associate researcher at the College of Systems Engineering, National University of Defense Technology. He received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2011. His research interest covers parallel and distributed simulation and cloud simulation. Corresponding author of this paper.)



尹全军 国防科技大学系统工程学院研究员。2005 年获得国防科技大学博士学位。主要研究方向为行为建模，云仿真。

E-mail: yin_quanjun@163.com (YIN Quan-Jun Researcher at the College of Systems Engineering, National University of Defense Technology. He received his Ph.D. degree from National University of Defense Technology in 2005. His research interest covers behavior modeling and cloud simulation.)

基于微分同胚映射动态系统的接触任务运动规划与控制

文 / 杨尚尚 谢啸 高霄 段宝阁 肖晓晖

摘要：为解决目前机器人接触任务中时间相关的运动规划与控制方法抗扰动性弱的问题，提出了基于微分同胚映射动态系统的运动规划和控制方法。首先，采用动觉示教的方式在搭建的实验平台上采集人工完成接触任务时的位置和力数据，并建立基于微分同胚映射的动态系统。然后，将人工扰动条件下的接触任务分解为接触作业、人工扰动下运动和自由空间运动 3 个状态，并针对各个状态分别设计基于动态系统的力和姿态控制调节项。最后，分别进行无人工扰动和有人工扰动实验，同时与离线控制方法比较力控制效果。实验结果表明：当机器人从示教轨迹起点开始运动，10 次重复实验的运动轨迹相比于示教轨迹位置和姿态的最大误差分别小于 0.008m 和 1.01°，力均方根误差的平均值为 0.86N，相比于离线控制方法略大；从自由空间任意位置出发，机器人都可以进入接触空间执行接触任务；当机器人在作业过程中出现人工扰动时，机器人可根据人的意图运动，且在扰动消除之后恢复作业且力均方根误差值与无人工扰动时的结果接近。实验结果充分验证了本文方法的有效性，实现了在扰动下接触任务的运动规划与控制，且具有较强的抗扰动性。

1 引言 (Introduction)

机器人在工业应用中有大量接触作业需求，如打磨^[1]、擦拭^[2]和柔性材料铺放^[3]等。传统接触任务一般采用离线规划法，首先基于接触任务模型或实验测试获取合适的运动轨迹和接触力，并将轨迹根据运动时间进行离散化处理，然后采用如力/位混合、PID（比例—积分—微分）等控制算法实现接触力跟踪。由于接触任务建模较为困难，实验测试需要大量数据，因而此类基于时间的离线规划方法周期较长，且抗扰动性弱^[4]。当技术人员需要在线对接触任务完成质量检查^[4]或缺陷修复时，需要将机器人停机，然后重新规划运动轨迹，恢复作业。这种模式的工作效率较低，且难以适应多样化的操作场景。因此，接触

任务的运动规划与控制，不仅需要满足规划周期短和力跟踪控制精度高的要求，还要具有较强的抗扰动能力，即能够在受到人为扰动后，自主恢复接触作业。

示教学习为机器人运动规划提供了另一种方法，即通过示教的方式将人工作业经验迁移到机器人上，可有效缩短机器人运动规划周期，被广泛地应用于喷涂、点胶、搬运等自由空间任务，以及打磨、装配、焊接等接触任务。示教方法包括动觉示教^[5]、视觉示教^[6]和遥操作示教^[7]等，其中动觉示教的方式能直接对人工执行接触任务的轨迹与力数据进行采集^[1]。在获得示教数据后，需要从轨迹数据中提取规律，构建运动模型，指导机器人的运动规划。基于示教数据建模的运动轨迹方法中应用较为广泛的是基于时间序列的概率模型^[8]，其将示教轨迹看作随机过程，并

基于最大似然估计求解选定的统计模型参数, 获得时间到轨迹的映射关系, 常用建模方法有: 高斯混合回归^[9]、高斯过程回归^[10]、支持向量回归^[11]、局部加权回归^[12]和隐马尔可夫模型^[13]等。由于这些方法生成的轨迹精确度与时间相关, 因此对任务中扰动较为敏感。

为使机器人在运动中具有抗扰动性, 需要将示教轨迹描述为动态系统 (DS) 模型, 并基于示教轨迹求解 DS 参数, 实现针对任务的运动规划。文^[14]提出运动动态基元 (DMP), 该模型由基于示教轨迹数据的非线性前馈项和弹簧阻尼的线性反馈组成, 可使运动收敛到终点。为提高 DMP 对高维示教轨迹的泛化能力, 在其基础上, 提出了轨迹概率运动表达的概率运动基元 (ProMP)^[15]和核运动基元 (KMP)^[16]。此类 DS 用于时间轨迹序列的规划, 在扰动较小时, 不会影响吸引子的动态特性, 但无法抵抗较大扰动, 例如人手阻挡机器人运动^[17], 在扰动结束后难以依赖动态系统的运动规划直接恢复任务。

为进一步提高机器人运动抗扰动性, 需构建时间无关的 DS 模型。文^[18]提出 DS 稳定估计器 (SEDS), 该模型基于高斯混合模型将示教数据编码成 1 阶自治系统, 并建立系统全局渐近稳定的充分条件, 但对复杂示教轨迹的学习能力较差。为解决该问题, 可先基于示教数据构建灵活的李雅普诺夫函数, 然后基于李雅普诺夫稳定性求解 DS。SEDS-II 模型^[19]采用回归算法将示教轨迹建模为 DS, 同时保证稳定性。 τ -SEDS 算法^[20]将示教数据映射到隐空间, 并在隐空间中采用 SEDS 算法学习全局渐近稳定 DS, 再逆映射获得原空间 DS。基于能量的动态系统稳定器 (ESDS)^[21]在李雅普诺夫函数基础上叠加虚拟能量, 生成高精度的非自治 DS。为解决 SEDS 的两步学习耗时较长、需调整参数较多的问题, 文^[22]提出基于快速微分同胚映射的动态系统, 建立示教数据与某已知全局渐近稳定系统之间的微分同胚映射, 并基于迭代方法快速建立映射关系, 被用在自由空间的抓取任

务中^[23]。

上述动态系统运动规划方法可以直接用于自由空间的运动轨迹规划, 但应用到接触任务时, 需添加力控制调节项。文^[24]采用 DMP 建立位置动态系, 将接触力表示为类似运动 DMP 模型的形式, 并采用力/位混合控制将力误差转换为位置补偿量。文^[25]也在 DMP 基础上, 添加基于导纳的力控制调节项, 并将其与无源性系统和迭代学习控制相结合, 实现对变化接触表面的在线适应。这种方法将时间相关的 DS 模型与力控制结合, 实现了对接触任务的运动规划与控制, 但难以满足人将机器人拖离接触面的动态交互需求。文^[26]将 DMP 和 ProMP 相结合、采用改进的 VMP (via-point movement primitive) 模型获得参考速度源, 并添加力控制、姿态控制和力矩控制速度源, 通过对控制器刚度值和速度源的调节来实现机器人受到扰动时的自适应控制和扰动结束后的作业恢复^[2]。为使机器人在受到扰动后能够根据动态系统运动规划恢复接触作业, 需要基于示教轨迹建立时间无关的 DS 模型。文^[4]采用时间无关的动态系统对接触任务进行运动规划, 并通过径向基函数编码的力修正项进行阻抗力控制, 进一步结合能量箱的方式保证系统的无源性, 但整个设计过程复杂。

为实现接触任务轨迹的快速规划与力控制, 并且使机器人在作业中具有对外界扰动的适应性, 本文提出微分同胚映射动态系统运动规划与力控制相结合的接触任务运动规划与控制方法。为了建立时间无关的运动 DS 模型, 首先通过导纳控制器设计接触任务触觉示教, 并采用微分同胚映射建立位置 DS 模型。其次, 将接触任务划分为 3 种状态, 分别基于所建立 DS 模型设计各状态力调节项和姿态控制项, 将位置 DS 模型应用于接触任务的全过程, 使其具有较强的环境适应性和抗扰动性。

2 人工示教 (Human demonstration)

选用碳纤维织物复合材料铺放任务作为实验场景

进行验证,为此搭建示教平台,并通过动觉示教的方式采集人工作业过程中的位置和力数据。

2.1 平台搭建

示教时传感器和执行器等各部件安装及受力示意如图 1 所示,机械臂末端关节 J_{end} 中内部 6 维力/力矩传感器为 S_0 , J_{end} 与外部 6 维力/力矩传感器 S_1 通过连接件 C_0 连接,并将执行器 T_0 安装在 S_1 末端,分别对 2 个 6 维力/力矩传感器进行零点标定。在图 1, S_0 检测数据 $F_0 = (f_0, \tau_0)^T$, S_1 检测数据 $F_1 = (f_1, \tau_1)^T$ 为接触面对执行器 T_0 的反力,人手施加在连接件 C_0 处的力与力矩数据 $F_2 = (f_2, \tau_2)^T$ 。

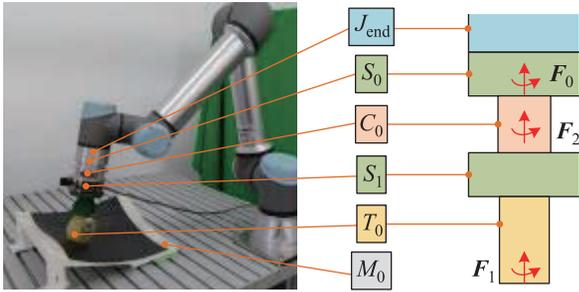


图 1 示教平台与机械臂末端力示意

2.2 数据采集

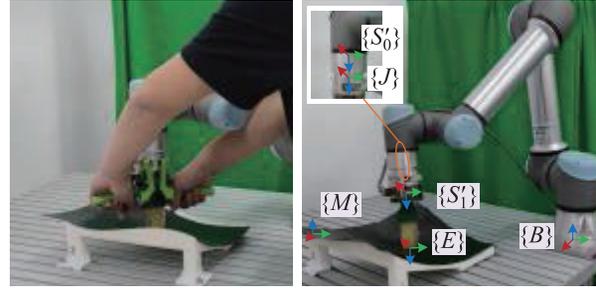
针对机械臂末端安装的部件和模具,分别建立如图 2 (b) 所示坐标系: 模具 M_0 坐标系 $\{M\}$, 其与机械臂的基坐标系 $\{B\}$ 坐标轴平行, 到 $\{B\}$ 的变换关系为 ${}^B_M T$; 传感器 S_0 坐标系为 $\{S_0\}$, 其与机械臂末端坐标系 $\{J\}$ 的坐标轴平行, 到 $\{J\}$ 的变换关系为 ${}^J_{S_0} T$; 传感器 S_1 坐标系为 $\{S_1\}$, 其与 $\{J\}$ 的坐标轴平行, 到 $\{J\}$ 的变换关系为 ${}^J_{S_1} T$; 执行器 T_0 末端坐标系 $\{E\}$, 其与 $\{J\}$ 的坐标轴平行, 到 $\{J\}$ 的变换关系为 ${}^J_E T$ 。可通过机械臂运动学获得 $\{J\}$ 到 $\{B\}$ 的变换关系 ${}^B_J T$, 进而获得 $\{S_0\}$ 、 $\{S_1\}$ 、 $\{E\}$ 到 $\{B\}$ 变换关系分别为

$$\begin{cases} {}^B_{S_0} T = {}^B_J T {}^J_{S_0} T \\ {}^B_{S_1} T = {}^B_J T {}^J_{S_1} T \\ {}^B_E T = {}^B_J T {}^J_E T \end{cases} \quad (1)$$

F_0 在 $\{B\}$ 中表示为 $F'_0 = (f'_0, \tau'_0)^T$:

$$\begin{cases} f'_0 = {}^B_{S_0} M f_0 \\ \tau'_0 = P_t {}^B_{S_0} M f_0 + {}^B_{S_0} M \tau_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, ${}^B_{S_0} M$ 为变换关系 ${}^B_{S_0} T$ 中的旋转矩阵, P_t 为 ${}^B_{S_0} T$ 中变换向量 ${}^B_{S_0} P$ 的斜对称矩阵。



(a) 动觉示教 (b) 坐标系建立

图 2 采集人工铺放数据

设计动觉示教时机械臂末端导纳力控制律为

$$M \ddot{X} + B \dot{X} = F'_0 \quad (3)$$

其中, M 为 6×6 惯性系数矩阵, B 为 6×6 阻尼系数矩阵, \ddot{X} 、 \dot{X} 分别为期望加速度、期望速度。

第 t 控制周期, 期望位姿、期望速度和加速度控制输出量分别为

$$\begin{cases} X(t) = \dot{X}(t)T + X(t-1) \\ \dot{X}(t) = \ddot{X}(t)T + \dot{X}(t-1) \\ \ddot{X}(t) = [F'_0(t) - B\dot{X}(t-1)]/M \end{cases} \quad (4)$$

其中, $X(t-1)$ 、 $\dot{X}(t-1)$ 和 $\ddot{X}(t-1)$ 分别表示第 $t-1$ 控制周期的期望位姿、速度和加速度, $F'_0(t)$ 为第 t 控制周期 F'_0 值, T 为机械运动控制周期。

在人工示教过程中, 如图 2 (a) 所示, 人拖动机械臂末端进行铺放作业, 并尽量使机械臂末端 z 向沿着模具表面法向, 同时记录传感器 S_1 的力/力矩 $F_1 = (f_1, \tau_1)^T$ 和 $\{E\}$ 相对于 $\{B\}$ 的运动轨迹 $\xi_0 = (x_0, q_0)^T$, 其中 x_0 为示教轨迹的位置。基于模具表面的三角面片信息, 获取示教轨迹位置 x_0 的各离散点对应的三角面片的单位法向量 $N_z = (n_x; n_y; n_z)^T$, 并计算 f_1 在单位法向量 N_z 的投影, 将投影值作为执行实际任务

时机械臂末端的 z 向期望力:

$$f_n = f_1 \cdot N_z \quad (5)$$

在示教轨迹的离散位置点分别建立坐标系作为机械臂末端运动的期望姿态。首先搜索曲面上离 ξ_0 最近的三角面片, 将其单位法向 N_z 作为 z 向, ξ_0 轨迹运动方向 v_q 作为 y 向, 通过 N_z 与 v_q 叉乘, 获得垂直于 z 向的 x 向:

$$N_x = N_z \times v_q \quad (6)$$

由于 z 向和 y 向可能不垂直, 因此将 N_x 与 N_z 叉乘, 获得垂直于 z 向的 y 向:

$$N_y = N_z \times N_x \quad (7)$$

通过式 (6) (7) 可获得示教轨迹各点的期望姿态, 从而将执行器的 z 方向调整至始终与曲面垂直。本文采用四元数的方式描述姿态, 将示教轨迹的期望姿态描述为 q'_0 。通过上述方法, 获得人工完成碳纤维织物复合材料铺放的期望位置 x_0 、期望姿态 q'_0 和执行器的 z 向期望力 f_n 。

3 运动动态系统建立 (Establishment of the motion dynamical system)

基于微分同胚映射的动态系统是一种时不变系统, 表达式中不显式地含有时间。在获得示教轨迹的位置 x_0 后, 连续非线性的 DS 将运动轨迹描述为非线性微分方程:

$$\dot{x} = f(x) \quad (8)$$

将期望的非零平衡点 x^* , 经平移变为零平衡点, 并构建变量 $x' = x - x^*$, 得到新的平衡方程:

$$\dot{x}' = f(x' + x^*) \quad (9)$$

空间中的任意起点都将向着动态系统平衡点运动, 为实现机器人末端运动与示教运动趋势一致, 结合式 (9), 将示教轨迹的终点设为零平衡点, 即将示教轨迹点的位置坐标减去终点的位置坐标。采用文

[22] 的微分同胚映射动态系统建立方法, 在隐空间 A 中, 将实际空间 B 中示教轨迹 b 的起点与终点相连, 建立简单轨迹 a 。建立隐空间 A 中简单轨迹 $a = (x_{a,i})$ 和实际空间 B 中示教轨迹 $b = (x_{b,i})$ 之间的映射, $i = 0, \dots, N$ 。其映射关系为

$$\phi(a) = a + k_\phi(a)v \quad (10)$$

其中, $k_\phi(a) = e^{-\rho^2 \|a-c\|^2}$ 为径向基函数, c 为 $k_\phi(a)$ 的中心位置, $\rho > 0$ 为 $k_\phi(a)$ 的宽度, v 为平移的变换方向。

通过迭代的方法, 可以获取超参数 ρ , 迭代过程中的映射误差函数为

$$F_p(\Phi_x(a), b) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|\Phi_x(x_{a,i}) - x_{b,i}\| \quad (11)$$

其中, $\Phi_x(a) = \phi_{N_1} \circ \dots \circ \phi_1(a)$ 为映射函数 $\phi(a)$ 经过 N_1 次迭代获得的最终映射函数, \circ 代表函数复合运算。

建立隐空间 A 中轨迹 $a' = x_A^i - x_A^N$ ($i=0, \dots, N$) 的动态系统:

$$\dot{x}_A = f_1(x_A) = \gamma(x_A) P x_A \quad (12)$$

其中, $\gamma(x_A) = \begin{cases} \frac{\|x_0\|}{N\Delta t \|x_A\|}, & \|x_A\| \geq \frac{\|x_0\|}{N} \\ \frac{1}{\Delta t}, & \text{其他} \end{cases}$, x_0 是运动起点位置, x_A 为机器人实际运动时在 A 空间中的位置, P 为对称负定矩阵。

通过隐空间 A 中轨迹 a 和实际空间 B 中轨迹 b 的位置映射函数 $\Phi_x(a)$, 得到实际空间 B 中的示教轨迹 b 的动态系统:

$$\dot{x}_B = f_2(x_B) = \gamma(\Phi^{-1}(x_B)) J_{h1}(\Phi^{-1}(x_B)) P \Phi^{-1}(x_B) \quad (13)$$

其中, x_B 为机器人实际运动时在 B 空间中的位置, $J_{h1}(x) = \frac{\partial \Phi(x)}{\partial x}$ 。

基于第 2 节中采集的人工示教的位置数据 x_0 和上述动态系统的建立方法, 建立图 3 (a) 中隐空间 A 中简单直线轨迹 a 和图 3 (b) 中实际空间 B 中示教轨迹

b 的映射关系, 并建立简单轨迹 a 的动态系统, 进而获得示教轨迹 b 的动态系统。在实际空间 B 中任意设置一个测试点, 作为运动起点, 从图 3(b) 可以看出, 该点在运动中不断地向示教轨迹 b 靠近, 最终收敛到示教轨迹终点, 并如图 3(a) 所示, 该点在隐空间 A 中也是朝向简单轨迹 a 逐渐靠近, 并收敛到简单轨迹 a 的终点。

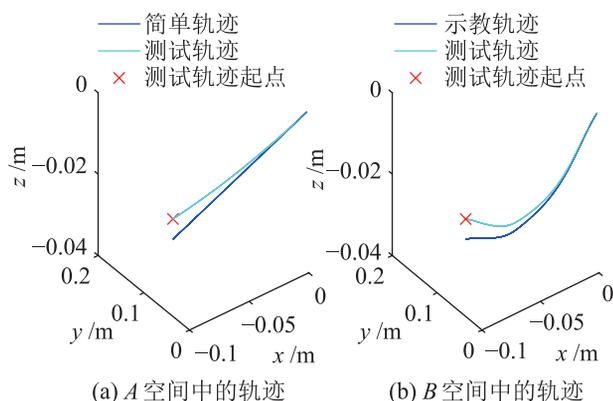


图 3 基于示教轨迹的动态系统

4 接触任务运动控制 (Motion control for contact task)

如图 4 所示, 将机器人接触任务的执行过程划分为接触作业 (图 4(a))、人工扰动 (图 4(b)) 和自由空间运动 (图 4(c)) 3 个状态。当机器人在接触空间中作业时, 需要末端姿态为示教轨迹的对应期望姿态 q_0 , 并且末端 z 向接触力为期望力 f_n 。当人工干扰机器人作业时, 人手将机器人的末端拖离接触面, 此时机器人末端需要跟随人手运动。在人工扰动消除后, 机器人需要从被释放的位置重新开始接触作业。



(a) 接触作业 (b) 人工扰动 (c) 自由空间运动

图 4 接触任务的不同状态

4.1 接触作业

为实现机械臂末端与模具的接触力控制和末端姿态控制, 对第 3 节建立的动态系统添加导纳力控制调节项, 并基于姿态反馈设计 PI (比例-积分) 控制器, 其控制框架如图 5 所示。结合动态系统的运动速度 $v_B = (v_{Bx}; v_{By}; v_{Bz})^T$ 和机械臂末端 z 向导纳控制器输出速度调节量 Δv , 获得机械臂末端的速度控制量 v_c , 并乘以控制周期 T , 获得位置调节量 Δx_c , 进而与当前实际位置 x_c 叠加, 获得位置控制量 x_c , 同时基于 PI 控制对机械臂末端的姿态 q_c 进行反馈调节, 获得机械臂末端的姿态控制量 q_c 。将 x_c 和 q_c 输入到机器人内部控制器实现对机器人接触作业的运动控制。

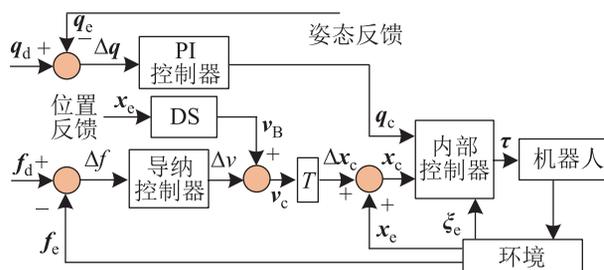


图 5 接触作业的运动控制框架

在接触作业中, 机械臂末端姿态的 z 向始终沿着接触面法向, 且在 z 向施加期望接触力, 因此只需考虑机械臂末端 z 向的单自由度导纳控制, 其控制律为

$$m\ddot{e} + b\dot{e} + ke = \Delta f \quad (14)$$

其中, $e = x_{ez} - x_{cz}$ 为机械臂末端 z 向实际位置 x_{ez} 和控制输入位置 x_{cz} 之间的误差, \dot{e} 和 \ddot{e} 分别为速度和加速度误差; $\Delta f = f_c - f_d$ 为机械臂末端 z 向实际力 f_c 与期望力 f_d 的差值, $f_d = f_n$; m 为导纳控制器的惯性系数; b 为阻尼系数; k 为刚度系数。

若将刚度系数 k 设置为 0, 则既可以在接触作业中进行力跟踪控制^[27], 还可以在人工扰动情况下控制机器人跟随人的意图运动^[2]。结合所建立的动态系统的输出速度 v_B , 获得 $\{B\}$ 系下速度控制量 v_c 和位置控制量 x_c 分别为

$$\begin{cases} \mathbf{v}_c = \mathbf{v}_B + {}^B_E \mathbf{M}(\mathbf{S}_z \Delta \mathbf{v}) \\ \mathbf{x}_c = \Delta \mathbf{x}_c + \mathbf{x}_e \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\mathbf{S}_z = (0, 0, 1)^\top$; $\Delta \mathbf{v}$ 为导纳力控制产生的机械臂末端 z 向速度调节量; $\Delta \mathbf{x}_c = \mathbf{v}_c T$; ${}^B_E \mathbf{M}$ 为 $\{E\}$ 系相对于 $\{B\}$ 系的旋转变换矩阵, ${}^B_E \mathbf{M} = {}^B_J \mathbf{M}_E^J \mathbf{M}$ 。

对机械臂采用离散控制形式, 在第 t 控制周期, 对机械臂末端与模具接触的导纳控制产生的速度调节量 $\Delta \mathbf{v}(k)$ 和期望加速度 $\ddot{x}_{cz}(t)$ 分别为

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{v}(t) = \ddot{x}_{cz}(t) \cdot T \\ \ddot{x}_{cz}(t) = \ddot{x}_{cz}(t) + \frac{1}{m} [\Delta f(t) - b(\dot{x}_{cz}(t-1) - \dot{x}_{cz}(t))] \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\dot{x}_{cz}(t)$ 和 $\ddot{x}_{cz}(t)$ 分别为第 t 控制周期实际运动的速度和加速度, $\Delta f(t)$ 为第 t 控制周期的力误差, $\dot{x}_{cz}(t-1)$ 为第 $t-1$ 控制周期执行器的 z 向速度。

第 t 控制周期, 坐标系 $\{B\}$ 下机械臂末端位置控制量输出为

$$\mathbf{x}_c(t) = \Delta \mathbf{x}_c(t) + \mathbf{x}_e(t) \quad (17)$$

其中, $\Delta \mathbf{x}_c(t) = \mathbf{v}_c(t) T$, $\mathbf{v}_c(t) = \mathbf{v}_B(t) + {}^B_E \mathbf{M}(\mathbf{S}_z \Delta \mathbf{v}(t))$, $\mathbf{x}_e(t)$ 为第 t 控制周期时机械臂末端的实际位置。

当机器人在接触空间作业时, 搜索距离当前接触点最近的示教轨迹点的期望姿态 \mathbf{q}_0 作为机器人实际运动的期望姿态 \mathbf{q}_n , 且当前机械臂末端的实际姿态为 \mathbf{q}_e 。利用四元数与 RPY (横滚、俯仰、偏航) 角之间的转换关系, 获得实际角度 θ_e 与期望角度 θ_d 相对于坐标系 $\{B\}$ 的角误差 $\Delta \theta = (\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma)^\top$, 通过 PI 控制器计算获得角度调节量 $\Delta \theta_c$ 与角度控制量 θ_c , 并将 θ_c 转换为四元数姿态, 得到机械臂末端控制姿态 \mathbf{q}_c 。

第 t 控制周期, 经 PI 控制器计算, 获得角度调节量输出和角度控制量输出:

$$\begin{cases} \Delta \theta_c(t) = \mathbf{K}_P \Delta \theta(t) + \mathbf{K}_I \sum_{i=0}^t \Delta \theta(i) \\ \theta_c(t) = \theta_e(t) + \Delta \theta_c(t) \end{cases} \quad (18)$$

其中, $\Delta \theta(t)$ 和 $\Delta \theta(i)$ 为第 t 控制周期和第

i 控制周期的姿态角度误差, $\theta_e(t)$ 为第 t 控制周期的实际姿态角度, $\mathbf{K}_P = (k_{p\alpha}, k_{p\beta}, k_{p\gamma})^\top$ 为比例系数, $\mathbf{K}_I = (k_{i\alpha}, k_{i\beta}, k_{i\gamma})^\top$ 为积分系数。

4.2 人工扰动

在接触任务正常执行过程中, 通过检测机械臂末端受到的外界扰动力, 可以判断机械臂作业是否受到人工扰动。设定机械臂末端除 z 向之外其他方向的力阈值, 当大于阈值时, 即认为发生人工扰动。在人工扰动条件下完成接触作业时, 期望机械臂末端能够跟随人手运动, 且在交互结束后能够恢复接触作业, 为此设计将动态系统和导纳控制器相结合的运动控制框架。如图 6 所示, 将动态系统的速度 \mathbf{v}_B 乘以方向选择矩阵 \mathbf{S}_T 后, 与导纳示教控制器输出的包含位姿的速度调节量 $\Delta \xi$ 叠加, 获得机械臂末端包含位姿的速度控制量 $\dot{\xi}_c$, 将其乘以控制周期 T 获得末端位姿控制量 ξ_c 。将 ξ_c 输入到机器人内部控制器, 实现人工扰动条件下的机器人运动控制, 即机器人末端跟随人手运动。

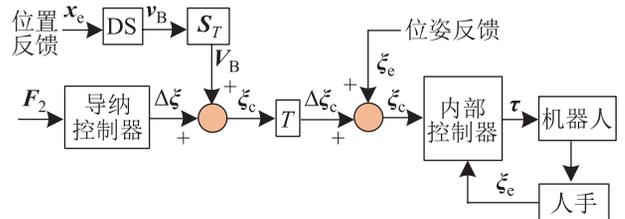


图 6 人工扰动下的运动控制框架

相比于第 2 节基于导纳控制器的示教, 当机器人自主执行任务时, 将执行器 T_0 直接安装在机械臂末端关节 J_{end} 法兰处, 机械臂的末端即为执行器 T_0 的末端, 因此当人手拖动机械臂末端运动时, 传感器 S_0 的检测数据 $F_0 = (f_0, \tau_0)^\top$ 即为人手作用力与力矩 $F_2 = (f_2, \tau_2)^\top$, 其在坐标系 $\{B\}$ 中表示为 $F'_0 = (f'_0, \tau'_0)^\top$, 即为当人施加扰动时导纳控制器的期望力与力矩。设计人施加扰动时的导纳控制律为

$$\mathbf{M}' \ddot{\xi} + \mathbf{B}' \dot{\xi} = \mathbf{F}'_0 \quad (19)$$

其中, \mathbf{M}' 为 6×6 惯性系数矩阵, \mathbf{B}' 为 6×6 阻尼系数矩阵, $\ddot{\xi}$ 和 $\dot{\xi}$ 分别为期望加速度和期望速度。

采用式 (4) 的计算方法, 获得交互力 F_0' 产生的速度调节量 $\Delta \dot{\xi}$, 并与动态系统产生的速度 v_B 叠加, 获得速度的控制量:

$$\Delta \dot{\xi}_c = \Delta \dot{\xi} + v_B = \Delta \dot{\xi} + S_T v_B \quad (20)$$

其中, $S_T = [I_{3 \times 3}; 0_{3 \times 3}]^T$ 。

存在人工扰动时, 机械臂的运动控制量为

$$\dot{\xi}_c = \Delta \dot{\xi}_c + \dot{\xi}_c \quad (21)$$

其中, $\Delta \dot{\xi}_c = \Delta \dot{\xi}_c T$, ξ_c 为机器人实际运动的位姿反馈。

在人工扰动消失后, 机械臂末端从自由空间向接触空间运动, 采用 4.1 节的接触空间作业控制方式, 在导纳力控制器和动态系统的共同作用下, 使机械臂快速到达接触空间并恢复接触作业。

4.3 自由空间运动

在机械臂进行接触作业之前, 首先其末端从自由空间向接触空间运动, 需要对此进行规划与控制。基于第 3 节建立的动态系统, 将示教轨迹起点设置为动态系统的终点, 可以实现机械臂从自由空间任意起点 ξ_a 到接触空间轨迹起点的运动规划。如图 7 所示, 接触面一般为曲面, 这导致动态系统规划的运动在未达到示教轨迹起点 ξ_b 前已经在点 ξ'_a 发生接触, 并且从接触点 ξ'_a 开始, 机器人末端姿态的 z 向须为曲面的法向。当从接触点 ξ'_a 运动到 ξ_b 时, 单一的动态系统的运动规划会使得接触力过大, 影响机械臂的正常工作。

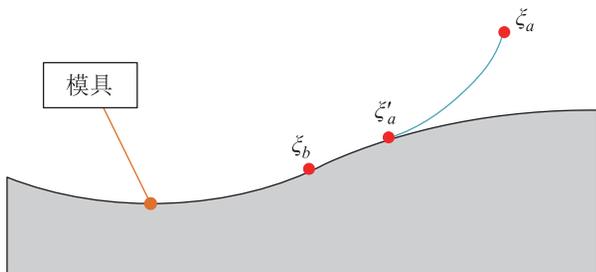


图 7 自由空间到接触空间运动示意

为保证机械臂末端在到达示教轨迹起点前可以正常工作, 在动态系统基础上添加 z 向导纳力控制器产

生的速度调节量 Δv , 导纳控制律与式 (14) 相同, 并将 z 向期望力设置为第 2 节获得的示教轨迹 ξ_0' 的第 1 个起点的 z 向期望力 f_{n1} , 其运动速度控制量 v_c' 和位置控制量 x_c' 分别为

$$\begin{cases} v_c' = v_B + \frac{B}{E} M (S_Z \Delta v) \\ x_c' = v_c' T + x_c \end{cases} \quad (22)$$

其中, Δv 计算方法与式 (16) 相同。

上述的运动规划保证了在机械臂未到达示教轨迹起点就与曲面提前接触时, 机械臂仍可正常工作。此外, 还需考虑运动中的姿态规划。首先对自由空间运动进行姿态规划, 将终点 ξ_b 的姿态 q_b 作为终点姿态, 通过四元数球面插值的方式, 获得运动轨迹点的姿态为

$$q'_b = q_a \otimes (q_a^{-1} \otimes q_b)^{t_1} \quad (23)$$

其中, $0 \leq t_1 \leq 1$; \otimes 为四元数乘法, 若四元数 $p = (p_w, p_v^T)^T$, 四元数 $q = (q_w, q_v^T)^T$, 则其乘法为 $p \otimes q = (p_w q_w - p_v^T q_v, p_w q_v^T + q_w p_v^T + p_v^T \times q_v^T)$ 。

连接自由空间轨迹起点 ξ_a 位置 $x_a = (x_a, y_a, z_a)^T$ 和终点 ξ_b 的位置 $x_b = (x_b, y_b, z_b)^T$ 获得直线段 L , 在第 t 控制周期, 将机械臂末端控制位置 $x_c'(t)$ 投影到直线 L , 投影点的位置为 $x_c''(t) = (x_i, y_i, z_i)^T$, 由点 x_a 、 x_b 和 $x_c''(t)$ 共线可得:

$$\frac{x_i - x_a}{x_b - x_a} = \frac{y_i - y_a}{y_b - y_a} = \frac{z_i - z_a}{z_b - z_a} = \rho \quad (24)$$

则可获得投影点的各坐标值为

$$\begin{cases} x_i = \rho(x_b - x_a) + x_a \\ y_i = \rho(y_b - y_a) + y_a \\ z_i = \rho(z_b - z_a) + z_a \end{cases} \quad (25)$$

投影点位置 $x_c''(t)$ 与起点位置 x_a 之间的距离与直线段 L 的长度之比为

$$\beta = \frac{\|x_c''(t) - x_a\|}{\|x_b - x_a\|} \quad (26)$$

将 β 作为四元数球面插值的指数 t_1 , 即可获得自由空间运动轨迹上各点的对应姿态。

当机械臂末端到达接触空间但未到达示教轨迹起点时,期望姿态为 q'_d 。首先,将接触点所在模具表面的三角面片法向 n_z 作为机械臂末端的 z 向,当前运动方向 v'_q 设置为 y 方向,采用式(6)的计算方法,获得 x 方向 n_x ,再采用式(7)的计算方法,获得新的 y 方向 n_y ,并将获得的期望姿态转换成四元数 q'_n 。通过传感器 S_0 实时检测末端力,在检测到末端与模具表面接触后,将姿态 q'_n 作为期望姿态 q'_d ,并采用4.1节的PI姿态控制法对提前接触点 ζ'_a 和示教起点 ζ_b 之间的轨迹姿态进行控制。

5 实验与分析 (Experiment and analysis)

基于第2节搭建的示教平台和第4节提出的接触任务不同状态的机器人运动控制方法,针对碳纤维织物铺放任务分别进行无人工扰动作业和有人工扰动作业实验,验证本文方法的有效性。

针对无人工扰动条件下的接触任务作业,从自由空间中选择10个不同的起点开始运动。机器人先到达示教轨迹起点,然后自主进行接触任务作业。10次实验中,实际轨迹与示教轨迹对应部分相比,在示教轨迹起点处轨迹误差最大为0.004m,在示教轨迹终点处为0.007m,示教轨迹起点和示教轨迹终点之间部分的轨迹误差在0.008m以内,姿态误差在 1.01° 以内。对动态系统添加力控制项后,不同起点处的实际轨迹位置重复性较好,并且在PI控制下姿态偏差较小,可以获得较好的控制效果。相比于只进行动态系统运动规划的情形,机械臂末端 z 向的力控制对位置控制产生调节量,同时考虑到接触任务中模具 M_0 为自由曲面,变化的表面形状对动态系统向示教轨迹的贴合运动也产生了一定阻碍,导致实际轨迹与示教轨迹之间存在一定的偏差。

随机选择其中3个不同起点的运动轨迹,如图8(a)所示,机械臂末端从自由空间开始向示教轨迹起点运动,且在到达示教轨迹起点附近后,不同起点运动轨迹接近重合,向示教轨迹终点运动,重复性较好。

其中3个不同起点轨迹对应示教轨迹部分的姿态误差如图8(b)所示,在PI控制下姿态最大误差为 0.98° ,姿态控制效果较好。

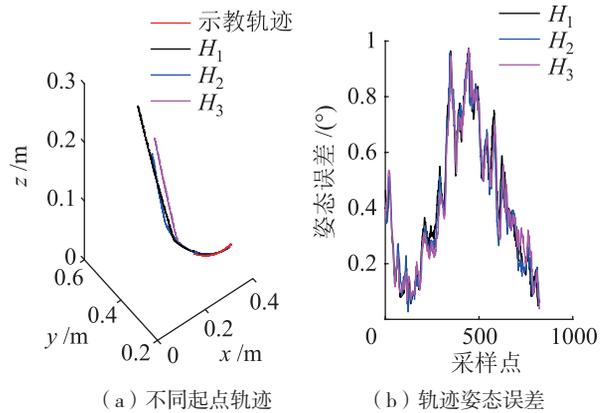


图8 实际运动与姿态误差

在人工扰动条件下做了10次接触任务作业实验。每次实验选择相同的运动起点,当机械臂末端运动到随机位置时,施加工扰动,将机械臂末端拖离接触面,机械臂末端随人手运动;扰动结束后,释放机械臂末端,让其自动恢复接触作业。在施加工扰动前,机械臂末端处于接触作业状态,且与无人扰动的接触作业状态相同。消除扰动并恢复接触作业后,机械臂轨迹与示教轨迹之间的位置、姿态最大误差与无人扰动时的结果一致,其中第1次施加工扰动时机械臂末端的全部运动轨迹 R_1 如图9(a)所示,局部运动轨迹如图9(b)所示;在 r_1 点施加工扰动,机械臂末端与模具 M_0 脱离接触,在 r_2 点消除人工

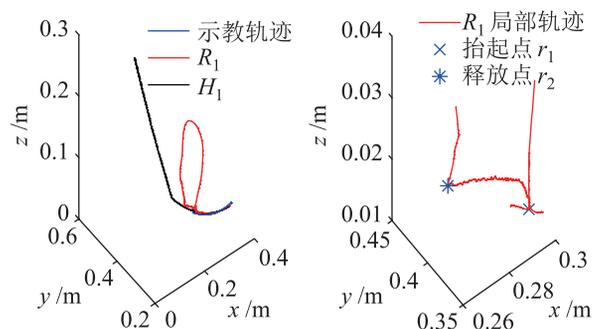


图9 人工扰动下的运动轨迹

工扰动, r_1 与 r_2 点之间为机械臂末端在自由空间中的运动轨迹, 消除扰动后机械臂末端逐渐与模具恢复接触, 并且其轨迹逐渐与无人扰动时的 H_1 轨迹接近重合。

为对比本文方法与基于时间的离线运动规划与控制的力跟踪效果, 采用 4.1 节的导纳力控制方法, 并将图 5 中的 v_B 变为离线控制速度, 进行离线的力跟踪实验。在调整控制器参数后进行 10 次重复实验, 得到力的均方根误差, 如表 1 所示, 其范围为 0.73 ~ 0.80N, 平均值为 0.77N。采用本文方法, 在无人工扰动条件下和有人工扰动条件下分别进行 10 次实验, 恢复接触作业后的力与对应期望力的均方根误差分别如表 2 和表 3 所示。在无人工扰动时力的均方根误差范围为 0.81 ~ 0.93N, 平均值为 0.86N, 而在有人工扰动时恢复接触作业后的力均方根误差范围为 0.85 ~ 0.96N, 平均值为 0.91N。本文方法相比于基于时间序列的离线运动规划与控制法, 在无人扰动时力的均方根误差平均值增大 0.09N, 原因为动态系统在线规划轨迹与示教轨迹之间存在偏差, 且曲面的变化对力的跟踪也有一定影响, 使得力的偏差较大。在有人扰动时相比于无人扰动时力的均方根误差增大 0.05N, 二者结果相近。

表 1 离线运动规划与控制下力的均方根误差

序列	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
均方根误差 /N	0.73	0.76	0.78	0.76	0.78
序列	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
均方根误差 /N	0.76	0.78	0.77	0.80	0.79

表 2 无人工扰动时力的均方根误差

序列	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
均方根误差 /N	0.82	0.85	0.85	0.89	0.85
序列	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
均方根误差 /N	0.93	0.87	0.81	0.86	0.82

表 3 有人工扰动时力的均方根误差

序列	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
均方根误差 /N	0.88	0.85	0.87	0.96	0.93
序列	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
均方根误差 /N	0.95	0.98	0.84	0.96	0.85

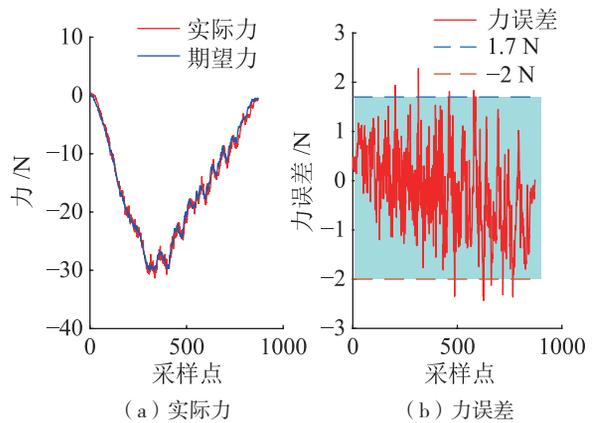


图 10 离线运动规划与控制中第 1 次实验的实际力与误差

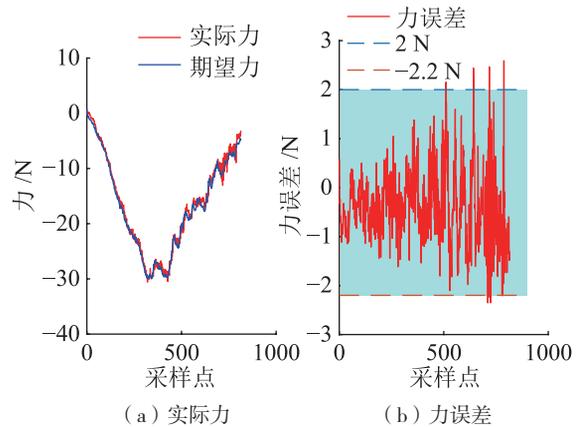


图 11 H_1 轨迹实际力与误差

在 10 次离线实验中, 力跟踪效果最佳实验的实际力如图 10 (a) 所示, 力误差值变化如图 10 (b) 所示, 误差最大绝对值为 2.43N, 98.5% 的力误差分布范围为 $-2.0 \sim 1.7N$ 。其中, 图 8 的 H_1 轨迹所对应示教轨迹部分的力变化如图 11 (a) 所示, 力误差值变化如图 11 (b) 所示, 误差最大绝对值为 2.59N, 98.7% 的误差值分布范围为 $-2.2 \sim 2.0N$, 力均方根误差为 0.86N。相比于离线实验的最佳结果, H_1 轨迹

的力控制误差绝对值与力误差值变化范围与其接近,但均方根误差较大,且在终点附近,由于动态系统不断向终点收敛,因此力误差较大。

恢复接触后 R_1 轨迹对应示教轨迹部分的力变化如图 12 (a) 所示,力误差值变化如图 12 (b) 所示。刚恢复接触时接触力较小,而接触轨迹中间部分的期望力较大,使得在刚恢复接触位置处力误差绝对值最大,为 4.1N。恢复接触后,随着运动,力的误差值逐渐减小,98.4% 的力误差值分布范围为 $-2.4 \sim 2.2\text{N}$,均方根误差为 0.90N,与 H_1 轨迹的力跟踪结果相近。在消除人工扰动后,本文方法自动恢复接触作业,且仍可获得与无人扰动时相近的力控效果。同时,消除人工扰动后,机械臂末端刚恢复接触时力误差较大,因此与无人工扰动的情况相比,有人工扰动时力均方根误差的平均值较大。

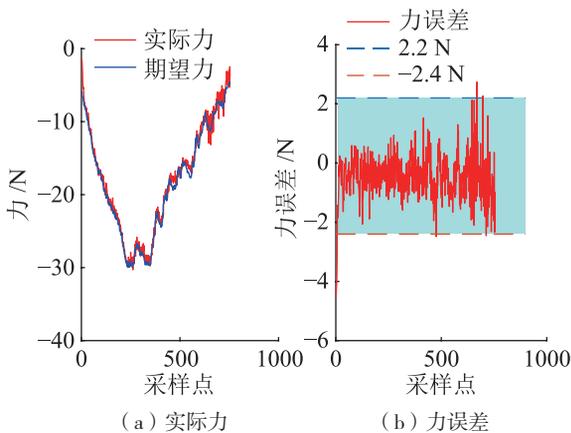


图 12 恢复接触后 R_1 轨迹的实际力与误差

6 结论 (Conclusion)

针对存在人工扰动条件下的机器人接触作业,提出了基于微分同胚映射动态系统的运动规划和控制方法,并分别设计基于动态系统的力控制调节项和姿态控制项,使机器人在接触任务执行过程中具有较强的抗扰性。具体贡献如下:

(1) 采用微分同胚映射动态系统对人工示教轨迹

位置建立动态系统,实现了接触任务的运动快速规划,并考虑接触任务中接触作业、人工干扰下运动和自由空间运动等不同的需求,分别设计基于运动动态系统的位置控制调节项和姿态控制项,实现了基于动态系统的接触任务全过程运动规划与控制。

(2) 搭建碳纤维织物复合材料铺放实验平台,在无人工扰动时,机械臂末端从自由空间中任意起点开始运动,10 次实验的力均方根误差为 0.86N,与离线方法的力跟踪实验结果相近,充分说明了该方法可以用于接触任务的运动规划与控制,丰富了接触任务的运动规划与控制方法。

(3) 当有人工扰动时,消除扰动、恢复接触作业后与无人工扰动条件下的力均方根误差结果相近,且轨迹与无人工扰动时的轨迹接近重合,验证了该方法具有较强的抗扰性,可以用于有人工干预作业需求的接触任务执行场景。

研究过程中,未考虑曲面形状变化对基于动态系统在线运动规划的力控制的影响,后续工作拟对曲面形状变化对力控制的影响进行研究,提高本文方法的力跟踪效果。○

来源: 机器人

作者简介

杨尚尚 (1990—), 男, 武汉大学动力与机械学院博士生。研究领域: 机器人运动规划与控制, 复合材料自动铺放。

谢啸 (1998—), 男, 武汉大学动力与机械学院硕士生。研究领域: 机器人运动规划与控制, 复合材料自动铺放。

高霄 (1994—), 男, 武汉大学动力与机械学院博士。研究领域: 机器人学习, 柔顺控制。

首届全国青少年劳动技能与智能设计大赛决赛在沈开幕

2023年8月22日，由中国自动化学会、沈阳市人民政府主办，市委宣传部、市人力资源社会保障局、市教育局、大东区人民政府承办的首届全国青少年劳动技能与智能设计大赛决赛在沈阳举行。

本届大赛以“自主、协同、探究、实践、创新”为主题，以“人文引领、以劳育人、智能驱动、五育并举、人才强国”为宗旨，为全国青少年创造学习科技、交流成果、展示技能的舞台，培养青少年的科学兴趣、创新意识、

实践能力和社会责任感。比赛期间，将有来自全国近7000名参赛选手将围绕无碳小车、创意结构、数控智能制造、智能网联电车、智能家居、数字素养、风能利用、脑机互联8个赛题进行设计和比赛。

大赛开幕式分别在东北育才东关模范小学（周恩来少年读书旧址）设主会场，在沈阳大学音乐厅设分会场。开幕式主题为“为中华民族伟大复兴而奋斗”，分为“中华志、少年志、英雄志”三个部分，通过创意短片、主题

宣讲、现场对话、节目汇演等形式展现了沈阳的振兴发展。

中国工程院院士，中国自动化学会会士、理事长，西安交通大学教授郑南宁；中国科学院院士，清华大学教授费维扬；中国科学院院士，中国自动化学会特聘顾问，北京控制工程研究所研究员吴宏鑫；中国科学院院士，中国科学院地质与地球物理研究所研究员刘嘉麒；中国工程院院士，中国自动化学会会士、特聘顾问，中国科学院沈阳自动化研究所研究员王天然；中国工程院院士，中国自动化学会理事，东北大学副校长唐立新；辽宁省科学技术协会党组书记张春英；中国自动化学会会士、监事长，中国科学院自动化研究所研究员王飞跃；英国工程院院士，国际欧亚科学院院士，北京理工大学教授冯长根；欧洲科学院院士，中国自动化学会会士、副理事长，华南理工大学教授陈俊龙；中国自动化学会会士、副理事长，山东大学特聘研究员王成红；中国自动化学会会士、副理事长，中国科学院沈阳分院院长于海斌；



图1 开幕式现场



图2 吴宏鑫院士对话



图3 冯长根院士对话



图4 郑南宁院士致辞

中国自动化学会会士、副理事长，青岛科技大学副校长李少远；中国自动化学会会士、副理事长，山东科技大学副校长周东华；中国自动化学会会士、副理事长，中国科学院自动化研究所研究员侯增广；欧亚科学院院士，重庆大学教授，中国自动化学会会士、常务理事宋永端；欧洲科学院院士，中国自动化学会会士、副秘书长，哈尔滨工业大学教授高会军等出席开幕式。



图5 陈杰院士致辞



图6 张春英党组书记致辞



图7 于海斌副理事长宣读赛事要求



图8 段继阳副市长致辞并宣布大赛开幕

在院士对话环节，邀请东北育才学校学生周子璐；与兴沈英才董兴俊博士；中国科学院院士，中国自动化学会特聘顾问，北京控制工程研究所研究员吴宏鑫；英国工程院院士，国际欧亚科学院院士，北京理工大学教授冯长根展开了一次关于理想与未来的对话交流，让青少年更加切身地感受到建设世界科技强国，实现高水平科技自立自强的时代呼唤。

在大赛决赛开幕式现场，中

国工程院院士、中国自动化学会会士、理事长、西安交通大学教授郑南宁；中国工程院院士、中国自动化学会会士、副理事长陈杰；辽宁省科协党组书记张春英分别致辞；中国自动化学会会士、副理事长、中国科学院沈阳分院院长于海斌宣读赛事要求；沈阳

市人民政府副市长段继阳致辞并宣布大赛开幕。

最后大赛开幕式在沈阳广播电视台童声合唱团演唱的《如愿》中结束。○

大赛组委会 供稿

CAA “企·话”沙龙—未来网络在沈阳成功召开

2023年8月21日，由中国自动化学会主办的第二期CAA“企·话”沙龙—未来网络在沈阳举办。本次沙龙聚焦“未来网络”，共同商讨未来网络发展大计，加快未来网络产业培育发展，构建自主可控开放的产业链供应链，塑造我国未来产业的新动能新优势，成为助力网络强国战略的重要支撑。

本次沙龙邀请到中国工程院院士，中国自动化学会会士、理事长、西安交通大学教授郑南宁，中国工程院院士、中国自动化学会理事、东北大学副校长唐立新，欧

洲科学院院士、中国自动化学会会士、副理事长、华南理工大学教授陈俊龙，欧洲科学院院士、中国自动化学会会士、副秘书长、哈尔滨工业大学教授高会军，沈阳市人力资源和社会保障局局长王志刚，中国自动化学会荣誉理事、沈阳新松机器人自动化股份有限公司副总裁曲道奎，科大讯飞股份有限公司副总裁、研究院院长刘聪，ABB（中国）有限公司副总裁余臻，ABB贝加莱工业自动化（中国）有限公司市场技术总监宋华振，上海宝信软件股份有限公司技术总监曾新潮，鞍钢集团信息产业公司首席专

家刘佳伟，沈阳仪表科学研究院有限公司党委委员、副总经理郑浩，来自武汉大学、安徽大学、北京交通大学、西安交通大学等高校科研工作者，此外还有沈大网联汽车等沈阳当地企业共计30余人参会。

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

郑南宁院士在致辞中指出，ChatGPT的横空出世给人工智能和互联网带来了颠覆性的挑战，未来网络与大模型的发展具有密切联系。如今，大模型已经渗透进人类社会的每一个角落，它不仅仅可以为我们解答疑惑、决策咨询，更重要的是能创造出新的产业价值，也将会为我们未来企业发展乃至人才培养，带来意想不到的结果。

会上，与会嘉宾围绕传统企业与互联网的深度融合、未来网络的企业布局和人才培养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。

唐立新院士表示，互联网应该成为企业发展的必需品而非奢侈品，企业的转型升级离不开互



图1 沙龙现场



图2 李少远教授主持



图3 郑南宁院士

联网的加持；企业在面对“卡脖子”问题时，应建立习近平总书记的现代化产业体系观，充分发挥制度的优越性，把企业上下游布局好，通过利用互联网这一自主可控载体，将产业更好地带动起来；我们目前面对的产业体系，应该是构建制造工业循环系统，而这离不开工业互联网，只有通过互联网才能实现数据畅通、实现信息化，突破“卡脖子”技术，突破单边底线。

陈俊龙教授谈到，未来网络是一个综合交叉学科，涉及网络

建模和网络制条，希望可以用人工智能技术中的人工智能模型软件对未来网络进行优化。另一方面，未来网络可以提供优化人工智能的训练过程，不管在工业应用还是车联网应用，都可以利用分布式训练在人工智能算法里提供一些契机。

高会军教授认为，未来网络和ChatGPT是我们应该重点研究的两个新技术，要充分发挥未来网络和人工智能在自动化中的作用。要充分联动高校科研院所，共同解决企业面临的共性技术难

题，推动科技成果转移转化。

王志刚局长提出，沈阳是东北地区教育资源非常集中的城市，人工智能推动了产业和人才之间的有效配给。今天汇聚了领域众多院士专家，也有很多本土的企业，希望能够从需求和实践角度，碰撞出新的机遇。

曲道奎副总裁提到，在数字化、网络化、智能化时代，传统企业转型离不开网络化的支撑，不仅要不断提升自身产品的功能和技术，还要制造符合未来发展的数字产品；对于未来网络产业



图4 唐立新院士



图5 陈俊龙教授



图6 高会军教授



图7 王志刚局长



图8 曲道奎副总裁

的人才培养，要从增量人才和存量人才两个维度综合考量，既要不断创造新的平台，吸引更多的人才，也要加大培训力度，不断提升存量人才的技能水平。在未来网络的发展中，人才是关键要素，更需要政产学研各界的共同布局。

刘聪副总裁从三点阐述了关于“未来网络”的想法，首先，ChatGPT 用统一模型带来了技术的飞跃，它以语言认知为核心，成为带领我们通向人工智能的曙光。其次大模型并不是无所不能，

无所不在，需要看问题适不适合通过大模型解决。第三，大模型对网络训练、推理提出了更大的挑战。关于人才培养，刘聪副总裁提到，一方面要让学生掌握更多交叉内容，启发科研方向；另一方面学校应该带着行业需求做教育。

余臻副总裁指出，人才培养要从培养兴趣做起，ABB 和中国自动化学会多年来一直合作大学生创新大赛，对机器人技术感兴趣的不仅仅是大学生，现如今已经渗透到了青少年群体，关于青少年的智慧教育和科普工作值得我们

关注并深入探究。关于传统企业的数字化和智能化转型，余臻副总裁以 ABB 为例，鼓励企业要通过科技创新，从而实现转型升级。

宋华振技术总监认为，目前未来网络还没有在产业中将 IT 网络和 OT 网络进行融合，同时数据建模有着不确定性，希望可以基于物理建模，通过数据、AI 基础方法进行参数优化，或者利用新的公约来解决存在的问题。

曾新潮技术总监表示，新技术从提出到企业的落地需要经过漫长的过程，很难有机会赶上热



图9 刘聪副总裁



图10 余臻副总裁



图 11 宋华振技术总监



图 12 曾新潮技术总监

点。工业互联网在工厂中一旦建成投运，很少被更改或替换，这就对技术提出了高可靠、高可用，性能上留有充分余地，未来能用、可用的要求。通过网络技术一线的体会指出新技术的真正落地是任重道远的。

刘佳伟首席专家谈到，鞍钢在数字化产业实践中已用到了未来网络，将5G网络、TFN技术、云化技术相融合，实现对工业控制领域的革新、解决“卡脖子”问题会成为企业数字化转型的主流过程，如何通过标识解析赋能

废钢产业链，运用好双链融合技术，对于钢铁行业在未来领域的发展至关重要。

沈阳当地企业代表沈阳仪表科学研究院有限公司党委委员、副总经理郑浩提到，传统机械制造行业的数字化转型迫在眉睫，如何更好的实现设备互通与人机结合，不仅需要科技工作者坚持不懈的刻苦研究，还需不断强化对产业体系的底层理解。

此次沙龙活动，不仅深入探讨了未来网络、未来产业的布局发展等问题，也为与会企业家

开启了深化企业转型升级的新思路，提供了多方资源深度合作的新方向。在为推动未来网络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



图 13 刘佳伟首席专家



图 14 郑浩副总经理

中国自动化学会十一届三十八次秘书长工作会议成功召开

2023年8月21日，中国自动化学会十一届四十次秘书长工作会议以线上线下相结合的形式成功召开。中国自动化学会秘书长张楠，副秘书长陈积明、邓方、

董海荣、付俊、李实、乔非、石红芳、孙彦广、孙长生、孙长银、王坛、谢海江、赵延龙等人出席会议。会议由张楠秘书长主持。

会上，学会秘书处从组织建

设、党建、出版宣传、会员服务与管理、分支机构管理、奖励推荐与评选、会议活动、公共服务、科普传播、国际事务等方面汇报了学会2023年7-8月份重点工作情况。随后，各副秘书长就组织管理、学术、会议会展、政府智库、奖励、出版宣传、财务、会员与学生、工业科技、社会服务、外事、科普等分管事务进行了补充汇报。

在具体议题环节，听取了2023中国自动化大会筹备进展、2023国家工业软件大会筹备进展情况，并对筹备细节进行了讨论。

会议最后，各副秘书长就学会未来发展方向、工作重点、会员服务等方面进行了深入交流和探讨，并提出了宝贵的意见和建议。在未来的工作中，学会将认真汲取会议期间的意见和建议，不断完善学会的管理机制和服务体系，致力于为会员提供更加优质的学术交流平台和专业服务。同时，学会还将积极推动国内外自动化领域的合作与交流，为中国自动化事业的蓬勃发展贡献智慧和力量。○

学会秘书处 供稿



图1 线上参会代表



图2 线下参会代表

营运工程师学会一行来访中国自动化学会

2023年8月20日，营运工程师学会英国总部国际事务部部长 Chris GRIME、会员及职业标准部主席 Ian Martin MAC-DONALD、营运工程师学会香港分会终身名誉会长祝赖源、会长谭启文、副会长黄嘉俊、会员及职业标准部主席文婉玲、内务部主席梁伟民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同志进行了接待。

张楠秘书长对营运工程师学会一行的来访表示热烈欢迎，并从发展背景、会员服务、学术会议、会企合作、人才培养、科技奖励、

国际合作、科普活动等方面对学会的整体情况进行了简要介绍。

营运工程师学会英国总部国际事务部部长 Chris GRIME 介绍了营运工程师学会的历史及发展现状，香港分会会长谭启文和副会长黄嘉俊介绍了营运工程师学会香港分会的会员发展和服务情况，以及一些创新举措。随后双方就未来学会人才培养、科普教育、会议会展等合作事项以及后期深入合作方向等进行了商讨，并就双方学会会员服务合作、学术交流、职业资格认证、青少年暑期活动、影响力提升等事宜展开深入探讨交流。双方一致表示今后

将在科普教育、会员活动等多层次面创新合作平台，深化交流合作。

此次座谈，中国自动化学会与营运工程师学会加深了彼此的了解，为后续全面深度合作奠定了坚实的基础。此前，中国自动化学会与国际自动控制联合会（IFAC）、电气电子工程师学会（IEEE）以及国际模式识别学会（IAPR）等均建立了互惠合作网络，未来，学会将持续加强与国际学会的沟通衔接，探索海外会员机制，吸纳海外知华友华科学家及港澳台科学家加入学会，不断提升学会国际影响力。○

学会秘书处 供稿



参会代表合影

“新兴技术潮流驱动科技期刊产业变革” 小型学术沙龙在京召开



图1 会议现场

2023年8月17日，由中国科协学会服务中心主办、中国自动化学会承办的“新兴技术潮流

驱动科技期刊产业变革”小型学术沙龙在京举行。来自高校、科研机构、学会、知名出版商及期

刊编辑部的32名专家学者出席并参与研讨。中国自动化学会副理事长、中国钢研科技集团有限公司党委副书记、冶金自动化研究设计院院长张剑武出席会议并致辞。

会议邀请了中国自动化学会监事长、IEEE智能车汇刊主编、中国科学院自动化研究所研究员王飞跃、国际欧亚科学院院士、中国自动化会常务理事、重庆大学教授宋永端、中华医学会杂志社副社长刘冰、同方知网（北京）技术有限公司副总经理肖宏和施普林格自然集团AJE公司总监张羽翀作主旨报告。

当前，区块链智能、分布开



图2 张剑武副理事长致辞



图3 王飞跃教授作报告



图4 宋永端教授作报告

围绕“新兴技术与科技期刊生产机制创新”“新兴技术与科技期刊传播”“新兴技术与知识服务平台”“新兴技术给科技期刊产业带来的机遇与挑战”等议题进行了互动交流和学术探讨。

会议讨论认为，探索新兴技术在科技期刊产业中的应用，不仅能够提高期刊的生产效率和质量，还有助于创造出更符合读者需求和行业趋势的新兴出版模式，进而重塑科技期刊价值链，增强出版内容创新与成果转化能力，提升科技期刊学术影响力，促进形成良好的产业生态。○

学会秘书处 供稿

放科学、人工智能技术、数字化技术、通用大语言模型等技术有效的推动了出版流程的数字化改造、数据分析和挖掘的应用、科

技期刊在线化与开放获取以及期刊宣传的社交化和互动化，最终将有助于构建一种追溯、自律、自洽的科技期刊生态。与会专家

喜报
X I B A O

位列第四！2023年7月科协系统科普新媒体传播榜发布

近日，中国科协发布科协系统科普新媒体传播榜。中国科协科普部联合中国科协信息中心共同开展“一体两翼”科普信息化评价工作，采用大数据技术自动抓取215个全国学会、32个省级科协的自有网络平台以及主要第三方平台的科普信息数据，结合科普中国资源使用和传播情况，定期发布科协系统科普新媒体传播榜（前20名）。中国自动化学会位列第四，相较6月上漲6名。详情请查看官网：<http://www.caa.org.cn/article/191/4027.html>

中国自动化学会“科创中国”智能产业科技服务团走进雄安新区



图1 服务团专家考察调研

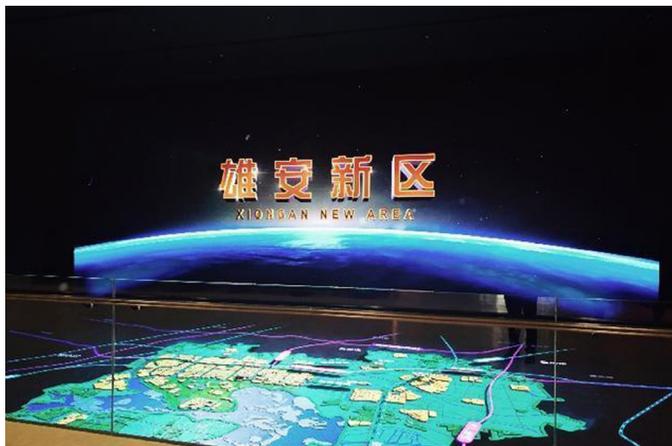


图2 雄安新区

2023年7月28—29日，中国自动化学会“科创中国”智能产业科技服务团专家、中国自动化学会监事长、中科院自动化研究所研究员王飞跃，中国自动化学会秘书长张楠，中国自动化学会智能物流专业委员会主任、中国科学院雄安创新研究院研究员黄武陵，中国自动化学会综合智能交通专委会主任、中国科学院自动化研究所研究员吕宜生，中国自动化学会3D打印与社会制造专委会秘书长、中国科学院自动化研究所研究员沈震等一行到雄安新区考察调研。

智能产业科技服务团一行首先来到容东数字道路智慧运营中心，听取中电信数城科技公司在数字孪生系统实现物理世界中

“新基建维护、新要素汇聚、新交通赋能”的演示汇报。对公司实施容东数字潮汐车道、以绿波方式提升城市通行效率的实践表示认可，并提出智能化与道路物理组织深度结合的演进方向。

为深入了解京津冀一体化发展与雄安新区规划建设，服务团一行走进雄安规划展示中心，深入领会千年大计，亲身感受雄安新区绿色智慧新城、优美生态环境、高端高新产业、优质公共服务、快捷高效交通、体制机制改革、全方位对外开放的建设目标。同时，重游白洋淀，回顾抗战历史，坚定理想信念。

中国自动化学会于2021年组建“科创中国”智能产业科技服务团，以创新驱动发展为引领，以服

务科技经济科融合为目标，以学会会员和专家库为支撑，聚焦智能产业，合理优化空间布局，实施创新平台搭建、创新成果转化应用和品牌学术会议落地三大工程。服务团通过聚成果、聚专家、聚项目，切实开展企业专家对对碰、成立以企业为核心的联合体组织，形成以“学会—地方科协—企业—服务站”四级合作模式的长效发展机制。经过多年培育发展，学会面向智能车、机器人、智能制造及智能产品等多个领域在上海、宁波、芜湖等全国多个地区形成联动示范区域，在战略必争领域抢占科技制高点，为国家的繁荣富强提供战略支撑力量、提供充盈的底气。○

学会秘书处 供稿

新产业标准化领航工程实施方案

(2023—2035 年)

新产业是指应用新技术发展壮大新兴产业和未来产业，具有创新活跃、技术密集、发展前景广阔等特征，关系国民经济和社会发展和产业结构优化升级全局。标准化在推进新产业发展中发挥着基础性、引领性作用。实施新产业标准化领航工程，对于推动新产业高质量发展、加快建设现代化产业体系具有深远意义。为深入贯彻落实《国家标准化发展纲要》部署要求，持续完善新兴产业标准体系，前瞻布局未来产业标准研究，充分发挥标准的行业指导作用，系统提升标准的经济效益、社会效益、生态效益，引领新产业高质量发展，制定本实施方案。

一、指导思想

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，立足新发展阶段，完整、准确、全面贯彻新发展理念，服务新发展格局，坚持新型工业化道路，以推动新兴产业创新发展和抢抓未来产业发展先机为目标，以完善高效协同

的新产业标准化工作体系为抓手，统筹推进新产业标准的研究、制定、实施和国际化，充分发挥新产业标准对推动技术进步、服务企业、加强行业指导、引领产业升级的先导性作用，不断提升新产业标准的技术水平和国际化程度，为加快新产业高质量发展、建设现代化产业体系提供坚实的技术支撑。

二、基本原则

坚持创新引领。优化产业科技创新和标准化布局联动机制，协同推进技术研发、标准研制和产业发展。加强关键技术领域标准研究，推动先进适用的科技创新成果形成标准，促进科技创新成果高效转化。

坚持应用带动。面向新产业发展需求，坚持企业主体、市场导向、应用牵引，强化创新成果迭代和应用场景构建，着力打造大企业引领带动、中小企业深度参与、全产业链紧密协作的新产业标准化工作模式。

坚持系统布局。强化新产业发展战略、规划、政策、标准的

协同，统筹推进国际标准、国家标准、行业标准、团体标准等各类型标准研制，全面加强标准研究、制定、实施、复审等全生命周期管理，持续完善新产业标准化工作体系。

坚持工程推进。紧密围绕新产业高质量发展对标准化工作的需求，科学确立具有前瞻性、系统性和阶段性的中长期目标，细化任务分工，明确进度安排，加强工程化推进，注重阶段性成果评估，确保取得实效。

坚持开放合作。深化国际标准化交流与合作，稳步扩大标准制度型开放。持续提升我国标准与国际标准关键技术指标的一致性。结合我国新产业发展的实践经验，凝练技术规范和管理要求，积极贡献中国方案，共同制定国际标准。

三、主要目标

到 2025 年，支撑新兴产业发展的标准体系逐步完善、引领未来产业创新发展的标准加快形成。共性关键技术和应用类科技计划项目形成标准成果的比例达

到60%以上，标准与产业科技创新的联动更加高效。新制定国家标准和行业标准2000项以上，培育先进团体标准300项以上，以标准指导产业高质量发展的作用更加有力。开展标准宣贯和实施推广的企业10000家以上，以标准服务企业转型升级的成效更加凸显。参与制定国际标准300项以上，重点领域国际标准转化率超过90%，支撑和引领新产业国际化发展。

到2030年，满足新产业高质量发展需求的标准体系持续完善、标准化工作体系更加健全。新产业标准的技术水平和国际化程度持续提升，以标准引领新产业高质量发展的效能更加显著。

到2035年，满足新产业高质量发展需求的标准供给更加充分，企业主体、政府引导、开放融合的新产业标准化工作体系全面形成。新产业标准化发展基础更加巩固，以标准引领新产业高质量发展的效能全面显现，为基本实现新型工业化提供有力保障。

四、重点任务

（一）完善高效协同的新产业标准化工作体系

1. 协同推进新产业发展战略、规划、政策、标准实施。聚焦新型工业化、制造强国、网络强国

等发展战略，开展新产业标准需求分析和研究，强化标准对产业发展战略实施的技术支撑。围绕落实国家、行业 and 重点领域规划，加快关键和急需标准研制与实施，有力支撑规划分步骤分阶段实施。坚持标准与产业政策同研究、同部署、同实施，鼓励在产业政策中引用先进适用的标准，助力产业政策落实落细。

2. 协同推进新产业各类型标准研制。紧跟新产业发展趋势，强化国际标准、强制性国家标准、推荐性国家标准、行业标准、团体标准的系统性和协调性。鼓励我国企事业单位联合国内外产业链上下游企业共同制定国际标准。聚焦保障人身健康和生命财产安全、生态环境安全、满足经济社会管理基本需要等重点领域，开展强制性国家标准研制。围绕满足基础通用、与强制性国家标准配套、对各有关行业起引领作用等需要的技术要求，开展推荐性国家标准研制。加强关键技术、先进工艺、试验方法、重要产品和典型应用等行业标准研制。鼓励社会团体快速响应技术创新和市场需求，自主制定和发布团体标准，实施先进团体标准应用示范。

3. 协同推进新产业标准全生命周期管理。健全覆盖新产业标准研究、制定、宣贯、实

施、复审、修订、废止等全过程的追溯、监督和纠错机制，实现标准制定与实施信息反馈的闭环管理。鼓励行业协会、标准化技术组织、标准化专业机构等开展新产业标准的宣贯和培训，引导企业在研发、生产、管理等环节对标达标，促进新产业标准的应用推广。动态跟踪评估新产业标准的实施效果，及时开展标准复审，确保标准满足新产业发展需求。

4. 协同推进新产业技术基础标准化建设。加强新产业标准中关键技术指标的试验验证，提升标准的先进性和适用性。研制一批新产业重点领域计量技术规范，提升计量的精准性和科学性。加快重点领域可靠性与质量提升标准研制，提升产品质量水平和品牌影响力。加强新产业重点领域技术基础公共服务体系建设，提升新产业标准、计量、认证认可、检验检测、试验验证、产业信息、知识产权、成果转化等一体化服务能力。

5. 协同推进新产业标准化技术组织建设与管理。紧扣新产业发展需求，优化完善现有标准化技术组织体系，结合实际适时组建新兴领域的标准化技术组织。建立健全产业链上下游、产业生态体系各环节标准化技术组织的协作机制，共同推进重点标准的

研制与实施。定期组织开展标准化技术组织考核评估，持续提升标准化技术组织的工作能力和成效。

6. 协同推进大中小企业标准化融通发展。依托行业协会、标准化技术组织、标准化专业机构等，面向企业开展标准专题培训和诊断服务，指导企业提升标准化能力，鼓励企业制定技术指标优于国家标准、行业标准的企业标准。强化“一流企业做标准”理念，发挥好龙头企业在产业生态体系构建和供应链主导地位的优势作用，加强与关键配套环节中小企业的技术协作，联合开展标准研制，形成全产业链协同推进、上下游协调配套的工作格局。鼓励优质中小企业积极参与国家标准和行业标准研制。支持符合条件的中小企业特色产业集群研制团体标准，参与先进团体标准应用示范。

（二）强化标准支撑产业科技创新体系建设的能力

1. 提升标准与产业科技创新联动水平。建立标准研制与产业科技创新的协同机制，推动将标准化工作基础、能力和水平作为关键共性技术和应用类科技计划项目的设置依据。加大对标准化工作的支持力度，适度超前开展关键技术领域重点标准研究和验证。推动将标

准化成果作为重大项目的主要产出指标，纳入科技计划绩效评价体系，提高科技计划项目成果的产业化水平。结合新产业发展实际，适时建立技术成熟度评估标准体系，鼓励标准化专业机构依据标准开展新产业技术成熟度评估。

2. 提升先进适用科技创新成果向标准转化水平。紧密跟踪研究全球新兴产业和未来产业的技术发展趋势，在标准中精准确定核心技术指标和实现方法，有效支撑前瞻性基础技术、先导性通用技术、引领性原创技术的攻关和应用。健全科技成果转化为标准的评价机制与服务体系，加强对重点领域科技计划项目成果的先进性、适用性和扩散性评估，建设可转化为标准的科技创新成果库。支持科技计划项目管理专业机构与标准化专业机构加强协同，加快将行业急需、先进适用的关键共性技术、先进生产工艺、通用试验方法等科技创新成果转化为标准。

3. 提升标准制定质量水平。加强新产业标准中关键技术指标、先进制造工艺、通用试验方法等试验验证，确保标准技术内容的科学性和适用性。强化新产业标准体系建设，指导全产业链相关方协同推进标准研制，确保上下游标准的有效衔接。加强新

产业标准实施效果跟踪评估，建立重点领域标准化效益评价机制，鼓励标准化专业机构等开展标准化效益评价试点。加强新产业标准的复审工作，加快老旧落后标准修订，持续提升标准的质量水平。

4. 提升标准制定效率水平。推动将新产业科技创新成果高效转化为标准，缩短新技术、新工艺、新材料、新方法标准的研制周期。加强新产业标准预研工作，提升标准研制的可行性。加大新产业标准统筹协调力度，加强跨行业、跨领域标准化技术组织的协作，提高标准研制速度。指导行业协会、标准化专业机构等加强标准化基础理论、工作方法和支撑能力建设，提高标准关键环节和主要内容的审查效率。发展机器可读标准，促进标准数字化转型。

（三）全面推进新兴产业标准体系建设

1. 新一代信息技术。面向重点场景和行业应用，优化完善5G标准。研制集成电路、基础器件、能源电子、超高清视频、虚拟现实等电子信息标准。研制基础软件、工业软件、应用软件等软件标准。研制大数据、物联网、算力、云计算、人工智能、区块链、工业互联网、卫星互联网等新兴数字领域标准。

专栏1 新一代信息技术

第五代移动通信（5G）

制修订面向5G增强移动宽带（eMBB）、高可靠低时延通信（uRLLC）、高速大连接物联网的5G核心网、基站和终端设备标准。研制面向垂直行业的非地面网络、新型无源物联、通信感知一体化等5G演进（5G-A）技术标准。研制工业、医疗、电力、矿山等重点行业的5G应用及安全标准。

电子信息制造

研制集成电路材料、专用设备与零部件等标准，制修订设计工具、接口规范、封装测试等标准，研制新型存储、处理器等高端芯片标准，开展人工智能芯片、车用芯片、消费电子用芯片等应用标准研究。研制智能传感器、功率半导体器件、新型显示器件等基础器件标准，制修订电连接器、纤维光学、微波器件以及印制电路等领域标准。研制光伏、电力电子器件等关键技术、试验方法、先进产品、系统应用标准。研制智能光伏、储能产品安全性能测试评价、智能系统调度、智能运维等标准。研制超高清制式、参数规范等基础通用标准，高动态范围、三维声、高速数字接口等关键技术标准，超高清显示设备等重点产品标准，以及车载、文教、娱乐等应用标准。研制虚拟现实健康舒适度、信息安全、内容制作、编码传输、终端设备等重点标准，以及应用场景下模型架构、解决方案等应用标准。

软件

聚焦基础软件领域，研制工业、桌面、服务器、智能终端、嵌入式等操作系统标准，中间件标准，集中式事务、分布式事务、分析型、混合事务分析处理、图数据库等数据库标准，以及流式、版式、浏览器等办公软件标准。聚焦工业软件领域，研制分类、术语、命名规范等基础标准，制修订工业软件数据模型、行业应用、质量测评等标准。聚焦应用软件领域，研制数据模型和接口、系统互操作性、软件架构开放性、应用编程接口、典型场景、价值和质量评估等标准。研制开源术语、许可证、互联互通、项目成熟度、社区运营治理，以及开源软件供应链管理标准。

新兴数字领域

研制数据质量、数据管理、数据共享、数据安全等基础通用标准，数据登记、评估、交易等数据要素流通标准，工业大数据等应用标准。聚焦物联网领域，制修订分类描述、安全可信等基础共性标准，研制高精度室内定位、感知通信一体化、新型短距无线通信、边缘计算、数字孪生等关键技术标准，规划设计、部署实施、运行维护等建设运维标准，智能家居、智慧健康等应用标准。聚焦算力领域，研制设施层、网络层、IT层以及算力应用各层联动等技术标准，算力调度、网络监测、算网协同等平台建设标准，以及算力高能效、高安全发展等标准。研制云操作系统、智能云服务、算力服务、云原生、云迁移、分布式云、边缘云、行业云、云化应用、云安全等云计算标准。聚焦人工智能领域，研制加速器、服务器等基础硬件标准，编译器、算子库、开发框架等关键软件标准，自然语言处理、计算机视觉、基础模型等关键技术标准，智能化水平、服务能力、重点行业应用场景等应用评价标准，以及风险管理、伦理治理、隐私保护等安全可信标准。聚焦区块链领域，研制编码标识等基础标准，共识算法、智能合约、跨链等技术和平台标准，服务能力评价、测试测评、存证追溯等应用和服务标准，以及开发运营和安全保障标准。研制全产业链协同、数字化供应链体系、新模式新业态、数字化转型诊断评估等标准。聚焦工业互联网领域，研制术语定义、测试与评估、管理等基础共性标准，新型工业网络、标识解析、互联互通互操作等网络标准，数据字典与上云管理、工业机理模型、低代码开发与工业智能技术等平台标准，网络与数据安全防护管理等安全标准，以及行业应用标准。

2. 新能源。研制光伏发电、光热发电、风力发电等新能源发电标准，优化完善新能源并网标准，研制光储发电系统、光热发电系统、风电装备等关键设备标准。

专栏 2 新能源

新能源发电

面向光伏应用创新融合发展趋势，研制光电建筑（BIPV）、光储系统、光伏农业、光伏交通等标准。研制槽式、塔式、菲涅尔发电配套技术，大容量储热技术、高参数发电技术等光热标准。研制深海漂浮风力发电、沙戈荒风力发电、分散式风力发电、构网型风力发电开发与运营标准，以及风电制氢、风光一体化标准。开展利用生物质能、地热能等发电标准预研。

新能源并网

加快双高双峰形势下新能源并网安全稳定运行和控制领域标准研究，制修订大型风电场集群、光伏电站、分布式光伏、户用光伏等新能源并网标准。研制特高压交直流、配电网智能调控等电网标准。研制电力需求侧资源开发、应用等电力需求侧管理、电能替代以及分布式微电网标准。研制并推广电动汽车充换电设施与服务网络建设相关标准。

新能源关键设备

研制 TOPCon、异质结、钙钛矿等新型高效电池和组件以及光储部件等标准。研制智能光伏标准，完善光伏组件回收利用及光储系统检测、安全管理、状态评价等标准。研制海上风电工程一体化设计与仿真、大容量海上风力发电机组试验检测、大容量与高电压储能变流器技术与试验检测等标准。研制光热发电系统中吸热器、大容量储热、槽式集热器等关键设备技术标准。研制风电机组及关键部件状态监测与检修、智能运维、故障预警、更新延寿等标准。

3. 新材料。研制先进石化化工材料、先进钢铁材料、先进有色金属及稀土材料、先进无机非金属材料、高性能纤维及制品和复合材料标准。面向产业融合发展需求和应用场景探索，开展前沿新材料标准预研。

4. 高端装备。研制工业机器人基础共性、关键技术和行业应用

专栏 3 新材料

先进石化化工材料

研制高端聚烯烃、工程塑料、氟硅材料、聚氨酯材料、高性能合成橡胶、合成树脂、热塑性弹性体、高性能纤维专用料等先进高分子材料标准，研究性能表征与测试方法标准。研制高端分离膜、光学膜、新能源薄膜、导电膜等特种膜材料标准。研制集成电路与芯片等产业用化学品、高端试剂与生物试剂等高纯和超纯化学品标准。研制特种涂料、特种油品、光刻胶、新能源用化学品、生物基材料、医用材料、高效催化材料等特种功能型化学品标准。

先进钢铁材料

研制高强韧建筑结构钢、高性能混凝土结构用钢、高强度桥梁和缆索用钢、高性能海工钢、钢结构用钢等工程结构材料标准。研制高强韧汽车用钢、高品质零部件用钢、长寿命耐磨钢、高品质工模具钢、超高强度钢、新一代高温合金、增材制造用黑色金属粉末等机械结构材料标准。研制超大输量管线钢、高性能电工钢、特种不锈钢、超超临界耐热钢、储氢输氢钢、耐蚀合金、非晶纳米晶合金等功能材料标准。

先进有色金属及稀土材料

面向轻量化、高性能、精密化等应用需求，研制铝、镁、铜、钛、镍等高性能有色金属结构材料及检测方法标准。研制特种焊接材料、高端涂层/镀层材料、高纯/超高纯金属及靶材/蒸发料、高温形状记忆合金、高强高弹及耐蚀耐磨铜合金、超导材料、贵金属浆料/贵金属催化剂等功能材料及检测方法标准。研制稀土永磁、储氢、光功能、抛光、催化、高纯等先进稀土材料及检测方法标准，开展特种稀土功能材料标准预研。

先进无机非金属材料

制修订特种玻璃、结构陶瓷、人工晶体等高性能无机非金属结构材料及检测方法标准。制修订技术玻璃、功能陶瓷、先进矿物功能材料、节能长寿耐火材料等功能材料标准。以高强度高耐久、可循环利用、绿色环保为导向，研制低碳水泥、新型墙体材料、高性能建筑防水材料、高性能轻质隔热隔音材料等新型建材标准。

高性能纤维及制品和高性能纤维复合材料

制修订高性能碳纤维、对位芳纶、聚酰亚胺纤维、特种玻璃纤维、陶瓷纤维、连续玄武岩纤维等高性能纤维及制品标准。面向轻量化、整体化、长寿命等应用需求，研制高性能纤维复合材料标准。

前沿新材料

面向新材料技术与信息技术、纳米技术、智能技术等融合发展需求和应用场景探索，加强超导材料、智能仿生、液态金属材料、增材制造材料等前沿新材料的技术路线图研究，开展前沿新材料关键技术标准和检测方法标准预研，支撑前沿新材料首批次应用和推广。

标准。研制高端数控机床关键共性技术、整机、数字化控制与核心部件标准。研制农机装备基础通用、关键技术以及高端化智能化绿色化

标准。研制工程机械基础通用、关键材料、核心部件、电动化以及高端化智能化绿色化标准。研制医疗装备关键材料、核心部件、运行服

务与集成应用标准。研制智能检测装备基础、关键技术和互联互通标准。研制增材制造装备核心工艺和部件、关键技术、测试评估等标

专栏 4 高端装备

工业机器人

研制工业机器人术语、分类、结构等基础共性标准，质量检测、性能评估、安全通信、智能化分级、云服务平台等关键技术标准。研制重点行业机器人应用工艺流程和专用算法模型、融合设备接口、应用数据安全、人机交互安全等标准，机器人新产品通用技术规范、模块化设计与制造、应用安全与可靠性等标准，机器人新兴技术领域专有安全基础标准、产品标准、方法标准以及伦理等标准。

高端数控机床

研制数控机床高性能、高可靠性、高精度保持性测试与评价，以及产品成熟度评价等关键共性技术标准。研制高端数控机床整机标准。研制高档数控系统功能和性能评测、高档数控系统的多传感接口、智能工艺数据接口、机床数字孪生技术与接口等数字化标准。研制高精度滚动功能部件、高速精密大功率电主轴、大容量高性能刀库、高精度转台、高性能摆头、伺服刀架等核心部件标准。

农机装备

研制农机装备用专用材料、专用传感器、关键核心零部件标准，以及农机作业通信协议、农机性能试验等基础通用标准。研制高效精细耕种、多功能田间管理、粮经饲高效低损收获等关键技术标准。研制大马力拖拉机、高标准农田建设装备、种子繁育与精细选别加工设备、集约化畜牧养殖设备、规模化农产品初加工设备、现代设施农业设备等高端农机装备标准。研制具有信息感知、智能决策、精准控制等功能的智能农机装备标准。研制节能、节水、节种、节肥、节药、绿色产品、绿色工厂等绿色农机装备标准。

工程机械

研制工程机械装备用安全要求、性能试验方法等基础通用标准，以及碳纤维、石墨烯、特种合金等关键材料标准，高速轴承、高压液压件、高可靠性紧固件、高性能密封件等核心部件，以及轻量化设计等标准。聚焦工程机械电动化发展需要，研制纯电驱动、混合动力等标准。研制大型、超大型及多功能型工程机械标准。研制具有信息感知、智能决策、精准控制、无人驾驶等功能的智能工程机械标准。

医疗装备

面向医疗装备全产业链协同发展需求，研制医用管线等关键材料标准，医用传感器、医用调节阀等关键零部件标准，医疗装备制造工程评价、运维工程等运行服务标准，医疗装备数字化、信息化与互联互通等集成应用标准。加强标准在呼吸机、体外膜肺氧合机、检验设备、外科手术室设备、大型医学影像设备、放射治疗设备等典型医疗装备中的应用，支撑构建医疗装备协同制造与服务体系。

智能检测装备

面向重点行业需求，研制检测技术、方法等基础标准，智能检测装备功能、性能、安全、可靠性以及零部件等关键技术标准，智能检测装备、制造装备、软件系统等互联互通标准。

增材制造装备

研制增材制造粘结剂喷射、定向能量沉积、粉末床熔融等基础工艺和装备标准，以及多材料、多色流、阵列式、复合增材制造等新工艺和装备标准。研制工艺数据库、数据转换、编码要求、文件格式等数据和接口标准。研制装备验收、人员评定、关键零部件检测等标准。

准。研制装备数字化和智能制造基础共性、关键技术、典型行业应用等标准。

5. 新能源汽车。聚焦新能源汽车领域，研制动力性测试、安全性规范、经济性评价等整车标准，驱动电机系统、动力蓄电池系统、燃料电池系统等关键部件系统标准，汽车芯片、传感器等核心元器件标准，自动驾驶系统、功能安全、信息安全等智能网联

技术标准，以及传导充电、无线充电、加氢等充换电基础设施相关标准。

6. 绿色环保。聚焦实现碳达峰碳中和目标，研制温室气体基础通用、核算核查、技术与装备、监测、管理与评价标准。优化完善绿色产品、绿色工厂、绿色工业园区和绿色供应链等标准。研制工业节能、工业节水、工业环保、工业资源综合利用等标准。

7. 民用航空。研制商用飞机、水陆两栖飞机、直升机、无人机以及新动力、新构型航空器等航空器标准。研制整机、关键重要部件、适航符合性、客户服务等发动机标准。研制航空电子系统、飞行控制系统与机电系统等机载系统标准。研制基础产品、全生命周期数据、生产制造等航空通用基础标准，以及运营支持标准。

8. 船舶与海洋工程装备。聚

专栏 5 新能源汽车

新能源汽车整车

面向新能源汽车动力性、安全性、经济性评价需求，制修订纯电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车等整车动力性测试评价标准，研制电动汽车安全和远程监管标准与燃料电池汽车碰撞后安全、氢安全标准，制修订电动汽车能量消耗量限值、能耗折算方法标准。

关键部件系统

研制电机控制器、减速器总成等驱动电机系统标准。聚焦提升动力蓄电池性能要求，制修订动力蓄电池安全性、电性能、循环性能、热管理系统标准。研制动力蓄电池梯次利用、回收利用、碳核算标准，支撑电池全生命周期管理。研制空气压缩机、氢气循环泵及耐久性等燃料电池系统标准。

核心元器件

围绕动力系统、底盘系统、车身系统、座舱系统及智能驾驶等主要应用场景，研制汽车芯片环境及可靠性、电磁兼容、功能安全和信息安全等通用要求，控制、计算、传感等芯片产品与技术应用，系统匹配和整车匹配等测试标准；制定高精度传感器、激光雷达、高精度摄像头等器件标准。

智能网联技术

研制智能网联汽车术语和定义、自动驾驶系统设计运行条件等基础标准，功能安全及预期功能安全过程、审核及评估、整车网络安全、数据安全、软件升级、数字证书及密码应用、测试目标物等通用规范，应急辅助、组合驾驶辅助、自动驾驶、车用操作系统、数据交互、LTE-V2X 网联功能等产品与技术应用标准。

充换电基础设施

面向新能源汽车传导充电、无线充电、加氢、车网互动等需求，制修订电动汽车传导充电连接装置、互操作性、传导充电性能、无线充电通信一致性要求、燃料电池汽车加氢枪、加氢通信协议、充放电双向互动标准。面向新能源汽车换电需求，制定纯电动汽车车载换电系统互换性、换电通用平台、纯电动商用车换电安全等标准。

专栏 6 绿色环保

碳达峰碳中和

研制术语定义、数据质量、标识标志、报告声明与信息披露等基础通用标准。研制组织温室气体排放量、项目温室气体减排量、产品碳足迹核算核查标准。研制源头控制、生产过程控制、末端治理、协同降碳等技术与装备标准。研制温室气体排放监测技术、分析方法、设备及系统等监测标准。研制绿色低碳评价、碳排放管理、碳资产管理等管理与评价标准。

绿色制造

制修订绿色制造术语、属性等基础通用标准，各细分行业、细分领域的绿色工厂评价标准，绿色工业园区评价通则等绿色园区标准，供应链长、带动性强的行业绿色供应链标准，以及重点产品绿色设计相关标准，持续完善绿色制造标准体系。

工业节能

研制新型基础设施节能标准。研制重点行业先进节能技术工艺、重点用能设备系统节能改造等设备节能标准。

研制分布式能源、工业绿色微电网、可再生能源、余热余能回收利用等节能方法与技术应用标准。制修订能源计量、能效测试、能效评估、能量系统优化及梯级利用、能源管理体系、能源绩效评估、能源审计、节能监察、节能服务等配套管理服务标准。

工业节水

围绕石化化工、钢铁、有色金属、黄金、建材、轻工、纺织、电子等重点用水行业，研制取水定额、节水型企业、节水型园区标准。研制废水循环利用、非常规水利用等节水工艺和技术应用标准。制修订水平衡测试、水足迹、节水诊断等管理服务标准。

工业环保

制修订汽车生产过程限用物质管控标准，船舶、电子等行业限用物质管控标准，持续推进有害物质管控要求与国际接轨。制修订石化化工、钢铁、有色金属、黄金、建材、轻工、纺织等行业重点工艺减污技术标准。研制低噪声技术产品标准及低能耗、分散式、模块化、智能化污水、烟气、固废处理等工业环保装备标准。

工业资源综合利用

研制尾矿、冶炼渣、工业副产石膏、赤泥、化工废渣、煤矸石、粉煤灰等工业固废综合利用标准。制修订废钢铁、废有色金属、再生金、废纸、废塑料、新能源汽车废旧动力蓄电池、废旧轮胎、废玻璃、废旧纺织品、废弃电器电子产品、废旧光伏产品、废旧风力发电装置、废旧海洋工程装备等综合利用标准。研制工程机械、机床工具、矿山机械等高附加值产品再制造标准。

专栏 7 民用航空

航空器

研制商用飞机飞发一体化、降噪减阻、全机防火等设计标准，以及模块化研制、数字样机、人机工效仿真验证、系统布置、重量管控等标准。研制水陆两栖飞机总体、气水动、涉水结构、水载荷、水上试验与试飞、水上保障等标准。研制旋翼航空器球柔性旋翼系统、大载荷高性能传动系统、无轴承尾桨、旋翼防除冰装置等标准。研制无人机系统、平台、数据链、地面控制站标准，以及集群无人机、网联无人机、智能无人机等标准。研制电动、混动、氢能等新动力标准，以及变体飞行器、多旋翼航空器等新构型标准。

发动机

研制涡轴发动机、大涵道比涡扇发动机整机及关键重要部件和系统适航符合性标准。研制民用航空发动机交付数据、随机资料、维修 / 大修等发动机客户服务标准。

机载系统

研制民机通信导航软件、硬件、数据、防撞告警设备、机载产品自动测试等航空电子系统标准，飞行控制电子、作动器、液压控制、飞行操纵等飞行控制系统标准，以及电力、液压、燃油、环控、氧气、起落架等机电系统标准。

通用基础与运营支持

研制民机材料、标准件、专用元器件等基础产品标准，民机产品设计、制造、装机、交付、服务等各阶段产品数据标准，先进成形技术、复合材料及构件制造、柔性装配等制造标准。研制飞行运行工程、飞机运行安全、运营工程、维修工程、培训工程和技术出版物等运营支持标准。

专栏 8 船舶与海洋工程装备

高技术船舶

研制大型邮轮、绿色智能船舶、极地船舶、LNG 船舶、二氧化碳运输船、电动船舶等重点船型的总体设计、总装建造标准。研制船用柴油机及关键零部件、低碳/零碳燃料发动机、燃料供应系统、吊舱推进器、新型甲板机械、中高压电气设备等标准。研制船舶能效管理、船用产品能耗限额、碳强度计算、碳排放核算等标准。

海洋工程装备

研制深海油气开发装备、海上风电装备、深海采矿装备、天然气水合物钻采船、深海养殖装备、大型人工浮岛、海上氢能装备等新型海洋工程装备总体设计、总装建造标准。研制动力定位系统、单点系泊装置、平台升降装置、水下系统等新型海洋工程装备关键系统标准。研制潜水器设计建造、测试验证、运行保障等标准。

焦高技术船舶领域，研制重点船型总体设计、总装建造标准，关键零部件和系统标准，以及绿色管理标准。聚焦海洋工程装备领域，研制总体设计、总装建造、关键系统标准，研制潜水器标准。

（四）前瞻布局未来产业标准研究

1. 元宇宙。开展元宇宙标准化路线图研究。加快研制元宇宙术语、分类、标识等基础通用标准，元宇宙身份体系、数字内容生成、跨域互操作、技术集成等关键技术标准，虚拟数字人、数字资产流转、数字内容确权、数据资产保护等服务标准，开展工业元宇宙、城市元宇宙、商业元宇宙、文娱元宇宙等应用标准研究，以及隐私保护、内容监管、数据安全等标准预研。

2. 脑机接口。开展脑机接口标准化路线图研究。加快研制脑机接口术语、参考架构等基础共

性标准。开展脑信息读取与写入等输入输出接口标准，数据格式、传输、存储、表示及预处理标准，脑信息编解码算法标准研究。开展制造、医疗健康、教育、娱乐等行业应用以及安全伦理标准预研。

3. 量子信息。开展量子信息技术标准化路线图研究。加快研制量子信息术语定义、功能模型、参考架构、基准测评等基础共性标准。聚焦量子计算领域，研制量子计算处理器、量子编译器、量子计算机操作系统、量子云平台、量子人工智能、量子优化、量子仿真等标准。聚焦量子通信领域，研制量子通信器件、系统、网络、协议、运维、服务、测试等标准。聚焦量子测量领域，研制量子超高精度定位、量子导航和授时、量子高灵敏度探测与目标识别等标准。

4. 人形机器人。研制人形机器人术语、通用本体、整机结构、

社会伦理等基础标准。开展人形机器人专用结构零部件、驱动部件、机电系统零部件、控制器、高性能计算芯片及模组、能源供给组件等基础标准预研。研制人形机器人感知系统、定位导航、人机交互、自主决策、集群控制等智能感知决策和控制标准。开展人形机器人运动、操作、交互、智能能力分级分类与性能评估等系统评测标准预研。开展机电系统、人机交互、数据隐私等安全标准预研。面向工业、家庭服务、公共服务、特种作业等场景，开展人形机器人应用标准预研。

5. 生成式人工智能。围绕多模态和跨模态数据集，研制视频、图像、语言、语音等数据集和语料库的标注要求、质量评价、管理能力、开源共享、交易流通等基础标准。围绕大模型关键技术领域，研制通用技术要求、能力评价指标、参考架构，以及训练、推理、部署、接口等技术标

准。围绕基于生成式人工智能（AIGC）的应用及服务，面向应用平台、数据接入、服务质量及应用可信等重点方向，研制 AIGC 模型能力、服务平台技术要求、应用生态框架、服务能力成熟度评估、生成内容评价等应用标准。在工业、医疗、金融、交通等重点行业开展 AIGC 产品及服务的风险管理、伦理符合等标准预研。

6. 生物制造。研制传感器等关键元器件，生物反应器等生产设备，生产技术规范等工艺标准。优化完善生物制造食品、药品、精细化学品等应用领域的产品、检测和评价方法等标准。

7. 未来显示。开展量子点显示、全息显示、视网膜显示等先进技术标准预研。研制 Micro-LED 显示、激光显示、印刷显示等关键技术标准，新一代显示材料、专用设备、工艺器件等关键产品标准，以及面向智慧城市、智能家居、智能终端等场景的应用标准。

8. 未来网络。开展 6G 基础理论、愿景需求、典型应用、关键能力等标准预研。面向下一代互联网升级演进，构建“IPv6+”技术标准体系，开展分段路由（SRv6）、应用感知网络（APN6）、随路检测（iFit）等核心技术标准研制；面向产业数字化转型紧迫需求，加快确定性网络、数字孪生网络、算网融合 / 算力网络、自智

网络、网络内生安全等关键网络技术标准研制；面向海空天地一体化、高通量全息通信、海量人机物通信等新场景，开展新型网络体系结构、路由协议、智能管控等标准预研。开展 Web3.0 相关标准预研，研制术语、参考架构等基础类标准，跨链技术要求、分布式数字身份分发等技术类标准，以及面向数据资产交易、数字身份认证、数字藏品管理等场景的应用类标准。

9. 新型储能。聚焦锂离子电池领域，研制电池碳足迹、溯源管理等基础通用标准，正负极材料、保护器件等关键原材料及零部件标准，以及回收利用标准。面向钠离子电池、氢储能 / 氢燃料电池、固态电池等新型储能技术发展趋势，加快研究术语定义、运输安全等基础通用标准，便携式、小型动力、储能等电池产品标准。

（五）拓展高水平国际标准化发展新空间

1. 扩大标准制度型开放。积极营造内外资企业公开、公平、公正参与标准化工作的环境，保障外商投资企业依法参与标准制定。聚焦贸易便利化，结合重大国际合作项目积极推动质量标准、检验检测、认证认可等有效衔接，努力实现重点领域同线同标同质。围绕政策、规则和标准联通需求，持续推进国家标准和行业标准外

文版研制，助力我国技术、产品、工程和服务“走出去”。

2. 加快国际标准转化。组织有关行业协会、标准化技术组织、标准化专业机构，系统开展新兴产业重点领域国内外标准对比研究和分析，结合我国产业发展实际，研究提炼亟待转化的国际标准项目清单。在国家标准计划和行业标准计划中优先支持国际标准转化项目，持续提升国际标准转化率，推动我国标准与国际标准体系兼容。

3. 深度参与国际标准化活动。鼓励国内企事业单位积极参与国际标准组织和各类国际性专业标准组织活动，健全以企业为主体、产学研联动的国际标准化工作机制，发挥标准化研究机构 and 标准化技术组织的技术支撑作用，贡献中国技术方案，携手全球产业链上下游企业共同制定国际标准。建设重点领域国际标准化信息资源库，提高国内外标准信息共享和服务水平。

4. 推动构建良好的国际标准化合作环境。倡导开放、包容、合作、共赢的国际标准化理念，维护国际标准组织的工作体系。持续完善标准化领域的双边和多边合作机制，积极与金砖国家、亚太经合组织等开展标准化交流，继续深化东北亚、欧洲和亚太等区域的标准化合作，推动国内外协会和标准化组织建立互

利共赢的合作伙伴关系。发挥国际论坛“软倡议”作用，宣传我国标准化政策和立场，讲好“中国故事”，积极扩大国际标准化工作“朋友圈”。

五、保障措施

（一）加强组织领导。完善新产业标准化工作协作机制，健全标准化技术组织体系，加强横向协同、纵向联动，及时研究解决工程实施中的问题。加快建设综合性标准化研究机构，打造标准化高端智库。有关行业协会、地方工业和信息化、科技、市场监管、能源等主管部门要加强协作，制定切实可行的落实举措，统筹推进各项任务实施。

（二）加大资源投入。推动

国家科技计划项目和重大产业化专项加大对标准研究的支持力度。加大对新产业标准化工作的经费支持，强化政策保障。发挥好国家先进制造业集群等优势作用，支持地方加大新产业重点领域标准化工作力度，鼓励重点企业加大标准化相关经费投入，积极引导社会资本向新产业标准领域汇聚，形成多元化的经费保障机制。

（三）动态考核评估。加强方案实施情况的动态监测和效果反馈，做好新产业标准化工作新进展、新成效的总结和推广。定期开展方案执行进度和实施效果评估，做好方案动态调整。

（四）健全人才队伍。加强面向标准化从业人员的专题培训，

健全标准化培训体系。鼓励标准化研究机构培养和引进标准化高端人才，加强国际标准化研究机构建设。支持企业将标准化人才纳入职业能力评价和激励范围，做大标准化专业人才“蓄水池”，构建标准化人才梯队。

（五）注重宣传激励。召开新产业标准化领航峰会，积极交流新产业标准化成果和典型经验。支持在新产业标准化工作方面做出突出贡献的单位和个人参与国家级奖励的评选表彰。鼓励地方政府、社会团体等按照国家有关规定对新产业标准化工作突出的单位、个人以及先进标准项目予以表彰奖励。○

来源：科技司

2023 国家工业软件大会招展火热进行中!



国家工业软件大会是由中国自动化学会主办的国内工业软件领域综合性学术会议，旨在积极响应国家重大战略需求，强化科技创新和产业链供应链韧性，加快解决“卡脖子”问题，大力推动自主可控工业软件推广应用。2023 国家工业软件大会将于 2023 年 10 月 27-29 日在浙江湖州召开，大会内容形式丰富，包括开幕式、特邀报告、大会论坛、专题论坛、特色展览等。为全面展示工业软件技术成果及应用，加强工业软件与产业深度融合发展，现面向工业软件企业、高校、研究院招展。详情请查看：<http://www.caa.org.cn/article/192/4031.html>

关于进一步加强论坛活动规范管理的通知

各省、自治区、直辖市文化和旅游局(局)、党委宣传部、党委网信办、外办、教育厅(教委)、公安厅(局)、民政厅(局)、国资委、市场监管局(厅、委):

近年来,论坛活动在推动经济社会发展 and 思想文化交流等方面发挥了重要作用,但同时也存在一些假冒官方机构、正规组织举办“山寨”论坛活动,违规开展评比达标表彰活动,违规收费借机敛财,随意冠以高规格名号,主题交叉重复、内容空泛等问题,造成了经济社会资源的浪费,扰乱了市场秩序,损害了人民群众合法权益。为进一步打击整治违法违规行为,规范论坛活动管理,现就各类主体面向社会公开举办的论坛活动(包括论坛、峰会、年会以及其他具有论坛性质的会议活动)提出如下工作要求。

一、坚持正确导向。举办论坛活动必须坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导,践行社会主义核心价值观,遵守相关法律法规和政策规定。主办单位应切实履行主体责任,加强对活动内容的审核把关和活动全

过程管理,确保论坛活动坚持正确政治方向、价值取向和舆论导向,着力提升论坛活动质量,充分发挥论坛活动在经济社会文化发展中的积极作用。

二、规范论坛活动举办主体、名称和内容。举办论坛活动的各类社会主体,应经依法登记、具有合法身份。未经合法登记的企业及社会组织或无实际承办单位不得面向社会公开举办论坛活动。论坛活动名称应准确、规范、名实相符,不得随意冠以“中国”“中华”“全国”“国际”“世界”“峰会”“高端”“高峰”“巅峰”等字样。论坛活动内容应围绕中心、服务大局,注重质量和实效,主题设置不得超出主办单位职责范围,设立分论坛、子论坛、平行论坛应紧紧围绕主论坛活动主题。

三、严厉打击各类违法违规行为。重点打击未经合法登记的主体面向社会公开举办的论坛活动、“山寨”论坛活动、以论坛活动名义进行诈骗敛财等违法违规行为。公安部门依法打击涉非法集资、非法经营、传销、诈骗等

违法犯罪行为。市场监管部门严格查处论坛活动违规收费、虚假宣传等行为。民政部门严厉打击整治举办论坛活动的各类非法社会组织,依法查处在举办论坛活动中存在违反社会组织登记管理法律法规行为的社会组织。表彰奖励主管部门对借举办论坛活动违规设奖颁奖的,采取叫停活动、依法查处、责令整改、追究相关人员责任等措施。

四、规范社会组织举办论坛活动。社会组织举办论坛活动应按章程规定履行内部工作程序,并按其主管单位有关规定履行相关手续。论坛主题内容应符合章程规定的宗旨和业务范围;与其他单位合作举办论坛活动的,要加强对合作单位资质、能力的审核把关,加强对活动全过程的监督管理;不得只挂名、不参与管理,不得与非法主体合作开展活动。

五、规范管理党政机关及其直属单位举办论坛活动。除党中央国务院决定开展的论坛活动外,党政机关及其直属单位举办论坛活动,要严格履行报批程序。省

部级党政机关、人民团体、经国务院批准免于登记的社会团体举办新的论坛活动应报党中央、国务院审批；各省（区、市）党委、政府负责审批本地区省级以下地区、部门和单位举办的论坛活动；中央和国家机关、人民团体、经国务院批准免于登记的社会团体负责审批所属机关、直属单位举办的论坛活动。分级分类建立论坛活动保留清单，对清单范围内的论坛活动实行备案管理。各级党委机关及其直属单位原则上不再举办保留清单以外的论坛活动。确有必要新增的，应从严审核论证，按程序报批后纳入清单管理。党政机关及其直属单位论坛活动的审批实行总量控制、严控规模、厉行节约、注重实效等原则，防止形式主义和铺张浪费。贯彻落实中央八项规定及其实施细则精神，规范党员领导干部出席论坛活动。涉外论坛活动按照有关外事管理规定办理，规范邀请党和国家领导人、其他领导干部及重要外宾出席论坛活动。

六、鼓励支持合法合规论坛活动开展。对于组织规范、导向正确、效果优良、影响力大的论坛活动，各地区各部门应通过加

强宣传推介、提供业务指导、给予表扬奖励等方式予以支持，打造一批具有示范性引领性的品牌论坛活动，助推论坛活动在服务高质量发展中发挥积极作用。

七、落实主管主办责任和行业监管职责。论坛活动主办单位要切实履行主体责任，加强对论坛活动的全过程管理，制定应急预案，确保活动健康有序开展。中央和国家机关要加强对所属单位举办论坛活动的规范管理，各省（区、市）论坛活动主管部门应切实履行论坛活动的属地管理职责，健全工作机制，完善管理制度，加强对本地区各类主体举办论坛活动的规范管理。各行业管理部门要加强对本行业、本领域论坛活动的业务指导和行业监管。

八、加强对场地提供主体的规范管理。论坛活动场地的主体不得为违法违规论坛活动提供便利，在签订合同、提供服务前，要对论坛活动举办主体的身份真实性、合法性予以核实，不得为未经合法登记的主体提供论坛活动场地。发现存在违法违规线索的，应及时通报相关部门。

九、规范媒体平台对论坛活

动的宣传推广。新闻媒体、网站平台、公众账号不得对违法违规论坛活动进行宣传报道或为其刊登广告、提供传播渠道；要对论坛活动相关信息内容进行审核把关，不得不实宣传、夸大宣传。

十、加强信用管理和社会监督。对于违法违规举办论坛活动、造成不良社会影响的主体，除依据相关法律法规进行处理外，相关主管部门要将其纳入信用管理范畴。各相关部门要促进信息共享，对于有不良信用记录的论坛活动及举办主体予以重点监管。畅通举报投诉途径，鼓励广大群众积极参与打击违法违规论坛活动，鼓励合规论坛举办主体依法维护自身权益。

各地区各部门要进一步提高政治站位，认真落实本通知精神，强化责任担当，按照统筹协调、分级负责、分类管理、上下联动的要求，构建高效衔接、运转有序的工作机制，加强组织领导，层层压实责任，坚持问题导向、标本兼治、精准施策，推动论坛活动健康有序发展。

特此通知。○

来源：中国政府网

加强基础研究 实现高水平科技自立自强

今天，中央政治局进行第三次集体学习，内容是加强基础研究。安排这次集体学习，目的是分析我国基础研究现状和挑战，了解国外加强基础研究的主要做法，探讨加快推进我国基础研究发展的措施。

加强基础研究，是实现高水平科技自立自强的迫切要求，是建设世界科技强国的必由之路。党和国家历来重视基础研究工作。新中国成立后，党中央发出“向科学进军”号召，广大科技工作者自力更生、艰苦奋斗，取得“两弹一星”关键科学问题、人工合成牛胰岛素、多复变函数论突破、哥德巴赫猜想证明等重大基础研究成果。改革开放后，我国迎来“科学的春天”，先后实施“863计划”、“攀登计划”、“973计划”，基础研究整体研究实力和学术水平显著增强。党的十八大以来，党中央把提升原始创新能力摆在更加突出的位置，成功组织一批重大基础研究任务、建成一批重大科技基础设施，基础前沿方向重大原创成果持续涌现。

当前，新一轮科技革命和产

业变革深入发展，学科交叉融合不断推进，科学研究范式发生深刻变革，科学技术和经济社会发展加速渗透融合，基础研究转化周期明显缩短，国际科技竞争向基础前沿前移。应对国际科技竞争、实现高水平科技自立自强，推动构建新发展格局、实现高质量发展，迫切需要我们加强基础研究，从源头和底层解决关键技术问题。正因为如此，党的二十大报告突出强调要加强基础研究、突出原创、鼓励自由探索，作出战略部署，要切实落实到位。

第一，强化基础研究前瞻性、战略性、系统性布局。基础研究处于从研究到应用、再到生产的科研链条起始端，地基打得牢，科技事业大厦才能建得高。加强基础研究要突出前瞻性、战略性需求导向，优化资源配置和布局结构，为创新发展提供基础理论支撑和技术源头供给。

要坚持“四个面向”，坚持目标导向和自由探索“两条腿走路”，把世界科技前沿同国家重大战略需求和经济社会发展目标结合起来，统筹遵循科学发展规律

提出的前沿问题和重大应用研究中抽象出的理论问题，凝练基础研究关键科学问题。要把握科技发展趋势和国家战略需求，加强基础研究重大项目可行性论证和遴选评估，充分尊重科学家意见，把握大趋势、下好“先手棋”。要强化国家战略科技力量，有组织推进战略导向的体系化基础研究、前沿导向的探索性基础研究、市场导向的应用性基础研究，注重发挥国家实验室引领作用、国家科研机构建制化组织作用、高水平研究型大学主力军作用和科技领军企业“出题人”、“答题人”、“阅卷人”作用。要优化基础学科建设布局，支持重点学科、新兴学科、冷门学科和薄弱学科发展，推进学科交叉融合和跨学科研究，构筑全面均衡发展的高质量学科体系。

第二，深化基础研究体制机制改革。世界已经进入大科学时代，基础研究组织化程度越来越高，制度保障和政策引导对基础研究产出的影响越来越大。我国支持基础研究和原始创新的体制机制已基本建立但尚不完善，必

须优化细化改革方案，发挥好制度、政策的价值驱动和战略牵引作用。

要稳步增加基础研究财政投入，通过税收优惠等多种方式激励企业加大投入，鼓励社会力量设立科学基金、科学捐赠等多元投入，提升国家自然科学基金及其联合基金资助效能，建立完善竞争性支持和稳定支持相结合的基础研究投入机制。要优化国家科技计划基础研究支持体系，完善基础研究项目组织、申报、评审和决策机制，实施差异化分类管理和国际国内同行评议，组织开展面向重大科学问题的协同攻关，鼓励自由探索式研究和非共识创新研究。要处理好新型举国体制与市场机制的关系，健全同基础研究长周期相匹配的科技评价激励、成果应用转化、科技人员薪酬等制度，长期稳定支持一批基础研究创新基地、优势团队和重点方向，打造原始创新策源地和基础研究先锋力量。提高基础研究投入是大趋势，同时要考虑国家财力，保持合理投入强度，加强实施过程绩效评估，确保“好钢用在刀刃上”。

第三，建设基础研究高水平支撑平台。过去很长一段时间，我国基础研究存在题目从国外学术期刊上找、仪器设备从国外进口、取得成果后再花钱到国外期刊和平台上发表的“两头在外”

问题。近年来，我国着力打造世界一流科技期刊、建成一批大国重器，基础研究支撑平台建设取得长足进步，但是从根本上破解“两头在外”问题还任重道远。

我们要协同构建中国特色国家实验室体系，布局建设基础学科研究中心，加快建设基础研究特区，超前部署新型科研信息化基础平台，形成强大的基础研究骨干网络。要科学规划布局前瞻引领型、战略导向型、应用支撑型重大科技基础设施，强化设施建设事中事后监管，完善全生命周期管理，全面提升开放共享水平和运行效率。要打好科技仪器设备、操作系统和基础软件国产化攻坚战，鼓励科研机构、高校同企业开展联合攻关，提升国产化替代水平和应用规模，争取早日实现用我国自主的研究平台、仪器设备来解决重大基础研究问题。要加快培育世界一流科技期刊，建设具有国际影响力的科技文献和数据平台，发起高水平国际学术会议，鼓励重大基础研究成果率先在我国期刊、平台上发表和开发利用。

第四，加强基础研究人才队伍建设。加强基础研究，归根结底要靠高水平人才。近年来，我国深入实施人才强国战略，深化人才体制机制改革，取得显著成效，但基础研究人才队伍仍有明显短板。必须下气力打造体系

化、高层次基础研究人才培养平台，让更多基础研究人才竞相涌现。

要加大各类人才计划对基础研究人才支持力度，培养使用战略科学家，支持青年科技人才挑大梁、担重任，积极引进海外优秀人才，不断壮大科技领军人才队伍和一流创新团队。要明确“破四唯”后怎么“立”的评价方式和标准，完善基础研究人才差异化评价和长周期支持机制，赋予科技领军人才更大的人财物支配权和技术路线选择权，构建符合基础研究规律和人才成长规律的评价体系。要加强科研学风作风建设，坚持科学监督与诚信教育相结合，纵深推进科研作风学风治理，引导科技人员摒弃浮夸、祛除浮躁，坐住坐稳“冷板凳”。要坚持走基础研究人才自主培养之路，深入实施“中学生英才计划”、“强基计划”、“基础学科拔尖学生培养计划”，优化基础学科教育体系，发挥高校特别是“双一流”高校基础研究人才培养主力军作用，加强国家急需高层次人才培养，源源不断地造就规模宏大的基础研究后备力量。

第五，广泛开展基础研究国际合作。当前，国际科技合作面临少数国家单边主义、保护主义的冲击和挑战。人类要破解共同发展难题，比以往任何时候都更需要国际合作和开放共享，没有

一个国家可以成为独立的创新中心或独享创新成果。我国要坚持以更加开放的思维和举措扩大基础研究等国际交流合作，营造具有全球竞争力的开放创新生态。

我们要构筑国际基础研究合作平台，牵头实施国际大科学计划和大科学工程，设立面向全球的科学研究基金，加大国家科技计划对外开放力度，围绕气候变化、能源安全、生物安全、外层空间利用等全球问题，拓展和深化中外联合科研。要前瞻谋划和深度参与全球科技治理，参加或发起设立国际科技组织，支持国内高校、科研院所、科技组织同国际对接，完善法律法规、伦理审查规则和监管框架。我们要敢于斗争、善于斗争，努力增进国际科技界开放、信任、合作，以更多重大原始创新和关键核心技术突破为人类文明进步作出新的更大贡献，并有效维护我国的科技安全利益。

第六，塑造有利于基础研究的创新生态。开展基础研究既需要物质保障，更需要精神激励。我国几代科技工作者通过接续奋斗铸就的“两弹一星”精神、西迁精神、载人航天精神、科学家精神、探月精神、新时代北斗精神等，共同塑造了中国特色创新生态，成为支

撑基础研究发展的不竭动力。

要在全社会大力弘扬追求真理、勇攀高峰的科学精神，广泛宣传基础研究等科技领域涌现的先进典型和事迹，教育引导广大科技工作者传承老一辈科学家以身许国、心系人民的光荣传统，把论文写在祖国的大地上，把科研成果应用在全面建设社会主义现代化国家的伟大事业中。要加强国家科普能力建设，深入实施全民科学素质提升行动，线上线下多渠道传播科学知识、展示科技成就，树立热爱科学、崇尚科学的社会风尚。要切实推进科教融汇，在教育“双减”中做好科学教育加法，播撒科学种子，激发青少年好奇心、想象力、探求欲，培育具备科学家潜质、愿意献身科学研究事业的青少年群体。

各级党委和政府要把加强基础研究纳入科技工作重要日程，加强统筹协调，加大政策支持力度，推动基础研究实现高质量发展。各级领导干部要学习科技知识、发扬科学精神，主动靠前为科技工作者排忧解难、松绑减负、加油鼓劲，把党中央关于科技创新的一系列战略部署落到实处。○

来源：《求是》杂志刊文

习近平总书记 论创新思维

党的十八大以来，习近平总书记一直要求坚持创新思维，提高创新思维能力。2014年6月，在中国科学院第十七次院士大会、中国工程院第十二次院士大会上要求：“广大青年科技人才要树立科学精神、培养创新思维、挖掘创新潜能、提高创新能力，在继承前人的基础上不断超越。”同年11月，在中央财经领导小组第八次会议上指出：“要以创新思维办好亚洲基础设施投资银行和丝路基金。”2015年3月，在会见美国前国务卿基辛格谈到中美关系时指出：“坚持合作共赢的创新思维，共同把握好两国关系的重要机遇，进一步拓展双边、地区和全球层面的互利合作。”2018年9月，在全国教育大会上提出：“教育引导学生培养综合能力，培养创新思维。”2020年10月，在十九届中央政治局第二十四次集体学习时强调：“要围绕量子科技前沿方向，加强相关学科和课程体系建设，造就一批能够把握世界科技大势、善于统筹协调的世界级科学家和领军人才，发现一批创新思维活跃、敢闯‘无人区’的青

年才俊和顶尖人才。”同年11月，在全国劳动模范和先进工作者表彰大会上针对努力建设高素质劳动大军提出：“要增强创新意识、培养创新思维，展示锐意创新的勇气、敢为人先的锐气、蓬勃向上的朝气。”对干部特别是各级领导干部，在党的十九大、二十大以及全国组织工作会议等一系列重要会议的报告和讲话中，都强调坚持创新思维并提高创新思维能力。进入新时代以来习近平总书记提出的一系列新理念、新思想、新战略，采取的一系列新政策、新举措、新办法以及我国取得的一系列新成就、新变革，都与坚持运用创新思维治国理政密不可分。

那么，创新思维的基本特征是什么？对此，习近平总书记作出了全面的分析和论述。他不仅在一般意义上从思维方式的角度去阐释创新思维，而且更重要的是站在党和国家发展全局的高度，结合新时代的创新特征来认识创新思维，为我们运用创新思维指出方向、明确原则、阐述内容、提出要求。

坚持“创新是第一动力”，树立强烈的创新意识

2018年3月，在参加十三届全国人大一次会议广东代表团审议时指出：“发展是第一要务，人才是第一资源，创新是第一动

力。”同年4月，在庆祝海南建省办经济特区30周年大会上指出：“发展是第一要务，创新是第一动力，是建设现代化经济体系的战略支撑。”5月，在中国科学院第十九次院士大会、中国工程院第十四次院士大会上指出：“坚持创新是第一动力，坚持抓创新就是抓发展、谋创新就是谋未来”。11月，在首届中国国际进口博览会开幕式上指出：“创新是第一动力。只有敢于创新、勇于变革，才能突破世界经济发展瓶颈。”12月，在庆祝改革开放40周年大会上指出：“我们要坚持创新是第一动力、人才是第一资源的理念，实施创新驱动发展战略，完善国家创新体系，加快关键核心技术自主创新，为经济社会发展打造新引擎。”习近平总书记一年内多次强调“创新是第一动力”的重要论断，之后还一直强调“创新是第一动力”，这是对创新重要地位和作用的深刻认识和把握。

习近平总书记之所以反复强调“创新是第一动力”，是因为只有通过创新才能解决深层次的矛盾和问题，从根本上推动经济社会发展。他指出：“纵观人类发展历史，创新始终是一个国家、一个民族发展的重要力量。”“创新是一个民族进步的灵魂，是一个国家兴旺发达的不竭动力，也是中华民族最深沉的民族禀赋。在激烈的国际竞争中，惟创新者进，

惟创新者强，惟创新者胜。”“全面建设社会主义现代化国家，实现第二个百年奋斗目标，创新是一个决定性因素。”党的十八大以后，我国经济社会发展进入新常态，转型发展迫在眉睫，新的发展动力究竟在哪里？习近平总书记有着明确的阐释。2013年9月，在十八届中央政治局第九次集体学习时指出：“创新驱动是形势所迫。我国经济总量已跃居世界第二位，社会生产力、综合国力、科技实力迈上了一个新的大台阶。同时，我国发展中不平衡、不协调、不可持续问题依然突出，人口、资源、环境压力越来越大。我国现代化涉及十几亿人，走全靠要素驱动的老路难以为继。物质资源必然越用越少，而科技和人才却会越用越多，因此我们必须及早转入创新驱动发展轨道，把科技创新潜力更好释放出来。”2014年5月，在河南考察时指出：“一个地方、一个企业，要突破发展瓶颈、解决深层次矛盾和问题，根本出路在于创新，关键要靠科技力量。”2015年10月，在党的十八届五中全会第二次全体会议上指出：“新一轮科技革命带来的是更加激烈的科技竞争，如果科技创新搞不上去，发展动力就不可能实现转换，我们在全球经济竞争中就会处于下风。为此，我们必须把创新作为引领发展的第一动力”。在这些重

要论述中，习近平总书记为我们深刻解答了作出“创新是第一动力”重大判断的根本原因。

用“创新是第一动力”的观点看创新、看问题，必然要求树立强烈的创新意识，遇到问题自觉运用创新思维去开辟新思路、寻找新办法。对于增强创新意识，习近平总书记的要求也是一贯的。2013年7月，在中国科学院考察工作时指出：“要创新，就要有强烈的创新意识。”2014年5月，在上海考察时提出：“要进一步增强改革创新意识，敞开思想谋划新思路，放开手脚追求新突破”。2016年4月，在主持召开知识分子、劳动模范、青年代表座谈会时强调：“广大知识分子要增强创新意识，把握创新特点，遵循创新规律，既奇思妙想、‘无中生有’，又兼收并蓄、博采众长”。2017年5月，在视察海军机关时强调：“要坚持创新驱动，抓住科技创新这个牛鼻子，强化创新意识，提高创新能力，激发创新活力，厚植创新潜力，为海军转型建设注入强大动力。”2020年9月，在科学家座谈会上提出：“注重培养学生创新意识和创新能力。”习近平总书记特别强调创新意识，是因为只有树立了强烈的创新意识，才会运用创新思维去创新。

同时，习近平总书记还给我们解答了创新的动力问题。他指

出：“问题是创新的起点，也是创新的动力源。”我们知道，社会总是在发展的，新情况新问题总是层出不穷的，其中有一些可以凭老经验、用老办法来应对和解决，同时也有不少是老经验、老办法不能应对和解决的，必须用创新的思路和办法来解决。创新无论大小，揭示一条规律是创新，提出一种学说是创新，阐明一个道理是创新，寻找一个办法也是创新，最终都是为了解决问题。

坚持打破不合时宜的传统思维和思维定势束缚，敢于质疑

2013年7月，习近平总书记在中国科学院考察工作时指出：“学贵知疑，小疑则小进，大疑则大进。”“凡事要有打破砂锅问到底的劲头，敢于质疑现有理论，勇于开拓新的方向，攻坚克难，追求卓越。”2020年9月，在科学家座谈会上指出：“科技创新特别是原始创新要有创造性思辨的能力、严格求证的方法，不迷信学术权威，不盲从既有学说，敢于大胆质疑，认真实证，不断试验。”2021年4月，在清华大学考察时强调：“要保持对基础研究的持续投入，鼓励自由探索，敢于质疑现有理论，勇于开拓新的方向。”同年5月，在中国科学院第二十次院士大会、中国工程院第十五次院士大会、中国科协第十次全国代表大会上指出：“要更

加重视人才自主培养，更加重视科学精神、创新能力、批判性思维的培养培育。”从这些重要论述可以看出，创新思维就是敢于质疑、具有批判性的思维。

为了通过质疑实现创新，就要善于打破不符合不断发展的客观实际的传统思维和思维定势的束缚。2014年2月，在省部级主要领导干部学习贯彻十八届三中全会精神全面深化改革专题研讨班上提出：“要注意打破不合时宜的思维定势。思维定势有的是在长期工作中形成的，有的是个人立场、地位、利益决定的，有的是同现有一些工作格局、工作权限、工作机制密切相关的。事业在发展，形势在变化，过去合理的现在可能已经不适应，以前长期有效的目前可能开始失灵。”“我们说要以更大决心冲破思想观念束缚，就是要破除妨碍改革发展的那些思维定势，顺应潮流，与时俱进。”同年8月，在十八届中央政治局第十七次集体学习时强调：“面对国家安全稳定遇到的严峻挑战，面对改革中的深层次矛盾和问题，更需要我们的思想观念有一个大的解放，勇于改变机械化战争的思维定势，树立信息化战争的思想观念；改变维护传统安全的思维定势，树立维护国家综合安全和战略利益拓展的思想观念；改变单一军种作战的思维定势，树立诸军兵种

一体化联合作战的思想观念；改变固守部门利益的思维定势，树立全军一盘棋、全国一盘棋的思想观念。”2018年11月，在上海考察时强调：“要进一步解放思想，准确识变、科学应变、主动求变，坚决破除条条框框、思维定势的束缚，深入推进重要领域和关键环节改革”。2021年9月，在中央人才工作会议上指出：“要遵循人才成长规律和科研规律，进一步破除‘官本位’、行政化的传统思维，不能简单套用行政管理的办法对待科研工作，不能像管行政干部那样管科研人才。”从这些重要论述看，创新思维就是要敢于突破传统思维和思维定势的局限，通过批判、质疑去进行创新。

坚持全面创新

全面创新是习近平总书记关于创新的一个重要观点，也是进行创新思维的基本遵循。2014年8月，在中央财经领导小组第七次会议上强调：“我国是一个发展中大国，正在大力推进经济发展方式转变和经济结构调整，必须把创新驱动发展战略实施好。实施创新驱动发展战略，就是要推动以科技创新为核心的全面创新”。同年12月，在中央经济工作会议上进一步强调：“创新要实，就是要推动全面创新”。2021年5月，在中国科学院第二十次院士大会、

中国工程院第十五次院士大会和中国科学技术协会第十次全国代表大会上进一步提出：“要推进科技体制改革，形成支持全面创新的基础制度。”从这些重要论述看，习近平总书记提出的创新是全面创新。

全面创新是从主体到对象、从领域到工作、从内容到形式、从思路到手段等全方位、各方面的创新。2012年12月，习近平总书记在广东考察工作时就提出：“全方位推进科技创新、企业创新、产品创新、市场创新、品牌创新，加快科技成果向现实生产力转化，推动科技和经济紧密结合。”2013年8月，在全国宣传思想工作会议上指出：“宣传思想工作创新，重点要抓好理念创新、手段创新、基层工作创新，努力以思想认识新飞跃打开工作新局面，积极探索有利于破解工作难题的新举措新办法”。2014年8月，在中央财经领导小组第七次会议上指出：“创新是多方面的，包括理论创新、体制创新、制度创新、人才创新等”。2015年10月，在党的十八届五中全会第二次全体会议上要求：“把创新摆在国家发展全局的核心位置，不断推进理论创新、制度创新、科技创新、文化创新等各方面创新，让创新贯穿党和国家一切工作，让创新在全社会蔚然成风。”2020年7月，在企业家座谈会上要求：

“企业家要做创新发展的探索者、组织者、引领者，勇于推动生产组织创新、技术创新、市场创新，重视技术研发和人力资本投入，有效调动员工创造力，努力把企业打造成为强大的创新主体，在困境中实现凤凰涅槃、浴火重生。”总之，任何领域、任何工作都要创新，对任何创新也都应该是全面的。

坚持守正创新

守正创新是创新的基本原则，也是创新思维的基本原则。习近平总书记反复强调守正创新。比如，2020年8月，在经济社会领域专家座谈会上指出：“我们要守正创新、开拓创新，大胆探索自己未来发展之路。”同年10月，在纪念中国人民志愿军抗美援朝出国作战70周年大会上指出：“无论时代如何发展，我们都要激发守正创新、奋勇向前的民族智慧。”对于一切领域和各个方面的守正创新，习近平总书记也提出了具体要求。比如，对于中医药工作，他提出：“要遵循中医药发展规律，传承精华，守正创新，加快推进中医药现代化、产业化”。对于文化产业，他提出：“文化产业既有意识形态属性，又有市场属性，但意识形态属性是本质属性。一定要牢牢把握正确导向，坚持守正创新，确保文化产业持续健康发展。”对于人权研究，他提

出：“我国人权研究工作者要与时俱进、守正创新，为丰富人类文明多样性、推进世界人权事业发展作出更大贡献。”对于党史学习教育，他指出：“全党要高度重视，提高思想站位，立足实际、守正创新，高标准高质量完成学习教育各项任务。”

在习近平总书记的创新思维中，守正创新最重要的是在思想、理论、道路、制度、文化等方面坚守正确方向和观点基础上的创新。守正是创新的前提。从指导思想上看，就是要守马克思主义之正。2016年7月，在庆祝中国共产党成立95周年大会上指出：“马克思主义是我们立党立国的根本指导思想。背离或放弃马克思主义，我们党就会失去灵魂、迷失方向。在坚持马克思主义指导地位这一根本问题上，我们必须坚定不移，任何时候任何情况下都不能有丝毫动摇。”从经济理论创新上看，就是要坚守马克思主义政治经济学的基本原理和正确观点之正。2015年11月，在十八届中央政治局第二十八次集体学习时指出：“现在，各种经济学理论五花八门，但我们政治经济学的根本只能是马克思主义政治经济学，而不能是别的什么经济理论。”从道路探索和制度创新上看，就是要守中国特色社会主义道路和根本制度之正。2013年11月，在党的十八届三中全

会第二次全体会议上强调：“我们的改革是在中国特色社会主义道路上不断前进的改革，既不走封闭僵化的老路，也不走改旗易帜的邪路。推进改革的目的是要不断推进我国社会主义制度自我完善和发展，赋予社会主义新的生机活力。这里面最核心的是坚持和改善党的领导、坚持和完善中国特色社会主义制度，偏离了这一条，那就南辕北辙了。”从文化创新上看，就是要守中国特色社会主义文化、中华优秀传统文化之正。2019年3月，在参加全国政协十三届二次会议文化艺术界、社会科学界委员联组会时指出：“正本清源、守正创新，一个国家、一个民族不能没有灵魂，作为精神事业，文化文艺、哲学社会科学当然就是一个灵魂的创作，一是不能没有，一是不能混乱。”2022年5月，在十九届中央政治局第三十九次集体学习时强调：“要坚持守正创新，推动中华优秀传统文化同社会主义社会相适应，展示中华民族的独特精神标识，更好构筑中国精神、中国价值、中国力量。要坚持马克思主义的根本指导思想，传承弘扬革命文化，发展社会主义先进文化，从中华优秀传统文化中寻找源头活水。”

之所以突出强调守正创新，习近平总书记引用三国时期诸葛亮所著的《便宜十六策·治乱第

十二》中提出的“治国者，圆不失规，方不失矩，本不失末，为政不失其道，万事可成，其功可保”来论证没有规矩不成方圆，治理国家要坚守根本和正道，才能成就事业，功业长保。守正就是守根本，关键是不能在根本性问题上出现颠覆性错误。习近平总书记多次强调：“中国是一个大国，决不能在根本性问题上出现颠覆性错误，一旦出现就无法挽回、无法弥补。”2012年12月，在十八届中央政治局第二次集体学习时指出：“在方向问题上，我们头脑必须十分清醒。我们的方向就是不断推动社会主义制度自我完善和发展，而不是对社会主义制度改弦易张。我们要坚持四项基本原则这个立国之本，既以四项基本原则保证改革开放的正确方向，又通过改革开放赋予四项基本原则新的时代内涵，排除各种干扰，坚定不移走中国特色社会主义道路。”2022年10月，在党的二十大报告中深刻指出：“必须坚持守正创新。我们从事的是前无古人的伟大事业，守正才能不迷失方向、不犯颠覆性错误，创新才能把握时代、引领时代。”这是对于为什么要守正创新，守正与创新的实质内涵及其辩证关系的经典凝练表达。○

来源：理论网



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9万余人,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、课题研究与决策支撑、科学普及与继续教育等方面开拓创新,推动中国自动化科学和事业的发展 and 壮大,成为连接政府、产业、学术、科研、会员的重要纽带,致力于成为国内外有影响力的现代社会团体组织。

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

- CAA科技进步奖 ·CAA自然科学奖 ·CAA技术发明奖 ·CAA自动化与人工智能创新团队成果奖
- CAA科技成就奖 ·CAA大学生激励计划 ·CAA论文卓越行动工程 ·CAA青年托举工程
- CAA教育教学成果卓越行动工程 ·CAA科学普及成果

学会主办期刊

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

邮编:100190