

中国自动化学会通讯

COMMUNICATIONS OF CAA

第 1 期

2024 年 01 月

第45卷 总第244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



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 | 2024 年 1 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



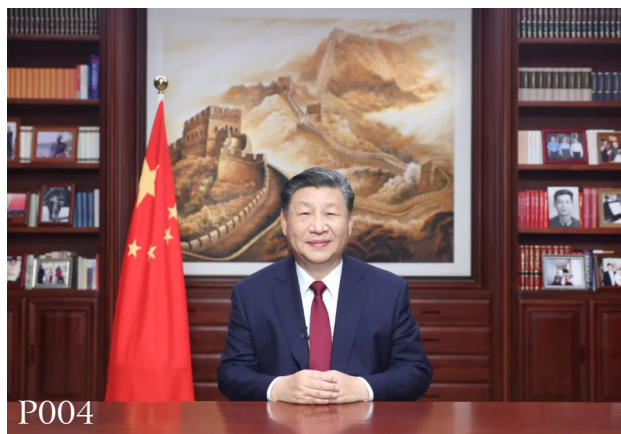
郑南宇

日月开新元，万象启新篇。2023 年，是全面贯彻党的二十大精神
的开局之年，是我国全面建设社会主义现代化国家开局起步的关键时期的第
一年。这一年，学会稳步推进各项工作有序开展，收获满满。充满希望的
2024 年已经到来，首先向长期以来关心和支持《中国自动化学会通讯》
发展的编委、学者、读者，以及广大会员和各界人士，致以新年最诚挚的
感谢和美好的祝愿！

新岁开启新梦想，新年承载新希望！2024 年，是新中国成立 75 周
年，是实现“十四五”规划目标任务的关键一年。学会将锲而不舍锚定服
务国家战略这一时代命题，坚定不移走高质量发展之路。始终面向世界科
技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求，始终把自动化科技创新摆
在更加突出的战略地位，加强原创性、引领性科技攻关，奋勇攀登世界科
技巅峰，坚持创新驱动，勇于跨越鸿沟，为实现国家强盛、民族复兴贡献
自动化更大的力量！

为进一步满足科技工作者获取自动化前沿科技最新研究进展和成果
的需求，更好地激发创新创造活力，《中国自动化学会通讯》将继续致力
于为学界搭建高质量的学术成果展示和交流平台，为广大科技工作者搭建
施展才华的舞台，让科技创新成果源源不断涌现出来，践行《中国自动化
学会通讯》的使命与担当。

科技期刊既是科技成果的承载和传播者，也是科技强国的重要推动
者。新的一年，《中国自动化学会通讯》继续立足办刊宗旨，不忘初心，
以更加昂扬奋进的姿态，团结引领广大自动化人在新时期以更高的热情、
更专业的能力凝心聚力办好品牌期刊，推动自动化学科取得新成绩，在建
设科技强国的使命上作出新贡献！



专题 / Column

- 004 国家主席习近平发表二〇二四年新年贺词
- 006 中国科协主席万钢、中国科协党组书记贺军科发表 2024 年新年贺词
- 007 中国自动化学会理事长郑南宁院士发表 2024 年新年贺词
- 009 中国自动化学会监事长王飞跃教授发表 2024 年新年贺词
- 010 朝暮共往，行至天光——致全体会员的一封信
- 011 中国自动化学会 2024 工作计划

观点 / Viewpoint

- 012 王飞跃：在沙漠绿洲 UA 教过的课程与建过的实验室

- 018 吴朝晖：充分发挥科技创新对现代化产业体系建设的支撑引领作用

会员成就 / Members Achievement

- 021 热烈祝贺中国自动化学会常务理事王海峰主任、理事王大珩研究员等多名会员被授予“国家卓越工程师”称号

学术前沿 / Academic Frontier

- 023 智能网联电动汽车节能优化控制研究进展与展望 / 申永鹏 袁小芳 赵素娜 孟步敏 王耀南
- 041 磁驱动微型机器人的智能控制发展现状 / 徐天添 黄晨阳 刘佳 徐艳花 赖证宇 吴新宇





P081



P082

科普园地 / Science Park

- 061 复杂系统管理学：从概念到仿真，不同时期基于复杂理论的管理学模型
- 070 大模型安全与对齐：复杂系统视角下的 AI 安全

学会动态 / Activities

- 080 2024 年第一期会士面对面活动火热召开
- 081 CAA 浙江工业大学学生分会硕博学术论坛成功举办
- 082 CAA 北京工业大学学生分会“第一届学术老带新指导交流会”成功举办
- 083 年度总榜第三 2023 年度科协系统科普新媒体传播榜发布

- 084 中国自动化学会被评为 2023 年度全国学会科普工作优秀单位
- 085 深圳自动化学会换届选举大会暨第八届理事会第一次会员大会成功召开

党建强会 / Party Building

- 087 让青年科技人才挑大梁当主角
- 088 为加快形成新质生产力注入科技创新力量

形势通报 / Voice

- 090 2024 年度国家自然科学基金改革举措——节选自《2024 年度国家自然科学基金项目指南》
- 093 工业和信息化部等八部门关于加快传统制造业转型升级的指导意见

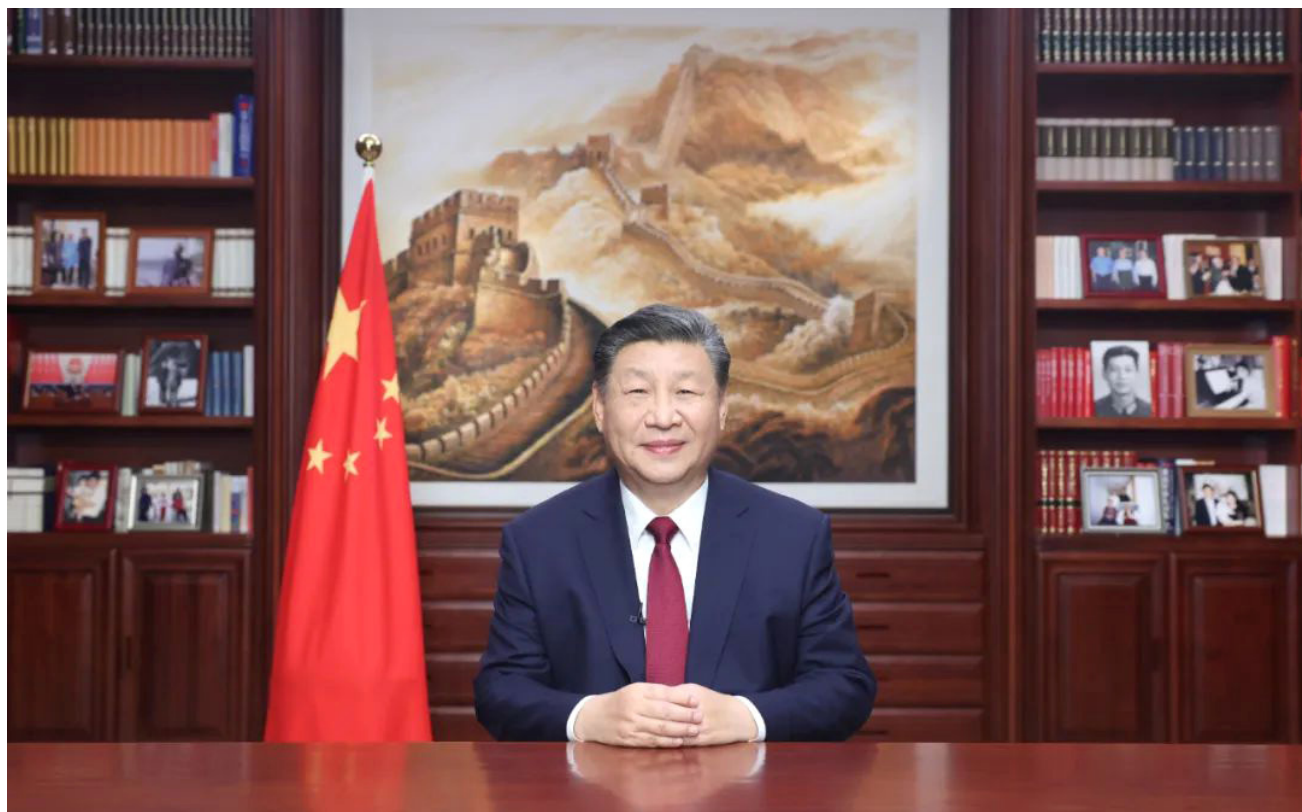


P085



P087

国家主席习近平发表二〇二四年新年贺词



新年前夕，国家主席习近平通过中央广播电视总台和互联网，发表二〇二四年新年贺词。新华社记者 鞠鹏 摄

大家好！冬至阳生，岁回律转。在这辞旧迎新的美好时刻，我在北京向大家致以新年的祝福！

2023年，我们接续奋斗、砥砺前行，经历了风雨洗礼，看到了美丽风景，取得了沉甸甸的收获。大家记住了一年的不易，也对未来充满信心。

这一年的步伐，我们走得很坚实。疫情防控平稳转段，我国经济持续回升向好，高质量发展扎实推进。现代化产业体系更加健全，一批高端化、智能化、绿色化新型支柱产业快速崛起。粮食生产“二十连丰”，绿水青山成色更足，乡村振兴展现新气象。东北全面振兴谱写新篇，雄安新

区拔节生长，长江经济带活力脉动，粤港澳大湾区勇立潮头。中国经济在风浪中强健了体魄、壮实了筋骨。

这一年的步伐，我们走得很很力量。经过久久为功的磨砺，中国的创新动力、发展活力勃发奔涌。C919大飞机实现商飞，国产大型邮轮完成试航，神舟家族

太空接力，“奋斗者”号极限深潜。国货潮牌广受欢迎，国产新手机一机难求，新能源汽车、锂电池、光伏产品给中国制造增添了新亮色。中国以自强不息的精神奋力攀登，到处都是日新月异的创造。

这一年的步伐，我们走得很见神采。成都大运会、杭州亚运会精彩纷呈，体育健儿勇创佳绩。假日旅游人潮涌动，电影市场红红火火，“村超”、“村晚”活力四射，低碳生活渐成风尚，温暖的生活气息、复苏的忙碌劲头，诠释了人们对美好幸福的追求，也展现了一个活力满满、热气腾腾的中国。

这一年的步伐，我们走得很显底气。中国是一个伟大的国度，传承着伟大的文明。在这片辽阔的土地上，大漠孤烟、江南细雨，总让人思接千载、心驰神往；黄河九曲、长江奔流，总让人心潮澎湃、豪情满怀。良渚、二里头的文明曙光，殷墟甲骨的文字传承，三星堆的文化瑰宝，国家版本馆的文脉赓续……泱泱中华，历史何其悠久，文明何其博大，这是我们的自信之基、力量之源。

中国不仅发展自己，也积极拥抱世界，担当大国责任。我们成功举办中国—中亚峰会、第三

届“一带一路”国际合作高峰论坛，一系列主场外交迎来五洲宾朋。我也访问了一些国家，出席了一些国际会议，会晤了不少老朋友、新伙伴，分享中国主张，深化彼此共识。世事变迁，和平发展始终是主旋律，合作共赢始终是硬道理。

前行路上，有风有雨是常态。一些企业面临经营压力，一些群众就业、生活遇到困难，一些地方发生洪涝、台风、地震等自然灾害，这些我都牵挂在心。大家不惧风雨、守望相助，直面挑战、攻坚克难，我深受感动。辛勤劳作的农民，埋头苦干的工人，敢闯敢拼的创业者，保家卫国的子弟兵，各行各业的人们都在挥洒汗水，每一个平凡的人都作出了不平凡的贡献！人民永远是我们战胜一切困难挑战的最大依靠。

明年是新中国成立75周年。我们要坚定不移推进中国式现代化，完整、准确、全面贯彻新发展理念，加快构建新发展格局，推动高质量发展，统筹好发展和安全。要坚持稳中求进、以进促稳、先立后破，巩固和增强经济回升向好态势，实现经济行稳致远。要全面深化改革开放，进一步提振发展信心，增强经济活力，

以更大力度办教育、兴科技、育人才。要继续支持香港、澳门发挥自身优势，在更好融入国家发展大局中保持长期繁荣稳定。祖国统一是历史必然，两岸同胞要携手同心，共享民族复兴的伟大荣光。

我们的目标很宏伟，也很朴素，归根到底就是让老百姓过上更好的日子。孩子的抚养教育，年轻人的就业成才，老年人的就医养老，是家事也是国事，大家要共同努力，把这些事办好。现在，社会节奏很快，大家都很忙，工作生活压力都很大。我们要营造温暖和谐的社会氛围，拓展包容活跃的创新空间，创造便利舒适的生活条件，让大家心情愉快、人生出彩、梦想成真。

当前，世界上还有一些地方处在战火硝烟之中。中国人民深知和平的珍贵，我们愿同国际社会一道，以人类前途为怀、以人民福祉为念，推动构建人类命运共同体，建设更加美好的世界。

此时此刻，夜色斑斓，万家灯火。让我们一起，祝愿祖国繁荣昌盛、世界和平安宁！祝愿大家福暖四季、顺遂安康！

谢谢大家！○

来源：新华社

中国科协主席万钢、中国科协党组书记贺军科发表2024 年新年贺词

值此辞旧迎新之际，我们谨代表中国科学技术协会，向全国广大科技工作者致以诚挚的新年祝福！

2023 年，广大科技工作者以百倍的创新激情投身到科教兴国战略、人才强国战略、创新驱动发展战略的实践中，在全面贯彻落实党的二十大精神方面开局起步、成就斐然。我们迎着新一轮科技革命和产业变革的潮头，坚持面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求、面向人民生命健康，不断向科学技术广度和深度进军，不断开辟科

技创新的新领域和产业发展的新赛道。空天逐梦、深海探索、大国重器等领域成果竞相涌现，人工智能、生命健康、清洁能源、先进材料等新的产业增长点不断形成，广大科技工作者以卓越的智慧 and 辛勤的汗水，书写着科技强国的壮丽篇章。

一年来，广大科技工作者始终与党同心同德、同向同行，把不断满足人民群众对美好生活的需要，作为科技创新的重要基点，在拼搏奋斗中充分展现具有深厚家国情怀的新时代科学家精神。在以新质生产力突破报效国家的

同时，广大科技工作者更以科学家精神火炬的传承接力持续涵养优良学风，以骄人的创新实绩践行社会主义核心价值观，引领社会风尚。

百年未有之大变局，引发世界经济格局深刻变革、全球创新版图深度重构。广大科技工作者牢记习近平总书记关于坚持面向世界、面向未来的重要指示，勇当科技创新的开拓者和科技人文交流的使者，以更加开放的姿态融入到全球化发展的新浪潮中，在世界科技舞台上与国际同行不断增进开放、信任、合作，在“一带一路”创新发展蓝图上镌刻下中国工程师的不朽印记，一批国际科技组织应运而生，不断织密中国与全球创新网络的节点与联系。中国科技工作者以开放创新的确定性应对百年变局的不确定性，为推动构建人类命运共同体作出新的贡献。

过去的一年里，最令人欣喜的成绩就是，随着教育、科技、人才的一体化部署，以及全社会的聚力托举，一大批青年人才在科技进步的最前沿崭露头角，在



图1 中国科协主席万钢



图2 中国科协党组书记贺军科

中国自动化学会理事长郑南宁院士发表 2024 年新年贺词

创新发展的第一线勇挑重担，为科技强国建设提供了不竭的源头活水。各级科协组织通过搭建更高水平的学术交流平台、提供更大力度的托举支持，为青年科技人才施展才华搭桥铺路，开放型、枢纽型、平台型的科技工作者之家更有温度、更加贴心。

新年的第一缕曙光即将如期而至，我们即将迎来更加充满创新创造活力的 2024 年。期待广大科技工作者以更加坚定的信心、更加饱满的热情和更加务实的作风，汇聚建设世界科技强国的磅礴力量，瞄准世界科技前沿持续探索突破，聚焦新质生产力勇当先锋，不断发展繁荣科学文化，着力提升全民科学素质，共同以高水平科技自立自强谱写中国式现代化的崭新篇章，为实现中华民族伟大复兴的中国梦而不懈奋斗！

来源：中国科协宣传文化部

日月其迈，岁律更新。值此时序更迭，辞旧迎新之际，中国自动化学会向全体会员、广大自动化、信息与智能科技领域的科技工作者致以新年最诚挚的祝福和问候，向学会所属各分支机构、期刊编辑部、省级自动化学会以及关心学会事业发展的科研院所、企事业单位、媒体等社会各界人士表示由衷的感谢。

2023 年是全面贯彻落实党的二十大精神开局之年，是实施“十四五”规划承前启后的关键一年。过去的一年，学会深入贯彻落实习近平总书记关于科技创新和群团发展的重要指示，凝心聚力，扎实工作，有序推进学会高质量发展，有力提升学会的影响力和号召力。

这一年，学会强化政治引领，以党建创新推动学会建设。学会理事会党委多次开展党史学习教育、知名科学家讲党课、组织召开“党的二十大精神宣讲报告会”；学会秘书处党支部进行系列主题党日活动、推进“口述历史”系列访谈、创设 CAA 青年风采展，弘扬传承科学家精神；以 CAA 党



员先锋队为主力，以 CAA 科普下基层、CAA 智航助教、CAA 系列赛事为品牌，不断拓展自动化传播边界；以 CAA 线上活动为载体，有序推进 CAA 云讲座、会士面对面、青年菁英论坛、我和优博有个约会等线上活动全面开花，真正实现对会员的分类分级精准服务，赢得了更广泛会员和科技工作者的信任与支持，会员数量增长 25%，会员规模再创新高。

这一年，学会坚守学术本源，以卓越品牌构筑学术高地。学会瞄准世界科技前沿，紧扣时代发展主题，聚焦新质生产力，持续扩大中国自动化大会影响力，传

承国家发展系列品牌论坛，有序召开国家智能车发展论坛、国家机器人发展论坛、国家工业软件大会，发布自动化领域突出成果，尤其是团结带领所属分支机构举办百余场学术会议，受众人数突破 5000 万人次，更广泛传播自动化声音；加快一流期刊建设，培育以《自动化学报》中英文版为代表的 11 种精品学术期刊，创办《国际智能控制与系统学报》，做优做强《自动化学报》，实现核心影响因子、总被引频次、综合评价总分、学科影响指标全部位列第一，持续提升《自动化学报》（英文版）国际影响力，影响因子首次突破 11，全面满足了自动化人的学术需求。

这一年，学会突出人才培养，以核心价值观引领人才。学会建立三位一体的人才工作路线图，打通人才培育、服务和举荐体系，召开 2022 年度中国自动化学会科学技术奖励大会，隆重表彰 116 项科技成果、27 位青年人才。再度加大对青年人才的支持力度，除依托中国科协青年人才托举项目支持 16 名优秀青年人才外，还首次开展北京市科协青年人才托

举项目，支持 7 名北京青年人才茁壮成长。

这一年，学会立足职责使命，以主动作为提升社会公信力。学会聚焦国家发展战略重大问题，持续发挥人才优势，组建智能产业和智能制造产业科技服务团，获批医疗机器人和能源互联网决策咨询专家团队，形成《数字化转型背景下我国工控系统安全存在问题及应对建议》《推进通用人工智能实现创新引领和理性健康发展的建议》等近 10 份建议专报；积极开展自动化领域团体标准研制工作，批准发布《城市地下水管网运营管理平台功能规范》等 4 项团体标准，立项《自主水下航行器导航控制关键技术及应用指南》2 项团体标准；完善科技成果评价机制，完成 43 项科技成果评价，以专业精神不断提供高质量、优质化的公共服务产品，有力促进自动化科学与技术高水平发展。

这一年，学会秉承开放包容，以对外合作拓宽国际视野。学会派代表团出席第 22 届国际自动控制联合会世界大会，与美国自动控制委员会联合主办欢迎晚宴，

成功承办 IEEE 数字孪生和平行智能国际会议、第一届信息能源系统与智慧能源国际会议等多个国际会议；积极推荐近十位学会会员竞选国际自动控制联合会主要领导职务，有力提升学会在国际舞台上的影响力。

时节如流，催人奋进。走过 2023，迈进 2024，脚下的征途依旧是星辰大海。站在新的时间起点上，中国自动化学会将守正创新，战略谋划，努力推进世界一流学会建设；将开辟新领域、新赛道，与广大自动化科技工作者共同携手，努力开创自动化事业高质量发展的新局面，为我国科技强国建设和实现中华民族伟大复兴的中国梦作出新的更大贡献！

新征程是充满光荣和梦想的远征。回首过往，我们秉承初心、砥砺前行；展望未来，我们踔厉奋发、勇毅前行。新的一年，祝自动化科技创新取得丰硕成果！祝广大会员和自动化、信息与智能科学领域的科技工作者新年快乐！万事胜意！○

中国自动化学会监事长王飞跃教授发表 2024 年新年贺词



岁序常易，华章日新。值此2024年即将来临之际，中国自动化学会向全体会员、广大自动化、信息与智能科技领域的科技工作者致以诚挚问候！向学会所属各分支机构、期刊编辑部、省级自动化学会以及关心学会事业发展的科研院所、企事业单位、媒体等社会各界人士表示由衷的感谢。

2023 年是中国自动化学会创新发展，锐意进取的一年。围绕新时代科技社团的使命和职责，学会全面深化改革，扎实履行为科技工作者服务、为创新驱动发展服务、为提高全民科学素质服务、为党和政府科学决策服务的职责，显著提升学会组织凝聚力、学术引领力、战略支撑力、国际影响力，推动学会各项事业呈现新活力，实现新发展，取得新突破。

这一年，学会进一步深化治

理结构与治理机制改革，持续推进治理能力现代化。学会坚持政治引领、深化改革、目标导向、任务牵引、开放融合、系统推进的基本原则，以治理结构和治理方式现代化为目标，全面推进学会组织方式、运行机制和党建工作创新，线上线下召开4次理事长、监事长工作会议，7次秘书长工作会议，2次全体常务理事工作会议，1次全体理事工作会议，1次全国秘书长工作会议，形成决议20余项，严格落实民主选举、民主决策和民主管理，有效推进学会治理体系和治理能力现代化，全面提升了学会创新和服务能力。

这一年，学会进一步规范分支机构管理，提高分支机构服务水平。学会不断加强分支机构的管理与评估工作，持续完善分支机构管理系统，优化年度考核和评优机制，严格分支机构创建审核流程。2023 年，学会新成立分支机构6个，筹备成立4个，完成分支机构换届20个。截至目前，学会共有63个专业委员会，9个工作委员会，30个省级自动化学会。

这一年，学会全面推动智慧

学会建设，实现数字化与学会发展同频共振。学会以会员库为核心，完善六大平台和六大管理系统，形成高效融媒体传播矩阵，有效提升融合传播力和公信力。重磅上线CAA数字图书馆，持续深化两微一平台的广度与深度，搭建以视频号为核心的线上直播平台，实现与学会工作同频共振，2023 年度学会粉丝数量增加近10万人，连续多次在中国科协网络平台宣传评价中位列第二。

春潮逐浪，未来可期。新的一年，学会将坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深入贯彻落实党的二十大精神和中央经济工作会议精神，坚定信心、开拓奋进，不断发展新质生产力，夯实业务主责，全面提升“四服务”能力，团结自动化、信息与智能科学领域科技工作者开创新时期学会事业高质量发展新局面，为我国科技强国建设作出新的更大贡献！

最后，祝各位会员和各界朋友新年快乐、和顺致祥、幸福美满！祝我国自动化事业发展蒸蒸日上、蓬勃繁荣！祝伟大祖国山河锦绣、国泰民安！

朝暮共往，行至天光

——致全体会员的一封信

凛冬散尽，星河长明。

山高水长，不负遇见。

感恩所有自动化人的一路相伴，让 CAA 的每一步都走得坚定、自信而充满力量。

这一年，CAA 如愿与您，看风和日丽、山河万里。山城重庆、羊城广州、古镇湖州……我们在场又一场的山海里携手奔

赴，共同坚守学术初心，引领学科进步。

这一年，CAA 不负众望，从不改初心、奋楫笃行。不断完善会员发展与服务机制，用更加优质、精准、个性化的服务温暖人心，赢得了更广泛会员和科技工作者的信任与支持，会员数量增长 25%，会员规模再创新高。

世间辽阔，岁月流长。诚挚感谢您一路上与 CAA 携手相伴，走过光阴的漫长，走向更可期的未来。

辞旧岁，赴明媚。新的一年，CAA 愿您勇敢丰盈，前行所至皆是曙光。CAA 也将始终与您朝暮并往，行至天光! ○



关于开展 2024 年中国自动化学会科技成果评价工作的通知

各有关单位：

为充分发挥国家级学会在科技评价中的独立第三方作用，客观判别自动化、信息及智能科学领域科技成果质量和水平，促进科技水平提升和科技成果推广应用，2024 年中国自动化学会按照《中国自动化学会科技成果评价管理办法》，继续组织开展科技成果评价工作。

学会建立有严谨规范的评价组织流程，所开展的科技成果评价工作，为完成单位提供客观公正、严谨规范、专业高效的评价服务，将为促进创新链、产业链、价值链深度融合，构建新发展格局和实现高质量发展提供有力支撑。

欢迎自动化、信息及智能科学领域的高等院校、科研院所和广大企业，联系委托学会组织科技成果评价，学会将竭诚做好咨询与服务工作！

联系人：屈老师

联系电话：010-82544541

联系邮箱：caa@ia.ac.cn

详情请查看：<https://www.caa.org.cn/article/192/4444.html>

中国自动化学会 2024 工作计划

一、提高政治站位，以党建促会建

1. 坚持贯彻党对学会的全面领导，始终把政治建设摆在首位，夯实三级党组织体系建设坚持“三会一课”，继续学会理事长、知名科学家讲党课常态化机制；积极承接中国科协“党建强会计划”项目，开展主题教育活动、“党建强会”系列活动、主题党日活动等，继续发挥“CAA 党员先锋队”的政治优势、组织优势和群众工作优势，促进党建和业务工作深度融合。

2. 弘扬新时代科学家精神，持续开展“口述历史”“领袖企业访谈”“CAA 青年风采展”系列访谈活动，塑造自动化学界、产业界模范先锋，营造风清气正、求真务实、勇于创新的良好氛围。

二、坚持会员为本，精准会员服务

1. 打造一体化数字化平台，建设中国自动化学会 App，实现一站式线上服务，推动资源共享、知识传播与价值提升，迈入“智慧学会”建设新台阶。

2. 线上线下系统联动推进“自动化科技工作者之家”建设，为 CAA 广大会员提供精准服务，继续开展“云讲座”“钱学森国际杰出科学家系列讲座”“—CAA YeS 系列活动”“会士面对面”“我和优博有个约会”等特色会员品牌活动。

3. 打通人才培养、服务和举荐通道，做优自动化创新人才成长的教育、培养与服务环境，建立闭环反哺新态势。

4. 扩大海外会员数量，依照有关规定发展港澳台和外籍会员等。

三、持续打造高质量学术交流平台

1. 以“高起点新刊”“一流期刊建设”为抓手，推动期刊建设，突出学术期刊与学术会议融合的学会办刊优势，推动期刊数字化平台建设，强化运营服务能力，提升期刊学术质量和国内国际影响力。

2. 加大中国自动化大会、国家发展系列论坛等学会品牌学术会议的科技前瞻研判力度，突出高端学术引领，面向全球征文、引入海外审稿人，推动自动化大会进一步走向国际。

3. 加强科普队伍建设和自动化科普资源整合，建设自动化科普平台，打造多样化、系列化、内容丰富、吸引力强的科普活动品牌，提升科学传播效果，实现科普基地—科普团队—科普作品集成与共享。

4. 继续加强学会智库建设，组织开展重大科学问题 / 技术难题征集和学科发展战略研讨，依托决策咨询专家团队，形成高水平咨询报告；继续扩大科技产业服务团服务区域，实施区域服务中心推进建设计划，以点带面完善区域合作网络，实现学会服务站与区域服务中心“点面相结合”服务模式。

四、国际影响力开拓新局面

1. 扩大国际组织“朋友圈”，持续推荐中国科学家参与国际学术组织重要领导职位竞选，拓展全球治理的广度深度。

2. 积极承办国际学术会议，拓展学会的国际影响力，积极承办 IEEE 数字孪生和平行智能国际会议等，提升学会国际知名度和影响力。同时，为学会成员提供更多的学术交流机会，促进学术研究的进展和成果的共享。○

王飞跃：在沙漠绿洲 UA 教过的课程与建过的实验室

收到过去的教学秘书 LC 的邮件，附有我 1999 年之前在 UA 教过和共同设计的课程（见后），看后十分感慨，好多课程自己差不多已经忘记。印象中，这还不是我上过全部课程，至少没有列上一硬一软的 Mechatronics 和 Computational Intelligence 两门课。从计算机和控制转 SIE，让我在教学上付出超过常人的努力，但回报也颇为丰厚。这些课程中，SIE350，SIE 370/570，SIE453/653，SIE 458/558/685 一直由我教，其它课程都是因为相关主讲教授享学术假 Sabbatical Leave，离职或者退休而由我接手、替代一个或二个学期。

实际上，SIE350 课的名字已从 Deterministic Systems 改为 Systems Dynamics and Modeling，因为加了相当经济和社会系统内容，相应地，SIE453 也从 Deterministic Control Systems 改为 Systems Control and Synthesis；SIE370 的名字最初为 Design of Microprocessor Systems，后来很短一段时间改为 Design of Computer

Systems，都名不符实，最后我将其改为 Design of Embedded Systems，引入 Xilinx 和 Altera 的 FPGA（两个公司的产品类似，但不同，具体差别已记不清了），Lattice 的 iSP，还有工业级的 PLC（但离散和连续点数都很少，记得不到一千美元一台，朋友 Weiping Li 还推荐了一台只有十几个点的 PLC，只有 200 多美元，同事都不信如此便宜），使课程名符其实，虽然累但学生非常喜欢此课，很长一段时间这也是 SIE 唯一的一门低年级大学生有硬件动手实践的课程。只是，这几门课的新名字和 Catalog 长期在学校系统登记不上，原因在我：学校系统允许改时，忘了或来不及申请改课的名字和 Catalog；等突然想起了要改的时候，又过了学校系统允许修改的期限。那时事多思杂，人就是这样“糊涂”，加上心里根本不重视此事，导致这些课二三年里都有“挂羊头卖狗肉”的嫌疑，还曾引起几位学生的“抗议”，好在教授对授课内容有很大的自主权，学期开始时说明一下，学生还都能理解接受。

后来，我把这些课程整合起来，申请了 NSF 的 CRCD(Combined Research and Curriculum Development) Program 项目，没想到经费“被”翻翻，NSF 直接经费在加州里和学校的 Matching Fund 及 In-kind Support，超过百万美元。这是我最后一个 NSF 项目，由此开始建立通过 Internet 实时进行硬件试验的 WAVES Lab。

SIE 465/565 Financial and Investment Engineering 一课，是由应用数学功力深厚的 Sid Yakowitz 教授领衔设立的新课，当时因为 Sid 即将退休，因此系里有人反对引入此课，我保证接下来才通过。此课的起因是 Luenberger 在 Stanford 开设相关课程的成功，后来 Luenberger 的专著 Investment Science 成为此领域的经典之作，为控制学者有跨学科的习惯提供了又一个例子。可惜后因 Sid 不幸去世，这门课还有 Sid 引入的 SIE475/575 也无疾而终。我和 Sid 曾讲好把 SIE475/575 的讲义整理成书在我主编的《World Scientific Se-

ries on Intelligent Control and Intelligent Automation》丛书里发表,而且已写了前五章,结果最终书没有完成,讲义的手稿现在也不知让我放在哪里,真是有歉于 Sid。

SIE 422/522 和 SIE 558 是老系主任 Lucian Duckstein 教授的课,他退休回巴黎教书后由我接下来二年。接手后,我立刻把他的教科书和参考书全换了,因为他与我们的水利系合作密切,弄得这两门课好像是专为水利问题而设的。后来,我把 SIE 558 扩展成为新课 Computational Intelligence in Systems Analysis and Decision Making,第一次教科书用的就是朋友、加拿大另一 UA 的波兰籍教授 Witold Pedrycz 的书,但因内容不适我们的学生而吃了不少苦头,第二年只好自编讲义。Lucian 走之前,把根据二战期间儿时与母亲被关在纳粹犹太人集中营的经历写成的回忆小册子《Lucian's Story》赠我,我还是非常认真地阅读了一遍。读完之后,非常伤心,不仅仅是由于迫害者行为之残酷,还因有些受害者心理之黑暗,或更准确地说,无奈。Lucian 还邀我一同去河边的犹太人中心参加过小册子的讨论会,私下告诉了我一些书上没有描述的事情。原来,由于母亲在集中营对他的一些行为,成年后 Lucian 就一直不

原谅其母亲,内心埋了很多怨恨,书出版之后,他自我感觉好多了。我曾试图按中国的文化传统劝 Lucian 原谅自己的母亲,很快发现效果还不如对牛弹琴。与他的交往,使我对人性有了新的认识,也原谅了过去我们之间的一次争吵:他曾在 Faculty Meeting 上指责我“走私”中国人,因为我的研究生多为大陆来的同胞;我十分生气,回应说这种话根本不应在此种场合说,更不必反驳,而且他过去的学生也多为中国和东欧的学生,特别是作为一个犹太人,更不该说这种话。我们小小的系里有五位犹太教授,差一点就占当时教授人数的四分之一强,我气头上的关于犹太人的话,虽然会上他们没有说什么,但明显产生了不好的影响,差不多一年后才消除。退休后不久, Lucian 就离了婚,与在巴黎生病时照顾他的护士再婚,好像不久又再离婚。

在 UA 期间,除了从 1990 年起主持 Robotics and Automation Lab,参与医学院的 Motor Control Group (属 Arizona Research Lab), NASA/UA 空间研究中心 SERC 和 CEA (Controlled Environment Agriculture) Group 之外,还主持创建了:

Dynamics and Control Lab
Real-Time Embedded Systems Lab

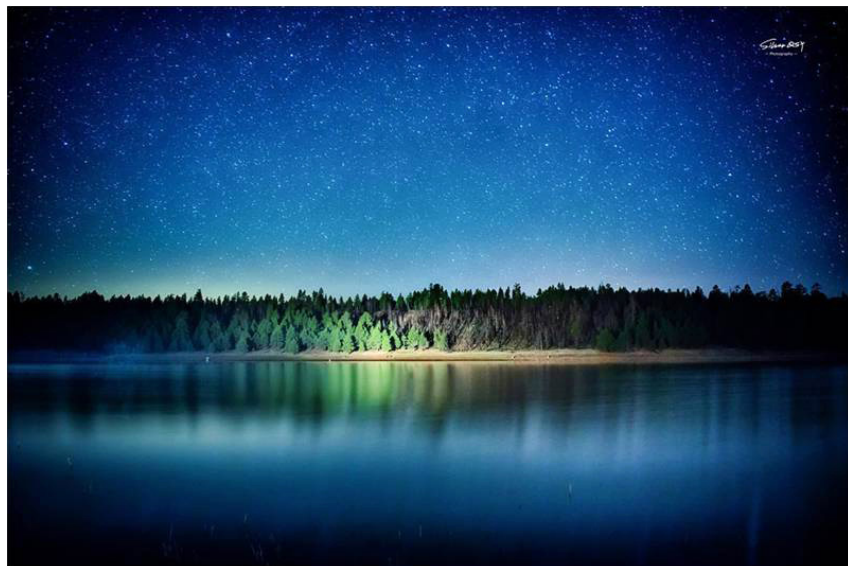
CIM and Flexible Manufacturing Automation Lab

WAVES (Web-based Audio and Video Educational Systems) Lab

PARCS (Program for Advanced Research in Complex Systems) 中心

另还参与创立了 ARMS (Advanced Robotic Mining Systems) 和 ATLAS (Advanced





Traffic and Logistic Algorithmic Systems) 两个跨系研究中心。回想起来,真是年轻无畏才会作这些事。

北京的雾霾让人无法不回忆留恋 Arizona 的天空。下面是微博里下载的 Arizona 夜空,应是在 White Mountains 上的人工湖边照的,十多年前的一个生日曾在那里与系的同事钓过鱼,半天下来竟无一收获,算是生日不杀生吧。

Department of Systems and Industrial Engineering (SIE)
[Dept Info - College Info](#)

SIE 350. Deterministic Systems (3) II Modeling and analysis and design of linear deterministic systems in both the time and frequency domains. Input/output differential equations, Laplace

transforms and state space methods. Attention will be given to modeling physical and engineering systems and computer simulations. 3ES. P, ECE 207, MATH 254.

SIE 370. Design of Embedded Systems (4) I II Boolean algebra, combinational and sequential logic circuits, finite state machines, programmable logic devices, simple computer architecture, assembly language programming, and real-time computer control. The computer is used as an example of systems engineering design; it is analyzed as a system, not as a collection of components. 3R, 3L. 1ES, 2ED. P, ENGR 102, ECE 207.

SIE 377. Software for Engineers (3) I Programming in C. Modular program design and verification, pointers and structures, data structures and algorithms including: lists, trees, graphs, searching and sorting. 1.5 ES, 1.5 ED. P, SIE 170. Credit allowed for only one of these courses: SIE 377, C SC 342.

SIE 383. Integrated Manufacturing Systems (3) II Introduction to the integrated manufacturing enterprise and automation. Topics include computer-aided design, process planning, computer-numerical control machining, machine vision, application of robots and automation. 2R, 2L. 2ES, 1ED. P, SIE 260, MSE 331.

SIE 396A. Seminar (1) I II
 SIE 399. **Independent Study (1-5) [Rpt./]**

SIE 399H. Honors Independent Study (1-3) [Rpt./] I II

SIE 422. Engineering Decision Making Under Uncertainty (3) I Application of principles of probability and statistics to the design and control of engineering systems in a ran-

dom or uncertain environment. Emphasis is placed on Bayesian decision analysis. 1ES, 2ED. P, SIE330R, SIE 330L or equivalent. May be convened with SIE 522.

SIE 431. Simulation Modeling and Analysis (3) I II Discrete event simulation, model development, statistical design and analysis of simulation experiments, variance reduction, random variate generation, Monte Carlo simulation. 1.5 ES, 1.5 ED. P, CR, SIE 321; SIE330R, SIE 330L. May be convened with SIE 531.

SIE 453. Deterministic Control Systems (3) I The analysis and synthesis of deterministic linear control systems, with emphasis on design using both frequency-domain and state-variable approaches. 1.5 ES, 1.5 ED. P, SIE 350.

SIE 465. Financial and Investment Engineering (3) I Definitions and modeling of cash flow streams, random securities, investment and portfolio problems. Operations research and decision analysis methods for investment, capacity expansion and equipment replacement in a random

environment. P, SIE 305 or equivalent calculus-based probability course. May be convened with SIE 565.

SIE 473. Concepts in Information and Communication Systems (3) II Modeling and analysis of information and communication, systems/networks for applications in telecommunication, systems and computer communication networks. Topics selected from the following: signal representation, sampling, coding and error detection, modulation, OSI network architecture, network protocols, delay models of performance, routing and flow control. 3ES. P, SIE 321, SIE 340.

SIE 474. Decision Support Systems (3) I Building, testing and evaluating expert systems, computer systems that emulate the human and draw conclusions based on incomplete or inaccurate data. Each student will build a decision support system using commercially available expert system shells. Students will use many tools to test and validate their systems. 1ES, 2ED. P, familiarity with com-

puters. May be convened with SIE 574.

SIE 475. Computational Methods for Games, Decisions, and Artificial Intelligence (3) II An introduction to automata, computer representation and optimal solution of games and decision problems. Principles of heuristic programming and machine learning. A programming project is to be selected from areas such as game strategies, graphics, recreational mathematics, and manufacturing simulation. Microcomputer experience is emphasized. 1.5 ES, 1.5ED. May be convened with SIE 575.

SIE 485. Robotics and Automation (3) I Methods of design and operation of general purpose and industrial manipulation systems. Kinematic and dynamic models of mechanical manipulators, trajectory planning, manipulator control, robotic vision and other sensing techniques. 2ES, 1ED. P, SIE 350 or equivalent. May be convened with SIE 585.

SIE 495S. Senior Colloquium (1) I P, senior status. Open to majors only.

SIE 498. Senior Capstone
(1-3) I II

SIE 498H. Honors Thesis (3)
[Rpt./ 2] I II

SIE 499. Independent Study
(1-3) [Rpt./]

SIE 499H. Honors Independent Study (3) [Rpt./] I II

SIE 522. Engineering Decision Making Under Uncertainty (3) I For a description of course topics see SIE 422. Graduate-level requirements include a semester research project. May be convened with SIE 422.

SIE 531. Simulation Modeling and Analysis (3) I II For a description of course topics see SIE 431. Graduate-level requirements include a library research report. May be convened with SIE 431.

SIE 536. Experiment Design and Regression (3) II Planning and designing experiments with an emphasis on factorial layout. Includes analysis of experimental and observational data with multiple linear regression and analysis of variance. P, SIE 530.

SIE 541. Dynamic Programming (3) II Modeling of stochastic dynamic systems and

the application of dynamic programming techniques to optimal decision and control problems. Topics include inventory control, admission and flow control in queuing systems, stochastic scheduling, dynamic portfolio analysis and computational methods. P, SIE 321, SIE 340.

SIE 558. Fuzzy Sets in Systems Analysis and Decision Making (3) I Fuzzy numbers' definition, operations; fuzzy regression, interpolation and reliability, fuzzy logic, optimization and control; fuzzy events and decision-making applications in areas such as systems, civil, industrial, electrical, computer engineering and water management.

SIE 565. Financial and Investment Engineering (3) I For a description of course topics see SIE 465. Graduate-level requirements include solving an additional problem of a more advanced nature on each of two midterm examinations. Additionally, they will be expected to submit a project with a summary report. May be convened with SIE 465.

SIE 570. Real- Time Embed-

ded Systems (4) Task allocation, task scheduling, remote programmable field units, real-time operating systems, application specific operating systems, applications in industrial process control, robotics and automation, intelligent vehicles. 3R, 3L. 1ES, 2ED. P, SIE 370, SIE 450.

SIE 573. Concepts in Information and Communication Systems (3) II Graduate-level requirements include a course project in the subject area.

SIE 575. Computational Methods for Games, Decisions, and Artificial Intelligence (3) II For a description of course topics see SIE 475. Graduate level requirements include a comprehensive and intensive programming project. May be convened with SIE 475.

SIE 583. Computer Integrated Manufacturing Systems (3) I Modern manufacturing systems with emphasis on information requirements and data management. Includes CAD, CAM, CAPP, real time scheduling, networking and system justification. P, real time scheduling, networking and system justification.

SIE 584. Manufacturing Automation (3) II Current topics in hardware for automation, selecting and implementing robots, part orientation, computer vision, automated warehousing and material handling, programmable controllers, NC machining, on-line computer control. Laboratory projects.

SIE 585. Robotics and Automation (3) I For a description of course topics see SIE 485. Graduate-level requirements include two research projects. May be convened with SIE 485.

SIE 599. Independent Study (1-5) [Rpt./]

SIE 631. Digital Systems

Simulation (3) II Emphasis on current research problems including random variate generation, modeling, language development and statistical analysis of output. P, SIE 431 or MIS 521A or MIS 521B.

SIE 653. Selected Topics in Intelligent Control (3) II Selected topics covering recent advances in intelligent control, to be chosen from a list including architectures, processes, algorithms, and applications for intelligent control and systems. P, SIE 453, SIE 558, SIE 575.

SIE 685. Advanced Topics in Robotics and Automation (3) II Selected topics covering

recent advances in robotics and automation, to be chosen from a list including applications, kinematics, dynamics, tactile sensing, vision and intelligent systems. P, SIE 585.

SIE 695A. Colloquium (1-3) [Rpt./ 12 units] I II P, consult department before enrolling.

SIE 699. Independent Study (1-6)

SIE 900. Research (2-8) [Rpt./]

SIE 909. Master's Report (1-6) [Rpt./]

SIE 910. Thesis (1-6) [Rpt./]

SIE 920. Dissertation (1-9) [Rpt./]

来源: 王飞跃科学网博客

作者简介



王飞跃, 1990年获美国伦塞利尔理工学院(RPI)计算机与系统工程博士学位。1990年起在

美国亚利桑那大学先后任副教授、副教授和教授, 机器人与自动化实验室主任, 复杂系统高等研究中心主任。曾任中国科学院自动化研究所副所长, 现任中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任、智能科学与技术学报主编、IEEE智能车汇刊(IEEE Trans. on Intelligent Vehicles)主编、中国自动化学会监事长。2003年起先后当选IEEE、INCOSE、

IFAC、ASME和AAAS等国际学术组织Fellow。2007年获国家自然科学二等奖和ACM杰出科学家称号, 2014年获IEEE诺伯特·维纳奖, 2021年The IFAC Pavel J. Nowacki Distinguished Lecturer。主要研究复杂系统、智能控制、智能机器人、无人驾驶、平行智能、平行情报、平行管理、社会计算、知识自动化等领域。

吴朝晖：充分发挥科技创新对现代化产业体系建设的支撑引领作用

习近平总书记在二十届中央财经委员会第一次会议上强调，现代化产业体系是现代化国家的物质技术基础，加快建设以实体经济为支撑的现代化产业体系，关系我们在未来发展和国际竞争中赢得战略主动。我们必须深入学习贯彻习近平总书记的重要指示精神，坚持补短板、建长板、强能力、成体系，以科技支撑实体经济提质增效，以创新引领现代化产业体系发展。

一、科技创新是建设现代化产业体系的战略支撑

科技创新是建设现代化产业体系的战略支撑，推进产业智能化、绿色化、融合化，建设具有完整性、先进性、安全性的现代化产业体系，必须深刻理解科技创新与现代化产业体系建设的逻辑关系，坚持以构建健全、高效、自主的科技创新体系支撑引领建设完整、先进、安全的现代化产业体系。

科技创新是现代化产业体系完整性的重要基础。科技创新始

终是全球产业发展水平和产业形态演进方向的决定性因素。当前，技术交叉融合引发的新一轮科技革命和产业变革正在向纵深演进，我国现代产业体系的完整性要求技术创新体系能够提供全面支撑，在提升科技创新体系能力的基础上，加快补齐关键领域核心技术短板，保障技术的全面供给支撑，才能实现以科技创新体系的健全性支撑现代化产业体系的完整性。

科技创新是现代化产业体系先进性的核心要素。创新是引领发展的第一动力，新兴技术和颠覆性创新成为推动全球产业格局变化和产业链重构的主导力量。保持现代化产业体系的先进性，需要紧密结合世界科技发展前沿，高效集聚全球创新要素，不断提升产业体系的科技含量，加快重大科技成果广泛渗透到各个产业，拓展新领域新赛道，不断培育产业发展新动能新优势，实现更多的创新引领型发展。

科技创新是现代化产业体系安全性的根本保障。实践证明，现代产业的发展必须是具有安全

性的发展，而关键核心技术缺失的风险才是现代产业发展面临的最大的风险。为了实现现代化产业体系的安全性，必须以强大的科技创新能力为保障，加强关键核心技术攻关和战略性资源支撑，把科技命脉牢牢掌握在自己手里，以自主可控的科技创新体系保障现代产业体系的安全性。

从科技创新的视角看，现代化产业体系就是以科技创新为核心，推动形成基础设施、金融资本、人力资源等各类生产要素和创新要素有效配置、协同联动的有机系统。科技创新能力的高低决定了现代化产业发展水平的强弱，现代化产业体系实现智能化、绿色化、融合化，关键依靠科技创新。科技创新正以前所未有的广度深度改变产业发展模式、催生新的产业形态。我们要把现代化产业体系建立在高水平科技自立自强的牢固根基之上，保持并增强产业体系完备和配套能力强的优势，不断增强应对外部重大风险挑战的能力，为增强产业链韧性和产业安全提供根本保障。

二、科技创新支撑引领现代化产业体系建设成效显著

党的十八大以来，我国科技事业发生了历史性、整体性、格局性重大变化，2022 年我国全社会研究与试验发展（R&D）经费总量首次突破 3 万亿元，占国内生产总值的比重达到 2.55%，成功进入创新国家行列。科技创新赋能高质量发展的作用更加凸显，走出了一条从人才强、科技强到产业强、经济强、国家强的发展道路。

支撑引领现代农业快速发展。农业重大科研成果频出，有力推动藏粮于地、藏粮于技战略落实落地。生物育种、农业生物安全、现代农业装备等领域原创性、引领性科技攻关取得重大突破，有力保障国家粮食安全。农作物耕种收综合机械化率超过 72%；三大粮食作物肥料、农药利用率均达到 40% 以上。创制一批水稻、小麦、玉米新品种，良种对粮食增产贡献率超过 45%，粮食单产由 2012 年的亩产 357 公斤提高到 2021 年的亩产 387 公斤。144 家创新型县（市）、9 家国家农业高新技术产业示范区、286 家国家农业科技园区加快建设，为推动农业高质量发展提供有力支撑。

支撑引领工业加快转型升级。科技促进制造业向高端化迈进，高性能装备、先进材料等技术突

破，已建成高水平的数字化车间和智能工厂 2100 多个。人工智能技术加速赋能传统产业，智能制造、智能矿山、智慧医疗等应用场景快速拓展；我国超大规模市场有力推动攻关产品推广应用，5G 率先实现规模化应用，赋能实体经济转型升级。科技支撑产业绿色化转型取得积极成效，煤炭清洁高效利用走在世界前列，光伏、风电、新能源汽车等产业规模世界第一。生物技术和信息技术的融合，推动生物计算、生物存储、神经形态芯片等新兴产业崛起。

支撑引领现代服务业提质增效。研发设计、成果转移转化、创新创业、科技金融、科技咨询等科技型服务业有力拓展经济增长新形态，为现代服务业发展注入强大活力。建成 19 个国家技术创新中心、12 个国家科技成果转移转化示范区、420 家国家技术转移机构、40 余家技术交易市场，全国技术合同成交额从 2012 年的 0.64 万亿元增长到 2022 年的 4.78 万亿元。众创空间、孵化器创业孵化载体超 1.5 万家，覆盖 95% 县级以上地区，创业带动就业近 500 万人。国家科技成果转化引导基金设立 36 只子基金，总规模达到 624 亿元。

支撑引领基础设施建设迈上新台阶。科技创新支撑传统基础设施建设水平不断攀升，关键技

术和国产装备为港珠澳大桥、北京大兴国际机场、川藏铁路等重大工程建设提供有力保障；超大直径盾构机“京华号”投入使用，大大加速我国城市化和大铁路网建设。新型基础设施建设“科技含量”显著提升，重大技术突破带动特高压输电迅猛发展；车桩云互联、大功率充电桩技术应用落地，促进新能源汽车规模化推广应用。13.3 万套大型科学仪器和 85 个重大科研基础设施纳入开放共享网络，科技资源对全社会科技创新的支撑保障能力大幅提高。

三、强化打造现代化产业体系的“科技硬核”

科技部将坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深入落实党中央、国务院“围绕产业链部署创新链，围绕创新链布局产业链”的部署要求，一方面，立足当前强化攻坚，着力突破关键核心技术，保证产业链供应链自主可控；另一方面，面向未来换道超车，超前部署前沿技术研发应用，不断开辟经济新增长极和产业竞争新赛道。

一是加快构建完整的技术创新体系，支撑现代化产业体系建设。充分发挥企业需求牵引的引擎作用，打造匹配市场需要的技术创新体系，保障现代化产业体系健康蓬勃发展。强化企业牵头

的产学研协同创新机制，逐步形成以企业为主导、各类创新主体协同推进的新局面，支持科技领军企业发挥产业链引领带动作用，鼓励新型研发机构探索颠覆性技术研发创新，在产业链细分领域形成科技型中小企业梯队，构建优势互补的“创新联合体”。构建有利于企业创新的技术转移转化体系，营造良好创新生态，切实提高科技成果转化和产业化水平。瞄准新兴前沿领域，建设一批未来产业科技园和孵化高地，打造科技特色鲜明的现代化产业集群。

二是加强关键核心技术攻关突破，保障产业链供应链安全稳定。瞄准事关国家发展和安全的战略性产业领域，健全新型举国体制，发挥好政府在关键核心技术攻关中的组织者作用，加强战略谋划和系统布局，强化各类科技计划的统筹协调，形成关键核心技术攻关强大合力。围绕重点产业链，着力突破关键基础材料、元器件、零部件核心技术，补齐重大技术装备短板，成体系突破“卡脖子”技术难题，保障重点产业的创新链供应链自主可控。

三是布局开拓新领域新赛道的引领性技术，培育未来产业竞

争新优势。面向国家重大战略和未来产业发展需求，围绕科技前沿领域超前部署，加快产出原创性、突破性、引领性重大科技成果，夯实支撑未来产业发展的技术基础。聚焦人工智能、量子信息、前沿生物、低碳能源、未来交通等前沿技术方向，以重大应用场景为牵引，着力加强基础研究、应用基础研究和颠覆性技术研发，促进自动驾驶、智能机器人、新药研制等未来产业发展。搭建多层次的未来产业技术创新网络，促进产业链垂直领域、不同产业链跨领域的融合创新，构建支撑未来产业发展的创新生态。

四是加快完善科技金融政策体系，推动实现科技—产业—金融良性循环。坚持支撑科技攻关和服务实体经济同步推进，以科技创新全链条、科技型企业全生命周期融资两大需求为系统牵引，促进科技与金融深度融合。强化科技与金融部门工作的协同联动，加强科技、金融、产业等领域政策协同、资源对接、信息共享；加强科技信贷服务能力建设，引导支持金融机构建立企业科技创新能力评价体系；强化成果转化引导基金等政府投资基金管理，

引导社会资本更多投早投小；推动分类施策和精准施策有机结合，支持有关方面丰富科技金融支持工具、开发保险产品等，建立多层次的科技金融服务体系。○

来源：经济日报

作者简介



吴朝晖，男，汉族，中国自动化学会会士。1966年12月出生，浙江温州人。1995年6月加入中国共产党，1993年10月参加工作，浙江大学计算机应用专业博士研究生毕业，教授。中国科学院院士。现任第二十届中央候补委员，科学技术部党组成员、副部长。

热烈祝贺中国自动化学会常务理事王海峰主任、理事王大轶研究员等多名会员被授予“国家卓越工程师”称号

2024年1月19日，“国家工程师奖”表彰大会在人民大会堂举行，81名个人被授予“国家卓越工程师”称号，50个团队被授予“国家卓越工程师团队”称号。

中国自动化学会常务理事、百度首席技术官、深度学习技术及应用国家工程研究中心主任王海峰，中国自动化学会理事、北京空间飞行器总体设计部科技委主任、研究员王大

轶，中国自动化学会会员、比亚迪股份有限公司高级副总裁廉玉波，中国自动化学会会员、中国自然资源航空物探遥感中心首席科学家熊盛青被授予“国家卓越工程师”称号！



王海峰

中国自动化学会常务理事

百度首席技术官

深度学习技术及应用国家工程研究中心主任

王海峰，百度首席技术官、深度学习技术及应用国家工程研究中心主任。王海峰是自然语言处理领域最重要的国际学术组织 ACL 首位华人主席，ACL 会士，ACL 亚太分会创始主席。还是 IEEE Fellow、CAAI Fellow 及国际欧亚科学院院士等。获国家技术发明二等奖、国家科技进步二等奖、光华工程科技奖、中国专利金奖、首届全国创新争先奖、首个吴文俊人工智能杰出贡献奖等。已发表学术论文 200 多篇，已授权专利 150 余项。



王大轶

中国自动化学会理事

北京空间飞行器总体设计部科技委主任、
研究员

王大轶，北京空间飞行器总体设计部科技委主任，973 项目（自主诊断重构）和 173 重点项目（自主导航）技术首席专家，长期从事空间飞行器自主导航与自主诊断重构技术研究，为我国月球和火星探测等任务的圆满完成做出重要贡献。获国家技术发明二等奖、国家科技进步特等奖，以及全国创新争先奖、何梁何利基金科技创新奖等，是国家有突出贡献中青年专家。



廉玉波

中国自动化学会会员
比亚迪股份有限公司高级副总裁

廉玉波，比亚迪股份有限公司高级副总裁、汽车工程研究院院长、汽车产业群总工程师、比亚迪丰田电动车科技有限公司董事。曾多次荣获中国外观设计金奖、广东省专利金奖、汽车工业科学技术进步奖。2017 年被评为中国汽车技术进步领军人物、深圳市高层次专业人才，2018 年荣获中国汽车产业纪念改革开放 40 周年“杰出人物奖”，2020 年荣获中华国际科学交流基金会杰出工程师奖。同时担任全国专业标准化技术委员会电动分标委主任委员、国家重点研发计划“新能源汽车”重点专项总体专家、中国汽车工程学会常务理事、中国汽车工业协会副会长等。



熊盛青

中国自动化学会会员
中国自然资源航空物探遥感中心首席科学家

熊盛青，长期从事航空地球物理勘查技术方法研究与应用，李四光地质科学奖和黄汲清青年科技奖获得者，中央直接联系高级专家，首批国家重点领域创新团队负责人。兼任国家 863 计划重大项目、主题项目首席专家和总体专家组组长，国家科学技术奖评审专家，中国地球物理学会副理事长和中国地质学会理事等职务。曾获国家科技进步奖 2 项，部省级科技奖 10 项，国家科技攻关奖 2 项。出版专著 13 部，论文 119 篇，行业技术标准 1 部，科研成果报告 27 部。○

来源：人民日报

智能网联电动汽车节能优化控制研究进展与展望

文 / 申永鹏 袁小芳 赵素娜 孟步敏 王耀南

摘要：提升纯电动汽车整车能效、降低百公里耗电量，是我国新能源汽车产业发展的重大需求。智能网联背景下，V2X（Vehicle to everything）网联信息以及激光雷达、毫米波雷达、摄像头、定位及导航装置等各类车载传感器，为智能网联电动汽车（Connected automated electric vehicle, CAEV）提供了全方位的信息交互、共享和状态感知能力，赋予了其巨大的节能优化潜力。针对CAEV节能优化控制问题，首先从动力电池、电机控制器、驱动电机、传动机构、轮胎和驾驶决策六个环节分析电动汽车的典型损耗特性，从决策、控制和执行三个层面分析CAEV的能量转换过程及耦合关系，以及网联信息对CAEV的节能影响；然后，从决策层车速优化、控制层驱动/制动转矩优化控制和执行层电流矢量优化控制三个方面，对各层的节能优化问题进行阐述，并重点对国内外研究现状进行归纳分析；最后，对决策层、控制层和执行层CAEV节能优化控制的难点以及现有研究工作进行总结，并对下一步发展趋势进行展望。

关键词：智能网联，电动汽车，节能，优化控制

发展以纯电动汽车为主的新能源汽车是我国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路，是应对气候变化、推动绿色发展的战略举措^[1]。历经多年发展，我国在电池、电机、电控等新能源汽车核心关键技术方面持续提升，纯电动汽车产销量不断攀升，但是续航里程问题始终是制约纯电动汽车发展的重要因素^[2]。

延长纯电动汽车续航里程的两条技术路径分别是：1）提升单车带电量；2）提升整车能效，降低百公里耗电量。尽管前者可直接增加续航里程，但是不可避免地导致了整车质量和成本的增加，以及电池安全风险的上升^[3]。围绕纯电动汽车能效的提升，中国汽车工程学会发布的“节能与新能源汽车技术路线图2.0”制定了2025年、2030年和2035年的发展目标，如图1所示^[4]。国家标准“GB/T 36980-2018 电动汽车能量消耗率限值”和“GB/T 18386-2017 电动汽车能量消耗率和续航里程试验方法”分两个阶段给出

了不同整车质量车型对应的百公里耗电量限值，如图2所示^[4-5]。由此可见，提升纯电动汽车整车能效、降低百公里耗电量，是我国新能源汽车产业发展的重大需求。

当前，新一轮科技革命驱动汽车产业加速变革，能源、互联、智能革命为新能源汽车发展注入了强劲新动能。立足新阶段，2020年10月，国务院印发的“新能源汽车产业发展规划（2021~2035年）”指出，

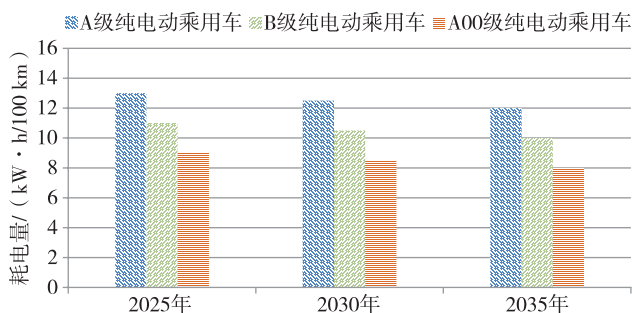


图1 我国纯电动汽车能耗发展目标

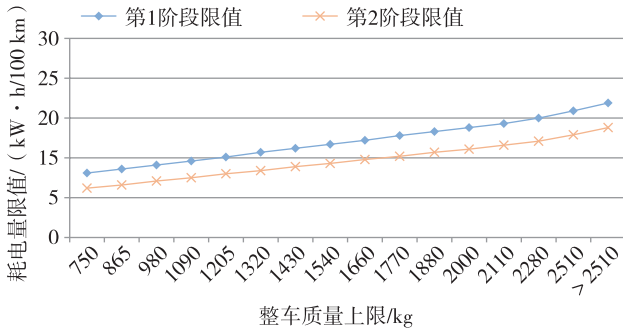


图2 纯电动汽车百公里耗电量限值

电动化、网联化、智能化是汽车产业的发展潮流和趋势，并确立了以纯电动汽车、插电式混合动力（含增程式）汽车、燃料电池汽车为“三纵”的整车技术创新链布局，以动力电池与管理系统、驱动电机与电力电子、网联化与智能化技术为“三横”的关键零部件技术供给体系^[1]。面对“2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的经济社会发展绿色转型目标，汽车与能源、交通、信息通信等领域有关技术加速融合，“绿色低碳、智能网联”已成为当前新能源汽车产业发展的新特征。

智能网联背景下，电动汽车不再是单纯的交通工具，网联信息以及激光雷达、毫米波雷达、摄像头、定位及导航装置等各类车载传感器，将为车辆提供全方位的信息交互、共享和状态感知能力，赋予了智能网联电动汽车（Connected automated electric vehicle, CAEV）巨大的节能优化潜力。复杂道路状况及车辆运行状态下，如何根据交通状况、信号灯状态、道路状况等网联信息，并结合车辆传感信息、电驱动系统和动力电池运行状态，对车辆行驶速度以及电驱动系统进行优化决策与优化控制，是实现整车能效提升的重要技术路径，也是当前亟待解决的技术难题。针对该问题，本文首先分析了电动汽车能量转换与传递各环节的节能潜力；然后，从决策层的车速优化、控制层驱动/制动转矩优化控制和执行层电流矢量优化控制三个方面，在对各层面的节能优化问题进行阐述的基础上对国内外研究现状进行了综述分析；

最后，总结了决策层、控制层和执行层 CAEV 节能优化控制的难点以及现有研究工作的特征，并对下一步发展趋势进行了展望。

1 CAEV 节能潜力分析

1.1 电动汽车典型损耗

图3所示为电动汽车行驶过程中的典型损耗情况^[6-10]。存储于锂离子电池内的电能输出过程中，由于欧姆内阻和极化内阻的存在，将造成少量内阻损耗^[6, 8]；动力电池输出的直流电能经电机控制器转换为幅值和频率可调的交流电能，在此过程中，由于电力电子开关器件的非理想开关特性，将引入一定的开关损耗和导通损耗^[8]；交流电机运行过程中，由于磁滞损耗和涡流损耗，会引入铁损；同时，由于定子线圈电阻的存在，会产生铜损^[7-8]；驱动电机产生的机

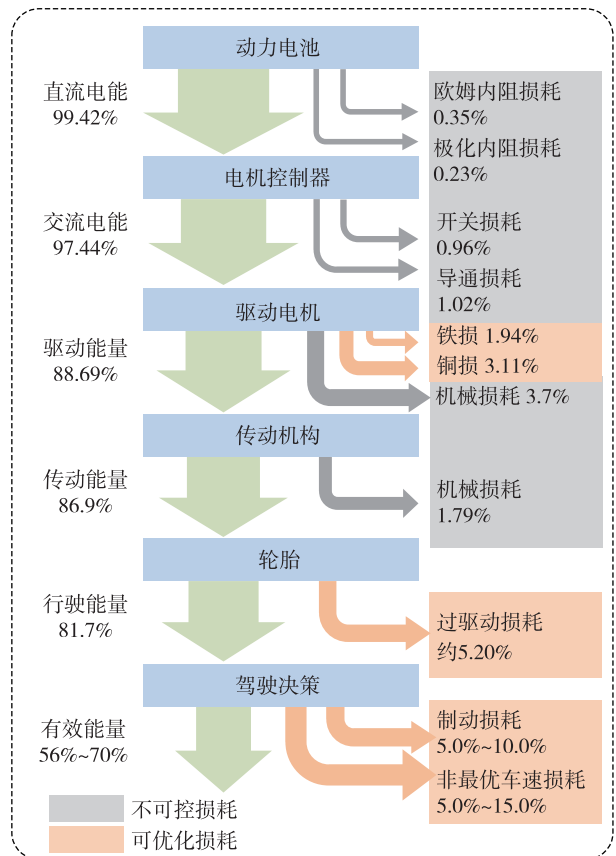


图3 电动汽车典型损耗

械能,进一步经减速器、差速器等传动机构传递至轮胎,该过程中,传动机构将产生啮合齿面摩擦损耗、轴承摩擦损耗和润滑油的阻力损耗等机械损耗^[8];进一步地,轮胎将传动机构传递的驱动转矩转换为牵引力,该过程中最大牵引力受轮胎滑移率-路面峰值附着系数特性的限制,当转矩大于最大牵引力时,将导致车轮打滑,进而引入一定量的过驱动损耗^[9];车辆牵引力克服滚动阻力、空气阻力和爬坡阻力,进而驱动车辆行驶,但如果不能根据道路状况、交通状况和信号灯状态,对车速进行合理的规划,将引入较大比例的非最优车速损耗;同时,车辆制动时,如不能对再生制动强度进行优化,将导致机械制动的介入,进而引入一定比例的制动损耗。通常,只有56%~70%的电能被转换为有效的行驶能量^[10]。

然而,并非所有损耗都可通过车辆控制进行优化。动力电池的欧姆内阻主要由电极材料、电解液、隔膜电阻及集流体、极耳等各部分零件的接触电阻组成,由电池的材料、尺寸、结构、连接方式等决定;极化内阻由活性物质特性、电极结构、电池的制造工艺、电池荷电状态(State of charge, SOC)、温度及充放电电流等因素决定;电力电子器件开关损耗和导通损耗由器件材料、

器件参数特性、驱动电路参数、工作温度等因素决定;传动机构的机械损耗由齿轮的啮合齿面摩擦因数、轴承摩擦因数、润滑油的黏度等因素决定。上述因素,在相关部件的设计、生产阶段就已经决定了损耗特性,无法在控制环节进行优化,即不可控损耗。

非最优车速损耗和制动损耗、过驱动损耗和电机的铁损及铜损为可优化损耗,CAEV在这三个环节蕴含着巨大的节能潜力。相关研究表明,利用车载传感信息和网联信息对车辆速度、动力及传动系统进行合理的优化,可使能耗下降30^[11]。2017年,美国能源部高级能源研究计划署(Advanced Research Projects Agency-Energy, ARPA-E)斥资3200万美元,开展为期三年的“NEXTCAR”研发项目,从不同角度开展下一代智能网联汽车的节能研究^[11-12]。文献^[13]在分析智能网联汽车能耗优化基本数学原理的基础上,从考虑坡度预测巡航控制、跟车工况预测巡航控制、智能辅助驾驶和车道变换等应用场景下的单车智能网联环境下的能耗优化问题进行了综述分析,从经济驾驶、多车协同节能、道路交叉口车路协同节能和车云协同节能等方面对车辆协同节能问题进行了综述分析。文献^[14]从路况预测、交通信号灯预测、车辆跟随预测、车道选择

与并线预测四个方面分析了智能网联车辆的节能潜力,并从协同车辆跟随、协同道路选择与并线、协同交叉路口通行等方面对相关车辆能耗优化控制方法进行了综述分析。文献^[15]从忽略道路和交通信息的单车行驶优化、考虑道路和交通信息的单车行驶优化、基于车-车、车-路通信的多车行驶优化三个方面对车辆的能效优化方法进行了综述分析,并对未来智能交通系统下车辆行驶优化进行了展望。上述文献关注的是车辆在决策层的节能优化原理及方法,侧重点在于不同行驶工况、运行场景下对车辆行驶速度的优化,没有对执行层和控制层的节能优化方法展开讨论。

1.2 CAEV 能量转换过程及耦合关系

如图4所示,CAEV自顶向下的能量转换过程可以描述为决策层的车速优化决策、控制层的驱动/制动转矩优化控制,以及执行层的电流矢量优化控制过程。

1)在决策层,CAEV根据车载传感设备实现对运行场景的局部感知;根据网联信息实现对工况和路况的全局感知,在满足时间-空间双重约束的前提下,可通过对车速的优化,避免无效的加减速,实现能效优化。

2)在控制层,CAEV可通过车身姿态传感器、GNSS+INS(Global navigation satellite

systems and inertial navigation systems) 组合导航、轮速传感器、电机控制器等车载传感和控制设备获取车辆纵向加速度、车速、驱动轮速、驱动转矩等多维传感信息, 根据车辆纵向动力学特性和轮胎-路面动力学特性, 对道路和车辆参数进行自适应辨识, 进而通过对驱动/制动转矩的优化控制, 实现驱动和制动过程中最佳滑移率的动态控制, 以及路面附着力的最大化, 提升驱动效率和制动能量回馈效率。

3) 在执行层, CAEV 可实时监测动力电池电压、电机定子电阻、温度等参数, 分析系统电流极限圆和电压极限椭圆动态限制, 对电机损耗特性和电驱动系统损耗特性进行在线估计, 进而通过对电流矢量的实时优化, 提升电驱动系统运行效率。同时, CAEV 控制层与决策层存在驱动/制动效率耦合及最大牵引力限制; 执行层与控制层之间存在电驱动系统效率耦合及最大转矩限制, 如图 4 所示。

1.3 网联信息对 CAEV 的节能影响

车-车 (Vehicle to vehicle, V2V)、车-云 (Vehicle to cloud, V2C)、车-基础设施 (Vehicle to infrastructure, V2I) 等 V2X (Vehicle to everything) 网联信息, 为 CAEV 提供了对道路、交通状态、交通信号的全局感知能力, 以及对周边车辆运行状态和驾驶意图的局部感知能力, 进而通过对车辆的优化决策与控制, 实现节能运行。

在决策层, 根据从 V2I 获取的三维地图信息, 文献^[16]以能耗和距离为优化目标, 构建了车辆能耗估算模型和距离综合估计模型, 提出了基于混沌多目标优化的三维路径优化方法, 实现了路径和能耗的同时优化。根据从 V2C 获取的交通和道路信息, 文献^[17]根据车辆经济性模型, 采用空间域动态规划算法确定行驶路线的最佳速度轨迹, 降低了 5%~15% 的能耗。文献^[18]分别通过 V2V 和 V2I 获取车辆驾驶信息和路侧基础设施信息, 构建了基于深度受限玻尔兹曼机 (Deep restricted Boltzmann machines, DBM) 和双向长短期记忆 (Bidirectional long short-term memory, BLSTM) 的序列预测模型, 实现了不同范围内的车速预测, 并采用模型预测控制 (Model predictive control, MPC) 进行能量管理优化, 最终实现了 6% 的能耗优化。文献^[19]依据 V2V 瞬时安全速度信息和 V2I 交通信号信息, 提出了融合粒子群优化 (Particle swarm optimization, PSO) 和极限学习机 (Extreme learning machine, ELM) 的车速预测方法, 以及改进的 MPC 能量管理方法, 实验结果表明, 相比基于规则的策略, 能耗降低了 13.55%。文献^[20]提出了实时能量优化减速规划系统, 该系统根据 V2I 获取的地图和导航数据、交通灯相位和时序信息, 生成远景速度曲线; 根据 V2V 获取的前方车辆信息对车速进行再次规划, 以确保安全

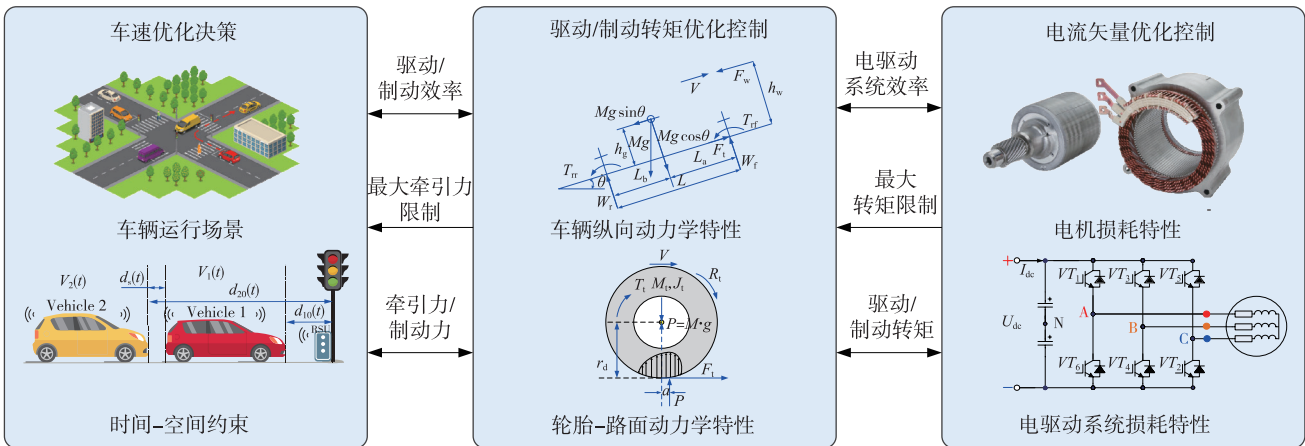


图 4 CAEV 能量转换过程及耦合关系分析

距离,实验结果表明所提方法将减速过程中的能量回收率提升了 40% 以上。

在控制层,根据 V2I 获取的路面附着系数、路面平整度等信息,文献^[21]分析了不同路面的最优速度和转矩,提出了路面自适应双电机扭矩优化分配控制方法,硬件在环测试结果表明,所提方法在三种驾驶模式下能效分别提升了 3.4%, 5.1% 和 6.1%。文献^[22]基于 V2I 和 V2V 获取的网联信息,设计了高斯过程未来工况预测器和最小二乘法车辆参数辨识器,通过优化动力分配提升了车辆能效。文献^[23]通过 V2X 获取行驶环境信息,推导出车辆的制动距离和最终速度,提出了基于伪谱法且具有终端约束的多目标制动控制策略,实现了制动能量回馈率与电池寿命的多目标优化。文献^[24]综述分析了智能交通系统(Intelligent traffic system, ITS)对车辆能效的影响,并从交通信息采集、驾驶状态优化、在线更新机制等方面展望了交通信息集成能效优化控制的发展趋势。文献^[25]通过 V2N(Vehicle to network)获取未来路况信息和车辆的功率需求,提出了非线性模型预测控制器,实现了多动力单元之间的最优转矩分配,多个驾驶循环下的测试结果表明,所提方法可节能 1%~4%。

针对智能网联背景下电动汽车的节能优化问题,下文从决策层车速优化、控制层驱动/制动转矩优化控制和执行层电流矢量优化控制三个层面,对 CAEV 的节能问题及其国内外研究现状进行综述分析。

2 车速优化决策

CAEV 可利用 V2X 网联信息和车载感知设备,通过对交通环境和车辆状态的预测,综合考虑未来交通状态对车辆运行经济性的影响,有预见性地对车速进行规划,避免无效的加速或者制动,从而提升整车的能效^[11]。已有研究表明,决策层面的车速优化是 CAEV 能效优化的关键环节,也是目前的研究热点。

2.1 车速优化问题概述

如图 5 所示,车速优化的基本思路是以车辆即将

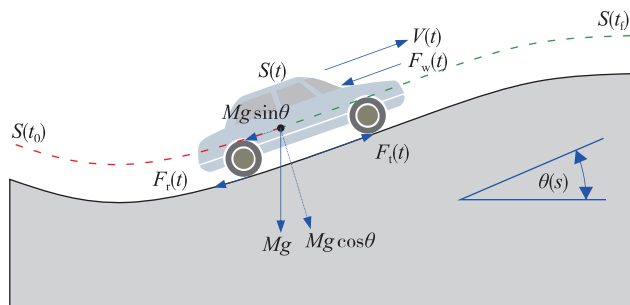


图 5 车速优化问题示意图

通过的某一路段为优化范围,以驱动轮的轮胎和路面之间的牵引力为控制变量,以车辆在固定时间内完成行驶任务所消耗的能量为性能指标,构建如下最优控制(Optimal control, OPC)问题^[13, 15, 26-27]:

$$\begin{aligned} \min J[V(t), F_t(t), t] &= H[V(t_f), t_f] + \\ &= \int_{t_0}^{t_f} G[V(t), F_t(t), t] dt \\ \text{s. t. } \dot{V}(t) &= f[V(t), F_t(t), t] \\ C[V(t), F_t(t), t] &\leq 0 \\ E[V(t_f), t_f] &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $V(t)$ 为车速; $H[V(t_f), t_f]$ 为终点性能指标函数; $G[V(t), F_t(t), t] = V(t) F_t(t)$ 为积分性能指标函数; $C[V(t), F_t(t), t] \leq 0$ 为状态变量 $V(t)$ 和控制变量 $F_t(t)$ 的约束条件; $E[V(t_f), t_f] = 0$ 为末端状态约束; $\dot{V}(t) = f[V(t), F_t(t), t]$ 为车辆的纵向动力学方程,

$$\begin{aligned} M \frac{dV}{dt} &= F_t - (F_r + F_g + F_w) = \\ &= F_t - [Mg(f_r \cos \theta + \sin \theta) + \\ &\quad \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V(t) - V_w(t))^2] \end{aligned} \quad (2)$$

式中, M 为车辆总质量; F_r 为车辆滚动阻力; F_g 为车辆爬坡阻力; F_w 为空气阻力; g 为重力系数; f_r 为滚动阻力系数; θ 为道路坡度; ρ 为空气密度; A_f 为车辆有效迎风面面积; C_D 为车辆的空气阻力系数; $V_w(t)$ 为车辆运动方向上的实时风速。当进一步考虑路面坡度随车辆水平行驶距离 S 变化时, $\theta(S)$ 为随水平距离

变化的路面坡度; $\frac{dS}{dt} = V(t)$ 为水平行驶距离与车速的关系,且 $S(t_0) = S_0$, $S(t_f) = S_f$ 。

从上述分析可知，车速优化由车辆的纵向控制实现。Eco-driving 泛指通过优化车辆的纵向控制，实现节能减排的各类措施^[26, 28-29]。文献[26]针对 Eco-driving 最优控制问题，提出了其连续时间模型及离散化方法，避免了非凸项的引入，并给出了该问题的顺序二次规划（Sequential quadratic programming, SQP）求解方法，实现了 7.44% 的能耗优化。文献[28]系统地分析了不同动力系统结构下，Eco-driving 作为最优控制问题的一般公式，具体包括 OPC 问题的目标函数、控制变量及约束条件、状态方程、终端状态约束，以及车辆运行过程中来自交通信号或自身运行状态的各种内部约束。文献[29]从影响因素、控制策略、实施效果等方面对 Eco-driving 的研究现状及进展进行了分析。Eco-driving 适用于各类驾驶场景，包括信号交叉口^[30-31]，巡航^[32-33]等。

根据所适用场景和所采用的数学方法，已有的车速优化决策方法可分为两类，如图 6 所示。

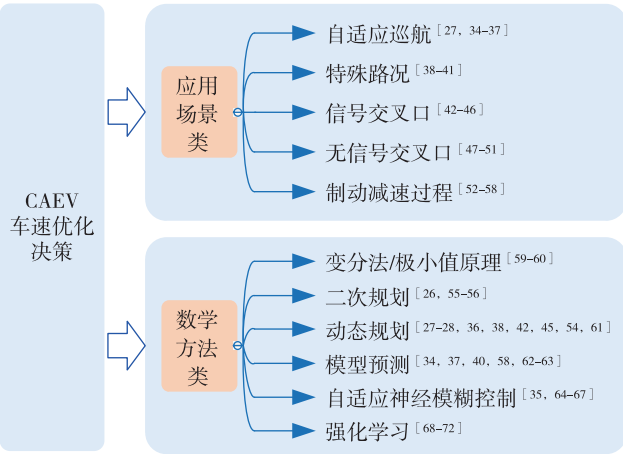


图 6 CAEV 车速优化决策方法分类

2.2 应用于不同场景的车速优化决策方法

根据所提出的 CAEV 车速优化决策方法的适用场景，已有方法可分为自适应巡航（Adaptive cruise control, ACC）[27, 34-37]、特殊路况^[38-41]、信号交叉口^[42-46]、无信号交叉口^[47-51]、制动减速过程^[52-58]五大类。

自适应巡航场景中，车辆通过高级辅助驾驶系统（Advanced driving assistance systems, ADAS）以及 V2X 设备获取关于前后车辆距离、道路地形、限速等信息，通过对车速的优化控制，实现对前车距离以及能耗的优化，其优化目标除能耗外，通常还包括前车距离、舒适性等^[27, 34-35]。例如，文献[27]基于交通信息物理系统获取的动态道路坡度和交通限速信息，构建了基于道路限速分段的电动汽车（Electric vehicle, EV）能量优化问题，在距离域上实现全程优化问题分段滚动优化，并设计了迭代动态规划算法（Iterative dynamic programming, IDP），实现能量最优巡航车速的快速求解。相比恒定速度（Constantspeed, CS）策略能效提升 23.29%，相比常规动态规划方法能效提升 2.72%。

特殊路况通常包括弯曲道路^[38-39]、上下坡道路^[40]、特殊几何特征道路^[41]等，此类研究结合道路的曲率、坡度等特征，通过针对性地构建车速 OPC 问题，从而实现车辆在特殊路况下的能耗优化。例如，文献[38]基于从高精度数字地图中提取的车辆前方道路曲率信息，构建了考虑道路水平曲率的车速 OPC 系统，并采用动态规划算法实现了车速的优化，相比传统比例 - 积分（Proportional integral, PI）控制器，在加速和减速模式下的能耗分别降低 5.46% 和 17.64%；文献[40]针对丘陵地带常见的上下坡道路，通过数字地图获得的前方道路坡度信息，构建了上下坡道路上的车速优化模型，并采用模型预测控制算法实现了问题的求解，相比固定速度模式，不同工况下节能 4.73%~7.04%；相比自动速度模式，不同工况下节能 4.03%~5.70%。文献^[41]结合坡度、曲率等道路几何特征和平均交通速度信息，以车辆能耗和转弯安全性为控制目标，提出了车速预瞄优化控制方法，并针对所设计的特殊几何特征道路进行了仿真。结果表明，所提方法可同时提升能效和车辆安全性，但未定量给出具体数据。

信号交叉口是城市道路中常见的交通场景。在信

号交叉口, 车辆行驶可能被交通信号中断, 当同一路口车辆较多时, 则将在车流中产生冲击波, 导致车辆交通运行于加速 / 减速操作, 从而增加能耗。因此, 结合交通信号的相位时间 (Signal phase and timing, SPaT) 信息、V2V 信息, 通过对车辆队列运行、SPaT 的预测, 构建车速的能耗优化模型, 可一定程度上优化车辆能耗^[42-46]。文献 [42] 首先提出了一种改进的排队车辆队列消散预测方法 (Improved queue discharge prediction, IQDP), 然后构建了分层控制策略, 其中上层采用动态规划获取节能车速曲线的总体趋势, 下层模型预测控制器用于确保安全车距, 实现了 CAEV 在信号交叉口的能耗优化。相比 CS 策略, 该方法在两种运行场景下分别节能 12.48% 和 8.51%。文献 [43] 在构建车速 OPC 模型时, 同时考虑了多个下游信号交叉口的 SPaT 信息和队列信息, 构建了车辆能耗优化的 Eco-MSQ (Eco-driving algorithm for multiple intersections with the consideration of vehicle queues) 算法, 并在 INTEGRATION 软件中, 对一条有四个信号交叉口的主干道和一个由 16 个信号交叉口组成的路网进行了仿真测试, 最高可实现节能 13.8%。

在无信号交叉口, 由于没有交通信号的中断, 车速优化决策的关键是对多台车辆的行驶轨迹进行协同优化控制, 以提升通行效率和车辆能效^[47]。针对无信号交叉口 CAEV 的速度规划问题, 文献 [48] 以最小化车辆能量消耗和通行时间为目标, 通过优化车辆的交叉顺序和速度曲线, 提出了分层集中式协调方法。仿真结果表明, 相较对比方法, 所提方法在同等通行时间下, 实现了节能 21.8%。文献 [49] 针对无信号交叉口通行效率问题, 构建了包含瞬时效率、行车延误等四个指标的奖励函数, 提出了基于 Q 学习模型的强化学习车队轨迹离散控制方法。仿真结果表明, 所提方法可针对不同工况灵活地分配组队指令, 将交叉口的通行能力提升 36.1%。文献 [50] 提出了用于自主交叉口管理的车辆队列双层优化算法, 上层交通

调度模型根据交通实况, 优化车辆通行顺序和时隙; 下层轨迹规划模型根据给定调度信息和耦合约束, 生成节能行驶轨迹。仿真结果表明, 所提方法具有高运行效率以及良好的工况适应性。文献^[51]将连续的交通流离散化为一系列小规模车辆组, 提出了基于协同分组的无信号交叉口控制方法, 将车辆运动分解为分支调整和路口协调两个过程。同时, 提出了具有分叉的协作自适应巡航控制模型, 用于车辆跟踪控制。仿真结果表明, 所提方法可使车辆运行更平稳, 同时节能高达 29%。

制动减速过程中的速度规划是电动汽车能耗优化的关键环节。传统的电动汽车制动控制研究通常聚焦于制动转矩分配和部件控制^[52-53]。智能网联背景下, 电动汽车可通过共享制动意图、前车运动轨迹预测等方式, 进一步通过制动速度规划提升能量回馈比例^[54]。文献^[54]通过共享车辆制动意图, 构建了用于网联电动汽车轨迹规划和跟踪的双层能量优化制动控制方案。其中, 上层采用动态规划算法, 求解具有接近制动意图的能量最优制动问题, 以获取能量最优制动轨迹; 下层将非线性时变车辆纵向动力学转化为线性时变系统, 然后设计了模型预测控制器并采用二次规划算法求解, 在保证制动舒适性和安全性的同时实现了能量最优制动轨迹的跟踪控制。相比 CDBS (Constant deceleration braking strategy) 策略, 两种工况下, 该方法可分别提升制动能量回馈 11.42% 和 3.19%。针对转弯或停车时的减速需求, 文献 [55] 通过对真实车辆测试数据的回归分析, 以最大化减速过程中的能量回馈为目标, 提出了参数化多项式减速模型, 并根据实时剩余时间、距离以及目标速度确定多项式参数, 获得了平滑的最优减速曲线。仿真结果表明, 该方法可提升能量回馈 16% 以上。

2.3 采用不同数学方法的车速优化决策方法

在数学方法层面, 应用于 CAEV 车速优化求解的方法主要有变分法 / 极小值原理^[59-60]、二次规划^[26, 55-56]、动态规划^[27-28, 36, 38, 42, 45, 54, 61]、MPC^{[34,}

37, 40, 58, 62-63]、自适应神经模糊控制[35, 64-67]以及强化学习[68-72]等。

作为求解最优化问题最经典的方法之一,变分法和 Pontryagin 极小值原理在车速优化领域已得到了研究[59-60]。但是变分法只能应用于控制变量连续且不受限制,而且状态变量连续可微的场景;Pontryagin 极小值原理仅提供了最优性的必要条件,限制了它们在实际车速优化场景中的应用[26]。二次规划求解车速优化问题存在的主要不足是限定了目标函数是二次型函数且约束条件是变量的线性不等式[26, 55-56]。

动态规划的基本思想是基于 Richard Bellman 提出的“最优性原理”。首先将系统的运行过程划分为若干个相继的阶段,各阶段都是一个最优化子问题,进而逐段进行决策。多级决策过程的最优策略具有如下性质:无论初始状态和初始决策如何,其余的决策对于由初始决策所形成的状态来说,必定也是一个最优策略[73-74]。采用动态规划求解车速优化问题时,通常采用前向欧拉法对式(1)进行离散化处理,得到离散时间 OPC 问题,即

$$\begin{aligned} \min J[V(k), F_t(k), k] &= H_d[V(N), N] + \\ &\sum_{i=k}^{N-1} G_d[V(i), F_t(i), i] \\ \text{s. t. } V(k+1) &= f_d[V(k), F_t(k), k], \\ k &= 0, 1, \dots, N-1 \\ C_d[V(k), F_t(k), k] &\leq 0, k = 0, 1, \dots, N-1, N \\ E_d[V(N), N] &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

定义值函数

$$\begin{aligned} J^*[V(k), k] &= \min_{F_t(k) \in U} J[F_t(k); V(k), k], \\ k &= 0, 1, \dots, N-1, N \end{aligned} \quad (4)$$

车速优化离散时间 OPC 问题的最优策略满足 Bellman 方程,即

$$J^*[V(N), N] = H_d[V(N), N] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} J^*[V(k), k] &= \min_{F_t(k) \in U} \{H_d[V(N), N] + \\ &J[V(k+1), k+1]\}, \\ k &= 0, 1, \dots, N-2, N-1 \end{aligned} \quad (6)$$

根据式(5),首先可得 $J[V(N), N]$ 然后令 $k = N-1$,代入式(6),求解关于 $F_t(N-1)$ 的函数极值问题,可得 $F_t(N-1)$ 及 $J[V(N-1), N-1]$;继续求解,直至 $k=0$,便可得到完整的 OPC 序列 $F_t(k)$ 和状态序列 $V(k), k=0, \dots, N-1$ 。上述过程可描述为图7所示,图7中实线为状态转移过程,虚线为求解过程。

动态规划方法可求解不连续及有约束 OPC 问题,适用性广泛。文献[36]围绕混合动力汽车的跟车控制与能量管理,提出了基于安全距离的滚动动态规划算法,同时考虑单位步长内电池 SOC 的变化约束,进一步缩小对 SOC 状态搜索空间,解决了存储空间有限和在线计算量大的问题,更有利于车辆的安全控制和实时的能量优化管理。与 Advisor 中的能量管理策略相比,实现了节能 12%。文献[61]基于车辆动力学方程,建立了离散形式的速度规划模型,并基于动态规划算法,详细分析了计算复杂度。进一步,针对动态规划算法计算效率低的问题,提出基于迭代动态规划的新算法来减小搜索域的大小。在减少计算规

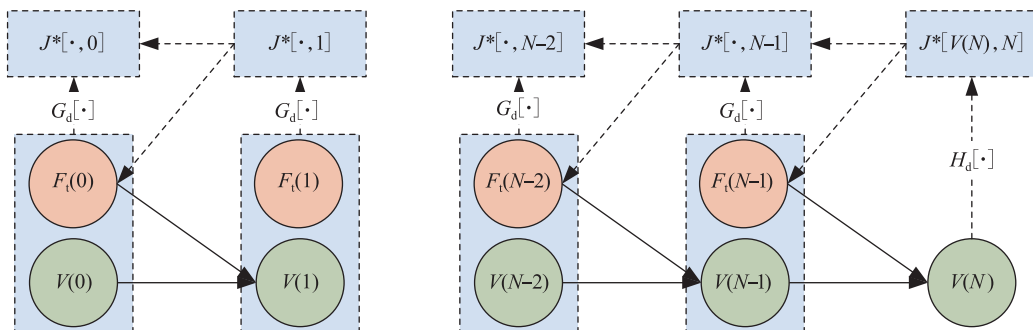


图7 动态规划求解过程示意图

模、提高速度规划效率的同时,实现了车辆实时速度的优化。

动态规划求解车速优化决策问题的主要不足在于无法对连续空间进行精确表示和求解,并且当离散化过程非常精细时,将带来巨大的计算和存储代价,即“维数灾难”^[73-74]。针对该问题,Werbos提出了自适应动态规划(Adaptive dynamic programming, ADP)算法,通过利用值函数的近似(神经网络、多项式、模糊模型等),避免了值函数的大量存储需求,实现了最优控制问题的正向求解^[75]。目前,ADP是最优控制领域的研究热点之一,其值迭代和策略迭代的收敛性均已得到证明^[76-77],并且已经在车辆控制领域得到了应用^[78-82]。典型地,针对跟车过程中的能耗优化和舒适性问题,文献[81]构建了非线性混合整数优化模型,并采用ADP实现了在线换挡和车速优化控制。仿真结果表明,与线性二次控制器相比,所提方法在两种情况下能耗分别降低1.59%和2.32%。

模型预测控制的基本思想是利用已有模型、系统当前状态和未来的控制量去预测系统未来输出,通过滚动求解带约束优化问题来实现控制目的。模型预测控制系统一般包括预测模型、滚动优化和反馈校正三个环节^[74, 83]。具体地,模型预测控制求解车速优化问题如图8所示。

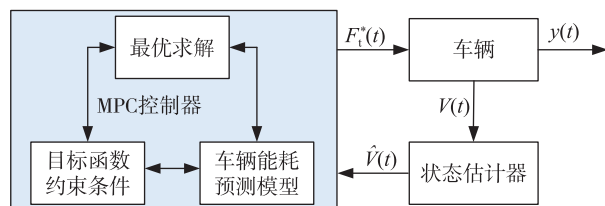


图8 模型预测控制求解车速优化问题示意图

文献[37]利用V2V通信,采用贝叶斯网络预测前车运动,结合车辆运动学模型和电机模型的非线性特征,构建了车辆的能耗优化显式模型预测系统,并在8个典型的循环工况下进行了仿真验证。针对CAEV的安全和节能驾驶,文献[62]将最小车距和最大限速定义为约束条件,定义了一个最小化车辆能

耗的MPC问题,并建立了可行的终端状态范围以确保解析解存在。

模型预测控制求解车速优化问题的主要不足在于其求解精度取决于预测模型精度,并且过于复杂的模型会降低运算速度^[74, 84]。针对该问题,提出了数据驱动的迭代学习模型预测控制(Iterative learning MPC, ILMP),其采用离线数据进行系统建模,其中迭代学习控制根据历史数据更新全区间控制率,MPC通过预测未来系统状态和输出进行滚动时域优化并获得当前时刻控制信号。数据驱动的ILMP既具有迭代学习控制的学习能力,同时提高了闭环时域跟踪性能^[85-86]。得益于数据驱动ILMP的上述优点,该方法已在车辆控制领域得到初步应用^[86]。此外,平行控制以数据为驱动,采用人工系统为建模工具,利用计算实验对系统行为进行分析和评估,构造实际系统与人工系统的并行互动,实现了虚实系统互动^[74, 87]。文献[87]介绍了基于CPSS(Cyberphysical-social systems)和ACP(Artificial societies, computational experiments, parallel execution)的智能机器系统,然后在网络-物理-社会空间中,基于云CPSS框架提出了平行驾驶概念,为复杂环境中的车辆控制提供了新思路。

自适应神经模糊控制是一种将模糊逻辑和神经网络有机结合的新型模糊推理系统,最早由Jang提出^[88]。通过将神经网络与模糊推理有机结合,既发挥了神经网络的自学习和自适应能力,同时还具备了模糊逻辑的逻辑推理能力。

文献[35]提出了基于自适应神经模糊控制的车辆自适应巡航控制系统,包括前车状态估计和后车控制器两大部分。首先,系统通过雷达传感器获取前车的位置、速度、加速度等信息,并通过V2V通信将前车的控制力传递给后车;然后,利用Takagi-Sugeno模糊模型对前车模型进行估计,得到前车的预测状态序列,后车基于该数据进行行车距离和经济性的自适应神经模糊控制,在保证驾驶舒适性和安全

性的同时,与线性二次型调节器(Linear quadratic regulator, LQR)和约束 LQR(Constrained LQR, CLQR)相比,分别可节能 7.21% 和 7.29%。

自适应神经模糊控制的主要不足在于车辆运行场景多变,需要大量的数据样本对模糊神经网络进行离线训练。当样本数量不足时,将影响控制器性能。

强化学习是一种基于马尔科夫决策过程的机器学习算法,其原理是智能体在完成某项任务时,通过动作与环境进行交互,产生新的状态,同时从环境得到回报。如此循环,在环境给予的奖励或惩罚的刺激下,强化学习算法在不断探索环境的过程中,利用产生的数据迭代优化其行为策略,进而产生能获得最大利益的习惯性行为^[89-90]。

强化学习的工作原理如图 9 所示。智能体为完成某项控制任务,根据环境的当前状态 s_t 和当前奖励 r_t 输出当前动作 a_t 与环境进行交互。当动作作用于环境后,环境产生新的状态 s_{t+1} 和奖励 r_{t+1} 。在智能体和环境不断的循环交互过程中,强化学习算法利用交互过程中的数据来调整策略 π ,以确保系统获得的累计回报最大化。策略 π 是指智能体根据环境状态 s_t 到输出动作 a_t 的映射过程。强化学习的目标就是得到一个策略函数,在每个时刻根据观测到的状态做出决策^[90]。

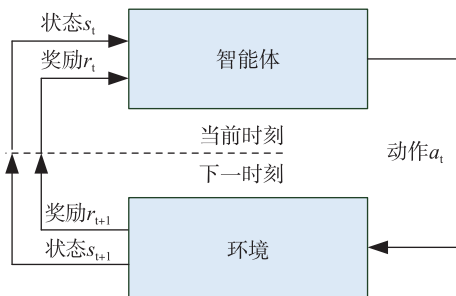


图 9 强化学习原理

强化学习与人类的学习过程类似,可根据奖励机制实现不确定场景下的自主行为优化决策。文献^[69]针对跟车控制,以领航车速度、领航车加速度、两车间距、跟随车速度为状态变量,以跟随车加速度为动作变量,构建了基于深度强化学习的智能跟车控制系统,

领航车与跟随车的经济性相比动态规划的方法分别改善了 12.08% 和 13.05%。文献^[70]基于云控系统的资源平台获取目标路段的经纬度、海拔、气象等信息,提出了基于高精度地图驱动的深度强化学习型混合动力汽车集成控制方法,利用深度确定性策略梯度(Deep deterministic policy gradient, DDPG)算法控制整车层的加速度与转向角,利用深度值 Q 网络(Deep Q-network, DQN)算法控制动力系统层的 CVT(Continuously variable transmission)传动比与功率,实现了 14 个状态变量和 4 个控制变量条件下的高效运行及经济性提升。

在车速优化决策领域,强化学习方法的主要不足在于实际道路、交通场景复杂,并且奖励函数的设置需考虑能耗、安全性、交通法规、舒适性、人类驾驶习惯等多重因素,价值网络和策略网络的训练过程需要多场景下的海量样本支撑。

表 1 对不同车速优化决策方法的优缺点进行了总结。

3 驱动 / 制动转矩优化控制

3.1 驱动 / 制动转矩优化控制问题概述

车速优化决策环节解决了车轮牵引力 $F_t(t)$ 至 $V(t)$ 车速环节的能量优化。电机驱动 / 制动转矩优化控制环节所解决的核心问题是从电机输出转矩和转速 (T_m, R_m) 至车轮牵引力 $F_t(t)$ 过程中的能耗优化。由于电机制动是驱动的逆过程,因此以驱动过程为例进行分析。

针对目前广泛使用的单挡传动前轮驱动电动汽车,驱动转矩控制环节的能量转换过程如图 10 所示。电机输出转矩和转速 (T_m, R_m) 经由传动装置(变速箱)和末端传动齿轮(差速器)构成的传动机构后,车轮获得的转矩和转速为 (T_t, R_t) , 其中, $(T_t = T_m i_g i_0 \eta_g \eta_0)$, $R_t = R_m / (i_g i_0)$; 受与路面附着力的影响, T_t 转换成牵引力 F_t 的过程将受最大牵引力限制,车轮可获得的最大牵引力为 $F_{t\max} = P\mu(s)$, P 为驱动轮铅垂方向载荷, $\mu(s)$ 为路面附着系数,它是滑移率 s 的函数

表 1 车速优化决策方法优缺点总结

方法	优点	缺点
变分法	有解析解、计算开销较小	只能应用于控制变量连续且不受限制，而且状态变量连续可微的场景
Pontryagin 极小值原理	可用于控制变量分段连续且受限情况	仅提供了最优性的必要条件
二次规划	收敛速度快，求解效率高	目标函数必须是二次型函数，并且约束条件是变量的线性不等式
动态规划	可求解不连续及有约束 OPC 问题，适用性广泛	无法对连续空间进行精确表示和求解，存在“维数灾难”
MPC	可有效地克服过程的不确定性、非线性，鲁棒性强	求解精度取决于预测模型精度，过于复杂的模型会降低运算速度
自适应神经模糊控制	兼具自适应性和逻辑推理能力	需要大量的数据样本对模糊神经网络进行离线训练
强化学习	与人类的学习过程类似，可根据奖励机制实现不确定场景下的自主行为优化决策	奖励函数的设置需考虑多重因素，价值网络和策略网络的训练过程需要多场景下的海量样本支撑

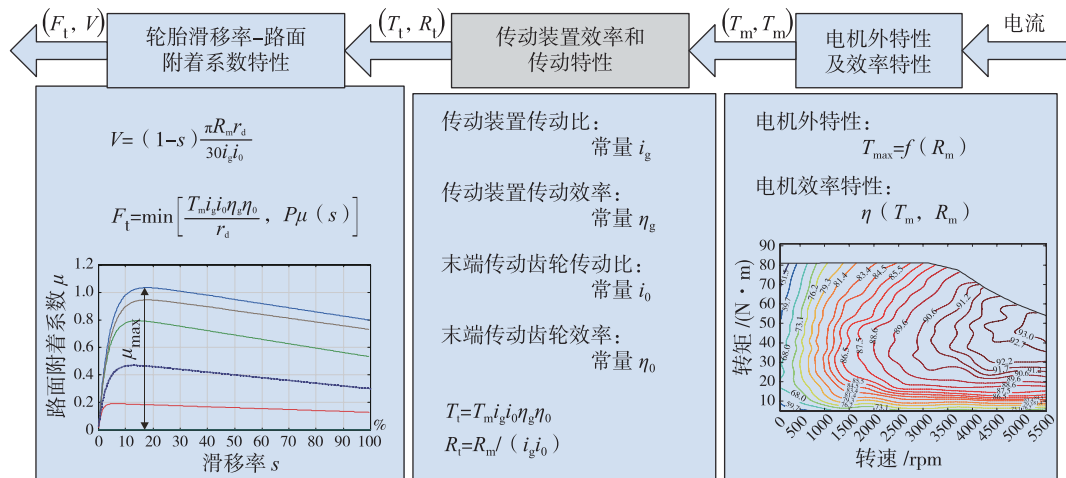


图 10 电机输出转矩至车轮牵引力环节的能量转换过程示意图

^[91]。当 T_t 大于 $F_{t \max}$ 时，将导致驱动轮打滑，进而影响车辆能耗。车轮获得的实际牵引力为

$$F_t = \min \left[\frac{T_m i_g i_0 \eta_0}{r_d}, P \mu(s) \right] \quad (7)$$

此时车速为

$$V = (1-s) \frac{\pi R_m r_d}{30 i_g i_0} \quad (8)$$

可见，通过实时识别路面条件以及整车质量估计，确定当前最优滑移率 s ，进一步根据路面附着系数 $\mu(s)$ 和车辆驱动轮铅垂方向的载荷 P 获取车辆的实时最大牵引力 $F_{t \max}$ ，通过优化电机输出转矩 T_m 避免车轮打滑，是实现电动汽车能耗优化的可行途径。

3.2 驱动转矩优化控制方法

通过优化驱动转矩实现电动汽车的节能行驶已经

得到了研究人员的广泛关注。针对驱动轮的纵向控制,文献[92]提出了基于路面附着系数估计器和附着系数梯度控制器的驱动转矩控制系统,该方法同时采用了模糊控制器和滑模控制器两种附着系数梯度控制器,并通过仿真和实验验证了所提方法对道路特性的良好适应性。为实现将车轮滑移率保持在最优附近,以最大化利用路面附着率,文献[93]构建了闭环降阶观测器,根据车轮轮速和车轮驱动转矩来估计路面附着力,实现了不确定轮胎-路面条件下,无需滑移率信息的最佳工作点在线搜索方法。文献[94]以车速和前后轮速度为控制变量,构造了由车辆行驶特性、车轮旋转特性、路面附着特性在内的车辆行驶动力学线性模型,并设计了采用模型预测控制器的纯电动汽车转矩需求控制方法。实验结果表明,所提方法在城市工况和高速公路下能效分别提升了1.81%和1.67%。文献[95]根据车载声学道路类型估计单元(Acoustic road-type estimation, ARTE)获取道路类型参数,通过查询摩擦系数-滑移率表格确定电机输出转矩,降低了车辆打滑,提高了能效。

3.3 制动转矩优化控制方法

相比驱动转矩的优化控制,制动环节既需要考虑滑移率及路面附着系数的限制,同时还要考

虑储能装置功率状态(State of power, SOP)、前后轴上的制动力分布、制动稳定性、制动性能等约束条件^[96]。

在全电制动方面,以提高效率和安全性为目标,文献[96]提出了一种全电再生制动方案。该方案通过知识库在线捕获滑移率的稳定区-非稳定区过渡点,以确定未知轮胎-路面条件下的最大附着力,并综合驾驶员制动需求设计了制动转矩参考值,实现了制动能量深度回收。针对没有传统防抱死(Antiskid brake system, ABS)系统的电动汽车,文献[97]设计了车辆动力学模型、滑移率模型以及车速观测器,通过迭代学习进行电机制动转矩优化,由电机制动实现ABS,将轮胎滑移率控制在峰值路面附着系数。围绕制动状态下的最优滑移率估计,文献[98]提出了由纵向制动力滑模观测器和滑移率辨识器构成的多道路工况下的最优滑移率估计方法,构建了用以描述滑移率与路面附着系数之间关系的路面滑移图,设计了基于模型预测控制的制动转矩控制器以跟踪最优滑移率,实现了高达81.26%的能量回馈率。

在机电复合制动方面,针对由摩擦制动器和电机制动构成的复合制动系统,文献[99]提出了具有冗余制动执行器的电动汽车预测制动控制算法,能够同

时优化能量回馈率和抑制车轮打滑,同时考虑了车辆的动力学约束和电机约束。在ROMO原型车上的实验结果表明,所提方法可将转矩控制误差降低60,同时,在干燥的沥青路面上和低附着系数路面,所提方法平均可增加减速度5%~10%。针对由液压制动和电机制动构成的复合制动系统,文献[100]设计了ABS滑模控制器,通过连续调节液压制动转矩,将滑移率保持在最佳范围,同时基于滑移率、SOC和电机速度,应用模糊逻辑控制策略动态调整再生制动转矩,实现了再生制动与ABS的协同控制。针对由气动制动和电机制动构成的复合制动系统,文献^[101]提出了基于滑移率调整的积分滑模控制器(Integral sliding mode control, ISMC)。硬件在环实验表明,所提方法将滑移率跟踪均方根误差降低了12.13%~72%。针对液压/电机复合制动系统,以提高车辆在跟车过程中的安全性和能效为目标,文献[102]构建了由动力电池、电机、单档变速器和液压制动系统构成的智能电动汽车耦合非线性动力学模型,设计了自适应模糊滑模控制器,以获取车辆的纵向加速度。同时,该方法设计了牵引力控制和制动控制系统,与固定比例制动能量回馈策略相比,能量回馈率提升了23.33%。

通过制动转矩优化控制以实现

能耗优化一直是电动汽车领域的研究热点, 相关研究还包括再生制动的快速响应特性^[101]、紧急制动情况下的能量回馈优化^[103]、低速下的能量回馈优化^[104]等。

车辆驱动/制动转矩优化控制的难点在于: 1) 轮胎-路面动力学具有高度非线性和不确定性; 2) 难以精准获得车速、整车质量、滑移率和路面附着系数等参数; 3) 制动转矩优化控制受限于电机的扭矩限制、动力电池 SOP、制动稳定性、制动性能等复杂约束条件。

相比于传统的电动汽车, CAEV 配置有 GNSS+INS 组合导航, 以及车身姿态传感器等复杂感知设备, 可通过精确估计车速、整车质量、滑移率和路面附着系数等参数^[105], 实现复杂约束条件下的制动约束条件分析, 进而通过优化电机驱动/制动转矩, 实现“电机转矩-牵引力”环节的能耗优化。

3.4 多挡传动/CVT 及四轮驱动 CAEV 的转矩优化

如图 10 所示, 尽管在整个工作区间内, 电机具有较高的工作效率, 采用单挡传动装置即可确保较高的整车效率。但采用多挡传动装置或者 CVT 可实现电机转速与车速的解耦, 使电机工作于高效率区域, 进而提升车辆运行效率。同时还可改善车辆的动力性能和高 速 NVH (Noise, vibration, and harshness)^[106-107]。

多挡传动/CVTEV 能耗优化的研究主要集中在换挡策略优化^[106-110]。针对纯电动汽车, 文献^[108]设计了新型双速行星手自一体变速器 (Planetary automated manual transmission, PAMT), 开发了由电机、双速 PAMT、同步器等构成的电气化动力总成动力学模型, 提出了五阶段换挡流程, 并设计了三次多项式 (Third-degree polynomial, TDP)、五次多项式 (Fifth-degree polynomial, FDP) 和七次多项式 (Seventh-degree polynomial, SDP) 转矩轨迹。文献^[109]针对双电机和多传动比 EV 动力总成, 提出了结合全局搜索方法和非支配排序遗传算法-II (Non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II) 的双环优化算法对电机参数和传动比进行了优化, 并设计了转矩分配和换挡策略, 将车辆电耗降低了 4.82%~5.08%。文献^[110]针对电动汽车双速传动系统, 依据车速范围、车辆加速度和道路坡度, 以能耗优化为目标, 设计了两种换挡策略, 不同运行场景下实现了 4.0%~7.5% 的能耗优化。

分布式驱动电动汽车通过采用多个轮毂/轮边驱动系统代替传统电动汽车的集中驱动系统, 具有传动链短、结构紧凑、底盘布置方便等优点。同时, 分布式电驱动系统可独立实现转矩快速、

精确调节, 便于更精准地估计路面和车辆状态, 更精准地进行驱动和制动力矩的分配, 可显著提升车辆动力性能、主动安全性能和能效^[111]。

四轮驱动 (Four-wheels drive, 4WD) 电动汽车是典型的分布式驱动电动汽车, 其四个车轮的输出转矩均可独立控制, 可通过优化各驱动轮的转矩分配, 实现能耗优化^[112-116]。文献^[113]提出了基于 Pontryagin 极小值原理的前后电机功率分配方法, 并通过仿真验证了所提方法在市区工况和高速公路工况下可分别实现能耗优化 1.81% 和 13.36%。文献^[114]针对 4WD 方程式赛车, 设计了最优扭矩分配的约束多目标模型, 通过仿真验证了所提方法在效率、转弯速度和稳定性方面的有效性, 实现了约 5% 的能耗优化。文献^[115]针对 4WD 电动汽车的能耗优化转矩分配问题, 提出了非线性模型预测控制器 (Nonlinear model predictive control, NMPC), 并通过模糊逻辑控制器对 NMPC 成本函数的权重进行自适应调整, 实现了稳定的转弯性能和更低的能耗。为提升 4WD 电动汽车制动过程中的回馈率并减少轮胎损耗, 文献^[116]提出了基于多项式拟合求解的制动转矩分配方案, 在高速和低速驾驶循环中, 分别提高能效 4.3% 和 1.5%。

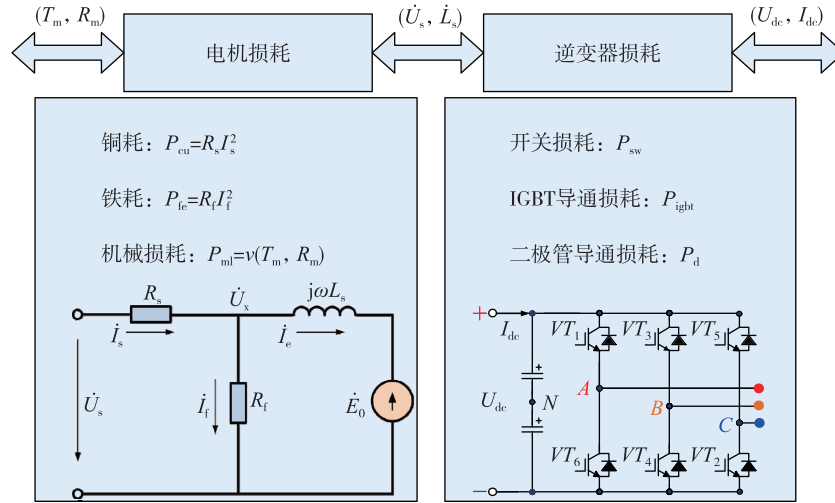


图 11 直流电能至电机输出转矩环节的能量转换过程示意图

4 电流矢量优化控制

4.1 电流矢量优化控制问题概述

电流矢量优化控制环节所解决的核心问题是从动力电池端输出直流电能 (U_{dc}, I_{dc}) 至电机输出转矩 (T_m, R_m)，或者上述逆过程中的能耗优化。

如图 11 所示，该过程中，直流电能 (U_{dc}, I_{dc}) 经逆变器转换为特定的电压电流矢量 ($\dot{U}_s, \dot{I}_s$)，驱动电机运行输出转矩 (T_m, R_m)。该过程中的能量损耗主要由逆变器损耗和电机损耗两部分构成。其中，逆变器损耗主要由绝缘栅双极晶体管 (Insulated gate bipolar transistor, IGBT) 开关损耗 P_{sw} 、IGBT 导通损耗 P_{igbt} 和续流二极管导通损耗 P_d 三部分构成；电机损耗主要由铜耗、铁耗、机械损耗和杂散损耗四部分构成^[117]。

在逆变器损耗环节，IGBT 开关损耗 P_{sw} 主要由系统开关频率、直流母线电压 U_{dc} 、流经 IGBT 的电流以及器件的开关特性决定；IGBT 导通损耗 P_{igbt} 和续流二极管导通损耗 P_d 主要由器件的集电极-发射极间饱和压降 V_{ceo} 、导通压降 V_{df} 、调制度、电流超前角 γ 等因素决定。对于逆变器环节，主要的能耗优化潜力在于设计环节，例如选用开关特性良好、导通特性

良好的碳化硅金属半导体氧化物场效应管 (SiC metal oxide semiconductor field-effect transistor, SiC-MOSFET) 器件等。

在电机损耗环节，只有铜耗和铁耗为可优化损耗，可分别描述为

$$P_{cu} = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2) = \frac{3}{2} R_s \left[\left(i_{ed} - \frac{\omega_r L_{sq} i_{eq}}{R_f} \right)^2 + \left(i_{eq} + \frac{\omega_r (\psi_f + L_{sd} i_{ed})}{R_f} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$P_{fe} = \frac{3}{2} R_f (i_{fd}^2 + i_{fq}^2) = \frac{3}{2} \frac{\omega_r^2}{R_f} \left[(\psi_f + L_{sd} i_{ed})^2 + (L_{sq} i_{eq})^2 \right] \quad (10)$$

式中， R_s 和 R_f 分别为定子电阻和等效铁损电阻； i_d 和 i_q 分别为 $\dot{I}_s$ 的直轴和交轴分量； i_{ed} 和 i_{eq} 分别为 i_d 和 i_q 的转矩分量； i_{fd} 和 i_{fq} 分别为 i_d 和 i_q 的铁损支路分量； ψ_f 为气隙磁通； L_{sd} 和 L_{sq} 分别为直轴和交轴电感； ω_r 为电机角速度，且 $\omega_r = \pi R_m / 30$ 。根据永磁同步电机的转矩方程，得到

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_{cq} \left[\psi_f + (L_{sd} - L_{sq}) i_{cd} \right] \quad (11)$$

式中, T_e 为电磁转矩, 且 $T_e = T_m + T_{ml}$, T_{ml} 为机械损失转矩。将 i_{cq} 代入式 (9) 和式 (10), 分别可得

$$P_{cu} = \frac{3}{2} R_s \left[\left(i_{cd} - \frac{\omega_r L_{sq} T_e}{1.5 R_f p_n [\psi_f + (L_{sd} - L_{sq}) i_{cd}]} \right)^2 + \left(\frac{T_e}{1.5 p_n [\psi_f + (L_{sd} - L_{sq}) i_{cd}]} + \frac{\omega_r (\psi_f + L_{sd} i_{cd})}{R_f} \right)^2 \right] \quad (12)$$

$$P_{fe} = \frac{3}{2} \frac{\omega_r^2}{R_f} \left[(\psi_f + L_{sd} i_{cd})^2 + \left(\frac{L_{sq} T_e}{1.5 p_n [\psi_f + (L_{sd} - L_{sq}) i_{cd}]} \right)^2 \right] \quad (13)$$

由式 (12) 和式 (13) 可知, 当电机运行在特定运行工况 ω_r 和 T_e 时, P_{cu} 和 P_{fe} 均为 i_{cd} 的函数。欲实现损耗最小控制, 需满足

$$\frac{\partial (P_{cu} + P_{fe})}{\partial i_{cd}} = 0 \quad (14)$$

由式 (14) 可知, 永磁同步电机损耗最小控制的核心问题是确定最优 i_{cd} , 使 i_{cd} 最小化。由于 i_{cd} 为

i_d 的转矩分量, i_d 又为电流矢量 $\vec{I}_s$ 的直轴分量, 且 $i_d = -I_s \sin \gamma$, 因此由直流电能 (U_{dc}, I_{dc}) 至电机输出转矩 (T_m, R_m) 过程的能耗优化问题可简化为电流矢量优化控制, 如图 12 所示。

4.2 电流矢量优化控制方法

典型的永磁同步电机 (Permanent magnet synchronous motor, PMSM) 电流矢量优化控制方法是最大转矩/电流比控制 (Maximum torque per ampere, MTPA) [118-128]。该控制策略在输出电磁转矩一定的情况下, 通过调整分配直轴电流 i_d 和交轴电流 i_q 的大小, 使得定子电流矢量 $\vec{I}_s$ 的幅值最小, 进而使 $\sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ 最小, 由式 (9) 电机铜损会相应减小, 达到降低铜耗提高电机运行效率的目的。

文献 [129] 对已有的 MTPA 电机效率优化方法进行了综述分析, 并将其分为在线方法和离线方法两大类。在线方法通过采用不同的算法来跟踪电机参数的变化, 其核心在于电机参数的在线估计 [120-121], 以及最优问题的实时求解 [130-131]。离线方法通过在开发和调试阶段, 根据运行特性以及已知参数进行控制策略的优化设计, 在运行阶段直接执行预置策略, 具体可分为解析法 [132-133]、简化 MTPA [134-135]、查表法 [136-137] 等。三类离线 MTPA 方法的优缺点如表 2 所示。

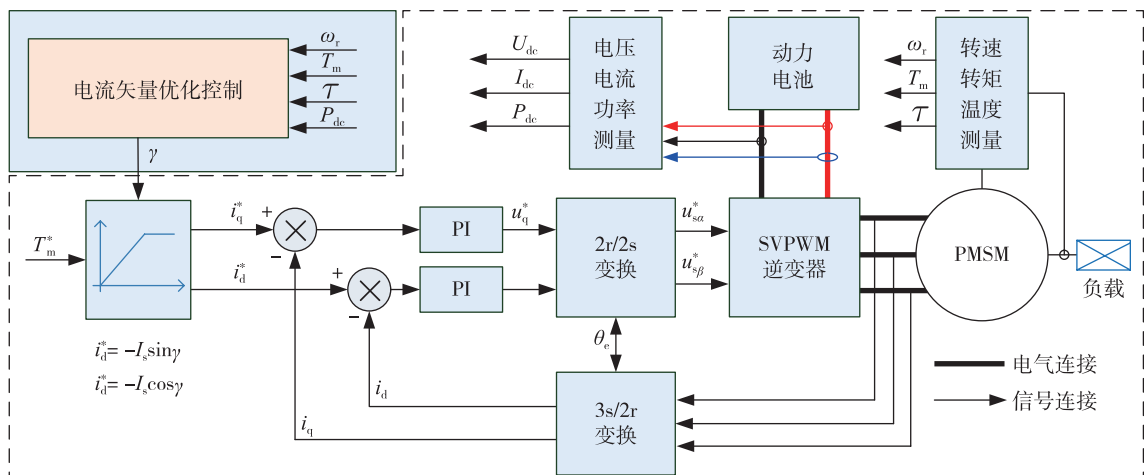


图 12 永磁同步电机电流矢量优化控制示意图

表 2 三类离线 MTPA 方法的优缺点

方法	优点	缺点
解析法	原理简单，易于实现	控制精度易受电机与数变化影响
简化 MTPA	控制复杂度低	控制精度随着简化而降低
查表法	避免了复杂运算，降低了硬件负担	需要提前做大量实验以建立控制表格，普适性差

MTPA 方法的主要不足在于其仅考虑了电机的铜损，没有考虑铁损。目前，同时优化永磁同步电机铜损、铁损的研究方法，一般称之为最大效率 (Maximum efficiency, ME) 控制。已有的 ME 控制方法总体上可分为基于模型的方法^[138-141]、基于搜索的方法^[142-144]以及混合方法^[145]三大类。

基于模型的方法的总体思路是通过构建包含铜损和铁损在内的 PMSM 效率模型，然后根据损耗模型采用相应的优化控制方法，推导出不同运行状态下的最优电流矢量。该方法理论上可实现全局最优，在减小转矩波动、改善瞬态响应等方面具有较大优势，但是对电机参数较敏感^[138]。目前，部分基于模型的 ME 控制考虑了逆变器损耗^[138-139]、磁链饱和与交叉耦合^[140]、机械参数的不确定性^[141]等因素，进一步提升了控制效果。例如，综合考虑铁损、磁链饱和与交叉耦合效应，文献[140]建立了 PMSM 的全阶效率模型，提出了简化的铁损分析方法，通过优化电流矢量实现了铜损和铁损的同时优化。与

$i_d=0$ 方法相比，在 60% 负载条件下，该方法将效率由 91.6% 提升至 92.6%；在额定负载下，该方法将效率由 91.5% 提升至 92.3%。文献[141]将基于能效损失模型的控制器集成在非线性控制器中，并对电机参数进行了在线估计。相比传统的 PI 控制器或非线性控制器，所提方法将电机的综合能效提升了 3%。

基于搜索的方法的总体思路是在确保电机输出转速、转矩不变的前提下，通过在线调整控制变量，寻找输入功率最小的运行点，以实现系统效率的最优化^[142-1414]，该方法不受电机参数变化的影响，但收敛速度慢，并且容易引起转矩和转速的脉动，甚至可能会导致系统振荡^[142]。文献[142]在分析“搜索控制”和“损失模型控制”两类方法的基础上，建立了考虑铁损的新型动态模型，并提出二分搜索算法在线查找最优电流矢量，将电机的运行效率提升了 3.5%。文献[143]构建了考虑温升、磁饱和、交叉耦合效应和逆变器非线性 PMSM 效率模型，并基于该模型

提出了具有离散搜索空间的梯度下降搜索算法，实现了最优电流矢量的快速搜索。实验结果表明，与 MTPA 方法相比，即使在低速下，该方法也可将驱动系统效率提高 1.1%。文献[144]针对逆变器引起的谐波铁损，提出了基于搜索的电流矢量角优化方法。实验结果表明，相比传统基波铁损优化方法，所提方法在 25% 负载转矩、325r/min 转速下，可提升 1.8% 的驱动效率。

混合方法本质上是上述两种方法的结合，它通过建立 PMSM 系统的损耗模型，采用在线求解，或者在线搜索的方式确定最优电流矢量^[145]。理论上，混合方法可实现全局最优，并且可根据电机参数的变化进行动态调整，但其主要不足在于计算复杂度高，通常难以在实车中运行。

三类 ME 方法的优缺点如表 3 所示。

电流矢量优化控制的难点在于：1) PMSM 的铁损、铜损受磁链饱和、磁链交叉耦合和电机温度等因素的影响，具有较强的时变和不确定性特征，同时受逆

表 3 三类 ME 方法的优缺点

方法	优点	缺点
基于模型的方法	考发了铜轮和铁托，理论上可以实现最大效率控制	对电机参数十分敏感，参数变化后持续控制效果
基于搜索的方法	不受电机参数变化影响，鲁棒性强	收敛速度较慢，容易导致转矩、转速脉动，甚至引起系统振荡
混合方法	理论上可实现全局最优，并且可根据电机参数的变化动态调整	计算复杂度较高，在实际电机控制中难以实现运行

变器输出电流谐波的影响，会产生额外的谐波损耗；2）车辆运行工况多变，电机的转速和负载通常需要在较宽的转速和转矩范围内快速动态调整，再加上车载储能系统的电压也存在一定的波动范围，导致电流矢量受系统电流极限圆、电压极限椭圆等约束条件的限制；3）铁损及最优电流矢量的计算复杂，需要较大的计算量，电流矢量优化控制方法通常难以根据系统最新状态以及实时参数进行动态在线优化求解。

相比于传统的电动汽车，CAEV 通常可依托强大的计算能力和实时网联能力，采用神经网络等具有自适应性和自学习能力的算法，构建基于数据驱动的 PMSM 驱动系统最优电流矢量角控制系统，实现多工况下电流矢量角的动态自适应调节，进而实现“直流电能—电机转矩”环节的能耗优化。

5 总结与展望

CAEV 的节能潜力已得到广泛的关注，相关研究处于探索阶段。

目前，主要的研究具有如下特征：

1）在决策层，已针对特定的路况、交通场景构造了车速优化方法，一定程度上实现了“牵引力—车速”环节的能耗优化，并且部分研究已经考虑到电机的稳态效率的影响^[27, 42, 60]。今后仍需进一步对来自交通信号灯、临近车辆的时间域、空间域等外部约束，以及电机控制器电压/电流极限约束、电机最大制动/驱动转矩约束、动力电池 SOC 和 SOP 约束等内部约束条件综合考虑，实现不依赖于特定交通场景的车速节能优化，以提升算法的实用性。

2）在控制层，已通过最优滑移率控制等方法，一定程度上通过电机转矩的优化实现了“转矩—牵引力”环节的能耗优化，并且部分研究已经考虑到制动力矩控制对制动稳定性的影响^[99-100]。今后仍需进一步发挥 CAEV 感知设备的高精度状态估计能力，进而结合轮胎—路面动力学的非线性、时变性，实现不依赖于特定路况的最优转矩实时控制。

3）在执行层，已通过构建 PMSM 的效率模型，一定程度上通过电流矢量角的优化实现了“电流矢量—转矩”环节的优化，并且部分研究已经考虑到逆变器损耗^[138-139]、铜损及铁损^[140]。今后仍需进一步综合分析车辆在复杂运行工况下，动力电池输出电压、电流极限圆、电压极限椭圆的实时约束，实现时变工况下的电流矢量角优化，提升算法的实时性和优化精度。

结合现有研究，对未来 CAEV 节能优化领域的发展趋势作如下展望。

1）CAEV 整车综合节能优化。尽管电驱动系统电能消耗占比最高，节能潜力最大，但动力电池热管理系统、空调系统的能耗对车辆续航里程的影响非常大，尤其在寒冷地区。CAEV 可通过 V2C 从云端获取气象信息，综合用户驾驶习惯、出行规律，通过揭示动力电池、电机、电力电子器件、乘员舱等子系统之间的热力学耦合关系，构建一体化协同热管理系统，结合高效制冷、蓄

热、热传导技术，实现整车综合节能优化。

2) 多车协同节能优化控制。交通运输领域碳达峰、碳中和目标对交通运输系统的综合运行能效提出了新要求，探索多车协同节能优化机理，通过 V2V 实时通信的协调以及 V2I 道路综合运行态势的引导，以综合能效、通行效率、安全性、舒适性为目标函数，考虑道路几何约束、安全性约束和交通法规约束，构建多智能体协同多目标优化模型，通

过对道路网多 CAEV 时空运动轨迹的协同控制，使车辆的运行更加快捷高效，进而提升道路交通安全性、运行效率和综合能效。

3) V2G (Vehicle to grid) 深度融合节能优化。大规模电动汽车的接入，既对电力系统的运行和规划带来了严峻挑战，也给电网乃至能源互联网的发展创造了机遇，一方面，大规模电动汽车接入电网会带来随机负荷和谐波污染的增加，为电网运行优化调度控制、配电网规划与运行增

加难度；另一方面，通过 V2G 互动，电动汽车可作为分布式储能资源，为电网提供削峰填谷、调频等服务，可有效促进新能源本地消纳，增强电网能量管理的灵活性和稳定性。依托大规模 CAEV 与电网、能源网的双向信息、电能交互，可通过优化 CAEV 接入电网的时空分布、参与 V2G 互动的瞬时功率，实现 CAEV 的 V2G。深度融合优化，提升全生命周期能效。○

来源：自动化学报

作者简介



申永鹏 郑州轻工业大学电气信息工程学院副教授。2015 年获湖南大学博士学位。主要研究方向为智能网联电动汽车节能控制，新能源汽车储能与电驱动系统控制与优化。本文通信作者。



袁小芳 湖南大学电气与工程学院教授。2008 年获湖南大学博士学位。主要研究方向为智能网联电动汽车路径规划与控制。



赵素娜 郑州轻工业大学电气信息工程学院讲师。2017 年获华南理工大学控制理论与控制工程专业博士学位。主要研究方向为脑控机器人，移动机器人运动控制。



孟步敏 湘潭大学自动化与电子信息学院副教授。2018 年获湖南大学博士学位。主要研究方向为电动车辆智能化与网联化技术。



王耀南 中国工程院院士，湖南大学电气与信息工程学院教授。1995 年获湖南大学博士学位。主要研究方向为机器人学，智能控制和图像处理。

磁驱动微型机器人的智能控制发展现状

文 / 徐天添 黄晨阳 刘佳 徐艳花 赖证宇 吴新宇

摘要：低强度磁场无线驱动微型机器人可以在狭小空间中运动并完成复杂作业任务，如花向给药、微操作及环境检测等。本文旨在总结磁驱动微型机器人的智能控制发展现状，主要包括智能控制方法在以下方面的应用：从刚性结构到柔性结构的磁驱动微型机器人，从单一运动模式到多种运动模式的磁驱动微型机器人，从开环控制到闭环控制的磁驱动微型机器人，从单个个体到单个群体再到多个个体的磁驱动微型机器人。最后，展望了磁驱动微型机器人的未来发展方向，包括更大空间的磁驱动装置，更多运动模式的微型机器人，软体结构的医疗微型机器人，微型机器人自主导航和多个磁驱动微型机器人的控制。

1 引言 (Introduction)

微型机器人是指尺度在几微米到几毫米、能够自主运动的一类机器人。这一概念自 20 世纪中叶被提出后，经过几十年的沉寂直至 90 年代末才出现大规模的相关研究，至今历经了 20 年的发展，取得了一些初步的成果。微型机器人尺寸小、可远程无线驱动、且能适应狭小环境，因而被广泛应用于生物医疗和微操作等领域^[1-7]。首先，在体内生物医疗方面，无线驱动的微型机器人在微创手术中的应用潜力巨大，例如靶向给药、微创外科手术、热疗等^[8-12]。毫米级和微纳米级的微型机器人甚至可以进入人体的一些部位进行远程微创治疗，包括循环系统、泌尿系统和中枢神

经系统^[13-19]。在体外生物医疗中，微型机器人在与生物细胞的相互作用（如细胞手术的应用）方面前景广阔。无线驱动的微型机器人可以操作细胞或亚细胞规模的对象，实现细胞的移动和分类^[20]。此外，在微操作、微装配以及微小物体的运输与分类等工业任务中，它们也表现出了巨大的潜力^[21-23]。精确、高效的运动控制使微型机器人能够装载多个物体，并将其运送到微流控芯片中的目标位置^[24-26]。最后，它们还被广泛应用于环境任务中，如污染物降解、重金属检测、环境监测和环境修复^[27]。相比于传统的大型机器人，微型机器人的研究与开发面临着重要的挑战。

微型机器人的尺寸小，很难通过自身携带能量源的方式提

供动力。现有的驱动方式可按照驱动机理分为自驱动和外场驱动 2 类。自驱动是指机器人可以从自身所处的流体中获取能量，如自电泳驱动、化学燃料驱动等方式^[28-32]。该类型还包括与细菌、真菌等微生物杂化的微型机器人以及与心肌细胞等生物细胞混合驱动的微型机器人^[33-37]。外场驱动是指只有在外场的作用下机器人才能获取驱动动能。该类型包括了电场驱动^[38]、光场驱动^[39]、声场驱动^[40]、热驱动^[41]、磁场驱动^[42]以及多种混合场驱动^[43]等。其中，由于磁驱动微型机器人的低强度、低频率磁场能够穿透生物组织，且对生物体无害，在生物医学应用中有着非常重要的意义，因此受到国内外学者的广泛关注。

当下，磁驱动微型机器人研究面临的挑战性问题有：外磁场驱动系统产生的磁场工作空间有限，导致机器人的运动范围受限；刚性的微型机器人自由度少，难以实现复杂环境下的多种运动模式；开环控制的方式易受到外界扰动的影响，导致控制精度不高；面向非结构化的环境，单一运动形式的机器人适应性不强；单体

机器人在靶向药物治疗方面，个体载药能力不足。为了在大范围工作空间和非结构化环境中完成靶向的药物治疗和热疗等生物医学任务，磁驱动微型机器人技术出现以下发展趋势：首先，从刚性向柔性发展，充分利用柔性机器人可形变的特点，提高其在狭小环境的通过性；其次，设计闭环的控制方法，克服外界的扰动，

提高自动化操作的精度，特别是在复杂环境中的精细动作能力；再次，设计多模态的运动形式，自主选择运动方式，提高其面向非结构化环境的运动能力；最后，为克服单体载药能力不足的问题，需要进一步发展磁驱动微型机器人的多机器人或是群机器人技术。

总结以上讨论的磁驱动微型机器人四大发展趋势，如图 1 所示。

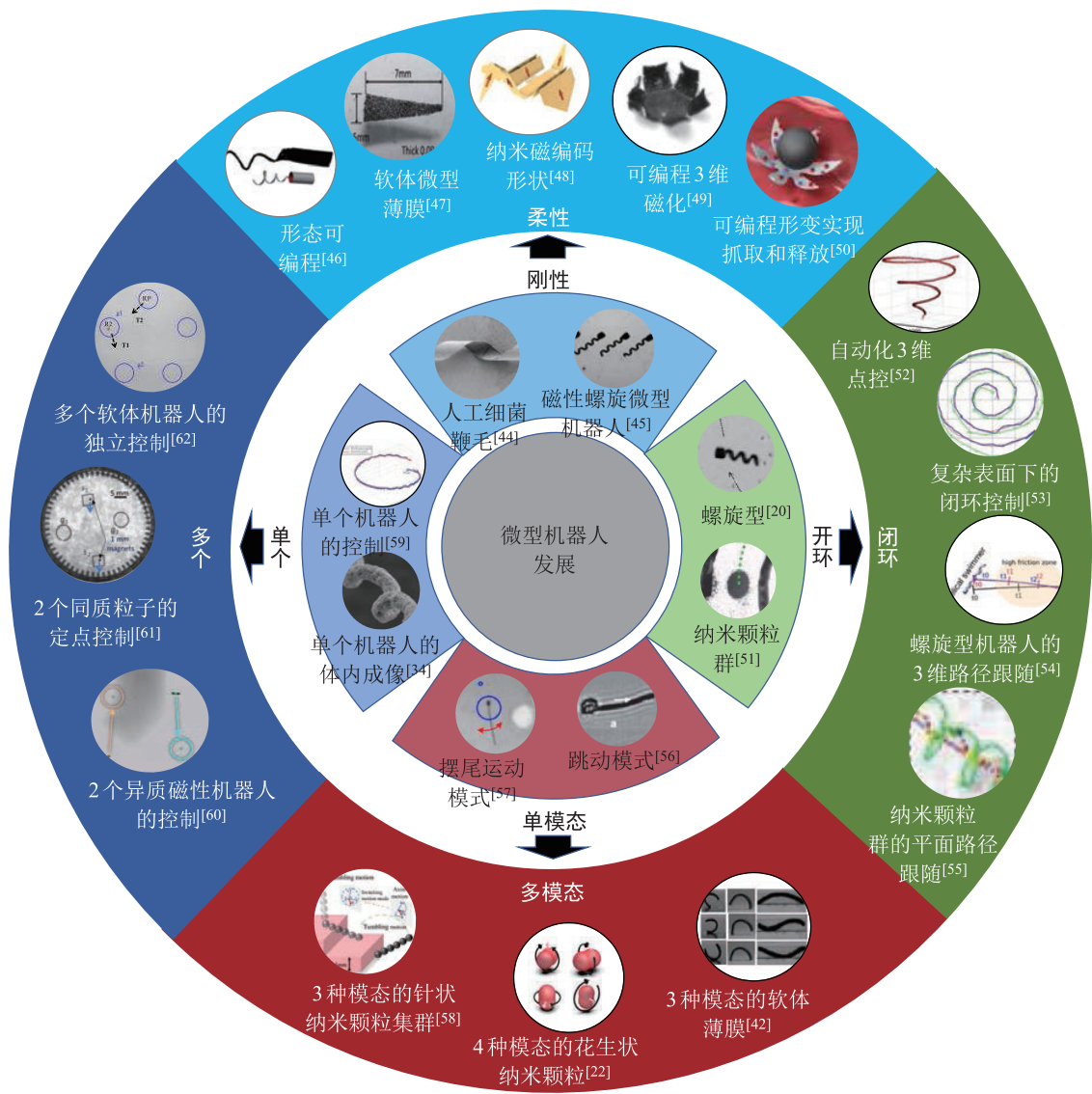


图 1 磁驱动微型机器人的发展趋势

2 磁驱动方法 (Magnetic actuation method)

2.1 概述

不同类型的磁场可以通过永磁铁和电磁线圈得到。特别是对于电磁铁来说,通过实时调控电磁线圈电流的强度、频率、相位及开关方式等,可以对磁驱动微型机器人施加可控的磁力或磁力矩,从而为驱动微型机器人提供动力,完成多自由度运动。

2.2 磁驱动原理

对于磁性对象,可用总偶极矩 $\mathbf{M}$ 表示其整个身体的平均磁化强度。磁性对象在磁通量密度为 $\mathbf{B}$ 的磁场中受到的磁力 $\mathbf{F}_m$ 和扭矩 $\boldsymbol{\tau}_m$ 可以表示为

$$\mathbf{F}_m = (\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{B} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\tau}_m = \mathbf{M} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

在匀强磁场中,磁性物体受到的磁力为 0,而当磁性物体的磁偶极矩的方向与外加磁场的方向不共线时,磁性物体会受到磁力矩的作用,并向外加磁场的方向偏转,直到磁偶极矩的方向与外加磁场的方向共线时才会停止转动。因此,对于匀强磁场,只有方向随时间不断变化的匀强磁场才可以为机器人提供磁力矩,从而实现驱动。常见的磁场方向周期性变化的匀强磁场包括旋转磁场、振荡磁场和脉冲磁场等。然而,在低雷诺数环境下惯性作用可以忽略不计,这导致机器人在周期性磁力矩的作用下往往只能对称地往复运动,为实现运动,需要专门设计机器人的形状和步态。

在梯度磁场中,由于磁场在某一方面存在磁感应强度的梯度变化,因此磁性物体会受到磁场力的作用而被牵引运动。然而,使用梯度磁场磁力牵引机器人运动是很难控制的,如果磁力太小,则机器人受到的摩擦力或黏性力将起主导作用,导致不发生运动;如果磁力能克服摩擦力和黏性力,则机器人可能经历高加速度,从而导致其行为不可预测。

2.3 磁驱动系统

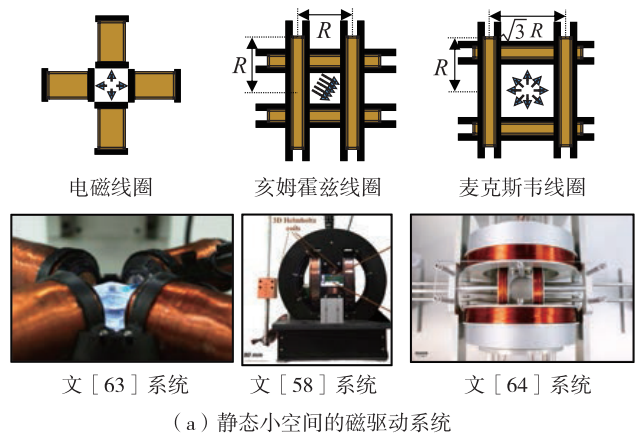
磁驱动系统可产生梯度磁场和 / 或匀强磁场,主

要分为静态小空间的磁驱动系统和动态大空间的磁驱动系统 2 大类。常见的 2 类系统如图 2 所示。其中,静态小空间的磁驱动系统包括普通电磁线圈驱动和非普通电磁线圈(亥姆霍兹线圈和麦克斯韦线图)驱动的系统,动态大空间的磁驱动系统包括移动永磁驱动和移动电磁驱动的系统。表 1 对比了这 4 种磁驱动系统的组成结构、用途和自由度。

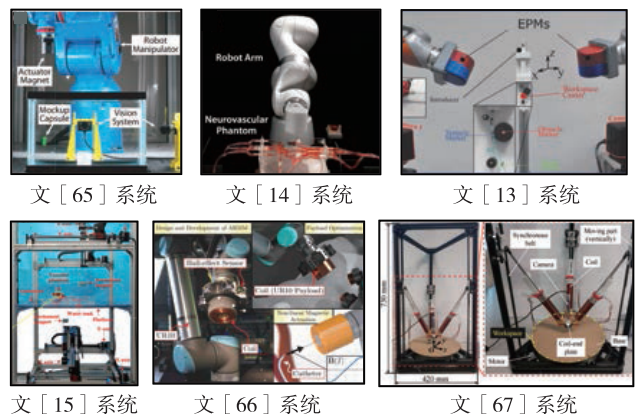
2.3.1 静态小空间的磁驱动系统特点及应用

通过电磁线圈很容易生成一个静态小空间内的磁场,而磁场的调控可通过改变线圈电流的大小、频率和方向来实现。静态小空间的电磁线圈可以进一步分为普通电磁线圈、亥姆霍兹线图、麦克斯韦线图以及多类型电磁线圈组合这 4 个子类。

普通电磁线圈系统是根据需求定制设计的一类由单个或若干个线图及铁芯组成的电磁系统,可在特定



(a) 静态小空间的磁驱动系统



(b) 动态大空间的磁驱动系统

图2 几种常见的磁驱动系统

表 1 典型磁驱动系统的分类

磁驱动系统类型	组成结构	用途	自由度	参考文献
普通电磁线圈驱动系统	2 个共轴电磁线圈	产生 1 维梯度磁场	1 (1T)	[68-70]
	3 个电枢线圈正交叠分布	产生 3 维梯度磁场	3 (3T)	[72-73]
	4 个电磁线圈正交分布	产生 2 维梯度磁场	2 (2T)	[57, 74]
	6 个电磁线圈正交分布	产生 3 维梯度磁场	3 (2T)	[71]
	8 个电磁线圈非正交分布	产生 3 维梯度磁场或匀强磁场	6 (3T+3R)	[52, 75-79]
亥姆霍兹线圈和麦克斯韦线圈	3 对亥姆霍兹线圈正交分布	产生均匀旋转磁场	3 (3R)	[44, 46, 54, 58, 80-85]
	1 对麦克斯韦线圈	产生 1 维梯度磁场	1 (1T)	[44]
	1 对亥姆霍兹线圈 + 1 对麦克斯韦线圈正交分布 + 电机	2 维平面运动控制	3 (2T+1R)	[86]
	2 对亥姆霍兹线圈 + 2 对麦克斯韦线圈	2 维平面运动控制	3 (2T+1R)	[87]
	3 对亥姆霍兹线圈 + 1 对麦克斯韦线圈	3 维空间运动控制	4 (1T+3R)	[88-89]
	1 对亥姆霍兹线圈 + 1 对麦克斯韦线圈 + 马鞍形线圈正交分布	2 维平面运动控制	3 (1T+2R)	[90]
移动永磁系统	1 个机械臂 + 1 个永磁铁	3 维空间 (管道) 内运动控制	6 (3T+3R)	[13, 65, 91]
	1 对 3 维位移台 / 机械臂 + 1 对永磁铁	3 维空间 (管道) 内运动控制	6 (3T+3R)	[14-15]
移动电磁驱动系统	1 个机械臂 + 1 个电磁线圈	3 维空间 (管道) 内运动控制	6 (3T+3R)	[66]
	3 维并联机构 + 3 个电枢线圈	3 维空间 (管道) 内运动控制	6 (3T+3R)	[67, 92]

空间的小区域内产生所需要的梯度磁场和 / 或匀强磁场。Yoon 课题组^[68-70]使用由 2 个嵌套有铁芯的电磁线圈组成的电磁系统来创建不同波形的梯度磁场, 通过改变线圈电流的大小和频率产生正负脉冲梯度磁场, 从而研究磁场对微纳米颗粒穿越血脑屏障的影响。此后, 他们增加了线圈数量, 设计了一种由 6 个独立的带铁芯的圆柱形线圈组成的电磁线圈系统, 其中心轴沿笛卡儿坐标

系 3 个轴对称排列, 通过独立控制 6 个线圈的电流大小和方向产生 3 维空间内任意方向的梯度磁场, 可以实现纳米颗粒更大空间和更多自由度的操控^[71]。Abbott 课题组^[72]设计了由 3 个正交嵌套的螺线管及包裹在其中的球形磁芯组成的电磁线圈系统 (Omnimagnet), 通过控制 3 个螺线管中的电流, 可以在 3 维任意方向上产生梯度磁场。Régnier 课题组^[74]设计了由 4 个独立控制

的线圈 (在平面内中轴线正交分布) 组成的电磁线圈系统, 可以通过分别控制 4 个线圈电流的大小和方向产生 2 维任意方向的梯度磁场。Abbott 课题组^[52]使用了 8 个非正交分布的线圈组成的电磁系统 (OctoMag), 产生的 3 维空间磁场可以对微型机器人进行 5 个自由度 (3 个位置自由度、2 个方向自由度) 的无线控制。他们还制作了一种类似结构的微型 8 线圈装置 (MiniMag), 实现了

3 维的运动控制^[75]。Diller 课题组^[76-78]设计了由 8 个电磁铁结构组成的电磁线圈控制系统,可在 3 维空间中产生任意方向的梯度磁场。在前者的基础上,Jang 课题组^[79]在每个线圈上加 1 个磁芯,并将 8 个磁体用 2 个十字背轭连接起来,形成闭合磁路。其中铁芯和磁轭可以有效地提高磁场强度。总之,这些电磁线圈驱动系统都是由多组电磁线圈或多组带铁芯的电磁线圈简单地组合排列而成,然而在磁场工作空间的大小、能量消耗、磁场强度及密度的分布等方面未能做到最优化。

亥姆霍兹线圈是一种特殊的组合线圈,可在线圈中心产生匀强磁场。它包含 1 对共轴放置的线圈,线圈间的距离等于线圈半径,且两线圈电流方向相同。3 对正交嵌套分布的亥姆霍兹线圈可在其内部工作区域产生 3 维方向的匀强磁场。通过控制每对线圈电流的大小、方向及频率即可产生 3 维方向的旋转磁场、锥形磁场、振荡磁场和方波形开关磁场等。张立课题组^[44]通过控制 3 对正交分布的亥姆霍兹线圈中的电流产生旋转磁场,实现了螺旋形人造细菌鞭毛微型机器人的正向和反向螺旋推进驱动。徐天添课题组^[80]通过 3 维亥姆霍兹线圈产生多种不同磁场,如旋转磁场、振荡磁场和锥形磁场,实现了带有磁性头部和软体尾部的薄膜微

型机器人的多种运动模态,包括滚动运动、摆动运动、爬行运动和螺旋推进运动。麦克斯韦线圈也是一种特殊的线圈组合,可实现线圈之间空间的最大化并产生梯度均匀分布的梯度磁场。它包含 1 对共轴放置的线圈,线圈间的距离是线圈半径的 $\sqrt{3}$ 倍,两线圈电流方向相反。总之,两者都是排列组合方式经过最优化的线圈,可以实现场强均匀分布磁场或梯度均匀分布磁场的工作空间的最大化。

将以上普通线圈、亥姆霍兹线圈和麦克斯韦线圈等典型线圈组合搭配可以产生更加丰富的磁场类型,提供更多的自由度。Nelson 课题组^[86]建立了微型机器人磁驱动与转向控制系统,该系统包括 1 对亥姆霍兹线圈、1 对麦克斯韦线圈以及 2 对线圈下方的伺服电机。水平驱动可通过线圈产生的周期性变化磁场来实现,转向驱动可通过线圈下方的伺服电机的转动进而调节磁场方向来实现。Park 课题组^[87]将 2 对亥姆霍兹线圈(内)和 2 对麦克斯韦线圈(外)正交嵌套组成电磁线圈系统,控制电流大小即可实现微型机器人的 2 维转向和 2 维平移运动。Ferreira 课题组^[88-89]提出使用 3 组亥姆霍兹线圈和 1 组麦克斯韦线圈组成的电磁线圈系统来实现 3 维运动控制。Park 课题组^[90]进一步提出了一种新型

的磁驱动与导航系统,由 1 对麦克斯韦线圈、1 对亥姆霍兹线圈和 1 对新开发的梯度均匀马鞍形线圈组成,可以实现 2 维平面运动控制。

总之,静态小空间的电磁线圈可以通过控制线圈电流的大小、频率和方向在工作空间内快速产生或关闭所需的磁场。未来,它可以产生更大空间的匀强磁场或梯度磁场以及更多自由度和类型的磁场,具备这些特性的静态小空间的电磁线圈是推进磁驱动微型机器人广泛应用的关键。

2.3.2 动态大空间的磁驱动系统的特点及应用

动态大空间的磁驱动系统由机械臂、电动平移台等移动装置与电磁线圈或永磁铁组成,可以分为移动永磁系统和移动电磁系统。

永磁铁能在不消耗电能情况下产生稳定的强磁场,将其安装在多自由度机械臂的末端执行器上可实现更大空间内的磁场调控。Abbott 课题组^[91]采用 6 自由度机械臂末端连接永磁铁,可在机械臂可达空间内的任意指定区域产生强磁场,并实现了球状磁驱动微型机器人和螺旋形胶袈状磁驱动微型机器人在管道内的远程无线驱动与位置控制。Zhao 课题组^[13]设计了末端带有永磁铁的机械臂装置,操控磁性导丝在体外通过了真实的人体神经血管模型,

并在猪臂动脉的体内导航实验中通过了狭窄和弯曲通路。通过控制 2 个相同永磁铁之间的相对位置和姿态可以调节 2 个永磁铁中心区域的磁场大小和方向。Valdastri 课题组^[14]采用双机械臂各夹持 1 个永磁铁,可在大空间的指定区域产生可调节磁场,实现了磁软导管在体外支气管模型中的可控运动。徐天添课题组^[15]采用 2 个上下对称的 3 维电动平移装置分别夹持 1 个永磁铁,可实现磁软导丝在体外血管模型内的导航与控制。

移动电磁系统中使用的是电磁线圈,该系统可以实现大空间指定区域内的磁场方向、梯度或强度的调控。Misra 课题组^[66]设计了由 6 自由度机械臂和 1 个电磁线圈组成的磁驱动装置 (ARMM),可以在机械臂末端的可达空间内控制磁场的大小和梯度。张立课题组^[67]设计的磁驱动装置 (DeltaMag) 通过控制并联装置的末端位置和 3 个电磁线圈中电流的大小及方向,实现大空间指定区域内的磁场大小和方向的调控。

总之,移动永磁系统和移动电磁系统各有优缺点。前者的优点是可以产生较大的磁场,缺点是无法在工作区域快速开闭磁场或产生高频周期性变化的磁场(需要改变永磁铁位姿)。后者的优点是在启动移动装置的情

况下实现工作区域内磁场的快速生成、变化或关闭,缺点是可产生的最大磁场强度和最大梯度强度是较小的,并存在上限。它们受限于线圈的几何尺寸及电流参数等。在未来的面向生物医疗应用的场景中,亟需研究可在更大空间中产生可编程磁场的磁驱动系统。

3 运动原理 (Motion principle)

3.1 概述

早在 1977 年, Purcell 就关注到自然界中低雷诺数液体中微生物的运动方式,根据牛顿流体的纳维-斯托克斯方程,建立了在低雷诺数液体中的运动方程,并进一步提出 2 种有效的运动方式:鞭毛非往复摆动波动前进和螺旋体的自转螺旋推进前进。此外,通过仿照自然界中其他微生物的运动方式,不同类型的磁驱动微型机器人相继问世,包括磁力驱动的微型机器人和磁力矩驱动的微型机器人。图 3 列举了 5 种经典的运动控制模式及其原理,表 2 总结对比了这几种运动模式。

3.2 梯度牵引运动

在梯度磁场空间中,磁驱动微型机器人受到磁力作用,由低磁密度区域被拉引到高磁密度区域,如图 3 (a) 所示。纯梯度磁场拉引微型机器人运动是最简单的磁驱动运动方式之一,只需要

调节磁场的梯度大小和方向即可调节微型机器人的运动速度 [93-94]。在梯度磁场中,机器人在达到稳定移动速度时存在如下平衡方程:

$$F_m = -F_d \quad (3)$$

其中, F_m 和 F_d 分别为机器人所受的磁拉力和外界阻力。当微型机器人在郎性液体环境中受到阻力较大时,梯度磁场产生的磁力将难以使得微型机器人克服阻力而运动。尽管提高梯度磁场强度可以增大施加在微型机器人上的磁力,然而这将使得微型机器人在到达稳定速度前具有较大的加速度,从而带来不可预测行为。

3.3 螺旋推动运动

在低雷诺数环境下,螺旋推进运动是一种有效的推进方式,运动原理如图 3 (b) 所示。近年来,研究者们制造了一系列可在旋转磁场下实现螺旋推进的微型机器人^[46-47, 106-107, 115]。张立课题组^[20, 44, 95]首次制备了与细菌大小相似的微米尺度螺旋推动式机器人,名为人造细菌鞭毛 (artificial bacterial flagella),并且在之后还实现了流体内的货物靶向运输。张立课题组^[34]通过将螺旋微藻在磁铁矿 (Fe_3O_4) 悬浮液中浸涂制备了具有超顺磁性的螺旋磁性微藻微型机器人,在各种生物流体中具有强大的运动和导航能力。在旋转磁场下,螺旋形

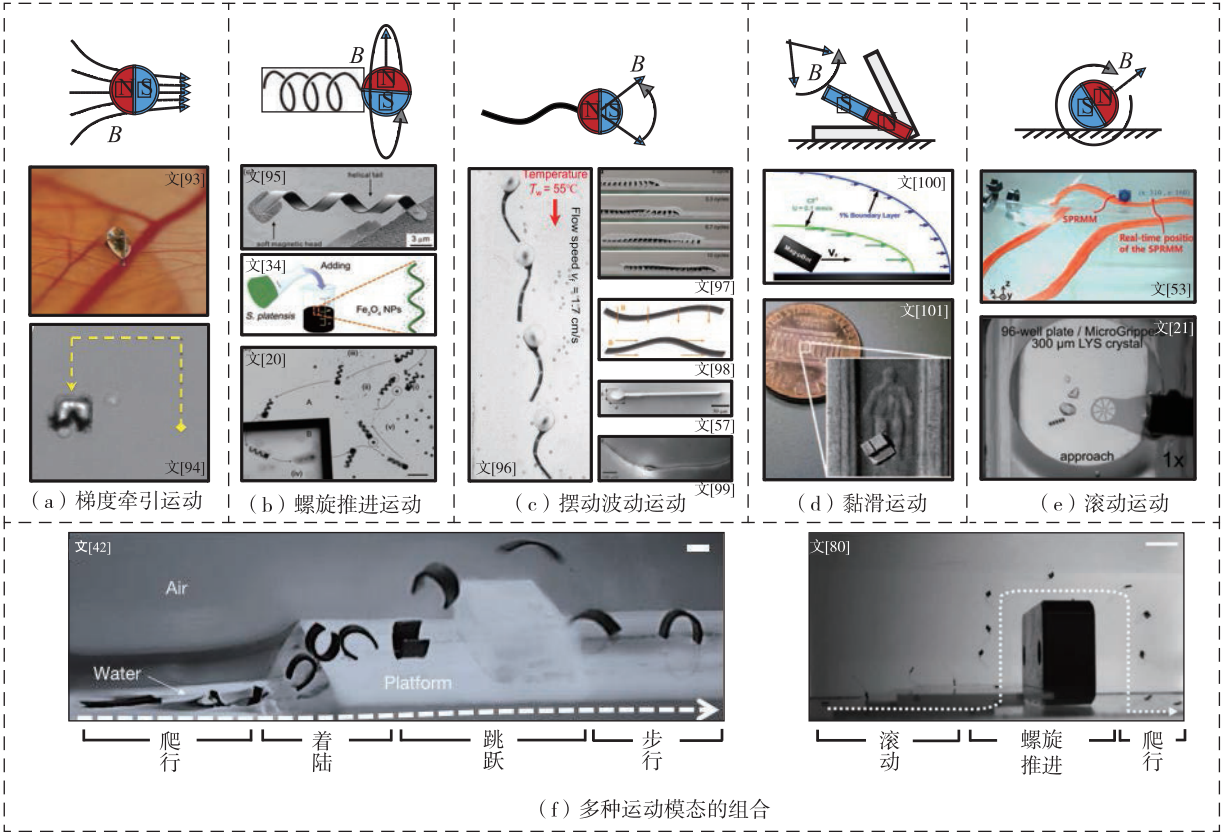


图3 踏驱动微型机器人运动方法及相应的微型机器人例子

表2 磁驱动微型机器人运动原理的分类

运动类型	适用场景	运动空间自由度	参考文献
梯度牵引式	液体管道内或容器基板	3 (3T)	[88, 94, 102]
螺旋推动式	阴性机器人: 3 维粘性液体空间	5 (3T+2R)	[20, 34, 44, 54, 82-83, 103-105]
	柔性机器人: 3 维粘性液体空间	5 (3T+2R)	[46-47, 84, 106-107]
振荡 / 波动式	采性机器人: 3 维粘性液体空间	5 (3T+2R)	[57, 59, 63, 96-97, 108-110]
黍滑运动	光滑的硅基表面或玻璃表面	3 (2T+1R)	[60, 111-112]
滚动运动	基板衣面	3 (2T+1R)	[18, 53, 113]
多种运动模式	各种复杂环境, 如半月板、液体环境、埤地	6 (3T+3R)	[42, 114]

微型机器人沿着中轴线推进时的前进运动方程为

$$\begin{bmatrix} f \\ \tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, 机器人的前进速度 v 和角速度 ω 与其受到的非流体力

f 和力矩 τ 存在线性关系, 且该关系可表示为常量 a 、 b 和 c 组成的对称矩阵。此类机器人具有稳定的推进速度, 速度可通过外界磁场的旋转频率调控。然而, 当外界旋转磁场旋转频率增大到一定

值时, 机器人将无法跟随外界旋转磁场同步旋转, 速度反而呈现下降的趋势。通常将该旋转频率定义为微型机器人的截止频率, 由微型机器人的几何参数、磁矩大小及外界磁场大小等因素决定。

3.4 摆动波动运动

受精子细胞周期性改变尾部形态而实现波动运动的现象启发,学者们开发了带有柔性尾部的磁性软体微型机器人,可实现流体环境下的摆动波动前进,原理如图3(c)所示。Misra 课题组^[57]开发了由磁性头部和灵活的尾巴组成的毫米级机器人,可在微弱的振荡磁场下实现高效波动前进。Sitti 课题组^[96]开发了由磁复合头和 k 值不同的被动弹性体组成的毫米级无栓软体机器人,可在振荡磁场下实现类似斑马鱼幼虫的高速波动游动。Nelson 课题组^[97]提出软结构人造纤毛地稳机器人,它由多个排列分布的磁性复合材料的纤毛腿和无磁性的衬底组成,特殊磁化的纤毛可以实现可编程异时摆动波动,以及类似于千足虫的爬行运动。摆动波动运动的磁弹性体的形变可通过欧拉-伯努利方程求解:

$$EI \frac{dy}{ds} = \int_0^s \tau_s ds \quad (5)$$

E 和 I 分别为弹性尾的杨氏模量和截面惯性矩。 y 为尾部 s 处的横向位移, τ_s 为弯矩。摆动波动运动是软体微型机器人实现高效运动的一种普遍方式,适用于固体表面、管道环境、液体环境等场景。

3.5 黏滑运动

在外界振荡/脉冲磁场下,在固体表面振荡摆动的物体会发

生黏滑运动,如图3(d)所示。Sitti 课题组^[100, 111]利用脉冲磁场施加的磁力矩使固体表面的微型机器人产生稻滑运动,实现了无接触的微操控。Nelson 课题组^[116]设计了由2个小的、不对称的软磁块组成的磁性驱动器,在外界脉冲磁场下可实现共振并前进。在脉冲磁场中振荡的磁性体可以简化为摆动弹簧-质量块系统,其固有频率为

$$\omega_n = \sqrt{\left(\frac{\partial T_m}{\partial \theta}\right)/J} \quad (6)$$

其中 J 为磁性体的转动惯量。数滑运动式机器人存在与自身几何参数、磁化强度等相关的截止频率。随着激励频率增大到截止频率,机器人的磁矩方向将难以和外界磁场方向对齐,使得稻滑运动受到阻碍,运动速度降低。

3.6 滚动运动

作为另一种高效的磁力矩驱动运动方式,滚动运动的原理如图3(e)所示。Hou 课题组^[117]提出了一种矩形磁驱动微型机器人的滚动运动方法,可以在旋转磁场下实现沿直线或沿曲线的移动,也可以爬斜坡或楼梯。Kim 课题组^[53]研究了在3维薄面上做滚动运动的磁珠,并设计了闭环控制算法实现滚动磁珠的路径跟随控制。微型机器人的滚动运动速度 V_{roll} 可以表示为

$$V_{\text{roll}} = 2\pi r_{\text{eff}} f \quad (7)$$

其中, r_{eff} 为滚动运动的微型机器人的等效半径, f 为滚动频率。滚动运动的微型机器人存在与自身几何参数、磁化强度等相关的截止频率。同样,截止频率范围内的微型机器人的磁矩方向将难以和外界磁场方向对齐,运动速度将逐渐降低。

4 制作方法 (Fabrication methods)

4.1 概述

近年来微纳米加工技术与材料科学的发展,促成了微型机器人在结构与功能上的一系列突破。按结构,磁驱动微型机器人可以分为刚性结构和柔性结构,两类的典型代表如图4所示。刚性结构的一个典型代表是螺旋形磁驱动微型机器人,除此之外还有磁圆柱体微型机器人、磁珠微型机器人等^[45, 95, 100, 111, 116-117]。柔性结构磁驱动微型机器人通常由软体复合智能材料制备。相对于结构单一和自由度有限的刚性微型机器人,柔性微型机器人因形变的多样性而拥有更大的自由度,对于空间受限的复杂场景有更强的适应性和敏捷性,更适于生物医学方面的应用^[118]。典型的制造方法如表3所示。

4.2 刚性磁驱动螺旋形微型机器人的制造方法

现今微加工技术已能小批量地制造螺旋结构。制造过程的主

可实现的自由度较有限,运动模式较为单一。

4.3 柔性磁驱动薄膜微型机器人的制造方法

柔性磁驱动薄膜微型机器人的制造材料决定了其功能,起至关重要的作用^[138]。如典型的一类机器人本体主要由混合了磁性颗粒(如钆铁硼颗粒或四氧化三铁颗粒等)的功能性软体薄膜构成。该材料可响应外部刺激,如温度、超声、光或者化学刺激^[139-141],改变本体的物理或化学特性。

这种智能功能性薄膜主要包括记忆金属^[142]和刺激响应型水凝胶^[107, 138],例如后者能够被制成任意形态,并能响应pH值、温度或者化学浓度梯度的变化,面向特定任务改变自身的形状和体积^[140]。几种典型的制备方法包括自卷曲技术、化学沉积技术、注模或切割技术以及3维打印技术。

自顶向下设计的具有自折叠行为的微型机器人是一种简单而高效的类型。当多种由化学或物理刺激而产生膨胀或收缩的材料耦合时,在刺激源的作用下,机器人折叠或弯曲。这种折纸工艺已被用于多功能软体薄膜机器人的制造。Nelson课题组^[46]使用磁性纳米复合材料制作的自折叠的折纸机器人由1层支撑结构和1层热响应层组成:在材料中掺入磁性纳米颗粒,实现可编程的磁性结构;通过近红外光加热的

方法,实现结构的重构和再折叠。由此方法制备的机器人,可根据其磁性颗粒排列的不同、工作温度的不同,获得不同的运动能力。

使用注模或切割技术将机器人制作成所设计的几何形状,再进行特定方向的磁化处理^[118, 125, 129],可使机器人在2维或3维空间内运动甚至完成运输任务。Shen课题组^[109, 131]模仿海星的足部行走特征,设计了多足薄膜机器人。先将PDMS(聚二甲基硅氧烷)与磁性颗粒混合,再在混合物凝固前使用磁铁引导出600 μm 左右的腿部,最后烘干至凝固,凝固后的混合物可以被切割成任意形态。这种多足结构能够在干燥和潮湿的表面运动,具有很强的承载能力(大于100倍自重)和越障能力(10倍身体高度),能够在胃内实现药物运输。Zheng课题组^[49]使用海藻酸盐水凝胶制造了软体结构的薄膜微型机器人,可在磁场和环境粒子刺激的作用下完成靶向运动、释放和采样等任务。它们模仿海星的变形机理,利用海藻酸盐对离子的敏感性,调节粒子浓度令海星形态的微结构完成抓取和释放动作;利用这种材料的生物可降解性,在小鼠消化道内实现了药物的运输。

近年来3维打印技术的质量和批量生产能力正在不断提高,

更重要的是,适用于3维打印的材料种类繁多^[130]。目前市面上的3维打印机,能够打印弹性水凝胶材料的复杂结构^[143]。3维打印技术还能与智能材料结合,打印出的结构会在外部环境的影响下再一次改变形状或特性,这种技术称为4维打印^[144-145]。典型的3维打印技术包括3维激光墨水直写技术和3维数字光固化技术。Xu课题组^[126]使用3维数字光固化技术精确控制磁性颗粒的重定向,对平面材料中的磁性颗粒进行任意3维方向的磁化编码,制作出能够快速从2维结构转化为3维复杂结构的折纸微型机器人。通过在不同形状材料上进行磁化编码可以组成不同的模块,从而形成更高阶的弯曲和扭转,例如多臂抓取与多桨叶爬行。Cui课题组^[133]提出一种3维激光墨水直写技术,在更小尺寸的氮化硅基板上对单畴的纳米钴磁颗粒进行排列,纳米磁颗粒的横向尺寸为100~500 nm,磁化方向平行于长轴,在室温下具有可调的磁各向异性。利用不同厚度的纳米磁材料在磁滞曲线上的差异,对较厚的复合材料使用较弱的磁场“重写”该区域的磁化方向,进而构建出纳米磁材料阵列。通过对单元的不同磁化编码,纳米磁材料在磁场的作用下能够形成多种复杂形态,以此为基础构建的微型“团”形机器人,可以完成拍打、

悬停、转向和侧滑等动作。

总之,采用这些方法可以设计不同尺度、不同形状、不同磁化剖面 and 不同功能的柔性磁驱动薄膜微型机器人。具有特殊磁化剖面的柔性磁驱动薄膜微型机器人可以在外界可编程磁场中实现多种运动模式,与刚性的未能实现磁化方向多样性的磁驱动微型机器人相比其自由度更多,在未来有望在多种复杂场景中执行任务。

5 控制方法 (Control methods)

5.1 单个微型机器人的运动控制

迄今为止,已经报道的单个微型机器人的运动控制方法可以分为3大类,线性控制、非线性优化控制和神经网络控制。表4对比了这3类方法。

5.1.1 线性控制

磁驱动微型机器人的运动控制早期研究都是开环控制^[44, 46]。在对螺旋形微型机器人的运动有了深入的理解后,发现在外界扰动和建模不确定条件下开环控制不稳定、精度不高,研究者们开始关注闭环控制。闭环控制大致分为2类,2维的基于图像的伺服控制和3维的基于位置的伺服控制。

在2维平面空间中,徐天添课题组^[105]设计了双闭环的路径跟随控制系统,在采集的图像中

定义了参考路径和误差状态,并实验验证了多种路径的跟随和避障。之后他们又针对“参考路径需要人工设定”的问题,采用RRT(快速拓展随机树)路径规划算法自动计算最短路径^[146]。

在3维立体空间中,徐天添课题组^[54]通过双目视觉定位和级联线性化的运动模型设计了路径跟随控制方法;同时研究不同位姿角度对于转向速度的影响,在3维空间中实现了直线参考路径的跟随;采用固定的角度平衡重力的干扰,使机器人悬浮在溶液中。Tottori 课题组^[20]采用3D激光加工和物理气相沉积技术制作出表面具有磁性的微型螺旋形机器人,实现了其在3维空间内灵巧运动的开环控制,可搬运微小的物体。Kim 课题组^[53]提出在3维薄表面上沿复杂运动路径沮动的控制方法。设计了控制外部旋转磁场的闭环算法,可在双目视觉定位的辅助下精确地操控磁珠沿着预设的路径运动。此外,Diller 课题组^[147]利用永磁体搭建的磁驱动平台既能产生梯度磁场,也能产生旋转磁场;能以最大化磁场强度和磁力为目标,优化旋转永磁体的空间布置;能实现3维路径跟踪。

分析发现,这些都是基于简化的运动学模型或动力学模型的研究,对于外界扰动的考虑还不充分。在控制过程中流体黏度的

变化(受温度升高、电磁线圈热衰退等因素影响)是时变的,这对于控制器的自适应能力是一项挑战。Misra 课题组^[148]基于外界扰动观测器提出内环控制律,控制电磁线图产生梯度磁场驱动磁性微粒子,并且分析了控制系统的暂态和稳态特性。Abbott 课题组^[52]设计了可产生5自由度磁场的装置,利用多个电磁线圈组产生的磁场的矢量叠加,生成复杂的非匀强磁场,进而控制机器人在空间中运动(旋转运动和平移运动),此外还手动操控机器人完成了鸡胚中的血管穿刺实验。与基于模型的预测控制不同,张立课题组^[149]提出的无模型的平面路径跟随控制,将磁粒子自身的动力学模型和外界扰动都视为扰动,并设计观测器来估计磁粒子的位置和速度。这些基于状态观测器的方法需要针对特定的扰动微调观测器参数,方法的通用性有待进一步验证。

5.1.2 非线性优化控制

除了线性控制,针对特定应用场景的非线性优化控制算法对微型磁控机器人的有效运动控制也是至关重要的。Sun 课题组^[150]建立了磁性微粒子的动力学模型,采用输入状态稳定性方法设计控制器,用典型的反演法将非线性模型转化成线性系统,实现2维曲线轨迹的跟踪。但由于上述方法通过实时采集的图像来计算磁性微粒子的

表 4 单个的微型机器人控制方法的比较

控制类型	控制方法	扰动补偿方法	微型机器人类型	运动空间	参考文献
线性控制	双环 PI 控制	无	螺旋形	2 维	[105]
	PID 控制	无	螺旋形	2 维	[146]
	级联线性化控制	固定重力补偿	螺旋形	3 维	[54]
	P 控制	无	螺旋形	3 维	[59]
	PD 控制	无	磁针	3 维	[147]
	双环 PI 控制	扰动补偿观测器	磁珠	2 维	[148]
	PI 控制	ESO	磁粒子	2 维	[149]
非线性优化控制	反演法	输入状态稳定性	磁珠	2 维	[150]
	反演法	高增益观测器	磁珠	2 维	[151]
	反演法	高增益观测器	磁珠	3 维	[152]
	鲁棒控制	ESO	磁珠	3 维	[153]
	鲁棒控制	RBF 神经网络	细胞	3 维	[154]
	反演法	高增益观测器	磁珠	2 维	[155]
	反演法	高增益观测器	磁珠	2 维	[156]
	自适应反演法	高增益观测器	磁珠	2 维	[88]
	Proxy-SMC	RBF 神经网络	螺旋形	3 维	[82]
	Proxy-SMC	在线 ELM	螺旋形	3 维	[83]
	SMC	ELM	螺旋形	2 维	[104]
	基于最佳决策策略的控制	无	螺旋形	2 维	[157]
	MPC	回归补偿	细菌	2 维	[158]
	LQR	RBF 神经网络	螺旋形	2 维	[159]
神经网络控制	宽度学习系统	无	螺旋形	2 维	[160]
	Q 学习	无	布朗粒子	2 维	[161]
	DDPG 方法	无	布朗粒子	2 维	[162-163]

简写注释：PID（比例-积分-微分）、ESO（状态观测器）、RBF（径向基函数）、SMC（滑模控制）、ELM（极限学习机）、MPC（模型预测控制）、LQR（线性二次型调节器）、DDPG（深度确定性策略梯度）。

速度，会放大测量噪声，所以他们又提出一个高增益的观测器来估算磁性微粒子的运动速度，进而提高速度反馈的精度；最后基于简化的 2 阶动力系统模型，构建路径跟踪控制器^[151]。进一步地，他们将环境的扰动和空间电磁能量的衰减信息考虑在内，用非线性高增益观测

器替换高增益观测器，改进文^[151]中的控制方法，并利用李雅普诺夫函数证明控制方法的稳定性，实现空间 2 维和 3 维螺旋形轨迹的跟踪控制^[152]。随后，他们提出用 2 个相机预先构建环境地图，用于在空间运动的磁驱动微型机器人的定位，采用 RRT 方法获得空间的参

考轨迹，在厘米级的工作空间完成导航及跟踪控制^[153]。在平面空间中，用光镊子捕获、运输细胞的办法难以获得不同体积的细胞与光镊子之间的接触刚度和细胞的参数。因此，Li 课题组^[154]采用径向基函数（RBF）神经网络预测出未知参数，进而实现轨迹跟踪。

分析发现,在控制方面尽管已经在2维和3维的路径跟踪上取得了一些研究成果,但在控制的鲁棒性上仍需要进一步深入研究。Ferreira 课题组^[155-156]针对在血管中运动的微型机器人提出基于非线性动力学模型的非线性控制方法,不仅考虑了血液的非牛顿流体特性和边界效应的影响,计算出最优运动轨迹,而且还给出了一种基于反演方法的非线性控制律,并通过仿真实验验证系统对参数不确定性和噪声影响具有鲁棒性。Ferreira 课题组^[88]提出了由纳米级铁磁颗粒与聚合物粘合方法制造的微型机器人,通过梯度磁场牵引运动,采用自适应反演法设计稳定的路径跟踪控制器,提出用高增益观测器来估计模型中的不确定性参数,克服速度测量不准确的问题。徐天添课题组^[82]基于RBF神经网络方法在3维空间自适应地补偿重力和外界扰动带来的干扰,通过离线采集的数据拟合映射模型。在实现3维轨迹跟踪的基础上,他们还提出了可以在线更新的模型,解决了离线模型拟合精度有限和泛化能力不足的问题,实现了自动的轨迹规划、跟随和避障^[83]。进一步的,针对平面运动过程中的接触摩擦力及其他外界扰动,提出了基于神经网络的补偿模型作为控制系统的前馈输入,并实验验证了控制的稳定性^[104]。通

常螺旋形微型机器人的控制是在其自转的截止频率以下进行的,Mohammadi 课题组^[157]设计了磁性螺旋形微型机器人的优化决策控制方法,在高于截止频率时仍然可以跟随参考的直线路径。对于具有磁性的细菌,Kim 课题组^[158]利用最小二乘方法建立了磁性细菌的离散运动模型,进而基于图像反馈设计了模型预测控制器,在平面空间上控制磁性细菌的轨迹跟踪。徐天添课题组^[159]针对重力及其他扰动提出了自适应角度补偿方法,采用超限学习机离线建模了输入磁场和微型机器人游动方向之间的关系,并设计了类似于轮式移动机器人运动模型的线性二次型控制方法,实现了更加稳定的悬浮和精度更高的跟随控制。

以上介绍的基于模型的或者无模型的非线性控制方法,在实际的靶向医疗应用中仍然面临许多挑战:(1)目前只考虑了静态环境,对于动态环境中的磁驱动微型机器人的控制效果,有待进一步验证。有必要在参数的估计和控制的鲁棒性上进行深入研究,以便实现动态环境中的稳定控制。(2)多数研究在简单环境下实现了磁驱动微型机器人的定位,当然这样做可以相对容易地获得视觉反馈。而针对复杂背景环境下的鲁棒定位和跟踪问题的研究较少。尽管深度学习方法可以实现

目标的追踪和定位,但是其定位的精度不高,计算的速度不够快。特别是将定位应用到闭环的控制回路中,对于定位的精度和定位求解的速度要求更高。

5.1.3 神经网络控制

针对设计和调节控制器参数繁琐的问题,徐天添课题组^[160]采用宽度学习系统建立轨迹跟踪控制误差和控制输入之间的映射关系,实现了稳定控制,并在磁性螺旋形微型机器人的2维路径跟踪中成功应用。Cichos 课题组^[161]提出了网格化环境中的球形微型机器人运动控制方法。由于运动空间小,因此采用了经典的强化学习(Q学习)方法,在有限的运动空间中建立状态动作表格,通过训练得到表格中的状态转移概率,实现了两点之间的运动导航。Li 课题组^[162-163]通过卷积神经网络获取全局图像的特征,之后连接一个演员-评论家网络架构的强化学习方法DDPG,通过在随机环境中训练得到的动作策略实现了导航控制。

基于学习的控制方法可以免去调整控制器参数的步骤,而“通过交互数据去学习控制器参数”的研究尚不够深入。这种有监督的离线学习控制参数的方式,易受到训练数据分布与实际应用数据分布不一致的影响,而另一种与环境交互的学习方式,存在样本采样效率低以及稳定性不高

的问题。

5.2 群体微型机器人的集群控制

单个的刚体和软体薄膜微型机器人的负载能力有限，而后来研发出来的具有集群功能的纳米微群，在执行药物递送和其他的运输任务时具有更高的效率，并且在多模态形状控制上具有更高的灵活性。磁驱动微纳米颗粒机器人目前主要的应用方向是生物学^[164]，包括临床医疗的靶向给药、细胞操作、微创手术、活组织检查^[165-172]和影像增强^[34, 173-174]；此外，还包括环境修复中的污染去除^[175]、微纳米群用于货物运输^[176]和充当特定组织结构^[177]。在过去的几十年，特别是近5年里，群体微型机器人控制的研究成果纷纷涌现，主要分为平面运动控制、运动形态控制和运动模态控制，相关论文的统计如表5所示。

表5 群体微型机器人运动方法类型比较

控制类型	磁性材料	文献
平面运动控制	铁磁性纳米颗粒	[22, 176, 178-180]
	顺磁性纳米颗粒	[55, 85, 181]
运动形态控制	顺磁性纳米颗粒	[51, 81, 85, 182-186]
运动模态控制	铁磁性纳米颗粒	[22, 184]

5.2.1 平面运动控制

微纳米颗粒群的平面运动控制是执行实际任务的基础。目前一般采用开环控制方法提前设置好磁场或者手动控制磁场的大小和方向，可让磁性纳米颗粒微群在平面上沿直线（图5（a））^[178]、方形轨迹（图5（b））^[22, 176, 179-180]和分叉通道（图5（c））^[85, 181]运动。为进一步提高控制精度，俞江帆课题组^[55]研究了一种针对顺磁性纳米粒子群的全自动控制方案（图5（d）），提出了一种利用500个边界点的统计量来跟踪群体微型机器人分布的方法，实验证明了该方法对背景噪声、形状变化、粒子损失和粒子吸收具有鲁棒性，能保证高精度的轨迹跟踪。总之，群体微型机器人的平面运动控制为高负载条件下的靶向送药提供了可行的解决方案，但是自动避障问题仍然有待研究。

5.2.2 运动形态控制

通过控制个体间的距离大小来控制集群的覆盖范围，是实现自适应群形状重构的关键步骤。以磁场调控的方式使磁性纳米颗粒产生聚集和分散以控制集群的形态，极大地提高了灵活性。

俞江帆课题组^[81]通过叠加磁场设计了使顺磁性纳米颗粒动态地聚集和分散的策略（图6（a）），并分析了纳米颗粒群的形成与运动机理。利用相同的原理，也可以控制几个独立的集群相互吸引形成一个集

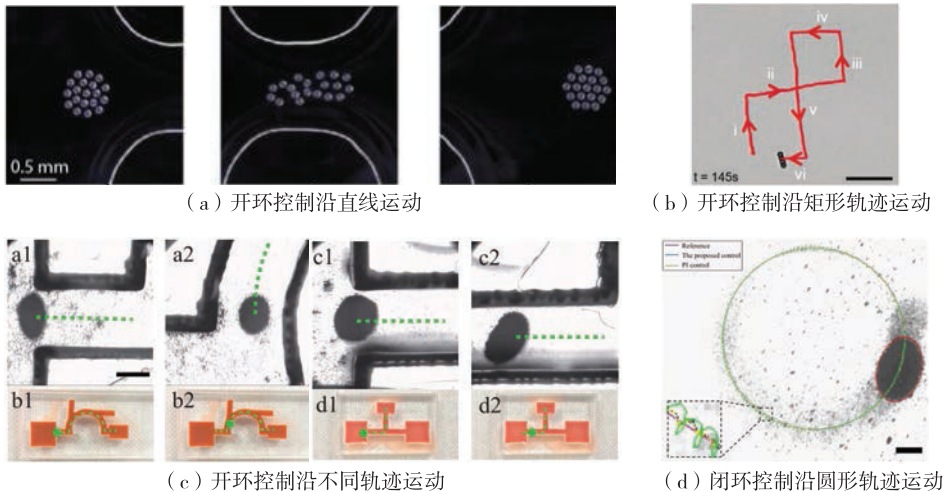


图5 群体微型机器人的平面运动控制

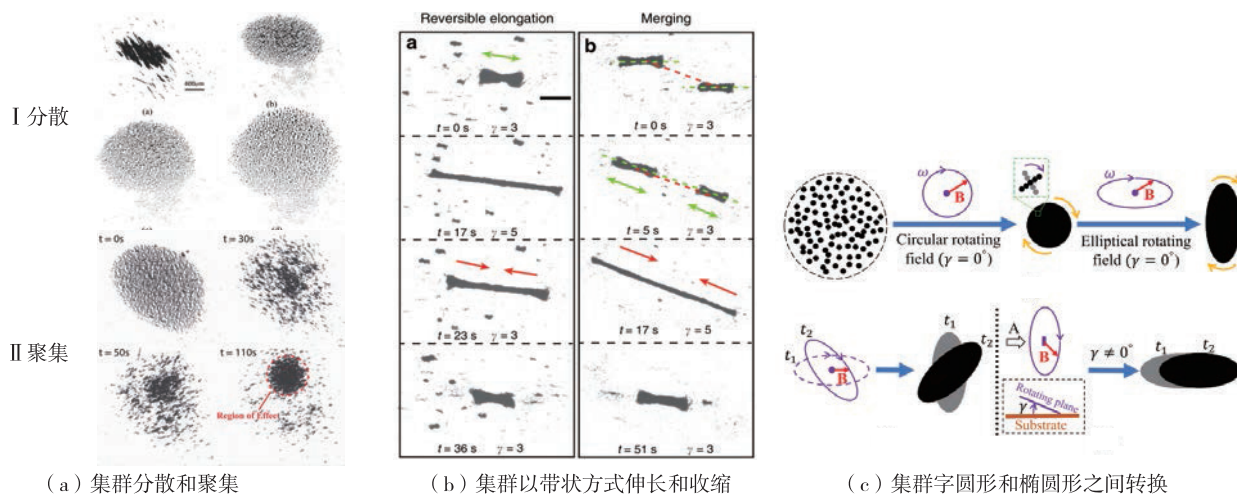


图6 群体微型机器人的集群形状控制

群^[85]。在此基础上,他们又研究了生物体液中群体的聚合与分散^[185]。采用的3种生物流体为含聚山梨醇酯-20的磷酸盐缓冲盐水、模拟体液(SBF)和胎牛血清。结果表明,除了磁偶极子相互作用和流体动力学效应外,静电相互作用对生物流体中集群的产生和重构也起着重要作用。此外,还通过实验证明了所提出的拆卸和扩散策略在脏器离体(猪膀胱)的不均匀表面上是有效的^[183]。除了以圆形的形式进行聚合和分散以外,磁性纳米颗粒集群还可以以带状的形式进行伸长和收缩。如图6(b)所示,俞江帆课题组^[51]提出了将顺磁性纳米颗粒通过叠加振荡磁场聚集成带状集群的方法,能通过调整振荡磁场系数,可逆地改变带状集群的纵横比。此外,还设计了利用椭圆旋转磁场来控制集群形状重构的方法^[184],如图6(c)所示,如果改变椭圆旋转场的长轴和短轴方向

磁场强度的比值,那么所形成的椭圆纳米粒子群的形状比(即长轴和短轴之间的长度比)将发生相应的变化。另外,针对于二者关系的非线性提出了基于模糊策略的控制方案,使集群的形状具有较高的可逆性,并能在平移运动过程中保持形状。此外,该课题组还研究了带状和簇状纳米粒子群之间的转换控制^[186]以及如何通过磁场控制纳米棒集群进行形状转换^[182]。

以上研究都是通过开环控制磁场的变化,使磁性纳米颗粒集群产生形状上的变化。但开环控制操作耗费的时间和人力较多,若想进一步实现群体形状的自适应控制,需要能敏锐识别集群形状变化的视觉系统,以及有效的控制决策算法。

5.2.3 运动模式控制

群体微型机器人能适应复杂的环境并进行多任务处理的关键,是它们可以根据应用环境来切换不

同的运动模式(通常通过切换不同类型的外部磁场来实现)。Sitti课题组^[22]通过控制外部磁场的类型来改变由花生状纳米颗粒组成的集群的形状,在液体流动状、链状、呎旋状和带状之间进行转换(图7(a))。徐天添课题组^[58]设计了具备3种运动模式的针状集群微型机器人,集群由铁磁性纳米颗粒组成,磁矩与其长轴方向相同。如图7(b)所示,改变外部振荡磁场的俯仰角、倾斜角和频率可以让微型机器人分别沿其长轴和短轴方向运动,从而将外部磁场改为旋转磁场,可以让微型机器人切换为翻滚运动模式。

总之,群体微型机器人的运动模式控制往往受限于群体最小组成单元的形状结构,或者是稳定群体的结构特征。目前,群体微型机器人多模式控制方面的进步仍然依赖于微型机器人在结构设计上的创新。

5.3 多个微型机器人的独立协同控制

由于微型机器人尺寸小，在某些应用（如靶向治疗和微操作）中单一机器人能完成的任务非常有限。相比之下，多个微型机器人并行执行任务可以增大靶向送药或者微操作的有效荷载能力，增加系统的冗余度，提高任务的执行效率。对于传统的机器人系统，机器人自身可携带微处理器和通信模块，不同机器人个体之间的相互通信以及与上位机的无线独立控制可以提供多种多机器

人控制策略。然而，由于各个微型机器人接收到的外界磁场驱动信号全局相同，因此难以在工作空间内的多个磁驱动微型机器人中单独选中某个个体进行独立驱动。迄今为止，已有报道的几种独立控制策略可以分为4大类，如图8所示，图中还展示了对应的部分研究成果。表6对这4大类方法进行了比较。

5.3.1 通过异构设计微型机器人实现独立控制

异构设计可使全局均匀外界磁场控制下的不同集群机器人个

体产生不同的行为。例如，当被设计成不同的几何形状时，相同控制输入下的机器人个体可输出不同的速度或运动方向。通过合理设计控制输入序列，可以使个体朝向不同目标位置或沿着不同轨迹运动。

在低雷诺数流体力学的框架下，螺旋推进的物体的游动速度与旋转频率存在普遍的非线性关系，即：存在一个截止频率，当旋转频率低于该值时，游动速率与旋转频率成正相关；当高于该值时，成负相关^[206-208]。根据该

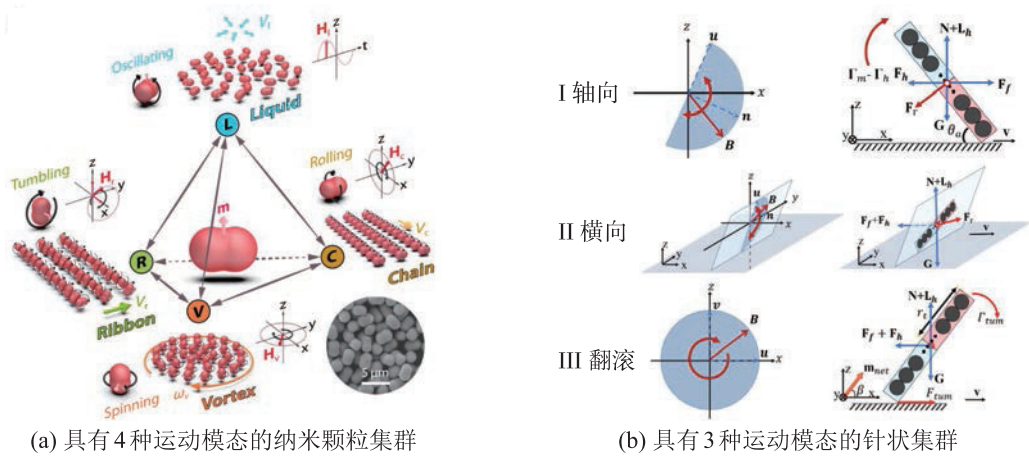


图7 群体微型机器人的运动模式控制

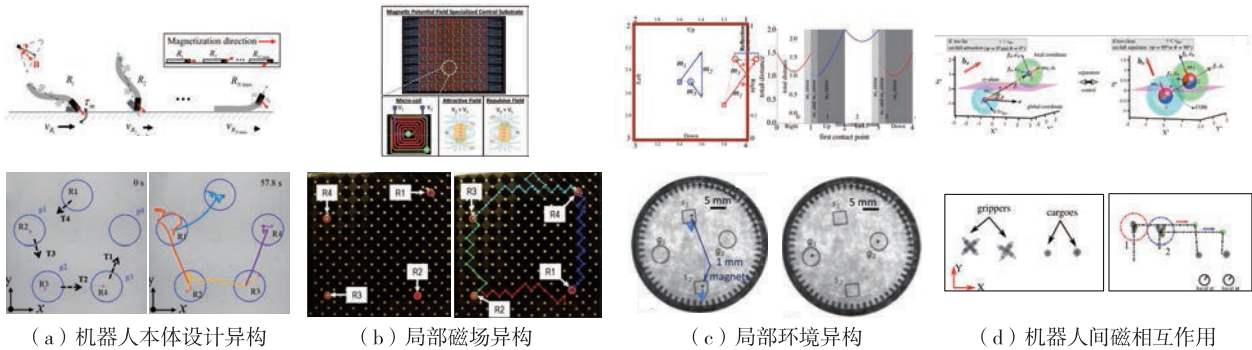


图8 多微型机器人的独立控制方法

表 6 多微型机器人独立控制方法比较

类型	方法	独立控制最大数量	是否完全解耦	运动空间限制	微型机器人类型	参考文献
本体设计异构	螺旋形状异构	2	非完全解耦	2 维	旋转磁场驱动的螺旋形微型机器人	[187-188]
	螺旋方向异构	2	非完全解耦	2 维	旋转磁场驱动的螺旋形微型机器人	[189]
	长宽比异构	3	非完全解耦	2 维	振荡磁场驱动的薄片爬行微型机器人	[60, 112]
	尾巴长短	2	非完全解耦	2 维	振荡磁场驱动的软体双尾微型机器人	[63]
	磁化强度异构	2	非完全解耦	2 维	振荡磁场驱动的薄片微型机器人	[112]
	磁化方向	2 ~ 4	完全解耦	2 维	振荡磁场驱动的软体薄膜爬行微型机器人	[62, 190]
	几何及磁化强度异构	2	非完全解耦	3 维	梯度场磁力驱动的薄片微型机器人	[78, 191]
局部磁场异构	非匀强磁场	2	完全解耦	2 维	旋转磁场驱动的螺旋形微型机器人	[192-194]
	棋盘磁线圈	2 ~ 3	完全解耦	2 维	梯度场磁力驱动的粒子微型机器人	[195-197]
	非均匀磁梯度陷阱	2	完全解耦	3 维	梯度场磁力驱动的粒子微型机器人	[198]
	全局磁场与局部磁场叠加	2	完全解耦	2 维	梯度场磁力驱动的粒子微型机器人	[199]
局部环境异构	局部静电锚定	2	完全解耦	2 维	梯度场磁力驱动的薄片微型机器人	[195, 200]
	局部障碍物锚定	2	非完全解耦	2 维	梯度场磁力驱动的粒子微型机器人	[61]
	局部梯度磁锚定	2	完全解耦	2 维	梯度场磁力驱动的粒子微型机器人	[201]
	局部光热响应夹具锚定	2	完全解耦	2 维	梯度场磁力驱动的粒子微型机器人	[202]
机器人间磁相互作用	个体间磁相互作用力	2	非完全解耦	2 维 / 3 维	梯度场磁力驱动的球状微型机器人	[101, 203-205]

关系，Nelson 课题组^[187]研究了磁驱动螺旋形微型机器人的截止频率与机器人磁性部分的磁化强度的关系，提出了多个具有不同磁化强度的螺旋形微型机器人的

独立控制策略。
在外界周期振荡磁场中，具有一定厚度的磁性薄片微型机器人在外界磁力矩作用下在平面上产生黏滑运动，其运动模型表明

黏滑运动速度与微型机器人大小及形状、外界激励磁场波形、周围环境和表面相关^[111]。针对这类机器人，Sitti 课题组^[112]设计了一系列具有不同长宽比、或

不同磁化强度、或两者组合的异构微型机器人,并研究了它们在相同周期振荡磁场激励下的磁响应的差异。尽管通过这种几何异构和磁化异构的方法不能完全解耦的独立驱动,但是 Diller 课题组^[60]提出全局磁场下多个微型机器人的独立控制方法,实现了 2 个机器人有限的独立路径跟随控制。另外,他们提出了多机器人 3 维路径跟随控制方法^[78],首次实现了对 2 个磁化强度不同的机器人在 3 维空间中的独立控制及不同路径的跟随。

不同于上述非完全解耦的多微型机器人独立控制方法,徐天添课题组^[62]针对磁化方向不同的多个磁驱动软体微型机器人提出了完全解耦的独立控制策略,可以独立控制 4 个机器人分别去往不同目标位置,以及控制 3 个机器人分别跟踪不同的参考路径。该毫米级软体机器人可以由外界振荡磁场驱动并在平面上爬行,而且对于具有相同几何形状但磁化方向不同的异构软体微型机器人,它们对振荡磁场的速度响应曲线形状相同,但相位不同。基于该速度响应模型设计的最优独立驱动控制算法,可以针对机器人群期望的速度矩阵计算出相应的最优驱动磁场控制策略,实现任意一个机器人速度非 0,而其他机器人的速度近似为 0 的控制。

总之,基于异构设计的多机

器人独立控制方法可以在相同磁场下独立控制 2 个、3 个甚至 4 个机器人,且不依赖于特殊的磁场产生装置或特殊的环境障碍,系统的计算复杂度相对较低。然而,该方法需要异构设计机器人个体,不适用于多个相同机器人执行任务的场景。并且该方法的扩展性是受限制的,即随着机器人数量的增多,个体运动将相互耦合。

5.3.2 基于局部位置磁场的异构方法

除了利用微型机器人的异质性以外,利用非均匀的外部输入也可以实现独立控制。研究者对磁场梯度对磁驱动微型机器人的驱动效果进行了广泛的探索。合理设计局部非均匀的磁场梯度分布,可以实现多个微型机器人的独立控制。

Yousefi 课题组^[192-193]搭建了由 1 对亥姆霍兹线圈和多个旋转永磁铁组成的磁驱动平台,其中旋转永磁铁的旋转角度由 PI(比例-积分)控制器控制的电机来调节。基于解析模型设计的磁场,可以同时控制多个微型机器人。Wong 课题组^[209]提出了一种相同磁驱动微型机器人的操纵方法,并利用 4 个固定电磁线圈实现了 2 维平面上的操纵。Misra 课题组^[210]利用电磁线圈系统产生了可编程的非均匀分布的磁场梯度,并通过提出的领航-跟随控制器实现了多个相同磁性粒子的协调

运动控制和独立运动控制。Kantaros 课题组^[195-197]通过 MEMS(微机电系统)制作了一种由多个微细电磁线圈呈棋盘格状排布而成的基板,通过每个线圈的电流通断,即可实现局部磁场的产生与关闭。通过该棋盘网格微磁线圈基板,可以独立控制多个分布在基板平面上不同位置的磁驱动微型机器人。针对在 3 维空间运动的磁驱动微型机器人,Misra 课题组^[198]设计了由 6 组带铁芯的电磁线圈组成的电磁系统,可以通过解析模型实现期望的非均匀强磁场梯度分布,并用于实现 2 个相同磁性颗粒在 3 维空间中的独立位置控制。

每个网格电极都可以单独被激活以针定微型机器人,而未被针定的微型机器人可以使用外界全局磁场进行驱动。Shahrokhi 课题组^[161]提出了一种最优控制策略,可在具有防滑接触壁的空间环境中实现 2 个粒子的独立位置控制。2 个粒子在同一外界梯度磁场的驱动下具有相同的速度大小和方向,但是当某个粒子与环境中的防滑接触壁接触时,将会被针定而中止运动。通过求解最优的控制序列,可以使得 2 个粒子在不同的时间与障碍物碰撞,从而到达各自相应的目标位置。Rahmer 课题组^[201]设计了一种线圈设备,由 2 对能产生匀强磁场的正交亥姆霍兹线圈对和另外 1

对可以产生针定梯度磁场的特殊线圈对组成。利用均匀旋转磁场操作几个磁性螺杆进行运动,通过强磁场梯度锁定所有不移动的螺杆,以此来实现多个磁性螺杆的独立控制。

总之,这类方法不依赖于微型机器人的差异性结构或物理性质,可以独立控制相同或不不同的若干个微型机器人,具有较大的应用潜力。然而,该技术需要解决复杂的非线性问题来实现输入电流与局部磁场输出的映射,计算复杂度较大,并且电磁线圈数量较多,容易造成能量消耗过大、过热等不利后果。

5.3.3 基于局部位置环境的异构方法

选择性驱动或针定是多个微型机器人实现独立控制的另一方案。该方法的基本原理是通过在微型机器人的运动空间环境中设置一个或多个阻碍机器人运动的装置或障碍物,来选择性地锚定某个或多个机器人,而其他的机器人被磁场驱动。该方法不需要对多个微型机器人进行异构设计即可实现独立选择驱动控制。为了在全局电磁驱动系统中控制多个微型机器人,Sitti 课题组^[200]引入了静电力来选择性地锁定在相同磁场下运动的多个微型机器人。在微型机器人运动平面的基板上网格状地排布着交叉电极阵列,用于实现选择性驱动。

Gwangjun 课题组^[202]利用热响应微夹钳控制多个磁驱动微型机器人,提出了一种选择性的独立控制方法。该方法在外界磁场驱动这些机器人运动时,通过基于热响应水凝胶制作的微夹钳结构夹住某个微型机器人,可阻止其运动。

总之,这类方法不依赖于微型机器人个体之间的几何差异或物理性质差异,可以独立控制相同和不不同的微型机器人,具有较大的应用潜力。特别地,棋盘化的特殊基板可以选择性地驱动或锁定特定的微型机器人,实现多个微型机器人的完全解耦的独立控制。然而,该技术需要特殊的基板或者边界障碍物,极大地限制了它的应用场景范围。

5.3.4 基于机器人间的磁相互作用的方法

在上述研究中,不同微型机器人个体之间的相互作用力问题要么由于个体之间的距离较远而被忽略,要么通过选择特殊的微型机器人制作材料而被规避,要么由于远远小于外界施加的强作用力而被忽略。然而,对于某些类型的微型机器人,当个体之间足够接近时,内部相互作用力是不可忽略的。相比之下,微型机器人之间的相互作用力可以提供另一种独立控制的方法。

Diller 课题组^[203-204]结合磁驱动微型机器人相互间作用力提

出了双微型机器人的3维独立操作方法。在匀强磁场中,假设微型机器人的磁矩与磁场方向瞬间对齐,那么当施加一个匀强磁场时,可以对微型机器人之间的相对方向进行调整,从而可以控制微型机器人之间的作用力和相对位置。根据叠加原理,再额外施加一个梯度磁场,可以将多个微型机器人等效为一个整体来驱动。因此,通过调节外界匀强磁场方向,实现了多个微型机器人间相对位置和姿态的自主操作;通过外界额外的梯度磁场,实现了微型机器人整体的驱动运动。此外,该方法可以用于远程独立控制磁性夹持爪的整体运动及开合动作,具有良好的应用前景。Ferreira 课题组^[211]研究了由相同控制输入驱动的一对磁驱动微型机器人在允许轨迹上的局部可控性、轨迹规划结果和稳定性^[212]。

总之,这类方法为相隔较近的2个微型机器人的运动控制提供了解决方案,但将该理论推广到3个及以上的微型机器人的独立控制,则很困难。

6 结论与展望 (Conclusions and prospects)

综上所述,本文围绕着磁驱动微型机器人的驱动系统、运动原理、制作设计以及智能控制方法展开了综述,并总结了磁驱动微型机器人的智能化发展趋势。

磁驱动微型机器人的驱动系统主要分为静态小空间的磁驱动系统和动态大空间的磁驱动系统。静态小空间的磁驱动系统通常由静止固定的电磁线圈组合而成,可以在固定受限区域内产生可控磁场从而驱动微型机器人运动。移动大空间的磁驱动系统通常由移动装置与电磁线圈或永磁铁组合而成,可以通过移动装置改变所产生的磁场区域的位置,从而大大提高了微型机器人的运动空间。在外界磁场驱动下,磁驱动微型机器人可以在不同介质环境下实现高效运动。相对于单一运动模式的刚性微型机器人,具有更多自由度的软体结构的微型机器人有更大的潜力通过多运动模式实现高机动性和高适应性。在微型机器人控制方面,研究人员在早期阶段使用开环预编程控制方法来操控微型机器人,这种方法无需高精度控制。然而,在许多应用中,由于环境噪声的存在,需要对路径或位置误差进行校正,因此研究人员开发了一系列闭环控制方法以实现高精度的位置与路径跟随控制。相比于单个的磁驱动微型机器人的控制,多个机器人的独立控制以及大量机器人的群体控制也是微型机器人运动控制的难点。

在未来,磁驱动微型机器人几个潜在的研究方向包括:

更大空间的磁驱动装置。根

据应用的要求(磁场强度、自由度、工作空间等)优化驱动系统参数(线圈的组合方式、几何参数、电流参数,永磁铁材料参数、几何参数,移动装置的自由度等),以最大限度地提高驱动系统的适用性,提高微型机器人的驱动性能。

更多运动模态的微型机器人。在未来的生物体内应用场景中,微型机器人运动的介质、环境是复杂多变的。仅具有单一运动模态的磁驱动微型机器人将难以执行任务,而具有多种运动模态的微型机器人将更容易适应外界环境。

软体结构的医疗微型机器人。用于医疗的软体微型机器人的软材料需要有较大的弹性变形能力,以使机器人具备主/被动运动和环境适应能力。这些材料必须能够方便地装载或覆盖药物、显像剂或生物传感分子,并集成功能微/纳米材料,如细胞、生物材料、合成微/纳米颗粒、电线或管,以实现可能的驱动和医疗功能。

微型机器人自主导航。目前的微型机器人控制任务通常要假设一个简单的静态环境,但这与现实环境有很大的不同。未来需要识别复杂环境和微型机器人的状态,进行动态运动规划和控制等。基于深度学习的方法能够解决动态环境下的识别和控制问题,促进了磁驱动微型机器人在许多

领域的应用,并且深度学习在网络结构上的多样性也为磁驱动微型机器人运动控制的创新提供了大量的机会。

多个磁驱动微型机器人控制。单个磁驱动微型机器人的负载能力和操作能力总是有限的,像人类群体一样,为了完成更加复杂的任务,需要同时实现多个磁驱动微型机器人的控制。通过建立多个磁驱动微型机器人的独立与协同控制策略,可开发多个磁驱动微型机器人在3维空间内的导航方法。此外,对于在复杂环境下具有良好适应性和高度自主水平的磁驱动微型机器人,可以通过对多个机器人的编队控制来实现协同控制。○

来源: 机器人

作者简介

徐天添(1987—),女,博士,研究员。研究领域:微纳机器人的设计与控制,微纳机器人的生物医学应用技术。

黄晨阳(1995—),男,博士生。研究领域:磁驱动微型机器人的运动与控制,多微型机器人系统。

刘佳(1985—),男,博士,副研究员。研究领域:微型机器人导航与控制。

复杂系统管理学：从概念到仿真，不同时期基于复杂理论的管理学模型

导语

模型代表人类对自己认知事物的抽象和概括，管理领域的模型则是对企业管理的抽象和概括，为企业管理提供解释力，以便管理者决策或规避风险。陈雁鸿老师介绍了不同时期基于复杂理论的管理学模型，并分享了自己从实践视角出发对这些模型的思考。他山之石可以攻玉，希望通过了解不同时期基于复杂理论的管理学模型，可以帮助我们建立、完善自己的模型，并在实践中更好地使用。

研究领域：复杂系统，企业管理，复杂理论，概念模型，仿真建模，AGI

什么是复杂系统？贝塔朗菲给出的定义是：由两个及两个以上相互作用的部分构成的整体。身边无处不系统，个人是系统，群体也是系统，机器是系统，生物体的也是系统。系统会表现出一些特征，譬如自组织、涌现、临界相变等等这些复杂的现象，因此也被称为复杂系统，复杂系统科学即研究这一类问题的学科。

这里把企业或组织看作一个复杂系统，基于此，沿着时间的脉络，从组织理论系统学派的兴起讲起，分成三个部分对不同时期基于复杂理论的管理学模型进行介绍和讨论。第一部分介绍概念模型，系统学派早期更多的是抽象的理论化概念模型；第二部分介绍仿真建模，系统学派发展到上个世纪末发生了巨大的转变，更加偏重仿真；第三部分介绍 AGI，今天它对我们的影响之大难以忽略。

1. 概念模型

1.1 概念模型 0：权变理论

$Y=X_1+X_2+X_3+\dots+X_N$ 是我们在分析事情时常用的一个简单数学公式，传统管理学模型中会有大量这样的结构出现，比如波特五力、SWAT 模型、生产领域的人机料法环、项目管理领域的 HEROS 模型等，这个结构表示一个问题可以拆分为不同部分的相加。

权变理论即将问题的每一个部分视作一个权重可变的因子，其中因子权重的变化可能是连续

的，也可能是离散值，甚至有时会是另一个因子权重的函数。

虽然权变理论是系统学派诞生之初最具代表性的理论，但它的逻辑仍然是还原论的。权变理论在分解要素对结果的影响时通常从净效应的视角出发，不考虑相互作用，而从系统的定义来看，相互作用几乎可以认为是系统的本质，因此，忽略相互作用的权变理论并不系统。

这里作概念区分不是完全否定权变理论的价值，而是要提醒大家，当分析的要素有三个及以上时，权变理论等还原论方法就已经无法求解了。例如三体问题，三个星体相互作用的情况无法用牛顿力学方法求解。这里不再展开，感兴趣的朋友可以看看复杂管理学读书会第一季第九期杜运周老师的《复杂动态视角下的组态理论与 QCA 方法》以及因果科学的读书会。

1.2 概念模型 1：组织系统模型

组织系统模型是第一个真正基于系统科学的模型。组织系统模型有两个要点：第一，它强调

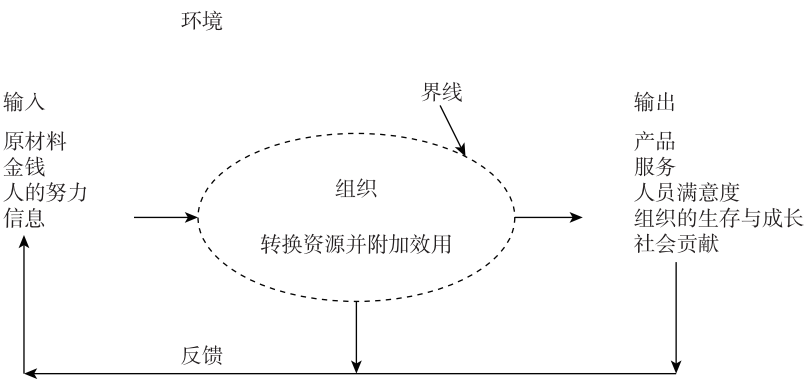


图1 组织的开放系统模型

组织是一个开放的系统，与外部环境做着各种物质信息交换，有输入、有输出、有界线；第二，它把组织内部从输入到输出的过程称为一个系统转化的过程（早期理论中视为黑箱）。

组织系统模型通常将组织划分为几个不同的功能部分或分系统，除了外部环境超系统外，组织系统模型还包括以下分系统：

结构分系统：可类比为人体中的肌肉和骨骼，这个分系统包括组织的架构、流程等支撑组织框架的元素。

管理分系统：可类比为人体中的神经系统，这个分系统负责组织的反馈、控制和调节功能，确保组织的运行效率和效果。

社会心理分系统：可类比为人体的营养输入和能量供应系统，这个分系统包括人力资源、领导力、群体动力、激励等，为组织提供驱动力。

技术分系统：可类比为人的知识、技能和工具应用，这个分

系统包括组织的知识储备、技术提升、设备装备等。

目标与价值分系统：可类比为人的目标设定和价值观，这个分系统定义了组织的目标、使命和价值观。

该模型的核心观点是各个分系统之间没有绝对的优劣之分，关键在于各分系统之间的协调和整合，以保证组织健康、长久的

良好运行。例如，结构分系统中的组织架构并不一定扁平结构就优于其他结构，重要的是选择与其它分系统协调的结构。

在这个组织系统模型的基础上，衍生出了许多管理工具和方法。例如，《流程圣经》就是一种管理工具，其副标题“管理组织空白地带”强调了组织中可见的部分并非最关键，连接各个实体的不可见部分（如流程、沟通、协调等）才是关键。这种视角有助于管理者更好地理解 and 优化组织的运作机制。

“六个盒子”模型是由 Marvin 提出的一种简化版的组织系统模型，它更易于理解和应用。

组织系统模型在组织诊断中表现出极高的性价比和效率，其解释力得到了广泛的认可。然而，

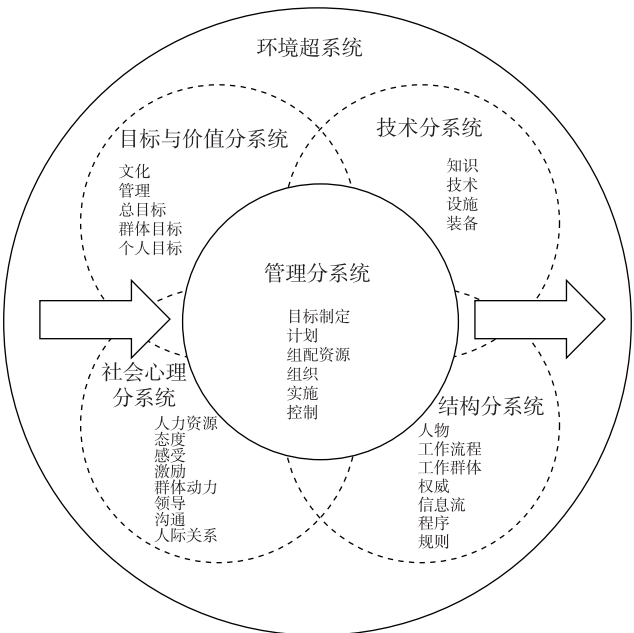


图2 《组织与管理-系统方法与权变方法》F.E.Kast&J.E.Rosenzweig

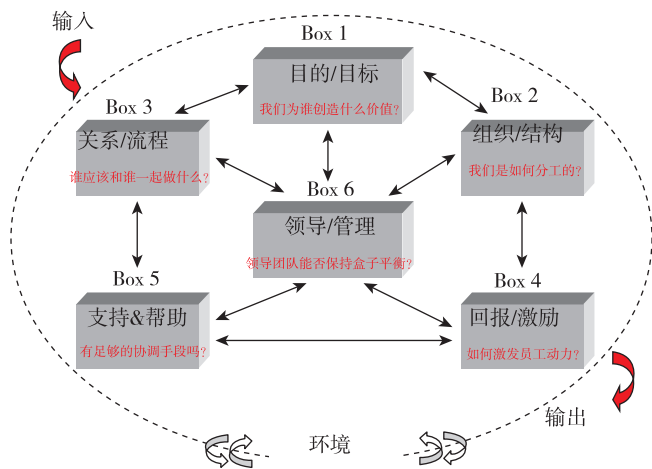


图3 《组织诊断-六个盒子的理论与实践》——马文·韦斯伯德

这个模型也存在一些局限性：

1. 依赖诊断者个人水平：类似于中医把脉，诊断结果的质量很大程度上取决于诊断者的专业能力和经验。
2. 工作量大：如果完全依赖人力进行分析，处理大量的数据和关系会非常耗时和繁琐。
3. 各子系统的定义有争议：由于组织系统是虚实结合的，不像物理系统那样层次分明，因此在划分子系统时可能会出现定义不清或争议的情况。
4. 对子系统间联系的关注不足：虽然模型强调了子系统的定义，但在实际应用中，子系统之间的联系往往更为重要且复杂，而“六个盒子”模型在这方面可能有所欠缺。
5. 带有权变思想的色彩：组织系统模型可能受到权变管理理论的影响，这种理论认为管理策略应根据具体情况灵活调整，但

这可能导致模型缺乏普适性和稳定性。

正因为这些硬伤，以“六个盒子”为代表的组织系统模型逐渐淡出人们的视线，取而代之的是一系列软系统思考方法。这些新方法更加注重系统间的动态关系、适应性和整体性，更加问题导向。

尽管如此，组织系统模型在某些情况下仍具有价值，特别是在相对稳定的环境下进行全身扫描式的诊断。对于想要了解自身状况的企业来说，使用类似的工具进行诊断仍然是一个值得尝试的选择。此外，随着 AI 技术的发展，有可能通过引入 AI 的力量来解决组织系统模型的一些局限性，如依赖个人水平和工作量大的问题，使其在未来重新焕发生机。

1.3 概念模型 2：软系统思考

既然硬系统的划分方法硬伤

太多，不如放弃划分的努力，直接基于系统思想去解决企业面临的问题，所以一系列软系统思想应运而生。这一系列的思想有一些共性。

首先是问题导向，软系统从问题出发，把企业看成一个整体去解决问题。同时，那个时期已经有了自组织的概念，系统理论认识到组织中个体交互所产生的宏观效应之重大，所以软系统方法特别强调个体的主动性以及个体交互产生的效应。

接下来我会介绍三个各具特色的软系统模型，这三个模型充分展示了软系统思想的精髓。

第一个是双线模型。切克兰德和索尔斯在著作《软系统方法论实践》（1990）中提出了“双线模型”。双线模型的核心观点是将企业要解决的问题从现实中抽离出来，运用系统的方法来解读这个问题，现实世界和系统思考间的分界线就是它最值得称道的地方，对识别模型与现实之间的差异起到重要作用。

双线模型的流程中，首先要描述问题情境，然后运用系统思维进行建模。接着，我们将构建的模型与现实中实际发生的状况进行对比，找出理论模型与现实状况之间的差异，这些差异就是我们需要着手解决的问题。

在整个七步流程中，有几个亮点特别值得关注。

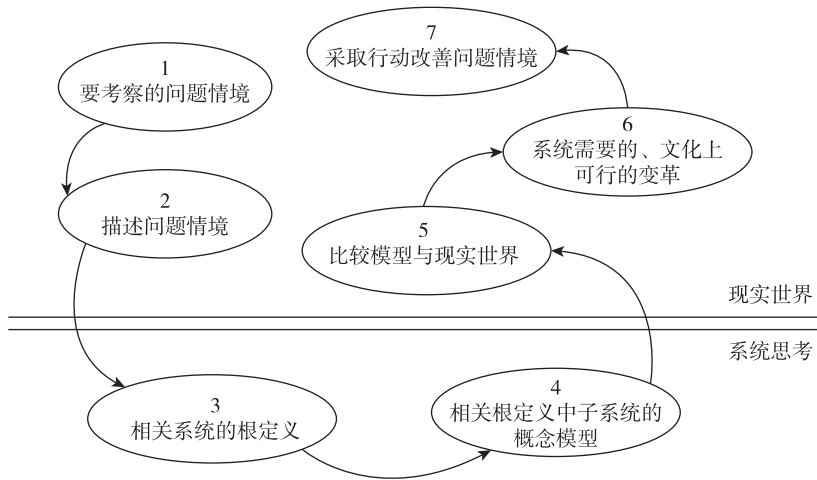


图4 《软系统方法论实践》——切克兰德、索尔斯

首先，在描述问题时，双线模型非常强调使用图像化或视觉化的方式。这种方法的优势在于，人类大脑对图像的认知通常更为整体和全局，而对文字或概念的认知则较为线性和局部。因此，通过图像化的方式认识问题，能更容易调动大脑的全局观念来看待问题。在实际工作中，尝试使用绘画等方式来描述和分析问题，往往比口头表述、列表或书面表达效果更好。这有助于提升问题分析的整体性和直观性。

其次，双线模型在将问题图像化描述之后，尝试用一个系统性的模型去解读问题。与组织系统模型不同，双线模型提供了一些指导性的意见，根据问题自身的特点构建系统模型，而不是强行将问题纳入某个预设模型中。这种问题友好的方式允许根据问题的具体情况灵活选择架构。

在定义问题的目标后，可以

构建若干个不同的系统模型，从不同方向拆解和解决问题。例如，针对业务团队开展业务不利的问题，可以构建对市场信息敏感的系统、狼性系统、合作良好的系统等。

在第四步，双线模型会构建一个具体的模型。这个模型旨在达成某个目的，通过某种手段实现特定的结果。在这里，目标和结果被明确区分，这是一个重要的观点。在系统中，特别是组织系统模型中，我们强调应将目标和结果区分开来。因为目标只是一个方向，实际采取的措施可能会带来与预设目标相近但不完全吻合的结果。

这种对目标和结果的理解不同于传统的目标管理理念，后者倾向于设定目标并期望通过线性步骤直接实现。然而，在系统中，目标和结果之间存在一定的容错空间，这是反思传统目标管理和

绩效管理失效问题的一个重要视角。

总的来说，双线模型通过区分目标和结果，以及运用图像化和系统性方法解读问题，为解决问题提供了独特的思路和实用的工具。

第二个模型是交互式规划，它并不强调特定形式的模型，而是着重于交互的过程。

交互式规划提倡的原则包括参与原则、连续性原则和整体性原则。参与原则即在问题分析和规划设计过程中必须有尽可能多的相关方参与，改进应当基于委托人的标准进行。这意味着没有一个客观存在的、绝对好的标准。所有的决策和行动应基于主观的认知和期望的方向，即“适合就好”。这是一个重要的观点，因为在传统的企业管理中，常常会存在机械对标其他成功企业而忽略具体情境的误区。连续性原则指出改善是持续的，因为系统不断变化，不能一次性完成改善就算了事。整体性原则则强调系统是各部分相互作用的整体，不能只改进某一部分。

交互式规划包括五个步骤：

1. 明确地表述问题；2. 目标设定；3. 手段设计；4. 资源规划；5. 实施与控制。其中，在第二步设定目标时，交互式规划采用两次理想化设计，一次是有限设计，基于当前的人力、财力和市场情况，

一次是无限设计，假设技术已经发展到理想状态，不考虑现实限制。这种结合有助于企业看到长远的可能性，并在做长期规划，特别是变革性规划时，找到眼前和远期的差异。

交互式规划的提出者强调管理者应集中管理组织部分之间的相互作用，而不是直接进行控制。然而，该方法被诟病的一点是过度强调共识，认为所有问题都可以通过讨论找到共识点。但实际上，许多复杂的问题可能存在不可调和的利益冲突，这是该方法论假设中被忽略的部分。尽管如此，我们仍然可以使用交互式规划的工具和方法来追求共识。

同时，也存在另一种完全不追求共识的工具，这就是第三个软系统模型——基本假设表面化与检验，它认为组织本身就是各种不同观点的角逐场，应该通过冲突和对抗来找到问题的解决方案。

这种方法认为组织系统是一个主观的系统，每个人眼中的系统都是不同的，因此冲突是必然存在的。在使用这种方法时，可以借鉴其分组技巧，通过不同的分组方式（如基于职能、组织层级、地域、时间等）来最大化组间的差异和冲突，从而产生更多的创新思路。这种方法特别适用于变革或创新的工作坊设计。

总之，软系统思想在做变革

或创新工作坊时非常有用。硬系统方法和软系统方法各有特点，都在理论发展中不断得到尝试和改进。如果有兴趣深入了解，可以参考 Michael C. Jackson 的《系统思考 – 适于管理者的创造性整体论》。

1.4 概念模型 3：生存系统模型

生存系统模型看似复杂，但其核心观点非常有趣。该系统由五个部分组成，其中系统 1 为核心部分，可以独立完成组织系统的输入、输出和转化，2、3、4、5 部分被称为超系统，它们为系统 1 提供支持，包括协调、开发和政策等。

生存系统模型中，强调了系统的主次关系，与前面系统模型

不同，系统模型只强调系统之间的协同作用。生存系统模型更贴近组织的本质，因为组织的功能结构通常有一个中心或核心竞争力的部分，其他部分则是为其服务的。

该模型还认为组织是分层的，每个系统 1 内部也可以呈现出类似的结构，具有自相似性。这个模型的提出者以教育系统为例进行了解释。从大学到学科，再到具体的教育层次，都可以用这个模型进行分析。在最外层的循环中，我们可能看到的是大学 A、大学 B 和大学 C 等不同的高等教育机构。当我们想要深入分析其中一所大学时，大学可以被进一步划分为不同的学科领域，如工程、科学、艺术和人文等。在每

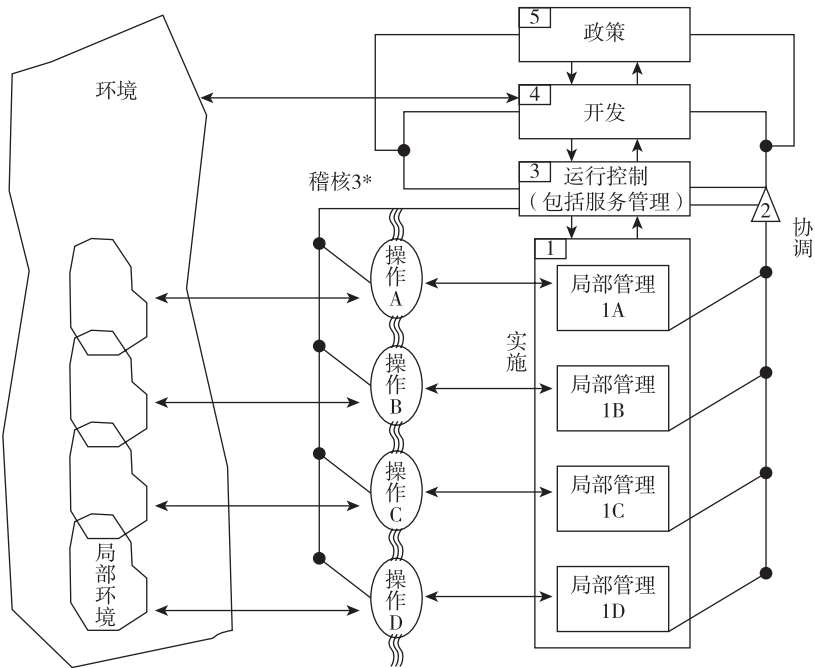


图5 组织控制论：Stafford Beer “生存系统模型”

个学科领域中，我们可能会有一个重点关注的层面，将这个重点关注的层面再进行拆分，我们可以看到更细致的结构，如本科教育、研究生教育和科研活动等。这些部分各自构成了一个独立的系统，它们都有自己的输入、输出和转化过程。

相比于硬系统模型的单纯功能分层，生存系统模型的独特之处在于其自相似性和层次性，使得它在分析涉及众多要素的复杂系统时更为有效。例如，它可以用于分析涉及面非常广，上至国家政策、国际关系，下至平民百姓的日常生活的一类问题。生存系统模型可能不太适合直接分析企业，但在进行产业、行业或政策分析时，它是一个很好的工具。因为它可以帮助清晰地梳理出各个层级的关系，以及每个层级的主干和分支。

1.5 概念模型 4：复杂性理论

上个世纪末以来出现了大量基于复杂性的学说，也有许多相关著作，但其中很多被认为是缺乏严谨性和理论基础的“流行文化”。对于没有理论基础的人来说，阅读这些“流行文化”可能会感到困惑，因为其中存在许多不严谨甚至偷换概念的内容。

当然，在“流行文化”之外，也有一些可以称为“模型”、值得一读的著作：《规模》和《规模法则》，它涉及幂律，探讨的是一种普世规律，其推导过程有理有据，是比较有价值的；《战略管理与组织动力学》，其理论基础是复杂适应系统（CAS），对组织战略管理中演化学派感兴趣的话可以阅读这本书，但需要注意的是，这本书的内容比较专业、晦涩。

此外，Cynefin Framework 和 Stacey Matrix 这两个模型在一定程度上也是实用的。但对有理论洁癖的人而言，从复杂科学的理论来看，它们会有些生造概念的嫌疑。这反映管理领域的一些学者喜欢创造概念来填补自己模型中的理论空白，虽然这些模型有时能用，但因其概念的似是而非可能会造成混淆。

至于“自组织”，这个概念已经被滥用，衍生出了五花八门、良莠不齐的各种模型。我将在以后的分

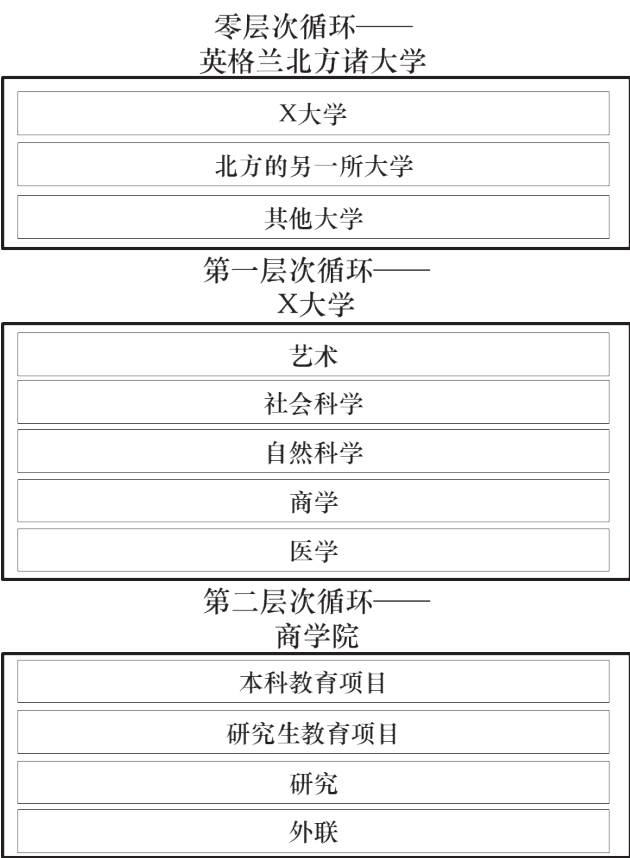


图6 生存系统模型在教育系统的应用

享中专门剖析各种自组织模型的优点和缺点。

1.6 概念模型小结

在概念模型这一部分，我分享了两个硬模型和三个软模型，以及近期的一些流行趋势。从中可以发现，近年来真正具有模型性质的东西越来越少。这可能因为复杂科学的发展历程是从共性研究转向个性研究的过程。

在复杂科学的大家庭中，管理学往往处于较为边缘的位置，常常是跟随其他学科的突破而发展。早期，当其他学科的研究成果关注共性时，管理学可以轻易借用这些成果来解释组织或企业的复杂性。但随着各学科研究的深入和分化，不同学科的结论可能不再完全适用于组织或企业。因此近年来似乎没有能脱颖而出的模型，许多讨论变得零散和鱼龙混杂，更多依赖于借用和解释概念，而非提出新的模型。

在我看来，简单地将其他学科的成果套用到组织或企业上是行不通的，我们需要将企业真正视为一个系统，采用专门的科学方法进行研究、得出结论，这才是未来的发展方向。

尽管前面提到的模型当下仍有实用性，但这种借用和套用的方法在未来会越来越局限。相应地，我们将转向下一个主题——仿真。

2. 仿真建模

在讨论仿真之前，有必要解释一下“计算不可约”的概念，以理解为什么仿真会成为研究复杂系统的有效方法。复杂系统与简洁的数学模型不同（例如质能方程，在非常简洁的情况下依然保持极佳的解释力和预测能力），复杂系统之复杂性即在于简化后可能丢失许多关键信息。例如，混沌理论中著名的逻辑斯蒂映射（logistic map），虽然基于一个看似确定的公式，但经过多次迭代后会出现混沌现象。这意味着将复杂系统简化为一个确定的公式并不能完全解释这类现象，这就是所谓的“计算不可约”。

在计算不可约的情况下，仿真方法变得非常可取。仿真能够更真实地模拟复杂系统的运行过程，保留更多的细节和动态特性，从而为我们提供更深入的理解和更具针对性的管理实践指导与解

决方案。

2.1 仿真建模 1：系统动力学

系统动力学是一种仿真方法，它通过存量和反馈回路等概念来分析系统的动态变化。系统动力学的经典案例是《第五项修炼》中的啤酒游戏，它可以让我们体会到局部扰动对整体的影响，以及全局视角的重要性。

系统动力学适用于那些可以被类比为机器的组织，如生产型企业或者是不太依赖于人的创造力的组织。这类组织的数据和因素比较容易获取和模拟。但系统动力学也有一些局限性，比如它忽视了人的因素，如员工的积极

性、态度和能力等，这些在企业管理中是非常重要的。如果没有考虑这些因素，系统动力学可能无法真实反映组织的实际情况。

系统动力学的基本概念和实际应用可以参考相关的书籍或者软件。如果你想了解系统动力学的理念，可以阅读《系统之美》等概念性书籍。如果你想学习并应用系统动力学，建议学习专业的教材，如王其藩的《系统动力学》，并使用相关的软件来辅助你的学习和实践。

2.2 仿真建模 2：Agent-Based Modeling (ABM)

ABM 是一种计算模型，它由许多单元（或称为代理、个体）

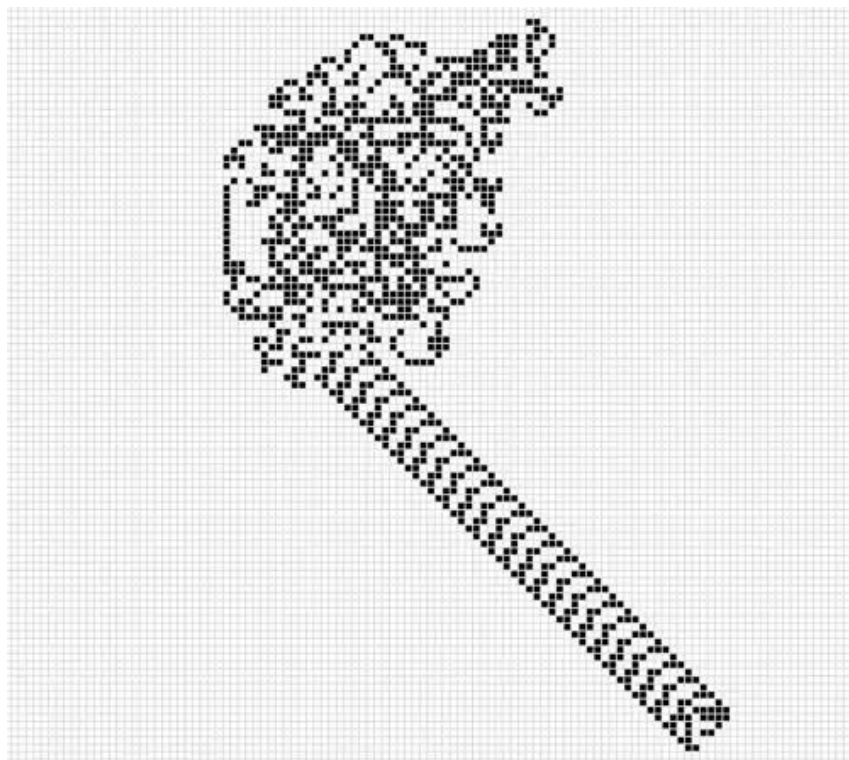


图7 朗顿蚂蚁的“高速公路”

组成，每个单元都有自己的状态和行为规则。ABM 的运行基于这些规则，使得单元的状态随着时间不断变化。ABM 能够模拟出许多复杂系统的特征，如涌现、自组织、临界相变等。

朗顿蚂蚁 (Langton's ant) 是一个非常著名的二维 ABM 例子。在这个模型中，一个小蚂蚁遵循以下规则：如果它所在的格子是白色的，它就向右转 90 度，向前走一步，并将该格子变成黑色；如果它所在的格子是黑色的，它就向左转 90 度，向前走一步，并将该格子变成白色。

虽然一开始蚂蚁看起来像是在乱跑，但大约在 1 万步左右，我们会看到一个规律性的结构开始涌现，这就是所谓的“高速公路”。这是一个典型的涌现现象，基于非常确定的规则，在经过若干轮迭代后，系统会呈现出规律的结构。有趣的是，每次运行时，高速公路的起点和走向都是不确定的。

作为计算模型，ABM 还可以用来模拟物理系统和生物系统。如果你感兴趣，可以查看相关的模型库，其中包含许多有意思的模型。通过这些模型，我们可以更好地理解 and 探索复杂系统的特性。

ABM 也被应用在社会学领域。其中最著名的例子可能是种族隔离模型。在这个模型中，绿色和红色的点代表不同肤色的人。每个人都倾向于与自己同类的人在一起，每个人的幸福感取决于周围同类人的比例。如果这个比例低于某个阈值，他们可能会基于个人舒适度和偏好做出选择，导致群体之间的分离。

种族隔离模型表明，即使没有任何种族歧视的意图，个体与同类人相邻的偏好也能在宏观上呈现出种族隔离现象。

该模型还有一个有趣的地方，即存在一个临界相变的状态。当对同类人的偏好设定为 75% 时，模型最终会显示出种族隔离状态，但当偏好设定为 76% 时，隔离状

态会消失，呈现出一种宏观上的临界状态。

由于社会学科中往往难以进行大规模采样观察或重复实验，ABM 工具为我们提供了一种新的选择。通过提取相关的特征或数据来建模，我们可以在模型上模拟并演示各种可能性。因此，近年来人们开始尝试将 ABM 应用于企业环境中，以更好地理解和管理问题。

但是也必须指出，将 ABM 应用于企业实际情况会遇到一个难题，那就是人的特性难以量化，进而影响模型的解释力。更多情况下，它起到的是启发性的作用。

2.3 仿真建模 3：网络科学

网络科学目前在组织管理和企业层面有一些应用。

我们可以直接构建组织或网络的结构，通过分析其结构来了解其功能特性，如效率、最短路径、连通性等。

此外，关于信息在网络中的传播也已有很多理论研究成果，如模型和二次传播理论等，这些理论在一定程度上可以指导我们在营销实践中的行为。例如，如何引爆热点、在哪些特定群体中推广以实现事件的爆发和病毒式营销等。在社交网络领域，随着直播的兴起和种草、带货、KOL 等概念的普及，基于社群的营销策略也日益丰富。根据对社交网络的分析，我们发现越来越多的

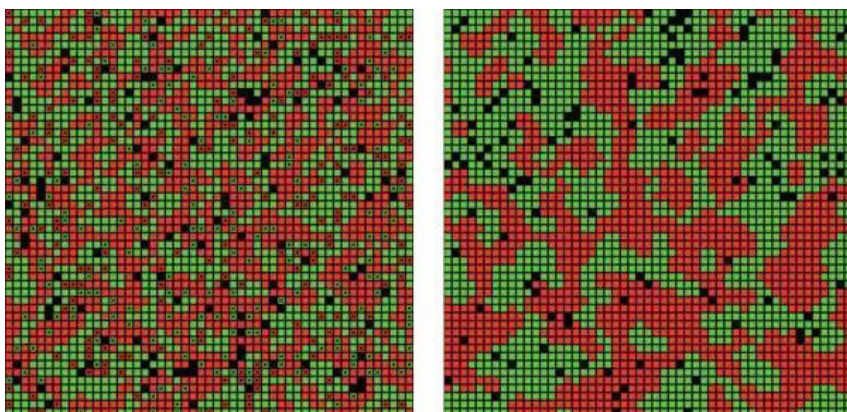


图8 种族隔离模型的初始状态 (左) 与隔离状态 (右)

种草活动不再只依赖大型头部主播，而是转向腰部主播。这是因为许多腰部主播的社群网络结构具有更高的聚集系数，这意味着他们的社群粘性更强，能产生更好的带货效果。

尽管网络科学理论丰富且颇具实用性，但在实际应用中仍然存在问题。

在我与一线营销人员交流这些理论时，他们虽然感到新奇并有所启发，但往往会因为担心风险而犹豫不决。即使模型提供了看似确凿的理论依据，他们仍可能倾向于坚持传统做法。

因此，在实践层面上，我们亟需更多企业尝试和探索。或许也需要一些突破性的事件来证明新方法的价值，促使更多人愿意迈出实践的第一步。我深刻体会到，理论与实践之间的鸿沟需要大胆的创新者去跨越，这是我们共同面临并需要解决的问题。

2.4 仿真建模 4：社会网络分析

社会网络分析是我在仿真模型中运用最为自如的模型。这可能是由于社会网络分析或者社会计算从诞生之初就面向企业或组织，并非从其他学科借用过来的方法，因此在研究组织群体时更加贴合实际，结论也更符合现实情况。

社会网络分析经过多年的发展，研究领域非常广泛，包括对个体、群体的研究，从节点出发

的关系研究以及基于整个网络结构位置的研究，也包括最近很火的自组织概念，如个体间交互导致的整体结构变化以及整体对个体的影响等方面。

然而，挑战在于如何将这些研究成果真正落实到实践中，这是我们需要努力的方向。这些研究方法如果运用得当，可以为企业提供非常独特的解决问题的视角，有兴趣的伙伴不妨尝试往这个方向发展。

2.5 仿真建模小结

在我看来仿真建模是未来研究的一大方向，而且如果我们能恰当地使用这些具有强大解释力的工具，仿真建模可以成为一个低成本试错的有效方式，对企业决策具有很高的辅助价值。

然而，这个领域的难点也非常明显。

首先，技术要求是一大挑战，这些软件通常需要投入大量的时间和精力去学习和掌握，而一线的管理人员往往忙于日常事务，很难有足够时间和精力去做这件事。

更重要的是，当前使用的许多仿真模型借鉴自其他学科，可能并不完全符合组织特性。组织系统既展现出机械、规律的特性，又包含人的自主意识、适应性、学习能力和变化等许多复杂因素，如何真实地将这些因素融入模型是一项艰巨的任务。

尽管仿真模型面临诸多技术难题，但我们可以尝试将其与前面提及的概念模型相结合，在实践中进行探索。在无法获取精确数据定义模型的情况下，如果先建立一个概念模型作为基础，基于该模型做出一些假设，那么仿真的结果可能会具有启示性，这是一个值得尝试的方向。

3. 走向 AGI

我并非 AI 领域的专家，作为企业管理实践者，我们更关注新技术如何在实际场景中应用。

AI 的应用最初主要集中在数字孪生、数字化和智能化等方面，许多企业试图追赶这股热潮。随着 ChatGPT 等技术的发展，AI 对人的影响变得越来越明显。不仅客服和程序员的工作被 AI 改变，整个工作流程的自动化生成也在发生变化。

然而，在将这些新技术应用于企业场景时，我发现了一些问题。

对于一些基础管理问题，大模型能够提供平均水平甚至以上的答案，但是，当涉及到更专业、更具体的问题时，回答准确性明显降低，甚至出现答非所问的情况。因此，当企业真正考虑使用 AI 时，还面临如何在垂直领域构建起 AI 应用的重大挑战。

另一个值得注意的地方是智能制造部分。例如当下讨论火热的 agent，我们期望它可以自己分

解任务并调配资源，但实际离实现这一目标还相当遥远。AI 目前还无法独立完成任务，很多过程仍然需要人来完成。

另外，在企业管理中，我们可以使用 AI 处理招聘需求、定薪、岗位匹配和绩效考核等任务，看似大大提高了效率，但如果仅仅将 AI 视为替代人力、机械化执行这些任务的工具，可能忽视了其真正的价值。在企业环境中，我们并不希望只是通过使用 AI 取代人力提高效率，而是希望真正改善组织的绩效。曾经的 Alpha-Go 能在围棋游戏中找到超越以往认知的最优解，但那是在一个有限空间和两方博弈的场景下，在

管理实践场景下，如今的 AI 能否找到整体最优解？这或许需要 AI 与人类智慧相结合，使 AI 应用建立在人类认知基础上，从而真正实现组织绩效的提升。

4. 总结

企业本质上涉及到两个核心活动：经营和管理。经营是指将各种资源转化为产品或服务的过程，而管理则是通过运用各种策略和方法，以提升经营效率、规模化生产能力、降低成本，并增强对市场变化的适应能力。管理模型是为服务企业而设计的，它是企业的强大工具，能够帮助我们构建理论框架，识别关键的管理环节，实现更高的

运营效率、更大的规模生产、更低的成本，以及解释和预测业务中的各种现象。

AI 的出现给企业带来许多变化，也引发了人们对工作岗位可能被替代的不安。确实，AI 正在改变商业生态和运作规则。正因为如此，深入理解 AI 的内在逻辑，并在构建 AI 模型时融入更多的企业管理深层认知，变得至关重要。通过赋予 AI 更深层次的认知，可以使它在执行任务时更好地理解 and 适应复杂的管理情境，从而为企业提供更具有洞察力和价值的建议，提升决策效率、推动企业的持续发展和创新。○

来源：集智俱乐部

大模型安全与对齐：复杂系统视角下的 AI 安全

导语

大模型的狂飙突进唤醒了人们对 AI 技术的热情和憧憬，也引发了对 AI 技术本身存在的社会伦理风险及其对人类生存构成的潜在威胁的普遍担忧。尤其在复杂系统视角下，大模型正在展现出非线性的、远超预期的

涌现能力，这是 AI 技术的新机遇，也是 AI 安全的新挑战。在此背景下，大模型安全与对齐得到广泛关注，这是一个致力于让 AI 造福人类，避免大模型失控或被滥用而导致灾难性后果的研究方向。

研究领域：复杂系统，大模型安全与对齐，深度学习

< PRAGMATIC AI SAFETY >

Complex Systems for AI Safety [Pragmatic AI Safety #3]

by Dan H, ThomasW 25 min read 24th May 2022 1 comment ***

原文题目：Complex Systems
for AI Safety

原文地址：[https://www.
alignmentforum.org/s/FaEB-
whhe3otzYKGQt/p/n767Q8H-
qbrteaPA25#Resources_on_](https://www.alignmentforum.org/s/FaEB-whhe3otzYKGQt/p/n767Q8H-qbrteaPA25#Resources_on_)

Complex_Systems

引导 AI 研究领域走向更安全的道路至关重要。然而，由于其复杂性以及未来发展的高度不确定性，我们很难理解如何塑造它。因此，仅仅是初步思考如何引导该领域，就可能会令人生畏。我们不能过于简化假设以掩盖该领域的复杂性，但也不能过少假设，以至于无法产生任何可操作的见解。

幸运的是，复杂系统领域提供了出路。复杂系统研究已经找出许多种系统的共性，并识别出了它们可以被建模和改变的方式。在本文中，我们将解释复杂系统背后的一些基础理念，以及如何将它们应用于塑造 AI 研究生态。在此过程中，我们还将展示深度学习系统体现了复杂系统的许多基本属性，并阐述复杂系统如何对深度学习 AI 安全研究有所裨益。

1. AI 安全的系统视角

背景：复杂系统

在考虑改变深度学习等经验领域的轨迹以及防止高风险系统的灾难时，必须对复杂系统有所了解。复杂系统是一个完整的研究领域，我们无法在这里描述每一个相关细节。在本节中，我们将尝试仅对该领域进行一个非常高层次的概览。在本文的最后，我们提供一些学习更多的资源。

复杂系统由许多相互作用的组件构成，展现出涌现的群体行

为。复杂系统高度互联，使得分解和还原性分析效果欠佳：将系统拆解为各个部分并对其进行分析，并不能很好地解释整体。然而，复杂系统对于统计学来说又过于有序，因为系统中的相互依赖关系打破了统计学中许多基本的独立性假设。复杂系统无处不在：金融系统、电网、社会昆虫、互联网、气候系统、生物细胞、人类社会、深度学习模型、大脑和其他系统，都是复杂系统。

将 AI 安全性与提升其他特定系统的安全性相比较可能颇具挑战。保障 AI 安全，是否类似于保障火箭、电厂或计算机程序的安全？虽然可以寻找一些类比，但也存在许多不同点。更为实用的观点是讨论如何提高复杂系统的安全性。在进行系统理论风险分析时，我们可以抽离出具体内容，仅关注各个系统中共享的结构。与其讨论某个高风险技术的成功之处，通过系统视角，我们可以讨论在大量技术中取得成功的共性，这样可以避免过度拟合到特定的例子上。

从复杂系统理论中得出的核心教训是，还原论是不够的。将一个系统分解为孤立的事件或组件，然后尝试分析每个部分并将结果结合起来，这往往是诱人的。这种做法错误地假设分离不会扭曲系统的属性。实际上，系统各个部分并不是独立运作的，而是

受到反馈回路和非线性相互作用的影响。仅仅分析部分之间的两两相互作用不足以捕捉到完整的系统复杂性（这是为什么 n-gram 模型远不如注意力模型的原因之一）。

危害分析（hazard analysis）过去仅仅采用还原论方法。在早期的模型中，事故被分解成一系列被认为导致该事故的事件链，所谓危害即导致事故的根本原因。复杂系统理论已经在许多行业中取代了这种分析方法，部分原因是在分析复杂系统时，寻找灾难的最终“根本原因”并不是一种有效方法。不同于寻找负责安全的单一组件，识别包括社会技术因素在内的众多因素是有意义的。系统视角不是将事件分解为因果关系，而是将事件视为系统部分之间复杂互动的产物。

认识到我们正在处理复杂系统，现在我们将讨论如何利用复杂系统的见解来帮助使 AI 系统更安全。

改善贡献因素

“直接影响”是指由简单、短暂和确定性因果链引起的影响，相对而言比较容易分析和量化。然而，这并不意味着直接影响总是实现影响的最佳途径。如果一个人只专注于直接影响，就无法优化以间接方式实现影响的途径。例如，EA（有效利他主义）社区建设是间接的，但如果没有它，致力于解决某些问题的资金和人

员将大大减少。成为亿万富翁并捐赠资金也是间接的，但如果没
有这一点，资金将明显减少。同
样地，安全领域建设可能不会直
接对技术问题产生立即的影响，
但它仍然可以极大地改变致力于
解决这些问题的资源，并进而有
助于解决这些问题（注意，“资源”
不仅仅指金钱，还有能够取得进
展的研究能手）。在一个复杂系
统中，必须考虑和优先处理这些
间接 / 分散因素。

AI 安全并不仅仅是寻找安全
机制，比如可以添加的机制来使
超级智能完全安全。这有点像说
计算机安全只关乎防火墙，这是
不正确的。信息保障的发展是为
了解决信息安全中的盲区，因为
我们不能忽视复杂系统、安全文
化、协议等因素。

在 AI 安全的研究方向中，通
常被认为需要有一个简单的直接
影响故事：如果这种干预成功，
它对实现安全和对齐的 AGI（通
用人工智能）有何用处？“这如何
直接降低风险”是一个出于善意
的问题，但它忽略了显著的远程、
间接或非线性因果因素。这些分
散因素不能被忽视，我们将在下
面进行讨论。

关于简单的影响理论的权衡 说明

AI 安全研究足够复杂，我们
应该预期理解其影响理论可能需
要对特定领域有深入的知识和专

业技能。因此，对于没有任何背
景的人来说，在短时间内很难简
单地解释这项研究的“影响理论”
（theory of impact）。尤其是对于
多方面、涉及社会动力学，并
要求了解问题的多个不同角度的
影响理论来说，这一点尤为真实。
因此，我们不仅应该关注那些对
新手易于解释的影响理论。

在某些情况下，从使用角度
看，人们并不总是应该只关注最
直接和明显相关的研究领域。乍
一看，强化学习（RL）与先进
的人工智能主体（agent）密切相
关。强化学习在概念上比监督学
习更广泛，以至于监督学习可以
被看作是一个强化学习问题。然
而，强化学习所考虑的问题，在
监督学习中并未考虑，目前要解
决这些问题的可解性要低得多。
这意味着在实践中，监督学习可
能提供了更易解决的研究方向。

然而，对于与风险缓解不太
直接和明显相关的影响理论，我
们需要非常谨慎确保研究仍然具
有相关性。与研究的核心目标关
联较弱可能导致其偏离轨道，无
法实现其最初目的。当研究议程
由原本研究动机较弱的人员执行
时，这一点尤其真实，并且可能
导致价值偏移（即先前以风险缓
解为动机的研究人员，开始追求
不再相关的中间替代性目标）。因
此，对于以风险缓解为动机的研
究人员和资助机构来说，维护该

领域并积极确保研究保持相关
性更加重要（稍后将对此进行
讨论）。

因此，在仅选择能够立即
把握的影响策略时存在权衡。不
能忽视系统性因素，但这并不消
除理解研究和影响之间因果关系
（无论是间接 / 非线性 / 分散还是
直接）的需求。

系统因素的重要性的例子

以下例子阐明了系统因素的
极度重要性（以及直接因果分析
与如反向链这类补充技术存在的
局限）：

- 财富增长与儿童死亡率减低
有着强烈关联。但我们不能总是
把特定孩子的生存归结为他们所
在国家财富的提升。然而，提高
整体财富仍是减少儿童死亡率
的有效途径。

- 社区建设、改善机构和改善
认知通常不能直接与特定结果联
系起来，但总体而言，它们显然
具有重大影响。

- 吸烟并不保证你会得癌症。
如果你吸烟并患上了癌症，患癌
原因并不一定是你吸烟。然而，
避免吸烟显然是预防癌症的好方
法。相反地，锻炼并不能保证你
会健康，但它确实有很大的帮助。

- 智力（如通过智商测试所衡
量的）对于人们执行各种任务的
能力具有巨大影响。然而，我们
很难断言某人正确回答了特定选
择题是因为他们的智商超过了某

一数值。同样，预测和理性可能会提升超有机体的“智商”，但同样不能期待它带来单一明确的结果。提升理性标准有助于改善结果，即使我们无法构建一个简单的事件链来证明它可以预防特定的未来灾难。

- 任何特定的飓风或野火都不能直接归咎于气候变化，但是减缓气候变化无疑是降低这些极端天气事件频发的有效途径。

在上述例子中，只要数据充足，我们可以利用统计学来揭示变量之间的关系。有些关系甚至能通过随机对照试验来确立因果性。然而，我们并无能力或时间对那些可能减缓 AI 带来的存在性风险的分散因素（diffuse factors）进行随机对照试验。不同于上述情形，我们无法观察到大量不同的结果，因为一旦发生存在性灾难，那将是我们最后的观察结果。这并不意味着分散因素就不重要；相反，它们极其重要。我们可以去识别那些在过去类似情景中经过时间检验、证明具有鲁棒效用的因素。

在更大的社会尺度上，以下列举的分散因素对于减少 AI 带来极端风险至关重要。请注意，在某些情况下这些因素可能会相互作用：例如，如果恶意行动者掌握了权力，那么主动防范风险可能就无济于事了。

- 人们具有改进的认识能力：

非理性可能导致人们忽视警告信号，对正确的主张不予理会，并在不应该的时候继续前进。

- 对（尾部）风险的主动性：让人类作为一个集体更加关注尾部风险将对安全产生积极影响。由于人类倾向于忽视尾部风险，目前对减轻尾部风险的工作缺乏激励。

- 扩展的道德圈：术语“道德圈”描述了一个人认为具有道德相关性的存在（例如社区中的人们、世界各地的人们、未来的人们、非人类动物等）。人们并不需要一个很大的道德圈来希望避免自己的死亡，但它可以加强减少风险的重要性的感知。

- 将（不合适的）恶意行为者（自私主义者 / 马基雅维利主义者 / 精神病患者）排除在权力之外：与积极恶意的领导者相抗衡比与冷漠的领导者更加困难。让公正、谨慎和利他主义者担任权力职位可能会减少风险。

社会技术因素

社会技术因素与操作过程之间复杂的相互作用，by Nancy Leveson

我们现在可以讨论一些具体的分散因素，这些因素已被证明与使高风险技术系统更安全有很高的相关性，也与使现有和未来的 AI 系统更安全有关。以下社会技术因素（摘自 Perrow、La Porte、Leveson 等人的研究）往

往会影响危险性：

- 规章制度，可能包括内部政策和法律治理。

- 社会压力，包括来自普通大众以及有权势的人士的压力。

- 生产力压力，或者是迅速交付的压力。

- 组织内的激励机制，如快速交付的奖励或对举报行为的报复。

- 来自其他行动者的竞争压力，他们可能有不同的安全标准，或者能够更快地行动。

- 安全预算和计算分配：安全团队是否有能力进行他们所需的实验？预算和计算资源中是否有相当比例专门用于安全？

- 安全团队的规模与预算有关。研究人员、工程师和安全团队的顶级研究人员数量非常重要。

- 报警疲劳：如果对从未发生的安全问题频繁发出虚假警报，可能会降低对安全的关注意愿。

- 减少检查和预防性维护，这对于像安全这样的前瞻性问题的可能不那么相关。然而，如果人们不密切关注能力发展，可能会让涌现出的能力（或者行动者）给我们带来惊喜。

- 缺乏深度防御：提供多层次防御以应对各种危险的重叠系统。

- 缺乏冗余：多个系统完成类似的安全任务，以消除单点故障。

- 缺乏故障保护措施：指的是使系统能够优雅地失败的功能。

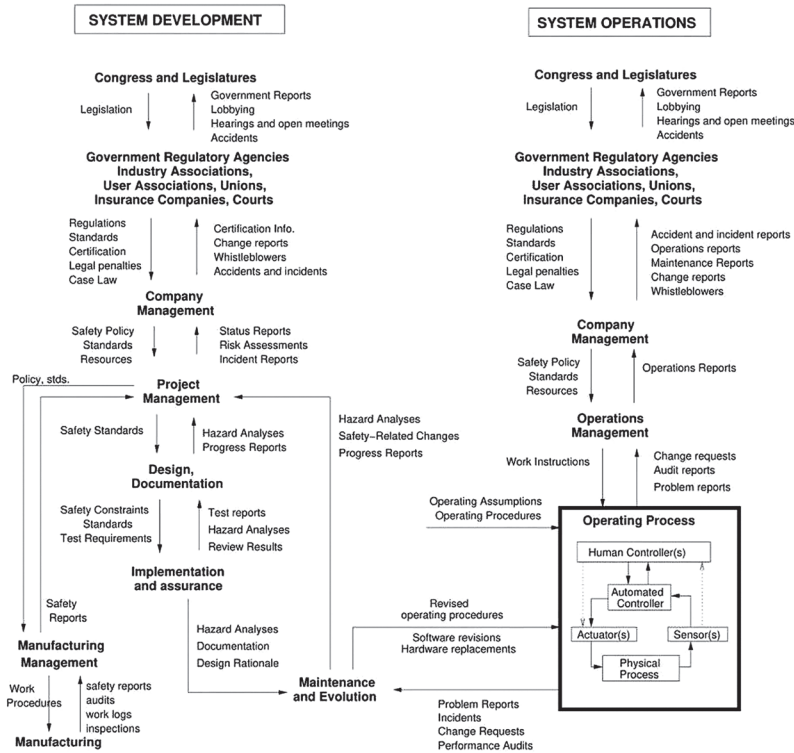


Figure 4.4: General Form of a Model of Socio-Technical Control

· 安全机制成本：使系统安全需要多少费用？

· 安全文化，指的是组织或领域内对安全的普遍态度。

根据曾在多个行业咨询高风险技术设计的 Leveson 所说，“如果我们想要预防未来的事故，最重要的 [因素] 是安全文化。”

安全文化

安全文化并不是一个容易解决的风险因素，尽管它很可能是最重要的之一。许多机器学习研究人员在被问及对齐或安全性时常常会翻白眼：通常情况下，我

们不能简单地直接讨论超级智能存在的潜在风险，而不考虑可能带来的社会成本或可能适得其反的努力。这是安全文化不足的一个迹象。

我们如何提升安全文化呢？通过良好的激励结构和深入的研究，需要将安全置于首位。推动研究文化朝更安全的方向发展的瓶颈在于寻找有趣、即刻可行且与安全相关的任务，并为完成这些任务提供资金支持。

如上所示的投机金字塔建议，立即将安全变成社区规范是不现

实的。在此之前，我们需要明确安全的样貌，并且需要基础设施尽可能地简化 AI 安全研究。研究人员需要接受有关风险的论证，并且需要明确、具体、低风险的研究任务来追求。这涉及到创建资金机会、研讨会和奖励，以及通过指标明确定义问题。

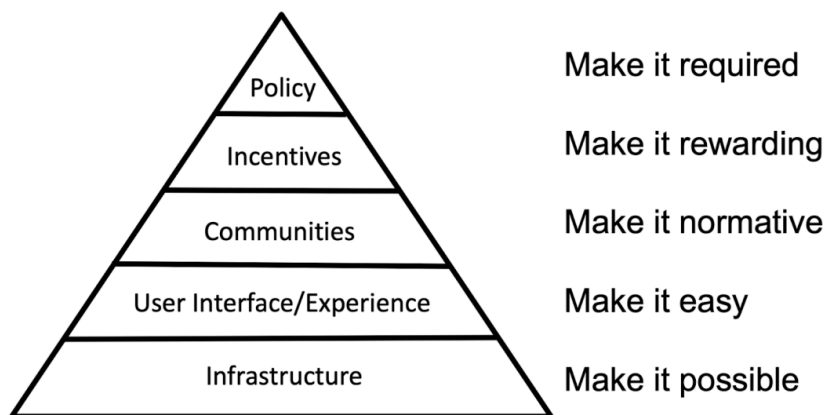
下列因素影响了安全文化：

- 对失败的过度关注，尤其是黑天鹅事件和未曾预见的失败。
- 不愿意简化解释并仅用简单的叙述来解释失败。
- 对操作的敏感性，涉及密切监控系统以察觉意外行为。
- 对韧性的承诺，意味着在面对意外情况时能够迅速适应变化，并愿意尝试新的想法。
- 组织结构的定义不规范，新信息可以在整个组织内部传播，而不仅仅依赖固定的报告链条。

对于主流文化来说，公众宣传可以起到一定作用。一种可能的方式是，由于更广泛的文化需求或对安全性缺乏信任的担忧，AI 系统可能变得更加安全。相反地，如果 AI 安全性受到贬低或在大众中没有得到重视，可能会有其他公众压力（例如赢得 AI 竞赛、利用 AI 快速实现某种社会利益），这可能会对安全性构成一定的冲击。然而，主流宣传不应过于极端，以至于使研究界反对安全性。必须谨慎地改变舆论窗口。

目前，一些批评者认为安全

Changing a Research Culture



性工作会削弱对 AI 公平性和偏见的关注，并且没有高度重视当前权力不平等的问题，而他们认为这是全球问题的根源。这些批评与对长期主义的批评有关，特别是对未来存在的数量进行荒谬似乎的预期价值计算，以及有效利他主义的亿万富翁的影响。这些批评威胁到了安全文化的发展。在避免负面副作用的同时，呈现一种替代观点是非常棘手但也是必要的。

目前，安全性面临着批评，批评者认为它削弱了对 AI 公平性和偏见的研究，并没有充分优先考虑当前的权力不平等的问题，而他们认为这是全球问题的根源。这些批评与对长期主义（认为应当优先考虑未来世代影响而非当前问题）的批评有关，特别是对未来人口规模的荒谬预期，和不切实际的价值预估，以及对秉承有效利他主义（认为通过效果最大

化的方式帮助他人和解决社会问题）的亿万富翁的影响力的批评。这些批评威胁到了安全文化的发展。在避免负面副作用的同时，提出一种替代观点是棘手但必要的。

一些技术问题除了直接对安全有用之外，还在安全文化方面具有工具性的用途。一个例子是可靠性：构建高度可靠的系统，训练人们特别考虑系统的尾部风险。这种方式不同于仅仅在典型环境中构建更准确的系统。另一方面，价值学习虽然也是一个需要解决的问题，但目前对于安全文化优化来说并不是那么有用。

顶级 AI 研究人员的构成

现在我们将讨论另一个对改进至关重要的因素：顶级 AI 研究人员的构成。未来，与最先进的 AI 系统进行实验将变得异常昂贵（在很多情况下，已经如此）。只有少数几个人将有权力为这些系

统设定研究方向。尽管无法确切知道将有哪些人组成这个小团体，但可能包括某个数量的顶级 AI 研究人员。并且有一点是已知的：大多数顶级 AI 研究人员并不关注安全性问题。因此，需要增加顶级研究人员中对安全性问题的认同度，特别是包括中国的研究者，并培养更多对安全具有意识的人成为顶级研究人员。

“顶级 AI 研究人员可以被带走”这个想法很诱人。事实并非如此。要成为顶级研究人员，他们必须具有高度的个人见解，并受到除金钱以外的其他因素的驱动。他们中的许多人选择进入学术界，而这并非以金钱为驱动力的人通常选择的职业道路。Yann LeCun 和 Geoffrey Hinton 除了在 Meta 和 Google 的工作职位外，仍然担任学术职位。Yoshua Bengio 完全在学术界。科技公司肯定愿意用更高的价格购买他们的时间，那么为什么这三位深度学习的先驱者不都在薪酬最高的行业工作呢？金钱激励对于外部动机驱动的人是有用的，但许多顶级研究人员主要是受内在动机驱动的。

研究人员的主要动力之一是问题的有趣程度或“酷炫”程度。要让更多人研究相关问题，就需要找到有趣且明确定义的子问题供他们研究。这需要将问题具体化，并提供解决问题的资金支持。

由于许多顶级研究人员对技

术持积极态度，他们对于有关研究危险性的抱怨并不感兴趣，而且很可能会不予理睬。尤其是当这些抱怨来自那些在该领域没有做出太多贡献的人时，这一点更为明显。因此，对于那些希望获得任何可信度的人来说，保持贡献与抱怨的比例较高非常重要。“贡献”可以是安全方面的贡献，但它需要是对机器学习研究人员可读的贡献。顶级研究人员可能还会将对存在风险的讨论与媒体上的耸人听闻的故事、末日预言或恐慌情绪联系在一起，即“我们都会死”的恐慌。

被忽视的因素

有许多其他因素导致了 AI 安全问题的普遍被忽视。为了提高安全性，优化这些因素是非常重要的。以下是这些因素的更一般的列表。

- 企业：短视追求短期股东回报，安全特性可能需要很长时间才能得到回报，一些人类价值可能难以体现在价格或金钱激励中。
- 喜怒无常：科技乐观主义，不喜欢讨论风险。
- 政治：AI 安全被视为与气候变化和减少不平等这些更受欢迎的政治议题相竞争。
- 技术背景：安全问题超出了一个人现有的技能和培训范围，同样机器伦理和社会技术关注并不会如同定量倾向那样容易适应。
- 社会经济距离：许多 AI 研

究人员生活在科技圈的小圈子里，这可能导致研究人员对于强调人类价值的世界性方法持有贬低或隐含低调的态度。

- 尾部风险：非常重大的黑天鹅事件和尾部风险被系统性地忽视。

- 威望性：对于 AGI 的讨论不感兴趣，觉得某个领域缺乏声望，或者与持有其他不受欢迎或看似奇怪的观点的人相关联。

- 时间性：未来的风险和未来的人被严重忽视。

AI 安全的复杂系统

复杂系统研究强调我们应该关注贡献因素（因为事件是许多贡献因素相互作用的产物），并且它帮助我们确定在许多现实情境中哪些贡献因素最重要。它们还提供了关于深度学习的客观层面的洞察，因为深度学习系统本身就是复杂系统。

深度学习展示了许多复杂系统的特征：

- 高度分布的功能：部分概念被冗余编码并高度聚合。
- 众多弱非线性连接：连接参数非零（而非稀疏），神经网络包含非线性激活函数。
- 自组织：通过自动优化损失函数来指定模型的内部内容。
- 适应性：少样本模型和在线模型具有适应性。
- 反馈循环：自我对弈，人在循环中，自动诱发的分布转移。

- 可扩展的结构：规模缩放定律（Scaling Law）表明模型可以简单而一致地进行缩放。

- 涌现能力：许多计划外的能力自发地“启动”。

因此，复杂系统的洞见对深度学习非常适用。同样地，像所有大型社会技术结构一样，AI 研究社区也可以被视为一个复杂系统。运营 AI 系统的组织也是复杂系统。

复杂系统是解决各种问题的一种预测性模型，包括 AI 安全。事实上，AI 安全中的许多重要概念都是更一般原则的具体实例。以下是来自《系统圣经 The Systems Bible》（1975 年）的高度简化的复杂系统教训的例子：

- 系统一旦形成，就会立即产生自己的目标。

解释：一个系统的目标很少仅仅是最初被赋予的目标。相反，其他目标会从系统的组织过程中涌现。

- 对 AI 的影响：一个显著的例子是自我保护或追求权力的工具性目标。

- 系统内部的目标首先。

解释：系统通常将目标分解为不同的内部组件的子目标来解决。在这个分解过程中，目标往往会被扭曲。一个常见的失败模式是系统明确写下的目标不一定是系统在操作上追求的目标，这可能导致不一致。系统的子目标

可能会超越其实际目标。例如，一个官僚机构（一个子系统）可以掌握权力，并使公司追求与其初始目标不同的目标。

对 AI 的影响：一个相关的现象已经被社区广泛认知为“内部优化”；系统理论几十年来已经对其进行了更一般性的预测。

· 复杂系统的失效模式通常无法从其结构中预测。

解释：仅仅对一个复杂系统进行检查，并不能确切地让你知道它可能出现的故障。通常，故障是通过经验和测试来确定的。

对 AI 的影响：仅通过检查神经网络的权重、架构或通过纸面推理 / 白板分析，很难理解神经网络可能出现的所有故障方式。我们可以预料到，一些故障是无法预测的。（尽管故障是不可避免的，但灾难并非如此。）

战略意义：采用“认真思考问题，确保解决方案没有漏洞”的方法很难找到一个真正没有漏洞的解决方案。在复杂系统中，防止失败不是一个数学问题。在复杂系统中，很少有对称性，很少有必要和充分条件或布尔连接（没有根本原因），存在循环关系，有许多部分概念（组合爆炸），自组织性强，分布性高。所有这些特性使得复杂系统很难从纸面 / 白板上通过论证进行分析。

· 关键变量是偶然发现的。

解释：通过检查很难知道系

统中最重要的部分是什么。最具影响力的点并不明显。同样，最有效的方法通常是通过试验或偶然发现的。

对 AI 的影响：许多最重大的 AI 突破并不是通过原理性、高度结构化的研究发现的，而是通过不断摸索和调试实现的。

战略意义：许多当前的研究方法都押注于将 AGI 视为数学对象而非复杂系统，考虑到当前的 AI 系统以及我们所了解的其他智能系统（例如人类、公司），这似乎是不现实的。

· 通过扩展较小系统的维度所产生的大系统，其行为不同于较小系统。

解释：单纯扩大一个系统规模，不仅仅使其在之前的工作中变得更好。我们应该期望看到新的性质和新的能力的涌现。

对 AI 的影响：我们应该预期在更小的版本中根本不存在的涌现能力的出现。例如，在能力较低的情况下，欺骗对于一个智能体来说并不是一个好主意，但随着智能程度的提高，欺骗可能成为实现目标的更好策略。

战略意义：扩大一个协调一致的系统并期望其完全一致，并非是一个完美的想法。即使是一个高度可靠的系统，扩大规模也需要谨慎处理。

· 吉尔布的不可靠定律（Gilb's Laws of Unreliabili-

ty）：任何依赖于人类可靠性的系统都是不可靠的。

解释：人类不可靠。依赖他们会导致不可靠性。

战略意义：AI 系统的发展速度可能过快，过于爆炸性。过度依赖人类反馈或人机协同方法可能不够可靠。我们需要一种更可靠的策略来保护人类价值观，或许可以通过其他 AI 系统的监督来实现。

· 一个运作良好的复杂系统往往是从一个运作良好的简单系统演化而来的。

解释：复杂系统不能从零开始创建并期望其能够正常运行。相反，它们必须始于更简单的运行系统，逐步演化而来。

战略意义：在简单系统上进行安全性工作，并尝试（谨慎地）进行扩展，比起从零开始构建一个一致性复杂系统更有可能取得成功。尽管系统在扩展时表现不同，但那些有效的系统是从较小规模的系统演化而来的。如果无法使较简单版本的复杂系统保持一致，那么很难使更复杂的版本保持一致。基于这种观点，当务之急是使当前的简单系统更加安全。

多样性

确保复杂系统良好运作涉及到许多不同的方面，单一的贡献因素或研究方向是不足以解决问题的。因此，有必要保持多样化

的优先事项，以确保系统能够有效运行。

由于个体的专业能力有限且个体众多，通常最明智的做法是押注于单一预期价值最高的研究方法。然而，将整个系统视为系统内的个体，这样的做法是错误的。如果系统将所有资源分配给预期价值最高的选项，而该选项未能产生回报，那么系统将失败。这在金融和许多其他采用投资组合方法的领域中，是已知事实。不要只进行一次大赌注，或者只押注于最有利的（例如，预期价值最高的）途径。在孤立情况下，X 的边际收益可能高于 Y，但整个系统不要局限于只能选择一个因素。正如俗语所说：“不要把所有的鸡蛋放在一个篮子里。”

显然资源分配明显不够优化的一个例子是，直到相对最近，AI 安全社区将其大部分资源投入到强化学习上。虽然对于一些最初的安全研究人员来说，强化学习可能似乎是朝着 AGI 进展最有希望的领域，但这种策略意味着没有太多人研究深度学习。深度学习安全研究人员被鼓励专注于强化学习环境，因为它“更加普适”，但并不意味着，仅仅因为某个问题可以转化为强化学习问题，就应该这样做。与此同时，更大的机器学习社区更加关注深度学习而非强化学习。显然，深度学习现在至少与强化学习一样有希

望，并且在深度学习领域进行了更多的安全研究。基于可行性、信息价值、研究的迭代进展以及社区建设效应，如果更多人从早期开始研究深度学习，情况可能会更好。如果社区领导者重视推动研究的多样化，这种情况可以很容易避免出现。

如果我们同时处理多个方面，而不仅仅依赖于单一领域或策略，我们将能够更好地应对问题并降低忽视重要变量所带来的成本。由于成本往往与问题被忽视的时间成超线性关系，这对实际应用具有严重影响。因此，将资源用于经常支付成本而不仅在成本已经激增后才应用资源是明智之举。等待越久，实施干预就越困难；如果成本是凸函数（例如二次函数而不是对数函数），那么成本将进一步增加。通过多样化处理，可以隐含地降低这些成本。

AI 安全是一个极度不确定的领域：关于最大的问题将是什么，时间表是什么，第一个 AGI 系统会是什么样子等等。在最高的不确定性水平上，最重要的是提高系统的优点（例如，精英主义结构，人才的数量等等）。如果你的不确定性水平稍低，你还想进行一些大的赌注和许多小的赌注，以应对可能的未来。此外，在高度不确定或工作尚未成熟时，遵循“涌现战略”要比制定高度结构化、完善的方向更加有效。

通过多样化，我们不需要在采取行动之前决定性地解决所有重大问题。是我们缓慢启动，还是 AI 会突然爆发？隐含在随机梯度下降中的偏见对我们有利，还是对我们不利？我们应该创建追求积极方向的 AI，还是应该尽力控制以防止其掌控？只要这些问题的答案之间不是高度负相关的，我们可以分散投资并支持多个研究方向。此外，研究可以帮助解决这些问题，并指导哪些未来研究应该包括在整体投资组合中。看到多样化的价值使研究人员不必花费时间向公众表达其默会知识和深奥的技术直觉，因为也许这个问题直到以后才能得到解答。多样化使研究人员之间减少分歧，并让他们继续工作，同时降低了我们对错误假设的风险敞口。

多样化并不意味着对想法不应该有选择性。一些想法，包括学术界和工业界常常追求的那些，可能对于降低风险并没有任何用处，即使它们被描述成有用的。仅仅因为变量之间存在非线性相互作用，并不意味着资源应该被投入到与问题无关的变量上。

此外，个人并不一定需要拥有多样化的投资组合。专业化有其好处，因此个人可能更好地选择一个领域，在这个领域中通过专业化可能更有可能产生重大影响。然而，如果每个人都专注于他们所认为的在整体研究中最重

要的领域，并且他们对此的判断高度相关，我们将会看到研究将集中在少数几个领域。这将会带来问题，因为即使这些领域是最重要的，也不应该单纯地追求它们而忽视其他所有干预措施。

在复杂系统中，我们应该预期许多相互作用的变量对系统整体安全性具有重要影响。如果我们忽视其他安全因素，只专注于“最重要的一个”，实质上是将其其他一切都置零，这并不是在多元化的系统中降低风险概率的方式。例如，我们不应只关注创建技术安全解决方案，更不要押注于一个主要的技术解决方案。还有其他变量可以预期与此变量非线性地相互作用：这种系统的成本、在拥有强大安全文化的实验室中开发 AGI 的可能性、其他参与者实施不符合目标的版本的可能性以及所讨论的符合目标系统实际上会导致 AGI 的可能性。这些相互作用和相互依赖意味着必须同时努力推动所有因素。这也有助于提供所谓的深度防御：如果某项降低危险因素的措施失败，其他已有措施可以帮助处理问题。

影响往往是长尾的，一项资助的影响将由几条关键路径所主导。同样，在一个多样化的投资组合中，绝大部分的影响可能会由少数几项资助所主导。然而，最佳策略将从长尾分布中进行大量采样，或者最大程度地接触到

长尾分布。增加接触“黑天鹅事件”（极端事件）的方法之一是，采用可以产生多种不同正面影响的广泛干预措施，以及更大规模的干预措施组合。这与仅选择针对尾部的干预措施的方法形成对比，在大型复杂系统中这通常是不可行的，因为尾部在事前无法完全知晓。相反，应优先考虑那些有足够机会成为尾部事件的干预措施。

根据 AI 发展的阶段，我们应该更加注重有针对性或广泛的干预措施。过去，广泛的干预措施明显更为有效：例如，在深度学习出现之前，研究经验对齐几乎没有多大用处。甚至在深度学习出现后不久，许多经验对齐方法在大规模预训练模型出现时被大大弱化。由于深度学习社区规模相对较小，相对而言更容易进行广泛的干预措施（相对于诸如全球卫生领域需要影响数百万人的干预措施）。

在当前阶段，针对特定系统进行定向干预可能无法产生全部影响，而希望将所有可能的系统进行整合的广泛方法也不太可能成功。这是因为在优化有助于良好研究的因素方面仍存在巨大潜力，这将进一步使这两种方法显著提高效果。最好的干预措施将不再像具体的故事，描述干预如何在 AGI 创建过程中影响特定参与者，而更接近帮助改善多个可能参与者的文化、激励和认同的行动。

这表明一个有用的做法可能是提出广泛的干预措施，以使安全研究领域能够更有效地应对问题，并更好地为未来的有针对性干预措施做好准备。需要注意的是，一些广泛的干预措施，比如影响安全文化的干预措施，不仅仅在于加速后续有针对性干预措施的实施，而且还可能增加这些有针对性干预措施成功被采纳的可能性。

我们还需要有针对性的干预措施，并且它们应该在有需求之前开发，因为存在自发涌现能力的风险。还有一个观点认为，现在就开发有针对性的干预措施，可能会更容易在未来继续开发有针对性的干预措施。因此，需要综合运用针对性和广泛的干预措施。

结论

由于 AI 研究领域的规模和复杂性，甚至仅仅开始思考如何影响这个领域，就可能会让人望而却步。然而，复杂系统的研究揭示了一些常见模式，可以帮助我们更好地解决这个问题。特别是在许多情况下，更有意义的是专注于改善贡献因素，而不仅仅试图开发一个对预期结果产生简单、直接因果效应的解决方案。复杂系统对于理解机器学习安全性也非常有用，因为广泛的研究社区、深度学习系统以及部署深度学习系统的组织都是复杂系统。○

来源：集智俱乐部

2024 年第一期会士面对面活动火热召开



图1 中国自动化学会会士、中国科学院自动化研究所熊刚研究员作报告



图2 中国科学院自动化研究所王健助理研究员主持

CAA 会士面对面系列活动是中国自动化学会为学会会士量身打造的高端学术交流平台，每期活动邀请 1 位或数位学会会士进行专题报告，围绕国际科技热点，聚焦国家创新发展战略需求，前瞻学科领域发展新方向，积极发挥学术引领和科技智库作用，展现重大学术咨询研究成果，引导社会尊崇科学思想和方法，促进公众提升科学意识和素养。2024 年第一期，总第二十三期会士面对面讲座于 2024 年 1 月 17 日上午成功召开，中国自动化学会会士、中国科学院自动化研究所熊刚研究员作题为“复杂系统平行

控制理论技术及平行系统应用”的报告。

熊刚研究员报告中介绍了研究团队在中国科学院自动化研究所王飞跃研究员的带领下，在国际上率先提出了解决复杂系统难题的 ACP 方法（人工系统 A、计算实验 C 和平行执行 P），逐步攻克了平行控制、平行管理、平行学习和平行应急等基础理论和关键技术，并在交通、制造、国防、社会管理等领域获得了越来越多应用；介绍团队近期工作成果及未来展望。讲座的最后熊老师对观众提出的：平行执行有具体算法或者公式吗；平行系统和代理

模型之间什么关系；一个平行系统需要建立哪些代理模型；是不是除了人机环料代理以外还有各种功能代理等问题进行了一一解答。本次活动由中国科协“青年人才托举工程”入选者、中国科学院自动化研究所王健助理研究员主持，通过腾讯会议、CAA 会议小程序、CAA 官方视频号、学会微博官方账号、百家号、科界、蔻享、机器人大讲堂等平台全程直播，共计 5 万 2 千余人次在线观看直播。○

来源：学会秘书处

CAA 浙江工业大学学生分会硕博学术论坛成功举办



论坛现场

为加强对学生会的服务，方便学生会会员就近参加活动，促进学生会员间的交流与合作，CAA 浙江工业大学学生分会和信息工程学院研究生会于 2024 年 1 月 5 日联合举办了 CAA 浙江工业大学学生分会硕博学术论坛。

本次论坛由 CAA 浙江工业大学学生分会主席沈怡俊主持，信息工程学院数据驱动控制与学习系统研究所所长陈强教授，信息工程学院研究生会主席张傅瑜淇，学研部负责人李奕洋，CAA 浙江工业大学学生分会候任主席李义甲、分会委员毛安杰、委员李亚倩、分会委员江悦出席本次论坛。

会议伊始，陈强教授致发表讲话，他表示，信息工程学院扎根中国大地，瞄准世界一流，CAA 浙江工业大学学生分会的创立，定将为优秀创新型青年人才

的培育作出更大的贡献，并预祝此次论坛取得圆满成功。

本次硕博学术论坛邀请的两位嘉宾进行报告。报告人李涛是信息工程学院 22 级博士研究生，发表了 IEEE TPAMI 等 ZJUT-100, CCF-A 期刊论文 2 篇，其他期刊或会议论文 5 篇，在投 ZJUT100CCF-A 论文 3 篇，参与了面向跨层攻击的工业信息物理系统源位置隐私保护理论研究（国家自然科学基金），参与工业控制系统源位置安全攻击与保护机制研究（浙江省自然科学基金），并参与了华为界腾众智项目开发。在报告中，他向参会学生们分享了顶级期刊论文写作思路及科研经验，回顾了硕博连读期间的科研经历与感想，并以自身经验讲述研究生如何写好顶级期刊论文。

第二位报告人是信息工程学院 23 级博士研究生郑露华，他以学生一作发表 IEEE TEC (SCI I 区)、TTE (SCII 区)，中国电机工程学报 (EI) 论文各 1 篇，参与发表 IEEE TPE (SCI I 区)、TIE (SCI I 区)，电工技术学排

(EI) 论文各 1 篇，在投论文 4 篇。以团队负责人获得中国研究生电子设计竞赛全国总决赛一等奖、总决赛最佳论文奖、兆易创新企业命题三等奖 2 次，华东赛区奖多次。协助指导本科生电子设计竞赛，累计获得国家一等奖 2 项、国家二等奖 1 项、国家三等奖 1 项、省级奖二十余项。参与基于非对称脉宽调制的永磁同步电机高可靠性无位置传感器控制研究、飞机油泵驱动器、Profinet 伺服驱动器等项目。他在汇报中分享了科研竞赛经历与经验，回顾了硕博连读期间的科研、竞赛经历与感想，介绍了永磁同步电机伺服控制领域的热点问题。

随后，CAA 浙江工业大学学生分会主席沈怡俊致闭幕词，对与会嘉宾的到来表达谢意，对中国自动化学会和浙江工业大学的支持表示感谢，并表示未来工作中 CAA 浙江工业大学学生分会将致力国家自动化领域事业的发展，为全校学生会会员搭建青年学生交流、学习、成长、展现自我的平台。○

CAA 浙江工业大学学生分会 供稿

CAA 北京工业大学学生分会“第一届学术老带新指导交流会”成功举办

CAA 北京工业大学学生分会举办的“第一届学术老带新指导交流会”于2024年1月13日成功举办，张嘉成和孙晨暄两位博士研究生分别就学术论文的写作技巧进行了深入的报告和交流。

张嘉成的报告主题为“学位论文写作注意事项”，主要聚焦于硕士和博士学位论文写作过程中的关键环节。张嘉成首先强调了研究方向选题的重要性，他指出选题不仅需要具备创新性和科学性，还应当关注其实际应用价值。他进一步讨论了如何将选题与当前研究趋势相结合，以及如何通过文献综述确定研究缺口。报告中还提及了整体逻辑结构设计的技巧，从论文的大纲构思到

各个章节的详细撰写提供了实际操作建议。张嘉成强调了清晰的逻辑流和良好的论文结构对于读者理解重要性，建议通过明确的章节标题和小节划分来提升论文质量。此外，他还讲述了标准化写作规范的重要性，包括格式设定、引用标准以及图表的使用规则。在研究领域方面，张嘉成专注于智能鲁棒优化和复杂系统最优控制，尤其是城市污水处理过程的鲁棒优化控制技术。他介绍了如何将理论研究应用到实际问题中，以及如何通过实验设计和数据分析来验证研究假设。

紧接着，孙晨暄以“英文期刊论文写作技巧”为题，分享了她在撰写英文学术论文方面的经验。她从论文的结构开始，详细讲解了英文论文的常规章节划分，包括引言、方法论、结果、讨论和结论，并强调了每个部分应该包

含的关键要素。孙晨暄特别指出，语言的准确性和可读性对于英文论文至关重要。她建议使用简洁、明了且专业的语言表述，并避免使用术语滥用和晦涩难懂的句子。此外，她还提到了文献引用的规范，强调了正确引用他人工作的必要性，以确保学术诚信。在研究领域上，孙晨暄的工作集中在神经网络设计和系统建模，特别是在城市污水处理过程建模及出水水质预测方面的研究。她分享了如何基于系统建模来预测和优化处理结果，同时也展示了神经网络在处理复杂数据方面的强大能力。

在报告后的学术讨论答疑阶段，与会的博士准毕业生们对研究生们进行了关于学术论文写作的全面指导，从选题到写作风格，再到数据分析和结果呈现，为他们未来撰写高质量学术论文奠定了坚实的基础。希望通过本次学术交流能够帮学术生涯刚起步的研究生们早日步入科研正轨，进一步提高研究生的学术能力、专业素养和创新能力。○

CAA 北京工业大学学生分会 供稿



交流会现场

年度总榜第三 2023 年度科协系统科普新媒体传播榜发布

今日，中国科协发布 2023 年度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）。本期榜单为 2023 年年度榜单。

中国自动化学会位列第三！

来源：今日科协

中国自动化学会始终肩负传播自动化、信息及智能科学领域新知识、提高全民科学素质的重要使命，积极推动自动化、信息与智能科学领域内科普传播协同化、侧重化、多样化发展。2024 年，学会将加强科普队伍建设和自动化学科普资源整合，完善以特色科普品牌活动与系列赛事为一体的自动化科普平台，提升科学传播效果，实现科普基地－科普团队－科普作品集成与共享。○

通

知

关于征集 2024 年中国自动化学会团体标准项目的通知

为深入贯彻《国家标准化发展纲要》、《关于促进团体标准规范优质发展的意见》等文件精神，充分发挥中国自动化学会（以下简称学会）团体标准为市场服务、为创新驱动发展服务的能动作用，助力产业高质量发展，促进科技成果转化，根据《中国自动化学会标准化工作管理办法》，现面向全行业公开征集 2024 年度学会团体标准计划项目。

详情请查看：<https://www.caa.org.cn/article/192/4403.html>

科协系统 科普新媒体传播榜

为积极引导全国学会、省级科协系统提升科普信息化水平，推动科普中国建设和资源落地应用。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）。本期榜单为2023年年度榜单，后续将按月、半年、年度发布，敬请关注。

年度

2023

全国学会

1	中国抗癌协会
2	中国康复医学会
3	中国自动化学会
4	中华口腔医学会
5	中国计算机学会
6	中国人工智能学会
7	中国国土经济学会
8	中国城市规划学会
9	中国青少年科技教育工作者协会
10	中国茶叶学会
11	中国岩石力学与工程学会
12	中国科普作家协会
13	中国水力发电工程学会
14	中国宇航学会
15	中国纺织工程学会
16	中国反邪教协会
17	中国生物材料学会
18	中国环境科学学会
19	中国作物学会
20	中国仪器仪表学会

中国自动化学会被评为 2023 年度全国学会科普工作优秀单位

近日，中国科协科普部公布了 2023 年度全国学会科普工作优秀单位名单，中国自动化学会被评为“2023 年度全国学会科普工作优秀单位”。学会将在后续工作中，积极构建全方位、多渠道的科普宣传平台，开展更多有吸引力的特色科普活动，为提高全民科学素养服务，承担起向社会公众宣传科技文化的责任。○

来源：今日科协

2023 年度全国学会科普工作优秀单位名单（按学会编号排序）

中国物理学会	中国力学学会	中国光学学会	中国天文学会
中国气象学会	中国空间科学学会	中国海洋学会	中国植物学会
中国昆虫学会	中国心理学会	中国生态学会	中国环境科学学会
中国自然资源学会	中国岩石力学与工程学会	中国野生动物保护协会	中国神经科学学会
中国机械工程学会	中国汽车工程学会	中国电机工程学会	中国电工技术学会
中国水力发电工程学会	中国制冷学会	中国真空学会	中国自动化学会
中国仪器仪表学会	中国计量测试学会	中国图学学会	中国电子学会
中国计算机学会	中国通信学会	中国航海学会	中国铁道学会
中国公路学会	中国航空学会	中国宇航学会	中国兵工学会
中国金属学会	中国化工学会	中国核学会	中国石油学会
中国煤炭学会	中国能源研究会	中国建筑学会	中国纺织工程学会
中国材料研究学会	中国食品科学技术学会	中国粮油学会	中国烟草学会
中国仿真学会	中国风景园林学会	中国消防协会	中国图象图形学学会
中国人工智能学会	中国指挥与控制学会	中国大坝工程学会	中国卫星导航定位协会
中国生物材料学会	中国农学会	中国林学会	中国水产学会
中国畜牧兽医学学会	中国作物学会	中国热带作物学会	中国茶叶学会
中华医学会	中华中医药学会	中国中西医结合学会	中华护理学会
中国解剖学会	中国病理生理学会	中国营养学会	中国麻风防治协会
中国抗癌协会	中国体育科学学会	中国康复医学会	中华预防医学会
中华口腔医学会	中国卒中学会	中国科学学与科技政策研究会	中国农村专业技术协会
中国科普作家协会	中国自然科学博物馆学会	中国青少年科技教育工作者协会	中国科教电影电视协会
中国科技新闻学会	中国城市规划学会	中国科技发展基金会	

深圳自动化学会换届选举大会暨第八届理事会第一次会员大会成功召开

2023年12月27日，深圳自动化学会换届选举大会暨第八届理事会第一次会员大会成功召开，大会选举产生了第八届理事会、监事会成员，全体会员代表及获奖单位、个人等参加大会，大会由学会副会长、深圳职业技术大学高素萍教授主持。

出席本次大会的领导有：深圳自动化学会荣誉会长主临宁；

深圳自动化学会会长杨俊；深圳自动化学会监事长岳连生，常务副会长李云峰，副会长高素萍、安代春、滕保健、许华等，深圳市科技创新类行业协会联合党委组织员王苑玲同志列席会议。

按照大会议程，首先深圳自动化学会会长杨俊博士作第七届理事会工作报告。杨会长首先代表学会理事会及秘书处向广大关

心、支持、帮助我会工作的领导和会员同志们表示衷心的感谢。在报告中回顾了第七届理事会的工作情况，从党建工作、学术活动、会员服务、政府职能转移等方面做了详细报告。党建工作，学会理事会积极响应与落实“全面加强党对社会组织的领导”号召，在深圳市科技创新类行业协会联合党委的直接领导下，努力



大会现场

提升学会党组织建设的制度化、规范化水平，不断推动党建引领学会工作的高质量发展；学术活动，高举技术引领大旗，聚焦高端学术论坛，推动产业发展。发挥学会专家智力优势，助力会员与行业企业科技成果转化；会员服务，不断聚焦、优化服务模式，在行业奖项推荐方面重点服务会员。积极开展产业投融资对接服务活动、创新诊断、决策咨询等服务活动。承接政府职能转移工作，在深圳市自主创新大讲堂“20+8”产业集群项目、星火沙龙、前沿专题讲堂、自动化专业职称评审、南山区科技型中小企业评价及国家高新技术企业认定培育等工作发挥了科技社团的桥梁作用和专业优势。

杨会长表示，我们身处深圳——国家综合创新能力排名前茅的城市，我们不仅仅是要力争做好一个学术团体，我们更要做成一个产学研用各领域并重的复合型、创新型服务团体。2024年的重点工作思路可以概括为：一个核心，四个加强。一个核心，就是学会理事会将一如既往地聚焦学会宗旨与角色定位，在党的坚强领导下，不断追求发展与提升。加强会员、特别是学术带头人与行业龙头企业的吸纳入会工作；加强粤港澳大湾区自动化创新与发展论坛的建设工作；加强践行学会创新（孵化）投资咨询委员会的工作；加强为学会会员

及行业企业的科技成果评价与转化的服务工作。

学会监事长岳连生作第七届监事会工作报告。监事会成员任职以来，列席学会会员大会、理事会和常务理事会会议，对学会会务、管理和财务等相关管理工作进行全面监督，认真履行监事职责。岳监事长特别提到，学会获得的社会组织等级评估从4A级提升到5A级，这是一个质的飞跃，也充分表明学会在依法登记和接受监督、内部治理、业务活动、财务管理以及信息公开等方面的规范管理和不断发展。换届之际，希望新一届监事会继续履行监事职责，积极有效开展工作，发挥监事会的监督保证作用。

根据民政局下发的《深圳市民政局关于推行社会组织法定代表人述职制度的通知》，在市级社会组织中推行法定代表人述职制度，我会遵照通知要求执行。由现任法定代表人、学会秘书长贺艳萍作2023年度法人述职报告，分别从执行本组织各项规章制度、依法依规履职情况，完成年度工作计划（目标）及取得成绩情况，作用发挥情况等方面总结述职，正视存在的问题并重点部署下一年度工作计划和重点，在规划项目申报、人才补贴、专精特新服务等方面将投入更多的服务；开展学术交流、技能大赛、技能等级认定、科技成果评价工作常态

化；作为全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会可编程程序控制器及系统分技术委员会的成员之一，将整合更多的标准资源服务会员和行业企业。

换届选举大会严格遵守《广东省社会组织换届选举工作指引（试行）》和《中共深圳市社会组织委员会关于进一步加强社会组织负责人人选审核工作的通知》进行第八届理事会、监事会换届工作，全体会员依法依规、民主选举投票产生了新一届理事会、监事会和常务理事会，理事会成员51名，其中常务理事11名，理事长杨俊，监事会成员3名，监事长肖芬，新晋多名学术带头人和行业龙头企业代表，为学会发展增添新鲜血液和有生力量。新一届理事会将继续坚持党建建双融共促，聚焦学会宗旨，聚合专业力量、聚力多元平台，不负各会员单位的信任、支持和期待。

会上，向2023年度“优秀通讯员”、“优秀学会工作者”、“优秀专家”、“创新活动支持单位”、“深圳技能大赛—数字孪生应用技术员职业技能竞赛获奖选手”、“深圳技能大赛—数字孪生应用技术员职业技能竞赛优秀组织单位”等获奖的单位和个人颁发了荣誉证书。○

来源：深圳自动化学会

让青年科技人才挑大梁当主角

“年轻人是团队的新鲜血液，他们头脑转得快，点子想得多，不仅能活跃气氛，还为解决难题提供了新看法、新思路。”一位航天前辈的感慨，令笔者印象深刻。正是出于这种惜才、爱才之情，许多资深科技工作者甘当绿叶，用心呵护“苗子”，坚定托举“潜力股”，助力一大批青年科技人才崭露头角、发光发热。

近年来，在高校科研院所、科技型企业，越来越多的年轻科研人员开始牵头国家重点科研项目相关的课题研究。与此同时，用人单位对青年科技人才的帮扶力度也越来越大。创新团队蒸蒸日上，创新成果源源不断，关键就在于把握住了人才这个第一资源。

实现高水平科技自立自强，归根结底要靠高水平创新人才。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视青年科技人才队伍建设，出台了一系列改革文件、制度举措。国家重点科研项目实施“揭榜挂帅”制，“破四唯”和“立新标”并举，这些举措为青年科技人才提供了向上生长的空间，厚植了向下扎根

的沃土。国家自然科学基金委员会提出将在基础科学中心项目中单设赛道，专门资助最高年龄不超过55周岁、平均年龄不超过50周岁的年轻科研团队；第九届中国科协青年人才托举工程人选名单发布，继续大力扶持有较大创新能力和发展潜力的青年科技人才……一项项真招实招，为青年科技人才创造了更多机遇。

青年科技人才的创新能力、创造力都处于高峰期。如今，不计其数的80后、90后甚至00后活跃在科研一线，在科技创新的赛道上激扬青春、成就梦想。比

如，北斗导航、探月探火等重大战略科技任务的许多项目团队成员平均年龄在30多岁。青年科技人才已成为我国科技创新发展的生力军，是国家战略人才力量的重要组成部分。2023年8月，《关于进一步加强青年科技人才培养和使用的若干措施》印发，提出了更多突破性措施，充分契合了当前科技创新发展的迫切需求，有利于我国青年科技人才队伍建设，更好为实现高水平科技自立自强提供人才支撑。

任何创新成果都离不开人才。把培育国家战略人才力量的政策



北京航天飞行控制中心调度团队的青年科技人才。新华社发（张敬宜 摄）

重心放在青年科技人才上，优化人才资源配置，有利于为未来发展积蓄深厚能量。着眼“到2035年，形成我国在诸多领域人才竞争比较优势，国家战略科技力量和高水平人才队伍位居世界前列”的目标，就要造就规模宏大的青年科技人才队伍，搭建更加合理的科技创新人才梯队。正因如此，必须帮助青年科技人才在科研黄金时期干出突出业绩，加快成长为国家科技领域高层次领军人才和高水平创新团队的重要后备力量。

能否支持青年科技人才挑大梁、当主角，主动为其搭梯子、铺路子，检验着科研单位的智慧和眼光。适当压力能够激发人的潜能，大考大练助人拔节生长。应因地制宜、因时制宜，建立健全符合本单位青年科技人才特点的制度机制，重点在青年科技人才职业早期提供有力有效帮扶，为他们创造更多成长平台和发展机会。同时，继续完善符合青年科技人才特点的评价机制，激励青年科技人才全身心投入到科研上来，产出更多创新成果。

当前，我国科技创新步伐加快，气象万千。多措并举、注重实效，给予青年科技人才更多信任、帮助和支持，为年轻人创造更多机会，我国青年科技人才活力必将得到进一步释放。○

来源：人民日报评论

为加快形成新质生产力注入科技创新力量

坚持科技是第一生产力、人才是第一资源、创新是第一动力，深入实施创新驱动发展战略，加快形成新质生产力，是新时代实现高水平科技自立自强，加快构建新发展格局和推进中国式现代化的重要任务。

习近平总书记在黑龙江考察时指出，整合科技创新资源，引领发展战略性新兴产业和未来产业，加快形成新质生产力。解放和发展社会生产力是促进社会进步的根本动力，也是贯穿马克思主义理论体系的一条主线。新质生产力本质是创新驱动的生产力，科学地揭示了新科技革命条件下科学技术在生产力形成和发展过程中的重要地位与作用，是对马克思主义生产力理论的继承、丰富与创新性发展。坚持科技是第一生产力、人才是第一资源、创新是第一动力，深入实施创新驱动发展战略，加快形成新质生产力，是新时代实现高水平科技自立自强，加快构建新发展格局和推进中国式现代化的重要任务。

科技创新是新质生产力的核心驱动力

当今世界正经历百年未有之大变局，正处在世界经济结构深度调整与新科技革命产业变革历史性交汇期。当前，基础科学和前沿技术加快突破，向经济社会各领域扩散的速度、深度和广度前所未有。人工智能、大数据正在推动科学研究范式发生深刻变革，以科学技术新原理、新组合、新应用为基础产生的突破性创新，有望推动相关产业乃至全球经济的革命性进步，量子计算、类脑计算等非传统架构计算技术持续进步，将突破现有计算系统的物理极限和瓶颈，对信息技术和产业带来颠覆性影响。各类前沿和颠覆性技术相互赋能，迭代突破，发展的新能量不断集聚，正在成为全球生产力新跃升的突破口，对经济社会发展将产生全局性的影响。

新质生产力主要来源于新科技革命产业变革推动下所产生的经济形态，突出高质量发展新动能，以数字化、智能化、绿

色化为主要特征，以知识和技术密集型产业为主要支柱，以智力资源为主要依托。科技创新作为新质生产力的核心驱动力，正在从经济发展的“关键变量”转化为高质量发展的“最大增量”。在过去几十年的发展中，我国较好地利用了后发优势，通过要素和投资驱动，实现了经济的高速增长。但随着发展阶段和发展水平的不断提升，我们利用后发优势的空间日益缩小，传统投入要素的边际效益日益递减，迫切需要在继续用足用好后发优势的同时，依靠科技创新创造新的竞争优势，建立以创新驱动为核心的新发展模式。我国超大规模市场、完备产业体系、海量数据资源、丰富应用场景和正在形成的全方位开放新格局，要与智能化时代创新效率提升相结合，一方面提升传统要素的配置效率和质量，另一方面通过数据等新要素的高效组合，积极塑造领先产品、领先产业和领先市场等先发优势，加快形成新质生产力，为经济增长拓展新的战略空间。

新质生产力向更深层次拓展需 补上短板

党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央把科技创新摆在国家发展全局的核心位置，对科技创新进行了全局谋划和系统部署，坚持党对科技事业的全

面领导，贯彻新发展理念、构建新发展格局，以科技创新催生新发展动能，以高水平科技自立自强维护产业链供应链安全稳定，以科技创新支撑高质量发展，推动我国社会生产力水平实现整体跃升。

当前，新质生产力向更深层次拓展还存在一些短板，包括科技经济全链条一体化部署不够，以科技创新为核心的全面创新格局还未形成，有利于支撑实体经济、构筑先发优势的重大科技创新成果供给仍显不足，科技成果向现实生产力转化的渠道存在阻碍，制约创新驱动的深层次体制机制和思想观念障碍依然存在，对新规则和新赛场变化的战略应对能力不足等。

建立创新驱动的经济发展模式，向科技创新要“新质生产力”，需要坚持问题导向，把握科技革命和产业变革的历史经验、发展规律与新趋势，围绕我国经济发展、社会进步的新形势和重大需求进行全局性谋划：一要注重以科技创新为核心的全面创新。充分发挥科技创新对放大各种要素生产力的乘数效应，为发展方式转变、动力转换和结构优化提供动力，走出一条创新驱动发展的新路。二要注重促进创新供给与有效激发创新需求相结合。既要加大科技创新的研发及应用，不断提高创新产品供给；又要加

强需求引导，清除市场障碍，为新技术新产品的应用创造更加广阔的市场空间。三要注重塑造领先的创新制度。培育壮大经营主体，激发市场活力和社会创造力，使整个经济肌体充满生机活力。四要注重人才驱动。要把人的发展作为创新驱动发展的出发点和落脚点，让一切劳动、知识、技术、管理、资本的活力竞相迸发。

多措并举瞄准重点加紧部署

加快形成和发展新质生产力，要围绕重大项目和民生基础工程、产业升级与新产业培育、区域创新发展、开放合作新格局等方面加紧部署。

一是加快部署一批牵引未来经济增长的重大科技项目、重大科技工程、重大新型基础设施。围绕国家发展和安全的重大应用场景凝练关键科技问题，形成以场景带动科研攻关、成果转化和产业培育的新模式，加快打造新的经济增长点。

二是支撑现代化产业体系建设。在新一代信息技术、生物技术、新能源、新材料、高端装备、绿色环保等领域，打造一批具有国际竞争力的先进产业集群，促进数字经济和实体经济深度融合。聚焦人工智能、量子信息、前沿生物、低碳能源等前沿和颠覆性技术，加速未来产业孵化孕育和成长。

三是加速科技成果转化和产业化。在智能制造、智慧城市、智慧交通、智慧教育、智慧医疗等多个领域加大应用场景开放力度，支持新一代信息网络、智能绿色制造、现代农业、现代能源、人口健康等领域科技成果示范推广和产业化。

四是推动形成一批世界级创新高地和增长极。发挥北京、上海、粤港澳大湾区三大国际科创中心引领作用，打造具有国际领先水平的创新创业生态，辐射带动区域创新水平全面提升。深化区域科技创新合作，鼓励共建科技创新走廊和创新基地，推动科技资源共建共享、人才政策互用互认、技术市场互联互通。

五是以高水平国际合作拓展经济增长新空间。结合“一带一路”建设，发展全产业链合作方式，推动北斗导航、高铁、核能、超算中心等先进技术和重大装备“走出去”。推动设立重大产业国际化创新发展基金，支持自主创新成果国际化。○

来源：科技日报

2024 年度国家自然科学基金改革举措——节选自《2024 年度国家自然科学基金项目指南》

自然科学基金委贯彻落实党中央、国务院决策部署，切实担负起新时期赋予科学基金的职责使命，聚焦基础研究、应用基础研究和科技人才培养，持续提升资助效能，在 2024 年推出以下改革举措。

一、深化人才资助体制机制改革

开展国家杰出青年科学基金项目结题分级评价及延续资助工作，确定评价等级并将其反馈依托单位作为国家杰出青年科学基金项目负责人科研表现的评价参考，同时择优遴选不超过 20% 的项目给予第二个五年滚动支持，资助强度加倍，达到 800 万元 / 项，构建对优秀人才的长周期稳定资助机制。

在基础科学中心项目中单设赛道，专门资助最高年龄不超过 55 周岁、平均年龄不超过 50 周岁的年轻科研团队，给予

其更多挑大梁、担重任的机会，推动其早日脱颖而出。

将女性申请国家杰出青年科学基金项目的年龄限制放宽到 48 周岁，给予她们更多承担项目的机会，着力培养女性科技领军人才。

试点推进临床医师科研评价体系改革，深入开展临床医学人才项目评审，鼓励青年临床医师立足临床实践，开展创新性科学研究和技术探索，培养和造就一批具有国际影响力的临床科学研究领军人才。

扩大港澳地区依托单位范围，向港澳地区依托单位开放国家杰出青年科学基金项目，将优秀青年科学基金项目（港澳）并入优秀青年科学基金项目，继续向港澳地区依托单位开放青年科学基金项目。在以上三类项目的评审中，对于港澳地区和内地采用同样的标准和方式，一视同仁，择优资助。

继续试点开展对优秀博士

研究生、本科生的资助，坚持“少而精”，为构建高水平基础研究人才队伍提供“源头活水”。

二、优化分类申请与评审模式

根据基础研究发展的新形势和新要求，进一步优化分类申请与评审模式，将四类科学问题属性简化为“自由探索类基础研究”和“目标导向类基础研究”两类研究属性。

“自由探索类基础研究”是指选题源于科研人员好奇心或创新性学术灵感，且不以满足现阶段应用需求为目的的原创性、前沿性基础研究；“目标导向类基础研究”是指以经济社会发展需要或国家需求为牵引的基础研究。分类评审的项目范围为重点项目、面上项目和青年科学基金项目。

三、持续激励原始创新

瞄准提升原始创新能力，在所有类型项目的申请和评审中鼓励原创，进一步强调对原始创新的关注、保护和支持。继续实施原创探索计划，对原创性强、难以通过常规评审机制获得资助的项目设立专门渠道，遴选具有非共识、颠覆性、高风险等特征的原创项目，引导和激励广大科研人员投身原创性基础研究工作，详见后续发布的《2024 年度国家自然科学基金原创探索计划项目申请指南》。

四、继续开展“负责任、讲信誉、计贡献”（RCC）评审机制试点工作

坚持正面引导主基调，鼓励评审专家严格履行职责。广泛宣传倡导性、限制性和禁止性的评审专家行为规范，为负责任评审营造良好氛围。认真总结试点工作经验，推动成功经验制度化，不断提升科学基金项目评审整体质量。

五、不断完善多元投入机制

试点企业创新发展联合基金和“叶企孙”科学基金申请时不计入申请和承担项目总数范围，正式接收申请后计入；试点对加入区域创新发展联合基金的内蒙古自治区等 9 个基础研究薄弱的地区采取适当的倾斜政策；加强联合基金项目指南科学问题凝练，提升项目指南编制质量；进一步拓展区域创新发展联合基金、企业创新发展联合基金、与行业部门设立联合基金资助规模，扩大社会和个人捐赠的范围，不断提升联合基金资助效能。

六、持续推进国际（地区）科技合作与交流

贯彻落实党的二十大关于“扩大国际科技交流合作”的精神要求及党中央关于加强基础研究国际合作、建立面向全球的科学

研究基金战略意图，更大力度推进科学基金开放合作。进一步挖掘双多边合作渠道和合作潜力，推动构筑基础研究国际合作平台，稳步开展全球科技创新合作联合资助；持续深化与境外合作伙伴政策对话，积极参与全球科技治理；加强海峡两岸及与港澳伙伴的合作交流，推进港澳更好融入国家发展大局；加大对外籍人才的支持力度，启动国际科研资助部的资助工作，创造更适宜的开放合作科研资助平台，推动构建具有全球竞争力的开放创新生态。

七、做好重大类型项目资助统筹

落实重大类型项目资助统筹有关要求，切实做好重大类型项目与国家其他科技计划项目的统筹衔接。持续做好重大项目、基础科学中心项目、国家重大科研仪器研制项目（部门推荐）与国家重点研发计划项目、科技创新 2030—重大项目的联合限项审查。有效配置科技资源，提升重大类型项目资助效能。

八、持续落实科研经费管理改革

始终遵循科学规律、坚持“以人为本、放管结合”，持续推进落实《国家自然科学基金资助项目资金管理办法》（财教〔2021〕177 号，以下简称《资金

管理办法》),加大对科研人员的激励力度,激发创新活力。

贯彻落实党中央、国务院关于加强青年科技人才培养和使用的改革精神,对试点设立的青年学生基础研究项目实行经费包干制。为进一步提高科学基金项目经费配置效率,对基础科学中心延续资助项目增设预算评审。严格开展国家重大科研仪器研制项目预算评审,对于申请经费严重超过实际需求的项目将不予资助。

继续开展《资金管理办法》落实调研工作,广泛宣传科研经费管理政策,及时总结经验做法,持续压实依托单位主体责任,确保政策落实落地落细,积极探索符合基础研究发展规律的科学基金项目资金管理机制。

九、持续优化申请要求,减轻申请与评审负担

取消面上项目连续两年申请未获资助后暂停一年申请的限制。取消面上项目、青年科学基金项目 and 地区科学基金项目不允许博士后研究人员变更依托单位的限

制;博士后研究人员作为申请人申请项目时,研究期限由相应的项目类型确定。对于面上项目、青年科学基金项目、地区科学基金项目、重点项目、优秀青年科学基金项目、国家杰出青年科学基金项目、创新研究群体项目、基础科学中心项目、联合基金项目、国家重大科研仪器研制项目和重大项目,其研究期限由信息系统结合项目类型自动生成、不可更改,为申请人提供更便捷的服务。

对于个人简历中的代表性论文,申请人及主要参与者填写时应当根据其发表时的真实情况如实规范列出所有作者署名,并对本人署名情况进行标注,同时继续要求上传公开发表的代表性论文全文 PDF 电子版,减轻评审专家的评审负担。

十、加强依托单位管理

提高依托单位规范化、精细化和科学化的注册管理,探索构建科学可行的单位注册系统性评价指标,进一步健全依托单位准入和退出机制,强化依托单位动

态管理。建立并完善依托单位管理体系,进一步加强依托单位项目管理过程监督,持续推进包干制项目管理规定备案工作,深入研究并完善信誉评价与惩戒机制,定期开展依托单位科学基金项目经费使用状况抽查工作,压实依托单位履行管理与监督的主体责任。落实科学基金改革要求,切实提升依托单位项目管理能力和水平。

十一、严明评审纪律,深入推进评审专家被“打招呼”顽疾专项整治工作

遵循“正面引导、极限防守、严肃惩戒”的工作原则,强化宣传引导、严明评审纪律,坚决整治评审专家被“打招呼”顽疾。系统总结工作经验做法,持续完善评审机制、优化评审流程,进一步健全覆盖通讯评审、会议评审全流程的防范整治评审专家被“打招呼”的工作机制和制度体系,切实强化监督、抓好落实,营造风清气正的科研生态环境。○

来源:国家自然科学基金委员会

工业和信息化部等八部门关于加快传统制造业转型升级的指导意见

一、发展基础和总体要求

党的十八大以来，在以习近平同志为核心的党中央坚强领导下，我国制造业已形成了世界规模最大、门类最齐全、体系最完整、国际竞争力较强的发展优势，成为科技成果转化的重要载体、吸纳就业的重要渠道、创造税收的重要来源、开展国际贸易的重要领域，为有效应对外部打压、世纪疫情冲击等提供了有力支撑，为促进经济稳定增长作出了重要贡献。石化化工、钢铁、有色、建材、机械、汽车、轻工、纺织等传统制造业增加值占全部制造业的比重近 80%，是支撑国民经济发展和满足人民生活需要的重要基础。与此同时，我国传统制造业“大而不强”“全而不精”问题仍然突出，低端供给过剩和高端供给不足并存，创新能力不强、产业基础不牢，资源约束趋紧、要素成本上升，巩固提升竞争优势面临较大挑战，需加快推动质量变革、效率变革、动力变革，

实现转型升级。

加快传统制造业转型升级要以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深入贯彻党的二十大精神，落实全国新型工业化推进大会部署，坚持稳中求进工作总基调，完整、准确、全面贯彻新发展理念，加快构建新发展格局，统筹发展和安全，坚持市场主导、政府引导，坚持创新驱动、系统推进，坚持先立后破、有保有压，实施制造业技术改造升级工程，加快设备更新、工艺升级、数字赋能、管理创新，推动传统制造业向高端化、智能化、绿色化、融合化方向转型，提升发展质量和效益，加快实现高质量发展。

到 2027 年，传统制造业高端化、智能化、绿色化、融合化发展水平明显提升，有效支撑制造业比重保持基本稳定，在全球产业分工中的地位和竞争力进一步巩固增强。工业企业数字化研发设计工具普及率、关键工序数控化率分别超过 90%、70%，工业能耗强度和

二氧化碳排放强度持续下降，万元工业增加值用水量较 2023 年下降 13% 左右，大宗工业固体废物综合利用率超过 57%。

二、坚持创新驱动发展，加快迈向价值链中高端

（一）加快先进适用技术推广应用。鼓励以企业为主体，与高校、科研院所共建研发机构，加大研发投入，提高科技成果落地转化率。优化国家制造业创新中心、产业创新中心、国家工程研究中心等制造业领域国家级科技创新平台布局，鼓励面向传统制造业重点领域开展关键共性技术研究和产业化应用示范。完善科技成果信息发布和共享机制，制定先进技术转化应用目录，建设技术集成、熟化和工程化的中试和应用验证平台。

（二）持续优化产业结构。推动传统制造业优势领域锻长板，推进强链延链补链，加强新技术新产品创新迭代，完善产业生态，提升全产业链竞争优势。支持传

统制造业深耕细分领域，孵化新技术、开拓新赛道、培育新产业。持续巩固“去产能”成果，依法依规淘汰落后产能，坚决遏制高耗能、高排放、低水平项目盲目上马。完善高耗能、高排放、低水平项目管理制度，科学细化项目管理目录，避免对传统制造业按行业“一刀切”。

（三）深入实施产业基础再造工程。支持企业聚焦基础零部件、基础元器件、基础材料、基础软件、基础工艺和产业技术基础等薄弱领域，加快攻关突破和产业化应用，强化传统制造业基础支撑体系。深化重点产品和工艺“一条龙”应用，强化需求和场景牵引，促进整机（系统）和基础产品技术互动发展，支持企业运用首台（套）装备、首批次材料、首版次软件实施技术改造，扩大创新产品应用市场。

（四）着力增品种提品质创品牌。聚焦消费升级需求和薄弱环节，大力开发智能家居、绿色建材、工艺美术、老年用品、婴童用品等领域新产品。推动供给和需求良性互动，增加高端产品供给，加快产品迭代升级，分级打造中国消费名品方阵。实施卓越质量工程，推动企业健全完善先进质量管理体系，提高质量管理能力，全面提升产品质量。加快企业品牌、产业品牌、区域品牌建设，持续保护老字号，打造一

批具有国际竞争力的“中国制造”高端品牌。推动传统制造业标准提档升级，完善企业技术改造标准，用先进标准体系倒逼质量提升、产品升级。

三、加快数字技术赋能，全面推动智能制造

（五）大力推进企业智改数转网联。立足不同产业特点和差异化需求，加快人工智能、大数据、云计算、5G、物联网等信息技术与制造全过程、全要素深度融合。支持生产设备数字化改造，推广应用新型传感、先进控制等智能部件，加快推动智能装备和软件更新替代。以场景化方式推动数字化车间和智能工厂建设，探索智能设计、生产、管理、服务模式，树立一批数字化转型的典型标杆。加快推动中小企业数字化转型，推动智改数转网联在中小企业先行先试。完善智能制造、两化融合、工业互联网等标准体系，加快推进数字化转型、智能制造等贯标，提升评估评价公共服务能力，加强工业控制系统和数据安全防护，构建发展良好生态。

（六）促进产业链供应链网络化协同。鼓励龙头企业共享解决方案和工具包，带动产业链上下游整体推进数字化转型，加强供应链数字化管理和产业链资源共享。推动工业互联网与重点产

业链“链网协同”发展，充分发挥工业互联网标识解析体系和平台作用，支持构建数据驱动、精准匹配、可信交互的产业链协作模式，开展协同采购、协同制造、协同配送、产品溯源等应用，建设智慧产业链供应链。支持重点行业建设“产业大脑”，汇聚行业数据资源，推广共性应用场景，服务全行业转型升级和治理能力提升。

（七）推动产业园区和集群整体改造升级。推动国家高新区、科技产业园区等升级数字基础设施，搭建公共服务平台，探索共享制造模式，实施整体数字化改造。以国家先进制造业集群为引领，推动产业集群数字化转型，促进资源在线化、产能柔性化和产业链协同化，提升综合竞争力。探索建设区域人工智能数据处理中心，提供海量数据处理、生成式人工智能工具开发等服务，促进人工智能赋能传统制造业。探索平台化、网络化等组织形式，发展跨物理边界虚拟园区和集群，构建虚实结合的产业数字化新生态。

四、强化绿色低碳发展，深入实施节能降碳改造

（八）实施重点领域碳达峰行动。落实工业领域和有色、建材等重点行业碳达峰实施方案，完善工业节能管理制度，推进节能

降碳技术改造。开展产能置换政策实施情况评估,完善跨区域产能置换机制,对能效高、碳排放低的技术改造项目,适当给予产能置换比例政策支持。积极发展应用非粮生物基材料等绿色低碳材料。建立健全碳排放核算体系,加快建立产品碳足迹管理体系,开展减污降碳协同创新和碳捕集、封存、综合利用工程试点示范。有序推进重点行业煤炭减量替代,合理引导工业用气增长,提升工业终端用能电气化水平。

（九）完善绿色制造和服务体系。引导企业实施绿色化改造,大力推行绿色设计,开发推广绿色产品,建设绿色工厂、绿色工业园区和绿色供应链。制修订一批低碳、节能、节水、资源综合利用、绿色制造等重点领域标准,促进资源节约和材料合理应用。积极培育绿色服务机构,提供绿色诊断、研发设计、集成应用、运营管理、评价认证、培训等服务。发展节能节水、先进环保、资源综合利用、再制造等绿色环保装备。强化绿色制造标杆引领,带动更多企业绿色化转型。

（十）推动资源高效循环利用。分类制定实施战略性资源产业发展方案,培育创建矿产资源高效开发利用示范基地和示范企业,加强共生伴生矿产资源综合利用,提升原生资源利用水平。积极推广资源循环生产模式,大力

发展废钢铁、废有色金属、废旧动力电池、废旧家电、废旧纺织品回收处理综合利用产业,推进再生资源高值化循环利用。推动粉煤灰、煤矸石等工业固废规模化综合利用,在工业固废集中产生区、煤炭主产区、基础原材料产业集聚区探索工业固废综合利用新模式。推进工业废水循环利用,提升工业水资源集约节约水平。

（十一）强化重点行业本质安全。引导企业改造有毒、有害、非常温等生产作业环境,提高工作舒适度,通过技术改造改善安全生产条件。深化“工业互联网+安全生产”,增强安全生产感知、监测、预警、处置和评估能力。加大安全应急装备在重点领域推广应用,在民爆等高危行业领域实施“机械化换人、自动化减人”。支持石化化工老旧装置综合技术改造,培育智慧化工园区,有序推进城镇人口密集区危险化学品生产企业搬迁改造和长江经济带沿江化工企业“搬改关”。

五、推进产业融合互促,加速培育新业态新模式

（十二）促进行业耦合发展。推进石化化工、钢铁、有色、建材、电力等产业耦合发展,推广钢化联产、炼化集成、资源协同利用等模式,推动行业间首尾相连、互为供需和生产装置互联互

通,实现能源资源梯级利用和产业循环衔接。大力发展生物制造,增强核心菌种、高性能酶制剂等底层技术创新能力,提升分离纯化等先进技术装备水平,推动生物技术在食品、医药、化工等领域加快融合应用。支持新型功能性纤维在医疗、新能源等领域应用。搭建跨行业交流对接平台,深挖需求痛点,鼓励企业开展技术产品跨行业交叉应用,拓展技术产品价值空间,打造一批典型案例。

（十三）发展服务型制造。促进传统制造业与现代服务业深度融合,培育推广个性化定制、共享制造、全生命周期管理、总集成总承包等新模式、新场景在传统制造业领域的应用深化。推动工业设计与传统制造业深度融合,促进设计优化和提升,创建一批国家级工业设计中心、工业设计研究院和行业性、专业性创意设计园区,推动仓储物流服务数字化、智能化、精准化发展,增强重大技术装备、新材料等领域检验检测服务能力,培育创新生产性金融服务,提升对传统制造业转型升级支撑水平。

（十四）持续优化产业布局。支持老工业基地转型发展,加快产业结构调整,培育产业发展新动能。根据促进制造业有序转移的指导意见和制造业转移发展指导目录,充分发挥各地资源禀赋、

产业基础优势，结合产业链配套需求等有序承接产业转移，提高承接转移承载力，差异化布局生产力。在传统制造业优势领域培育一批主导产业鲜明、市场竞争能力强的先进制造业集群、中小企业特色产业集群。支持与共建“一带一路”国家开展国际产能合作，发挥中外中小企业合作区等载体作用，推动技术、装备、标准、服务等协同走出去。

六、加大政策支持力度，营造良好发展环境

（十五）加强组织领导。在国家制造强国建设领导小组领导下，加强战略谋划、统筹协调和重大问题研究，推动重大任务和重大政策加快落地。各地区各部门协同联动，鼓励分行业、分地区制定实施方案，细化工作举措、出台配套政策、抓好推进落实，形成一批优秀案例和典型经验。充分发挥行业协会等中介组织桥梁纽带作用，加强政策宣贯、行业监测、决策支撑和企业服务。

（十六）加大财税支持。加大对制造业技术改造资金支持力度，以传统制造业为重点支持加快智改数转网联，统筹推动高端化、智能化、绿色化、融合化升级。落实税收优惠政策，支持制造业高质量发展。支持传统制造业企业参与高新技术企业、专精特新中小企业等培育和评定，按规定充分享受财政奖补等优惠政策。落实企业购置用于环保、节能节水、安全生产专用设备所得税抵免政策，引导企业加大软硬件设备投入。

（十七）强化金融服务。充分利用现有相关再贷款，为符合条件的传统制造业转型升级重点项目提供优惠利率资金支持。发挥国家产融合作平台、工业企业技术改造升级导向计划等政策作用，引导银行机构按照市场化、法治化原则加大对传统制造业转型升级的信贷支持，优化相关金融产品和服务。鼓励产业投资基金加大传统制造业股权投资支持力度。发挥多层次资本市场作用，支持

符合条件的传统制造业企业通过股票、债券等多种融资方式进行技术改造或加大研发投入，通过并购重组实现转型升级。

（十八）扩大人才供给。优化传统制造业相关中职、高职专科、职业本科专业设置，全面实践中国特色学徒制，鼓励建立校企合作办学、培训、实习实训基地建设等长效机制，扩大高素质技术技能人才培养规模。实施“制造业人才支持计划”，推进新工科建设，布局建设一批未来技术学院、现代产业学院、专业特色学院，建设“国家卓越工程师实践基地”，面向传统制造业领域培养一批数字化转型人才、先进制造技术人才、先进基础工艺人才和具有突出技术创新能力、善于解决复杂工程问题的工程师队伍。○

工业和信息化部、国家发展改革委、教育部、财政部、中国人民银行、税务总局、金融监管总局、中国证监会

2023年12月28日

来源：中华人民共和国工业和信息化部



关于征集自动化领域科技成果转化典型案例的通知

各理事单位、分支机构、省级自动化学会、学会会员：

为深入实施创新驱动发展战略，弘扬科技创新精神，推动构建政产学研深度融合的技术创新体系，营造支持成果转化的良好氛围，中国自动化学会现面向各相关单位开展科技成果转化典型案例征集工作。

详情请查看：<https://www.caa.org.cn/article/192/4442.html>



中国自动化学会

中国自动化学会(Chinese Association of Automation, 缩写CAA)于1961年成立,是我国最早成立的国家一级学术团体之一,是中国科学技术协会的组成部分,是发展我国自动化科技事业的重要社会力量。学会现有个人会员8万余人,团体会员单位300余个,专业委员会63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 with 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 · 国家工业软件大会
- 青年菁英系列活动 · 智能自动化学科前沿讲习班 · 钱学森国际杰出科学奖系列讲座
- 中国控制会议 · 中国过程控制会议 · 青年学术年会

学会奖励奖项

- CAA科技进步奖 · CAA自然科学奖 · CAA技术发明奖 · CAA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