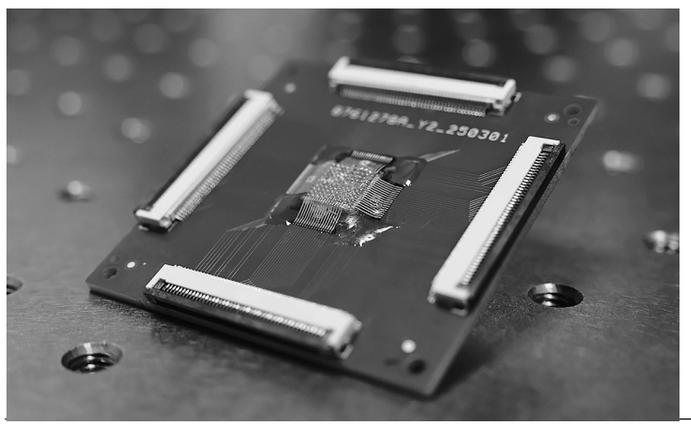
让机器人拥有人类般“指尖触觉”

■本报记者 朱汉斌 通讯员 余毅菁

指尖轻轻触碰，便能感知苹果的爽脆、面包的松软、丝绸的细腻，这得益于人类皮肤历经数百万年进化形成的精妙结构。

研究发现，人类指尖每平方厘米分布着约 240 个触觉感受器。它们能够同时捕捉压力、纹理、软硬等多维信息，并瞬间传递给大脑，从而形成精准的“触觉画像”。倘若能为机器人赋予这样的“指尖触觉”，甚至使其具备更敏锐的感知能力，那么世界将充满无限可能。

一项来自香港科技大学(广州)(以下简称港科大〈广州〉)的研究正逐步将这份“指尖智慧”变为现实。该校副教授訾云龙团队与合作者成功研制出亚毫米级分辨率的双模态触觉传感器阵列，首次实现对物体表面软硬度分布的精细触觉感知，让机器人系统获得了接近人类指尖皮肤的感知与辨析能力。近日，相关研究成果发表于《先进材料》。



亚毫米级分辨率的双模态触觉传感器阵列。 彭博 / 摄

为机器人赋予“智能指尖”

“人类依靠五感认知世界，机器要迈向真正的智能，也需要模拟这些感官。”论文通讯作者訾云龙表示，“目前，仿生视觉和听觉技术已相当成熟，但触觉的精细复现仍是亟待突破的‘深水区’。”

据介绍，现有的触觉传感器长期面临着一个困境：高分辨率与多模态感知难以兼得。高分辨率传感器往往只能测量单一信息，如压力；而多模态传感器又因结构复杂，导致尺寸偏大、精度受限。此外，基于压电、摩擦电等自供电机理的传感器，信号串扰问题严重，阻碍了信息的精准解码。

訾云龙团队决心突破上述困境。他们选择从“软硬度”这一关键物理属性切入，为机器人增添辨别真伪、判断品质的感知维度。团队从昆虫触觉感受器的结构中获得灵感，提出了双模态智能触觉传感器。

“该传感器基于摩擦电效应，在自供能条件下可同时实现材料种类识别、材料柔软度识别及量化弹性模量。”论文共同第一作者、港科大(广州)博士生何少帅表示，其设计为半球顶结构，利用与不同柔软度物体接触面积不同所产生的电压信号幅度差异，结合力学赫兹接触理论，可实现材料柔软度识别和量化弹性模量。

何少帅介绍，此前的研究虽实现了材料种类识别率 99.4%、材料软硬度识别率 100%的准确率，并制作出单个触感器在 5 毫米级的阵列集成，但要赋予机器人真正灵巧的“智能指尖”，必须在传感器的微型化与集成度上继续取得突破。

触感器尺寸从 5 毫米缩至 0.35 毫米

指纹间距约在一毫米以内，触感器要做到这个尺度，才能感知如指纹般精细的纹理。这意味着研究需迈向亚毫米级的阵列集成。

“在港科大(广州)，我们不仅要以科学家的思维发现问题、提供解决方案，更要以工程师的思维交付‘实际可用的样品’，让科研与工程贯通，走向真实应用场景。”訾云龙说。

不过尺寸每缩小一步，工艺难度便呈指数级增长。传感器阵列需做到“平面与曲面的精密结合”，要将上百个微米级的“小手指”(传感单元)排列整齐，每个单元独立连接压电与摩擦电两层信号线，总计两百余根导线不能互相串扰，这如同在一个极小面积内进行超精密的“布线手术”。

材料选择与工艺调试更是困难重重。仅为了找到适合制造微柱阵列基底的材料，訾云龙团队就迭代了十几种配方，从热固化到光固化，经历了上百次失败。

訾云龙认为，导师要帮助学生判断难点是“可攻克的技术挑战”还是“必须绕行的理论死胡同”，培养学生的风险判断与科研管理能力。

訾云龙团队师生虽大多为材料学背景，但通过跨学科学习与协作，补全了微电子等相关知识，并与人工智能、智能制造等学域的师生紧密合作，不断优化传感器设计，逐步实现了从宏观器件到微米级器件的跨越。

最终，訾云龙团队通过将皮秒紫外激光精密加工与高精度 3D 打印等尖端制造技术进行创新融合，攻克了相应的工艺集成难题，成功实现了触感器单元的微型化，将单个触感器尺寸从 5 毫米缩小至 0.35 毫米，完成了亚毫米级分辨率双模态智能触觉传感器的关键跨越。

潜在的应用场景

性能的稳定与提升，为技术转化铺平了道路。最直接的应用是高安全性产品的溯源与防伪。“我们可以在产品表面，用肉眼乃至光学设备都无法识别的微小软硬度差异，制作一个独特的‘物理指纹’。”訾云龙描述道，“专用设备或机器人一摸，便能读取信息，实现极难仿造的真伪验证。”

在智能家居与工业分拣领域，机器人将真正实现“择优而取”——从一堆水果中精准挑出成熟度最佳的一颗，或在一批外观相同的物品中识别并抓取特定目标。

如果将该技术集成于内窥镜等医疗器械，通过感知身体内部组织硬度的细微差异，就可为肿瘤等疾病的早期诊断提供触觉线索，辅助医生实现更精准的诊疗。

对于应用前景，团队秉持着开放而务实的态度：“有的方向非常契合，有的则是技术原理的有趣延伸。这也恰恰说明，精细触觉感知蕴藏着无限可能。”

訾云龙透露，下一步，基础研究将继续向感知滑动、三维力等更复杂的触觉维度深化；技术转化则会秉持开放心态，积极寻求与产业界的合作契机。“现在正是带着我们‘能做什么’的明确答案，与市场进行对话的好时机。”

“在不远的将来，拥有一双‘人类般灵巧双手’的机器人，或许将从愿景逐步走入现实。”訾云龙说。

相关论文信息：
https://doi.org/10.1002/adma.202519734

集装箱

我国首个人形机器人与具身智能标准体系发布

本报讯(记者高雅丽)近日，人形机器人与具身智能标准化年会在北京召开。会上发布了《人形机器人与具身智能标准体系(2026 版)》。这是我国首个覆盖人形机器人与具身智能全产业链、全生命周期的标准顶层设计，标志着相关产业进入规范化发展新阶段。

工业和信息化部人形机器人与具身智能标准化技术委员会组织领域内 120 余家科研院所、企业和行业用户单位，研究编制了该标准体系。体系设有基础共性、类脑与智算、肢体与部组件、整机与系统、应用、安全伦理 6 个部分。

其中，基础共性标准是通用性、指导性的标准和规范，为技术演进和发展提供合规保障；类脑与智算标准覆盖具身智能“大小脑”与智能计算等关键标准，规范数据全生命周期、模型训推部署全链路技术；肢体与部组件标准包含类人躯干、臂与腿足、灵巧手，以及执行、感知、通信单元模组等关键标准，为人形机器人与具身智能模块化发展提供规范指导；整机与系统标准是具身智能整机、系统软件及软硬件协同等关键标准，为实现人形机器人与具身智能的软硬件集成融合提供规范依据；应用标准规范人形机器人与具身智能体在不同应用场景的开发、运行和维护等；安全伦理标准贯穿于人形机器人与具身智能产业全生命周期，为技术演进和发展提供安全与合规保障。

会上还发布了人形机器人与具身智能重点标准项目预研清单、《人形机器人身份管理机制建设合作倡议》和《人形机器人与具身智能产业安全发展倡议》。

农药残留测定法等强制性食品安全国家标准实施

本报讯(记者李晨)日前，国家卫生健康委员会、农业农村部和国家市场监督管理总局联合发布了《食品安全国家标准 植物源性食品中 352 种农药及其代谢物残留量的测定 液相色谱 - 质谱联用法》等强制性食品安全国家标准。这些标准均于 3 月 1 日起正式实施。

农药残留是国家和人民群众重点关注的农产品质量安全问题。精准检测农药残留是农产品质量安全监管的重要依据。根据《中华人民共和国食品安全法》第二十六条，农药残留检测方法标准等“与食品安全有关的食品检验方法与规程”属于食品安全标准，是强制执行的标准。农残限量标准必须配套相应检测方法标准，并作为强制性标准指导应用。

“制定满足当前农业生产和进出口贸易需求的农药残留检测方法标准是合法、合规、准确开展农产品质量安全监管的前提。”农业农村部环境保护科研监测所环境危害因子风险评估创新团队贺泽英研究员在解读国标时表示，近年来我国加快了农药残留相关标准的制修订进程，发布实施了一系列检测方法标准，为农产品质量安全监管提供了坚实的标准支撑。

在前期工作基础上，此次制修订的标准规定了 500 余种农药及代谢物在植物源性食品中的检测方法，覆盖我国目前登记使用的主要农药品种，涵盖所有种植业农产品类型。

标准制修订过程中，围绕传统检测技术前处理复杂、灵敏度和精密度低、适用基质类型缺乏的问题，团队开发了一体化快速前处理技术，结合高通量串联质谱分析，在实现农药残留精准检测的同时显著提高了检测工作效率。

目前系列标准已广泛应用于国家农产品质量安全风险监测、国家食品安全监督抽检以及各省市级农产品和食品安全监管。

太赫兹创新联盟在上海成立

本报讯(见习记者江庆龄)日前，2026 太赫兹高峰论坛暨太赫兹创新联盟成立大会在上海复旦大学举行。

在工业和信息化部高新技术司的指导下，太赫兹创新联盟在会上揭牌成立，标志着我国太赫兹领域“高校 + 科研院所 + 科技企业”协同创新机制正式确立。该联盟由复旦大学、中山大学、北京理工大学等 15 家高校、科研机构和科技领军企业共同发起，66 家单位作为第一批联盟理事单位，旨在整合国内太赫兹领域创新资源，推动太赫兹领域前沿突破、技术发展、人才引育、产业创新，拓展产学研合作空间和交流渠道，促进太赫兹科技与产业发展。

据悉，联盟将跟踪研究国内外太赫兹科技产业现状及趋势、组织太赫兹科技协同攻关、建设自主可控的基础设施，打通“基础研究 - 技术研发 - 产业应用”创新链条，服务国家战略发展目标，强化太赫兹关键元器件与芯片、科学仪器等底层技术研发，推动太赫兹技术标准建立、应用场景与产业生态建设。

未来，联盟将依托复旦大学等发起单位的基础研究优势，联合成员单位在核心元器件、系统集成、科学仪器等领域开展攻关，培育国家战略急需的拔尖创新人才，搭建开放式服务平台，推广优秀成果和案例，推进标准工作，构建具有全球竞争力的太赫兹技术体系与创新生态，为提升我国在前沿科技领域的国际话语权作出重要贡献。

首个医生数字分身正式启用

本报讯(记者朱汉斌 通讯员周颖怡)近日，由广东省医学会、广东省第二人民医院（以下简称省二医）主办的全国首个医生数字分身暨数字疗法生态发布会在广州举行。

省二医首席科学家、健康管理研究所所长田军章介绍，数字疗法生态的核心有别于通用问答机器人，它通过独创的“思维链技术”，深度学习并完整复刻某一位名医专家的诊疗逻辑、处方经验和临床直觉，形成基于特定专家的数字分身。

“群众面对的不是通用的人工智能医生，而是特定专家的数字分身，也就是‘有灵魂’的医生数字分身，相当于这位专家本人基于群众的个人健康数据，进行病因分析、风险识别、干预方案生成与动态调整。”田军章表示，这一成果标志着医疗人工智能实现从“单一数字工具”向“具备思考能力”的认知型系统跃迁，破解当下数字医疗“千面一人”的行业痛点。

记者从会上了解到，省二医构建了“一项数据基座、一套决策中枢、一支数字团队”三位一体的数字疗法生态。个人健康数据胶囊作为数据基座，主动健康智能体作为决策中枢，医生数字分身作为服务载体，共同打破传统医疗中的数据孤岛，真正打通医院诊疗与居家康养的“最后一公里”，让预防为主的卫生与健康工作方针落地生根，优质医疗资源通过医生数字分身直达群众身边。

依托数字疗法生态，医生数字分身如何将个性化健康管理落到实处？答案藏在三大数字处方之中：营养数字处方、运动数字处方、中医调理数字处方。这三剂“数字药”因人而异、精准适配，让健康管理在多元场景中落地生根，真正走进群众的日常生活。

据悉，目前这一数字疗法生态在省二医糖胖病逆转中心等科室开展。糖胖病逆转中心主任徐谷根等专家的数字分身已上线，成为糖胖病患者的专属保健医生。

按图索技

这些机器人可“海陆两栖”“管道巡检”

本报讯(记者刁雯蕙)清华大学深圳国际研究生院副教授曲钧天团队通过模仿海龟、蠕虫等生物的高效运动模式，研发出面向复杂两栖环境的智能仿生两栖海龟机器人、面向水下复杂管道内部探测的仿蠕虫柔性管道机器人。近日，相关研究成果分别发表于《电气与电子工程师学会机器人学汇刊》《细胞报告物质科学》。

曲钧天团队从海龟的运动中汲取灵感，研制出一款智能仿生两栖海龟机器人。该机器人采用三自由度仿生鳍肢与轻量化设计，并通过贝叶斯优化实现低功耗高效运动，其核心创新在于融合视觉与触觉信息。他们利用双流卷积神经网络实时进行地形分类，准确率高达 99.17%，并据此实现动态步态自适应。该策略使机器人能效提升 19.1%，运动速度提高 9.2%，在复杂环境中表现出卓越的稳定性。

曲钧天团队还研制出一款磁吸式模块化仿蠕虫柔性管道机器人。该机器人采用星形三向锚定足与纤维增强波纹管主干设计，兼具纯柔性与高负载能力，重量仅 120 克，却能在垂直管道中推动 750 克、拉动 309.5 克负载，并适应 39 至 60 毫米的变管径，以及 0 到 90 度管道倾角。其模块化磁吸设计支持快速构型重组，使三节构型可跨越 25 毫米缺口，五节串联构型能跨越 80 毫米宽断裂缺口，搭载摄像头后机器人可在复杂管道内部完成巡检任务。

两项研究中，仿海龟软体机器人通过多模态感知实现了环境智能适应，而仿蠕虫软体管道机器人则通过可重构模块化躯体突破了复杂非结构化空间的运动限制，分别为海 - 陆两栖跨介质探测与水下管道内部巡检等复杂任务提供了高效、灵活的技术方案。

智能仿生两栖海龟机器人。 研究团队供图

相关论文信息：
https://ieeexplore.ieee.org/document/11219361
https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2025.103038

专家讲坛

“蓝天标准”升级意味着什么

■许小峰

3 月 1 日，我国新修订的《环境空气质量标准》正式实施。这是自 2012 年以来我国首次全面提升国家空气质量标准，标志着大气环境治理工作从“攻坚”迈向了“持久战”的新阶段。

此次标准修订以大气中细颗粒物（PM2.5）年均浓度二级限值从 35 微克 / 立方米收严至 25 微克 / 立方米为核心牵引，同步提高了对 PM10、二氧化硫、二氧化氮等相关指标的限值。如何理解和认识这次标准升级？

对标国际，我国环境治理水平稳步提升

近年来，我国大气污染治理取得了显著成效。数据显示，在我国国内生产总值（GDP）翻一番的同时，PM2.5 平均浓度下降了 59%，创造了近年来全球空气质量改善速度最快的纪录。特别是“十四五”期间，我国 GDP 增长 30%，PM2.5 浓度下降 20%；空气质量达标城市数量从 206 个增至 246 个，增幅达 20%。2025 年，全国地级及以上城市 PM2.5 平均浓度为 28.0 微克 / 立方米，优良天数比例为 89.3%，重污染天数比例为 0.9%，三项指标均达到有监测记录以来的最优水平。

这一成绩的取得得益于国家出台了一系列有效政策和措施。五年来，我国累计压减煤炭产能 10 亿吨、钢铁产能 3 亿吨、水泥产能 4 亿吨，完成 9.4 亿吨粗钢、3.6 亿吨焦化、4.7 亿吨水泥熟料产能超低排放改造。同时，我国淘汰高排放老旧车辆近 3000 万辆，新能源汽车市场渗透率超过 50%。在资金支持方面，中央财政累计投入 1585 亿元，带动总投资超 3000 亿元，支持大气污染治理项目 1.2 万个。

经济发展与环境保护虽然时有冲突，但经过努力，是可以做到协同发展的。中国的实践证明，我们确实做到了经济社会发展和空气质量改善的“双赢”。

此次标准修订的一个重要背景是国际空气质量标准的普遍升级。2021 年，世界卫生组织发布了更为严格的《全球空气质量指南》，将 PM2.5 年均浓度指导值由 10 微克 / 立方米收严至 5 微克 / 立方米。根据生态环境部调研数据，2022 年全球 194 个国家中，126 个国家制定了环境空气质量标准。我国此前执行的 PM2.5 限值为 35 微克 / 立方米，在全球排名第 76 位，仅高于印度和埃及。此次将 PM2.5 年均浓度收严到 25 微克 / 立方米，与世界卫生组织最新版《全球空气质量指南》第二阶段过渡值相当，总体处于全球中等水平。

我国在发展进程中，坚持了以人为本的初心使命，通过不断改善提升空气质量来保护人民健康；同时，我国立足发展阶段、产业布局、资源禀赋、人口规模等基本国情，不盲目追求国际最严水平、过早提出不切实际的高指标。

积极应对极端天气气候，适应气候变化“新常态”

我国空气质量深受自然地理环境的影响，沙尘天气是空气质量治理中不可回避的“先天因素”。就在新标准发布前夕的 2 月下旬，受蒙古国南部和中蒙交界地区起沙影响，我国北方地区出现大范围沙尘天气，55 个地级及以上城市 PM10 浓度达到短时重度或严重污染水平，部分地区 PM10 小时浓度峰值超过 3000 微克 / 立方米。从天气气候条件角度分析，近期沙源地降水量明显偏少，蒙古国南部和中蒙交界地区降水量相较于常年平均偏少 50%以上，地表干燥疏松，为沙尘天气的发生提供了有利条件。这种自然本底状况会对空气质量造成直接影响。

以 2025 年为例，剔除沙尘影响后，全国地级及以上城市优良天数比例从实际监测的约 88%提升至 89.3%。这也解释了为何我国在设定空气质量目标时，必须充分考虑沙尘等自然因素带来的短期波动，采取更加科学、合理的评价方法。

在全球温室气体排放量未能得到有效遏制、全球平均气温持续增暖的背景下，极端天气气候事件日益频繁，给空气质量治理带来新的不确定性。冬季的静稳天气易在我国北方地区形成重污染天气条件，使城市 PM2.5 年均浓度显著升高；而春季的强冷空气则易造成我国大范围沙尘天气，通过大气中颗粒物浓度变化影响空气质量。这是在推进减排工作进程中需要特别关注的一个因素。气象条件对大气质量有着不可低估的影响，并在很大程度上影响治理成效。

面对这一挑战，我国正在采取措施，加强气候变化适应能力建设。例如，2025 年 12 月生态环境部等七部门联合印发了《京津冀美丽中国先行区建设行动方案》，其中就明确提出“突出大气污染防治提质增效，提升适应气候变化能力，打造京津冀减污降碳协同和生态修复示范区。到 2027 年，区域生态环境质量显著改善，PM2.5 年均浓度降至 33 微克 / 立方米”等要求。

把握好发展与治理平衡，渐进推进环境治理

此次新标准实施采取“一次修订、两阶段实施”的方案，体现了政策制定的审慎与智慧。第一阶段自 2026 年 3 月 1 日起至 2030 年 12 月 31 日，执行过渡阶段浓度限值；第二阶段自 2031 年 1 月 1 日起，在全国范围内执行修订后的浓度限值。设置这样的过渡期，可以为各级政府组织制订和实施改进计划留出缓冲时间，为产业结构调整、源头治理减排等治本之策的实施做好准备。修订标准既体现了空气质量改善的目标和方向，也为最终达标所需的过程留有余地，是实事求是的政策考量。

从实际情况看，如果立即采用新标准评价，全国 PM2.5 达标城市数量将从 271 个下降到 140 个，优良天数比例将从 88.1% 下降到 78.3%。显然这并不是空气质量本身出了问题，而是在更为严格的评判标准下，对“蓝天”指标的要求更高了。

分区分类施策也是重要考量。对于 PM2.5 年均浓度高于 35 微克 / 立方米的 68 个城市，要继续聚焦结构减排；对于 PM2.5 年均浓度介于 26 微克 / 立方米至 35 微克 / 立方米的 131 个城市，要利用好过渡期挖掘减排潜力；对于 PM2.5 年均浓度低于 25 微克 / 立方米的 140 个城市，要进一步巩固达标成果。

新空气质量标准的实施既是我国大气污染治理成效的体现，也是未来持续改善的起点。它传递了清晰的远期目标，推动各方面加快绿色低碳转型，同时也为结构调整留出充足时间，在经济发展与环境保护的平衡木上，以中国自己的节奏和方式，探索一条符合国情的可持续发展道路。蓝天白云，正在成为高质量发展的底色，成为人民群众幸福生活的日常。

（作者系中国气象局研究员、中国气象服务协会会长）