

附件 5

“智能机器人”重点专项 2024 年度项目申报指南

为落实“十四五”期间国家科技创新有关部署安排，国家重点研发计划启动实施“智能机器人”重点专项。根据本重点专项实施方案的部署，现发布 2024 年度项目申报指南。

本重点专项总体目标是：构建适合我国国情的智能机器人技术体系，推动技术与产品持续创新；实现产业链高级化、产品与系统应用高端化，推动我国机器人技术与产业高质量发展；支撑国民经济主战场、国家重大需求、人民生命健康等相关行业/领域自主发展。

2024 年度指南部署坚持问题导向、分步实施、重点突出的原则，围绕基础前沿技术、共性关键技术、工业机器人、服务机器人、特种机器人等 5 个技术方向，按照基础研究、共性关键技术和应用示范三个层面，拟安排 36 项指南任务，拟安排国拨经费 3.24 亿元。其中，围绕基础前沿技术方向，拟部署青年科学家指南任务 2 项，拟安排国拨经费 1200 万元，每个项目 200 万元。除特殊说明外，共性关键技术类项目配套经费与国拨经费比例不低于 2:1，应用示范类项目由企业牵头申报，配套经费与国拨经

费比例不低于 3:1。

项目统一按指南二级标题（如 1.1）的研究方向申报。除特殊说明外，每个指南任务拟支持项目数为 1 项，实施周期不超过 3 年。申报项目的研究内容必须涵盖二级标题下指南所列的全部研究内容和考核指标。基础研究类项目下设课题数不超过 4 个，项目参与单位总数不超过 5 家；共性关键技术类和应用示范类项目下设课题数不超过 5 个，项目参与单位总数不超过 8 家。项目设 1 名项目负责人，项目中每个课题设 1 名课题负责人。

青年科学家项目不要求对指南内容全覆盖，不再下设课题，项目参与单位总数不超过 3 家。项目设 1 名项目负责人，1984 年 1 月 1 日以后出生，原则上团队其他参与人员年龄要求同上。

1. 基础前沿技术

1.1 多模态运动柔性电子机器人（基础研究类）

研究内容：针对恶劣水下环境中重大工程与装备结构表面的动态大变形监测需求，研究跨域多模态黏附移动柔性电子机器人的基础理论，研究适应高频振动大变形表面的“驱-感-控”一体柔性电路、机器人在复杂工程表面的无损附着及定向运动智能控制等关键技术；研制跨域多模态附着移动柔性电子机器人，实现跨水/空域灵活部署，开展实验方法和测试能力研究，并进行验证。

考核指标：研制出可测量包括应力/应变、加速度等物理量的大变形柔性电子机器人系统，柔性传感部分变形率 $\geq 500\%$ ，可测

振动频率 ≥ 50 Hz；机器人整体可通过 <1 cm 狭缝，机器人附着移动速度 ≥ 0.5 cm/s；实现柔性电子机器人在水面及水下环境的附着部署，吸/脱附时间 ≤ 1 s，附着表面粗糙度 ≥ 500 μm ，可于 2 m 波高和 1 m/s 流速环境中稳定附着。完成水/空多域传感器灵活部署应用实验验证。至少 2 项关键技术实现首创或达到同类技术的国际领先水平，并提供佐证材料；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：柔性电子，多模态运动机器人，跨域附着运动，智能控制

1.2 生成式人工智能驱动的机器人集群三维环境协同探索（基础研究类）

研究内容：针对野外复杂未知的三维动态环境下机器人集群智能协同探索需求，研究面向机器人集群协同任务规划的生成式人工智能模型构建、训练、调优与提示工程，研究具有可泛化、安全可信的具身智能未知环境探索理论方法，研发面向集群三维环境数据共享的低时延/抗干扰轻小型通信模块与专用通信机制、人-机集群友好交互界面设计与高效指控技术；研制生成式人工智能驱动的机器人集群协同探索系统，开展面向野外搜救等场景的实验验证，实现协同探索效率与通用多任务支撑能力的提升。

考核指标：3D 探索外场试验集群规模不低于 20 台，复杂场景协同探索成功率不低于 95%；任务推理成功率不小于 85%，可泛化场景数量不少于 100 个，具身导航模型平均碰撞次数低于 3

次/1000 米；卫星导航拒止条件下 1000 立方米范围内 3D 环境重建误差小于 10 cm；通信模块重量不高于 200 g，山地、丛林等非视距 2 公里时带宽不低于 10 Mbps，所使用的无线电频率应符合国家无线电管理规定，实现语音等人机友好交互模式不低于 4 种，且交互指令下达后集群系统具备自主运行能力；集群 3D 环境探索技术在协同探索效率、通用多任务支撑能力等方面达到国际领先水平，并提供佐证材料；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：生成式人工智能，机器人集群，智能协同探索，集群友好交互，具身智能

1.3 可穿戴沉浸式触觉反馈人机交互系统（基础研究类）

研究内容：针对现有触觉反馈系统阵列密度低、可穿戴性差的问题，研究高频响驱动触觉反馈机制与多模态触觉传感融合机理，研究高密度主动触觉反馈驱动阵列与人机友好机械界面的一体化设计方法、基于触觉反馈阵列与生机接口的触觉编码与人机双向交互控制等关键技术；研制集成触觉感知-反馈-主动控制的可穿戴沉浸式触觉反馈人机交互系统，开展实验验证。

考核指标：开发不少于两种主动触觉反馈驱动装置，固有频率 ≥ 600 Hz，功率密度 ≥ 1000 W/kg；可穿戴触觉反馈系统的空间分辨率 ≤ 8 mm，阵列数量 ≥ 30 个，最大输出力不小于 100 mN，工作带宽不低于 300 Hz；实现动态力、滑移方向等不少于 10 类触觉感知行为识别，准确率不低于 90%；具备肌电等生机接口与触觉

反馈系统的双向触觉信息传递，人机交互延迟不大于 1 s；完成不少于 2 种典型场景的应用。至少 2 项关键技术实现首创或达到同类技术的国际领先水平，并提供佐证材料；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：主动触觉反馈驱动，动态触觉信息编码，多模态触觉传感皮肤，人机交互接口

1.4 具身视角下的机器人通用行为生成与发育(基础研究类)

研究内容：面向动态开放场景下机器人复杂作业技能与通用自主行为的生成需求，研究类人具身行为发育与模仿学习的认知机理、通用行为生成类脑决策机理模型，研究作业技能与具身行为的知识表达及推理方法并构建多模态具身行为数据集，研发机器人通用行为生成大模型与高逼真交互式机器人行为仿真平台，支持具身行为的高效训练、虚实迁移与泛化，实现面向感知-规划-执行一体化的具身行为学习与发育能力。以实体机器人为载体，开展典型场景示范验证。

考核指标：建立具有原创性的类脑决策机理模型 1 个，构建作业与行为知识图谱与推理框架 1 套，构建第一人称多模态行为数据集 (≥ 10000 小时、 ≥ 10 类场景、 ≥ 5 类行为、 ≥ 30 种作业技能)；行为生成式大模型可生成 ≥ 30 种作业技能，行为生成与执行响应时间 ≤ 0.5 s，已知类型行为生成准确率 $\geq 95\%$ ，未知类型行为生成准确率 $\geq 75\%$ ；交互式机器人仿真平台覆盖机器人类型 ≥ 5 类，作

业与行为仿真准确性不低于 95%，并发支持实时仿真环境不低于 10 个，在医疗康养、敏捷家政、柔性装配作业等不少于 5 种典型场景进行实验验证，任务成功率 $\geq 95\%$ ，机器人动作执行偏差 $\leq 5\%$ 。至少 2 项关键技术实现首创或达到同类技术的国际领先水平，并提供佐证材料；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：技能学习，具身行为发育，生成式行为大模型，模仿学习、机器人行为仿真平台

1.5 智能-驱动一体化的类生命机器人理论与方法（基础研究类）

研究内容：针对传统硅基智能和机电驱动在机器人决策、执行等方面存在的缺陷，推动具身智能从人工回路向生命本征闭环转变，探究类生命机器人具身智能生成范式，研究智能-驱动融合构建的类生命机器人原理与技术，研发面向大尺度组织培养的生物-机电混合组织制造与生命维持技术，研制高通量双向交互的三维生机接口器件，研究类脑智能-类生驱动一体化机器人的信息交互与智能-驱动闭环控制方法，研发基于生物神经网络与类生命驱动器的生机融合机器人系统平台。研制智能-驱动融合的类生命机器人原理样机，并在典型任务中进行实验验证。

考核指标：研制出智能-驱动融合的类生命机器人原理样机；培养体积不低于 0.5 cm^3 的大尺度类生命驱动器，包含可灌注的百微米（主干）~十微米（分支）树状结构血管网络；三维神经电

极位点不少于 128 个；实现爬行、游动等不少于 2 类机器人动作，完成自主避障导航等任务的闭环控制验证，基于脑类器官的类生命智能控制决策准确率不低于 90%，类生命驱动器任务完成准确率不低于 80%；至少 2 项关键技术实现首创或达到同类技术的国际领先水平，并提供佐证材料；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：类生命机器人，三维生机接口，闭环控制，具身智能

1.6 感驱控一体化的智能微米机器人技术（基础研究类）

研究内容：针对机器人的微型化、智能化与集成化需求，研究多种物理和生化信息的原位微传感技术，研究亚毫米尺度的精准驱动和微纳操作技术，研究亚毫米机器人的无线通信、控制和能量传输的微芯片技术；研发单体集成传感-驱动-控制功能的亚毫米机器人系统，实现基于微芯片的智能闭环控制、传感信号读出和无线控制功能，在细胞传感与操控典型场景开展实验验证。

考核指标：研制集成有传感-驱动-控制功能的亚毫米机器人单体；传感器尺寸 $<500\ \mu\text{m}$ ，集成有力传感器、化学传感器和电生理传感器等不少于 3 类典型感知元件，传感误差 $\leq 10\%$ ；微操作元件尺寸 $<800\ \mu\text{m}$ ，运动控制精度优于 $5\ \mu\text{m}$ ，输出力 $\geq 1\ \text{mN}$ ，实现对细胞不少于 3 种典型微操作和刺激方式；芯片面积（含天线）不超过 $1\ \text{mm}^2$ ，上行无线通信数据率 $\geq 10\ \text{kbps}$ ，下行无线通信数据率 $\geq 100\ \text{bps}$ ，通信和供电距离 $\geq 5\ \text{mm}$ ，无线供电增益 $\geq -40\ \text{dB}$ ，

所使用的无线电频率应符合国家无线电管理规定；微米机器人与外部控制设备距离 $\geq 5\text{ mm}$ ，能够自主完成传感-控制-操作，控制反馈响应时间 $\leq 5\text{ s}$ ，稳态误差 $\leq 10\%$ ；机器人整体体积 $< 1\text{ mm}^3$ ，在细胞芯片上进行感驱控一体化的功能验证；至少 2 项关键技术实现首创或达到同类技术的国际领先水平，并提供佐证材料；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：亚微米机器人，感驱控一体化，微驱动器

1.7 高柔顺自适应仿人行走机器人设计理论（基础研究类）

研究内容：针对传统人形机器人运动柔顺性差、驱动传动能效低等问题，研究高柔顺自适应仿人行走机器人设计方法，研究基于人体腿足骨骼肌肉力学的环境自适应和低能耗运动机理，研究基于人体解剖学与形态学的仿生柔顺关节设计、仿人体肌肉的高性能驱动与动力传输、刚柔耦合系统自适应学习等关键技术；研制高柔顺自适应仿人行走机器人，实现运动自然、能耗低、适应性强等类人特征，开展实验验证。

考核指标：研制出高柔顺自适应仿人行走机器人系统，实现平路面、不平路面、上坡、下坡等多种路况下保持正常速度稳定行走，并可以在不同路况之间自适应切换；单关节最大运动自由度不少于 4 个，踝-膝-髌单腿运动自由度不少于 12 个，各自由度的运动范围和运动轨迹，以及步速、步频、步长等步态参数与人体相似度达到 80% 以上；各关节在每个自由度上具有变刚度的柔

顺力学特性，关节各自由度变刚度的比值范围不小于 5；单条人工肌肉驱动单元的最大负载不少于 30 kg，收缩频率不低于 2 Hz；腿长范围 0.8~1.1 m，行走速度不少于 5 km/h，同时平路面行走能耗 CoT 不大于 $1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ，较现有代表性人形机器人降低 50% 以上。至少 2 项关键前沿技术实现首创或达到同类技术的国际领先水平，并提供佐证材料；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：仿人行走，骨骼肌肉柔顺系统，低能耗运动

1.8 基于人体结构和神经机理的类人机器人系统（基础研究类）

研究内容：面向复杂、通用场景下机器人高精度操作和高效、安全人机协作的需求，研究仿人体肌肉动态特性的新型驱动器，研发仿人体肌肉骨骼结构的轻量化机器人系统，研究面向肌肉骨骼机器人操作任务的神经启发式操作策略和多肌肉协同控制方法，研究面向肌肉骨骼机器人安全和高效协作任务的神经启发式多模态感知和共情决策方法；构建仿人体肌肉骨骼结构-感知-决策-肌肉控制机理的类人机器人系统，开展实验验证。

考核指标：研制满足功率密度高于 150 W/kg ，力控精度高于 $\pm 0.5 \text{ N}$ ，具有生物肌肉动态特性的仿肌肉驱动器；研制满足单臂负载自重比高于 1.5，重复定位精度高于 5 mm，不低于 28 个自由度，不少于 31 个驱动器，长度大于 0.65 m 且重量不高于 1.5 kg 的轻量化类人肌肉骨骼机械臂；实现零件配合间隙为重复定位精

度 1/5 以下的装配任务；实现基于多模态信号的情感识别准确率 98%以上，实现基于意图预测、情感理解和共情决策的肌肉骨骼机器人人机协作任务，提高人机协作任务完成速度 20%以上，构建人机协作的用户评价量表，提高用户对人机协作安全性、效率等满意度指标的综合评分 30%以上；至少 2 项关键技术实现首创或达到同类技术的国际领先水平，并提供佐证材料；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：肌肉骨骼系统，多肌肉运动控制，仿人操作

1.9 人工智能新概念机器人（基础研究类，青年科学家项目）

研究内容：针对大模型、生成式人工智能、具身智能、类脑智能等学科发展趋势，通过信息、机械、传感等多学科与机器人的交叉融合，研究提升机器人信息融合感知能力、智能决策能力、任务作业能力或环境适应能力的新原理、新方法、新形态，实现人工智能新概念机器人创新设计。

考核指标：研制具有原创性的人工智能新概念机器人系统样机，展示验证在相关重要领域的潜在应用，具体任务目标和系统考核指标由申报项目自主设计。相对于领域已有技术，至少 1 项单项技术在提升机器人信息融合感知能力、智能决策能力、任务作业能力或环境适应能力上具有突破性创新；发表高水平论文不少于 5 篇，申请不少于 5 项发明专利。

有关说明：拟支持项目数 3 项。

关键词：人工智能，新概念机器人

1.10 多模式新概念机器人（基础研究类，青年科学家项目）

研究内容：面向多模式机器人的国际学术前沿，通过物理、化学、材料、生命、仿生等多学科与机器人的交叉融合，研究基于结构进化、形态转换、机械智能等方式提升机器人环境适应能力、任务作业能力或智能决策能力的新原理、新方法、新形态，实现多模式新概念机器人创新设计。

考核指标：研制具有原创性的多模式新概念机器人系统样机，展示验证在相关重要领域的潜在应用，具体任务目标和系统考核指标由申报项目自主设计。相对于领域已有技术，至少 1 项单项技术在提升机器人环境适应能力、任务作业能力或智能决策能力上具有突破性创新；发表高水平论文不少于 5 篇，申请不少于 5 项发明专利。

有关说明：拟支持项目数 3 项。

关键词：多模式，新概念机器人

2. 共性关键技术

2.1 大力重比一体化直线伺服关节（共性关键技术类）

研究内容：面向人形机器人、机械臂等领域对高集成度的大力重比直线伺服关节的迫切需求，针对大力重比一体化直线伺服关节的设计、制造与驱控难题，开展大力重比直线伺服关节的多材料轻量化一体式集成与拓扑优化设计、多传感融合的高精度高

频响力位混合控制、高速重载摩擦副耐磨-抗疲劳-自润滑高可靠制造等技术研究；构建大力重比直线伺服关节完整的设计、制造、控制和测试规范；研制不同输出等级的伺服关节，并开展典型应用验证。

考核指标：提出驱动-控制一体化直线伺服关节的轻量化设计新方法，研发设计软件；研制出 0.5 ± 0.1 kN、 4 ± 0.5 kN、 8 ± 1 kN、 11 ± 2 kN 输出等级的一体化直线伺服关节，重量覆盖 0.3~2.6 kg，整机力重比 ≥ 5000 N/kg，伺服控制重复定位误差 ≤ 0.03 mm，使用寿命 ≥ 600 万次；在人形机器人、机械臂、四足机器人等不少于 3 种典型机器人上进行应用验证，装机不少于 1000 套；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：直线伺服关节，集成设计，力重比，力位混合控制，低摩擦

2.2 手术机器人力感知与力反馈技术（共性关键技术类）

研究内容：针对手术机器人缺乏精准力感知与交互的难题，研究主从软组织操作机器人高分辨力感知系统；研究面向主从端的笛卡尔力和扭矩、以及夹持力准确与连续的映射方法；研究时间-空间-力信息高度协调的实时力交互模型，实现软组织手术机器人操作力的精准感知与反馈，在腔镜、血管介入、显微外科等机器人手术场景开展技术与功能验证。

考核指标：开展手术机器人力交互共性关键技术研究，笛卡

尔力感知检测范围 $\geq \pm 20$ N，笛卡尔力感知测量误差 $\leq 2\%$ FS，夹持力感知范围 0~20 N，夹持力感知误差 $\leq \pm 2\%$ FS；力反馈延时 ≤ 60 ms，力反馈映射各向线性误差 $\leq \pm 10\%$ ，力反馈波动率 $\leq \pm 10\%$ ；整体技术就绪等级 ≥ 7 级；在腔镜、血管介入、显微手术机器人中集成应用，开展临床试验 ≥ 20 例，整机申报并获批三类医疗器械产品注册证 ≥ 2 项，申请不少于 10 项发明专利，实现商业化装机 50 台以上。

关键词：手术机器人，触觉力反馈

2.3 基于多模态融合感知的移动机器人双臂自主作业（共性关键技术类）

研究内容：面向非结构化场景中移动操作机器人操作智能化与类人化的需求，探索人类动作到机器人动作的端到端映射机理，研究复杂环境下机器人自主移动、多模态传感器融合的精准定位与精确导航、双臂移动机器人的全身协同运动策略生成、手眼协调的视觉伺服精准操作控制、双臂柔顺交互操作控制等关键技术，面向操作任务过程的不确定性，建立鲁棒的规划框架与相应的校准评估技术；研制 7 自由度双臂人形上肢构型移动作业机器人样机，在不少于 3 种长时序任务场景下进行应用验证。

考核指标：自主定位的平移误差 ≤ 2 cm，旋转误差 $\leq 1^\circ$ ；移动操作场景语义建图单帧语义渲染精度 mIoU $\geq 94\%$ ，地图重建深度误差 ≤ 0.5 cm；具备实时动态避障能力，路径规划成功率达到 92%

以上，导航精度优于 1.5%；人类演示 ≤ 45 次情况下单项任务成功率大于 80%；末端操作精度优于 0.4 mm，末端交互操作力控制误差 $\leq 3\%$ ；机器人样机具有 7 自由度双臂和人形上肢构型；在不少于 3 种长时序任务场景（如自主完成称重、滴定、光谱测试等一系列步骤的产物合成任务，自主操作未经改造的分析仪器任务，自主完成移液、振荡、离心生化实验联合操作等）中进行测试应用；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：双臂移动机器人，多模态融合导航，全身协同运动，双臂协作规划，柔顺操作控制

2.4 智能机器人信息安全防护技术（共性关键技术类）

研究内容：面向“云-边-端”平台架构下的机器人互联互通互操作带来的信息安全防护需求，探索控制器及其组件的安全威胁机理和漏洞特征，研究攻击路径的利用、识别、计算方法，以及正向和逆向求解安全机制及安全验证方法；研发工业分布式控制模式的多变量行为可信任技术；研发协同机构的分布式安全控制闭环、协同控制和通信行为轻量化安全防护技术；研究“云-边-端”场景下示教行为模式下的云边、边端安全协同及快速验证，同步实现基于安全模式的敏感数据感知及数据关键要素隐藏；研制低时延硬件级工业安全密码技术及防护模组和通用套件，完成功能和性能验证以及规模化应用验证。

考核指标：完成多轴联动、速度和加速度控制、示教等 10

种以上原型验证，覆盖主流控制协议不少于 10 种，开发漏洞关联推理及攻击路径分析软件；运动控制模式下，可信任机制影响率不超过 5%，控制程序频率可达 1000 Hz；硬件级密码模组支持国密算法，支持透明传输方式，支持与机器人控制器插拔式集成，支持 3 种以上总线接口，符合国家密码局二级要求；突破多设备、多品牌、跨地域共享互联互通的行为异常感知及敏感数据保护，安全套件能力达到国内领先水平，支持 2 种以上机器人操作系统；开发机器人“云-边-端”安全防护系统，完成机器人平台验证，安全等级达到 SL2 级，协同操作认证时延 ≤ 500 ms、通信时延 ≤ 200 ms；制定或修订不少于 1 项的行业/国家标准；在不少于 2 种应用场景进行验证，每个场景在线数不少于 100 台（套）；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：机器人安全，信息安全，数据脱敏

2.5 面向云边协同智能机器人的自然语义交互与任务决策（共性关键技术类）

研究内容：面向制造业场景中的云边端协同机器人自然语义交互与任务决策需求，研究智慧工厂场景下的多模态环境感知技术、环境信息的语义表达技术、多模态融合的行为预测、多模态人机交互技术、云边协同智能决策技术、多模态云边协同方法、人机混合增强智能技术；研制感知、认知、交互、决策一体化的实时云边协同智能机器人多模态交互推理系统和软硬件系统；实

现云边协同的异构机器人感知认知能力快速适配，针对典型场景开展规模化应用。

考核指标：智能脑坞软硬件系统可集成多模态环境感知软件，多模态环境感知模态不少于 10 种，特种罕见物体识别类别不少于 30 种，物体识别准确率高于 90%。环境语义表达软件的环境语义表达准确率高于 90%，速度高于 200 FPS。多模态人机交互系统确保人机交互任务执行成功率高于 92%，交互响应时间低于 2 s，人机交互模态不少于 3 种。构建可实时决策的智能机器人平台，集成云边协同智能决策系统，云端推理决策能力提升 30%，云端推理速度提升 5 倍；研发多模态云边协同算法，实现单云端并行机器人数量大于 20 台，协同推理准确率大于 92%。8 小时内实现新型机器人感知能力的快速适配，智能脑坞应用于 10 种以上机器人，在智慧工厂实现 200 台以上示范；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：环境感知，语义表达，人机交互，智能决策，云边协同

2.6 云边端协同的工业机器人集群运维关键技术（共性关键技术类）

研究内容：面向工业机器人集群高可靠运行与健康管理需求，研究“云-边-端”协同的工业机器人集群分布式数据获取、工业机器人集群增强智能故障诊断与溯源、工业机器人集群性能退

化建模及自数据驱动的终端匹配退化趋势预测、控诊协同的工业机器人集群智能运维决策等关键技术；建立“诊断-预测-决策-控制”功能集成的工业机器人运维大模型；研发工业机器人集群“云-边-端”协同智能运维系统，并在重点行业进行应用验证，提升工业机器人精准运维能力。

考核指标：建立 PB 级以上工业机器人分布式数据库，支持不少于 10 类监测数据的并发获取，建立工业机器人关键部件全寿命周期退化案例库，案例数目不少于 20 例；构建首个集成“诊断-预测-决策-控制”功能的工业机器人运维大模型，工业机器人故障溯源正确率不低于 90%，退化趋势预测准确率不低于 85%，功能性失效提前预警时间不少于 15 天；研发工业机器人“云-边-端”协同智能运维系统，在新能源汽车、半导体加工、电池制造等 3 类以上重点行业进行验证，接入机组数量不少于 1000 台（套），故障恢复时间相较于系统应用前平均缩短 20%；申请不少于 5 项发明专利，工业机器人集群智能运维技术行业/团体标准报批稿 1 项。

关键词：工业机器人，智能运维，大模型

2.7 医用手术机器人安全性和有效性验证关键技术（共性关键技术类）

研究内容：面向医用手术机器人亟需临床安全性和有效性测试方法与评价标准的现状，研究硬组织典型术式及其关键操作行

为的动态环境建模、组织-器械交互运动生成、体内扰动复杂环境多源感知、手术机器人自主程度分级等关键技术，研究人机力/位交互安全测评、导航定位与规划能力测评、机器人受限空间操作有效性测评以及远程遥操作安全测评方法。制定医用手术机器人自主程度分级规范以及扰动环境下的操作行为检测规范，研制典型术式高仿真临床环境的智能多维运动模拟平台，建立动/静环境下医用手术机器人操作行为安全性和有效性的通用测试验证平台，构建医用手术机器人伦理、安全和性能的标准体系，完成医用机器人临床应用效果和效价的评估研究，制定医用手术机器人技术评价的指导性和规范性文件。

考核指标：研制硬组织医用手术机器人典型术式临床操作行为检测的智能多维运动模拟平台，实现动静态环境下切、钻、磨、剪、穿刺等 5 种以上典型操作的性能检测，智能多维运动模拟平台运动自由度数 ≥ 6 ，操作重复定位误差 $\leq 0.2\text{ mm}$ ，力测量误差 $\leq 0.1\text{ N}$ ；操作位置测量误差 $\leq 0.2\text{ mm}$ ，操作姿态测量误差 $\leq 0.1^\circ$ ，操作延时测量误差 $\leq 100\text{ }\mu\text{s}$ ；制动及滑落距离测量误差 $\leq 0.2\text{ mm}$ ，碰撞力测量误差 $\leq 0.1\text{ N}$ ，最大碰撞力测量 $\geq 300\text{ N}$ ；具备延迟等远程模拟测试功能，制定远程环境中医用手术机器人产品性能测试规范 1 项；制定国家或行业标准 ≥ 3 项；制定医用手术机器人操作行为检测流程及规范 1 项、医用手术机器人可用性测试规范 1 项、医用手术机器人自主程度分级指南 1 项、医用手术机器人技术审评

指导原则 2 项、医用手术机器人伦理规范 1 项，完成不少于 3 类操作行为 6 台医用机器人的产品检验；基于超大型城市级别的临床应用数据，完成医用手术机器人卫生经济学报告。整体技术就绪等级 ≥ 6 级，申请不少于 3 项发明专利。

有关说明：由医疗器械技术审评机构或医疗器械检验机构牵头申报。

关键词：安全性和有效性，测试方法，测试平台，医学伦理

3. 工业机器人

3.1 自主缝制作业机器人技术与系统（共性关键技术类）

研究内容：针对成衣制造行业自动化生产对自主缝制技术与装备的需求，研究多品种柔性织物形态检测、分层抓取与精准上下料、多维空间机器人实时协同缝制、缝制质量检测与评价等关键技术，构建面料拼接、开袋、贴片、卷边等缝制工艺知识库；开发智能机器人缝制工艺软件包，研制机器人自主缝制作业装备与系统，并在上衣、裤子等成衣制造行业开展应用验证。

考核指标：研制出具有缝前送料、缝中协同、缝后质量评价等功能的机器人柔性缝制系统，可完成缝料自动分层、褶皱展平、堆叠上料、协同缝制等不少于 4 种操作；抓取的检测精度 $\geq 95\%$ ，每层裁片抓取分离周期 ≤ 2 s；协同缝纫轨迹跟踪误差 $\leq \pm 0.5$ mm，缝纫线迹误差 $\leq \pm 1$ mm，缝料最小可缝厚度 ≤ 0.5 mm；建立缝制质量评价体系，线迹识别误差 $\leq \pm 0.5$ mm；开发出满足面料拼接、开

袋、贴片、卷边等不少于 4 种工艺的缝制工艺软件包；自主缝制作业机器人系统在典型行业开展不少于 50 台（套）的应用验证；申请不少于 5 项发明专利/软件著作权。

有关说明：由企业牵头申报。

关键词：变形物体操作，多机协同，质量评价

3.2 自主智能弧焊机器人技术与系统（应用示范类）

研究内容：面向重工行业柔性化自主焊接需求，研究非结构化环境下工件的识别、定位与特征提取，复合视觉的工件局部特征检测与实时跟踪；研发多机器人协同与自主路径规划，多模态感知数据融合与焊接质量在线监测，以及知识数据双驱动的焊接工艺垂直模型训练与泛化等关键技术；研发弧焊应用领域垂直大模型，并在机器人智能焊接关键工序中实现应用；研制自主智能弧焊机器人系统，并在船舶制造、钢结构等行业开展规模化应用。

考核指标：焊接工件识别准确率达到 99% 以上，视觉识别焊缝几何尺寸误差 $\leq \pm 0.1 \text{ mm}$ ，工件焊接偏差 $\leq \pm 0.5 \text{ mm}$ ，焊接质量在线检测准确率达到 90% 以上；弧焊应用领域垂直大模型参数量 $\geq 16 \text{ B}$ ，数据库零部件个数 ≥ 1 万个，支持文字、图片、语音等智能交互，实现在机器人焊接工件识别、路径规划和检测等不少于 3 个环节的应用；自主智能焊接机器人系统焊接质量达标率 $\geq 99\%$ ，推广应用不少于 500 台（套）；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：多模态感知，多机器人协同，弧焊垂直大模型

3.3 高速超高精度混合键合机器人（共性关键技术类）

研究内容：面向半导体产业混合键合工艺对高良率和高产能的迫切需求，研究晶圆传输机器人与键合平台的高速高稳定性协同控制、高稳定性六轴纳米定位平台解耦铰链设计及高精度闭环运动控制、高效率双晶圆原位对准动态调控等关键技术；研发大范围高速超高精度混合键合机器人系统，实现混合键合工艺中晶圆的高效率传输和超高精度对准，并在面向晶圆至晶圆产线上进行应用验证。

考核指标：晶圆传输机械手的重复定位误差 $\leq \pm 30\ \mu\text{m}$ ，角度误差 $\leq \pm 35\ \text{mrad}$ ，最高传输速度 $\geq 2\ \text{m/s}$ ；终端执行器主动补偿控制技术重复定位误差 $\leq \pm 10\ \mu\text{m}$ ；超高对位精度 6 轴键合平台，兼容 8 英寸和 12 英寸标准晶圆，键合平台行程 $X/Y \geq \pm 20\ \mu\text{m}$ ，带宽 $\geq 1\ \text{kHz}$ ，重复定位误差 $\leq \pm 3\ \text{nm}$ ，角度误差 $\leq \pm 100\ \text{nrad}$ ；可实现超高精度双晶圆原位对准动态调控，位移控制误差 $\leq \pm 3\ \text{nm}$ ；在晶圆至晶圆混合键合装备中进行完整键合工艺的验证和性能检测，核心技术模块实现国产化，双晶圆混合键合对准误差 $\leq \pm 30\ \text{nm}$ ，晶圆混合键合产能 ≥ 30 对/小时；申请不少于 10 项发明专利，系统技术就绪度达到 7 级。

关键词：混合键合机器人，高速超高精度，晶圆至晶圆

3.4 移动重载智能高空作业机器人系统（应用示范类）

研究内容：面向干散货码头卸船过程中的人工清舱作业效率

不高、工作环境恶劣、安全风险高的问题，研究移动重载大臂展机器人多功能复合本体优化设计、电液比例高精度自适应抗扰控制、船舱快速建模与自主作业规划、重载大臂展机器人作业主动安全等关键技术，研发移动重载大臂展高空作业机器人系统，实现高空刮料、清扫、堆料等功能，能够与卸船机协同作业，在港口实现应用示范。

考核指标：机器人展开作业高度 $\geq 8\text{ m}$ ，负载能力 $\geq 2\text{ t}$ ；机器人船舱内定位误差 $\leq 10\text{ cm}$ ；能够完成高空刮料、清扫、堆料等3种以上智能操作，并能够与卸船机协同生产作业；智能清仓作业效率 $\geq 500\text{ 吨/小时}$ ；适用货种不少于3种，在至少3个干散货码头开展应用示范，并实现5台（套）以上的推广应用；申请不少于5项发明专利。

关键词：移动重载高空作业，船舱快速建模，自主作业规划

3.5 新能源汽车电池机器人化拆解关键技术与应用示范（应用示范类）

研究内容：项目面向新能源退役电池高效安全拆解重大需求，针对锂电池多级复杂结构自动化分离与单一电池组件精准分割回收等关键问题，研究退役动力电池拆解去芯系统仿真技术，集成电池包预处理、安全放电及整包拆解工艺构架，开发安全高效动力电池机器人自动拆解、多组高效分离及污染物综合控制等工艺技术及模块化、易交互的机器人专用工艺软件包，研制智能

控制驱动下可迁移人机交互式电池拆解机器人系统。面向新能源电池紧固件、导电连接件、模组外壳精确识别及自动拆卸、电芯分离、物料转运存储等工艺开展示范应用。

考核指标：研制出新能源电池机器人自动拆解装置，配备专用的模块化工艺软件系统，实现退役电池自动化拆解所需关键工艺步骤。其中，电池拆解系统 6 自由度机器人负载 $\geq 165\text{ kg}$ 、臂展 $\geq 3100\text{ mm}$ 、重复定位精度优于 0.05 mm ；铝、铜分选回收率 $\geq 95\%$ ；正、负极粉料分选回收率 $\geq 98\%$ ；相对于传统方式，综合能耗降低 70%、二氧化碳减排 80%；形成废旧电池处理产能 2000 吨以上能力，在新能源汽车电池回收处理、环保等行业领军企业示范应用新能源电池机器人自动拆解生产线 5 条，单条产线集成拆解、检测、转运专用机器人不低于 10 台；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：再制造，电池拆解，新能源

4. 服务机器人

4.1 操作型护理机器人系统研发与应用示范（应用示范类）

研究内容：围绕功能衰退及失能老人的康养照护需求，研究多任务康养照护的双臂机器人与抓持器模块化构型设计方法；研究人-机-物多尺度交互下的障碍环境感知与照护场景理解、行为数据驱动的照护技能模仿学习等关键技术；研发操作型护理机器人和网络化监控系统，依托社区或敬老院开展典型示范应用。

考核指标：研制操作型双臂护理机器人系统，快速更换抓持

器 ≥ 3 种，抓持器更换时间 ≤ 15 s；目标识别及其功能理解准确率 $\geq 95\%$ ，感知理解的照护场景 ≥ 5 类，模仿学习老人生活照护操作技能（物品递送、烹饪、清洁桌面等） ≥ 10 类，照护操作中目标抓取成功率 $\geq 90\%$ ，照护操作任务成功率 $\geq 90\%$ ，每类开展5个以上同类应用泛化实验验证；开发网络化监控系统1套，依托10个社区或敬老院实现操作型护理机器人示范应用；申请不少于5项发明专利。

关键词：操作型护理机器人，照护场景感知理解，照护技能模仿学习

4.2 面向脑功能重塑的智能机器人系统（共性关键技术类）

研究内容：围绕康复机器人系统无法适应脑损伤和神经退行性病患者异常姿态、运动和认知功能训练分离等问题，设计针对异常姿态与运动的高相容关节自校准具身变构系统；研究人机动态系统的时空协同控制、中枢-外周神经的双向互学习方法；融合脑电、肌电、运动信号，构建“‘脑-肌-动’-机接口”康复系统，研制具身运动-认知协同的康复训练机器人，建立面向全康复周期的个性化运动-认知康复训练模式与量化评估体系，实现脑功能重塑，开展临床验证与推广。

考核指标：研制运动-认知协同的康复训练机器人，覆盖脑卒中、帕金森、痴呆等至少2种以上中枢系统疾病；关节运动匹配度 $\geq 85\%$ ，机器人腰骶、髋、膝、踝的总自由度 ≥ 15 ；人机动态系

统的协同控制响应时间 ≤ 240 ms；形成面向脑功能重塑的运动-认知协同康复训练模式 ≥ 4 种，运动-认知的量化评估模态 ≥ 6 种，个性化运动认知康复方法预后评估准确率 $\geq 90\%$ ；相比传统疗法，使用康复机器人对患者达到同样的关节活动度、关节稳定性、运动功能、平衡功能、认知功能、日常生活能力等康复指标的临床治疗效果提升20%以上；临床应用中心不少于5家，开展患者临床验证 ≥ 100 例；申报并获批医疗器械产品注册证2项；申请不少于10项发明专利。

关键词：脑功能重塑，康复机器人，协同康复，关节自校准

4.3 人机融合的心肺辅助可穿戴机器人（共性关键技术类）

研究内容：针对慢性肺病、心血管疾病等引起的呼吸功能障碍问题，研究双相位辅助的宽阻抗变化可变构型和无关节依附锚点结构设计方法；研究神经-肌肉-骨骼-气流时序传导的多模态融合呼吸意图理解、人机同步呼吸实时触发切换、人在回路自适应控制等关键技术；研制体外仿生肌肉驱动的呼吸辅助可穿戴机器人，实现仿自然呼吸，开展面向运动神经元损伤、慢性阻塞性肺疾病以及颈脊髓损伤等典型病症的呼吸功能辅助治疗和临床验证。

考核指标：可穿戴机器人支持吸气与呼气双相位辅助和胸腹联合呼吸模式；机器人驱动力 ≥ 400 N，可变刚度调节比例 ≥ 20 倍；机器人辅助呼吸触发延迟 ≤ 50 ms，人机对抗发生率 $\leq 5\%$ ；系统响

应时间 ≤ 200 ms, 控制误差小于 5%; 呼吸潮气量、运动信号或膈肌活动度提升 10%, 自身呼吸做功降低 20%, 血氧饱和度增加 5%, 六分钟步行试验结果改善 20%; 累计完成 200 例以上患者临床验证; 申报并获批医疗器械产品注册证 2 项; 申请不少于 5 项发明专利。

关键词: 呼吸康复, 可穿戴机器人, 变刚度机构

4.4 儿童头颈外科小型化柔性手术机器人(共性关键技术类)

研究内容: 针对儿童头颈部外科手术中组织脆弱、解剖结构暴露困难、术野空间受限等难题, 研究脆弱组织与狭窄腔道环境下结构-感知一体化的小型柔性灵巧手术执行器; 研究目标组织识别与肿瘤边界自标记、血管与神经危险区预警和术中智能导航、融合视觉/力觉等信息的人机共享安全控制等关键技术; 研制儿童头颈外科手术机器人系统。开展动物实验和临床试验验证, 并进行推广应用。

考核指标: 研制儿童头颈部外科手术机器人系统, 手术执行器自由度 ≥ 6 , 直径 ≤ 4 mm, 末端负载 ≥ 3 N, 重复定位精度优于 0.25 mm, 可携带末端工具数量 ≥ 3 种; 末端力感知范围 ≥ 5 N, 力感知精度优于 0.1 N, 术中智能导航显示延迟 ≤ 300 ms; 肿瘤边界自标记准确度 $\geq 90\%$, 血管神经危险区预警偏差 ≤ 1 mm; 完成整机系统动物实验和临床试验验证, 申报并获批三类医疗器械产品注册证; 申请不少于 5 项发明专利。

关键词：微创手术机器人，儿童头颈外科，力感知与反馈

4.5 人工智能辅助远程骨科操作手术机器人（共性关键技术类）

研究内容：面向机器人远程硬组织手术高扰动环境下的精准与安全操作需求，研究主控端高精度系统建模与具有力反馈的机构创成；研究基于人工智能的手术操作任务学习与自主生成、任务自主权限分配与共享操作、时空不一致下主从跟随运动补偿、大负载扰动下器械-骨块交互稳定性控制等关键技术；研制远程骨科手术机器人系统，实现安全手术，并开展实验验证。

考核指标：研制人工智能辅助远程骨科手术机器人系统，主端反馈力 $\geq 40\text{ N}$ ，从端操作输出力 $\geq 400\text{ N}$ ，力反馈误差 $\leq 10\%$ ；多骨块实例智能分割 Dice 系数 $\geq 95\%$ ，复位操作任务自主生成准确率 $\geq 90\%$ ，动态负载下骨块移动轨迹跟踪误差 $\leq 1.2\text{ mm}$ ，机器人系统精度优于 1 mm ；面向骨科大负载远程手术应用场景开展实验研究，完成截骨、钻骨、复位场景下不少于 10 例动物实验，整机申报并获批三类医疗器械产品注册证 1 项；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：操作型机器人，远程骨科手术，临场感操作，人工智能

4.6 软组织拨进及复杂操作手术机器人关键技术（共性关键技术类）

研究内容：针对人体组织深部（如眼球后眶深部等）缺乏微创手术所需的腔道等难题，研究可建立微创通道的多层异构复合连续体机器人和形成手术操作空间的柔性支撑机构创成方法；研究软组织精细化建模、术中实时引导、面向术中位姿调整的刚柔软复合机构协调控制、狭小空间手术精准操作等关键技术；研制机器人系统样机，建立手术机器人操作规范，开展动物实验及有效性评价，开展眼眶深部眼球后肿瘤切除、颈部淋巴结清扫等深部组织内的复杂微创手术场景下的技术与功能验证。

考核指标：研制软组织拨进及复杂操作手术机器人系统，拨进建立微创通道的机器人外径 $\leq 10\text{ mm}$ ；软体机构支撑形成的类球体手术操作空间直径可变范围 $10\sim 15\text{ mm}$ ，组织内压感知精度优于 0.1 kPa ；组织分割准确率 $\geq 92\%$ ；执行器末端自由度 ≥ 4 ，综合定位精度优于 1 mm ；在一种典型专科中实现不少于 3 种手术场景应用，完成不少于 10 例动物实验和 2 例临床试验；整体技术就绪等级 ≥ 7 级，申请不少于 5 项发明专利。

关键词：软组织手术机器人，手术通道建立，操作空间形成

4.7 药物递送微针机器人理论与方法（共性关键技术类）

研究内容：针对载药机器人大分子药物口服吸收率低、递送稳定性差、降解排出难等瓶颈，研究可突破药物递送屏障的消化

道微针给药机器人结构设计与微纳尺度多维制造方法；研究机器人环境响应、集群控制、动态反馈闭环给药、滞留释药、可控降解等关键技术；研制消化道驱动药物递送微针机器人样机，结合典型药物和疾病模型完成大型动物活体验证，并开展临床试验。

考核指标：研制不少于 2 类生物相容可控降解消化道驱动微针机器人，实现动态反馈闭环给药；构建不少于 1 种的机器人集群给药模型，不少于 1 种的子母式给药机器人模型；具备不少于 4 类大分子药物跨消化道屏障递送功能，载药量 $\geq 6\text{ mg}$ ，药物吸收率 $\geq 85\%$ ；微针机器人递送 10 分钟后微针刺入数量 $\geq 95\%$ ，递送 30 分钟后微针滞留效率 $\geq 90\%$ ；完成临床前大型动物有效性与安全性验证，完成临床一期试验；整体技术就绪等级 ≥ 7 级；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：药物递送，微针机器人，消化道驱动

5 特种机器人

5.1 面向高海拔环境的作业型科考机器人技术与应用（共性关键技术类）

研究内容：面向我国第二次青藏科考、南极科考等重大任务对科考机器人的需求，研究高海拔、低温、强风等极端环境影响下的作业型飞行机器人操控、空地协同及精准释放与回收、实时地表结构三维建模、地表表层约束的自动钻取机构设计及远程人机混合智能操控、崎岖地形表层样品采集精细化作业控制等关键

技术；研制具有高适应性、广域作业能力的科考机器人样机，提升机器人在高海拔科考中的适应性、易用性和智能性，面向冰芯、浮雪、岩石、植被样品采集等典型科考任务开展试验验证。

考核指标：研制适应极端环境的电动垂直起降作业型飞行机器人 1 套，最大起降海拔高度 ≥ 6000 m，最大作业海拔高度 ≥ 7000 m，7000 m 海拔载荷能力 ≥ 10 kg，续航能力 ≥ 1 h，作业半径 ≥ 20 km，抗风能力 ≥ 7 级；研制可释放回收式表层样品采集装置，总重量 ≤ 25 kg，宽度不大于 50 cm，爬坡不低于 30°，投放误差 ≤ 1 m；研制小型化高精度表层建模载荷，数据获取频率 ≥ 500 万点/秒，探测视角优于 $360^\circ \times 250^\circ$ ，重量 ≤ 4 kg，三维重构精度优于 5 cm，可实时输出三维重构结果；研制轻量化样品钻取载荷，样品钻取深度 ≥ 65 cm，适应地形坡度 $\geq 30^\circ$ ，具备自动、遥控两种钻取模式；研制轻量化表层样品采集机械臂，具备空中作业能力，作业控制精度优于 10 cm，最大可采集样品重量 ≥ 500 g；协同作业机器人间最远通讯距离 ≥ 1 km，所使用的无线电频率应符合国家无线电管理规定；在高海拔、南极等极端环境开展冰芯、浮雪、岩石、植被等不少于 5 类样品、20 次任务的科考应用；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：高海拔科考，作业型飞行机器人，空地协同，科考取样

5.2 基于宏-微智能机器人的航空发动机结构原位检测系统 (共性关键技术类)

研究内容: 面向航空发动机外场在翼原位检测需求, 研究基于宏-微智能机器人技术的发动机检测与路径规划、宏观投放-微型检测机器人构型设计、多异构机器人协作、高精度图像实时采集与传输、关键部件损伤容限评估与判定、微型检测机器人定位导航与回收等关键技术; 研制基于智能宏-微机器人的航空发动机外场在翼原位检测装置并开展试验验证。

考核指标: 研发基于宏-微智能机器人的航空发动机外场在翼原位检测总体方案 1 套; 研发航空发动机关键部件检测路径规划方案 ≥ 3 套、控制方案 ≥ 2 套、成套机器人连续工作时间 $\geq 1\text{h}$; 实现沿叶片、机匣内壁爬行, 沿机匣周向爬行角度为 $0\text{-}360$ 度, 可爬行最小曲率半径 $\leq 20\text{ cm}$, 原理样机最大轮廓尺寸 $\leq 2\text{ cm}$, 检测路径长度 $\geq 4\text{ m}$, 爬行速度 ≥ 4 倍身长/秒, 单次续航时间 $\geq 12\text{ min}$; 研制宏观连续体投放机器人 2 套, 投放机器人臂直径 $\leq 3\text{ cm}$ 、可装载微型机器人数量 ≥ 3 个, 宏观连续体机器人操作段长度 $\geq 1.5\text{ m}$ 、总自由度数 ≥ 20 个、最小弯曲半径 $\leq 7\text{ cm}$; 研制微型图像采集与传输模块, 模块采集和传输的图像分辨率 $\geq 1080\times 720$, 视频帧率 ≥ 15 帧/s; 微型机器人定位误差 ≤ 1 倍身长; 开发发动机关键部件损伤容限评估、损伤在线判定软件 1 套, 可检最小裂纹宽度 $\leq 0.7\text{ mm}$; 在大涵道比和小涵道比 2 大类不少于 4 个型号的发动机开展应用

验证；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：航空发动机原位检测，宏-微智能机器人，异构机器人协作，微型机器人定位与回收

5.3 面向复杂环境巡查的三栖跨域特种机器人（共性关键技术类）

研究内容：面向海上救助打捞、应急救援、水下建筑检测等复杂环境对机器人全域机动与感知能力的需求，研究能力边界约束和稳定跨域切换的机器人设计、水空多介质兼容的高效推进器设计、跨介质探测感知与控制、磁/声/电/光多源数据融合目标识别与追踪、三栖跨域运行规划等关键技术，研发磁/声/电/光探察功能载荷集成平台和面向复杂环境巡查的三栖跨域特种机器人，并开展应用验证。

考核指标：研制具备三栖跨域机动能力的特种机器人 1 套，具备空中搜索、水面航行、水下潜航和水底爬行等三栖能力，具备不低于 2 级海况情况下的自主跨介质能力和作业能力；机器人自身重量不超过 50 kg，空中负载能力 $\geq 10\text{kg}$ ；飞行速度不低于 120 km/h；水下最高巡航速度不小于 6 节，下潜深度不低于 20 m，水下负载能力不小于 30 kg；复合环境下综合续航时间不小于 8 小时，其中空中/水下续航时间不少于 30 分钟；研制可搭载于三栖跨域特种机器人平台上的跨介质多模式复合探测载荷 1 套，具备磁/声/电/光复合探察及抗干扰能力，室外视觉定位累积误差

≤1%，低照度下感知特征识别率≥95%；在 2 个以上典型场景应用验证；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：三栖机器人，跨介质运动，水陆空全域感知，运动规划控制

5.4 水下密闭空间可重构作业机器人研制与验证（共性关键技术类）

研究内容：面向城市输水管、核电站冷却水管、有压引水隧管等水下密闭空间保水情况下内壁全覆盖、快速精确检测的需求，研究水下平台模块化快速重构、多水下平台精准对接与变形态自适应控制、贫信息条件下密闭空间多源信息融合导航与损伤检测等关键技术；研制用于水下密闭空间检测的可重构无缆自主机器人样机，在市政输水管道、有压引水隧管等水下典型密闭空间场景开展应用验证。

考核指标：研制水下密闭空间检测可重构无缆自主机器人样机 1 套，最大工作水深不低于 700 m，在 2 kn 航速下最大续航能力不小于 4 h，具备不低于 3 种功能或构型、不小于 6 个水下检测单元自主重构，无缆机器人可在直径不大于 1m 的投送口安全收放，完成不小于 3 个折弯、直径不大于 10 m、长度不小于 2 km 的水下密闭空间检测任务；实现模块化检测单元水下自主对接，末端对接精度优于 10 cm，对接成功率不低于 90%；实现可重构水下机器人变形态自适应控制，重构机器人全向姿态控制精度优

于 5°；可实现水下密闭空间保压有水条件下 3 种以上典型缺陷检测，可检测最小裂缝宽度 0.5 mm，缺陷识别准确率不低于 80%，变形识别误差不大于 1 cm，水下缺陷定位精度优于 0.5 m；在不少于 3 个水下密闭空间工程中应用验证；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：模块化重构，自适应对接，多源信息融合，导航与运动控制，损伤检测

5.5 常驻型海底设施自主巡检与作业机器人关键技术及示范（应用示范类）

研究内容：面向海底电缆、光缆及海底观测网等海底设施水下常态化巡检与作业的重大需求，研究常驻型自主水下机器人（AUV）与可变形水下机器人组成的子母式深潜器总体设计、AUV 海缆自主巡检与实时状态判别方法；研究 AUV 与水下基站自主对接、无线电能补给和近场无线通信，以及复杂海洋环境下可变形水下机器人多任务灵巧作业和布放回收等关键技术；研制常驻型 AUV 与可变形水下机器人组成的子母式深潜器成套装备，面向海底设施全天候自主巡检与作业开展示范应用。

考核指标：研制一套具有自主知识产权的常驻型 AUV 与可变形水下机器人组成的子母式深潜器成套装备，具备海缆埋深/海底地形地貌自主探测、海缆裸露/悬空/外部损伤自主识别、航迹自主规划跟踪、与无线传能基站自主对接和无线充电等功能，

一次对接成功率 $\geq 85\%$ ；可变形水下机器人具备海缆标记、绑扎及海底设施电缆插拔等灵巧作业能力；无线传能基站海水环境充电功率 $\geq 10\text{ kW}$ ，充电效率 $\geq 90\%$ ；子母式深潜器成套装备水下连续驻留时间 ≥ 3 个月，单次巡检续航能力 $\geq 50\text{ km}$ ，最大作业水深 $\geq 300\text{ m}$ 。所使用的无线电频率应符合国家无线电管理规定。完成不少于3种作业场景的示范应用，整体技术就绪等级 ≥ 7 级；申请不少于5项发明专利。

有关说明：配套经费与国拨经费比例不少于5:1。

关键词：子母式深潜器，可变形水下机器人，自主巡检，灵巧作业，无线充电

5.6 视嗅协同的自主巡检取证一体化作业机器人（共性关键技术类）

研究内容：面向危化工业、公共安全等领域对安全巡检应急处置类作业技术的需求，研究视-嗅多模态融合的机器人广域环境危险源判别机理建模、多种类危化气体高灵敏识别、多光谱立体视觉场景风险要素检测、跨时空域危险源嗅觉溯源定位与快速精准取证、高风险性应急排险精细作业等关键技术；研制视嗅协同的自主巡检取证一体化作业机器人，并在典型场景开展测试评估与应用验证。

考核指标：研制视嗅协同的自主巡检取证机器人系统1套，具有一定的防爆能力；嗅觉导航成功率 $\geq 98\%$ ；嗅觉灵敏度达到

PPB 量级；视嗅多模态融合的危险源识别种类 ≥ 15 种，识别正确率 $\geq 98\%$ ，漏报率 $\leq 5\%$ ；物理+气味 4D 语义安全风险地图构建时间 < 30 s，可推演未来 5 分钟的风险场景变化；实现疑似危险物品的检测与取证一体化，50 平方米内对危险物品的取证时间 ≤ 1 min；机器人自适应地形变化 ≥ 4 种，最大爬坡仰角不小于 45° ，最大越障高度不小于 20 cm，最大载荷不小于 20 kg；完成危险气体坑道、化工场地、地下管道等 3 种以上典型场景的应用验证；申请不少于 5 项发明专利。

关键词：嗅觉导航，4D 安全风险建图，自主巡检取证，精细排险作业

5.7 露天矿用超大型铲装机器人研制及示范应用（应用示范类）

研究内容：针对露天矿人工操作铲装设备作业效率低的问题，研究矿山全天候复杂工况铲装机器人大场景作业环境感知、高效铲装作业自主规划、多机构协同自适应精准作业控制、设备远程智能运维等关键技术；研制适应不同作业条件的露天矿用超大型铲装机器人，在典型大型露天矿开展示范应用。

考核指标：研制出露天矿用斗容 55 m^3 以上铲装机器人，实现自主行走、自主挖掘和自主装载作业；作业目标识别准确率 $\geq 90\%$ ；平均铲装工作循环时间 ≤ 45 s，平均能耗降低 5%；铲斗位置控制误差 ≤ 15 cm；平均无故障率 $\geq 93\%$ ；最大挖掘半径 ≥ 25 m，

最大挖掘高度 $\geq 18\text{ m}$ ，单次最大挖掘重量 $\geq 100\text{ t}$ ，平均满斗率 $\geq 95\%$ ；在年产量 2000 万吨及以上的露天矿完成全系列不少于 20 台（套）的铲装机器人示范应用，其中斗容 55 m^3 铲装机器人不少于 5 台（套）；整体技术就绪等级 ≥ 8 级，申请不少于 5 项发明专利。

有关说明：配套经费与国拨经费比例不少于 4:1。

关键词：露天矿无人化，铲装机器人，自主作业