



王耀南，中国工程院院士，机器人与智能控制专家。湖南大学教授、机器人视觉感知与控制技术国家工程实验室主任。中国自动化学会会士、中国计算机学会会士、中国人工智能学会监事、教育部科技委能源与交通学部委员、湖南省自动化学会理事长等。国家863 智能机器人主题专家，全国高等学校优秀骨干教师，全国五一劳动奖章，全国先进工作者，第二届全国创新争先奖。

高端制造机器人关键技术及未来发展方向

王耀南

高端制造业是与低端制造业相对应的说法，既是工业化发展的高级阶段，又是具有高技术含量和高附加值的产业。《工业转型升级规划书》提出，要抓住产业升级的关键环节，积极培育发展智能制造、新能源汽车、海洋工程装备、轨道交通装备、民用航空航天等高端装备制造业，促进装备制造业由大变强。由此，高端制造业有了较为明确的行业指向。

从 20 世纪末开始，世界制造业的中心逐渐向中国转移。在经历了国际金融危机之后，发展高端制造业的话题在业内逐渐升温。推动“中国制造”突破价值链低端，将高端制造业纳入战略性新兴产业范畴，不仅是振兴中国制造业的契机，更是推动“中国制造”向“中国创造”转变的主要动力。

机器人是智能制造的关键支撑装备，其研发、制造、应用已成为衡量高端制造水平的重要标志。区别于传统工业机器人简单、重复性劳动，高端制造机器人是更信息化、网络化、智能化、柔性化的机器人。为了应对高端制造业发展过程中稳定性、可靠性、精细化，高质量、高精度、高效率，多品种、小批量、定制化等方面的生产需求，高端制造机器人必须突破以下几项关键技术：

实时准确的环境感知：设计高分辨率视觉和信息获取系统，应对复杂动态作业环境下目标的鲁棒感知难题；通过学习、推理和判断，实现多样化工件识别定位；工件的精密三维测量，为工件加工和质量监测提供依据；移动机器人同时定位和建图，实现大范围智能化加工作业。

高效自主的规划决策：综合测量、工艺、材料等多方面的因素，优化多自由度加工轨迹和阻抗轨迹；研究移动机器人在非结构化环境和复杂空间约束下的运动路径规划。

高速精准的加工控制：针对机器人精准作业的问题，设计非奇异终端滑模的控制方法降低磨削抖振；针对机器人加工存在死区、摩擦、齿隙、时滞等执行器非线性问题，辨识和补偿非线性提高机器人打磨控制精度；针对加工力位混合控制切换时响应不稳定，引入阻抗控制优化加工过程的接触响应。

多机器人的协同控制：将机器人作为核心智能感知和作业单元，实现加工、测量、装配、物流、仓储等生产作业系统的泛在感知与无缝集成；构建机器人生产线的自主决策控制系统，作为生产线上的核心大脑进行多任务，多工序，多机器的作业分配和优化调度。

随着信息化、网络化、智能化高速推进，高端制造机器人将向柔性化、灵巧化、协作化的方向发展，以适应网络化协同制造、大规模个性化定制。未来高端制造机器人有望搭乘“顺风车”，在以下方面取得进一步发展：

1) 随着 5G/6G 时代的到来，低延迟、高可靠度、高带宽移动网络将允许我们在高端制造领域引入云计算、边缘计算和人工智能技术。通过 5G 连接到云 - 边缘端的机器人，可以使用深度学习技术在互联网知识库中找到其在环境中感知和执行任务。

2) 离线编程、三维仿真、VR、声音和手势识别、生肌电检测等技术的发展为人机协同作业提供技术基础，即机器人与工人形成友好交流的合作关系，相互学习共同促进人机融合。

3) 以高端制造机器人核心，打造集智能云端，工业互联网，专用工业软件包等为一体的高端制造生态系统。