

焊接自动化技术的发展趋势与挑战

高峰

摘要：焊接作为一种常见的制造工艺，在工业生产中扮演着重要的角色。随着科技的发展和工业生产的需求不断增长，焊接自动化技术也逐渐成为焊接行业的发展趋势。焊接自动化技术正朝着智能化与自适应方向快速发展，主要体现在AI算法、传感器融合、实时参数调整等方面。

关键词：焊接自动化技术；发展趋势；挑战

随着科技的不断进步，焊接自动化技术的成熟度也在不断提高。自动化焊接设备的智能化程度越来越高，能够实现更加精准和高效的焊接操作。焊接自动化技术正朝着高精度、高效化、智能化、柔性化、网络化和人性化方向发展，同时国产化进程显著加快。

一、焊接智能化技术现状

1. 焊接过程传感与监控

焊接智能化技术通过自动化设备与智能控制系统实现高效精准焊接，其核心在于利用传感器实时监控并调整参数，确保质量。当前技术已广泛应用于汽车制造、航空航天等领域，并逐步向石化管道、钢结构等复杂场景渗透。焊接过程传感与监控技术，传感技术是智能焊接的关键，主要分为两类：直接视觉传感：通过CCD或激光视觉系统实时获取焊缝图像，结合图像处理算法（如边缘检测、阈值分割）提取焊缝特征，实现路径纠偏。例如，基于被动视觉的焊缝跟踪系统可实时计算电弧与焊缝的偏差，动态调整焊枪轨迹。电弧与复合传感：利用摆动电弧或弧压传感器检测焊缝位置，结构简单且响应快，适用于高度方向调整。复合传感系统（如视觉+弧压）可提升多维度跟踪精度。

2. 焊接过程建模与控制

当前，焊接智能化技术已从传统自动化向“数据驱动、智能控制”转型，核心突破包括：智能感知与检测：通过机器视觉、激光传感实时识别焊缝位置与质量，解决中厚壁构件焊偏、未熔合等缺陷。路径与工艺规划：结合数字孪生和AI算法优化焊接轨迹，提升复杂结构件（如石化管道、高铁车体）的加工效率。人机协同与仿生机器人：仿生焊接机器人可模拟焊工经验，适应动态环境，降低对人工经验的依赖。焊接过程建模与控制技术，焊接过程建模是智能化的基础，需解决多

物理场耦合的实时性难题：模型构建：基于热-力-流体多场耦合理论，建立焊接温度场、熔池动态的数学模型，支持工艺优化。智能控制：采用模糊控制、神经网络等算法，通过传感器反馈实时调整参数（如电流、速度），确保焊缝质量。数字孪生应用：虚拟仿真与实体焊接同步，实现工艺预演和缺陷预测，如航天高温合金焊接的控形控性。

二、焊接自动化技术的发展趋势

1. 智能化与自适应技术

焊接自动化技术正加速向智能化与自适应方向演进，核心趋势包括：技术突破方向，AI自适应焊接，通过深度学习实时分析焊缝形态、材料特性等参数，动态调整电流/速度等工艺。例如航天器钛合金焊接中，系统可预测热变形并补偿路径偏差，缺陷检出率达99.5%。数字孪生应用，虚拟仿真技术将焊接工艺开发周期缩短70%，如特斯拉4680电池组焊接通过数字孪生预判变形，减少试错成本。行业应用深化，汽车制造：智能机器人实现白车身焊接一次合格率提升，24小时连续作业效率达人工3-5倍。航空航天：高精度激光焊接应用于发动机部件，微米级控制保障结构强度。船舶工程：防爆型机器人完成大型构件焊接，换料时间减少80%，市场驱动因素，成本下降：核心零部件国产化使设备成本降低35%，需求增长：新能源装备、轨道交通等领域需求增速超20%。技术融合：5G远程操控、超快激光焊接等新技术加速落地。

2. 高精度与柔性化

焊接自动化技术正加速向高精度与柔性化方向发展，主要体现在以下方面：高精度技术突破，重复定位精度：科为机器人焊接系统可达 $\pm 0.05\text{mm}$ ，支持复杂空间曲线轨迹的精准复现。智能控制：哈工现代IBWSV1.2系统通过AI视觉算法提升焊缝识别精度20%，实现动态参数调整，

精密化设计：焊接机器人配套变位机重复定位精度达0.05mm，移动速度控制精度0.1%。柔性化技术演进，多工艺兼容：科为机器人支持气保焊、激光焊等4种工艺，适配不锈钢/碳钢等材质，快速换型：哈工现代地轨工作站支持负载模式切换，3米长焊缝一次性完成，模块化设计：焊接自动化系统通过标准化接口实现功能扩展，支持多品种混线生产。典型应用场景，汽车制造：激光焊接技术实现保险杠高效密封焊接，满足外观与强度双重要求，工程机械：麒麟激光风冷焊接机支持-40℃至45℃环境下的7×24小时连续作业，精密电子：高精度焊接机器人完成微型元件0.1mm级接点加工，当前技术已实现从“单点突破”向“全链路协同”的跨越，未来将深度融合AI与物联网技术，进一步推动制造智能化升级。

3. 国产化加速

技术智能化升级，焊接自动化正从传统编程示教向免示教编程和自适应焊接转型。AI视觉与3D重构技术实现焊缝自主识别和参数动态调整，如昇视唯盛机器人通过实时熔池跟踪将焊接工人从恶劣环境中解放。哈工现代IBWS地轨工作站采用AI算法，使非标件焊接精度提升20%，长焊缝效率达人工3倍。国产化进程加速，2025年国内焊接机器人市场规模预计达300亿元，卡诺普机器人成为中国最大出口商，产品覆盖东南亚、欧洲等地。政策推动下，管道焊接自动化设备市场快速增长，览众自动焊机通过磁吸式设计和视觉跟踪技术，实现98%焊接合格率。产业链协同创新，上游视觉感知系统成本占比达27%，软件算法成为智能化核心。下游应用从汽车制造延伸至核电站、桥梁等高风险领域，仁新机器人通过“手-眼-足-脑”协同系统降低对高级技工的依赖。

三、主要挑战

1. 非标场景适配

焊接自动化技术在新标场景适配中面临的主要挑战包括复杂结构识别、工艺参数自适应、环境干扰应对及成本效益平衡。复杂结构识别，非标焊接场景（如钢结构小件、汽车轻量化构件）存在尺寸小、规格多、焊缝位置复杂等问题。传统示教型机器人依赖人工编程，难以快速适应多品种小批量生产需求。3D视觉系统通过点云分层和焊缝识别技术，可提升路径规划效率，但高反光材质或油污表面仍可能导致成像失真，影响识别精度。工艺参数自适应，焊接过程受工件材质、厚度、热积累等因素影响，需动态调整电流、电压、焊接速度等参数。例如，哈工现代的IBWS系统通过AI算法实现工艺自适

应，但复杂工况下仍需人工干预优化参数，限制了完全自动化。环境干扰应对，反光、粉尘或狭小空间易导致传感器数据失真。部分厂商采用多角度补光、偏光滤光片及环境光校准技术，但极端环境下仍需人工辅助校正。成本与效率平衡，非标场景定制化需求高，设备研发和调试成本显著。例如，永大电梯通过机器人+旋转工装将焊接效率提升50%，但初期投入较大。徐工集团案例显示，3D视觉系统可降低单件成本27%，但需权衡技术投入与回报周期。非标场景适配的核心挑战，工件多样性：钢结构非标小件形状、尺寸差异大，传统固定编程模式需频繁调整，导致研发周期延长。装配精度不足：人工装配的坡口误差（如错边量超0.1倍壁厚）易引发漏焊或过焊，需机器人具备动态纠偏能力。成本与效率矛盾：定制化焊接系统造价达50-200万元，中小企业难以承担，而标准化生产又无法满足非标需求。技术突破方向，3D视觉应用：如徐工集团采用AI视觉系统，实现焊缝自动识别，调试时间减少90%。免示教技术：哈工现代IBWS工作站通过AI算法提升非标件焊接精度20%，支持动态负载调整。材料与工艺优化：如佛山金景盛采用氩弧焊+机器人满焊工艺，焊缝强度达母材120%。

2. 技术门槛高

焊接自动化技术的主要挑战包括技术门槛高、设备灵活性不足、质量控制复杂、安全风险及实施成本高等问题。技术门槛高，工艺复杂性：大型构件焊接需应对多层多道焊、热变形控制等难题，传统机器人固定轨迹难以适应工件偏差或变形。例如，重型构件焊接时，热输入大易导致变形，焊枪需实时调整位置以保持轨迹精度。智能化需求：需集成多维感知系统（如激光扫描、3D视觉）、深度学习算法（如YOLOv5模型）及高精度执行机构（如七轴机械臂），技术融合难度大。设备灵活性不足，可达性限制：焊接机器人工作空间固定，难以适应异形或大型工件的复杂结构，人工焊接在灵活性上仍具优势。模块化不足：现有设备多为专用设计，缺乏可重构功能，难以快速切换不同焊接任务。质量控制复杂，一致性要求：焊接参数（电流、电压等）需严格控制，但热应力、变形等因素易导致缺陷，需依赖实时监测与无损检测技术（如超声波相控阵）。人为干预依赖：传统人工焊接依赖经验调整，自动化系统需通过AI算法实现自主决策，减少返工率。安全与成本挑战，安全风险：高温、火花及有害气体排放需通过防护罩、呼吸设备等措施降低风险，协作机器人虽能识别障碍物，但全面覆

盖仍需完善。实施成本高：物联网设备、AI系统及数据加密等基础设施投入大，中小企业可能面临资金压力。数据隐私与学习曲线，数据安全：焊接过程数据易泄露，需端到端加密及网络安全措施。员工适应性：新技术引入需培训工人掌握操作与维护技能，存在学习曲线。焊接自动化技术的主要挑战与技术门槛主要体现在以下方面：大型构件焊接的物理限制，重型构件因体积大、重量高，存在移动困难、寻缝精度要求高等问题。焊接机器人工作空间固定，可达性不如人工灵活，且厚板多层焊接易导致热变形，需实时修正焊枪轨迹。高强度钢的工艺复杂性，X80及以上级高强度钢焊接时易出现冷裂纹、热影响区软化等问题。自动化焊接需精确控制焊丝送丝稳定性（ $\pm 0.1\text{mm/s}$ ）和热输入，否则易产生强度阶梯缺陷。智能化的技术瓶颈，当前多数焊接机器人依赖人工示教编程，调试耗时且容错率低。需突破多物理场耦合控制（如电弧-熔池动态监测、多机器人协同）和实时数据交互技术。设备与成本壁垒，定制化大直径自动焊接系统造价达50-200万元，是传统焊机的5-10倍。同时需高精度机械结构（ $\pm 0.05\text{mm}$ 行走精度）和抗干扰电气控制系统。工艺适配性要求，工件装配精度、焊枪可达性及焊接参数（如电流、速度）需严格匹配，否则易出现漏焊或过焊。传统手工焊的实时调整能力仍是自动化难以完全替代的。

3.焊接自动化技术面临的主要挑战集中在成本压力和复合型人才短缺两大核心问题上

成本压力，初期投资高：进口激光焊接机器人单台成本较高，中小企业若订单不饱和，投资回收周期长。维护成本高：激光焊接设备依赖恒温恒湿环境，维护成本占设备总投入的15%-20%。后期运营成本：易损件更换（如焊枪嘴、焊丝导管）和定期保养需纳入预算，否则可能影响设备正常使用。人才缺口，复合型人才稀缺：操作人员需掌握编程、机械维护及焊接工艺知识，但行业此类人才培养周期长达6-12个月。技术门槛高：复杂工艺（如异种材料焊接）需专用工艺数据库支持，且设备调试需专业人员参与。应用场景局限性，示教调试耗时：传统示教再现型机器人需频繁停机调整，影响产

线效率。柔性不足：定制化小批量生产时，设备切换成本高，需搭配模块化夹具和快速编程工具。解决方向，政策支持：通过租赁模式或政府补贴降低中小企业设备采购门槛。技术优化：轻量化、柔性化设备（如负载 $\leq 10\text{kg}$ 的专用机器人）更适合中小工厂需求。人才培养：校企合作培养焊接工艺工程师等新岗位人才，缩短培训周期。焊接自动化技术面临的核心挑战是成本高企与人才短缺的双重压力：成本问题，设备投入大：基础款焊接机器人价格约1.6万-5万元，高精度设备（如激光焊接机器人）可达10万元以上。维护与培训成本：需定期升级软件、更换配件，且操作人员需掌握编程与设备维护技能，进一步增加隐性支出。人才缺口，技能错配：传统焊工缺乏机器人操作经验，而高校培养的复合型人才培养不足，导致“招工难”与“就业难”并存。行业吸引力低：焊接工作环境恶劣，年轻人更倾向选择白领职业，加剧人才断层。应对方向，技术替代：协作机器人可降低操作门槛，普通工人经短期培训即可上岗。政策支持：部分地区对高级焊工提供住房补贴，鼓励技能升级。

总之，焊接工艺自动化与智能化是大势所趋，对提质增效、转型升级具有重要意义。经过多年发展，焊接机器人、自动化生产线等硬件水平显著提升，多传感器融合、过程建模等软件技术也取得长足进步。展望未来，人工智能、数字孪生、知识自动化、人机协作等将成为主要发展方向。同时，复杂对象、极端环境、数据缺失、人才短缺等现实困难依然存在，需产学研用多方协同攻关。可以预见，随着理论、技术、标准的不断成熟，我国焊接自动化与智能化必将迎来更加广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 周长森. 机械自动化技术在汽车制造中的应用研究[J]. 汽车维修技师, 2024(8): 130-132. DOI: 10.3969/j.issn.1671-279X.2024.08.072.
- [2] 吴新华, 李坡. 焊接技术及自动化现状挑战与未来发展的深度剖析[J]. 冶金与材料, 2025, 45(9): 175-177. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5183.2025.09.059.