

机械制造领域中自动化焊接技术的研究与实践

方裕存

珠海市新维焊接器材有限公司，广东省珠海市，519070；

摘要：自动化焊接技术作为现代制造业中的关键工艺手段，正逐步取代传统手工焊接方式，在提高生产效率、焊接质量和安全水平等方面发挥着重要作用。本文围绕机械制造领域，系统梳理了自动化焊接技术的发展历程与原理，归纳了其在汽车、轨道交通、工程机械等典型行业中的应用实践，进一步分析了焊接机器人、智能控制系统、传感器与实时监控等关键技术的功能与实现路径。在此基础上，探讨当前自动化焊接面临的主要技术难题与瓶颈，并结合智能制造趋势，提出未来的发展方向。研究表明，自动化焊接正加速向柔性化、智能化、网络化方向演进，其技术创新将为机械制造业高质量发展提供重要支撑。

关键词：自动化焊接；机械制造；焊接机器人；智能控制；技术应用

DOI：10.69979/3060-8767.25.07.054

引言

焊接技术作为连接材料、构造产品的重要工艺手段，在机械制造领域具有广泛的应用基础和战略价值。随着制造业规模扩大和产品精密化程度不断提高，传统依赖人工操作的焊接方式已难以满足高效、精准、标准化的生产要求。因此，自动化焊接技术应运而生，并迅速发展成为推动产业升级的重要动力之一。

自动化焊接不仅显著提升了焊接质量的一致性和可靠性，还有效降低了对操作人员技能的依赖，改善了劳动强度和作业环境。在汽车制造、轨道交通、工程装备等关键产业中，自动化焊接设备与智能化系统已成为生产线核心组成部分。与此同时，焊接过程的数字化、控制系统的智能化、设备运行的柔性化，正在不断推动这一技术走向新的阶段。

尽管自动化焊接已取得显著成果，但在复杂构件适用性、系统集成稳定性、柔性控制策略等方面仍存在一定挑战。基于此，本文拟从技术原理与发展路径出发，结合典型应用场景展开分析，进而聚焦于当前关键技术与未来发展趋势，为机械制造业自动化焊接水平的提升提供参考。

1 自动化焊接技术的理论基础与发展现状

1.1 焊接自动化的定义与技术原理

自动化焊接是指通过机械设备与电子控制系统，替代人工完成焊接操作的一种高效焊接方式。其核心在于利用程序设定与控制逻辑，实现焊接过程中焊枪的定位、移动、加热、冷却等操作的全过程自动控制。该技术结合了焊接工艺、电气控制、机械结构与传感技术，在连续化、高频次、高精度的焊接任务中展现出显著优势^[1]。从原理上看，自动化焊接系统主要包括执行机构（如焊

接机器人或焊接机床）、控制系统（PLC 或嵌入式控制器）、传感装置（焊缝跟踪、温度传感等）以及工艺参数库。系统根据预设程序对焊接路径、功率输出、焊接速度等进行精确控制，实现焊缝的稳定成形与重复一致性。

1.2 自动化焊接的发展历程与阶段

自动化焊接技术的发展大致经历了三个阶段。初期为“机械自动化阶段”，以气动、电动装置为主，实现简单的重复性焊接作业，如滚焊、缝焊等。该阶段以 20 世纪 50 年代至 70 年代为主，设备结构相对简单，但效率和精度受限。第二阶段为“机电集成阶段”，引入数控技术与可编程控制器（PLC），焊接动作更加精细可控，焊接路径也可灵活设定。这一阶段自动化程度明显提高，适用于大批量标准化生产，应用领域从汽车到船舶制造不断拓展。当前已进入“智能焊接阶段”，焊接系统融合了计算机控制、图像识别、激光测量与大数据分析等先进技术，实现了更高层次的信息反馈与自适应调整^[2]。现代自动化焊接不再依赖固定编程路径，而是借助传感器与 AI 算法，实时判断工件状态，进行参数优化与路径修正，具备更高的柔性智能化特征。

1.3 主要类型及其适用领域

自动化焊接按照技术形式与能源特征，可分为多种类型。其中应用最广的是电弧焊自动化，包括 MIG、MAG 和 TIG 等变种，适用于碳钢、不锈钢、铝合金等材料的中厚板焊接。其优势在于技术成熟、工艺稳定、成本适中。激光焊则以其高能密度、热影响区小、焊接速度快的特点，广泛用于精密零部件制造、高端电子设备及航空航天结构件加工。尽管成本较高，但其在薄板与高强度材料焊接中的应用潜力不容忽视。电阻点焊、超声

波焊、电子束焊等其他自动化焊接技术也在特定场景下被采用。例如,电阻点焊常用于车身框架拼装,超声波焊多用于塑料构件连接,而电子束焊因其真空环境与集中能量优势,被用于核电设备或航天器部件加工。从应用领域看,自动化焊接已从传统重工业延伸至精密制造、医疗器械、家用电器等多个行业,成为现代机械制造不可或缺的组成部分。未来,随着智能化技术进一步嵌入,其适应性和自主化程度将持续提升。

2 自动化焊接在机械制造中的应用实践

2.1 在典型制造环节中的应用案例

自动化焊接在机械制造领域的实际应用,已渗透至多个关键环节,尤其在汽车制造、工程机械与轨道交通等行业表现尤为突出。

以汽车制造为例,整车车身的焊接点多、节奏快,对焊接质量与效率的要求极高。通过部署机器人电阻点焊系统,企业实现了车身焊接的标准化与高效率生产^[3]。焊接机器人不仅能快速完成大批量重复操作,还能通过焊接电流与压力的实时控制,保障焊点的一致性,降低次品率。大型整车厂如一汽、比亚迪等已实现90%以上焊接工序自动化,生产节拍可缩短至60秒以内。

在工程机械行业,自动化焊接技术广泛应用于挖掘机、推土机、起重设备的结构件拼装。因结构件常为厚板与异形构件,需较强的焊接穿透力与工艺稳定性,自动化系统常采用多层多道焊接模式,并辅以工件翻转台与变位机联动控制,实现立焊、角焊与水平焊的集成操作,显著降低了人工误差。

轨道交通领域同样对焊接精度有较高要求。车体材料多采用铝合金与不锈钢,需要高强度、低变形焊接方式。激光自动化焊接凭借其小热影响区与快速熔融能力,成为核心技术。中车集团在高铁车体制造中已全面采用激光搭载机器人焊接工艺,实现长焊缝无中断拼接,提高了产品气密性与耐久性。

2.2 工艺流程设计与优化

自动化焊接工艺的成功实施不仅依赖先进设备,更有赖于合理的工艺流程设计与参数优化。其关键在于将原本依赖焊工经验的焊接判断转化为系统化控制流程,并辅以算法与数据模型进行支撑。

在制定工艺流程时,需根据材料特性、零件结构与装配顺序,确定焊接顺序、焊缝形式、预热温度与冷却控制策略。例如,厚板结构件在焊前需进行坡口加工与夹具定位,通过多道焊接与间断冷却降低热应力积聚^[4]。焊缝余高、焊角尺寸与熔深均通过视觉传感器或激光测量装置进行在线监测与修正。

对于批量化生产的焊接线,工艺流程的节拍控制尤为关键。以焊接机器人为核心,辅以自动上下料系统与

智能工装夹具,可构建出连续作业的流水线,节省换线与人工调整时间。同时,应用MES系统将工艺流程与订单管理联动,使生产计划与焊接程序同步,实现“以件定序”的柔性化生产。

此外,数据反馈机制是流程优化的核心之一。通过采集焊接电流、电压、熔池图像等关键数据,结合历史工艺数据库,可进行参数溯源与故障诊断。例如,当焊缝出现未熔合或夹渣等缺陷时,系统可自动标记问题段,并反馈至操作端,提醒调整热输入或清理接头表面,形成闭环式质量管理。

2.3 效率提升与质量控制分析

自动化焊接的显著优势体现在效率提升与产品一致性方面。在相同生产条件下,自动化设备可实现24小时连续运行,远超人工操作的稳定性与节拍控制能力。

在效率方面,一台六轴焊接机器人平均每分钟可完成6~10个焊点的操作,相比人工提高效率30%以上。同时,可根据不同结构件配置多机协同工作,一条自动焊接线可替代4~6名熟练焊工^[5]。通过工艺路径优化与运动轨迹调速控制,系统可进一步压缩空行程时间,实现节拍最优分布。

在质量控制方面,自动化焊接系统凭借其高度一致性,显著降低了焊缝尺寸波动与焊接缺陷率。实时监控系統可精确记录每一道焊缝的参数与成形图像,一旦出现偏差,可立刻进行停机检查与修正。某大型制造企业在实施焊接自动化后,产品一次合格率从原先的92%提升至98%以上,返修率下降超过50%。

值得关注的是,自动化焊接并非完全替代人工,而是在标准化环节中实现“人机协作”。部分复杂结构件仍需人工预拼或质量复核,自动化系统则承担重负荷与重复性焊接作业,协同保障生产效率与成品质量。

3 自动化焊接系统的关键技术研究

3.1 焊接机器人与智能控制系统

焊接机器人是自动化焊接系统的核心执行单元,其性能决定了整个焊接工艺的效率与质量水平。典型的焊接机器人一般由机械臂本体、驱动装置、末端焊接工具与控制系统组成。当前主流产品多为六轴工业机器人,具备较高的自由度与轨迹柔性,适应复杂焊缝路径及多角度焊接需求。

在实际应用中,焊接机器人的精度与响应速度由伺服驱动系统与运动控制算法共同决定。现代焊接机器人普遍采用交流伺服驱动器和闭环反馈控制,通过编码器实时校正关节位置,实现亚毫米级路径精度。配合三维建模与离线编程技术,工程师可预先模拟焊接动作、避免干涉,并将程序上传至控制终端进行仿真验证,减少现场调试时间。

智能控制系统则实现了焊接过程中的数据采集、决策控制与异常干预。以 PLC、工业 PC 或嵌入式控制板为载体，系统对电流、电压、焊枪姿态、焊接速度等参数进行实时运算与调整。一些高端系统还融合了基于模型预测控制（MPC）的自适应算法，能够根据焊接状态自动优化电弧能量与移动轨迹，提高成型质量并延长焊接耗材寿命。

随着工业互联网的发展，控制系统也在向网络化演进。通过工业以太网将各模块串联，可实现远程监控、数据上传与云端存储，为大规模协同生产提供技术基础。例如，某重工企业部署基于 5G 连接的远程焊接控制平台，实现了跨厂区协同焊接与专家远程诊断。

3.2 传感器技术与焊缝跟踪

传感器技术是实现自动化焊接系统“感知能力”的关键，其应用贯穿焊前定位、焊中跟踪与焊后检测全过程。不同传感器的组合可实现焊缝路径识别、焊接状态监控与缺陷预警等多重功能。

常见的传感器包括激光位移传感器、电弧传感器、红外热成像仪与图像传感器等。激光位移传感器多用于焊缝识别与路径引导，特别适用于对接焊与 T 型焊接。其通过在焊缝表面扫描激光线，实时获取三维坐标并传输给机器人控制系统，使其动态调整路径以适应实际工件形状的微小偏差。

电弧传感器则通过检测电流、电压波动变化判断电弧与焊缝中心的偏移程度，在熔池形状发生变化时及时反馈，实现动态路径微调。尤其在 CO₂ 气体保护焊中，电弧信号的响应速度快、灵敏度高，成为在线跟踪系统的重要组成部分。

近年来，图像识别与人工智能算法的引入使焊缝跟踪更加精准。通过工业相机与深度学习模型协同分析焊缝特征，可实现复杂焊缝的自动识别与分类。在高精密制造领域，如航空发动机叶片焊接中，这一技术已实现对毫米级焊缝的精准捕捉与动态调整。

在焊后检测方面，超声波探伤、X 射线无损检测与结构光扫描等技术已开始与自动化焊接线融合，形成闭环控制系统。焊后缺陷信息可反馈至工艺数据库，为后续工艺参数调整提供依据。

3.3 焊接参数的实时监控与反馈调节

在自动化焊接系统中，焊接参数的设定与实时调节对焊接质量影响显著。传统参数设定依赖人工经验，难以适应焊接过程中材料差异、热输入变化等动态因素。为此，现代系统普遍引入实时监控与反馈调节机制，形成焊接过程的“闭环控制”。

实时监控主要涵盖电流、电压、焊接速度、热输入、

冷却速率等关键指标。这些数据通过内置传感器与采集模块实时汇总至中央控制系统，系统通过设定的工艺窗口判断参数是否偏离预期区间。例如，在薄板焊接中，电流波动过大会导致烧穿风险，系统可自动降低热输入，调整脉冲频率以稳定焊缝成形。

此外，针对复杂结构件或多道焊接工艺，反馈调节系统还能动态识别每一道焊缝的状态，并对后续焊道进行个性化参数修正。某大型风电叶片制造商就引入了这一机制，根据前一道焊接熔深数据自动设定下一道填充量与电弧偏移角度，提升了结构可靠性。

数据反馈不仅限于本地调节，还可用于长期工艺优化。焊接过程数据上传至云端后，可通过大数据分析发现隐性缺陷模式与设备磨损规律，为焊接工艺改进与设备维保提供预测支持。

未来，基于人工智能的焊接参数自学习系统正在逐步成熟。其可通过历史焊接样本构建工艺模型，自动完成参数设定与自适应优化，减少对焊接专家的依赖，提升新产品导入速度与首件合格率。

4 结语

自动化焊接虽然已在多个制造行业中广泛应用，但在实际推广过程中仍存在不少障碍，影响了技术的全面落地。

当前系统在柔性化方面的能力仍显不足。许多焊接机器人依赖预设程序进行重复作业，一旦工件尺寸或焊缝形态发生变化，就需要重新示教与调整，这种模式不适用于变化频繁、定制化程度高的生产场景，尤其在中小批量加工中效率不高。

在成本与维护层面，自动化系统的投入门槛依旧偏高。设备购置本身价格昂贵，配套的系统、传感器及调试工具也需额外投入。此外，系统运行对人员编程能力与设备运维技术的依赖较强，中小企业往往难以独立支撑全流程的维护管理。

参考文献

- [1] 刘鹏, 魏伟. 自动化焊接技术在机械制造中运用分析[J]. 中国金属通报, 2024, (10): 104-106.
- [2] 李文平. 智能焊接技术在机械制造中的应用探讨[J]. 科技与创新, 2024, (11): 52-54.
- [3] 徐恩亮. 自动化焊接技术在机械制造中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53 (05): 80-82.
- [4] 霍德廷. 自动化焊接技术在机械制造中的实践路径分析[J]. 中国设备工程, 2024, (04): 198-200.
- [5] 杨春雷. 自动化焊接技术在机械制造中的实践路径分析[J]. 模具制造, 2023, 23 (12): 34-36.