



DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.07.06

电弧焊的弧源协同控制技术

赵红雁, 彭峪峰, 余悦*, 吕涛, 陈树君

北京工业大学 机械与能源工程学院, 北京 100124

摘要: 电弧是弧焊工艺的核心能量载体,其动态行为与热力特性直接决定熔池形态及焊缝成形质量。作为电弧的输出来源,焊接电源输出特性关系到热输入均匀性,同时,波形控制精度则直接影响熔滴过渡过程与电弧形态调控效果。从弧焊工艺与电力电子技术的交叉视角出发,综述了电弧-电源耦合控制的研究进展,重点解析了弧源协同控制技术中电弧形态主动控制、熔滴过渡精确调控及多参数闭环反馈等核心突破。最后从焊接电源与电弧的协同控制技术方面进行了展望。

关键词: 弧源协同控制技术; 焊接电源; 焊接电弧; 研究现状

中图分类号: TG 434.1, TG444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2026)07-0047-10

Arc-Power Synergistic Control Technology in Arc Welding

ZHAO Hongyan, PENG Yufeng, YU Yue*, LV Tao, CHEN Shujun

School of Mechanical and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: As the core energy carrier in arc welding processes, the dynamic behavior and thermal characteristics of the electric arc were found to directly determine molten pool morphology and weld formation quality. Serving as the output source of the arc, the output characteristics of welding power sources were demonstrated to govern heat input uniformity, while waveform control accuracy was proven to critically influence droplet transfer processes and arc morphology regulation effectiveness. In this study, a cross-disciplinary methodology integrating arc welding processes with power electronics technologies was adopted. Research progress in arc-power coupling control was systematically summarized, with particular emphasis on core breakthroughs in arc-source collaborative control mechanisms. Key innovations were analyzed, including active arc morphology control strategies, precision droplet transfer regulation methods, and multi-parameter closed-loop feedback architectures. Finally, future development trajectories were proposed regarding synergistic control technologies between welding power sources and electric arcs.

Keywords: arc-source coordinated control; welding power supply; welding arc; state of the art

引用格式: 赵红雁, 彭峪峰, 余悦, 等. 电弧焊的弧源协同控制技术[J]. 电焊机, 2026, 56(7): 47-56.

Citation: ZHAO Hongyan, PENG Yufeng, YU Yue, et al. Arc-Power Synergistic Control Technology in Arc Welding[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(7): 47-56.

收稿日期: 2025-05-22 修回日期: 2025-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(52205325)

作者简介: 赵红雁(1988—),男,博士,副教授,主要从事电力电子与电力传动、逆变电源、新能源发电/并网、智能电气装备技术、增材制造高频斩波电源的研究。E-mail: zhaohy@bjut.edu.cn。

通讯作者: 余悦(1993—),女,博士,讲师,主要从事电力电子技术及高频焊接热源方向的研究。E-mail: yuyue@bjut.edu.cn。

0 引言

作为工业零部件连接的“生命线”,焊接技术承载着高端装备制造、新能源及电子信息等战略产业的核心制造需求^[1-3]。尽管我国制造业整体实力显著提升,但在面向精密器械、超大型结构件等高端制造场景时,焊接工艺仍面临材料适应性不足、过程控制精度有限等技术瓶颈,与国际顶尖制造标准存在代际差异^[4-5]。

作为现代工业体系的核心工艺,弧焊技术深度渗透于汽车车身智能产线、船舶分段精密组装、航天器动力系统焊接等关键制造环节^[6-7]。电弧作为焊接系统中能量传输的物理媒介,其热力学行为与电磁特性将直接改变熔池动态,从而影响焊接质量。本文聚焦电弧物理特性与电源控制技术,系统梳理了最新研究进展,并对其发展趋势进行展望。

1 弧源协同控制技术的研究现状

近年来,弧焊技术越来越成熟,弧源协同控制技术也得到了长足发展。本文按照从时间维度进行划分,将弧源协同控制技术分为静态参数匹配及动态响应优化阶段和智能自适应阶段两个部分。

1.1 静态参数匹配及动态响应优化阶段

在20世纪90年代,经过建国后30多年的发展,电焊机行业初具规模,但直流弧焊电源绝大部分仍为工业发达国家逐步淘汰的旋转直流弧焊电源,技术指标较为落后^[8]。当时的焊接电源主要依赖进口技术,以中低端产品为主,技术核心聚焦于电源输出稳定性与电弧静特性的匹配^[9]。

焊接电源依靠稳定的输出与良好的电源动特性,实现对焊接质量的有效保证。弧焊电源动特性描述的是电弧负载瞬态变化时,其输出电压、电流随时间的变化关系。在非熔化极电弧焊中,因无熔滴过渡,焊接过程中电弧长度、电压及电流波动小,且多采用非接触引弧,故对电源动特性要求不高。而熔化极电弧焊的情况更为复杂,其工艺方法、焊接参数及熔滴过渡形式不同,负载变化也存在差异,致使对弧焊电源动特性的要求各有不同。特别是采用短路过渡的熔化极电弧焊,焊接时电弧需在

负载、短路、空载三种状态间频繁转换,因此对电源动特性有着较高要求^[10]。短路过渡的电压、电流波形如图1所示。为了实现良好的电源动特性,学者们提出了闭环控制、优化电路、控制过渡过程等方法,以进一步提升焊接设备性能。

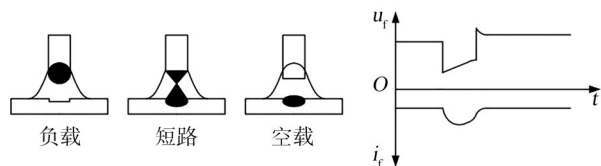


图1 短路过渡的电压、电流波形

Fig. 1 Voltage and current waveforms of short-circuit transfer

1.1.1 通过闭环控制优化焊接质量

表面张力过渡(STT)波形恒流控制法可以有效地控制飞溅量和焊缝成形质量,解决CO₂气体保护焊中燃弧阶段电流下降速度快、燃弧能量不足、焊缝成形差、飞溅大的问题,但存在电弧自调节特性较差的缺点^[11-14]。河南科技大学刘珊中^[15]提出采用燃弧末期恒压控制、其余阶段STT电流波形控制的焊接逆变电源闭环控制结构,输出电流波形如图2所示,焊接电流与理想的STT电流波形非常接近,理论上能改善焊缝成形、实现无飞溅过渡,并且能降低瞬间短路飞溅量。

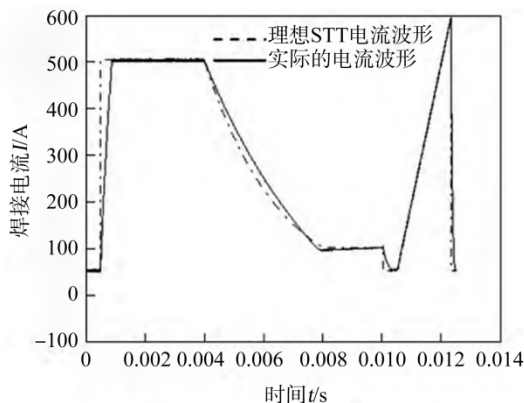


图2 STT 闭环控制输出电流波形

Fig. 2 Output current waveform of STT closed-loop control

上海交通大学的王强^[16]针对铝-镁合金脉冲 GMAW 建立了基于输送功率、焊弧电压与电流的线性“功率-电弧”模型,并以此为依据提出了一种微秒级自适应电弧长度闭环控制策略,电压采样和控制逻辑如图3所示。在每个脉冲的基准电流阶段,系统高速采样焊弧电压并与模型计算的阈值比较,

若电压降低则提前触发下一个脉冲, 以保持恒定电弧长度。实验表明, 该方法使 8 mm 左右的电弧长度稳态误差小于 0.2 mm, 焊接过程无飞溅和电弧中断, 对送丝速率突变的抗扰能力优异, 显著提升了铝-镁合金焊接的稳定性和成形质量。

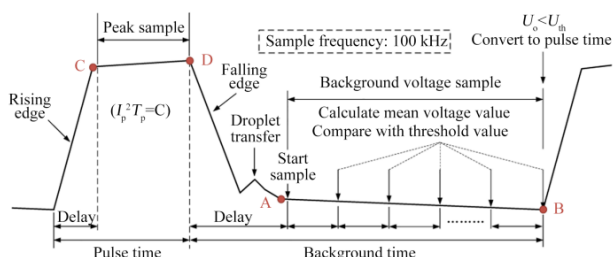


图3 电压采样和控制逻辑

Fig. 3 Voltage sampling and control logic

华南理工大学的吴开源^[17]提出一种支持向量机(SVM)与PID复合控制的方案以解决铝合金脉冲 GMAW 中因焊接电流变化导致弧长失稳的问题。如图 4 所示, 内环 PI 控制器维持焊接电流恒定以保障熔滴稳定过渡; 外环通过 SVM 模块依据实时峰值电流与基值电流动态生成最优参考电弧电压, 并将该设定值输入 PID 控制器, PID 以瞬时电弧电压为反馈信号, 计算误差值后动态调节送丝速度(WFS), 每脉冲周期输出 PWM 信号驱动送丝电机, 使实际电弧电压精准跟踪最优参考电弧电压, 使得电弧电压波动显著降低, 焊缝成形均匀无缺陷, 并且提升了动态工况下的电弧稳定性与焊接质量。

上述闭环控制方法通过引入电信号(电压、电流)的反馈机制, 显著提升了焊接过程的稳定性。

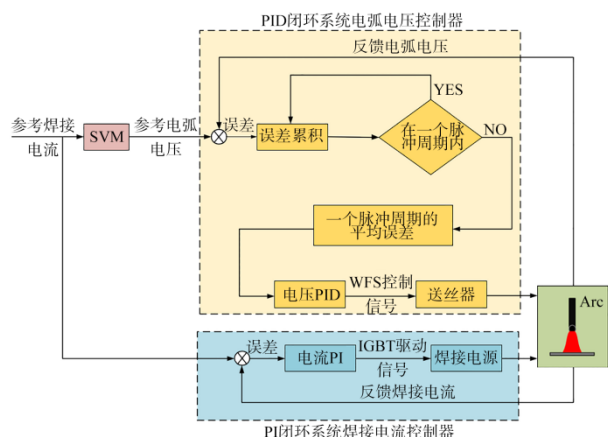


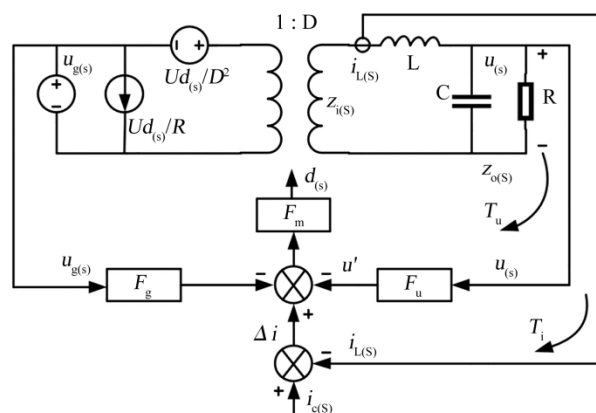
图4 电弧控制系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of arc control system

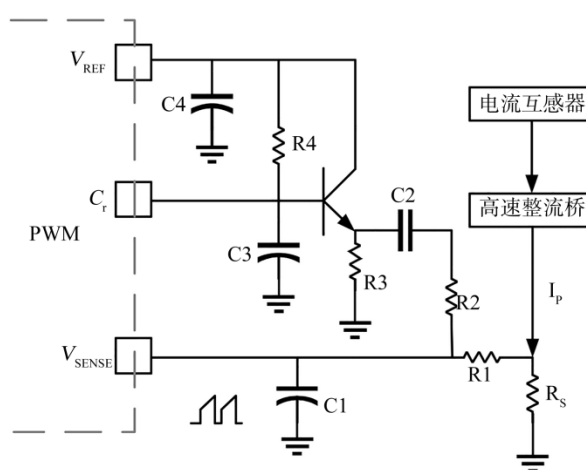
但此类方法主要依赖电参数的单变量反馈, 对电弧形态和熔池状态缺乏直接感知能力, 在复杂工况(如大间隙、变板厚、多材料切换)下的自适应能力仍有提升空间。

1.1.2 通过优化电路优化焊接质量

目前随着轻质高强薄板合金的大量使用, 对弧焊工艺提出了新的要求, 弧焊电源性能要适应这一变化, 即具有优良的动特性、较高的可靠性、控制的实时性、较高的效率以及良好的电磁兼容性。华南理工大学的薛家祥^[18]对移相全桥软开关弧焊逆变电源的动态特性进行了深入分析。如图 5 所示, 首先将主电路等效为 Buck 变换器, 推导出占空比到输出电压与电流闭环的传递函数, 并结合峰值电流反馈与斜坡补偿设计, 提出了具体的补偿斜率计算方法。结果表明, 补偿斜率与开关周期共同决定了开



(a) 峰值电流控制 Buck 变换器模型



(b) 斜坡补偿电路

图5 峰值电流-斜坡补偿双闭环结构

Fig. 5 Peak current-slope compensation dual closed-loop structure

环穿越频率,而输出回路电抗对动态响应影响极小,从而验证了峰值电流-斜坡补偿双闭环结构可以有效提高系统稳定性和抗电抗变化能力。

成都熊谷加世电器有限公司^[19]基于更为复杂的PSFB-ZVS PWM架构,如图6所示,构建了包含功率级和控制级的完整小信号模型,既采用平均开关建模法,也考虑了电流采样效应,并在此基础上给出了斜坡补偿和频率补偿的定量设计原则。通过频域小信号分析工具与实验扫频测量,模型与实测高度吻合;在铝合金脉冲焊和金属粉芯焊丝短路过渡焊等多种工业应用中,优化后的控制环路在最轻载到最重载条件下均表现出优异的相位裕度、增益裕度和动态响应。

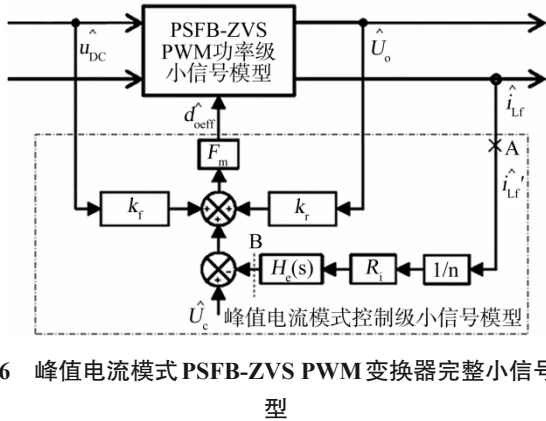


图6 峰值电流模式PSFB-ZVS PWM变换器完整小信号模型

Fig. 6 Complete small-signal model of peak current mode PSFB-ZVS PWM converter

北京工业大学的黄鹏飞^[20]针对逆变CO₂气体保护焊电源动特性对焊缝成形的影响,设计了一种可分别调节短路阶段与燃弧阶段动态特性的电子电抗器,如图7所示,采用电流负反馈与电压负反馈的双闭环控制策略。在恒定平均电压和送丝速度条件下,通过改变两阶段的时间常数调节电流上升速率,进而影响短路过渡频率、平均焊接电流及熔深。试验结果显示:随着燃弧阶段时间常数增大,平均电流与熔深均减小;而短路阶段时间常数增大时,二者均呈相反趋势,验证了该方法在在线调节焊缝熔深方面的实用性。

普里亚佐夫斯基国立技术大学的Podnebenaya^[21]首次提出在谐振电源输入端引入“谷底填充”无源PFC电路以解决LLC拓扑交流输出整流滤波后驱动直流电弧时依然会引入输入侧谐波畸变

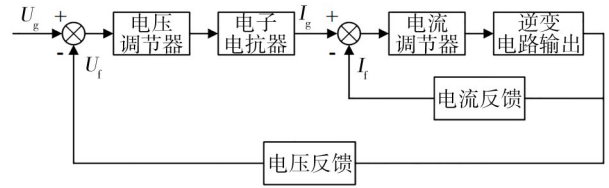


图7 电子电抗器控制原理

Fig. 7 Schematic diagram of electronic reactor control

和功率因数下降的问题,如图8所示。具体策略为:当市电瞬时电压绝对值大于峰值的50%时,负载由桥式整流BR1供电;当市电电压小于峰值的50%时,负载由并联电容C₁、C₂经VD₁、VD₃供电,以填补电流波形谷底,使零交叉区电流不为零。实验结果显示,采用该方案后输入电流的总谐波失真降低至原来的50%以下,功率因数提升约0.4,并使焊接电弧电流更为平滑、飞溅率降低,综合提升了焊接质量。

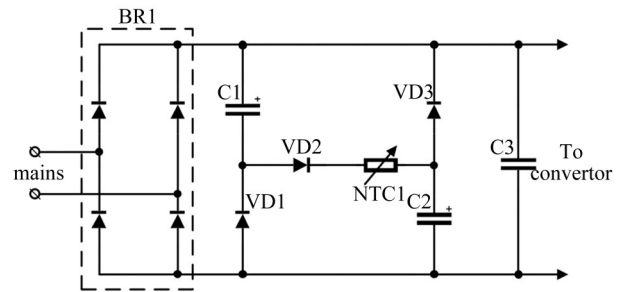


图8 谷底填充电路

Fig. 8 Valley filling circuit

电路拓扑优化虽从硬件层面提升了电源的动态响应品质、效率和功率因数,但本质上仍属于“电源端独立优化”范畴,尚未建立电源输出与电弧实时状态之间的闭环反馈通道。

1.1.3 通过控制过渡过程优化焊接质量

采用熔化极气体保护焊(GMAW),在短路过渡时焊缝成形好,过渡频率高。但在电弧重新引燃时,大电流产生的电弧力会引起过渡金属的飞溅,使得短路过渡飞溅量大。为了解决这一问题,天津大学的吕小青^[22]提出基于LabVIEW开发了一种改进的GMAW短路过渡电信号参数提取方法,通过脉冲测量函数定位电压短路结束点,并在对应电流波形范围内检测最大值是否低于设定阈值(如图9所示),以此区分正常短路与瞬时短路,替代了传统易受噪声干扰的逐点电压阈值扫描法。该方法将脉

冲测量封装为子VI, 结合JKI状态机架构设计交互界面, 利用U-PDD和I-PDD曲线辅助用户精准设置参考电平和阈值电流, 最终输出短路时间、短路周期的时间变化图、频次图及其变异系数。试验表明, 该方法能有效抑制噪声干扰, 准确识别瞬时短路, 显著提升参数提取的效率和可靠性, 为焊接过程稳定性评估提供了自动化工具。

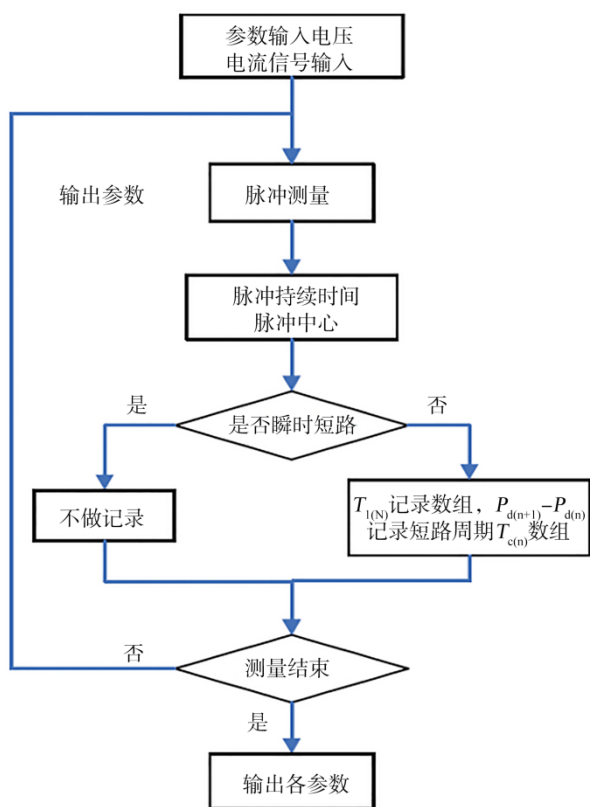


图9 短弧焊电信号脉冲测量流程

Fig. 9 Pulse measurement flowchart of GMAW short-circuit transfer electrical signals

贵州大学的王莹^[23]基于电弧相和短路相特征及其交替关系, 将改进的“质量-弹簧”模型与焊接电源系统回路模型结合, 提出熔滴过渡临界判断条件, 构建更精确的动态模型。通过该模型计算分析了不同送丝速度下的短路过渡频率、焊接电流电压、接触熔滴与残留熔滴等效半径及其统计分布等动态变化, 并与实验结果吻合。研究发现, 熔滴位移、速度及焊丝伸出长度在最佳电弧点时波动最小, 且初始液桥曲率半径越小, 短路过渡稳定性越好。

上海广为焊接设备有限公司^[24]提出了可控短路过渡技术, 在短路过渡结束与重新引弧的瞬间,

通过迅速降低焊接电流从而减少飞溅量。具体方式为采集电弧电压, 当电弧电压低于10 V判定进入短路状态, 通过比较短路电压与基准短路电压的偏差值判断重燃弧, 进而驱动斩波开关降低焊接电流, 电流波形如图10所示。实验结果显示, 后级斩波控制在重燃弧瞬间能拉低短路电流, 相比传统短路控制, 后级斩波控制的焊缝飞溅明显得到改善。

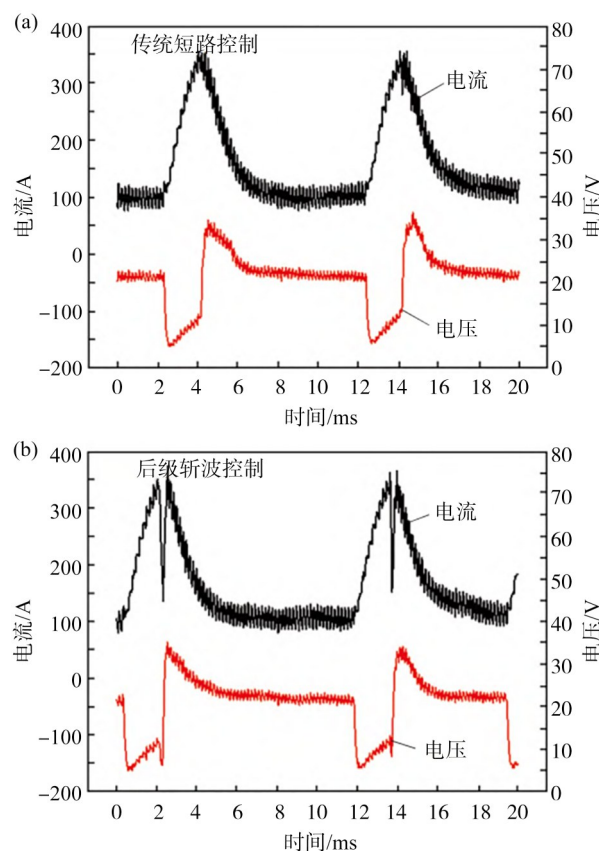


图10 不同焊接模式的焊接电流、电压波形对比

Fig. 10 Comparison of welding current and voltage waveforms under different welding modes

过渡过程控制方法有效降低了短路过渡飞溅并提升了过程稳定性, 但主要研究对象集中于短路过渡形式, 对射流过渡、脉冲过渡等其他过渡形式的适用性有限; 且多为开环或半闭环控制策略, 尚缺乏对电弧整体状态的全局感知与调控能力。

1.2 智能自适应阶段

相比于静态参数匹配及动态响应优化阶段, 智能自适应阶段脱离了单纯的电流、电压反馈, 同时还加入了熔池状态、温度场以及电弧形态等反馈量, 在实现焊接电源在具备稳定的输出与良好的电

源动特性的同时,还会对更具体的焊缝进行自适应调节,达到更好的焊缝质量。

1.2.1 通过熔池温度场预测焊缝熔透状态

焊接时,对接接头熔透状态对焊接质量至关重要,可现有基于温度测量的监测技术却存在短板。南京理工大学的王克鸿^[25]针对GMAW过程中对接接头熔透状态的监测展开研究,搭建了含焊接平台和视觉检测模块的实验装置,采用CMT焊接工艺,调整参数改变熔透状态并采集图像。利用双色测温法处理图像获取表面温度场信息,经校准提升精度,再通过基于温度直方图的算法提取温度分布特征。如图11所示,借助BPNN和CNN分别建立预测模型,实现对不完全熔透、完全熔透和过度熔透三种状态的在线监测。实验表明,基于BPNN的模型整体预测准确率为98.83%,而基于CNN的模型效果更优,预测准确率达100%,泛化能力强。该研究成果能实时调整焊接电流,为提升GMAW焊接质量提供技术支持,也为焊接过程监测技术发展开拓了新方向。

1.2.2 通过熔池图像特征预测焊接质量

针对MAG焊接传统人工监测效率低、精度不足等问题,西南交通大学的陈杰^[26]提出系统性解决方案,通过硬件架构与算法创新实现焊接质量全流程智能化管控。团队搭建了熔池图像采集平台,基于模拟实验构建多维度数据集,并设计基于CaD-UNet的熔池特征提取方法,通过相机标定与深度学习结合,显著提升熔池高度、宽度、面积等关键形貌参数的分割精度与实时性,这些动态参数直接表征焊接能量分布及工艺稳定性。针对缺陷识别,创新采用残差网络构建分类模型,结合Grad-CAM可解释性分析技术,实现对正常、夹渣、未熔合、焊偏、气孔五类缺陷的精准判别,并引入多任务学习优化处理效率。最终基于PyQt框架开发的集成化系统,通过熔池形貌动态监测与缺陷分类的协同分析,实现了焊接质量的实时闭环管控。实验表明,该方案在精度与效率方面均突破传统监测技术瓶颈,为焊接过程智能化提供了可落地的技术路径,具有显著的工程应用价值。

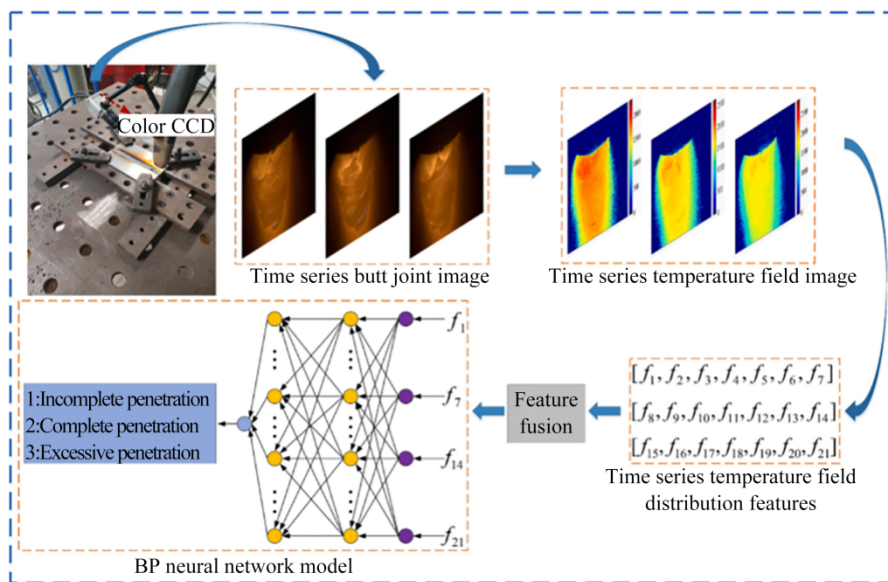


图11 基于BP神经网络的预测模型建立过程

Fig. 11 Establishment process of prediction model based on BP neural network

1.2.3 通过电弧形态预测焊接质量

超窄间隙焊接对厚板高效焊接意义重大,但电弧检测与焊缝评估不易,传统手段实时性、精度欠佳。针对这一问题,兰州理工大学的张爱华^[27]搭建了含机械、控制、视觉检测系统的平台,首创共面线

性相机标定法,经误差分析达工程精度。检测系统的整体流程如图12所示,在多工况焊接下采集典型电弧、焊缝截面图像,用变换、调整、Mosaic技术构建双数据集,支撑模型训练。研究提出基于关键点检测的焊缝截面形貌视觉检测方法,使用HRnet网

络提取“测量单元”的18个关键点,转换坐标系后用最小二乘法拟合曲线,根据几何关系定位测量点,结合相机标定实现几何尺寸定量测量。通过构建的预测模型,可依据电弧形态参数实时判断熔合状态,为焊接质量在线监测提供动态反馈。德国柏林工业大学的Fabry^[28]等人在自动化超窄间隙GMAW中提出了一种基于神经网络的电弧传感器,将“电弧形态”简化为可由电气信号反算的电弧长度,并用其与离线质量评价结果建立映射,以此在线监测并调整,从而用电弧形态预测并保障焊接质量。检

测系统的整体流程如图13所示,在18~25 mm间隙、9~13 m/min送丝速率条件下,通过对1 696次往复摆动周期中电弧电压、电流、送丝速率及几何光学测量数据进行采集,训练了多层ANN模型。该模型将送丝速率、摆动阶段与侧壁驻留阶段的平均电流及对应的摆动角度作为输入,输出实时间隙宽度估算值。验证结果表明,神经网络传感器在覆盖的参数空间内能将间隙估算误差控制在 ± 0.5 mm范围内,且适应不同焊接参数与摆动方式,无需复杂光学设备即可实现高精度、低成本的在线缝隙检测。

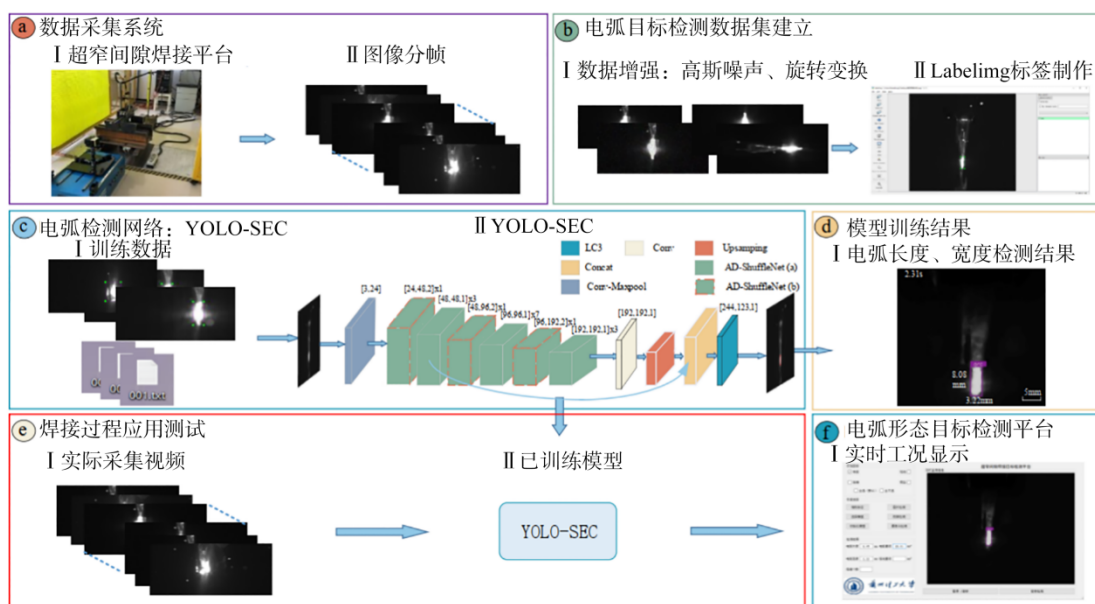


图12 焊接电弧形态检测实现整体流程

Fig. 12 Overall flowchart of welding arc morphology detection

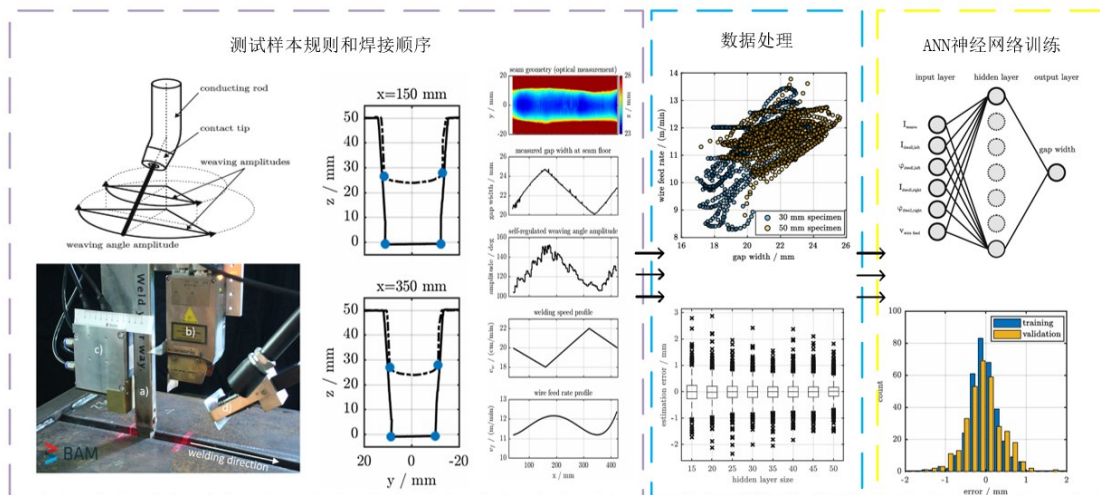


图13 基于ANN神经网络的预测模型建立过程

Fig. 13 Establishment process of prediction model based on ANN

1.2.4 通过电弧形态控制焊接质量

前述 1.2.1~1.2.3 节的方法均以“预测”为核心,即通过感知信息判断焊接质量状态;而实现真正意义上的弧源协同控制,还需在此基础上形成从电弧状态感知到电源参数调节的完整闭环。

摆动电弧对熔池具有搅拌作用,但由于材料的多样性,焊接不同材料产生最佳焊缝的主电弧形态也会不一致。根据北京工业大学的陈树君^[29]研究结论可知,通过调节旁路电弧的电流强度和变极性频率,可以有效调控主电弧的摆动角度及其左右摆动的停留时间。基于这一特性,该团队设计了一种弧源协同控制系统,旨在实现主动控制电弧,使其能够适应多种焊接工艺和材料的需求。该系统的

原理图如图 14 所示,通过设置旁路电流参数和主电弧摆动角度,结合摄像仪实时采集的电弧图像,利用上位机进行闭环调节,从而实现对主电弧摆动角度的精准控制。

弧源协同控制系统主要包括三个核心模块。首先,根据焊接材料、焊缝宽度等初始条件,通过参数预置模块计算出焊接工艺所需的旁路电流、摆动角度等,并基于磁流体动力学模型计算出相应的初始旁路电弧频率;其次,通过高速摄像与上位机构成的实时监测模块,同步采集电弧形态并计算出电弧的实际摆动角度;最后,采用 PID 算法,根据实时工况动态调整控制参数,使主电弧的摆动轨迹始终与熔池动态保持最佳匹配。

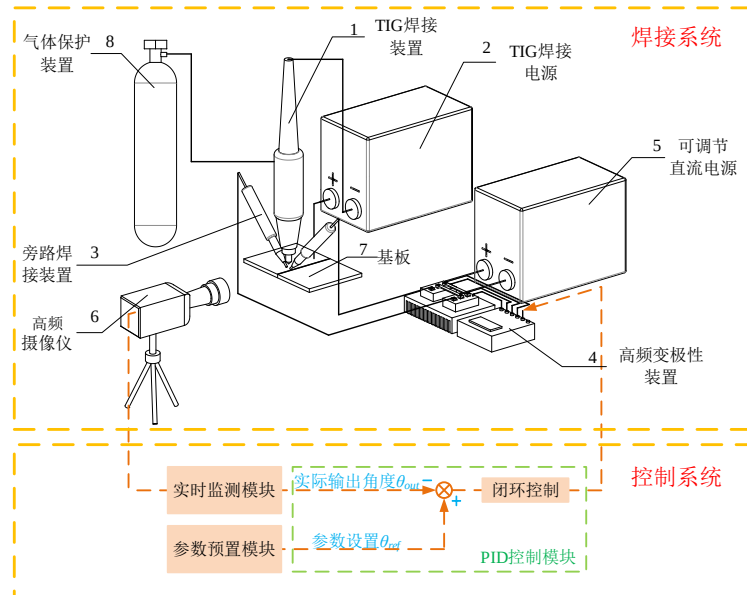


图 14 弧源控制系统原理

Fig. 14 Schematic diagram of arc-power synergistic control system

在上述系统的工作流程中,弧源控制系统旨在实现对不同材料焊接过程的自适应调节,进一步提升焊接过程的稳定性和成形质量。为达成这一目标,对电源有着特殊要求:一方面,电源必须能够输出高频的变极性电流,以实现对主电弧摆动的调控;另一方面,由于不同材料焊接所需电流差异较大,电源还需具备输出较宽范围电流值的能力,以满足不同材料和板厚的焊接场景。

为确保电流能精准、快速地被调节到给定值,PID 控制模块尤为重要。若使用传统的 PID 调节方式,对所有大电流变化采用相同的控制策略,会难

以兼顾全电流范围的动态响应需求,在大跨度电流调节时易出现响应滞后与超调等问题,导致电流响应时间不尽相同,进而影响电流的稳定输出,对焊接质量产生负面影响。为此,系统引入大小信号模型,如图 15 所示,基于电流分区的多权重 PID 控制机制,将电流范围划分为多个特征区间,各区间独立配置最优 PID 参数组。当设定电流切换时,系统自动匹配对应区间的控制参数,从而保证全工况范围内的动态响应速度与控制精度^[30]。将该系统应用于焊接,理论上可以实现真正意义上的“焊接闭环”,通过监测电弧的状态,进而控制焊接电源,使

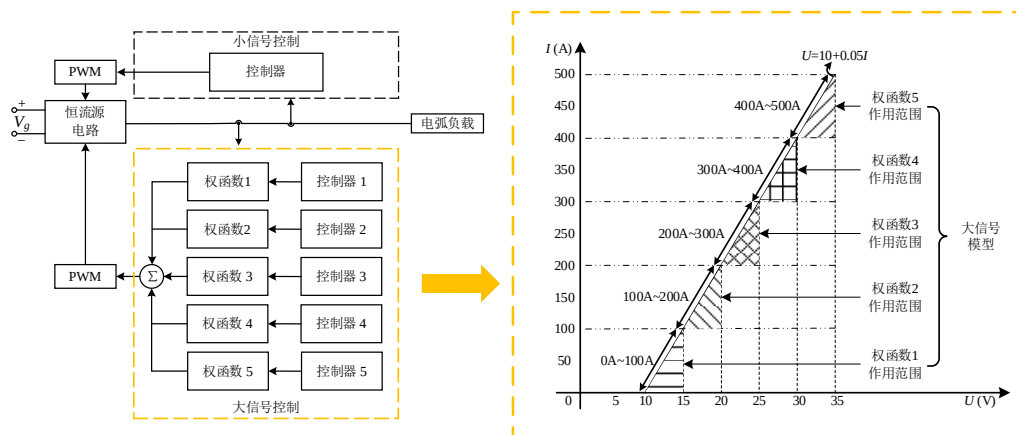


图15 大小信号控制原理

Fig. 15 Schematic diagram of large- and small-signal control

焊缝达到最佳。

2 结论与展望

本文系统梳理了弧源协同控制技术的研究进展,主要结论如下:

(1)在静态参数匹配及动态响应优化阶段,研究者从闭环控制、电路拓扑优化和过渡过程调控三个维度提升了焊接电源的输出品质。但上述方法的核心思路仍以电源端为出发点,通过优化电源自身的输出特性来被动适配电弧负载需求,尚未建立电弧状态到电源输出的实时闭环反馈通道。

(2)在智能自适应阶段,研究者将熔池温度场、熔池图像特征和电弧形态等信息引入控制回路,推动了弧焊控制从“电参数单变量反馈”向“多源信息融合感知”的跨越。但该类方法本质上仍以“预测/监测”为主,尚未形成从感知到调控的完整闭环。

(3)在电弧形态主动控制方面,初步具备了“焊接闭环”的技术特征。但该类系统对电源硬件要求较高,应用场景仍有限,且代表性工作主要集中在少数课题组,亟需更多研究力量参与。

(4)焊接电源作为现代制造业的核心设备,已经深入各个制造领域,其未来发展方向将紧密围绕精密化、高效化和应用多元化展开。目前我国的焊接设备与国外先进技术和高端装备相比,仍存在一定差距。仅依靠良好的电源动特性来实现高质量焊接,并不能有效地应对任何状况,而基于图像采

集系统的焊接也正停留在预测阶段,并不能实现真正的实时监测焊接情况从而调控焊接电源应对任何突发状况。进一步研究电弧状态与焊接质量的内在关系,并针对焊机电源参数映射电弧状态,实现真正意义上的“焊接闭环”,将会更深层次地推进优质高效电弧焊接工艺的发展。

参考文献:

- [1] 张照,高延峰,喻伟,等. 旋转电弧传感的弯曲角焊缝自动焊接系统设计[J]. 热加工工艺, 2025, 54(13): 116-121.
ZHANG Z, GAO Y F, YU W, et al. Design of automatic welding system for fillet welds based on rotating arc sensor[J]. Hot Working Technology, 2025, 54(13): 116-121.
- [2] Jiang Z, Cong B, Zeng C, et al. Correlation analysis of current, molten pool, and weld formation in double-pulsed variable polarity TIG welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 131: 724-735.
- [3] Bao W, Liu H, Wang F, et al. Keyhole critical failure criteria and variation rule under different thicknesses and multiple materials in K-TIG welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 126: 48-59.
- [4] 王潇,韩伟,李拔,等. 深水油气开采用海洋立管研究进展与展望[J]. 中国工程科学, 2025, 27(2): 123-136.
WANG X, HAN W, LI B, et al. Research progress and prospects of marine risers for deepwater oil and gas exploitation [J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27(2): 123-136.
- [5] 冯消冰,郑军,刘爱平. 基于激光视觉传感的多层多道自动化排道技术[J]. 清华大学学报(自然科学版),

- 2025, 65(8):1596-1608.
- FENG X B, ZHENG J, LIU A P. Automatic path planning technology for multi-layer multi-pass welding based on laser vision sensing[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2025, 65(8): 1596-1608..
- [6] 王小伟, 张斌, 曾如川, 等. 铝合金 VPPAW 穿孔焊接匙孔闭合处的微观组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2024, 45(3):1-6.
- WANG X W, ZHANG B, ZENG R C, et al. Microstructure and mechanical properties at keyhole closure of aluminum alloy VPPAW penetration welding[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2024, 45(3): 1-6.
- [7] Sangwan K, Herrmann C, Egede P, et al. Life cycle assessment of arc welding and gas welding processes[J]. Procedia CIRP, 2016, 48:62-67.
- [8] 施秉周. 发展中的我国电焊机行业[J]. 电焊机, 1984, 24(3):1-4.
- SHI B Z. Developing welding power source industry in China[J]. Electric Welding Machine, 1984, 24(3):1-4.
- [9] 杨文忠. 逆变弧焊电源的发展现状与发展趋势研究[J]. 河南科技, 2018(31):129-131.
- YANG W Z. Research on development status and trend of inverter arc welding power source[J]. Henan Science and Technology, 2018(31):129-131.
- [10] 胡绳荪. 现代弧焊电源及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2025.
- [11] 李恒, 胡连海, 李俊岳, 等. 波控 CO₂ 焊短路过渡过程的计算机仿真及试验[J]. 焊接学报, 2002(2):1-4.
- LI H, HU L H, LI J Y, et al. Computer simulation and experiment of short-circuit transfer process in wave-controlled CO₂ welding[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2002(2):1-4.
- [12] 张光先, 邹增大, 陈仁富, 等. CO₂ 气保焊表面张力过渡的建模及仿真[J]. 焊接学报, 2003(4):68-72.
- ZHANG G X, ZOU Z D, CHEN R F, et al. Modeling and simulation of surface tension transfer in CO₂ gas shielded welding[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2003(4):68-72.
- [13] 刘明志, 张光先, 聂丽丽, 等. 表面张力过渡动态过程的仿真[J]. 焊接学报, 2003(5):60-64.
- LIU M Z, ZHANG G X, NIE L L, et al. Simulation of dynamic process of surface tension transfer[J]. China Welding Research, 2003(5):60-64.
- [14] 张光先, 邹增大, 尹海, 等. CO₂ 气体保护焊表面张力的过渡[J]. 焊接学报, 2003(1):80-84.
- ZHANG G X, ZOU Z D, YIN H, et al. Surface tension transfer in CO₂ gas shielded welding[J]. China Welding Research, 2003(1):80-84.
- [15] 刘珊中, 汪运浩, 赵予龙, 等. CO₂ 气体保护焊逆变电源闭环控制系统[J]. 焊接学报, 2015, 36(1):10-14.
- LIU S Z, WANG Y H, ZHAO Y L, et al. Closed-loop control system of inverter power source for CO₂ gas shielded welding[J]. China Welding Research, 2015, 36(1):10-14.
- [16] Wang Q, Qi B, Xu Y, et al. Power-arc model based adaptive arc length control of P-GMAW for Al-Mg alloy[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2023, 128:639-665.
- [17] Wu K, Chen Z, Huang H, et al. Intelligent control of arc stability and arc length in aluminum alloy pulsed GMAW[J]. Weld World, 2022, 66:1357-1368.
- [18] 王瑞超, 薛家祥. 软开关弧焊逆变电源动特性分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(10):17-20.
- WANG R C, XUE J X. Analysis of dynamic characteristics of soft-switching arc welding inverter power source[J]. China Welding Research, 2012, 33(10): 17-20.
- [19] 何亚宁. 峰值电流模式 PSFB-ZVS PWM 逆变弧焊电源的完整小信号模型及控制环路设计[J]. 焊接学报, 2016, 37(1):81-84.
- HE Y N. Complete small-signal model and control loop design of peak current mode PSFB-ZVS PWM inverter arc welding power source[J]. China Welding Research, 2016, 37(1):81-84.
- [20] 黄鹏飞, 张华栋, 马超, 等. 逆变 CO₂ 焊电源动特性对焊缝成形影响分析[J]. 热加工工艺, 2019, 48(9): 227-229.
- HUANG P F, ZHANG H D, MA C, et al. Analysis of influence of dynamic characteristics of inverter CO₂ welding power source on weld formation[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(9):227-229.
- [21] Podnebennaya S, Burlaka V, Gulakov S, et al. Modeling of Power Supply for Welding with Power Factor Correction[C]//IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy System, Kremenchuk, Ukraine, 2021:1-4.
- [22] 黄宁, 冯占荣, 熊光劲, 等. 基于 LabVIEW 的 GMAW 短路过渡电信号周期参数提取[J]. 焊接, 2021(1): 13-17.
- HUANG N, FENG Z R, XIONG G J, et al. Extraction of periodic parameters of GMAW short-circuit transfer