

基于改进神经网络的激光焊接偏差识别智能化研究

成慧翔

晋中信息学院 山西晋中 030800

摘要: 激光焊接作为高精度制造的关键工艺,其质量控制对加工精度具有决定性影响。传统偏差检测方法在动态工况下的适应性不足,难以满足智能制造对实时性与准确性的双重需求。基于此,以下对基于改进神经网络的激光焊接偏差识别智能化进行了探讨,以供参考。

关键词: 改进神经网络;激光焊接偏差识别;智能化;研究

引言

激光焊接是一种高效精密的焊接方法,通过高能量密度的激光束作为热源,采用连续或脉冲激光束实施完成,是应用于激光材料加工的主要技术之一。热传导型焊接和激光深熔焊接为激光焊接的两种原理,向待加工物体表面采用激光辐射加热后,热传导效应导致物体表面温度逐渐向内部蔓延,实现物体熔化并产生特定的熔池,该熔化是通过控制脉冲的多个参数完成,此过程为激光热传导运力。

一、激光焊接偏差识别现状与神经网络改进背景

激光焊接偏差识别是保证焊接质量的关键环节,当前主流检测方法主要包括机器视觉检测、光谱分析和传感器监测等技术路线。机器视觉系统通过CCD相机采集熔池图像,利用图像处理算法提取焊缝特征参数,但易受焊接飞溅、弧光干扰和烟尘遮挡等因素影响,在动态工况下稳定性较差。基于光谱分析的方法通过监测等离子体辐射特征间接判断焊接状态,虽然抗干扰能力较强,但对微小偏差的识别灵敏度不足,且设备成本较高。多传感器融合方法综合采集声发射、红外辐射等多物理场信号,虽然提高了检测可靠性,但各传感器数据的时间同步和特征提取仍存在技术瓶颈^[1]。传统神经网络模型如CNN、LSTM在焊接偏差识别中已取得初步应用,但由于焊接过程的强非线性、多变量耦合特性,这些模型在特征提取的针对性和时序关联的建模能力上仍显不足。

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(基于改进神经网络的激光焊接偏差智能识别研究2023L514)

作者简介: 成慧翔(1985年--),女,汉族,山西太原人,研究生,副教授,研究方向:智能控制。

焊接过程中熔池动态行为的时空特征具有显著的多尺度特性,常规网络结构难以有效捕捉这种跨尺度特征关联。此外,实际工业场景中的样本不均衡问题导致模型对小概率异常工况的识别率偏低,现有数据增强方法难以生成符合物理规律的虚拟样本。

二、改进神经网络模型构建与原理

(一)神经网络基础架构与工作机理

本研究所构建的改进神经网络采用层次化特征学习框架,其核心架构包含特征提取、时空关联建模和决策输出三个关键模块。特征提取模块采用多尺度卷积核并行处理机制,通过不同尺寸的卷积核同步捕捉熔池图像的局部细节和全局形态特征^[2]。时空关联建模模块创新性地融合了三维卷积与门控循环单元,既能提取焊接过程的动态时序特征,又能保持对空间拓扑关系的敏感性。决策输出模块采用注意力加权机制,自动聚焦于对偏差识别最具判别力的特征维度。网络工作机制遵循“分层抽象-特征融合-动态决策”的处理流程,输入的多模态焊接数据首先经过归一化预处理,随后在不同层次进行非线性变换和特征精炼。特别设计了跨层特征复用通道,允许浅层的高分辨率细节特征与深层的语义特征进行自适应融合。在网络训练阶段,采用渐进式学习策略,先固定部分层参数训练基础特征提取能力,再开放全部参数进行端到端优化。这种架构设计显著提升了网络对焊接过程中复杂非线性关系的建模能力,为后续针对性优化奠定了坚实基础。

(二)针对激光焊接的网络结构优化策略

针对激光焊接过程的特殊需求,网络结构进行了三个方面的专项优化。在空间特征提取方面,设计了非对称卷积模块,针对焊缝纵向和横向的不同特征尺度,分别采用细长型和扁平型卷积核,更精准地捕捉焊缝形貌

的几何特征。在时序建模方面，开发了可变时间窗的循环单元，能够根据焊接速度自动调整时序依赖范围，确保对不同焊接节奏的适应性。针对焊接过程中常见的干扰因素，网络嵌入了多模态特征过滤层，通过并行支路分别处理视觉、热学和声学数据，在特征层面实现有效信息的提纯与融合^[3]。特别值得注意的是，在网络深层引入了物理约束模块，将焊接工艺的基本原理转化为网络的正则化项，确保网络学习到的特征关系符合物理规律。这种面向激光焊接特性的网络优化，不仅提高了特征提取的针对性，还增强了模型在实际工况下的解释性和可靠性，为构建可信赖的智能识别系统提供了结构保障。

（三）特殊激活函数与参数调整方法

为适应焊接数据的特殊分布特性，本研究开发了具有自适应特性的复合激活函数。该函数在传统 ReLU 基础上，引入了可学习的非线性变换参数，能够根据输入特征的统计特性动态调整激活阈值和曲线形态。针对焊接信号中存在的稀疏激活问题，设计了通道间差异化的激活策略，允许不同特征通道采用个性化的非线性处理方式^[4]。在网络参数优化方面，采用分层自适应学习率机制，根据各层梯度分布特性自动调整更新步长，确保深层参数和浅层参数的协同优化。特别开发了基于工艺知识的热启动策略，利用焊接参数的物理约束范围初始化网络权重，大幅缩短模型收敛时间。为防止过拟合，创新性地应用了动态正则化技术，在训练过程中根据验证集表现自动调整正则化强度。这些针对性的激活函数和参数调整方法，有效解决了焊接数据中存在的非线性、非平稳性问题，显著提升了模型的收敛速度和泛化性能，为神经网络在复杂工业场景中的可靠应用提供了算法保障。

三、基于改进神经网络的激光焊接偏差智能化识别系统的实现

（一）数据采集与预处理流程设计

激光焊接偏差识别系统的数据采集采用多传感器协同工作模式，构建了包含视觉、声学和热学三个维度的综合监测体系。工业级高速摄像机以 2000fps 的采样率捕捉熔池动态行为，同步采集焊接区域的红外热像和声发射信号。为实现精确的时空对齐，系统配备高精度硬件触发装置，确保多源数据的时间同步误差控制在微秒级。预处理阶段开发了专门的特征增强算法，针对焊接飞溅干扰设计了基于运动轨迹预测的动态掩模技术，有效消除虚假特征点的干扰。对于热学数据，采用非均匀性校

正算法消除传感器本身的响应差异，并通过空间插值技术提升温度场分辨率。声学信号经过带通滤波和时频变换后，提取反映焊接稳定性的特征频段^[5]。所有预处理模块均采用并行计算架构，确保系统满足实时性要求。特别设计了数据质量评估环节，通过多维度一致性检查自动识别并剔除异常采样数据，为后续分析提供可靠的数据基础。

（二）基于改进网络的识别算法开发

识别算法核心采用改进的深度卷积循环神经网络架构，创新性地融合了空间注意力和时序记忆机制。网络输入端设置多模态特征融合层，通过可学习的权重矩阵自动调节不同传感数据的贡献度。主体结构包含四个级联的特征处理阶段：初级特征提取采用多尺度卷积核组，同步捕捉熔池形貌的局部细节和全局特征；中级处理层引入空间注意力模块，动态聚焦于焊缝区域的关键部位；高级特征抽象层结合三维卷积和门控循环单元，建立时空特征的长期依赖关系；最终决策层输出焊接偏差的类型识别结果和位置定位信息。网络训练采用两阶段优化策略，先通过大量仿真数据进行预训练，再使用实际焊接数据微调。为防止过拟合，设计了基于工艺知识的数据增强方法，通过物理模型生成符合真实规律的虚拟样本。算法实现采用模块化设计，各功能单元可独立更新，确保系统的持续进化能力。

（三）实验平台搭建与测试方案规划

智能化识别实验平台由焊接加工系统、数据采集系统和实时分析系统三大部分构成。焊接系统采用光纤激光器配合六轴机器人，可实现多种接头形式和空间位置的焊接实验。数据采集系统集成高速摄像机、红外热像仪和声发射传感器，通过专用数据采集卡实现多通道同步采样。实时分析系统搭载高性能 GPU 计算单元，部署改进神经网络模型和数据处理算法。测试方案设计遵循“控制变量-梯度变化-极限验证”的原则，规划了三类测试工况：基准测试采用标准焊接参数，验证系统的基本识别性能；参数扰动测试通过调节功率、速度等关键参数，评估系统的适应性；极端工况测试模拟强干扰条件，检验系统的鲁棒性。每个测试工况包含 50 组重复实验，确保结果统计显著性。测试过程采用双盲设计，操作人员和系统互不知晓预设偏差条件，保证评价结果的客观性。实验数据自动存入数据库，支持后续追溯分析。

（四）光纤激光焊接试样的组织分析

选用焊接质量好，抗拉强度接近母材的试样进行组

织形貌和显微硬度进行分析。从工艺优化焊缝的横截面和未工艺优化焊缝的可以看出，参数未优化前的焊接显微组织较粗大，焊缝较宽，而优化后显微组织细晶较多，焊缝较窄。先从靠近基体的部分凝固，然后再到中心区。高倍金相显微镜下观察焊缝横截面的显微组织，焊缝组织由边缘细小的柱状晶和中心部位的等轴晶组成。焊接热影响区非常窄，这种组织特征的形成是由连续光纤激光焊接的特点和工艺参数决定的。光纤激光焊接的光斑直径小，焊接能量非常集中，焊接速度快，焊接时只在焊缝局部区域加热，母材受到的热作用较小，基本没有升温，因此热影响区非常小。受到母材的冷却作用，在焊缝的边缘温度梯度很大，易于生成柱状晶。而在焊缝中心，金属液态存在时间长，热量分布相对均匀，温度梯度较小，易于生成等轴晶。

四、基于改进神经网络的激光焊接偏差识别智能化发展趋势

(一) 多模态融合与边缘计算技术的深度整合

未来激光焊接偏差识别系统将向更深层次的多模态感知方向发展，突破现有视觉主导的单一模式局限。新一代系统将整合等离子体光谱、超声波检测、激光测振等新型传感手段，构建更高维度的焊接过程特征空间。边缘计算技术的进步将推动识别算法下沉至设备端，实现“传感-计算-决策”的闭环实时控制。特别值得关注的是，基于毫米波雷达的非接触式监测技术有望解决当前视觉系统在强反光工况下的应用瓶颈。量子传感技术的引入可能带来检测精度的数量级提升，实现对焊接热影响区微观组织的无损监测。分布式计算架构的发展将使多设备协同分析成为可能，通过产线级的数据共享建立更全面的质量预测模型。这些技术进步将共同推动焊接偏差识别从单点检测向全过程质量追溯转变，实现真正意义上的智能制造闭环。

(二) 自适应学习与数字孪生技术的协同演进

下一代识别系统将具备持续自我优化的能力，通过在线学习机制不断适应新材料和新工艺的需求。深度强化学习技术的引入将使系统能够自主探索最优检测策略，在少量样本条件下快速适应新的焊接场景。数字孪生技术将提供虚拟试验环境，通过高保真仿真生成海量训练数据，大幅降低实际试错成本。特别具有前景的是元学习框架的应用，使系统能够从历史任务中提取可迁移的检测知识，显著提升在小样本工况下的泛化能力^[7]。知识图谱技术的融合将增强系统的可解释性，建立焊接参数、工艺特征与质量缺陷之间的显式关联规则。

(三) 云-边-端协同的智能化服务生态构建

未来的发展趋势将突破单机智能的局限，向云-边-端协同的分布式服务模式转变。云端平台将汇聚行业级焊接质量数据，训练具有广泛适应性的基础模型；边缘节点负责区域性工艺知识的精调，适应本地化生产需求；设备端轻量化模型则保障实时响应能力。区块链技术的应用将建立可信的质量数据共享机制，促进产业链上下游的知识流动。开放式API接口的设计将支持第三方开发者扩展应用功能，形成丰富的智能焊接应用生态。特别具有突破性的是联邦学习技术的应用，在保护企业数据隐私的前提下实现群体智能的提升。5G/6G通信技术的普及将实现跨地域的专家系统远程协作，使偏远地区的焊接作业也能获得顶级技术支持。

结束语

激光焊接过程中，激光束与焊缝之间的偏差会对熔池红外辐射特征造成影响导致其产生变化，因此，采用高速摄像机获取熔池动态热像，并针对熔池红外热像展开分析，获取激光焊接过程中匙孔特征信息。采用多种图像预处理方法对图像进行预处理后，通过对匙孔形态实行特征分析，完成特征参数提取以及完成匙孔质心的获取，通过构建改进神经网络，完成激光焊接偏差识别。

参考文献

- [1] 孙绍野, 李闯, 赵新桐. 基于激光视觉的薄板拼焊焊接偏差检测技术研究[J]. 机械工程与自动化, 2025, 54(01): 167-169.
- [2] 江浩, 齐慧芳. 弱偏差特征过滤的建筑物焊接连接构造点激光雷达特征提取[J]. 粘接, 2023, 50(08): 134-137.
- [3] 韩冰. 基于改进卷积神经网络的3D打印机激光点温度检测方法[J]. 工业计量, 2023, 33(02): 96-99+112.
- [4] 赵仕方. 铌钛合金/镍合金激光焊接焊缝组织性能调控与工艺优化[D]. 中南大学, 2022.
- [5] 杨琦. 激光焊机控制系统的设计与实现[D]. 苏州大学, 2022.
- [6] 范魁. 基于深度学习的激光焊接缺陷检测方法研究[D]. 合肥工业大学, 2022.
- [7] 成慧翔, 马艳娥, 李新卫. 基于改进神经网络的激光焊接偏差智能识别研究[J]. 激光杂志, 2021, 42(12): 165-169.