

基于在线激光扫描的保温杯焊缝质量实时检测与焊接过程闭环控制

余丁超

浙江精匠智能科技有限公司 321200

【摘要】在保温杯的焊接生产过程中，普遍存在质量波动大、人工检测效率低等突出问题。针对这些问题，本文提出了一种基于在线激光扫描的焊缝质量实时检测方法，并构建了焊接过程闭环控制系统。该系统借助高精度激光扫描仪实时获取焊缝的形貌特征，结合先进的机器学习算法实现缺陷分类与参数优化，最终形成“检测 - 分析 - 反馈”的动态调控机制。实验结果表明，该系统能够将焊缝合格率提升至 99.2%，检测响应时间缩短至 0.8 秒，为不锈钢制品的智能制造提供了创新解决方案。

【关键词】在线激光扫描；焊缝质量检测；实时检测；闭环控制；保温杯焊接

Real-time detection of thermal cup weld quality and closed-loop control of welding process based on online laser scanning

Yu Dingchao

Zhejiang Jingjiang Intelligent Technology Co., LTD. 321200

【Abstract】In the welding production process of thermal cups, there are widespread issues such as significant quality fluctuations and low efficiency in manual inspection. To address these problems, this paper proposes a real-time weld quality inspection method based on online laser scanning and constructs a closed-loop control system for the welding process. The system uses high-precision laser scanners to obtain the morphological characteristics of the weld in real time, combined with advanced machine learning algorithms to achieve defect classification and parameter optimization, ultimately forming a dynamic control mechanism of "inspection-analysis-feedback." Experimental results show that the system can increase the weld pass rate to 99.2% and reduce the inspection response time to 0.8 seconds, providing an innovative solution for the intelligent manufacturing of stainless steel products.

【Key words】online laser scanning; weld quality inspection; real-time detection; closed-loop control; thermos welding

1. 引言

1.1 研究背景

保温杯作为日常生活中常见的不锈钢制品，其真空焊接质量对产品的密封性与使用寿命有着直接影响。在传统的生产模式中，主要依赖人工目检来检测焊缝质量。然而，人工目检存在诸多弊端，主观性强是其显著特点，不同检测人员的经验和判断标准存在差异，导致检测结果缺乏一致性。同时，人工目检的漏检率较高，行业平均缺陷检出率仅在 85% - 90%之间，难以满足高质量生产的需求。

此外，离线检测设备虽然能够对焊缝质量进行较为准确的检测，但存在检测周期长、无法实时反馈等缺点，难以满足高速产线的生产节奏。随着激光传感技术的不断发展，基于三维形貌的在线检测技术逐渐成为解决保温杯焊接质量检测难题的突破方向。该技术能够实时获取焊缝的三维形貌信息，为后续的质量分析和控制提供有力支持。

1.2 技术挑战

在实现基于在线激光扫描的保温杯焊缝质量实时检测与焊接过程闭环控制过程中，面临着诸多技术挑战。首先，焊接过程中产生的热变形会导致扫描数据失真。焊接过程中，焊缝区域会因受热而发生形变，使激光扫描仪获取的点

云数据与实际焊缝形貌存在偏差，影响检测结果的准确性。

其次，需要实现对 0.1mm 级微小缺陷的实时识别。保温杯焊缝中的微小缺陷可能会对产品的密封性和使用寿命产生严重影响，但由于其尺寸极小，在扫描数据中难以准确捕捉和识别，这对检测算法的精度和实时性提出了极高要求。

最后，要实现多工艺参数（电流、速度、压力）的协同调控。焊接质量不仅取决于焊缝的形貌特征，还与焊接过程中的多个工艺参数密切相关。如何根据实时检测结果，对多工艺参数进行协同优化，以实现焊接质量的稳定提升，是该系统需要解决的关键问题之一。

2. 系统总体设计

2.1 硬件架构

本系统的硬件架构设计精妙，由四大核心模块紧密协作，共同构建起一套高效、精准的焊缝质量实时检测与焊接过程闭环控制系统。

数据采集层：作为系统的信息获取源头，数据采集层集成了蓝光激光扫描仪与高速工业相机两大关键设备。蓝光激光扫描仪以其卓越的 $\pm 3 \mu\text{m}$ 精度和高分辨率特性，成为捕

捉焊缝三维形貌信息的利器。它通过发射蓝光激光束,在焊缝表面进行逐点扫描,获取焊缝表面的高度、宽度及形状等详细数据,为后续的分析提供坚实基础。与此同时,高速工业相机以 500fps 的帧率,持续捕捉焊接过程中的动态图像。这些图像不仅记录了焊接过程的每一个细节,还为系统提供了辅助信息,帮助系统更全面地理解焊接状态,提升检测的准确性。

边缘计算层:面对数据采集层产生的大量原始数据,边缘计算层搭载了 GPU 加速的嵌入式工控机,承担起数据实时预处理的重任。这一层通过高效的滤波算法去除数据中的噪声干扰,利用降噪技术提升数据质量,再通过特征提取算法,从海量数据中提炼出关键信息。这一系列操作不仅减轻了网络传输负担,更大幅缩短了数据处理时间,确保了系统的实时响应能力。

决策控制层:作为系统的“大脑”,决策控制层基于 OPC UA 协议,与 PLC、焊接机器人等设备建立了紧密的实时通信。OPC UA 协议以其跨平台、高安全性、可扩展性强的特点,确保了不同设备间数据的无缝传输与交互。决策控制层通过实时获取焊接设备的运行状态和参数信息,结合数据采集层与边缘计算层处理后的数据,运用先进的算法模型进行决策分析。一旦发现焊缝质量异常,系统将立即启动参数优化算法,自动调整焊接参数,并将优化后的参数指令下发至焊接机器人,实现焊接过程的闭环控制。

人机交互层:为了提升系统的操作便捷性和用户体验,人机交互层提供了直观的可视化监控界面。操作人员可以通过该界面实时查看焊接过程的各项参数、焊缝质量检测结果以及系统运行状态。界面设计简洁明了,支持参数配置、报警追溯等功能。当系统检测到焊缝质量异常时,将立即触发报警机制,并通过界面提示操作人员。同时,系统还会自动记录异常事件的相关数据,为后续的问题追溯和质量分析提供有力支持。

2.2 工作流程

系统的工作流程紧密衔接,形成了一个高效运转的闭环体系,具体包括激光扫描、点云重构、特征提取、质量判定、参数优化和执行反馈六个关键环节。

激光扫描阶段:蓝光激光扫描仪对焊缝进行高精度扫描,获取焊缝表面的点云数据。扫描过程中,系统会根据预设的扫描路径和参数,精确控制扫描仪的运动轨迹和扫描速度,确保扫描数据的完整性和准确性。

点云重构环节:利用先进的算法模型,将扫描得到的点云数据进行处理,还原焊缝的三维形貌。这一过程涉及复杂的数学计算和模型拟合,要求算法具备高效性和准确性。通过点云重构,系统能够获得焊缝表面的详细几何信息,为后续的特征提取和分析提供基础。

特征提取阶段:从重构后的三维形貌中提取关键特征,如焊缝宽度、高度、表面粗糙度等。这些特征是判断焊缝质量的重要依据。特征提取算法需要具备高度的敏感性和准确性,能够准确捕捉焊缝表面的细微变化。通过不断优化算法模型,提高特征提取的效率和准确性,为后续的质量判定提供有力支持。

质量判定环节:根据提取的特征,结合预设的质量标准,系统对焊缝质量进行判定。判定过程中,系统会综合考虑多个特征指标,通过科学的评估模型,准确判断焊缝是否合格。若焊缝不合格,系统将立即触发后续处理流程。

参数优化阶段:针对不合格焊缝,系统通过先进的优化算法,自动调整焊接工艺参数,如焊接电流、焊接速度等。这一过程要求算法具备快速响应和精准调整的能力,以确保焊接参数能够迅速适应焊缝质量的变化,实现焊接过程的动态优化。

执行反馈阶段:将优化后的参数反馈给焊接机器人,执行新的焊接操作。焊接机器人根据新参数进行焊接,形成闭环控制。同时,系统持续监控焊接过程,确保焊接质量符合标准。若检测到新的质量问题,系统将重新进入扫描、分析、优化的循环,直至达到质量标准。

3. 核心技术创新

3.1 动态补偿算法

在焊接这一复杂且精密的工艺过程中,热影响区的存在是一个不可忽视的关键问题。热影响区是焊接时焊缝两侧因热循环作用而发生组织和性能变化的区域,它的出现会导致扫描数据产生严重的失真现象。这种失真直接影响到后续对焊接质量的检测准确性,使得检测结果无法真实反映焊缝的实际状况,进而可能引发一系列质量问题,如焊缝强度不足、密封性差等。

为了有效解决这一问题,我们投入了大量的研发精力,成功开发了温度 - 形变耦合模型。该模型的核心在于充分利用红外测温数据,对点云坐标进行实时修正。在实际焊接过程中,温度是一个动态变化的参数,不同的温度会导致焊缝产生不同程度的形变。我们的温度 - 形变耦合模型能够敏锐地捕捉到焊接过程中的温度变化,并依据这些变化精准地预测焊缝的形变情况。一旦预测出形变,模型便会立即对点云数据进行动态修正。这种动态修正的精度极高,达到了 0.02mm,能够最大程度地还原焊缝的真实形状,从而有效提高了检测的准确性,为焊接质量的保障提供了坚实的技术支持。

3.2 缺陷智能诊断

在焊接质量检测中,缺陷诊断的效率和准确性至关重要。为了提高这两个关键指标,我们精心构建了级联分类器架构。该架构分为两个主要阶段,即初级筛选阶段和深度判定阶段。

在初级筛选阶段,我们主要基于几何特征来快速定位异常区域。几何特征是焊缝表面直观可见的特征,如形状、大小、轮廓等。通过对这些几何特征的分析,系统能够迅速识别出可能存在缺陷的区域,从而大大缩小后续分析的范围。这种快速定位的方式不仅提高了诊断效率,还减少了不必要的计算量。

进入深度判定阶段,我们采用了轻量化卷积网络 (MobileNetV3) 来识别气孔、未熔合等六类常见的焊接缺陷。MobileNetV3 具有轻量化的设计特点,能够在保证较高

准确率的同时,降低对计算资源的需求。在我们的实际应用中,该网络对这六类缺陷的识别准确率高达 98.7%,表现出了卓越的性能。而且,由于其轻量化的优势,非常适合在嵌入式工控机上运行,为现场的实时缺陷诊断提供了便利,使得焊接缺陷能够被及时发现和处理,有效提高了焊接产品的质量。

3.3 多目标参数优化

在焊接生产中,实现质量提升与能耗降低的双重目标是一个具有挑战性的任务。为了达成这一目标,我们建立了焊接质量-能耗多目标函数。该函数综合考虑了焊缝质量、焊接能耗等多个重要因素,通过建立它们之间的数学关系,为优化工艺参数提供了理论基础。

为了解这个多目标函数的最优工艺参数组合,我们采用了 NSGA-II 算法。NSGA-II 算法是一种经典的多目标优化算法,它能够在多个目标之间进行巧妙的权衡。在焊接工艺参数优化的过程中,焊缝质量和焊接能耗往往是相互制约的。提高焊缝质量可能需要增加焊接能量输入,但这又会导致能耗的上升;而降低能耗可能会影响焊缝的质量。NSGA-II 算法通过其独特的非支配排序和拥挤度计算机制,能够在众多的工艺参数组合中找到一组最优解,使得焊接质量和生产效率得到同步提高,为焊接生产的优化提供了有效的技术手段。

4. 实验验证与分析

4.1 测试环境

为验证系统的有效性和可靠性,我们在某不锈钢制品企业产线部署了系统,并针对 304 不锈钢保温杯(直径 60-90mm)的环缝焊接场景进行了测试。测试过程中,我们采集了 5000 组焊接数据,确保了测试结果的全面性和准确性。

4.2 性能指标对比

检测指标	传统方法	本系统
缺陷检出率	87.4%	99.1%
平均响应时间	3.2s	0.75s
误报率	5.8%	1.2%

通过对比传统方法与本系统的性能指标,我们发现本系统在缺陷检出率、平均响应时间和误报率等方面均表现出色。具体数据对比显示,本系统缺陷检出率高达 99.1%,远高于传统方法的 87.4%;平均响应时间缩短至 0.75 秒,而传

统方法需 3.2 秒;误报率降低至 1.2%,远低于传统方法的 5.8%。这些数据充分证明了本系统的优越性和有效性。

4.3 质量提升效益

实施闭环控制后,产品返修率从 6.3%显著降低至 0.9%,单线年节约成本约 127 万元。这一成果不仅提高了产品质量,还为企业带来了显著的经济效益。

5. 工程应用案例

以某型号保温杯底座焊接为例,在实际焊接过程中,系统发挥了强大的缺陷检测与工艺参数优化能力。它成功检测到底座焊缝处存在一处 0.15mm 的断续未熔合缺陷。这种缺陷若不及时处理,会严重影响保温杯底座的强度和密封性。系统迅速做出响应,基于其内置的智能算法,自动将焊接电流从原本的 85A 调整至 92A,同时将焊接速度由 12mm/s 降低至 10mm/s。通过这样的参数调整,能够增加焊接时的热输入,使焊缝金属更好地熔合。修正工艺参数后完成的焊缝,经过 X 射线探伤检测确认,各项指标均达到标准要求。这一实际应用案例充分验证了系统在焊接过程中缺陷检测与工艺参数自动优化的实际应用效果,能够有效提升焊接质量和产品可靠性。

6. 结论与展望

本研究通过在线激光扫描与智能控制技术融合,有效解决了保温杯焊接质量管控难题。未来研究方向包括:

1.多传感器数据融合增强系统鲁棒性:结合视觉、红外、力觉等多传感器数据,提高系统在不同工况下的适应性和稳定性。

2.迁移学习技术拓展至异形件焊接:利用迁移学习技术,将现有模型应用于不同形状、材质的焊接件检测,扩大系统的应用范围。

3.结合数字孪生实现全生命周期质量追溯:构建数字孪生模型,记录焊接过程数据,实现从原材料到成品的全程质量追溯,为产品质量管理提供更全面的支持。

通过不断的研究和实践,基于在线激光扫描的保温杯焊缝质量实时检测与焊接过程闭环控制系统有望在智能制造领域发挥更大的作用,推动不锈钢制品行业向更高质量、更高效率的方向发展。

参考文献

- [1]刘桂雄,廖普,杨宁祥.基于深度学习主动视觉压力容器焊缝质量参数检测方法[J].仪器仪表学报,2023,44(5):1-9. DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2311266.
- [2]廖普.基于机器视觉压力容器焊缝表面质量参数检测关键技术研究[D].广东:华南理工大学,2023.
- [3]翁文武.基于激光扫描和工业机器人的不锈钢保温杯自动焊接[J].轻工机械,2018,36(5):73-76,81. DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.05.014.
- [4]朱圆圆,易挺.不锈钢保温杯激光焊接工艺研究[J].焊接技术,2017,46(8):47-49.