

钢敷地面焊缝自动检测装置的研究

黄 珊^{1*}, 黄仁杰¹, 温培忠¹, 刘建喜²

(1. 中核建中核燃料元件有限公司, 四川 宜宾 644000; 2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘要: 本文研究了一种基于涡流检测技术的钢敷地面焊缝自动检测装置, 详细阐述了涡流检测原理, 并从硬件、软件方面对装置进行了设计。通过试验验证, 该装置对钢敷地面焊缝表面及表面下 3 mm 以内区域的焊缝缺陷具有较高检出率, 缺陷检测识别率可达 99.7%, 误报率仅 1.7%, 实现了对大面积钢敷地面焊缝的全覆盖、高效、精确识别和可追溯检测。

关键词: 钢敷地面; 焊缝缺陷; 涡流检测

中图分类号: TG441.7

文献标志码: B

文章编号: 1006-3757(2026)03-0232-09

DOI: 10.16495/j.1006-3757.2026.03.007

CSTR: 32263.14.j.1006-3757.2026.03.007

Research on an Automatic Weld Inspection Device for Steel-Clad Flooring

HUANG Shan^{1*}, HUANG Renjie¹, WEN Peizhong¹, LIU Jianxi²

(1. CNNC Jianzhong Nuclear Fuel Co., Ltd., Yibin 644000, Sichun China; 2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: An automatic weld inspection device for steel-clad flooring based on eddy current detection technology was studied. The operational principles of the eddy current detection was elaborated in detail, and the design of the automated inspection system was addressed from the perspectives of hardware and software. Experimental validation demonstrated that the device achieved a high detection rate for weld defects located on the surface and within a 3 mm subsurface region. The defect detection and recognition rate reached 99.7%, with a false positive rate of merely 1.7%. It realizes comprehensive, efficient, accurate identification and traceable detection of large areas of welds in steel-clad flooring.

Key words: steel-clad flooring; weld defect; eddy current detection

钢敷地面是由钢板与混凝土复合形成的地面结构, 因其高强度、耐磨性和良好的承载能力, 在工业场所和交通设施等领域得到了广泛应用。此类结构通过焊接工艺将钢板拼接成大面积连续承载面, 焊缝作为关键连接部位, 其质量直接决定了整个结构的安全性和耐久性^[1]。由于焊接工艺受参数波动、环境因素及材料特性等影响, 焊缝区域极易产生裂纹、气孔、未熔合等缺陷。这些缺陷不仅削弱接头的力学性能, 更可能在循环载荷或腐蚀环境下扩展, 导致灾难性失效。因此, 焊缝缺陷的高效、准确检测是保障钢敷地面焊接结构可靠性的核心环节。

长期以来, 焊缝缺陷检测主要依赖目视检测、磁粉检测和超声检测等手段。虽然这些方法在工程中已得到广泛应用, 但在大面积钢敷地面、高密度焊缝和复杂工况条件下, 其局限性逐渐显现。如目视检测和机器视觉更适用于外观筛查^[2-3]。其中, 目视检测仅适合作为初步筛查手段; 机器视觉适用于焊缝外观质量评价, 但难以承担缺陷检测主体任务。磁粉检测和超声检测虽然分别对表面裂纹和内部缺陷具有一定优势^[4], 但磁粉检测适用于局部精细复检, 超声检测更适用于深层内部缺陷分析^[5-6], 在钢敷地面大面积连续检测中的效率和适应性均不足。

收稿日期: 2026-02-08; 修订日期: 2026-04-15

作者简介: 黄珊(1992—), 女, 工程师, 研究方向为设备维护, E-mail: 915605331@qq.com

*通信作者: Corresponding author, E-mail: 915605331@qq.com

相比之下(如表 1 所列), 涡流检测技术在钢敷地面焊缝检测中更具有优势. 涡流检测对表面及近表面缺陷高度敏感^[7], 能够有效识别裂纹、气孔和未熔合等关键缺陷类型. 同时, 该技术无需耦合剂, 可实现非接触式检测, 适用于已涂装或环境复杂的工况^[8].

表 1 检测方法对比表
Table 1 Comparison of detection methods

检测方法	主要检测对象	优点	主要局限性	钢敷地面焊缝适用性
目视检测	表面可见缺陷	操作简单、成本低、无需专用设备	依赖人工经验; 无法识别微小裂纹、气孔及近表面缺陷; 一致性和可追溯性差	低
机器视觉	表面缺陷	非接触、速度快、适合外观自动检测	仅能检测表面缺陷, 泛化能力受限, 对环境条件敏感, 易误报	中偏低
磁粉检测	表面及近表面缺陷	对表面裂纹灵敏度较高	需清理、磁化、撒粉、退磁; 流程复杂、效率低; 不适用于已涂装、腐蚀或污染焊缝	中
超声检测	表面及内部缺陷	可检测较深层缺陷, 内部缺陷识别能力较强	对表面和近表面缺陷有限; 依赖耦合剂; 受操作者经验影响大	中
涡流检测	表面及近表面缺陷	对表面与近表面缺陷灵敏度高; 无需耦合剂; 非接触式检测	缺陷成像与定位精度差, 难以自动化批量检测	高

结合钢敷地面焊缝检测面积大、焊缝数量多、缺陷以表面和近表面为主、需实现连续检测和数据可追溯的特点, 本文将重点研究基于涡流检测的焊缝自动检测装置, 通过集成智能行走机构、室内定位与循迹系统以及核函数特征识别算法, 实现对大面积钢敷地面焊缝的全覆盖、高效与可追溯检测, 为焊缝检测提供一种更加高效和可靠的技术路径.

1 涡流检测原理

涡流检测机理基于电磁感应定律与导体中交变电流的分布规律^[9-12], 核心过程可概括为磁场激励—涡流形成—信号调制三个连续物理阶段.

当涡流探头的激励线圈通入交变电流时, 在其周围空间中产生交变磁场. 该磁场穿过钢敷面板焊缝区域, 并在导电金属内部根据法拉第电磁感应定律激发感应电动势:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \tag{1}$$

式中: ε 为感应电动势, V; N 为线圈匝数; $d\Phi/dt$ 为磁通量 Φ 随时间 t 的变化率, Wb/s.

由此在工件表层及其附近区域形成闭合电流回路, 即涡流, 涡流电流密度:

$$J = \sigma E \tag{2}$$

式中: J 为涡流电流密度; σ 为材料导电率, 即电阻

率的倒数; E 为感应电场强度.

当交变磁场作用于焊缝区域时, 在导体内部形成的涡流遵循电磁扩散规律, 其分布随深度呈指数衰减, 并在缺陷区域发生显著扰动. 同时涡流本身产生的二次磁场会与探头线圈原有的激励磁场叠加, 从而对线圈产生反作用(如图 1 所示). 这种反作用可等效为线圈阻抗的变化, 其物理本质是涡流对激励磁场的能量吸收与磁场畸变所引起的电磁耦合变化. 线圈的等效阻抗可用公式(3)表示:

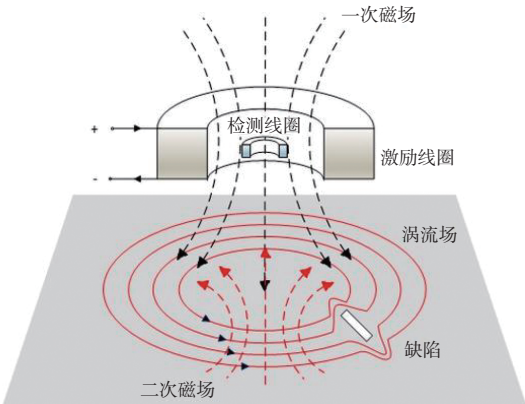


图 1 涡流检测原理图
Fig. 1 Principle diagram of eddy current detection

$$Z = R + j\omega L \tag{3}$$

式中: Z 为线圈阻抗, Ω ; R 为线圈电阻, Ω ; ωL 为线圈电抗, ω 为角频率, rad/s, L 为电感, H.

当焊缝内部存在裂纹、气孔等缺陷时,涡流通路被局部阻断或偏移,使得局部电流密度降低或重新分布,从而引起 R 和 L 的微小变化,如公式(4):

$$\Delta Z = \Delta R + j\omega \Delta L \quad (4)$$

从而通过测量线圈阻抗的变化,可以推断出导体表面或近表面的缺陷信息. 这种检测方式不仅适用于焊缝检测,还广泛应用于其他导电材料的无损检测领域.

2 焊缝自动检测装置设计

2.1 硬件设计

2.1.1 传感器选型

在焊缝自动检测装置中,涡流传感器的选择直接影响着检测精度和效率. 目前,焊缝涡流检测中常用的传感器主要包括单线圈涡流探头、差动式涡流探头、多通道阵列涡流探头以及专用焊缝涡流探头.

单线圈涡流探头结构简单,通常由单个激励-接收线圈构成,对材料导电率和表面缺陷均具有一定的响应能力,但其对焊缝余高、坡口几何及探头-工件间距变化极为敏感,容易将焊缝几何特征误判为缺陷信号,因此更适用于平整表面的点测场景.

差动式涡流探头通过两个相邻线圈的信号差分方式,有效抑制了均匀背景变化对检测信号的影响,对裂纹等局部缺陷具有更高灵敏度. 然而,该类型探头仍需严格沿焊缝中心线扫描,当焊缝存在摆动或路径偏差时,信号一致性明显下降,不利于自动化运行环境下的稳定检测.

多通道阵列涡流探头由多个微型涡流单元并行布置组成,可在一次扫描中覆盖较宽区域^[13],从而形成焊缝横向的空间响应分布. 这种结构不仅可以显著提高检测速度,还能有效降低由于轨迹偏移引起的漏检风险,在自动化检测系统中具有明显优势.

专用焊缝涡流探头是在阵列涡流技术的基础上,进一步针对焊缝的几何形态进行结构优化,其探头底部轮廓通常与焊缝余高和坡口形貌相匹配,并对线圈排布和磁场方向进行定向设计,从而在抑制焊缝几何噪声的同时增强对裂纹等真实缺陷的响应能力.

综合考虑,在钢敷地面焊缝检测中,选用基于多通道阵列技术的专用涡流探头作为核心传感器,该类型传感器不仅能够适应复杂焊缝形貌,还能够自动行走和连续扫描条件下保持稳定、可靠的缺陷响应,为后续信号处理与缺陷识别算法提供高质量数据基础.

2.1.2 电路设计

焊缝自动检测装置的电路设计是实现信号采集、处理与控制的核心环节,主要包括信号处理电路与控制电路两部分. 信号处理电路是焊缝自动检测装置的重要组成部分,其主要功能是将传感器采集的模拟信号转换为数字信号,并进行滤波、放大等预处理操作,以提高信号质量与可靠性. 控制电路则承担着整个检测装置的运行管理与协调功能,通常采用微处理器或现场可编程门阵列(FPGA)作为核心控制器,实现指令发送、反馈接收以及执行机构驱动等功能. 装置的控制拓扑图如图 2 所示.

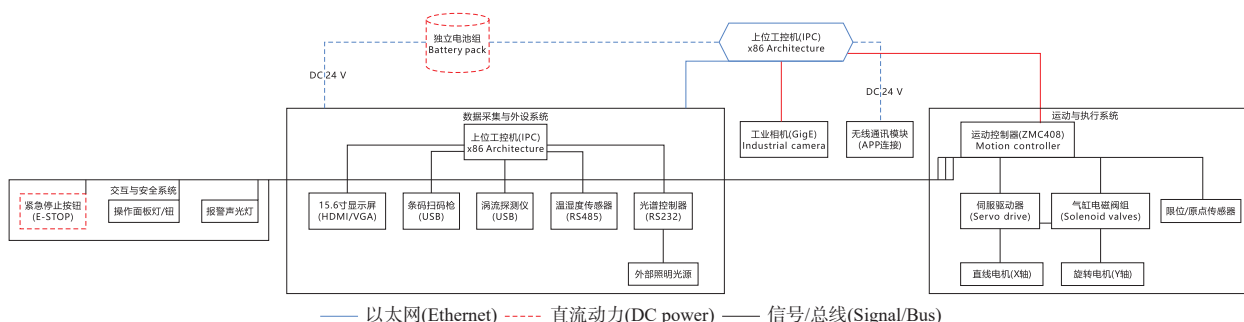


Fig. 2 Control topology diagram

2.1.3 装置结构设计

在实际应用中,焊缝自动检测装置需要对地面、墙面、槽内区域等大面积焊缝进行检测,这对检测

装置的兼容性提出了较高要求.

针对地面大面积焊缝检测的问题,检测装置以智能循迹小车为载体,如图 3(a)所示,通过橡胶驱

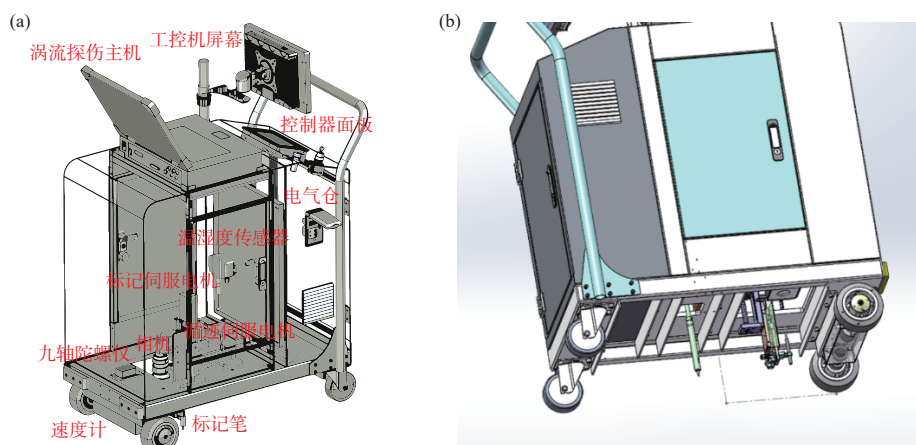


图3 焊缝自动检测车设计图

(a) 焊缝自动检测车结构, (b) 焊缝自动检测车底部示意图

Fig. 3 Design drawings of automatic weld inspection vehicle

(a) structure of automatic weld inspection vehicle, (b) bottom schematic diagram of automatic weld inspection vehicle

动轮与钢敷地面形成稳定接触, 前后双驱动轮结构能够保证装置在焊缝方向上的直线运动能力, 同时具备一定的越障能力以适应焊缝余高和局部不平整表面, 如图 3(b) 所示. 为保证装置能够沿焊缝准确行走, 在行走机构两侧设置导向轮组, 使装置在焊缝横向产生微小偏移时能够通过机械约束回到焊缝附近. 小车底部结构装置集成智能控制系统和室内定位系统, 采用视觉循迹定位, 可将检测探头准确定位并移动至待检测区域. 小车可根据提供的图纸形成内置地图, 结合预设好的检测路线, 引导检验人员前进^[14]. 针对墙面、槽内区域以及短焊缝等配套设计手持检测杆和墙面检测器, 以实现小车检测受限区域的焊缝检测.

此外, 检测装置配备人机交互触摸屏, 更方便进行结果展示和检测参数配置. 检测前, 可进行检测参数配置、检测轨迹设置. 检测中, 可实时显示焊缝探伤成像, 系统自动分析检测结果, 并对可疑区域提示人工补检. 当装置偏离轨道时, 会有信号灯闪烁提示将装置推回焊缝轨迹中. 检测后, 将会输出整体的检测结果和合格比例, 存档检测数据, 标记出所有已检测部分、未检测部分和焊缝质量异常部分.

2.2 软件设计

2.2.1 检测算法研究

在焊缝自动检测装置的软件设计中, 检测算法的选择直接决定着缺陷识别的准确性和效率. 基于特征提取的缺陷识别算法具备强大的数据处理能

力和环境适应性, 已成为焊缝自动检测的核心技术之一.

该算法整体采用分层、流水线式架构: 信号采集层 → 信号预处理层 → 背景抑制层 → 特征分析层 → 缺陷判定层 → 输出层.

首先采用多通道涡流探头同步采集幅值信号和相位信号, 保留尽可能完整的原始信息.

本质信号 $x(t)$ 如公式(5):

$$x(t) = \text{激励响应} + \text{结构变化} + \text{缺陷扰动} + \text{噪声} \quad (5)$$

涡流探头输出信号 $A(t)$ 可表示为复数形式(如图 4 所示).

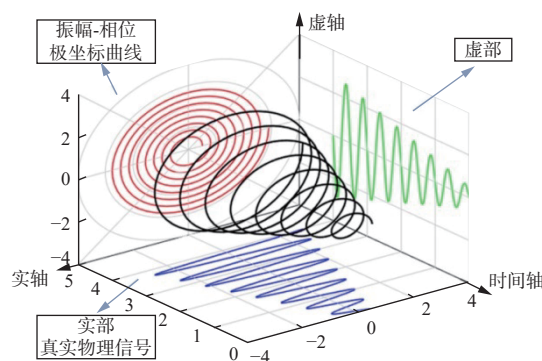


图4 小波变换原理图

Fig. 4 Principle diagram of wavelet transform

$$S(t) = A(t)e^{j\phi(t)} \quad (6)$$

式中: $A(t)$ 为幅值; $\phi(t)$ 为相位, j 为虚数单位

焊缝区域由于材料组织变化, 产生连续背景信号, 而缺陷则在该背景上叠加局部扰动. 对于阵列

探头, 阵列信号 S_i 如公式(7)所示:

$$S_i = B(x_i - x_w) + D(x_i - x_w) \quad (7)$$

式中: x_i 为第 i 个通道的横向位置; x_w 为焊缝中心位置; B 表示焊缝背景响应; D 表示缺陷或几何扰动。

其次对信号进行处理, 以提高信噪比, 进而保证信号稳定性, 压制噪声。将焊缝背景视为“缓慢变化信号”, 将缺陷视为“局部突变信号”, 通过算法分离二者。

再通过对涡流检测信号进行时域和频域分析, 定义缺陷的特征向量。提取与缺陷相关的特征参数, 如幅值、相位和频率成分等, 并利用机器学习模型对这些特征进行分类和识别。由于焊缝缺陷的涡流响应由深度、方向、焊缝几何与材料磁导率等多因素耦合, 其在特征空间中呈现高度非线性分布, 线性判别边界难以实现有效分离。因此引入核函数:

$$K(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2), \quad \gamma = \frac{1}{2\delta^2} \quad (8)$$

式中: x, y 为输入空间中的两个样本向量; δ 为带宽参数, 控制核函数的宽度。

将原始特征映射至高维特征空间, 使裂纹、气孔与焊缝几何扰动在核空间中呈线性可分, 从而显著提高缺陷识别的稳定性与准确性, 进一步进行模型的优化, 提高算法的鲁棒性。研究表明, 这种算法能够有效区分不同类型的焊缝缺陷, 并在复杂工况下保持较高的识别精度。此外, 结合数值模拟与试验验证的方法, 可以进一步优化算法的参数设置, 提升其在实际应用中的性能表现。

2.2.2 数据分析流程

焊缝自动检测装置的数据分析流程涵盖从数据采集、预处理到分析判断的完整环节, 各环节之间相互关联且缺一不可。

首先, 数据采集模块通过涡流传感器获取焊缝表面的电磁感应信号, 针对每个采样点从阵列、多频、时间序列进行数据采集, 并将其传输至信号处理电路进行初步放大和滤波。随后, 预处理阶段对采集到的信号进行去噪、归一化等操作, 以消除环境干扰和系统误差的影响, 此阶段建立高效的数据管理系统, 确保检测数据的完整性与可追溯性。在此基础上, 数据分析模块利用检测算法对预处理后的信号进行特征提取和缺陷识别, 最终生成检测结果, 整个流程通过软件实现自动化控制, 不仅提高了检测效率, 还确保了结果的一致性和可靠性。

3 焊缝自动检测装置性能验证

为验证焊缝自动检测装置的性能, 本研究设计了一系列试验, 并通过采集和分析试验数据得出结论。

3.1 样本选取

试验对象主要选取厚度为 3 mm 的钢敷地面焊缝, 既包含实际工业场景中的典型焊缝, 又包含人工缺陷焊缝试件, 以保证试验结果具有代表性和可重复性。

选取实际工业场景常见直线焊缝、异型焊缝和墙面焊缝三类典型焊缝, 每类均包括合格焊缝与缺陷焊缝两种状态, 各 5 条, 共计 30 条焊缝, 如表 2 所列。其中, 直线焊缝长度约为 2~3 m, 用于验证系统在标准工况下的循迹稳定性; 异型焊缝包含弯折、圆弧及转角等形式, 用于考察系统对复杂轨迹的适应能力; 墙面焊缝布置于地面与立面交界区域, 用于验证探头及行走机构在边界区域的循迹能力。

表 2 工业场景焊缝
Table 2 Weld seams in industrial scenarios

焊缝类型	合格焊缝数量	缺陷焊缝数量	总数
直线焊缝	5	5	10
异型焊缝	5	5	10
墙面焊缝	5	5	10
合计	15	15	30

人工缺陷焊缝为焊接过程中人为制造, 缺陷均位于焊缝表面或近表面区域, 与钢敷地面焊缝的典型缺陷特征保持一致, 以模拟实际场景常见的焊缝缺陷。为保证缺陷尺寸一致性, 采用控制焊接电流、焊接速度等方法形成不同类型缺陷。为保证统计结果的可靠性, 每类缺陷均设置不同尺寸等级, 并在不同焊缝位置重复布置。具体缺陷制备方式和尺寸如表 3 所列。

所有人工缺陷均布置于焊缝中部区域, 距离焊缝起点和终点至少 300 mm, 以避免小车启动和减速阶段对检测结果的影响。每条缺陷焊缝仅设置 1~2 种缺陷, 缺陷间距大于 200 mm, 避免多个缺陷信号相互叠加。为减小试件差异对试验结果的影响, 在试验前对所有焊缝进行编号、尺寸测量及人工复核。采用游标卡尺、焊缝规和磁粉检测对缺陷尺寸

表 3 人工缺陷焊缝
Table 3 Artificial defect welds

缺陷类型	制备方法	尺寸等级	试件编号
气孔	在焊接时短时间关闭保护气体	孔径1.0、1.5、2.0 mm, 深度1.00 mm	S1
		孔径1.0、1.5、2.0 mm, 深度2.00 mm	S2
		孔径1.0、1.5、2.0 mm, 深度3.00 mm	S3
裂纹	焊后局部机械刻划, 并进行轻微热冲击	10.0 mm×2.0 mm, 深度1 mm	S4
		10.0 mm×2.0 mm, 深度2 mm	S5
		10.0 mm×2.0 mm, 深度3 mm	S6
未熔合	降低焊接电流并提高焊接速度, 使局部熔池不足	20.0 mm×2.0 mm、20.0 mm×3.0 mm、 20.0 mm×4.0 mm, 深度2 mm	S7

及位置进行确认, 并建立试件台账. 对于尺寸偏差超过设计范围的试件予以剔除.

此外, 在正式检测前, 使用同一套标准试件对涡流探头进行标定, 以确保不同批次试件之间的检测结果具有可比性.

3.2 检测参数设定

为保证焊缝自动检测装置在钢敷地面焊缝检测中的准确性与稳定性, 需要对涡流检测系统的关键参数进行选择.

3.2.1 激励频率优选试验

设定检测速度为 200 mm/s, 提离距离为 1.0 mm. 考虑钢敷地面焊缝缺陷主要分布于表面及近表面区域, 因此选取 20、40、60、80、100 kHz 5 组激励频率对 S5 试件进行 60 次试验, 记录缺陷信号幅值、信噪比及检测识别率, 试验数据如表 4 所列.

表 4 激励频率试验数据
Table 4 Excitation frequency test data

激励频率/kHz	缺陷信号 幅值/V	信噪比/dB	识别率/%	误报率/%
20	0.31	11.8	85.0	8.3
40	0.46	15.7	91.7	6.7
60	0.58	19.4	96.7	3.3
80	0.61	18.9	95.0	5.0
100	0.49	15.2	90.0	8.3

结果表明, 随着激励频率的升高, 缺陷信号幅值与信噪比先增大后减小. 当频率低于 40 kHz 时, 探头对浅表面裂纹缺陷的响应不足; 当频率超过 80 kHz 后, 信号虽然仍较明显, 但更容易受到焊缝表面粗糙度及焊渣残留的影响, 误报率上升.

3.2.2 检测速度优选试验

检测速度会影响探头在焊缝上的采样密度和信号稳定性. 速度过低将降低检测效率, 速度过高则会导致信号失真和漏检. 因此, 分别选取 50、100、150、200 和 250 mm/s 对 S5 试件进行 60 次试验. 设定提离距离为 1.0 mm, 激励频率为 60 kHz, 试验数据如表 5 所列.

表 5 检测速度试验数据
Table 5 Detection speed test data

检测速度/ (mm/s)	识别率/%	漏检率/%	单条2 m焊缝 检测时间/s
50	98.3	1.7	40
100	96.7	3.3	20
150	95.0	5.0	13
200	91.7	8.3	10
250	85.0	15.0	8

结果表明, 当检测速度低于 100 mm/s 时, 系统虽然能够获得较高的检测识别率, 但检测效率偏低; 当速度高于 200 mm/s 时, 由于采样点间距增大, 探头无法完整捕获局部缺陷信号, 导致漏检率明显上升.

3.2.3 提离距离优选试验

探头与焊缝表面的间隙会直接影响涡流耦合效果. 为验证其影响, 分别测试 0.5、1.0、1.5、2.0 mm 离面高度下的检测效果. 设定激励频率为 60 kHz, 检测速度为 150 mm/s 对 S5 试件进行 60 次试验, 试验数据如表 6 所列.

结果表明, 当提离距离超过 1.5 mm 后, 涡流耦合显著减弱, 缺陷信号幅值快速下降, 导致检测准

表 6 提离距离试验数据

Table 6 Pull-off distance test data

离面高度/mm	信噪比/dB	识别率/%
0.5	21.2	98.3
1.0	20.1	96.7
1.5	15.9	90.0
2.0	11.3	83.3

确率降低.

3.2.4 最佳参数试验

为确定焊缝自动检测装置的最佳参数组合,以缺陷检出信噪比为评价指标,采用正交试验法对激励频率、检测速度及提离距离三因素进行 $L_4(2^3)$ 正交试验,正交试验因素水平如表 7 所列.

表 7 正交试验因素水平表

Table 7 Orthogonal test factors and levels table

水平	因素A	因素B	因素C
	激励频率/kHz	检测速度/(mm/s)	提离距离/mm
1	60	100	0.5
2	80	150	1.0

试验方案及结果如表 8 所列. 试验数据表明各因素主次顺序: A(激励频率)>C(提离距离)>B(检测速度),各因素最优水平组合为 $A_1B_2C_2$,即激励频率为 60 kHz,检测速度为 150 mm/s,提离距离为 1.0 mm.

采用最优水平组合对所有人工缺陷试件 S1~S7 进行检测,均能有效检出.

表 8 正交试验结果

Table 8 Orthogonal test results

试验号	A	B	C	信噪比/dB
1	1	1	1	17.5
2	1	2	2	20.1
3	2	1	2	16.4
4	2	2	1	15.1
K_1	37.6	33.9	32.6	
K_2	31.5	35.2	36.5	
k_1	18.80	16.95	16.30	
K_2	15.75	17.60	18.25	
R	3.05	0.65	1.95	

检测结果表明,激励频率为 60 kHz,检测速度为 150 mm/s,提离距离为 1.0 mm 时,焊缝自动检测装置对钢敷地面焊缝表面及表面下 3 mm 以内区域的焊缝缺陷均能有效检出.

3.3 性能验证

为验证焊缝自动检测装置在实际工况下的应用能力,选取实际工业场景中的 30 条焊缝,对焊缝检测、焊缝循迹、缺陷标记、室内定位、检测车、手持检测杆以及墙面检测器等功能进行了调试与测试. 测试内容涵盖缺陷识别率、误报率、循迹精度、定位偏差、续航能力以及模式切换效率等关键指标. 测试结果如表 9 所示.

试验结果表明,装置在焊缝检测性能方面具有较高的可靠性. 现场检测中缺陷识别率达到 99.7%,误报率为 1.7%,均优于设计目标. 特别是在缺陷深度接近 3 mm 的极限条件下,系统仍能保持较高的

表 9 焊缝自动检测装置性能验证

Table 9 Performance verification of automatic weld inspection device

序号	功能模块	关键指标	测试结果	是否满足要求
1	焊缝检测	缺陷识别率 $\geq 99\%$, 误报率 $\leq 5\%$, 检测深度 ≤ 3 mm	对30条焊缝进行350次检测,漏检1次,误报6次,满足识别率99.7%,误报率1.7%	满足
2	焊缝循迹	探头能够准确定位并沿焊缝移动	对10条直线焊缝共进行30次循迹,探头均能稳定沿焊缝运行,无明显偏移	满足
3	缺陷标记	标记误差 ≤ 10 cm	实际标记偏差约4 cm,标记清晰、可擦除	满足
4	室内定位	定位误差满足现场要求	定位误差约1 m,可实时更新位置	满足
5	检测车	最大速度 ≥ 30 m/min; 续航 ≥ 8 h; 充电时间 < 3 h	最大检测速度32 m/min; 续航约8.8 h; 充电约2 h	满足
6	手持检测杆	异型焊缝与短焊缝检测有效	共200次检测,无漏检、无误报	满足
7	墙面检测器	检测高度0.3~5 m; 支持自动标记与模式切换	实际检测范围0.15~6.85 m; 切换时间约2 min	满足

检测能力,说明所设计的阵列涡流探头与缺陷识别算法具有较好的灵敏度和稳定性。

在循迹性能方面,探头能够在直线焊缝、异型焊缝以及墙面焊缝上稳定运行,未出现明显偏离。对于复杂轨迹焊缝,系统能够通过实时位置反馈自动调整探头运动路径,从而保证检测区域始终覆盖焊缝中心。

此外,缺陷标记功能的平均偏差约为4 cm,小于10 cm的设计要求;室内定位误差约为1 m,可满足现场缺陷回溯与路径记录需求;检测车续航时间约8.8 h,充电时间约2 h,能够满足长时间连续检测任务;墙面检测器则实现了0.15~6.85 m范围内的稳定检测,并能够在2 min内完成地面模式与墙面模式之间的切换,体现出较好的现场适应性与应用价值。

4 结论

综上所述,本文设计的基于涡流检测的焊缝自动检测装置在钢敷地面表面与近表面缺陷检测方面具有显著优势,通过与定位系统、循迹系统集成,实现对大面积钢敷地面焊缝的全覆盖、高效、精确识别和可追溯检测,为钢敷地面焊缝检测提供了新的技术手段。但在深层缺陷、材料参数波动等情况下仍存在一定局限性。未来可进一步与超声波、红外热成像等技术深度融合,通过引入深度学习自适应补偿算法,提升系统对不同材质电磁特性波动及极端表面腐蚀条件的鲁棒性,从而为核电、航空及大型交通设施的钢敷地面提供更加全面、深层次的焊缝质量保障解决方案。

参考文献:

- [1] 别尔兰·贾纳依汗,王勇勇,姜秀海.焊缝表面缺陷的涡流红外热成像检测[J].激光与红外,2022,52(11): 1657-1665. [Bieerlan Jianayihan, WANG Yongyong, JIANG Xiuhai. Eddy current infrared thermal imaging for the detection of weld surface defects[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(11): 1657-1665.]
- [2] 李少波,杨静,王铮,等.缺陷检测技术的发展与应用研究综述[J].自动化学报,2020,46(11): 2319-2336. [LI Shaobo, YANG Jing, WANG Zheng, et al. Review of development and application of defect detection technology[J]. Review of Development and Application of Defect Detection Technology, 2020, 46(11): 2319-2336.]
- [3] 杨文卓,胡峰,冯俊雄,等.常规钢结构焊缝探伤无损检测方法概述及未来展望[J].中国金属通报,2021(7): 79-80.
- [4] 汪浩,方志勇,杜越峰,等.钢结构无损检测技术的特点及应用[J].江西建材,2022(1): 35-36, 40. [WANG Hao, FANG Zhiyong, DU Yuefeng, et al. Characteristics and application of nondestructive testing technology for steel structure[J]. Jiangxi Building Materials, 2022(1): 35-36, 40.]
- [5] 刘文超.无损检测技术在建筑工程检测中的应用浅析:以某钢结构厂房单体建筑工程为例[J].房地产世界,2022(12): 61-63. [LIU Wenchao. Analysis on the application of nondestructive testing technology in building engineering: taking a single construction project of a steel structure workshop as an example[J]. Real Estate World, 2022(12): 61-63.]
- [6] 游佳玥.无损检测技术在工程检测中的应用[J].中国高新科技,2023(10): 120-122. [YOU Jiayue. Application of nondestructive testing technology in engineering inspection[J]. China High and New Technology, 2023(10): 120-122.]
- [7] 黄凤英,安尚文,王岩,等.大型养路机械构件焊缝涡流检测技术及应用研究[J].高速铁路新材料,2024,3(1): 77-82. [HUANG Fengying, AN Shangwen, WANG Yan, et al. Research on eddy current testing technology and application of welds in large road maintenance machinery components[J]. Advanced Materials of High Speed Railway, 2024, 3(1): 77-82.]
- [8] 李晓光,王春蕾,黄三傲,等.新型核电站蒸汽发生器传热管管板密封焊缝涡流自动检测装置设计与实现[J].信息化研究,2019,45(2): 59-64. [LI Xiaoguang, WANG Chunlei, HUANG San'ao, et al. Design and implementation of a new eddy current automatic detection device for tube-tube sheet sealed welding of nuclear power plant steam generator[J]. Informatization Research, 2019, 45(2): 59-64.]
- [9] 朱健华,何建锋.基于焊缝3D检测系统应用的超高强钢焊接工艺优化[J].宝钢技术,2020(4): 51-55. [ZHU Jianhua, HE Jianfeng. Welding process optimization of ultra-high strength steel based on the application of welding seam 3D detection system[J]. Bao steel Technology. 2020(4): 51-55.]
- [10] 蔡文,薛锋,靖婧,等.涡流探伤在焊缝涂装状态下质量检测的应用[J].船海工程,2021,50(2): 125-128. [CAI Wen, XUE Feng, JING Jing, et al. Application of eddy current flaw detection in quality inspection of

- weld under coating condition[J]. Ship & Ocean Engineering, 2021, 50(2): 125-128.]
- [11] 徐大川. 基于 COMSOL 仿真的薄壁不锈钢焊管焊缝缺陷涡流检测与缺陷类型识别 [D]. 上海: 上海应用技术大学, 2022. [XU Dachuan. Eddy current detection and identification of defect types for thin-walled stainless steel welded pipe welds based on COMSOL simulation[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2022.]
- [12] 张国才, 谢小荣, 邢秀文, 等. 相关函数在涡流检测信号提取分析中的应用 [J]. 宇航计测技术, 2020, 40(5): 56-61, 75. [ZHANG Guocai, XIE Xiaorong, XING Xiuwen, et al. Application of correlation function in extraction and analysis of eddy current testing signal[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2020, 40(5): 56-61, 75.]
- [13] 张一平, 罗雄, 杨开宇, 等. 涡流阵列技术在焊缝检测上的应用初探 [J]. 中国特种设备安全, 2018, 34(3): 42-46. [ZHANG Yiping, LUO Xiong, YANG Kaiyu, et al. Initial use of eddy current array technique on welding joint inspection[J]. China Special Equipment Safety, 2018, 34(3): 42-46.]
- [14] 陈张景宣, 王峰, 姚晓磊, 等. 基于 CMOS 摄像头的自动循迹小车设计 [J]. 宁波工程学院学报, 2020, 32(1): 26-31. [CHEN Zhangjingxuan, WANG Feng, YAO Xiaolei, et al. Design of automatic tracking car based on CMOS camera[J]. Journal of Ningbo University of Technology, 2020, 32(1): 26-31.]
-

请速订阅 2026 年《分析测试技术与仪器》

如果您想

了解当代分析测试领域的新进展和新动向

交流分析测试研究的新理论与新成果

开发分析测试研究工作的新技术与新方法

扩展分析测试仪器的新用途与新功能

研制分析测试的新仪器与新组件

.....

请您订阅向国内外公开发行的《分析测试技术与仪器》杂志, 刊号 $\frac{\text{ISSN } 1006-3757}{\text{CN } 62-1123/\text{O6}}$, 邮发代号: 54-90, 定价: 15 元/册, 全年定价 90 元. 投稿请与《分析测试技术与仪器》编辑部联系, 联系电话: 0931-4968280, E-mail: fxcsl@licp.cas.cn, 网址: <http://www.sciengine.com/atti/home>, 联系人: 魏丽萍, 地址: 甘肃省兰州市天水中路 18 号, 中国科学院兰州化学物理研究所.