

化。该机制将传统的事后分析转变为事中干预与事前预防，显著提高了试制过线阶段的响应速度与过程稳定性。

4.3 经验沉淀与知识复用机制

汽车试制阶段具有高频问题与重复验证的特点，大量的经验数据若无法有效沉淀，将导致知识断层与资源浪费。企业应构建基于知识工程理念的经验数据库，将试制问题、改进措施、工艺优化方案与验证结果进行结构化、标签化管理，形成标准化知识条目。通过 PLM 与 QMS 系统集成，所有问题解决方案自动归档至知识库，并按照零部件类型、问题属性及责任领域分类存储。基于机器学习算法的推荐系统可在新项目中根据问题特征自动匹配相似案例，为工程师提供高相关度解决方案建议，缩短问题定位与验证周期。经验数据库还可支持定期复盘与数据挖掘，提炼共性问题与系统性改进方向，实现知识的传承与创新。该机制使试制阶段由“单次解决”向“体系优化”转变，推动企业形成可持续演进的智能化知识管理体系，为后续量产阶段提供数据化决策支撑。

5 过线控制的数字化与智能化优化路径

5.1 数字化追溯与全链路监控体系

在汽车试制阶段，零部件来源多样、装配路径复杂，若缺乏统一的数据追溯体系，极易出现责任不清、问题定位困难等现象。建立基于条码与 RFID（射频识别）技术的全链路追溯系统，可实现物料、工艺、检测及装配状态的全过程信息采集与监控。系统自动记录零部件供应商、生产批次、检测结果、装配时间与操作人员信息，形成独立且可验证的“数据指纹”。该数据不仅可追溯问题根因，还能通过异常识别算法提前预警质量隐患。通过 PLM（产品全生命周期管理）系统与 MES（制造执行系统）的集成，设计变更信息可实时传递至生产端，实现从设计、工艺到制造的闭环跟踪。此体系的核心价值在于提高问题定位的准确性与响应速度，构建数据驱动的透明化质量管理机制，使试制过程实现全可视、可控与可验证。

5.2 智能诊断与质量预测模型应用

针对试制过线阶段多因素交织、质量波动频繁的特征，可引入机器学习与深度神经网络（DNN）技术，建立智能诊断与预测模型。通过对历史试制数据、工艺参数、检具验证结果及装配偏差信息进行多维特征提取，模型能够识别影响过线成功率的关键因子，并实现实时质量预测。该模型以随机森林（RF）与卷积神经网络（CNN）为核心算法，对样本数据进行训练，形成高精度分类与回归分析机制。经实

车试制验证，模型预测准确率超过 90%，对装配偏差与试制失败风险具有较高敏感度。其结果可为工程师提供基于数据的预警信息与优化建议，在过线前即识别潜在问题，实现资源优先配置与风险规避。智能诊断模型的引入使过线质量管理从“经验判断”转向“数据驱动”，显著提高试制阶段的预判性与决策科学性。

5.3 数字孪生驱动的虚实融合决策支持

数字孪生技术通过构建与物理车间同步运行的虚拟模型，为试制过程提供了实时的仿真与决策支撑。系统基于三维 CAD 模型、传感器数据及生产过程信息，形成虚实交互的动态映射，实现设备运行状态、装配顺序及质量结果的可视化展示。通过虚拟环境中的参数调整与策略仿真，工程师可提前验证不同装配方案的可行性，预测变更对装配精度与过线节拍的影响，避免现场反复试错所造成的时间与成本损耗。该技术还可在早期阶段评估潜在装配干涉与公差叠加风险，为设计优化提供定量依据。数字孪生平台与 PLM、MES 系统互联后，能够实现从虚拟验证到实体反馈的闭环运行，使过线控制从“被动修正”转向“主动优化”。这一虚实融合的决策体系不仅提升了过线的稳定性与柔性响应能力，也为汽车研发全流程的智能化管理奠定了基础。

6 结语

汽车研发试制阶段的过线问题具有多领域耦合、数据复杂与决策实时性高等特征。本文基于系统工程与数字化协同管理理念，构建了从问题识别、协同分析到智能控制的完整研究体系。研究表明，建立多领域协同机制与数字孪生技术融合的智能控制平台，能够有效提升问题溯源效率、提高装配一致性与过线稳定性。未来研究可进一步拓展 AI 算法在问题因果推理与自适应优化中的应用，实现试制阶段“虚实共生、数据驱动、智能决策”的全过程质量管理，为汽车研发体系的智能化与高效化提供持续支撑。

参考文献

- [1] 李贝贝,杨阳.纯电动汽车样车试制过程探究[J].汽车与驾驶维修(维修版),2025,(02):42-44.
- [2] 鄢国文.整车产品开发项目样车试制的管理方法研究[J].时代汽车,2022,(15):4-6.
- [3] 张浩亮.基于“大数据”的样车试制准备工作评价模型[J].时代汽车,2019,(16):14-18.
- [4] 杨兴,罗益强.汽车研发试制阶段激光技术和设备的应用[J].世界制造技术与装备市场,2019,(05):45-50.
- [5] 李曙光.智能制造背景下汽车试制精益管理研究[D].对外经济贸易大学,2019.

Application and Precision Analysis of Digital Radiography in Weld Defects Identification

Qiang Chen

State Pipeline Network Group West Pipeline Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830011, China

Abstract

As a core process in manufacturing sectors including petrochemicals, aviation, and shipbuilding, welding quality directly determines the structural safety and operational reliability of products. In the new era of modern industry pursuing high-quality and sustainable development, stricter requirements are imposed on welding quality control. Enhancing welding inspection quality and optimizing Digital Radiography (DR) technology applications to achieve precise identification and quantitative analysis of internal weld defects have become critical for industry advancement. This study focuses on practical applications of DR technology in weld defect detection, systematically explores key process methodologies, and investigates effective strategies for improving inspection accuracy through image processing and intelligent algorithms. The research aims to provide theoretical foundations and technical support for achieving coordinated improvements in welding quality and efficiency, thereby enhancing product competitiveness and driving comprehensive industry optimization.

Keywords

DR Digital Radiography Technology; Weld Defect Recognition; Application; Precision Analysis

DR 数字射线检测技术在焊缝缺陷识别中的应用与精度分析

陈强

国家管网集团西部管道有限责任公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830011

摘要

焊接工艺作为石油化工、航空、造船等制造业的核心环节，其质量直接关乎产品的结构安全性与运行役可靠性。在现代化工业迈向高质量与可持续发展的新阶段，对焊接质量的控制提出了更为严苛的要求。强化焊接检测质量，优化应用DR（数字射线）检测技术，以实现焊缝内部缺陷的精准识别与定量分析，是行业发展的关键。聚焦于DR技术在焊缝缺陷识别中的应用实践，系统探究其关键工艺方法，从图像处理、智能算法等维度深入探讨提升检测精度的有效策略，旨在为实现焊接质量与效率的协同提升，为增强产品竞争力提供理论依据与技术支撑，推动行业的整体升级优化。

关键词

DR数字射线检测技术；焊缝缺陷识别；应用；精度分析

1 引言

DR 数字射线检测技术在焊缝缺陷识别中发挥了重要作用，能够利用射线穿透被检测物体，射线与物体相互作用后，部分射线被吸收，剩余射线照射到数字探测器上，探测器将射线信号转换为电信号，再经过计算机处理形成数字化图像。该技术方法能够快速、直接地获取数字图像，具有高分辨率和高对比度的特点，能够清晰地显示焊缝内部的微小缺陷。它所生成的数字图像可以直接存储在计算机中，便于后期的分析、比较和存档。借助先进的图像处理软件，对图像进行增强、滤波等处理，提高缺陷识别的精度。

【作者简介】陈强（1979-），男，中国新疆克拉玛依人，本科，副高级工程师，从事油气储运及长输管道工程与附属工程、油田地面建设研究。

2 DR 数字射线检测技术在焊缝缺陷识别中的应用

2.1 前期准备工作

样品准备是基础，参数设置是关键，环境控制是保障，在焊缝缺陷识别前，要做好准备工作。备好焊接样品，精准测量和控制焊接样品的尺寸，把尺寸误差控制在合理范围内，只有这样才能确保样品在 DR 检测设备中准确放置，防止尺寸偏差引起的检测误差；要做好焊接样品表面处理，清除表面油污，打磨表面铁锈，表面粗糙度控制在标准范围内，确保射线能够均匀穿透样品，获得清晰图像。DR 检测前，结合焊接样品的材质、厚度等因素针对性调整检测装置参数，校准和调试成像系统，进而保障图像清晰度和对比度^[1]。还需要评估和优化检测环境，环境湿度、温度控制在合理范围内，避免影响设备性能。

2.2 优化检测技术工艺

选择合适的射线源。选择射线源时，需要保障射线源所发出的射线对被检部位具有较强的穿透力，X射线机可通过调节管电压和管电流来控制射线强度和能量，适用不同厚度和材质的焊缝检测； γ 射线源具有能量高、穿透能力强、无需电源等优点，存在半衰期限制和辐射防护要求高的问题。还需要确保射线源与成像板保持匹配校准，通过暗场图片校准、中场图片校准、亮场图片校准等方式进行，确保所有像素点的起始点相同，进而保障图像均匀性，最大程度上保证图像质量。如果采集的图像中出现规则状条纹，需要第一时间匹配校准射线源，避免影响检测图像的质量。选择合适的射线能量。射线能量的大小直接影响射线的穿透能力和成像质量。在保证穿透的前提下，应根据工件材质和成像质量要求选择合适的射线能量。对于较薄的焊缝，可以选择较低的射线能量以提高成像质量；而对于较厚的焊缝，则需要选择较高的射线能量以确保足够的穿透能力^[2]。选择合适的成像方式，传统的胶片成像方式通过胶片感光形成潜影，经显影、定影处理得到射线底片。这种方式成像直观，可存档，但操作复杂且成本较高。随着数字成像技术的发展，数字探测器逐渐取代胶片成为主流的成像方式。数字探测器利用平板探测器将射线直接转换为电信号或数字信号，通过计算机处理生成数字图像。这种方式成像速度快、图像可实时处理，大大提高了检测效率。

2.3 DR 图像采集

在射线检测过程中，要确保焊缝表面清洁无油污、铁锈等杂质，以免影响射线的穿透和成像质量；选择合适的透照几何参数，如射线焦点大小、透照距离等，获得清晰的底片或数字图像；根据焊缝的材质、厚度和结构选择合适的像质计来评估射线检测图像的质量。采集过程中，要采用先进的平板探测器，进而提高图像分辨率和灵敏度，如在对大型压力容器焊缝检测时，需要使用 200 μm 像素间距的平板探测器（FPD），采集到的图像能够清晰显示焊缝内部 0.1mm 的微小缺陷（如细微气孔、微裂纹）。为了保证图像的完整性和准确性，需要对采集过程进行实时监控和调整，避免过曝光或欠曝光。在采集过程中，要注意避免外界干扰，如电磁干扰、机械振动等，这些因素都可能导致图像出现伪影或模糊，影响后续的缺陷识别^[3]。

2.4 DR 数据处理

在焊缝缺陷检测中，采集的原始 DR 图像存在一些缺陷问题，如噪声、对比度不足等，要进行图像预处理，通过科学方式去除噪声，提升图像质量。1）常用的图像去噪方式有：中值滤波算法，可以去除图像中的椒盐噪声和散斑噪声，保留图像边缘信息；小波去噪技术，该方法具有低熵、多分辨率、选择灵活等优点，进而提升射线图像质量；还可以利用多幅叠加的方式有效抑制噪声。2）完成图像去噪处理后，原始图像边缘会变得模糊，影响缺陷特征提取，需要

使用图像增强技术对图像边缘进行锐化，进而强化图像对比度，突出图像中的特定信息，弱化图像中无用成分。常见的图像增强技术有：修整灰度、去模糊、平滑、边缘锐化、伪彩色等方式。如可以通过直方图均衡化算法进行处理，强化图像灰度的均匀分布，提高缺陷区域与背景对比度的明显度，更容易识别缺陷^[4]。在使用图像增强工具时，要尽量减少图像处理步骤，避免图像失真。3）图像分割，即把焊缝区域（ROI）与背景分离，以便精准识别缺陷区域，通常应用较为广泛的分割算法有阈值分割、边缘检测等。

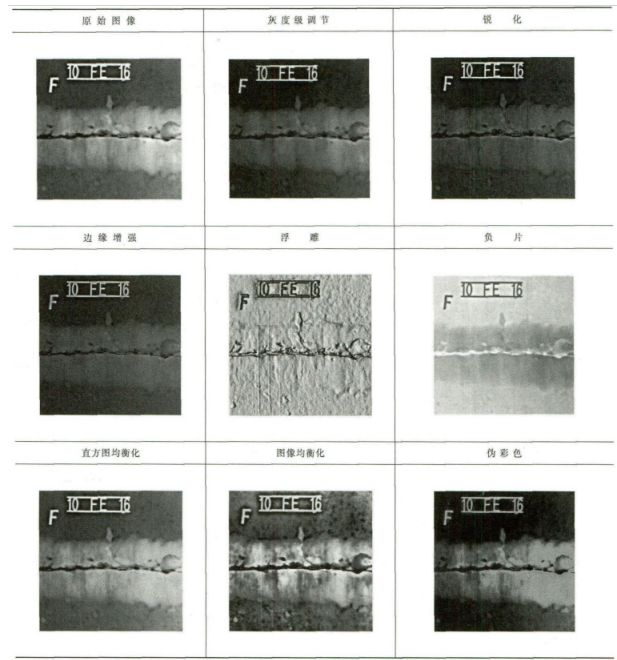


图 1 经过不同数据处理方法处理后的图像

2.5 焊缝缺陷特征提取

完成缺陷分区工作后，需要提取特征，如缺陷大小、形状、灰度等特征，同时通过机器学习算法对其分类。其中，常见的焊缝缺陷类型和基本特征体现为：1）裂纹，在焊接应力、脆化等因素的干扰下，导致焊接区域部分金属原子结合力被破坏，把原本一体的材料分割成两部分，外观体现为焊接裂纹。常用裂纹类型有纵向裂纹、横向裂纹、弧坑裂纹等。通常情况下，裂纹主要出现在焊缝上或者热影响区域，呈现不规则的黑色细线，末端尖锐。2）未焊透，包含根部未焊透、层间未焊头、边缘未焊头，这种缺陷问题会降低焊缝嵌固端和延伸率，甚至加大开裂概率。其外在表现为规则的黑线，主要处于焊缝中间，逐渐向焊缝方向延伸，边界较为平直规则^[5]。3）未融合，即焊接材料和母材、焊道材料与焊道材料没有完全熔化结合。未融合缺陷包含边缘未融合、根部未融合、层间未融合。外在表现为宽窄不一、黑度不均匀、断续分布条带等。4）气孔，熔池中的气泡残留在凝固中的材料中形成空洞，呈现为椭圆形、圆形黑色图像，边缘光滑、外观规则，边界清晰，分布不均匀，大小不一。5）夹渣，残留在焊缝中的熔渣，包含条状夹渣、球状夹渣。