

钢铁表面缺陷检测中的照明与图像增强技术进展

苏振东

江苏师范大学物理与光电工程学院, 江苏 徐州

摘要 | 本文针对钢铁表面强反射、照度不均及纹理和油污干扰造成的缺陷成像问题, 采用叙述性综述方法, 梳理照明与图像增强技术的研究进展。归纳照明几何优化、偏振调控、多光源协同及数字增强策略, 比较其适用条件与局限, 并分析其与智能检测的衔接关系。光学采集与数字处理具有互补作用, 增强方法需与表面状态和缺陷特征匹配, 以缺陷可分辨性及检测性能评价效果; 数字增强难以恢复采集阶段已丢失的真实细节。未来研究需加强光学与算法协同、多模态信息可靠融合, 以及跨工况条件下全流程效率与运行稳定性的验证。

关键词 | 钢铁表面缺陷; 机器视觉; 照明优化; 图像增强

Copyright © 2026 by the author(s).

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



引言

钢铁表面缺陷检测是产品质量控制的重要环节。强反射、照度不均、轧制纹理及油污等因素容易掩盖微弱缺陷, 影响机器视觉检测的可靠性。照明优化可提高缺陷与背景的对比度, 数字图像增强则用于补偿亮度起伏、抑制噪声和保留细节。两者相互补充, 其效果应结合后续检测任务评价。

本文采用叙述性综述方法, 结合公开网络检索与期刊题录核验, 按主题相关性和技术代表性选取 30 篇文献。检索截至 2026 年 10 月 14 日, 文献发表年份覆盖 1987—2026 年, 兼顾相关基础方法及其他金属表面检测研究。

本文围绕钢铁表面成像问题, 梳理照明优化、偏振调控、多光源协同及数字图像增强技术, 比较其适用条件与局限。在此基础上, 讨论光学与智能

算法协同、多模态融合及工业应用的发展方向, 为检测方案选择提供参考。

1 钢铁表面缺陷成像特性与照明优化

1.1 表面反射特性与缺陷成像问题

钢铁表面缺陷成像受产品形态、表面状态及成像几何影响。Luo 等^[1]综述了连铸坯、热轧带钢和冷轧带钢的视觉检测技术, 说明方法选择需结合具体对象。钢铁表面通常兼具镜面反射与散射特征, 难以用理想漫反射模型统一描述。Pernkopf 和 O'Leary^[2]比较了强度成像与几何信息获取方法, 并展示了利用光度立体估计钢块表面法向和反射率的实例, 为区分外观与形貌变化提供参考。

缺陷引起的形貌、粗糙度或表层组成变化, 会改变其反射响应。Kazama 和 Oshige^[3]发现, 合金化镀锌带钢缺陷区的微观平坦部分面积占比与宏观反

作者简介: 苏振东, 江苏师范大学, 硕士研究生, 主要从事高反光钢铁表面缺陷检测技术方向研究。

文章引用: 苏振东. 钢铁表面缺陷检测中的照明与图像增强技术进展[J]. 应用科技研究, 2026, 1 (4) : 192-202.

<https://doi.org/10.68070/va3wwx12>

射强度相关。改变观测角度时，同一缺陷可由亮于背景转为暗于背景，如图 1 所示。因此，缺陷对比度依赖成像条件，照明与观测角度需与表面状态及目标缺陷匹配。

实际检测中，局部过曝会掩盖缺陷细节，照度

不均会引起背景灰度起伏，轧制纹理和油污则易与缺陷混淆。Song 等^[4]将显著性分析与线性扫描形态学结合，用于油污干扰下的硅钢带缺陷检测。成像优化应在控制过曝和抑制背景干扰的同时，保留有效缺陷信息。

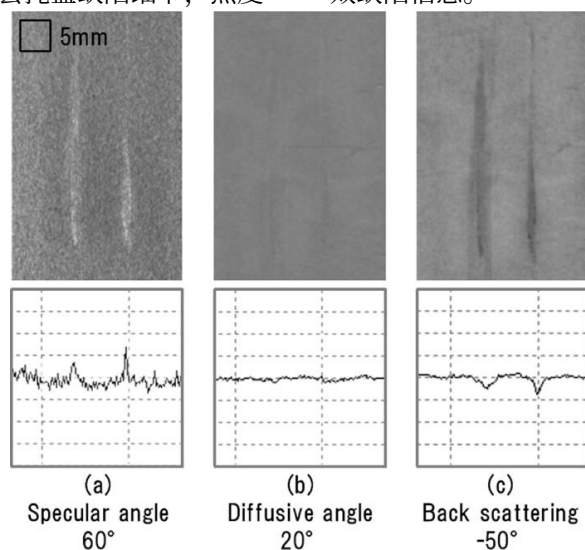


图 1 不同观测角度下带钢表面缺陷的成像差异

Fig. 1. Imaging Differences in Strip Steel Surface Defects at Different Viewing Angles

1.2 照明几何与光场均匀性优化

照明几何优化通过调整光源、工件与相机的相对位置，改变缺陷与背景反射光的接收条件，从采集端提高缺陷对比度。明场成像使相机接收正常表面的主要反射光，利用缺陷区域反射特性的变化形成灰度差异；暗场成像则使正常表面的镜面反射光偏离镜头，通过接收缺陷产生的散射或偏转光突出划痕等局部异常。两种方式的适用性取决于表面状态及缺陷形貌，需要合理匹配入射角与观测角。Ono 等^[5]在厚钢板检测中结合反射模型仿真与实验，确定了适于凹凸缺陷显现的入射角和视场范围，为照明几何的参数选择提供了依据。

光场均匀性优化主要针对检测区域内的照度差异，通过光源布局和漫射结构设计，减小照明起伏引入的背景灰度变化。Huang 等^[6]针对高反光不锈钢板设计了半球形漫射照明结构，利用罩内多次反射形成较均匀的照明，并结合光学仿真调整 LED 发光方向，通过局部黑色遮罩构建有利于凹坑、凸起和划痕显现的光场。该研究采用最小照度与平均照度之比评价均匀性，同时发现，均匀度较高的配置仍可能因照度过强而产生过曝。这表明，光场均匀性需要与照度水平及曝光条件共同考虑。用于高反光金属表面检测的半球形照明结构及不同 LED 角度下的照度分布见图 2。

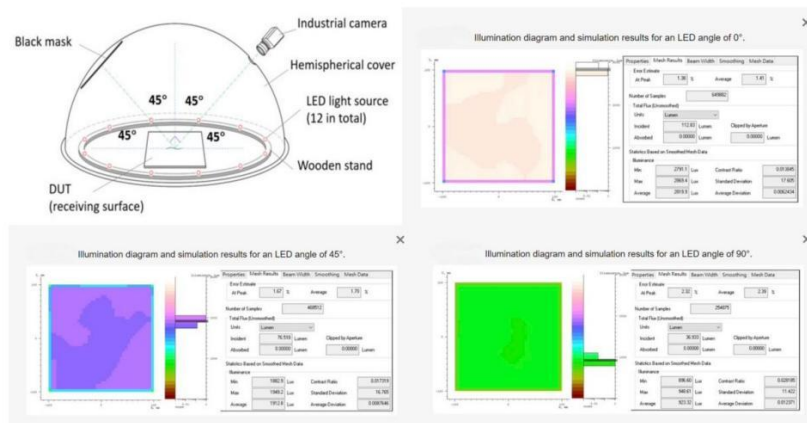


图 2 半球形照明结构及不同 LED 角度下的照度分布

Fig. 2. Hemispherical Illumination Structure and Illuminance Distributions at Different LED Angles

照明优化还需兼顾背景稳定性与缺陷信息保留。漫射照明能够减弱局部高亮和阴影，但也可能降低部分缺陷的边缘对比度；定向照明有利于突出特定形貌，却对缺陷朝向和观测几何更为敏感。综合上

述研究，照明设计应围绕目标缺陷的可见性，在光场均匀性、反射方向和曝光水平之间进行权衡，并结合实际表面状态确定适用参数。钢铁表面典型成像问题及相应优化重点归纳见表 1。

表 1 钢铁表面典型成像问题及优化重点
Tab. 1. Typical Imaging Issues on Steel Surfaces and Key Optimization Strategies

成像问题	典型图像表现	对检测的影响	优化重点
镜面高光与局部过曝	局部灰度饱和, 弱缺陷细节被掩盖	缺陷边界与背景难以区分, 增加漏检风险	调整照明和观测角度, 协调光强与曝光
照度分布不均	背景出现缓慢亮度起伏或局部阴影	分割阈值适应性下降, 缺陷响应不稳定	优化光源布局与漫射结构, 补偿残余亮度起伏
缺陷响应具有方向性	同一缺陷随观测方向改变而变亮、变暗或减弱	单一成像方向难以兼顾不同朝向的缺陷	选择有利观测几何, 获取多方向互补信息
轧制纹理与粗糙度变化	背景纹理明显, 灰度变化与缺陷相互叠加	缺陷与背景特征混淆, 增加误检风险	匹配照明方向与处理尺度, 抑制纹理并保留缺陷边缘
油污等表面附着物	出现斑纹、反光区域及不规则边界	无害附着物可能被识别为缺陷	联合分析反射响应与形态特征, 区分附着物和真实缺陷

2 缺陷信息增强与智能检测策略

2.1 基于照明优化的缺陷增强策略

基于照明优化的缺陷增强，通过调节光场分布与照射时序，提高缺陷与背景的可分辨性。漫射照明与局部遮光可改善反射条件，切换照明则可构造便于提取的缺陷信号。Jeon 等^[7]采用双光源切换照明，使缺陷呈现黑白交替模式，再结合优化的有限冲激响应滤波抑制背景干扰。该方法在实际钢铁生产线图像上得到验证，体现了照明设计与特征提取的协同作用。

针对热态钢管的氧化皮纹理干扰，Ono 等^[8]对同一区域施加相反方向的照明，经光照校正与图像相减，削弱平坦表面纹理并突出凹凸缺陷，如图 3 所示。随后结合明暗模式、面积和宽度等特征，利用二叉决策树区分缺陷与干扰。由于翘起氧化皮及局部镜面反射仍可能产生残余信号，差分增强不能代替后续判别。

照明优化后残余的亮度不均与低对比度问题，可通过数字处理进一步补偿。Pizer 等^[9]研究了自适应直方图均衡化及其变体，为限制对比度自适应直方图均衡化（CLAHE）提供了方法基础。应用时应结合缺陷尺寸设置局部窗口和增强强度，避免同时放大纹理与噪声。Jobson 等^[10]提出的多尺度 Retinex 结合不同尺度的中心—周围响应，可为缓慢亮度起伏的校正提供参考。但强镜面反射不一定满足简化的照明—反射分解假设，增强结果不宜直接视为真实反射率。

针对钢板局部灰度偏高的问题，高如新等^[11]提出动态均值增强方法，并结合最大熵分割检验效果，展示了依据灰度分布进行针对性补偿的思路。具体选型应结合表面状态、缺陷特征及后续检测需求，协调光学采集与数字处理。对于过曝饱和导致的信息丢失，应优先调整照明与曝光条件，不能仅依靠灰度增强恢复真实缺陷细节。

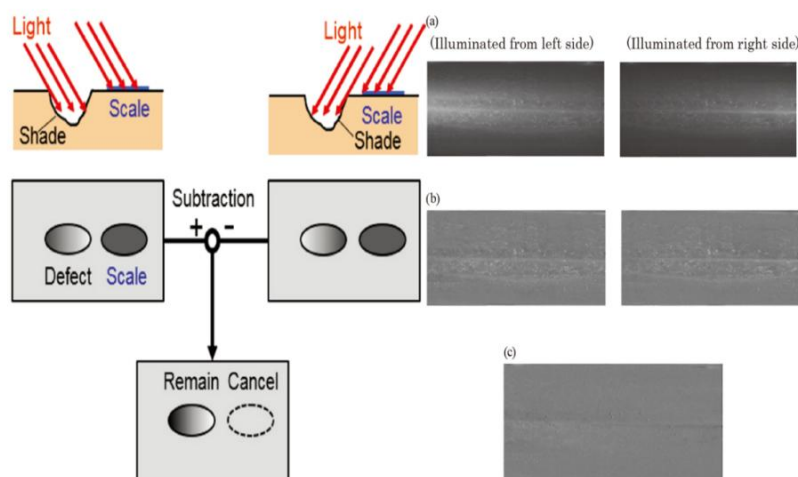


图 3 双向照明差分增强原理及处理效果

Fig. 3. Principle and Results of Bidirectional Illumination Difference Enhancement

2.2 基于偏振调控的反射抑制策略

偏振调控主要通过设置入射光的偏振状态和接收端的检偏方向，选择性衰减干扰反射，提高缺陷与背景的可分辨性。对于保持入射偏振方向的反射光，起偏器与检偏器的正交配置能够降低其强度。但金属表面对不同偏振分量的反射幅度和相位响应存在差异，反射光可能由线偏振转变为椭圆偏振，因此固定的正交配置并不总能充分抑制反光，需要结合材料特性与成像几何选择偏振参数。

针对钢板浅表缺陷与油膜等无害斑纹在普通反

射图像中外观相近的问题，Kazama 等^[12]研究了二者的偏振反射差异。结果表明，在特定线偏振光照射下，缺陷区域的反射光呈现较明显的椭圆偏振特征，而无害斑纹的反射光基本保持线偏振状态。研究者据此利用椭圆偏参数区分二者，并采用三个不同检偏方位的相机构建在线检测装置。该研究表明，合理选择偏振配置，可以利用表面光学性质差异削弱无害斑纹干扰，为缺陷识别提供普通灰度图像以外的判别依据。钢板浅表缺陷与油膜斑纹在不同检偏角度下呈现不同的反射响应，具体成像差异见图 4。

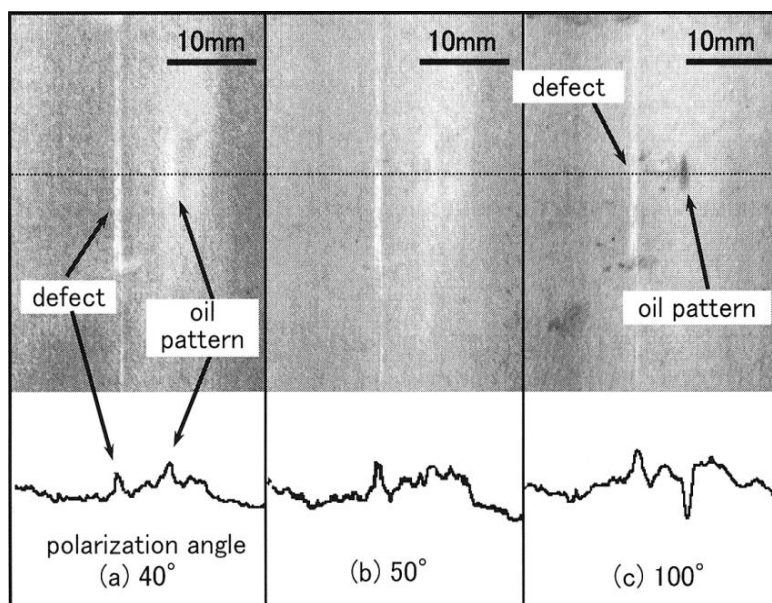


图 4 不同检偏角度下钢板缺陷与油膜斑纹的成像差异

Fig. 4. Imaging Differences Between Steel Plate Defects and Oil Film Patterns at Different Analyzer Angles

偏振信息可沿两条路径参与后续检测：一是通过反射抑制处理改善输入图像，二是保留不同偏振

状态下的信息，作为特征学习的补充。前者关注干扰削弱后能否保留弱缺陷，后者关注偏振与强度信

息的互补程度。因此，背景亮度降低不宜直接等同于检测效果改善，还需考察缺陷对比和边界信息是否得到保留。

偏振策略的适用性仍受入射角、表面微观形貌及附着层性质等因素影响。实际应用中应根据目标缺陷与背景的偏振响应选择检偏方向，必要时结合多个偏振方位的信息进行分析。同时，偏振滤光会减少接收光量，需要协调光源强度与曝光条件，在抑制反光的同时保留微弱缺陷信号。

2.3 多光源协同的缺陷信息增强策略

缺陷的局部坡度与延伸方向会影响明暗响应，

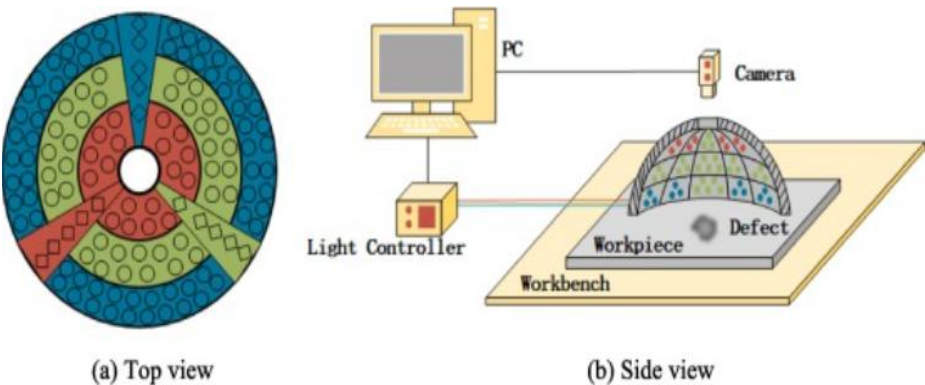


图 5 经纬多色光源视觉检测系统组成

Fig. 5. Configuration of the Warp-and-Weft Multicolor Light Source Visual Inspection System

多幅图像的融合需兼顾背景平滑与缺陷边缘保留。He 等^[14]提出引导滤波，利用引导图像与输出图像之间的局部线性关系，兼顾边缘保持与计算效率。Li 等^[15]进一步提出引导滤波图像融合方法，将图像分解为基础层和细节层，并结合显著性与空间一致性构建融合权重。这些方法可为多方向照明图像融合提供参考，但通用图像融合效果不能直接等同于

单一照明难以兼顾不同形貌。多光源协同通过调节照明方向与点亮时序，获取同一区域的互补信息。分时采集可分别保留各方向的响应，同时点亮则会叠加反射信号，未必保留可独立分析的方向信息。差分处理侧重突出方向敏感的形貌变化，融合处理则侧重整合各幅图像中的有效细节。

Li 等^[13]采用多色经纬光源分时成像，在色调域中解耦表面梯度幅值与方向，为缺陷形貌分析提供互补信息。其光源布局与系统组成见图 5。该研究以热轧铝合金板为对象，方向与颜色编码思路可为钢铁检测提供参考，但仍需结合钢铁表面的反射特性验证适用性。

钢铁缺陷检出效果。

多光源系统还需协调采集同步性与处理效率。运动工件检测中，应协调光源触发、图像配准与亮度校正，避免位置错位或照度差异形成伪缺陷。同时，应合理设置融合权重与滤波尺度，防止细裂纹等弱小目标的边缘被过度平滑。不同光学增强策略的特点与适用条件见表 2。

表 2 典型光学增强策略的特点与适用条件

Tab. 2. Characteristics and Applicability of Typical Optical Enhancement Strategies

增强策略	信息增强方式	适用需求	主要限制
光场分布与照明几何优化	调节定向光、漫射光及局部遮光，改变反射光接收条件	控制高亮、阴影和背景起伏，提高目标缺陷对比度	均匀照明可能削弱部分形貌对比；参数随表面状态变化
切换照明	交替点亮光源，使缺陷呈现可识别的明暗变化模式	从非均匀亮度和复杂纹理中提取缺陷响应	需要协调触发时序、工件运动和后续滤波
双向照明差分	比较相反方向照明图像，削弱共同背景并突出凹凸响应	增强热态钢管等表面的凹凸缺陷，减轻氧化皮纹理干扰	对配准和亮度一致性敏感；翘起氧化皮仍可能产生残余信号
偏振调控	利用缺陷与附着层的偏振反射差异提高可分辨性	区分浅表缺陷与油膜等无害斑纹，改善反光干扰	受入射角、表面状态和检偏方向影响；滤光会减少接收光量
多方向与多色照明协同	获取不同方向或颜色编码响应，进行形貌表征与信息融合	补充单幅图像缺失的方向信息，保留互补缺陷细节	增加采集与处理开销，需处理同步、配准及颜色响应差异

2.4 基于智能算法的缺陷识别与检测策略

智能算法主要用于缺陷识别、定位与分割，其效果依赖输入图像中的有效信息。Liu 和 Yan^[16]将小波变换与各向异性扩散结合，抑制冷轧带钢的背景纹理并保留细节，再通过边缘检测提取缺陷。Liu 等^[17]利用数学形态学增强算子补偿非均匀照明，并通过遗传算法确定二值化阈值。此类方法将预处理与缺陷提取衔接，但参数设置仍需匹配缺陷形态与背景结构。

学习型方法也可用于检测前的图像恢复。Zhang 等^[18]提出的 DnCNN 通过残差学习和批量归一化实

现图像去噪，为减少人工滤波规则的设计提供了思路。该研究面向通用图像去噪，应用于钢铁图像时，需检验实际噪声与训练退化模型的匹配程度，避免将细微裂纹作为噪声去除。

Yang 等^[19]针对不锈钢管裂纹，采用 Gamma 校正与 CLAHE 进行离线预处理，并改进 YOLOv8s 网络。网络引入双向特征金字塔和注意力机制，加强多尺度信息融合与裂纹特征表达，检测示例见图 6。该研究尚未采用独立测试集，跨工况适用性仍需验证；所报告的模型推理耗时也不能代表包含增强处理的完整流程耗时。

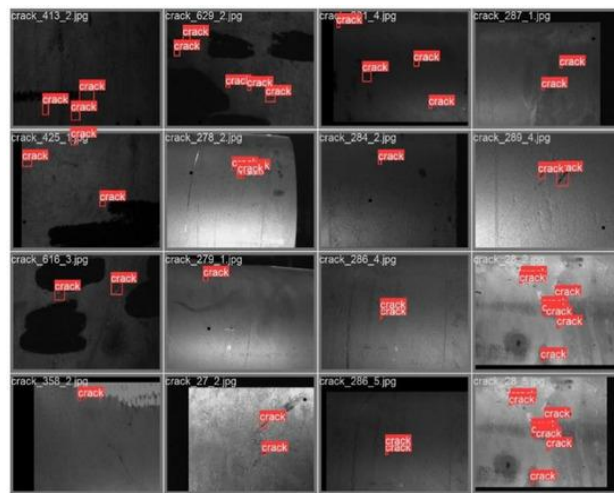


图 6 基于 YOLOv8s-BISW 的不锈钢管裂纹检测示例

Fig. 6. Example of Stainless Steel Pipe Crack Detection Using YOLOv8s-BISW

Lu 等^[20]面向高反光金属零件，将偏振成像、反射抑制处理与改进 YOLO 网络结合，通过小波池化和多尺度特征融合改善小缺陷检测。其结果向不同钢种与表面状态推广时仍需验证。此类目标检测方法以边界框定位缺陷，精细轮廓提取仍需采用分割

方法。评价时应统一数据划分与工况，通过消融实验区分图像增强、偏振信息和网络改进的贡献，并综合考察检测性能与处理速度。相关方法的作用、适用条件及局限见表 3。

表 3 典型数字增强与缺陷检测方法比较

Tab. 3. Comparison of Typical Digital Enhancement and Defect Detection Methods

方法类别	主要作用	适用条件	使用局限
灰度与局部对比度调整，如 Gamma、CLAHE	重新分配灰度或局部对比度，突出弱灰度差异	缺陷信息仍可辨认，但亮度或对比度不足	可能同时放大噪声和纹理；不能恢复已饱和丢失的真实细节
Retinex 类光照校正	补偿较缓慢的亮度变化，兼顾动态范围与细节	存在背景照明起伏，需要改善缺陷可见性	依赖尺度和模型假设；强镜面反射下输出不等同于真实反射率
小波与各向异性扩散	结合尺度分析与保边平滑，抑制纹理和噪声	冷轧带钢等背景纹理干扰明显的图像	尺度及扩散参数影响细节保留，过度平滑可能削弱细裂纹
数学形态学与阈值优化	补偿背景并提取缺陷区域，优化二值化结果	缺陷形态和尺度具有一定规律，可建立分割判据	结构元素、阈值与优化目标需匹配场景，复杂背景下稳定性受限
学习型图像去噪，如 DnCNN	通过学习噪声或残差信息改善输入图像	实际噪声与训练条件较匹配，且需要保留弱缺陷	通用去噪能力不等于缺陷检出能力，需检验细小结构是否被抹除
深度目标检测，如 YOLO 及其改进方法	学习多尺度特征，输出缺陷类别和位置框	具备标注样本，需要自动识别与快速定位	受样本分布和工况变化影响；位置框不能替代精细轮廓分割

3 技术融合与工业应用发展趋势

3.1 光学增强与智能检测协同优化

光学增强与智能检测的协同优化,是以缺陷判别需求为依据,协调成像配置、图像处理与检测模型,使采集信息更有利于缺陷定位和分割。Tang 等^[21]在钢铁产品视觉检测综述中,将图像采集系统与图像处理算法纳入同一分析框架,为从完整流程理解检测性能提供了参考。光学增强主要改善缺陷信号的可获取性,智能算法则提高有效信息的提取与判别能力,二者应以最终检测效果为共同评价依据。

在成像端,照明参数应与目标缺陷的响应特征及后续处理方式相匹配;在处理端,则应保留能够被检测或分割算法利用的细节。汤勃等^[22]针对钢板

低对比度微小缺陷,采用小波与同态滤波相结合的方法,分别处理低频亮度变化和高频细节,再利用 Otsu 阈值与 Canny 边缘检测完成缺陷提取。该研究将增强与分割衔接,说明亮度校正的价值需要通过下游缺陷信息的保留与提取效果体现。

对于不均匀照明下的缺陷信息保护, Qiu 等^[23]提出基于联合先验的增强方法,在半耦合 Retinex 模型中引入背景先验与深度去噪先验,以减轻照明干扰并避免判别信息损失。这类研究强调增强目标与视觉检测需求的对应关系。结合前述光学设计可以看出,已有方法主要体现成像配置、预处理与检测算法之间的联合设计,光学参数与模型参数的闭环共同优化仍可进一步探索。不均匀照明条件下,不同处理方法对应的钢轨表面缺陷分割结果对比见图 7。

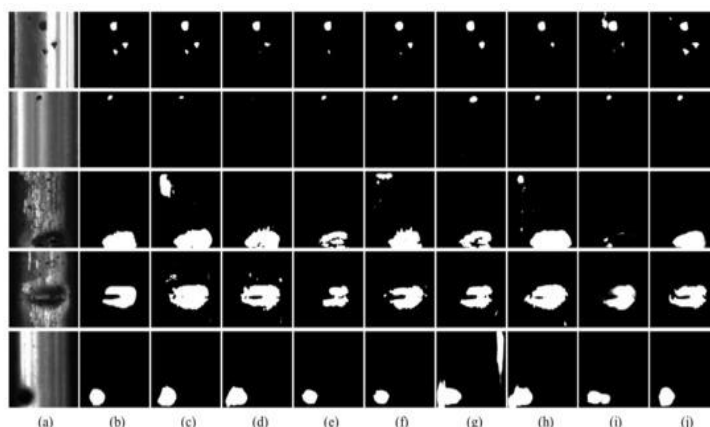


图 7 不均匀照明图像增强对钢轨缺陷检测结果的影响

Fig. 7. Effect of Uneven Illumination Image Enhancement on Rail Defect Detection Results

协同优化还需要区分图像质量与任务性能。Wang 等^[24]提出的结构相似性指标 (SSIM) 从结构信息保持角度评价图像质量,可在参考图像来源和含义明确时作为辅助指标。但工业增强任务往往缺乏理想参考图像,以原始低质量图像作为唯一参照也可能限制评价意义。因此,应结合缺陷召回、误检和分割边界等任务指标判断增强是否有效。

后续优化可将漏检、误检及分割偏差作为光学参数选择的反馈依据,使光源角度、强度和偏振配置更直接地服务于检测任务。评价时,应在一致的数据划分与工况下,对比成像端改进、算法端改进及二者结合的效果,并将采集与预处理时间纳入系统效率评价。对于表面状态或照明条件变化,还应考察模型性能的稳定性,避免仅凭图像观感或单一数据集结果判断协同效果。

3.2 多模态视觉检测技术

多模态视觉检测联合利用强度、偏振与几何信息,弥补单一观测的局限。Xie 等^[25]综述了高反光金属表面的二维、三维视觉检测方法 & 工业部署问题,

为外观与几何信息的联合利用提供参考。强度图像反映纹理与明暗变化,偏振信息表征反射状态差异,几何信息则描述表面起伏,各类信息具有不同的敏感对象和干扰来源。

Pan 等^[26]针对钢制导轨表面缺陷,将 RGB 图像与偏振角图像输入改进的 DeepLabV3+ 网络。该方法通过双流特征提取与融合,增强低对比度缺陷的表达,网络结构如图 8 所示。偏振信息除用于成像端的反光抑制外,还可作为独立输入参与特征学习,为缺陷分割提供互补信息。

外观与几何信息的联合利用,有助于区分局部起伏和单纯的反射性质变化。光度立体与多方向编码照明可为表面法向或梯度估计提供信息,但获得法向或梯度并不等于完成缺陷深度测量。相关方法从其他金属对象迁移至钢铁表面时,还需考虑镜面反射、阴影及材料差异的影响。

融合方式应与信息属性及检测任务匹配。像素级融合侧重整合图像细节,特征级融合则分别提取各模态特征后联合判别。不同方向的强度图像属于

多源观测, 不宜仅因图像数量增加就视为多模态。实际应用需处理空间配准、时间同步及输入质量差

异。后续可依据各模态的可靠性调整融合权重, 并检验部分输入退化时的检测稳定性。

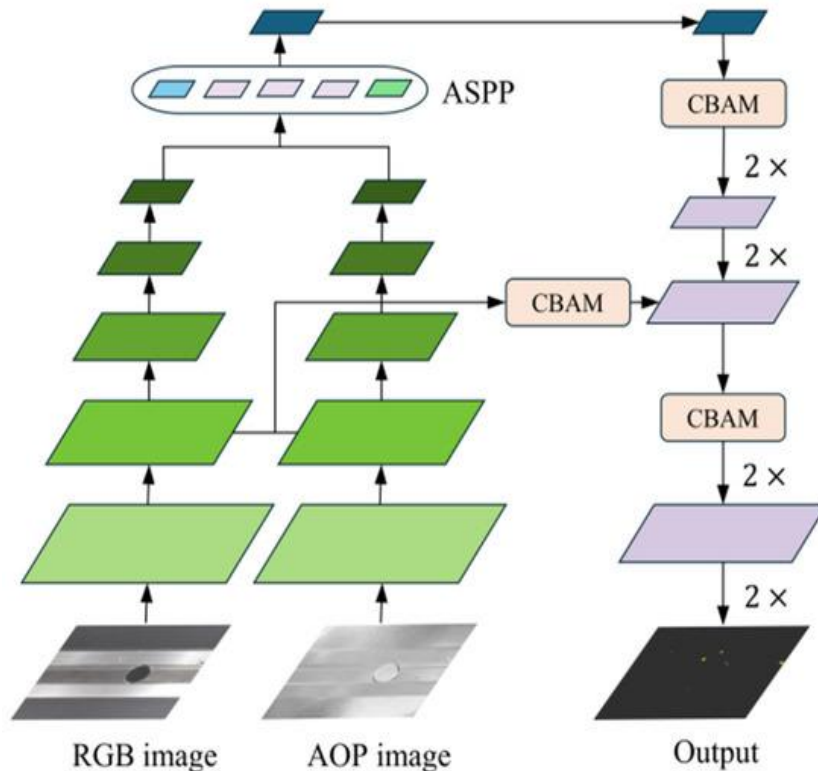


图 8 RGB 与偏振角图像的双流特征融合结构

Fig. 8. Dual-Stream Feature Fusion Architecture for RGB and Polarization-Angle Images

3.3 面向工业应用的智能检测系统

工业检测系统需协调图像采集、处理、缺陷判别与结果反馈, 兼顾产线节拍和运行稳定性。Neogi 等^[27]综述了钢铁表面检测中的照明、相机、处理硬件及实时运行问题。现场部署应协调曝光时间与输送速度, 保证分时采集对应同一区域, 并考虑热态检测中的热辐射干扰。

实时性评价应覆盖采集、传输、增强、推理和输出全过程。Reza^[28]研究了适于 VLSI 及 FPGA 实现的 CLAHE 方案, 为图像增强加速提供参考。该研究属于通用图像处理, 具体钢铁检测系统仍需结合硬件和输入分辨率, 验证连续处理能力, 并兼顾微小缺陷召回率。

增强方法还需适应现场亮度与表面状态变化。王伟江等^[29]针对机柜表面缺陷检测, 研究了不均匀光照和低亮度图像增强方法。相关方法迁移至钢板、带钢检测时, 仍需验证其对材质、反光程度及背景纹理变化的适应性。

检测结果还可服务于生产监测与质量追溯。Zhao 等^[30]将冷轧表面缺陷检测与工业液体量化结合, 为轧制系统状态监测和设备维护提供思路。后续可关联缺陷图像、位置与生产批次, 并积累误检、漏

检样本, 支持质量追溯与模型更新。系统效果仍需通过跨工况连续运行验证。

4 总结与展望

钢铁表面缺陷检测中的照明与图像增强, 核心在于稳定保留并突出缺陷相对于背景的有效差异。照明几何优化能够改善反射光接收条件, 偏振调控和多光源协同可提供额外的反射或方向信息, 数字增强则有助于补偿亮度起伏、抑制干扰并衔接后续检测。不同方法的收益均受表面状态、缺陷形态和采集条件约束, 实际选型应同时考虑缺陷细节保留、误检漏检和系统开销。

现有研究已展示光学设计与智能算法结合的应用价值, 但在跨工况适应性和连续运行验证方面仍需完善。后续研究可重点关注以下方向。

(1) 面向检测任务的协同优化。将缺陷召回、误检和边界保留等指标用于指导照明参数与增强方法选择, 逐步探索采集端与检测端的反馈调节, 并在一致数据和工况下区分各环节对性能的贡献。

(2) 多源与多模态信息的可靠融合。围绕强度、偏振及几何信息的互补性, 处理好配准误差、运动

同步与输入质量差异, 考察部分信息退化时的检测稳定性, 明确新增采集通道所带来的有效信息增益。

(3) 面向产线的效率与稳定性评价。结合实际分辨率、输送速度和处理硬件, 评价从采集到结果输出的整体延迟及连续处理能力, 并通过现场误检、漏检样本积累和跨工况验证, 为模型维护与质量追溯提供依据。

致谢

本工作得到了我的导师的细心指导与全力支持。

利益冲突声明

作者申明不存在与本文研究相关的利益冲突。

参考文献

- [1] LUO Q, FANG X, LIU L, et al. Automated visual defect detection for flat steel surface: A survey[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(3): 626-644. DOI: 10.1109/TIM.2019.2963555.
- [2] PERNKOPF F, O'LEARY P. Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces[J]. NDT & E International, 2003, 36(8): 609-617. DOI: 10.1016/S0963-8695(03)00081-1.
- [3] KAZAMA A, OSHIGE T. Correlation of optical microstructure and macroscopic intensity of defects on steel strip surface[J]. ISIJ International, 2014, 54(8): 1843-1848. DOI: 10.2355/isijinternational.54.1843.
- [4] SONG K C, HU S P, YAN Y H, et al. Surface defect detection method using saliency linear scanning morphology for silicon steel strip under oil pollution interference[J]. ISIJ International, 2014, 54(11): 2598-2607. DOI: 10.2355/isijinternational.54.2598.
- [5] ONO H, TATE M, IJIMA Y, et al. Surface inspection system for heavy steel plate using twin illumination and subtraction technique[J]. Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, 2023, 59(8): 362-371. DOI: 10.9746/sicetr.59.362.
- [6] HUANG L P, HSU Q C, LIU B H, et al. Light source modules for defect detection on highly reflective metallic surfaces[J]. Metals, 2023, 13(5): 861. DOI: 10.3390/met13050861.
- [7] JEON Y J, CHOI D C, LEE S J, et al. Steel-surface defect detection using a switching-lighting scheme[J]. Applied Optics, 2016, 55(1): 47-57. DOI: 10.1364/AO.55.000047.
- [8] ONO H, OGAWA A, YAMASAKI T, et al. Twin-illumination and subtraction technique for detection of concave and convex defects on steel pipes in hot condition[J]. ISIJ International, 2019, 59(10): 1820-1827. DOI: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-742.
- [9] PIZER S M, AMBURN E P, AUSTIN J D, et al. Adaptive histogram equalization and its variations[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1987, 39(3): 355-368. DOI: 10.1016/S0734-189X(87)80186-X.
- [10] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976. DOI: 10.1109/83.597272.
- [11] 高如新, 杨晓雪, 齐成. 基于钢板表面缺陷检测的图像增强研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(6): 850-854. DOI: 10.16186/j.cnki.1673-9787.2015.06.019.
- [12] KAZAMA A, SUGIURA H, OSHIGE T, et al. Analysis of polarized light reflection from surface defects on steel sheets and its application to a high-speed inspection technique[J]. Tetsu-to-Hagane, 2004, 90(11): 870-876. DOI: 10.2355/tetsutohagane1955.90.11_870.
- [13] LI S, YAN Z, LI P, et al. Metal surface defect detection based on Latitude-Longitude light sources[J]. Measurement, 2024, 228: 114315. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114315.
- [14] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409. DOI: 10.1109/TPAMI.2012.213.
- [15] LI S, KANG X, HU J. Image fusion with guided filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(7): 2864-2875. DOI: 10.1109/TIP.2013.2244222.
- [16] LIU W, YAN Y. Automated surface defect detection for cold-rolled steel strip based on wavelet anisotropic diffusion method[J]. International Journal of Industrial and Systems Engineering, 2014, 17(2): 224-239. DOI: 10.1504/IJISE.2014.061995.

- [17] LIU M, LIU Y, HU H, et al. Genetic algorithm and mathematical morphology based binarization method for strip steel defect image with non-uniform illumination[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2016, 37: 70-77. DOI: 10.1016/j.jvcir.2015.04.005.
- [18] ZHANG K, ZUO W, CHEN Y, et al. Beyond a Gaussian denoiser: Residual learning of deep CNN for image denoising[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(7): 3142-3155. DOI: 10.1109/TIP.2017.2662206.
- [19] YANG Z, GU R, ZHU L, et al. YOLOv8s-BISW a surface defect detection algorithm for stainless steel pipes[J]. *Sensors*, 2026, 26(11): 3573. DOI: 10.3390/s26113573.
- [20] LU J, YU R, ZHANG H, et al. Highly reflective metal industrial parts surface detection with polarization vision and modified YOLO[J]. *Digital Signal Processing*, 2025, 163: 105238. DOI: 10.1016/j.dsp.2025.105238.
- [21] TANG B, CHEN L, SUN W, et al. Review of surface defect detection of steel products based on machine vision[J]. *IET Image Processing*, 2023, 17(2): 303-322. DOI: 10.1049/ipr2.12647.
- [22] 汤勃, 孔建益, 王兴东, 等. 钢板表面低对比度微小缺陷图像增强和分割[J]. *中国图象图形学报*, 2020, 25(1): 81-91. DOI: 10.11834/jig.190057.
- [23] QIU Y, NIU S, NIU T, et al. Joint-prior-based uneven illumination image enhancement for surface defect detection[J]. *Symmetry*, 2022, 14(7): 1473. DOI: 10.3390/sym14071473.
- [24] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861.
- [25] XIE X, SHEN Y, ZHANG J, et al. A review of vision-based defect detection research for highly reflective metal surfaces[J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2026, 81: 102492. DOI: 10.1016/j.jestch.2026.102492.
- [26] PAN Y, CHEN J, WU P, et al. Enhanced rail surface defect segmentation using polarization imaging and dual-stream feature fusion[J]. *Sensors*, 2025, 25(11): 3546. DOI: 10.3390/s25113546.
- [27] NEOGI N, MOHANTA D K, DUTTA P K. Review of vision-based steel surface inspection systems[J]. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2014, 2014(1): 50. DOI: 10.1186/1687-5281-2014-50.
- [28] REZA A M. Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement[J]. *Journal of VLSI Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology*, 2004, 38(1): 35-44. DOI: 10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82.
- [29] 王伟江, 彭业萍, 曹广忠, 等. 面向机柜表面缺陷检测的不均匀光照和低亮度图像增强方法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(8): 131-139.
- [30] ZHAO Y J, YAN Y H, SONG K C. Vision-based automatic detection of steel surface defects in the cold rolling process: considering the influence of industrial liquids and surface textures[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(5-8): 1665-1678. DOI: 10.1007/s00170-016-9489-0.

Advances in Illumination and Image Enhancement Techniques for Steel Surface Defect Detection

Su Zhendong

school of Jiangsu Normal University, Xuzhou Jiangsu

Abstract: This narrative review summarizes advances in illumination and image enhancement for steel surface defect detection, focusing on imaging challenges caused by strong reflections, nonuniform illumination, surface textures, and oil contamination. It reviews the optimization of illumination geometry, polarization control, coordinated illumination using multiple light sources, and digital enhancement strategies. Their applicability, limitations, and integration with intelligent detection methods are discussed. Optical image acquisition and digital processing play complementary roles. Enhancement methods should be matched to surface conditions and defect characteristics, with their effectiveness evaluated in terms of defect distinguishability and detection performance. Digital enhancement has limited ability to recover true image details lost during acquisition. Future research should focus on joint optimization of optical configurations and algorithms, reliable fusion of multimodal information, and validation of processing efficiency and operational stability across the entire detection workflow under varying operating conditions.

Keywords: steel surface defects; machine vision; illumination optimization; image enhancement