中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

冷轧钢表面与内部缺陷检测研究

陈名渝 谢玥辰 吕雄涛 郭建荣 贾国军 许志鹏 王狮凌 项震 刘东

Detection of surface and internal defects in cold rolled steel

CHEN Ming-yu, XIE Yue-chen, LV Xiong-tao, GUO Jian-rong, JIA Guo-jun, XU Zhi-peng, WANG Shi-ling, XIANG Zhen, LIU Dong

引用本文:
陈名渝, 谢玥辰, 吕雄涛, 郭建荣, 贾国军, 许志鹏, 王狮凌, 项震, 刘东. 冷轧钢表面与内部缺陷检测研究[J]. 中国光学, 2024, 17(4): 823-833. doi: 10.37188/CO.2023-0189
CHEN Ming-yu, XIE Yue-chen, LV Xiong-tao, GUO Jian-rong, JIA Guo-jun, XU Zhi-peng, WANG Shi-ling, XIANG Zhen, LIU Dong. Detection of surface and internal defects in cold rolled steel[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 823-833. doi: 10.37188/CO.2023-0189

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2023-0189

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

表面损伤衍射双向反射分布函数模型建立及分析

Establishment and analysis of the diffraction bidirectional reflection distribution function model for surface defects

中国光学（中英文）. 2021, 14(2): 375 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0162

低维光电材料缺陷与界面增强拉曼散射

Defects- and interface-enhanced Raman scattering in low-dimensional optoelectronic materials

中国光学（中英文）. 2021, 14(1): 170 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0145

石墨烯缺陷对光子晶体光吸收特性的调制

The modulation effect of graphene defects on the light absorption properties of photonic crystals

中国光学（中英文）. 2022, 15(3): 418 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0203

二维过渡金属硫族化合物中的缺陷和相关载流子动力学的研究进展

Progress on defect and related carrier dynamics in two-dimensional transition metal chalcogenides

中国光学（中英文）. 2021, 14(1): 18 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0106

显微条纹投影小视场三维表面成像技术综述

3D small-field surface imaging based on microscopic fringe projection profilometry：a review

中国光学（中英文）. 2021, 14(3): 447 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0199

基于三维边界元算法的石墨烯纳米圆盘表面等离子体共振特性研究

Surface plasmon resonance characteristics of a graphene nano-disk based on three-dimensional boundary element method

中国光学（中英文）. 2021, 14(5): 1288 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0004

文章编号 2097-1842(2024)04-0823-11

冷轧钢表面与内部缺陷检测研究

陈名渝[1,2], 谢玥辰[1,2], 吕雄涛[1,2], 郭建荣[3], 贾国军[4], 许志鹏[2], 王狮凌[5], 项 震[1], 刘 东[1,2*]
（1. 浙江大学 光电科学与工程学院 极端光学技术与仪器全国重点实验室, 浙江 杭州 310027;
2. 浙江大学杭州国际科创中心, 浙江 杭州 311200;
3. 浙江东南新材科技有限公司, 浙江 杭州 311222;
4. 宁波钢铁有限公司 技术中心, 浙江 宁波 315807;
5. 中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018）

摘要: 为实现冷轧钢缺陷的全面检测, 针对其表面和内部缺陷检测展开研究。对于表面缺陷检测, 提出采用双侧线光源照明方案, 并与常规线光源照明方案进行对比。对于内部缺陷检测, 从检测分辨率和缺陷边缘特征两方面分析 X 射线、超声以及红外热波成像等金属内部检测技术的适用性。经实验验证, 双侧线光源照明不仅可以使 YOLOv5 目标检测算法总体平均精度 mAP:0.5 达到 90.16%, 相比线光源照明提升了 15.46%, 还可优化模型分类和提高训练效率。X 射线和超声波检测法可检测直径为 0.25 mm 的盲孔, 而红外热波成像技术则可有效识别出直径为 1 mm 的盲孔。在缺陷边缘特征评估中, X 射线检测法的最小盲孔边缘灰度差值为 145, 超声波为 89, 红外热波成像为 30。本研究提出了一种冷轧钢表面缺陷检测的改进方案, 并为内部缺陷检测提供了思路。

关 键 词: 冷轧钢缺陷检测; 表面缺陷; 内部缺陷; 双侧线光源照明
中图分类号: O439 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2023-0189

Detection of surface and internal defects in cold rolled steel

CHEN Ming-yu[1,2], XIE Yue-chen[1,2], LV Xiong-tao[1,2], GUO Jian-rong[3], JIA Guo-jun[4],
XU Zhi-peng[2], WANG Shi-ling[5], XIANG Zhen[1], LIU Dong[1,2*]
（1. *State Key Laboratory of Extreme Photonics and Instrumentation*, *College of Optical Science and Engineering*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310027, *China*;
2. *ZJU-Hangzhou Global Scientific and Technological Innovation Center*, *Hangzhou* 311200, *China*;
3. *Zhejiang Southeast New Material Technology Company Limited*, *Hangzhou* 311222, *China*;
4. *Technology Center*, *Ningbo Steel Company Limited*, *Ningbo* 315807, *China*;
5. *College of Metrology and Measurement Engineering*, *China Jiliang University*, *Hangzhou* 310018, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *liudongopt@zju.edu.cn*

Abstract: This paper focuses on the comprehensive detection of defects in cold rolled steel through examina-

收稿日期: 2023-10-31; **修订日期:** 2023-11-24
基金项目: 国家重点研发计划（No. 2022YFB3403404）; 极端光学技术与仪器全国重点实验室创新项目（No. EPI2023ZD01）
Supported by National key research and development program (No. 2022YFB3403404); State Key Laboratory of Extreme Photonics and Instrumentation Innovation Program (No. EPI2023ZD01)

tion for surface and internal defects. Regarding surface defect detection, a bilateral line light illumination scheme is proposed and a comparison with line light illumination scheme is carried out. As for internal defect detection, the applicability of various metal internal inspection technologies such as X-ray, ultrasound, and infrared thermography is analyzed from the perspectives of detection resolution and defect edge characteristics. The results show that bilateral line light illumination not only increases the overall average precision of the YOLOv5 object detection algorithm model to 90.16% (an increase of 15.46% compared to the line light illumination) but also improves model classification and training efficiency. X-ray and ultrasound inspection technologies can detect blind holes with a diameter of 0.25 mm, while infrared thermography can detect blind holes with a diameter of 1 mm. In evaluating defect edge characteristics, X-ray inspection technology exhibits a minimum blind hole edge grayscale difference of 145, ultrasound of 89, and infrared thermography of 30. This study proposes an improved scheme for the detection of surface defects in cold rolled steel and offers insights for the research on internal defect detection.

Key words: cold rolled steel defect detection; surface defects; internal defects; bilateral line light illumination

1 引 言

近年来，我国锂电池[1]、汽车[2]等制造业与建筑业发展步伐加快，当今市场对作为锂电池外壳、车门外板等原材料的冷轧钢的需求与日俱增，其品控标准也日益提升[3-4]。目前冷轧钢工业生产线多采用人工目视检测，但流水线所带来的视觉压力，以及酸洗、冷轧、退火等多工艺环节形成的缺陷种类繁多等问题常导致漏检和误判现象[5-8]。

基于机器视觉的冷轧钢表面缺陷检测的相关研究已有报道，其中，多以美国 Honeywell 公司线扫成像检测系统为基础[9]，并结合实际情况进行改进[10]。然而，实践中常出现对于复杂缺陷检测效果不理想的问题[11-12]。此外，受限于生产模式与环境等因素，尚未有成熟的冷轧钢内部缺陷检测系统成功应用。然而，对于其他金属材料的内部缺陷检测研究已有丰富的成果积累。法国里昂大学[13]、南昌航空大学[14]、中北大学[15]等单位采用 X 射线法进行金属零部件检测研究。日本 JFE 钢铁[16]、清华大学[17]、南京大学[18]等运用超声波法检测金属板材内部缺陷。英国巴斯大学[19]、江苏大学[20]、哈尔滨工业大学[21]等众多研究单位基于红外热波成像法进行金属内部缺陷检测。因此，综合考虑现有的各类金属内部缺陷检测方法的优劣势，结合冷轧钢材料特性，可设计和开发适用于冷轧钢内部缺陷的检测方案。

针对上述问题，本文以实现冷轧钢缺陷全面检测为目标，提出冷轧钢缺陷检测总体方案。在该检测方案中，首先分析系统照明对冷轧钢表面缺陷检测的影响，并基于双侧线光源照明方案搭建表面缺陷检测模块。通过与同类方法中常用的线光源进行对比，本文不仅探究了双侧线光源照明对系统成像的影响，还分析了其对 YOLOv5 目标检测算法缺陷识别影响，充分证明了双侧线光源照明在实际应用中的可靠性。其次，本文通过 X 射线检测法、超声波检测法与红外热波成像法进行冷轧钢内部缺陷检测实验。从检测分辨能力角度进行分析，验证了 X 射线检测法、超声波检测法、红外热波成像法对冷轧钢内部缺陷检测的适用性。此外，通过 Sobel 算法提取盲孔缺陷边缘特征，进一步评估 3 种技术对于冷轧钢内部缺陷检测的效果和准确性。

2 冷轧钢缺陷检测方案

冷轧钢缺陷检测方案如图 1 所示。该检测体系包括表面缺陷检测模块、内部缺陷检测模块和数据分析模块。表面缺陷检测模块包括成像单元与照明单元，内部缺陷检测模块包括检测单元，数据分析模块包括数据处理与缺陷识别。在检测过程中，表面缺陷检测模块通过照明单元与成像单元采集冷轧钢表面缺陷数据，数据分析模块进一步进行图像处理和目标检测识别。内部缺陷检测模块则直接通过检测单元采集冷轧钢内部缺陷数据。

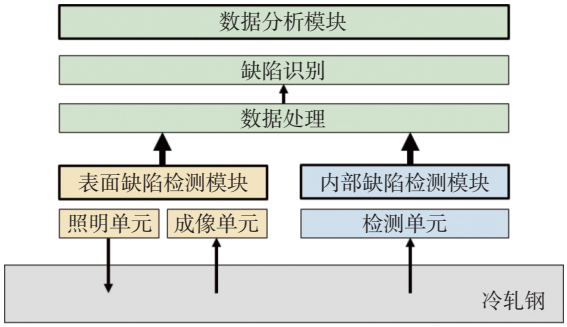


图 1　冷轧钢缺陷检测方案

Fig. 1　Cold rolled steel defect detection scheme

2.1　表面缺陷检测模块

2.1.1　相机拍摄角设置

针对物体表面特性与缺陷散射特性设计出合适的照明方案能够突出表面缺陷信息, 从而提高成像质量, 减小后期图像处理难度。从表面特性分析, 冷轧钢具有金属表面的特性, 容易产生强烈的镜面反射。如图 2 所示, 表面反射一般认为由漫反射波瓣、镜面反射波瓣和镜面反射尖峰三部分组成。

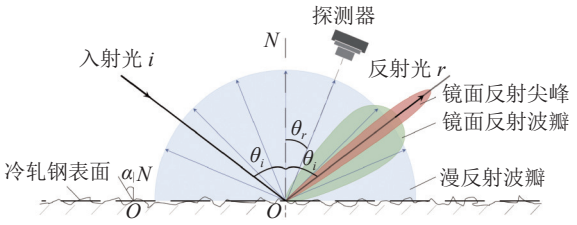


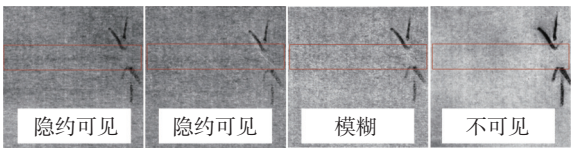
图 2　冷轧钢表面检测模型

Fig. 2　Model of cold rolled steel surface detection

其中, 漫反射波瓣为冷轧钢表面固有的散射光分布, 用 Lambertian 模型表示, 镜面反射波瓣与镜面反射尖峰则代表镜面反射光分布, 分别用 Torrance-Sparrow 模型与 Beckmann-Spizzichino 模型的镜面反射分量表示。结合上述 3 种模型可以得到以下反射模型公式[22]:

$$I = C_{dl} + \frac{C_{sl}}{\cos\theta_r}\exp\left(-\frac{\alpha^2}{2\sigma_\alpha{}^2}\right) + C_{ss}\delta(\theta_i-\theta_r)\delta(\phi_r), \tag{1}$$

其中, I为反射光光强, C_{dl}、C_{sl}、C_{ss}分别为漫反射波瓣、镜面反射波瓣和镜面反射尖峰的强度, α为反射表面的表面微元法线与宏观表面法线之间的夹角平均值, σ_α为以α表示的反射表面粗糙度, θ_i为照明入射角, θ_r为相机拍摄角, ϕ_r则为空间角。由式(1)可知, 镜面反射波瓣随着粗糙度的增大而增大。普通冷轧钢的表面粗糙度约为 0.6 μm[23], 属于可微辨加工痕迹的光面, 镜面反射波瓣较强。因此, 在进行系统设计时需要考虑相机拍摄角θ_r的设置。研究表明当照明方向与表面缺陷方向垂直时, 相机接收到的散射光效果最好[24]。然而, 如图 3 所示, 当照明入射角θ_i固定时, 相机拍摄角θ_r为 10°时便已进入镜面反射波瓣范围内, 无法有效拍摄出与照明方向垂直的划痕。由此可知, 为减小镜面反射对成像的影响, 需使相机拍摄角θ_r减小至 0。



(a) θ_r=0°　(b) θ_r=5°　(c) θ_r=10°　(d) θ_r=θ_i

图 3　不同相机拍摄角θ_r下的检测划痕

Fig. 3　Detecting scratches captured at different angles θ_r by camera

2.1.2　照明光源设置

照明对缺陷散射的影响主要体现在照明方向上。环形光源的多方向照明可突出缺陷不同维度的信息, 可避免特定角度的缺陷漏检, 但其照明范围小, 无法有效覆盖幅宽尺寸达米级的冷轧钢。线光源可实现米级范围的照明, 但其照明方向单一, 无法突出缺陷其他维度的信息。本文提出一种双侧线光源照明进行研究, 如图 4 所示。

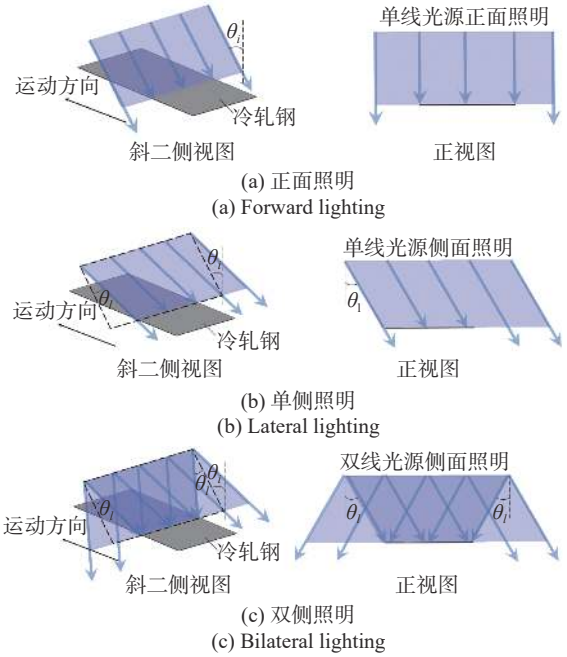
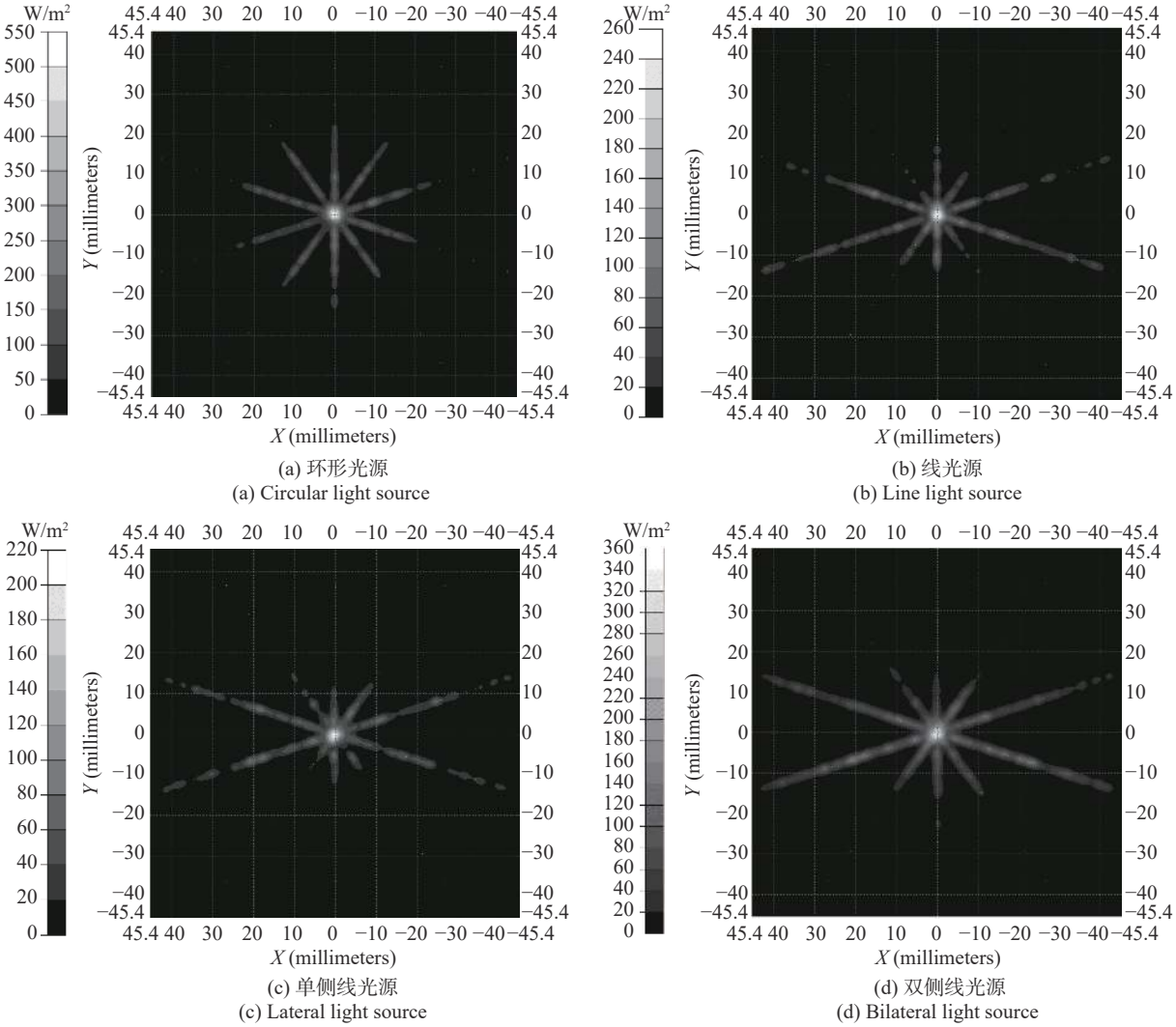


图 4　3 种线光源照明方向示意图

Fig. 4　Lighting direction of three kinds of line light sources

照明入射角θ_i相同时，如图 4(a) 所示，常用的单线光源照明仅有正面方向。在图 4(b) 中，单线光源又以角度θ_i侧向倾斜入射物体表面，为物体表面提供单侧的光照。在图 4(c) 中，双侧线光源由两个对向的单线光源组成，光源重叠部分即为实际照明区域。

如图 5 所示，基于 TracePro 软件进行环形光源，线光源，单侧线光源与双侧线光源照明仿真。图 5(a) 为环形光源照明。由图 5(a) 可见，其可有效照明各方向划痕，但整体照明范围小。图 5(b) 为线光源照明，其范围大，但单一方向照明使部分方向划痕照明不充分。图 5(c) 为单侧线光源照明，其与普通线光源照明效果相似。如图 5(d) 所示，双线光源侧向照明不仅能够有效照明各方向划痕，而且整体照明范围也比环形光源大。



(a) 环形光源
(a) Circular light source

(b) 线光源
(b) Line light source

(c) 单侧线光源
(c) Lateral light source

(d) 双侧线光源
(d) Bilateral light source

图 5 不同光源下各方向划痕仿真结果

Fig. 5 Simulation results of scratches illuminated by different light sources

2.1.3 线扫成像表面缺陷检测模块

普通冷轧钢幅宽一般为 1 000~1 200 mm，在检测环节中最大运行速度常为 2~3 m/s。根据以上实际生产需求，本文设计的冷轧钢线扫成像表面缺陷检测系统模块如图 6 所示，其包括成像单元、照明单元和数据分析模块。

依据原理分析，照明单元采用双侧线光源方案。其中照明角度θ_i固定为 35°，两个单侧斜照线光源入射光分别为i_1与i_2，经过冷轧钢表面反射入射光形成对应的反射光r_1与r_2。这两束反射光仅有小部分重叠区域，其余均沿着光源照明角度θ_i与侧向斜照角度θ_i以空间角θ_s的方向出射。该照明方案可以有效降低冷轧钢表面镜面反射对检测的影响。

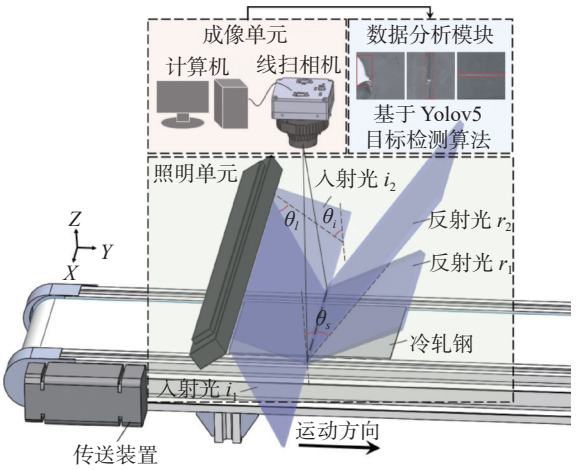


图 6　冷轧钢表面缺陷检测系统

Fig. 6　The cold rolled steel surface defect detection system

在成像单元中, 选用像素数为 8 192×1、最大行频为 80 kHz 的线扫相机进行数据采集。该线扫相机配套焦距为 41 mm 镜头, 放大倍率为 0.046×, 取线扫相机视场为 1 250 mm 以覆盖冷轧钢幅宽大小。同时, 设置线扫相机拍摄位以使相机拍摄角θ_r为 0°。通过计算可得到本系统理论分辨率约为 152 μm, 理论可测得物体运动最大速度约为 12.16 m/s, 系统相机工作距约为 893.79 mm, 系统景深为 191.19 mm。

在数据分析模块中, 采用 YOLOv5 目标检测算法实现冷轧钢表面缺陷的识别与分类。以 YOLO 系列算法为代表的单阶段检测算法有着检测速度快、目标识别效果较好、检测实时性好等优点, 可广泛应用于工业、行人车辆、医学以及遥感等领域[25-29]。相较于其他 YOLO 系列算法, YOLOv5 目标检测算法在 Backbone 网络融入了 Focus 结构进行特征提取与卷积, 其可在保持图片原有信息的情况下减小图片尺寸、扩大了通道数、提高了计算速度。同时, 在 Backbone 网络和 Neck 网络中加入 CSP1 结构与 CSP2 结构, 可增强网络特征融合能力, 减轻内存负担并保持准确性。而在输出端, YOLOv5 沿用原有的损失函数 CIOU_Loss, 使预测框保持快速回归, 使模型实现高精度识别。损失函数 CIOU_Loss 具体表达式如下:

$$CIOU_Loss = 1 - \left(IOU - \frac{L_2^2}{L_1^2} - \frac{v^2}{(1-IOU)+v} \right), \tag{2}$$

其中, IOU 为预测框与真实框的交并比, L_1 为两框的最小外接矩形对角线, L_2 为两框中心点的欧氏距离。v 为衡量长宽比的一致性参数, 具体定义为:

$$v = \frac{4}{\pi^2}\left(\arctan\frac{w_{gt}}{h_{gt}} - \arctan\frac{w_p}{h_p} \right)^2 , \tag{3}$$

其中, w_{gt} 和 h_{gt} 分别为真实框的长与宽, w_p 和 h_p 分别为预测框的长与宽。经综合评价知, 冷轧钢表面缺陷识别与分类采用 YOLOv5 目标检测算法更为合适。

2.2　内部缺陷检测模块

2.2.1　X 射线检测

综合了解各种检测技术原理与特点, 有助于实际应用评估。在 X 射线检测中, X 射线计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)是一种利用物体对 X 射线吸收差异, 并结合计算机图像三维重建算法的检测技术, 常应用于物体内部结构的成像和缺陷检测。根据 Lambert-Beer 定律, X 射线在物体中的衰减表示为:

$$I = I_0 e^{-\mu x} , \tag{4}$$

式中, I_0 为入射 X 射线强度, μ 为物体材料的衰减系数, x 为空间坐标。常规 CT 检测系统主要通过高能电子束打靶产生 X 射线源, 并采用高分辨率线阵探测器或面阵探测器采集 X 射线强度数据。然而, 受高能电子束质量, 设备成像范围与三维重建效率等因素影响, X 射线检测不适合应用于大尺寸物体检测。因此, 对于冷轧钢内部缺陷检测, X 射线检测更适用于小尺寸样品研究分析。

2.2.2　超声波检测

超声波检测是一种基于超声波传播与反射强度分析的检测技术, 通过测量超声波在不同介质中的强度分布可对物体内部结构成像。其中, 超声波强度通常指声压强度, 用声学方程表示为:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{E}{\rho}\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} , \tag{5}$$

式中, P 表示声压, t 表示超声波传播时间, v 表示声速, x 表示空间坐标, E 为介质弹性模量, ρ 为介质密度。由式(5)可知, 超声波强度在传播过程中与介质特性相关。超声波在作为介质的空气中会产生强烈的反射与折射, 为了减小超声波能量损失常需要水、油等液态耦合剂辅助超声波进入物体内部。

2.2.3 红外热波成像检测

红外热波成像是一种对物体施加热源激励并依据红外辐射分布进行成像的技术。利用缺陷与物体热传导率的差异，其采用红外热像仪记录物体表面温度变化从而实现物体内部缺陷探测。Stefan-Boltzmann 定律指出一个黑体表面单位面积在单位时间内辐射出的总能量E与物体本身的热力学温度T的四次方成正比，即：

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad , \tag{6}$$

式中ε为物体发射率，若为绝对黑体，则发射率$\varepsilon = 1$；σ为 Stefan-Boltzmann 常数，一般为 5.67×10^{-8} W/(m^2·K^4)。

热波在物体内部的传热过程则遵循 Fourier 定律：

$$\Phi = -kA\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x} \quad , \tag{7}$$

式中，负号表示热波向低温方向传递，k为材料导热系数，A表示物体表面面积，x表示空间坐标。对于各项同性的平板，结合能量守恒定律知其传热方程为：

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t} = k\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad , \tag{8}$$

式中，ρ为平板材料密度，c为比热容，t为时间。根据实际情况将定解条件带入上式，即可求解温度分布。

3 实验结果与分析

3.1 实验准备

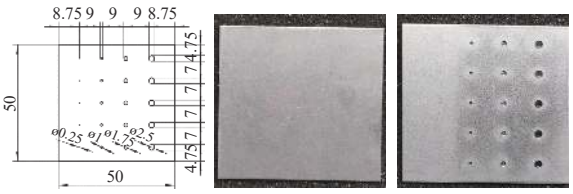
搭建所设计的冷轧钢表面缺陷检测模块，并采用 UAF1951 分辨率板进行实际成像分辨率测试。该表面缺陷检测模块可分辨出分辨率板上 2.83 lp/mm 线对组，即可分辨线宽值为 176.78 μm，在误差允许范围内与理论值保持一致。进一步地，采用刻度尺、游标卡尺与显微镜等测量工具，对实际生产线中的孔洞、破损、夹杂、树纹、划痕和色差等 6 种缺陷样品进行尺寸测量。通过多次测量和数据分析，每种样品尺寸均值与不确定度如表 1 所示。其中，刻度尺精度为 10^{-1} cm，游标卡尺精度为 10^{-2} cm，显微镜精度为 10^{-4} cm。

如图 7 所示，对冷轧钢样品进行盲孔加工。其中，样品尺寸为 50 mm×50 mm×0.8 mm，样品上每一列盲孔直径分别为 2.50、1.75、1.00 和 0.25 mm，对应深度均为 0.4 mm。X 射线检测时，采用工业 CT 系统检测盲孔样品。其中，系统的扫描电压设置为 160 kV，电流为 180 μA，扫描步距为 25 μm。超声波检测时，将盲孔样品置于水中，并采用脉冲频率为 15 MHz，焦距为 19.05 mm 的探头进行扫描，扫描电压设置为 275 V，高通滤波为 1.0 MHz，低通滤波为 50.0 MHz。红外热波成像检测中，利用工作波段为 3.7~4.8 μm，像素数为 640×512，噪声等效温度差为 20 mK 的热像仪进行测试，热激励脉冲能量设置为 5 kJ，样品表面作提高发射率喷涂处理。在实验过程中，探测器始终从样品无盲孔面（样品正面）进行检测。

表 1 冷轧钢样品缺陷尺寸

Tab. 1 Defect size in cold rolled steel samples

缺陷类型	长度均值/cm	不确定度	宽度均值/cm	不确定度
孔洞	0.896	0.035	0.512	0.020
破损	4.960	0.025	1.204	0.030
夹杂	15.52	0.74	0.162	0.091
树纹	8.242	0.030	0.200	0.025
划痕	20.49	0.74	0.022 2	0.008 4
色差	19.70	0.74	5.994	0.030



(a) 盲孔加工示意 (a) Schematic diagram of blind hole　(b) 样品正面 (b) Front of the sample　(c) 样品背面 (c) Back of the sample

图 7 盲孔加工样品

Fig. 7 Sample with blind hole

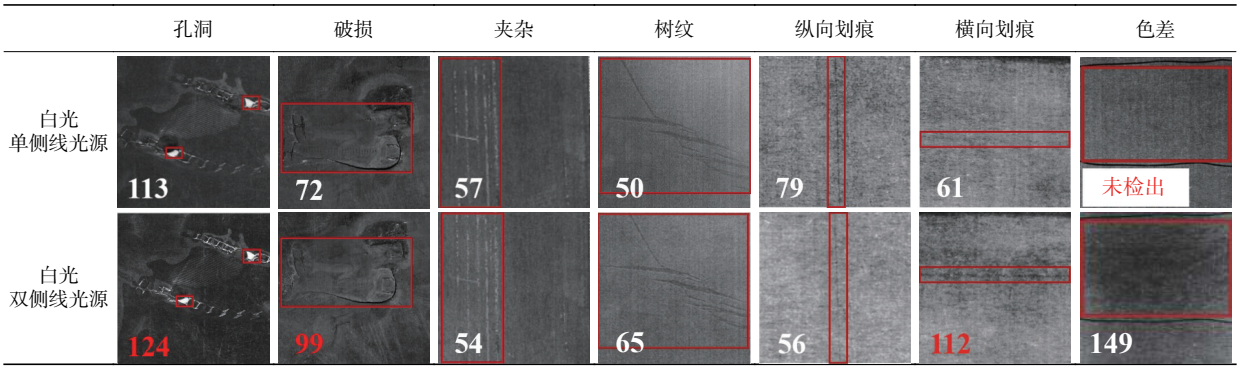
3.2 冷轧钢表面缺陷检测照明对比实验

在冷轧钢表面缺陷检测模块中，如表 2 所示，运用白光线光源与白光双侧线光源进行照明成像，并进行灰度差值分析，以进一步评估成像质量。检测结果表明，在白光线光源照明下，检测模块无法对横向划痕清晰成像，且无法有效检测出色差缺陷。在白光双侧线光源照明条件下，检测模块对横向划痕和色差缺陷的成像较为清晰。从灰度差值对比结果可知，采用白光双侧线光源可

有效提高缺陷与冷轧钢表面之间的对比度。双侧线光源照明下大部分缺陷对应的灰度差值比白光线光源高, 仅夹杂缺陷与纵向划痕缺陷的灰度值略低于白光线光源。根据冷轧钢表面检测模型分析, 针对横向划痕与色差等横向缺陷, 双侧线光源减小了镜面反射对检测的影响。但对于纵向缺陷, 双侧线光源照明依然存在镜面反射, 影响检测模块的成像效果。

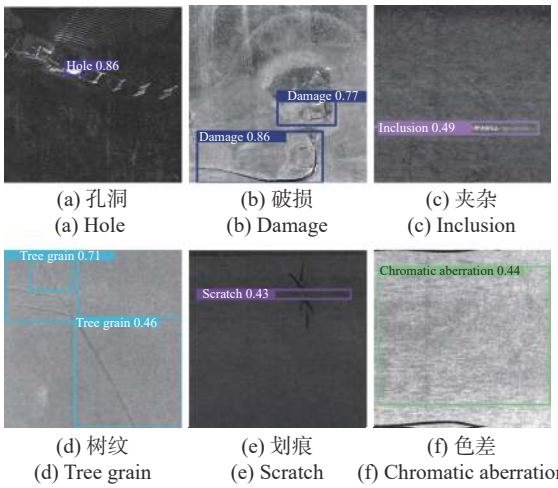
表 2　白光线光源与白光双侧线光源之间的对比

Tab. 2　Imaging comparison when using white lateral and white bilateral line light source illuminations



利用 YOLOv5 目标检测算法对冷轧钢表面缺陷进行识别, 相关结果如图 8 所示。在此基础上, 对白光线光源和白光双侧线光源照明对后期算法的影响进行分析。其中, 在两种光源照明条件下, 利用表面缺陷检测模块采集孔洞、破损、夹杂、树纹、划痕与色差等样品图片数据。为了明确呈现照明对后期算法的影响, 对于原始图片数据, 实验仅进行了图片切割的预处理和旋转与翻转等数据增强操作。对于每种光源照明条件, 各有 1 770 张图片数据用于神经网络训练, 30 张图片数据用于缺陷识别分类性能验证。在训练过程中, 所输入图像大小设置为 512×512, 训练轮数(Epoch)为 300, 批大小(Batch size)为 4, 同时初始权重选用 YOLOv5m。在验证阶段, 目标置信度阈值设置为 0.40, 非极大值抑制(Non-Maximum suppression, NMS)IOU 阈值设置为 0.45。

在白光线光源和白光双侧线光源照明条件下,对应的图片数据训练与识别检测结果如表 3 所示。其中, 当使用白光双侧线光源照明时, YOLOv5 目标检测算法模型的准确率和召回率分别高达 91.50% 与 97.67%。同时, 平均精度 mAP:0.5 达到 90.16%, 相比于白光线光源照明条件提升了 15.46%。此外, 在该照明条件下, 模型对各类缺陷(例如夹杂、树纹和划痕)检测性能也有显著的提升。具体而言, 相比于白光线光源照明, 白光双侧线光源照明下对夹杂、树纹和划痕类型的缺陷的平均精度分别提高了 15.00%, 21.67% 和 18.33%, 且色差类型的检测平均精度达到 73.00%。



(a) 孔洞　(b) 破损　(c) 夹杂
(a) Hole　(b) Damage　(c) Inclusion

(d) 树纹　(e) 划痕　(f) 色差
(d) Tree grain　(e) Scratch　(f) Chromatic aberration

图 8　样品缺陷识别结果

Fig. 8　Defect identification results

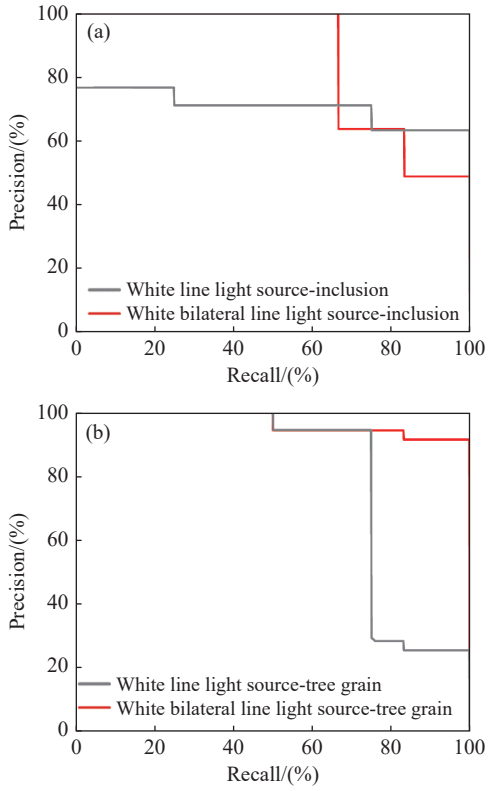
值得注意的是, 如图 9(彩图见期刊电子版)所示, 通过对比夹杂、树纹和划痕类型缺陷下, 白光单侧线光源和白光双侧线光源的 Precision-Recall 曲线面积可知, 白光双侧线光源照明下这 3 种缺陷对应面积均更大。这说明在白光双侧线光源照明条件下, 模型的多类别分类效果优于白光单侧线光源照明。此外, 由图 10(彩图见期刊电子版)mAP:0.5 随训练轮数的变化情况可以看出, 白光双侧线光源照明下, 模型的训练效率有所提高。采用指数模型拟合 mAP:0.5 的数据进行实验, 结果显示: 在白光单侧线光源照明下, 拟合度

R^2 为 0.974, mAP:0.5 趋于平缓的速度慢；在白光双侧线光源照明下，拟合度 R^2 为 0.983, mAP:0.5 趋于平缓的速度快。上述结果表明，采用白光双侧线光源照明方案可获取更高质量的数据，从而使模型能够快速收敛且能高效地进行训练。

表 3 白光线光源与白光双侧线光源照明下 YOLOv5 目标检测算法结果

Tab. 3 Results of YOLOv5 target detection algorithm using white line light source and white bilateral line light source illuminations

	白光线光源	白光双侧线光源
准确率	80.80%	91.50%↑
召回率	96.00%	97.67%↑
mAP:0.5	74.70%	90.16%↑
损失值	1.38%	1.37%
孔洞	99.50%	99.50%
破损	99.60%	99.60%
夹杂	74.80%	89.80%↑
树纹	74.60%	96.27%↑
划痕	65.57%	83.90%↑
色差	\	73.00%



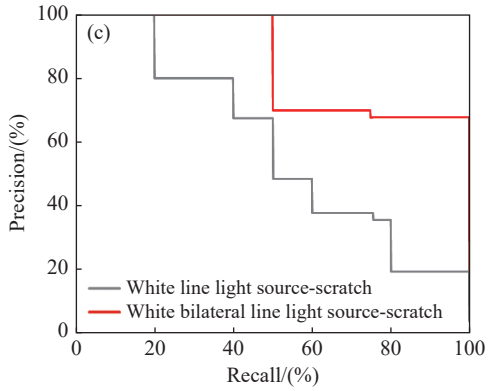


图 9 针对不同缺陷时，白光线光源与白光双侧线光源照明下 Precision-Recall 曲线。(a)夹杂；(b)树纹；(c)划痕

Fig. 9 Precision-Recall curve for different defects under white line light source and white bilateral line light source illumination. (a) Inclusion; (b) tree grain; (c) scratch

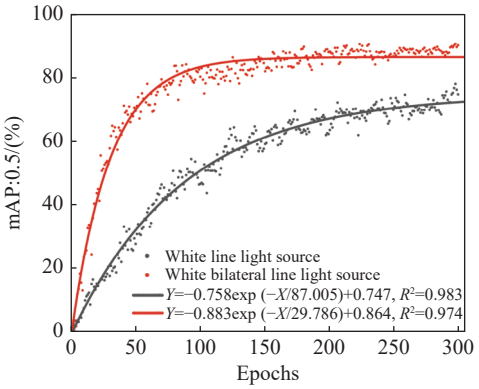


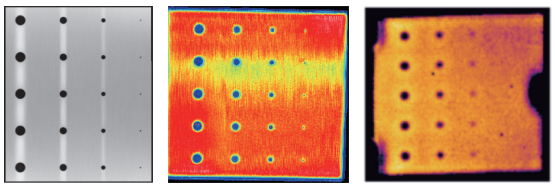
图 10 白光线光源与白光双侧线光源照明下平均精度 mAP:0.5 随训练轮数变化关系

Fig. 10 Variation of mAP:0.5 with the epochs under white line light source and white bilateral line light source illumination

3.3 内部缺陷检测方法对比实验

冷轧钢内部缺陷检测实验中，采用 X 射线检测法、超声波检测法与红外热波成像检测法检测盲孔样品，结果如图 11(彩图见期刊电子版)所示。可见，X 射线和超声波检测法的灵敏度较高，而超声波和红外热波成像的检测范围较大。另外，X 射线检测法可检测所有尺寸的盲孔，最小可以探测到直径为 0.25 mm 的盲孔，而且对于样品加工残留痕迹也能有效检测出。然而，X 射线检测分辨率越高时，对应的扫描范围越小。X 射线检测成像尺度与射线源、被测物和探测器三者位置关系有关[30]。如图 12 所示，当被检测物体距 X 射

线源的距离为d_1, 距探测器的距离为d_2时, 探测器接收到被检测物体的成像发生几何放大, 放大倍数为$(d_1+d_2)/d_1$。因此, 被测物离射线源越近, 对应成像分辨率会越高, 但对应检测范围却越小。超声检测法也可有效检测出直径为 0.25 mm 的盲孔, 且其扫描范围可覆盖整个样品。红外热波成像检测法可检测出最小直径为 1 mm 的盲孔, 且检测范围可覆盖样品。另外, 值得注意的是, 样品表面的灰尘等也会被红外热波成像检测到。



(a) X 射线检测 (a) X-ray　(b) 超声检测 (b) Ultrasonic　(c) 红外热波成像检测 (c) Infrared thermal imaging

图 11　内部缺陷检测结果

Fig. 11　Detection results of internal defects

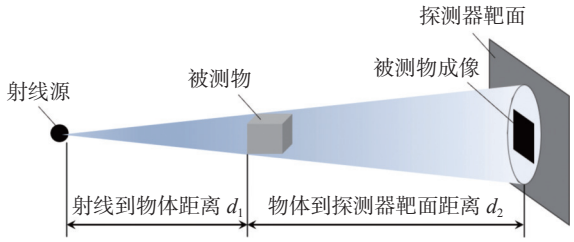
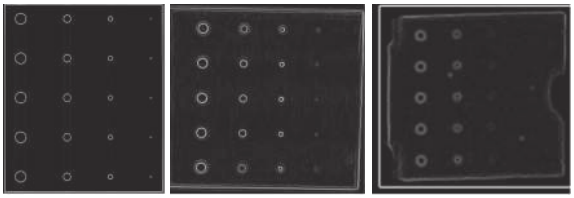


图 12　X 射线检测几何放大原理

Fig. 12　Geometric magnification principle for X-ray detection

对 X 射线检测, 超声检测与红外热波检测结果进行高斯滤波等预处理后, 采用 Sobel 算法提取盲孔样品的边缘特征, 以评估检测技术效果和准确性, 详细结果如图 13 和表 4 所示。可见, X 射线检测法可清晰检测盲孔边缘, 即使直径只有 0.25 mm 的盲孔, 其边缘也清晰可见, 且对应边缘灰度差值达到了 145。超声检测方法检测到的盲孔边缘也较为清晰, 相应的最小灰度差值达到了 89。然而, 对于直径为 0.25 mm 的盲孔边缘特征的提取, 超声检测方法存在一定的不稳定性。这种不稳定性可能是盲孔缺陷边缘形变导致的。这些形变在超声波检测中被捕捉并呈现出来, 从而影响边缘定位算法的准确度。红外热波成像检测所呈现的盲孔边缘较模糊。随着盲孔直径的减小, 灰度差值也明显降低。当盲孔的直径达到 1 mm 时, 灰度差值则降低至 30。



(a) X 射线 (a) X-ray　(b) 超声检测 (b) Ultrasonic　(c) 红外热波成像 (c) Infrared thermal imaging

图 13　Sobel 算法盲孔样品边缘特征提取

Fig. 13　Blind hole sample edge detection using Sobel algorithm

表 4　Sobel 算法盲孔样品边缘特征提取结果

Tab. 4　Results of edge detection on blind hole sample by applying the Sobel algorithm

	工业CT	超声检测	红外热波成像
盲孔检出数	20	20	15
盲孔边缘连通数	20	19	13
边缘提取准确数	20	19	10
最大盲孔边缘灰度差值			
φ2.50 mm	190	193	104
φ1.75 mm	187	180	80
φ1.00 mm	184	172	30
φ0.25 mm	145	89	/

4　结　论

为实现冷轧钢缺陷的全面检测, 本文对其表面缺陷与内部缺陷检测展开研究。研究首先针对表面缺陷提出双侧线光源照明方案, 并与常规线光源方案作对比。实验结果证明, 采用双侧线光源照明可有效改善 YOLOv5 目标检测算法的检测性能, 其中 mAP:0.5 高达 90.16%, 相比于常用的白光线光源提升了 15.46%。其次, 对 X 射线, 超声波与红外热波成像检测 3 种方法进行对比分析, 总结 3 种方法对冷轧钢内部缺陷检测的适用性。实测结果显示, X 射线和超声波对直径为 0.25 mm 的盲孔检测效果良好, 红外热波成像则能对直径为 1 mm 的盲孔进行有效识别。三者中, X 射线检测效果最好, 盲孔边缘最小灰度差值可达 145。超声检测效果次之, 盲孔边缘最小灰度差值也可达 89, 但可能受缺陷边缘形变的影响, 红外热波成像对微小缺陷的检测效果并不理想, 其对盲孔边缘最小灰度差值仅为 30。本研究不仅提供了一种冷轧钢表面缺陷检测的优化思路, 还为内部缺陷检测研究提供了研究基础。

参考文献：

[1] LI ZH, LI ZH, HUANG H, *et al*.. Green lithium: photoelectrochemical extraction[J]. *PhotoniX*, 2023, 4(1): 23.

[2] ZHU Y N, LUO H, YANG CH Y, *et al*. . Color-preserving passive radiative cooling for an actively temperature-regulated enclosure[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 122.

[3] 李玮. 用于锂离子电池钢壳的镀镍钴钢带制备工艺及耐蚀性研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2011.
LI W. *The study of preparation and corrosion resistance of cobalt-nickel-plated steel strip for lithium-ion battery shell*[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2011. (in Chinese).

[4] 赵小龙, 王雄, 罗晓阳, 等. 退火温度对 CSP 冷轧低碳高强钢带组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(1): 43-49.
ZHAO X L, WANG X, LUO X Y, *et al*.. Effect of annealing temperature on microstructure and properties of cold rolled low carbon high strength sheet by CSP[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2021, 46(1): 43-49. (in Chinese).

[5] MANCINI E, CAMPANA F, SASSO M, *et al*.. Effects of cold rolling process variables on final surface quality of stainless steel thin strip[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61(1-4): 63-72.

[6] 董双鹏, 宋进英, 陈业熊, 等. 冷轧钢板表面缺陷的种类及形成原因[J]. 机械工程材料, 2012, 36(7): 100-104.
DONG SH P, SONG J Y, CHEN Y X, *et al*.. Types and forming reasons of cold rolled steel plate surface defects[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2012, 36(7): 100-104. (in Chinese).

[7] 胡华东, 王乐, 汤化胜, 等. 冷轧宽厚规格深冲钢梗印缺陷成因分析及其控制措施[J]. 轧钢, 2022, 39(2): 124-128.
HU H D, WANG L, TANG H SH, *et al*.. Cause analysis of stem seal defects of cold rolled wide and thick gauge deep drawing steel strip and its control measures[J]. *Steel Rolling*, 2022, 39(2): 124-128. (in Chinese).

[8] 王畅, 于洋, 王林, 等. 冷轧双相钢镀锌条带状色差缺陷产生原因及机理研究[J]. 轧钢, 2023, 40(1): 52-58.
WANG CH, YU Y, WANG L, *et al*.. Study on the cause and mechanism of the strip color difference defects of cold rolled dual- phase steel galvanized strip[J]. *Steel Rolling*, 2023, 40(1): 52-58. (in Chinese).

[9] SURESH B R, FUNDAKOWSKI R A, LEVITT T S, *et al*.. A real-time automated visual inspection system for hot steel slabs[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1983, PAMI-5(6): 563-572.

[10] NATH V, CHATTOPADHYAY C, DESAI K A. On enhancing prediction abilities of vision-based metallic surface defect classification through adversarial training[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 117: 105553.

[11] 杨水山, 何永辉, 王康健. 高速冷连轧带钢表面质量在线检测系统开发与应用[J]. 世界钢铁, 2013, 13(3): 62-67.
YANG SH SH, HE Y H, WANG K J. Development on on-line inspection system for high speed strip surface quality at cold continuous rolling mill[J]. *World Iron & Steel*, 2013, 13(3): 62-67. (in Chinese).

[12] 沈春光, 李虎威, 荆涛, 等. 基于深度学习的带钢表面缺陷检测在小样本数据集的应用[J]. 轧钢, 2022, 39(2): 82-86.
SHEN CH G, LI H W, JING T, *et al*.. Application of deep learning-based surface defect recognition of plate in small sample dataset[J]. *Steel Rolling*, 2022, 39(2): 82-86. (in Chinese).

[13] JUNet A, MESSAGER A, WECK A, *et al*.. Internal fatigue crack propagation in a Ti-6Al-4V alloy: an in situ study[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 168: 107450.

[14] YANG Q ZH, ZHAO Y, HU X A, *et al*.. Small crack propagation and closure behaviours and mechanisms in a powder metallurgy superalloy at high temperature in air[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 175: 107797.

[15] 白赟泓, 刘祎, 张小琳, 等. 基于 GF-WLS 和 VSM 的多能量 X 射线图像融合方法[J]. 无损检测, 2022, 44(9): 34-41,74.
BAI Y F, LIU Y, ZHANG X L, *et al*.. Multi energy X-ray image fusion method based on GF-WLS and VSM[J]. *Nondestructive Testing*, 2022, 44(9): 34-41,74. (in Chinese).

[16] TAKADA H, TOMURA Y, ARATANI M, *et al*.. On-line detection system for internal flaws in as-hot-rolled steel strip using ultrasonic probe array[J]. *Materials Transactions*, 2011, 52(3): 531-538.

[17] 张永生, 黄松岭, 赵伟, 等. 基于电磁超声的钢板裂纹检测系统[J]. 无损检测, 2009, 31(4): 307-310.
ZHANG Y SH, HUANG S L, ZHAO W, *et al*.. Detection system about steel cracks based on electronic ultrasonic[J]. *Nondestructive Testing*, 2009, 31(4): 307-310. (in Chinese).

[18] LIU SH Y, JIA K N, WAN H P, *et al*.. Inspection of the internal defects with different size in Ni and Ti additive manufactured components using laser ultrasonic technology[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 146: 107543.

[19] ALMOND D P, PICKERING S G. An analytical study of the pulsed thermography defect detection limit[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(9): 093510.

[20] ZHUO L J, YANG X, ZHU J G, *et al*.. Size determination of interior defects by reconstruction of subsurface virtual heat flux for step heating thermography[J]. *NDT & E International*, 2023, 133: 102734.

[21] WANG F, SHENG J, SFARRA S, *et al*.. Multimode infrared thermal-wave imaging in non-destructive testing and evaluation (NDT&E): physical principles, modulated waveform, and excitation heat source[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 135: 104993.

[22] NAYAR S K, IKEUCHI K, KANADE T. Surface reflection: physical and geometrical perspectives[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(7): 611-634.

[23] 张青树, 齐韦. 冷轧带钢表面形貌测试及其粗糙度均匀性控制研究[J]. 轧钢, 2022, 39(5): 103-107.
ZHANG Q SH, QI W. Study on surface profile test and roughness uniformity control of cold rolled strip[J]. *Steel Rolling*, 2022, 39(5): 103-107. (in Chinese).

[24] 杨甬英, 陆春华, 梁蛟, 等. 光学元件表面缺陷的显微散射暗场成像及数字化评价系统[J]. 光学学报, 2007, 27(6): 1031-1038.
YANG Y Y, LU CH H, LIANG J, *et al*.. Microscopic dark-field scattering imaging and digitalization evaluation system of defects on optical devices precision surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(6): 1031-1038. (in Chinese).

[25] LI X C, WU Q Q, XIAO B P, *et al*.. High-speed and robust infrared-guiding multiuser eye localization system for autostereoscopic display[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(14): 4199-4208.

[26] 吴海滨, 魏喜盈, 刘美红, 等. 结合空洞卷积和迁移学习改进 YOLOv4 的 X 光安检危险品检测[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1417-1425.
WU H B, WEI X Y, LIU M H, *et al*.. Improved YOLOv4 for dangerous goods detection in X-ray inspection combined with atrous convolution and transfer learning[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1417-1425. (in Chinese).

[27] 张寅, 朱桂熠, 施天俊, 等. 基于特征融合与注意力的遥感图像小目标检测[J]. 光学学报, 2022, 42(24): 2415001.
ZHANG Y, ZHU G Y, SHI T J, *et al*.. Small object detection in remote sensing images based on feature fusion and attention[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(24): 2415001. (in Chinese).

[28] 张印辉, 庄宏, 何自芬, 等. 氨气泄漏混洗自注意力轻量化红外检测[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(3): 607-619.
ZHENG Y H, ZHUANG H, HE Z F, *et al*.. Lightweight infrared detection of ammonia leakage using shuffle and self-attention[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(3): 607-619. (in Chinese).

[29] 刘彦磊, 李孟喆, 王宣宣. 轻量型 YOLOv5s 车载红外图像目标检测[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(5): 1045-1055.
LIU Y L, LI M ZH, WANG X X. Lightweight YOLOv5s vehicle infrared image target detection[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1045-1055. (in Chinese).

[30] VILLARRAGA-GÓMEZ H, SMITH S T. Effect of geometric magnification on dimensional measurements with a metrology-grade X-ray computed tomography system[J]. *Precision Engineering*, 2022, 73: 488-503.

作者简介：

刘　东(1982—), 男, 辽宁大连人, 博士, 教授, 博士生导师, 浙江大学光电科学与工程学院副院长, 极端光学技术与仪器全国重点实验室副主任, 中国光学工程学会理事, 中国光学学会激光光谱学专委会副主任委员,《大气与环境光学学报》执行副主编、《激光技术》编委会副主任委员、《光学学报》等期刊编委。担任多个国际/国内学术会议主席/共主席等。主要研究方向包括机器视觉缺陷检测、极端应用干涉检测、环境探测激光雷达等。主持国家重点研发计划项目及国家自然科学基金项目 4 项, 出版教材及专著 5 部, 作为第一/通讯作者在 PNAS、Research、PhotoniX、Light: Sci & App 等期刊上发表学术论文百余篇, 授权的国家发明专利实现成果转化 10 余项, 国内外学术会议作大会/主旨/邀请报告 70 余次。研究成果获浙江省科技进步一等奖 1 项(排名第一)、“金穗奖”中国光电仪器品牌榜金奖 1 项(排名第一)等。E-mail: liudongopt@zju.edu.cn