



工程力学
Engineering Mechanics
ISSN 1000-4750, CN 11-2595/O3

《工程力学》网络首发论文

题目：基础设施日光热成像无损检测研究综述
作者：杨瑞珍，周云，张阳，冷建波，谈忠坤，周泉
收稿日期：2025-04-09
网络首发日期：2025-10-16
引用格式：杨瑞珍，周云，张阳，冷建波，谈忠坤，周泉. 基础设施日光热成像无损检测研究综述[J/OL]. 工程力学.
<https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20251016.0942.010>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基础设施日光热成像无损检测研究综述

杨瑞珍¹, 周云^{*1}, 张阳¹, 冷建波¹, 谈忠坤², 周泉^{3,4}

(1. 湖南大学工程结构损伤诊断湖南省重点实验室, 长沙 410082; 2. 湖南中腾结构科技集团有限公司, 长沙 410012;
3. 中国建筑第五工程局有限公司, 长沙 410000; 4. 湖南中建五局绿色市政工程研究中心有限公司, 长沙 410000)

摘要: 我国基础设施从大规模兴建进入运维阶段, 对于结构病害的识别和诊断亟需经济有效的无损检测手段。日光热成像是一种被动热成像检测技术, 指在户外条件下考虑太阳辐射和环境影响的热成像检测方法。日光热成像检测方式具有非接触和轻量化的特点, 受到国内外学者广泛关注。本文对日光热成像检测机理、检测模式、影响因素等进行了分析和总结, 介绍了日光热成像在建筑外墙、道路与桥梁、风电叶片等领域的主要研究案例, 并在此基础上对常用的热图像处理 and 损伤识别方法进行了总结和对比。最后, 总结并展望了日光热成像在基础设施无损检测领域需要进一步研究的方向。

关键词: 基础设施; 无损检测; 日光热成像; 被动热成像; 综述

中图分类号: TU18 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2025.04.0160

REVIEW ON SOLAR LOADING THERMOGRAPHY IN NON-DESTRUCTIVE TESTING OF INFRASTRUCTURES

YANG Rui-zhen¹, ZHOU Yun^{*1}, ZHANG Yang¹, LENG Jian-bo¹, TAN Zhong-kun², ZHOU Quan^{3,4}

(1. Key Laboratory of Damage Diagnosis for Engineering Structures of Hu'nan Province, Hu'nan University, Changsha 410082, China;
2. Hu'nan Zhongteng Structural Technology Group Co. Ltd, Changsha 410012, china;
3. China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha 410000, China;
4. Hu'nan China Construction Fifth Bureau Green Municipal Engineering Research Center Co., Ltd., Changsha 410000, China)

Abstract: As China's infrastructure enters the operation and maintenance stage from large-scale construction, economical and effective non-destructive testing (NDT) methods are urgently needed for the identification and diagnosis of structural defects. Solar Loading thermography (SLT) is a passive thermal imaging technique that refers to infrared thermography conducted under outdoor conditions considering the influences of solar radiation and other environmental effects. SLT has the characteristics of non-contact and lightweight, and has attracted widespread attention from scholars at home and abroad. This paper analyzes and summarizes its fundamental mechanisms, detection modes, and influencing factors. It also presents major research applications in infrastructure maintenance domains including building facades, roads and bridges, and wind turbine blades. Furthermore, prevalent thermal

收稿日期: 2025-04-09; 修改日期: 2025-09-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52278306); 国家自然科学基金青年项目(51408071); 湖南省自然科学基金企业联合基金项目(2023JJ70004); 湖南省重点研发计划项目(2022SK2096); 无损检测技术福建省高校重点实验室开放基金项目(S2-KF2012)

通讯作者: 周云(1979—), 男, 湖南人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构健康监测研究(E-mail: zhouyun05@hnu.edu.cn)

作者简介: 杨瑞珍(1984—), 女, 山西人, 研究员, 博士, 主要从事热成像无损检测与健康监测研究(E-mail: xbaiyang@163.com);

张阳(2001—), 男, 湖南人, 硕士生, 主要从事热成像无损检测研究(E-mail: 1426028435@qq.com);

冷建波(2001—), 男, 湖南人, 硕士生, 主要从事结构健康监测方面的研究(E-mail: Lengjianboo@163.com);

谈忠坤(1978—), 男, 湖南人, 教授级高工, 博士, 主要从事结构检测与加固方面的研究(E-mail: tzk9888@hnu.edu.cn);

周泉(1983—), 男, 湖南人, 高工, 博士, 副院长, 主要从事装配式住宅研发研究(E-mail: quanzhou516@163.com).

image processing techniques and defect identification methodologies are reviewed and compared. Finally, some directions requiring further investigation are presented to advance SLT applications in infrastructure NDT.

Key words: infrastructure; non-destructive testing; solar loading thermography; passive thermography; review

从 20 世纪 80 年代始,我国基础设施建设经历了跨越式发展,当前已逐渐迈入“监管并重”的阶段,亟需经济、可靠的检测和监测手段。党的二十大报告强调建设高水平平安中国,提高公共安全治理水平,完善公共安全体系,推动公共安全治理模式向事前预防转型^[1],对基础设施安全提出了更高要求。

威胁公共安全的基础设施损伤往往由程度较轻、隐蔽性较强的早期损伤逐步发展而来。在人为因素(制造阶段、服役阶段)和自然环境(如日晒雨淋、冻融循环、温差变化等)综合影响下,各类基础设施的结构构件或非结构构件可呈现出多种类型的损伤:表面异常(附着/脱落)、含水率异常、分层、裂缝、空腔及其他异常形变等。在建筑外围护系统中,易形成外墙含水率异常、空鼓、裂缝及热工缺陷;在钢筋混凝土受力构件中,易出现空腔和裂缝;在桥路面结构上,易形成表面裂缝、亚表面分层和空腔缺陷;针对构成风电叶片或其他结构的 GFRP 或 CFRP 等复合材料构件,易形成表面附着、裂缝、涂层剥落、内部分层、局部或整体异常形变等病害。

1 技术背景

在基础设施的各个服役阶段,无损检测技术能够实现损伤识别、损伤定位、类型判断和损伤定量,并为设施剩余寿命预测提供关键数据^[2]。常见的接触式检测手段包括冲击回波、探地雷达、超声检测、声发射检测等。传统的冲击回波对传感器耦合条件要求高,检测效率较低^[3]。探地雷达数据的解译依赖人工识别,不仅效率较低,且主观性较强^[4]。超声检测速度快、安全、可定位,对人员技术和经验要求较高,数据可解释性较差^[5];一般需要耦合接触,而空气耦合设备复杂^[6]。声发射检测方式对线性损伤敏感,适用于早期损伤,对损伤预警和定位具有较好的效果,但定量能力不足、易受噪声干扰^[7-9]。在户外基础设施,特别是大型结构检测中,接触式检测方法实施具有一定的局限性。而非接触式检测手段如 X 射线存在辐射危害、检测设备体积较大等问题,便携式 X 射线机的功率较小,在检测一定混凝土厚度的构件时,形成的图像不清晰^[10]。近

年来,计算机视觉技术凭借多目标检测能力,在各类基础设施监测及古迹保护方面凸显出优势^[11-12],但其对目标的检测局限于表面可见特征,难以检测内部损伤。

作为一种非接触检测手段,红外热成像技术(Infrared Thermography, IRT)通过采集物体表面的热辐射分布来判断结构表面、亚表面乃至较深层损伤,能够在裂纹检测^[13]、内部空鼓检测^[14]等方面实现结构的局部损伤检测和评估^[15],具有较高的科学研究和应用价值。按照有无人为热激励可分为两大类:被动红外热成像(以下简称被动热成像)和主动红外热成像(以下简称主动热成像)^[16]。被动热成像是 在不对被检目标实施人为热激励的情况下获取其表面热辐射分布;主动热成像利用人工热源以一定模式对目标实施热激励,诱发其内部热传导,并在热激励期间和/或之后采集目标表面热图像^[17-21]。由于热激励源受人为控制,主动热成像被认为更易于实现损伤的定量检测^[22-23]。

然而,在基础设施检测中,传统主动热成像所采用的人工激励方式通常难以满足检测目标在探测广度、深度和环境适应性等方面的要求。作为一种被动热成像技术,日光热成像(Solar Loading Thermography, SLT)以自然日光为热激励源,因此又被称为自然条件下的热成像。自然日光能量较高、分布均匀且持时较长,并具有一定周期变化规律,具备对户外大型基础设施实施热激励的天然优势。近年来,该技术得到越来越多的关注,在基础设施安全、建筑能源效率、新能源设施维护、文物古迹保护等方面均有较广泛的研究和应用^[17,24-29]。同时,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)、人工智能和神经网络以及 5G 通信技术的发展,促进了日光热成像技术的进一步发展。除了具有一定探测广度和深度、结果可视化较强等优点外,日光热成像还具有较明显的非接触和轻量化优势。所谓非接触指检测的实施一般通过无人机搭载或地面布设的热像仪获取主要检测数据,不需要对被测对象近距离接触。轻量化包含人员、设备、耗材等的轻量化,即人工参与少、检测设备简单、不需大批布置传感器或其他耗材等。但日光热成像技术对环境敏感、

初始成本较高、定量检测的算法依赖性高等问题也是需要积极关注和探讨的。

本文主要总结并分析了近年来日光热成像在基础设施检测领域的相关研究成果及主要研究案例。首先,对日光热成像基本原理进行了介绍和分析;其次,阐述了其检测模式和主要影响因素;再次,介绍了日光热成像在建筑外墙、路桥和风电等领域的主要研究案例;最后,对日光热成像未来的研究趋势做了总结和展望。

2 日光热成像基本原理

2.1 太阳辐射特点

太阳辐射经过地球大气吸收和散射衰减后到达地表。研究显示,近60年来我国地表太阳辐射平均值为 $5031 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$,且体现出较大的地区与季节差异^[30]。在全球平均大气状况下,地表太阳辐射能量分布在红外、可见光和紫外区的占比分别约为48%、37%、15%^[31]。根据对日地关系的研究,可以获得不同纬度的太阳路径^[32],据此了解检测目标处的太阳辐射条件,得到一年中逐月逐日逐时的太阳辐射角,进而分析不同朝向、不同倾斜面上的太阳辐射值,并在日光热成像检测的相关研究与应用中合理利用。

太阳辐射具有辐照时间长、辐照能量高、辐照范围广及周期性变化等优点;但也存在辐照方向性强、受地区和大气情况影响较大等缺点。掌握太阳辐射特点、有效利用太阳辐射能,有利于提高日光热成像检测的研究和应用水平。同时,也可以考虑在已有日照辐射条件下采用人工调控方式如反射、聚焦和移动扫描等改变辐射加热效果,图1为可利用的太阳辐射形式。

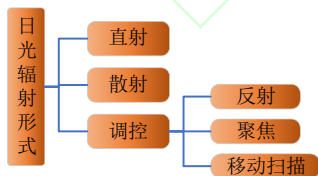


图1 日光热成像中可利用的太阳辐射形式

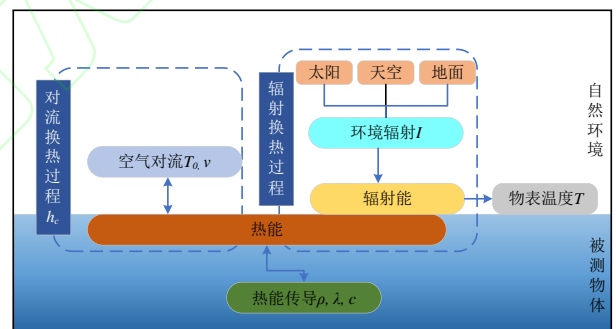
Fig. 1 Solar Radiation used in SLT

2.2 空间热能传递

地球上的热能主要来自太阳辐射,并通过直射、天空散射和地面反射等形式影响地面物体。空间中热能的传递有三种基本方式:热辐射、热对流和热传导^[33]。利用热成像技术,物体表面热辐射可被热

红外相机内的感光芯片捕捉并转化为电信号,并将其还原为温度信息,形成反映物体表面温度场分布的热谱图。工业检测所涉及物体的热辐射波长绝大多数分布于红外波段($0.78\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$),其中热辐射主要分布在中波(MWIR, $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$)和长波(LWIR, $7\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$)范围内^[34]。

一般情况下,自然环境中被测物体主要通过自然对流换热和辐射换热过程实现与环境间的热量传递,如图2所示。物体表面热辐射在这两个过程作用下动态变化,并影响内部热传导。对流换热是受流动原因、物表几何特性、流体性质等多方面因素影响的复杂物理现象。在日光热成像研究中,可以采用经验法^[35]、数值法、实验法来确定对流传热系数。物体热辐射由Stefan-Boltzmann定律描述,并与表面发射率 ε 相关。热能在被测物体内的传导过程受材料密度、导热系数和比热容等性质影响。当存在内部热源时,还需考虑内热源性质的影响。部分研究还将内热源作为检测中的热激励源,如程崇晟等^[36-37]、李胜利等^[38]利用混凝土凝固过程中产生的水化热来实现混凝土、钢管混凝土和预应力混凝土壁内脱空缺陷的热成像检测。



注: T_0 -环境温度; T -物表温度; v -气流速度; h_c -对流传热系数; I -为环境辐射; ε -表面发射率; ρ -材料密度; λ -材料导热系数; c -比热容

图2 自然环境与被测物体间的热量交换过程

Fig.2 Heat transfer between environment and object in SLT

2.3 损伤物体传热

日间环境因素影响下,损伤物体传热过程如图3所示。图3(a)展示了常见的浅表损伤,包括表层含水率异常(通常为升高)、表面裂缝和浅层分层/空鼓等。表层含水率升高会导致该位置处的比热容升高,表面温度将低于正常区域。表面裂缝损伤处存在空气间隙,且可能伴随一定程度的湿度升高,导致表面裂缝位置出现温度异常。

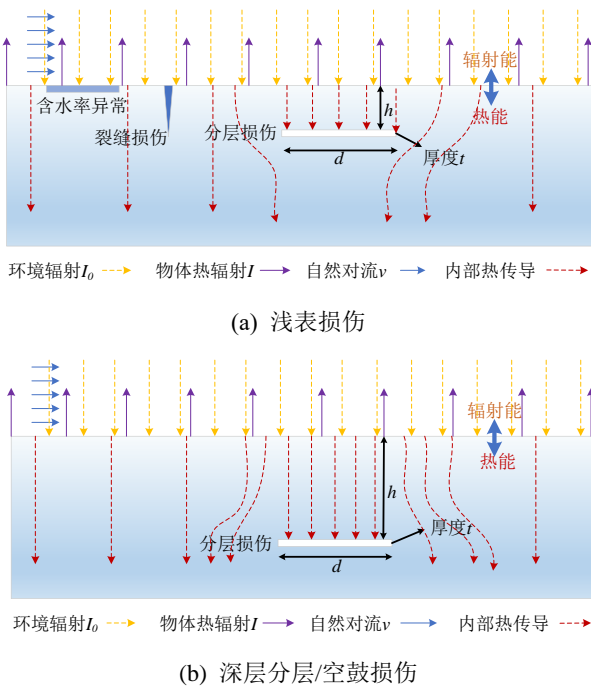


图3 日间损伤物体传热示意图

Fig.3 Heat conduction diagram of objects with defects in SLT during day

针对分层/空鼓损伤, 将径深比 (d/h) 大于 2 的损伤定义为浅层损伤, 反之为深层损伤。此处, d 为缺陷在材料表面投影的等效直径, h 为缺陷上表面到材料检测面的垂直深度。对于浅层分层, 认为物体表面与分层损伤区间内受横向热传导影响较小。对于图 3(b) 所示的深层分层/空鼓, 内部分层至物表区间的横向热扩散效应较明显, 表面热异常也呈现明显的扩散效应, 使得该类损伤的识别和表征难度增加。被测物体在环境升温时吸收外界热量, 损伤位置表面温度呈现异常升高; 在环境降温过程中, 物体损伤处亦呈现出异常温度。以 BABAR 等^[35]的

研究为例, 混凝土桥面板白天吸收太阳辐射, 温度升高, 分层/空鼓缺陷最先达到最大温度; 夜晚温度降低, 缺陷处先达到最低温度。由此产生的损伤区域与正常区域的温差 ΔT (或称热对比度) 是识别与衡量被检目标损伤的基本指标。

根据傅里叶导热定律, 对物体热分布规律进行量化研究, 可以实现损伤的检测与定量。刘成禹等^[39]获取了大麦地岩画的二维温度场数据, 结合导热定律重构热流密度场, 构建了空鼓特征线的高斯函数模型。通过参数敏感性分析, 提出了以热积比率 R 为核心的宽度判据, 建立了空鼓边界的量化识别准则, 对其他对象的被动热成像空腔或分层检测具有良好的借鉴意义。彭雄等^[40]构建了外墙饰面层脱粘缺陷形状特征向量集, 并将圆度 C 、最小外接矩形长宽比 B 、偏心率 E 、矩形度 R 等作为向量参数。LAI 等^[41]将温度梯度作为外墙脱粘面积定量指标。冯力强等^[14]、王永茂等^[42]将中心最大温差与边界温差比作为空鼓边界衡量指标。作者总结了现有研究中基于单张热图像的损伤识别和量化分析参数, 如表 1 所示。

目前, 已有学者对内部缺陷深度的影响进行了研究^[43-44], 但尚未实现有效定量。根据主动热成像研究, 已知物体的热特性参数和外部热流参数, 能够计算得到内部空鼓或分层埋置深度^[39]。户外基础设施涉及更复杂检测环境和结构材料组成, 深度定量难度增加, 但随着对构件热特征和识别量化参数的不断研究, 依然具有实现损伤深度定量的潜力。更有利的是, 多数基础设施检测对象涉及更深的空鼓或分层缺陷, 边缘部位形成的温度梯度较小, 测量结果受测量时间选择的影响较小, 定量更容易^[42]。

表 1 基于热图像数据的损伤识别与量化分析参数

Table 1 Identification and quantitative analysis parameters

对象及缺陷类型	检测目标	识别与量化参数	来源文献
岩画空鼓	空鼓边界确定	最大温差 ΔT 、热积比率 R 、宽度参数 ω 、面积比 B 、温度梯度 $df(x)/dx$	[39]
建筑面层脱粘	脱粘缺陷识别	形状特征向量 $X=(C, B, E, R)$	[40]
	脱粘面积定量	圆度 C 、最小外接矩形长宽比 B 、偏心率 E 、矩形度 R	[41]
墙体饰面砖空鼓/碳纤维	缺陷面积定量	温度梯度 $df(x)/dx$	[14, 42]
维复合材料板缺陷	缺陷尺寸定量	中心最大温差与边界温差比 $\Delta T_{max}/T_b$	[14, 42]
钢试件	缺陷尺寸定量	高斯函数半高全宽 (FWHM)	[45]

综上,受自然环境影响,物表热辐射是一个受多因素影响的动态过程。对单时刻热图像的分析能够在一定程度上起到损伤识别和定量的作用,但只保留了某时刻的空间温度数据,存在较大的误判风险。结合环境特征、物体热特征和热传递过程,进行多维度的损伤识别和量化特征提取,是深化日光热成像检测原理研究的重要方向。

3 日光热成像检测模式与影响因素

3.1 检测模式

根据是否利用时间维度的温度变化信息,将日光热成像分为两大类:静态热成像和动态热成像。静态热成像虽然在采集数据时参考了日照、气温、风速、朝向等因素影响,但仅以检测区域的单帧热图像为分析对象。这种方法“只见树木不见森林”,随机性强、受噪声影响大、可靠性不足,难以对目标的损伤状态实现有效检测和评估,是阻碍其工程应用的“卡点”。动态热成像记录某一时段内温度场随时间演化的过程,让数据的多维度分析成为可能,有利于损伤识别和量化特征提取及环境干扰抑制。

按照所涉及日光加热模式的不同,动态热成像

又可分为日光脉冲热成像、日光阶跃热成像和日光周期热成像。日光脉冲热成像通过施加能量较高的短时光辐射,获取热图像序列并通过时域或频域分析实现缺陷检测,可用于浅层缺陷检测,如风电叶片 GFRP 材料的分层缺陷。为了实现较高能量的日光辐射,该方法可依赖图 2 中所提到的日光调控(特别是日光聚焦)。日光阶跃热成像又可称为长脉冲热成像,即把某一时段内的自然日光辐射视为对被检物体较低能量的持续加热^[16,46],并获取目标热图像序列,通过分析其温度变化及相关数据,获得物体损伤信息。该方法中数据采集时段的选择与环境、气候、缺陷类型和对对象特征有关,一般有白天升温,白天降温,夜晚降温等阶段。日光周期热成像则利用日光辐射的天然周期性,一般以 24 小时为一个加热周期,记录其热红外辐射信息。此外,从长期监测的角度,热成像数据还可以以周、月、季度和年等为数据采集间隔或分析的时间维度。根据现有研究,总结日光热成像检测模式见表 2,并说明了各类检测模式的加热特点、数据特点、参数选择及适用范围。

表 2 日光热成像检测模式

Table 2 Testing modes in SLT

检测模式	加热模式	加热特点	数据特点	检测参数选择	适用范围	
静态热成像	不考虑	—	单帧热图像	检测时段	简单筛查、表面损伤,如路面裂缝	
动态热成像	日光脉冲热成像	脉冲加热	局部较高能量短时加热	热图像序列	脉冲能量密度、脉冲时长、采集频率	浅表损伤,如风电叶片表面或浅层脱粘
	日光阶跃热成像	阶跃加热	一日内某时段	热图像序列	检测时段、采集间隔	浅层损伤,如墙面瓷砖空鼓
	日光周期热成像	周期加热	24 小时为一个热激励周期	周期性热图像序列	检测时段、采集间隔、采集周期数	较深层损伤,如混凝土构建内部分层、地下空腔

动态热成像能够更好地获取检测目标的动态热行为,降低损伤误判率并提高定量水平^[17,47-48]。针对不同类型和深度的损伤检测,可采用不同的检测模式。日光阶跃热成像采集一日某时段内的热图像数据,能够检测浅层损伤,如建筑瓷砖外墙的空鼓检测^[49]。日光周期热成像将太阳辐射作为周期性热源,实施数据采集和分析。如 CLEMENTE 等^[17]对一座钟楼外立面实施四昼夜(96 小时)日光热成像检测,获得了隐藏窗区域和其他区域的温度变化曲线,两者均呈现明显的周期性变化规律。针对深

层损伤,如钢筋锈蚀或其他因素导致的混凝土构件内部分层或脱空,周期模式往往能取得更好的检测效果^[43,50]。

KLEIN^[26,51]研究表明当天气条件合适时,日光热成像和主动热激励下的阶跃热成像、锁相热成像具有良好的相关性,并验证了阶跃热成像和锁相热成像算法在日光热成像检测中的适用性,探究了自然激励下如何确定检测目标的热特性,提出了环境参数修正对提高检测精度的重要性。日光周期热成像在户外检测中具有独特优势。一方面,由于检测

深度与其调制频率成反比^[52], 相较人工激励锁相热成像, 日光周期热成像加热周期长、频率低, 能够达到较大检测深度。如 FARRAG^[53]、MAC^[54]、ZHANG 等^[55]研究表明, 运用日光周期热成像能够探测到埋深 10cm 乃至 25cm 的混凝土内部分层损伤。另一方面, 周期热成像检测可以获得热图像序列的幅值、相位等信息, 有助于损伤特征的识别与定量^[56]。相位图不受可见光表面特性的影响, 能够有效抑制不均匀加热^[16]。动态热成像与静态热成像均需选择合适的时段进行, 这涉及到环境因素对检测的影响, 这部分内容将在 3.3 节具体讨论。除了检测时段的选择, 动态热成像中数据采集时间间隔、数据长度(周期数)的选择也会对检测产生影响。提出了更高的要求。在实际工程检测中应该根据对象类型, 在检测效率、成本和准确度方面进行平衡。提出了更高的要求。在实际工程检测中应该根据对象类型, 在检测效率、成本和准确度方面进行平衡。提出了更高的要求。在实际工程检测中应该根据对象类型, 在检测效率、成本和准确度方面进行平衡。

表 3 典型对象动态热成像研究中的数据收集参数

Table 3 Data collecting parameters in SLT

损伤对象	损伤特征	检测时段	数据间隔	数据长度
瓷砖外墙	含水率异常	8:09~18:09	1/2h、1h、2h ^[57]	—
	分层/空鼓	9:00~19:00	1/2h ^[49]	—
混凝土板	内部分层 6.7cm、12.7cm 深	全天	0.5 min~15 min ^[58]	12h~18h(Var-PbpSA) 3d~15d
	内部分层 1.3cm、2.5cm 深	7:00~24:00	30min ^[59]	—
低层民居	墙体裂缝、空洞、补丁等	全天	20 min~30min ^[48]	14 h~63h
风电叶片段/GFRP 板材	内部分层 2mm~10mm 深	8:00~19:00	1/2 h~1h ^[60]	—

注: h-小时; d-天。

3.2 自身影响因素

除损伤特征外, 物体的热特征如表面发射率、吸收率、传热系数和热扩散率等也影响着热传递过程, 进而影响物体表面热辐射分布。表 4 总结了热特征相关参数的影响因素及对应的影响过程。如目标表面纹理特征、颜色和入射波长会影响表面吸收率, 并影响物体表面辐射吸收过程; 材料种类、密度、导热率、比热容等因素会影响热扩散系数, 并对目标内部的热传导产生影响。

检测对象往往由多个种类或表面状态的材料构成, 如建筑外墙可能涉及混凝土、砌体、金属等材料或多种颜色的瓷砖, 风电叶片结构多涉及木材、GFRP 或 CFRP 等多种材料分布。CHENG 等^[44]研

究了表面吸收率和埋置深度对混凝土结构内部分层缺陷热红外检测的影响, 揭示出深度对混凝土分层的红外检测有负面影响, 而吸收率对检测有正面影响。LOURENCO^[61]通过黑白两种瓷砖饰面墙体研究了颜色对墙面空鼓或水分异常检测表明黑色瓷砖由于更强的热辐射吸收能力, 在检测中表现出更高的温度和热对比度。ROCHA^[62]研究了混凝土不同水灰比对日光热成像检测的影响, 表明低水灰比混凝土内的分层缺陷更易被检测到。尽管如此, 目前对相关热特征影响的研究仍然不足, 亟需针对不同种类材料或同类型不同参数材料的定量检测研究, 以提高各类材料的定量检测水平。

表 3 列举了现有研究中几种典型对象动态热成像研究中的数据收集参数(采集时段、间隔、长度等)。EDIS^[57]在瓷砖墙面含水率检测研究中讨论了 1/2h、1h、2h 等时间间隔的影响, 表明 1/2h 和 1h 间隔均能够有效检测含水率异常。数据采集时间间隔一般与检测目标的类型、损伤的类别相关, 且当期望获得较准确的定量检测结果时, 应采用较短的时间间隔进行数据采集^[48]。MAC^[58]研究了数据采集周期数对混凝土桥面板内部损伤检测的影响, 表明大于 3 天和 15 天的数据采集周期能有效提高 7cm 和 12.7cm 深度分层损伤的检测能力。MAC^[58]研究还表明不同的数据分析方法能够扩展适宜检测的时间窗口, 缩短所需数据长度^[58]。

从以上研究可以看出, 动态热成像具有降低环境干扰^[16]、增加检测深度^[53]、提高定量准确度^[57]等优势, 但也会增加检测时间, 对数据存储和处理提出了更高的要求。在实际工程检测中应该根据对象类型, 在检测效率、成本和准确度方面进行平衡。

表 4 目标热特征的影响因素及影响过程

Table 4 Thermal characteristics, related parameters and processes

热特征	材料种类	表面纹理特征	表面颜色	材料密度	材料导热率	材料比热容	其他影响因素	影响过程
表面发射率	√	√	—	—	—	—	表面温度	表面热辐射
表面吸收率	—	√	√	—	—	—	辐射波长	表面辐射吸收
表面传热系数	√	—	—	—	—	—	表面朝向、气流速度	表面热对流
热扩散系数	√	—	—	√	√	√	—	内部热传导

3.3 环境影响因素

热对比度 ΔT 是热图像损伤分析中最直接的指标。除了损伤物体内部热传导, ΔT 值也受对流换热和辐射换热过程的影响, 而这两个过程受环境影响较大。因此, 对环境影响的研究是日光热成像检测中的重要方面。其他条件一定时, ΔT 越大, 对损伤检测越有利, 因此把能增强损伤位置处 ΔT 序列变化特征的因素称为有利因素, 反之为不利因素。国内外学者对检测过程中的环境影响因素进行了研究^[25, 35, 54, 58], 主要涉及检测时间窗口、日光辐射量、气温、风速、湿度、大气压等, 但绝大多数限于定性分析。表 5 列出了不同类型损伤下环境因素, 包括日光辐射、气温和风速等, 对日光热成像检测的影响规律。

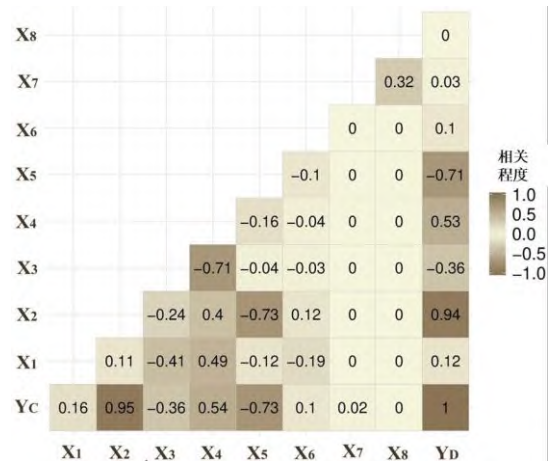
表 5 环境因素对日光热成像检测的影响

Table 5 Influence of environmental factors on solar loading thermography detection

损伤类型	日光辐射	环境温度	风速 (自然对流)	
			向阳	背阴
含低导热异常	有利	有利	不利	有利
含水分异常	有利	有利	有利	有利
含高导热异常	有利	有利	不利	有利
表面流场分布	有利	有利	有利	有利

目前, 针对内部分层损伤检测的影响因素研究较多^[25, 54, 58, 63], TOMITA 等^[64]对该类型的文献进行了较详细的调研和综述。总的来说, 较高的日光辐射强度有利于被测物体温度快速升高并在各类损伤处形成表面温差。CLEMENTE^[17]、BABAR^[43]等研究表明, 针对空鼓或分层类损伤, 较高的检测温度差值 ΔT 往往出现在气温的峰值和低谷处。然而, 阳光辐射值高也会使得物体表面温度更快达到平衡, 所以检测时机的选择非常重要。除了运用试验方法, CHENG 等^[65]还采用了数值模拟方法获得了检测对象的最佳检测时间点。多个研究证实, 被检物体向阳面损伤处和完好处的温差会随着风速的增大而降低^[35, 66]; 而当涉及到被测对象背阴面时, 较高的风速能够增加温度对比^[67]。

物体热辐射是受多环境因素耦合影响的动态过程, 定性研究难以厘清各因素影响程度及耦合机制。POZZER 等^[68]对现浇钢筋混凝土板内部分层缺陷检测中各环境影响的相互作用进行了探索, 通过回归分析获得了 8 个不同影响参数与检测温度的相关性系数 (如图 4 所示), 显示试件表面温度分布与这些参数均存在不同程度的相关性, 其中环境温度与试件表面变化的相关性最强, 且通过方差膨胀因子 (VIF) 表明各影响参数间具有较弱的多重共线性。CHENG 等^[44]通过对内部包含分层损伤的混凝土试件进行连续昼夜观测, 分析了不同吸收率、缺陷深度和季节环境条件间的关系, 发现试件-环境温差 δT 与分层-非分层温差 ΔT 之间存在近似的“滞回关系”。这一关系进一步证明了环境温度与物体热辐射变化之间的强相关性, 同时也体现了数据变化的周期性和缺陷温差 ΔT 相比环境温度变化的滞后性。研究同时也表明该关系同时受到缺陷埋深和表面吸收率的影响。CAI 等^[69]通过对不同模拟气候条件下钢管混凝土脱粘的数值和实验研究, 揭示了热指标与热对比度之间的关系, 实现了脱粘尺寸、管壁热流量、日光辐射和热对比度 ΔT 之间关系的线性量化。受自身及环境影响, 不同结构类型下的日光热成像检测中, 各因素影响关系必然存在差异。



注: X1-时间; X2-环境温度; X3-相对湿度; X4-太阳辐射; X5-大气

压; X6-风速; X7-缺陷面积; X8-缺陷埋深; Y_C-无缺陷温度; Y_D-缺陷温度

图4 从 X1~X8 的回归潜在变量之间的相关性^[68]

Fig.4 Plot correlation between regression potential variables from X1 to X8 ^[68]

目前针对日光热成像检测中各因素影响定量研究仍处在起步阶段,更缺乏对其耦合影响机制的研究。作者认为,结合损伤物体物理模型和相关试验研究,建立物理与数据双驱动研究模型,能够进一步明晰内外因素耦合影响机制,提高定量研究水平,促进日光热成像检测理论和方法的发展。

4 典型研究案例

4.1 建筑外墙

含水率异常、空鼓、裂缝、热工缺陷是建筑外墙中常见的缺陷类型,其中空鼓由于隐蔽性和直接危害较大,在外墙质量检测中受到较多关注。目前,外墙饰面粘结质量检测仍以蜘蛛人锤击法、饰面砖粘结强度拉拔抽检为主,存在主观性强、安全风险高、检测效率低等问题。红外热成像法作为一种具有潜力的轻量化外墙安全检测方法,在行业和外地的外墙粘结质量检测标准中均有涉及^[70-71],但由于早期热像仪硬件水平和热成像检测方法研究不足等诸多问题,一直缺乏有效的技术突破,无法满足实际检测需求。

墙面含水率异常往往先于其他明显损伤(如空鼓、风化、脱落等)出现。EDIS等^[72]将被动热成像方法运用于光面瓷砖饰面墙体的早期含水率异常检测,采用现场测试和有限元法进行了研究和分析,并认为被动热成像有望成为光面瓷砖墙体含水率异常的初步检测技术。该研究得出的主要结论包括:1)含水率差异越大,表面温差越大;2)由含水量导致的温差在白天较高但持续时间短,夜间温差较小但持续时间较长且稳定;3)更高的日光热量和昼夜温差有利于在湿度异常处获得更大的检测温差。进一步地,EDIS等^[57]对瓷砖墙面含水率变化进行了准定量热成像检测研究。通过一定时域范围的热成像数据采集和分析,认为基于日光加热和主成分分析的准定量热成像检测在识别高于36%含水率状态的检测中具有较大潜力,但需要注意日光加热时间和空鼓等因素造成的干扰,按照1/2h或1h的数据采集间隔可以获得较好的主成分分析数据,并消除检测时阴影和反射的影响。

针对墙面空鼓损伤, FREITAS等^[73]通过试验研究证明了外墙抹灰空鼓区域与完好区域相比温度变化更剧烈,且加热过程较降温过程呈现出更大的温度差异。黄文浩等^[74]利用红外热成像检测技术对建筑物外墙饰面砖的粘贴质量进行了研究,通过理论研究、数值模拟和实验研究的方法探索了影响红外热成像检测方法精度的主要因素。LOURENCO等^[61]通过对瓷砖墙体的户外试验验证了运用热红外方法检测空鼓和潮湿的可行性,并考虑了瓷砖颜色、外保温系统和检测时段对结果的影响,表明黑色瓷砖能够产生更大的损伤温差,外保温系统的存在对检测不利,且在热量变化最快的时段损伤更容易被检测。EDIS等^[49]运用动态热成像法检测两栋建筑瓷砖外墙的分层缺陷,采用非负矩阵分解(NMF)和主成分分析(PCA)处理红外图像。结果表明:动态热成像能够提高瓷砖墙面空鼓的检测准确度,并降低不同检测时间点对检测结果的不良影响,在检测瓷砖外墙的分层缺陷方面具有较大潜力;PCA和NMF在识别缺陷区域方面更有优势,且PCA针对不同的检测时段和检测环境均有良好的表现。LAI等^[41]运用空间像素微分的方法处理红外热图像,识别抹灰及瓷砖墙面不同深度空鼓损伤的尺寸。该研究分析了墙面类别、环境温度和热流对尺寸识别误差的影响,探索了以日光为热源的被动红外热像法在定量检测建筑外墙内部空鼓方面的可行性。

彭雄等^[40]提出了一种基于热源聚类的外墙脱粘缺陷红外图像分割方法,构建了饰面层脱粘缺陷形状特征向量集,建立了基于支持向量机的无人机热成像脱粘损伤识别特征学习模型和脱粘面积计算方法。王伟等^[75]通过对可见光和热红外融合数据的训练,实现了对建筑外墙空鼓和脱落损伤的同时识别。

王嘉怡等^[76]提出一种基于外保温层表面裂缝三维传热模型的红外热成像检测方法,运用量纲分析法得到裂缝与非裂缝处的温差如下式:

$$\Delta T = \theta \cdot C \cdot R \quad (1)$$

式中: θ 为环境温度; C 为裂缝自身尺寸大小; R 为热力学常数,为损伤模型建立奠定了理论基础。更多的热成像裂缝检测研究中,侧重对采集的图片进行深度处理^[77],如采用形态学相关理论确定裂缝形态^[78-79],利用较传统的边缘检测算法确定裂缝形态^[80-81],近来更具潜力的方法是通过深度学习算法实

现对裂缝的自动识别^[82]。

此外,日光热成像也被用来检测建筑热工缺陷和较大的内部隐藏结构。SFARRA 等^[83]研究揭示了目前被动热成像检测建筑热桥的 ISO 规范易受目标热辐射检测精度和阴影作用的影响,表明迭代滤波方法可以降低阴影作用影响,并可通过稀疏主成分分析优化热桥检测效果。ZHANG 等^[84]将无人机获取的热红外图像与可见光图像进行了特征融合,并进一步映射至 BIM 模型,提升了热红外图像的对比度,初步实现了具备热红外肌理信息的 BIM 模型构建,可为建筑热泄漏和热桥缺陷的检测提供帮助。CLEMENTE 等^[17]通过对两栋建筑的原位试验验证了用日光周期热成像对建筑外墙进行隐藏结构检测的可行性,并运用脉位相冲法 (Pulsed phase thermography, PPT) 和主成份分析法 (Principal component analysis, PCA) 提高了红外图像的热对比度和信噪比。该研究还指出,更长周期的数据监测有望获得更深范围的内部结构信息。TU 等^[24]运用多尺度集成经验模态分解 (MEEMD),根据局部频率水平将每个热图像分解为几个固有模式函数 (IMF),实现了材料结构信息与高频噪声和低频非均匀热背景的分离,可以在不同的空间尺度上提取材料的结构信息。鲁友存等^[85]研究表明 LBP-SVM 分类模型对正常墙体图像和异常墙体图像具有较好判断效果,并提出局部最大类间方差算法与 Canny 检测算法结合,实现了自适应性和自动化地选取阈值,提高了处理效率。

本文作者研究团队开展了无人机日光热成像建筑外墙瓷砖脱粘检测试验研究,并提出了分区域逐像素墙体空鼓损伤分割方法。研究综合考虑相对温度、绝对温度和异常像素比例等参数对损伤判断的影响,提高了空鼓损伤的识别和分割效果,在东西南北四个朝向的空鼓检测中均有良好表现,如图 5 所示为东朝向空鼓分割结果对比,该方法为墙体空鼓损伤的自动定量奠定了基础。然而,不同材料

和环境条件下的参数存在差异,如何科学设定识别参数,仍需要通过定量试验研究并借助多类型分析方法进行探索。

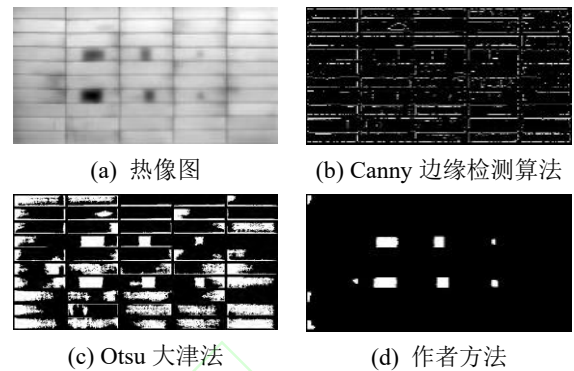


图 5 日光热成像建筑外墙瓷砖脱粘损伤分割效果对比

Fig.5 The comparison between different segmentation method in exterior wall delamination detection by SLT

本小节涉及的主要参考文献见表 6。日光热成像在建筑物外墙损伤检测中具备可行性且研究逐步从辅助检测、定性检测向准定量检测和损伤表征发展,识别方法也逐步从局部红外图像相关的人工判别向借助深度学习网络的双光图像多特征融合识别发展。受墙体自身构造特征、墙体损伤特性和多环境因素等综合影响,损伤的准确识别和定量研究仍不足。此外,多高层建筑检测数据量较大,图像相似度较高,损伤定位与全景展示也是检测中亟待解决的关键技术问题。基于以上趋势和不足,作者认为目前研究存在以下两个关键科学问题亟待解决: 1) 日光辐射场、内部温度场、表面气流场动态耦合作用下的物体热辐射分布机理; 2) 基于各检测模式的多参数影响下不同类型缺陷热红外损伤特征的构建与提取。未来,可通过理论分析、试验研究、多场耦合作用下的内部损伤参数反演和有限元分析相结合,厘清多场耦合作用机理;通过红外图像处理、多源图像融合,结合机器学习方法提炼损伤目标的不变性特征,提高外墙系统损伤的红外热成像识别和定量水平。

表 6 建筑外墙日光热成像检测主要文献

Table 6 Building exterior wall SLT related references

文献编号	年份/年	检测对象	检测模式	研究因素	研究方法	数据处理及分析方法
[74]	2006	瓷砖墙空鼓	静态热成像	缺陷面积、深度、厚度、朝向、时间段、湿度等	理论建模、试验研究、有限元分析	温度-时间曲线分析
[72]	2014	瓷砖墙含水率	静态热成像	日光辐射、环境温度、墙体含水率	有限元分析、原位实验、对比验证	空间温度曲线分析
[73]	2014	抹灰墙空鼓	静态热成像	检测时段	试验研究、原位实	空间温度曲线分析

[57]	2015	瓷砖墙含水率	动态热成像	检测时机、数据时间间隔	原位实验、对比验证	简单图像相减、非负矩阵分解、主成分分析
[49]	2015	瓷砖墙空鼓	动态热成像	检测时机、数据时间间隔	原位实验、对比验证	简单图像相减、非负矩阵分解、主成分分析
[41]	2015	抹灰墙空鼓/瓷砖墙空鼓	静态热成像	脱粘埋深、环境温度、热流变化、墙面种类(抹灰、瓷砖)	试验研究	空间像素微分
[61]	2017	瓷砖墙空鼓/瓷砖墙含水率	静态热成像	瓷砖深浅、检测时段、外保温系统	试验研究	温度-时间曲线分析
[17]	2017	外墙隐藏结构	动态热成像	红外设备(长波&中波制冷)	原位实验	脉冲相位分析、主成分分析
[83]	2019	建筑热桥	动态热成像	检测时段	原位实验	平滑数据、迭代滤波、稀疏主成分分析
[76]	2022	墙体外保温层裂缝	静态热成像	环境温度、裂缝尺寸	有限元分析、试验研究	空间温度曲线分析
[40]	2022	外墙瓷砖空鼓	静态热成像	检测时机	原位实验	C均值聚类、直方图处理、支持向量机 SVM
[75]	2023	外墙空鼓与脱落	静态热成像、可见光检测	—	原位实验	UNet、Res-UNet
[84]	2023	建筑热桥、热泄漏	静态热成像	—	原位实验	直方图处理、图像拼接、图像融合

4.2 道路与桥梁

桥路面混凝土或铺装层损伤类型主要包括混凝土桥面板中因钢筋锈蚀导致分层剥离损伤、沥青或水泥路面的疲劳裂缝、空洞等。与一般墙面空鼓相比，桥路面空鼓损伤埋藏较深，隐蔽性较强，可对局部构件乃至整体结构的强度与耐久性产生严重影响。

针对混凝土内部分层的研究较多。WASHER 等^[86]研究了日光加热对检测混凝土试块亚表面缺陷热红外成像的影响，证明了该方法对高速公路混凝土桥梁损伤实时检测的可能性，分析了试块热像图中的热对比度，并讨论了缺陷深度与最佳检测时间之间的关系。

针对热图像处理方法方面，OMAR^[87]探索运用无人机热成像方法对混凝土桥面下分层缺陷进行的日光热成像检测，运用 K 均值聚类算法进行热图像数据的阈值识别，避免了阈值法中研究者的主观性影响。ICHI 等^[88]开发了一种基于自适应图像处理的模型来检测在役混凝土桥面在不同环境下的亚表面分层缺陷，结果表明：与传统的 KNN 聚类方法相比，采用的模型具有更好的分割效果和性能。POZZER 等^[50]研究日光热成像技术在不同光照强度下检测混凝土基础设施亚表面分层缺陷的能力，并运用偏最小二乘法对动态热成像数据进行了处理。研究表明：日光热成像技术能够检测径深比 (S/D) 为 2.0 的钢筋混凝土板的分层；在 S/D 为

1.0 的混凝土结构中识别亚表面缺陷的能力最大可达 80mm。HIASA 等^[89]通过结合有限元模型模拟，开发了一种实用且更客观的方法来获得热红外图像数据处理的阈值，采用高斯滤波实现了红外热图像增强，优化了混凝土板内部脱空的检测结果。程崇晟^[65]提出一种拉普拉斯高斯滤波法对红外热图像进行处理，实现了混凝土板内多种尺寸分层损伤的检测。郑丹等^[25]对混凝土中不同大小和深度的缺陷进行检测，表明全局直方图均衡 (GHE) 能扩展温度范围，更适用于太阳加热下的深度缺陷识别，而对比度极限自适应直方图均衡 (CLAHE) 的梯形处理更适用于缺陷轮廓模糊的脉冲加热图像。MOHANNED 等^[47]利用自适应信号和图像处理技术开发了一种全自动动态热成像数据处理流程，该方法通过小波变换的多尺度数据分析方法将原始热成像数据集分解到窄带时频域内，可以改进对更深缺陷 (7.62cm 及以上) 的检测效果。POZZER 等^[90]提出了一种将被动红外热成像结果与 BIM 相结合的框架，以改善混凝土基础设施内部的分层缺陷检测。CHENG 等^[91]提出基于温度梯度的水平集方法 (LSM) 来检测分层分割的边界，开发了一种改进的边缘指示器函数来表示热图像的归一化温度梯度。

在检测影响因素的研究方面，POZZER 等^[50]在混凝土板分层损伤检测的研究中发现数据采集的时间窗口窄 (每次采集时间短，没有覆盖一个周期)

不利于 PPT 检测效果的发挥。MAC 等^[54, 58]研究了自然日光条件下多种气候和时间因素影响的桥面板分层损伤热成像检测, 通过逐像素统计分析法对顶面和底面损伤进行了识别和区分, 表明基于方差的逐像素统计法能够取得更优的效果, 且更长时间跨度的数据采集能够增强检测效果。该方法克服了日光热成像技术检测桥面和底板分层缺陷时对检测时间窗口的依赖, 并从向阳面检测到了 19.5cm 深度的分层损伤。

裂缝检测方面, LIU 等^[92]、王俊杰等^[93]运用热成像方法对沥青路面裂缝检测进行了研究, 表明沥青路面裂缝内部区域发出的热辐射与外部沥青背景不同, 使红外图像能够识别裂缝的形态和位置, 同时避免可见光的环境干扰。LIU 等^[92]运用 7 种 CNN 模型对多种类型和背景的沥青路面裂缝进行分割, 并综合准确度和复杂度对模型进行了评价。LIU 等^[94]进一步采用 13 种 CNN 模型对沥青路面疲劳裂缝严重程度进行了评估, 表明基于热红外图像数据的 CNN 模型准确率最高, 且可见光和红外的双光融合图像数据在沥青路面检测中具有更高的准确度和可靠度, 是裂缝检测的更优选择。王俊杰^[93]结合 GhostNet 和 SKN 构建了改进的 GSKYOLOv5s 网络, 对沥青路面进行了裂缝识别与分类, 目标检测精度较 YOLOv4、YOLOv5s 等网络有了明显提升。JANG 等^[95]开发了一种可见光和激光红外热像技术相结合的混合图像扫描系统, 并提出了一种基于深度学习的混凝土裂缝自主评估算法。将双光图像融合重构后划分为小块, 通过预训练的 Google Net 模型进行分类, 提高了混凝土构件裂缝的可检测性, 降低了错误报警率。LIU 等^[96]通过多种神经网络研究了基于五种图像类型(可见光

图像、红外图像和不同红外比的融合图像)的沥青路面病害研究, 表明 Yolo v5 的效果最优且基于融合图像的检测准确度最高。邓露等^[97]通过调研认为机器视觉结合红外图像能够为提高裂缝识别度、获取裂缝深度信息提供新思路。

针对其他结构形式, CAI 等^[69]通过对不同模拟气候条件下钢管混凝土脱粘的数值和实验研究, 揭示了热指标与热对比度之间的关系, 提出了一种钢管混凝土脱粘的红外评估方法, 实现了脱粘尺寸、环境因素和热对比度之间关系的线性量化。ZHANG 等^[55]对混凝土桥面板内部分层空鼓实施了室内主动热成像和自然环境下的被动热成像, 通过热对比度和热梯度幅值分析, 成功地定位了分层厚度 1.63mm、长 150mm、深 25mm 的缺陷。本小节涉及的主要参考文献见表 7。

综上, 日光热成像能够实现包括混凝土内部分层、桥路面裂缝和空鼓以及钢管混凝土构件空鼓等损伤的检测。动态热成像能实现较深层的内部分层或空鼓损伤检测, 但目前对热红外数据时空演化关系研究不足, 深层损伤识别能力和量化水平有限, 检测时间间隔较短, 检测数据量较大, 损伤识别与定量易受噪声影响, 在实践中实施难度较大。在现有热图像序列处理方法基础上, 通过神经网络模型对复杂多特征进行求解, 在试验研究数据基础上优化动态热成像数据采集策略, 提炼更优的数据时空演化特征, 有望提高各类损伤的识别与定量分析能力。针对桥路面裂缝检测, 明确并优化路面裂缝检测数据集构建标准, 构建优质双光数据集, 能够推动基于无人机双光数据的路面裂缝检测方法和标准的建立和轻量化检测的开展。

表 7 桥路面日光热成像检测主要文献

Table 7 Bridge deck and pavement SLT related references

文献编号	年份/年	检测对象	检测模式	研究因素	研究方法	数据分析方法
[86]	2010	混凝土内部分层	静态热成像	缺陷埋深、日光辐射	试验研究	温度-时间曲线分析
[53]	2016	混凝土内部分层、脱空、裂缝、钢筋锈蚀、钢筋缺失等	静态热成像	材料性质、环境温度、损伤尺寸、损伤埋深等	试验研究	对比分析
[87]	2017	混凝土桥面分层	静态热成像	—	原位实验对比验证	图像拼接、平滑滤波、直方图均衡、K 均值聚类
[89]	2017	混凝土内部分层	静态热成像	检测时机、缺陷埋深	试验研究 有限元分析	高斯滤波、阈值法、空间温度曲线分析

[47]	2019	混凝土内部分层	动态热成像	缺陷埋深	试验研究	一维小波变换
[95]	2019	混凝土裂缝	静态热成像	—	原位实验	GoogLeNet 深度卷积神经网络
[54]	2021	混凝土桥面分层	动态热成像	环境温度、相对湿度、检测时段	试验研究	温度-时间曲线分析、主成分分析
[25]	2021	混凝土内部分层	动态热成像	缺陷大小、缺陷埋深、加热方式	试验研究	温度/温差-时间曲线分析、空间温度曲线分析、直方图均衡
[88]	2022	混凝土桥面分层	静态热成像	—	原位实验 对比验证	平滑滤波、直方图均衡、Otsu 阈值法
[92]	2022	沥青路面裂缝	静态热成像	—	原位实验	裂缝目标分割（7 种 CNN 模型）
[94]	2022	沥青路面疲劳裂缝严重性	静态热成像	图像类型（可见光、热红外、融合）	原位实验	13 种 CNN 模型
[58]	2023	混凝土桥面分层	动态热成像	数据时间间隔、检测时段、检测时长、缺陷埋深	试验研究	逐像素统计分析法
[93]	2024	沥青路面裂缝	静态热成像	—	原位实验	GSkYOLOv5、生成对抗网络（GAN）
[96]	2024	沥青路面病害	静态热成像	图像类型（可见光、热红外、融合）	原位试验	Yolo v5- Eigen-CAM
[90]	2025	混凝土内部分层	静态热成像	—	试验研究	空间温度曲线分析、CNN、SNN
[69]	2025	钢管混凝土内部剥离	动态热成像	环境温度、日光辐射	试验研究 有限元分析	数据相关性分析
[55]	2025	混凝土桥面分层	动态热成像	户内外检测	试验研究	图像温度梯度幅值分布

4.3 风电叶片

风电叶片是发电机组的重要部件，保持其健康状态对保障机组安全运行和提高发电效率具有重要意义。在役叶片健康问题包括叶片表面污渍附着、孔洞、起鼓、裂纹，表面不可见的材料内部分层和内部结构性脱粘等损伤，以及有多种因素引起的整体形变等。

4.3.1 表面及亚表面损伤检测

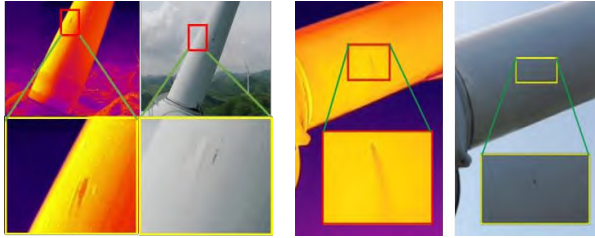
气泡、分层、脱粘损伤是风机叶片常见的亚表面缺陷。这些缺陷的存在和发展会对风机叶片的结构强度和气动效率产生负面影响，进而影响风力发电机的运行安全、发电效率和寿命。传统的检测方法如目测法、高倍望远镜检测以及叶片检修平台存在安全性低、成本高、效率低等问题。随着近年来风电安全运维需求的激增，通过日光热成像技术检测风机叶片的亚表面缺陷逐渐受到国内外研究者的关注。

WORZEWSKI 等^[98-99]通过户外试验证明较长时间的日光加热可实现 3cm 厚 GFRP 板材的有效加热，通过对退役损伤叶片截断进行户外检测试验和有限元模拟，证明了日光热成像对叶片表面缺陷检测的可行性，并指出未知材料参数与环境变量对缺陷定量检测的挑战。DOROSHTNASIR 等^[100]针对风

机叶片运行状态热成像监测这一主要目标，研究了通过减少热像图中的干扰因素来提高红外图像质量，实现远距离检测旋转风机叶片的亚表面缺陷。吴国境等^[101]对附有损伤的风机叶片进行日光热成像检测研究，结果表明：可以通过日光热成像技术检测风机叶片的内部损伤。GALLEGUILLLOS 等^[102]运用无人机实施在役风机叶片缺陷的热成像检测，结果表明该方法可快速检测叶片运行过程中常见的裂纹、分层和磨损等缺陷，在结合相关数据处理软件的基础上可作为有效的在役叶片检测手段。

CHAUDHURI 等^[103]对在役风电叶片进行日光热成像检测，同时基于现场测量结果，利用输入参数和边界条件对风机叶片结构进行有限元模拟，以预测风机叶片的热响应。作者团队^[60]对基于无人机日光热成像的风电叶片检测进行了数值分析、地面试验和现场试验。数值分析使用了实测太阳辐射拟合曲线作为边界条件，地面试验运用了 GFRP 板和真实风力涡轮机叶片片段，表明该方法可对表面和内部损伤进行区分，且发现了不同深度和类型缺陷对应表面温度差的时间变化特征。根据现场检测数据，获得了在役叶片常见损伤的双光图像，部分典

型损伤如图 6 所示。同时，探讨了无人机热成像在使用自然太阳辐射检查风电叶片方面的潜力，通过数值分析和实验研究，分析了太阳辐射和环境温度对分层缺陷、含水缺陷和表面缺陷检测的影响规律。



(a)内部损伤 (b)表面突起

图 6 红外及可见光图像下风电叶片的部分典型损伤

Fig.6 Some typical damages of wind blades under infrared and visible images

张玉等^[104]通过修正的热弹性应力分析 TSA (Thermoelastic Stress Analysis) 模型对低频率载荷下风机叶片的表面温度进行分析,进而通过 TSA 理论对叶片表面进行应力及损伤检测。

4.3.2 在役叶片流场状态检测

叶片表面特别是前缘处的污渍、起鼓、腐蚀等情况会影响气流边界层分布,降低叶片升力,增加运行阻力^[105]。在役风电叶片与其边界层内气流之间存在热对流,其他条件相同时,湍流传热的强度大于层流。据此,可以通过获取叶片运行中的表面热辐射分布来识别其边界层内层流到湍流过渡的转捩线。也就是说,叶片转捩位置可作为叶片气动性能的衡量指标,对监测叶片健康状况和分析机组发电效率均具有重要意义。目前,监测在役叶片表面流场状况的手段有限,常用的表面丝线法空间分辨率差,只能对流场状况进行大致判断。恰当运用红外热成像方法,能够实现在役叶片表面流场的高分辨、非接触的轻量化检测。

GLEICHAUF 等^[106]通过采集并对比阵风前后在役风电叶片表面热图像,证明了日光热成像测量风电叶片转捩位置的能力。DOLLINGE 等^[105]采用地面架设热像仪对发电状态下的风电叶片实施

远距离拍摄,提出一种基于热成像流体可视化的非侵入式叶片边界层流扰动测量方法,能够通过热图像识别叶片表面紊流楔并确定转捩线位置。据此,针对特定型号的风力涡轮机,测算出平均风速为 6m/s 时,其年发电损失为 4.7%。JENSEN 等^[107]研究了风机叶片腐蚀孔洞尾流的热成像可视化,结果表明表面孔洞位置、深度直径比、分布情况及入流速度等会对尾流形状、转捩线位置等产生影响,验证了利用气流热成像可视化间接检测叶片表面孔洞类损伤的可行性。OEHME 等^[108]采用传统丝线法验证了热成像检测可行性。本文作者团队对在役风电叶片气流可视化相关技术进行了文献综述,提出了日光热成像的低空与地面相结合的叶片流场检测系统(如图 7),并指出了日光热成像方法在叶片转捩状态的轻量化和智能化检测中的应用前景^[109]。

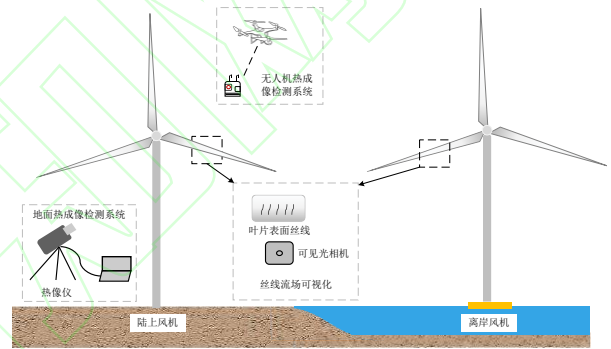


图 7 低空与地面相结合的叶片流场检测系统^[109]

Fig.7 Low-altitude and ground-based wind turbine blade flow field detection system^[109]

本团队运用无人机载热像仪实施了在役风电叶片转捩检测。结果表明,在天气晴好时,气温最高点附近的检测效果最佳。叶片静止状态检测时,易受内部主梁造成的热异常耦合影响;叶片运行状态下获得的转捩检测效果更佳,但由于民用无人机载非制冷型热红外相机帧率较低,所获取的热图像往往存在运动模糊。未来可采用动态热成像结合图像处理算法消除叶片内部结构影响,并结合运动特征和机器学习方法消除运动模糊,此为运用国产化热像仪实现在役叶片轻量化转捩检测的关键。

表 8 风电叶片日光热成像检测主要文献

Table 8 Wind turbine blade SLT related references

文献编号	年份/年	检测对象	检测模式	研究因素	研究方法	数据分析方法
[102]	2015	内部分层、撞击损伤、裂纹	静态热成像	分层尺寸及深度、不同撞击能量、裂缝宽度	试验研究、原位实验	一维/二维空间像素分布分析

[98, 99]	2016	GFRP 板材、叶片表面及内部损伤	静态热成像	环境温度、相对湿度、太阳照度、日光入射角、检测时段、损伤参数	试验研究、有限元分析	温度时间曲线分析
[100]	2016	叶片内部损伤	静态热成像	表面反射率、表面热反射	试验研究、原位实验	图像增强、高斯滤波、图像相减
[105]	2019	叶片转捩	静态热成像	叶片表面污染程度、叶片攻角	原位实验	弦向温度曲线分析、高斯误差函数、几何赋值调整、测量不确定性分析
[101]	2020	表面磨损、表面裂纹、内部损伤	静态热成像	检测时段、太阳照度、环境温度、环境湿度	试验研究	温度-时间曲线分析
[103]	2023	叶片内部损伤	静态热成像	加热方式、损伤尺寸及深度	试验研究、原位实验、有限元分析	温度/温差-时间曲线分析
[106]	2023	叶片转捩	静态热成像	太阳照度、阳光入射角、阵风时间间隔	理论分析、原位实验	图像相减
[107]	2024	表面腐蚀孔洞、叶片转捩	静态热成像	叶片翼型、孔洞弦向位置、孔洞深度/直径比、相邻孔洞数量	试件风洞试验、有限元仿真	对比分析
[60]	2024	下表面缺陷	静态热成像	日光辐射、环境温度、对流换热系数、缺陷深度、检测时段	有限元仿真、试验研究	温度-时间曲线分析

本节涉及的主要参考文献见表 8。这些研究证明了日光热成像在役叶片损伤和前缘状态检测中的可行性，并从定性和定量角度进行了较丰富的探索和分析。目前研究主要存在的问题有：1) 基于热红外和可见光图像融合的损伤检测研究中，像素级与特征级融合运用较多，决策级融合研究不足，对特定缺陷无法综合双光信息进行综合判断，导致对在役叶片各类损伤识别的准确度较低；2) 缺乏消除热红外图像目标运动模糊的有效途径；3) 长大叶片热红外二维及三维全景图像生成与损伤定位问题

有待解决。随着我国陆上及海上风电产业的迅速发展，在役叶片亟需经济可靠的巡检手段，突破基于无人机载双光相机的叶片损伤及流场可视化技术，将为风电场运维提供新的手段和思路。

考虑到热图像处理方法和损伤识别方法的多样性与文章篇幅限制，此处仅通过表 9 和表 10 列出本节相关文献中所涉及的方法。热图像处理方法与深度学习、物理约束以及相关信号处理等方法的融合，在日光热成像研究中具有重要意义，有望推动其从“经验诊断”迈向“可解释智能诊断”发展。

表 9 日光热成像中的热图像处理方法

Table 9 Thermal image processing methods in SLT

方法名称	文献编号	作用	优点	缺点	适用场景
空间滤波（拉普拉斯高斯滤波、高斯滤波等）	[65]、[87]、[88]、[89]、[100]	去噪、平滑、增强	降低不均匀加热和表面纹理干扰	对滤波器核依赖性强、运算量较大	降低单张热图像中的噪声干扰
直方图均衡（GHE、CLAHE 等）	[25]、[84]、[87]、[88]	增强、去噪	可扩展温度动态范围	灰度级减少、高维数据不适用、计算量较大	增强单张热图像特征
简单图像相减	[57]、[49]、[100]、[106]	降噪	简单易行、结果直观	对相减图像选取依赖性强	多张热图像
小波变换 WT	[47]	去噪、压缩	适合处理多尺度特征信号	基函数选择的经验依赖性强、缺少相位信息	热图像序列的多尺度变化特征提取
主成分分析 PCA/加权主成分分析/稀疏主成分分析	[17]、[24]、[54]、[57]、[49]、[83]、[110]、[111]、[50]	数据降维、去噪、特征重建	消除反射和阴影	对非线性问题的处理有限、对图像序列有空间对齐要求、对异常值敏感、可解释性差	热图像序列的降噪和时空特征提取
非负矩阵分解 NMF	[57]、[49]	数据降维、去噪、分类	物理可解释性强、适用于叠加结构数据	对初始数据及迭代次数敏感、运算量较大、对非线性问题的处理有限	热图像序列或热视频的时空特征提取
迭代滤波 IF	[83]	降噪、降低阴影影响	抑制模态混叠、收敛性明确、高频噪声抑制	计算复杂度较高、滤波器长度初始化敏感	稀疏主成分分析前的热图像序列前处理
经验模态分解 EMD	[24]	增强、去	自适应性较好、	模态混叠、无法提供全局的频	热图像序列特征提取

		噪、材料结构信息提取	适用于非线性、非平稳信号	域分析、边界效应、计算量较大	
脉冲相位热成像 PPT	[17]、[50]	去噪	抑制不均匀加热、环境反射、表面反射等影响	数据量要求高、对图像序列有空间对齐要求、频域混叠效应、频率分辨率不够高	日光脉冲热成像及日光阶跃热成像中图像序列的特征增强
偏最小二乘热成像/热图回归法	[50]、[112]	降噪、特征重建	提高模型稳定性和预测能力	变量数目依赖性强、需要大量标注数据、对非线性问题的处理有限	热图像序列降噪、时空特征提取
逐像素统计分析	[58]	丰富特征图像	特征统计意义强、考虑时域特征	数据量较大、对图像序列有空间对齐要求	热图像序列的时空特征提取

表 10 日光热成像损伤识别方法

Table 10 Defect detecting methods

方法名称	相关文献	优点	缺点
温度/温差-时间曲线分析	[54]、[61]、[74]、[86]、[101]、[103]	结果较直观、考虑时间维度	需对比分析、难以定量分析
空间温度曲线分析/空间像素分布分析	[72]、[73]、[76]、[89]、[102]、[105]	简单易行、结果较直观	难以定量分析
阈值法	[88]、[89]	简单易行、结果直观、可定量	阈值设定主观性强、对前期图像处理依赖性强
空间像素微分边缘检测	[41]、[47]、[91]	结果较直观、一维方向可定量	二维空间定量准确度较差
K 均值聚类/C 均值聚类	[40]、[87]	较阈值法更客观	对噪声敏感、对初始值敏感、计算量较大
机器学习/神经网络	[40]、[75]、[85]、[92]、[93]、[94]、[95]、[113]、[114]	抽象特征提取能力强	对数据和方法敏感、可解释性较差

5 总结与展望

日光热成像是在自然条件下实施的非接触式无损检测技术，对其理论和方法的深入探索能提高户外大型基础设施轻量化运维水平，推动我国基础设施运维领域的新质生产力培育。综合国内外研究现状，未来需从以下几方面开展深入研究：

(1) 多场耦合量化作用机理。日光热成像检测机理涉及日光辐射场、气流场、温度场的多场耦合作用；实际检测中，环境与目标自身特性会显著影响检测准确度。目前对各因素影响的研究主要从检测效果角度进行统计分析，而从检测机理角度的量化研究和分析不足。采用理论模型分析、定量试验、多物理场仿真等多种手段相结合的方法，能够进一步阐明检测机理、厘清成像规律，明晰量化关系。

(2) 损伤热特征构建与提取。如何构建并提取多目标特征、多场耦合、时空变化等多类因素影响下的损伤目标（准）不变性特征，并构建损伤特征模型，是实现日光热成像损伤定量和表征的关键。现有研究多基于热红外数据实施损伤识别，对检测对象的物理参数和基于环境条件的物理约束考虑不足，难以构建有效的损伤识别模型。建立优质多

源损伤数据集，构建数据与物理相融合的认识与量化模型，突破日光热成像损伤检测的关键难题。

(3) 周期性在役巡检研究。丰富在役场景下基础设施日光热成像检测研究，开展周期性在役巡检，进一步提升损伤识别与定量准确度。目前，多数原位实验研究仅针对局部区域实施检测，对高耸、大跨、大尺度设施检测场景考虑不足，对大批量数据处理、分析和损伤定位的研究有限。同时，亟需建立较长时间跨度下周期性巡检数据的时频域分析方法，突破热红外检测误检率较高的“卡点”，将检测与监测相结合，提高日光热成像技术的可靠性。

(4) 基于无人机技术的多源信息融合。依托无人机搭载热成像等数据采集设备获取户外被检对象的热红外、可见光、多光谱和三维激光点云等数据的技术已比较成熟。在此基础上，基于双光融合乃至多光谱融合的户外大尺寸目标三维全景图像重构理论的研究将使得损伤定位、全局评估和视觉展示等成为可能。多波段图像的前期处理、低误差拼接、多级别融合，特别是决策级融合，将提高检测准确性和可靠性；多源数据与三维点云模型或 BIM 模型的自动化精确配准等内容的研究，也将推动日光热成像检测技术的发展和变革。

(5) 与其他无损检测技术的结合。充分利用热成像非接触和轻量化特点,充分发挥筛查功能,与其他技术形成互补。利用传统定量检测技术进行日光热成像检测技术的验证,推动其定量检测研究。如采用红外热像技术结合应力传感网络,构建建筑或其他户外大型基础设施的监测体系。结合其他技术,扩展应用范围。如探索太赫兹波与热红外复合成像技术在隐蔽工程检测中的应用,开发可穿透更深层混凝土结构的检方法与设备,扩展其适用范围。最后,可探索其他热源作为日光加热的补充,如以激光作为补充激励^[15],利用其输出功率稳定、能量分布均匀、可控性强等优势强化检测效果。

除此之外,基础设施领域中新材料和新结构(如3D打印结构、气凝胶隔热层等)不断涌现,探索日光热成像技术与它们的适配性研究,将为提高未来基础设施的轻量化和智能化检测与监测提供更多可能。

参考文献

- [1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告 [EB/OL]. (2022-10-25) [2024-05-20]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.
XI Jinping. Hold high the great banner of socialism with Chinese characteristics and strive in unity to build a modern socialist country in all respects: Report to the 20th National Congress of the Communist Party of China [EB/OL]. (2022-10-25) [2024-05-20]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-10/25/content_5721685.htm.
- [2] SOHN H, FARRAR C R. Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals [J]. *Smart Materials & Structures*, 2001, 10(3): 446-51.
- [3] 章俊, 刘书奎, 刘盛东, 邓晗. 基于旋转敲击空气耦合冲击回波的衬砌壁后注浆缺陷快速检测方法研究 [J]. *工程力学*, 2025: 1-11.
ZHANG Jun, LIU Shukui, LIU Shengdong, DENG Han. A rapid detection method for grouting defects behind lining walls using rotational air-coupled impact echo [J]. *Engineering Mechanics*, 2025: 1-11. (in Chinese)
- [4] 杨洋, 赵广茂, 张志厚, 张天一, 吴艳霞, 黄丽敏, 舒永正, SHRESTHA R. 铁路路基病害探地雷达智能识别方法 [J]. *地球物理学进展*, 2024, 39(6):2471-2482.
YANG Yang, ZHAO Guangmao, ZHANG Zhihou, ZHANG Tianyi, WU Yanxia, HUANG Limin, SHU Yongzheng, SHRESTHA R. Intelligent detection

- method for railway subgrade diseases based on ground penetrating radar [J]. *Progress in Geophysics*, 2024, 39(6):2471-2482. (in Chinese)
- [5] 凌千展, 秦大燕, 解威威, 吴雄华, 唐睿楷, 赵玉峰, 侯凯文, 曹璐, 丁自豪. 基于超声波波速的钢管混凝土带球冠形脱空缺陷定量评估模型 [J]. *工程力学*, 2025, (08): 134-43.
LING Ganzhan, QIN Dayan, XIE Weiwei, WU Xionghua, TANG Ruikai, ZHAO Yufeng, HOU Kaiwen, CAO Lu, DING Zihao. Quantitative evaluation model of concrete-filled steel tubes with spherical-cap gaps upon ultrasonic pulse velocity [J]. *Engineering Mechanics*, 2025(8): 134-143. (in Chinese)
- [6] 常俊杰, 曾雪峰. 改良线性调频脉冲压缩在空耦超声混凝土检测中的应用 [J]. *混凝土*, 2019(12): 161-164, 172.
CHANG Junjie, ZENG Xuefeng. Application of improved linear-frequency-modulation based pulse compression in air-coupled ultrasonic concrete testing [J]. *Concrete*, 2019(12): 161-164, 172. (in Chinese)
- [7] 徐晓阳, 苏怀智, 闫潇群, 姚可夫. 基于声发射信号能量衰减的混凝土材料损伤检测 [J]. *无损检测*, 2023, 45(8): 46-51.
XU Xiaoyang, SU Huaizhi, YAN Xiaoqun, YAO Kefu. Damage detection of concrete materials based on energy attenuation of acoustic emission signals [J]. *Nondestructive Testing*, 2023, 45(8): 46-51. (in Chinese)
- [8] 李军伟, 徐飞, 王兵, 高阳. 混凝土不同骨料粒径对声发射检测的影响 [J]. *山东大学学报(工学版)*, 2021, 51(5): 84-90.
LI Junwei, XU Fei, WANG Bing, GAO Yang. Influence of concrete aggregate particle size on acoustic emission detection [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2021, 51(5): 84-90. (in Chinese)
- [9] 段进涛, 仇培云, 刘建勇, 齐建全. 混凝土结构损伤声发射分析方法研究进展 [J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(11): 4487-501.
DUAN Jintao, QIU Peiyun, LIU Jianyong, QI Jianquan. Progress of Study on Acoustic Emission Analysis Methods for Damage of Concrete Structures [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(11): 4487-4501. (in Chinese)
- [10] 李秋, 吴幼磊, 余地华, 邓昌福, 赖国梁, 李松, 陈伟. 重晶石改性钢筋套筒灌浆料对X射线检测灌浆缺陷效果影响研究 [J]. *建筑结构*, 2023, 53(S1): 1318-25.
LI Qiu, WU Youlei, YU Dihua, DENG Changfu, LAI Guoliang, LI Song, CHEN Wei. Effect of baryte modified grouting material on the efficiency of X-ray digital

- radiography test of grouting quality [J]. *Building Structure*, 2023, 53(S1): 1318-1325. (in Chinese)
- [11] 杨娜, 王烁, 迪力达尔·迪力夏提. 古建筑砌体结构裂缝损伤监测和数据挖掘 [J]. *工程力学*, 2025, 42(3): 18-31.
YANG Na, WANG Shuo, DILIDAER Dilixiati. Crack damage monitoring and data mining of ancient building masonry structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(3): 18-31. (in Chinese)
- [12] 杨娜, 王烁, 汪德佳. 基于计算机视觉的藏式古建筑石砌体壁画墙裂缝生长变形监测 [J]. *工程力学*, 2025, 42(1): 129-142.
YANG Na, WANG Shuo, WANG Dejia. Deformation monitoring during the growth of cracks in mural walls with stone masonry material of tibetan ancient buildings based on computer vision [J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(1): 129-142. (in Chinese)
- [13] 黄凯, 尹函彬, 孙庆平. 红外热像技术测量I型裂纹应力强度因子的研究 [J]. *工程力学*, 2017, 34(11): 231-239.
HUANG kai, YIN hanbin, SUN qingping. Research on using infrared imaging techniques to measure mode-I crack stress intensity factors [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(11): 231-239. (in Chinese)
- [14] 冯力强, 王欢祥, 晏大玮, 刘吉林. 红外热像法检测建筑外墙饰面层内部缺陷试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2014, 47(06): 51-56.
FENG Liqiang, WANG Huanxiang, YAN Dawei, LIU Jilin. Experimental study on internal defects detection of exterior wall finish coat by infrared thermography [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(6): 51-56. (in Chinese)
- [15] 周颖, 孟诗乔, 孔庆钊, 翁渝峰. 建筑结构损伤智能检测与响应智能预测研究综述 [J]. *建筑结构学报*, 2024, 45(06): 107-132.
ZHOU Yin, MENG Shiqiao, KONG Qingzhao, WENG Yufeng. State-of-the-art of intelligent damage detection and response prediction of building structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2024, 45(6): 107-132. (in Chinese)
- [16] ALDAGUE X P. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing* [M]. Canada: Wiley, 2001.
- [17] IBARRA-CASTANEDO C, SFARRA S, KLEIN M, MALDAGUE X. Solar loading thermography: Time-lapsed thermographic survey and advanced thermographic signal processing for the inspection of civil engineering and cultural heritage structures [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 82: 56-74.
- [18] ZOU X, MIRALA A, SNEED L H, AL QASEER M T, DONNELL K. Detection of CFRP-concrete interfacial debonding using active microwave thermography [J]. *Composite Structures*, 2021, 260.
- [19] 王扬, 李科, 刘俊岩. CFRP 复合材料层板缺陷的红外热波成像检测方法 [J]. *航空制造技术*, 2016, (4): 7.
WANG Yang, LI Ke, LIU Junyan. Nondestructive testing and evaluation (ndt&e) for cfrp laminate with subsurface defects using infrared thermal wave imaging [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(4): 7. (in Chinese)
- [20] GU J-C, UNJOH S, NAITO H. Detectability of delamination regions using infrared thermography in concrete members strengthened by CFRP jacketing [J]. *Composite Structures*, 2020, 245.
- [21] MIRALA A, ZOU X, GHASR M T, SNEED L, DONNELL K M, IEEE. Active Microwave Thermography: A Real-Time Monitoring Tool for CFRP-Concrete Bond Testing; proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Auckland, NEW ZEALAND, F 2019 May 20-23, 2019 [C]. 2019.
- [22] YANG R, HE Y, MANDELIS A, WANG N, WU X, HUANG S. Induction Infrared Thermography and Thermal-Wave-Radar Analysis for Imaging Inspection and Diagnosis of Blade Composites [J]. *Ieee Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(12): 5637-47.
- [23] ARNDT R W. Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53(4): 246-53.
- [24] TU K, IBARRA-CASTANEDO C, SFARRA S, YAO Y, MALDAGUE X P. Multiscale analysis of solar loading thermographic signals for wall structure inspection [J]. *Sensors*, 2021, 21(8): 2806.
- [25] ZHENG D, TAN S, LI X, CAI H. Research on the Infrared Thermographic Detection of Concrete under Solar Heating [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 6692729.
- [26] KLEIN S, HEIB T, HERRMANN H-G. Estimating thermal material properties using step-heating thermography methods in a solar loading thermography setup [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(16): 7456.
- [27] MA Y, WONG L, VIEN B S, KUEN T, KODIKARA J, CHIU W K. Quasi-Active Thermal Imaging of Large Floating Covers Using Ambient Solar Energy [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(20): 3455.
- [28] KRANKENHAGEN R, MAIERHOFER C. Pulse phase thermography for characterising large historical building

- façades after solar heating and shadow cast—a case study [J]. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2014, 11(1): 10-28.
- [29] 周仁练, 苏怀智, 刘明凯, 徐朗, 华倩宇. 基于被动红外热成像的土石堤坝渗漏探测试验研究 [J]. *水利学报*, 2022, 53(1): 54-67.
ZHOU Renlian, SU Huaizhi, LIU Mingkai, XU Lang, HUA Qianyu. Experimental study on leakage detection of earth rockfill dams using passive infrared thermography [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(1): 54-67. (in Chinese)
- [30] 张玮睿, 胡琦, 和骅芸, 潘学标, 董智强, 李楠. 不同时间尺度中国大陆区域辐射资源时空变化特征分析 [J]. *中国农业资源与区划*, 2024, 45(10): 97-108.
ZHANG Weirui, HU Qi, HE Huayun, PAN Xuebiao, DONG Zhiqiang, LI Nan. Characterization of spatial and temporal changes in regional radiation resources in china's mainland at different time scales [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024, 45(10): 97-108. (in Chinese)
- [31] 沈钟平, 张华. 影响地面太阳辐射及其谱分布的因子分析 [J]. *太阳能学报*, 2009, 30(10): 1209-1215.
SHEN Zhongping, ZHANG Hua. Analysis on the factors affecting surface solar radiation and its spectral distribution [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2009, 30(10): 1209-1215. (in Chinese)
- [32] POZZER S, OMIDI Z, EL REFAI A, LÓPEZ F, IBARRA-CASTANEDO C, MALDAGUE X. Passive infrared thermography for subsurface delamination detection in concrete infrastructure: Capabilities [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 419: 135542.
- [33] 杨世铭, 陶文铨. *传热学* [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG Shiming, TAO Wenquan. *Heat transfer* [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [34] IBARRA-CASTANEDO C, SFARRA S, GENEST M, MALDAGUE X. *Infrared Vision: Visual Inspection Beyond the Visible Spectrum* [M]//LIU Z, UKIDA H, RAMUHALLI P, et al. *Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection: Advances and Applications*. London; Springer London. 2015: 41-58.
- [35] RAJA B N K, MIRAMINI S, DUFFIELD C, SOFI M, MENDIS P, ZHANG L. The influence of ambient environmental conditions in detecting bridge concrete deck delamination using infrared thermography (IRT) [J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2020, 27(4).
- [36] CAI H, CHENG C, NA R, ZHANG H, ZHOU J, JING S, MIAO C. Cooling-excited infrared thermography for enhancing the detection of concrete filled steel tube interfacial debonding at concrete hydration [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20.
- [37] CHENG C, SHEN Z. Semi real-time detection of subsurface consolidation defects during concrete curing stage [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270.
- [38] LI S, GAO X, WANG J, YANG Q, JIANG N, ZHENG P, CUI C, HAN S, SUN S. Investigation of the applicability of infrared thermography detection of grouting voids in prestressed tendon ducts under hydration heat excitation [J]. *Ndt & E International*, 2024, 143.
- [39] 魏鹏, 刘成禹, 王金华, 吴昌宇, 胡东. 基于热红外成像的岩画空鼓边界检测方法研究 [J]. *激光与光电子学进展*: 1-19.
WEI Peng, LIU Chengyu, WANG Jinhua, WU Changyu, HU Dong. The study on the detection method of hollow boundary in rock paintings based on thermal infrared imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, : 1-19. (in Chinese)
- [40] 彭雄, 钟新谷, 赵超, 陈安华, 张天予. 基于无人机热成像的建筑饰面层脱粘缺陷识别 [J]. *红外技术*, 2022, 44(2): 189-197.
PENG Xiong, ZHONG Xingu, ZHAO Chao, CHEN Anhua, ZHANG Tianyu. Debonding Defect Recognition of Building Decoration Layers by UAV Thermography [J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(2): 189-197. (in Chinese)
- [41] LAI W W-L, LEE K-K, POON C-S. Validation of size estimation of debonds in external wall's composite finishes via passive Infrared thermography and a gradient algorithm [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 87: 113-24.
- [42] 王永茂, 郭兴旺, 李日华. 红外检测中缺陷大小和深度的测量 [J]. *激光与红外*, 2002(6): 404-406.
WANG Yongmao, Guo Xingwang, LI Rihua. Measuring Defect Diameter and Depth in Infrared Testing [J]. *Laser & Infrared*, 2002(6): 404-406. (in Chinese)
- [43] RAJA B N K, MIRAMINI S, DUFFIELD C, SOFI M, ZHANG L. Infrared thermography detection of delamination in bottom of concrete bridge decks [J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2022, 29(3).
- [44] CHENG C, CHEN D, SHAO S, NA R, CAI H, ZHOU H, WU B. Revealing the Impact of Depth and Surface Property Variations on Infrared Detection of Delamination in Concrete Structures Under Natural Environmental Conditions [J]. *Buildings*, 2025, 15(1).
- [45] LAU S K, ALMOND D P, MILNE J M. Quantitative analysis of pulsed video thermography [J]. *NDT international*, 1991, 24(4): 195-202.
- [46] SPICER J W M, OSIANDER R, CHANG Y, HILDEBRAND R. Time-Resolved Microwave

- Thermoreflectometry for Infrastructure Inspection [M]//THOMPSON D O, CHIMENTI D E. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Volume 15A. Boston, MA; Springer US. 1996: 541-7.
- [47] AL GHARAWI M, ADU-GYAMFI Y, WASHER G. A framework for automated time-lapse thermography data processing [J]. Construction and Building Materials, 2019, 227.
- [48] FOX M, COLEY D, GOODHEW S, DE WILDE P. Time-lapse thermography for building defect detection [J]. Energy and Buildings, 2015, 92: 95-106.
- [49] EDIS E, FLORES-COLEN I, DE BRITO J. Time-Dependent Passive Building Thermography for Detecting Delamination of Adhered Ceramic Cladding [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015, 34(3).
- [50] POZZER S, OMIDI Z, EL REFAI A, LOPEZ F, IBARRA-CASTANEDO C, MALDAGUE X. Passive infrared thermography for subsurface delamination detection in concrete infrastructure: Capabilities [J]. Construction and Building Materials, 2024, 419.
- [51] KLEIN S, FERNANDES H, HERRMANN H-G. Estimating thermal material properties using solar loading lock-in thermography [J]. Applied Sciences, 2021, 11(7): 3097.
- [52] 王慧鹏, 蔡冬威, 董丽虹, 林恩, 王海斗. 材料亚表面/表面缺陷锁相红外热成像检测研究现状与趋势 [J]. 材料导报, 2024, 38(18): 39-46.
WANG Huipeng, CAI Dongwei, DONG Lihong, LIN En, WANG Haidou. Research status and development trend of lock-in infrared thermography detection of material subsurface/surface defects [J]. Materials Reports, 2024, 38(18): 39-46. (in Chinese)
- [53] FARRAG S, YEHIA S, QADDOUMI N. Investigation of Mix-Variation Effect on Defect-Detection Ability Using Infrared Thermography as a Nondestructive Evaluation Technique [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(3).
- [54] VAN HA M, HUH J, DOAN N S, LEE B Y, HALDAR A. A comprehensive study on identification of both deck and soffit defects in concrete bridge decks through thermographic investigation of shaded side under natural conditions [J]. Construction and Building Materials, 2021, 303.
- [55] ZHANG H, SHI Z, LI L, JIAO P, SHANG B, CHEN G. Code-specified early delamination detection and quantification in a RC bridge deck: passive vs. active infrared thermography [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2025, 15(1): 227-44.
- [56] 刘俊岩, 戴景民, 王扬. 红外图像序列处理的锁相热成像理论与试验 [J]. 红外与激光工程 2009, 38(2): 346-351.
- LIU Junyan, DAI Jingmin, WANG Yang. Theory and experiment of IR lock-in thermography with image sequence processing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 346-351. (in Chinese)
- [57] EDIS E, FLORES-COLEN I, DE BRITO J. Quasi-quantitative infrared thermographic detection of moisture variation in facades with adhered ceramic cladding using principal component analysis [J]. Building and Environment, 2015, 94: 97-108.
- [58] HA MAC V, HUH J, DOAN N S, TA Q T, HALDAR A. Detection of deteriorations in both bottom and top of concrete bridge decks during blind time windows from thermographic inspections of shaded side [J]. Ndt & E International, 2023, 138.
- [59] HIASA S, BIRGUL R, CATBAS F N. Effect of Defect Size on Subsurface Defect Detectability and Defect Depth Estimation for Concrete Structures by Infrared Thermography [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2017, 36(3).
- [60] LI X, HE Y, WANG H, SUN G, YU J, DU X, HU M, WANG Y. Thermal Inspection of Subsurface Defects in Wind Turbine Blade Segments Under the Natural Solar Condition [J]. Ieee Transactions on Industrial Electronics, 2023.
- [61] LOURENCO T, MATIAS L, FARIA P. Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 419-28.
- [62] AQUINO ROCHA J H, POVOAS Y V, SANTOS C F. Detection of Delaminations in Sunlight-Unexposed Concrete Elements of Bridges Using Infrared Thermography [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2019, 38(1).
- [63] MAC V H, TRAN Q H, HUH J, DOAN N S, KANG C, HAN D. Detection of Delamination with Various Width-to-depth Ratios in Concrete Bridge Deck Using Passive IRT: Limits and Applicability [J]. Materials, 2019, 12(23).
- [64] TOMITA K, CHEW M Y L. A Review of Infrared Thermography for Delamination Detection on Infrastructures and Buildings [J]. Sensors, 2022, 22(2).
- [65] CHENG C, NA R, SHEN Z. Thermographic Laplacian-pyramid filtering to enhance delamination detection in concrete structure [J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 97: 162-76.
- [66] WASHER G A, FENWICK R G, BOLLENI N, HARPER J. Effects of Solar Loading and Other Environmental Conditions on Thermographic Imaging of Subsurface Defects in Concrete; proceedings of the 35th Annual

- Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Univ Chicago, Chicago, IL, F 2009, Jul 20-25, 2008 [C]. 2009.
- [67] WASHER G, FENWICK R, NELSON S, RUMBAYAN R. Guidelines for Thermographic Inspection of Concrete Bridge Components in Shaded Conditions [J]. Transportation Research Record, 2013, (2360): 13-20.
- [68] POZZER S, CHAMBERLAIN PRAVIA Z M, AZAR E R, ROSA F D. Statistical analysis of favorable conditions for thermographic inspection of concrete slabs [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2020, 10(4): 609-26.
- [69] CAI H, CHENG C, WANG L, ZHANG H, ZHOU J, NA R, WU B. Numerical and experimental study on the evolution of thermal contrast for infrared detection of debonding in concrete filled steel tubular structure [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 258: 124743.
- [70] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 红外热像法检测建筑外墙饰面粘结质量技术规程: JGJ/T 277-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for testing of bonding quality of building exterior wall finishes by infrared thermography: JGJ/T 277-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [71] 江苏省市场监督管理局, 江苏省住房和城乡建设厅. 建设工程红外热成像法检测技术规程: DB32/T 4168-2021 [S]. 江苏省住房和城乡建设厅, 江苏省市场监督管理局, 2021.
- Jiangsu Provincial Administration for Market Regulation, Jiangsu Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development. Technical specification for testing of construction engineering by infrared thermography: DB32/T 4168-2021 [S]. Jiangsu Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development, Jiangsu Provincial Administration for Market Regulation, 2021. (in Chinese)
- [72] EDIS E, FLORES-COLEN I, DE BRITO J. Passive thermographic detection of moisture problems in facades with adhered ceramic cladding [J]. Construction and Building Materials, 2014, 51: 187-97.
- [73] DE FREITAS S S, DE FREITAS V P, BARREIRA E. Detection of facade plaster detachments using infrared thermography - A nondestructive technique [J]. Construction and Building Materials, 2014, 70: 80-7.
- [74] 黄文浩. 建筑物外饰层缺陷红外热成像检测方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- HUANG Wenhao. The infrared-thermography method on delamination of the surface decoration for buildings evaluation [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [75] 王玮, 米庆仁, 肖云, 杨新聪. 基于可见光和红外图像融合的建筑外墙空鼓与脱落识别方法研究 [J]. 工业建筑, 2024, 54(5): 51-59.
- WANG Wei, MI Qingren, XIAO Yun, YANG Xincong. Research on the detection method of hollowing and missing for building exterior walls based on visible and infrared image fusion [J]. Industrial Construction, 2024, 54(5): 51-59. (in Chinese)
- [76] 王嘉怡, 段中兴. 建筑外墙外保温层表面裂缝的红外热成像检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(22): 74-81.
- WANG Jiayi, DUAN Zhongxing. Infrared thermal imaging detection of surface cracks in external insulation layer of building exterior wall [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(22): 74-81. (in Chinese)
- [77] 张桓, 陈志盛. 多尺度自校正双直方图均衡化红外图像增强 [J]. 红外技术, 2023, 45(11): 1207-1215.
- ZHANG Huan, CHEN Zhisheng. Multi-scale auto-corrected bi-histogram equalization for infrared image enhancement [J]. Infrared Technology, 2023, 45(11): 1207-1215. (in Chinese)
- [78] 李国耀, 王腾. 基于形态学处理与特征分析的混凝土裂缝检测研究 [J]. 建筑结构, 2020, 50(S2): 529-533.
- LI Guoyao, WANG Teng. Research on concrete crack detection based on morphological processing and feature analysis [J]. Building Structure, 2020, 50(S2): 529-533. (in Chinese)
- [79] 杨杰文, 章光, 陈西江, 班亚. 融合深度学习聚类分割和形态学的混凝土表面裂缝量化识别 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 242-252.
- YANG Jiewen, ZHANG Guang, CHEN Xijiang, BAN Ya. Quantitative identification of concrete surface cracks based on deep learning clustering segmentation and morphology [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 242-252. (in Chinese)
- [80] 张卫国, 张思瑞. 基于改进 DeepLabV3 与 Canny 算法的路面裂缝语义分割方法 [J]. 计算技术与自动化, 2023, 42(3): 96-101.
- ZHANG Weiguo, ZHANG Sirui. Semantic segmentation of concrete pavement cracks based on improved DeepLabV3 and Canny algorithm [J]. Computing Technology and Automation, 2023, 42(3): 96-101. (in Chinese)
- [81] 郭运冲, 李孟军, 刘名果, 敖天勇. 基于 Canny 算子的建筑裂缝边缘检测改进算法 [J]. 计算机仿真, 2022, 39(11): 360-365, 410.

- GUO Yunchong, LI Mengjun, LIU Mingguo, AO Tianyong. Improved Algorithm for Edge Detection of Building Cracks Based on Canny Operator [J]. *Computer Simulation*, 2022, 39(11): 360-365, 410. (in Chinese)
- [82] YANG X, LI H, YU Y, LUO X, HUANG T, YANG X. Automatic Pixel-Level Crack Detection and Measurement Using Fully Convolutional Network [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2018, 33(12): 1090-109.
- [83] SFARRA S, CICONE A, YOUSEFI B, IBARRA-CASTANEDO C, PERILLI S, MALDAGUE X. Improving the detection of thermal bridges in buildings via on-site infrared thermography: The potentialities of innovative mathematical tools [J]. *Energy and Buildings*, 2019, 182: 159-71.
- [84] ZHANG C, ZOU Y, DIMYADI J, CHANG R. Thermal-textured BIM generation for building energy audit with UAV image fusion and histogram-based enhancement [J]. *Energy and Buildings*, 2023, 301.
- [85] 鲁友存. 基于红外图像特征的建筑热工缺陷检测方法 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- LU Youcun. Detection Method of Building Thermal Defects Based on Infrared Image Feature [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [86] WASHER G, FENWICK R, BOLLENI N. Effects of Solar Loading on Infrared Imaging of Subsurface Features in Concrete [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2010, 15(4): 384-90.
- [87] OMAR T, NEHDI M L. Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography [J]. *Automation in Construction*, 2017, 83: 360-71.
- [88] ICHI E, DORAFSHAN S. Effectiveness of infrared thermography for delamination detection in reinforced concrete bridge decks [J]. *Automation in Construction*, 2022, 142.
- [89] HIASA S, BIRGUL R, CATBAS N. A data processing methodology for infrared thermography images of concrete bridges [J]. *Computers & Structures*, 2017, 190: 205-18.
- [90] POZZER S, RAMOS G, NOORALISHAHI P, AZAR E R, EL REFAI A, LÓPEZ F, IBARRA-CASTANEDO C, MALDAGUE X. Integration of thermographic inspection data with BIM for enhanced concrete infrastructure assessment [J]. *Automation in Construction*, 2025, 171: 105965.
- [91] CHENG C, SHEN Z. The application of gray-scale level-set method in segmentation of concrete deck delamination using infrared images [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 240: 117974.
- [92] LIU F, LIU J, WANG L. Asphalt Pavement Crack Detection Based on Convolutional Neural Network and Infrared Thermography [J]. *Ieee Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(11): 22145-55.
- [93] JIANG J, LI P, WANG J, CHEN H, ZHANG T. Asphalt pavement crack detection based on infrared thermography and deep learning [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2024, 25(1).
- [94] LIU F, LIU J, WANG L. Asphalt pavement fatigue crack severity classification by infrared thermography and deep learning [J]. *Automation in Construction*, 2022, 143.
- [95] JANG K, KIM N, AN Y-K. Deep learning-based autonomous concrete crack evaluation through hybrid image scanning [J]. *Structural Health Monitoring-an International Journal*, 2019, 18(5-6): 1722-37.
- [96] LIU F, LIU J, WANG L, AL-QADI I L. Multiple-type distress detection in asphalt concrete pavement using infrared thermography and deep learning [J]. *Automation in Construction*, 2024, 161: 105355.
- [97] 邓露, 褚鸿鹄, 龙砺芝, 王维, 孔烜, 曹然. 基于深度学习的土木基础设施裂缝检测综述 [J]. *中国公路学报*, 2023, 36(2): 1-21.
- DENG Lu, CHU Honghu, LONG Lizhi, WANG Wei, KONG Xuan, CAO Ran. Review of deep learning-based crack detection for civil infrastructures [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(2): 1-21. (in Chinese)
- [98] WORZEWSKI T, KRANKENHAGEN R, DOROSHTNASIR M, ROELLIG M, MAIERHOFER C, STEINFURTH H. Thermographic inspection of a wind turbine rotor blade segment utilizing natural conditions as excitation source, Part I: Solar excitation for detecting deep structures in GFRP [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 756-66.
- [99] WORZEWSKI T, KRANKENHAGEN R, DOROSHTNASIR M. Thermographic inspection of wind turbine rotor blade segment utilizing natural conditions as excitation source, Part II: The effect of climatic conditions on thermographic inspections - A long term outdoor experiment [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 767-76.
- [100] DOROSHTNASIR M, WORZEWSKI T, KRANKENHAGEN R, ROELLIG M. On-site inspection of potential defects in wind turbine rotor blades with thermography [J]. *Wind Energy*, 2016, 19(8): 1407-22.
- [101] 吴国境, 王健, 张永, 王超誉, 杜国正, 高靖. 自然激励下风电叶片损伤的红外热像检测研究 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(09): 353-8.

- WU Guojing, WANG Jian, ZHANG Yong, WANG Chaoyu, DU Guozheng, GAO Jing. Research on infrared thermal image detection of wind turbine blade damage under natural excitation [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(9): 353-358. (in Chinese)
- [102] GALLEGUILLOS C, ZORRILLA A, JIMENEZ A, DIAZ L, MONTIANO A L, BARROSO M, VIGURIA A, LASAGNI F. Thermographic non-destructive inspection of wind turbine blades using unmanned aerial systems [J]. *Plastics Rubber and Composites*, 2015, 44(3): 98-103.
- [103] CHAUDHURI S, STAMM M, KRANKENHAGEN R. Weather-dependent passive thermography and thermal simulation of in-service wind turbine blades; proceedings of the WindEurope Annual Event Conference, Copenhagen, DENMARK, F 2023, Apr 25-27, 2023 [C]. 2023.
- [104] 张朋, 张玉, 崔锟, 马佳星, 梅嵩. 基于修正热弹性应力分析的风机叶片热红外温度检测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(15): 211-218.
- ZHANG Peng, ZHANG Yu, CUI Kun, MA Jiaxing, MEI Song. Inspection of wind turbine blades based on modified thermoelastic stress analysis using thermal detection of infrared radiation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(15): 211-218. (in Chinese)
- [105] DOLLINGER C, BALARESQUE N, GAUDERN N, GLEICHAUF D, SORG M, FISCHER A. IR thermographic flow visualization for the quantification of boundary layer flow disturbances due to the leading edge condition [J]. *Renewable Energy*, 2019, 138: 709-21.
- [106] GLEICHAUF D, OEHME F, PARREY A M, SORG M, BALARESQUE N, FISCHER A. On-site contactless visualization of the laminar-turbulent flow transition dynamics on wind turbines [J]. *Tm-Technisches Messen*, 2023, 90(9): 613-23.
- [107] JENSEN F, SORG M, VON FREYBERG A, BALARESQUE N, FISCHER A. Detection of erosion damage on airfoils by means of thermographic flow visualization [J]. *European Journal of Mechanics B-Fluids*, 2024, 104: 123-35.
- [108] OEHME F, GLEICHAUF D, SUHR J, BALARESQUE N, SORG M, FISCHER A. Thermographic detection of turbulent flow separation on rotor blades of wind turbines in operation [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 226.
- [109] CHEN Q, YANG R, LIU X, DENG B, WANG H, HE Y. A review on flow visualisation of wind turbine blades in operation [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2025.
- [110] 王昵辰, 杨瑞珍, 何赞泽, 孟志强, 黄守道. 多模红外热成像检测碳纤维布加固混凝土粘结缺陷 [J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(3): 37-44.
- WANG Nichen, YANG Ruizhen, HE Yunze, MENG Zhiqiang, HUANG Shoudao. Detection of interface bonding defects in carbon fiber sheet reinforced concrete using multi-mode infrared thermography [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(3): 37-44. (in Chinese)
- [111] GARRIDO I, LAGUELA S, OTERO R, ARIAS P. Thermographic methodologies used in infrastructure inspection: A review-Post-processing procedures [J]. *Applied Energy*, 2020, 266.
- [112] LOPEZ F, IBARRA-CASTANEDO C, NICOLAU V D P, MALDAGUE X. Optimization of pulsed thermography inspection by partial least-squares regression [J]. *Ndt & E International*, 2014, 66: 128-38.
- [113] POZZER S, AZAR E R, DALLA ROSA F, PRAVIA Z M C. Semantic Segmentation of Defects in Infrared Thermographic Images of Highly Damaged Concrete Structures [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2021, 35(1).
- [114] SAEED N, KING N, SAID Z, OMAR M A. Automatic defects detection in CFRP thermograms, using convolutional neural networks and transfer learning [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 102.
- [115] HE Yunze, CHEN Qi, WANG Hongjin, DENG Baoyuan, YANG Ruizhen, WANG Yaonan. Research progress of laser thermography non-destructive testing (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(7): 51-66. (in Chinese)