



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

硕士学位论文

基于日光热成像技术的建筑外立面饰 面砖空鼓识别方法研究

作者姓名	张阳
指导教师	秦鹏副教授 谈忠坤教授级高工
培养单位	土木工程学院
专业类别	土木水利
专业领域	结构健康监测

学校代码 10532
学 号 S2301W0133
密 级 公开

湖南大学硕士学位论文

基于日光热成像技术的建筑外立面饰面 砖空鼓识别方法研究

国家自然科学基金（52278306）
湖南省重点研发计划（2022SK2096）
湖南省自然科学基金项目（2023JJ70003）
湖南省水利厅水利科技项目（XSKJ2023059-31）
湖南省应急管理厅科技项目（yjtkjxm_202406）

作 者 姓 名： 张阳
指 导 教 师： 秦鹏副教授
谈忠坤教授级高工
培 养 单 位： 土木工程学院
专 业 类 别： 土木水利
专 业 领 域： 结构健康监测
论文提交日期： 2026 年 4 月 16 日
论文答辩日期： 2026 年 5 月 21 日
答辩委员会主席： 黄远教授

Research on the Identification Method of Ceramic Tile Debonding in
Building Facades Based on Solar Loading Thermography

by

Yang Zhang

B.E. (Changsha University of Science & Technology) 2023

A thesis submitted in partial fulfillment of the

requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Civil and Hydraulic

in the

Graduate school

of

Hunan University

Supervisor

Associate Professor Peng Qin

Senior Engineer Zhongkun Tan

May, 2026

湖南大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

涉密学位论文在解密后适用本授权书。

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

改革开放以来,我国经历了快速的城市化进程,大量既有建筑逐步进入设计使用年限的中后期。在材料老化、环境侵蚀及施工缺陷等因素的耦合作用下,建筑外墙饰面层脱落事故频发,严重威胁城市公共安全。目前常用的外墙空鼓检测方法主要包括目测法、敲击法、拉拔法、探地雷达法、超声波法与红外热像法等。其中,目测法仅能发现已产生明显形变或损伤的空鼓,无法检测隐蔽缺陷;敲击法结果易受人员经验影响且对高层建筑实施困难,虽已有爬墙机器人等改进手段,但吸附稳定性与成本问题仍待解决;拉拔法属有损检测,效率低下;探地雷达法与超声波法分别存在数据解译复杂、需耦合剂操作不便等局限。相比之下,红外热像法在与无人机技术及智能图像处理算法深度融合后,兼具轻量化、无损与可大面积普查的综合优势,为外墙空鼓检测提供了有效手段。然而,当前外墙饰面层空鼓红外检测仍面临以下问题:(1)对太阳运动规律与建筑外立面辐照特征的时空关联缺乏系统性分析;(2)多环境因素耦合作用下空鼓的热成像识别机理缺乏系统性的试验研究;(3)复杂背景干扰下传统空鼓面积定量检测方法精度低且对小尺寸空鼓检出能力不足。针对上述问题,本文以饰面砖空鼓红外检测试验数据为基础开展了太阳运动规律与辐射强度模型研究、多环境因素耦合作用下空鼓热响应的演化规律研究和基于红外图像处理的空鼓定量检测方法研究,旨在为城市既有建筑外墙提出低成本、高效率、非接触式的空鼓识别及定量检测方法。本文的主要研究内容如下:

(1)开展了太阳运动规律与辐射强度模型研究,揭示了建筑外立面日照特征的时空分布规律。基于天球坐标系建立了太阳高度角、方位角的计算方法,系统阐明了东、西、南、北四个朝向墙面的日照时段与日照时长的季节变化规律;引入太阳辐射强度计算模型,为后续空鼓热响应分析提供准确的热边界条件;验证了观测点数据的区域代表性,表明基于观测点所得的太阳运动规律及相关结论可在长沙市范围内推广应用。

(2)开展了足尺、长期的饰面砖空鼓红外检测试验,阐明了多环境因素耦合作用下空鼓热响应的演化规律。设计制作了包含 6 种不同面积与厚度组合空鼓缺陷的釉面砖饰面墙体,布设于四个典型朝向,开展了为期一年的现场试验。系统分析了空鼓尺寸(面积与厚度)对热对比度的影响规律,论证了空鼓尺寸与热信号强度的正相关关系;基于辐射强度计算模型,揭示了辐射强度在热信号形成中的主导作用及热对比度峰值相对于辐射峰值的时滞关系;建立了日照时长与热对比度的线性回归模型,量化了日照时长对不同朝向墙面的影响程度;以 1.0°C 为检测阈值,明确了各朝向墙面的检测效果差异,并总结出各朝向墙面全年适用的最佳检测时段。

(3) 构建了基于红外图像处理的空鼓定量检测方法, 提高了复杂背景下空鼓的定量检测精度。建立了完整的图像预处理与分割定量流程: 对比分析了各类滤波降噪与直方图增强方法, 论证了同态滤波与 CLAHE 增强组合的优越性; 针对砖缝热干扰问题, 提出了基于条带掩膜的砖缝剔除方法, 有效消除了伪目标干扰; 融合空鼓热对比度、面积及绝对温度三重判别指标, 提出了基于邻域多阈值的图像分割方法, 其在空鼓区域检测精度上优于三种经典图像分割方法; 建立了图像空间分辨率与物理尺寸的映射关系, 实现了空鼓面积的定量计算。以长沙市某大楼西面墙为例的工程应用结果表明, 所提方法与传统敲击法相比, 检测效率与精度更高, 在实际检测工程中具有良好的应用前景。

关键词: 日光热成像; 建筑外墙; 饰面砖空鼓; 太阳运动规律; 环境因素; 热响应规律; 定量检测

Abstract

Since the reform and opening-up, China has experienced rapid urbanization, and a large number of existing buildings have gradually entered the middle and late stages of their design service life. Under the coupling effects of material aging, environmental erosion, and construction defects, spalling accidents of exterior wall finishes occur frequently, posing a serious threat to urban public safety. Currently, the commonly used methods for detecting external wall debonding mainly include visual inspection, the tapping method, the pull-off test, ground-penetrating radar (GPR), ultrasonic testing, and infrared thermography. Among them, visual inspection can only detect debonding that has already caused visible deformation or damage and is incapable of identifying hidden defects. The tapping method is highly dependent on the operator's experience and is difficult to implement on high-rise walls; although wall-climbing robots have been developed as an improvement, challenges in adhesion stability and cost remain. The pull-off test is a destructive method with low efficiency. GPR and ultrasonic testing both have their own limitations, such as complex data interpretation and inconvenient coupling requirements. In contrast, when deeply integrated with unmanned aerial vehicle (UAV) technology and intelligent image processing algorithms, infrared thermography combines the advantages of being lightweight, non-destructive, and capable of large-area survey, providing an effective means for exterior wall debonding detection. However, infrared thermographic detection of debonding in exterior wall finishes still faces the following problems: (1) a lack of systematic analysis of the spatiotemporal correlation between solar motion patterns and the irradiation characteristics of building facades; (2) insufficient systematic experimental research on the thermal imaging identification mechanism of debonding under the coupling effect of multiple environmental factors; and (3) under complex background interference, traditional quantitative detection methods exhibit low accuracy for debonding area estimation and a clearly insufficient capability to detect small-sized debonding. To address these issues, based on experimental data from infrared detection of tile debonding, this paper conducts research on solar motion patterns and radiation intensity models, the influence of environmental factors on thermographic detection performance, and a quantitative debonding detection method using infrared image processing. The aim is to propose a low-cost, high-efficiency, non-contact method for debonding identification and quantification for the exterior walls of existing urban buildings. The main research contents of this paper are as follows:

(1) A study on solar motion patterns and radiation intensity models was carried out, revealing the spatiotemporal distribution characteristics of solar insolation on building façades. Based on the celestial coordinate system, calculation methods for the solar altitude angle and azimuth angle were established, systematically clarifying the seasonal variations of insolation time windows and sunshine duration for east-, west-, south-, and north-facing walls. A solar radiation intensity calculation model was introduced to provide accurate thermal boundary conditions for subsequent debonding thermal response analysis. The regional representativeness of the observation site data was verified, indicating that the solar motion patterns and relevant conclusions derived from the site can be applied throughout the urban area of Changsha.

(2) A full-scale, long-term infrared detection experiment on tile debonding was conducted to elucidate the evolution pattern of the thermal response of debonding under coupled multiple environmental factors. A glazed tile finished wall panel containing six combinations of debonding defects with different areas and thicknesses was designed and fabricated, installed on four typical orientations, and monitored in a one-year field test. The influence of debonding size (area and thickness) on thermal contrast was systematically analyzed, and a positive correlation between debonding size and thermal signal intensity was demonstrated. Based on the radiation intensity model, the dominant role of radiation intensity in the formation of thermal signals and the time lag between the peak thermal contrast and the peak radiation intensity were revealed. A linear regression model between sunshine duration and thermal contrast was established to quantify the influence of sunshine duration on differently oriented walls. Taking 1.0°C as the detection threshold, the differences in detection effectiveness for each orientation were clarified, and the optimal detection time windows throughout the year for each wall orientation were summarized.

(3) A quantitative detection method for debonding based on infrared image processing was constructed, improving the quantitative detection accuracy under complex backgrounds. A complete workflow of image preprocessing and segmentation-based quantification was established: various filtering and histogram enhancement methods were compared and analyzed, demonstrating the superiority of combining homomorphic filtering with CLAHE enhancement. To address the thermal interference from tile joints, a joint removal method based on strip masks was proposed, effectively eliminating false target interference. Integrating three discrimination indices—thermal contrast, area, and absolute temperature—a neighborhood multi-threshold image segmentation method was proposed, which outperformed three classical segmentation methods in the detection

accuracy of debonding areas. The mapping relationship between image spatial resolution and physical size was established, enabling the quantitative calculation of debonding areas. The engineering application results on the west-facing wall of a building in Changsha show that the proposed method achieves higher detection efficiency and accuracy compared with the traditional sounding method, demonstrating promising prospects for practical inspection engineering.

Key Words: Solar loading thermography; Building facade; Ceramic tile debonding; Solar motion pattern; Environmental factors; Thermal response mechanism; Quantitative detection

目 录

学位论文原创性声明	I
摘要	II
Abstract.....	IV
附图索引	IX
附表索引	XI
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	6
1.2.1 环境因素对热成像检测效果影响规律的研究现状	6
1.2.2 空鼓的识别和定量检测方法研究现状	8
1.2.3 现有研究的不足	16
1.3 本文的主要工作	16
第 2 章 日光热成像检测技术基本原理	18
2.1 引言	18
2.2 热辐射基本定律	18
2.3 热像仪检测原理	19
2.4 空鼓的检测原理	21
2.5 本章小结	23
第 3 章 太阳的运动规律和辐射强度研究	24
3.1 引言	24
3.2 天球坐标系	24
3.2.1 时角坐标系	24
3.2.2 地平坐标系	25
3.3 太阳运动规律分析	26
3.3.1 建筑外立面日照特征分析	26
3.3.2 区域代表性验证	30
3.4 太阳辐射强度计算	31
3.4.1 直射辐射强度	31
3.4.2 散射辐射强度	32
3.4.3 地面反射辐射强度	32
3.5 本章小结	32
第 4 章 基于日光热成像的饰面砖空鼓检测试验研究	33

4.1 引言	33
4.2 饰面砖空鼓红外检测试验	33
4.2.1 试件设计	33
4.2.2 试件制作	34
4.3 试验实施	34
4.4 试验结果分析	35
4.4.1 空鼓尺寸对热对比度的影响	36
4.4.2 辐射强度对热对比度的影响	37
4.4.3 日照时长对热对比度的影响	43
4.4.4 各朝向墙面的最佳检测时段	48
4.5 本章小结	51
第 5 章 基于红外图像处理的空鼓定量检测方法	52
5.1 引言	52
5.2 图像降噪	52
5.2.1 空域滤波	52
5.2.2 频域滤波	53
5.3 图像增强	56
5.4 砖缝剔除	59
5.5 图像分割	60
5.5.1 大津法	60
5.5.2 迭代法	61
5.5.3 Canny 边缘检测	62
5.5.4 基于邻域多阈值的图像分割方法	63
5.5.5 分割结果对比	65
5.6 定量检测	67
5.7 工程应用	68
5.7.1 检测结果与分析	69
5.7.2 工程应用建议	71
5.8 本章小结	71
结论与展望	72
参考文献	74
致谢	86
攻读学位期间的学术或实践成果	87
答辩委员会名单	88

附图索引

图 1.1 全国房屋的建成时间占比图	1
图 1.2 常见的外墙饰面砖	2
图 1.3 空鼓检测示意图	5
图 1.4 图像处理方法的验证 ^[55]	9
图 1.5 桥梁状况图 ^[58]	10
图 1.6 真实缺陷与伪缺陷 ^[76]	11
图 1.7 检测结果 ^[79]	12
图 1.8 不同模型语义分割结果的对比验证 ^[82]	13
图 1.9 不同几何形状损伤的分割结果 ^[90]	14
图 1.10 检测结果 ^[97]	15
图 1.11 研究内容	17
图 2.1 红外热像仪工作原理	20
图 2.2 电磁波谱图	21
图 2.3 热辐射原理 ^[19]	21
图 2.4 空鼓的检测原理 ^[19]	22
图 3.1 天球坐标系 ^[114]	25
图 3.2 太阳方位角—墙面受照关系示意图	26
图 3.3 湖南大学风工程试验研究中心	27
图 3.4 太阳高度角与方位角变化曲线	28
图 3.5 区域地图	30
图 3.6 地点 1 和 2 的太阳高度角与方位角变化曲线	31
图 4.1 空鼓分布图（单位：cm）	34
图 4.2 试件制作流程	34
图 4.3 空鼓的制作与粘贴	34
图 4.4 数据采集设备	35
图 4.5 工作照片	35
图 4.6 各朝向墙面内部空鼓的热对比度变化曲线	37
图 4.7 总辐射强度与空鼓热对比度的日变化曲线	40
图 4.8 各朝向墙面平均辐射强度与空鼓最大热对比度	42
图 4.9 日照时长和空鼓的最大热对比度月变化曲线	44
图 4.10 南面线性回归结果	45
图 4.11 西面线性回归结果	45

图 4.12 东面线性回归结果	46
图 4.13 北面线性回归结果	46
图 4.14 不同热对比度的空鼓	47
图 4.15 西向墙面不同时刻红外热像图	49
图 4.16 各朝向墙面空鼓达到最大热对比度的时刻	49
图 5.1 频域滤波原理	54
图 5.2 同态滤波	54
图 5.3 不同滤波方法降噪效果	55
图 5.4 CLAHE.....	57
图 5.5 不同方法的增强效果	58
图 5.6 砖缝剔除前后对比	60
图 5.7 基于邻域多阈值的图像分割方法	64
图 5.8 像素点 (i,j) 的邻域矩阵	65
图 5.9 红外图像处理流程	66
图 5.10 西面全景图	69
图 5.11 西面墙检测结果	70

附表索引

表 1.1 高层建筑物外墙饰面砖脱落情况 ^[6]	2
表 1.2 外墙脱落事故造成的损伤统计表	3
表 1.3 环境因素对日光热成像检测的影响 ^[34]	7
表 3.1 典型日日照时段表	29
表 3.2 常见地表反射率	32
表 4.1 空鼓参数	33
表 4.2 H20T 红外镜头参数	35
表 4.3 计算参数表	38
表 4.4 各朝向墙面的最佳检测时段	49
表 5.1 不同滤波方法的 CII	56
表 5.2 不同方法的 EME	59
表 5.3 各阶段处理结果	66
表 5.4 不同分割方法结果对比	67
表 5.5 空鼓的相对误差表	68
表 5.6 环境条件	69
表 5.7 两种方法的检测结果	69

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

城市房屋安全关乎国计民生，是国家治理现代化进程中的重要议题。自改革开放以来，我国城镇化速度与规模均创人类历史之最，城镇化率从 1978 年的 17.92% 提升至 2025 年的 67.89%^[1]。第一次全国自然灾害综合风险普查公报显示，全国存量城乡房屋及市政设施逾 6 亿栋；扣除农村辅助用房、在建工程及非房屋杂项后，实际城乡房屋建筑共 3.54 亿栋，总建筑面积约 1280 亿平方米^[2]。随着我国城市化进程的持续推进与建筑存量规模的不断扩大，大量既有建筑逐步进入维护与老化高发期，房屋老龄化问题日益凸显。根据国家统计局 2025 年发布的《中国统计年鉴》^[3]，计算出全国房屋的建成时间占比图，如图 1.1 所示，预计至 2040 年前后，我国房龄超过 25 年的存量房屋占比将达到 49%。根据《建筑结构可靠度设计统一标准》（GB 50068-2018）^[4]，普通房屋与构筑物的设计使用年限为 50 年。这意味着届时全国大部分房屋将进入设计使用年限的中后期，整体步入加速老化阶段。

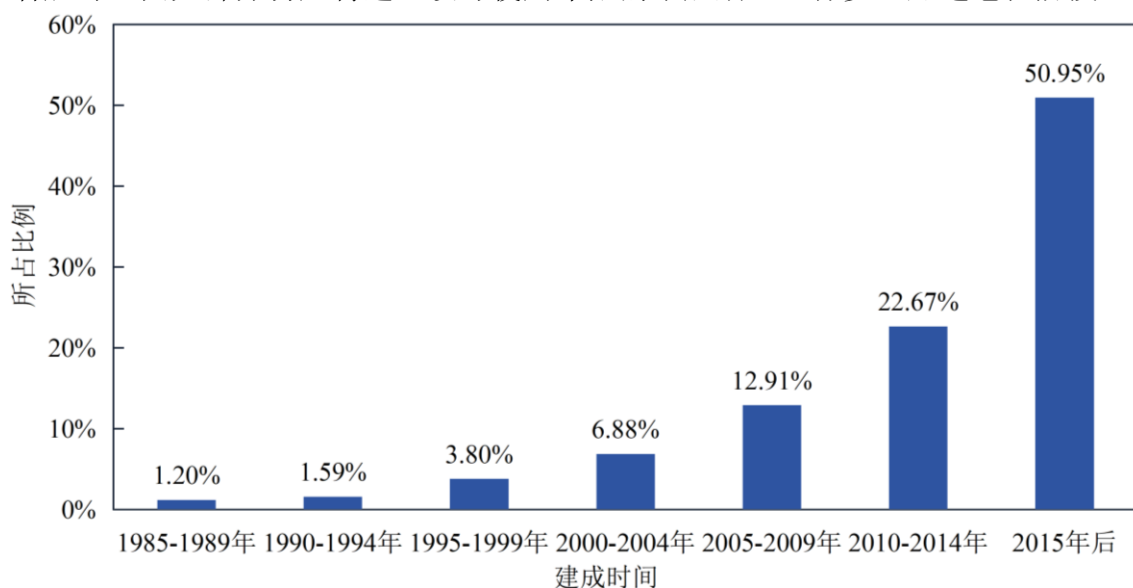


图 1.1 全国房屋的建成时间占比图

在上述大量既有建筑中，外墙饰面砖是应用最为广泛的一类饰面材料。在我国长期的建筑发展历程中，外墙饰面材料经历了从传统清水砖墙、抹灰饰面向多元化陶瓷饰面砖的演变。自 20 世纪 80 年代起，伴随建筑陶瓷工业的快速发展与城镇化进程的推进，外墙饰面砖凭借其优异的装饰性与耐久性，逐步成为我国建筑外墙饰面的主流选择^[5]。按产品工艺与外观功能划分，常用的外墙饰面砖主要包括釉面砖、通体砖、马赛克及劈开砖等，如图 1.2 所示。其中，釉面砖表面施有釉层保护，具备抗氧化、耐酸碱腐蚀等特性，颜色与图样选择最为丰富，是应用最广泛的外墙饰面砖品种；通体砖表面不施釉，正反面色泽与材质一致，具有硬度高、耐磨损等

特点,玻化程度高、吸水率极低者亦称玻化砖,常用于对耐候性要求较高的外墙部;马赛克(陶瓷锦砖)由数十块小尺寸砖块拼合而成,材质涵盖陶瓷与玻璃等类型,常用于外墙局部装饰或整体铺贴;劈开砖(劈离砖)属挤压成型陶瓷砖,坯体烧成后经机械劈离分割,具有高硬度、高韧性及良好的抗冻融性能,广泛适用于追求自然外观的建筑立面。上述饰面砖多采用湿作业法施工,即以水泥砂浆或专用瓷砖胶粘剂为粘结材料,通过薄贴法或厚贴法粘贴于外墙基层之上。建筑外墙基层材料以混凝土墙体和烧结黏土砖等砌体墙体为主,粘贴饰面砖前,基层表面须采用水泥砂浆进行找平处理,以提供平整、牢固的粘结基面。

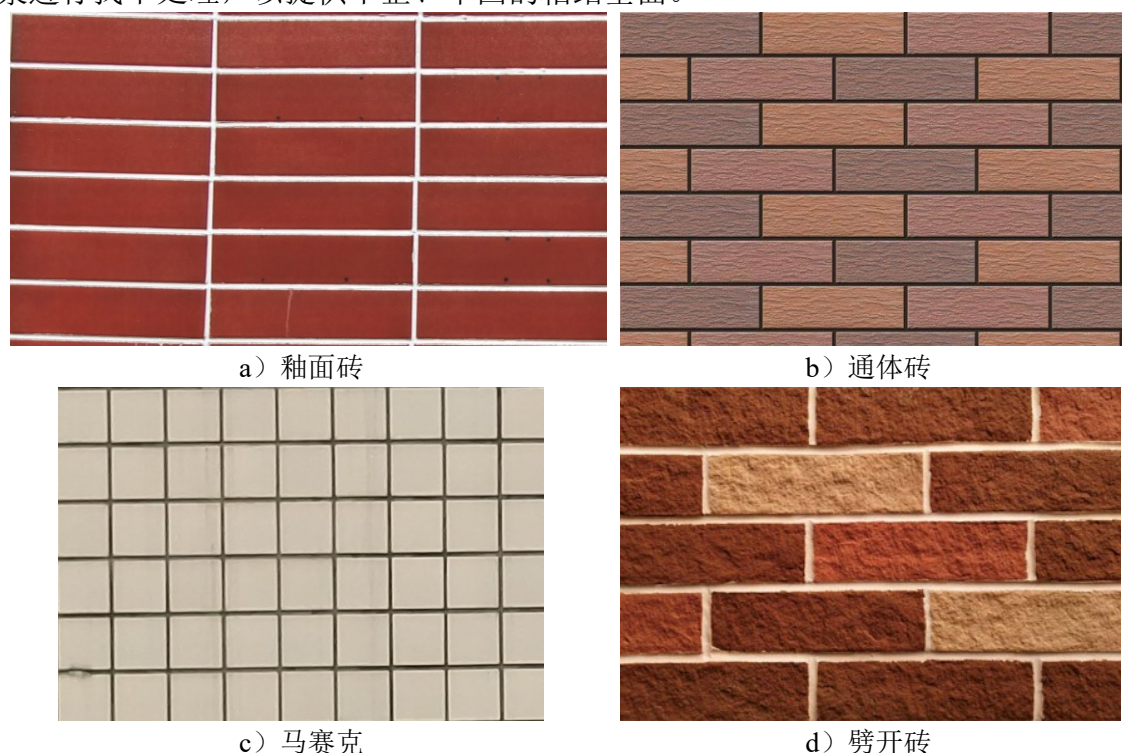


图 1.2 常见的外墙饰面砖

然而,随着服役时间增长,建筑外墙饰面层在材料老化、施工缺陷与环境侵蚀等因素的耦合作用下,易出现空鼓、开裂等隐蔽病害。空鼓区域在外界温湿度变化、风荷载及重力长期作用下,极易发展为饰面层剥落,从而导致外墙脱落事故频发,不仅严重影响建筑外观与使用功能,更对公共安全构成严重威胁。近年来,由外墙脱落引发的伤人毁物事件屡见不鲜,已成为城市安全管理中不容忽视的重大风险源。国内研究团队在 2009–2014 年间,以上海、北京、深圳、武汉等城市的 128 栋高层建筑为对象,对外墙饰面砖脱落事故开展了专项统计调查,其结果汇总于表 1.1^[6]。可以看到饰面砖使用 10 年及以上发生脱落事故占事故总数约 87.50%。本文同时也搜集、整理了国内近 11 年的“外墙脱落”相关新闻事件,结果如表 1.2 所示。仅从公开报道可统计到的数据来看,2015 年至 2025 年间,外墙脱落事故至少已造成 141 人死亡、165 人受伤、636 辆车受损。

表 1.1 高层建筑物外墙饰面砖脱落情况^[6]

分类	所在城市				面砖材料		使用年限		人员伤亡		财产损失	
	上海	北京	深圳	武汉	饰面砖	马赛克	10年以下	10年以上	无	有	100万以下	100万以上
数量	68	28	17	15	87	41	16	112	120	8	107	21

表 1.2 外墙脱落事故造成的损伤统计表

年份	死亡（人）	受伤（人）	受损车辆（辆）
2015	11	19	79
2016	21	28	63
2017	11	9	99
2018	9	6	49
2019	8	13	110
2020	16	12	76
2021	19	13	25
2022	19	6	36
2023	11	23	39
2024	8	16	20
2025	8	20	40

上述触目惊心的事故数据表明，我国大量既有建筑已进入饰面层脱落风险高发期，建立系统、规范的房屋安全管理与检测制度已刻不容缓。面对这一严峻形势，国家相关部门密集出台了一系列政策文件，从顶层设计到基层落实，全面部署房屋安全隐患排查与专项整治行动，力求构建覆盖房屋全生命周期的安全管理体系。2022 年国务院办公厅印发的《全国自建房安全专项整治工作方案》，要求依法依规彻查自建房安全隐患，逐步建立城乡房屋安全管理长效机制^[7]。2023 年住房和城乡建设部出台《关于全面开展城市体检工作的指导意见》，把城市体检作为统筹城市规划、建设、管理工作的重要抓手，建立健全“发现问题—解决问题—巩固提升”的城市体检工作机制^[8]。2024 年，中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见》，明确提出要提升房屋建筑管理智慧化水平，建立房屋使用全生命周期安全管理制度，健全房屋建筑安全隐患消除机制，推动新一代信息技术与城市基础设施建设深度融合^[9]。党的二十届四中全会更是将“建立房屋全生命周期安全管理制度”提升至民生保障和共同富裕的战略高度。近年来住房和城乡建设部大力推动建立房屋安全体检、房屋安全管理资金和房屋质量安全保险“三项制度”。多地已出台相关实施细则，对房龄超过 25 年或 30 年的住宅房屋实施定期体检。如 2026 年湖南省住房和城乡建设厅发布的《湖南省既有高层民用建筑外立面系统安全隐患检查和评估技术指南（试行）》通知中明确提出要规范既有高层民用建筑外立面系统排查工作,加快完善高层民用建筑外立面风险管理长效机制的战略部署^[10]。这些制度安排标志着我国房屋安全管理正从“被动

应对”向“主动预防”转型。

根据《建筑装饰装修工程质量验收标准》（GB 50210-2018）^[11]、《建筑工程饰面砖粘结强度检验标准》（JGJ/T 110-2017）^[12]、《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）^[13]及《建筑外围护系统智能无损检测技术规程》（T/CECS 1884-2025）^[14]等现行规范，针对外墙空鼓的检测，常用方法主要包括目测法、敲击法、拉拔法、探地雷达法、超声波法与红外热像法等。

（1）目测法

目测法依赖检测人员肉眼观察外墙饰面层的表观状态，通过裂缝、隆起、变色等视觉特征间接推断可能存在空鼓的区域。该方法仅能发现已产生明显形变或损伤的空鼓，无法检测内部初始或隐蔽性空鼓缺陷^[15]。

（2）敲击法

敲击法使用敲击工具有节奏地敲击外墙饰面层，通过辨识反馈声音的清脆（密实）与沉闷（空鼓）特征来判断饰面层与基层的粘结质量。然而，该方法检测结果易受操作人员主观经验影响，且对高层、大面积的建筑外墙实施困难，存在安全风险^[15]。近年来，为克服传统敲击法在高层建筑中的适用性不足，搭载自动敲击装置与回波采集传感器的爬墙机器人被相继开发并投入工程应用。该类机器人可在建筑立面上进行连续、均匀的机械敲击，通过高灵敏度传感器实时采集回波信号以定位空鼓缺陷。Lin 等^[16]提出了一种融合水蛭、壁虎与啄木鸟生物特性的混合仿生爬墙机器人，采用 3D 打印轻量化结构和真空吸盘吸附，搭载边缘端机器学习模型与 CNN 声学识别模块，实现了外墙瓷砖缺陷的即时客观检测，试验准确率达到 74.62%。然而，爬墙机器人在不同粗糙度与破损程度墙面上的吸附稳定性和越障能力仍存在不足，且设备成本较高。

（3）拉拔法

拉拔法通过对饰面层施加垂直拉拔力，直接测定饰面材料与基层的粘结强度，可提供定量评价指标。该方法属于局部有损检测，单次检测面积有限，效率低下，并会对饰面层造成二次破坏，不适用于大面积的快速普查^[15]。

（4）探地雷达法

探地雷达法通过发射天线向墙体内发射高频电磁波，利用空鼓等缺陷与密实基层之间介电常数差异引起的反射波信号特征，推断缺陷的位置、范围与深度信息。其优势在于穿透能力强，可“透视”一定厚度的饰面层并提供深度信息。其局限性在于：数据解译复杂、高度依赖专业经验；分辨率受天线频率制约，高频天线虽可提高分辨率，但探测深度受限，对微小浅表层空鼓的识别能力较弱；逐点扫描的采集方式导致大面积检测效率偏低^[17]。近年来，爬墙机器人搭载高频雷达扫描仪协同检测的模式受到广泛关注。Li 等^[18]提出了一种基于探地雷达的端到端多任务智能检测方法，通过自动选择 C 扫描切片估算粘结面积，同时利用 B 扫描切片检测

脱粘缺陷，粘结面积估算相对误差仅为 0.70%，脱粘检测精度达到 78.45%，在复杂场景中亦表现出良好性能。然而，机器人平台的越障振动对雷达信号质量构成潜在干扰，加之系统集成复杂度高，其在复杂立面上的连续可靠采集与工程经济性仍需进一步改善。

（5）超声波法

超声波法利用超声脉冲波在材料中的传播时间、波速和振幅衰减等声学参数的变化，判别内部是否存在脱粘等不连续界面。该技术对混凝土等均质基材的深层缺陷检测效果较好，设备相对简单。其主要局限在于：检测时需使用耦合剂以保证探头与墙面的良好声学接触，在高空、竖向的外墙表面操作极为不便；对陶瓷面砖等多层、非均质饰面层的适应性较差，信号衰减严重，检测精度受限^[17]。

（6）红外热像法

红外热像法通过测量物体表面发出的红外辐射，将不可见的温度分布转化为可视化的热像图，进而依据材料热传导特性差异所导致的表面温度异常，有效识别空鼓等内部缺陷区域，如图 1.3 所示。该技术因其能够实现轻量化、大面积、非接触式外墙扫描，逐渐显现出优势^[19]。特别是近年来随着无人机技术的发展、图像采集设备的改进以及人工智能与图像处理算法的快速迭代^[20-22]，红外热成像技术的应用形态不断革新。无人机搭载热成像系统进行建筑立面检测的技术路径，融合了高空作业可达性、数据采集高效性与缺陷识别智能化的多重优势，为实现城市建筑外墙空鼓的大规模、无损化、智能化巡检提供了理想的解决方案，相关技术研究与应用探索已成为当前领域热点^[23-28]。

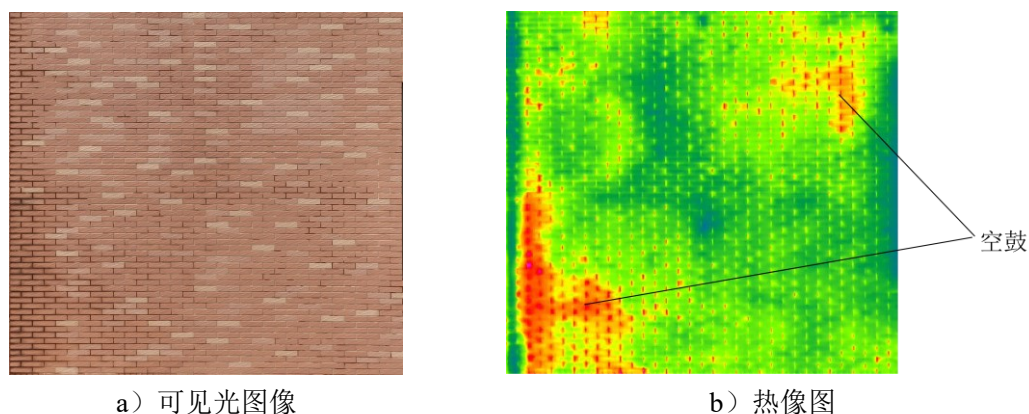


图 1.3 空鼓检测示意图

红外热像法根据热激励源的来源不同，可分为被动式热成像（Passive Thermography）与主动式热成像（Active Thermography）两大类。被动式热成像直接利用被测物体自身与环境之间的温差或其自然的热辐射分布进行检测，无需外加人工热源，适用于在役结构或自然状态下的缺陷筛查。主动式热成像则通过外部激励（如闪光灯、卤素灯、激光、超声等）向被测物体施加可控的热脉冲或周期热波，人为诱导缺陷区域产生表面温差，从而获得更高的热对比度和信噪比，常用于

实验室或近距离高精度检测。两类方法各具优势,被动式适合大面积、快速、远距离检测,主动式则在定量分析和小缺陷检出方面更为灵敏。在建筑外立面空鼓检测中,通常采用日光热成像法进行分析^[29-32],这是一种典型的被动式热成像,即以太阳作为自然热激励源对建筑表面进行加热。然而,该方法的检测效果在很大程度上受环境条件制约,包括辐射强度、环境温湿度、风速以及墙体朝向等因素,均会显著影响空鼓表面的热响应特征与检测结果的可靠性。此外,在热图像采集过程中,受相机噪声、环境反射及砖缝热干扰的影响,常导致所获热图像中出现信噪比低、对比度不足及缺陷边缘模糊等问题,给空鼓区域的准确识别带来困难。

综上,本文拟针对日光热成像检测中环境因素对空鼓热响应的影响机制不明,以及复杂因素干扰下红外图像信噪比低、对比度不足导致空鼓识别困难的问题,开展基于日光热成像的建筑外墙饰面砖空鼓识别方法研究。

1.2 国内外研究现状

日光热成像法在实际工程中的应用效果,既依赖于检测期间环境条件的适宜性,也取决于后续图像处理算法的有效性与鲁棒性,二者共同决定了该技术在外墙空鼓识别中的实际性能。故目前国内外关于日光热成像检测建筑外立面饰面层空鼓的研究主要集中于以下两个方面:(1)探究环境因素对热成像检测效果的影响规律;(2)探究空鼓的识别和定量检测方法。

1.2.1 环境因素对热成像检测效果影响规律的研究现状

国内外学者对热成像检测过程中的环境影响因素进行了研究,主要涉及检测时间窗口、辐射强度、气温、风速、湿度、大气压等因素,但绝大多数限于仿真和定性分析。

Clemente^[30]、Babar^[34]等研究表明,针对空鼓损伤,较高的热对比度 ΔT (定义为缺陷区域与完好区域在同一时刻的温度差值) 往往出现在气温的峰值和低谷时刻。

Freitas 等^[32]通过试验研究证明了外墙抹灰层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。

Lourenco 等^[29]验证了运用热红外方法检测空鼓和含水率异常的可行性,并考虑了瓷砖颜色、外保温系统和检测时段对结果的影响,结果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。

Cheng 等^[35]采用了数值模拟方法获得了空鼓检测的最佳时间点。

Washer 等^[36]研究证实,被检物体向阳面损伤处和好处的温差会随着风速的增大而降低;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。

Pozzer 等^[37]研究了环境因素对混凝土板内部分层缺陷检测效果的影响,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,其中环境温度、检测时段、太阳辐射强度和大气压力是影响试件表面温度变化的主要因素。

Cai 等^[39]通过模拟不同气候条件,对钢管混凝土脱粘开展了数值和实验研究,实现了脱粘尺寸、管壁热流量、辐射强度和热对比度 ΔT 之间关系的线性量化。

Edis 等^[40]将日光热成像方法运用于瓷砖饰面墙体的含水率异常检测,采用现场测试和有限元法进行了研究和分析,其结论包括:(1)含水率越大,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)更高的辐射强度和昼夜温差有利于提高热对比度。

进一步地,Edis 等^[41]认为基于日光加热和主成分分析的热成像检测在识别高于 36%含水率的缺陷检测中具有较大潜力,按照 1/2 h 或 1 h 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。

Jun 等^[42]通过现场试验和有限元模拟研究太阳辐射、风速和环境温度对空鼓检测效果的影响规律,主要结论包括:太阳辐射是影响 IRT 结果的主要因素,其辐射强度与缺陷的热对比度成正比;低风速可提高热对比度,并延迟热对比度峰值出现的时间;环境温度变化率较高时,有利于提升热对比度。

Li 等^[43]对基于日光热成像的风电叶片检测进行了数值分析和现场试验,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。

杨瑞珍等^[44]列出了不同类型损伤下环境因素对热成像检测效果的影响规律,把能增强损伤位置处热对比度 ΔT 的因素称为有利因素,反之为不利因素,结果如表 1.3 所示。

表 1.3 环境因素对日光热成像检测的影响^[34]

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

综合以上分析,现有研究已从检测时段、辐射强度、气温、风速、含水率等多个维度揭示了环境因素对热成像检测效果的显著影响,并初步归纳了各因素对不同损伤类型的有利或不利作用方向。然而,当前研究仍存在两方面明显不足:(1)对太阳运动规律与建筑外立面辐照特征的时空关联缺乏系统性分析。太阳方位角、高度角的日变化与季节性变化直接影响建筑立面的辐射照度、热流分布及表面温差特征,进而决定空鼓等缺陷在热图像中的可识别性,而当前国内外相关研究普遍未充分考虑该动态变化因素,导致检测模型在跨时段、跨季节应用中的适应性不足。

(2)多环境因素耦合作用下空鼓的热成像识别机理缺乏系统性的试验研究。现有

成果多基于实验室可控环境或简化模型开展,未能充分考虑真实环境的复杂性。由于缺乏足尺、长期的现场实测数据支撑,相关结论的可靠性与普适性尚未得到充分验证,进而制约了其在实际工程中的推广应用。

1.2.2 空鼓的识别和定量检测方法研究现状

为提高空鼓的识别和定量检测精度,必须借助数字图像处理(Digital Image Processing)技术对原始热图像进行增强、分割^[45-48]。数字图像处理是指利用计算机算法对数字图像进行变换、分析与理解的一门技术。数字图像本质上是一个按行列排列的二维灰度值矩阵,每个矩阵元素(即像素)的数值大小对应该空间位置的光强度或色彩信息,图像处理的底层运算即围绕这一数值矩阵展开。其基本流程通常包括图像获取、预处理、分割提取等步骤:预处理阶段通过对各像素灰度值及其邻域实施滤波降噪、对比度拉伸等数学变换,抑制背景干扰并增强缺陷与正常区域间的灰度差异;在此基础上,图像分割依据灰度分布的不连续性或相似性准则,将缺陷区域所对应的像素子集从复杂背景中分离出来,实现目标轮廓的精确提取;在此基础上再对所获目标进行几何尺寸或物理属性的定量测量。近年来,围绕红外热成像技术在工程结构空鼓损伤检测中的应用,国内外学者开展了大量研究,涵盖建筑、道路与桥梁、风电叶片、光伏组件等多个领域。尽管应用领域不同,但这些研究均聚焦于红外图像中空鼓的识别与定量检测,所采用的方法在原理上互通,具备跨领域的技术可移植性。当前,相关研究已形成从传统图像处理到深度学习、从单一模态到多模态融合的技术演进脉络。本节从研究方法与技术路径的角度,对相关研究进行系统梳理。

(1) 基于传统数字图像处理的缺陷识别方法

传统数字图像处理方法通常以单张图像为处理单元,通过滤波降噪、边缘检测、阈值分割、形态学运算等手工设计的算法逐像素提取缺陷特征。这类方法的优势在于:(1)可解释性强,每个处理步骤的物理意义明确,便于针对特定缺陷进行算法调优;(2)在小样本条件下稳定性好,不依赖大规模标注数据,适用于缺陷样本获取困难的场景;(3)缺陷识别精度较高。但其局限性同样明显:(1)处理效率较低,逐张图像的人工调参与处理难以满足大规模工程检测需求;(2)对复杂背景敏感,砖缝、阴影、反射等干扰易导致传统分割算法出现欠分割或过分割。

在建筑外墙领域,Wallace 等^[49]提出一种基于空间像素微分技术的图像处理方法,将二维灰度图像或温度矩阵转换为缺陷特征图,实现了空鼓的定量检测。Zhu 等^[50]对 Canny 边缘检测算法进行改进,用于提取空鼓轮廓,平均误差约为 10%。Lu 等^[51]将局部最大类间方差算法引入 Canny 边缘检测,提高了空鼓轮廓的识别精度。Garrido 等^[52]通过热图像分解、子热图像直方图叠加及时空滤波等方法,实现了瓷砖内部空鼓与渗水缺陷的检测。冯力强等^[53]开展了红外热像检测建筑外墙饰

面粘结质量的系统研究。陈文等^[54]结合激光标定与热成像技术，通过图像处理实现了热工缺陷面积的计算。Chang 等^[55]分别提出了基于温度与颜色的图像处理方法，用于识别空鼓缺陷，如图 1.4 所示。Huang 等^[56]提出一种引入强度不均匀性与多窗口尺寸的图像分割模型。Tu 等^[57]运用多尺度集成经验模态分解，根据局部频率水平将每个热图像分解为多个固有模式函数，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。综上，建筑外墙领域的传统图像处理方法已初步形成了从图像增强、边缘检测到定量计算的较为系统的技术框架，但多数方法在复杂背景干扰下传统的空鼓面积定量检测方法精度低，尤其对小尺寸空鼓的检出能力明显不足。

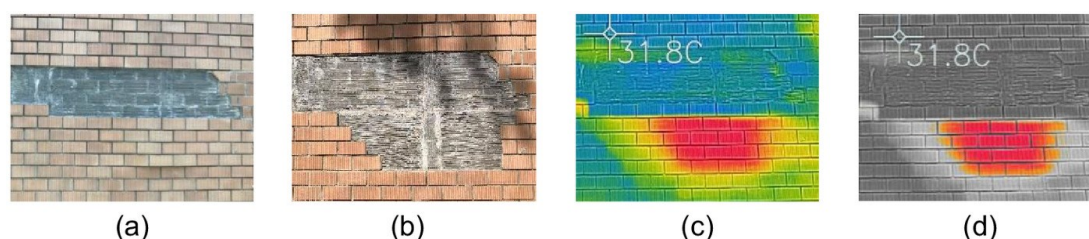
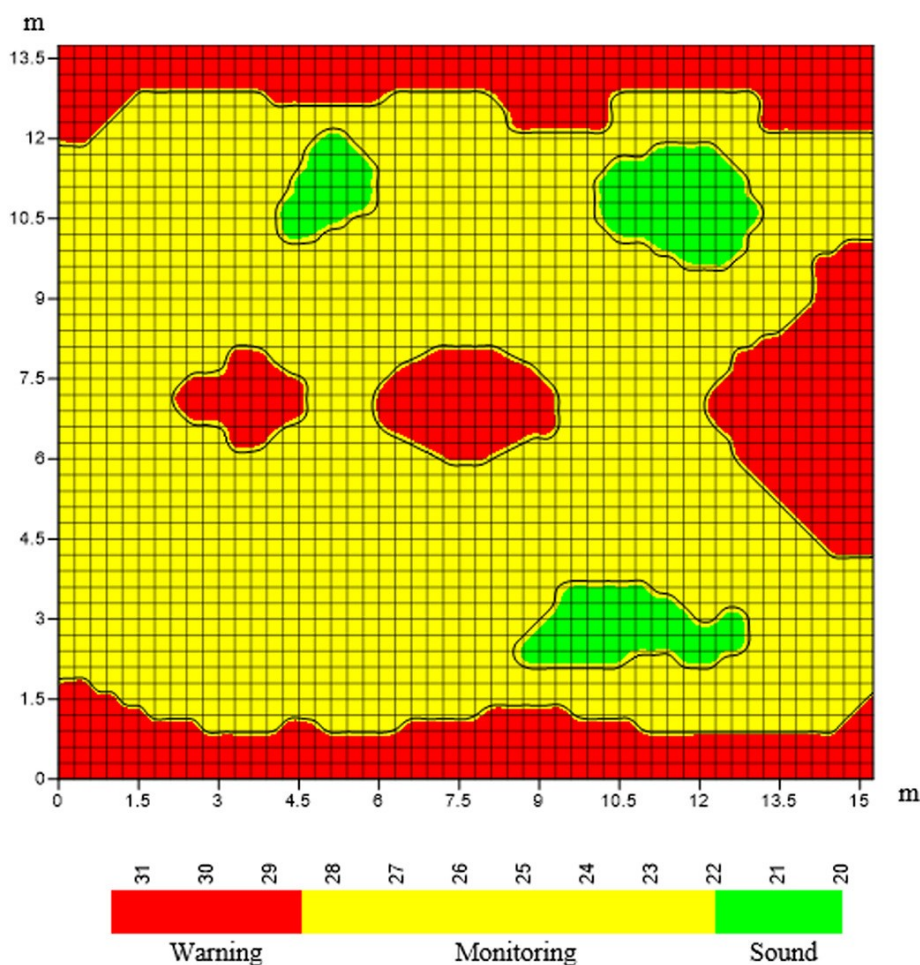


图 1.4 图像处理方法的验证^[55]

在道路与桥梁领域，Omar^[58]运用 K 均值聚类算法进行热图像阈值识别，避免了人工阈值的主观性，如图 1.5 所示。Ichi 等^[59]开发了自适应图像处理模型，在混凝土桥面分层检测中优于传统 K 最近邻（K-Nearest Neighbors, KNN）方法。程崇晟^[25]采用拉普拉斯高斯滤波实现了混凝土板内多种尺寸分层损伤的检测。Mohammed 等^[60]利用小波变换的多尺度分析，将热成像数据集分解到窄带时频域，提升了深层缺陷检测能力。Hiasa 等^[61]结合有限元模拟，开发了热红外图像处理阈值的客观获取方法。Pozzer 等^[62]将被动红外热成像与建筑信息模型（Building Information Modeling, BIM）融合，提高混凝土分层缺陷检测精度。Cheng 等^[63]提出了一种基于温度梯度的水平集方法（Level Set Method, LSM），通过构建归一化温度梯度的改进边缘指示函数，实现对混凝土路面分层缺陷边界的检测与分割。综上，道路与桥梁领域研究在自适应阈值、多尺度时频分析等方面为建筑外墙检测提供了重要借鉴：（1）K 均值聚类阈值选取策略可减少对外墙空鼓人工判别的依赖；（2）小波变换与水平集方法在处理大尺寸、深层次缺陷方面的经验，可迁移至外墙深层空鼓的识别中。


 图 1.5 桥梁状况图^[58]

在风电叶片领域，Worzewski 等^[64,65]通过户外试验与有限元模拟，验证了日光热成像检测叶片缺陷的可行性。Doroshtnasir 等^[66]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^[67]证实了日光热成像检测风机叶片内部损伤的有效性。Galleguillos 等^[68]通过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^[69]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。王睿男等^[70]提出基于形态学的红外图像边缘检测方法。Haegeun 等^[71]提出联合考虑固定模式噪声（Fixed Pattern Noise, FPN）与模糊伪影的反卷积算法，能够在随机噪声存在的情况下实现对 FPN 分量的精确估计。康爽等^[72]提出一种基于膨胀腐蚀的微分形态学梯度（Differential Morphological Gradient, DMG）边缘增强方法，并结合对比度受限自适应直方图均衡化对融合图像进行增强。Jiang 等^[73]提出一种基于剪切波域特征分析的新算法，可在抑制噪声的同时自适应增强边缘。Qiang 等^[74]提出一种称为序列差异处理的新型红外预处理模式，能够有效降低激光能量分布对检测效率的影响，并增强内部缺陷信息。Bu^[75]提出了

一种集成混合域去噪算法的脉冲红外热成像系统，用于检测风电叶片中的脱粘缺陷，该方法结合频域傅里叶变换（Fourier Transform, FT）去噪、时域热信号重构（Thermal Signal Reconstruction, TSR）作为混合域去噪（Hybrid Domain Denoising, HDD）算法，并在此基础上采用脉冲相位热成像（Pulsed Phase Thermography, PPT）技术，克服了传统单域方法的局限性。Zhou 等^[76]提出一种风电叶片真实缺陷检测方法，通过“Regression Crop”数据预处理与 RGB-红外自适应特征融合模块，有效区分涂层脱落等真实缺陷与灰尘等伪缺陷，如图 1.6 所示。综上，风电叶片领域的研究在日光热成像可行性验证、远距离无人机检测、形态学边缘增强及混合域去噪等方面积累了丰富的经验，对建筑外墙检测具有直接借鉴意义：（1）风机叶片与建筑外墙同属大面积立面结构，面向阳光照射的被动热激励方式与无人机搭载热成像的远距离检测模式具有很强的可迁移性；（2）DMG 边缘增强和混合域去噪等预处理技术可为外墙红外图像质量提升提供参考。

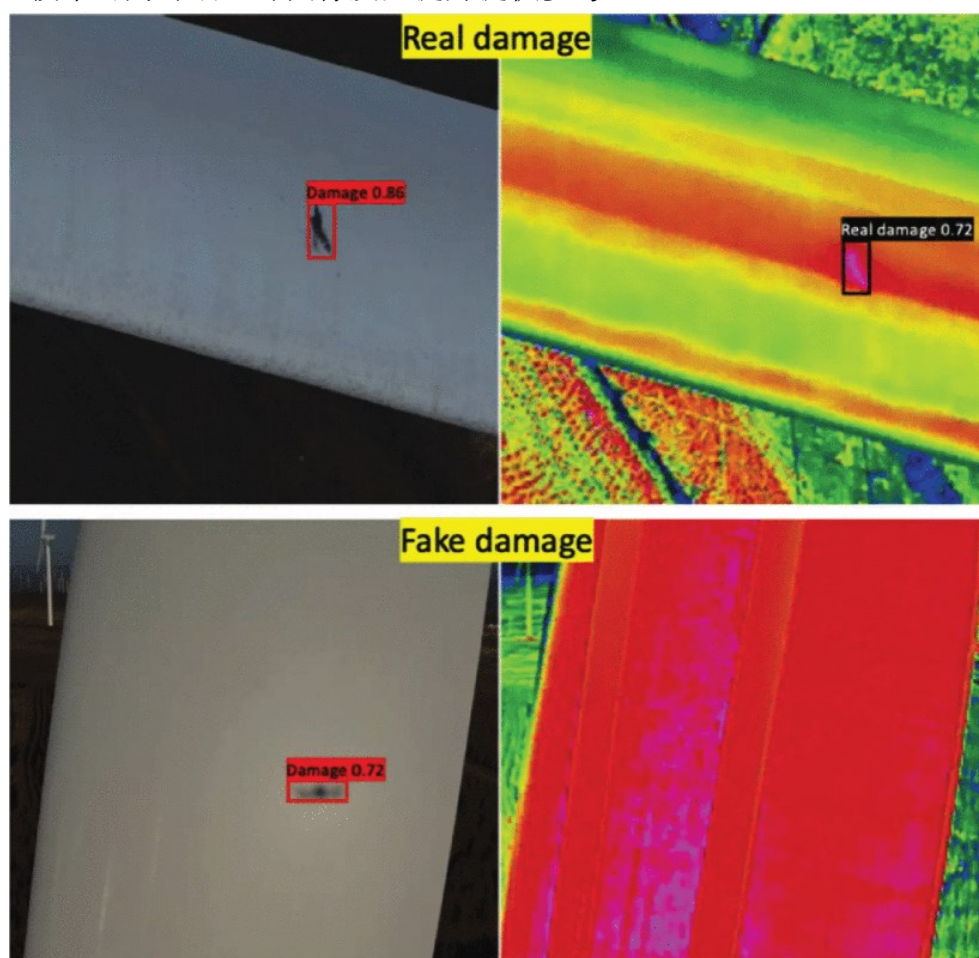


图 1.6 真实缺陷与伪缺陷^[76]

在光伏组件领域，Ngo 等^[77]利用聚类分析实现热斑轮廓提取。Wei 等^[78]分别提出了基于霍夫变换与 Canny 算子相结合的传统图像处理算法，以及基于 Faster-RCNN 与迁移学习的卷积神经网络方法。Chen 等^[79]将红外图像转换至 HSV（Hue, Saturation, Value）颜色空间，然后基于 Canny 边缘检测提取电池板边缘信息，最

后通过计算颜色空间中的均值和标准差对热斑进行分类,如图 1.7 所示。综上,光伏组件领域的传统方法以颜色空间转换和聚类分析为特色,其将温度信息转换至 HSV 空间进行统计分类的思路,可为外墙红外图像中空鼓与正常区域的色彩特征分离提供参考。

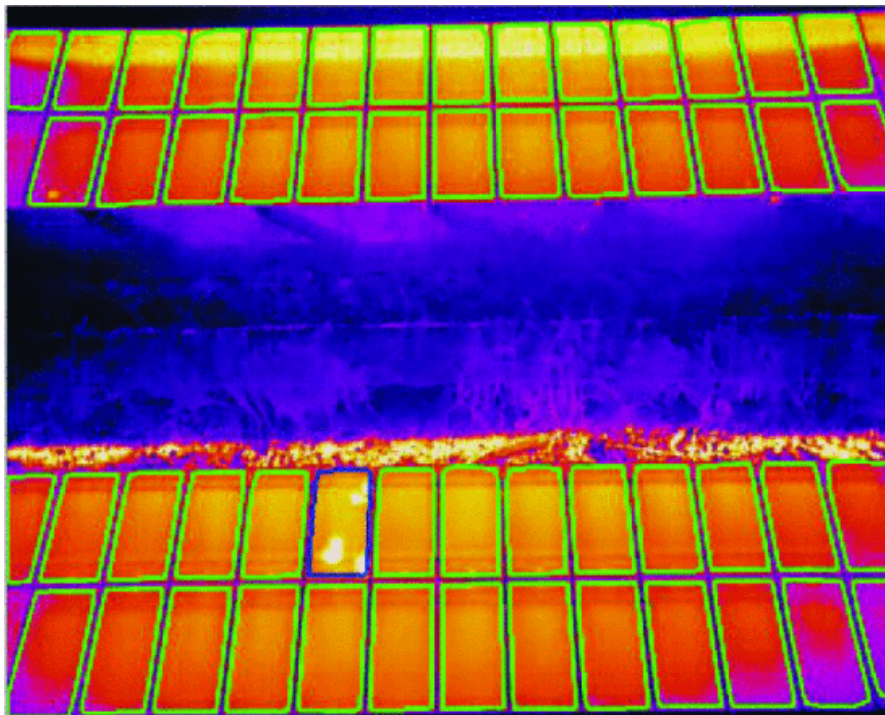


图 1.7 检测结果^[79]

在其它领域, Ahmed 等^[80]提出了一种基于红外图像多分辨率分析的均匀材料缺陷表征方法,通过对小波系数进行阈值化去噪及多分辨率图像分割,实现了缺陷的定位与定量检测。Zhou 等^[81]提出一种基于线激光红外热成像的碳纤维增强聚合物 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) 分层缺陷检测方法,通过差分热成像与频域滤波预处理去除扫描拖尾伪影,并利用改进的模糊 C 均值聚类实现边缘检测,结合 K 近邻算法完成深度分类。

(2) 基于深度学习的缺陷识别方法

深度学习 (Deep Learning, DL) 技术借助卷积神经网络 (Convolutional Neural Network, CNN)、Transformer 等模型结构,通过端到端的训练方式从海量标注数据中自动提取缺陷的层次化特征。凭借其强大的特征自动提取能力,为红外图像缺陷检测提供了新的技术路径,逐步成为该领域的研究热点。其主要优势在于批量化处理能力强,训练完成后可对海量图像进行快速推理,检测效率显著优于传统方法。其缺点在于:(1) 对标注数据依赖强,高质量像素级标注数据获取成本高;(2) 对复杂背景下的缺陷识别精度较低;(3) 模型泛化能力受限,在不同建筑风格、不同采集条件下的迁移应用需要针对性调整。

在建筑外墙领域, Peng 等^[82]提出了一个具有集成注意力机制的两阶段网络,

该方法将目标检测和语义分割网络相结合，首先通过 CS-YOLOv7 (Channel-Spatial You Only Look Once v7) 网络以准确识别红外图像并抑制背景干扰，然后通过带有 SE (Squeeze-and-Excitation) 神经网络的轻量级 MS-DeepLabv3+ 算法以获得更准确的缺陷区域边界和形状信息，如图 1.8 所示。Zheng 等^[83]将 LAFR (Local Affine Feature Representation) 算法与 Vision Transformer (ViT) 分割方法相结合，融合热图像与可见光图像进行热异常检测。He 等^[84]提出一种弱对齐跨模态学习框架，该框架包含两个核心模块：多模态特征描述网络 (Multi-modal Feature Description Network, MFDN) 用于提取 RGB-IR 图像对的特征描述子以实现多模态对齐；提示辅助跨模态图学习算法 (Prompt-assisted Cross-modal Graph Learning, PCGL) 通过 Wasserstein 图划分定位视觉关键区域。Wang 等^[85]构建了端到端的多模态融合网络，同时完成图像配准、融合与损伤分割。Kurtser 等^[86]提出基于无标签 (Artificial Intelligence, AI) 的红外热成像异常检测方法，通过识别实际与预测热分布的差异实现缺陷定位。王玮等^[87]通过对可见光与热红外融合数据的训练，实现了空鼓与脱落损伤的同时识别。综上，建筑外墙领域的深度学习方法正从单一红外模态向可见光-红外多模态融合方向演进，同时注意力机制与语义分割网络的结合有效提升了缺陷边界的提取精度，这为本文融合热对比度等多重判别指标的图像分割方法提供了技术参照。

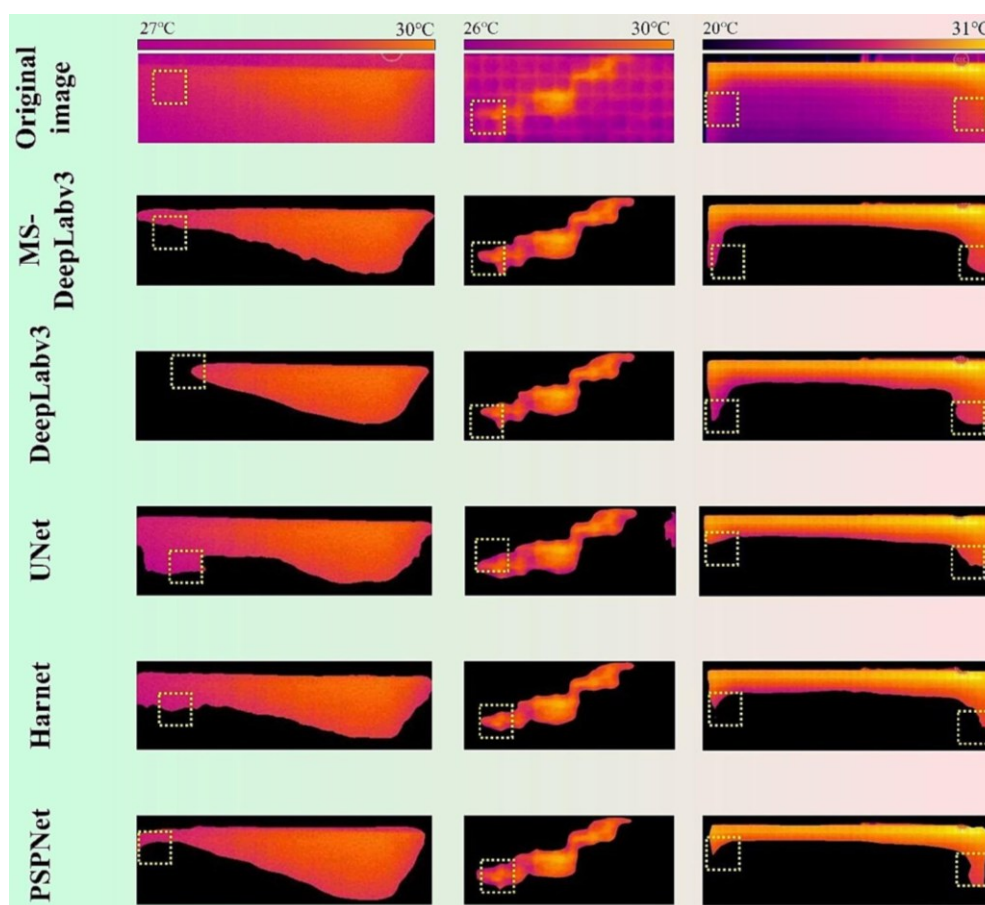


图 1.8 不同模型语义分割结果的对比较证^[82]

在道路与桥梁领域，Rahmat^[88]改进深度起始神经网络实现迁移学习，用于钢桁梁桥亚表面损伤检测。Liu^[89]对比了残差网络（Residual Network, ResNet）、密集连接卷积网络（DenseNet）和高效网络（EfficientNet）在沥青路面裂缝严重程度分类中的性能。Ali^[90]开发了基于注意力机制的生成对抗网络，用于生成复合图像并设计轻量化分割网络，如图 1.9 所示。Deng^[91]结合红外热成像与深度学习，通过理论分析、数值模拟与实验室试验，实现了混凝土内部缺陷的分类、定位与量化。综上，道路与桥梁领域在迁移学习和轻量化网络设计方面的探索，为建筑外墙检测中标注数据有限、需适应不同建筑立面的实际情况提供了解决思路。

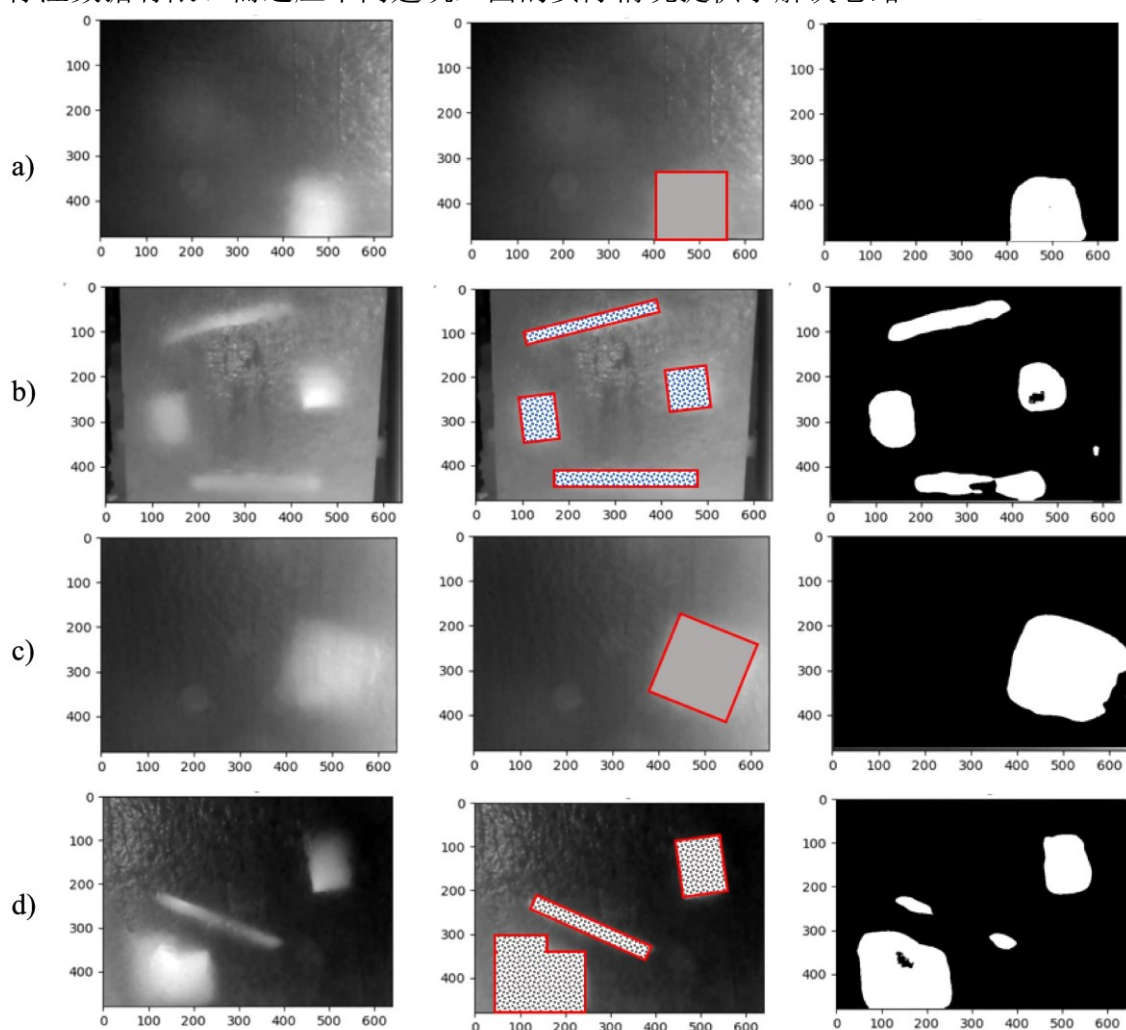


图 1.9 不同几何形状损伤的分割结果^[90]

在光伏组件领域，Greco 等^[92]采用 YOLO（You Only Look Once）框架实现热斑检测，准确率达 95%。Kellil 等^[93]提出了一种基于卷积神经网络与视觉几何组（Visual Geometry Group, VGG-16）的混合改进模型，用于提升红外图像中光伏组件缺陷的检测准确率，该优化模型对 5 类缺陷的平均检测准确率达 99.91%，表现出较高的预测精度。Xing 等^[94]结合 U-Net 与分类器实现光伏组件状态监测与故障诊断方法。V. K 等^[95]借助图像处理技术实现缺陷识别。Guo 等^[96]提出阶梯式热成

像检测方法。Pathak 等^[97]提出了一种双卷积神经网络模型方法，其中 ResNet-50 迁移学习模型用于光伏板故障分类（F1 分数 85.37%），Faster R-CNN 模型用于故障区域定位（平均精度 67%），从而实现了光伏面板故障的早期识别与定位，如图 1.10 所示。Sun 等^[98]提出了一种基于改进锚点与预测头的 YOLOv5（AP-YOLOv5）检测方法，通过 K-means 聚类优化小目标锚点并构建对应预测头，实现了光伏面板热斑的高精度快速检测。郝帅等^[99]提出一种融合知识蒸馏与注意力机制的热斑故障检测算法，通过设计高阶空间交互与通道注意力模块、结合通道与位置信息的注意力模块以及引入 Focal-CIoU（Complete Intersection over Union）损失函数，在复杂环境下实现了 84.8% 的检测精度和 142 FPS（Frames Per Second，帧/秒）（640×512 分辨率）的高效检测。秦怡鸣等^[100]将 HCF-Net 与 YOLOv8n 相结合，提出 HCF-YOLO 融合网络，通过并行化注意力机制、维度感知选择性集成模块及 PIoU（Probabilistic Intersection over Union）损失函数，使检测精度提升至 97.28%，检测速度达 217.33 帧/秒。孙海蓉等^[101]提出基于轻量化 YOLOv5s 的方法，采用 ShuffleNetV2 改进主干网络、GSConv 优化 Neck 部分，在保证较高精度的前提下提升了检测速度，并减少了参数量与计算量。王道累等^[102]提出一种改进 YOLOv4-tiny 方法：采用伽马变换扩充数据集、嵌入 CBAM（Convolutional Block Attention Module）注意力模块、并在特征金字塔中融合 PANet（Path Aggregation Network）思想及 1×1 卷积，使 AP50 达 98.42%，检测速度达 50.06 FPS。牛小育等^[103]提出一种二阶段深度学习方法：首先采用改进 DeepLabv3+ 实现光伏组件分割；然后基于改进 YOLOv10 进行热斑故障检测，并利用 PyQt5 搭建了光伏热斑故障检测系统。Ma 等^[104]提出一种基于 LFS-YOLO 的光伏热斑缺陷检测算法，通过设计多尺度轻量卷积模块 C2f_LMSC、采用 Focal Nets 替换空间金字塔池化（Spatial Pyramid Pooling-Fast, SPPF）模块及构建小目标检测特征金字塔 SORP，使检测精度达到 91.9%。综上，光伏组件领域在 YOLO 系列轻量化检测框架、知识蒸馏、注意力机制及网络剪枝等方面的深入探索，使热斑检测在精度与速度之间取得了良好平衡，为建筑外墙空鼓检测的实时化与轻量化提供了成熟的技术路径参考。

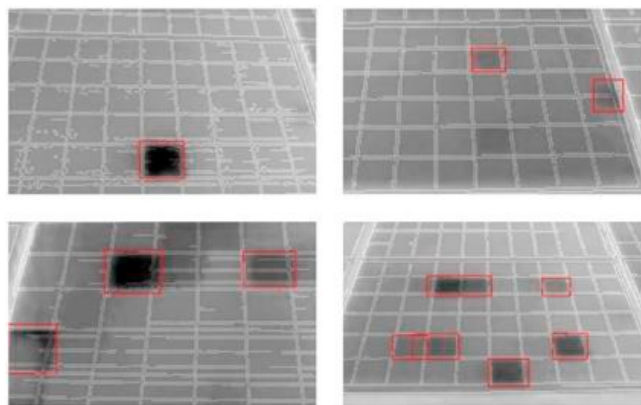


图 1.10 检测结果^[97]

在其它领域, Tang^[105]结合马尔科夫模型与神经网络理论, 对目标特征进行分析, 实现了热障涂层材料脱粘缺陷尺寸与深度的定量检测。Min^[106]提出了一种基于深度学习的红外热像分割方法, 用于自动评估施工现场的混凝土强度。Jin^[107]提出了一种基于无人机热成像与深度学习的非接触式构件分类与故障诊断方法, 通过对比实时目标检测网络架构与激活函数, 为核电站构件的分类与故障检测提供了最优性能。Xu 等^[108]针对碳纤维增强聚合物 (CFRP) 曲面结构内不同深度的分层缺陷, 提出了一种基于 Res-Transformer 神经网络的自动表征框架, 该网络设计了数据处理模块以增强不同深度缺陷的时序信号特征差异, 并利用残差模块与 Transformer 编码器协同提升局部与全局特征提取能力。

1.2.3 现有研究的不足

综上, 目前国内外学者对外墙饰面层空鼓红外检测主要存在如下问题和不足:

(1) 对太阳运动规律与建筑外立面辐照特征的时空关联缺乏系统性分析。太阳方位角、高度角的日变化与季节性变化, 直接影响建筑立面的辐射照度、热流分布及表面温差特征, 进而决定空鼓等缺陷在热图像中的可识别性。当前国内外相关研究普遍未充分考虑该动态变化因素, 导致检测模型在跨时段、跨季节应用中的适应性不足。

(2) 多环境因素耦合作用下空鼓的热成像识别机理缺乏系统性的试验研究。现有成果多基于实验室可控环境或简化模型开展, 未能充分考虑真实环境的复杂性。由于缺乏足尺、长期的现场实测数据支撑, 相关结论的可靠性与普适性尚未得到充分验证, 进而制约了其在实际工程中的推广应用。

(3) 复杂背景干扰下传统空鼓面积定量检测方法精度低且对小尺寸空鼓检出能力不足。在图像分割过程中, 常出现过分割 (目标区域丢失) 或欠分割 (残留大量背景区域) 现象, 导致空鼓轮廓提取不完整、边界模糊, 难以实现准确的面积计算与形态评估。

因此, 本文拟针对上述问题系统开展太阳运动规律分析、多因素耦合作用下的空鼓热响应试验研究和基于红外图像处理的空鼓定量检测方法研究。

1.3 本文的主要工作

本文基于国家自然科学基金项目《基于星载 InSAR 变形测量和信息共享平台数据的大跨度桥梁结构状态评估方法》(52278306)、湖南省重点研发计划项目《基于星载 InSAR 技术的城市桥梁群多灾害条件下状态评估与预警研究》(2022SK2096)、湖南省自然科学基金项目《基于天-空-地一体化的基础设施结构安全监测技术研究》(2023JJ70003)、湖南省水利厅水利科技项目《基于“天-空-地”一体化的渡槽结构损伤检测及状态评估研究》(XSKJ2023059-31)、湖南省

应急管理厅科技项目（yjtjxm_202406）开展相关研究。针对日光热成像检测中环境因素对空鼓热响应的影响机制不明，复杂背景下红外图像信噪比低、对比度不足导致空鼓识别困难的问题，从理论分析、试验研究与图像处理三个层面开展系统研究，旨在实现对建筑外墙饰面砖空鼓的高效、精准识别与定量检测，主要内容如下：

（1）针对现有研究对太阳运动规律与建筑立面辐照特征时空关联缺乏系统性分析的问题，拟开展太阳运动规律与辐射强度模型研究。具体而言：基于天球坐标系建立太阳高度角与方位角的计算方法，揭示不同朝向墙面日照时长的季节变化规律；构建太阳总辐射强度计算模型，为热响应分析提供准确的热边界条件；通过区域对比验证观测点数据的代表性，为试验结论的推广应用奠定基础。

（2）针对多环境因素耦合作用下空鼓热响应机理缺乏系统性试验研究的问题，拟开展足尺、长期的饰面砖空鼓红外检测试验。具体而言：设计并制作包含不同尺寸空鼓的釉面砖饰面墙体，布设于四个典型朝向，开展为期一年的现场数据采集；系统分析空鼓几何参数、太阳辐射强度及日照时长对热对比度的影响；以 1.0°C 为检测阈值，明确各朝向墙面的检测效果差异，并总结出各朝向墙面全年适用的最佳检测时段。

（3）针对复杂背景干扰下传统方法对小尺寸空鼓检出能力不足且定量检测精度偏低的问题，拟开展基于红外图像处理的空鼓定量检测方法研究。具体而言：通过对比多种滤波降噪与增强方法，确定最优预处理组合；提出基于条带掩膜的砖缝剔除方法；提出融合空鼓热对比度、面积及温度三重判别指标的邻域多阈值图像分割方法，实现空鼓轮廓的精确提取；建立图像空间分辨率与物理尺寸的映射关系，实现空鼓面积的定量计算；通过工程实例验证方法的可靠性与适用性。

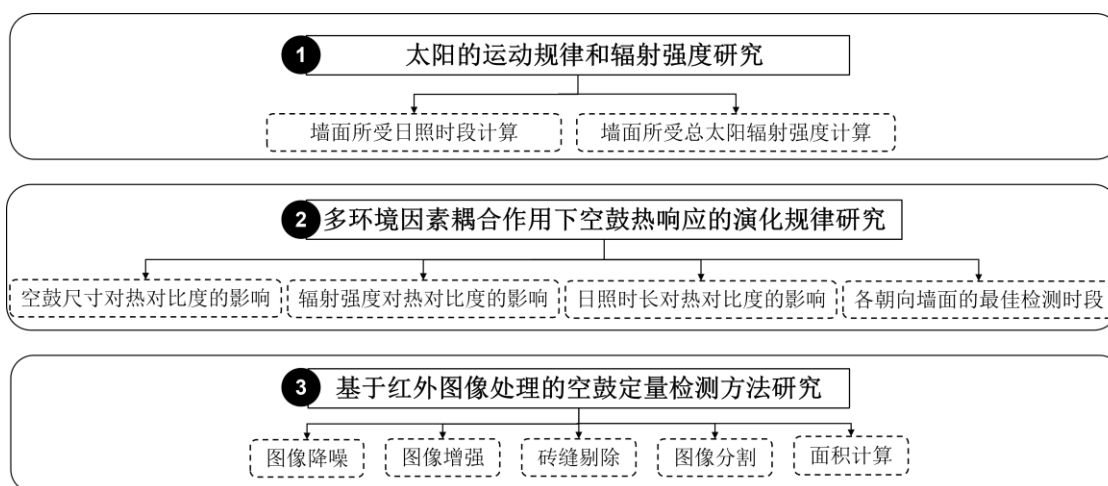


图 1.11 研究内容

第 2 章 日光热成像检测技术基本原理

2.1 引言

红外热成像技术作为一种非接触、大面积、轻量化的无损检测方法，在建筑外墙饰面层空鼓缺陷识别中展现出显著优势。该技术的物理本质在于通过探测物体表面的红外辐射能量，反演其温度场分布，进而依据缺陷区域与完好区域的热响应差异实现损伤识别。因此，深入理解热辐射的基本规律、红外热像仪的工作机制以及空鼓缺陷的传热原理，是开展外墙空鼓红外检测研究的重要理论基础。本章首先阐述热辐射的四大基本定律，揭示红外辐射能与物体温度之间的定量关系。在此基础上，系统分析红外热像仪的组成结构与工作原理，介绍了热像仪检测的热辐射原理。最后，基于传热学理论，剖析空鼓缺陷在日间加热阶段与夜间冷却阶段的传热机理，阐明其形成热斑与冷斑的物理根源。

2.2 热辐射基本定律

热能的传递有三种基本方式：热传导、热对流和热辐射。热传导和热对流需要在固体或流体介质内进行，热辐射的能量不依赖其他介质存在，任何温度高于绝对零度的物体均会向外发出辐射。红外热成像技术的物理本质在于通过探测物体表面的红外辐射能量，反演其温度场分布，进而依据缺陷区域与完好区域的热响应差异实现损伤识别。检测原理可以采用如下定律进行解释^[109]：

（1）普朗克黑体辐射定律

该定律揭示了黑体（理想吸收体和辐射体）的光谱辐射出射度与波长及绝对温度之间的定量关系。它表明，在任一给定温度下，黑体的辐射能量随波长呈连续分布，并存在一个峰值波长。该定律是红外热成像技术进行温度测量的根本物理依据，通过测量物体在特定红外波段内辐射的能量，可以反推其表面温度，如式(2.1)所示：

$$M_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (2.1)$$

式中， M_{λ} 为光谱辐射出射度； λ 为波长； T 为黑体绝对温度； h 为普朗克常数（ $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ）； c 为光速（ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）； k_B 为玻尔兹曼常数（ $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ）。

（2）斯特藩-玻尔兹曼定律

该定律指出，黑体单位表面积在单位时间内向半球空间辐射的总能量（总辐射出射度），与其绝对温度的四次方成正比。这表明，物体的辐射能力随温度急剧变化。在红外检测中，即使物体表面存在微小的温差，也会在总辐射能量上产生可探测的差异，从而为识别因空鼓等缺陷导致的热异常提供了基础，如式(2.2)所示：

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.2)$$

式中, M 为单位面积辐射总功率; ε 为物体表面发射率; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$); T 为黑体绝对温度。

(3) 维恩位移定律

该定律描述了黑体辐射光谱峰值波长与绝对温度成反比的关系。随着温度升高, 辐射能量的峰值向短波方向移动。这一定律对于选择红外热像仪的工作波段具有重要指导意义, 例如针对接近环境温度的建筑物表面检测, 通常选择对长波红外 ($8 \sim 14 \mu\text{m}$) 敏感的设备, 如式(2.3)所示:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \quad (2.3)$$

式中, $\lambda_{\max}$ 为辐射强度达到峰值时的波长; b 为维恩位移常数 ($2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$); T 为黑体绝对温度。

(4) 基尔霍夫热辐射定律

该定律阐明了物体的辐射能力与吸收能力之间的关系。在热平衡条件下, 任何物体的光谱辐射出射度与其光谱吸收比之比, 恒等于同温度下黑体的光谱辐射出射度。这意味着, 在相同环境下, 良好吸收体必然是良好的辐射体。在建筑红外检测中, 饰面材料的发射率 (物体辐射能力与黑体辐射能力之比) 是准确测量其真实温度的关键参数, 不同材料需要做相应的发射率校正, 如式(2.4)所示:

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda} \quad (2.4)$$

式中, ε_{λ} 为物体表面发射率; α_{λ} 物体表面吸收率。

这些定律共同构成了红外热成像检测的物理基础, 为表面温度场的反演、辐射信号的解释以及空鼓等缺陷的热响应分析提供了关键理论支持。

2.3 热像仪检测原理

红外热像仪实质上是一个空间分辨辐射计, 通过精密测量物体表面在特定波段的红外辐射功率, 并基于热辐射定律、仪器标定参数及环境补偿模型, 将检测到的物体表面热辐射信号转化为电信号, 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。其工作原理如图 2.1 所示:

(1) 辐射接收: 如图 2.1 (a) 所示, 红外热像仪通过内置的光学镜头系统收集目标物体发出的红外辐射能量。光学系统将接收的辐射聚焦至焦平面探测器, 为后续转换提供原始信号输入。

(2) 辐射转换: 如图 2.1 (b) 所示, 位于焦平面的红外探测器是实现辐射信号至电信号转换的核心元件。常用的非制冷型微测辐射热计探测器由数千至数万个微桥结构像元组成, 每个像元在吸收入射红外辐射后产生温升, 引起其电阻值发

生相应变化，从而将辐射功率差异转换为可测量的电压信号变化。探测器输出信号的强度与入射辐射功率成正比，实现了从光辐射到电信号的线性转换，为温度反演奠定基础。

(3) 信号处理：如图 2.1 (c) 所示，探测器输出的微弱电信号需经多级信号调理与数字化处理。首先通过前置放大器对信号进行放大，并利用滤波电路抑制系统噪声与环境干扰；随后经模数转换器将模拟信号转换为数字信号，形成表征各像元辐射强度的原始数字矩阵。在此基础上，热像仪内置处理器根据辐射定标方程对数字信号进行温度反演，综合考虑目标表面发射率、环境反射辐射、大气透过率及测量距离等因素，最终计算出每个像元对应的真实温度值。

(4) 图像生成：如图 2.1 (d) 所示，经温度标定后的二维温度数据矩阵被映射为伪彩色图像。系统根据预设的色彩查找表（如铁红、彩虹、黑白等），将不同温度值赋予对应的颜色或亮度等级，生成直观反映目标表面温度分布的热谱图。

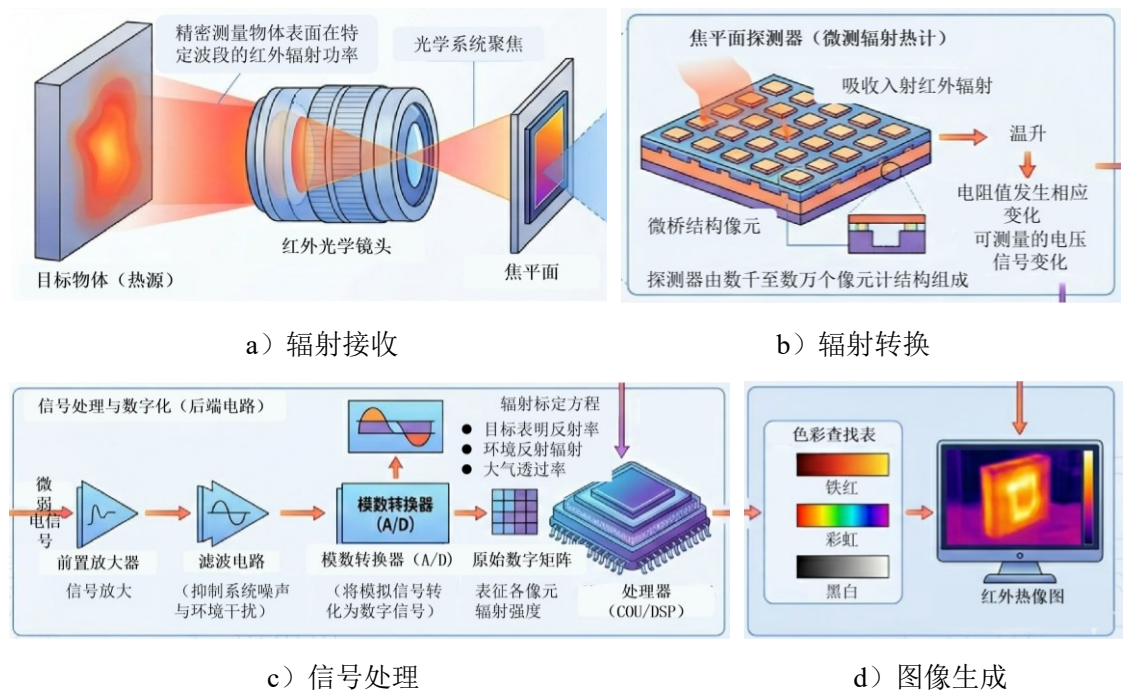


图 2.1 红外热像仪工作原理

太阳光本质上是太阳发出的电磁辐射，太阳发出的电磁波覆盖了从伽马射线到无线电波的极宽频谱，红外线是电磁波谱中介于可见光与微波之间的波段，波长 $0.75\ \mu\text{m}\sim 10^3\ \mu\text{m}$ ，具体的可划分为近红外 (NIR, $0.75\ \mu\text{m}\sim 1.4\ \mu\text{m}$)、中红外 (MWIR, $1.4\ \mu\text{m}\sim 8\ \mu\text{m}$) 和远红外 (LWIR, $8\ \mu\text{m}\sim 10^3\ \mu\text{m}$)，如图 2.2 所示。根据维恩位移定律，当目标温度处于常见建筑表面范围（约 $0\sim 60\ ^\circ\text{C}$ ）时，其热辐射峰值波长 λ_{max} 位于 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 之间，正好落入远红外波段。因此，选用该波段的热像仪能够捕获最显著的热辐射信号。红外相机在检测过程中的热辐射原理如图 2.3 所示^[19]。

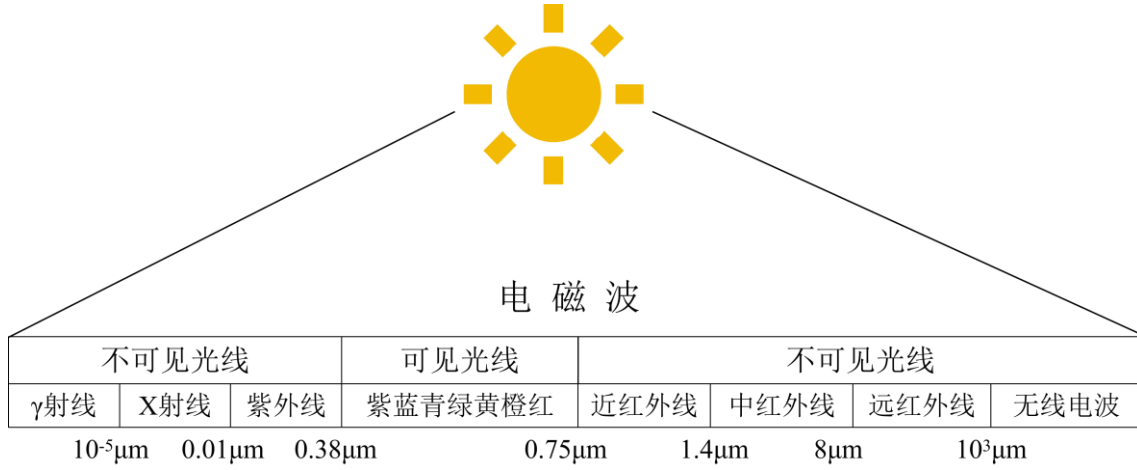


图 2.2 电磁波谱图

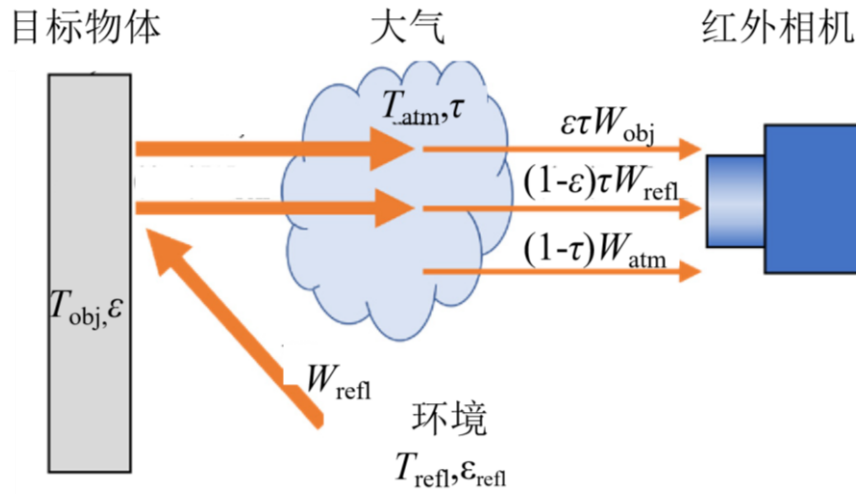


图 2.3 热辐射原理^[19]

由图 2.3 可知，红外相机接收到的总辐射出射度计算如式(2.5)所示：

$$W_{\text{total}} = \varepsilon\tau W_{\text{obj}} + (1-\varepsilon)\tau W_{\text{refl}} + (1-\tau)W_{\text{atm}} \quad (2.5)$$

式中， W_{total} 为红外相机接收到的总辐射出射度； ε 为物体发射率； τ 为大气透射率； $1-\tau$ 为大气的发射率； W_{obj} 、 W_{refl} 、 W_{atm} 分别表示目标物体的辐射出射度、目标物体反射的辐射出射度、大气辐射出射度。

式(2.5)表明在建筑外墙实际检测中，必须根据饰面材料特性设定准确的发射率值，并根据拍摄距离与环境湿度估算大气透射率，否则将引入显著的测温误差，进而影响空鼓缺陷的识别可靠性。

2.4 空鼓的检测原理

日光热成像技术作为一种典型的被动式热成像方法，被广泛应用于建筑物外立面内部空鼓的无损检测。其原理在于捕捉空鼓区域与周边完整区域因热流分布不均所形成的表面热对比度差异^[110]。图 2.4 (a)、(b) 分别展示了存在空鼓的目

标物体在加热阶段与降温阶段的传热过程；图 2.4 (c) 则为晴朗天气条件下物体表面温度及热对比度随时间变化曲线^[19]。

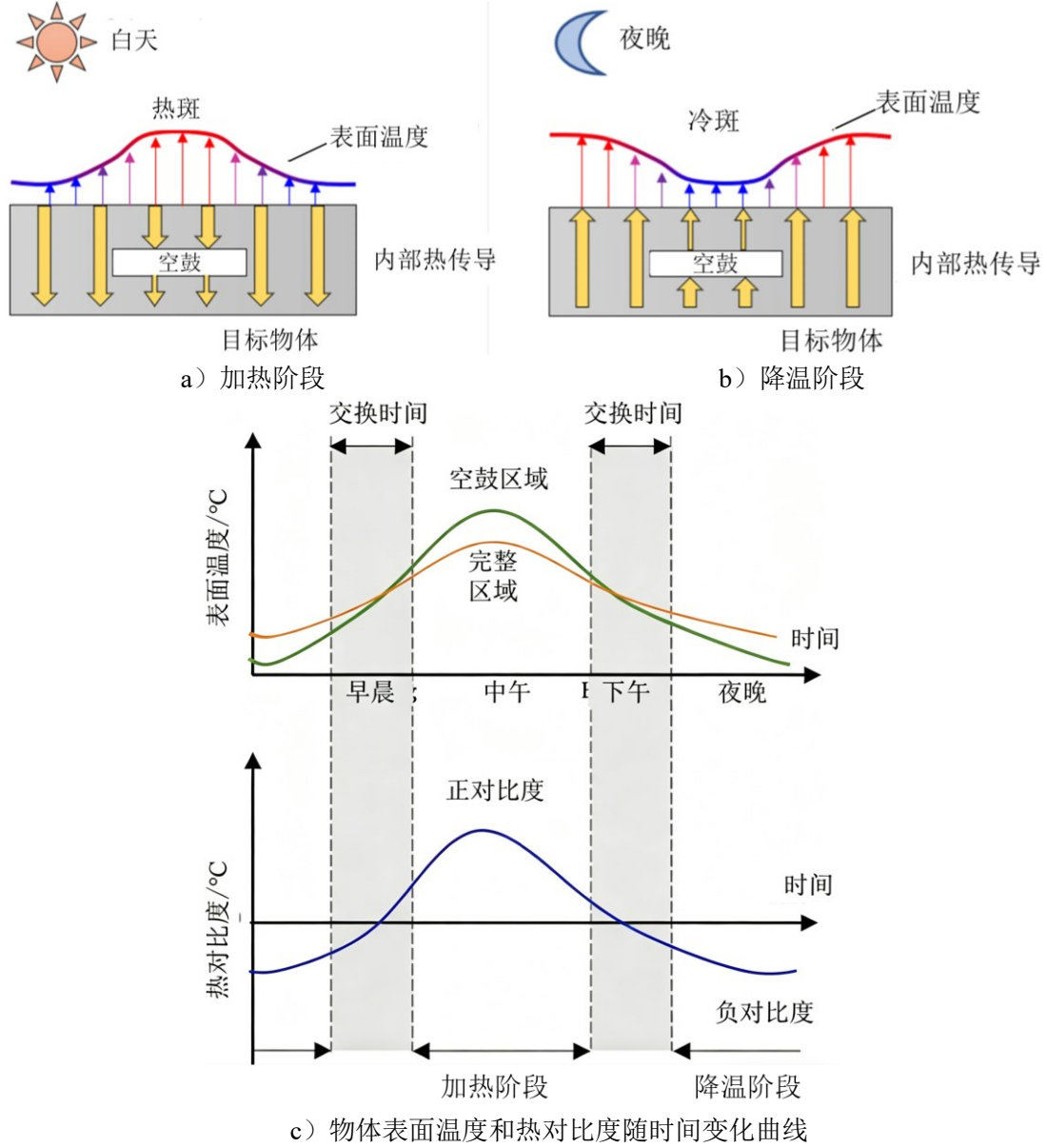


图 2.4 空鼓的检测原理^[19]

从早晨至正午，太阳辐射逐渐增强，环境温度亦随之升高。太阳辐射与暖湿气流共同作用于目标物体表面，驱动热量向内部传导。该过程属于非稳态传热，可用一维瞬态热传导方程描述，如式(2.6)、式(2.7)所示：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.6)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (2.7)$$

式中， T 为温度； t 为时间； α 为热扩散系数； x 为空间坐标，表示热量传递方向（墙体厚度方向）； λ 为导热系数； ρ 为密度； c_p 为比热容。

从传热机理分析, $\partial^2 T / \partial x^2$ 表示温度分布曲线的曲率, 即热流在单位距离内的变化程度。若某区域温度分布呈上凸形态 ($\partial^2 T / \partial x^2 < 0$), 表示流入该区域的热流小于流出热流, 该区域将降温 ($\partial T / \partial t < 0$); 反之, 若温度分布呈下凹形态 ($\partial^2 T / \partial x^2 > 0$), 则区域升温 ($\partial T / \partial t > 0$)。热扩散系数 α 的大小决定了温度变化的快慢: α 越大, 材料内部温度均化能力越强, 温度响应越迅速。

由于空鼓层内空气的导热系数仅为 $0.024 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{[11]}$, 其热扩散系数 α 远小于实体材料。因此根据一维瞬态热传导方程, 在相同热激励条件下, 白天加热阶段空鼓层作为隔热介质, 阻碍热流的正常传递, 导致其上方的表面温度高于周边完整区域, 在热图像中呈现为热斑。

另一方面, 夜间因辐射冷却和环境温度降低, 物体表面温度逐渐降低^[12]。目标物体在日间储存的热量向表面传递, 但该传热过程受到空鼓层的阻碍。因此, 空鼓区域上方的表面温度低于周边完整区域, 在热图像中呈现为冷斑。

2.5 本章小结

本章围绕日光热成像检测技术的基本原理展开系统阐述, 从热辐射基本定律、红外热像仪工作机制及空鼓缺陷传热机理三个层面进行了深入分析。主要结论如下:

(1) 基于热辐射四大基本定律揭示了红外辐射能与物体温度间的定量关系。普朗克黑体辐射定律揭示了光谱辐射能量与波长、温度的定量关系; 斯特藩-玻尔兹曼定律表明总辐射出射度与温度的四次方成正比, 为微小温差的可探测性提供了理论依据; 维恩位移定律指导了针对建筑常温目标应选用长波红外 ($8\sim 14 \mu\text{m}$) 波段; 基尔霍夫热辐射定律阐明了发射率与吸收率的关系, 强调了发射率校正在温度测量中的重要性。

(2) 阐述了红外热像仪的工作原理, 包括辐射接收、辐射转换、信号处理与图像生成四个环节。光学系统汇聚目标红外辐射, 探测器将辐射信号转换为电信号, 经放大、滤波与模数转换后形成数字矩阵, 最终通过温度标定与伪彩色映射生成热谱图。热像仪接收的总辐射需综合考虑目标自身辐射、环境反射辐射与大气辐射, 并进行发射率与大气透过率校正。

(3) 空鼓的检测原理在于捕捉空鼓区域与周边完整区域因热流分布不均所形成的表面热对比度差异。日间加热阶段, 空鼓内空气的低导热系数使其成为隔热层, 阻碍热量向内传导, 导致表面温度高于周边区域, 形成热斑; 夜间冷却阶段, 空鼓层阻碍内部储存热量向表面回传, 导致表面温度低于周边区域, 形成冷斑。

第3章 太阳的运动规律和辐射强度研究

3.1 引言

建筑外立面的红外热成像检测本质上是一种被动热激励下的热响应过程，太阳作为自然界中最普遍且能量最强的热激励源，其运动规律与辐射强度直接决定了外立面表面温度场的分布特征及空鼓区域的热对比度表现。因此，系统研究太阳的运动轨迹，并精确计算其投射至建筑表面的辐射能量，是揭示空鼓热响应机理、优化检测时机与方法的重要理论前提。然而，现有研究对太阳作为日光热成像检测自然激励源的运动规律缺乏系统性分析，当前国内外相关研究普遍未充分考虑该动态变化因素，导致检测模型在跨时段、跨季节应用中的适应性不足。因此，本章首先借助天球坐标系推导出描述太阳运动规律的两个关键参数—太阳高度角与方位角的计算公式。在此基础上，以湖南大学风工程试验研究中心为观测基点，选取全年典型日计算太阳位置逐时变化曲线，分析不同朝向建筑墙面的日照时段与日照时长分布规律，并验证观测点数据的区域代表性。最后，建立建筑表面太阳辐射强度的计算模型，为后续研究空鼓热对比度的时空规律提供准确的热边界条件。

3.2 天球坐标系

太阳作为日光热成像检测的自然激励源，其运动规律直接影响建筑外立面的辐射照度分布与表面温度场演化。太阳高度角与方位角是描述该运动规律的两个关键参数，准确刻画其随时间的变化，是定量分析不同朝向墙面日照条件、优化空鼓检测窗口的理论前提。借助天球坐标系，可实现对太阳高度角与方位角的精确计算。天球坐标系是天文学中用于描述天体位置的基本框架^[113]。作为一种球面坐标系，它通过定义空间中的方向来表示天体的视位置。在该坐标系中，参考中心通常取为地球表面的观测点，从而能够直观地描述天体在特定时刻和地点的视分布。根据所选参考面与极点的不同，天球坐标系可分为多种类型，主要包括地平坐标系、时角坐标系、即赤道坐标系、黄道坐标系以及银道坐标系等^[114]。这些坐标系各自适用于不同的天文观测与应用场景。

3.2.1 时角坐标系

时角坐标系是以天赤道为基圈、以天北极为基本极的天球坐标系统，常用于描述天体随地球自转所发生的位置变化，如图 3.1（a）所示。图中 ω 和 δ 分别表示时角与赤纬角。天赤道是地球赤道平面延伸后与天球相交所形成的大圆，其几何极即为天极，其中北天极 P 为该坐标系的基本极。时角定义为天体所在时圈与当地子午圈（通过天顶和天底的大圆）之间的角度差。其量度以子午圈西方为起点，向

西为正、向东为负，反映了地球自转对天体视位置的影响^[114]。太阳时角的计算如式(3.1)~式(3.5)所示：

$$\omega_s = 15(T_\alpha - 12) \quad (3.1)$$

$$T_\alpha = LMT + EoT \quad (3.2)$$

$$LMT = t + (L - 120) \times 4 \quad (3.3)$$

$$EoT = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad (3.4)$$

$$B = 2\pi(N - 81) / 365 \quad (3.5)$$

式中， ω_s 为太阳时角； T_α 为真太阳时，24 小时制； LMT 表示地方平太阳时； EoT 表示均时差； t 为北京时间； L 为当地经度； N 为年积日。

赤纬角是天体相对于天赤道的角度，以北为正、以南为负，以度为单位，用于确定天体的南北位置。太阳赤纬角计算如式(3.6)所示：

$$\delta_s = 23.45(2\pi \cdot \frac{284+n}{365}) \quad (3.6)$$

式中， δ_s 为太阳赤纬角； n 为观测年 365 天中的第几天。

时角坐标系的一个显著特点在于其与地球自转的直接关联性，能够有效描述天体在夜空中的视运动轨迹^[115]。因此，该坐标系在研究天体周日运动及确定外墙检测时刻等方面具有重要应用。

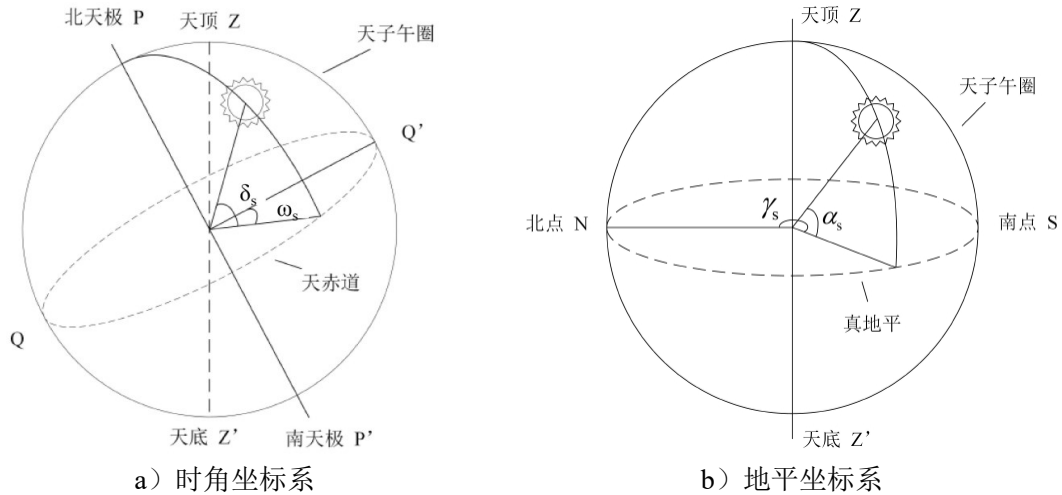


图 3.1 天球坐标系^[114]

3.2.2 地平坐标系

地平坐标系是以观测者所在位置为基准的天球坐标系统，主要用于描述天体相对于观测地平面的瞬时位置，是天文观测中应用最广泛的坐标系之一^[116]。该坐标系以观测者所处的地面点为原点，以垂直于当地重力方向的地平面为参考面，通过天顶、天底和地平线等基本要素构建其空间框架。天顶为观测者正上方的一点，

与天底（观测者正下方）共同构成垂直于地平面的参考轴线。

在地平坐标系中，天体的位置由方位角和高度角两个参数唯一确定，如图 3.1 (b) 所示，图中的 α_s 和 γ_s 分别表示太阳的高度角与方位角。其中，高度角为天体相对于地平面的仰角，其取值范围为 0° （位于地平线）至 90° （位于天顶），太阳高度角大于 0 表示处于白昼时段，反之则为夜晚。其计算如式(3.7)所示：

$$\sin \alpha_s = \cos \omega_s \cos \varphi \cos \delta_s + \sin \varphi \sin \delta_s \quad (3.7)$$

式中， α_s 为太阳高度角； ω_s 为当地太阳时角； φ 为当地纬度； δ_s 为当地太阳赤纬角。

方位角则为天体在地平面上的投影与正北方向之间的水平夹角^[104]，以北为 0° ，向东、南、西依次递增至 90° 、 180° 和 270° 。如图 3.2 所示，当方位角位于 $270^\circ \sim 90^\circ$ 区间时，太阳位于北侧，北向墙面受照； $0^\circ \sim 180^\circ$ 区间对应东侧，东向墙面受照； $90^\circ \sim 270^\circ$ 区间对应南侧，南向墙面受照； $180^\circ \sim 360^\circ$ 区间对应西侧，西向墙面受照。其计算如式(3.8)所示：

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \delta_s - \sin \alpha_s \sin \varphi}{\cos \alpha_s \cos \varphi} \quad (3.8)$$

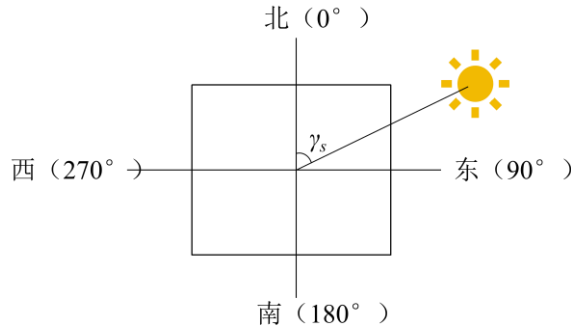


图 3.2 太阳方位角—墙面受照关系示意图

地平坐标系能够直观地反映太阳在天空中的视位置（高度角与方位角）及其随时间的变化轨迹，与人类日常观测习惯以及工程实践中的定位需求高度吻合。因此，基于该坐标系分析太阳运动规律，可有效简化从理论模型到实际观测与工程应用之间的转换过程，提高定位与预测的便捷性和准确性^[114]。

3.3 太阳运动规律分析

本节以湖南大学风工程试验研究中心为观测基点，基于 3.2 节建立的天球坐标系，计算全年典型日的太阳位置逐时变化曲线，系统揭示东、南、西、北四个朝向墙面的日照时段与日照时长的季节分布特征。在此基础上，通过对比不同地方的太阳运动规律，验证观测点数据的区域代表性，为后续试验结论的推广应用奠定基础。

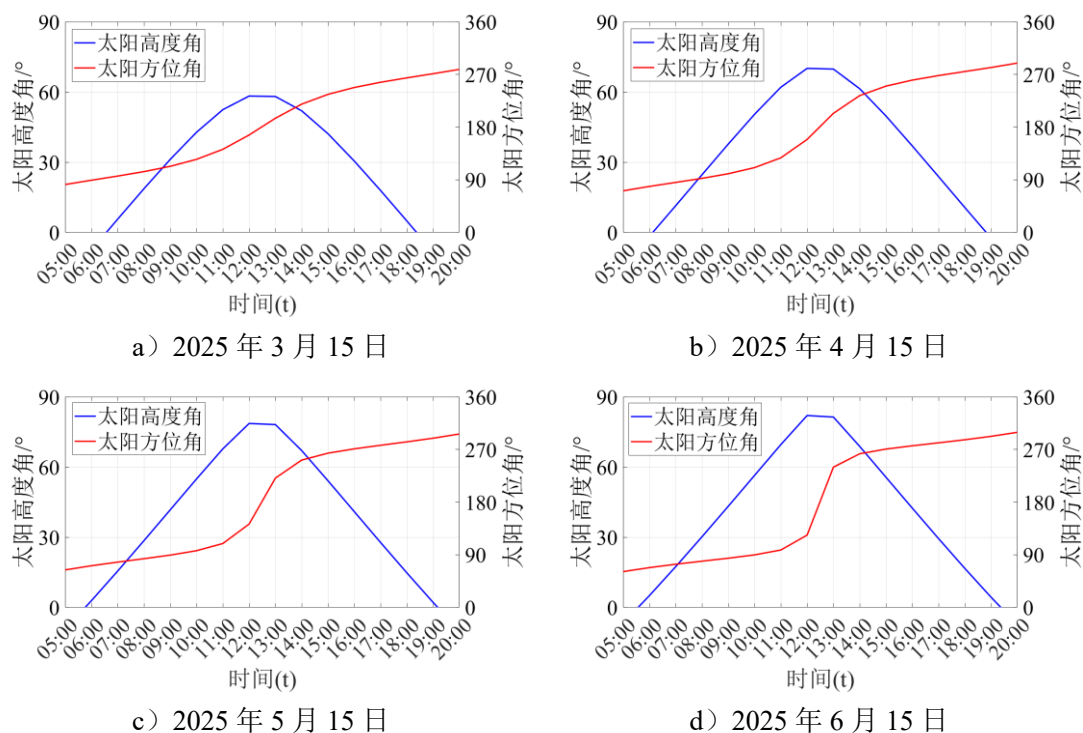
3.3.1 建筑外立面日照特征分析

为了系统揭示太阳运动规律对建筑外立面日照条件的影响，本节以湖南大学

风工程试验研究中心 ($112.946972^{\circ}\text{E}$, $28.17678808^{\circ}\text{N}$) 为观测基点, 如图 3.3 所示, 其建筑外立面分别面向正东、正南、正西、正北四个方位。以 2025 年 3 月至 2026 年 2 月期间每月 15 日作为典型日计算当地太阳高度角与方位角逐时变化曲线, 结果如图 3.4 所示。选择每月 15 日作为典型日, 主要基于以下两点考虑: (1) 15 日接近该月的中间日期, 其太阳高度角与方位角能够较好地代表该月的平均天文状态, 避免月初或月末因地球公转速度变化带来的边缘效应; (2) 在天文学和气象学中, 月中数据常被用于构建标准年或典型气象月, 具有公认的代表性和可比性。



图 3.3 湖南大学风工程试验研究中心



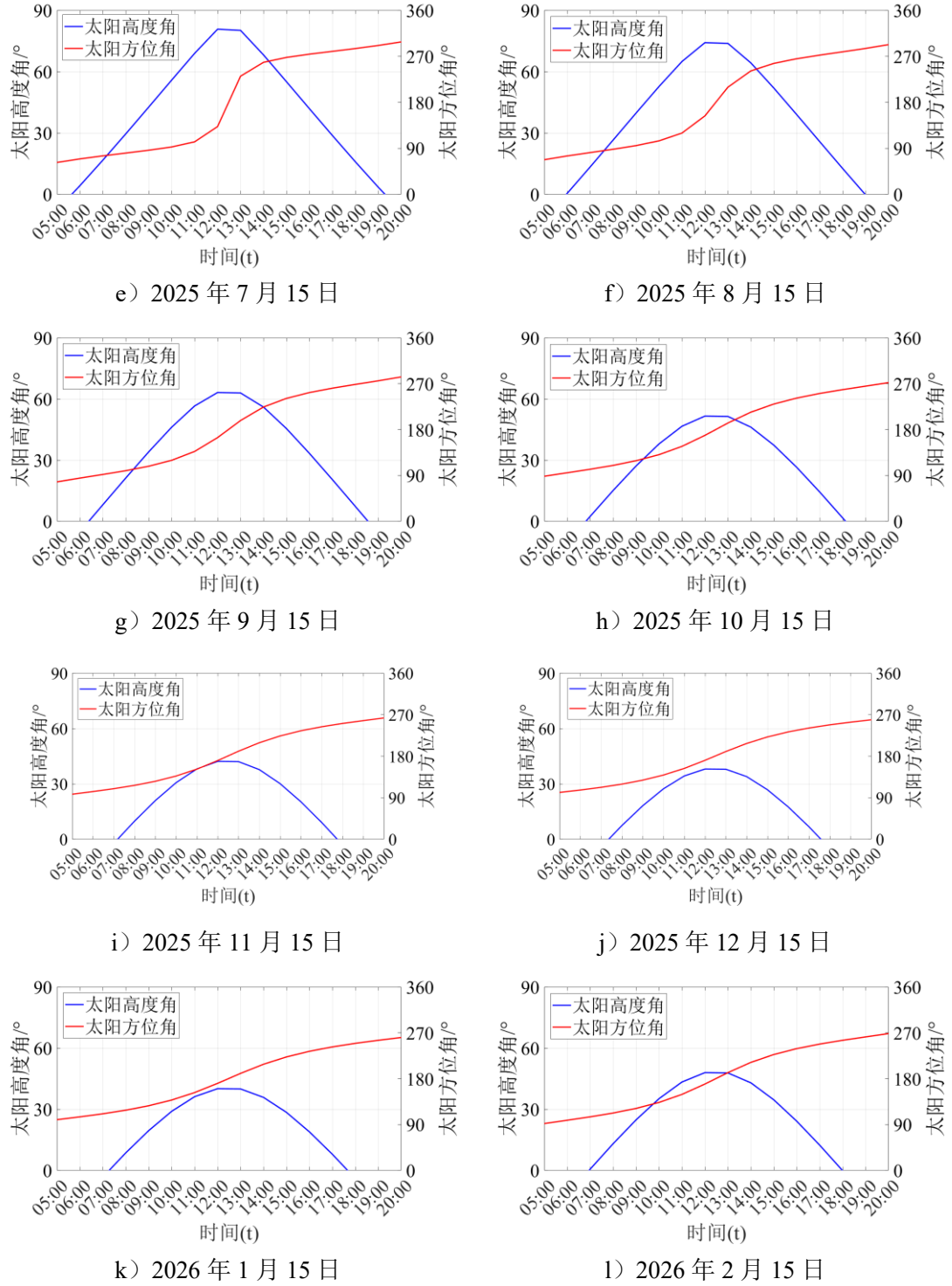


图 3.4 太阳高度角与方位角变化曲线

基于图 3.4 中各典型日的逐时数据,统计得到各朝向墙面的日照时段与日照时长,结果列于表 3.1。

表 3.1 典型日日照时段表

日期	日出	日落	东面		南面		西面		北面	
			日照时段	日照时长 (min)	日照时段	日照时长 (min)	日照时段	日照时长 (min)	日照时段	日照时长 (min)
2025.03.15	6:32	18:20	6:32-12:26	354	6:32-18:20	708	12:26-18:20	354	—	—
2025.04.15	6:11	18:52	6:11-12:32	381	7:44-17:20	576	12:32-18:52	380	6:11-7:44、 17:20-18:52	185
2025.05.15	5:52	19:16	5:52-12:34	402	9:12-15:57	405	12:34-19:16	402	5:52-9:12、 15:57-19:16	399
2025.06.15	5:35	19:21	5:35-12:28	413	10:02- 14:54	292	12:28-19:21	413	5:35-10:02、 14:54-19:21	534
2025.07.15	5:28	19:06	5:28-12:17	409	9:47-15:08	321	12:17-19:06	409	5:28-9:47、 15:08-19:06	497
2025.08.15	5:42	18:42	5:42-12:12	390	8:01-16:23	502	12:12-18:42	390	5:42-8:01、 16:23-18:42	278
2025.09.15	6:13	18:23	6:13-12:18	365	6:35-18:02	687	12:18-18:23	365	6:13-6:35、 18:02-18:23	43
2025.10.15	6:52	18:11	6:52-12:32	340	6:52-18:11	679	12:32-18:11	339	—	—
2025.11.15	7:25	17:59	7:25-12:42	317	7:25-17:59	634	12:42-17:59	317	—	—
2025.12.15	7:34	17:48	7:34-12:41	307	7:34-17:48	617	12:41-17:48	307	—	—
2026.01.15	7:20	17:44	7:20-12:32	312	7:20-17:44	624	12:32-17:44	312	—	—
2026.02.15	6:54	17:56	6:54-12:25	331	6:54-17:56	662	12:25-17:56	331	—	—

由表 3.1 可知, 该地点不同朝向墙面的日照时长随季节呈规律性变化:

(1) 东向与西向墙面日照时长波动幅度较小。最大值均出现在 6 月 15 日 (约 413 min), 最小值出现在 12 月 15 日 (约 307 min), 全年极值相差约 106 min。这一差异主要源于日出日落时刻的季节性偏移: 夏半年日出早、日落晚, 昼长增加。

(2) 南向墙面日照时长呈现出鲜明的冬长夏短特征: 以 3 月 15 日最长 (708 min), 6 月 15 日最短 (292 min), 极值相差达 416 min, 为四个朝向中变化幅度最大者。这一现象源于太阳赤纬的季节性变化: 夏季太阳直射北半球, 日出北偏东、日落北偏西, 太阳视运动轨迹偏向北天, 导致南向墙面仅在正午前后受直射, 早晚时段处于阴影中, 日照时段被压缩至正午附近; 冬季太阳直射南半球, 日出南偏东、日落南偏西, 太阳视运动轨迹终日位于南天, 南向墙面从日出至日落全程受照。

(3) 北向墙面仅在 4 月至 9 月期间存在日照, 其中 6 月 15 日日照时长最长 (534 min), 9 月 15 日最短 (43 min)。这一现象源于太阳赤纬角的季节性变化: 当太阳赤纬大于 0° 时, 日出日落方位偏北, 北向墙面可获得清晨和傍晚的低角度日照; 赤纬越大, 北向日照时段越长; 当太阳赤纬小于 0° 时, 太阳终日位于南天, 北向墙面无直射日照。

上述日照时长的季节变化与建筑外立面空鼓的热对比度演化存在密切关联。日间太阳辐射的持续时间与入射强度直接影响墙体的蓄热总量与表面温度分布, 进而影响空鼓区域的热响应特征。因此, 表 3.1 所揭示的日照时段分布规律, 可为后续开展不同朝向、不同季节的外墙空鼓红外检测试验提供时间窗口选择的参考依据。相关分析将在第四章结合实测热对比度数据进一步展开。

3.3.2 区域代表性验证

为验证观测点太阳运动规律的区域代表性, 选取了两个地点进行对比分析: 地点 1 (112.95°E , 28.18°N , 即观测基点) 与地点 2 (115.31°E , 29.18°N)。长沙市地理范围为东经 $111.88^{\circ}\sim 114.25^{\circ}$ 、北纬 $27.85^{\circ}\sim 28.68^{\circ}$, 区域地图如图 3.5 所示。两地 2025 年 3 月 15 日太阳高度角与方位角的日变化曲线对比如图 3.6 所示。

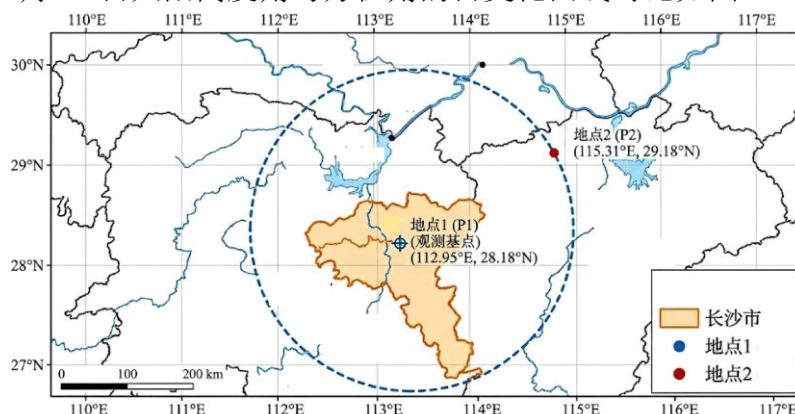


图 3.5 区域地图

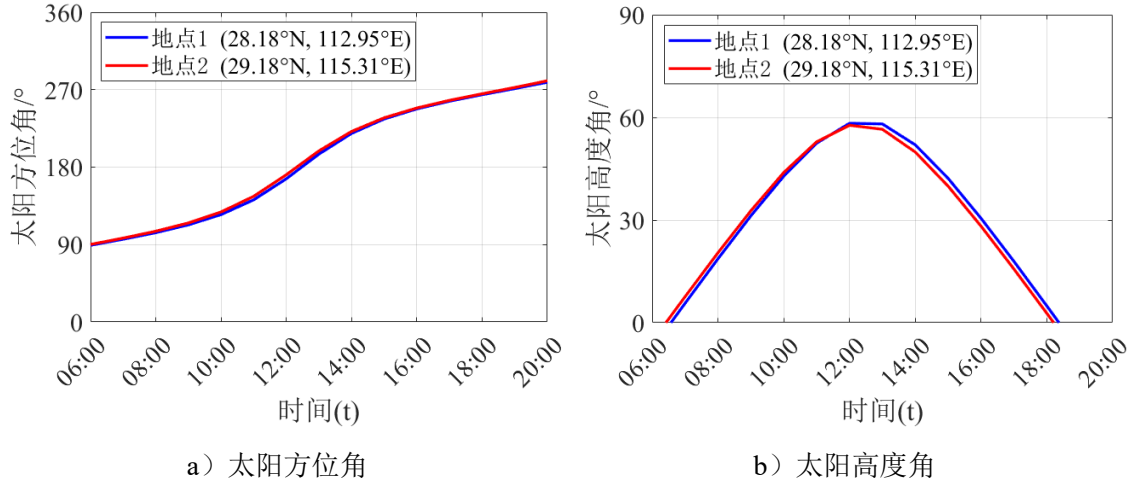


图 3.6 地点 1 和 2 的太阳高度角与方位角变化曲线

由图 3.6 可知，两地的太阳方位角与高度角曲线高度吻合，偏差可忽略不计。这表明在长沙市域范围内，太阳运动规律的空间差异极小，基于试验观测点获得的日照时段数据及后续检测结论具有良好的区域代表性，可在长沙市内推广应用。

3.4 太阳辐射强度计算

太阳辐射作为空鼓检测过程中最普遍且最关键的热激励源，其强度分布直接决定了建筑表面温度场的形成与空鼓热对比度的大小。因此，建立精确的太阳辐射强度计算模型，是后续定量研究空鼓热响应特征、揭示其时空规律及优化检测方案的理论前提。

3.4.1 直射辐射强度

建筑表面接收到的太阳总辐射强度通常由三部分组成：直射辐射强度、散射辐射强度和地面反射辐射强度^[117]，如式(3.9)所示：

$$I = I_b + I_d + I_r \quad (3.9)$$

直射辐射强度是指太阳光线未经大气成分散射而直接以平行光方式投射到建筑表面的辐射分量，其计算如式(3.10)、式(3.11)所示：

$$I_b = I_{b,h} \cdot \frac{\cos \theta}{\sin \alpha_s} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta_s \sin \varphi \cos \beta_s - \sin \delta_s \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta_s \cos \varphi \cos \beta \cos \omega_s + \\ & \cos \delta_s \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega_s + \cos \delta_s \sin \beta \sin \gamma \sin \omega_s \end{aligned} \quad (3.11)$$

式中， I_b 为倾斜表面接收到的直射辐射强度； $I_{b,h}$ 为水平面上的直射辐射强度，为气象站常见数据； θ 为太阳光线入射角； α_s 为太阳高度角； φ 为纬度； β 为建筑表面倾斜角； γ 为建筑表面的方位角； δ_s 为太阳赤纬角； ω_s 为太阳时角。

3.4.2 散射辐射强度

散射辐射强度是指太阳辐射经过大气分子、气溶胶、云层等散射后，从天空各个方向漫射到达建筑表面的辐射分量，在工程应用中，常采用计算简便且满足精度要求的各向同性 Liu-Jordan 模型计算，如式(3.12)所示：

$$I_d = I_{d,h} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (3.12)$$

式中， I_d 为倾斜表面接收到的散射辐射强度； $I_{d,h}$ 水平面上的散射辐射强度，为气象站常见数据。

3.4.3 地面反射辐射强度

地面反射辐射强度是指太阳辐射到达地面后，被地面反射至建筑立面的辐射分量，其计算如式(3.13)所示：

$$I_r = \rho_g \cdot (I_{b,h} + I_{d,h}) \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3.13)$$

式中， ρ_g 为地表反射率^[118]，取值见表 3.2。

表 3.2 常见地表反射率

地表类型	一般地面	草地	水面	雪地	冰面
地表反射率	0.08~0.20	0.14~0.26	0.20	0.81	0.69

3.5 本章小结

针对现有研究对太阳运动规律与建筑外立面辐照特征的时空关联缺乏系统性分析的问题，本章基于天球坐标系和太阳辐射强度计算模型揭示了太阳运动规律及其对建筑外立面的辐射作用机制，为后续空鼓热响应分析提供了理论基础。主要内容与结论如下：

(1) 建立了天球坐标系下的太阳位置定量描述方法。基于时角坐标系与地平坐标系，推导了太阳高度角及方位角的计算公式，为准确刻画太阳在天球中的运动轨迹提供了数学工具，奠定了日照条件分析的理论基础。

(2) 揭示了建筑外立面日照特征的时空分布规律。以湖南大学风工程试验研究中心为观测点，计算了全年典型日太阳高度角与方位角逐时曲线，统计得到东、南、西、北四个朝向墙面的日照时段与日照时长分布规律，为空鼓检测时间窗口的选取提供了直接参考。并验证了观测点数据的区域代表性，表明基于观测点所得的太阳运动规律及相关结论可在长沙市范围内推广应用。

(3) 构建了建筑表面太阳总辐射强度的分解计算模型。将总辐射分解为直射、散射与地面反射三个分量，明确了各分量的物理意义及计算方法，为后续定量分析空鼓热对比度的时空演化规律提供了准确的热边界条件。

第 4 章 基于日光热成像的饰面砖空鼓检测试验研究

4.1 引言

基于日光热成像的饰面砖空鼓检测效果在很大程度上受环境条件制约,包括辐射强度、环境温湿度、风速以及墙体朝向等因素,均会显著影响空鼓表面热响应特征与检测结果的可靠性。目前,国内外在研究环境因素对热成像检测效果影响规律方面的问题主要为:(1)多基于实验室可控环境或简化模型开展,未能充分考虑真实环境的复杂性;(2)由于缺乏足尺、长期的现场实测数据支撑,相关结论的可靠性与普适性尚未得到充分验证,进而制约了其在实际工程中的推广应用,也使得检测时机的科学优化缺乏依据。因此,开展面向真实环境的系统性现场试验,获取多朝向、多季节、多气象条件下的空鼓热响应数据,已成为提升热成像检测准确性与工程适用性的迫切需求。基于上述背景,本章在自然日照条件下进行了为期一年的饰面砖空鼓红外检测试验,以第三章所揭示的建筑外立面日照特征时空分布规律及太阳总辐射强度分解计算模型为理论基础对空鼓尺寸、太阳辐射强度及日照时长对空鼓热对比度的影响规律展开系统分析,明确各朝向墙面的最佳检测时段。

4.2 饰面砖空鼓红外检测试验

4.2.1 试件设计

为了分析空鼓尺寸、太阳辐射强度及日照时长等因素对空鼓热对比度的影响规律,明确各朝向墙面的最佳检测时段。本次试验在湖南大学风工程试验研究中心楼顶选取了东、南、西、北四个朝向的墙面在其表面粘贴红色釉面砖,墙面基底材料为红砖,墙体厚度 30 cm。鉴于工程实践中空鼓内部的介质以空气为主,因此选择导热性能与空气相近的发泡苯乙烯板作为空鼓模拟材料。在各试件饰面层中均预埋 6 个厚度、面积各不相同的空鼓缺陷,空鼓参数如表 4.1 所示。试件尺寸及空鼓分布如图 4.1 所示。

表 4.1 空鼓参数

厚度 \ 面积	3 cm×3 cm	5 cm×5 cm	10 cm×5 cm
0.2 cm	A1	B1	C1
0.5 cm	A2	B2	C2

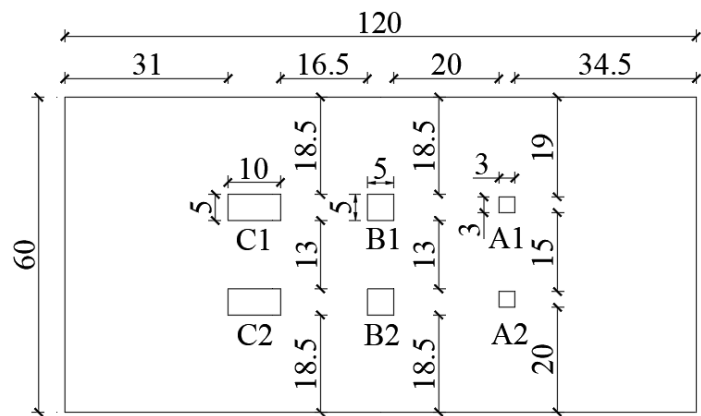


图 4.1 空鼓分布图（单位：cm）

4.2.2 试件制作

试件制作流程如图 4.2 所示。

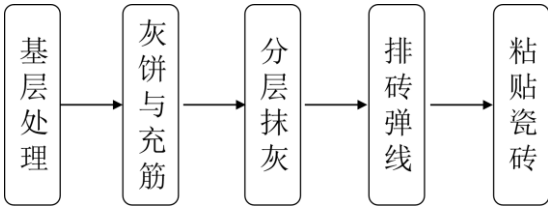


图 4.2 试件制作流程

根据《外墙饰面砖工程施工及验收规程》（JGJ126-2015）^[119]，第一步基层处理，凿掉原有外饰面层，清除墙面上的油污、浮灰等杂质。第二步吊垂直、套方、找规矩、贴灰饼、充筋。第三步抹灰基层施工，采用 M7.5 抹灰砂浆依次抹底层灰、中层找平灰和罩面灰，厚度分别为 6 mm、7 mm、7 mm，确保墙面平整度 ≤ 3 mm。第四步排砖弹线，计算规划砖块的排列方式，并结合工具在基层表面标定控制线。第五步粘贴饰面砖，首先在饰面砖内表面相应位置粘贴聚乙烯泡沫板，空鼓的制作与粘贴如图 4.3（a）、（b）所示，然后利用瓷砖胶将制作好的饰面砖（饰面砖尺寸为 $240\times 60\times 5\text{ mm}^3$ ）粘贴于基层之上，砖与砖之间留有不小于 5 mm 的缝隙。第六步填缝施工。制作完成的饰面层如图 4.3（c）所示。



图 4.3 空鼓的制作与粘贴

4.3 试验实施

本试验采用大疆经纬 300 RTK（DJI Matrice 300 RTK）无人机搭载禅思 H20T（Zenmuse H20T）多光谱镜头作为数据采集设备，如图 4.4 所示，该设备集成了热

成像、广角、变焦及激光测距模块，适用于建筑外墙远距离、非接触式检测。H20T 红外镜头的主要技术参数如表 4.2 所示。

表 4.2 H20T 红外镜头参数

热成像传感器 类型	非制冷氧化钒（VOx）微测热辐射
镜头	DFOV: 40.6°、焦距: 13.5 mm（等效焦距: 58 mm）、光圈: f/1.0、对焦距离: 5 m 至无穷远
照片分辨率	640×512
照片格式	R-JPEG* (16 bit)
像元间距	12 μm
波长范围	8~14 μm
测温分辨率	0.1 $^{\circ}\text{C}$
测温范围	-40 $^{\circ}\text{C}$ ~150 $^{\circ}\text{C}$ （高增益模式） -40 $^{\circ}\text{C}$ ~550 $^{\circ}\text{C}$ （低增益模式）

试验期间，将无人机放置于被检测饰面层前方适当距离处，确保视场完整覆盖待测区域且成像清晰，拍摄期间镜头稳定无晃动，如图 4.5 所示。数据采集时段覆盖每日从日出至日落的完整日照周期，热像图采集时间间隔设置为 30 分钟。试验于 2025 年 1 月至 2026 年 1 月期间开展，每月选取 1~3 天进行数据采集，累积获得 28 天有效数据。为确保检测效果，实验日均为晴天，阴、雨、雪等天气条件下因空鼓热对比度不显著而未纳入采集范围。在图像采集的同时，采用温湿度计（温度分辨率 0.1 $^{\circ}\text{C}$ ，湿度分辨率 0.1%）同步记录环境温度与相对湿度，并使用 TES-1333R 太阳能功率表（分辨率 0.1 W/m^2 ）测量现场太阳辐射强度，为后续热对比度分析提供同步环境参数支撑。



图 4.4 数据采集设备



图 4.5 工作照片

4.4 试验结果分析

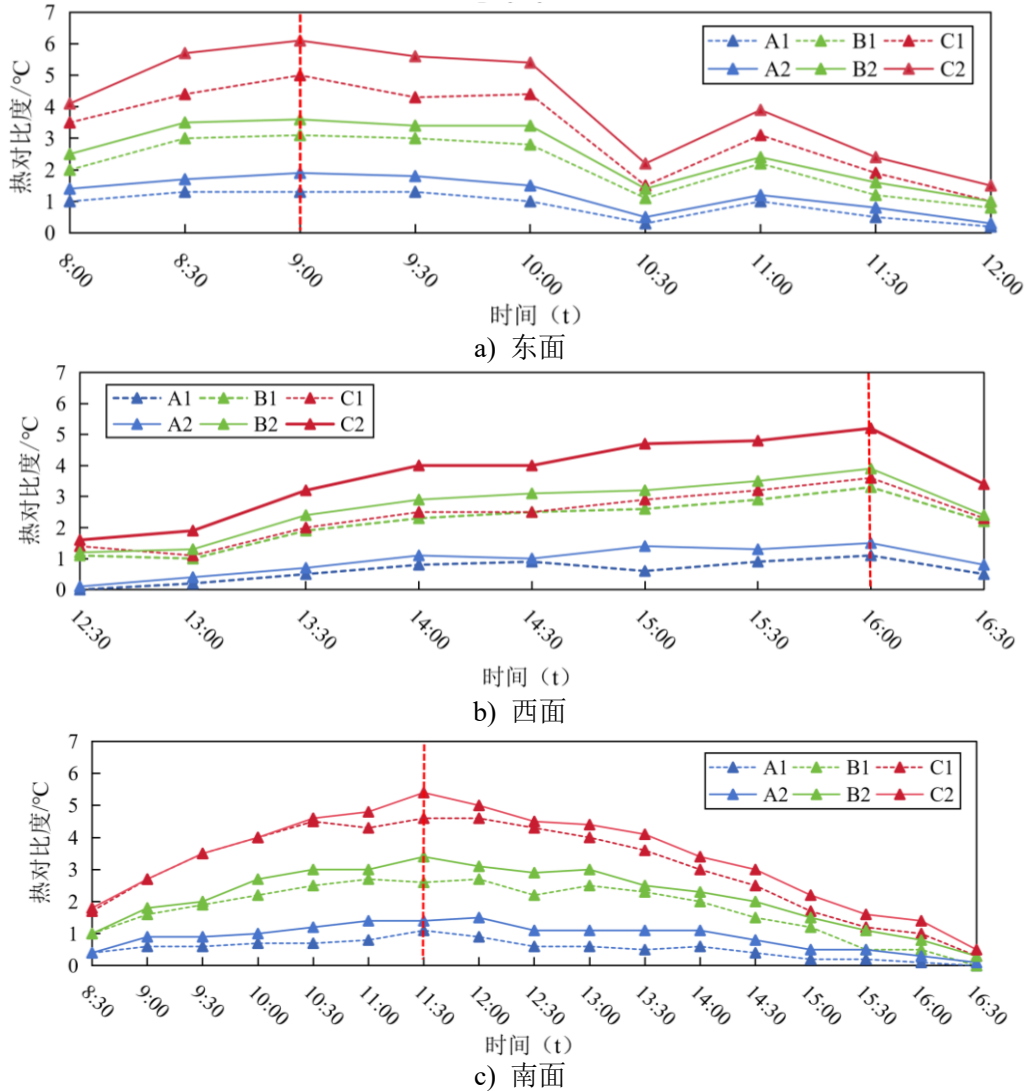
基于第 4.3 节所述的试验方案与数据采集结果,本节对四个朝向墙面中不同尺寸空鼓的红外热像数据进行系统分析。采用热对比度作为核心评价指标,重点分析空鼓几何参数(面积与厚度)、太阳辐射强度及日照时长对热对比度演化规律的影响。在此基础上,进一步明确各朝向墙面的最佳检测时段,为实际工程检测提供时间窗口依据。热对比度计算公式如式(4.1)所示:

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_s(t) \quad (4.1)$$

式中, $T_d(t)$ 代表 t 时刻缺陷区域的温度, $T_s(t)$ 代表 t 时刻非缺陷区域的温度。该指标直接反映了空鼓缺陷在热图像中的可识别程度,是评价检测效果的关键参数。

4.4.1 空鼓尺寸对热对比度的影响

为探究空鼓几何尺寸(面积与厚度)对热对比度演化规律的影响,选取 2025 年 3 月 22 日东向与北向墙面、2025 年 3 月 19 日西向与南向墙面的数据,计算得到各朝向墙面不同尺寸空鼓的热对比度的日变化曲线,如图 4.6 所示,通过竖向红色虚线标注出空鼓达到最大热对比度的时刻。



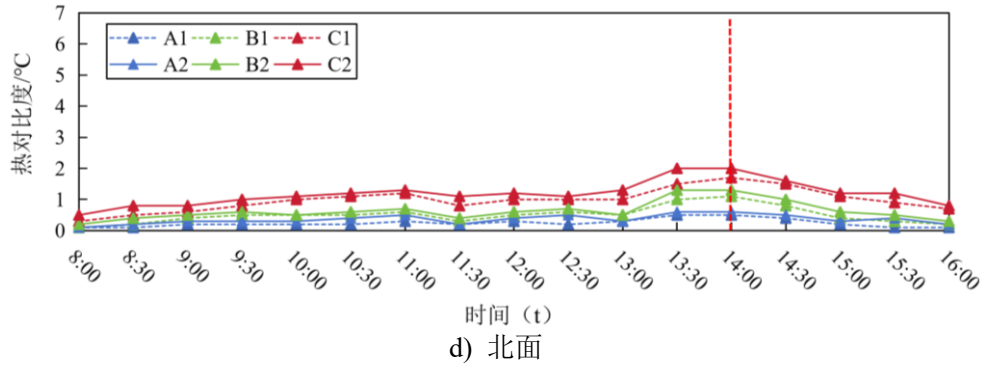


图 4.6 各朝向墙面内部空鼓的热对比度变化曲线

分析图 4.6 所示曲线，可得出以下结论：

(1) 空鼓尺寸与热对比度呈正相关。即在同一朝向墙面及相同环境条件下，空鼓的面积越大、厚度越大，其所能达到的最大热对比度值越高。这一现象表明，红外检测所获取的信号强度与缺陷的几何尺寸存在本质关联，尺寸较大的空鼓意味着更厚的空气夹层或更大的热阻异常区域，在太阳辐射加热过程中形成更为显著的温度积累效应。

(2) 峰值热对比度出现时间对尺寸的不敏感性。即在空鼓埋深保持一致的前提下，不同面积和厚度的空鼓基本在同一时刻达到各自的热对比度峰值。这一现象说明，对于给定的饰面层材料与厚度，热量的垂向传递过程主导缺陷区域的温度响应特征，而缺陷的平面扩展尺寸对热量传播的相位影响较小。因此，在工程检测实践中，对于埋深相近的空鼓缺陷，可依据相同的最佳检测时间窗口进行图像采集，无需针对不同平面尺寸分别优化检测时机，这为现场检测方案的制定提供了便利。

4.4.2 辐射强度对热对比度的影响

太阳辐射是建筑外墙最主要的外部热激励来源，其强度变化直接影响墙体表面温度分布以及内部缺陷区域的热响应特征。因此，分析太阳辐射强度与空鼓热对比度之间的关系，对于优化红外热成像检测的时间窗口具有重要意义。

基于一维瞬态热传导方程，可建立墙面温度响应与辐射激励之间的解析关系，进而阐明热对比度的形成机理与演化规律。考虑建筑外墙为多层结构，由外至内依次为饰面层、粘结层与基层。空鼓缺陷表现为饰面层与粘结层之间的空气间隙层。为简化分析，将墙体视为一维半无限大介质，忽略沿墙面的横向热扩散，仅考虑垂直于墙面方向（ x 方向）的热传导。

在太阳照射下，墙面接收的总辐射强度 $I(t)$ 由直射辐射、散射辐射与地面反射三部分组成。墙面吸收的热流密度如式(4.2)所示：

$$q_{\text{abs}}(t) = \alpha_{\lambda} \cdot I(t) \quad (4.2)$$

式中， α_{λ} 为墙面表面对太阳辐射的吸收率（与饰面材料及颜色相关）。该热流作为边界条件作用于墙面外表面（ $x=0$ ）。同时，外表面与环境之间存在对流和辐射换

热，净热流边界条件如式(4.3)所示：

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{\text{abs}}(t) - h_c [T(0,t) - T_{\text{amb}}] - \varepsilon \sigma [T^4(0,t) - T_{\text{sky}}^4] \quad (4.3)$$

式中， λ 为饰面层导热系数， h_c 为表面对流换热系数， T_{amb} 为环境温度， ε 为饰面发射率， σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数， T_{sky} 为等效天空温度。

在相同热激励下，完好区域热量沿 x 方向连续传导；空鼓区域则在深度 d 处引入空气层，其导热系数 λ_{air} 远小于实体材料。

为获得解析解，采用阶跃激励模型：设 $t=0$ 时刻，表面热流由 0 突变为 q_0 。对于半无限大物体，一维瞬态热传导方程的解如式(4.4)所示：

$$T(x,t) = T_0 + \frac{2q_0}{\lambda} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_0 x}{\lambda} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (4.4)$$

式中， α 为热扩散系数， $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为余误差函数。表面温度 ($x=0$) 响应如式(4.5)所示：

$$T_s(0,t) = T_0 + \frac{2q_0}{\lambda} \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} \quad (4.5)$$

即表面温度与 $\sqrt{t}$ 成正比。对于空鼓区域，空气层的隔热作用使热量在饰面层中积累，等效热扩散系数 α_{eq} 与等效导热系数 λ_{eq} 均显著降低（均小于完好区域），其表面温度响应可近似如式(4.6)所示：

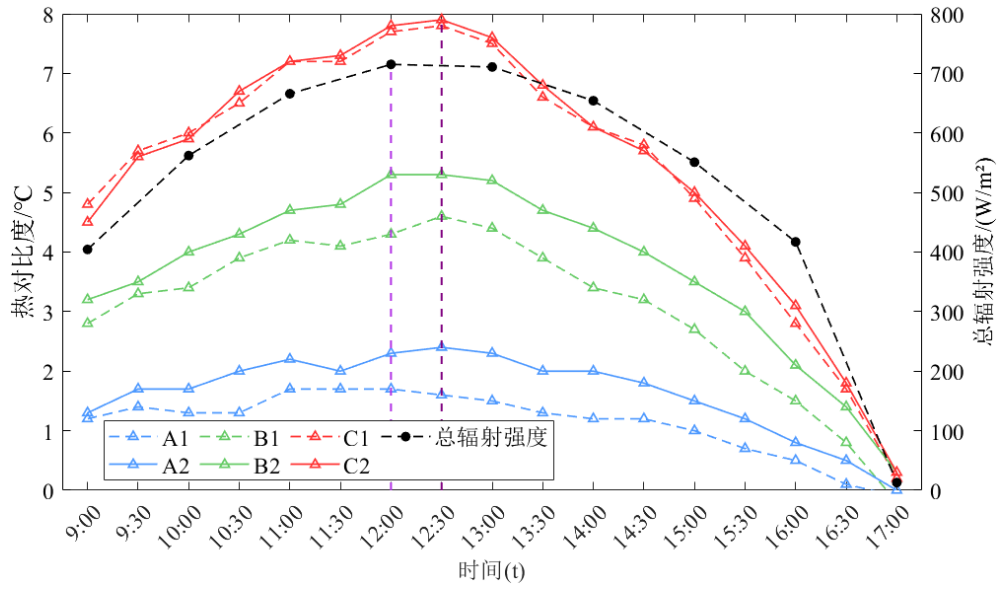
$$T_d(0,t) \approx T_0 + \frac{2q_0}{\lambda_{\text{eq}}} \sqrt{\frac{\alpha_{\text{eq}} t}{\pi}} \quad (4.6)$$

由式(4.5)和(4.6)相减可得式(4.7)：

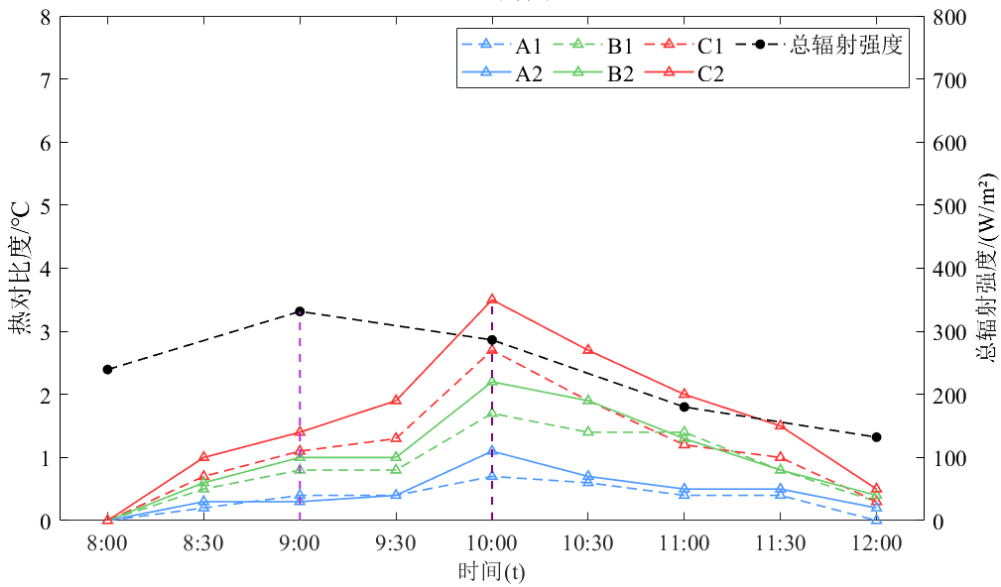
$$\Delta T(t) = \frac{2q_0}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{\sqrt{\alpha_{\text{eq}}}}{\lambda_{\text{eq}}} - \frac{\sqrt{\alpha}}{\lambda} \right) \sqrt{t} = k \cdot q_0 \sqrt{t} \quad (4.7)$$

由于等效导热系数 λ_{eq} 、等效密度 ρ_{eq} 、等效比热容 $c_{p,\text{eq}}$ 均小于完好区域的 λ 、 ρ 、 c_p ，故 $k > 0$ 。故式(4.7)表明，在加热阶段，热对比度 ΔT 与表面吸收的热流密度 q_0 成正比，且随时间按 $\sqrt{t}$ 增长。由于 $q_0 = \alpha_\lambda \cdot I(t)$ ，且吸收率 α_λ 为常数，因此 $\Delta T \propto I(t)$ 。

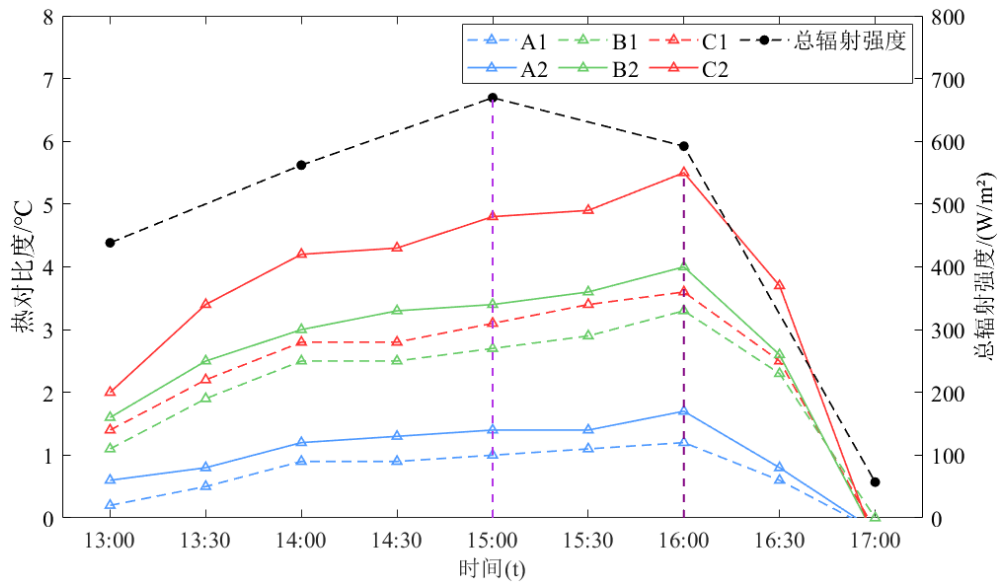
结合实测数据，根据第 3.4 节中的公式(3.9)~(3.12)，相关参数如表 4.3 所示。计算得到 2024 年 12 月 3 日东向墙面、2025 年 1 月 12 日南向墙面、2025 年 3 月 19 日西向墙面以及 2025 年 6 月 6 日北向墙面所受到的总辐射强度日变化曲线，并将其与对应墙面空鼓区域的热对比度变化曲线进行对比分析，结果如图 4.7 所示。



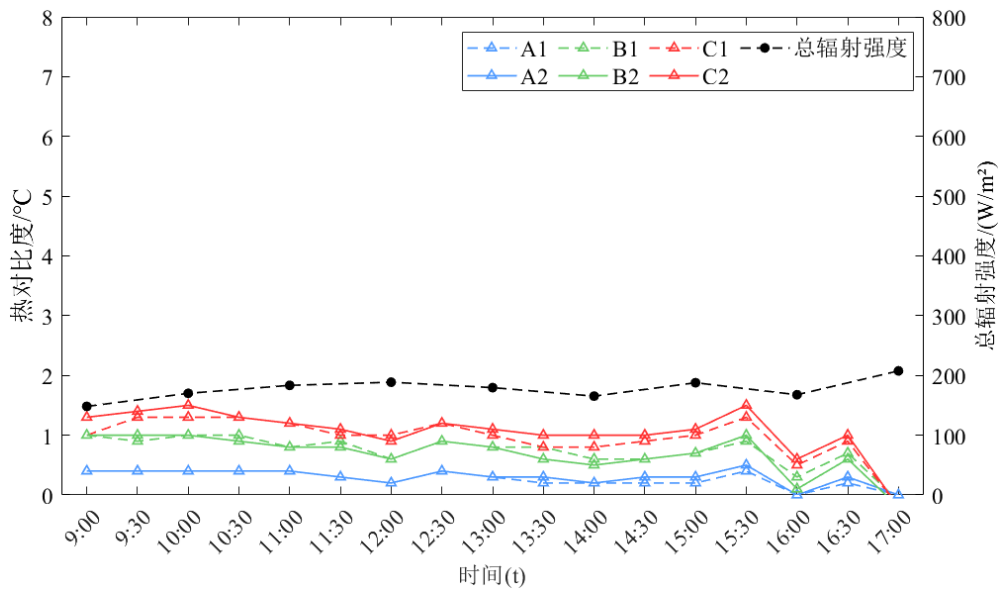
a) 南面



b) 东面



c) 西面



d) 北面

图 4.7 总辐射强度与空鼓热对比度的日变化曲线

表 4.3 计算参数表

		8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
东面	$I_{b,h}(W/m^2)$	88	222	308	314	416	390	301	170	50	2
	$I_{d,h}(W/m^2)$	83	114	150	182	151	138	124	103	62	7
	$\beta(^{\circ})$						90				
	$\gamma(^{\circ})$						-90				
	ρ_g						0.2				
南面	$I_{b,h}(W/m^2)$	82	224	360	455	494	472	391	264	115	15
	$I_{d,h}(W/m^2)$	62	96	115	125	128	125	116	98	70	19
	$\beta(^{\circ})$						90				
	$\gamma(^{\circ})$						0				
	ρ_g						0.2				
西面	$I_{b,h}(W/m^2)$	216	394	545	646	677	603	477	378	188	75
	$I_{d,h}(W/m^2)$	102	129	147	159	169	192	198	161	143	75
	$\beta(^{\circ})$						90				
	$\gamma(^{\circ})$						90				
	ρ_g						0.2				
北面	$I_{b,h}(W/m^2)$	309	462	585	664	657	632	544	349	108	124
	$I_{d,h}(W/m^2)$	146	170	186	195	205	194	185	186	195	110
	$\beta(^{\circ})$						90				
	$\gamma(^{\circ})$						180				
	ρ_g						0.2				

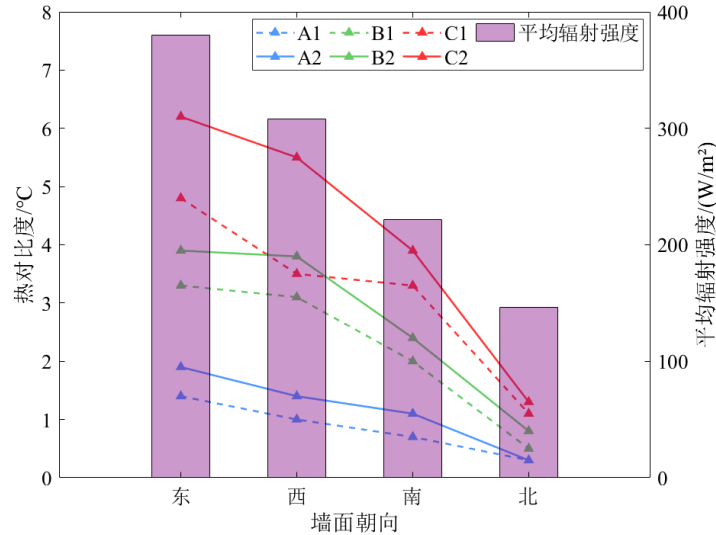
分析图 4.7 可以得出以下结论：

(1) 在南向、东向和西向墙面上，空鼓区域的热对比度变化趋势与墙面所受的总辐射强度变化基本一致。随着太阳辐射强度的增强，热对比度随之增加；当太阳辐射强度逐渐减弱时，热对比度亦同步降低。这一试验结果与理论推导结果高度吻合，证明了辐射强度是驱动空鼓热信号形成的主导因素。

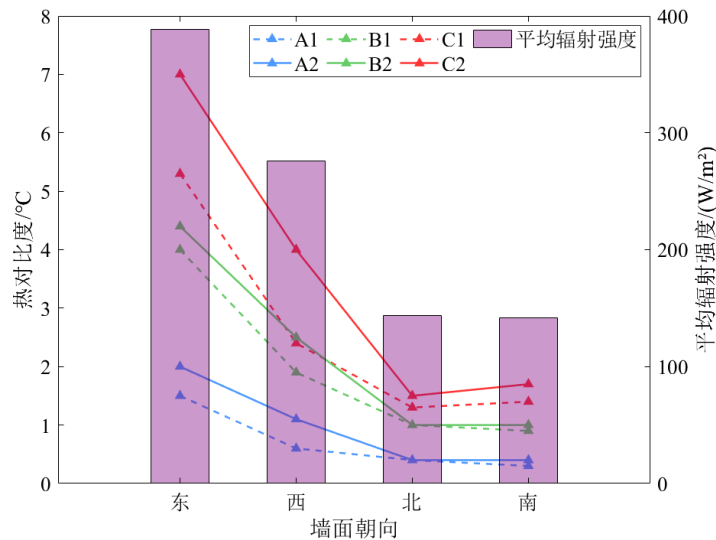
(2) 热对比度峰值出现的时间通常滞后于辐射强度峰值约 0.5~1 小时。该滞后现象可由热传导的累积效应解释。当辐射强度达到峰值时, 墙面仍在吸收前期积累的热量, 温度继续上升; 直至辐射强度下降至一定程度, 净热流变为负值(散热大于吸热)后, 温度才开始下降。因此, 温度峰值(以及热对比度峰值)必然滞后于辐射强度峰值。设辐射强度峰值出现在 t_p , 则热对比度峰值出现在 $t_p + \tau_d$, 滞后时间 τ_d 与墙体材料的热惯性(热扩散系数 α 、厚度、空鼓埋深等)有关。空鼓埋深越大, 热量传递路径越长, 滞后时间也越长。

(3) 北向墙面在全天所接收到的太阳辐射较少, 辐射强度整体较低且变化较为平缓, 无明显峰值点。因为墙体获得的热激励不足, 空鼓区域与正常区域之间难以形成明显的温度差异, 导致热对比度整体较低且无明显峰值点。

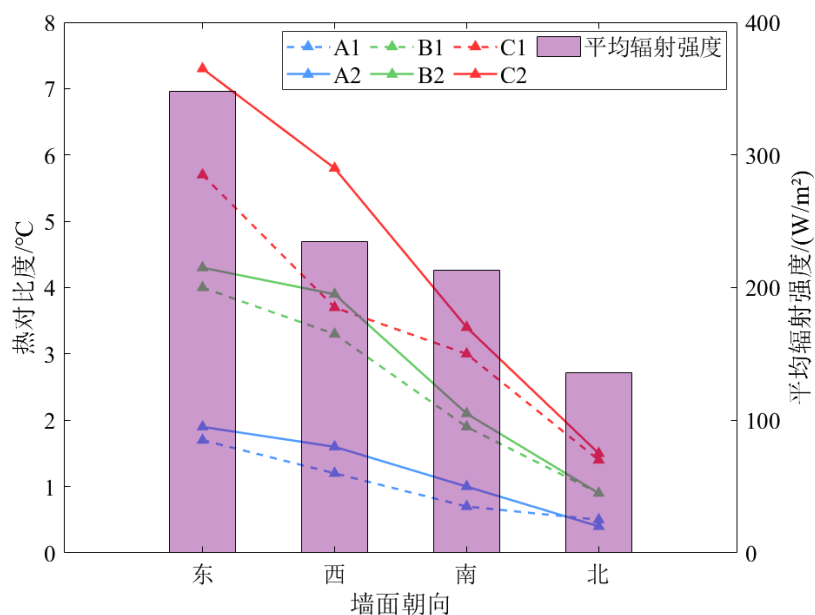
为了进一步分析辐射强度对热对比度的影响规律, 选取 2025 年 4 月 14 日、6 月 6 日、8 月 17 日和 10 月 28 日四个日期, 对不同朝向墙面空鼓的最大热对比度与对应时间段的平均辐射强度进行比较, 如图 4.8 所示。



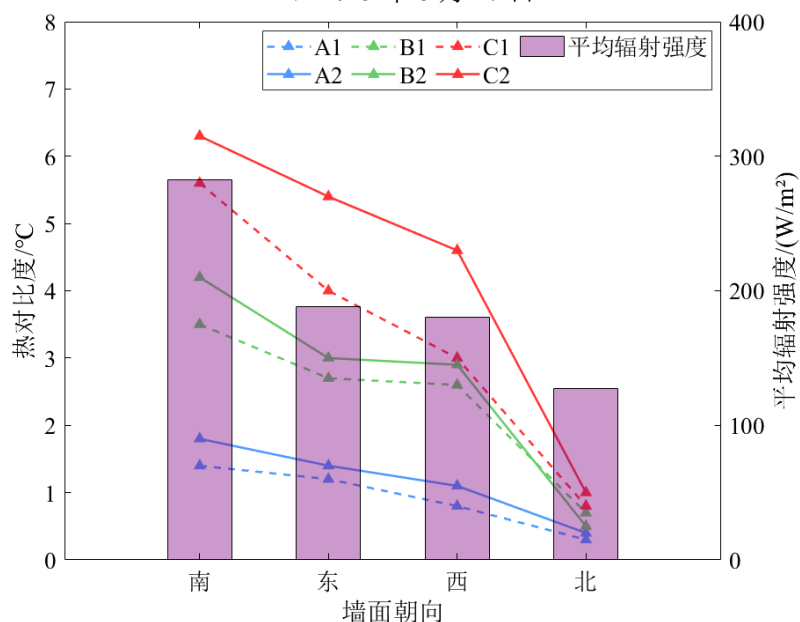
a) 2025 年 4 月 14 日



b) 2025 年 6 月 6 日



c) 2025 年 8 月 17 日



d) 2025 年 10 月 28 日

图 4.8 各朝向墙面平均辐射强度与空鼓最大热对比度

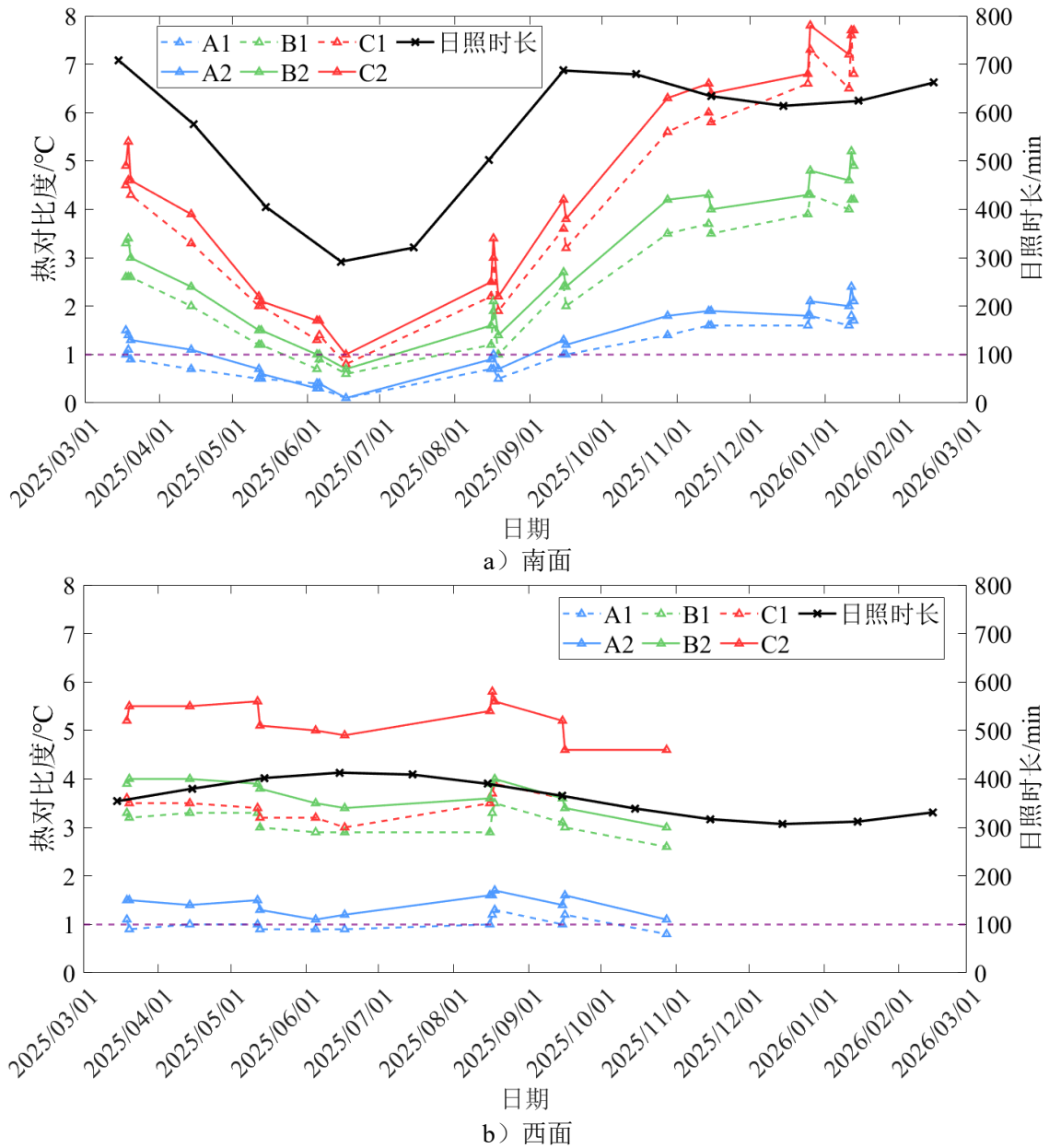
由图 4.8 可以看出，不同朝向墙面的空鼓最大热对比度与其所受到的平均辐射强度之间呈明显的正相关关系。所受平均辐射强度越高的墙面其内部空鼓的最大热对比度越高，这一规律在不同日期、不同空鼓尺寸下均保持稳定，进一步说明了辐射强度是控制空鼓热对比度的关键外部因素。

综上，太阳辐射强度是影响墙体空鼓热对比度的主导因素。较强的太阳辐射能够为墙体提供更充分的热激励，使空鼓区域与正常区域之间形成更加明显的温度差异，从而提高红外热成像检测的识别效果。因此，在实际工程检测中，应优先选择太阳辐射较强且墙面受光条件较好的时间段开展红外检测；同时需注意辐射峰值与热对比度峰值的滞后关系，将检测窗口安排在辐射峰值后约 1 小时，以获得

更明显的空鼓热异常特征，提高缺陷识别的可靠性。

4.4.3 日照时长对热对比度的影响

日照时长决定了建筑表面接收太阳辐射的累积时间，是影响空鼓区域温度积累效应的重要外部因素。为探究日照时长对空鼓热对比度的影响规律，将第三章表 3-1 所统计的各朝向墙面月均日照时长与同年份实测空鼓最大热对比度进行对比分析，绘制如图 4.9 所示的月变化曲线。需要说明的是，2 月与 7 月因故未开展数据采集；西向墙面在 11 月至次年 1 月期间，因下午时段受周边建筑阴影遮挡，无法获得有效数据，故图中仅呈现有效月份的变化趋势。



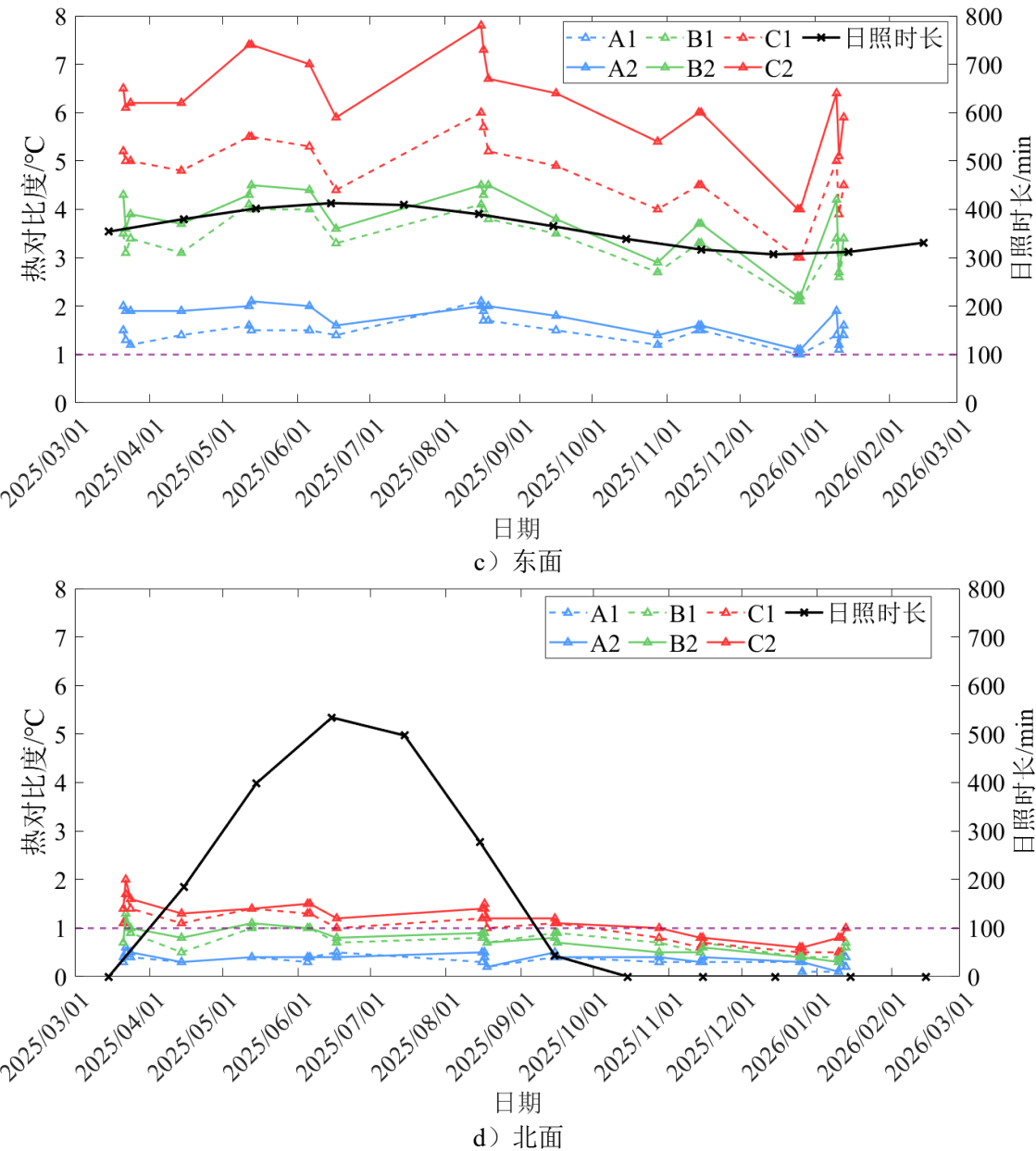
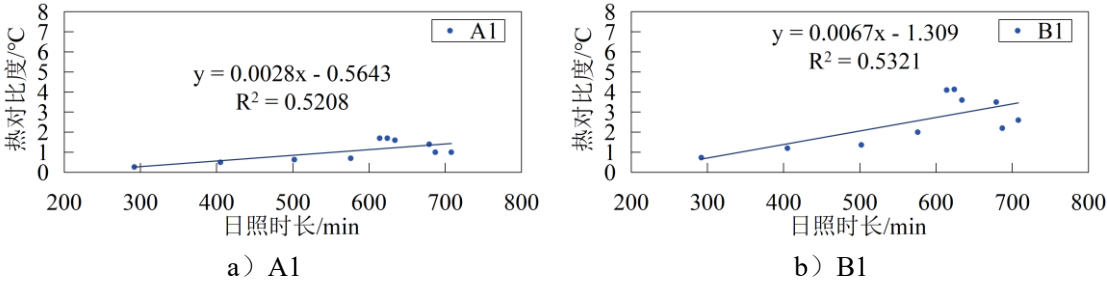


图 4.9 日照时长和空鼓的最大热对比度月变化曲线

为了进一步定量评估日照时长对空鼓热对比度的影响，对二者进行线性回归分析，结果如图 4.10~图 4.13 所示。



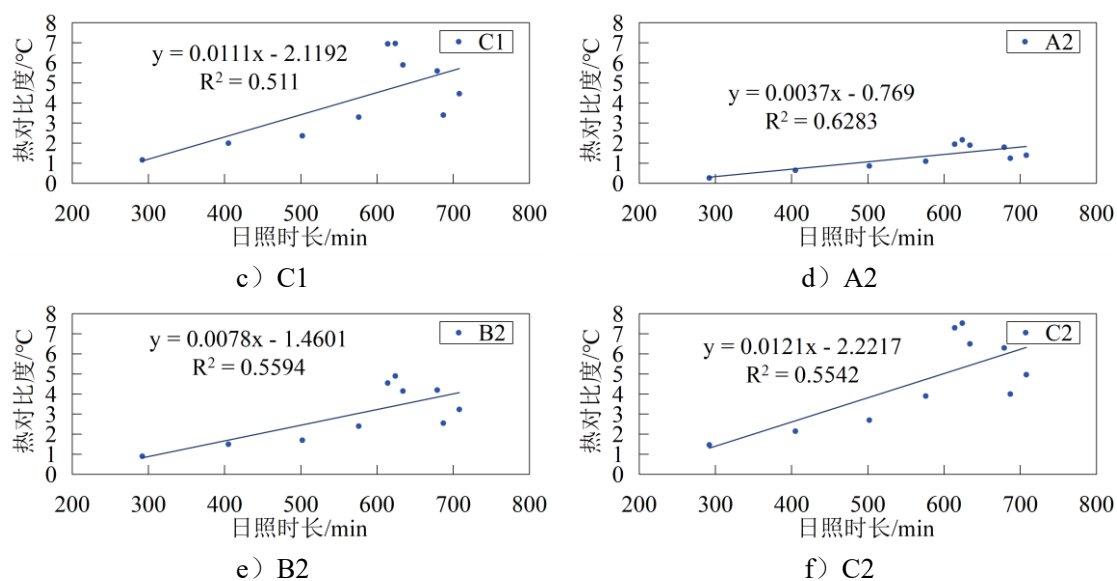


图 4.10 南面线性回归结果

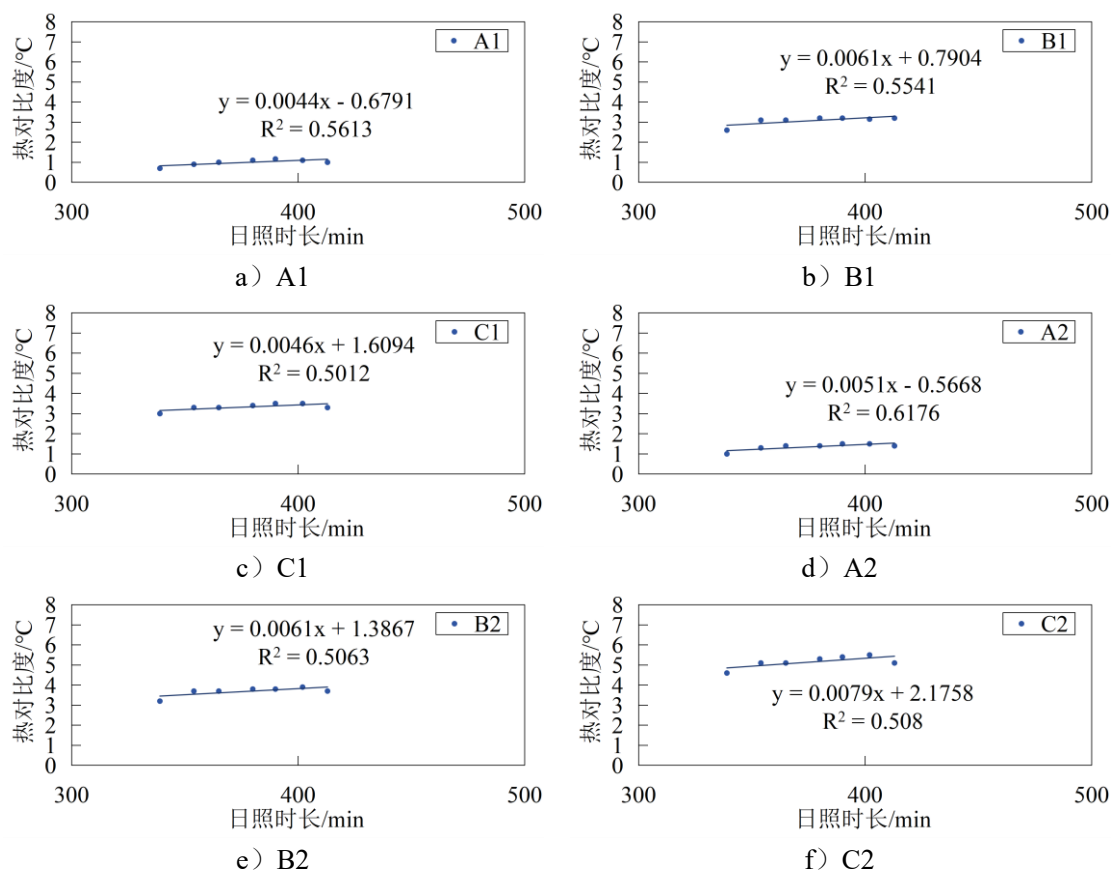
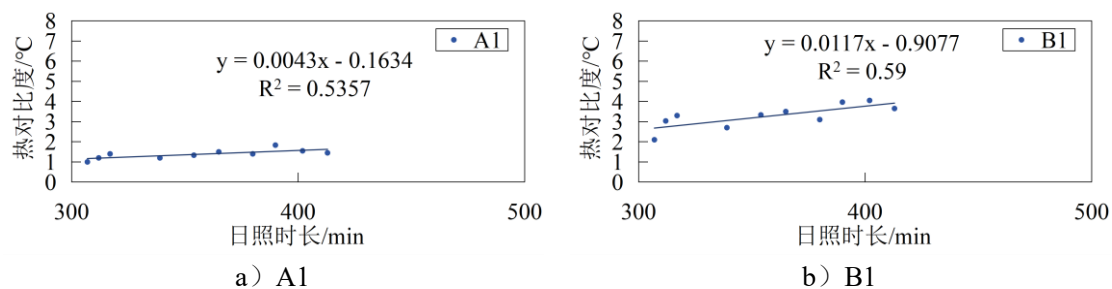


图 4.11 西面线性回归结果



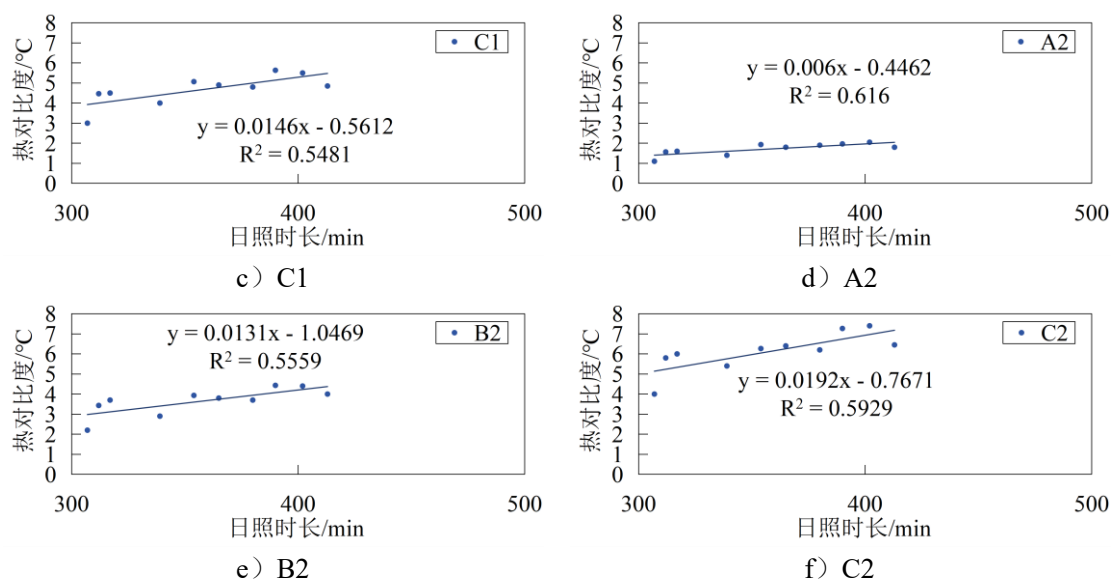


图 4.12 东面线性回归结果

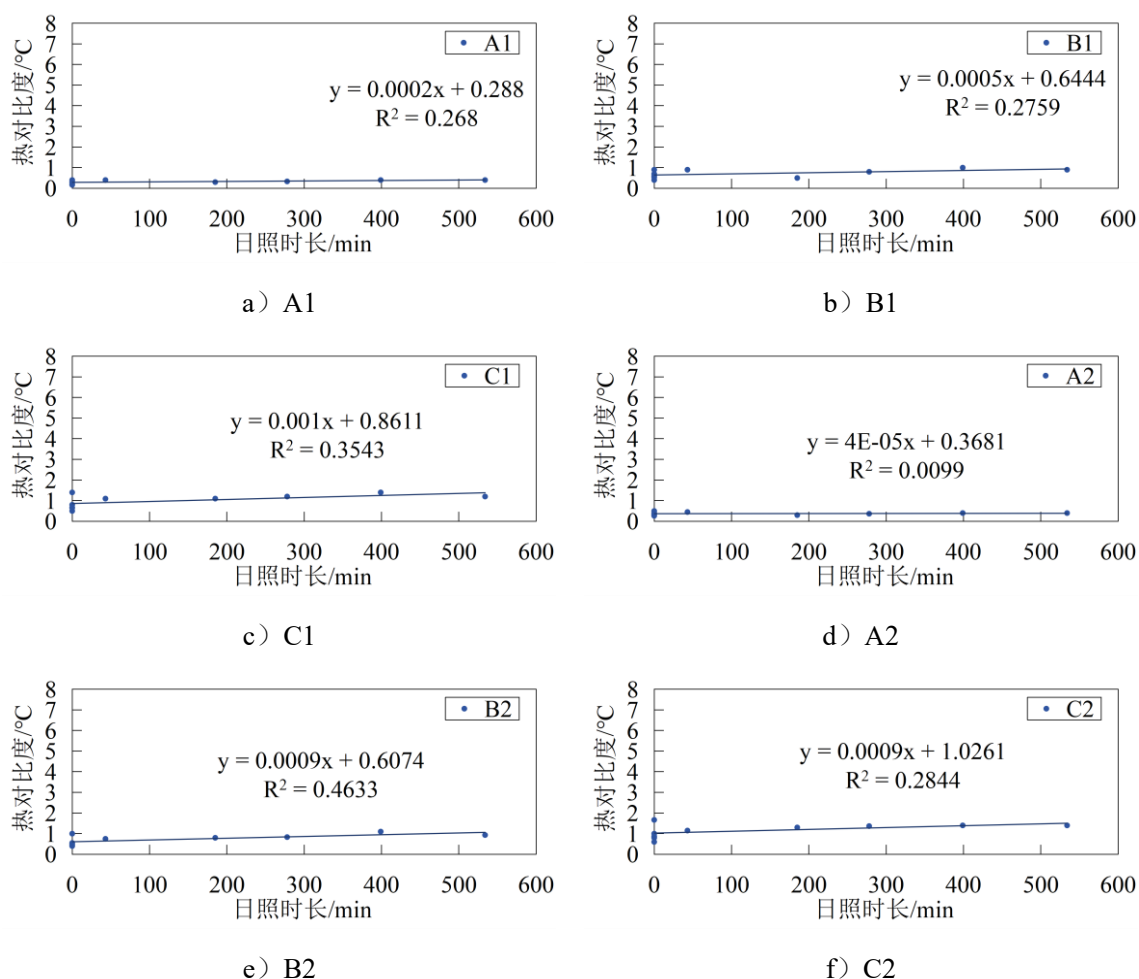


图 4.13 北面线性回归结果

《建筑红外热像检测要求》(JG/T269-2010)^[120]规定,一般外墙缺陷在晴朗天气有太阳直射条件下的温差识别阈值为 1.0°C 。结合现场实测数据,当空鼓区域温差低于 1.0°C 时,红外图像中的缺陷可识别性显著降低,如图4.14所示。故以

1.0 °C作为检测阈值，根据图 4.9~图 4.13 对各朝向墙面的检测效果进行讨论：

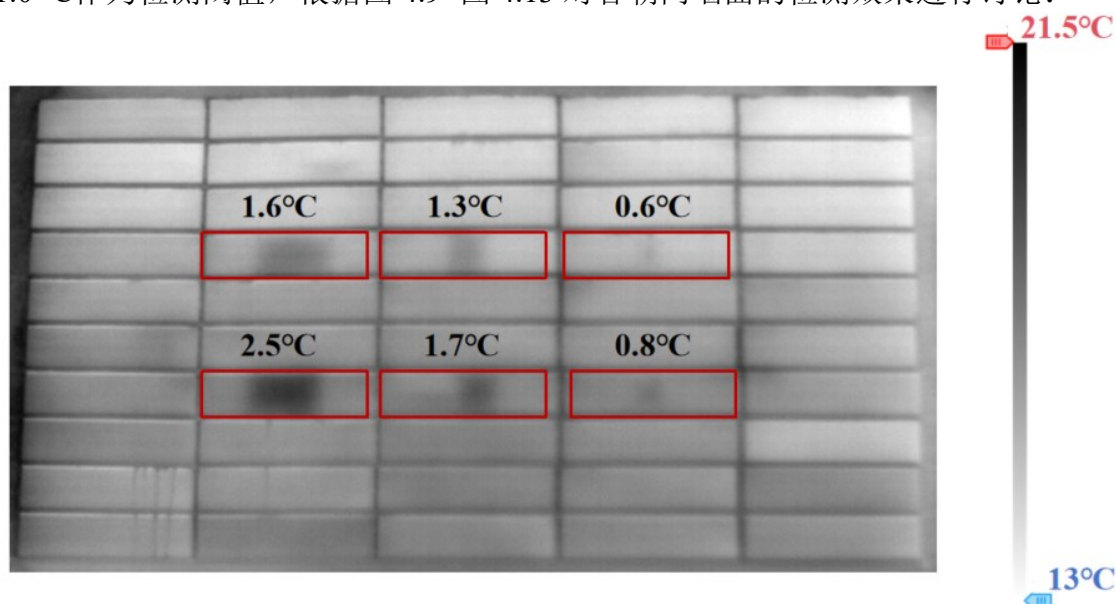


图 4.14 不同热对比度的空鼓

(1) 南向墙面

南向墙面检测效果季节性差异显著，秋冬季优于春夏季，日照时长与空鼓热对比度之间具有较好的相关性。具体而言，空鼓的最大热对比度呈现明显的谷型分布：1 月与 12 月较高，6 月达到谷值，极值差达 6.7 °C，为四个朝向中变化幅度最大。其中，A1 空鼓最大热对比度在 3~9 月期间低于 1.1 °C，检测效果较差；其余月份提升至 1.4~1.8 °C，检测效果一般。A2 空鼓最大热对比度在 4~8 月期间低于 1.1 °C，检测效果较差，其余月份均高于 1.2 °C，检测效果较好。B 类空鼓在 6 月低于 1.0 °C，检测效果较差，其余月份均高于 1.0 °C，检测效果较好。C 类空鼓全年均高于 1.0 °C，检测效果最佳。

日照时长同样呈谷型分布，以 3 月 15 日的 708 min 为最长，6 月 15 日的 292 min 为最短，极值相差 416 min。各类空鼓线性回归模型的 R^2 值介于 0.5~0.7，表明二者存在较强的线性关系。这一现象的根本原因在于第三章所揭示的太阳赤纬季节性偏移：夏季太阳直射北半球，太阳视运动轨迹偏北，南向墙面仅在正午前后短时间受到直射辐射，导致日照时长缩短、累积辐射能量减少，空鼓区域蓄热不足，热对比度随之降低；而在冬季，太阳高度角降低，太阳轨迹偏南，南向墙面可在较长时间内接受直射辐射，日照时长显著增加，墙体表面吸收的辐射能量增多，从而提高空鼓区域的温度差异。因此，对于以直射辐射为主的南向墙面而言，日照时长与接收辐射能量具有较强一致性，是主导空鼓热对比度季节变化的关键因素。

(2) 东、西向墙面

东向墙面全年检测效果最优，西向墙面除 A1 空鼓外整体检测效果良好，东、西向墙面所受日照时长与空鼓热对比度之间具有较好的相关性。具体而言，西向墙

面空鼓的最大热对比度变化幅度较小,极值差约为 1.8°C 。其中,除 A1 最小尺寸空鼓外,其余尺寸空鼓的最大热对比度均维持在 1.1°C 以上,检测效果良好。A1 空鼓热对比度在 $0.6\sim 1.2^{\circ}\text{C}$ 之间波动,部分月份低于 1.0°C 检测阈值,检测效果较差。东向墙面各尺寸空鼓全年的最大热对比度均高于 1.0°C ,检测效果整体最优。

东、西向墙面日照时长全年变化相对平缓,极值差约 106 min。线性回归模型的 R^2 值均介于 $0.5\sim 0.7$,说明东、西向墙面的日照时长与空鼓热对比度之间具有较好的相关性。其原因在于东、西向墙面分别主要在上午、下午时段接受太阳直射,日照时长直接反映了墙面接收有效辐射激励的时间长度,二者具有高度的一致性,从而使得日照时长成为热对比度的良好预测指标。

(4) 北向墙面

北向墙面仅春夏季 C 类空鼓勉强达到检测要求,整体检测效果最差,日照时长与空鼓热对比度之间的相关性较差。具体而言,北向墙面空鼓的最大热对比度变化幅度较小,极值差约 1.4°C 。其中,A、B 类空鼓最大热对比度全年均未超过 1.1°C ,检测效果较差;C 类空鼓在 3~9 月期间可达到 1.0°C 以上,最高约 2.0°C ,检测效果一般,其余月份均低于 1.0°C ,检测效果较差。

北向墙面日照时长为峰型分布,仅在 4~9 月存在日照,6 月达到峰值 534 min,极值差达 534 min。线性回归模型的 R^2 值小于 0.5,表明北向墙面的空鼓热对比度与日照时长的相关性较差,其原因在于北向墙面接收的太阳辐射以清晨和傍晚的低角度直射及散射辐射为主,辐射强度远低于其他朝向。即使在日照时长最长的夏至前后,其累积辐射能量仍不足以形成显著的空鼓温差。因此,对于以散射辐射为主的北向墙面,辐射强度而非日照时长成为主要影响因素。

上述分析表明,日照时长通过影响墙体表面的辐射能量累积过程,进而调控空鼓区域的温度响应特征。但不同朝向墙面的辐射获取机制存在显著差异:对于以直射辐射为主的南、东、西向墙面,日照时长与热对比度之间具有较好的相关性;而对于以散射辐射为主的北向墙面,辐射强度成为限制空鼓温差形成的主要因素。上述认识为优化红外热像检测时间及制定不同朝向的检测策略提供了重要依据。

4.4.4 各朝向墙面的最佳检测时段

检测时段的选择对于提高空鼓的识别精度至关重要。为直观展示检测时段对红外热成像效果的影响,选取 2025 年 6 月 6 日西向墙面在不同时刻采集的红外热像图进行对比分析,如图 4.15 所示。从图中可以明显看出,不同时刻空鼓区域的热对比度存在显著差异:在 14:30 之前,空鼓区域(尤其是 A 类空鼓)与背景的温差尚不明显,热像图中缺陷轮廓模糊;14:30~15:30,空鼓区域逐渐显现清晰的热斑特征,空鼓与周边完好区域的热对比度逐渐达到峰值;此后随着太阳辐射强度减弱,热对比度逐渐下降,至 17:00 时缺陷热对比度已呈现负值。

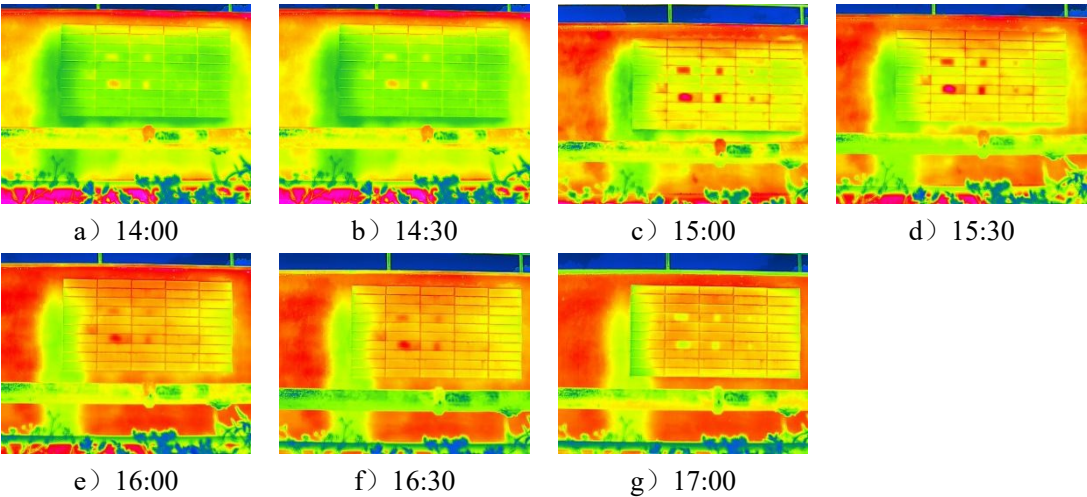


图 4.15 西向墙面不同时刻红外热像图

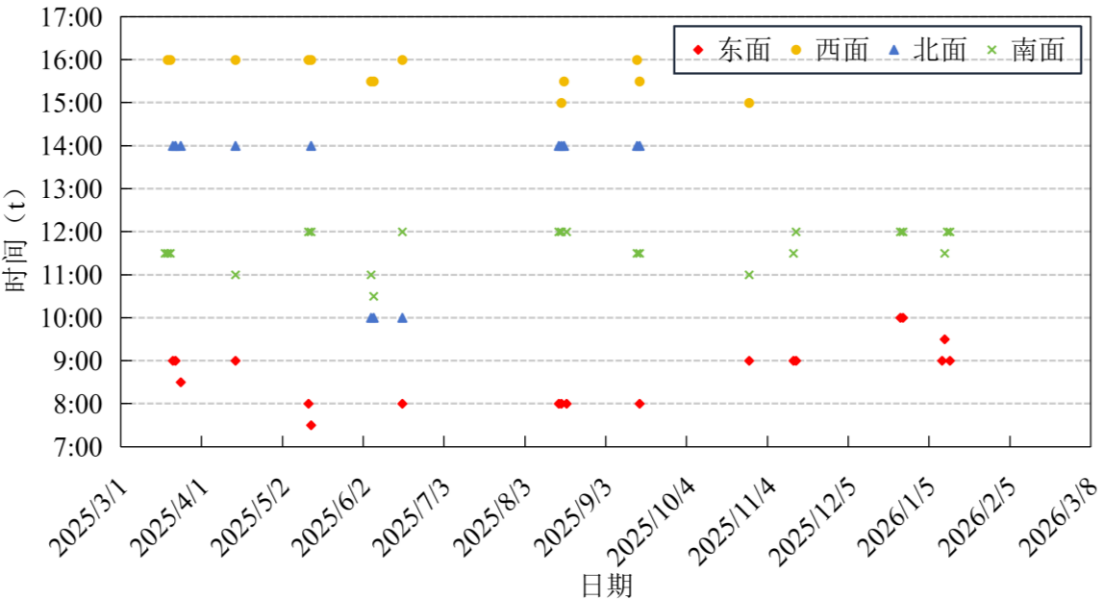


图 4.16 各朝向墙面空鼓达到最大热对比度的时刻

表 4.4 各朝向墙面的最佳检测时段

月份	最佳检测时段			
	东面	南面	西面	北面
1	9:00-9:30	11:00-12:00	—	—
3	8:30-9:00	11:00-12:00	16:00	14:00
4	9:00	11:00-12:00	16:00	14:00
5	7:30-8:00	11:00-12:00	16:00	14:00
6	8:00	11:00-12:00	15:30-16:00	10:00
8	8:00	11:00-12:00	15:00-15:30	14:00
9	8:00	11:00-12:00	15:30-16:00	14:00
10	9:00	11:00-12:00	15:00	—
11	9:00	11:00-12:00	—	—
12	10:00	11:00-12:00	—	—

注：表中“—”表示该月份无有效检测时段。

为明确各朝向墙面在实际红外检测中的最佳作业窗口，本节统计了各观测日

期中空鼓达到最大热对比度的时刻，如图 4.16 所示，并据此归纳出各朝向墙面全年的最佳检测时段，如表 4.4 所示。需要说明的是，2025 年 2 月与 7 月因故未开展数据采集，因此相关月份未列入统计分析。

由表 4.4 可见，不同朝向墙面的最佳检测时段具有明显差异，各朝向的具体规律如下。

（1）东向墙面

东向墙面的最佳检测时段随季节略有变化：1 月、12 月最晚，为 9:00~10:00，3~4 月、10~11 月略早，为 8:30~9:00，5~9 月最早，为 7:30~8:00。整体来看，其峰值时刻随季节变化呈现夏季提前、冬季推迟的规律。这一变化规律与日出时刻的季节性偏移及太阳辐射强度上升速率有关：夏季日出早，辐射强度在清晨迅速升高，空鼓区域在较短的时间内积累足够热量，热对比度峰值相应提前出现；冬季日出晚，辐射强度上升缓慢，热积累过程延长，导致峰值时刻推迟。

（2）南向墙面

南向墙面的最佳检测时段全年高度集中在 11:00~12:00，几乎不受季节影响。这一特征主要源于南向墙面的太阳辐射分布具有较强的对称性。在北半球地区，无论冬季还是夏季，南向墙面均在正午前后接收最强的直射太阳辐射。

（3）西向墙面

西向墙面的最佳检测时段集中在 15:00~16:00，几乎不受季节影响。这是因为西向墙面主要在下午时段接受太阳直射辐射。需要指出的是，2025 年 11 月至次年 1 月期间，由于西向墙面在下午时段受到周边建筑物阴影遮挡，无法获得有效热像数据，因此相应月份未给出最佳检测时段。

（4）北向墙面

北向墙面的最佳检测时段仅出现在 3~9 月，这一结果与前文日照时长分析结果基本一致。从时刻分布来看，其峰值时间具有较为特殊的特征：除 6 月为 10:00 外，其余月份均为 14:00 左右。主要原因在于北向墙面接收的辐射以清晨和傍晚的低角度直射及天空散射辐射为主，整体辐射强度显著低于其他朝向。在夏至前后（6 月），太阳高度角最大，上午时段北向墙面可获得一定的直射辐射，热对比度峰值提前至 10:00；而在其他月份，由于直射辐射较弱，墙体表面温度主要依赖于全天散射辐射的逐渐积累，因此空鼓热对比度峰值通常出现在午后约 14:00。而在 10 月至次年 1 月期间，北向墙面完全处于阴影区域，辐射强度不足，热对比度始终低于 1.0 °C 检测阈值，故不适宜开展红外检测。

综上，不同朝向墙面的最佳检测时段主要受太阳辐射入射方向、辐射强度变化以及墙体热积累过程的影响。东向墙面最佳检测时间出现在上午早期；南向墙面稳定集中在正午前后；西向墙面主要位于下午中后期；而北向墙面仅在春夏季存在有限的检测窗口。

4.5 本章小结

针对多环境因素作用下空鼓的热成像识别机理缺乏系统性试验研究的问题，本章开展了足尺、长期的饰面砖空鼓红外检测试验，系统揭示了空鼓几何参数与环境因素对红外检测效果的影响机制，明确了各朝向墙面的最佳检测时段，为长沙地区建筑外墙空鼓的日光热成像检测提供了理论依据和技术指导。主要结论如下：

（1）空鼓尺寸与热对比度呈正相关。空鼓的面积越大、厚度越大，其所能达到的最大热对比度值越高。且不同尺寸空鼓达到热对比度峰值的时刻基本一致，说明在埋深相近的前提下，检测窗口的选取无需针对不同平面尺寸进行差异化调整。

（2）太阳辐射强度是驱动空鼓热信号形成的主导因素。热对比度与辐射强度呈明显的正相关关系，热对比度峰值时刻普遍滞后于辐射强度峰值约 0.5~1.0 小时，这一滞后效应源于墙体材料的热惯性及热量传递过程的延迟特性。

（3）日照时长对热对比度的影响具有朝向依赖性。对于以直射辐射为主的南、东、西向墙面，日照时长与热对比度呈较好的线性相关关系（ R^2 介于 0.5~0.7）；对于以散射辐射为主的北向墙面，日照时长与热对比度的相关性较弱（ $R^2<0.5$ ），辐射强度成为主要制约因素。以 1.0℃为检测阈值的评价结果显示：东向墙面全年检测效果最优；西向墙面除最小尺寸空鼓外整体良好；南向墙面季节性差异显著，秋、冬季优于春、夏季；北向墙面仅春、夏季 C 类空鼓勉强达到检测要求，整体检测效果最差。

（4）各朝向墙面的最佳检测时段存在明显差异。东向墙面最佳时段出现在上午早期，随季节呈夏季提前、冬季推迟的规律；南向墙面全年稳定在 11:00~12:00；西向墙面集中于下午 15:00~16:00；北向墙面仅在 3~9 月存在有效检测窗口，除 6 月为 10:00 外，其余月份为 14:00 左右，而在 10 月至次年 1 月热对比度始终低于 1.0℃检测阈值，故不适宜开展红外检测。

第5章 基于红外图像处理的空鼓定量检测方法

5.1 引言

红外热像仪采集的原始图像受相机噪声、环境反射及砖缝热干扰等因素影响,普遍存在信噪比低、对比度不足、目标边界模糊等问题,直接影响空鼓识别的准确性与定量检测的精度。因此,如何通过有效的图像处理技术提升红外图像质量,并实现空鼓区域的精确分割与面积量化,是日光热成像检测从定性识别走向定量评估的关键环节。传统的图像处理方法在进行复杂背景下的空鼓分割时,常出现过度分割(目标区域丢失)或欠分割(残留大量背景区域)现象,导致空鼓轮廓提取不完整、边界模糊,难以实现准确的面积计算与形态评估。针对上述问题,本章基于MATLAB R2022b建立了一套完整的空鼓定量检测算法。首先通过对比多种滤波降噪与增强方法,确定红外图像的最优预处理组合;其次,提出基于条带掩膜的砖缝剔除方法;在此基础上,融合空鼓热对比度、面积及温度三重判别指标,提出邻域多阈值图像分割方法;最后,建立图像空间分辨率与物理尺寸的映射关系,实现空鼓面积的定量计算。并通过工程实例验证方法的可靠性与适用性。

5.2 图像降噪

红外图像在采集过程中,受相机固有噪声、电子元器件热噪声以及外界环境干扰等因素影响,常出现信噪比降低、图像对比度下降等问题。通过对图像进行滤波处理,可有效抑制或消除噪声,提升图像质量,从而为空鼓区域的准确识别与定量分析提供可靠的输入数据。根据处理域的不同,常见的滤波降噪方法可分为空域滤波与频域滤波两大类。

5.2.1 空域滤波

空域滤波直接在图像像素空间上进行操作,通过定义一个模板(或称窗口、核),对图像中每个像素的邻域进行特定运算,所得结果作为该像素的新值。其数学本质如式(5.1)所示:

$$g(x,y)=T[f(x,y),N(x,y)] \quad (5.1)$$

式中, $f(x,y)$ 为原始图像, $g(x,y)$ 为滤波后图像, $N(x,y)$ 表示以 (x,y) 为中心的邻域窗口, T 为定义在该邻域上的变换算子。常用的空域滤波方法主要包括均值滤波、中值滤波和高斯滤波。

(1) 均值滤波

均值滤波的基本思想是用邻域内所有像素值的算术平均值替换中心像素的原

始值^[121]。对于图像中的每个像素点 (x,y) ,选取一个固定大小的邻域窗口(如 $m \times n$),计算窗口内所有像素的灰度均值,作为该点滤波后的输出值,如式(5.2)所示:

$$g(x,y) = \frac{\sum f(x,y)}{m \times n} \quad (5.2)$$

该方法的优点是算法简单、计算速度快,对高斯噪声具有较好的抑制效果。然而,由于所有邻域像素等权参与平均,均值滤波会模糊图像的边缘和细节信息,且对椒盐噪声等孤立异常值敏感,去噪效果不理想。

(2) 中值滤波

中值滤波其核心思想是将图像中某像素点的灰度值,替换为该像素点邻域窗口内所有像素点灰度值的中位数^[121]。具体步骤为:将窗口内所有像素按灰度值排序,取排序序列的中间值作为输出,如式(5.3)所示:

$$g(x,y) = \text{median}\{f(x+i,y+j) | (i,j) \in W\} \quad (5.3)$$

式中, W 为邻域窗口。中值滤波对椒盐噪声具有极佳的抑制能力,且能在一定程度上保持图像边缘的锐度。但由于其不进行线性加权,处理高斯噪声的效果相对有限,且计算量较均值滤波稍大。

(3) 高斯滤波

高斯滤波其核心思想是:在滤波窗口中,中心像素的灰度值由其邻域内所有像素值的加权平均替代,且权重由像素到中心点的空间距离决定,距离越近,权重越大,权重的分布服从二维高斯函数^[121],权重函数如式(5.4)所示:

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (5.4)$$

式中, σ 为标准差。 σ 越大,权重分布越平坦,平滑效果越强; σ 越小,权重越集中在中心点,细节保留能力越强。高斯滤波的数学表达式如式(5.5)所示:

$$g(x,y) = \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k G(i,j) \cdot f(x+j,y+j) \quad (5.5)$$

高斯滤波具有平滑过渡自然、旋转对称性好、可通过行列分离实现快速计算等优点,在工程应用中较为广泛。但其本质上仍属于低通滤波,会损失部分高频边缘信息,且对椒盐噪声的抑制能力较弱。

5.2.2 频域滤波

频域滤波的基本思想是:将图像通过傅里叶变换转换至频域,对频谱中的不同频率分量进行增强或抑制,再经傅里叶逆变换重建空间域图像^[122]。其原理框图如图 5.1 所示。设原始图像为 $f(x,y)$,其傅里叶变换为 $F(u,v)$,频域滤波器传递函数为

$H(u,v)$, 则滤波过程如式(5.6)所示:

$$g(x,y) = F^{-1}[H(u,v) \cdot F(u,v)] \quad (5.6)$$

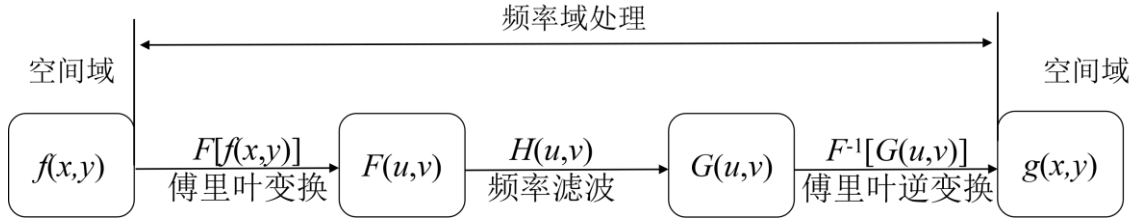


图 5.1 频域滤波原理

(1) 低通滤波

图像中的背景区域通常对应频域中的低频分量, 而边缘、细节及噪声对应高频分量。低通滤波器允许低频分量通过, 抑制高频分量, 从而实现图像平滑与噪声抑制^[122]。常用滤波器包括理想低通、巴特沃斯低通和高斯低通等。以巴特沃斯低通滤波器为例, 其传递函数如式(5.7)所示:

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + [D(u,v) / D_0]^{2n}} \quad (5.7)$$

式中, $D(u,v)$ 为频率平面原点到点 (u,v) 的距离, D_0 为截止频率, n 为滤波器阶数。巴特沃斯低通滤波器具有平滑过渡带, 可有效避免理想低通滤波器常见的振铃效应。低通滤波的优点是能有效抑制高频噪声, 缺点是会同时模糊图像边缘和细节。

(2) 高通滤波

高通滤波器保留图像的高频分量, 衰减低频分量, 从而增强边缘、线条等细节信息^[122]。以巴特沃斯高通滤波器为例, 其传递函数如式(5.8)所示:

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + [D_0 / D(u,v)]^{2n}} \quad (5.8)$$

高通滤波的优点是突出空鼓边缘和轮廓, 提升缺陷的可识别性; 缺点是会同时放大噪声, 导致信噪比下降, 且参数选择不当可能产生过冲或振铃伪影。

(3) 同态滤波

同态滤波是一种用于处理由光照不均和乘性噪声引起的图像退化问题的频域滤波方法, 基于图像的物理成像模型, 在频率域中同时实现动态范围压缩和对比度增强, 特别适用于校正光照不均匀问题^[122], 算法流程如图 5.2 所示。

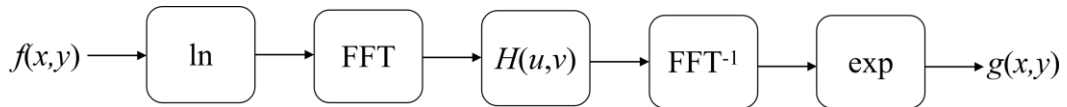


图 5.2 同态滤波

该模型将图像 $f(x,y)$ 表示为照度分量 $i(x,y)$ 与反射分量 $r(x,y)$ 的乘积, 如式(5.9)所示:

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (5.9)$$

照度分量通常变化缓慢，属于低频；反射分量反映物体细节，属于高频。同态滤波通过对数运算将乘性模型转化为加性模型，如式(5.10)所示：

$$\ln f(x, y) = \ln i(x, y) + \ln r(x, y) \quad (5.10)$$

对对数图像进行傅里叶变换后，设计滤波器 $H(u, v)$ 分别对照度（低频）和反射（高频）进行压缩和增强，其传递函数如式(5.11)所示：

$$H(u, v) = (r_H - r_L) \left[1 - \exp\left(\frac{-k \cdot D(u, v)}{D_0}\right)^{2n} \right] + r_L \quad (5.11)$$

式中， r_H 、 r_L 分别表示低频、高频增益； k 为锐化强度常数。经滤波后的频谱再经逆傅里叶变换和指数运算，得到增强后的图像，如式(5.12)所示：

$$g(x, y) = \exp\left[F^{-1}\left(H(u, v) \cdot F(\ln f(x, y))\right)\right] \quad (5.12)$$

同态滤波的优点在于能够有效校正光照不均，增强图像细节；其缺点在于计算复杂度较高，滤波器参数（ r_H 、 r_L 、 D_0 ）需根据图像特性人工调整，适应性有限。

5.2.2.3 滤波效果对比评价

以湖南大学风工程试验研究中心楼顶南面墙于 2025 年 1 月 12 日 12:00 采集的红外图像为例，采用上述滤波方法进行处理，结果如图 5.3 所示。通过视觉对比可初步观察各方法的处理效果：中值滤波能有效去除椒盐噪声，但空鼓边缘出现一定程度的钝化，细节清晰度有所下降。均值滤波对高斯噪声有一定的平滑作用，但图像整体变得模糊，空鼓轮廓明显弱化。高斯滤波在平滑背景噪声的同时较好地保留了图像的整体结构，但对高频细节仍有削弱。高通滤波显著增强了边缘信息，空鼓轮廓更加突出，但背景噪声也被同步放大；低通滤波有效抑制了噪声，但图像边缘模糊程度较大，缺陷边界不易分辨。同态滤波在去除光照不均影响的同时增强了局部对比度，图像整体清晰度最高，空鼓区域与背景的差异最为明显。

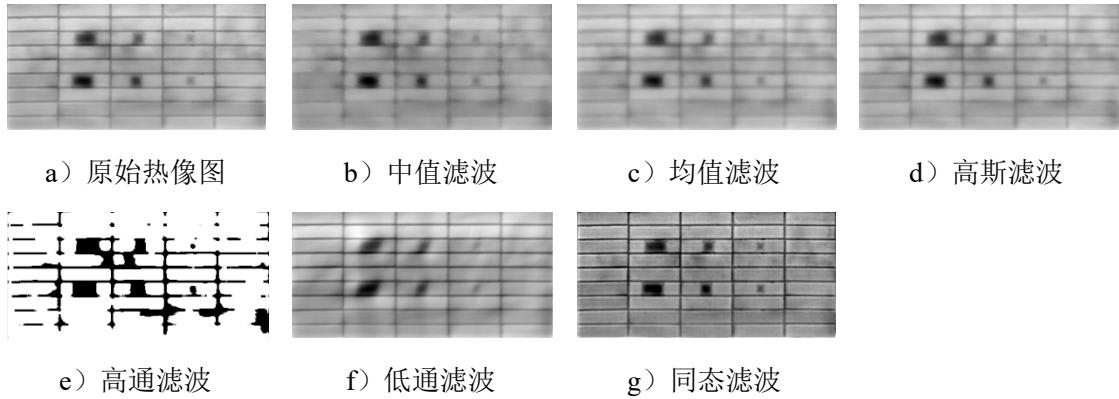


图 5.3 不同滤波方法降噪效果

为了科学、定量地评价上述方法的处理效果，本文使用对比度提升指数

(Contrast Improvement Index, CII) 作为评价指标^[123], 以衡量不同方法对图像对比度的影响, 如式(5.13)所示:

$$CII = \frac{C_p}{C_o} \quad (5.13)$$

式中 C_p 和 C_o 分别为处理前后图像的对比度。图像对比度 C 的计算公式如式(5.14)所示:

$$C = \frac{C_{mfg} - C_{mbg}}{C_{mfg} + C_{mbg}} \quad (5.14)$$

式中, C_{mfg} 和 C_{mbg} 分别代表图像中目标和背景区域的平均灰度值。 CII 值越高, 降噪效果越显著。

计算结果如表 5.1 所示。同态滤波的 CII 值最高, 达到 1.381, 是唯一使对比度提升超过原始图像的方法 ($CII > 1$)。这一结果表明, 同态滤波通过压缩照度分量、增强反射分量, 有效校正了红外图像中常见的光照不均现象, 显著提升了空鼓区域与背景之间的对比度, 视觉效果与定量评价结果高度一致。

表 5.1 不同滤波方法的 CII

领域		空域			频域	
方法	中值滤波	均值滤波	高斯滤波	高通滤波	低通滤波	同态滤波
CII	0.8876	0.8926	0.9130	0.8085	0.6344	1.381

5.3 图像增强

在进行降噪处理后, 图像仍会存在对比度低、边缘模糊等问题, 图像增强旨在通过特定变换改善图像的视觉效果, 突出目标与背景的差异, 为后续处理提供更高质量的输入。基于直方图变换的增强方法因其原理简单、效果显著而得到广泛应用。本节重点介绍三种常用的直方图增强方法: 直方图均衡化、自适应直方图均衡化及对比度受限自适应直方图均衡化。

(1) 直方图均衡化

直方图均衡化 (Histogram Equalization, HE) 是一种通过调整图像灰度分布来增强全局对比度的方法。其核心思想是将原始图像的灰度直方图从集中分布变换为近似均匀分布, 使得像素灰度在整个动态范围内尽可能均匀分布, 从而增强图像的整体对比度^[124]。该方法基于概率论中的累积分布函数变换, 对于灰度级范围 $[0, L-1]$ 的图像, 其变换函数如式(5.15)所示:

$$s_k = T(r_k) = (L-1) \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \frac{L-1}{N} \sum_{j=0}^k n_j \quad (k = 0, 1, \dots, L-1) \quad (5.15)$$

式中, r_k 为原始图像的第 k 个灰度级, s_k 为变换后的灰度级, $p_r(r_j)$ 为灰度级 r_j 的概率密度函数, N 为图像总像素数, n_j 为灰度级 r_j 的像素个数。该变换将原始图像的灰度级映射到整个动态范围, 使输出图像的直方图趋于平坦。

HE 的优点是算法简单、计算效率高, 能够有效扩展图像的动态范围, 显著提升整体对比度, 对于灰度分布集中、整体偏暗或偏亮的图像改善效果明显。其局限性在于全局变换无法适应局部灰度分布差异, 可能导致局部细节过增强或丢失, 同时可能放大背景噪声。

(2) 自适应直方图均衡化

自适应直方图均衡化 (Adaptive Histogram Equalization, AHE) 是对全局直方图均衡化的改进, 旨在解决其无法适应局部灰度分布的问题。该方法将图像划分为若干矩形子块, 对每个子块独立进行直方图均衡化处理, 然后通过双线性插值消除块间边界效应^[124]。设图像被划分为 $M \times N$ 个子块, 对于每个子块, 其灰度变换函数由该子块的累积分布函数确定, 如式(5.16)所示:

$$s_k^{(m,n)} = \frac{L-1}{N_{m,n}} \sum_{j=0}^k n_j^{(m,n)} \quad (5.16)$$

式中, $N_{m,n}$ 子块 (m,n) 的像素总数, $n_j^{(m,n)}$ 为该子块中灰度级 j 的像素个数。对于位于子块内部的像素, 直接使用该子块的变换函数; 对于边界附近的像素, 则通过相邻子块变换函数的插值得到最终灰度值。

AHE 能够适应图像局部灰度分布, 增强局部细节, 对光照不均匀的图像具有较好的处理效果, 可显著提升暗区和亮区的细节可见度。然而, 该方法在图像灰度均匀的区域可能过度增强噪声, 产生伪影; 计算量较大, 处理速度较慢; 对于对比度本身较高的区域, 可能出现过度增强现象。

(3) 对比度受限自适应直方图均衡化

对比度受限自适应直方图均衡化 (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE) 是针对 AHE 过度增强噪声问题的改进方法。该算法在 AHE 的基础上引入了对比度限制机制, 通过裁剪直方图峰值来限制每个子块内的最大增益, 从而抑制噪声放大^[125]。其算法流程如图 5.4 所示:

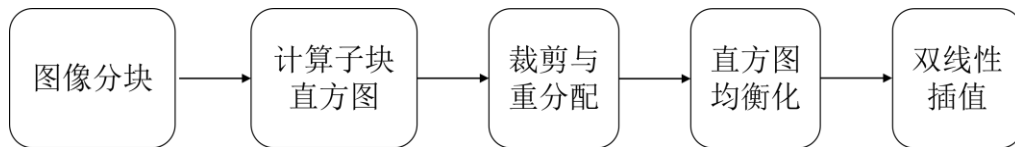


图 5.4 CLAHE

- ① 将图像划分为若干子块, 计算每个子块的直方图;
- ② 设定对比度限制阈值 T (通常取直方图平均高度的 α 倍, α 为限制系数, 一般取 2~4);

③ 对直方图中超过阈值 T 的部分进行裁剪，将裁剪下来的像素均匀重新分配到整个灰度范围内，得到修正后的直方图；

④ 对修正后的直方图进行均衡化处理，得到子块变换函数；

⑤ 通过双线性插值计算各像素的最终灰度值。

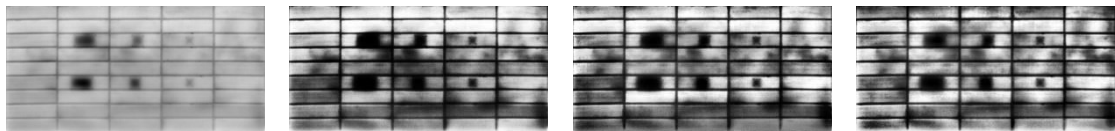
裁剪后的直方图满足式(5.17)：

$$h'(g) = \begin{cases} T, & h(g) \geq T \\ h(g), & h(g) < T \end{cases} \quad (5.17)$$

被裁剪的像素总数 $N_c = \sum_{h(g) > T} [h(g) - T]$ 被均匀分配到所有灰度级，即每个灰度级增加 $\Delta = N_c / L$ 。

CLAHE 在增强局部对比度的同时有效抑制噪声放大，避免过度增强；能够更好地保持图像的自然观感，减少伪影；参数可调，适应性强，可根据不同应用需求调整对比度限制程度。但其参数需根据图像特性人工调优，计算复杂度较高，处理速度较慢。

上述三种方法对红外热像图的处理结果如图 5.5 所示。HE 处理整体对比度得到明显提升，灰度范围被有效拉伸，空鼓区域变得更加突出。然而，部分背景区域的细节被过度增强，导致噪声有所放大，图像出现轻微的不自然感。AHE 处理进一步改善了局部细节的可见度，空鼓边缘更加清晰，背景中的纹理信息也得到了增强。但可以观察到，在灰度均匀的区域出现了明显的噪声放大现象，部分区域产生伪影，影响了图像的整体质量。CLAHE 处理在增强对比度的同时有效控制了噪声水平。空鼓区域的轮廓清晰锐利，背景噪声得到有效抑制，整体视觉效果最为自然。这表明 CLAHE 在增强细节与抑制噪声之间取得了更好的平衡。



a) 原始热像图

b) HE

c) AHE

d) CLAHE

图 5.5 不同方法的增强效果

为了科学、定量地评价上述方法的处理效果，本文使用 *EME* (Enhancement Measure Evaluation) 作为评价指标^[126]，该指标通过分析图像子块的局部对比度来量化增强效果，如式(5.18)所示：

$$EME = \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{l=1}^{k_2} \sum_{k=1}^{k_1} 20 \log \frac{I_{\max, k, l}^W}{I_{\min, k, l+c}^W} \quad (5.18)$$

式中，对于一幅划分为 $k_1 \times k_2$ 个非重叠子块的图像： c 为极小常数，用于避免分母为零； $I_{\max, k, l}^W$ 和 $I_{\min, k, l}^W$ 分别表示第 (k, l) 个子块中的最大和最小灰度值。 EME 值越高，增强效果越显著。

计算结果如表 5.2 所示。CLAHE 的 EME 值最高（5.5740），表明该方法在增强局部对比度方面效果最佳，这与视觉效果一致。AHE 的 EME 值（5.4599）略低于 CLAHE，说明 AHE 虽能有效增强局部对比度，但由于噪声放大和伪影问题，局部对比度的提升效果略逊于 CLAHE。HE 的 EME 值最低（4.6158），表明全局对比度增强对局部细节的提升有限。对于存在光照不均或局部灰度差异较大的红外图像，全局处理方法难以充分展现空鼓区域的细微特征。

综合视觉评价与 EME 定量指标，CLAHE 在本研究的红外空鼓图像增强中表现最优。该方法能够在有效提升空鼓区域对比度的同时抑制背景噪声，为后续的空鼓分割与定量分析提供了高质量的图像基础。

表 5.2 不同方法的 EME

	HE	AHE	CLAHE
EME	4.6158	5.4599	5.5740

5.4 砖缝剔除

外墙饰面砖在日间太阳辐射作用下，由于砖缝区域材料导热系数、发射率与砖体存在差异，且砖缝易形成局部热桥效应，其表面温度常高于周围砖体，在红外热图像中呈现出与空鼓相似的局部高温特征。若不加以处理，砖缝的热异常将严重干扰空鼓缺陷的准确识别。因此，在完成图像降噪与增强后，需对砖缝区域进行有效剔除，以消除其对后续分割与定量分析的干扰。

建筑外墙饰面砖通常采用规则排列，砖缝在图像中呈现为纵横交错的网格状分布，具有明确的几何规律性。基于这一特性，可采用条带掩膜法对砖缝进行定位与剔除。该方法通过生成与砖缝位置相匹配的竖向和横向条带掩膜，将砖缝区域标记为待剔除区域，在后续处理中予以排除，从而避免砖缝热异常对空鼓识别的干扰。

设红外图像大小为 $M \times N$ 像素，砖缝在水平方向上的间距为 d_h （像素），在竖直方向上的间距为 d_v （像素），砖缝宽度为 w （像素）。则竖向条带掩膜 M_v 的定义如式(5.19)所示：

$$M_v(x, y) = \begin{cases} 1, & \exists k \in Z, |x - k \cdot d_v| \leq \frac{w}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.19)$$

横向条带掩膜 M_h 的定义如式(5.20)所示：

$$M_h(x, y) = \begin{cases} 1, & \exists k \in Z, |y - k \cdot d_h| \leq \frac{w}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.20)$$

最终的砖缝掩膜 M 为两者的并集，如式(5.21)所示：

$$M(x, y) = M_v(x, y) \cup M_h(x, y) \quad (5.21)$$

处理结果如图 5.6 所示，通过纵横交错的砖缝掩膜将图像划分为多个子区域，便于后续对子区域进行图像分割。

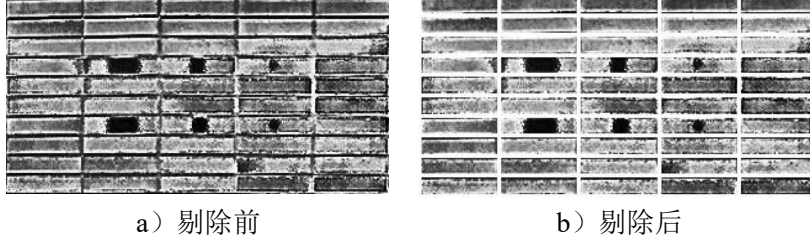


图 5.6 砖缝剔除前后对比

5.5 图像分割

图像分割的主要目的是将图像中的目标从背景中分离出来，以便于后续的分析、处理或识别。经过前述降噪、增强及砖缝剔除等预处理后，红外图像中空鼓区域与背景的对比度得到显著提升，但如何准确分离二者仍是后续定量分析的前提。本节首先介绍了三种经典的图像分割方法，包括大津法、迭代法及 Canny 边缘检测，并将其与本文提出的基于邻域多阈值的图像分割方法进行对比分析。

5.5.1 大津法

大津法 (Otsu's Method) 是一种全局自适应阈值分割方法，其核心在于遍历全部候选灰度阈值，将图像划分为前景 (目标) 与背景两类，并选取使两类间方差最大的阈值作为最佳分割阈值。该方法假设图像的灰度直方图呈双峰分布，且目标与背景的灰度存在一定差异^[127]。设图像灰度级范围为 $[0, L-1]$ ，总像素数为 N 。对于任一灰度阈值 $t \in [0, L-1]$ ，将图像像素分为两类： C_0 (灰度值 $\leq t$) 和 C_1 (灰度值 $> t$)。两类出现的概率如式(5.22)、式(5.23)所示：

$$\omega_0(t) = \sum_{i=0}^t p_i \quad (5.22)$$

$$\omega_1(t) = \sum_{i=t+1}^{L-1} p_i \quad (5.23)$$

式中， $p_i = n_i/N$ ， n_i 为灰度级 i 的像素个数。两类对应的灰度均值如式(5.24)、式(5.25)所示：

$$\mu_0(t) = \frac{\sum_{i=0}^t i p_i}{\omega_0(t)} \quad (5.24)$$

$$\mu_1(t) = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} ip_i}{\omega_1(t)} \quad (5.25)$$

图像的整体灰度均值计算如式(5.26)所示:

$$\mu = \omega_0(t)\mu_0(t) + \omega_1(t)\mu_1(t) \quad (5.26)$$

类间方差计算如式(5.27)所示:

$$\sigma_B^2(t) = \omega_0(t)[\mu_0(t) - \mu]^2 + \omega_1(t)[\mu_1(t) - \mu]^2 \quad (5.27)$$

最佳阈值 t^* 即为使类间方差最大的灰度值, 如式(5.28)所示:

$$t^* = \arg \max_{0 \leq t \leq L-1} \sigma_B^2(t) \quad (5.28)$$

大津法原理简洁, 计算效率高, 无需预先设定参数, 适用于直方图呈双峰分布的图像。然而, 当目标与背景灰度分布重叠严重或光照不均匀时, 全局阈值往往难以取得理想的分割效果。

5.5.2 迭代法

迭代法 (Iterative Thresholding Method) 是一种基于逼近思想的自适应阈值选取方法, 通过反复迭代逐步逼近最优阈值^[128]。该方法不依赖直方图的特定分布, 具有较强的鲁棒性。迭代法的基本流程如下:

(1) 选取初始阈值 T_0 。通常取图像灰度均值, 如式(5.29)所示:

$$T_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(i) \quad (5.29)$$

式中, $I(i)$ 为像素灰度值, N 为总像素数。

(2) 根据当前阈值 T_k 将图像分为前景 G_1 与背景 G_2 两类, 如式(5.30)、式(5.31)所示:

$$G_1 = \{I(i) | I(i) > T_k\} \quad (5.30)$$

$$G_2 = \{I(i) | I(i) \leq T_k\} \quad (5.31)$$

(3) 分别计算两类的灰度均值, 如式(5.32)、式(5.33)所示:

$$\mu_1 = \frac{1}{|G_1|} \sum_{I \in G_1} I \quad (5.32)$$

$$\mu_2 = \frac{1}{|G_2|} \sum_{I \in G_2} I \quad (5.33)$$

(4) 更新阈值为两均值的平均值, 如式(5.34)所示:

$$T_{k+1} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} \quad (5.34)$$

(5) 重复步骤(2)~(4)，直到阈值变化小于预设精度 ε ，如式(5.35)所示：

$$|T_{k+1} - T_k| < \varepsilon \quad (5.35)$$

此时 T_{k+1} 即为最终分割阈值。迭代法能够根据图像灰度分布动态调整阈值，对光照变化具有一定的适应性。但其收敛速度与初始阈值选择有关，且对噪声较为敏感；当目标与背景灰度差异不明显时，迭代过程可能无法收敛至理想阈值。

5.5.3 Canny 边缘检测

Canny 边缘检测是一种基于梯度算子的多阶段边缘提取方法。该方法以信噪比准则、定位精度准则和单边缘响应准则为优化目标，能够有效抑制噪声并提取连续、准确的边缘轮廓^[129]。其算法流程主要包括以下四个步骤：

(1) 高斯滤波平滑

为抑制图像噪声对梯度计算的影响，首先采用高斯滤波器对原始图像进行平滑。二维高斯函数见式(5.4)。平滑后的图像如式(5.36)所示：

$$I_s(x, y) = I(x, y) * G(x, y) \quad (5.36)$$

式中， σ 为标准差，控制平滑程度；*表示卷积运算。

(2) 梯度幅值与方向计算

采用一阶微分算子（如 Sobel 算子）计算平滑后图像在水平方向与垂直方向的梯度分量，如式(5.37)、式(5.38)所示：

$$G_x = \frac{\partial I_s}{\partial x} \quad (5.37)$$

$$G_y = \frac{\partial I_s}{\partial y} \quad (5.38)$$

梯度幅值 $M(x, y)$ 与方向 $\theta(x, y)$ 的计算分别如式(5.39)、如式(5.40)所示：

$$M(x, y) = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5.39)$$

$$\theta(x, y) = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (5.40)$$

(3) 非极大值抑制

在梯度幅值图像上，沿梯度方向进行非极大值抑制，以细化边缘。针对每一像素点，沿梯度方向取前后两个邻域像素，并将该点的梯度幅值与二者逐一比较，若该点幅值非最大，则将其置为零，从而消除边缘的“拖尾”现象，得到候选边缘像素。

（4）双阈值边缘连接

设定高阈值 T_{high} 与低阈值 T_{low} （通常 $T_{\text{high}}=2\sim 3 T_{\text{low}}$ ）。将梯度幅值高于 T_{high} 的像素标记为强边缘，低于 T_{low} 的像素直接剔除，介于两者之间的像素标记为弱边缘。通过邻域连接，将与强边缘相连的弱边缘保留，形成完整的边缘轮廓。

Canny 边缘检测能够有效抑制噪声并提取连续、准确的边缘，常用于缺陷边界的定位。然而，该方法对于边缘闭合性要求较高，当空鼓区域与背景对比度不足或边缘存在断裂时，难以形成完整的闭合轮廓；此外，双阈值参数的选取需人工调整，对检测结果影响较大。

5.5.4 基于邻域多阈值的图像分割方法

本文从空鼓的物理特征出发，结合空鼓的热对比度、面积及温度三个判别指标，提出了一种基于邻域多阈值的图像分割方法。该方法的算法流程如图 5.7 所示，具体步骤如下。

（1）子区域划分与邻域矩阵构建

对预处理后的图像进行子区域划分（各子区域尺寸由砖缝掩膜确定），对于任一子区域中的像素点 (i, j) ，以其为中心构建一个 $(2n-1)\times(2n-1)$ 邻域矩阵，采集该矩阵内所有像素点的灰度值，形成灰度值集合。

（2）设定空鼓点判定条件

若像素点 (i, j) 的邻域矩阵同时满足以下三个条件，则判定该像素点为空鼓点；否则，判定为非空鼓点：

①热对比度条件。如式(5.41)所示：

$$I_{(i,j)} - I_{\min} \geq x \quad (5.41)$$

式中， $I_{(i,j)}$ 为像素点 (i, j) 的灰度值， $I_{\min}$ 为该点邻域矩阵内的灰度最小值， x 为灰度差阈值。该条件确保空鼓区域与局部背景之间存在足够的热对比度。

②面积条件。在像素点 (i, j) 的邻域矩阵内，满足灰度差 $\geq x$ 的像素点数量 N 应不小于面积阈值 y ，如式(5.42)、式(5.43)所示：

$$N \geq y \quad (5.42)$$

$$y = n \times n = \frac{a^2 \cdot L \cdot B}{l \cdot b} \quad (5.43)$$

式中， L 、 B 分别表示检测区域的像素长度和宽度； l 、 b 分别表示检测区域的实际长度和宽度； $a \times a$ 是指需要识别出的最小空鼓实际面积，根据项目检测要求进行设定； $n \times n$ 为最小空鼓的像素尺寸。

③绝对温度条件。如式(5.44)所示：

$$I_{(i,j)} \geq z \quad (5.44)$$

式中, z 为灰度阈值, 对应实际温度。确保所识别区域具有足够的热响应强度。

(3) 确定邻域矩阵尺寸

在实际工程中, 空鼓形态往往不规则, 可将其近似分解为若干正方形区域与边缘不规则区域的组合。由于正方形区域的面积通常远大于残余的不规则区域, 因此以前者表征空鼓面积可在兼顾计算简便性的同时, 较真实地反映实际缺陷规模, 一般也能满足工程检测的精度要求。基于此, 本研究将识别此类正方形空鼓作为主要目标。若检测项目所要求的最小空鼓对应像素尺寸为 $n \times n$, 则应识别出所有尺寸不小于该阈值的正方形空鼓。为保证正方形 $n \times n$ 中的每个像素 (i, j) 都能被判定为空鼓点, 则要求正方形内任意像素点对应的邻域矩阵, 能完全包含该 $n \times n$ 区域 (即满足第 (2) 步所述的第二个判定条件)。同时, 为提高计算效率, 应尽可能减小矩阵尺寸, 故最终的邻域矩阵尺寸为 $(2n-1) \times (2n-1)$, 如图 5.8 所示。

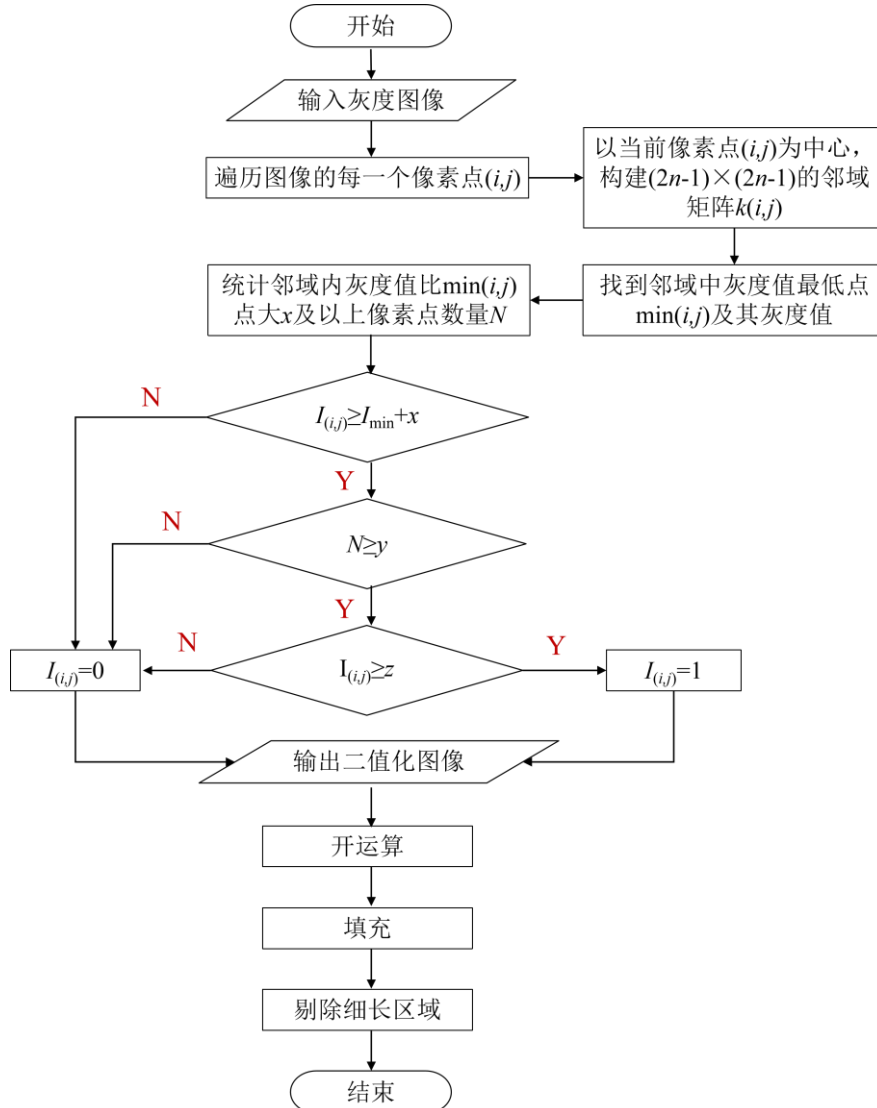
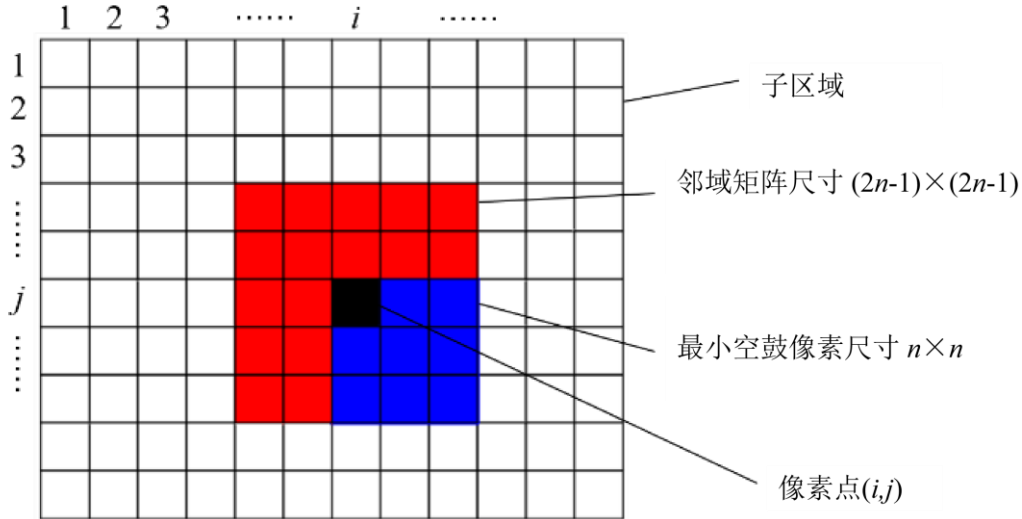


图 5.7 基于邻域多阈值的图像分割方法

图 5.8 像素点 (i, j) 的邻域矩阵

(4) 二值化处理

在处理完所有子区域后，将检测出的空鼓点像素值都赋值为 1，其余像素则赋值为 0，生成初步的二值化图像。

(5) 后处理优化

为消除孤立噪声点及非典型缺陷区域的干扰，对初步二值化图像进行后处理：剔除面积小于阈值 ε 的小面积噪声区域，对孔洞区域进行填充，剔除细长条状区域（其长宽比超过设定阈值 η ）。最终得到空鼓区域的二值化图像，用于后续的面积计算。

本节提出的基于邻域多阈值的图像分割方法，从空鼓缺陷的物理本质出发，融合热对比度、面积及绝对温度三重判别指标，在子区域尺度上通过邻域矩阵进行逐像素判定。该方法充分考虑了红外图像中空鼓区域的局部热响应特征，能够有效排除砖缝、背景噪声及非典型热异常的干扰，实现空鼓轮廓的精确提取。与传统的全局阈值分割或单一特征边缘检测方法相比，本文方法在复杂背景下的分割完整性与鲁棒性方面具有明显优势，为后续空鼓面积的定量计算提供了高质量的二值化输入。

5.5.5 分割结果对比

为验证本文提出的基于邻域多阈值的图像分割方法的有效性与优越性，选取了试验数据中南、北、东、西四个朝向墙面的红外图像作为测试样本，处理流程如图 5.9 所示，各阶段处理结果如表 5.3 所示。

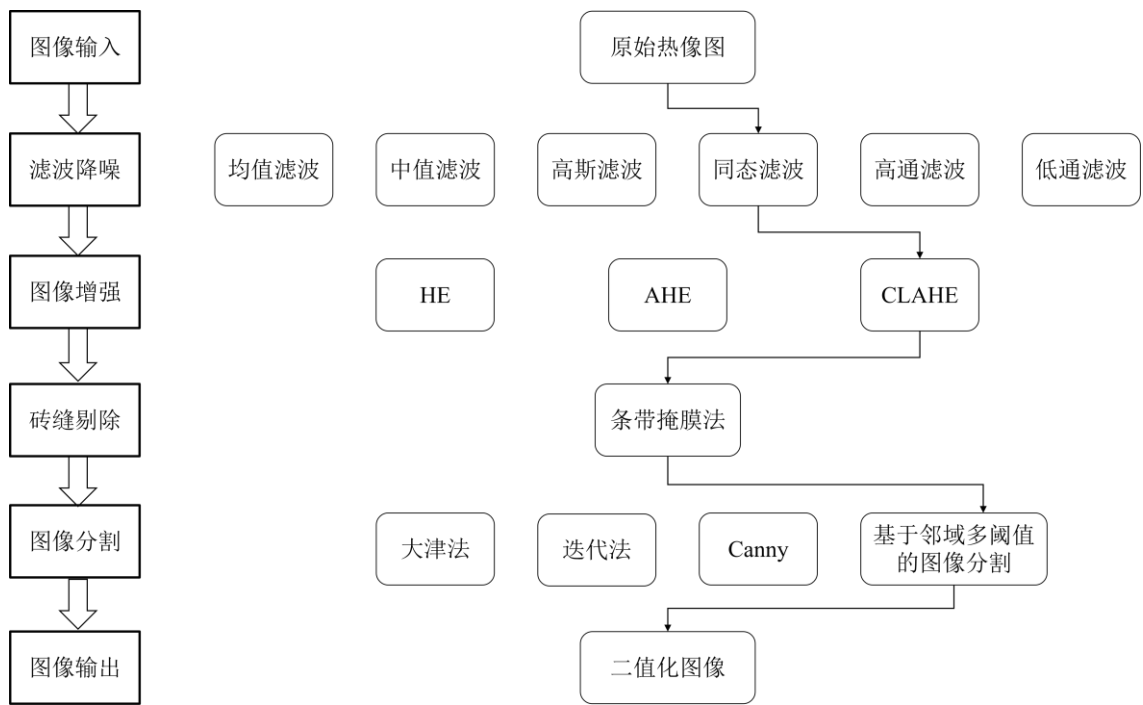


图 5.9 红外图像处理流程
表 5.3 各阶段处理结果

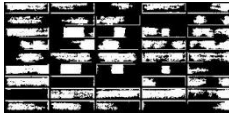
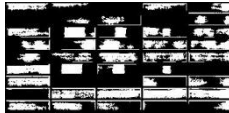
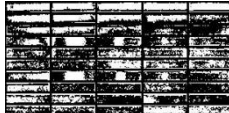
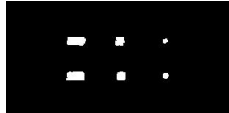
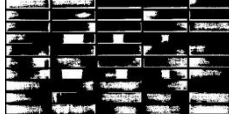
	原始热像图	同态滤波	CLAHE	剔除砖缝	基于邻域多阈值的图像分割
南面					
北面					
东面					
西面					

由表 5.3 可见，经过同态滤波处理后，原始图像中光照不均的问题得到有效改善，整体对比度显著提升；CLAHE 进一步增强了空鼓区域与背景的局部对比度，使空鼓轮廓更加清晰；砖缝剔除步骤有效消除了因砖缝热桥效应产生的伪目标干扰，为后续子区域分割提供了干净的图像背景。最终，基于邻域多阈值的图像分割方法能够准确提取空鼓区域的完整轮廓，同时最大程度地减少了对背景区域的错误分割。需要指出的是，在南、东、西三面的结果中可以看到除了预埋的 6 处空鼓外，还出现了少量额外的分割区域。经现场核查与分析，其原因主要有以下两点：一是在试件制作过程中，因人工粘贴瓷砖操作误差，部分区域未能达到满粘状态，形成了意料之外的空鼓；二是图像边缘处受边界热流扰动影响，产生局部异常高温

区域,导致误分割。上述额外区域虽非预埋缺陷,但其本身符合空鼓的热响应特征,故分割结果仍反映了实际物理状况。

为验证本文方法的有效性,将本文方法与 Canny 边缘检测算子、大津法、迭代法等传统图像分割方法进行对比,结果如表 5.4 所示。传统阈值分割方法(如大津法、迭代法)仅依赖图像的全局灰度统计特征寻找分割阈值,本质上是一种纯数学驱动策略。当目标和背景的灰度分布严重交叠时,任何全局阈值都只能得到一个在数学上“最优”的折中结果,物理上却不可避免地将部分目标像素划归背景、或将背景像素划归目标,导致欠分割与过分割同时存在。从对比结果可以看出,大津法和迭代法虽能较完整地分割出空鼓区域,但结果中包含大量背景噪声;而 Canny 边缘检测算子则难以形成闭合轮廓,分割结果呈破碎线段,无法完整表征空鼓区域,同时砖缝边缘也被大量检出,造成严重的误分割。相比之下,本文提出的邻域多阈值方法从空鼓的传热物理本质出发,将热对比度、面积及绝对温度三重物理判据嵌入逐像素判定逻辑中,在局部邻域内进行差异化判别,天然规避了全局阈值难以处理的非均匀背景干扰。结果表明,该方法能够准确提取各朝向墙面空鼓区域的完整轮廓,同时显著降低对背景区域的误分割,实现了从“数学分割”到“物理分割”的跨越,为后续空鼓面积计算提供了高质量的输入。

表 5.4 不同分割方法结果对比

	Canny	大津法	迭代法	本文方法
南面				
北面				
东面				
西面				

5.6 定量检测

图像分割完成后,空鼓区域在二值图像中以像素集合的形式呈现,需建立图像坐标与物理坐标之间的映射关系,进而实现空鼓面积的定量计算。步骤如下:

- (1) 计算相机的空间分辨率 δ , 如式(5.45)所示:

$$\delta = \frac{l}{L} \quad (5.45)$$

式中， l 、 L 分别表示检测区域的实际宽度和像素宽度。

(2) 计算缺陷面积 $S_{\text{estimated}}$ ，如式(5.46)所示：

$$S_{\text{estimated}} = N_i \cdot \delta^2 \quad (5.46)$$

式中， N_i 表示缺陷区域的像素数。

(3) 为评价定量检测的准确性，引入相对误差 E_r ，如式(5.47)所示：

$$E_r = \frac{S_{\text{estimated}} - S_{\text{real}}}{S_{\text{real}}} \times 100\% \quad (5.47)$$

式中， S_{real} 为缺陷实际面积。

统计本文方法分割出的各空鼓区域的像素数 N_i ，代入式(5.45)~(5.47)中进行计算，结果如表 5.5 所示。对于 A1 类空鼓（面积 9 cm²，厚度 2 mm），四个朝向的平均相对误差绝对值高达 43%，检测精度显著低于其他尺寸空鼓。相比之下，B1、C1、A2、B2、C2 类空鼓的平均误差控制在 10%~18%之间，检测精度明显提升。对比同面积、不同厚度的空鼓（A1 与 A2、B1 与 B2、C1 与 C2），可以发现空鼓厚度增加有利于提高检测精度。以面积 9 cm²的空鼓为例，厚度 2 mm 的 A1 平均误差为 43%，厚度 5 mm 的 A2 平均误差降至 13%。这一现象符合传热机理：厚度较大的空鼓具有更高的热阻，在日间加热过程中可形成更显著的温度积累效应，从而在热图像中呈现更为清晰、稳定的热对比度，有利于分割算法准确界定其边界。

表 5.5 空鼓的相对误差表

空鼓编号		A1	B1	C1	A2	B2	C2
实际面积(cm ²)		9	25	50	9	25	50
厚度(mm)		2	2	2	5	5	5
南面	缺陷面积(cm ²)	5	20	37	8	24	52
	相对误差(%)	-41	-21	-26	-10	-6	4
北面	缺陷面积(cm ²)	6	22	44	9	21	45
	相对误差(%)	-32	-14	-13	-2	-15	-10
东面	缺陷面积(cm ²)	4	24	46	9	26	52
	相对误差(%)	-56	-6	-8	5	6	4
西面	缺陷面积(cm ²)	5	21	38	12	28	62
	相对误差(%)	-44	-15	-24	37	14	25
相对误差的绝对平均值(%)		43	14	18	13	10	11

5.7 工程应用

为了验证本文所提出的基于红外图像处理的空鼓定量检测方法在实际工程检测中的可行性与适用性，选取了湖南省长沙市某大楼西面墙作为检测对象，开展现场试验验证。图 5.10 为西面墙的全景图。该墙面采用瓷砖饰面（瓷砖尺寸：5 cm × 20 cm，砖缝宽度：8 mm）。数据采集设备为 DJI Matrice 350 RTK 无人机搭载

Zenmuse H30T 镜头（红外图像分辨率：1280×1024 像素，温度分辨率 0.1 ℃）。现场天气状况如表 5.6 所示。

表 5.6 环境条件

对象	日期	天气	平均气温	平均相对湿度	检测时段
西面	2025.06.26	晴天	28.1 ℃	83.4%	15:00~15:30



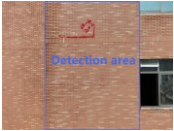
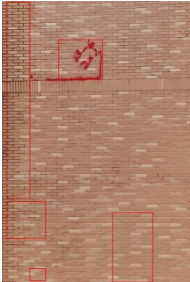
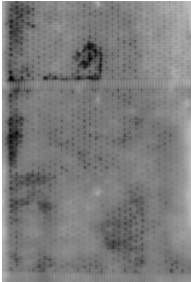
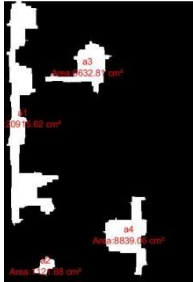
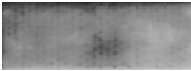
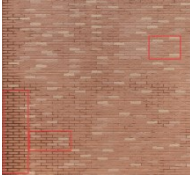
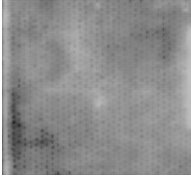
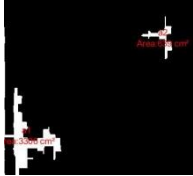
图 5.10 西面全景图

5.7.1 检测结果与分析

从采集的红外图像数据集中，选取 6 张疑似存在空鼓的典型图像，采用本文建立的图像处理流程（如图 5.9 所示）进行空鼓识别与面积定量计算。为验证检测结果的准确性，对识别出的空鼓区域同步开展敲击法验证，两种方法的检测结果对比如表 5.7 所示。

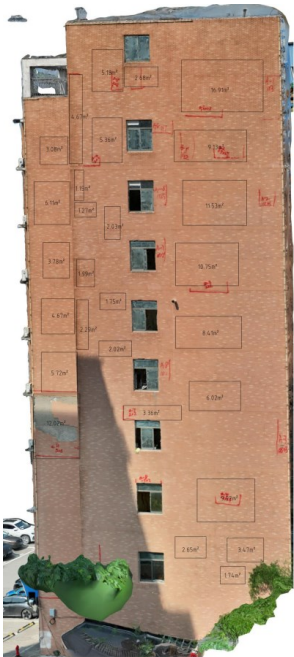
表 5.7 两种方法的检测结果

编号	检测区域	敲击法	原始热像图	本文方法	空鼓面积(m ²)
1					0.18/0.19
2					4.31
3					0.99/0.32/0.57/ 0.71/0.07

4					2.09/0.11/ 0.66/0.88
5					0.16/0.06
6					0.33/0.06

由表 5.7 可见本文方法识别出的所有疑似空鼓区域，经敲击法验证均为真实空鼓，未出现误检，表明该方法具有较高的检出可靠性。相比之下，敲击法依赖人工判断，通常以矩形框标注空鼓大致范围，难以精确量化空鼓面积与形态；而本文方法通过图像分割与像素统计，可实现空鼓面积的定量计算，并提供清晰的二值化轮廓，检测结果更为客观、精确，能更准确地反映空鼓分布与严重程度，有助于后续维修定位与损伤评估。

西面墙的整体红外检测结果如图 5.11 所示，图中用黑色方框标注了所有识别出的空鼓区域。



a) 西立面左侧



b) 西立面右侧

图 5.11 西面墙检测结果

5.7.2 工程应用建议

基于试验结果与本次工程实践，提出以下工程应用建议：基于日光热成像的建筑外墙空鼓检测效果受太阳辐射强度、风速及环境温度等环境条件影响显著，因此需严格选择检测窗口期，优先在晴朗、低风速且朝向适宜的时段开展作业。同时，本文方法对小尺寸空鼓和深层空鼓的检出能力有限，未检测出空鼓的区域仍可能存在安全隐患，需结合建筑使用年限及饰面层状况综合评估。此外，对于红外热像法检测出的疑似空鼓，建议采用敲击法或其他方法进行复核验证，以提高最终检测结果的可靠性。

5.8 本章小结

针对复杂背景干扰下传统空鼓面积定量检测方法精度低且对小尺寸空鼓检出能力不足的问题，本章对图像降噪、增强、分割及定量计算等方法开展了系统研究，建立了一套完整的空鼓识别与定量检测方法，并通过试验与工程应用验证了方法的有效性。主要结论如下：

(1) 构建了一套从“图像降噪—图像增强—砖缝剔除—图像分割—面积计算”的空鼓定量检测流程。首先，通过对比六种滤波降噪与三种直方图增强方法，确定了“同态滤波降噪+ CLAHE 增强”的最优预处理组合；其次，提出了基于条带掩膜的砖缝剔除方法，有效消除了伪目标干扰；然后，提出了融合热对比度、面积及绝对温度三重判别指标的邻域多阈值图像分割方法，实现了空鼓轮廓的精确提取；最后，建立了图像空间分辨率与物理尺寸的映射关系，实现了空鼓面积的定量计算。

(2) 通过对比不同方法的分割结果，表明本文方法在定量检测精度上优于传统方法。与 Canny 边缘检测、大津法及迭代法相比，该方法能更准确提取空鼓完整轮廓，同时显著降低对背景区域的误分割；对六种不同尺寸与厚度的空鼓进行面积计算，结果表明对于面积 $\geq 25 \text{ cm}^2$ （或厚度大于 2 mm）的空鼓，平均相对误差控制在 10%~18%。

(3) 通过对比敲击法与本文方法的检测结果，验证了本文方法在工程应用中的可靠性与实用性。以长沙市某大楼西面墙为检测对象，本文方法识别出的所有空鼓经敲击法验证均为真实缺陷，具有较高的检出可靠性，且检测效率与精度优于传统敲击法，能提供清晰的二值化轮廓，更准确地反映空鼓分布与严重程度，有助于后续维修定位与损伤评估。

结论与展望

城市建筑作为城市空间的核心载体，其安全运行直接关系到社会稳定与城镇化健康发展。当前，我国大量既有建筑已进入设计使用年限中后期，随着服役时间的延长，饰面层材料老化、粘结性能退化等问题日益凸显，加之早期施工工艺的局限性，外墙空鼓、开裂、脱落等隐患逐年增多，已成为城市公共安全的“悬顶之剑”。近年来，全国各地因外墙脱落导致的人员伤亡与财产损失事件频发，社会反响强烈，凸显了对外墙安全状态进行常态化、精准化检测的紧迫性。在此背景下，响应国家关于规范既有高层民用建筑外立面系统排查工作，加快完善高层民用建筑外立面风险管理长效机制的战略部署，亟需发展适用于大规模既有建筑外墙的高效、非接触、低成本的空鼓检测技术。本文立足建筑外墙空鼓这一典型隐蔽缺陷，将红外热成像技术与传热学理论、数字图像处理方法相结合，系统开展了太阳运动规律与辐射强度模型研究、多环境因素耦合作用下空鼓热响应的演化规律研究、基于红外图像处理的空鼓定量检测方法研究，具体研究内容和成果如下：

(1) 通过开展太阳运动规律与辐射强度模型研究，揭示了建筑外立面日照特征的时空分布规律。基于天球坐标系建立了太阳高度角、方位角的计算方法，以湖南大学风工程试验研究中心为观测点，选取全年典型日计算了太阳位置逐时变化曲线，阐明了东、西、南、北四个朝向墙面的日照时段与日照时长的季节变化规律。结果表明：东、西向墙面日照时长全年波动约 106 min；南向墙面呈冬长夏短的谷型分布，极值差达 416 min；北向墙面仅在 4~9 月存在日照，6 月达到峰值 534 min。在此基础上，构建了建筑表面太阳总辐射强度的计算模型，将总辐射分解为直射、散射与地面反射三个分量，为后续空鼓热响应分析提供了准确的热边界条件。最后，通过区域对比验证观测点数据的代表性，为试验结论的推广应用奠定了基础。

(2) 通过开展足尺、长期的饰面砖空鼓红外检测试验，阐明了多环境因素耦合作用下空鼓热响应的演化规律。设计制作了包含 6 种不同面积与厚度组合空鼓缺陷的试验墙体，布设于东、南、西、北四个典型朝向，开展了为期一年的现场试验。系统分析了空鼓尺寸、太阳辐射强度及日照时长对热对比度的影响规律。结果表明：红外检测信号强度与缺陷几何尺寸呈正相关；辐射强度是驱动空鼓热信号形成的主导因素，热对比度峰值时刻滞后于辐射峰值约 0.5~1.0 小时；日照时长与热对比度在以直射辐射为主的南、东、西向墙面呈较强线性相关 ($R^2=0.5\sim0.7$)，在以散射辐射为主的北向墙面相关性较弱 ($R^2<0.5$)。以 1.0 °C 为检测阈值，明确了各朝向墙面的检测效果差异：东向墙面全年检测效果最优；西向墙面除最小尺寸空鼓外整体良好；南向墙面秋、冬季优于春、夏季；北向墙面仅春、夏季 C 类空鼓勉强达到检测要求。总结出各朝向墙面全年适用的最佳检测时段：东向 7:30~9:30、

南向 11:00~12:00、西向 15:00~16:00、北向 3~9 月 14:00（6 月为 10:00）。

（3）构建了基于红外图像处理的空鼓定量检测方法，实现了复杂背景下空鼓轮廓的高精度提取与面积计算。对比了六种滤波降噪方法与三种直方图增强方法的处理效果，确定了“同态滤波降噪（ $CIH=1.381$ ）+CLAHE 增强（ $EME=5.5740$ ）”的最优预处理组合；针对砖缝热干扰问题，提出了基于条带掩膜的砖缝剔除方法，有效消除了伪目标干扰；提出了一种基于邻域多阈值的图像分割方法，融合空鼓的热对比度、面积及绝对温度三重判别指标，在子区域尺度上进行逐像素判定，实现了空鼓轮廓的精确提取。与 Canny 边缘检测、大津法及迭代法等传统方法的对比表明，本文方法能够准确提取空鼓区域的完整轮廓，同时显著降低对背景区域的误分割。建立了图像空间分辨率与物理尺寸的映射关系，实现了空鼓面积的定量计算，结果表明，对于面积 $\geq 25 \text{ cm}^2$ （或厚度大于 2 mm ）的空鼓，平均相对误差控制在 10%~18% 之间。以长沙市某大楼西面墙为例开展验证性研究，结果表明，与敲击法相比，本文方法的检测效率与精度更高，且误检率较低，在实际检测工程中具有良好的应用前景。

尽管本文对日光热成像技术在建筑外墙空鼓检测中的应用开展了较为深入的研究，仍在下列问题上存在进一步研究的需要：

（1）探索基于深度学习与多模态数据融合的智能化空鼓分割方法。本文提出的基于邻域多阈值的图像分割方法虽取得了较好的效果，但其参数（如灰度差阈值、面积阈值等）需根据图像特性人工调优，适应性有待提升。未来可引入深度学习技术，构建端到端的空鼓分割网络，利用大规模标注样本训练模型，实现复杂背景下空鼓区域的自动、精准分割。同时，可探索多模态数据融合方法，将红外图像与可见光图像相结合，利用可见光图像的纹理信息辅助空鼓边缘定位，进一步提升分割精度。

（2）探索“数据+物理”双驱动的空鼓检测与评估方法。面对红外热成像所获取的有限温度场信息，可充分利用计算机仿真、结构热传导理论等方法，建立以物理模型为驱动的空鼓热响应数值模拟平台，预测不同工况下的热对比度演化规律；同时，结合现场实测数据，利用机器学习等算法挖掘检测效果与环境参数之间的非线性映射关系，构建数据驱动的检测效果评估模型。融合数据驱动与物理驱动方法，研究实现动态环境变化输入下的空鼓可检测性实时评估，为工程检测提供更为智能化的决策支持。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2025年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202602/t20260228_1962662.html, 2026-02.
- [2] 中华人民共和国应急管理. 第一次全国自然灾害综合风险普查公报[EB/OL]. <https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202405/W020240508313655815475.pdf>, 2024-05.
- [3] 国家统计局. 中国统计年鉴—2025[EB/OL]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2025/indexch.htm>, 2025-10.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50068-2018, 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [5] Liao C T. Study on Exterior Wall Tile Degradation Conditions of High-rise Buildings in Taoyuan City[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2018, 17(3): 549-556.
- [6] 朱斌, 张辉. 基于贝叶斯网络的高层建筑外墙饰面砖脱落风险发生概率研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(04): 83-86.
- [7] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于印发全国自建房安全专项整治工作方案的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-05/27/content_5692543.htm, 2022-05.
- [8] 中华人民共和国中央人民政府. 住房和城乡建设部关于全面开展城市体检工作的指导意见[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6918801.htm, 2023-11.
- [9] 中共中央办公厅, 国务院办公厅关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/202412/content_6991173.htm, 2024-12.
- [10] 湖南省住房和城乡建设厅. 湖南省既有高层民用建筑外立面系统安全隐患检查和评估技术指南(试行)[EB/OL]. https://zjt.hunan.gov.cn/zjt/xxgk/xinxigongkaimulu/tzgg/fwwh12/202604/t20260403_33948243.html, 2026-04.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50210-2018, 建筑装饰装修工程质量验收标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 110-2017, 建筑工程饰面砖粘结

- 强度检验标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T 277-2012, 红外热像法检测建筑外墙饰面粘结质量技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [14] 中国工程建设标准化协会. T/CECS 1884-2025, 建筑外围护系统智能无损检测技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025.
- [15] 何佳斌. 基于红外热成像快速识别技术的高层建筑饰面砖缺陷检测及风险评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [16] Lin T H, Chiang P C, Putranto A. Multispecies hybrid bioinspired climbing robot for wall tile inspection[J]. *Automation in Construction*, 2024, 164: 105446.
- [17] 宋培源. 基于红外热成像的结构缺陷检测技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [18] Li Y H, Yang X P, Gong J B, et al. Intelligent detection of bonding status in external building insulation layers using ground-penetrating radar[J]. *Automation in Construction*, 2025, 173: 106100.
- [19] Tomita K, Chew M Y L. A Review of Infrared Thermography for Delamination Detection on Infrastructures and Buildings[J]. *Sensors*, 2022, 22(2): 423.
- [20] Gao J, Koopialipour M, Armaghani D J, et al. Evaluating the bond strength of FRP in concrete samples using machine learning methods[J]. *Smart Structures and Systems*, 2020, 26(4): 403-418.
- [21] Cao Y, Miraba S, Rafiei S, et al. Economic application of structural health monitoring and internet of things in efficiency of building information modeling[J]. *Smart Structures and Systems*, 2020, 26(5): 559-573.
- [22] Ma X, Foong L K, Morasaei A, et al. Swarm-based hybridizations of neural network for predicting the concrete strength[J]. *Smart Structures and Systems*, 2020, 26(2): 241-251.
- [23] Chen A S, Jacob M, Shoshani G, et al. Using computer vision, image analysis and UAVs for the automatic recognition and counting of common cranes (*Grus grus*)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 328: 116948.
- [24] Akshatha K R, Karunakar A K, Shenoy B S, et al. Manipal-UAV person detection dataset: A step towards benchmarking dataset and algorithms for small object

- detection[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 195: 77-89.
- [25] Souza B J, Stefenon S F, Singh G, et al. Hybrid-YOLO for classification of insulators defects in transmission lines based on UAV[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 148: 108982.
- [26] Tan L, Lv X Y, Lian X F, et al. YOLOv4_Drone: UAV image target detection based on an improved YOLOv4 algorithm[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2021, 93: 107261.
- [27] Qiu Q W, Lau D. Real-time detection of cracks in tiled sidewalks using YOLO-based method applied to unmanned aerial vehicle (UAV) images[J]. *Automation in Construction*, 2023, 147: 104745.
- [28] Ali R, Kang D H, Suh G, et al. Real-time multiple damage mapping using autonomous UAV and deep faster region-based neural networks for GPS-denied structures[J]. *Automation in Construction*, 2021, 130: 103831.
- [29] Lourenço T, Matias L, Faria P. Anomalies detection in adhesive wall tiling systems by infrared thermography[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 148: 419-428.
- [30] Ibarra-Castanedo C, Sfarra S, Klein M, et al. 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.
- [31] 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): 24.
- [32] 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: 80-87.
- [33] Maierhofer C, Röllig M, Steinfurth H, et al. Untersuchung sicherheitsrelevanter Ablösungen von Fassadenelementen mit aktiver Thermografie[J]. *Bautechnik*, 2015, 92(10): 677-682.
- [34] Raja B N K, Miramini S, Duffield C, et al. Infrared thermography detection of

- p delamination in bottom of concrete bridge decks[J].
- Structural Control & Health Monitoring*
- , 2022, 29(3).
-
- [35] Cheng C, Na R, Shen Z. Thermographic Laplacian-pyramid filtering to enhance delamination detection in concrete structure[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 97: 162-176.
- [36] 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.
- [37] 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): 609-626.
- [38] Cheng C, Chen D, Shao S, et al. 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): 10.
- [39] Cai H, Cheng C, Wang L, et al. 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.
- [40] 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: 187-197.
- [41] 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.
- [42] Chen J, Zhang S, Zhao G, et al. Infrared thermography of façade delamination: Quantifying environmental variability and heat transfer mechanisms[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 494: 143177.
- [43] Li X, He Y, Wang H, et al. Thermal Inspection of Subsurface Defects in Wind Turbine Blade Segments Under the Natural Solar Condition[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(9): 11488 - 11497.
- [44] 杨瑞珍, 周云, 张阳, 等. 基础设施日光热成像无损检测研究综述[J/OL]. *工程力学*, 2025.

- [45] Schmid S, Reinhardt J, Grosse C U. Spatial and temporal deep learning for defect detection with lock-in thermography[J]. *NDT & E International*, 2024, 143: 103063.
- [46] Lee S, Chung Y, Kim C, et al. Image segmentation for automatic detection and detectability evaluation of thinning defects using LSM-based induction thermography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 134: 104900.
- [47] Rodríguez-Martín M, Fueyo J G, Pisonero J, et al. Step heating thermography supported by machine learning and simulation for internal defect size measurement in additive manufacturing[J]. *Measurement*, 2022, 205: 112140.
- [48] Pedram M, Taylor S, Hamill G, et al. Experimental evaluation of heat transition mechanism in concrete with subsurface defects using infrared thermography[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 360: 129531.
- [49] 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: 113-124.
- [50] Zhu D R, Li J G, Wang F B, et al. A Method for Extracting Contours of Building Facade Hollowing Defects Using Polarization Thermal Images Based on Improved Canny Algorithm[J]. *Buildings*, 2023, 13(10): 2563.
- [51] Lu Y C, Lin D M, Zhai Z Q, et al. Application and improvement of Canny edge-detection algorithm for exterior wall hollowing detection using infrared thermal images[J]. *Energy and Buildings*, 2022, 274: 112421.
- [52] Garrido I, Barreira E, Almeida R, et al. Introduction of active thermography and automatic defect segmentation in the thermographic inspection of specimens of ceramic tiling for building facades[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 121: 104012.
- [53] 冯力强. 建筑外墙饰面层粘结质量红外热像无损检测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [54] 陈文, 孙保燕, 贾巧志. 基于激光标定的热工缺陷面积测量方法[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(2): 175-179.
- [55] Chang W C, Lu H K, Chen P H. Application of Mixed Reality and Infrared Inspection to Examine External Wall Tiles[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2025, 39(6).

- [56] Huang Y S, Hong J J. Building health monitoring using segmented thermography[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 111: 113490.
- [57] Tu K, Ibarra-Castanedo C, Sfarra S, et al. Multiscale analysis of solar loading thermographic signals for wall structure inspection[J]. Sensors, 2021, 21(8): 2806.
- [58] Omar T, Nehdi M L. Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography[J]. Automation in Construction, 2017, 83: 360-371.
- [59] Ichi E, Dorafshan S. Effectiveness of infrared thermography for delamination detection in reinforced concrete bridge decks[J]. Automation in Construction, 2022, 142: 104523.
- [60] Al Gharawi M, Adu-Gyamfi Y, Washer G. A framework for automated time-lapse thermography data processing[J]. Construction and Building Materials, 2019, 227: 116507.
- [61] Hiasa S, Birgul R, Catbas N. A data processing methodology for infrared thermography images of concrete bridges[J]. Computers & Structures, 2017, 190: 205-218.
- [62] Pozzer S, Ramos G, Nooralishahi P, et al. Integration of thermographic inspection data with BIM for enhanced concrete infrastructure assessment[J]. Automation in Construction, 2025, 171: 105965.
- [63] 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.
- [64] Worzewski T, Krankenhagen R, Doroshtnasir M, et al. 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: 756-766.
- [65] 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: 767-776.
- [66] 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): 1407-1422.
- [67] 吴国境, 王健, 张永, 等. 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(9): 353-358.
- [68] Galleguillos C, Zorrilla A, Jimenez A, et al. Thermographic non-destructive inspection of wind turbine blades using unmanned aerial systems[J]. *Plastics Rubber and Composites*, 2015, 44(3): 98-103.
- [69] Chaudhuri S, Stamm M, Krankenhagen R. Weather-dependent passive thermography and thermal simulation of in-service wind turbine blades[C]. *WindEurope Annual Event Conference*. Copenhagen, Denmark, 2023.
- [70] 王睿男, 武穆清, 陈铁英, 等. 基于形态学的红外图像边缘检测[J]. *北京邮电大学学报*, 2021, 44(1): 66-71.
- [71] Lee H, Kang M G. Infrared Image Deconvolution Considering Fixed Pattern Noise[J]. *Sensors*, 2023, 23(6): 3033.
- [72] 康爽, 陈长征, 罗园庆, 等. 基于微分形态学梯度风力发电机叶片缺陷边缘增强的红外检测研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(6): 432-437.
- [73] Jiang M. Edge enhancement and noise suppression for infrared image based on feature analysis[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 91: 142-152.
- [74] Wang Q, Hu Q, Qiu J, et al. Image enhancement method for laser infrared thermography defect detection in aviation composites[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(10): 1.
- [75] Bu C, Huang X, Chen P, et al. Delamination defects detection for wind turbine blades based on pulsed infrared thermography[J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2026, 41(4): 2181-2193.
- [76] Zhou W, Wang Z, Zhang M, Wang L. Wind Turbine Actual Defects Detection Based on Visible and Infrared Image Fusion[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 3509208.
- [77] Ngo G C, Macabebe E Q B. Image segmentation using K-means color quantization and density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN) for hotspot detection in photovoltaic modules[C]. *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*. Singapore: IEEE, 2016: 1614-1618.

- [78] Wei S, Li X, Ding S, et al. Hotspots Infrared detection of photovoltaic modules based on Hough line transformation and Faster-RCNN approach[C]. 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). Paris: IEEE, 2019: 1266-1271.
- [79] Chen J, Li Y, Ling Q. Hot-spot detection for thermographic images of solar panels[C]. 2020 Chinese Control and Decision Conference. Hefei: IEEE, 2020: 4651-4655.
- [80] Ahmed K, Abdelhamid K, Hussein Y. Applied multiresolution analysis to infrared images for defects detection in materials[J]. NDT and E International, 2017, 92: 38-49.
- [81] Zhou G Y, Fu Y, Zhang Z J, et al. Edge detection and depth evaluation of CFRP internal delamination defects based on differential image frequency domain preprocessing[J]. Journal of Instrumentation, 2025, 20(01): P01027.
- [82] Li Q X, Peng X, Zhong X G, et al. Quantitative identification of debonding defects in building façades based on UAV-thermography using a two-stage network integrating dual attention mechanism[J]. Infrared Physics & Technology, 2024, 138: 105241.
- [83] Zheng S Y, Zhang J X, Zu R, et al. Vision transformer-enhanced thermal anomaly detection in building facades through fusion of thermal and visible imagery[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2024, 24(4): 2854-2868.
- [84] He S D, Zhao G, Chen J, et al. Weakly-aligned cross-modal learning framework for subsurface defect segmentation on building façades using UAVs[J]. Automation in Construction, 2025, 170: 105946.
- [85] Wang P J, Wang J H, Liu Q, et al. Fusion-Based Damage Segmentation for Multimodal Building Façade Images from an End-to-End Perspective[J]. Buildings, 2025, 15(1): 63.
- [86] Kurtser P, Feng K L, Olofsson T, et al. One-class anomaly detection through color-to-thermal AI for building envelope inspection[J]. Energy and Buildings, 2025, 328: 115052.
- [87] 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.

- [88] Ali R, Cha Y J. Subsurface damage detection of a steel bridge using deep learning and uncooled micro-bolometer[J]. Construction and Building Materials, 2019, 226: 376-387.
- [89] Liu F, Liu J, Wang L. Deep learning and infrared thermography for asphalt pavement crack severity classification[J]. Automation in Construction, 2022, 140: 104383.
- [90] Ali R, Cha Y J. Attention-based generative adversarial network with internal damage segmentation using thermography[J]. Automation in Construction, 2022, 141: 104412.
- [91] Deng L, Zuo H, Wang W, et al. Internal Defect Detection of Structures Based on Infrared Thermography and Deep Learning[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27(3): 1136-1149.
- [92] Greco A, Pironti C, Saggese A, et al. A deep learning based approach for detecting panels in photovoltaic plants[C]. 3rd International Conference on Applications of Intelligent Systems. Las Palmas de Gran Canaria, Spain, 2020: 1-7.
- [93] Kellil N, Aissat A, Mellit A. Fault diagnosis of photovoltaic modules using deep neural networks and infrared images under Algerian climatic conditions[J]. Energy, 2023, 263: 125902.
- [94] Xing W, Wenxian Y, Bo Q, et al. Intelligent monitoring of photovoltaic panels based on infrared detection[J]. Energy Reports, 2022, 8: 5005-5015.
- [95] V. K, D. M D P, U. A, et al. Infrared Thermal Images of Solar PV Panels for Fault Identification Using Image Processing Technique[J]. International Journal of Photoenergy, 2022, 2022(1): 6427076.
- [96] Guo X, Cai J. Optical stepped thermography of defects in photovoltaic panels[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(1): 490-497.
- [97] Pathak S P, Patil S, Patel S. Solar panel hotspot localization and fault classification using deep learning approach[J]. Procedia Computer Science, 2022, 204: 698-705.
- [98] Sun T, Xing H, Cao S, et al. A novel detection method for hot spots of photovoltaic (PV) panels using improved anchors and prediction heads of YOLOv5 network[J]. Energy Reports, 2022, 8: 1219-1229.
- [99] 郝帅, 吴瑛琦, 马旭, 等. 融合知识蒸馏和注意力机制的光伏热斑检测[J]. 光

- 学精密工程, 2023, 31(24): 3640-3650.
- [100] 秦怡鸣, 尹丽菊, 高晓宁, 等. 基于HCF-YOLO的光伏组件红外图像热斑故障检测[J]. 太阳能学报, 2025, 46(10): 285-294.
- [101] 孙海蓉, 刘永朋, 周黎辉. 基于轻量化YOLOv5s的光伏热斑检测定位方法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 282-288.
- [102] 王道累, 姚勇, 张世恒, 等. 基于红外热图像的光伏组件热斑深度学习检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9608-9616.
- [103] 牛小育, 刘长良, 刘卫亮, 等. 基于深度学习的光伏红外图像热斑检测方法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(11): 272-281.
- [104] Ma Z, Guo H, Wen H, Cao Y. LFS-YOLO: A PV Panel Defect Detection Algorithm for UAV Infrared Sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(11): 19592-19601.
- [105] Tang Q, Dai J, Liu J, et al. Quantitative detection of defects based on Markov - PCA - BP algorithm using pulsed infrared thermography technology[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 144-148.
- [106] Woldeamanuel M M, Kim T, Cho S, Kim H K. Estimation of concrete strength using thermography integrated with deep-learning-based image segmentation: Case studies and economic analysis[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 213: 119249.
- [107] Jae Jin I, Yeong Lim D, Cheol Bang I. Development of fault diagnosis for nuclear power plant using deep learning and infrared sensor equipped UAV[J]. Annals of Nuclear Energy, 2023, 181: 109577.
- [108] Xu Z L, Wang Q, Chen G C, et al. An automatic delamination characterization method for detection of CFRP curved structure using laser infrared thermography based on Res-Transformer[J]. Measurement Science and Technology, 2025, 36(8): 085206.
- [109] 陶文铨. 传热学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [110] Washer G, Fenwick R, Bolleni N. Development of Hand-Held Thermographic Inspection Technologies[R]. OR10-007. Jefferson City, MO: Department of Transportation, 2009.
- [111] 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(2): 1-21.
- [112] Hiasa S, Birgul R, Matsumoto M, Necati Catbas F. Experimental and Numerical Studies for Suitable Infrared Thermography Implementation on Concrete Bridge Decks[J]. Measurement, 2018, 121: 144-159.
- [113] A K M A, Sakib A. Optical efficiency comparison of circular heliostat fields: Engender of hybrid layouts[J]. Renewable Energy, 2021, 178: 506-519.
- [114] 李思凡. 塔式太阳能定日镜场光学效率分析及布局优化研究[D]. 兰州交通大学, 2024.
- [115] 孙浩. 基于混合策略鲸鱼优化算法的定日镜场布局研究及优化[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [116] 张春琳, 周志伟, 陈昕, 等. 塔槽耦合光热系统镜场效率研究[J]. 热力发电, 2022, 51(5): 41-47.
- [117] Demain C, Journée M, Bertrand C. Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces[J]. Renewable Energy, 2013, 50: 710-721.
- [118] 中国气象局. 气象辐射观测方法[M]. 北京: 气象出版社, 1996.
- [119] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 126-2015, 外墙饰面砖工程施工及验收规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [120] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JG/T 269-2010, 建筑红外热像检测要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [121] 高向阳. 基于空域自适应滤波的红外弱小目标检测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
- [122] 曹颖川. 低光照图像增强方法研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [123] Shanmugavadivu P, Balasubramanian K. Particle swarm optimized multi-objective histogram equalization for image enhancement[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 57: 243-251.
- [124] 周雪妍. 针对雾霾和低照度的图像增强算法[D]. 天津: 南开大学, 2024.
- [125] Huang L D, Zhao W, Wang J, et al. Combination of contrast limited adaptive histogramequalisation and discrete wavelet transform for image enhancement[J]. Image Processinglet, 2015, 9(10): 908-915.
- [126] Chang Y, Jung C, Ke P, et al. Automatic contrast-limited adaptive histogram

- equalization with dual gamma correction[J]. IEEE Access, 2018, 6: 11782-11792.
- [127] Pavesic N, Ribaric S. Gray level thresholding using the Havrda and Charvat entropy[C]. 2000 10th Mediterranean Electrotechnical Conference. Information Technology and Electrotechnology for the Mediterranean Countries. Proceedings. MeleCon 2000. Lemesos, Cyprus: IEEE, 2000, 2: 631-634.
- [128] 张德丰. 数字图像处理 (MATLAB版) [M]. 1版. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [129] Canny J. A Computational Approach to Edge Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, PAMI-8(6):679-698.

致 谢

“落其实者思其树，饮其流者怀其源。”论文付梓之际，这句话时常在心中想起。回望来路，正是因为有大家的支持、指导与陪伴，我才能顺利完成这份研究工作。

首先要感谢我的家人。你们是最坚实的后盾，也是我最温暖的依靠。感谢你们用朴素而无私的爱，支持我勇敢追逐梦想。因为有你们，我才能在科研路上不惧风雨，坚定前行。

在科研过程中，我最想感谢的是我的两位恩师——周云教授与杨瑞珍研究员。从选题、试验设计，到论文的反复修改与完善，每一步都离不开你们的悉心指导。

周老师视野开阔、思维系统，您提出的每一条建议都精准而实用，让我少走了很多弯路。在日常训练中，您对 PPT 制作、文字材料撰写等每一个工作细节都高标准、严要求，让我逐渐理解了什么是严谨治学。您教会我的不只是如何做研究，更是如何以负责任的态度去面对学术与人生。

杨老师温和亲切、体贴学生。无论我遇到的是大问题还是小困惑，您都耐心倾听、细致指导，从不吝啬时间与精力。这种既包容又务实的指导方式，让我在科研路上少了许多焦虑，多了几分踏实前行的底气。

此外，我还要感谢罗先明、周晓枫、陈琦、张文杰、赵贺俊、陈建炜、冷建波等师兄师姐在学习和生活中给予的耐心解答与指导。感谢邹少豪、杨晨烨、刘迎澳、魏子青、陈祎林等同门三年来的互帮、互助、互促。感谢所有周门的兄弟姐妹以及亲朋好友。感谢你们在我科研路上的无私支持与陪伴。每一次相互鼓励的瞬间、每一个共同奋斗的日子，都是我记忆中最珍贵的画面。感谢你们的理解、包容与陪伴，让这条本可能孤单的路，变得温暖而充满力量。

最后，再次感谢所有在学业与生活中给予我关怀和帮助的人。未来的道路上，我会带着这份温暖与力量，继续脚踏实地，努力前行。

攻读学位期间的学术或实践成果

- [1] 杨瑞珍, 周云, 张阳, 等. 基础设施日光热成像无损检测研究综述[J/OL]. 工程力学, 2025.
- [2] 周云, 杨瑞珍, 张阳, 等. 一种外围护墙体浅表损伤的主动热成像检测方法及系统:CN202510023080.0[P]. 2025-03-21.
- [3] 谈忠坤, 张阳, 杨瑞珍, 等. 基于热图像子区域及双阈值分割的外墙瓷砖空鼓检测方法:CN202510758996.0[P]. 2025-09-30.
- [4] 周云, 张文杰, 陈祎林, 张阳, 等. 基于无人机单目视频的道路裂缝定位与量化方法[J/OL]. 工程力学, 2024

答辩委员会名单

答辩委员会	姓名	职称	工作单位
主席	黄远	教授	湖南大学
委员	易伟建	教授	湖南大学
委员	李鹏	教授级高工	湖南省建筑设计院集团股份有限公司
秘书	刘艳芝	副教授	湖南大学