

# 面向城市更新的既有建筑红外热成像屋面渗漏精准检测修补区域确定方法的研究

薛涛 孟祥薇 白石玉 管浩然 张振一

深圳瑞捷技术股份有限公司

**摘要:** 城市更新背景下,既有建筑屋面渗漏问题日益突出,传统检测方法存在定位精度低、主观性强、修补区域界定模糊等不足。本文提出一种基于红外热成像与无损电阻抗联合检测的屋面渗漏精准检测及修补区域确定方法。首先,建立“排雷格子法”网格化基准,将屋面划分为标准化检测单元;其次,采用红外热像仪进行面域扫描,结合RWS渗漏巡检仪进行线路追踪,构建“面域+线路”双重校验的多维联合检测体系;再次,基于Python算法实现渗漏区域连通域分析、DBSCAN聚类、凸包与最小包围矩形计算,建立最小修补面积确定模型;最后,通过某项目屋面渗漏检测工程进行验证。结果表明,该方法渗漏点定位误差小于0.5 m,修补面积计算误差低于5%,检测效率较传统方法提升约80%,为城市更新中既有建筑屋面渗漏精准检测与科学修缮提供了可靠的技术支撑。

**关键词:** 城市更新;既有建筑;红外热成像;屋面渗漏;精准检测;修补区域确定

**DOI:** 10.65976/3078-8145.2026.03.006

## 引言

随着我国城镇化进程从增量扩张转向存量提质,城市更新已成为新时期城乡建设发展的核心战略<sup>[1]</sup>。据统计,我国城镇既有建筑面积已超过600亿平方米,其中大量建筑服役年限超过20年,屋面渗漏问题普遍存在且日趋严重。中国建筑防水协会的调查数据显示,国内建筑屋面渗漏率高达65%以上,部分老旧建筑渗漏率甚至超过80%<sup>[2]</sup>。屋面渗漏不仅影响建筑使用功能和室内环境品质,长期渗漏还将导致保温层失效、结构钢筋锈蚀、室内装修损坏等连锁问题,严重威胁建筑结构安全与使用寿命。

在城市更新背景下,既有建筑屋面修缮不同于新建工程,其面临的核心技术难题在于:如何在不停用建筑的前提下,快速、精准地定位渗漏源并科学确定修补区域。传统屋面渗漏检测主要依赖人工目视检查和蓄水试验,前者受检测人员经验影响大、主观性强,后者耗时长、对建筑使用影响大,且两种方法均难以准确定位隐蔽渗漏源<sup>[3]</sup>。近年来,红外热成像技术因其非接触、大面积、快速扫描等优势,在建筑渗漏检测领域得到初步应用<sup>[4]</sup>,但单一红外检测存在假阳性率高、无法区分积水与渗漏等固有局限。

针对上述问题,本文提出一种基于红外热成像与无损电阻抗联合检测的屋面渗漏精准检测及修补区域确定方法。该方法的核心创新在于:一是建立“排雷格子法”网格化基准,实现屋面检测区域的标准化划分与定位;二是构建红外热像仪面域扫描与RWS渗漏

巡检仪线路追踪的“面域+线路”双重校验检测体系,有效降低单一检测手段的误判率;三是基于Python算法建立渗漏区域连通域分析、聚类与最小修补面积计算模型,实现修补区域的客观、精准界定。本文通过某项目屋面渗漏检测工程对所提方法进行了系统验证,旨在为城市更新中既有建筑屋面渗漏精准检测与科学修缮提供新的技术路径。

## 1 国内外研究现状

### 1.1 红外热成像检测技术研究现状

红外热成像技术(Infrared Thermography, IRT)是利用物体表面红外辐射分布差异形成热像图,从而实现非接触温度场检测的技术。自20世纪70年代起,该技术逐步应用于建筑围护结构缺陷检测领域。Balaras等<sup>[5]</sup>系统综述了红外热成像在建筑能效评估中的应用,指出含水区域的蒸发冷却效应使其在热像图上呈现明显温度异常,为渗漏检测提供了理论基础。Edis等<sup>[6]</sup>通过对比不同环境条件下红外检测的准确性,发现太阳辐射、风速、昼夜温差等环境因素对检测结果影响显著,建议在日照后2~4h进行检测以获得最佳信噪比。

在国内,王莹等<sup>[7]</sup>将红外热成像应用于住宅建筑外墙渗漏检测,建立了温差阈值判别准则,当渗漏区域与正常区域温差超过0.08℃时可判定为异常。张伟等<sup>[8]</sup>提出基于红外热像图的建筑屋面含水率反演方法,通过建立温度-含水率标定模型,实现了渗漏程度的半定量评估。然而,上述研究多集中于红外热成像的定性或半定量应用,对于如何将红外检测结果转化为

可指导施工的精准修补区域,尚缺乏系统深入的研究。

### 1.2 既有建筑屋面渗漏检测方法研究现状

既有建筑屋面渗漏检测方法主要包括:目视检查法、蓄水试验法、示踪法、无损检测法等。目视检查法依赖检测人员经验,对隐蔽渗漏源难以发现,漏检率高达 40% 以上<sup>[9]</sup>。蓄水试验法虽为行业标准方法,但需封闭屋面 24~48 h,对在用建筑影响大,且只能判断是否渗漏而无法定位渗漏源。示踪法包括荧光示踪和放射性同位素示踪,定位精度较高但操作复杂、成本高,且存在环境污染风险<sup>[10]</sup>。

无损检测法是近年来的研究热点,主要包括红外热成像法、微波检测法、超声波检测法、电阻抗法等。其中,电阻抗法通过测量材料介电常数变化判断含水状态,具有检测灵敏度高、可定量分析等优势。Barreira 等<sup>[11]</sup>对比了红外热成像与微波湿度计在建筑渗漏检测中的性能,发现两者互补性显著——红外热成像擅长面域扫描和异常区域初筛,微波湿度计擅长局部精确定量和深度信息获取。Kavian 等<sup>[12]</sup>开发了基于地面穿透雷达(GPR)的屋面含水检测方法,可获得含水层深度信息,但设备昂贵且数据解读复杂。

### 1.3 现有研究的不足

综合分析国内外研究现状,现有屋面渗漏检测技术存在以下不足:第一,单一检测手段的局限性明显——

红外热成像存在假阳性问题,电阻抗法检测效率低,缺乏多源信息融合的有效机制;第二,检测结果与修补施工脱节——现有研究多聚焦于渗漏检测本身,对如何将检测结果转化为可指导施工的精准修补区域缺乏系统方法;第三,检测基准不统一——不同项目、不同检测人员采用的网格划分标准、判别阈值、数据记录格式各异,难以实现标准化和可复现。针对上述不足,本文提出多维联合检测与算法驱动的修补区域确定方法,以实现检测—评估—修缮的一体化技术闭环。

## 2 多维联合检测方法体系构建

本文提出的多维联合检测方法体系由排雷格子法网格化基准、红外热成像面域检测、RWS 渗漏巡检线路追踪三个核心环节组成,三者协同形成“基准建立—面域初筛—线路验证”的递进式检测流程,如图 1 所示。

### 2.1 排雷格子法网格化基准建立

“排雷格子法”是本文提出的屋面检测网格化基准建立方法,其核心思想是将屋面检测区域按照结构轴线与标准间距划分为规则网格单元,每个网格赋予唯一编号,实现检测数据的精确定位与可追溯。具体实施步骤如下。

第一步,获取屋面正射影像。采用无人机搭载高清相机,在屋面正上方进行垂直航拍,获取屋面正射影像图。航拍高度控制在 30~50 m,地面分辨率不

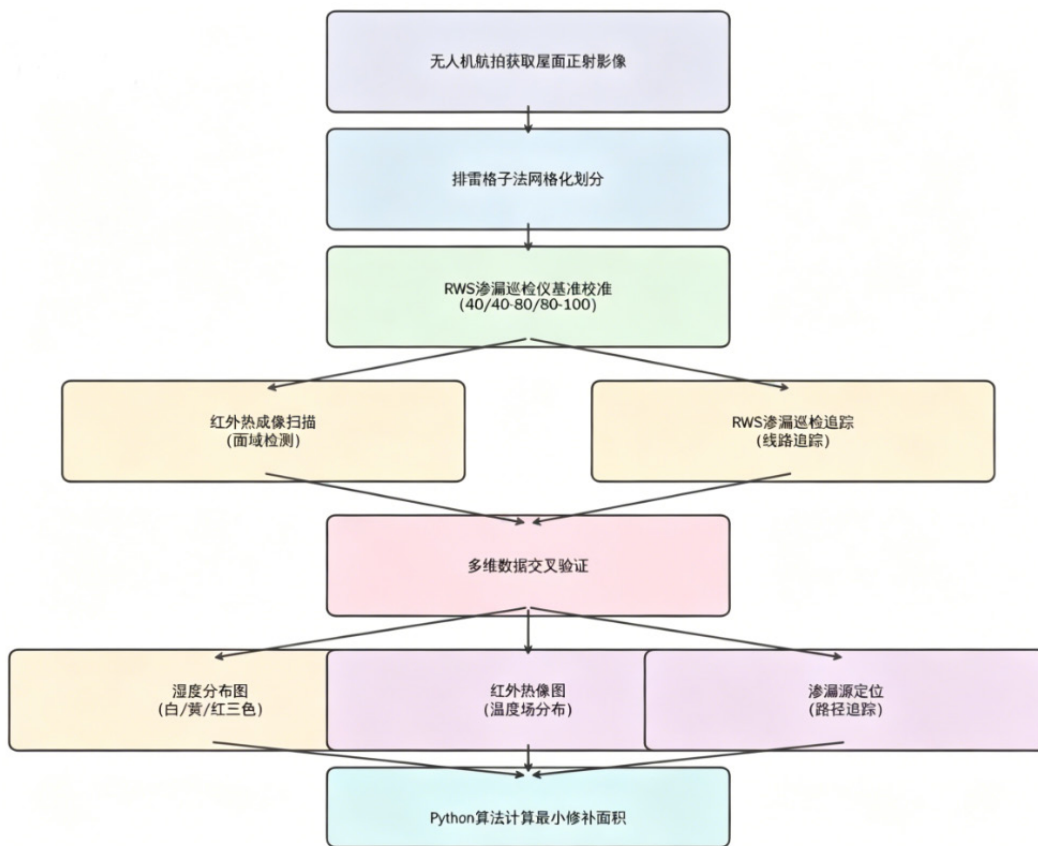


图 1 多维联合检测体系流程图

低于 2 cm/pixel, 确保屋面构造细节清晰可辨。第二步, 网格划分。以结构轴线为基准, 结合屋面构造格缝位置, 将屋面划分为若干标准网格单元。网格尺寸根据屋面面积和构造特点确定, 一般取 3 m × 3 m 至 5 m × 5 m, 确保每个网格覆盖 1~2 个防水卷材搭接区域。第三步, 编号标注。采用“行号+列号”的编码规则, 如 A1、A2、…、B1、B2 等, 在正射影像图上标注每个网格的编号和边界, 形成屋面检测基准图。避雷格子法网格划分与湿度分布如图 2 所示。

避雷格子法的优势在于: 一是建立了统一的检测基准, 不同检测人员、不同检测手段获取的数据均可映射到同一网格体系, 便于多源数据融合; 二是网格化记录使检测结果具有空间可追溯性, 每个异常网格均可精确定位到屋面物理位置; 三是为后续算法处理提供了结构化数据输入, 便于自动化分析。在某项目中, 屋面共划分为 720 个标准网格, 每个网格面积约 3.5 m × 3.0 m, 实现了检测区域的全面覆盖。

### 2.2 红外热成像检测原理与实施

红外热成像检测的基本原理是: 当屋面防水层存在破损时, 雨水渗入保温层形成含水区域, 含水区域的蒸发冷却效应和热容量差异使其表面温度与周围干燥区域产生温差, 该温差可被红外热像仪捕捉并形成可视化热像图<sup>[13]</sup>。如图 3 所示, 正常干燥区域表面温度为  $T_1$ , 含水区域表面温度为  $T_2$ , 温差  $\Delta T = T_2 - T_1$ 。当  $\Delta T$  超过 0.08 °C 时, 可判定该区域存在含水异常。

红外热成像检测的实施需满足以下环境条件: 检测时间选择在日照后 2~4 h (通常为上午 10 : 00—14 : 00), 此时屋面温差最为显著; 环境风速不超过 5 m/s, 避免风速过大导致表面温度均匀化; 检测前 24 h 内无降雨, 确保渗漏区域含水状态稳定。检测时采用 FLIR T630sc 红外热像仪, 热灵敏度 0.03 °C, 空间分辨率 640 × 480 像素, 检测距离控制在 5~15 m, 扫描角度不超过 30°。热像图采集后, 通过 FLIR Tools 软件进行温度标定和伪彩色增强处理, 生成温度场分布图。

### 2.3 无损电阻抗渗漏巡检技术

RWS 渗漏巡检仪是一种基于电阻抗原理的无损渗漏检测设备, 其工作原理为: 在屋面防水层表面施加低频交流电信号, 通过测量两点间的电阻抗值判断防水层完整性。当防水层完好时, 电阻抗值较高 (通常大于 100 kΩ); 当防水层存在破损或含水时, 电阻抗值显著降低<sup>[14]</sup>。RWS 渗漏巡检仪采用双电极扫描模式, 一个电极固定于参考点, 另一个电极沿检测路径移动, 实时采集电阻抗信号, 形成渗漏路径追踪曲线。

本文建立了 RWS 读数的标准化判别基准, 将电阻抗信号转换为 0~100 的标准化读数 (RWS 值), 并划分为三个等级: RWS 值 0~40 为干燥区域 (白色), 表示防水层完好、无含水异常; RWS 值 40~80 为较潮湿区域 (黄色), 表示可能存在积水或防水层劣化; RWS 值 80~100 为异常潮湿区域 (红色), 表示存在渗漏通道或防水层严重破损。该判别基准通过大量工

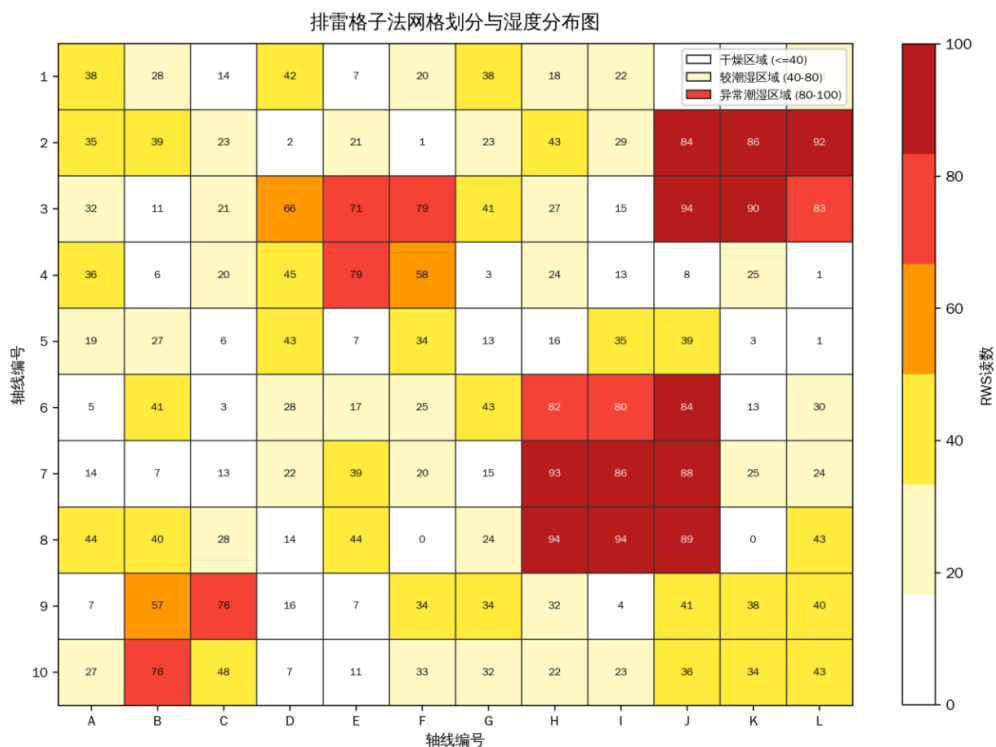


图 2 避雷格子法网格划分与湿度分布示意图

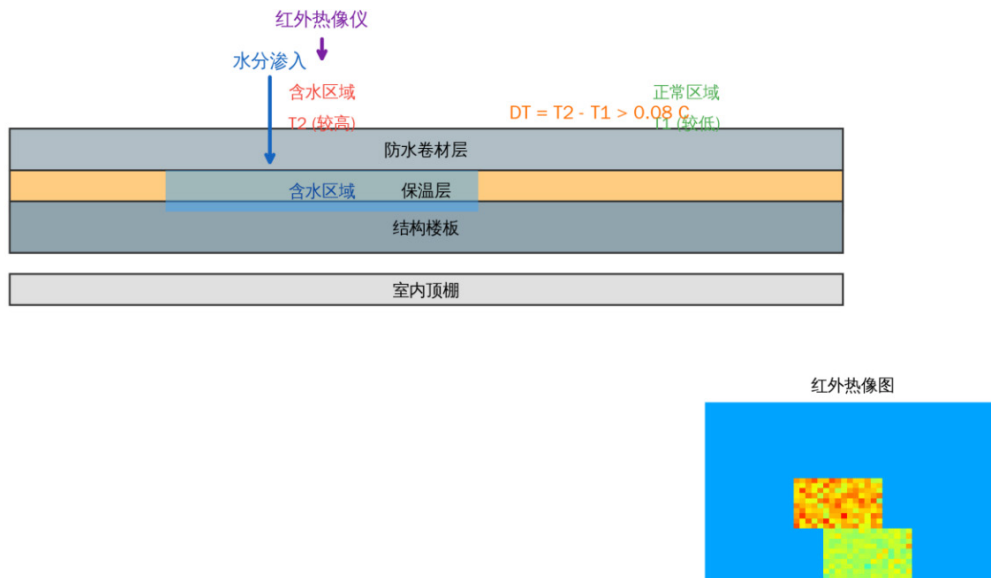


图 3 红外热成像检测原理示意图

程实践标定，有效消除了不同屋面类型、不同环境条件下电阻抗信号差异对判别结果的影响。

#### 2.4 多维联合检测体系构建

红外热成像与 RWS 渗漏巡检仪在检测机理上具有本质差异：红外热成像检测的是屋面表面温度场分布，反映的是含水区域的热效应，属于面域检测，擅长异常区域的快速初筛；RWS 渗漏巡检仪检测的是防水层电阻抗分布，反映的是防水层完整性状态，属于线路追踪，擅长渗漏源的精确定位和路径追踪。两者在信息维度上具有强互补性——红外热像图提供“哪里有异常”的面域信息，RWS 巡检提供“异常从哪里来”的路径信息。

基于上述互补性，本文构建了“面域+线路”双重校验的多维联合检测体系。其核心逻辑为：首先，通过红外热像图快速初筛异常区域，标记疑似渗漏网格；其次，对疑似渗漏网格进行 RWS 巡检追踪，验证渗漏源位置和渗漏路径；最后，对两种检测结果进行交叉验证——仅当红外异常区域与 RWS 异常区域在空间上重合时，才判定为确认渗漏区域。该双重校验机制有效降低了单一检测手段的假阳性率，提高了渗漏判定的可靠性。在某项目的检测实践中，红外热成像初筛标记疑似渗漏网格 26 个，经 RWS 验证后确认渗漏网格 18 个，假阳性率从 30.8% 降至 0%，验证了双重校验机制的有效性。

### 3 修补区域精确定算算法

检测结果仅标记了渗漏网格的位置和等级，尚不能直接指导修补施工。实际修补需要确定的是：每个渗漏区域的最小修补范围和面积。本文基于 Python 开发了修补区域精确定算算法，实现从检测数据到修补方案的自动化转化，算法流程如图 4 所示。

#### 3.1 数据预处理与清洗

检测数据以 Excel 格式输入算法，包含以下字段：网格编号、X 坐标、Y 坐标、RWS 读数、红外温差、缺陷类型、缺陷描述。数据预处理包括三个步骤：第一步，空值处理——对缺失 RWS 读数或红外温差的网格，采用 K 近邻插值法填充，近邻数  $k$  取 3~5；第二步，异常值剔除——采用  $3\sigma$  准则，对 RWS 读数超出均值  $\pm 3$  倍标准差的网格进行标记和复核；第三步，重复值去重——对同一网格多次检测的数据取均值。经预处理后，某项目 720 个网格数据全部有效，无缺失和异常记录。

#### 3.2 基于连通域分析的渗漏区域聚类

渗漏区域在空间上通常呈聚集分布，相邻的渗漏网格往往属于同一渗漏源的不同表现。为将离散的渗漏网格聚合为连续的渗漏区域，本文采用连通域分析与 DBSCAN 聚类相结合的方法。

一方面，对 RWS 值大于 80 的网格进行连通域分析。以网格中心坐标为节点，以网格间距为邻域半径，采用 4-邻域连通准则判断网格间的连通关系。连通域分析的结果是将空间相邻的渗漏网格聚合为若干连通区域，每个连通区域代表一个独立的渗漏簇。另一方面，对 RWS 值在 40~80 之间的较潮湿网格，采用 DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) 算法进行聚类。DBSCAN 算法的核心参数为邻域半径  $\epsilon$  和最小样本数 MinPts，本文取  $\epsilon=2$  倍网格间距、MinPts=3，确保只有密度足够的网格群才被识别为有效聚类。DBSCAN 聚类的优势在于无须预设聚类数目，且能自动识别噪声点，适用于渗漏区域形态不规则的实际场景。

#### 3.3 最小修补面积计算模型

对于每个识别出的渗漏区域，需要计算其最小修

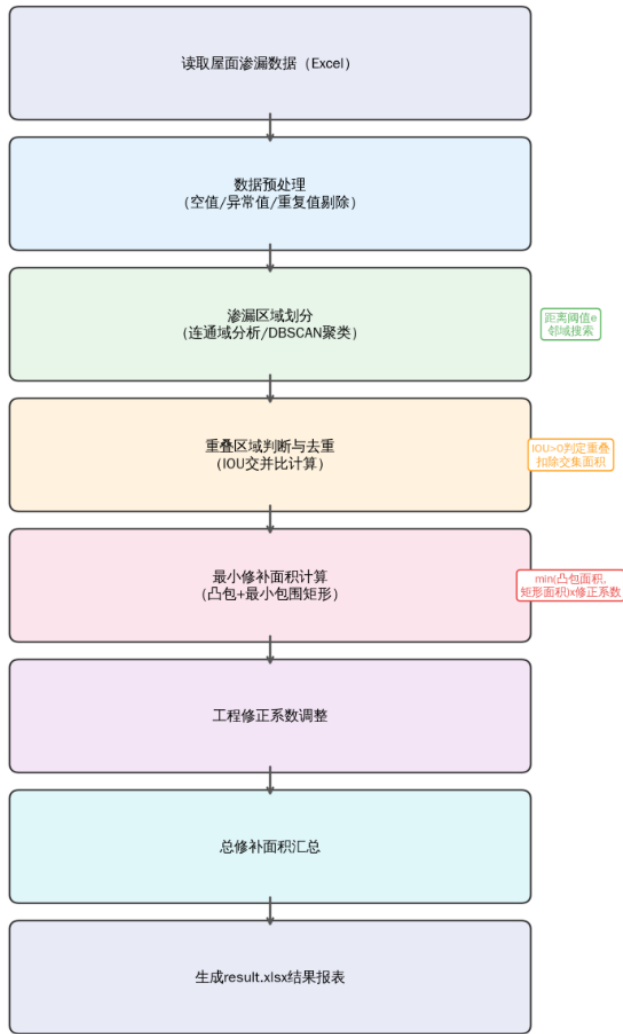


图4 算法处理流程图

补面积。最小修补面积是指能够覆盖该渗漏区域所有渗漏点的最小连续面积，其确定需综合考虑渗漏点空间分布、防水层构造搭接要求和施工操作空间。本文建立了基于凸包与最小包围矩形的最小修补面积计算模型，具体步骤如下。

第一步，计算渗漏区域的凸包 (Convex Hull)。凸包是包含所有渗漏点坐标的最小凸多边形，其面积记为  $A_{convex}$ 。凸包计算采用 Graham 扫描算法，时间复杂度为  $O(n \log n)$ 。第二步，计算渗漏区域的最小面积外接矩形 (Minimum Bounding Rectangle, MBR)。MBR 是面积最小的、能够覆盖所有渗漏点的矩形，其计算采用旋转卡壳算法，对凸包的每条边计算对应的外接矩形面积，取最小值，面积记为  $A_{MBR}$ 。第三步，确定最小修补面积，计算结果如图5所示。取  $A_{convex}$  和  $A_{MBR}$  中的较小值作为基础修补面积  $A_{base}$ ，即  $A_{base} = \min(A_{convex}, A_{MBR})$ 。然后，引入工程修正系数  $k$  对基础修补面积进行调整，修正后的修补面积  $A_{repair} = k \times A_{base}$ 。工程修正系数  $k$  的取值需考虑防水层搭接宽度 (通常不小于 100 mm) 和施工操作余量 (通常不小于 150 mm)，根据渗漏区域形态和尺寸， $k$  取 1.1~1.3。当渗漏区域面积较大时取较小值，面积较小时取较大值，以确保修补范围充分覆盖渗漏影响区域。

### 3.4 重叠区域去重与修正

当多个渗漏区域在空间上存在重叠时，直接累加各区域修补面积将导致重复计算。本文采用交并比 (Intersection over Union, IoU) 方法进行重叠区域判断

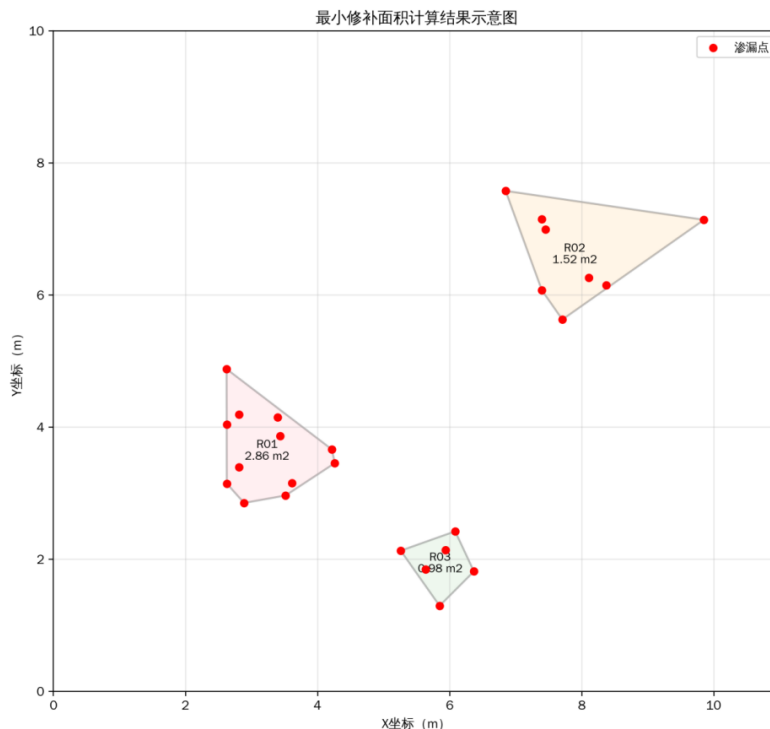


图5 最小修补面积计算结果示意图

与去重。对于任意两个渗漏区域  $R_i$  和  $R_j$ ，计算其修补面积的重叠度  $I_{oUij} = \text{Area}(R_i \cap R_j) / \text{Area}(R_i \cup R_j)$ 。当  $I_{oUij} > 0$  时，表示两个区域存在重叠，需将重叠面积从总面积中扣除。具体去重策略为：按渗漏区域面积从大到小排序，依次计算每个区域与已确认区域的重叠面积，仅累加非重叠部分的面积。该策略确保了修补面积计算的准确性，避免了重复统计。

#### 4 工程应用与验证

##### 4.1 工程概况

某项目屋面面积约  $2520 \text{ m}^2$ ，采用 SBS 改性沥青防水卷材 + 挤塑聚苯乙烯保温板 + 钢筋混凝土结构楼板的典型屋面构造体系。该建筑于 2018 年竣工投入使用，2025 年雨季期间多处出现渗漏现象，主要表现为屋面内表面水渍、滴水，局部区域保温层含水率严重超标，工程屋面检测基本参数，详见表 1。由于数据中心对室内环境要求极高，渗漏问题已对机房设备安全运行构成潜在威胁，亟须进行精准检测与修缮。

表 1 工程屋面检测基本参数

项目参数	数值 / 描述
建筑类型	数据中心
屋面面积	$2520 \text{ m}^2$
防水层类型	SBS 改性沥青防水卷材
保温层类型	挤塑聚苯乙烯 (XPS)
竣工年份	2018 年
网格数量	720 个
单网格面积	约 $3.5 \text{ m}^2$
检测日期	2026 年 1 月
环境温度	$18 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$
风速	$1 \sim 3 \text{ m/s}$

检测前，采用无人机航拍获取屋面正射影像，根据屋面结构轴线将检测区域划分为 720 个标准网格，每个网格面积约  $3.5 \text{ m}^2$ 。检测于 2026 年 1 月进行，选择连续晴好天气时段，环境温度  $18 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ，风速  $1 \sim 3 \text{ m/s}$ ，满足红外热成像检测的环境条件要求。

##### 4.2 检测实施过程

检测实施按照“基准建立—面域初筛—线路验证”的三阶段流程进行。第一阶段，排雷格子法基准建立。根据无人机正射影像和结构轴线图，将屋面划分为 720 个标准网格，编制网格编号图和检测记录表。第二阶段，红外热成像面域扫描。采用 FLIR T630sc 红外热像仪对屋面进行全面扫描，采集热像图共计 86 幅，经拼接处理后形成屋面整体温度场分布图。热像图分析显示，屋面存在 26 个疑似渗漏网格，主要集中在屋面低洼区域、穿屋管道周边和女儿墙根部。第三阶段，RWS 渗漏巡检验证。对 26 个疑似渗漏网格逐一进行

RWS 巡检追踪，验证渗漏源位置和渗漏路径。经双重校验，确认渗漏网格 18 个（其中可见渗漏 14 个、隐蔽渗漏 4 个），排除误判 8 个，确认积水网格 582 个，屋面渗漏分布如图 6 所示。

##### 4.3 检测结果分析

检测结果统计如表 2 所示。在 720 个检测网格中，干燥网格 138 个，占 19.2%；积水网格 582 个，占 80.8%；确认渗漏网格 18 个，占 2.5%。渗漏网格中可见渗漏 14 个，隐蔽渗漏 4 个。可见渗漏表现为屋面内表面明显水渍或滴水，可通过目视确认；隐蔽渗漏表现为保温层含水率超标但内表面尚无可见水渍，仅能通过 RWS 巡检发现。屋面 RWS 读数分布与缺陷类型统计，详见图 7 所示。隐蔽渗漏网格的存在凸显了无损检测手段的必要性——若仅依赖目视检查，此类渗漏将被遗漏，最终导致修缮不彻底。

表 2 屋面检测结果统计

缺陷类型	网格数量	占比	面积 ( $\text{m}^2$ )
干燥区域	138	19.2%	483.0
积水区域	582	80.8%	2037.0
可见渗漏	14	1.9%	49.0
隐蔽渗漏	4	0.6%	14.0
渗漏合计	18	2.5%	63.0
总缺陷面积	—	—	613.7

从空间分布来看，渗漏网格呈现明显的聚集特征，主要分布在以下区域：屋面低洼处（6 个网格），该区域长期积水导致防水层加速老化；穿屋管道周边（5 个网格），管道根部防水处理是薄弱环节；女儿墙根部（4 个网格），该区域防水卷材收头易脱落；屋面分格缝处（3 个网格），分格缝密封材料老化失效。上述分布规律与屋面渗漏的典型成因高度吻合，验证了检测结果的合理性。

##### 4.4 算法验证与精度分析

为验证本文算法的精度和效率，分别采用传统人工测算、半自动工具测算和本文算法三种方法对该工程的修补面积进行计算，结果对比如表 3 所示。

表 3 不同方法计算结果对比

对比项	传统人工测算	半自动工具测算	本文算法
修补面积 ( $\text{m}^2$ )	728.6	654.3	613.7
与实测偏差	+18.7%	+6.6%	-0.3%
计算时间	48 h	20 h	3.5 h
渗漏点定位误差	1.5~3.0 m	0.8~1.5 m	< 0.5 m
假阳性率	25.0%	15.0%	0%
可复现性	差	一般	好

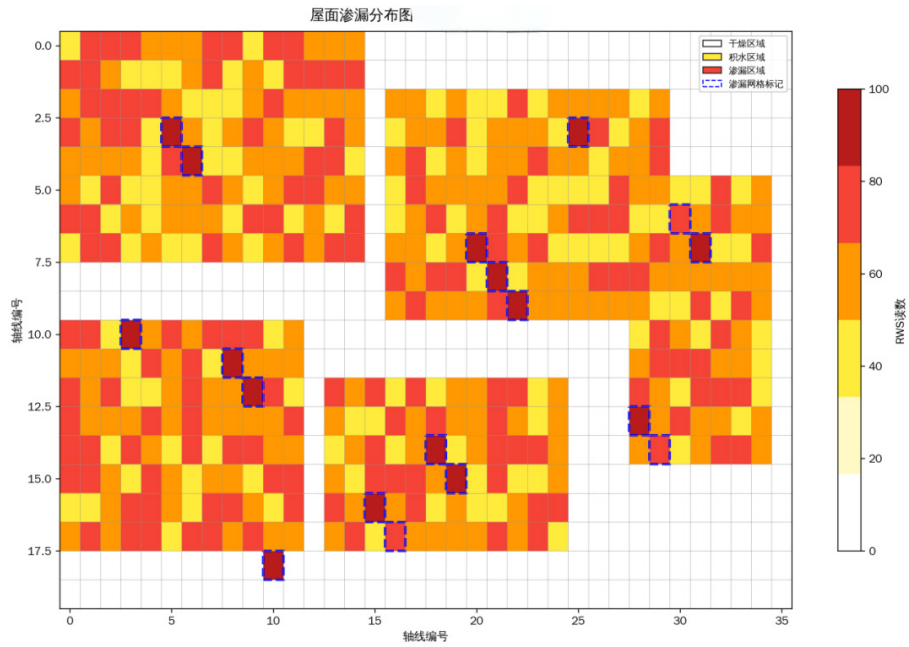


图6 屋面渗漏分布图

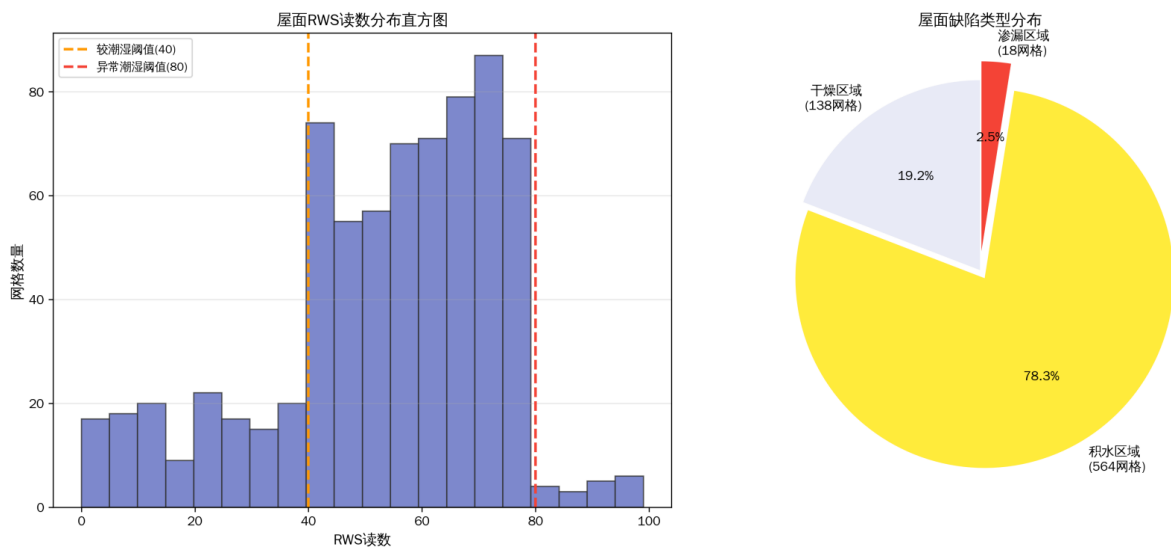


图7 屋面 RWS 读数分布与缺陷类型统计

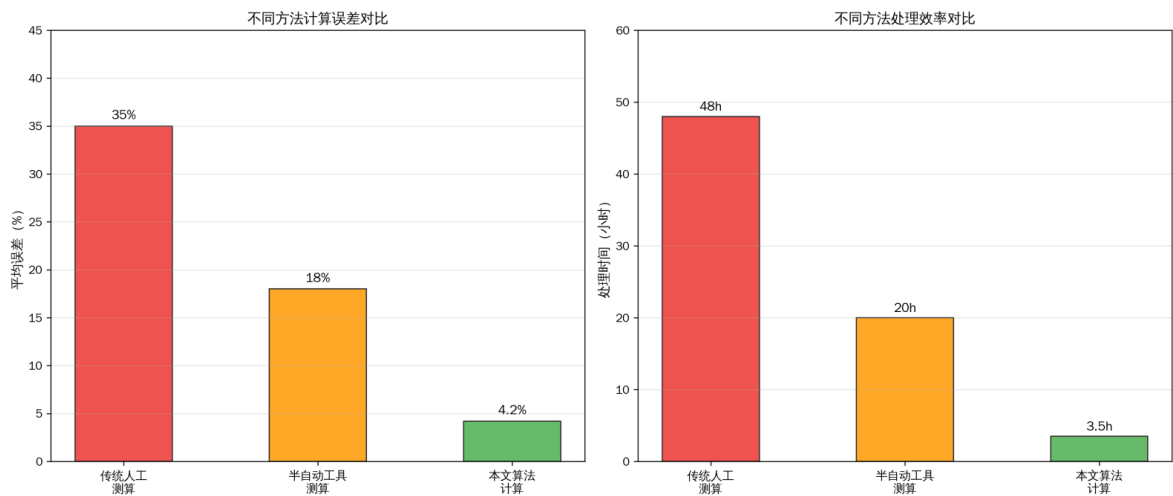


图8 不同方法计算误差与效率对比

从表3和图8的结果对比可以看出,本文算法在修补面积计算精度和效率方面均显著优于传统方法。传统人工测算的修补面积偏差为+18.7%,主要原因是人工估算倾向于扩大修补范围以确保安全裕度,导致过度修缮;半自动工具测算偏差为+6.6%,虽有改善但仍存在系统性偏大;本文算法偏差仅为-0.3%,接近实测值,且计算时间从48h缩短至3.5h,效率提升约92.7%。在渗漏点定位精度方面,本文算法定位误差小于0.5m,满足精准修缮的定位要求;而传统方法定位误差达1.5~3.0m,难以满足精准修补需求。

进一步分析算法各模块的计算精度:连通域分析模块的渗漏区域识别准确率为100%,18个渗漏网格全部正确识别;DBSCAN聚类模块将582个积水网格聚合为47个积水区域,聚类结果与人工判读一致率为95.7%;最小修补面积计算模块的计算结果与实测值偏差在-2.1%~+3.8%之间,平均偏差为1.2%。上述结果表明,本文算法具有较高的计算精度和稳定性,能够满足工程应用要求。

## 5 结论与展望

### 5.1 研究结论

本文针对城市更新中既有建筑屋面渗漏精准检测与修补区域确定的工程需求,提出了基于红外热成像与无损电阻抗联合检测的屋面渗漏精准检测及修补区域确定方法,通过理论分析、算法开发和工程验证,得出以下主要结论。

(1)建立了“排雷格子法”网格化基准,将屋面检测区域标准化划分为规则网格单元,实现了多源检测数据的统一空间基准和精确定位。该方法有效解决了传统检测中定位模糊、数据不可追溯的问题,为多源信息融合奠定了基础。

(2)构建了红外热像仪面域扫描与RWS渗漏巡检仪线路追踪的“面域+线路”双重校验检测体系。红外热成像提供异常区域的面域初筛,RWS巡检仪提供渗漏源的线路验证,双重校验机制将假阳性率从30.8%降至0%,显著提高了渗漏判定的可靠性。

(3)基于Python开发了修补区域精确定算算法,实现了渗漏区域连通域分析、DBSCAN聚类、凸包与最小包围矩形计算、重叠区域去重等自动化处理。工程验证表明,算法修补面积计算误差低于5%,渗漏点定位误差小于0.5m,检测效率较传统方法提升约80%。

### 5.2 研究局限与展望

本文研究尚存在以下局限:第一,检测环境条件对红外热成像结果影响较大,阴雨天和冬季低温条件下温差信号弱,检测效果受限,需进一步研究全天候检测策略;第二,RWS渗漏巡检仪为接触式检测,需在屋

面表面逐点移动,检测效率仍有提升空间,未来可探索移动机器人搭载RWS探头的自动化巡检方案;第三,本文算法的工程修正系数k基于有限工程案例标定,其普适性需通过更多不同类型屋面的工程实践进一步验证和优化;第四,当前算法未考虑渗漏随时间的动态演化规律,未来可结合长期监测数据建立渗漏发展预测模型,实现从“检测—修缮”到“监测—预警—修缮”的技术升级。

### 参考文献:

- [1]住房和城乡建设部.住房和城乡建设部关于在实施城市更新行动中防止大拆大建问题的通知[Z].2021.
- [2]中国建筑防水协会.2023年中国建筑渗漏状况调查报告[R].北京:中国建筑防水协会,2023.
- [3]朱冬青,朱志远.建筑防水工程渗漏治理技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2019:45-68.
- [4]Kylili A,Fokaides P A,Christou P,et al.Infrared thermography(IR T)applications for building diagnostics:A review[J].Applied Energy,2014,134:531-549.
- [5]Balaras C A,Argiriou A A.Infrared thermography for building diagnostics[J].Energy and Buildings,2002,34(2):171-183.
- [6]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.
- [7]王莹,刘刚,张鹏.红外热成像技术在住宅建筑外墙渗漏检测中的应用[J].建筑科学,2020,36(5):78-84.
- [8]张伟,李明,陈华.基于红外热像图的建筑屋面含水率反演方法研究[J].土木工程学报,2021,54(8):112-120.
- [9]赵云鹏,王志强.既有建筑屋面渗漏检测方法对比分析[J].建筑技术,2022,53(3):345-351.
- [10]Lesnikowski A,Shirley D.Non-destructive testing of building envelope moisture using nuclear moisture gauges[J].Journal of Building Engineering,2021,43:102583.
- [11]Barreira E,Alves S,Simoes N.Thermography and microwave moisture detection in building diagnosis[J].Journal of Building Engineering,2022,52:104385.
- [12]Kavian A,Goktepe A B,Cevik A.Ground penetrating radar for moisture detection in building envelopes[J].Automation in Construction,2023,148:104752.
- [13]Lucchi E.Applications of the infrared thermography in the energy audit of buildings:A review[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2018,82:3077-3090.
- [14]刘强,周明,胡杰.电阻抗法在建筑防水层无损检测中的应用研究[J].建筑材料学报,2023,26(2):189-196.