

基于红外图像处理的建筑外窗缺陷能耗分析研究

张玲玲¹, 张继冉¹, 许 廛², 任攀攀¹, 丁立斌¹

(1. 烟台大学 建筑学院, 山东 烟台 264005; 2. 中铁建工集团第二建设有限公司, 山东 青岛 266112)

摘要: 将红外热成像技术与图像处理技术结合, 用压差法进行建筑外窗空气渗透检测。通过红外热成像仪对建筑外窗进行红外图片采集, 利用图像处理技术对采集的外窗图像进行红外图像处理, 针对红外图像中的异常区域对外窗缺陷进行检测, 并进行缺陷的面积计算, 建立外窗缺陷红外检测模型。根据实验测得的室内外温差、外窗缺陷面积、空气渗透量建立建筑外窗空气渗透量计算模型, 将模型与建筑外窗缺陷红外检测模型结合, 对外窗缺陷引发的能耗进行定量分析。结果表明: 对外窗缺陷进行维护, 能够减少外窗耗能, 提高外窗节能。外窗每减少 1 cm² 的空气渗透面积, 每年能够节能 66146 kJ; 外窗气密性能等级每提高 1 级, 单位面积外窗每年能够节能 110012 kJ。

关键词: 红外图像处理; 外窗缺陷; 建筑能耗; 碳排放; 定量分析

中图分类号: TU111 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2023)09-0996-09

Energy Consumption Analysis of Building Window Defects Based on Infrared Image Processing

ZHANG Lingling¹, ZHANG Jiran¹, XU Ao², REN Panpan¹, DING Libin¹

(1. School of Architecture, Yantai University, Yantai 264005, China;

2. China Railway Construction Engineering Second Construction Co., Ltd., Qingdao 266112, China)

Abstract: The differential pressure method, which combines infrared thermal imaging and image processing technologies, is used to detect air infiltration of building exterior windows. Infrared images of the exterior windows of the building were collected using an infrared thermal imager and then processed using infrared image processing technology. Exterior window defects were detected from abnormal areas in the infrared images, and the area of the defects was calculated to establish an infrared detection model for exterior window defects. Based on the indoor and outdoor temperature difference, defect area of the outer window, and air infiltration amount measured in the experiment, a calculation model was established for the amount of air infiltration for the building's outer window. The model was combined with the infrared detection model for building window defects, to quantitatively analyze the energy consumption caused by the defects. The results show that the maintenance of exterior window defects can reduce energy consumption of the exterior window and improve energy savings. For every 1 cm² reduction in the air infiltration area of exterior windows, 66146 kJ of energy can be saved annually. For each level of airtightness improvement of exterior windows, 110012 kJ of energy per unit area of exterior windows can be saved annually.

Key words: infrared image processing, exterior window defects, building energy consumption, carbon emissions, quantitative analysis

0 引言

工业、交通、建筑占据世界能源消耗的主体, 建筑的能耗在我国全部的能源消耗中约为 46.5%^[1]。外窗的耗能占建筑耗能很大的比例, 在建筑使用中能耗占建筑围护结构能耗的 50%, 对建筑能耗的影响在

25%左右^[2]。对于建筑节能问题, 我国与国外发达国家相比有一定的差距, 我国外窗的耗能是发达国家的 1.5~2.2 倍, 空气渗透量约为发达国家的 3~6 倍^[3-5]。建筑外窗的气密性对建筑能耗会产生重要的影响, 在外窗安装过程中, 外墙与外窗结合的地方往往由于施工水平的影响导致外窗与墙体存在缝隙, 并且

收稿日期: 2022-06-11; 修订日期: 2022-07-21。

作者简介: 张玲玲 (1972-), 女, 教授, 研究方向: 建筑节能与绿色建筑, E-mail:305125954@qq.com。

在随着建筑的使用过程中,外窗会受各种因素影响产生变形,出现气密性能等级降低的情况,影响建筑的能耗^[6-7]。对于外窗安装后缺陷的检测,现阶段尚未有成熟的检测方法和流程,一般利用发烟笔或用手感觉的方式寻找漏风位置^[8-9]。外窗安装的施工问题及其自身的质量问题,检测方法存在对缺陷识别和维护的短板,难以便捷和准确地检测出外窗缺陷的位置,限制了外窗在生产和施工过程中生产工艺和安装水平的提高,不利于缺陷的修补和气密性能等级的提升,从而增加建筑能耗并降低室内舒适度。目前对外窗缺陷位置的准确定位以及对缺陷部位空气渗透量的测量存在困难^[10-11],使外窗缺陷面积难以计算,无法定量分析因外窗空气渗透产生的能耗。

红外热成像技术和图像处理技术发展日渐成熟,很多学者利用图像处理技术对墙体、瓷砖、钢轨、道路等裂缝问题进行检测^[12-15],对于能够用肉眼观察到裂缝,普通电子照片利用图像处理加以识别即可实现计算机对裂缝的检测。对于人眼无法识别,需用触觉方式判断是否存在漏风或温度变化的问题,普通数码相机无法实现,需利用红外热成像仪解决^[16]。国内外诸多学者,利用红外热成像仪对墙体的空鼓、冷热桥、风管水管的渗漏进行无损检测^[17-19],通过热成像中颜色的异常寻找缺陷,并用图像处理手段进行辅助判断^[20-21]。目前,利用红外热成像技术和图像处理技术进行建筑外窗方面的研究相对较少,其优势能够为外窗的缺陷判断提供便利条件,研究空间相对广阔。

本文将红外热成像技术和图像处理技术结合,对建筑外窗缺陷进行检测并对缺陷引发的能耗进行量化分析。利用压差法进行建筑外窗空气渗透检测,通过红外热成像仪对建筑外窗进行红外图像采集,对采集的图像进行红外图像处理,针对红外图像中的异常区域对外窗缺陷实现检测,并进行缺陷的面积计算,建立外窗缺陷红外检测模型,根据外窗空气渗透检测测得的室内外温差、外窗缺陷面积、空气渗透量,建立建筑外窗空气渗透量计算模型。运用模型对因外窗缺陷产生的能耗增加比和外窗空气渗透引发能耗的计算,实现对外窗缺陷引发能耗的定量分析。

1 建筑外窗缺陷检测

1.1 外窗空气渗透检测

对于外窗的空气渗透的检测,采用美国 The Energy Conservatory 公司 DG700 型测试系统进行。测试系统包括密封与压力调节、数据采集、TECTITE 数据分析 3 部分组成,图 1 为外窗空气渗透检测原理图,通过密封和压力调节系统对房间向内或向外鼓

风,使待测房间与室内外形成压差,在外窗缺陷处形成空气流动,求出空气渗透量、渗漏面积等参数。

测试系统建立后首先进行房间整体的测量,按照压差法(鼓风门法)气密性测试实验进行相应的操作,对建筑整体的气密性进行测试。在进行外窗气密性测试实验时的最佳环境条件是无风或微风,减少室外环境因素的波动对实验以及后续结果的影响。

测出房间整体的气密性后,需要对待测外窗进行封堵,重复实验,进行封堵后的测量。安装后的测试步骤与封堵前的测试步骤一致。待测外窗的封堵利用聚氯乙烯薄膜在房间内部对待测外窗进行包裹,为了实现完全密封,根据建筑内墙墙体粗糙情况选择合适的密封方式。通过对封堵前后测试结果求差,能够得出待测外窗的空气渗透量和渗漏面积。

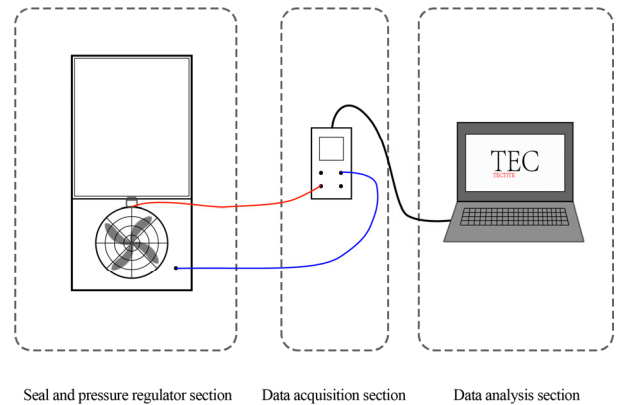


图 1 外窗空气渗透检测原理

Fig. 1 Schematic diagram of air permeability detection for outer window

1.2 外窗红外图像采集

普通的数码图像利用边缘检测技术可以将图像中存在的各种边界检测出来,但对于外窗检测而言,受外窗构造的影响,普通数码照片的图像处理技术无法检测外窗存在的缺陷。红外热成像仪接受物体发射的红外线形成热成像图,热像图反映了物体温度信息,由于外窗缺陷处存在空气流动,外窗缺陷处与窗户本体正常部位形成温度差异,通过寻找热成像图中颜色异常的区域,能够实现对外窗缺陷的判断。外窗红外图像的采集实验采用瑞典 FLIR SYSTEMS AB 公司 FLIR B200 红外热成像仪,采集过程中在外窗气密性能现场测量实验中进行,并在适宜红外热成像工作的环境条件下对外窗的红外热成像图进行采集。DG700 型测试系统测试出的等效渗漏面积 (equivalent infiltration area, EqLA) 是在 10 Pa 的压差条件,在采集外窗红外图像时,设定风机的运行状态也维持室内外 10 Pa 的压差环境,使红外热成像仪拍

摄的外窗渗漏状态与空气渗透的实验 EqLA 状态保持一致。

建筑外窗缺陷因存在空气流动与正常部位形成温差,在红外图像中表现为颜色的异常^[22]。在室内外压差平衡的环境中,外窗缺陷仍然存在,压差环境只能使缺陷部位空气流动更迅速、在红外热像图中表现得更为明显。为了后续在室内外压差平衡的环境中能够对外窗直接进行检测,在完成 10 Pa 压差环境的图像采集后,停止风机运行,开窗平衡、稳定室内外气压,关闭外窗进行室内外压差平衡的 0 Pa 压差环境下待测外窗红外图像的采集。

1.3 外窗红外图像处理

对 10 Pa 压差条件下采集的外窗红外图像利用图像处理技术进行预处理,灰度化处理采用加权平均法,对于降噪处理采用中值滤波,图像增强处理选用直方图均衡化和图像锐化的方法进行^[23]。图 2 所示的是对某一外窗进行图像预处理后的结果,(a)~(d)依次为外窗原始红外图像、灰度化处理结果、中值滤波结果以及图像增强结果。

由于图像增强结果无法定位缺陷位置,利用边缘检测技术对图 2 中(d)图像增强结果进行外窗缺陷的识别和定位,各方法检测的外窗缺陷结果如图 3 所示,(a)~(f)依次为采用 Roberts、Sobel、Prewitt、Canny、

Log 算法和阈值分割法实行检测的结果,由图可知外窗缺陷可以从外窗和墙体中分离,其具有显著的轮廓特征。由于每种方法对目标缺陷的计算方式不同,在边缘检测过程中对外窗缺陷的识别定位存在差异,从而影响外窗缺陷定位的准确性^[24]。因此,有必要将检测结果与外窗空气渗透检测的实验结果进行比较,确定面积吻合度高的缺陷识别方法,并将该方法应用在外窗红外图像的缺陷检测和定位中。

利用像素面积法对各方法检测到的缺陷结果进行面积计算,表 1 是随机选择部分外窗的空气渗透检测实验值与 Roberts、Sobel、Prewitt、Canny、Log 不同算法和阈值分割法处理后的缺陷面积结果。将外窗空气渗透检测实验得到的实验值与不同算法处理后的缺陷面积进行对比,发现其存在一定的误差,且检测值普遍高于实验值。这是由于进行红外图像采集时,外在的环境因素例如风速、湿度、温度、太阳辐射、空气质量状况等,会使红外辐射在传输中造成能量衰减^[25],使得热成像图中缺陷的状态与实际状态存在一定的差别,导致检测的缺陷面积与实验值存在误差;同时在红外热成像图中显示的温度异常部位,由于检测中的误判,实际不存在空气渗透,也会使处理结果大于实验值,从而影响计算结果。

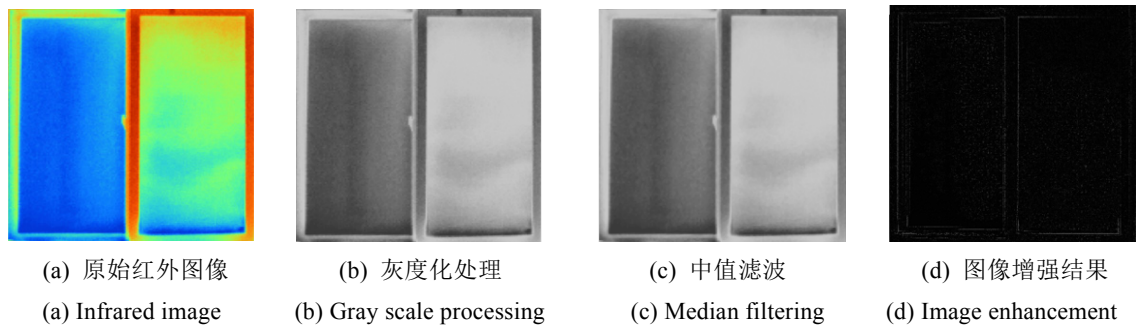


图 2 外窗红外图像预处理结果

Fig. 2 Infrared image preprocessing results of window

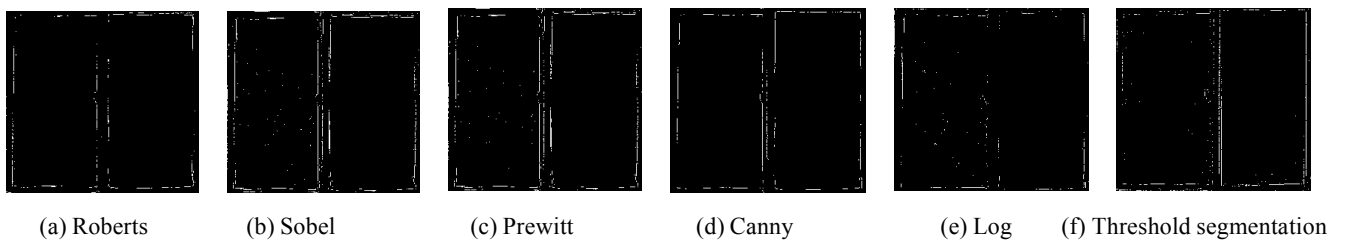


图 3 各方法进行外窗缺陷检测结果

Fig. 3 Different methods were used to detect the defects of windows

表1 外窗缺陷面积对比

Table 1 Defect area comparison of windows

Windows	Value of experiment/ cm ²	Roberts/ cm ²	Sobel/ cm ²	Prewitt/ cm ²	Canny/ cm ²	Log/ cm ²	Threshold value segmentation/cm ²
C1218(1)	11.20	11.50	14.44	14.40	15.44	7.20	11.52
C1218(2)	10.50	10.95	18.13	17.89	11.73	14.47	11.32
C1218(3)	10.30	11.03	14.22	14.02	10.89	14.76	10.43
C1218(4)	11.10	11.30	14.07	13.82	12.94	7.93	11.21
C1716(1)	9.20	9.30	11.92	11.90	9.32	4.96	9.30
C1716(2)	14.50	15.01	16.79	16.62	14.83	9.57	14.24
C2114(1)	15.80	14.86	25.42	24.88	22.93	23.33	16.87
C2114(2)	11.50	13.80	17.20	17.00	13.80	16.30	13.90
C2418(1)	22.10	24.50	30.92	30.50	36.28	26.65	25.66
C2418(2)	20.90	24.60	31.80	31.40	23.40	26.90	24.60

通过对 100 组外窗红外热成像进行预处理和边缘检测,计算了实验值与每种边缘检测技术得到的处理结果之间的误差。计算误差汇总如表 2 所示,用

Roberts 法检测外窗缺陷与实验值较好吻合,平均处理误差为 7.36%。可以认为用 Roberts 法对外窗缺陷的检测和定位与外窗热缺陷的实际位置更为接近。

表2 各处理方式误差汇总

Table 2 Summary of errors of each processing method

Roberts	Sobel	Prewitt	Canny	Log	Threshold value segmentation
7.36%	56.21%	53.86%	26.35%	61.92%	7.97%

2 建筑外窗能耗分析模型

2.1 外窗缺陷红外图像检测模型

为使外窗缺陷检测的方法能够便捷地在外窗热工缺陷检测中实现外窗缺陷面积计算,缩减在检测中利用风机维持 10Pa 压差的流程,建立 0Pa 压差环境的外窗缺陷红外检测模型。将拍摄的 0 Pa 压差环境下的待测外窗红外图像,进行与 10Pa 压差环境图像的一致处理,求出图像处理值。由于利用 Roberts 对外窗的缺陷检测值与实验值误差最小,因此通过外窗空气渗透检测的实验值和外窗红外热成像经 Roberts 检测后的处理值进行分析,确定 0 Pa 压差环境下的外窗红外图像经过红外图像处理得到的处理值与实验值的关系,建立外窗缺陷红外检测模型。

图 4 是 100 组外窗的实验值与其在 0 Pa 压差环境下图像处理值绘制的散点图,求得 0 Pa 压差环境的线性回归模型为: $y=0.965x-0.090$, 其中, R^2 统计量为 0.997, $F=31611.933$, $P=0$ 。模型拟合较好,通过此模型,将 0 Pa 压差环境下采集的外窗红外热成像经图像处理,能够得到外窗缺陷在 10Pa 压差环境状态的面积,模型使处理的平均误差降至 3.21%。0 Pa 压差环境的建筑外窗缺陷红外检测模型

的建立,缩减了外窗空气渗透检测实验步骤,在室内外压差平衡的 0 Pa 压差环境下能够直接对外窗的缺陷面积进行计算。

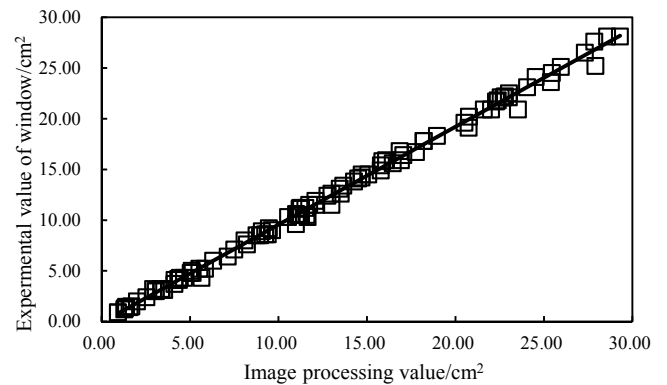


图4 外窗缺陷实验值与图像处理值的散点图

Fig. 4 Scatter plot of experimental values and image processing values of window defects

2.2 建筑外窗空气渗透量计算模型

建筑外窗的空气渗透量与外窗缺陷面积、所处环境的风速、室内外温度有关。进行建筑外窗缺陷检测实验时,为了避开在非适宜实验仪器工作的环境条件,且减少环境因素波动对实验结果的影响,建筑外窗缺陷检测选择在无风或轻风的环境^[26]。因此对建

筑外窗空气渗透量计算模型的建立时,室外风速环境无法作为变量便不再考虑,模型建立考虑空气渗透量与缺陷面积和室内外温度的关系。

外窗空气渗透检测实验能够间接测量出外窗空气渗透量和渗漏面积,同时在实验测试前对室内外温度进行了测量和记录,其实验数据,能够为建筑外窗空气渗透量计算模型的建立提供实验样本,通过实验数据,建立外窗空气渗透量 V 与外窗缺陷面积 S 和所处环境室内外温差 ΔT 的关系模型。

进行 1000 组外窗空气渗透检测实验,在 1000 组的样本中,测试环境的室内温度范围在 $0^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$,室外温度范围在 $-10^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$,室内外温差 ΔT 范围在 $-19^{\circ}\text{C}\sim 36^{\circ}\text{C}$ 。建筑外窗空气渗透量计算模型建立选用神经网络的方法,图 5 为神经网络结构示意图,神经网络结构包含输入层、隐含层、输出层,通过输入样本数据利用神经网络结构不断进行训练、检验减少误差,最终输出与样本数据相关性高的模型,实现相关预测和计算^[27-28]。对于一个典型含有输入层、隐含层、输出层的神经网络可以表达为:

$$y = p[f(W^1x + B_1) - W^2 + B^2] \quad (1)$$

式中: x 和 y 分别为输入和输出矩阵向量; W^1 和 B_1 分别为输入层隐含层的权重和偏置; W^2 和 B^2 分别为输出层隐含层的权重和偏置; f 和 p 为同一个激活函数。

在神经网络训练过程中,损失函数通常由实际输

出和预测输出之间的均方误差 (mean square error, MSE) 表示,具体表示为:

$$\text{MSE} = \frac{1}{2q} \sum_{i=1}^q (y_i - y_{i,t})^2 \quad (2)$$

式中: q 为训练样本个数; y_i 和 $y_{i,t}$ 分别为第 i 项神经网络的预测值和实际数值。

使用神经网络建模时,输入变量为外窗缺陷面积 S 和所处环境室内外温差 ΔT ,目标变量为外窗空气渗透量 V 。关于神经网络计算的设置,1000 组实验样本中的 700 组用于训练集,200 组用于测试集,100 组用于检验集。使用训练集建立神经网络模型,然后使用测试集检验新建立的神经网络模型,测试其是否可以计算或预测训练集以外的数据,并使用检验集数据对神经网络进行最终检验^[29]。图 6 所示的是神经网络完成训练后,建筑外窗空气渗透量计算模型的回归分析图,分别是训练集,测试集,检验集、样本总集的回归分析。各图中虚线代表的最优回归线和实线代表的理想回归线重合,训练集,测试集,检验集、样本总集相关系数 R 分别为 0.99702、0.99746、0.99738、0.99712,拟合效果良好。

在建立建筑外窗空气渗透量计算模型后,将外窗的缺陷面积和室内外环境的温差输入模型中,对外窗的透气性进行预测计算。由于获得的实验数据基于 10 Pa 的压差状态,因此所建立的模型输出也是 10 Pa 状态下建筑外窗的空气渗透量。

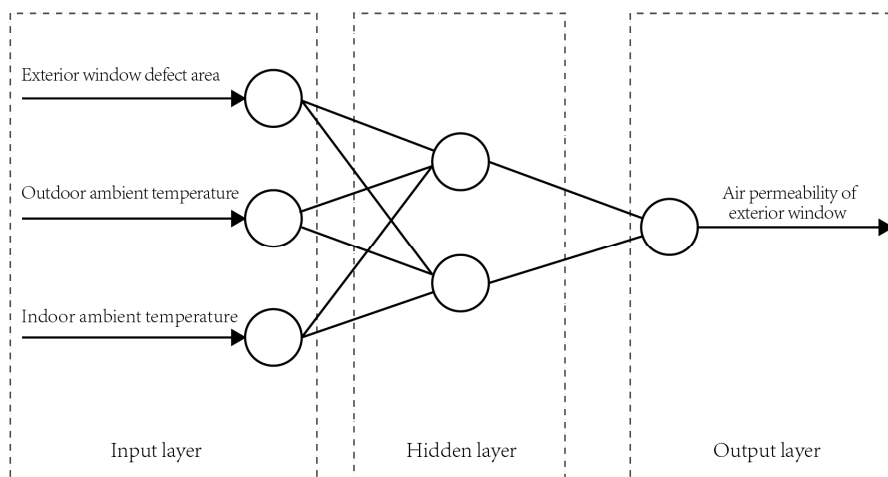


图 5 神经网络结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of neural network structure

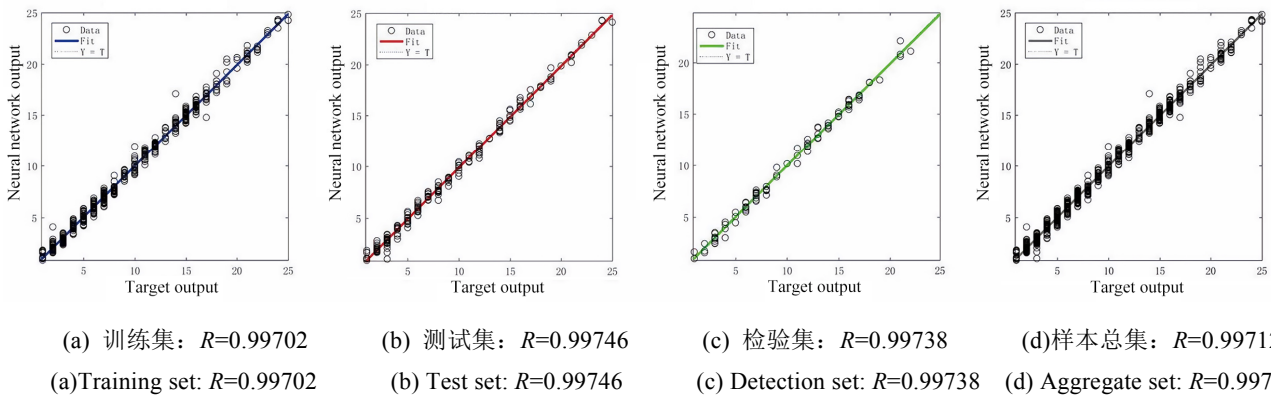


图6 建筑外窗空气渗透量计算模型神经网络回归分析

Fig. 6 Neural network regression analysis of calculation model for air permeability of building windows

3 建筑外窗缺陷的能耗分析

3.1 建筑外窗缺陷能耗的计算

对建筑外窗缺陷进行能耗计算时,对外窗进行热成像的采集,测试待测外窗的窗高、窗宽和室内外温度,计算因外窗缺陷造成的能耗增加比和外窗空气渗透引发的能耗。

- 1) 因外窗缺陷产生的能耗增加比计算
因外窗缺陷造成的能耗增加比^[30]:

$$\beta = \psi \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: β 代表建筑外窗由于缺陷所产生的能耗增加比; ψ 代表外窗关键部位热工缺陷区域占外窗整体区域面积的比例; T_1 代表外窗去除缺陷后整体区域的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; T_2 代表外窗缺陷区域的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 代表室内环境温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

- 2) 外窗空气渗透引发的能耗计算

对于因外窗缺陷的空气渗透引发的能耗计算,可以通过流体热量的计算原理求得^[30]:

$$Q_h = Cm|\Delta t| = C\rho V|\Delta t| \quad (4)$$

式中: Q_h 代表每小时因外窗缺陷的空气渗透引发的能耗, kJ/h ; C 代表空气的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; m 是通过外窗缺陷的空气渗透质量, kg/h ; 外窗空气渗透质量的获取,可以根据 $m = \rho \times V$ 计算得出气体的质量流量; ρ 为室外计算温度下的空气密度, kg/m^3 , V 代表通过外窗缺陷的空气渗透量, m^3/h ; $|\Delta t|$ 代表室内外温差的绝对值, $^{\circ}\text{C}$ 。

以烟台地区某居住建筑外窗为例,进行能耗计算和相关分析,待测外窗的原始红外图像如图7所示。待测外窗的窗高1.80 m,窗宽1.80 m,拍摄时室内温度 19.1°C ,室外温度 2.3°C 。图8所示是经图像处理

的外窗缺陷检测结果,通过对待测外窗进行外窗红外图像处理和缺陷的能耗计算,得出待测外窗缺陷面积 13.14cm^2 ,空气渗透量 $11.79\text{ m}^3/\text{h}$,因外窗缺陷产生的能耗增加比为 0.071% 。

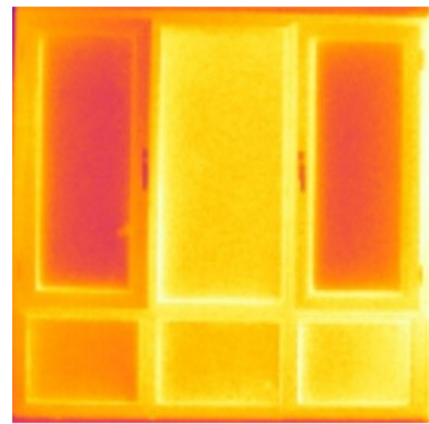


图7 外窗原始红外图像

Fig.7 Original infrared image of window

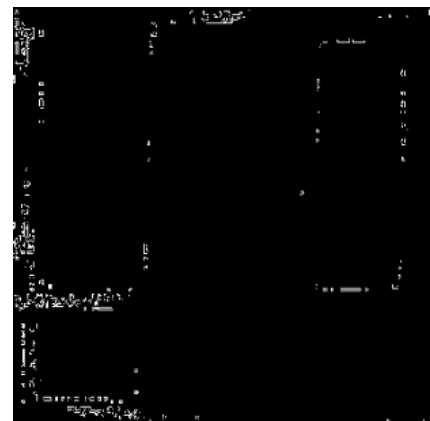


图8 外窗缺陷检测结果

Fig.8 Defect detection image of window

根据《建筑节能气象参数标准》^[31]中已有的气象参数地点,选取烟台龙口的气象参数作为室外环境参数进行能耗的计算,此外窗所属建筑的供冷和供热采

用空气源热泵系统,对于室内环境参数,冬季室内温度取 18℃,夏季室内温度取 26℃^[32];对于能耗计算时间参数,选取烟台地区的采暖期 11月15日-3月31日,夏季空调的制冷期 6月15日-8月31日。此外窗冬季因缺陷部位空气渗透引发的能耗为 796798.38 kJ,夏季因缺陷部位空气渗透引发的能耗为 67680.36 kJ,全年因缺陷部位空气渗透引发的能耗为 864478.74 kJ。通过此外窗因缺陷引发全年的能耗结果,计算此外窗因缺陷导致空气源热泵机组电力消耗而引发的碳排放,根据所在华北区域电网平均 CO₂ 排放因子 0.8843 kg CO₂/kWh^[33],计算可得,此外窗全年因外窗缺陷引发的碳排放量为 212.35 kg CO₂。

根据计算结果,测得此外窗的空气渗透量为 11.79 m³/h,计算出待测外窗单位面积空气渗透量 3.64 m³/h,可得出其气密性能等级为 6 级。以单位面积计算和衡量此外窗由于空气渗透所引发的能耗,每年因外窗的缺陷耗能约 266814.43 kJ/m²,造成约 65.54 kg/m² 的 CO₂ 排放。由于安装在建筑中的外窗数量庞大,外窗缺陷产生的能耗无法被忽略,对于气密性能低于 6 级的建筑外窗而言,则会引发更大的能耗损失。

测试结果表明,对于此外窗而言,缺陷仅使外窗整体能耗增加了约 0.07%,外窗缺陷产生的能耗占外窗整体能耗很小的部分。外窗缺陷的存在,不会对外窗整体的能耗产生很大的影响,但通过计算,即使外窗缺陷产生的能耗在外窗整体能耗中占比低,此部分能耗也引发了大量的能耗损失和 CO₂ 的排放。这是因为对于外窗整体而言,其本身是围护结构的薄弱环

节,即使外窗不存在渗漏、没有产生与外界的空气渗透,外窗自身也会向室外环境传热,导致消耗大量的能量,加重 CO₂ 的排放。虽然对于外窗整体能耗而言,缺陷造成的能耗占比低,但通过对外窗缺陷引发的能耗以及碳排放量的计算结果来看,若对外窗缺陷进行维护,能够对其产生的大量能耗进行降低,减少一定的外窗耗能,以此提高外窗节能。

3.2 建筑外窗缺陷能耗分析

为了分析维护外窗缺陷、提高外窗气密性能等级,对外窗缺陷引发能耗的影响,以烟台地区建筑供冷和供热均利用电网电力为能源的空调系统为例,对各气密性能指标下不同气密性能等级的建筑外窗每年引发的能耗进行计算,绘制图 9 所示的各气密性能指标下单位面积外窗因缺陷引发的能耗和碳排放量的统计图。

通过计算,若对建筑外窗缺陷进行维护,外窗每减少 1 cm² 的空气渗透面积,每年能够节能 66146 kJ,减少 16 kg 的 CO₂ 排放。通过维护外窗缺陷使外窗气密性能等级每提高 1 级,单位面积外窗每年能够节能 110012 kJ,减少 27 kg 的 CO₂ 排放。目前新建建筑外窗的气密性能等级主要为 6~7 级,但对于既有建筑而言,目前气密性能等级为 4 级甚至更低的建筑外窗仍在老旧建筑中被使用,并且外窗随着建筑使用时间的增加,其外窗缺陷将不断增加,气密性能等级将变得更低,其每年因空气渗透而消耗的能量与目前 6~7 级的外窗相比,每年因外窗缺陷造成的耗能高出一倍,对于缺陷严重且无法维护、气密性能等级较低的外窗,应采取更换措施。

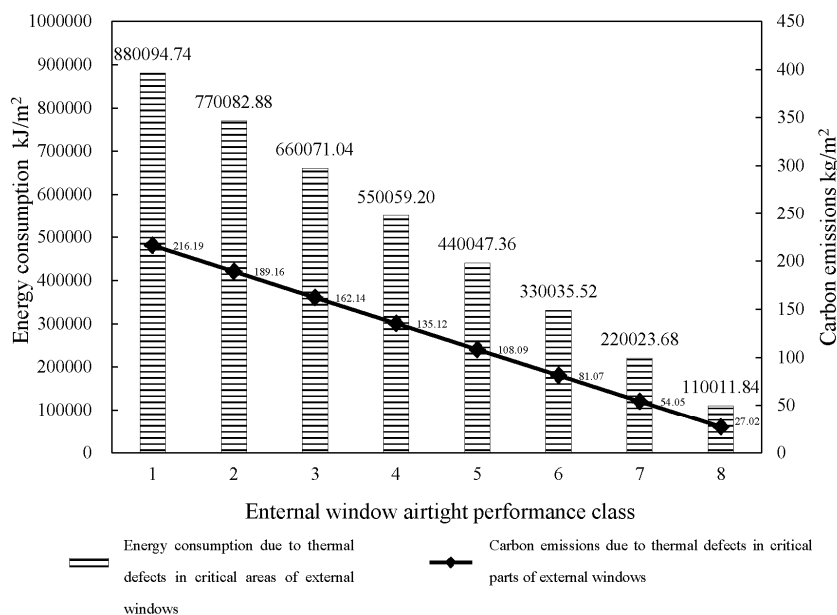


图 9 各气密性能指标下外窗缺陷引发的能耗和碳排放量

Fig. 9 Energy consumption and carbon emissions caused by exterior window defects under various airtight performance indicators

由于建筑中的外窗数量庞大,且在围护结构中外窗面积占了较高的比例,对于一座建筑而言,建筑中所有的外窗,每年因外窗缺陷会产生大量的能源消耗。通过对建筑外窗缺陷进行检测,对检测到的外窗缺陷进行维护,从而提高外窗气密性能等级,能够减少大量的外窗能耗。根据计算通过维护外窗缺陷和提升气密性能等级的节能结果来看,从外窗缺陷的角度来减少外窗耗能,具有较大的节能空间,能够提高外窗的节能,以此实现建筑节能。

4 小结

本文基于红外图像处理技术提出建筑外窗缺陷检测和能耗分析的方法,对外窗红外热成像图中的缺陷进行提取和计算,确定建筑外窗红外图像的处理方式,并建立外窗缺陷红外图像检测模型,实现建筑外窗缺陷的检测和能耗计算。结果表明:

1) 通过红外热成像技术和图像处理技术结合,能够对建筑外窗缺陷进行检测并对缺陷引发的能耗进行量化分析,通过计算,外窗缺陷产生的能耗在外窗整体能耗中占比低,但此部分能耗也引发了大量的能耗损失和 CO₂ 的排放。若对外窗缺陷进行维护,能够减少外窗耗能,提高外窗节能。

2) 从外窗缺陷的角度来减少外窗耗能,具有较大的节能空间,对建筑外窗缺陷进行维护,外窗每减少 1 cm² 的空气渗透面积,每年能够节能 66146 kJ,减少 16 kg 的 CO₂ 排放;通过维护外窗缺陷使外窗气密性能等级每提高 1 级,单位面积外窗每年能够节能 110012 kJ,减少 27 kg 的 CO₂ 排放。

参考文献:

- [1] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告 2020[J]. 建筑节能, 2021, 49(2): 1-6.
China Association of Building Energy Efficiency. China building energy consumption annual report 2020[J]. *Building Energy Efficiency*, 2021, 49(2): 1-6.
- [2] GUO S, YAN D, HU S, et al. Modelling building energy consumption in China under different future scenarios[J]. *Energy*, 2021, 214: 119063.
- [3] 郭兴忠, 杨闯, 张超, 等. 节能门窗热工性能对建筑能耗影响的模拟研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(2): 261-265, 297.
GUO Xingzhong, YANG Chuang, ZHANG Chao, et al. Simulation on thermal performance of energy-saving windows and doors and its influence on building energy consumption[J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(2): 261-265, 297.
- [4] 赖惠玲. 绿色节能塑料门窗的发展[J]. 塑料工业, 2018, 46(10): 22-25.
LAI Huijing. Development of green and energy saving plastic doors and windows[J]. *China Plastics Industry*, 2018, 46(10): 22-25.
- [5] 李伟, 东岩, 高强, 等. 我国建筑气密性研究现状与分析[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(8): 1097-1098, 1101.
LI Wei, DONG Yan, GAO Qiang, et al. Current situation and analysis of research on building airtightness in China[J]. *Fire Science and Technology*, 2019, 38(8): 1097-1098, 1101.
- [6] 董子忠, 许永光, 温永玲, 等. 炎热地区夏季窗户的热过程研究[J]. 暖通空调, 2003(3): 93-96.
DONG Zizhong, XU Yongguang, WEN Yongling, et al. Window thermal process in hot climate[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2003(3): 93-96.
- [7] 李扬捷, 徐伟, 董宏. 压差法评价建筑常压气密性能的实验研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(6): 206-210.
LI Yangjie, XU Wei, DONG Hong. Experimental study on the evaluation of building airtightness under normal pressure by fan pressurization method[J]. *Building Science*, 2021, 37(6): 206-210.
- [8] JI Y, LIN D. Airtightness field tests of residential buildings in Dalian, China[J]. *Building and Environment*, 2017, 119: 20-30.
- [9] Barreira E, Almeida R M S F, Moreira M. An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings[J]. *Energy & Buildings*, 2017, 140: 224-235.
- [10] Nathan V D B, Janssens A. Airtightness and water tightness of window frames: comparison of performance and requirements[J]. *Building & Environment*, 2016, 110: 129-139.
- [11] TU B, YANG X, ZHOU C, et al. Hyperspectral anomaly detection using dual window density[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(12): 8503-8517.
- [12] Mohan A, Poobal S. Crack detection using image processing: a critical review and analysis[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, 57(2): 787-798.
- [13] HAN Qinzhe, YIN Qian, ZHENG Xin, et al. Remote sensing image building detection method based on Mask R-CNN[J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2021, 8(3): 1847-1855.
- [14] Riehm M, Gustavsson T, Bogren J, et al. Ice formation detection on road surfaces using infrared thermometry[J]. *Cold Regions Science & Technology*, 2012, 83: 71-76.
- [15] XU C H, XIE J, CHEN G M, et al. An infrared thermal image processing framework based on superpixel algorithm to detect cracks on metal surface[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 67(1): 266-272.
- [16] 曹依蕾, 刘寅, 高龙, 等. 红外热像仪在被动式超低能耗建筑性能检测中的应用[J]. 激光与红外, 2020, 50(2): 174-178.
CAO Yilei, LIU Yin, GAO Long, et al. Application of infrared thermal imager in the performance detection of passive ultra-low energy buildings[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(2): 174-178.

- [17] Sharma S, Varma T. Graph signal processing based underwater image enhancement techniques[J]. *Engineering Science and Technology*, 2022, **32**: 101059.
- [18] Ed Is E, Flores Colen I, Brito J D. Passive thermographic inspection of adhered ceramic claddings: limitation and conditioning factors[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2012, **27**(6): 737-747.
- [19] Doshvarpassand S, WANG X. An automated pipeline for dynamic detection of sub-surface metal loss defects across cold thermography images[J]. *Sensors*, 2021, **21**(14): 4811.
- [20] Gehri N, J Mata-Falcón, Kaufmann W. Automated crack detection and measurement based on digital image correlation[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, **256**: 119383.
- [21] 陈劲, 陈晓东, 赵辉, 等. 基于红外热成像法和超声波法的钢管混凝土无损检测技术的试验研究与应用[J]. *建筑结构学报*, 2021, **42**(S2): 444-453.
CHEN Jin, CHEN Xiaodong, ZHAO Hui, et al. Experimental research and application of non-destructive detecting techniques for concrete-filled steel tubes based on infrared thermal imaging and ultrasonic method[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, **42**(S2): 444-453.
- [22] 范鹏, 冯万兴, 周自强, 等. 深度学习在绝缘子红外图像异常诊断的应用[J]. *红外技术*, 2021, **43**(1): 51-55.
FAN Peng, FENG Wanxing, ZHOU Ziqiang, et al. Application of deep learning in abnormal insulator infrared image diagnosis[J]. *Infrared Technology*, 2021, **43**(1): 51-55.
- [23] 张玲玲, 许廌, 张继冉, 等. 基于红外图像处理技术的建筑外窗缺陷面积计算研究[J]. *红外技术*, 2022, **44**(12): 1358-1366.
ZHANG Lingling, XU Ao, ZHANG Jiran, et al. Research on calculation of defect area of building exterior windows based on infrared image processing technology[J]. *Infrared Technology*, 2022, **44**(12): 1358-1366.
- [24] 孙晓斐, 祁卓, 孙王倩, 等. 基于特征融合的红外图像增强算法[J]. *光学技术*, 2022, **48**(2): 250-256.
SUN Xiaofei, QI Zhuo, SUN Wangqian, et al. Infrared image enhancement algorithm based on feature fusion[J]. *Optical Technique*, 2022, **48**(2): 250-256.
- [25] GAO C, MENG D, YANG Y, et al. Infrared patch-image model for small target detection in a single image[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(12): 4996-5009.
- [26] 张玲玲, 任攀攀, 许廌, 等. 基于红外图像处理的建筑外窗气密性能现场检测[J]. *红外技术*, 2023, **45**(4): 410-416.
ZHANG Lingling, REN Panpan, XU Ao, et al. On-site detection of airtightness of building windows based on infrared image processing[J]. *Infrared Technology*, 2023, **45**(4): 410-416.
- [27] Val A, Padilla-Marcos M N, Meiss A, et al. Air infiltration monitoring using thermography and neural networks[J]. *Energy and Buildings*, 2019, **191**: 187-199.
- [28] López-Pérez L A, Flores-Prieto J J, C Ríos-Rojas. Comfort temperature prediction according to an adaptive approach for educational buildings in tropical climate using artificial neural networks[J]. *Energy and Buildings*, 2021, **251**: 111328.
- [29] XIE L, PI D, ZHANG X, et al. Graph neural network approach for anomaly detection[J]. *Measurement*, 2021, **180**(1): 109546.
- [30] 中国建筑科学研究院. 居住建筑节能检测标准: JGJ/T 132-2009 [S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部.
China Academy of Building Research. Energy efficiency test standard for residential buildings: JGJ/T 132-2009 [S]. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.
- [31] 中国建筑科学研究院. 建筑节能气象参数标准: JGJT346-2014 [S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部.
China Academy of Building Research. Standard for weather data of building energy efficiency: JGJT346-2014[S]. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.
- [32] 中国建筑科学研究院. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB50736-2012[S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部.
China Academy of Building Research. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB50736-2012[S]. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.
- [33] 中国建筑科学研究院, 中国建筑标准设计研究院. 建筑碳排放计算标准: GB/T51366-2019[S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局.
China Academy of Building Research, China Institute of Building Standard Design & Research. Standard for building carbon emission calculation: GB/T51366-2019 [S]. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation.