

玻璃幕墙结构热损伤区域图像改进机器视觉识别方法

Improvement of Machine Vision Recognition Method for Thermal Damage Area Image of Glass Curtain Wall Structure

李海滨, 纪晓鹏, 郑祥, 杨英, 吴喜元

(中建深圳装饰有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 为提高玻璃幕墙结构热损伤区域图像识别精度, 提出基于改进机器视觉的玻璃幕墙结构热损伤区域图像识别方法。根据玻璃幕墙结构损伤热波传播原理, 构建温度传递函数和玻璃幕墙结构热损伤区域概率模型, 利用改进机器视觉增强处理玻璃幕墙结构热损伤图像, 结合锐化处理实现对玻璃幕墙结构热损伤图像的识别。结果表明: 方法识别出玻璃幕墙结构损伤区域与正常区域表面温度差别较大, 其变化趋势符合玻璃幕墙实际情况, 能够识别玻璃幕墙结构热损伤区域图像; 在适当的热激励时间下, 可以提高玻璃幕墙结构热损伤区域识别精度。

关键词: 改进机器视觉; 图像识别; 热损伤; 热波传播; 玻璃幕墙

中图分类号: TP751 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 02-0164-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.030

LI Haibin, JI Xiaopeng, ZHENG Xiang, YANG Ying, WU Xiyuan

(China Construction Shenzhen Decoration Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: To improve the accuracy of image recognition of thermal damage areas in glass curtain wall structures, a method based on improved machine vision for image recognition of thermal damage areas in glass curtain wall structures is proposed. Based on the principle of thermal wave propagation in glass curtain wall structure damage, a temperature transfer function and a probability model of thermal damage area in glass curtain wall structure are constructed. The improved machine vision is used to enhance the processing of thermal damage images in glass curtain wall structure, and combined with sharpening processing, the recognition of thermal damage images in glass curtain wall structure is achieved. The results show that the method proposed in the article identifies a significant difference in surface temperature between the damaged and normal areas of the glass curtain wall structure, and its changing trend is consistent with the actual situation of the glass curtain wall. It can identify images of thermal damage areas in the glass curtain wall structure; Under appropriate thermal excitation time, the accuracy of identifying thermal damage areas in glass curtain wall structures can be improved.

Keywords: improve machine vision; image recognition; thermal damage; thermal wave propagation; glass screen wall

0 引言

随着经济的飞速发展, 国内玻璃幕墙应用得越来越多, 尤其一些具有代表性的建筑均使用各种不同的玻璃幕墙^[1]。这些玻璃幕墙将建筑的外部防护和装潢

的作用完美结合在一起, 缩短了施工周期, 增强了建筑美感, 也提高了建筑的安全性和稳定性。尽管玻璃幕墙可以为建筑物增添美感, 但同时也存在一定的安全风险, 受到风、雨、灰尘、大气、高温等多种外部环境的长期作用, 使其表面损坏, 从而发生剥落^[2]。由于玻璃幕墙造成的安全事故频频发生, 所以通过安

作者简介: 李海滨 (1981—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 室内外装饰装修及结构力学施工技术。

收稿日期: 2023-11-21

全检查来判定玻璃幕墙的安全状态，并针对安全状况进行及时处置，对人民生命财产安全和社会稳定都具有重要的意义。

徐涵等^[2]采用非线性弹簧单元模拟结构胶及脱胶状态，有限元法分析了 12, 545 种隐框玻璃幕墙脱胶工况。反向传播神经网络训练并校验了预测精度，成功预测了幕墙脱胶状态；陈玉明等^[2]提出玻璃幕墙热图像序列处理方法，包括数据重建、小波变换重构、维纳滤波增强和损伤区域识别。实验证明，小波变换降低噪声并保留特征，维纳滤波平滑图像保留关键信息，损伤区域识别率高达 93. 7%；郑恒等^[4]以原点频响函数的累计误差为衡量标准，建立了一种灵敏、快捷的损伤检测算法，可以快速、灵敏地检测出粘合构件的损伤程度；张强等^[5]利用 SRV 与 SVM 相结合的方法来识别四边框玻璃幕墙的松弛状态，并根据这一类结构的动态和静态性能，构建了玻璃幕墙 SRV 模型，结果证明了采用四边框对玻璃幕墙连接松弛具有良好的识别效果。

基于以上研究背景，本文将改进机器视觉应用到玻璃幕墙结构热损伤区域图像识别中，通过建立完整的实验方案和评估体系，确保其在实际应用中的可行性和有效性。减少玻璃幕墙结构因热损伤引发的潜在风险，避免玻璃幕墙事故的发生。

1 玻璃幕墙结构热损伤区域分析与识别

1.1 构建玻璃幕墙结构损伤热波温度传递函数

在玻璃幕墙结构发生损伤时，产生的热量阻碍了其反射热波的传导，从而在受损的界面上反弹，产生了一种反射式的热辐射，经幕墙的表面又会被反射回来，这样循环，直到全部减弱^[6]。在这种情况下，幕墙玻璃的表层温度是由两组直线叠加而成，其中一组是受热激发的直接辐射，而另外一组则是在受损伤界面处来回反射的热波，使玻璃幕墙表面产生了较大的升温，如图 1 所示。

为了使解析的程序简单，把系统理论的视角应用于 ϑ 域中进行了微分方程的映射^[7]。拉普拉斯方程是一类二阶常差的黏合结构，其理论公式如下：

$$\begin{cases} \bar{Z}_1(X, \vartheta) = \vartheta(\vartheta)g_1[\delta_1(\alpha_1, \alpha_2), f_1(L_1, \gamma_1), X, \vartheta] \\ \bar{Z}_2(X, \vartheta) = \vartheta(\vartheta)g_2[\delta_2(\alpha_1, a_2), f_2(L_2, \gamma_2), X, \vartheta] \end{cases} \quad (1)$$

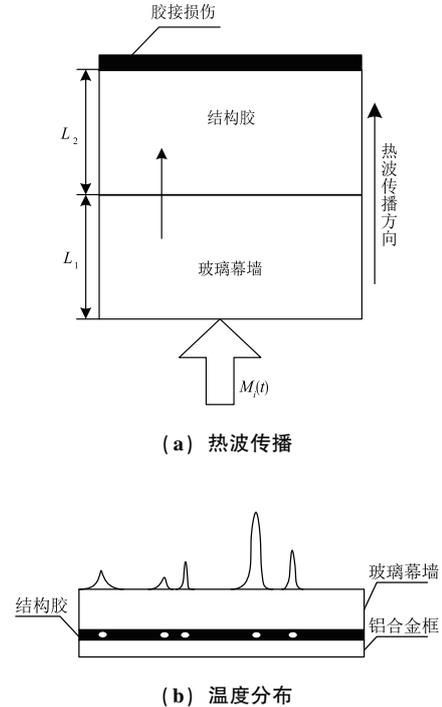


图 1 玻璃幕墙结构损伤热波传播及温度分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal wave propagation and temperature distribution for structural damage of glass curtain walls 式中： g_1 和 g_2 分别为幕墙玻璃损伤系数和导热系数； δ_1 和 δ_2 为幕墙玻璃和结构胶材料的损伤函数； f_1 和 f_2 分别为幕墙玻璃损伤的热波函数和温度； L_1 和 L_2 分别为玻璃幕墙和结构胶的厚度； X 为玻璃幕墙结构损伤后热波传播方向； α_1 和 α_2 分别为幕墙玻璃和结构胶的温度扩散率； γ_1 和 γ_2 分别为幕墙玻璃和结构胶的导热系数。

热波法只能探测到幕墙玻璃的表层温度，而且同一测试过程中，其导热系数保持不变，故将温度传递函数 $Z_1(0, \vartheta)$ 简记为：

$$\bar{Z}_1(\vartheta) = \vartheta(\vartheta)g_1[f_1(L_1, \gamma_1), \vartheta] \quad (2)$$

当玻璃幕墙结构损伤时，幕墙玻璃表面温度由正常热波和反射热波的线性叠加而成^[8]，故玻璃幕墙结构损伤热波的传播记作为：

$$\bar{Z}_{L1}(\vartheta) = \vartheta(\vartheta)g_{L1}[f_{L1}(L_1, L_2), \vartheta] \quad (3)$$

式中： g_{L1} 为玻璃幕墙结构损伤热波传播函数； f_{L1} 为玻璃幕墙结构损伤热波调制函数。

根据玻璃幕墙结构损伤的热波传播原理及温度分布情况，构建温度传递函数，完成玻璃幕墙结构损伤热波的传播分析。

1.2 检测玻璃幕墙结构热损伤区域

由于空气和玻璃幕墙存在温差，从而形成热传

研究与应用

导,使玻璃幕墙发生散热现象,散发热量公式为:

$$Q_c = \beta(T_m - T_d) \quad (4)$$

式中: β 为散热系数; T_m 为气温; T_d 为玻璃幕墙结构表面的温度。

根据能量守恒定律^[9],得到玻璃幕墙结构表面的热传导公式,可表示为:

$$Q_a = \rho_b c_g - \nabla T \quad (5)$$

式中: ρ_b 为玻璃幕墙的密度; c_g 为玻璃幕墙的比热容; ∇T 为温差。

当玻璃幕墙结构发生热损失时,其一维的损伤温度分析数学表达式如下:

$$T_{\text{dam}}(t) = \frac{Q_d \alpha_h}{\rho_b c_g H_e} \quad (6)$$

式中: Q_d 为热损伤位置; H_e 为玻璃幕墙的厚度; α_h 为散热系数。

在实际应用中,由于玻璃幕墙的热传输距离比涡流传递热量的传输距离要长得多,所以可以忽略涡流传递热量的影响^[10],而只通过玻璃幕墙的结构特点来进行计算。可以用以下数学方程式来表达玻璃幕墙的表面温度分布:

$$T_r(l, t) = \frac{Q_c}{\zeta_e} (2 - x) \quad (7)$$

式中: l 为玻璃幕墙结构热损伤位置与热像仪的距离; ζ_e 为热导常数。

尽管通过温度的改变可以判断出玻璃幕墙的热损伤程度,但由于受初始温度和温差等因素的限制,必须对其进行温度测试,而在热辐射探测中,由于温度、风速、光照等因素对检测结果造成很大的影响,且结构不同,施工控制参差不齐,因此在实际检测之前,必须使用标准的样品对其进行校正^[11]。以玻璃幕墙结构表面温度变化作为参考,并与差分计算相结合,得出了由反射热波所致的表面温差:

$$\Delta T_i(t) = \sum M_i(t) T_r(l, t) \quad (8)$$

式中: $M_i(t)$ 为第*i*个玻璃幕墙的热损伤响应函数。

通过差分计算可以有效地减少原始温度对测量结果的影响,降低了测量时的共模干涉,同时通过热导体体系进行计算,无需考虑初始条件^[12],从而简化检测玻璃幕墙结构热损伤区域的过程。

1.3 识别玻璃幕墙结构热损伤区域图像

在识别玻璃幕墙结构热损伤区域图像时,首先,

计算玻璃幕墙结构热损伤程度,计算公式如下:

$$\begin{cases} \phi_a = \frac{E_{c, \min}}{E_{sd, \max}} + E_{dd} \\ \phi_b = \frac{\chi_c R_y}{R_{sd, \max}} + R_{dd} \end{cases} \quad (9)$$

式中: ϕ_a 为玻璃幕墙结构热损伤的区域; ϕ_b 为玻璃幕墙损伤区域的热传播温差比; $E_{c, \min}$ 、 E_{dd} 和 $E_{sd, \max}$ 代表玻璃幕墙结构在不同热波下的热损伤; χ_c 为玻璃幕墙结构的热损伤需求比; R_y 、 $R_{sd, \max}$ 和 R_{dd} 为玻璃幕墙结构热损伤行为的热激励、导热脉冲和恒温热波。

在对玻璃幕墙结构热损伤区域进行图像识别的过程中,首先建立玻璃幕墙结构热损伤的概率需求模型,假设,玻璃幕墙结构热损伤参数均值 \bar{S} 和损伤强度指标之间的关系,满足下式:

$$\bar{S} = \lambda \psi^t \quad (10)$$

式中: λ 为玻璃幕墙结构热损伤参数的响应函数; t 为损伤强度指标的响应系数。

为了进一步分析出玻璃幕墙结构的热损伤情况,构建玻璃幕墙结构热损伤区域概率模型,表示为:

$$\ln \bar{S} = \frac{1}{\kappa} + \sigma \ln(\psi) \quad (11)$$

式中: κ 和 σ 分别为玻璃幕墙结构热损伤指标的回归系数。

基于玻璃幕墙结构热损伤区域概率模型,利用改进机器视觉分析玻璃幕墙结构热损伤图像 $f_{i,j}$ ^[13],得到玻璃幕墙结构热损伤图像的灰度图,公式如下:

$$\frac{1}{\Omega} + \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{f_{i,j}} \quad (12)$$

式中: Ω 为识别系数; Λ 为玻璃幕墙热损伤的强度。

对玻璃幕墙结构热损伤图像进行灰度处理后^[14],再利用改进机器视觉对玻璃幕墙结构热损伤图像进行增强处理,最后利用模板 U 对其进行识别,得到结果 φ_i ,表达式为:

$$\varphi_i = U \times \xi_i \quad (13)$$

式中: ξ_i 为玻璃幕墙结构热损伤区域识别函数。通过上述计算,可以得到玻璃幕墙结构热损伤图像的像素值,输出表达式为:

$$f_i(x, y) = \underset{(x, y) \in N(x, y)}{\text{median}} [U(x, y)] \quad (14)$$

利用式(14)对玻璃幕墙结构热损伤区域图像进行锐化处理^[15],并与实际的玻璃幕墙结构热损伤图像进行对比,表达式为:

$$\Lambda^2 U = \frac{\varepsilon^2 U}{\varepsilon x^2} + \frac{\varepsilon^2 U}{\varepsilon y^2} \quad (15)$$

式中： ε 为玻璃幕墙结构热损伤区域图像的转换系数。

根据锐化处理后的玻璃幕墙结构热损伤图像，利用机器视觉，实现对玻璃幕墙结构热损伤图像的认识，即：

$$U^* = \frac{1}{U} + \Lambda^2 U + \varphi_i \quad (16)$$

综上所述，通过计算玻璃幕墙结构热损伤程度，构建玻璃幕墙结构热损伤区域概率模型，利用改进机器视觉增强处理玻璃幕墙结构热损伤图像，结合锐化处理实现对玻璃幕墙结构热损伤图像的认识。

2 算例实验与结果分析

2.1 选取热损伤区域图像识别的热激励时间

为了验证文中方法在识别玻璃幕墙结构热损伤区域图像时的可行性，采用如图 2 所示的无损伤方形玻璃幕墙试件，在温度为 24 ℃、湿度为 70% 的实验室内，检测试件的辐射照度。

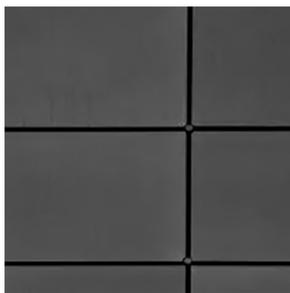


图 2 无损伤方形玻璃幕墙试样
Fig. 2 Undamaged square glass curtain wall sample

对试件的热激励时间为 2~20 s，每间隔 2 s 为一组，共计 10 组，每一组之间的时间间隔为 1 h，保证试件完全冷却。

通过将温度反演为辐射照度，计算玻璃幕墙试件的均匀度，在不同热激励时间下，玻璃幕墙试件的均匀度如图 3 所示。

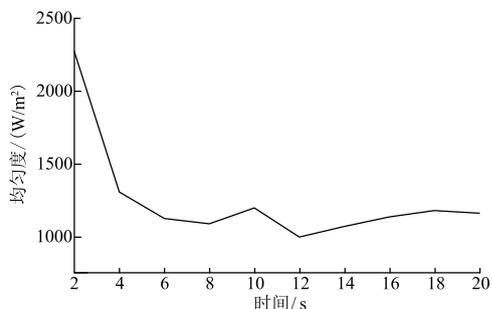


图 3 玻璃幕墙试件的均匀度
Fig. 3 Uniformity of glass curtain wall specimens
当热激励时间为 2 s 时，玻璃幕墙的均匀度最

大，为 2250 W/m²，原因是热激励时间不足导致玻璃幕墙表面的温度偏低，热图像会呈现明显的噪声，增大了玻璃幕墙的均匀度；随着热激励时间的延长，玻璃幕墙的均匀度逐渐稳定，2~20 s 内的均匀度均值为 1186 W/m²。

如果横向热波对玻璃幕墙结构的传播影响比较明显，玻璃幕墙的局部升温会随着热激励时间增加而增大，玻璃幕墙的热损伤也会更加严重。选择热激励时间为 20 s 的热图像为参考，得到了该图像与其他热图像的比值，如图 4 所示。

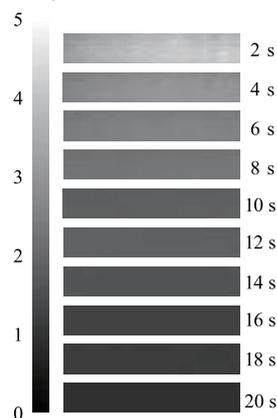


图 4 玻璃幕墙热图像的比值图像

Fig. 4 Ratio image of thermal image of glass curtain wall

由图 4 可知，2 s 时图像出现了明显的环状起伏，4 s 时逐渐减弱，随后便消失，原因是制作试件时结构胶的气泡所致。随着热激励时间的延长，热图像与 20 s 时的图像区别逐渐变小，6 s 时热波的横向传播减弱。由于 2 s 和 4 s 的均匀度较大，可以得出环状起伏是时滞效应所致，因此热损伤区域图像识别的热激励时间应大于等于 6 s。

2.2 结果分析

利用太阳光和热空气等热激励源进行玻璃幕墙结构的热损伤区域图像识别，由于玻璃幕墙结构的热损伤在环境载荷下会逐渐扩展，最终导致玻璃脱落，因此设置热损伤的宽度为 4 mm，深度为 0~2 mm，热损伤区域图像识别的热激励时间为 10 s。为了避免邻近试件对实验结果的影响，试件之间选择发泡橡胶隔离，并将试件放在泡沫塑料板上，避免与人体接触。

采用文中方法分别在日照条件下，识别玻璃幕墙结构的热损伤区域图像，得到玻璃幕墙结构热损伤图像和表面温度差曲线，如图 5 所示。

研究与应用

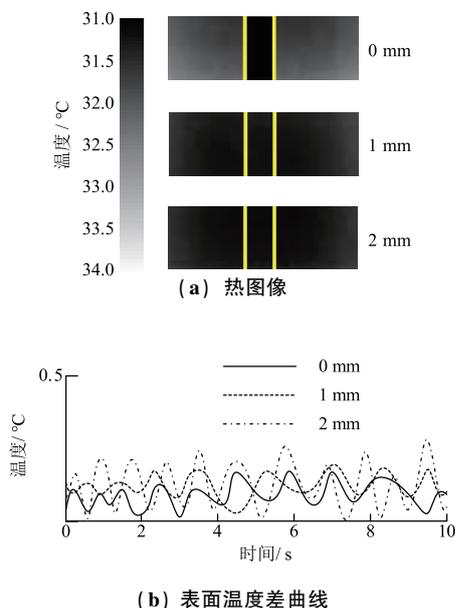


图5 热损伤识别的热图像和表面温度差曲线
Fig.5 Thermal image and surface temperature difference curve for thermal damage identification

玻璃幕墙结构的损伤区域与正常区域的表面温度差别较大,说明文中方法能够识别玻璃幕墙结构的热损伤区域图像;在日照条件下,玻璃幕墙表面温度差曲线在深度为0~2 mm均出现了一定变化,波动幅度在0~0.3 °C之间,高于热像仪的测温精度 ± 0.2 °C。

3 结束语

改进机器视觉,针对玻璃幕墙结构的热损伤区域,提出一种图像识别方法。分析玻璃幕墙结构损伤的热波传播原理,构建温度传递函数;基于玻璃幕墙的散热现象,构建玻璃幕墙结构热损伤区域概率模型;通过改进机器视觉增强处理玻璃幕墙结构热损伤图像,结合锐化处理实现对玻璃幕墙结构热损伤图像的识别,在识别玻璃幕墙结构的热损伤区域时精度较高。

参 考 文 献

[1] 陈玉明,林金帆,任则铭,等.基于热图像重建及增强的

- 玻璃幕墙结构胶损伤区域识别方法[J].自动化与信息工程,2021,42(2):43-48.
- [2] 徐涵,杨健,王星尔,等.反向传播神经网络在隐框玻璃幕墙脱胶损伤识别中的应用[J].硅酸盐学报,2019,47(8):1073-1079.
- [3] 任重翠,李建辉,唐意,等.风震联合作用下高层建筑主体结构和玻璃幕墙的性能研究[J].工程力学,2022,39(7):58-69.
- [4] 郑恒,张喜臣,王洪涛,等.基于原点频响函数的建筑玻璃幕墙粘接结构损伤检测[J].振动与冲击,2021,40(13):289-298.
- [5] 张强,杨健,王星尔,等.基于结构响应向量和支撑向量机的框支承玻璃幕墙连接松弛状态智能识别[J].硅酸盐学报,2020,48(10):1682-1688.
- [6] 张元植,魏明宇,黄友帮,等.玻璃幕墙振动测试法现场试验研究与数值分析[J].四川建筑科学研究,2021,47(1):16-23.
- [7] 黄琳洁,刘文白,原媛,等.基于数字照相量测技术的风荷载作用下玻璃幕墙变形量测研究[J].硅酸盐通报,2021,36(2):625-628.
- [8] 王永祥,何海涛,伍军,等.光纤光栅技术在玻璃幕墙边缘检测应用[J].应用科学学报,2020,38(6):853-863.
- [9] 李立,余翠,孙涛,等.基于颜色特征的数字钻孔图像溶隙结构识别方法[J].岩土力学,2019,40(8):3274-3281,3290.
- [10] 李腾,梁云东,李滇,等.玻璃幕墙中钢板肋稳定性分析及设计方法研究[J].建筑科学,2021,37(3):34-38.
- [11] 周易非,原媛,刘文白,等.基于数字图像相关技术的隐框玻璃幕墙抗风压性能评估[J].应用光学,2020,41(6):1197-1206.
- [12] 苏擎柱.某机场预应力索桁架点支式玻璃幕墙安全性检测鉴定[J].建筑结构,2021,51(2):1425-1428.
- [13] 种迅,李一松,蒋庆,等.某塔楼玻璃幕墙结构模型试验研究及有限元分析[J].建筑结构,2021,51(3):71-76.
- [14] 还向州,王介场,沈培,等.基于屋面幕墙钢结构的组合式玻璃幕墙板块吊装施工技术[J].施工技术,2019,48(3):52-54.
- [15] 谷小红,陈强,王强,等.基于太赫兹时域光谱的玻璃纤维复合材料热损伤检测分析[J].安全与环境学报,2019,19(2):406-410.