

基于改进最小二乘法的椭圆形玻璃幕墙缺陷多传感器融合检测技术

田江云¹, 温欣², 刘旭东¹, 乔世行¹

(1. 中铁二十二局集团有限公司, 北京 100000;

2. 广州铁路投资建设集团有限公司, 广州 510000)

摘要: 针对常规椭圆形玻璃幕墙缺陷多传感器融合检测的结果误差较大的问题, 提出基于改进最小二乘法的椭圆形玻璃幕墙缺陷多传感器融合检测技术。在分析椭圆形玻璃幕墙受力点处应力值和反差增强分组传感器检测数据信号而获取缺陷部位的初始拟合曲线后, 采用改进最小二乘法拟合缺陷部位立体位置曲线, 融合缺陷检测图像得到检测结果。试验结果表明: 应用该方法得出的检测累积误差平均值为 0.07, 可满足椭圆形玻璃幕墙缺陷的检测要求。

关键词: 玻璃幕墙; 缺陷检测; 多传感器融合; 检测技术; 改进最小二乘法

中图分类号: TP391.41; TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2024)01-0028-05

Multi-sensor fusion detection technology for elliptical glass curtain wall defects based on improved least squares method

TIAN Jiangyun¹, WEN Xin², LIU Xudong¹, QIAO Shixing¹

(1. China Railway 22 Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100000, China;

2. Guangzhou Railway Investment and Construction Group Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: A multi-sensor fusion detection technology for elliptical glass curtain wall defects based on improved least squares method was proposed to address the issue of significant errors in the detection results of conventional multi-sensor fusion detection for elliptical glass curtain wall defects. After analyzing the stress value and contrast enhancement of the grouped sensor detection data signal at the force point of the elliptical glass curtain wall to obtain the initial fitting curve of the defect location, the improved least squares method was used to fit the three-dimensional position curve of the defect location, and the defect detection images were fused to obtain the detection results. The experimental results demonstrated that the defect detection results of elliptical glass curtain walls obtained by the proposed method showed an average detection accumulative error of 0.07, which can meet the defect detection requirements of elliptical glass curtain walls.

Key words: glass curtain wall; defect detection; multi-sensor fusion; detection technology; improved least squares method

随着建筑结构美观度要求的提升, 椭圆形玻璃幕墙的应用越来越广泛。与平面式玻璃幕墙相比, 椭圆形幕墙在受力结构上更为不均匀, 受力点较为

集中。为了保证椭圆形玻璃幕墙在实际应用中的稳定性, 业内提出了结合多传感器的融合检测技术, 分析椭圆形玻璃幕墙各个受力点的实时状态, 并以此为定位, 融合多个受力点的传感结果, 得出椭圆形玻璃幕墙的实时稳定性。

梁海波等^[1]采用激光雷达扫描被检测装置, 将扫描得到的结果作为非线性优化的外参数, 结合参数结果设定多传感器的安装位置, 连续识别被检测

收稿日期: 2023-06-15

作者简介: 田江云(1983—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为建筑施工技术

通信作者: 刘旭东, 357466563@qq.com

装置的实时状态,再以帧堆叠的方式构建三维图像数据,融合处理数据,得到多传感器的融合检测结果。试验结果表明,该方法检测效率较低。王海等^[2]利用智能感知系统融合多个传感器,建立数据层、表征层以及决策层3个检测层,选取多传感器中的4路传感器,将得到的数据信息进行直接融合,形成被检测装置的偏磨信号,再利用插值法进行定量分析,得出检测结果。试验结果表明,该检测方法误差较大。金鹏等^[3]以多传感器检测为基础,结合航拍技术,将数据信息处理为图像信息,并利用不同传感器的成像机理进行光学成像分析,并添加ESM被动传感器检测缺陷特征不明显的区域,对雷达与红外等多种异类传感器进行缺陷轨迹关联,进而计算目标缺陷的误差协方差,获取测量值信息,得出检测结果。试验结果表明,该检测方法通用性较差。

考虑到上述文献提出的多传感器融合检测技术无法满足当前建筑应用需求,文章以椭圆形玻璃幕墙为研究对象,提出了一种基于改进最小二乘法的多传感器融合检测技术。针对椭圆形幕墙的多个受力点,全面设置多个传感器装置,融合多项数据,进而分析缺陷状态,得到了精确度较高的缺陷检测结果。

1 检测技术

1.1 椭圆形玻璃幕墙受力点应力分析

一般情况下,玻璃幕墙的厚度远小于其尺寸面积,因此,在进行受力点分析时,忽略椭圆形玻璃板厚度带来的影响^[4]。分析时,将椭圆形玻璃幕墙视为薄模型,如图1所示。

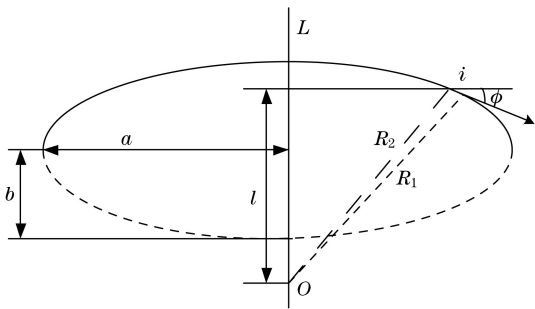


图1 椭圆形玻璃幕墙薄模型

图1中,实线部分表示椭圆形玻璃幕墙的实体模型,虚线部分为受力点分析所需补全的虚拟部分。其中, L 表示该椭圆形玻璃幕墙的中轴线; a 表示长轴; b 表示短轴; i 表示所选取的受力点。在该受力点 i 处作一条切线,将该切线的垂直线延长至与中轴线相交(交于 O 点),形成直线 R_2 。该切线与水平线的夹角为 ϕ ,在相交点 O 处沿垂直方向取

$1/2\phi$,延长至椭圆形玻璃幕墙表面,形成直线 R_1 ,该相交点 O 与切点水平线的距离为 l 。

根据图1所构建的椭圆形玻璃幕墙模型,计算受力点处的应力^[5]。首先计算椭圆形玻璃幕墙的固有角频率 f 为

$$f = \frac{a}{b \cdot 2\pi} \quad (1)$$

结合 f ,计算受力点 i 的刚度矩阵,如式(2)所示。

$$\mathbf{K}_i = \int_0^a \int_0^b f^\phi \frac{R_1}{R_2} \quad (2)$$

求解该矩阵的特征值,如式(3)所示。

$$\lambda_{\mathbf{K}_i} = M\sigma \quad (3)$$

式中: $\lambda_{\mathbf{K}_i}$ 为该刚度矩阵的特征值; M 为椭圆形玻璃幕墙的质量; σ 为特征向量。

基于受力点 i 处应力受刚度的影响,计算受力点 i 的应力刚度矩阵,如式(4)所示。

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_i \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: \mathbf{K} 为应力刚度矩阵; μ 为约束力矩的矢量。

解构该矩阵,得到受力点 i 处的应力值,如式(5)所示^[6]。

$$D_{\mathbf{K}} = \frac{Eh^3}{12(1-c^2)} \quad (5)$$

式中: $D_{\mathbf{K}}$ 为受力点 i 处的应力值; E 为弹性模量,取200 GPa; h 为椭圆形玻璃幕墙的厚度; c 为泊松比,取0.3。

利用上述计算公式,得出椭圆形玻璃幕墙的受力点应力值。

1.2 缺陷数据信号反差增强

分析 $D_{\mathbf{K}}$,统计应力值计算结果大于105 MPa的受力点,在统计得到的受力点上设置传感器。设置完成后,检查所有传感器是否覆盖了椭圆形玻璃幕墙的全部位置^[7-8]。确认无缺漏后,开启所有传感器,同时获取椭圆形玻璃幕墙各个点位的缺陷感知数据。

将所有传感器按照位置划分为A、B、C、D4组,每45°划为一组,如图2所示。

对感知所得的数据信息进行增强处理,并利用处理后的数据组成一个灰度图像,获取该图像背景区域中的灰度中值与缺陷数据信号区域的灰度中值^[9]。此两者数据之差即为灰度图像的差异值,该

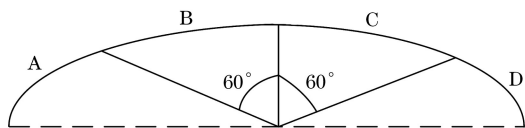


图2 传感器分组示意

差异值的大小代表了缺陷区域数据信号的清晰度。因此,为了提高检测结果清晰度,对其进行反差增强处理。

获取该灰度图像中缺陷区域信号的边缘抖度,如式(6)所示^[10]。

$$y(z) = \sum_{u=1}^7 (u + 6z) \quad (6)$$

式中: $y(z)$ 为传感器 z 的灰度反差值; u 为该灰度图像中缺陷区域信号的边缘抖度; z 取值为 1, 2, 3, 4。

通过对灰度图像的反差处理,得到增强后的椭圆形玻璃幕墙缺陷传感数据。

1.3 缺陷曲线的改进最小二乘法拟合

采用改进最小二乘法对上述增强后的感知数据进行拟合处理,获得椭圆形玻璃幕墙缺陷区域的初始拟合曲线,如式(7)所示^[11]。

$$Y = 1.334\ 667D_K + 1.001\ 300 \quad (7)$$

将缺陷数据曲线拟合的精度设置为 0.2 级。对 Y 进行 A/D 转换,在转换过程中得到缺陷数据信号与数字量之间的一次线性关系,如式(8)所示^[12]。

$$g = \alpha y(z) + \beta Y \quad (8)$$

式中: g 表示一次线性关系; α 和 β 分别为 A/D 转换过程中的系数。

利用式(7)分别计算当 Y 为 1 和 5 时系数 α 、 β 的值,得出系数 α 值为 0.000 208 398,系数 β 值为 -0.000 974。不同位置的传感器所感知的椭圆形玻璃幕墙缺陷图像较为平面化,根据该结果拟合缺陷立体位置曲线,如式(9)所示。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} Y_1(g_1) & Y_1(g_n) \\ Y_n(g_1) & Y_n(g_n) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: \mathbf{A} 为改进最小二乘法曲线拟合的最终结果; n 为拟合的缺陷数据量。

根据公式(9)的计算结果,重构椭圆形玻璃幕墙缺陷的立体数据图像。

1.4 多传感器缺陷检测图像结果融合

对基于改进最小二乘法曲线拟合得到的缺陷数据图像进行融合处理,融合多个传感器对该缺陷的感知图像,得到精细的缺陷信息^[13]。

多传感器缺陷检测图像的融合流程如图 3

所示。

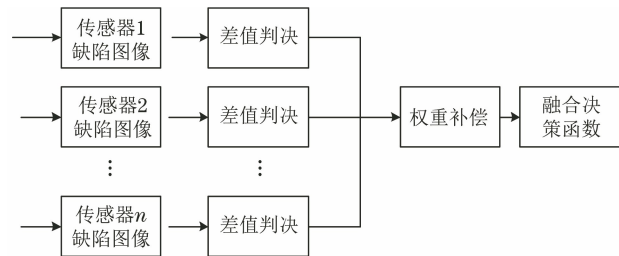


图3 缺陷检测图像融合流程

在椭圆形玻璃幕墙的缺陷图像中,缺陷区域表现为突变的峰值。基于此特性,在进行缺陷图像融合时,可在图像中设置一个滑窗^[14],计算处于该滑窗内部各个像素点的灰度值,并与滑窗中心点位的像素点灰度值进行比较,取比较结果的最大差值进行判决,如式(10)所示。

$$G = \begin{cases} 1, \max [\Delta T(q, Q)] > \eta \\ 0, \max [\Delta T(q, Q)] < \eta \end{cases} \quad (10)$$

式中: G 为判决结果; ΔT 为两个点位灰度值差值的集合; Q 为滑窗的中心点位; q 为滑窗内部具有最大灰度值差值的点位; η 为判决门限。

在判决过程中,判决因子的取值直接影响融合后缺陷图像的分辨率。因此,需要计算判决因子的取值,如式(11)所示。

$$\rho = \frac{1}{Qq} \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^q [I(\rho)] \quad (11)$$

式中: ρ 为判决因子; $I(\rho)$ 为判决因子为 ρ 时,灰度级像素数与总像素数的比值。

完成判决后,对不同传感器得到的椭圆形玻璃幕墙缺陷检测图像进行权重补偿^[15]。基于图像熵及标准差的补偿来完成这一步骤,如式(12)所示。

$$W = - \sum_{i=1}^G t_i \lg v_i \quad (12)$$

式中: W 为需要补偿的权重值; t_i 为受力点 i 处的图像熵; v_i 为受力点 i 处的缺陷图像标准差。

完成权重值的补偿后,即可进行缺陷检测图像融合。基于式(10)获取图像融合的最终决策函数,如式(13)所示。

$$P(q, Q) = G_1(q, Q) \cdot G_2(q, Q) \quad (13)$$

式中: $P(q, Q)$ 为图像融合决策; $G_1(q, Q)$ 为未计算判决因子时的判决结果; $G_2(q, Q)$ 为计算最优判决因子后的判决结果。

根据上述计算,得出以下图像融合决策:
① $P(q, Q) = 1$, 在最大像素值处进行融合;
② $P(q, Q) = 0$ 且 $G_1(q, Q) = 1$, 在滑窗中心像素点融合;
③

$P(q,Q)=0$ 且 $G_2(q,Q)=1$, 在最大灰度值差值的点位融合。

根据不同的结果采取不同的缺陷检测图像融合决策,即完成椭圆形玻璃幕墙缺陷的多传感器融合检测。

2 试验与结果分析

2.1 试验制备

为了验证文章方法的可行性,设计了模拟试验。试验在光学平台上进行,试验平台实物如图 4 所示。

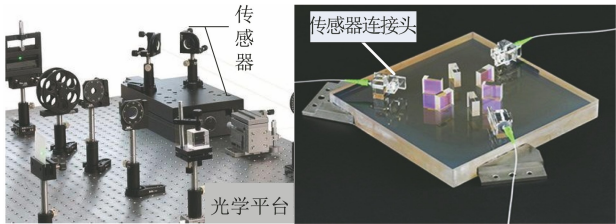


图 4 试验平台实物

准备椭圆形玻璃若干片,基于玻璃的透光性,在所有的椭圆形玻璃上喷涂一层哑光白漆,使玻璃表面形成漫反射曲面。将处理好的椭圆形玻璃按照常规玻璃幕墙的形式分为不同的试验组,保证每个试验组中的玻璃幕墙形状、数量及大小一致。在每组玻璃幕墙的所有受力点处安装型号一致的传感器,确保玻璃幕墙各个点位的状态均纳入传感器探测范围,如图 5 所示。

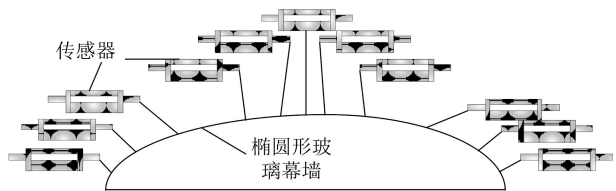


图 5 传感器安装位置示意

试验所应用的传感器参数如表 1 所示。

表 1 传感器参数配置

参数项目	参数配置
额定荷载	1/2 额定量程
允许使用负荷/%	130~140
重复性/mv	0.5
蠕变恢复/s	5~10
使用温度/℃	-40~250
温度补偿/℃	-10±55
激励电压/V	5~10
系数温漂/℃	<10

将传感器数据传输部分连接至 Windows 10 操作系统的计算机中,以图像的形式展现检测结果。

2.2 椭圆形玻璃幕墙缺陷检测

对上述椭圆形玻璃幕墙试验组进行缺陷检测,得到试验结果如图 6 所示。

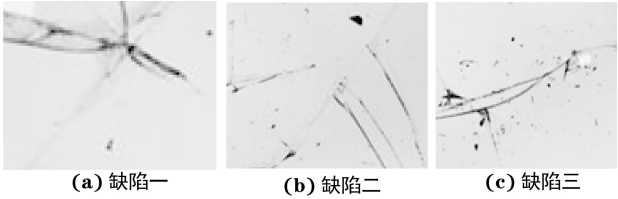


图 6 椭圆形玻璃幕墙缺陷检测结果

由图 6 可见,在该椭圆形玻璃幕墙中共检测到 3 处缺陷,且 3 处缺陷均呈现不同的破损状态。经过计算机拟合,得到 3 处缺陷在玻璃幕墙中的位置如图 7 所示。

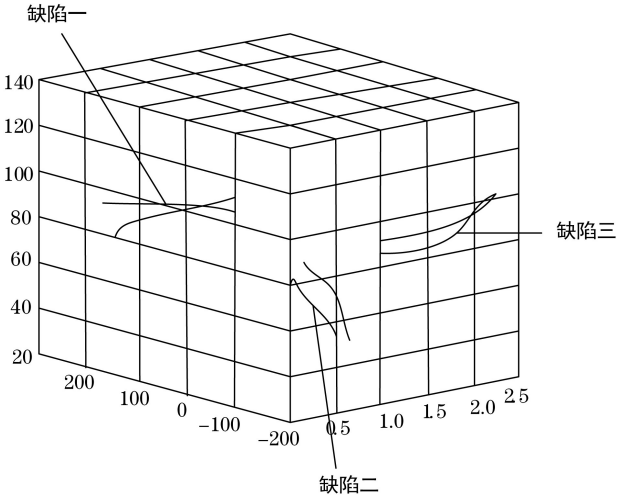


图 7 玻璃幕墙缺陷位置拟合结果

根据图 7 可以初步判断出文章方法的检测结果较为合理,表明该方法具有可行性。

2.3 结果分析指标

为了更加直观地体现出文章方法的有效性,将多次检测结果的累积误差作为此次试验结果的分析指标,如式(14)所示。

$$\delta = 10^2 S \sin \delta_{\theta} \tag{14}$$

式中: δ 为多次缺陷检测结果的累积误差; S 为椭圆形玻璃幕墙的总面积; δ_{θ} 为传感器的仰俯角误差。

累积误差的计算结果能直接反映椭圆形玻璃幕墙缺陷多传感器融合检测的性能。计算所得的累积误差越小,表明该方法的检测结果越优良。

2.4 结果分析与讨论

在文章试验搭建的椭圆形玻璃幕墙中,分别应用文献[1]和文献[2]提出的多传感器融合检测方法进行椭圆形玻璃幕墙的缺陷检测试验。检测幕墙共

有 10 组,计算 10 组缺陷检测结果的累积误差。此次试验共进行 5 次,在试验过程中记录每次检测结果的累积误差。得到不同方法下,椭圆形玻璃幕墙缺陷多传感器融合检测结果,如图 8 所示。

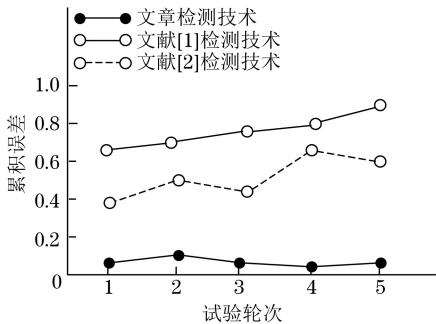


图 8 不同检测方法的累积误差结果

由图 8 可知,文章检测方法的累积误差小于其他 3 种方法中的累积误差。在 5 轮检测试验中,文章方法的多传感器融合检测结果累积误差始终未超过 0.1,平均累积误差仅为 0.07。而其他两种方法中,平均累积误差分别达到 0.54 和 0.68。从对比试验结果可以看出,文章方法获取的椭圆形玻璃幕墙多传感器融合检测结果误差较小,检测效果较优,具有较高的实际应用价值。

3 结语

针对常规椭圆形玻璃幕墙缺陷传感器检测误差较大的问题,提出一种基于改进最小二乘法的椭圆形玻璃幕墙缺陷多传感器融合检测技术,幕墙缺陷检测试验结果表明文章方法得出的缺陷检测结果误差较小,具有较好的实际应用效果。

参考文献:

[1] 梁海波,成刚,张志东,等.多传感器检测管道缺陷数据融合方法[J].激光与光电子学进展,2023,60(4):316-324.

[2] 王海,徐岩松,蔡英凤,等.基于多传感器融合的智能汽车多目标检测技术综述[J].汽车安全与节能学报,2021,12(4):440-455.

[3] 金鹏,黄浩,刘检华,等.多传感器信息融合的铁路扣件缺陷检测方法[J].机械工程学报,2021,57(20):38-46.

[4] 潘文波,袁希文,林军,等.智轨电车多传感器融合检测与跟踪研究[J].机车电传动,2022(4):157-165.

[5] 贾鹏飞,刘全周,彭凯,等.多传感器信息融合的前方车辆检测[J].红外与激光工程,2022,51(6):498-505.

[6] 刘仓,童靳于,包家汉,等.基于多传感器两级特征融合的滚动轴承故障诊断方法[J].振动与冲击,2022,41(8):199-207,259.

[7] 谢德胜,徐友春,陆峰,等.基于多传感器信息融合的 3 维目标实时检测[J].汽车工程,2022,44(3):340-349,339.

[8] 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.

[9] 王单单,高岩,李伟仙,等.数字剪切散斑干涉玻璃幕墙缺陷无损检测[J].中国测试,2022,48(4):29-34.

[10] 简洪树,金楠,伍永靖邦,等.既有玻璃幕墙检测技术的研究进展[J].工业建筑,2022,52(10):9-15.

[11] 虞杨,郑燕萍.基于改进递推最小二乘法的锂电池 SOC 估算[J].控制工程,2021,28(9):1759-1764.

[12] 佐磊,徐相相,陈昊,等.基于改进最小二乘支持向量机的 FPGA 焊点失效故障评估方法研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(7):74-82.

[13] 舒星,刘永刚,申江卫,等.基于改进最小二乘支持向量机与 Box-Cox 变换的锂离子电池容量预测[J].机械工程学报,2021,57(14):118-128.

[14] 王红平,史明.基于改进移动最小二乘法的数据拟合[J].组合机床与自动化加工技术,2021(3):9-13,20.

[15] 李小敏,陈铸,李恒,等.PCB 基板玻璃表面缺陷检测设备控制系统设计[J].现代制造工程,2022(2):124-128.