

DOI: 10.7672/sgjs2024210017

基于激光测振技术的既有建筑玻璃幕墙安全服役状态评估*

赵鹏, 梁金虎, 石昊

(上海市建筑科学研究院有限公司上海市工程结构安全重点实验室, 上海 200032)

[摘要] 以某既有建筑玻璃幕墙为研究对象, 利用激光测振仪获取大量玻璃面板一阶自振频率, 并以此为评价指标, 结合理论分析和数值模拟结果, 对该既有建筑玻璃幕墙安全服役状态进行分析评估。提出首先基于概率统计法进行动力特性异常对象筛查, 然后对异常对象进行重点考察和安全服役状态确认的评估方法, 并通过实际工程验证了激光测振技术评估玻璃幕墙安全服役状态的可靠性和可操作性, 体现了激光测振技术非接触和可远程测试等优势。

[关键词] 玻璃幕墙; 激光测振; 自振频率; 安全; 检测; 评估

[中图分类号] TU18

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)21-0017-05

Safety and Serviceability Status Assessment for Existing Building Glass Curtain Wall Based on Laser Vibrometry Technology

ZHAO Peng, LIANG Jinhui, SHI Hao

(Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Taking an existing building glass curtain walls as the research subject, a large number of first-order natural frequencies of glass panels are obtained using a laser vibrometer, which serves as an evaluation index. Combined with theoretical analysis and numerical simulation results, the safety and serviceability status of the existing building glass curtain walls are analyzed and assessed. This paper proposes an evaluation plan that initially screens for abnormal dynamic characteristics of glass panels based on statistical probability methods, and then conducts a focused examination and confirmation of the serviceability status for the abnormal objects. The reliability and operability of laser vibrometry technology have been verified through the actual engineering projects, demonstrating the advantages of non-contact and remote measurement capabilities of laser vibrometry technology.

Keywords: glass curtain walls; laser vibration measurement; natural frequency; safety; detection; assessment

0 引言

建筑外围护结构是建筑物遮风挡雨、抵御外界环境影响的重要组成部分, 但由于自身材料耐久性、施工质量及外界环境长期直接作用等问题, 目前我国大量既有建筑外围护结构存在脱落隐患和高空坠落风险, 存在安全隐患。玻璃幕墙因其质轻、外观优美等优点备受青睐, 我国自 20 世纪 80 年

代开始使用玻璃幕墙, 由于设计、施工和管理等多方面原因, 已投入使用的大量既有建筑玻璃幕墙出现了开裂、坠落等现象, 引起了广泛关注。

安全问题推动了既有建筑玻璃幕墙安全使用状态检测评估的发展, 成为近年来新兴的鉴定业务, 但在技术方面, 由于检测量大、高空不易抵达、工艺复杂、隐蔽性强等原因, 采用传统检测技术手段对玻璃幕墙开展全面检测仍存在较大困难, 且存在抽样数量少、代表性差, 检测结果评定主要依靠高空作业人员经验等诸多缺陷, 可供实际推广应用的研究成果较少。

*上海市优秀技术带头人项目(21XD1434100); 上海市科学技术委员会科研项目(22DZ1201703)

[作者简介] 赵鹏, 高级工程师, E-mail: zhaopeng@sribs.com

[收稿日期] 2024-07-05

本文依托实际工程与已有研究成果^[1-3],在利用激光测振技术获取大量玻璃面板一阶自振频率的基础上,提出了首先基于概率统计法进行动力特性异常对象筛查,然后对其中安全性存疑对象进行重点考察确认的检测评估方法,验证了激光测振技术在既有建筑玻璃幕墙安全服役状态评估中的可行性和可靠性,为该技术的进一步推广应用提供了参考,并就其进一步研究发展给出了建议。

1 动态法检测评估玻璃幕墙安全服役状态机理

玻璃幕墙在建设使用过程中,由于施工缺陷,支承体系及黏结体系会发生松动、损伤或老化,实际表现为支承结构发生松动损伤,并导致玻璃面板刚度降低,从而使玻璃面板自振频率下降。另一方面,玻璃面板边界支承结构和黏结材料损伤老化使玻璃幕墙抵抗外力(风荷载、地震作用、冲击荷载)的能力降低,增大了玻璃面板整体脱落风险,影响玻璃幕墙使用安全。玻璃幕墙连接体系(螺栓、预埋件、紧固件、结构胶等)松动和损伤识别是评价其安全性能的关键环节之一,建立玻璃面板自振频率与其边界支承结构松动损伤关系,可通过玻璃面板自振频率间接描述玻璃幕墙连接体系损伤与老化程度,预测玻璃面板脱落风险程度及抵抗外力剩余能力,进而评价玻璃幕墙安全可靠性能。

结构动力特性常用作结构损伤识别指标^[4-5]。由于自振频率不仅为易获得的结构振动模态参数,且识别精度较高,因此为通过比较玻璃幕墙结构损伤发生前后自振频率的变化识别其安全服役状态提供了技术上的可能性。对于玻璃幕墙而言,每块玻璃面板均为相对独立的结构单元,面板数量多,且多处于高空,导致检测难度大,快速、方便、准确地获取其自振频率,并设定合理的自振频率安全阈值,成为了实际工程中推广利用该检测评估技术的关键。

2 激光测振仪工作原理与优势

激光测振仪工作原理为基于激光的多普勒效应,在测试目标发生振动的情况下,远离激光器(测振仪)时,反射光波长变长,接近激光器(测振仪)时,反射光波长变短。

激光测振仪在工作时主机头部发射激光束照射测试目标表面,同时收集反射光。典型的激光多普勒测振仪工作光路如图1所示,首先,激光器产生激光,由分光镜分为2束,一束经过透镜投射于被测物体,利用透镜的聚焦作用,将激光汇聚于一点,有利于瞄准微小目标;另一束经过反射镜,通过布拉格盒调制,作为参考光投射于探测器。被测物体的

反射光线同样传递到探测器。然后,通过对比参考光线与被测物体反射光线干涉图样变化,解调得到被测物体反射光频移 f_D 。最后,通过多普勒频移计算公式(1),得到被测物体振动速度。

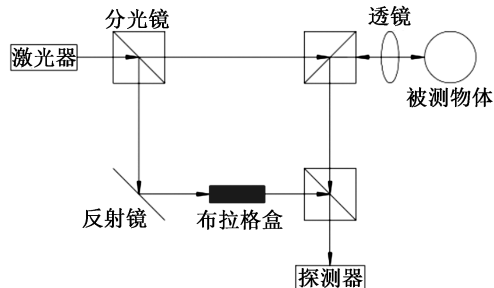


图1 激光多普勒测振仪工作光路示意

Fig. 1 Working optical path of Doppler laser vibrometer

$$f_D = \frac{2V}{\lambda} \quad (1)$$

式中: V 表示振动物体振动速度; λ 表示工作激光波长。

激光测振技术具有非接触的优点,避免了传统拾振器附加质量对被测目标的影响,可准确测得测试目标的自振频率。另一方面,由于玻璃面板多处于高空,人员不易抵达,传统测试方法难度和危险性大、成本高,而利用激光测振仪,通过合理的透镜选择与组合,可实现远程测试,摆脱距离对自振频率测试的限制,具有明显优势。

3 基于概率统计法的异常面板筛查与评估方法

已有研究采用划分安全频率区间法进行异常面板筛查与评估^[1,6],频率区间划分时的界限值以四边简支、四边固支的极限边界条件为基准,乘以不同的安全系数作为安全等级划分的临界频率值。值得注意的是,幕墙面板自振频率受约束条件(金属框架、结构胶尺寸等)、面板尺寸和材质等诸多因素影响,这些因素在实际的频率计算中常由于复杂性而被简化忽略,但其会直接影响临界频率取值,进而影响安全服役状态评估结果。

对于具体的玻璃幕墙工程来说,一般由几种标准玻璃面板组成,同种标准玻璃面板由于具有相同的材质、构件尺寸、连接形式等,在理论上应具有相同的一阶自振频率。但在实际工程中,受安装工人熟练程度、所处环境、材料性能差异及安装偏差等因素影响,同种标准玻璃面板的自振频率并不是完全相等的固定值,而是具有一定范围,且在无异常因素影响的情况下,其应符合正态分布特征。通过对大量实测面板一阶自振频率的概率统计分析,可

得到该种标准玻璃面板一阶自振频率正常值区间,对于每块实测面板而言,一阶自振频率位于正常值区间之外的可视为异常面板。

一阶自振频率正常值区间可通过箱线法求取,将 n 块标准玻璃面板一阶自振频率实测值按从小到大排序,通过计算得到该序列的第 1 四分位数 Q_1 、第 2 四分位数 Q_2 、第 3 四分位数 Q_3 ,并由式(2)计算得到自振频率实测值序列的四分位距 IQR ,由式(3)计算得到异常面板与正常面板之间的下限临界频率 $f_{\text{下}}$,由式(4)计算得到异常面板与正常面板之间的上限临界频率 $f_{\text{上}}$ 。

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (2)$$

$$f_{\text{下}} = Q_1 - 1.5IQR \quad (3)$$

$$f_{\text{上}} = Q_3 + 1.5IQR \quad (4)$$

实际应用中,首先需要实测大量玻璃面板自振频率,以获取标准玻璃面板自振频率的样本统计特征数据 Q_1, Q_3 ,不同于传统测试方法,激光测振技术无须进行拾振器安装、拆卸等工序,因此节约了测试时间,为进行统计分析和异常面板筛选提供了保障。

对于实测频率在安全服役状态临界频率区间之外的异常面板,后续可通过手试、目测、内窥镜检查、荷载试验等方式进行重点检测确认。

4 玻璃幕墙安全服役状态评估

4.1 工程概况

上海某 8 层办公楼建于 1985 年,使用至今已近 40 年。房屋主体结构为钢筋混凝土框架结构,其中西立面局部采用玻璃幕墙,如图 2 所示。幕墙结构采用铝合金框架体系,通过预埋件与房屋主体结构构件相连。玻璃面板用硅酮结构胶粘结在铝合金副框上,副框与幕墙框架通过压块固定,副框每边安装 2~3 个压块。玻璃面板之间的空隙采用泡沫条与建筑密封胶进行封闭,形成隐框式玻璃幕墙。

现场实测该工程采用的玻璃面板尺寸主要为 1 090mm×780mm,780mm×483mm,厚度约为 6mm,为单层玻璃面板。

本文以尺寸较大的 1 090mm×780mm 标准玻璃面板为研究对象,其连接如图 3 所示,图中红色框表示副框压块位置。

4.2 玻璃面板自振频率理论解析

玻璃面板平面尺寸远大于厚度,属于典型的薄板结构,其自振频率可采用薄板理论进行解析。以平分板厚的中间平面为中面,以中面为 Oxy 平面,建立如图 4 所示的空间直角坐标系。

基于弹性薄板小挠度弯曲理论,薄板自由振动

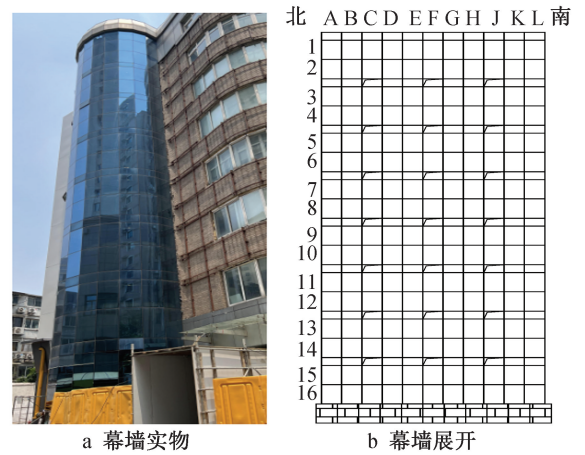


图 2 办公楼玻璃幕墙

Fig. 2 The glass curtain walls of the office building



图 3 标准玻璃面板连接示意

Fig. 3 The standard glass panel connections

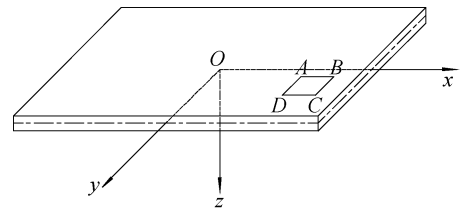


图 4 薄板结构振动系统

Fig. 4 Thin plate structure vibration system

微分方程可写为^[7]:

$$D \nabla^4 \omega + \bar{m} \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (6)$$

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

对于四边简支的弹性薄板,其一阶自振圆频率经典理论解析解为:

$$\omega = \pi^2 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{\bar{m}}} \quad (8)$$

对于四边固支的弹性薄板,其一阶自振圆频率

经典理论解析解为:

$$\omega^2 = \frac{504D}{a^4 b^4 \bar{m}} (a^4 + b^4 + \frac{4}{7} a^2 b^2) \quad (9)$$

式中: D 为薄板抗弯刚度; h 为薄板厚度; ν 为泊松比; ω 为自振圆频率; E 为弹性模量; \bar{m} 为单位面积质量; a, b 为矩形面板边长; t 为时间; ∇^4 为调和算子。

对于实际工程中的玻璃面板,其边界条件与支承方式有关。当边界为弹性支承时,可认为面板为简支;当边界未受任何支承件约束时,可认为面板为自由;当边界被镶固时,可认为面板为固支;当某点被支承时,可认为面板为点支。本工程通过硅酮结构胶的粘结作用将玻璃面板依附固定在副框上,副框通过周边的压块固定在幕墙框架上,硅酮结构胶对玻璃面板约束边的平动位移限制较强,但对转动角位移的约束作用有限,因此,可近似取边界条件为四边简支进行计算。

根据式(8),结合本工程实际情况,计算时弹性模量取 70GPa,泊松比取 0.24,单位面积质量取 12.5kg, a 取 1.09m, b 取 0.78m, h 取 0.006m,计算得到四边简支条件下的一阶自振圆频率为 231.6rad/s,根据频率转换公式可得一阶自振频率为 36.9Hz。

采用上述参数,由式(9)进行计算,得到该玻璃面板在四边固支条件下的一阶自振频率为 69.1Hz。

4.3 玻璃面板自振频率数值模拟

采用有限元计算软件 ABAQUS 对本工程玻璃面板自振频率进行数值模拟分析^[8]。玻璃面板视为弹性薄板,边界条件视为四边简支,单元类型采用壳单元,弹性模量取 70GPa,泊松比取 0.24,单元质量密度取 2500kg/m³, a 取 1.09m, b 取 0.78m,建立的有限元模型如图 5 所示。

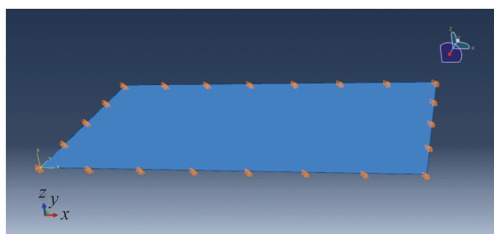


图 5 四边简支玻璃面板有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the four-sided simply supported glass panel

计算结果表明,四边简支玻璃面板一阶自振频率数值模拟和理论解析结果分别为 36.6、36.9Hz,二者较接近,仅相差 0.8%。

4.4 玻璃面板自振频率实测

采用 LV-M200 型微型激光测振仪对 68 块 1090mm×780mm 标准玻璃面板自振频率进行了测试,测试时在玻璃面板表面粘贴反光片,同时用橡皮锤对面板进行敲击激励,通过激光测振仪获取面板自由振动速度响应时程曲线,经快速傅里叶变换得到其振动速度响应频谱(见图 6),分析后得到其一阶自振频率,如图 7 所示。每块面板敲击测试 3 次以上,取平均值作为自振频率实测结果。

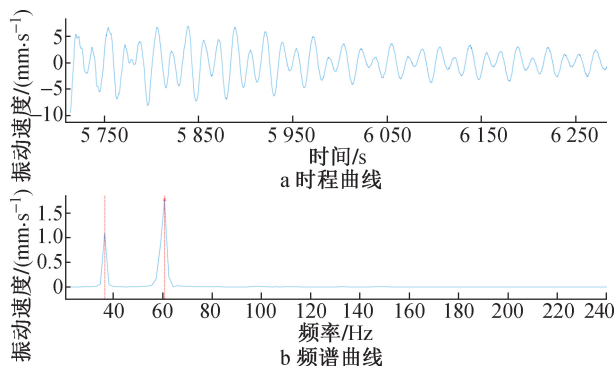


图 6 玻璃面板自由振动速度时程与频谱曲线

Fig. 6 Free vibration velocity time-history curve and spectral curve of the glass panel

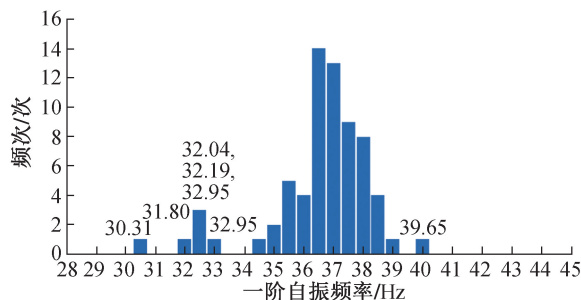


图 7 实测玻璃面板一阶自振频率

Fig. 7 Measured first-order natural frequencies of glass panels

由图 7 可知,实测玻璃面板一阶自振频率总体呈现正态分布特征,符合统计学规律;实测玻璃面板一阶自振频率为 30.31~39.65Hz,样本第 2 四分位数 Q_2 为 36.61Hz,与前文求得的理论解析解 36.9Hz 和数值模拟解 36.6Hz 接近,验证了激光测振技术的可靠性,表明实测结果可用于后续评估;个别玻璃面板实测一阶自振频率明显偏离总体分布,可能存在异常。

4.5 评估结果与验证

对实测玻璃面板一阶自振频率样本数据进行统计分析,得到第 1 四分位数 Q_1 为 35.895Hz,第 3 四分位数 Q_3 为 37.3825Hz,四分位距 IQR 为 1.4875Hz。计算得到该类型标准玻璃面板与异常

面板之间的下限临界频率 $f_{\text{下}}$ 为 33.663 75Hz,与异常面板之间的上限临界频率 $f_{\text{上}}$ 为 39.613 75Hz。

共有 7 块玻璃面板一阶自振频率实测值位于正常频率区间(33.663 75~39.613 75Hz)之外,可将其判定为动力特性异常面板。其中,一阶自振频率位于正常频率区间左侧的玻璃面板共 6 块,分别为 A3, A5, A9, A11, A16, L3 面板(见图 1),对应的一阶自振频率分别为 32.19, 32.95, 32.27, 31.80, 32.04, 30.31Hz;一阶自振频率位于正常频率区间右侧的玻璃面板共 1 块,为 J7 面板(见图 1),一阶自振频率为 39.65Hz。

对上述一阶自振频率位于正常频率区间左侧的 6 块异常玻璃面板位置进行分析,可知这些面板均位于玻璃幕墙体系边列(见图 1)。现场将异常玻璃面板密封胶去除,露出结构连接情况进行实体检查,发现由于不方便施工,副框长边未使用压块进行固定,仅使用建筑硅酮密封胶密封,无结构连接作用,导致玻璃面板边界发生松动,一阶自振频率处于正常频率区间之外,存在一定安全隐患,如图 8 所示。同理,对一阶自振频率位于正常频率区间右侧的 1 块玻璃面板进行实体检查,未发现安全隐患。



图 8 异常玻璃面板连接情况现场检查

Fig. 8 Connections inspection of abnormal glass panels

综上所述,采用激光测振技术对玻璃面板一阶自振频率进行测试,并通过统计分析、异常对象筛查和实体检查相结合的方式对其安全服役状态进行评估是行之有效的方法,具有较强的操作性。

5 结语

1) 本文提出了首先基于概率统计法进行动力特性异常对象筛查,然后对异常对象进行重点考察和安全服役状态确认的评估方法,并通过实际工程验证了激光测振技术评估玻璃幕墙安全服役状态的可靠性和可操作性。

2) 玻璃面板一阶自振频率与其边界固定损伤状态具有直接相关性,一阶自振频率作为易获取、精度高的结构振动特性指标,对面板类结构对象的

隐蔽性损伤识别具有较强的参考价值。

3) 利用激光测振技术的非接触、可远程测试等优势,可方便、准确、高效地实测玻璃面板自振频率,使对幕墙工程玻璃面板进行逐个分析成为可能。

4) 利用激光测振技术进行既有建筑玻璃幕墙安全服役状态评估时,激光测点照射玻璃面板时会将其穿透,后续研究需解决反射信号强度差的问题。目前测试时还需对被测面板进行人为锤击激励,有时无法完全发挥激光测振技术的优势,后续可研究借助无人机设备实现激励的技术。

参考文献:

- [1] 刘小根,包亦望,宋一乐,等.基于动态法对基于玻璃幕墙安全性能评估研究[J].土木工程学报,2009,42(12):11-15.
LIU X G, BAO Y W, SONG Y L, et al. Safety evaluation of glass curtain walls by using dynamic method[J]. China civil engineering journal, 2009,42(12):11-15.
- [2] 黄智德.建筑幕墙安全状态评价模型与远程检测方法研究[D].北京:北京科技大学,2019.
HUANG Z D. Study on the safety-state evaluation model of building curtain wall and remote detection method[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019.
- [3] 郑毅.基于振动响应的背栓式石材幕墙损伤识别方法研究[D].杭州:浙江大学,2022.
ZHENG Y. Research on damage identification method of back bolted stone curtain wall based on vibration response[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [4] 张汝学,郑永来,韩雨莘,等.基于模态柔度的高桩码头损伤识别方法研究[J].施工技术(中英文),2023,52(21):26-32.
ZHANG R X, ZHENG Y L, HAN Y S, et al. Damage identification method of high-piled wharf based on modal flexibility[J]. Construction technology, 2023, 52(21):26-32.
- [5] 黄莺,宋睿,屈如意,等.基于曲率模态和神经网络的施工桁架梁损伤识别研究[J].施工技术(中英文),2023,52(5):41-48.
HUANG Y, SONG R, QU R Y, et al. Damage identification of construction truss beam based on curvature mode and neural network[J]. Construction technology, 2023, 52(5):41-48.
- [6] 包亦望,刘小根.玻璃幕墙安全评估与风险检测[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
BAO Y W, LIU X G. Glass curtain wall safety assessment and risk detection[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [7] 王博,马红艳.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2018.
WANG B, MA H Y. Mechanics of materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2018.
- [8] 王玉镯,傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例详解[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
WANG Y Z, FU C G. ABAQUS structural engineering analysis and detailed example explanation[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.