引用格式：施钟淇，王罡，金楠，等．影像数据不完备条件下桅杆结构风致疲劳寿命评估方法[J]．工业建筑，2026，56(1)：144-150．SHI Zhongqi，WANG Gang，JIN Nan，et al．Assessment of Wind-Induced Fatigue Life of Mast Structures Under Incomplete Image Data Conditions[J]．Industrial Construction，2026，56(1)：144-150 (in Chinese)．DOI：10．3724/j．gyjzG25021905

影像数据不完备条件下桅杆结构风致疲劳寿命评估方法*

施钟淇[1]　王　罡[1]　金　楠[1]　陈振明[2]　赵晓青[3]

（1．深圳市城市公共安全技术研究院有限公司，深圳市城市灾害数字孪生重点实验室，广东深圳　518102；2．中建钢构股份有限公司，广东深圳　518118；3．北京科技大学未来城市学院，城镇化与城市安全研究院，北京　100083）

摘　要　桅杆常设置于超高层建筑顶部，起到防雷、防撞、提升建筑美观度及高度的作用，然而桅杆结构隶属于高柔风敏结构，较易因风致振动而引发疲劳损伤。2021年5月深圳某大厦的异常振动事件引发了国内外社会各界的广泛关注，桅杆的疲劳损伤成因成为该事件溯源的难点之一。由于缺少必要的风场历史数据，并不能直接采用荷载-结构响应分析的方法解析桅杆的风致疲劳问题。实际工程中超高层顶部一般会设置1~2台摄像机监控桅杆的服役状态。这便为基于影像数据开展桅杆结构的疲劳寿命评估提供了基础数据支撑。然而由于现场条件差异，通常情况下桅杆服役状态的影像数据存在时空不完备性，难以直接通过影像分析获取桅杆的历史风振数据。为此提出了一种基于不完备数字影像的桅杆结构风致振动历史性态反演方法，通过对有限影像数据的时域、频域特征分析，关键节点损伤检查及桅杆结构自振特性分析等，获取疲劳敏感节点的应力状态概率分布，再结合随机抽样算法实现了该类结构的疲劳寿命可靠性评价。试验结果表明所述方法的评估结果具有较高的吻合度。

关键词　影像数据；不完备；桅杆；风致疲劳损伤；寿命评估

Assessment of Wind-Induced Fatigue Life of Mast Structures Under Incomplete Image Data Conditions

SHI Zhongqi[1]　WANG Gang[1]　JIN Nan[1]　CHEN Zhenming[2]　ZHAO Xiaoqing[3]

(1. *Shenzhen Key Laboratory of Urban Disasters Digital Twin, Shenzhen Urban Public Safety and Technology Institute Co., Ltd., Shenzhen* 518102, *China*; 2. *China Construction Steel Structure Corp., Ltd., Shenzhen* 518118, *China*; 3. *Research Institute of Urbanization and Urban Safety, School of Future Urban Studies, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Masts are frequently positioned on the top of super high-rise structures to provide lightning protection, collision prevention, and enhanced architectural aesthetics and height. Being highly sensitive to wind, these structures are susceptible to fatigue-induced damage due to wind-induced vibrations. In May 2021, an abnormal vibration incident at a building in Shenzhen attracted significant global attention. Determining the cause of fatigue damage in the mast became one of the key challenges in tracing the source of this incident. However, due to a lack of comprehensive wind field historical data, the load-structure response analysis method could not be directly applied to address the wind-induced fatigue

* 国家重点研发计划项目(2022YFC3801205)；国家自然科学基金项目(52478122)；深圳市城市公共安全技术研究院有限公司深圳市城市灾害数字孪生重点实验室开放基金课题。

第一作者：施钟淇，博士，正高级工程师，主要从事城市安全理论与天空地协同监测预警方面的研究。

通信作者：赵晓青，博士，讲师，主要从事工业钢结构诊治方面的研究，xiaoqingchong@ustb．edu．cn。

收稿日期：2025-02-19

issue of masts. In practice, one or two cameras are typically installed on the top of super high-rise buildings to monitor the service status of masts, offering foundational data for fatigue life assessment based on image information. However, due to variations in site conditions, the image data regarding the masts' service status often exhibit spatiotemporal incompleteness, complicating the direct acquisition of historical wind vibration data through image analysis. For this purpose, this study introduced a method for the inverse analysis of the wind-induced vibration history of mast structures using incomplete image data. By examining the temporal and frequency domain characteristics of the limited image data, conducting damage assessments at key joints, and analyzing the natural vibration properties of the mast structure, the probability distribution of stress states in fatigue-sensitive joints was derived. This was complemented by a stochastic sampling algorithm to achieve a fatigue reliability evaluation of such structures. Experimental results indicated that the assessment outcomes of this method were highly consistent.

Keywords: image data; incompleteness; mast; wind-induced fatigue damage; life assessment

0　引　言

深圳某大厦建成于1999年，服役20余年，总高355.8 m，桅杆拆除前是世界最高的钢管混凝土结构。2021年5月18日该大厦出现罕见异常振动，引发社会各界普遍关注。张献兵等[1]从结构响应的角度分析了地震、施工振动、地铁振动、地质灾害、风荷载等因素诱发大厦振动的可能性。杨易等[2]依据实测气象数据，指出振动当天深圳上空发生了一次持续约12 h的突发气象事件，这一事件可能引发了桅杆涡激共振，而持时较长的桅杆振动又进一步引发了桅杆-塔楼系统的高阶共振响应。胡卫华等[3]通过现场实测指出桅杆的前4阶频率分别为1.60，1.78，1.96，2.12 Hz，且振动时刻桅杆与塔楼的主频均为2.12 Hz。黄铭枫等[4]采用计算流体动力学(CFD)和时程分析技术研究了该大厦双桅杆结构的风致高阶振动特性。李聃等[5]也采用数值模拟技术探讨了发生双圆柱尾流驰振的可能性。广州大学周福霖团队通过现场激振试验[6]、钢管混凝土柱界面脱空检测[7]、风致振动分析[8]等较为系统地分析了该大厦产生异常振动的原因，为事件溯源提供了大量数据支撑。这些研究均指向桅杆的风致振动是本次异常振动的主要原因。因此，桅杆的风致振动问题成为该事件溯源的关键。

众所周知，风流过钝体结构时会产生旋涡的脱落。若流速恒定，则旋涡以固定的频率脱落(该频率称为涡脱频率)。若涡脱频率等于结构的固有频率，则激发结构共振。这种特定风速下的限幅振动被称为涡激共振。涡激共振一旦发生，以频率f_s振动的结构将对旋涡脱落产生反作用，使涡脱频率在相当长的风速范围内被f_s所“俘获”(称为锁频现象)[9]。涡激共振常引发结构的疲劳破坏，如九江长江大桥吊杆风致振动问题。而圆柱绕流是经典的涡激共振问题，在生活中十分常见。显然深圳某大厦桅杆的风致振动属于圆柱绕流问题。圆柱绕流问题又可分为单圆柱绕流和多圆柱绕流。国内外学者针对单圆柱绕流问题开展了大量研究，取得了丰硕的研究成果。Volker[10]对比了现有单圆柱绕流数值模拟方法的计算精度，给出了特定条件下的升力系数、阻力系数精确计算方法。文献[11]基于已有的研究成果给出了单圆柱绕流卡门涡街的漩涡脱落频率计算公式。时至今日，单圆柱的绕流问题已普遍达成共识。受绕流场的相互作用，多圆柱绕流问题与单圆柱绕流问题有着本质的区别，目前学术界尚未形成普适的计算模型，但在一些风致振动的基本特征上已经达成了共识，如前柱尾流对后柱旋涡脱落的放大效应等[12-13]。在风致振动引发疲劳损伤方面，众多学者也开展了相关研究，如陆越[14]以风电塔筒为研究对象，建立了考虑风速风向联合概率分布的管接焊缝疲劳寿命评估方法。黄国庆等[15]建立了基于改进Tovo-Benasciutti谱方法(T-B谱方法)的高层建筑风致疲劳损伤评估方法。此类研究均以风载为基础，正向研究结构在风荷载作用下的动力响应。在缺少必要风场历史数据的条件下，此类方法并不适用于解析深圳某大厦桅杆风致振动的历史性态。

结构的风致振动反演问题是当下的研究热点之一。国内外相关学者或基于时域法、或基于频域法对该问题进行研究，取得了丰硕的成果[16-19]。这些结构风致振动反演算法均以必要的实测振动数

据为基础,而深圳某大厦的桅杆上并未设置振动传感器监测这些数据。显然这些方法也不适用于该大厦桅杆风致振动历史性态的反演分析。事实上,除了深圳气象局公布的部分年度统计数据[20],其他相关历史数据匮乏。因此必须寻找一种新方法开展此类研究。在机械、船舶等领域常采用随机振动分析法评估桅杆结构的风致疲劳寿命问题,如文献[21-23]中所述。随机振动疲劳分析方法可分为时域法和频域法两种。前者需要已知完整的荷载谱数据,而后者需要已知结构在外界环境作用下的频率响应。在分析与振动相关的疲劳问题时,尤其是结构的振动状态较为模糊时,频域法有较高的精度和可靠性,不仅能够预测疲劳损伤出现的位置,也能给出敏感部位的疲劳寿命。

基于上述思路,以深圳某大厦的桅杆为研究对象,首先通过有限的影像数据获取桅杆振动的时间-位移曲线,然后计算桅杆风致振动的功率谱密度(PSD)曲线,并结合有限元计算分析,获取桅杆关键节点的疲劳寿命,以及疲劳裂纹的萌生位置。最后将分析结果与桅杆的疲劳损伤实测结果进行对比,验证了所提出方法的合理性。

1 基于模版匹配法的结构振动时程曲线提取

如前文所述,采用随机振动疲劳寿命预测方法进行分析,首先需要获取结构在外界环境激励作用下的动态响应,如结构上某测点的振动位移时程曲线或加速度时程曲线。超高层桅杆上很少设置振动传感器记录其动态响应数据,但一般会在平台上设置1~2台摄像机,监控顶层空间的使用安全,如深圳某大厦桅杆的异常振动便被摄像机记录了。本节基于模版匹配法从上述影像数据中提取桅杆的振动时程曲线。

模版匹配法,通过在图像中搜索并定位与给定模板图像最相似的局部区域实现振动测量,其测量精度可达到像素级。

其计算流程如下:

1)选择匹配模版图像:在视频第一帧图像中选择一个包含检测目标的局部图像作为匹配模版,该匹配模版通常是一个小区域但应能够完整包含目标物体的形状和特征。

2)定义相似性度量指标:需要定义一个用于衡量目标图像中局部区域与模版图像相似程度的指标,常用的相似性度量指标包括均方差、相关系数、归一化互相关等。

3)在目标图像中搜索最佳匹配:对于每一帧图像,遍历目标图像的每个像素点移动匹配模版,在每个位置计算匹配模版与目标图像局部区域的相似性度量指标数值,得到映射关系矩阵$\boldsymbol{R}$,其计算公式如下:

$$\boldsymbol{R}(x,y)=\frac{\sum_{x',y'}[T(x',y')I(x+x',y+y')]}{\sqrt{\sum_{x',y'}T(x',y')^2\sum_{x',y'}I(x+x',y+y')^2}} \tag{1}$$

式中:(x,y)为振动图像上某一点的坐标;(x',y')为模版图像某一点的坐标;$T(x,y)$为模版图像;$I(x,y)$为目标图像;$\boldsymbol{R}(x,y)$为映射关系矩阵,其数值代表目标图像与匹配模版的相似程度。

4)确定最佳匹配位置:检索映射关系矩阵中的最大值/最小值,相似性度量指标最值位置即为模版图像与目标图像的匹配位置。由此,遍历每一帧图像可得到横向匹配坐标数组L以及竖向匹配坐标数组H。

5)计算结构的振动时程信号:

$$\Delta H_i=H_{i+1}-H_i \qquad i=1,2,\cdots,n-1 \tag{2a}$$

$$\Delta L_i=L_{i+1}-L_i \qquad i=1,2,\cdots,n-1 \tag{2b}$$

式中:n为图像帧数;H_i和L_i分别为第i帧图像输出振动位置追踪结果的宽度位置以及高度位置。

由此可得到监测结构横向以及竖向的振动时程信号ΔH_i以及ΔL_i。基于所研发的长时序视频识别构件模态提取算法,对深圳某大厦桅杆的振动视频进行处理,部分影像处理结果如图1、2所示。

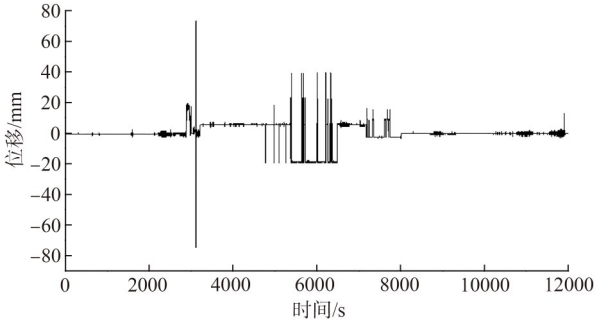


图1 左侧桅杆顶部某一时段的振动位移时程曲线

Fig. 1 Time-history curve of vibration displacement at the top of the left mast

由图1、2可知,桅杆在服役环境下存在振动行为,随着振动循环次数的增加势必会使得应力集中较大的节点产生疲劳损伤。

2 桅杆振动的功率谱密度(PSD)曲线

随机响应分析是结构受到统计意义上的连续激励所做出的动态响应,其载荷通常是不确定的,

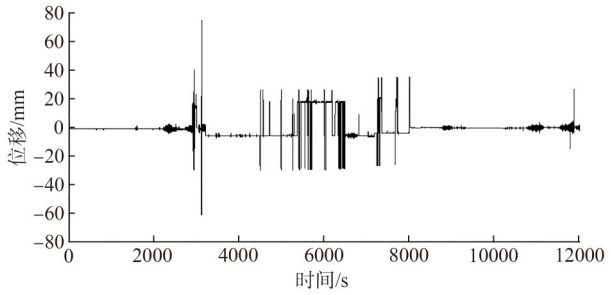


图 2　右侧桅杆顶部某一时段的振动位移时程曲线

Fig. 2　Time-history curve of vibration displacement at the top of the right mast

一般以统计意义来表征。因此，PSD 分析方法被广泛应用于随机振动疲劳寿命分析。*PSD* 是描述稳态各态历经过程的重要参数，其直接描述了在各频率分量上能量的分布，是随机振动疲劳寿命分析的必要参数。本节对第 1 节中的振动位移时程曲线进行微分可得到左、右桅杆顶点的加速度时程曲线，如图 3、4 所示。

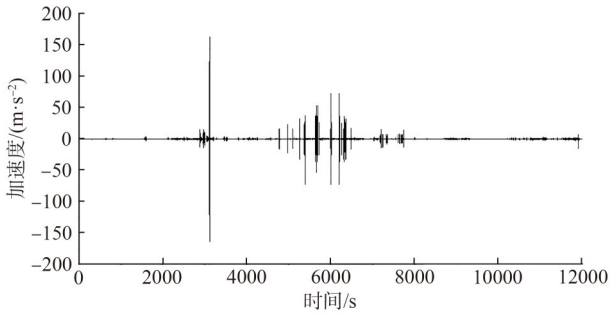


图 3　左侧桅杆顶部的振动加速度时程曲线

Fig. 3　Time-history curve of vibration acceleration at the top of the left mast

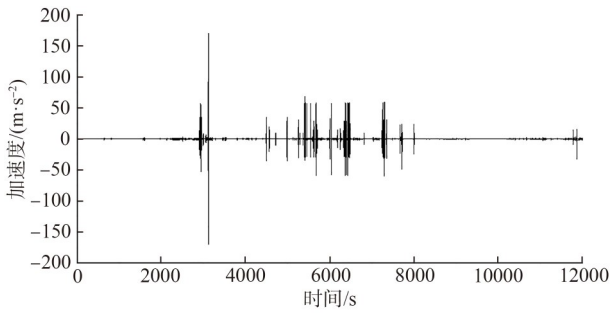


图 4　右侧桅杆顶部的振动加速度时程曲线

Fig. 4　Time-history curve of vibration acceleration at the top of the right mast

参照已有的研究结果[24]，桅杆的振动主要由前 4 阶频率控制，因此在进行 PSD 曲线计算时仅需考虑前 4 阶频率对应的 *PSD* 值。不妨分别以桅杆的前 4 阶频率为中心点将 PSD 曲线划分为 5 段，分别为 1.51~1.60 Hz、1.60~1.78 Hz、1.78~1.96 Hz、1.96~2.12 Hz、2.12~2.20 Hz。其后，通过窗口滤波函数得到相应分段的加速度时程曲线，再将其进行快速傅里叶变换（FFT 变换），并依据式（3）求得各点的 *PSD* 值。

$$PSD = \frac{P_{12}}{f_2 - f_1} \tag{3}$$

式中：*PSD* 为对应频率的功率谱密度；P_{12} 为 FFT 变换后频域下幅值的平方和；f_1、f_2 分别为频率区段的上下限。

通过上述计算后可得桅杆左、右两个顶点的 PSD 曲线，如图 5、6 所示。可知，桅杆在服役环境下存在振动行为，随着振动循环次数的增加势必会使得应力集中较大的节点产生疲劳损伤。

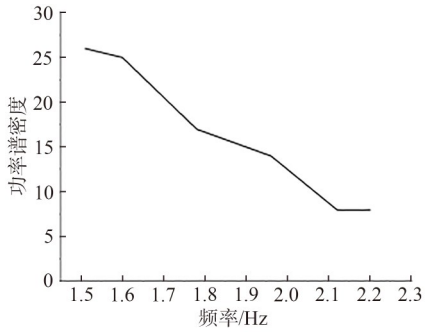


图 5　左侧桅杆 PSD 曲线

Fig. 5　PSD curve of the left mast

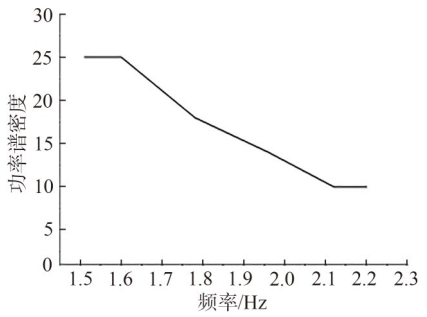


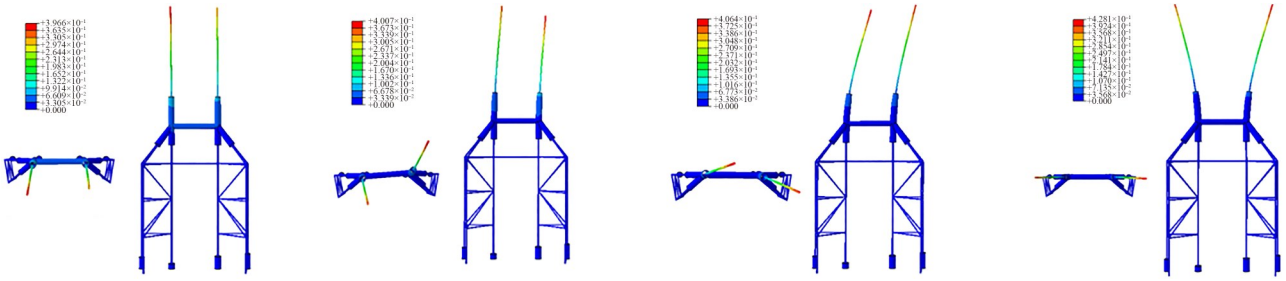
图 6　右侧桅杆 PSD 曲线

Fig. 6　PSD curve of the right mast

3　模态分析

文献[24-25]对深圳某大厦桅杆几何尺寸进行了核验，参照该核验结果，采用 ABAQUS 软件建立桅杆自振特性有限元模型。为便于计算，针对桅杆的不同部位分别采用了梁单元、壳单元、实体单元进行建模。钢材和混凝土的材料属性均设置为线弹性。钢材密度为 7850 kg/m^3，弹性模量为 2.06×10^{11} Pa，泊松比为 0.3。混凝土材料密度为 2549 kg/m^3，弹性模量为 2.979×10^{10} Pa，泊松比为 0.2。桅杆底部钢管

混凝土柱中外部钢管采用壳单元，内部混凝土采用实体单元。位于桅杆顶部的相贯节点及其附近采用壳单元。桅杆的其他部分采用梁单元。桅杆的前4阶模态计算结果如图7所示。可知，桅杆的第1阶模态频率为1.793 Hz，振型为面外同向振动；第2阶模态频率为1.908 Hz，振型为面外反向振动为主，同时伴随平面内同向振动；第3阶模态频率为2.086 Hz，振型为面内同向振动为主，同时伴随平面外反向振动；第4阶模态频率为2.181 Hz，振型为面内反向。前4阶振型右侧竖杆的振幅均大于左侧竖杆。有限元计算所得的前4阶自振频率与实测结果较为接近。



（a）第1阶　（b）第2阶　（c）第3阶　（d）第4阶

图7　桅杆前4阶模态示意

Fig. 7　Schematic diagram of the first four modes of the structure

本节模态计算结果与实测结果有所差异，其主要原因有以下三方面：其一是实际工程中桅杆经过长期的服役已经存在一定程度的损伤，这些损伤识别造成了结构固有频率的变化；其二是实际工程中桅杆底部约束并非全部固接，这与计算模型有一定的差异；其三是计算模型对一些次要的相贯节点进行了简化以提高建模效果，这也会导致计算所得的模态频率与实测值有所差异。虽然有限元计算结果与实测值有一定的差异，但差异相对较小，满足工程分析的需求。

4　随机振动疲劳寿命分析

随机振动疲劳寿命分析方法起源于20世纪80年代末，发展至今已有很多成熟的分析模型，其中Dirlik算法最为常用，且计算结果与试验的吻合性较好。本节采用该方法对桅杆进行疲劳寿命分析。依据Dirlik算法可知，应力幅值概率密度函数$P(S)$的表达式为：

$$P(S)=\frac{1}{\sqrt{m_0}}\left[\left(\frac{D_1}{Q}\right)\mathrm{e}^{-\frac{Z}{Q}}+\left(\frac{D_2 Z}{R^2}\right)\mathrm{e}^{-\frac{Z^2}{2R^2}}+D_3 Z\mathrm{e}^{-\frac{Z^2}{2}}\right] \tag{4}$$

其中　$Z=\dfrac{S}{\sqrt{m_0}}$　　$D_1=\dfrac{2\left(X_{\mathrm{m}}-r^2\right)}{1+r^2}$

$$D_2=\frac{1-r-D_1+D_1^2}{1-R}\qquad D_3=1-D_1-D_2$$

$$Q=\frac{1.25\left(r-D_3-D_2R\right)}{D_1}\qquad r=\frac{m_2}{\sqrt{m_0 m_4}}$$

$$R=\frac{r-X_{\mathrm{m}}-D_1^2}{1-r-D_1+D_1^2}\qquad X_{\mathrm{m}}=\frac{m_1}{m_0}\sqrt{\frac{m_2}{m_4}}$$

式中：S为应力幅值；m_0、m_1、m_2、m_4分别为功率谱密度PSD函数的0、1、2、4阶惯性矩；r为不规则因子。

由式(4)可知，采用Dirlik算法进行桅杆的随机振动疲劳寿命分析时，结构上应力幅的概率密度函数仅与PSD函数相关。

再结合Miner线性累积损伤理论，可知对于一个连续的振动状态，在时间T内和应力范围$\left(S_i, S_i+\Delta S_i\right)$内的应力循环次数为：

$$n_i=E(P)TP\left(S_i\right)\Delta S_i \tag{5}$$

式中：$P(S)$为应力幅值概率密度函数；$E(P)$为单位时间内出现的应力循环次数。

若已知材料或构件的S-N曲线，可得随机振动损伤的表达式为：

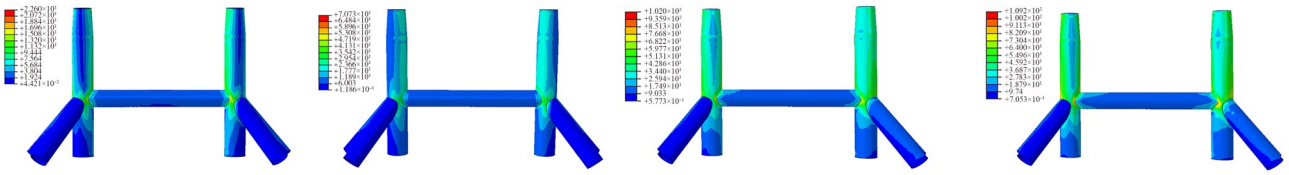
$$E(D)=\frac{E(P)}{k}T\int_0^{\infty}S^b P(S)\mathrm{d}S \tag{6}$$

式中：k为相应材料S-N曲线方程的系数；b为相应材料S-N曲线方程的指数。

依据Miner准则可知，当D等于1时，结构发生疲劳破坏，即为对应的疲劳寿命。

$$T=\frac{k}{E(P)\int_0^{\infty}S^b P(S)\mathrm{d}S} \tag{7}$$

依据上述公式获得桅杆的Mises均方根应力云图，见图8。



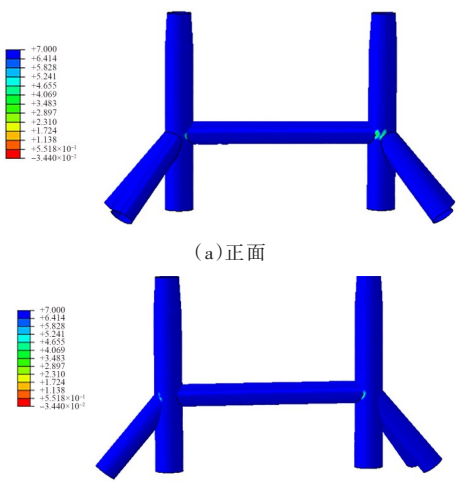
(a)第 1 阶频率　(b)第 2 阶频率　(c)第 3 阶频率　(d)第 4 阶频率

图 8　不同频率下桅杆的 Mises 均方根应力云图　MPa

Fig. 8　Contour plots of the root mean square Mises stress of the mast at different frequencies

由该计算结果可知，当桅杆随机振动的频率在 1.5~2.2 Hz 之间时，桅杆各相贯节点的最大 Mises 应力均方根均位于最上方的横杆与两根竖杆的连接焊缝上。从正面看，最大 Mises 应力均方根位于横杆的中轴线以下；从背面看，最大 Mises 应力的均方根位于横杆的中轴线两侧，近似对称分布。依据随机振动疲劳分析理论，Mises 应力均方根越大的位置越易出现疲劳损伤，而桅杆前 4 阶频率所对应的最大 Mises 应力均方根位置相同，说明该处最易先出现疲劳损伤。与文献[24-25]中桅杆疲劳损伤的检测结果对比可知，该预测结果与实际情况一致。

桅杆的概率寿命分布云图如图 9 所示。由该计算结果可知，桅杆节点的疲劳寿命最小值约为 150 万次，疲劳损伤萌生的位置与前文中依据 Mises 应力均方根分析的一致，同样也与实际工程中损伤的检测结果一致。结合影像数据所对应的时长，折算后该节点的疲劳寿命约为 20.8 a，与实际工程中的检测结果吻合。



(a)正面

(b)背面

图 9　桅杆的对数概率疲劳寿命分布云图

Fig. 9　Contour plots of the mast's logarithmic probability fatigue life distribution

5　结　论

以深圳某大厦桅杆的异常振动为背景，开展了影像数据不完备条件下桅杆结构风致疲劳寿命评估方法研究，通过上述研究工作得出以下结论：

1）以 PSD 为基础的随机振动疲劳寿命评估方法可用于桅杆类结构的疲劳性能分析，且适合于荷载数据不完备的条件下使用，分析结果与实际工程中的检测结果吻合度较好。

2）深圳某大厦桅杆的疲劳损伤易出现在两根竖杆与顶部横杆的相贯节点处，基于 Dirlik 算法得到的疲劳裂纹萌生位置与实际工况基本相同。

3）桅杆节点的疲劳寿命约为 150 万次，折算后的安全使用年限为 20.8 a。

本文研究成果的提出有效解决了影像数据不完备条件下桅杆结构的疲劳寿命评估问题，具有一定的工程应用和理论研究价值。

参　考　文　献

[1] 张献兵，雷军，张秀玲，等. 深圳赛格大厦异常振动成因分析[J]. 科学技术与工程，2021，21(25)：10588-10602.

[2] 杨易，麻福贤，谭健成，等. 赛格大厦振动事件中的大气边界层风场实测与分析[J]. 建筑结构学报，2021，42(10)：122-129.

[3] 胡卫华，唐德徽，李俊燕，等. 基于分布式同步采集的赛格大厦结构动力学参数识别[J]. 建筑结构学报，2022，43(10)：76-84.

[4] 黄铭枫，唐归，陶慕轩，等. 赛格广场大厦楼顶双桅杆结构的风致高阶涡振分析[J]. 建筑结构学报，2022，43(12)：1-10.

[5] 李聃，曹铁柱. 赛格大厦振动事件风振分析[J]. 建筑结构，2022，52(增刊 2)：1997-2003.

[6] 林照涛. 赛格大厦"5·18"事件振动溯源的人工激振试验：理论分析，技术方案及现场实测[D]. 广州：广州大学，2023.

[7] 廖境毅，面向钢管混凝土界面脱粘缺陷的叩诊检测方法与技术[D]. 广州：广州大学，2025.

[8] 张建文，实时混合模型试验在赛格大厦风致振动分析中的应用研究[D]. 广州：广州大学，2025.

[9] 汪志昊，赵洋，徐宙元. 钢拱桥刚性细长吊杆风致振动，疲劳与控制[M]. 北京：中国水利水电出版社，2020.

[10] VOLKER J. Reference values for drag and lift of a two-dimensional time-dependent flow around a cylinder[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids，2010，44：777-788.

[11] British Standards Institution (BSI). Eurocode 1: Actions on structures—part 1-4: general actions-wind actions: BS EN 1991-1-4:2005[S]. London: BSI, 2005.

[12] WANG P Y, ZHOU Q, ALAM M M, et al. Effects of streamwise gust amplitude on the flow around and forces on two tandem circular cylinders[J]. Ocean Engineering, 2022, 261: 112040.

[13] WU G F, DU X Q, WANG Y L, et al. LES of flow around two staggered circular cylinders at a high subcritical Reynolds number of 1.4×105[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 196: 104044.

[14] 陆越. 风力发电机塔架风致疲劳损伤的TLD控制技术[D]. 苏州: 苏州科技大学,2025.

[15] 黄国庆,范宇航,姜言. 基于改进T-B谱方法的高层建筑风致疲劳损伤分析[J]. 振动与冲击, 2022,41(5):243-250.

[16] LIU Y, SHEPARD W S. Dynamic force identification based on enhanced least squares and total least-squares schemes in the frequency domain[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 282(1/2): 37-60.

[17] 方明新. 超高层建筑风荷载反演分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2025.

[18] HIROTSUGU I, JOHN J H, STEPHEN R. Review of inverse analysis for indirect measurement of impact force[J]. Applied Mechanics Review,2001,54(6): 503-524.

[19] NORDSTRON L J L, NORDBERG T P. A critical comparison of time domain load identification methods[C]//Proceeding of the Sixth International Conference on Motion and Vibration Control. Saitama: Japan: 2002: 1151-1156.

[20] 深圳市气象局. 深圳市气候环境年报[R]. 深圳: 深圳市气象局, 2010—2021.

[21] 张志政. 基于功率谱密度的旋挖钻机桅杆振动疲劳寿命研究[D]. 西安:长安大学,2021.

[22] 鲁丽君. 桅杆结构纤绳连接拉耳风致疲劳裂纹萌生与扩展寿命预测[D]. 武汉:武汉理工大学,2008.

[23] 孙静. 桅杆结构疲劳状态的安全预警[D]. 武汉:武汉理工大学,2006.

[24] 中冶建筑研究总院(深圳)有限公司. 深圳赛格广场518楼宇振动事件原因分析简要报告[R]. 深圳:中冶建筑研究总院(深圳)有限公司, 2021:16-21.

[25] 中冶检测认证有限公司. 深圳赛格广场二期工程天线桅杆节点检测报告[R]. 深圳:中冶检测认证有限公司,2022.