

桅杆结构有限元模型修正与参数敏感性研究

刘慕广^{1,2}, 乔磊¹, 王雷³, 余先锋¹, 张春生⁴, 谢壮宁¹, 张丽⁴

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室, 广东 广州 510641;
3. 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507; 4. 深圳市国家气候观象台, 广东 深圳 518040)

摘要: 基于台风“圆规”激励下的实测加速度响应识别了深圳 356 m 高气象梯度观测塔的模式参数, 结合带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)对气象塔有限元模型进行修正。结果表明: 气象塔模式非常密集, 且纤维模式的参与程度较为显著。气象塔 X 向和 Y 向的基频分别为 0.614 Hz 和 0.603 Hz, 其前 3 阶弯曲模式阻尼比在 1%~2% 之间。塔身密度、纤维弹模对塔身模式频率和振型有显著影响, 高层纤维的线质量和塔身弹模对其也有一定影响, 但纤维张力的影响较低。气象塔有限元模型修正后的风致响应高于修正前, 并更接近实测结果, 验证了修正模型的准确性。

关键词: 模型修正; 风振响应; 桅杆; 模式识别; 实测

中图分类号: TU311.3; TU323.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)07-1107-08

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.07.003

引言

精确的有限元模型对于研究土木结构的静动力响应和开展结构安全二级评估等至关重要。但是, 由于土木结构体型庞大、参数繁多, 且存在各类不确定性和非线性因素^[1], 按照设计图纸建立的有限元模型不可避免地存在各种误差^[2], 最终会影响到有限元模型分析结果的准确性。因此, 极有必要以现场实测的数据为基准优化有限元模型, 使有限元与实际结构的模式特征尽量吻合, 这对于高耸或大跨等土木结构尤为重要。

有限元模型修正方法可分为矩阵优化法^[3]和基于敏感性分析的参数型法^[4]。矩阵优化法需要事先精确估计结构的质量、刚度矩阵, 对于复杂工程, 实际应用中通常难以满足^[5]。相比之下, 参数型方法以结构物理参数(如材料特性、几何特性、边界条件等)作为修正对象, 以有限元响应特征值与实测值的残差为目标函数, 运用优化算法迭代调整物理参数, 使目标函数最优。该类方法具有明确的物理意义, 在有限元修正中被较多采用。张建等^[6]以 2019 年北京世界园艺博览会国际竹藤组织馆为实测对象, 基于实测模式参数对该结构的有限元模型进行了修

正。Saudi^[7]基于一座 90 m 桅杆通信塔现场实测的固有频率修正了有限元模型, 并进一步评估了桅杆的结构安全。Ni 等^[8]基于实测数据对广州塔有限元模型进行了修正。叶锡钧等^[9]也以广州塔为实测对象, 利用遗传算法对广州塔的初始参数进行了修正。Foti 等^[10]对一座意大利塔楼进行多次环境振动实测, 基于实测模式采用敏感性参数分析法修正了有限元模型。Ren 等^[11]基于实测的固有频率构造二次多项式响应曲面, 通过修正弹性模量、节点区域面积来优化有限元模型, 并通过振动试验验证有限元修正的有效性。Brownjohn 等^[12]利用实测频率和振型, 采用基于灵敏度的参数型修正方法修正桥梁有限元模型, 且以修正模型为基准评估了实际结构的损伤状况。

本文以深圳市气象梯度观测塔这一高耸桅杆结构为研究对象, 采用 2021 年台风“圆规”激励下现场实测的加速度信号识别塔身的模式参数。结合参数型模型修正方法, 对影响桅杆结构模式特征的参数进行了敏感性研究, 通过带精英策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)^[13]对有限元模型进行修正, 并对修正前后的风致响应特征进行了初步对比分析。

收稿日期: 2022-11-09; **修订日期:** 2023-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978285, 52378514); 广东省现代土木工程重点实验室基金资助项目(2021B1212040003); 亚热带建筑与城市科学全国重点实验室开放基金资助项目(2021ZB11); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2024A1515011828, 2024A1515011525)。

1 桅杆结构有限元模型

深圳市气象梯度观测塔位于深圳市宝安区,是亚洲第一、世界第二高的桅杆格构塔。该塔高356 m,由5层纤绳固定,在东南西北各方向分别设置3个锚固点,如图1所示。塔身内部设置一台载重量为500 kg的齿条式升降机。塔身为桁架结构,采用Q345B热轧无缝钢管。塔身横断面为正方形,在地面0标高处为5 m×5 m,至15 m标高处渐变为2.5 m×2.5 m并保持不变。纤绳采用半平行镀锌钢丝拉索,与地面倾角在44°~56°范围内,在65,195和330 m各方向单根布置,在130,260 m各方向双根布置。

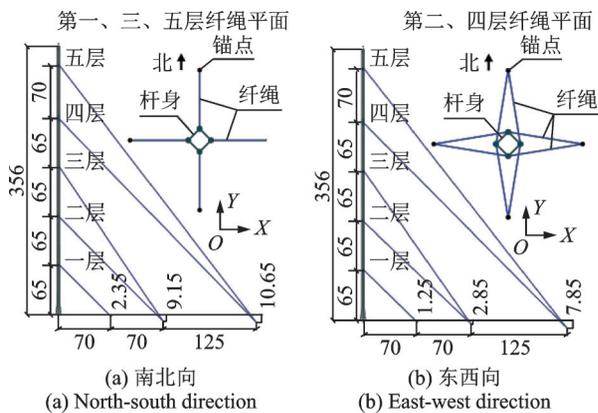


图1 气象塔布置图(单位:m)

Fig. 1 Meteorological tower layout (Unit: m)

采用ANSYS建立气象塔有限元模型,原型中的观测平台、爬梯、电梯、螺栓、法兰板等附属设备未在模型中直接建模,而是通过对塔身密度适当放大来简化考虑。塔身各杆件采用BEAM188单元,弹性模量为206 GPa,考虑附属结构后的等效密度取7890 kg/m³。纤绳采用LINK180单元,弹性模量为185 GPa,每层纤绳线质量和张力如表1所示,有限元模型中通过施加初应变的方式来模拟纤绳的预张力。塔顶避雷针等设备通过质量单元MASS21施加在模型上。有限元模型共包含9555个单元、4190个节点、25116个自由度,如图2所示。

表1 纤绳设计参数

Tab. 1 Design parameters of rope

纤绳锚固高度/m	设计张力/kN	线质量/(kg·m ⁻¹)
65	377	9.2
130	172	9.2
195	531	18.0
260	298	10.2
330	500	21.3

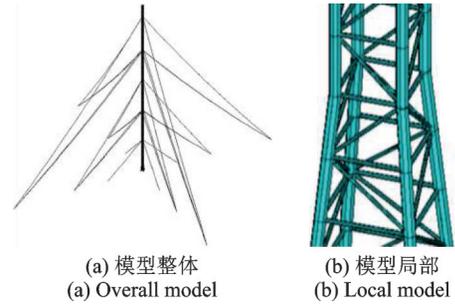


图2 气象塔有限元模型

Fig. 2 FE model of meteorological tower

通过ANSYS的Block Lanczos大变形预应力模态分析法对有限元模型进行模态计算。表2和3分别给出了频率低于1.0 Hz的纤绳(南北向)和塔身模态分析结果。有限元结果表明,气象塔塔身的X向、Y向前3阶模态主要集中在0.7~0.9 Hz,纤绳在1 Hz以内出现了10多阶模态,且部分频率与塔身较为接近。虽然南北向和东西向纤绳地面标高不同(见图1)会导致两个方向的纤绳的模态频率略不同,但考虑到东西向纤绳频率与南北向差异并不大,表2中不再列出。

表2 南北向纤绳频率

Tab. 2 North-south rope frequency

锚固高度/m	模态频率/Hz				
	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶
130	0.356	0.704	—	—	—
195	0.354	0.708	—	—	—
260	0.231	0.461	0.692	0.923	—
330	0.185	0.369	0.557	0.739	0.925

注:锚固在65 m高的纤绳1阶频率大于1.0 Hz。

表3 塔身频率与模态

Tab. 3 Frequency and modal of mast

模态特征	模态频率/Hz		
	1阶	2阶	3阶
X向弯曲	0.725	0.758	0.898
Y向弯曲	0.719	0.743	0.883

2 基于实测的模态参数识别

2.1 实测数据

华南理工大学在气象塔塔身50,160,250,300和350 m 5个高度布置了X,Y双向加速度仪(LAC-II型)。设备采样频率为25 Hz,其X,Y正向分别对应气象塔正东向和正北向。

2021年第18号台风“圆规”于10月8日下午在菲律宾以东洋面生成,10月13日5时,“圆规”加强

为台风级,中心附近最大风力 12 级,10 月 13 日 15 时 40 分前后,“圆规”在海南省琼海市沿海登陆。台风“圆规”的中心距离深圳气象梯度塔最近时不足 400 km,且 2021 年 10 月 12—13 日,气象塔基本处于台风“圆规”的 7 级风圈内。图 3 为 2021 年 10 月 12 日 0 时至 14 日 0 时气象塔 320 m 高度处的风速和风向样本,图 4 为对应气象塔的加速度响应。由图 3 可见,自 12 日 0 时起,气象塔处风速稳步增大,在 13 日 12 时前后达到最大,对应的 10 min 平均风速为 16 m/s,随后风速逐渐降低;风向则由 12 日 0 时的北风逐渐在 13 日下午变为东风。由图 4 可见,随风速增加,气象塔的加速度响应也逐渐增大,且响应总体随高度的增加而增大,平均风速最大时气象塔 350 m 处 X 向峰值加速度为 19 cm/s²,Y 向峰值加速度为 20 cm/s²。下文统一选取 2021 年 10 月 12 日 22:00—24:00 持续大风时段数据作为分析样本。

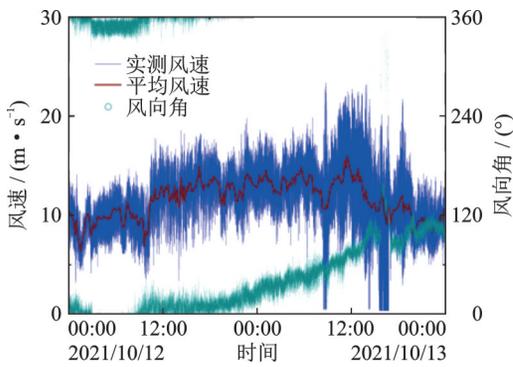
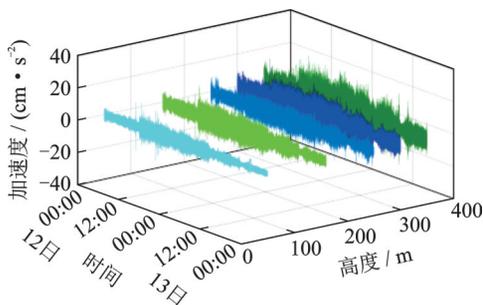
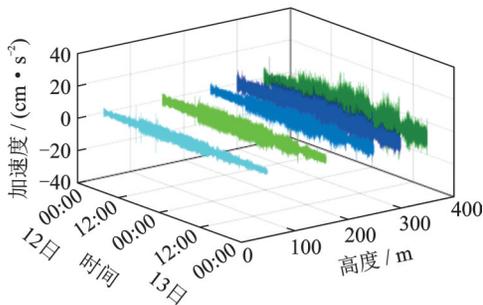


图 3 320 m 高度的风速和风向
Fig. 3 Wind speed and direction at 320 m



(a) X向
(a) X-direction



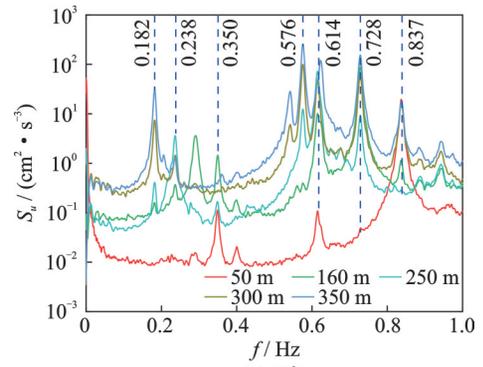
(b) Y向
(b) Y-direction

图 4 加速度响应历程

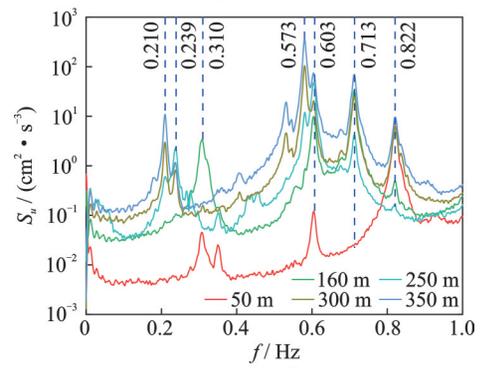
Fig. 4 Time-history of acceleration response

2.2 模态参数识别

图 5 为各实测高度 X 向和 Y 向截止频率为 1.0 Hz 的加速度功率谱曲线。由图 5 可见,桅杆结构在 X 向和 Y 向分别呈现出近 10 个较为明显的能量峰值。结合表 2 和 3 的有限元结果,图 5 中桅杆的加速度功率谱中必然同时混杂了纤绳和塔身的振动信息。考虑到塔身振动的整体性和纤绳振动对塔身影响的局部性,利用稳定图^[14]进一步剔除纤绳局部振动引起的虚假模态,由 5 个高度的加速度响应得到的频率稳定图如图 6 所示。



(a) X向



(b) Y向

图 5 加速度功率谱

Fig. 5 Acceleration power spectrum

由图 6 可见,X 向、Y 向分别有 6 个稳定的频率极点。对于 X 向、Y 向 0.58 Hz 以内的频率,其能量峰仅在 2,3 个高度位置较为明显,进一步通过不同高度信号的互功率谱相位信息及振型特征,并结合表 2 和 3 中的有限元结果,推断出 X 向的 0.182, 0.238 和 0.576 Hz,Y 向的 0.210,0.239 和 0.573 Hz 分别为不同锚固高度纤绳的频率。同理,可推断 0.614,0.728 和 0.837 Hz 分别为塔身 X 向前 3 阶模态;0.603,0.713 和 0.822 Hz 分别为塔身 Y 向前 3 阶模态。图 7 给出了实测和有限元的振型对比,由图 7 可见,X 向、Y 向的前 3 阶实测振型与有限元结果具有较好的一致性。

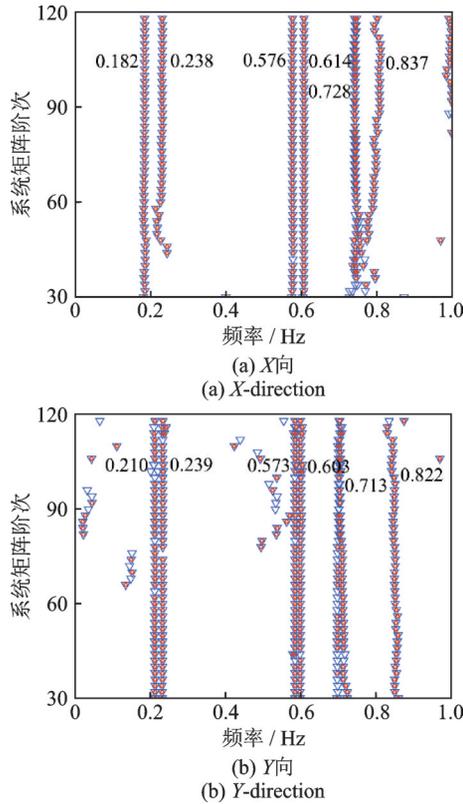


图6 频率稳定图

Fig. 6 Frequency stability diagram

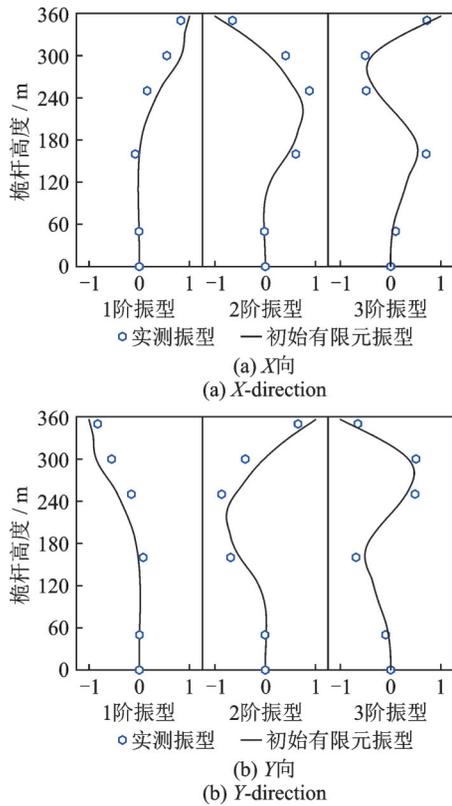


图7 有限元与实测振型对比

Fig. 7 Mode shape comparison between FE and measured data

表4中汇总了气象塔X向、Y向的前3阶弯曲模态频率实测结果,表中同时给出了基于随机子空间

法识别的塔身模态阻尼比。由表4可见,塔身的前3阶阻尼比在1%~2%间变化,具有一定的离散性,这一结果与Harikrishna等^[15]针对50 m高桅杆实测的1%~3%阻尼比相近,也接近中国规范^[16]中钢塔架2%的阻尼比建议值。

表4 有限元与实测模态对比

Tab. 4 FE and measured modal comparison

模态阶数	实测频率 f/Hz	阻尼比	频率误差 /%	振型 MAC
X向1阶	0.614	0.0209	18.08	0.72
X向2阶	0.728	0.0114	4.12	0.67
X向3阶	0.837	0.0101	7.29	0.72
Y向1阶	0.603	0.0137	19.24	0.70
Y向2阶	0.713	0.0167	4.21	0.68
Y向3阶	0.822	0.0113	7.42	0.74

另外,表4中对比了气象塔有限元模型与实测频率的误差及振型MAC(Modal Assurance Criterion)。由表4可见,有限元模型的前3阶模态均与实测存在较大差异,振型MAC值均在0.75以下,其X向、Y向最大频率误差分别为18.08%和19.24%,均出现在1阶模态。这些差异的出现可能是模型中各项设计参数与结构实际服役状态不符的缘故。为了得到一个比较理想的桅杆塔身动力模型,需要对初始有限元模型进行修正。

3 有限元模型修正

3.1 参数敏感性研究

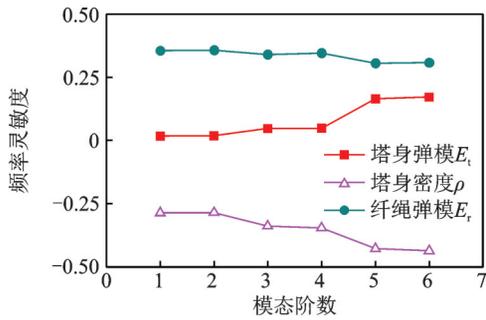
由于桅杆结构的非线性特征,其基本动力特性与结构组成形式、纤绳分布、结构刚度等相互关联^[17]。结合桅杆结构的实际构造和工程实际,初步选定的影响参数主要有:塔身弹模 E_t 、塔身密度 ρ 、第1~5层纤绳线质量 $\rho_1 \sim \rho_5$ 、第1~5层纤绳预张力 $F_1 \sim F_5$ 和纤绳弹模 E_r 。

首先分析塔身模态频率和振型对以上参数的敏感性。参数的敏感性研究实质上是函数对自变量求导的数学问题,有限元差分法是常用的灵敏度数值分析方法。利用摄动法使修正参数发生微小扰动,再根据一阶差分公式近似计算参数灵敏度,一阶差分公式为:

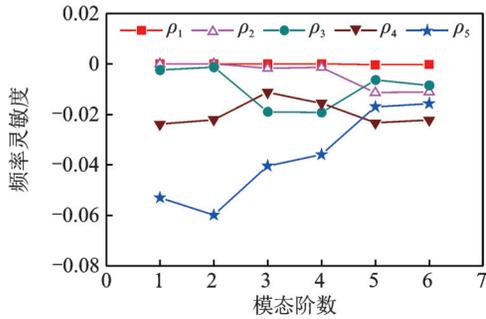
$$\frac{\partial f}{\partial x_i} \approx \frac{f(x_i + \Delta x_i) - f(x_i)}{\Delta x_i} \quad (1)$$

式中 模态特征量 f 可以是频率、振型MAC等; x_i 为修正参数; Δx_i 为摄动量,取设计值的10%;各参数的设计值如第1节所述。

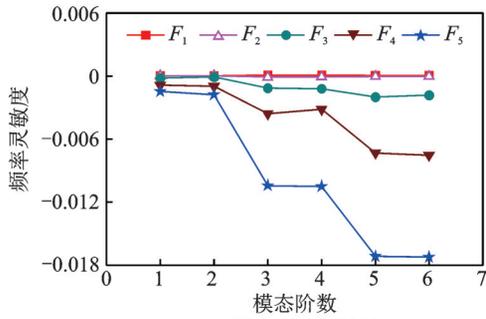
模态特征量对各参数的灵敏度分析如图 8 和 9 所示。图中 1,3,5 阶模态分别对应 Y 向的 1,2,3 阶弯曲模态;2,4,6 阶模态分别对应 X 向的 1,2,3 阶弯曲模态。从图 8 中频率的敏感性可以看出:1)塔身模态频率对塔身弹模和密度、纤绳弹模的敏感性最高,纤绳质量次之,纤绳张力最小;2)塔身密度和纤绳弹模对塔身 X 向、Y 向的前 3 阶弯曲模态频率均有明显影响,但塔身弹模仅对 X 向、Y 向的第 3 阶模态频率存在较大影响;3)3~5 层纤绳的线质量和预张力对塔身模态频率影响较大,底部两层纤绳的影响很小。



(a) 频率灵敏度量级 1
(a) Frequency sensitivity metric 1



(b) 频率灵敏度量级 2
(b) Frequency sensitivity metric 2

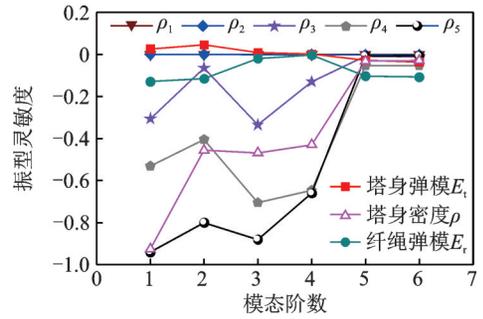


(c) 频率灵敏度量级 3
(c) Frequency sensitivity metric 3

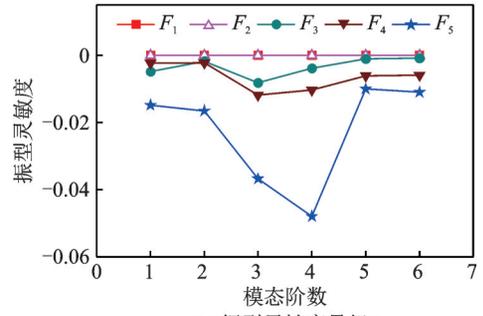
图 8 模态频率对各参数的灵敏度

Fig. 8 Modal frequency sensitivity to each parameter

由图 9 中对模态振型的敏感性可以看出:1)塔身振型对塔身密度、3~5 层纤绳线质量及纤绳弹模均具有较高的敏感性,塔身弹模和 1 层、2 层纤绳线质量对塔身振型的影响不大;2)3~5 层纤绳预张力对模态振型也有一定影响,底部两层纤绳的影响很小。



(a) 振型灵敏度量级 1
(a) Mode shape sensitivity metric 1



(b) 振型灵敏度量级 2
(b) Mode shape sensitivity metric 2

图 9 模态振型对各参数的灵敏度

Fig. 9 Mode shape sensitivity to each parameter

依据图 8 和 9 中灵敏度分析结果,下文选取塔身弹模、塔身密度、纤绳弹模及第 3~5 层纤绳的线质量和预张力作为修正参数,以实测结果为目标,对塔身 X 向、Y 向的前 3 阶模态进行修正。

3.2 NSGA-II 算法与修正结果

NSGA-II 算法降低了非劣排序的复杂性,具有运算速度快,解集收敛性好的优点^[13]。本文通过设计 MATLAB-ANSYS 联合仿真优化程序,利用全局搜索和局部优化实现模型修正,每次迭代的参数由 MATLAB 导入 ANSYS 中,目标函数值通过 MATLAB 读取 ANSYS 输出文件进而分析优化。算法参数设置:初始种群 500 个,最大迭代次数 20 代,交叉概率 0.7,变异概率 0.02。根据工程经验并经初步试算,表 5 给出了各参数的初始值与变化范围。

通过定义频率误差平方和 Q_1 、振型 MAC 之和 Q_2 建立目标函数,构造的目标函数如下:

$$Q_1 = \min \left\{ \sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{f_{Xi}^a - f_{Xi}^e}{f_{Xi}^a} \right)^2 + \left(\frac{f_{Yi}^a - f_{Yi}^e}{f_{Yi}^a} \right)^2 \right] \right\} \quad (2)$$

$$Q_2 = \max \left(\sum_{i=1}^3 \frac{[(\phi_{Xi}^a)^T \phi_{Xi}^e]^2}{[(\phi_{Xi}^a)^T \phi_{Xi}^a][(\phi_{Xi}^e)^T \phi_{Xi}^e]} \right) \quad (3)$$

式中 f_{Xi}^a, f_{Yi}^a 分别为 X 向、Y 向的第 i 阶有限元计算频率; f_{Xi}^e, f_{Yi}^e 分别为 X 向、Y 向的第 i 阶实测频率; ϕ_{Xi}^a, ϕ_{Xi}^e 分别为 X 向第 i 阶有限元振型向量和实测振

表 5 修正参数初始值与变化范围

Tab. 5 Initial values and variation ranges of parameters

参数	初始值	变化范围
E_t/GPa	206	[160, 230]
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7890	[7101, 8679]
$\rho_3/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	18	[15.3, 20.7]
$\rho_4/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	10.2	[8.7, 11.7]
$\rho_5/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	21.3	[18.1, 24.5]
F_3/kN	531	[431, 631]
F_4/kN	298	[198, 398]
F_5/kN	500	[400, 600]
E_r/GPa	185	[150, 200]

型向量(由于表 4 中 Y 向振型 MAC 差别很小,目标函数 Q_2 中仅考虑 X 向前 3 阶振型)。

NSGA-II 算法对目标函数的优化过程如图 10 所示。迭代至第 9 代满足收敛条件,对应目标函数 Q_1 收敛至 0.009,目标函数 Q_2 收敛至 2.8(各阶频率误差小于 6%,各阶振型 MAC 大于 0.9)。

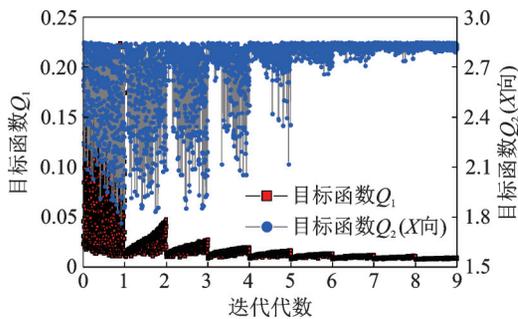


图 10 NSGA-II 算法优化过程

Fig. 10 NSGA-II algorithm optimization process

表 6 为修正后的参数值及变化率,表 7 为修正后塔身 X 向、Y 向的前 3 阶弯曲模态。由表 6 可见,纤绳线质量、张力及弹模变化最显著,塔身弹模和密度较参数初始值变化较小。另外,修正后塔身弹模和密度较初始值略有增大;对于纤绳,除第 5 层的线质量比初始值大外,其他参数均有较大程度的减小。纤绳参数的变化率表明实际服役纤绳的一些性能较设计值可能存在一定衰减。由表 7 可见,修正后有

表 6 修正后参数的变化

Tab. 6 Variation of parameters after updating

参数	修正值 (变化率)	参数	修正值 (变化率)
E_t/GPa	214(3.9%)	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	8006(1.5%)
$\rho_3/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	16.6(-7.8%)	F_3/kN	461(-13.2%)
$\rho_4/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	9.6(-5.9%)	F_4/kN	266(-10.7%)
$\rho_5/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	24.3(14.1%)	F_5/kN	420(-16.0%)
E_r/GPa	157(-15.1%)		

表 7 修正后模型模态与实测数据对比

Tab. 7 Modal comparison between FE model updating and measured data

模态		频率/Hz		误差/	振型
阶数	特性	有限元	实测	%	MAC
X 向 1 阶	弯曲	0.640	0.614	4.23	0.95
X 向 2 阶	弯曲	0.693	0.728	-4.81	0.93
X 向 3 阶	弯曲	0.835	0.837	-0.24	0.95
Y 向 1 阶	弯曲	0.635	0.603	5.31	0.95
Y 向 2 阶	弯曲	0.680	0.713	-4.63	0.94
Y 向 3 阶	弯曲	0.820	0.822	-0.24	0.96

有限元模型 X 向、Y 向的前 3 阶频率与实测的误差均在 5.31% 以内,振型 MAC 不低于 0.93,较表 4 中初始有限元模型有较大程度的改善,其相对误差可以接受^[18]。

3.3 有限元和实测结果的对比

为了进一步验证模型修正的合理性,本节对梯度塔有限元风振结果与实测数据进行对比。由于 2021 年 10 月 12 日多个风速仪的数据存在异常,本节选用 13 日 12:00—12:10 的大风数据及梯度塔加速度实测数据。将梯度塔不同高度 13 台超声风速计(0.1 Hz 采样频率)的平均风速进行指数律拟合,得到梯度塔对应时刻的风速沿高度的分布,如图 11 所示。由于所选时段台风已登录海南,拟合到的剖面指数明显偏大。通过对 10 Hz 采样的实测风速数据进行频谱分析发现,实测风谱与 von Karman 谱较为吻合,如图 12 所示,图中 L_u 为湍流积分尺度, U 为对应高度处风速。通过以上实测风场的分析,采用谐波叠加法,基于实测风速拟合剖面每 10 m 高度生成一个风速时程。风速谱采用 von Karman 谱,仅考虑塔身高度方向脉动风的相关性,相关函数采用 Simiu 建议值($C_z=10$),脉动风间隔取 0.1 s。

采用完全法进行瞬态动力分析,阻尼比按表 4 中 X 向 1 阶模态 0.0209 取值。通过分析,得到有限

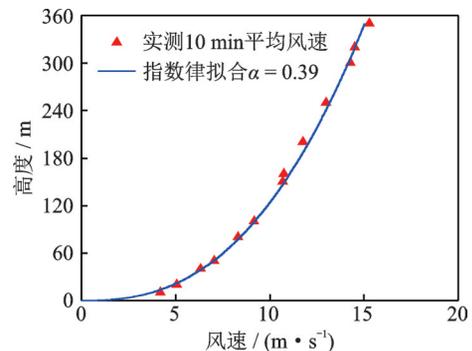


图 11 风剖面

Fig. 11 Wind profile

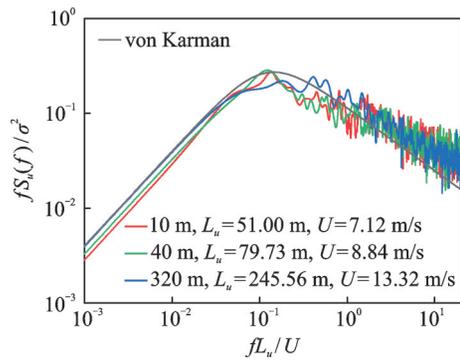


图12 脉动风功率谱

Fig. 12 Fluctuation wind power spectrum

元模型修正前、后塔身响应的加速度均方根,其X向结果与实测值的对比如图13所示。

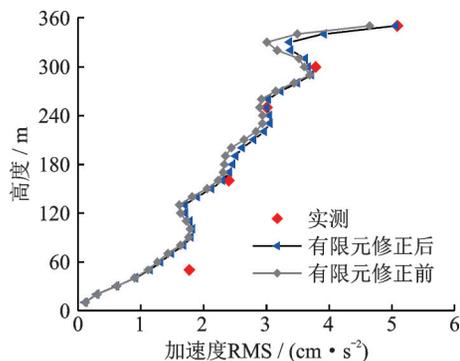


图13 X向加速度均方根

Fig. 13 Acceleration RMS at X-direction

由图13可见,修正后模型加速度均方根要高于修正前,且更接近实测值。修正后上部四个测点值与实测值误差均小于5%,但在50 m处两者差异较为明显,其误差为-35.35%,这可能是因为实测中近地面风场更易受周边干扰,高湍流导致结构脉动响应偏大。

4 结论

(1)深圳气象塔模态非常密集,且纤绳模态参与程度较为显著。X向、Y向的基频分别为0.614 Hz和0.603 Hz,结构阻尼比为1%~2%。

(2)塔身密度、纤绳弹模对动力特性有显著影响,塔身弹模、高层纤绳的线质量也存在一定程度的影响,纤绳张力对其影响较低。

(3)结合NSGA-II算法修正了有限元模型的材料参数,修正后的塔身弹模和密度略有增大,纤绳张力、弹模等参数明显减小,说明实际服役纤绳的一些性能较设计值可能存在一定衰减。

(4)气象塔有限元模型修正后的风致响应高于修正前,并更接近实测结果,验证了修正模型的准

确性。

参考文献:

- [1] Asgari E, Moaveni B, Barbosa A R, et al. Nonlinear model calibration of a shear wall building using time and frequency data features[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 85: 236-251.
- [2] Yuan Z X, Liang P, Silva T, et al. Parameter selection for model updating with global sensitivity analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 115: 483-496.
- [3] Berman A, Nagy E J. Improvement of a large analytical model using test data[J]. AIAA Journal, 1983, 21(8): 1168-1173.
- [4] Mazzotti M, Mao Q, Bartoli I, et al. A multiplicative regularized Gauss-Newton method with trust region sequential quadratic programming for structural model updating[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 131: 417-433.
- [5] 杨朋超,薛松涛,谢丽宇. 结构动力模型的改进直接修正方法及工程应用[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(3): 34-40.
YANG Pengchao, XUE Songtao, XIE Liyu. An improved direct method for dynamic model updating and its practical engineering applications[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(3): 34-40.
- [6] 张建,钱孝文,杨娜,等. 大跨度圆竹拱结构动力测试及有限元模型修正[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(2): 94-104.
ZHANG Jian, QIAN Xiaowen, YANG Na, et al. Dynamic test and finite element model modification of long-span round bamboo arch structures[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(2): 94-104.
- [7] Saudi G. Structural assessment of a guyed mast through measurement of natural frequencies[J]. Engineering Structures, 2014, 59: 104-112.
- [8] Ni Y Q, Xia Y, Lin W, et al. SHM benchmark for high-rise structures: a reduced-order finite element model and field measurement data[J]. Smart Structures & Systems, 2012, 10(4): 411-426.
- [9] 叶锡钧,安关峰,周朝阳,等. 高耸柔性结构的模态参数识别及模型修正研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 33-39.
YE Xijun, AN Guanfeng, ZHOU Chaoyang, et al. Modal parameter identification and model updating of high-rise flexible structure[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5): 33-39.
- [10] Foti D, Diaferio M, Giannoccaro N I, et al. Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower[J]. NDT & E International,

- 2012, 47: 88-95.
- [11] Ren W X, Chen H B. Finite element model updating in structural dynamics by using the response surface method[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32 (8) : 2455-2465.
- [12] Brownjohn J M W, Xia P Q, Hao H, et al. Civil structure condition assessment by FE model updating: methodology and case studies[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2001, 37(10): 761-775.
- [13] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6 (2): 182-197.
- [14] Reynders E, De Roeck G. Reference-based combined deterministic-stochastic subspace identification for experimental and operational modal analysis[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(3): 617-637.
- [15] Harikrishna P, Annadurai A, Gomathinayagam S, et al. Full scale measurements of the structural response of a 50 m guyed mast under wind loading[J]. *Engineering Structures*, 2003, 25(7): 859-867.
- [16] 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. 高耸结构设计标准:GB 50135—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for design of high-rising structures: GB 50135—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [17] 王肇民. 桅杆结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- WANG Zhaomin. The Guyed Masts[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [18] 丁一凡, 刘宇飞, 樊健生, 等. 基于空间位形的在役索膜结构有限元模型修正与安全评估[J]. *工程力学*, 2022, 39(5): 44-54.
- DING Yifan, LIU Yufei, FAN Jiansheng, et al. Finite element model updating and safety assessment of in-service cable-membrane structure based on spatial configuration[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39 (5) : 44-54.

Finite-element model updating and parameter sensitivity research of high-rise guyed mast

LIU Mu-guang^{1,2}, QIAO Lei¹, WANG Lei³, YU Xian-feng¹, ZHANG Chun-sheng⁴,
XIE Zhuang-ning¹, ZHANG Li⁴

(1.School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2.State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, Guangzhou 510641, China;

3.Guangdong Communication Planning & Design Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510507, China;

4.Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040, China)

Abstract: Based on the measured acceleration response under Typhoon Kompasu, the modal parameters of the 356 m Shenzhen Meteorological Gradient Tower (SMGT) are identified. The Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II), which is a fast and elitist genetic algorithm, is applied to update the finite element (FE) model of SMGT. The results show that the vibration modes of SMGT are very dense, and the involvement of cable vibration modes is obvious. The fundamental frequencies of SMGT in X and Y directions are 0.614 Hz and 0.603 Hz, respectively, and the damping ratio of the first 3 order bending modes are about 1%~2%. The tower density and cable elastic modulus have a significant effect on the modal frequency and mode shape of SMGT, the lineic mass of high-rise cable and tower elastic modulus also have a certain influence, while the cable tension has a relatively low influence on the modes of SMGT. The wind-induced response of the updating FE model is higher than that of initial model, and closer to the actual measurement, which verifies the accuracy of the updating FE model.

Key words: model updating; wind vibration response; guyed mast; modal identification; field measurements

作者简介: 刘慕广(1981—),男,博士,副教授。电话:(020)87110615;E-mail:liumg@scut.edu.cn。

通讯作者: 余先锋(1985—),男,博士,讲师。电话:(020)87110615;E-mail:ctxfyu@scut.edu.cn。