

考虑边界条件不确定性的塔机有限元模型修正^{*}

秦仙蓉, 郝婧兰, 徐俭, 张氢, 孙远韬

(同济大学机械与能源工程学院 上海, 201804)

摘要 由于在大型塔机的模型修正中为简化计算, 往往忽略了边界条件的不确定性, 导致修正结果精度不够或修正计算收敛困难, 为此提出一种考虑边界条件不确定性的塔机有限元模型修正方法。首先, 以某型塔机为研究对象, 进行整机风致振动实测, 获取结构的实测动态特性; 其次, 建立考虑边界条件不确定性的塔机有限元模型, 基于二次响应面法对该有限元模型进行修正; 最后, 将模型修正前后的计算结果与实测值进行对比。结果表明, 考虑边界条件的影响能有效提高修正的精度, 对结构的边界条件进行修正后的有限元模型能复现实测频段内的模态, 也能以一定精度预测实测频段外的模态, 证实了所提出的考虑边界条件不确定性的修正方法的有效性。

关键词 塔式起重机; 模型修正; 边界条件; 响应面法
中图分类号 TH113

引言

由于塔式起重机(以下简称塔机)常处于恶劣的工作环境中可引发严重事故, 所以必须对起重机械的安全进行基础性、系统性的研究, 实现对塔机进行动态性能在线监测, 这首先需要可信的、能准确反映结构实际力学特性的有限元模型。随着大型塔机结构的复杂化, 需要利用试验数据对初始有限元模型进行修正, 修正后的有限元模型能反映结构的力学特性, 更能对工程结构进行损伤识别、健康诊断以及对工程结构工作状态进行评估与预测^[1]。

有限元模型修正方法大体分为 4 类, 分别为基于静力学信息^[2]、基于动力学信息^[3]、联合静力学和动力学信息^[4]、基于响应面法的有限元模型修正^[5-12]。基于响应面方法的有限元模型修正的主要思路是: 首先, 采用合适的试验设计方法设计试验; 然后, 基于统计学分析技术得到能反映特征量与设计空间之间复杂隐式函数关系的显式响应面模型; 最后, 直接利用响应面替代原有限元模型进行修正。这样就将计算工作量非常大的有限元分析转移到计算速度更快的响应面分析, 使计算效率大大提高。文献[5]在分析土坡稳定的可靠性中, 应用响应面法建立了包含常数项和线性项的二次多项式响应面函数, 该方法的计算效率相比传统可靠度计算方法有

大幅提升。文献[6]在二阶多项式响应面函数中忽略交叉项, 考虑平方项的影响, 建立了更加简单有效的回归响应面。文献[8-12]系统阐述了响应面方法的几个关键步骤, 包括响应面函数形式的选择和试验设计方案的确定等, 并通过许多工程实例证明了该方法能明显提高修正的效率。

过去的大型塔机模型修正案例中, 为了简化问题, 往往忽略边界条件的不确定性, 只对结构的材料参数及结构参数进行修正, 这样会使修正结果精度不够或计算收敛困难。笔者考虑边界条件的不确定性, 建立某型塔机有限元模型, 采用质量刚度阻尼单元 MATRIX27 来模拟实际结构的边界条件, 通过修正质量刚度阻尼单元 MATRIX27 的刚度值来逼近实际结构的边界条件, 从而说明有限元模型修正过程中考虑边界条件影响的必要性, 证明了所提出的考虑边界条件不确定性的修正方法的有效性。

1 塔机风振响应现场实测

图 1 为某型塔机及主要部件图。整机高度为 56 m, 最大臂长为 65 m, 最大臂长处额定起重量为 1 300 kg。采用模态测试方法, 通过风致振动测试进行结构动力特性识别。由于测试对象结构跨度非常大且结构复杂, 人在塔机上活动范围非常有限, 不适宜配置有线式振动传感器和数据采集仪, 故采用

^{*} 国家科技支撑计划资助项目(2015BAF06B05); 国家自然科学基金资助项目(51205292)
收稿日期: 2016-10-04; 修回日期: 2017-02-20

无线环境激励试验模态测试分析系统 DH5907A 测试设备,测试设备与现场如图 2 所示。

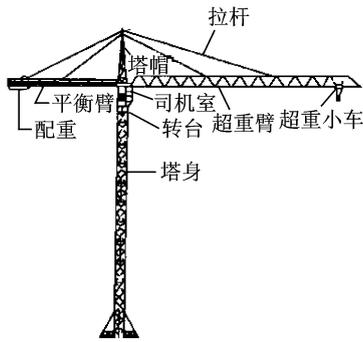


图 1 某型塔机及主要部件

Fig. 1 Components of a tower crane

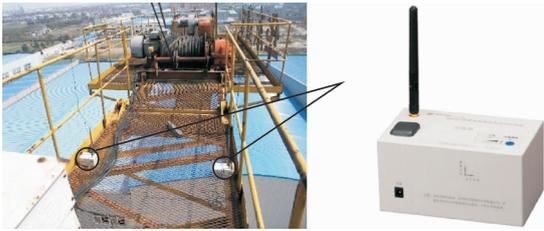


图 2 测试设备与测试现场

Fig. 2 Test equipment and testing scene

基于风致振动测试数据,采用时域的随机子空间方法对塔机模态参数进行识别,得到如表 1 所示的塔机低阶固有频率及振型。以前五阶实测模态数据为依据,修正塔机有限元模型。

表 1 实测塔机前五阶模态频率及相应振型

Tab. 1 Modal frequencies and mode shapes of the tower crane from field tests

阶次	f/Hz	振型
1	0.12	起重臂回转平面一阶弯曲
2	0.26	起重臂起升平面一阶弯曲
3	0.35	塔身回转平面一阶弯曲
4	0.70	塔身起升平面一阶弯曲
5	0.88	起重臂回转平面二阶弯曲

2 考虑边界条件不确定性的有限元建模

根据塔机施工图纸中的材料参数、几何参数及边界条件等在 ANSYS 平台中建立初始有限元模型。其中:塔身、起重臂、平衡臂及塔顶等结构采用三维铁木辛柯梁单元 BEAM189;起重臂及平衡臂的拉杆采用杆单元 LINK10;起升机构、变幅机构、平衡重、套架、小车及吊钩以集中质量点单元 MASS21 的方式分别加在平衡臂、起重臂、平衡臂、

塔身和起重臂上的对应位置。在基础节插入混凝土部分的 4 个脚点对应的节点施加全约束。

在边界条件的处理方面,以往的很多大型塔机的修正案例中为简化问题,在建立塔机的有限元模型时,往往是直接在基础节与加强节连接处的节点上施加全约束,相当于将基础节与加强节之间的连接刚度视为无穷大,这显然不符合实际情况。基础节与加强节连接处的实际刚度值(x 方向刚度(k_x), y 方向刚度(k_y), z 方向刚度(k_z),绕 x 轴转动的扭转刚度(k_{qx}),绕 y 轴转动的扭转刚度(k_{qy})和绕 z 轴转动的扭转刚度(k_{qz}))不可能为无穷大,但具体为多少无法准确测量,且随着时间推移,连接材料的强度等会发生不同程度的变化,因此塔机有限元模型的边界条件不能完全确定,具有不确定性。由于这种不确定性的存在,通过对边界直接施加全约束建立的初始有限元模型得到的仿真结果必然与试验结果之间存在误差。

为了建立更准确的有限元模型,了解边界条件对模型修正结果精度的影响,建立考虑边界条件不确定性的初始有限元模型,即用质量刚度阻尼单元 MARTIX27 模拟边界条件。如图 3 所示,基础节和加强节通过点 1~4 连接,在 4 个连接点处都建立 6 个六自由度质量刚度阻尼单元 MATRIX27,分别模拟 $k_x, k_y, k_z, k_{qx}, k_{qy}$ 和 k_{qz} ,共 24 个单元。

初始有限元模型如图 3 所示,其单元数近 6 000 个,节点数超过 1 万个,自由度数超过 6 万个。

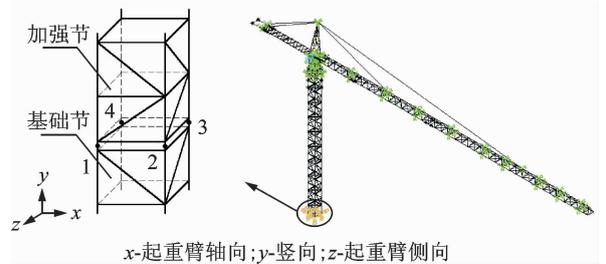


图 3 初始有限元模型

Fig. 3 The initial finite element model

3 基于响应面法的有限元模型修正

基于响应面方法的有限元模型修正的主要步骤是:a. 选定修正参数;b. 采用合适的试验设计方法设计试验,进行样本计算;c. 基于统计学分析技术,得到能反映特征量和设计空间之间复杂隐式函数关系的显式响应面模型;d. 评价响应面的有效性;e. 利用响应面替代模型进行模型修正。具体步骤及流程如图 4 所示。

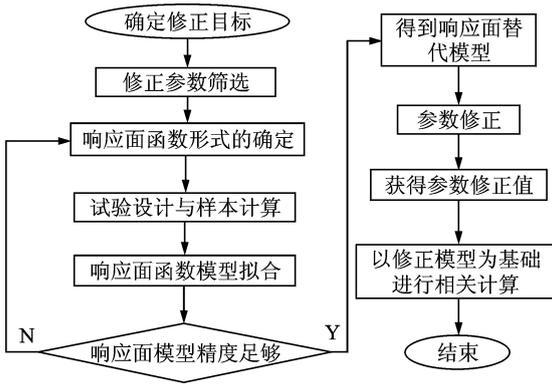


图4 基于响应面法的有限元模型修正实现流程

Fig. 4 The FEM updating implementation process based on the response surface method

3.1 修正参数筛选

考虑到有些自由度上的弹簧单元可能对结构动态特性的影响不显著,为了进一步简化模型,进行灵敏度分析。灵敏度分析的结果显示每个连接点的转动刚度($k_{\varphi x}$, $k_{\varphi y}$ 和 $k_{\varphi z}$)对结构的动态特性影响均不显著,剔除这些参数,剩下每个连接点处3个方向的平动刚度(k_x , k_y 和 k_z),共12个待修正参数。

由于条件限制,未能通过试验方式给出修正参数的初始值。笔者在基础节与加强节之间节点施加全约束的有限元模型中提取被约束单元的刚度矩阵,用来初步预估12个修正参数的初始值,如表2所示。

表2 某型塔机基础节及加强节之间各向连接刚度初始值
Tab. 2 Initial value of the connection stiffness between the base section and the strengthen section of the tower crane

序号	参数	参数说明	初始值/(MN·m ⁻¹)
1	x_1	连接点1处 x 方向	6
2	x_2	连接点1处 y 方向	100
3	x_3	连接点1处 z 方向	2
4	x_4	连接点2处 x 方向	6
5	x_5	连接点2处 y 方向	100
6	x_6	连接点2处 z 方向	2
7	x_7	连接点3处 x 方向	6
8	x_8	连接点3处 y 方向	100
9	x_9	连接点3处 z 方向	2
10	x_{10}	连接点4处 x 方向	6
11	x_{11}	连接点4处 y 方向	100
12	x_{12}	连接点4处 z 方向	2

3.2 二次响应面模型修正

由上所述,共选取了12个修正参数,选取结构的前4阶模态频率作为响应,采用二次响应面方法

对选取的参数进行修正。其步骤如下:a. 基于D最优设计方法,选择94组设计样本,将样本参数代入有限元模型中,计算前4阶频率;b. 采用以F检验法为标准的逐步回归法对各自变量进行显著性分析,决定变量的取舍;c. 选取二次响应面函数。

应用最小二乘回归分析技术对样本数据进行拟合,得到塔机前四阶固有频率的响应面函数为

$$y_1^{\text{RSM}} = 0.101 + 0.0027x_1 + 0.0004x_3 + 0.0021x_4 + 0.0025x_6 + 0.0028x_7 + 0.0005x_9 + 0.0006x_{10} + 0.0006x_{12} - 0.0003x_1^2 - 0.0003x_4^2 - 0.0003x_6^2 - 0.0003x_7^2 \quad (1)$$

$$y_2^{\text{RSM}} = 0.175 + 0.0149x_2 + 0.0150x_5 + 0.0156x_8 + 0.0153x_{11} - 0.0018x_2^2 - 0.0018x_5^2 - 0.0019x_8^2 - 0.0019x_{11}^2 \quad (2)$$

$$y_3^{\text{RSM}} = 0.2562 + 0.0108x_2 + 0.0110x_5 + 0.0104x_8 + 0.0107x_{11} - 0.0011x_2^2 - 0.0011x_5^2 - 0.0011x_8^2 - 0.0011x_{11}^2 \quad (3)$$

$$y_4^{\text{RSM}} = 0.5467 + 0.0148x_2 + 0.0138x_5 + 0.0153x_8 + 0.0133x_{11} - 0.0011x_2^2 - 0.0017x_5^2 - 0.0015x_8^2 - 0.0018x_{11}^2 \quad (4)$$

其中: y_i^{RSM} ($i=1,2,3,4$)为塔机前四阶振动频率。

由二次响应面表达式可以看出,塔机的第1阶频率,即起重臂在回转平面内的弯曲振动模式主要与基础节和加强节1,2和3连接点 x 方向的刚度以及2连接点 z 方向的刚度有关;塔机的第2阶~第4阶模态,即起重臂在起升平面内的弯曲振动模式,塔身在回转平面内的弯曲振动模式及塔身在起升平面内的弯曲振动模式均主要与基础节和加强节连接点 y 方向的刚度有关。

通过对比有限元模型和响应面模型的计算值,来评价响应面模型的有效性,保证其可靠性。对于含有多个响应的响应面模型,通常采用样本的决定系数 R^2 和相对均方根误差 RMSE^[12-13] 两种标准进行评价,其表达式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (y_i^{\text{RSM}} - y_i^{\text{FEM}})^2}{\sum_{i=1}^m (y_i^{\text{FEM}} - \bar{y}^{\text{FEM}})^2} \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = \frac{1}{m\bar{y}^{\text{FEM}}} \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i^{\text{FEM}} - y_i^{\text{RSM}})^2} \quad (6)$$

其中: m 为试验样本数; y_i^{FEM} 为相应的有限元计算结果; \bar{y}^{FEM} 为有限元计算结果的平均值。

表3为计算的 R^2 和 RMSE 的结果。可见: R^2 的最小值为0.8716,接近于1;RMSE的最大值为0.0033,接近于0,说明响应面函数计算值与真值

之间的差异程度很小。因此在参数设计空间内,响应面函数能够有效反映结构响应和参数之间的关系,回归的响应面模型可以替代有限元模型进行模型修正。

表 3 塔机二次响应面模型有效性评价

Tab.3 Evaluation of the effectiveness of quadratic response surface for the tower crane

阶次	1	2	3	4
R^2	0.878 5	0.872 4	0.871 6	0.937 2
RMSE/ 10^{-3}	1.2	3.3	2.6	0.87

将塔机前 4 阶频率的响应面模型替代有限元模型,进行优化迭代,对参数进行修正。此模型修正问题可以转化为一个单目标约束优化问题,数学模型为

$$\min f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^r \omega_j \left(\frac{f_j^{\text{RSM}}(\mathbf{x}) - f_j^{\text{TRUE}}}{f_j^{\text{TRUE}}} \right)^2 \quad (7)$$

$$\text{s. t. } x_{i, \min} \leq x_i \leq x_{i, \max} \quad (8)$$

其中: $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_{12}\}^T$; r 为参与修正的频率的阶次, $r=4$; $f_j^{\text{RSM}}(x)$ 为由响应面模型计算的第 j 阶频率, f_j^{TRUE} 为实测的第 j 阶频率; ω_j 为权重因子,取 $\omega_j = 1 (j = 1, 2, 3, 4)$ 。

表 4 修正后参数值与初始值比较

Tab.4 Comparison of updated parameters and initial values

结构参数	初始值/(MN · m ⁻¹)	修正值/(MN · m ⁻¹)
k_{x1}	6	20.8
k_{y1}	100	340
k_{z1}	2	5.02
k_{x2}	6	21.6
k_{y2}	100	224
k_{z2}	2	4.53
k_{x3}	6	24.4
k_{y3}	100	438
k_{z3}	2	5.80
k_{x4}	6	2.38
k_{y4}	100	251
k_{z4}	2	2.22

修正后的参数值与初始值对比如表 4 所示。将修正后的参数代入有限元模型进行计算,将计算得到的频率与实测结果进行对比,如表 5 所示。分析前 4 阶频率可知,基于二次响应面法修正后的有限元模型计算结果与实测频率很接近,最大相对误差为 8.3%,最小相对误差为 0%,证实了用响应面模型替代有限元模型进行修正的可行性和有效性。将修正前后模型的第 5 阶频率与实测第 5 阶频率对比可得,修正后的有限元模型预测精度明显高于修正前模型,说明对结构的边界条件进行修正后的有限

元模型不仅能复现实测频段内的模态,还能以一定精度预测实测频段外的模态。

考虑到相同的频率不一定对应一致的振型,将修正后的参数代入有限元模型进行计算,提取前 5 阶振型,分别与实测振型进行对比,发现各阶振型能较好吻合。这说明利用修正后的有限元模型计算得到的各阶模态仍然与实测模态相对应。

表 5 修正前后频率与实测频率比较

Tab.5 Comparison of non-updated, updated frequencies and measured frequencies

模态阶次	实测频率/Hz	初始模型		二次响应面	
		初始频率/Hz	误差/%	修正后频率/Hz	误差/%
复现 1	0.12	0.10	-16.7	0.13	8.3
复现 2	0.26	0.22	-15.4	0.28	7.7
复现 3	0.35	0.29	-17.1	0.35	0.0
复现 4	0.70	0.61	-12.8	0.66	5.7
预测 5	0.88	0.84	-4.5	0.89	1.1

误差率 = 100% × (计算值 - 实测值) / 实测值

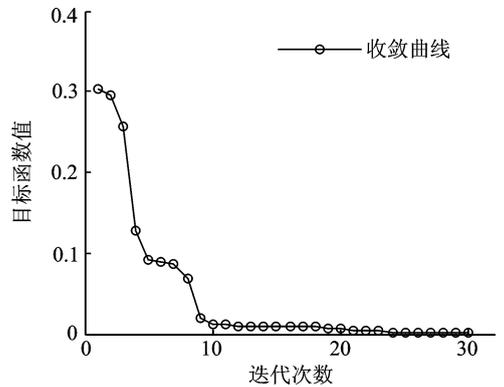


图 5 基于二次响应面法目标函数收敛曲线

Fig.5 Convergence curve of the cost function based on the quadratic response surface method

图 5 为基于二次响应面法的塔机模型修正过程的目标函数收敛曲线。由图可得,收敛曲线是从第 21 次迭代开始收敛,整个优化过程计算时间仅为 3 s 左右。在相同的电脑配置下采用传统的修正方法,即直接用该塔机有限元模型进行修正,参数每改变一次,就需对参数修改的有限元模型计算一次,每次耗时约 1.5 h 左右。由此说明,基于响应面法的有限元模型修正方法可以极大提高修正效率。

4 结束语

考虑边界条件的不确定性,以边界条件为修正参数,建立可靠的二次响应面替代模型,用于有限元

模型修正。将修正结果与风致振动试验结果相对比,得到结论:a.基于二次响应面法修正后的有限元模型计算结果与实测频率很接近,最大相对误差为8.3%,最小相对误差为0%,且各阶振型与实测振型吻合较好,说明了用响应面模型替代有限元模型进行修正的可行性和有效性;b.对结构的边界条件进行修正后的有限元模型能以一定精度预测实测频段外的模态;c.考虑边界条件的不确定性,对有限元模型进行修正,可以提高模型的精度,有助于对工程结构进行更准确地损伤识别、健康诊断以及工作状态的评估与预测。此外,与传统修正方法对比,说明了基于响应面法的有限元模型修正方法可以极大提高修正效率。

参 考 文 献

- [1] 秦仙蓉,徐俭,赵坤,等.基于分层进化寻优的塔机结构有限元模型修正[J].同济大学学报:自然科学版,2015(6):900-903.
Qin Xianrong, Xu Jian, Zhao Kun, et al. Dynamic model hierarchy updating of tower cranes using evolutionary computation[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015(6):900-903. (in Chinese)
- [2] Sanayei M, Phelps J E, Sipple J D, et al. Instrumentation, nondestructive testing, and finite-element model updating for bridge evaluation using strain measurements[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 17(1):130-138.
- [3] Berman A, Flannelly W G. Theory of incomplete models of dynamic structures[J]. Aiaa Journal, 1970, 9(8): 1481-1487.
- [4] Lorenzoni F, Casarin F, Modena C, et al. Structural health monitoring of the Roman Arena of Verona, Italy[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2013, 3(4): 227-246.
- [5] Wong F S. Slope reliability and response surface method[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(1): 32-53.
- [6] Bucher C G, Bourgund U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems[J]. Structural Safety, 1990, 7(1):57-66.
- [7] 费庆国,张令弥,李爱群,等.基于统计分析技术的有限元模型修正研究[J].振动与冲击,2005,24(3): 23-26.
Fei Qingguo, Zhang Lingmi, Li Aiqun, et al. Finite element model updating using statistics analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(3): 23-26. (in Chinese)
- [8] 邓苗毅,崔聚印,任伟新.桥梁结构静力模型修正响应面方法试验设计研究[J].河南科学,2007,25(4): 604-608.
Deng Miaoyi, Cui Juyin, Ren Weixin. Experimental designs study of bridge structure statics-load test model updating based response surface methodology[J]. Henan Sciences, 2007, 25(4): 604-608. (in Chinese)
- [9] 邓苗毅,任伟新,王复明.基于静力响应面的结构有限元模型修正方法[J].实验力学,2008,23(2): 103-109.
Deng Miaoyi, Ren Weixin, Wang Fuming. Structure finite element model (FEM) updating based on static-load response surface methodology[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(2): 103-109. (in Chinese)
- [10] 任伟新,陈华斌.基于响应面的桥梁有限元模型修正[J].土木工程学报,2008,41(12): 73-78.
Ren Weixin, Chen Huabin. Response-surface based on finite element model updating of bridge structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(12): 73-78. (in Chinese)
- [11] 马成良.现代试验设计优化方法及应用[M].郑州:郑州大学出版社,2007: 70-209.
- [12] 钟儒勉,樊星辰,黄学漾,等.基于两阶段响应面方法的结合梁斜拉桥多尺度有限元模型修正[J].东南大学学报:自然科学版,2013(5): 993-999.
Zhong Rumian, Fan Xingchen, Huang Xueyang, et al. Multi-scale finite element model updating of composite cable-stayed bridge based on two-phase response surface methods[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013(5): 993-999. (in Chinese)



第一作者简介:秦仙蓉,女,1973年5月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为机械系统动力学与工程结构抗风。曾发表《大型机械结构的分层动态优化方法》(《振动、测试与诊断》2012年第32卷第2期)等论文。

E-mail: tjqin@tongji.edu.cn

通信作者简介:孙远韬,男,1979年1月生,博士、副教授、硕士生导师。主要研究方向为机械结构可靠性。

E-mail: sun1979@sina.com