

基于分层进化寻优的塔机结构有限元模型修正

秦仙蓉, 徐 俭, 赵 坤, 孙远韬

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 采用分层优化策略, 运用进化寻优算法实现结构有限元模型的优化修正。根据设计变量对有限元模型影响的区别将其置于节点层与截面层分别执行进化寻优, 两个层次的进化寻优交替进行直至问题收敛。建立了某型塔机的参数化有限元模型, 根据实测的风致振动响应识别的模式参数采用所提出的方法对塔机的有限元模型进行了修正。修正结果表明, 该方法可以有效地实现塔机的有限元模型修正, 且修正计算效率高于对应的基于整体策略的修正方法。

关键词: 分层优化; 模型修正; 进化算法; 有限单元法; 塔机

中图分类号: TH113

文献标志码: A

Dynamic Model Hierarchy Updating of Tower Cranes Using Evolutionary Computation

QIN Xianrong, XU Jian, ZHAO Kun, SUN Yuantao

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: This paper proposed a new method to update the finite element model by using hierarchy strategy and evolutionary computation. The design variables were set to two uncoupled sub-spaces, i.e. node space and section space, and were optimized by evolutionary computation. As an example, the parametric finite element model of a tower crane was constructed, and updated according to its wind-induced vibration results. The results suggest that the proposed method is effective and efficient.

Key words: hierarchy optimization; model updating; evolutionary computation; finite element method; tower crane

施工现场的各种塔式起重机(简称塔机)的提升高度也逐渐增大,有必要对其进行动态性能在线监测。而经过实验验证的、可以准确反映结构实际状态的有限元模型则是塔机动态性能在线监测的前提条件。

塔机的主体承载结构普遍采用空间桁架结构,构件众多且存在集中布置的传动装置如起升机构、回转机构或变幅机构等。工程实践中塔机结构的有限元建模多是在设计图纸基础上开展的,需要对材料的属性、构件的连接方式、基础约束条件等进行理想化的假定或简化,与结构的实际状况存在一定差别。另外,在役塔机由于实际施工的差异以及长期服役过程中受载荷作用、环境侵蚀、材料老化、自然灾害等种种因素的影响,其结构性能通常不再完全等同于最终设计,这就使得根据最终设计图纸所建立的塔机有限元模型预测的结构特性与实测结果之间不可避免地出现偏差,必须以实测响应为基础对其进行修正优化方可动态在线监测提供可靠准确的监测基准信息。

结构有限元模型修正可以描述为一个高度非线性的、多维、多目标、约束优化问题。传统的直接约束优化算法多根据目标函数与约束函数的取值来确定搜索方向,在设计可行域进行逐点搜索,其收敛性多依赖于初始点的选择及相邻迭代之间设计变量的变化^[1]。而对于有限元模型修正这类特殊优化问题,目标函数和约束函数很少可以表征为设计变量的显式函数,采用传统的约束优化算法势必计算量巨大、收敛困难且优化往往陷入局部最优,选择适当的进化类算法则可较好解决这些难题。

实际有限元建模过程中,为充分把握结构的整体动力学特征,同时兼顾模型的复杂程度与计算效率,塔机主体承载结构普遍用梁单元来模拟^[2]。梁单元的采用使得对应的设计参数型有限元模型修正方法中参与修正的设计参数分成两类,外形尺寸参数

我国城市化发展进程的大力推进使得城市建筑的高度逐步攀升。与之相适应,广泛服务于高层建筑

收稿日期: 2014-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(51075304, 51205292)

第一作者: 秦仙蓉(1973—),女,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为机械系统动力学。E-mail: tjqin@tongji.edu.cn

通讯作者: 孙远韬(1979—),男,讲师,工学博士,主要研究方向为机械现代设计方法与可靠性。E-mail: sun1979@tongji.edu.cn

与截面尺寸参数,分别影响有限元模型中梁单元的节点信息和单元截面信息.研究表明,将这两类变量解耦到两个相互分离的层次分别优化,可以很好地提升模型修正中的优化迭代效率^[3].

本文针对基于动态信息的设计参数型有限元模型修正问题,探讨问题求解的分层进化寻求方法.建立某型塔机的参数化有限元模型,并结合其现场风振响应实测结果,利用分层进化寻优方法对塔机的有限元模型进行修正优化.

1 有限元模型修正的分层进化寻优方法

经有限元方法离散之后,塔机结构系统的运动可以用如下二阶常微分方程表示:

$$\mathbf{M}_a(\mathbf{x})\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}_a(\mathbf{x})\mathbf{y}(t) = \mathbf{p}(t) \quad (1)$$

式中: \mathbf{M}_a , \mathbf{K}_a 分别为结构的质量矩阵和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{y}}(t)$, $\mathbf{y}(t)$ 分别为结构的加速度响应和位移响应; $\mathbf{p}(t)$ 是系统受到的激励; \mathbf{x} 为结构参数,可分为影响有限元模型节点信息的节点参数和影响其截面信息的截面参数两类.

选择塔机的低阶模态特征作为模型修正的目标函数,按照权重法分配模态频率与模态振型对目标函数 $f(\mathbf{x})$ 的贡献程度.

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^r (\omega_{\omega i} |f_{\omega i}(\mathbf{x})|) + \sum_{i=1}^r (\omega_{\varphi i} |f_{\varphi i}(\mathbf{x})|) \quad (2)$$

式中: r 为参与修正的模态总数; $f_{\omega i}(\mathbf{x})$, $f_{\varphi i}(\mathbf{x})$ 分别为与第 i 阶模态的模态频率和振型相关的目标函数; $\omega_{\omega i}$, $\omega_{\varphi i}$ 是对应的权重,均大于零且

$$\sum_{i=1}^r (\omega_{\omega i} + \omega_{\varphi i}) = 1 \quad (3)$$

与 i 阶模态频率及振型相关的目标函数分别定义为

$$f_{\omega i} = \frac{\omega_i - \omega_i^*}{\omega_i^*} \quad (4)$$

$$f_{\varphi i} = \frac{M_i - M_i^*}{M_i^*} \quad (5)$$

$$M_i = \frac{\boldsymbol{\varphi}_i^T \boldsymbol{\varphi}_i^*}{|\boldsymbol{\varphi}_i| |\boldsymbol{\varphi}_i^*|} \quad (6)$$

式(4)~(6)中: ω_i , $\boldsymbol{\varphi}_i$ 分别为第 i 阶模态的模态频率与振型.上标 * 代表相应的理论值,在模型修正中取对应量的试验模态参数结果.

对各设计参数进行灵敏度分析,选择对参与修正的模态参数灵敏度高的设计参数作为有限元模型

修正优化的设计变量.

方程(2)~(6)所描述的有限元模型修正优化问题可以按照如下的分层进化寻优方法求解.

Step 1 参数初始化.确定参与修正的设计参数,并将其区分为节点信息变量与截面信息变量两类;定义问题的收敛条件.

Step 2 节点层进化寻优^[4].

(1) 定义初始种群规模、最大种群规模、群体规模、最大代数、初始和最终标准差及随机产生的最大和最小种子个数.

(2) 生成初始种群.生成指定规模的、均匀分布的初始种群.

(3) 更新.更新进化代数和子代中个体正态分布的标准差.

(4) 繁殖子代.按 $f(\mathbf{x})$ 值的大小分配个体产生的子代个体数目, $f(\mathbf{x})$ 值最好的个体产生的子代数最多, $f(\mathbf{x})$ 值最差的个体产生的子代数最少,其余个体生成的子代个数与 $f(\mathbf{x})$ 值的好坏服从线性关系;以父代个体为均值,以(3)中更新的标准差将子代个体以正态分布的方式叠加于父代个体周围.判断新种群个体数目是否达到最大种群规模,若小于最大种群规模,转(3)再转(4);否则转(5).

(5) 竞争淘汰.将父代个体与子代个体按 $f(\mathbf{x})$ 值大小排序,消灭其中 $f(\mathbf{x})$ 值最差的那些个体,保持群体规模为最大种群规模.

(6) 判断是否达到最大代数.若否,执行(3)~(5);若是,进化寻优完成,输出 $f(\mathbf{x})$ 值最好的个体.

Step 3 判断问题是否收敛.若是,输出 $f(\mathbf{x})$ 与 \mathbf{x} ;若否,转 Step 4 进行截面层进化寻优.

Step 4 截面层进化寻优.进行截面属性优化,进化寻优的步骤同 Step 3.

Step 5 判断问题是否收敛.若否,转 Step 2~4 进行节点层与截面层寻优;若是,分层进化寻优结束,输出 $f(\mathbf{x})$ 与 \mathbf{x} .

图1是有限元模型修正的分层进化寻优算法框图.

2 塔机结构的有限元模型修正

2.1 塔机结构参数化有限元模型的建立

塔机的典型配置与主要部件如图2所示.在有限元建模过程中,塔机的主要承载结构如起重臂、平衡臂与塔身等采用二次三维梁单元模拟;前后拉杆用杆单元模拟;集中布置的非主要承载结构如配重、

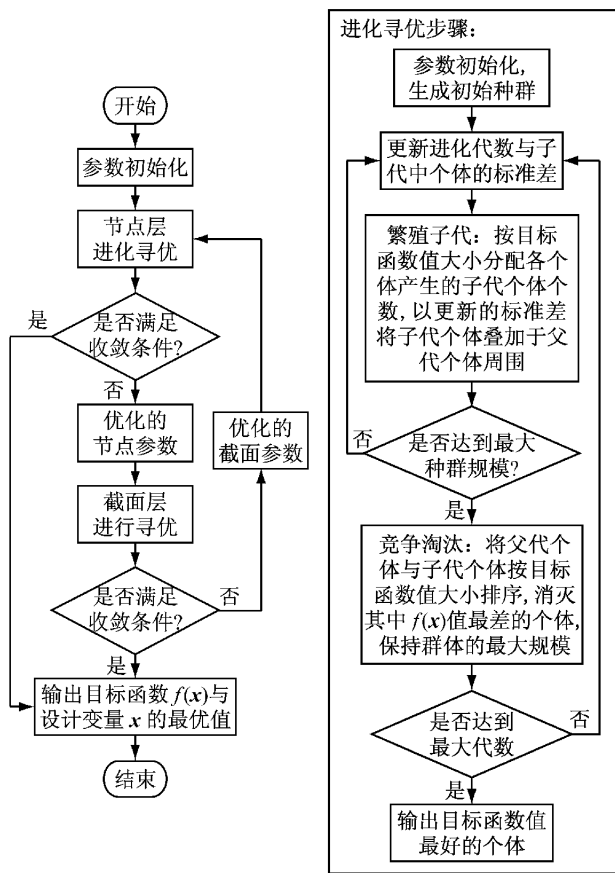


图 1 有限元模型修正的分层进化寻优算法框图

Fig.1 Flowchart of hierarchical evolutionary method for finite element model updating

司机室、起重小车等,采用集中质量单元来模拟.以某 QTZ125 型塔机为例,所建立的有限元模型单元数超过 5 000 个,节点数超过 1 万个,自由度总数超过 6 万个.

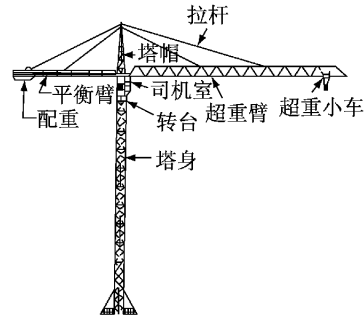


图 2 QTZ125 型塔机及其主要部件

Fig.2 Components of a QTZ125 tower crane

在模型的塔身下端的 8 个梁单元节点施加全约束;因起重臂与塔身通过铰点相连,故有限元建模过程中释放起重臂与塔身相连节点在起升平面内的转动自由度.表 1 是有限元分析所得该型塔机的低阶模态特征,图 3 是分析所得的低阶振型.

设计参数型有限元模型修正开展的前提是参数驱动的有限元模型.为此借助 ANSYS 的 APDL 对上述建立的塔机有限元模型超过 100 个结构参数(主要包括塔身、起重臂、平衡臂的有关几何参数,如弦杆、腹杆长度、有关构件的截面参数如厚度、外径

表 1 QTZ125 塔机的有限元分析与试验模态参数识别所得模态频率对比

Tab.1 Comparison of the modal frequencies of finite element analysis and experimental modal identification of QTZ125 tower crane

阶次	试验频率/ Hz	初始有限元模型		修正后有限元模型		振型
		频率/Hz	误差/%	频率/Hz	误差/%	
1	0.12	0.14	16.7	0.12	0	起重臂回转平面一阶弯曲
2	0.26	0.32	23.1	0.28	7.7	起重臂起升平面一阶弯曲
3	0.35	0.39	11.4	0.36	2.8	塔身回转平面一阶弯曲
4	0.70	0.72	2.9	0.68	-2.8	塔身起升平面一阶弯曲

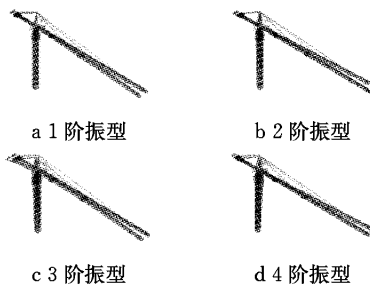


图 3 某 QTZ125 型塔机的前 4 阶振型

Fig.3 Mode shapes of a QTZ125 tower crane

以及部件之间的几何位置等)进行了参数化处理.

2.2 塔机风致振动响应的现场实测与参数识别

采用无线磁电式速度传感器在浙江某地进行了

QTZ125 型塔机风振响应的现场实测,实测了塔机起重臂、平衡臂及塔身上 7 个测点、14 个自由度上的速度响应时间历程,如图 4 所示.并在实测振动响应的基础上完成了该型塔机的试验模态参数识别,识别的塔机低阶频率见表 1.

由表 1 可以看出,虽然有限元分析与试验模态识别获得了一致的模态振型,但对应模态频率存在较大误差.这表明初始有限元模型未能充分准确地反映该型塔机金属结构的实际状态,必须对其进行修正.

2.3 塔机有限元模型修正

根据建立的参数化有限元模型,分析塔机低阶

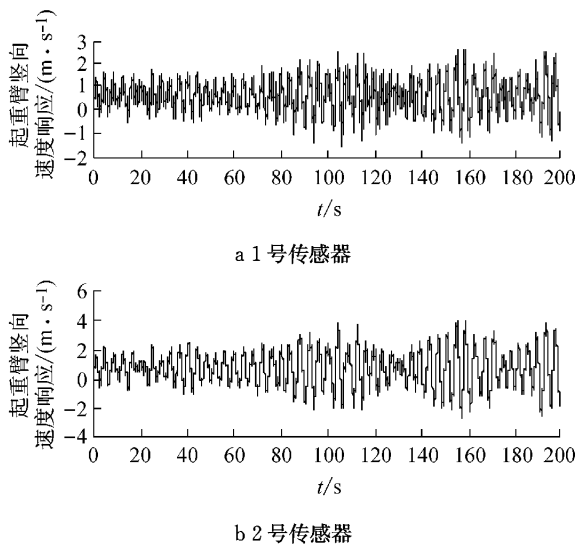


图4 QTZ125型塔机的实测风致振动响应

Fig.4 Wind-induced responses of a QTZ125 tower crane

模态对各结构参数的灵敏度,选择其中最灵敏的包括起重臂斜腹杆长度、塔身标准节长度、塔身斜腹杆长度、腹杆及弦杆外径与壁厚等15个结构参数作为该型塔机有限元模型修正优化的设计变量.运用本文提出的分层进化寻优方法对塔机的初始有限元模型进行修正.

塔机有限元模型修正中,选择塔机的前5阶模态根据式(2)定义修正优化的目标函数.式(2)中的权重代表了对应函数在目标函数中的重要程度,本文塔机模型修正中认为这5阶模态重要程度相同.由表1列出的有限元分析与试验模态分析结果对比可以看出,模态频率的误差大于振型,故在修正中模态频率的权重较大.基于以上考虑,塔机模型修正中取各阶模态权重相同,但模态频率对应的总权重取0.7,振型对应的总权重取0.3.根据15个优化设计变量的性质,将影响模型节点位置的5个变量置于节点层优化,而其余10个不影响节点位置只影响模型截面性质的变量则置于截面层,在节点层和截面层依次进行进化寻优.

在节点层20次迭代优化后,式(2)定义的目标函数收敛,从0.35下降到0.18,优化效果已优于整体策略的30次迭代优化的结果.同时由于搜索维度大幅度减小,计算效率也高于基于整体优化策略的修正.然后转入截面层进化寻优,20次迭代后目标函数收敛,从0.18进一步下降至0.14.修正后的有限元模型分析所得的模态频率与试验模态识别结果的对比见表1.图5是塔机有限元模型修正优化的收敛曲线.

虽然这里讨论的塔机有限元模型修正以其固有模态特征作为目标函数,但优化设计变量为塔机的结构参数,修正后的有限元模型所对应的结构参数更准确.根据修正后的有限元模型进行强度分析或刚度分析,将得到更符合实际的结果.

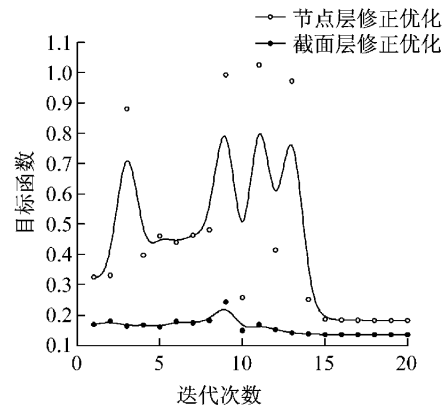


图5 塔机有限元模型修正的收敛曲线

Fig.5 Convergent curve of tower crane model updating

3 结论

结构有限元模型修正是一个复杂的多维度、高非线性约束优化问题.本文提出采用分层优化策略,运用进化寻优算法进行结构有限元模型的修正优化.某型塔式起重机的动力学模型修正的实际应用表明,本文提出方法可以有效地完成有限元模型修正优化,且计算效率优于整体优化方法.

参考文献:

- [1] Arora J S. Optimization of structural and mechanical systems [M]. Hackensack: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2007.
- [2] 于兰峰,王金诺.塔式起重机结构系统动态优化设计[J].西南交通大学学报,2007,42(2):206.
YU Lanfeng, WANG Jinnuo. Dynamic optimum design of tower crane structures [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(2): 206.
- [3] 秦仙蓉,蔡敏,廖鑫.大型机械结构的分层动态优化方法[J].振动、测试与诊断,2012,4:234.
QIN Xianrong, CAI Min, LIAO Xin. A component dynamic modeling based bi-level optimization method for large-scale mechanical structures [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2012, 4: 234.
- [4] Mehrabian A R, Lucas C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization [J]. Ecological Informatics, 2006, 1: 355.