

基于ANSYS WorkBench的塔式起重机标准节的模态分析与优化设计

柴华逸, 王 艳

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2022年2月15日; 录用日期: 2022年3月14日; 发布日期: 2022年3月23日

摘 要

塔式起重机作为一种高耸设备, 经常装备于码头、矿山和建筑工地中。随着我国社会经济的发展, 高层建筑逐渐增多, 对高层建筑的需求也进一步加大, 因此对塔式起重机的性能要求和安全要求也逐步提高。由于建筑层数越来越多, 建筑高度不断升高, 塔式起重机的高度也随之增加, 与此同时, 风载荷和风振效应的影响也随之增大。为了研究塔式起重机在强风作用下的振动特性, 以减少因为风载荷带来的损失, 本文在三维软件SolidWorks中建立了塔式起重机一个标准节的几何模型, 然后将模型导入ANSYS WorkBench基于有限元进行约束模态分析, 对塔式起重机的一个标准节的固有频率和振型进行了详细讨论, 最后, 在保证一个标准节性能不变的前提下, 对现有的标准节提出了3种优化设计并进行分析, 为进一步解决塔式起重机标准节的振动问题提供理论基础, 为结构改进提供参考。

关键词

塔式起重机, WorkBench, 模态分析, 固有频率, 优化设计

Modal Analysis and Structural Optimization of a Standard Section of Tower Crane Based on ANSYS WorkBench

Huayi Chai, Yan Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 15th, 2022; accepted: Mar. 14th, 2022; published: Mar. 23rd, 2022

Abstract

As a kind of towering equipment, tower crane is often equipped in docks, mines and construction

sites. With the development of China's social economy, high-rise buildings are gradually increasing, and the demand for high-rise buildings is further increasing. Therefore, the performance and safety requirements of tower crane are also gradually improved. Due to the increasing number of building floors and the continuous rise of building height, the height of tower crane also increases. At the same time, the influence of wind load and wind vibration effect also increases. In order to study the vibration characteristics of tower crane under strong wind and reduce the loss caused by wind load, the geometric model of a standard section of tower crane is established in the three-dimensional Software SolidWorks, and then the model is imported into ANSYS Workbench for constrained modal analysis based on finite element, The natural frequency and vibration mode of a standard section of tower crane are discussed in detail. Finally, on the premise of ensuring the performance of a standard section unchanged, three optimization designs are proposed and analyzed for the existing standard section, which provides a theoretical basis for further solving the vibration problem of tower crane standard section and a reference for structural improvement.

Keywords

Tower Crane, WorkBench, Modal Analysis, Natural Frequency, Optimal Design

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

塔式起重机简称为塔吊, 起源于西欧。由于塔式起重机在工程上有广泛的运用, 且应用场合均为重载场合, 因此对塔式起重机的动力学研究有重要意义, 国内外科研人员已经取得了很多的成果。我国从 80 年代初期开始应用动力有限元法, 李维仁[1]和黄珊秋[2]使用有限元法分别研究了塔式起重机的动力响应和振动分析, 兰朋[3]等人以吊机部分为研究对象, 研究了塔式起重机柔性臂的回转和制动过程。夏拥军[4]等人对输电线路大型铁塔使用的专用塔式起重机进行了优化设计, 使其更符合使用场合。之后王恩军[5]等人对塔式起重机进行了模态分析, 但并未分析塔式起重机承受风载荷情况下的振动特性。

塔式起重机最重要的结构是钢结构部分, 即塔式起重机主题结构。这部分复杂的结构都是由基本的标准节构成, 一个标准节就是塔式起重机的最小单元。为了简化计算, 本文取出塔式起重机中的一个标准节进行三维建模和仿真分析, 并基于有限元软件 ANSYS WorkBench 进行振动特性分析, 得到一标准节的约束模态结果。考虑到塔式起重机的适用范围, 本文以提高固有频率为目的, 对现有结构进行优化设计, 避免在外部的激振下发生共振, 提高标准节的工作性能和系统稳定性, 从而提高整个塔式起重机系统的稳定性。

2. 标准节几何模型建立

本文以塔式起重机的标准节作为分析对象, 并根据塔式起重机标准节的相关尺寸规格在 SolidWorks 中建立三维模型。结构复杂的塔式起重机是由基本的标准节构成, 一个标准节是塔式起重机的最小单元, 能够组合成塔式起重机各个部分的结构。塔式起重机的一标准节如图 1 所示。

一般来说塔式起重机标准节有以下几种规格:

角钢(140 × 10, 140 × 12, 160 × 12, 160 × 16 的 Q235B 和 Q345B)

圆管(135 × 10, 135 × 12)

扣方(125 × 12)

尺寸规格: 1.5 × 1.5 × 2.2 米, 1.5 × 1.5 × 2.5 米, 1.615 × 1.615 × 2.5 米, 1.6 × 1.6 × 2.5 米, 1.6 × 1.6 × 2.8 米, 1.8 × 1.8 × 2.8 米, 1.8 × 1.8 × 2.5 米, 1.835 × 1.835 × 2.8 米, 1.5 × 1.5 × 3 米。

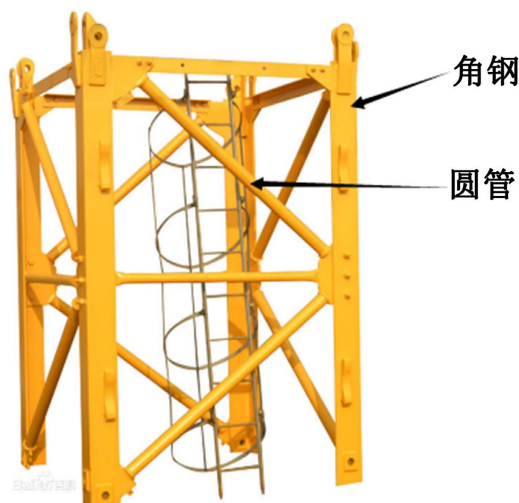


Figure 1. A standard section of tower crane
图 1. 塔式起重机一标准节

本文选择角钢 140 × 12, 圆管 135 × 10, 并且选择尺寸规格为 1.5 × 1.5 × 2.5 米的标准节作为研究对象, 在 SolidWorks 软件中建立一标准节的模型。如图 2 所示:

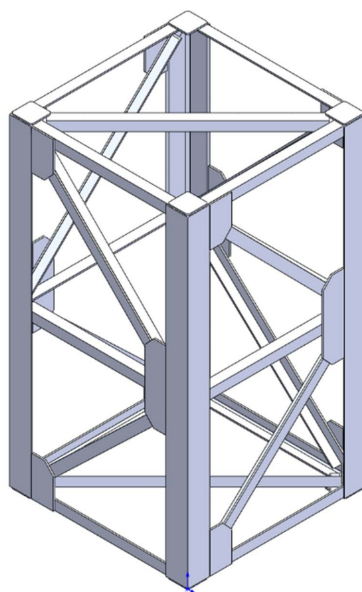


Figure 2. 3D model of a standard section
图 2. 标准节的三维模型

三维模型创建完毕后导入软件 ANSYS WorkBench, 通过网格划分、添加约束和加载后进行振动特性分析。如图 2 所示为本文塔式起重机标准节的三维模型, 其材料为 Q235, 材料性能如下表 1 所示:

Table 1. Material properties of Q235
表 1. Q235 的材料性能

材料性能	振型特征
密度/(g/cm ³)	7.85
弹性模量(GPa)	200~210
泊松比	0.25~0.33
抗拉强度(MPa)	370
屈服强度(MPa)	235
伸长率	5%

在不同温度下, Q235 的弹性模量也不同。设定该标准节的工作时所处的温度为 20℃, 此时 Q235 的弹性模量为 2.06 Gpa。

3. 风载荷分析

在风的作用下, 高耸构筑物会受到两个作用, 一个是由于风力造成的风压作用, 会给建筑物表面一个近似于平面载荷的作用力, 被称为风载荷, 另一个是在风的作用下产生一种漩涡而形成的脉动效应, 这种效应使建、构筑物受力条件变得非常复杂, 并且能造成建筑物的振动。

由于风的漩涡脱落和脉动效应使高耸构筑物的受迫振动情况非常复杂, 本文不做研究, 仅研究风载荷下的塔式起重机一标准节的振动特性分析。根据我国 2012 年 6 月发布的《风力等级》国家标准, 依据标准气象观测场 10 米高度处的风速大小, 其主要数据为风速, 表达风速的常用单位有三个, 分别为海里/小时、米/秒、公里/小时, 我国台风预报时常用单位为米/秒。

风速和风级的对应如下表 2 所示:

Table 2. Corresponding relationship between wind speed and wind level

表 2. 风速和风级的对应关系

风级	名称	风速(m/s)
0	无风	0~0.2
1	软风	0.3~1.5
2	轻风	1.6~3.3
3	微风	3.4~5.4
4	和风	5.5~7.9
5	劲风	8.0~10.7
6	强风	10.8~13.8
7	疾风	13.9~17.1
8	大风	17.2~20.7
9	烈风	20.8~24.4

Continued

10	狂风	24.5~28.4
11	暴风	28.5~32.6
12	飓风	32.7~36.9

风压是垂直于气流方向的平面所收到的风的压力。根据伯努利方程得出风 - 压关系: 风的动压为:

$$W_p = 0.5\rho v^2 \quad (1)$$

式中, W_p ——风压(kN/m²);

ρ ——空气密度(kg/m³);

v ——风速(m/s)。

空气密度和重度的关系为:

$$r = \rho g \quad (2)$$

在标准状态下(大气压 101 kPa, 15°C)纬度为 45°C 的地方重力加速度为 9.8 m/s², 可以得到:

$$W_p = v^2/1600 \quad (3)$$

式中, v ——风速(m/s)。

例如十级大风的风速是 24.5~28.4 m/s, 取上限 28.4 m/s, 得到风压 $W_p = 0.5$ kN/m²。按照风级和风速的对应表中的信息, 取风速为每个风力等级的上限, 进而可以得到每级风力对应风压的具体数值。

风速与风压的转换如下表 3 所示:

Table 3. Correspondence of wind level, wind speed and wind pressure

表 3. 风级、风速与风压的对应

风级	风速(m/s)	风压(kPa)
0	0~0.2	2.5e-5
1	0.3~1.5	1.4e-3
2	1.6~3.3	6.8e-3
3	3.4~5.4	0.02
4	5.5~7.9	0.04
5	8.0~10.7	0.07
6	10.8~13.8	0.12
7	13.9~17.1	0.18
8	17.2~20.7	0.27
9	20.8~24.4	0.37
10	24.5~28.4	0.50
11	28.5~32.6	0.66
12	32.7~36.9	0.85

本文取最大风级 12 级风产生的风压为输入载荷, 分别分析塔式起重机一标准节的振动特性, 从而得一标准节的固有频率。

4. 标准节模态分析

4.1. 模态分析概述

模态分析作为一种重要的故障检测和结构分析方法, 应用在各大领域, 是工程实践中的设计过程的重要一环[6]。模态分析可分为自由和约束模态分析两种, 实质上, 对给定机械系统的模态分析是将该系统的力学方程组中物理坐标转换为模态的坐标进行求解, 得到模态参数。模态与是否受外力和外力的大小无关, 由其材料属性和结构决定。

对任意一个系统, 其结构的振动微分方程为:

$$[M]\{x(t)''\} + [C]\{x(t)'\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (4)$$

式中, $[M]$ 为系统质量矩阵, $[C]$ 为系统阻尼矩阵, $[K]$ 为系统刚度矩阵; $F(t)$ 为外部激励载荷矩阵; $x(t)$ 为系统各点的广义向量。

若不考虑外界施加的载荷, 系统的自由振动微分方程可表示为:

$$[M]\{x(t)''\} + [K]\{x(t)\} = 0 \quad (5)$$

根据公式求解可得该标准节的各阶固有频率及振型。

4.2. 模态分析

4.2.1. 模型的建立和网格的划分

同一系统在不同的约束方式下的模态也不同。因此在对系统进行模态分析前要先分析系统的约束, 才能添加正确的边界条件。塔式起重机一标准节通过四处连接件组合成整体, 可以得到标准节上下各四处约束。同时在不同风级的影响下, 标准节侧面会受到不同的载荷, 受到的载荷数值可由表 3 得到。标准节施加的约束与载荷如图 3 所示。

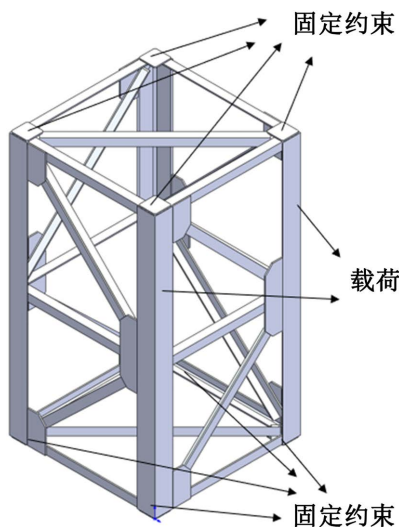


Figure 3. Load and constraint distribution of a standard section
图 3. 标准节的载荷和约束分布

模态分析前需要在 ANSYS WorkBench 软件中对计算域进行网格划分。网格划分的精度和质量会对振动特性分析结果产生较大影响, 网格数量太少, 网格划分过大, 都会使得计算结果有较大偏差; 然而网格数量过多, 网格划分过细, 虽然计算精度很高, 但是运算时间较长。同时本文仿真考虑到圆角结构对模态分析过程影响, 同时兼计算精确度和计算效率, 将网格划分为单元类型为 3D20N、节点数为 433,078 和单元数为 168,712 的四面体网格, 如图 4 所示。

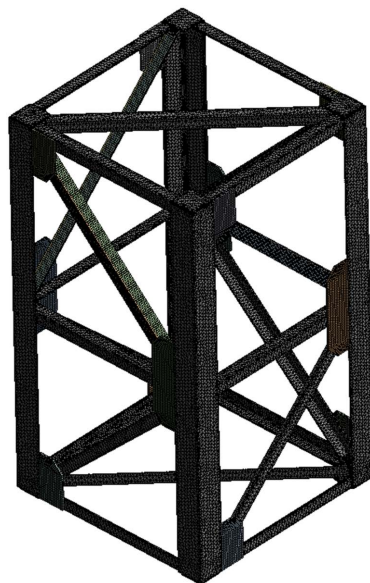
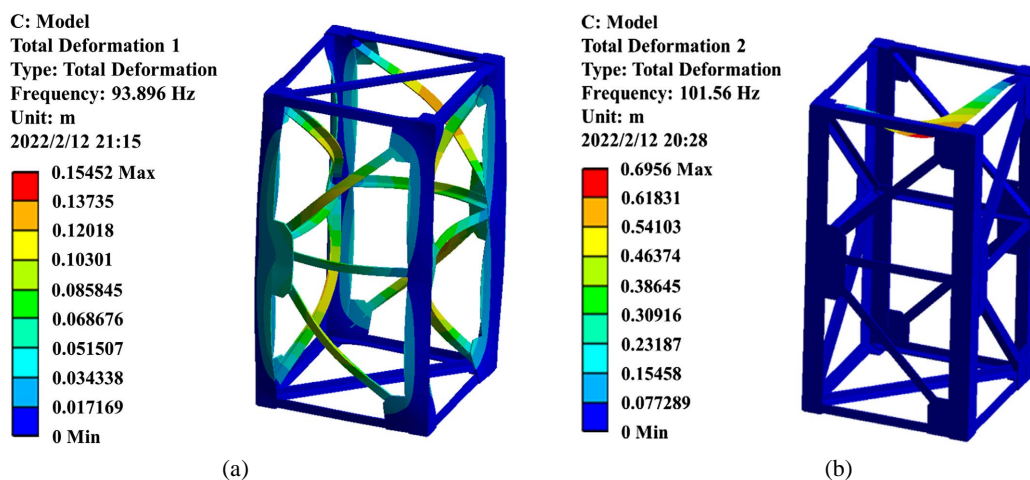


Figure 4. Structure meshing of a standard section
图 4. 标准节结构网格划分

4.2.2. 模态分析结果

根据机械振动理论可知, 任意系统都具有无限阶的固有频率, 但工程实践中影响系统稳定性的只有前几阶固有频率[7]。所以, 本文在软件中对塔式起重机标准节振动特性的有限元分析后导出前 6 阶固有频率和振型, 如图 5 所示为标准节的前 6 阶振型图, 由图可知每 1 阶的共振部分和振型变形量的大小不同; 由于标准节上下两端固定, 且受到一侧载荷, 因此标准节四周各面有一定的振幅, 这于标准节的正常工况相符合。



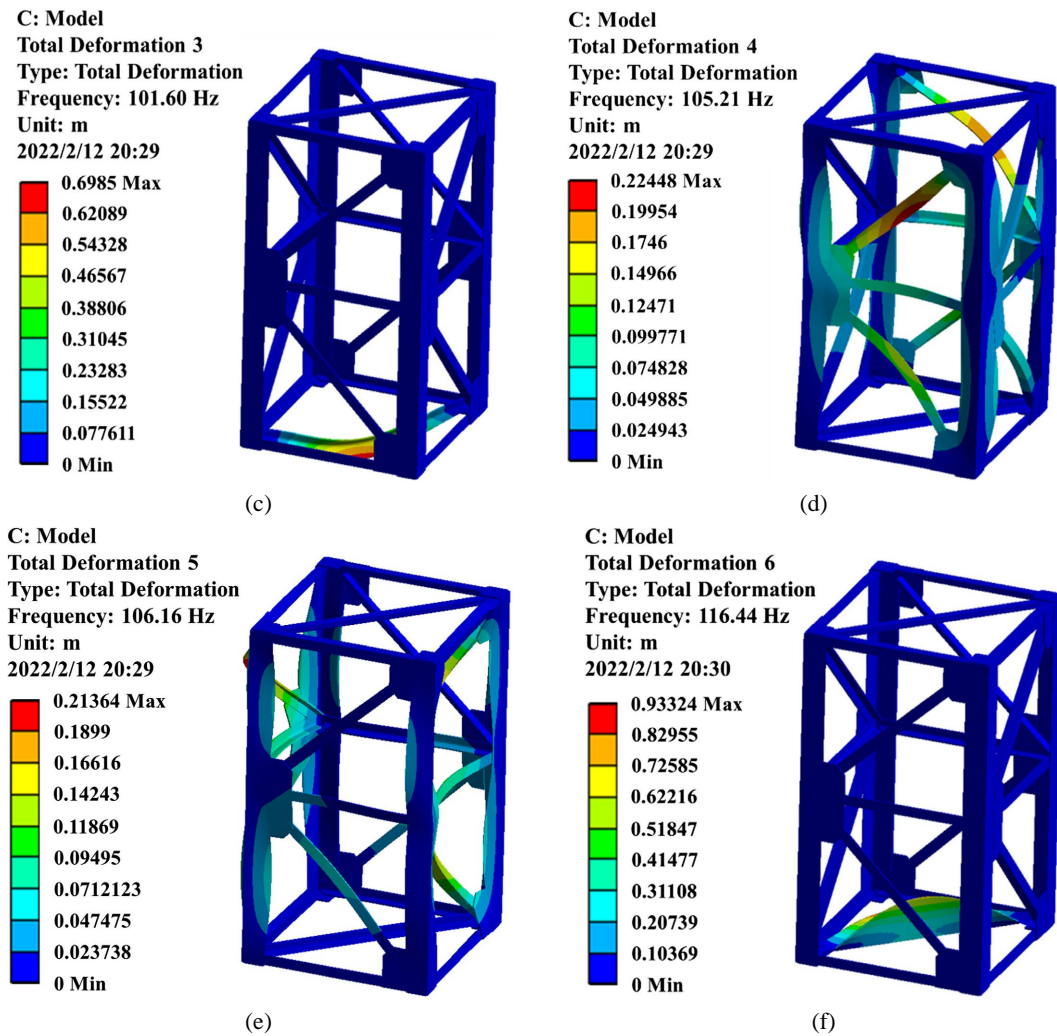


Figure 5. The first 6-order mode of a standard section. (a) The 1 vibration mode; (b) The 2 vibration mode; (c) The 3 vibration mode; (d) The 4 vibration mode; (e) The 5 vibration mode; (f) The 6 vibration mode

图 5. 标准节前 6 阶振型图。(a) 1 阶振型; (b) 2 阶振型; (c) 3 阶振型; (d) 4 阶振型; (e) 5 阶振型; (f) 6 阶振型

以 12 级风产生载荷为例, 如表 4 所示。由表可知, 标准节的约束条件下从 1 到 6 阶固有频率大小从 93.90 Hz 到 116.44 Hz。

Table 4. The first 6-order natural frequency and mode characteristics of a standard section

表 4. 标准节前 6 阶固有频率和振型特征

阶数	固有频率(Hz)	振型特征
1	93.90	四个侧面两侧内陷两侧突出
2	101.56	顶面向下凹陷
3	101.60	底面向下凹陷
4	105.21	四个侧面两侧内陷两侧突出
5	106.16	两个侧面一侧凹陷一侧突出
6	116.44	底面向上翻转

将上表 4 中固有频率数值随阶数变化的柱状图绘制于下图 6 中。

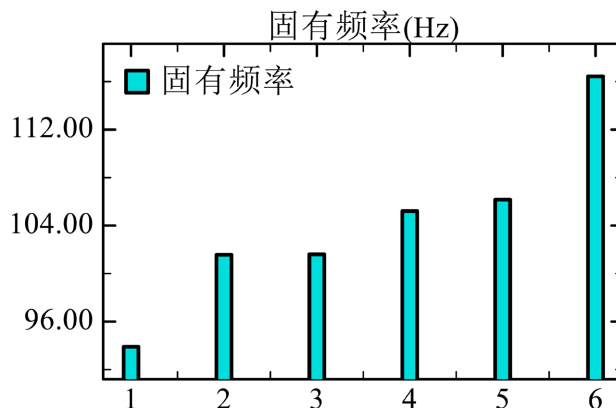


Figure 6. Bar graph of natural frequency with order

图 6. 固有频率随阶数变化的柱状图

对 9~11 级风载荷下标准节的前六阶固有频率进行计算后, 发现不同风级下标准节的固有频率相同。虽然在不同风级的载荷下标准节有着相同的固有频率和振型, 但不同的风级造成的风振效应不同。为了防止因为大风造成的塔式起重机坍塌带来生命和财产损失, 需要尽可能地提高塔式起重机一标准节的固有频率, 防止因为风振效应使标准节发生共振致使结构破坏, 而导致塔式起重机整体结构的破坏。

从上图 6 可知, 空气滤清器在约束条件下从 1 阶至 6 阶固有频率逐渐增大, 第 2 阶与第 3 阶固有频率大致相等, 第 4 阶和第 5 阶固有频率大致相等, 这与标准节形状有很大关系。标准节形状类似于长方体, 上下底面是正方形形状, 结合图 6 的振形图可以看到第 2 阶和第 3 阶以及第 4 阶和第 5 阶振形运动趋势一致。同时, 标准节第 1 阶至第 2 阶固有频率与第 5 阶至第 6 阶固有频率增加幅度超过其他阶, 这与标准节结构以及约束有很大关系。

5. 标准节优化设计

5.1. 优化设计方案的提出

在保证标准节基本功能不变且保证实际运用中强度刚度足够的前期下, 本文对现有的标准节进行结构优化。设计方案 A: 与 Q235 相比, 不锈钢 304 的弹性模量和屈服强度相近, 但不锈钢 304 的密度更高, 因此考虑用不锈钢 304 作为塔式起重机标准节的材料; 设计方案 B: 考虑到标准节是由立柱和连接架构成, 此优化方案在立柱部位加厚 5 mm 处理, 如图 6 所示; 设计方案 C: 考虑到标准节的材料主要为角铁, 为薄壁件材料, 次优化方案在角铁内部增加厚度为 30 mm 的加强筋, 如图 7 所示。

5.2. 优化方案结果分析

基于前文所述的动态特性分析方法, 对三种设计方案进行分析, 得到三种设计方案的前 6 阶固有频率。由于方案 A 仅更换材料, 且方案 B 加厚处为四周对称, 因此方案 A 和方案 B 振形相较于优化前并无明显变化。方案 C 因为添加加强筋的关系, 所以振形对比优化前有明显改变。

三种优化方案的前 6 阶固有频率与各个方案固有频率相对原方案的增加比率, 如表 5 所示。

根据表 5 中三种优化方案的 6 阶固有频率数值, 结合表 4 中标准节优化前的 6 阶固有频率数值, 对比标准节优化前后固有频率变化趋势, 如图 8 所示。

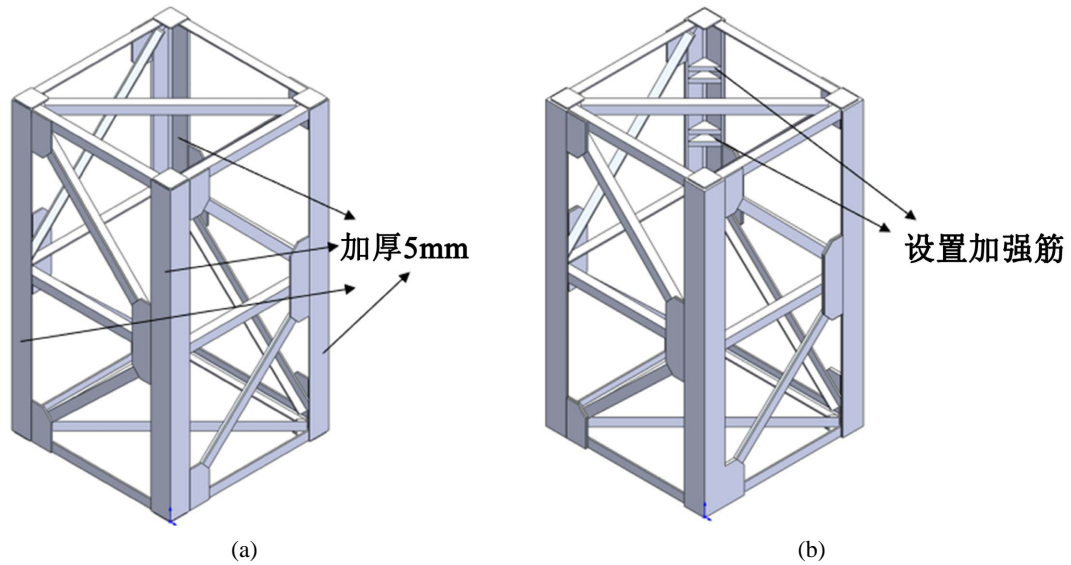


Figure 7. 3D models of optimization plan B and optimization plan C. (a) 3D model of optimization plan B; (b) 3D model of optimization plan C

图 7. 优化方案 B 及优化方案 C 的三维模型。(a) 优化方案 B 的三维模型; (b) 优化方案 C 的三维模型

Table 5. Natural frequency and increase ratio of three optimization schemes

表 5. 三种优化方案固有频率值和增加比率

固有频率(Hz)	方案 A	增加比率	方案 B	增加比率	方案 C	增加比率
1 阶	94.58	0.72%	102.98	9.67%	102.97	9.70%
2 阶	102.30	0.73%	103.03	1.45%	103.00	1.41%
3 阶	102.34	0.73%	103.74	2.11%	111.53	9.77%
4 阶	105.97	0.72%	116.90	11.11%	117.65	11.82%
5 阶	106.94	0.73%	117.63	10.80%	118.55	11.67%
6 阶	117.29	0.73%	117.69	1.07%	124.10	6.58%

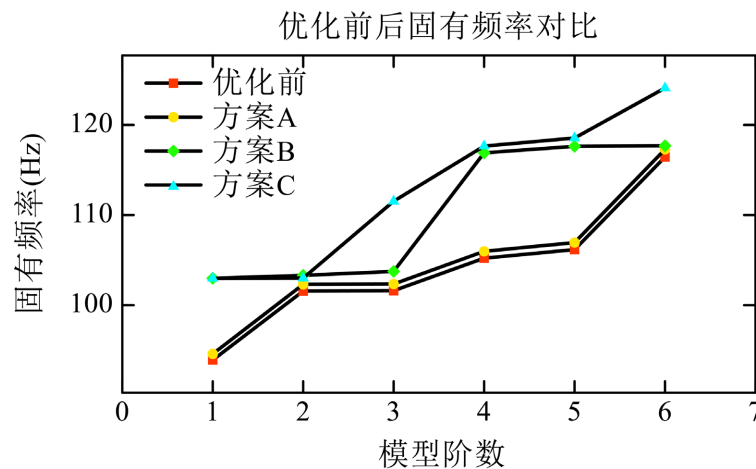


Figure 8. Six order natural frequency variation trend before and after air filter optimization

图 8. 空气滤清器优化前后 6 阶固有频率变化趋势

由表可知, 相对于优化前的标准节, 设计方案 A 从 1 阶至 6 阶固有频率均有所提高, 平均增加比率为 0.73%; 设计方案 B 从 1 至 6 阶固有频率均有所增加, 平均增加比率为 6.04%, 其中 4 阶和 5 阶固有频率增加较为明显, 此方案满足结构优化要求; 设计方案 C 从 1 至 6 阶固有频率均有所增加, 平均增加比率为 8.49%, 且除第 2 阶固有频率提升不明显外, 其余几阶均有明显提升。综上, 从标准节的使用情形及其经济性角度出发, 考虑到不锈钢 304 成本相对于 Q235 较高, 且立柱增加厚度后整体结构质量显著提高, 不利于运输和组装, 故优化方案 C 即将标准节角铁内部增加加强筋满足结构优化要求。最终方案 C 的仿真结果如图 9 所示:

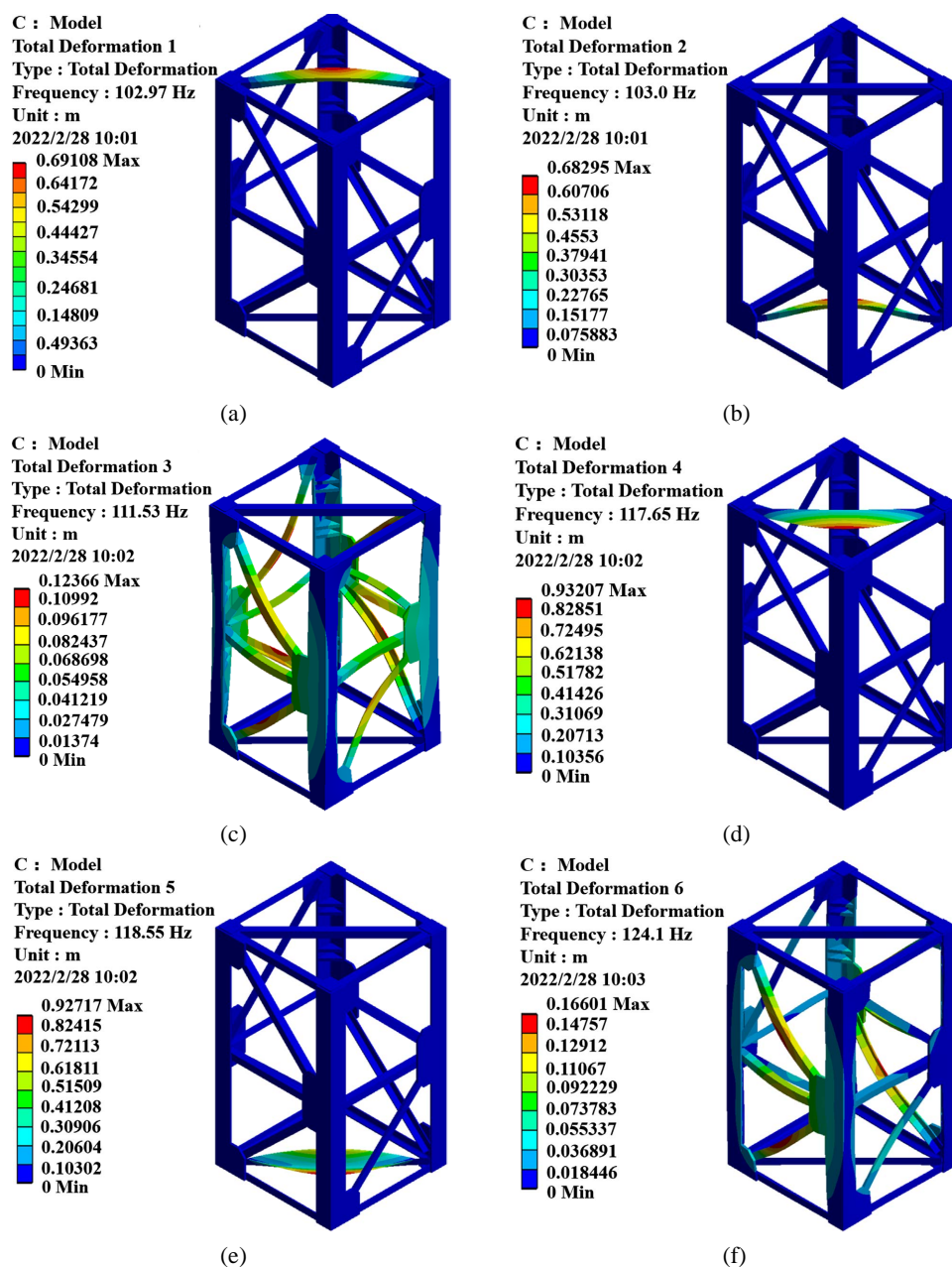


Figure 9. Simulation results of optimization plan C. (a) The 1 vibration mode; (b) The 2 vibration mode; (c) The 3 vibration mode; (d) The 4 vibration mode; (e) The 5 vibration mode; (f) The 6 vibration mode

图 9. 优化方案 C 的仿真结果。(a) 1 阶振型; (b) 2 阶振型; (c) 3 阶振型; (d) 4 阶振型; (e) 5 阶振型; (f) 6 阶振型

6. 结论

本文以塔式起重机标准节为研究对象, 将基于三维软件 SolidWorks 建立的标准节几何模型导入至有限元软件 ANSYS WorkBench 对标准节进行了约束模态分析, 仿真结果显示该标准节的基频(1 阶固有频率)为 93.90 Hz, 1 阶至 6 阶固有频率依次增大, 6 阶固有频率大小为 116.44 Hz。本文对该标准节提出的优化结构中, 在四侧立柱角铁内部增加厚度为 30 mm 的三角形加强筋, 能使标准节的各阶固有频率都提高, 基频提高 9.7%, 1 阶至 6 阶总体提高 8.94%, 为改进塔式起重机在风载荷作用下的振动性能提供理论基础。

参考文献

- [1] 李维仁. 塔式起重机动力响应的研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1983(4): 97-111.
- [2] 黄珊秋. QTZ80 塔式起重机的振动分析[J]. 起重运输机械, 2000(7): 20-23.
- [3] 兰朋, 陆念力. 塔式起重机柔性臂回转制动过程动力分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(5): 12-16.
- [4] 夏拥军, 秦剑. 输电线路大型铁塔组立专用塔式起重机的设计与优化[J]. 机械工程与技术, 2015, 4(2): 101-107.
- [5] 王恩军, 张银龙. 塔式起重机的振动模态分析[J]. 江苏建材, 2006(3): 36-39.
- [6] 魏敏, 魏宁, 李俊虎. 某型起动机定子模态分析[J]. 现代车用动力, 2020(3): 25-29.
- [7] 黄从阳, 李旭锋. 基于 ABAQUS 的轴承座静力学和动力学分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(11): 125-128.