

无动力攀爬角塔受力性能研究

许 飞

中铁四局集团有限公司市政工程分公司 安徽合肥 230000

【摘要】无动力攀爬角塔作为实现结构施工和维护等功能的重要辅助结构而应用广泛，但其格构式体系具有轻柔、易损等特点，因此，无动力攀爬角塔结构的力学性能已成为此类结构安全高效使用的重要指标。本文利用3D3S软件对无动力攀爬梯结构的结构振型、位移和内力进行研究，结果表明：结构第1阶、第2阶和第4阶振型周期分别为0.3096s、0.2409s和0.1576s，变形与运动主要由X方向运动贡献；结构最不利区域在与支座连接的竖向杆件和爬梯上部与下部的连接位置，结构杆件压力和拉力最大值分别为53.2kN和85.1kN；爬梯最大正位移和最大负位移分别为1.7mm和-7.3mm，均发生在结构上部凸出位置；所有杆件验算均能满足规范要求，强度应力比最大值为0.36。

【关键词】无动力攀爬角塔；3D3S；结构振型；受力性能

引言

无动力攀爬角塔主要用于大跨度结构装饰、建筑施工和设施维护等场景，在游乐场、商业中心等大跨度空间结构中具有非常广泛的运用。然而，无动力攀爬角塔结构作为质量较轻的格构式体系，其结构较为轻柔、刚度较低且易于损坏，因此，无动力攀爬角塔结构的力学性能研究可为此类结构的设计、施工和安全使用提供指导。

在格构式塔结构的力学性能方面，国内外一些专家学者展开了相关研究。周扬^[1]等人采用有限元方法对格构式塔架固有频率展开分析，考察在不同底部跟开、不同角柱直径和壁厚、不同斜杆壁厚下的固有频率的变化特征。李刚^[2]等人针对格构式雨棚进行有限元分析，计算该雨棚稳定承载力的理论值，并研究加固前后结构的稳定承载力。司贤达^[3]提出一种聚氨酯泡沫和玻璃纤维复合材料的格构式防撞装置，利用ABAQUS软件对碰撞过程进行模拟分析并探索耗能机理，考察环向GFRP肋板构型和设计参数对防撞装置性能影响的规律。银鹏^[4]等人通过有限元分析对某格构式铝合金台体结构进行模态分析，评估系统频带的适用性，考虑最不利荷载作用工况并探讨其承载能力和疲劳性能评估。魏源^[5]采用数值模拟和理论分析相结合的方法对风机塔架基本力学性能进行研究，分析最优宽高比和高度比及出现长短腿后相关力学性能的变化规律。周义清^[6]等人采用有限元程序建立格构式桅杆结构有限元模型，基于不同的实际工况，对整体桅杆结构进行了受力与变形分析，寻找其危险截面并对整体结构稳定性进行评价。Gao^[7]针对GFRP通信格构塔开展抗弯试验，验证塔立柱与腹板构件之间的连接可靠性，采用大挠度理论精确计算塔位移。Zhu^[8]等人提出基于

物理模型方法的构件屈曲行为自适应非线性模拟方法模拟塔架构件的塑性变形行为。

上述研究主要集中在格构式塔的承载能力和有限元分析，对无动力攀爬梯结构静力和动力特性研究十分有限，基于此，本文利用3D3S软件对无动力攀爬梯结构的自振特性、位移和内力展开研究。

1 工程概况

本文选取某实际工程中的无动力攀爬格构式角塔作为研究对象，结构计算简图如图1所示，图示节点号即为支座位置，格构式角塔结构采用方钢管焊接而成，方钢管截面在图中示意，材料采用Q345钢材，弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ，泊松比为0.30，线膨胀系数为 1.20×10^{-5} ；质量密度为 7850 kg/m^3 。结构恒荷载为 3.00 kN/m^2 ，活荷载为 0.50 kN/m^2 ，基本风压为 0.50 kN/m^2 ，地面粗糙度为B类地貌，风压高度变化修正系数为1.00，风荷载计算用阻尼比为0.02，

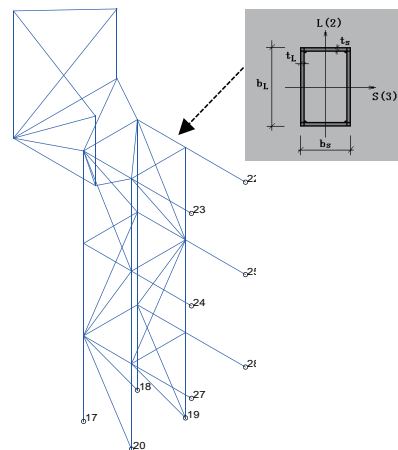


图1 结构计算简图

Fig. 1 Structural calculation sketch

采用振型分解法计算地震作用，地震烈度取7度(0.10g)，场地类别为II类；地震分组为第三组，荷载均采用双向节点导荷。

2 结构振型

表1为结构前9阶振型周期和质量参与系数，可以发现，结构前9阶振型周期范围为0.018s~0.3096s之间，结构第1阶、第2阶和第4阶振型周期分别为0.3096s、0.2409s和0.1576s，从振型质量参与系数可知，第1阶、第2阶和第4阶振型参与最大的是X方向，表明结构的变形与运动主要是X方向的运动引起的，第3阶和第5阶振型周期分别为0.2238s和0.1069s，其变形与运动由X方向和Z方向的运动共同决定，第6阶振型由X、Y和Z三个方向共同引起，第7阶振型Z方向贡献最大，第8阶和第9阶振型以X方向为主。

表1 结构振型周期表

Tab. 1 Periodic table of structural vibration patterns

振型号	周期(秒)	各振型质量参与系数		
		X	Y	Z
1	0.3096	14.10%	5.67%	0.50%
2	0.2409	41.65%	4.52%	0.97%
3	0.2238	0.62%	0.00%	0.51%
4	0.1576	12.65%	3.93%	0.38%
5	0.1069	13.82%	0.02%	7.83%
6	0.0805	3.35%	5.87%	4.30%
7	0.0636	0.34%	0.23%	12.86%
8	0.0495	2.89%	0.46%	0.49%
9	0.0480	8.08%	1.69%	2.13%

3 内力与位移

通过计算获得的结构最大轴力(受压)和最小轴力(受拉)结果如图2所示，由图可知，最大轴力杆件在攀爬角塔顶部斜撑杆，最小轴力杆件在与支座连接的竖直杆件上，结构最不利区域在与支座连接的竖向杆件和爬梯上部与下部的连接位置。表2为轴力最大和轴力最小的前4个单元内力计算结果，分析可知，结构受压最大杆件为38号杆件，最大值为53.2kN，结构受拉杆件最大杆件为12号杆件，最大值为85.1kN。图3为计算获得的结构最大正位移和最大负位移结果，分析可知，结构最大正位移和最大负位移均发生在结构上部凸出位置，最大正位移为1.7mm，最大负位移为-7.3mm。

表2 轴力最大和轴力最小的前4个单元内力(单位: m, kN, kN·m)

Tab. 2 Internal forces in the first 4 units with the highest and

lowest axial forces (Unit: m, kN, kN·m)

轴力N最大的前4个单元的内力				轴力N最小的前4个单元的内力			
序号	单元号	位置	轴力N	序号	单元号	位置	轴力N
1	38	0.000	53.2	1	12	1.850	-85.1
2	43	0.000	27.2	2	9	1.850	-84.4
3	50	0.000	26.8	3	5	0.000	-71.8
4	14	0.000	25.0	4	13	0.000	-62.5

4 设计验算

根据计算分析模型进行规范检验，检验结果表明，结构能够满足承载力计算要求，模型总体应力比分布图如图4所示，57根杆件按强度、绕2轴整体稳定、绕3轴整体稳定、沿2轴抗剪应力比、沿3轴抗剪应力比、绕2轴长细比和绕3轴长细比验算均能满足规范要求，其中强度应力比最大值为0.36，绕2轴和绕3轴长细比最大值均为107。

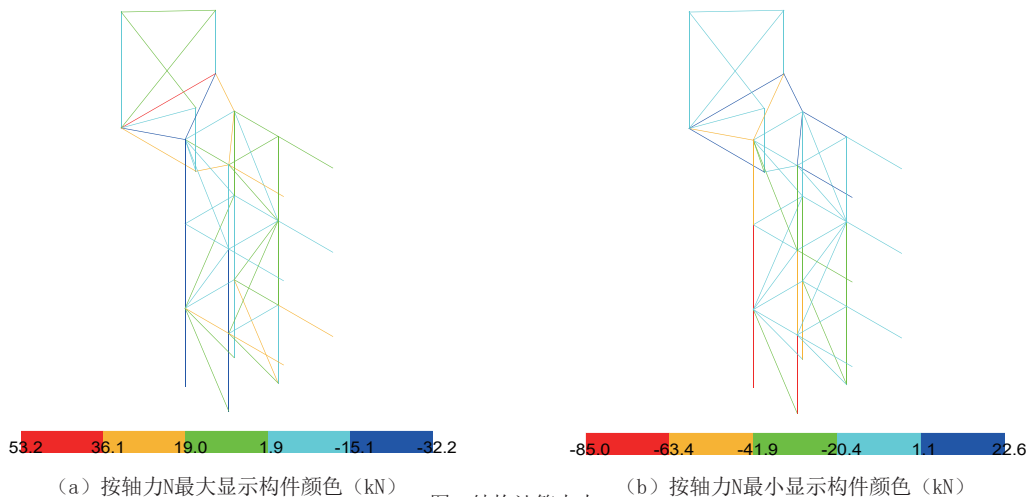
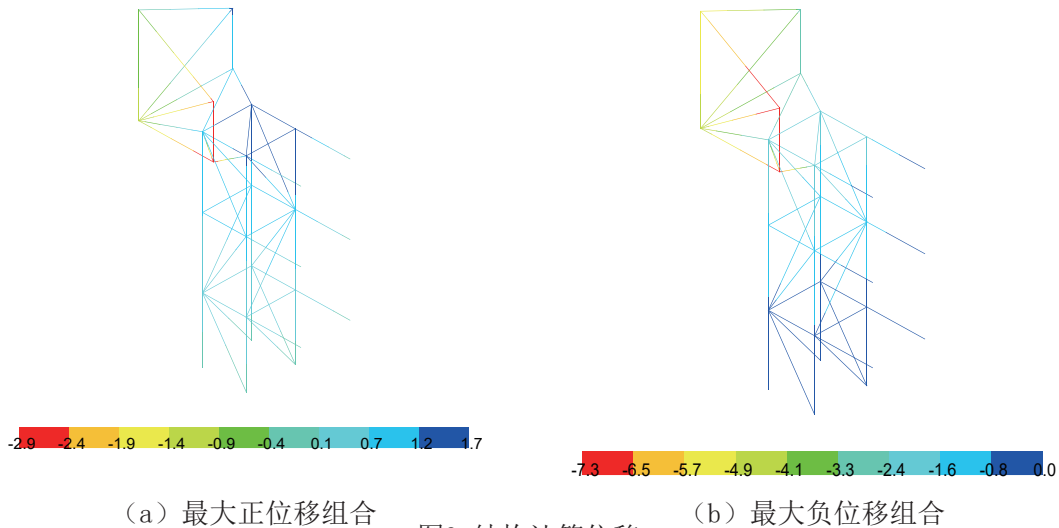


图2 结构计算内力
Fig. 2 Calculated internal forces of the structure



(a) 最大正位移组合 (b) 最大负位移组合
图3 结构计算位移
Fig. 3 Calculated displacement of the structure

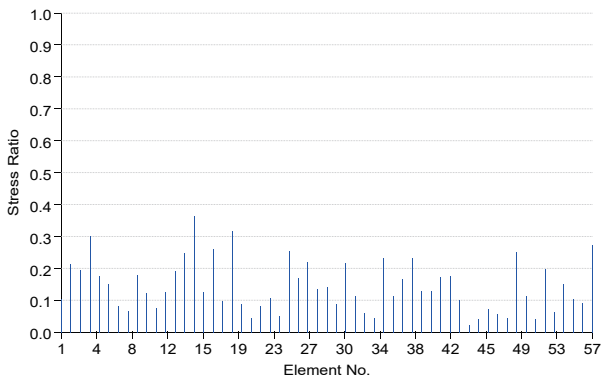


图4 杆件应力比分布图

Fig. 4 Stress ratio distribution of bars

5 结论

本文利用3D3S软件对无动力攀爬梯结构的自振特性、位移和内力展开研究,获得以下主要结论:

(1) 结构第1阶、第2阶和第4阶振型周期分别为0.3096s、0.2409s和0.1576s,变形与运动主要由X方向运动贡献,第3阶和第5阶振型由X和Z方向运动共同决定。

(2) 结构最不利区域在与支座连接的竖向杆件和爬梯上部与下部的连接位置,结构杆件压力最大值为53.2kN,杆件拉力最大最大值为85.1kN。

(3) 爬梯最大正位移和最大正位移均发生在结构上部凸出位置,最大正位移为1.7mm,最大负位移为-7.3mm。

(4) 所有结构杆件按强度、整体稳定、抗剪和长细比验算均能满足规范要求,强度应力比最大值为0.36,绕2轴和绕3轴长细比最大值均为107。

参考文献:

- [1] 周扬, 骆光进, 李晓艳等. 海上风电机组预应力钢管混凝土格构式塔架动力特性分析[J]. 船舶工程, 2022, 44 (S2): 112-115.
- [2] 李刚, 孙雨生, 牛功科. 格构式辐形单柱钢雨棚力学性能分析与加固研究[J]. 特种结构, 2022, 39 (05): 120-124.
- [3] 司贤达. 复合材料格构式防撞装置力学性能分析[D]. 哈尔滨工程大学, 2022.
- [4] 银鹏, 卢文胜, 杨上清等. 某格构式铝合金振动台体结构力学性能分析[J]. 山西建筑, 2020, 46 (10): 37-40.
- [5] 魏源. 混合式风力发电机组塔架基本力学性能研究[D]. 福州大学, 2016.
- [6] 周义清. 格构式桅杆结构力学性能分析[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2010, 24 (03): 58-62.
- [7] Hongshuai Gao, Yue Sun, Xinji Lei, et al. Mechanical properties and application of glass fiber reinforced polyurethane composites communication lattice tower[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411: 134180.
- [8] Yu Zhu, Hong-Nan Li, Xing Fu, et al. An adaptive nonlinear simulation method for member buckling in lattice towers[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 213: 108395.