

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250919002

# 基于midas NFX的聊城铁塔CFD数值模拟研究<sup>\*</sup>

关修龙, 袁立群, 闫昊

(聊城大学建筑工程学院, 山东 聊城, 252000)

**摘要:**以国家重点文物聊城隆兴寺铁塔为研究对象, 鉴于风荷载对古建筑的潜在危害, 通过实地测量获取关键数据, 构建了铁塔三维模型。运用midas NFX软件, 采用SST  $k-\omega$  湍流模型进行CFD数值模拟与有限元分析。研究表明迎风面风速随高度递增, 背风面呈先降后升趋势, 塔尖流速达到峰值; 因铁塔阻挡形成低风速区, 梯度衰减体现风影效应; 迎风面压力自下而上呈现先升后降趋势, 背风面因涡旋形成低压区, 符合伯努利原理; 塔尖最大位移1.312 mm, 第六层以上位移显著增加; 迎风面体型系数均值为0.339, 背风面为-0.199, 塔架的体型系数为0.538; 铁塔模态阶次越高频率越大, 低阶表现为整体弯曲, 中高阶表现为中部屈曲, 且铁塔对环境激励呈非线性关系。研究成果为聊城铁塔的防风保护提供了理论依据, 也为类似古建筑的风载作用保护研究提供了有益参考。

**关键词:** 有限元分析; CFD分析; 风荷载; 铁塔

**中图分类号:** TU312.1   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2026)03-0521-09

## Research on CFD Numerical Simulation of Liaocheng Iron Tower Based on Midas NFX

GUAN Xiulong, YUAN Liqun, YAN Hao

(School of Architectural Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

**Abstract:** Taking the Longxing Temple Iron Tower in Liaocheng, a nationally protected cultural relic, as the research object, a three-dimensional model of the iron tower was established on the basis of field measurements in view of the potential hazard of wind loads to ancient buildings. Using the midas NFX software and the SST  $k-\omega$  turbulence model, CFD numerical simulations and finite element analyses were carried out. The results showed that the wind speed on the windward side increased with height, whereas that on the leeward side first decreased and then increased, with the peak value occurring at the tower tip. A low-wind-speed zone formed because of the obstruction of the iron tower, and the gradient attenuation reflected the wind-shadow effect. The pressure on the windward side first increased and then decreased from bottom to top, whereas a low-pressure zone formed on the leeward side because of vortices, which was consistent with the Bernoulli principle. The maximum displacement at the tower tip was 1.312 mm, and the displacement increased significantly above the sixth story. The mean shape coefficient was 0.339 on the windward side, -0.199 on the leeward side, and 0.538 for the tower frame. The modal frequency of the iron tower increased with modal order; the low-order modes showed overall bending, whereas the medium- and high-order modes showed mid-height buckling, and the iron tower exhibited a nonlinear response to environmental excitation. The results

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2025-09-19; 修回日期: 2026-03-12

基金项目: 2024年山东省研究生教育教学改革研究项目(SDYJSJGC2024075)资助

作者简介: 关修龙(2001—), 男, 硕士研究生。研究方向为岩土工程。E-mail: 1003748683@qq.com

通信作者: 袁立群(1981—), 男, 副教授, 博士。研究方向为岩土及地下工程。E-mail: liqunyuan@163.com

provide a theoretical basis for the wind-resistant protection of the Liaocheng Iron Tower and a useful reference for wind-load protection of similar ancient buildings.

**Keywords:** finite element analysis; CFD analysis; wind load; iron tower

## 0 引言

隆兴寺铁塔(又名聊城铁塔,图1),位于山东省聊城市东昌府区铁塔体育场东南角。铁塔通高18.5 m,为仿木结构的铸铁式佛塔,共八角十二层。它与江苏镇江甘露寺铁塔、湖北当阳玉泉铁塔、山东济宁铁塔、山东泰安铁塔、陕西咸阳千佛铁塔、陕西府谷孤山铁塔并称为“中国七大古铁塔”。隆兴寺铁塔不仅是研究宋代佛塔建筑极为珍贵的实物资料,更是中国为数不多的金属古建筑。它作为2006年5月25日入选的第六批全国重点文物保护单位,属于国宝级文物,承载着深厚的历史文化内涵,是中华民族珍贵的文化遗产。然而随着时间的推移,像铁塔这样珍贵的古建筑遭到众多自然和人为的破坏,例如强风可致古建筑变形、位移,过大侧向位移使结构构件内力剧增,引发损坏。通过模拟风效应,可提前了解风力作用下铁塔的受力、变形情况,预测潜在风险,为制定科学有效的保护措施提供依据,避免因风灾导致铁塔受损,确保这一珍贵文化遗产的安全。



图1 聊城铁塔

Fig.1 Liaocheng Iron Tower

古建筑是承载历史文化的重要载体,风荷载引发的结构损伤是其保护领域的重要课题,精准探究风荷载的作用效应,是制定古建筑科学保护措施的关键。目前学界针对古塔类建筑的风效应、动力特

性已开展诸多研究。杨娜等<sup>[1]</sup>辨识了开元寺砖塔层间刚度分布,却未分析风荷载下的流场与结构响应;袁建力等<sup>[2]</sup>提出了古塔动力建模方法,但未针对风荷载开展专项研究;Y. Li<sup>[3]</sup>、李铁英等<sup>[4-5]</sup>围绕应县木塔的风效应与动力特性展开研究,其成果因材质、几何特征差异难以适用于金属古塔;W. Liu等<sup>[6]</sup>通过风洞试验与CFD数值模拟研究瑞典中世纪教堂的风压系数,却难以精准模拟平屋顶气流分离的强负压区域;高延安等<sup>[7]</sup>优化了古建筑动力特性识别手段,未结合风荷载开展耦合分析;刘海瑞<sup>[8]</sup>算出太和殿的风荷载体型系数,因建筑类型差异,成果对古塔缺乏通用性。

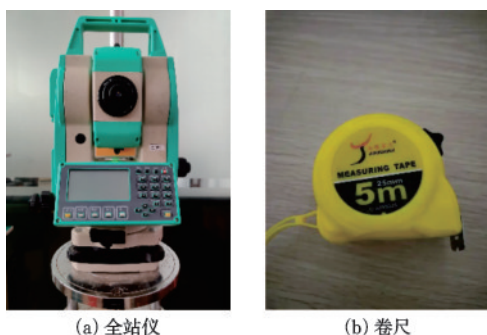
整体来看,现有研究多聚焦砖塔、木塔、宫殿式建筑,针对金属古塔的风荷载数值模拟研究较为匮乏,尚未结合CFD数值模拟与有限元分析,对八角十二层仿木结构铸铁佛塔开展风场分布、风压特性、结构位移及模态响应的系统性研究。聊城隆兴寺铁塔作为国宝级金属古塔,结构特征特殊,其在风荷载下的流场与结构响应规律尚不明确,缺乏针对性的抗风保护理论依据。为此,本文以聊城铁塔为研究对象,通过实地测量构建三维模型,采用MIDAS NFX软件结合SST  $k-\omega$ 湍流模型开展CFD数值模拟与有限元分析,系统探究其在风荷载作用下的风速、风压分布及结构位移、体型系数、模态响应等规律。本研究既能填补金属古塔风效应数值模拟的研究空白,明确聊城铁塔的抗风薄弱环节、为其防风保护提供理论支撑,也能为国内其他古铁塔及同类高耸金属古建筑的风载保护研究提供参考与技术借鉴。

## 1 铁塔模型

### 1.1 三维模型建立

在建立铁塔三维模型之前,采用图2所示的全站仪、卷尺进行实地测量,实测结果表明,铁塔的塔座高度为3 m,其结构为石砌的正方形,塔座占地约 $9.5 \text{ m}^2$ ,本文底边长取值3 m。铁塔的塔身高度达到了15.5 m。在塔身的具体尺寸方面,仅获取到第一层塔身中径的数据,其值为1.53 m,并且从外观上

可以明显观察到,随高度的增高塔身中径逐级递减,三维模型如图3所示。



(a) 全站仪 (b) 卷尺

图2 现场测量设备

Fig.2 Field measurement equipment

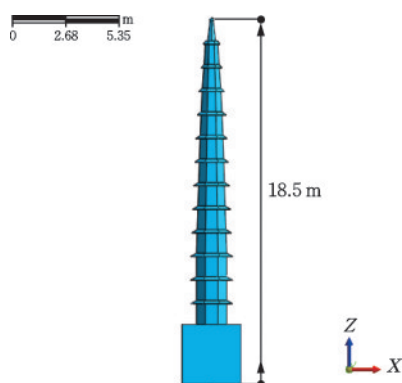


图3 铁塔模型示意

Fig.3 Iron tower model

## 1.2 网格划分

本文的数值模拟中,由于四面体网格的计算效率和精度较高,因此本文采用四面体网格来有效地适应建筑物的形状,并设置最小网格使其满足 $y^+ \leq 1$ 的条件,设置网格尺寸为 $0.25 \text{ m}^{[9]}$ ,网格划分完成后如图4所示。

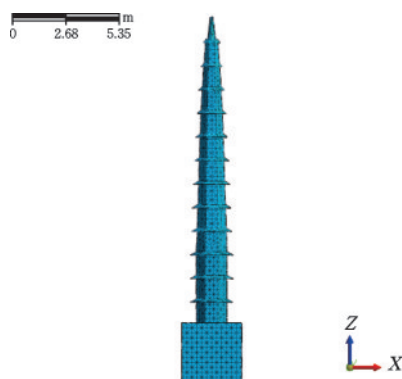


图4 铁塔网格示意

Fig.4 Iron tower mesh

## 2 内外部流场模型

### 2.1 确定计算区域

在计算流体工程的数值模拟中流体域的设置可直接影响到计算结果的精确度和计算时间的长短。入流面距离建筑物太近,会使流域中的湍流得不到足够长时间发展;出流面距离建筑物太近,则流出面可能还处在由建筑物的阻塞而形成的尾流的回流区中,使建筑物受到风回流的影响。在进行流体的数值模拟计算时,应避免以上两种情况的发生,以保证模拟结果的准确性。

在构建铁塔流场数值模型时,将流域中建筑物的长定义为 $D_y$ ,宽定义为 $D_x$ ,高定义为 $H$ 。同时,对于计算区域的设定也给出了明确的标准,其长、宽、高分别取值为 $33D_y$ 、 $24D_x$ 、 $2H$ 。此外,入流面到建筑中心的距离设定为 $8D_y$ ,出流面到建筑中心的距离为 $25D_y^{[10]}$ 。

结合铁塔的实测数据,将铁塔塔座的底边长 $3 \text{ m}$ 分别对应上述的 $D_y$ 和 $D_x$ (因为塔座为正方形),铁塔的总高度 $18.5 \text{ m}$ 对应 $H$ ,得到图5所示流场模型。由此进行数值模拟,本模型外部流场的长为 $99 \text{ m}$ ,宽为 $72 \text{ m}$ ,高为 $37 \text{ m}$ ,这样的设定能够较为合理地模拟铁塔周围的流场环境。

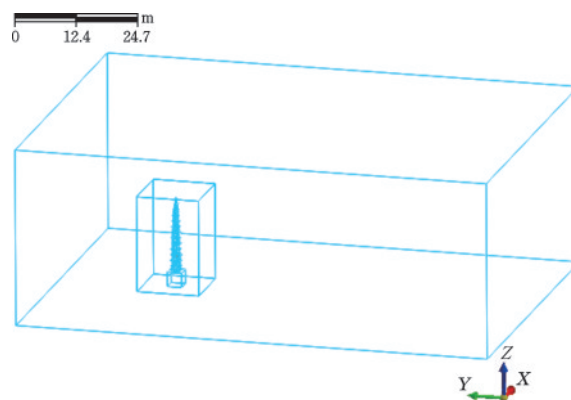


图5 流场模型示意

Fig.5 Flow-field model

### 2.2 网格划分

默认四面体网格生成器生成效率较低且网格质量一般,混合网格生成过程复杂,所以本文采用高速四面体网格,在控制计算成本的基础上,将网格划分至足够精细共有 $121\,916$ 个节点以及 $702\,690$ 个网格,使试验能够识别出该区域内可能



出现的具有大梯度特征的流场形态,经检验共有1个网格纵横比大于20且无翘曲<sup>[11]</sup>;对靠近模型表面的区域,气流会在该区域形成一层很薄的附面层从而影响计算结果,为提高该区域的求解精度,同样将内部流场划分为足够细密的网格,尺寸设置为0.5 m。

在流场域中,随着与模型的距离逐渐增大,周围流场和模型区域之间的相互干扰作用会逐步减弱,为节省计算成本、提高计算效率,外部流场网格设置的较为简洁,网格尺寸设置为2 m,内外流场网格划分效果如图6所示。

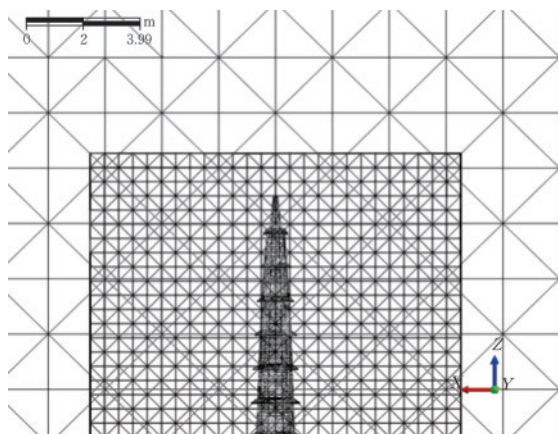


图6 流场网格示意

Fig.6 Flow-field mesh

## 2.3 边界条件

### (1) 入口风速

入口的速度边界条件采用百年一遇大风,根据《建筑结构荷载规范》<sup>[12]</sup>聊城地区重现期100年的基本风压为0.5 kN/m<sup>2</sup>(数据来源于莘县气象局原聊城气象站,区站号54808),根据风荷载公式得到对应风速约为28.3 m/s

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

式中, $W$ 为基本风压; $\rho$ 为流体密度; $v$ 为流体速度。

### (2) 出口设置

为消除压力边界条件的干扰、稳定计算过程,出口采用压力出口边界条件<sup>[13-14]</sup>,当流体流出到大气中时,出口处的流体压力会迅速与周围大气压力达到平衡,此时将出口静压设为0 N/m<sup>2</sup>。

### (3) 壁面设置

在外部流场的顶面和两侧壁面,均采用无摩擦的滑移壁面条件<sup>[14]</sup>,其设置路径为CFD→壁面设

置→面壁→滑移壁面,目的在于确保顶部与侧壁位置不受壁面摩擦效应的干扰。当壁面为无摩擦的滑移壁面时,外部流场边界面处的剪应力为零。这表明流体在流经这些壁面时,不会因为壁面的摩擦作用而产生额外的能量损耗和流动阻力,从而能够更真实地模拟自由流动的状态,使得计算结果更加符合实际物理现象。

对于地面边界条件,采用无因次距离壁面( $y+$ ),其设置路径为CFD→壁面设置→面壁→无因次距离壁面→设置数值。将第一个节点的 $y+$ 定义为65,能够在保证计算效率的同时,更好地模拟地面附近流体的流动特性<sup>[15]</sup>。地面作为流体与固体的交界面,其附近的流动状态较为复杂,存在着边界层等现象。

对于铁塔壁面,同样采用无因次距离壁面( $y+$ )的设定方式。然而,为了确保计算结果的准确性,铁塔壁面的第一个节点 $y+$ 定义为1。铁塔壁面附近的流体流动与地面附近存在差异,由于铁塔的形状和结构特点,其周围的流场更为复杂,存在着分离、再附着等现象。将第一个节点的 $y+$ 值设定为1,能够更精细地解析铁塔壁面附近流体的流动行为,使得模型能够更准确地反映流体与铁塔壁面之间的相互作用。

## 2.4 湍流模型

### (1) 标准 $k-\epsilon$ 模型

标准 $k-\epsilon$ 模型是基于湍流动能 $k$ 和湍流耗散率 $\epsilon$ 的双方程湍流模型。该模型通过求解湍流动能 $k$ 和湍流耗散率 $\epsilon$ 的输运方程来封闭雷诺时均方程组,从而实现对湍流流动的模拟。标准 $k-\epsilon$ 模型在近壁面区域有较好的性能,对低雷诺数流动和有壁面限制的流动模拟效果良好,比如模拟建筑物墙面处的风压分布,它可以比较准确地计算出墙面上的压力变化。

### (2) SST $k-\omega$ 模型

SST  $k-\omega$ 模型基于湍流动能 $k$ 和比耗散率 $\omega$ 构建输运方程。SST  $k-\omega$ 模型结合了 $k-\omega$ 模型在远场的优点和 $k-\epsilon$ 模型在近壁面的优点。在风工程中应用广泛,能够有效模拟从近壁面到远离壁面的整个风场。当模拟大型建筑群落的风场时,从建筑物表面到建筑群上方的大气边界层,它都能给出较为合理的模拟结果。

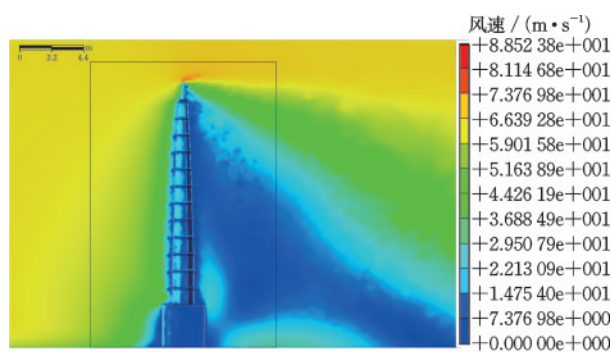
SST  $k-\omega$ 模型相对于标准 $k-\omega$ 模型在风荷载模

拟计算领域中具有更好的实用性和更高的计算精度<sup>[6]</sup>。SST  $k-\omega$  模型在古建筑风荷载数值模拟中无需壁面函数即可精准表征近壁区湍流特性,适配斗拱、飞檐等复杂构件几何形态,且分离流与回流捕捉能力更强,该模型能有效提升局部风压与整体风荷载预测精度,更契合古建筑抗风性能精细化研究与保护工程诉求,所以本文选用 SST  $k-\omega$  模型对铁塔进行有限元数值模拟<sup>[16-19]</sup>。

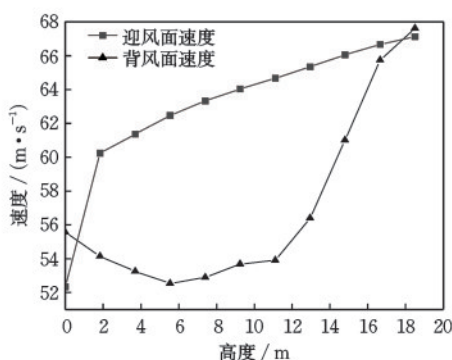
### 3 分析结果

#### 3.1 风速分析

在迎风面处速度与高度成正比,随着高度的增加,速度逐渐增大;在背风面 0~7.4 m 速度随着高度升高缓慢递减,7.4~18.5 m 速度又随着高度升高而增加,从图 7 中可看出速度的极值位于塔尖处。由于铁塔对气流的阻挡作用,从图 8 中可看出,7.9 m 高度处气流在经过塔身后动能明显降低,风速从 10.5 m/s 至 71.9 m/s 在铁塔两侧呈对称分布,结合图 7 可以发现形成大面积的低风速区,其影响范围随距离增加呈梯度衰减趋势,体现了典型的风影效应。



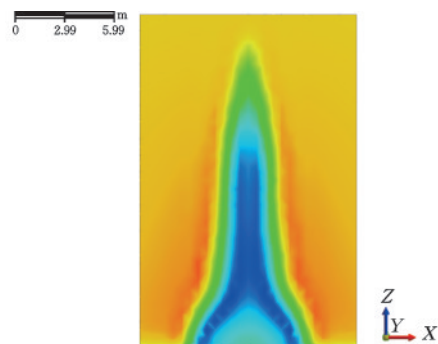
(a) 流场风速云图



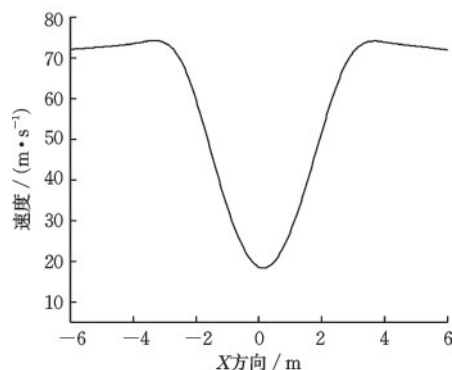
(b) 迎/背风面不同高度处风速变化曲线

图 7 风速分布

Fig.7 Wind speed distribution diagram



(a) 背风面流场截面形态



(b) 背风面 7.9 m 高度处沿 X 方向风速分布曲线

图 8 背风面 7.9 m 高度处风速分布

Fig.8 Wind speed distribution diagram at 7.9 m height on leeward side

#### 3.2 流线分析

由图 9 可知,气流在未受到铁塔显著干扰前,具有相对稳定的流动方向,但是在经过铁塔时出现典型的钝体扰流,在建筑物两侧和后面形成特征湍流<sup>[20]</sup>。在铁塔的背风面,原本汇聚到迎风面的流线,在经过铁塔后,而是向不同方向散开,这种分离导致了涡旋的形成,从图 9 中可以看到流线在背风面形成了多个回旋的区域。

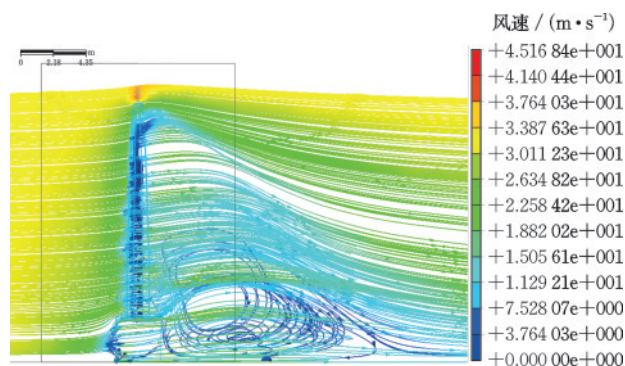


图 9 流线分布

Fig.9 Streamline distribution diagram

### 3.3 风压分析

根据伯努利原理,流速降低时,压力数值相对升高,这是因为迎风面直接承受了气流的冲击,气流的动能在这一区域转化为压力能,从而使得压力升高,由图 10 可以看出迎风面风压总体呈先升后降的趋势,在 5.5 m 处达到最大值 3 101.42 N/m<sup>2</sup>,而在铁塔的背风一侧风压基本呈降低趋势,在 4 m 和 15 m 处风压略微增高是因为气流在该区域有涡旋。

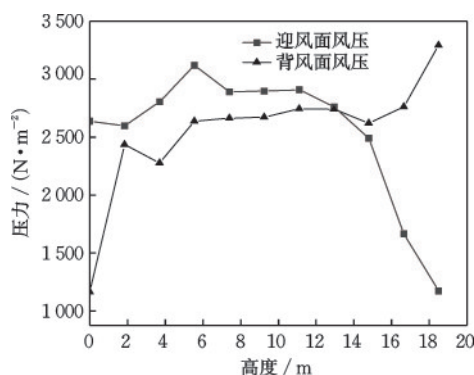


图 10 风压分布

Fig.10 Wind pressure distribution diagram

### 3.4 位移分析

由图 11 可知,底部区域其位移数值明显较小。这是因为底部与坚实的基础紧密相连,基础为底部提供了强大的约束作用,有效地限制了底部在受到外力时的移动趋势。从第 7 层开始出现明显位移,位移最大值出现在塔尖达到 1.312 mm。如表 1 所示层间位移角随高度上升逐渐增大,底部层间位移角趋近 0;中高层显著上升(第 8 层达 0.63‰,第 11 层 1.032‰);塔尖层间位移角 0.8‰。

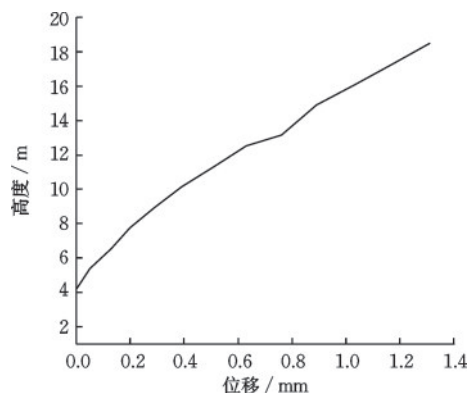


图 11 位移分布

Fig.11 Displacement distribution diagram

表 1 层间位移汇总

Table 1 Summary of interstory displacements

| 层数 | 高度/m  | 位移/mm | 层间位移角  |
|----|-------|-------|--------|
| 底部 | 3     | 0     |        |
| 1  | 4.19  | 0     | 0      |
| 2  | 5.38  | 0.05  | 5/419  |
| 3  | 6.57  | 0.13  | 4/269  |
| 4  | 7.76  | 0.2   | 7/657  |
| 5  | 8.95  | 0.29  | 9/776  |
| 6  | 10.14 | 0.39  | 2/179  |
| 7  | 11.33 | 0.51  | 2/169  |
| 8  | 12.52 | 0.63  | 7/661  |
| 9  | 13.17 | 0.76  | 10/963 |
| 10 | 14.9  | 0.89  | 3/304  |
| 11 | 16.09 | 1.032 | 1/105  |
| 12 | 17.28 | 1.174 | 3/340  |
| 塔刹 | 18.5  | 1.312 | 5/626  |

### 3.5 体型系数分析

通过对体型系数分布规律的解析,可精准定位气动薄弱环节,为设计改进提供可量化的工程决策依据,利用公式计算。

$$w_k = \beta_z \cdot u_s \cdot u_z \cdot w_0 \quad (2)$$

式中, $u_s$ 为风荷载体形系数; $\beta_z$ 为 $z$ 高度处的风振系数; $u_z$ 为风压高度变化系数; $w_0$ 为基本风压。

由图 12 可知体型系数沿建筑高度呈现底部到顶部逐渐降低的趋势,典型分布形态符合高耸结构气动特性。为方便铁塔体型系数的整体计算,将塔身的体型系数统计见表 2,其中迎风面系数均值为 0.339,背风面为 -0.199,铁塔整体的体型系数为 0.538,与规范值相比较小,可能由于 CFD 能够精确还原铁塔的复杂几何特征,而规范值通常基于简化几何模型,忽略局部细节对风荷载的影响。

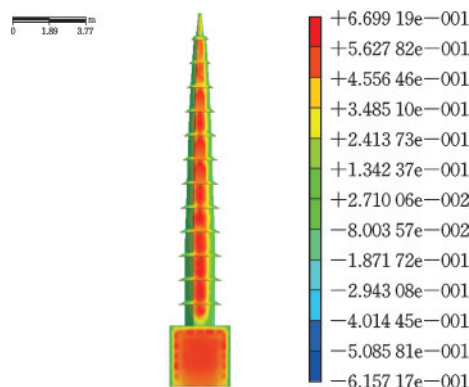


图 12 体型系数分布

Fig.12 Distribution of shape coefficients



表2 体型系数统计

Table 2 Statistics of shape coefficients

| 区域   | 体型系数   |                        |
|------|--------|------------------------|
|      | 本文     | 《荷载规范》 <sup>[12]</sup> |
| 迎风面  | 0.339  | 0.8                    |
| 背风面  | -0.199 | -0.5                   |
| 铁塔整体 | 0.538  | 1.3                    |

### 3.6 模态分析

结构的模态参数,作为表征结构动力特性的关键指标,其识别成果在结构优化设计、安全状况评估、损伤探测以及模型校正等领域,均发挥着举足轻重的作用<sup>[21]</sup>。由表3可知结构固有频率随模态阶次升高而增加,表明铁塔振动模式从整体柔性向局部刚性的过渡:低阶模态(1~2阶)固有频率为8.15~8.18 Hz、周期0.12 s,呈整体弯曲,体现铁塔

的柔性且易受低频激励影响;中高阶模态(3~6阶)频率升至34.30~78.3 Hz、周期缩短为0.01~0.3 s,表现为塔身中部屈曲,体现了在环境激励下塔身局部的振动特性;振动模式表现为从低阶整体弯曲,到中阶局部屈曲,再到高阶耦合振动的规律,且低频模态易受风振影响,高频模态对地震或局部冲击较敏感。

表3 特征值分析结果

Table 3 Eigenvalue analysis results

| 模态编号 | 特征值     | 圆频率/(rad·s <sup>-1</sup> ) | 频率/Hz | 周期/s |
|------|---------|----------------------------|-------|------|
| 1    | 2 620   | 51.2                       | 8.15  | 0.12 |
| 2    | 2 640   | 51.4                       | 8.18  | 0.12 |
| 3    | 46 400  | 215                        | 34.3  | 0.03 |
| 4    | 47 300  | 217                        | 34.6  | 0.03 |
| 5    | 240 000 | 490                        | 77.9  | 0.01 |
| 6    | 242 000 | 492                        | 78.3  | 0.01 |

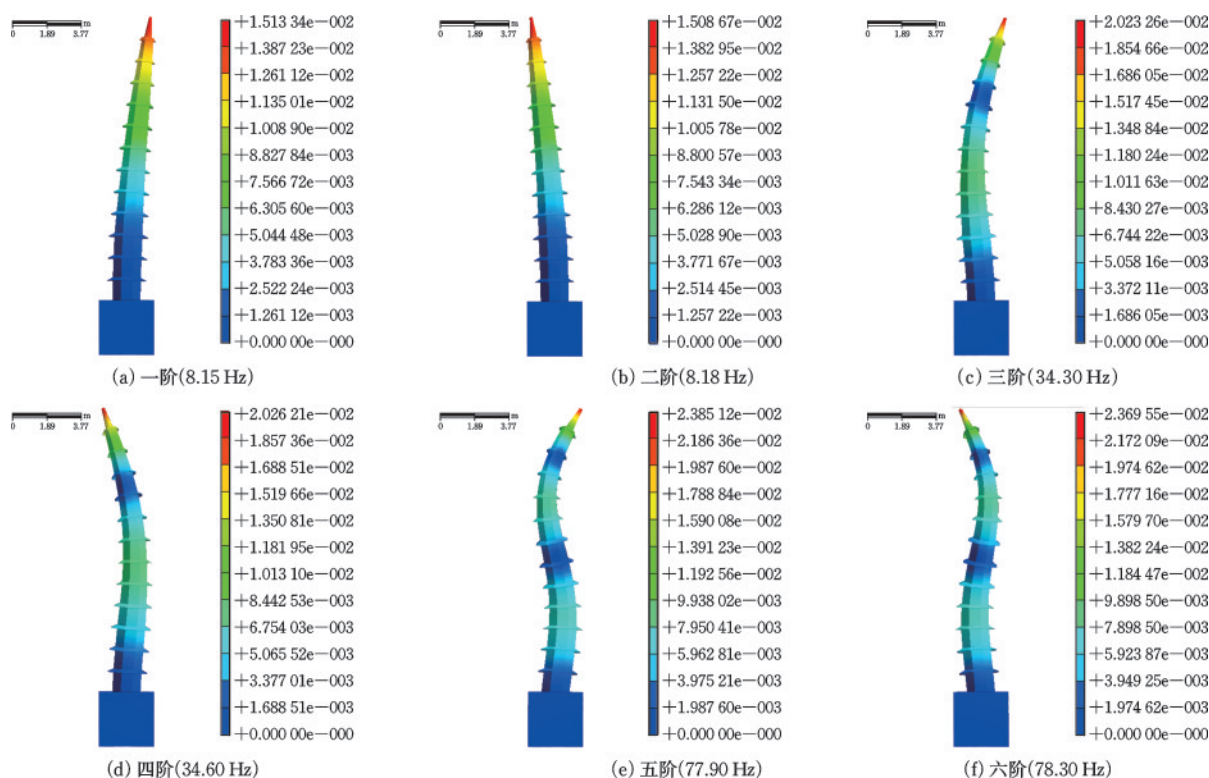


图13 一~六阶模态图

Fig.13 First- to sixth-order mode shapes

## 4 结 论

以聊城铁塔为依据建立铁塔三维模型,基于SST  $k-\omega$  湍流模型,对铁塔进行了CFD数值模拟计

算,通过建立midas NFX有限元模型进行分析,主要结论有以下几点:

(1)迎风面高度增加时风速随之增大;背风面风速先降后升,0~7.4 m风速随高度递减,7.4~18.5 m风速递增,塔尖处速度达到极值。7.9 m高度

处因铁塔阻挡,气流动能明显降低,形成低风速区,影响范围随距离拉远梯度衰减,展现了风影效应。

(2)依照伯努利原理,铁塔迎风侧受气流冲击,动能转化为压力能,压力相对较高;背风侧为尾流区,有涡旋,压力较低。铁塔不同部位压力不同,迎风面风压总体呈先升后降的趋势,在5.5 m处达到最大值3 101.42 N/m<sup>2</sup>,而在铁塔的背风一侧风压基本呈降低趋势。

(3)铁塔顶部因约束不足,在风力作用下位移较大,塔尖处达1.312 mm,从第7层起位移明显出现。

(4)铁塔迎风面体型系数均值为0.339,背风面为-0.199,铁塔的体型系数为0.538,与规范值相比较小。

(5)低阶振动模式表现为结构整体的弯曲变形特征,具有明显柔性响应特性;中高阶振动能量主要集中在分布于塔身中部区域,形成典型的整体屈曲形态。各阶模态对外界激励的敏感度存在显著差异,其激励响应特性与模态阶次呈非线性关系。

(6)研究结果为铁塔的防风保护提供了理论依据,通过数值模拟与有限元分析的结合,可为类似古建筑的风载作用保护提供参考。

## 参考文献:

- [1] 杨娜,刘威,张淑慧,等.基于环境激励测试的开元寺塔动力性能分析[J].土木工程学报,2021,54(9):79-87.  
Yang N, Liu W, Zhang S H, et al. Dynamic performance analysis of kaiyuan temple tower based on ambient vibration testing[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(9):79-87. (in Chinese)
- [2] 袁建力,樊华,陈汉斌,等.虎丘塔动力特性的试验研究[J].工程力学,2005,22(5):158-164.  
Yuan J L, Fan H, Chen H B, et al. Experimental study on dynamic characteristics of Huqiu Tower[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 158-164. (in Chinese)
- [3] Li Y, Sun P P, Li A, et al. Wind effect analysis of a high-rise ancient wooden tower with a particular architectural profile via wind tunnel test[J]. International Journal of Architectural Heritage, 2023, 17(3): 518-537.
- [4] 李铁英,魏剑伟,张善元,等.应县木塔实体结构的动态特性试验与分析[J].工程力学,2005,22(1):141-146.  
Li T Y, Wei J W, Zhang S Y, et al. Experimental

study and analysis on dynamic characteristics of Yingxian wooden tower full-scale structure[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1):141-146. (in Chinese)

- [5] 薛建阳,吴晨伟,翟磊,等.考虑台基影响的应县木塔地震响应有限元分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(2):22-29.  
Xue J Y, Wu Ch W, Zhai L, et al. Finite element analysis of seismic response of yingxian wooden pagoda considering the influence of the pedestal[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese and English), 2022, 44(2): 22-29. (in Chinese)
- [6] Liu W, Mattsson M, Widström T, et al. Wind tunnel and numerical study of wind pressure coefficients on a medieval Swedish church[J]. Building and Environment, 2024, 264: 111905.
- [7] 高延安,杨庆山,王娟,等.环境激励下古建筑飞云楼动力性能分析[J].振动与冲击,2015,34(22):144-148, 182.  
Gao Y A, Yang Q S, Wang J, et al. Dynamic performance analysis of Fei yunlou ancient building under ambient vibration excitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22):144-148, 182. (in Chinese)
- [8] 刘海瑞.清代重檐古建筑太和殿风荷载体型系数研究[D].西安:长安大学,2014.  
Liu H R. Study on wind load shape coefficients of Taihe Hall, a qing dynasty double-eaved ancient building[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [9] 徐艺颖.不等高方形建筑气动干扰对风压特性影响的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.  
Xu Y Y. Study on the Influence of aerodynamic interference on wind pressure characteristics of square buildings with Unequal Heights[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023. (in Chinese)
- [10] Dagnew K A, Bitsuamlak T G. Computational evaluation of wind loads on buildings: a review[J]. Wind and Structures, 2013, 16(6):629-660.
- [11] 李彩霞,唐睿楷,解威威,等.六律邕江大桥非规则塔架结构风荷载参数分析[J].公路,2024,69(12):242-247.  
Li C X, Tang R K, Xie W W, et al. Wind load parameter analysis of irregular tower structure of Liulu Yungjiang bridge[J]. Highway, 2024, 69(12): 242-247. (in Chinese)
- [12] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [13] 朱相鹏.云南某大型地下水封洞库施工通风CFD数值模拟[J].人民黄河,2024,46(增2):149-150.  
Zhu X P. CFD numerical simulation of construction ventilation for a large underground water-sealed cave in



- Yunnan [J]. Yellow River, 2024, 46(Sup 2):149-150. (in Chinese)
- [14] 郑德乾,黄轩,潘钧俊,等.某科技园双塔楼非定常绕流大涡模拟[J].建筑结构,2025,55(5):101-106, 132. Zheng D Q, Huang X, Pan J J, et al. Large eddy simulation of unsteady flow around twin towers in a science park [J]. Building Structures, 2025, 55(5): 101-106, 132. (in Chinese)
- [15] Ayvaz I, Kocer C, Schneider J. Vacuum insulated glazing (VIG) units under wind load—part 1: global deformation and stresses on the outer glass surfaces [J]. Glass Structures & Engineering, 2023, 8(4):483-494.
- [16] 孙相雨.塔吊结构风效应的模拟及有限元分析[D].长沙:长沙理工大学,2018. Sun X Y. Simulation and finite element analysis of wind effects on tower crane structure [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [17] 蔡萌琦,钟博林,赵鑫,等.SSTk- $\omega$ 湍流模型下的覆冰八分裂导线气动特性分析[J].电网与清洁能源,2025, 41(7):9-18. Cai M Q, Zhong B L, Zhao X, et al. Aerodynamic characteristics analysis of iced octagonal conductor under SSTk- $\omega$  turbulence model [J]. Power Grids and Clean Energy, 2025, 41(7): 9-18. (in Chinese)
- [18] 霍林生,齐昊.周围建筑群对大跨穹顶屋盖的风致干扰效应研究[J].防灾减灾工程学报,2022,42(6):1257-1266. Huo L S, Qi H. Study on the wind-induced disturbance effects of surrounding buildings on large-span dome roofs [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1257-1266. (in Chinese)
- [19] 钱宇,蒋皓.基于k- $\omega$ 湍流模型的翼尖涡演化过程数值模拟[J].科学技术与工程,2020,20(35):14708-14713. Qian Y, Jiang H. Numerical simulation of wing tip vortex evolution based on the k- $\omega$  turbulence model [J]. Science, Technology and Engineering, 2020, 20(35): 14708-14713. (in Chinese)
- [20] 胡涛,阳富强,张一夫.两类不同结构高层建筑风振安全特性数值模拟[J].防灾减灾工程学报,2023,43(5): 1067-1075. Hu T, Yang F Q, Zhang Y F. Numerical simulation of wind-induced vibration safety characteristics in two types of differently structured high-rise buildings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(5): 1067-1075. (in Chinese)
- [21] 熊青松,陈琳,熊海贝.台风激励下上海中心大厦模态频率识别分析[J/OL].建筑结构,1-7[2025-03-30]. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.20231033>. Xiong Q S, Chen L, Xiong H B. Modal frequency identification analysis of Shanghai tower under typhoon excitation [J/OL]. Building Structure, 1-7 [2025-03-30]. <https://doi.org/10.19701/j.jzjg.20231033>. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)