

圆钢管格构式塔架气动力的数值模拟

游溢^{1,2,3}, 晏致涛^{1,2†}, 陈俊帆⁴, 李文胜³, 何成³, 闫渤文^{1,2}

(1.重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆 400045; 2.重庆大学 土木工程学院,重庆 400045; 3.国网新疆电力公司 电力科学研究院,乌鲁木齐 830011; 4.中南电力设计院有限公司,湖北 武汉 430071)

摘要:输电塔结构具有高柔、轻质和小阻尼的特性,因此风荷载是输电塔结构的主要控制荷载.以苏通大跨越输电塔结构作为工程背景,开展了一系列的刚性节段模型风洞试验,研究了在光滑均匀流作用下的圆钢管格构式塔架气动力特性.并基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,简称CFD)技术,采用大涡模拟(Large-eddy simulation,简称LES)方法分别对圆钢管格构式塔架节段的顺风向、横风向和扭转向风荷载特性进行计算,并将计算结果与实验值以及各国规范进行了对比.此外,讨论了湍流度分别为5%、10%、15%和20%四种情况下的三分力系数.结果表明,本文的数值模拟结果与各国规范及风洞试验结果较为一致,且湍流度的变化对结构三分力系数的脉动成分有显著影响.此外,从节段模型的表面风压力分布情况来看,最大正压出现在迎风面的主管正面和辅材相交节点的正面,最大负压出现在主管的侧面.通过涡量图对节段模型流场结构分析发现, x 向的涡量离散程度更高,而 y 和 z 向上涡量分布更加均匀连续.本文的研究成果对实际工程中的圆管截面格构式结构风荷载评估具有重要的参考价值.

关键词:格构式塔架;大涡模拟;气动力;输电塔

中图分类号:TM75, TU312.1

文献标志码:A

Numerical Simulations on Aerodynamic Forces of Circular Steel Tubular Lattice Structures

YOU Yi^{1,2,3}, YAN Zhitao^{1,2†}, CHEN Junfan⁴, LI Wensheng³, HE Cheng³, YAN Bowen^{1,2}

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. State Grid Xinjiang Electric Power Company Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China;
4. Central Southern China Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, China)

Abstract: Due to the high flexibility, light self-weight and low damping ratio of the power transmission tower, wind loads are the dominant lateral loads at its design stage. This study conducted a series of rigid model tests on the

* 收稿日期:2017-02-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478069,51608075), National Natural Science Foundation of China (51478069,51608075); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(106112016CDJXY200010), Fundamental Research Fund for the Central Universities (106112016CDJXY200010); 重庆市科委基础与前沿研究计划项目(cstc2017jcyjA1426), Chongqing Science and Technology Commission Basic and Frontier Research Project (cstc2017jcyjA1426)

作者简介:游溢(1988—),男,重庆涪陵人,重庆大学博士研究生,工程师

† 通讯联系人, E-mail: yanzhitao@cqu.edu.cn

aerodynamic forces of circular steel tubular lattice structures under smoothly uniform flow conditions in the wind tunnel laboratory, and the models were fabricated based on a super high-rise power transmission tower in Huainan-Nanjing-Shanghai UHVAC transmission line. The Large-eddy simulation (LES) of lattice structures were performed to simulate the aerodynamic forces in the longitudinal, transverse and lateral directions, and the results were compared to the corresponding specifications in the available wind codes or standards. In addition, the aerodynamic forces of lattice structures were simulated by using LES under the flow conditions with turbulence intensities of 5%, 10%, 15% and 20%. The results showed that the numerical results were in relatively reasonable agreement with the experimental measurements, and the incoming turbulence intensity had indispensable influences on the fluctuating components of the aerodynamic forces. Moreover, the maximum positive pressures were observed on the windward surface at the junction of the strut and the diagonal member, while the maximum negative pressures were recorded on the lateral surface of the strut. Furthermore, the vorticity analysis showed that the vorticity in the x -direction was more scattered while those in the y - and z - directions were more uniform and continuous. The findings of this study are of great use for evaluating the aerodynamic forces of circular steel tubular lattice structures in the practice constructions.

Key words: lattice towers; LES; aerodynamic force; transmission towers

格构式塔架由于具有受力合理、节省材料、风荷载体型系数小、回转半径大等结构优点,应用遍及输电、通讯信息以及广播、电视信号传送各个领域。然而,格构式塔架轻质、高柔、小阻尼的结构特性,决定了风荷载是其设计中的主要控制性荷载^[1-2]。因此,研究格构式塔架的风荷载特性以及作用机理,可为设计提供荷载取值依据,对保证结构的安全具有重要意义。

国内外学者通过风洞试验的方法对格构式塔架结构的风荷载特性进行了大量的研究。Holmes 等^[3-5]基于准定常假定,深入研究了顺风向格构式塔架的风振响应。Bayar 等^[6]通过风洞试验的方法,采用刚性模型高频天平测力试验,开展了对格构式塔架静态风效应的研究。Celio 等^[7]基于试验的塔架平均和脉动阻力系数,对比研究了风向角、挡风系数、遮蔽效应以及紊流度与阻力系数的关系。邹良浩等^[8]则开展了对输电塔、通讯塔以及电视塔三种不同形式格构式塔架,在动力风荷载下三分力系数的研究。楼文娟、程志军等^[9-10]通过气动弹性模型的风洞试验,对格构式塔架的风振响应进行了研究。风洞试验虽然能够提供准确的气动力系数,但参数化分析成本较高,并且无法给出流场结构特征。除采用风洞试验研究外,数值模拟计算也成为了研究的重要手段之一。然而,目前采用数值风洞来模拟格构式塔架风荷载特性的文献比较少见,谢华平等^[11]通过 CFD 技术对

角钢格构式塔架进行数值模拟,分析了计算域、网格划分、湍流模型和湍流强度等因素对塔架平均风压的影响,但模拟的结果缺乏试验的验证。周志勇等^[12]基于 CFD 技术采用雷诺时均法(RANS)对河南电视塔的体型系数进行了数值模拟。RANS 方法的湍流模型中包含了人为的假定,不能完全反映实际的湍流运动特征。

为更好地适应目前计算机的计算能力,较真实和精确地反映湍流的运动、发展和耗散,本文采用大涡模拟法(LES)对格构式塔架进行数值模拟,研究圆管截面格构式塔架节段的静风三分力系数,通过与相关实验数据进行对比^[13],为实际工程提供一定的参考。

1 数值计算模型及工况

1.1 数值模型

计算域及模型尺寸如图 1 所示,节段高度方向与向上的 z 方向一致,计算域高度与节段高度一致,取 474 mm。其中,主材圆管直径为 $D = 57$ mm,横杆和斜材的直径分别为 17 mm 和 20 mm。计算域入口边界为速度入口,设定常流速 $U_0 = 18.4$ m/s,出口为压力出口,上下边界以及左右边界为对称边界,杆件表面为无滑移墙面边界(no-slip wall)。根据国内外相关圆柱绕流大涡模拟研究^[14-15],工程结构风荷载

的大涡模拟宜采用一方程亚格子模型,例如动力 Smagorinsky-Lilly 模型,计算时间步长为 5×10^{-4} s.

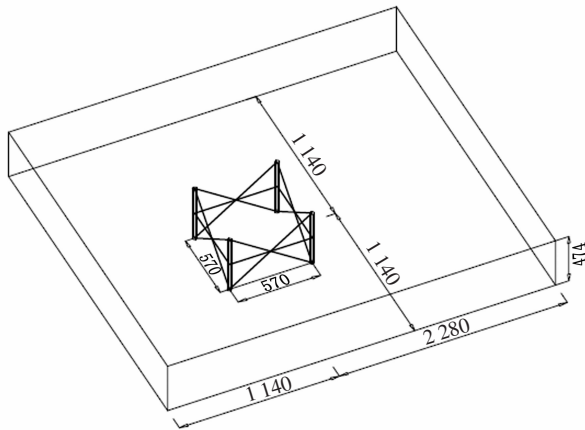


图1 计算模型

Fig.1 Numerical model

为在满足阻塞比的情况下,尽可能地减少计算网格数,因此以节段模型底面中心为原点,计算域上下两侧各取 $20D$,来流方向取 $20D$,出流方向上为保证尾流的充分发展取为 $40D$.由于横杆、斜杆和主材(竖杆)之间交叉接触的地方夹角较小,且三者又是不同直径的圆截面杆件相交,要实现外流场结构化网格的划分十分困难.另一方面,即使采用结构化网格也无法保证足够高的网格质量,且可能存在网格分布方向与流体流向不一致时产生的伪耗散,故核心区域的网格采用的是非结构化网格,而核心区外的网格则采用的是结构化网格.为了保证计算结果的精度,通过加密核心区近壁面处的网格并增设棱柱型边界层网格,来保证近壁面第一层网格 $y^+ \leq 1$,从而确保取得误差较小精度较高的计算结果.计算域网格划分如图2所示:

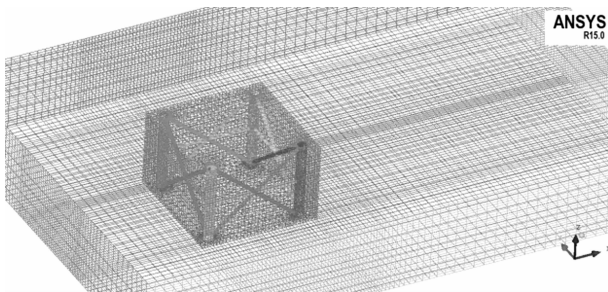


图2 计算模型的网格划分

Fig.2 Mesh scheme of numerical model

为了准确模拟来流风场的脉动风速谱特性,采用 Huang 等提出的 Discretizing and Synthetic Random Flow Field Generation method (简称 DSRFG)方

法生成满足卡门谱的入口湍流.该方法基于严格的理论推导,能产生满足任意形式功率谱及各向异性的湍流脉动风速场,可调空间关联性、通用性,能够严格满足流体连续性条件,从而保证了大涡模拟计算的稳定性,易于并行化处理^[16-17].模型前方的脉动风速谱如图3所示,结果表明 DSRFG 生成的脉动风速谱和目标卡门谱吻合良好,准确地再现了风洞试验的来流脉动风速谱特性.

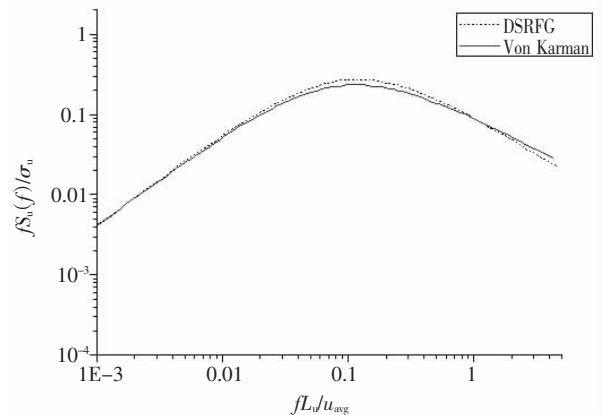


图3 LES中的顺风向来流风速谱与目标谱对比

Fig.3 Comparison between velocity power spectrum of the LES in the along-wind direction and von Karman model

1.2 计算工况

将竖直节段模型在光滑均匀流作用下(无湍流)的数值模拟结果与风洞试验结果进行对比分析.同时还对同风速下,湍流度分别为5%、10%、15%和20%的工况进行模拟计算,讨论研究湍流度对圆管截面格构式塔架三分力系数的影响,详细计算工况如表1所示.

表1 CFD 计算工况

Tab.1 CFD cases

工况编号	风向角/(°)	风速/(m·s ⁻¹)	湍流度/%
ZJD1-1	0	18.4	0
ZJD1-1a	0	18.4	5
ZJD1-1b	0	18.4	10
ZJD1-1c	0	18.4	15
ZJD1-1d	0	18.4	20

截断模型由4根竖杆(主管),8根斜杆以及4根横杆组成.由于各个杆件的截面尺寸不相同,故各个杆件在同一工况中的雷诺数也相互不同,各杆的雷诺数具体情况如表2所示.

表 2 模型各杆件的雷诺数

Tab.2 Reynolds numbers of each member of the model

杆件	流体密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	动力粘度/ ($10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$)	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	直径/ mm	雷诺数/ $\times 10^4$
竖杆	1.225	1.79	18.4	57	7.17
横杆	1.225	1.79	18.4	17	2.14
斜杆	1.225	1.79	18.4	20	2.52

2 计算结果及分析

2.1 数值模拟与试验结果比较

CFD 计算结果与文献[11]中风洞试验三分力的对比如表 3 所示。

表 3 计算结果与风洞试验值对比

Tab.3 Comparison results between numerical simulations and experimental measurements

工况 编号	阻力系数 C_D		升力系数 C_L		扭转系数 C_M	
	CFD	试验值	CFD	试验值	CFD	试验值
ZJD1-1	1.479	1.632	-0.034	0.202	-0.018	-0.024
ZJD1-1a	1.473	—	-0.027	—	-0.005	—
ZJD1-1b	1.486	—	-0.030	—	-0.005	—
ZJD1-1c	1.499	—	-0.003	—	-0.013	—
ZJD1-1d	1.511	—	-0.012	—	-0.018	—

从表 3 中可以看出, 竖直节段模型的三分力系数与试验值存在一定的差异, 其中阻力系数 C_D 与试验值的误差为 9.4%, 升力系数 C_L 和扭转系数 C_M 均小于试验值. 分析造成二者误差的原因, 有以下几点:

1) 试验模型在辅材相交的部分采用了方形钢夹片进行连接固定, 使得迎风面积略有增加, 经计算会造成约 3% 的误差;

2) 一方面, 试验模型由于加工制作的关系, 所有杆件尺寸不可能做到与设计完全一致, 连接固定的地方也不可能完全严丝密缝且完全刚接, 而数值模型却是完全一致且在几何上完全对称的; 另一方面, 风洞试验时模型的迎风角度不可能完全准确, 可能出现较小的偏角. 这两方面的原因都会造成试验结果的升力系数 C_L 和扭转系数 C_M 比数值模拟偏大一些.

CFD 计算结果与各国规范^[18-24]的对比如图 4 所示.

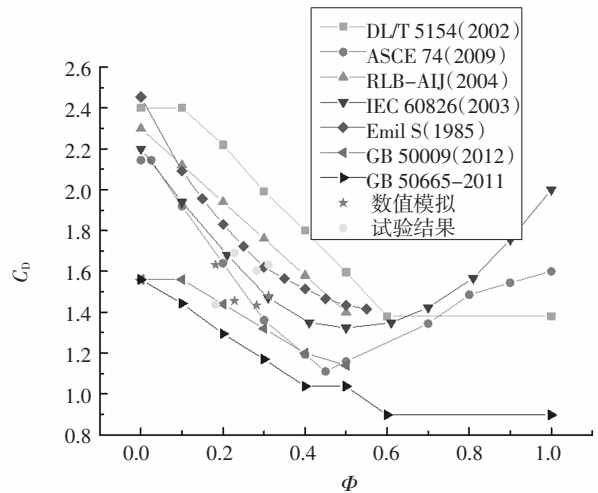


图 4 计算结果与各国规范及试验的对比

Fig.4 Comparison between numerical simulations and available codes or standards of different countries

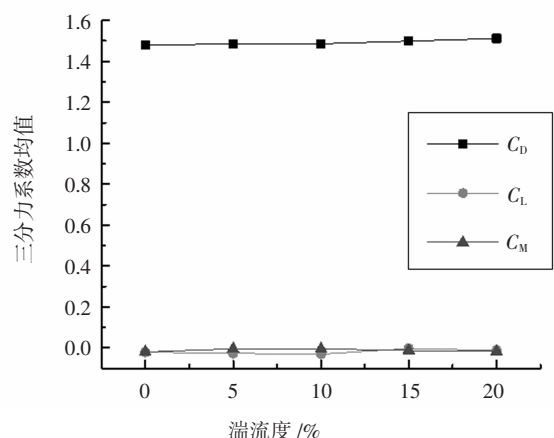
其中密实比的定义如下:

$$\Phi = \frac{\text{迎风面投影面积}}{\text{外轮廓面积}}$$

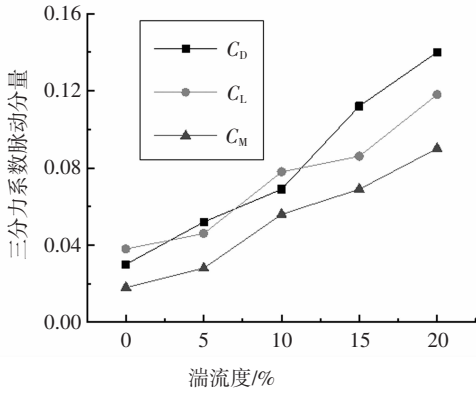
按照上述公式得出试验模型的 Φ 为 0.314. 图 4 中与 CFD 计算结果对比的规范值, 取的是 0° 风向角下方形塔架体型系数与密实比 Φ 的关系曲线, 从图中能够看出, 本文的计算结果与规范 IEC60826 给定值最为接近.

2.2 湍流度对三分力系数的影响

图 5(a)(b) 给出了模型的三分力系数随来流湍流度增加的变化情况, 从图中可以看出, 湍流度的变化对模型三分力系数均值的影响较小. 湍流度的增大对模型三分力系数的脉动分量影响较大, 湍流度的增大会导致模型三分力系数的脉动分量随之变大, 脉动幅值增大.



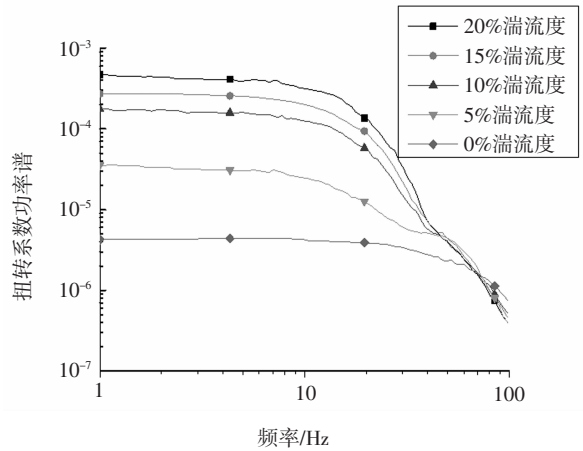
(a) 来流湍流度对三分力系数均值的影响



(b)来流湍流度对三分力系数脉动分量的影响

图5 来流湍流度对三分力系数均值及脉动分量的影响

Fig.5 Effects of incoming flow turbulent intensity on the mean and fluctuating aerodynamic force coefficients



(c)不同湍流度下扭转系数功率谱

图6 不同湍流度下三分力功率谱

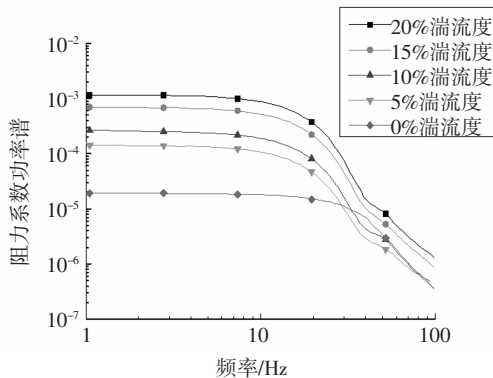
Fig.6 Power spectra of aerodynamic forces under flow conditions with different incoming turbulence intensities

图6给出了不同来流湍流度情况下模型三分力系数的功率谱,通过频谱上的分析能够更清楚地看到,三个方向的气动力功率谱随着频率的增大先缓慢减小最后急剧减小,并且随着湍流度的增加,在低频部分结构三分力系数的脉动幅值逐渐增大。

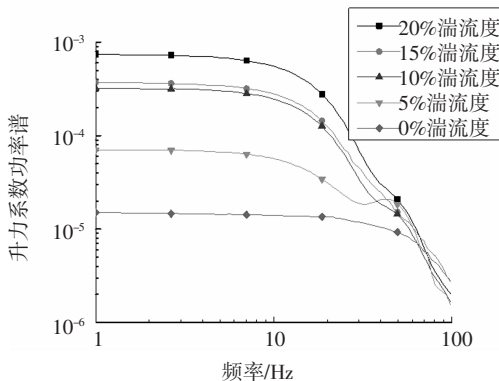
将三分力功率谱 $S_i^*(f)$ 按如下表达式进行归一化处理,结果如图6所示。

$$S_i^*(f) = \frac{fS_i(f)}{\sigma_i^2} \quad (1)$$

式(1)中, $S_i(f)$ 为模型基底的荷载功率谱; U 为来流风速; σ_i 为模型基底荷载脉动值。

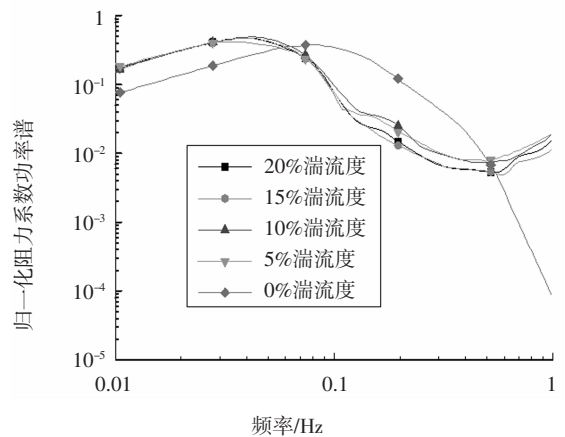


(a)不同湍流度下阻力系数功率谱

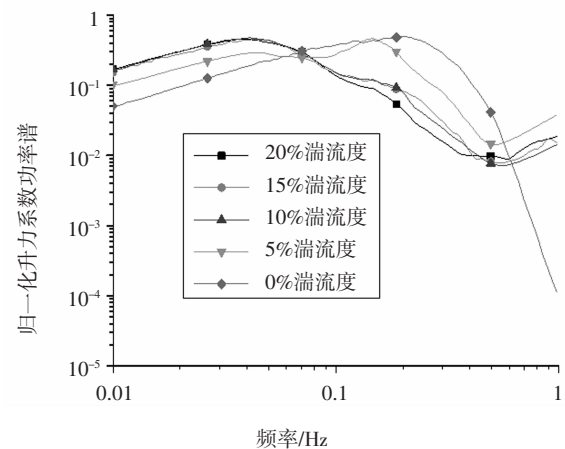


(b)不同湍流度下升力系数功率谱

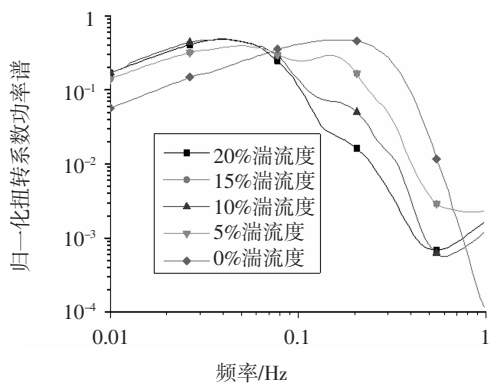
图7表明,随着湍流度的增加,功率谱峰值及其对应卓越频率逐渐前移,且湍流度对阻力谱高频部分影响显著。



(a)不同湍流度下归一化阻力系数功率谱



(b)不同湍流度下归一化升力系数功率谱



(c)不同湍流度下归一化扭转系数功率谱

图 7 不同湍流度下归一化三分力功率密度谱

Fig.7 Normalized power spectra of aerodynamic forces under flow conditions with different incoming turbulence intensities

2.3 压力分布云图

图 8 分别给出了模型迎风面和背风面的风压系数分布云图.从图中可以看出,节段模型的迎风面受正压,侧面和背面受负压.其中,结构所受最大正风压系数约为 1.0,出现在迎风面的两根主管正面和辅材相交的连接处,因为这两个局部的相对过流截面较小,来流会在这两个地方产生较大的风压.而由于上游主管和辅材的遮挡效应,可以明显地看出下游杆件迎风面的正风压分布是小于上游杆件的.

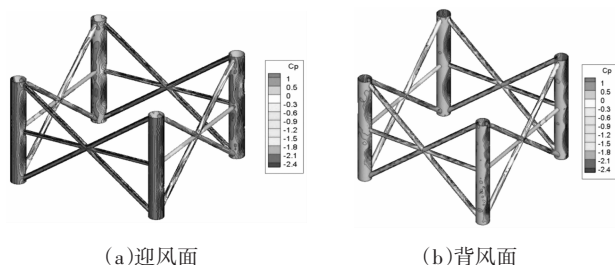


图 8 模型压力系数等值线图

Fig.8 Contours of pressure coefficients

结构所受的最大负压出现在主管的侧面,从图 8(b)中可以较清楚地看出,斜杆和水平横杆对负压的分布是有影响的,在主管无辅材的一侧,负压分布呈长条形,而在有辅材的一侧,负压分布呈椭圆形,在辅材的位置处负压变小回收,表明流体的再附点提前了.就背风面而言,主管和辅材上的压力分布并不十分规整,这是由于主管和侧面斜杆的间距是不断变化的,互相会对彼此的尾流涡脱产生影响,导致其压力分布的不均匀性.

2.4 流场结构分析

在流场结构的分析中,涡量反映了旋涡的能量

强度和方向,描述了速度矢量场的特性,因此涡量图较速度分布云图能够更直观地表达结构的涡脱特征,给出更多的流场结构信息,因此,可以通过涡量图的分析来描述节段模型的流场结构特征.

图 9 分别给出了模型在三个方向的涡量图,可以清楚地看到流体在流经结构杆件时的附着和分离,并形成随机脱落的旋涡.结果表明 x 向的涡量离散程度更高, y 和 z 向上涡量相对连续性更高一些.

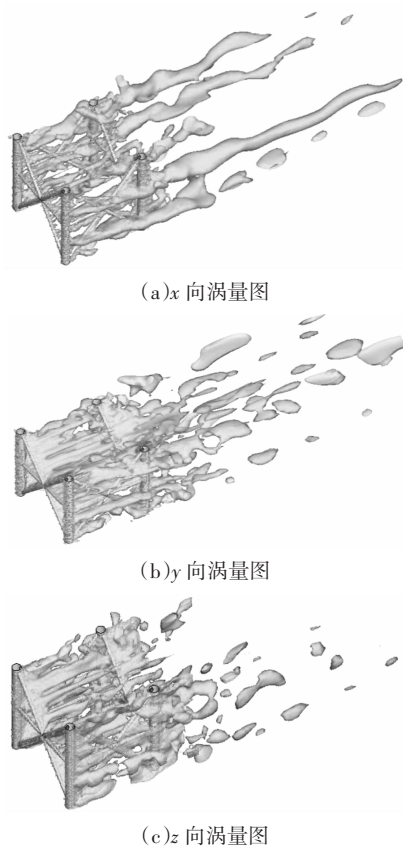


图 9 三维涡量图

Fig.9 Three-dimensional vorticity in the vicinity of lattice towers

3 结论

采用大涡模拟方法对圆管截面格构式塔架节段模型进行了数值模拟计算,同时为了研究来流湍流度对结构三分力系数的影响,对湍流度分别为 5%、10%、15%和 20%时的工况进行分析.通过数值模拟的手段,对结构的风压分布、流场结构进行了更细致的研究,经过对比分析得到了以下的结论:

1)采用大涡模拟方法对格构式塔架节段模型进行数值模拟,能够得到较为满意的计算结果,与风洞的试验值对比,阻力系数 C_D 的误差能够控制在 10%以内,并与规范 IEC60826 给定值最为接近,数

值模拟计算的升力系数 C_L 和扭转系数 C_M 均略小于试验值。

2) 来流湍流度的增加,对模型三分力系数的均值基本没有影响,但脉动分量会随之增加,即脉动幅值变大.同时,随着湍流度的增加,三分力系数功率谱峰值对应的卓越频率逐渐前移,且湍流度对功率谱高频部分影响显著。

3) 通过对节段模型的压力分布的分析发现,最大正压出现在迎风面的主管正面和辅材相交节点的正面,最大负压出现在主管的侧面。

4) 通过涡量图对节段模型流场结构的分析发现, x 向的涡量离散程度更高, y 和 z 向上涡量相对连续性更高一些。

参考文献

- [1] PARK J H, MOON B W, MIN K W, *et al.* Cyclic loading test of friction-type reinforcing members upgrading wind-resistant performance of transmission towers [J]. *Engineering Structures*, 2007, 29(11):3185—3196.
- [2] 梁枢果, 邹良浩, 赵林, 等. 格构式塔架动力风荷载解析模型[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(2):166—171.
LIANG S G, ZOU L H, ZHAO L, *et al.* Analytical model of dynamic wind loads on lattice towers [J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2008, 36(2):166—171. (In Chinese)
- [3] HOLMES J D. Along-wind responses of lattice tower: part I—derivation of expressions for gust response factors [J]. *Engineering Structures*, 1994, 6(4):287—292.
- [4] HOLMES J D. Along-wind responses of lattice tower—II. aerodynamic damping and deflections [J]. *Engineering Structures*, 1996, 18(7):483—488.
- [5] HOLMES J D. Along-wind responses of lattice tower—III. effective load distributions [J]. *Engineering Structures*, 1996, 18(7):489—494.
- [6] BAYAR D C. Drag coefficients of latticed towers [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1986, 112(2):417—430.
- [7] CELIO F C J, ISYUMOV N, BRASIL R M L R F. Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(8):1007—1022.
- [8] ZOU L H, LIANG S G, LI Q S, *et al.* Investigation of 3-D dynamic wind loads on lattice towers [J]. *Wind and Structures*, 2008, 11(4):323—340.
- [9] 楼文娟, 孙炳楠, 叶尹. 高耸塔架横风向动力风效应[J]. *土木工程学报*, 1999, 32(6):67—71.
LOU W J, SUN B N, YE Y. Across-wind dynamic response of tall latticed towers [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1999, 32(6):67—71. (In Chinese)
- [10] 程志军, 付国宏, 楼文娟. 高耸格构式塔架风荷载试验研究[J]. *实验力学*, 2000, 15(1):51—55.
CHENG Z J, FU G H, LOU W J. Research for the wind force on high-rise latticed tower [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2000, 15(1):51—55. (In Chinese)
- [11] 谢华平, 何敏娟. 格构塔数值风洞基础研究[J]. *结构工程师*, 2009, 25(3):102—106.
XIE H P, HE M J. Fundamental research on numerical wind tunnel for lattice towers [J]. *Structural Engineers*, 2009, 25(3):102—106. (In Chinese)
- [12] 周志勇, 陈艾荣, 曾勇, 等. 河南电视塔体型系数 CFD 数值模拟及随机风响应数值分析(I)[J]. *特种结构*, 2006, 23(3):5—8.
ZHOU Z Y, CHEN A R, ZENG Y, *et al.* Numerical simulation of shape coefficient by CFD and numerical analysis of random wind vibration response of Henan TV tower [J]. *Special Structures*, 2006, 23(3):5—8. (In Chinese)
- [13] 李正良, 晏致涛. 苏通大跨越刚性模型实验报告[R]. 重庆: 重庆大学土木工程学院, 2016:28—30.
LI Z L, YAN Z T. Experiment report of Sutong large span rigid mode [R]. Chongqing: School of Civil Engineering, Chongqing University, 2016:28—30. (In Chinese)
- [14] BREUER M. Large eddy simulation of the subcritical flow past a circular cylinder: numerical and modeling aspects [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1998, 28(9):1281—1302.
- [15] KRAVCHENKO A G, MOIN P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re_D=3900$ [J]. *Physics of Fluids*, 2000, 12(2):403—417.
- [16] HUANG S H, LI Q S, WU J R. A general inflow turbulence generator for large eddy simulation [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(10/11):600—617.
- [17] YAN B W, LI Q S, HE Y, *et al.* Inflow turbulence generation methods with large eddy simulation for wind effects on tall buildings [J]. *Computers & Fluids*, 2015, 116:158—175.
- [18] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012:48—51.
GB 50009—2012 Load code for the design of building structure [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012:48—51. (In Chinese)
- [19] ASCE-74 Guidelines for electrical transmission line structural loading [S]. New York: American Society of Civil Engineers, 2009:35—37.
- [20] AI J. Recommendations for loads on buildings [M]. Tokyo: Architectural Institute of Japan, 2004:170—172.
- [21] IEC60826 Design criteria of overhead transmission lines [M]. Geneva: International Electrical Commission, 2003:54—62.
- [22] DL/T 5154—2002 架空送电线路杆塔结构设计技术规定 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2002:18—19.
DL/T 5154—2002 Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002:18—19. (In Chinese)
- [23] SIMIU E, SCANLAN R H. 风对结构的作用: 风工程导论 [M]. 刘尚培, 译. 上海: 同济大学出版社, 1992:303—304.
SIMIU E, SCANLAN R H. Wind effect on structure [M]. LIU S P, translated. Shanghai: Tongji University Press, 1992:303—304. (In Chinese)
- [24] GB 50665—2011 1 000 kV 架空输电线路设计规范 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2002:27—29.
GB 50665—2011 Code for design of 1 000 kV overhead transmission lines [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002:27—29. (In Chinese)