

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2022.06.009

文章编号:1672-3767(2022)06-0083-12

输电塔塔型对气象监测塔影干扰效应影响分析

李丹煜¹, 刘 彬¹, 吴昊恺², 徐万海², 王恩浩², 李明鑫²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

2. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:为了揭示输电塔的塔型对气象监测的塔影干扰效应,分别建立了双回路直线/耐张两用塔、单回路猫头塔与圆管塔 3 种不同塔型输电塔的计算流体动力学模型。运用切割体网格技术对计算域进行了网格划分,采用 Realizable $k-\epsilon$ 模型,结合雷诺平均 Navier-Stokes 方程模拟输电塔周围的流场,探究各截面风速变化较小的区域,对比得出塔影干扰效应最小的截面。结果表明:对于所研究的 3 种塔型的输电塔,塔影干扰效应较弱的位置一般出现在塔腿或塔身横隔面的迎风侧杆件附近,为获取准确的风速数据,可将风速监测装置安装在相应的位置。

关键词:输电塔;塔影效应;塔型;计算流体动力学

中图分类号:TU347;O351

文献标志码:A

Towershadow effect of different transmission towers on meteorological monitoring

LI Danyu¹, LIU Bin¹, WU Haokai², XU Wanhai², WANG Enhao², LI Mingliu²

(1.China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To reveal the tower shadow effect of different typical tower types, computational fluid dynamics (CFD) models were established for three different typical tower types, including double circuit linear/tensioning tower, single circuit cat head tower and circular tube tower. The trimmed mesh technique was adopted to discretize the computational domain. The wind field around the transmission tower was simulated by solving the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and adopting the Realizable $k-\epsilon$ turbulence model. The regions with the smallest variations in wind velocity and the cross-sections with the weakest tower shadow effect for different tower types were studied. The results show that the tower shadow effect becomes weaker near the structural members on the windward side of the tower leg and tower body for the three tower types. To obtain more accurate wind velocity data, the monitoring device can be installed in the corresponding positions.

Key words: transmission tower; tower shadow effect; tower type; computational fluid dynamics(CFD)

随着输电线路规模的日益扩大,输电塔逐渐向高塔身方向发展,使结构更易遭受台风、龙卷风等自然灾害的侵袭。当风吹过输电塔时,由于塔架的阻滞作用,会产生塔影干扰效应,塔架周围风矢量的方向和大小会发生变化。尤其在高速、高湍流度的条件下,风场更容易受到塔架结构的干扰。因此,研究较高风速下输电塔的塔影干扰效应,对确保结构安全、提高气象监测的准确性具有重要的工程意义。

现场实测是最直接的研究方法,然而实测耗时耗力,相关研究较为有限。国内外学者对登陆台风风场进行过一系列实测^[1-6]。英国国家海运研究所测量了锐边杆件正方形塔架的风荷载^[7]。何宏明等^[8]实测分析

收稿日期:2021-08-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51678548)

作者简介:李丹煜(1988—),女,辽宁本溪人,工程师,博士,主要从事电网风工程研究工作。E-mail:lidanyu@bjtu.edu.cn

徐万海(1981—),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,博士生导师,主要从事流-固耦合动力学的工作,本文通信作者。

E-mail:xuwanhai@tju.edu.cn

了台风经过期间,塔身所处位置的风场特性及其动力响应特征。

风洞试验是当前国家标准和规范中相关参数选取的重要依据。Watakabe等^[9]分别采用现场测量和风洞试验对一塔状结构物的风压进行对比研究,发现风洞试验得到的平均风压系数与现场实测结果接近。Celio等^[10]对通讯塔进行风洞试验,并将结果和规范进行对比分析。邹良浩等^[11]测量了输电塔的基底弯矩、基底剪力时程,确定了输电塔在不同风向角时的风载体型系数。刘石等^[12]研制了输电塔气动弹性试验模型,较好地再现了输电塔体系在极限风荷载下的倒塌破坏情况。陈建稳等^[13]利用不同数值模型研究了风载、冰雪载荷、地震载荷和导线及铁塔自重载荷作用下输电塔的内力和变形情况。

近年来,计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)技术在实际工程中的应用越来越广泛,相对于实测和风洞试验,在速度、便捷性和经济性方面具有明显优势。徐旭等^[14]建立了高耸钢塔结构的三维有限元模型,研究该结构在台风作用下的动力时程响应。党会学等^[15]运用CFD方法对三角形格构式塔体结构挡风特征进行分析,发现国内相关规范中最大体型系数偏低。肖凯等^[16]提出一种以无量纲风速比为输出的数值计算方法。王勇等^[17]利用单向流-固耦合法,计算了结构表面受到的龙卷风风压,并进行了有限元分析。杨莉等^[18]对极端风况下的风力机组建模,基于FLUENT研究了极端风向变化情况下,塔影效应对风力机下游尾迹特性的影响。

本研究建立典型塔型输电塔的计算流体动力学仿真模型,在高速强风条件下,对双回路直线/耐张两用塔、猫头塔与钢管塔3种输电塔的风场开展数值模拟研究,以确定受塔影干扰效应影响最弱的横截面。研究成果可为架空输电线路输电塔的风场气象监测提供必要的理论依据和技术支持。

1 模型的建立

1.1 几何模型

选取双回路直线/耐张两用塔(5C3-SZCK)、单回路猫头塔(5A1-5B1-ZM1)与钢管塔(55GT1-SSJ1)3种输电塔型作为研究对象,参照国家电网标准图册建立输电塔几何模型。定义顺流方向为 z 向(或 i 方向),垂直流速方向为 x 向(或 j 方向),沿塔高方向为 y 向(或 k 方向),流体域如图1(a)所示。以双回路直线塔为例,固定风向角 $\alpha=90^\circ$,流体域的顺流方向长度设为100 m,横流方向宽度设为60 m,高度设为90 m。塔架底座中心点位于流体域入口边界下游20 m,距离流体域两侧边界均为30 m处。根据输电塔型号的不同,所设流体域会存在差异。图1(b)~1(d)分别为双回路直线/耐张两用塔、猫头塔以及钢管塔的主视图,图中标记了输电塔型的各个截面,不同塔型的截面数量及分布均存在一定差异。

1.2 网格划分

由于输电塔架外形较为复杂,选择混合型网格的生成方法,采用切割体网格对流体域进行空间离散。以 90° 风向角为例,利用表面包面技术、表面重构技术、切割体网格技术划分的网格切片图如图2所示。采用自适应网格方法,由于只关注输电塔附近的流场,因此仅需对塔架周围的方形区域进行网格加密,以此提高求解的精度。地面附近的流场变量梯度变化较大,为准确捕捉杆件周围较强的流动分离现象,同时节省计算资源,设置三层棱柱层网格,运用Two-Layer全 y^+ 壁面处理方法,距离壁面最近的第一层网格高度满足 $y^+=300$ ($\Delta y=0.0057$ m),以模拟壁面附近的湍流边界层。在网格划分前,将塔身表面的网格目标尺寸设为0.035 m,塔身周围网格目标尺寸为1.5 m,外围流场网格目标尺寸设为8 m,而后进行网格自动划分。体网格生成后,进行光滑处理,对畸变率较大的网格进行重新划分或调整,确保棱柱层外大部分区域为计算性能较好的六面体网格,提高整体网格的质量。网格划分过程采用并行的方式,使用多个核心加速网格的生成。

1.3 网格无关性验证

开展系统研究之前,首先对3种不同塔型输电塔的计算网格开展无关性验证,以确保进一步加密网格对数值模拟结果的影响较小。对于每种输电塔,分别生成3套网格,其中M1网格较为稀疏,M2为中等密度的网格,M3的网格密度最高。利用不同的网格对均匀来流流速为50 m/s、风向角为 90° 的工况进行模拟,并选取具有代表性的截面外缘杆件附近的风速进行对比。表1~3为不同网格计算结果的对比。对比可见,对于

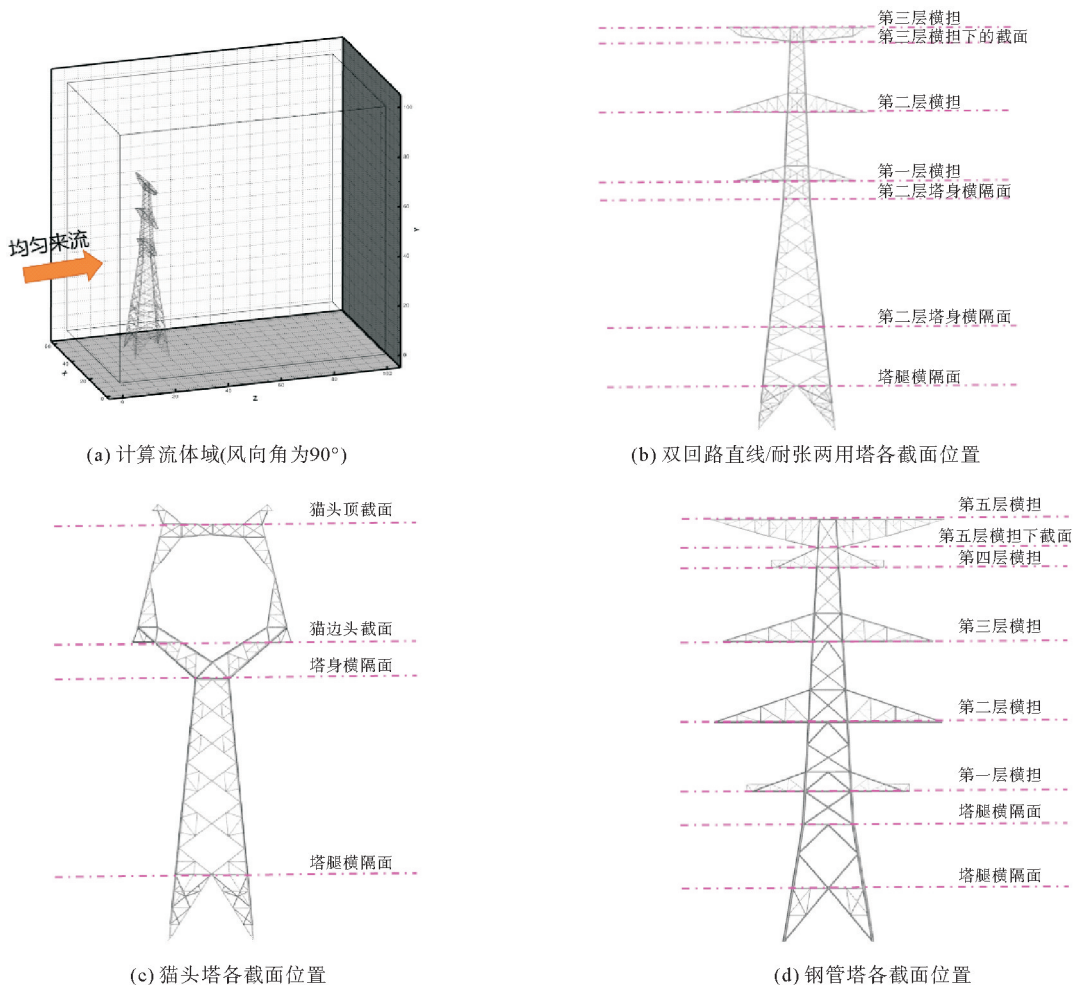


图 1 输电塔绕流计算域及各截面划分

Fig. 1 Computational domain and different cross sections of three types of transmission towers

所考虑的 3 种不同塔型的输电塔, M1 与 M2 之间的最大误差为 10%, 随着网格的细化, M2 与 M3 之间的最大误差不超过 3%。综合平衡计算精度与计算时间, 3 种塔型均选用相应的 M2 网格进行后续数值模拟研究。

2 湍流模型的选取

输电塔周围流场采用三维非定常雷诺平均 Navier-Stokes 方程模拟。运用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型^[19]对 Navier-Stokes 方程中的雷诺应力项进行封闭。与 Jones 等^[20]提出的标准 $k-\epsilon$ 模型不同, Realizable $k-\epsilon$ 模型包含了湍流黏度的变换方程, 极大地提高了壁面附近低雷诺数区域的湍流模拟精度。该模型控制方程:

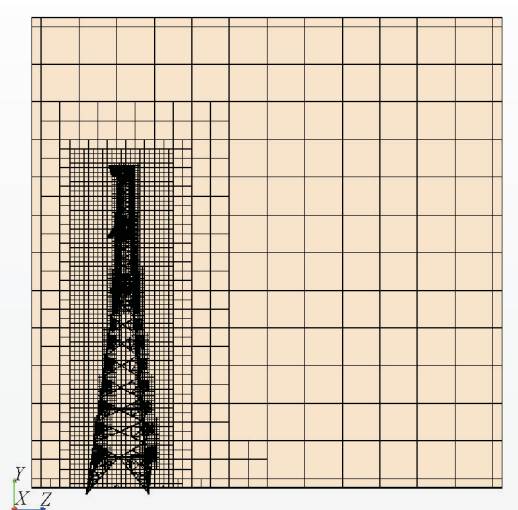


图 2 输电塔周围切割体网格切片图

Fig. 2 Slice of the trimmed mesh around the transmission tower

表1 双回路直线/耐张两用塔不同网格风速计算结果对比

Tab. 1 Comparison of wind speed results from different mesh systems for double circuit linear/tensioning tower

网格编号	网格单元数量	塔腿横隔面 $V_i/(m \cdot s^{-1})$	塔腿横隔面 $V_j/(m \cdot s^{-1})$	第一层横担 $V_i/(m \cdot s^{-1})$	第一层横担 $V_j/(m \cdot s^{-1})$	第三层横担 $V_i/(m \cdot s^{-1})$	第三层横担 $V_j/(m \cdot s^{-1})$
M1	5 409 825	50.710 4	0.003 5	42.158 1	0.011 2	52.406 9	0.064 3
M2	7 651 356	50.041 8	0.003 3	41.923 4	0.010 6	49.731 4	0.065 0
M3	10 820 299	49.747 2	0.003 2	41.087 0	0.010 9	50.087 7	0.064 2

表2 单回路猫头塔不同网格风速计算结果对比

Tab. 2 Comparison of wind speed results from different mesh systems for single circuit cat head tower

网格编号	网格单元数量	塔腿横隔面 $V_i/(m \cdot s^{-1})$	塔腿横隔面 $V_j/(m \cdot s^{-1})$	猫头边截面 $V_i/(m \cdot s^{-1})$	猫头边截面 $V_j/(m \cdot s^{-1})$	猫头顶截面 $V_i/(m \cdot s^{-1})$	猫头顶截面 $V_j/(m \cdot s^{-1})$
M1	2 747 890	51.576 8	0.072 4	49.499 3	0.004 4	45.689 0	-0.962 9
M2	3 885 963	49.816 9	0.068 7	50.016 5	0.004 0	42.450 3	-1.053 2
M3	5 496 581	50.337 8	0.070 5	50.616 9	0.004 1	42.566 7	-1.044 0

表3 钢管塔不同网格风速计算结果对比

Tab. 3 Comparison of wind speed results from different mesh systems for circular tube tower

网格编号	网格单元数量	塔腿横隔面 $V_i/(m \cdot s^{-1})$	塔腿横隔面 $V_j/(m \cdot s^{-1})$	第一层横担 $V_i/(m \cdot s^{-1})$	第一层横担 $V_j/(m \cdot s^{-1})$	第三层横担 $V_i/(m \cdot s^{-1})$	第三层横担 $V_j/(m \cdot s^{-1})$
M1	5 851 891	45.653 1	0.006 0	44.546 4	0.209 5	50.820 3	-0.356 1
M2	8 276 249	49.851 1	0.006 1	49.650 0	0.194 4	50.442 5	-0.324 5
M3	11 704 710	50.773 3	0.006 3	50.015 5	0.190 8	50.433 4	-0.328 4

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} P_b + S_\epsilon. \quad (2)$$

式中： ρ 为流体密度， t 为时间， k 为湍流动能， x_i, x_j 表示笛卡尔坐标， u_i 为 x_i 方向的速度分量， μ 为流体动力黏度， μ_t 为湍流黏度， ϵ 为湍动能耗散率， P_k 和 P_b 分别表示由平均速度梯度和浮力产生的湍动能， $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别为 k 方程和 ϵ 方程的普朗特数， ν 为流体速度， Y_M 代表可压缩湍流中的脉动膨胀对整体耗散率的贡献度， S_k 与 S_ϵ 为自定义源项， $C_1, C_2, C_{1\epsilon}$ 与 $C_{3\epsilon}$ 为常数。

与平常的良态风相比，极端强风的风速剖面垂直方向速度梯度较小，湍流强度较大^[8]，因此本研究的强来流风可近似看作均匀流。流场入口边界采用速度入口，即 $u_1 = 50 \text{ m/s}$ ， $u_2 = 0$ ， $u_3 = 0$ ，均匀来流对应着15级强台风风速；流场出口边界设置为压力出口，即 $\partial u_1 / \partial x = 0$ ， $\partial u_2 / \partial x = 0$ ， $\partial u_3 / \partial x = 0$ ， $p_{ref} = 0$ ；输电塔的表面采用无滑移边界，即 $u_1 = u_2 = u_3 = 0$ ；地面和上边界($\partial u_1 / \partial z = 0$ ， $\partial u_2 / \partial z = 0$ ， $u_3 = 0$)及两侧边界($\partial u_1 / \partial y = 0$ ， $u_2 = 0$ ， $\partial u_3 / \partial y = 0$)设置为自由滑移边界。风场的空气密度为 $1.181 45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，动力黏度为 $1.855 08 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ，湍流强度为20%。

3 结果分析

3.1 双回路直线/耐张两用塔

本部分主要讨论高速、高湍流度的强风条件下，不同塔型输电塔各截面的塔影干扰效应，固定风向角 $\alpha = 90^\circ$ 。在数值模拟中对残差、输电塔的整体受力情况及不同截面监测点的风速变化进行监控，当残差降低

至设置的最低水平,输电塔整体受力及不同截面监测点的风速变化达到稳定状态后,再对结果进行分析。首先通过风速云图,定性分析初始风向及风速受干扰较低的截面区域。双回路直线/耐张两用塔的塔腿横隔面、塔身横隔面和各层横担周围的二维时间平均风速场分量剖面图如图 3~4 所示。

从图 3 可发现,塔腿与各层塔身横隔面迎风侧杆件附近的风速变化较小。对于第一层横担,在迎风侧杆件上游一定范围内,顺流方向风速仍较接近 50 m/s。上述三个横隔面上,迎风侧杆件及其前沿大部分区域的横流方向风速均很低。随着截面高度的提升,在横流方向的高风速区域面积逐渐扩大,尤其在背风侧杆件处,风向受到的影响将愈发显著。

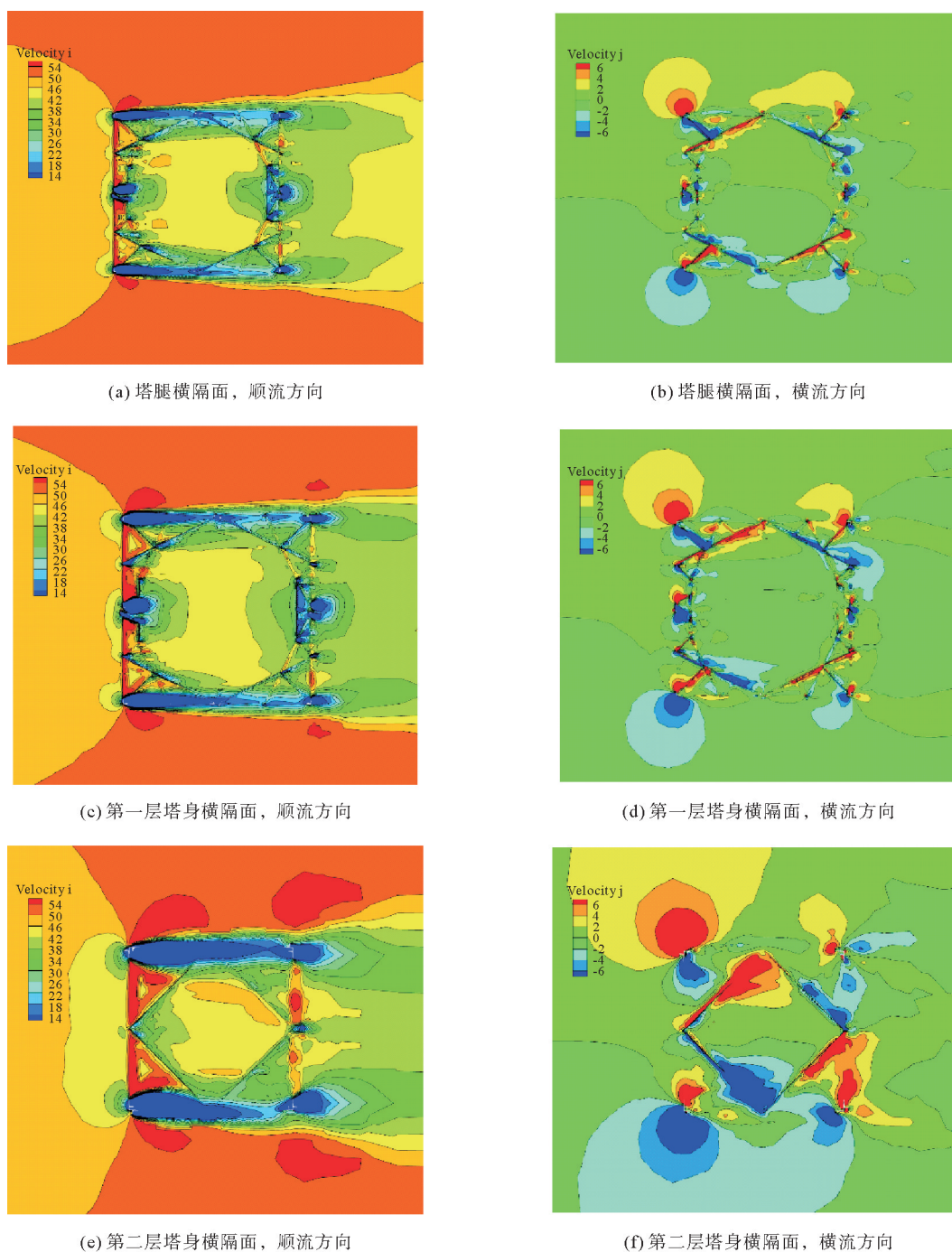


图 3 双回路直线/耐张两用塔的塔腿与塔身横隔面风速分布

Fig. 3 Wind velocity contours for the tower leg and tower body cross sections of double circuit linear/tensioning tower

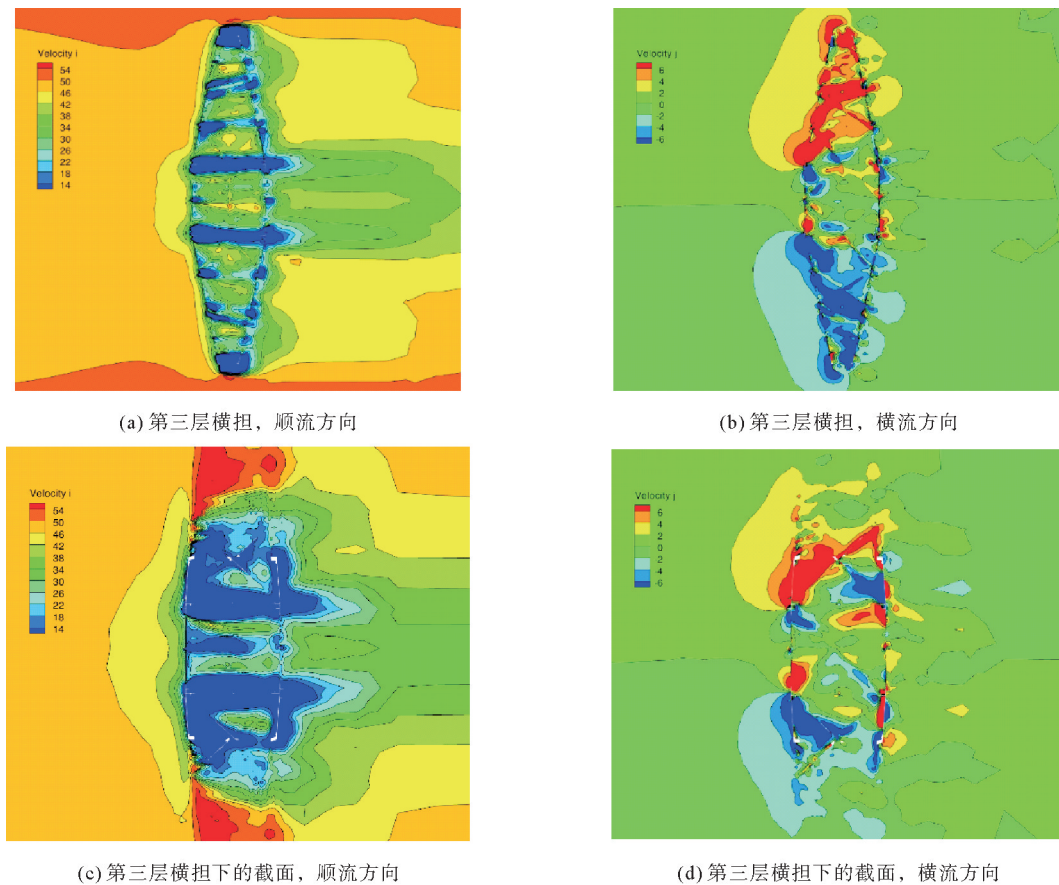


图 4 双回路直线/耐张两用塔第三层横担及其相邻截面的风速分布

Fig. 4 Wind velocity contours for the cross section of the third set of the cross arm and its adjacent section of double circuit linear/tensioning tower

在塔架的横担及其相邻高度的截面上,塔架结构对初始风场的干扰程度增强。由图 4 可知,顺流方向风速远低于 50 m/s 的区域明显扩大并基本覆盖了横担外围杆件。同时顺流方向风速分层较为密集,表明风速变化较为敏感。在中心平台迎风侧外缘,各横担均形成较集中的低横流方向风速区域,而在中心平台两侧的外伸部分,高横流方向风速的影响程度有所加强。

如图 4 所示,对于第四层横担面之下的平面,其迎风侧杆件附近的顺流方向风速普遍低于初始风速。同一侧杆件上,低横流方向风速涵盖的范围较大。因此与塔腿、塔身横隔面类似,该截面迎风侧上的风向受到影响同样很小,但风速显著下降。

针对不同的截面,在外缘杆件及其外侧 0~30 cm 的范围进行风速定量监测,监测点在顺流方向风速大小受影响较低。塔腿、塔身横隔面以及第三层横担之下截面的监测点选取在迎风侧杆件附近;而各层横担面的监测点选择在中心平台迎风侧杆件附近。表 4 中列出了测点处各风速分量的大小、二维风速及其相对初始风向的夹角、三维风速以及监测点相对于基底中心点的坐标。可以发现,对于双回路直线塔,其塔腿横隔面、两层塔身横隔面以及第三层横担的迎风侧风速相对于初始风速的差距较小,结合风速剖面图,风向受影响的范围与程度均很小,表明初始风场受塔架结构的影响较小。但第三层横担的三维风速明显偏高。其余各横担处二维风速均显著低于初始风速,塔影干扰较大。综合以上结果,塔腿与塔身横隔面迎风侧杆件附近的风速监测效果较佳。

表 4 双回路直线/耐张两用塔各截面外缘杆件附近的风速监测数据

Tab. 4 Wind velocity monitoring data near the outer bars of each cross section of double circuit linear/tensioning tower

截面	$V_i/(m \cdot s^{-1})$	$V_j/(m \cdot s^{-1})$	二维风速 $/(m \cdot s^{-1})$	三维风速 $/(m \cdot s^{-1})$	测点位置 (以塔底座中心为原点)
塔腿横隔面	50.041 8	0.003 3	50.041 8	51.425 4	(-2.005 6, 7.578 0, -5.672 5)
第一层塔身横隔面	49.954 7	0.017 4	49.954 7	51.024 2	(1.618 2, 17.312 0, -4.641 7)
第二层塔身横隔面	49.288 4	0.162 3	49.288 7	50.635 7	(0.714 8, 39.065 0, -2.227 7)
第一层横担	41.923 4	0.010 6	41.923 4	41.952 9	(0.396 4, 42.137 0, -2.319 0)
第二层横担	40.244 4	0.037 4	40.244 4	40.334 5	(0.335 7, 53.626 0, -1.826 9)
第三层横担下的截面	38.580 5	-0.022 7	38.580 5	38.705 8	(0.189 9, 65.528 0, -1.325 6)
第三层横担	49.731 4	0.065 0	49.731 4	57.957 5	(0.010 5, 67.841 0, -1.043 8)

3.2 单回路猫头塔

单回路猫头塔中的塔腿横隔面、塔身横隔面与猫头部分各层截面周围的平均风速场分量剖面分别如图 5 和图 6 所示。从图 5(a)和 5(b)观察到,与初始风场相比,塔腿横隔面迎风侧杆件及其外围的顺流方向风速接近于初始风速,相应区域的横流方向风速也普遍较低。如图 5(c)和 5(d)所示,与双回路直线塔不同,该型的塔身横隔面迎风侧杆件周围顺流方向风速明显低于初始风速,且存在较强的风速变化梯度,相反,在背风侧杆件的局部位置形成更贴于初始风速的区域。而横流方向上,与迎风侧相似,背风侧杆件周围的风速同样较低,风向受到的干扰非常弱。

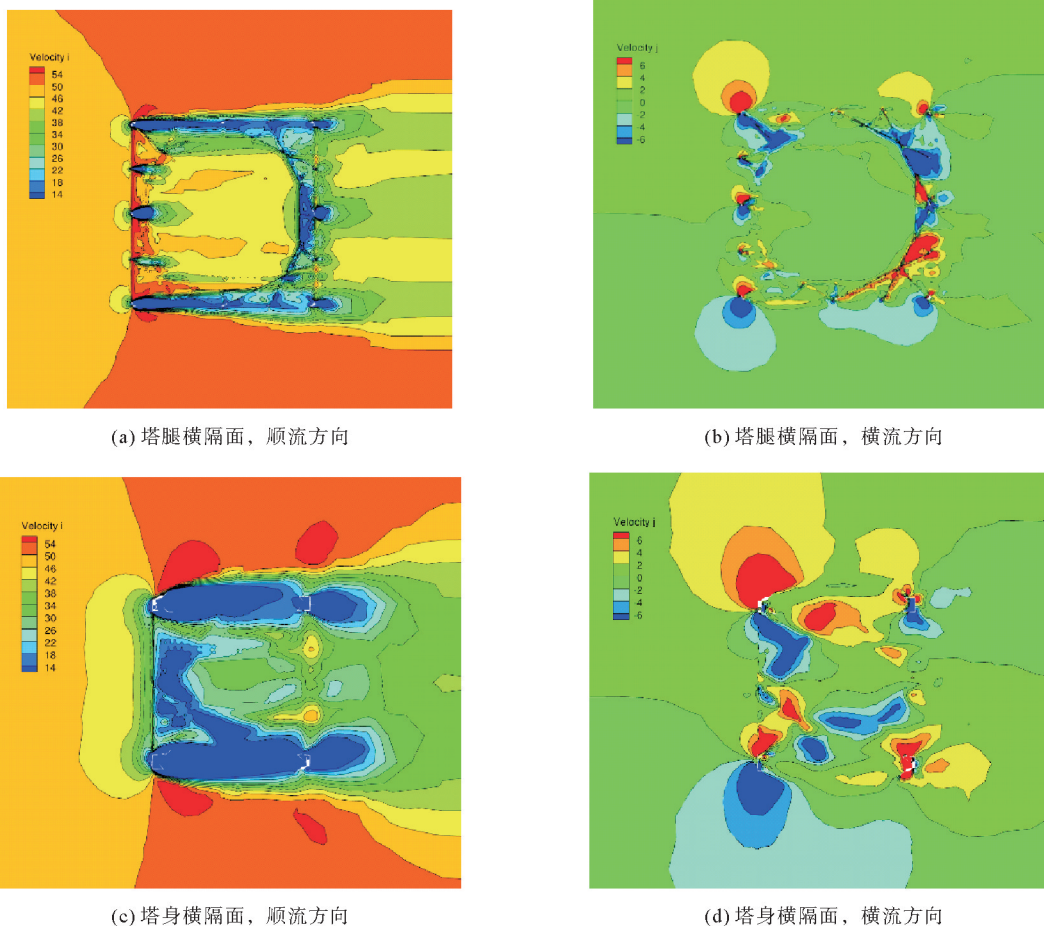


图 5 单回路猫头塔的塔腿、塔身横隔面的风速分布

Fig. 5 Wind velocity contours for the tower leg and tower body cross sections of single circuit cat head tower

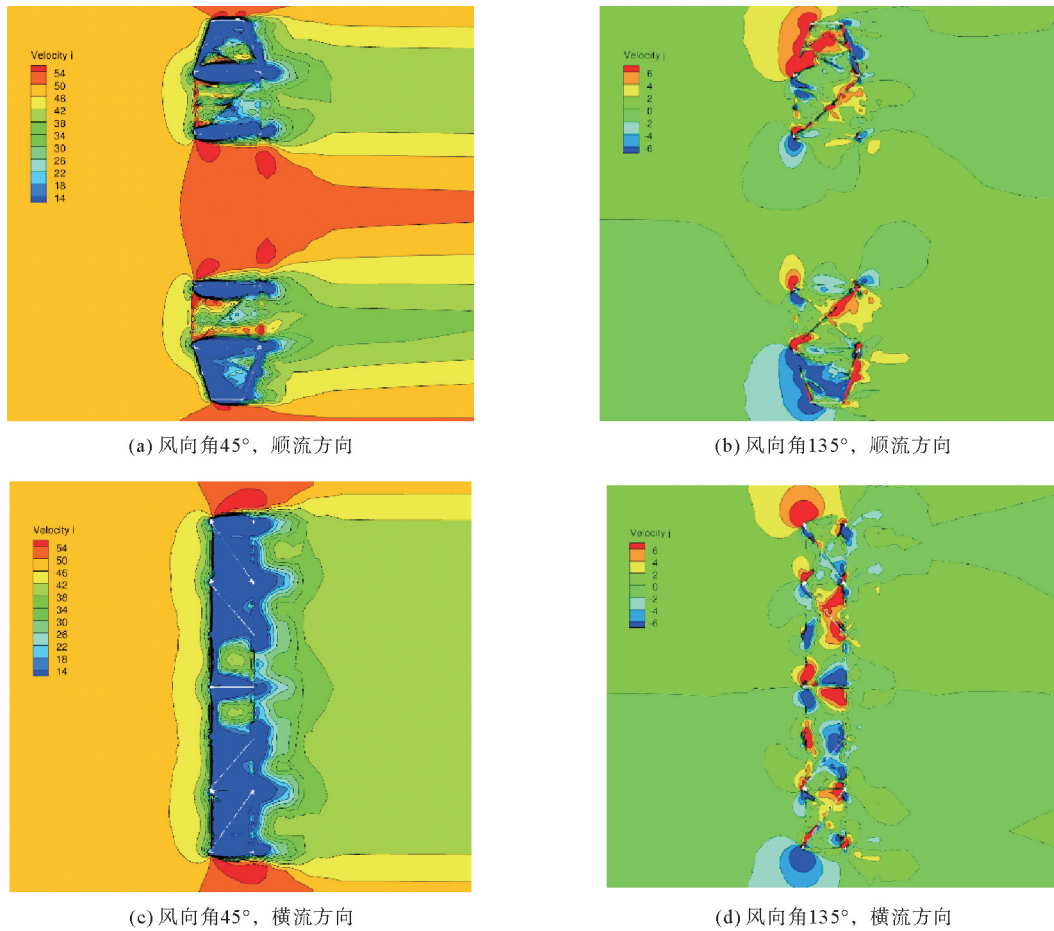


图 6 单回路猫头塔的猫头边截面与顶截面的风速分布

Fig. 6 Wind velocity contours for side and top cross sections of the cat head part of single circuit cat head tower

从图 6(a)和 6(b)可见,两处边截面迎风侧杆件上的顺流方向风速均接近初始风速,相应位置的横流方向风运动也并不显著。而由图 6(c)和 6(d)可知,猫头顶截面外围的顺流方向风速明显低于 50 m/s,横流方向风速较低的区域则分散分布于外围杆件上。

结合风速分布图,发现塔腿横隔面、猫头边截面以及顶截面迎风侧杆件附近的风向改变较小;而塔身横隔面背风侧杆件附近的风向改变较大,因而监测点选在相应区域内。通过表 5 风速大小的对比可发现,对于猫头型输电塔,塔腿横隔面与猫头边截面的迎风侧杆件附近顺流方向风速和二维风速最接近于初始风速,风向受影响程度极低。其余截面的顺流方向风速与二维风速均显著低于初始风速,塔影干扰较大。综合以上结果,塔腿横隔面与猫头边截面的迎风侧杆件附近的塔影干扰最小,风速监测效果较佳。

表 5 单回路猫头塔的各截面外缘杆件附近的风速监测数据

Tab. 5 Wind velocity monitoring data near the outer bars of each cross section of single circuit cat head tower

截面	$V_i/(m \cdot s^{-1})$	$V_j/(m \cdot s^{-1})$	二维风速 $/(m \cdot s^{-1})$	三维风速 $/(m \cdot s^{-1})$	测点位置 (以塔底座中心为原点)
塔腿横隔面	49.816 9	0.068 7	49.816 9	50.625 4	(1.013 0, 6.061 0, -3.279 0)
塔身横隔面	46.642 4	0.398 3	46.644 1	46.745 9	(0.616 3, 23.831 0, 1.514 5)
猫头边截面	50.016 5	0.004 0	50.016 5	53.162 3	(-3.702 8, 27.051 0, -1.375 1)
猫头顶截面	42.450 3	-1.053 2	42.463 4	50.163 7	(-3.795 5, 37.759 0, -0.592 1)

3.3 钢管塔

钢管塔中的塔腿横隔面、塔身横隔面与各层横担截面周围的二维时间平均风速场分量剖面分别如图 7 和图 8 所示。从图 7 观察到,塔腿、塔身横截面与较低层横担(第一至第三层)上,各截面迎风侧杆件上的顺流方向风速在 54 m/s 以上,高于初始风速。相比双回路直线塔与单回路猫头塔的角钢,钢管塔的圆钢外沿的风速梯度更大,变化更为敏感,接近初始风速的范围小且极难捕捉。而由图 8 所示,自第四层横担始,随着高度的提升,中心平台迎风侧杆件及其周围趋近 50 m/s 的顺流方向风速范围逐步扩大。其中在第四层横担

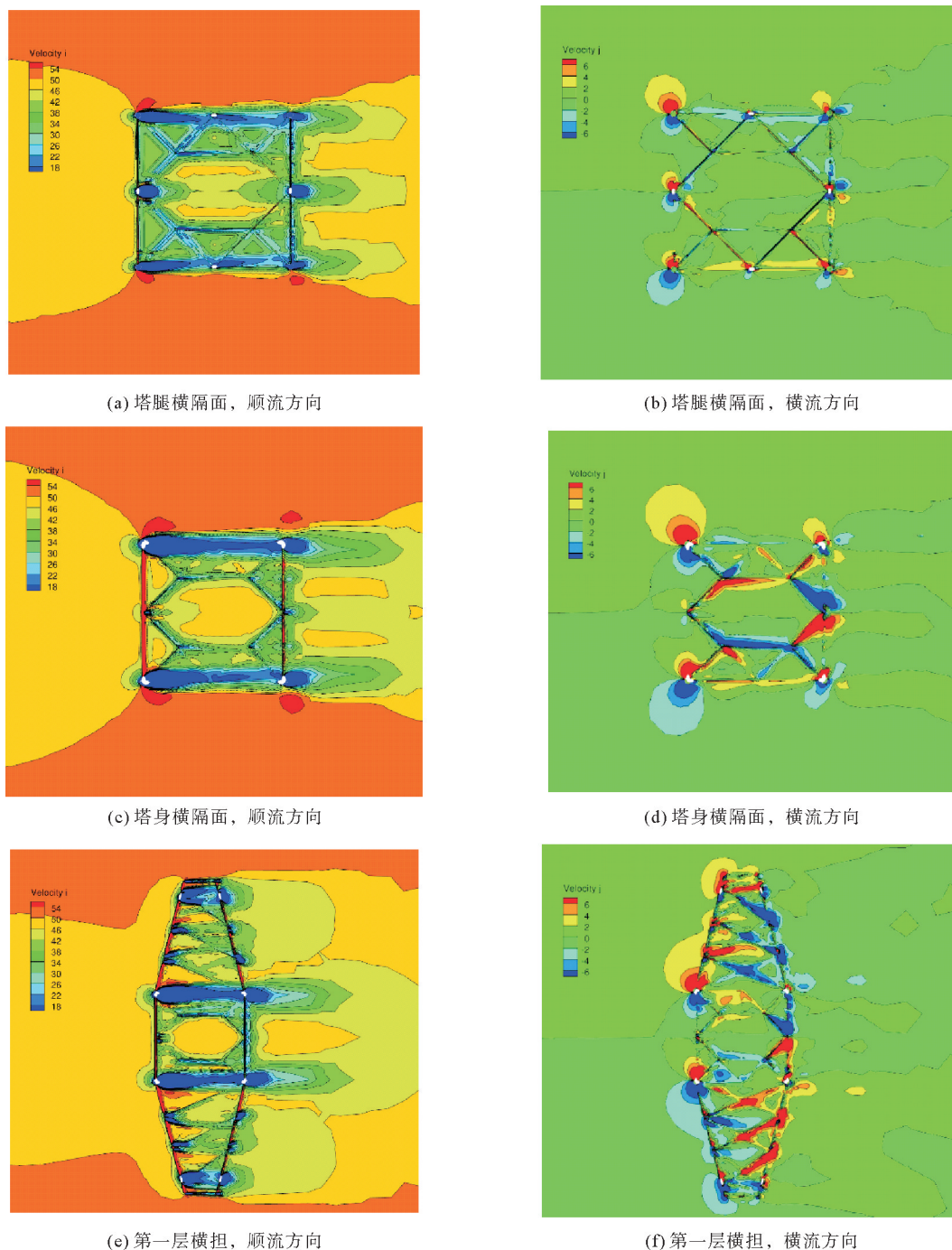


图 7 钢管塔的塔腿、塔身横截面与较低层横担的风速分布

Fig. 7 Wind velocity contours for the tower leg and body cross sections and the cross section of the low cross arm of circular tube tower

与第五层横担下载面的背风侧杆件附近,同样出现大片接近初始风速的顺流方向风区域。对于横流方向而言,塔腿、塔身横隔面的迎风侧杆件附近与各层横担中心平台迎风侧杆件周围的风速值相对较低。而第五层横担下载面的背风侧杆件周围出现范围较大的低风速区域,相应位置上风向受到的干扰非常弱。

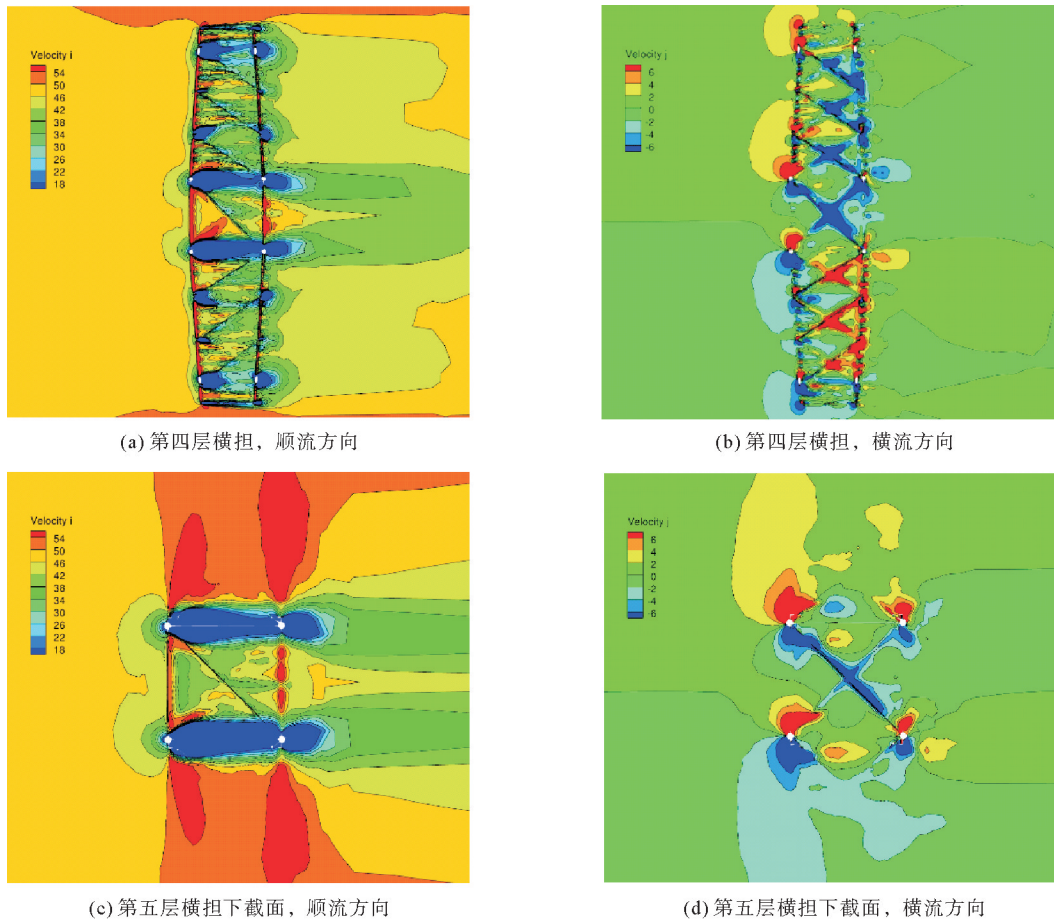


图 8 钢管塔的高层横担及其相邻截面的风速分布

Fig. 8 Wind velocity contours for the the cross section of the high cross arm and its adjacent section of circular tube tower

结合风速分布图,发现钢管塔 8 个截面上迎风侧杆件附近的风向改变均非常小,因而监测点选在相应区域内。通过表 6 可发现,各截面在监测点附近的顺流方向风速和二维风速均与初始风速相近,风向所受影响也不显著。结合以上风速分布分析可知,第五层横担下载面的迎风侧杆件周围趋近于初始风速的顺流方向

表 6 钢管塔各截面外缘杆件附近的风速监测数据

Tab. 6 Wind velocity monitoring data near the outer bars of each section of circular tube tower

截面	$V_i/(m \cdot s^{-1})$	$V_j/(m \cdot s^{-1})$	二维风速 $/(m \cdot s^{-1})$	三维风速 $/(m \cdot s^{-1})$	测点位置 (以塔底座中心为原点)
塔腿横隔面	49.851 1	0.006 1	49.851 1	53.654 6	(3.073 9, 9.683 0, -6.440 6)
塔身横隔面	50.194 4	-0.173 5	50.194 7	53.741 6	(1.552 8, 21.119 0, -4.601 4)
第一层横担	49.650 0	0.194 4	49.650 4	58.036 5	(-0.702 4, 27.135 0, -4.279 1)
第二层横担	50.307 7	-0.114 6	50.307 8	60.081 0	(1.378 8, 39.576 0, -3.620 4)
第三层横担	50.442 5	-0.324 5	50.443 5	57.012 8	(0.867 3, 54.041 0, -2.802 6)
第四层横担	49.989 3	0.033 0	49.989 3	53.153 8	(-0.063 8, 67.311 0, -2.053 1)
第五层横担下载面	50.369 0	-0.113 6	50.369 1	53.223 0	(-0.012 2, 70.762 0, -1.774 6)
第五层横担	50.019 5	0.011 0	50.019 5	53.141 1	(0.357 5, 75.815 0, -1.513 5)

风速范围最大,监测点附近顺流方向风速更接近于 50 m/s,因而最利于监测点的选取。同时,该截面上所受的垂向风影响也相对较小。因此,第五层横担下截面的迎风侧杆件附近的风速监测效果最佳。

4 结论

采用三维计算流体动力学的方法,对均匀风荷载作用下输电塔的绕流场开展了数值模拟研究。通过对输电塔不同截面风场的可视化处理及风速数据的统计,确定了各截面风速变化较小的区域,并分析了 3 种典型塔型工况下输电塔的塔影干扰效应。

对于 3 种不同塔型的输电塔,塔腿或塔身横隔面迎风侧杆件附近的塔影干扰效应一般较弱,很可能是由于塔架低层截面附近的杆件数量相对高层更少,构造更为简单,风受到的扰动较弱造成的。在实际工程中,宜将气象监测装置安装在低层截面的迎风侧杆件附近,以保证风速测量的准确性。相比于双回路直线/耐张两用塔和单回路猫头塔,钢管塔截面周围的风速梯度更大,变化更为剧烈,不利于风速的稳定采集。钢管塔塔影干扰较弱的位置也可能出现在更高层的横担,及其相邻截面的迎风侧杆件附近。因此,需要针对具体的塔型,在塔影干扰较小的各截面中,选择周围风速梯度更小的截面进行风速监测。

参考文献:

- [1]史文海,李正农,张传雄.温州地区近地强风特性实测研究[J].建筑结构学报,2010,31(10):34-40.
SHI Wenhai, LI Zhengnong, ZHANG Chuanxiang. Field measurements of strong wind characteristics near ground in Wenzhou district[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(10): 34-40.
- [2]李秋胜,戴益民,李正农,等.强台风“黑格比”登陆过程中近地风场特性[J].建筑结构学报,2010,31(4):54-61.
LI Qiusheng, DAI Yimin, LI Zhengnong, et al. Surface layer wind field characteristics during a severe typhoon ‘Hagupit’ landfalling[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(4): 54-61.
- [3]王旭,黄鹏,顾明,等.台风“米雷”近地层脉动风特性实测研究[J].土木工程学报,2013,46(7):28-36.
WANG Xu, HUANG Peng, GU Ming, et al. Field measurement of turbulence characteristics near ground during typhoon ‘Meari’[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 28-36.
- [4]李波,张星灿,杨庆山,等.台风“苏力”近地风场脉动特性实测研究[J].建筑结构学报,2015,36(4):99-104.
LI Bo, ZHANG Xingcan, YANG Qingshan, et al. Research on fluctuating wind characteristics near ground of typhoon ‘Soulik’ by field measurement[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(4): 99-104.
- [5]MASTERS F J. Measurement, modeling and simulation of ground-level tropical cyclone winds[D]. Gainesville: University of Florida, 2004.
- [6]YU B, CHOWDHURY A G. Gust factors and turbulence intensities for the tropical cyclone environment[J]. American Meteorological Society, 2009, 48(3): 534-552.
- [7]FLINT A R, SMITH B W. The development of the British draft code of practice for the loading of lattice towers[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Wind Engineering. New York: Pergamon Press, 1980: 1293-1304.
- [8]何宏明,雷旭,聂铭,等.台风作用下输电塔塔周风场与动力响应实测分析[J].建筑结构学报,2018,39(8):1-9.
HE Hongming, LEI Xu, NIE Ming, et al. Measurement and analysis of nearby wind field characteristics and dynamic response of transmission tower during typhoon[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(8): 1-9.
- [9]WATAKABE M, OHASHI H. Comparison of wind pressure measurements on tower-like structure obtained from full-scale observation, wind tunnel test, and the CFD technology[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12): 1817-1829.
- [10]CELIO F, CARRIL J, NICHOLAS I, et al. Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91: 1007-1022.
- [11]邹良浩,梁枢果,邹焱,等.格构式塔架风载体型系数的风洞试验研究[J].特种结构,2008,25(5):41-43.
ZOU Lianghao, LIANG Shuguo, ZOU Yao, et al. Wind tunnel tests of wind load of lattice towers[J]. Special Structures, 2008, 25(5): 41-43.
- [12]刘石,杨毅,黄正,等.考虑结构极限状态的输电塔-线体系风洞试验研究[J].工业建筑,2020,50(10):145-151.
LIU Shi, YANG Yi, HUANG Zheng, et al. Study on collapse states of transmission towers by wind-tunnel tests of tower-line system[J]. Industrial Construction, 2020, 50(10): 145-151.

- [13] 陈建稳,袁广林,刘涛,等.数值模型对输电塔内力和变形的影响分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2009,28(1):40-45.
CHEN Jianwen, YUAN Guanglin, LIU Tao, et al. The influence of analysis of numerical model on internal force and structural deformation of power transmission tower[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2009, 28(1):40-45.
- [14] 徐旭,刘玉.高耸结构在台风作用下的动力响应分析[J].建筑结构,2009,39(6):105-109.
XU Xu, LIU Yu. Dynamic response analysis of a high-rising structure under typhoon[J]. Building Structure, 2009, 39(6):105-109.
- [15] 党会学,赵均海,张宏杰,等.三角形格构式塔身体型系数及屏蔽特性研究[J].计算力学学报,2016,33(3):362-368.
DANG Huixue, ZHAO Junhai, ZHANG Hongjie, et al. Study on shape coefficient and shielding effects of triangular latticed tower body[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2016, 33(3):362-368.
- [16] 肖凯,赵子涵,罗啸宇,等.复杂地形下基于计算流体动力学的风速比计算[J].科学技术与工程,2018,18(33):1-6.
XIAO Kai, ZHAO Zihan, LUO Xiaoyu, et al. Computational fluid dynamic approach to calculate wind velocity ratio over complex terrain[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(33):1-6.
- [17] 王勇,吕令毅.龙卷风作用下输电塔结构的单向流固耦合分析[J].特种结构,2017,34(2):13-19.
WANG Yong, LV Lingyi. One-way fluid-structure interaction analysis of transmission tower under tornado loading[J]. Special Structures, 2017, 34(2):13-19.
- [18] 杨莉,李丽,孙凯,等.动态来流及塔影效应对风力机尾迹特性影响研究[J].计算技术与自动化,2020,39(3):7-12.
YANG Li, LI Li, SUN Kai, et al. Study on influence of dynamic inflow and tower shadow effect on wake characteristics of wind turbine[J]. Computing Technology and Automation, 2020, 39(3):7-12.
- [19] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3):227-238.
- [20] JONES W P, LAUNDER B E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(2):303-314.

(责任编辑:吕海亮)