

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230614001

输电塔风雨荷载特性的CFD数值模拟*

荣卫涛¹, 王振国², 姜文东³, 徐枫¹, 段忠东¹, 欧进萍¹

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055; 2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 3. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 本文基于欧拉多相流方法研究了输电塔表面的风雨荷载分布特性。首先基于现有某风驱雨实测模型建立CFD数值模型, 基于欧拉多相流模型模拟获得结构表面雨滴抓取率, 将模拟结果与现有实测数据进行对比, 验证本文模拟结果的准确性。以某106.6 m高的钢管输电塔为例, 基于输电塔结构特性将整塔沿高度分段, 建立精细化输电塔CFD模型。采用SST $k-\omega$ 湍流模型模拟输电塔周围的流场, 获得各塔段阻力系数, 将模拟结果与现有规范进行对比验证风场模拟的准确性。雨相基于欧拉多相流通过Fluent的用户自定义函数(UDF)求解。选择合适的雨滴谱和雨滴粒径, 求得不同粒径雨滴在计算域入口处的末速度和体积分数, 模拟获得雨滴冲击壁面时的速度和体积分数, 进而求得模型壁面抓取率和风驱雨荷载。结果表明: 本模拟所得雨荷载与公式方法所得结果吻合较好, 输电塔的风驱雨荷载随着降雨强度增大而增大。当降雨强度为709 mm/h时, 输电塔各段顺风向雨荷载的最大值为风荷载的5.1%。

关键词: 输电塔; 风驱雨; 抓取率; 风雨荷载; 数值模拟

中图分类号: TU347 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1115-11

CFD Numerical Simulation of Wind and Rain Load Characteristics on Transmission Towers

RONG Weitao¹, WANG Zhenguo², JIANG Wendong³, XU Feng¹,
DUAN Zhongdong¹, OU Jinping¹

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China;
2. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;
3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: In this study, the distribution characteristics of wind and rain loads on the surface of a transmission tower were investigated using the Euler multiphase flow method. First, the Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical model was established based on an existing measured model of wind-driven rain, employing the Euler multiphase flow model to simulate the raindrop catch ratio on the structural surface. The simulation results were then compared with the existing measurement data to validate their accuracy. Taking a 106.6 m high steel pipe transmission tower as an example, the tower was segmented along its height based on structural characteristics to create a refined CFD model. The

* 收稿日期: 2023-06-14; 修回日期: 2023-09-26

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS220006)资助

作者简介: 荣卫涛(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事结构风工程研究。E-mail: 1027321197@qq.com

通信作者: 徐枫(1980—), 男, 副教授, 博导, 博士。主要从事结构风工程研究。E-mail: xufenghit@hit.edu.cn

SST $k-\omega$ turbulence model was adopted to simulate the flow field around the transmission tower, allowing for the calculation of drag coefficients for each tower section and enabling comparison with existing standards to confirm the accuracy of the wind field simulation. For the rain phase, the Euler multiphase flow method was implemented using a User Defined Function (UDF) in Fluent. Appropriate raindrop spectra and particle sizes were selected to determine the final velocity and volume fraction of different-sized raindrops at the inlet of the computational domain. The simulation also captured the velocity and volume fractions of raindrops upon impact with the wall, allowing for the calculation of the wall catch ratio and wind-driven rain load. The results indicated that the simulated rain load aligned well with those obtained from formulaic methods, showing that the wind-driven rain load on the transmission tower increased with rainfall intensity. When the rainfall intensity was 709 mm/h, the maximum along-wind rain load for each section of the transmission tower reached 5.1% of the wind load.

Keywords: transmission tower; wind-driven rain; catch ratio; wind and rain load; numerical simulation

0 引言

随着科学技术以及工业生产的迅猛发展,电力的输送距离以及输送容量都在不断增大。输电系统的安全极其重要,而作为载体,输电线路的正常运行至关重要。高耸柔性的大跨越输电塔一线体系对风雨荷载作用比较敏感,强对流天气下的风雨共同作用已经构成了大跨越输电塔一线体系的极端环境荷载,在水平向强风的驱动下,雨滴可能形成较大的水平速度,从而对结构产生不利影响。在以往的研究中,由于研究者采用不同假定,使得雨荷载计算结果差异很大,因此有必要结合现有风驱雨模拟方法进行输电塔风驱雨荷载研究。

风驱雨(Wind-Driven Rain,简称WDR)是雨滴在下降过程中,受到水平风力的影响,从而产生水平向速度自然现象。评估建筑物外墙风驱雨(WDR)的方法主要有现场实测方法、半经验方法和基于计算流体动力学(CFD)的数值方法。

现场测量是以往风驱雨研究的主要方法,但是该方法很容易出现较大误差且非常耗时。半经验方法的优点是易于使用,缺点是只能获得风驱雨量的粗略估计。考虑到与测量和半经验方法相关的缺点,近年来,CFD方法为风驱雨领域的研究提供了新的动力。E. Choi^[1]开发了一种数值模拟技术,确定了稳态条件下建筑壁面上风驱雨量的分布,该技术已被WDR研究界普遍采用。B. Blocken等^[2]将E. Choi的稳态模拟技术扩展到时域。S. H. Huang等^[3]使用欧拉多相流模型进行了低层建筑风

驱雨的模拟,并表明该方法可以获得孤立低层建筑迎风面上的WDR的精确结果。A. Kubilay等^[4]将基于欧拉多相流模型的数值模拟结果与测量数据进行比较,结果较为符合。与拉格朗日多相流模型相比,欧拉多相流模型模拟WDR所花费的用户时间大大减少,且能够估计复杂几何结构中所有表面上的WDR。

吴小平^[5]基于拉格朗日多相流模型模拟了稳态风作用下低层房屋的雨荷载,发现在10 m高度处风速为10 m/s和降雨强度为200 mm/h的条件下,低层房屋的平均雨荷载占风荷载的8%左右。该模拟以0.1 s为一个时间步,假设每一个时间步范围内所有雨滴同时撞击到结构上,而雨滴与结构的撞击时间在 10^{-5} s左右,故该模拟放大了作用在结构上的雨荷载。李宏男等^[6]假定雨滴水平末速度等于风速,采用雨滴碰撞模型计算雨荷载,探究了单位体积内的雨滴对输电塔产生的雨荷载,该模拟同样建立在假设所有雨滴同时撞击在输电塔上,与实际情况有所差异。杨俊涛^[7]基于拉格朗日多相流模型模拟了某塔高193.5 m的输电塔雨荷载,该模拟假设雨滴撞击输电塔壁面的时间为 $D/2V_{\parallel}$ (D 为雨滴粒径, V_{\parallel} 为雨滴水平方向速度),得出不同粒径雨滴撞击输电塔壁面的作用时间,进而求得时间间隔为0.25 s的平均雨荷载。研究发现,当降雨强度为709 mm/h、风速为10 m/s时,平均雨荷载占风荷载的2.53%。劳俊等^[8]基于流固耦合理论,利用数值风洞方法对脱硝钢架结构表面体型系数及风致响应进行了研究。孙芳锦等^[9]基于数值模拟平台,采用欧拉-欧拉方法,模拟得到了不同风

向工况下大跨度悬挑屋盖结构表面平均压力分布规律,并研究得到了一次自然降雨过程中最不利抗风雨位置。

现有结构风驱雨荷载研究中,由于研究者采用不同计算方法和不同假定,使得风驱雨荷载计算结果差异很大,甚至相差10倍以上,而单个雨滴的作用时间较短,将单个雨滴与结构的作用时间作为雨荷载计算的时间步长,将使大大增加计算量和计算的难度。本文采用欧拉多相流模型,将雨视为连续介质,可在减少计算量的同时,更精确的求解输电塔结构表面的雨荷载。

1 风雨多相流计算方法

1.1 欧拉-欧拉方法概述

欧拉-欧拉方法将空气相和雨相均视为连续介质,由于各相被认为是相互贯穿的,空气相所占的体积无法再被雨相占有,故引入体积分数的概念。每一相的体积分数 α_k 表示每一相所占的空间,从而求解每相在流场中的质量和动量守恒方程。

由于空气中的雨滴粒径大小不一,本文将不同粒径的雨滴分为 N 相。 D_k 代表第 k 相的雨滴粒径。对第 k 相而言, $dD_k = D_k - D_{k-1}$ 代表不同粒径雨滴的尺寸间隔, D_k 代表粒径尺寸在 $(D_k - dD_k/2, D_k + dD_{k+1}/2)$ 之间的雨滴。当 $k=1$ 时,第1相雨滴粒径 D_1 代表的粒径尺寸范围的下限取 D_0 ;当 $k=N$ 时,第 N 相雨滴粒径 D_N 代表的粒径尺寸范围的上限取 D_{N+1} 。第 k 相的体积分数为 α_k ,即相应代表粒径尺寸范围内的雨滴的体积分数,则第 k 相质量守恒方程和动量守恒方程如下:

$$\frac{\partial \rho \alpha_k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \alpha_k u_{kj})}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \alpha_k u_{ki}}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \alpha_k u_{ki} u_{kj})}{\partial x_j} = \rho \alpha_k g_i + \rho \alpha_k \frac{18\mu C_D Re_p}{24\rho D_k^2} (u_i - u_{ki}) \quad (2)$$

式中, ρ 为雨滴的密度($1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$); μ 为空气分子粘度; g_i 为重力第 i 方向的分量; u_i 为第 i 方向(x, y, z)风速分量; Re_p 为风和雨的相对雷诺数; C_D 为风和雨的阻力系数。

1.2 WDR 模拟参数设定概述

与粒子轨迹追踪方法相比,采用欧拉多相流方法进行WDR模拟的优点之一是简化了边界条件的处理。欧拉多相流模型不再需要指定雨滴的入口位置,只需要在每个边界处指定每个雨相的体积分数及其边界位置处对应的速度分量,可以根据降雨强度及其它参数的信息方便的确定。

WDR模拟需要确定雨滴谱、降雨强度和雨滴末速度三个参数。降雨强度能够反映一次降雨的快慢缓急程度,是衡量降雨强弱的基本指标,通常用 R_h 表示。降雨强度根据不同单位时间段可分为小时降雨量、日降雨量、月降雨量和年降雨量。由于日降水量反映的是24h内降水的平均值,而忽略的短期内的强降雨情况,而短时间内的强降雨作用于结构,对结构施加更不利荷载,故本文选用小时降雨量为单位进行数值模拟。

空气中雨滴的实际大小是分布不均匀的,通常采用雨滴谱函数经验公式来量化雨滴粒径的分布特征。1943年,J. W. Laws等^[10]开创性通过实测对雨滴谱分布函数进行研究,其成果为后来的研究提供了参考依据。2001年,D. Wolf^[11]发现,修正的 Λ 分布更符合Laws-Parsons(LP)实测结果。因此,本文研究采用如下所示的修正 Λ 分布:

$$N(D_k, R_h) = N_0 D_k^\alpha \exp(-\Lambda D_k) \quad (3)$$

式中,常量 $\alpha=2.93$; $N(D_k, R_h)$ 指单位体积内和直径 $(D_k - dD_k/2, D_k + dD_{k+1}/2)$ 范围内雨滴数量; N_0 和 Λ 为雨强 R_h 的函数,在标准大气压下, N_0 和 Λ 的表达式分别为:

$$N_0(R_h) = 1.98 \times 10^7 R_h^{-0.384} \quad (4)$$

$$\Lambda(R_h) = 5.38 R_h^{-0.186} \quad (5)$$

由雨滴谱函数可以求得不同粒径雨滴的体积占有率,粒径为 D_k 雨滴的体积占有率 δF 如下:

$$\delta F = \frac{D^3 N(D_k, R_h) dD}{\int_0^\infty D^3 N(D_k, R_h) dD} \quad (6)$$

根据降雨强度 R_h 和上述公式可求得不同粒径雨滴的体积占有率。不同降雨强度雨滴粒径分布规律和对应的体积占有率均有所不同,图1给出了本研究考虑的不同降雨强度下不同粒径雨滴的体积占有率结果。

雨滴末速度包括水平末速度和竖向末速度。

水平末速度边界条件:假设风相与雨相水平方向相对速度为零,即雨相水平方向末速度等于相同位置处的水平风速。竖向末速度边界条件:直径为 D_k 的雨滴沿重力方向的速度用 $V_t(D_k)$ 表示,假设雨滴下

$$V_t(D_k) = \begin{cases} 0; & D_k \leq 0.03 \text{ mm} \\ 4.323 \times (D_k - 0.03); & 0.03 \text{ mm} \leq D_k \leq 0.6 \text{ mm} \\ 9.65 - 10.3 \times \exp(-0.6D_k); & D_k \geq 0.6 \text{ mm} \end{cases} \quad (7)$$

利用以上确定的雨滴谱、降雨强度和雨滴末速度可得第 k 相雨滴的体积分数 α_k (其中 $k=1, 2, 3, \dots, N$)表达式如下:

$$\alpha_k = \frac{R_h f_h(R_h, D_k)}{V_t(D_k)} \times \frac{1.0 \times 10^3}{3600} \quad (8)$$

式中, $f_h(R_h, D_k)$ 表示直径为 D_k 雨滴的通量分数,表达式如下:

$$f_h(R_h, D_k) = \frac{D^3 N(R_h, D_k) V_t(D_k)}{\int_0^\infty D^3 N(R_h, D_k) V_t(D_k) dD} \quad (9)$$

目前,风驱雨研究领域主要采用特定抓取率(specific catch ratio) $\eta_D(D_k)$ 和抓取率(catch ratio) η 来衡量建筑壁面WDR强度的大小。

$$\eta_D(D_k) = \frac{R_{WDR}(D_k)}{R_h(D_k)} = \frac{\alpha_k |V_n(D_k)|}{R_h f_h(D_k)} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \eta &= \int_D f_h(R_h, D) \eta_D(D) dD \\ &= \frac{3600 \times 10^3}{R_h} \int_D \alpha_D |V_n(D)| dD \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $R_{WDR}(D_k)$ 表示风驱雨(WDR)强度; $V_n(D_k)$ 表示雨滴撞击壁面时沿壁面法向方向速度分量。

值得注意的是,在风驱雨的模拟中,相对于空气相,雨的体积分数通常处于较小的数量级。因此,为保证雨不在壁面和地面处累积和碰撞壁面后飞溅,对建筑壁面和地面进行如下处理:

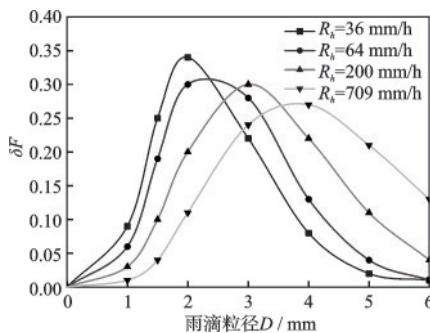


图1 不同雨强下雨滴粒径和体积占有率关系

Fig.1 Relationship between raindrop size and volume fraction under different rainfall intensities

落过程中,空气阻力和重力达到平衡,雨滴在空气中沿重力方向匀速运动,雨滴的最终速度即重力和阻力达到平衡时的速度。雨滴竖向末速度采用C. Mätzler^[12]提出的 $V_t(D_k)$ 公式:

$$\begin{cases} \alpha_k = 0, & \vec{V}_k = 0 & \vec{n} \cdot \vec{V}_k < 0 \\ \frac{\partial \alpha_k}{\partial n} = 0 & \frac{\partial \vec{V}_k}{\partial n} = 0 & \vec{n} \cdot \vec{V}_k \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

对于公式第一项,当雨滴的速度矢量和壁面法向量内积小于零时,令雨滴体积分数和速度为零。这表示不考虑雨滴由建筑壁面进入流场的情况,即不考虑雨滴碰撞壁面后的飞溅和反弹现象。

对于公式第二项,当雨滴的速度矢量和壁面法向量内积非负时,令雨滴的体积分数和速度沿壁面法向量方向梯度为零。这表示当雨滴射向壁面并落在壁面上时,雨相体积分数和速度的梯度为零意味着雨滴穿透壁面。

2 欧拉多相流模型WDR模拟验证

2.1 计算域与边界条件设置

A. Kubilay等^[4]在位于瑞士苏黎世东部郊区的杜本多夫联邦材料科学与技术实验室(Empa)开展WDR实测,实测现场位于北纬 $47^{\circ}24'9''$,东经 $8^{\circ}36'50''$ 。实测旨在研究两个不同高度的等宽建筑物的WDR强度,实测模型由9个边长为2 m的立方体组成的两列建筑模型。1号建筑为3个立方体模型组成的低矮建筑,位于降雨期间主导风向上游方向作为施扰建筑,尺寸为 $6 \times 2 \times 2.17 \text{ m}^3$;2号建筑为6个立方体模型组成的高层建筑,尺寸为 $6 \times 2 \times 4.29 \text{ m}^3$ 。1号建筑和2号建筑相隔2 m,如图2所示。实测获得的现场数据包括:风速、风向、降雨强度和壁面各测点的风驱雨量。测点布置如图3所示,风速和风向由位于模型西面的气象桅杆测得,降雨强度和建筑壁面的风驱雨量由降雨测试仪和建筑壁面不同测点处分布的风驱雨量收集器测量。

根据以上现场实测的降雨数据,获得风驱雨模拟研究采用的风雨边界条件:有效雨强



图2 实测模型及测点布局^[4]

Fig.2 Measured model and measuring points layout^[4]

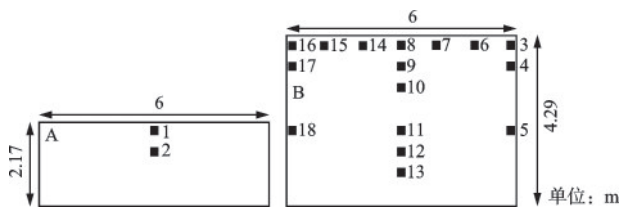


图3 模型壁面测点布置示意^[4]

Fig.3 Schematic diagram of measuring points layout on the model wall^[4]

$R_{h,eff} = 1.36 \text{ mm/h}$; 入口风速采用指数率风剖面, C类地貌, 地表粗糙度指数 $\alpha = 0.22$, 2.4 m 高度处风速 $U_{2.4} = 0.8 \text{ m/s}$, 风向为 $\varphi = 220^\circ$, 即西偏南 50° 。

根据实测模型尺寸建立实尺的数值模型, 计算域尺寸如图4所示。后排2号高层建筑高度为 $H = 4.29 \text{ m}$, 坐标原点位于1号建筑的底面形心处。1号建筑迎风面距离入口为 $3H$, 2号建筑背风面距离出口为 $15H$, 建筑两侧面距离计算域侧面边界的距离分别为 $5H$, 后排2号高层建筑距离顶面 $5H$, 计算域高 $6H$ 。计算域分别采用多面体网格和结构化六面体网格进行离散, 两种网格方案的数量分别为27万和63万。第一层网格高度均为 0.001 m , 多面体网格采用边界层的数量为10层, 增长比例为1.1。两种方案的网格划分如图5所示。

计算域各边界条件设置如下: 来流入口采用速度入口 (Velocity-inlet), 计算域出口采用自由流出

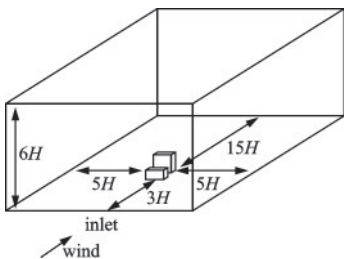


图4 计算域示意

Fig.4 Schematic diagram of computational domain

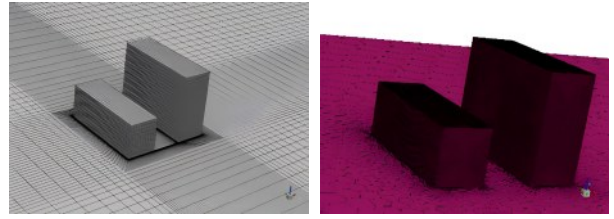


图5 网格划分示意

Fig.5 Schematic diagram of mesh division

(Outflow), 计算域两侧采用对称边界 (Symmetry), 计算域顶面、地面和建筑表面采用无滑移壁面 (Wall), 并对地面和建筑表面按照公式(12)进行特殊处理。依据等效雨强和现有的雨滴谱, 依照体积占有原则, 选择以下五组代表性雨滴进行模拟, 粒径分别为: 4、2、1.5、1、0.5 mm。

入口处雨滴的速度分为竖向与水平向速度, 其中竖向速度根据公式(7)求得, 雨滴水平速度等于水平风速。根据实际情况, 雨滴颗粒可以通过计算域顶面进入流场, 因此, 顶面设置为雨相入口, 其对不同粒径雨滴的设定方式与入口处一致。

2.2 风驱雨模拟结果与验证

基于欧拉多相流模型建立空气相和雨相的控制方程, 分别采用 SST $k-\omega$ 和 LES 湍流模型进行流场求解和风驱雨模拟, 模拟中监测点布置同实测模型相同, 得到建筑表面抓取率分布的等值线如图6所示。

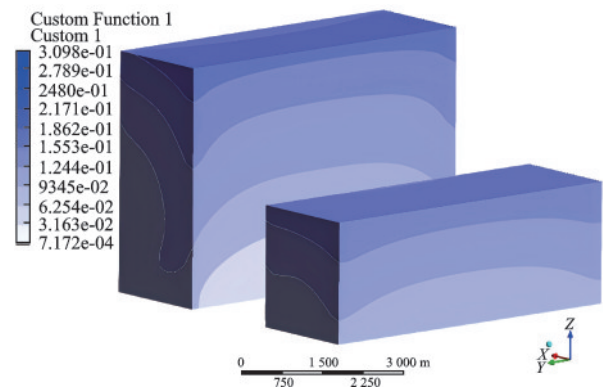


图6 建筑壁面抓取率分布

Fig.6 Distribution of capture ratio on building wall

图7和表1给出了建筑迎风面测点抓取率的本文模拟结果与现有实测和模拟结果^[13]的对比分析。对比图中各结果可知, 本研究采用63万结构化网格方案的模拟结果与现有实测结果整体吻合较好, 只有局部测点存在误差; 尤其是在后排建筑上部区域测点位置, 较现有模拟结果相比更接近与实测结果。

表1 建筑迎风面测点抓取率结果对比

Table 1 Comparison of catch ratio results at measuring points on windward side of buildings

测点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
实测值(A. Kubilay等 ^[4])	0.143	0.121	0.163	0.151	0.126	0.172	0.189	0.186	0.155
模拟值(A. Kubilay等 ^[4])	0.146	0.125	0.179	0.167	0.134	0.179	0.171	0.171	0.152
模拟值(H. Wang等 ^[13])	0.134	0.112	0.180	0.182	0.151	0.179	0.177	0.174	0.161
LES模拟值(63万网格)	0.159	0.128	0.206	0.175	0.147	0.200	0.207	0.202	0.162
RANS模拟值(63万网格)	0.154	0.124	0.202	0.173	0.144	0.210	0.201	0.209	0.166
测点编号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
实测值(A. Kubilay等 ^[4])	0.138	0.123	0.103	0.099	0.191	0.169	0.161	0.138	0.119
模拟值(A. Kubilay等 ^[4])	0.133	0.113	0.100	0.100	0.176	0.177	0.174	0.152	0.122
模拟值(H. Wang等 ^[13])	0.152	0.127	0.115	0.107	0.170	0.174	0.188	0.179	0.152
LES模拟值(63万网格)	0.139	0.119	0.094	0.074	0.195	0.208	0.185	0.141	0.128
RANS模拟值(63万网格)	0.136	0.114	0.095	0.076	0.201	0.217	0.197	0.142	0.249

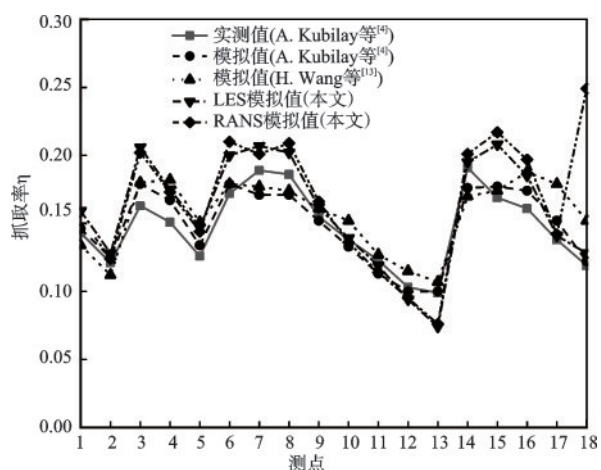


图7 抓取率模拟结果与现有研究结果对比

Fig.7 Comparison of simulated catch ratio with existing research results

3 输电塔风雨荷载模拟结果与分析

3.1 输电塔CFD数值模型

本研究选择SZ322钢管输电塔为分析对象,该塔塔高106.6 m,根开21.074 m,塔腿高17 m。在Solidworks软件用实体建立整个输电塔几何模型,将建好的几何模型导入Space Claim,建立精细化三维输电塔实尺模型,并沿着塔高将整个输电塔划分为9段,如图8所示。计算域为六面体区域,长宽高为800 m × 400 m × 200 m。坐标原点位于输电塔底面形心处,原点与入口、出口和计算域两侧的距离分别为200、600、200 m,计算域的高度为200 m。计算域和边界条件设置如图9所示。

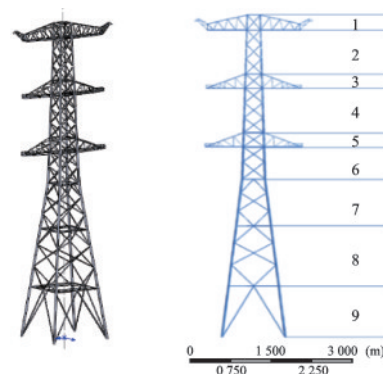


图8 输电塔三维模型与分段示意

Fig.8 3D model of the transmission tower and section diagram

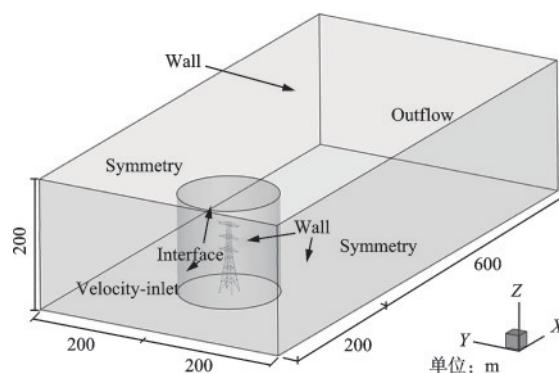


图9 计算域和边界条件

Fig.9 Computational domains and boundary conditions

由于输电塔结构复杂,网格划分难度大,故将计算域分为加密区和外部区两部分。加密区为以原点为中心、直径和高度均为150 m的圆柱形区域;其余区域为外部区域。对加密区,输电塔表面采用三角形网格进行划分,由于角柱杆件和其他支撑杆件直

径差异较大,故对其面网格尺寸分别控制,其中较粗的四根角柱杆件直径约为0.6 m,令其表面的最大网格尺寸范围为0.1~0.2 m,令其他支撑杆件表面的最大网格尺寸分别为0.12、0.1、0.08 m,生成三种不同数量的网格进行网格无关性验证。从输电塔表面到加密区边界采用非结构四面体网格进行划分,四面体网格数量分别为902万、1069万和1431万,计算过程中将其转化为多面体网格的数量分别为398万、497万和610万。外部区域采用结构化六面体网格进行划分,网格数量为40万。最终两部分组合后的计算域网格数量分别为438万、537万和650万。计算域整体和输电塔表面网格分布如图10所示。

计算域边界类型:入口采用速度入口(Velocity-inlet);出口采用自由出流(Outflow);计算域两侧采用对称边界(Symmetry);计算域顶面、地面和输电塔表面采用无滑移壁面(Wall),并对地面和输电塔表面按照公式(12)进行特殊处理。圆柱内外区域交界处采用Interface实现内外区域数据传递。

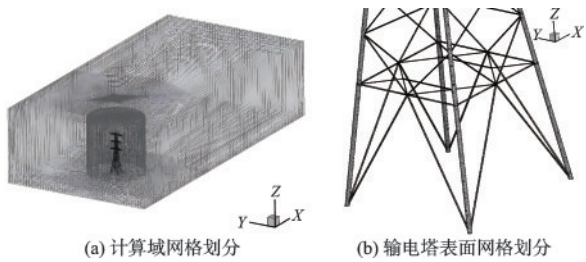


图10 计算域整体和输电塔表面网格分布

Fig.10 Overall computational domain and mesh distribution on the transmission tower surface

3.2 输电塔风荷载模拟

对输电塔进行CFD数值模拟,入口风速采用指数率风剖面,C类地貌,其中 $\alpha = 0.22$,10 m高度处的水平风速 $U_{10} = 40$ m/s,在输电塔顶部位置处速度为67.3 m/s。采用Fluent软件对输电塔风场进行模拟,湍流模型采用SST $k-\omega$ 。输电塔各塔段顺风向(x 向)的阻力系数可采用谢华平等^[14]建议公式计算:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 \Delta S_D} \quad (13)$$

式中, F_D 为塔段顺风向的平均风压力; U 为塔段形心高度处风速; ΔS_D 为塔段在 x 方向的投影面积;空气密度 ρ 为1.225 kg/m³。

不同网格计算得到各塔段阻力系数如图11所

示。由图可知,3种网格算得各塔段阻力系数趋势相同,且误差均不超过10%,网格仍具有较大的离散型,受现有计算资源能力的限制,本文采用趋势符合较好的537万网格进行后续分析。

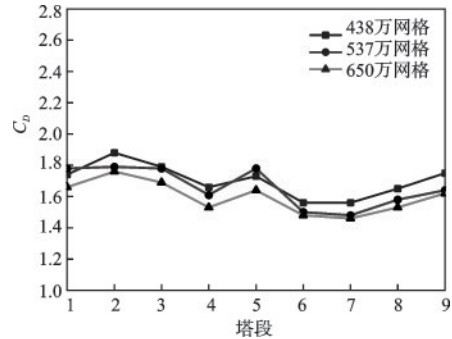


图11 不同网格各塔段阻力系数对比

Fig11 Comparison of drag coefficients for different mesh sizes across tower sections

基于CFD数值模拟得到了输电塔表面的平均风压系数等值线,如图12所示。输电塔表面的最大平均风压系数为1.046,最小平均风压系数为-2.088,平均风压系数随着高度增加不断增大。

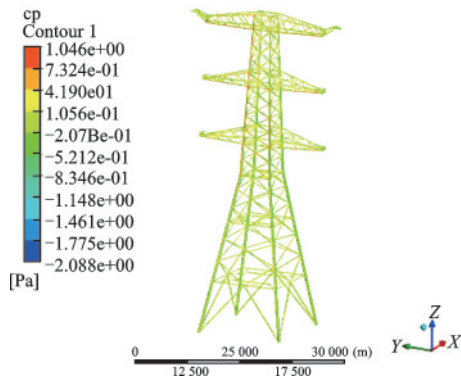


图12 输电塔表面平均风压系数等值线

Fig12 Contour map of mean wind pressure coefficients on the transmission tower surface

图13给出了第一层横担(63 m)、第二层横担(82.4 m)和第三层横担(101.6 m)三种高度处输电塔周围的流场平均速度等值线结果。由图所知,随着高度的增加,输电塔周围流场风速增大,在靠近输电塔处风速快速下降,且在背风面产生负压区,流场特征与预期较为符合。

依据各国规范计算出各塔段的阻力系数(阻力系数)规范值:中国《架空输电线路荷载规范》^[15](DL/T 5551-2018)规定,角钢塔阻力系数 μ_s 取

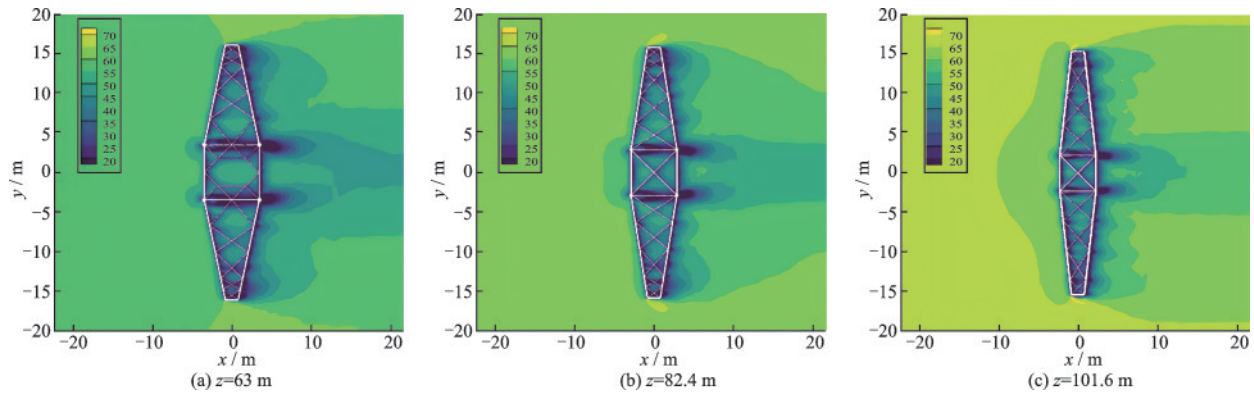


图13 不同高度处输电塔周围流场风速等值线

Fig13 Velocity contour map of flow field around transmission towers at different heights

$1.3(1 + \eta)$, η 为塔架背风面荷载降低系数;对于钢管塔,当 $\mu_z W_0 d^2 \leq 0.003$ 时, μ_s 按角钢塔架的 μ_s 值乘0.8采用(其中 μ_z 为风压高度系数、 W_0 为基准风压、 d 为钢管直径),当构件 $\mu_z W_0 d^2 \geq 0.021$ 时,钢管塔阻力系数 μ_s 值按角钢塔架的 μ_s 值乘0.6采用,当 $0.003 < \mu_z W_0 d^2 < 0.021$ 时, μ_s 值按插入法计算;美国ASCE/SEI 7-22^[16]规定,阻力系数 C_f 按 $4.0\epsilon^2 - 5.9\epsilon + 4.0$ 求得(其中挡风系数 ϵ 为输电塔节段构件的投影面积与该节段外廓面积之比);日本JEC-TR-00007-2015^[17]规定钢管塔阻力系数为 $1.9 - 1.5\phi + 1.5\phi^2$;IEC 60826-2016^[18]规定,阻力系数为 $2.2002 - 3.1323\phi + 2.7091\phi^2 + 0.2293\phi^3$ 。

将各塔段阻力系数数值模拟结果与规范值进行对比分析,如图14所示。对于不同规范阻力系数的规定值,美国规范^[16]远高于其他国家规范和数值模拟结果。日本规范^[17]和IEC规范^[18]结果相近,在塔段1-5较平稳,在塔段6-9逐渐增大。中国规范^[15]与日本^[17]和IEC^[18]规范值趋势相似,数值小0.2左右。澳洲规范^[19]与中国^[15]规范值塔段1-5接近,其各塔段

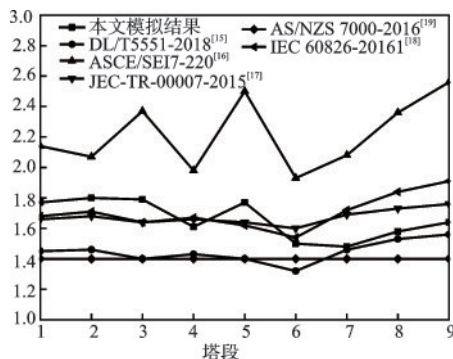


图14 输电塔各塔段阻力系数模拟值与规范值对比

Fig14 Comparison between simulated and standard drag coefficients for each section of transmission tower

阻力系数值趋于一条直线。本文模拟值在塔段1-3略大于日本规范^[17]和IEC规范^[18],在塔段6-9位于中国^[15]和日本^[17]规范值之间,变化趋势除在塔段5处有所增大外,与中国^[15]、日本^[17]和IEC^[18]规范值变化趋势基本符合。究其原因是塔段5为第一层横担,其阻力远大于塔段4和塔段6,故其阻力系数值与第二层横担(塔段3)和第三层横担(塔段1)相近。

3.3 输电塔风驱雨荷载模拟

假设垂直于结构表面的雨相动量将因壁面施加的反作用力减小为零,S. H. Huang^[3]根据动量定理提出输电塔壁面的WDR压强 P_{rain} 为:

$$P_{rain} = \int_0^{\infty} \rho \alpha |V_n|^2 dD \quad (14)$$

式中, α 为雨滴的体积分数。

在以往输电塔雨荷载研究中,将降雨对输电塔的冲击力分为竖向力和水平向力,雨滴撞击输电塔表面时的水平速度 V_n 取顺风向的平均速度。本文通过CFD数值模拟,求得输电塔表面雨相的体积分数与速度,更精确地分析风驱雨荷载在输电塔表面的分布情况。根据上述公式(13)可求得降雨强度 R_h 分别为32、64、200、709 mm/h时输电塔表面的WDR荷载,如图15所示。

根据以上确定的五种雨强,并依照体积分数原则,选择以下五组有代表性雨滴进行模拟,雨滴粒径分别为:1、2、3、4、5 mm。入口处雨滴的速度分为竖向与水平向速度,其中水平速度等于入口对应位置处的水平风速,竖向速度求解方法见公式(7)。根据以上求得不同粒径雨滴入口边界处的体积分数如图16所示。

通过本文模拟方法可获得不同降雨强度下输电塔表面的风驱雨荷载,图17给出了输电塔的代表性塔

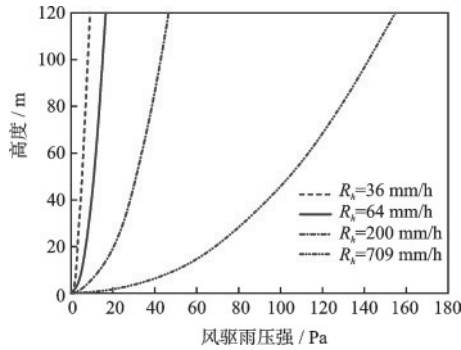


图 15 公式法计算不同高度风驱雨压强

Fig15 Calculation of wind-driven rain pressure at different heights using formulaic methods

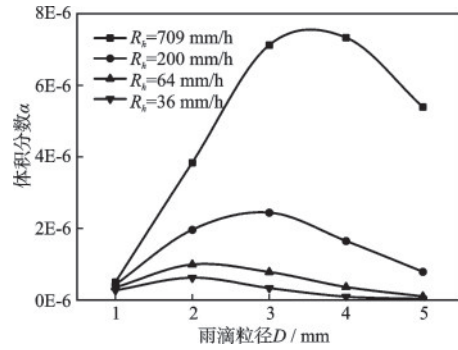


图 16 入口不同粒径雨滴的体积分数分布

Fig16 Distribution of volume fractions for raindrops of different sizes at the inlet

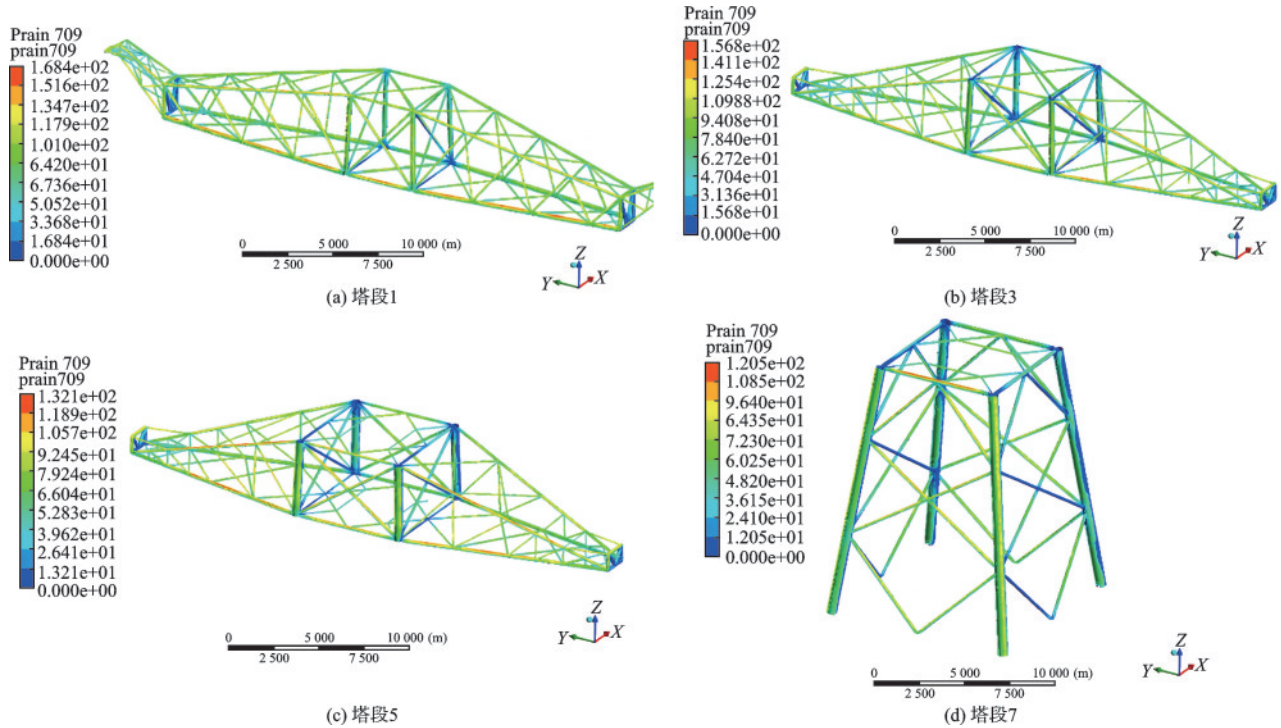


图 17 输电塔表面雨荷载分布($R_h = 709$ mm/h)

Fig17 Distribution of rain load on the transmission tower surface($R_h = 709$ mm/h)

段壁面雨荷载等值线和分布特征。由图 17 可知,各塔段壁面雨压主要位于输电塔迎风杆件上,且管径较细的横担和支撑杆件壁面雨压略大于角柱杆件。

对于各塔段,分别求出雨荷载和风雨总荷载并进行对比。表 2 和表 3 给出了不同降雨强度下输电塔各塔段壁面最大雨压和最大风雨总压强。分析表中数据可知:各塔段的雨压都随降雨强度增大而增大;同一降雨强度下,除塔段 3 因为横担的存在最大雨压略大于塔段 2 以外,其他各塔段壁面雨压最大值都随着高度增加而增加。当降雨强度为 709 mm/h 时,输电塔壁面最大雨压约为最大风压的 5.8%。表 4 和表 5 分别给出了不同降雨强度下输电

塔各塔段的顺风向雨荷载和各塔段顺风向雨荷载与风荷载的比值。当降雨强度为 709 mm/h 时,输电塔各塔段雨荷载最大约为风荷载的 5.1%。可见,极值降雨条件下雨荷载相对于风荷载仍处于一个较小的量级。

以往研究中输电塔雨荷载多采用公式法计算,雨滴水平方向速度采用水平风速,此方法计算简便,但没有考虑空气对雨滴水平方向速度的影响,将本文模拟结果与李宏男等^[6]求得的雨荷载对比,见表 6。本文模拟结果与公式法计算所得结果误差均在 20% 以内,且本文通过数值模拟,可精确得到壁面雨压分布特性及各塔段顺风向雨荷载。

表 2 输电塔各塔段壁面最大雨压强

Table 2 Maximum rain pressure on the wall of each section of the transmission tower 单位: Pa

降雨强度	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_h = 32 \text{ mm/h}$	9.9	9.0	9.1	8.3	8.0	7.3	7.1	6.2	5.0
$R_h = 64 \text{ mm/h}$	16.6	15.0	15.1	13.8	13.3	12.1	11.8	10.3	8.4
$R_h = 200 \text{ mm/h}$	48.9	43.6	45.7	40.8	38.5	36.1	35.0	30.1	24.4
$R_h = 709 \text{ mm/h}$	168.4	148.7	156.8	137.4	132.1	125.8	120.5	102.1	83.0

表 3 输电塔各塔段壁面最大风雨总压强

Table 3 Maximum total wind and rain pressure on the wall of each section of the transmission tower 单位: Pa

降雨强度	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_h = 32 \text{ mm/h}$	2 796	2 764	2 504	2 507	2 279	2 225	2 051	1 801	1 250
$R_h = 64 \text{ mm/h}$	2 801	2 768	2 508	2 511	2 282	2 228	2 054	1 804	1 252
$R_h = 200 \text{ mm/h}$	2 819	2 792	2 521	2 532	2 299	2 245	2 069	1 815	1 259
$R_h = 709 \text{ mm/h}$	2 878	2 871	2 574	2 600	2 355	2 300	2 116	1 849	1 276

表 4 输电塔各塔段顺风向雨荷载

Table 4 Along-wind rain load (N) for each section of the transmission tower 单位: N

降雨强度	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_h = 32 \text{ mm/h}$	310	165	223	196	207	262	230	276	175
$R_h = 64 \text{ mm/h}$	509	269	364	319	338	246	375	451	286
$R_h = 200 \text{ mm/h}$	1 359	712	971	850	903	652	995	1 193	743
$R_h = 709 \text{ mm/h}$	4 189	2 186	2 995	2 625	2 799	2 008	3 060	3 649	2 221

表 5 输电塔各塔段顺风向雨荷载与风荷载比值

Table 5 Ratio of along-wind rain load to wind load for each section of the transmission tower

降雨强度	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_h = 32 \text{ mm/h}$	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%	0.4%	0.3%	0.3%	0.4%
$R_h = 64 \text{ mm/h}$	0.4%	0.4%	0.3%	0.4%	0.4%	0.4%	0.5%	0.5%	0.6%
$R_h = 200 \text{ mm/h}$	1.1%	1.1%	1.0%	1.1%	1.0%	1.2%	1.3%	1.4%	1.7%
$R_h = 709 \text{ mm/h}$	3.4%	3.4%	3.2%	3.6%	3.3%	3.7%	4.1%	4.5%	5.1%

杨俊涛^[7]采用拉格朗日多相流模型计算输电塔雨荷载,假设雨滴作用时间为 $D/2V_n$ (D 为雨滴粒径, V_n 为雨滴水平方向速度),求得输电塔表面平均雨压与平均风压的比值。本文将雨滴作为连续相,求得降雨强度分别为200 mm/h和709 mm/h时不同高度

处输电塔表面平均雨压与平均风压的比值见表7。本文基于欧拉多相流模型,改进采用拉格朗日多相流模型模拟时雨滴作用时间的不确定性,模拟结果约为拉格朗日多相流模型模拟结果的两倍。可见,雨滴作用时间的假设会使结果产生较大误差。

表 6 输电塔全塔最大雨荷载模拟与公式法对比

Table 6 Comparison of maximum simulated rain load on the entire transmission tower with formulaic methods 单位: Pa

降雨强度	李宏男等 ^[6]	本文模拟	误差
$R_h = 32 \text{ mm/h}$	8.2	9.9	17.5%
$R_h = 64 \text{ mm/h}$	15.3	16.6	7.7%
$R_h = 200 \text{ mm/h}$	43.9	48.9	10.3%
$R_h = 709 \text{ mm/h}$	146.2	168.4	13.2%

表 7 不同方法平均雨压与平均风压的比值

Table 7 Ratio of mean rain pressure to mean wind pressure using different methods

高度/m	杨俊涛等 ^[7] (拉格朗日法)		本文(欧拉法)	
	200 mm/h	709 mm/h	200 mm/h	709 mm/h
18.0	0.90%	2.53%	1.70%	5.20%
64.5	0.89%	2.19%	1.65%	5.83%
101.0	0.93%	2.21%	1.63%	5.41%

4 结 论

本文基于CFD数值模拟研究了输电塔风雨场特性。通过将输电塔分段,获得了各塔段的阻力系数,将数值模拟结果与规范结果进行对比分析,验证了本模拟的合理性。采用欧拉-欧拉多相流模型对输电塔表面雨荷载进行了数值模拟研究,将空气中的雨滴看作连续相,改进了现有输电塔雨荷载模拟时雨滴作用时间的假设所导致的误差,进而更准确的获得输电塔雨荷载,得到结论如下:

(1)输电塔壁面平均风压系数随着高度增大而增大,最大平均风压系数为1.046;输电塔阻力系数略大于我国现有规范值,且受力面积较大的横担处阻力系数大于其它塔段。

(2)输电塔壁面雨压随高度增大而增大,最大值位于输电塔顶部前方迎风杆件处,且管径较细的横担和支撑杆件壁面雨压略大于管径较粗的角柱杆件。

(3)输电塔各塔段顺风向雨荷载随着降雨强度增大而增大,当降雨强度为709 mm/h时,输电塔各塔段顺风向雨荷载最大为风荷载的5.1%。可见,相较于风荷载,雨荷载对结构的影响较小。

参考文献:

- [1] Choi E. Simulation of wind-driven-rain around a building [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, 46/47: 721-729.
- [2] Blocken B, Carmeliet J. Spatial and temporal distribution of driving rain on a low-rise building[J]. *Wind and Structures and International Journal*, 2002, 5(5): 441-462.
- [3] Huang S H, Li Q S. Numerical simulations of wind-driven rain on building envelopes based on Eulerian multiphase model[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(12): 843-857.
- [4] Kubilay A, Derome D, Blocken B, et al. Wind driven rain on two parallel wide buildings: Field measurements and CFD simulations[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2015, 146: 11-28.
- [5] 吴小平. 低层房屋风雨作用效应的数值研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Wu X P. Numerical study of wind-rain interaction effect on low rise buildings[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [6] 李宏男, 任月明, 白海峰. 输电塔体系风雨激励的动力分析模型[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(30): 43-48.
Li H N, Ren M Y, Bai H F. Rain wind induced dynamic model for transmission tower system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(30): 43-48. (in Chinese)
- [7] 杨俊涛. 大跨越输电塔线体系环境荷载与极限承载力分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
Yang J T. The environmental loads and ultimate carving capacity of large span transmission tower-line system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- [8] 劳俊, 王希慧, 宋波, 等. 脱硝钢架表面体型系数及风致响应分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(3): 534-541.
Lao J, Wang X H, Song B, et al. Analysis of superficial shape coefficient and wind-induced response of denitrification steel frame [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(3): 534-541. (in Chinese)
- [9] 孙芳锦, 王岩露, 冯旭, 等. 风雨联合作用下风向对大跨度悬挑屋盖的压力分布影响研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(3): 542-547.
Sun F J, Wang Y L, Feng X, et al. Research on the influence of wind direction on the pressure distribution of long span cantilevered roof under the combined action of wind and rain [J] *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(3): 542-547. (in Chinese)
- [10] Laws J O, Parsons D A. The relation of raindrop-size to intensity [J]. *Transactions-American Geophysical Union*, 1943, 24: 452-460.
- [11] Wolf D. On the Laws-Parsons distribution of raindrop sizes[J]. *Radio Science*, 2016, 36(4): 639-642.
- [12] Matzler C. Drop-size distributions and mie computations for Rain[R]. University of Bern, Switzerland: Institute of Applied Physics, 2002.
- [13] Wang H, Song W H, Chen Y S. Numerical simulation of wind-driven rain distribution on building facades under combination layout[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 188: 375-383.
- [14] 谢华平, 何敏娟, 马人乐. 基于CFD模拟的格构塔平均风荷载分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(5): 1980-1986.
Xie H P, He M J, Ma R L. Analyse of mean wind load of lattice tower based on CFD simulation[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41(5): 1980-1986. (in Chinese)
- [15] 架空输电线路荷载规范: DL/T 5551-2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [16] ASCE. Minimum design loads and associated criteria for bulidings and other structures: ASCE standards ASCE/SEI 7-22[S]. New York: ASCE, 2022.
- [17] JEC. Design standards on structures for transmissions: JEC-TR-00007-2015[S]. Tokyo: JEC, 2015.
- [18] IEC. Design criteria of overhead transmission lines: IEC 60826-2016[S]. Switzerland: IEC, 2016.
- [19] AS/NZS. Overhead line design: AS/NZS 7000-2016 [S]. Sydney: Technical Committee EL-052, 2016.

(本文编辑:张艺)