

文章编号:0254-0096(2020)06-0032-09

最不利停机状态下兆瓦级风力机风驱雨分布特性研究

杨青^{1,2}, 柯世堂³, 余文林³, 王同光¹, 曹曙阳⁴

(1. 南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 南京 210016;

2. 常州工学院常州市建设工程结构与材料性能研究重点实验室, 常州 213032; 3. 南京航空航天大学土木工程系, 南京 210016;

4. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为系统探索此类风力机风雨分布特性, 设置不同风速及降雨参数, 以中国某 1.5 MW 风力机为工程背景, 建立三维塔筒-机舱-叶片一体化刚体模型, 采用欧拉-拉格朗日方法, 展开风雨联合数值模拟, 从雨滴着点分布特征、雨滴速度分布特性与雨荷载 3 个方面进行分析。研究表明, 风力机下部叶片在中等风速暴雨雨强工况下着点比例最高; 雨滴粒径集中范围随风速的增大而逐渐偏向较大粒径; 叶片下部在低风速工况下, 随雨强的增加, 其雨滴末速度逐渐朝高风速方向迁移, 叶片上部此类迁移现象更为明显; 相同风速等级下, 雨荷载随雨强的增加而显著升高; 中等风速强大暴雨工况下雨荷载 9 种工况中的雨荷载极值。

关键词: 风力机; 降雨; 数值模拟; 分布特性; 雨荷载

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引言

随着新能源开发需求不断扩大, 风力机逐渐朝单机大功率方向发展, 兆瓦级机体已成为当今主流趋势。在此过程中, 塔筒与叶片尺寸进一步增大, 塔架与叶片之间的气动干扰更为凸显, 风敏感性增强。已有研究表明, 叶片完全遮挡塔架是影响风力机气动性能的最不利停机位置^[1]。此外, 在极端气候条件中, 大风常伴随有暴雨现象, 雨滴下降过程中同时受到重力与空气粘滞阻力的作用, 使其以倾斜的运动轨迹撞击至风力机结构表面, 产生相应雨荷载。相关输电塔风场效应研究^[2-3]发现, 高度越高的输电塔, 其风雨荷载效应愈加明显, 风驱雨所产生的作用力使得强风雨作用下的输电塔倒塌事故频繁发生, 设计时需考虑放大风荷载设计值。因此, 开展最不利停机状态下兆瓦级风力机风雨荷载效应研究, 对于此类设施的安全运行和未来发展尤其重要。

1970 年之后, 商业软件的开发极大地推动了数值模

拟技术在风驱雨研究方面的发展。Souster 等^[4-5]于 1979 年首次利用数值模拟手段, 计算出二维流场下雨滴颗粒的运动曲线。此后, Choi^[6-7]分别将风场与雨滴视为连续相及离散相, 采用欧拉-拉格朗日方法, 开展不同维度建筑物的风驱雨研究, 吴小平^[8]基于此类方法展开低层建筑风驱雨研究, 提出局部强度因子去分析建筑立面区域降雨强度的异同。杨俊涛等^[9]针对输电塔结构, 研究水平风速和降雨强度对平均雨荷载的影响, 并指出水平平均雨荷载与水平风速和降雨强度成正比, 水平平均雨荷载与风荷载的比值沿高度的增加而递减, 最大值不超过 2.6%。付兴等^[10]则采用数值模拟及风洞试验方法研究输电塔在良态风及特异风谱下的风振反应, 并利用压强缩尺比与几何缩尺比的关系, 推导出风洞试验中风雨荷载的缩尺比计算公式。具体到风力机结构, 早期此类结构气动性能研究多侧重于单一风场, 仅有董辉等^[11]和高乾丰^[12]在风雨单向耦合和固定雨强的情况下, 展开风力机风雨荷载特性及结构响应研究。

综上所述, 风力机风雨联合效应研究仍处于初始阶

收稿日期: 2017-11-27

基金项目: 国家自然科学基金 NSFC-RGC 合作研究项目(51761165022); 国家重点研发计划(2019YFB1503700; 2017YFE0132000); 江苏省青蓝工程优秀青年骨干教师培养计划

通信作者: 柯世堂(1982—), 男, 博士、教授, 主要从事结构工程与风洞试验方面的研究。keshitang@163.com

段,采用风雨双向耦合,并设置不同风速、雨强参数组合的风力机荷载特性研究鲜有展开。鉴于此,本文以某1.5 MW 水平轴风力机最不利停机状态为研究对象,建立高精度风力机三维实体模型。首先,基于 CFD 方法模拟风力机周围风场,通过风力机表面风压分布与规范曲线的对比,验证风场模拟的有效性;在此基础上,添加离散相模型(discrete phase model, DPM)输入不同等级雨量,展开雨滴和风场同步迭代以实现风-雨双向耦合运算。本研究旨在分析出不同风速及雨强对风力机结构表面风驱雨量分布与雨滴附加荷载的影响规律,以期风力机荷载取值与结构设计提供参考。

1 风雨场模拟

1.1 降雨强度

单位时间内通过水平面的降雨体积通量称为降雨强度(R),又简称雨强,本文以 mm/h 为标准对雨强进行分类。与气象中常用的 12 h 和 24 h 平均降雨量相比,小时降雨量更能直观反映出工程中最为关心的极端气候条件下瞬时雨强对结构性能的影响。表 1 给出了暴雨强度分类列表,由表 1 可看出,2 种雨强分类的采样时间不同,同一场雨的测量结果差别较大,采用小时雨强进行结构验算相对日雨强偏于安全。

表 1 暴雨强度等级划分

Table 1 Grade of heavy rainfall intensity

雨强等级	暴雨	大暴雨			
		弱	中	强	极值
日雨/mm·d ⁻¹	100	200			
小时雨强/mm·h ⁻¹	32	64.0	100.0	200.0	709.2

1.2 雨滴谱分布

研究中常将雨滴等效为球体,并采用同体积雨滴近似直径描述粒径分布,其随时间和空间而改变,粒径函数称为雨滴谱。雨滴粒径超过 1 mm 后,其竖向密度随粒径的增大显著减小,雨强增大导致大粒径雨滴数量随之增加。试验统计归纳发现,雨滴谱近似服从负指数分布,目前比较流行的有 Best 谱、Marshall-Palmer 谱及 Gamma 谱。已有研究指出选取不同种类雨滴谱对后续计算影响较小,故本节主要对 Marshall-Palmer 谱进行介绍,如式(1)所示:

$$n(D) = N_0 \exp(-\Delta D) \quad (1)$$

式中, $n(D)$ ——直径为 D 的雨滴数量; N_0 ——截距, $N_0 = 8 \times 10^3$ 个/($\text{m}^3 \cdot \text{mm}$); Δ ——斜率因子, $\Delta = 4.1I^{-0.21}$,

其中 I 为降雨强度, mm/h。

1.3 雨滴释放速度

无风条件下,雨滴受重力作用加速下落,与此同时,空气阻力也随之增加。当空气阻力与自重平衡时雨滴以竖直末速度匀速下降,该速度常被称为雨滴终速或极限速度。三原义秋^[13]通过室内测试雨滴落地速度,总结出了雨滴下落竖直末速度的经验公式:

$$V(r) = 9.1549r^{0.5} - 2.6549 + 2.5342e^{-3.727r^{0.5}} - 0.389r^{2.18} \quad (2)$$

式中, $V(r)$ ——半径为 r 的雨滴的垂直降落末速度, m/s。

有风情况下,雨滴在水平方向受空气粘滞力作用,最终水平末速度 V_i 与所在位置处水平风速近似相等。

1.4 风-雨双向耦合算法

雨滴冲击至塔筒壁面,其末速度由 V_i 变为零,求解冲击力的关键在于碰撞时间。计算中忽略雨滴在冲击过程中可能发生的蒸发、飞溅、破裂等现象,认为雨滴与结构间相互作用遵循牛顿第二定律。由动量定理^[8-9]:

$$\int_0^\tau f(t)dt + \int_{V_i}^0 m dv = 0 \quad (3)$$

式中, $f(t)$ ——单个雨滴冲击力矢量, N; v ——雨滴速度矢量。

雨滴在时间 τ 内对结构冲击力 $F(\tau)$ 可表示为:

$$F(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau f(t)dt = \frac{mV_i}{\tau} \quad (4)$$

假设下落雨滴为球体,则 $m = \frac{1}{6}\rho\pi D^3$,表达式可简化为:

$$F(\tau) = \frac{mV_i}{\tau} = \frac{1}{6\tau}\rho\pi D^3 V_i \quad (5)$$

由于雨滴直径一般在 6 mm 以下,且撞击前水平末速度相对较大,故可将碰撞时间 τ 表达为:

$$\tau = \frac{D}{2V_i} \quad (6)$$

则雨滴对结构的冲击力可进一步表示为^[8-9]:

$$F(\tau) = \frac{1}{3}\rho\pi D^2 V_i^2 \quad (7)$$

2 工程简介及工况设置

2.1 工程简介

该 1.5 MW 水平轴风力机,塔体为通长变厚度结构,叶片之间夹角为 120°,沿周向均匀分布,塔架高为 220 m,塔底半径 2 m,塔顶半径 1.5 m,塔顶厚度 23 mm,塔底厚度 50 mm,叶片长度为 31.5 m,机舱尺寸 9 m × 3 m × 3 m,表 2 为该典型风力机的主要结构尺寸及示意图。

表2 风力机主要结构尺寸及示意图

Table 2 Size characteristics of main component and sketch map for super large cooling tower

1.5 MW 风力机 参数	数值	示意图
塔架高度/m	65.0	
塔顶半径/m	1.5	
塔底半径/m	2.0	
塔顶厚度/mm	23.0	
塔底厚度/mm	50.0	
叶片长度/m	31.5	
机舱尺寸/m	9×3×3	
切入风速/ $m \cdot s^{-1}$	3.0	
额定风速/ $m \cdot s^{-1}$	10.4	
切出风速/ $m \cdot s^{-1}$	25.0	
叶片倾角/ $(^\circ)$	5.0	

2.2 工况设置

该风力机位于 B 类地貌,以叶片完全遮挡塔架考虑风力机停机状态^[1]。设置 3 种风速(10、15、25 m/s)与 3 种雨强(50、100、200 mm/h)。雨强以暴雨气候条件为基准选择,分别为暴雨、中大暴雨和强大暴雨,经排列组合共形成表 3 所列出的 9 种对比工况。

3 计算域设置及计算策略

3.1 计算域与网格划分

本文研究的风力机均处于 0° 来流风向角。为保证风力机尾流能够充分发展,计算域尺寸设置为 $12D \times 5D \times 5D$ (流向 $X \times$ 展向 $Y \times$ 竖向 Z , D 为风轮直径),风力机置于距离计算域入口 $6D$ 处。为兼顾计算效率与精度,同时考虑到叶片曲线复杂,网格划分整个计算域划分为局部加密区域和外围区域。局部加密区域内含风力机模型,采用非结构化网格进行划分,外围区域形状规整,采用高质量的结构化网格进行划分。核心区最小网格尺寸为 0.3 m,总网格数量为 340 万。计算域及模型网格划分如图 1 所示。

表3 风力机风雨工况划分表

Table 3 Working condition of wind-rain coupling action for super large cooling tower

工况编号	雨强/ $mm \cdot h^{-1}$	风速/ $m \cdot s^{-1}$	工况编号	雨强/ $mm \cdot h^{-1}$	风速/ $m \cdot s^{-1}$	工况编号	雨强/ $mm \cdot h^{-1}$	风速/ $m \cdot s^{-1}$
工况 1	50		工况 4	50		工况 7	50	
工况 2	100	10	工况 5	100	15	工况 8	100	25
工况 3	200		工况 6	200		工况 9	200	

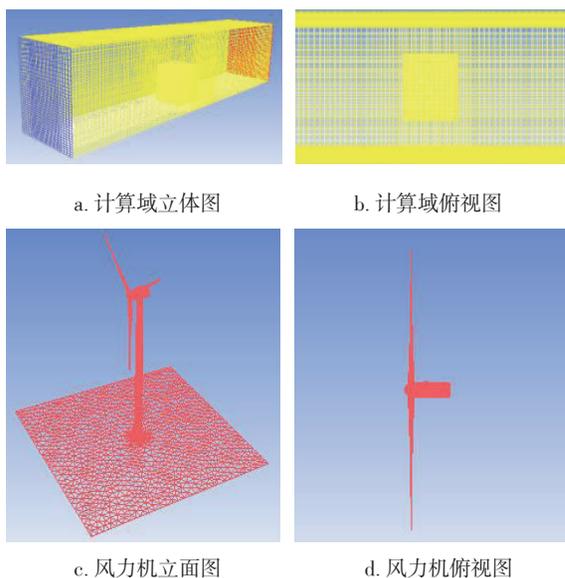


图1 计算域及模型网格划分示意图

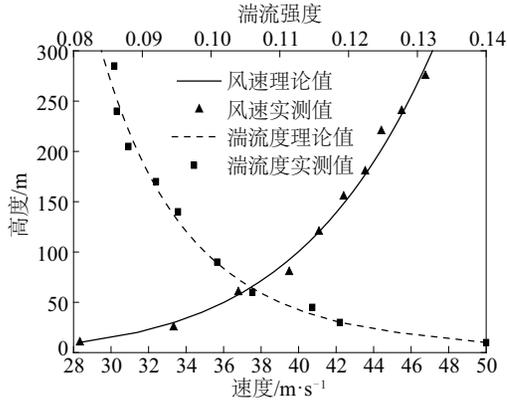
Fig. 1 Sketch maps of computational field and model mesh

3.2 边界条件与参数设置

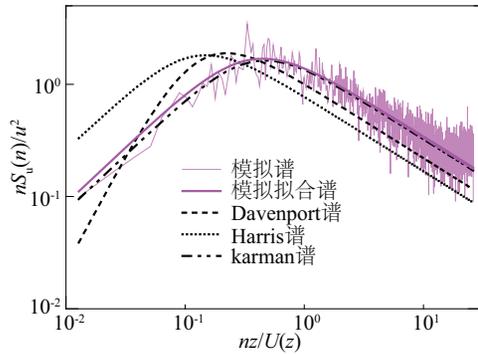
该数值模拟,定义计算域左侧和顶部边界条件为速度入口,右侧为压力出口,按照 B 类地貌设置大气边界层指数风剖面 and 湍流度剖面,将模拟的脉动风谱进行拟合,并与 Davenport 谱、Harris 谱及 Karman 谱进行比较,可认为该风场模拟的脉动风谱满足工程要求(见图 2,图 2b 中 n 代表风荷载频率; $S_u(n)$ 代表风荷载顺风向功率谱密度; u 代表脉动风速; z 代表高度; $U(z)$ 代表高度 z 位置的风速),其中地面粗糙度指数为 0.15,50 年重现期 10 m 参考高度处的基本风速为 10、15、25 m/s,并通过 UDF 文件定义上述脉动风场;地面以及风力机表面采用无滑移壁面,侧面采用等效于自由滑移壁面的对称边界条件。

数值计算采用 3D 单精度、分离式求解器,空气风场选用不可压缩流场,湍流模型选用雷诺平均方法中

的 SST 模型, 压力速度耦合方程组求解采用 Simplec 格式, 对流项求解格式为 2 阶, 计算过程中设置网格倾斜校正以提高混合网格计算效果, 控制方程的计算残差设置为 1×10^{-6} 。



a. 平均风剖面及湍流强度分布图



b. 脉动风谱对比图

图2 B类风场模拟结果示意图

Fig. 2 Result diagrams of wind field simulation for class B

3.3 风-雨耦合计算策略

此类高雷诺数下高耸结构的风-雨双向耦合模拟, 待风场求解稳定后, 插入雨滴离散相执行风雨场耦合运算, 颗粒位置在每个时间步内的相间迭代计算过程中都会得到更新。本文采用 1.0~6.0 mm 范围内 6 种直径分布雨滴来模拟自然降雨(见表 4), 每类直径雨滴数量和体积占有率采用 2.1 节中 Marshall-Palmer 谱确定。设定计算域顶部作为雨滴释放入口, 以满足最小降落高度要求, 保证不同大小雨滴均达到式(3)所示末速度。雨滴水平释放速度为零, 其在稳定流场的风力驱动下, 逐渐接近所在位置处水平风速。为更贴合实际工程情况, 将风力机表面边界设置为捕捉(trap), 在风雨耦合计算过程中捕捉结构表面捕捉雨滴数量, 并记录撞击瞬间的基本信息, 如位置坐标、雨滴速度、粒径大小等; 计算域壁面边界设为逃逸(escape), 以避免雨滴过多积累于计

算域中, 引起运算发散。风雨耦合迭代完成后, 可根据连续相流场结果及风力机表面雨滴信息, 得出风雨联合作用下风力机表面压力分布。

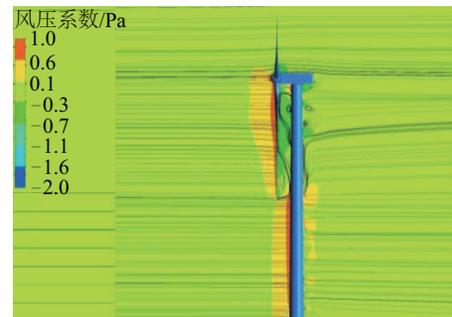
表4 雨滴直径分组(mm)

Table 4 Diameter of raindrops(mm)

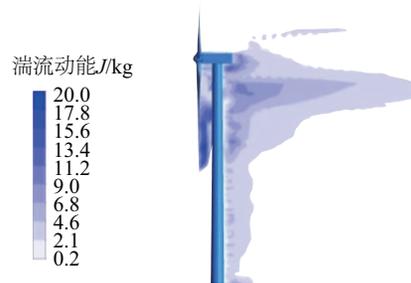
雨滴直径	控制范围	雨滴直径	控制范围
1	0.0~1.5	4	3.5~4.5
2	1.5~2.5	5	4.5~5.5
3	2.5~3.5	6	5.5~6.0

3.4 模拟结果分析与可靠性验证

验证计算中, 10 m 参考高度处的基本风速为 25 m/s。图 3、图 4 分别为风力机风场云图和未干扰区段风压系数分布曲线。观察分析可知: 1) 平均压力分布左右对称且从迎风面到背风面呈现出先减小后增大直至平稳的分布规律, 与规范类似; 2) 气流在风力机塔筒迎风面前缘发生流动分离, 侧边流动分离出现加速效应, 持续发展后在背风面形成尾流涡旋以及回流。图 4 计算所得出的塔架平均风压系数与规范中环向分布规律值基本吻合, 验证了本文数值模拟的可靠性。



a. 压力-速度云图



b. 湍流动能云图

图3 风力机风场数值模拟云图

Fig. 3 Contours of flow field for wind turbine

4 结果分析

离散相雨滴在水平空气来流的作用下, 以一定风速

随机撞击至风力机结构表面,并因风力机结构周围流场分离的复杂性,在不同风速及雨强参数下,发生雨滴分布比例、粒径分布、撞击速度的变化。本节分别从雨滴着点分布特征、雨滴速度分布特性与雨荷载 3 个方面展开详细讨论。

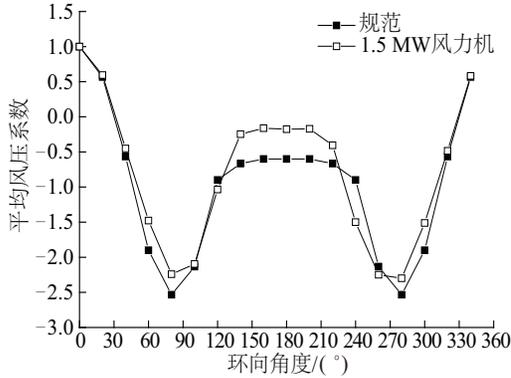


图4 未干扰区段塔筒表面风压实测及数值模拟结果对比图

Fig. 4 Illustration of comparison between specification value and numerical simulation result for undisturbed section

4.1 雨滴着点分布特征

风力机结构由于其各部分迎风面尺寸的不同,雨滴着点分布比例会产生较大差异,在不同风速与雨强下,此类差异可能会趋于明显。对 9 种工况展开综合分析,由图 5 可看出,风力机叶片由于其迎风半径大,着点数量占据比例较高,其中下部叶片在中等风速暴雨雨强(工况 4)下着点比例最高。此后随风速及雨强参数的升高,下部叶片着点比例逐渐减小,且减小比例随风速的增大而升高。其原因可能是高风速导致的剧烈流动分离使气流裹挟雨滴大量偏离叶片结构。此时,雨

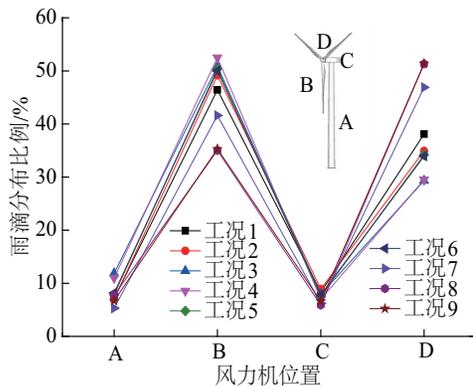


图5 风力机结构雨滴着点分布比例示意图

Fig. 5 Illustration of raindrop proportion in wind turbine

滴着点数量主要影响因素为风速,而非雨强。

进一步分析风力机整体结构雨滴着点粒径对应的数量分布,图 6 可看出雨滴着点数量主要受雨强影响,雨滴粒径集中范围随风速的增大而逐渐偏向较大粒径。强大暴雨雨强下,风力机各粒径雨滴着点数量均较为突出,且随着来流风速的增加,雨滴粒径主要集中在 2 mm 变化至 5 mm。其原因为大风速使较小粒径雨滴受到气流裹挟,在风力机结构周围发生流动分离,只有较大粒径雨滴脱离气流涡旋,冲击至结构表面,其着点数量比例呈现线性关系。

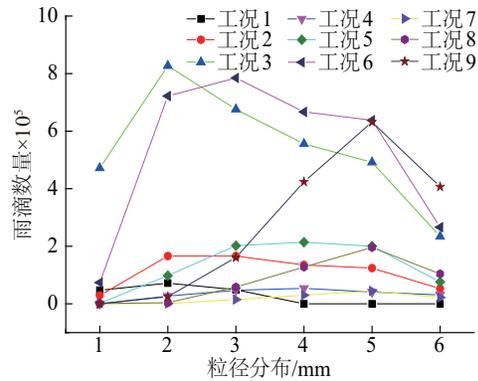
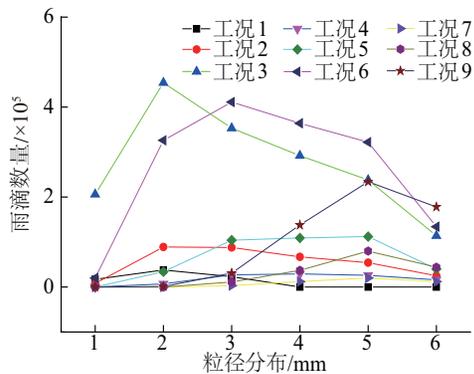


图6 风力机整体结构雨滴粒径及数量整体图

Fig. 6 Illustration of raindrop diameter and corresponding number of wind turbine

在此基础上,针对风力机各部分展开雨滴着点粒径分析,由图 7 可看出中等风速强大暴雨雨强工况下,各机构雨滴着点粒径分布范围较广,主要集中于 2~5 mm;对应低风速工况,其雨滴粒径主要集中于 2 mm,高风速工况则主要集中于 5 mm,雨滴分布效应较不明显,其效应可能导致此 2 类工况下的雨荷载效应不突出。



a. 叶片下部

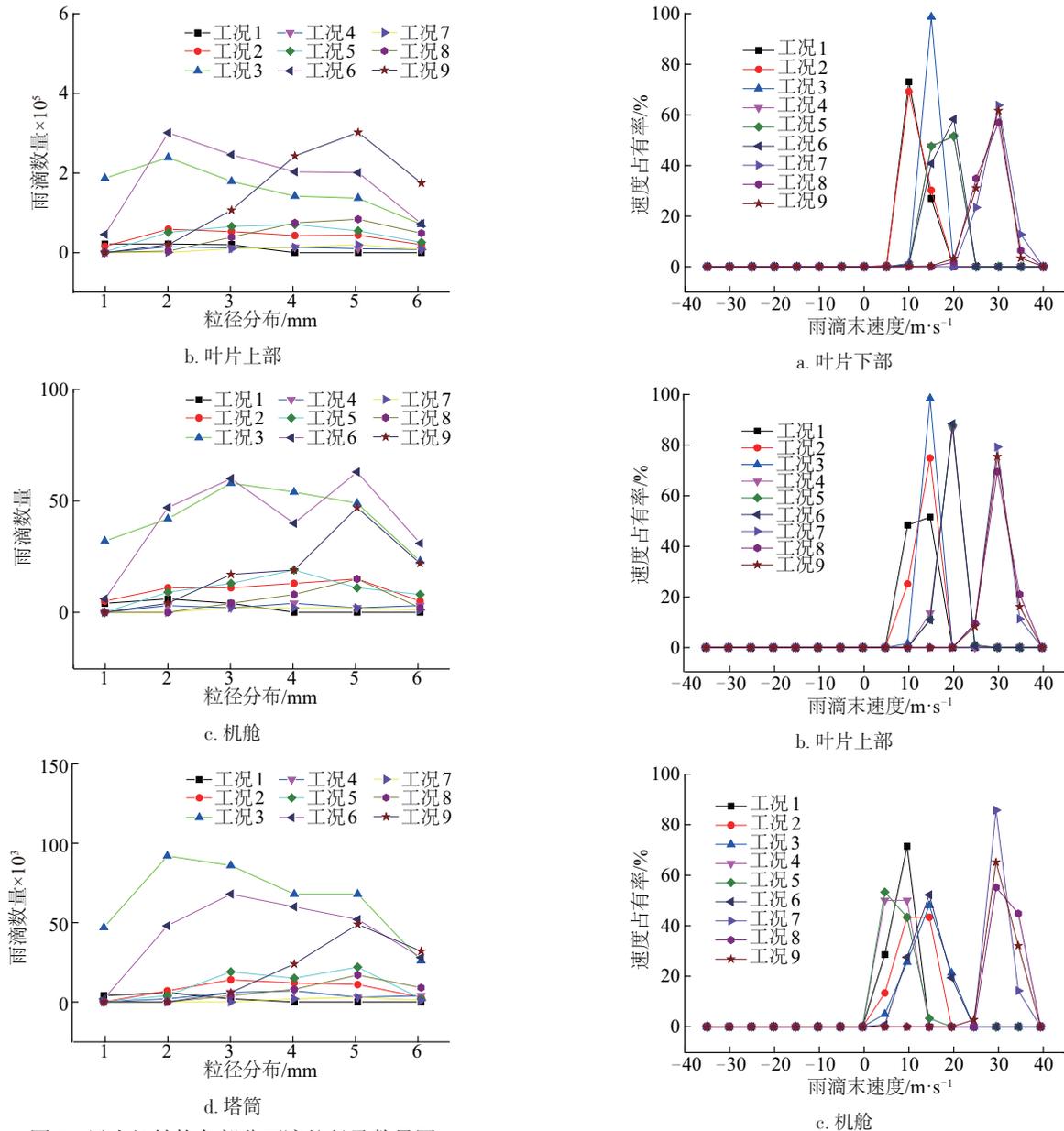


图7 风力机结构各部分雨滴粒径及数量图

Fig. 7 Illustration of raindrop diameter and corresponding number of wind turbine components

4.2 雨滴速度分布特性

针对风力机各部分展开雨滴速度比率分析,如图8所示。从图8a和图8b可看出,叶片下部在低风速工况下,随雨强的增加,其雨滴末速度逐渐朝高风速方向迁移,叶片上部此类迁移现象更为明显;中等风速及高风速工况下,雨滴末速度分布特征基本保持一致,不随雨强发生较大变化,叶片雨滴水平末速度主要受来流风速影响。来流空气在叶尖处所发生的流动分离,增强局部风速,并带动雨滴水平末速度升高。

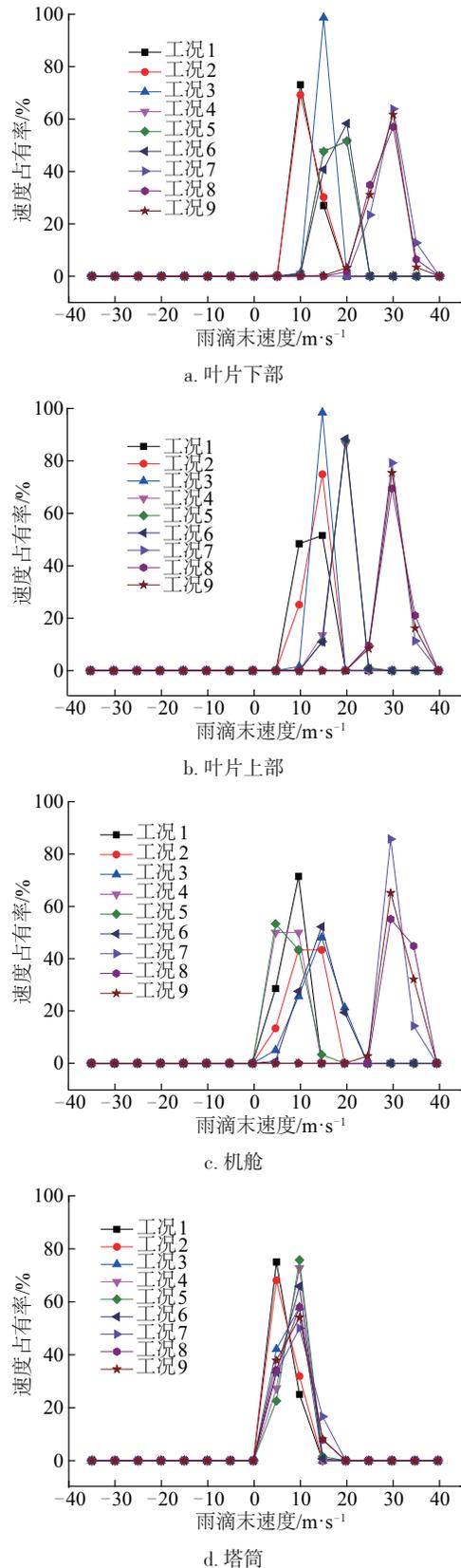
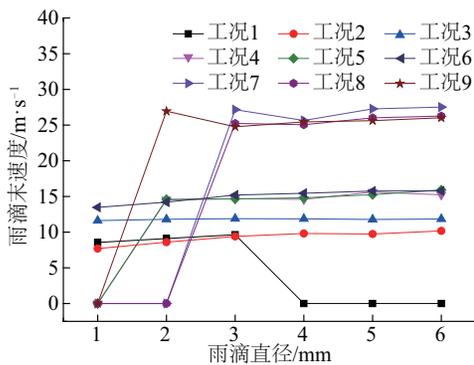


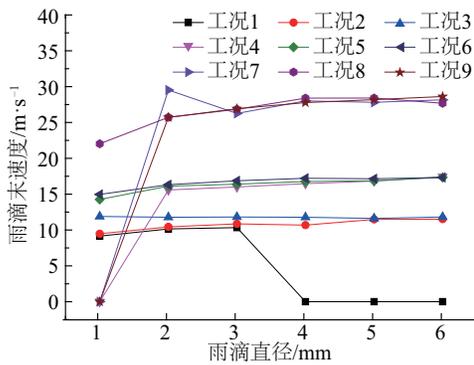
图8 风力机结构各部分雨滴速度占有率示意图

Fig. 8 Illustration of velocity proportion for wind turbine components

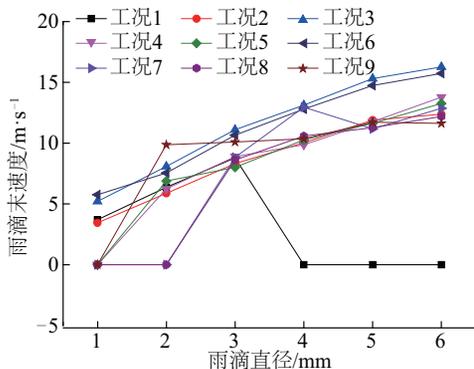
由图 8c 和图 8d 可看出,机舱雨滴末速度交叉分布特征较为明显,尤其在中低风速工况下,雨滴末速度分布比例特征基本一致,高风风速工况下,占据较高比例的雨滴末速度主要集中于来流风速附近,中大暴雨雨强工况下,雨滴末速度主要位于高于来流风速的区间内,且分布更为均匀。塔筒处,除去小风速中大暴雨雨强工况分布外,其余各工况下的雨滴末速度分布比例保持一致。进一步展开各雨滴粒径对应平均速度分析,由图 9 可看出,叶片下处各雨滴粒径所对应的平均速度较为一致,粒径对应风速基本随风速的增加而升高。机舱雨滴速度基本呈线性增加的趋势,塔筒雨滴速度随着风速的增加而增加,但分布较为均匀。



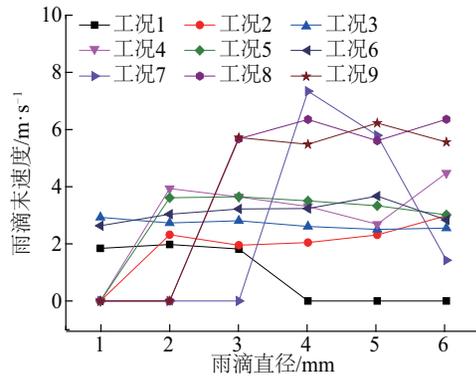
a. 叶片下部



b. 叶片上部



c. 机舱



d. 塔筒

图9 风力机结构各部分雨滴平均速度图

Fig. 9 Illustration of average velocity distribution of wind turbine components

4.3 雨荷载特性分析

采用 2.3 节式(7)开展 9 种工况的结构表面总雨荷载计算,图 10 为 9 种工况下风力机雨滴荷载分布图。其中,工况 1 总雨荷载仅为 0.04 kN,相同风速等级下,雨滴荷载随雨强增加而显著升高。每一风速工况下,最大雨强等级对应的雨荷载均为同类风速最大值。中等风速强大暴雨雨强工况下雨滴荷载高于最大风速对应雨强工况下的雨滴荷载值,为 9 种工况中雨滴荷载极值。

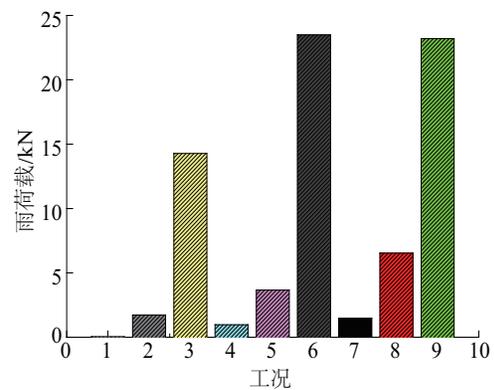


图10 风力机结构各工况雨滴荷载分布图

Fig. 10 Rain load distribution of wind turbine under different work conditions

进一步列出各工况雨荷载与总风荷载的比例值,如表 5 所示。由表 5 可知,风力机结构表面承受雨荷载受风速与雨强共同影响,各风速下总雨荷载随雨强的提升而增大。工况 6 中雨荷载为 23.49 kN,所占比例最高,为总风荷载的 7.53%。

表5 风力机表面风雨荷载列表

Table 5 Summary table of wind and rain load for wind turbine

工况 编号	总雨 荷载/kN	总风 荷载/kN	风雨总 荷载/kN	比例/%
1	0.04	202.14	202.18	0.02
2	1.72	201.86	203.58	0.85
3	14.28	203.04	217.32	7.03
4	0.97	312.15	313.12	0.31
5	3.67	308.53	312.20	1.19
6	23.49	311.82	335.31	7.53
7	1.48	568.41	569.89	0.26
8	6.54	552.61	559.15	1.18
9	23.21	557.36	580.57	4.16

5 结论

基于数值模拟方法针对风雨共同作用下风力机雨滴着点分布特征、雨滴速度分布特性与雨荷载3个方面进行研究,主要结论如下:

1)风力机下部叶片在中等风速暴雨雨强下着点比例最高。此后,随风速及雨强参数的增加,下部叶片着点比例逐渐减小,且减小比例随风速的增大而升高。其原因可能为高速导致的剧烈流动分离,使得气流裹挟雨滴大量偏离叶片结构。此时,雨滴着点数量主要影响因素为风速,而非雨强。

2)雨滴粒径集中范围随风速的增大而逐渐偏向较大粒径。强大暴雨雨强下,风力机各粒径雨滴着点数量均较为突出,且随着来流风速的增加,雨滴粒径主要集中范围从2 mm变化至5 mm。

3)叶片下部在低风速工况下,随雨强的增加,其雨滴末速度逐渐朝高速方向迁移,叶片上部此类迁移现象更为明显;中等风速及高速工况下,雨滴末速度分布特征基本保持一致,不随雨强发生较大变化,叶片雨滴水平末速度主要受来流风速影响。

4)工况1总雨荷载仅为0.04 kN,相同风速等级下,雨滴荷载随雨强的增加而显著升高。每一风速工况下,最大雨强等级对应的雨荷载均为同类风速最大值。中等风速强大暴雨雨强工况下雨滴荷载高于最大风速对应雨强工况下的雨滴荷载值,为9种工况中雨滴荷载极值。

[参考文献]

[1] 柯世堂,余玮,王同光. 停机状态叶片位置对风力机

体系气动性能影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(7): 1230-1238.

KE S T, YU W, WANG T G. Impact for blade position on aerodynamic performance of wind turbine system under stopped status[J]. Journal of Zhejiang University (natural science edition), 2016, 50(7): 1230-1238.

[2] 付兴,林友新,李宏男. 风雨共同作用下高压输电塔的风洞试验及反应分析[J]. 工程力学, 2014, 31(1): 72-78.

FU X, LIN Y X, LI H N. Wind tunnel test and response analysis of high-voltage transmission tower subjected to combined loads of wind and rain[J]. Engineering mechanics, 2014, 31(1): 72-78.

[3] 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 G, REN Y M, BAI H F. Rain-wind-induced dynamic model for transmission tower system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(30): 43-48.

[4] BLOCKEN B, CARMELIET J. A review of wind-driven rain research in building science[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2004, 92: 1079-1130.

[5] 刘顺,黄生洪,李秋胜,等. 基于欧拉多相流模型的桥梁主梁三维风驱雨数值研究[J]. 工程力学, 2017, 34(4): 63-71.

LIU S, HUANG S G, LI Q S, et al. 3D numerical simulation of wind-driven rain on bridge deck sections based on Eulerian multiphase model[J]. Engineering mechanics, 2017, 34(4): 63-71.

[6] CHOI E C C. Simulation of wind-driven-rain around a building[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1993, 46(1): 721-729.

[7] CHOI E C C. Determination of wind-driven-rain intensity on building faces[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1994, 51(1): 55-69.

[8] 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 studies of low-rise building wind and rain effect [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[9] 杨俊涛,楼文娟. 风驱雨CFD模拟及平均雨荷载计算方法研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(5): 600-606.

YANG J T, LOU W J. The wind drive rain CFD simulation and average rain load calculation method

- research[J]. Journal of air dynamics, 2011, 29(5): 600-606.
- [10] 付兴, 李宏男. 良态风及台风不同风谱对结构风雨振反应对比分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(11): 7-10, 22.
- FU X, LIN H N. Comparative analysis for wind and rain-induced responses of structures with normal wind and typhoon spectra[J]. Journal of vibration and shock, 2015 (11): 7-10+22.
- [11] 董辉, 高乾丰, 邓宗伟, 等. 大型风力机风雨荷载特性数值研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(15): 17-22.
- DONG H, GAO Q F, DENG Z W, et al. Large wind turbine wind load characteristics of the numerical study [J]. Journal of vibration and shock, 2015, 34(15): 17-22.
- [12] 高乾丰, 董辉, 邓宗伟, 等. 大型风力机风雨结构三场耦合分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(3): 1011-1016.
- GAO Q F, DONG H, DENG Z W, et al. Large wind turbine wind structure in three coupling analysis[J]. Journal of Central South University (natural science edition), 2016, 47(3): 1011-1016.
- [13] 吕宏兴, 武春龙. 雨滴降落速度的数值模拟[J]. 水土保持学报, 1997, 3(2): 14-21.
- LYU H X, WU C L. Raindrops falling velocity of numerical simulation[J]. Journal of soil and water conservation, 1997, 3(2): 14-21.

STUDY OF WIND DRIVEN RAIN DISTRIBUTION CHARACTERISTICS FOR MW LEVEL WIND TURBINE UNDER ADVERSE STOPPED STATUS

Yang Qing^{1,2}, Ke Shitang³, Yu Wenlin³, Wang Tongguang¹, Cao Shuyang⁴

(1. Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Changzhou Key Lab of Construction Engineering Structure and Material Properties, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China; 3. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 4. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to investigate systematically the raindrop distribution characteristics of wind turbine, different parameters of wind velocities and rain intensities are set in this computation. A 1.5 MW wind power is selected as engineering background to establish three dimensional rigid model, which contains tower, nacelle and blade. In this paper, numerical simulation of wind-rain coupling action is launched by applying Euler-Lagrangian method. The raindrop track, velocity distribution characteristics and rain load are researched in detail. The results indicate that the number of raindrop in the lower blade reaches highest value under medium wind velocity and high intensity rain. The diameters of raindrop gradually cluster around high value with increasing wind velocity. Under same wind velocity, the rain load magnifies remarkably with increasing rain intensity, which reaches highest value under medium velocity and highest rainfall intensity.

Keywords: wind turbines; rainfall; numerical simulation; distribution characteristics; rain loads