

文章编号:0254-0096(2020)05-0107-07

低空急流结构变化对水平轴风力机气动性能的影响

杨从新, 罗 颂, 李寿图, 张旭耀

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 为了解低空急流结构变化对水平轴风力机气动性能的影响,以一台 1.5 MW 的三叶片变速变桨型风力机作为研究对象,通过数值计算的方法进行模拟,选取 3 组急流宽度和 5 组急流强度作为变化的低空急流结构特征进行研究,得到以下结论:急流宽度增加,风轮功率和推力增加,但增长率下降;急流强度增加,风轮功率和推力增加。急流宽度或急流强度增加都会使得叶片吸力面失速区扩大,流动分离线前移,但两者的影响方式不同。急流宽度或急流强度增加时,叶片各截面的压力系数增加;各截面单位展长上的法向力和切向力总趋势是随急流宽度或急流强度的增加而增加,但由于叶片的失速状况不一样,在部分截面法向力和切向力会出现与总体趋势不同的现象。急流高度作为低空急流的另一重要特征,将在未来的工作中探索其对水平轴风力机气动性能的影响。

关键词: 风力机; 空气动力学; 计算流体力学; 低空急流; 水平轴

中图分类号: TK83/TM315

文献标志码: A

0 引 言

随着风能产业的不断扩大,单台风力机的发电规模和尺寸规模作为一种发展方向不断升级,在这一发展方向下,水平轴风力机与大气边界层间的相互作用更趋复杂,边界层中一些气象现象开始进入风力机研究者的视线中。其中,低空急流(low-level jet, LLJ)是大型水平轴风力机在运行过程中遇到的一种复杂入流状况,也是大型水平轴风力机在设计中应该考虑的一种状况。

低空急流是一定高度范围内的快速运动气流,最早于 20 世纪 30 年代受到关注^[1],20 世纪 50 年代以后,与低空急流相关的研究迅速发展。低空急流的结构特征变化一直是研究者的兴趣所在,相应的结构特征判断标准更是研究焦点,Emeis^[2]把急流核心的高度(jet core height)和最大急流风速(maximum jet speed)作为低空急流的结构特征;Bonner^[3]在对低空急流进行分类时,把最大风速和最大风速与往上极小风速间的风速差作为分类标准,Whiteman 等^[4]在 Bonner^[3]的基础上添加了一个较低风速下出现频率较高的低空急流级别以描述更普遍的低空急流,Song 等^[5]在统计美国大平原低空急流气象特征时引用了 Whiteman^[4]的分类方法;Andreas 等^[6]把最大风速超过上下风速 2 m/s 的风速廓线称为低空急流的特征,Banta 等^[7]沿用这一判断标准,并根据当

地情况将 2 m/s 的标准改为 1.5 m/s 的标准;He 等^[8]通过对艾默伊登海上低空急流的观察统计,将急流高度(jet height)、低空急流强度(LLJ strength)和低空急流衰减(LLJ falloff)作为低空急流最重要的特征。

低空急流会对大型风力机产生影响,Gutierrez 等^[9]通过实验测量低空急流下风力机的动静载荷;文献[8, 10-11]结合测得的低空急流数据通过数值计算软件分析了低空急流对风力机输出功率、叶根和塔基等部位受到的力矩、弯矩等参数的影响;Manuel 等^[12]、Rai 等^[13]通过大涡模拟模拟出低空急流,再通过 FAST 软件计算了风力机受到的力矩和疲劳载荷,Kelley 等^[14]对比了 GP_LLJ 和 IEC NTM 这 2 种模型产生的风速廓线,分析了风力机结构载荷。这些研究的聚焦点主要集中在风力机的输出功率与结构载荷上,对于风力机气动特性的探索则需要结合风力机空气动力学领域的研究,美国可再生能源实验室的 Phase VI 实验是著名的风力机空气动力学实验,包含了一套完整的气动性能分析方法^[15]。

结合前期对一种典型低空急流下水平轴风力机气动性能影响的研究,进一步探索低空急流结构变化对水平轴风力机气动性能的影响,将急流宽度和急流强度 2 个参量作为研究变量,主要从风轮功率和推力、叶片失速特性、叶片表面压力系数分布以及气动力 4 个方面进行分析,深入了解低空急流对水平轴风力机的影

收稿日期: 2017-10-24

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2014CB046201); 国家自然科学基金(11262011)

通信作者: 杨从新(1964—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事流体机械设计方面的研究。yexwind@163.com

响,扩展复杂入流状况下水平轴风力机的研究。

1 计算方法

1.1 计算模型

以一台 1.5 MW 三叶片变桨变速型风力机为研究对象,风轮直径 D 等于 83 m,轮毂中心高度 65 m,额定风速 10.4 m/s,额定转速 17.2 r/min。

计算域分为旋转域和静止域,如图 1 所示,静止域中,风轮距入口 $3D$,距出口 $7D$,除了到下边壁的距离为轮毂高度外,轮毂中心到其他三边壁的距离均为 $2D$ 。

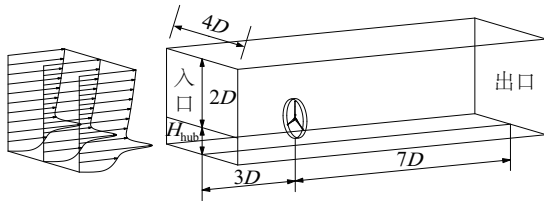


图1 计算域示意图

Fig. 1 Schematic of computational domain

入流模型为工程化的低空急流模型,由地面风剪切和平面自由射流的速度剖面叠加而成,再在自由射流速度分布上叠加一个等速度分布并乘以地面边界层形状函数,使得低于最大速度下的射流分量也受到地面边界层的影响^[16],表示如下:

$$V = \left\{ V_{\text{ref}} + V_s \left[1 - \tanh^2 \left(C_s \frac{z - z_s}{z_s} \right) \right] \right\} \left(\frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中, V_{ref} ——参考风速; V_s ——急流强度; C_s ——形状因子; z ——离地高度; z_s ——表征对称分布的自由射流的最大速度的高度; z_{ref} ——参考高度; α ——风切变指数。

急流宽度 B 和形状因子 C_s 间的关系为:

$$B = 4 \frac{z_s}{C_s} \quad (2)$$

1.2 数值计算方法

网格划分采用六面体结构化网格的方式,对旋转域和静止域分别进行网格划分并合并,经过多风速状况下机组输出特性验证,确定最终网格数为 2570 万,其中,旋转域网格数为 1362 万。在额定风况下,叶片主功能区 y^+ 大部分不超过 5。

通过求解雷诺时均的三维不可压 N-S 方程进行数值计算,湍流模型采用 SST $k-\omega$ 湍流模型,耦合求解采取 SIMPLC 算法,以二阶迎风格式进行离散。

入口设置为速度入口,低空急流风速廓线通过用户自定义函数(UDF)的方式给定,出口设置为自由出流,

两侧和顶部设置为对称边界条件,旋转域和静止域界面设置为 interface,其余设置为壁面。

2 参数取值

He^[8]将急流高度(jet height)、低空急流强度(LLJ strength)和低空急流衰减(LLJ falloff)作为低空急流最重要的特征,其中,低空急流强度定义为最大风速和往上极小风速间的差值,低空急流衰减定义为最大风速和往上极小风速间的高度差。这种定义方式由竖直风速廓线的测量方式决定,直接适用于离散测量点测得的风速廓线。对于工程化的低空急流模型,按照这一套方法变化低空急流结构需要进行二次分析,为了直接准确地从工程化模型的角度对低空急流的结构进行变化,以急流强度 V_s 和急流宽度 B 为变量变化低空急流结构,其中,急流强度 V_s 为叠加低空急流的自由射流的最大射流速度,与 He 定义的低空急流强度相区别;急流宽度 B 是射流 7% 最大速度所限定的速度范围^[16]。急流高度和急流强度、急流宽度这 2 个低空急流的形状结构参数区分开来,将在未来的工作中进行研究,这里的急流高度给定为轮毂中心高度。

急流宽度的取值参考低空急流衰减和风轮半径的比值 η_{LJ} ,取 3 组急流宽度 11.25、39.00、78.00 m,相应的 η_{LJ} 分别为 22%、65%、118%,相当于急流主区分别覆盖了叶片过渡段、大部分叶片和整个叶片。急流宽度取值如表 1,其中 f 为低空急流衰减;竖直风速廓线如图 2 所示。

表1 急流宽度取值

Table 1 Value of jet width

B/m	f/m	$\eta_{LJ}/\%$
11.25	9	22
39.00	27	65
78.00	49	118

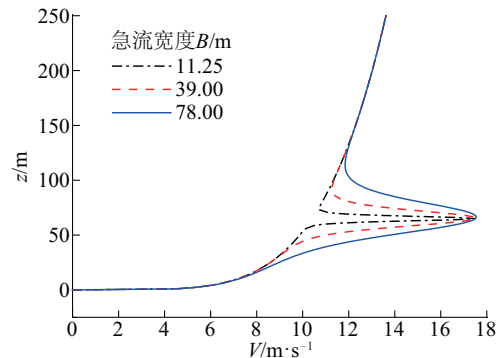


图2 不同急流宽度下低空急流廓线

Fig. 2 LLJ profile under different jet width

Whiteman^[4]延续 Bonner^[3]的分类标准对观测的低空急流进行分类: 当最大风速在 3000 m 以内大于等于 10 m/s, 且在最大风速垂直向上到达一个风速极小值或 3000 m 以内时风速下降不小于 5 m/s, 就把这种急流定义为 LLJ-0, 从 LLJ-1 到 LLJ-3 的定义方式类似, 最大风速最小值分别为 12、16 和 20 m/s, 速度衰减分别为 6、8 和 10 m/s^[4]。Stull^[17]认为, 只要 1500 m 之内的最低大气层出现相对风速大于其上风速 2 m/s 的最大值, 就定义为低空急流。因此, 急流强度的取值除参考 Whiteman^[4]对低空急流的分类标准外, 在原有的 4 组低空急流上再增加 1 组风速更低并符合 Stull^[17]定义的低空急流。急流强度取值列于表 2, V_{\max} 为急流最大风速; 竖直风速廓线如图 3 所示。

表 2 急流强度取值
Table 2 Value of jet strength

$V_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{\max}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_{\max}/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
4.1	14.5	9.1	19.5
6.1	16.5	11.1	21.5
7.1	17.5	—	—

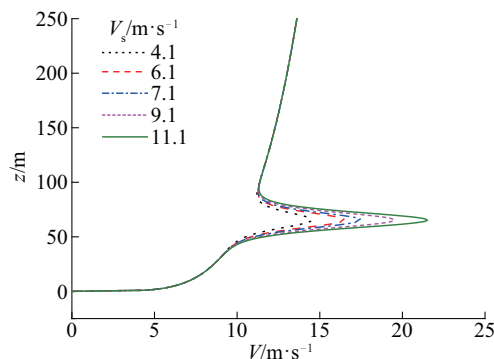


图 3 不同急流强度下低空急流廓线

Fig. 3 LLJ profile under different jet strength

因为急流宽度等于 39 m 时, 急流主区覆盖了大部分叶片, 所以将 39 m 当作急流宽度的典型值。又因为在 Whiteman^[4]和 Song^[5]的研究中, LLJ-1 出现的频率最高, 所以将 7.1 m/s 当作急流强度的典型值。

3 结果分析

经过数值计算, 从急流宽度和急流强度 2 个方面得到低空急流结构变化对水平轴风力机气动性能的影响。

3.1 功率和推力

作为重要的风力机性能参数, 不同急流宽度和不同急流强度下水平轴风力机风轮的功率 P_{rotor} 和推力 T 分别列于表 3、表 4 中。由表 3 可看出, 随着急流宽度的

增加, 功率和推力增加。从风速廓线的形状来看, 急流宽度越大, 风轮接收的风速越大。按照文献[18]的第 1 种方法可求得急流宽度为 11.25、39.00、78.00 m 时低空急流在风轮平面的等效风速分别为 10.92、12.38 和 14.08 m/s, 可解释功率和推力随急流宽度增加而增加的原因。同时, 急流宽度为 39.00 m 的低空急流相对于急流宽度为 11.25 m 的低空急流风轮功率增加了 28.94%, 推力增加了 10.54%, 而急流宽度为 78.00 m 时, 功率相对于急流宽度为 39.00 m 时增加了 12.16%, 推力增加了 3.69%, 增长率有所下降, 一方面是因为风力机叶片的重载区范围为 $35\% \leq r/R \leq 80\%$, 急流宽度为 11.25 m 时, 急流衰减仅为风轮半径的 22%, 未达到叶片重载区, 急流宽度为 39.00 m 时, 急流衰减为风轮半径的 65%, 包含了大部分重载区, 而急流宽度为 78.00 m 时, 急流衰减包含了整个重载区, 不同急流宽度下叶片重载区出力不同; 另一方面是因为急流宽度增加, 叶片表面失速加重。

由表 4 可看出, 随着急流强度的增长, 功率和推力增长。从风速廓线形状来看, 急流强度越大, 风轮接收的风速越大, 按照文献[18]的第 1 种方法可求得急流强度为 4.1、6.1、7.1、9.1 和 11.1 m/s 时, 低空急流在风轮平面的等效风速分别为 11.50、12.08、12.38、12.96 和 13.54 m/s, 由此可解释急流强度增加, 功率和推力增加的原因。

表 3 不同急流宽度下风轮功率和推力

Table 3 Power and thrust of rotor under different jet width

B/m	$P_{\text{rotor}}/\text{kW}$	T/kN
11.25	1778.177	243.505
39.00	2292.773	269.180
78.00	2571.677	279.100

表 4 不同急流强度下风轮功率和推力

Table 4 Power and thrust of rotor under different jet strength

$V_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$P_{\text{rotor}}/\text{kW}$	T/kN
4.1	2093.603	262.9011
6.1	2209.288	265.804
7.1	2292.773	269.180
9.1	2384.259	273.322
11.1	2507.200	281.950

3.2 叶片失速特性

如图 4 所示为不同结构低空急流下轮毂中心上方叶片(叶片 1)吸力面的极限流线图, 对比图 4a~图 4c 可

知,随着急流宽度的增加,叶片吸力面失速区扩大,流动分离线向前缘方向移动;对比图 4a、图 4d、图 4e、图 4f、图 4g 可知,随着急流强度的增加,叶片吸力面失速区扩大,流动分离线前移。虽然急流宽度和急流强度对叶片失速的影响本质上是因为 2 个物理量的增加造成了截面相对速度的增加,攻角增大,叶片失速点前移且失速范围扩大,但两者的影响方式不同,急流宽度增加的影响在于扩大了急流主区涵盖的截面(参考图 2),而急流强度增加的影响则在于增加了一定截面的相对风速(参考图 3),导致分离线前移,所以急流宽度增加导致叶片失速区扩大的现象更为明显。

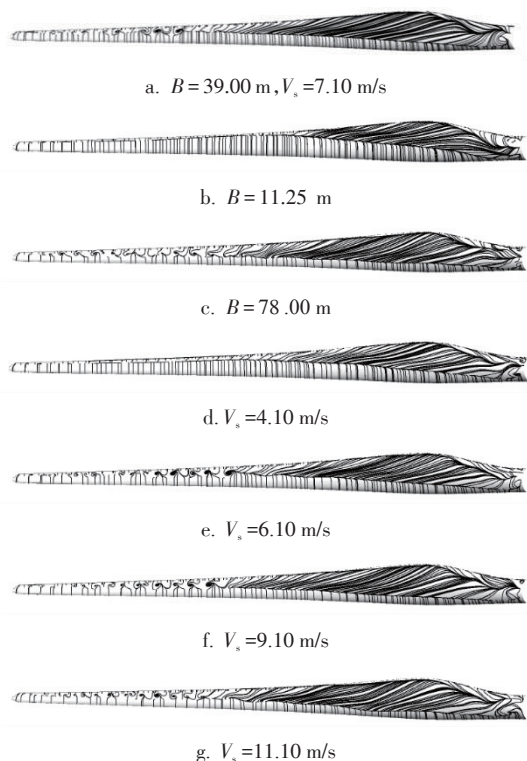


图 4 不同结构低空急流下叶片吸力面极限流线图
Fig. 4 Limiting streamline along suction surface under different LLJ structures

3.3 叶片表面压力系数

如图 5 所示为不同急流宽度下叶片设计控制截面 8.5、17.5、23.5、31.0、37.0 和 41.0 m (无量纲化为 20.48%、42.17%、56.63%、74.70%、89.16%、98.80%) 截面的压力系数分布状况,在急流宽度为 11.25 m 时,各截面的压力系数分布与其他 2 种急流宽度相比明显偏小,这是因为急流宽度为 11.25 m 时,急流衰减未达到叶片重载区,对叶片主功能区的影响相对较小。同时,随着急流宽度的增加,失速截面数增加,失速点前移;翼型前

缘压力系数增加,在失速影响较小的 98.80% 截面较为明显。这是由于急流宽度增加,沿叶根向叶尖的截面相对速度增加,受力增加,同时攻角增大,更多的截面失速。

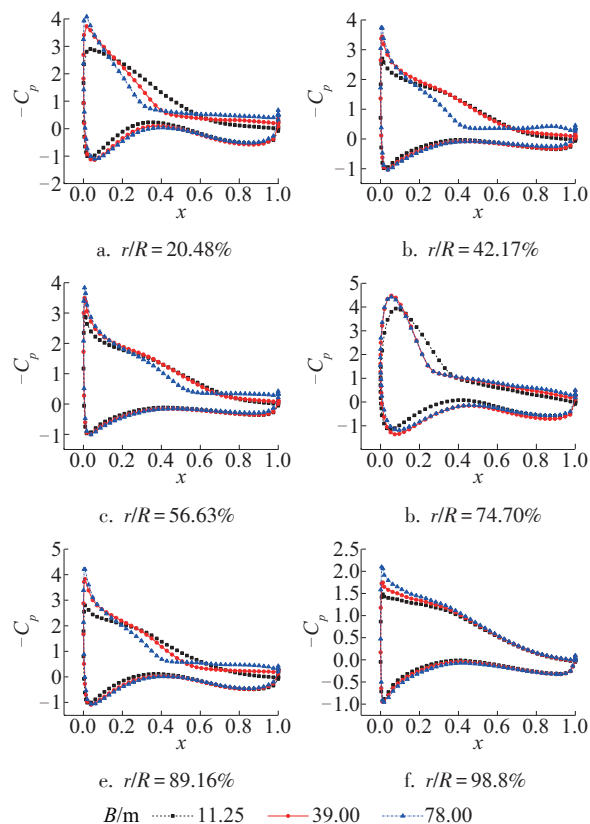
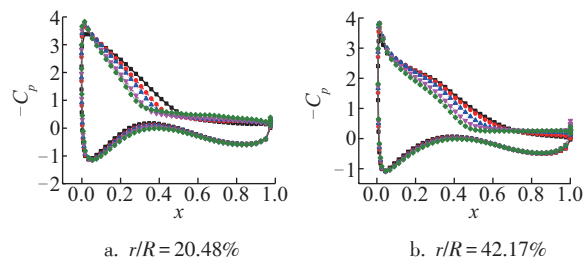


图 5 不同急流宽度下叶片各截面压力系数分布
Fig. 5 Pressure coefficient of each section under different jet width

如图 6 所示为不同急流强度下叶片各截面的压力系数分布状况,随着急流强度的增加,截面压力系数增加,失速截面增多,失速点提前。一方面是因为各急流强度工况的急流宽度皆为 39.00 m,对叶片主功能区存在影响,急流强度增加,截面相对速度增加,受力增加,攻角增大造成了截面失速点的前移;另一方面,受风轮旋转的影响,急流强度大的工况影响的截面增加,失速截面增多。

对比图 5 和图 6 可知,在靠近叶根的部位,急流强



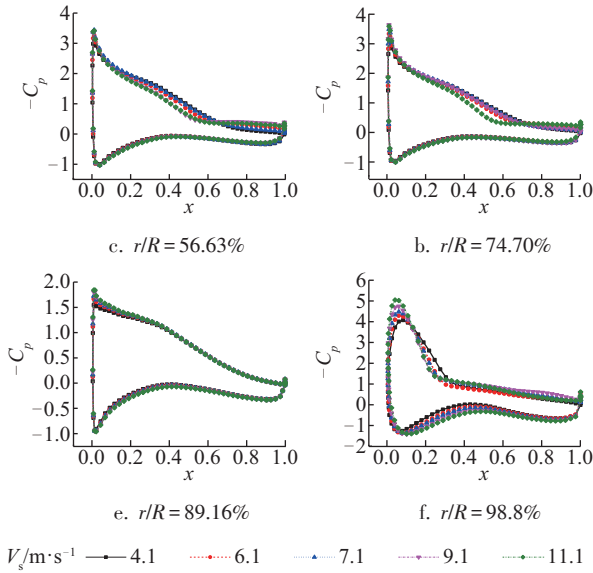


图6 不同急流强度下叶片各截面压力系数分布

Fig. 6 Pressure coefficient of each section under different jet strength

度对压力系数的影响较急流宽度的影响大;反之,在靠近叶尖的部位,急流宽度对压力系数的影响更为显著,这是由2个特征量对低空急流风速廓线不同的影响方式决定的。

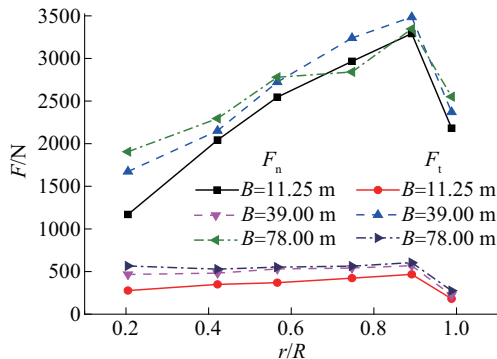
3.4 气动

读取不同结构低空急流下叶片1各翼型截面单位展长上的轴向力 F_y 和旋转方向的力 F_x ,通过力分解得到法向力 F_n 和切向力 F_t :

$$F_n = F_x \sin \beta + F_y \cos \beta \quad (3)$$

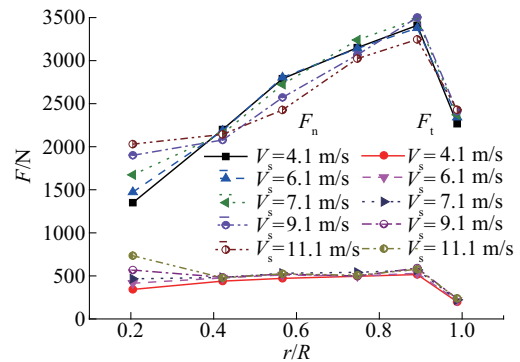
$$F_t = F_x \cos \beta - F_y \sin \beta \quad (4)$$

如图7所示,急流宽度增加,各截面 F_n 、 F_t 增加,但由于急流衰减对叶片重载区占比的差异和叶片失速状态的不同, F_n 、 F_t 的增长幅度下降:以20.48%截

图7 不同急流宽度下 F_n 、 F_t Fig. 7 F_n , F_t under different jet width

面为例,当急流宽度由11.25 m增长至39.00 m,再增长至78.00 m时, F_n 的增长幅度依次为43.04%和13.87%; F_t 的增长幅度依次为68.04%和21.25%。同时,在急流宽度为78 m时,74.70%截面的 F_n 小于其他2种急流宽度状况,89.16%截面的 F_n 小于急流宽度为39 m时的数值。结合图4、图5可知,在急流宽度为78 m时,这2个截面的失速状况较其他2种急流宽度下的严重,且74.70%截面的失速状况较89.16%截面的更为严重,因此出现了急流宽度为39 m时74.70%截面和89.16%截面 F_n 的特殊状况。

如图8所示,急流强度越大,靠近叶根部位的 F_n 、 F_t 越大,以20.48%截面为例,当急流强度由4.1 m/s增长至11.1 m/s时, F_n 依次增长了9.17%、13.60%、13.55%和6.83%; F_t 依次增长了21.22%、12.37%、21.76%和29.35%。同时,因为各急流强度下98.80%翼型截面未发生失速,所以该截面的 F_n 、 F_t 随急流强度的增大而增大,其他4个截面因为失速状况的不同, F_n 、 F_t 并未随着急流强度的增加而增加。结合图4、图6可知,急流强度越大,截面失速状况越严重,在56.63%截面,各急流强度下的失速差异尤为显著,导致了该截面各急流强度下 F_n 的较大差异;随着截面向叶尖方向的推进,失速状况逐渐改善, F_n 、 F_t 逐渐恢复随急流强度增大而增大的规律。

图8 不同急流强度下 F_n 、 F_t Fig. 8 F_n , F_t under different jet strength

4 结论

1)随着急流宽度的增加,风轮功率和推力增加,但增长率下降;随着急流强度的增加,风轮功率和推力增加。

2)急流宽度或急流强度增加都会使得叶片吸力面失速区扩大,流动分离线前移,但两者的影响方式不同,

一个是扩大了急流主区涵盖的截面数,另一个是增加一定截面的相对风速。

3)急流宽度或急流强度增加时,叶片各截面的压力系数增加,前缘部位压力系数的变化尤为显著,同时失速截面增多,失速点提前;因为2个特征量对低空急流风速廓线的影响方式不同,在靠近叶根的部位,急流强度对压力系数的影响较为显著,而在靠近叶尖的部位,急流宽度的影响更明显。对于各截面单位展长上的法向力和切向力,总的趋势是随急流宽度或急流强度的增加而增加,但由于不同急流宽度或不同急流强度下叶片的失速状况不一样,法向力和切向力受到的影响程度也不一样,在部分截面会出现与总体趋势不同的现象。

4)急流高度作为低空急流的另一重要特征,将在未来的工作中探索其对水平轴风力机气动性能的影响。

致 谢:衷心感谢甘肃省超算中心和兰州理工大学超算中心为本文提供的计算支持。

[参考文献]

- [1] FARQUHARSON S J. The diurnal variation of wind over tropical Africa[J]. Quarterly journal of the Royal Meteorological Society, 1939, 65(280): 165-184
- [2] EMEIS S. Wind speed and shear associated with low-level jets over Northern Germany[J]. Meteorologische zeitschrift, 2014, 23 (3): 295-304.
- [3] BONNER W D. Climatology of the low level jet[J]. Monthly weather review, 1986, 96(12): 833-850.
- [4] WHITEMAN C D, BIAN X, ZHONG S. Low-level jet climatology from enhanced Rawinsonde observations at a site in the Southern Great Plains[J]. Journal of applied meteorology, 1997, 36(10): 1363-1376.
- [5] SONG J, LIAO K, COULTER R L, et al. Climatology of the low-level jet at the Southern Great Plains atmospheric boundary layer experiments site[J]. Journal of applied meteorology, 2005, 44(10): 1593-1606.
- [6] ANDREAS E L, CLAFFY K J, MAKSHITAS A P. Low-level atmospheric jets and inversions over the Western Weddell Sea[J]. Boundary-layer meteorology, 2000, 97 (3): 459-486.
- [7] BANTA R M, NEWSOM R K, LUNDQUIST J K, et al. Nocturnal low-level jet characteristics over Kansas during Cases-99[J]. Boundary-layer meteorology, 2002, 105 (2): 221-252.
- [8] HE Y F. A new LLJ model and its application to wind turbine power analysis [D]. Technical University of Denmark, 2014.
- [9] GUTIERREZ W, ARAYA G, KILIYANPILAKKIL P, et al. Structural impact assessment of low level jets over wind turbines[J]. Journal of renewable and sustainable energy, 2016, 8(2): 1-15
- [10] COSACK N, EMEIS S, KUHN M. On the Influence of low-level jets on energy production and loading of wind turbines [C]//Proceedings of the Euromech Colloquium, Heidelberg: Wind energy, 2005.
- [11] MCNEILL J. Characterization and simulation of inhomogeneous and non-stationary turbulent wind fields for assessment of wind turbine reliability [D]. Texas Tech University, 2012.
- [12] MANUEL L, VEERS P S. A framework for the reliability analysis of wind turbines against windstorms and non-standard inflow definitions [C]//47th AIAA aerospace Sciences Meeting, Orlando, Florida, 2009.
- [13] RAI R K, SINGH M J, NAUGHTON J W. Investigation of turbine response to various wind inflow models [C]//49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Florida, 2011.
- [14] KELLEY N D, JONKMAN B J, SCOTT G N. The great plains turbulence environment: its origins, impact and simulation[R]. U. S. National Renewable Energy Laboratory, 2006.
- [15] HAND M M, SIMMS D A, FINGERSH L J, et al. Unsteady aerodynamics experiment phase VI: wind tunnel test configurations and available data campaigns [R]. Golden, National Renewable Energy Laboratory, 2001: 1-299.
- [16] 肖业伦, 金长江. 大气扰动中的飞行原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [17] STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Netherlands: Springer, 1988.
- [18] WAGNER R, ANTONIOU I, PEDERSEN S M, et al. The influence of the wind speed profile on wind turbine performance measurements[J]. Wind energy, 2009, 12 (4): 348-362

EFFECTS OF DIFFERENT LOW-LEVEL JET STRUCTURES ON AERODYNAMIC PERFORMANCE OF HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE

Yang Congxin, Luo Song, Li Shoutu, Zhang Xuyao

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to explore effects of low-level jet (LLJ) structures on aerodynamic performance of horizontal axis wind turbine (HAWT), a 1.5 MW variable-pitch variable-speed three-blade wind turbine which used as the research object was investigated under 3 sets of jet width and 5 sets of jet strength that was selected as different LLJ structures, and some results were concluded: no matter jet width or jet strength increased, power and thrust of the rotor increased, but with the increase of jet width, the increasing rate decreased. Increasing of jet width or jet strength will cause the expansion of stall area of blade suction surface and forward movement of separation line, but with different impact ways. When jet width or jet strength increased, pressure coefficient of each section increased. The general trend of normal force and tangential force on unit exhibition of each section is that increased with the increase of jet width or jet strength, but because of the different stall situation, some sections performed differently. As another important feature of LLJ, effects of different jet heights on aerodynamic performance of horizontal axis wind turbine will be researched in the future work.

Keywords: wind turbines; aerodynamics; computational fluid dynamics; low-level jet; horizontal axis