

强湍流相干结构位置的改变对风力机叶根载荷的影响研究

李仁年^{1,2,3}, 胡渊¹, 李德顺^{1,2,3}, 郭涛¹

- (1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;
2. 甘肃省风力机工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730050;
3. 甘肃省流体机械及系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 真实环境运行的风力机常受到强湍流相干结构对其的影响, 而湍流相干结构的发生具有空间位置的不确定性和随机性, 叶片作为捕获风能的主要部件其载荷直接关系到风力机运行的安全性, 因此该文对湍流相干结构位置的改变对叶根载荷的影响展开研究。结果表明, 湍流相干结构位置的改变对摆振力矩影响较小, 位置的下降会使得挥舞力矩趋于稳定且波动集中; 叶根挥舞方向的载荷约为摆振方向 3.5 倍; 叶根载荷波动具有低频高能的特点, 当湍流相干结构中心位于轮毂中心时叶根载荷最大。

关键词: 强湍流相干结构; FAST; 叶根载荷; 作用位置

中图分类号: TH137; TH312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-0813(2021)05-0010-06

Research on the Influence of the Change of Strong Turbulent Coherent Structure Position on the Wind Turbine Blade Root Load

LI Ren-nian^{1,2,3}, HU Yuan¹, LI De-shun^{1,2,3}, GUO Tao¹

- (1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Gansu Wind Turbine Engineering Technology Research Center, Lanzhou 730050, China;
3. Gansu Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Wind turbines operating in a real environment are often affected by strong turbulent coherent structures, and the occurrence of turbulent coherent structures has uncertainty and randomness in spatial position. The blade as the main component of capturing wind energy, its load is directly related to the operation of wind turbine. For safety, this paper studies the effect of the change of the position of the turbulent coherent structure on the blade root load. The results show that the change of the position of the turbulent coherent structure has little effect on the edgewise moment, and the decrease of the position will make the flapwise moment tend to be stable and the fluctuations concentration; The load in the flapwise direction of the blade root is about 3.5 times the direction of the edgewise; the blade root load fluctuation has the characteristics of low frequency and high energy, and the blade root load is the largest when the center of the turbulent coherent structure is located in the center of the hub.

Key words: strong turbulent coherent structure; FAST; bladed root load; action position

0 引言

随着我国风电行业的飞速发展^[1], 一、二类风资源区以开发完毕, 现阶段主要对山区、丘陵等来流条件更加复杂的三、四类风资源区进行开发。因此在进行风

力机设计时, 需考虑装机位置风资源和环境参数对其载荷强度的影响。所以研究风力机在复杂的来流条件下对其载荷的影响显得尤为重要。

为研究湍流相干结构下风力机的动态载荷特性, 选择合适的方法构建随时间及空间变化的湍流风是仿真首先要解决的问题。目前较为常用的仿真方法为基于湍流风谱模型和大涡模拟进行湍流风的生成, 其中前者主要对 Kaimal 和 Von Karman 风谱模型研究较多。Amir^[2] 分别将风力机布置于由标准 Kaimal 风谱生成的风场和通过修改标准 Kaimal 风谱建立的极端高湍流强度风场中, 模拟了小型风力机的结构载荷, 发现后者所

收稿日期: 2020-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(51766009, 51566011); 国家基础研究计划(973 计划)(2014CB046201)

作者简介: 李仁年(1963-), 男, 甘肃民勤人, 教授, 硕士, 现从事风力机空气动力学方向的研究。

构建风场中的风力机载荷是前者的两倍。Arundhuti^[3]分别使用 Von karman 谱和 Pierson Moskowitz 谱模拟近海随机风和波浪载荷对 5MW 海上风力机的动态响应。上述学者均采用基于湍流风谱的方法建立风场仿真模型,但是由于风力机运行环境差异极大,湍流风谱及其参数的设置对载荷计算结果有较大影响,普适性不强。Fleming^[4]通过大涡模拟方法,考虑大气边界层和地表粗糙度等条件,建立风电场区域的三维风场,该方法虽然空间、时间尺度均满足仿真需求,但需耗费大量的计算资源。李倩倩^[5]基于 Kaimal、Von Karman、SMOOTH 和 NWTcup 湍流风谱模型模拟了不同地表粗糙度和湍流强度条件下所建立风场的风速分布规律,发现 NWTcup 模型在 50 m 和 80 m 高度处的风速分布与实测值最为接近。由于本文所选风力机的轮毂高度为 84.28 m,故采用 NWTcup 湍流风谱模型生成基础风更切合实际。

在风力机载荷研究方面, Kelley^[6,7]通过实验表明,疲劳载荷是影响风力发电机组稳定运行的重要问题。Lavelly^[8]在对大气风场进行计算的同时单向耦合了 FAST 和 LES,并得出以下结论:风力机的载荷特性对大气稳定度变化比较敏感。Wait^[9]对运行中的风力发电机组的非稳态振动监测数据进行了分析,结果表明,频率随着时间变化呈现非平稳振动,在强风载荷的作用下由于叶片激励风力机系统会表现出一定程度上的共振。Simms^[10]通过 NASA-Ames 风洞进行了非稳态空气动力学实验,并精确地描述作用在风力机结构上的力。上述风力机载荷研究仅针对来流对风力机结构造成的影响,没有深入研究湍流来流相对于风力机作用位置的改变对其载荷影响的变化规律。

因此本文使用 NWTcup 风谱模型耦合 KHB 相干结构构建了一种风速大小和方向变化剧烈的湍流风,并且改变湍流风的作用位置,采用 FAST 程序对风力机载荷进行计算,研究 KHB 作用位置对风力机叶根载荷的影响规律,为风力机设计与安全分析提供参考。

1 仿真模型及软件构架

1.1 仿真模型

本文以美国可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)的 WindPACT(The Wind Partnerships for Advanced Component Technology) 1.5MW 风力机作为研究对象,风力机具体参数见表 1。

表 1 WindPACT 1.5MW 风力机主要参数

| 参数 | 数值/说明 | 参数 | 数值/说明 |
|----------|-------|---------------|-------|
| 功率/(MW) | 1.5 | 轮毂高度/(m) | 84.28 |
| 叶轮布置 | 上风向 | 切入风速/(m/s) | 3.00 |
| 叶片数 | 3 | 额定风速/(m/s) | 12.00 |
| 控制系统 | 变速变桨距 | 切出风速/(m/s) | 25.00 |
| 叶轮直径/(m) | 70 | 风轮转速/(r/min) | 20.46 |
| 轮毂直径/(m) | 3.50 | 高速轴转速/(r/min) | 1800 |

1.2 FAST 软件构架

本文首先通过 TurbSim 生成计算域上的二进制风文件,将其作为 AeroDyn 的输入文件,其次通过 FAST 以及其内部的气动模块(AeroDyn)进行联合仿真计算,最后得到部件载荷与变形的时序输出数据文件。

FAST 程序在仿真前需要准备一系列的输入文件,在进行仿真时需要与 AeroDyn 连接在一起,用来提供仿真时所需要的气动力。FAST 输入文件有包含风力机结构特性以及控制系统的主输入文件、包含材料属性以及气动外形的塔架叶片输入文件、包含迭代计算和扰动影响等参数的线性化输入文件等组成。气动力模型采用叶素动量理论(Blade Element Momentum Theory, BEMT)。计算输入输出文件结构如图 1 所示。

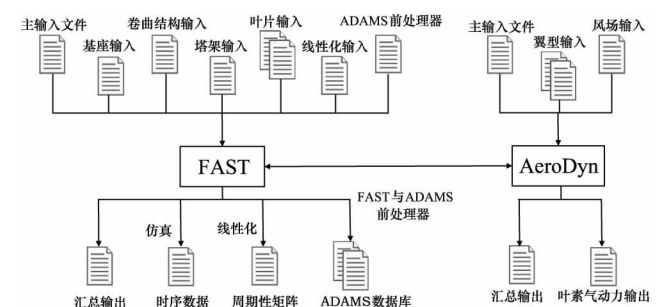


图 1 FAST 输入输出文件

2 数值模拟

2.1 湍流风的生成

本文风谱模型采用基于 NWTc/LIST 项目^[11]测量数据和 SMOOTH 风谱模型建立的 NWTcup 模型。NWTcup 风谱通过比例缩放 SMOOTH 功率密度函数得到,对于中性和稳定流动 NWTcup 风谱为^[12]:

$$S_{K,NWTcup}(f) = \sum_{i=1}^2 [P_{i,K} \cdot S_K(F_{i,K} \cdot f)] \quad (1)$$

式中, f 为周期频率, K 表示风向, $K = u, v, w$ (X', Y', Z' 方向); $P_{i,K}$ 和 $F_{i,K}$ 为缩放系数 ($i = 1, 2$), 由经验函数

曲线确定。 $S_k(f)$ 为 SMOOTH 风谱模型, 具体为:

$$S_k(f) = U_f^2 \frac{\xi_{1,k}(z/\gamma) (\phi_e/\phi_m)^{2/3}}{1 + \xi_{2,k}(fz/\gamma)^{5/3}} \quad (2)$$

式中, U_f 为风轮平面的平均剪切速度; z 为垂直高度; $\gamma = \bar{u} \cdot \phi_m$, \bar{u} 为 z 高度时的平均速度, ϕ_e 和 ϕ_m 分别为稳定性测量参数 Z_L 的函数:

$$\phi_e = (1 + 2.5Z_L^{0.6})^{3/2} \quad (3)$$

$$\phi_m = 1 + 4.7Z_L \quad (4)$$

式中, Z_L 一般取值为 0.4。

$\xi_{1,k}$ 和 $\xi_{2,k}$ 在 u, v, w 的取值分别为:

$$\langle \xi_{1,k}, \xi_{2,k} \rangle = \begin{cases} \langle 79.0, 263.0 \rangle & K = u \\ \langle 13.0, 32.0 \rangle & K = v \\ \langle 3.5, 8.6 \rangle & K = w \end{cases} \quad (5)$$

通常网格节点间 i, j 的空间相干性定义为:

$$Coh_{i,jk} = \exp\left(-a_k \left(\frac{r}{z_m}\right)^{CohExp} \sqrt{\left(\frac{fr}{\bar{u}_m}\right)^2 + (b_k r)^2}\right) \quad (6)$$

式中, r 为 i, j 节点之间的距离; z_m 为两节点之间的平均高度; $CohExp$ 为相干指数在这里使用默认值 0; \bar{u}_m 为两节点之间的平均风速; a_k, b_k 的取值为轮毂高度、理查德数和平均风速定义的经验函数。

2.2 风谱模型耦合相干结构

KHB (Kelvin-Helmholtz Billow) 流动是一种典型的相干结构, 是描述自然界连续流场中由于速度梯度而导致涡迅速卷起并破裂的较为规则的周期性流动现象, 因此, 可以通过将 KHB 数值模拟在时间和空间维度进行速度场信息无量纲化, 并叠加于基础湍流风以构建风速剧烈变化的风况。

假设选定区域共有 $m \times n$ 个节点, 其中第 i 行 j 列的节点基础风速为 $u_{i,j}(t)$, 相干结构无量纲速度为 $CohU_{i,j}(t)$, 则叠加相干结构后的风速为 $U_{i,j}(t)$ 为:

$$U_{i,j}(t) = u_{i,j}(t) + \frac{CohU_{i,j}(t)}{m \cdot n} \sum_i^m \sum_j^n u_{i,j}(t) \quad (7)$$

本文根据风轮直径构建风场计算域网格, 网格为以轮毂为中心, 空间范围为 $84 \text{ m} \times 84 \text{ m}$, 网格节点数为 19×19 , 如图 2 所示。

2.3 湍流相干结构尺度与位置

KHB 作为一种常见的湍流相干结构, 在时间和空间上波动具有一定的周期性和规律性, 但其尺度与空间位置具有不确定性。因此为了研究 KHB 对风力机载荷影响需要考虑 KHB 相对于风轮旋转平面的尺度

与位置, 尺度与位置示意图如图 3 所示, 其中尺度 S 是 KHB 的高度 h_1 与风轮直径 d 的比率, 如 1.0 使 KHB 的高度成为风轮的高度, 0.5 使它们成为风轮高度的一半。位置 P 是风轮中心相对于 KHB 的最底部高度 h_2 与风轮直径 d 的比率, 如 0.5 使轮毂中心位于 KHB 中心, 1.0 使轮毂中心位于 KHB 的最顶部。本文仅对 KHB 位置的改变对叶根载荷的影响展开研究, 因此选定 KHB 尺度 (S) 为 1.0。

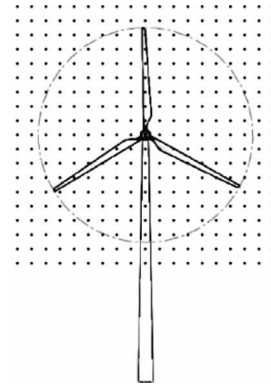
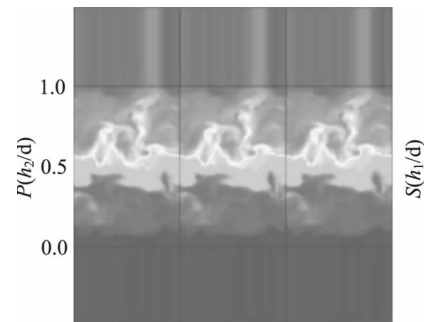


图2 风场计算域及网格节点



注: S 为描述 KHB 尺度; P 为描述 KHB 位置; h_1 为 KHB 高度; h_2 为风轮中心相对于 KHB 最低点的高度; d 为风轮直径。

图3 相干结构的尺度与位置示意图^[13]

3 计算工况

本文为了研究 KHB 位置对风力机载荷的影响规律, 首先由风谱模型 NWTcup 耦合 KHB 相干结构生成来流风况, 轮毂中心处平均风速为 12 m/s , 时间步长 0.005 s , 总时长为 600 s , KHB 加入起始时间是 150 s , 持续时间为 300 s 。最后将该风况作为 FAST 程序的来流条件计算载荷, 设置工况如表 2 所示, 计算 KHB 位置的改变对叶根摆振、挥舞载荷的影响规律。

4 数值模拟结果与分析

4.1 叶根载荷时程分析

图 4 为 KHB 位置的改变对风力机各载荷影响的

时程分析,其中图4a、图4b分别为KHB位置对叶根摆振、挥舞载荷的影响时程分析。

表2 计算工况

| 工况编号 | 尺度(h_1/d) | 位置(h_2/d) |
|------|---------------|---------------|
| I | 1.0 | 0.5 |
| II | 1.0 | 0.0 |
| III | 1.0 | 1.0 |

由图4a可知,KHB位置的改变导致摆振力矩周期变化较小,仅幅值波动发生变化,当 $P=0.0$ 与 $P=1.0$ 时仅出现几处力矩突增,突增幅度在 $150\text{ kN}\cdot\text{m}$ 左右,其余时刻幅值波动基本一致在 $-400\sim 500\text{ kN}\cdot\text{m}$ 之间, $P=0.5$ 时摆振力矩波动幅值略增,增加幅度在 $50\text{ kN}\cdot\text{m}$ 左右。

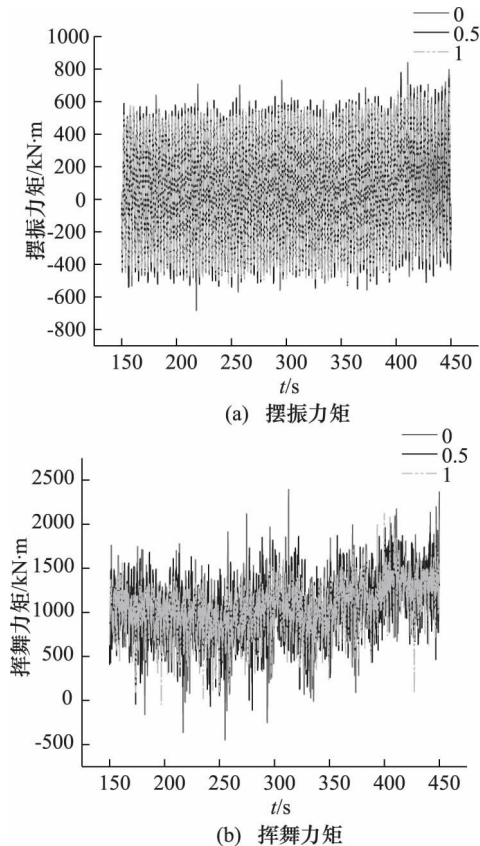


图4 KHB不同位置时叶根载荷时程图

由图4b可知,挥舞力矩在 $P=0.0$ 时相比较其它两处位置力矩会发生突变,突降情况较为明显,幅度约在 $1000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 左右,其它时刻力矩波动与 $P=1.0$ 时较为相似, $P=1.0$ 时力矩波动情况较为平缓,波动幅度约在 $750\sim 1400\text{ kN}\cdot\text{m}$ 之间,当 $P=0.5$ 时挥舞力矩整体波动情况较为规律,波动幅度约在 $250\sim 1750\text{ kN}\cdot\text{m}$ 之间。

综上所述,KHB位置的改变对摆振力矩影响较小,仅在 $P=0.0$ 时出现几处较为明显的载荷突变,而挥舞力矩出现明显的载荷突变,当 $P=0.0$ 挥舞力矩向下突变,并有明显的周期性。

4.2 叶根载荷统计分析

材料强度设计时需考虑极端条件下材料的最大应力,标准差的大小反映了载荷在均值附近范围内的波动情况,标准差越大载荷离散程度越高,波动越剧烈。图5为KHB不同位置时的载荷统计分析,其中图5a、图5b分别对应不同位置时叶根摆振、挥舞载荷的影响时程分析。

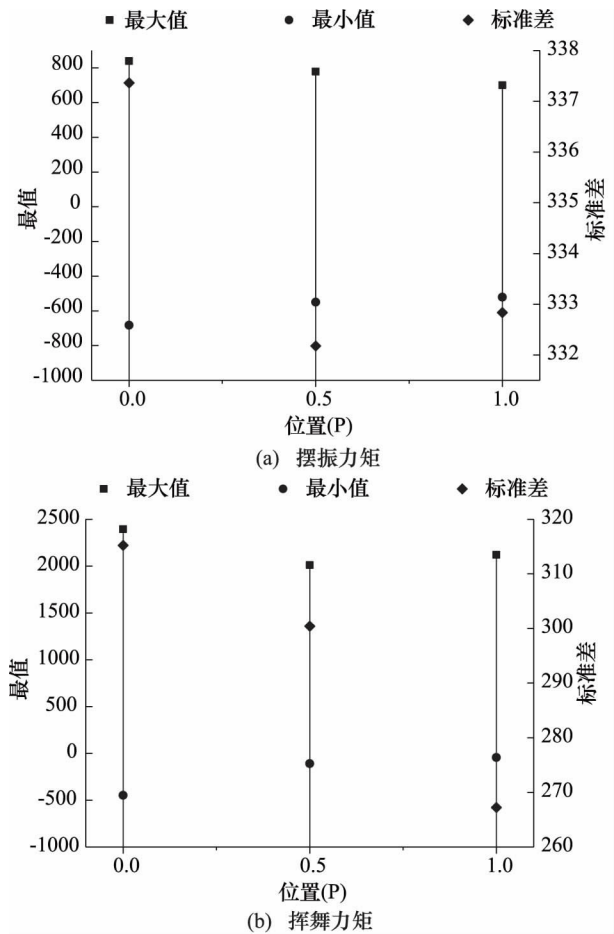


图5 KHB不同位置时叶根载荷统计

随着KHB位置从 0.0 到 1.0 的改变,由图5a可知,摆振力矩最大值减小、最小值增大、标准差在 $P=0.5$ 时最小。位置从 0.0 到 0.5 最大值降低了 7.28% ,最小值升高了 19.40% ,标准差降低了 1.54% ;从 0.5 到 1.0 最大值降低了 10.01% ,最小值升高了 5.27% ,标准差升高了 0.20% 。由图5b可知,挥舞力矩最值在 $P=0.5$ 时较小、标准差降低。位置从 0.0 到 0.5 最大值降低了 16.01% ,最小值升高了 75.63% ,标准差降低

了4.69%;从0.5到1.0最大值升高了5.47%,最小值升高了59.72%,标准差降低了11.05%。

综上所述,KHB位置的改变对摆振力矩最值以及离散程度影响较小,挥舞力矩变化明显。随着KHB位置的不同,当P从0到1时挥舞力矩最大值的减小和最小值的上升会逐渐变得平缓,而离散程度降低速率会越来越快。说明随着风力机轮毂中心从KHB最底部逐渐上移至最顶部的时候,力矩趋于稳定且波动较为集中。

4.3 叶根载荷均值分析

载荷均值决定了风力机各部件的平均使用寿命,均值变化越大部件平均使用寿命越低。图6为KHB不同位置时各叶根载荷的均值变化图,其中图6a、图6b分别对应不同位置时的摆振力矩、挥舞力矩载荷均值图。由于力矩为矢量,正负代表其方向故此均值图是将力矩取绝对值后再求均值。

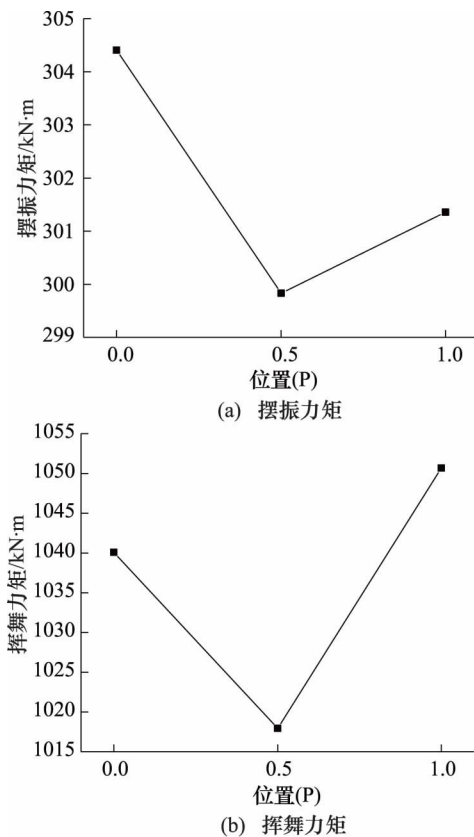


图6 KHB不同位置时叶根载荷均值

随着KHB位置的改变,由图6a可知,摆振力矩均

值在0.0~0.5下降了1.50%,在0.5~1.0升高了0.51%。由图6b可知,挥舞力矩均值在0~0.5下降了2.13%,在0.5~1.0升高了3.22%。综上所述,KHB位置改变时,摆振力矩百分比变化率不超过1.50%,挥舞力矩百分比变化率不超过3.22%。说明KHB位置的改变对摆振力矩和挥舞力矩均值影响均较弱。结合图5b可知,对于均值变化较剧烈的挥舞力矩,在P=0.5时均值最小但是离散程度相对较大,在P=1时均值最大但是离散程度反而最小。说明离散程度的改变并没有引起力矩均值剧烈变化。

4.4 叶根载荷离散性小波分析

为了探究KHB不同作用位置对叶根载荷各频带的能量影响,本节采用了离散小波分析对其展开研究。在对叶根载荷进行离散小波分析时,采用7阶Biorthogonal小波作为母波,对其在7个细节带内进行小波分析,采用bior3.5进行分解与重构。由于载荷高频的小尺度波动所携带的能量较低,因此下述离散小波分析仅从d3到d7细节带展开,表3为离散小波细节带对应频率范围。

图7为KHB不同作用位置时各载荷的离散小波分析,其中图7a、图7b分别为摆振力矩、挥舞力矩所对应的离散小波。每图第1行到第6行分别为d7到d3细节带各频率范围内所对应的载荷能量,每一行的纵坐标为能量,横坐标为时间。

由图7可知,随着采样频率的升高,叶根载荷波动频率增加,对应能量降低,说明叶根的高频载荷具有频率高能量低的特性,低频载荷具有频率低能量高的特性。由图7a可知,摆振载荷能量主要集中在d6、d7细节带即低频带,且在KHB各位置处能量波动较为相似,每7s出现5次高能量,而风轮转速为20.46 r/min,每旋转一圈需2.93s出现2次高能量,这进一步说明摆振力矩主要与叶片自身重力有关,相干结构位置的改变对其影响较小。当P=0.0时在各细节带下摆振力矩能量波动幅度均较低,当P=0.5时在各细节带下摆振力矩能量波动幅度最大变化最剧烈,尤其是在d3和d4细节带内能量始终高于其它位置处对应的能量,当P=1.0时能量波动幅度居中。说明KHB中心位于轮毂中心时来流中的小尺度高频湍流增加,使得摆振

表3 离散小波细节带对应频率

| 细节带 | d3 | d4 | d5 | d6 | d7 |
|--------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 频率(Hz) | 3.125 - 6.25 | 1.565 - 3.125 | 0.781 - 1.562 | 0.390 - 0.781 | 0.195 - 0.390 |

力矩在波动频率为 1.565 ~ 6.25 Hz 内的能量明显增加。由图 7b 可知,随着 KHB 位置的改变,各细节带对应的能量变化较大,且在 $P=0.5$ 时能量波动最大,在 $P=0.0$ 时挥舞力矩在 d7 细节带内有一定的周期性变化。说明挥舞力矩主要受到来流中的大尺度低频湍流的影响,当 $P=0.5$ 时来流中各频带内的湍流尺度均增加,使得挥舞力矩能量波动较大,当 $P=0.0$ 时来流中主要是含周期性的能量较低的大尺度湍流,使得挥舞力矩能量波动周期性较明显。

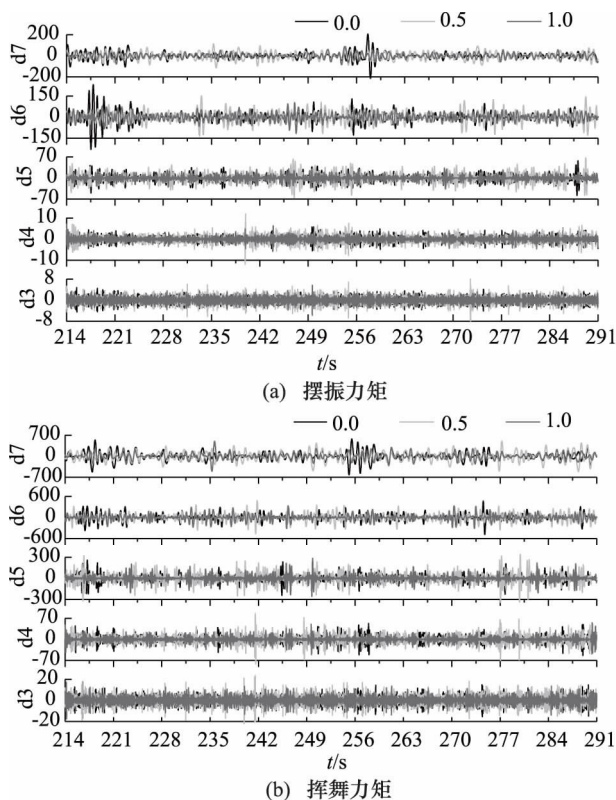


图 7 KHB 不同位置时叶根载荷离散小波分析

综上所述,叶根载荷的能量波动具有高频率低能量的特点,且能量主要集中在 d6、d7 细节带内;叶根所受挥舞方向的载荷约为摆振方向的 3.5 倍;当 KHB 位于轮毂中心处时,摆振载荷和挥舞载荷在各细节带内能量均最大。

5 结论

KHB 位置的改变对摆振力矩最值和离散程度影响较小。挥舞力矩随着风力机轮毂中心从 KHB 最底部逐渐上移至最顶部的时候,最值趋于稳定且波动较为集中。

KHB 位置的改变对摆振力矩和挥舞力矩均值影响较小,且叶根挥舞方向的载荷约为摆振方向的 3.5 倍;叶根载荷主要是低频率大尺度的波动,当 KHB 位

于轮毂中心处时,会使得各频带上的叶根载荷均增大。

参考文献

- [1] 陶宇鸥,朱玥,刘思畅,等. 2019 年风电行业深度报告 [EB/OL]. <http://news.bjx.com.cn/html/20190801/997099.shtml>. (2019-08-01).
- [2] Amir BT., Jonathan W., Lyons T., et al. Modelling the Structural Loading of a Small Wind Turbine at a Highly Turbulent Site Via Modifications to the Kaimal Turbulence Spectra [J]. *Renewable Energy*, 2017, 105.
- [3] Arundhuti B., Tanusree C., Vasant M., et al. Dynamic Analysis of an Offshore Wind Turbine under Random Wind and Wave Excitation with Soil-structure Interaction and Blade Tower Coupling [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 125.
- [4] Fleming P., Gebradd P., Van Wingerden J. W., et al. The SOWFA Super-controller: A High-fidelity Tool for Evaluating Wind Plant Control Approaches [R]. Vienna: the EWEA Annual Meeting, 2013.
- [5] 李倩倩,李春,杨阳,等. 基于分形学的湍流风谱模型适用性研究 [J]. *太阳能学报*, 2017, 38(11): 3123-3130.
- [6] Kelley N. D.. A Case for Including Atmospheric Thermodynamic Variables in Wind Turbine Fatigue Loading Parameter Identification [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 1999.
- [7] Kelley N. D.. Turbulence Descriptors for Scaling Fatigue Loading Spectra of Wind Turbine Structural Components [J]. *Nasa Sti/recon Technical Report N*, 1994, 95.
- [8] Lavelly A., Vijayakumar G., Kinzel M., et al. Space-Time Loadings on Wind Turbine Blades Driven by Atmospheric Boundary Layer Turbulence [R]. Orlando: 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2011.
- [9] Wait I., Yang Z. J., Chen G., et al. Wind-induced Instabilities and Monitoring of Wind Turbine [J]. *EARTHQUAKE ENGINEERING AND ENGINEERING VIBRATION* April, 2019, 18(2): 475-485.
- [10] Simms D., Schreck S., Hand M., et al. NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [11] SHIRAZI M., JAGER D., WILDE S., et al. Lamar Low-level Jet Project Interim Report [R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2004.
- [12] Kelley N., Hand M., Larwood S., et al. The NREL Large-scale Turbine Inflow and Response Experiment: Preliminary Results [R]. RENO NEVADA: ASME 2002 Wind Energy Symposium, 2002.
- [13] Jonkman B. J.. *TurbSim User's Guide: Version 1.50* [Z]. Golden: National Renewable Energy Lab (NREL), 2009.