

文章编号 1004-924X(2016)增-0503-08

大型风电叶片疲劳试验两点激振耦合特性及试验

张磊安*, 魏修亭, 陶黎明, 黄雪梅

(山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 为了提高大型风电叶片疲劳测试的激振能力, 设计了一套两点疲劳试验激振系统。首先, 基于拉格朗日方程推导出风电叶片两点激振的动力学方程, 并结合三相异步电机在两相静止坐标下的状态方程, 联合构建风电叶片两点激振数学模型。然后, 采用 Matlab/Simulink 软件建立仿真模型, 数值模拟结果揭示了两个激振源在风电叶片疲劳振动过程中的机电耦合特性。最后, 搭建了一套大型风电叶片全尺寸结构测试平台, 试验结果表明: 当激振源转速设定为 40 rpm 时(等效于叶片面向一阶频率), 其转速和相位基本能保持相对稳定; 当激振源转速设定为 75 rpm 时(等效于叶片弦向一阶频率), 激振源的转速波动范围为 ± 2 rpm, 相位角有不规则的波动, 说明激振源的转速越快, 转速、相位耦合程度越严重。试验结果与仿真结论基本吻合, 即进行叶片疲劳加载试验时, 弦向激振源的耦合程度大于面向, 叶片要获得更好的同步激振效果需采用智能解耦控制算法。

关键词: 风电叶片; 两点激振; 机电耦合; 数值仿真; 疲劳试验

中图分类号: TH212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0503

Coupling characteristics and test on dual-excitation for large wind turbine blade fatigue test

ZHANG Lei-an*, WEI Xiu-ting, TAO Li-ming, HUANG Xue-mei

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

* Corresponding author, E-mail: ziaver@163.com

Abstract: To improve shock excitation capacity of fatigue test of large-scale wind power blade, shock excitation system of two-point fatigue test is designed. Firstly, deduct kinetic equation of two-point shock excitation of wind power blade on the basis of Lagrange equation, and jointly construct mathematical model of two-point shock excitation of wind power blade by combining with state equation of three-phase asynchronous motor under two-phase static coordinate. Then establish simulation model by adopting Matlab/Simulink software, and numerical simulation result shows electromechanical coupling property of two shock excitation sources in the fatigue vibration process of wind power blade. Finally, a set of full-scale structural testing platform of large-scale wind power blade is constructed. Test result shows that when rotate speed of shock excitation source is set as 40rpm (being equivalent to first-order frequency in the direction of blade surface), its rotate speed and phase can be kept relatively stable; when rotate speed of shock excitation source is set as 75rpm (being equivalent to first-

收稿日期: 2016-05-20; 修订日期: 2016-06-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51405275, No. 51305243); 山东省自然科学基金资助项目 (No. ZR2014EL027); 中国博士后科学基金资助项目 (No. 2015M571840)

order frequency in the choral direction of blade, fluctuation range of rotate speed of shock excitation source is $\pm 2\text{rpm}$, and there is irregular fluctuation at phase angle, which shows that the faster the rotate speed of shock excitation source is, the severer the coupling degree between rotate speed and phase will be. Test result basically conforms to simulation result, and that is to say that when fatigue loading test of blade is performed, coupling degree of shock excitation source in the choral direction is greater than that of shock excitation source in the direction of surface. If better synchronous shock excitation effect of blade needs to be gained, intelligent decoupling control algorithm shall be adopted.

Key words: wind power blade; two-point shock excitation; electromechanical coupling; numerical simulation; fatigue test

1 引言

风电作为当今世界最主要的可再生能源技术之一,具有很高的经济、生态效益,所以受到世界各国的高度重视^[1-2]。叶片作为风力发电机组核心部件之一,具有良好的设计、可靠的质量和优越的性能,可以保证机组稳定运行^[3-5]。由于工作过程中风电叶片不断受到外界交变载荷作用,因此疲劳破坏是其最主要的失效方式。据不完全统计,风电叶片约 40% 的失效形式都是疲劳破坏^[6]。为了提前确定叶片的抗疲劳性能,对其进行全尺寸结构测试是当今主流的产品级性能检测方式。

根据 IEC 61400-23 Full-Scale Structural Testing of Wind Turbine Blade 标准^[7],对叶片进行疲劳性能测试通常以目标弯矩为依据,沿着叶片展向布置一个激振源和多个配重块,以此来测试叶片某一区域的抗疲劳性能。但是随着风电叶片逐步向大功率化发展,由于单点加载模式的激振能力有限,该方式已不能满足实际测试需要。为了提高对大型风电叶片的激振能力,本文提出了两点激振新方法,通过沿着叶片展向位置布置 2 个激振源,达到合力激振的目的。虽然该方法提高了激振能力,但是若干研究成果表明,两个激振源之间存在着耦合特性,严重影响激振效果,所以对于激振耦合特性有了相应的研究。郑书河等^[8]通过建立水平对称、垂直不对称滞回模型,并利用谐波线性化等效刚度和阻尼,通过数值计算得到连耦、滑转等规律,保证了振动轮的跳振和打滑现象。廖高华等^[9]基于能量分布法对两振动锤的能量分布求解,分析了激振系统在各个频率段的耦合特性,利用哈密顿原理推导了振动同

步条件,并采用相临偏差耦合转速调节获得了较好的同步效果。王斌华^[10]采用柔性多体动力学和耦合动力学理论建立了双节悬臂管流固耦合系统基座振动力学模型,进行了多参数对流固耦合系统的振动影响分析,并搭建实验系统检验了理论模型的准确性。但目前对大型风电叶片疲劳试验两点激振系统的耦合理论和工程应用还未开展。本文主要从风电叶片疲劳试验两点激振为出发点,通过理论建模、数值仿真和现场试验,提高了大型风电叶片的激振能力,为后续解耦控制算法与激振装备开发提供理论依据。

2 两点激振系统设计

风电叶片根部通过大型法兰盘固定在疲劳加载基座上,沿叶片展向特定位置固定两个激振源,分别记作激振源 A 和激振源 B。每个激振源由变频电机、减速箱、偏心质量块、转速/相位测试单元和连接板等组成。激振源与风电叶片通过夹具刚性连接,夹具与叶片之间通过木鞍相连。激振力为电机带动偏心质量块旋转产生的离心力,偏心质量块的臂长与重量均可调节。两点激振总体结构方案如图 1 所示。

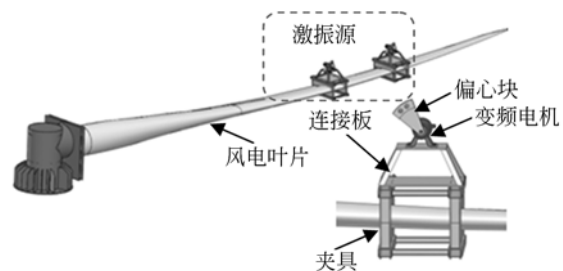


图 1 两点激振系统

Fig. 1 Dual-excitation system

为了获得激振源的转速和相位,设计转速、相位测试单元如图 2 所示。测试单元硬件由 180 个齿的测速齿轮和脉冲传感器组成,测速齿轮与电机旋转轴串联,脉冲传感器将脉冲信号传递给采集系统,采集软件通过单位时间内检测齿轮脉冲的个数,实时计算出激振源转速和相位角。

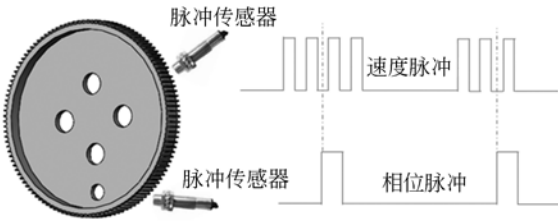


图 2 转速、相位角测试方案

Fig. 2 Measure scheme of revolution speed and phase angle

3 两点激振动力学模型构建

为了获得“激振源 A-风电叶片-激振源 B”动力学模型,假设:

- (1) 风电叶片为悬臂梁且为弹塑性体;
- (2) 叶片振动的阻尼力和弹性力分别为速度和位移的线性函数;
- (3) 两个激振源对称布置在叶片上。

在假设前提下,建立风电叶片两点激振动力学模型,如图 3 所示。两个激振源的偏心质量块反向回转,将水平方向的离心力相互抵消,最终整个激振模型可简化为 3 个自由度,分别是沿 x 轴, y 轴的平动和绕 z 轴的转动。

图 3 中, x_0y_0 为绝对坐标系, $x'o'y'$ 为动坐标, φ 为两个坐标系的夹角, o' 为激振系统的质心, o, o' 为运动合成质心, o_1, o_2 分别为激振源偏心块旋转连线的中点, $l_1 = oo_1, l_2 = oo_2, \omega_i (i = 1, 2)$ 为偏心块旋转角速度,且有 $\omega_i = \dot{\theta}_i (i = 1, 2)$ 。

以 $x, y, \varphi, \theta_1, \theta_2$ 为广义坐标,激振系统的动能 T 表示为:

$$T = \frac{1}{2} J_0 \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 J_i \dot{\theta}_i^2 + \frac{1}{2} M [(\dot{x} - \dot{\varphi} l_0 \sin \beta_0)^2 +$$

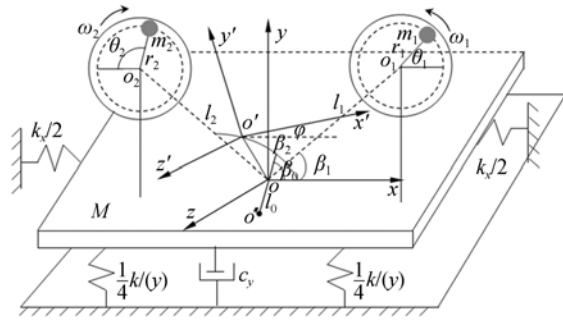


图 3 两点激振动力学模型

Fig. 3 Dynamic model of dual-excitation system

$$(\dot{y} + \dot{\varphi} l_0 \cos \beta_0)^2] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 m_i [(\dot{x} + \dot{\varphi} l_i \sin \beta_i)^2 + (\dot{y} - \dot{\varphi} l_i \cos \beta_i + \dot{\theta}_i r_i \cos \theta_i)^2], \quad (1)$$

式中: J_0 为激振系统转动惯量; $J_i (i = 1, 2)$ 为偏心块转动惯量; M 为激振系统总重量; $m_i (i = 1, 2)$ 为 2 个偏心块的重量; $r_i (i = 1, 2)$ 为偏心距。

激振系统的势能 V 表示为:

$$V = \frac{1}{2} k_x x^2 + \frac{1}{2} k_y y^2 + \frac{1}{2} k_\varphi \varphi^2, \quad (2)$$

式中: k_x, k_y, k_φ 一在 x, y, φ 方向的等效刚度。

因为 o 点为合成质心,得到质心方程:

$$\begin{cases} M l_0 \sin \beta_0 - \sum_{i=1}^2 m_i l_i \sin \beta_i = 0 \\ M l_0 \cos \beta_0 - \sum_{i=1}^2 m_i l_i \cos \beta_i = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

根据拉格朗日定理^[11-12],广义力定义为:

$$Q_i = \begin{bmatrix} -c_x \dot{x} \\ -c_y \dot{y} \\ -c_\varphi \dot{\varphi} \\ T_{m1} - T_{f1} - c_1 \dot{\theta}_1 \\ T_{m2} - T_{f2} - c_2 \dot{\theta}_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: c_x, c_y, c_φ 为 x, y 和 φ 方向的等效阻尼; c_1, c_2 为等效阻尼; $T_{mi}, T_{fi} (i = 1, 2)$ 为电动机电磁转矩和负载转矩。

对广义坐标进行求解,得到风电叶片两点激振系统的动力学方程:

$$\left\{ \begin{aligned}
 & (M + \sum_{i=1}^2 m_i) \ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x = 0 \\
 & (M + \sum_{i=1}^2 m_i) \ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y = \\
 & \quad \sum_{i=1}^2 m_i r_i (\ddot{\theta}_i^2 \sin \theta_i - \ddot{\theta}_i \cos \theta_i) \\
 & (M l_0^2 + \sum_{i=1}^2 m_i l_i^2 + J_0) \ddot{\varphi} + c_\varphi \dot{\varphi} + k_\varphi \varphi = \\
 & \quad \sum_{i=1}^2 m_i l_i r_i \cos \beta_i (\ddot{\theta}_i \cos \theta_i - \dot{\theta}_i^2 \sin \theta_i) \\
 & J_i \ddot{\theta}_i = T_{mi} - T_{fi} - c_i \dot{\theta}_i - \\
 & \quad m_i r_i \sin \theta_i [(\dot{\theta}_i - 1)(\dot{y} - \dot{\varphi} l_i \cos \beta_i) - \dot{\theta}_i^2 r_i \cos \theta_i] - \\
 & \quad m_i r_i \cos \theta_i (\dot{y} - \dot{\varphi} l_i \cos \beta_i + \dot{\theta}_i r_i \cos \theta_i) \quad (i = 1, 2)
 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

三相异步电机在两相静止坐标系 α 、 β 下的状态方程^[13]可表示为:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{\alpha 1} \\ \dot{I}_{\beta 1} \\ \dot{I}_{\alpha 2} \\ \dot{I}_{\beta 2} \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega L_m^2 & R_r L_m & \omega L_m L_r \\ -\omega L_m^2 & -R_s L_r & -\omega L_r L_m & R_r L_m \\ R_s L_m & -\omega L_s L_m & R_r L_s & R_r L_m \\ \omega L_s L_m & R_s L_m & \omega L_r L_s & -R_r L_s \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{\alpha 1} \\ I_{\beta 1} \\ I_{\alpha 2} \\ I_{\beta 2} \end{bmatrix} + \mathbf{K} \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \\ -L_m & 0 \\ 0 & -L_m \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_{\alpha 1} \\ U_{\beta 1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{K} = 1/(L_s L_r - L_m^2)$

转矩方程可表示为:

$$\frac{J}{n_p} \dot{\omega} - M_f = L_m n_p (I_{\beta 1} I_{\alpha 2} - I_{\alpha 1} I_{\beta 2}), \quad (7)$$

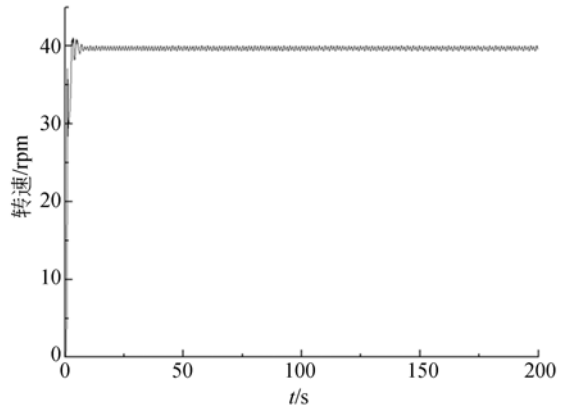
式中: $U_{\alpha 1}$ 、 $U_{\alpha 2}$ 、 $U_{\beta 1}$ 、 $U_{\beta 2}$ 、 $I_{\alpha 1}$ 、 $I_{\alpha 2}$ 、 $I_{\beta 1}$ 、 $I_{\beta 2}$ 为两相静止坐标下的定子、转子电压和电流; L_s 、 L_r 、 L_m 为电机定子、转子自感和互感; R_s 、 R_r 为电机定子、转子电阻; ω 为电机转速; J —电机转子转动惯量; M_f 为摩擦阻矩; n_p 为电机极对数。

式(5)~式(7)联合构建“激振源 A-风电叶

片-激振源 B”的振动数学模型。

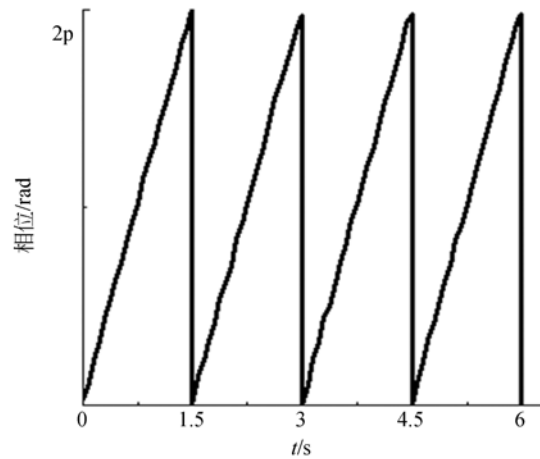
4 数值仿真

上述构建的振动数学模型难以获得精确的解析解,为了可视化的获得两激振源的耦合特性,采用 Matlab/Simulink 软件建立仿真模型进行求解。以 aeroblade2.5~59.5 风电叶片为激振对象,该叶片额定功率为 2.5 兆瓦,额定长度为 59.5 m。根据叶片设计单位提供的产品参数文件,初始参数确定为: $M=13\,915\text{ kg}$ 、 $m_1=m_2=360\text{ kg}$ 、 $l_0=0.38\text{ m}$ 、 $J_0=940\text{ kg}\cdot\text{m}^3$ 、 $r_1=r_2=1.2\text{ m}$ 、 $l_1=l_2=3.5\text{ m}$ 、 $\beta_1=60^\circ$ 、 $\beta_2=120^\circ$ 。



(a)转速变化曲线

(a)Revolution speed variable curve



(b)相位变化曲线

(b)Phase angle variable curve

图 4 $n=40\text{ rpm}$, 激振源转速、相位仿真曲线

Fig. 4 $n=40\text{ rpm}$, Simulation curve of revolution speed and phase angle

通过模态试验获得叶片面向和弦向的一阶固有频率分别为: $f_{flapwise} = 0.62 \text{ Hz}$, $f_{edgewise} = 1.15 \text{ Hz}$ 。两个激振源设定转速分别为 40 rpm 和 75 rpm,初始相位为零,数值模拟得到激振源的转速、相位曲线分别如图 4 和图 5 所示。

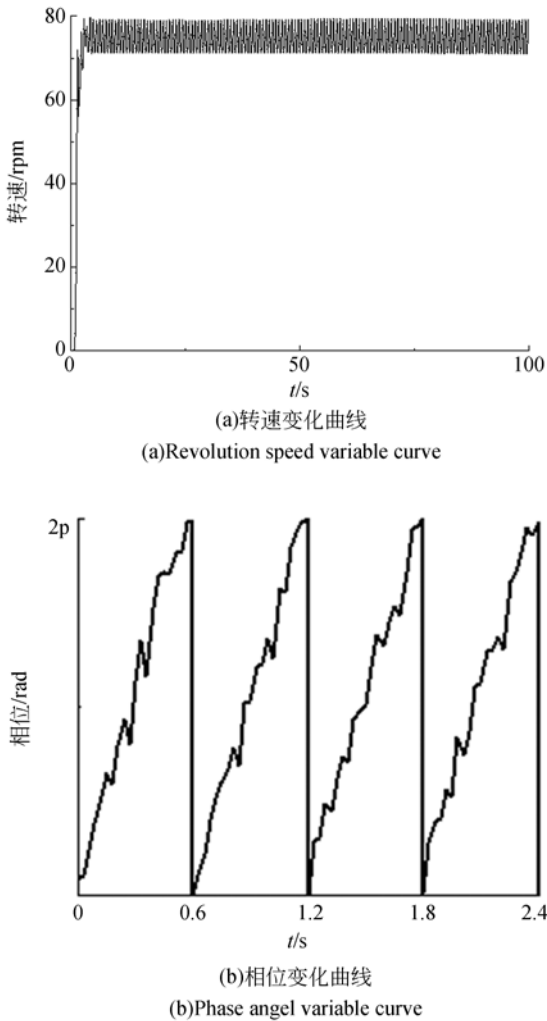


图 5 $n=75 \text{ rpm}$, 激振源转速、相位仿真曲线

Fig. 5 $n=75 \text{ rpm}$, Simulation curve of revolution speed and phase angle

从图 4 可以得出,在较小的激振频率下,近似于叶片面向一阶固有频率,激振源转速基本能维持在 40 rpm,相位变化也比较均匀,说明两个激振源的耦合程度较小。

从图 5 可以得出,当两个激振源的转速设定在 75 rpm 时,近似于叶片弦向一阶固有频率,激振源的转速产生一定的波动,转速波动范围大约为 $\pm 2 \text{ rpm}$,没有维持一个固定值,相位角也产生

不规则的波动。说明电机的设定转速越大,两个激振源的速度、相位耦合越严重。

5 试验研究

5.1 测试平台搭建

为了测试风电叶片疲劳试验两个激振源的耦合特性,搭建了一套 12 MW 大型风电叶片全尺寸结构测试平台,如图 6 所示。该测试平台主要包括双面加载支座、变频电机、减速箱、偏心质量块和连接夹具等。两个激振源通过夹具与叶片连接,两电机驱动偏心质量块旋转产生激振力,从而驱动叶片上下振动。偏心质量块的臂长与重量均可调节,可满足不同的叶片振幅要求。

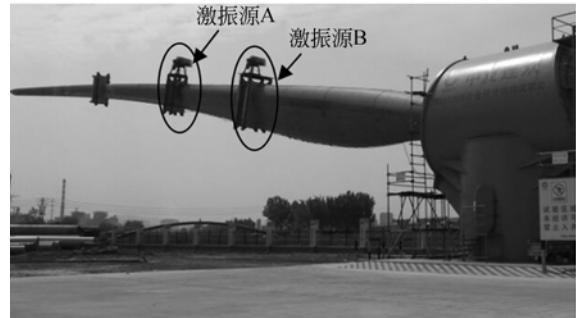


图 6 风电叶片两点激振试验现场

Fig. 6 Dual-excitation test for wind turbine blade

表 1 试验参数

Tab. 1 Test parameters

名称	参数
叶片型号	LZ59.5-2.5
叶片总长度/m	59.5
叶片质量/kg	13915
叶片重心位置/m	17.8
激振源 A 与叶根距离/m	37.5
激振源 B 与叶根距离/m	29
偏心块质量/kg	360
臂长/cm	120
电机功率/kW	30
接近开关型号	CORON CSJ-E35-15APA-6
试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	室外 16
湿度/RH	45%

5.2 试验测试方案

测试方案采用上位监控界面-数据采集卡-测

试仪器的单向数据传输模式, 监控如图 7 所示。上位机监控界面基于 Labview11.0 软件二次开发, 激振源的数据采集通过板卡实现。

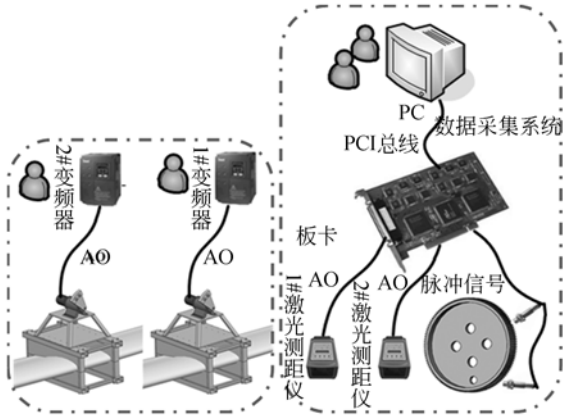


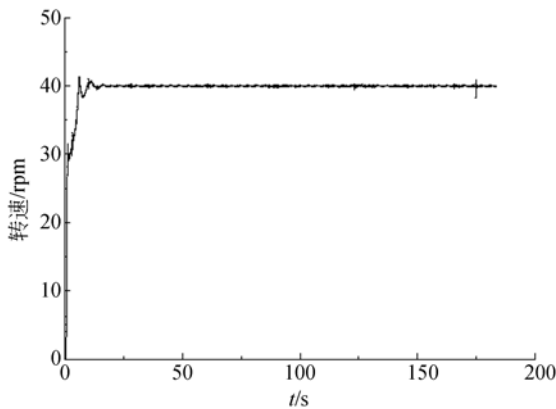
图 7 试验测试方案

Fig. 7 Test measure scheme

由图 7 的测试方案可知, 初始转速通过变频器手动设定, 变频器通过变频信号控制电动机。两个激振源的转速及相位采用齿轮测速传感器实现, 传感器输出一系列脉冲信号给数据采集卡, 相位的零位基准则通过接近开关清零。

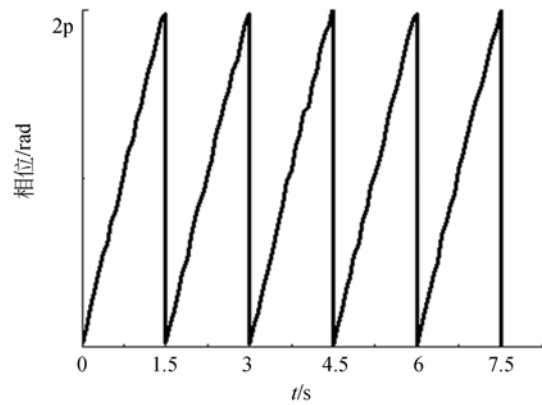
5.3 测试结果及分析

对叶片面向和弦向分别进行激振试验, 设定变频器频率使激振源转速分别为 40 rpm 和 75 rpm, 两激振源的初始相位角为零。两电机的机械特性和偏心块几何尺寸、质量近似等效。现场试验得到激振源的转速及相位角分别如图 8 和图 9 所示。



(a)转速测试曲线

(a)Measurement curve of revolution speed

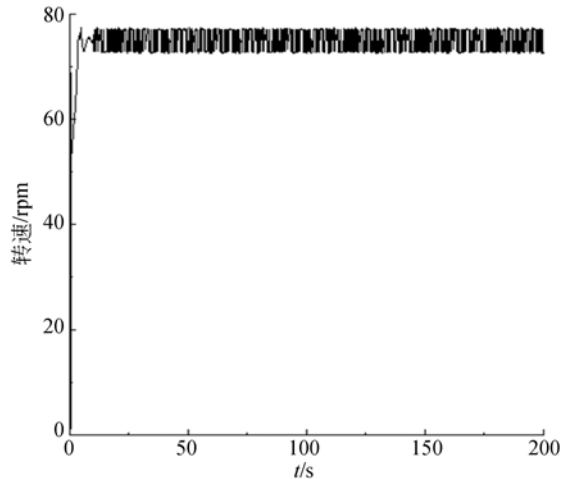


(b)相位测试曲线

(b)Measurement curve of phase angle

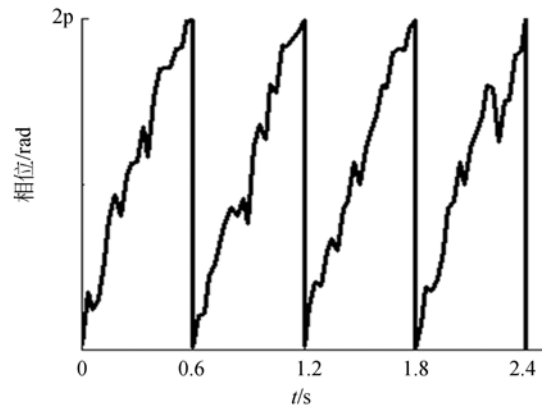
图 8 $n=40$ rpm, 激振源转速、相位测试曲线

Fig. 8 $n=40$ rpm, Measurement curve of revolution speed and phase angle



(a)转速变化曲线

(a)Measurement curve of revolution speed



(b)相位变化曲线

(b)Measurement curve of phase angle

图 9 $n=75$ rpm, 激振源转速、相位测试曲线

Fig. 9 $n=75$ rpm, Measurement curve of revolution speed and phase angle

由试验曲线可知,当设定转速 $n=40$ r/min,两激振源的实际转速基本能维持稳定,相位角变化也非常均匀,说明两个激振源的耦合较小。但是当设定转速增大到 $n=75$ r/min,两个激振源的实际转速呈现较大波动的紊乱状态,波动范围基本在 ± 2 r/min,相位角也出现不规则的波动,说明此时两个激振源的速度和相位耦合较为严重。结论与仿真结果基本吻合,验证了构建的数学模型和仿真模型的正确性。

6 结 论

风电叶片大型化必然是海上风电的主流发展方向,为了提高对大尺寸风电叶片全尺寸结构试验的激振能力,两个(多个)激振源联合激振是疲劳加载方法与装备的发展方向之一。构建了一个

用于 12 MW 级风电叶片全尺寸结构测试平台,该加载支座为双面结构,能同时进行两支叶片的疲劳性能测试。同时开发了两点激振装备,能提高对大型风电叶片的激振能力。本文通过理论建模、仿真分析和试验验证表明,耦合效应固存在风电叶片疲劳试验的两个激振源。且激振源的转速越快,耦合程度越严重,当设定转速为 75 rpm 时,由于耦合效应,激振源转速在 ± 2 rpm 内波动。通常叶片弦向的一阶频率大于面向,所以进行叶片疲劳加载试验时,弦向激振源的耦合明显大于面向,该现象在一定程度上降低了叶片两点激振的疲劳测试效果。本文的研究理论和方法对其它工程应用具有一定的指导意义。另外,要提高更加精确的疲劳测试精度,可采用解耦控制算法,保证每个激振源的速度、相位自适应调节;若需要更大的疲劳试验振幅,可考虑风电叶片多点激振模式。

参考文献:

- [1] 豆红尧,周华飞,秦良忠,等. 风电叶片全场三维变形测试及分析[J]. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2257-2262.
DOU H Y, ZHOU F H, QIN L ZH, *et al.*. Test and analysis of full-field 3D deformation for a wind turbine blade[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2015, 36(9): 2257-2262. (in Chinese)
- [2] CHEN J, WANG X D, SHEN W Z, *et al.*. Optimization design of blade shapes for wind turbines [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(3): 131-134.
- [3] HERBERT G M, INIYAN S, SREEVALSAN E, *et al.*. A review of wind energy technologies [J]. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(6): 1117-1145.
- [4] ZHANG L A, WU J Z. Frequency capture characteristics in wind blade fatigue loading process [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(6): 86-91.
- [5] CHEN X, ZHAO W, ZHAO X L, *et al.*. Failure test and finite element simulation of a large wind turbine composite blade under static loading[J]. *Energy*, 2014, 7(4): 2274-2297.
- [6] KONG C, BANG J, SUGIYAMA Y. Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life[J]. *Energy*, 2005, 30(11): 2101-2114.
- [7] 乔玉军,李成良,丁蕊. 基于疲劳测试的叶片优化设计研究[J]. 机电产品开发与创新, 2015, 28(1): 29-31.
QIAO Y J, LI CH L, DING S. The blade design optimization based on the fatigue test[J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2015, 28(1): 29-31. (in Chinese)
- [8] 郑书河,林述温. 斜向激振模式下振动轮滞回耦合特性分析[J]. 振动与冲击, 2015, 22(3): 47-53.
ZHENG SH H, LIN SH W. Analysis on the coupled hysteresis characteristic of intelligent vibratory roller under slant excitation mode [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 22(3): 47-53. (in Chinese)
- [9] 廖高华,来鑫,乌建中. 多锤电驱式激振系统的振动耦合特性及控制[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2015, 10(7): 130-135.
LIAO G H, LAI X, WU J ZH. Coupling characteristics of electrically-driven multi-hammer excitation system and its control [J]. *Journal of South China University of technology (Natural Science Edition)*, 2015, 10(7): 130-135. (in Chinese)
- [10] 王斌华. 双节悬臂管流固耦合系统基座振动研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(14): 183-187.
WANG B H. Fluid-solid coupling analysis of two cantilever pipers supported on vibration foundation

- [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(14):183-187. (in Chinese)
- [11] 马钟成,刘占辰,郑无计,等. 基于拉格朗日力学的末敏弹稳态扫描阶段动力学模型[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(1):19-23.
MA ZH C,LIU ZH C,ZHENG W J, *et al.*. A dynamic model of rotating parachute systems based on language mechanics[J]. *Journal of Force Engineering University (Natural Science Edition)*, 2016,17(1):19-23. (in Chinese)
- [12] 陈修龙,孙德才,王清. 基于拉格朗日的冗余驱动并联机构刚体动力学建模[J]. 农业机械学报,2015,46(12):329-336.
CHEN X L,SUN D C,WANG Q. Rigid dynamics modeling of redundant acuation parallel mechanism based on language method[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*,2015, 46(12):329-336. (in Chinese)
- [13] 张杰,柴建云,孙旭东,等. 双三相异步电机反相高频注入无速度传感器控制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(23):6162-6171.
ZHANG J,CHAI J Y,SUN X D, *et al.*. Sensorless control of dual three phase induction mechaines by antiphase high frequency signal injection [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015,35(23):6162-6171. (in Chinese)

作者简介:



张磊安(1982—),男,山东即墨人,博士后,讲师,2008年于山东理工大学获得硕士学位,2012年于同济大学获得博士学位,主要从事机电一体化研究。E-mail: ziaver@163.com



黄雪梅(1974—),女,山东东营人,副教授,2001年于山东大学获得硕士学位,2004年于上海交通大学获得博士学位,主要从事数字图像及机电控制研究。E-mail: huangxuemei@sdu.edu.cn