

风电叶片两点并激疲劳加载系统协同控制研究

廖高华^{1,2}, 乌建中²

(1. 江西省精密驱动与控制重点实验室南昌工程学院, 南昌 330099; 2. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘 要: 研发一种新型风电叶片电驱动两点并激惯性疲劳试验系统。为了消除风电叶片两激振器加载过程中耦合效应, 提出虚拟主令耦合同步控制策略, 以滑模变结构控制算法设计误差补偿器, 利用李雅普诺夫函数证明算法稳定性, 然后建立控制仿真模型, 数值仿真分析该算法收敛性及鲁棒性。风电叶片两点激振现场试验结果表明, 控制算法能使两激振器快速跟随, 并激加载能较好地维持同步状态, 两激振器的相位差的波动很小, 其值约 $\pm 2^\circ$, 叶片振幅稳定, 实现了风电叶片的平稳有效加载。

关键词: 叶片疲劳试验; 两点惯性加载; 耦合; 协同控制

中图分类号: TH122

文献标识码: A

0 引 言

风电机组叶片寿命直接影响风力发电成本, 疲劳损伤是风电叶片主要的失效形式, 而风电叶片进行疲劳性能测试是一种可靠且有效的检测方法^[1]。随着风电机组的容量增加, 叶片规模越来越大, 使用单套加载设备激振加载, 会存在疲劳寿命检测结果失真或驱动力不足等问题; 新形势下的单轴多点加载形式应运而生, 采用多套设备在不同点进行并激加载, 可加大激振力促使叶片和设备产生共振, 同时提高疲劳试验、节省能量^[2,3]。多加载源系统振动过程中存在能量传递, 构成了一个复杂的非线性机电耦合系统, 而机电耦合影响控制效果^[4]。针对振动系统多加载源同步问题的研究, 已逐步从控制同步领域进一步向前延伸, 发展到振动同步与控制同步相结合的复合同步阶段^[5]。众多学者提出若干控制方法应用于风电叶片试验, 文献[6]提出一套风电叶片疲劳试验线性控制系统, 将非线性叶片振动模型通过输出的振幅简化等效为线性模型, 使得叶片实现以给定的幅值振动。文献[7]研发一种风电叶片疲劳加载系统, 采用模糊 PID 进行振幅控制, 开展风力机叶片全尺寸疲劳试验, 完成频率搜索及载荷谱加载测试过程。文献[8,9]设计大型风力机叶片加载系统, 建立模糊控制系统, 试验验证

算法应用于叶片加载试验具有良好的控制精度。文献[10]设计一套针对两轴共振疲劳加载源的转速差、相位差及风电叶片振幅测量方案, 并制定相应的控制策略。

本文构建风电叶片电驱动两点惯性疲劳加载测试平台, 提出虚拟主令耦合同步控制策略, 以滑模变结构控制算法设计误差补偿器, 从理论上验证其渐近稳定性, 并建立模型数值仿真其有效性。风电叶片进行激振试验表明, 系统控制效果较好, 可减小耦合作用的固有相位差, 并能较好地维持同步状态。

1 叶片两点并激疲劳加载系统

叶片根部固定在加载基座上, 2 台电驱动疲劳加载惯性激振器通过木芯及夹具安装于叶片上, 激振器安装距离根部距离分别为 16 和 24 m, 两点位置的激振器可同时给叶片提供交变激振力。在叶片展向不同位置上设置配重来调整载荷分布, 得到各剖面位置所需的载荷。因此, 建立仿真模型对载荷匹配优化, 并校验配重块的质量和数量, 得到沿叶片展向的弯矩分布误差小于 7%。两点疲劳加载系统参数采用表 1 中的数据配置, 疲劳试验系统如图 1 所示。

收稿日期: 2017-05-05

基金项目: 产学研合作计划(2015122801); 江西省精密驱动与控制重点实验室开放基金(PLPDC-KFKT-201622)

通信作者: 廖高华(1978—), 男, 博士、副教授, 主要从事机电液控制方面的研究。tjjd328@163.com

Table 1 Parameters configuration for fatigue test

用跟随误差及同步误差来描述系统位置同步性能,同步控制的目标是通过一定的同步控制算法使跟随误差 $e_i(t)$ 与同步误差 $\varepsilon_i(t)$ 均趋于零。引入一个同时包含 $e_i(t)$ 、 $\varepsilon_{i(i+1)}(t)$ 、 $\varepsilon_{i(i-1)}(t)$ 的信息量 $E_i(t)$,称之为相邻耦合误差。定义按相邻次序定义 $E_i(t)$ 为 $E_i = e_i + \Lambda_i \varepsilon_i$, 其中 Λ_i 为一个正的耦合系数,用于权衡控制器的跟踪性能和同步性能。

根据引入新的变量耦合误差, $E = e + \Lambda \varepsilon$, Λ 是控制增益矩阵,为对角正定矩阵,得到:

$$E = (I + \Lambda T)e \quad (4)$$

其中, I ——单位矩阵;如果矩阵 $(I + \Lambda T)$ 可逆,则 $E \rightarrow 0$, 则 $e \rightarrow 0$, 进而 $\varepsilon \rightarrow 0$;增益 Λ 越高,同步控制越强。

3 位移滑模控制器设计

设计基于滑模变结构伺服控制系统,其整体结构如图4所示。控制器以激振器的跟踪误差作为输入,完成振子位移到电机转角的参数转换,以及对电机转角指令补偿。

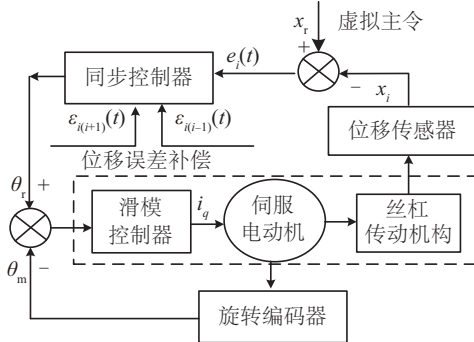


图4 滑模伺服控制结构框图

Fig. 4 Servo control structure sliding block diagram

由交流电机磁场定向控制理论可知^[11],加载系统状态方程式的伺服运动学方程可表示为:

$$\begin{cases} J_{eq} \ddot{\theta}_m = T_{em} - B_{eq} \dot{\theta}_m - \frac{P_h}{2\pi} F_s \\ \quad = K_{em} i_q - B_{eq} \dot{\theta}_m - T_L \\ K_{em} = 1.5 p_n \psi_f, T_L = \frac{P_h}{2\pi} F_s \end{cases} \quad (5)$$

式中, J_{eq} ——伺服结构等效转动惯量; K_{em} ——电机转矩系数; P_h ——丝杠导程; i_q ——电机输入交轴电流; B_{eq} ——等效摩擦系数; p_n ——电机极对数; ψ_f ——各相绕组的匝链永磁磁链值; T_L ——转轴上承受的负载转矩。

系统状态方程式(5)可改为:

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_m(t) = \alpha \dot{\theta}_m(t) + \beta i_q(t) + \gamma T_L(t) \\ \alpha = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}}, \beta = -\frac{K_{em}}{J_{eq}}, \gamma = -\frac{1}{J_{eq}} \end{cases} \quad (6)$$

位移滑模变结构控制器输入为缸位移偏差,输出为电机角速度参考值, $l_m = P_h \theta_m / 2\pi$ 。为了保证系统的快速性,要求跟踪误差有较快的收敛速度。若能使跟踪误差以指数形式渐近收敛至零,则可完全满足快速性要求,此时跟踪误差 $E(t)$ 须满足:

$$\dot{E}_i(t) = -c E_i(t), c > 0 \quad (7)$$

定义 $\theta_r(t)$ 为由位置控制器和误差补偿控制器合成的位置指令信号,则系统跟踪误差及其变化率为:

$$\begin{cases} e_s(t) = \theta_r(t) - \theta_m(t) \\ \dot{e}_s(t) = \dot{\theta}_r(t) - \dot{\theta}_m(t) \end{cases} \quad (8)$$

在系统的动态过程中,跟踪误差及其积分量收敛并趋于零。鉴于此,选择系统的跟误差及其积分量作为状态变量,具体定义为:

$$\begin{cases} x_1 = \theta_r(t) - \theta_m(t) = \int_0^t (\omega_r - \omega_m) dt \\ x_2 = \dot{\theta}_r(t) - \dot{\theta}_m(t) = \omega_r - \omega_m \end{cases} \quad (9)$$

对于滑模变结构控制系统,系统状态必然从滑模面的两边向滑模面靠近,然后沿滑模面趋向于稳定的平衡点。在系统处于滑模面期间,切换函数 s 保持为零,因此系统状态满足方程 $s = 0$ 和 $\dot{s} = 0$,取切换函数 $s = cx_1 + x_2$ 。此时跟踪误差以指数形式渐近收敛至零,设计滑模变结构控制系统时,要保证滑动模态满足存在性及可达性,即 $s\dot{s} < 0$ 。将系统状态方程代入式 $s\dot{s} < 0$, 可得:

$$s(cx_2 + \beta i_q + \gamma T_L) < 0 \quad (10)$$

为使式(10)成立,构造 $i_q = \eta \operatorname{sgn}(s) + kx_2$, 由构造的 i_q 及式(10)可得:

$$k = \begin{cases} a_1, x_2 s < 0 \\ b_1, x_2 s > 0 \end{cases}, \eta > T_L / 1.5 p_n \psi_f \quad (11)$$

式中, a_1 ——常数,且满足 $a_1 < J_{eq} c / 1.5 p_n \psi_f$; b_1 ——常数,且满足 $b_1 > J_{eq} c / 1.5 p_n \psi_f$ 。

考虑到疲劳加载系统中参数摄动和随机扰动对系统造成的影响,进一步将式(6)系统模型表示为:

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_m(t) = (\alpha + \Delta\alpha)\dot{\theta}_m(t) + (\beta + \Delta\beta)i_q(t) + (\gamma + \Delta\gamma)T_L(t) \\ = \alpha\dot{\theta}_m(t) + \beta(i_q(t) + f(t)) \\ f(t) = \beta^{-1}[\Delta\alpha\dot{\theta}_m(t) + \Delta\beta i_q(t) + (\gamma + \Delta\gamma)T_L(t)] \end{cases} \quad (12)$$

式中, $f(t)$ ——系统总干扰量; $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$ ——参数 B_{eq} 、 J_{eq} 和 K_{em} 所产生的不确定性。

假设 $k_m = \max(|f(t)|) + \sigma$ 为系统干扰 $f(t)$ 的确定上界, $\sigma > 0$ 。采用积分滑模面设计 SMC 的切换函数可改为:

$$\begin{aligned} s_1 &= cx_1 + x_2 \\ &= \dot{\theta}_r(t) + \int_0^t [-\ddot{\theta}_m(t) + c\dot{e}_s(t)]dt \end{aligned} \quad (13)$$

当系统达到理想滑动模态控制时, $\dot{s}_1 = 0$, 由式(12)可定义等效控制 $u_{eq}(t)$ 为:

$$u_{eq}(t) = \beta^{-1}[\ddot{\theta}_r(t) - \alpha\dot{\theta}_m(t) - \beta f(t) + c\dot{e}_s(t)] \quad (14)$$

由于 $f(t)$ 的不确定性, 通过干扰上界设计 SMC 控制律为:

$$u_{eq}(t) = \beta^{-1}[\ddot{\theta}_r(t) - \alpha\dot{\theta}_m(t) + c\dot{e}_s(t)] + k_m \operatorname{sgn}(s) \quad (15)$$

考察滑模变结构控制中滑模运动段对参数摄动和随机扰动的鲁棒性, 稳定性证明如下:

$$\begin{aligned} s_1(t)\dot{s}_1(t) &= s_1(t)[\ddot{\theta}_r(t) - \ddot{\theta}_m(t) + c\dot{e}_s(t)] \\ &= \beta s_1(t)[-k_m \operatorname{sgn}(s_1(t)) - f(t)] \\ &= \beta[-k_m |s_1(t)| - f(t)s_1(t)] \leq -\sigma |s_1(t)| \end{aligned} \quad (16)$$

在 Matlab/Simulink 中进行算法验证仿真, 电机模型在 $d-q$ 旋转坐标系下的设置各主要参数。相关参数为: 额定功率 22 kW, 额定转速 3000 r/min, 极对数 $P=4$, 传动比 $i=1$, 丝杠导程 $P_h=0.02$ m。在控制结构不变的情况下, 对 3 种控制算法进行比较。给定 4 台电机的参考速度为 $\theta_r=2\pi$, 仿真时间为 $t=0.2$ s, 在 $t=0.1$ s 时, 各电机的负载转矩分别突变为 20 N·m, 在保证其他条件均相同的情况下, 以电机 1 为例, 其位置响应曲线如图 5 所示。由图 5 可看出, 加入同步耦合器的控制方式控制效果明显强于未加的控制方式, 电机在同步控制器控制下系统响应更快, 波动更小, 而滑模控制(sliding mode control, SMC)要比 PID 控制的幅值小, 说明 SMC 对扰动具有不变性、鲁棒性强。

采用正弦位置给定, 对 PID 同步控制器和 SMC

同步控制器的跟踪性能进行仿真实验, 结果如图 6 所示, 其中黑色实线为正弦位置给定。从仿真实验结果可明显看出, 所提出的控制方法跟踪效果好, 鲁棒性强, PID 同步控制器在参数或负载转矩变化时出现波动, 但很快就能调整过来, 滑模耦合同步控制器在参数或负载转矩变化时基本不变, 对扰动具有不变性, 鲁棒性强, 效果最好。

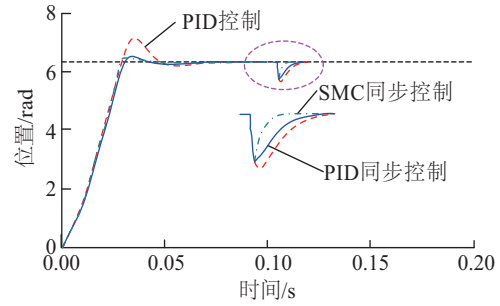


图5 位置阶跃响应曲线

Fig. 5 Position step response curve

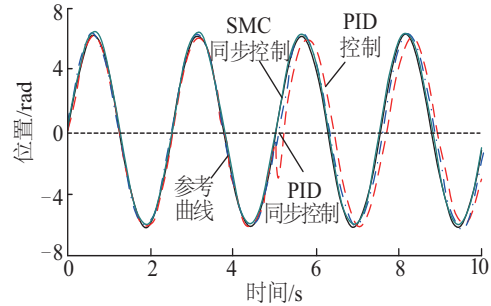
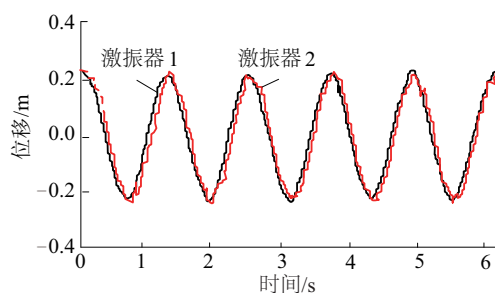


图6 正弦信号的跟踪效果

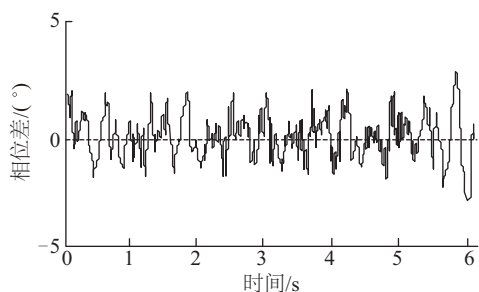
Fig. 6 Sine signal tracking effect of controller

4 试验及分析

两点加载控制试验对象为 1.5 MW 风电叶片, 设定同频和异频驱动频率 2 种情况进行加载, 验证所提出的算法对两点加载系统的控制效果。试验环境温度为 25 ℃、湿度 50%, 激光测距仪分辨率 0.1 mm/测距 30 m。由于共振时电机轴受最大的惯性转矩作用, 激振器的频率都均向共振点方向趋近, 在整个频率区域内都存在机电耦合作用。图 7 为在两激振器频率为 7.85 rad/s 时测量得到的激振器振子位移变化与相位差曲线, 可看出在近共振时, 控制同步下的相位差波动较小, 其值约 $\pm 2^\circ$ 。



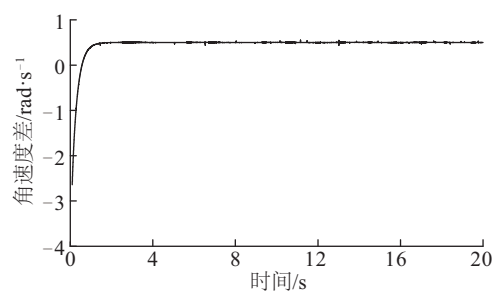
a. 位移同步曲线



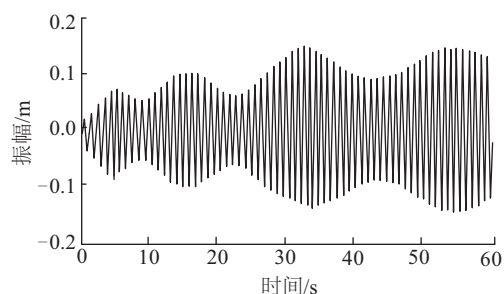
b. 相位差曲线

图7 激振加载的耦合控制结果

Fig. 7 Controlling displacement of excitation loading



a. 两激振器角速度差曲线



b. 叶片摆振振幅变化曲

图9 激振频率不同时系统振动曲线

Fig. 9 Vibration curve of different exciting frequency

叶片振幅与时间的关系曲线如图8所示,从图8可看出,振幅随着激振时间的增加而逐渐增大,加载系统能很好地捕捉叶片共振点,并逐步达到共振峰值并趋于稳定,叶片加载点24 m处摆振稳定幅值约为0.20 m。

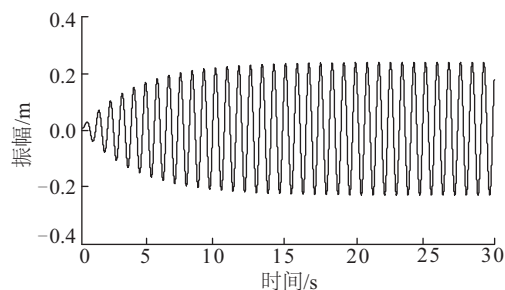


图8 叶片摆振振幅变化曲

Fig. 8 Amplitude variation curve of blade

系统两激振器频率不同时,对振动特性进行试验,设定激振器1的频率为7.45 rad/s和激振器2的频率为7.85 rad/s,试验曲线如图9所示。从图9可看出,两激振器的相位差随试验的进行逐渐增大,叶片振幅表现为不同程度的波动,不能达到稳定状态。在控制算法作用下,系统能克服固存的耦合,两激振器的角频率能快速跟随并保持。

5 结 论

1)为了提高大型风电叶片疲劳试验的驱动能力、缩短测试周期,模块化设计疲劳加载激振器,优化匹配叶片加载系统试验载荷,构建MW级风电叶片两点电驱动惯性式疲劳试验系统。

2)风电叶片两激振器加载过程中耦合效应,影响着两激振器的同步性,提出虚拟主令耦合同步控制策略,以滑模变结构控制算法设计误差补偿器,并对算法的稳定收敛性进行分析,仿真验证算法有效性。

3)将设计的控制算法对不同工况进行性能测试,试验结果表明,两激振器均能快速跟随并保持,算法具有良好的控制同步效果,并激加载时叶片振幅稳定,误差在设定范围之内,保证了风电叶片疲劳试验的有效顺利进行。

[参考文献]

- [1] Lee Hak Gu, Park Jisang. Static test until structural collapse after fatigue testing of a full-scale wind turbine blade[J]. Composite Structures, 2016, 136: 251—257.
- [2] Lee Hak Gu, Park Jisang. Linear relationship of

- damping ratios in resonance-type fatigue testing of a wind turbine blade[J]. *Wind Energy*, 2014, 17: 1119—1122.
- [3] 石可重, 赵晓路, 徐建中. 大型风电机组叶片疲劳试验研究[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(8): 1264—1267.
- [3] Shi Kezhong, Zhao Xiaolu, Xu Jianzhong. Research on fatigue test of large horizontal axis wind turbine blade [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2011, 32(8): 1264—1267.
- [4] 张磊安, 黄雪梅, 姚锦恺. 风电叶片两点疲劳加载系统振动耦合特性[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(17): 83—87.
- [4] Zhang Leian, Huang Xuemei, Yao Jinkai. Vibration coupling features for a dual-point fatigue loading system of wind turbine blades [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(17): 83—87.
- [5] 闻邦椿, 刘树英, 李 鹤, 等. 机械振动理论及应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [5] Wen Bangchun, Liu Shuying, Li He, et al. Theory and application of mechanical vibration [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [6] Anders Toft, Bjarke Roe-Poulsen. Design of linear control system for wind turbine blade fatigue testing[J]. *Journal of Physics*, 2016, 753: 1—11.
- [7] 廖高华, 乌建中, 王亦春. 全尺寸风力机叶片疲劳加载系统设计及试验研究[J]. *机械科学与技术*, 2016, 35(8): 1227—1232.
- [7] Liao Gaohua, Wu Jianzhong, Wang Yichun. Design and experiment of fatigue loading system for full scale wind turbine blade [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2016, 35(8): 1227—1232.
- [8] 廖高华, 乌建中. 风力机叶片摆锤共振疲劳加载系统及控制研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(11): 2785—2791.
- [8] Liao Gaohua, Wu Jianzhong. Wind turbine blade resonance fatigue loading system and experiment [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2016, 37(11): 2785—2791.
- [9] 张磊安, 黄雪梅. 风电叶片全尺寸静力试验加载力协调控制算法[J]. *太阳能学报*, 2015, 36(6): 1418—1422.
- [9] Zhang Leian, Huang Xuemei. Loading coordination control algorithm of full-scale static test for wind turbine blade [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2015, 36(6): 1418—1422.
- [10] 张磊安, 王忠宾, 刘卫生. 基于两轴共振模式的风电叶片疲劳加载监控系统设计[J]. *河北科技大学学报*, 2016, 37(1): 7—12.
- [10] Zhang Leian, Wang Zhongbin, Liu Weisheng. Design of fatigue loading monitoring system for wind turbine blades under dual-axes resonance mode [J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2016, 37(1): 7—12.
- [11] 梁锦涛, 赵升吨, 谢 嘉, 等. 双肘杆机械压力机实现柔性加工的混合闭环伺服控制系统研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(7): 120—127.
- [11] Liang Jintao, Zhao Shengdun, Xie Jia, et al. Research on hybrid-loop servo control system of double toggle mechanical press for achieving flexible process [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(7): 120—127.

COORDINATIVE CONTROL ALGORITHM OF TWO POINT SYNCHRONOUS LOADING SYSTEM FOR WIND TURBINES BLADE

Liao Gaohua^{1,2}, Wu Jianzhong²

(1. Jiangxi Province Key Laboratory of Precision Drive & Control, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;

2. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A new type of electric drive two point inertial fatigue loading test system has been designed. In order to eliminate the coupling effect during the two exciter loading test of the wind turbine blade, a coupling control strategy based on virtual master order was proposed. The sliding mode variable structure control algorithm was used to design the error compensator. The stability of the algorithm was proved by Lyapunov function, and the effectiveness of the algorithm was analyzed by numerical simulation. The sliding mode variable structure control algorithm was used to design the error compensator. The control algorithm was applied to the two point excitation test of 1.5 MW wind turbine blade. When the exciting frequency of the two exciter is 7.85 rad/s, the speed of the two exciter is in step and the phase can be synchronized. At this point, the system reaches resonance and the blade amplitude is stable at the maximum. The experimental results showed that the control effect of the system is better, and the solid coupling between the two vibrators can be overcome, so that the synchronous excitation of the two vibrators can be carried out.

Keywords: wind blade fatigue testing; two-point inertia loading; coupling; cooperative control