文章编号：1006-1355(2014)05-0114-03

风电叶片双轴疲劳加载系统振动分析

廖高华[1]，乌建中[2]

（1. 南昌工程学院，南昌 330099； 2. 同济大学 机械工程学院，上海 201804）

摘 要：多轴疲劳加载可使风电叶片各截面的试验载荷更等效实际所受疲劳载荷，缩短试验周期。针对风电叶片双轴疲劳加载系统，建立系统的动力学模型，列出动力学方程，再对振动体的运动轨迹仿真求解，得出运动轨迹图形。在此基础上，分析系统出现机电耦合的原因。利用试验装置验证，为多轴疲劳系统的应用提供理论依据及试验验证，也为后续的风电叶片疲劳加载试验打下基础。

关键词：振动与波；多轴；风电叶片；振动特性；疲劳加载

中图分类号：TH113 **文献标识码**：A DOI编码：10.3969/j.issn.1006-1335.2014.05.026

Vibration Analysis of a Dual-axial Fatigue Loading System for Wind Turbine's Blades Test

LIAO Gao-hua[1], *WU Jian-zhong*[2]

(1. Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China;
2. School of Mechnical Engineering, Shanghai Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract : Multi-axial fatigue loading can make the load in the sections of wind turbine blade to approach the real fatigue load condition and shorten the test period. In this paper, the dynamics model of the biaxial fatigue loading system for the wind turbine's blades test is built. According to the kinetics equation, the trajectory of the vibrating body is simulated and the diagrams of the trajectory are drawn. On this basis, the cause of the electro-mechanical coupling phenomenon of the system is analyzed and then validated by experimental testing. This work provides a theoretical basis and an experimental reference for the application of multi-axial fatigue system to the fatigue loading test for wind turbine blades.

Key words : vibration and wave ; multi-axis ; wind turbine blade ; vibration performance ; fatigue loading

风电叶片疲劳加载目的在于确定叶片的疲劳寿命，常用方式是利用振动锤激振风电叶片使其振动。采用单轴加载时，需分别对叶片翼向和弦向加载试验。因此，试验周期延长。丹麦的LM公司采用单轴加载方式对叶片进行疲劳加载试验，试验翼向振动后，再进行弦向振动，37.5 m叶片试验需时三个半月，而61.5 m的叶片约为一年[1]。风载荷是多点多轴的时变载荷，用单轴振动来模拟实际的多点多轴激励振动环境是不完备的，且单向激励下得到的模态激发及疲劳方式与多点多轴激励情况不尽一样[2, 3]。为了使得叶片剖面周围的剪应力更符合实际工况，采用多轴加载模式对叶片翼向和弦向同时施加激振力进行激振，可以更加真实地等效风负载，缩短加载试验周期[4]。本文对叶片疲劳双轴加载模式建立系统动力学模型，分析系统的振动特性，仿真叶片发生复杂的运动轨迹，最后利用加载试验装置试验验证。

1 叶片双轴疲劳加载数学模型

根据叶片试验要求，设计的疲劳加载装置需要给叶片翼向和弦向分别提供一个交变激振力，迫使叶片作简谐振动，如图1所示的是叶片翼向和弦向的摆锤振动疲劳加载系统。

整个疲劳加载装置由电机，减速器，摆锤，夹具和变频器等组成，待检的叶片以水平的方式固定于疲劳试验支座上，在距离叶片根部大约70 %处安装疲劳加载装置，通过调节变频器频率来使两者进行

收稿日期：2014-01-23

作者简介：廖高华(1978-)，男，南昌人，副教授，从事机电液控制的研究工作。
E-mail: wfm_77@163.com

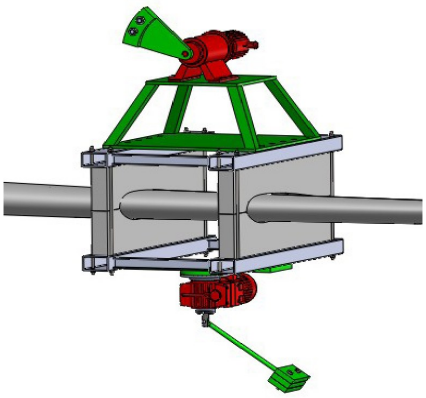


图1 双摆锤疲劳加载装置

振动。风电叶片在两个相互垂直的简谐力作用下产生负载的运动轨迹，更加真实的对风载荷进行模拟，节省加载时间。

为了便于研究叶片的多轴疲劳加载，可通过建立振动力学模型来分析系统之间的运动关系[5,6]。由于叶片悬臂安装，且质量分散，加大了振动分析的难度，可以通过做以下的假设来简化：

(1) 叶片根部固定于疲劳支座上，可以看成悬臂梁结构，叶片本身具有一定的重量，且离散分布，可以用一个集中质量块来等效，但保持系统的振动特性不变；

(2) 叶片 y 轴的刚度等效于 y 方向的刚度 K_y，空气阻力等效于阻尼 C_y，叶片 z 轴的刚度等效于 z 方向的刚度 K_z，空气阻力等效于阻尼 C_z。

建立模型的广义坐标 y，z，θ，φ，如图2所示。当系统处于稳定状态时，叶片弦向疲劳加载装置的摆杆与竖直轴成一定夹角，此时取平衡位置 $\varphi=0$ 作为势能零点。根据拉格朗日函数建立振动系统的动力学方程为

$$\begin{cases}\left(m'+m_1+m_2\right)\ddot{y}+C_y\dot{y}+K_y y=m_1r_1\dot{\theta}^2\sin\theta-m_1r_1\ddot{\theta}\cos\theta\\ \left(m'+m_1+m_2\right)\ddot{z}+C_z\dot{z}+K_z z=-m_2r_2\ddot{\varphi}\sin\varphi-m_2r_2\dot{\varphi}^2\cos\varphi\\ \left(J_1-m_1r_1^{\,2}\right)\ddot{\theta}+C_1\dot{\theta}=m_1\ddot{y}r_1\cos\theta-m_1\dot{y}r_1\dot{\theta}\sin\theta\\ \left(J_2-m_2r_2^{\,2}\right)\ddot{\varphi}+C_2\dot{\varphi}=m_2\ddot{z}r_2\sin\varphi+m_2\dot{z}r_2\dot{\varphi}\cos\varphi\end{cases}\tag{1}$$

式中 m' ——叶片等效质量；m_1 ——叶片弦向摆锤质量；m_2 ——叶片翼向摆锤质量；J_1，J_2 ——摆锤1和摆锤2的转动惯量；C_1，C_2 ——摆锤1竖直平面转动和摆锤2水平转动阻尼系数。

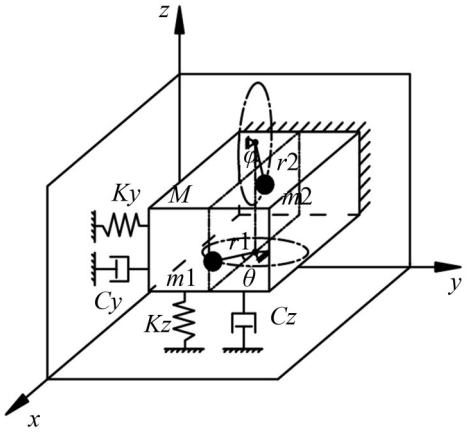


图2 叶片双轴疲劳加载数学模型

从式中可以看出，整个系统的运动微分方程为非线性的，其能反映出叶片翼向和叶片弦向疲劳加载装置与叶片三者之间的耦合作用。

通过Simulink软件，建立系统的动力学模型，叶片特征参数与疲劳加载装置的参数，取叶片质量 $m'=6\,000$ kg，偏心质量块 $m_1=260$ kg，$m_2=210$ kg，叶片在加载点处的刚度值近似为 $k=158\,000$ N/m，阻尼为350 N·s·m^{-1}。当叶片在同频率 $\omega_1=\omega_1=0.78$ Hz的条件下，系统稳定运转时叶片运动轨迹如图3所示；在异频 $\omega_1=0.78$ Hz，$\omega_1=0.86$ Hz条件下，系统稳定运转时叶片的运动轨迹如图4所示。

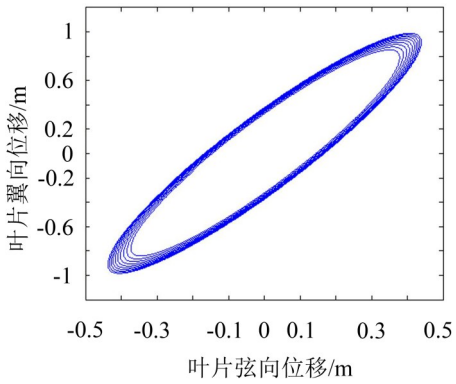


图3 异频条件叶片运动轨迹

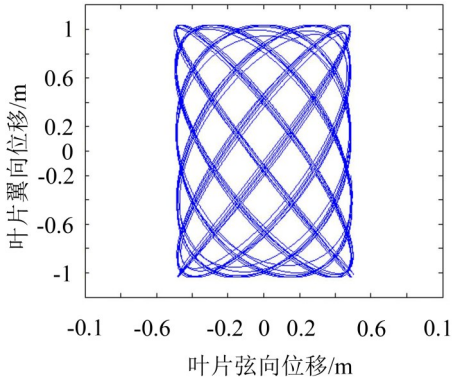


图4 同频条件叶片运动轨迹

2 风电叶片双轴加载试验

为了验证双轴激振系统的振动特性，设计了风电叶片双轴加载的试验装置，如图5所示。该装置利用一根钢条模拟风电叶片，利用两振动锤分别对钢条的两个方向进行激振。对激振过程中的转速及相位差进行测量，并利用控制同步方式对两振动锤实施同步控制。在叶片双轴疲劳加载实验装置中，两个电机的转动频率分部通过变频器1和变频器2来控制，并在钢条末端安装了一个MEMS加速度传感器。

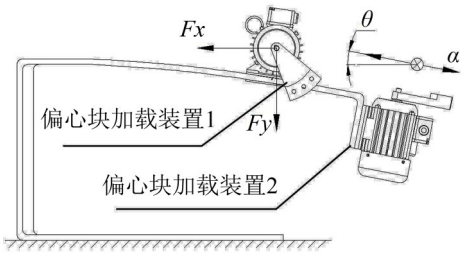


图5 双轴加载试验装置

激振锤间通过模拟叶片的转角 θ 造成了一定的力学耦合关系，实验装置在 y 轴受到的力不仅与翼向加载装置有关，也有弦向加载装置有关。当两个方向上的激振频率相等于3.67 Hz时，即设定旋转偏心块的初始速度为230 r/min，在两个方向上振动相位差曲线如图6所示，相位差经过波动后稳定在接近 π/2。此时机电耦合作用最强烈，内外耦合作用趋于平衡。

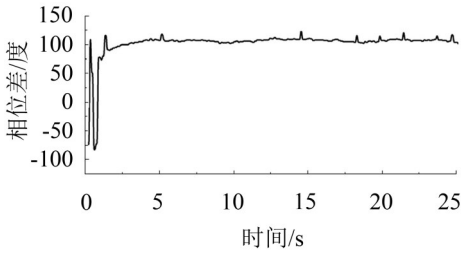


图6 同频率激振时相位差试验曲线

当两个方向上的激振频率不相等时，一台振动锤的激振频率为3.5 Hz，一台振动锤的激振频率为3.67 Hz，相位差曲线如图7所示，从试验曲线可知相位差比较混乱，不会收敛，同时可以看出相位差曲线不是稳定的有规律的斜线，说明振动锤间存在一定的机电耦合作用。

相位差与振动体的运动轨迹密切相关，如果对振动体的运动轨迹有特殊要求，可采用控制同步的方法控制相位差的数值，从而得到目标运动轨迹。试验时采用文献[7]的控制策略与控制算法，并设定相位差的控制目标值为零度。试验结果如图8所示，

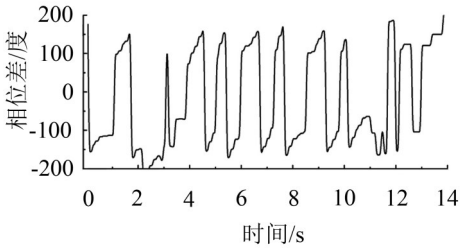


图7 激振频率相差较大时的相位差曲线

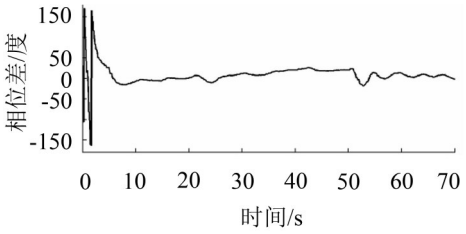


图8 控制同步下的相位差曲线

通过试验结果可知通过控制手段相位差能趋于目标值，同时相位差曲线有一定的波动(15°左右)，利用同步控制方法，可实现双轴激振系统同步(转速同步，相位差可控)。

3 结 语

对新型的叶片双轴疲劳加载系统，建立系统的弹簧阻尼模型，分析系统整体的动能和势能，得到了系统拉格朗日方程，并得到系统运动微分方程的非线性及叶片与摆锤的相互耦合关系。对叶片多轴疲劳加载振动模型，设计了疲劳加载实验装置。通过实验结果分析，可得出实验装置的相互耦合关系及最优加载速度区间。

参考文献：

[1] Christoph W. Kensche. Fatigue of composites for wind turbines[J]. **International Journal of Fatigue,** 2006, (28): 1363-1374.

[2] 陈循，温熙森. 多轴随机激励振动控制技术研究[J]. **国防科技大学学报，**2000，22(1)：66-70.

[3] White, Darris. New methods for dual-axis testing of large blades[J]. **Golden, CO: NREL,** April 2004. pp. 23-28.

[4] Nima Shamsaei，Maksym Gladskyi． Multi-axial fatigue of titanium including step loading and load path alteration and sequence effects[J]. **International Journal of Fatigue**，2010,32(11): 1862-1874.

[5] 周璞，柳瑞锋，章艺. 叶片泵振动机理特性分析及改进设计[J]. **噪声与振动控制，**2012，2：32-34.

[6] 唐驾时，彭海. 阻尼对叶片非线性振动的影响[J]. **噪声与振动控制，**2013，33(5):15-19.

[7] 来鑫，乌建中，张珍，等. 多桩锤同步振动系统及同步控制策略研究[J]. **振动与冲击，**2012，31(3)：147-152.