

风电叶片双作动器疲劳加载同步激振算法研究

陶黎明¹, 黄雪梅¹, 张磊安¹, 刘卫生², 隋文涛¹, 袁光明¹

(1. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255049; 2. 连云港中复连众复合材料集团有限公司, 连云港 222000)

摘 要: 针对双作动器驱动的风电叶片疲劳加载系统中两作动器同步控制问题, 提出一种基于自抗扰控制算法的交叉耦合同步控制策略; 根据双作动器同步系统中同步误差与跟踪误差的控制要求, 建立交叉耦合控制系统模型; 进一步从安排过渡过程、跟踪估计系统状态和扰动、误差反馈及扰动补偿方面出发, 利用最优控制综合函数设计一套自抗扰控制器; 最后搭建一套风电叶片双作动器疲劳加载试验系统。试验结果表明, 基于自抗扰控制算法的交叉耦合控制策略应用于双作动器疲劳加载系统能较好地保证作动器的速度同步性和位移同步性, 受风载影响较小, 系统鲁棒性强。

关键词: 风电叶片; 同步控制; 疲劳加载; 自抗扰控制; 交叉耦合

中图分类号: TP273

文献标志码: A

0 引 言

风电叶片是风力发电机的主要部件, 因长期受交变载荷的影响, 导致其最主要的失效方式是疲劳破坏。对风电叶片进行疲劳加载试验是检测其抗疲劳性能最可靠、最有效的方式^[1-2]。国内外现有的疲劳加载方式以离心式摆锤加载和液压强制加载为主, 主要应用于陆上风电叶片^[3]。近年来随着海上风电的大力发展, 相应的风电机组需具有更大的输出功率和叶片尺寸。随着叶片尺寸的增大, 为达到叶片共振振幅, 所需的加载力也越来越大。摆锤加载方式只有离心力的竖直分力在疲劳加载中做有用功, 能量利用率低, 且受到单个电机功率的限制, 加载力小, 很难达到试验要求; 液压强制加载方式虽能达到试验目的, 但随着液压缸长度的不断增加, 加载效率降低、试验成本加高等缺点愈发明显^[4]。

双作动器驱动的风电叶片疲劳加载是针对现有加载方式的不足而提出的一种新式疲劳加载方法。通过控制在空间结构上对称分布的两作动器滑块同步往复直线运动所产生的反作用力实现对风电叶片的疲劳加载。与传统的偏心质量块加载方式相比, 该加载方式中的质量块仅沿加载方向做加减速直线运动, 故加减速产生的惯性力可完全作用于风电叶片的疲劳加载, 能量利用率高, 且两作动器同时加载相当于将加载电机的功率扩大了一倍, 大大提高了加载力, 可满足对大型风电叶

片高效率疲劳测试的需求。由于两作动器的参数差异及试验过程中负载扰动的影响, 两作动器很难在位移和速度上达到完全同步, 导致两作动器在同一时刻产生的反作用力大小或相位不同, 在等效成加载方向合力的同时产生一个附加扭矩, 影响振幅的稳定性, 且附加扭矩会使叶片产生扭转, 严重时可能会损伤叶片, 因此研究双作动器同步性对风电叶片的影响有极其重要的意义。目前, 已有国内外学者对电机同步控制领域做了相关研究, Hou 等^[5]建立偏心轮反向旋转激振系统的数学模型, 并研究以振动体为介质 2 个转子之间的能量传递关系; Koren^[6]提出一种交叉耦合控制结构, 根据同步误差生成校正信号并反馈至单轴控制环路中, 从而提高同步性能; Patterson^[7]从温度变化引起 PMSM 电机结构参数变化的角度出发, 提出采用前馈的模型参考自适应控制实时抑制伺服控制系统中的结构扰动。

本文提出的双作动器疲劳加载方案中两作动器速度以正弦曲线变化, 同步控制难度大, 用传统的同步控制方式无法达到控制要求。根据文献[6], 采用交叉耦合控制策略能很好地提高系统的同步性, 然而由于作动器在室外工作, 工况恶劣、负载扰动大, 因此本文针对双作动器疲劳加载同步控制问题, 在交叉耦合控制策略的基础上, 考虑疲劳加载试验的特点, 将具有估计扰动功能的自抗扰控制算法引入到交叉耦合控制策略中, 设计基于自抗扰控制算法的交叉耦合双作动器同步控制器,

收稿日期: 2017-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(51405275); 山东省重点研发计划(2016GGX103005); 山东省自然科学基金(ZR2016EEM20)

通信作者: 黄雪梅(1974—), 女, 博士、副教授, 主要从事风电叶片智能测试方面的研究。huangxuemei@sdu.edu.cn

实现两作动器的同步控制,并通过现场试验证明该控制策略的有效性。

1 双作动器疲劳加载试验方案

双作动器驱动的风电叶片疲劳加载系统由动力系统、控制系统及检测系统 3 个子系统组成。风电叶片通过叶片根部的预埋螺栓固定在圆柱形基座上,两套相同的作动器对称安装在叶片夹具两侧。作动器主要包括伺服电机、传动丝杠、滑块、配重块及限位开关,伺服电机伸出轴通过联轴器与滚珠丝杠连接,滑块安装在丝杠螺母上,丝杠螺母副将电机的旋转运动转换成滑块的直线运动,滑块上安装质量可调的配重块,作动器的上下两端各安装有一个限位开关。疲劳试验时,两作动器分别通过下端的限位开关找到运动零点,然后控制两作动器以叶片固有频率做同步正弦运动,产生正弦激振力,通过调节配重块的质量大小或者作动器振幅即可调节激振力大小。激光测距仪用于测量叶片加载面的振幅变化,应变片用于测量叶片扭转变形,试验方案如图 1 所示。

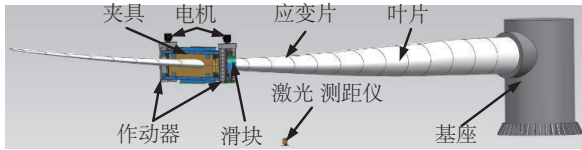


图 1 两作动器疲劳加载试验方案

Fig. 1 Fatigue loading scheme of wind turbine blades driven by dual actuator

2 交叉耦合控制器设计

双作动器驱动的风电叶片疲劳加载系统为双作动器同步加载,两轴的参数会不可避免地存在差异,且该设备在室外高空工作,极易受到大风、雨雪等极端恶劣天气的影响,导致两作动器很难在位移和速度上达到完全同步,所以本文采用双作动器交叉耦合控制策略,通过将 2 个独立的作动器控制系统连接成 1 个整体闭环系统来提高两作动器同步性,其基本原理是由作动器同步误差通过交叉耦合控制器进行运算,得到每个作动器的速度补偿值,并将每个作动器的速度补偿值加至每个作动器的控制速度中来消除双作动器的同步误差。但双作动器疲劳加载系统扰动较大,且由于超调量和快速性之间的矛盾,在保证快速性的前提下仅使用交叉耦合控制器,误差曲线会出现较大的超调,总体呈现较大的波动现象。鉴于此,将自抗扰控制算法引入到交叉耦合控制策略中,通过自抗扰控制算法的估计扰动功能,

提高作动器的跟踪精度,进而减小扰动对同步性的影响,减小交叉耦合控制的超调量。结合自抗扰控制算法设计的交叉耦合双作动器同步控制策略如图 2 所示。其中, ω 为系统给定速度, r/min; ω_1 、 ω_2 分别为两作动器电机的跟踪速度, r/min; i_{q1} 、 i_{q2} 为两作动器电机 q 轴电流, mA; T_1 、 T_2 分别为两作动器负载扰动, N·m; k_1 、 k_2 分别为两作动器电机速度补偿增益, 由于作动器电机选择为同一型号同一批次的同步电机,两电机性能基本相同,因此本文中 k_1 、 k_2 取值近似相等。

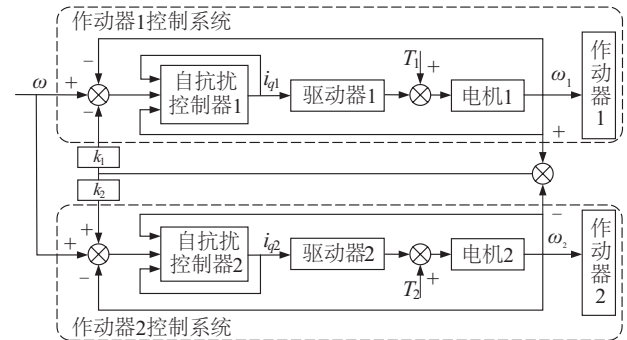


图 2 基于自抗扰控制算法的交叉耦合同步控制策略

Fig. 2 Synchronization control strategy of cross-coupling based on active disturbance rejection algorithm

由图 2 可知,如果要保证两作动器的同步性良好,需满足电机 1 转速跟随值与电机 2 转速跟随值基本相等,即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\omega_1 - \omega_2) = 0 \quad (1)$$

式中, t ——时间变量, s。

3 自抗扰控制器设计

由于双作动器输出跟随同一输入,因此双作动器的同步误差与单个作动器的跟随误差息息相关,通过增强各作动器运动跟踪精度和稳定性可间接达到减小双作动器同步误差的效果。鉴于此,本文设计了自抗扰控制器,利用 2 个自抗扰控制器分别控制 2 个作动器,以达到减小跟踪误差,增强同步性的效果。自抗扰控制器结构图如图 3 所示^[8]。

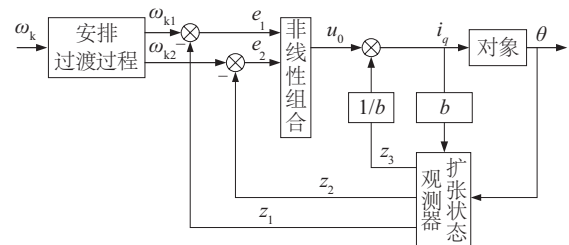


图 3 自抗扰控制器结构图

Fig. 3 Structure of active disturbance rejection controller

图 3 中, ω_k 为交叉耦合控制器补偿后的角速度, r/min; ω_{k1} 、 ω_{k2} 分别为 ω_k 的跟踪信号和 ω_k 近似微分信号, r/min, 且 $\dot{\omega}_{k1} = \omega_{k2}$; z_1 、 z_2 为作动器电机转角和转速的估计值, z_3 为负载扰动的估计值; e_1 、 e_2 为估计误差值, $e_1 = \omega_{k1} - z_1$, $e_2 = \omega_{k2} - z_2$; u_0 为误差反馈控制量; b 为补偿因子; θ 为电机实际转角, rad。由于自抗扰控制器的扩张状态观测器的设计涉及到系统模型中控制量的放大倍数, 故首先建立单作动器系统模型, 电机采用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略, 使得 d 轴电流分量始终为零, 忽略系统的粘滞摩擦力, 可得电机转速公式:

$$\dot{\omega}_r = \frac{3p\psi_f}{2J}i_q - \frac{B}{J}\omega_r - \frac{T_L}{J} = f(\omega_r, T_L) + bi_q \quad (2)$$

式中, p ——电机的极对数; ψ_f ——激磁绕组磁链, Wb; J ——电机的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; B ——电机的摩擦阻尼系数; $f(\omega_r, T_L) = -\frac{B}{J}\omega_r - \frac{T_L}{J}$; $b = \frac{3p\psi_f}{2J}$ 。

由式(2)可知, 单作动器系统为二阶系统, 系统模型可表示为:

$$\begin{cases} y = \theta r^2 \tan \alpha \\ \dot{\theta} = \omega_r \\ \dot{\omega}_r = f(\omega_r, T_L) + bi_q \end{cases} \quad (3)$$

式中, y ——作动器位置, mm; θ ——电机输出轴转角, rad; r ——丝杠半径, mm; α ——丝杠导程角, ($^\circ$); ω_r ——机械角速度, r/min; T_L ——电机负载转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; i_q —— q 轴电流, mA。

双作动器疲劳加载系统是以正弦加速度产生的惯性力作为激振力对风电叶片进行疲劳加载, 这决定了系统必须具有快速性以保证产生规范正弦力, 为解决系统快速性和超调之间的矛盾, 以交叉耦合控制器调节后的速度 ω_k 作为自抗扰控制器的输入, 安排过渡过程为:

$$\begin{cases} fh = fhan(\omega_{k1} - \omega_k, \omega_{k2}, r_0, h) \\ \omega_{k1} = \omega_{k1} + h\omega_{k2} \\ \omega_{k2} = \omega_{k2} + hfh \end{cases} \quad (4)$$

$fhan$ 为快速最优控制综合函数:

$$\begin{cases} d = \lambda h, a_0 = hx_2, y = x_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d+8|y|)} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d)/2 \\ s_y = (\text{sign}(y+d) - \text{sign}(y-d))/2 \\ s_a = (\text{sign}(a+d) - \text{sign}(a-d))/2 \\ a = (a_0 + y - a_2)s_y + a_2 \\ fhan = -\lambda(\frac{a}{d} - \text{sign}(a))s_a - \lambda \text{sign}(a) \end{cases} \quad (5)$$

式中, r_0 ——快速因子, 调节 r_0 值可调节跟踪快慢; h ——采样步长。

为把握作动器系统运行状况, 以单作动器电机转角 θ 和输入 i_q 建立以下状态观测器来跟踪估计系统状态和扰动:

$$\begin{cases} e = z_1 - \theta, fe = \text{fal}(e, 0.5, \delta), fe_1 = \text{fal}(e, 0.5, \delta) \\ z_1 = z_1 + h(z_2 - \beta_{01}e) \\ z_2 = z_2 + h(z_3 - \beta_{02}fe + \frac{3p\psi_f}{2J}i_q) \\ z_3 = z_3 + h(-\beta_{03}fe_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中, δ ——线性段区间长度; β_{01} 、 β_{02} 、 β_{03} ——观测器调节参数。

为避免系统产生高频颤振现象, 将传统幂次函数改为原点附近具有线性段的连续幂次函数:

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{\alpha-1}}, & |e| \leq \delta \\ |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \end{cases} \quad (7)$$

线性误差反馈虽然具有快速性的优点, 但存在很大的误差, 为提高系统反馈精度采用最速控制综合函数形式的反馈规律:

$$\begin{cases} e_1 = i_{q1} - z_1, e_2 = i_{q2} - z_2 \\ u_0 = -fhan(e_1, ce_2, r_1, h_1) \end{cases} \quad (8)$$

式中, c ——反馈控制系数; r_1 ——快速因子, 调节 r_1 可调节跟踪快慢; h_1 ——采样步长。

对误差反馈控制量 u_0 用扰动估计值 z_3 的补偿来决定最终控制量:

$$u = u_0 - \frac{2Jz_3(t)}{3p\psi_f}z_3 \quad (9)$$

从自抗扰控制器的设计过程可看出, 自抗扰控制器具有不依赖精确数学模型的优点, 同时安排了过渡过程、增加了扩张状态观测器, 解决了传统 PID 控制系统中快速性与超调量之间的矛盾, 并能实时估计系统内外扰动并进行补偿, 提高了系统的跟随精度和抗干扰能力。

4 试验分析

4.1 试验

以连云港中复连众风电叶片检测中心为试验基地, 以 lz5.0-62 型号叶片为试验对象测试双作动器同步激振性能, 部分试验参数如表 1 所示。自抗扰控制器中的参数根据经验选取: $h = 0.01$, $r_0 = 2.0$, $\delta = 0.01$, $\beta_{01} = 100$, $\beta_{02} = 300$, $\beta_{03} = 1000$, $r_1 = 5$, $c = 0.3$, $h_1 = 0.03$, 两作动器控制器参数完全相同。试验时, 两作动器通过试验夹具安装在叶片左右两侧, 叶片通过高强度螺栓弦向平行于地面固定于试验基座上, 激光传感器实时检测叶片振幅,

并通过 RS485 电缆传给上位机,实现曲线显示和数据记录。电机转速、转角等参数通过 Driver GUI 软件显示并记录,作动器位移通过转角换算得到,试验现场如图 4 所示。

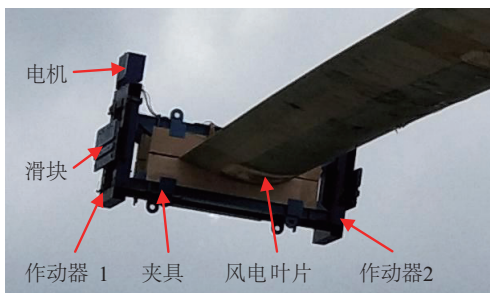
表 1 试验参数

Table 1 Test parameters

名称	参数/型号
叶片长度/m	62
伺服电机	U31005F303M10Y0Kb1
驱动器	KOLLMORGEN S724
丝杠行程/mm	600
丝杠导程/mm	16
配重块质量/kg	500
激光测距仪	Leuze ODSL 30/D485-30M-S12
接近开关	CORON CSJ-E35-15APA-6
试验温度	室温
试验湿度/%	50



a. 试验整体图



b. 作动器局部放大图

图 4 双作动器疲劳加载试验现场

Fig. 4 Test site of double actuator fatigue loading

4.2 试验分析

试验时设定作动器周期为 1910 ms,振幅为 200 mm,两作动器同步曲线如图 5 所示。为提高数据可读性,将两电机转速作差得到两电机转速同步误差,如图 6

所示。由图 5 可知,两电机转速能较好地跟随控制信号按正弦规律变化,由 2.20~2.60 s 电机转速放大图可看出,两电机转速均以波动状态相互调节且误差较小;由图 6 可知,两电机转速同步误差在 0 值附近上下波动,最大转速同步误差小于 30 r/min。以上试验结果表明,作动器电机转速在基于自抗扰控制算法的交叉耦合策略控制下能很好地跟随输入信号变化,且风载荷对电机转速影响不大,两电机转速同步性良好。

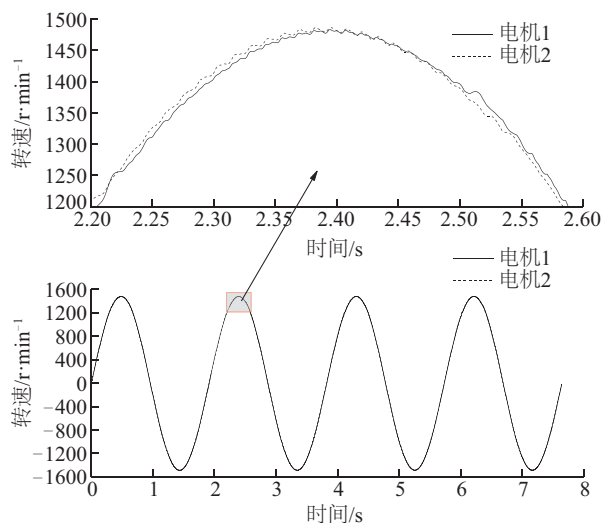


图 5 电机转速曲线

Fig. 5 Motor speed curve

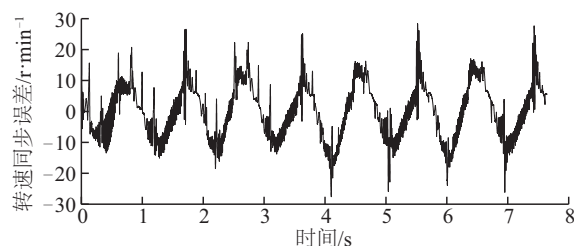


图 6 电机转速同步误差

Fig. 6 Synchronization error of motor speed

两作动器位移曲线及位移同步误差分别如图 7 和图 8 所示。由图 7 中 2.64~3.12 s 作动器位移放大图及图 8 可看出,作动器位移同步误差由丝杠中部向两端逐步增大,最大同步误差出现在行程两端且最大同步误差小于 0.5 mm。由图 8 中 2~5 s 位移同步误差可看出,在自然风载荷影响下,位移同步误差极值有轻微浮动。以上试验结果表明,在基于自抗扰控制算法的交叉耦合控制策略下,两作动器位移同步性会受到风载荷的影响,但影响较小,证明系统鲁棒性较强。

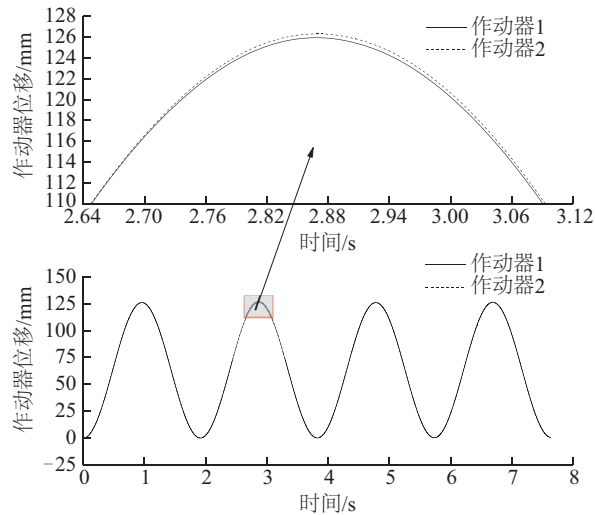


图7 作动器位移曲线

Fig. 7 Actuator displacement curve

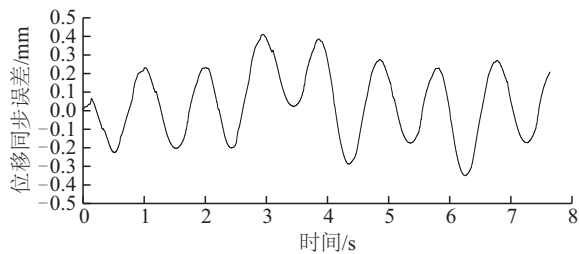


图8 作动器位移同步误差

Fig. 8 Synchronization error of actuator displacement

5 结 论

对于双作动器驱动的风电叶片疲劳加载同步激励控制问题,由理论分析和试验数据可得:基于自抗扰控制算法的交叉耦合控制策略应用于双作动器疲劳加载系统,能较好地保证双作动器电机转速同步和作动器位移同步,且系统受风载荷影响较小,系统鲁棒性强。

[参考文献]

- [1] KONG C, BANG J, SUGIYAMA Y. Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life[J]. Energy, 2005, 30: 2101-2114.
- [2] WHITE D, MUSIAL W, ENGBERG S. Evaluation of the new B-REX fatigue testing system for multi-megawatt wind turbine blades[C]//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, USA, 2005: 1-14.
- [3] 乌建中, 于永军, 胡康, 等. 风电叶片脉冲式疲劳加载试验特性研究[J]. 风能, 2015(3): 86-88.
WU J Z, YU Y J, HU K, et al. Study on the characteristics of blade fatigue loading test of wind turbine[J]. Wind energy, 2015(3): 86-88.
- [4] 乐韵斐, 贾强. 风轮叶片电动惯性式疲劳加载系统研究与开发[J]. 风能, 2016(3): 62-64.
LE Y F, JIA Q. Research and development of electric momentum fatigue loading system for wind turbine blade [J]. Wind energy, 2016(3): 62-64.
- [5] HOU Y, FANG P. Synchronization and stability of two unbalanced rotors with fast antirotation considering energy balance [J]. Mathematical problems in engineering, 2015(3): 17-33.
- [6] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer controls for manufacturing systems [J]. Journal of dynamic systems measurement & control, 1980, 102(4): 265-272.
- [7] PATTERSON C R. Improved feedforward control of a permanent magnet synchronous motor using MRAS[M]. University of Arkansas, 2008:11-27.
- [8] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007(1): 25-32.
- [8] HAN J Q. Active disturbance rejection control technique [J]. Frontier science, 2007(1): 24-31.

RESEARCH ON SYNCHRONOUS EXCITATION ALGORITHM FOR FATIGUE LOADING OF WIND TURBINE BLADE DRIVEN BY DOUBLE ACTUATOR

Tao Liming¹, Huang Xuemei¹, Zhang Leian¹, Liu Weisheng², Sui Wentao¹, Yuan Guangming¹

(1. College of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Lianyungang Zhongfu Lianzhong Composite Group Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

Abstract: Aiming at the problem of synchronization of two actuators in the fatigue loading system of wind turbine blades driven by double actuator, a cross-coupled control strategy based on active disturbance rejection control algorithm is proposed. According to the synchronization error and tracking error of the dual actuator synchronization system, a cross-coupling control system model is established. Based on arranging the transition process, tracking and estimating the system state and perturbation, error feedback and disturbance compensation, a set of active disturbance rejection controller is designed by using the optimal control function. Finally, a set of fatigue loading test system of double actuator for wind turbine blades was built. Test results showed that the cross-coupled control strategy based on the active disturbance rejection control algorithm is applied to the double-actuator fatigue loading system to ensure the synchronization and displacement synchronization of the actuator, which is less affected by the wind load and strong system robustness.

Keywords: wind turbine blades; synchronous control; fatigue loading; active disturbance rejection control; cross-coupling