

# 基于 RBF 补偿滑模变桨控制的风力机叶片颤振抑制

易成宏,孙长乐,孙启童,刘廷瑞

(山东科技大学 机械电子工程学院,山东 青岛 266590)

**摘要:**针对风力机叶片经典颤振问题,采用 RBF 神经网络补偿滑模控制来控制风力机叶片的变桨运动。依据弹簧-质量-阻尼器的典型叶型截面模型以及变桨激励器的二阶模型,给出了系统的非线性气动弹性方程。滑模变桨控制通过控制叶片的变桨运动,达到抑制叶片颤振、保护叶片的目的,但是在系统到达滑模面后,滑模控制器会迫使系统沿滑模面做小幅度、高频率的运动,即出现抖振现象。RBF 神经网络的自适应、自学习能力可以逼近非线性函数,采用神经网络对滑模控制器进行补偿。实验选取 5 组不同的基本结构参数进行模拟仿真,仿真结果表明:滑模控制器能够抑制颤振,但是在滑模控制器的输出端会出现剧烈抖振,RBF 神经网络滑模控制能够保证系统的鲁棒性,不仅能够抑制颤振,而且能够降低抖振频率以及幅度。

**关键词:**经典颤振;RBF 神经网络;滑模控制;变桨运动;抖振

**中图分类号:**TK83

**文献标志码:**A

## Flutter suppression of wind turbine blade based on RBF compensating the sliding mode pitch control

YI Chenghong, SUN Changle, SUN Qitong, LIU Tingrui

(College of Mechanical & Electronic Engineering, Shandong University of Science & Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** In view of the classical flutter problem of wind turbine blades, radial basis function (RBF) neural network compensating the sliding mode control was used in this study to control the pitching motion of wind turbine blades. Based on the typical blade section model of spring-mass-damper and the two-order model of pitch actuator, the nonlinear aeroelastic equation of the system was given. The sliding mode pitch control could control the motion of the blades to suppress blade flutter and protect the blades, but after the system reached the sliding mode surface, the sliding mode controller would force the system to move along the sliding mode surface in a small amplitude and with high frequency, namely, the occurrence of chattering phenomena. The adaptive and self-learning ability of RBF neural network could approximate the nonlinear function and compensated the sliding mode controller by adopting the neural network. Five groups of different basic structure parameters were selected to carry out the simulation experiment. The results show that although the sliding mode controller can suppress the flutter, there will be violent chattering at the output end of the sliding mode controller, whereas the RBF neural network sliding mode control can not only suppress the chattering but also reduce the chattering frequency and amplitude while ensure the robustness of the system at the same time.

**Key words:** classical flutter; RBF neural network; sliding mode control; pitching motion; chattering

收稿日期:2020-05-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51675315)

作者简介:易成宏(1995—),男,江西宜春人,硕士研究生,主要从事风机控制研究。

刘廷瑞(1972—),男,山西阳泉人,教授,博士,主要从事精密机械设计研究,本文通信作者。

E-mail:liutingrui9999@163.com

在惯性力、弹性力和复杂气动负载力耦合作用下,大型水平轴风力机叶片容易出现颤振现象,即出现负载力耦合作用引起的气动弹性动态不稳定性问题。经典颤振是水平轴风力发电机叶片在低攻角状态的势流中,气流流动基本附着无明显分流的情况下,风力机叶片挥舞自由度和扭转自由度产生的自激振荡。Lobitz<sup>[1]</sup>最先为固定翼飞机提出平板机翼颤振理论,用来定性描述气流作用在非流线体上的非定常气动力。任勇生等<sup>[2]</sup>针对非时变叶片气弹系统,采用特征法画出根轨迹曲线来分析叶片颤振稳定性。Kallesoe等<sup>[3]</sup>采用特征值和特征向量来分析静态攻角下的叶片气弹特性。李迺璐等<sup>[4]</sup>基于标量化的挥舞-扭转振动界面,引入B-L非定常气动模型为旋转叶片在低攻角处提供周期时变非定常势流气动力,研究旋转叶片动态时变气弹系统的经典颤振稳定性特性。刘廷瑞等<sup>[5]</sup>基于压电反馈的方式分析单细胞薄壁复合风力机叶片的经典颤振和主动控制,研究了在横向剪切变形、翘曲约束和二次翘曲耦合作用下,压电反馈对风力机叶片梁的经典颤振抑制效应。本课题组在早期的工作中<sup>[6]</sup>对水平轴风力机叶片的经典颤振稳定性特性进行了阐述。虽然目前还没有风力机叶片出现经典颤振的报道,但随着大型风力机组的研究和发展,叶片朝着更细长的方向发展,抑制经典颤振成为叶片设计过程中一个重要的考虑因素。经典颤振类属于气动弹性动态不稳定性问题,本研究采用滑模控制实现变桨运动,并通过变桨主动控制实现颤振抑制。

滑模控制本质上是一类特殊的非线性控制,且非线性表现为控制的不连续性<sup>[7]</sup>。风力机控制系统本身是一个非线性、时变、多变量、强耦合的复杂系统,与滑模控制有着很好的贴合性。但是在叶片颤振主动抑制上,滑模控制一般应用于航天领域,宋晨等<sup>[8]</sup>以带后缘控制面的二元机翼为对象,研究滑模控制用于气动弹性颤振主动抑制的可行性与机理,结果表明:在控制切换延时较大时,会引起滑模控制系统的抖振。杨超等<sup>[9]</sup>以经典二元机翼为对象,研究滑模控制用于颤振主动抑制的效果,讨论其控制系统的离散化和控制输入限幅等问题,数值仿真结果表明,带有离散滑模控制系统的闭环系统是基本稳定的,但当舵偏达到约束边界时,表现不稳定。综上所述,根据已知系统的数学模型,滑模控制器可以直接使系统输出跟踪期望指令,由于系统惯性的存在,滑模变结构控制系统的切换增益必然出现滞后,故产生高频率、小幅度的上下运动即抖振现象。如何消除抖振是滑模控制亟待解决的问题。

随着神经网络的发展,将径向基函数(radial basis function, RBF)网络自适应控制方案和滑模变结构控制结合,为消除抖振问题提供了很好的思路<sup>[10]</sup>。田猛等<sup>[11]</sup>提出了一种基于RBF神经网络滑模变结构独立变桨控制策略,通过试验平台的测试,验证了RBF-SMC在独立变桨控制策略的可行性,但其目的是得到风力发电机最大化的输出功率,并未从气弹角度去分析颤振问题。袁家信<sup>[12]</sup>在机翼气动弹性系统响应的滑模控制方法研究中提出一种RBF神经网络观测器的滑模控制器设计方法,可有效实现不确定风况下的颤振抑制。该方法采用独立尾缘控制,假定仅俯仰角可测,其他不可测状态都通过观测器估计,验证了该方法在分析系统稳定性上的可行性。综上所述,若抖振引起控制面高频摆动,将不利于工程上的可应用性,变桨运动常被用来获取更大的输出功率,通过变桨运动实现颤振抑制少有研究。本研究提出采用RBF神经网络补偿的滑模控制方案实现变桨运动,且以颤振抑制为主,降低抖振频率及幅度为辅,基于系统线性化后的气动弹性动态方程,选取5组不同的无量纲参数,完成模拟仿真,通过分析经典滑模变桨控制器以及基于RBF神经网络补偿的滑模变桨控制器的阶跃响应曲线,对比两者在风力机叶片颤振抑制以及降低抖振频率与幅度方面的有效性。

## 1 结构模型及经典颤振气弹模型

采用大长径比的叶片典型截面模型(其中截面旋转半径为 $r$ ),研究叶片挥舞弯曲与弹性扭转的时域响应曲线,截面质量体分别由 $y$ 和 $z$ 方向的弹簧、阻尼器所悬挂,如图1所示。其中: $y$ 方向表示

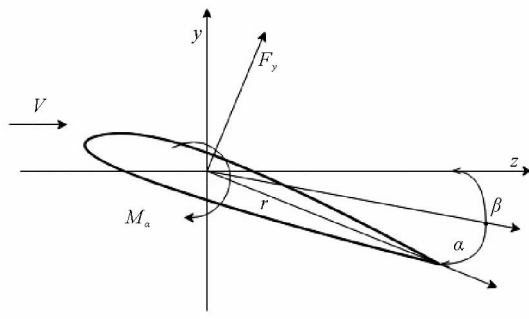


图1 位移坐标及气动力

Fig. 1 Coordinate systems and aerodynamic forces

挥舞运动方向; $\alpha$  表示扭转角; $\beta$  为变桨角; $V$  为入流风; $F_y$  与  $M_a$  分别表示气动升力和力矩。

通过对系统质量、刚度和阻尼的求和,推导出力和力矩的平衡方程,将其设为气动升力产生的总力和总力矩,可以得到挥舞、扭转方向的运动方程,定义公式<sup>[13]</sup>:

$$F_y = \bar{\rho} \ddot{y} + S \ddot{\alpha} + S \ddot{\beta} + C_y \dot{y} + K_y y, M_a = S \ddot{y} + I_a \ddot{\alpha} + I_\beta \ddot{\beta} + C_a \dot{\alpha} + C_\beta \dot{\beta} + K_a \alpha + K_\beta \beta. \quad (1)$$

式中: $y$  表示挥舞位移; $\alpha$  表示扭转位移; $\beta$  为变桨位移; $K$  和  $C$  分别表示刚度系数和阻尼系数; $\bar{\rho}$  表示截面的总线性质量,且  $\bar{\rho} = \int d\bar{\rho}$ ;  $S$  为弹性轴的静力矩,且  $S = \int r d\bar{\rho}$ ;  $I$  表示扭转与变桨方向的质量惯性矩,  $I = \int r^2 d\bar{\rho}$ 。

为了得到适合于参数化研究的无量纲形式,对方程进行归一化处理,定义:

$$\bar{r} = \frac{S}{\bar{\rho}} = \frac{\int r d\bar{\rho}}{\bar{\rho}}, \bar{r}^2 = \frac{I}{\bar{\rho}} = \frac{\int r^2 d\bar{\rho}}{\bar{\rho}}, \xi_m \bar{\omega}_m \Omega = \frac{C_m}{\bar{\rho}}, \bar{\omega}_m^2 \Omega^2 = \frac{K_m}{\bar{\rho}}. \quad (2)$$

式中: $\bar{\omega}_m$  表示归一化固有频率; $\xi_m$  为阻尼比; $\Omega$  为角速度; $m$  指代动态方程的挥舞自由度  $y$ 、扭转自由度  $\alpha$ 、变桨自由度  $\beta$ 。通过升力与力矩系数  $c_L$  和  $c_M$  定义  $F_y$  和  $M_a$  为:

$$F_y = \frac{1}{2} \rho_a c \bar{V}^2 c_L, M_a = \frac{1}{2} \rho_a c^2 \bar{V}^2 c_M. \quad (3)$$

式中: $\rho_a$  为空气密度; $\bar{V}$  为入流风速; $c$  为弦长。且根据二阶变桨激励器模型<sup>[14]</sup>,有:

$$I_\beta \ddot{\beta} + C_\beta \dot{\beta} + K_\beta \beta = K_\beta \beta_{\text{ref}}. \quad (4)$$

式中: $\beta_{\text{ref}}$  为控制器的请求变桨角,即控制系统中变桨角的输入  $u_i$ ;  $I_\beta$  取值 0.2;  $C_\beta$  取值 1.1;  $K_\beta$  取值 1; 转换为无量纲形式,  $\bar{\omega}_\beta$  取值 5;  $\xi_\beta$  取值 0.02。联立式(1)~(4),定义系统的气动弹性动态方程为:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} R_f c_L \\ \frac{1}{2} R_f c_M \\ K_\beta \beta_{\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & I_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \kappa \xi_y \bar{\omega}_y & 0 & 0 \\ 0 & \kappa \xi_\alpha \bar{\omega}_\alpha & \kappa \xi_\beta \bar{\omega}_\beta \\ 0 & 0 & C_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \kappa^2 \bar{\omega}_y^2 & 0 & 0 \\ 0 & \kappa^2 \bar{\omega}_\alpha^2 & \kappa^2 \bar{\omega}_\beta^2 \\ 0 & 0 & K_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中: $\kappa = \Omega c / \bar{V}$  表示缩减频率; $R_f = c^2 \rho_a / \bar{\rho}$  表示空气密度与截面线密度之比,考虑叶片重量影响,用  $\tau = (\bar{V}/c)t$  来补偿微分方程。经典颤振问题主要影响因素为流体的线性流态,基于特征值的稳定性分析,升力和力矩系数可以分别定义为:

$$c_L = \frac{\partial C_L}{\partial(\alpha + \beta)} (\alpha + \beta + \dot{y}), c_M = \frac{\partial C_L}{\partial(\alpha + \beta)} (\alpha + \beta + \dot{y}) \ell. \quad (6)$$

式中: $\partial c_L / \partial(\alpha + \beta)$  为升力系数对攻角的斜率,值为  $-2\pi$ ;  $\ell$  为弦分数,值为  $-0.15$ 。

## 2 滑模变结构控制

### 2.1 系统线性化处理

经典滑模控制器的设计重新定义状态向量,结合式(4)与式(5),将非线性系统转化为线性系统,设挥舞位移  $y$ 、扭转位移  $\alpha$ 、变桨位移  $\beta$  为输出量,请求变桨角  $\beta_{\text{ref}}$  为控制量,风力机动力学方程描述如下:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x}) u_i + \mathbf{d}t. \quad (7)$$

式中: $u_i$  表示变桨角控制输入; $\mathbf{d}t$  表示干扰状态向量; $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = [0, 0, 0, 0, 0, 1]^T$ ; 设  $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6]^T$ ; 定义状态向量形式:

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [y, \dot{y}, \alpha, \dot{\alpha}, \beta, \dot{\beta}]^T. \quad (8)$$

根据式(5)与式(6)可以将  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ -\kappa^2 \bar{\omega}_y^2 x_1 - (R_f \pi + \kappa \bar{\xi}_y \bar{\omega}_y) x_2 - R_f \pi (x_3 + x_5) \\ x_4 \\ -R_f \pi (x_2 + x_3 + x_5) - \kappa \bar{\xi}_a \bar{\omega}_a x_4 - \kappa \bar{\xi}_\beta \bar{\omega}_\beta x_6 - \kappa^2 \bar{\omega}_a^2 x_3 - \kappa^2 \bar{\omega}_\beta^2 x_5 + \frac{K_\beta}{I_\beta} x_5 + \frac{K_\beta C_\beta}{I_\beta K_\beta} x_6 \\ x_6 \\ -\frac{K_\beta}{I_\beta} x_5 - \frac{K_\beta C_\beta}{I_\beta K_\beta} x_6 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

## 2.2 滑模控制律设计

得到线性方程(7)后,设计变桨控制的控制律,定义滑模面形式为:

$$s(x) = c^T x = \sum_{i=1}^6 c_i x_i = \sum_{i=1}^5 c_i x_i + x_6. \quad (10)$$

式中,参数  $c = [c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, 1]^T$ ,为了保证式(10)中等式右端多项式的稳定,需满足劳斯-赫尔维茨稳定判据,通过列劳斯阵求解,取  $c = [1, 10, 25, 50, 1, 1]^T$ . 并根据线性化处理过程,可设经典滑模面微分方程为:

$$\dot{s}_1 = c_1 x_2 + c_2 f_2 + c_3 x_4 + c_4 f_4 + c_5 x_6 + f_6 + u_i. \quad (11)$$

因此定义基于趋近律的滑模控制律形式为:

$$u_1 = -c_1 x_2 - c_2 f_2 - c_3 x_4 - c_4 f_4 - c_5 x_6 - f_6 - \epsilon \operatorname{sgn}(s_1) - k s_1, \epsilon > 0, k > 0. \quad (12)$$

式中: $\epsilon$  取值 0.05;  $k$  取值 10. 要证明系统(7)在控制律(12)的作用下具有鲁棒性,需要构建 Lyapunov 函数来判断系统的稳定性. 定义 Lyapunov 函数形式为:

$$L_1 = \frac{1}{2} s_1^2. \quad (13)$$

满足条件:

$$\lim_{|s_1|} L_1 = \infty, L_1 < 0, s_1 \neq 0. \quad (14)$$

将  $L_1$  对时间  $t$  求导,得到:

$$\dot{L}_1 = s_1 \dot{s}_1 = -\epsilon \operatorname{sgn}(s_1) - k s_1 \leq 0. \quad (15)$$

依据 Lyapunov 函数稳定性判据,  $L_1$  正定,  $\dot{L}_1$  负定. 由此可证设计的经典滑模控制器能够达到使系统颤振趋势收敛至零点。

## 3 RBF 神经网络滑模控制

经典颤振是一类气弹不稳定现象,与叶片的弯扭耦合有关,表现为叶片的发散振动,这类颤振引起的发散不稳定,提高了叶片损坏、断裂概率,可能在工程领域造成巨大损失. 经典滑模控制器虽然能抑制颤振,将振动发散趋势收敛至理想跟踪指令,但与此同时出现的抖振现象不利于工程应用,在风力发电机组运行过程中,无法实现如此高频的变桨运动,而且高频的变桨模式在叶片运转过程中会对机械结构造成磨损甚至破坏。

RBF 神经网络对任意函数具有学习能力,且网络的隐含神经元采用了激活函数,具有非线性映射功能,可以逼近任意非线性函数<sup>[15]</sup>,所以采用 RBF 神经网络逼近的方式能够有效解决抖振问题. 如图 2 所示,在 RBF 神经网络自适应控制系统中,采用 RBF 网络通用函数逼近的方式设定理想跟踪指令  $x_d$ . 基于 RBF 神经网络算法,重新定义系统的输出,并在此基础上设计滑模控制器,实现稳定控制设计。

RBF 网络含有三层神经网络,构造第一层网络为系统(7)的输入误差及其一阶导数,计 6 个参数;第二层网络为隐含层,隐含层的神经元激活函数由径向基函数构成,保证层内数组运算单元达到要求,取 9 个神经元节点;第三层为输出层,含有 1 个参数. 定义网络算法形式为:

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|x - z_j\|^2}{2b_j^2}\right), j = 1, 2, \dots, 9, f = W^{*T} h(x) + \delta. \quad (16)$$

式中:网络输入  $x$  由式(8)给出;  $b_j$  为一个正的标量,表示高斯基函数的宽度,取值为 0.01;  $h(x)$  表示 RBF

神经网络的高斯函数; $\mathbf{W}^*$  为网络的理想权值; $\delta$  为网络的逼近误差,且  $\delta \leq \delta_N$ ; 径向基函数向量  $\mathbf{h}_j$  以及隐含层节点中心向量  $\mathbf{z}_j$  分别表示为:

$$\mathbf{h}_j = [h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, h_8, h_9]^T, \mathbf{z}_j = [-2, -1.5, -1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5, 2]^T. \quad (17)$$

定义 RBF 神经网络输出为:

$$\hat{f} = \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}), \quad (18)$$

式中  $\hat{\mathbf{W}}$  为估计权值。针对网络输出过程中的误差分析,设定 RBF 网络滑模面微分方程为:

$$\dot{\tilde{f}} = f - \hat{f} = \mathbf{W}^{*T} \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \delta - \hat{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}), \dot{s}_2 = \tilde{f} + c_1 x_2 + c_2 f_2 + c_3 x_4 + c_4 f_4 + c_5 x_6 + f_6 + u_i. \quad (19)$$

定义理想权值与估计权值之间的差值为:

$$\tilde{\mathbf{W}}^T = \mathbf{W}^{*T} - \hat{\mathbf{W}}^T. \quad (20)$$

定义控制律形式为:

$$u_2 = -\tilde{f} - c_1 x_2 - c_2 f_2 - c_3 x_4 - c_4 f_4 - c_5 x_6 - f_6 - \epsilon \operatorname{sgn}(s_2) - k s_2, \epsilon > 0, k > 0. \quad (21)$$

结合式(19)与式(21),可得:

$$\dot{s}_2 = -\tilde{f} - \epsilon \operatorname{sgn}(s_2) - k s_2, \epsilon > 0, k > 0. \quad (22)$$

同时,为证明系统(7)能在控制律(21)的作用下达到滑模面,构建 Lyapunov 函数为:

$$L_2 = \frac{1}{2} s_2^2 + \frac{1}{2} \gamma \tilde{\mathbf{W}}^T \tilde{\mathbf{W}}, \gamma > 0. \quad (23)$$

将  $L_2$  对时间  $t$  求导,得到:

$$\begin{aligned} \dot{L}_2 &= s_2 \dot{s}_2 + \gamma \tilde{\mathbf{W}}^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}} = s_2 (-\tilde{\mathbf{W}}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \delta - \epsilon \operatorname{sgn}(s_2)) - \gamma \tilde{\mathbf{W}}^T \dot{\tilde{\mathbf{W}}} \\ &= -\tilde{\mathbf{W}}^T (s_2 \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \gamma \dot{\tilde{\mathbf{W}}}) - s_2 (\delta + \epsilon \operatorname{sgn}(s_2)). \end{aligned} \quad (24)$$

为满足  $\dot{L}_2 \leq 0$ ,设计自适应律为:

$$\dot{\tilde{\mathbf{W}}} = -\frac{1}{\gamma} s_2 \mathbf{h}(\mathbf{x}). \quad (25)$$

式中: $\gamma$  取值为 0.015,由于逼近误差  $\delta$  可以限制得足够小,取  $\epsilon \geq \delta_N$ ,可得  $\dot{L}_2 \leq 0$ 。且存在  $\epsilon_0 > 0, \epsilon \geq \delta_N + \epsilon_0$ ,使得  $\dot{L}_2 \leq -\epsilon |s_2| - k s_2 \leq 0$ ;由于  $L_2 \geq 0, \dot{L}_2 \leq 0$ ,可得  $s_2$  与  $\tilde{\mathbf{W}}$  有界。当  $\dot{L}_2 \equiv 0$  时,  $s_2 = 0$ ,根据 LaSalle 不变性原理<sup>[16]</sup>,闭环系统为渐进稳定,当  $t \rightarrow \infty$  时,  $s_2 \rightarrow 0$ 。从而实现颤振抑制。

#### 4 模拟仿真

结合上述控制方案,采用滑模变结构控制与 RBF 神经网络补偿滑模变结构控制的方式控制风力机叶片的变桨运动,达到抑制颤振的作用,通过模拟仿真进行验证。模拟基于文献[13]中 NACA 0015 翼型经典颤振的研究实例,采用无量纲形式,选取了 5 组基本结构参数,仿真模型的参数如表 1 所示。

首先需要得到 5 组实例在无变桨作用下的颤振趋势,看是否存在振动发散的可能,为得到颤振时域响应图,给定初始挥舞位移与扭转位移 0.1,根据 5 组基本结构参数,调用 MATLAB 中的 ode45 函数得到这 5 组参数在无变桨作用下的颤振时域响应曲线,如图 3 所示。

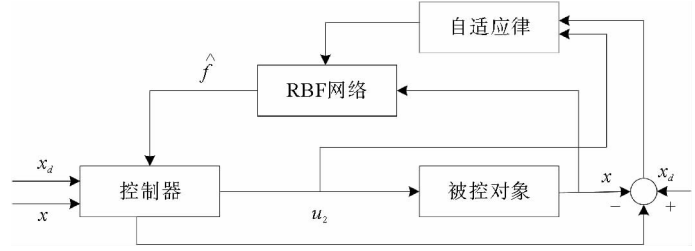


图 2 基于神经网络的自适应系统

Fig. 2 Adaptive system based on neural network

表 1 仿真模型的参数

Tab. 1 Parameters of simulation model

序号	$\kappa$	$\bar{\omega}_y$	$\bar{\omega}_a$	$R_f$	$\xi_y$	$\xi_a$
Case1	0.13	4	7	0.02	0.02	0.01
Case2	0.13	4	7	0.08	0.02	0.01
Case3	0.04	4	7	0.02	0.02	0.01
Case4	0.04	4	7	0.01	0.02	0.01
Case5	0.04	4	20	0.02	0.02	0.01

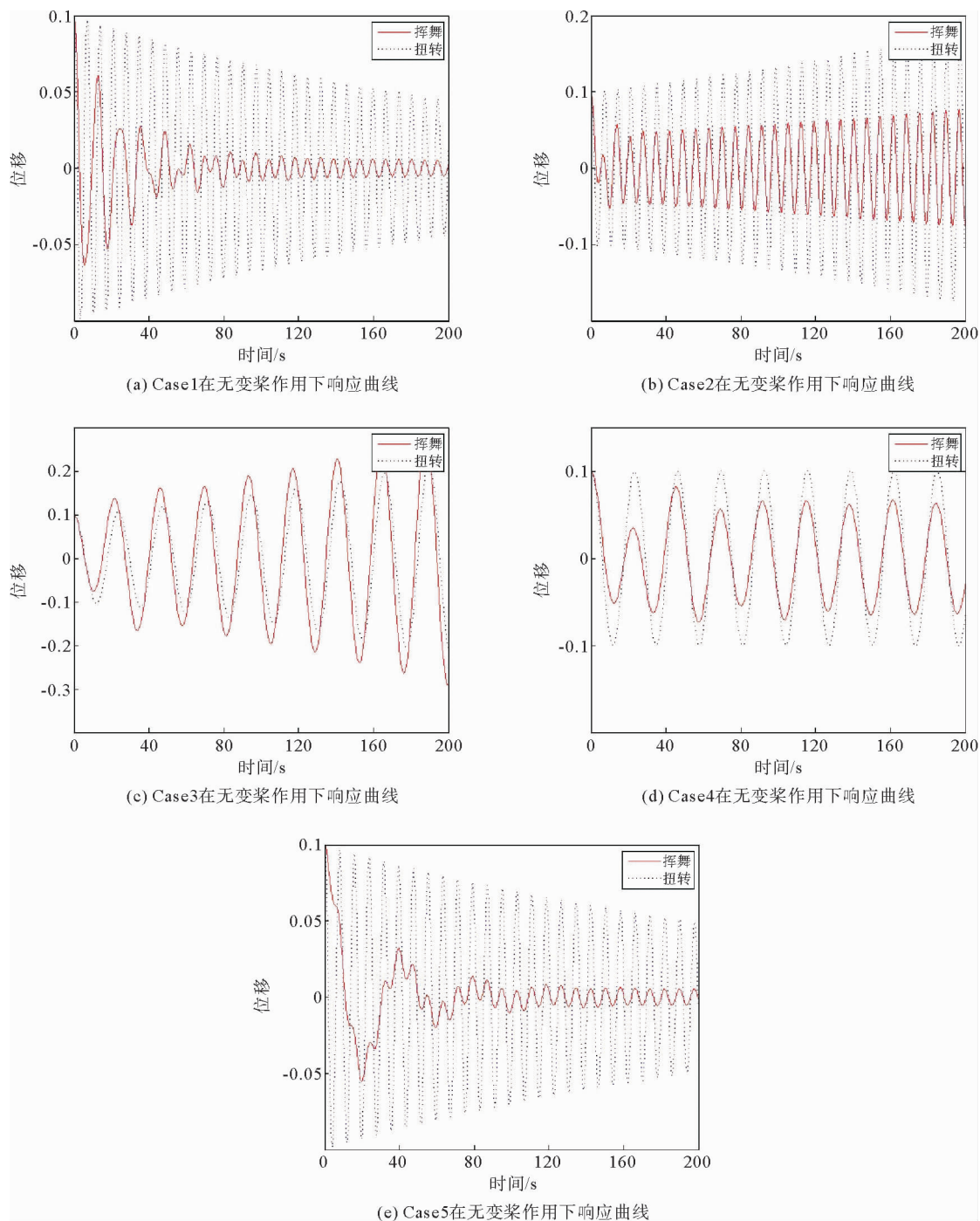


图3 颤振阶跃响应曲线

Fig. 3 Flutter step response curve

从阶跃响应曲线判断系统处于颤振收敛状态还是发散状态,收敛状态说明叶片颤振不会进一步加剧,而发散状态说明叶片颤振幅度正在持续增大,若放任不管,随着时间的推移,颤振趋势一定会造成叶片断裂失效。由图3可以看出,Case2与Case3处于颤振发散状态,在此基础上,加入滑模变桨控制,在Siumlink中编写仿真程序实现,验证方案的有效性,模拟结果如图4所示。

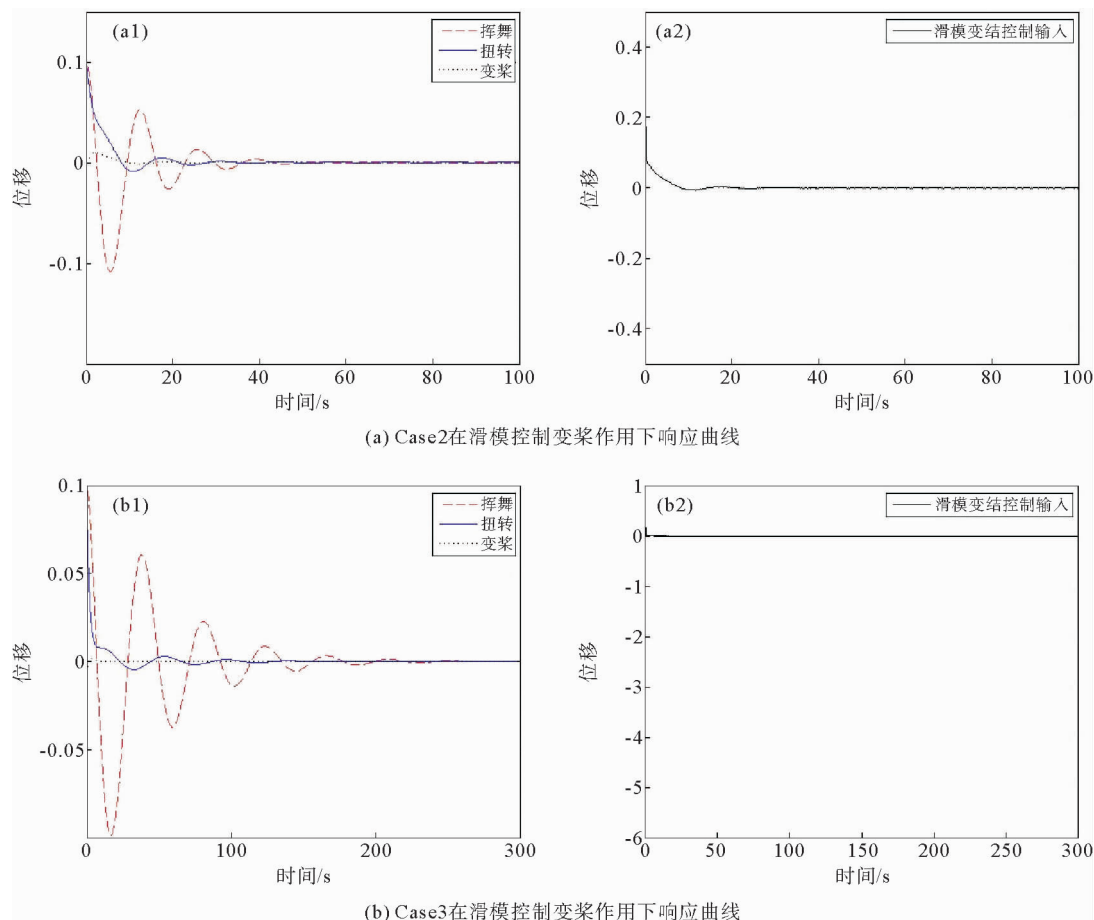


图 4 滑模控制下阶跃响应曲线

Fig. 4 Step response curve under sliding mode control

为了验证 RBF 神经网络滑模变桨控制的鲁棒性,对 Case2 与 Case3 实例,在 Siumlink 中实现模拟 RBF 滑模变桨控制,模拟结果如图 5 所示。

由于图 4 与图 5 中保证了模拟过程的完整性与一致性,不易看出抖振现象,以 Case2 为例,把控制区间压缩到正负 0.05 以内,得到图 6。由图 6 可以看出,相较于经典滑模控制器,RBF 网络滑模控制器能够减缓抖振的频率以及幅度。

结合图 4 与图 5 不难发现,经典滑模控制器与 RBF 神经网络滑模控制器均能使颤振趋势收敛至零点,迅速得到稳定且收敛的颤振阶跃响应曲线,在稳定特性以及路径跟踪上具有良好的表现。在图 6 抖振现象对比中,基于相同的趋近律,相较于经典滑模控制器,RBF 神经网络滑模控制器能够大幅度地削弱系统抖振,抖振幅度削减了 90% 以上。

## 5 结论

针对风力机叶片多耦合的非线性气动弹性系统,设计了经典滑模控制器以及 RBF 网络滑模控制器,基于滑模控制律、Lyapunov 函数和 RBF 网络自适应律等,验证了两种方案对于叶片颤振抑制的有效性。模拟结果表明:

- 1) 滑模变结构控制算法响应速度快,整个闭环系统可以快速达到稳定以及收敛。
- 2) 系统状态变量到达滑模面后具有很强的鲁棒性,但会出现小幅度、高频率的抖振,不利于实际工程应用。RBF 网络算法可提高控制器的性能,通过自适应权重调节降低抖振的频率以及幅度。
- 3) 由于风力机叶片控制系统的单一性,需要探索更优的控制算法以进一步降低抖振趋势。

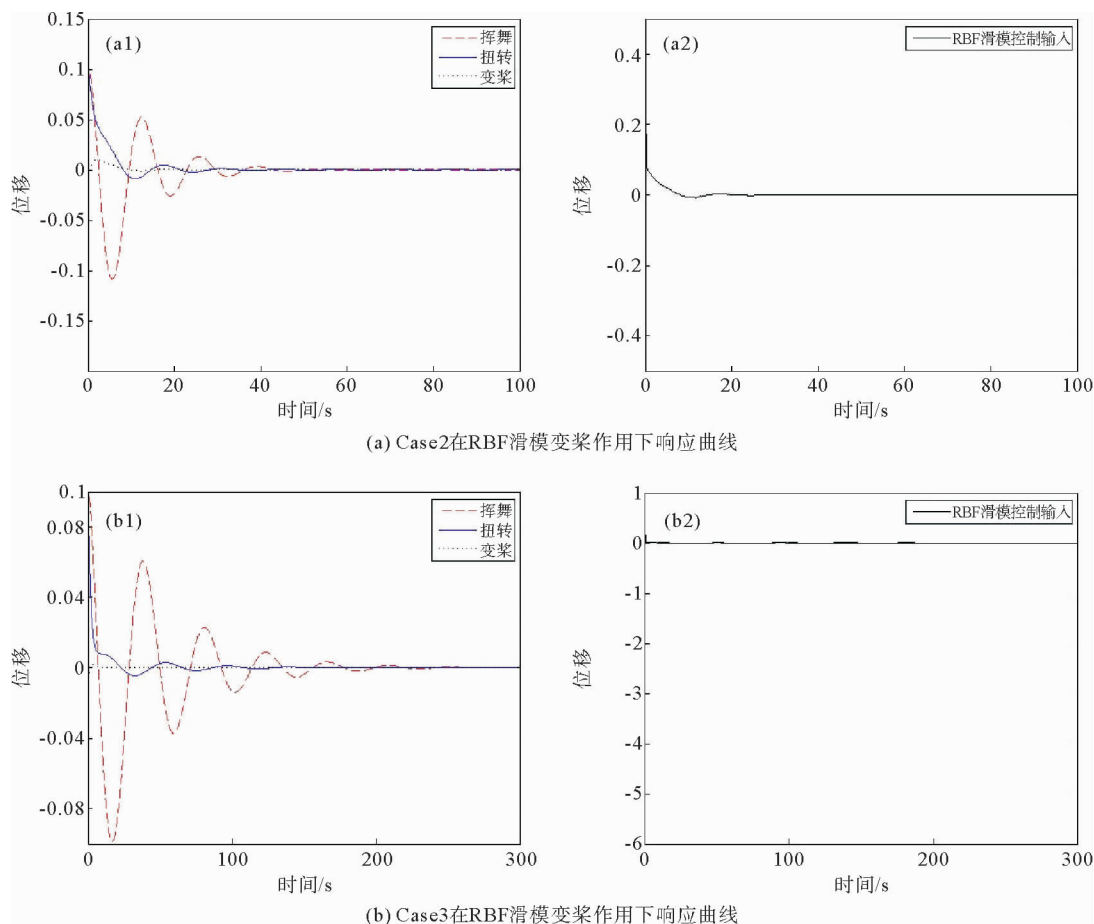


图5 RBF网络滑模控制下阶跃响应曲线

Fig. 5 Step response curve under RBF sliding mode control

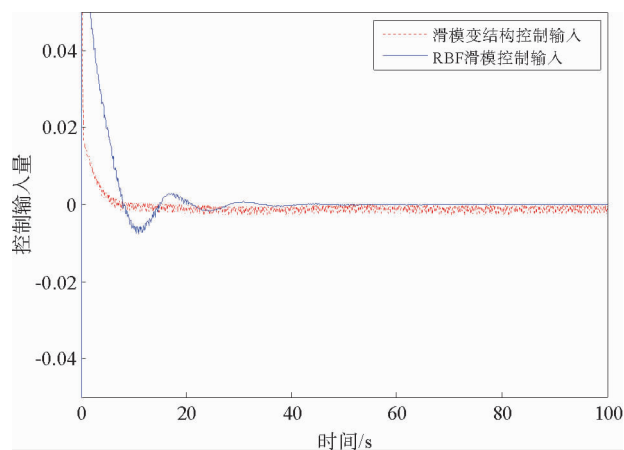


图6 抖振现象对比

Fig. 6 Chattering phenomenon contrast

## 参考文献:

- [1] LOBITZ DON W. Aeroelastic stability predictions for a MW-sized blade[J]. Wind Energy, 2004, 7(3): 211-224.
- [2] 任勇生, 张明辉. 水平轴风力机叶片的弯扭耦合气弹稳定性研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(7): 196-200.
- REN Yongsheng, ZHANG Minghui. Aeroelastic stability of a horizontal axis wind turbine blade with bending-torsion coupled [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(7): 196-200.



- [3] KALLESØE B S. A low-order model for analysing effects of blade fatigue load control[J]. *Wind Energy*, 2006, 9(5): 421-436.
- [4] 李迺璐, 穆安乐, BALAS M J. 基于 B-L 气动模型的旋转水平风机叶片经典颤振稳定性分析[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(23): 171-176.
- LI Nailu, MU Anle, BALAS M J. Classical flutter stability of rotating horizontal wind turbine blades based on B-L aeroelastic model[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(23): 171-176.
- [5] LIU T R, TERZO M. Classical flutter and active control of wind turbine blade based on piezoelectric actuation[J]. *Shock and Vibration*, 2015, DOI: 10.1155/2015/292368.
- [6] 任勇生, 林学海. 风力机叶片挥舞-摆振的动力失速非线性气弹稳定性研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(1): 121-124.
- REN Yongsheng, LIN Xuehai. Flap/lead-lag nonlinear aeroelastic stability of a wind turbine blade system during dynamic stall[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(1): 121-124.
- [7] LIU J K. Sliding mode control design and MATLAB simulation: The design method of advanced control system (3rd edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [8] 宋晨, 吴志刚, 杨超. 二元机翼滑模变结构控制颤振主动抑制[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36(12): 1400-1403.
- SONG Chen, WU Zhigang, YANG Chao. Sliding mode variable structure control of flutter suppression for two-dimensional wing[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(12): 1400-1403.
- [9] 杨超, 宋晨, 吴志刚, 等. 滑模输出反馈控制在二元机翼颤振主动抑制中的应用[J]. *中国科学杂志社*, 2010, 53: 1338-1348.
- YANG Chao, SONG Chen, WU Zhigang, et al. Application of output feedback sliding mode control to active flutter suppression of two-dimensional airfoil[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2010, 53: 1338-1348.
- [10] CHU Yundi, FEI Juntao. Adaptive global sliding mode control for MEMS gyroscope using RBF neural network[J/OL]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, Article ID 403180.
- [11] 田猛, 张波文, 周腊吾等. 基于 RBF 神经网络滑模变结构独立变桨控制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(4): 107-114.
- TIAN Meng, ZHANG Bowen, ZHOU Lawu, et al. Study of individual variable pitch control based on RBF neural networks-sliding mode control[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(4): 107-114.
- [12] 袁家信. 机翼气动弹性系统响应的滑模控制方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- YUAN Jiaxin. Research on sliding mode control of wing aeroelastic systems[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2018.
- [13] CHAVIAROPOULOS P K, SOERENSEN N N, HANSEN M O L. Viscous and aeroelastic effects on wind turbine blades. The VISCEL Project. Part II: Aeroelastic Stability Investigations[J]. *Wind Energy*, 2003, 6: 387-403.
- [14] 刘廷瑞, 于子晴. 风力机叶片失速非线性颤振伺服气弹智能控制[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(10): 3562-3569.
- LIU Tingrui, YU ziqing. Aeroservoelastic intelligent control for stall nonlinear flutter of wind turbine blade[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(10): 3562-3569.
- [15] LIU J K. RBF neural network control for mechanical systems: design, analysis and MATLAB simulation (2nd edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2018.
- [16] DING B Y, DING C M. Recurrence and LaSalle invariance principle[J]. *Systems & Control Letters*, 2016, 93: 64-68.

(责任编辑: 傅 游)