

## 大型风电机组桨距角跟踪鲁棒自适应反演控制

崔双喜, 王维庆

(新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 针对具有很强非线性的风力机桨叶系统, 利用动量矩定理, 建立桨叶动力学数学模型, 采用自适应反演控制, 设计独立变桨鲁棒自适应桨距角跟踪控制器; 该控制方法采用在实际控制量中, 引入自适应鲁棒项, 克服和消除不确定性对桨叶系统的影响; 利用 Matlab/Simulink 软件, 搭建风力机仿真平台, 仿真结果验证了所提出控制方法的可行性和有效性; 在桨叶系统参数不确定、受到未知不平衡载荷的情况下, 经过自适应过程, 设计的控制器较好地实现了风力机桨叶桨距角独立、快速跟踪各自期望的桨距角。

**关键词:** 风力机; 鲁棒; 自适应; 桨距角; 反演控制

## Robust Adaptive Blade Pitch Angle Tracking Backstepping Control for Large-scale Wind Turbines

Cui Shuangxi, Wang Weiqing

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** For highly nonlinear blades system of wind turbine, Blades dynamic mathematical model are established. Individual pitch robust adaptive controller are designed by use of backstepping control. The proposed control method introduces a robust adaptive item in the real control, by which to overcome and eliminate the impact of uncertainty on the blade system. By use of Matlab/Simulink software, wind turbine simulation platform are built, simulation results demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed control method, when blade system lie in parameters uncertainty and subjected to unknown unbalanced loads, the designed controller can make pitch angle of the three blades quickly track their expectation pitch angles.

**Keywords:** wind turbine; robust; adaptive; pitch angle; backstepping control

## 0 引言

为保证大型风电机组正常、安全、高效运行, 需按功能要求, 对机组各组成部分实施必要的控制<sup>[1-4]</sup>。针对风力机电动桨叶执行系统, 因其具有较强非线性动力学行为, 如采用变桨模糊控制<sup>[5-6]</sup>, 桨叶变桨执行系统的控制性能可在一定程度上得到改善, 但该方法依赖于知识规则, 自适应能力不高, 易造成精度下降。神经网络在学习规则方面与模糊控制类似。针对复杂快变的非线性风力机变桨执行系统, 也有文献利用变结构、自寻优、 $H_\infty$  控制等方式<sup>[7-8]</sup>, 克服系统参数不确定及非线性时变因素。

反演控制设计方法由于其独特构造性的设计过程和对不确定性有较优良的处理能力, 在飞机、导弹、电机、机器人等领域的控制器设计中得到了广泛的应用<sup>[9-13]</sup>。本文利用动量矩定理, 建立含有时变不确定性参数和未知扰动载荷的桨叶非线性动力学模型; 通过选择状态变量和引入误差状态向量, 利用反演控制设计方法, 设计了鲁棒自适应桨距角跟踪控制器。对具有时变不确定项和高度非线性的风力机桨叶系统, 提出了一种鲁棒自适应桨距角跟踪控制设计方法。

## 1 风力机桨叶动力学建模

风力机单片桨叶桨距角调节机构的机械示意图如图 1 所

示。由动量矩定理微分形式<sup>[14]</sup>, 对第  $i$  片桨叶可得式 (1) 所示动力学方程。

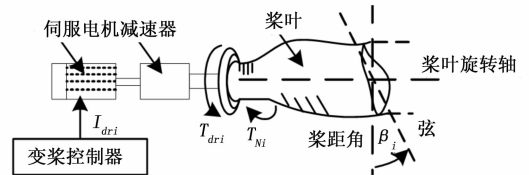


图 1 第  $i$  片桨叶桨距角调节示意图

$$\frac{d(J_i \frac{d\beta_i}{dt})}{dt} = T_{dri} - (k_{Di} + k_{fi}) \frac{d\beta_i}{dt} - T_{Ni} \quad (1)$$

式 (1) 也可写为:

$$J_i \ddot{\beta}_i + (k_{Di} + k_{fi}) \dot{\beta}_i + T_{Ni} = T_{dri} \quad (2)$$

其中:

$$T_{Ni} = T_{Palli} + T_{Lifli} + T_{Ti} + T_{Tilti} + T_{Bendi} + T_{Aeroi}$$

式中,  $J_i$  是第  $i$  片桨叶绕其轴的转动惯量;  $\beta_i$  是第  $i$  片桨叶的桨距角;  $k_{Di}$  和  $k_{fi}$  分别是第  $i$  片桨叶的空气阻尼系数和轴承摩擦系数;  $T_{dri}$  是第  $i$  片桨叶变桨调节装置的驱动力矩;  $T_{Ni}$  是第  $i$  片桨叶所受的扭转力矩和空气动力产生的扰动阻力矩的总和, 包括第  $i$  片桨叶推力矩  $T_{Palli}$ 、第  $i$  片桨叶升力产生的升力矩  $T_{Lifli}$ 、第  $i$  片桨叶的扭转复位力矩  $T_{Ti}$ 、第  $i$  片桨叶由转子倾斜造成的倾斜力矩  $T_{Tilti}$ 、第  $i$  片桨叶弯曲造成的弯曲力矩  $T_{Bendi}$  以及第  $i$  片桨叶承受的因空气动力造成的不平衡载荷  $T_{Aeroi}$ 。

桨叶桨距角调节采用电动变桨距, 如图 1 所示。图 1 中,  $T_{dri}$  表示调节第  $i$  片桨叶桨距角到需要的角度所需的驱动电机

收稿日期: 2015-01-20; 修回日期: 2015-03-24。

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2014211A007)。

作者简介: 崔双喜(1970-), 男, 甘肃武威人, 博士研究生, 主要从事风力发电系统建模、控制及仿真方向的研究。

电流的大小。电机电流和产生的桨叶驱动力矩之间的关系可以写为  $T_{dri} = f(I_{dri})$ ，为简化分析，采用线性关系表达， $T_{dri} = b_i I_{dri}$ ，其中  $b_i$  描述电机驱动电流和产生的桨叶驱动力矩之间的一个机电变换常数。

将  $T_{dri} = b_i I_{dri}$  代入式 (2) 整理可得

$$\dot{\beta}_i + \frac{k_i}{J_i} \beta_i + T'_{Ni} = \frac{b_i}{J_i} I_{dri} \quad (3)$$

式中， $k_i = k_{Di} + k_{fi}$ ； $T'_{Ni} = \frac{1}{J_i} T_{Ni}$ 。

式 (3) 为建立的第  $i$  片桨叶的动力学数学模型。考虑三片桨叶变桨执行系统，式 (3) 动力学方程写成式 (4) 的矩阵方程的形式。

$$\dot{\beta} + (A + \Delta A)\beta + C = (b + \Delta b)I_{dr} \quad (4)$$

式中， $\beta = [\beta_1, \beta_2, \beta_3]^T \in \mathbf{R}^3$ ； $\dot{\beta} = [\dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2, \dot{\beta}_3]^T \in \mathbf{R}^3$ ； $A = \text{diag}(\frac{k_1}{J_1}, \frac{k_2}{J_2}, \frac{k_3}{J_3}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ ；

$\Delta A = \text{diag}(\Delta \frac{k_1}{J_1}, \Delta \frac{k_2}{J_2}, \Delta \frac{k_3}{J_3}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  为不确定项；

$\Delta \frac{k_i}{J_i}$  是  $\frac{k_i}{J_i}$  的参数不确定项， $i = 1, 2, 3$ ；

$C = [T_{N1}, T_{N2}, T_{N3}]^T \in \mathbf{R}^3$ ， $C$  是 3 个桨叶的不确定载荷和扰动不确定项；

$b = \text{diag}(\frac{b_1}{J_1}, \frac{b_2}{J_2}, \frac{b_3}{J_3}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ ；

$\Delta b = \text{diag}(\Delta \frac{b_1}{J_1}, \Delta \frac{b_2}{J_2}, \Delta \frac{b_3}{J_3}) \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$  为不确定项；

$\Delta \frac{b_i}{J_i}$  是  $\frac{b_i}{J_i}$  的参数不确定项， $i = 1, 2, 3$ ； $I_{dr} = [I_{dr1}, I_{dr2}, I_{dr3}]^T \in \mathbf{R}^3$ 。

选取状态向量  $X_1 = \beta = [\beta_1, \beta_2, \beta_3]^T \in \mathbf{R}^3$ ， $X_2 = \dot{\beta} = [\dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2, \dot{\beta}_3]^T \in \mathbf{R}^3$ ，控制向量  $u = [u_1, u_2, u_3]^T \in \mathbf{R}^3 = [I_{dr1}, I_{dr2}, I_{dr3}]^T \in \mathbf{R}^3$ 。将风力机桨叶系统动力学数学模型式 (4) 写成式 (5a)、式 (5b) 的系统状态方程的形式。

$$\dot{X}_1 = X_2 \quad (5a)$$

$$\dot{X}_2 = f_2(X_2) + b_2 u \quad (5b)$$

式中， $f_2(X_2) = f_{20}(X_2) + \Delta f_2(X_2)$ ， $f_{20}(X_2) = -AX_2$ ， $\Delta f_2(X_2) = -\Delta AX_2 - C$ ； $b_2 = b + \Delta b$ ； $f_{20}(X_2)$  和  $b$  为系统的名义值， $\Delta f_2(X_2)$  和  $\Delta b$  为系统中的不确定项。

式 (5a)、式 (5b) 即为所建立的含有参数不确定和载荷扰动项的桨叶系统数学模型。

## 2 桨距角跟踪反演控制器设计

为便于桨距角跟踪反演控制器设计，引入误差状态向量  $Z_1, Z_2 \in \mathbf{R}^3$ ，

$$Z_1 = X_1 - X_{1d} \quad (6a)$$

$$Z_2 = X_2 - X_{2d} \quad (6b)$$

式中， $X_{1d}$  为桨叶期望的桨距角； $X_{2d}$  为  $X_2$  的期望值，由式 (9) 给出。

由式 (6) 及式 (5) 可得误差动态方程为

$$\dot{Z}_1 = X_2 - \dot{X}_{1d} \quad (7)$$

$$\dot{Z}_2 = f_2(X_2) + b_2 u - \dot{X}_{2d} \quad (8)$$

对式 (7) 存在一个理想的  $X_2^* = -k_1 Z_1 + \dot{X}_{1d}$ ，使得  $\dot{Z}_1 = -k_1 Z_1 + (X_2 - X_2^*)$ ，其中  $k_1 > 0$  为设计参数。由于  $X_2^*$  是得不到的，故选取其期望的  $X_{2d}$  为

$$X_{2d} = -k_1 Z_1 + \dot{X}_{1d} \quad (9)$$

使得  $\dot{Z}_1 = -k_1 Z_1 + (X_2 - X_{2d})$ 。

选取李雅普诺夫 (Lyapunov) 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} Z_1^T Z_1 \quad (10)$$

对  $V_1$  求导可得

$$\dot{V}_1 = Z_1^T \dot{Z}_1 = Z_1^T [-k_1 Z_1 + (X_2 - X_{2d})] = -k_1 \|Z_1\|^2 + Z_1^T (X_2 - X_{2d}) \quad (11)$$

由  $\dot{Z}_1 = -k_1 Z_1 + (X_2 - X_{2d})$  和 Lyapunov 稳定性判别式 (11) 可知，只要  $X_2$  与  $X_{2d}$  之间的误差足够小，就可使误差  $Z_1$  渐进指数收敛至系统原点很小的一个邻域。

为使  $X_2$  跟踪  $X_{2d}$ ，考虑第二个子系统式 (8)，则存在一个理想的控制量

$$u^* = -b_2^{-1} [k_2 Z_2 + f_2(X_2) - \dot{X}_{2d}] + kZ_2 + Z_1 \quad (12)$$

使得

$$\dot{Z}_2 = f_2(X_2) + b_2 u - \dot{X}_{2d} + b_2 u^* - b_2 u^* = -k_2 Z_2 + b_2 (kZ_2 + Z_1) + b_2 (u - u^*) \quad (13)$$

式中， $k_2 > 0, k > 0$  为设计参数。由于不确定项的存在，理想的控制量  $u^*$  是得不到的，可以设为

$$u^* = -b^{-1} [k_2 Z_2 + f_{20}(X_2) - \dot{X}_{2d}] + kZ_2 + Z_1 + \Delta_2 \quad (14)$$

式中， $\dot{X}_{2d}$  为以  $X_{2d}$  为输入的非线性跟踪微分器的输出； $\Delta_2$  为由于系统存在不确定性及用  $\dot{X}_{2d}$  代替  $\dot{X}_{2d}$  而引入的不确定项，本文引入自适应鲁棒项来抵消其影响。

假设存在一个未知的正数  $\rho_2$ ，使得

$$\|\Delta_2\| \leq \rho_2 \delta_2(X_1, X_2) \quad (15)$$

式中， $\delta_2(X_1, X_2)$  为已知的非负光滑函数，以下简称为  $\delta_2$ 。

选取实际控制量为

$$u = -b^{-1} [k_2 Z_2 + f_{20}(X_2) - \dot{X}_{2d}] + kZ_2 + Z_1 + \eta_2 \quad (16)$$

式中， $\eta_2$  为引入的自适应鲁棒项，由式 (20) 给出。将式 (14)、式 (16) 代入式 (13)，则

$$\dot{Z}_2 = -k_2 Z_2 + b_2 (kZ_2 + Z_1) + b_2 (\eta_2 - \Delta_2) \quad (17)$$

设  $\hat{\rho}_2$  为未知正数  $\rho_2$  的估计值， $\tilde{\rho}_2 = \hat{\rho}_2 - \rho_2$  为估计误差。考虑如下 Lyapunov 函数

$$V_2 = V_1 - \frac{1}{2} Z_2^T b_2^{-1} Z_2 + \frac{1}{2r_2} \tilde{\rho}_2^2 \quad (18)$$

式中， $r_2 > 0$  为设计参数。对  $V_2$  求导可得

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - Z_2^T b_2^{-1} \dot{Z}_2 - Z_2^T \tilde{b}_2^{-1} Z_2 + \frac{1}{r_2} \tilde{\rho}_2 \dot{\rho}_2 \quad (19)$$

选择自适应鲁棒项和参数自适应调节律分别为

$$\eta_2 = Z_2 \tilde{\rho}_2 \delta_2^2 + \frac{\epsilon_2^2}{4} Z_2 \delta_2^2 \quad (20)$$

$$\dot{\rho}_2 = r_2 [\epsilon_2 \|Z_2\|^2 \delta_2^2 - \sigma_2 (\hat{\rho}_2 - \rho_2^0)] \quad (21)$$

式中， $\epsilon_2, \sigma_2, \rho_2^0$  为正的设计参数。

将式 (17) 及式 (11) 代入式 (19)，并考虑到  $Z_1^T Z_2 = Z_2^T Z_1$  可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & \dot{V}_1 - Z_2^T b_2^{-1} [-k_2 Z_2 + b_2 (kZ_2 + Z_1) + b_2 (\eta_2 - \Delta_2)] \\ & - Z_2^T \tilde{b}_2^{-1} Z_2 + \frac{1}{r_2} \tilde{\rho}_2 \dot{\rho}_2 = \\ & -k_1 \|Z_1\|^2 + k_2 Z_2^T b_2^{-1} Z_2 - k \|Z_2\|^2 - Z_2^T \tilde{b}_2^{-1} Z_2 + \\ & Z_2^T (\Delta_2 - \eta_2) + \frac{1}{r_2} \tilde{\rho}_2 \dot{\rho}_2 \end{aligned} \quad (22)$$

设  $\hat{b}_2^{-1} = \text{diag} [b_{11}, b_{22}, b_{33}]$ , 取

$k = \max ( |b_{11}|, |b_{22}|, |b_{33}| )$ 。如果选取  $k > k_d$ , 并将式 (20)、式 (21) 代入式 (22) 得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -k_1 \|Z_1\|^2 + k_2 Z_2^T \hat{b}_2^{-1} Z_2 - \\ &k \|Z_2\|^2 + k_d \|Z_2\|^2 + \\ &Z_2^T (\Delta_2 - Z_2 \hat{\rho}_2^2 \delta_2^2 - \frac{\varepsilon_2^2}{4} Z_2 \delta_2^2) + \\ &\tilde{\rho}_2 \varepsilon_2 \|Z_2\|^2 \delta_2^2 - \\ &\frac{1}{2} \sigma_2 \tilde{\rho}_2 (\hat{\rho}_2 - \rho_2^0)^2 \leq \\ &-k_1 \|Z_1\|^2 + k_2 Z_2^T \hat{b}_2^{-1} Z_2 + \\ &Z_2^T (\Delta_2 - Z_2 \hat{\rho}_2^2 \delta_2^2 - \frac{\varepsilon_2^2}{4} Z_2 \delta_2^2) + \\ &\tilde{\rho}_2 \varepsilon_2 \|Z_2\|^2 \delta_2^2 - \frac{1}{2} \sigma_2 \tilde{\rho}_2 (\hat{\rho}_2 - \rho_2^0)^2 \end{aligned} \quad (23)$$

由于

$$\begin{aligned} Z_2^T (\Delta_2 - Z_2 \hat{\rho}_2^2 \delta_2^2 - \frac{\varepsilon_2^2}{4} Z_2 \delta_2^2) + \tilde{\rho}_2 \varepsilon_2 \|Z_2\|^2 \delta_2^2 &\leq \\ \|Z_2\| \delta_2 \rho_2 - \|Z_2\|^2 \hat{\rho}_2^2 \delta_2^2 - \frac{\varepsilon_2^2}{4} \|Z_2\|^2 \delta_2^2 + \tilde{\rho}_2 \varepsilon_2 \|Z_2\|^2 \delta_2^2 &\leq \\ (\varepsilon_2 \|Z_2\|^2 \delta_2^2 + \frac{1}{4\varepsilon_2}) \rho_2 - \|Z_2\|^2 \hat{\rho}_2^2 \delta_2^2 - & \\ \frac{\varepsilon_2^2}{4} \|Z_2\|^2 \delta_2^2 + \tilde{\rho}_2 \varepsilon_2 \|Z_2\|^2 \delta_2^2 = & \\ -\delta_2^2 (\|Z_2\| \rho_2 - \frac{\varepsilon_2}{2} \|Z_2\|)^2 + \frac{\rho_2}{4\varepsilon_2} &\leq \frac{\rho_2}{4\varepsilon_2} \end{aligned} \quad (24)$$

且利用

$$\begin{aligned} -\sigma_2 \tilde{\rho}_2 (\hat{\rho}_2 - \rho_2^0) &= -\frac{1}{2} \sigma_2 \tilde{\rho}_2^2 - \frac{1}{2} \sigma_2 (\hat{\rho}_2 - \rho_2^0)^2 + \\ &\frac{1}{2} \sigma_2 (\rho_2 - \rho_2^0)^2 \end{aligned} \quad (25)$$

则, 式 (23) 变为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -k_1 \|Z_1\|^2 + k_2 Z_2^T \hat{b}_2^{-1} Z_2 - \frac{1}{2} \sigma_2 \tilde{\rho}_2^2 + \\ &\frac{1}{2} \sigma_2 (\rho_2 - \rho_2^0)^2 + \frac{\rho_2}{4\varepsilon_2} \leq -c_1 V_2 + c_2 \end{aligned} \quad (26)$$

式中,  $c_1 = 2k_2 = \min\{2k_1, \sigma_2 r_2\}$ ;

$$c_2 = \frac{1}{2} \sigma_2 (\rho_2 - \rho_2^0)^2 + \frac{\rho_2}{4\varepsilon_2}。$$

由式 (26) 可得

$$V_2(t) \leq V_2(0) e^{-c_1 t} + \frac{c_2}{c_1} \quad (27)$$

综上所述可知, 对风力机桨叶系统桨距角跟踪控制时,  $X_2$  的期望值  $X_{2d}$  和控制量分别采用式 (9) 和式 (16) 的形式, 自适应鲁棒项和自适应参数调节律风别采用式 (20) 和式 (21) 的形式, 则系统状态跟踪误差  $Z_1, Z_2$  以及自适应参数估计误差均有界且指数收敛至系统原点的一个邻域:

$$\Omega = \{Z_1, Z_2, \tilde{\rho}_2 \mid V_2 \leq c_2/c_1\} \quad (28)$$

风力发电机组变桨距执行控制的目标是: 在高于额定风速时, 变桨距执行控制器应能够发出信号, 驱动每个桨叶变桨执行电机, 使变桨执行机构及时调节桨叶桨距角, 快速准确跟踪各自的期望桨距角, 同时控制器应具有一定的鲁棒自适应能力。对于非线性时变且具有许多不确定项的电动变桨系统, 本文设计了独立桨距角跟踪鲁棒自适应反演控制器, 控制系统框图如图 2 所示。

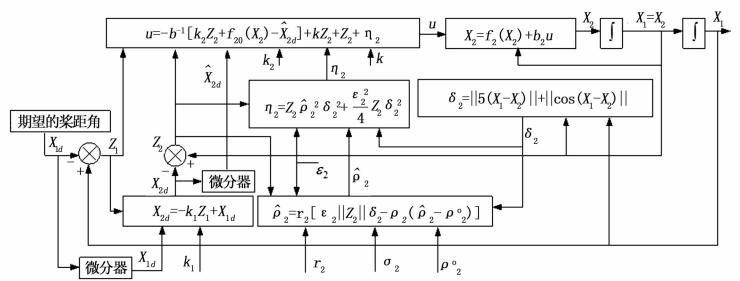


图 2 鲁棒自适应桨距角跟踪反演控制系统框图

### 3 桨距角跟踪鲁棒自适应反演控制仿真验证

为验证所设计桨距角跟踪反演控制器的有效性和可行性, 采用 Matlab/Simulink 软件搭建了风电机组桨叶系统仿真平台。仿真时 3 个桨叶转动惯量分别选取为  $J_1 = 2.25 \times 10^3 \text{ kgm}^2$ ,  $J_2 = 2.2 \times 10^3 \text{ kgm}^2$ ,  $J_3 = 2.3 \times 10^3 \text{ kgm}^2$ ; 空气阻尼系数分别选取为  $k_{D1} = 1\ 000 \text{ Nm/(rad/s)}$ ,  $k_{D2} = 990 \text{ Nm/(rad/s)}$ ,  $k_{D3} = 995 \text{ Nm/(rad/s)}$ ; 轴承摩擦系数分别取为  $k_{f1} = 97 \text{ Nm/(rad/s)}$ ,  $k_{f2} = 100 \text{ Nm/(rad/s)}$ ,  $k_{f3} = 98 \text{ Nm/(rad/s)}$ ; 3 个桨叶变桨系统的机电变换常数分别取为  $b_1 = 350 \text{ Nm/A}$ ,  $b_2 = 340 \text{ Nm/A}$ ,  $b_3 = 360 \text{ Nm/A}$ ; 仿真时控制参数选择为  $k_1 = 10$ ,  $k_2 = 8$ ,  $k = 15$ ,  $\sigma_2 = 5$ ,  $r_2 = 3.2$ ,  $\varepsilon_2 = 0.3$ ,  $\rho_2^0 = 0.1$ ; 已知的非负光滑函数取为:  $\delta_2 = \|5(X_1 - X_2)\| + \|\cos(X_1 - X_2)\|$ 。

为便于控制系统仿真, 系统不确定项选取为:  $\Delta b = \text{diag} [ |0.1 \sin(0.2 t)|, |0.1 \cos(0.1 t)|, |0.12 \sin(0.1 t)| ]$ ;

$\Delta f_2(X_2) = [500 \sin t, 500 \cos t, 500 \sin(2 t)]^T$ 。仿真的初始条件为  $X_1(0) = [0, 0, 0]^T$ ,  $X_2(0) = [0, 0, 0]^T$ 。

仿真时, 假设根据风速的变化, 为达到控制目标, 3 个桨叶的期望桨距角  $X_{1d} = [\beta_{1d}, \beta_{2d}, \beta_{3d}]^T$  按图 3 所示来调节桨距角。

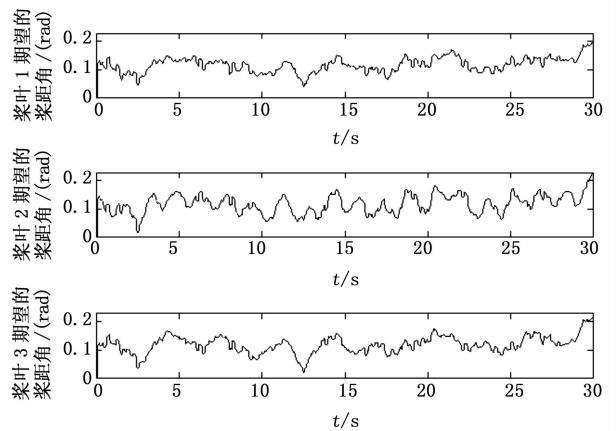


图 3 3 个桨叶的期望桨距角

在桨距角跟踪鲁棒自适应反演控制下, 3 个桨叶的桨距角跟踪性能曲线如图 4 所示。跟踪误差曲线如图 5 所示。由图 4 和图 5 可以看出, 即使风力机组桨叶系统参数时变、存在不确定项, 系统经过自适应过程后, 能够较好地跟踪各自期望桨距角。虽然起始跟踪误差略大, 但经过自适应调节后渐趋平

稳。表明所设计的反演控制器能够实现快速的独立桨距角跟踪，表现出了较好的鲁棒自适应能力。

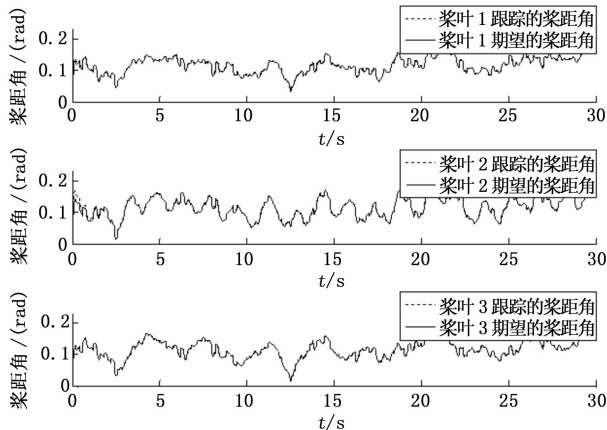


图 4 3 个桨叶的桨距角跟踪性能曲线

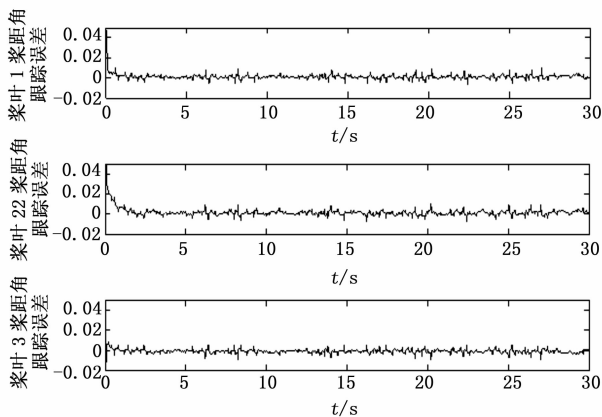


图 5 桨距角跟踪误差曲线

### 4 结论

实际的风力发电机组桨叶系统包含未建模动态，在运行过程中又有系统参数的时变和不确定项，本文在充分考虑以上影响的情况下，设计了风力机桨叶桨距角跟踪反演控制器。在设

计时，运用反演控制原理，通过引入自适应鲁棒函数，有效消除参数时变及不确定项的影响。利用 Lyapunov 稳定性定理，证明了系统的状态跟踪误差和自适应参数估计误差指数收敛于原点的一个邻域。所设计的控制器能够使 3 个桨叶，快速独立跟踪各自期望的桨距角，表现出控制器良好鲁棒控制性能。

### 参考文献:

[1] 张文苑, 郑恩让, 朱玉国, 等. 兆瓦级同步风力发电机变桨距控制策略研究 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (11): 2203-2204.

[2] 廖冬, 常梦星. 基于反馈数学控制的大型风力机组变频信号抗扰动方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (9): 2886-2889.

[3] 崔双喜, 王维庆, 张新燕. 无模型控制在大型风电机组独立变桨中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (8): 2132-2135.

[4] 金鑫, 钟翔, 谢双义, 等. 大型风力发电机转矩 LQR 控制及载荷优化 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (6): 93-98.

[5] 董海鹰, 魏占宏, 赵香桂, 等. 基于多种群遗传算法的电动变桨系统的变论域模糊控制 [J]. 控制工程, 2014, 21 (2): 182-188.

[6] 邱静, 徐大林, 孔屹刚. 基于模糊控制的电动变桨距系统建模与仿真 [J]. 机械与电子, 2011 (1): 64-67.

[7] 李辉, 杨超, 赵斌, 等. 风电机组电动变桨系统建模及运行特性评估与测试 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37 (11): 20-25.

[8] 陈金元, 李相俊, 谢巍. 风力发电系统液压变桨执行机构的  $H_{\infty}$  控制 [J]. 电力建设, 2014, 35 (6): 1-6.

[9] 谷志锋, 朱长青, 邵天章, 等. 全状态 EKF 估计的最优反演鲁棒励磁控制设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (19): 118-125.

[10] 朱凯, 齐乃明, 秦昌茂. BTT 导弹的自适应滑模反演控制设计 [J]. 宇航学报, 2010, 31 (3): 769-773.

[11] 孙隼华, 崔明月, 李永福. 具有参数不确定性的轮式移动机器人自适应 backstepping 控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29 (9): 1198-1204.

[12] 缪志强, 王耀南. 基于径向小波神经网络的混沌系统鲁棒自适应反演控制 [J]. 物理学报, 2012, 61 (3): 030503-1-030503-7.

[13] 王芳, 宗群, 田栢苓, 等. 基于鲁棒自适应反步的可重复使用飞行器再入姿态控制 [J]. 控制与决策, 2014, 29 (1): 12-18.

[14] 周衍柏. 理论力学教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.

(上接第 2384 页)

[7] Kapoor A, Simaan N, Taylor R H. Suturing in confined spaces: constrained motion control of a hybrid 8-DoF robot [A]. Advanced Robotics, 2005. ICAR05. Proceedings., 12th International Conference on. IEEE [C]. 2005, 21 (19): 452-459.

[8] 唐志勇, 谭振中, 裴忠才. 下肢外骨骼机器人动力学分析与设计 [J]. 系统仿真学报, 2013, 21 (6): 457-463.

[9] Andreasen D S, Alien S K, Backus D A. Exoskeleton with EMG based active assistance for rehabilitation [A]. Rehabilitation Robotics, 2005. ICORR 2005. 9th International Conference on. IEEE [C]. 2005, 23 (12): 333-336.

[10] Wearable robots: biomechatronic exoskeletons [M]. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008.

[11] Yu W, Rosen J, Li X. PID admittance control for an upper limb exoskeleton [A]. American Control Conference [C]. 2011.

IEEE, 2011, 42 (27): 1124-1129.

[12] Craig J J. Introduction to robotics: mechanics and control [M]. Upper Saddle River, NJ, USA.: Pearson/Prentice Hall, 2005.

[13] 郑青山, 侯保林. 基础振动下两自由度机械臂的鲁棒控制 [J]. 机械制造与自动化, 2013, 21 (3): 155-157.

[14] Buss S R. Introduction to inverse kinematics with jacobian transpose, pseudoinverse and damped least squares methods [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 2004, (27) 17: 1-19.

[15] 李铁铮, 居鹤华. 基于栅格空间的移动机器人快速路径规划方法 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (1): 164-166.

[16] Bellmont Montoya J. Control of a robotic arm during a robotized flexible needle insertion in interventional radiology [J]. 2013, 43 (27): 1274-1281.