

风力发电机组独立变桨鲁棒自适应桨距角跟踪控制

崔双喜, 王维庆, 张强

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 在全面考虑风力发电机组桨叶所受各种载荷的情况下, 建立了含有时变不确定项、未知载荷干扰的桨叶动力学数学模型, 该模型精确描述了桨叶系统的非线性动力学行为。模型存在很多不确定时变参数和未知干扰项, 针对这一复杂多变的桨叶模型, 采用鲁棒自适应控制方法, 成功设计了独立桨距角跟踪控制器。利用李雅普诺夫(Lyapunov)稳定性理论, 证明了系统的稳定性。采用 Matlab/Simulink 仿真软件, 建立了风力机组桨叶动力学仿真模型。仿真结果表明, 所设计的桨叶桨距角控制器, 在系统参数和所受干扰完全未知、不确定且时变的情况下, 能够快速跟踪期望的桨距角, 表现出良好的鲁棒性。

关键词: 桨叶; 自适应; 桨距角; 跟踪控制; 稳定性

Robust adaptive blade pitch angle tracking control for wind turbines

CUI Shuangxi, WANG Weiqing, ZHANG Qiang

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

Abstract: In full consideration of wind turbine blades suffered various loads, blade dynamics mathematical model containing time-varying uncertain terms and unknown load interference are established, the model accurately describes the nonlinear dynamic behavior of blade system. Blade system model is complex and there are many time-varying uncertainties parameter, for this complex and changeable blade system model, by use of robust adaptive control methods, an independent pitch angle tracking controller is designed. Lyapunov stability theory proves the stability of the system. Using Matlab/Simulink simulation software, wind turbines blade dynamics simulation model are built. Simulation results show that the designed blade pitch angle controller, when the system parameters and suffered interference are completely unknown uncertain and time-varying, are able to fast track the expected pitch angle, and controller shows good robustness.

This work is supported by Natural Science Foundation of Xinjiang (No. 2014211A007).

Key words: blade; adaptive; pitch angle; tracking control; stability

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0052-06

0 引言

大型风电机组是复杂快变的多变量非线性动力学系统, 具有不确定性和多干扰性, 且风能具有能量密度低、随机性和不稳定性等特点。因此, 先进控制策略是机组安全高效运行的保证。

独立变桨系统是大型风电机组核心部分之一, 通常采用电动独立变桨系统, 通过独立的电控调桨机构, 调节各桨叶桨距角, 实现合理的载荷抑

制和功率控制^[1-7]。建立在系统准确数学模型基础之上的独立变桨距控制, 国内外研究文献较多。但变桨系统动力学模型复杂, 存在很多不确定性, 显示较强的非线性动力学行为。并且在运行过程中, 模型的参数有可能发生时变。面对复杂多变的桨叶系统, 有采用现代控制算法的^[8-10], 如利用模糊、神经网络等控制方法, 以解决风电系统建模不确定及随机扰动问题。用变桨模糊控制, 系统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, 但其可以充分利用观测数据, 在线学习修正参数, 实现神经网络自适应控

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2014211A007)

制。针对复杂快变的非线性动力学桨叶系统, 也有文献利用变结构、自寻优等功能, 来克服系统参数不确定及非线性时变等因素^[11-12], 以实现快速高精度的控制目的。

针对具有时变不确定参数和未知载荷干扰的桨叶系统, 本文建立了桨叶动力学数学模型。在桨叶模型参数未知不确定、受到未知载荷干扰的情况下, 采用鲁棒自适应控制方法, 设计了独立桨距角跟踪控制器。通过选取李雅普诺夫函数, 证明了控制系统的稳定性。仿真结果验证了控制器的正确性和有效性, 在复杂的桨叶系统中, 实现了控制器的良好鲁棒控制效果。

1 桨叶动力学建模

风力发电机组单片桨叶变桨机构机械示意图如图 1 所示。图中 θ_i 是第 i 片桨叶桨距角; T_{dri} 是第 i 片桨叶变桨调节驱动力矩; T_{twi} 是第 i 片桨叶所受的扭转力矩和空气动力产生的扰动力矩的总和, 无法精确建模。在本文的控制器设计中, 勿需知道这些载荷数学模型, 仅将其视为桨叶所受的不确定载荷扰动项, 包括桨叶所受推力矩、桨叶升力产生的升力矩、桨叶扭转复位力矩、桨叶由转子倾斜造成的倾斜力矩、桨叶弯曲造成的弯曲力矩以及桨叶承受的因空气动力造成的不平衡载荷, 包括确定性载荷(由风切变和塔影等确定性因素造成)和随机扰动(由紊流等因素造成)。

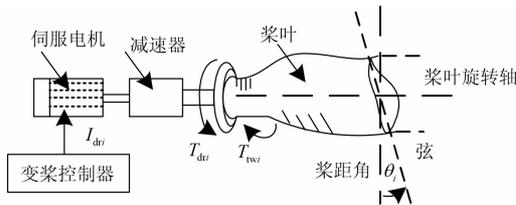


图 1 第 i 片桨叶变桨机构机械示意图

Fig. 1 Pitch mechanism schematic diagram for the i -th piece blade

由动量矩定理的微分形式^[13], 对第 i 片桨叶, 可得桨叶动力学方程, 如式(1)所示。

$$\frac{d(J_i \frac{d\theta_i}{dt})}{dt} = T_{dri} - \frac{d((k_{Di} + k_{Fi})\theta_i)}{dt} - T_{twi} \quad (1)$$

将式(1)写为

$$J_i \ddot{\theta}_i + (\frac{dJ_i}{dt} + k_{Di} + k_{Fi}) \dot{\theta}_i + (\frac{dk_{Di}}{dt} + \frac{dk_{Fi}}{dt}) \theta_i + T_{twi} = T_{dri} \quad (2)$$

式中: J_i 是第 i 片桨叶绕其轴的转动惯量; k_{Di} 是第 i 片桨叶的阻尼系数; k_{Fi} 是第 i 片桨叶轴承的摩擦

系数。桨叶系统在运行调节过程中, 这些参数可能发生时变, 在本文控制器设计中, 它们被视为未知不确定参数。

桨叶桨距角调节系统示意图如图 2 所示。桨距角调节的力矩可以是电机驱动或液压驱动。

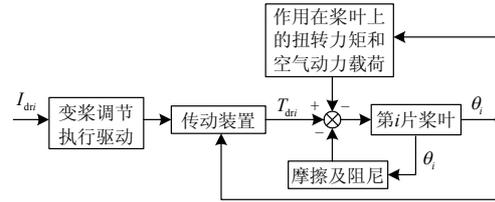


图 2 第 i 片桨叶桨距调节系统示意图

Fig. 2 Pitch adjustment system schematic diagram for the i -th piece blade

在图 2 中, I_{dri} 表示调节第 i 片桨叶桨距角到需要的角度时, 所需驱动电机电流的大小(考虑变桨执行机构为电机)。电机电流和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, $T_{dri} = C_{Ti} I_{dri}$, 其中 C_{Ti} 表示第 i 片桨叶电机驱动电流和桨叶驱动力矩之间的一个机电变换常数。

将式(2)写成式(3)矩阵方程的形式, 式(3)即为建立的三桨叶水平轴风力机桨叶系统动力学模型。

$$J(\theta)\ddot{\theta} + D(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + Q(\theta, \dot{\theta})\theta + T_{tw}(\theta, \dot{\theta}) = T_{dr} = C_T u \quad (3)$$

式中: $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T \in \mathbf{R}^3$; $u = [u_1, u_2, u_3]^T = [I_{dri1}, I_{dri2}, I_{dri3}]^T \in \mathbf{R}^3$; $T_{tw}(\theta, \dot{\theta}) = [T_{tw1}, T_{tw2}, T_{tw3}]^T \in \mathbf{R}^3$; $T_{dr} = [T_{dr1}, T_{dr2}, T_{dr3}]^T \in \mathbf{R}^3$; $J(\theta) = \text{diag}[J_1, J_2, J_3] \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$; $D(\theta, \dot{\theta}) = \text{diag}[D_1, D_2, D_3] \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 。

其中: $D_i = \frac{dJ_i}{dt} + k_{Di} + k_{Fi}, i = 1, 2, 3$; $Q(\theta, \dot{\theta}) = \text{diag}[Q_1, Q_2, Q_3] \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$, $Q_i = \frac{dk_{Di}}{dt} + \frac{dk_{Fi}}{dt}, i = 1, 2, 3$; $C_T = \text{diag}[C_{T1}, C_{T2}, C_{T3}] \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 是正定常对角矩阵。

需要指出的是, 在建立的桨叶动力学数学模型式(3)中, $J(\cdot)$ 、 $D(\cdot)$ 、 $Q(\cdot)$ 和 $T_{tw}(\cdot)$ 是未知且具有时变的不确定项。

2 自适应独立变桨距控制器设计

式(3)所建立的桨叶动力学数学模型, 考虑了作用在桨叶上的各种力矩(虽然它们是未知不确定的), 无疑更精确描述了独立变桨系统的非线性动力学行为, 但模型存在很多不确定项和未知载荷干扰, 给控制器设计带来了困难和挑战。由于鲁棒自适应的控制方法对处理不确定性有较大的优势^[14-15],

因此本文采用自适应控制方法,进行独立变桨控制器设计。

对风电机组独立变桨控制器而言,变桨控制的目标是:让三个桨叶的桨距角 θ ,分别独立跟踪各自桨叶的期望桨距角 $\theta^* = (\theta_1^*, \theta_2^*, \theta_3^*)^T \in \mathbf{R}^3$ 。为便于控制器设计,首先引入复合误差向量 $\mathbf{s} \in \mathbf{R}^3$

$$\mathbf{s} = \dot{\mathbf{e}} + \gamma \mathbf{e}, \quad \gamma > 0 \quad (4)$$

式中: $\mathbf{e} = \theta - \theta^*$; $\dot{\mathbf{e}} = \dot{\theta} - \dot{\theta}^*$; γ 是设计时选取的控制参数。

对 \mathbf{s} 求一阶导数可得

$$\dot{\mathbf{s}} = \ddot{\theta} - \ddot{\theta}^* + \gamma \dot{\mathbf{e}} \quad (5)$$

由式(3)和式(5)可导出式(6)

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot) \dot{\mathbf{s}} &= \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot) \ddot{\theta} - \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot) \ddot{\theta}^* + \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot) \gamma \dot{\mathbf{e}} = \\ &= \mathbf{u} - \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{D}(\cdot) \dot{\theta} - \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{Q}(\cdot) \theta - \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{T}_{\text{tw}}(\cdot) - \\ &= \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot) \ddot{\theta}^* + \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot) \gamma \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{u} + \ell(\cdot) \end{aligned} \quad (6)$$

式中,

$$\ell(\cdot) = -\mathbf{C}_T^{-1} [\mathbf{D}(\cdot) \dot{\theta} + \mathbf{Q}(\cdot) \theta + \mathbf{T}_{\text{tw}}(\cdot) + \mathbf{J}(\cdot) (\ddot{\theta}^* - \gamma \dot{\mathbf{e}})] \quad (7)$$

将 $\dot{\mathbf{e}} = \dot{\theta} - \dot{\theta}^*$ 代入式(7),再利用矩阵范数三角不等式,容易推得

$$\|\ell(\cdot)\| \leq \rho \varphi(\theta, \dot{\theta}) \quad (8)$$

式中: $\varphi(\cdot) = (\gamma + 1) \|\dot{\theta}\| + \|\theta\| + 1$; $\rho = \max \{ \|\mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{D}(\cdot)\|, \|\mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{Q}(\cdot)\|, \|\mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot)\|, l_0 \}$, $l_0 = \|\mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{T}_{\text{tw}}(\cdot)\| + \|\mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot)\| \cdot (\|\ddot{\theta}^*\| + \|\gamma \dot{\theta}^*\|)$

接下来定义一个新的变量:

$$\mathbf{H} = \ell(\cdot) + \frac{1}{2} \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot) \mathbf{s} \quad (9)$$

实际的风力机在正常运行时, $\mathbf{J}(\cdot)$ 的变化不可能无限快速,因此有 $\|\mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot)\| \leq d_0 < \infty$ 。结合式(8)可得

$$\begin{aligned} \|\mathbf{H}\| &\leq \|\ell(\cdot)\| + \frac{1}{2} \|\mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot)\| \|\mathbf{s}\| \leq \rho \varphi(\cdot) + \frac{d_0}{2} \|\mathbf{s}\| \leq \\ &= \max \left\{ \rho, \frac{d_0}{2} \right\} (\varphi(\cdot) + \|\mathbf{s}\|) = a \psi \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\psi = \varphi(\cdot) + \|\mathbf{s}\|$; $a = \max \left\{ \rho, \frac{d_0}{2} \right\}$ 。

变量 a 未知,实际上也不能够得到,为此可用自适应方法来处理,令 \hat{a} 是 a 的估计值,估计误差为 $\tilde{a} = a - \hat{a}$ 。

选取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot) \mathbf{s} + \frac{1}{2} \tilde{a}^2 \quad (11)$$

对其求导,结合式(6)可得

$$\dot{V} = \mathbf{s}^T \mathbf{C}_T^{-1} \mathbf{J}(\cdot) \dot{\mathbf{s}} + \frac{1}{2} \mathbf{s}^T \mathbf{C}_T^{-1} \dot{\mathbf{J}}(\cdot) \mathbf{s} + \tilde{a}(-\dot{\hat{a}}) = \quad (12)$$

$$\mathbf{s}^T (\mathbf{u} + \ell(\cdot) + \frac{1}{2} \mathbf{C}_T^{-1} \dot{\mathbf{J}}(\cdot) \mathbf{s}) + \tilde{a}(-\dot{\hat{a}})$$

若鲁棒自适应独立变桨跟踪控制器设计为

$$\mathbf{u} = -(k_{\text{adp}} + k_0) \mathbf{s} = -\frac{\psi \hat{a} \mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} - k_0 \mathbf{s} \quad (13)$$

式中, $k_{\text{adp}} = \psi \hat{a} / \|\mathbf{s}\|$, $k_0 > 0$ 为控制参数。

由式(9)、式(10)、式(13),则式(12)变为

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{s}^T \left(-\frac{\psi \hat{a} \mathbf{s}}{\|\mathbf{s}\|} - k_0 \mathbf{s} \right) + \mathbf{s}^T \mathbf{H} + \tilde{a}(-\dot{\hat{a}}) \leq \\ &= -\|\mathbf{s}\| \psi \hat{a} - k_0 \|\mathbf{s}\|^2 + \|\mathbf{s}\| \|\mathbf{H}\| + \tilde{a}(-\dot{\hat{a}}) \leq \\ &= -\|\mathbf{s}\| \psi \hat{a} - k_0 \|\mathbf{s}\|^2 + \|\mathbf{s}\| a \psi + \tilde{a}(-\dot{\hat{a}}) = \\ &= \tilde{a} \|\mathbf{s}\| \psi - k_0 \|\mathbf{s}\|^2 + \tilde{a}(-\dot{\hat{a}}) \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可知,若待估参数 \hat{a} 的自适应更新率 $\dot{\hat{a}}$ 取为

$$\dot{\hat{a}} = \|\mathbf{s}\| \psi \quad (15)$$

则, $\dot{V} = \|\mathbf{s}\| \psi \tilde{a} + \tilde{a}(-\dot{\hat{a}}) - k_0 \|\mathbf{s}\|^2 = -k_0 \|\mathbf{s}\|^2 \leq 0$ (16)

由于 $\mathbf{s} \in \ell_\infty$, $\hat{a} \in \ell_\infty$, 进而易得 $\mathbf{u} \in \ell_\infty$, 根据式(13),有 $\dot{\mathbf{s}} \in \ell_\infty$, 因此 \mathbf{s} 一致连续。注意到 $\int_0^t \|\mathbf{s}\|^2 dt < \infty$, 由此可知, $\mathbf{s} \in \ell_\infty \cap \ell_2$ 。根据 Barbalat 引理^[16],可推出 $\mathbf{s} \rightarrow 0$ (当 $t \rightarrow \infty$)。进而得到 $\dot{\mathbf{e}} \rightarrow 0$ (当 $t \rightarrow \infty$)且 $\mathbf{e} \rightarrow 0$ (当 $t \rightarrow \infty$)。

综上所述,若鲁棒自适应独立变桨跟踪控制器、自适应参数更新率分别采用式(13)和式(15)的形式,则风力机桨叶桨距角跟踪误差能够收敛至零,且控制系统一致渐进稳定。

从提出的控制策略式(13)和式(15),还可以看出,所设计的控制器仅计算系统的核心信息 $\psi = \varphi(\cdot) + \|\mathbf{s}\|$,并未用到风力发电机变桨系统模型中的系统参数。在系统参数未知时变不确定,且受到未知载荷扰动的情况下,实现了控制目标。

注意到设计的控制器式(13)中包含有一项 $\psi \hat{a} \mathbf{s} / \|\mathbf{s}\|$,当 \mathbf{s} 接近零点时,可能导致控制器工作点的不连续,为保证控制性能的平稳和有界性,式(13)的控制器被修改为

$$\mathbf{u} = -\psi^2 \hat{a} \mathbf{s} / (\psi \|\mathbf{s}\| + \varepsilon) - k_0 \mathbf{s} \quad (17)$$

式中, ε 是一个极小的正数。

本文设计了风电机组独立变桨鲁棒自适应桨距角跟踪控制器,系统框图如图3所示。

3 控制器仿真验证

为验证所设计桨距角跟踪控制器的有效性和

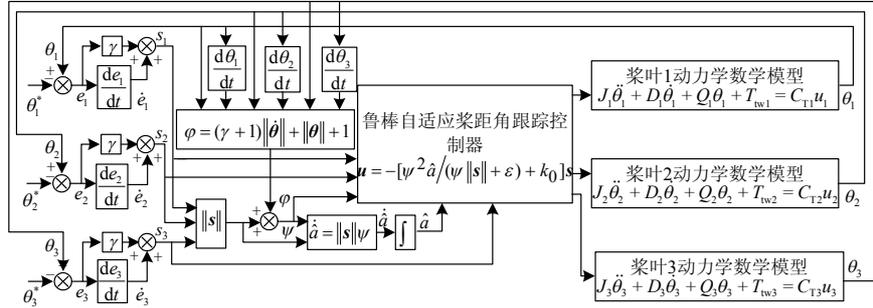


图 3 鲁棒自适应桨距角跟踪控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of robust adaptive pitch angle tracking control system

可行性, 采用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建桨叶仿真模型, 风力发电机组为三桨叶水平轴变速恒频型风力发电机。在仿真建模时, 桨叶参数不确定性项采用如下的表达式来模拟(这些数据并未用于控制器设计)。

$$J(\cdot) = \text{diag}[\sin(0.8\theta_1 t) + 3, \sin(0.8\theta_2 t) + 3, \sin(0.8\theta_3 t) + 3]$$

$$D(\cdot) = \text{diag}[\cos(0.8\theta_1 t + \dot{\theta}_1) + 3, \cos(0.8\theta_2 t + \dot{\theta}_2) + 3, \cos(0.8\theta_3 t + \dot{\theta}_3) + 3]$$

$$Q(\cdot) = \text{diag}[\cos(0.8\theta_1 t + \dot{\theta}_1) / 3 + 3, \cos(0.8\theta_2 t + \dot{\theta}_2) / 3 + 3, \cos(0.8\theta_3 t + \dot{\theta}_3) / 3 + 3]$$

仿真建模时, 不确定载荷主要考虑气动载荷(相对于气动载荷, 重力载荷和惯性载荷要小得多), 包括风切变和塔影引起的载荷和随机扰动。由于风切变和塔影所造成的载荷具有周期性, 使用正弦信号来模拟, 而随机扰动用白噪声模拟。因此, 在仿真建模时, 未知载荷干扰不确定性项选择为(这些数据也未用于控制器设计)。

$$T_{tw}(\cdot) = [0.8\cos(0.8\theta_1 t) + 3\sin(0.8\dot{\theta}_1 t) + \sin(0.08t) + \text{whitenoise}, \\ 0.8\cos(0.8\theta_2 t) + 3\sin(0.8\dot{\theta}_2 t) + \sin(0.08(t + 2\pi/3)) + \text{whitenoise}, \\ 0.8\cos(0.8\theta_3 t) + 3\sin(0.8\dot{\theta}_3 t) + \sin(0.08(t + 4\pi/3)) + \text{whitenoise}]^T$$

其他控制参数选择: $\gamma = 2$, $k_0 = 350$, $\varepsilon = 0.000001$ 。

仿真时, 假设风速的变化, 为达到控制目标三个桨叶期望桨距角分别按图 4 所示来调节桨距角。

在独立变桨距鲁棒自适应跟踪控制下, 三个桨叶的桨距角跟踪性能曲线如图 5 所示, 跟踪误差曲线如图 6 所示。在图 5 中, 从三个桨叶桨距角跟踪性能对比来看, 所设计的控制器, 均能够使三个桨叶实现快速的独立桨距角跟踪, 桨距角跟踪超调量

几乎为零。由图 6 可知, 三个桨叶的跟踪误差, 在桨叶期望桨距角阶跃突变处, 期望阶跃幅度越大, 则跟踪误差越大, 随后控制器的跟踪误差快速趋于零, 表现出较快的响应速度。对实际大型风力机而言, 桨叶重达数吨, 考虑到惯性以及调节器的疲劳,

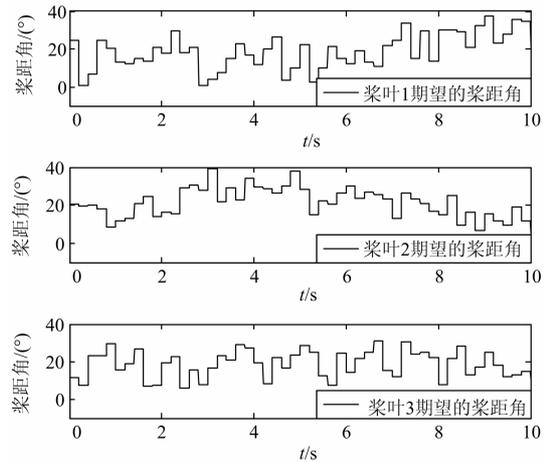


图 4 三个桨叶期望的桨距角

Fig. 4 Expected pitch angles of three blades

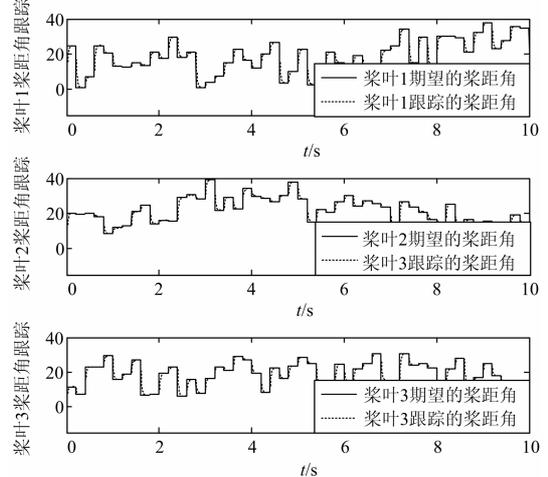


图 5 三个桨叶的桨距角跟踪性能曲线

Fig. 5 Tracking performance curves for the blades

桨距角的调节速率是有限制的，桨距角不可能突变调节，在期望桨距角阶跃处，存在跟踪误差与实际是相符的。

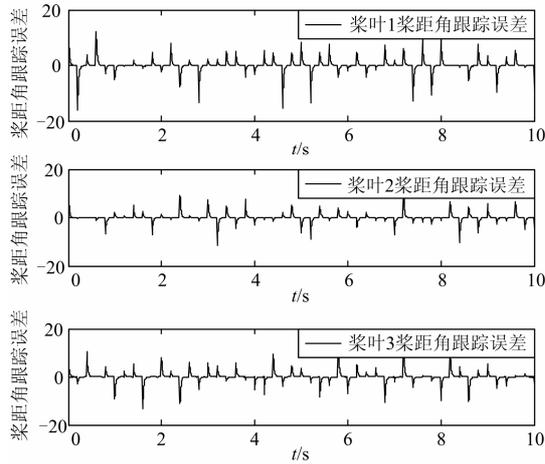


图 6 桨距角跟踪误差曲线
Fig. 6 Pitch angles tracking error curves

在独立变桨距鲁棒自适应跟踪控制下，自适应参数仿真曲线如图 7 所示，由图可看出，自适应估计参数有界。

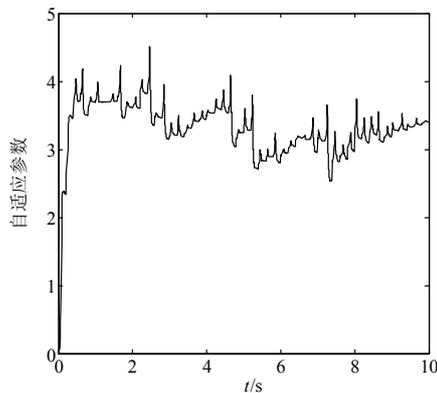


图 7 参数自适应估值曲线
Fig. 7 Parameter adaptive valuation curve

由以上分析可见，所设计的控制器，在无须知道系统时变不确定参数、且受到未知不确定载荷干扰的情况下，能够在复杂的桨叶非线性模型中，实现控制器的良好鲁棒控制效果，并且考虑风力发电机组所受不平衡载荷的影响，对风力发电机组的安全稳定运行，也具有一定的参考价值。

4 结论

实际的风力发电机组桨叶系统，包含未建模动态，在运行过程中又存在系统参数的时变不确定性及干扰。本文在充分考虑以上影响的情况下，设计了风力机桨叶的独立变桨鲁棒自适应桨距角跟踪

控制器。通过建模仿真，证实了鲁棒自适应独立变桨控制器设计方法的可行性和有效性。所设计的鲁棒自适应独立桨距角跟踪控制器，可以保证控制系统的性能，达到桨叶桨距角的快速跟踪，并使得自适应参数一致有界，对系统中的不确定性和不平衡载荷及干扰影响具有很好的适应能力。

参考文献

[1] 王晓兰, 李家亮, 马呈霞. 基于功率预测的变速变桨距风电系统的优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 88-92.
WANG Xiaolan, LI Jialiang, MA Chengxia. Optimization control of variable-speed variable-pitch wind power generation system based on power prediction[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 88-92.

[2] 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.
JIN Xin, ZHONG Xiang, XIE Shuangyi, et al. Load reduction for large-scale wind turbine based on LQR torque control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 93-98.

[3] 何玉林, 刘军, 李俊, 等. 变速变桨距风力发电机组控制策略优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 55-60.
HE Yulin, LIU Jun, LI Jun, et al. Pitch control and load optimization of variable speed variable pitch wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 55-60.

[4] 何玉林, 苏东旭, 黄帅, 等. 变速变桨风力发电机组的桨距控制及载荷优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 95-100.
HE Yulin, SU Dongxu, HUANG Shuai, et al. Pitch control and load optimization of variable speed variable pitch wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 95-100.

[5] 何玉林, 黄帅, 杜静. 基于前馈的风力发电机组变桨距控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 15-20.
HE Yulin, HUANG Shuai, DU Jing. Variable pitch control of wind turbine based on feed forward[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 15-20.

[6] 崔双喜, 王维庆, 张新燕. 大型风力发电机组无模型独立变桨载荷控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 54-59.
CUI Shuangxi, WANG Weiqing, ZHANG Xinyan. Model free and individual pitch load control for large-scale wind turbine[J]. Power System Protection and

- Control, 2013, 41(5): 54-59.
- [7] 肖帅, 杨耕, 耿华. 抑制载荷的大型风电机组滑模变桨距控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 145-150.
XIAO Shuai, YANG Geng, GENG Hua. Sliding-mode pitch control strategy for large wind turbines to reduce loads[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 145-150.
- [8] 韦徵, 陈冉, 陈家伟, 等. 基于功率变化和模糊控制的风力发电机组变速变桨距控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 121-126.
WEI Zheng, CHEN Ran, CHEN Jiawei, et al. Wind turbine-generator unit variable-speed pitch control based on judgment of power changes and fuzzy control[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 121-126.
- [9] 窦真兰, 施刚, 曹云峰, 等. 减少风力机转矩波动的异步变桨控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 236-245.
DOU Zhenlan, SHI Gang, CAO Yunfeng, et al. Individual pitch control for reducing wind turbine torque fluctuation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 236-245.
- [10] 秦斌, 周浩, 杜康, 等. 基于RBF网络的风电机组变桨距滑模控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 37-41.
QIN Bin, ZHOU Hao, DU Kang, et al. Sliding mode control of pitch angle based on RBF neural-network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 37-41.
- [11] 窦真兰, 王晗, 凌志斌, 等. 电动变桨距控制系统设计与实现[J]. 电力电子技术, 2011, 45(7): 1-4.
DOU Zhenlan, WANG Han, LING Zhibin, et al. Design and realization of electric pitch control system[J]. Power Electronics, 2011, 45(7): 1-4.
- [12] 何真, 龚春英. 变速风力发电机组的自适应滑模变桨距控制[J]. 计算机仿真, 2013, 30(6): 121-124.
HE Zhen, GONG Chunying. Adaptive sliding mode pitch control of variable-speed wind turbines[J]. Computer Simulation, 2013, 30(6): 121-124.
- [13] 周衍柏. 理论力学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [14] 王永富, 王殿辉, 柴天佑. 基于状态估计的摩擦模糊建模与鲁棒自适应控制[J]. 自动化学报, 2011, 37(2): 245-251.
WANG Yongfu, WANG Dianhui, CHAI Tianyou. State estimate-based friction fuzzy modeling and robust adaptive control[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(2): 245-251.
- [15] 王耀南, 陈维. 无速度传感器的感应电机神经网络鲁棒自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 92-98.
WANG Yaonan, CHEN Wei. Speed sensorless network robust adaptive control for induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(33): 92-98.
- [16] 闵颖颖, 刘允刚. Barbalat引理及其在系统稳定性分析中的应用[J]. 山东大学学报: 工学版, 2007, 37(1): 51-55, 114.
MIN Yingying, LIU Yungang. Barbalat Lemma and its application in analysis of system stability[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2007, 37(1): 51-55, 114.

收稿日期: 2014-06-08; 修回日期: 2014-08-26

作者简介:

崔双喜(1970-), 男, 博士研究生, 研究方向为风力发电系统建模、控制及仿真; E-mail: ysucsx@126.com

王维庆(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为风能、太阳能利用控制技术;

张强(1976-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制。

(编辑 姜新丽)