

# 基于扰动观测器的 分数阶终端滑模电液变桨控制方法

王 慧, 郭燕冰, 卢胜东, 赵国超, 董正涛  
(辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:** 为改善风电机组电液变桨系统的控制性能, 文章提出了基于扰动观测器的分数阶终端滑模控制方法。建立风电机组电液变桨系统数学模型, 利用滑模状态扰动观测器(SMSPO)对变桨系统参数的不确定性和未知扰动进行实时补偿。采用分数阶微积分理论设计终端滑模控制器的滑模面, 在保证有限时间收敛的同时, 改善了滑模控制自身抖动。利用 Simulink 进行试验验证, 结果表明, 该方法增强了变桨系统的抗干扰能力, 削弱了系统的抖动, 提高了桨距角的跟踪精度和变桨系统的稳定性。

**关键词:** 风电机组; 变桨系统; 分数阶微积分理论; 滑模控制; 扰动观测器

**中图分类号:** TK83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)04-0493-06

## 0 引言

目前, 大型风电机组普遍采用变桨距技术, 相对于定桨距, 变桨距具有更好的启动和制动性能, 风能利用系数更高, 当风速高于额定风速时也能输出稳定功率。传统的液压变桨距和电动变桨距均有自身的局限性, 本文采用伺服电机驱动泵控液压马达的电液变桨距方案。该方案既具有电动变桨距的控制灵活、结构紧凑, 又具有液压变桨距的响应快、可实现大扭矩变桨, 同时系统采用闭环回路, 功耗低、节能效果明显。

电液变桨系统具有典型的参数不确定性和非线性, 同时风能的随机性和大扭矩液压马达的“低速爬行”问题均会影响桨距角的跟踪精度和控制的平稳性。针对变桨系统, 李昊<sup>[1]</sup>采用模糊控制, 虽然对扰动具有一定的抑制效果, 但面对连续未知扰动时, 控制效果并不理想。任海军<sup>[2]</sup>采用神经网络和自适应估计对 PID 参数实现在线优化, 其效果明显优于模糊控制。殷秀兴<sup>[3]</sup>提出了恒压网络电液变量马达的风力机变桨距控制技术, 该方式变桨效率较高, 功率和转矩控制的准确性较好。Yilin Hu<sup>[4]</sup>将扰动观测器引入到滑模控制中, 提高了复杂环境下系统的鲁棒性。王兴<sup>[5]</sup>采用分数阶滑模控制器, 不仅提高了变桨控制系统的性能, 还改善了滑模自身的抖动。

为了进一步改善电液变桨系统的控制性能, 本文提出了基于滑模状态扰动观测器(SMSPO)的分数阶终端滑模控制。设计 SMSPO, 对系统参数的不确定性和未知扰动进行在线估计, 实现对扰动的补偿。将分数阶微积分理论用于改进传统的整数阶滑模面, 从而得到参数选择更为灵活的分数阶终端滑模面。利用 Simulink 搭建电液变桨系统仿真模型, 通过仿真对比试验证明该方法的有效性和优越性。

## 1 电液变桨系统模型

### 1.1 电液变桨系统结构

当风速高于额定风速且小于切出风速时, 变桨系统开始工作, 通过改变桨叶角度来调节风能利用系数, 从而确保风电机组具有稳定的输出功率。本文采用的电液变桨控制系统如图 1 所示。

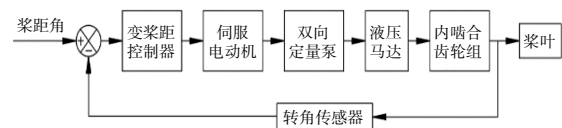


图 1 电液变桨系统结构框图  
Fig.1 Structure block diagram of electro-hydraulic pitch system

系统的执行机构主要是伺服电机驱动一个由双向定量泵和液压马达组成的闭式液压回路。液压马达输入转矩通过内啮合齿轮组带动桨叶转

收稿日期: 2022-06-21。

基金项目: 辽宁工程技术大学博士启动基金(21-1024)。

作者简介: 王 慧(1960-), 男, 博士, 教授, 研究方向为机电液一体化系统仿真与应用。E-mail: wanghui9955@126.com

通信作者: 郭燕冰(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为机电液系统仿真。E-mail: guoyb1826146703@126.com

动,桨叶转动角度通过转角传感器反馈给控制器,从而实现闭环风电机组桨距角的跟踪控制。

### 1.2 电液变桨系统数学模型

结合图 1 建立的电液变桨系统动力学方程为

$$\begin{cases} \ddot{\gamma} = \frac{B_m}{J_i} \dot{\gamma} + \frac{k_i D_m}{J_i} P_L - \frac{k_i T_L}{J_i} \\ \dot{P}_L = -\frac{4\beta_e D_m}{V_i k_i} \dot{\gamma} - \frac{4\beta_e C_i}{V_i} P_L + \frac{4\beta_e D_i k_m}{V_i} u \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\gamma$  为桨叶转角; $k_m$  为伺服电机增益; $u$  为伺服电机的输入电压; $D_b$  为泵的排量; $C_i$  为总泄漏系数; $P_L$  为负载压力; $D_m$  为液压马达排量; $V_i$  为腔室的总容积; $\beta_e$  为有效体积弹性模量; $J_i$  为作用在液压马达轴上的总惯量; $B_m$  为粘性阻尼系数; $T_L$  为未建模摩擦力和负载扰动。

电液变桨系统为三阶系统,对于高阶系统,扰动观测器和终端滑模控制器的设计比较复杂,参数选取与调试也更加繁琐,为了简化观测器和控制器的设计过程,便于在实际工程应用和计算,本文对电液变桨系统动力学方程进行降阶简化。对于实际的电液变桨系统来说, $V_i/4\beta_e$  远远小于零,定义  $\zeta = V_i/4\beta_e$ ,文献[6]利用奇异扰动理论证明了令  $\zeta=0$  实现系统模型降阶是合理的。定义状态变量  $[x_1, x_2]^T = [\gamma, \dot{\gamma}]^T$ ,利用奇异扰动理论降阶后的系统状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = (b_1 + \Delta b_1)x_2 + (b_2 + \Delta b_2)u + d \\ Y = x_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $b_1 = -\frac{D_m^2 + C_i B_m}{J_i C_i}$ ;  $b_2 = \frac{k_m k_i D_m D_p}{J_i C_i}$ ;  $d = -\frac{k_i}{J_i} T_L$ ;  $\Delta b_1, \Delta b_2$  均为系统的参数不确定性。

将系统的参数不确定性、未建模摩擦力和负载扰动聚合为一个总扰动  $\psi(\cdot)$ ,即  $\psi(\cdot) = \psi(x_2, u, d) = \Delta b_1 x_2 + \Delta b_2 u + d$ ,则上式中  $\dot{x}_2$  可以改为  $\dot{x}_2 = b_1 x_2 + b_2 u + \psi(x_2, u, d)$ 。

## 2 SMSPO 设计

本文利用 SMSPO 对  $\psi(\cdot)$  进行估计,得到估计值  $\hat{\psi}(\cdot)$ 。SMSPO 具有类似滑模控制器的潜在优势,对于系统的参数不确定性和未知扰动具有很好的鲁棒性,同时观测器只需一个可测状态量即可实现对系统状态量和扰动的估计,便于在实

际工程中应用<sup>[7]</sup>。由于事先对  $\psi(\cdot)$  未知,为便于扰动观测器的设计又不失一般性,假设  $|\Delta b_2/b_2| < 1$ ,确保有界的控制量  $u$  可以抵消扰动,假设  $\psi(\cdot)$  和总扰动的导数  $\dot{\psi}(\cdot)$  在定义域内满足局部 Lipschitz 条件,确保原点是开环系统的平衡点。

针对式(2),定义桨距角估计误差为  $\tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1$ ,  $\hat{x}_1$  为  $x_1$  的估计值。设计 SMSPO 为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + \delta_1 \tilde{x}_1 + v_1 \text{sat}(\tilde{x}_1, \Delta_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{\psi}(\cdot) + \delta_2 \tilde{x}_1 + v_2 \text{sat}(\tilde{x}_1, \Delta_1) + b_1 \hat{x}_2 + b_2 u \\ \dot{\hat{\psi}}(\cdot) = \delta_3 \tilde{x}_1 + v_3 \text{sat}(\tilde{x}_1, \Delta_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\delta_i$  为观测器增益; $v_i$  为滑模面增益,其中  $i = 1, 2, 3$ ;  $\text{sat}(\cdot)$  为饱和函数; $\Delta_1$  为边界层厚度。

为了保证设计的 SMSPO 是稳定的,同时便于参数选取,根据文献[7], $\delta_i$  和  $v_i$  取值应满足如下条件:

①  $\delta_i$  的取值应满足使多项式  $s^3 + \delta_1 s^2 + \delta_2 s + \delta_3 = (s + \lambda_\delta)^3 = 0$  的极点位于复平面的左半平面上  $-\lambda_\delta$ ;

②  $v_i$  的取值满足  $v_i \geq \left| \tilde{x}_2 \right|_{\max}$ ,同时  $v_i$  满足使多项式  $s^2 + (v_2/v_1)s + (v_3/v_1)s = (s + \lambda_v)^3 = 0$  的极点位于复平面的左半平面上  $-\lambda_v$ 。

根据条件可以选取参数: $\delta_1 = 3\lambda_\delta, \delta_2 = 3\lambda_\delta^2, \delta_3 = \lambda_\delta^3, v_2 = 2\lambda_v v_1, v_3 = \lambda_v^2 v_1$ 。通过合理选取参数  $v_1, \lambda_\delta, \lambda_v$ ,便可实现对  $\psi(\cdot)$  的估计。

## 3 分数阶终端滑模控制器设计

传统的滑模控制自身具有抖动问题,所以本文将分数阶微积分理论引入到滑模控制器的设计中,利用分数阶微积分算子的记忆和遗传特性,来削弱系统的抖动。

### 3.1 分数阶微积分理论

分数阶微积分理论是从整数阶微积分理论发展而来的,是整数阶微积分理论的延伸,统一的分数阶微积分的算子可表示为

$${}_t^{\alpha} D_t^{\alpha} f(t) = \begin{cases} \frac{d^{\alpha}}{dt^{\alpha}} f(t), & \text{if } \alpha > 0 \\ f(t), & \text{if } \alpha = 0 \\ \int_{t_0}^t f(\tau) d\tau^{-\alpha}, & \text{if } \alpha < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $t$  为自变量; $t_0$  为自变量的下限; $\alpha$  为微积分算子的阶次,  $\alpha \in R$ 。

目前,常用的3种分数阶微积分定义有 Caputo 型、G-L 型和 R-L 型,其中 R-L 型应用较为广泛。对于给定函数  $f(t)$  的 R-L 分数阶微分和积分的定义<sup>[8]</sup>分别如式(5)、(6)所示。

$${}_t^{\alpha} D_t f(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \frac{d^m}{dt^m} \int_{t_0}^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1+\alpha-m}} d\tau \quad (5)$$

$${}_t^{\alpha} D_t^{-\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_{t_0}^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1-\alpha}} d\tau \quad (6)$$

式中:  $m=[\alpha]$ ;  $\Gamma(\cdot)$  为 Gamma 函数;  $\Gamma(\lambda) = \int_0^{\infty} e^{-t} \cdot t^{\lambda-1} dt$ 。

函数  $f(t)$  的  $\alpha$  阶 R-L 积分是有界的<sup>[9]</sup>,即:

$$\| {}_t^{\alpha} D_t^{-\alpha} f(t) \| \leq K \| f(t) \|_{\rho}, 1 \leq \rho \leq \infty \quad (7)$$

对于分数阶微积分的计算则采用改进 Oustaloup 滤波器近似法,后续系统模型的仿真采用文献[8]FOTF 工具箱中的 Fractional operator 模块。为了便于描述分数阶微积分算子,下文中的  ${}_t^{\alpha} D_t f(t)$  简化为  $D^{\alpha}$ 。

### 3.2 分数阶终端滑模控制器设计

分数阶终端滑模控制器是把分数阶微积分理论融入到终端滑模面的设计中,用分数阶微分算子替代整数阶微分算子,这样即能保证滑动阶段在有限时间内收敛,又能减弱系统抖动<sup>[10]</sup>。定义桨叶转角跟踪误差  $e = \gamma_d - \gamma$ ,  $\gamma_d$  为桨距角给定信号,滑模面的设计为

$$s = c_1 |e|^{\sigma} \text{sign}(e) + D^{\alpha} e \quad (8)$$

式中:  $0 < \sigma < 1$ ;  $c_1 > 0$ ;  $0 < \alpha < 1$ 。

对式(8)求导得:

$$\dot{s} = c_1 \sigma |e|^{\sigma-1} \dot{e} + D^{\alpha-1} [\ddot{\gamma}_d - b_1 x_2 - b_2 u - \dot{\psi}(\cdot)] \quad (9)$$

选择传统的趋近率  $\dot{s} = -\varepsilon \text{sign}(s)$ ,  $\varepsilon > 0$ , 由于式(9)中的  $\psi(\cdot)$  未知,采用  $\hat{\psi}(\cdot)$  最终得到基于 SMSPO 的分数阶终端滑模控制率为

$$u = \{ D^{1-\alpha} [c_1 \sigma |e|^{\sigma-1} \dot{e} + \varepsilon \text{sign}(s)] + \ddot{\gamma}_d - b_1 x_2 - \hat{\psi}(\cdot) \} / b_2 \quad (10)$$

定义估计误差  $\tilde{\psi}(\cdot) = \psi(\cdot) - \hat{\psi}(\cdot)$ 。选取 Lyapunov 函数为  $V = s^2/2$ , 求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{s} \dot{s} = s \{ c_1 \sigma |e|^{\sigma-1} \dot{e} + D^{\alpha-1} [\ddot{\gamma}_d - b_1 x_2 - b_2 u - \psi(\cdot)] \} \\ &= -s D^{\alpha-1} \tilde{\psi}(\cdot) - \varepsilon |s| \leq |s| [D^{\alpha-1} \tilde{\psi}(\cdot) - \varepsilon] \quad (11) \end{aligned}$$

当风速大于切出风速时,风电机组关桨并停止工作,理论上  $\psi(\cdot)$  有最大值,即  $\tilde{\psi}(\cdot)$  有界,

SMSPO 的估计值  $\hat{\psi}(\cdot)$  越精确,则  $\tilde{\psi}(\cdot)$  越小。由式(7)可知,  $D^{\alpha-1} \tilde{\psi}(\cdot)$  是有界的,只要满足  $\varepsilon > |D^{\alpha-1} \tilde{\psi}(\cdot)|$ , 便可得到  $\dot{V} \leq 0$ , 根据 Lyapunov 稳定理论,可以得到系统是渐进稳定的。

综上得到电液变桨系统的控制框图(图2)。

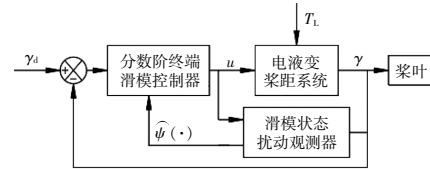


图2 电液变桨系统控制框图

Fig.2 Control block diagram of electro-hydraulic pitch system

## 4 仿真试验与结果分析

仿真试验选用的风电机组额定功率为 100 kW, 额定风速为 15 m/s。电液变桨系统参数如表 1 所示。利用 Simulink 软件搭建电液变桨控制系统仿真模型并进行对比试验。

表 1 电液变桨距系统参数

Table 1 Electro-hydraulic pitch system parameters

参数	数值
伺服电机增益 $k_m / (\text{rad/s}) \cdot \text{v}^{-1}$	3.2
双向定量泵排量 $D_t / \text{m}^3 \cdot \text{rad}^{-1}$	$1.6 \times 10^{-6}$
液压马达排量 $D_m / \text{m}^3 \cdot \text{rad}^{-1}$	$6.4 \times 10^{-4}$
液压马达轴上的总惯量 $J / \text{kg} \cdot \text{m}^2$	850
粘性阻尼系数 $B_m / \text{N} \cdot (\text{rad/s})^{-1}$	80
总泄露系数 $C_t / \text{m}^3 \cdot (\text{Pa} \cdot \text{s})^{-1}$	$8 \times 10^{-12}$
内啮合齿轮组传动比 $k_i$	0.125

为了验证分数阶终端滑模控制器(STSMC)的有效性,与终端滑模控制器(TSMC)和普通滑模控制器(SMC)进行比较。TSMC 和 SMC 的控制率分别为

$$u = [c_1 \sigma |e|^{\sigma-1} \dot{e} + \ddot{\gamma}_d - b_1 x_2 + \varepsilon \text{sign}(s)] / b_2 \quad (12)$$

$$u = [c_1 \dot{e} + \ddot{\gamma}_d - b_1 x_2 + \varepsilon \text{sign}(s)] / b_2 \quad (13)$$

为了更好地对比 3 种控制器的控制性能,选取每种控制器最佳的控制参数。TSMC 和 SMC 参数的选取尽量满足系统超调小、调整时间短,STSMC 参数的选取要保证控制器性能的同时尽量减小控制器输出的抖动<sup>[11,12]</sup>。经手动调试,STSMC 控制器参数  $c_1=15, \alpha=0.7, \sigma=0.4, \varepsilon=50$ ; TSMC 控制器参数  $c_1=10, \sigma=0.3, \varepsilon=50$ ; SMC 控制器参数  $c_1=3, \varepsilon=50$ 。采用阶跃信号验证控制器性

能,桨距角给定值为 30,假定总扰动为零,仿真结果如图 3,4 所示。

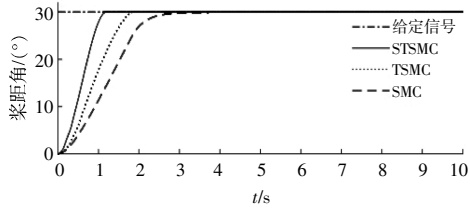


图 3 无扰动下 3 种控制器的桨距角输出曲线  
Fig.3 Pitch angle output curves of three controllers without perturbation

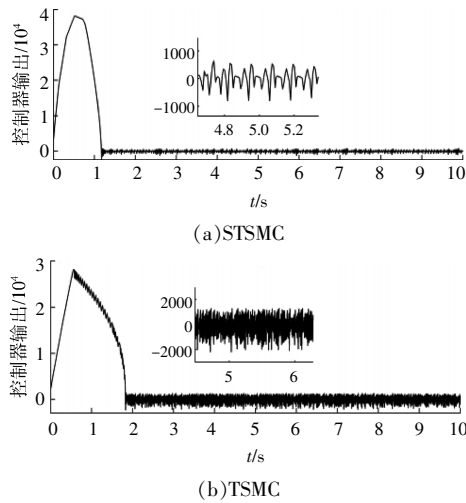


图 4 无扰动下 STSMC 和 TSMC 控制量  $u$  的输出曲线  
Fig.4 Output curves of STSMC and TSMC control variable  $u$  without perturbation

由图 3 可知:STSMC,TSMC,SMC 的调整时间分别为 1.2,1.8 s 和 3.5 s;相对于 SMC,TSMC 的调整时间减少了 48.6%,说明终端滑模控制可以有效提高系统的收敛速度;相对于 TSMC,STSMC 的调整时间仅减少了 33.3%。

由图 4 可知,相对于 TSMC,STSMC 在稳态的抖动幅度减少了 54.1%,所以分数终端滑模控制器不仅提高了系统的收敛速度,还改善了滑模控制器自身的抖动。

为了验证系统参数变化和扰动作用下 SMSPO 对总扰动的补偿效果,将带有观测器的 SMSPO-STSMC 和无观测器的 STSMC 进行对比。将参数  $B_m$  由 80 N/(rad/s) 增加到 200 N/(rad/s),将参数  $k_m$  由 3.2 (rad/s)/v 减小到 2.8 (rad/s)/v,在仿真时间为 5s 时,加入  $d=80\sin(0.3\pi t)-30\sin(0.2\pi t)$  的扰动信号<sup>[13]</sup>。SMSPO 的参数选取  $v_1=10, \lambda_\delta=50, \lambda_v=200, \Delta_1=0.1$ 。SMSPO-STSMC 中的切换增益  $\varepsilon$  由 50 变为 30,其他参数不变。仿真结果见图 5。

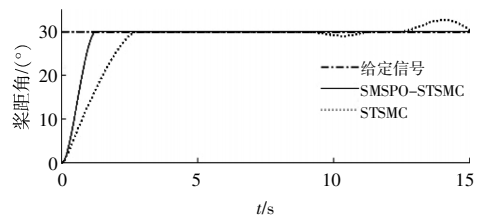


图 5 有扰动下两种控制器的桨距角输出曲线  
Fig.5 Pitch angle output curves of two controllers with perturbation

由图 5 可知:SMSPO-STSMC 的调整时间为 1.2 s,并没有因系统参数变化而受到影响;STSMC 的调整时间为 2.8 s,相对于无扰动条件下的调整时间增加了 133%,这是由于系统增益减小、阻尼增加而导致系统收敛时间增大;加入扰动信号后,SMSPO-STSMC 在减小切换增益  $\varepsilon$  的前提下亦能很好地抑制扰动,输出曲线没有发生突变,而 STSMC 在面对较小扰动时可以较好地抑制扰动,当面对较大扰动时,输出曲线发生明显的突变。因此,加入扰动观测器后可以有效地提高系统的抗干扰能力,增加控制器切换增益  $\varepsilon$  的整定范围,使  $\varepsilon$  具有更大的裕度,同时减小  $\varepsilon$  的取值,对滑模控制器自身的抖动也有一定的减弱效果。

为了更好地模拟系统外部扰动,加入如图 6 所示的随机外部扰动信号。为了更好地验证 SMSPO-STSMC 对桨距角的跟踪性能,系统桨距角的变化采用图 7 中的给定信号曲线。系统参数

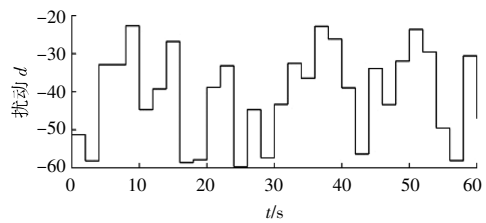


图 6 扰动信号  
Fig.6 Perturbation signal

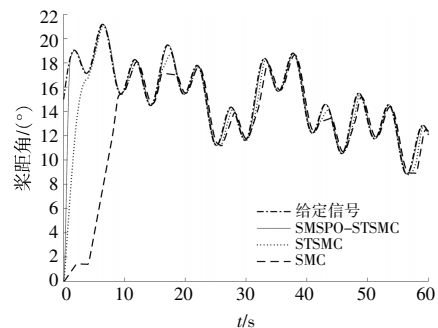


图 7 3 种控制器的桨距角跟踪曲线  
Fig.7 Pitch angle tracking curves of three controllers

变化和控制器参数均采用前文试验数据,仿真试验与 STSMC 和 SMC 进行对比,结果如图 7,8 所示。

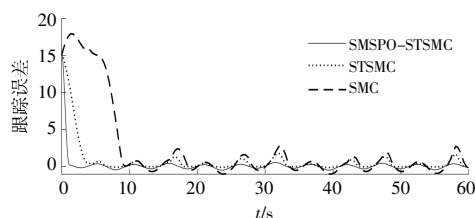


图 8 3 种控制器的桨距角跟踪误差曲线

Fig.8 Pitch angle tracking error curves of three controllers

由图 7,8 可知:SMSPO-STSMC 对给定信号的跟踪效果最好,跟踪误差曲线的波动也是最小的;STSMC 在扰动较大时,没有扰动观测器的跟踪曲线出现失真,跟踪误差曲线在个别位置出现突变;由于 SMC 收敛时间慢,在面对系统参数变化和强扰动时,跟踪曲线发生滞后,而跟踪误差曲线突变也比较明显,整体跟踪效果不佳。因此,采用 SMSPO-STSMC 可以提高桨距角的跟踪精度,改善系统稳定性。

## 5 结束语

针对风电机组电液变桨系统具有典型的参数不确定性和非线性,本文采用了一种基于 SMSPO 的分数阶终端滑模控制方法,设计 SMSPO 对系统参数变化和未知扰动进行补偿,设计分数阶终端滑模控制器以确保有限时间收敛的同时削弱系统抖动。通过 Simulink 仿真对比试验验证了分数阶终端滑模控制器的有效性,证明了 SMSPO 对扰动的抑制效果。最后通过桨距角跟踪仿真试验证明了该方法能够提高桨距角的跟踪精度和抗扰能力,使系统具有更好的自适应性和鲁棒性,能很好地满足风电机组对桨距角跟踪精度的要求。

## 参考文献:

- [1] 李昊.液压型风电机组阀控液压马达变桨距控制理论与实验研究[D].秦皇岛:燕山大学,2013.
- [2] 任海军,邓广,吉昊,等.基于人工蜂群-RBF-PID 的风力机液压变桨距控制系统设计 [J]. 可再生能源, 2019,37(7):1078-1083.
- [3] 殷秀兴,林勇刚,李伟,等.恒压网络电液变量马达的风力机变桨距控制[J].农业机械学报,2014,45(14):206.
- [4] Yilin Hu, Yan Xie, Bo Li, et al. Robust variable-pitch control design of PMSG via perturbation observer [J]. Energy Engineering, 2021, 118(4):911-929.
- [5] 王兴. 基于 SMC 的风电变桨距伺服控制系统的研究 [D].湘潭:湖南科技大学,2016.
- [6] 郭新平,汪成文,刘华,等.基于扩张状态观测器的泵控电液伺服系统滑模控制 [J]. 北京航空航天大学学报,2020,46(6):1159-1168.
- [7] L Jiang, Q H Wu. Nonlinear adaptive control via sliding-mode state and perturbation observer [J]. IEE Proceedings. D. Control Theory and Applications, 2002, 149(4):269-277.
- [8] 薛定宇.分数阶微积分学与分数阶控制[M].北京:科学出版社,2018.31-44.
- [9] 靳宇星,曹兴举,常海赐,等.基于扰动观测与分数阶终端滑模转速调节器的永磁同步电机模型预测控制 [J].微电机,2021,54(2):84-90.
- [10] 吴飞,王杰,李鹏瀚.永磁同步电机的改进快速终端滑模控制[J].电机与控制应用,2018,45(9):9-13.
- [11] 高洁,王华宇,徐萌.开关磁阻电机的分数阶终端滑模控制[J].电机与控制学报,2022,26(2):142-150.
- [12] 王龙,郭寅远,杨博,等.永磁同步发电机自适应分数阶变桨距角控制 [J]. 电力系统保护与控制,2021,49(20):92-103.
- [13] 王兴亮,秦露露,顾华,等.永磁同步电机分数阶改进快速终端滑模控制 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2021,33(12):110-116,124.

## Research on fractional terminal sliding mode electro-hydraulic pitch control method based on perturbation observer

Wang Hui, Guo Yanbing, Lu Shengdong, Zhao Guochao, Dong Zhengtao  
(College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In order to improve the control performance of wind turbine electro-hydraulic pitch system, a fractional terminal sliding mode control method based on perturbation observer is proposed. The mathematical model of the wind turbine electro-hydraulic pitch system is established, and the sliding-mode state and perturbation observer is used to compensate the uncertainty and unknown disturbance of the pitch system parameters in real time. Fractional calculus theory is used to design the sliding mode surface of the terminal sliding mode controller, which can improve the jitter of the sliding mode control itself while ensuring the finite time convergence. Simulink is used for experimental verification, and the results show that the method enhances the anti-interference ability of the pitch system, weakens the jitter of the system, improves the tracking accuracy of the pitch angle, and improves the stability of the pitch system.

**Keywords:** wind turbine; variable pitch system; fractional calculus theory; sliding mode control; perturbation observer