

风能转换系统执行器故障主动容错控制

沈艳霞[†], 季凌燕, 吴定会

(江南大学 电气自动化研究所, 江苏 无锡 214122)

摘要: 提出了一种新颖的风能转换系统滑模主动容错控制策略. 针对风能转换系统执行器故障, 运用预测控制思想和迭代算法, 设计了一种故障观测器. 在设定的优化时域长度内, 利用实际系统与故障观测器的输出差值, 通过反复迭代运算, 不断地对虚拟故障信号进行调整, 使其能有效地拟合实际系统执行器故障, 并根据故障观测值实时调整滑模容错控制器结构. 未发生故障时, 故障观测值为零, 系统在滑模控制器控制下稳定运行; 执行器发生故障时, 运用故障观测值实时调整滑模容错控制项, 并用双曲正切函数代替符号函数, 消除抖动. 仿真实验结果表明, 滑模容错控制器下的系统具有良好的容错能力, 提高了风能转换系统最大风能捕获效率.

关键词: 风能转换系统; 执行器故障; 故障诊断; 主动容错控制; 控制律重构

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Active fault-tolerant control of actuator failure for wind energy conversion system

SHEN Yan-xia[†], JI Ling-yan, WU Ding-hui

(Institute of Electrical Automation, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: A novel sliding-mode fault-tolerant active control strategy for wind energy conversion system is proposed. For actuator fault of wind energy conversion system, predictive control theory and iterative learning algorithm are introduced to design the fault observer. Within the preset optimizing time span, the introduced virtual fault is adjusted by the difference between the fault observer output and the actual system output through repetitive iteration, so that it can effectively fit the actual value of the actuator fault, and the structure of the sliding fault-tolerant controller is adjusted real-time according to the fault observed value. When there is no fault, the fault observed value is zero and the system is running stably under the control of the sliding-mode controller. When actuator failure occurs, sliding fault-tolerant controller is adjusted real-time on the basis of fault observed value, and the hyperbolic tangent function is used to substitute the sign function to eliminate chattering. Experimental results show that good fault tolerance ability of the system under the control of sliding-mode fault-tolerant controller can be guaranteed, improving the efficiency of maximum wind energy capture for wind energy conversion system.

Key words: wind energy conversion system; actuator fault; fault diagnosis; active fault-tolerant control; reconstruction of control law

1 引言(Introduction)

风能是一种无污染、永不枯竭的重要自然资源. 近年来, 随着电力电子等技术不断成熟和发展, 风力发电等新型能源开发和利用水平得到了很大的提高. 风能转换系统是复杂的非线性系统, 风速的大小和方向的随机性, 电网的参数波动和大气条件等, 都构成了系统的干扰因素, 因此风能转换系统的可靠性问题受到越来越广泛的关注, 作为提高系统可靠性的有效手段, 容错控制成为风能转换系统研究的一大热点^[1-3].

风能转换系统是复杂强非线性系统, 又长期运作为在沿海高原等严峻的环境中, 其传感器和执行器等部件都是容易发生故障的环节, 因此需要采用非线性的容错控制方法来改善系统的性能. 文献[4]针对一类非线性系统执行器故障, 提出了 H_∞ 容错控制方法. 利用线性矩阵不等式方法, 给出有干扰和无干扰时控制器存在的充分条件. 保证系统在正常和故障情况下均能达到渐进稳定. 然而被动控制策略只具有有限的容错范围, 主动容错控制克服了被动容错控制器不能达到最优控制的缺点. 文献[5]针

收稿日期: 2015-04-09; 录用日期: 2015-06-03.

[†]通信作者. E-mail: shenyx@jiangnan.edu.cn; Tel.: +86 510-85910653

高等学校博士学科点专项科研基金(20130093110011), 国家自然科学基金(61573167)资助.

Supported by Ph.D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20130093110011) and National Natural Science Foundation of China (61573167).

对变速恒频风力机系统参数不确定性和传感器故障, 提出了一种多观测器转换控制的模糊鲁棒主动容错控制策略. 采用系统的参数不确定性T-S模糊模型, 建立了传感器故障模型, 同时建立模糊状态观测器, 通过泰勒级数以及线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)得到系统稳定的充分条件. 文献[6]考虑一类非线性系统, 针对所有可能发生的执行器和传感器故障, 研究了基于滑模观测器的故障诊断与容错控制, 在线检测故障, 并且对其进行重构, 提高了系统的性能. 神经网络具有很强的非线性映射和自学习能力, 并能对非线性系统以任意精度逼近^[7], 文献[8]利用神经网络逼近执行器未知故障, 实现执行器故障状态下的跟踪控制, 设计容错控制律保证闭环系统稳定. 文献[9]对常规小脑模型神经网络(cerebellar model articulation controller, CMAC)进行改进, 提高神经网络在线学习速度和精度, 并利用滑模控制算法进行容错控制律在线重构, 实现动态非线性系统在线故障诊断与容错控制的集成.

本文运用预测和迭代学习^[10]的思想, 设计故障观测器, 根据观测器的输出和实际系统输出的差值, 通过反复迭代获取故障观测值, 达到故障检测的目的. 在故障准确观测的基础上, 将故障观测值输入到滑模容错控制器中, 并根据故障观测值实时调整滑模容错控制项, 使系统能自动补偿执行器故障的影响, 实现风能转换系统在线故障诊断和容错控制的集成. 执行器发生故障时, 滑模容错控制器下的系统性能尽可能地恢复到发生故障前, 达到容错控制的目的.

2 风能转换系统建模 (Modelling of wind energy conversion system)

风能转换系统结构图如图1所示, 风轮机捕获风能并转换成机械能, 通过齿轮箱带动发电机转子旋转, 由发电机将机械能转换为电能, 经过双向变频器整流逆变后转换为符合要求的交流电输送到电网^[11].

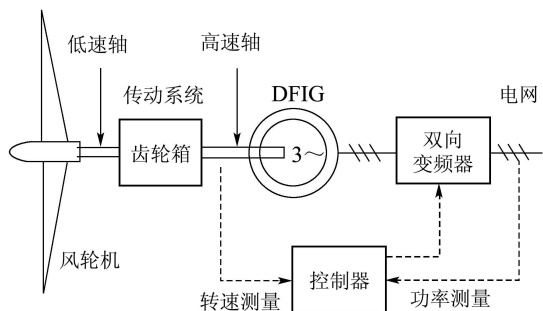


图 1 风能转换系统基本框图

Fig. 1 Basic structure of wind energy conversion system

2.1 风轮机(Wind turbines)

风轮机产生的机械功率和风力矩^[12]为

$$P_{wt} = 0.5\pi\rho v^3(t)R_t^2 C_p(\lambda(t), \beta(t)), \quad (1)$$

$$\Gamma_{wt} = \frac{P_{wt}}{\Omega_l(t)} = 0.5\pi\rho v^2(t)R_t^3 C_\Gamma(\lambda(t), \beta(t)), \quad (2)$$

其中: $C_\Gamma(\lambda(t), \beta(t))$ 为转矩系数,

$$C_\Gamma(\lambda(t), \beta(t)) = C_p(\lambda(t), \beta(t))/\lambda(t),$$

ρ 为空气密度; R_t 为风轮半径; $v(t)$ 为风速; $C_p(\lambda(t), \beta(t))$ 为风能功率系数(power coefficient); $\lambda(t)$ 是叶尖速比(tip speed ratio); $\beta(t)$ 是桨距角函数. 叶尖速比 $\lambda(t)$ 为风轮叶尖线速度与风速之比, 即 $\lambda(t) = \Omega_l(t) \cdot R_t/v(t)$, $\Omega_l(t)$ 为风轮机的机械角速度.

2.2 传动系统(Drive system)

系统的高速轴运动方程^[13]如式(3)所示:

$$J_t \dot{\Omega}_h = \Gamma_{wt} - \Gamma_G, \quad (3)$$

即

$$\dot{\Omega}_h = \frac{\Gamma_{wt}}{J_t} - \frac{\Gamma_G}{J_t},$$

其中: J_t 表示高速轴端的转动惯量, 值为 J_{wt}/i_0^2 , J_{wt} 表示风轮机转轴的转动惯量, 风轮机转子转速 Ω_h 是状态变量, Γ_G 是发电机电磁转矩. 由式(3)可以看出, 控制 Γ_G 即可实现风机的转速控制, 进而实现风能最大捕获.

考虑发电机电磁转矩的惯性

$$\dot{\Gamma}_G = -\frac{\Gamma_G}{T_g} + \frac{u}{T_g}, \quad (4)$$

其中: T_g 为惯性时间常数, u 系统的输入量, 即发电机所参考的电磁转矩 Γ_{ref}^* .

2.3 风能转换系统数学模型(Mathematical model of wind energy conversion system)

考虑执行器故障, 结合式(1)–(4)得风能转换系统动态状态方程

$$\begin{cases} \dot{x} = \\ F(x, u) + Bu(t) + H(t-T)B_f\xi(t) = \\ Ax + h(x(t), t) + Bu(t) + H(t-T)B_f\xi(t), \\ t \geq 0, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (5)$$

其中: $x \in \mathbb{R}^2$ 是系统状态向量;

$$x(t) = \begin{bmatrix} \Omega_h \\ \Gamma_G \end{bmatrix}; u(t) = \Gamma_{ref}^*;$$

$$F(x, u) = \begin{bmatrix} \Gamma_{wt}(\Omega_h/i_0, v) - \Gamma_G \\ J_t \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 - \frac{1}{J_t} \\ 0 - \frac{1}{T_g} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_g} \end{bmatrix}; C = [1 \ 0];$$

$y \in \mathbb{R}^2$ 是系统的输出; u 是控制输入, 系统的控制输入为参考的电磁转矩 Γ_{ref}^* , 即驱动链执行侧输出;

$$h(x(t), t) = \begin{bmatrix} \Gamma_{wt}(\Omega_h/i, v) & 0 \\ i \cdot J_t \cdot \Omega_h & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

是非线性部分; $\xi(t)$ 为执行器故障; $H(t - T)$ 为故障发生时间函数; T 是故障发生时刻:

$$H(t - T) = \begin{cases} 1, & t \geq T, \\ 0, & t < T. \end{cases}$$

3 滑模主动容错控制(Active sliding fault-tolerant control)

风能转换系统滑模主动容错控制系统如图2所示, 主要包括: 故障诊断单元以及滑模容错控制器设计. 系统出现执行器故障, 观测器的输出与实际系统输出产生偏差, 根据这个偏差值, 不断自适应调整虚拟故障, 使其能准确地观测实际执行器故障值, 当系统未发生故障时, 故障观测值为零, 滑模容错控制项亦为零, 整个系统在滑模控制器控制作用下稳定运行; 执行器发生故障时, 观测器实时观测故障值, 并将故障观测值输出到滑模控制器, 运用故障观测值在线调整滑模控制器容错控制项, 通过滑模容错控制补偿执行器故障对系统的影响, 实现容错控制, 因此故障观测值的准确性将会影响到系统的容错性能.

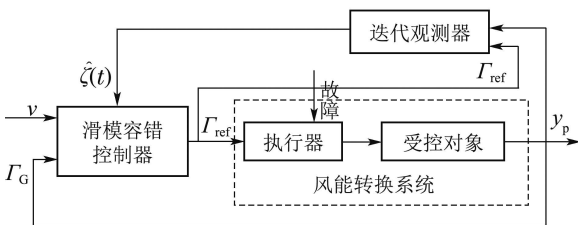


图2 风能转换系统滑模主动容错控制整体框图
Fig. 2 Wind energy conversion system sliding active fault-tolerant control block diagram

3.1 风能转换系统故障诊断设计(Design of fault diagnosis for wind energy conversion system)

风能转换系统故障观测器原理如图3所示, 构建系统观测器, 根据观测器的输出 \hat{y} 和系统实际输出 y 的差值, 通过反复迭代计算, 自适应调节观测器

可调参数, 使得故障估计值能够逼近系统实际故障值, 实现系统故障诊断.

设计观测器(6)–(11), 估计系统执行器故障.

$$\dot{\hat{x}}_k(t) = A\hat{x}(t) + h(\hat{x}_k(t), t) + Bu_k + B_f \hat{\xi}_k(t) + L(y_k(t) - \hat{y}_k(t)), \quad (6)$$

$$\hat{y}_k(t) = C\hat{x}_k(t), \quad (7)$$

$$e_k(t) = x_k(t) - \hat{x}_k(t), \quad (8)$$

$$r_k(t) = Ce_k(t), \quad (9)$$

$$\hat{\xi}_{k+1}(t) = \hat{\xi}_k(t) + \Gamma \dot{r}_k(t) (\hat{\xi}_k(0) = 0), \quad (10)$$

$$\|y_k(t) - \hat{y}_k(t)\|_\infty \leq \gamma, \quad t \in [t_a, t_b]. \quad (11)$$

残差系统状态方程为

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) + B_f \tilde{\xi}(t) + h(x(t), t) - h(\hat{x}(t), t), \quad (12)$$

$$r(t) = Ce(t), \quad (13)$$

其中: L 是维数适当的观测器增益矩阵, 使得 $A - LC$ 的特征根在复平面的左平面; Γ 是迭代算法增益; γ 是允许跟踪误差; t_b 是优化周期; $e(t)$ 是系统状态误差, $r(t)$ 是系统输出误差, $\hat{\xi}(t)$ 是故障估计值.

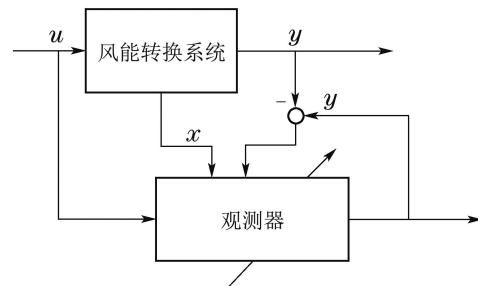


图3 观测器原理

Fig. 3 Theory of observer

为了进一步分析, 做如下假设:

假设 1 风能转换系统非线性项满足Lipschitz条件:

$$\|h(x_1(t), t) - h(x_2(t), t)\| \leq \alpha \|x_1(t) - x_2(t)\|,$$

其中 α 是已知Lipschitz常数, 保证非线性项是平稳的.

假设 2 矩阵 (A, C) 是可观测的.

假设 3 S 是状态映射: $x(0), \xi(t) \rightarrow x(t)$, 记 O 是输出映射: $x(0), \xi(t) \rightarrow y(t), t \in [0, t_b]$. 映射 S 和 O 一对一, 则保证系统是可逆的.

假设 4 假设优化周期为 $[0, t_b]$, 在 $[0, t_b]$ 内观测器的状态和输出初始值已知;

$$\hat{x}_k(0) = x(0), \hat{y}_k(0) = y(0), \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

定理 1 考虑系统(5), 设计观测器(6)–(11), 在

有限优化周期内 $[0, t_b]$, 若条件:

- 1) $\|I - \Gamma CB_f\| \leq 1$;
- 2) 初始状态 $\hat{x}_k(0) = x(0)$, $k = 0, 1, 2, \dots$.

则当迭代次数 $k \rightarrow \infty$ 时, 故障观测器的输出 $\hat{y}(t)$ 在 $[0, t_b]$ 一致收敛于系统实际输出 $y(t)$, 即

$$\lim_{\substack{k \rightarrow \infty \\ t \in [0, t_b]}} \|y(t) - \hat{y}_k(t)\| = 0.$$

具体实现步骤如图4所示.

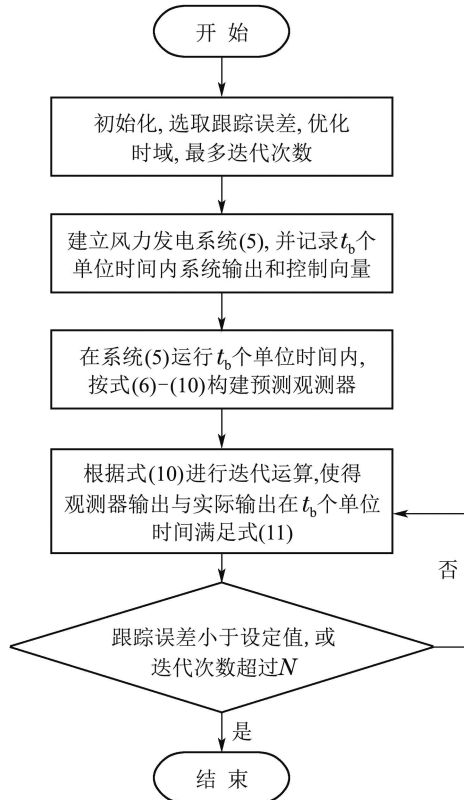


图 4 故障观测流程图

Fig. 4 Flow chart of fault observer

3.2 收敛性分析(Convergence analysis)

定理 2 考虑发生执行器故障的系统(5), 满足假设1, 同时系统的初始状态 $x(0)$ 已知, 观测器的初始状态 $\hat{x}_k(0) = x(0)$ 且条件 $\|I - \Gamma CB_f\| \leq 1$ 满足, 根据故障观测器(6)-(10)所得的值 $\hat{\xi}(t)$ 在 $[0, t_b]$ 上一致收敛于实际故障, 观测系统输出值 $\hat{y}(t)$ 一致收敛于实际输出. 收敛性证明见文献[14].

3.3 滑模控制器设计(Sliding mode controller design)

根据故障状态下系统状态方程(5), 定义滑模面(14):

$$\sigma_0(\tilde{x}) = S^T \tilde{x} = 0, \quad (14)$$

$$\tilde{x} = x - x_d, \quad (15)$$

其中: \tilde{x} 是实际状态 x 和期望状态 x_d 之间的差值; S 是滑模面参数矢量.

定义风能转换系统的Lyapunov函数

$$V(\sigma_0) = \frac{1}{2} \sigma_0^2. \quad (16)$$

对滑模面(14)求导:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_0(\tilde{x}) &= S^T \dot{\tilde{x}} = S^T (\dot{x} - \dot{x}_d) = \\ &= S^T (Ax + Bu + h(x(t), t) + B_f \xi(t)) - S^T \dot{x}_d. \end{aligned} \quad (17)$$

要使系统保持稳定, 则须满足

$$\dot{V}(\sigma_0) = \sigma_0 \dot{\sigma}_0 \leq 0. \quad (18)$$

取滑模面导数

$$\dot{\sigma}_0 = -\varepsilon^2 \text{sgn } \sigma_0,$$

则 $\dot{V}(\sigma_0) \leq 0$ 恒成立, 其中 ε 是一个大小可调的正数. 得

$$\begin{aligned} S^T (Ax + Bu + h(x(t), t) + B_f \xi(t)) - S^T \dot{x}_d = \\ = -\varepsilon^2 \text{sgn } \sigma_0. \end{aligned} \quad (19)$$

由式(19)得控制输入

$$\begin{aligned} u &= \hat{u} + \bar{u} = \\ &= (S^T B)^{-1} (S^T Ax) + (S^T B)^{-1} (S^T \dot{x}_d - \\ &= S^T h(x(t), t) - S^T B_f \xi(t) - \varepsilon^2 \text{sgn } \sigma_0), \end{aligned} \quad (20)$$

其中: \hat{u} 是基于系统(5)的状态反馈控制律, 反馈增益

$$K^T = (S^T B)^{-1} S^T A, \quad (21)$$

K 由系统极点配置方法确定; \bar{u} 是非线性控制项, $-\varepsilon^2 \text{sgn } \sigma_0$ 随着系统状态误差在滑模面上、下穿行而改变符号; $S^T B_f \xi(t)$ 是滑模容错控制项, $\xi(t) = \hat{\xi}(t)$ 为执行器故障, 通过观测器得 $\hat{\xi}(t)$. 滑模容错控制项根据故障观测值实时进行调整, 实现系统的容错控制.

为保证控制器输出平滑有界, 不存在一般滑模变结构控制中的抖动现象, 减小高频振动对系统的不良影响, 用双曲正切函数 $\tanh(\sigma_0/\phi)$, 代替符号函数 $-\varepsilon^2 \text{sgn } \sigma_0$, 滑模控制器输出

$$\begin{aligned} u &= \\ &= (S^T B)^{-1} (-S^T Ax) + (S^T B)^{-1} (S^T \dot{x}_d - \\ &= S^T h(x(t), t) - S^T B_f \xi(t) - \tanh(\sigma_0/\phi)). \end{aligned} \quad (22)$$

取

$$\dot{\sigma}_0 = \tanh(\sigma_0/\phi),$$

Lyapunov函数的导数 $\dot{V}(\sigma_0) = \sigma_0 \dot{\sigma}_0 \leq 0$ 仍成立, 所以系统保持稳定. 由式(21)得

$$\begin{aligned} S^T (A - BK^T) &= 0, \\ A - BK^T &= A_\tau, \end{aligned} \quad (23)$$

其中: S 是 A_τ 零特征值的特征矢量, 由 K 进一步求

出 S 各分量.

选择观测器(6)–(11),对满足假设1–4的风能转换系统(5)进行执行器故障观测,如式(22)所示,运用故障观测值实时调整滑模容错控制项,重构后的系统(5)具有较好的容错能力.

4 仿真分析(Simulation analysis)

为了检验滑模主动容错控制的有效性,对风能转换系统进行仿真分析.仿真数据如表1所示.

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
R	2.5 m	ρ	1.25 kg/m ³
i_0	6.25	η	0.95
J_1	3.6 kg·m ²	$C_{p\max}$	0.476
L_t	150 m	λ_{opt}	7

选取参数:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -10.834 \\ 0 & -50 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 50 \end{bmatrix},$$

$$C = [1 \ 0], L = \begin{bmatrix} -48 \\ -221.617 \end{bmatrix},$$

$$h(x(t), t) = \left[\frac{8.5C_p(\lambda)\Omega_h^2}{\lambda^3} \ 0 \right]^T.$$

观测器允许跟踪误差 $\gamma = 0.7$,优化时域长度 $P = 2$,迭代算法增益 $\Gamma = 0.3$,根据设计的算法,估计执行器发生的故障.

功率系数 $C_p(\lambda(t))$ 为^[11]

$$C_p = -4.54 \times 10^{-7} \lambda^7 + 1.3027 \times 10^{-5} \lambda^6 - 6.5416 \times 10^{-5} \lambda^5 - 9.7477 \times 10^{-4} \lambda^4 + 0.0081 \lambda^3 - 0.0013 \lambda^2 + 0.0061 \lambda.$$

风速如图5所示.

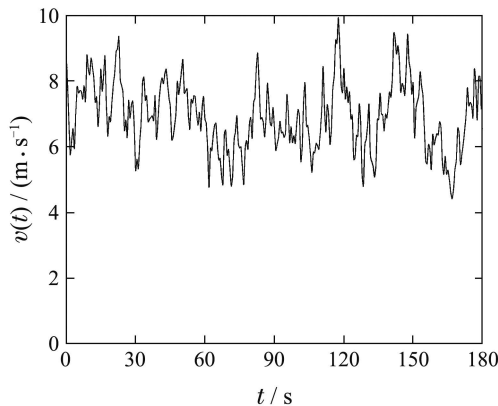


图 5 风速波形

Fig. 5 Wind waveform

执行器发生漂移故障 $\xi(t) = 2 \sin(6\pi t + 2)$, $20 \text{ s} \leq T \leq 40 \text{ s}$ 时,实线表示实际故障值,虚线表示估计故障值.故障未发生时,故障估计值为零,故障发生后,如图6所示,故障估计值能较好地逼近实际系统漂移故障.

执行器发生偏差故障 $\xi(t) = 1$, $20 \text{ s} \leq T \leq 40 \text{ s}$ 时,实线表示实际故障,虚线表示估计故障.故障未发生时,故障估计值为零,故障发生后,如图7所示,故障估计值能较好地逼近系统偏差故障.

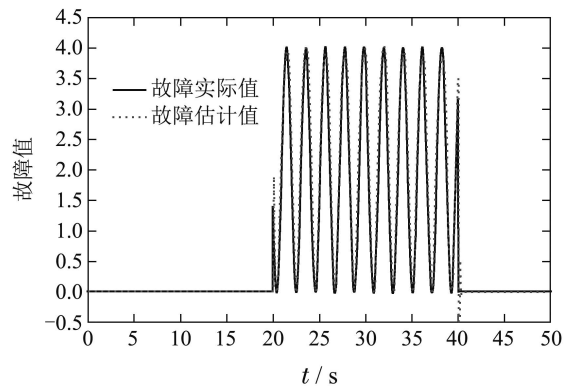


图 6 实际和漂移故障估计值

Fig. 6 True and estimated drifting fault

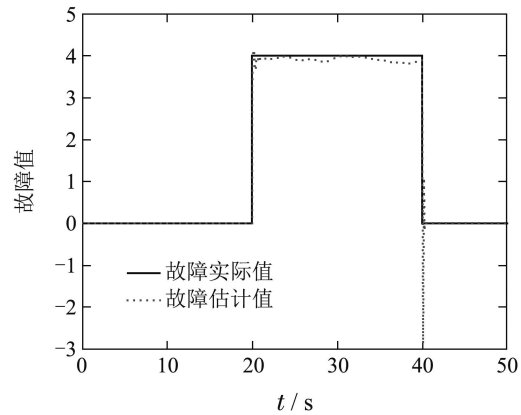


图 7 实际和偏差故障估计值

Fig. 7 True and estimated deviation fault

系统稳定运行时,功率系数 C_p 维持在0.476附近,叶尖速比 λ 在7 m/s左右,系统实现最大风能捕获.如图8–9中虚线所示,发生执行器漂移故障时,功率系数 C_p 偏离最优值0.476,叶尖速比 λ 亦不能保持在最优值7 m/s,进而不能捕获最大风能.基于执行器漂移故障观测值,设计的变结构滑模主动容错控制器使得功率系数 C_p 以及叶尖速比 λ 在最优值附近波动,如实线所示,提高了系统最大风能捕获效率,达到了容错控制的目的.

如图10–11中虚线所示,发生执行器偏差故障时,系统性能恶化,功率系数 C_p 与叶尖速比 λ 均偏离

最优值, 进而不能捕获最大风能. 基于执行器偏差故障的观测值进行滑模主动容错控制, 提高了系统最大风能捕获效率, 达到了容错控制的目的, 大大降低了执行器偏差故障引起的冲击与振荡影响.

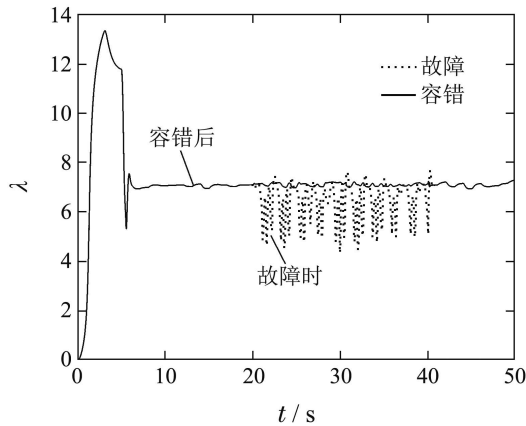


图 8 漂移故障时容错控制前后叶尖速比
Fig. 8 Tip speed ratio before and after fault-tolerant control with drifting fault

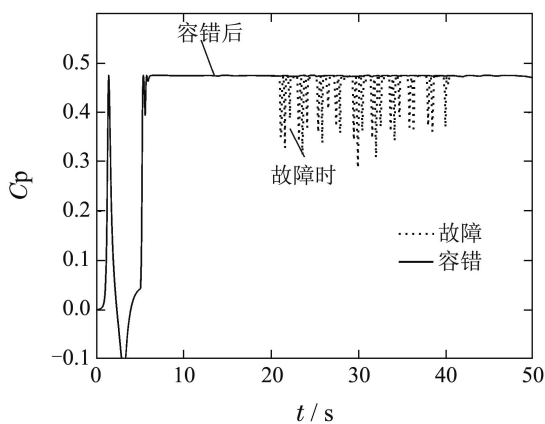


图 9 漂移故障时容错控制前后功率系数
Fig. 9 Power coefficient before and after fault-tolerant control with drifting fault

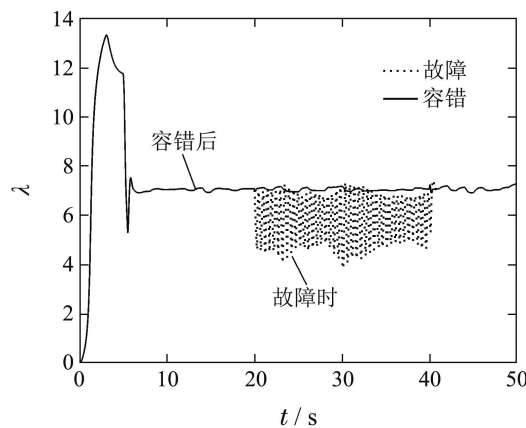


图 10 偏差故障时容错控制前后叶尖速比
Fig. 10 Tip speed ratio before and after fault-tolerant control with deviation fault

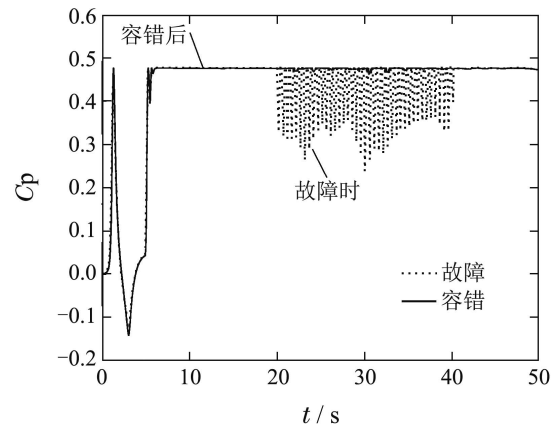


图 11 偏差故障时容错控制前后功率系数
Fig. 11 Power coefficient before and after fault-tolerant control with deviation fault

5 结语(Conclusions)

针对由风能转换系统执行机构, 齿轮箱齿面磨损、疲劳以及轴承变形等部分失效故障引起的输出信号偏离准确值的故障特征, 运用迭代预测思想设计故障观测器, 提出了一种风能转换系统主动容错控制策略. 根据观测器的输出和实际系统输出的差值, 通过反复迭代获取故障估计值, 实现对系统执行器故障实时高灵敏度的故障检测. 在故障准确实时诊断基础上, 采用滑模变结构容错控制策略实现系统执行器故障主动容错功能. 仿真结果表明, 故障观测器能实时精准地捕捉到执行器故障; 针对故障信息, 采用滑模变结构容错控制实现控制律重构, 保证系统发生执行器故障时, 仍能实现最大风能捕获.

参考文献(References):

- [1] 沈艳霞, 贺庆楠, 杨雄飞, 等. 风能转换系统执行器故障重构与容错控制 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(3): 413 – 420. (SHEN Yanxia, HE Qingnan, YANG Xiongfei, et al. Actuator fault reconstruction and fault-tolerant control of wind energy conversion system [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(3): 413 – 420.)
- [2] 吴定会, 李意扬, 纪志成, 等. 风力机的线性变参数主动容错控制 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(4): 425 – 430. (WU Dinghui, LI Yiyang, JI Zhicheng, et al. Active fault-tolerant linear-parameter-varying control of wind turbines [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(4): 425 – 430.)
- [3] HE Q N, SHEN Y X, JI L Y. Fault tolerant control strategy for nonlinear system based on feedback control [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2013: 4897 – 4902.
- [4] 罗跃生, 温秀平, 龚新平, 等. 带有执行器故障的非线性系统的 H_∞ 容错控制 [J]. 控制工程, 2012, 19(1): 123 – 127. (LUO Yuesheng, WEN Xiuping, GONG Xinping, et al. H_∞ fault-tolerant control for nonlinear system with actuator failures [J]. *Control Engineering of China*, 2012, 19(1): 123 – 127.)

- [5] KAMAL E, AITOUACHE A, GHORBANI R, et al. Robust fuzzy fault-tolerant control of wind energy conversion systems subject to sensor faults [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2012, 3(2): 231 – 241.
- [6] 张柯. 基于滑模观测器控制系统的故障诊断与容错控制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
(ZHANG Ke. *Fault diagnosis and fault-tolerant control based on sliding mode observer control system* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.)
- [7] HONG C M, CHENG F S, CHEN C H. Optimal control for variable-speed wind generation systems using general regression neural network [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2014, 9(60): 14 – 23.
- [8] 李金阳, 夏虹, 刘永阔, 等. 基于BP神经网络的核电厂主动容错控制方法研究 [J]. 原子能科学技术, 2012, 46(7): 827 – 830.
(LI Jinyang, XIA Hong, LIU Yongkuo, et al. Active fault tolerant control research for nuclear power plant based on BP neural network [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2012, 46(7): 827 – 830.)
- [9] 朱大奇, 孔敏. 基于平衡学习的CMAC神经网络非线性滑模容错控制 [J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 81 – 86.
(ZHU Daqi, KONG Min. Fault-tolerant control of nonlinear system based on balanced learning CMAC neural network [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(1): 81 – 86.)
- [10] CHEN W, SAIF M. An Iterative Learning observer for fault detection and accommodation in nonlinear time-delay systems [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2006, 16(1): 1 – 19.
- [11] 孟涛, 沈艳霞, 纪志成. 基于风能转换系统的T-S模糊建模与控制 [J]. 微特电机, 2011, 39(10): 68 – 72.
(MENG Tao, SHEN Yanxia, JI Zhicheng. Wind energy conversion systems using T-S fuzzy modeling [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2011, 39(10): 68 – 72.)
- [12] MUNTEANU I, BRATCU A I, CUTULULIS N A, et al. *Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach* [M]. London: Springer, 2008: 28 – 135, 150 – 158.
- [13] NICHITA C, LUCA D, DAKYO B, et al. Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2002, 17(4): 523 – 529.
- [14] 颜秉勇. 非线性系统故障诊断若干方法及其应用研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
(YAN Bingyong. *Research on several methods of fault diagnosis nonlinear systems and their applications* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.)

作者简介:

沈艳霞 (1973–), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电机的非线性控制、风力发电以及参数辨识等, E-mail: shenyx@jiangnan.edu.cn;

季凌燕 (1990–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为控制理论与控制工程, E-mail: jly900730@163.com;

吴定会 (1970–), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为风力发电控制技术, E-mail: wh033098@163.com.