

风力发电系统传感器故障诊断

沈艳霞^{1†}, 杨雄飞², 赵芝璞¹

(1. 江南大学 物联网技术应用教育部工程研究中心, 江苏 无锡 214122;

2. 蚌埠供电公司, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 针对非线性风力发电系统, 提出了一种基于滑模观测器的传感器故障诊断方法. 基于考虑传感器加性故障的非线性动态模型, 利用T-S模糊理论建立风力发电系统全局T-S模型, 设计模糊T-S系统滑模故障观测器, 产生对故障具有敏感性的残差, 实现故障检测. 通过等价输出控制方法来维持滑模运动, 直接获取故障信息, 重构传感器故障. 最后以三叶片水平轴风力发电系统为例, 仿真验证了该方法的有效性与可靠性.

关键词: 风力发电系统; 故障诊断; T-S模糊; 故障检测; 等价输出控制; 故障重构

中图分类号: TM46 文献标识码: A

Sensor fault diagnosis for wind turbine system

SHEN Yan-xia^{1†}, YANG Xiong-fei², ZHAO Zhi-pu¹

(1. Engineering Research Center of Internet of Things Technology Applications Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China;

2. Bengbu Power Supply Company, Bengbu Anhui 233000, China)

Abstract: In this paper, the approach of sensor fault diagnosis based on sliding-mode observers for nonlinear wind turbine system (WTS) is proposed. Considering the additive fault of sensor, the nonlinear dynamic model of WTS is built, then a global T-S fuzzy model of the system is established by T-S fuzzy theory. Under some assumptions, a residual which is robust to disturbance but sensitive to sensor fault is produced by designing a kind of T-S fuzzy sliding-mode observer. The residual can be used to detect the sensor fault. Then sensor fault is detected and reconstructed by the designed T-S fuzzy sliding-mode observer and the equivalence output control concept to maintain sliding-mode motion. Finally, some numerical simulations based on three blade horizontal axis wind power system are carried out. The results show that, the proposed new method can effectively and reliably detect and reconstruct the sensor fault of wind turbine system.

Key words: wind turbine system; fault diagnosis; T-S fuzzy; fault detection; equivalence output control; fault reconstruction

1 引言(Introduction)

风电能源是世界上发展最快的可再生能源, 已经成为解决世界能源问题不可或缺的重要力量^[1]. 风力发电设备通常建在高山或远离海岸的偏远地域, 气候变化不可预测, 在这样高度恶劣、复杂的工作环境中, 传感器、执行器故障时有发生, 再加上风力发电系统(wind turbine system)本身是一个非线性、多变量、强耦合的系统, 当参数出现不确定时, 系统的控制将会更加复杂. 为此必须对风力发电系统进行实时故障诊断, 实施有效的容错控制确保系统的可靠性.

传感器作为风力发电系统中的基本元件, 将尽可

能全面的数据传送到数据采集系统, 并由数据采集系统将这些数据传送到主控系统, 经过分析和处理后, 发出控制指令. 其种类繁多, 安装位置特殊, 故障发生频繁, 特别地, 如果故障传感器的输出信号被用于系统控制器的输入, 将会对闭环反馈控制产生影响, 对风力发电系统输出异常的控制量, 导致系统性能降低. 而传统的人工定期检修很难及时找到故障所在, 因此对风力发电系统中传感器单元进行实时故障诊断已经成为亟需研究的课题.

过去的几十年内, 风力发电系统的故障诊断技术已经逐步发展起来, 学者和专家提出了众多故障诊断

收稿日期: 2016-05-07; 录用日期: 2016-12-29.

[†]通信作者. E-mail: shenyx@jiangnan.edu.cn; Tel.: +86 13861867517.

本文责任编辑: 张化光.

国家自然科学基金项目(61573167, 61572237), 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130093110011)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61573167, 61572237) and Specialized Research Fund for Doctoral Program of Higher Education of China (20130093110011).

方法,如文献[2]针对风力发电系统中的齿轮箱、发电机、叶片等主要部件,对现有故障诊断方法进行了分类与综述,为提高系统可靠性、降低成本等提供了有效的参考.目前风力发电系统的故障诊断方法主要分为基于解析模型^[3-4]、基于数据处理方法^[5-6]、基于智能和模糊网络方法^[7-8].先进的建模技术使得基于模型的方法成为故障诊断中最为实用的方法之一,而观测器法应用最为广泛,其基本思想^[9]是根据系统的输入与可测输出设计状态观测器,产生一个输出误差作为残差,用来判断系统是否出现故障,并已经取得一系列成果^[10-13].文献[10]通过设计滑模观测器对风力发电系统的传感器进行故障检测与隔离,克服了系统外界干扰和不确定性,提高了系统的稳定性,但系统全局性与实时性差.如文献[11]针对一种V47/660 kW的风力机,利用未知输入观测器产生残差实现故障检测,提高了系统抗扰动和模型不确定性,其通过建立故障隔离逻辑表对不同故障辨别和隔离,工作复杂且对故障的幅值大小、波形等信息未知.文献[12]采用 H_∞ 观测器对传感器故障进行检测,其利用一种动态滤波器来获得故障大小,但不能在大范围内实现对故障的准确估计.因此可看出故障检测只能给出何时出现了故障,并不能得到故障信息.此时必须考虑故障重构技术,其在实现故障检测和分离的同时,得到故障大小与发生时间等信息,为采取有效措施消除故障对系统的影响提供更充分的依据.文献[13]针对风力发电系统中执行器故障,通过设计滑模故障观测器获取故障信息,对执行器故障进行重构,达到故障诊断目的,并利用重构的执行器故障补偿控制器输入,实现主动容错控制目的,但其并未对观测器、控制器的稳定性进行证明,同时故障重构方法有很大局限性,不能实现对非线性风力发电系统执行器故障的准确重构.文献[14]针对基于双馈感应发电机的风力发电系统,采用T-S模型来处理传感器故障诊断中的非线性,同时引入输出误差的“虚拟动态”来避免复杂的LMI解耦和转换问题,但系统的稳定性不能得到可靠保证.

然而风力发电系统具有非线性、多变量、强耦合的特点,传统的线性观测器在实现故障诊断时很难达到理想效果.滑模观测器是一种非线性观测器,利用其固有的鲁棒性克服系统模型的不确定性或非线性,同时T-S模糊理论具有结构简单、逼近能力强等优点,便于建立系统的全局T-S模糊模型,去处理非线性系统.因此论文将T-S模糊理论与滑模观测器理论相结合,设计一种模糊T-S系统滑模故障观测器,通过引入等价输出控制方法来维持滑模运动,直接获取故障信息,实现风力发电系统中转速和电磁转矩的传感器故障检测与重构.

2 双馈风力发电系统的建模 (Model of double-fed wind turbine system)

基于双馈感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)的风力发电系统的基本结构如图1所示.所给出的4个数字分别表示从图形的左边缘、下边缘、右边缘、上边缘被截去的值,正数表示从边缘截去的大小,而负数表示从边缘加上大小.

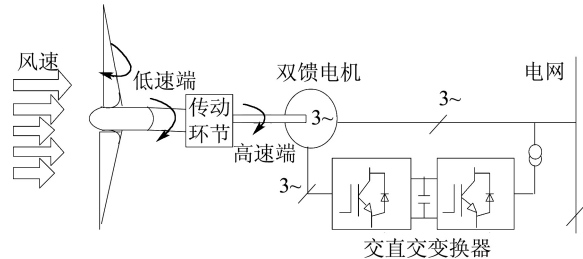


图1 基于DFIG的风力发电系统的基本结构

Fig. 1 Basic structure of wind turbine based on DFIG

风力发电系统主要由风轮机、传动系统、发电机及电网组成.其中风轮机捕获电能决定了风力发电系统的转换效率.

根据贝兹理论,风轮机产生的机械功率为

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

式中: ρ 为空气密度; R 为风轮机风轮半径; v 为风速; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数; $\lambda = R \cdot \Omega_l / v$ 为叶尖速比, Ω_l 为低速轴转速, β 为桨叶节距角.

在额定风速以下时,桨叶节距角 β 固定,论文取 $\beta = 0$,则 $C_p(\lambda, \beta) = C_p(\lambda)$,功率系数可由如下多项式给出^[15]:

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

则 C_p 与 λ 的关系曲线如图2所示.

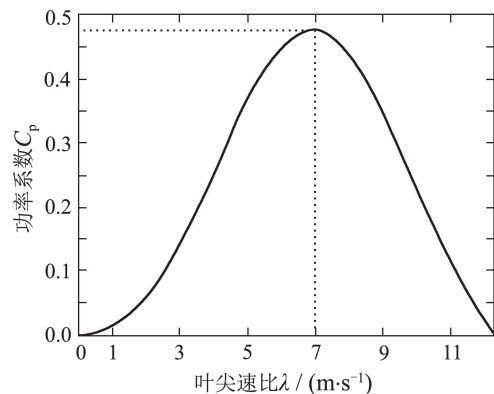


图2 C_p - λ 曲线

Fig. 2 Curve of C_p - λ

如图2所示, C_p - λ 的关系曲线体现了风力机的风能转换效率.当叶尖速比 $\lambda = 7$ 时, $C_p = 0.476$,此时

性能参数叶尖速比与风能利用系数均为最优值, 风力发电系统在部分负荷区实现风能最大捕获。

风轮输出转矩为

$$\Gamma_{wt} = \frac{P_{wt}(t)}{\Omega_l(t)} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_\Gamma(\lambda), \quad (2)$$

式中: $C_\Gamma(\lambda)$ 为风力机的转矩系数, $C_\Gamma(\lambda) = C_p(\lambda)/\lambda$ 。

忽略模型中的一些动态特性^[16], 考虑电磁时间常数远小于机械时间常数, 在系统建模时可忽略发电机的电磁响应的动态过程, 则风力发电系统动态状态方程可表示如下^[15]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (3)$$

式中: $x(t) = [\Omega_h \ \Gamma_G]^T$ 为状态向量, $u(t) = \Gamma_G^*$ 为输入向量, 即电磁转矩参考值, $y(t)$ 为输出向量,

$$A(x(t)) = \begin{bmatrix} \frac{\Gamma_{wt}(\Omega_h/i_0, v)}{i \cdot J_t \cdot \Omega_h} & -\frac{1}{J_t} \\ 0 & -\frac{1}{TG} \end{bmatrix},$$

$$B = [0 \ \frac{1}{TG}]^T, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

其中: Ω_h 为高速轴的转速, Γ_G 为发电机的电磁转矩, Γ_{ref}^* 为电磁转矩参考值, i_0 为齿轮的变速比, T_G 为电磁时间常数, J_t 为高速轴转动惯量。

从风力发电系统的状态方程(3)可知系统的控制输入为电磁转矩参考值, 系统矩阵 A 中元素 A_{11} 包含空气动力转矩 Γ_{wt} 和状态变量高速轴转速 Ω_h , 由于空气动力转矩 Γ_{wt} 是非线性函数且内部变量风速 v 和高速轴转速 Ω_h 具有强耦合, 所以风力发电系统具有强的非线性特点。

当系统发生传感器加性故障时, 风力发电系统模型变为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t) + Ff_s(t), \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f_s(t) = [f_{wt}(t) \ f_h(t)]^T$ 为传感器故障, 并且是范数有界的, 即存在正数 β , 使 $\|f_s(t)\| < \beta$; $f_{wt}(t)$ 为电磁转矩传感器故障; $f_h(t)$ 为高速轴转速传感器故障; F 为已知传感器故障的满秩分配矩阵, 表示哪个提供测量的传感器易出现故障。

3 风力发电系统 T-S 模糊模型建立 (T-S fuzzy model of wind turbine system)

T-S模糊算法的主要思路是利用多个局部线性模型去逼近非线性动态模型, 如果模糊规则 i 选择足够多, 其能够以任意精度逼近任意一个复杂的非线性动态模型。

对风力发电系统进行T-S模糊^[17], 定义前件模糊变量为 $z_1(t) = v, z_2(t) = \Omega_h(t)$, 则系统(4)中矩阵 A 可写成新形式 $A(z_1(t), z_2(t))$ 。取 $v_1 \leq \min(v) \leq \max(v) \leq v_m; \Omega_{h1} \leq \min(\Omega_h) \leq \max(\Omega_h) \leq \Omega_{hm}$ 。在区间 $[v_1, v_m]$ 上取 $m - 2$ 个点, 并且在区间 $[\Omega_{h1}, \Omega_{hm}]$ 上也取 $n - 2$ 个点, 则可得到由若干个前件模糊变量值组成的两个序列:

$$\begin{cases} Z_1 = (v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_m), \\ Z_2 = (\Omega_{h1}, \Omega_{h2}, \dots, \Omega_{hi}, \dots, \Omega_{hn}), \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 。

根据泰勒公式, 得到风转矩变量在 (v_i, Ω_{hi}) 处的线性表达式为

$$d\Gamma_{wt} = \frac{\gamma \pi \rho R^3}{2} C_\Gamma(\lambda_i) \frac{i_0^2 v_i^2}{\Omega_{hi}} d\Omega_h + \frac{(2 - \gamma) \pi \rho R^3}{2} C_\Gamma(\lambda_i) v_i dv, \quad (6)$$

式中 γ 为转矩参数, 并且

$$\gamma = \frac{\lambda C'_p(\lambda_i)}{C_p(\lambda_i)} - 1, \quad C'_p(\lambda) = \frac{dC_p(\lambda)}{d\lambda}.$$

将式(6)代入式(4), 并将序列 Z_1 和 Z_2 中元素彼此匹配, 代替系统矩阵 $A(z_1(t), z_2(t))$ 中的 $z_1(t)$ 和 $z_2(t)$, 可得一系列的常值矩阵 $A_{ij}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$, 进一步可得第 i 个子系统的局部线性模型为

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (7)$$

定义T-S模糊模型的模糊规则如下:

Rule R^i : If $z_1(t)$ is M_{i1} and z_2 is M_{i2} and $\dots z_r(t)$ is M_{ir} , then

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t), \\ y(t) = C_i x(t) + F f_s(t), \quad i = 1, 2, \dots, r, \end{cases} \quad (8)$$

式中: R^i 为第 i 条模糊规则, $z_j(j = 1, 2)$ 为前件模糊变量, M_{ij} 为模糊子集, r 为模糊规则总数。

定义模糊权值为

$$h_i(z(t)) = \frac{\prod_{j=1}^n M_{ij}(z_j(t))}{\sum_{i=1}^r \prod_{j=1}^n M_{ij}(z_j(t))}, \quad (9)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, r, M_{ij}(z_j(t))$ 为前件模糊变量 $z_j(t)$ 在第 i 条模糊规则下对应的隶属度函数, 且两个模糊子集的隶属度函数均采用三角函数, 且 $\sum_{i=1}^r h_i(z) = 1, 0 \leq h_i(z) \leq 1$ 。

则风力发电系统T-S模糊模型的全局状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z) [A_i x(t) + B_i u(t)], \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z) C_i x(t) + F f_s(t). \end{cases} \quad (10)$$

4 基于滑模观测器的传感器故障重构 (Sensor fault reconstruction based on sliding mode observer)

4.1 T-S模糊系统滑模观测器(T-S fuzzy sliding-mode observer)

假设 1 增广矩阵 (A_i, C_i) 是可观的, 这样存在增益矩阵 L_i 使得 A_{0i} 的特征值都在复平面的左半平面, 其中 $A_{0i} = A_i - L_i C_i$.

假设 2^[18] 设存在正交阵 T , 经过可逆线性变换, 使得

$$\begin{cases} TC_i = [C_{1i} \ C_{2i}]^T, \\ TF = [F_1 \ 0]^T, \end{cases} \quad (11)$$

式中: F_1 是非奇异的, T 可通过对 F 进行简单的QR分解得到 C_{1i}, C_{2i} .

用矩阵 T 乘以系统状态方程(10)中的输出矩阵 C_i , 可将输出方程分解为含有传感器故障(y_1)和不含有传感器故障(y_2)的两个测量方程:

$$y_1 = \sum_{i=1}^r h_i(z) C_{1i} x + F_1 f_s(t), \quad (12)$$

$$y_2 = \sum_{i=1}^r h_i(z) C_{2i} x. \quad (13)$$

为了实现故障 f_s 进行重构, 定义一个新的状态 z_f ^[19-20]如下:

$$\dot{z}_f = -A_f z_f + A_f y_1, \quad (14)$$

式中 A_f 为一个稳定滤波矩阵.

联立式(11)至(14)得

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{z}_f(t) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^r h_i(z) (A_{\alpha i} \begin{bmatrix} x(t) \\ z_f(t) \end{bmatrix} + B_{\alpha i} u) + F_{\alpha} f_s(t), \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} y_2(t) \\ z_f(t) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^r h_i(z) (C_{\alpha i} \begin{bmatrix} x(t) \\ z_f(t) \end{bmatrix}), \quad (16)$$

式中:

$$A_{\alpha i} = \begin{bmatrix} A_i & 0 \\ A_f C_{2i} & -A_f \end{bmatrix}, \quad B_{\alpha i} = [B_i \ A_f \ F_{1i2}]^T,$$

$$C_{\alpha i} = \begin{bmatrix} C_{1i} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad F_{\alpha} = [0 \ A_f \ F_1]^T,$$

$$E_{\alpha i} = [E_i \ 0]^T.$$

构造系统状态观测器如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{\hat{z}}_f(t) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^r h_i(z) (A_{\alpha i} \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{z}_f(t) \end{bmatrix} + B_{\alpha i} u + L_i \begin{bmatrix} e_{y2} \\ e_{zf} \end{bmatrix}) + L_n v_{\rho}, \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{y}_2(t) \\ \hat{z}_f(t) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^r h_i(z) C_{\alpha i} \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{z}_f(t) \end{bmatrix}, \quad (18)$$

式中: $e_{y2} = y_2 - \hat{y}_2$, $e_{zf} = z_f - \hat{z}_f$, 为了能够确保滑模运动而设计滑模控制策略 v_{ρ} , 即

$$v_{\rho} = \begin{cases} -\rho P_2^{-1} \frac{e_{zf}}{\|e_{zf}\|}, & e_{zf} \neq 0, \\ 0, & e_{zf} = 0, \end{cases} \quad (19)$$

式中: ρ 为修正系数(增益), 由故障幅值所决定. L_i, L_n 为鲁棒滑模观测器的待定线性反馈矩阵和非线性反馈矩阵.

则状态估计误差为

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z) h_j(z) ((A_{\alpha i} + L_i C_{\alpha j}) e) + \\ &L_n v_{\rho} - F_{\alpha} f_s(t), \end{aligned} \quad (20)$$

式中 $e = [e_x \ e_{zf}]^T$.

引理 1^[21] 对于系统(10), 存在满足李雅普诺夫方程解的对称正定矩阵 P 和矩阵 L_i , 使得

$$P(A - L_i C) + (A - L_i C)^T P < 0. \quad (21)$$

证明参见文献[21].

下面对所设计的状态观测器(17)–(18)的稳定性进行证明. 考虑系统(10), 在满足假设1、2且传感器故障范数有界情况下, 构造李雅普诺夫函数 $V = e^T P e$, 对称阵

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix},$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} = \\ &\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z) h_j(z) e^T (A_{\alpha i} + L_i L_{\alpha j})^T P e + \\ &L_n v_{\rho} P e - F_{\alpha} f_s(t) P e + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z) h_j(z) e^T \\ &P (A_{\alpha i} + L_i L_{\alpha j})^T e + e^T P L_n v_{\rho} - e^T P F_{\alpha} f_s(t) = \\ &\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z) h_j(z) e^T ((A_{\alpha i} + L_i L_{\alpha j})^T P + \\ &P (A_{\alpha i} + L_i L_{\alpha j})) e + 2e^T P L_n v_{\rho} - 2e^T P F_{\alpha} f_s(t). \end{aligned} \quad (22)$$

据引理1可取

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z) h_j(z) ((A_{\alpha i} + L_i C_{\alpha j})^T P + \\ &P (A_{\alpha i} + L_i C_{\alpha i})) < -\delta I. \end{aligned} \quad (23)$$

将式(23)代入式(22)可得

$$\dot{V} < -\delta e^T e + 2e^T P L_n v_{\rho} - 2e^T P F_{\alpha} f_s(t). \quad (24)$$

这里可以看出当 $e_{zf} = 0$ 时, 显然 $\dot{V} < 0$, 取 $L_n = [0 \ I]^T$, 并将

$$v_{\rho} = -\rho P_2^{-1} \frac{e_{zf}}{\|e_{zf}\|} (e_{zf} \neq 0), \quad F_{\alpha} = [0 \ A_f F]^T$$

代入式(24)得

$$\begin{aligned} \dot{V} < -\delta e^T e - 2e^T P \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \rho P_2^{-1} \frac{e_{zf}}{\|e_{zf}\|} - \\ 2e^T P \begin{bmatrix} 0 \\ A_f F_1 \end{bmatrix} f_s(t) < -\delta \|e\|^2 - 2\rho \|e_{zf}\| - \\ 2e^T P_2 A_f F_1 f_s(t) < -\delta \|e\|^2 - \\ 2\|e_{zf}\|(\rho + \|P_2 A_f F_1\| \|f_s(t)\|) < 0. \end{aligned} \quad (25)$$

根据李雅普诺夫全局稳定性原理, 由于 $\dot{V} < 0$, 到达滑模面 $s = \{e : e_{zf} = 0\}$ 后, 系统动态偏差方程(20)渐进收敛于0. 因此所设计的状态观测器(17)–(18)为风力发电系统(10)的鲁棒故障观测器并且是渐进稳定的.

定理 1 对于系统(10)满足假设1–2条件下, 若观测器增益满足

$$\rho > (\|P_2 A_f F_2\| \|f_s(t)\| + \max \|P_2 A_{21ij}\| \|e_x\|),$$

则系统状态能够在有限时间内到达滑模面, 渐进估计系统的状态. 证明如下:

考虑李雅普诺夫函数 $V(e_{zf}) = e_{zf}^T P_2 e_{zf}$, 并进行求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_{zf}) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z) h_j(z) (e_{zf}^T (A_{22ij}^T P_2 + \\ P_2 A_{22ij}) e_{zf} + 2e_{zf}^T P_2 A_{21ij} e_x) - \\ 2e_{zf}^T P_2 v_\rho + 2e_{zf}^T P_2 A_f F_2 f_s(t). \end{aligned} \quad (26)$$

据引理1可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_{zf}) < 2e_{zf}^T P_2 A_{21ij} e_x - 2e_{zf}^T P_2 v_\rho + \\ 2e_{zf}^T P_2 A_f F_2 f_s(t). \end{aligned} \quad (27)$$

与式(27)同理可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_{zf}) < -2\|e_{zf}\|(\rho - \|P_2 A_f F_2\| \|f_s(t)\| - \\ \max \|P_2 A_{21ij}\| \|e_x\|). \end{aligned} \quad (28)$$

当满足

$$\rho > \|P_2 A_f F_2\| \|f_s(t)\| + \max \|P_2 A_{21ij}\| \|e_x\|,$$

则 $\dot{V}(e_{zf}) < 0$. 因此在有限时间内, 状态估计误差将会到达滑模面 $s = \{e : e_{zf} = 0\}$, 渐进估计系统(10)的状态.

这里观测器增益矩阵 L_i 和对称正定阵 P 的求解步骤参考文献[22–23]. 由式(17)–(18)所确定的观测器可作为风力发电系统的状态观测器. 这里状态估计误差(20)仅与传感器故障有关, 可用来进行传感器故障检测. 当传感器故障 $f_s(t) = 0$ 时, 残差会渐进收敛于零; 而当传感器故障 $f_s(t) \neq 0$ 时, 对不同故障做出不同的响应. 此时可通过对残差 $e_y(t)$ 进行逻辑划分来判断是否发生传感器故障:

$$J(t) = \begin{cases} \|e_y(t)\| \leq t_{vd}, f_s = 0, \\ \|e_y(t)\| > t_{vd}, f_s \neq 0, \end{cases} \quad (29)$$

式中: t_{vd} 为人为设定的故障检测阈值, 此时观测器(17)–(18)可以称为风力发电系统故障检测器, 关于风力发电系统的故障检测具体工作可参见文献[24].

4.2 传感器故障重构(Sensor fault reconstruction)

引入等价输出控制 $v_{\rho eq}$, 其代表滑模策略的平均特性以及维持滑模表面运动所必需的作用.

当系统滑模运动到达切换面时, $e_{zf} = \dot{e}_{zf} = 0$, 则误差方程(20)可以表示为

$$\dot{e}_x = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z) h_j(z) (A_{11ij} e_x), \quad (30)$$

$$\begin{aligned} f_s(t) = (A_f F_1)^{-1} (v_{\rho eq} + \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z) h_j(z) \\ (A_{21ij} e_x)). \end{aligned} \quad (31)$$

T-S模糊滑模观测器(17)–(18)的设计过程中采用不连续开关项, 即滑模控制策略 v_ρ , 使得观测器偏差方程(20)产生一种滑模运动, 维持估计误差轨迹在误差空间, 确保系统对外界扰动具有鲁棒性. 但是这将不可避免地产生抖振, 对系统带来高频干扰, 增加系统的机械应力. 为了减小抖振对系统带来的影响, 论文对采用如式(32)连续函数对等价输出控制 $v_{\rho eq}$ 进行的逼近方法[25], 使得

$$v_{\rho eq} = \eta P_2^{-1} \frac{e_{zf}}{\|e_{zf}\| + \sigma}, \sigma > 0, \quad (32)$$

式中 σ 表示近似精确程度较小的正标量.

通过式(30)–(32), 传感器故障重构值可表示如下:

$$\hat{f}_s(t) = (A_f F_1)^{-1} v_{\rho eq}. \quad (33)$$

此时传感器故障重构误差为

$$e_{sr} = f_s(t) - \hat{f}_s(t), \quad (34)$$

式中 e_{sr} 为传感器故障重构误差. 为了反映故障重构的精度, 可选择故障重构误差阈值 $t_{vr} = m + d$, m 和 d 分别为残差的平均值和标准差[10].

5 仿真结果与分析 (Simulation results and analysis)

5.1 仿真条件 (Simulation conditions)

论文采用低功率(6 kW)、高转速、定桨距的三叶片水平轴双馈风力发电系统, 具体参数如表1所示.

表 1 风力发电系统系统仿真参数

Table 1 Simulation parameter of wind turbine system

空气动力参数	传动链参数	发电机参数
$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$	$i_0 = 6.25$	$\Gamma_{Gopt} = 40 \text{ Nm}$
$R = 2.5 \text{ m}$	$J_t = 0.0092$	$P_n = 6 \text{ kW}$
$C_{pmax} = 0.4769$	$\eta = 0.95$	
$\lambda_{opt} = 7$	$J_{wt} = 3.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	

风力发电系统和所设计观测器的初始状态设置为

$$x(0) = [0 \ 0]^T, \hat{x}(0) = [0.1 \ 0.2]^T.$$

为了得到风力发电系统的T-S模糊全局模型, 对前件输入变量风速从 $v = 1 \text{ m/s}$ 到 $v = 9 \text{ m/s}$ 范围变化时取若干点, 同时对高速轴转速在 $\Omega_h = 1.986 \text{ rad/s}$ 至 $\Omega_h = 156.623 \text{ rad/s}$ 进行匹配取点, 然后对具有强非线性的空气动力转矩进行线性化, 得到各个子系统的线性化模型. 论文为了避免较大的估计误差及增加设计控制器的难度, 取十个点进行计算. 则风力发电系统的T-S模糊模型可描述为

Rule 1 if $z_1(t)$ is about 1 and $z_2(t)$ is about 1.986, then $\dot{x} = A_1x + B_1u$;

⋮

Rule 10 if $z_1(t)$ is about 9 and $z_2(t)$ is about 156.623, then $\dot{x} = A_{10}x + B_{10}u$;

则各局部线性子系统的参数分别为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.138 & -10.83 \\ 0 & -50 \end{bmatrix}, \dots,$$

$$A_{10} = \begin{bmatrix} 238.43 & -10.83 \\ 0 & -50 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \dots = B_{10} = \begin{bmatrix} 0 \\ 50 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = \dots = C_{10} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$F_1 = \dots = F_{10} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

对应的风速 v 和高速轴转速 Ω_h 两个模糊子集的隶属度函数均采用三角函数, 如图3所示.

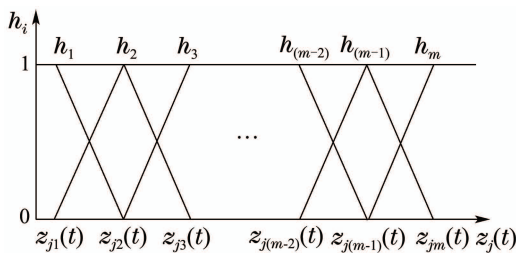


图3 隶属度函数结构图

Fig. 3 The structure of membership functions

可得风力发电系统的全局T-S模糊模型为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^{10} h_i(z)A_i x(t) + \sum_{i=1}^{10} h_i(z)B_i u(t), \\ y(t) = \sum_{i=1}^{10} h_i(z)C_i x(t) + F f_s(t). \end{cases} \quad (35)$$

利用极点配置算法, 计算可得观测器增益矩阵分别为

$$L_1 = \begin{bmatrix} -36.32 \\ -196.61 \end{bmatrix}, \dots, L_{10} = \begin{bmatrix} -45.27 \\ -212.76 \end{bmatrix}.$$

5.2 系统的整体结构框图(Global structure diagram of system)

风力发电系统传感器故障诊断策略整体结构, 如图4所示. 系统控制器是以传感器输出信号作为输入, 由于系统采用闭环反馈控制, 当输出端传感器发生故障时, 控制器的输入信号发生改变, 导致反馈给系统的控制信号异常, 降低系统的风能转换效率. 通过所设计的T-S模糊滑模观测器来获得系统输出残差, 基于此信号设计故障重构系统, 利用等价输出注入理论估计传感器故障信号, 在实现故障隔离的同时直接获取故障波形、幅值等信息, 为进一步采取容错控制消除故障对系统的影响提供更充分的依据.

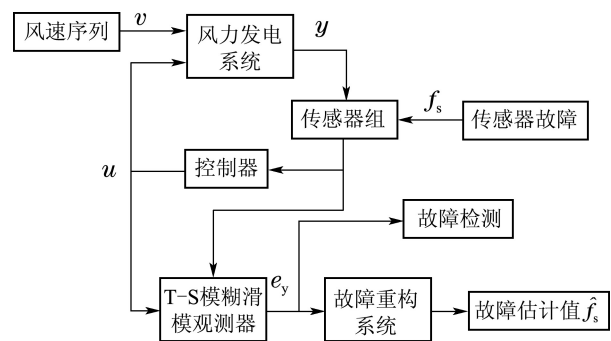


图4 风力发电系统传感器故障诊断策略整体结构图

Fig. 4 The global structure of sensor fault diagnosis for wind turbine system

5.3 仿真结果(Simulation results)

传感器故障通常来源于传感器老化磨损, 长期使用而未定期进行校正, 甚至是完全失效, 故障类型主要有突变故障、缓变故障和完全失效. 由于完全失效一般会对风机带来致命性危害, 严重影响系统性能, 在此不作考虑. 论文以高速轴转速传感器的突变故障及缓变故障为例, 论文中传感器故障都取为时间 t 的函数, 对风力发电系统进行故障重构研究和仿真分析.

1) 传感器突变故障.

可用偏差故障表示, 如式(36)所示:

$$f_{h1}(t) = \begin{cases} 15, & 30 \leq t \leq 60, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (36)$$

2) 传感器缓变故障.

可用漂移故障表示, 如式(37)所示:

$$f_{h2}(t) = \begin{cases} 24 \sin \frac{\pi}{2} t \cdot \cos \frac{\pi}{2} t, & 45 \leq t \leq 75, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (37)$$

论文在给定的故障时间内, 分别对两种类型的故障重构误差在30–60 s和45–75 s进行采样, 取1000个数据点, 分别计算误差的平均值和标准差, 进而选取故障重构误差阈值 $t_{vr1} = 0.836$, $t_{vr2} = 0.672$.

风力发电系统输入风速序列, 如图5所示.

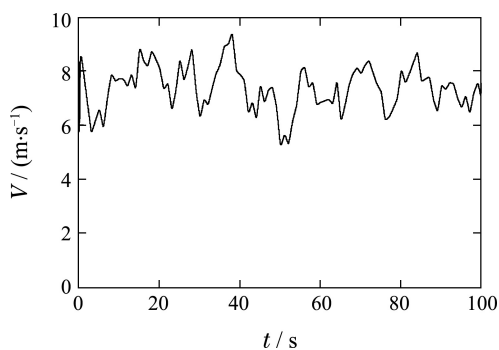


图5 风速 v

Fig. 5 Wind speed

利用论文所设计的T-S模糊滑模观测器可以得到系统状态估计值, 图6为无传感器故障时系统高速轴转速状态估计值与实际值的对比图, 图7为无传感器故障时系统电磁转矩状态估计值与实际值的对比图. 如图6-7所示, 论文所设计的T-S模糊滑模观测器能快速跟踪系统原始状态, 其状态估计效果是令人满意的.

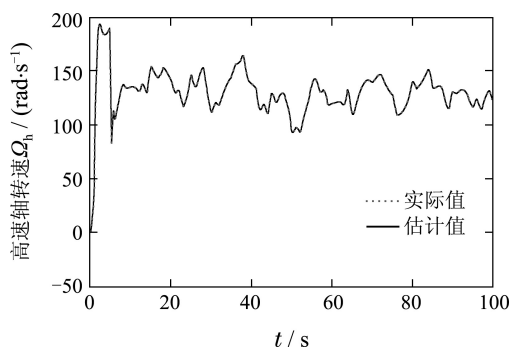


图6 无故障下高速轴转速 Ω_h 实际值及估计值

Fig. 6 Actual value and estimated value of high speed shaft speed Ω_h without fault

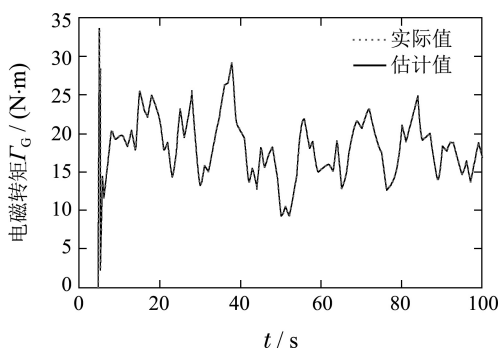


图7 无故障下电磁转矩 Γ_G 实际值及估计值

Fig. 7 Actual value and estimated value of electromagnetic torque Γ_G without fault

利用论文所设计的故障重构系统能够实现传感器故障重构, 得到故障重构值及重构误差如图8-11所示.

根据图8-10, 可看出论文所设计的观测器能够准确地对高速轴转速传感器故障进行重构, 可以直接获

取故障波形、幅值等信息, 避免了产生和评价残差信号的复杂性.

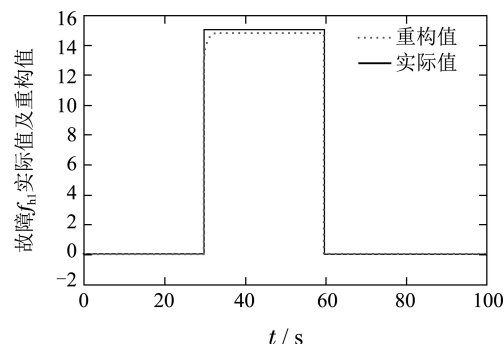


图8 传感器偏差故障 $f_{h1}(t)$ 重构

Fig. 8 Fault reconstruction of sensor deviation fault $f_{h1}(t)$

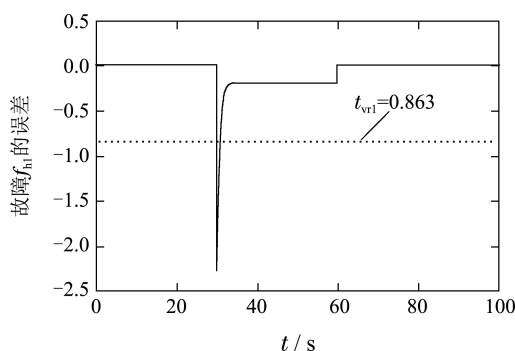


图9 传感器偏差故障 $f_{h1}(t)$ 的重构误差

Fig. 9 Error of sensor deviation fault $f_{h1}(t)$ reconstruction

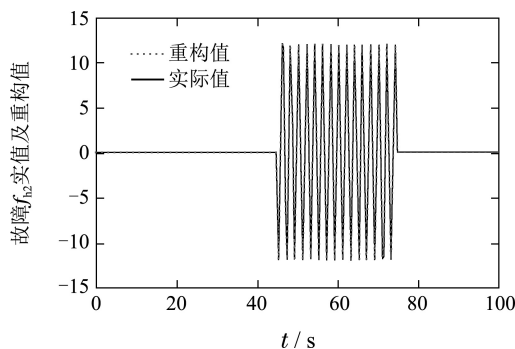


图10 传感器漂移故障 $f_{h2}(t)$ 实际值及重构值

Fig. 10 Fault reconstruction of sensor drifting fault $f_{h2}(t)$

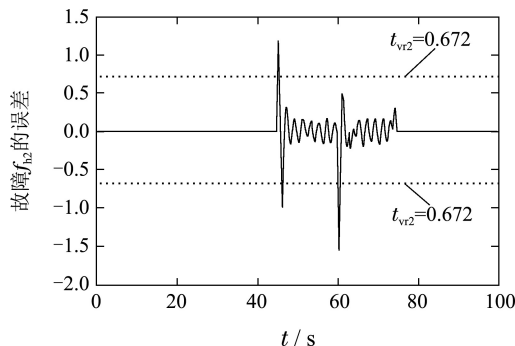


图11 传感器漂移故障 $f_{h2}(t)$ 的重构误差

Fig. 11 Error of sensor drifting fault f_{h2} reconstruction

根据图9-11,将两种故障重构误差分别与给定阈值 $t_{vr1} = 0.836$, $t_{vr2} = 0.672$ 进行比较判断,可看出除少数尖峰点外,故障重构误差均保持在给定的阈值范围内,说明故障重构精度很高,所提出的故障重构理论对传感器故障的重构是准确和有效的。

6 结论(Conclusions)

故障重构是实现风力发电系统的容错控制策略的依据,降低风电维修成本的重要手段。论文利用T-S模糊理论建立系统全局模型,研究了风力发电系统的高速轴转速传感器的故障重构问题。给出模糊T-S系统滑模观测器的设计方法与稳定性证明,同时利用等价输出控制方法直接获取故障信息,实现传感器故障的重构。通过仿真分析可看出所设计的模糊T-S系统滑模观测器能够在较大的风速范围内实现传感器故障检测与重构,并且取得了满意的故障重构效果。

参考文献(References):

- [1] HAMEED Z, AHH S H, CHO Y M, et al. Practical aspects of condition monitoring system for a wind with emphasis on its design, system architecture, testing and installation [J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(5): 879 – 894.
- [2] SHEN Yanxia, LI Fan. A survey of diagnosis methods for wind power system [J]. *Control Engineering of China*, 2013, 20(5): 789 – 795. (沈艳霞, 李帆. 风力发电系统故障诊断方法综述 [J]. 控制工程, 2013, 20(5): 789 – 795.)
- [3] SHEN Yanxia, JI Lingyan, JI Zhicheng. Design of fault-tolerant controller for wind energy conversion system based on the RBF neural network fault observer [J]. *Information and Control*, 2015, 44(3): 359 – 366. (沈艳霞, 季凌燕, 纪志成. 基于径向基函数神经网络故障观测器的风力发电系统容错控制器设计 [J]. 信息与控制, 2015, 44(3): 359 – 366.)
- [4] HWAS A, KATEBI R. Model-based fault detection and isolation for wind turbine [C] // *Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control*. Cardiff, UK: IEEE, 2012: 876 – 881.
- [5] YANG Z, WANG B, DONG X, et al. Expert system of fault diagnosis for gear box in wind turbine [J]. *System Engineering Procedia*, 2012, 4(1): 189 – 195.
- [6] GONG X. Bearing fault diagnosis for direct-driven wind turbine via a current-demodulated signal [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(8): 61 – 66.
- [7] YIN S, WANG G, KARIMI H R. Data-driven design of robust fault detection system for wind turbine [J]. *Mechatronics*, 2014, 24(4): 298 – 306.
- [8] WU J, LIU C. An expert system for fault diagnosis in internal combustion engines using wavelet packet transform and neural network [J]. *Expert System with Applications*, 2009, 36(3): 4278 – 4286.
- [9] ZHU Fanglai, CEN Feng, DONG Xueping. A kind of fault detection and fault reconstruction based on full-order and reduced-order observers [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(2): 258 – 270. (朱芳来, 岑峰, 董学平. 一种基于全维和降维观测器的故障检测和重构方法 [J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 258 – 270.)
- [10] WEI X, VERHAEGEN M. Sensor and actuator fault diagnosis for wind turbine systems by using robust observer and filter [J]. *Wind Energy*, 2011, 14(4): 491 – 516.
- [11] ASGARI S, YAZDIZADEH A, KAZEMI M G, et al. Model-based fault detection and isolation for V47/660 kW wind turbine [C] // *Proceedings of the 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*. Tehran, Iran: IEEE, 2015: 1574 – 1579.
- [12] ZHANG J, BENNOUNA O, SWAIN A K, et al. Detection and isolation of sensor faults of wind turbines using sliding mode observers [C] // *Proceedings of 2013 International Renewable and Sustainable Energy Conference*. Ouarzazate, Morocco: IEEE, 2013: 234 – 239.
- [13] 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. (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.)
- [14] QUYESSAAD H, CHAFOUK H, LEFEBVRE D. Fault sensor diagnosis with Takagi-Sugeno approach design applide for DFIG wind energy systems [C] // *Proceeding of the 3rd International Conference on Systems and Control*. Algeria: IEEE, 2013: 55 – 60.
- [15] MUNTEANU I, BRARCU A I, CUTULUIS N A, et al. *Optimal Control of Wind Energy System* [M]. London: Springer, 2008.
- [16] ESBENSEN T, SLOTH C. *Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of Wind Turbines* [M]. Denmark: Aalborg University, 2008–2009: 9 – 23.
- [17] KAZUO T, WANG H O. *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach* [M]. New York, American: John Wiley & Sons, 2001: 5 – 83.
- [18] ZHAO Jin, GU Xingsheng, SHEN Zhongyu. Design and simulation of robust sliding mode observer for linear uncertain system [J]. *Journal of East China University of Science and Technology*, 2006, 32(7): 810 – 813. (赵瑾, 顾幸生, 申忠宇. 线性不确定系统的鲁棒滑模观测器设计与仿真 [J]. 华东理工大学学报, 2006, 32(7): 810 – 813.)
- [19] CHEE P, CHRISTOPHE E. Sliding mode observers for detection and reconstruction of sensor faults [J]. *Automatica*, 2002, 38(10): 1815 – 1821.
- [20] CHEE P, CHRISTOPHER E. A robust sensor fault reconstruction scheme using sliding mode observers applied to a nonlinear aero-engine mode [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2002, 6: 5086 – 5091.
- [21] CORLESS M, TU J. State and input estimation for a class of uncertain systems [J]. *Automatica*, 1998, 34(6): 757 – 764.
- [22] MENG Jianji, ZHANG Weiwei. Fault detection and reconstruction for a nonlinear system based on sliding mode observers [J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28(11): 24 – 28. (孟建基, 张巍巍. 基于滑模观测器的非线性系统故障检测与重构 [J]. 科技导报, 2010, 28(11): 24 – 28.)
- [23] WANG Zhanshan, ZHANG Huaguang, LI Ming, et al. Design of a class of nonlinear state observer [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science Edition*, 2003 24(11): 1025 – 1028. (王占山, 张化光, 黎明, 等. 一类非线性状态观测器的设计 [J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2003, 24(11): 1025 – 1028.)
- [24] YANG Xiongfei, SHEN Yanxia. Research of actuator fault detection for wind energy conversion system [J]. *Control Engineering of China*, 2016, 23(4): 506 – 511. (杨雄飞, 沈艳霞. 风能转换系统的执行器故障检测研究 [J]. 控制工程, 2016, 23(4): 506 – 511.)
- [25] EDWARDS C, SPURGEON S K, PATTON R J. Sliding mode observers for fault detection and isolation [J]. *Automatica*, 2000, 36(4): 541 – 553.

作者简介:

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

杨雄飞 (1989–), 男, 硕士研究生, 研究方向为风能转换系统的容错控制, E-mail: yxfjnlw@163.com;

赵芝璞 (1976–), 女, 讲师, 研究方向为电力电子与电气传动, E-mail: zzp-wx@163.com.