# 基于集值观测器的风能转换系统多类型故障检测的设计

## 赵睿楠, 沈艳霞†

(江南大学物联网工程学院,江苏无锡 214122)

摘要:针对受延时输入影响的风能转换系统的故障检测问题,本文设计了基于集值观测器的故障检测策略.风能转换系统常见故障可以区分为加性故障与乘性故障,本文对增广统一风能转换系统模型,设计一种全局集值观测器,通过改变所选择的状态集顶点和参考误差区间,改变增益矩阵元素的取值范围,选择合适的增益矩阵,实现精确的状态跟踪.在此基础上设计了同时考虑状态相对估计误差与输出的绝对估计误差的故障检测策略.仿真结果表明,本文设计的故障检测策略对常见多类型故障可以做出快速的故障判断.对比Rosa所设计的故障检测策略,该研究在故障检测时间上具有明显优势.

关键词: 延时输入;风能转换系统;集值观测器;多类型故障;故障检测

引用格式: 赵睿楠, 沈艳霞. 基于集值观测器的风能转换系统多类型故障检测的设计. 控制理论与应用, 2021, 38(2): 187-196

DOI: 10.7641/CTA.2020.00248

## Multi-type fault detection design of wind energy conversion systems via set-valued observer

ZHAO Rui-nan, SHEN Yan-xia<sup>†</sup>

(School of IoT Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** The fault detection (FD) strategies based on set-valued observer (SVO) are designed in this paper to deal with the problem of FD of wind energy conversion systems (WECSs) affected by delayed input. The common faults of WECSs can be divided into additive faults and multiplicative faults. For the augmented unified model of WECS, a global SVO is designed to achieve accurate state tracking by changing the selected state sets vertexes and reference error intervals, changing the value ranges of the gain matrix elements, and selecting the appropriate gain matrix. On this basis, the fault detection strategies which considered both the relative estimation errors of state and the absolute estimation error of output are designed. The simulation results show that the designed FD strategies can offer rapid fault determination for common multi-type faults. Comparing with the FD strategies designed by Rosa, this research has obvious advantages in the time of FD.

Key words: delayed input; wind energy conversion systems; set-valued observer; multi-type faults; fault detection Citation: ZHAO Ruinan, SHEN Yanxia. Multi-type fault detection design of wind energy conversion systems via set-valued observer. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(2): 187 – 196

## 1 引言

随着非可再生能源的不断消耗,环保和可持续发展的要求不断提高,风能等可再生清洁能源逐渐成为 我国能源结构中不可缺少的部分.中国已经成为风电 规模最大,增长最快的国家,新增装机容量和累计装 机容量均为世界第一<sup>[1]</sup>.提高风力发电系统的可靠性, 成为降低运行成本的重要手段.为提高可靠性,对风 能转换系统进行故障检测是基础工作.除去由于设计 缺陷等引发的重大故障(如塔台倒塌、桨叶脱落等), 风能转换系统的传感器、执行器和部分机械运动部件 可能发生的故障会对风能转换系统的运行带来显著 的影响<sup>[2]</sup>.根据造成的危害大小,系统故障可以分为 低危害故障和高危害故障.高危害故障的诱因一般是 设计问题或者设备质量问题,且一旦发生会造成系统 停机,将带来经济损失.对于大型机械系统,一般允许 在系统运行时发生低危害故障,采取容错控制或者硬

本文责任编委:陈增强

Supported by the National Natural Science Foundation of China (62573167, 61572237), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (JUSRP51106, JUSRP51510) and the Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYCX17\_1459).

收稿日期: 2020-05-06; 录用日期: 2020-09-28.

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup>通信作者. E-mail: shenyx@jiangnan.edu.cn; Tel.: +86 13861867517.

国家自然科学基金项目(61164015, 61305132), 中央高校基本科研基金项目(JUSRP31106, JUSRP51510), 江苏省研究生创新培养工程项目 (KYCX17\_1459)资助.

件冗余等运行策略,等到停机检修时统一处理.一般 地,低危害故障根据模型的差别可区分为加性故模型 和乘性故障模型.针对这些故障,近年来已有不少研 究成果.如吴忠强等针对风能转换系统主传动链的加 性故障,采用σ修正方法设计自适应故障观测器<sup>[3]</sup>;杨 雄飞等针对风轮机执行器的两种加性故障——增量可 变的漂移故障和增量恒定的偏差故障,设计滑模观测 器和控制器<sup>[4]</sup>;沈艳霞等同样针对风轮机执行器的复 杂加性故障——漂移故障和偏差故障设计了滑模故障 重构观测器<sup>[5]</sup>;赵芝璞等结合冗余控制的思维,采用 的T-S模糊模型对风能转换系统的类加性故障——传 感器失效进行分层容错控制<sup>[6]</sup>.史运涛等针对风速模 型湍流部分的性质,对执行器的乘性故障——增益损 耗采用随机分段仿射建模的算法研究容错控制<sup>[7]</sup>.

以上的研究均存在不足之处,首先是仅仅考虑了 系统某一部分的单一种类故障,对多类型故障的检测 适用性不足;其次是研究对象均为一般输入信号的线 性模型,随着海上风电的不断发展,风能转换系统的 延时特性逐渐明显,因此研究有延时输入信号的风能 转换系统的故障检测更具有现实意义.常见故障检测 是基于状态观测器研究的,目前对于带延时输入的系 统的研究,以观测器设计居多. Mohajerpoor等针对大 延迟输入系统设计了一种新的降阶观测器,并引入指 数稳定算法证明观测器稳定性[8];针对多延时系统, Pakzad 等研究了前向状态转换和后向状态转换两种 状态转换方法,并分别设计了观测器<sup>[9]</sup>;对于延时系 统的特例正延时系统, Trinh等设计了一类降阶正观测 器<sup>[10]</sup>; Branislav采用Razumikhin方法,设计了一种继 承了延时输入部分的状态观测器<sup>[11]</sup>: Vincent等通过 对延时输入信号进行泰勒展开,对扩展的系统设计观 测器[12]. 以上研究中, 观测器对状态在短时间内的正 常波动均表现出了良好的状态跟踪性能.基于集值理 论设计的集值观测器(set-valued observer, SVO)可以 对状态进行误差可控的估计,通过调整参数可以实现 高精度的状态跟踪,构造简单且可控.Hai Lin等提供 了一种基于多顶点估计的集值观测器设计方法[13],对 低维度线性系统的状态跟踪效果良好. Rosa等设计了 基于正常状态与故障状态并集运算的集值观测器,并 构建了一套基于该集值观测器的故障检测和容错控 制理论,奠定了基于保守状态估计的故障检测的基 础<sup>[14]</sup>.为了验证该理论的正确性, Rosa设计了一系列 的故障检测滤波器.例如,针对单一传感器的两个并 行集值观测器,从逻辑上保证了故障检测的正确 性[15]: 4个并行集值观测器和1个并行的名义故障检测 滤波器[16];将文献[16]中的名义故障检测滤波器换成 全局集值观测器以进一步提高故障检测的表现[17]. 仿 真结果表明,基于集值观测器的复杂结构故障检测滤

波器对于多种线性系统的常见故障均能进行正常的 故障检测.设计集值观测器的理论基础为一致有界集 和集合诱导李雅普诺夫函数,该理论基础保证了观测 器的估计状态误差是有界的且收敛的.

本文针对带有延时输入的风能转换系统,设计了 一种基于集值观测器的故障检测滤波器和故障检测 策略.采用集值观测器进行状态估计,对于受延时输 入影响的风能转换系统的3种常见故障进行正确的故 障检测.本文首先给出带延时输入信号的风能转换系 统的近似线性模型;其次给出风能转换系统的两种故 障模型,增广的统一模型;再次对统一模型设计了集 值观测器;然后给出基于集值观测器的故障检测策略; 最后对系统的3种故障分别进行仿真,并给出故障检 测结果和对比研究.

#### 2 风能转换系统模型

风能转换系统包含多个子系统,如图1所示,主要 包括空气动力学模型、传动部分、桨叶系统、发电机 和整流器系统等.







不考虑由风引发的塔台位移造成的影响,风能转换系统的数学模型<sup>[18]</sup>可写为

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B_1 U_1(t) + B_2 U_2(t - t_d) + ED(t),$$
(1)

$$Y(t) = CX(t), \tag{2}$$

其中:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & a_{15} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{15} & 0 \\ 1 & a_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} \end{vmatrix},$$

1

$B_1 =$	$\begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$b_{12}$ 0 0 0 0 0 0	$, B_2 =$	$\begin{bmatrix} 0\\0\\-a_{44}\\0\\0\\0\end{bmatrix}$	$\begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -a_{65} \end{array}$	, E =	$\begin{bmatrix} 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1\\ 1 \end{bmatrix}$
X(t)	$= [\omega$	r(t)	$\omega_{ m g}(t) \;  heta_{ m z}$	$\Delta(t) T_{\rm g}$	(t) $\beta(t)$	t) $\dot{\beta}(t)$ ]	г,
$U_1(t)$	$=$ [ $\dot{I}$	$\bar{\Gamma}_{\rm a}(t)$	$v_{\mathbf{r}}(t)]^{\mathrm{T}},$				
$U_2(t - $	$-t_{\rm d})$	= [2	$T_{ m g,ref}(t-t)$	$t_{ m d}) \ eta_{ m re}$	$_{ m ef}(t-t$	$_{\rm d})]^{\rm T},$	
C =	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	0	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	,			
$a_{11} =$	$\underline{B}$	$\frac{d_{\mathrm{d}t}+}{J_{\mathrm{r}}}$	$\frac{B_{\rm r}}{J_{\rm r}} + \frac{1}{J_{\rm r}}$	$\frac{\partial T_{\rm a}}{\partial \omega_{\rm r}}, \ a$	$u_{12} = \frac{1}{N}$	$\frac{B_{\mathrm{d}t}}{N_{\mathrm{g}}J_{\mathrm{r}}},$	
$a_{13} =$	$\frac{K_{\mathrm{d}t}}{J_{\mathrm{r}}}$	$, a_{13}$	$_{5}=\frac{1}{3J_{\mathrm{r}}}$	$\frac{\partial T_{\mathrm{a}}}{\partial \beta},$			
$a_{21} =$	$\frac{B_{\rm d}}{N_{\rm g}}$	$\frac{t}{J_{\rm g}}, a$	$z_{22} = -($	$\frac{B_{\mathrm{d}t}}{N_{\mathrm{g}}^2 J_{\mathrm{g}}} -$	$+ \frac{B_{\rm g}}{J_{\rm g}}),$		
$a_{23} =$	$\frac{K_{\rm d}}{N_{\rm g}}.$	$\frac{t}{J_{\rm g}}, a$	$z_{24} = -\frac{1}{2}$	$\frac{1}{I_{\rm g}},$			
$a_{32} =$	$-\frac{1}{N}$	, a.	$_{44} = -\frac{1}{\tau_1}$	- 			
$a_{65} =$	$-\omega_r^2$	$a_{n}^{2}, a_{6}$	$_6 = -2\xi$	$\omega_n,$			
$b_{11} =$	$\frac{1}{J_{\rm r}},$	b <sub>12</sub> =	$= \frac{1}{3J_{\rm r}} \frac{\partial T}{\partial u}$	$\frac{1}{r}$ .			

空气动力学模型是一个以叶尖速比λ和桨叶角β作为 变量、数据已知但具体函数未知的非线性系统.本文 根据已知数据,采用正弦函数进行拟合,并在变量的 平均值处采用泰勒公式进行线性逼近,获得驻点T<sub>a</sub>, 以及一阶泰勒展开式

$$\frac{\partial T_{\mathrm{a}}}{\partial \beta}, \ \frac{\partial T_{\mathrm{a}}}{\partial \omega_{\mathrm{r}}}, \ \frac{\partial T_{\mathrm{a}}}{\partial v_{\mathrm{r}}}$$

驻点 $\overline{T}_{a}(t)$ 和风速 $v_{r}(t)$ 视为一般输入信号;参考发电 机转矩 $T_{g,ref}(t-t_d)$ 和参考桨叶角 $\beta_{ref}(t-t_d)$ 为延时 输入控制信号.延时时间t<sub>d</sub>为由实际情况确定大小的 常数; 可测噪声D(t)为白噪声, 模拟系统自带噪声. 对 于常见的水平轴三叶片风机,同等条件下3个叶片的 桨叶角之间的差别基本只有相位角,因此本文对单一 桨叶角建模,用以描述叶片状态.

状态空间方程(1)-(2)中的各参数符号及其含义如 表1所示.

	表 1 风能转换系统参数符号及含义
Table 1	Symbols and meanings of WECS parameters
参数符	号 符号含义
$B_{ m r}$	低速轴粘性摩擦系数
$B_{ m g}$	高速轴粘性摩擦系数
$J_{ m r}$	低速轴转动惯量
$J_{\rm g}$	高速轴转动惯量
$B_{\mathrm{d}t}$	传动系统扭转阻尼系数
$K_{\mathrm{d}t}$	传动系统扭转刚度
$N_{ m g}$	传动系统变速比
$ au_{ m g}$	一阶系统时间常数
$\omega_n$	桨叶执行器模型自然频率
ξ	桨叶执行器模型阻尼比
$\frac{\partial T_{\rm a}}{\partial \beta}$	空气动力学模型对桨叶角的一阶泰勒展开式
$\frac{\partial T_{\rm a}}{\partial \omega_{\rm r}}$	空气动力学模型对转子速度的一阶泰勒展开式
$\frac{\partial T_{\rm a}}{\partial v_{\rm r}}$	空气动力学模型对等效风速的一阶泰勒展开式

## 3 风能转换系统故障模型

首先考虑加性故障模型.其故障模型方程为

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B_1U_1(t) + B_2U_2(t - t_d) + ED(t) + A\Delta X = A(X(t) + \Delta X) + B_1U_1(t) + B_2U_2(t - t_d) + ED(t),$$
(3)

其中项 $A\Delta X$ 代表加性故障. 一般加性故障是时变, 本 文采用与状态系数矩阵A相关的 $A\Delta X$ 模拟加性故障. Abdelghani认为对不同状态布置的传感器越多,对单 一状态加性故障的灵敏度就越高[19].乘性故障的数学 模型表现为状态的等比例放大,故障模型方程为

$$\begin{split} \dot{X}(t) &= AX(t) + AK_{\rm a}X(t) + B_1U_1(t) + \\ B_1K_{\rm b1}U_1(t) + B_2U_2(t - t_{\rm d}) + \\ B_2K_{\rm b2}U_2(t - t_{\rm d}) + ED(t) &= \\ AK_{\rm fa}X(t) + B_1K_{\rm fb1}U_1(t) + \\ B_2K_{\rm fb2}U_2(t - t_{\rm d}) + ED(t), \end{split}$$
(4)

其中:  $AK_{a}X(t)$ ,  $B_{1}K_{b1}U_{1}(t)$ ,  $B_{2}K_{b2}U_{2}(t-t_{d})$ 代 表某一乘性故障映射在整体状态方程下的故障项; K<sub>fa</sub>, K<sub>fb1</sub>, K<sub>fb2</sub>则代表该乘性故障项整合后的系数矩 阵增益,且有

$$K_{\text{fa}} = I + K_{\text{a}}, K_{\text{fb1}} = I + K_{\text{b1}}, K_{\text{fb2}} = I + K_{\text{b2}}.$$
  
一般乘性故障的根源可以追踪到某一状态相关参数  
的变化.考虑乘性故障已稳定的情况,则有

$$X(t) = A_{\rm f}X(t) + B_{\rm 1f}U_{\rm 1}(t) + B_{\rm 2f}U_{\rm 2}(t - t_{\rm d}) + ED(t),$$
(5)

乘性故障的持续过程可以参考式(1)到式(5)的过程, 即 $A_{\rm f}, B_{1\rm f}, B_{2\rm f}$ 为故障的系数矩阵, 一般为时变的, 且 有 $A_{\rm f} = AK_{\rm fa}, B_{1\rm f} = B_1K_{\rm fb1}, B_{2\rm f} = B_2K_{\rm fb2}.$  假设 系统在某一时间段内最多发生一种加性故障和一种 乘性故障, 且两种故障发生在不同位置, 若同时考虑 系统加性故障和乘性故障, 综合式(3)和式(4), 获得风 能转换系统的故障模型如式(6):

$$\dot{X}(t) = \\ AK_{\rm fa}(X(t) + \Delta X) + B_1 K_{\rm fb1} U_1(t) + \\ B_2 K_{\rm fb2} U_2(t - t_{\rm d}) + ED(t) = \\ AX(t) + B_{\rm a} f_{\rm a}(t) + B_{\rm m} f_{\rm m}(t) + \\ B_1 K_{\rm b1} U_1(t) + B_2 K_{\rm b2} U_2(t - t_{\rm d}) + ED(t),$$
(6)

其中:  $B_{a}f_{a}(t) = AK_{fa}\Delta X$ ,  $B_{m}f_{m}(t) = A(K_{fa}-I)X$ ,  $B_{a} \in \mathbb{R}^{6\times p_{a}}$ 代表等效加性故障的分布矩阵,  $f_{a}(t) \in \mathbb{R}^{p_{a}\times 1}$ 代表等效加性故障状态矢量,  $B_{m} \in \mathbb{R}^{6\times p_{m}}$ 代表 等效乘性故障的分布矩阵,  $f_{m}(t) \in \mathbb{R}^{p_{m}\times 1}$ 代表等效 乘性故障状态矢量. *R*代表欧几里得空间, R代表实数 矩阵. 由式(6)可得式(7):

$$\dot{X}(t) = AX(t) + B_{\rm f}f_{\rm f}(t) + B_{\rm 1}K_{\rm b1}U_{\rm 1}(t) + B_{\rm 2}K_{\rm b2}U_{\rm 2}(t-t_{\rm d}) + ED(t),$$
(7)

其中: 等效故障分布矩阵 $B_{\rm f} = (B_{\rm a} \ B_{\rm m}) \in \mathbb{R}^{6 \times p_{\rm f}}$ , 等 效故障状态矢量 $f_{\rm f}(t) = (f_{\rm a}^{\rm T}(t) \ f_{\rm m}^{\rm T}(t))^{\rm T} \in \mathbb{R}^{p_{\rm f} \times 1}$ , 且  $p_{\rm f} = p_{\rm a} + p_{\rm m}$ . 将故障系统(7)增广, 可以获得增广的 统一故障模型, 如式(8)所示:

$$\begin{cases} \dot{X}_{\rm e}(t) = A_{\rm e}X_{\rm e}(t) + B_{\rm 1e}K_{\rm b1e}U_{\rm 1}(t) + \\ B_{\rm 2e}K_{\rm b2e}U_{\rm 2}(t-t_{\rm d}) + E_{\rm e}D(t), \quad (8) \\ Y_{\rm e}(t) = C_{\rm e}X_{\rm e}(t), \end{cases}$$

定义增广状态向量

$$X_{\mathbf{e}}(t) = \left(X^{\mathrm{T}}(t) \ f_{\mathbf{f}}^{\mathrm{T}}(t)\right)^{\mathrm{T}} \in \mathbb{R}^{6+p_{\mathbf{f}}},$$

保留了故障信号的增广状态矩阵

$$A_{\mathbf{e}} = \begin{bmatrix} A & B_{\mathbf{f}} \\ 0_{p_{\mathbf{f}} \times 6} & I_{p_{\mathbf{f}}} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(6+p_{\mathbf{f}}) \times (6+p_{\mathbf{f}})},$$

增广输入矩阵

$$B_{1e} = [B_1^{T} \ 0_{p_f \times 2}^{T}]^{T} \in \mathbb{R}^{(6+p_f) \times 2},$$
  
$$B_{2e} = [B_2^{T} \ 0_{p_f \times 2}^{T}]^{T} \in \mathbb{R}^{(6+p_f) \times 2},$$

增广噪声系数矩阵 $E_{\rm e} = [E^{\rm T} \ 0_{p_{\rm f} \times 1}^{\rm T}]^{\rm T} \in \mathbb{R}^{(6+p_{\rm f}) \times 1},$ 增广输出向量 $C_{\rm e} = [C \ 0_{2 \times p_{\rm f}}] \in \mathbb{R}^{2 \times (6+p_{\rm f})}.$ 输入信号  $U_1(t) \cap U_2(t - t_{\rm d})$ 保持不变.

#### 4 集值观测器设计

针对增广故障模型(8),设计集值观测器对状态进行估计,估计误差收敛在给定区间内.集值观测器形式如式(9):

$$\hat{X}_{\rm e}(t) = (A_{\rm e} - L_{\rm e}C_{\rm e})\hat{X}_{\rm e}(t) + B_{\rm 1e}K_{\rm b1e}U_{\rm 1}(t) + B_{\rm 2e}K_{\rm b2e}U_{\rm 2}(t - t_{\rm d}) + L_{\rm e}Y_{\rm e}(t).$$
(9)

定义估计误差 $e(t) = \hat{X}_{e}(t) - X_{e}(t), 则$ 

$$\dot{e}(t) = (A_{\rm e} - L_{\rm e}C_{\rm e})e(t) + L_{\rm e}n(t) - E_{\rm e}D(t),$$
(10)

其中n(t)为缩小L<sub>e</sub>取值范围的特定矩阵,一般根据各 状态的极值确定.应用欧拉近似算法离散化估计误 差(10)可得

$$e(k+1) = (I + \tau (A_{\rm e} - L_{\rm e}C_{\rm e}))e(k) + \tau L_{\rm e}n(k) - \tau E_{\rm e}D(k).$$
(11)

对于连续的估计误差(10), 假设集合 $\Phi$ 是其在给定约 束条件 $0 < \lambda < 1$ 下的强正D不变集, 则 $\Phi$ 同样是欧拉 近似系统(11)在 $\tau > 0$ 条件下的 $\lambda$ 收缩集.因此, 依据 Lin等<sup>[13]</sup>提供的证明思路, 满足约束条件的增益矩阵  $L_e$ 选择如下: 定义符号vert{ $\Xi$ }代表多胞形 $\Xi$ 的所有 顶点的集合, 则对于 $v_j \in vert{\Phi}$ 有

$$v_j + \tau (A_{\rm e} - L_{\rm e}C_{\rm e})v_j + \tau L_{\rm e}n(k) - \tau E_{\rm e}D(k) \in \lambda \Phi,$$
(12)

引入凸锥集 $Z_j$ 来选择参数 $\tau$ . 当且仅当存在 $\tau > 0$ , 顶 点 $v_j \in \text{vert}\{\Phi\}$ , 称 $\Phi = \{e \in \mathbb{R}^n : f_i^{\mathsf{T}} e \leq \psi_i, i = 1, \dots, s\}$ 是连续估计误差(10)的强正D不变集. 根据强 正D不变性可知式(12)满足下式:

$$v_j + \tau (A_e - L_e C_e) v_j + \tau L_e n(k) - \tau E_e D(k) \in \lambda Z_j.$$
(13)

由顶点 $v_j$ 延伸获得的凸锥集 $Z_j$ 与集合 $\Phi$ 的关系如图2 所示.



图 2 顶点 $v_j$ , 凸锥集 $Z_j$ 与集合 $\phi$ 的关系 Fig. 2 The diagram of relationship of vertex  $v_j$ , convex cone  $Z_j$  and set  $\phi$ 

考虑到输出的最差情况,即对于 $v_j \in \operatorname{vert}\{\Phi\}$ ,  $\delta_i = \max(-f_i^{\mathrm{T}} E_{\mathrm{e}} D) \pi f_i^{\mathrm{T}} v_j = \psi_i$ ,存在下式:  $f_i^{\mathrm{T}} v_j + \tau f_i^{\mathrm{T}} (A_{\mathrm{e}} - L_{\mathrm{e}} C_{\mathrm{e}}) v_j + \tau f_i^{\mathrm{T}} L_{\mathrm{e}} n_l \leqslant \lambda \psi_i - \tau \delta_i$ , (14)

一般选择 $\tau = 1$ ,则增益矩阵 $L_e$ 可通过解决以下不等

式集获取:

$$f_i^{\mathrm{T}} v_j + f_i^{\mathrm{T}} (A_{\mathrm{e}} - L_{\mathrm{e}} C_{\mathrm{e}}) v_j + f_i^{\mathrm{T}} L_{\mathrm{e}} n_l \leqslant \lambda \psi_i - \delta_i,$$
(15)

其中:  $\lambda \psi_i - \delta_i$ 是与给定误差区间 $\Delta$ 相关的矩阵, 一般 取 $\Delta$ 的值;  $v_j$ 是选择的状态顶点集, 一般选定某一状态的最值点, 选择该点以及同一时刻其他状态的值作 为 $v_j$ . 一般的, 对多状态系统的每个状态都做一次的 取值参考点选定与确切值选择, 确定 $n \wedge v_j$ 用于不等 式(15)的计算.  $f_i$ 是缩放与反转不等式方向的矩阵, 用 于适当放大系数极小的不等式, 以及反转不等式方向, 对于n状态系统, 一般 $f_i$ 取 $n + 2 \wedge .$  通过选择以上3种 矩阵, 经过计算 $n \times n \times (n+2)$ 个不等式(15), 可获得 增益矩阵 $L_e$ 每个元素的取值范围. 由于 $\lambda \psi_i - \delta_i, v_j$ 和n(t)的选择具有主观性, 因此增益矩阵 $L_e$ 的取值范 围不唯一. 此外, 存在多个增益矩阵 $L_e$ 满足某一估计 误差范围要求, 因此增益矩阵 $L_e$ 存在多个确定值.

关于强正D不变性以及故障误差的收敛性证明均 类似于先期工作<sup>[20]</sup>.证明过程如下:

**步骤1** 首先, 定义半径为r的球体集合 $B_r = \{x : O(x) \leq r\}$ , 其中规度函数O(x)满足如下条件:

1) 对于所有 $a, b \in \mathbb{R}^n$ ,有 $O(a+b) \leq O(a) + O(b)$ ;

2) O(x)非负, O(a) = 0 则 a = 0, 反之亦然;

3) 对于 $\mu > 0$ , 有 $O(\mu a) = \mu O(a)$ .

根据Minkowski函数, 定义C集合P是一单位球体 集合 $O_P(x) = \begin{cases} 0, & x = 0, \\ r > 0, & x \in \partial(rP). \end{cases}$ 由于 $\partial P$ 包含x, 则有 $x \in P$ 且 $O_P \leq 1$ .

**步骤 2** 其次,根据已经假设的集合 $\Phi$ 是连续估计误差(10)在给定约束条件0 <  $\lambda$  < 1下的强正D不变集,集合 $\Phi$ 同样是欧拉近似系统(11)在 $\tau$  > 0条件下的 $\lambda$ 收缩集可知,如果e不属于单位球体集合 $B_1$ ,则 $B_\mu$ 对于所有的 $\mu \ge 1$ 都是 $\lambda$ 收缩的.

**步骤 3** 最后, 定义有关C集合 $\Phi$ 的Minkowski 函数  $O_{\Phi}(e)$ . 对于所有满足  $e(k) \in \mathbb{R}^n$  且 e 属于 $\Phi$  的 e(k), 存在 $O_{\Phi}(e(k+1)) \leq \lambda O_{\Phi}(e(k))$ . 对于所有确定 的 $\lambda$ , 由集合 $\Phi$ 引申而来集合诱导稳定函数 $O_{\Phi}(e(k))$ 是稳定的. 由于集合 $\Phi$ 是系统(11)的收缩集, 则离散函 数 $O_{\Phi}(e(k))$ 是收敛的. 根据线性变换的欧拉近似算法 的性质, 可知连续误差系统(10)的相关Minkowski函 数是稳定且收敛的. 对于估计误差的任意初始状 态 $e(t_0)$ , 当时间t足够大时, 存在 $e(t) \in \Phi$ 和x(t) + e(t) $\in \chi(t)$ . 证毕.

# 5 基于集值观测器的故障检测

故障检测系统如图3所示.





Fig. 3 The diagram of fault detection system structure

故障检测原理:

误差评价是故障检测的重要依据,包括误差评价 函数J(e(t))和阈值 $J_{th}$ 的确定,其中e(t)代表任一用 于故障检测的估计误差.定义faulty代表系统发生故 障,faulty-free代表系统无故障.从而可根据如下假设 检测条件进行故障检测和报警:

$$J(e(t)) > J_{\rm th} \Rightarrow \text{faulty},$$
  

$$J(e(t)) \leqslant J_{\rm th} \Rightarrow \text{faulty-free}.$$
(16)

从图3可知,本文采用状态与功率进行故障检测,因此 采用两种不同的误差评价函数表现故障的危害程度.

对于状态向量*X*(*t*),本文采用引入先验解项的*L*<sub>2</sub> 正则化算法处理估计误差.该算法如式(17)所示:

$$\min_{\tilde{X}} \Lambda(\tilde{X}) = \| (A_{\rm e} - L_{\rm e}C_{\rm e})\tilde{X} - e(t) \|_2^2 + \| \alpha \Gamma(\tilde{X} - I_n) \|_2^2,$$
(17)

其中:  $\tilde{X}$ 代表估计误差正则化的结果向量,  $\alpha\Gamma$ 代表约束性的正则化对角矩阵,  $I_n$ 代表先验解项. 规定 $\alpha > 0$ , 则 $\Lambda(\tilde{X})$ 为凸函数, 式(17)必有唯一解, 如式(18) 所示:

$$\tilde{X} = ((A_{\rm e} - L_{\rm e}C_{\rm e})^{\rm T}(A_{\rm e} - L_{\rm e}C_{\rm e}) + \sqrt[2]{\alpha}\Gamma)^{-1}$$
$$((A_{\rm e} - L_{\rm e}C_{\rm e})^{\rm T}e(t) + \sqrt[2]{\alpha}\Gamma I_6),$$
(18)

 $L_2$ 正则化可以抑制估计误差的波动,采用不同的正则 化对角矩阵 $\alpha \Gamma$ 则有不同程度的抑制效果.

对于输出功率,本文采用一种普适的误差评价函数:

$$J(P) = \frac{|e_P|}{P_{\rm r}} \times 100\%,$$
 (19)

其中 $P_r$ 代表额定功率,  $e_P$ 代表由集值观测器获得输出 功率估计值与额定功率的误差. 根据国家标准GB/ T12325-2008中第4.1条的规定, 本文设置输出功率的 故障检测阈值 $J_{th} = 10\%$ . 根据以上故障检测原理, 针 对执行器故障和传感器故障, 本文分别设计了相应的 故障检测策略, 如下:

对执行器故障的故障检测策略:

**步骤1** 对执行器相关状态的估计误差进行L<sub>2</sub> 正则化处理,获得状态估计误差的相对误差*X*曲线;

**步骤 2** 对输出功率的估计误差计算式(18), 获 得绝对误差曲线*J*(*P*);

**步骤 3** 观察相对误差X 曲线, 如果无明显波动, 认为系统无故障, 转向步骤5; 如果有明显波动, 认为 系统发生故障, 转向步骤4;

**步骤4** 对比绝对误差J(P)与阈值 $J_{th}$ ,如果  $J(P) \leq J_{th}$ ,认为系统发生低危故障,允许容错运行; 如果 $J(P) > J_{th}$ ,认为系统发生高危故障,需要紧急 处理.转向步骤**5**;

步骤 5 故障检测结束.

对传感器故障的故障检测策略:

观察集值观测器估计状态曲线与传感器输出状态 曲线,若无明显差异,认为传感器正常;若出现明显差 异,认为传感器故障,需要处理.

补充说明: 以上故障检测策略中并未涉及两种情况: 状态误差绝对值没有超过最大阈值但功率误差绝对值超过最大阈值; 状态误差绝对值超过最大阈值但 功率误差绝对值没有超过最大阈值. 以上情况均不应 出现在经过调试的全局集值观测器, 如果出现, 表明 该集值观测器的增益矩阵选择不当, 需要调整. 如果 系统噪声引起的状态变化满足了故障检测策略的某 一流程, 则进行同样的故障判断.

#### 6 数值仿真及对比研究

本节对故障风能转换系统以及基于集值观测器的 故障检测进行仿真研究,仿真环境为MATLAB 2019a/ Simulink,采样频率为100 Hz.本文采用的仿真对象为 变风速,变桨角风能转换系统基准模型,标称功率 4.8 MW.相关参数及取值如表2所示.

表 2 风能转换系统参数表	
Table 2 The table of WECS parameter	s

符号	参数值(单位)
$B_{\rm r}$	$7.11(\text{Nm/(rad} \cdot \text{s}^{-1}))$
$B_{\mathbf{g}}$	$45.6(Nm/(rad \cdot s^{-1}))$
$J_{\rm r}$	$5.5{ imes}10^7({ m kg}\cdot{ m m}^2)$
$J_{\rm g}$	$390(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2)$
$B_{\mathrm{d}t}$	$775.49(Nm/(rad \cdot s^{-1}))$
$K_{\mathrm{d}t}$	$2.7 \times 10^9$ (Nm/rad)
$N_{\rm g}$	95
$ au_{ m g}$	0.02
$\omega_n$	11.11(rad/s)
ξ	0.6
$rac{\partial T_{\mathrm{a}}}{\partial eta}$	-418963.8446
$rac{\partial T_{\mathrm{a}}}{\partial \omega_{\mathrm{r}}}$	-2748138.328
$rac{\partial T_{\mathrm{a}}}{\partial v_{\mathrm{r}}}$	16729193.25

由式(15)计算可得增广的集值观测器增益矩阵L<sub>e</sub>的各元素的取值范围.在该取值范围内,经过多次仿 真试验,本文在满足估计误差要求的多个增益矩阵L<sub>e</sub> 中选择确定的增益矩阵L<sub>e</sub>如下:

т_	1	100	0.5	1	0.1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	
$L_{\rm e} =$	1	1	1	1.2	0.1	1	1.1	1.1	1.1	1.1	

#### 6.1 集值观测器仿真

首先是对集值观测器的仿真, 仿真结果如图4-5所示.



Fig. 4 The estimation error of generator speed  $\omega_{g}$ 





图4-5是集值观测器对于发电机转速 $\omega_g$ ,转矩 $T_g$ 的估计误差.可以看出,两个状态的估计误差的数量级均在10<sup>-11</sup>左右,表明选择合适的增益矩阵 $L_e$ ,集值观测器可以表现出精度极高的状态跟踪能力.

#### 6.2 加性故障仿真及故障检测

**情况1** 执行器故障. 设置故障发生时间 $t_f =$  120.0 s, 结束时间 $t_e = 130.0$  s. 故障的实际表现为发电机转子的润滑油老化粘稠, 摩擦力增大, 最大可能导致转子接近停转; 数学模型表现为转矩 $T_g$ 受到负增量影响, 该增量最大时可能导致转矩 $T_g$ 趋近于零. 考虑到该故障的最简形式, 设置故障为转矩 $T_g$ 在 $t_f$ 时刻受到恒定增量 $\Delta T_g = -3300$  Nm(额定值的11%)的影响. 仿真结果如图6–9所示.







由图6可知,在 $t_f = 120.0 \text{ s}$ 处故障发生,发电机转 矩 $T_g$ 的集值观测器估计波形产生一个负波动,误差绝 对值是额定值的11.89%,经过 $L_2$ 正则化处理后如图7 所示,仍表现为一个明显的波动.由图8–9可知,功率 波形出现相似的波动,绝对误差已达到10.47%.依据 第5节给出的故障检测策略可以判断发电机转矩 $T_g$ 相



图 7 发电机转矩Tg的相对估计误差波形(情况1) Fig. 7 Trajectory of relative estimation error of generator torque Tg (Case 1)



Fig. 9 Trajectory of absolute estimation error of output

power P (Case 1)

关部件发生故障,危险较大并超出允许最大波动范围, 急需处理.

表3给出了不同数值的故障下集值观测器检测结果.由表3可知,本文设计的故障检测策略能够对发电机转矩相关的执行器故障进行准确的检测.当故障绝对值 $|\Delta T_g| > 3300$  Nm时,其故障诊断等同于情况1.

表 3 发电机转矩多种数值故障的检测结果

Table 3 The fault detection results of various numerical faults of general	tor torque
--	------------

故障绝对值/占	发电机转矩估计误差最大绝	输出功率估计误差最大绝	故障检测结果
标称值百分比/%	对值/占标称值百分比/%	对值/占标称值百分比/%	
1500 Nm/5	1167 Nm/3.89	$1.838 \times 10^5$ W/3.83	低危故障
3000 Nm/10	3334 Nm/11.11	$4.662 \times 10^5$ W/9.71	低危故障
3300 Nm/11	3567 Nm/11.89	$5.027 \times 10^5$ W/10.5	高危故障

**情况2** 发电机转速传感器故障. 设置故障发生时间 $t_f = 100.0 \text{ s}$ ,结束时间 $t_e = 110.0 \text{ s}$ . 故障的实际表现为发电机速度传感器故障,输出恒值;数学模型表现为 $\omega_g(t)$ 的测量值在 $t_f$ 时刻改变为恒量 $\omega_g(t_f)$ . 仿真结果如图10–11所示.

由图10可知,  $t_{\rm f} = 100.0 \, {\rm s}$ 后发电机转速 $\omega_{\rm g}$ 传感器

输出固定值,集值观测器的估计状态等同于系统的正 常状态,两者间存在明显误差; $t_e = 110.0$ s故障结束 后转速传感器输出立刻恢复到正常状态.由测量值 的曲线特征可以判断传感器发生故障.由图11可知,  $t_f = 100.0$ s后输出功率的传感器测量值与集值观测 器估计值表现出逐渐增大的误差,说明传感器故障对 系统无实质影响,但对状态监控有明显影响,需要更 换传感器.



Fig. 10 Trajectory of generator speed  $\omega_g$  (Case 2)



Fig. 11 Trajectory of output power P (Case 2)

#### 6.3 乘性故障仿真及故障检测

**情况3** 桨叶执行器液压泄漏故障. 设置风机的3 个桨叶角 $\beta_i$ (*i*=1,2,3)两两对比,降低故障误判概率. 假设某一桨叶执行器发生液压泄漏故障于 $t_f$  = 120.0 s,人为结束于时间 $t_e$  = 130.0 s.数学模型表现 为桨叶角 $\beta$ 的状态方程参数 $\omega_n$ 和 $\xi$ 发生变化,采用简 化的参数变化过程,假设在120.0 s~125.0 s内参数  $\omega_n$ 和 $\xi$ 随时间呈线性变化;125.0 s时参数改变至最 终状态,即 $\tilde{\xi} = (1 - \alpha_{hlm})\xi + \alpha_{hlm}\xi_{hl}$ 和 $\tilde{\omega}_n = (1 - \alpha_{hlm})\omega_n + \alpha_{hlm}\omega_{n,hl}$ ,其中: $\alpha_{hlm} = 1$ ,  $\xi_{hl} = 0.9$ ,  $\omega_{n,hl}$ = 3.42 rad/s; 125.0 s~130.0 s内参数保持不变. 仿真 结果如图12-15所示.

从图12-13可知, t<sub>f</sub> = 120.0 s液压泄漏发生后, 桨 叶角β<sub>i</sub>的集值观测器估计值与正常值间产生了明显 的误差, 相对误差也开始有明显波动, 表明桨叶执行 器发生故障. 由于桨叶执行器故障大概率引起桨叶失 速失控, 导致发电机起火烧毁等严重事故, 可以直接 判断桨叶执行器发生高危害故障. 由图14-15可知, 尽 管桨叶执行器发生高危害故障, 输出功率的测量值和 估计值的误差在故障发生初期并不明显, 中后期表现 出快速增大的趋势, 可以认为该故障具有潜伏性.



图 13 桨叶角β的相对估计误差波形(情况3) Fig. 13 Trajectory of relative estimation error of pitch angle β (Case 3)



图 14 输出功率P的波形(情况3)





图 15 输出功率P的绝对估计误差波形(情况3) Fig. 15 Trajectory of absolute estimation error of output power P (Case 3)

#### 6.4 对比研究

本节将对本文提出的故障检测策略与Rosa设计的 故障检测滤波器<sup>[15-17]</sup>进行对比,对比的故障情况为情 况3,对比内容为检测用时.定义检测用时t<sub>fd</sub>=t<sub>a</sub>-t<sub>f</sub>, 其中t<sub>a</sub>为报警时间点.对于没有额定值的桨叶角,本 文设置以正常状态的10%作为故障报警的阈值.具体 对比内容如表4所示.

#### 表 4 两种故障检测系统的量化对比

 Table 4 Quantitative comparison of two fault detection

 systems

systems		
故障检测策略	故障情况	故障检测用时 $t_{\rm fd}/s$
本文SVO	情况3	0.49
Rosa–SVO	情况3	近1

由表4可知,对于特定的故障情况和同等的故障报 警条件,本文设计的集值观测器的故障检测用时明显 小于Rosa的故障检测策略,具有更大的实际应用价值. 相比于Rosa的故障检测策略,本文设计的故障检测策 略具有结构简单,观测器算法易实现,相似故障的检 测用时更快等特点.本故障检测策略的设计初衷期望 提供快速的故障检测能力,因此对故障不能提供数值 估计.

### 7 结论

本文针对风能转换系统故障检测进行了研究,采 用一种保守的集值观测器作为故障检测的基础, 通过 选择状态集多胞形的顶点和给定误差区间来调整集 值观测器增益矩阵的取值范围和估计误差收敛区间, 通过调整集值观测器的增益矩阵Le,实现高精度的状 态追踪效果[21]. 针对受控的风能转换系统的加性故障 和乘性故障,本文设计了基于集值观测器的故障检测 策略. 仿真结果表明, 对于直接影响系统输出功率的 状态的故障,如执行器故障,该策略能够给出快速且 准确的故障检测;对于不影响系统运行的传感器故障, 该设计在保证实际状态估计的同时,同样能够给出 准确的故障检测.相较于Rosa设计的故障检测滤波 器[15-17],本文设计故障检测系统即保证了故障的正确 检测,又具有结构简单,集值观测器实现简易的优点. 缺点是不具有故障的数值估计能力. 改进故障检测策 略,实现对故障数值的估计功能;同时通过设计状态 反馈控制算法,实现系统延时输入的补偿和故障的控 制,将是未来的研究目标.

#### 参考文献:

 LU Zhengshuai, LIN Hongyang, YI Yang. Current situation and trend of wind power development. *China Science and Technology Information*, 2017, (2): 91 – 92. (卢正帅,林红阳,易杨.风电发展现状与趋势.中国科技信息,2017, (2):91-92.)

- [2] SAHA S, HAQUE M E, TAN C P, et al. Sensor fault resilient operation of permanent magnet synchronous generator based wind energy conversion system. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 2019, 55(4): 4298 – 4308.
- [3] WU Zhongqiang, YANG Yang, XU Chunhua. Fault diagnosis and initiative tolerant control for wind energy conversion system. *Journal* of Mechanical Engineering, 2015, (9): 112 – 118.
  (吴忠强,杨阳,徐纯华.风能转换系统的故障检测与主动容错控制. 机械工程学报, 2015, (9): 112 – 118.)
- [4] YANG Xiongfei, SHEN Yanxia. Research of actuator fault detection for wind energy conversion system. *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. 控制工程, 2016, 23(4): 506 – 511.)
- [5] SHEN Yanxia, HE Qingnan, YANG Xiongfei, et al. Actuator fault reconstruction and fault-tolerant control of wind energy conversion system. *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. 控制理论与应用, 2015, 32(3): 413 – 420.)
- [6] ZHAO Zhipu, SHEN Yanxia, HE Qingnan. Active fault-tolerant control strategy based on T-S fuzzy model for wind energy conversion system. *Control Engineering of China*, 2017, 24(7): 1447 1453.
  (赵芝璞, 沈艳霞, 贺庆楠. 基于T-S模型风能转换系统容错控制策略 研究. 控制工程, 2017, 24(7): 1447 1453.)
- [7] SHI Yuntao, HOU Yanjiao, SUN Dehui, et al. Stochastic modelling and H<sub>∞</sub> fault tolerance control of WECS. *Electric Machines and Control*, 2015, 19(3): 100 – 110.
  (史运涛, 侯彦娇, 孙德辉, 等. 风能转换系统随机建模与H<sub>∞</sub>容错控 制. 电机与控制学报, 2015, 19(3): 100 – 110.)
- [8] MOHAJERPOOR R, ABDI H, NAHAVANDI S. A new approach to functional observer design for linear time-delay systems. *The 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (CMS). Budapest, Hungary: IEEE, 2016: 143 – 148.
- [9] PAKZAD S, PAKZAD M A. A new improved approach to design observer for state delay systems with unknown inputs. *The 2017 American Control Conference (ACC)*. Seattle, WA, USA: IEEE, 2017: 5720 – 5725.
- [10] TRINH H, HUONG D C, HIEN L V, et al. Design of reduced-order positive linear functional observers for positive time-delay systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2017, 64(5): 555 – 559.
- [11] REHAK B. Observer design for a time delay system via the Razumikhin approach. Asian Journal of Control, 2017, 19(6): 2226 – 2231.
- [12] LECHAPPE V, DE LEON J, MOULAY E, et al. Delay and state observation for SISO nonlinear systems with input delay. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2018, 28(6): 2356 – 2368.
- [13] LIN H, ZHAI G, ANTSAKLIS P J. Set-valued observer design for a class of uncertain linear systems with persistent disturbance and measurement noise. *International Journal of Control*, 2003, 76(16): 1644 – 1653.
- [14] ROSA P, CASAU P, SILVESTRE C, et al. A set-valued approach to FDI and FTC: theory and implementation issues. *IFAC Proceedings Volums*, 2012, 45(20): 1281 – 1286.
- [15] ROSA P, SILVESTRE C, SHAMMA J S, et al. Fault detection and isolation of LTV systems using set-valued observers. *The 49th IEEE*

Conference on Decision and Control (CDC). Atlanta, GA, USA: IEEE, 2010: 768 – 773.

- [16] ROSA P, SILVESTRE C. Fault detection and isolation of LPV systems using set-valued observers: an application to a fixed-wing aircraft. *Control Engineering Practice*, 2013, 21(3): 242 – 252.
- [17] ROSA P, SILVESTRE C, SHAMMA J S, et al. Fault detection and isolation of an aircraft using set-valued observers. *IFAC Proceedings Volumes*, 2010, 43(15): 398 – 403.
- [18] SLOTH C, ESBENSEN T, STOUSTRUP J. Robust and fault-tolerant linear parameter-varying control of wind turbines. *Mechatronics*, 2011, 21(4): 645 – 659.
- [19] ABDELGHANI M. Sensor validation for structural systems with additive sensor faults. *Structural Health Monitoring: An International Journal*, 2004, 3(3): 265 – 275.

- [20] ZHAO R N, SHEN Y X. Design of set-valued observer for a particular situation of WECS: commensurate time delays. *International Journal of Dynamics and Control*, 2019, 7(3): 901 – 913.
- [21] ZHAO R N, SHEN Y X, WU D H, et al. Reduced-order set-valued observer design for high order uncertain linear system with disturbance. *The 2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*. Dalian, China: IEEE, 2017: 76 – 81.

#### 作者简介:

**赵睿楠**博士研究生,目前研究方向为基于观测器的风能转换系统的故障诊断和容错控制, E-mail: chnpal@126.com;

沈艳霞 教授,目前研究方向为新能源控制技术、电机非线性控

制等, E-mail: shenyx@jiangnan.edu.cn.