

# 一种基于凸多面体的集员滤波故障诊断方法

沈艳霞<sup>†</sup>, 尹天骄

(江南大学 物联网技术应用教育部工程研究中心, 江苏 无锡 214000)

**摘要:** 针对含有未知但有界噪声的线性系统, 利用基于凸多面体的集员滤波算法进行故障诊断策略研究; 针对不同故障类型设计集员滤波器, 通过求解基于无故障模型的集员滤波器状态可行集进行故障检测. 采用模型去伪的思路进行故障隔离, 即在故障发生后寻找唯一当前状态可行集不为空的集员滤波器, 其对应的故障类型即为故障隔离结果. 通过实例仿真分析得出, 所提出方法可完成对不同类型故障的诊断, 具有可行性.

**关键词:** 故障诊断; 故障隔离; 集员; 凸多面体

**中图分类号:** TP13      **文献标志码:** A

## A fault diagnosis method of set membership filter based on convex ploytope

SHEN Yan-xia<sup>†</sup>, YIN Tian-jiao

(Research Center of Engineering Applications for IOT, Jiangnan University, Wuxi 214000, China)

**Abstract:** For the linear systems with unknown but bounded noises, set membership algorithm based on convex ploytope is used to complete fault diagnosis. Set membership filters are designed according to different faults, solving the state feasible set of the set membership filter based on the normal model, and checking whether or not it is empty to finish fault detection. At the same time, a way of “model falsification” is used to accomplish fault isolation, which is aiming to find the only set membership filter that is not null. The simulation analysis shows the feasibility of the proposed method for different types of fault diagnosis.

**Keywords:** fault diagnosis; fault isolation; set membership; convex ploytope

## 0 引 言

随着科学技术的发展, 各类工程系统的复杂性大大增加, 系统的可靠性和安全性已成为保障经济效益和社会效益的一个关键因素, 故障诊断技术作为提高系统可靠性和降低事故风险的重要方法得到了广泛的重视<sup>[1]</sup>. 常用的故障诊断技术可分为基于解析模型、基于信号处理和基于知识的 3 类方法<sup>[2]</sup>. 在基于解析模型的方法中, 故障诊断的性能依赖于系统状态的精确估计. 传统的状态估计方法如卡尔曼滤波器、扩展卡尔曼滤波器等通常都假定噪声为随机噪声且满足某一概率分布<sup>[3]</sup>. 然而, 实际应用中很难事先已知噪声的统计特性, 这会直接影响模型的精确性以及状态估计效果. 集员理论早期由学者 Scheppe 提出<sup>[4]</sup>, 它是对含未知但有界噪声系统进行状态估计的有效方法<sup>[3]</sup>, 适用面广且鲁棒性强<sup>[5]</sup>, 在故障诊断、系统辨

识等领域已有应用<sup>[6-7]</sup>. 基于集员滤波的故障诊断方法在状态空间中寻找与量测数据和已知噪声界相容的状态可行集, 通过检测该可行集是否为空进行故障检测. 与基于观测器的方法相比, 避免了因系统噪声、外部干扰的影响, 难以确定残差序列最佳阈值问题且对于乘性故障有更好的适用性<sup>[8]</sup>. 集员滤波方法的一个关键问题是如何描述状态可行集的复杂形状, 目前常用来描述所得集合形状的方法有椭球<sup>[3,9-10]</sup>、全对称多胞形<sup>[11-13]</sup>方法等. 学者 Shamma 等在文献 [14] 中提出了一种基于凸多面体的集员滤波方法, 通过求解线性不等式组求得可行集范围. 该方法与最常见的椭球描述方法相比, 更为精确且思路简单<sup>[15]</sup>. 本文在此研究基础上, 对含有未知但有界噪声线性系统的故障检测及隔离进行研究, 通过判断状态可行集是否为空完成故障检测.

收稿日期: 2016-09-26; 修回日期: 2017-02-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61573167, 61572237); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (JUSRP51510); 高等学校博士学科点专项科研项目 (20130093110011); 江苏省普通高校学术学位研究生科研创新计划项目 (KYLX16\_0775).

作者简介: 沈艳霞 (1973—), 女, 教授, 博士, 从事人工智能、风电系统优化等研究; 尹天骄 (1993—), 女, 硕士生, 从事风力发电故障诊断及容错控制的研究.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: shenyx@jiangnan.edu.cn

目前,针对基于集员滤波的故障诊断方法中,对故障检测涉及的较多<sup>[7-8,10-13]</sup>,对故障隔离研究的较少.因此,本文采用模型去伪的思路完成故障隔离,即通过去除不符合故障时输入输出序列关系的模型,得到唯一符合故障情况模型的故障隔离方法.最后通过对风力发电机桨距子系统中传感器以及执行器故障进行诊断,验证该方法的可行性.

## 1 问题描述

考虑如下线性时变离散系统:

$$\begin{cases} x(k+1) = \mathbf{A}(k)x(k) + \mathbf{B}(k)u(k) + \mathbf{L}(k)d(k), \\ y(k) = \mathbf{C}(k)x(k) + n(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $x(k) \in R^{n_x}$ ,  $y(k) \in R^{n_y}$ ,  $u(k) \in R^{n_u}$  分别为  $k(k \geq 0)$  时刻系统的状态变量、输出变量和输入变量;  $\mathbf{A}(k)$ ,  $\mathbf{B}(k)$ ,  $\mathbf{L}(k)$ ,  $\mathbf{C}(k)$  分别为适当维数的系统矩阵;  $d(k) \in R^{n_d}$  和  $n(k) \in R^{n_n}$  分别为  $k(k \geq 0)$  时刻系统的干扰以及测量噪声.

**假设1** 干扰和噪声均未知但有界,其中干扰项和噪声项分别为

$$|d(k)| = \max_i |d_i(k)| \leq \bar{d},$$

$$|n(k)| = \max_i |n_i(k)| \leq \bar{n}.$$

边界值  $\bar{d}$ ,  $\bar{n}$  一般根据系统模型、传感器等实际因素确定.相较于已知分布的噪声,未知但有界噪声更符合实际要求<sup>[7]</sup>.

**假设2** 初始状态为  $x(0) \in X(0) = \text{Set}(\mathbf{M}_0, \mathbf{m}_0)$ , 其中  $X(k) = \text{Set}(\mathbf{M}_k, \mathbf{m}_k) = \{x(k) : \mathbf{M}x(k) \leq \mathbf{m}\}$  代表了由所有可行集元素  $x(k)$  组成的凸多面体.

在满足以上假设的基础上,预测  $k+1$  时刻对应的可行状态集合  $X(k+1)$ , 并判断该集合是否为空,完成故障检测与隔离.

## 2 基于凸多面体的集员滤波算法

利用集员滤波算法进行状态可行集估计时,与卡尔曼滤波算法类似,也包括状态预测和量测更新2个部分.

定义状态预测集合为

$$\tilde{X}(k+1) = \{\tilde{x} : \tilde{x} = \mathbf{A}(k)x(k) + \mathbf{B}(k)u(k) + \mathbf{L}(k)d(k), x \in X(k), |d| \leq \bar{d}\}, \quad (2)$$

其中  $X(k)$  为  $k$  时刻的状态可行集.

定义量测更新集合为

$$S_{k+1} = \{x : y(k+1) = \mathbf{C}(k+1)x + n, |n| \leq \bar{n}\}, \quad (3)$$

则  $k+1$  时刻包含所有状态可行解的集合可表示为

$X(k+1)$ , 且

$$X(k+1) = S_{k+1} \cap \tilde{X}(k+1). \quad (4)$$

首先在  $x(k) \in X(k)$  的基础上说明求解  $X(k+1)$  的方法.假设系统模型如式(1)所示,且模型中各参数矩阵、干扰以及噪声的边界值已知.

**定理1** 基于凸多面体的集员滤波器中量测更新集合为

$$S_{k+1} = \text{Set}(\tilde{\mathbf{M}}(k), \tilde{\mathbf{m}}(k)). \quad (5)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{M}}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}(k+1) \\ -\mathbf{C}(k+1) \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{m}}(k) = \begin{bmatrix} \bar{n} + y(k+1) \\ \bar{n} - y(k+1) \end{bmatrix}.$$

$k+1$  时刻的可行集集合为

$$X(k+1) = \text{Set}(\mathbf{M}(k), \mathbf{m}(k)). \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{M}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{A}(k) & -\mathbf{L}(k) \\ -\mathbf{I} & \mathbf{A}(k) & \mathbf{L}(k) \\ 0 & 0 & \mathbf{I} \\ 0 & 0 & -\mathbf{I} \\ \tilde{\mathbf{M}}(k) & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{M}(k-1) & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{m}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{B}(k)u(k) \\ -\mathbf{B}(k)u(k) \\ \mathbf{1} \\ \mathbf{1} \\ \tilde{\mathbf{m}}(k) \\ \mathbf{m}(k-1) \end{bmatrix},$$

且  $\mathbf{M}(k-1)$  和  $\mathbf{m}(k-1)$  符合条件  $X(k) = \text{Set}(\mathbf{M}(k-1), \mathbf{m}(k-1))$ . 则有下式:

$$\hat{x}(k+1) \in X(k+1) \Leftrightarrow$$

$$\exists_{x \in R^{n_x}, d \in R^{n_d}} : [\hat{x}(k+1)^T, x(k)^T, d(k)^T]^T \in \Omega(k+1),$$

其中  $\Omega(k+1) = \text{Set}(\mathbf{M}(k), \mathbf{m}(k))$ .

**证明** 由量测更新集合(3),令  $x \in S_{k+1}$ , 则有

$$|y(k+1) - \mathbf{C}(k+1)x| \leq \bar{n},$$

经不等式变换得到

$$\begin{aligned} \mathbf{C}(k+1) - \mathbf{C}(k+1))^T x &\leq \\ (\bar{n} + y(k+1)\bar{n} - y(k+1))^T, \end{aligned}$$

式(5)得证.

由式(4)有  $x \in S_{k+1}$ , 同时,也需满足状态预测条件

$$x(k+1) = \mathbf{A}(k)x(k) + \mathbf{B}(k)u(k) + \mathbf{L}(k)d(k).$$

其中:  $x \in X(k)$ ,  $|d| \leq \bar{d}$ . 同理,由不等式变换,同时满足状态预测和量测更新集合条件的不等式可表示为

$$\begin{bmatrix} I & -A(k) & -L(k) \\ -I & A(k) & L(k) \\ 0 & 0 & I \\ 0 & 0 & -I \\ \tilde{M}(k) & 0 & 0 \\ 0 & M(k-1) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ x(k) \\ d(k) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} -L_d^k & 0 & \dots & 0 \\ L_d^k & 0 & \dots & 0 \\ -L_d^k & -\tilde{A}_1^k L_d^{k-1} & \dots & 0 \\ L_d^k & \tilde{A}_1^k L_d^{k-1} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ -L_d^k & \dots & \dots & -\tilde{A}_{N-2}^k L_d^{k-N+1} \\ L_d^k & \dots & \dots & \tilde{A}_{N-2}^k L_d^{k-N+1} \\ I & 0 & \dots & 0 \\ -I & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & I \\ 0 & \dots & \dots & -I \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

则式(6)得证. □

基于凸多面体的集员滤波算法的目的是在满足  $x(k) \in X(k), x(k-1) \in X(k-1), \dots, x(k-N) \in X(k-N)$  的基础上求得  $X(k+1)$ , 其中  $N$  为一常数, 适当的  $N$  的取值可以限制状态可行集的扩大, 有利于提高故障诊断的精确性. 由定理1易将不等式(6)推广得到

$$M_N(k) \begin{bmatrix} x(k+1) \\ x(k) \\ x(k-1) \\ \vdots \\ x(k-N+1) \\ d(k) \\ d(k-1) \\ \vdots \\ d(k-N+1) \end{bmatrix} \leq m_N(k). \quad (8)$$

其中

$$M_N(k) = \begin{bmatrix} I & -\tilde{A}_0^k & \dots & 0 \\ I & \tilde{A}_0^k & \dots & 0 \\ I & 0 & \dots & 0 \\ -I & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I & 0 & \dots & -\tilde{A}_{N-1}^k \\ -I & 0 & \dots & \tilde{A}_{N-1}^k \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 \\ \tilde{M}(k) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M(k-1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & M(k-N) \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$m_N(k) = \begin{bmatrix} B(k)u(k) \\ -B(k)u(k) \\ \tilde{A}_1^k B(k-1)u(k-1) + B(k)u(k) \\ -\tilde{A}_1^k B(k-1)u(k-1) - B(k)u(k) \\ \vdots \\ \tilde{A}_N^k - 1 B(k-1)u(k-1) + \dots + B(k)u(k) \\ -\tilde{A}_{N-1}^k B(k-1)u(k-1) - \dots - B(k)u(k) \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \tilde{m}(k) \\ \vdots \\ m(k-N) \end{bmatrix},$$

$$\tilde{A}_m^k = A(k)A(k-1)\dots A(k-m).$$

求解式(7)和(8), 可以利用 Fourier-Motzkin 消去法<sup>[16]</sup>并结合线性规划, 将凸多面体  $\text{Set}(M(k), m(k))$  从立体空间投影到对应的  $R^{n_x}$  平面后得到对应的可行状态集  $X(k+1)$ .

### 3 基于集员滤波器的故障检测与隔离方法

系统无故障时, 描述系统的无故障模型状态可行集必不空, 若被检测为空集, 则说明当前模型无法描述该输入输出序列关系, 系统已发生故障<sup>[5]</sup>.

由于干扰、噪声等因素, 若某个模型可满足输入输出序列间的关系, 则只能说明其不与当前序列关系矛盾, 但不能代表该模型一定可以正确描述当前系统. 所谓模型去伪即给定系统模型  $\Gamma$ , 输入输出序列  $U, Y$ , 若模型  $\Gamma$  在  $t$  时刻可描述当前输入输出序列  $U$  与  $Y$  之间的关系, 则并不能保证在  $t + \tau (\tau > 0)$  时刻

也可描述该系统.反之,若一个模型已不能满足当前输入输出之间的关系,则一定可以说明该模型无法描述当前系统,该问题已经在文献[17]中说明.因此,采用模型去伪的策略进行故障隔离较选取最符合当前输入输出关系模型的方法更合理.

### 3.1 故障检测方法

集员滤波器通过检测状态可行集  $X(k+1)$  是否为空判断故障是否发生.对于无故障系统(1),若  $X(k+1) = \emptyset$ ,则判定系统在  $k_0$  时刻已经发生故障,其中  $k_0 \leq k+1$ ; 否则判定系统无故障.

### 3.2 故障隔离方法

基于模型去伪策略的故障隔离过程,可描述为利用集员滤波器在模型集中去除不符合当前输入输出序列关系的故障模型,寻找唯一符合序列关系的模型.假设已有系统模型集  $\Gamma_{\text{set}} = \{\Gamma_0, \dots, \Gamma_n\}$ , 描述了无故障系统  $\Gamma_0$  模型,以及对应故障为  $\{f_1, \dots, f_n\}$  的故障模型  $\{\Gamma_1, \dots, \Gamma_n\}$ , 对于输入序列  $U = [u(0), \dots, u(T_d - 1)]$ , 以及输出序列  $Y = [y(0), \dots, y(T_d)]$ , 经过  $T_d$  时间后,只有唯一可描述的模型  $\Gamma_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 则经故障隔离得出系统发生的故障类型为  $f_i$ . 通过求解定理1中对应模型的状态可行集  $X(k+1)$ , 判断该模型是否可描述序列  $U$  和  $Y$  之间的关系.

文献[18]讨论了基于凸多面体的集员滤波方法在模型去伪方面具有较好的适用性.为了避免可能出现不唯一的可描述模型  $\Gamma_i (i = 1, 2, \dots, n)$  的情况,外加激励信号在适当的情况下可增强集员滤波器对不同模型的区分能力.常用的外加激励信号为正弦信号<sup>[19]</sup>, 设有正弦输入信号  $u(k) = a_0 \sin(\omega_0 k) + \lambda$ , 则该问题可表示为在已知初始条件及干扰有界的条件下,系统需保证不同模型的可区分性,即对于任意两个模型有如下条件成立:

$$\begin{cases} u(k) = a_0 \sin(\omega_0 k) + \lambda; \\ x_i(k+1) = \mathbf{A}_i(k)x_i(k) + \mathbf{B}_i(k)u(k) + \mathbf{L}_i(k)d(k); \\ y_i(k) = \mathbf{C}_i(k)x_i(k) + n(k); \\ y_i(T_{d0}) - y_j(T_{d0}) \neq 0, i, j \in \{0, \dots, n\}, i \neq j; \\ |n(k)| \leq \bar{n}, |d(k)| \leq \bar{d}, x_i(0) \in X_i(0); \\ k = 0, \dots, T_{d0}. \end{cases}$$

其中:  $a_0, \omega_0, \lambda$  为常数;  $u(k)$  为系统输入;  $x_i(k+1), y_i(k), \mathbf{A}_i(k), \mathbf{B}_i(k), \mathbf{L}_i(k), \mathbf{C}_i(k)$  分别为对应模型  $\Gamma_i (i = 1, 2, \dots, n)$  的输入变量、输出变量和适当维数的系统矩阵.其余参数与式(1)中含义一致.

基于集员滤波器的故障诊断策略结构如图1所

示,其包含3类集员滤波器.

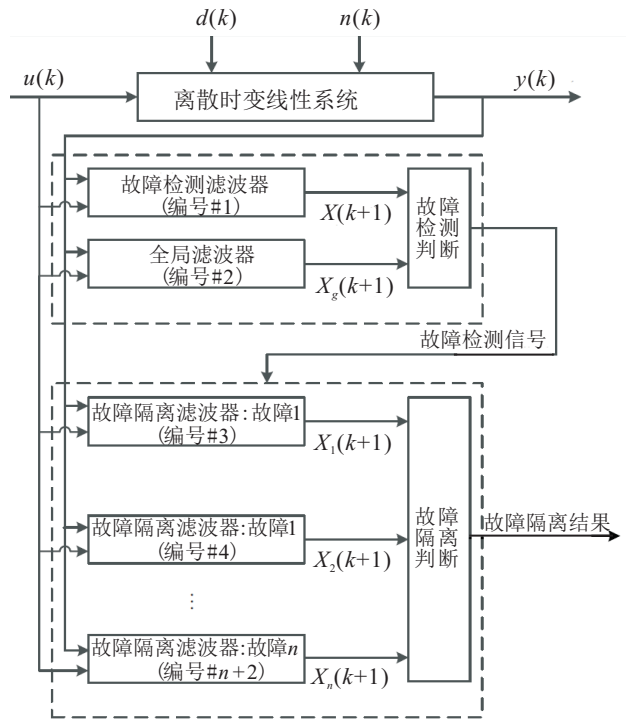


图1 故障诊断策略结构

1) 故障检测集员滤波器. 该滤波器基于无故障时的系统(1)进行设计.其作用是进行故障检测,当它输出的状态可行集  $X(k+1) = \emptyset$  时,说明系统有故障发生.

2) 全局集员滤波器. 该滤波器不仅对无故障模型可适用,对故障模型也适用.它在故障检测的过程中输出状态可行集  $X_g(k+1)$  一直不为空集,总是可以描述系统的输入输出关系.作用是当判断系统发生故障后,对故障模型的集员滤波器进行初始化.其结构同样基于系统(1),其中  $\mathbf{A}(k)$  已知且固定,其他系统矩阵均为零集.

3) 故障隔离集员滤波器. 故障隔离集员滤波器在故障隔离过程中用来判断故障类型,即假设有故障隔离集员滤波器  $\{N_1, \dots, N_n\}$ , 当仅有其中一个滤波器  $N_i$  的状态估计输出值  $X_i(k+1)$  不为零时,即完成了故障隔离,并且故障类型为  $f_i$ . 它的设计基于如下形式的故障系统模型:

$$\begin{cases} x(k+1) = \\ \tilde{\mathbf{A}}(k)x(k) + \mathbf{B}(k)u(k) + \mathbf{L}(k)d(k) + \mathbf{E}_f f(k), \\ y(k) = \mathbf{C}(k)x(k) + n(k) + \mathbf{F}_f f(k). \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $\mathbf{E}_f, \mathbf{F}_f$  为对应故障情况的系统参数矩阵,  $f(k) = [f_A(k)^T \ f_S(k)^T]^T \in R^{n_f}$  为故障信号,  $f_A(k)$  和  $f_S(k)$  分别为执行器和传感器故障信号.其他参数描

述与式(1)一致。

### 3.3 故障诊断步骤

在已知系统无故障模型及故障模型、输入输出信号、未知但有界噪声的边界值和初始状态的基础上设计3.2节中所述的3种集员滤波器。集员滤波器的主要作用是根据定理1求解对应模型的状态可行集 $X(k+1)$ 。故障诊断过程可以分为以下3个阶段。

1) 无故障阶段: 利用故障检测集员滤波器以及全局滤波器, 求解对应的状态可行集 $X(k+1)$ 、 $X_g(k+1)$ , 若不为空则说明当前系统无故障发生, 系统当前不做任何动作。

2) 故障检测阶段: 当检测到故障检测滤波器的状态可行集 $X(k+1) = \emptyset$ , 而全局滤波器的状态可行集 $X_g(k+1) \neq \emptyset$ 时, 说明故障已经发生, 将进行故障隔离。

3) 故障隔离阶段: 利用对应故障为 $\{f_1, \dots, f_n\}$ 的故障隔离集员滤波器, 求解状态可行集 $X_i(k+1)$ , 其中 $i = \{1, 2, \dots, n\}$ 。当有唯一的状态可行集 $X_i(k+1) \neq \emptyset$ 时, 故障隔离完成, 故障类型为 $f_i$ 。

## 4 仿真分析

为了检验上述故障诊断方法, 对风力发电机的桨距子系统进行故障诊断仿真。桨距子系统是风力发电机控制桨叶桨距角变换的重要部分, 它的模型可用下式<sup>[19]</sup>表示:

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\beta}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \beta_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix} \beta_r \quad (10)$$

其中:  $c\beta$  和  $\beta_a$  分别为桨距角和角速度大小,  $\beta_r$  为桨距参考值;  $\omega_n = 11.11 \text{ rad/s}$ ,  $\zeta = 0.6$  为系统参数, 分别为自然频率和阻尼系数。将该系统写为连续时间状态空间方程为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_n^2 \end{bmatrix} u - \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \omega_n^2 & \omega_n^2 \end{bmatrix} d, \\ y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} n. \end{aligned} \quad (11)$$

其中:  $x = [\beta \ \beta_a]^T$ ,  $u = \beta_r$ ,  $d$  和  $n$  分别为干扰和输出误差, 并设  $|n(k)| = \max_i |n_i(k)| \leq \delta$ ,  $|d(k)| = \max_i |d_i(k)| \leq 5\delta$ ,  $N = 2$ 。  $\delta$  为传感器的标准偏差, 根据文献[19]取  $\delta = 1.5 \times 10^{-3}$ , 采样时间  $T_s = 0.01 \text{ s}$ 。对系统离散化, 其中

$$\begin{aligned} A(k) &= \begin{bmatrix} 0.9941 & 0.0093 \\ -1.1532 & 0.8695 \end{bmatrix}, \quad B(k) = \begin{bmatrix} 0.0059 \\ 1.1532 \end{bmatrix}, \\ C(k) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad L(k) = \begin{bmatrix} -0.0030 & -0.0030 \\ -0.5766 & -0.5766 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

对应桨距子系统, 故障诊断集员滤波器的设计基于离散化后的系统模型。全局集员滤波器设计基于的模型中  $A(k)$  为单位矩阵, 其余矩阵均为零集。

根据文献[20]选取传感器、执行器, 共4个故障, 故障说明如表1所示。仿真运行在  $t = 10 \text{ s}$  时加入故障, 并假设每次只有一个故障发生, 当检测到有唯一符合输入输出关系类型的故障模型时, 即完成本次故障诊断。图2为集员滤波器对无故障模型的状态估计结果, 说明基于凸多面体的集员滤波方法可以对系统状态进行有效估计。

表1 故障类型及故障说明

序号	故障类型	故障名称	故障说明
1	传感器故障	输出固定值	输出固定值 $5^\circ$
2	传感器故障	输出固定值	输出固定值 $10^\circ$
3	传感器故障	增益输出	增益比例 1.2
4	执行器故障	液压泄露	$\omega_n^2 = 5.73$ , $\zeta_2 = 0.45$

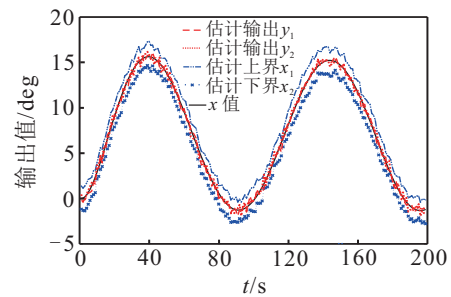


图2 无故障模型状态估计结果

风速高于切入风速但是未达到额定风速期间, 桨距系统的参考角度为恒值, 不利于模型之间的区分, 且系统存在干扰、噪声等, 可能会造成不可区分的问题。选取正弦信号  $u(t) = 8 \sin(6t) + 7$  为外加激励信号。为了减少仿真用时, 应用 Matlab 的并行计算功能对每个故障进行 30 次蒙特卡洛仿真后, 得到结果如表2和表3所示。

表2 故障检测用时结果

故障序号	完成故障检测用时 / s			检测成功率 / %
	最小值	最大值	平均值	
1	0.01	0.01	0.01	100
2	0.01	0.01	0.01	100
3	0.4	21.39	4.22	100
4	0.35	0.65	0.59	100

表3 故障隔离用时结果

故障序号	完成故障隔离用时 / s			检测成功率 / %
	最小值	最大值	平均值	
1	0.01	0.01	0.01	100
2	0.01	0.01	0.01	100
3	0.45	22.22	5.06	100
4	0.57	0.88	0.79	100

需要说明的是,故障隔离所用时间为完成故障诊断及故障隔离所用的总时间.为了更直观展示故障隔离的过程,取对故障1、故障3、故障4仿真中30次平均故障诊断及隔离结果进行描述,分别如图3~图5所示.由于故障2与故障1的诊断过程类似,这里不再赘述.图中滤波器#1~#6分别代表故障诊断集员滤波器、全局集员滤波器、代表故障1~故障4的故障隔离集员滤波器.

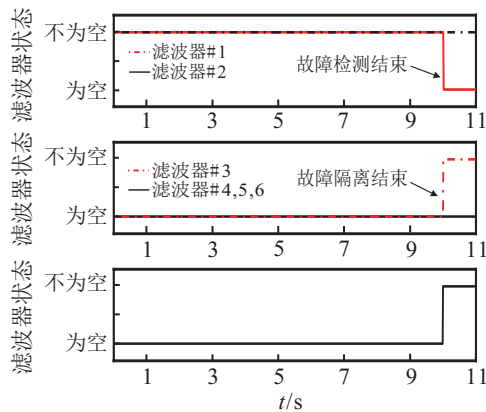


图3 故障1故障检测及隔离过程

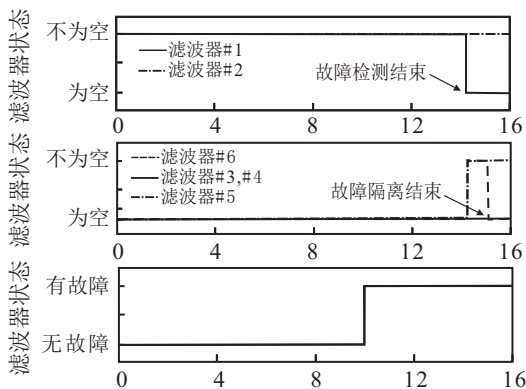


图4 故障3故障检测及隔离过程

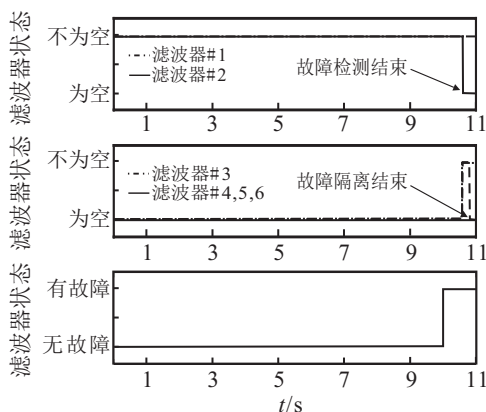


图5 故障4故障检测及隔离过程

如图3所示,在无故障加入时( $t < 10$  s),基于无故障模型进行状态估计的滤波器#1状态可行集不为空.在图中表示一直为状态1.当 $t = 10$  s发生故障,传感器输出固定值,0.01 s后检测到滤波器#1无法描述当前状态,为空集;同时,故障隔离滤波器#3~#6

号开始进行检测,最终只有一个滤波器#3可描述当前故障输入输出序列关系,则判定此时故障类型为滤波器#3代表的故障,故障序号为1,传感器输出固定值 $5^\circ$ .集员滤波对该故障的检测和隔离都可以在0.01 s内完成,且故障检测全过程全局集员滤波器状态一直不为空.

如图4所示,当 $t < 10$  s时无故障发生,当 $t = 10$  s发生故障,传感器输出增益变化为原来的1.2倍.对于该故障类型,需要平均经过4.25 s检测到滤波器#1状态为空,故障检测完成的同时故障隔离滤波器#3~#6号开始进行检测,对于滤波器#3和滤波器#4可以立即检测为不符合当前输入输出状态,平均再经过0.84 s滤波器#6检测其对应模型,无法描述当前输入输出状态.最终只有一个滤波器#5不为空,即可描述当前故障输入输出序列关系,则判定此时故障类型为滤波器#5代表的故障,故障序号为3.

对于故障4的故障检测及隔离过程与上述几种故障类似,不再描述.由实验结果可以看出,集员滤波方法对风力发电机桨距子系统进行故障检测的结果中,故障1和故障2都可以在发生后0.01 s内得到检测和隔离,效果较好.对于故障4也可在一定时间内完成故障诊断,其中对于故障3诊断和隔离的时间较长,但对于每个故障的诊断及隔离成功率都可以达到100%,且无误诊情况出现.

### 5 结论

本文在基于凸多面体的集员滤波理论上,研究了包含未知但有界噪声线性系统的故障检测及隔离方法.通过判断故障检测滤波器的可行状态集是否为空进行故障检测,并利用模型去伪的思路进行故障隔离.论文以风力发电机桨距子系统的传感器和执行器故障为例进行实例仿真验证,取得了较好的诊断效果.如何提高基于凸多面体的集员滤波算法对不同故障类型的诊断效率,以及对于具有参数不确定性系统,该故障检测及隔离方法还有待进一步研究.

### 参考文献(References)

[1] 胡正高, 赵国荣, 李飞, 等. 基于自适应未知输入观测器的非线性动态系统故障诊断[J]. 控制与决策, 2016, 31(5): 901-906.  
(Hu Z G, Zhao G R, Li F, et al. Fault diagnosis for nonlinear dynamical system based on adaptive unknown input observer[J]. Control and Decision, 2016, 31(5): 901-906.)

[2] Gao Z, Cecati C, Ding S X. A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques — Part I: Fault diagnosis with model-based and signal based approaches[J]. IEEE Trans

- on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3757-3767.
- [3] 江涛, 钱富才. 基于ESMF算法的GPS信号多普勒频率估计[J]. 控制与决策, 2016, 31(2): 378-384.  
(Jiang T, Qian F C. Estimated doppler frequency of GPS signal based on ESMF[J]. Control and Decision, 2016, 31(2): 378-384.)
- [4] Scheweppe F C. Recursive state estimation: Unknown but bounded errors and system inputs[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1968, 13(1): 22-28.
- [5] 郑维荣, 何青. 基于扩展集员滤波的发电机动态状态估计[J]. 电力科学与工程, 2014, 30(11): 11-15.  
(Zheng W R, He Q. Dynamic state estimation for a power generator based on extended set membership filter[J]. Electric Power Science and Engineering, 2014, 30(11): 11-15.)
- [6] 袁震东, 徐桥南. 多输入多输出系统参数的集员辨识[J]. 控制理论与应用, 1994, 11(4): 404-412.  
(Yuan Z D, Xu Q N. Set membership identification for the parameters of MIMO systems[J]. Control Theory & Applications, 1994, 11(4): 404-412.)
- [7] 张峻峰, 何潇, 周东华. 基于集员估计的线性MIMO系统故障检测方法[J]. 上海应用技术学院学报: 自然科学版, 2015, 15(2): 149-152.  
(Zhang J F, He X, Zhou D H. Fault detection for a linear MIMO systems based on set membership estimation[J]. J of Shanghai Institute of Technology: Natural Science, 2015, 15(2): 149-152.)
- [8] Puig V. Fault diagnosis and fault tolerant control using set-membership approaches: Application to real case Ssudies[J]. Int J of Applied Mathematics & Computer Science, 2010, 20(4): 619-635.
- [9] 周波, 钱堃, 马旭东, 等. 一种新的基于保证定界椭球算法的非线性集员滤波器[J]. 自动化学报, 2013, 39(2): 150-158.  
(Zhou B, Qian K, Ma X D, et al. A new nonlinear set membership filter based on guaranteed bounding ellipsoid algorithm[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(2): 150-158.)
- [10] 苗琳璐, 王武. 基于集员滤波器的故障诊断[J]. 福州大学学报, 2014, 42(1): 80-84.  
(Miao L L, Wang W. Fault diagnosis based on the set membership filter[J]. J of Fuzhou University, 2014, 42(1): 80-84.)
- [11] Bravo J M, Alamo T, Camacho E F. Bounded error identification of systems with time-varying arameters[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2006, 51(7): 1144-1150.
- [12] Scott J K, Raimondo D M, Marseglia G R, et al. Constrained zonotopes: A new tool for set-based estimation and fault detection[J]. Automatica, 2016, 69(6): 123-136.
- [13] Le V T H, Stoica C, Alamo T, et al. Zonotopic guaranteed state estimation for uncertain systems[J]. Automatica, 2013, 49(11): 3418-3424.
- [14] Shamma J S, Tu K Y. Set-valued observers and optimal disturbance rejection[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(2): 253-264.
- [15] 柴伟. 集员估计理论、方法及其应用[D]. 北京: 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2008: 13-33.  
(Chai W. Set membership estimation theory, methods and their applications[D]. Beijing: School of Automation Science & Electrical Engineering, Beihang University, 2008: 13-33.)
- [16] Smith D K. Theory of linear and integer programming[M]. England: Wiley, 1998.
- [17] Poolla K, Khargonekar P, Tikku A, et al. A time-domain approach to model validation[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1994, 39(5): 951-959.
- [18] Rosa P, Silvestre C. On the distinguishability of discrete linear time-invariant dynamic systems[C]. The 50th IEEE Conf on Decision and Control and European Control Conf. Florida: IEEE, 2011: 3356-3361.
- [19] Casau P, Rosa P, Tabatabaeipour S M, et al. A set-valued approach to FDI and FTC of Wind Turbines[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2014, 23(1): 245-263.
- [20] Odgaard P F, Stoustrup J, Kinnaert M. Fault-tolerant control of wind turbines: A benchmark model[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 1168-1182.

(责任编辑: 孙艺红)