

风力机系统基于 H_-/H_∞ 未知输入观测器的故障诊断

陈宣含, 沈艳霞[†], 吴定会

(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: 针对实际工程中风力机传动系统未知输入难以完全解耦的问题, 提出基于 H_-/H_∞ 未知输入观测器 (unknown input observer, UIO) 故障诊断方法. 首先, 利用未知输入观测器的等式条件将未知输入分解为可解耦与不可解耦两部分, 且将可解耦部分从估计误差中消除. 其次, 利用 H_-/H_∞ 性能指标设计未知输入观测器的残差产生器, 使残差对未知输入中不可解耦部分具有鲁棒性并对故障信号具有敏感性, 并通过引入松弛矩阵解决观测器参数设计过程中的保守问题. 考虑残差信号的随机特性, 采用统计理论确定故障检测阈值. 经仿真验证, 该方法可对风力机传动系统传感器加性故障和乘性故障进行有效诊断.

关键词: 观测器; 传感器; H_- 指标; H_∞ 指标; 故障诊断

引用格式: 陈宣含, 沈艳霞, 吴定会. 风力机系统基于 H_-/H_∞ 未知输入观测器的故障诊断. 控制理论与应用, 2019, 36(10): 1690 – 1697

DOI: 10.7641/CTA.2019.80811

Fault diagnosis of wind turbine system based on H_-/H_∞ unknown input observer

CHEN Xuan-han, SHEN Yan-xia[†], WU Ding-hui

(Engineering Research Center of Application Internet of Things Technology, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the unknown input of the wind turbine drive system is difficult to be fully decoupled, a fault diagnosis method based on H_-/H_∞ unknown input observer (UIO) is proposed. Firstly, the unknown input is decomposed into decouplable and uncoupled parts by using the equation condition of the unknown input observer, and the decouplable part is eliminated from the estimation error. Secondly, the residual generator of the unknown input observer is designed by using H_-/H_∞ performance index to make the residual robust to the uncoupled part of the unknown input and sensitive to the fault signal. The conservative problem in the parameter design of the observer is solved by introducing relaxation matrix. Considering the stochastic characteristics of residual signal, the fault detection threshold is determined by statistical theory. The simulation results show that the method can effectively diagnose the additive and multiplicative faults of sensors in wind turbine drive system.

Key words: observer; sensor; H_- index; H_∞ index; fault diagnosis

Citation: CHEN Xuanhan, SHEN Yanxia, WU Dinghui. Fault diagnosis of wind turbine system based on H_-/H_∞ unknown input observer. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(10): 1690 – 1697

1 引言

风电作为应用最广泛和发展最快的新能源发电技术, 已在全球范围内实现大规模开发应用^[1]. 风力机大多安装在沿海或是沙漠等天气不可预测、条件恶劣的环境, 极易发生故障, 影响风力机组的安全运行甚至导致系统停机, 造成经济损失和能源浪费^[2]. 因此, 研究风力机故障诊断对提高系统运行可靠性和安全性有重要意义^[3]. 在过去的几十年里, 基于模型的故

障诊断方法得到广泛研究, 其基本思路是利用系统状态及其观测器构造残差, 然后根据决策规则判断故障的发生^[4].

针对存在模型不确定性和未知输入干扰的系统, 未知输入观测器可解除状态估计误差与未知输入之间的耦合关系, 生成对未知输入鲁棒但对故障信息敏感的故障检测信号^[5], 是常用的基于模型的故障诊断方法之一. 目前, 基于未知输入观测器的风力机故障

收稿日期: 2018–10–20; 录用日期: 2019–03–13.

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

本文责任编辑: 梅生伟.

国家自然科学基金项目(61573167, 61572237)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61573167, 61572237).

诊断研究中, 大多假设外部未知输入干扰可完全解耦, 但实际系统难以实现外部干扰的完全解耦^[6], 且未知输入完全解耦需要满足一定条件, 当条件无法满足时, 未知输入观测器则不存在^[7]. 于是, 研究学者们提出了H_∞未知输入观测器, 将H_∞性能指标与未知输入观测器的设计相结合, 提高残差对未知输入中不可解耦部分的鲁棒性. 文献[8]针对未知输入可部分解耦的线性系统, 由系统状态和故障信号构造增广系统, 结合线性矩阵不等式设计增广系统干扰部分解耦的未知输入观测器, 实现系统状态和故障的有效估计. 文献[9]在不考虑未知输入是否完全解耦的情况下, 利用H_∞未知输入观测器消除整体未知输入对残差的影响. 文献[10]针对未知输入不满足完全解耦条件的情况, 提出了将未知输入一分为二的思想, 采用H_∞性能指标对不可解耦部分进行约束, 消除未知输入对残差的影响. 近年来, H_∞性能指标被广泛用于描述残差对故障信号敏感程度. 文献[11]研究了线性切换系统故障检测问题, 利用H_∞性能保证未知输入观测器残差对系统故障具有敏感性. 文献[12]针对Lipschitz非线性系统, 不考虑未知干扰是否完全解耦, 采用有限频域的H_∞指标描述残差最小故障敏感度, 利用L_∞范数描述残差对干扰的鲁棒性能, 设计了H_∞/L_∞故障检测观测器, 实现非线性系统的故障检测. 文献[13]以异步切换系统为研究对象, 设计了H_∞/H_∞未知输入观测器实现系统的故障检测, 并且通过加入矩阵变量的方法解决系统矩阵与Lyapunov矩阵的耦合问题问题.

目前, 针对风力机故障诊断的研究, 大多假设未知输入可完全解耦. 但在实际工程中, 由于外部干扰和模型的不确定性, 难以实现未知输入的有效解耦. 针对该问题, 本文将考虑未知输入无法完全解耦的未知输入观测器应用于风力机的故障诊断. 以风力机传动系统为研究对象, 利用未知输入观测器的等式条件将未知输入分解为可解耦与不可解耦两部分, 并将未知输入可解耦部分从估计误差中消除. 结合H_∞性能指标和H_∞性能指标使残差对未知输入中不可解耦部分具有鲁棒性且对故障信号具有敏感性, 设计了H_∞/H_∞基于未知输入观测器的残差产生器, 并采用松弛矩阵解决观测器参数设计过程中使用同一Lyapunov矩阵求解H_∞/H_∞性能的保守性问题, 实现风力机传动系统传感器加性故障与乘性故障的有效诊断. 考虑到残差信号的随机特性, 采用统计理论确定故障检测阈值, 确保故障诊断结果的可靠性.

2 风力机传动系统模型

风力机是风能转换系统的重要组成部分, 其中传动机构包括风轮转子、低速轴、齿轮箱和高速轴, 如图1所示. 风轮捕获风能使低速轴转动, 产生机械转矩, 再由齿轮箱连接高速轴, 实现低速向高速的变换, 将机械转矩传递到高速轴, 最后由高速轴接入发电机.

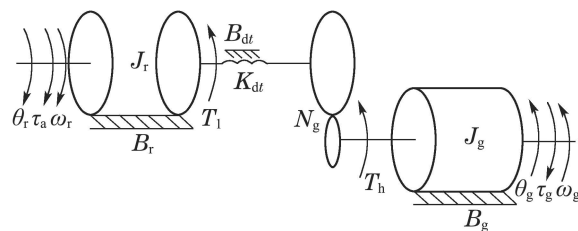


图 1 传动机构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of drive system

传动机构模型如下^[14]:

$$J_r \dot{\omega}_r(t) = \tau_a(t) - K_{dt} \theta_{\Delta}(t) - (B_{dt} + B_r) \omega_r(t) + \frac{B_{dt}}{N_g} \omega_g(t), \quad (1)$$

$$J_g \dot{\omega}_g(t) = \frac{K_{dt}}{N_g} \theta_{\Delta}(t) + \frac{B_{dt}}{N_g} \omega_r(t) - \left(\frac{B_{dt}}{N_g^2} + B_g \right) \omega_g(t) - \tau_g(t), \quad (2)$$

$$\dot{\theta}_{\Delta}(t) = \omega_r(t) - \frac{1}{N_g} \omega_g(t), \quad (3)$$

其中: J_r , J_g 为低速轴和高速轴的转动惯量; B_r , B_g 为低速轴和高速轴的摩擦系数; ω_g 为发电机转速; ω_r 为风轮转子转速; K_{dt} 为扭转刚度; N_g 为传动机构的传动比; B_{dt} 为扭转阻尼系数; η_{dt} 为传动系统的效率; θ_{Δ} 为传动系统的扭转角度; τ_g 为电机产生的转矩; τ_a 为空气动力学转矩, 易受风速影响, 其传递函数如下所示:

$$\tau_a(t) = \frac{\rho A C_p(\theta(t), \lambda(t)) v^3(t)}{2 \omega_r(t)}, \quad (4)$$

其中: v 为风速; ρ 是空气密度; A 为桨叶扫过的面积; C_p 是风能转换效率, 它是桨距角 θ 和桨叶叶尖速比 λ 的函数. 空气动力学转矩与风速有关, 而风速是不可精确估计的, 故将其它看成由估计部分 $\hat{\tau}_a(t)$ 以及未知输入部分 $\bar{\tau}_a(t)$ 组成, 即 $\tau_a(t) = \hat{\tau}_a(t) + \bar{\tau}_a(t)$.

根据式(1)–(4), 建立风力发电机传动机构模型

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (5)$$

其中: $x = [\omega_r \ \omega_g \ \theta_{\Delta}]^T$ 为系统的状态变量; $u = [\hat{\tau}_a \ \tau_g]^T$ 为输入状态; $d = [\bar{\tau}_a \ d_2]^T$ 代表系统的未知输入; d_2 表示除风速外其他因素带来的未知输入或干扰, 且假设 d 无法被完全解耦. 并且有

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{B_{dt} + B_r}{J_r} & \frac{B_{dt}}{J_r N_g} & -\frac{K_{dt}}{J_r} \\ \frac{\eta_{dt} B_{dt}}{J_g N_g} & -\frac{\eta_{dt} B_{dt}}{N_g^2} - B_g & \frac{\eta_{dt} K_{dt}}{J_g N_g} \\ 1 & -\frac{1}{N_g} & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_g} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, E_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

当传动机构传感器出现故障,此时系统可表现为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t), \\ y(t) = Cx(t) + D_f f(t), \end{cases} \quad (6)$$

其中: $f(t) \in \mathbb{R}^{l_f}$ 为系统的故障信号, l_f 为系统会发生的故障个数, D_f 为系统的故障分布矩阵.

传动机构传感器故障可分为加性故障和乘性故障,表现形式和模型如表1所示^[15].

表1 传感器故障类型及建模
Table 1 Sensor fault types and modeling

故障描述	表现形式	传感器故障模型
增益变化	乘性故障	$y_{out}(t) = \beta y_{in}(t)$, 其中: β 为增益系数, y_{in} 为正常时给出的信号.
偏差失效	加性故障	$y_{out}(t) = y_{in}(t) + \Delta$, Δ 为常数.

当传动机构传感器出现乘性故障,传感器故障模型为

$$y_{out}(t) = \beta y_{in}(t) = y_{in}(t) + (\beta - 1)y_{in}(t) = y_{in}(t) + \Delta, \quad (7)$$

其中 $\Delta = (\beta - 1)y_{in}(t)$. 因此,传动机构传感器的乘性故障可转化成加性故障.

3 基于 H_2/H_∞ 未知输入观测器故障诊断方法

3.1 未知输入观测器

已知含未知输入干扰的无故障系统模型:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (8)$$

其中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 为系统的状态变量, $y(t) \in \mathbb{R}^k$ 为输出状态量, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 为输入状态, $d(t) \in \mathbb{R}^{l_d}$ 代表系统的未知输入, A, B, C, E 为适当维数的系统参数矩阵.

对于系统(8),其未知输入观测器可表示为^[16]

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Fz(t) + TBu(t) + Ky(t), \\ \hat{x}(t) = z(t) + Hy(t), \end{cases} \quad (9)$$

其中: $z \in \mathbb{R}^n$ 是观测器式(9)的状态变量; $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ 是状态估计值; F, T, K, H 为需设计的矩阵,用于实现未知输入的解耦.

定理1 针对系统(8)存在如式(9)所示的未知输入观测器的充分必要条件为^[17]

1) $\text{rank}(CE) = \text{rank}(E)$;

2) (C, A_1) 可观测, 且 $A_1 = (I - HC)A$.

当系统矩阵满足定理1中的条件1)时,系统的未知输入可完全解耦. 接下来讨论对于未知输入无法全部解耦的系统,将在该UIO原理的基础上,设计新的观测器,实现系统状态估计和故障诊断.

3.2 未知输入部分解耦的故障诊断方法

当系统矩阵满足 $\text{rank}(CE) = \text{rank}(E)$ 时,系统的未知输入 d 可以完全从估计误差中解耦;反之,未知输入 d 则不可被完全解耦. 但若未知输入分布矩阵 E 中的 p_1 列满足定理1中的条件1),则可将 $E \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 分成 $E_1 \in \mathbb{R}^{n \times p_1}$ 和 $E_2 \in \mathbb{R}^{n \times (p-p_1)}$ 两部分,未知输入也可以分为未知输入可解耦部分 $d_1(t) \in \mathbb{R}^{p_1}$ 和未知输入不可解耦部分 $d_2(t) \in \mathbb{R}^{(p-p_1)}$ 两部分,从而含未知输入干扰的传感器故障系统模型可表示为^[18]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E_1 d_1(t) + E_2 d_2(t), \\ y(t) = Cx(t) + D_f f(t). \end{cases} \quad (10)$$

对于系统(10),将 $E_2 d_2$ 看作系统状态的一部分,则基于未知输入观测器的故障观测器可表示为

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Fz(t) + TBu(t) + Ky(t), \\ \hat{x}(t) = z(t) + Hy(t), \\ r(t) = y(t) - C\hat{x}(t), \end{cases} \quad (11)$$

其中: $z \in \mathbb{R}^n$ 是观测器式(11)的状态变量, $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ 是状态估计, r 为残差, F, T, K, H 为需要设计的参数矩阵;且观测器(11)与观测器(9)存在差异,其只可实现未知输入 d_1 从估计误差中完全解耦,但无法实现 d_2 和估计误差的解耦.

定义状态估计误差为 $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$.

根据式(10)和式(11)可得

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) = & (A - HCA - K_1 C)e(t) + [(A - HCA - K_1 C) - F]z(t) + [(A - HCA - K_1 C)H - K_2]y(t) + [(I - HC) - T]Bu(t) + (I - HC)E_1 d_1(t) + (I - HC)E_2 d_2(t)K_2 D_f f(t) - HD_f \dot{f}(t). \end{aligned} \quad (12)$$

考虑故障 $f(t)$ 为恒定或者缓变故障时,有 $\dot{f}(t) \approx 0$ 且当满足以下等式:

$$\begin{cases} (HC - I)E_1 = 0, \\ T = I - HC, \\ F = A - HCA - K_1 C = A_1 - K_1 C, \\ K_2 = FH, \\ K = K_1 + K_2. \end{cases} \quad (13)$$

可得系统(10)的误差系统:

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = Fe(t) + TE_2d_2(t) - (K_1 + H)D_f f(t), \\ r(t) = Ce(t) + D_f f(t). \end{cases} \quad (14)$$

观察误差系统式(14)可知, 估计误差 $e(t)$ 和未知输入 $d_1(t)$ 实现完全解耦, 但与 $d_2(t)$ 未完成解耦. 故残差 $r(t)$ 将受到故障 $f(t)$ 和未知输入未解耦部分 $d_2(t)$ 两个因素的影响. 因此结合H_∞/H_∞混合性能指标, 重新设计故障检测器(11)使得:

1) 误差系统(14)是全局稳定的;

2) 当误差系统(14)的初始状态 $e(t_0) = 0$ 时, 残差 $r(t)$ 对未知输入未解耦部分 $d_2(t)$ 具有鲁棒性, 即满足H_∞性能指标^[19]:

$$\begin{cases} \sum_{t=t_0}^{\infty} (1-\alpha)^{t-t_0} r^T(t)r(t) \leq \gamma^2 \sum_{t=t_0}^{\infty} d_2^T(t)d_2(t), \\ 0 < \alpha < 1, \gamma > 0; \end{cases} \quad (15)$$

3) 当误差系统(14)的初始状态 $e(t_0) = 0$ 时, 残差 $r(t)$ 对故障 $f(t)$ 具有敏感性, 即满足H_∞性能指标:

$$\begin{cases} \sum_{t=t_0}^{\infty} (1-\alpha)^{t-t_0} r^T(t)r(t) \geq \beta^2 \sum_{t=t_0}^{\infty} f^T(t)f(t), \\ 0 < \alpha < 1, \beta > 0, \end{cases} \quad (16)$$

则将同时满足式(15)和式(16)的故障观测器(11)称为H_∞/H_∞未知输入观测器. 首先考虑H_∞性能指标, 需用到下面的引理.

引理 1 考虑系统^[20]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (17)$$

其中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 为系统的状态变量, $y(t) \in \mathbb{R}^k$ 为输出状态量, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 为输入状态, A, B, C 为适当维数的系统参数矩阵. 给定常数 $0 < \alpha < 1, \gamma > 0$, 如果存在Lyapunov函数 $V(x(t))$, 使得矩阵不等式

$$\begin{aligned} & V(\dot{x}(t)) - (1-\alpha)V(x(t)) + \\ & y^T(t)y(t) - \gamma^2 u^T(t)u(t) < 0 \end{aligned} \quad (18)$$

成立, 则系统(17)指数稳定且 $y(t)$ 对于 $u(t)$ 满足H_∞性能指标.

考虑时 $f(t) = 0$, 误差系统(14)可表示为

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = Fe(t) + TE_2d_2(t), \\ r(t) = Ce(t). \end{cases} \quad (19)$$

定理 2 给定常数 $0 < \alpha < 1, \gamma > 0$, 如果存在正定对称矩阵 P 满足矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} -P & PF & PTE_2 \\ * & -(1-\alpha)P + C^TC & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0, \quad (20)$$

则误差系统(19)全局稳定, 并满足H_∞性能指标.

证 定义误差系统(19)的Lyapunov函数

$$V(e(t)) = e^T(t)Pe(t), \quad (21)$$

其中 $P > 0$, 则 $V(e(t)) > 0$.

根据式(19)和式(21)可得

$$\begin{aligned} & V(\dot{e}(t)) - (1-\alpha)V(e(t)) + \\ & r^T(t)r(t) - \gamma^2 d_2^T(t)d_2(t) = \\ & \dot{e}^T(t)P\dot{e}(t) - (1-\alpha)e^T(t)Pe(t) + \\ & e^T(t)C^TCe(t) - \gamma^2 d_2^T(t)d_2(t) = \\ & (Fe(t) + TE_2d_2(t))^T P(Fe(t) + TE_2d_2(t)) - \\ & (1-\alpha)e^T(t)Pe(t) + e^T(t)C^TCe(t) - \\ & \gamma^2 d_2^T(t)d_2(t) = \\ & \begin{bmatrix} e(t) \\ d_2(t) \end{bmatrix}^T \Omega \begin{bmatrix} e(t) \\ d_2(t) \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (22)$$

其中

$$\Omega = \begin{bmatrix} F^TPF - (1-\alpha)P + C^TC & F^TPTE_2 \\ * & (TE_2)^T PTE_2 - \gamma^2 I \end{bmatrix}.$$

根据式(20)可得 $\Omega < 0$, 因此有

$$\begin{aligned} & V(\dot{e}(t)) - (1-\alpha)V(e(t)) + \\ & r^T(t)r(t) - \gamma^2 d_2^T(t)d_2(t) < 0, \end{aligned} \quad (23)$$

则误差系统(19)全局指数稳定, 并且满足H_∞性能指标.

注 1 在定理 1 的基础上, 给出满足H_∞性能的 F, T, K, H 的计算步骤.

由 $\text{rank}(CE_1) = \text{rank}(E_1)$ 可计算 CE_1 的伪逆:

$$(CE_1)^+ = ((CE_1)^T CE_1)^{-1} (CE_1)^T. \quad (24)$$

根据式(13), 可计算

$$H = E_1(CE_1)^+, \quad (25)$$

$$T = I - E_1(CE_1)^+ C. \quad (26)$$

将式(13)代入式(20), 可得

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} -P & PA - PHCA - UC & PTE_2 \\ * & -(1-\alpha)P + C^TC & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0, \\ U = PK_1. \end{cases} \quad (27)$$

由式(27)可求解 P 和 U , 则 $K_1 = P^{-1}U$. 再根据式(13)可计算观测器参数 F 和 K .

考虑H_∞性能指标, 需用到下面的引理.

引理 2 考虑系统(17), 给定常数 $0 < \alpha < 1, \beta > 0$, 如果存在Lyapunov函数 $V(x(t))$, 使得矩阵不等式^[21]

$$V(\dot{x}(t)) - (1-\alpha)V(x(t)) +$$

$$\beta^2 u^T(t)u(t) - y^T(t)y(t) < 0 \quad (28)$$

成立, 则系统(17)指数稳定且 $y(t)$ 对于 $u(t)$ 满足 H_- 性能指标.

考虑 $d_2(t) = 0$ 时, 误差系统(14)可表示为^[22]

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = Fe(t) + TE_2d_2(t), \\ r(t) = Ce(t). \end{cases} \quad (29)$$

定理3 给定常数 $0 < \alpha < 1$, $\beta > 0$, 如果存在正定对称矩阵 Q 和 V 满足矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} -P & QA - QHCA - VC & -V - QH \\ * & -(1 - \alpha)Q - C^TC & -C^T \\ * & * & -\beta^2 I - I \end{bmatrix} < 0, \quad (30)$$

则误差系统(29)全局稳定, 并满足 H_- 性能指标. 且观测器参数的计算为

$$K_1 = Q^{-1}V, \quad (31)$$

$$F = A - HCA - Q^{-1}VC, \quad (32)$$

$$K = Q^{-1}V + FH. \quad (33)$$

定理2的证明与定理1类似, 此处省略.

注2 若对定理1和定理2同时求解, 即可得到 H_-/H_∞ 未知输入观测器参数. 观察两组参数可发现

$$K_1 = P^{-1}U = Q^{-1}V, \quad (34)$$

只有当 $P = Q$ 时, 式(34)才成立, 这相当于使用同一Lyapunov矩阵求解 H_-/H_∞ 性能, 所得结果具有保守性. 下面通过使用松弛矩阵方法, 对该问题进行求解.

定理4 给定常数 $0 < \alpha < 1$, $\beta > 0$, $\gamma > 0$, 如果存在正定对称矩阵 P , Q 和矩阵 G , Z 使得矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} P - G - G^T & G^T A - G^T HCA - ZC \\ * & -(1 - \alpha)P + C^TC \\ * & * \\ G^T TE_2 \\ 0 \\ -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0, \quad (35)$$

$$\begin{bmatrix} Q - G - G^T & G^T A - G^T HCA - ZC \\ * & -(1 - \alpha)Q + C^TC \\ * & * \\ -Z - G^T H \\ -C^T \\ -\beta^2 I - I \end{bmatrix} < 0, \quad (36)$$

则误差系统(14)全局稳定, 并且满足 H_- 性能指标 H_∞ 性能指标, 且 H_-/H_∞ 未知输入观测器的参数计算如下:

$$K_1 = (G^T)^{-1}Z, \quad (37)$$

$$F = A - HCA - (G^T)^{-1}ZC, \quad (38)$$

$$K = (G^T)^{-1}Z + FH. \quad (39)$$

证 若式(35)成立, 则 $P - G - G^T < 0$, 即 $G + G^T > P > 0$, 说明 G 是可逆矩阵. 由于 P 是正定对称矩阵, 则

$$(P - G)^T P^{-1} (P - G) \geq 0 \quad (40)$$

成立, 将式(40)展开移项可得

$$G^T P^{-1} G \geq G + G^T - P. \quad (41)$$

在式(41)左右两边同时乘以 $-I$ 可得

$$-G^T P^{-1} G \leq P - G - G^T, \quad (42)$$

则矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} -G^T P^{-1} G & G^T A - G^T HCA - ZC & G^T TE_2 \\ * & -(1 - \alpha)P + C^TC & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (43)$$

成立, 由于 G 是可逆矩阵, 在等式(43)两边同时左乘 $\Gamma = \text{diag}\{P(G^T)^{-1}, I, I\}$ 和右乘 Γ^T , 并且则可得式(35)成立. 同理可证式(36)成立, 且误差系统(14)全局指数稳定, 并且满足 H_∞ 性能指标和 H_- 性能指标. 且 H_-/H_∞ 未知输入观测器的参数计算如式(37)–(39)所示.

证毕.

注3 总结 H_-/H_∞ 未知输入观测器的设计步骤.

步骤1 检验系统满足 $\text{rank}(CE) \neq \text{rank}(E)$ 时, 但未知输入分布矩阵 E 中的 p_1 列满足定理1中的条件1), 即 $\text{rank}(CE_1) = \text{rank}(E_1)$.

步骤2 选取 α, β, γ 的值, 求解线性矩阵不等式(35)–(36), 得到参数矩阵 P, Q, G, Z .

步骤3 根据式(37)–(39)求解 K_1, F, K .

3.3 故障检测

当系统无故障发生时, 即 $f(t) = 0$, 残差可近似看作均值为零的高斯白噪声序列; 当系统发生故障时, 即 $f(t) \neq 0$, 残差不再符合白噪声特性, 则检测出故障.

故障检测的基本思想是针对观测器产生的残差信号设计合理阈值, 一旦故障残差超出阈值表示故障发生^[23]. 一般是利用残差的评价函数 $J(r(t))$ 与选定的阈值 J_{th} 进行比较, 进而判断故障是否发生, 其逻辑决策规则如下:

$$\begin{cases} J(r(t)) \leq J_{th}, & \text{无故障,} \\ J(r(t)) > J_{th}, & \text{故障发生.} \end{cases} \quad (44)$$

根据经验, 通常取一较小的正常数作为阈值. 但在实际系统中, 受模型误差、噪声和干扰等不确定性因素的影响, 残差有故障时的条件概率密度曲线与无故障时的条件概率密度曲线存在交叠, 若是阈值取的不

恰当, 故障检测容易出现漏报或误报, 影响故障检测的准确性. 风力机这类实际系统存在模型误差等不确定性因素, 残差可近似为高斯分布的随机过程. 为保证结果的准确性和可靠性, 在处理残差数据之前对系统残差样本进行高斯分布检验, 确保在随机理论的基础上设计合理的故障检测阈值.

定义残差的均值为

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r(n), \quad (45)$$

其中: μ 为残差均值, N 为样本数量, $r(n)$ 为第 n 个残差值. 理论上, N 样本数量越大, 则计算值 μ 越接近真值. 但实际上, 样本数目通常是有限的, 根据有效估计法则可得有效估计样本为 $N \geq 30$ 或者 $N \geq 3 \times (k+1)$, k 为系统变量个数. 为确保残差均值 N 的可靠性, 本文选取样本数量为 50.

定义残差的方差为

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [r(n) - \mu]^2. \quad (46)$$

求均值 μ 的 $(1 - \alpha)$ 置信区间, 即满足下式:

$$p(\bar{\mu} - \frac{\sigma}{\sqrt{N}}\mu_{1-\frac{\alpha}{2}}, \bar{\mu} + \frac{\sigma}{\sqrt{N}}\mu_{1-\frac{\alpha}{2}}) = 1 - \alpha, \quad (47)$$

其中: $(1 - \alpha)$ 是置信度, $\mu_{1-\frac{\alpha}{2}}$ 为 μ 的 $(1 - \frac{\alpha}{2})$ 分位数. 实际工程中, 取置信度为 0.95~0.99.

综上, 残差的阈值函数可表示为

$$J_{th} = \bar{\mu} \pm \frac{\sigma}{N}\mu_{1-\frac{\alpha}{2}} + r_0, \quad (48)$$

其中 r_0 为无故障残差, 理想情况下等于 0, 但由于建模误差和外界干扰等因素的影响, 实际工程中 $r_0 \neq 0$. 本文中, 为了降低故障检测的误报率, 取置信区间的上界作为阈值, 即 $J_{th} = \bar{\mu} + \frac{\sigma}{N}\mu_{1-\frac{\alpha}{2}} + r_0$.

4 仿真分析

论文对额定功率为 4.8 MW 的风力机的传动机构传感器故障进行仿真, 其主要参数如表 2 所示.

表 2 风力机传动机构参数

Table 2 Driving system parameters of wind turbine

参数符号	参数值	参数符号	参数值
J_r	55×10^6	K_{dt}	2.7×10^9
J_g	390	N_g	95
B_r	7.11	B_{dt}	775.49
B_g	45.6	η_{dt}	0.97

考虑风力机传动系统传感器故障如表 3 所示, 其中: f_{s1} 是风轮转子转速传感器故障信号, f_{s2} 是发电机转速传感器故障信号, $\omega_{r,m}$ 是风轮转子转速传感器测量值, ω_r 是风轮转子转速, $\omega_{g,m}$ 是发电机转速传感器测量值, ω_g 是发电机转速.

表 3 风力机传动机构传感器故障

Table 3 Fault of drive system sensor of wind turbine

故障	表现形式	故障描述	故障模型
f_{s1}	加性故障	偏差失效	$\omega_{r,m} = \omega_r + 0.5$
f_{s2}	乘性故障	增益变化	$\omega_{g,m} = 0.8\omega_g$

根据 H_{∞}/H_{∞} 未知输入观测器的设计步骤, 选取 $\alpha = 0.60$, $\beta = 0.49$, $\gamma = 0.08$, 求得矩阵 P, Q, G, Z 的值分别为

$$P = \begin{bmatrix} 3.5733 & 0 & 0.0041 \\ 0 & 3.5732 & 0.0000 \\ 0.0041 & 0.0000 & 0.7021 \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0.7284 & 0 & 0.0045 \\ 0 & 0.7283 & 0 \\ 0.0045 & 0 & 0.7142 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} 1.5143 & 0 & 0.0054 \\ 0 & 1.7142 & 0.0001 \\ 0.0054 & 0.0001 & 0.6943 \end{bmatrix},$$

$$Z = \begin{bmatrix} 0.0194 & 0.0194 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0194 & 0.0194 \\ 0.0029 & 0.0029 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

当风轮转子转速传感器发生故障 f_{s1} , 在检验残差服从高斯分布的基础上, 取置信度 $(1 - \alpha) = 0.95$, 故障检测阈值 $J_{th} = 0.021$, 仿真结果如图 2 所示.

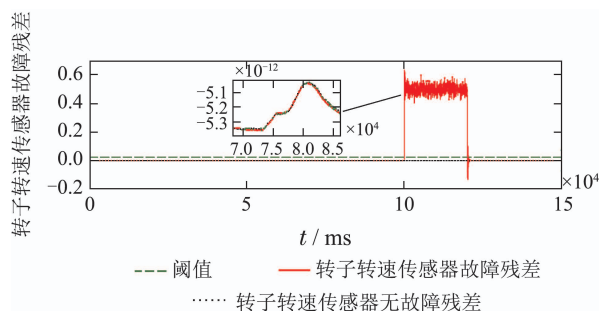


图 2 转子转速传感器故障残差图

Fig. 2 Fault residual diagram of rotor speed sensor

当发电机转速传感器发生故障 f_{s2} , 在检验残差服从高斯分布的基础上, 取置信度 $(1 - \alpha) = 0.95$, 故障检测阈值 $J_{th} = 0.021$, 仿真结果如图 3 所示.

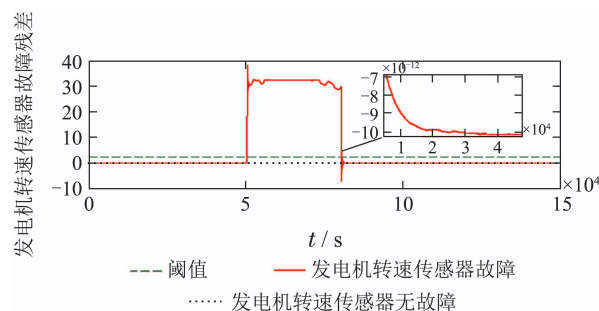


图 3 发电机转速传感器故障残差图

Fig. 3 Fault residual diagram of generator speed sensor

图2所示是风力机风轮转子转速传感器在 $t = 1000 \sim 1200$ s时, 发生加性故障 f_{s1} 时的仿真图. 由仿真图可得, 当系统无故障时, 残差值为 10^{-12} 级, 远小于故障检测阈值; 在 $t = 1000 \sim 1200$ s时残差值大于设定阈值, 系统产生故障信号, 则说明系统可准确诊断加性故障.

图3所示是风力机发电机转速传感器在 $t = 500 \sim 800$ s时, 发生乘性故障 f_{s2} 时的仿真图. 当系统发生乘性故障时, 残差信号的变化较大. 由仿真图可得, 当系统无故障时, 残差值为 10^{-12} 级, 接近于零; 在 $t = 500 \sim 800$ s时残差值明显大于设定阈值, 则说明系统可以准确诊断出乘性故障. 因此, 采用这种基于 H_-/H_∞ 未知输入观测器的故障诊断方法能可靠诊断出风力机传动系统传感器故障.

5 结论

本文针对实际工程中风力机存在未知输入无法完全解耦的问题, 以风力机传动系统为研究对象, 提出了一种基于 H_-/H_∞ 未知输入观测器. 对于未知输入中可直接解耦部分, 采用未知输入观测器的等式条件将其从估计误差中消除. 对于不可解耦部分, 采用 H_- 性能指标和 H_∞ 性能指标使残差对未知输入中不可解耦部分具有鲁棒性并对故障信号具有敏感性, 完成风力机传动系统传感器的加性故障和乘性故障的诊断. 未来可以在对执行器故障的故障诊断等问题上做进一步研究.

参考文献:

- [1] YANG Xiongfe, SHEN Yanxia. Research of actuator fault detection for wind energy conversion system. *Control Engineering*, 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.)
- [2] SATADRU D, PIERLUIGI P, BESHAA A. A comparative study of three fault diagnosis schemes for wind turbines. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(5): 1853 – 1868.
- [3] SHEN Yanxia, LI Fan. A survey of diagnosis methods for wind power system. *Control Engineering*, 2013, 20(5): 789 – 795.
(沈艳霞, 李帆. 风力发电系统故障诊断方法综述. 控制工程, 2013, 20(5): 789 – 795.)
- [4] DAVID G D, RACHID O, MUSTAPHA O. A comparative study of unknown-input observers for prognosis applied to an electromechanical system. *IEEE Transactions on Reliability*, 2016, 65(2): 704 – 717.
- [5] HU Zhikun, SUN Yan, JIANG Bin, et al. An optimal unknown input observer based fault diagnosis method. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(8): 1225 – 1230.
(胡志坤, 孙岩, 姜斌, 等. 一种基于最优未知输入观测器的故障诊断方法. 自动化学报, 2013, 39(8): 1225 – 1230.)
- [6] BESSA I V D, PALHARES R M, FILHO J E C. Data-driven fault detection and isolation scheme for a wind turbine benchmark. *Renewable Energy*, 2016, 87(10): 634 – 645.
- [7] YIN Tianjiao, SHEN Yanxia. Fault estimate of wind turbine sensor fault using unknown input observer. *Information and Control*, 2017, 46(6): 706 – 711, 719.
(尹天骄, 沈艳霞. 基于未知输入观测器的风力机传动机构传感器故障重构方法. 信息与控制, 2017, 46(6): 706 – 711, 719.)
- [8] GAO Z W, LIU X X, CHEN M Z Q. Unknown input observer-based robust fault estimation for systems corrupted by partially decoupled disturbances. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4): 2537 – 2547.
- [9] TAN D L, PATTON R J, WANG X. A relaxed solution to unknown input observers for state and fault estimation. *The 9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SafeProcess 2015*. Paris: Elsevier, 2015, 48(21): 1048 – 1053.
- [10] LIU X H, GAO X W, HAN J. Robust unknown input observer based on fault detection for high-order multi-agent systems with disturbances. *ISA Transactions*, 2016, 61(10): 15 – 28.
- [11] WANG Jiawei, SHEN Yi, WANG Zhenhua. Fault detection for linear switched systems based on H_-/H_∞ unknown input observer. *Control and Decision*, 2017, 32(11): 1973 – 1979.
(王佳伟, 沈毅, 王振华. 基于 H_-/H_∞ 未知输入观测器的线性切换系统故障检测. 控制与决策, 2017, 32(11): 1973 – 1979.)
- [12] ZHOU Meng, WANG Zhenhua, WANG Chang, et al. Fault detection for lipschitz nonlinear systems based on H_-/L_∞ observer. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(6): 778 – 785.
(周萌, 王振华, 王昶, 等. Lipschitz非线性系统的 H_-/L_∞ 故障检测观测器设计. 控制理论与应用, 2018, 35(6): 778 – 785.)
- [13] WANG Jiawei, CUI Yiming, WANG Zhenhua, et al. Asynchronous switching fault detection for linear switched systems based on H_-/H_∞ filter. *Control and Decision*, 2017, 32(2): 223 – 231.
(王佳伟, 崔一鸣, 王振华, 等. 切换系统 H_-/H_∞ 异步切换故障检测滤波器设计. 控制与决策, 2017, 32(2): 223 – 231.)
- [14] 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(12): 1698 – 1704.
(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(12): 1698 – 1704.)
- [15] ODGAARD P F, STOUSTRUP J. Unknown input observer based detection of sensor faults in a wind turbine. *2010 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*. Japan: Yokohama, 2010: 310 – 315.
- [16] ZHU Fanglai, CEN Feng, DONG Xueping. A fault detection and reconstruction method based on full-dimensional and reduced-order observers. *Control and Decision*, 2011, 26(2): 258 – 262, 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. 控制与决策, 2011, 26(2): 258 – 262, 270.)
- [17] GAO Z W. Fault estimation and fault-tolerant control for discrete-time dynamic systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(6): 3874 – 3884.
- [18] ZHOU M, WANG Z H, SHEN Y, et al. H_-/H_∞ fault detection observer design in finite-frequency domain for lipschitz non-linear systems. *IET Control Theory and Applications*, 2017, 11(14): 2361 – 2369.
- [19] SHEN Yi, WANG Jiawei, WANG Zhenhua. Fault detection for discrete switching systems based on H_-/H_∞ filter. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(10): 39 – 43.
(沈毅, 王佳伟, 王振华. 离散切换系统的 H_-/H_∞ 故障检测滤波器设计. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(10): 39 – 43.)

- [20] ZHU Xihua, LI Yinghui, LI Ning, et al. A new observer based on robust fault detection method for nonlinear uncertain systems based on observer. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(5): 644 – 648.
(朱喜华, 李颖晖, 李宁, 等. 基于观测器的非线性不确定系统鲁棒故障检测新方法. 控制理论与应用, 2013, 30(5): 644 – 648.)
- [21] ABDO A, DING S X, DAMLAKHI W, et al. Robust fault detection filter design for uncertain switched systems with adaptive threshold setting. *2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. Orlando, FL, USA: IEEE, 2011: 5467 – 5472.
- [22] SHEN Zhe, XING Junlei, YANG Guanghong, et al. Fault detection for linear systems with time delay dependent on H_-/H_∞ observers. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(5): 592 – 596.
(沈喆, 邢俊雷, 杨光红, 等. 时滞依赖 H_-/H_∞ 观测器的线性系统故障检测. 控制理论与应用, 2013, 30(5): 592 – 596.)
- [23] JIANG Dongnian, LI Wei. Fault detection method based on data-driven residual evaluation strategy. *Control and Decision*, 2017, 32(7): 1181 – 1188.
(蒋栋年, 李炜. 基于数据驱动残差评价策略的故障检测方法. 控制与决策, 2017, 32(7): 1181 – 1188.)

作者简介:

陈宣含 硕士研究生, 研究领域为故障诊断与容错控制, E-mail: jessicacxh@126.com;

沈艳霞 博士, 教授, 研究领域为电机非线性控制、风力发电系统故障诊断与容错控制, E-mail: shenyx@jiangnan.edu.cn;

吴定会 博士, 副教授, 研究领域为风力发电控制技术, E-mail: wdh123@jiangnan.edu.cn.