

基于广义未知输入观测器的鲁棒故障估计方法^{*}

邓露¹, 文传博¹, 张素君²

(1. 上海电机学院 电气学院, 上海 201306; 2. 河南科技学院 机电工程学院, 河南 新乡 453003)

摘要: 当干扰存在时, 有效地估计故障且放松故障的限制条件需要进一步研究, 为此针对含未知干扰的非线性连续系统的鲁棒故障估计问题, 提出一种广义未知输入观测器方法。将执行器故障向量和传感器故障向量与原系统状态向量组成广义系统, 放松对故障类型的限制, 对此广义系统设计未知输入观测器解耦干扰, 保证鲁棒性的同时估计出状态变量、执行器故障及其一阶微分和传感器故障; 然后通过解线性矩阵不等式 (LMI) 给出估计误差渐近收敛的条件。在 MATLAB 的 Simulink 平台上用三叶片水平轴风力模型仿真验证观测器的故障估计的有效性和鲁棒性。

关键词: 未知输入观测器; 广义观测器; 鲁棒故障估计

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2018)05-1441-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.035

Robust fault estimation approach based on generalized unknown input observer

Deng Lu¹, Wen Chuanbo¹, Zhang Sujun²

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China; 2. College of Mechanical & Electrical Engineering, Henan Institute of Science & Technology, Xinxing Henan 453003, China)

Abstract: Estimating faults effectively and relaxing the constraints of faults when disturbance exists need further study, this paper proposed a generalized unknown input observer method aiming at nonlinear systems with unknown disturbance. First, actuator fault vector and sensor fault vector together with states of original system formed a new generalized system, relaxing the constraints of faults. Designing unknown input observer to decoupling disturbance, the observer could estimate states and actuator fault and its first order differential vector and sensor fault. Second, it gave the conditions of asymmetric convergence of the estimation error by solving the linear matrix inequality (LMI). Finally, a three-blade horizontal-axis turbine model demonstrates the effectiveness and robustness of proposed approach by MATLAB simulations.

Key words: unknown input observer; generalized observer; robust fault estimation

0 引言

随着工业系统复杂程度的提高, 对其可靠性要求也日益提高, 由故障导致的系统性能的偏差会造成严重的后果, 故障诊断显得尤为重要, 许多基于观测器的故障检测方法已经被提出^[1-17]。由于建模过程和外界不可避免地存在不确定性和扰动, 严重影响了检测结果, 所以对未知干扰的鲁棒性一直是故障检测方法设计面临的挑战。目前已形成多种鲁棒故障检测方法: 滑模观测器方法^[1,2]、 H_∞ 最优化方法^[3]、自适应观测器方法^[4]、未知输入观测器 (UIO) 方法^[5-10]等。其中滑模观测器方法用滑模块抵消干扰的影响, 但要求干扰本身有上界且上界已知。自适应观测器方法通过设计含对估计误差的比例积分估计算法估计出干扰, 在观测器中引入干扰补偿抵消干扰的影响, 对干扰没有有界的要求, 但这两种方法均不适用于故障同时存在的情况。在不考虑干扰估计的情况下, H_∞ 最优化方法和 UIO 方法可用于同时有故障存在的系统, 且对干扰本身有较宽松的条件。 H_∞ 最优化方法最小化干扰到估计误差的 L_2 增益, 通过解矩阵不等式得出最优参数, 但受原系统参数影响

较大, 不能完全抵消干扰的影响, 而 UIO 方法通过参数设计能直接消除干扰对估计误差的影响, 鲁棒性强, 目前已有较多应用^[7-9]。文献[7,8]对于参数矩阵满足匹配条件的干扰采用未知输入观测器参数设计方法解耦输入干扰, 对于输出噪声采用 H_∞ 方法衰减噪声到估计误差的影响。文献[8]对于不满足匹配条件的输入干扰同时采用 H_∞ 方法减弱其对估计误差的影响。文献[9]将输入与状态变量组成新的状态变量, 形成广义系统, 于是为广义系统的未知输入观测器方法提供了思路。UIO 方法为鲁棒故障估计提供了保证, 文献[10]在文献[9]基础上对广义系统设计未知输入观测器, 在解耦干扰的前提下, 设计多积分和高增益观测器完成对故障的估计。

故障估计方法可以更加直接地反映出故障类型、幅值, 为容错系统提供保障, 因此近年来受到广泛关注^[7-17]。Edwards 等人针对存在有界执行器故障的系统设计了一类滑模观测器, 在用 H_∞ 方法减弱干扰影响的基础上利用等效输出控制原理重构故障^[11,12]。针对无界执行器故障的估计, 文献[13,14]提出了多积分比例观测器方法, 观测器中引入故障各阶微分的估计, 通过含估计误差的比例项估计出故障及其各阶微分, 但干

收稿日期: 2016-12-25; **修回日期:** 2017-02-15 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (61374136, 61473159); 上海市自然科学基金资助项目 (12ZR1411800); 上海市人才发展资金资助项目 (201511)

作者简介: 邓露 (1991-), 女, 江苏高邮人, 硕士研究生, 主要研究方向为基于模型的故障诊断 (757115491@qq.com); 文传博 (1981-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为故障诊断、数据融合; 张素君 (1978-), 女, 讲师, 主要研究方向为电力系统分析、故障诊断。

扰存在时用滑模方法和多积分方法估计故障需考虑鲁棒性,滑模块抵消故障影响还需要故障本身满足有上界且已知的条件。文献[7,8]通过将执行器故障信号及其微分与状态变量组成新系统,对此新系统设计观测器则可以直接估计出故障及其微分,与干扰无关,这种扩维估计方法思路简洁,计算量小,虽然高阶观测器方法也可以估计向量及其微分^[15],但对向量本身及其微分都要求有界,因此扩维方法对无界故障的估计打开了新的思路。对于传感器故障的估计问题,引入含输出的滤波向量将传感器故障转换为伪执行器故障进行估计^[12],但这种方法并不适用于执行器故障和传感器故障同时存在的情况,计算量大。于是将扩维方法应用于传感器故障的估计值得研究^[16,17]。目前,对可以同时鲁棒估计出无界执行器故障和无界传感器故障的观测器方法还有很大的研究空间,滑模重构方法^[12]要求故障有界,文献[8]要求两类故障类型相同,本文用扩维方法估计故障放松了对两类故障的限制,即估计无界执行器故障和任意形式的传感器故障。

本文对于执行器故障和传感器故障同时存在的非线性连续系统进行故障估计,先扩维为广义系统,放松对故障形式的限制,考虑到正常形式的观测器应用更为灵活,对其设计正常形式的广义观测器估计出两类故障,运用未知输入观测器方法解耦干扰,保证状态估计的鲁棒性。用文献[19]中的三叶片水平轴风力机为模型,考虑变桨系统中液压过低的执行器故障和传动系统中的齿轮转速的测量传感器故障,用广义观测器方法估计出两类故障,以确保及时了解故障类型,采取维持风机正常运行的措施。

1 系统描述

考虑如下含未知干扰、执行器故障和传感器故障的非线性连续系统:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{g}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{E}f_a(t) + \mathbf{D}\eta(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{F}f_s(t) \quad (2)$$

其中: $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ 、 $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ 和 $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$ 分别为系统的状态向量、输入向量和可测输出向量; $\mathbf{g}(\mathbf{x}, t)$ 为系统的已知非线性部分, 对于 \mathbf{x} 满足 Lipschitz 条件: $\|\mathbf{g}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}, t)\| \leq \gamma \|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|$, γ 为已知的 Lipschitz 常数; $f_a(t) \in \mathbb{R}^l$, $f_s(t) \in \mathbb{R}^q$ 分别是执行器故障和传感器故障信号; $\eta(t) \in \mathbb{R}^k$ 是未知输入信号, 代表外界干扰和建模不确定性等。矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、 $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 、 $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{p \times n}$ 、 $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{n \times k}$ 、 $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{n \times l}$ 、 $\mathbf{F} \in \mathbb{R}^{p \times q}$ 是具有相应维数的常数矩阵, $n \geq p \geq l + k + q$ 。不失一般性, 假设 $\text{rank}(\mathbf{D}) = k$ 。

假设 1 $\text{rank}[\mathbf{F} \quad \mathbf{C}\mathbf{D}] = q + k$ (3)

假设 2 对于 $\text{Re}(s) \geq 0$, 下面式子成立:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} s\mathbf{I}_n - \mathbf{A} & \mathbf{0} & \mathbf{D} \\ \mathbf{C} & \mathbf{F} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = n + k + q \quad (4)$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{D} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{F} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = n + l + k + q, s \neq 0 \quad (5)$$

假设 3 $f_a(t)$ 的一般形式为 $f_a(t) = A_0 + A_1 t$, 即其二阶微分为零。

注 1: 本文提出的该类观测器所研究的执行器故障的一般形式为

$$f_a(t) = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + \cdots + A_{q-1} t^{q-1} \quad (6)$$

式(6)表示故障的 q 阶微分为零, 即 $f_a^{(q)}(t) = 0$, 符合工业控制系统中的一般故障情况, 本文从工程意义角度取 $q = 2$ 的

情况, 但如有需要, 本文所设计观测器很容易扩展至 $q \geq 3$ 的情况, 估计出故障值。

定义一个新的增广状态向量: $\bar{\mathbf{x}} = [\mathbf{x}^T \quad f_a^T \quad f_s^T \quad \eta^T]^T$, 则系统式(1)(2)写为

$$\mathbf{M} \dot{\bar{\mathbf{x}}} = \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{x}} + \bar{\mathbf{B}}\mathbf{u} + \bar{\mathbf{D}}\eta + \bar{\mathbf{g}}(\bar{\mathbf{x}}, t) \quad (7)$$

$$\mathbf{y} = \bar{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{x}} \quad (8)$$

其中: $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n+2l} & \mathbf{0}_{(n+2l) \times q} \end{bmatrix}$, $\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0}_{(n+2l) \times q} \end{bmatrix}$, $\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} & \mathbf{E} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_l & \mathbf{0} \end{bmatrix}$, $\bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0}_{l \times m} \\ \mathbf{0}_{l \times m} \end{bmatrix}$, $\bar{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{0}_{l \times k} \\ \mathbf{0}_{l \times k} \end{bmatrix}$, $\bar{\mathbf{g}}(\bar{\mathbf{x}}, t) = \begin{bmatrix} \mathbf{g}(\mathbf{x}, t) \\ \mathbf{0}_{l \times 1} \\ \mathbf{0}_{l \times 1} \end{bmatrix}$, $\bar{\mathbf{C}} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{F} \end{bmatrix}$, $\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0}_{p \times l} & \mathbf{0}_{p \times l} \end{bmatrix}$ 。

引理 1 在假设 1 的基础上, 存在 $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{(n+2l+q) \times (n+2l)}$, $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{(n+2l+q) \times p}$ 满足

$$\begin{cases} \mathbf{T}\mathbf{M} + \mathbf{Q}\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{I}_{n+2l+q} \\ \mathbf{T}\bar{\mathbf{D}} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (9)$$

证明 令 $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \bar{\mathbf{D}} \\ \bar{\mathbf{C}} & \mathbf{0}_{p \times k} \end{bmatrix}$, 式(9)写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{Q} \end{bmatrix} \mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n+2l+q} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

当且仅当下式成立时, 式(10)有解^[7]:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{I}_{n+2l+q} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \text{rank}(\mathbf{S}) \quad (11)$$

式(11)左边为

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ \mathbf{I}_{n+2l+q} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \bar{\mathbf{D}} \\ \bar{\mathbf{C}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_{n+2l+q} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = n + 2l + q + \text{rank} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{D}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = n + 2l + q + k \quad (12)$$

式(11)右边为

$$\begin{aligned} \text{rank}(\mathbf{S}) &= \text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \bar{\mathbf{D}} \\ \bar{\mathbf{C}} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n+2l} & \mathbf{0} & \bar{\mathbf{D}} \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{F} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \\ &= \text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_l & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I}_l & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{F} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = 2l + \text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n & \mathbf{0} & \mathbf{D} \\ \mathbf{C} & \mathbf{F} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \\ &= 2l + \text{rank} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{I}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n & \mathbf{0} & \mathbf{D} \\ \mathbf{C} & \mathbf{F} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \right\} = \\ &= 2l + \text{rank} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n & \mathbf{0} & \mathbf{D} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F} & -\mathbf{C}\mathbf{D} \end{bmatrix} = \\ &= n + 2l + \text{rank}[\mathbf{F} \quad -\mathbf{C}\mathbf{D}] = n + 2l + k + q \end{aligned} \quad (13)$$

因此, 假设 1 成立时, 式(11)有解, 其解可以表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T} & \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n+2l+q} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{S}^+ + \mathbf{Z}(\mathbf{I}_{n+2l+p} - \mathbf{S}\mathbf{S}^+) \quad (14)$$

其中: \mathbf{S}^+ 为 \mathbf{S} 的左伪逆矩阵, 即 $\mathbf{S}^+ = (\mathbf{S}^T \mathbf{S})^{-1} \mathbf{S}^T$ 。

令

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n+2l+q} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{S}^+ \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n+2l} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n+2l+q} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{S}^+ \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix} \\ \mathbf{G} &= (\mathbf{I}_{n+2l+p} - \mathbf{S}\mathbf{S}^+) \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{n+2l} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{K} = (\mathbf{I}_{n+2l+p} - \mathbf{S}\mathbf{S}^+) \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

得 \mathbf{T} 、 \mathbf{Q} 的表达式为

$$\mathbf{T} = \mathbf{J} + \mathbf{Z}\mathbf{G} \quad (16)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{V} + \mathbf{Z}\mathbf{K} \quad (17)$$

其中: $Z \in \mathbb{R}^{(n+2l+q) \times (n+2l)}$ 是任意选择的常数矩阵。

引理2 基于假设2,系统 $(T\bar{A}, \bar{C})$ 是可检测的,即满足未知干扰到可测输出的任一不变零点都是稳定的:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - T\bar{A} & T\bar{D} \\ \bar{C} & 0 \end{bmatrix} = \bar{n} + k \quad \text{Re}(s) \geq 0 \quad (18)$$

其中: $\bar{n} = n + 2l + q$ 。

证明 式(18)成立等价于下式成立^[17]:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_{n+2l} - A_1 & 0 & \bar{D} \\ C_1 & F & 0 \end{bmatrix} = n + 2l + q + k \quad \text{Re}(s) \geq 0 \quad (19)$$

对于每个实部为非负的复数 s ,有

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_{n+2l} - A_1 & 0 & \bar{D} \\ C_1 & F & 0 \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & 0 & -E & 0 & D \\ 0 & sI_l & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -I_l & sI_l & 0 & 0 \\ C & 0 & 0 & F & 0 \end{bmatrix} =$$

$$n + 2l + q + k = \begin{cases} \text{rank} \begin{bmatrix} A & E & 0 & D \\ C & 0 & F & 0 \end{bmatrix} + l & s \neq 0 \\ \text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & 0 & D \\ C & F & 0 \end{bmatrix} + 2l & s = 0 \end{cases} \quad (20)$$

即式(20)等价于以下两个条件:

$$\text{rank} \begin{bmatrix} A & E & 0 & D \\ C & 0 & F & 0 \end{bmatrix} = n + l + k + q \quad s = 0 \quad (21)$$

$$\text{rank} \begin{bmatrix} sI_n - A & 0 & D \\ C & F & 0 \end{bmatrix} = n + k + q \quad s \neq 0 \quad (22)$$

其中: $\text{Re}(s) \geq 0$ 。证毕。

引理3^[9] 对于任意正数 ∂ 和正定对称矩阵 P ,下式成立:

$$2x^T P y \leq \frac{1}{\partial} x^T P x + \partial y^T P y \quad x, y \in \mathbb{R}^n$$

2 观测器设计及故障估计

基于将传感器故障作为状态变量后,系统变为广义系统,运用广义系统未知输入观测器思想通过参数设计对于干扰解耦,保证状态估计的鲁棒性,同时直接估计出执行器故障及其微分、传感器故障。对扩维后系统式(7)(8)设计如下观测器:

$$\dot{z}(t) = Nz(t) + Ly(t) + T\bar{g}(M\hat{x}, t) + T\bar{B}u \quad (23)$$

$$\hat{\bar{x}}(t) = z(t) + Qy(t) \quad (24)$$

其中: $\hat{\bar{x}}(t) \in \mathbb{R}^{n+2l+q}$ 是 $\bar{x}(t)$ 的估计向量; $N \in \mathbb{R}^{(n+2l+q) \times (n+2l+q)}$; $L \in \mathbb{R}^{(n+2l+q) \times p}$ 是待设计矩阵。

定理1 对于满足假设1的系统设计广义未知输入观测器式(23)(24),当存在正定对称矩阵 $P \in \mathbb{R}^{(n+2l+q) \times (n+2l+q)}$,正标量 ∂ 使下式有可行解时,则未知输入观测器式(23)(24)在解耦未知干扰 η 的同时,可以渐进估计状态变量 $x(t)$ 、执行器故障 $f_a(t)$ 及其一阶微分 $\dot{f}_a(t)$ 和传感器故障 $f_s(t)$ 。

$$\begin{bmatrix} N^T P + PN & PT & I \\ (PT)^T & -\partial I & 0 \\ I & 0 & -\frac{1}{\partial \gamma^2} I \end{bmatrix} < 0 \quad (25)$$

证明 定义状态估计误差为 $\bar{e}(t) = \hat{\bar{x}}(t) - \bar{x}(t)$,由式(7)(23)结合式(9)得

$$\begin{aligned} \dot{\bar{e}}(t) &= \dot{\hat{\bar{x}}}(t) - \dot{\bar{x}}(t) = \dot{z}(t) - TM\dot{\bar{x}}(t) = \\ & Nz + Ly + T(\bar{g}(M\hat{\bar{x}}, t) - \bar{g}(M\bar{x}, t)) - T\bar{A}\bar{x} = \\ & N(\bar{e} + TM\bar{x}) + Ly + T(\bar{g}(M\hat{\bar{x}}, t) - \bar{g}(M\bar{x}, t)) - T\bar{A}\bar{x} = \\ & N\bar{e} + (NTM + L\bar{C} - T\bar{A})\bar{x} + T(\bar{g}(M\hat{\bar{x}}, t) - \bar{g}(M\bar{x}, t)) \end{aligned} \quad (26)$$

令 $NTM + L\bar{C} - T\bar{A} = 0$,由 $TM + Q\bar{C} = I_{n+2l+q}$ 得

$$N(I - Q\bar{C}) + L\bar{C} - T\bar{A} = N + (L - NQ)\bar{C} - T\bar{A} = 0 \quad (27)$$

令 $L_1 = L - NQ$,则

$$N = T\bar{A} - L_1\bar{C} \quad (28)$$

由引理2可知假设2保证 $(T\bar{A}, \bar{C})$ 可检测,则可配置极点使 N 为稳定矩阵。

选取李雅普诺夫函数为 $V = \bar{e}^T P \bar{e}$,沿着对式(26)求导得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \bar{e}^T (N^T P + PN) \bar{e} + \bar{e}^T PT(\bar{g}(M\hat{\bar{x}}, t) - \bar{g}(M\bar{x}, t)) + \\ & (\bar{g}(M\hat{\bar{x}}, t) - \bar{g}(M\bar{x}, t))^T T^T P \bar{e} \end{aligned} \quad (29)$$

令 $\bar{g} = \bar{g}(M\hat{\bar{x}}, t) - \bar{g}(M\bar{x}, t)$,由引理3得

$$\begin{aligned} \bar{e}^T PT\bar{g} + \bar{g}^T T^T P \bar{e} &\leq \partial \bar{g}^T \bar{g} + \frac{1}{\partial} \bar{e}^T PT(T^T P \bar{e}) \leq \\ & \partial \gamma^2 \bar{e}^2 + \frac{1}{\partial} \bar{e}^T PT(T^T P \bar{e}) \end{aligned} \quad (30)$$

将式(30)代入式(29)得

$$\dot{V} \leq \bar{e}^T (\partial \gamma^2 I + \frac{1}{\partial} PTT^T P + N^T P + PN) \bar{e} \quad (31)$$

令 $R = (\partial \gamma^2 I + \frac{1}{\partial} PTT^T P + N^T P + PN)$ 。则当 $R < 0$ 时, $\dot{V} < 0$, $e(t)$ 收敛,观测器式(23)(24)可以渐进估计状态变量 $x(t)$ 、执行器故障 $f_a(t)$ 及其一阶微分 $\dot{f}_a(t)$ 和传感器故障 $f_s(t)$ 。

为了利用线性矩阵不等式(LMI)解黎卡提不等式 $R < 0$,利用 Schur 补引理^[18] 转换其为式(25)。证毕。

注2 干扰的处理对故障估计的性能有直接的影响, H_∞ 方法^[3] 能最优化干扰对估计的影响,不能完全消除,且受参数影响较大。本文采用鲁棒性较强的 UIO 方法结合扩维方法运用广义 UIO,保证强鲁棒性的同时对故障的形式放松要求,在实际情况中有更强的适用性。

基于定理1成立,基于广义未知输入观测器式(23)(24)得到扩维后广义系统式(7)(8)的状态估计: $\hat{\bar{x}} = [\hat{x}^T \quad \hat{f}_a^T \quad \hat{f}_a^T \quad \hat{f}_s^T]^T$,即得到状态变量 $x(t)$ 、执行器故障 $f_a(t)$ 及其一阶微分 $\dot{f}_a(t)$ 和传感器故障 $f_s(t)$ 的估计:

$$\hat{x} = [I_n \quad 0_{2l+q}] \hat{\bar{x}}; \quad \hat{f}_a = [0_n \quad I_l \quad 0_{l+q}] \hat{\bar{x}};$$

$$\hat{f}_a = [0_{n+l} \quad I_l \quad 0_q] \hat{\bar{x}}; \quad \hat{f}_s = [0_{n+2l} \quad I_q] \hat{\bar{x}}$$

观测器参数设计算法流程如下:

- 验证系统是否满足假设1~3,若满足,则进行下一步。
- 根据引理1,求得 T, Q 。
- 根据引理2,配置 $N = T\bar{A} - L_1\bar{C}$ 的极点,求得 L_1 。
- 利用 MATLAB 的 LMI 工具箱求得式(25)的解,若能得到满足条件的 P, ∂ ,则进行下一步。
- 根据式(28)有 $N = T\bar{A} - L_1\bar{C}$, $L_1 = L - NQ$,求得 L, N ,观测器设计完成。

3 仿真实验

三叶片水平轴风机模型是由叶片/变桨系统、传动系统、发电机及变压系统和控制器等模块组成。图1^[20]是这几个模块之间的关联,风机的液压变桨系统利用液压缸伺服系统控制叶片位置,根据风速实时改变叶片的桨距角,调整旋转速度。传

利用 MATLAB 配置 $N = \bar{T}\bar{A} - L_1\bar{C}$ 极点为 $[-2 \ -3 \ -4 \ -5+i \ -5-i \ -7 \ -8+i \ -8-i \ -9]$ 得

$$L_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & -2.818 & -1 & 2 & -3 \\ -14 & 0 & -47 & 7 & -3 & 5.3197 & 12 & -39 & 61 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2.817 & -1 & 2 & -3 \end{bmatrix}^T$$

由式(26)得

$$N = \begin{bmatrix} 1 & -14 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & -47 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 7 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6.45 & 0 & 0 \\ -2.818 & 5.3197 & -2.817 & 0 & 3.42 & 0 & 0 & 0 & -2.817 \\ -1 & 12 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 2 & -3.9 & 2 & 0 & -7 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ -3 & 6.1 & -3 & 0 & 0 & -2 & 1 & 0 & -3 \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & -3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -9 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 5.63 & 1.0639 & -5.63 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & -8 & 0 \\ 1 & 12 & -1 \end{bmatrix}$$

由定理 1 可知,观测器式(23)(24)可估计出状态变量及故障向量。图 2~5 为状态变量估计图,由图可知该观测器可以很好地估计状态变量、执行器故障及其微分和传感器故障向量都是以状态向量的形式被估计出,将乘性执行器故障转换为加性故障,转换后的加性故障是状态变量 x_5 的函数, $q=2$ 。图 6 为执行器故障的实际曲线与估计曲线,为了显示本文用未知输入观测器方法能够很好地解耦风干扰的影响,与干扰处理方法 H_∞ 方法比较,用 H_∞ 方法利用矩阵不等式最小化干扰到估计误差的增益,可看出 H_∞ 方法只能最大化地减弱干扰对估计的影响,并不能完全消除干扰,估计效果并不理想。而本文的 UIO 方法可以完全消除干扰的影响,鲁棒性较强,很好地估计出了状态和故障。图 7 为执行器故障一阶微分估计曲线,同样也为传感器故障估计。图 8 为传感器故障估计曲线,可看出该类观测器能够很好地以状态变量形式估计出故障向量。

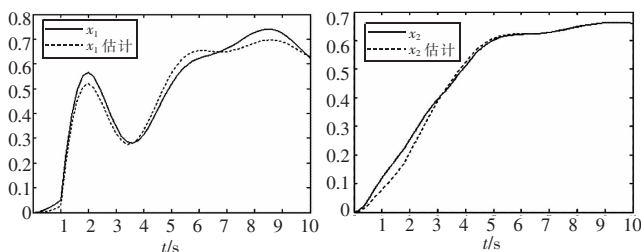


图 2 状态 x_1 的实际与估计曲线

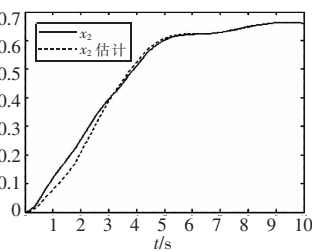


图 3 状态 x_2 的实际与估计曲线

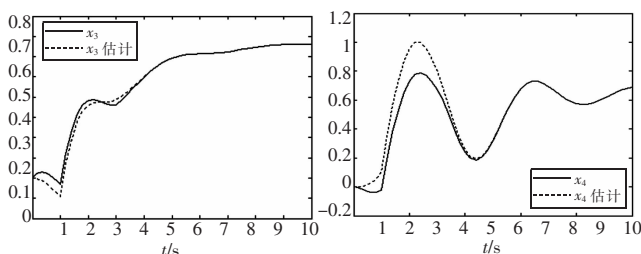


图 4 状态 x_3 的实际与估计曲线

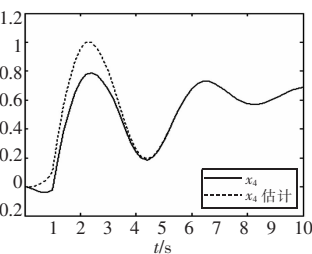


图 5 状态 x_4 的实际与估计曲线

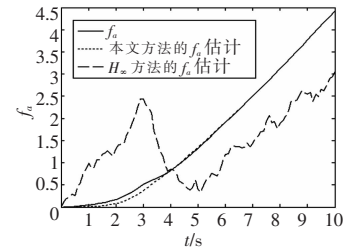


图 6 f_a 的实际与估计曲线

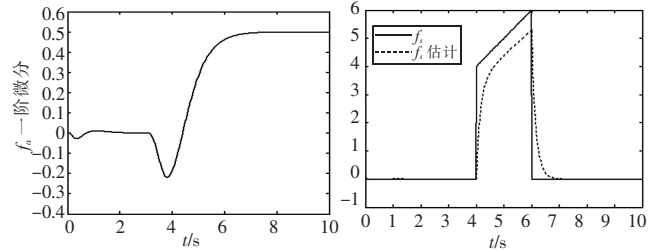


图 7 f_a 的一阶微分曲线估计

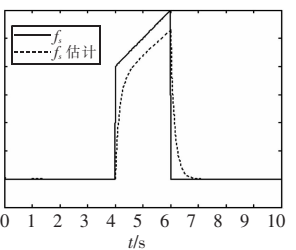


图 8 f_s 的实际与估计曲线

4 结束语

对于未知干扰、执行器和传感器故障同时存在的非线性连续系统,本文设计广义未知输入观测器,鲁棒估计状态变量、同时估计出执行器故障及其各阶微分和传感器故障。将执行器故障和传感器故障与原状态变量组成新的广义系统后,对其设计未知输入观测器,解耦干扰保证状态变量估计的鲁棒性。通过液压过低时的变桨系统执行器故障和传动系统中齿轮转速测量故障的三叶片水平轴风力机模型仿真,验证了本文的观测器可以有效地估计出故障、鲁棒估计出系统状态。

参考文献:

- [1] Chee P T, Edwards C. Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor faults[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2003, 13(5): 443-463.
- [2] 于金泳,刘志远. 基于滑模观测器的广义非线性系统故障重构[C]//第 29 届中国控制会议. 北京:中国自动化学会控制理论专业委员会, 2010:4028-4032.
- [3] Raoufi R, Marquez H J, Zinobier A S. H_∞ sliding mode observers for uncertain nonlinear Lipschitz systems with fault estimation synthesis[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2010, 20(16): 1785-1801.
- [4] 张珂,姜斌,刘津京. 基于自适应观测器控制系统的快速故障调节[J]. *控制与决策*, 2008, 23(7): 771-775.
- [5] Chen Jie, Patton R J, Zhang Hongyue. Design of unknown input observers and robust fault detection filters[J]. *International Journal of Control*, 1996, 63(1): 85-105.
- [6] 杨俊起,朱芳来. 未知输入和可测噪声重构之线性矩阵不等式非线性系统观测器设计[J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(4): 540-544.
- [7] Sun Xiaoyu, Patton R J. Robust actuator multiplicative fault estimation with unknown input decoupling for a wind turbine system[C]//Proc of Control & Fault-Tolerant Systems. Nice, France: IEEE Press, 2013: 263-268.
- [8] Gao Zhiwei, Liu Xiaoxu, Chen Z Q M. Unknown input observer based robust fault estimation for systems corrupted by partially decoupled disturbances[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2016, 63(4): 2537-2547.
- [9] Ha Q P, Trinh H. State and input simultaneous estimation for a class of nonlinear systems[J]. *Automatica*, 2004, 40(10): 1779-1785.

人像产品相似度评价方法。该方法主要包括以下几个方面:

a)提出了基于相似三角形原理的个性化人像产品相似度定义。根据相似三角形原理定量描述了人像产品相似度定义,将相似这一抽象概念量化表达,为相似度评价提供了基础。

b)建立了基于相似度定义的相似度模型。面向人像特征选取基础三角形,并对每个特征赋予相应的权重,实现个性化人像产品相似度的量化计算。

c)提出了基于相似度模型的个性化人像产品相似度的评价方法。从实际应用的角度出发,提出了基于 FDP 特征点的基础三角形确定方案,然后根据 FDP 特征点将个性化人像产品分为不同的分区,分别获取每个分区的相似度;并基于人眼视觉特性,对每个分区赋予不同的权重,最后通过各个分区的加权和,获取个性化人像产品的相似度。另外,为了保证特征点采集效率和评价结果的准确性,提出了基于像素点和点云的数据采集方法。

d)个性化人像浮雕吊坠产品和三维扫描真人人像产品的验证实验表明,上述方法能够准确地量化评价产品的相似度,对于人像产业发展中控制个性化人像产品的质量以及解决制造商与客户的争议问题均具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] Cai Wei, Liu Fei, Zhou Xiaona, *et al.* Fine energy consumption allowance of workpieces in the mechanical manufacturing industry[J]. *Energy*, 2016, 114: 623-633.
- [2] Cao Chong, Ai Haizhou. Facial similarity learning with humans in the loop[J]. *Journal of Computer Science & Technology*, 2015, 30(3): 499-510.
- [3] Stephan C N, Arthur R S. Assessing facial approximation accuracy: how do resemblance ratings of disparate faces compare to recognition tests? [J]. *Forensic Science International*, 2006, 159(1): 159-163.
- [4] Quatrehomme G, Balaguer T, Staccini P, *et al.* Assessment of the accuracy of three-dimensional manual craniofacial reconstruction: a series of 25 controlled cases[J]. *Deutsche Zeitschrift Für Die Gesamte Gerichtliche Medizin*, 2007, 121(6): 469-475.
- [5] 陈涛, 张红民, 刘军发. 异构人脸在流形空间中的相似模型研究[J]. *计算机科学与探索*, 2013, 7(2): 152-159.
- [6] Moorthy A K, Mittal A, Jahanbin S, *et al.* 3D Facial similarity: automatic assessment versus perceptual judgments[C]//Proc of the 4th IEEE International Conference on Biometrics: Theory Applications and Systems. Washington DC: IEEE Computer Society, 2010: 1-7.
- [7] 顾晓东, 杨诚. 新的颜色相似度衡量方法在图像检索中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(10): 2286-2292.
- [8] 马媛媛. 可变光照下的人脸识别算法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [9] Drira H, Ben A B, Srivastava A, *et al.* 3D face recognition under expressions, occlusions, and pose variations[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2013, 35(9): 2270-2283.
- [10] 李红艳, 武仲科, 周明全. 基于几何特征的三维面貌相似度评价[C]//第六届图像图形技术与应用学术会议. 2011: 105-111.
- [11] Jain A K, Murty M N, Flynn P J. Data clustering: a review[J]. *ACM Computing Surveys*, 1999, 31(3): 264-323.
- [12] 魏衍君, 杨明莉. 基于聚类建模的三维人脸识别技术研究[J]. *陕西科技大学学报: 自然科学版*, 2012, 30(2): 77-81.
- [13] Chen H F, Belhumeur P N, Jacobs D W. In search of illumination invariants[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York: IEEE Computer Society, 2000: 254-261.
- [14] 庄小芳. 基于混合图结构的图像相似度的研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2013.
- [15] 张秀琴, 陈立潮, 潘理虎. 基于 DCT 和分块 2D2PCA 的人脸识别[J]. *太原科技大学学报*, 2014, 35(5): 333-338.
- [16] ISO/IEC 14496-1: 1999, Coding of audio-visual objects: systems, amendment 1 [S]. 1999.
- [17] ISO/IEC 14496-2: 1999, Coding of audio-visual objects: visual, amendment 1 [S]. 1999.
- [18] Takahasi K, Ueda H, Miyahara T, *et al.* A study on face similarity using knowledge processing methods[C]//Proc of Tencon IEEE Region. Melbourne, Qld., Australia: IEEE Press, 2005: 1-6.
- [19] 刘飞, 徐韶华, 王舟洲, 等. 一种雕刻有个性化人像浮雕的吊坠体的制造方法: 中国, ZL 201510579764.5 [P]. 2016-01-06.
- [10] Koenig D. Unknown input proportional multiple integral observer design for linear descriptor systems: appalachian to state and fault estimation[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2005, 50(2): 212-217.
- [11] Chee P T, Edwards C. Sliding mode observers for detection and reconstruction of sensor faults [J]. *Automatica*, 2002, 38(10): 1815-1821.
- [12] Chee P T, Edwards C. Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor faults[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2003, 13(5): 443-463.
- [13] Gao Zhiwei, Ding X C. Actuator fault robust estimation and fault-tolerant control for a class of nonlinear descriptor systems[J]. *Automatica*, 2007, 43(5): 912-920.
- [14] Gao Zhiwei, Daniel W C. Proportional multiple-integral observer design for descriptor systems with measurement output disturbances[J]. *Control Theory Application*, 2004, 151(3): 279-288.
- [15] Yang Junqi, Zhu Fanglai, Sun Xiaojie. State estimation and simultaneous unknown input and measurement noise reconstruction based on associated observers[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2013, 27(10): 846-858.
- [16] Gao Zhiwei, Wang Hong. Descriptor observer approaches for multivariable systems with measurement noise and application in fault detection and diagnosis [J]. *Systems and Control Letters*, 2006, 55(4): 304-313.
- [17] Yang Junqi, Zhu Fanglai, Wang Xin. Robust sliding-mode observer-based sensor fault estimation, actuator fault detection and isolation for uncertain nonlinear systems [J]. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2015, 13(5): 1037-1046.
- [18] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 35-78.
- [19] Christoffer S, Thomas E, Jakob S. Robust and fault tolerant linear parameter varying control of wind turbines[J]. *Mechatronics*, 2011, 21(4): 645-659.
- [20] Odgaard P F, Stoustrup J, Kinnaert M. Fault tolerant control of wind turbines: a benchmark model[C]//Proc of the 7th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety of Technical Processes. 2009: 155-160.

(上接第 1445 页)