

控制与决策

Control and Decision

基于有限时间未知输入观测器的一类受扰非线性系统故障检测与估计

刘仁和, 刘乐, 方一鸣, 王馨

引用本文:

刘仁和, 刘乐, 方一鸣, 王馨. 基于有限时间未知输入观测器的一类受扰非线性系统故障检测与估计[J]. 控制与决策, 2022, 37(11): 2941–2948.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0538>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[输出受限的不确定非线性系统的自适应固定时间控制](#)

Adaptive fixed-time control for uncertain nonlinear systems with output constraints
控制与决策. 2022, 37(9): 2265–2273 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0310>

[基于向量集逆区间滤波的故障观测器设计](#)

Vector set inversion interval filtering based fault observer design
控制与决策. 2021, 36(12): 2973–2981 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0212>

[基于动态观测器零极点优化的网络控制系统故障检测](#)

Pole-zero optimization design of dynamic observer for fault detection of networked control systems
控制与决策. 2021, 36(6): 1351–1360 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1107>

[基于变速趋近律的Buck型变换器抗扰动控制](#)

Disturbance rejection control of Buck converters based on variable rate reaching law
控制与决策. 2021, 36(4): 893–900 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1073>

[输入饱和的充液航天器抗干扰有限时间滑模控制](#)

Anti-disturbance finite-time sliding mode control for liquid-filled spacecraft with input saturation
控制与决策. 2021, 36(5): 1078–1086 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0820>

基于有限时间未知输入观测器的一类受扰非线性系统 故障检测与估计

刘仁和, 刘乐, 方一鸣[†], 王馨

(1. 燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;
2. 燕山大学 智能控制系统与智能装备教育部工程研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对一类非线性系统同时存在执行器故障、传感器故障和扰动的问题, 提出一种基于有限时间未知输入观测器的故障检测与估计方法. 首先, 通过线性非奇异变换将原系统解耦为两个降阶的子系统, 其中一个子系统只包含扰动, 另一个子系统同时包含扰动和故障; 然后, 通过一阶低通滤波器获得新的状态并与子系统构成增广系统, 实现将原系统的传感器故障转化为增广系统的执行器故障; 接着, 设计未知输入观测器对增广系统故障进行检测, 实现在有限时间内估计出系统的扰动和故障, 并通过理论分析验证所设计观测器的有限时间收敛性; 最后, 基于永磁同步电机(PMSM)转速系统进行仿真研究, 仿真结果验证了所提出方法的有效性.

关键词: 故障检测; 故障估计; 有限时间; 未知输入观测器; 永磁同步电机

中图分类号: TP277 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0538

引用格式: 刘仁和, 刘乐, 方一鸣, 等. 基于有限时间未知输入观测器的一类受扰非线性系统故障检测与估计[J]. 控制与决策, 2022, 37(11): 2941-2948.

Fault detection and estimation for a class of disturbed nonlinear systems based on finite-time unknown input observers

LIU Ren-he, LIU Le, FANG Yi-ming[†], WANG Xin

(1. Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Engineering Research Center of Intelligent Control System and Intelligent Equipment of Ministry of Education, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: For a class of nonlinear systems where actuator faults, sensor faults and disturbances exist simultaneously, a fault detection and estimation method is proposed based on finite-time unknown input observers in this paper. Firstly, the original system is decoupled into two reduced-order subsystems by linear nonsingular transformation, and one subsystem contains only disturbances, and the other subsystem contains both disturbances and faults. Then, new states are obtained by the first-order low-pass filters and the augmented system is formed with the subsystem, which can transform the sensor faults of the original system into the actuator faults of the augmented system. The unknown input observers are designed to detect the faults of the augmented system, and the disturbances and faults of the system can be estimated in finite time. The finite time convergences of the designed unknown input observers are proved by theoretical analysis. Finally, the simulation study is conducted on the permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed system, and the simulation results verify the effectiveness of the proposed control method.

Keywords: fault detection; fault estimation; finite time; unknown input observer; PMSM

0 引言

许多现代工业设备随着自动化水平的提高变得越来越复杂, 对安全性和稳定性的要求也越来越高. 实际工作环境通常复杂恶劣, 长时间的工作负荷易造成执行器或传感器发生故障. 为了提高系统运

行的安全性和可靠性, 及时有效地进行故障诊断是十分必要的^[1-2]. 然而实际中的系统大多具备多变量、非线性、强耦合等特征, 易受参数摄动、负载扰动等不确定因素的影响, 给系统故障诊断带来了一定的挑战.

为了及时准确地发现系统中潜在或现有故障, 使

收稿日期: 2021-04-01; 录用日期: 2021-08-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61803327, 61873226); 河北省自然科学基金项目(F2020203018, F2019203090).

[†]通讯作者. E-mail: fyiming@ysu.edu.cn.

得系统能够安全可靠稳定运行,国内外许多专家学者对此进行了广泛而深入的研究.对于受扰系统同时存在执行器和传感器故障的问题,文献[3]将传感器故障转化为执行器故障后再进行故障检测,这样将系统的两种故障转化为一种故障,处理相对便捷;文献[4]介绍了一种基于区间观测器的故障检测与隔离方法.然而,文献[3-4]只是完成了系统故障的检测与隔离,没有进行故障估计,相较于故障检测与隔离,故障估计能够重构故障的具体形式,在工程中更具有实际意义.在进行故障估计前,应先基于系统模型分析故障在一定条件下的可隔离性^[5],以及故障与扰动之间的耦合.文献[6]设计了扰动补偿器并对系统中的故障进行估计;文献[7]将干扰与系统状态和传感器故障解耦,并设计了一种广义降阶观测器,可同时得到系统状态和传感器故障的估计值;文献[8]先将系统模型转化为只包含执行器故障的形式,然后通过坐标变换实现系统故障与干扰的解耦,并设计了滑模观测器对故障进行估计;文献[9]设计了广义观测器同时估计系统故障和状态,并通过解耦未知输入减弱模型不确定性和干扰对观测器性能的影响.另外,对于系统中与故障不可解耦的扰动,文献[10]针对系统的执行器故障和传感器故障分别设计了滑模观测器和广义观测器,并在滑模观测器中对干扰进行了补偿;文献[11]基于李雅普诺夫稳定性理论设计了故障观测器,并采用线性矩阵不等式方法削弱了系统干扰和测量噪声对故障估计的影响.

需要说明的是,文献[3-11]研究的故障类型均为常规故障,当系统发生微小故障时,由于闭环系统自身的鲁棒性会掩盖故障带来的影响,从而提高系统的故障漏报率^[12].针对系统早期微小故障易被掩盖的问题,文献[13]为得到准确的残差信号,通过检测系统的控制信号和状态信号放大得到的残差,并用于检测一类非线性闭环系统的微小故障;文献[14]设计了一种基于广义估计器的早期故障估计方法,能够同时处理执行器故障和传感器故障,并采用线性矩阵不等式方法改善估计结果.

基于上述分析,针对一类非线性系统同时存在执行器故障、传感器故障和扰动的问题,本文提出一种基于有限时间未知输入观测器的故障检测与估计方法.首先,通过引入非奇异变换将系统的扰动与故障解耦,并将原系统转换为两个降阶子系统;然后,将两个子系统的输出分别引入一阶低通滤波器,并将滤波器状态和子系统状态组成新的增广系统,实现将原系统的传感器故障转化为执行器故障;接着,针对两个

新的增广系统分别设计有限时间未知输入观测器得到残差信号,并采用一组时变的自适应阈值检测系统故障,通过所设计的未知输入观测器对扰动和故障进行估计;最后,基于永磁同步电机转速系统进行仿真研究,以验证所提出方法能够在有限时间内检测并估计出系统同时存在的执行器故障和传感器故障.

1 考虑故障的非线性系统模型及变换

考虑如下一类带故障的不确定非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{M}\phi(t, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) + \\ \quad \boldsymbol{D}\boldsymbol{d}(t) + \boldsymbol{E}\boldsymbol{f}_a(t), \\ \boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{G}\boldsymbol{f}_s(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\boldsymbol{x}(t)$ 、 $\boldsymbol{u}(t)$ 、 $\boldsymbol{y}(t)$ 分别为系统状态、输入和输出; $\phi(t, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{u})$ 为系统的非线性项且满足Lipschitz条件,即 $|\phi(t, \boldsymbol{x}_1, \boldsymbol{u}) - \phi(t, \boldsymbol{x}_2, \boldsymbol{u})| \leq L_p |\boldsymbol{x}_1 - \boldsymbol{x}_2|$, L_p 为Lipschitz常数; $\boldsymbol{d}(t)$ 为系统的内部干扰与不确定项之和; $\boldsymbol{f}_a(t)$ 为系统的执行器故障; $\boldsymbol{f}_s(t)$ 为传感器故障; \boldsymbol{A} 、 \boldsymbol{B} 、 \boldsymbol{C} 、 \boldsymbol{M} 、 \boldsymbol{D} 、 \boldsymbol{E} 和 \boldsymbol{G} 均为已知且维数适当的矩阵,矩阵 \boldsymbol{C} 满秩.

考虑系统(1)中扰动 $\boldsymbol{d}(t)$ 对故障诊断的影响,对系统(1)进行线性非奇异变换,以实现其扰动与故障解耦.为此,引入的状态和输出转换矩阵 \boldsymbol{T} 、 \boldsymbol{S} 满足

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{T}^{-1}\bar{\boldsymbol{z}}(t) = \boldsymbol{T}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{z}}_1(t) \\ \bar{\boldsymbol{z}}_2(t) \end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{S}^{-1}\bar{\boldsymbol{v}}(t) = \boldsymbol{S}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{v}}_1(t) \\ \bar{\boldsymbol{v}}_2(t) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)和(2),得到

$$\dot{\bar{\boldsymbol{z}}}(t) = \boldsymbol{T}\boldsymbol{A}\boldsymbol{T}^{-1}\bar{\boldsymbol{z}}(t) + \boldsymbol{T}\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{T}\boldsymbol{D}\boldsymbol{d}(t) + \boldsymbol{T}\boldsymbol{M}\phi(t, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) + \boldsymbol{T}\boldsymbol{E}\boldsymbol{f}_a(t), \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{v}}_1(t) \\ \bar{\boldsymbol{v}}_2(t) \end{bmatrix} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{C}\boldsymbol{T}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{z}}_1(t) \\ \bar{\boldsymbol{z}}_2(t) \end{bmatrix} + \boldsymbol{S}\boldsymbol{G}\boldsymbol{f}_s(t). \quad (4)$$

其中: $\boldsymbol{S}\boldsymbol{C}\boldsymbol{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{C}}_{11} & 0 \\ 0 & \bar{\boldsymbol{C}}_{22} \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{S}\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\boldsymbol{G}}_2 \end{bmatrix}$.

进一步,由式(3)得到

$$\dot{\bar{\boldsymbol{z}}}(t) = \bar{\boldsymbol{A}}\bar{\boldsymbol{z}}(t) + \bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{u}(t) + \bar{\boldsymbol{M}}\phi(t, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{u}) + \bar{\boldsymbol{D}}\boldsymbol{d}(t) + \bar{\boldsymbol{E}}\boldsymbol{f}_a(t). \quad (5)$$

其中

$$\bar{\boldsymbol{A}} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{A}\boldsymbol{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{A}}_{11} & \bar{\boldsymbol{A}}_{12} \\ \bar{\boldsymbol{A}}_{21} & \bar{\boldsymbol{A}}_{22} \end{bmatrix},$$

$$\bar{\boldsymbol{B}} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{B}}_1 \\ \bar{\boldsymbol{B}}_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{\boldsymbol{M}} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{M}}_1 \\ \bar{\boldsymbol{M}}_2 \end{bmatrix},$$

$$\bar{\boldsymbol{D}} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} \bar{\boldsymbol{D}}_1 \\ \bar{\boldsymbol{D}}_2 \end{bmatrix}, \quad \bar{\boldsymbol{E}} = \boldsymbol{T}\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\boldsymbol{E}}_2 \end{bmatrix}.$$

至此, 基于式(2)和(5), 系统(1)经过线性非奇异变换后可写为如下两个子系统形式:

$$\begin{cases} \dot{\bar{z}}_1(t) = \bar{A}_{11}\bar{z}_1(t) + \bar{A}_{12}\bar{z}_2(t) + \bar{B}_1u(t) + \\ \quad \bar{M}_1\phi(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) + \bar{D}_1d(t), \\ \bar{v}_1(t) = \bar{C}_{11}\bar{z}_1(t). \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dot{\bar{z}}_2(t) = \bar{A}_{21}\bar{z}_1(t) + \bar{A}_{22}\bar{z}_2(t) + \bar{B}_2u(t) + \\ \quad \bar{M}_2\phi(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) + \bar{D}_2d(t) + \bar{E}_2f_a(t), \\ \bar{v}_2(t) = \bar{C}_{22}\bar{z}_2(t) + \bar{G}_2f_s(t). \end{cases} \quad (7)$$

将式(6)和(7)所示子系统的输出 $\bar{v}_1(t)$ 和 $\bar{v}_2(t)$ 分别通过如下—阶低通滤波器:

$$\dot{\bar{z}}_3(t) = \mathbf{A}_1\bar{z}_3(t) + \bar{C}_{11}\bar{z}_1(t), \quad (8)$$

$$\dot{\bar{z}}_4(t) = \mathbf{A}_2\bar{z}_4(t) + \bar{C}_{22}\bar{z}_2(t) + \bar{G}_2f_s(t). \quad (9)$$

其中: $\bar{z}_3(t)$ 和 $\bar{z}_4(t)$ 为滤波器的状态, 滤波器矩阵 \mathbf{A}_1 和 \mathbf{A}_2 为 Hurwitz 矩阵.

定义 $\mathbf{z}_1(t) = \begin{bmatrix} \bar{z}_1(t) \\ \bar{z}_3(t) \end{bmatrix}$, $\mathbf{z}_2(t) = \begin{bmatrix} \bar{z}_2(t) \\ \bar{z}_4(t) \end{bmatrix}$, 则由式

(6)和(8), 得到

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}_1(t) = \mathbf{A}_{11}\mathbf{z}_1(t) + \mathbf{M}_{11}\phi(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) + \\ \quad \mathbf{A}_{12}\bar{z}_2(t) + \mathbf{B}_{11}u(t) + \mathbf{D}_{10}d(t), \\ \mathbf{v}_1(t) = \mathbf{C}_1\mathbf{z}_1(t). \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & 0 \\ \bar{C}_{11} & \mathbf{A}_1 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{12} \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{11} = \begin{bmatrix} \bar{B}_1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{11} = \begin{bmatrix} \bar{M}_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{D}_{10} = \begin{bmatrix} \bar{D}_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix},$$

\mathbf{I} 为维数适当的单位阵.

同理, 基于式(7)和(9), 有

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{z}}_2(t) = \mathbf{A}_{21}\mathbf{z}_2(t) + \mathbf{A}_{22}\bar{z}_1(t) + \mathbf{B}_{21}u(t) + \\ \quad \mathbf{M}_{21}\phi(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) + \mathbf{D}_{20}d(t) + \mathbf{E}_{21}f(t), \\ \mathbf{v}_2(t) = \mathbf{C}_2\mathbf{z}_2(t). \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$\mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{22} & 0 \\ \bar{C}_{22} & \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{22} = \begin{bmatrix} \bar{A}_{22} \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{21} = \begin{bmatrix} \bar{B}_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{21} = \begin{bmatrix} \bar{M}_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{D}_{20} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{D}_2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{E}_{21} = \begin{bmatrix} \bar{E}_2 & 0 \\ 0 & \bar{G}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{f}(t) = \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_s(t) \end{bmatrix}, \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix}.$$

综上, 系统(1)经过非奇异变换后得到式(10)和(11)两个增广子系统, 其中式(10)只包含扰动, 增广子系统(11)同时包含扰动和故障, 这样可将系统(1)中的执行器故障和传感器故障一并转化为式(11)增广

子系统执行器故障进行研究.

2 转换后系统的扰动及故障有限时间观测器设计

基于式(10)和(11)两个增广子系统, 本节设计有限时间未知输入观测器, 以便实现系统的故障检测与估计.

假设1 式(10)中的扰动 $d(t)$ 是有界且连续可微的, 令 $\mathbf{d}_3(t) = \mathbf{D}_{10}d(t)$, 即存在正常数 L_1 和 L_2 , 使得 $|\mathbf{d}_3(t)| \leq L_1, |\dot{\mathbf{d}}_3(t)| \leq L_2$.

假设2 式(11)中的故障 $f(t)$ 是有界的, 但其上界未知, 令 $\mathbf{d}_4(t) = \mathbf{D}_{20}d(t) + \mathbf{E}_{21}f(t)$, 且 $\mathbf{d}_4(t)$ 是连续可微的, 即存在正常数 L_3 , 使得 $|\dot{\mathbf{d}}_4(t)| \leq L_3$.

假设3 对于式(10)和(11)所示的系统, 存在一个适当维数的矩阵 \mathbf{P} , 满足 $\mathbf{P}\mathbf{D}_{10} = \mathbf{D}_{20}$.

引理1^[15] 考虑一类非线性系统 $\dot{\bar{\mathbf{x}}} = f(\bar{\mathbf{x}})$, 其中 $f(\bar{\mathbf{x}})$ 为 R^n 内的非线性函数. 若存在一个连续函数 $V(\bar{\mathbf{x}})$, 满足 $V(\bar{\mathbf{x}}) > 0, V(0) = 0$, 且

$$\dot{V}(\bar{\mathbf{x}}) \leq -cV^\alpha(\bar{\mathbf{x}}), \quad (12)$$

其中 $c > 0, 0 < \alpha < 1$, 则系统 $\dot{\bar{\mathbf{x}}} = f(\bar{\mathbf{x}})$ 是有限时间稳定的, 且有限时间 T_1 为

$$T_1 \leq \frac{1}{c(1-\alpha)}(V(\bar{\mathbf{x}}_0))^{1-\alpha}. \quad (13)$$

引理2^[16] 存在一个包含原点的区域 G_* , 满足

$G_* = \{(\mathbf{e}_1(t), \mathbf{e}_2(t)) : |h_1(\mathbf{e}_1(t), \mathbf{e}_2(t))| \leq q_1(\mathbf{e}_1(t))\}$, 其中 $q_1(\mathbf{e}_1(t))$ 为连续正定的函数, 且 $q_1(0) = 0, G_*$ 为系统 $(\mathbf{e}_1(t), \mathbf{e}_2(t))$ 的一个自稳定域(SSR).

定理1 若式(10)满足假设1, 则对其设计有限时间未知输入观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{z}}}_1(t) = \mathbf{A}_{11}\mathbf{z}_1(t) + \mathbf{A}_{12}\hat{\mathbf{z}}_2(t) + \mathbf{B}_{11}u(t) + \\ \quad \mathbf{M}_{11}\phi(t, \hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) + \hat{\mathbf{d}}_3(t) + \varphi_1(\tilde{\mathbf{z}}_1(t)), \\ \dot{\hat{\mathbf{z}}}_2(t) = \bar{A}_{21}\bar{z}_1(t) + \bar{A}_{22}\hat{\mathbf{z}}_2(t) + \bar{B}_2u(t) + \\ \quad \bar{M}_2\phi(t, \hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) + \mathbf{L}_{11}\varphi_1(\tilde{\mathbf{z}}_1(t)), \\ \dot{\hat{\mathbf{d}}}_3(t) = \varphi_2(\tilde{\mathbf{z}}_1(t)). \end{cases} \quad (14)$$

其中: $\hat{\mathbf{z}}_1(t)$ 为观测器的状态, $\hat{\mathbf{d}}_3(t)$ 为 $\mathbf{d}_3(t)$ 的估计值, $\hat{\mathbf{x}}(t)$ 为 $\mathbf{x}(t)$ 的估计值, $\hat{\mathbf{z}}_2(t)$ 为 $\bar{z}_2(t)$ 的估计值, \mathbf{L}_{11} 为适当维数的矩阵; 定义误差 $\tilde{\mathbf{z}}_1(t) = \mathbf{z}_1(t) - \hat{\mathbf{z}}_1(t), \tilde{\mathbf{d}}_3(t) = \mathbf{d}_3(t) - \hat{\mathbf{d}}_3(t), \tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t), \tilde{\phi} = \mathbf{M}_{11}\phi(t, \mathbf{x}, \mathbf{u}) - \mathbf{M}_{11}\phi(t, \hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}), \tilde{\bar{z}}_2(t) = \bar{A}_{12}\bar{z}_2(t) - \bar{A}_{12}\hat{\mathbf{z}}_2(t)$, 将函数 $\varphi_1(\tilde{\mathbf{z}}_1(t))$ 和 $\varphi_2(\tilde{\mathbf{z}}_1(t))$ 分别取

$$\varphi_1(\tilde{\mathbf{z}}_1(t)) = K_1|\tilde{\mathbf{z}}_1(t)|^{\alpha_1}\text{sgn}(\tilde{\mathbf{z}}_1(t)) + K_2|\tilde{\mathbf{z}}_1(t)|^{\beta_1+1}\text{sgn}(\tilde{\mathbf{z}}_1(t)), \quad (15)$$

$$\varphi_2(\tilde{\mathbf{z}}_1(t)) = K_1|\tilde{\mathbf{z}}_1(t)|^{\alpha_2}\text{sgn}(\tilde{\mathbf{z}}_1(t)) + K_2|\tilde{\mathbf{z}}_1(t)|^{\beta_2+1}\text{sgn}(\tilde{\mathbf{z}}_1(t)). \quad (16)$$

其中: $K_1, K_2 > 0, 1/2 < \alpha_1 < 1, 1/2 < \beta_1 < 1, \alpha_2 =$

$2\alpha_1 - 1, \beta_2 = 2\beta_1 - 1$, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数. 观测器(14)是有限时间稳定的, 即观测误差 $\tilde{z}_1(t)$ 和 $\tilde{d}_3(t)$ 能够在有限时间内收敛到0.

证明 将式(15)和(16)代入(14), 得到如下误差系统:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{z}}_1(t) = \tilde{d}_3(t) + \tilde{\phi} + \tilde{z}_2(t) - (K_1|\tilde{z}_1(t)|^{\alpha_1} + K_2|\tilde{z}_1(t)|^{\beta_1+1})\text{sgn}(\tilde{z}_1(t)), \\ \dot{\tilde{d}}_3(t) = \dot{d}_3(t) - (K_1|\tilde{z}_1(t)|^{\alpha_2} + K_2|\tilde{z}_1(t)|^{\beta_2+1})\text{sgn}(\tilde{z}_1(t)). \end{cases} \quad (17)$$

定义 $K_3 = K_1|\tilde{z}_1(t)|^{\alpha_1} + K_2|\tilde{z}_1(t)|^{\beta_1+1}, K_4 = K_1|\tilde{z}_1(t)|^{\alpha_2} + K_2|\tilde{z}_1(t)|^{\beta_2+1}$, 结合假设1将式(17)写为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{z}}_1(t) \in -(K_3 + K_4 - L_1 - L_p|\tilde{x}(t)| - |\tilde{z}_2(t)|, K_3 + K_4 + L_1 + |\tilde{z}_2(t)| + L_p|\tilde{x}(t)|)\text{sgn}(\tilde{z}_1(t)), \\ \dot{\tilde{d}}_3(t) \in -(K_4 - L_2, K_4 + L_2)\text{sgn}(\tilde{z}_1(t)). \end{cases} \quad (18)$$

为便于分析观测器(14)的稳定性, 将式(18)进一步转化为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{z}}_1(t) = \tilde{d}_3(t) - K_3^*\text{sgn}(\tilde{z}_1(t)) - K_4^*\text{sgn}(\tilde{z}_1(t)), \\ \dot{\tilde{d}}_3(t) = -K_3^*\text{sgn}(\tilde{z}_1(t)). \end{cases} \quad (19)$$

其中: $0 < K_3^* \in (K_4 - L_2, K_4 + L_2), 0 < K_4^* \in (K_3 + K_4 - L_1 - L_p|\tilde{x}(t)| - |\tilde{z}_2(t)|, K_3 + K_4 + L_1 + |\tilde{z}_2(t)| + L_p|\tilde{x}(t)|)$.

选取 Lyapunov 函数

$$V_1(t) = (K_3^* + K_4^*)|\tilde{z}_1(t)| + \frac{1}{2}\tilde{d}_3^2(t). \quad (20)$$

对式(20)求导, 并将式(19)代入, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &= (K_3^* + K_4^*)\dot{\tilde{z}}_1(t)\text{sgn}(\tilde{z}_1(t)) + \tilde{d}_3(t)\dot{\tilde{d}}_3(t) = \\ &= K_3^*\text{sgn}(\tilde{z}_1(t))[\tilde{d}_3(t) - K_3^*\text{sgn}(\tilde{z}_1(t))] + \\ &= K_4^*\text{sgn}(\tilde{z}_1(t))[-K_4^*\text{sgn}(\tilde{z}_1(t))] - \\ &= \tilde{d}_3(t)K_3^*\text{sgn}(\tilde{z}_1(t)) = \\ &= -K_3^{*2} - K_4^{*2} \leq 0. \end{aligned} \quad (21)$$

由式(21)可知, 观测器(14)是渐近稳定的. 进一步, 为证明观测器(14)的有限时间收敛特性, 定义函数

$$\begin{aligned} h_1(\tilde{z}_1(t), \tilde{d}_3(t)) &= \\ &= \tilde{d}_3(t) - \varphi_1(\tilde{z}_1(t)) + k_1q_1(\tilde{z}_1(t))\text{sgn}(\tilde{z}_1(t)). \end{aligned} \quad (22)$$

其中: $k_1 > 1, q_1(\tilde{z}_1(t)) = m_1|\tilde{z}_1(t)|^{r_1}$ 为连续正定函数, $m_1 > 0, 0 < r_1 < 1$.

由式(22)和引理2, 有

$$\begin{aligned} -q_1(\tilde{z}_1(t)) - k_1q_1(\tilde{z}_1(t))\text{sgn}(\tilde{z}_1(t)) &\leq \\ \tilde{d}_3(t) - \varphi_1(\tilde{z}_1(t)) &\leq \\ q_1(\tilde{z}_1(t)) - k_1q_1(\tilde{z}_1(t))\text{sgn}(\tilde{z}_1(t)). \end{aligned} \quad (23)$$

选取 Lyapunov 函数

$$V_2(t) = \frac{1}{2}\tilde{z}_1^2(t). \quad (24)$$

对式(24)求导, 并将式(22)和(23)代入, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \tilde{z}_1(t)\dot{\tilde{z}}_1(t) \leq \\ &= \tilde{z}_1(t)[q_1(\tilde{z}_1(t)) - k_1q_1(\tilde{z}_1(t))\text{sgn}(\tilde{z}_1(t))] \leq \\ &= |\tilde{z}_1(t)|q_1(\tilde{z}_1(t)) - k_1q_1(\tilde{z}_1(t))|\tilde{z}_1(t)| = \\ &= -(k_1 - 1)m_12^{\frac{r_1+1}{2}}(V_2(t))^{\frac{r_1+1}{2}}. \end{aligned} \quad (25)$$

其中: $k_1 - 1 > 0, m_1 > 0, \frac{1}{2} < \frac{r_1+1}{2} < 1$.

将系统初始时刻记为 t_0 , 误差 $\tilde{z}_1(t)$ 收敛到0的时间记为 t_1 , 则由式(25)和引理1可知

$$t_1 \leq \frac{1}{(k_1 - 1)m_12^{\frac{r_1+1}{2}}\left(1 - \frac{r_1+1}{2}\right)}(V_2(t_0))^{1 - \frac{r_1+1}{2}}. \quad (26)$$

将 $\tilde{d}_3(t)$ 收敛到0的时间记为 t_2 , 由式(23)可知 $t_2 \leq t_1$, 因此 $\tilde{d}_3(t)$ 可在有限时间内收敛到0.

综上, 未知输入观测器(14)是有限时间稳定的, 即观测误差 $\tilde{z}_1(t)$ 和 $\tilde{d}_3(t)$ 能够在有限时间内收敛到0. \square

定理2 若式(11)满足假设2, 并考虑其复合干扰 $d_4(t)$ 的上界未知, 则针对系统(11)设计自适应有限时间未知输入观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{z}}_2(t) = A_{21}z_2^*(t) + A_{22}\tilde{z}_1(t) + M_{21}\phi(t, \hat{x}, u) + \\ \quad B_{21}u(t) + \hat{d}_4(t) + (\hat{l} + \delta)\varphi_3(\tilde{z}_2(t)), \\ \dot{\hat{d}}_4(t) = \varphi_4(\tilde{z}_2(t)). \end{cases} \quad (27)$$

其中: $\hat{z}_2(t)$ 为观测器的状态, $\hat{d}_4(t)$ 为 $d_4(t)$ 的估计值, $z_2^*(t) = \begin{bmatrix} \hat{z}_2(t) \\ \tilde{z}_4(t) \end{bmatrix}, \delta > 0$ 且数值较小. 假设 $d_4(t)$ 的上界

为 l, l 未知, \hat{l} 为 l 的估计值, 其自适应律为 $\dot{\hat{l}} = K_5|\tilde{z}_2(t)|^{\alpha_3} + K_6|\tilde{z}_2(t)|^{\beta_3+1}$. 定义观测误差 $\tilde{z}_2(t) = z_2^*(t) - \hat{z}_2(t), \tilde{d}_4(t) = d_4(t) - \hat{d}_4(t), l$ 的估计误差 $\tilde{l} = l - \hat{l}$. 将函数 $\varphi_3(\tilde{z}_2(t))$ 和 $\varphi_4(\tilde{z}_2(t))$ 分别取

$$\begin{aligned} \varphi_3(\tilde{z}_2(t)) &= K_5|\tilde{z}_2(t)|^{\alpha_3}\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)) + \\ &= K_6|\tilde{z}_2(t)|^{\beta_3+1}\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)), \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \varphi_4(\tilde{z}_2(t)) &= K_5|\tilde{z}_2(t)|^{\alpha_4}\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)) + \\ &= K_6|\tilde{z}_2(t)|^{\beta_4+1}\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)). \end{aligned} \quad (29)$$

其中: $K_5, K_6 > 0, 1/2 < \alpha_3 < 1, 1/2 < \beta_3 < 1, \alpha_4 = 2\alpha_3 - 1, \beta_4 = 2\beta_3 - 1$. 观测器(27)是有限时间稳定的,

即观测误差 $\tilde{z}_2(t)$ 和 $\tilde{\mathbf{d}}_4(t)$ 能够在有限时间内收敛到 0.

证明 由定理 1 和式 (17) 可知, 当 $t > t_1$ 时, $\tilde{\phi} + \tilde{z}_2(t) = 0$. 将式 (28) 和 (29) 代入 (27), 可得到如下误差系统:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{z}}_2(t) = \tilde{\mathbf{d}}_4(t) - (\hat{l} + \delta)(K_5|\tilde{z}_2(t)|^{\alpha_3} + K_6|\tilde{z}_2(t)|^{\beta_3+1})\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)), \\ \dot{\tilde{\mathbf{d}}}_4(t) = \dot{\mathbf{d}}_4 - (K_5|\tilde{z}_2(t)|^{\alpha_4} + K_6|\tilde{z}_2(t)|^{\beta_4+1})\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)). \end{cases} \quad (30)$$

定义 $K_7 = K_5|\tilde{z}_2(t)|^{\alpha_3} + K_6|\tilde{z}_2(t)|^{\beta_3+1}$, $K_8 = K_5|\tilde{z}_2(t)|^{\alpha_4} + K_6|\tilde{z}_2(t)|^{\beta_4+1}$. 由假设 2 可知 $|\dot{\mathbf{d}}_4(t)| \leq L_3$, 故式 (30) 写为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{z}}_2(t) \in \tilde{\mathbf{d}}_4(t) - (\hat{l} + \delta)K_7\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)), \\ \dot{\tilde{\mathbf{d}}}_4(t) \in -(K_8 - L_3, K_8 + L_3)\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)). \end{cases} \quad (31)$$

为便于分析观测器 (27) 的稳定性, 将式 (31) 进一步转化为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{z}}_2(t) = \tilde{\mathbf{d}}_4(t) - (\hat{l} + \delta)K_7\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)), \\ \dot{\tilde{\mathbf{d}}}_4(t) = \dot{\mathbf{d}}_4 - K_8\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)) = -K_8^*\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)), \end{cases} \quad (32)$$

其中 $0 < K_8^* \in (K_8 - L_3, K_8 + L_3)$.

选取 Lyapunov 函数

$$V_3(t) = K_8^*|\tilde{z}_2(t)| + \frac{1}{2}\tilde{\mathbf{d}}_4^2(t) + \frac{K_8^*}{2}\tilde{l}^2. \quad (33)$$

对式 (33) 求导, 并将式 (32) 代入, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_3(t) &= K_8^*\text{sgn}(\tilde{z}_2(t))[\tilde{\mathbf{d}}_4(t) - \hat{l}K_7\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)) - \delta K_7\text{sgn}(\tilde{z}_2(t))] - K_8^*(l - \hat{l})K_7 + \\ &\quad \tilde{\mathbf{d}}_4(t)[-K_8^*\text{sgn}(\tilde{z}_2(t))] = \\ &\quad - K_8^*K_7\delta - K_8^*K_7l \leq 0. \end{aligned} \quad (34)$$

由式 (34) 可知, 观测器 (27) 是渐近稳定的. 进一步地, 为证明观测器 (27) 的有限时间收敛特性, 定义函数

$$h_2(\tilde{z}_2(t), \tilde{\mathbf{d}}_4(t)) = \tilde{\mathbf{d}}_4(t) - (\hat{l} + \delta)\varphi_3(\tilde{z}_2(t)) + k_2q_2(\tilde{z}_2(t))\text{sgn}(\tilde{z}_2(t)). \quad (35)$$

其中: $k_2 > 1$, $q_2(\tilde{z}_2(t)) = m_2|\tilde{z}_2(t)|^{r_2}$ 为连续正定函数, $m_2 > 0, 0 < r_2 < 1$.

由式 (35) 和引理 2, 得到

$$\begin{aligned} -q_2(\tilde{z}_2) - k_2q_2(\tilde{z}_2)\text{sgn}(\tilde{z}_2) &\leq \\ \tilde{\mathbf{d}}_4 - (\hat{l} + \delta)\varphi_3(\tilde{z}_2) &\leq \\ q_2(\tilde{z}_2) - k_2q_2(\tilde{z}_2)\text{sgn}(\tilde{z}_2). \end{aligned} \quad (36)$$

选取 Lyapunov 函数

$$V_4(t) = \frac{1}{2}\tilde{z}_2^2(t). \quad (37)$$

对式 (37) 求导, 并将式 (35) 和 (36) 代入, 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_4(t) &= \tilde{z}_2(t)\dot{\tilde{z}}_2(t) \leq \\ \tilde{z}_2(t)[q_2(\tilde{z}_2(t)) - k_2q_2(\tilde{z}_2(t))\text{sgn}(\tilde{z}_2(t))] &\leq \\ |\tilde{z}_2(t)|q_2(\tilde{z}_2(t)) - k_2q_2(\tilde{z}_2(t))|\tilde{z}_2(t)| &= \\ - (k_2 - 1)m_22^{\frac{r_2+1}{2}}(V_4(t))^{\frac{r_2+1}{2}}. \end{aligned} \quad (38)$$

其中: $k_2 - 1 > 0, m_2 > 0, \frac{1}{2} < \frac{r_2+1}{2} < 1$.

将误差 $\tilde{z}_2(t)$ 收敛到 0 的时间记为 t_3 , 由式 (38) 和引理 1 可知

$$t_3 \leq \frac{1}{(k_2 - 1)m_22^{\frac{r_2+1}{2}}\left(1 - \frac{r_2+1}{2}\right)}(V_4(t_0))^{1-\frac{r_2+1}{2}} + t_1. \quad (39)$$

将误差 $\tilde{\mathbf{d}}_4(t)$ 收敛到 0 的时间记为 t_4 , 由式 (36) 可知 $t_4 \leq t_3$, 因此 $\tilde{\mathbf{d}}_4(t)$ 可在有限时间内收敛到 0.

综上, 未知输入观测器 (27) 是有限时间稳定的, 即观测误差 $\tilde{z}_2(t)$ 和 $\tilde{\mathbf{d}}_4(t)$ 能够在有限时间内收敛到 0. \square

3 系统执行器及传感器故障的检测与估计

基于式 (14) 和未知输入观测器 (27) 得到式 (10) 和 (11) 系统状态的估计值 \hat{z}_1 和 \hat{z}_2 , 以及未知项 \mathbf{d}_3 和 \mathbf{d}_4 的估计值 $\hat{\mathbf{d}}_3$ 和 $\hat{\mathbf{d}}_4$, 本节给出系统 (1) 执行器故障和传感器故障的检测与估计方法.

考虑增广子系统 (11) 中扰动 $\mathbf{d}(t)$ 对故障检测与估计的影响, 设计一组时变的自适应阈值以检测系统中的常规故障. 结合观测器 (14) 对扰动 \mathbf{d}_3 的估计值 $\hat{\mathbf{d}}_3$, 将自适应阈值设计为

$$\begin{cases} \theta_1 = \mathbf{P}\hat{\mathbf{d}}_3 + \sigma, \\ \theta_2 = \mathbf{P}\hat{\mathbf{d}}_3 - \sigma. \end{cases} \quad (40)$$

其中: θ_1 和 θ_2 分别为设定的阈值上界和下界, $\theta_1 = \begin{bmatrix} \theta_{11} \\ \theta_{12} \end{bmatrix}$, $\theta_2 = \begin{bmatrix} \theta_{21} \\ \theta_{22} \end{bmatrix}$; $\sigma > 0$ 为自适应阈值的偏移量, 这里取值为 $\sigma = L_1/3$.

假设系统 (11) 在已知标称条件下状态为 $\mathbf{z}_N(t)$, 观测器 (27) 的状态 $\hat{z}_2(t)$ 为系统 (11) 状态 $\mathbf{z}_2(t)$ 的估计值, 有

$$\mathbf{z}_N(t) = \hat{z}_2(t) - \hat{\mathbf{d}}_4(t). \quad (41)$$

由式 (11) 和 (41) 可计算得到一组残差信号 $\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{v}_2(t) - \mathbf{C}\mathbf{z}_N(t)$, 给出如下检测故障的条件:

$$\begin{cases} \theta_2 < \boldsymbol{\gamma} < \theta_1, \text{ 无故障;} \\ \boldsymbol{\gamma} \leq \theta_2 \text{ 或 } \boldsymbol{\gamma} \geq \theta_1, \text{ 有故障.} \end{cases} \quad (42)$$

其中 $\boldsymbol{\gamma} = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{bmatrix}$.

结合式 (11) 可知残差 γ_1 和 γ_2 分别由执行器故障

和传感器故障引起,因此通过式(42)可分别检测出系统(1)中的执行器故障和传感器故障.

为便于分析,定义 $d_1 = D_1 d(t)$, $d_2 = D_2 d(t)$. 由定理1可知,当观测误差 $\tilde{d}_3(t)$ 收敛到0时,系统(10)中扰动的估计值 $\hat{d}_3 = d_3$;进一步由假设3,系统(11)中的扰动可表示为 $D_{20}d = PD_{10}d = P\hat{d}_3$,故结合式(10)和(11)得到 $\hat{d}_3 = \begin{bmatrix} \bar{D}_1 \hat{d} \\ 0 \end{bmatrix}$, $P\hat{d}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{D}_2 \hat{d} \end{bmatrix}$. 由式(2)可将原系统(1)中的扰动估计值 \hat{d}_1 和 \hat{d}_2 表示为

$$\begin{bmatrix} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} \bar{D}_1 \hat{d} \\ \bar{D}_2 \hat{d} \end{bmatrix}. \quad (43)$$

同理,根据式(1)定义 $f_{a1} = E f_a(t)$, $f_{s1} = G f_s(t)$. 由定理2,当观测误差 $\tilde{z}_2(t)$ 和 $\tilde{d}_4(t)$ 收敛到0时,有 $\hat{d}_4 = d_4$,进一步由假设2,有 $d_4(t) = D_{20}d(t) + E_{21}f(t)$,因此可将转换后系统(11)中故障估计值 \hat{f} 表示为 $\hat{f} = \hat{d}_4 - P\hat{d}_3$. 令 $\hat{f} = \begin{bmatrix} \hat{f}_1 \\ \hat{f}_2 \end{bmatrix}$,由式(3)可将原系统(1)中的故障估计值 \hat{f}_{a1} 和 \hat{f}_{s1} 表示为

$$\begin{cases} \hat{f}_{a1} = T^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{f}_1 \end{bmatrix}, \\ \hat{f}_{s1} = S^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{f}_2 \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (44)$$

至此,基于式(14)和(27)有限时间未知输入观测器,可将系统(1)中同时存在的执行器故障和传感器故障检测并估计出来.

4 考虑故障的永磁同步电机转速系统仿真

为了验证所提出方法的有效性,基于永磁同步电机转速系统在 dq 坐标系下的模型进行仿真研究,有

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \frac{3P_m \psi_{fd}}{2J} i_q - \frac{B}{J} \omega - \frac{1}{J} T_L, \\ \dot{i}_q = \frac{1}{L} u_q - \frac{R}{L} i_q - P_m \omega i_d - \frac{P_m \psi_{fd}}{L} \omega, \\ \dot{i}_d = \frac{1}{L} u_d - \frac{R}{L} i_d + P_m \omega i_q. \end{cases} \quad (45)$$

采用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略,考虑参数 T_L 、 J 和 R 均存在不确定性,以及永磁同步电机模型中的控制器信号 u_q 和转速传感器分别存在故障 f_a 和 f_s ,可将式(45)进一步写为

$$\begin{cases} \dot{\omega} = \frac{3P_m \psi_{fd}}{2J} i_q - \frac{B}{J} \omega - \frac{1}{J} T_L + d_1, \\ \dot{i}_q = \frac{1}{L} (u_q + f_a) - \frac{R}{L} i_q - P_m \omega i_d - \frac{P_m \psi_{fd}}{L} \omega + d_2, \\ y = \begin{bmatrix} \omega + f_s \\ i_q \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (46)$$

其中: d_1 和 d_2 为系统中的扰动,仿真时选取 $d_1 = 0.05 \sin(5t) + 0.03 \cos(10t) + 2\Delta$, $d_2 = 0.025 \sin(5t) + 0.015 \cos(10t) + \Delta$, Δ 表示幅值为0.01的随机噪声; $T_L = (10 + 5 \sin(\omega t))(\text{N} \cdot \text{m})$.

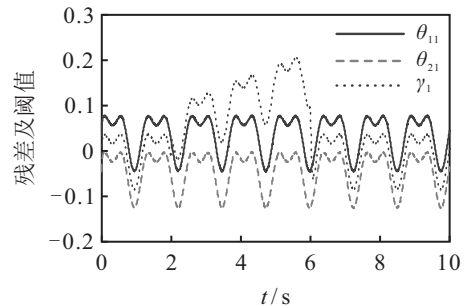
永磁同步电机的参数如下:额定电压 $U_e = 220 \text{ V}$,额定电流 $I_e = 1.27 \text{ A}$,定子电阻 $R = 12.5 \Omega$,定子电感 $L = 0.03 \text{ H}$,磁链 $\psi_{fd} = 0.371 \text{ Wb}$,阻尼系数 $B = 0.001 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$,磁极对数 $P_m = 4$,转动惯量 $J = 0.17 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$.

工况1 假设在第2~6s和第4~8s分别发生执行器故障和传感器故障,故障大小分别为

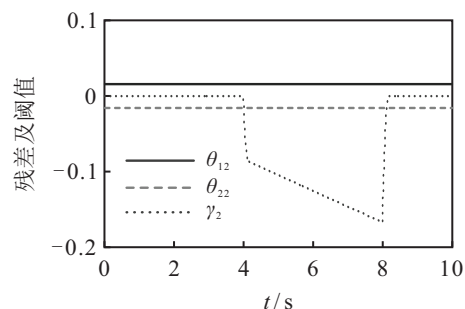
$$f_a = \begin{cases} 0.03t, & 2 < t \leq 6; \\ 0, & \text{otherwise}, \end{cases}$$

$$f_s = \begin{cases} -0.02t, & 4 < t \leq 8; \\ 0, & \text{otherwise}. \end{cases}$$

图1为工况1下执行器故障和传感器故障的残差信号和阈值曲线. 由图1可见,所提出方法可及时地检测出两种故障,具有较强的故障分离能力. 此外,所提出的自适应阈值方法相比于常规的阈值方法,具有较高的故障检测灵敏度.



(a) 执行器故障的残差信号和阈值曲线

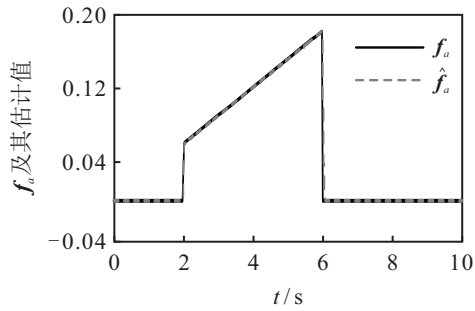


(b) 传感器故障的残差信号和阈值曲线

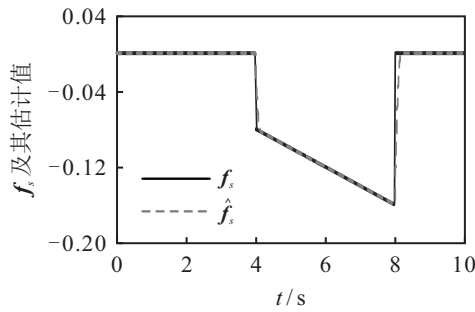
图1 工况1下执行器和传感器故障的残差和阈值曲线

图2为工况1下执行器故障和传感器故障的估计值曲线. 由图2可见,所提出方法对同时存在的执行器故障和传感器故障均进行了有效估计,且估计精度较高.

图3为系统扰动的估计值曲线. 由图3可见,所提出方法可以有效地估计出系统扰动,从而补偿扰动对故障估计的影响.

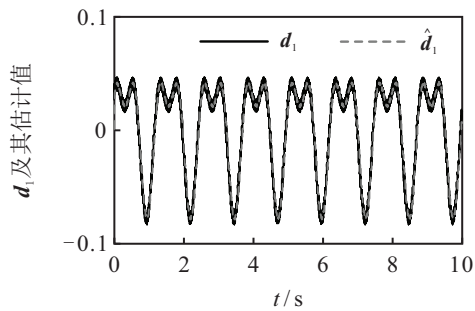


(a) 执行器故障及其估计值曲线

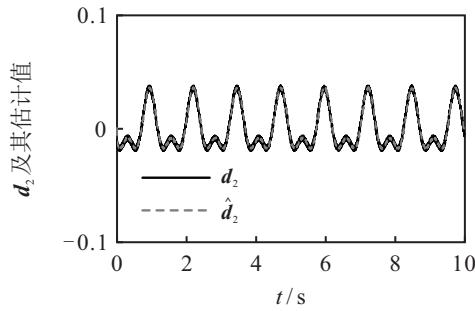


(b) 传感器故障及其估计值曲线

图2 工况1下执行器故障和传感器故障的估计值曲线



(a) d_1 及其估计值曲线



(b) d_2 及其估计值曲线

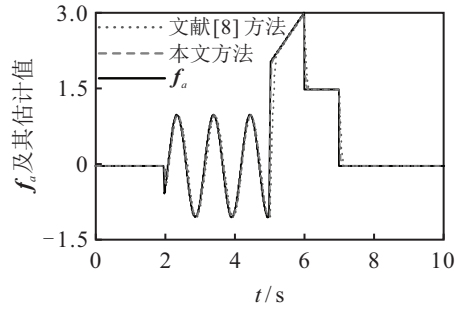
图3 系统扰动的估计值曲线

工况2 为了验证所提出自适应方法能够对上界未知的故障进行有效的自适应估计,考虑如下时变的执行器故障和传感器故障,并与文献[8]方法进行对比仿真:

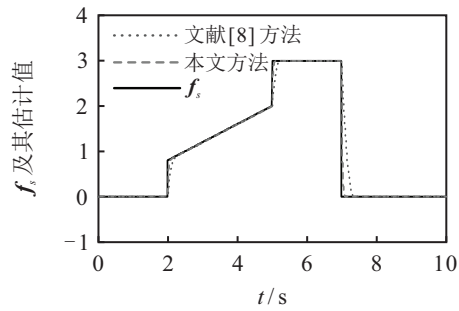
$$f_a = \begin{cases} \sin(6t), & 2 < t \leq 5; \\ t - 3, & 5 < t \leq 6; \\ 1.5, & 6 < t \leq 7; \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$$f_s = \begin{cases} 0.4t, & 2 < t \leq 5; \\ 3, & 5 < t \leq 7; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

图4为时变的执行器故障和传感器故障的估计值曲线.由图4可见,所提出方法对不同类型的故障均具有较好的估计效果,表明所提出方法具有较高的故障辨识能力和自适应能力.



(a) 执行器故障及其估计值曲线



(b) 传感器故障及其估计值曲线

图4 时变的执行器故障和传感器故障的估计值曲线

为了检验所提出方法的故障检测性能,计算该方法和文献[8]方法在工况2下的故障检测性能指标:对0~10s内执行器故障的仿真结果(图4(a))进行周期为4ms的均匀采样,并根据式(42)判断故障数据;被正确识别为故障的样本个数记作TP,被正确识别为无故障的样本个数记作TN,被错误识别为故障(误报)的样本个数记作FP,被错误识别为无故障(漏报)的样本个数记作FN.相关的计算公式如下:

$$\text{准确率ACC} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

$$\text{精确率PRE} = \frac{TP}{TP + FP},$$

$$\text{召回率REC} = \frac{TP}{TP + FN},$$

$$F_1 = \frac{2 \times \text{PRE} \times \text{REC}}{\text{PRE} + \text{REC}}.$$

工况2下故障检测性能指标的计算结果如表1所示.

表1 工况2下故障检测性能指标的计算结果

计算参数	本文方法	文献[8]方法
ACC/%	97.25	96.21
PRE/%	98.61	97.15
F_1	0.9721	0.9621

由表1可见,所提出方法在准确率、精确率和 F_1 等方面均优于文献[8]方法,因而具有较好的故障检测性能.

5 结论

针对一类非线性系统中同时存在执行器故障、传感器故障和扰动的问题,本文提出了一种基于有限时间未知输入观测器的故障检测与估计方法.首先,通过线性非奇异变换实现了系统扰动与故障间的解耦,并通过增广状态将原系统的传感器故障转化为执行器故障;然后,针对增广系统设计有限时间未知输入观测器检测故障,实现了对系统扰动和故障的有效估计;最后,基于永磁同步电机转速系统进行了多个工况下的仿真研究,仿真结果表明所提出方法能够在有限时间内检测并估计出系统的执行器故障和传感器故障.通过与文献[8]方法的对比仿真,进一步表明了所提出方法具有较好的故障检测精度.需要说明的是,所提出方法不需要已知故障的上界,对微小故障和时变故障均具有较好的检测和估计性能,且可处理同时存在的执行器故障和传感器故障,对于多种故障类型具有一定的适用性.

参考文献(References)

- [1] Bhuiyan E A, Akhand M M A, Das S K, et al. A survey on fault diagnosis and fault tolerant methodologies for permanent magnet synchronous machines[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2020, 17(6): 763-787.
- [2] Badihi H, Zhang Y M, Hong H. Wind turbine fault diagnosis and fault-tolerant torque load control against actuator faults[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2015, 23(4): 1351-1372.
- [3] Wu Y K, Jiang B, Lu N Y, et al. Multiple incipient sensor faults diagnosis with application to high-speed railway traction devices[J]. *ISA Transactions*, 2017, 67: 183-192.
- [4] 杨光红, 张志慧. 基于区间观测器的动态系统故障诊断技术综述[J]. *控制与决策*, 2018, 33(5): 769-781. (Yang G H, Zhang Z H. Review of interval observer based fault diagnosis techniques for dynamic systems[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(5): 769-781.)
- [5] Chen C X, Chen L P, Ding J W, et al. The effectivity analysis of adding sensors for improving model based fault isolability properties[J]. *Journal of Process Control*, 2018, 70: 123-132.
- [6] Vidal Y, Tutivén C, Rodellar J, et al. Fault diagnosis and fault-tolerant control of wind turbines via a discrete time controller with a disturbance compensator[J]. *Energies*, 2015, 8(5): 4300-4316.
- [7] Yin S, Gao H J, Qiu J B, et al. Descriptor reduced-order sliding mode observers design for switched systems with sensor and actuator faults[J]. *Automatica*, 2017, 76: 282-292.
- [8] Huang G, Fukushima E F, She J H, et al. Estimation of sensor faults and unknown disturbance in current measurement circuits for PMSM drive system[J]. *Measurement*, 2019, 137: 580-587.
- [9] Nemati F, Safavi Hamami S M, Zemouche A. A nonlinear observer-based approach to fault detection, isolation and estimation for satellite formation flight application[J]. *Automatica*, 2019, 107: 474-482.
- [10] 文传博, 邓露, 吴兰. 基于滑模观测器和广义观测器的故障估计方法[J]. *自动化学报*, 2018, 44(9): 1698-1705. (Wen C B, Deng L, Wu L. Fault estimation approaches with sliding mode observer and descriptor observer[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(9): 1698-1705.)
- [11] Rotondo D, Buciakowski M, Witczak M. Simultaneous state and process fault estimation in linear parameter varying systems using robust quadratic parameter varying observers[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2021, 31(17): 8390-8407.
- [12] 周东华, 刘洋, 何潇. 闭环系统故障诊断技术综述[J]. *自动化学报*, 2013, 39(11): 1933-1943. (Zhou D H, Liu Y, He X. Review on fault diagnosis techniques for closed-loop systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(11): 1933-1943.)
- [13] Chen T R, Wang C, Chen G, et al. Small fault detection for a class of closed-loop systems via deterministic learning[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(3): 897-906.
- [14] Wu Y K, Jiang B, Lu N Y. A descriptor system approach for estimation of incipient faults with application to high-speed railway traction devices[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(10): 2108-2118.
- [15] 刘洋, 井元伟, 刘晓平, 等. 非线性系统有限时间控制研究综述[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(1): 1-12. (Liu Y, Jing Y W, Liu X P, et al. Survey on finite-time control for nonlinear systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(1): 1-12.)
- [16] Zhao L, Yang Y F, Xia Y Q, et al. Active disturbance rejection position control for a magnetic rodless pneumatic cylinder[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(9): 5838-5846.

作者简介

刘仁和(1996—),男,硕士生,从事非线性系统的故障诊断与容错控制的研究, E-mail: 15032377591@163.com;

刘乐(1985—),男,副教授,从事复杂动态系统建模、分析与控制、智能优化控制等研究, E-mail: leliu@ysu.edu.cn;

方一鸣(1965—),男,教授,博士生导师,从事复杂系统的建模仿真与控制、自适应鲁棒控制理论与应用、冶金自动化等研究, E-mail: fyming@ysu.edu.cn;

王馨(1996—),女,硕士生,从事复杂动态系统故障诊断与容错控制的研究, E-mail: wangxinishe@163.com.