

# 进气压力调节执行机构故障诊断方法研究<sup>\*</sup>

但志宏<sup>1</sup>, 张 松<sup>1</sup>, 王 彬<sup>2</sup>, 常 睿<sup>2</sup>, 刘 威<sup>2</sup>

(1. 中国航发四川燃气涡轮研究院 高空模拟技术重点实验室, 四川 绵阳 621703;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 面向高空台进气压力调节系统试验和维护需求, 提出了一种基于滑模观测器的执行机构故障诊断方法。考虑特种调节阀的流量-压差气动特性对执行机构外负载作用机制, 建立了电液伺服执行机构的非线性模型。由其识别出最佳估计数学模型, 以获得自适应滑模观测器。分析确定不同故障对应伺服阀或液压缸的主导特征参数, 据此选择可观测状态量且结合自适应阈值进行判断某部件是否发生故障, 仿真验证该观测器对典型故障的诊断效果。结果表明, 基于自适应滑模观测器的故障诊断方法可实现对进气压力调节系统中电液伺服执行机构典型液压、机械、电气故障的诊断和定位, 诊断准确率达 91% 以上。

**关键词:** 进气压力调节系统; 特种调节阀; 电液伺服执行机构; 自适应滑模观测器; 故障诊断

**中图分类号:** V263.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2023) 12-2210103-10

**DOI:** 10.13675/j.cnki. tjjs. 2210103

## Fault Diagnosis Method of Intake Pressure Regulating Actuator

DAN Zhi-hong<sup>1</sup>, ZHANG Song<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>, CHANG Rui<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>

(1. Science and Technology on Altitude Simulation Laboratory, AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621703, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** A fault diagnosis method of actuator based on sliding mode observer is proposed to meet the test and maintenance requirements of intake pressure regulating system of high altitude platform. Considering aerodynamic characteristics of flow-pressure difference across the special valve on external load mechanism of the actuator, the nonlinear model of the electro-hydraulic servo actuator is established. The best estimation model is identified based on the nonlinear model, so as to obtain an adaptive sliding mode observer. The dominant characteristic parameters of the servovalve or the hydraulic cylinder for different faults are analyzed and determined. Accordingly, the observable state parameters are selected to decide whether one component has a fault or not by comparing with the adaptive threshold. Simulation demonstrator verifies diagnostic effect on typical faults using this observer proposed in this paper. The results show that the fault diagnosis method based on adaptive sliding mode observer can realize the diagnosis and location of typical hydraulic, mechanical and electrical faults in electro-hydraulic servo actuator of the intake pressure regulating system of high altitude platform, and the diagnosis accura-

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2022-10-27; 修订日期: 2023-01-11。

基金项目: 中国航发四川燃气涡轮研究院稳定支持项目 (GJCZ-0039-20)。

作者简介: 但志宏, 硕士, 研究员, 研究领域为航空发动机高空模拟技术。

通讯作者: 王 彬, 博士, 副教授, 研究领域为先进航空燃油及执行机构技术。E-mail: binwang@nuaa.edu.cn

引用格式: 但志宏, 张 松, 王 彬, 等. 进气压力调节执行机构故障诊断方法研究[J]. 推进技术, 2023, 44(12): 2210103. (DAN Zhi-hong, ZHANG Song, WANG Bin, et al. Fault Diagnosis Method of Intake Pressure Regulating Actuator[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(12):2210103.)

cy is no lower than 91%.

**Key words:** Intake pressure regulating system; Special regulating valve; Electro-hydraulic servo actuator; Adaptive sliding mode observer; Fault diagnosis

## 1 引言

随着航空发动机高空模拟试验任务和技术要求的不断提高,随之而来的试验风险也逐步增加。进气压力调节系统是实现航空发动机高空进气参数模拟的关键设备,主要基于电液伺服执行机构驱动大口径调节阀实现阀门开度的控制,从而达到调节进气压力的目的。该系统执行机构主要由轮盘式特种调节阀、电液伺服阀、液压缸及传感器等组成。进气压力动态调节过程中,执行机构常在大负荷、不确定户外环境气候条件下运行,其关键部件不可避免发生故障。进气压力调节系统执行机构典型故障诊断方法研究,不仅有助于规避高空环境模拟试验风险,也能为后续执行机构故障诊断的工程应用和容错控制技术提供参考。

如何快速准确判断故障发生、基于当前系统可用信息进行容错控制,保证系统稳定及其基本性能是执行机构故障诊断的核心科学问题。近年来,国内外对基于机器学习算法及滤波器的执行机构故障诊断均开展了较为深入的研究。通过卡尔曼滤波器可补偿任何不被滤波器处理的系统非线性,区分故障和模型的不确定性可用于执行机构的故障诊断<sup>[1-3]</sup>。Lamoureux等<sup>[4]</sup>通过系统分析显示主要的降级模式和潜在故障,基于学习算法和分类方法进行故障诊断得到了广泛应用。其中,利用试验数据通过神经网络实现执行机构典型故障的智能诊断<sup>[5-8]</sup>。Siahpour等<sup>[9]</sup>利用跨越迁移学习算法可消除不同传感器数据对诊断效果的影响且诊断精度高。上述方法虽诊断效果良好,但大多基于数据而在故障定位和诊断实时性方面均显不足。

基于阈值比较的故障诊断方法研究中,Cheng xin等<sup>[10]</sup>针对磁悬浮轴承中的执行机构,通过分析调制电流变化特性,将负载电流的等效斜率定义为故障诊断阈值,实现了执行机构的故障诊断。陶文华等<sup>[11]</sup>利用关系矩阵法将不同执行机构对系统的影响进行分离,发动机输出和执行机构指令形成残差,其与阈值比较,从而诊断出执行机构故障。蒋平国等<sup>[12]</sup>通过LVDT将对象输出作为反馈与数学模型的计算值得到残差,与阈值比较以实现故障诊断。但上述方法受传感器故障影响,杨士权<sup>[13]</sup>把执行机构

故障和传感器故障进行隔离能够有效降低误诊率;另一方面何皑等<sup>[14]</sup>通过正交子空间投影来削弱干扰因素对残差的影响,从而提高诊断精度。通过阈值比较的方法不依赖于试验数据,结合观测器有望实现故障诊断及故障定位。

近年来基于滑模观测器的执行机构故障诊断方法受到了越来越多的关注。Tan等<sup>[15]</sup>针对执行机构系统受到干扰不确定性的特点,滑模观测器使其对故障信号重构的影响最小化。高阶滑模可使设计的控制信号连续并削弱高频抖振的不利影响,但模型中存在的不确定性和未知扰动对系统输出影响明显,对系统线性度高度依赖。对此,Tan<sup>[16]</sup>等提出了级联滑模观测器对执行机构进行故障诊断。

以上表明,自适应滑模观测器使用非线性高增益反馈迫使估计状态逼近超平面,滑模变结构响应速度快,对参数变换和扰动不敏感,具有强鲁棒性。传统执行机构故障诊断极少开展故障定位及故障类型判别。本文提出一种基于自适应滑模观测器的进气压力调节执行机构故障诊断方法,对典型故障进行诊断与定位。考虑轮盘式特种调节阀对执行机构负载力作用,建立了符合故障诊断需求的电液伺服执行机构非线性模型,基于参数识别获得执行机构状态空间模型且设计了自适应滑模观测器,基于执行机构模型设置故障等效的对应主导特征参数,分析判别执行机构典型液压、电气和机械故障,仿真验证自适应滑模观测器对上述故障的诊断与定位效果。

## 2 执行机构建模

高空台进气压力调节系统的电液伺服执行机构采用射流管伺服阀,可满足室外环境条件对执行机构元件抗污染等要求。基于射流管伺服阀的阀控缸电液伺服执行机构组成原理如图1所示。图1中 $p_1$ ,  $p_2$ 分别为液压缸高压腔和低压腔压力; $m_1$ 为被控对象质量; $x_{cp}$ 为液压缸活塞杆位移; $F_L$ 为负载力; $F_f$ 为摩擦力; $p_s$ 为伺服阀供油压力; $u$ 为伺服阀输入信号。

图2为进气压力调节系统特种阀执行机构故障诊断流程。取电液伺服执行机构伺服阀阀芯位移、液压缸活塞速度和液压缸高压腔压力为可观测状态参数,自适应滑模观测器将状态参数与其对应观测

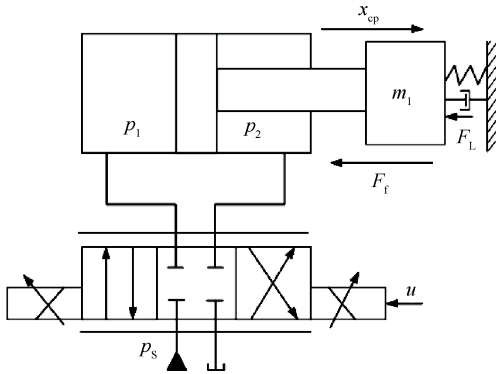


Fig. 1 Diagram of electro-hydraulic actuator

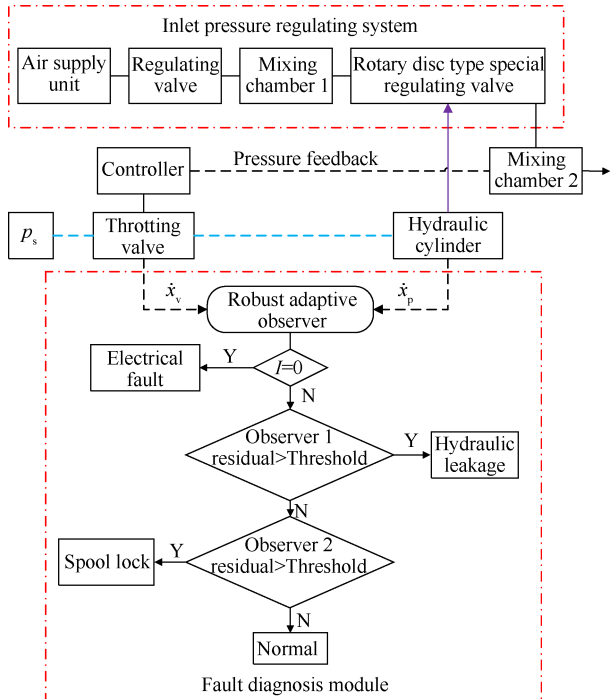


Fig. 2 Block diagram of fault diagnosis with robust adaptive observer

输出对比形成残差,根据自适应阈值判断电液伺服执行机构发生故障的位置及故障类别。

## 2.1 数学模型

射流管电液伺服阀动力学方程如下

$$e_c = R_c i + N_c \frac{d\varphi_a}{dt} = \frac{1}{2} R_c i_c + 2 \frac{aN_c \varphi_g}{g} \frac{d\theta}{dt} + \frac{N_c^2}{R_g} \frac{di_c}{dt} \quad (1)$$

式中  $e_c, R_c, \varphi_a, N_c, \varphi_g, i_c$  分别为线圈电动势、每个线圈电阻、通过衔铁的磁通、每个控制线圈匝数、衔铁中位时每个气隙的固定磁通、控制电流。

$$M_d = J_a \frac{d^2\theta}{dt^2} + B_a \frac{d\theta}{dt} + K_a \theta + lK_f(x_j + x_v) \quad (2)$$

式中  $M_d, J_a, B_a, K_a, K_f, l, x_v, x_j$  分别为衔铁所受的力矩、衔铁的转动惯量、阻尼系数、弹簧管刚度、反馈杆刚度、转动中心到弹簧管末端距离、阀芯位移、射流喷

嘴端面位移。

$$p_1 = (\rho f_1 (1 - \varphi \lambda)^2 (v_p + v_{k1})^2 + \rho (f_k - f_1 (1 - \varphi \lambda)^2) \frac{v_p f_1 (1 - \varphi \lambda)^2 + v_{k1} f_k}{f_k - f_1 (1 - \varphi \lambda)^2} - v_{k1}) / f_k \quad (3)$$

$$p_2 = (\rho f_2 (1 - \varphi \lambda)^2 (v_p - v_{k1})^2 + \rho (f_k - f_2 (1 - \varphi \lambda)^2) \frac{v_p f_2 (1 - \varphi \lambda)^2 + v_{k2} f_k}{f_k - f_2 (1 - \varphi \lambda)^2} + v_{k2}) / f_k \quad (4)$$

式中  $p_1, p_2, v_p, v_{k1}, v_{k2}$  分别为左右孔恢复压力、喷嘴端面油液速度、左右接收孔中油液的平均速度;  $\lambda$  为射流喷嘴与接收孔之间的相对距离;  $\varphi$  为射流系数;  $f_k, f_1, f_2$  分别为接收孔截面积、左右接受孔遮盖面积。

$$p_f A_v = m_v \frac{d^2 x_v}{dt^2} + (K_f + K_v) x_v \quad (5)$$

式中  $A_v, m_v, K_v, K_f, p_f$  分别为滑阀截面积、滑阀质量、稳态液动力刚度、负载压差。

执行机构液压缸活塞力平衡方程为

$$m_{ep} \ddot{x}_{ep} + c_{ep} \dot{x}_{ep} = (p_1 - p_2) A_{ep} - F_f - F_L \quad (6)$$

式中  $m_{ep}, c_{ep}, x_{ep}, A_{ep}, F_f, F_L, p_1, p_2$  分别为等效负载质量、阻尼系数、液压缸活塞位移、活塞有效截面积、摩擦力、外负载力、活塞两侧压力。

进气压力调节系统中,轮盘式特种调节阀为执行机构的驱动对象,其调节阀瓣前后气压及所受摩擦力、惯性力等均被直接或间接传递并作用于执行机构,液压缸驱动阀瓣运动的受力分析如图 3 所示,图中  $F_g$  为阀瓣上的气压,  $F_r$  为阀瓣上的周向力,  $M_t$  为阀瓣的转动惯量,  $F_L$  为液压驱动力。

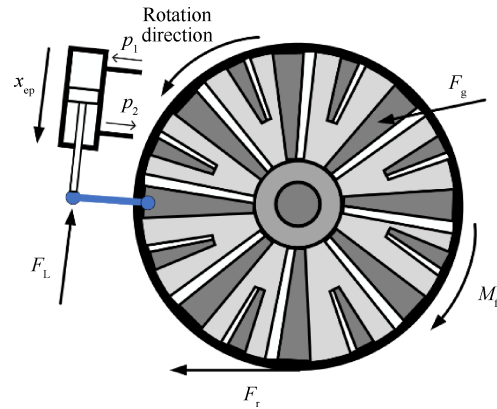


Fig. 3 Force diagram of valve disk with the cylinder

阀瓣上的气压为

$$F_g = S_1 p_3 - S p_4 \quad (7)$$

式中  $p_3, p_4$  为调节阀前后压力;  $S$  为阀瓣面积;  $S_1$  为调节阀的开口面积。

阀瓣间摩擦力为

$$F_f = \mu F_g \quad (8)$$

式中 $\mu$ 为摩擦系数。

阀瓣调节过程中液压缸活塞杆施加的液压驱动力为

$$F_L = \mu(S_1 p_1 - S_2 p_2) + \frac{mR\beta}{2t^2} \quad (9)$$

式中 $m$ 、 $R$ 和 $\beta$ 分别为阀瓣的质量、半径和转角。

## 2.2 AMESim 模型

由于常规数学模型无法向自适应观测器提供所需的故障参数,为验证故障诊断方法有效性,基于上节所描述的执行机构数学模型利用 AMESim 建立(如图4所示)执行机构非线性模型。

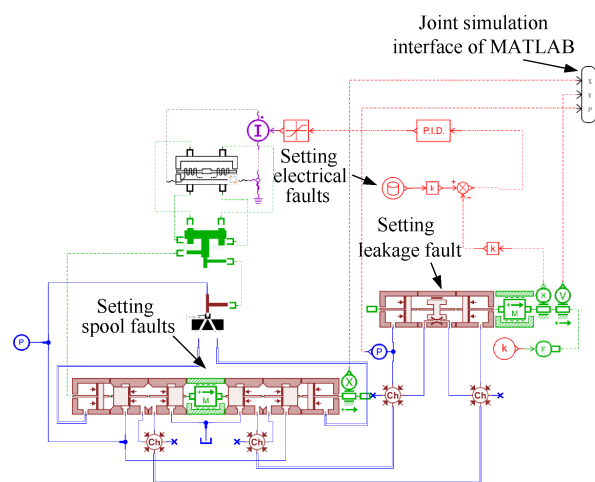


Fig. 4 AMESim model of whole system

该模型为代替实物的虚拟样机,可通过改变主导特征参数以模拟执行机构典型故障,各主要状态参数以 AMESim/MATLAB 联合仿真方式为自适应滑模观测器提供故障诊断的输入数据。

基于 AMESim 模型的故障植入方法为:

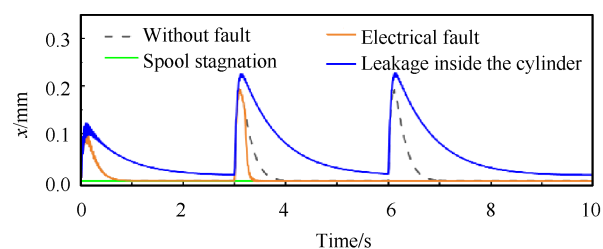
(1) 泄漏故障:缸发生内泄漏本质是活塞和缸体密封间隙或高低压腔压差增加导致的(如磨损或过载),考虑两腔压差主要由负载及工况决定,取活塞和缸壁间间隙作为主导特征参数。基于执行机构 AMESim 模型设置与泄漏量对应的间隙大小以模拟液压缸泄漏故障。

(2) 阀芯卡滞故障:阀芯卡滞由于阀内颗粒堆积即某时刻起阀芯无法运动,故取阀芯位移作该故障对应的主导特征参数,基于执行机构模型设置与卡滞程度对应的限位条件以模拟阀芯卡滞。

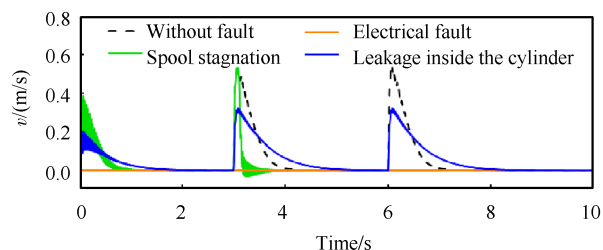
(3) 电气断路故障:断线是伺服阀常见的电气故障形式,一般线圈电流会出现明显变化。将伺服阀输入电流信号作为主导特征参数,基于执行机构模型设

置符合伺服阀断线对应的电流信号以模拟该故障。

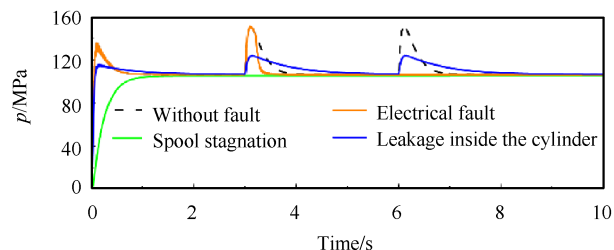
图5为上述三种典型故障情况下所选取状态参数(液压缸活塞速度、阀芯位移、液压缸高压腔压力)的响应曲线。由此得出,不同故障时对应的状态参数表征差异较为显著,可为自适应滑模观测器提供有效的故障诊断信息和依据。



(a) Spool displacement



(b) Piston speed



(c) Pressure in high cavity of the cylinder

Fig. 5 Comparison of dynamic parameters under three typical faults

## 3 自适应滑模观测器设计

本文基于执行机构模型设计了滑模观测器。发生典型液压、电气和机械故障时,执行机构模型输出伺服阀阀芯位移、液压缸活塞速度和液压缸高压腔压力可作为故障诊断和故障部位判别的主导特征状态参数。自适应滑模观测器观测上述状态参数并获得相应残差,为故障诊断及故障定位提供判断依据。

基于伺服阀动态特性方程、系统偏差输入方程、伺服阀的负载流量方程、液压缸流量连续性方程、系统力平衡方程等基本方程,建立电液伺服执行机构的状态空间模型,即

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}\end{aligned}\quad (10)$$

式中  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$  为系统矩阵, 控制矩阵和输出矩阵;  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n; \mathbf{u} \in \mathbb{R}^m; \mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$  分别为电液伺服执行机构的状态、输入、输出向量;  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  为满足 Lipschitz 条件的已知非线性项。

基于诊断要求, 系统满足以下假设:

假设 1:  $\text{rank}(\mathbf{C}\mathbf{D}) = \text{rank}(\mathbf{D})$ ;

假设 2: 对每一个具有负实部的变量满足

$$\text{rank}\begin{bmatrix} s\mathbf{I} - \mathbf{A} & \mathbf{D} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = \text{rank}(\mathbf{D}) + n \quad (11)$$

式中  $s$  为常数,  $\mathbf{I}$  为单位矩阵,  $n$  为  $\mathbf{x}$  的维数。

系统满足假设 1, 对状态变量  $\mathbf{u}$  和输出变量  $\mathbf{y}$ , 存在以下线性变换

$$\mathbf{q} = \mathbf{T}\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{T}_2 \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{g} = \mathbf{S}\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \end{bmatrix} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1 \\ \mathbf{g}_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

使变换后的非线性系统系数矩阵满足

$$\mathbf{T}\mathbf{A}\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_3 & \mathbf{A}_4 \end{bmatrix} \mathbf{T}\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{S}\mathbf{C}\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中  $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{nn}, \mathbf{S} \in \mathbb{R}^{pp}, \mathbf{q}_1 \in \mathbb{R}^r, \mathbf{q}_2 \in \mathbb{R}^{n-r}, \mathbf{g}_1 \in \mathbb{R}^r, \mathbf{g}_2 \in \mathbb{R}^{n-r}, \mathbf{D}_1$  和  $\mathbf{C}_1$  可逆。

当且仅当系统满足假设时, 系统  $(\mathbf{A}_4, \mathbf{C}_4)$  可检测。

传统的滑模观测器设计为  $\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{G}_n\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{v} = \rho \text{sgn}(\mathbf{e}_y) = \rho \mathbf{e}_y / \|\mathbf{e}_y\|$ ,  $\mathbf{e}_y$  是输出残差,  $\mathbf{v}$  是高频不连续项。不连续系统不便于数字仿真且增加滑模抖振, 因此在分母增加一个常数项使其“平滑”。对于传统的滑模观测器, 增加一个误差反馈项的目的是使滑动区域增加且滑模面可到达, 误差可二次稳定, 即误差收敛。

基于电液伺服执行机构设计自适应滑模观测器可得

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\mathbf{x}}} &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{G}_1\mathbf{e}_y + \mathbf{G}_n\mathbf{v}(t) \\ \hat{\mathbf{y}} &= \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}\end{aligned}\quad (14)$$

式中  $\mathbf{G}_n = \begin{bmatrix} -\mathbf{L} \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix} \mathbf{C}_2^{-1}$  为非线性项增益,  $\mathbf{G}_1$  为增益矩阵;  $\mathbf{I}_p$  为  $p$  阶的单位矩阵,  $\mathbf{L} = [\mathbf{L}_1 \mathbf{0}]$ ,  $\mathbf{L}_1 \in \mathbb{R}^{(n+h-p)(p-q-h)}$ ;  $\mathbf{e}_y$  为输出误差。

$\mathbf{v}(t)$  为滑模变结构输入信号, 即

$$\mathbf{v}(t) = \begin{cases} (\eta(t) + \eta_0) \left\| \mathbf{D}_2 \mathbf{C}_2 \right\| \frac{\mathbf{e}_y}{\|\mathbf{e}_y\| + \delta}, & \mathbf{e}_y \neq \mathbf{0} \\ \mathbf{0}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

式中  $\eta(t)$  为所设计的自适应律, 自适应律及  $\mathbf{C}_1, \mathbf{D}_2$  项是为了使非线性项能够围绕滑模面切换, 并驱动  $\mathbf{e}_y$  至滑模面的运动, 滑模面的定义为  $s = \{\mathbf{e}_y : \mathbf{e}_y = \mathbf{0}\}$ , 且有

$$\frac{d\eta(t)}{dt} = \rho \left\| \mathbf{P}_2 \mathbf{C}_2 \mathbf{D}_2 \right\| \left\| \mathbf{e}_y \right\| \quad (16)$$

式中  $\rho, \eta$  为大于 0 的常数, 定义状态估计误差为  $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$ 。

设非线性项增益具有如下结构, 即

$$\mathbf{G}_n = \begin{bmatrix} -\mathbf{K} \\ \mathbf{I}_p \end{bmatrix} \mathbf{T}^T \mathbf{P}_0^{-1} \quad (17)$$

式中  $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{pp}$  为正交矩阵,  $\mathbf{K} = [\mathbf{K}_0 \mathbf{0}]$ ,  $\mathbf{K}_0 \in \mathbb{R}^{(n-p)(p-q)}$ ,  $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P}_0^T$  为非线性增益项所设计的矩阵。

对于正定对称矩阵  $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{nn}$ , 当

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 & \mathbf{P}_1 \mathbf{K} \\ \mathbf{K}^T \mathbf{P}_1 & \mathbf{T}^T \mathbf{P}_0 \mathbf{T} + \mathbf{K}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{K} \end{bmatrix} > \mathbf{0} \quad (18)$$

式中  $\mathbf{P}_1 \in \mathbb{R}^{(n-p)(n-p)}$  为正定对称矩阵, 且满足  $\mathbf{P}\mathbf{A}_L + \mathbf{A}_L^T < \mathbf{0}$  和  $\rho \geq \left\| \mathbf{P}_0 \mathbf{C}_0 \right\| \alpha + \eta_0$ ;  $\eta_0$  为一任意大小的正实数, 则  $\|\mathbf{e}_x\|$  稳定有界,  $\mathbf{G}_n$  能够在满足  $\mathbf{P}\mathbf{A}_L + \mathbf{A}_L^T < \mathbf{0}$  和  $\mathbf{A}_0 + \mathbf{L}\mathbf{C}_0 < \mathbf{0}$  的条件下求解。

无故障时执行机构模型与观测器估计的状态量差值  $r$  可视为随机变量, 可保证估计残差收敛, 则设其数学期望  $E(r) = \mu$ , 标准差为  $S(r) = \sigma$ 。

阈值上界选为

$$\text{Th}_{\max}(r) = E(r) + nS(r) \quad (19)$$

式中  $\text{Th}_{\max}(r)$  为阈值上界,  $n$  为带宽系数,  $n > 0$ 。

给定阈值上界式 (19), 则虚警率不高于  $\frac{1}{n^2}$ 。

证明: 对于残差  $r$ , 其数学期望  $E(r) = \mu$ , 方差  $S(r) = \theta^2$ , 则下式成立

$$P(|r - E(r)| \geq \varepsilon) \leq \frac{\theta^2}{\varepsilon^2} \quad (20)$$

式中  $\varepsilon$  为一正常数。

证明: 令概率密度函数为  $f(x)$ , 则有

$$P(|r - E(r)| \geq \varepsilon) = \int_{|r - E(r)| \geq \varepsilon} f(x) dx \quad (21)$$

标准差的定义为

$$S(r) = E(r - E(r))^2 \quad (22)$$

则有

$$\frac{\theta^2}{\varepsilon^2} = \frac{E(r - E(r))^2}{\varepsilon^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} (r - E(r))^2 f(x) dx \quad (23)$$

积分区域  $|r - E(r)| \geq \varepsilon$  是比积分区域  $(-\infty, +\infty)$

小, 且  $\frac{r - E(r)}{\varepsilon} \geq 1, \frac{(r - E(r))^2}{\varepsilon^2} \geq 1$ , 则

$$\begin{aligned}P(|r - E(r)| \geq \varepsilon) &= \int_{|r - E(r)| \geq \varepsilon} f(x) dx \leq \\ \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx &\leq \frac{1}{\varepsilon^2} \int_{-\infty}^{+\infty} |r - E(r)|^2 f(x) dx = \frac{\theta^2}{\varepsilon^2}\end{aligned} \quad (24)$$

令  $\varepsilon = n\theta$ , 有  $P(|r - u|) \geq n\theta \leq \frac{1}{n^2}$ , 即虚警率不

高于  $\frac{1}{n^2}$ 。

证毕!

数学期望和标准差可由在线统计的样本平均值  $\bar{X}(r)$  和样本均标准差  $\bar{S}(r)$  代替。

$$\bar{X}(r) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i \quad (25)$$

$$\bar{S}(r) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{X}(r))^2} \quad (26)$$

为减少计算量和存储空间,采用递推算法,即

$$\bar{X}(r)_N = \bar{X}(r)_{N-1} + \frac{1}{N} (r_N - \bar{X}(r)_{N-1}) \quad (27)$$

$$\bar{S}(r)_N = \sqrt{\frac{N-2}{N-1} \bar{S}(r)_{N-1}^2 + \frac{1}{N-1} (r_N - \bar{X}(r)_{N-1})^2} \quad (28)$$

以上给出了阈值上界的计算方法,阈值下界采用通过经验获得的固定阈值,由下式计算

$$\text{Th}_{\min}(r) = r - aS(r) \quad (29)$$

式中  $r$  为观测器残差,  $\text{Th}_{\min}(r)$  为阈值下界,  $a$  为选取的常数,  $a > 0$ 。

#### 4 典型故障诊断仿真验证

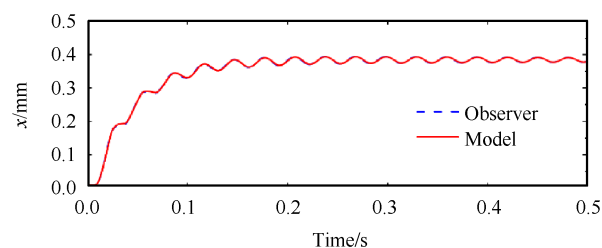
为模拟实际系统的故障,通过设置对应主导特征参数:液压缸泄漏系数(初始值为 0.1mm)、阀芯限位(初始值为 -5mm 和 5mm)和伺服阀控制电流(初始值为 0.015A 阶跃),以所取的主导特征状态参数(阀芯位移、液压缸活塞速度、液压缸高压腔压力)的实际输出与对应观测输出的残差,对比自适应阈值判断电液伺服执行机构故障类型及故障部位。

图 6 为执行机构无故障时状态参数与相应观测器输出、残差与自适应阈值。图 6(a)、图 6(c) 和图 6(e) 看出,观测器输出对模型状态参数(阀芯位移、液压缸速度以及液压缸高压腔压力)跟踪效果良好。图 6(b)、图 6(d) 和图 6(f) 看出,观测器输出与其对应模型状态参数的残差均不超出上下阈值。阈值随时间变化,并非固定大小,具有较好的自适应性。

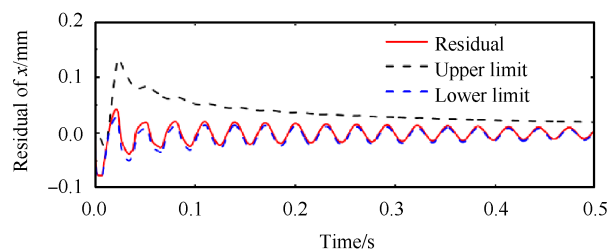
4.1~4.4 节均为植入故障后进气系统压力调节开始时的执行机构故障诊断仿真结果。

##### 4.1 泄漏故障

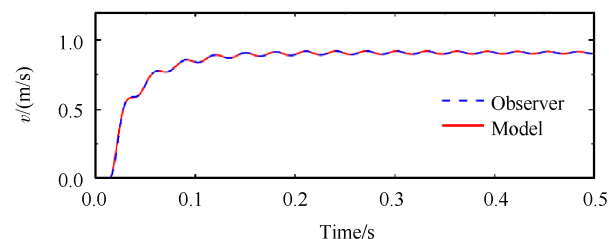
基于执行机构 AMESim 模型设置了与泄漏量对应的间隙大小(泄漏系数设置为 0.35)以输出发生该故障时执行机构的相关状态参数(阀芯位移、液压缸活塞速度及液压缸高压腔压力),并与自适应滑模观测器的输出进行对比。图 7 即为执行机构液压缸泄漏故障时,状态参数与相应观测器输出、残差与阈值。图 7(a) 和图 7(b) 显示,阀芯位移的观测器输出



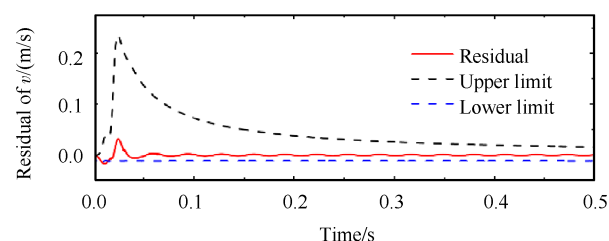
(a) Spool displacement



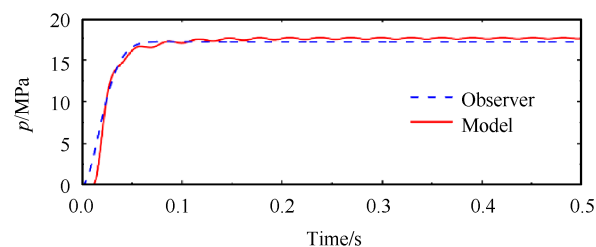
(b) Residual of spool displacement



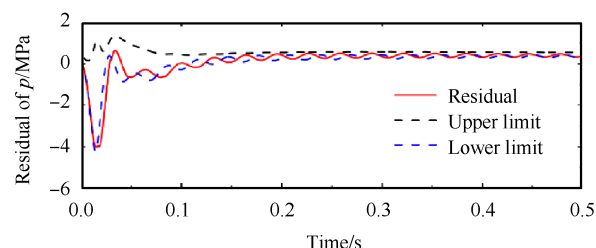
(c) Piston speed



(d) Residual of piston speed



(e) Pressure in high cavity of the cylinder



(f) Residual of the pressure in high cavity of the cylinder

Fig. 6 Fault-free observation effect

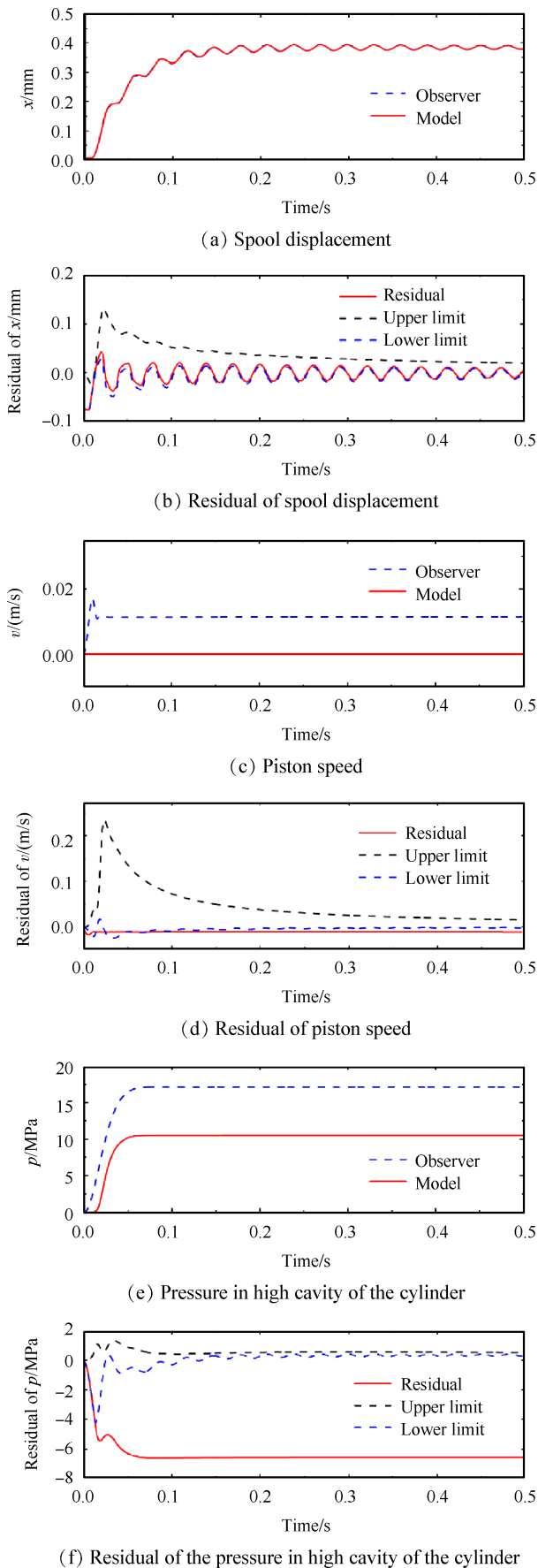


Fig. 7 Observation effect for leakage inside the cylinder

能够跟踪阀芯位移响应且近乎重合,两者残差位于阈值上下限之间。图7(c)和图7(d)中,液压缸活塞速度的观测器输出始终未能跟踪实际活塞速度响应,两者残差低于阈值下限。图7(e)和图7(f)中,液压缸高压腔压力的观测器输出未能跟踪实际压力响应,两者残差始终远小于阈值下限。

#### 4.2 阀芯卡滞故障

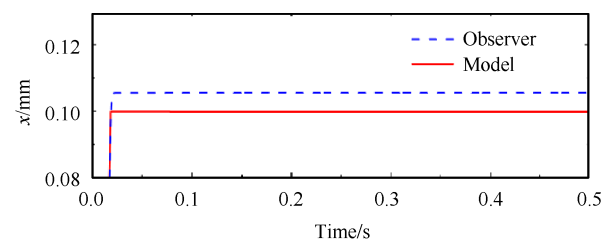
基于执行机构 AMESim 模型设置与卡滞程度对应的限位条件(阀芯限位设置为0)以模拟阀芯卡滞。图8即为阀芯卡滞故障时,状态参数与相应观测器输出、残差及阈值曲线。图8(a)和图8(b)中,阀芯位移的观测器输出未能跟踪实际阀芯位移响应,两者残差低于阈值下限。图8(c)和图8(d)中,液压缸活塞速度的观测器输出未能跟踪对应实际信号,两者残差于仿真后段略低于阈值下限。图8(e)和图8(f)中,液压缸高压腔压力的观测器输出未能跟踪实际压力响应,两者残差始终远小于阈值下限。

#### 4.3 断线故障

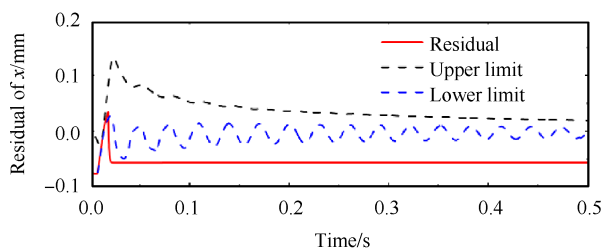
基于执行机构 AMESim 模型设置了符合伺服阀断路对应的电流信号(设置0.42s时,电流为0)以模拟该断线故障。图9即为断线故障时,状态参数与相应观测器输出、残差及阈值曲线。图9(a)和图9(b)中,0.42s时阀芯位移的观测器输出未能跟踪实际阀芯位移响应,两者残差在0.42s时骤降且低于阈值下限。图9(c)和图9(d)中,0.42s时液压缸活塞速度的观测器输出未能跟踪实际活塞速度响应,两者残差在0.42s时低于阈值下限。图9(e)和图9(f)中,0.42s时液压缸高压腔压力的观测器输出未能跟踪实际压力响应,两者残差在0.42s时骤降且远低于阈值下限。

#### 4.4 多故障并发

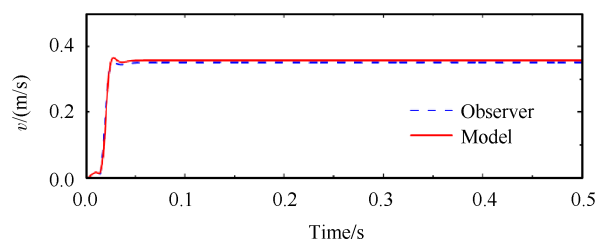
基于执行机构 AMESim 模型设置了符合伺服阀断线的电流信号(0.42s时电流为0)及与泄漏量对应的间隙(泄漏系数为0.2mm)以模拟断线和泄漏故障同时发生。图10(a)和图10(b)中,0.42s时阀芯位移观测器输出未能跟踪实际阀芯位移响应,两者残差因发生断线故障骤降且低于阈值下限。图10(c)和图10(d)中,0.42s前因泄漏故障,观测器输出跟踪效果不佳,0.42s时由于断线故障,液压缸活塞速度观测器输出未能跟踪对应的实际参数,两者残差低于阈值下限。图10(e)和图10(f)中,泄漏故障时,液压缸高压腔压力的观测器输出未能跟踪对应的实际参数,两者残差低于阈值下限,且因0.42s时发生断线而明显下降。上述分析可判断故障发生且能够根据观测器输出与残差变化趋势判断泄漏故障和断线故障同时发生。



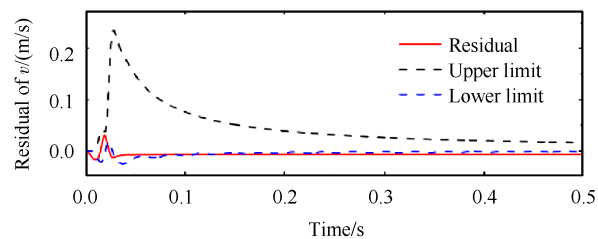
(a) Spool displacement



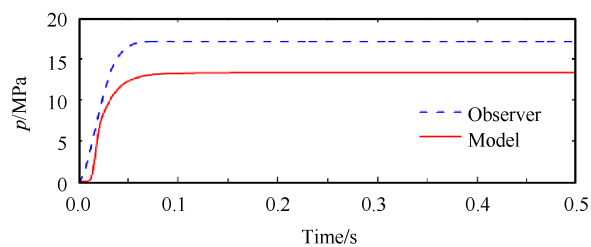
(b) Residual of spool displacement



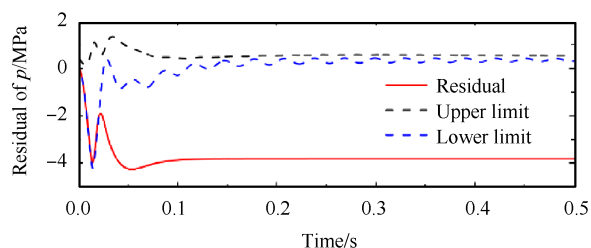
(c) Piston speed



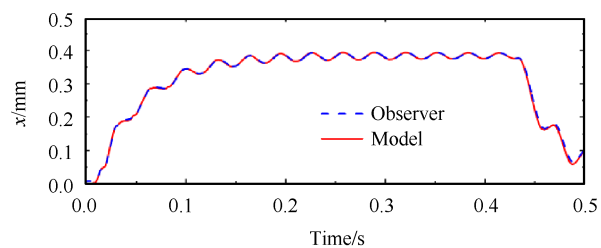
(d) Residual of piston speed



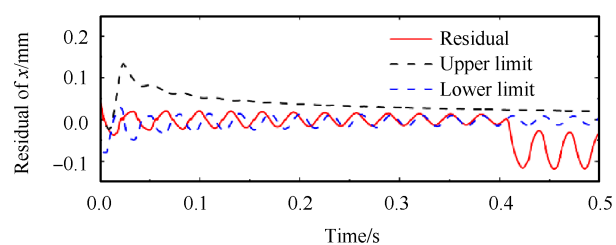
(e) Pressure in high cavity of the cylinder



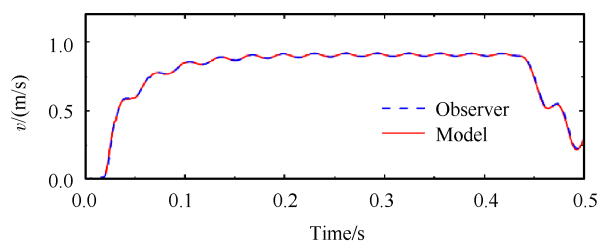
(f) Residual of the pressure in high cavity of the cylinder

**Fig. 8 Observation effect for spool stagnation**

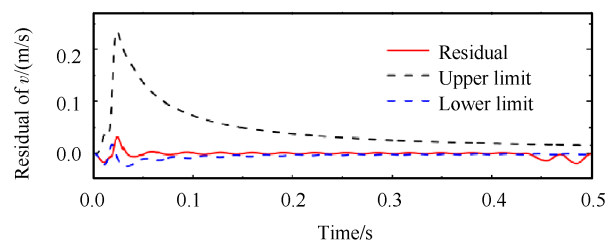
(a) Spool displacement



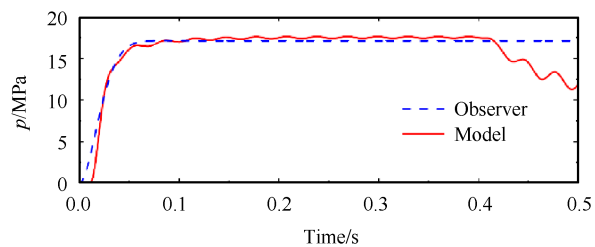
(b) Residual of spool displacement



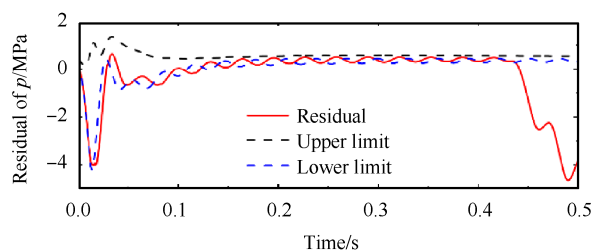
(c) Piston speed



(d) Residual of piston speed



(e) Pressure in high cavity of the cylinder



(f) Residual of the pressure in high cavity of the cylinder

**Fig. 9 Observation effect for broken-line fault**

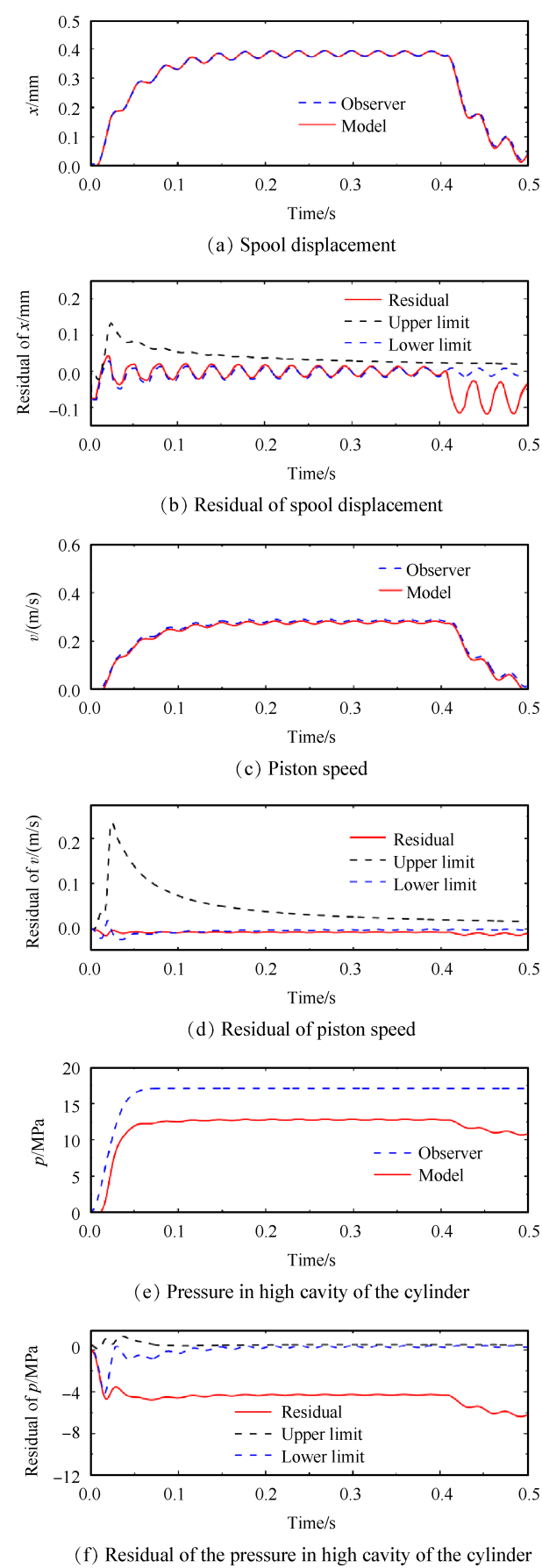


Fig. 10 Observation effect for synchronous broken-line and leakage faults

4.5 诊断结论

对上述故障诊断方法进行多次仿真验证,分析得出:

(1)除阀芯位移,其余观测器输出未能跟踪其状态参数且对应残差均低于阈值下限,可判定执行机构发生液压缸泄漏故障。

(2)除液压缸活塞速度,其余观测器输出未能跟踪其状态参数且对应残差均远低于阈值下限,可判定执行机构发生阀芯卡滞故障。

(3)全部观测器输出未能跟踪其状态参数且对应残差均低于阈值下限,可判定执行机构发生断线故障。

(4)基于各故障发生时观测器输出与对应残差特有的变化趋势可判定多故障同时发生。

为将故障诊断准确度量化,定义故障诊断准确度为

$$\gamma = \frac{N}{M} \times 100\% \tag{30}$$

式中  $M$  为发生故障后的采样次数,  $N$  为发生故障后前  $M$  次采样中观测器残差大于阈值上界或低于阈值下限的采样次数。

本故障诊断算法精度如表 1 所示,由于每个故障采样次数不同,本表将采样次数归一化。发生故障后,改变了滑模观测器的滑模运动。但在变结构作用下,观测残差也会逐渐收敛直至超出阈值范围。表 1 中可看出,当采样次数足够多,三种典型故障的准确率均可达 91% 以上。

| Table 1           | Fault diagnosis accuracy (%) |       |       |       |       |
|-------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Sampling times    | 0.2                          | 0.4   | 0.6   | 0.8   | 1.0   |
| Spool stagnation  | 67.60                        | 83.80 | 89.20 | 91.90 | 93.52 |
| Leakage fault     | 64.25                        | 82.10 | 89.10 | 91.10 | 92.80 |
| Broken-line fault | 56.50                        | 78.25 | 85.50 | 89.20 | 91.30 |

5 结 论

本文通过研究,得到如下结论:

(1)所建立的电液执行机构非线性模型可描述特种调节阀的负载特性,可获得执行机构多状态参数的动态数据。基于相应故障的失效机理注入的信号,可模拟典型机械、液压、电气故障,各参数符合特定故障下的特征。

(2)根据阀芯位移和液压缸活塞速度等执行机构状态参数,仿真环境下基于自适应滑模观测器的故障诊断方法对电液伺服执行机构典型液压、机械、电气故障的诊断准确率分别达 92.8% ,93.52% 和

91.3%,可为高空台进气压力调节系统电液伺服执行机构在线故障诊断实践与应用提供理论参考。

**致 谢:**感谢中国航发四川燃气涡轮研究院稳定支持项目的资助。

## 参考文献

- [ 1 ] Junhan L, Park C G. Cascade Filter Structure for Sensor/actuator Fault Detection and Isolation of Satellite Attitude Control System[J]. *International Journal of Control Automation and Systems*, 2012, 10(3): 506–516.
- [ 2 ] Yedavalli R K. Robust Estimation and Fault Diagnostics for Aircraft Engines with Uncertain Model Data[C]. *New York: American Control Conference, IEEE*, 2007.
- [ 3 ] Hasan A, Johansen T A. Model-Based Actuator Fault Diagnosis in Multirotor UAVs[C]. *Dallas: International Conference on Unmanned Aircraft Systems*, 2018.
- [ 4 ] Lamoureux B, Masse J R, Mechbal N. An Approach to the Health Monitoring of the Fuel System of a Turbofan[C]. *Denver: 2012 IEEE Conference on Prognostics and Health Management(PHM)*, 2012: 1–6.
- [ 5 ] 张文广, 李浩瀚, 蔺 媛, 等. 基于EWT-DKELM的控制系统执行器故障诊断方法研究[J]. *机电工程*, 2022, 39(4): 444–451.
- [ 6 ] 姜 洁, 李秋红, 张高钱, 等. 基于NN-ELM的航空发动机燃油系统执行机构故障诊断[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(2): 484–492.
- [ 7 ] Peng K. Sensor and Actuator Fault Diagnosis for Robot Joint Based on Deep CNN[J]. *Entropy*, 2021, 23(6): 751.
- [ 8 ] Hongmei L, Jiayao J, Jian M. Fault Diagnosis of Electro-mechanical Actuator Based on VMD Multifractal Detrended Fluctuation Analysis and PNN [J]. *Complexity*, 2018, 2018: 1–11.
- [ 9 ] Siahpour S, Li X, Lee J. Deep Learning-Based Cross-Sensor Domain Adaptation for Fault Diagnosis of Electro-Mechanical Actuators [J]. *International Journal of Dynamics and Control*, 2020, 8(3): 1054–1062.
- [ 10 ] Cheng X, Deng S, Cheng B X. Design and Implementation of a Fault-Tolerant Magnetic Bearing Control System Combined with a Novel Fault-Diagnosis of Actuators [J]. *IEEE Access*, 2020, 99: 2454–2465.
- [ 11 ] 陶文华, 叶志锋. 关系矩阵法在发动机执行机构故障检测中的应用[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(8): 1872–1877.
- [ 12 ] 蒋平国, 姚 华, 孙健国. 航空发动机数控系统执行机构回路故障诊断和容错控制方法[J]. *航空动力学报*, 2005, 10(4): 282–286.
- [ 13 ] 杨士权. 航空发动机执行机构故障诊断与容错控制 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [ 14 ] 何 颢, 覃道亮, 孔祥兴. 基于UIO的航空发动机执行机构故障诊断[J]. *推进技术*, 2012, 33(1): 98–104. (HE Kai, TAN Dao-liang, KONG Xiang-xing. UIO-Based Diagnosis of Aeroengine Actuator Faults [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(1): 98–104.)
- [ 15 ] Tan C P, Edwards C. Sliding Mode Observers for Robust Detection and Reconstruction of Actuator and Sensor Faults[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2010, 13(5): 443–463.
- [ 16 ] Tan C P, Crusca F, Aldeen M. Extended Results on Robust State Estimation and Fault Detection [J]. *Automatica*, 2008, 44(8): 2027–2033.

(编辑:白 鹭)