

基于扩展 Kalman 滤波器组的 ECAS 系统 传感器故障诊断*

陈 龙¹, 单海强¹, 徐 兴¹, 崔晓利²

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院 镇江, 212013) (2. 湖南工学院机械工程学院 衡阳, 421002)

摘要 针对电控空气悬架(electronically controlled air suspension, 简称 ECAS)系统在车高调节过程中由于传感器故障频发导致控制效果变差的问题, 提出一种能够对电控空气悬架系统传感器故障进行诊断的方法。首先, 采用 AMESim 软件搭建 ECAS 系统物理模型以实现空气弹簧特性的精确描述, 同时在 Matlab/Simulink 中搭建路面激励和传感器故障的数学模型; 其次, 针对车辆 ECAS 系统的非线性特性, 采用扩展卡尔曼滤波器组设计故障诊断方案, 并进行不同传感器不同故障类型的联合仿真; 最后, 搭建了 1/4 ECAS 系统台架, 进行车高调节过程中传感器故障诊断试验。试验结果表明, 所提出的方法能够准确地辨识 ECAS 系统传感器的典型故障, 较好地隔离不同的故障传感器, 为 ECAS 系统的准确可靠运行提供了保证。

关键词 电控空气悬架; 车高调节; 传感器故障; 扩展卡尔曼滤波器; 故障诊断

中图分类号 TH165⁺.3; U463.33

引 言

目前, 针对电控空气悬架(ECAS)系统的研究主要集中于通过优化控制方法来改善行驶平顺性、车高调节的有效性和操作稳定性^[1-4]。但是, 以上研究均需以传感器正常工作为前提。实际上, 作为 ECAS 系统的重要部件, 由于传感器长期工作在恶劣条件下很容易发生故障, 导致 ECAS 系统控制效果变差甚至误控制。

故障诊断技术是提高系统运行可靠性及可维修性的重要方法, 在各种行业的控制系统中得到了广泛应用^[5-8]。

在汽车悬架系统中, 故障诊断技术的主要应用如下。Chamseddine^[9-10]等针对发生完全损坏故障的传感器进行了检测与隔离研究, 同时采用滑模控制技术针对液压主动悬架的传感器故障设计了容错控制器。Fischer 等^[11]通过设计观测器来获得系统输出残差, 并对残差进行征状分类从而实现故障传感器的检测隔离。杨柳青等^[12-14]通过设计故障检测

滤波器、自适应观测器以及鲁棒观测器等方法实现汽车液压主动悬架的作动器及传感器故障诊断。高振刚等^[15]基于故障诊断观测器提出了电磁阀式半主动悬架作动器在线故障估计方法, 在有效估计作动器故障幅值的基础上实现了容错控制。Kim 等^[16]采用基于模型的故障诊断方法, 针对闭式空气悬架系统的压力传感器和高度传感器设计了故障自动防护算法。然而以上研究主要针对悬架的线性模型进行故障诊断研究, 所采用的方法无法直接应用到具有强非线性的 ECAS 系统中。

文献^[17-19]建立了 1/4 车 ECAS 单质量系统非线性模型, 该模型仅考虑簧上质量运动, 通过将簧下质量运动与路面激励合并视为干扰简化了 ECAS 系统模型。基于气体热力学原理和车辆动力学理论, 同时考虑簧上与簧下质量运动, 笔者将道路激励视为扰动, 针对气路开式电控空气悬架系统建立 1/4 ECAS 双质量系统非线性模型, 通过基于扩展卡尔曼滤波器组的故障诊断策略实现 ECAS 系统故障传感器的检测和隔离。

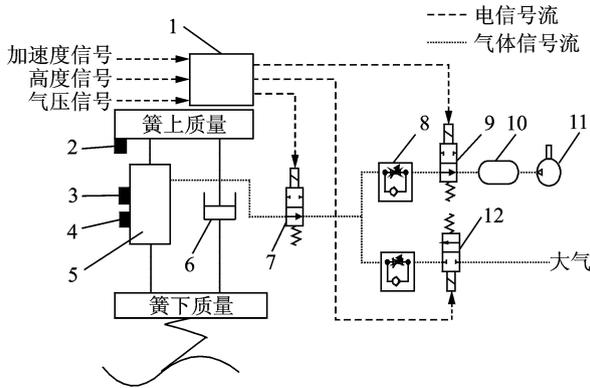
* 国家自然科学基金资助项目(51875256, 51375212), 江苏省自然科学基金资助项目(BK20131255); 湖南省重点研发计划资助项目(2017GK2204); 衡阳市科技发展计划资助项目(2017KJ158)

收稿日期: 2017-04-10; 修回日期: 2017-05-18

1 系统建模

1.1 1/4车 ECAS 系统建模

图1为1/4车气路开式ECAS系统总体结构,主要元件有:传感器、空压机、高压罐、充放气电磁阀和车高控制器等。高度、加速度以及气压传感器分别安装在特定的测量位置。



1-车高控制器; 2-加速度传感器; 3-高度传感器; 4-气压传感器; 5-空气弹簧; 6-减振器; 7-空气弹簧电磁阀; 8-单向阀; 9-充气电磁阀; 10-储气罐; 11-空压机; 12-放气电磁阀

图1 1/4 ECAS系统模型

Fig.1 ECAS system model of quarter vehicle

依据车辆动力学理论,簧上与簧下质量的运动学方程为

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s = (P_1 - P_a) A_e - m_s g + C_0 (\dot{x}_u - \dot{x}_s) \\ m_u \ddot{x}_u = -(P_1 - P_a) A_e + m_u g + C_0 (\dot{x}_s - \dot{x}_u) - k_t (x_u - q) \end{cases} \quad (1)$$

其中: m_s, m_u 为簧上和簧下质量; x_s, x_u 为簧上和簧下质量绝对位移; P_a 为标准大气压; P_1 为空气弹簧内绝对气压; g 为重力加速度; C_0 为减振器阻尼系数; A_e 为空气弹簧有效面积; k_t 为轮胎刚度; q 为道路激励。

作为ECAS系统的主要元件,空气弹簧内部的气体质量变化遵循热力学定律^[20]。电磁阀打开时,空气弹簧充放气模型为

$$\kappa R T_1 \frac{dm_1}{dt} = \kappa P_1 \frac{dV_1}{dt} + V_1 \frac{dP_1}{dt} \quad (2)$$

其中: κ 为空气绝热系数; R 为气体常量; T_1 为空气弹簧内部温度; m_1 为空气弹簧充放气过程中的气体质量; V_1 为空气弹簧容积。

电磁阀关闭后即 $\frac{dm_1}{dt} = 0$, 此时式(2)退化为

$$\frac{dP_1}{dt} = -\frac{\kappa P_1 dV_1}{V_1 dt} \quad (3)$$

根据式(2),(3),可以推导出完整的空气弹簧充放气模型

$$V_1 \dot{P}_1 = -\kappa P_1 \Delta V (\dot{x}_s - \dot{x}_u) + \kappa R T_1 q_m \quad (4)$$

其中: ΔV 为空气弹簧容积变化率; q_m 为空气弹簧充放气时气体质量流量。

车身高度变化过程中,空气弹簧容积会发生突变,其模型建立如下

$$V_1 = V_0 + \Delta V (x_s - x_u) \quad (5)$$

其中: V_0 为空气弹簧初始容积。

通过滤波白噪声法建立路面模型为

$$\dot{q} = -2\pi f_0 q + 2\pi \sqrt{u G_q(n_0)} \omega(t) \quad (6)$$

其中: f_0 为下限截止频率; q 为路面垂向位移; u 为行驶速度; $\omega(t)$ 为白噪声; $G_q(n_0)$ 为路面功率谱密度值; n_0 为参考空间频率。

联立式(1)、式(4)、式(5)和式(6)可得1/4车ECAS系统数学模型(单组空气弹簧)为

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s = (P_1 - P_a) A_e - m_s g + C_0 (\dot{x}_u - \dot{x}_s) \\ m_u \ddot{x}_u = -(P_1 - P_a) A_e + m_u g + C_0 (\dot{x}_s - \dot{x}_u) - k_t (x_u - q) \\ V_1 \dot{P}_1 = -\kappa P_1 \Delta V (\dot{x}_s - \dot{x}_u) + \kappa R T_1 q_m \\ V_1 = V_0 + \Delta V (x_s - x_u) \\ \dot{q} = -2\pi f_0 q + 2\pi \sqrt{u G_q(n_0)} \omega \end{cases} \quad (7)$$

选取簧上质量位移 x_s 、簧上质量速度 \dot{x}_s 、簧下质量位移 x_u 、簧下质量速度 \dot{x}_u 、空气弹簧内部绝对气压 P_1 为状态变量,得 $\mathbf{X} = [x_s \ \dot{x}_s \ x_u \ \dot{x}_u \ P_1]$ 。选取悬架动挠度即空气弹簧高度变化量 $x_s - x_u$ 、簧上质量加速度 \ddot{x}_s 、空气弹簧内部绝对气压 P_1 为量测输出,则 $\mathbf{Y} = [x_s - x_u \ \ddot{x}_s \ P_1]$ 。 v 为测量噪声,将路面激励 q 视为过程噪声, $u = q_m$ 为控制输入。1/4车ECAS系统的状态方程和输出方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}) + \mathbf{g}(\mathbf{X})u + \mathbf{E}q \\ \mathbf{Y} = \mathbf{h}(\mathbf{X}) + \mathbf{v} \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$\mathbf{f}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{C_0}{m_s}(x_4 - x_2) + \frac{A_e}{m_s}(x_5 - P_a) - g \\ x_4 \\ \frac{C_0}{m_u}(x_2 - x_4) - \frac{(x_5 - x_4)A_e}{m_u} + \frac{m_s g}{m_u} - \frac{k_t x_3}{m_u} \\ \frac{-k x_5 \Delta V (x_2 - x_4)}{V_0 + \Delta V (x_1 - x_3)} \end{bmatrix};$$

$$g(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{kRT_1}{V_0 + \Delta V(x_1 - x_3)} \end{bmatrix}; \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_1}{m_u} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$h(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} x_1 - x_3 \\ \frac{C_0}{m_s}(x_4 - x_2) + \frac{A_e}{m_s}(x_5 - P_a) - g \\ x_5 \end{bmatrix}.$$

1.2 传感器故障建模

传感器常见故障分为恒偏差、恒增益变化和卡死^[21]。文中只考虑同一时刻仅存在一个故障传感器的情况。当第 i 个传感器出现故障时,与之对应的量测输出方程为

$$y_{if} = \lambda_i y_i + n_i \quad (9)$$

其中: y_{if} 和 y_i 分别为第 i 个传感器有故障输出和无故障输出; λ_i 为第 i 个传感器恒增益故障系数; n_i 为第 i 个传感器恒偏差值或卡死值; $i=1,2,3$ 分别代表高度、车身加速度和气压 3 个传感器。

传感器故障发生时,ECAS 系统输出为

$$\mathbf{y}_f = \begin{bmatrix} y_{1f} \\ y_{2f} \\ y_{3f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 y_1 + n_1 \\ \lambda_2 y_2 + n_2 \\ \lambda_3 y_3 + n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\lambda_1 - 1)y_1 + n_1 \\ (\lambda_2 - 1)y_2 + n_2 \\ (\lambda_3 - 1)y_3 + n_3 \end{bmatrix} = \mathbf{h}(\mathbf{X}) + \mathbf{v} + \mathbf{F}\mathbf{f} \quad (10)$$

其中: $\mathbf{F} = [\mathbf{F}_1 \quad \mathbf{F}_2 \quad \mathbf{F}_3]^T$ 为故障系数矩阵; $\mathbf{F}_1 = [1 \quad 0 \quad 0]$, $\mathbf{F}_2 = [0 \quad 1 \quad 0]$, $\mathbf{F}_3 = [0 \quad 0 \quad 1]$ 分别为高度、车身加速度、空气弹簧压力传感器故障矩阵; $\mathbf{f} = [f_1 \quad f_2 \quad f_3]^T$ 为传感器故障值矩阵; $f_i = (\lambda_i - 1)y_i + n_i$ 为第 i 个传感器故障值。

2 故障检测与隔离策略

ECAS 系统控制器根据传感器采集的多路信息,通过控制高速开关电磁阀的占空比来调节空气弹簧内部的气体质量。但是当传感器出现故障时,控制器将无法调节空气弹簧的充放气过程。故障检测与隔离 (fault detection and isolation, 简称 FDI) 策略如图 2 所示。

从图 2 可知,3 次测量输出值由传感器测量获得,分别以 3 次测量输出 y_i 与控制器发出的控制信

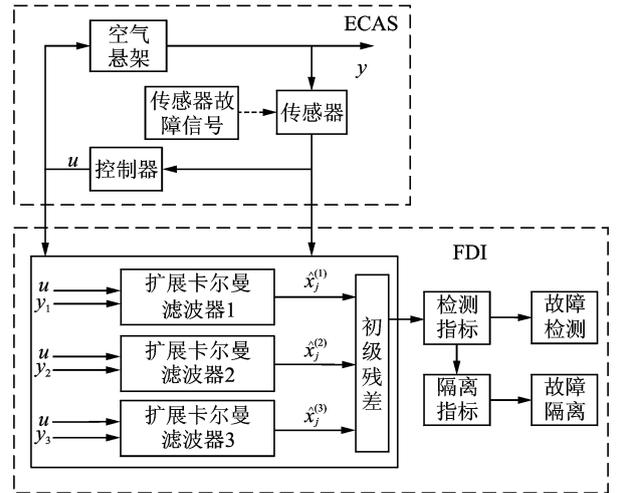


图 2 ECAS 系统传感器故障检测与隔离 (FDI) 策略

Fig. 2 Fault detection and isolation (FDI) strategy of sensors for ECAS system

号 u 作为滤波器输入,设计扩展卡尔曼滤波器,并构成扩展卡尔曼滤波器组,滤波器组中各滤波器独立对 ECAS 系统状态变量进行估计。由此获得检测和隔离指标值,根据指标值与自适应检测阈值的比较结果来实现故障传感器的检测与隔离。

2.1 故障检测方法

定义:状态变量误差 $\bar{x} = x - \hat{x}$, 输出残差 $e = y - \hat{y}$ 。滤波器按照式(8)进行设计。由状态估计值计算获得初级残差如下

$$\begin{cases} r^{(1)} = |\hat{x}_j^{(1)} - \hat{x}_j^{(2)}| \\ r^{(2)} = |\hat{x}_j^{(2)} - \hat{x}_j^{(3)}| \\ r^{(3)} = |\hat{x}_j^{(3)} - \hat{x}_j^{(1)}| \end{cases} \quad (11)$$

其中: $r^{(i)}$ 为初级残差; $\hat{x}_j^{(i)}$ 为状态估计; i 为传感器编号 ($i=1\sim 3$); j 为状态估计值编号 ($j=1\sim 3$)。

由式(11)计算获得的初级残差具有一般性,对于 1/4 ECAS 系统,其特性如表 1 所述。

表 1 初级残差特性描述

Tab. 1 Signature for primary residual

初级残差	$r^{(1)}$	$r^{(2)}$	$r^{(3)}$
传感器均无故障	0	0	0
传感器 1 故障	1	0	1
传感器 2 故障	1	1	0
传感器 3 故障	0	1	1

由各滤波器所得的第 j 个状态估计 $\hat{x}_j^{(i)}$ 来计算故障检测指标值,故障检测指标值如下

$$\begin{cases} r^{(1)} = |\hat{x}_j^{(1)} - \hat{x}_j^{(2)}| \\ r^{(2)} = |\hat{x}_j^{(2)} - \hat{x}_j^{(3)}| \\ r^{(3)} = |\hat{x}_j^{(3)} - \hat{x}_j^{(1)}| \end{cases} \quad (12)$$

将故障检测指标值 r_{index} 与自适应阈值 h 进行比较,便可检测出传感器是否发生故障。

$$\begin{cases} r_{index} \geq h & (\text{发生故障}) \\ r_{index} \leq h & (\text{未发生故障}) \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)可知,当故障检测指标值大于或等于检测阈值时表明传感器发生故障;当检测指标值小于检测阈值时表明传感器未出现故障。

2.2 故障隔离方法

当检测出 ECAS 系统存在故障传感器后,需要进一步隔离故障传感器,由故障检测指标值计算获得的隔离指标值如下

$$\begin{cases} \eta_1 = r^{(1)} r^{(3)} \\ \eta_2 = r^{(1)} r^{(2)} \\ \eta_3 = r^{(2)} r^{(3)} \end{cases} \quad (14)$$

其中: η_a 为故障隔离指标值($a=1\sim 3$)。

如表 2 所示,ECAS 系统传感器故障隔离策略为:当 3 个传感器均未发生故障时,由于各组滤波器对状态变量的估计近似一致,因此检测和隔离指标值均极小且稳定在零值附近。当某一传感器发生故障时,与该故障传感器对应的滤波器获得的状态估计值将发生异常变化,而此时与正常传感器对应的其他滤波器输出的状态估计保持正常,因此与故障传感器相关的隔离指标值迅速增大最终超过检测阈值,从而达到隔离故障传感器的目的。

表 2 故障隔离指标特性描述
Tab.2 Signature for fault isolation

故障隔离指标值	η_1	η_2	η_3
传感器均无故障	0	0	0
传感器 1 故障	1	0	0
传感器 2 故障	0	1	0
传感器 3 故障	0	0	1

3 系统仿真分析

3.1 扩展卡尔曼滤波器设计

根据式(8)所示系统状态方程和输出方程,设计滤波器方程为

$$\begin{cases} \hat{x}^{(i)} = f(\hat{x}_k^{(i)}) + g(\hat{x}_k^{(i)})u_k + L_i(\hat{y}_i - y_i) \\ \hat{y}_i = h(\hat{x}_k^{(i)})\hat{x} \end{cases} \quad (15)$$

其中: \hat{y}_i 为输出估计值; L_i 为滤波器增益矩阵。

扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter,简称 EKF)算法被广泛应用于非线性系统中进行状态估计,其主要思想是采用泰勒公式将非线性模型化成线性模型再进行卡尔曼滤波。算法流程如图 3 所示。

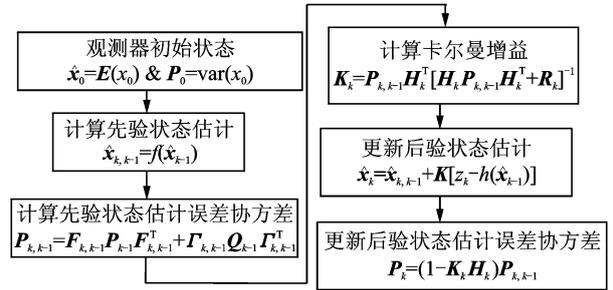


图 3 EKF 算法流程

Fig. 3 Flowchart of EKF algorithm

3.2 故障诊断结果分析

采用 AMESim 搭建 1/4ECAS 系统物理模型,在 Matlab/Simulink 中搭建路面激励和传感器故障的数学模型,并编写滤波器程序。在 AMESim 中搭建的物理模型如图 4 所示。该模型与 Simulink 联合仿真,向 Simulink 发送空气弹簧气体质量流量 m ,簧上和簧下质量 M 的位移 X ,空气弹簧气压值 P ,簧上质量加速度 A 信号,并从 Simulink 模型中获得道路激励信号与电磁阀控制信号。

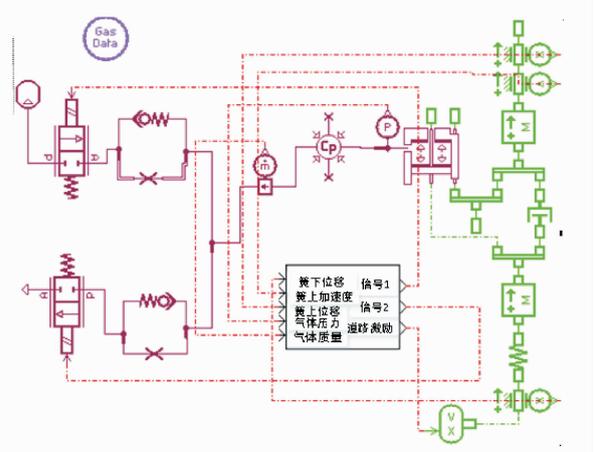


图 4 AMESim 中物理模型

Fig. 4 Physical model in AMESim

综合上述 3 种故障类型,文中选取如表 3 所示的 4 种故障行为验证所提出的故障检测与隔离方案,故障发生时间为第 2 s。

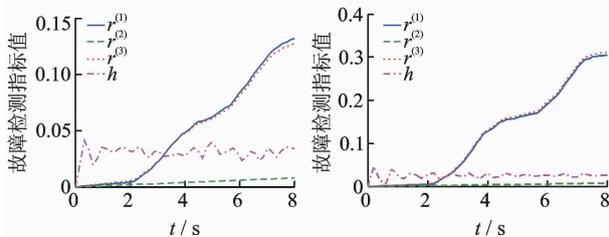
表 3 故障行为描述

Tab. 3 Fault behavior description

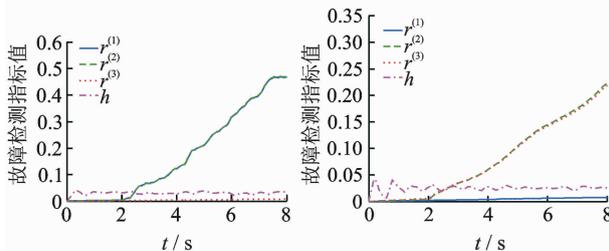
故障编号	1	2	3	4
传感器号	1	1	2	3
故障行为	λ_i	0	5	2
	n_i	0.01	0	0.05
				20^4

3.2.1 故障检测结果分析

由图 5 可知,传感器 i 发生故障前,3 个故障检测指标值均小于检测阈值,2 s 后与故障传感器相关的两个检测指标值迅速增大,并在短时间内超过阈值,另一检测指标值仍保持极小,故障得到检测。



(a) 故障1下故障检测指标值 (b) 故障2下故障检测指标值
(a) Fault detection index value under fault 1 (b) Fault detection index value under fault 2



(c) 故障3下故障检测指标值 (d) 故障4下故障检测指标值
(c) Fault detection index value under fault 3 (d) Fault detection index value under fault 4

图 5 故障检测指标值

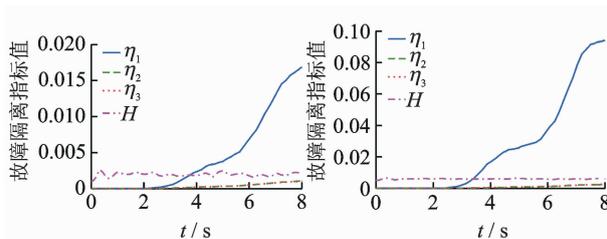
Fig. 5 Fault detection index value

3.2.2 故障隔离结果分析

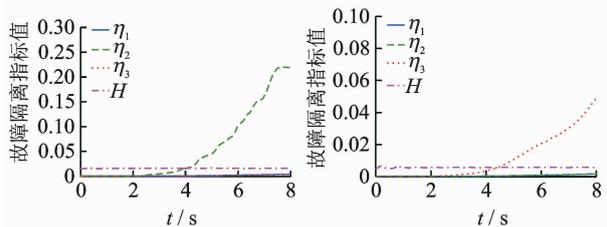
由图 6 可见,故障传感器未出现之前,故障隔离指标值均低于检测阈值。故障传感器出现后,与其相关的隔离指标值不断增大并最终超过检测阈值,其余隔离指标值仍然小于检测阈值,故障得到隔离。

4 试验与结果分析

为进一步验证笔者所设计的故障诊断方法的有效性,在 1/4ECAS 台架上进行试验。台架组成部件包括:单根空气弹簧、传感器测试系统、数据采集系统和激振台。测试台架如图 7 所示。



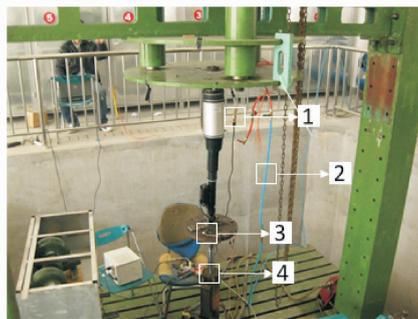
(a) 故障1下故障隔离指标值 (b) 故障2下故障隔离指标值
(a) Fault isolation index value under fault 1 (b) Fault isolation index value under fault 2



(c) 故障3下故障隔离指标值 (d) 故障4下故障隔离指标值
(c) Fault isolation index value under fault 3 (d) Fault isolation index value under fault 4

图 6 故障隔离指标值

Fig. 6 Fault isolation index value



1-气体压力传感器; 2-管路; 3-高度与加速度传感器; 4-INSTRON8800 台架

图 7 1/4 ECAS 台架

Fig. 7 Test bench of 1/4 ECAS system

4.1 试验方案

激振台模拟真实道路激励,通过对单根空气弹簧进行充放气来调节 1/4 ECAS 系统车身高度,具体步骤为:a. 将车身高度抬升到高位;b. 将车身高度降落到低位。传感器将车身高度、加速度等信息输入到数据采集系统进行仿真。

4.2 试验结果分析

采样时间间隔设定为 0.004 s。选取如表 3 所示的 4 种故障行为验证扩展卡尔曼滤波器组的效果。

4.2.1 故障检测结果分析

试验所得故障检测指标值曲线如图8所示,由图可知,故障发生前,检测指标值非常小且均未大于检测阈值。故障传感器出现后,与其相关的故障检测指标值迅速超过检测阈值。故障检测方法得以实验验证。

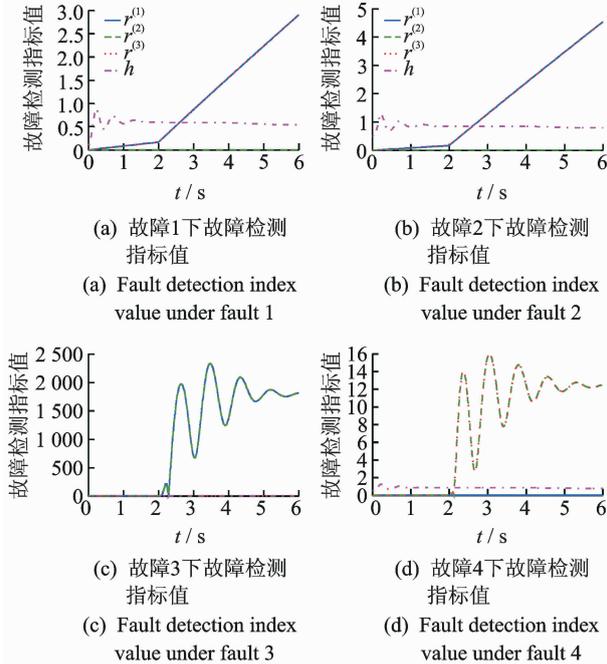


图8 故障检测指标值

Fig. 8 Fault detection index value

4.2.2 故障隔离结果分析

试验所得故障隔离指标值曲线如图9所示,传

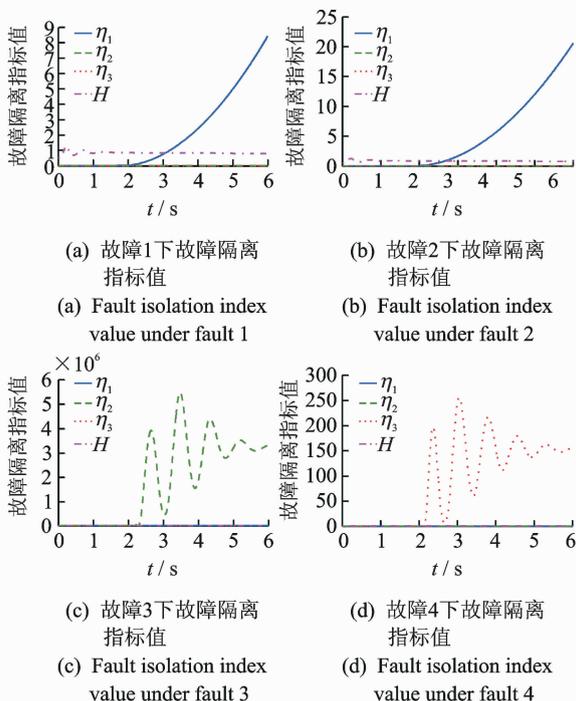


图9 故障隔离指标值

Fig. 9 Fault isolation index value

感器故障发生前,隔离指标值极小且均小于阈值。当出现故障传感器后,与其相关的隔离指标值迅速增大且超过检测阈值。故障隔离方法得以试验验证。

5 结束语

为了精确描述空气弹簧充放气特性及 ECAS 系统的非线性,采用 AMESim 搭建 1/4ECAS 系统双质量模型,采用 Matlab 建立传感器故障模型及扩展卡尔曼滤波器组,建立的联合仿真模型适用于采用膜式空气弹簧的气路开式 ECAS 系统,对于气路闭式 ECAS 系统或用其他形式空气弹簧的空气悬架系统并不完全适用。系统台架试验表明:采用扩展卡尔曼滤波器组设计的故障诊断方案可以准确快速检测及隔离传感器故障,从而实现 ECAS 系统传感器故障的有效诊断。相比于线性系统成熟的故障诊断方法,非线性系统故障诊断还处于发展中,ECAS 系统作为非线性系统,其故障诊断属于非线性系统故障诊断问题,基于扩展卡尔曼滤波器组的传感器故障诊断方法可以解决这一非线性系统的故障诊断问题,为相关非线性系统故障诊断研究提供了参考。

参 考 文 献

- [1] 孙晓强, 陈龙, 汪少华, 等. 半主动空气悬架阻尼多模型自适应控制研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 351-357.
Sun Xiaoliang, Chen Long, Wang Shaohua, et al. Research on damping multi-model adaptive control of semi-active air suspension [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 351-357. (in Chinese)
- [2] 庞辉, 彭威, 原园. 随机激励下重载车辆空气悬架参数多目标优化[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 156-160.
Pang Hui, Peng Wei, Yuan Yuan. Multi-objective optimization of pneumatic suspension parameters for heavy vehicle under random excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6): 156-160. (in Chinese)
- [3] Sun Xiaoliang, Cai Yingfeng, Chen Long, et al. Vehicle height and posture control of the electronic air suspension system using the hybrid system approach [J]. Vehicle System Dynamics, 2016, 54(3): 1-25.
- [4] Huang Junming, Zhou Kongkang, Xu Xing, et al. Nonlinear model on leveling procedure of electronically controlled air suspension [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 278-283.
- [5] 刘昱, 张俊红, 毕凤荣, 等. 基于 Wigner 分布和分形维数的柴油机故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(2): 240-245.
Liu Yu, Zhang Junhong, Bi Fengrong, et al. Study on

- fault diagnosis of diesel valve trains based on wigner distribution and fractal dimension[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(2):240-245. (in Chinese)
- [6] Chen Fuyang, Zhang Shijun, Jiang Bin, et al. Multiple model-based fault detection and diagnosis for helicopter with actuator faults via quantum information technique[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I, Journal of Systems & Control Engineering*, 2013, 228(3):182-190.
- [7] Cheng Yao, Wang Rixin, Xu Minqiang, et al. Simultaneous state and actuator fault estimation for satellite attitude control systems[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29(3):714-721.
- [8] 李蔚, 俞芸萝, 盛德仁, 等. 基于动态数据挖掘的热力参数传感器故障诊断[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(4):694-699.
Li Wei, Yu Yunluo, Sheng Deren, et al. The fault diagnosis of thermal parameter sensor based on dynamic data mining[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(4):694-699. (in Chinese)
- [9] Chamseddine A, Noura H, Ouladsine M. Sensor fault detection, identification and fault tolerant control: application to active suspension[C]// *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, IEEE, Minneapolis, USA; IEEE, 2006.
- [10] Chamseddine A, Noura H. Control and sensor fault tolerance of vehicle active suspension[J]. *Control Systems Technology IEEE Transactions on*, 2008, 16(3):416-433.
- [11] Fischer D, Kaus E, Isermann R. Fault detection for an active vehicle suspension[C]// *Proceedings of the IEEE(American Control Conference)*. Denver, USA; IEEE, 2003, 5:4377-4382.
- [12] 杨柳青, 陈无畏, 汪洪波. 基于残差信息的汽车液压主动悬架故障诊断与隔离研究[J]. *中国机械工程*, 2012, 23(14):1746-1752.
Yang Liuqing, Chen Wuwei, Wang Hongbo. Vehicle hydraulic active suspension fault diagnosis and isolation based on residual error generation[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(14):1746-1752. (in Chinese)
- [13] 杨柳青, 陈无畏. 基于传感器信号重构的汽车主动悬架主动容错控制[J]. *汽车工程*, 2013, 35(12):1084-1091.
Yang Liuqing, Chen Wuwei. Active fault tolerant control of vehicle active suspension based on sensor signal reconstruction[J]. *Automotive Engineering*, 2013, 35(12):1084-1091. (in Chinese)
- [14] 杨柳青, 陈无畏, 张荣芸, 等. 基于控制律重组的汽车半主动悬架容错控制与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(10):1-9.
Yang Liuqing, Chen Wuwei, Zhang Rongyun, et al. Fault-tolerant control and experiment on vehicle semi-active suspension system based on control law reconfiguration[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(10):1-9. (in Chinese)
- [15] 高振刚, 陈无畏, 汪洪波, 等. 基于故障补偿的汽车半主动悬架容错控制[J]. *汽车工程*, 2016, 38(6):705-715.
Gao Zhengang, Chen Wuwei, Wang Hongbo, et al. Fault-tolerant control of vehicle semi-active suspension based on fault compensation[J]. *Automotive Engineering*, 2016, 38(6):705-715. (in Chinese)
- [16] Kim H S, Lee H C. Fault-tolerant control algorithm for a four-corner closed-loop air suspension system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(10):4866-4879.
- [17] Xu Xing, Wang Wei, Zou Nannan, et al. A comparative study of sensor fault diagnosis methods based on observer for ECAS system[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2017, 87(3):169-183.
- [18] 邹南南. 基于观测器的车辆 ECAS 传感器故障诊断研究[D]. 镇江:江苏大学, 2016.
- [19] 刘雁玲, 徐兴, 杨晓峰, 等. 基于 STF 的车辆 ECAS 传感器故障诊断研究[J]. *中国科技论文*, 2016, 11(16):1817-1820.
Liu Yanling, Xu Xing, Yang Xiaofeng, et al. Study on STF-based fault diagnosis for vehicular ECAS sensors[J]. *China Sciencepaper*, 2016, 11(16):1817-1820. (in Chinese)
- [20] 徐兴, 陈照章, 黄俊明, 等. 电控空气悬架充放气的动态建模及特性仿真[J]. *系统仿真学报*, 2011, 23(6):1225-1228.
Xu Xing, Chen Zhaozhang, Huang Junming, et al. Dynamic modeling and characteristic simulation of charging-discharging system for electronically controlled air suspension[J]. *Journal of System Simulation*, 2011, 23(6):1225-1228. (in Chinese)
- [21] 闻新, 张洪钺, 周露. 控制系统的故障诊断与容错控制[M]. 北京:机械工业出版社, 1998:27-128.



第一作者简介: 陈龙, 男, 1958 年 7 月生, 博士、教授、博士生导师。主要研究方向为车辆动态性能模拟与控制。曾发表《基于半车模型的两级串联型 ISD 悬架性能分析》(《机械工程学报》2012 年第 48 卷第 6 期)等论文。

E-mail: chenlong@ujs.edu.cn

通信作者简介: 徐兴, 男, 1979 年 4 月生, 博士、教授、博士生导师。主要研究方向为车辆动力学控制。

E-mail: xuxing@ujs.edu.cn

