

基于自适应观测器的电磁混合悬架容错控制*

寇发荣, 王正旺, 王国宏, 王倩磊

(西安科技大学机械工程学院 西安, 710054)

摘要 针对电磁混合作动器发生增益故障或恒偏差故障时造成的悬架性能下降问题,提出了一种模式切换容错控制策略。首先,建立了二自由度非线性悬架模型、故障悬架模型、直线电机数学模型及电磁阀减振器多项式模型;其次,设计了自适应观测器来估计悬架状态和故障大小,以簧载质量加速度均方根估计值为模式切换控制器的切换指标,以故障估计值为作动器是否发生故障的判断指标,通过切换工作模式实现容错控制;最后,仿真分析了容错控制前后悬架性能,并开展了台架试验。结果表明:仿真容错控制后簧载质量加速度均方根值相较增益故障、恒偏差故障时分别降低了 16.10% 和 24.79%;试验容错控制后簧载质量加速度均方根值相较增益故障时降低了 16.24%;模式切换容错控制策略能够有效改善故障状态下的悬架性能,提高了电磁混合悬架的可靠性。

关键词 主动悬架;自适应观测器;模式切换;容错控制

中图分类号 U463

0 引言

主动悬架可以根据车辆的行驶条件输出相应的主动力,有良好的减振效果^[1-2]。目前,对主动悬架的控制研究大多是在传感器、作动器完好情况下进行的,但当上述元器件出现故障时,主动悬架无法实现预期的控制效果,会导致悬架系统性能下降^[3-4]。容错控制能够对未知故障在线识别,并对故障进行实时补偿,使悬架系统始终保持较好的性能^[5]。

悬架作动器在使用过程中容易发生多种故障,对其进行容错控制研究很有必要^[6]。文献[7]考虑作动器增益故障,通过鲁棒观测器获得残差,实现故障检测与诊断,并通过控制律重组设计了容错控制器。文献[8]考虑电磁混合作动器增益故障,利用未知输入观测器得到的残差进行故障诊断,并通过模式切换消除了作动器故障的影响。文献[9]针对电磁阀减振器的常见故障,设计了故障估计算法,并通过完好作动器补偿故障作动器损失的阻尼力,改善了故障悬架性能。然而,以上研究并未考虑悬架系统存在非线性因素,导致估计出的悬架状态和故障大小不精确,难以在实际中进行应用。

本研究在建立二自由度非线性电磁混合悬架模型和故障悬架模型的基础上,针对电磁混合作动器增益故障或恒偏差故障,提出了一种模式切换容错

控制策略,建立自适应观测器来实现悬架系统状态和故障大小的估计,设计模式切换控制器,通过切换完好部件或者故障补偿,提高故障悬架性能。

1 电磁混合悬架结构与原理

电磁混合悬架系统结构原理如图 1 所示,主要由控制器、传感器、超级电容、功率模块电路、电磁混合作动器、弹簧及液压减振器等组成。

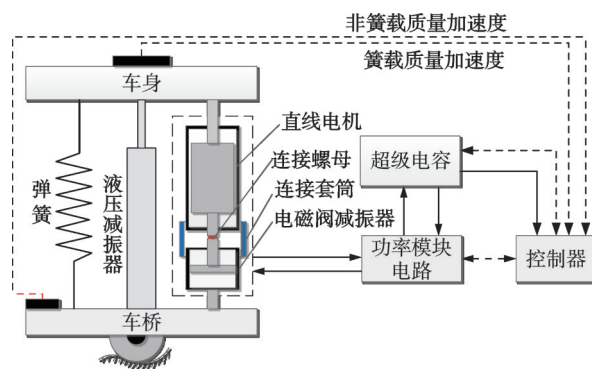


图 1 电磁混合悬架结构原理图

Fig.1 Electromagnetic hybrid suspension structure schematic

悬架系统在主动模式时,直线电机工作,通过功率模块电路控制输入电流,并输出所需的主动力,此时电磁阀节流口全开,电磁阀减振器不工作。悬架

* 国家自然科学基金资助项目(51775426);陕西省重点研发计划资助项目(2020GY-128);西安市碑林区应用技术研发类资助项目(GX1928)

收稿日期:2023-10-19;修回日期:2024-03-08

系统在半主动模式时,电磁阀减振器工作,通过功率模块电路控制输入电流进而调节电磁阀节流口大小,输出所需阻尼力,此时直线电机不工作。悬架系统在馈能模式时,直线电机将振动能量转化为电能并储存至超级电容中,此时电磁阀减振器不工作。

2 电磁混合悬架动力学模型

2.1 二自由度非线性悬架数学模型

考虑悬架弹簧和阻尼的非线性参数摄动,并将非线性特性描述为一个有界函数,建立二自由度非线性电磁混合悬架模型,如图2所示。

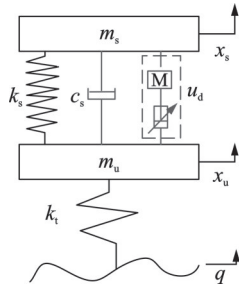


图2 二自由度电磁混合悬架模型

Fig.2 2-DOF electromagnetic hybrid suspension model

根据牛顿第二定律得出运动学方程组

$$\begin{cases} m_s \ddot{x}_s = -k_s(x_s - x_u) - c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) + f_1(x_s - x_u) + f_2(\dot{x}_s - \dot{x}_u) + u_d \\ m_u \ddot{x}_u = k_s(x_s - x_u) + c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u) - k_t(x_u - q) - f_1(x_s - x_u) - f_2(\dot{x}_s - \dot{x}_u) - u_d \end{cases} \quad (1)$$

其中: x_s 为簧载质量位移; x_u 为非簧载质量位移; q 为路面垂直位移; m_s 为簧载质量; m_u 为非簧载质量; u_d 为电磁混合作动器输出力; k_s 为弹簧刚度; c_s 为液压减振器阻尼系数; k_t 为轮胎刚度; $f_1(x_s - x_u)$ 和 $f_2(\dot{x}_s - \dot{x}_u)$ 分别表示弹簧和阻尼的非线性参数摄动。

$f_1(x_s - x_u)$ 和 $f_2(\dot{x}_s - \dot{x}_u)$ 满足

$$\|f_1(x_s - x_u)\| \leq \|V_k k_s(x_s - x_u)\| \quad (2)$$

$$\|f_2(\dot{x}_s - \dot{x}_u)\| \leq \|V_c c_s(\dot{x}_s - \dot{x}_u)\| \quad (3)$$

其中: V_c 、 V_k 为参数摄动界,本研究取 $V_c = V_k = 0.1$ 。

选取状态向量 $x = [x_s - x_u \quad \dot{x}_s - \dot{x}_u \quad x_u - q \quad \dot{x}_u]^T$;测量输出 $y = [x_s - x_u \quad \dot{x}_s - \dot{x}_u \quad x_u - q \quad \dot{x}_u]^T$;控制输出 $z = [\ddot{x}_s \quad x_s - x_u \quad k_t(x_u - q) \quad u_d]^T$;控制输入 $u = [u_d]$;扰动输入 $w = [\dot{q}]$;非线性变量 $f(x, t) = [f_1(x_s - x_u) \quad f_2(\dot{x}_s - \dot{x}_u)]^T$,且 $f(x, t)$ 满足Lipchitz条件^[10],从而得到二自由度非线性悬架状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Dw + F_1 f(x, t) \\ y = Cx \\ z = C_1 x + D_1 u \end{cases} \quad (4)$$

2.2 故障悬架模型

电磁混合作动器由两部件串联而成,在长期使用中更容易发生故障。电磁混合作动器常见故障及原因见表1。

表1 电磁混合作动器常见故障及原因

Tab.1 Common faults and causes of electromagnetic hybrid actuators

作动器部件	常见故障	故障原因
电磁阀减振器	增益故障	液压油泄漏
	恒偏差故障	阀芯位移偏差
	卡死故障	油体高温烧结或变质
直线电机	增益故障	漏磁
	卡死故障	活塞杆受热膨胀

发生故障时电磁混合作动器的输出力 u_f 可表示为

$$u_f = \delta u_d + u_0 \quad (5)$$

其中: δ 为作动器增益故障系数; u_0 为作动器故障时的偏差值或卡死值; u_d 为正常作动器的输出力。

当 $0 < \delta < 1$ 且 $u_0 = 0$ 时为增益故障;当 $\delta = 1$ 且 $u_0 \neq 0$ 时为恒偏差故障;当 $\delta = 0$ 且 $u_0 \neq 0$ 时为卡死故障。

电磁混合作动器故障值 f 可通过如下变化得到

$$u_f = u_d + [(\delta - 1)u_d + u_0] = u_d + f \quad (6)$$

$$f = (\delta - 1)u_d + u_0 \quad (7)$$

令电磁混合作动器故障向量 $f = [f]$,可得故障悬架状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B(u + f) + Dw + F(x, t) \\ y = Cx \\ z = C_1 x + D_1 u \end{cases} \quad (8)$$

其中: $F(x, t) = F_1 f(x, t)$ 。

本研究考虑作动器故障导数 $\dot{f}$ 有界,即假设

$$\|\dot{f}\|_2 \leq f_\lambda \quad (9)$$

其中: $f_\lambda > 0$,为一个未知常数。

2.3 直线电机数学模型

在 d - q 坐标系下,直线电机的电磁推力表达式为

$$F_L = 1.5 P_n \pi \phi_i i_q / \tau = K_a i_q \quad (10)$$

其中: P_n 为极对数; ϕ_i 为永磁体磁链; i_q 为直线电机绕组交轴电流; τ 为极距; K_a 为推力系数。

直线电机感应电动势表达式为

$$U_L = K_e \dot{x}_{su} \quad (11)$$

其中: K_e 为直线电机反电动势系数; $\dot{x}_{su}$ 为悬架运动速度。

2.4 电磁阀减振器多项式模型

对电磁阀减振器进行试验建模,分析台架试验结果。通过数据拟合的方法确定了电磁阀减振器输出阻尼力 F_s 与可控电流 i 之间的关系表达式^[11]为

$$F_s = \sum_{k=0}^3 (b_k i^2 + c_k i + d_k) \dot{x}_{s-u}^k \quad (12)$$

其中: k 取 0、1、2 和 3; b_k 、 c_k 和 d_k 为多项式系数; $\dot{x}_{s-u}$ 为悬架相对速度。

3 电磁混合悬架容错控制策略

3.1 容错控制系统结构

容错控制策略框图如图3所示,主要由自适应观测器、正常状态和故障状态模式切换控制器组成。

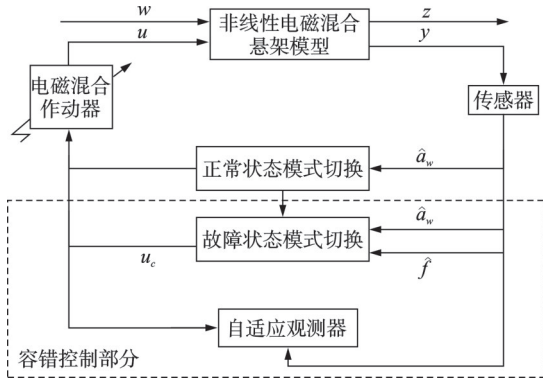


图3 容错控制策略框图

Fig.3 Fault-tolerant control strategy block diagram

当电磁混合作动器无故障时,为了保证车辆平顺性和低能耗性,以自适应观测器得到的簧载质量加权加速度均方根估计值 $\hat{a}_w$ 为切换指标进行正常状态模式切换,通过检测由自适应观测器得到的故障估计值 $\hat{f}$ 是否超过设定阈值来判断电磁混合作动器是否发生故障。当电磁混合作动器发生故障时,以簧载质量加权加速度均方根估计值 $\hat{a}_w$ 为切换指标进行故障状态模式切换,实现容错控制。

3.2 自适应观测器

为了准确估计悬架系统状态和故障大小,建立自适应观测器^[12]为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B(u + \hat{f}) + F(\hat{x}, t) + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \\ \dot{\hat{f}} = \rho R[(y - \hat{y}) + (\dot{y} - \dot{\hat{y}})] \end{cases} \quad (13)$$

其中: $\hat{f}$ 为故障向量 f 的估计; $\hat{x}$ 为悬架状态向量 x 的估计; $\hat{y}$ 为测量输出 y 的估计; L 、 R 为待求的增益矩

阵; $\rho > 0$, 为自适应学习率。

定义 $e_x = x - \hat{x}$, $e_y = y - \hat{y}$, $e_f = f - \hat{f}$ 。

定理1 对于式(8)系统,如果存在对称正定矩阵 P 和 G 、适当维数矩阵 W 和 R ,以及标量 $\epsilon_1 > 0$ 、 $\epsilon_2 > 0$ 分别满足式(14)和式(15),则有如式(13)所示的自适应观测器,其中增益矩阵 $L = P^{-1}W$ 。

$$\begin{bmatrix} N_1 & N_2 & PD & P & 0 \\ - & N_3 & -B^T PD & 0 & B^T P \\ - & - & -\gamma^2 I & 0 & 0 \\ - & - & - & -\epsilon_1^{-1} I & 0 \\ - & - & - & - & -\epsilon_2^{-1} I \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

$$B^T P = RC \quad (15)$$

其中: $N_1 = A^T P + PA - C^T W^T - WC + (\kappa^2/\epsilon_1 + \kappa^2/\epsilon_2)I + C^T C$; $N_2 = C^T W^T B - A^T PB$; $N_3 = G - 2B^T PB$ 。

证明:根据式(8)和式(13)可得误差方程为

$$\dot{e}_x = (A - LC)e_x + Be_f + Dw + \Delta F \quad (16)$$

其中

$$\Delta F = F(x, t) - F(\hat{x}, t) \quad (17)$$

取 Lyapunov 函数

$$V = e_x^T P e_x + e_f^T e_f / \rho \quad (18)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V} = & e_x^T [P(A - LC) + (A - LC)^T P] e_x + 2e_x^T P \Delta F + \\ & 2e_x^T P B e_f + 2e_x^T P D w + 2e_f^T \dot{e}_f / \rho = \\ & e_x^T [P(A - LC) + (A - LC)^T P] e_x + 2e_x^T P \Delta F + \\ & 2e_x^T (PB - (RC)^T) e_f + 2e_x^T P D w + 2e_f^T \dot{f} / \rho - \\ & 2e_f^T R C A e_x + 2e_f^T R C L C e_x - 2e_f^T R C B e_f - \\ & 2e_f^T R C \Delta F - 2e_f^T R C D w \end{aligned} \quad (19)$$

将式(15)代入式(19),可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & e_x^T [P(A - LC) + (A - LC)^T P] e_x + 2e_x^T P \Delta F + \\ & 2e_x^T P D w - 2e_f^T B^T P A e_x + 2e_f^T B^T P L C e_x - \\ & 2e_f^T B^T P B e_f - 2e_f^T B^T P \Delta F - 2e_f^T B^T P D w + \\ & 2e_f^T \dot{f} / \rho \end{aligned} \quad (20)$$

由式(9)可得

$$\begin{aligned} 2e_f^T \dot{f} / \rho \leq & e_f^T G e_f + \dot{f}^T \rho^{-1} G^{-1} \rho^{-1} \dot{f} \leq \\ & e_f^T G e_f + f_{\lambda}^2 \lambda_{\max}(\rho^{-1} G^{-1} \rho^{-1}) I \end{aligned} \quad (21)$$

对于任意适当维数的矩阵 X 和 Y ,存在一个对称正定矩阵 H ,使如下条件成立

$$X^T Y + Y^T X \leq X^T H X + Y^T H^{-1} Y \quad (22)$$

由 Lipchitz 条件可得

$$\|\Delta F\| \leq \kappa \|e_x\| \quad (23)$$

其中: κ 为 Lipchitz 常数。

根据式(22)和式(23)可得

$$\begin{aligned} 2e_x^T P \Delta F \leq & \epsilon_1 e_x^T P P^T e_x + \Delta F^T \Delta F / \epsilon_1 \leq \\ & \epsilon_1 e_x^T P P^T e_x + \kappa^2 e_x^T e_x / \epsilon_1 \end{aligned} \quad (24)$$

$$-2e_f^T B^T P \Delta F \leq \epsilon_2 e_f^T B^T P P B e_f + \Delta F^T \Delta F / \epsilon_2 \leq \epsilon_2 e_f^T B^T P P B e_f + \kappa^2 e_x^T e_x / \epsilon_2 \quad (25)$$

将式(21)、(24)和(25)代入式(20),可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & e_x^T [P(A-LC) + (A-LC)^T P + \frac{\kappa^2}{\epsilon_1} I + \frac{\kappa^2}{\epsilon_2} I + \\ & \epsilon_1 P P^T] e_x - 2e_x^T A^T P B e_f + 2e_x^T C^T W^T B e_f - \\ & 2e_f^T B^T P B e_f + 2e_f^T P D w + \epsilon_2 e_f^T B^T P P B e_f - \\ & 2e_f^T B^T P D w + e_f^T G e_f + f_\lambda^2 \lambda_{\max}(\rho^{-1} G^{-1} \rho^{-1}) I \quad (26) \end{aligned}$$

为了保证自适应观测器对扰动输入 w 的鲁棒性,定义 H_∞ 性能如下

$$J = \int_0^\infty (e_y^T e_y - \gamma^2 w^T w) dt \quad (27)$$

其中: γ 为 H_∞ 性能指标。

由零初始条件 ($V(0)=0, V(\infty)>0$) 可得

$$\begin{aligned} J = & \int_0^\infty (e_y^T e_y - \gamma^2 w^T w + \dot{V}) dt + V(0) - V(\infty) \leq \\ & \int_0^\infty (e_y^T e_y - \gamma^2 w^T w + \dot{V}) dt \quad (28) \end{aligned}$$

式(28)中的积分项可写为

$$\begin{aligned} M = & e_x^T [P(A-LC) + (A-LC)^T P + \frac{\kappa^2}{\epsilon_1} I + \frac{\kappa^2}{\epsilon_2} I + \\ & \epsilon_1 P P^T + C^T C] e_x + 2e_x^T (C^T W^T B - A^T P B) e_f + \\ & 2e_x^T P D w + e_f^T (\epsilon_2 B^T P P B - 2B^T P B + G) e_f - \\ & 2e_f^T B^T P D w - \gamma^2 w^T w + f_\lambda^2 \lambda_{\max}(\rho^{-1} G^{-1} \rho^{-1}) I = \\ & \begin{bmatrix} e_x \\ e_f \\ w \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & P D \\ - & M_{22} + G & -B^T P D \\ - & - & -\gamma^2 I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_x \\ e_f \\ w \end{bmatrix} + \\ & f_\lambda^2 \lambda_{\max}(\rho^{-1} G^{-1} \rho^{-1}) I \quad (29) \end{aligned}$$

其中: $M_{11} = P(A-LC) + (A-LC)^T P + \kappa^2/\epsilon_1 I + \kappa^2/\epsilon_2 I + \epsilon_1 P P^T + C^T C$; $M_{12} = C^T W^T B - A^T P B$; $M_{22} = \epsilon_2 B^T P P B - 2B^T P B$ 。

如果以下不等式成立

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & P D \\ - & M_{22} + G & -B^T P D \\ - & - & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (30)$$

则 $M < \delta^2 I$, 从而可得 $J < \delta^2$, $\delta^2 = f_\lambda^2 \lambda_{\max}(\rho^{-1} G^{-1} \rho^{-1})$ 。

运用 Schur 补引理论将式(30)等效为式(14)的形式,并且令 $W = PL$,证明完成。

由于式(15)不是标准的线性矩阵不等式(linear matrix on equality, 简称 LMI)形式,不便于使用 LMI 工具箱求解,可将式(15)转化为

$$\begin{bmatrix} -\mu I & B^T P - RC \\ - & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (31)$$

其中: μ 为一个充分小的正数。

为了保证所构造的自适应观测器的收敛速度,将矩阵 $(A-LC)$ 的所有特征值配置在一个圆形区域 $D(\alpha, r)$ 内。因此,可以在定理 1 中加入如下条件约束

$$\begin{bmatrix} -P & PA - WC - \alpha P \\ - & -r^2 P \end{bmatrix} < 0 \quad (32)$$

其中: α, r 分别为圆形区域的圆心和半径。

3.3 模式切换控制器

电磁混合悬架模式切换控制器框图如图 4 所示,主要包括正常状态和故障状态两部分。

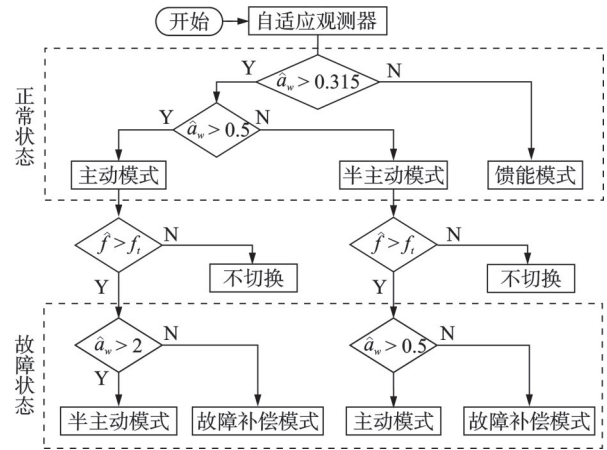


图 4 电磁混合悬架模式切换控制器框图

Fig.4 Block diagram of mode switch controller for electro-magnetic hybrid suspension

3.3.1 正常状态模式切换控制器

根据车辆行驶条件和电磁混合驱动器的冗余特性,可以设定电磁混合悬架 3 种工作模式:主动模式、半主动模式及馈能模式。路况较差时,主要考虑乘坐舒适性,切换为主动模式,此时只有直线电机工作,输出主动力;路况一般时,考虑保证乘坐舒适性的同时降低能耗,切换为半主动模式,此时只有电磁阀减振器工作,提供可调阻尼力;路况较好时,切换为馈能模式,此时电磁阀减振器不工作,直线电机作为发电机,将振动能量转为电能。

当悬架无故障时,以自适应观测器得到的悬架簧载质量加权加速度均方根估计值 $\hat{a}_w$ 作为切换指标,进行正常状态模式切换,此时的电磁混合驱动输出力由鲁棒 H_∞ 加权输出反馈控制求得^[13]。簧载质量加权加速度均方根值 a_w 与人主观感觉之间的关系见表 2。当 $\hat{a}_w < 0.315$ 时,乘客没有不舒服,切换为馈能模式;当 $0.315 < \hat{a}_w < 0.5$ 时,乘客有一些不舒服,切换为半主动模式;当 $\hat{a}_w > 0.5$ 时,乘客相当不舒服,切换为主动模式。

表 2 a_w 与人主观感觉之间的关系

Tab.2 The relationship between a_w and subjective feeling

$a_w / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	人的主观感觉	$a_w / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	人的主观感觉
> 2.0	极不舒服	$0.5 \sim 1.0$	相当不舒服
$1.25 \sim 2.5$	很不舒服	$0.315 \sim 0.63$	有一些不舒服
$0.8 \sim 1.6$	不舒服	< 0.315	没有不舒服

3.3.2 故障状态模式切换控制器

当电磁混合作动器中某一部件发生卡死故障时,故障作动器输出力为定值,无法进行容错控制,所以本研究只讨论电磁混合作动器中某一部件发生增益故障或恒偏差故障时的容错控制。

为了避免频繁进行容错控制,定义容错控制阈值为 f_t 。当故障估计值 $\hat{f}$ 大于阈值 f_t 时,电磁混合作动器发生故障。为了提升故障悬架性能,进行故障状态模式切换。若半主动模式下发生故障,当 $\hat{a}_w < 0.5$ 时,切换为故障补偿模式,故障电磁阀减振器继续工作,由正常输出力和故障补偿力共同作用;当 $\hat{a}_w > 0.5$ 时,切换为主动模式,此时故障电磁阀减振器停止工作,直线电机开始工作,由正常输出力单独作用。若主动模式下发生故障,当 $\hat{a}_w < 2$ 时,切换为故障补偿模式,故障直线电机继续工作,由正常输出力和故障补偿力共同作用;当 $\hat{a}_w > 2$ 时,为了避免过度消耗能量进行力补偿,切换为半主动模式,此时故障直线电机停止工作,电磁阀减振器开始工作,由正常输出力单独作用。

悬架理想补偿力为

$$u_c = -f \tag{33}$$

以故障估计值 $\hat{f}$ 代替 f ,则悬架实际补偿力为

$$u_c = -\hat{f} \tag{34}$$

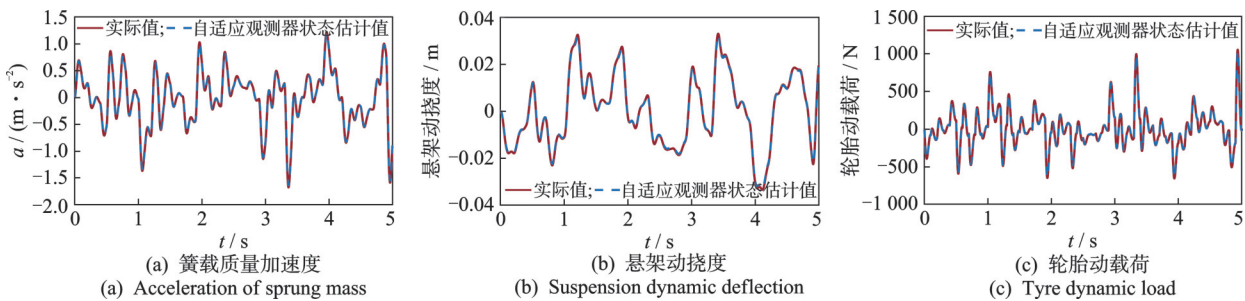


图5 悬架状态估计值与实际值对比

Fig.5 Comparison between estimated suspension state and actual value

表 4 悬架性能均方根值对比

Tab.4 Suspension performance root mean square value comparison			
项目	簧载质量加速度/(m·s ⁻²)	悬架动挠度/m	轮胎动载荷/N
实际值	0.498	0.015 1	248.9
自适应观测器状态估计值	0.487	0.014 7	243.9
误差/%	2.21	2.65	2.01

由图 5 和表 4 可知,簧载质量加速度、悬架动挠度和轮胎动载荷的状态估计误差分别为 2.21%、2.65% 和 2.01%,均在合理范围内,说明本研究设计的自适应观测器可以有效估计悬架状态。

4 仿真分析

为了验证模式切换容错控制策略的有效性,采用 Matlab 软件建立电磁混合悬架模型。悬架参数见表 3。设定适当的参数 ϵ_1 、 ϵ_2 、 μ 、 γ 、 ρ 、 α 和 r ,在 Matlab 中解得增益矩阵 L 和 R 。

表 3 悬架参数

Tab.3 Suspension parameters	
模型参数	取值
非簧载质量 m_u /kg	45
簧载质量 m_s /kg	400
轮胎刚度 k_t /(N·m ⁻¹)	150 000
弹簧刚度 k_s /(N·m ⁻¹)	12 000
推力系数 K_a /(N·A ⁻¹)	78.54
反电动势系数 K_e /(V·s·m ⁻¹)	68.42
电机绕组电阻 R/Ω	10
电磁阀减振器基值阻尼 c_0 /(V·s·m ⁻¹)	520

4.1 自适应观测器状态估计仿真分析

仿真测试在 60 km/h 车速的 B 级路面下进行,持续时间为 5 s。悬架状态估计值与实际值对比如图 5 所示。悬架性能均方根值对比见表 4。

4.2 自适应观测器故障估计仿真分析

仿真测试在 60 km/h 车速的 B 级路面下进行,设定电磁混合作动器发生 3 种常见故障,依次比较了 3 种故障下正常作动器的输出力 u_d 和故障作动器的输出力 u_f ,以及 3 种故障下的故障设定值(故障作动器输出力 u_f 与正常作动器输出力 u_d 的差值)和故障估计值。电磁混合作动器故障具体描述见表 5。作动器故障 1、故障 2 和故障 3 估计分别如图 6~8 所示。

由图 6(a)可见:在 5~10 s 内直线电机发生 $\delta=0.7$ 的增益故障;在 10~15 s 内电磁阀减振器发生 $\delta=0.7$ 的增益故障;故障作动器输出力 u_f 均为正常作动器输出力 u_d 的 70%。由图 6(b)可见:在 0~5 s

表 5 电磁混合作动器故障具体描述

Tab.5 Electromagnetic hybrid actuator fault specific description

故障	故障描述
1	在 $t=5$ s 时只有直线电机工作,发生 $\delta=0.7$ 的增益故障;在 $t=10$ s 时只有电磁阀减振器工作,发生 $\delta=0.7$ 的增益故障
2	在 $t=5$ s 时只有电磁阀减振器工作,发生 $u_0=-150$ N 的恒偏差故障
3	在 $t=5$ s 时只有直线电机工作,卡在 $u_0=200$ N 处;在 $t=10$ s 时只有电磁阀减振器工作,卡在 $u_0=200$ N 处

内,故障估计值接近于 0;在 5~15 s 内,故障估计值曲线与故障设定值曲线基本重合。

电磁阀减振器中的电磁阀为常闭型,当阀芯位移出现偏差时发生恒偏差故障,阀芯位移较正常偏大时,故障作动器输出力 u_i 小于正常作动器输出力

u_d ;反之 u_i 大于 u_d 。由图 7(a)可见:在 5~10 s 内电磁阀减振器发生 $u_0=-150$ N 的恒偏差故障,当正常作动器输出力 u_d 的绝对值小于 150 时,故障作动器输出力 u_i 因电磁阀提前回到开度最大位置变为 0;当 u_d 的绝对值大于 150 时, u_i 比 u_d 减小了 150 N。由图 7(b)可见:在 0~5 s 内故障估计值接近于 0;在 5~10 s 内故障估计值曲线可较好地跟踪故障设定值曲线。

由图 8(a)可见:在 5~10 s 内直线电机发生 $u_0=200$ N 的卡死故障,故障作动器输出力 u_i 变为固定值 200 N;在 10~15 s 内电磁阀减振器发生卡死故障,故障作动器输出力 u_i 的大小确定,由流经电磁阀的油液方向决定正负。当正常作动器输出力 u_d 为负数时,故障作动器输出力 u_i 为 200 N;当 u_d 为正数时, u_i 为 200 N。由图 8(b)可见:在 0~5 s 内故障估计值接近于 0;在 5~15 s 内故障估计值曲线与故障设定值曲线基本重合。

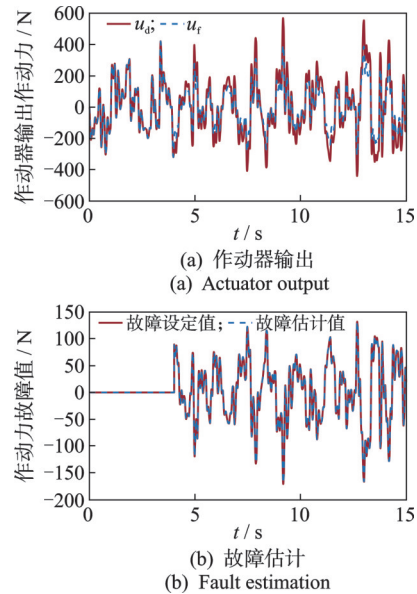


图 6 作动器故障 1 估计

Fig.6 Actuator failure 1 estimate

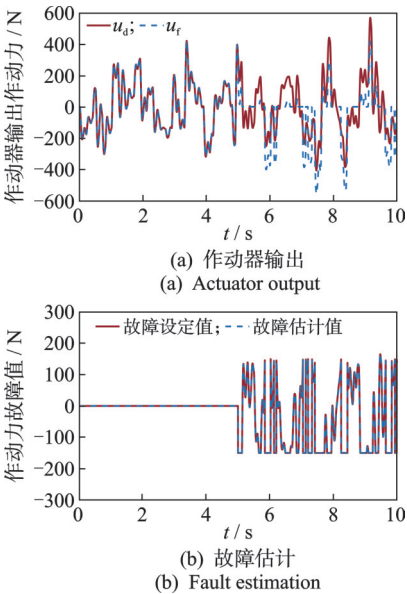


图 7 作动器故障 2 估计

Fig.7 Actuator failure 2 estimate

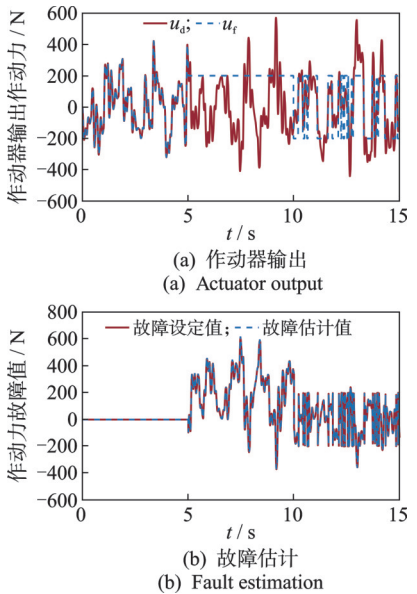


图 8 作动器故障 3 估计

Fig.8 Actuator failure 3 estimate

综上所述,本研究设计的自适应观测器在电磁混合作动器无故障下和发生常见的 3 种故障下都可以有效估计故障大小。

4.3 模式切换容错控制仿真分析

为了验证正常状态下模式切换的正确性,选取车速为 60 km/h、每隔 5 s 依次输入 A、B、C 路面等级进行仿真。为了验证发生故障后模式切换容错控制的有效性,每隔 5 s 依次对电磁混合作动器设定无故障、发生 $\delta=0.7$ 的增益故障以及发生 $u_0=-150$ N 的恒偏差故障进行仿真,并对正常、故障和容错控制 3 种状态下的悬架性能进行对比分析。3 种状态下的悬架性能如图 9 所示。悬架性能指标均方根值对比见表 6。

由图 9 和表 6 可见:在 0~5 s 内悬架处于正常状态,此时故障估计值未超过设定阈值,无需容错控制;在 5~10 s 内悬架发生 $\delta=0.7$ 的增益故障,故障状态下悬架性能相较正常状态下降,此时故障估计值超过设定阈值,启动容错控制,通过切换完好部件或者故障补偿实现容错控制,容错控制状态后簧载质量加速度均方根值、悬架动挠度均方根值和轮胎动载荷均方根值相较增益故障下分别降低了 16.10%、14.12% 和 18.35%;在 10~15 s 内,悬架发生 $u_0=-150$ N 的恒偏差故障,故障状态下悬架性能相较正常状态出现下降,此时故障估计值超过设定阈值,启动容错控制,容错控制后簧载质量加速度均方根值、悬架动挠度均方根值和轮胎动载荷均方根值相较恒偏差故障下分别降低了 24.79%、

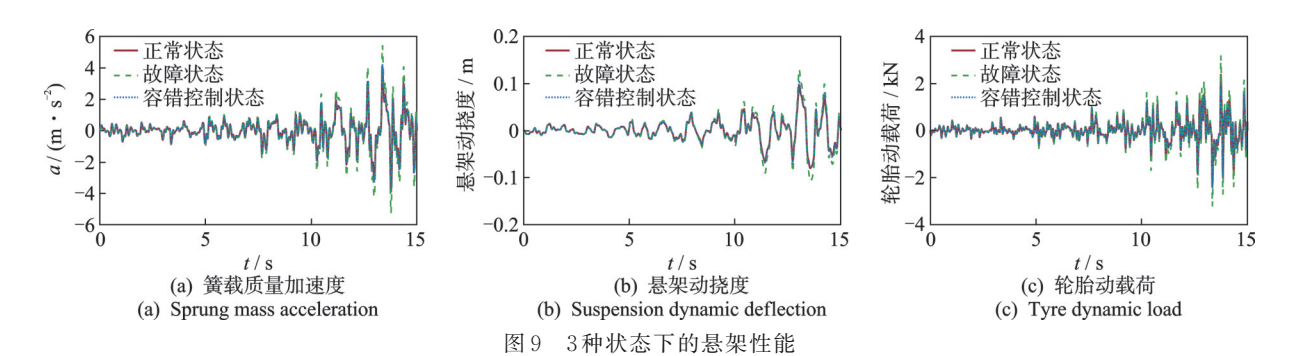


Fig.9 Suspension performance in three states

表 6 悬架性能指标均方根值对比

Tab.6 Suspension performance index root mean square value comparison

t/s	簧载质量加速度/ $(m \cdot s^{-2})$			悬架动挠度/m			轮胎动载荷/N		
	正常状态	故障状态	容错控制状态	正常状态	故障状态	容错控制状态	正常状态	故障状态	容错控制状态
0~5	0.265	0.265	0.265	0.006 7	0.006 7	0.006 7	145.6	145.6	145.6
5~10	0.491	0.590	0.495	0.014 7	0.017 7	0.015 2	245.3	294.3	240.3
10~15	1.303	1.759	1.323	0.039 3	0.053 0	0.040 5	623.8	842.1	598.1

23.59%和28.98%。根据仿真结果可知,当电磁混合作动器发生增益故障或恒偏差故障后,通过所设计的模式切换容错控制可以有效提升悬架性能,提高了电磁混合悬架的可靠性。

5 台架试验

为了进一步验证所设计控制策略的有效性,搭建电磁混合悬架台架试验系统,如图 10 所示。该系统主要包括液压振动台、上位机、驱动模块、加速度传感器、数据采集系统、半实物仿真设备(DSPACE)及电磁混合作动器等。

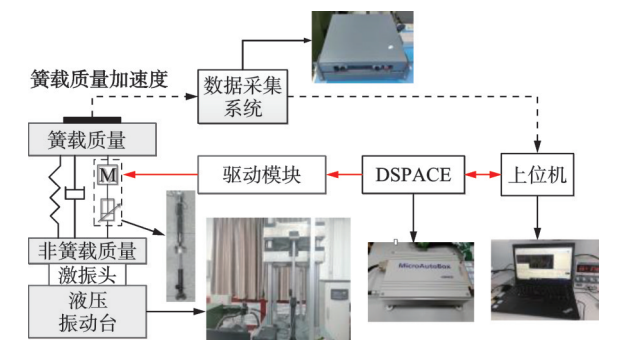


图 10 电磁混合悬架台架试验系统

Fig.10 Bench test system of electromagnetic hybrid suspension

每隔 5 s 依次输入 B、C 两个路面等级信号,通过控制液压振动台输出相应的路面激励,数据采集系统采集传感器信号,并传输至上位机,通过 DSPACE 控制电磁混合作动器的输入电流来控制输出力。试验中通过驱动模块输出回路上串接的电位器设置作动器故障,在 0~5 s 内,不设置故障;在

5 s 时刻,使电磁混合作动器输出发生 $\delta=0.7$ 的增益故障。由于试验条件限制,仅采集簧载质量加速度数据,并对比正常、故障和容错控制 3 种状态下的簧载质量加速度。

簧载质量加速度和均方根值对比分别如图 11、表 7 所示。可知,在 0~5 s 内悬架处于正常状态,此时故障估计值未超过设定阈值,无需容错控制;在 5~10 s 内电磁混合作动器发生 $\delta=0.7$ 的增益故障,故障状态下簧载质量加速度均方根值相较正常状态升高,悬架性能下降,此时故障估计值超过设定阈值,启动容错控制,通过切换完好部件或者故障补偿实现容错控制。容错控制后簧载质量加速度均方根值比增益故障时降低了 16.24%,说明所设计的模式切换容错控制策略可以有效改善故障悬架性能。

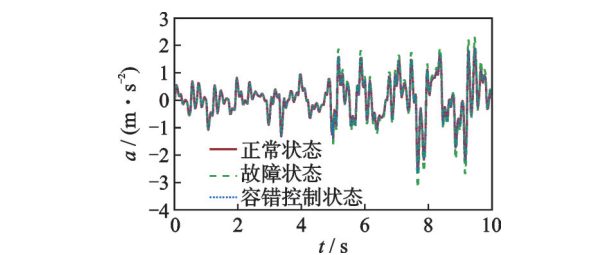


图 11 簧载质量加速度

Fig.11 Sprung mass acceleration

表 7 簧载质量加速度均方根值对比

Tab.7 Comparison of root-mean-square values of sprung mass acceleration

t/s	簧载质量加速度/ $(m \cdot s^{-2})$		
	正常状态	故障状态	容错控制状态
0~5	0.415	0.415	0.415
5~10	0.870	1.047	0.877

6 结 论

1) 在建立非线性电磁混合悬架模型和故障悬架模型的基础上,设计了模式切换容错控制策略,通过自适应观测器估计悬架状态和故障大小,通过模式切换控制器改善故障悬架性能。

2) 利用 Matlab/Simulink 软件进行仿真分析,结果表明,自适应观测器可以准确估计悬架状态和故障大小,模式切换容错控制下悬架的各项性能接近于无故障时水平。

3) 开展了电磁混合悬架容错控制台架试验,分析了簧载质量加速度的改善效果,验证了模式切换容错控制策略的可行性。

参 考 文 献

- [1] 吴晓,史文库,陈志勇.基于交互式多模型卡尔曼滤波的主动悬架控制[J].汽车工程,2023,45(7):1200-1211,1253.
WU Xiao, SHI Wenku, CHEN Zhiyong. Active suspension control based on interacting multiple model kalman filter[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(7): 1200-1211, 1253.(in Chinese)
- [2] 汪若尘,马晓炜,丁仁凯,等.基于模型参考的混合悬架多模式切换控制研究[J].农业机械学报,2017,48(7):353-360.
WANG Ruochen, MA Xiaowei, DING Renkai, et al. Multi-mode switching control system for hybrid suspension based on model reference[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 353-360.(in Chinese)
- [3] PANG H, SHANG Y, YANG J. An adaptive sliding mode-based fault-tolerant control design for half-vehicle active suspensions using T-S fuzzy approach[J]. Journal of Vibration and Control, 2020, 26(17/18): 1411-1424.
- [4] 陈龙,单海强,徐兴,等.基于扩展 Kalman 滤波器组的 ECAS 系统传感器故障诊断[J].振动、测试与诊断,2019,39(2):389-395.
CHEN Long, SHAN Haiqiang, XU Xing, et al. Sensor fault diagnosis of ECAS system based on extended Kalman filter banks[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(2): 389-395.(in Chinese)
- [5] 庞辉,杨军杰,刘雪.基于 T-S 模糊模型的主动悬架滑模容错控制器设计[J].工程力学,2019,36(2):229-238,248.
PANG Hui, YANG Junjie, LIU Xue. sliding-mode fault tolerant controller design for vehicle active suspension systems based on T-S fuzzy model[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(2): 229-238, 248.(in Chinese)
- [6] JIN P, XUE W P, LI K J. Actuator fault estimation for vehicle active suspensions based on adaptive observer and genetic algorithm[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(1): 1783850.
- [7] 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)
- [8] 寇发荣,武江浩,景强强,等.1/4 车辆电磁混合主动悬架容错控制[J].振动、测试与诊断,2022,42(1):96-102.
KOU Farong, WU Jianghao, JING Qiangqiang, et al. Fault-tolerant control of 1/4 vehicle electromagnetic hybrid active suspension[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2022, 42(1): 96-102.(in Chinese)
- [9] 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)
- [10] GUO L, MALABRE M. Robust H_{∞} control for descriptor systems with non-linear uncertainties[J]. International Journal of Control, 2003, 76(12): 1254-1262.
- [11] 寇发荣,武大鹏,许家楠,等.电磁混合主动悬架多模式协调切换控制[J].振动、测试与诊断,2023,43(3):467-475.
KOU Farong, WU Dapeng, XU Jianan, et al. Multi-mode coordinated switching control of electromagnetic hybrid active suspension[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(3): 467-475.(in Chinese)
- [12] 陆孟洁,王天真,祝小元.基于自适应观测器的直升机系统故障估计[J].电光与控制,2022,29(2):103-107,112.
LU Mengjie, WANG Tianzhen, ZHU Xiaoyuan. Fault estimation of helicopter system based on adaptive observer[J]. Electronics Optics & Control, 2022, 29(2): 103-107, 112.(in Chinese)
- [13] 高振刚,李晓雪,曹宇,等.基于作动器故障估计的汽车主动悬架容错控制研究[J].内蒙古大学学报,2016,47(5):533-541.
GAO Zhengang, LI Xiaoxue, CAO Yu, et al. Research on fault-tolerant control of automotive active suspension based on actuator fault estimation[J]. Journal of Inner Mongolia University, 2016, 47(5): 533-541.(in Chinese)



第一作者简介:寇发荣,男,1973年6月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为车辆振动与噪声控制。曾发表《车辆电动静液压半主动悬架设计与性能研究》(《农业机械学报》2016年第47卷第5期)等论文。
E-mail: koufarong@xust.edu.cn