

1/4 车辆电磁混合主动悬架容错控制*

寇发荣, 武江浩, 景强强, 许家楠, 李孟欣

(西安科技大学机械工程学院 西安, 710054)

摘要 为了解决电磁混合主动悬架在发生故障时导致的系统失稳现象,设计了一种多模式切换容错控制策略。分别建立了 1/4 车辆二自由度悬架模型、直线电机数学模型及电磁阀减振器多项式模型。采用未知输入观测器对悬架状态进行估计,以悬架系统簧载质量加速度为正常状态切换条件,以簧载质量加速度残差和稳定模块为故障状态切换条件,设计了一种多模式切换容错控制策略。仿真分析了多模式切换容错控制策略下悬架的动态性能,并开展台架试验。试验结果表明:在多模式切换容错控制下,簧载质量加速度均方根值相比故障状态降低 31.35%;多模式切换容错控制策略可以实现悬架在正常状态与故障状态的模式切换,且悬架的动态性能得到改善。

关键词 主动悬架;状态估计;未知输入观测器;容错控制;模式切换

中图分类号 U463.33; TH113.1

引言

汽车主动悬架可以实现阻尼和刚度的调节,提高车辆的舒适性和稳定性^[1]。目前,对于主动悬架的研究大多是在各部件完好条件下进行的^[2]。当悬架的作动器或者传感器发生故障时,主动悬架不能按照所设计的方案提供作动力,对车辆的安全性造成威胁^[3]。容错控制可以在悬架发生故障时,通过故障诊断与隔离,根据检测结果对悬架进行实时力补偿,提高悬架的安全性^[4]。杨柳青^[5]设计了基于控制率重组的容错控制器,消除了作动器故障影响。张袅娜等^[6]采用未知扰动输入观测器完成了对悬架故障的解耦,实现对悬架故障的诊断与检测。以上研究尚未将悬架容错控制与模式切换进行结合。

笔者基于电磁直线混合作动器(electro-magnetic linear hybrid actuator,简称 EMLHA)的主动悬架,针对直线电机或电磁阀故障,设计多模式切换容错控制策略。通过仿真与台架试验,验证了多模式切换容错控制策略的可行性。

1 电磁混合主动悬架工作原理

图 1 为混合悬架结构原理图。该悬架系统包括 EMLHA(由直线电机与电磁阀减振器串联构成)、液压减振器、螺旋弹簧、控制器、功率模块电路、超级

电容和加速度传感器等。EMLHA 的直线电机工作在馈能状态时,车身振动带动直线电机做切割磁感线运动产生的电能存储到超级电容中。EMLHA 的直线电机工作在主动状态时,通过功率模块电路的调节电流大小,控制直线电机输出相应的主动力。电磁阀减振器工作时,通过功率模块电路调节电流大小,实现电磁阀节流口开度大小调节。

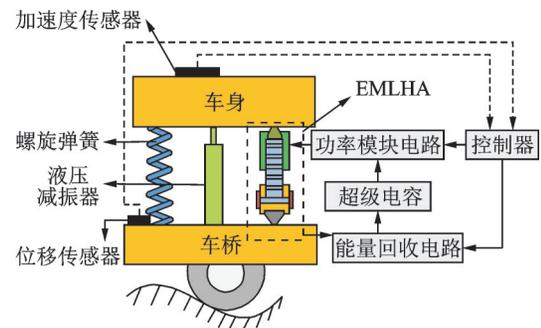


图 1 混合悬架结构原理图

Fig.1 Structure diagram of hybrid suspension system

2 悬架系统动力学模型

2.1 二自由度悬架数学模型

二自由度模型能够清晰地反应悬架动态特性,建立 1/4 车辆悬架二自由度模型如图 2 所示。

根据牛顿第二定律得出运动学方程组为

* 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);咸阳市重点研发计划资助项目(2021ZDYF-GY-0027)

收稿日期:2021-01-08;修回日期:2020-03-03

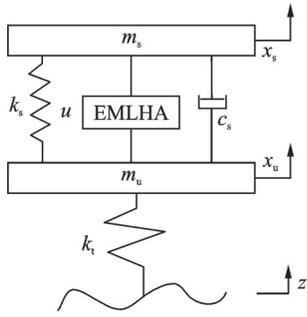


图 2 1/4 车辆二自由度混合悬架模型

Fig.2 1/4 vehicle 2-DOF hybrid suspension model

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

其中: x_s 为簧载质量位移; \dot{x}_s 为簧载质量速度; \ddot{x}_s 为簧载质量加速度; x_u 为非簧载质量位移; \dot{x}_u 为非簧载质量速度; \ddot{x}_u 为非簧载质量加速度; u 为作动器输出力; m_s 为簧载质量; m_u 为非簧载质量; z 为路面输入激励; k_s 为弹簧刚度; k_t 为轮胎刚度; c_s 为减振器阻尼系数。

选取该悬架系统的状态变量为 $X = [x_s - x_u \quad \dot{x}_s \quad x_u - z \quad \dot{x}_u]^T$; 输出向量为 $Y = [\ddot{x}_s \quad x_s - x_u \quad k_t(x_u - z) \quad \dot{x}_u]^T$; 控制输入为 $U = [u]$; 扰动输入为 $W = [\dot{z}]$ 。其状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + EW \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (2)$$

其中: A 为状态矩阵; B 为控制矩阵; E 为扰动输入矩阵; C 为输出矩阵; D 为直接联系矩阵。

2.2 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

$$F_L = 1.5P_n \pi \phi_f i_q / \tau = K_i i_q \quad (3)$$

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

直线电机感应电动势表达式为

$$U_L = K_e \dot{x}_{s-u} \quad (4)$$

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

2.3 电磁阀减振器多项式模型

电磁阀减振器速度特性试验如图 3 所示, 利用其对电磁阀减振器进行特性试验建模^[7]。根据采集的阻尼力信号与位移信号, 得到不同电流下电磁阀减振器速度特性试验拟合曲线, 如图 4 所示。

电磁阀减振器阻尼力与悬架速度相关性表达式为



图 3 电磁阀减振器速度特性试验

Fig.3 Speed characteristic test of solenoid valve damper

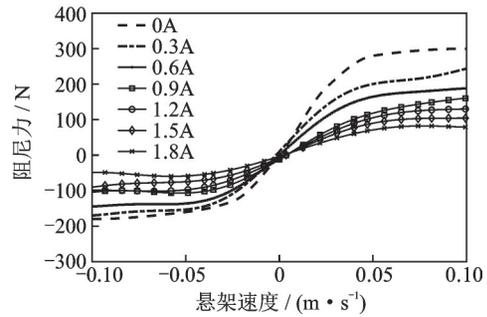


图 4 电磁阀减振器速度特性试验拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of velocity characteristic test for damper of solenoid valve

$$F_s = \sum_{k=0}^3 (b_k I^2 + c_k I + d_k) \dot{x}_{s-u}^k \quad (5)$$

其中: k 取值为 0, 1, 2, 3; b_k, c_k, d_k 为多项式系数; I 为控制电流; F_s 为电磁阀减振器阻尼力。

通过回归分析法得到电磁阀减振器的参数辨识结果, 如表 1 所示。将其代入式(5), 得到电磁阀减振器多项式模型。

表 1 参数辨识结果

Tab.1 Parameter identification results

k	b_k	c_k	d_k
0	9 614	26 240	-95 216
1	8 905	-18 980	17 288
2	-810	-894.1	2 420.3
3	-11.45	10.16	1.86

3 未知输入观测器模型

由于路面干扰是随机的, 所以全输入观测器不适用于悬架系统。未知输入观测器能够利用系统的冗余输出, 实现对系统状态量的渐进观测, 可以对外部干扰进行完全解耦^[8]。笔者采用未知输入观测器得到悬架的状态观测值, 根据状态观测值对悬架工作模式做出判定。其全阶未知输入观测器结构^[9]为

$$\dot{Z} = GZ + TBU + KY \quad (6)$$

$$\hat{X} = Z + HY \quad (7)$$

其中： \hat{X} 为状态估计向量； Z 为未知输入观测器(unknown input observer, 简称UIO)的观测向量； G, T, K, H 为设计用于未知输入解耦的矩阵。

图5为未知输入观测器结构图。

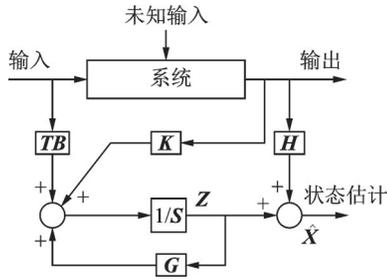


图5 未知输入观测器结构图
Fig.5 Structure of UIO

观测器的状态误差向量为

$$\bar{X} = X - \hat{X} \quad (8)$$

输出估计残差为

$$r = Y - \hat{Y} \quad (9)$$

状态误差向量的控制方程为

$$\begin{aligned} \dot{\bar{X}} &= \dot{X} - \dot{\hat{X}} = \\ & AX + BU + EW - (\dot{Z} + H\dot{Y}) = \\ & (A - HCA - K_1C)\bar{X} + (A - HCA - K_1C - \\ & G)Z + [(A - HCA - K_1C)H - K_2]Y + (B - \\ & TB - HCB - K_1D)U + (I - HC)EW - HD\dot{U} \end{aligned} \quad (10)$$

其中： I 为适维矩阵； $K = K_1 + K_2$ 。

当式(10)满足式(11)时,有

$$\begin{cases} HD = 0 \\ (I - HC)E = 0 \\ A - HCA - K_1C = G \\ GH = K_2 \\ B - TB - HCB - K_1D = 0 \end{cases} \quad (11)$$

则状态估计误差为 $G\bar{X}$ 。

如果 G 具有全部稳定的特征值,则 \bar{X} 趋近于0,系统输出残差 r 也将趋近于0,UIO可以有效地对悬架系统进行状态估计。

4 多模式切换容错控制策略

4.1 模式切换控制器

根据车辆对于悬架性能的要求,电磁混合悬架能够实现各种模式的稳定切换,保证车辆的安全性以及操纵稳定性。该多模式切换容错控制策略包括

正常状态模式切换与发生故障模式切换2部分。在正常状态下,将悬架系统根据UIO得到的簧载质量加速度观测值与设定的簧载质量加速度阈值进行比较,判定悬架的工作模式,完成在正常状态下的模式切换。发生故障后,根据未知输入观测器得到簧载质量加速度残差 r_a 。若残差 r_a 大于阈值 a_y ,且经过稳定模块判定该状态稳定存在后,则判定作动器发生故障,进行故障状态下的模式切换。图6为电磁混合悬架模式切换框图。

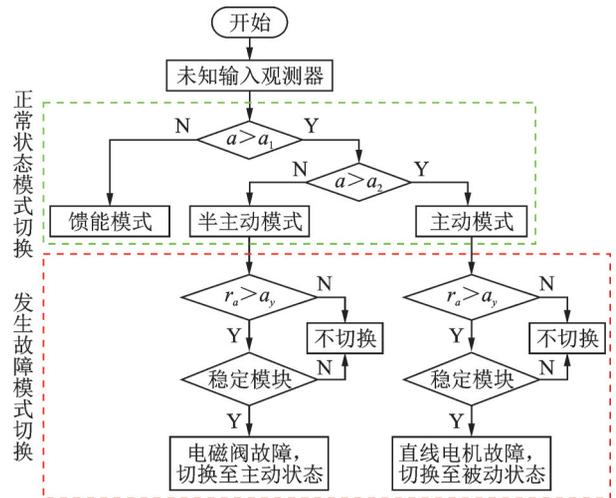


图6 电磁混合悬架模式切换框图

Fig.6 Block diagram of electro-magnetic hybrid suspension mode switching

设 a_1 和 a_2 为簧载质量加速度阈值,根据簧载质量加权加速度与人体主观感觉关系^[10]可知:当加权加速度均方根值为 0.315 m/s^2 时,人体没有不舒服;当加权加速度均方根值为 0.5 m/s^2 时,人体会感到相当不舒服,所以选 $a_1 = 0.315 \text{ m/s}^2, a_2 = 0.5 \text{ m/s}^2$ 。

根据混合悬架在不同工况选择的作动器执行部件不同,定义悬架4个工作模式,如表2所示。当车辆行驶条件较好时,悬架工作在馈能模式,直线电机馈能,电磁阀不工作。当车辆行驶条件一般时,悬架工作在半主动模式,直线电机馈能,电磁阀工作调节悬架阻尼力。当车辆行驶条件较差时,悬架工作在主动模式,直线电机输出主动控制力,电磁阀不工作。当

表2 悬架工作模式

Tab.2 Suspension working mode

工作模式	直线电机	电磁阀
馈能模式	馈能	不工作
半主动模式	馈能	工作
主动模式	主动	不工作
被动模式	不工作	不工作

悬架发生较大故障时,悬架工作在被动模式,直线电机与电磁阀均不工作,避免了过度消耗能量进行力补偿,此时悬架的阻尼由并联的液压减振器提供。

4.2 故障诊断与补偿

当作动器发生故障后,控制系统根据未知输入观测器所得的簧载质量加速度残差与设定的阈值进行比较,并经过稳定模块判定后,在线诊断悬架是否发生故障,对控制力进行实时补偿。图 7 为故障诊断结构图。常见的作动器故障有卡死、增益变化、恒偏差 3 种情况^[11]。为了使该研究具有一般性,笔者仅考虑作动器发生增益故障。悬架控制器计算得到补偿力后,将补偿力的大小信号传输给作动器,作动器进行力补偿。

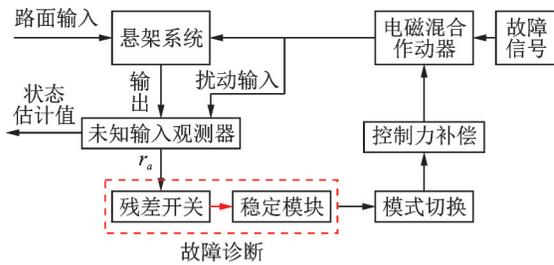


图 7 故障诊断结构图

Fig.7 Fault diagnosis structure diagram

悬架作动器发生故障时,系统状态方程表示为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + B\delta U + EW \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (12)$$

其中: δ 为作动器故障增益系数, $\delta \in [0, 1]$ 。

当 $\delta = 1$ 时,表示作动器无故障;当 $\delta = 0$ 时,表示作动器发生完全增益损失故障;当 $0 < \delta < 1$ 时,表示作动器部分增益损失故障。

发生故障时的残差为

$$r = Y - \hat{Y} = CX + DU - C\hat{X} - D\delta U = C(X - \hat{X}) + D(U - \delta U) \quad (13)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时,作动器发生增益故障, r 不趋向 0,悬架发生故障,此时残差表达式为

$$r = C \int_0^t e^{G(t-\lambda)} (\delta - I) TBU(\lambda) d\lambda + D(\delta - I)U \quad (14)$$

其中: λ 为积分变量。

悬架作动器的增益估计值为

$$\hat{\delta} = \text{pinv} \left[\int_0^t C e^{T(t-\sigma)} TBU(\sigma) d\sigma + DU \right] r + I \quad (15)$$

其中: $\hat{\delta}$ 为增益故障估计值;pinv 为求伪逆矩阵。

故障作动器的故障输出力为

$$u_f(t) = \delta u \quad (16)$$

其中: u 为无故障时作动器的输出力。

悬架的补偿力为

$$F(t) = (1 - \delta) u \quad (17)$$

4.3 稳定模块流程

随机路面冲击可能会导致悬架产生瞬间故障,从而进行模式切换。为了避免产生瞬间故障时悬架频繁的模式切换,导致系统的失稳问题,故在故障状态模式切换部分设计了一种稳定模块,以提高模式切换的稳定性。图 8 为稳定模块流程图。

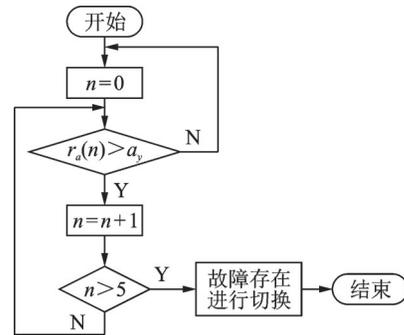


图 8 稳定模块流程图

Fig.8 Flow chart of stability module

通过未知输入观测器得到簧载质量加速度残差 r_a ,如果连续 5 次得到的残差都大于阈值 a_y ,则确定发生故障,可以进行模式切换。若其中一次采样不满足条件,则不进行切换,开始重新进行采样,稳定模块避免了不合理的模式切换。

5 仿真分析

为了验证所设计的电磁混合悬架多模式切换容错控制的正确性,在 Matlab/Simulink 环境下建立电磁混合悬架的仿真模型。悬架系统参数如表 3 所示。

表 3 悬架系统参数

Tab.3 Suspension system parameters

参数	取值
簧载质量 m_s/kg	300
非簧载质量 m_u/kg	40
电磁阀减振器基值阻尼 $c_0/(\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	522
轮胎刚度 $k_t/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	150
弹簧刚度 $k_s/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	12
推力系数 $K_i/(\text{N} \cdot \text{A}^{-1})$	78.54
反电动势系数 $K_e/(\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	68.42
电机绕组电阻 R/Ω	10.1

5.1 未知输入观测器仿真分析

设定仿真在车速为 60 km/h, B 级路面上进行, 仿真时间为 5 s, 对悬架状态的实际值以及采用 UIO 状态估计下的状态估计值进行对比。图 9 为悬架状态估计值对比结果。3 种状态下的悬架性能指标均

方根值如表 4 所示。

根据表 4 所示, 簧载质量加速度的状态估计误差为 2.94%, 悬架动挠度误差为 2.97%, 轮胎动载荷误差为 3.23%。3 项性能指标的状态估计误差都较小, 表明采用未知输入观测器可以对悬架状态进行准确估计。

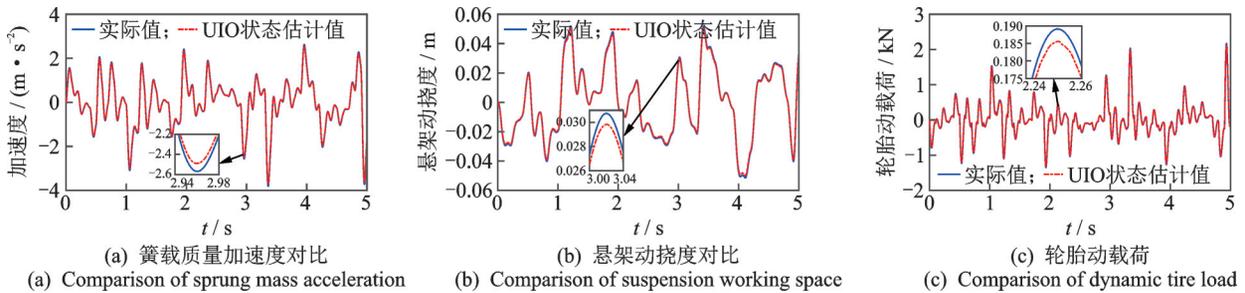


图 9 悬架状态估计值对比

Fig.9 Comparison of suspension state estimation

表 4 悬架性能指标均方根值

Tab.4 Root mean square of suspension performance index

指标	实际值	UIO 状态估计值	误差/%
簧载质量加速度/($m \cdot s^{-2}$)	1.123	1.090	2.94
悬架动挠度/m	0.026 9	0.026 1	2.97
轮胎动载荷/N	489.0	473.2	3.23

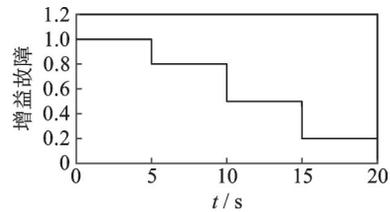


图 10 悬架增益故障

Fig.10 Suspension gain fault

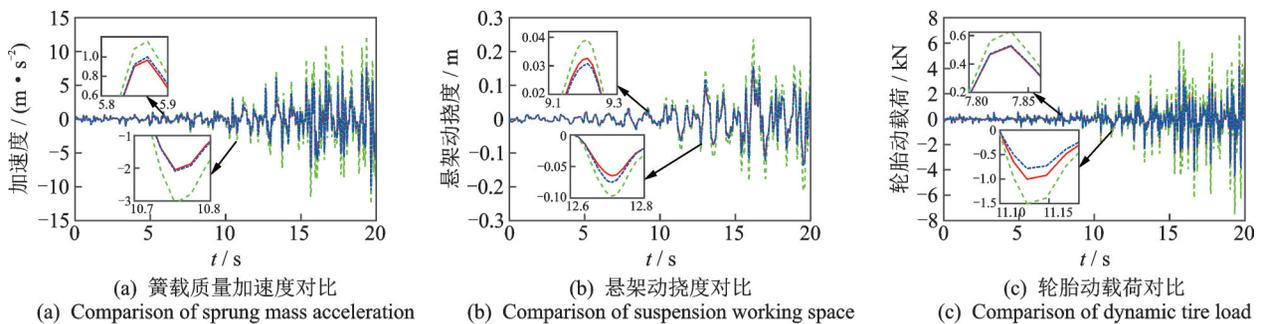
5.2 多模式切换容错控制仿真分析

为了验证悬架正常状态下多模式切换的正确性, 选取路面等级依次为 A, B, C, D 4 个等级, 持续时间各 5 s, 车速为 60 km/h 进行仿真分析。

为了验证在故障状态下多模式切换容错控制的有效性, 对悬架设定无故障、0.8 倍增益故障、0.5 倍增益故障、0.2 倍增益故障, 持续时间各 5 s, 车速为 60 km/h 时进行仿真分析, 悬架增益故障如图 10 所示。仿真分析得到正常切换状态、故障状态以及多

模式切换容错控制状态的性能对比如图 11 所示。表 5 为不同状态下悬架性能指标均方根值。

由表 5 可知, 在 0~5 s 时间段悬架未发生故障, 不需要进行容错控制, 容错误差均为 0; 在 5~10 s 时间段, 悬架发生 0.8 倍增益故障, 簧载质量加速度容错效果(多模式切换容错控制状态与故障状态比较)为 15.33%, 悬架动挠度容错效果为 13.46%, 轮胎动载荷容错效果为 18.68%; 在 10~15 s 时间段, 悬架发生 0.5 倍增益故障, 簧载质量加速度容错效果为 28.06%, 悬架动挠度容错效果为 29.21%, 轮胎动载



— 正常切换; - - - 故障状态; - - - 多模式切换容错控制

图 11 不同状态下悬架性能对比

Fig.11 Comparison of suspension performance in different states

表 5 不同状态下悬架性能指标均方根值

Tab.5 Root mean square of suspension performance index in different states

t/s	性能指标	正常切换状态	故障状态	多模式切换容错控制状态	容错效果/%
0~5	簧载质量加速度/(m·s ⁻²)	0.297	0.297	0.297	0
	悬架动挠度/m	0.008 9	0.008 9	0.008 9	0
	轮胎动载荷/N	179.5	179.5	179.5	0
5~10	簧载质量加速度/(m·s ⁻²)	0.468	0.561	0.475	15.33
	悬架动挠度/m	0.021 6	0.026 0	0.022 5	13.46
	轮胎动载荷/N	319.3	383.2	311.6	18.68
10~15	簧载质量加速度/(m·s ⁻²)	1.423	2.135	1.536	28.06
	悬架动挠度/m	0.051 8	0.077 7	0.055 0	29.21
	轮胎动载荷/N	778.1	1 167.4	734.2	37.11
15~20	簧载质量加速度/(m·s ⁻²)	2.884	4.614	3.058	33.72
	悬架动挠度/m	0.062 6	0.100 2	0.065 0	35.13
	轮胎动载荷/N	1 251.8	2 202.8	1 189.8	45.99
0~20	簧载质量加速度/(m·s ⁻²)	1.674	2.629	1.779	32.33
	悬架动挠度/m	0.041 3	0.062 6	0.043 7	30.19
	轮胎动载荷/N	714.2	1 068.0	675.6	36.74

荷容错效果为 37.11%；在 15~20 s 时间段，悬架发生 0.2 倍增益故障，簧载质量加速度容错效果为 33.72%，悬架动挠度容错效果为 35.13%，轮胎动载荷容错效果为 45.99%；在全局仿真时间 0~20 s 内，簧载质量加速度容错效果为 32.33%，悬架动挠度容错效果为 30.19%，轮胎动载荷容错效果为 36.74%。根据仿真结果，在多模式切换容错控制策略下，悬架的各项性能指标都得到了提升，改善了车辆的平顺性与安全性，表明该控制策略具有合理性。

6 台架试验

为了验证多模式切换容错控制的效果，对设计的控制策略进行台架试验。图 12 为试验系统原理图。试验设备主要包括 DSPACE、加速度传感器、上位机、数据采集系统、驱动模块、液压振动台和配重块等。

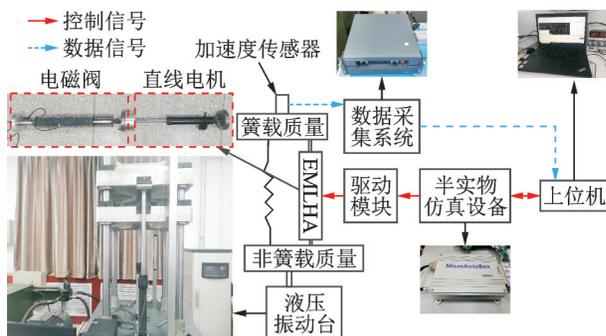


图 12 试验系统原理图

Fig.12 Schematic diagram of test system

初始时，通过半实物仿真设备控制输入电流为 10 A，混合悬架工作在正常状态，在 $t=5$ s 时，改变混合悬架输入电流为 5 A，悬架所提供的作动力不足，以此模仿混合悬架处于故障状态，试验总时长为 10 s。由于试验条件限制，只对簧载质量加速度进行对比。簧载质量加速度试验对比如图 13 所示。

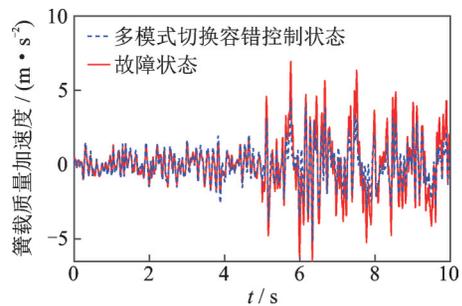


图 13 簧载质量加速度试验对比

Fig.13 Comparison of sprung loaded mass acceleration test

根据试验结果可知，在发生故障时，混合悬架的簧载质量加速度均方根值为 1.738 m/s^2 ，在多模式切换容错控制下，簧载质量加速度均方根值为 1.193 m/s^2 ，相比故障悬架降低了 31.35%，混合悬架在发生故障时，通过多模式切换容错控制策略实时控制，悬架的安全性与舒适性得到了提高。

7 结束语

针对电磁混合主动悬架的电磁阀或直线电机故障，提出了一种多模式切换容错控制策略，建立了悬

架系统的动力学模型和未知输入观测器模型。设计了多模式切换容错控制策略并进行仿真分析。分析结果表明,在全局仿真时间内,悬架的各项性能指标均得到提升。最后,开展了多模式切换容错控制台架试验,分析了时域下电磁混合悬架的性能,验证了多模式切换容错控制策略的可行性。

参 考 文 献

- [1] 庞辉,梁军,王建平,等.考虑系统不确定性的车辆主动悬架自适应模糊滑模控制[J].振动与冲击,2018,37(15):261-269.
PANG Hui, LIANG Jun, WANG Jianping, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control for vehicle active suspension systems considering system uncertain [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15): 261-269. (in Chinese)
- [2] 孟祥鹏,孙泽宇,丁仁凯,等.基于改进天棚控制的混合电磁主动悬架节能机理与试验[J].江苏大学学报(自然科学版),2020,41(6):627-633.
MENG Xiangpeng, SUN Zeyu, DING Renkai, et al. Energy-saving mechanism and experiment of hybrid electromagnetic active suspension based on improved skyhook control[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 627-633. (in Chinese)
- [3] 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 information[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(14): 1746-1752. (in Chinese)
- [4] CAO F, SUN H, LI Y M, et al. Fuzzy adaptive fault-tolerant control for a class of active suspension systems with time delay [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2019, 21(7): 2054-2065.
- [5] 杨柳青.基于作动器故障的整车主动悬架容错控制[J].贵州大学学报(自然科学版),2014,31(2):112-118.
YANG Liuqing. Fault tolerant control research on full vehicle active suspension system based on actuator fault [J]. Journal of Guizhou University (Natural Science Edition), 2014, 31(2): 112-118. (in Chinese)
- [6] 张袅娜,付留杰,徐才茂,等.基于未知输入观测器的悬架故障诊断[J].长春工业大学学报,2017,38(4):313-321.
ZHANG Niaoona, FU Liujie, XU Caimao, et al. Suspension fault diagnosis based on unknown input observer [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2017, 38(4): 313-321. (in Chinese)
- [7] 寇发荣,景强强,马建,等.电磁混合主动悬架内分泌复合天地棚控制研究[J].机械科学与技术,2020(1):1-10.
KOU Farong, JING Qiangqiang, MA Jian, et al. Research on endocrine compound skyhook and groundhook control of electro-magnetic hybrid active suspension [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020(1): 1-10. (in Chinese)
- [8] 彭靖波,王磊,任立通,等.未知输入观测器组的航空发动机分布式控制系统传感器解析重构控制[J].空军工程大学学报(自然科学版),2017,18(1):1-6.
PENG Jingbo, WANG Lei, REN Litong, et al. Analytic reconfiguration control in aero engine distributed control system based on UIO [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(1): 1-6. (in Chinese)
- [9] 包黎明,钟孝伟,王乾乾.基于UIO的汽车主动悬架系统状态估计[J].汽车实用技术,2017(22):23-26.
BAO Liming, ZHONG Xiaowei, WANG Qianqian. Vehicle active suspension system based on UIO state estimation [J]. Practical Automobile Technology, 2017(22): 23-26. (in Chinese)
- [10] 汤爱华,康小鹏,欧健,等.车辆平顺性评价标准适用性分析[J].四川理工学院学报(自然科学版),2011,24(5):530-533.
TANG Aihua, KANG Xiaopeng, OU Jian, et al. Analysis on applicability of ride comfort standards to vehicles [J]. Journal of Sichuan University of Science and Engineering (Natural Science Edition), 2011, 24(5): 530-533. (in Chinese)
- [11] 高振刚,陈无畏,任春,等.考虑作动器故障分级的汽车SASS与LKAS集成容错控制策略[J].机械设计,2020,37(4):110-118.
GAO Zhengang, CHEN Wuwei, REN Chun, et al. Integrated fault-tolerant control of SASS and LKAS with actuator fault-severity classification taken into consideration [J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(4): 110-118. (in Chinese)



第一作者简介:寇发荣,男,1973年6月生,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馈能研究》(《农业机械学报》2016年第47卷第5期)等论文。

E-mail:koufarong@xust.edu.cn