

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.045

基于模型参考的混合悬架多模式切换控制研究

汪若尘 马晓炜 丁仁凯 孟祥鹏 陈 龙
(江苏大学汽车工程研究院, 镇江 212013)

摘要: 混合悬架在单一控制模式下的舒适性、安全性和馈能性存在相互制约问题,本文基于模型参考的方式设计了一种混合悬架多模式切换控制方法,确定了各模式之间切换规则来控制直线电机和可调阻尼进行切换。然后基于Simulink/Stateflow进行了1/4混合悬架的切换控制系统的设计和仿真,并进行了快速原型试验论证。仿真试验结果表明:混合悬架多模式切换控制模型可以有效地进行切换并达到切换目标,提高混合悬架的综合性能。
关键词: 混合悬架; 能量回收; 多模式切换; 动态建模
中图分类号: U463.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)07-0353-08

Multi-mode Switching Control System for Hybrid Suspension Based on Model Reference

WANG Ruochen MA Xiaowei DING Renkai MENG Xiangpeng CHEN Long
(Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Due to the mutual restricted problem among comfort, safety, energy-regeneration in single control mode, the hybrid suspension with four working modes was designed and the switching strategy based on model reference was generated to control linear motor and adjustable damping to switch. Comfort model, safe model, combine model and passive energy recycle model were proposed to solve the above problems. And the body acceleration and tire dynamic displacement were used as the threshold of these four switching modes. In this system, the hybrid suspension with linear motor and three stages adjustable damping was taken as the research object. First of all, control strategies in different modes were changed through the use of multi-mode switching to improve the control effect. Then in order to reduce energy consumption and recover energy, the appropriate damping values in different modes were selected and the linear motor was used as a generator. And based on Simulink/Stateflow, the switching control system of 1/4 hybrid suspension was designed and simulated, and a complete simulation process from road switching, mode selection, mode switching to the changing of suspension model parameters was constructed. And a rapid prototype experiment was carried out. The experimental study on dynamic performance and energy feedback capability of hybrid suspension was based on dSPACE development model. The corresponding control strategy was designed and the results indicated that the root mean square value of the body acceleration and the root mean square value of the tire dynamic displacement were compared with the simulation results. Multi-mode switching control model of the hybrid suspension can effectively switch and reach the switching target, help hybrid suspension with energy recovery and improve the comprehensive performance of the hybrid suspension.
Key words: hybrid suspension; energy-regeneration; multi-mode switching; dynamic modeling

引言

混合悬架由并联的直线电机、弹簧、可调阻尼

器,连接簧上和簧下质量组成,从结构来说是混合的。就控制而言,直线电机既可以作为电动机改善动态性能,又可以作为发电机将振动能量回收。因

收稿日期: 2016-10-25 修回日期: 2017-02-06
基金项目: 国家自然科学基金项目(51575240)、江苏省教育厅自然科学基金重大项目(15KJA460005)和镇江市工业支撑项目(GY2015029)
作者简介: 汪若尘(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事车辆动态性能模拟与控制研究,E-mail: wr@ujs.edu.cn

此,如何对混合悬架进行控制并进行能量回收是众多学者和本文研究的重点^[1-4]。

针对模式切换的动态建模过程,当前主要研究对象依旧为混合动力汽车、航空发动机和汽车发动机。国内尹安东等^[5]、王庆年等^[6]、秦大同等^[7]都对混合动力汽车不同工作模式切换的动态特性及其稳定性进行了深入研究,将混杂理论融入模式切换研究。但目前对于混合悬架模式切换的动态分析还鲜有研究。

除各个工作模式的有效切换外,单一模式下直线电机主动控制或者能量回收也是研究重点。DAVID 等^[8]提出了一种基于电磁悬架的车辆动力学性能和节能特性的双目标控制结构,以期实现车辆动力学性能和节能特性的平衡。陈宏伟^[9]提出了一种节能型主动悬架系统,采用无刷永磁直线电机作动器,研究了直线电机式主动悬架的动态性能以及馈能性能。PIRES 等^[10]研究了悬架振动能量回馈与动力学控制的矛盾关系,但只研究单一模式下的悬架性能和能量回收,并未考虑利用模式切换来提高馈能效率。

为准确描述混合悬架模式切换系统中存在的动态特性,本文利用混杂自动机模型描述连续动态过程和离散事件以及两者之间相互耦合关系。并使用以有限状态机(FSM)为理论基础的 Simulink/Stateflow 模块建立切换控制系统。采用基于模型参考自适应控制方法,把自适应控制部分改进为自适应模式切换,对混合悬架进行多模式切换控制。本控制方法利用被动参考悬架模型提供实时汽车参考性能指标,并与切换条件比较,控制混合悬架在安全性模式、舒适性模式、综合性能模式、被动馈能模式 4 种工作模式中切换,在不同模式下调节控制方法,呈现混合悬架的不同特性。最后通过仿真和试验探究该混合悬架被动馈能模式和主动控制模式切换的有效性和汽车动态性能改良,以及在被动馈能模式下的能量回收状况。

1 混合悬架动态模型

混合悬架动态模型是实现控制悬架工作模式切换和能量回收的基础和关键。为了准确描述混合悬架动态模型,结合混杂自动机模型,对其进行描述以及建模。

1.1 混合悬架多模式切换过程分析

混合悬架多模式切换系统的主要控制目标是能够准确、快速地在各个模式之间进行切换,以满足整车的综合性能和能量回收要求。图 1 为 1/4 混合悬架结构示意图,可以看出,系统主要由直线电机、可

调阻尼器、弹簧、路面传感器和 ECU 组成。

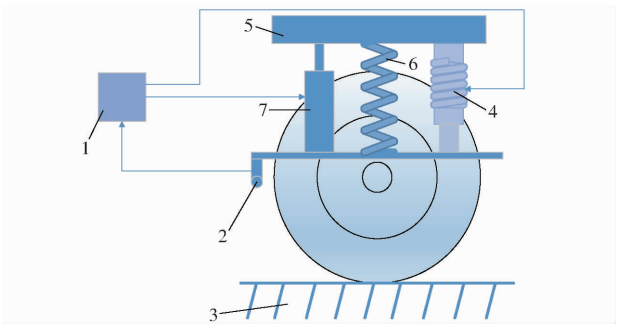


图 1 混合悬架结构

Fig. 1 Hybrid suspension structure

1. ECU 2. 路面传感器 3. 路面 4. 可调阻尼器 5. 车身
6. 弹簧 7. 直线电机

根据模式切换系统组成结构,混合悬架多模式切换过程可概括描述为:将 ECU 计算出的参考车身加速度、参考轮胎动位移分别与相应的参考阈值比较,根据切换策略(表 1)进入合适的工作模式。表 1 中, $(Z_u - Z_r)$ 和 $\ddot{Z}_s$ 分别为 ECU 根据路面输入计算出的轮胎动位移和车身垂直加速度; $(Z_u - Z_r)_1$ 和 $\ddot{Z}_{s1}$ 为所设定的阈值。ECU 发出控制信号,直线电机调节为电动机模式或发电机模式,可调阻尼器调至相应阻尼。

表 1 切换策略

Tab. 1 Switching strategy

车身垂直加速度	轮胎动位移	工作模式
$\ddot{Z}_s \geq \ddot{Z}_{s1}$	$(Z_u - Z_r) \geq (Z_u - Z_r)_1$	综合性能模式
$\ddot{Z}_s < \ddot{Z}_{s1}$	$(Z_u - Z_r) < (Z_u - Z_r)_1$	被动馈能模式
$\ddot{Z}_s \geq \ddot{Z}_{s1}$	$(Z_u - Z_r) < (Z_u - Z_r)_1$	舒适性模式
$\ddot{Z}_s < \ddot{Z}_{s1}$	$(Z_u - Z_r) \geq (Z_u - Z_r)_1$	安全性模式

车身垂直加速度直观体现了乘坐舒适性,轮胎动位移直观体现了汽车抓地能力,即安全性能。因此制定控制策略时将这 2 个参数作为模式切换的阈值。车身垂直加速度和轮胎动位移受车速和路面两个因素影响,在定车辆定速仿真与试验时,只受路面不平度等级的影响。

仿真后得知悬架在 A 级路面行驶时,车身垂直加速度和轮胎动位移均较小,在 D 级路面行驶时两者均较大,B、C 级路面行驶时会交替产生车身加速度和轮胎动位移较大的问题。因此设定合适的阈值使得仿真时悬架在 A 级路面行驶时进入被动馈能模式进行能量回收;在 B 级、C 级路面行驶时进入舒适性模式或者安全性模式,利用天棚或者地棚控制改善其车身垂直加速度或者轮胎动位移;在 D 级路面行驶时进入综合性能模式,采用天棚地棚混合控制改善其动态性能。

1.2 多模式切换系统描述

由混合悬架多模式切换过程可以看出,整个运行过程可以划分为 4 个离散的工作模式,即舒适性模式、安全性模式、被动馈能模式、综合性能模式。各个模式下,连续变量(如车身加速度和轮胎动位移)为典型的连续动态过程,为了达到控制目标,系统又必须在各个工作模式之间切换且驱动工作模式切换的为典型离散事件(如可调阻尼器状态和直线电机工作模式)。因此,整个过程中既包含连续动态过程,又存在离散事件,可以归纳为混杂系统。

混杂自动机模型(Hybrid automation model)是描述混杂系统的常用工具,本文利用它对混合悬架进行如下描述:混合悬架多模式切换系统包括 4 个状态: $q_1、q_2、q_3、q_4$ 。

(1)连续状态变量: $\{Z_u-Z_r, \ddot{Z}_s\}$ 。

(2)连续输入变量: $\{Z_r, F_M\}$,其中 Z_r 为路面位移, F_M 为电机主动输出力。离散输入变量 $\{c, M\}$,其中 c 为可调阻尼器应该选取的模式, M 为直线电机应该工作的类型。

(3)连续输出变量: $\{Z_u-Z_r, \ddot{Z}_s\}$,将输出变量传输给 ECU 计算出合适的工作模式。

(4)不变集合

$\text{Inv}(q) \rightarrow$

$\left\{ \begin{array}{l} Z_u - Z_r \geq (Z_u - Z_r)_1 \\ \ddot{Z}_s < \ddot{Z}_{s1} \\ M = \text{on} \\ c = c_1 \end{array} \right. \quad (q = q_1)$

$\left\{ \begin{array}{l} Z_u - Z_r < (Z_u - Z_r)_1 \\ \ddot{Z}_s \geq \ddot{Z}_{s1} \\ M = \text{on} \\ c = c_3 \end{array} \right. \quad (q = q_2)$

$\left\{ \begin{array}{l} Z_u - Z_r \geq (Z_u - Z_r)_1 \\ \ddot{Z}_s \geq \ddot{Z}_{s1} \\ M = \text{on} \\ c = c_2 \end{array} \right. \quad (q = q_3)$

$\left\{ \begin{array}{l} Z_u - Z_r < (Z_u - Z_r)_1 \\ \ddot{Z}_s < \ddot{Z}_{s1} \\ M = \text{off} \\ c = c_1 + c_e \end{array} \right. \quad (q = q_4)$

(5)离散状态模式之间的离散事件集合:对于悬架系统的 4 个工作模式有 12 个可能切换的离散事件,其切换关系如图 2 所示。

(6)容许输入域,定义输入作用域来确定输入

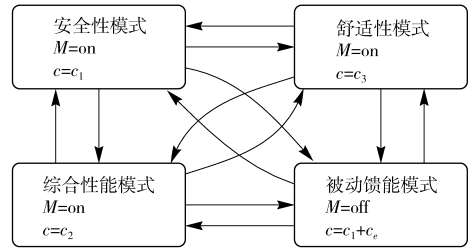


图 2 离散事件及其切换关系

Fig. 2 Discrete events and switching relation

值范围。在该系统中路面输入 Z_r 和直线电机主动输出力 F_M 都有一定的容许取值范围。混合悬架模式切换的主要工作路面为 A ~ D 级路面,因此路面输入 Z_r 的取值范围为 $-0.3 \sim 0.3 \text{ m}$,直线电机输出力的范围为 $-500 \sim 500 \text{ N}$ 。

1.3 混合悬架动态数学模型

为实现有效切换模式,在对模式切换过程中的混杂动力学行为分析的基础上,应结合其物理模型建立其动态数学模型,便于进行整个系统的控制策略设计。混合悬架系统结构示意图如图 3 所示。

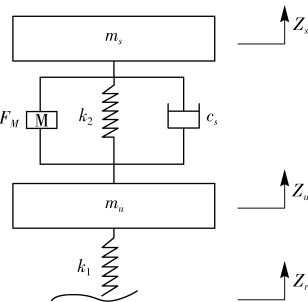


图 3 混合悬架模型

Fig. 3 Hybrid suspension model

为准确反映模式切换中可调阻尼器和直线电机的数学关系,建立混合悬架动态动力学方程

$$m_s \ddot{Z}_s = -c_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) - k_2(Z_s - Z_u) + F_M \quad (1)$$

$$m_u \ddot{Z}_u = c_s(\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) + k_2(Z_s - Z_u) + k_1(Z_r - Z_u) - F_M \quad (2)$$

其中

$$F_M = \begin{cases} c_{gnd} \dot{Z}_u & (\text{安全性模式}) \\ c_{sky} \dot{Z}_s & (\text{舒适性模式}) \\ c_{sky} \dot{Z}_s + c_{gnd} \dot{Z}_u & (\text{综合性能模式}) \\ 0 & (\text{被动馈能模式}) \end{cases} \quad (3)$$

$$c_s = \begin{cases} c_1 & (\text{安全性模式}) \\ c_3 & (\text{舒适性模式}) \\ c_2 & (\text{综合性能模式}) \\ c_1 + c_e & (\text{被动馈能模式}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 F_M ——直线电机、可调阻尼器和弹簧所结合产生的悬架控制力

c_s ——悬架阻尼
 k_1, k_2 ——轮胎和悬架刚度
 Z_s, Z_u ——簧上质量和簧下质量位移
 m_s, m_u ——簧上质量和簧下质量

2 模式切换控制策略

2.1 基于模型参考的模式切换

悬架系统模式切换的控制策略常将某几个实际输出信号例如车速、车身加速度均方根、持续时间等(本文为车身加速度和轮胎动位移)与切换阈值相比较,且将比较信号转换为逻辑变量信号输入到切换系统,切换系统判断并输出带有控制策略的逻辑信号^[9-10]。但在模式切换时,具体采用多长时间内的输入信号均方根往往需要靠经验公式或大量的实验来确定,对模式切换的设计过程带来较大的难度。

而且如果以实际混合悬架模型的动力学性能进行实时判断,前一刻悬架切换至舒适性模式改善了舒适性性能指标,下一刻却因为舒适性性能指标达标而切换到其他工作模式,此问题会导致系统切换的紊乱。

为解决该问题,本文采用一种类似于“基于模型参考的自适应控制”的控制方法,且命名为“基于模型参考的多模式切换控制”。该控制方法以混合悬架为对象,在控制器中建立一个与混合悬架所有悬架参数完全一样的被动悬架理论模型,作为动力学性能参考目标,并将其在不同车速不同路面的动力学性能与参考阈值相比较,利用比较结果操控真正的混合悬架进行模式切换,使实际混合悬架满足切换控制要求。两者对比如图4所示,图4b为本文所采用的控制方法。

2.2 稳定性控制策略设计

将仿真得到的被动悬架模型在B级路面和C级路面行驶的车身垂直加速度均方根和轮胎动位移均方根取两者平均数作为切换策略的阈值,仿真试验验证此阈值正好使得本悬架在A级路面进入被

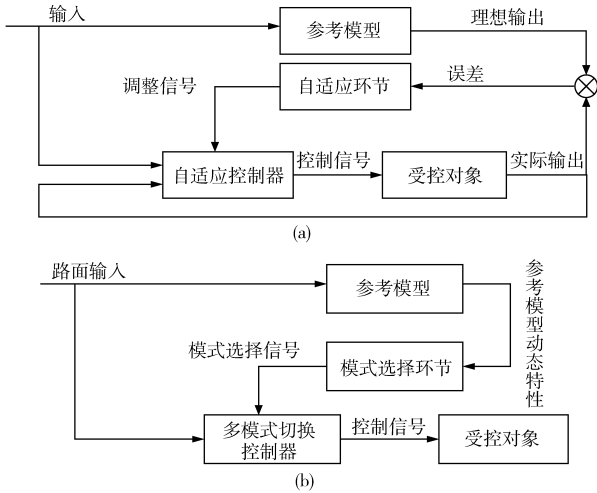


图4 基于模型参考的2种控制方式对比
Fig.4 Comparison of two control modes based on model reference

动馈能模式,B、C级路面时进入舒适性模式或者安全性模式,D级路面进入综合性能模式,4种模式和4种路面一一对应起来。具体公式为

$$(Z_u - Z_r)_1 = \frac{(Z_u - Z_r)_{Brms} + (Z_u - Z_r)_{Crms}}{2} \quad (5)$$

$$\ddot{Z}_{s1} = \frac{(\ddot{Z}_s)_{Brms} + (\ddot{Z}_s)_{Crms}}{2} \quad (6)$$

利用 Simulink 进行仿真测试,可有效进行模式切换且切换时机较为合适。根据 ECU 计算的实时车身加速度、轮胎动位移与相应阈值进行比较来控制切换。如果只利用这2个条件进行切换,系统可能在2个模式之间来回跳跃,则系统会陷入紊乱。为解决此问题,增加了一个系统稳定模块,如图5所示。

其原理是在切换控制器和悬架控制装置中加了一个用逻辑关系组成的稳定模块,其逻辑过程如图6所示。 Z_n 表示第 n 个输入值, k 表示稳定判断次数。

具体控制流程如下:

(1)将等效于混合悬架被动模式的被动悬架作

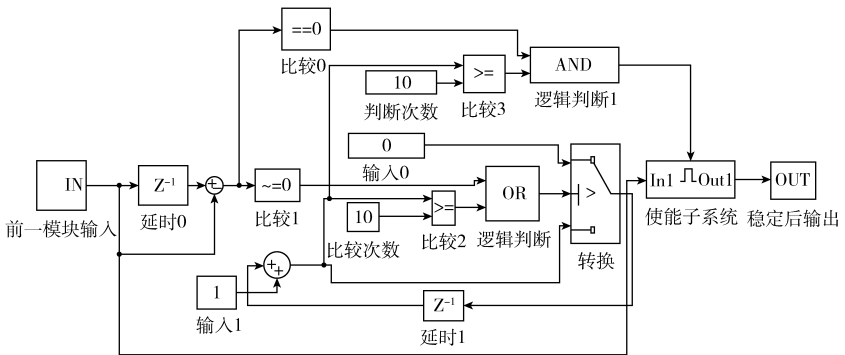


图5 系统稳定模块
Fig.5 System stability module

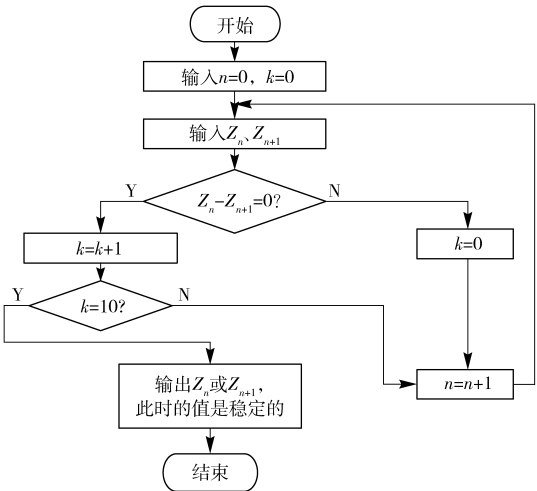


图 6 稳定控制原理流程图

Fig. 6 Flow chart of stability control principle

为参考对象,收集 ECU 计算的实时车身加速度和轮胎动位移。

(2)将收集的实时车身加速度和轮胎动位移直接与切换阈值相比较,确定实时的最佳工作模式。该步骤后切换系统将工作模式的输出信号转换为逻辑变量,并将逻辑变量输入系统稳定判断模块,如图 7 所示。

(3)利用系统稳定性判断模块检测输入的逻辑变量是否具有一定的稳定性,如能够保持 10 次输入均不变,则可以将该逻辑变量输出到混合悬架的阻尼和直线电机选择模块,控制混合悬架进行一次模式切换,否则从新计数。

此种模式切换略去了时间这一个不易确定阈值的输入对象,使得建立的模型适应性更强,切换更加准确。

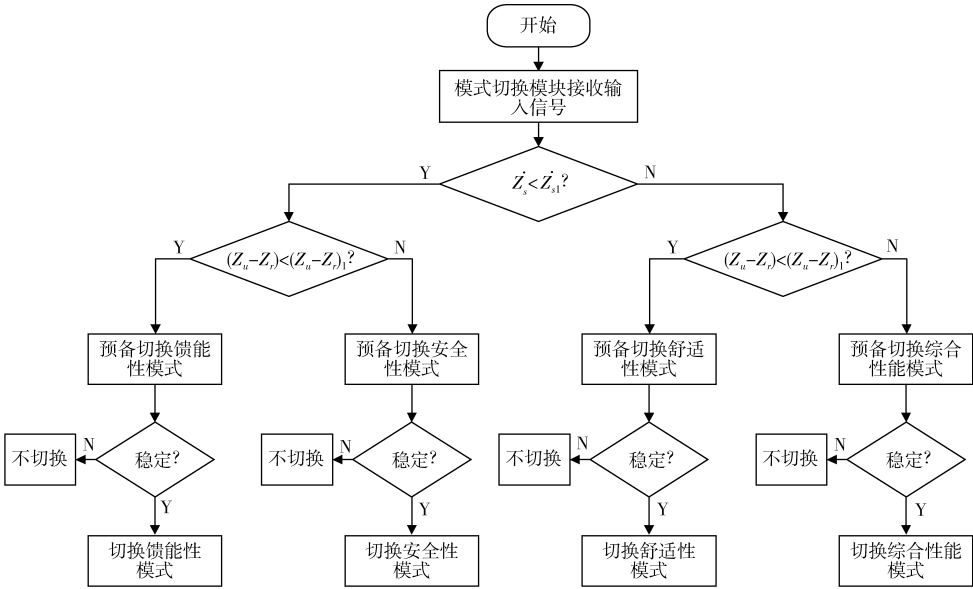


图 7 模式切换控制流程

Fig. 7 Mode switching control flow

3 模式切换仿真分析

3.1 Simulink/Stateflow 切换控制系统建模

通过对混合悬架实际运行工况进行分析,确定了混合悬架的工作模式和切换规则,在此基础上,为模拟混合悬架在模式切换过程中的汽车动力学性能,将切换模型和悬架模型结合起来,综合上文叙述的其他模块,建立了基于多模式切换的混合悬架控制模型,包括路面与车速输入模块、混合悬架模块、被动悬架模块、阻尼和直线电机模式选择模块、参考阈值模块、悬架模式切换模块、系统稳定时间判断模块一共 7 个模块。验证混合悬架系统是否满足切换控制要求。

首先验证悬架模式切换模块的准确性和有效性。将图 8、9 所示的车身加速度和轮胎动位移和相

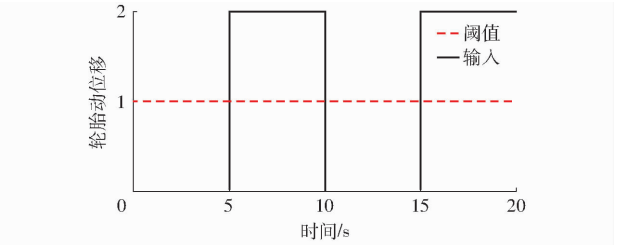


图 8 轮胎动位移阈值和输入

Fig. 8 Threshold and input of tire dynamic displacement

应阈值指标输入。

系统经历仿真得到的输出信号如图 10 所示,不同的直线电机工作信号输出与阻尼模式判断信号输出可以完整组成 4 种不同模式的工作需要。

仿真对多个模式下的切换进行了试验,由于篇幅原因,本文列举的是主动到被动的变化,其他模式的变化均为主动控制和主动控制之间的变化,其他

主动控制论文也描述的较多,因此本文由于篇幅原因只描述了一种主动到被动的切换情况。

表 2 为某 1/4 悬架模型主要参数,表 3 为仿真工况参数。

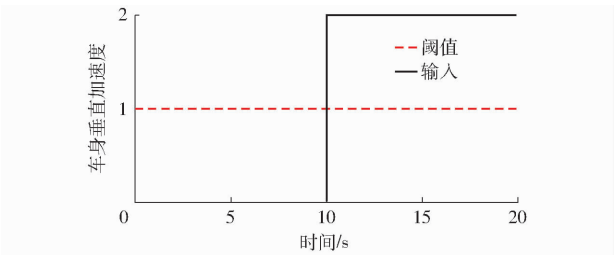


图 9 车身垂直加速度阈值和输入
Fig. 9 Threshold and input of body acceleration

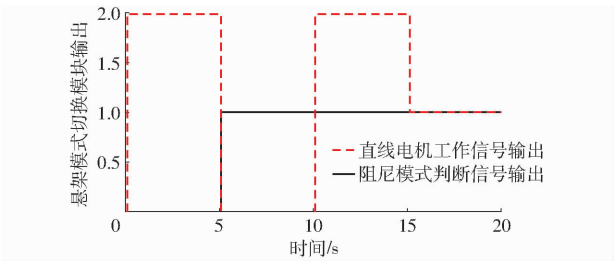


图 10 模式信号输出
Fig. 10 Mode signal output

表 2 悬架模型主要参数

参数	数值
1/4 车身质量 m_1/kg	80
车轮质量 m_u/kg	11.5
悬架刚度 $k_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	5 500
轮胎刚度 $k_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	48 000
被动悬架阻尼系数 $c/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	1 000
可调阻尼系数 $c_1/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	600、1 000、1 200
车身垂直加速度阈值 $(Z_u - Z_r)_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	2.69
轮胎动位移阈值 $\dot{Z}_{s1}/\text{m}$	0.006 3

表 3 仿真工况参数

参数	数值
路面不平度系数(B级路面) $G_0/(\text{m}^3\cdot\text{cycle}^{-1})$	6.40×10^{-5}
路面不平度系数(C级路面) $G_0/(\text{m}^3\cdot\text{cycle}^{-1})$	2.56×10^{-4}
车速 $u/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	30
行驶时间 t/s	10
下截至频率 f_0/Hz	0.062 8

3.2 仿真结果分析

为测试切换系统模式切换的有效性和单个模式下控制策略的有效性。暂列出模拟仿真车辆在第 10 秒时从 C 级路面行驶至 B 级路面时的 20 s 仿真的结果,验证悬架切换模型的有效性和悬架动力学性能的变化,仿真结果如图 11、12 和表 4 所示。

由图 11、12 和表 4 可得:

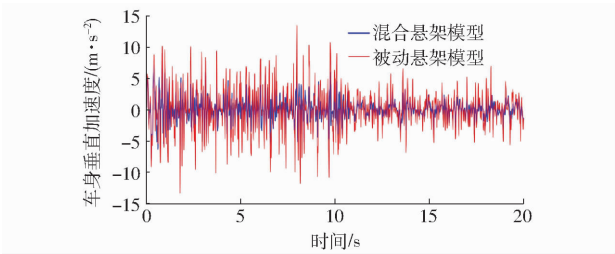


图 11 车身垂直加速度时域响应
Fig. 11 Time domain response of body acceleration

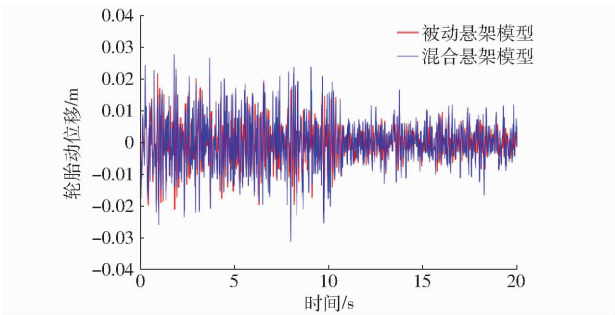


图 12 轮胎动位移时域响应
Fig. 12 Time domain response of tire dynamic displacement

表 4 各时间段仿真结果

时间	0 ~ 0.5 s	0.5 ~ 10.8 s	10.8 ~ 20 s
悬架模式	未切换, 被动馈能模式	切换舒适性模式	切换被动馈能模式
车身垂直加速度均方根(混)/(m·s ⁻²)	3.201 7	2.640 6	1.461 7
车身垂直加速度均方根(被)/(m·s ⁻²)	3.495 8	3.506 0	1.871 8
轮胎动位移均方根(混)/m	0.011 5	0.010 8	0.005 1
轮胎动位移均方根(被)/m	0.008 8	0.008 7	0.004 6

(1)此混合悬架模型可以实现主动模式到被动模式的相互切换,且能按照控制要求改善其舒适性,馈能性等性能。

(2)模式切换模型变化特点:①路面变化的时刻,模式切换的时刻,车身动力学性能受控制得以改善的时刻并非同一时刻,具体时间差受路面、车速、切换控制策略影响。例如路面在第 10 秒变化,模式切换开始于第 10.8 秒,而悬架动态性能改善约在第 11 秒后。②验证了该悬架可以在合理的情况下切换到被动馈能模式下,将直线电机瞬时功率在馈能模式时间段上积分可得通过在 B 级路面 30 m/s 的车速下 20 s 可以回收 24.41 J 的能量。约回收计算得出的前 20 s 主动控制所消耗能量的 1/2。理想情况下如果 B 级路面路程是 C 级路面路程的两倍,则该混合悬架在能耗的数值上基本可以实现自供能。③在切换舒适性模式过程中,车身加速度均方根改

善了 17.53%，轮胎动位移均方根基本不变，满足控制要求。

4 多模式切换系统的快速原型试验

为验证基于模型参考的多模式切换控制方法的有效性和可行性,除了离线仿真,本文进一步考虑实际控制时,信号的转换,硬件的连接也会对实际控制效果产生影响,所以需要建立控制器快速原型和实际混合悬架的半实物仿真试验系统,对整个控制进行更接近于实际对象的功能验证。本文采用的是由德国 dSPACE 公司开发的基于 dSPACE 软硬件系统的快速原型设计与仿真的解决方案。主要器材及其试验结构布置示意图如图 13、14 所示。图 13 中包括单通道液压伺服系统、1/4 混合悬架系统、加速度传感器、位移传感器、dSPACE 单元、Rapidpro 单元、LMS 信号采集系统、连接线材和步进电机(对可调阻尼进行驱动)等。



图 13 主要试验器材
Fig. 13 Main test equipments

利用单通道液压伺服系统加载 C 级到 B 级路面的路面信号,具体是将 Simulink 模型中所产生的路面谱数据转换为.csv 格式的文件导入到试验台的终端微机,即可以让激振头按给定路面工况进行输入。进行试验,在检测软件上输出车身垂直加速度和轮胎动位移。试验数据与仿真结果对比如图 15 和图 16 所示。

由图 15、16 可以看出试验与仿真得出的车身垂直加速度和轮胎动位移结果较为一致。稳定在被动模式下试验得出的车身垂直加速度均方根值和轮胎动位移均方根为 1.900 m/s^2 、 0.006 m ,相较于仿真值 1.771 m/s^2 、 0.006 3 m ,相对误差为 7.3% 和 4.8%,考虑到信号转换和硬件连接对试验效果的影响,结果基本吻合。同时在 10 s 附近试验悬架也进行了有效的模式切换,验证了模型的正确性和控制

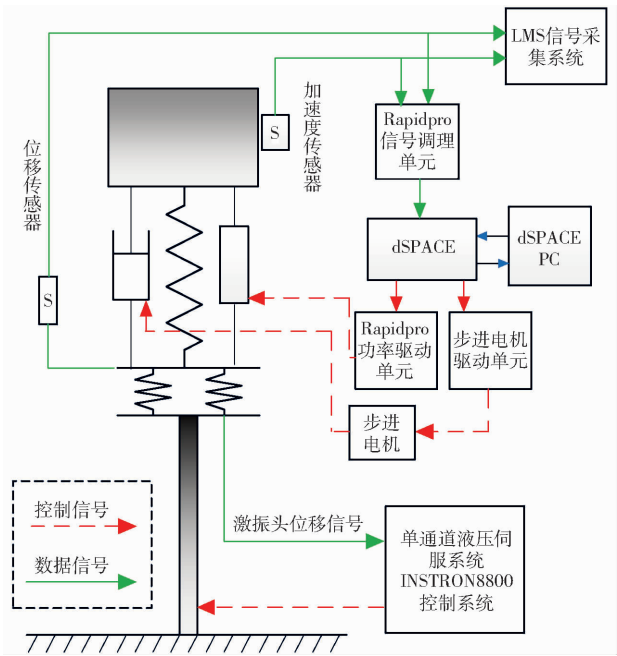


图 14 试验结构布置示意图

Fig. 14 Schematic diagram of test structure layout

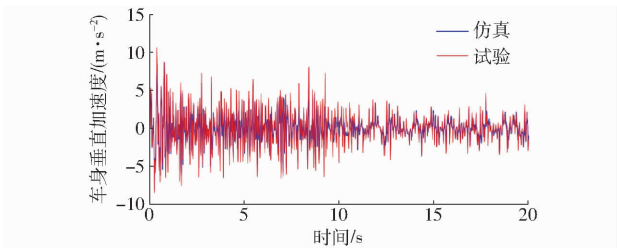


图 15 车身垂直加速度试验结果与仿真结果对比

Fig. 15 Comparison of test and simulation results for body acceleration

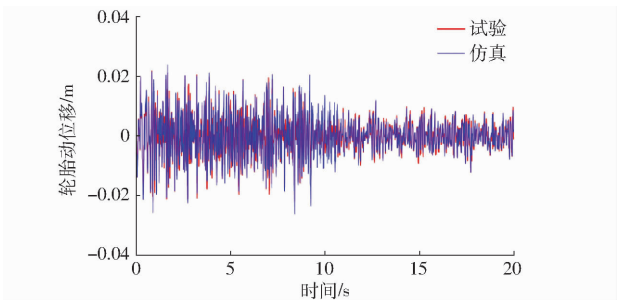


图 16 轮胎动位移试验结果与仿真结果对比图

Fig. 16 Comparison of test and simulation results for tire dynamic displacement

策略的有效性。

5 结论

(1)研究了混合悬架的多模式切换控制过程,建立了基于模型参考的多模式切换控制系统,使混合悬架可以在多种模式下自动切换。

(2)提出并设定了控制系统的主要切换参数,使得混合悬架针对不同路面能够切换到合适的工作模式,仿真试验表明模式切换使混合悬架在 C 级路

面的动态性能改善,在 B 级路面上有效地进行能量回收。

(3)进行了快速原型台架试验,对悬架进行试验研究,车身垂直加速度均方根和轮胎动位移均方根较仿真结果相对误差为 7.3% 和 4.8%,与仿真结果基本吻合,验证了仿真结果的正确性。

参 考 文 献

1 喻凡,曹民,郑雪春. 能量回馈式车辆主动悬架的可行性研究[J]. 振动与冲击, 2005, 24(4): 27-30.
YU Fan, CAO Min, ZHENG Xuechun. Research on the feasibility of the vehicle active suspension with energy regeneration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(4): 27-30. (in Chinese)

2 陈士安,何仁,陆森林. 新型馈能型悬架及其工作原理[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 177-182.
CHEN Shian, HE Ren, LU Senlin. New reclaiming energy suspension and its working principle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 177-182. (in Chinese)

3 张勇超,郑雪春,喻凡. 馈能式电动悬架的原理与试验研究[J]. 汽车工程, 2008(1): 48-52.
ZHANG Yongchao, ZHENG Xuechun, YU Fan. Theoretical and experimental study on electrical energy-regenerative suspension[J]. Automotive Engineering, 2008(1): 48-52. (in Chinese)

4 WENDEL G R, STECKLEIN G L. A regenerative active suspension system [C]. SAE Paper 910659, 1991.

5 尹安东,赵韩. 基于混合系统理论的混合动力城市客车控制策略研究[J]. 汽车工程, 2010, 32(2): 98-102.
YIN Andong, ZHAO Han. A study on the energy control strategy for hybrid electric bus based on hybrid system theory [J]. Automotive Engineering, 2010, 32(2): 98-102. (in Chinese)

6 王庆年,冀尔聪,王伟华. 并联混合动力汽车模式切换过程的协调控制[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(1): 2-6.
WANG Qingnian, JI Ercong, WANG Weihua. Coordinated control for mode-switch of parallel hybrid electric vehicle[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(1): 2-6. (in Chinese)

7 秦大同,杨官龙,刘永刚. 插电式混合动力汽车能耗优化控制策略的研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(12): 1366-1377.
QIN Datong, YANG Guanlong, LIU Yonggang. A research on energy consumption optimization control strategy for plug-in hybrid electric vehicle[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(12): 1366-1377. (in Chinese)

8 DAVID S B, BOBROVSKY B Z. Actively controlled vehicle suspension with energy regeneration capabilities [J]. Vehicle System and Dynamics, 2011, 49(6): 833-854.

9 陈宏伟. 车辆节能型主动悬架的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.

10 PIRES L, SMITH M C, HOUGHTON N E, et al. Design trade-offs for energy regeneration and control in vehicle suspensions [J]. International Journal of Control, 2013, 86(11): 2022-2034.

11 汪少华,陈龙,孙晓强. 电控空气悬架系统阻尼多模式自适应切换控制研究[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 22-28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131205&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.005.
WANG Shaohua, CHEN Long, SUN Xiaoqiang. Damping multi-mode adaptive switching control of ECAS system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 22-28. (in Chinese)

12 汪少华,陈龙,孙晓强. 半主动空气悬架多模式切换控制模型的分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2013, 34(6): 638-642.
WANG Shaohua, CHEN Long, SUN Xiaoqiang. A multi-mode switching control mode for semi-active air suspension[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2013, 34(6): 638-642. (in Chinese)

13 余志生. 汽车理论[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社, 2001.

14 张威. STATEFLOW 逻辑系统建模[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2007.

15 喻凡,林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.

16 陈星,罗虹,邓兆祥. 直线电机馈能悬架控制系统设计与馈能分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(8): 124-129.
CHEN Xing, LUO Hong, DENG Zhaoxiang. Design of an energy-regenerative suspension control system using linear motor and energy recovery analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(8): 124-129. (in Chinese)

17 SHI D H, CHEN L, WANG R C, et al. Design and experimental study of semi-active energy-regenerative suspension[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(1): 015001.

18 巴特,高印寒,王庆年. 混合动力汽车工作模式切换控制方案[J]. 吉林大学学报:工学版, 2016, 46(1): 22-27.
BA Te, GAO Yinhan, WANG Qingnian. Mode-switch control scheme for hybrid electric vehicle[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2016, 46(1): 22-27. (in Chinese)

19 秦大同,陈淑江,胡明辉,等. 基于驾驶员意图识别的纯电动汽车动力性驱动控制策略[J]. 汽车工程, 2015, 37(1): 27-37.
QIN Datong, CHEN Shujiang, HU Minghui, et al. Drive control strategy for the power performance of pure electric vehicles based on driver intention recognition[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(1): 27-37. (in Chinese)

20 MANSOUR A, EHSAN A, AVESTA G, et al. Multi-objective optimization of a hybrid electromagnetic suspension system for ride comfort, road holding and regenerated power[J]. Journal of Vibration and Control, 2015, 83(9): 969-970.