

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.03.002

## 液压互联悬架电磁平衡阀控制研究

李杰<sup>1</sup>, 郑敏毅<sup>1</sup>, 刘鹏飞<sup>1</sup>, 张农<sup>2</sup>, 杨天宇<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学汽车与交通工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 合肥工业大学汽车工程技术研究院, 安徽合肥 230009)

**摘要:** 液压互联悬架(hydraulically interconnected suspension, HIS)系统油缸内泄会直接影响其动态性能, 为保证 HIS 系统的抗侧倾性能, 文章提出一种基于电磁阀平衡两侧油路油压的解决方法, 并对其控制策略进行分析。首先建立 HIS 模型, 分析油路压力差对电磁阀平衡时间的影响, 并进行实验验证; 然后采用模糊控制方法实现对电磁阀开闭控制, 通过 MATLAB/Simulink 对车辆行驶状态仿真, 验证所提出的控制策略的有效性; 最后进行实车试验与仿真结果分析。结果表明, 该文提出的电磁平衡阀控制方法能有效平衡油缸内泄造成的两侧油路油压差。

**关键词:** 液压互联悬架(HIS); 内泄; 抗侧倾; 电磁阀; 模糊控制

**中图分类号:** U463.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)03-0296-08

### Research on control strategy of solenoid valve of hydraulically interconnected suspension

LI Jie<sup>1</sup>, ZHENG Minyi<sup>1</sup>, LIU Pengfei<sup>1</sup>, ZHANG Nong<sup>2</sup>, YANG Tianyu<sup>1</sup>

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Automotive Research Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The internal leakage of the cylinder of the hydraulically interconnected suspension(HIS) system will directly affect its dynamic performance. A solution based on the solenoid valve to balance the oil pressure on both sides of the oil circuit is proposed and its control strategy is analyzed to improve the anti-roll performance of the HIS system. Firstly, the model of HIS was established to analyze the influence of pressure difference on solenoid valve balance time, and the results were verified by experiments. Then, the fuzzy control method was used to control the solenoid valve, and based on MATLAB/Simulink platform, the driving state of the vehicle was simulated to verify the effectiveness of the proposed control strategy. Finally, the results of the experiment and simulation were compared and analyzed. The results show that the proposed control method of solenoid valve can effectively balance the oil pressure difference on both sides of the oil circuit caused by the internal leakage of the cylinder.

**Key words:** hydraulically interconnected suspension (HIS); internal leakage; anti-roll; solenoid valve; fuzzy control

液压互联悬架(hydraulically interconnected suspension, HIS)是一种液压悬架, 利用液压油管路实现各车轮之间互联, 通过不同的互联形式实现不同的性能要求, 如抗侧倾、抗俯仰、抗垂向和

消扭<sup>[1]</sup>。抗侧倾 HIS 是一种用来抑制车辆侧倾的悬架结构, 它可以增加车辆的侧倾刚度, 改善车辆的操稳性和平顺性, 提高车辆的安全性能<sup>[2]</sup>。当液压油缸活塞杆的密封圈受到磨损后, 不可避

**收稿日期:** 2021-06-01; **修回日期:** 2021-07-21

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51675152)

**作者简介:** 李杰(1996—), 男, 江苏扬州人, 合肥工业大学硕士生;

郑敏毅(1983—), 男, 福建福清人, 博士, 合肥工业大学讲师, 通信作者, E-mail: zheng-minyi@163.com;

张农(1959—), 男, 江苏江阴人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师。

免会产生油液内泄漏,并不断累积<sup>[3]</sup>,从而导致 HIS 两侧液压支路压力不平衡,最终影响悬架抗侧倾性能。为了提升抗侧倾互联悬架的性能,需要平衡液压支路的油压。

国内外专家对 HIS 已经做了大量研究。文献[4]对 HIS 的原理、建模以及对整车操稳性、平顺性的改善等方面做了系统的研究;文献[5]建立了两轴车辆的抗侧倾 HIS 整车动力学模型,分析了 HIS 对车辆平顺性和操稳性的影响;文献[6]提出了一种主动 HIS,采用模糊控制、模糊 PID 和线性二次型调节器(linear quadratic regulator, LQR)的控制方法研究其抗侧倾性能,并完成实验验证;文献[7]采用 Backstepping 非线性控制算法设计了一种主/被动切换式的 HIS 抗侧倾控制方法,有效地提高了车辆抗侧翻能力;文献[8]采用粒子群算法的类天棚控制和 PID 控制研究一种阻尼连续可调的 HIS 抗俯仰控制,有效地提高了车辆的平顺性,并完成实验验证;文献[9]对新型可调阻尼 HIS 系统采用 ON-OFF 控制方法和模糊控制方法提高汽车的平顺性。

上述文献中,对 HIS 的分析均为未考虑液压缸内泄影响的理想状况下的结果,由于液压缸存在内泄漏特性,长期积累产生的油路压力差会严重影响其抗侧倾性能,进而增大车辆侧翻风险发生的概率,因此本文提出一种在 2 个液压支路之间连接 1 个电磁阀的结构,以平衡内泄造成的压力差。对大量实车试验所得油压、侧倾角等数据进行处理分析,将去峰滤波后取均值处理的数据作为控制器输入,设计模糊控制器以控制电磁阀的开启,平衡油路间的压差,消除内泄影响,并以某 SUV 为研究对象进行实车试验,验证该方法的可行性。

## 1 模型建立

### 1.1 抗侧倾 HIS 模型

HIS 由安装在车辆的簧上部分(车架/车身)和簧下部分(车轮)之间的双作用液压缸、液压管路和蓄能器组成液压回路。安装电磁平衡阀的抗侧倾 HIS 结构如图 1 所示,左侧液压缸的上腔与右侧液压缸的下腔相连形成一个液压支路(蓝色实线),而左侧液压缸的下腔与右侧液压缸的上腔相连形成另一个液压支路(红色虚线),每条液压支路均安装一个蓄能器用于提供侧倾刚度<sup>[10]</sup>。为了消除内泄的影响,在 2 个液压支路之间连接 1 个电磁阀结构用于平衡液压支路间的压力。

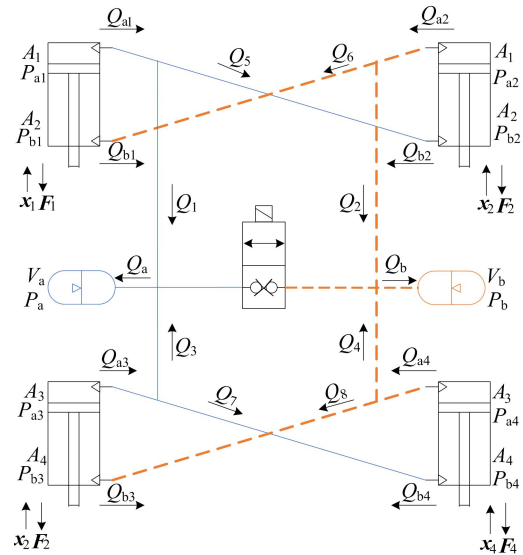


图 1 HIS 模型

由理想气体状态方程,可得 2 个蓄能器的气腔压力为:

$$P_a = \frac{P_0 V_0^{\gamma} V_s^{\gamma}}{(V_s + A_2 x_2 + A_4 x_4 - A_1 x_1 - A_3 x_3)^{\gamma}} \quad (1)$$

$$P_b = \frac{P_0 V_0^{\gamma} V_s^{\gamma}}{(V_s + A_2 x_1 + A_4 x_3 - A_1 x_2 - A_3 x_4)^{\gamma}} \quad (2)$$

其中: $P_0$ 、 $V_0$  分别为蓄能器的初始压力和初始体积; $P_a$ 、 $P_b$  分别为 2 个蓄能器的油压; $A_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 为前、后作动器的上腔作用面面积和下腔作用面面积; $x_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 为各作动器的位移。

各段管路中的沿程压力损失为:

$$\Delta P_i = \text{sign}(Q_i) \frac{8\lambda_i l_i \rho Q_i^2}{\pi d^5} \quad (3)$$

其中: $\Delta P_i$  ( $i=1, 2, \dots, 8$ ) 为各段管路两端的压力差; $l_i$  ( $i=1, 2, \dots, 8$ ) 为各段管路的长度; $Q_i$  ( $i=1, 2, \dots, 8$ ) 为各段管路内的流量; $\lambda_i$  ( $i=1, 2, \dots, 8$ ) 为管路的沿程阻力系数。

HIS 各液压缸的输出力为:

$$F_i = \begin{cases} A_1 P_{ai} - A_2 P_{bi}, & i = 1, 2; \\ A_3 P_{ai} - A_4 P_{bi}, & i = 3, 4 \end{cases} \quad (4)$$

液压缸内泄主要是由于密封圈磨损造成的。当车辆处于转向工况时,车身呈现外侧低内侧高现象,导致两侧油路产生的压力差与活塞的运动综合影响造成油缸内泄,使得 2 个液压支路的油量不均衡;当车辆直行时,液压缸上、下腔间存在压力差,在压力差的作用下使车身倾斜,此时若车辆转向侧倾角与内泄压力差造成的侧倾角同向,则抗侧倾 HIS 系统提供的抗侧倾力矩降低,从而

增大车身侧倾角,增大车辆侧翻的风险。

## 1.2 电磁平衡阀建模及验证

因为电磁阀连接在 HIS 系统之后,电磁阀两侧油液压力差总是存在,所以选用二位三通双向止回常闭式电磁阀。

根据电磁阀的结构特点和工作原理,建立电磁阀 AMEsim 物理模型<sup>[11]</sup>。该模型仿真参数见表 1 所列。安装电磁平衡阀的 HIS 系统 AMEsim 模型如图 2 所示。

表 1 电磁平衡阀模型仿真参数

参数	数值
电磁阀通径/mm	11
电磁阀出口孔径/mm	1.8
作动器无杆腔内径/mm	70
作动器活塞杆直径/mm	28
前/后交叉油管长度/mm	2 385/2 590
主油路(右上-左下)油管长度/mm	2 320
主油路(左下-右上)油管长度/mm	2 200
油液密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	870
油液弹性模量/MPa	1 400
蓄能器预充压力/MPa	1
油管内径/mm	19

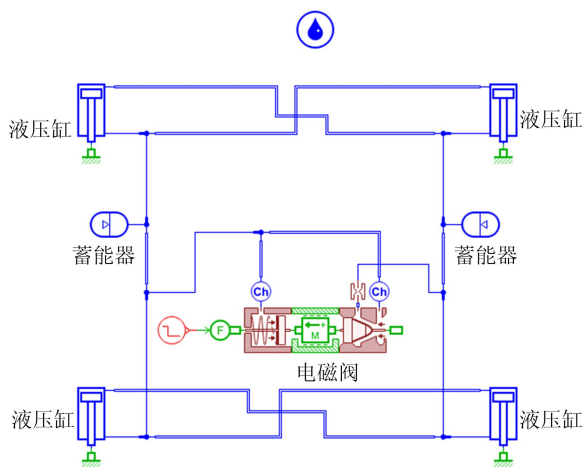


图 2 电磁平衡阀 AMEsim 模型

为了验证所建立的 AMEsim 仿真模型的正确性,对电磁平衡阀进行台架实验。

电磁阀开阀平衡时间实验。将一个液压支路初始油压设置为 1 MPa,另一个液压支路初始压力设置为 2~9 MPa,间隔 1 MPa,打开电磁阀记录两侧油压平衡所需的时间。实验结果如图 3 所示。

由图 3 可知,在油液压力平衡过程中,实验油压曲线会在交叉一次后逐渐趋于平稳,这是由于实际液压系统中液体存在液感和油液震荡。图 3

中实验曲线(实线)与仿真曲线(虚线)趋势一致,吻合较好,证明建立的电磁阀仿真模型是正确的。

实验得出的电磁平衡阀平衡压差时间与液压支路压力差关系如图 4 所示。

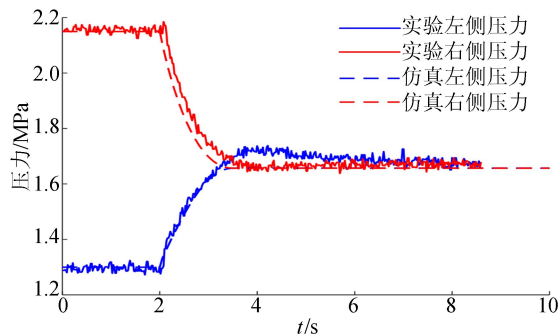


图 3 电磁平衡阀仿真与台架实验对比

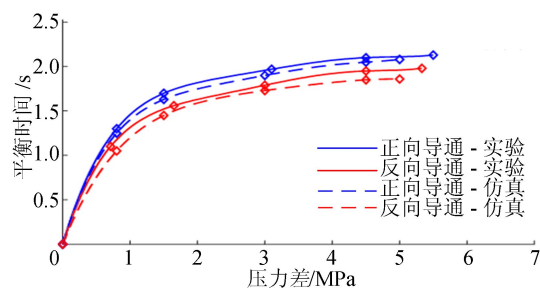


图 4 电磁平衡阀平衡时间与压差关系

图 4 中实验结果显示:电磁阀正向导通(电磁阀顶针受压紧力)时平衡压差所需时间大于电磁阀反向导通(电磁阀顶针受弹开力)时所需时间,这是由于正向导通时电磁阀受压紧力,阻碍电磁阀开阀,从而导致液压支路间油液互通受阻,平衡时间相较于反向时长;随着压差增大,平衡时间也随之变长,这是由于随着压差增大,液压互联系统中的总油量也随之增大,电磁阀开启时通过电磁阀的油量也增加,导致平衡所需的时间变长。一般 HIS 系统的静平衡压力为 2~4 MPa,由图 4 可知,对于油缸内泄造成的油路压力差,无论是正向导通还是反向导通电磁阀,均能在 2 s 内完成压力平衡。因此,在设计电磁阀控制策略时,在满足开阀条件的情况下,设置开阀时间为 2 s。

## 2 电磁阀控制策略研究

HIS 系统的液压缸发生内泄会使液压支路产生压力差,导致车身发生侧倾进而影响悬架性能。对角度传感器数据及控制逻辑进行分析,控制策略依据角度传感器数据,按照一定规则对电磁阀进行开闭控制以平衡压差。

## 2.1 角度传感器分析

### 2.1.1 角度传感器原理分析

本文选用的角度传感器是基于微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 加速度计的角度传感器,其工作原理是利用重力矢量及其在 MEMS 加速度角度传感器各测量轴上的投影,通过转换算法求得倾角值<sup>[12]</sup>,原理如图 5 所示。

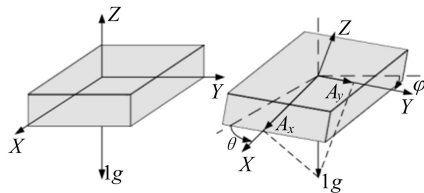


图 5 倾角传感器原理图

通过反正弦函数可以求得 X 轴、Y 轴与水平面夹角  $\theta$ 、 $\varphi$  为:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{A_x}{g}\right) \quad (5)$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{A_y}{g}\right) \quad (6)$$

该方法中,被测部件的倾斜角度越接近  $\pm 90^\circ$  时,对加速度计的灵敏度要求会越高,因此将传感器量程范围设置为  $\pm 15^\circ$ 。当车辆处于运动过程中时,由于车辆加减速、转向和路面不平度的影响,车身在 X 轴、Y 轴方向会产生加速度,从而导致角度传感器测得的加速度值产生突变,与重力加速度在 X 轴、Y 轴方向的分量不相等,测量所得倾角值不准确;而当车辆处于静止状态时,X 轴、Y 轴方向加速度无干扰,测得倾角值较准确。

### 2.1.2 倾角传感器测量数据分析

将 HIS 与电磁阀整套系统装车,进行一次完整路试,实验过程中,让车辆绕一个方向持续转向,记录角度传感器测得的瞬时侧倾角,如图 6 所示。

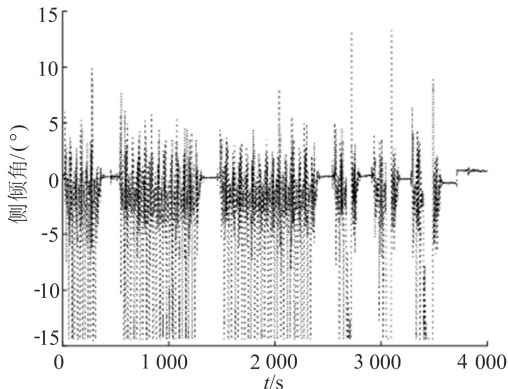


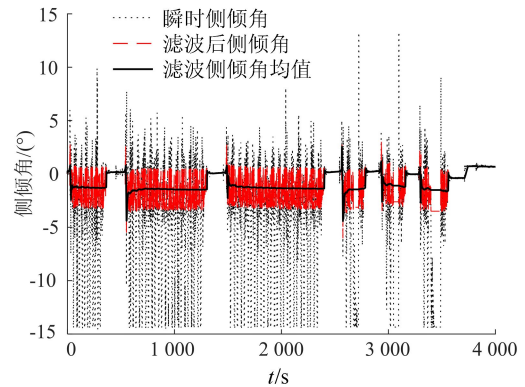
图 6 瞬时侧倾角曲线

从图 6 可以看出:车辆停车状态时,传感器侧倾角稳定,且值均小于  $2^\circ$ ;车辆运动过程中测得的车身侧倾角受侧向加速度影响,在量程范围内波动,但一段行驶过程中车身侧倾角主要分布在一固定角度值附近,该值可以反映行驶过程中车身的实际侧倾角。

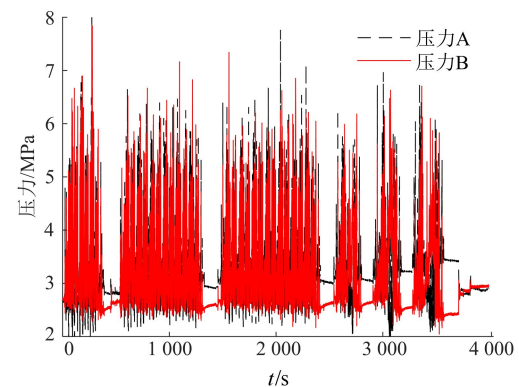
由于车辆行驶过程中车身侧倾角会集中分布在一定范围内波动,对图 6 中的瞬时侧倾角进一步处理。以标准差对瞬时侧倾角信号作滤波处理,并将滤波后的数据取均值,即

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (7)$$

该值反映行驶过程中车身侧倾角,滤波后结果如图 7 所示。



(a) 侧倾角变化



(b) 油压变化

图 7 实车路试侧倾角与油压的变化

从图 7a 可以看出,滤波后的侧倾角数据即为行驶过程中侧倾角众数分布的范围,其均值变化稳定,且绝对值均小于  $2^\circ$ 。

从图 7b 可以看出,车辆停车时,液压支路存在压力差,且随行驶过程不断增大,但图 7b 中车辆停车时的侧倾角度值处于  $0^\circ \sim 0.5^\circ$  范围,由液

压支路压力差分析车身侧倾角应为负值,停车时的车身侧倾角不能反映油路压力差造成的车身侧倾,是由油路压力差与路面倾斜度综合作用的结果,以两者的差近似地表示路面倾斜情况;而车辆行驶经历较长过程后,滤波后数据消除了车身加速度对侧倾角结果的影响,且取均值后路面的影响也减弱,能反映车辆侧倾情况,其变化趋势也与图 7b 中停车时压力差变化趋势相符。

由上述分析可知,车辆停车状态的侧倾角主要反映路面倾斜情况,停车前一段行驶过程的侧倾角能反映油缸内泄造成的车身倾斜。

### 2.2 模糊控制器设计

模糊控制是一种模拟人类控制特征的控制方法,具有较强的鲁棒性。模糊控制是以模糊集合、模糊语言和模糊逻辑推理为基础的控制方法,其实质是非线性控制。

根据电磁阀平衡油压要求以及对各传感器信号分析结果,选取 2 个信号作为模糊控制器的输入,分别为路面倾斜角  $A_r$  和内泄造成的侧倾角  $A_i$ ,控制器的输出是电磁阀的开闭控制信号,模糊控制器结构如图 8 所示。

通过模糊控制器使电磁阀在 HIS 系统发生内泄时打开以平衡压差,同时避免电磁阀误打开,保证 HIS 系统的性能。

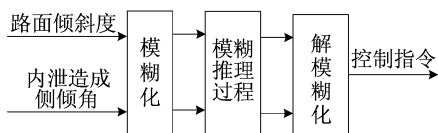


图 8 模糊控制器结构

依据 HIS 系统的特性机理,仅在车辆停止或怠速运行时对电磁阀进行控制。当内泄造成的车身侧倾角为  $0^\circ$  时,无论处于何种路面电磁阀均不打开;当存在内泄引起的车身侧倾角时,若路面水平,则打开电磁阀平衡两侧油压;若路面倾斜方向与车身倾斜方向相同时,路面加剧车身倾斜,此时打开电磁阀,可以平衡部分压力差,减小内泄影响;若路面与车身倾斜方向相反时,路面减小车身倾斜,适当开阀可平衡油路压力差,但开阀过久则会使两侧油路产生反向压力差。这种控制逻辑见表 2 所列,根据此控制逻辑设计模糊控制器的模糊规则。

依据实际控制车辆,对模糊控制器的内泄造成的侧倾角  $A_i$  和路面倾斜角  $A_r$  采用 7 个模糊集表示其模糊状态,对应的模糊子集为 PB(正大)、

PM(正中)、PS(正小)、ZE(零)、NS(负小)、NM(负中)、NB(负大)。

对于电磁阀控制信号的输出采用 5 个模糊集表示开闭控制趋势<sup>[13]</sup>,分别为 ZE(闭)、S(小)、M(中)、B(大)、K(开)。

在设计中,依据 2.1 节对实验结果的分析,将输入变量  $A_i$  和  $A_r$  的论域分别设置为  $[-2, 2]$  和  $[-2, 2]$ ,模糊输出的基本论域为  $[0, 2]$ 。模糊输出的结果仅表示对电磁阀开闭的控制趋势,因此需对输出结果取整。当输出为 0 时,控制电磁阀闭合;输出为 1 时,控制电磁阀打开 1 s;输出为 2 时,控制电磁阀打开 2 s<sup>[14]</sup>。

根据上文对车辆所处状态的传感器信息分析,设计电磁阀模糊规则见表 3 所列。

表 2 电磁平衡阀控制逻辑

倾斜情况	//////	//////	//////
	不开阀	不开阀	不开阀
	开阀	开阀	开阀 (时间短)
	开阀	开阀 (时间短)	开阀

表 3 电磁阀模糊规则

控制量	$A_i$							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
$A_r$	NB	K	K	S	S	S	M	M
	NM	K	B	S	S	S	S	M
	NS	B	B	S	ZE	S	S	S
	ZE	B	M	M	ZE	M	M	B
	PS	S	S	S	ZE	S	B	B
	PM	M	B	S	S	S	B	K
	PB	M	M	S	S	S	K	K

在确定好输入输出论域、模糊词集、每个电磁阀对应的模糊规则后,还需要确定输入与输出隶属度函数。隶属度函数的选取具有很大的主观性,需根据问题的实际情况具体分析。该电磁阀模糊控制器通过对比分析,选取输入变量采用高斯型函数,输出变量采用高斯型函数,能够取得较好的控制效果。

### 2.3 电磁阀控制策略及仿真分析

当车辆处于怠速及刚刚停车状态时,车身侧倾角受环境影响仍会存在振荡,因此,结合模糊控制

器与实际情况,制定的控制策略流程如图 9 所示。

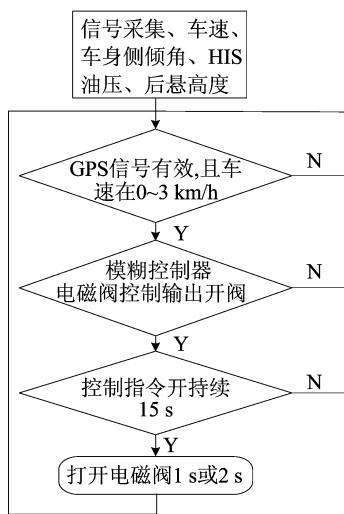


图 9 电磁阀控制流程

为了对所设计的控制策略进行验证,根据控制流程图,在 MATLAB/Simulink 环境下对建立的模糊控制器进行仿真分析。从图 7 中停车时获得的瞬时侧倾角及处理后的侧倾角作为输入信号输送到模糊控制模块,控制器输出电磁阀控制信号平衡压力差。停车状态瞬时侧倾角与处理均值侧倾角以及在此基础上电磁阀的输出结果如图 10 所示。

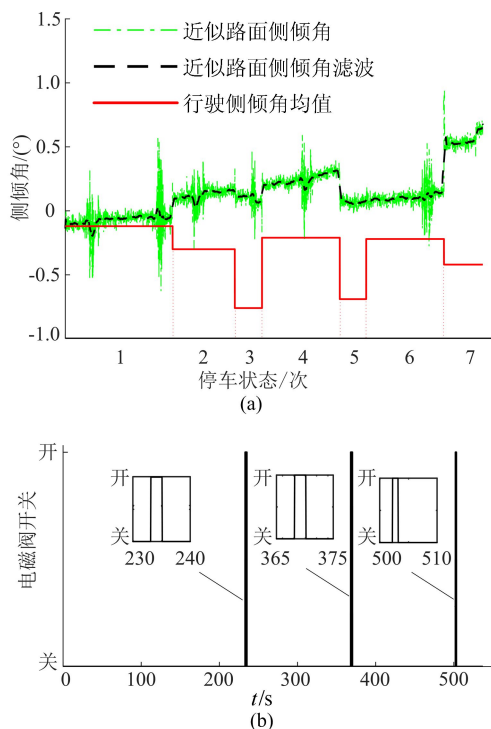


图 10 控制策略仿真结果

从仿真结果图 10a 可以看出,其中共截取了 7 次停车数据,行驶侧倾角均值为停车状态前行

驶倾角反映内泄造成的车身侧倾角。图 10a 中第 1、2、4、6 个停车时刻车身侧倾角与路面倾角均接近于 0,未开阀;第 3、5 个停车时刻路面倾角较小,车身侧倾角大,需开阀 2 s 充分平衡压力差;第 7 个停车时刻路面倾角与车身侧倾角反向,需开阀 1 s 平衡部分压差,造成反向压力差。仿真结果与控制策略相同,需进行进一步实车试验验证。

### 3 实车试验分析

为了验证本文采用的基于模糊控制的电磁平衡阀控制策略的正确性,对控制器进行实车试验,试验场景如图 11 所示,记录整个过程中车身侧倾角数据、液压支路压力数据、后悬高度数据和电磁阀信号,对记录的数据进行分析对比。



图 11 试验场景

因为车辆实际行驶过程中,HIS 系统液压缸内泄是一个不断累积的漫长过程,所以试验中通过单向阀连接两侧油路,使油液单向流通。当车辆转弯时,车身发生侧倾,一侧液压支路油液增加,另一侧减少,并不断累积,使两侧液压支路压力差不断增大,该过程不可逆,以此模拟液压缸内泄过程。记录车身倾角、油路油压、电磁阀控制指令信号,车辆行驶轨迹与压力变化如图 12 所示,试验过程中出现的控制逻辑存在的 3 种电磁阀状态结果如图 13 所示。

从图 12 可以看出,车辆沿道路绕 8 字行驶,试验过程中随机停车多次,电磁阀打开 4 次。

图 13a 中停车状态车身瞬时侧倾角为  $-0.67^\circ$ ,行驶侧倾角均值为  $-0.69^\circ$ ,初始油压差为  $0.74\text{ MPa}$ ,此时车身由于油压差造成的车身侧倾角为  $-0.69^\circ$ ,路面倾斜度为  $0.02^\circ$ ,此状态依据控制逻辑打开电磁阀 2 s 平衡压力差,电磁阀打开后车身侧倾角降为  $0.04^\circ$ ,压力差降为  $0.18\text{ MPa}$ ,两支路油压差得到平衡;图 13b 中停车状态车身瞬时侧倾角为  $0.59^\circ$ ,行驶侧倾角均值为  $-0.07^\circ$ ,初

始油压差为 0.07 MPa,此时车身由于油压差造成的车身侧倾角为 $-0.07^\circ$ ,路面倾斜度为 $0.66^\circ$ ,此状态液压支路压力差几乎不存在,车辆停在倾斜路面,电磁阀未打开,避免增大支路压力差;图 13c 中停车状态车身瞬时侧倾角为 $0.50^\circ$ ,行驶侧倾角均值为 $-0.47^\circ$ ,初始油压差为 0.17 MPa,此时车身由于油压差造成的车身侧倾角为 $-0.47^\circ$ ,路面倾斜度为 $0.97^\circ$ ,此时路面与车身倾斜方向相反,电磁阀打开 1 s 以平衡部分压力差且同时避免造成反向压力差,开阀后车身倾角增大 $0.13^\circ$ ,角度变化趋势对应于由于液压支路压力差造成的车身侧倾角减小 $0.13^\circ$ ,两侧支路压力差降至 0.15 MPa,油压达到平衡效果,同时避免过度平衡造成反向压力差。实车试验结果见表 4 所列。

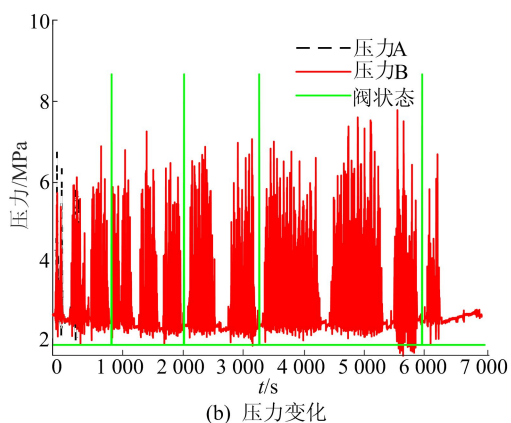
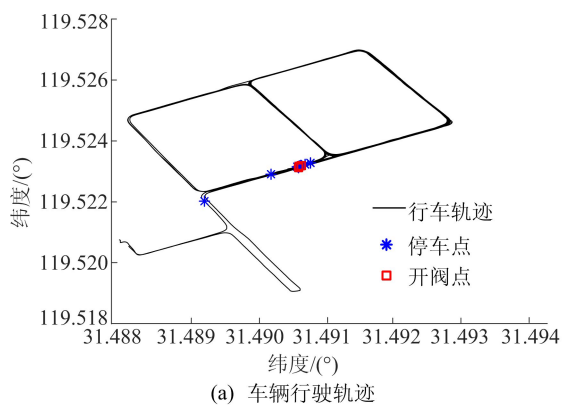


图 12 车辆行驶轨迹与压力变化

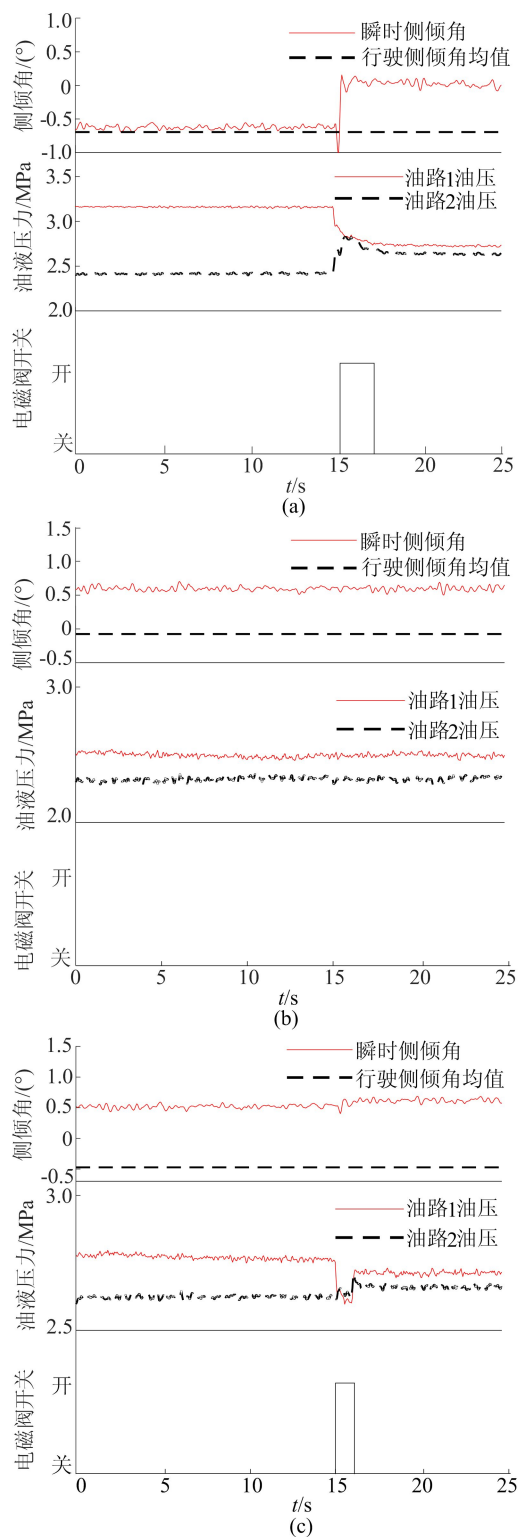


图 13 电磁阀平衡油压结果

表 4 实车试验结果

开阀序号	开阀时间/s	压力差/MPa		侧倾角/ $^\circ$		压力变化率/%	侧倾角变化率/%
		开阀前	开阀后	开阀前	开阀后		
1	2	0.30	0.12	$-0.42$	$-0.25$	$-60.0$	$-40.5$
2	2	0.57	0.15	$-0.68$	$-0.35$	$-73.7$	$-48.5$
3	2	0.74	0.18	$-0.66$	$-0.04$	$-75.7$	$-93.9$
4	1	0.20	0.10	0.50	0.58	$-50.5$	16.0

- 2016 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. [S. l.]:IEEE,2016:2117-2125.
- [14] YI J R, WU P X, METAXAS D N. ASSD: attentive single shot multibox detector[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2019, 189:102827. 1-102827. 7.
- [15] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition [EB/OL]. (2014-09-04) [2019-08-28]. <https://arxiv.org/abs/1409.1556v3>.
- [16] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of 2016 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. [S. l.]: IEEE, 2016:770-778.
- [17] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[C]//Proceedings of the European Conference on Computer Vision. [S. l. :s. n. ], 2018:3-19.

(责任编辑 李 凯)

#### (上接第 302 页)

由试验结果可知,整个试验过程共停车 11 次,开阀 4 次,试验前液压支路压力差为 0 MPa,试验过程中最大压力差为 0.76 MPa,试验结束时支路压力差为 0.18 MPa,结果表明该控制方法能够适时打开电磁阀平衡压力差,并避免电磁阀误开启造成压力差加剧,有效降低 HIS 系统液压缸内泄影响。

#### 4 结 论

本研究 HIS 电磁平衡阀的控制策略,以减小液压缸内泄影响,提高车辆性能。首先,利用 AMESim 建立了 HIS 与电磁阀模型,并通过实验分析对比了电磁阀的流量特性与平衡效果;然后通过对实验数据的分析,依据电磁阀与车辆特性设计了模糊控制器对电磁阀进行控制,通过 MATLAB/Simulink 验证模糊控制策略的可行性;最后以某 SUV 对设计的控制器进行试验分析。结果表明,基于模糊控制的电磁平衡阀能有效降低液压缸内泄对 HIS 系统的影响。

#### [参 考 文 献]

- [1] 丁飞,张农,韩旭. 安装液压互联悬架货车的机械液压多体系统建模及模态分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 116-123.
- [2] 赵贺雪,张邦基,张农,等. 高度可调式抗侧倾液压互联悬架建模及控制策略研究[J]. 振动与冲击 2018, 37(3): 202-209.
- [3] 朱海燕,苏校,陈齐平,等. 车辆减振器油液微小内泄漏分析[J]. 润滑与密封, 2019, 44(8): 81-86.
- [4] ZHANG N, SMITH W A, JEYAKUMARAN J. Hydraulically interconnected vehicle suspension: background and modelling[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(1): 17-40.
- [5] SMITH W A, ZHANG N, JEYAKUMARAN J. Hydraulically interconnected vehicle suspension: theoretical and experimental ride analysis[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(1): 41-64.
- [6] 曾繁鑫,郑敏毅,刘军,等. 半主动液压互联悬架客车的平顺性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(3): 307-315.
- [7] ZHU S, DU H, ZHANG N. Development and implementation of fuzzy, fuzzy PID and LQR controllers for an roll-plane active Hydraulically Interconnected Suspension[C]//2014 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE). [S. l.]: IEEE, 2014: 2017-2024.
- [8] 吴晓建,周兵,文桂林. 液压互联悬架抗侧倾控制研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(3): 123-132.
- [9] 江治东,郑敏毅,张农. 半主动抗俯仰液压互联悬架俯仰力学的研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(14): 272-278.
- [10] 陈盛钊,钟义旭,张邦基,等. 液压互联悬架系统关键参数对车辆动力学响应影响及试验验证[J]. 机械工程学报, 2017, 53(14): 39-48.
- [11] 杨扬,张翼. 基于 AMESim 的锥阀和球阀式液压阀动态特性分析[J]. 煤矿机械, 2015, 36(4): 154-155.
- [12] 朱佳鑫. 桥梁变形监测中基于 MEMS 加速度倾角传感器的设计与研究[D]. 广州:华南理工大学 2020.
- [13] 徐小东,张冰战. 基于模糊逻辑的混合动力汽车控制策略研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(6): 725-728.
- [14] 陈龙,马瑞,王寿静,等. 车辆半主动悬架阻尼多模式切换控制研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 148-155.

(责任编辑 胡亚敏)