

液电馈能式悬架的液压参数灵敏度分析与优化*

周创辉[†],文桂林

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室,湖南 长沙 410082)

摘要:为了在满足减振需求的同时提高悬架的馈能效果,对一种新型液-电馈能式悬架的液压系统参数进行了灵敏度分析和优化.在 AMESim 中建立了液-电馈能单元的仿真模型,并通过样机台架试验对仿真模型进行了验证.以 ISIGHT 为平台,在 1/4 车辆 AMESim 模型中,对影响车身加速度和馈能功率的 5 个液压系统参数进行了灵敏度分析.结果表明:液压马达排量对车身加速度和馈能功率均有显著的影响.以平顺性为约束,建立了提高馈能功率的优化模型,并对液压系统的参数进行了优化计算.结果表明:在满足车身平顺性的前提下,优化后的平均馈能功率提高了 12.7%.

关键词:汽车悬架;馈能悬架;ISIGHT;AMESim;灵敏度分析;优化

中图分类号:U463.1

文献标志码:A

Sensitivity Analysis and Optimization of Hydraulic Parameters to a Hydraulic-electrical Regenerative Suspension's Performance

ZHOU Chuanghui[†], WEN Guilin

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To improve suspension regenerative power with reasonable vehicle ride comfort, sensitivity analysis and optimization of hydraulic parameters to a hydraulic-electrical regenerative suspension were carried out. The regenerative suspension consists of a spring and a hydra-electrical regenerative unit. Based on the suspension structure and principle, a simulation model of the hydra-electrical regenerative unit was established by AMESim software. And the model was verified by a prototype testing of the hydraulic-electrical regenerative unit. Taking ISIGHT software as a platform, sensitivities of hydraulic system parameters affecting car-body vertical acceleration and suspension regenerative power were analyzed by a quarter car vehicle mode in AMESim. The results show that, compared with recharging pressures and volumes of two accumulators, hydraulic motor displacement has a significant effect on both the vehicle vertical acceleration and suspension regenerative power. Moreover, taking the vehicle vertical acceleration RMS value of a traditional suspension as a constraint, the hydraulic system parameters were optimized to maximize the suspension average regenerative power. The results show that the average regenerative power is improved by 12.7% after optimization when the vehicle ride comfort is acceptable.

Key words: vehicle suspension; regenerative suspension; ISIGHT; AMESim; sensitivity analysis; op-

* 收稿日期:2017-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275162), National Natural Science Foundation of China(51275612)

作者简介:周创辉(1986—),男,陕西武功人,湖南大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: zhouchuanghui@163.com

timization

车辆的悬架用于传递车身和车轮之间的力和力矩,对车辆的乘坐舒适性和操纵稳定性有直接影响^[1].其中,馈能式悬架在实现车身减振的同时,能够有效回收悬架的振动能量,已成为当前车辆工程领域的一个研究热点^[2-3].近年来,国内外学者对馈能式悬架系统展开了大量研究:Lei等^[4]设计了一种直线电机式馈能悬架,并通过1:2的样机试验对悬架的馈能特性做了研究.陈龙等^[5-6]在直线电机馈能悬架中引入Boost/Buck型DC-DC变换器,设计了自适应离线神经网络逆控制器对馈能悬架的电磁阻尼力进行控制.许光灿等^[7]对滚珠丝杠-电机式馈能悬架的馈能特性进行了仿真和实验分析,并对悬架的阻尼特性和优化特性进行了局部优化.寇发荣^[8]提出一种基于EHA作动器的馈能式悬架系统,并对该悬架的主动和半主动控制做了研究.过学迅^[9-10]提出一种采用多个单向阀组成整流回路的液-电式馈能悬架系统,通过仿真和试验对馈能悬架系统的阻尼力和馈能功率等特性进行了分析.

从已有的研究侧重点和方向来看,对液压-旋转电机馈能式悬架系统的研究主要集中在结构设计、特性分析和控制方式等方面,几乎没有针对馈能悬架系统参数的灵敏度分析和优化.本文针对一种新型液-电馈能式悬架系统,联合ISIGHT和AMESim,分析液压系统的几个重要参数对悬架减振和馈能特性的灵敏度.在此基础上,以车辆平顺性为约束,以提高馈能功率为目标,对液压系统参数进行优化.本文的研究对其他类型馈能式悬架系统的设计开发也有一定的指导意义.

1 基于AMESim的馈能式悬架系统建模

1.1 液-电馈能式悬架系统

图1所示是一种新型液-电馈能式悬架系统,该悬架系统安装在车身 m_c 和车轮 m_w 之间,由一个刚度为 K_1 的弹簧和一个液-电馈能单元并联组成.在液-电馈能单元中,液压缸的活塞杆和缸筒分别连接在车身和车轮上.其中,液压缸的上下腔通过活塞上的油孔连通,使其等同于一个柱塞缸.活塞上的油孔设计为多个直径较大的通孔,总通流截面积较大,压力损失可以忽略.液压缸上下两腔之间没有泄漏,活塞和缸体之间不需要密封,减小了液压缸的摩擦

力.两个单向阀反向并联安装在液压缸的油口上.单向阀的另一端分别安装一个蓄能器.液压马达通过三通接头安装在两个蓄能器之间,带动汽车发电机将振动能量转化成电能,并存储到蓄电池中.发电机采用汽车用发电机,输出14V直流电压,直接向蓄电池充电.

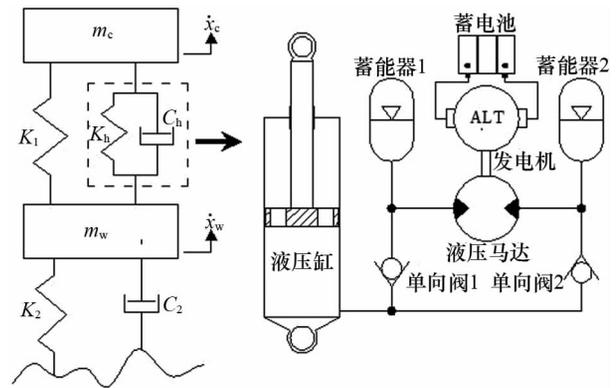


图1 液-电馈能式悬架系统示意图

Fig.1 Layout of the hydraulic-electrical regenerative suspension system

在悬架的压缩行程中,活塞杆被压进缸筒内,引起液压缸内压力升高,使单向阀1打开而单向阀2关闭.从液压缸流出的高压油经过单向阀1后,一部分流入蓄能器1,使蓄能器1的压力高于蓄能器2的压力,从而在液压马达两端产生压力差;另一部分高压油克服马达轴上的阻力矩后,经过液压马达进入蓄能器2.在悬架的伸张行程中,活塞杆从缸筒内拔出,导致液压缸内压力降低,使得单向阀1关闭而单向阀2打开.蓄能器2内的油液经过单向阀2流入到液压缸中,使得蓄能器2的压力低于蓄能器1的压力,从而在液压马达的两端产生压力差.当液压马达两端的压力差足够克服马达轴上的阻力矩时,液压马达带动发电机转动.蓄能器1内的高压油经过液压马达补充到低压侧.在悬架两个行程中,油液始终从蓄能器1经过液压马达流向蓄能器2,液压马达的旋转保持方向一致.

传统的油气悬架和液压减振器中,阻尼部件是串连在主油路中的.而图1所示的液-电馈能单元中,液压马达与蓄能器之间是并联的.当悬架处于压缩行程时,大部分高压油进入蓄能器1,液压缸中的压力主要由蓄能器1决定;当悬架处于伸张行程时,液压缸所需的大部分油液由蓄能器2提供,液压缸

的压力主要由蓄能器 2 决定.由于液压马达的隔离,两个蓄能器的工作状态是不相同的.因此,液压缸的输出力是不对称的,液-电馈能单元相当于一个变刚度的油气悬架系统.

车辆静止不动时,液-电馈能单元的液压系统中的压力为稳态工作压力 $p_g = 4 m_c g / \pi d_s^2$.其中, m_c 为车身质量, d_s 为活塞杆直径.蓄能器 1 和蓄能器 2 的充气压力低于 p_g , 稳态下两个蓄能器中分别会充入一定体积的油液.在参数设置合理的情况下,稳态下蓄能器 2 中充入的油液体积大于液压缸伸张行程所需的油液体积,防止液压缸出现“吸空”现象.

悬架的减振性能直接影响到车辆的乘坐舒适性,主要表现为车身垂向加速度的大小.在传统被动悬架的 1/4 车辆模型中,车身的振动微分方程为:

$$K_s(X_c - X_w) + C_s(\dot{X}_c - \dot{X}_w) + m_c \ddot{X}_c = 0 \quad (1)$$

式中: K_s 和 C_s 分别为传统被动悬架的刚度和阻尼, m_c 和 \ddot{X}_c 分别为车身的质量和加速度.从上式可以看出,减小车身加速度的关键是减小弹簧和减振器的合力,即悬架作用在车身上的力.通常在设计悬架时,在相同的速度下,要求压缩行程和伸张行程的阻尼力不对称.当悬架压缩时,弹簧力和阻尼力都向上,阻尼力越小,则悬架作用在车身上的力越小.当悬架处于伸张行程时,弹簧力向上,而阻尼力向下,阻尼力越大,弹簧和减振器向上的合力越小.

在图 1 所示的馈能悬架的 1/4 车辆模型中,液压系统中有一定的压力,液-电馈能单元相当于一个油气子悬架.液压缸的输出力 F_h 中包含弹性力和阻尼力.弹簧刚度 K_1 小于同等参数下传统悬架中的弹簧刚度系数.车身的振动微分方程可以描述为:

$$K_1(X_c - X_w) + F_h + m_x \ddot{X}_c = 0 \quad (2)$$

式中: K_1 为螺旋弹簧的刚度; F_h 为液压缸的输出力.前两项之和为悬架作用在车身上的力,且方向始终向上.在压缩行程中,蓄能器 1 起主要的缓冲储能作用,液压马达提供阻尼力.液压缸排出的大部分高压油进入蓄能器 1; 小部分高压油流经液压马达进入蓄能器 2.此时,蓄能器 1 的缓冲作用较大,而液压马达提供阻尼力作用较小.高压油快速进入蓄能器 1,使得液压缸内的压力得到释放,减小了液压缸的输出力 F_h .在伸张行程中,液压缸容腔增大、压力降低,需要从油路中补充油液.蓄能器 2 中的油液快速流出补充到液压缸,使得蓄能器 2 的压力降低.存储在蓄能器 1 中的高压油经过液压马达也补充到液压

缸,液压马达相当于阻尼,消耗液压系统中存储的振动能量.此时,液压马达的阻尼作用较大,蓄能器 2 提供的弹性力作用较小.液压缸的压力降低减小液-电馈能单元的输出力 F_h ,使式(2)的前两项之和减小,进而降低了车身加速度.综上所述,本文提出的液-电馈能悬架系统的工作原理符合悬架设计要求,满足车辆减振需要.

1.2 液-电馈能单元仿真模型及试验验证

根据馈能式悬架系统中液-电馈能单元的结构原理,在 AMESim 软件中建立液-电馈能单元的仿真模型,如图 2 所示.模型中,液压缸由 HCD 库中的 brp2 模块搭建,上下腔分别采用 BRP18 和 BRP17 子模型.单向阀采用 presscontrol102 元件模型,选择 CV000 子模型.液压马达选择 motor02 元件,选择 HYDFPM01M 子模型.蓄能器采用 accumulator 元件模型,选择 HA001 子模型.发电机采用 ae_Alternator_QS 汽车发电机模型,选择 AEALTO1 子模型.电池采用 ae_Battery 汽车电池模型,选择 AE-BAT01 子模型.rotaryload2ports 元件模型用于模拟液压马达和发电机的转动惯量和摩擦力.

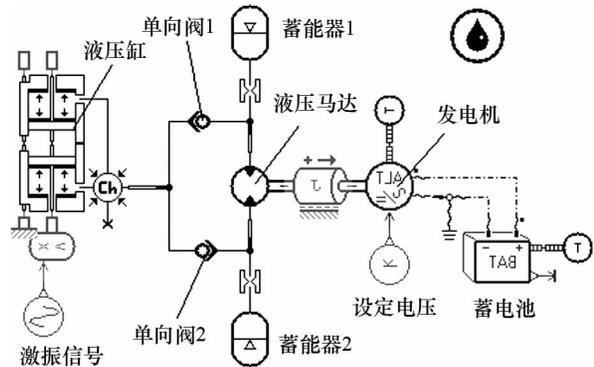


图 2 基于 AMESim 的液-电馈能单元仿真模型

Fig.2 Hydraulic-electrical regenerative unit model in AMESim

根据液-电馈能单元的结构原理制作样机一台,并进行台架试验,如图 3 所示.其中,发电机采用 JFZ03 型汽车发电机,蓄电池为 55D23 型汽车蓄电池.在馈能电路中采用 HCS-LTS-15A 型霍尔电流传感器测量发电机的输出电流,并通过示波器读取.测试台采用 MTS 电液伺服试验系统,激振液压缸的自带位移传感器和力传感器.液-电馈能单元液压缸的活塞杆和激振缸的活塞杆通过法兰联接,其输出力和位移可直接从测试台电脑终端读取.

由于液压马达有外泄露,一般液压马达的壳体需要外接泄油管到油箱.本文选择 Sauer 公司 OMM8 液压马达.如图 4 所示,该马达在内部通过



图3 液-电馈能单元的样机台架试验
Fig.3 Prototype testing of the hydraulic-electrical regenerative unit

单向阀将壳体泄油与液压马达的油口相连.当转速达到 800 r/min 以上时,液压马达壳体密封的可承受压力为 20 bar.由馈能单元的工作原理可知,蓄能器 2 的压力低于蓄能器 1 的压力.因此,液压马达的壳体泄油始终与蓄能器 2 相连,液压系统的稳态压力设置不宜过高,以保证马达壳体密封.

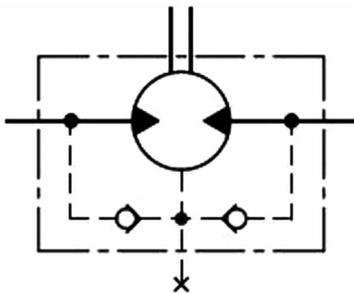


图4 液压马达壳体泄油回路
Fig.4 Oil drainage loop of the hydraulic motor

以某 SUV 车型为参照对象,其参数如表 1 所示.假设馈能悬架中并联的弹簧刚度 K_1 为 11 000 N/m,液-电馈能单元的稳态压力设为 17 bar,则计算可得液压缸活塞杆的直径约为 35 mm.其他参数如表 2 所示.

表1 某 SUV 的参数
Tab.1 Parameters of a SUV

参数	数值
1/4 车身质量 m_c/kg	400
车轮质量 m_w/kg	50
悬架弹簧刚度 $K_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	19 000
悬架阻尼系数 $C_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	1 400
轮胎刚度 $K_w/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	192 000
轮胎阻尼系数 $C_w/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$	100

表2 馈能悬架的参数

Tab.2 Parameters of the regenerative suspension

参数	数值
液压缸筒的直径 D_s/mm	60
活塞杆的直径 d_s/mm	35
油管的直径 d_p/mm	8
油管的等效长度 L_p/mm	350
油液的密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	870
油液的弹性模量 β/bar	16000
蓄能器 1 的容积 V_{ac1}/L	0.4
蓄能器 2 的容积 V_{ac2}/L	0.4
蓄能器 1 的充气压力 p_{ac1}/bar	15
蓄能器 2 的充气压力 p_{ac2}/bar	12
单向阀的节流系数 C_d	0.62
单向阀的开启压力 p_{cv}/bar	0.5
单向阀的通径 d_{cv}/mm	6
液压马达的排量 $q_m/(\text{mL} \cdot \text{r}^{-1})$	8

在图 2 所示的 AMESim 仿真模型中输入与样机中相同的参数,进行馈能悬架的外特性仿真.试验和仿真中的激振信号均为正弦信号,频率为 1.67 Hz,振幅为 0.05 m.为了模拟实车条件,先根据传统悬架下车身的平衡位置确定液-电馈能单元的静平衡位置.由表 1 参数计算可得,当车辆处于静止状态时,被动悬架弹簧的压缩量约为 0.2 m.因此,在仿真和试验中要先给液压缸一个 0.2 m 的位移,待系统达到稳态后再加激振信号.试验中,信号采样频率设为 128 Hz.将试验结果与仿真结果进行对比,验证仿真模型的正确性.

图 5 所示分别是试验和仿真得到的一个激振周期内液压缸的输出力-位移曲线,如图 6 所示分别是试验和仿真得到的发电机输出瞬时电流曲线.对比图 5 和图 6 中的曲线,可以看出在相同的激励下,试验得到的曲线和仿真结果之间存在一些误差.一是由于实际中的摩擦力随机性较大,仿真无法完全模拟;另一个原因是仿真模型中的发电机和电池的参数与实物之间可能存在一定误差.但是,两条曲线吻合度较高,趋势基本一致.因此,在 AMESim 中建立的液-电馈能单元仿真模型是比较准确的,可以用于搭建馈能悬架系统的仿真模型.

2 液压系统参数灵敏度分析

2.1 液-电馈能悬架系统的 1/4 车辆模型

利用图 2 所示的液-电馈能单元仿真模型,在 AMESim 软件中建立液-电馈能式悬架系统的 1/4 车辆仿真模型,如图 7 所示.利用 AMESim 软件的 AMEPilot 功能,设置 AMESim 与 ISIGHT 的联合

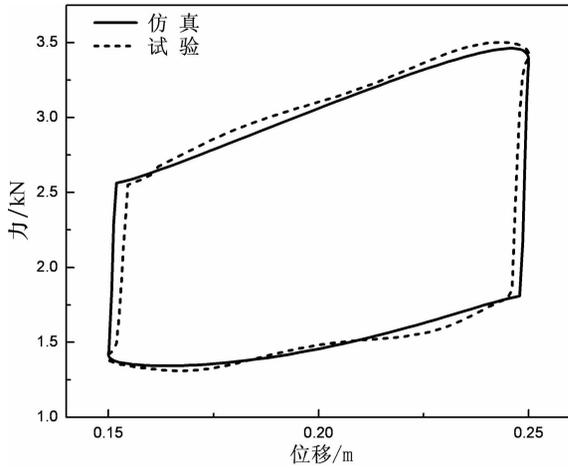


图 5 输出力-位移曲线

Fig.5 Force-displacement loops of the hydraulic cylinder

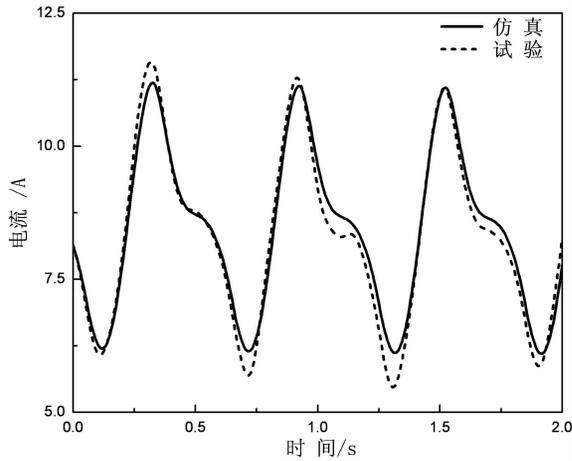


图 6 发电机输出电流曲线

Fig.6 Current loops of the alternator

仿真接口,车辆平顺性一般通过车身加速度均方根值来评价,而悬架的馈能性能可以通过发电机输出功率的平均值来评价.因此,在 Export 输出模块中,将表 1 中的参数设置为仿真输入变量,将车身加速度均方根值和发电机输出功率的平均值设置为复合输出变量.仿真时,以一段 50 km/h 车速下的 C 级路面为输入信号.模型中弹簧的刚度为 11 000 N/m,其他参数如表 1 和表 2 所示.

2.2 设计变量

液-电馈能单元中,液压缸、蓄能器和液压马达是主要的三个元件.其中,活塞杆直径主要影响悬架液压系统中的稳态压力.因此,以蓄能器 1,蓄能器 2 和液压马达排量为主要考察对象,设计变量参数及取值范围,如表 3 所示.

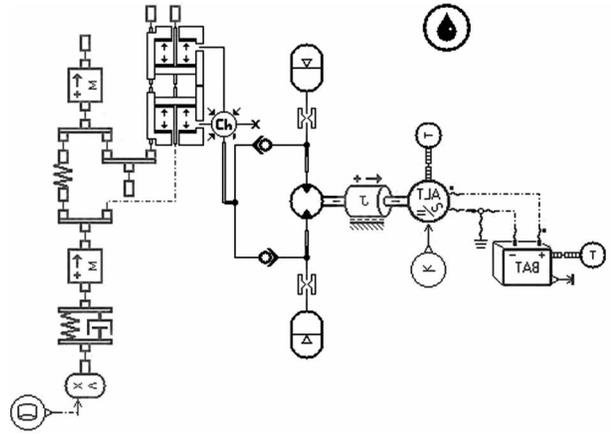


图 7 馈能悬架的 1/4 车辆仿真模型

Fig.7 Quarter car model for regenerative suspension

表 3 变量参数取值范围

Tab.3 The value range of the variable parameters

参数	取值范围
蓄能器 1 的充气压力 p_{ac1} /bar	[10,16]
蓄能器 2 的充气压力 p_{ac2} /bar	[8,14]
蓄能器 1 的容积 V_{ac1} /L	[0.25,0.5]
蓄能器 2 的容积 V_{ac2} /L	[0.25,0.5]
液压马达的排量 q_m /(mL · r ⁻¹)	[6,10]

2.3 灵敏度计算

在 ISGIHT 中建立如图 8 所示的参数 DOE 分析试验设计模型.在该模型中,采用 DOE 模块设计了一个 L32(4×5)的正交试验数组,采用 Simcod 组件调用 AMESim 程序并进行数据交换^[11].

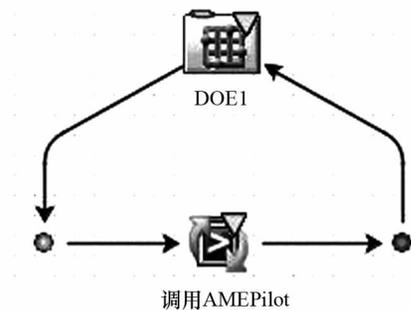


图 8 ISGIHT 参数 DOE 分析流程

Fig.8 Parameter DOE analysis flow in ISGIHT

图 9 和图 10 所示分别是输入变量对车身加速度均方根值和发电机输出功率平均值的灵敏度分析结果.图中灵敏度的正负代表了变量对输出结果的影响方向.若灵敏度为正,则输出结果随输入变量的增大而增大.若灵敏度为负,则输出结果随输入变量的增大而减小.从图 9 中可以明显看出,5 个参数对车身加速度的灵敏度都为负.其中,灵敏度最大的是液压马达排量 q_m ,其次是蓄能器 1 的容积 V_{ac1} ,

蓄能器 2 的容积 V_{ac2} , 蓄能器 2 的充气压力 p_{ac2} 和蓄能器 1 的充气压力 p_{ac1} . 从图 10 中可以看出, 液压马达排量 q_m , 蓄能器 2 的充气压力 p_{ac2} 和蓄能器 2 的容积 V_{ac2} 的灵敏度为负, 蓄能器 1 的充气压力和容积的灵敏度为正, 但绝对值较小. 相比其他参数, 液压马达的排量对车身加速度和悬架回收的功率影响最显著. 增大液压马达排量, 车身加速度和馈能功率都会减小. 通过调节液压马达排量可以有效调节车辆的平顺性和悬架的馈能特性, 可以作为馈能悬架半主动控制的一个途径.

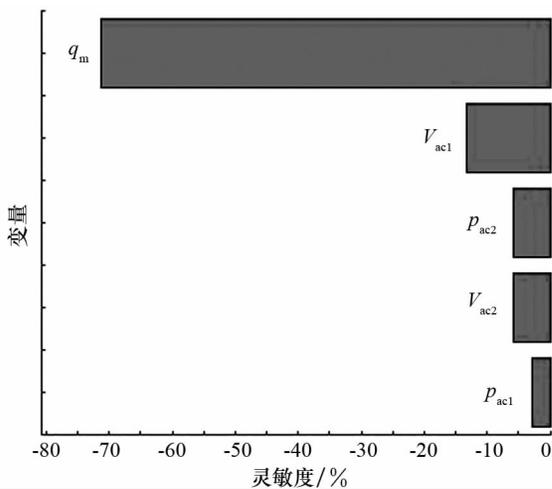


图 9 液压系统参数对车身加速度均方根值的灵敏度

Fig.9 Sensitivities of the hydraulic parameters on vehicle acceleration RMS value

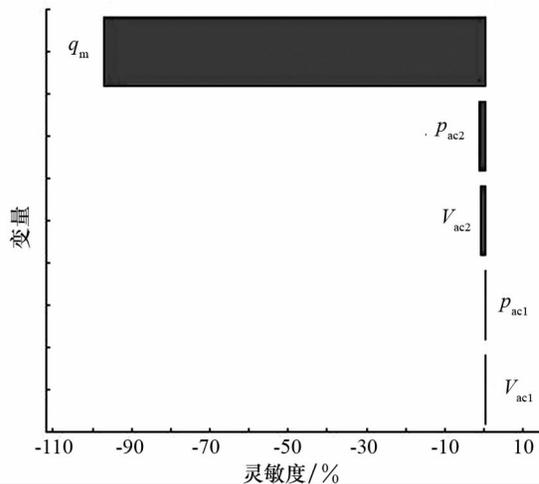


图 10 悬架参数对发电机输出功率平均值的灵敏度

Fig.10 Sensitivities of the hydraulic parameters on alternator output power average value

3 液压系统参数优化

3.1 优化模型

车辆的平顺性和悬架的馈能特性之间是对立的. 改善车辆的平顺性会在一定程度上降低悬架的馈能功率. 反之, 过分地提高馈能功率会造成平顺性变差. 馈能悬架作为一种特殊用途的悬架, 首要作用仍然是用于车辆的减振. 在满足车辆行驶平顺性的前提下, 提高悬架系统的馈能功率才有实际意义. 以相同条件下传统被动悬架对应的车辆平顺性为参考, 尽可能提高悬架的馈能功率. 因此, 以表 1 中被动悬架对应的车身垂向加速度均方根值为约束条件, 以馈能悬架中发电机回收功率的最大平均值为目标函数, 建立式(3)所示的优化模型.

$$\begin{cases} \max f(x) = \bar{P}_{out} \\ \text{st. } \sigma_c \leq \sigma_0 \\ 8 \leq p_{ac1} \leq 14 \\ 10 \leq p_{ac2} \leq 16 \\ 0.25 \leq V_{ac1}, V_{ac2} \leq 0.5 \\ 6 \leq q_m \leq 10 \end{cases} \quad (3)$$

式中: \bar{P}_{out} 为发电机输出的电功率平均值; σ_c 为车身加速度均方根值, σ_0 为传统被动悬架对应的车身加速度均方根值. 在图 7 所示的 1/4 车辆模型中, 根据表 1 中的参数建立被动悬架模型来替代馈能悬架模型. 其他条件不变, 仿真后可得安装原被动悬架对应的车身加速度均方根值 $\sigma_0 \approx 1.41 \text{ m/s}^2$.

3.2 优化计算

在图 7 所示的模型中将 DOE 模块替换为 Optimization 模块, 保持其他设置不变, 即可进行优化设计, 流程如图 11 所示. 优化算法选择 Optimization 模块中的 Pointer 智能优化器. Pointer 优化器是 ISIGHT 提供的智能自动化优化专家, 能够自动捕捉设计空间的信息, 自动组合线性单纯行法 (linear simplex)、最速下降法 (downhill simple)、序列二次规划法 (NLPQL) 和遗传算法 (genetic algorithms) 四种优化算法形成一个最优的优化策略^[12-13].

在 ISIGHT 中运行优化模型, 可得到优化后的输入输出变量计算结果. 考虑到工程实际, 需要对优化后的参数进行圆整. 优化前后的馈能悬架系统的液压参数如表 4 所示. 对比表中馈能悬架优化前后的参数可以看出, 蓄能器 1 的充气压力和容积基本没变化, 液压马达的排量、蓄能器 2 的充气压力和容

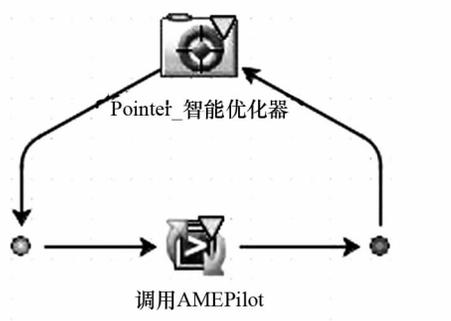


图 11 ISIGHT 参数优化流程

Fig.11 Parameters optimization flow in ISIGHT

积有所减小,这和前面的参数灵敏度分析结果是比较吻合的.

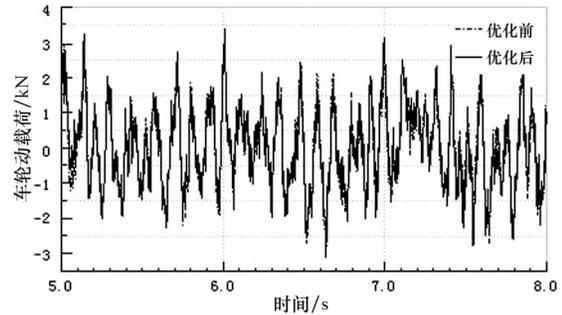
表 4 优化前后的液压系统参数

Tab.4 Hydraulic parameters before and after optimization

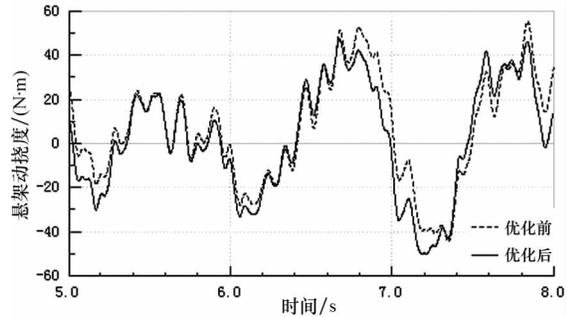
参数	p_{ac1}/bar	p_{ac2}/bar	V_{ac1}/L	V_{ac2}/L	$q_m/(\text{mL} \cdot \text{r}^{-1})$
初始值	15	12	0.4	0.4	7
优化值	15.26	12.77	0.382	0.354	6.42
圆整值	15	13	0.4	0.35	6.5

分别将表 4 中优化前和圆整后的参数,输入到图 7 所示的 1/4 车辆模型中,其他条件不变,进行仿真.图 12(a)(b)(c)和(d)所示分别为优化前后得到的发电机输出功率、车身加速度、车轮动载荷和悬架动挠度的时域响应结果.

由于图 12 中的曲线为随机激励的响应结果,不能直接对比.因此,对图 12 所示的优化前后的时域



(c) 车轮动载荷



(d) 悬架动挠度

图 12 优化前后的时域响应

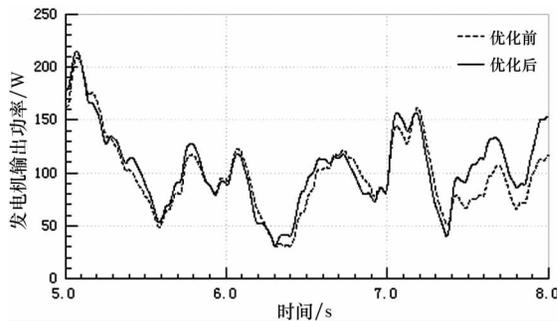
Fig.12 Time-domain responses before and after optimization

相应结果进行统计计算,得到发电机输出功率的平均值以及车身加速度、车轮动载荷和悬架动挠度的均方根值,如表 5 所示.从表中数据可知,优化后,发电机输出功率和悬架动挠度的改善比较显著,发电机的馈能功率的平均值提高了 12.7%;车轮动载荷均方根值减小了 4.4%,有利于提高车辆的操稳性;馈能悬架动挠度均方根值减小了 12.2%,减小了撞击限位块的概率.优化后车身加速度均方根值相比优化前增大了 6.1%,但仍小于被动悬架对应的车身加速度均方根值,且实际增加值只有 0.08 m/s^2 ,对平顺性影响不明显,可以认为优化后的车身平顺性在可接受范围内.上述结果表明,在满足车辆平顺性要求的前提下,以馈能功率最大为目标,对馈能悬架主要参数进行的优化符合设计要求.

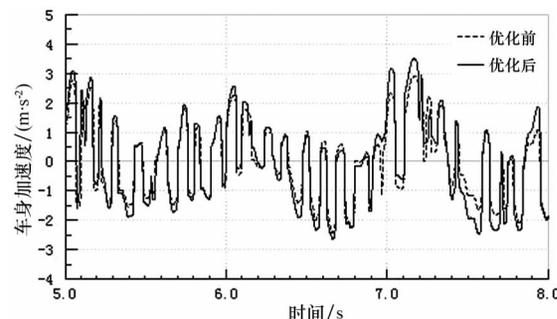
表 5 参数优化前后时域响应的计算结果

Tab.5 Computed results of the time-domain responses before and after optimization

输出变量	初始值	优化后	增幅
发电机输出功率平均值/W	74.2	83.6	12.7%
车身加速度均方根值/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	1.31	1.39	6.1%
车轮动载荷均方根值/N	1 246.4	1 191.7	-4.4%
悬架动挠度均方根值/mm	21.3	18.7	-12.2%



(a) 发电机输出功率



(b) 车身加速度

4 结论

本文联合 ISIGHT 和 AMESim 在液-电馈能式悬架系统的 1/4 车辆模型中,对影响车辆平顺性和悬架馈能功率的关键参数进行了灵敏度分析和优化,得到如下结论:

1)通过样机台架试验验证了在 AMESim 中建立的液-电馈能单元的仿真模型是比较准确的,可以用于液-电馈能悬架系统的仿真研究.

2)在 1/4 车辆仿真模型中,对影响车身平顺性和悬架馈能特性的 5 个液压系统参数进行了 DOE 分析.结果表明,5 个参数均对车身加速度和馈能功率有一定的影响.其中,液压马达排量对车辆平顺性和悬架馈能功率的影响最明显.

3)以传统被动悬架对应的车身平顺性为约束条件,以平均馈能功率最大值作为目标函数,对馈能悬架的 5 个液压系统参数进行优化.在满足车辆平顺性的前提下,优化后的发电机平均输出功率提高了 12.7%,车轮动载荷和悬架动挠度也得到了改善.

参考文献

- [1] 周长城. 车辆悬架设计及理论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
ZHOU Changcheng. Vehicle suspension design and theoretical analysis[M]. Beijing: Peking University Press, 2011. (In Chinese)
- [2] MARAVANDI A, MOALLEM M. Regenerative shock absorber using a two-leg motion conversion mechanism[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2015, 20(6): 2853-2861.
- [3] 苏玉青, 李舜酩, 王勇. 车辆能量回收系统研究[J]. 噪声与振动控制[J], 2016, 36(2): 6-11.
SU Yuqing, LI Shunming, WANG Yong. Overview of the research of automobile energy recovery systems[J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(2): 6-11. (In Chinese)
- [4] LEI Z, SCULLY B, SHESTANI J, et al. Design and characterization of an electromagnetic energy harvester for vehicle suspensions[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(4): 45-53.
- [5] 陈龙, 施德华, 汪若尘, 等. 馈能悬架自适应离线神经网络逆控制[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 281-287.
CHEN Long, SHI Dehua, WANG Ruochen, et al. Adaptive off-line neural network inverse control for energy-harvesting suspension[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 281-287. (In Chinese)
- [6] CHEN Long, SHI Dehua, WANG Ruochen, et al. Design and experiment study of a semi-active energy-regenerative suspension[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(1): 1-12
- [7] 许广灿, 徐俊, 李士盈, 等. 电动汽车振动能量回收悬架及其特性优化[J]. 西安交通大学学报: 自然科学版, 2016, 50(8): 90-95.
XU Guangcan, XU Jun, LI Shiyong, et al. Energy regenerative suspension and its performance optimization for electric vehicle[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University: Natural Sciences, 2016, 50(8): 90-95. (In Chinese)
- [8] 寇发荣. 车辆电动静液压半主动悬架设计与馈能研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 352-359.
KOU Farong. Design and energy regenerative study on vehicle semi-active suspension with electro-hydrostatic actuator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 352-359. (In Chinese)
- [9] FANG Zhigang, GUO Xuexun, XU Lin, et al. Experimental study of damping and energy regeneration characteristics of a hydraulic electromagnetic shock absorber[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013, P.943528
- [10] 张晗, 过学迅, 徐琳, 等. 液电式馈能减振器外特性仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 38-46.
ZHANG Han, GUO Xuexun, XU Lin, et al. Simulation and test for hydraulic electromagnetic energy-regenerative shock absorber[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(2): 38-46. (In Chinese)
- [11] 周兵, 黄晓婷, 耿元. 基于 Morris 法分析的液压参数对互联悬架的影响[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(2): 70-76.
ZHOU Bing, Huang Xiaoting, GENG Yuan. Influence of hydraulic parameters on hydraulically interconnected suspension based on Morris[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2016, 43(2): 70-76. (In Chinese)
- [12] 马天飞, 崔泽飞, 佟静. 基于 Isight 和 AMESim 的液压减振器关键参数集成优化[J]. 汽车工程, 2015, 37(1): 97-101.
MA Tianfei, CUI Zefei, TONG Jing. Integrated optimization of the key parameters of hydraulic shock absorber based on Isight and AMESim software[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(1): 97-101. (In Chinese)
- [13] 陈吉清, 钟海云, 兰凤崇, 等. 优化集成系统平台的建立及其应用研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(5): 50-57.
CHEN Jiqing, ZHONG Haiyun, LAN Fengchong, et al. Research on the establishing and application of integrated optimization system platform[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(5): 50-57. (In Chinese)