基于AMESim的电磁阀式减振器参数优化研究

王双虎　屈小贞

（辽宁工业大学汽车与交通工程学院，锦州 121001）

【摘要】为改善减振器的阻尼特性使其更易满足实际需求，对减振器结构参数进行了优化分析。以外置电磁阀式减振器为研究对象，分析了其结构和工作原理；基于阻尼力产生机理在AMESim中建立减振器仿真模型，对比台架试验结果，验证了模型的准确性；利用AMESim中的试验设计（DOE）模块，获得结构参数对阻尼力的影响程度，选取对阻尼力影响较大的参数，利用优化模块，以目标阻尼力曲线为目标进行结构参数优化。仿真结果表明：优化后最大复原阻尼力提升了34.61%，最大压缩阻尼力提升了9.67%；优化后的阻尼特性曲线更贴合目标曲线，结构参数更符合实际工程需求。

关键词：AMESim　电磁阀式减振器　DOE分析　结构参数优化

中图分类号：U463.33+5.1　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.20104/j.cnki.1674-6546.20240437

Research on Parameter Optimization of Solenoid Valve Damper Based on AMESim

Wang Shuanghu, Qu Xiaozhen

(College of Automotive and Traffic Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001)

【Abstract】To enhance the damping characteristics of the dampers to better meet practical demands, this paper conducts an optimization analysis on the damping structural parameters. With an electromagnetic valve-type damper as research object, this paper analyzes its structure and working principle. Based on the mechanism of damping force generation, a damper simulation model is established in AMESim and compared with the bench test results, verifying the accuracy of the model. Utilizing the DOE module in AMESim, the influence degree of structural parameters on damping force is obtained, and the parameters that have a greater impact on the damping force are selected. Using the optimization module, the structural parameters are optimized with the target damping force curve as the goal. Simulation results show that compared to that before optimization, the maximum recoverable damping force increases by 34.61%, while the maximum compression damping force increases by 9.67%. The optimized damping characteristic curve is closer to the target curve, making it easier to meet the actual engineering requirements through parameter optimization.

Key words: AMESim, Solenoid valve damper, DOE analysis, Structural parameter optimization

【引用格式】王双虎，屈小贞．基于AMESim的电磁阀式减振器参数优化研究[J]. 汽车工程师, 2026(3): 38-42.

WANG S H, QU X Z. Research on Parameter Optimization of Solenoid Valve Damper Based on AMESim[J]. Automotive Engineer, 2026(3): 38-42.

1　前言

目前，对于可调阻尼减振器的研究主要基于数学模型、物理模型和仿真模型。陈楠等以连续阻尼控制（Contious Damping Control，CDC）减振器的热力学为研究对象，搭建了热力学数学模型和仿真模型[1]。郑志斌等针对一种双复位结构的可调阻尼减振器，在Maxwell和Femm中分别研究了先导阀参数对减振器阻尼特性的影响[2]。丁二名等设计了一款CDC减振器，并通过试验获得了该减振器的调节特性[3]。陈龙等提出了一种新型螺旋式减振器，通过调整螺柱位置实现了减振器的阻尼力调节，建立其三维有限元模型并分析了模型的流场特性[4]。崔泽飞等利用AMESim搭建了双筒减振器的仿真模

型，分析得到对阻尼力影响较大的关键参数并用Isight对参数进行了优化[5]。陈双等通过实物拆解分析了可调阻尼减振器的工作原理并建立数学模型，在AMESim中搭建了仿真模型，通过试验验证了仿真模型的准确性[6]。黄彩霞等建立了叠加阀片式减振器的动力学模型和仿真模型，以平顺性为优化目标求得了最佳阻尼特性曲线，通过分析结构参数对阻尼特性的影响反求出了减振器的结构参数[7]。

由上述研究可知，减振器的结构参数对阻尼特性起到至关重要的作用。本文基于某型号电磁阀，在AMESim中搭建减振器仿真模型，利用试验设计（Design of Experiments，DOE）模块分析得出相关参数对减振器阻尼特性的影响，并利用遗传算法进行参数优化。

2　电磁阀式减振器结构分析

2.1　电磁阀式减振器结构

电磁阀式减振器如图1所示，其内部主要由活塞杆、工作缸、中间缸、储油筒、电磁阀、活塞阀系、底阀阀系组成。其中活塞阀系由流通阀、活塞、复原阀组成，而底阀阀系由补偿阀、底阀、压缩阀组成。



图1　电磁阀式减振器

电磁阀式减振器结构如图2所示。

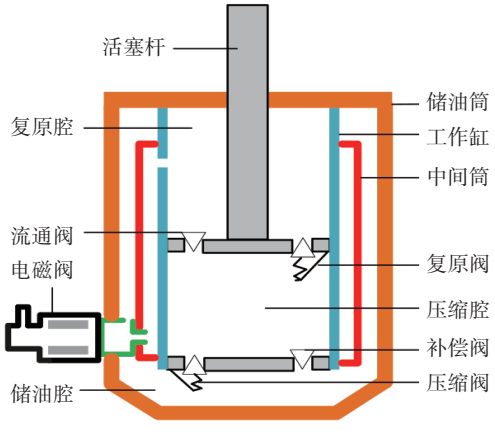
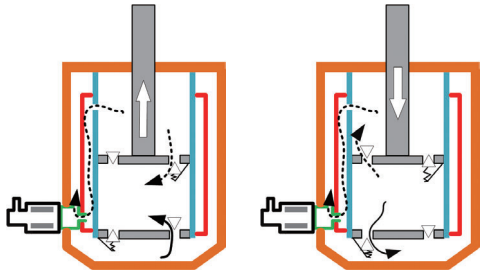


图2　电磁阀式减振器结构示意

2.2　工作原理分析

2.2.1　减振器工作原理

复原行程和压缩行程油液流向如图3所示。复原行程中活塞杆向上移动，复原腔油压增大，复原阀打开，复原腔的油液一部分经过复原阀流向压缩腔，另一部分通过中间缸经电磁阀流向储油腔；同时，储油腔的油液经过补偿阀流入压缩腔。压缩行程中活塞杆向下移动，压缩腔油压增大，此时流通阀打开，油液由压缩腔经流通阀流向复原腔，复原腔压力大于储油筒压力，部分油液在压强作用下从上方小孔经电磁阀流向储油腔。由于活塞杆占据一部分体积，部分油液推开压缩阀流向储油腔。



（a）复原行程　　（b）压缩行程

图3　减振器油液流向

2.2.2　电磁阀工作原理

减振器所采用的电磁阀结构如图4所示，电磁阀通电前、后的油液流向如图5所示。电磁阀未通电时，一部分油液从侧边小孔流出，另一部分从先导阀座上的固定节流孔流出。通电后，动铁芯在磁力作用下带动顶杆向下移动，流经先导阀座的油液一部分从固定节流孔流出，另一部分从先导阀片处产生的可变节流孔流出。电磁阀通过改变可变节流孔的大小来调节减振器产生的阻尼力，使其满足实际减振需求。

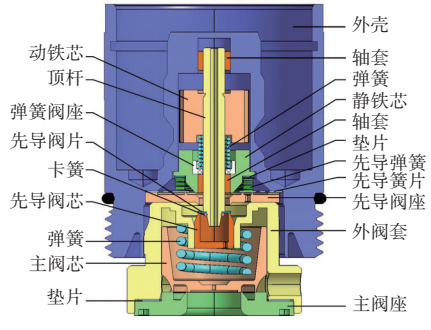
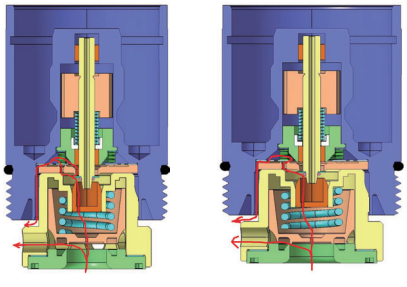


图4　电磁阀结构



（a）通电前　　（b）通电后

图5　通电前、后电磁阀油液流向

3 基于AMESim的减振器仿真模型搭建与验证

3.1 减振器仿真模型搭建

根据电磁阀式减振器的结构及工作原理，可以利用AMESim中的机械库、液压库、液压元件设计库中的元件搭建减振器仿真模型，如图6所示。

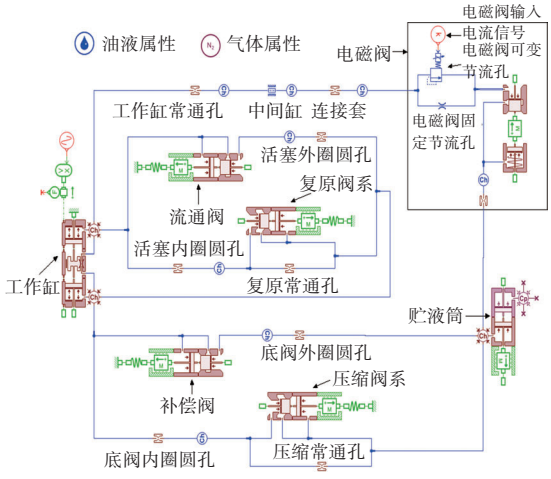


图6 电磁阀式减振器AMESim仿真模型

模型中包括了减振器的输入信号模块、工作缸、中间缸、储油筒、流通阀、复原阀、补偿阀、压缩阀、电磁阀模块、油液属性模块、气体属性模块。仿真模型的一些主要参数如表1所示。

表1 减振器仿真模型主要参数值

主要参数	取值	主要参数	取值
活塞直径/mm	32	复原阀固定节流孔宽度 W_1/mm	0.15
活塞杆直径/mm	15.8	压缩阀固定节流孔宽度 W_2/mm	0.1
活塞与工作缸的间隙 X/mm	0.04	电磁阀固定节流孔直径 D_1/mm	0.7
复原阀预紧力 F_1/N	120	电磁阀弹簧预紧力/N	10
压缩阀预紧力 F_2/N	50	充气压力 p_1/MPa	0.4
油液密度 ρ/kg·m^{-3}	843	活塞内圈孔径 D_2/mm	2.5
油液体积模量/MPa	1 700	底阀内圈孔径 D_3/mm	1.5

3.2 减振器模型仿真分析与试验验证

3.2.1 模型仿真分析

仿真模型与台架试验均采用正弦输入，减振器行程选为±50 mm，正弦输入时频率和速度转化关系如表2所示。

在AMESim中运用批处理，仿真得到在输入电流为0.6 A时，不同输入速度下的阻尼力随位移变化曲线（即示功图），如图7所示。

表2 正弦输入速度

速度/m·s^{-1}	正弦输入频率/Hz
0.05	0.16
0.10	0.32
0.30	0.95
0.60	1.91
1.00	3.18
1.57	5.00

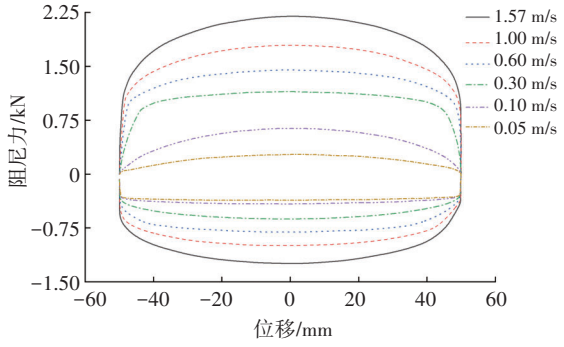


图7 不同速度输入下的示功图

3.2.2 试验验证

在常温环境下，将减振器固定在MTS850示功机上，台架试验如图8所示。



图8 台架试验

给定减振器行程为±50 mm、电磁阀输入电流为0.6 A，依照表2中的速度输入，试验得到减振器的示功图，如图9所示。

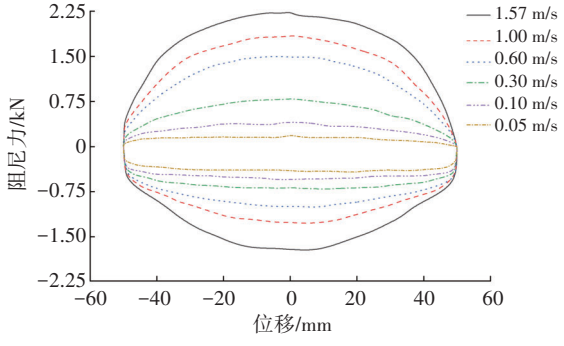


图9 试验示功图

整理得到仿真与试验的结果数据，如表3所示。

表3　仿真与试验结果对比

速度/m·s^{-1}	复原力			压缩力		
	仿真值/N	试验值/N	误差/%	仿真值/N	试验值/N	误差/%
0.05	248	210	14.28	382	368	3.80
0.10	631	567	11.29	426	385	10.65
0.30	1 085	925	17.29	628	610	2.95
0.60	1 424	1 523	−6.50	837	921	−9.12
1.00	1 775	1 835	−3.27	1 066	1 244	−14.31
1.57	2 189	2 315	−5.44	1 293	1 610	−19.69

对比仿真与试验结果可以看出，仿真得到的示功图图形较为饱满，阻尼力无明显突变，仿真与试验曲线相似。根据表3可知，除0.3 m/s时的复原力和1.57 m/s时的压缩力误差超过15%但未超过20%外，其他速度下的阻尼力误差均在15%以内，证明了该仿真模型的准确性，表明该仿真模型符合实际工程需要。

4　电磁阀式减振器参数优化分析

4.1　参数DOE分析

在模型的参数模式下进行全局参数设置，如表4所示，其中，A_1、A_2分别为活塞与底阀外圈圆环孔横截面积。

选择全因子进行DOE分析，仿真结束后，得到各参数对阻尼力影响的帕累托图Pareto Chart，如图10所示。

表4　全局参数设置

输入参数	初始值	最低值	最高值
复原阀预紧力F_1/N	120	90	150
压缩阀预紧力F_2/N	50	30	80
复原阀固定节流孔宽度W_1/mm	0.15	0.1	0.2
压缩阀固定节流孔宽度W_2/mm	0.1	0.05	0.15
活塞与工作缸之间的缝隙X/mm	0.04	0.01	0.1
电磁阀固定节流孔D_1/mm	0.7	0.4	1.2
油液密度ρ/kg·m^3	843	400	1 200
活塞内圈孔径D_2/mm	2.5	2	3
活塞外圈圆环孔横截面积A_1/mm^2	23	15	30
底阀内圈孔径D_3/mm	1.5	1	2
底阀外圈圆环孔横截面积A_2/mm^2	45	30	60

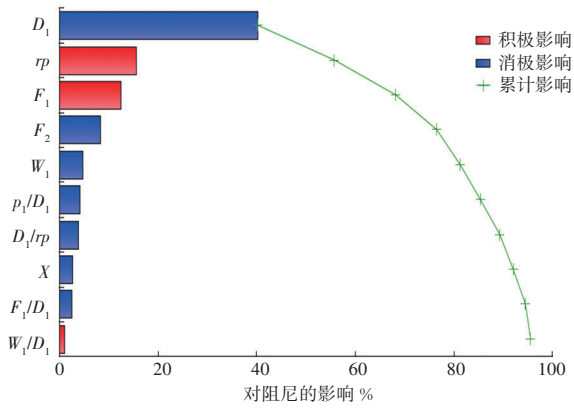


图10　帕累托图

从图10中可以看出，对阻尼力影响较大的结构参数为电磁阀固定节流孔直径D_1、复原阀预紧力F_1、压缩阀预紧力F_2、复原阀固定节流孔宽度W_1。

4.2　参数优化分析

根据前文结果，选择减振器的结构参数D_1、F_1、F_2为优化对象；优化目标设置为输出函数对应的力模型，输出函数是目标阻尼力与仿真阻尼力差值的平方。目标阻尼力是对某成熟车型的减振器试验测得的一组数据。优化值设定如表5所示。

优化参数设置完毕后，运行仿真优化，优化结果为：D_1=0.978 mm，F_1=114.322 N，F_2=68.324 N。

为符合实际工程需要，对结果进行取整，如表6所示。

表5　遗传算法优化参数设置

种群数量/个	100
再生率/%	80
最大进化代数	20
突变可能性/%	10
突变幅值	0.2
种子	1

表6　优化结果

优化对象	初始值	优化值	取整值
电磁阀固定节流孔D_1/mm	0.7	0.978	1.0
复原阀预紧力F_1/N	120	114.322	114
压缩阀预紧力F_2/N	50	68.324	68

将优化结果输入仿真模型，得到优化后的阻尼力变化曲线和示功图，优化前、后阻尼力变化曲线和目标阻尼力曲线如图11、图12所示。

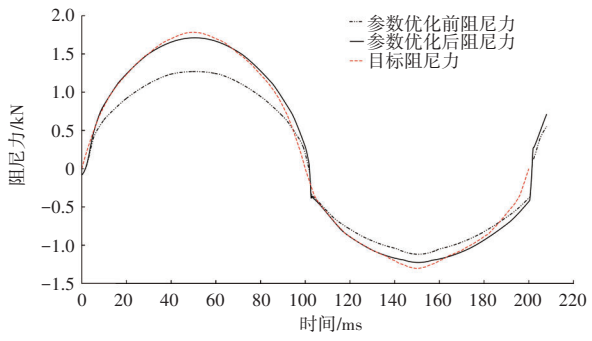


图11　阻尼力变化曲线对比

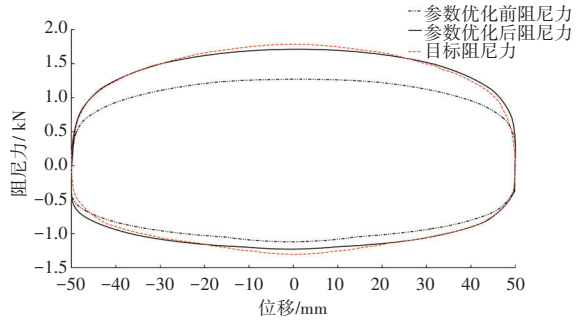


图12　示功图变化曲线对比

由图11、图12可知：优化前复原行程、压缩行程最大阻尼力分别为1 271 N、-1 117 N，最大复原力与目标值的误差为28.79%，最大压缩力与目标值的误差为14.27%；优化后复原行程、压缩行程最大阻尼力分别为1 711 N、-1 225 N，最大复原力与目标值的误差为4.15%，最大压缩力与目标值的误差为5.99%。优化后，最大复原阻尼力提升了34.61%、最大压缩阻尼力提升了9.67%，阻尼力变化曲线更加贴合目标阻尼力曲线，且示功图无明显的力突变。因此，可以认为优化后得到的参数更加符合实际工况需求。

5　结束语

为提高减振器的阻尼特性，本文对减振器结构参数进行了优化分析。首先，以外置电磁阀式减振器为研究对象，分析其结构和工作原理。其次，在AMESim中建立减振器的仿真模型，对比台架试验结果，验证了仿真模型的准确性。然后，利用DOE分析，找出对减振器阻尼力影响较大的结构参数为D_1、F_1、F_2。最后，以目标阻尼曲线为优化目标，利用遗传算法对结构参数进行优化分析。结果表明，优化后，最大复原阻尼力提升了34.61%，最大压缩阻尼力提升了9.67%，阻尼特性曲线更贴合目标阻尼曲线，减振器结构参数符合实际工程需要。

参　考　文　献

[1] 陈楠, 李尊, 谢方伟. 阻尼连续可调减振器热力学特性研究[J]. 液压与气动, 2024, 48(9): 33-40.
CHEN N, LI Z, XIE F W. Thermodynamic Characteristics Study of Damping Continuously Adjustable Vibration Absorber[J]. Hydraulics and Pneumatics, 2024, 48(9): 33-40.

[2] 郑志斌, 曲宝军, 张广世. 汽车阻尼连续可调减振器先导阀参数对其性能的影响[J]. 液压与气动, 2024, 48(8): 46-55.
ZHENG Z B, QU B J, ZHANG G S. The Influence of Pilot Valve Parameters on the Performance of Automotive Damping Continuously Adjustable Shock Absorber[J]. Hydraulics and Pneumatics, 2019, 48(8): 46-55.

[3] 丁二名, 戴开宇. 比例电磁阀内置式CDC减振器设计与验证[J]. 液压与气动, 2024, 48(4): 83-90.
DING E M, DAI K Y. Design and Verification of CDC Shock Absorber with Built-in Proportional Solenoid Valve[J]. Hydraulics and Pneumatics, 2019, 48(4): 83-90.

[4] 陈龙, 许闯, 李飞鸿, 等. 新型叶片式CDC减振器结构设计及性能研究[J/OL]. 太原理工大学学报, (2024-11-20) [2025-02-13]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/14.1220. N.20241011.1209.002.html.
CHEN L, XU C, LI F H, et al. Study on Structure Design and Performance of A New Type of Bladed CDC Damper[J/OL]. Journal of Taiyuan University of Technology, (2024-11-20) [2025-02-13]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/14.1220. N.20241011.1209.002.html.

[5] 崔泽飞. 基于AMESim双筒充气式减振器建模仿真与优化[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
CUI Z F. The Modeling Simulation and Optimization of Binocular Inflatable Shock Absorber Based on AMESim[D]. Changchun: Jilin University, 2014.

[6] 陈双, 赵凯旋. 电磁阀式阻尼可调减振器AMESim建模研究[J]. 机械设计与制造, 2019(4): 31-34+38.
CHEN S, ZHAO K X. Research on AMESim Modeling of Solenoid Valve Type Adjustable Damper[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(4): 31-34+38.

[7] 黄彩霞, 伍新, 舒雄, 等. 叠加阀片式减振器建模与结构参数优化[J]. 振动与冲击, 2023, 42(22): 121-129.
HUANG C X, WU X, SHU X, et al. Modeling and Structural Parameter Optimization of Superimposed Valve Disc Shock Absorber[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 42(22): 121-129.

（责任编辑　王　一）

修改稿收到日期为2025年2月13日。