

磁流变减振器多场耦合仿真分析*

于振环¹ 刘顺安¹ 张娜² 李万林¹

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130022; 2. 长春汽车工业高等专科学校机电工程学院, 长春 130011)

摘要: 研究了磁流变减振器电磁-流和流-固耦合的建模方法及求解方法。基于电磁-流和流-固耦合有限元方法, 利用 Adina 软件建立高精度的流-电磁有限元网格模型和固体有限元网格模型, 并在 Adina 软件后处理中进行求解分析, 分别得到了磁流变减振器非控状态和通电状态的阻尼力-速度特性、示功特性、磁场分布特性、核心区域流场压力场和速度场特性。仿真结果表明: 在高速磁流变液的冲击下, 核心区域流场压力场变化明显; 根据磁场分布特性, 说明设计的单筒磁流变减振器结构能增大阻尼力调节范围。在电磁-流和流-固耦合计算中考虑了流体湍流流动, 尽量使仿真模型与物理模型保持一致, 试验结果与仿真结果吻合较好。

关键词: 磁流变减振器 多场耦合 有限元分析

中图分类号: U463.33⁺4.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0001-07

引言

汽车悬架最重要的组成部件之一是减振器, 减振器是评价整车舒适性、操控性及安全性的重要零部件之一^[1-3]。车辆的舒适性和操控稳定性是一对相矛盾的因素, 传统的被动悬架系统由于刚度和阻尼不可调, 使整车舒适性和操控性的协调受到很大影响。磁流变液半主动悬架可以有效解决这一问题, 它可以根据当前行驶路况做出反馈^[4-6], 调节磁流变液减振器(MRD)阻尼力, 从而控制车辆的舒适性及操控稳定性。磁流变液属性和活塞组件结构以及电磁线圈匝数决定了阻尼力特性, 三者的合理匹配是保证磁流变液减振器特性的关键。然而, 这个复杂的多场耦合问题理论上尚无解析的数学描述, 现阶段开发仍采用基型参照设计结合试验测试匹配的技术路线^[7-8], 串行+回溯的流程严重制约了开发周期和效率。通过建模及仿真技术(VV&A)揭示多场耦合作用机理, 发掘结构、参数与性能间的联系并用于研发, 已成为减振器研究的热点问题, 例如文献[9~10]都对MRD磁-流耦合进行仿真分析, 但没有流-固耦合仿真分析, 未得到MRD的阻尼特性、示功特性等。

本文对MRD多场耦合建模及求解进行研究, 利用Adina软件建立MRD工作区域的完整耦合模型, 并进行求解和详细仿真分析。

1 磁流变液减振器结构原理

图1为MRD结构原理图, 活塞和浮动活塞将工作缸分为I、II、III腔室, 电磁线圈绕制在活塞内部, 通过空心活塞杆引出电源线。电磁线圈产生的磁场

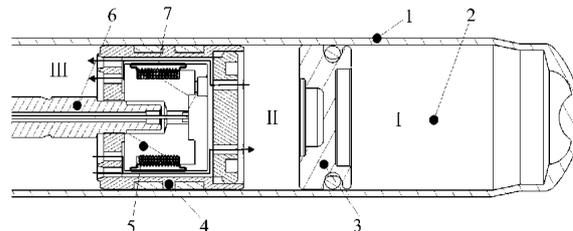


图1 单筒磁流变液减振器结构原理图

Fig.1 Mono MRD structure diagram

1. 工作缸 2. 气室 3. 浮动活塞 4. 活塞外盖 5. 活塞 6. 活塞杆 7. 电磁线圈

穿过位于活塞上的阻尼通道, 通过改变电流大小能够改变磁场大小, 从而改变阻尼通道磁流变液的运动粘度, 实现对阻尼力大小的控制。当减振器做复原行程时, 磁流变液由III腔室注入II腔室; 当减振器做压缩行程时, 磁流变液由II腔室注入III腔室, 气室I为补偿作用。本文设计的MRD应用了磁流变液的流动模式和剪切模式, 与普通MRD结构不同在于: 为增加减振器阻尼力可调范围, 活塞上侧和下侧增加磁流变液流动缝隙。活塞的孔径、个数及缝隙大小等参数决定了MRD的稳态特性和过渡特性, 准确分析、设计并实现期望的MRD阻尼力特性是MRD

收稿日期: 2013-06-16 修回日期: 2013-08-10

* 国家自然科学基金资助项目(50475011)

作者简介: 于振环, 博士生, 主要从事车辆动力学研究, E-mail: yuzhenhuan@163.com

研发的关键,也是多场耦合作用仿真及分析的重点。MRD 结构主要参数为:活塞材料为 DT4、活塞半径 $r = 33 \text{ mm}$ 、流动缝隙 $\delta = 1 \text{ mm}$ 、阻尼通道 $l = 10 \text{ mm}$ 。

2 基于 Adina 的 FSI 有限元分析方法

2.1 FSI 有限元数学模型^[11]

FSI 有限元分析是用来解决流体与固体之间运动状态的问题,它的基本原理是同时满足流体耦合边界动力学方程和运动学方程,以及固体耦合边界动力学方程和运动学方程

$$d_f = d_s \quad (1)$$

$$\text{动力学条件为} \quad n\tau_f = n\tau_s \quad (2)$$

式中 d_f ——流体边界位移

d_s ——固体边界位移

τ_f ——流体应力 τ_s ——固体应力

n ——单位外法线矢量

由运动学条件可以导出流体速度条件为

$$nv_f = nv_s \quad (3)$$

式中 v_f ——流体速度 v_s ——固体速度

2.2 磁-流耦合有限元数学模型^[12]

每个单元体的洛伦兹力 f_b^{em} 可以由麦克斯韦应力来表达,即

$$\begin{cases} f_b^{em} = \nabla T^{em} + T_b^{em} \\ T^{em} = T^e + T^m \\ T^e = DE - \frac{1}{2}(DE)I \\ T^m = BH - \frac{1}{2}(BH)I \\ T_b^{em} = -\frac{\partial D \times B}{\partial t} \end{cases} \quad (4)$$

式中 f_b^{em} ——洛伦兹力

T ——麦克斯韦应力

E ——电场强度

I ——电流强度 B ——磁感应强度

H ——磁场强度

在 Adina-CFD-EM 模式下,E-H 条件可以直接使用以上公式。

2.3 基于 Adina 的流-磁和流-固耦合有限元分析

利用有限元流-磁基本理论解决 MRD 流-磁问题时应注意:

(1) 确定电磁应力求解方法

Adina 软件计算电磁应力有两种解法,即:直接求解法和时间平均值法。本文需要对减振器整个周期内进行求解,故磁场应力通过时间平均值法求解,时间平均值数值方程为

$$\bar{f} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f d(\omega t) \quad (5)$$

(2) 流-磁边界处的耦合计算

Adina 的 CFD + EM 模块可以解决磁-流耦合问题,磁场为静磁模式,流体定义为 FCBI-C 元素。流体变量和磁场变量在边界处进行耦合计算,得到麦克斯韦应力和焦耳热速率,从而可以计算出流体压力和能量数值等参数。

利用有限元 FSI 基本理论分析 MRD 核心区域 FSI 问题时,需要解决 3 个关键问题:

(1) 准确传递流固耦合面上相互作用力

Adina 软件的固体模型与流体模型是分别建立的,并且分别在两个模型的耦合面上定义边界条件求解流-固耦合问题。流体和固体的网格不需要完全一致,只要达到一定容差即可^[13]。因此对 MRD 核心区域分析时,采用如下处理技术保证流固耦合面上作用力准确传递:将流固耦合面上流体节点位移与附近固体节点位移做插值,而固体节点力通过对周围流体应力积分求得,即

$$F(t) = \int h^d \tau_f dS \quad (6)$$

式中 h^d ——固体虚位移

(2) 解决固体变形引起的流体网格移动问题

目前使用的方法是将欧拉方程映射到 ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian),ALE 的位移及速度坐标点即是流体的位移和速度点。在 Adina 软件中,固体变形决定了流固耦合边界上流体节点的位移和速度,通过求解 Laplace 方程可以得到由此引起的流体体积的改变量。除此之外,定义 Leader-Follower 点可以对模型中流体边界的网格进行人为控制。

(3) 实现耦合系统的高效求解

Adina 软件有迭代解法和直接解法两种方法,它们都需要保证动态分析时流体和固体模型积分点的一致性。因为流固耦合模型是非线性解,所以两种方法均需要迭代求解,才能对流体方程和固体方程进行分别求解。直接解法是把流体模型及固体模型放在同一矩阵中求解,有限元方程为

$$\begin{bmatrix} A_{ff} & A_{fs} \\ A_{sf} & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_f^k \\ \Delta X_s^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_f \\ B_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$X^{k+1} = X^k + \Delta X^k \quad (8)$$

$$\begin{cases} A_{ff} = \frac{\partial F_f^k}{\partial X_f} \\ A_{fs} = \lambda_d \frac{\partial F_f^k}{\partial X_s} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} A_{sf} = \lambda_\tau \frac{\partial F_f^k}{\partial X_f} \\ A_{ss} = \frac{\partial F_s^k}{\partial X_s} \end{cases} \quad (10)$$

式中 λ_d ——位移松弛因子 ($0 < \lambda_d \leq 1$)
 λ_r ——应力松弛因子 ($0 < \lambda_r \leq 1$)

直接解法用于解决计算量不是很大的非接触瞬态模型时, 具有很高的精度。

3 MRD 流-磁-固有限元模型

减振器工作核心区域特性决定 MRD 特性, 因此需要建立 MRD 固体模型和磁-流场模型, 工作缸可做刚体处理, 仿真过程中不会出现空程现象, 所以不建立 I 腔室的气室模型。本文讨论 MRD 非控状态和通电状态的模型和求解结果。

3.1 非控状态流场有限元模型

MRD 非控状态没有电流输入, 所以没有磁场效应, 为 FSI 工作模式, 此时减振器阻尼力最小。

图 2 所示为流体有限元网格模型, 考虑到计算机 CPU 的计算能力及求解时间, 建立 1/4 有限元模型。根据有限元计算精度要求, 将复原阀系流场分为 II 腔室、核心区域和 III 腔室 3 部分。II、III 腔室分别为液体出口和入口处, II、III 腔室的流场与核心区域流场相比变化不大, 因此可以设置较大单位体积的有限单元, 以减少计算时间。活塞孔、流动缝隙是减振器核心工作区域, 流场运动剧烈, 为保证流固耦合面计算时, 相对位移 r_f 在公差范围内, 采用网格与细节匹配的划分原则, 只在活塞孔和隙缝部分的网格进行细分, 需要划分较小单位体积的有限单元。Adina 软件能对流-固耦合面上不同精度的网格自适应耦合计算, 可提高计算收敛性。

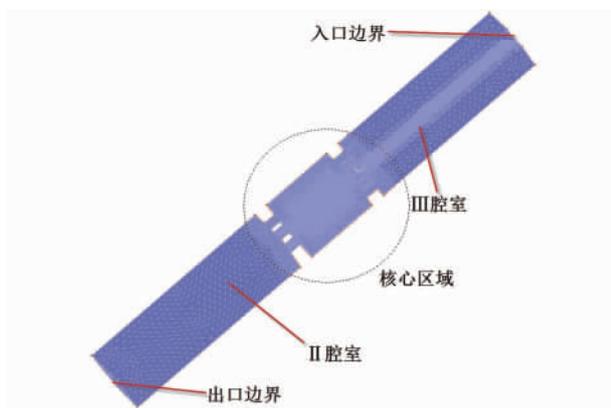


图 2 Finite element model of the flow field

3.2 非控状态固体有限元模型

图 3 为减振器固体有限元模型。考虑对称性, 建立 1/4 复原阀系模型, 采用 8 节点六面体单元划分, 以保证流固耦合面密度相容性。模型结构包括活塞杆、活塞、活塞套模型。

3.3 通电状态流-磁有限元模型

在 Adina 软件 CFD-struttrue-EM 模块下加载电



图 3 Solid finite element model

磁边界条件, 在 FSI 的流体模型上加载 EM 边界条件和电磁材料属性, 具体为: 起始磁导率 $\mu_i = 500$, 最大磁导率 $\mu_m = 10000$, 饱和磁感应强度 $B_s = 2.144 \text{ T}$, 矫顽力 $H = 80 \text{ A/m}$, 电阻率 $\rho = 10^{-5}$ 。

在 Adina 软件中对电流的加载实际上是加载电流密度, 可表示为

$$J_s = \frac{nI}{A} \quad (11)$$

式中 J_s ——电流密度 n ——线圈匝数
 I ——电流强度 A ——线圈横截面积

4 减振器 FSI 和流-电磁耦合的求解策略

对于流-固-电磁耦合求解, 既要保证计算结果的收敛性, 也要提高求解效率。

4.1 流-固耦合区域

尽管 Adina 软件能够进行流-固耦合面网格自适应计算, 但流-固耦合面的空间位置应保持一致, 以提高收敛性。

4.2 初始条件及边界条件

固体分析类型为隐式动态法。为保证仿真流场变化与试验环境相符, 对活塞杆施加振幅为 100 mm 正弦波载荷, 如图 4 所示。流场模型出口处不做任何边界条件设置, Adina 软件默认出口处压力值为零。工作缸为刚性材料, 设置为 wall。

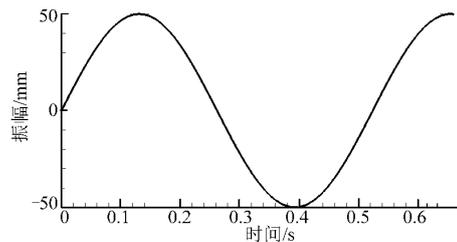


图 4 Load sine wave

4.3 提升流-固耦合求解能力

Adina 软件对流场模型和固体模型网格有自适应能力, 虽能提高求解精度, 但求解时间仍较长。因

此需要提升求解能力。

(1) 设置求解收敛因子。力收敛因子都选择 0.5, 位移收敛因子选择 0.6。

(2) 只考虑流场核心区域的动网格, 其余部分不考虑动网格移动。

(3) 时间步长在保证收敛性的前提下适当减小, 以控制求解效率。

(4) 对模型进行简化, 消除对减振器阻尼特性影响较小的特征, 如: 磁流变液体的可压缩性、磁流变液在运动过程中产生的热学效应等。

4.4 流-电磁耦合边界条件

仅在 FSI 的流体模型上加载 EM 边界条件即可, 其它设置与 FSI 相同, 假设没有漏磁效应, 导体外部没有磁场, 即在导磁体边界以外的介质中, 边界外法线方向上, 磁感应强度应为零值, 在导磁体内部的边界处, 其磁感应强度矢量方向与界面平行, 在 Adina 软件中设置电磁类型为 Dirichlet 分布。

5 MR 减振器仿真分析与试验

本文的试验设备为 Instron 公司生产的 PC63M 液压试验台, 试验结果采用 20 支减振器试验结果的平均值, 以减少试验误差。

试验台激振速度分别为: 0.05 m/s、0.1 m/s、0.3 m/s、0.6 m/s。方向为垂直方向。

试验方法: 加载振动 3~5 次, 记录阻尼力-速度和示功图, 从非控状态下开始做第 1 次, 当电流为 0.3 A 时做第 2 次, 然后电流每增加 0.1 A 做一次试验, 直到 2 A 时结束试验, 考虑通电铜线圈过热问题, 每做 2 次试验需要断电 30 min 后再继续做试验。

本文计算在 DELL XPS17 工作站上完成, 它配有 8 核 CPU(频率为 3.33 GHz X8) 和 8 GB 内存。一周期内的计算时间约为 10 h。

5.1 减振器仿真与试验

MRD 阻尼力可调范围是评价减振器特性的关键问题之一, 减振器非控状态时的阻尼力最小; 通电电流为 2 A 时, 减振器阻尼力最大。由于通电状态情况相似, 未经特别说明, 本文只讨论非控状态和通电 2 A 时减振器工作情况。表 1 为非控状态下复原阻尼力仿真及试验数据, 压缩阻尼力值与复原相等。图 5、图 6 分别为 MRD 的速度特性和示功图。从图

表 1 复原阻尼力仿真与试验数据

Fig. 1 Simulation and experimental data of rebound damper force

激振速度/ $m \cdot s^{-1}$	0.05	0.1	0.3	0.6
仿真值/N	80	88	206	536
试验值/N	93	111	224	534

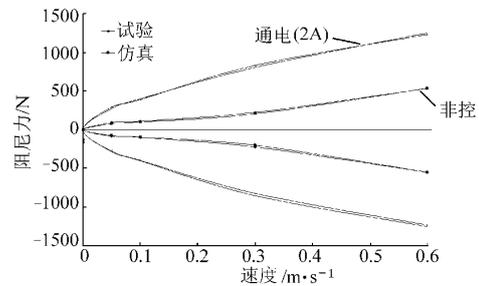


图 5 减振器速度特性

Fig. 5 Damper velocity characteristics

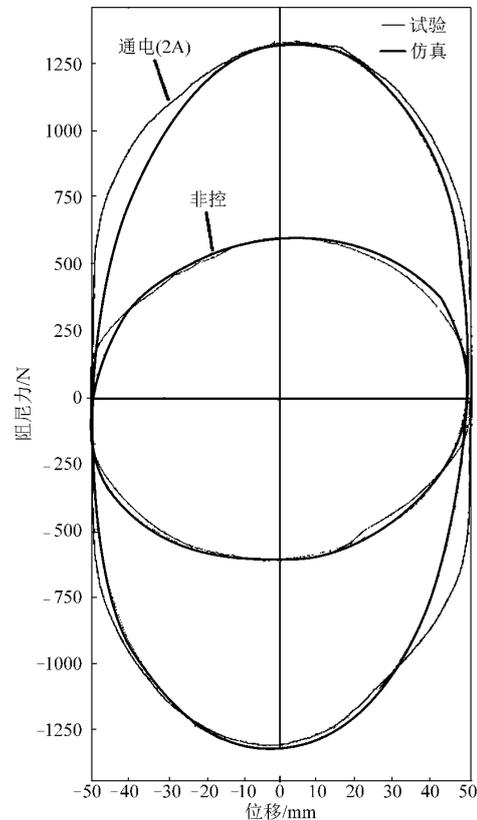


图 6 示功图

Fig. 6 Indicator diagram

中可以看出仿真结果与试验结果吻合较好, 减振器阻尼力调节范围大。

5.2 非控状态的流-固耦合分析

减振器在非控状态时, 没有磁场作用, 故流-固耦合作用是产生减振器阻尼力的主要因素。

5.2.1 核心区域流场分析

核心区域流场变化剧烈, 其特性对减振器的特性有决定性影响。图 7、8 分别为减振器压力云图和速度流线图。

由图 7 可以看出, MRD 压缩状态下工作时, 压力分布集中在活塞的上孔处, 而在复原状态下工作时, 压力分布集中在活塞的下孔处, 且从复原流场压力分布图和压缩流场分布图可以看出, 流场压力梯度分布明显, 活塞孔有明显的节流作用。

由图 8 可知, 活塞速度越大, 活塞孔节流特性越

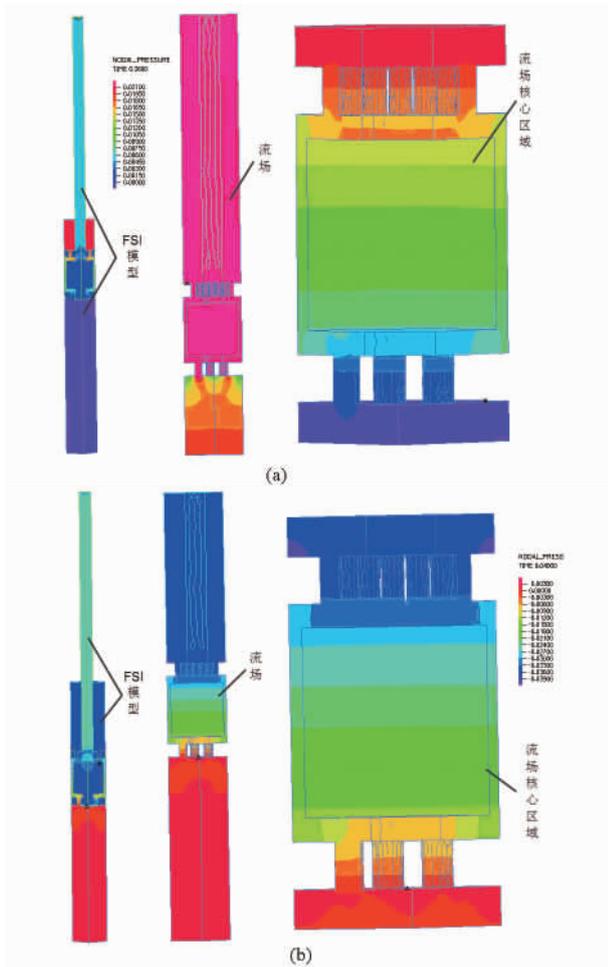


图 7 减振器压力云图

Fig. 7 Damper pressure cloud images
(a) 压缩行程 ($v=0.6 \text{ m/s}$ $t=0.36 \text{ s}$)
(b) 复原行程 ($v=0.6 \text{ m/s}$ $t=0.04 \text{ s}$)

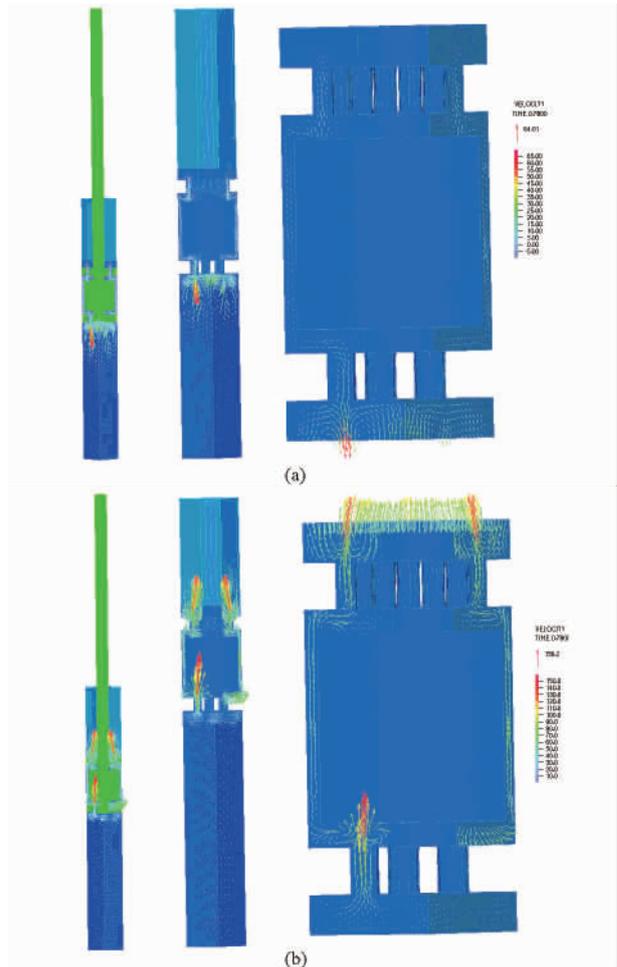


图 8 流场速度流线图

Fig. 8 Streamline of field velocity
(a) $t=0.78 \text{ s}$ $v=0.1 \text{ m/s}$ (b) $t=0.78 \text{ s}$ $v=0.6 \text{ m/s}$

明显 磁流变流体运动速度越大, 0.6 m/s 时的最大速度为 156.2 m/s 。

5.2.2 活塞动力特性分析

图 9 所示为活塞在 0.12 s 和 0.26 s 时的等效应力图。 0.12 s 时活塞运动到正向位移最大处, 0.26 s 时活塞运动到原点, 当活塞从 0.12 s 运动到 0.26 s 时, 活塞本体及活塞孔处的应力逐渐变大, 对应的流场区域压力也在逐渐变大, 使得高速流体冲击活塞壁面, 造成湍流流动。

5.3 通电状态的磁-流-固耦合分析

通电线圈能产生磁场, 磁流变流体的粘度系数可以根据磁场的大小而改变, 使得 MRD 阻尼力产生改变。通电状态的流-固耦合情况与非控状态相似, 本节不再讨论, 本节重点讨论磁场分布和磁流变流体与磁场之间的关系。

图 10 所示为磁力线分布, 从图可以看出, 磁力线通过减振器活塞上、下表面及环带层, 方向垂直于磁流变流体表面, 本文对传统 MRD 活塞总成进行优化, 在活塞上、下表面增加缝隙流动层, 能有效增

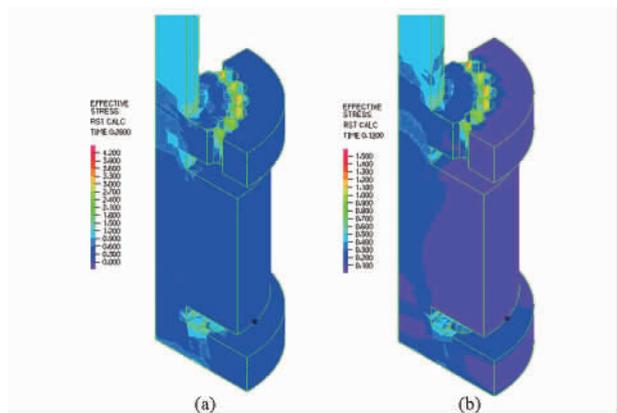


图 9 活塞应力图

Fig. 9 Piston stress images
(a) $t=0.26 \text{ s}$ (b) $t=0.12 \text{ s}$

加磁流变流体减振器阻尼力调节范围。

由图 11 可知, 磁流变流体屈服应力随磁场强度增加而变大, 当磁场强度增大到某一值时, 屈服应力不再随磁场强度变大。对本文的减振器施加 2 A 以上电流时, 阻尼力不再增大, 此时磁流变流体的屈服应力最大, 不再随磁场增加而变化, 减振器阻尼力为最大值。

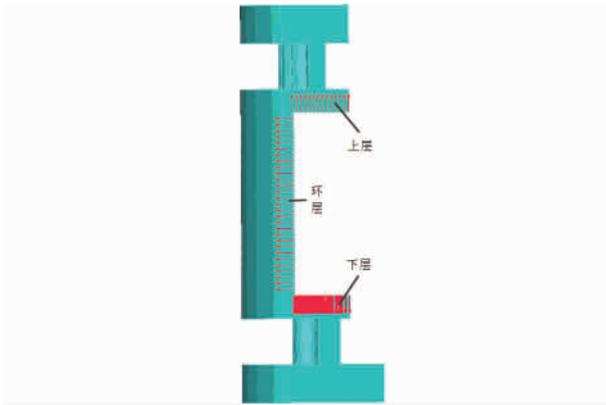


图10 磁场分布图

Fig. 10 Magnetic field distribution images

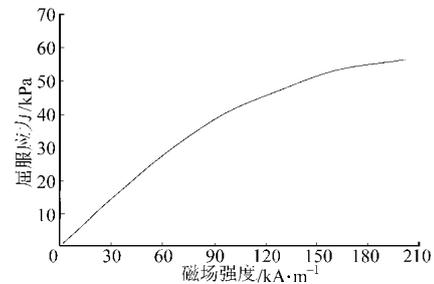


图11 屈服应力-磁场强度曲线

Fig. 11 Intensity curve of yield stress magnetic field

6 结论

(1) 基于 Adina 软件的流-固和流-电磁耦合方法,不仅可以解决复杂的多场耦合问题,还能建立详细的物理模型,有利于提高仿真精度,对复杂求解问题有重大意义。

题有重大意义。

(2) MRD 核心区域为仿真结果影响最大,本文建立的流-固-磁耦合模型与实际的物理模型相近,计算中考虑了流体湍流流动和磁场分布对核心区域结构的影响,仿真结果与试验吻合。

(3) 利用流-固-磁耦合方法得到减振器流场特性、结构应力、磁场分布和阻尼力调节范围,对研究 MRD 运动机理和实际工程都有积极意义。

参考文献

- Duym S W R. Simulation tools, modelling and identification, for an automotive shock absorber in the context of vehicle dynamics [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2000, 33(4): 261 ~ 285.
- Lee K. Numerical modelling for the hydraulic performance prediction of automotive monotube dampers [J]. *Vehicle System Dynamics*, 1997, 28(1): 25 ~ 39.
- 薛玉斌,王树军,王一臣. 汽车减振器与悬架系统的匹配研究[J]. *辽宁工学院学报*, 2003, 24(6): 24 ~ 28.
Xue Yubin, Wang Shujun, Wang Yichen. Research on the match for automobile damper with suspension system [J]. *Journal of Liaoning Institute of Technology*, 2003, 24(6): 24 ~ 28. (in Chinese)
- Spencer B F, Soong T T. New applications and development of active, semi-active and hybrid control techniques for seismic and non-seismic vibration in the USA [C]. *Proceedings of International Post-SMiRT Conference Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures*, 1999.
- 王灵,黄文良. 磁流变减振器在半主动振动控制中的应用[J]. *南京理工大学学报: 自然科学版*, 2004, 3(2): 32 ~ 36.
Wang Ling, Huang Wenliang. MRD in semi-active vibration control application [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2004, 3(2): 32 ~ 36. (in Chinese)
- Phillips R W. Engineering applications of fluids with a variable yield stress [D]. Berkeley: University of California, 1969: 22 ~ 26.
- 黄恒,程广伟,邓楚南. 车用减振器的外特性建模与仿真[J]. *汽车技术*, 2005, 24(11): 19 ~ 22.
Huang Heng, Cheng Guangwei, Deng Chunan. Modeling and simulation of external characteristic of automotive shock absorbers [J]. *Automobile Technology*, 2005, 24(11): 19 ~ 22. (in Chinese)
- 曹民,喻凡. 车用磁流变减振器的研制[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(3): 186 ~ 190.
Cao Min, Yu Fan. Vehicle development of MRD [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(3): 186 ~ 190. (in Chinese)
- 易斌,刘献栋. 磁流变减振器的电磁-流体耦合场有限元分析[J]. *功能材料*, 2006, 37(7): 1173 ~ 1176.
Yi Bin, Liu Xian Dong. Electromagnetic-fluid multiphysics FEM analysis of magnetorheological damper [J]. *Journal of Functional Materials*, 2006, 37(7): 1173 ~ 1176. (in Chinese)
- 祝世兴,王鹏,王海军. 新型磁流变减振器磁-流耦合有限元分析[J]. *机床与液压*, 2011, 39(19): 86 ~ 88.
Zhu Shixing, Wang Peng, Wang Haijun. The FEM analysis of electromagnetic-fluid field for a new type of MR damper [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2011, 39(19): 86 ~ 88. (in Chinese)
- ADINA R&D Inc. ADINA theory and modeling guide report, ARD01-9 [R]. ADINA R&D Inc., 2001: 235 ~ 262.
- ADINA R&D Inc. ADINA-EM theory and modeling guide, ARD11-11 [R]. ADINA R&D Inc., 2011: 65 ~ 68.
- 姜海晨,张娜,于振环. 减振器叠加节流阀非线性特性仿真分析[J]. *计算机仿真*, 2012, 29(5): 338 ~ 342.
Jiang Haichen, Zhang Na, Yu Zhenhuan. Nonlinear characteristics simulation analysis of shock absorber throttle valves [J]. *Computer Simulation*, 2012, 29(5): 338 ~ 342. (in Chinese)
- 王维锐,吴参,陈颖,等. 磁流变减振器滞回特性的改进 Bouc-Wen 模型[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(2): 48 ~ 53.
Wang Weirui, Wu Can, Chen Ying, et al. Modified Bouc-Wen model based on hysteretic characteristic experiment of magneto-

- rheological damper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery ,2011 42(2):48~53. (in Chinese)
- 15 王道明 孟庆睿 侯友夫 等. 传动装置磁流变液瞬态温度场研究[J]. 农业机械学报 2013 44(4):287~292.
Wang Daoming ,Meng Qingrui ,Hou Youfu , et al. Transient temperature field of magneto-rheological fluid in transmission device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery ,2013 44(4):287~292. (in Chinese)

Multi-field Coupling Simulation Analysis of MR Damper

Yu Zhenhuan¹ Liu Shunan¹ Zhang Na² Li Wanlin¹

(1. College of Mechanical Science and Engineering , Jilin University , Changchun 130022 , China

2. Mechanical and Engineering Department , Changchun Automobile Industry Institute , Changchun 130011 , China)

Abstract: The electromagnetism(EM) -fluid and fluid-structure interaction (FSI) modeling and solving method of shock absorber were studied. Adina software was used to establish accurate structure finite element mesh model and the finite element mesh model of EM-flow field based on EM-fluid and FSI method. Post-processing module of adina software was used for solving analysis. The velocity characteristics , indicator diagram , magnetic field distribution characteristics , core area fluid pressure field and velocity field characteristics of shock absorbers were obtained under the state of MR damper non-controlling and energized condition. The results show that under the high-speed impact of the shock absorber MR fluid and the core area fluid pressure field are changed significantly. According to the magnetic field distribution characteristics , self-designed mono tube MR damper structure can enlarge damping force adjustment range. The EM-CFD and FSI model is closed to the physical reality because of the consideration of turbulent flow of MR fluid; so the simulation results are in good agreement with the experimental results.

Key words: MRD Multi-field coupling Finite element analysis