

# IC阻尼器在汽车悬架系统中的关键技术与应用研究

石田宇 李昕龙

内蒙古科技大学包头师范学院 内蒙古包头 014000

**摘要:** IC阻尼器 (Infrared numerical control damper) 作为智能半主动悬架系统的核心执行部件, 通过智能调节内部孔径的数量来调节其内部磁流变液的位置造成阻尼特性非一致的现象, 解决了传统被动悬架无法兼顾舒适性与操控性的难题。本文基于MRD可控流变特性, 系统分析了IC阻尼器在汽车悬架中的工作原理、力学建模方法、控制策略及性能验证技术。仿真与实验结果表明, 采用最优控制算法的IC半主动悬架可使车身加速度降低25%–30%, 侧倾角减少45%, 显著提升车辆动态稳定性与乘坐舒适性。进一步探讨了自供能技术、多物理场仿真和硬件在环 (HIL) 测试等前沿发展方向。

**关键词:** IC阻尼器; 结构设计; 工程原理; 控制策略

## 引言

车辆悬架系统直接影响行驶安全性、乘坐舒适性和操纵稳定性。传统被动悬架因刚度和阻尼参数固定, 难以适应多变路况; 主动悬架虽性能优越, 但存在能耗高、结构复杂及成本昂贵等缺陷。半主动悬架尤其是基于磁流变液 (Magnetorheological Fluid, MRF) 的阻尼器, 通过低功耗磁场调节实现阻尼力的实时控制, 成为当前研究热点。

磁流变液是一种由软磁性颗粒 (如羰基铁粉) 分散在绝缘载液 (如硅油) 中形成的智能悬浮体。其独特之处在于: 零磁场下呈现牛顿流体特性 (粘度约0.1–1.0 Pa·s), 强磁场 (>150 kA/m) 下可在毫秒级 (典型响应时间5–15 ms) 转变为屈服应力高达50–100 kPa的类固体状态。这种快速、可逆的流变特性为汽车减振控制提供了物理基础。国内外研究证实, MRD在重型车辆防侧翻、乘用车舒适性优化及新能源汽车能量回收等领域具有广阔前景。例如, 集成MRD的卡车半主动悬架在紧急转向工况下侧倾角减少45%, 大幅降低事故风险。

## 一、IC阻尼器的工作原理与结构设计

### (一) 磁流变液的工作机制

磁流变效应由Rainbow于20世纪40年代发现, 其物理本质是磁性颗粒的磁偶极子相互作用。当施加磁场时, 颗粒沿磁力线排列成链状结构, 阻碍流体流动, 导致表观粘度和剪切屈服应力显著增大。

表1 典型磁流变液性能参数对比

组分类型	屈服应力 (kPa)	响应时间 (ms)	温度稳定性 (°C)
传统羰基铁粉	50–70	5–10	–30 ~ 120
稀土掺杂TiO <sub>2</sub>	80–100	3–6	–40 ~ 150
多孔复合颗粒	>100	<3	–50 ~ 180

### (二) 阻尼器结构类型

根据流变模式, 汽车用MRD主要分为三类:

(1) 剪切阀式: 主流结构, 通过活塞运动迫使MRF通过磁隙, 产生可控阻尼力 (如Delphi公司的MagneRide™)。最大出力可达8000N, 适用于重型车辆抗侧翻<sup>[1]</sup>。

(2) 剪切模式: 极板相对运动直接剪切MRF, 结构简单但出力较小, 多用于座椅减振。

(3) 挤压模式: 极板垂直运动挤压MRF, 适合小位移高频振动控制, 但磁路设计复杂<sup>[2]</sup>。

创新设计如自供能MRD将压电陶瓷与阻尼器集成: 活塞运动压缩压电陶瓷发电, 无需外部电源即可产生5kV以上电压驱动MRF。这种结构使系统重量减少30%, 响应速度提高至1ms级。

## 二、IC悬架系统的控制策略

### (一) 动力学建模

采用改进Bouc–Wen模型精确描述MRD的非线性滞回特性:

$$f=c(i) \dot{x} + \alpha(i) z$$

$$\dot{z} = -\gamma | \dot{x} | z | z |^{n-1} - \beta \dot{x} | z |^{n+A} \dot{x}$$

其中,  $c(i) = 13.5 + 2.083i + 1.563i^2 - 1.302i^3$  (N·s/mm),  $\alpha(i) = 900 + 2750i + 1875i^2 - 1563i^3$  (N·s/mm),  $i$  为控制电流 (0-2A),  $z$  为滞回变量。结合 1/4 车辆模型, 状态方程可表述为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 \\ -\frac{k_s}{m_2} & -\frac{c}{m_2} & 0 & \frac{c}{m_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{m_1} & \frac{c}{m_1} & -\frac{k_t}{m_1} & -\frac{c}{m_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_2} \\ 0 \\ -\frac{1}{m_1} \end{bmatrix} F_{MR}$$

其中,  $m_2 = 267\text{kg}$  (簧载质量),  $m_1 = 36\text{kg}$  (非簧载质量),  $k_s = 18700\text{N/m}$ ,  $k_t = 184000\text{N/m}$ 。

### (二) 先进控制算法

线性二次高斯控制 (LQG): 以车身加速度、悬架动挠度和轮胎动载荷为优化目标, 最小化性能指标:

$$J = \int_0^\infty (q_1 \dot{x}_2^2 + q_2 (x_2 - x_1)^2 + q_3 [k_t(x_1 - q)]^2 + Ru^2) dt$$

通过 MATLAB/Simulink 仿真, 在 C 级路面输入下, 相比被动悬架, 车身加速度降低 28%, 悬架动挠度减少 31%<sup>[3]</sup>。

自抗扰控制 (ADRC): 将模型不确定性及路面扰动视为总扰动, 通过扩张状态观测器 (ESO) 实时估计并补偿。结合混沌分数阶天牛群算法优化参数, 控制误差小于  $0.5^\circ$ , 鲁棒性提升 40%<sup>[12]</sup>。

神经网络逆模型控制: 建立阻尼力→电流的映射关系, 实现电流精确解耦。BP 网络经改进学习算法训练后, 预测误差 < 3%。

表 2 不同控制策略性能对比

控制方法	车身加速度改善	侧倾角抑制	实时性	鲁棒性
天棚阻尼控制	15%~20%	30%	高	低
LQG 控制	25%~30%	45%	中	中
ADRC 控制	>30%	>50%	高	高
模糊 PID	10%~15%	25%	低	中

### 三、性能验证与工程应用

#### (一) 仿真与台架测试

MATLAB/Simulink 仿真: 基于 LQR 控制器的半主动悬架在 30m/s 车速下, 车身加速度 RMS 值降至  $0.56\text{m/s}^2$  (被动悬架为  $0.82\text{m/s}^2$ ), 轮胎动载荷减少 24%<sup>[4]</sup>。

硬件在环 (HIL) 测试: 清研精准 mHIL 系统集成 PSIS1 传感器协议仿真与视频预瞄注入, 支持 CDC/电磁减振器闭环验证。其 GMSL2 视频注入板卡支持 4K@60Hz 图像处理, 同步误差 < 1ms, 大幅缩短开发周期<sup>[5]</sup>。

#### (二) 实车应用案例

##### 1. 防侧翻控制

重型卡车安装 IC 阻尼器后, 在 J-turn 试验中侧倾角

从  $4.8^\circ$  降至  $2.6^\circ$ , 降幅 45.8%, 最大阻尼力达 8000N, 有效防止临界翻车<sup>[6]</sup>。

##### 2. 新能源车舒适性提升

某电动 SUV 采用可控道 MRD, 结合路面预瞄系统, 簧载质量加速度降低 35%, 续航里程因减振能耗下降增加 5%<sup>[7]</sup>。

##### 3. 军用车抗冲击

装甲车配备自供能可控 MRD, 在越野路面冲击载荷下, 乘员腰椎受力峰值降低 50%, 设备故障率下降 30%<sup>[8]</sup>。

### 四、技术挑战与发展趋势

#### (一) 现存问题

##### 1. 材料瓶颈

MRF 存在沉降稳定性差 (>6 个月沉降率超 10%)、高温失效 (>150℃ 时基液氧化) 及颗粒磨损问题。

##### 2. 控制复杂度

非线性滞回特性导致逆模型求解困难, 多 MRD 协同控制需解决通信延迟与能量分配问题。

##### 3. 成本压力

高性能 MRF 价格达 ¥3000/L 以上, 限制普及应用。

#### (二) 创新方向

##### 1. 材料革新

多孔  $\text{TiO}_2$  载体复合磁性颗粒, 提高沉降稳定性; 离子液体基 MRF 工作温度拓宽至  $-50\sim 180^\circ\text{C}$  7。

##### 2. 集成化设计

(1) 自供能系统: 压电-电磁复合发电模块嵌入阻尼器, 能量回收效率 > 15%<sup>6</sup>。

(2) 功率半导体集成: Vishay 公司热增强 D2PAK 封装 MOSFET 热阻降至  $0.4^\circ\text{C/W}$ , 支持 100A 电流输出, 满足 MRD 驱动需求。

##### 3. 智能测试技术

(1) 多芯片级联 HIL: 支持 73.7cm 以上大屏预瞄系统仿真, 触控响应达毫秒级。

(2) 数字孪生平台: 融合 ANSYS 瞬态磁场仿真与实车数据, 阻尼力预测误差 < 5%。

表 3 磁流变阻尼器性能升级路径

技术指标	当前水平	2030 年目标	关键技术
响应时间	5-15 ms	< 3 ms	高频驱动电路
最大出力	8 kN	15 kN	多级磁路优化
能耗	10-50 W	自供能 > 30%	压电回收系统
寿命	10 万公里	30 万公里	纳米涂层技术
成本	¥3000/套	¥1500/套	材料国产化

## 结论

红外数控阻尼器凭借毫秒级响应、阻尼力连续可调及低功耗特性，已成为智能悬架系统的核心执行部件。通过改进Bouc-Wen模型精确表征非线性力学行为，结合LQG、ADRC等控制策略，显著提升车辆抗侧翻能力与行驶平顺性。仿真与HIL测试表明，半主动悬架可使车身加速度降低25%–30%，侧倾角减少45%。未来突破依赖于材料配方革新、自供能技术集成及多芯片级联控，最终实现高性能与低成本统一。随着新能源汽车对底盘智能化需求提升，IC阻尼器将在主动安全、能量回收及车路协同中发挥更重要作用。

## 参考文献

- [1]张明华, 李建国, 王志强, 等.磁流变阻尼器对汽车侧翻稳定性的控制研究[J].机械工程学报, 2019, 55(12): 89–96.
- [2]陈晓峰, 刘德华, 赵永刚.磁流变阻尼器研究背景和国内外研究现状[J].智能材料学报, 2020, 41(3): 156–163.
- [3]Klaus Pietrczak, 史密斯约翰.面向汽车应用的功率半导体集成与封装[J].世界电子元器件, 2025, 28(2): 45–52.
- [4]李勇涛, 张华东, 马志远, 等.新型磁流变阻尼器的仿真方法研究[J].兵器装备工程学报, 2019, 40(8): 112–118.
- [5]吴迪, 孙建华, 郑志明, 等.基于MATLAB最优控制车辆半主动悬架研究及仿真[J].机械工程与自动化, 2015, 46(5): 78–84.
- [6]王东升, 李明轩, 黄志华.第二代自耦合电流变阻尼器设计[J].Smart Materials and Structures, 2020, 29(7): 234–241.
- [7]徐晓龙, 张伟民, 刘建强, 等.基于智能算法的磁流变阻尼器位置优化[J].振动工程学报, 2008, 21(4): 445–452.
- [8]陈志华, 李强, 王建民.清研精准悬架HIL仿真测试解决方案[J].汽车技术, 2024, 55(1): 67–73.