

# 二自由度汽车磁流变半主动悬架最优控制仿真研究\*

贾永枢

(浙江工贸职业技术学院, 浙江 温州 325003)

**摘要:** 汽车半主动悬架系统的控制算法与策略决定半主动悬架系统的智能化程度和控制效果。应用汽车行驶动力学理论, 建立二自由度1/4汽车磁流变半主动悬架的动力学模型, 设计了半主动悬架最优控制器, 提出基于磁流变减振器可调阻尼力的控制策略。以某款轿车前悬架参数为例, 在Simulink软件中仿真分析半主动悬架系统的控制效果, 结果表明, 应用最优控制的汽车磁流变半主动悬架可以有效提高悬架性能。

**关键词:** 汽车半主动悬架; 磁流变减振器; 最优控制; 仿真

中图分类号: U463.33

文献标识码: A

文章编号: 1672-0105 (2015) 02-0042-04

## Simulation Research on Optimal Control of Vehicle Magnetorheological Semi-Active Suspension of Two Degrees of Freedom

JIA Yongshu

(Zhejiang Industry & Trade Vocational College, Wenzhou, 325003, China)

**Abstract:** The control algorithm and strategy of vehicle semi-active suspension system determines the degree of intelligence and control effect of semi-active suspension system. Based on system dynamics theory of vehicle, the dynamic model of 1/4 magnetorheological semi-active suspension with two degrees of freedom was established. The semi-active suspension optimal controller was designed, and the control strategy based on magnetorheological damper with adjustable damping force was put forward. Using the front suspension parameters of a vehicle, simulation analysis of the control effect had been done in the Simulink. The results show that the magnetorheological semi-active suspension system based on the optimal control of the vehicle can effectively improve the suspension performance.

**Key Words:** vehicle semi-active suspension; magnetorheological damper; optimal control; simulation

### 0 引言

悬架是影响汽车乘坐舒适性和行驶稳定性的关键系统, 目前大部分汽车采用弹簧刚度和减振器阻尼系数等参数固定的被动悬架, 悬架系统性能不能随汽车行驶状况的变化而调节, 难以满足人们的需求。汽车磁流变半主动悬架系统作为未来较高形式的悬架智能结构, 能够根据汽车行驶振动情况实时连续控制磁流变减振器的阻尼, 实现悬架系统的性能可控, 具有可控性好、响应快、结构简单等特点, 是提高汽车的平顺性和安全性的重要途径<sup>[1]</sup>。

本研究针对二自由度1/4汽车磁流变半主动悬架模型, 应用最优控制理论设计了汽车半主动悬架控制最优控制器。在Matlab软件中建立1/4汽车悬架Simulink仿真模型, 对半主动悬架系统的控制性能进行仿真研究。

### 1 1/4汽车半主动悬架模型的建立

#### 1.1 系统数学模型

1/4汽车悬架模型结构简单, 涉及的悬架设计参数最少, 但可以比较准确的反映整车行驶的基本特性, 包含了分析汽车平顺性和操作稳定性的指标,

收稿日期: 2014-12-3 修回日期: 2015-4-22

基金项目: 2015年度浙江省科技厅公益技术应用研究项目(2015C31064); 2013年度浙江省专业带头人专业领军项目(lj2013145); 2013年度温州市551人才资助项目

作者简介: 贾永枢, 硕士, 副教授, 研究方向: 车辆磁流变减振器、车辆动态性能。

在半主动悬架控制系统的研究中被广泛采用。本研究建立如图1所示的二自由度1/4汽车半主动悬架模型,模型假定条件如下:

- 其一,汽车不存在侧倾振动,没有侧向位移;
- 其二,前、后各悬架系统垂直振动是独立的;
- 其三,轮胎的阻尼很小,忽略不计,仅考虑其刚度;
- 其四,悬架系统的刚度、阻尼都为线性。

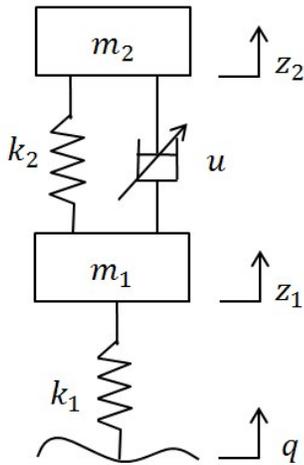


图1 二自由度1/4汽车磁流变半主动悬架模型

应用牛顿运动定律,根据图1可建立1/4半主动悬架系统的运动学微分方程<sup>[2]</sup>,表达式如下:

$$m_2 \ddot{z}_2 = -u - k_2(z_2 - z_1) \quad (1)$$

$$m_1 \ddot{z}_1 = u + k_2(z_2 - z_1) - k_1(z_1 - q) \quad (2)$$

式中:  $m_2$  为簧载质量;  $m_1$  为非簧载质量;  $k_2$  为悬架弹簧刚度;  $k_1$  为轮胎刚度;  $u$  为磁流变减振器可控阻尼力;  $z_2$  为簧载质量位移;  $z_1$  为非簧载质量位移;  $q$  为路面垂向位移。

路面激励采用一个滤波高斯白噪声作为路面输入模型<sup>[3]</sup>,即:

$$\dot{q}(t) = -2\pi f_0 v q(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_0} v w(t) \quad (3)$$

式中:  $v$  为汽车行驶速度;  $G_0$  为表示路面粗糙程度的路面不平度系数;  $w(t)$  为均值为零、强度为1的均匀分布的单位高斯白噪声;  $f_0$  为下截止空间频率,一般取  $0.011 \text{ m}^{-1}$ ;  $n_0$  为参考空间频率取  $0.1 \text{ m}^{-1}$ 。

## 1.2 系统状态方程

系统的控制属于完全状态信息的随机最优控制问题,选取状态变量为

$$X = (\dot{z}_2 \quad \dot{z}_1 \quad z_2 - z_1 \quad z_1 - q)^T \quad (4)$$

选取输出变量为

$$Y = (\ddot{z}_2 \quad z_2 - z_1 \quad z_1 - q)^T \quad (5)$$

根据现代控制理论,即得出线性系统的空间状态方程:

$$\dot{X} = AX + BU + EW \quad (6)$$

$$Y = CX + DU \quad (7)$$

式中,  $W = (\dot{q}(t))$  为高斯路面输入矩阵;

$U = (u(t))$  为输出可控阻尼力矩阵;

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{k_2}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_2}{m_1} & -k_1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} -\frac{1}{m_2} \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; E = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix};$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{k_2}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; D = \begin{pmatrix} -\frac{1}{m_2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}。$$

## 2 最优控制器设计

### 2.1 性能指标选取

汽车悬架主要性能指标有车身垂向振动加速度、轮胎动载荷、悬架动行程,分别代表了乘坐舒适性、轮胎接地性、悬架撞击限位块的可能性。汽车磁流变半主动悬架最优控制的目标是汽车行驶时具有良好的平顺性和操作稳定性,反应在物理量上就是要尽可能的降低车身垂向振动加速度、轮胎动载荷、悬架动行程等性能指标,同时要求实现控制目标所需的能量较小,即磁流变减振器可控阻尼力较小<sup>[4]</sup>。因此,基于汽车半主动悬架二自由度模型,最优控制器的性能优化指标通常选取

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ q_1 \dot{z}_2^2 + q_2 [z_2(t) - z_1(t)]^2 + q_3 [z_1(t) - q(t)]^2 + r u^2 \right\} dt \quad (8)$$

式中:  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  和  $r$  分别为车身垂向振动加速度、悬架动行程、轮胎动位移和磁流变减振器可控阻尼力的加权系数。

性能优化指标泛函数  $J$  的指标加权系数选取决定了设计者对悬架性能的倾向,加权系数的数值大小代表了各个性能指标在悬架中的相对重要程度,数值越大悬架性能指标越重要。指标的选取对半主动悬架控制效果有一定的影响,由于悬架性能指标互相影响,选取时应兼顾安全性和舒适性,一般采用经验法或者试凑法确定加权系数<sup>[5-6]</sup>。

将指标函数J的表达式改写成矩阵形式，即：

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{Y^T Q_w Y + U^T R_w U\} dt \quad (9)$$

式中， $Q_w$  和  $R_w$  为权矩阵。

$$Q_w = \begin{pmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{pmatrix}, \quad R_w = [r]$$

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{(CX + DU)^T Q_w (CX + DU)\} dt \quad (10)$$

$$= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \{X^T QX + U^T RU + 2X^T NU\} dt$$

式中， $Q = C^T Q_w C$ ， $R = r + D^T Q_w D$ ， $N = C^T Q_w D$ 。

当汽车参数和加权系数确定后，任意时刻的磁流变减振器最优阻尼力

$$U = -KX(t) \quad (11)$$

式中，最优控制反馈增益矩阵  $K = B^T P + N^T$ ， $P$  可由黎卡提 (Riccati) 方程求得：

$$PA + A^T P - (PN + N)R^{-1}(B^T P + N^T) + Q = 0 \quad (12)$$

仿真计算利用矩阵 A、B、Q、R、N，调用 matlab 中线性二次最优控制设计函数 [K,S,E]=lqr(A、B、Q、R、N)，即可计算出反馈增益矩阵 K，得到最优阻尼力 U。

### 2.2 控制策略

本研究选用基于磁流变减振器的汽车半主动悬架，磁流变减振器的可调阻尼力是通过改变输入电流调节外加的磁场强度来控制的，它无法在任意时刻达到最优控制算法(11)式所表述的最优控制力，

而只能通过控制磁流变减振器产生的可控阻尼力尽量接近最优控制力，所以计算分析时，对于磁流变减振器的可控阻尼力采用以下算法策略确定：

$$u_f = \begin{cases} f_{\max} & , u > f_{\max} \\ u & , f_{\min} < u < f_{\max} \\ f_{\min} & , u < f_{\min} \end{cases} \quad (13)$$

式中， $u_f$  为磁流变减振器阻尼力， $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$  为磁流变减振器在一定振动速度下产生的最大、最小阻尼力。通过比较最优控制器计算的最优阻尼力与磁流变减振器的阻尼力，调节磁流变减振器的控制电流，确定输出的阻尼力，实现悬架性能的控制。

### 3 仿真分析

利用已建立的 1/4 汽车磁流变半主动悬架动力学模型和最优控制策略，以系统性能指标 J 最小值为控制目标量，仿真对比分析半主动悬架系统和被动悬架系统的性能。在 Matlab 软件中建立被动悬架和最优控制算法半主动悬架的 Simulink 仿真模型，如图 2 所示。

仿真计算中选取 B 级路面作为输入位移，其路面不平度系数  $G_0 = 64 \times 10^{-6} m^2/m^{-1}$ ，选定车速  $v = 30 m/s$ ，响应时间 10 s，生成的路面垂向位移如图 3 所示。

选用某款小轿车的 1/4 车体悬架参数， $m_1 = 25 kg$ ， $m_2 = 330 kg$ ， $k_2 = 43 000 N/m$ ， $k_1 = 223$

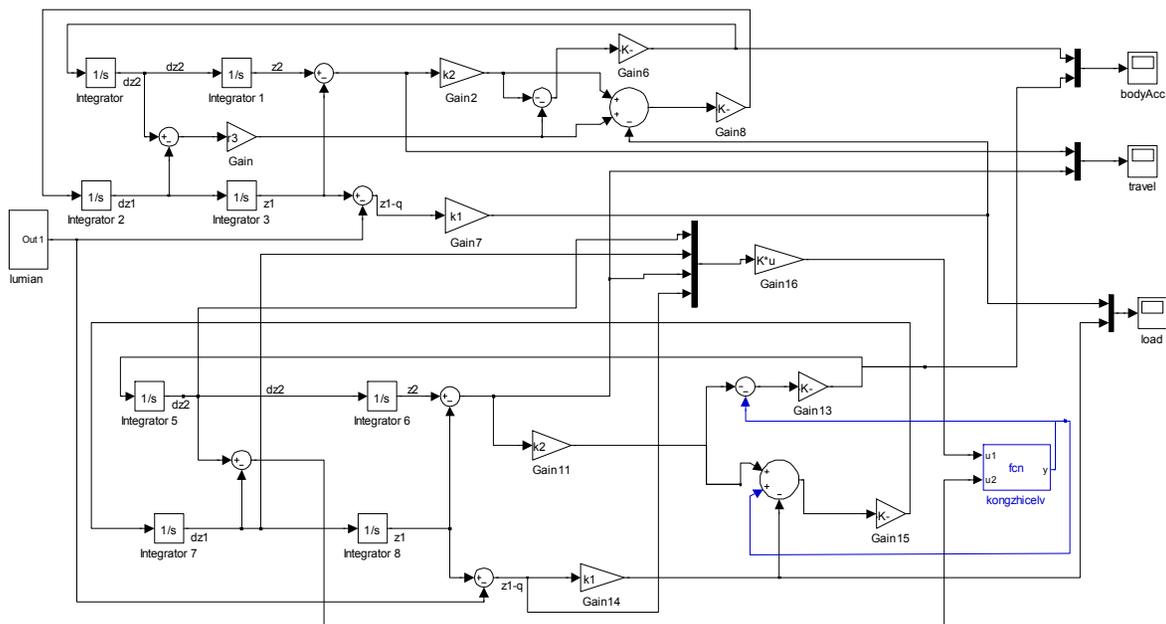


图2 被动悬架和半主动悬架的 Simulink 仿真模型

000 N/m, 极限动行程 100 mm。通过反复试算确定加权系数  $r = 1$ 、 $q_1 = 1 \times 10^5$ 、 $q_2 = 1 \times 10^5$ 、 $q_3 = 1 \times 10^8$ 。半主动悬架最优控制的可调减振器采用自行研发的某款小轿车的磁流变减振器<sup>[7]</sup>, 减振器的特性曲线特性如图4所示。

通过仿真得到如图5—图7所示的被动悬架和

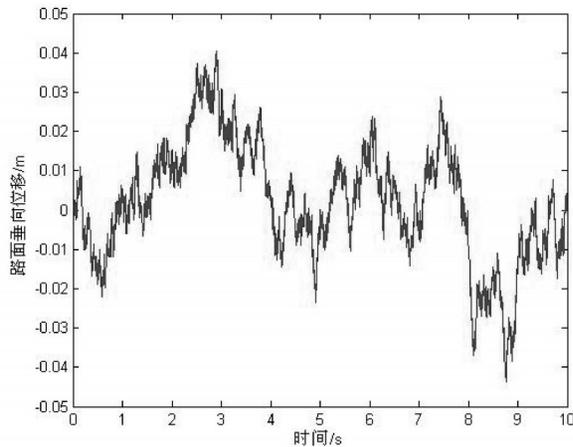


图3 B级路面垂向位移

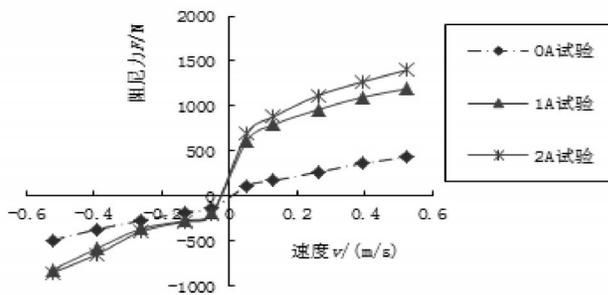


图4 磁流变减振器特性曲线

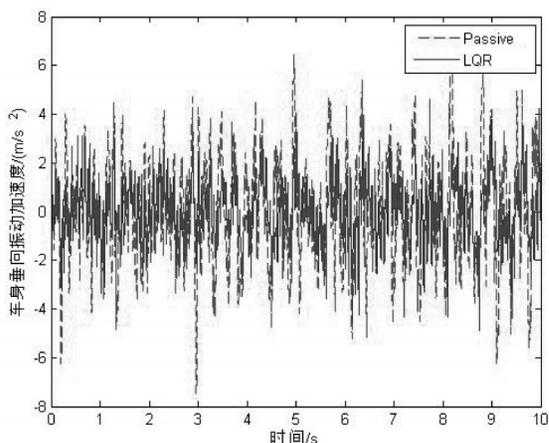


图5 车身垂向振动加速度

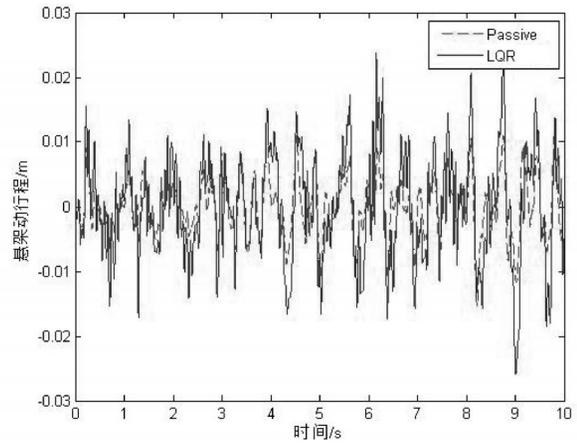


图6 悬架动行程

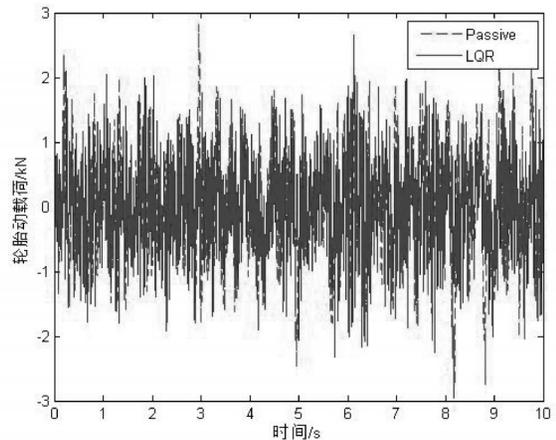


图7 轮胎动载荷

半主动悬架的车身垂向振动加速度、悬架动行程、轮胎动载荷的时间历程对比曲线, 图5—图7中 passive 表示被动悬架, LQR 代表最优控制的磁流变半主动悬架。

根据图5—图7计算车身垂向振动加速度、悬架动行程、轮胎动载荷的均方根值, 其结果如表3所示。

分析以上图5—图7及表3可以看出, 在随机路

表3 悬架性能指标的均方根值

性能指标	单位	被动悬架	最优控制半主动悬架
车身垂向振动加速度	$ms^{-2}$	2.2	1.2
悬架动行程	mm	4.5	8.0
轮胎动载荷	N	808.6	691.4

面输入下, 采用最优控制的磁流变减振器半主动悬架车身垂向振动加速度和轮胎动载荷比被动悬架分

(下转第52页)

体的结合力优异。

### 3 结论

第一, 钼酸盐钝化工艺的最佳范围为: 7~10 g/L, 氟硼酸钠 10~30 g/L, 乙酸钴 5~8 g/L, 适量的磷酸, pH 3~4.5, 钝化温度 60~70 °C, 时间为 10~15 min, 在该工艺范围内, 钼酸盐、复配成膜物氟硼

酸钠、乙酸钴浓度越高, 则成膜速度越快。钝化处理时间越长, 则钝化膜越厚。

第二, 采用钼酸盐钝化工艺在 7075 铝合金表面获得了色泽均匀、耐腐蚀性好的钝化膜, 膜层为黑色, 无金属光泽, 微观结构呈非连续的网状结构, 膜层耐蚀性优于 5% 铬酸酐钝化膜。

### 参考文献:

- [1] 裴旭明, 陈五一, 任炳义. 加工工艺对 7075 铝合金紧固孔表面形貌和组织的影响[J]. 中国有色金属学报, 2001(8): 655-660.
- [2] 李季, 孙杰, 安成强. 铝合金无铬钝化的研究进展[J]. 表面技术, 2008, 37(4): 1-5.
- [2] 屠振密, 张景双, 于元春, 等. 无铬钝化与三价铬钝化的研究进展[M]. 表面工程技术创新研讨会论文集, 2005: 37-41.
- [3] 章江洪, 张英杰, 闫磊. 镀锌产品钼酸盐钝化技术研究发展[J]. 材料保护, 2009, 42(3): 48-53.
- [4] 孙克宁, 刘兰毅, 石伟, 等. 镀锌层无铬钝化工艺研究[J]. 材料保护, 2002, 35(12): 35-36.
- [5] 卢锦堂, 孔纲, 陈锦虹, 等. 热镀 Zn 层钼酸盐钝化工艺[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(1): 46-48.

(责任编辑: 牛丽媛)

(上接第 45 页)

别下降了 45.5% 和 14.5%, 悬架动行程增加了 3.5 mm, 但并没有超过极限动行程 100 mm, 所设计的最优控制磁流变半主动悬架有效的提高了汽车的平顺性和操作稳定性, 设计的最优控制算法与策略是正确的。

### 4 结论

第一, 建立了二自由度的 1/4 汽车磁流变半主动悬架模型, 应用最优控制理论设计了磁流变半主

动悬架控制器, 提出了基于磁流变减振器的半主动悬架控制策略;

第二, 在 Simulink 软件中建立被动悬架和最优控制的磁流变半主动悬架的仿真模型, 对比分析悬架性能, 结果表明, 应用最优控制的汽车磁流变半主动悬架的车身垂向振动加速度、轮胎动载荷有明显下降, 有效的改善了汽车的平顺性和操作稳定性。

### 参考文献:

- [1] 王其东, 梅雪晴. 汽车半主动悬架的研究现状和发展趋势[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2013, 36(11): 1289-1294.
- [2] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] 陈杰平, 陈无畏, 祝辉, 等. 基于 Matlab Simulink 的随机路面建模与不平度仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 11-15.
- [4] 喻凡. 汽车系统动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 顾海明, 赵桂范, 杨佳璘, 等. 基于最优控制和模糊控制的半主动悬架仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2013, (6): 65-67.
- [6] 曹友强, 罗虹, 董红亮. 主动悬架最优控制性能函数的加权系数研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(23): 5459-5462.
- [7] 贾永枢, 周孔亢, 徐兴. 基于流动模式的汽车双筒式磁流变减振器设计与试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(10): 103-108.

(责任编辑: 翁茂荣)