

文章编号: 1006-1355(2014)05-0057-04

对地友好性的悬架参数优化及半主动控制

姚晶晶^{1,2}, 徐中明¹

(1. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

摘要: 为改善某商用车的对地友好性, 以某重型货车为研究对象, 建立了1/4车体的动力学模型, 研究悬架参数对道路友好性的影响, 运用优化方法对悬架刚度和阻尼进行优化设计。并在此基础上, 以提高道路友好性为目标并兼顾振动舒适性, 研究阻尼可调减振器的半主动悬架的控制, 结果表明, 相对于被动悬架, 采用最优模糊控制的半主动悬架车辆道路破坏系数有较大幅度的降低。

关键词: 振动与波; 道路友好性; 优化; 最优模糊控制

中图分类号: U463.33

文献标识码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2014.05.012

Parameters Optimization and Semi-active Control of Suspensions Based on Road Friendliness

YAO Jing-jing^{1,2}, XU Zhong-ming¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

Abstract: To improve the road friendliness of commercial vehicles, the dynamic model of a heavy duty truck is established, and the influence of suspension parameters of the truck on the road friendliness is studied. The suspension stiffness and damping are optimized. On this basis, the adjustable damping shock absorber and the semi-active suspension control are applied to improve the road friendliness. The results show that, compared with the passive suspension, the road damage coefficient of the optimal fuzzy-control semi-active suspension is greatly reduced, and the ride comfort is also improved at the same time.

Key words: vibration and wave; road friendliness; optimization; optimal fuzzy control

重载交通被认为是造成路面早期损坏的一个重要原因, 大型载重货车对路面的破坏远大于其他车辆。近年来对道路友好性的研究日益受到重视。英国学者COLE 等对被动悬架系统的优化设计进行了深入的研究, 对不同悬架刚度和阻尼组合下的道路友好性指标进行了数值分析并据此对被动悬架系统进行优化设计^[1]。Yi 等人通过对不同悬架类型的对比, 发现采用半主动悬架能够有效改善车辆的道路友好性^[2]。严天一等通过仿真分析表明主动悬架能够明显地改善车辆的道路友好性^[3], 陈一锴等人通过对半主动、主动改进天棚控制和被动悬架对比, 表明主动悬架和半主动悬架在车辆平顺性、道路友

好性方面都有较好效果^[4]。改善商用车的道路友好性主要在于悬架参数的合理选择, 进而减小车辆载荷以降低车辆对道路的破坏。目前研究得较多的半主动悬架都是基于空气悬架和磁流变减振器。本文以某重型货车为研究对象, 在 Simulink 中建立了1/4车体的动力学模型, 研究了悬架参数对道路友好性的影响, 运用优化方法对悬架刚度和阻尼进行优化。并在此基础上, 以提高道路友好性为目标并兼顾振动舒适性, 以阻尼可调减振器为基础研究了半主动悬架的控制。

1 车辆动力学模型的建立

为了分析车辆对道路的友好性, 对悬架系统进行适当简化, 选取1/4车辆模型为研究对象。建立1/4车体模型如图1所示。在模型中, 忽略轮胎阻尼。 m_1 为车轮质量, z_1 为车轮的垂直位移; m_2 为车身质量, z_2 为车身的垂直位移; z_0 为路面激励的垂向位移; k 为悬架的等效刚度; k_t 为轮胎的等效刚度。

收稿日期: 2013-11-16

基金项目: 机械传动国家重点实验室科研业务费资助

(基金编号: SKLMT-ZZKT-2012M513)

作者简介: 姚晶晶(1985-), 女, 湖北枝江, 在读博士, 目前从事汽车动力学研究。

E-mail: y119jj@126.com

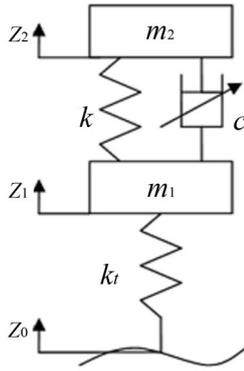


图1 1/4车体模型

此悬架模型的运动微分方程为

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{z}_1 &= k(z_2 - z_1) - k_t(z_1 - z_0) + c(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) \\ m_2 \ddot{z}_2 &= -k(z_2 - z_1) - c(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) \end{aligned} \quad (1)$$

选择系统状态变量 X 和输出变数 Y 为

$$\begin{cases} X = [z_1 - z_0 & z_2 - z_1 & \dot{z}_1 & \dot{z}_2]^T \\ Y = X \end{cases} \quad (2)$$

结合车辆模型的运动微分方程和路面输入,系统的状态空间方程可表达为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (3)$$

式中 A 为系统矩阵; B 为控制矩阵; C 为输出矩阵,是单位阵 $E_{4 \times 4}$; D 为传递矩阵,是零矩阵 $Zero_{2 \times 1}$; $U = [u \quad \dot{z}_0]^T$ 为阻尼力矩阵与路面输入矩阵的合矩阵。

2 悬架参数优化

2.1 评价指标

车辆工况复杂,且道路友好性的评价指标繁多。常用的三种典型道路友好性评价指标为动态载荷系数、动态载荷应力因子及95百分位综合四次幂力。许多研究指出前两个指标夸大了车辆对路面的疲劳损伤,英国学者通过深入研究,考虑了动载荷的相关性和空间重复性,将其纳入到车辆对路面的疲劳损伤评价,提出了95百分位综合4次幂力评价指标^[5]。95百分位四次幂和力提高了车辆对路面疲劳损伤的评价准确度,评价车辆对道路的破坏更为合理,本文选取该指标评价道路友好性。

对于1/4车辆模型,道路破坏系数为

$$J = 1 + \frac{1.65\sigma_{A^4}}{m_{A^4}} \quad (4)$$

式中 σ_{A^4} 为轮胎4次幂和力的标准偏差,(单位 N^4); m_{A^4} 为轮胎4次幂和力的均值(单位为 N^4)。

2.2 悬架参数对车辆性能的影响

悬架弹簧刚度和减振器阻尼对道路友好性有较大的影响。大量实验表明,在一定范围内,车辆的道

路友好性对于阻尼系数变化的敏感度较刚度要高^[5],因此,以悬架阻尼系数为变量进行仿真,以进一步得出道路友好性与阻尼系数的变化关系。

本文选用某重型商用车满载时后轴单侧的部分参数建立1/4车辆模型,具体参数如表1所示。根据式(1)在Matlab/Simulink中建立1/4车辆模型的动力学模型。以路面激励为输入,输出为道路破坏系数。

表1 仿真参数

参数	m_2/kg	m_1/kg	$k/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	$k_t/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
数值	15 986	2 140	1 780 000	7 840 000
参数	$c_0/\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	n_0/Hz	$v_0/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$G_0/\text{m}^3\cdot\text{cycle}^{-1}$
数值	117 000	0.01	20	64 e-6

仿真时车辆以20 m/s的速度在B级路面上行驶,B级路面采用带有低通滤波器的随机白噪声来模拟,其表达式为

$$\dot{q} = -2\pi n_0 v_0 \cdot q + 2\pi n_0 \sqrt{G_0 v} \cdot w \quad (5)$$

其中 n_0 为下截止频率; G_0 为路面不平度系数; v_0 为车速; w 为路面输入白噪声信号;

将阻尼分别缩小0.2、0.4、0.6、0.8和放大1.2、1.4、1.6、1.8、2倍,通过拟合仿真结果得到的道路友好性阻尼系数的变化规律如图2所示。

由图2可以看出,随着阻尼系数的增加,车辆的道路破坏系数先有所下降而后提高,可见,适当减少阻尼会在一定程度上改善车辆的平顺性和道路友好性。

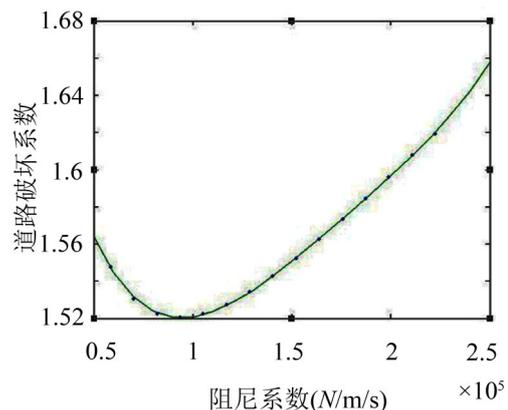


图2 道路友好性随阻尼变化规律

2.3 悬架参数优化

悬架的刚度、阻尼发生变化,货车道路友好性将随之变化。本文以悬架的刚度和阻尼为优化变量,以道路友好性评价指标为目标函数,通过遗传优化算法,得优化后的悬架阻尼和刚度,使得道路破坏系数最小。对于本文的单目标优化问题,选用多岛遗传算法来实现。本文基于Isight建立优化模型,定义设计变量、目标、约束和初始值。

阻尼取值范围根据重型货车的偏频来确定,满载偏频在 1.7 Hz~2.17 Hz 之间,阻尼优化范围按照与刚度相同比例确定。优化变量的初始值和范围如表 2 所示。

表 2 优化变量的范围

优化变量	下限	初值	上限
$K/N.m^{-1}$	890 000	1 780 000	3 560 000
$C/N.s.m^{-1}$	58 500	117 000	234 000

在 Matlab/Simulink 中建立车辆动力学模型,在 Isight 中设置目标函数为道路破坏系数 J ,优化变量为刚度 K 和阻尼 C 。设置相应的数据接口使得 Isight 与 Simulink 能够进行数据交互。

优化后的悬架的刚度为 $1\ 263\ 000\ N \cdot m^{-1}$,阻尼为 $91\ 600\ N \cdot s \cdot m^{-1}$ 刚度和阻尼均有所下降。

图 3 是优化前后的道路破坏系数对比图,由图可见,与优化前相比,道路友好性评价指标有所降低,从而在一定程度上减轻了车辆对道路的破坏。

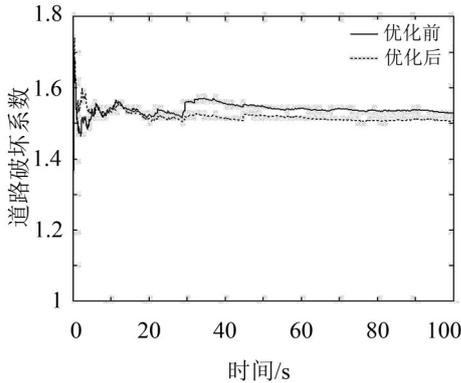


图 3 优化前后的道路破坏系数对比

3 半主动悬架最优模糊控制器设计

半主动悬架可以根据车辆行驶过程中的振动实时调节悬架阻尼,从而有效减少重型卡车对道路的损伤。车辆行驶时产生的动载荷与悬架系统特性关系密切,而动载荷又是影响道路友好性的重要因素。本文设计了半主动悬架控制器,以减少车辆动载荷为目标,使车辆获得良好道路友好性。

半主动悬架控制中的关键是使减振器产生所需要的阻尼力。本文采用最优模糊控制策略,外层最优控制器根据车辆行驶状态得到最优阻尼力,再由内层模糊控制器确定阻尼系数的大小,从而实现对阻尼的控制,控制策略的结构如图 4 所示。

在图 4 中 F_{re} 、 F_r 分别表示需要的最优阻尼力和实际阻尼力。阻尼 C 由模糊控制器进行调节,从而使 F_r 尽可能逼近 F_{re} 。

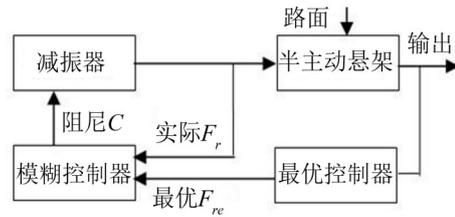


图 4 最优模糊控制策略的结构

3.1 最优控制器的设计

最优控制是使系统按照一定的控制规律进行工作使得系统性能的某个指标在一定意义下达到最优。本文的控制目标是使车辆获得良好道路友好性,并兼顾车辆的行驶平顺性。车辆动载荷的减小能明显改善道路友好性,车体振动加速度、悬架动挠度、轮胎动位移可以用来评价车辆的行驶平顺性和操纵稳定性。故选取车辆动载荷,车体质量垂向加速度、轮胎动位移和悬架动挠度为系统输出,则确定的半主动悬架 LQG 综合性能指标泛函为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [q_1 \dot{z}_2^2 + q_2 (z_1 - z_0)^2 + q_3 (z_2 - z_1)^2 + 4k_t^2 (z_1 - z_0)^2] dt \quad (6)$$

式中 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 为车身垂向加速度、轮胎动位移和悬架动挠度,轮胎动载荷的加权系数。

由系统运动微分方程求解得 \dot{z}_2 的表达式,代入性能指标泛函中,则 J 改写成标准形式有

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (X^T Q X + U^T R U + 2X^T N U) dt \quad (7)$$

式中 Q 为状态加权矩阵; R 为控制力加权矩阵; N 为交叉项权重矩阵。

根据最优控制理论可知系统的最优控制规律为: $U = -KX$,

$K = R^{-1}(N^T + B^T P)$ 为系统最优反馈增益矩阵; P 为 Riccati 方程 $PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0$ 的唯一正定解。

各指标以优化目标函数 P 中车辆各性能指标的顺序,综合考虑它们的重要性程度,利用层次分析法确定其主观加权比例系数^[6]。本文确定为轮胎动载荷最重要,车身垂向加速度次之,悬架动挠度最不重要,其中选取的比较矩阵

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 3 & 1/2 \\ 1 & 2 & 2 & 1/2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 1/5 \\ 2 & 2 & 5 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

假设垂向加速度的权重系数为 W_1 ,默认其主观加权比例系数为 1,以其为量化标准,其他各项的主观加权比例系数按公式求得

$$\gamma_i = \frac{W_i}{W_1}, \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

选择各性能指标的均方根值作为依据,对它们

进行同尺度量化处理。默认垂向加速度的同尺度量化比例系数为1,按公式确定其他性能指标的加权系数 β_i

$$\beta_i = \frac{\sigma_{z_i}^2}{\sigma_i^2} \quad (10)$$

则各指标的总加权系数有公式 $q_i = \gamma_i \times \beta_i$ 求得。

将参数代入分别求出 A, B, Q, R, N 。在 Matlab 中调用线性二次型最优控制器设计函数 LQR(A, B, Q, R, N), 求得最优反馈增益矩阵 K

$$K = -665 \ 740 \ -124 \ 100 \ 97 \ 800 \ -234 \ 600$$

3.2 模糊控制器的设计

模糊控制器采用两输入单输出结构。两输入为实际阻尼力和最优阻尼力之间的误差 e 及其变化率 ec , 输出为减振器的阻尼系数 c 。输入选用 Guassmf 型隶属函数, 输出选择 Trimf 型隶属函数。在模糊化、去模糊化中, 输入输出均取 7 个语言值, 即正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(Z)、负小(NS)、负中(NM)和负大(NB), 且模糊论域均为 $[-6, 6]$ 。

模糊控制器采用 Mandani 推理法。模糊规则制定的原则为: 当误差大时, 选择控制量以尽快消除误差为主; 当误差较小时, 选择控制量要注意防止超调, 以系统稳定性为主, 建立的模糊规则表 3^[7]。

表 3 模糊规则

	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NS	NS	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	PS
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PM
Z	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	NS	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PM	PB	PB	PB

3.3 半主动悬架控制仿真与结果分析

选用优化后的后悬的刚度和阻尼, 在 Simulink 中建立半主动悬架控制模型, 并与被动悬架车辆动力学模型的性能进行仿真对比。最优模糊控制悬架与被动悬架的道路破坏系数比较如图 5 所示, 从图中可以看出, 最优模糊控制悬架车辆的道路友好性有明显提高, 相对于被动车辆, 道路破坏系数 J 的均方根值降低了 11.8%。

本文以提高车辆对道路的友好性为控制目标, 主要性能指标是降低道路破坏系数。从以上仿真结果可以看出, 与被动悬架相比, 最优模糊控制下车辆的道路友好性更好, 且轮胎动载荷降低, 车辆的行驶

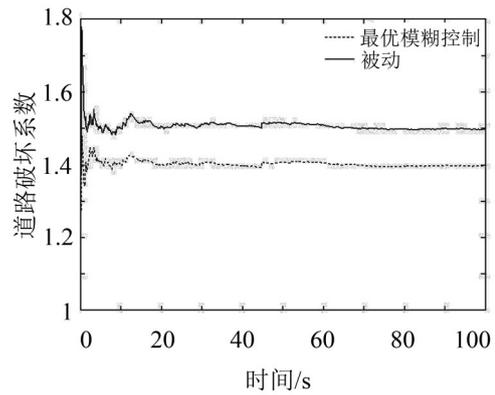


图 5 最优模糊控制与被动悬架道路破坏系数比较

安全性也有一定提高。因此, 选择该控制方法能在保持行驶安全性和平顺性的前提下, 大幅提高车辆对地友好性。

4 结语

(1) 以某重型商用车满载时后轴单侧的部分参数在 Simulink 中建立了 1/4 车体的动力学模型, 研究了悬架参数对道路友好性的影响, 并以提高道路友好性为目标, 运用优化方法对悬架刚度和阻尼进行优化设计, 结果表明优化后的悬架对道路友好性有一定改善。

(2) 以提高道路友好性为目标并兼顾振动舒适性, 提出了基于阻尼可调减振器的悬架最有模糊控制算法, 仿真结果表明最优模糊控制的车辆相对于被动悬架车辆的道路破坏系数 J 的均方根值降低了 11.8%, 大幅提高车辆对地友好性。

参考文献:

- [1] Cole D J. Truck suspension design to minimize road damage[J]. *Proc. Inst. Mech. Engrs*, (S0954- 40070). 1996, 210(2): 95-107.
- [2] Yi K, Hedrick K. The use of semi-active suspension to reduce pavement damage[J]. *Journal of ASTM*, Special Technical Publication CA, USA: Berkley University, 1990.
- [3] 严天一, 刘大维, 陈焕明, 等. 基于主动悬架系统车辆的道路友好性[J]. *机械工程学报*, 2007, 42(7): 163-167.
- [4] 陈一锴, 何杰, 郭彦, 等. 基于平顺性和道路友好性的重型货车悬架优化[J]. *江苏大学学报(自然科学报)*, 2009, 30(5): 251-255.
- [5] Valasek M, Kortum W, Sika Z, Magdolen L, Vaculin O. Development of semi-active road-friendly truck suspensions[J]. *Control Engineering*, (S0967- 0661), 1998, 6(6): 735-744.
- [7] 陈龙, 张训波, 江浩斌, 等. 转向姿态下车辆主动悬架系统的 LQG 控制研究 [J]. *噪声与振动控制*, 2008, 22(1): 22-25.
- [6] 赵永光, 陈剑. 半主动悬架控制的联合仿真[J]. *噪声与振动控制*, 2011, 104(5): 104-105.