

汽车悬架优化过程的 Pareto 最优解*

饶 江, 胡树根*, 宋小文, 王 耘
(浙江大学 能源工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对悬架优化过程目标函数相互冲突的问题,建立了四自由度半车模型,并施加随机路面激励,在此基础上研究了悬架多目标优化(MOP)。采用 Matlab 软件 m 文件与 Simulink 相结合的方法对悬架刚度、阻尼参数进行了数值模拟,分析了刚度或阻尼变化时悬架动行程与车身加速度之间的变化关系,并提出了一种通过数值模拟求解两目标函数优化下 Pareto 最优解的方法。研究结果表明,该方法可以有效地获得悬架动行程及车身加速度两目标函数下的优化解。

关键词:Pareto 最优;随机路面;数值模拟;多目标优化

中图分类号:TH12;U461.4

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)06-0028-04

Pareto optimal solution of vehicle suspension optimization

RAO Jiang, HU Shu-gen, SONG Xiao-wen, WANG Yun

(Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the conflicting problem between each objective function during suspension optimization, multi-objective optimization (MOP) was studied, based on four degrees of freedom model and random road excitation. A method of combining m file and Simulink file was used to do numerical simulation of suspension parameters, stiffness and damping. The relationship between suspension travel and body acceleration with different stiffness or damping was analyzed. A numerical simulation method for solving two-objective function optimization was proposed. The results show that the method can effectively obtain the Pareto optimal solution of suspension travel and body acceleration.

Key words: Pareto optimal; random road; numerical simulation; multi-objective optimize (MOP)

0 引 言

Pareto 最优解指的是在多目标优化过程中,当目标函数互相冲突时,其最优解不再唯一,而是一组解集,即 Pareto 最优解。Pareto 最优在各个领域都得到广泛的应用^[1-3],而在悬架优化方面研究却较少。G. GEORGIU 等通过数值模拟的方式得到加速度、悬架动行程和轮胎动载荷三者之间的相互关系^[4];G. NAKHAIE JAZAR 等在 1/4 数学模型的基础上,得到了加速度和悬架动行程两目标函数下的 Pareto 最优解^[5]。

本研究将建立四自由度半车模型,采用 Matlab 编程

方法进行数值模拟,以前后悬架参数为设计变量,获取车身加速度和悬架动行程两目标函数下 Pareto 最优解。

1 Pareto 最优理论

对于多目标问题:

$$\min_{x \in R} f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x))^T$$

若 $x^* \in R$, 且不存在 $x \in R$, 使得 $f_j(x) \leq f_j(x^*)$ ($j=1, 2, \dots, p$), 则 x^* 为 Pareto 最优解^[6]。

Pareto 最优解集为:

$$\rho^* = \{x^* \in R \mid \neg \exists x \in R, f(x) < f(x^*)\}$$

Pareto 前沿 (Pareto Front) 定义为:

$$\rho f^* = \{u = f(x^*) \mid x^* \in \rho^*\}$$

收稿日期:2009-12-22

基金项目:浙江省科技厅重大科技专项资助项目(2008C01002)

作者简介:饶 江(1986-),男,江西广昌人,主要从事汽车动力学,底盘设计及优化方面的研究. E-mail: raojiang. zju@gmail.com

通信联系人:胡树根,男,教授,硕士生导师. E-mail: hsgdj@zju.edu.cn

对于两目标优化,当目标函数随变量变化趋势相反时,不存在这样的解,它可以同时满足两目标函数都最优。两目标优化的 Pareto 前沿及可行域如图 1 所示。

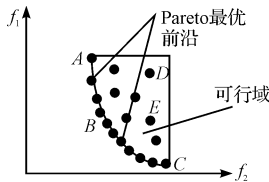


图 1 两目标优化的 Pareto 前沿及可行域

图 1 中, A、B、C 是分布于 Pareto 前沿的(近似) Pareto 最优解,点 D、E 所在区域为基于目标的可行解区域,相对于点 A、B、C,点 D 和 E 所表示的解为劣解(dominated solution)。点 A、B 和 C 对应的 Pareto 前沿上的解均为 Pareto 最优解,对应的解集为 Pareto 最优解集。很明显,如果目标函数 f_1 或 f_2 其中之一不变时, Pareto 前沿上的值在可行域内是最优的^[7]。

2 四自由度模型的建立

由于在低频路面激励下,车辆的左右两个车轮轨迹输入有较高的相关性,且车辆的几何尺寸及质量分布通常为左右对称;在高频路面激励下,车辆所受的激励实际上大多只涉及车轮跳动,对车身运动影响甚微,因此左右车轮相对运动可以忽略^[8-9]。故可将整车模型简化成四自由度半车模型,如图 2 所示。

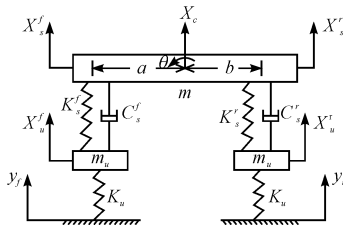


图 2 四自由度半车模型

m —簧上质量; I_p —车身俯仰转动惯量; a 、 b —前后桥到质心的距离; K_s^f 、 K_s^r —前、后悬架刚度; C_s^f 、 C_s^r —前后悬架阻尼; m_u —簧下质量; K_u —轮胎刚度; X_c —车身垂向位移; θ —车身俯仰角; X_u^f 、 X_u^r —前后轴簧下质量位移; y_f 、 y_r —前后轮路面激励。

图 2 中,车辆模型 4 个自由度包括:车身垂向运动、车身俯仰运动、前后轮垂向运动。

根据模型建立其振动方程为:

$$M \ddot{Z} + C \dot{Z} + KZ = PQ \tag{1}$$

式中:

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_u \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} C_s^f + C_s^r & bC_s^r - aC_s^f & -C_s^f & -C_s^r \\ bC_s^r - aC_s^f & b^2C_s^r + a^2C_s^f & aC_s^f & -bC_s^r \\ -C_s^f & aC_s^f & C_s^f & 0 \\ -C_s^r & -bC_s^r & 0 & C_s^r \end{bmatrix};$$
$$K = \begin{bmatrix} K_s^f + K_s^r & -aK_s^f + bK_s^r & -K_s^f & -K_s^r \\ -aK_s^f + bK_s^r & a^2K_s^f + b^2K_s^r & aK_s^f & -bK_s^r \\ -K_s^f & aK_s^f & K_s^f + K_u & 0 \\ -K_s^r & -bK_s^r & 0 & K_s^r + K_u \end{bmatrix};$$
$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ K_u & 0 \\ 0 & K_u \end{bmatrix}; Z = \begin{bmatrix} X_c \\ \theta \\ X_u^f \\ X_u^r \end{bmatrix}; Q = \begin{bmatrix} y_f \\ y_r \end{bmatrix}。$$

3 Matlab 建模及仿真

车辆运动方程可以通过 Matlab/Simulink 建模并仿真,再结合 m 文件便可实现悬架刚度、阻尼变化下车身加速度及悬架动行程的数值模拟。

3.1 路面激励

路面功率谱密度可表示为:

$$S(n) = G_0 n^{-p} \tag{2}$$

式中 G_0 —路面谱密度不平度系数; n —空间频率; p —双对数坐标下谱密度曲线的斜率。

路面输入不平度激励在 Matlab 中可采用积分白噪声法获得。

因此:

$$\dot{Z}_g(t) = 2\pi \sqrt{G_0 u} w(t) \tag{3}$$

$$Z_g(t) = \int_0^t \dot{Z}_g(t) dt = 2\pi \sqrt{G_0 u} \int_0^t w(t) dt$$

式中 $Z_g(t)$ —路面不平度位移; u —车速; $w(t)$ —单位强度为 1 的随机白噪声。

本研究实验车型为越野车,常用车速范围 $(v_1, v_2) = (10, 60)$ km/h,路面等级为一般越野路面,选取 $G_0 = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^3$,其 Simulink 模块如图 3 所示。

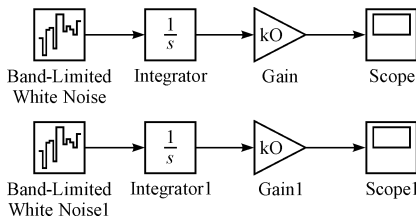


图 3 路面不平度激励模块

获得的路面不平度激励如图 4 所示。

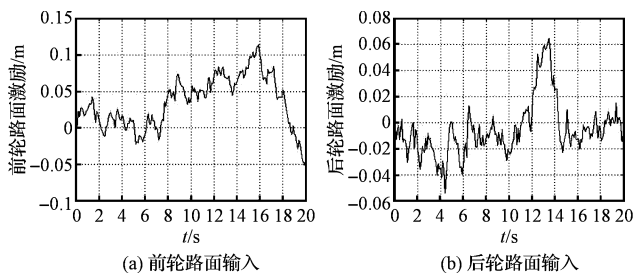


图 4 前后车轮路面不平度激励

3.2 仿真实验

仿真实验的目的在于得到不同刚度、阻尼参数下目标函数值的变化,以构造出可行域区间。

选择车身垂向加速度均方根值、悬架动行程最大值作为目标函数。车身加速度均方根用于衡量悬架舒适性能,而悬架动行程反映车辆通过性。因为实验车型为越野车,悬架受冲击时容易与限位块发生碰撞,因此将悬架动行程最大值作为目标函数之一。

通过 SIM 函数,将 Simulink 模块与 m 文件相结合。程序设计步骤为:

- (1) 定义参数全局变量;
- (2) 采用 for 语句循环实现参数变化;
- (2) 将 m 文件中定义的自变量赋值给 Simulink 进行仿真;
- (3) 每一次 Simulink 仿真结束后,输出加速度及悬架动行程变化量;
- (4) 在 M 文件中计算出加速度均方根值及悬架动行程最大值;
- (5) 保存每次仿真参数及结果。

程序设计流程图如图 5 所示。

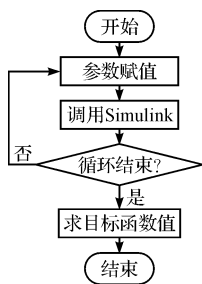


图 5 目标函数数值模拟流程图

3.3 仿真结果分析

实验一:刚度不变,阻尼变化。前悬架刚度 $K_f = 35 \text{ kN/m}$;后悬架刚度 $K_r = 35 \text{ kN/m}$;前悬架阻尼 C_f 每间隔 0.1 取一个值, $C_f = 0:0.1:1.5 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$;后悬架阻尼 $C_r = 0:0.1:1.5 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 。得出阻尼变化下悬架动行程与加速度均方根值变化情况,如图 6 所示。

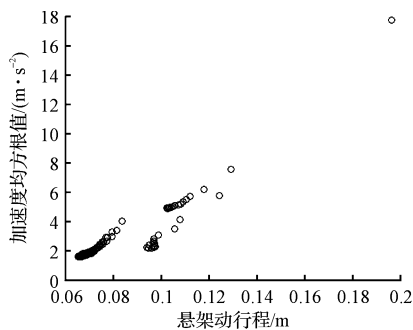


图 6 阻尼变化下动行程与加速度关系

在图 6 中,右上角有一点远离其它点,该点对应的阻尼参数为 $C_f = 0$ 、 $C_r = 0$,即在悬架只有刚度没有阻尼的情况下,车辆的悬架动行程和垂向加速度都变得非常大。

实验二:阻尼不变,刚度变化。 $C_f = 0.6 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$; $C_r = 0.87 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, $K_f = 0:1:35 \text{ kN/m}$; $K_r = 0:1:35 \text{ kN/m}$ 。得出刚度变化下悬架动行程与加速度均方根值变化情况,如图 7 所示。

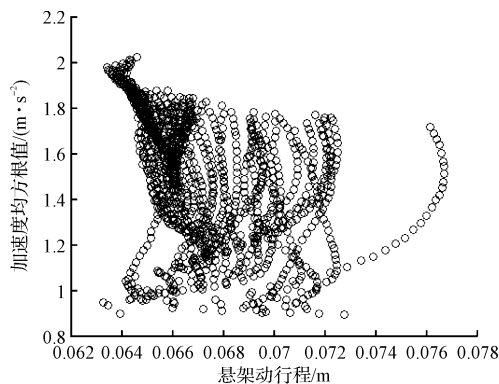


图 7 刚度变化下动行程与加速度关系

在图 7 中,每一组纵向离散点代表了前悬架 K_f 的一个值,即 K_f 不变, K_r 变化时的曲线。因此可得出:当 K_f 变化时,该组曲线,即悬架动行程与加速度曲线,横向平移变化,而当 K_r 变化时,主要是纵向值即垂向加速度变化。而且发现,悬架动行程的变化量(集中在 0.063 ~ 0.073)相比垂向加速度的变化量(0.9 ~ 2)较小,即刚度在 (0, 35) kN/m 变化时,主要影响垂向加速度值。

实验三:刚度、阻尼均变化。 $K_f = 5:2:35 \text{ kN/m}$; $K_r = 5:2:35 \text{ kN/m}$; $C_f = 0:0.2:1.2 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$; $C_r = 0:0.2:1.2 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 。得出此时悬架动行程与加速度均方根值变化情况,如图 8 所示。

由图 8 可得,当悬架刚度在 5 kN/m ~ 35 kN/m ,阻尼在 0 ~ 1.2 $\text{kN} \cdot \text{s/m}$ 范围内变化时,悬架动行程变化范围为 0.063 ~ 0.079 m,垂向加速度均方根值变化范围为 0.8 ~ 2.4 m。图中所有点均为可行域空间可行

解,其最优解在可行域边界上。

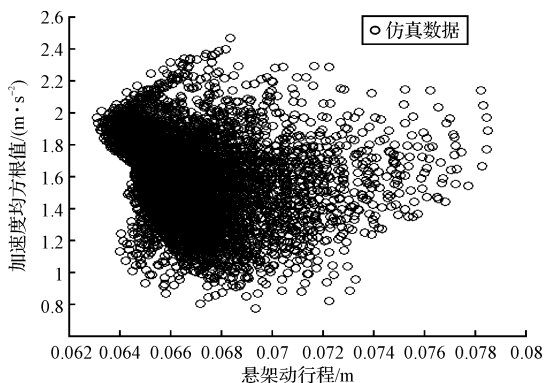


图8 刚度、阻尼变化下动行程与加速度关系

4 Pareto 最优解

从前面分析可知,Pareto 最优解即为可行域边界最优前沿上的解,因此求图8中可行域最优前沿得到的就是 Pareto 最优解。

通过 m 文件编程将前面仿真结果数据进行判定,可得到近似 Pareto 最优前沿。它的端点分别是悬架动行程最小值和加速度均方根最小值点。

程序设计步骤为:

(1) 求出 Pareto 最优前沿首末端点,即最小动行程和最小加速度对应点;

(2) 将横坐标划分为 N 份个间隔,在每个间隔内用 min 函数求出所有间隔内纵坐标最小值及对应参数;

(3) 保存所有小间隔内获得的最小点数据;

(4) 绘制近似 Pareto 最优前沿。

程序流程图如图9所示。

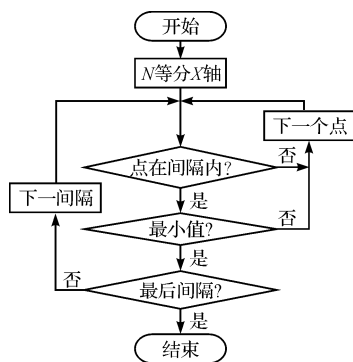


图9 求解 Pareto 最优程序流程图

Pareto 最优解曲线如图10所示,图10中曲线部分为所求的 Pareto 最优前沿,即悬架动行程与车身加速度两目标函数下近似 Pareto 最优解。从图中可以得出,所有曲线上的点在横坐标或纵坐标之一不变时,另一个值达到最小,验证了该曲线即为 Pareto 最优解。

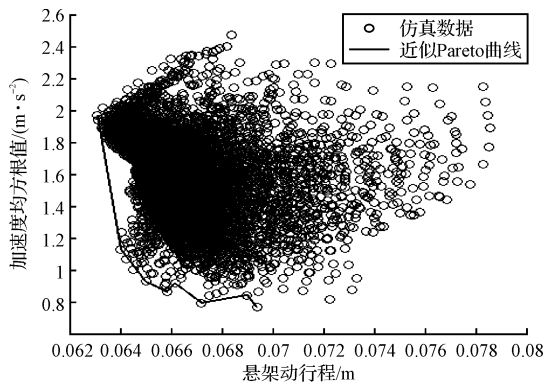


图10 Pareto 最优解曲线

5 结束语

本研究以四自由度半车模型为基础,通过 Matlab 数值模拟方法求解 Pareto 最优解。四自由度模型考虑了车身俯仰运动,以及前后悬架参数的共同作用,提高了优化精度。建立了不同参数下悬架动行程和垂向加速度关系,再通过程序从可行域获取 Pareto 最优前沿,直观准确地描述了可行域与 Pareto 最优解的关系。因此,当优化目标函数互相冲突时,采用该方法可以有效地获得目标函数的优化解集。

参考文献 (References):

- [1] 吴烈,吴向军. 矢量禁忌算法及其在电磁场逆问题中的应用[J]. 机电工程,2008,25(5):51-53.
- [2] 程文渊,崔德刚. 基于 Pareto 遗传算法的复合材料机翼优化设计[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(2):145-148.
- [3] 樊铁成,马孜. Pareto 前沿在航线优化中的应用[C]. 第十六届中国过程控制学术年会暨第四届全国故障诊断与安全性学术会议,2005.
- [4] GEORGIU G, VERROS G, NATSIAVAS S. Multi-objective optimization of quarter-car models with a passive or semi-active suspension system[J]. *Vehicle System Dynamics*,2007,45(26):77-92.
- [5] NAKHAIE JAZAR G, ALKHATIB R, GOLNARAGHI M F. Root mean square optimization criterion for vibration behavior of linear quarter car using analytical methods[J]. *Vehicle System Dynamics*,2006,44(6):477-512.
- [6] 林铨云,董加礼. 多目标优化的方法与理论[M]. 吉林:吉林教育出版社,1992.
- [7] 汪祖柱. 基于演化算法的多目标优化方法及其应用研究[D]. 安徽:安徽大学计算机学院,2005:5.
- [8] 喻凡,林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [9] 李锦灿. 路面不平度作用下汽车动载分析[J]. 机械,2007,34(2):23-25.

[编辑:张翔]