

# 基于 Kriging 模型的驾驶室悬置系统多目标优化\*

蒋荣超<sup>1</sup> 王登峰<sup>1</sup> 吕文超<sup>1</sup> 刘汉光<sup>2</sup> 徐昌城<sup>2</sup>

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 徐工集团江苏徐州工程机械研究院, 徐州 221004)

**摘要:** 为提高某国产自卸车行驶平顺性, 采用多体动力学软件 Adams 建立重型自卸车整车虚拟样机分析模型, 并通过行驶平顺性道路试验验证模型的正确性。选取驾驶室悬置刚度和阻尼参数为设计变量, 以驾驶室地板垂向和座椅支撑面俯仰加权加速度均方根为优化目标, 以驾驶室前后悬置动挠度为约束条件, 结合最优拉丁方试验设计拟合 Kriging 近似模型, 利用粒子群优化算法对自卸车行驶平顺性进行多目标优化, 得到 Pareto 最优解集, 并选取一个最优解进行整车行驶平顺性实车试验。结果表明, Kriging 近似模型具有较高的拟合精度, 可大幅提高自卸车行驶平顺性优化效率; 基于 Kriging 近似模型的多目标优化结果可通过权重系数对各个优化目标进行权衡, 有效改善了自卸车行驶平顺性。

**关键词:** 驾驶室悬置系统 Kriging 近似模型 行驶平顺性 粒子群优化

**中图分类号:** U461.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0344-07

## Multi-objective Optimization of Cab Suspension System Based on Kriging Model

Jiang Rongchao<sup>1</sup> Wang Dengfeng<sup>1</sup> Lü Wenchao<sup>1</sup> Liu Hanguang<sup>2</sup> Xu Changcheng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Jiangsu Xuzhou Engineering Machinery Institute, XCMG Group, Xuzhou 221004, China)

**Abstract:** In order to improve the ride comfort of a domestic self-dumping truck, a virtual prototype vehicle model was built through multi-body dynamics software Adams. And vehicle road test of ride comfort was implemented to verify the validity of this model. Taking the suspension stiffness and damp parameters of cab suspension as design variables, the root mean square (RMS) values of floor's vertical and seat's pitching weighted acceleration as optimization objectives, and the deflection of front and rear cab suspension as constraints, the Kriging approximation models were constructed based on optimal Latin hypercube design. On this basis, multi-objective optimization for self-dumping truck ride comfort was performed with particle swarm optimization algorithm, and the Pareto optimal set was obtained. Furthermore, a vehicle road test of ride comfort was conducted by using one of the optimal solutions. The results indicated that the Kriging approximation model with high fitting accuracy could significantly improve the efficiency of ride comfort optimization of self-dumping truck according to different weighting schemes of optimization objectives. The road test results showed that the overall weighted acceleration RMS values on the cab floor of the improved self-dumping truck were greatly reduced with a maximal reduction of 16.5%.

**Key words:** Cab suspension system Kriging approximation model Ride comfort Particle swarm optimization

收稿日期: 2014-03-10 修回日期: 2014-05-02

\*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAG03B01)和吉林省科技发展计划资助项目(20086007)

作者简介: 蒋荣超, 博士生, 主要从事汽车系统动力学与控制研究, E-mail: jrhc123@126.com

通讯作者: 王登峰, 教授, 博士生导师, 主要从事汽车系统动力学与控制研究, E-mail: caewdf@jlu.edu.cn

## 引言

近年来,消费者对重型自卸车行驶平顺性的要求日益增高,驾驶室悬置系统作为影响重型自卸车行驶平顺性的重要因素也受到广泛关注,如何对其参数进行匹配优化以改善驾驶员乘坐舒适性,成为驾驶室开发设计中的重要课题<sup>[1-3]</sup>。

国内外学者对车辆行驶平顺性进行了大量的研究,并取得了很多有价值的成果<sup>[4-8]</sup>。但在上述研究中,主要针对驾驶室垂向振动进行优化研究,而对俯仰振动考虑较少。自卸车驾驶室垂向振动和俯仰振动是影响驾驶员乘坐舒适性的关键因素<sup>[9-10]</sup>,并且相互之间耦合影响,单独对其中一个方向的性能进行优化通常会影响到另一个方向的性能。因此,综合考虑自卸车驾驶室垂向和俯仰振动,采用多目标优化算法进行驾驶室悬置系统平顺性优化研究,能获得更准确合理的优化结果,具有重要的工程实用价值。

在进行平顺性优化分析时,通常将整车虚拟样机仿真模型直接与优化算法耦合,优化迭代过程中仿真模型计算时间较长,致使优化效率比较低<sup>[11]</sup>。此外,优化过程中由于设计变量取值不合理、仿真参数变化等因素,使得仿真模型单次计算失败,并导致整个优化过程终止,消耗大量的计算时间。因此,用描述设计变量和响应之间关系的近似模型进行优化分析,可以显著提高优化效率,在工程实际中有广泛的应用前景。

本文以某国产重型自卸汽车驾驶室悬置系统为研究对象,建立带有全浮式驾驶室的重型自卸车虚拟样机动力学模型,并通过自卸车行驶平顺性道路试验验证所建整车模型的正确性。采用最优拉丁方试验设计拟合得到整车虚拟样机分析模型的 Kriging 近似模型,以车速为 60 km/h 时驾驶室座椅地板垂向和座椅支撑面俯仰角加权加速度均方根为优化目标,采用粒子群算法对整车行驶平顺性进行多目标优化,探讨影响重型自卸车行驶平顺性的驾驶室悬置系统刚度和阻尼参数的最优匹配结果,为驾驶室开发设计过程中悬置系统刚度和阻尼特性参数的确定提供技术依据。

## 1 整车虚拟样机模型

### 1.1 整车虚拟样机模型的建立

建模车辆为某国产 6×4 重型自卸汽车,其主要参数如表 1 所示。

利用 Adams 软件建立自卸车整车虚拟样机模型时,首先建立驾驶室、车架、货箱、前悬架、后平衡

表 1 整车技术参数

Tab.1 Vehicle technique parameters

参数	数值
满载质量/kg	24 995
满载前轴荷/kg	6 995
满载中、后轴荷/kg	9 000, 9 000
轴距/mm	4 000 + 1 350
前轮轮距/mm	2 047
后轮轮距/mm	1 804
前钢板弹簧刚度系数/(N·mm <sup>-1</sup> )	530
后钢板弹簧刚度系数/(N·mm <sup>-1</sup> )	4 470
轮胎型号	12.00 R20

悬架、动力总成、转向系和轮胎等子系统模型,其中钢板弹簧柔体模型采用离散体的概念建立,轮胎模型采用 Pacejka 教授提出的“魔术公式”轮胎模型,轮胎力学参数由平板式轮胎试验台测取<sup>[12]</sup>。然后按照各子系统间的拓扑关系,将各子系统通过通讯器完成相互之间的连接装配,最后得到自卸车整车虚拟样机动力学模型如图 1 所示。



图 1 自卸车多体动力学模型

Fig.1 Multi-body dynamics model of self-dumping truck

### 1.2 整车模型试验验证

在满载状态下使自卸车虚拟样机模型分别以 40、50、60、70、80 km/h 的车速在构建的 B 级路面上行驶,提取驾驶室各测点的振动加速度响应,进行整车行驶平顺性的仿真计算,并与实车试验结果进行对比验证。

按照 GB/T 4970—2009《汽车平顺性试验方法》附录 A 中规定的加权加速度均方根计算方法,计算出驾驶室座椅地板处垂向加权加速度均方根随车速变化的仿真和试验结果如图 2 所示。

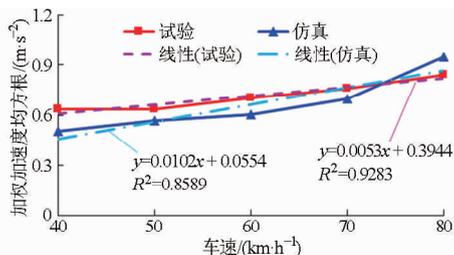


图 2 驾驶室垂向加权加速度均方根随车速变化曲线

Fig.2 Vertical weighted acceleration RMS vs vehicle speed

从图 2 中可以看出,随着车速的增加座椅地板

处垂向振动加权加速度均方根的仿真和试验结果均呈逐渐增大的趋势;两者的变化趋势一致,数值上略有差别,最大相对误差小于14.8%,从而验证了所建自卸车整车虚拟样机模型的正确性,能够用于驾驶室悬置系统优化匹配研究。

## 2 Kriging 近似模型

### 2.1 设计变量

研究表明驾驶室前、后悬置的弹性和阻尼元件对自卸车行驶平顺性有重要影响,选择其刚度和阻尼的比例系数作为设计变量,确定取值范围如表2所示。

表2 设计变量取值范围

Tab.2 Value range of design variable

设计变量	初始值	下限值	上限值
前悬置刚度比例系数 $K_1$	1.0	0.8	1.2
后悬置刚度比例系数 $K_2$	1.0	0.8	1.2
前悬置阻尼比例系数 $C_1$	1.0	0.8	1.2
后悬置阻尼比例系数 $C_2$	1.0	0.8	1.2

### 2.2 最优拉丁方试验设计

在拟合 Kriging 近似模型时,选择合理分布的采样点可以大幅提高近似模型的精度。最优拉丁方试验设计在设计空间内均匀随机采样,能以较少的样本获取较高的计算精度,充分体现设计空间的特征<sup>[12]</sup>,能够拟合出高精度的 Kriging 近似模型。

根据最优拉丁方试验设计方法在每个设计变量取值范围内均匀随机采样,参考设计变量的取值情况和拟合精度要求,选取33个样本点,得到  $4 \times 33$  的试验设计矩阵如图3所示。

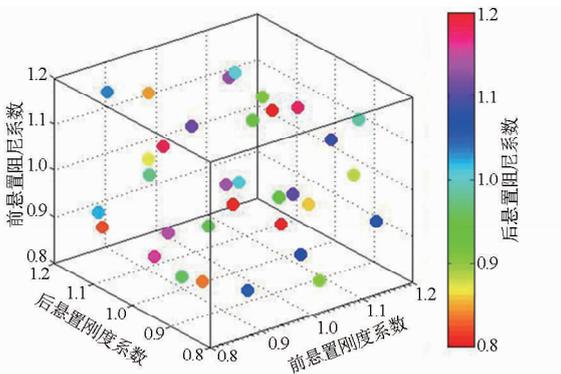


图3 最优拉丁方试验设计矩阵

Fig.3 Optimal Latin hypercube design matrix

### 2.3 Kriging 近似模型

Kriging 近似模型是全局近似模型和局部偏差的组合<sup>[13-14]</sup>,其表达式为

$$y(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + Z(\mathbf{x}) \quad (1)$$

式中  $\mathbf{x}$ ——设计变量

$y(\mathbf{x})$ ——待拟合的响应函数

$f(\mathbf{x})$ ——多项式响应面近似模型,表示设计空间的全局近似模型,一般被简化为常数  $\beta$

$Z(\mathbf{x})$ ——提供全局模型的局部偏差

$Z(\mathbf{x})$ 使得 Kriging 模型可在  $n$  个样本点做插值,可表示为期望为零、方差为  $\sigma^2$  和协方差如公式(2)的高斯静态随机过程。

$Z(\mathbf{x})$ 的协方差矩阵表示其局部偏离的程度,其表达式为

$$\text{Cov}[Z(\mathbf{x}_i), Z(\mathbf{x}_j)] = \sigma^2 \mathbf{R}[R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)] \quad (2)$$

式中  $\mathbf{R}$ ——相关矩阵,是对角线上均为1的  $n \times n$  阶对称矩阵

$R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ —— $n$  个采样点中任意两个样本点  $\mathbf{x}_i$  和  $\mathbf{x}_j$  的相关函数

$R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ 可采用高斯相关函数表示为

$$R(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \exp\left(-\sum_{k=1}^m \theta_k |x_{ik} - x_{jk}|^2\right) \quad (3)$$

式中  $m$ ——设计变量个数

$\theta_k$ ——用于拟合近似模型的未知相关系数

$x_{ik}, x_{jk}$ ——样本点  $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$  的第  $k$  个元素

确定相关函数之后,  $y(\mathbf{x})$  的近似响应  $\hat{y}$  在未知点  $\mathbf{x}$  的估计值为

$$\hat{y} = \hat{\beta} + \mathbf{r}^T(\mathbf{x}) \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{f}\hat{\beta}) \quad (4)$$

式中  $\mathbf{y}$ —— $n$  个样本点的响应列向量

$\mathbf{f}$ ——长度为  $n$  的单位列向量

$\mathbf{r}^T(\mathbf{x})$ —— $n$  个样本点与未知点  $\mathbf{x}$  所组成的相关矢量

$\mathbf{r}(\mathbf{x})$ 的表达式为

$$\mathbf{r}(\mathbf{x}) = [R(\mathbf{x}, \mathbf{x}_1), R(\mathbf{x}, \mathbf{x}_2), \dots, R(\mathbf{x}, \mathbf{x}_n)] \quad (5)$$

$\hat{\beta}$ 的计算表达式为

$$\hat{\beta} = (\mathbf{f}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{f})^{-1} \mathbf{f}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \quad (6)$$

方差估计值为

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{(\mathbf{y} - \mathbf{f}\hat{\beta})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - \mathbf{f}\hat{\beta})}{n} \quad (7)$$

用于拟合 Kriging 模型  $\theta_k$  的极大似然估计为

$$\max_{\theta_k > 0} \Phi(\theta_k) = -\frac{n \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln |\mathbf{R}|}{2} \quad (8)$$

通过求解  $k$  维非线性无约束优化问题,就可以得到最优拟合的 Kriging 近似模型。

采用车速为 60 km/h 时驾驶室地板垂向和座椅俯仰角加权加速度均方根来评价整车行驶平顺性,建立响应关于驾驶室前后悬置刚度和阻尼系数的 Kriging 近似模型,图4为部分 Kriging 近似模型。由图4可以看出, Kriging 近似模型能够反映局部和全局特点,近似面质量较高,能够提供更好的全局预

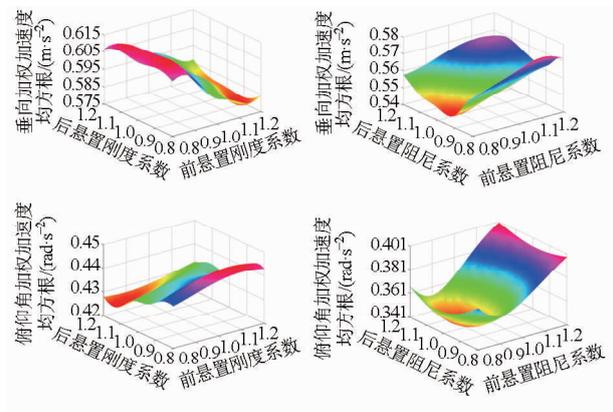


图4 Kriging 近似模型

Fig.4 Kriging approximate model

测,避免局部收敛。

### 2.4 模型精度检验

可通过决定系数  $R^2$  检验 Kriging 模型的精度,其表达式为

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^h (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^h (y_i - \bar{y})^2} \quad (9)$$

式中  $h$ ——用于检验模型精度的数据点数量

$\hat{y}_i$ ——第  $i$  个响应的近似模型预测值

$y_i$ ——第  $i$  个响应的仿真分析真实值

$\bar{y}$ ——平均值

决定系数  $R^2$  的取值范围是  $[0, 1]$ , 其值越接近于 1, 说明近似模型可信度越高。额外选取 23 个样本点来检验 Kriging 近似模型的精度, 得到的结果如图 5 所示。从图 5 中可见, 决定系数  $R^2$  分别为 0.9605、0.9818, 说明 Kriging 模型满足精度要求。

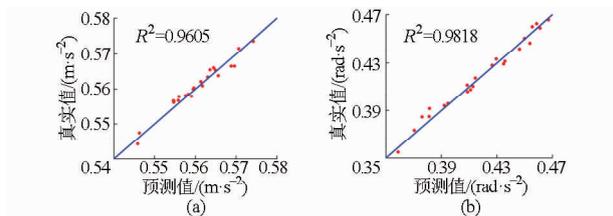


图5 Kriging 模型精度验证

Fig.5 Precision validation of Kriging model

(a) 垂向加权 (b) 俯仰角加权

## 3 自卸车行驶平顺性多目标优化

### 3.1 粒子群优化算法

粒子群优化 (Particle swarm optimization, PSO) 算法是由 Kennedy 等于 1995 年提出的一种进化型优化方法, 其基本思想源于对鸟群和鱼群等群体捕食行为的研究。该算法采用简单的速度位移模型, 通过群体中个体之间的协作和信息共享产生的群体智能来寻找最优解。由于其结构简单、收敛速度快、

易实现等特点, 在工程实际中得到广泛应用<sup>[15]</sup>。

粒子群算法将优化问题的解定义为粒子, 通过位移矢量和速度矢量描述, 以随机的方式对粒子进行初始化, 其寻优的基本过程可以表示为

$$\mathbf{V}_i^{q+1} = \omega \mathbf{V}_i^q + c_1 r_1 (\mathbf{P}_i^q - \mathbf{x}_i^q) + c_2 r_2 (\mathbf{G}^q - \mathbf{x}_i^q) \quad (10)$$

$$\mathbf{x}_i^{q+1} = \mathbf{x}_i^q + \mathbf{V}_i^{q+1} \quad (11)$$

式中  $\omega$ ——惯性因子

$r_1, r_2$ ——(0, 1) 区间服从均匀分布的随机数

$c_1, c_2$ ——学习因子  $q$ ——迭代次数

$\mathbf{x}_i^q$ ——迭代  $n$  次时粒子  $i$  的空间位置

$\mathbf{V}_i^q$ ——迭代  $n$  次时粒子  $i$  的速度

$\mathbf{P}_i^q, \mathbf{G}^q$ ——粒子从初始到当前迭代次数搜索产生的个体极值和全局极值

### 3.2 优化分析模型

采用驾驶室地板垂向和座椅俯仰角加权加速度均方根为整车行驶平顺性优化目标, 对驾驶室悬置系统进行优化的数学模型可描述为

$$\begin{cases} \min (a_{wz}, a_{wp}) \\ \text{s. t. } d_f \leq 25 \\ d_r \leq 41 \\ 0.8 \leq f(k_f, k_r) \leq 1.2 \\ 0.8 \leq f(c_f, c_r) \leq 1.2 \end{cases} \quad (12)$$

式中  $a_{wz}$ ——车速为 60 km/h 时驾驶室地板振动的垂向加权加速度均方根

$a_{wp}$ ——车速为 60 km/h 时座椅支撑面俯仰角加权加速度均方根

$d_f, d_r$ ——驾驶室前、后悬置动挠度

$f(k_f, k_r)$ ——驾驶室前、后悬置刚度比例系数

$f(c_f, c_r)$ ——驾驶室前、后悬置阻尼比例系数

将所建自卸车整车虚拟样机模型集成到多学科优化分析平台 Isight 软件环境中, 并利用 Matlab 软件计算平顺性评价指标  $a_{wz}$  和  $a_{wp}$ , 建立基于 Kriging 近似模型的自卸车行驶平顺性粒子群多目标优化分析模型, 如图 6 所示。

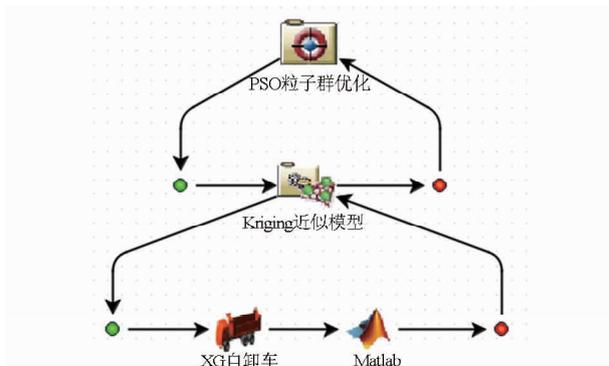


图6 多目标优化分析模型

Fig.6 Multi-objective optimization model

### 3.3 优化结果分析

设置粒子群优化算法的粒子群规模为40,迭代代数数为50,优化得到的 Pareto 前沿如图7所示。

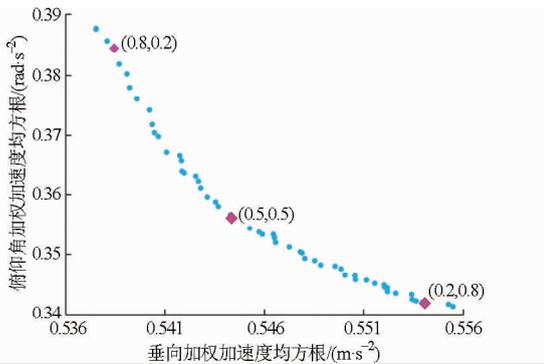


图7 Pareto 前沿

Fig.7 Pareto frontier

从图7中可以看出,在随机路面激励下驾驶室垂向振动和俯仰振动两个目标函数之间是相互矛盾的,其中一个目标函数达到最优要以牺牲另一个目标函数为代价。依据优化偏好和工程应用要求,分别选取不同权重系数下的3个最优解(图7),其优化结果如表3所示。其中第1个解侧重优化驾驶室垂向振动特性,第2个解兼顾驾驶室垂向和俯仰振动特性,第3个解偏重优化驾驶室俯仰振动特性。

表3 不同权重系数下的优化结果

Tab.3 Optimization results of different weights

$\omega$	$K_1$	$K_2$	$C_1$	$C_2$	$a_{wz}/$ ( $m \cdot s^{-2}$ )	$a_{wp}/$ ( $rad \cdot s^{-2}$ )	$d_f/$ mm	$d_r/$ mm
—	1.0	1.0	1.0	1.0	0.596	0.436	10.7	7.9
(0.8, 0.2)	1.01	0.96	0.93	0.82	0.538	0.390	10.9	8.6
(0.5, 0.5)	1.10	0.87	0.94	0.86	0.544	0.356	12.0	7.8
(0.2, 0.8)	1.14	0.86	0.92	1.01	0.554	0.342	12.1	7.0

由表3中可知,根据优化目的不同,可以通过权重系数制定优化决策;优化结果中驾驶室前后悬置动挠度变化不大,远小于限位行程,满足约束条件,驾驶室地板垂向和座椅支撑面俯仰角加权加速度均方根都有所降低,说明优化结果可提高整车行驶平顺性。

### 3.4 实车试验

选取表3中第2组优化结果为驾驶室悬置系统改进方案,改进后驾驶室悬置系统的刚度和阻尼参数如表4所示。表中 $K_f$ 、 $K_r$ 分别为优化前、后驾驶室前悬置和后悬置刚度比例系数, $C_f$ 、 $C_r$ 分别为优化前、后驾驶室前悬置和后悬置阻尼比例系数。

按照改进方案重新设计制造驾驶室前后悬置螺旋弹簧和减振器,并装配整车如图8所示。

为验证自卸车行驶平顺性的改进效果,进行了自卸车行驶平顺性试验,通过驾驶员座椅地板处加

速度传感器(图9)采集3个方向的振动加速度响应,并对测得的时域加速度信号进行变换,得到频域的加速度功率谱,其中车速为60 km/h时座椅地板处垂向振动加速度功率谱如图10所示。

表4 优化前后的驾驶室悬置特性参数

Tab.4 Cab suspension parameters before and after optimization

参数	$K_f/$ ( $N \cdot mm^{-1}$ )	$K_r/$ ( $N \cdot mm^{-1}$ )	$C_f/$ ( $N \cdot s \cdot mm^{-1}$ )	$C_r/$ ( $N \cdot s \cdot mm^{-1}$ )
初始值	46.50	42.00	5.29/7.54	4.87/6.91
优化值	51.15	36.54	4.97/7.09	4.19/5.94
变化率/%	10	-13	-6	-14

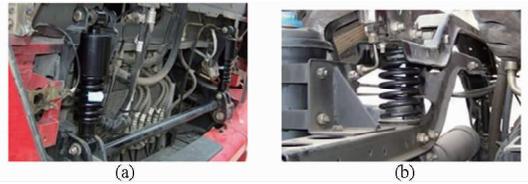


图8 改进后驾驶室前后悬置弹簧和减振器

Fig.8 Improved front and rear cab suspensions

(a) 前悬置 (b) 后悬置



图9 座椅地板处加速度传感器安装位置图

Fig.9 Acceleration sensor on cab floor

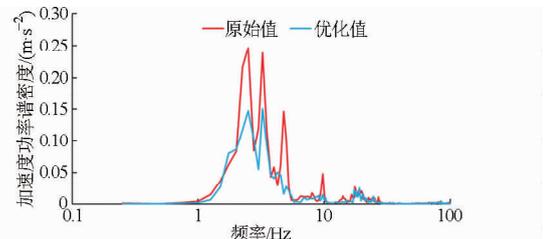


图10 垂向加速度功率谱密度曲线

Fig.10 Power spectral density of vertical acceleration

从图10中可以看出,在0~10 Hz的低频范围内,优化后的驾驶室座椅地板处垂向加速度功率谱密度的主要峰值均有所下降,说明驾驶室悬置系统改进后,驾驶室地板垂向振动明显降低。

参照GB/T 4970—2009对上述得到的驾驶室座椅地板处各个方向振动加速度功率谱密度进行倍频程分析,得到1/3倍频带加权加速度均方根 $a_w$ 为

$$a_w = \left( \int_{0.5}^{80} w^2(f) G_a(f) df \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

式中  $w(f)$ ——频率加权函数

$G_a(f)$ ——加速度功率谱密度函数

驾驶室座椅地板处频率加权函数可表示为

$$w_k(f) = \begin{cases} 0.5 & (0.5 \leq f \leq 2) \\ f/4 & (2 < f \leq 4) \\ 1 & (4 < f \leq 12.5) \\ 12.5/f & (12.5 < f \leq 80) \end{cases} \quad (14)$$

驾驶室座椅地板处总加权加速度均方根计算式

为

$$a_v = [(0.25a_{wx})^2 + (0.25a_{wy})^2 + (0.4a_{wz})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式中  $a_{wx}$ ——纵向加权加速度均方根

$a_{wy}$ ——横向加权加速度均方根

$a_{wz}$ ——垂向加权加速度均方根

图 11 给出了不同试验车速下驾驶员座椅地板处总加权加速度均方根优化前后的对比结果。

从图 11 中可以看出,随着车速的增加,座椅地板处总加权振动加速度均方根呈逐渐增大趋势;优化后总加权加速度均方根有所降低,最大降幅为 16.5%,整车行驶平顺性得到显著改善。

## 4 结论

(1)以某国产重型自卸汽车为研究对象,建立了

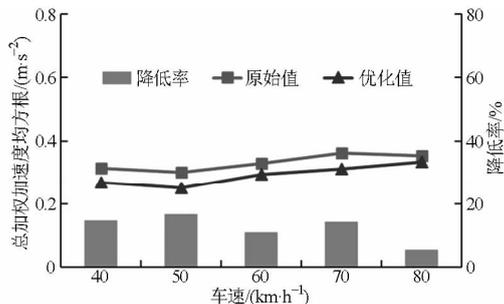


图 11 总加权加速度均方根随车速变化曲线

Fig. 11 Overall weighted acceleration RMS vs speed

带有全浮式驾驶室的整车虚拟样机分析模型,并通过行驶平顺性实车道路试验验证了所建模型的正确性。

(2)采用最优拉丁方试验设计方法,选取能够充分体现设计空间特征的样本点,拟合得到了具有全局和局部统计特性的 Kriging 近似模型。

(3)基于近似模型技术,利用粒子群多目标优化算法对驾驶室悬置系统进行了行驶平顺性优化研究,得到了 Pareto 最优解集。

(4)通过确定权重系数对 Pareto 最优解集进行了决策分析,并选取一个最优解进行整车行驶平顺性实车试验,结果表明优化后驾驶室地板总加权加速度均方根有所降低,最大降幅为 16.5%,整车行驶平顺性得到显著提升。

## 参 考 文 献

- 陈静,曹晓琳,王登峰,等. 重型商用车驾驶室空气悬置系统的匹配优化[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(5):1125-1129.  
Chen Jing, Cao Xiaolin, Wang Dengfeng, et al. Matching and optimization of heavy commercial vehicle cab air suspension system[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(5): 1125-1129. (in Chinese)
- 李鹏飞,马力,何天明,等. 商用车驾驶室悬置隔振仿真研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(6): 740-743.  
Li Pengfei, Ma Li, He Tianming, et al. A simulation study on vibration isolation of cab mounts in a commercial vehicle[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(6): 740-743. (in Chinese)
- 米承继,谷正气,伍文广,等. 基于参数辨识的矿用自卸车平顺性优化[J]. 机械工程学报,2012,48(6): 109-115.  
Mi Chengji, Gu Zhengqi, Wu Wenguang, et al. Mining dump truck ride optimization based on parameter identification[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(6): 109-115. (in Chinese)
- Marcu F M. Semiactive cab suspension control for semitruck applications[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.
- Wang Kaiyan, Shi Yuqian, Yang Changhai, et al. Vibration modal analysis and energy decoupling optimization of commercial vehicle cab suspension system[C]//2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC), IEEE, 2010, 1: 136-140.
- 杨荣山,袁仲荣,黄向东,等. 车辆操纵稳定性及平顺性的协同优化研究[J]. 汽车工程, 2009, 31(11): 1053-1055.  
Yang Rongshan, Yuan Zhongrong, Huang Xiangdong, et al. A study on the cooperative optimization of vehicle controllability/stability and ride comfort[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(11): 1053-1055. (in Chinese)
- 刘大维,蒋荣超,陈焕明,等. 重型车辆三维随机路面道路友好性仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 16-21.  
Liu Dawei, Jiang Rongchao, Chen Huanming, et al. Simulation of road-friendliness of heavy vehicle on 3-D random road[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 16-21. (in Chinese)
- 陈一锴,何杰,张卫华,等. 多轴重型货车悬架系统改进天棚控制策略[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 16-22.  
Chen Yikai, He Jie, Zhang Weihua, et al. Modified skyhook damping control of multi-axial heavy truck suspension system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 16-22. (in Chinese)
- 于学华,丁康. 汽车俯仰与跳动复合运动的分析[J]. 噪声与振动控制, 2005, 25(4): 26-29.  
Yu Xuehua, Ding Kang. Analysis of the pitching and bouncing motion of the car[J]. Noise and Vibration Control, 2005, 25(4):

26 - 29. (in Chinese)

- 10 张军峰,贺岩松,杨海威,等. 基于俯仰角加速度的驾驶室悬置系统修改[J]. 中国机械工程,2012,23(18): 2258 - 2262.  
Zhang Junfeng, He Yansong, Yang Haiwei, et al. Modification of cab suspension system based on pitch angular acceleration[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(18): 2258 - 2262. (in Chinese)
- 11 李伟平,张宝珍,王磊,等. 基于 Kriging 近似模型的某轿车前悬架不确定性优化[J]. 中国机械工程, 2012, 23(24): 3006 - 3012.  
Li Weiping, Zhang Baozhen, Wang Lei, et al. Front suspension uncertainty optimization of a car based on Kriging approximation model[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(24): 3006 - 3012. (in Chinese)
- 12 王登峰,郝赫,刘盛强,等. 车架弹性对重型载货汽车行驶平顺性的影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 7 - 12.  
Wang Dengfeng, Hao He, Liu Shengqiang, et al. Frame flexibility's effect on ride comfort of heavy-duty truck[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(12): 7 - 12. (in Chinese)
- 13 Ye K Q, Li W, Sudjianto A. Algorithmic construction of optimal symmetric Latin hypercube designs[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2000, 90(1): 145 - 159.
- 14 Simpson T W, Mauery T M, Korte J J, et al. Kriging models for global approximation in simulation-based multidisciplinary design optimization[J]. AIAA Journal, 2001, 39(12): 2233 - 2241.
- 15 王维博. 粒子群优化算法研究及其应用[D]. 成都:西南交通大学, 2012.  
Wang Weibo. Research on particle swarm optimization algorithm and its application [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)