

# 人体生物力学模型的驾驶舒适度仿真研究

李晓玲<sup>1,2</sup>, 张鄂<sup>2</sup>, 陆长德<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学工业设计研究所, 710072, 西安; 2. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 为了高效地评价人在驾驶汽车过程中的舒适性, 由 Adams/LifeMode 软件建立了坐姿人体-座椅系统的生物力学模型. 应用 Matlab 工具编程, 得出了 GB7031 规定的 B、C 级公路的功率谱函数, 并转换成易于加载的时域信号. 通过加权计算, 得到了在典型行驶速度下人体关键部位的振动加速度响应, 进而提出了全身振动以及人体局部振动的舒适性仿真评价方法. 采用 Adams/LifeMode 软件, 建立了有别于传统弹簧-阻尼-质量模型的人体生物力学模型, 实现了乘坐舒适性评价的计算过程, 为研究人体局部振动舒适性提供了理论基础.

**关键词:** 振动; 生物力学; 驾驶舒适度; 仿真

**中图分类号:** TB18; R741.044 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)05-0556-05

## Driving Comfort Simulation Based on Human Biomechanics Model Under Vibration

LI Xiaoling<sup>1,2</sup>, ZHANG E<sup>2</sup>, LU Changde<sup>1</sup>

(1. Institute of Industrial Design, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To evaluate human comfort effectively during automobile driving, the driving comfort simulation and evaluation are carried out under vibration. A biomechanics model of human body and seat is established based on Adams/LifeMode, and the power spectral density functions for grade B and C roads are gained and transformed into the time-domain signals that gets loaded easily. The acceleration of vibration response of the key parts of a human body is computed at typical running speeds. The simulation evaluation method of whole body vibration comfort as well as the calculation method of partial human body vibration comfort is proposed. It is an instructive attempt to realize the biomechanics modeling of human body and seat and human body comfort evaluation based on Adams/LifeMode, to differ from traditional spring-damping-mass model system.

**Keywords:** vibration; biomechanics; driving comfort; simulation

汽车行驶过程中会产生振动, 当振动达到一定的程度时, 将会使汽车内的乘员感到不舒适、疲劳甚至危及人体健康. 国内外已在该领域进行了有关研究, 如单自由度和多自由度模型理论的建立, 将人体表示为弹簧-阻尼-质量模型<sup>[1-4]</sup>, 这在一定程度上能够满足研究需要, 但由于人体组织结构及所处环境的复杂性, 分析动态情况下的人体响应往往显得不够准确.

本文采用生物力学专用建模器 LifeMode 软件来构建人体模型. 通过对不同路面情况的仿真模拟, 研究真实路面在振动条件下对人体驾驶舒适度的影响, 同时对人体不同部位振动影响因子进行了推导, 为研究人体局部振动的舒适性奠定了基础.

### 1 振动状态下的舒适性评价方法

汽车在行驶过程中, 由于路面的凹凸不平、车

速、方向、轮胎、发动机等都会引起汽车的振动,当振动达到一定的程度时,将会使汽车内的乘员感到不舒适、疲劳甚至危及人体健康。因此,汽车行驶过程的平顺性<sup>[5]</sup>直接影响着乘坐者的舒适度评价。

影响振动效应的主要因素是频率、振幅、加速度以及人体接触振动的时间和方式,1981年,国际标

准化组织提出了评价振动对人体影响的4个要素,即振动强度、振动频率、振动方向和接触振动的持续时间(暴露时间)。1997年又发布了ISO2631-1997人承受全身振动的评价,其中给出了舒适性评价的近似法:用垂直方向的总加权加速度均方根 $a_w$ 来评价舒适性<sup>[6]</sup>(见表1)。

表1 加速度、人的主观感觉和汽车乘坐舒适性对应表

| $a_w/\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$ | $<0.32$ | $0.32 \sim 0.63$ | $0.50 \sim 1.00$ | $0.80 \sim 1.60$ | $1.25 \sim 2.50$ | $>2.00$ |
|-------------------------------------|---------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------|
| 人的主观感觉                              | 没有不舒适   | 稍有不舒适            | 有些不舒服            | 不舒适              | 很不舒适             | 极不舒适    |
| 汽车乘坐舒适性                             | 1.0     | 0.8              | 0.6              | 0.4              | 0.2              | 0.0     |

总加权加速度的均方根值按下式计算

$$a_w = [(1.4a_{xw})^2 + (4a_{yw})^2 + (a_{zw})^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中: $a_{xw}$ 、 $a_{yw}$ 、 $a_{zw}$ 分别为各轴向( $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向)的加权加速度均方根值。此项评价方法将作为对振动状态下舒适性仿真分析的主要依据。

## 2 驾驶舱人机模型的构建

LifeMode软件可以构造从局部到整体的人体结构模型,包括骨骼、肌肉、韧带、关节等子系统,由于人骨在受力下变形非常小,因此在许多情况下允许将骨骼简化为刚性体进行分析<sup>[6]</sup>。人体关节可以简化为具有一定自由度的三轴铰链模型,本文在这里选择骨骼模型创建方式中的PeopleSize来设定人群的形态特征,以95百分位的中国男子Jack人体模型为例进行创建。定义关节模型为弹簧-阻尼类型,关节刚度为17.512 kN/m,极限刚度为1 kN/m,阻尼系数为1 751.2。在LifeMode软件环境下生成人体的118个肌群,每个肌群同时具有肌肉的黏弹特性和滞后特性的性质,设置肌肉模型的比例系数为100%,最大肌肉应力载荷为15 kN/m<sup>2</sup>。

由于主要是研究人体的驾驶姿势,而驾驶舱的座椅部分是人体和汽车直接接触的部件,影响其动态特性的因素有座垫的刚度、阻尼以及座椅刚架结构的动态特性<sup>[7]</sup>,因此刚度参数与阻尼参数就成为影响整个座椅系统性能的主要因素。由于人-座垫间的接触刚度范围约在8~12 kN/m,阻尼为0.1~0.4 kN·s/m,为了尽可能减少阻尼的影响,更直接地反映路面振动对人体的影响,本文定义接触刚度为10 kN/m,阻尼为0.1 kN·s/m。将座椅模型与人体模型组合,通过在矢状面、额状面和水平面关节角度的设置来定义人体的初始姿势,如图1所示。

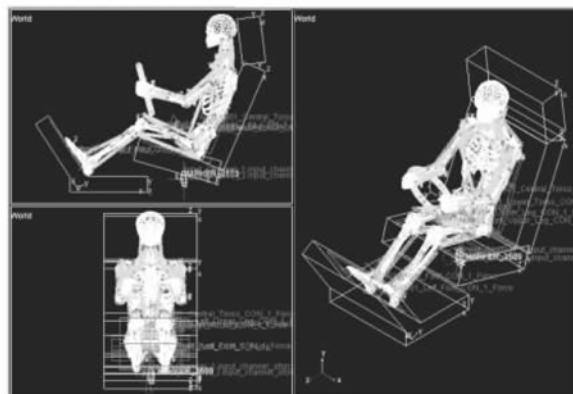


图1 人体-座椅的组合模型

## 3 随机振动激励的仿真模拟

引起汽车振动的原因很多,由于本文研究的主要目的是探讨人体生物力学模型在振动条件下的动力学响应特性,因此为方便计算起见,本文主要考虑由路面不平度引起的车体振动,且暂不考虑车架、座椅悬架等系统对振动的传递影响,振动激励将直接加载在座椅的下面。

### 3.1 随机路面的仿真生成

根据GB7031的规定,按照功率谱密度 $G_q(n)$ ,可以把路面分成8级。因此,在选定一定的路面等级的情况下,通过对路面不平度空间功率谱密度、时间功率谱密度、Adams软件对时间功率谱反变换的研究,利用Matlab软件编制了相应的路面程序。应用这个程序可以得到任意等级路面和速度下的道路文件,即

$$G_q(n) = G_q(n_0)(n/n_0)^{-w} \quad (2)$$

式中: $n$ 为空间频率,是波长 $\lambda$ 的倒数,表示每米长度中包括几个波长; $n_0$ 为参考空间频率; $w$ 为频率

指数,它决定路面谱的频率结构,一般取 $w=2$ 。

路面随机激励信号是时域信号,与路面不平度和车速有关,当车辆行驶速度为 $v$ 时,时间频率与空间频率的关系为 $f=vn$ ,由此可导出时间频率功率谱 $G_q(f)$ 与空间频率功率谱 $G_q(n)$ 之间的关系

$$f = vn \Rightarrow \Delta f = v \Delta n \quad (3)$$

$$G_q(n) = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\sigma_{q-\Delta n}^2}{\Delta n} \quad (4)$$

式中: $\sigma_{q-\Delta n}^2$ 为路面谱在频带 $\Delta n$ 内包含的功率,且

$$G_q(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{\sigma_{q-\Delta f}^2}{\Delta f} \quad (5)$$

$$\text{则} \quad G_q(f) = \frac{1}{v} G_q(n) \quad (6)$$

代入式(2)可得

$$G_q(f) = \frac{1}{v} G_q(n_0) (n/n_0)^2 = G_q(n_0) n_0^2 \frac{v}{f^2} \quad (7)$$

路面文件的生成流程如图2所示。



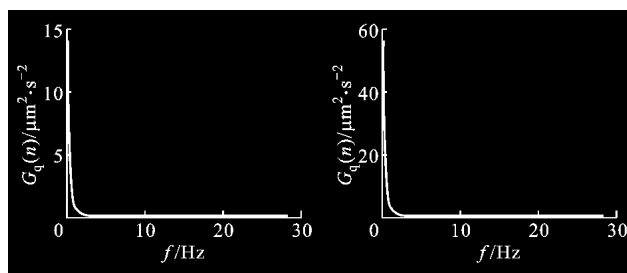
图2 随机路面的生成流程框图

### 3.2 虚拟路面激励的输入

在我国高等级公路路面谱中,B、C级路面占的比例较大<sup>[8]</sup>,因此本文选取B、C级路面作为激励输入源,汽车的行驶速度分别为30 km/h和60 km/h.将式(7)通过Matlab软件编制路面程序,得到的路面位移功率谱曲线如图3所示。

图3为未加入高斯白噪声的功率谱曲线,因此路面功率谱为光滑的曲线,未呈现出随机波动的特性.通过Adams软件的功率谱反求函数Inverse PSD,可将功率谱密度转化为时域信号.其格式为:

INVPSTD( $x$ , Spline Name, Min Frequency, Max Frequency, Num Frequencies, Use Logarithmic, Random Number Seed)



(a)B级路面

(b)C级路面

图3 Matlab软件编制的路面位移功率谱( $v=60$  km/h)

该函数是将功率谱信号转换成时域内信号的函数,在转化的过程中,随机数是一个白噪声,所以可以大致模拟出路面的随机信号。

将编制的路面文件数据以txt文件格式输出,格式为两纵列,第1列为 $x$ 坐标,第2列为 $y$ 坐标,该数据的采样频率为10 Hz,在Adams软件中读入并生成样条曲线保存。

## 4 不同振动条件下的人体驾驶舒适性仿真

### 4.1 人体振动加速度

由于加速度值是评价振动舒适性的主要指标,因此将第3节中的仿真路面文件作为振动激励条件添加到第2节所构建的模型中,在 $v=30$  km/h和 $v=60$  km/h下,得到的B、C级路面的人体仿真实验结果如图4、图5所示。

通过Adams软件跟踪曲线数据,可得到加速度的均方根值.根据式(1),可以计算出 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向以及加权加速度均方根的有效值(见表2)。

由于加载的是垂直激励,而模型又是对称建模,所以 $a_{xw}$ 值很小.由表1可知,在B级路面上,当 $v=30$  km/h和60 km/h时,以及在C级路面上, $v=30$  km/h时,若 $a_w < 0.315$ ,人的主观感觉没有不适,而在C级路面上, $v=60$  km/h( $a_w > 0.315$ )时,人的感觉就会有一些不适。

按照上述方法,可以在不同等级路面、不同速度下,对人体不同部位的振动响应逐一进行比较,通过仿真实验,可以得到不同等级路面和不同速度下人体的几个重要部位在垂直方向上的振动加速度曲线,添加振动激励计算加速度有效值,得到的结果是路面对舒适性的影响十分明显,随着速度的增加, $a_w$ 的有效值显著增加.在 $v=30$  km/h时,C级路面的有效值是B级路面的2倍多,在 $v=60$  km/h时则不到1.5倍,因此路面对低速行驶的车辆影响较大。

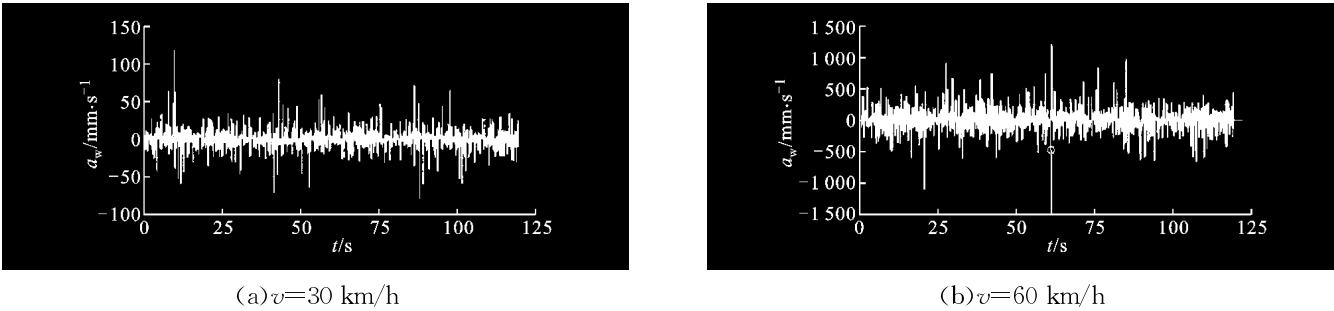


图4 B级路面人体下躯干(骨盆)的垂直振动

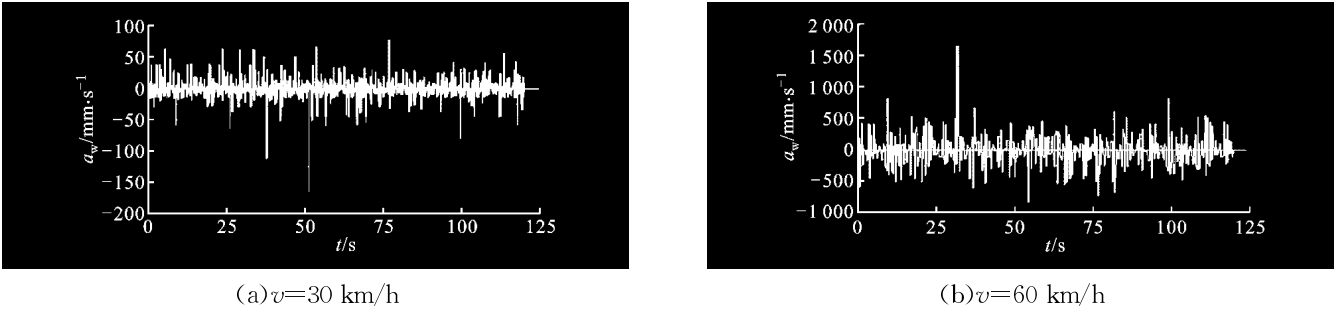


图5 C级路面人体下躯干(骨盆)的垂直振动

表2  $x,y,z$  方向及加权加速度均方根的有效值  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$

|          | B级路面                                  |                                       | C级路面                                  |                                       |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|          | $v=30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ | $v=60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ | $v=30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ | $v=60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ |
| $a_{xw}$ | 0.002 6                               | 0.006 6                               | 0.004 1                               | 0.009 6                               |
| $a_{yw}$ | 60.356 8                              | 194.778 8                             | 153.091 1                             | 282.724 6                             |
| $a_{zw}$ | 23.109 2                              | 74.668 6                              | 58.591 6                              | 108.449 6                             |
| $a_w$    | 87.602 5                              | 282.728 5                             | 222.192 0                             | 410.402 7                             |

在较好路况条件下,随着车辆速度的增加,振动感觉较明显.对于较差的路况,地面不平度为主要振动因素,而车速的影响为其次.对于同一路面,随着车辆速度的增加, $a_w$ 的有效值显著增加.在B级路面上, $v=60 \text{ km/h}$ 的有效值为  $v=30 \text{ km/h}$ 有效值的3倍;在C级路面上, $v=60 \text{ km/h}$ 的有效值为  $v=30 \text{ km/h}$ 有效值的1.5倍多.因此,车速对较好路况的影响较大.

4.2 人体局部舒适性评价

在评价舒适性时,传统的方法往往针对的是人体的全身,而对局部考虑较少.本文在振动条件下,探讨全身振动和局部振动之间的转换关系,并列出了B级路面  $v=60 \text{ km/h}$ 时,人体各部位的  $a_w$ 值(见表3).如表4所示,取人体躯干下部(座椅垂直振动接触处)振动影响的数值为1,将其他各部位加速度的均方根有效值除以人体躯干下部加速度的均

方根有效值,并定义为振动影响因子.

表3 人体各部位的加速度均方根值  $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$

| 人体部位 | $a_{xw}$ | $a_{yw}$  | $a_{zw}$ | $a_w$     |
|------|----------|-----------|----------|-----------|
| 头部   | 0.001 7  | 70.724 1  | 18.001 7 | 100.636 9 |
| 颈部   | 0.003 0  | 65.363 2  | 52.733 4 | 105.615 4 |
| 躯干上部 | 0.007 4  | 51.504 8  | 77.011 4 | 105.499 5 |
| 躯干中部 | 0.006 6  | 136.044 2 | 74.668 6 | 204.575 5 |
| 躯干下部 | 0.059 6  | 194.778 8 | 69.465 7 | 281.399 2 |
| 大腿   | 0.376 4  | 94.750 9  | 35.070 2 | 137.209 9 |

由于人体生物力学模型的定义较为理想,并且人体各部位的振动影响因子在各个状态下都几乎相等,因此计算得到的平均值可以作为人体各部位局部振动的影响因子,从而对全身振动时分析某部位受振的情况提供了很好的参考价值.如果引入类似的影响因子,还可比较方便地从研究人体的全身

表4 人体各部位的振动影响因子

| 人体部位 | 影响因子                            |                                 |                                 |                                 | 平均值     |
|------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------|
|      | B级路面                            |                                 | C级路面                            |                                 |         |
|      | $v=30$                          | $v=60$                          | $v=30$                          | $v=60$                          |         |
|      | $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ | $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ | $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ | $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ |         |
| 头部   | 0.362 8                         | 0.362 4                         | 0.362 6                         | 0.362 9                         | 0.362 7 |
| 颈部   | 0.346 2                         | 0.341 0                         | 0.345 1                         | 0.341 3                         | 0.343 4 |
| 躯干上部 | 0.281 4                         | 0.281 2                         | 0.281 6                         | 0.281 3                         | 0.281 4 |
| 躯干中部 | 0.702 4                         | 0.702 2                         | 0.702 7                         | 0.702 8                         | 0.702 5 |
| 躯干下部 | 1.000 0                         | 1.000 0                         | 1.000 0                         | 1.000 0                         | 1.000 0 |
| 大腿   | 0.486 2                         | 0.486 6                         | 0.487 0                         | 0.486 9                         | 0.486 7 |

振动经 转化为研究人体的局部振动。

## 5 结 论

本文运用 LifeMode 软件能够更好地体现人体的生物特性,相对于弹簧-阻尼-质量模型,能够更准确地反映人体的振动传递过程,对于动态环境人体舒适度评价的后续研究具有一定的参考价值。本文还探索了在全身振动条件下,人体各部位的局部振动影响因子,这对将来研究全身振动环境下的某一部位的振动或损伤情况都有很好的参考价值。通过实测得到的功率谱数据或者是位移、速度、加速度等数据,都可通过样条曲线拟合的方法,方便地读入任意振动状态下的输入,因此分析振动对人体的影响具有实际意义。本文的研究虽然是在汽车驾驶环境下进行的仿真,但是对于人体在其他工况(交通运输、航空航天)下的振动舒适性的评价都有一定的借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] KIM Tae-Hyeong, KIM Young-Tae, YOON Yong-San. Development of a biomechanical model of the human body in a sitting posture with vibration transmis-

sibility in the vertical direction [J]. Int J of Industrial Ergonomics, 2005,35(9):817-829.

- [2] CHO Younggun, YOON Yong-San. Biomechanical model of human on seat with backrest for evaluating ride quality [J]. Int J of Industrial Ergonomics, 2001, 27(5):331-345.
- [3] BOILEAU P E, RAKHEJA S. Whole-body vertical biodynamic response characteristics of the seated vehicle driver measurement and model development [J]. Int J of Industrial Ergonomics, 1998,22(6): 449-472.
- [4] LIANG Cho-Chung, CHIANG Chi-Feng. A study on biodynamic models of seated human subjects exposed to vertical vibration [J]. Int J of Industrial Ergonomics, 2006,36(10): 869-890.
- [5] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京:机械工业出版社, 1997:240-246.
- [6] LI Xiaoling, LU Changde, ZHANG E. Research of driving safety based on human body biological response [C] // The 7th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2006:615-618.
- [7] 张鄂,洪军,梁建,等. 汽车人机接触界面体压分布的实验与评价研究 [J]. 西安交通大学学报,2007,41(5):538-542.
- ZHANG E, HONG Jun, LIANG Jian, et al. Experiments and evaluation of body pressure distribution in automobile man-machine interface [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007,41(5):538-541.
- [8] 钱德猛,赵韩,魏映. 汽车振动系统的虚拟样机仿真及试验研究 [J]. 现代制造工程,2006(1):74-76.
- QIAN Demeng, ZHAO Han, WEI Ying. The research on simulation of virtual prototype and experiment to the vibration system of automobile [J]. Modern Manufacturing Engineering,2006(1): 74-76.

(编辑 管咏梅)