

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.11.029

# 基于有限元法的人体座椅系统随机响应分析

董瑞春, 郭立新

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 基于人体解剖测量学和人体运动学建立了包括人体骨骼、肌肉、皮肤、坐垫、靠背和头枕的驾驶姿势的人体座椅系统三维有限元模型. 通过人体座椅系统在重力作用下的静态分析, 提供动态分析的人体驾驶姿势初始边界条件. 通过频率提取分析确保随机响应分析所需足够数量的模态. 通过计算腰椎到坐垫表面在垂直方向的传递函数验证了模型. 最后分析了在座椅底部垂直方向 0 ~ 20 Hz 的白噪声激励下人体腰椎间盘的加速度和应力响应, 得出由于座椅的耦合作用使得腰椎间盘响应峰值频率低于其固有频率. 该方法可以代替实验研究其他方案的人体座椅系统动态响应问题.

**关 键 词:** 人体建模; 人体座椅系统; 功率谱; 随机响应分析; 腰椎间盘

中图分类号: U 463.83<sup>+</sup>6      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2016)11-1660-04

## Random Response Analysis of Human Body-Seat System Based on the Finite Element Method

DONG Rui-chun, GUO Li-xin

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: GUO Li-xin, professor, E-mail: lxguo@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The 3D finite element model of human body-seat system with driving postures including human skeleton, muscle, skin, seat, backrest and headrest was created based on the human anatomical anthropometry and the kinematics of human body. The initial boundary condition of driving postures of human body for dynamic analysis was provided by the static analysis of human body-seat system under the action of gravity. A sufficient number of modals for random response analysis were provided with the frequency extraction analysis. The model was validated by calculating the transfer function of lumbar disc to seat surface. Finally, the acceleration and stress response of lumbar disc under the action of white noise excitation of 0 ~ 20Hz on the seat bottom in the vertical direction were calculated, whose results showed that the peak response frequency of lumbar disc is less than its natural frequency as a result of seat coupling effect. The method can be used to replace experiments to research the response of human body-seat systems with different schemes.

**Key words:** human modeling; human body-seat system; power density spectrum; random response analysis; lumbar disc

从路面经过汽车的轮胎和悬架,最终经过座椅传递到人体的振动影响乘坐舒适性,并且给身体健康带来不利影响<sup>[1]</sup>.大量文献从表观质量或座椅到头部的振动传递比的角度对人体座椅系统进行了振动实验研究<sup>[2-4]</sup>,研究不同的因素对人体振动响应的影响.虽然实验法为人体座椅系统的振动研究提供了坚实的基础,但是实验法存在许多缺点:①不方便测量人体内部的响应,如腰椎间盘的应力、位移、速度和加速度等的响应;②不能保证传感器坐标系与全局坐标系平行或对齐,如在测量人体背部的振动响应,特别身体在倾斜姿势时,由于传感器几何形状的影响很难做到使

得传感器坐标系与全局坐标系平行或对齐,导致不同方向测量的数值与真实数值存在偏差;③加速度传感器自身惯性以及与皮肤之间的弹性连接影响.而有限元法能够较好地解决这些问题.

目前应用有限元法研究人体座椅系统响应的文献较少.本文主要解决应用有限元法分析人体座椅系统动态特性的难题(如人体的皮肤骨骼三维建模问题,人体座椅系统有限元模型动态分析的材料和接触等非线性问题等),并分析人体座椅系统在宽带白噪声激励下人体腰椎间盘的应力和加速度随机响应.

## 1 方 法

### 1.1 人体座椅系统有限元模型的建立

在前处理中通过把与座椅金属骨架相接处的泡沫单元的材料属性设置为钢的材料属性,实现金属骨架对泡沫的约束.所以为了简化模型,只建立聚氨酯泡沫材料的坐垫、靠背和头枕,略去座椅金属骨架.人体模型包括皮肤、肌肉软组织、腰椎间盘和骨骼等. POSER 软件内有基于人体解剖测量学的人体数据库,不仅可以获得人体表面尺寸,还可以获得肌肉和内部骨骼的尺寸数据,并且可以根据人体运动学进行人体模型姿态的调整,模型的尺寸与实际人体测量的尺寸达到很高的一致性<sup>[5]</sup>. 本文应用 50 百分位的中国男性测量尺寸数据(数据如表 1 所示)在 POSER 里设置人体模型. 因 POSER 保存文件格式是 obj,需在三维软件中利用 obj 文件重新造型生成实体模型. 本文应用 ANSA 软件快速建成实体模型. 人体座椅系统有限元模型如图 1 所示.

表 1 中国 50 百分位男性尺寸数据 <sup>[5]</sup>				
Table 1 50 percentile Chinese male anthropometry				
身高	体重	坐高	大腿长度	小腿长度
S/mm	m/kg	H/mm	L <sub>1</sub> /mm	L <sub>2</sub> /mm
1 735	68	890	445	415

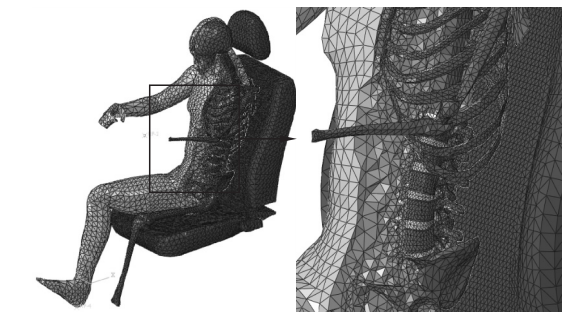


图 1 人体座椅系统有限元模型  
Fig. 1 Finite element model of human body-seat system

根据分析步骤不同,材料分为线性和非线性.在静态分析中使用非线性材料,在动态分析中使用线性材料.在软件 ABAQUS 中用超弹性准则描述聚氨酯泡沫材料的特性,本文用 Grujicic<sup>[6]</sup>研究的数据定义材料特性,用最小二乘法拟合上述数据,如图 2a 所示.

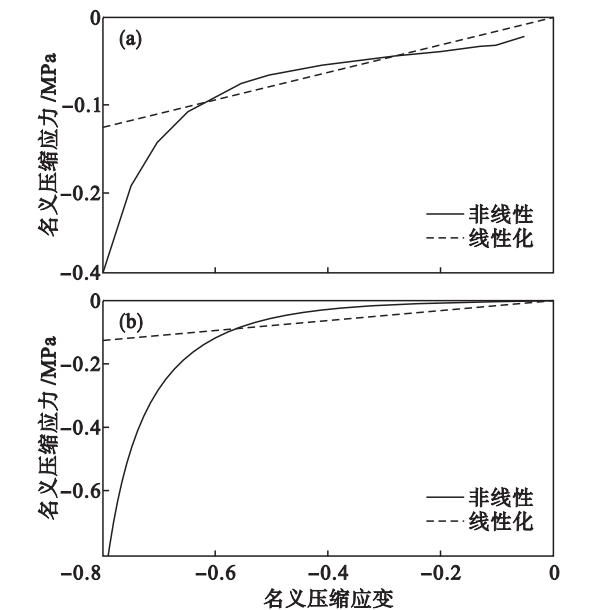


图 2 材料线性化  
Fig. 2 Material linearization

(a)—聚氨酯泡沫;(b)—肌肉组织.

由于人体不同组织的材料特性不同,必须进行合理的简化.皮肤应用线弹性、各向同性、近似不可压缩性的力学特性,根据医学研究皮肤的厚度设置为 1 mm. 根据文献<sup>[5]</sup>可得肌肉和其他的软组织材料特性.人体座椅系统有限元模型的材料参数如表 2 所示.其中椎间盘应由纤维环和髓核组成,这里简化成由一种物质构成.肌肉和聚氨酯泡沫的杨氏模量是经线性化求得,其非线性特性如图 2b 所示.

表 2 人体座椅系统材料参数			
Table 2 Material parameters of human body-seat system			
类型	杨氏模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 ρ kg·m <sup>-3</sup>
皮肤	0.15	0.46	1 100
骨骼	16 700	0.3	1 700
椎间盘	1	0.45	1 050
肌肉	0.15	0.49	1 060
聚氨酯泡沫	0.15	0	110
与金属骨架接触的泡沫单元	210 000	0.3	7 800

1.2 静态仿真

为反映在重力作用下人与座椅之间的真实接触,摩擦作用必须考虑在内,在有限元软件中通过定义接触属性实现.接触计算公式选用罚函数法,切向接触特性的摩擦因数设置为 0.2,法向接触特性选用硬接触计算方法.

为保证本文简化座椅的真实性,模型中固定坐垫底部和靠背背面与座椅金属骨架接触处的面,即限制与金属骨架相接触的坐垫和靠背节点的所有自由度.人与座椅只在重力载荷作用下发生接触关系.仿真环境中的重力场设置为负  $z$  轴方向,大小为  $9\,800\text{ mm}\cdot\text{s}^{-2}$ .

1.3 频率提取分析

频率提取分析和基于振型叠加法的随机响应分析要求系统是线性的,即材料是线性的,没有接触行为,不考虑几何非线性.图 2 为在应变较小的情况下,非线性材料可以用线性材料代替.实际驾驶环境中人体与座椅之间是面接触的,并且在振动强度不大的情况下,接触面是不分离的.所以通过静态仿真可得到人体与座椅之间的接触情况,在频率提取分析和随机响应分析中用 tie(不分离)链接人体与座椅之间的接触面,解决接触非线性问题.

1.4 随机响应分析

随机响应分析可以预测一个系统在不确定的连续激励条件下的响应,因为载荷是不确定性的,只能以统计学意义上的特征描述.在 ABAQUS 软件中激励以功率谱密度的形式作为输入.本文研究输入的激励为  $0\sim 20\text{ Hz}$  的宽带白噪声激励.激励分别施加在人的手部、脚部和座椅底部.白噪声激励的幅值为  $1\text{ m/s}^2$ ,以重力加速度为单位,则振动幅值为  $1/9.8\text{ g}$ ,在  $0\sim 20\text{ Hz}$  频率范围内的功率谱密度为一常数  $(1/9.8)^2/20\text{ g}^2/\text{Hz} = 5.206\,2\times 10^{-4}\text{ g}^2/\text{Hz}$ .整个模型的直接模态阻尼比为  $0.08^{[1]}$ .

2 结 果

2.1 模型验证结果

有效质量反映了各阶振型在各个自由度上所激活的质量,在使用振型叠加法分析线性振动时,要保证在频率提取步中提取到足够的模态,判断标准是在主要运动方向上总有效质量要超过模型中可运动质量的 90%.本模型中总质量为  $74.6\text{ kg}$ , $x,y,z$  坐标方向前 50 阶的总有效质量分别为  $68.9,69.5,67.8\text{ kg}$ ,分别是模型总质量的

$92.31\%,93.11\%,90.84\%$ .说明前 50 阶的模态和频率足够用于  $0\sim 20\text{ Hz}$  的随机响应分析.

从大腿的下表面(与座椅上表面相接触处)到腰椎的传递函数(腰椎的加速度功率谱密度与大腿下表面的加速度功率谱密度的比值,之后再开根号)如图 3 所示.发现峰值在  $8\sim 12\text{ Hz}$  范围内,这与人体脊椎垂向固有频率范围  $8\sim 12.5\text{ Hz}$  一致<sup>[7]</sup>.以上说明人体座椅系统有限元模型是有效合理的.

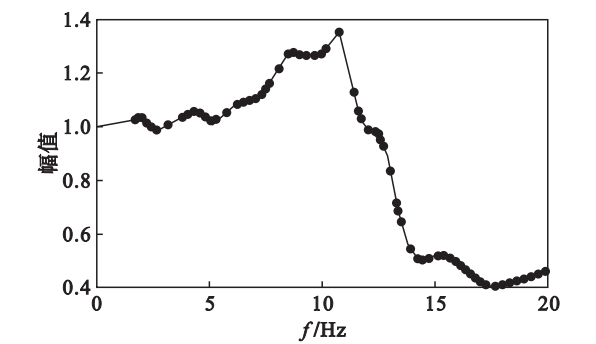


图 3 腰椎传递函数  
Fig. 3 Transfer function of lumbar disc

2.2 分析结果

图 4 为通过静态仿真得到人体与座椅之间的面接触情况.实际驾驶环境中人体与座椅之间是面接触的,并且在振动强度不大的情况下,接触面变化不大.所以人体与座椅之间的接触面用 tie 链接可解决接触非线性问题.

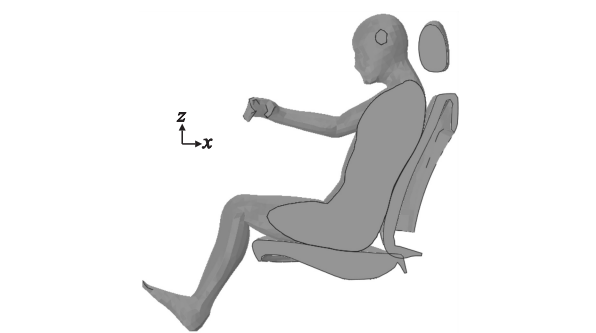


图 4 重力作用下人体与座椅接触关系  
Fig. 4 Contact relationship between body and seat under the action of gravity

人体座椅系统前 50 阶模态的固有频率如图 5 所示,发现前 50 阶模态的固有频率都在  $30\text{ Hz}$  之内.在座椅底部的  $0\sim 20\text{ Hz}$  白噪声激励下, $L1-S1$  段椎间盘垂直方向的加速度功率谱密度  $a_p$  如图 6 所示.发现垂直方向加速度响应峰值主要分布在  $5\sim 6\text{ Hz}$  内.图 7 为  $L1-S1$  段椎间盘对称面前部单元的应力分量  $s33$  功率谱  $p_f$ ,发现其峰值与加速度功率谱峰值一致都分布在  $5\sim 6\text{ Hz}$

内,而且与实验结果 4 ~ 6 Hz<sup>[8-9]</sup>很相近.但是不同腰椎间盘的 s33 应力响应峰值有较大的差别.在幅值为1 m/s<sup>2</sup>的白噪声激励下,最大应力峰值在L3 - L4 段椎间盘处.该处的 s33 响应幅值为 0.067 4 MPa,虽然远小于静态坐姿时 0.2 ~ 0.5 MPa<sup>[9]</sup>,但是在较大幅值的激励下 L3 - L4 段椎间盘是人体腰椎间盘容易破坏之处.

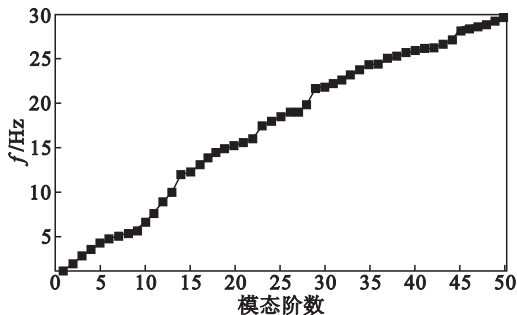


图 5 人体座椅系统固有频率

Fig. 5 Natural frequency of human body-seat system

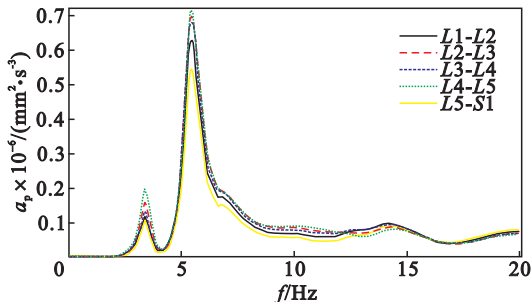


图 6 L1 - S1 段椎间盘垂直方向的加速度功率谱密度

Fig. 6 Vertical acceleration PSD of L1-S1 lumbar disc

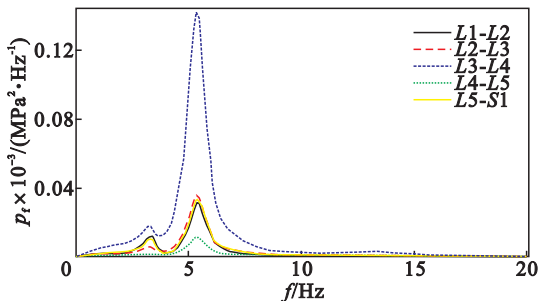


图 7 L1 - S1 段椎间盘的应力 s33 功率谱密度

Fig. 7 Stress s33 PSD of L1-S1 lumbar disc

虽然座椅泡沫的缓冲作用使得腰椎间盘响应峰值频率避开了人体脊椎固有频率的范围,但是仍处于人体垂向敏感频率范围 4 ~ 12 Hz<sup>[7]</sup>内.本文是通过把与座椅金属骨架相接处的泡沫单元的材料属性设置为钢的材料属性,实现金属骨架对泡沫的约束,可能增加了系统的刚度.根据文献[10]研究,下一步可以建立带有汽车座椅金属骨架的人体座椅系统有限元模型,从而可以进一步降低系统 z 坐标方向响应峰值的频率.

### 3 结 语

建立了人体座椅系统有限元模型,详述了随机响应的分析过程,并验证了模型的合理性.最后得出人体座椅系统在白噪声激励下腰椎的响应特点,解决了用实验法研究人体座椅系统中的不足.该方法可以用于研究人体座椅系统不同参数时的动态特性以及新设计座椅的动态舒适性.

### 参考文献:

[ 1 ] 郭立新,李睿.路面随机振动下人体椎间盘关节力学特性分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(3): 410 - 414.  
(Guo Li-xin, Li Rui. Analysis on mechanical properties of human intervertebral disc under random vibration [J]. Journal of Northeastern University( Natural Science ), 2015, 36(3): 410 - 414. )

[ 2 ] Zheng G T, Qiu Y, Griffin M J. Vertical and dual-axis vibration of the seated human body: nonlinearity, cross-axis coupling, and associations between resonances in transmissibility and apparent mass [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(26): 5880 - 5894.

[ 3 ] Mandapuram S, Rakheja S, Boileau P E, et al. Apparent mass and head vibration transmission responses of seated body to three translational axis vibration[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2012, 42(3): 268 - 277.

[ 4 ] Mandapuram S, Rakheja S, Marcotte P, et al. Analyses of biodynamic responses of seated occupants to uncorrelated fore-aft and vertical whole-body vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(16): 4064 - 4079.

[ 5 ] Du X M, Ren J D, Sang C L, et al. Simulation of the interaction between driver and seat [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(6): 234 - 242.

[ 6 ] Grujicic M, Pandurangan B, Arakere G, et al. Seat-cushion and soft-tissue material modeling and a finite element investigation of the seating comfort for passenger-vehicle occupants [J]. Materials and Design, 2009, 30(10): 273 - 285.

[ 7 ] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2012.  
(Yu Zhi-sheng. Automobile theory [M]. Beijing: China Machine Press, 2012. )

[ 8 ] Pope M H, Wilder D G, Jorneus L, et al. The response of the seated human to sinusoidal vibration and impact [J]. Journal of Biomechanical Engineering Transactions of the ASME, 1987, 109(4): 279 - 284.

[ 9 ] Sandover J, Dupuis H. A reanalysis of spinal motion during vibration[J]. Ergonomics, 1987, 30(6): 975 - 985.

[ 10 ] 蔡志鸿. 汽车座椅安全振动舒适度分析[J]. 科技资讯, 2007(19): 231 - 232.  
(Cai Zhi-hong. The analysis of the vibration safety and comfort of car seat [J]. Science & Technology Information, 2007(19): 231 - 232. )