Mechanical Engineering and Technology 机械工程与技术, 2022, 11(1), 22-32
Published Online February 2022 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/met
https://doi.org/10.12677/met.2022.111004

Hans汉斯

考虑蒙皮材料特性的体压分布仿真及评价研究

袁保国[1]，黄　浩[1]，张明泽[1]，赵卫红[1]，刘竹清[1]，任金东[2*]，戚诗敏[2]，张天明[2]

[1]理想汽车研发中心，北京
[2]吉林大学汽车工程学院，吉林 长春

收稿日期：2021年12月9日；录用日期：2022年2月2日；发布日期：2022年2月9日

摘　要

根据最新的中国人体测量数据建立了人体生物力学模型，其中包括人体骨骼、软组织和体表，不同的软组织根据部位和特点赋予不同的材料特性来准确模拟体压分布。研究了座椅蒙皮材料的力学特性和有限元建模方法，研究了体压分布仿真和评价方法。作为实例，根据实车座椅几何数据建立了座椅有限元模型，并装配人体模型后对体压分布进行了仿真，并将仿真结果和试验结果进行了对比，验证了仿真的准确度，并验证了所设计的座椅的舒适性和人体颈部的舒适性。本文的体压分布仿真和评价方法是一种系统的、实用的根据体压分布预测座椅舒适性的方法，能在设计早期只有少量几何数据的情况下就快速预估座椅舒适性，具有很好的使用价值。

关键词

蒙皮材料，体压分布，仿真，评价，生物力学

Research on Body Pressure Simulation and Evaluation Considering the Material Property of Seat Cover

Baoguo Yuan[1], Hao Huang[1], Mingze Zhang[1], Weihong Zhao[1], Zhuqing Liu[1], Jindong Ren[2*], Shimin Qi[2], Tianming Zhang[2]

[1]Lixiang Automotive Research & Development Center, Beijing
[2]College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun Jilin

Received: Dec. 9th, 2021; accepted: Feb. 2nd, 2022; published: Feb. 9th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 袁保国, 黄浩, 张明泽, 赵卫红, 刘竹清, 任金东, 戚诗敏, 张天明. 考虑蒙皮材料特性的体压分布仿真及评价研究[J]. 机械工程与技术, 2022, 11(1): 22-32. DOI: 10.12677/met.2022.111004

Abstract

The human body biomechanical models were created based on the latest Chinese anthropometry data. These models consisted of bone, soft tissue and skin, and the soft tissues were assigned with different material parameters to simulate body-seat interface pressure. The mechanical modeling of the seat cover was studied, as well as the simulation and evaluation of the body-seat interface pressure. As a case study, the seat FE model was established using the real-vehicle seat geometric data. The seat and body were assembled to conducted body-seat interface pressure. The simulative result was compared with those of test, which validated the accuracy of simulation. Furthermore, the comfort of seat and the postural comfort of neck of the human body were validated. The interface pressure simulation and evaluation method presented in this paper is a systematic and useful way predicting the seat comfort using interface pressure, which can be used to pre-evaluate the comfort characteristics of seat, and it is of great value of application.

Keywords

Cover Material, Body-Seat Interface Pressure Distribution, Simulation, Evaluation, Biomechanics

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

座椅是非常重要的驾乘界面。人体－座椅之间的体压分布常用于检验座椅静态舒适性[1] [2] [3]。一般认为，良好的体压分布特性是保证座椅为人体提供舒适的乘坐界面的必要条件。因此，座椅开发后期通常制作座椅样件，并测量样件的体压分布，据此评判座椅静态舒适性的优劣。然而，这种传统的座椅开发模式只能在设计后期才能根据检测到的体压分布来评价静态舒适性，一旦设计方案不理想，则由于优化设计方案造成的设计周期大大加长，势必增加了开发成本。

体压分布仿真技术是利用少量的座椅几何轮廓、海绵发泡轮廓和大致的骨架结构信息即能够对体压分布进行快速预估的仿真方法。采用这种方法能够在设计的早期就根据有限的设计资料进行仿真，从而能够很早就预估体压分布的情况，并评判静态舒适性的好坏；此外，还能方便地评估不同的海绵和蒙皮材料、海绵形状、骨架构造形式等因素可能对体压分布的影响，从而在设计早期就综合权衡多方面因素后选定最佳设计方案。

关于体压分布仿真，目前行业中普遍采用有限元方法来建立人体有限元模型，其中一般包括骨骼、体表、软组织三层来模拟人体[4] [5] [6] [7]。人体骨骼和体表通常采用线弹性材料进行模拟，软组织则通常采用超弹性 Mooney-Rivlin 材料模拟。目前的研究还存在姿势不准确、人体材料不够准确、采用单一尺寸的人体进行仿真分析等问题。很明显，人体姿势是影响仿真准确性的重要因素，文献[6]考虑了姿势因素来模拟体压分布，但模拟休息状态驾驶员或者其他乘员还需要进一步建立相应的姿势预测模型来进行模拟。人体软组织材料不是均匀的。事实上，人体肌肉组织和一般的皮下软组织的力学特性差异很大，因此，在模拟的时候就不能够泛泛地将软组织统一赋予一种材料属性。虽然实际应用中需要测量座椅样件的体压分布，但通常也都是需要测量不同尺寸人体所产生的体压分布，并综合考虑来对座椅静态舒适

性进行评价的，但目前的体压分布仿真往往还都采用单一尺寸(例如：95 百分位身高男子的人体尺寸)人体模型进行仿真，其结果对于体压分布的评价说服力还相对欠缺[4] [5] [6] [7]。在座椅建模方面，目前主要考虑海绵发泡的材料特性进行模拟，而蒙皮材料则考虑较少。蒙皮材料在座椅设计中经常更改材料类别，例如从织物材料改为 PVC 涂层面料，以获得更为理想的外观效果等。不同类别的蒙皮材料其力学特性有较大的差异，而且在座椅装配中为保证美观还施加了张紧力，这些都会显著影响体压分布。因此，在体压分布仿真中不能忽略蒙皮材料。

本文研究了考虑蒙皮材料、考虑不同尺寸人体的座椅体压分布仿真和评价，通过与实验数据的对比，验证了本文所建立的仿真分析方法的合理性、准确性、实用性。

2. 座椅蒙皮材料建模

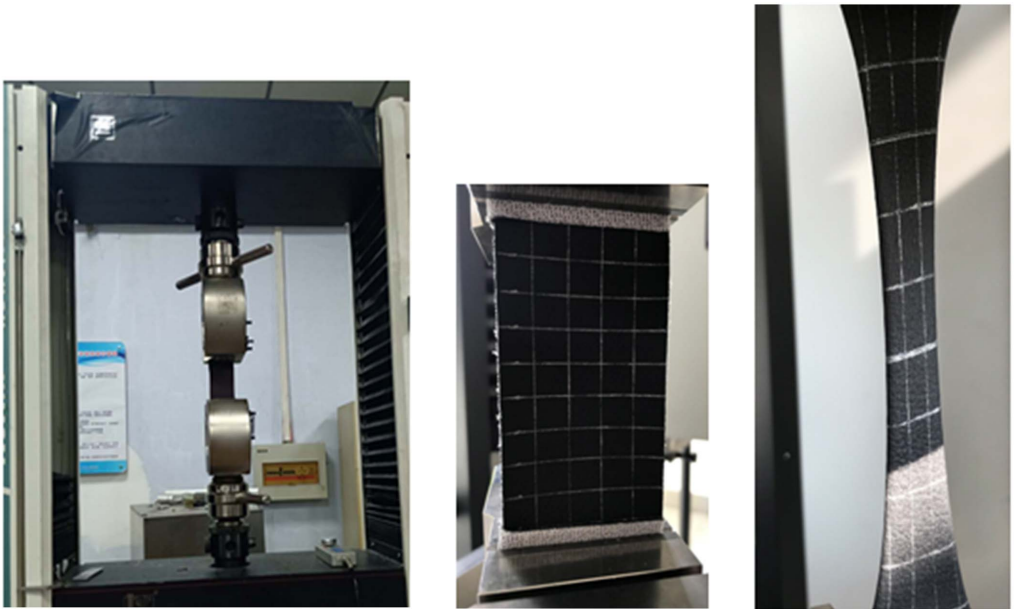
座椅采用的蒙皮材料为 PVC 涂层面料，其力学特性主要取决于基布材料。通常基布材料经纬向力学特性存在差异，考虑到在正常使用范围内单一方向的力学特性近似可以视为线弹性，于是可采用正交各向异性线弹性(orthotropic linear elasticity)材料来进行模拟，其应力应变关系为[8] [9]：

$$\sigma = Q\varepsilon \tag{1}$$

其中，$\sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}\}^T$，为应力；$\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \gamma_{12}\}^T$，为应变；而 Q 为刚度矩阵，且

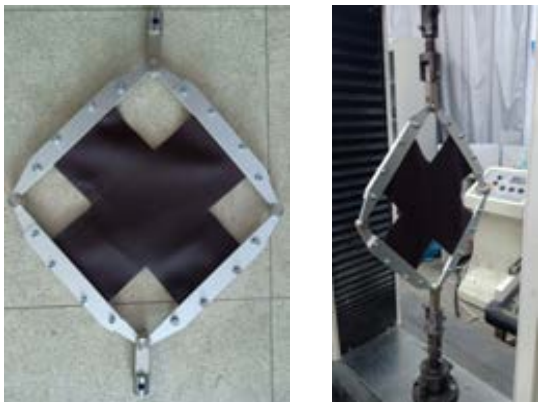
$$Q = \begin{bmatrix} E_x/D_v & v_{xy}E_x/D_v & 0 \\ v_{yx}E_y/D_v & E_y/D_v & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy} \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中，E_x、E_y 分别为经纬向的杨氏模量；v_{xy}、v_{yx} 为泊松比；$D_v = 1 - v_{yx}v_{xy}$；G_{xy} 为切变模量。经纬向杨氏模量、泊松比、切变模量可根据经纬向拉伸试验(图 1)和相框剪切试验(图 2)确定。图 3 为通过仿真得到的蒙皮材料拉伸曲线，他们都经过了试验验证，仿真的蒙皮材料特性是准确的。



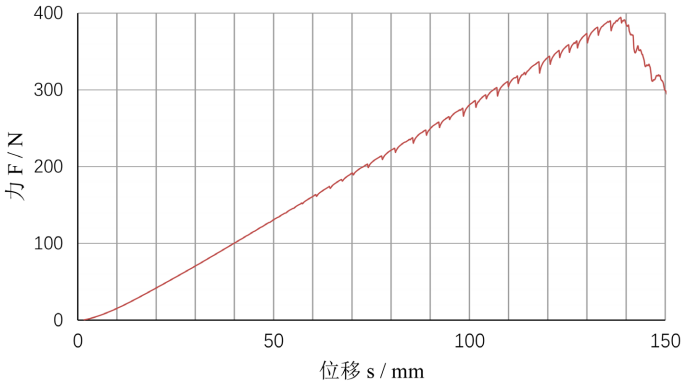
(a) (b) (c)

Figure 1. Tension test of cover materials. (a) Test apparatus; (b) 0% elongation; (c) 40% elongation
图 1. 蒙皮材料拉伸试验。(a) 试验设备；(b) 拉伸 0%；(c) 拉伸 40%

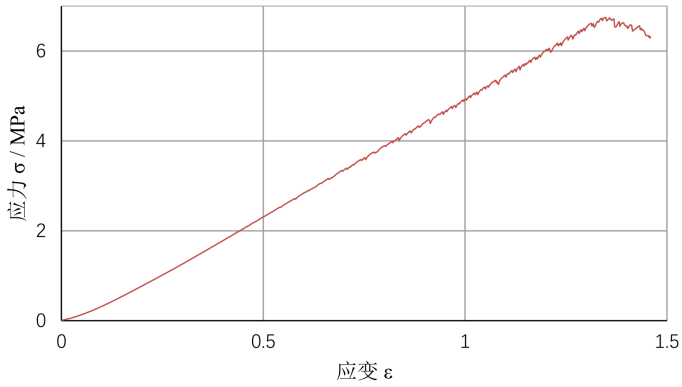


(a) (b)

Figure 2. Trellising shearing test of cover materials. (a) Trellising shearing frame; (b) Test process
图 2. 蒙皮材料相框剪切试验。(a) 相框剪切试验夹具；(b) 试验过程



(a)



(b)

Figure 3. Unidirectional tension curves of cover material. (a) Force-translation curve; (b) Stress-strain curve
图 3. 蒙皮单向拉伸曲线。(a) 力－位移曲线；(b) 应力－应变曲线

3. 人体生物力学建模

3.1. 人体软组织材料

对于体压分布数值模拟，影响较大的因素之一是软组织材料的力学特性。人体软组织一般用非线性、超弹性、不可压缩的 Mooney-Rivlin 材料模拟[4] [5] [6] [7]，其应变能函数为：

$$U = C_{10}\left(\bar{I}_1 - 3\right) + C_{01}\left(\bar{I}_2 - 3\right) + \frac{1}{D_1}\left(J - 1\right)^2 \tag{3}$$

其中，U 为应变能；$\bar{I}_1$ 和 $\bar{I}_2$ 分别为 Cauchy-Green 等容形式张量的第一和第二不变量；J 为材料变形前后的体积比；C_{10}、C_{01}、D_1 为材料参数，应用时需要针对不同部位的软组织赋予不同的数值。参考前人的研究成果，对于一般的皮下软组织，三者取值分别为 3.65 kPa、3.35 kPa 和 5.71，对于肌肉组织可以适当加大刚度来模拟。

3.2. 人体有限元建模

为了能反映目标人群中不同尺寸的人的体压分布特性，原则上应该建立不同身材的人体模型来模拟；但由于几何和有限元建模工作量非常巨大，并考虑到行业里常常用 95、50、5 百分位身高人体的体压分布来评价座椅静态舒适性，于是建立了 P95 男子、P50 男子和女子、P5 女子人体模型，见图 4。人体数据来自最新中国标准化研究院 2016 年的人体尺寸普查数据。

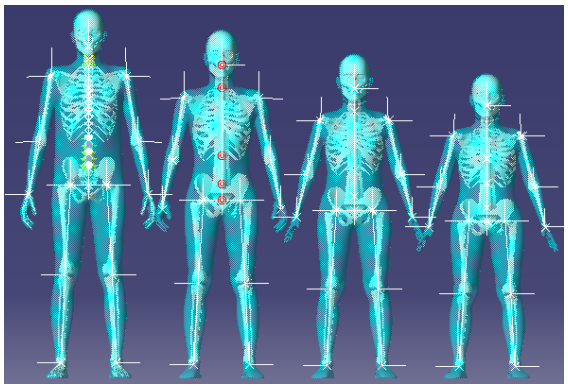


Figure 4. Human body geometric models
图 4. 人体几何模型

根据身高、坐高和体重，利用人体尺寸预测模型(见文献[10])计算人体尺寸，参照购买的人体体表点云和人体切片数据，利用几何放缩的方法建立人体几何模型，并利用姿势模型预测和设定人体模型的姿势[11]。基于几何模型建立有限元模型(图 5)，包括皮肤、骨骼和软组织三部分，在骨骼和皮肤之间的部分都简化为软组织。皮肤和骨骼材料的定义参见表 1 [4] [5] [6] [7]。

(a) (b) (c)

Figure 5. Geometric and FE models of seated human body. (a) Geometric model of bone; (b) Geometric model of soft-tissue and skin; (c) FE model
图 5. 坐姿人体几何和有限元模型。(a) 骨骼几何模型；(b) 软组织和体表几何模型；(c) 有限元模型

Table 1. Material properties of skin and bone
表 1. 皮肤和骨骼材料属性

	杨氏模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 ρ/(kg·m^{-3})
皮肤	0.15	0.46	1100
骨骼	16700	0.3	1700

人体骨架的各部分肢体之间需要定义关节。此外，骨骼-软组织之间、软组织-体表之间采用绑定的方式装配。

4. 体压分布仿真

4.1. 座椅有限元建模

根据座椅几何模型来建立有限元模型，包括蒙皮、软海绵、主海绵、弹簧、骨架。蒙皮采用壳单元模拟，其他均采用体单元模拟。由于很多的细节部分包含很多的不规则形状，因此，均自动划分网格。上述这些部分的材料属性的设置参见表 2。

Table 2. Settings of seat material parameters
表 2. 座椅材料参数的设置

	材料	设置方法
蒙皮－心部	真皮	材料试验曲线计算得到杨氏模量、泊松比
蒙皮－侧翼	PVC 革	材料试验曲线计算得到杨氏模量、泊松比
软海绵	软海绵	根据试验曲线计算得到应力应变曲线数据
主海绵	海绵	根据试验曲线计算得到应力应变曲线数据
弹簧	65Mn	设置杨氏模量、泊松比、密度
骨架	金属	采用刚性材料模拟

4.2. 边界条件

人体模型建立好之后，需要和座椅装配在一起。考虑到直接装配到落座后的位置会产生人体和座椅相互穿透的现象而导致计算出错，因此，也需要将人体模型事先相对于座椅产生一个位移(分解为前后向位移 X_offset 和垂向位移 Z_offset)，参见下图 6 所示。在仿真计算的时候，同样先施加前后向的强制位移，然后再施加垂向的重力场，使得人体正常下落，完成落座过程。人体和座椅接触面之间的切向属性采用“Penalty”(罚函数)进行设置，摩擦系数设置为 0.3 (具体视蒙皮材料而有所变化)；接触压力与穿透之间的关系通过法向属性定义，一般选用“Penalty”(罚函数)约束增强方法。为了尽可能避免穿透，在接触表面采用主从面权重算法，根据主－从面设置原则确定座椅表面和人体皮肤的主从面。为保证在模拟过程中座椅整体不产生运动，需要约束骨架的六个方向自由度；如果省略了骨架，则需要约束座垫、靠背和头枕背面六个方向的自由度。重力加载能够准确地模拟人体落座过程，但是对有限元模型的精确性要求较高，需要事先准确测量人体各部分的体积，并设置合理的密度，以保证人体模型以实际的重力进行落座。

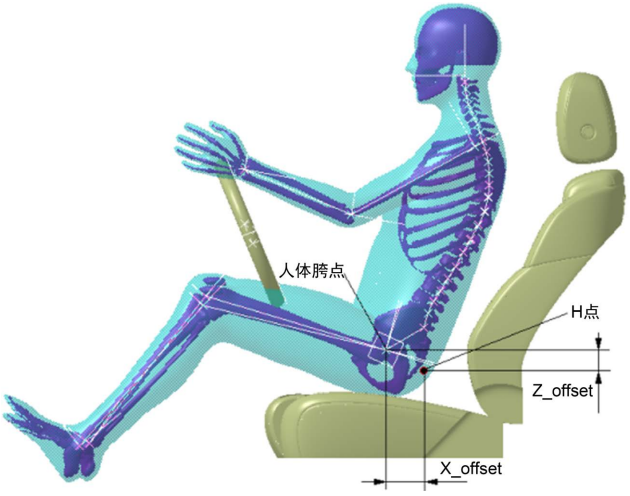
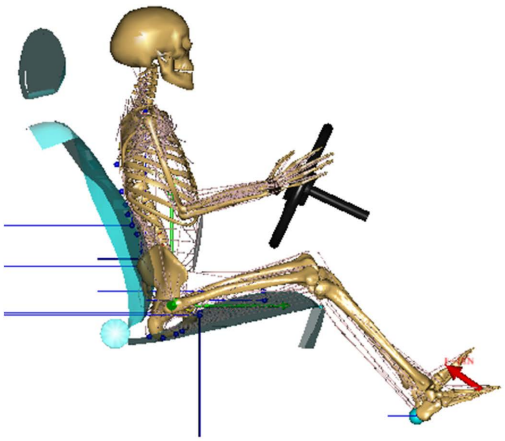


Figure 6. Assembly of human body and seat
图 6. 人体与座椅的装配

在蒙皮缝线处施加朝向海绵方向的拉力，目的是使得蒙皮绷紧。

考虑到能够分析不同座椅(不同人体坐姿)的体压分布，将脚踝相对于胯点的位置参数化，并设置计算步(Step)专门用于调节脚踝相对于胯点的位置，从而使下肢实现不同的姿势。

为了能够分析座椅上背部区域和头枕设计是否适合头颈部舒适性要求，增加了头部靠在头枕上的计算步，通过施加扭矩在颈部使得头向后靠，该扭矩通过骨肌生物力学计算(图 7)获得[12] [13]。建立了头颈部姿势舒适性评价模型来评价头部靠在头枕上之后的姿势舒适性。



```
AnyFolder Man95  = {
  AnyVar Sta     = 1815.925/1000; // P95
  AnyVar SH      = 976.382/1000;
  AnyVar Mass    = 76.172;
  AnyVar L_Thigh = 436.999/1000;
  AnyVar L_Calf  = 439.991/1000;
  AnyVar L_UArm  = 348.139/1000;
  AnyVar L_FArm  = 269.944/1000;
  AnyVar L_Hand  = 195.732/1000;
  AnyVar B_Hand  = 90.817/1000;
  AnyVar L_Foot  = 271.538/1000;
  AnyVar BoF     = 200/1000;

};

AnyOutputFile test ={
  FileName = "Output.csv";
  AnyFloat Jnt_Moment_Lumbar = .Jnt_Moment.LumbarFlexionExtension;
  AnyFloat Jnt_Momemt_Neck = .Jnt_Moment.NeckFlexion;
};
```

Figure 7. Calculation of head-neck joint moments
图 7. 头颈部关节扭矩计算

4.3. 仿真结果及验证

按照前述方法分别计算 P95、P50 男、P50 女、P5 女的体压分布。限于篇幅，仅给出 P95 男子的仿真和实测结果。仿真计算结果参见图 8，峰值压强 1.25 kPa 左右，出现在坐垫上坐骨下面的区域；由于模拟中考虑的人体背部姿态是自然休息的姿态，腰背部都有压强分布。图 9 为对应的体压分布实测结果，表 3 为主要分区的压力比率和峰值压强(定义见下节)的仿真和试验得到的置信区间的对比结果，可见，仿真和实测结果很接近。

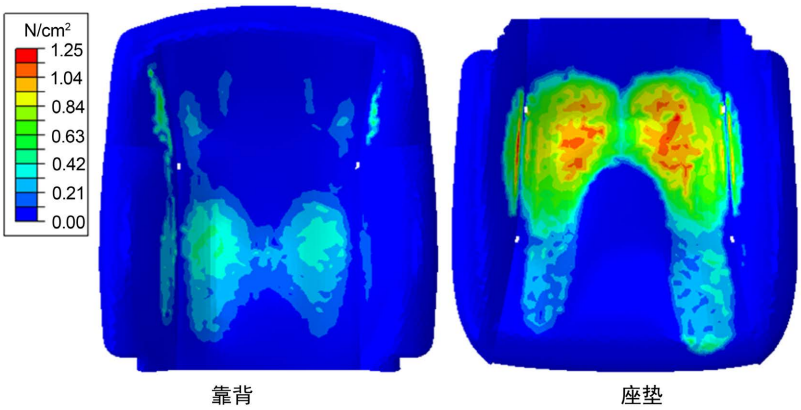


Figure 8. Simulation result of the interface pressure distribution of man with the percentile-95 stature
图 8. 身高 95 百分位男子的体压分布仿真结果

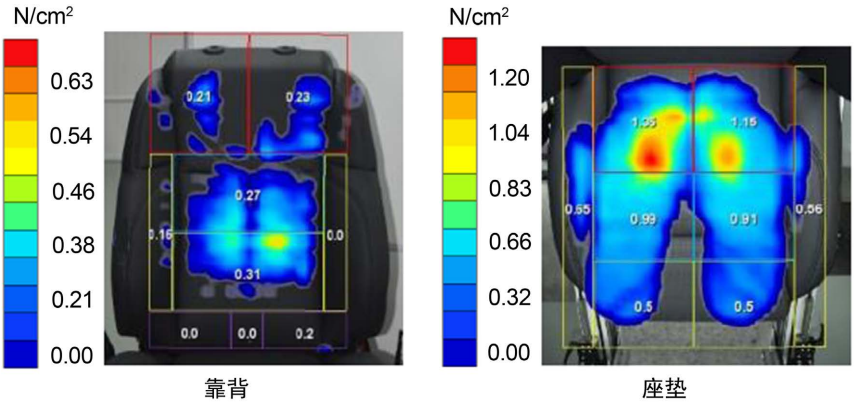


Figure 9. Test result of interface pressure distribution
图 9. 体压分布实测结果

Table 3. Comparison of the simulation and test results for load ratio and peak pressure
表 3. 压力比率和峰值压强仿真和试验对比

区域	压力比率/(%)			峰值压强/kPa		
	计算	下限	上限	计算	下限	上限
1	30	15.79	30.91	11.8	10.28	16.58
2	30.9	22.83	34.8	11.8	11.6	17.85
5	0.4	0.07	5.07	***1.1***	1.9	4.2
6	2.2	0.01	2.84	3.9	0.43	3.95

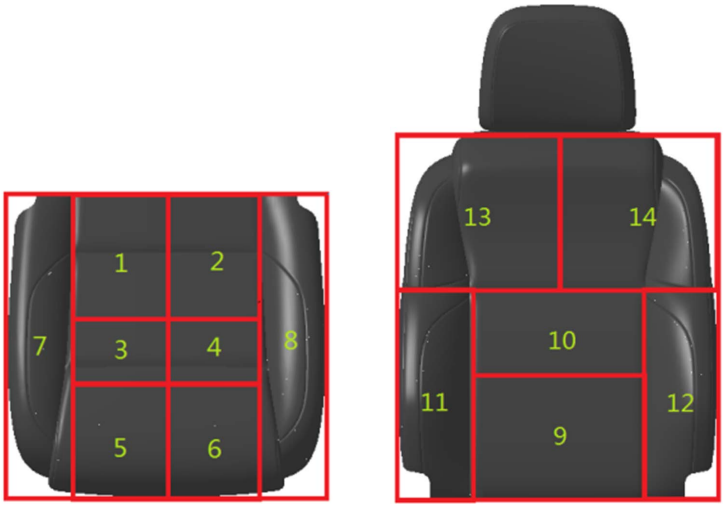
Continued

9	60.6	5.62	92.47	5	1.93	6.63
10	16.3	0	43.46	3.7	0	4.68

4.4. 结果的评价

4.4.1. 体压分布的评价

目前主流的体压分布评价都是基于座椅表面分区的[14]。典型的分区方法参见图 10。



(a) (b)

Figure 10. Regions of seat surface. (a) Seat cushion; (b) Seat back
图 10. 座椅表面分区。(a) 座垫；(b) 靠背

根据座椅分区，统计得到座椅上确定部位的体压分布统计特征值，包括峰值压强、平均压强、压力比率。若 P^{k}_{max} 为区域 k 的峰值压强；P_{ij} 为第 i 行第 j 列压强值；MAX{⋯}为最大值函数；r^{k} 为区域 k 的压力比率；L^{k} 为区域 k 的总压力；L 为区域所处的座垫或靠背的总压力，则

$$P^{k}_{\max} = MAX\left\{P_{ij}\right\} \tag{4}$$

$$L^{k} = \sum P_{ij} \tag{5}$$

$$L = \sum L^{k} \tag{6}$$

$$r^{k} = L^{k}/L \tag{7}$$

对典型的身高百分位的一定数量的被试人员舒适驾驶姿势的体压分布进行测量，并计算座椅各分区的峰值压强、平均压强、压力比率；再统计上述参量的 90%的置信区间，作为舒适座椅的评价标准。如果新设计方案仿真得到的上述参量落入该 90%置信区间，就认为是舒适的压力分布。

4.4.2. 颈部姿势的评价

首先需要评价标准。选取一定数量被试人员，通过测量统计(图 11)得到他们的舒适颈部姿势角度(图 12)的 90%置信区间，作为舒适的颈部姿势角度范围。

体压分布仿真得到人体落座稳定后的头颈和颈胸关节、以及胯点坐标，利用这三点坐标计算颈部姿势角度，并对比舒适的颈部姿势角度范围来作出评价。

Figure 11. Test for comfort neck posture angles
图 11. 颈部姿势角度实验

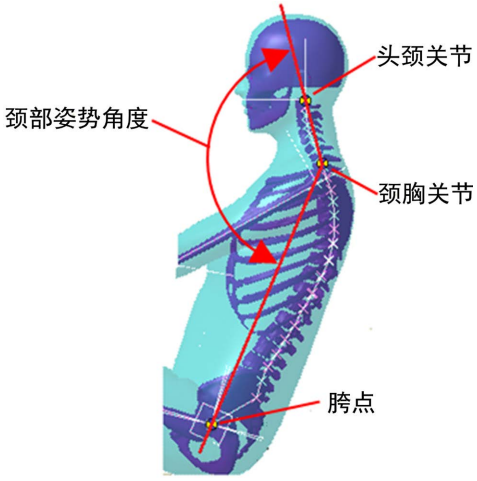


Figure 12. Definitions of neck posture angles
图 12. 颈部姿势角度定义

体压分布仿真得到人体落座稳定后的头颈和颈胸关节、以及胯点坐标，利用这三点坐标计算颈部姿势角度，并对比舒适的颈部姿势角度范围来作出评价。

5. 结论

1) 在体压分布仿真中考虑了座椅蒙皮的因素，并研究了蒙皮材料的有限建模方法，对于分析蒙皮材料的变化对体压分布的影响有帮助；

2) 根据最新的中国人体尺寸建立了典型尺寸的人体生物力学模型，可用于面向中国人群进行体压分布仿真和座椅静态舒适性分析；

3) 研究了适用于不同车型的体压分布仿真、分析和评价方法，其中评价包括体压分布本身的评价和人体颈部姿势的评价；

4) 本文所建立的体压分布仿真、评价方法自成体系，具有较高的应用价值。

参考文献

[1] Demontis, S. and Giacoletto, M. (2002) Prediction of Car Seat Comfort from Human-Seat Interface Pressure Distribu-

tion. SAE Technical Paper, No. 2002-01-0781. https://doi.org/10.4271/2002-01-0781

[2] 金晓萍, 袁向科, 王波, 等. 汽车泡沫坐垫舒适性的客观评价方法[J]. 汽车工程, 2012, 34(6): 551-555.

[3] Oudenhuijzen, A., Tan, K. and Morsch, F. (2003) The Relationship between Seat Pressure and Comfort. SAE Technical Paper, No. 2003-01-2213. https://doi.org/10.4271/2003-01-2213

[4] Grujicic, M., Pandurangan, B., Arakere, G., Bell, W.C., He, T. and Xie, X. (2009) Seat-Cushion and Soft-Tissue Material Modeling and a Finite Element Investigation of the Seating Comfort for Passenger-Vehicle Occupants. *Materials and Design*, **30**, 4273-4285. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.028

[5] Kim, S.H., Yun, J.K. and Choi, H.Y. (2010) Digital Human Body Model for Seat Comfort Simulation. *International Journal of Automotive Technology*, **11**, 239-244. https://doi.org/10.1007/s12239-010-0030-4

[6] Du, X.M., Ren, J.D., Sang, C.L., and Li, L.M. (2013) Simulation of the Interaction between Driver and Seat. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **26**, 1234-1241. https://doi.org/10.3901/CJME.2013.06.1234

[7] Laurent, V., Then, C. and Silber, G. (2014) Human Modeling and CAE Based Subjective Seat Comfort Score Correlation. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, **7**, 295-304.

[8] Naik, N. (1994) Woven Fabric Composite. Technomic Publishing Company, Lancaster, PA, 18-19.

[9] 王春敏. 机织复合材料弹性模量极值分析法[J]. 纺织学报, 2004, 25(3): 44-47.

[10] 高晓娴. 乘员人体体表参数化建模及仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2013.

[11] Reed, M.P., Manary, M.A., *et al*. (2002) A Statistical Method for Predicting Automobile Driving Posture. *Human Factors*, **44**, 557-568.

[12] 桑春蕾. 驾驶员全身生物力学建模及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2013.

[13] 华猛. 基于 AnyBody 生物力学仿真的驾驶姿势舒适机理研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2015.

[14] Zenk, R., Mergl, C., Hartung, J. and Bubb, H. (2007) Predicting Overall Seating Discomfort Based on Body Area Ratings. SAE Technical Paper, No. 2007-01-0346. https://doi.org/10.4271/2007-01-0346