

基于标准被试的座椅静态舒适性仿真评价研究

黄浩¹, 袁保国¹, 任金东^{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: 2024年9月24日; 录用日期: 2024年10月17日; 发布日期: 2024年10月28日

摘要

体压分布是度量座椅静态乘坐舒适性的重要指标。目前通过试验获取真人体压分布的方式不能用在设计早期来预测座椅舒适性。本研究实现了一种能够在设计早期应用的体压分布仿真和座椅舒适度评价方法。提出了标准被试的概念, 并根据本研究特点和要求, 面向中国人群, 通过抽样得到95百分位身高男子、50百分位身高男女和5百分位身高女子的人体尺寸, 进而建立对应的人体几何和生物力学模型, 作为体压分布仿真的标准被试。面向汽车座椅体压分布仿真和舒适性评价的需要, 研究了准确计算体压分布的座椅、人体方面的因素和体压分布仿真方法。通过小规模实验建立了座椅舒适度区间评价标准和头颈部舒适度评价标准。结合某SUV座椅开发进行了体压分布仿真分析和舒适性评价, 并通过实验验证了上述仿真方法和评价标准的有效性和准确性。

关键词

标准被试, 座椅, 静态舒适性, 体压分布, 仿真评价

Research on Simulative Evaluation of Seat Static Comfort Based on Standard Test-Subjects

Hao Huang¹, Baoguo Yuan¹, Jindong Ren^{2*}

¹Lixiang Automotive Research & Development Center, Beijing

²College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun Jilin

Received: Sep. 24th, 2024; accepted: Oct. 17th, 2024; published: Oct. 28th, 2024

Abstract

The body pressure distribution is an important index in evaluating seat static comfort. At present

*通讯作者。

文章引用: 黄浩, 袁保国, 任金东. 基于标准被试的座椅静态舒适性仿真评价研究[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(5): 472-481. DOI: 10.12677/met.2024.135055

the interface pressure acquiring method of real person testing is unable to be used in the early stage of design for seat comfort evaluation. In this study a method for body pressure distribution simulation and comfort evaluation was realized which can be used in the early stage of design. The standard test-subject concept was proposed. According to the status and requirements of this study, and by sampling the Chinese anthropometry database the anthropometric dimensions of percentile-95 male, percentile-50 male and female, and percentile-5 female individuals were obtained. Based on these data the corresponding geometric and biomechanical models were established, which were used as the standard test-subjects of body pressure simulation. To meet the requirements of body pressure distribution simulation and comfort evaluation of automobile seats, the factors of the seat and human body in body pressure distribution were studied, as well as the methods for accurate body pressure distribution simulation. The interval-evaluation standard of body pressure and the head-neck comfort evaluation standard were established by small-scale experiments. The body pressure distribution simulation and comfort evaluation were implemented in the development of a specific SUV seat, which validated the effectiveness and accuracy of the above simulation methods and evaluation standards by tests.

Keywords

Standard Test-Subjects, Seat, Static Comfort, Body Pressure Distribution, Simulative Evaluation

Copyright © 2024 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. 前言

座椅是重要的驾乘界面。人椅界面间的体压分布是度量座椅静态舒适性的重要指标[1]-[4]。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。研究也表明,体压分布与座椅静态舒适度明显相关,可综合平均压强、峰值压强、压强梯度等指标来评价座椅静态舒适度[5]-[8]。未来无论汽车怎样发展,其重要的载人功能不会消失,反而会不断在增强舒适性、人性化、智能、安全等方面需求越来越大。所以,研究如何准确、客观、规范地评价舒适性非常有意义。

以往对于座椅静态舒适性评价常常采用主观评价方法[9]-[11],但是结果容易受被试人员的身体状况、情绪、习惯、倾向等方面因素影响,结果不够客观,且每次评价都要做实验,结果不能反复使用。相比之下,体压分布则显得较为客观。目前在座椅开发的后期通常制作座椅样件,测量其体压分布来评判座椅静态舒适性;但必须在设计后期做出样件才能根据其体压分布来评价座椅设计得是否舒适,一旦设计方案不理想就可能造成设计迭代,势必导致开发周期加长、开发成本增加;并且也存在一致性不好,结果不够准确,着装、姿势、习惯等影响测量结果,不同身材人体测量结果不好权衡,评价标准不完善、不统一等问题。因此,无论是出于希望对座椅静态舒适性做出科学、准确的评价,还是希望评价结果对未来改进座椅设计提供有益的帮助,都需要一种能够客观、准确地测量和评价,能够在设计早期就能使用的座椅静态舒适性评价方法。

体压分布仿真可以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。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计算,还能方便地尝试不同的海绵和蒙皮材料、座椅造型和海绵形状、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。体压分布仿真一般采用有限元方法来建立人体模型,包括骨骼、体表、软组织三层来模拟人体[12]-[14]。目前体压分布仿真还存在人体材料单一、人体尺

寸不规范、采用单一尺寸的人体进行仿真分析、人体姿势不真实、座椅模型过度简化等问题,尤其是很多研究还都采用单一尺寸(例如:95百分位身高男子)人体模型进行仿真,其结果对于体压分布的评价说服力还欠缺,并且绝大多数仿真模型存在缺少蒙皮、蒙皮未张紧、弹簧装配与实际不符、难以针对不同车型的座椅进行仿真、难以模拟不同姿态人体等问题。

本研究面向目标人群(中国人)规范了仿真被试的选取,采用姿势预测模型来确定仿真中人体模型的态度,并考虑了座椅材料模型、蒙皮张紧、弹簧装配、机构模拟和跨车型的仿真方法,极大地增强了仿真结果的规范、客观、准确性和模型的实用性;通过小规模实验建立了体压分布区间评价标准和颈部姿态舒适度评价标准,配合上述体压分布计算模型和方法,用于在设计早期快速对设计结果预估。结合实例座椅进行了体压分布仿真计算和实验验证,表明了本方法的科学合理性。

2. 标准被试

为了规范加载过程,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,于是也采用身高95、50、5百分位,中等胖瘦,体型标准的男女作为体压分布测量的标准被试,其人体尺寸参照最新中国标准化研究院2016年的人体尺寸普查数据通过抽样计算得到。选取男子身高、体重两变量联合分布说明抽样原理[15],参见图1,多维正态分布概率密度函数为:

$$f(X) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} (\det B)^{\frac{1}{2}}} e^{-\frac{1}{2}(X-\mu)^T B^{-1}(X-\mu)} \quad (1)$$

式中, μ 为均值矢量, B 为协方差矩阵, X 为多维正态分布变量。多变量的联合分布定义了当其中一个变量变化的时候其他变量的变化规律,依此规律抽样方能准确获得符合目标人体尺寸数据分布特点的个体(人体尺寸数据)。

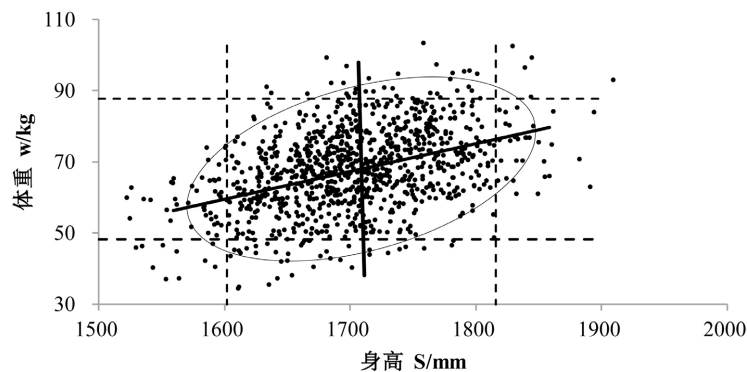
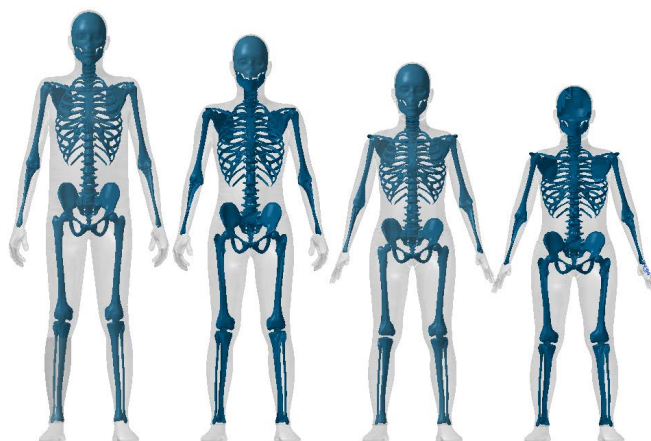


Figure 1. Sampling strategy under the joint distribution of stature and body mass of human body

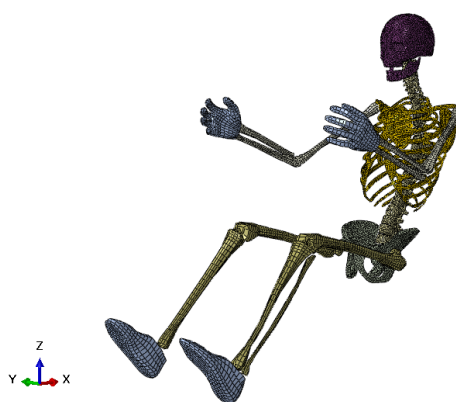
图1. 人体身高、体重联合分布下的抽样原理

对于体压分布仿真,除了选取95、50、5三个百分位身高之外,其他尺寸则符合标准胖瘦和肢体比例关系。依次选取身高5、50、95百分位处对应的体重平均值,得到男子的P95、P50和P5的身高、体重,同理得到女子的P95、P50和P5的身高、体重,其他尺寸则根据事先建立好的人体尺寸预测模型计算得到。考虑到95百分位身高时男子尺寸更有意义,5百分位身高时女子尺寸更有意义,于是,最后选取95百分位身高男子(简称P95男子)、50百分位身高男女(简称P50男女)、5百分位身高女子(简称P5女子)的人体尺寸来建立人体模型。这样规范下来的人体模型称为标准被试,用于体压分布仿真中进行加载。所建立的P95男子、P50男女、P5女子人体几何和有限元模型见图2。人体有限元建模细节参见文

献[16]。建模之后的模型各身体段相对质量分布经过了验证，与行业的研究结果大体一致[17][18]，见表1 (限于篇幅只列出了 P95 的)。表中本文躯干部分相对质量偏大，原因是中国人躯干普遍长于欧美等国家，质量也就相对偏大点。



(a) 站姿 P95 男子、P50 男女、P5 女子人体模型



(b) 坐姿人体有限元模型(P95 男子为例)

Figure 2. Geometric and FE models of human body
图 2. 人体几何和有限元模型

Table 1. Validation of relative mass distribution of body
表 1. 体段相对质量分布验证(%)

体段	CT 法	同位素法	仿真法	本文
头颈	8.62	6.94	7.8	7.6
躯干	44.05	43.46	47.9	48.95
上臂	2.43	2.71	2.7	2.63
前臂	1.25	1.62	1.5	1.61
手	0.64	0.61	0.9	0.65
大腿	14.19	14.17	10.1	10.95
小腿	3.67	4.33	5.4	4.48
足	1.48	1.37	1.9	1.38

体压分布仿真准确的关键因素之一是人体落座的姿势。为了能方便灵活地模拟不同的姿势,需要将人体各个体段通过关节连接在一起,这通过在各个关节处定义好的参考点(Reference Point,用以表示关节中心)处定义对应转动自由度的铰链(Hinge)来实现。图3展示了人体模型全身的铰链,尤其是脊柱部分参照人体的真实结构定义的一系列铰链,用来模拟坐姿躯干不同程度靠在靠背上的情况。

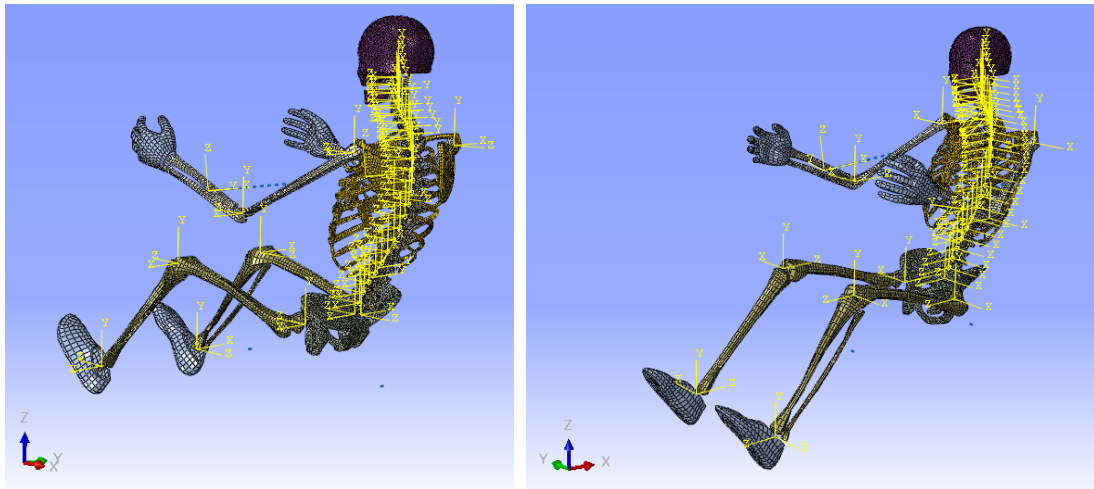


Figure 3. Joint hinges of human body
图3. 人体关节铰链

3. 体压分布的仿真方法

标准被试用于在体压分布仿真中加载得到体压分布,进而依据一定的标准来评价座椅静态舒适性。因此,在设计早期,当有了少量的座椅几何数据(大致的外观轮廓、蒙皮、海绵发泡、骨架等)之后,就可以建立座椅有限元模型,并将它与标准被试的人体模型装配起来,定义边界条件,进行体压分布仿真计算。当使用本方法设计迭代几次后,所积累的数据、经验、方法等会大大加快未来的仿真计算和分析改进等,对于设计会非常有帮助。

对于汽车座椅,有限元模型建立中常需要考虑蒙皮、主海绵、软海绵、复合层、减振弹簧、乃至腰托(机械式或者气袋式等)和调角机构的模拟,这其中除了材料的模拟之外,还包括机构和空气动力学的模拟,以便能够充分评估座椅各个使用工况下的体压分布情况及各个因素的影响。

主海绵和软海绵(包括复合层中的软海绵层)都可以使用超弹性海绵材料本构模型模拟,例如ABAQUS中的Hyperfoam模型,其应变能为:

$$\tilde{U}(\hat{\lambda}_i) = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[\sum_{j=1}^3 \hat{\lambda}_j^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} \left((J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

式中, N 为材料常数; μ_i 、 α_i 和 β_i 为依赖温度的材料常数; λ_i 为主伸长率; J^{el} 为弹性体积比。

从实际应用考虑,常见的蒙皮材料大体上包括三类:1)单纯的织物类,可采用正交各向异性线弹性本构材料模拟;2)近似可看成各向同性材料的真皮类(但有的真皮不同方向力学性能差异也很大,应具体分析);3)复合材料类,例如涂层面料,应根据实际的力学表现采用对应的模拟方法。为了模拟座椅装配好的状态,需要考虑将蒙皮进行预张紧,然后再进行落座仿真;可以通过在缝线处施加拉力来实现蒙皮预张紧。

减振弹簧是汽车座椅很常见的部分,对于体压分布也有一定的影响。座椅几何数据中的弹簧位置通

常是装配后的位置，常与周边结构存在穿透和干涉，这就需要在仿真的时候预先定义好接触，并对弹簧进行动态装配到最终位置。为了增强舒适性、缓解疲劳，座椅上常配有腰托、气袋、甚至按摩装置，他们的作用效果可以通过体压分布仿真来验证。实际建模中除了考虑前面各方面因素之外，还需要考虑进行机构的模拟，例如模拟机械式腰托凸起量的变化、作用位置的变化等，在建模的时候可以根据实际的机构形式通过定义机构零件刚性体、运动副、接触面与周边的接触等来实现，这种方法也适用于模拟机械式按摩系统。对于气袋效果的模拟，则还需要考虑空气动力学来模拟充气、放气，以及气袋与周边的接触、摩擦等，实现充放气之后对周边位置形状(压强)产生影响，进而评估这些影响。上述技术本文都在仿真中予以实现。

对于使用确定的人体模型仿真的情况，除了座椅自身因素之外，人体坐姿是影响体压分布的又一重要环节，仿真中需要尽可能真实准确地设置人体的姿态；而这恰恰是目前很多研究所欠缺的。为了能够与实测的结果进行对比验证，可以事先建立体压分布仿真、实测的人体姿态规范。表 2 给出了适用于乘用车驾驶员和乘客正常坐姿情况的姿态规范。仿真中为了实现上述规范，需要通过边界条件来控制人体模型与座椅(H 点)的位置，控制双脚的位置和角度，设置双手的位置，以及设置人体头颈和躯干的姿态。如前所述，人体建模的时候，在各个关节中心处都设置了参考点，于是可以通过在对应的参考点处沿着需要的自由度方向施加位移、作用力等实现姿势的控制和改变。

Table 2. Standards for sitting postures settings

表 2. 坐姿规范

部位	驾驶员	乘客
脚	按搁脚板的位置、角度对应放置	按室内地板的位置、角度对应放置
腿	大腿外撇角 8 度	大腿外撇角 8 度
躯干	按积极驾驶姿态设置	按坐正的休闲姿态设置
上肢	手对称放转向盘 10 点、2 点位置	手自然放大腿上

4. 基于体压分布的静态舒适性评价

4.1. 体压分布的区间评价

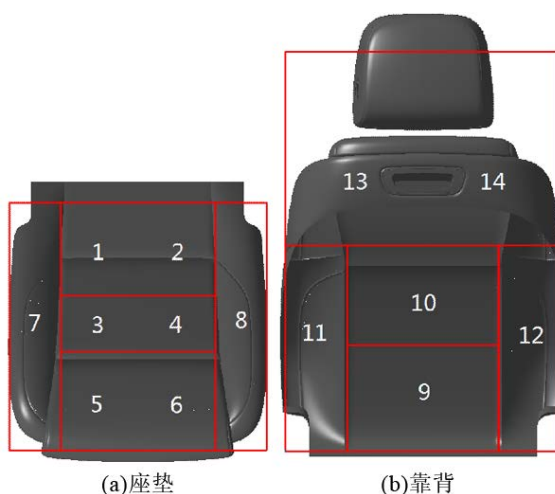


Figure 4. Region settings of seat surface

图 4. 座椅表面分区

研究表明,分区的压力比率和峰值压强适合用于座椅静态舒适度评价[9] [10]。精细的体压分布评价需要将体压分布图形进行分区。可对人体表面上的压力分布图形进行分区,也可对座椅表面上的压力分布图形进行分区;目前多数的体压分布评价采用的都是基于座椅表面分区的。无论分区建立在哪个载体上,都存在不同的分区的定义方法。图4给出了本文采用的分区定义,适用于正常坐姿情况的体压分布分析。如果考虑大靠背角度情况,可以在区域9、11、12下方再增加若干子分区[9] [10],以详细反映人体下腰背部与座椅表面的贴合和作用情况。现在商务车逐渐增多了商务座椅使用零重力姿态的情况,这种情况下还需要研究腿托、头枕等的压力分布,也需要对这些区域建立合适的分区来研究。对于每个分区,通过体压分布仿真得到的压强分布进一步计算可以得出该分区的峰值压强、平均压强、压力比率、压强变化梯度等参数[19]。

为了实现对体压分布的评价,可以通过实验统计得出各个分区的舒适体压分布参数的置信区间,作为未来的评价标准,称为区间评价法[20],优点是简单易行、直观可靠。还可利用数学方法建立体压分布参数与舒适度的数学模型[21]-[24],等等。

4.2. 头颈部姿势舒适度评价

汽车座椅为保障后碰时乘员头颈部的安全而广泛采用了头枕;但设计不当会导致头颈部不舒适。同时,座椅设计中越来越重视细节的舒适性,例如休闲姿态下上背部、头颈部与座椅对应部位的贴合性等,因此,建立休闲姿态下的头颈部舒适度评价标准很有意义。在体压分布仿真中,利用落座稳定后的头-颈、颈-胸关节、胯点(图5)这三点坐标可计算出头颈部姿势角度,将其与舒适的角度范围进行对比即可作出舒适与否的判断。舒适的头颈部姿势角度范围同样可事先通过实验统计建立起来。

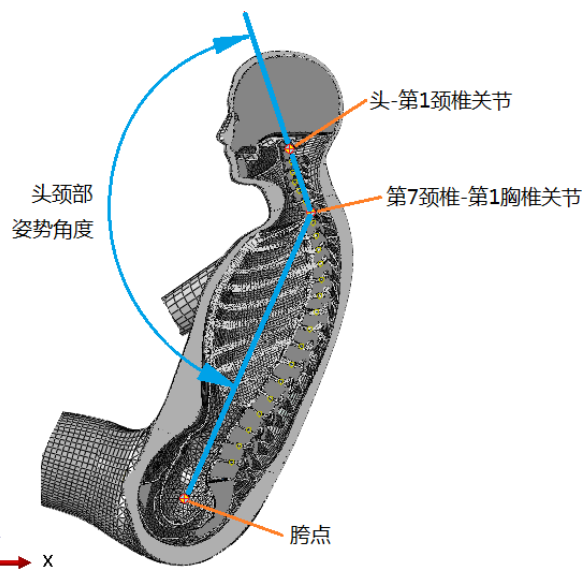


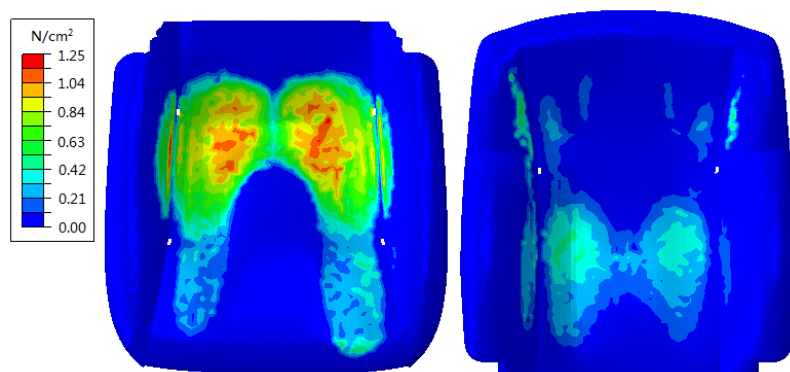
Figure 5. Definitions of neck posture angles
图5. 颈部姿势角度定义

5. 研究实例

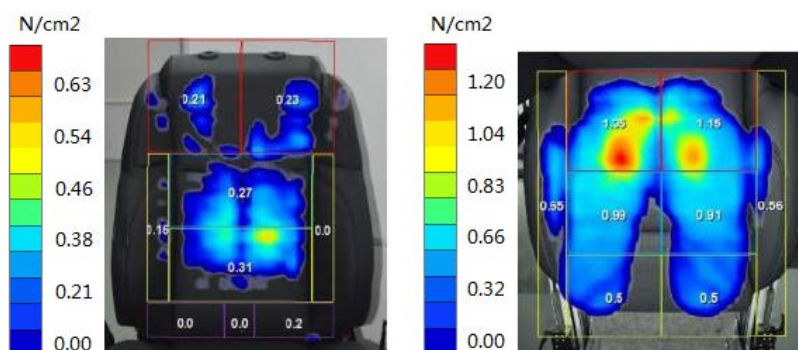
5.1. 某SUV驾驶座椅体压分布仿真

选取某SUV车型驾驶座椅,根据其几何模型建立了有限元模型,并与所建立的标准被试P95男、P50男女、P5女的人体模型进行装配来计算正常驾驶姿势的体压分布,P95男子的仿真结果参见图6,图

中也给出了对应的实测结果，可见，仿真和实测结果很接近。其他标准被试体压分布仿真的计算结果也都经过了验证。



(a) P95 男子的体压分布仿真结果



(b) P95 男子的体压分布实测结果

Figure 6. Validation of the simulation results of interface pressure for P95 male human body
图 6. P95 男子体压分布仿真的验证

5.2. 座椅静态舒适度区间评价标准

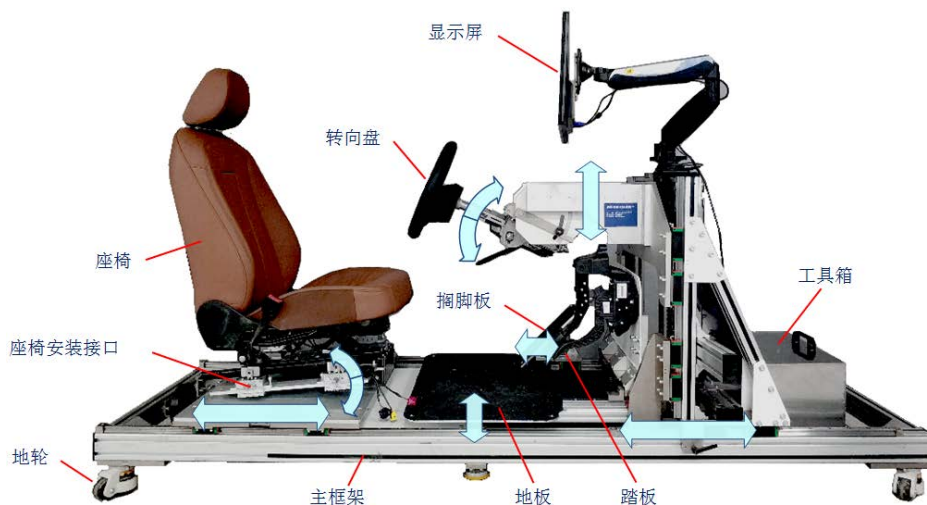


Figure 7. Flexible cab mockup
图 7. 柔性驾驶室台架

选取被认可的五款舒适座椅,覆盖目前的研究范围,分别将其根据车型参数固定在柔性驾驶台架上,如图7所示,确保座椅与脚踏板、地板、方向盘之间的硬点尺寸关系与实车一致。

选取与标准被试人体尺寸接近的一定数量的被试人员,对其在舒适驾驶姿势下的体压分布进行测量,并计算各分区的体压分布参数,统计他们的90%的置信区间,作为舒适座椅的评价标准。为了保证实验结果准确,每名被试人员开始实验之前都要接受简单的培训,并先将座椅滑轨、靠背角、座垫角、腰部支撑等调节到厂商规定的设计位置(复位)。被试人员入座后,再根据自己舒适乘坐要求在该车型的范围内调节座椅各部位以获得舒适的状态。待乘坐稳定后,记录体压分布数据,并从中选取较好的帧数据用于计算体压分布分区参数。依次测量每把座椅的体压分布。经过统计分析得到区间评价标准数据表格,参见表3(限于篇幅,仅给出座垫的结果示意)。未来使用中,如果新座椅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。

Table 3. Confidence intervals of Comfort interface pressure distribution

表 3. 舒适压力分布区间

区域	压力比率/(%)		峰值压强/kPa		平均压强/kPa	
	下限	上限	下限	上限	下限	上限
1	8	16	7.5	13	1.2	4
2	8	16	7.5	13	1.2	4
3	20	35	8	12	3	4
4	20	35	8	12	3	4
5	1	6	2	5	0	1.2
6	1	6	2	5	0	1.2
7	5	11	4	6	0.4	1.4
8	5	11	4	6	0.4	1.4

5.3. 头颈部姿势舒适度评价标准

基于某座椅尺寸参数设计了实验座椅,利用它测量统计了一定数量的不同身材被试者舒适姿态下的头颈部姿势和主观舒适度评分,通过统计分析得到舒适头颈部姿势角度的90%置信区间,作为头颈部姿势舒适度评价标准,落入该范围的姿势被认为是舒适的头颈部姿势。

6. 结论

1) 提出标准被试的概念。理论上标准被试能够广泛用于很多场合的人机工效分析,可大幅降低分析成本。本研究根据目标将标准被试限定(抽样)为四个标准被试,详细计算了他们的人体尺寸,并据此建立了人体几何模型和有限元模型;

2) 研究了被试的抽样方法。目前抽样得到四个标准被试的人体模型,用于计算体压分布。未来可针对不同的需求来抽样建立指定的人体模型,用于更多场合、更广泛用途的分析;

3) 面向汽车座椅体压分布仿真和舒适性评价的需要,研究了准确计算体压分布的座椅、人体方面的因素和仿真方法,并结合某款SUV座椅进行了体压分布仿真计算和实际验证;

4) 通过小规模实验统计建立了体压分布的区间评价标准和落座后头颈部舒适度评价标准,可结合体压分布仿真在设计早期对舒适度进行预估。

本文仅针对相对短时间的静态乘坐舒适性进行了研究。座椅舒适性不仅表现在短时间的体验上,中、

长时间的驾乘体验也需要考虑。未来的舒适度评价标准将考虑中长时间乘坐的情况。

参考文献

- [1] Yao, X., He, Y., Udomboonyanupap, S., Hessenberger, N., Song, Y. and Vink, P. (2022) Measuring Pressure Distribution under the Seat Cushion and Dividing the Pressure Map in Six Regions Might Be Beneficial for Comfort Studies of Aircraft Seats. *Ergonomics*, **66**, 1594-1607. <https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2157495>
- [2] Zhang, T. and Ren, J. (2023) Research on Seat Static Comfort Evaluation Based on Objective Interface Pressure. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, **16**, 341-348. <https://doi.org/10.4271/02-16-04-0023>
- [3] 王广彬, 任金东, 等. 基于体压分布仿真的驾驶员座椅舒适性设计研究[J]. *汽车工程*, 2018(6): 741-748.
- [4] 陈俊豪, 任金东, 等. 基于不同身材驾驶员体压分布的座椅舒适性研究[J]. *汽车工程*, 2017, 39(3): 351-356.
- [5] Demontis, S. and Giacoletto, M. (2002) Prediction of Car Seat Comfort from Human-Seat Interface Pressure Distribution. SAE Technical Paper No. 2002-01-0781. <https://doi.org/10.4271/2002-01-0781>
- [6] 金晓萍, 袁向科, 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.
- [7] 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>
- [8] Kyung, G. and Nussbaum, M.A. (2008) Driver Sitting Comfort and Discomfort (Part II): Relationships with and Prediction from Interface Pressure. *International Journal of Industrial Ergonomics*, **38**, 526-538. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.08.011>
- [9] Zenk, R., Mergl, C., Hartung, J., Sabbah, O. and Bubb, H. (2006) Objectifying the Comfort of Car Seats. SAE Technical Paper No. 2006-01-1299. <https://doi.org/10.4271/2006-01-1299>
- [10] 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>
- [11] 刘志平, 王健. 座椅舒适性及其评价理论和方法[J]. *航天医学与医学工程*, 2010, 23(4): 292-298.
- [12] Alam, D.N. and Chennubhotla, V. (2019) Use of CAE Tool to Evaluate the Body Pressure Distribution Plot on Automotive Seating. SAE Technical Paper No. 2019-01-0402. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0402>
- [13] Grujcic, 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 & Design*, **30**, 4273-4285. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.028>
- [14] Du, X., Ren, J., Sang, C. and Li, L. (2013) Simulation of the Interaction between Driver and Seat. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **26**, 1234-1242. <https://doi.org/10.3901/cjme.2013.06.1234>
- [15] Ren, J., Du, X., Liu, T., Liu, H., Hua, M. and Liu, Q. (2017) An Integrated Method for Evaluation of Seat Comfort Based on Virtual Simulation of the Interface Pressures of Driver with Different Body Sizes. SAE Technical Paper No. 2017-01-0406. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0406>
- [16] 戚诗敏. 人体生物力学精细建模及体压分布评价研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [17] 刘静民. 中国成年人人体惯性参数国家标准的制定[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京体育大学, 2004.
- [18] 扎齐奥尔斯基. 人体运动器官生物力学[M]. 北京: 人民体育出版社, 1987.
- [19] 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.
- [20] 王昊. 汽车座椅舒适性区间评价方法[J]. *时代汽车*, 2020(9): 115-117.
- [21] Kolich, M., Seal, N. and Taboun, S. (2004) Automobile Seat Comfort Prediction: Statistical Model vs. Artificial Neural Network. *Applied Ergonomics*, **35**, 275-284. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.01.007>
- [22] Mitsuya, R., Kato, K., Kou, N., Nakamura, T., Sugawara, K., Dobashi, H., *et al.* (2019) Analysis of Body Pressure Distribution on Car Seats by Using Deep Learning. *Applied Ergonomics*, **75**, 283-287. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.023>
- [23] Mansfield, N., Sammonds, G. and Nguyen, L. (2015) Driver Discomfort in Vehicle Seats—Effect of Changing Road Conditions and Seat Foam Composition. *Applied Ergonomics*, **50**, 153-159. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.03.010>
- [24] Kamra, A., Raina, S., Maheshwari, P., Agarwal, A. and Latkar, P. (2017) Study and Proposals for Improving Static Comfort in Automotive Seating. SAE Technical Paper No. 2017-01-1389. <https://doi.org/10.4271/2017-01-1389>