

车用座椅发泡密度对乘坐舒适性的影响分析

高振海¹, 李明月¹, 高菲^{1†}, 宋学伟¹, 梅兴泰², 杨枫², 张皓³

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 广东 广州 511434;

3. 长春职业技术学院汽车学院, 吉林 长春 130033)

摘要:为量化座椅坐垫发泡密度对车辆驾乘人员乘坐舒适性的影响,建立了中国95百分位体征的人体有限元模型和不同发泡密度的驾乘人员-座椅模型,进行驾乘人员与不同发泡密度座椅之间的整体体压分布及其躯体各部位体压分布的仿真分析.仿真结果表明:本文更精确测定了不同发泡密度座椅与驾乘人员之间的体压分布和剪切力的变化规律,缩短了座椅研发周期,实现了在座椅试制前的概念设计阶段评定发泡密度对乘坐舒适性影响的量化精细化分析.

关键词:车用座椅;发泡;体压分布;接触区域;乘坐舒适性

中图分类号:U463.83

文献标志码:A

Analysis on Effect of Foaming Density of Automotive Seats on Sitting Comfort

GAO Zhenhai¹, LI Mingyue¹, GAO Fei^{1†}, SONG Xuwei¹, MEI Xingtai², YANG Feng², ZHANG hao³

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

2. GAC Automotive Engineering Institute, Guangzhou 511434, China;

3. Automotive Engineering Institute, Changchun Vocational Institute of Technology, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to quantify the effects of different seat cushion density on driver/passengers' sitting comfort, a 95th percentile human-body model that meets the Chinese physical structure and a driver/passenger-automotive seat model of different density were built, which simulated the driver/passengers' general body pressure distribution and body-parts' pressure distribution with different foaming density of automotive seats. The simulation results showed that this paper more precisely determined the variation rule of pressure distribution and shear force between seats with different foaming density and occupants, shortened the seats' research period, then quantitatively and delicately analyzed the impact of different seat cushion density on sitting comfort during the concept design stage before commissioning.

Key words: automotive seat; foaming; pressure distribution; contact area; sitting comfort

* 收稿日期:2018-10-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775236, U1564214), National Natural Science Foundation of China(51775236, U1564214); 吉林省科技发展计划资助项目(20150204055GX), Jilin Provincial Research Foundation for Technology Guidance(20150204055GX)

作者简介:高振海(1973—),男,吉林长春人,吉林大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: 123284123@qq.com

座椅作为汽车人机交互的主要界面,骨架结构、材料、尺寸、振动传递性能^[1-2]等对汽车整体的乘坐舒适性产生重要作用,是汽车产品设计的核心技术。

前期研究主要关注于座椅坐盆结构以及坐垫材质特性对座椅舒适性的影响^[3-5],大多采用主观评价^[6-9]、客观评价^[10-13]以及主客观评价相结合^[14-15]的方法进行分析,对发泡材料研究甚少。现有的《汽车座椅手册》仅仅给出了一个发泡密度范围,设计人员大多依据主观评价进行座椅发泡的选取,并对发泡的静态和动态舒适性进行测定。

随着人机工程学研究的深入,发泡作为座椅重要的组成部分,密度值过高或者过低均会使座椅产生不合理的变形造成体压分布不合理,使血液循环受阻,肌肉产生疲劳,降低乘坐舒适性。为此,研究人员开始关注发泡材料密度对乘坐舒适性的影响。Lee等^[12]研究了发泡材料的硬度以及厚度与座椅舒适性的关系;Andreoni等^[15]对车辆驾乘人员乘坐于不同形状和刚度发泡座椅上的压力和舒适性进行了测试;金晓萍等^[16]从座椅泡沫坐垫的物理特性指标和体压分布指标对坐垫的舒适性进行了研究。

现有研究多是针对试制后的实椅,更换坐垫上不同密度的发泡材料,并由驾乘人员进行主观评价打分与体压分布实测。研究存在如下问题:1)实椅试制周期长,研发风险高;2)测试过程中受测人员的坐姿、座椅靠背和坐垫倾角及结构等特性的微小变动均会对测试结果产生重要影响,实测实验重复性差,无法精确测定人体与座椅界面间的压力;3)现有的体压测试系统仅提供人体与座椅接触界面间的正应力,对人体与座椅界面间相互作用有重要影响的剪切力无法测量。

针对以上问题,本文首先对驾乘人员坐姿下的人体骨肌力学机理进行分析,结合人体生物力学仿真分析技术,建立了国内某款车型的座椅有限元模型,并进行不同发泡密度座椅下95百分位人体模型的体压分布仿真,最终从坐垫的整体体压分布、坐垫与人体各局部接触区域间的体压分布、车辆驾乘人员与座椅坐垫界面间相互作用的剪切力等角度进行了座椅坐垫发泡密度对车辆驾乘人员乘坐舒适性影响的分析。

1 坐姿下人体躯干力学机理分析

车辆驾乘人员乘坐汽车座椅上时,人体头部和躯干的负荷通过骶髂关节传递至骨盆,座椅坐垫

承担了人体约75%的重量。因此,合理的体压分布对座椅舒适性的影响至关重要。

图1为车辆驾乘人员乘坐于座椅上时人体躯干的受力分析图。车辆驾乘人员乘坐于座椅上的受力可以分为靠背力 F_b 、上身重力 F_g 以及坐垫合力 F_c 。在静态平衡状态下,座椅对坐骨结节施加力的作用线、重力作用线和靠背力作用线相交于 P 点。

座椅的靠背力和坐垫合力为作用在车辆驾乘人员背部和臀部区域皮肤上的局部压力和剪切力,该作用力转化为对车辆驾乘人员背部和臀部的支撑力。同时,靠背力增加了坐骨结节部位的水平力分量,进而加大皮肤及皮下组织的剪切力。

研究表明:作用在车辆驾乘人员身体上的局部载荷致使肌肉软组织受压和变形,长时间受该载荷作用将阻碍血液循环,使组织的氧饱和度受限,出现局部缺血现象,产生一种新陈代谢物质刺激神经末梢,不利于人体肌肉组织的放松。同时,车辆驾乘人员-座椅坐垫界面间的压力分布过于集中,将加剧人体的压迫感,使血管的渗透性增加,从而使神经内形成水肿。水肿增加了神经内的液体压力,造成对神经内毛细血管的血流损伤并危害神经根的营养,使人体产生麻木、疼痛以及肌肉无力等症状。大腿下侧面处布置有大动脉以及神经系统,不宜承受重压。剪切力的存在会大大降低人体可耐受的压力,长时间受剪切力作用,将影响皮肤和组织的氧饱和度,致使酸性代谢产物堆积,细胞内缺钾,引起肌肉疼痛、疲劳甚至痉挛^[17]。

以上理论分析表明:一个舒适性高的座椅坐垫不仅需要合理的体压分布,还要控制人体与坐垫接触区域间的剪切力,增大血氧饱和度,提高座椅舒适性。为此,本文在后续的仿真分析中将体压分布与剪切力作为客观指标来评价座椅坐垫发泡密度对车辆驾乘人员乘坐舒适性的影响。

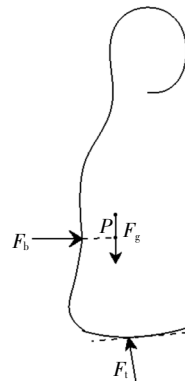


图1 人体躯干受力分析图

Fig.1 The stress diagram for the trunk

2 车辆驾乘人员-座椅模型

针对国内某款自主品牌乘用车座椅和中国人体基础体征, 本文建立了乘用车座椅模型和中国 95 百分位体征的假人模型, 运用 PAM-Comfort 有限元软件, 进行中国 95 百分位体征的车辆驾乘人员不同发泡密度座椅下的体压分布仿真分析。

座椅模型包括坐垫、靠背、头枕和调节装置, 坐垫、靠背和头枕分别由骨架、发泡、填料和蒙皮等部分组成, 在 CATIA 三维软件中建立座椅的各个构件模型。网格尺寸对非线性分析中的仿真精度和收敛速度具有重要影响, 网格过疏会影响计算精确度, 甚至得到错误解; 网格过密会加大计算量, 对计算机硬件要求较高, 增加计算时间。在综合考虑计算精度和速度要求的前提下, 本文运用 Hypermesh 软件完成座椅骨架、发泡、蒙皮和弹簧的网格划分, 座椅骨架网格模型采用壳单元划分, 单元的尺寸设定为 5 mm; 发泡选用尺寸为 15 mm 的四面体网格; 蒙皮作为座椅生产过程中的最后一道工序, 为与座椅发泡紧密贴合, 采用尺寸 10 mm 的膜单元; 弹簧采用尺寸为 7 mm 的梁单元进行网格划分。座椅各构件的网格划分如表 1 所示。

表 1 座椅网格划分

Tab.1 The meshing of seat

名称	单元类型	网格尺寸/mm	网格划分图
座椅骨架	壳单元	5	
发泡	四面体单元	15	
蒙皮	膜单元	10	
弹簧	梁单元	7	

在完成网格划分的基础上, 将座椅各构件导入 PAM-Comfort 软件中进行材料属性的设定, 各构件的材料属性如表 2 所示。根据汽车座椅各构件应用材料的材料属性, 选用 101 号材料模拟座椅骨架材料, 该材料模型的密度为 $7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, 杨氏模量与泊松比分别为 210 GPa 和 0.3; 发泡采用 45 号材料, 该材料模型模拟静态舒适性时可考虑泡沫应力松弛的特性, 并将实测各座椅发泡的应力-应变曲线导入发泡材料样块中; 蒙皮设定为 151 号材料, 运用矢量方向进行蒙皮纤维经纬方向的设定, 纤维 1 方向设为经向, 即蒙皮的主要受力方向, 纤维 2 方向设为纬向, 即蒙皮的次要受力方向, 座椅靠背和坐垫蒙皮的厚度分别设为 1.4 mm 和 1 mm; 弹簧采用密度、杨氏模量与泊松比分别为 7.85 kg/cm^3 、210 GPa 和 0.3 的 213 号材料。最后, 将各构件进行组装, 生成的座椅模型如图 2 所示。

表 2 座椅材料属性

Tab.2 The material property of seat

名称和材料	材料特性
座椅骨架, 101 号材料	密度: $7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 杨氏模量: 210 GPa 泊松比: 0.3
发泡, 47 号材料	应力-应变曲线
蒙皮, 151 号材料	密度: $1.0 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 纤维 1 和纤维 2 的应力-应变曲线
弹簧, 213 号材料	密度: $7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 杨氏模量: 210 GPa 泊松比: 0.3



图 2 车用座椅模型

Fig.2 The seat model

图 3 所示的人体模型是以 GB 10000—88《中国成年人人体尺寸》中的人体数据为基础建立的。实际构建过程是基于 HPM 假人模型, 通过等比例缩放的方式, 将人体背部、臀部以及腿部的尺寸调节

至 GB 10000—88《中国成年人人体尺寸》中的 95 百分位人体尺寸。



图 3 车辆驾乘人员-座椅模型

Fig.3 The driver and passenger-seat model

在合理装配座椅和人体模型后,进行边界条件的设置.人体与座椅的接触界面主要为靠背和坐垫,结合座椅的实际乘坐状况,进行 95 百分位的假人与座椅模型之间约束的定义.所施加的边界条件如表 3 所示.

表 3 边界条件

Tab.3 Boundary conditions

部位	边界条件			
	刚度比	摩擦因数	主接触面	从接触面
假人与靠背	0.1	0.22	假人背部	靠背蒙皮
假人与坐垫	0.1	0.22	假人臀部	坐垫蒙皮

表 3 所示的刚度比是座椅坐垫和靠背与驾乘人员之间的接触刚度比.具体是通过座椅坐垫和靠背的压缩试验,输出接触刚度曲线,进而测得座椅坐垫和靠背假人之间的刚度比.摩擦因数选用的是静态摩擦因数,根据试验的测试结果设定为 0.22.设定假人臀部和背部为主接触面,靠背蒙皮和坐垫蒙皮分别为从接触面,完成假人与座椅模型之间的约束.

组装、定位与设置完毕的车辆驾乘人员-座椅模型如图 3 所示.为降低椎间盘内压,防止人体向前滑动,参照 SAE 标准,将座椅靠背角和坐垫角分别调节至从铅垂面向后倾斜 25° 和从水平面向后倾斜 12° .将仿真工况中的仿真时间设为 2 000 ms,仿真步长设置为 100 ms,运行 PAM-Comfort 软件进行中国 95 百分位体征的车辆驾乘人员不同发泡密度座椅下的体压分布仿真分析.

3 仿真结果分析

为了合理测定座椅坐垫发泡密度对驾乘人员

乘坐舒适性的影响,本文在对国内若干款车用座椅发泡密度调研的基础上,参照《汽车座椅手册》中的发泡密度范围,具体如表 4 所示,进行各座椅发泡参数的设置.

以 57 kg/m^3 座椅发泡参数的设置为例,首先,运用 DW-200 试验机对各密度下的发泡进行静态压缩试验,压缩速率为 4 mm/min ,至发泡发生 50% 应变时,试验结束.然后,输出力-位移的变化曲线,并换算成应力-应变曲线,如图 4 所示.最后,将图 4 所示的应力-应变曲线导入仿真软件泡沫材料样块中,并输入发泡密度 57 kg/m^3 .与此类似进行密度分别为 47 、 52 、 62 和 67 kg/m^3 各座椅发泡参数的设置.

表 4 各座椅的发泡密度参数

Tab.4 Foaming density parameters of the seat

座椅编号	座椅发泡密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
1 号	47
2 号	52
3 号	57
4 号	62
5 号	67

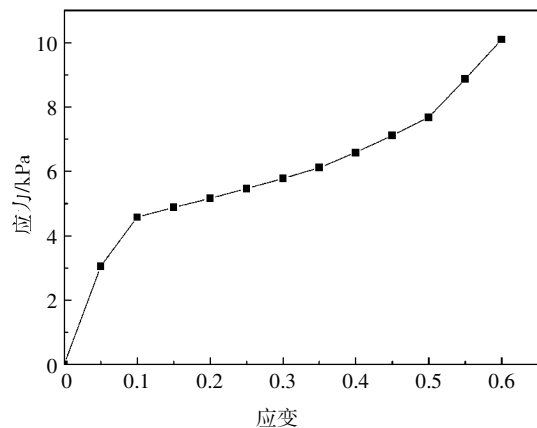


图 4 发泡压缩特性曲线

Fig.4 The loading compression curve of foam

人体模型乘坐在座椅上的过程包括 4 个阶段,即人体模型沿垂直椅面方向的 H 点位置变化,分别为自由下降阶段、假人与座椅坐垫接触阶段、假人背部逐渐嵌入座椅靠背阶段以及人-椅稳定阶段,分别对应图 5 中的区段 A、区段 B、区段 C 以及区段 D.后续的体压分析均为稳定状态的仿真结果.

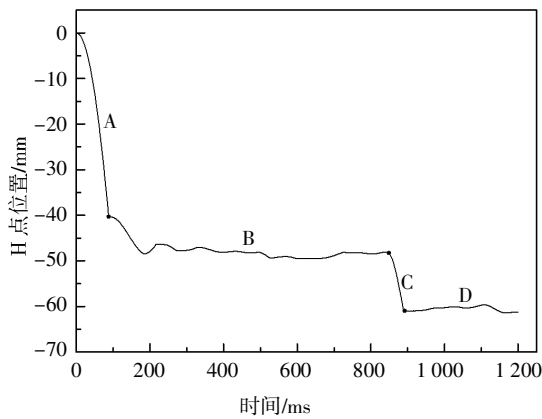


图 5 H 点位置

Fig.5 The position of H point

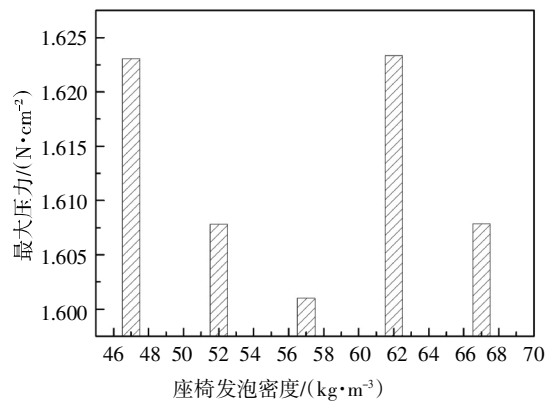


图 8 坐垫界面间的最大压力

Fig.8 The maximum pressure between seat surfaces

3.1 车辆驾乘人员-座椅坐垫界面间的整体体压分析

图 6、图 7 和图 8 所示为选用的能最终反映对舒适性影响的坐垫整体的平均接触压力、接触面积以及最大压力 3 个体压指标的仿真结果。

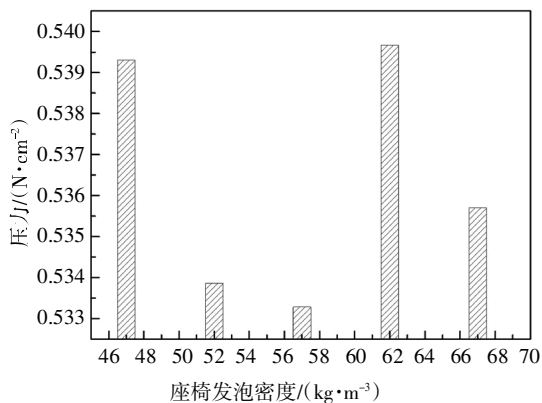


图 6 坐垫界面间的平均接触压力

Fig.6 The average contact pressure between seat surfaces

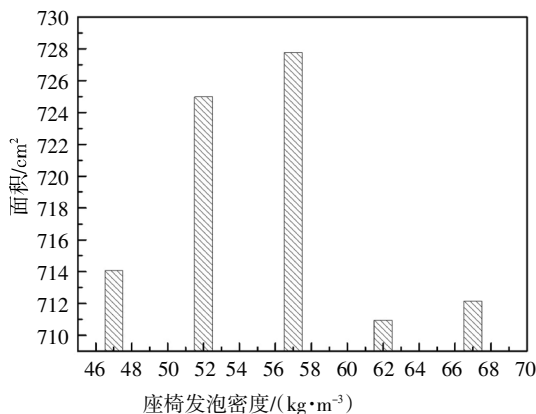


图 7 坐垫界面间的接触面积

Fig.7 The contact area between seat surfaces

对比图中坐垫界面间的平均接触压力和最大压力的仿真结果,95 百分位的驾乘人员乘坐在发泡密度为 57 kg/m^3 座椅上的平均接触压力和最大压力最小,分别约为 0.5333 N/cm^2 和 1.6010 N/cm^2 ,乘坐在发泡密度为 52 kg/m^3 座椅上的测试值次之,相比于乘坐在发泡密度分别为 47 、 62 和 67 kg/m^3 座椅上的测试值略小;接触面积的测试结果为乘坐在发泡密度为 57 kg/m^3 座椅上的接触面积最大,约为 727.756 cm^2 ,比乘坐在发泡密度为 47 kg/m^3 和 67 kg/m^3 座椅上的测试值分别高 1.92% 和 2.19% 。

通过上述分析可知,座椅发泡密度的改变影响着车辆驾乘人员与座椅坐垫界面间的体压分布. 95 百分位体征的车辆驾乘人员乘坐在发泡密度为 57 kg/m^3 的座椅上时,与座椅坐垫的贴合性最好,具有最大的接触面积、最小的平均接触压力与最小的最大压力值,车辆驾乘人员的臀部和腿部区域得到合理的支撑,坐垫界面间的压力得以分散,表面张力减小. 此时,臀部和腿部区域受到的压力刺激作用相对较小,车辆驾乘人员臀部和腿部区域的压迫感小。

当车辆驾乘人员乘坐在发泡密度分别为 47 、 52 、 62 和 67 kg/m^3 的座椅上时,平均压力和最大压力均高于乘坐在发泡密度为 57 kg/m^3 座椅上的测试值,受到的刺激作用比乘坐在发泡密度为 57 kg/m^3 的座椅上时对人的刺激大。

因此,发泡密度为 57 kg/m^3 的座椅与其他发泡密度的座椅相比,承载着 95 百分位体征车辆驾乘人员的人体质量具有更大的支撑面积、最小的平均压力和最大压力,更好地减小了压力对车辆驾乘人员整体的刺激作用. 且舒适性较高的座椅体压分布一般原则是使人体质量以较大的支撑面积,较小的

单位压力分布在座椅坐垫和靠背上. 因此, 乘坐在发泡密度为 57 kg/m^3 的座椅上时, 人体受到刺激作用更小, 有利于人体肌肉组织放松, 获得相对高的乘坐舒适性.

3.2 车辆驾乘人员-座椅坐垫界面间的剪切力

当车辆驾乘人员乘坐在座椅上时, 承载着人体约 60% 左右重量的臀部区域与座椅坐垫的接触区域会产生一定程度的压陷, 造成车辆驾乘人员的臀部部位不再呈直线, 除产生垂直于接触面的作用力外, 还会产生平行于接触面的剪切力. 实际行驶工况中, 剪切力会对车辆驾乘人员产生反作用力, 大大降低人体可耐受的压力.

如图 9 所示, 95 百分位体征的车辆驾乘人员乘坐在发泡密度为 57 kg/m^3 座椅上的剪切力最小, 约 0.1548 N/cm^2 , 乘坐在发泡密度为 52 kg/m^3 座椅上的剪切力次之, 乘坐在发泡密度为 47 kg/m^3 座椅上的剪切力最大, 约为 0.1573 N/cm^2 , 高出最低剪切力约 1.615%.

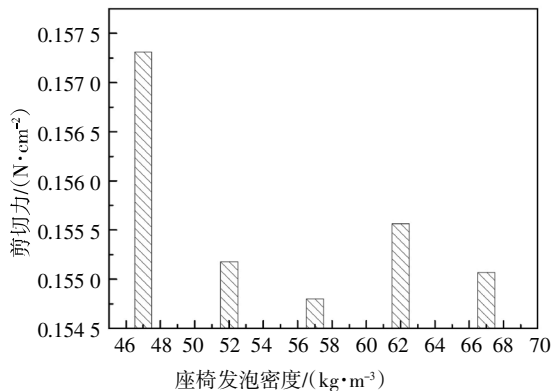


图 9 平行于坐垫平面的剪切力

Fig.9 The shear force between seat surfaces

通过对图 9 所示剪切力仿真结果的分析可知, 当 95 百分位体征的车辆驾乘人员乘坐在坐垫相对柔软, 发泡密度为 47 kg/m^3 的座椅上时, 承重较多的臀部下陷较深, 承重较小的腿部下陷较浅, 腿部凸起量大于其他发泡密度座椅的测试值, 结合图 6 中坐垫界面间的平均压力值, 正比于接触表面之间接触压力的剪切力最大值为乘坐在发泡密度为 47 kg/m^3 座椅上的测试结果. 与此相反, 乘坐在发泡密度为 57 kg/m^3 座椅上的剪切力最小, 对人体的刺激作用最弱, 人体可耐受压力的降低幅度相对较小, 进而减小对人体皮肤和组织氧饱和度的影响, 降低肌肉的疲劳与疼痛程度, 获得相对高的乘坐舒适性.

3.3 人体躯干各部位与座椅坐垫界面间的体压分析

为客观评定人体躯干各部位的体压变化, 量化

人体局部对压力的敏感程度, 本文对坐垫的纵向压力分布曲线进行了研究与分析, 如图 10 所示.

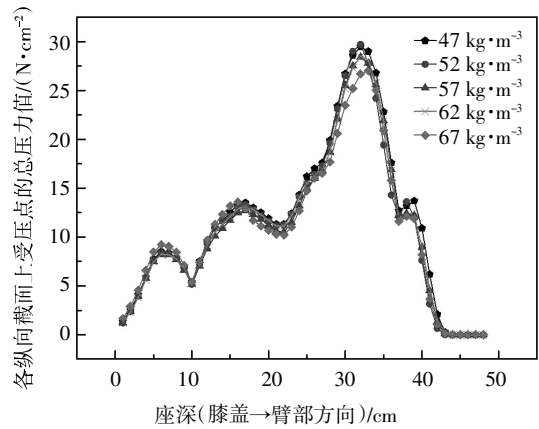


图 10 坐垫的纵向压力分布曲线

Fig.10 The distribution curve of the cushion's longitudinal pressure

由图 10 可知, 最大压力主要集中在坐骨结节部位, 由坐骨结节到臀部外围, 压力逐渐降低, 到与坐垫前缘接触的大腿前部区域时压力值最小. 产生这一现象的原因为: 臀部作为人体重量最集中的区域, 承受了人体较大比重的重量, 对受压状况刺激反应的灵敏程度相对较高, 进而臀部区域压力的测试结果高于大腿中部和大腿前部.

对比图 10 中数据可知, 95 百分位体征的车辆驾乘人员乘坐在发泡密度为 67 kg/m^3 的座椅上时, 臀部区域的压力值比乘坐在其他发泡密度座椅上的压力值偏低; 乘坐在发泡密度为 57 kg/m^3 的座椅上时, 大腿中部的压力值最低; 乘坐在发泡密度分别为 47 、 52 和 57 kg/m^3 的座椅上时, 大腿前部的压力值均低于乘坐在发泡密度为 67 kg/m^3 座椅上的测试值.

由上述的分析可知, 高阈值压力主要集中在承重较高的臀部区域, 腿部区域的压力相对较低, 臀部和腿部的最低压力值分别为乘坐在发泡密度为 67 kg/m^3 和 57 kg/m^3 座椅上的测试结果. 产生这一现象的原因是: 由于人体自身的结构和各部位重量的差异, 人体各区段的下沉量存在差异, 人体各部位与坐垫接触界面间表现的体压不同; 以坐骨结节为中心, 向四周逐渐扩散减小的体压分布符合人体生理结构的特点, 乘坐在发泡密度为 67 kg/m^3 和 57 kg/m^3 座椅上受到的压力刺激作用相对较小, 进而获得更高的舒适性.

因此, 为减小压力对人体臀部、大腿中部以及大腿前部区域的刺激作用, 获得相对高的舒适性, 可将座椅坐垫的发泡分区域设计.

4 结 论

本文构建了车辆驾乘人员-座椅模型,进行了 95 百分位体征驾乘人员的体压分布及其与座椅坐垫界面间剪切力的仿真,分析了不同发泡密度座椅与驾乘人员之间的整体体压和剪切力的分布规律,并更为精细地分析了驾乘人员人体各部位与坐垫接触区域间体压的变化规律,从而将座椅坐垫发泡密度对驾乘人员乘坐舒适性的影响,从前期的实椅试制阶段前移至概念设计阶段,实现了在发泡构件制造之前预测不同发泡密度对乘坐舒适性影响的量化精细化分析. 主要结论如下:

1) 发泡密度影响驾乘人员与座椅坐垫之间的整体体压和剪切力的分布. 当车辆驾乘人员乘坐在发泡密度为 57 kg/m^3 的座椅上时具有最大的接触面积,坐垫承载的压力得以分散,表面张力减小,平均接触压力、最大压力和剪切力最低.

2) 不同发泡密度的座椅对人体各部位的压力刺激存在差异. 大腿中部和大腿前部乘坐在发泡密度较小的 57 kg/m^3 的座椅上时受到的压力刺激作用相对较弱,臀部区域乘坐在发泡密度较大的 67 kg/m^3 的座椅上时受到的压力刺激作用相对较小.

3) 通过对驾乘人员的整体体压分布、剪切力与其躯体各部位局部压力分布的对比分析表明:在兼顾座椅整体舒适性的同时,为有效提高人体局部的舒适感,可通过将人体局部对应的座椅坐垫发泡密度优化配置进行发泡密度分区设计,使人体质量以较大的支撑面积、较小的整体和合理的局部压力分布在坐垫上.

后续研究中将开展发泡密度分区座椅的设计与试制开发,并进一步探索开展综合考虑发泡材料、座椅坐垫骨架、蒙皮及适应低频振动等因素的车用座椅舒适性一体化设计方法.

参考文献

- [1] 张邦基,易金花,张农,等. 装有动力调节悬架系统车辆的频域建模与仿真 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版),2016,43(10): 8—15.
ZHANG B J, YI J H, ZHANG N, *et al.* Frequency-domain modelling and simulation of a vehicle fitted with kinetic dynamic suspension system [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(10): 8—15. (In Chinese)
- [2] LEE J, FERRAIUOLO P. Seat comfort [R]. Washington DC: SAE International, 1993.
- [3] ZEMP R, TAYLOR W R, LORENZETTI S. Seat pan and backrest pressure distribution while sitting in office chairs [J]. Applied Ergonomics, 2016, 53: 1—9.
- [4] CILOGLU H, ALZIADEH M, MOHANY A, *et al.* Assessment of the whole body vibration exposure and the dynamic seat comfort in passenger aircraft [J]. Industrial Ergonomics, 2015, 45: 116—123.
- [5] ANDREONI G, SANTAMBROGIO G C, RABUFFETTI M, *et al.* Method for the analysis of posture and interface pressure of car drivers [J]. Applied Ergonomics, 2002, 33(6): 511—522.
- [6] 高振海,高菲,沈传亮,等. 汽车椅面倾角对驾驶员乘坐舒适性的影响分析 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2017, 44(8): 43—49.
GAO Z H, GAO F, SHEN C L, *et al.* Analyses of driver sitting comfort in different automotive seat-pan angle [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(8): 43—49. (In Chinese)
- [7] OLIVA A, SETOLA R, SCALA A. Sparse and distributed analytic hierarchy process [J]. Automatica, 2017, 85: 211—220.
- [8] LU Z L, LI S B, FELIX S, *et al.* Driving comfort evaluation of passenger vehicles with natural language processing and improved AHP [J]. Journal of Tsinghua University, 2016, 56(2): 137—143.
- [9] HUANG S R, ZHANG Z F, YUAN Q, *et al.* Weight coefficients of different body parts to whole body in terms of static comfort in sitting posture [J]. Automotive Engineering, 2016, 38(7): 889—895.
- [10] IVANCO M, HOU G, MICHAELI J. Sensitivity analysis method to address user disparities in the analytic hierarchy process [J]. Expert Systems with Applications, 2017, 90: 111—126.
- [11] LEE S H, PARK J S, JUNG B K, *et al.* Effects of different seat cushions on interface pressure distribution: a pilot study [J]. Physical Therapy Science, 2016, 28(1): 227—230.
- [12] SEOKHEE N, SUNGHYUN L, HWA-SOON C, *et al.* Evaluation of driver's discomfort and postural change using dynamic body pressure distribution [J]. Industrial Ergonomics, 2005, 35(12): 1085—1096.
- [13] 陈俊豪,任金东,刘涛,等. 基于 H 点装置仿真的压力分布与座椅参数测量和舒适性评价的研究 [J]. 汽车工程, 2017, 39(5): 593—598.
CHEN J H, REN J D, LIU T, *et al.* A research on the measurement of pressure distribution and seat parameters and comfort evaluation based on HPM simulation [J]. Automotive Engineering, 2017, 39(5): 593—598. (In Chinese)
- [14] 高菲. 基于骨肌生物力学的驾驶员疲劳机理与舒适性评价研究 [D]. 吉林: 吉林大学汽车学院, 2017: 102—126.
GAO F. Study of driver's fatigue mechanism and driving comfort evaluation based on musculoskeletal bio-mechanics [D]. Jilin: College of Automotive Engineering, Jilin University, 2017: 102—126. (In Chinese)
- [15] ANINDYA D, SHIVAKUNAR N D. An experimental study on energy absorption behavior of polyurethane foams [J]. Reinforced Plastics and Composites, 2009, 28: 3021—3026.
- [16] 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, 6: 551—555.
JIN X P, YUAN X K, WANG B, *et al.* An objective evaluation method for the comfort of foam cushion in vehicle seat [J]. Automotive Engineering, 2012, 6: 551—555. (In Chinese)
- [17] AKGUNDUZ A, RAKHEJA S, TARCZAY A. Distributed occupant-seat interactions as an objective measure of seating comfort [J]. International Journal of Vehicle Design, 2014, 65(4): 293—313.