DOI: 10.3901/JME.2019.17.162

基于体压数据映射的定制坐垫接触面设计方法^{*}

张志飞^{1,2} 李春雨² 梁玲² 徐中明^{1,2} 贺岩松^{1,2}

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400030;

2. 重庆大学汽车工程学院 重庆 400030)

摘要: 贴合人体臀部轮廓的定制坐垫能够提高舒适性, 定制坐垫接触面的体压映射设计方法简便且高效, 但合理的体压映射函数难以确定。针对聚氨酯泡沫坐垫, 提出了一种结合人体臀部-坐垫模型仿真结果确定体压映射函数的定制坐垫接触面体压映射设计方法(Simulated pressure and deformation mapping method, SPDM), 建立人体臀部-坐垫有限元模型, 结合实验者体型参数和泡沫材料特性曲线对人体臀部-坐垫模型进行适应性调整, 拟合坐垫上表面压力与变形量仿真结果得到体压映射函数, 利用体压映射函数对实测体压数据进行映射得到接触面凹陷量点云数据, 在三维软件中完成定制坐垫接触面曲面重构。以两个不同体型(95 和 50 百分位)的实验者为例, 采用 SPDM 方法进行定制坐垫接触面设计, 并与材料特性曲线映射方法(Tested material characteristic mapping method, TMCM)设计的定制坐垫接触面进行对比, 曲面光顺性和体压分布指标比较结果表明 SPDM 方法设计的定制坐垫接触面具有更好的光顺性, 能更好地贴合人体臀部, 有效改善了坐垫体压分布。

关键词: 定制坐垫; 接触面设计; 人体臀部-坐垫模型; 体压分布; 体压映射

中图分类号: TG156

Custom-contoured Cushion Interface Design Method Based on Interface Pressure Mapping

ZHANG Zhifei^{1,2} LI Chunyu² LIANG Ling² XU Zhongming^{1,2} HE Yansong^{1,2}

(1. The State key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030;

2. School of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract: The custom-contoured cushion (CCC) whose surface fits the human buttocks can improve the comfort of the cushion. The CCC design method based on body pressure mapping is simplicity and efficiency, however an appropriate mapping function is hard to obtain. Aimed at polyurethane foam cushion, a CCC design method based on body pressure mapping is proposed (simulated pressure and deformation mapping method, SPDM method), whose mapping function is obtained from the simulation results: firstly the finite element model of human buttock-seat cushion is established and is adaptively adjusted according to the human body parameters and material characteristic curve, secondly the body pressure mapping function is obtained by fitting the simulation results of pressure and deformations, then the body pressure distribution is transformed into the carving depth of the foam cushion, finally the interface of CCC is completed in CATIA. SPDM method and tested material characteristic mapping (TMCM) method were used to design cushions based on experiment and simulation pressure data of two different statures experiments(50th and 95th percentile), the smoothness and body pressure distribution of the designed cushion surface are used to validate the custom-contoured cushion. The results indicates that custom-contoured cushion designed based on SPDM method has a good smoothness and can improve the comfort of the cushion.

Key words: custom-contoured cushion; interface design; human buttock-cushion model; body pressure distribution; pressure mapping

0 前言

人们在坐姿下花费越来越多的时间, 坐垫作为

最重要的人机界面, 其舒适性得到越来越多的关注。研究发现, 坐垫接触面的体压分布是舒适性的重要指标之一^[1-2]。坐垫接触面的设计影响着坐垫的舒适性, 定制坐垫接触面能够贴合人体臀部轮廓, 增大接触面积, 降低接触面的压力, 提高坐垫舒适性^[3-4]。

人体臀部-坐垫接触面的体压数据是接触面人

^{*} 国家自然科学基金(51875060)、重庆市留学人员回国创业创新支持计划(cx2017027)资助项目, 20180814 收到初稿, 20190501 收到修改稿

机性能的体现,也可作为接触面设计的依据,如基于体压数据映射来设计定制坐垫,以改善舒适性。BRIENZA^[5]利用体压垫和轮廓仪测量接触面体压与臀部形状信息并进行分析,证明了体压映射方法生成定制坐垫的有效性;刘肖健等^[6]采用七种不同的体压映射函数进行接触面设计,根据接触面形态的统计数据,比较了七种体压映射模型的造型能力与造型质量;程东艳等^[7]选用10个个体的体压数据,利用体压映射的方法设计了能够贴合人体臀部轮廓的硬质座椅接触面;文献[8-9]提出了以坐垫泡沫材料的特性曲线作为体压映射函数进行接触面设计,舒适性主观与客观评价均表明其能有效降低接触面压力、改善舒适性;宗立成等^[10]采用曲面能量优化方法,将体压数据映射得到曲面形态,完成了载人潜水器舱室座椅接触面的设计。

然而,体压映射方法的理想映射函数需要大量的试验数据确定,耗费人力财力,是个悬而未决的问题。人体落座后接触面形状能够很好的贴合人体臀部形状,满足定制坐垫接触面的要求,但是接触面的形态难以通过试验测得。随着计算机仿真技术的发展,通过人体-坐垫有限元模型^[11-14]仿真模拟接触面的压力和变形,为坐垫设计提供了新途径。

针对汽车坐垫常用的聚氨酯泡沫材料,提出了一种结合有限元仿真结果确定体压映射函数的定制坐垫接触面体压映射设计方法(Simulated pressure and deformation mapping method, SPDM)。选取两种不同体型的实验者进行定制坐垫接触面设计,并与材料特性曲线映射方法(Tested material characteristic mapping method, TMCM)进行对比,分析定制坐垫接触面曲面的光顺性和体压分布参数,以验证 SPDM 方法的有效性。

1 人体臀部-坐垫模型的建立与验证

1.1 人体臀部模型

LSTC 公司研发的美国 50 百分位成年男子 Hybrid III 碰撞假人模型具有很好的生物逼真性,且体型与中国的 95 百分位人体相近^[14]。提取 Hybrid III 模型的臀部部分,对网格进行修改和细化,得到人体臀部有限元模型,网格大小为 10 mm,如图 1 所示。臀部模型的大腿肌肉和血管神经统一简化为肌肉软组织处理。骨盆、脊椎和大腿软组织均用四面体实体单元模拟,下肢骨和皮肤用壳单元模拟。通过施加集中质量点,模拟人体躯干的质量,集中质量点与骨骼进行连接。

图1 人体臀部有限元模型

参考文献[15],大腿皮肤材料用各向同性近似不可压缩的线弹性材料模拟,密度为 $1\,100\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 0.15 MPa ,泊松比为 0.46 。人体落座过程中骨骼几乎不发生变形,骨盆、脊椎和下肢骨等骨骼结构用刚体材料模拟,密度为 $1\,700\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3 。

肌肉软组织材料具有很强的黏弹性和非线性,参考文献[12],采用 LS_dyna 软件中的超弹性材料模型 Mooney-Rivlin 模拟,其应变能函数为

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2 \quad (1)$$

式中 C_{10} ——切变模量,取 1.65 kPa ;

C_{01} ——切变模量,取 3.35 kPa

D_1 ——体积模量,取 3.65 kPa ;

J^{el} ——弹性体积比。

I_1 和 I_2 为柯西格林等容形式张量的第一、第二不变量, $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$; $I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2$,其中 $\lambda_i = 1 + \gamma_i$, λ_i 为主伸长率, γ_i 为主应变。

1.2 泡沫坐垫模型

参考实际座椅的坐垫大小和人体就座时的区域,泡沫坐垫实物选为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 的长方体聚氨酯泡沫,采用 10 mm 的四面体网格建立其有限元模型。

坐垫材料特性决定了坐垫的受力变形情况,影响体压仿真的准确性。参考 GB/T 10807-2006,使用电子万能试验机对坐垫的泡沫材料进行单轴压缩测试。泡沫试件为聚氨酯泡沫坐垫切割所得,尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 。选用直径为 100 mm 的圆头压盘,以 50 mm/min 的速度匀速缓慢下压泡沫试件,压盘的最大位移为 49 mm ,试验现场图如图 2 所示。试验过程中泡沫试件基本没有横向变形,根据泡沫试件的压缩力-变形曲线,利用式(2)和式(3)得到泡沫材料的压缩应力-应变曲线

$$\varepsilon(t) = \frac{s(t)}{h} \quad (2)$$

$$\sigma(t) = \frac{1\,000F(t)}{A} \quad (3)$$

式中 $\varepsilon(t)$ ——泡沫材料的应变;

$\sigma(t)$ ——应力(kPa);

- $s(t)$ ——压盘位移(mm)
 $F(t)$ ——压盘受力(N);
 h ——泡沫试件的厚度(mm);
 A ——压盘与试件接触面积(mm²)。

图2 泡沫单轴压缩试验

泡沫材料实测的压缩应力-应变曲线,如图3中实线所示。

图3 泡沫材料应力-应变曲线

聚氨酯泡沫材料具有高度的非线性,在LS_dyna软件中选用Ogden超弹性材料模型模拟,Ogden超弹性材料模型的应变能定义如下

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} \left((J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

式中 N ——多项式模型阶数;

μ_i, α_i, β_i ——与变形无关的材料常数。

泡沫材料为可压缩材料,忽略材料的泊松效应,泊松比设置为0。根据单轴压缩试验数据,在软件中采用2阶应变能函数($N=2$)拟合得到材料应力-应变曲线,拟合结果如图3中虚线,能与试验测试结果很好吻合。

1.3 模型验证

1.3.1 静态体压测试试验

人体臀部模型的尺寸与中国95百分位体型相近,为了使试验与仿真有更好的参照性,选取与模型体型相近的5位实验者,分别进行硬木板坐垫和泡沫坐垫下的静态体压分布试验,实验者人体参数

见表1。硬木板坐垫下的体压分布受外界干扰最小,用于验证臀部模型的准确性;泡沫坐垫下的体压分布用于人体臀部-坐垫耦合模型的准确性验证。为消除靠背对体压分布的影响,硬木板坐垫和泡沫坐垫下的体压分布试验均在无靠背支撑条件下进行。

臀部-坐垫间的体压分布选用XSensor体压测试系统测量,该设备包括40×40布置的1600个压力传感器,均布于50.8 mm×50.8 mm的压力垫。

试验具体要求如下。

(1) 硬木板坐垫试验。

试验过程中,压力垫无褶皱平铺于水平放置的硬木板桌面上,实验者双脚悬空并正坐于压力垫(背部与大腿垂直,如图4a,增大了臀部与木板的接触面积,降低了最大压力峰值,保证试验在体压传感器的有效量程内进行。坐姿稳定后,持续采集试验数据1 min,硬木板坐垫的体压测试结果如图4c。

(a) 试验坐姿图

(b) 仿真坐姿图

(c) 试验压力云图

(d) 仿真压力云图

图4 硬木板坐垫试验和仿真示意图

(2) 泡沫坐垫试验。

在一款汽车座椅的骨架上固定一块水平放置的长方体木板,并在木板上放置500 mm×500 mm×70 mm的聚氨酯泡沫坐垫,压力垫无褶皱平铺于上。实验者就坐后背部与水平面垂直,实验者微调脚和小腿至舒适坐姿,如图5a。坐姿稳定后,持续采集试验数据1 min,泡沫坐垫的体压测试结果如图5c。

1.3.2 静态体压仿真

人体落座后硬木板坐垫几乎不变形,硬木板坐垫用400 mm×410 mm×20 mm长方体模拟,材料为线弹性材料,密度为1 700 kg/m³,弹性模量为16.7 GPa,泊松比为0.3,硬木板坐垫仿真模型如图4b。泡沫坐垫用500 mm×500 mm×70 mm长方体模拟,

材料根据试验结果设置,臀部-泡沫坐垫的仿真模型如图 5b 所示。硬木板试验和泡沫坐垫试验时,人体坐姿略有不同,人体落座于坐垫的载荷也不同。根据试验测得的落座载荷,修改集中质量点以调整臀部模型,硬木板坐垫条件下臀部模型质量为 75.8 kg,泡沫坐垫条件下臀部模型质量为 60 kg。

图 5 泡沫坐垫试验和仿真示意图

臀部模型骨骼与肌肉采用共节点方式连接;对人体臀部模型姿势进行调节,并约束骨骼只能沿垂

向运动,以保证人体落座后膝盖与坐垫面的夹角与试验测试保持一致;人体与坐垫接触采用“罚函数”面面接触,静摩擦因数为 0.3,动摩擦因数为 0.2;通过约束坐垫底部所有节点的全部 6 个方向自由度实现坐垫的支撑和固定;将人体臀部-坐垫模型简化为二分之一模型,约束人体臀部-坐垫模型横向对称面节点沿大腿横向运动的自由度,来模拟对称面边界条件,以方便接触面的对称设计和提高仿真效率;整个系统施加垂直向下的重力加速度 g ,大小为 9.83 m/s^2 ;仿真开始前,使人体臀部与坐垫尽量靠近且不穿透,模拟人体的缓慢落座过程。

1.3.3 体压结果分析

图 4d、图 5d 和表 1 为人体臀部-坐垫模型的仿真结果,可见硬木板和泡沫坐垫下的体压分布云图仿真结果与试验测试结果能很好地吻合,最大压力值均位于坐骨结节下方,体压值沿坐骨结节处向外逐渐减小。表 1 结果显示,硬木板坐垫和泡沫坐垫条件下,最大压力仿真值与试验值相比都偏小,原因可能是人体就坐时的不对称性导致实际体压分布不对称,实验者裤子和体压传感器的存在增加了接触的刚度;泡沫坐垫条件下的误差稍大,可能由于泡沫材料变形较大,裤子和压力传感器对其影响也更大。综合来看,体压分布各指标仿真结果的误差较小,说明人体臀部-坐垫模型体压仿真结果具有较高可信度,模型的精度得到验证。

表 1 静态压力分布试验仿真结果对比

实验者	身高/mm	体重/kg	硬木板			泡沫坐垫		
			最大压力/kPa	平均压力/kPa	接触面积/cm ²	最大压力/kPa	平均压力/kPa	接触面积/cm ²
1	181	72.4	67.19	7.34	1 038	21.49	5.57	981
2	171	70.3	62.83	7.21	971	23.13	6.02	935
3	178	75	65.90	7.42	1 027	21.38	5.76	1 001
4	173	75.4	56.39	7.51	1 004	18.63	5.60	923
5	174	69.5	58.20	7.53	923	22.45	5.63	895
平均	175.2	72.5	62.10	7.33	993	21.42	5.72	947
仿真	175.8	75.8	60.11	7.58	983	20.24	5.57	1 058
误差(%)	0.23	4.52	-3.21	9.34	-1.01	-5.51	-2.62	11.73

2 定制坐垫接触面设计方法

人体落座后坐垫上表面的最终形状能够很好地贴合人体臀部轮廓,可以作为定制坐垫接触面的设计曲面,但是其形态难以通过试验测得。因此提出一种结合有限元仿真的 SPDM 定制坐垫接触面设计方法,其思路为:以人体落座后的接触面形状作为理想设计曲面,结合臀部-坐垫仿真结果确定体压映射函数,最终进行体压映射获取定制坐垫接触面。

SPDM 方法包括试验测试、体压仿真、体压映射函数拟合和曲面设计四个环节。技术路线如图 6,具体流程如下。

- (1) 试验测试环节:进行人体参数测量试验、泡沫单轴压缩试验和泡沫坐垫静态体压分布试验。
- (2) 体压仿真环节:根据人体参数,坐垫材料曲线和坐垫载荷分布的试验测试结果,对人体模型的几何和质量及坐垫模型的材料进行适应性调整,并进行静态体压分布仿真。
- (3) 体压映射函数拟合环节:拟合坐垫上表面

各点体压与垂向变形的仿真结果,得到体压分布与接触面设计凹陷量的体压映射函数。

(4) 曲面设计环节:对试验体压数据进行对称和平滑处理;把实测体压数据通过体压映射函数映射得到接触面凹陷量点云数据,并对其进行归一化处理;在 Catia 三维建模软件中进行接触面曲面的点云重构,完成坐垫的曲面设计。

图 6 SPDM 方法技术路线

2.1 试验测试环节

根据 GB 5703 进行人体参数测量试验,按照 1.2 和 1.3 的方法进行泡沫试件单轴压缩试验和泡沫坐垫静态体压分布试验。测得人体体型参数(如图 7)、泡沫材料特性曲线以及压力分布数据。

图 7 人体坐姿参数示意图

选取体型与中国 95 百分位和 50 百分位体型相近的两位实验者,进行定制坐垫接触面设计,两位实验者人体参数如表 2 所示。

表 2 实验者体型参数

实验者	Hybrid III 模型	95 th 实验者	50 th 实验者
身高/mm	175.5	178	170
体重/kg	75.8	75.0	62.2
坐姿臀膝距 l/mm	591	595	550
坐姿臀宽 w/mm	358	362	332
坐姿大腿厚 t/mm	156	152	143

2.2 体压仿真环节

不同人体间存在体型差异、不同泡沫存在材料特性差异,因此对人体臀部-坐垫模型进行适应性调整能够提高仿真精度,更好地进行定制化设计。

以美国 50 百分位成年男子 Hybrid III 臀部模型作为放缩基准,根据文献[16]提供方法,对臀部模型几何形状进行等比例放缩。臀部模型的几何形状由臀部 x, y, z 方向的几何尺寸相关,选取坐姿臀膝距 l , 坐姿臀宽 w 和坐姿大腿厚 t 确定臀部几何的放缩因子。臀部几何放缩因子计算公式如下式

$$S = \sqrt[3]{\lambda_x \lambda_y \lambda_z} \quad (5)$$

式中 S ——几何放缩因子;

λ_x —— x 方向几何放缩系数;

λ_y —— y 方向几何放缩系数;

λ_z —— z 方向几何放缩系数。

结合表 2 中 Hybrid III 假人模型尺寸参数,

$$\lambda_x = \frac{l}{591}, \quad \lambda_y = \frac{w}{358}, \quad \lambda_z = \frac{t}{156}。$$

在完成臀部模型的几何放缩后,根据静态体压分布试验的落座载荷结果,修改集中质量点质量,即可完成臀部模型的适应性调整。

针对两位实验者,人体模型调整结果为:95 百分位实验者对应 95 百分位模型的比例放缩因子为 0.997,落座质量为 58.9 kg;50 百分位实验者对应 50 百分位模型的比例放缩因子为 0.925,落座质量为 45.0 kg。

表 3 调整后模型仿真结果

		实验者	仿真模型	误差(%)
95 th	最大压力/kPa	21.38	20.07	-6.17
	平均压力/kPa	5.76	5.49	-4.69
50 th	最大压力/kPa	19.74	17.58	-10.94
	平均压力/kPa	5.26	5.07	-3.61

根据坐垫泡沫材料的应力-应变曲线,完成坐垫模型的调整。人体-坐垫适应性调整后的 95 百分位和 50 百分位实验者对应放缩模型的仿真结果与两个实验者静态体压试验结果进行对比,如表 3 所示,模型仿真结果与试验结果具有较小误差,调整后模型能保持较高精度。

2.3 体压映射函数拟合环节

仿真得到坐垫接触面各点的体压数据与垂向变形数据散点图(图 8)。可以看出,压力与垂向变形数据分布于某条曲线附近,可进行函数拟合。通过比较,最终选用三次多项式拟合压力数据和垂向变形数据,得到压力与接触面凹陷量的映射函数

$$D = a * (P)^3 + b * (P)^2 + c(P) + d \quad (6)$$

式中, P 为接触面各点的压力矩阵; D 为接触面各点凹陷量矩阵; a, b, c, d 为多项式拟合参数。两个实验者压力数据的体压映射函数参数如表 4 所示。

图 8 接触面压力与垂向变形仿真数据散点图

表 4 映射函数拟合参数

	a	b	c	d
95 th 模型	0.002 1	-0.118 8	2.901 7	1.145 3
50 th 模型	0.003 7	-0.154 4	3.060 6	1.303 5

2.4 曲面设计环节

静态体压试验测得的 $M \times N(40 \times 40)$ 体压数据较粗糙并且不对称。为了保证设计坐垫接触面光滑和对称, 在体压映射接触面凹陷量数据前, 对体压数据进行对称和降噪滤波处理。

(1) 对称处理: 在保证总压力不变原则下, 对压力数据中心两侧试验数据作如下对称平均处理

$$P'_{i,j} = \frac{P'_{i,j} + P'_{i,N-j+1}}{2} \quad (7)$$

式中, P' 为原始体压数据, i 为体压数据沿坐深纵向的序号, j 为沿坐深横向的序号。

(2) 降噪滤波处理: 采用算术平均的滤波方法对数据进行降噪平滑, 选取各数据点以及与其相邻 4 个数据算术平均, 如式(8)。为了使得得到曲面更加平滑, 对试验数据重复进行了 2 次降噪滤波处理。

$$P_{i,j} = \frac{P'_{i-1,j} + P'_{i+1,j} + P'_{i,j} + P'_{i,j-1} + P'_{i,j+1}}{5} \quad (8)$$

预处理后的体压数据, 沿中心线对称分布, 峰值压力有所降低, 减小了噪声影响, 压力过渡更加平滑, 符合接触面的设计要求, 如图 9 所示。

图 9 实验者体压数据预处理结果

参考坐垫接触面设计经验, 坐垫接触面最大凹陷量为 20 mm 时较合适^[9]。对体压映射获得的接触面凹陷量数据矩阵 D 进行归一化处理, 把凹陷量数据转换到 0~20 mm 范围内, 归一化处理公式如下

$$D_{norm} = \frac{20}{D_{max}} \times D \quad (9)$$

式中, D_{norm} 为归一化凹陷量矩阵, D_{max} 为凹陷量矩阵 D 的最大值。

归一化处理后的接触面点云数据 D_{norm} 导入 Catia 三维建模软件进行曲面重构。首先滤除点云数据的冗余点, 将过滤后的点云数据生成网格, 并对网格进行平顺优化, 设置最大偏差为 0.3 mm; 最后使用最优化曲面工具, 自动完成接触面曲面的拟合重构, 曲面图及其垂向割线图如图 10 所示。

图 10 定制坐垫接触面垂向割线图

3 定制坐垫效果评价

在体压映射定制坐垫设计方法中, TMCM 方法利用坐垫泡沫单轴压缩试验得到的材料特性曲线作为压力分布与接触面凹陷设计量的映射函数, 进行定制坐垫接触面曲面设计, 有较好的适应性^[8-9], 因

此将该方法作为参考进行对比。

基于 95 百分位和 50 百分位实验者的实测体压数据、95 百分位和 50 百分位人体臀部-坐垫模型的体压仿真数据,分别运用 SPDM 方法和 TCMCM 方法获取体压映射函数(图 11),可见 SPDM 方法获取的体压映射函数更为平滑。基于这两种方法完成定制坐垫的曲面设计,利用曲面光顺性、体压分布指标进行比较。

图 11 体压映射函数

3.1 接触面曲面光顺性

人机接触曲面要具有较好的光顺性,曲面的曲率和等照度线分布云图可以直观地反映曲面的光顺性。曲面的曲率小、曲率云图分布均匀,等照度曲线疏密均匀过渡,则曲面光顺性好,反之曲面的光顺性差。

两种方法生成坐垫接触面的曲面曲率和等照度线结果如图 12 和表 5 所示。与 TCMCM 方法设计的定制坐垫接触面相比,SPDM 法的定制坐垫接触面的曲率峰值更小,曲率云图分布更加均匀,等照度曲线过渡更加平缓,曲面的光顺性更好。

表 5 接触面曲率峰值

	TCMCM 方法	SPDM 方法
95 百分位实验者	0.006 6	0.003 0
50 百分位实验者	0.015 3	0.008 6
95 百分位模型	0.018 3	0.007 4
50 百分位模型	0.037 3	0.012 6

(a) 95百分位试验数据TCMCM方法

(b) 95百分位试验数据SPDM方法

(c) 95百分位模型数据TCMCM方法

(d) 95百分位模型数据SPDM方法

(e) 50百分位试验数据TCMCM方法

(f) 50百分位试验数据SPDM方法

(g) 50百分位模型数据TCMCM方法

(h) 50百分位模型数据SPDM方法

图 12 TCMCM 和 SPDM 方法基于试验和模型数据生成曲面的曲率和等照度线云图

3.2 定制坐垫接触面压力仿真

针对这两位实验者(95 百分位和 50 百分位), 将利用 SPDM 和 TMCM 方法得到的接触面作为坐垫的上表面, 坐垫的下表面为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 的平面, 上下表面最大厚度为 70 mm , 即可获得定制坐垫, 其有限元模型如图 13。

坐垫接触面的最大压力、平均压力以及接触面剪切力影响着人体的舒适性。人体臀部-坐垫模型仿真的定制坐垫接触面压力和切应力结果如图 14、图

15 和表 6 所示。结果表明以下情况。

(1) 相比平面泡沫坐垫, SPDM 和 TMCM 两种方法生成定制坐垫均能明显增大接触面积、降低最大压力和平均压力。

(2) 相比 SPDM 方法, TMCM 方法设计坐垫的最大压力更小, 但是平均压力变大、接触面积变小, 接触面曲面过渡不均匀, 压力分布存在突变, 坐骨结节周围软组织受到较大压力, 容易引起不适。

图 13 TMCM 和 SPDM 方法基于试验和模型数据生成的三维坐垫模型图

图 14 不同坐垫压力分布结果

图 15 不同坐垫剪切力分布结果

表 6 不同坐垫接触面压力仿真结果

		最大压力/kPa	平均压力/kPa	接触面积/cm ²	最大剪切力/kPa
95 百分位模型	平面泡沫坐垫	20.07	5.49	1 054	2.13
	TMCN 方法	11.32	5.16	1 116	1.81
	SPDM 方法	14.29	5.01	1 146	1.31
50 百分位模型	平面泡沫坐垫	17.58	5.07	872	2.07
	TMCN 方法	9.46	4.68	931	1.48
	SPDM 方法	12.25	4.52	973	1.24

(3) 按照 SPDM 方法设计的定制坐垫, 接触面积最大, 平均压力最小, 体压分布更合理。

(4) SPDM 方法设计的定制坐垫接触面明显降低了大腿软组织边缘的剪切力, 说明该定制坐垫能更好地贴合人体臀部。

综上, 基于接触面体压映射设计方法(SPDM)设计的定制坐垫, 对臀部的贴合更好, 压力分布更合理, 有助于改善座椅舒适性。

4 结论

(1) 基于碰撞假人模型, 对原模型几何、材料进行修改, 建立了人体臀部模型。通过单轴压缩试验得到泡沫材料特性曲线, 建立了泡沫坐垫模型。结合硬木板和泡沫坐垫下的静态体压分布试验结果, 对人体臀部-坐垫模型的准确性进行了验证, 人体臀部-坐垫模型能够准确模拟体压分布。

(2) 以人体落座后最终形态作为理想接触面, 提出了一种结合有限元仿真结果的定制坐垫接触面体压映射设计方法。以两个不同体型(95 百分位和 50 百分位)的实验者为例进行定制坐垫设计, 并与文献中材料特性曲线映射方法进行了对比分析, 结果表明利用接触面体压映射 SPDM 方法设计的定制坐垫接触面具有更好的光顺性, 能够更好地贴合人体臀部轮廓, 能增大接触面积、减小接触面压力和剪切力, 有效改善了坐垫的体压分布。

(3) 目前仅在仿真条件下对定制坐垫的体压分布结果进行了分析评价。将在后续的工作中, 制作泡沫定制坐垫实物, 对泡沫定制坐垫的体压分布进行试验分析, 以完善基于体压数据映射的定制坐垫接触面设计方法。

参 考 文 献

- [1] PARK S J, KIM C B. The evaluation of seating comfort by the objective measures[R]. SAE Technical Paper 970595, 1997.
- [2] DE LOOZE M P, KUIJT-EVERS L F, VAN DIEEN J. Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures[J]. Ergonomics, 2003, 46(10): 985-997.
- [3] TASKER L H, SHAPCOTT N G, WATKINS A J, et al. The effect of seat shape on the risk of pressure ulcers using discomfort and interface pressure measurements[J]. Prosthetics and Orthotic International, 2014, 38(1): 46-53.
- [4] SMULDERS M, BERGHMAN K, KOENRAADS M, et al. Comfort and pressure distribution in a human contour shaped aircraft seat (developed with 3D scans of the human body)[J]. Work, 2016, 54(4): 925-940.
- [5] BRIENZA D M, CHEN-TSE L, KARG P E. A method for custom-contoured cushion design using interface pressure measurements[J]. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 1999, 7(1): 99-108.
- [6] 刘肖健, 董占勋, 吴剑锋, 等. 基于压力分布试验数据的产品人机接触曲面形态设计[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(4): 644-649.
LIU Xiaojian, DONG Zhanxun, WU Jianfeng, et al. Human-product interface shape design method based on interface pressure data[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(4): 644-649.
- [7] CHENG Dongyan, SUN Shouqian, YANG Zhongliang, et al. Seat surface design due to the analysis of body pressure test data[C]. International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design. IEEE, 2011: 659-661.
- [8] YANG Chechang, HSU Yehliang. Development of a rapid prototyping system for custom contoured foam cushion using the pressure mapping method[J]. Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications, 2009, 21(1): 9-16.
- [9] LI Sujiao, ZHANG Zhengxiang, WANG Jue. Development and evaluation of a new contoured cushion system with an optimized normalization algorithm[J]. Bio-Medical Materials Engineering, 2014, 24(6): 3427-3438.
- [10] 宗立成, 何再明, 余隋怀, 等. 载人潜水器舱室座椅人机曲面能量优化法的试验研究[J]. 船舶力学, 2014(7): 849-855.
ZONG Licheng, HE Zaiming, YU Suihuai, et al.

- Experimental research of manned submersible's seat surface in energy optimization method[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2014(7): 849-855.
- [11] VERVER M M, VAN HOOFF J, OOMENS C W, et al. A finite element model of the human buttocks for prediction of seat pressure distributions[J]. *Computer Methods in Biomechanics Biomedical Engineering*, 2004, 7(4): 193-203.
- [12] 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 & Design*, 2009, 30(10): 4273-4285.
- [13] DU Xiaoming, REN Jindong, SANG Chunlei, et al. Simulation of the interaction between driver and seat[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 26(6): 1234-1242.
- [14] HUANG Shenrong, ZHANG Zhifei, XU Zhongming, et al. Modeling of human model for static pressure distribution prediction[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2015(50): 186-195.
- [15] RASMUSSEN J, CHRISTENSEN S T, SIEBERTZ K, et al. Posture and movement prediction by means of musculoskeletal optimization[R]. *SAE Congress: Digital Human Modeling for Design and Engineering*, SAE Paper 2006-01-2342, 2006.
- [16] MERTZ H J, IRWIN A L, MELVIN J W, et al. Size, weight and biomechanical impact response requirements for adult size small female and large male dummies[R]. *Proceedings of the SAE International Congress & Exposition*, SAE Paper 890756, 1989.
-
- 作者简介：张志飞，男，1983 年出生，副教授。主要研究方向为汽车乘员座椅舒适性、汽车振动与声学、结构优化。
E-mail: z.zhang@cqu.edu.cn
- 李春雨，男，1993 年出生，硕士研究生。主要研究方向为汽车乘员座椅舒适性。
E-mail: 1512619685@qq.com