

马桶座圈的造型与舒适性设计研究

李远利¹, 涂细凯¹, 向萌², 李肖¹

(1.湖北工业大学, 武汉 430068; 2.湖北美术学院, 武汉 430205)

摘要: **目的** 为了满足马桶座圈造型美观性与使用舒适性的两者要求, 提出一种将造型设计与有限元分析相融合的综合设计方法。**方法** 首先根据感性工学原理归纳出马桶座圈造型的设计要素, 初步设计了8种马桶座圈的造型方案, 并采用语义差异法对各个方案进行美观性感意向评估, 挑选了4种偏向于美观的造型方案, 同时与人体模型装配进行有限元分析, 以获取人体与马桶座圈之间的接触压力, 然后使用层次分析法对设计方案的均值与压力数值进行综合评估, 得出最优设计方案, 最后通过30名测试者对最优设计方案进行实验测试。**结论** 实验测试的结果与有限元分析的结果近乎吻合, 表明了运用感性工学与有限元分析的综合设计方法, 可以有效地帮助设计师设计出造型美观且使用舒适的产品, 为相关的设计研究提供了参考指导。

关键词: 马桶座圈; 造型设计; 舒适性; 感性工学; 有限元分析; 层次分析

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)04-0120-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.04.013

Modeling and Comfort Design of Toilet Seat

LI Yuan-li¹, TU Xi-kai¹, XIANG Meng², LI Xiao¹

(1. Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Hubei Institute of Fine Arts, Wuhan 430205, China)

ABSTRACT: In order to satisfy the demands of both aesthetics and comfort of the toilet seat, a comprehensive design method integrating the modeling design and finite element analysis is proposed. Based on the principle of kansei engineering, the design elements of the toilet seat shape were summarized, and 8 types of modeling schemes were initially designed. Then, the semantic difference method was used to evaluate the aesthetics of the designs by means of kansei image, and 4 types of modeling schemes of more beauty were selected and integrated with human body model, which were further analyzed with finite element method to obtain the contact pressure between the human body and toilet seat. Next, the analytic hierarchy process method was taken to comprehensively evaluate the mean value of designs and the pressure value so as to determine the optimal design. Finally, 30 testers were recruited to test the optimal design. The experimental results are close to the finite element analysis, which demonstrates that the comprehensive design method integrating the kansei engineering and finite element analysis is able to assist the designer to design beautiful and comfortable products. Additionally, the paper can also be a reference guide for related designs.

KEY WORDS: toilet seat; modeling design; comfort; kansei engineering; finite element analysis; analytic hierarchy process

人口老龄化是我国当前一个严峻的问题, 据老年人特点, 如厕时需较长的时间, 臀大肌骨突出部位的肌肉易受阻碍、压迫、血液不通, 从而导致脑缺氧和

发生危险事故, 长期如此还会引发痔疮等疾病, 甚至会出现瘫痪等情况^[1]。目前, 各行各业对老年人如厕的产品越来越重视, 马桶的智能化设计^[2-3]已有了较

收稿日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(52005169); 武汉市科技计划项目(2020020602012087)

作者简介: 李远利(1995—), 女, 湖北工业大学硕士生, 主攻工业设计与用户体验。

通信作者: 向萌(1985—), 女, 硕士, 湖北美术学院讲师, 主要研究方向为艺术文化语言体系。

多的研究,当产品的功能性和易用性相同时,外观更好看的产品更加能够赢得用户的青睐,美观的设计带给用户积极的态度,让用户会觉得心情舒畅、愉悦,同时会让用户对品牌更加忠诚,使得在市场上更有优势。而同时马桶座圈作为整体马桶的重要组成部分,它直接与人体皮肤接触,是影响人体使用舒适性的关键部件,也直接影响马桶的整体性能。目前,不管是智能马桶还是其他直接与人体皮肤接触的产品,都在追求用户体验的舒适度,原因在于用户默认了产品的功能,开始寻找功能以外的体验,而舒适性能够给人带来放松、快乐的体验,更能刺激感官,唤起积极情绪。因此,马桶座圈应在满足可用性的基础上尽量提升用户体验。综上所述,美观且体验舒适的马桶座圈将是未来的设计趋势。

目前关于马桶座圈造型设计和舒适性的相关研究如下,李斌等人^[4]基于人因工程学原理对马桶座圈的造型进行调整,该方法提升了产品的美观性;McClelland IL 等人^[5]、Park S 等人^[6]基于主观问卷对马桶座圈的舒适性进行评估;Ino S 等人^[7]、Wang Z 等人^[8]基于压力测量和主观问卷相结合对马桶座圈的舒适性进行评估;Yokoyama S 等人^[9]基于感性工学原理设计和压力测量来研究马桶座圈的舒适性。由上述对马桶座圈的研究可知有三个侧重点:(1)造型设计美观性的研究;(2)压力舒适性的研究;(3)将造型设计与压力舒适性相结合的研究。前两者将美观性与舒适性分开,后者将美观性与舒适性结合,但没有采用方法验证造型的美观性。由于社会的发展及进步,用户对产品的要求越来越高,以上的研究方法会使产品存在缺陷,从而影响产品竞争力。本文以马桶座圈为研究对象,创新性地运用感性工学原理设计马桶座圈,挑选出美观的设计方案,并结合有限元分析的方法,对人体与马桶座圈之间的接触压力进行分析,然后通过层次分析法获得最优设计方案,并对其开展实验验证,目的是设计出一款造型美观且体验舒适的马桶座圈,并探索造型设计与有限元分析相融合的综合设计方法,为相关的智能如厕产品设计研究提供有效建议。

1 马桶座圈造型设计与评估

1.1 感性工学需求分析

情感词汇是基于用户对产品特征主观认知的表达,在进行情感词汇分析前,先对马桶座圈的造型进行调研,以更好地满足用户需求。根据调研分析总结,其形态普遍为V形、U形、O形等。随后通过用户访谈、互联网及文献综述法收集与马桶座圈相关的词汇,采用专家法挑选了108个词汇,通过KJ法将词汇分类,剔除含义相近、没有相关的词汇,筛选后得到20个词汇。而这20个词汇的重要性未能直观地体

现出来,因此使用李克特量表法来筛选相对重要的词汇。采用5个等级进行评价,5个等级的分值对应依次为“1、2、3、4和5”,以“非常不重要—非常重要”为例,其中非常不重要为1,不重要为2,不一定为3,重要为4,非常重要为5。邀请用户对20个词汇进行重要程度打分。有效问卷共有40人填写,年龄均分布在50~60岁,最终选取均值最高的8个词汇,马桶座圈情感词汇分值见图1。

得到马桶座圈的情感词汇后,为了将情感词汇进一步具体化,通过设计小组深度访谈及使用设计美学原则对其进行定义,归纳出满足用户感性需求的设计要素,马桶座圈情感词汇及对应的设计要素见表1。

1.2 马桶座圈的造型方案设计

进一步设计研究是为了更加满足用户的需求和更加人性化^[10]。在进行方案设计时,将8个情感词汇的设计要素进一步加强,具体为:(1)老年人如厕时间较长,加宽座圈表面设计,可增加与人体臀部的接触面积并减少压力,前额区域整体稍微往上突出,与之相邻的区域稍微往下降低,此造型与用户坐姿保持一致,贴合大腿肌肉,可提高使用的舒适性;(2)老年人心理缺乏安全感,尖锐的形态会存在危害;采用小弧面设计,边缘倒角圆滑,简洁大方,赋予人们亲和力,可提高用户安全性和美感;(3)老年人腰部

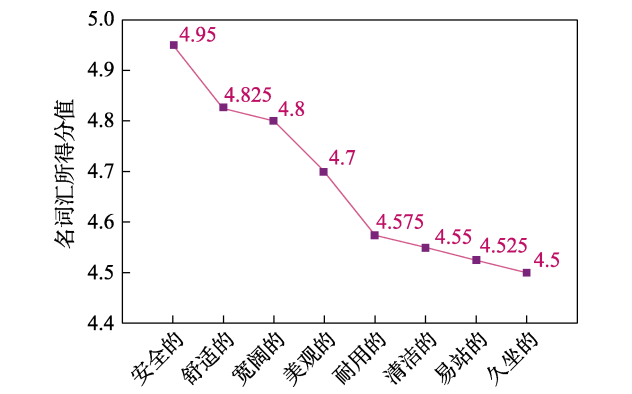


图1 马桶座圈情感词汇分值
Fig.1 Emotional vocabulary score of toilet seat

表 1 马桶座圈情感词汇及对应的设计要素
Tab.1 Emotional vocabulary of toilet seat and corresponding design elements

情感词汇	设计要素
舒适的	符合人机工程学,人性化,用户体验的愉悦程度
宽阔的	座圈面积大,增加压力分布面积,减少压力
安全的	防滑,没有尖锐的边缘,整体弧面设计、外形圆滑
美观的	造型简洁大方,干净利落,具有线条感、亲和力
耐用的	使用寿命长,不易损坏,性能良好
清洁的	座圈没有粘性的物品,整洁的
久坐的	表面曲面与肌肉贴合,减少久坐而引发的不适
易站的	座圈向前倾斜一定的角度,辅助老年人站立



图 2 马桶圈的形状设计

Fig.2 Shape design of toilet seats

力量少,自身不易站立,需借助外在辅助;座圈的表面设计向上倾斜至 10° ,此角度可提高从坐到站立的舒适性和方便性^[7]。

造型设计方案 1、2 和 3 以 O 形为基本形,方案 6、7 和 8 以方形为基本形,在此造型基础上进行演变,丰富了造型的多样化;方案 4、5 的内圈中间区域增加接触面积,能保持坐姿的平衡,可减少压迫和避免老年人血液流通不畅等。马桶圈的形状设计见图 2。

1.3 马桶座圈造型设计的美观性评估

对于设计出来的马桶座圈,很难让某种程序主动去判断哪个方案更好,这些通常需要人的主观意识来辅助判断^[11]。因此,采用 7 点标度语义差异法以问卷的方式让用户对 8 个马桶座圈方案进行美观性感意向评估。7 个等级的分值对应依次为-3、-2、-1、0、1、2、和 3。以“丑陋—美观”为例,其中非常丑陋为-3,很丑陋为-2,较丑陋为-1,不丑陋也不美观为 0,较美观为 1,很美观为 2,非常美观为 3。本次问卷调查有效填写人数共 132 人,受试者的年龄主要在 50~60 岁,其中男性 78 人,女性 54 人,使用马桶座圈时,在意其造型是否好看的人数有 106 人,表示中立态度的人数有 26 人,完全不在意的人数为 0。最终得到的数据用公式可描述为:

$$X = [x_1^i x_2^i x_3^i \cdots x_j^i] \quad (1)$$

其中: i 表示第 i 个受试者, $i=1 \sim 132$; j 表示第 j 个方案, $j=1 \sim 8$, 那么第 i 个受试者对方案 j 的(丑陋—美观)整体综合特征评价后获得的分数标记为 x_j^i 。含有粗大误差值的数据会干扰对问卷调查结果的分析,甚至歪曲结果。为了保证可靠性,需去除有误差值。根据拉依达准则可知,若 $|x_j^i - \bar{X}_j| > 3\sigma$, 则可疑值 x_j^i 含有粗大误差,应舍弃。其中,第 j 个方案关于(丑陋—美观)性感意向的均值和标准差的公式分别用(2)和(3)表示:

$$\bar{X}_j = \frac{1}{132} \sum_{i=1}^{132} x_j^i \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{132} (\bar{X}_j - x_j^i)^2}{131}} \quad (3)$$

去除粗大误差值后对数据进行整理,再计算每个方案的感性意象均值。平均值代表每种方案的美观评分水平,标准差代表数据集的离散程度。马桶座圈方案感性意向评估数值见图 3。通过 SPSS 计算,据图 3 可知,8 个方案的得分标准差范围在 1.30~1.63,该值相对较小,说明均值的离散程度较低,表明了结果高度可靠;方案 1、2、3 和 5 的均值都是正数,说明了这 4 个方案的感性意象评估是倾向于“美观的”;方案 4、6、7 和 8 的平均值都是负数,说明了这 4 个方案的感性意向评估是倾向于“丑陋的”。其中,方案 3 的均值最高,为 1.35,随后是方案 1、5 和 2,分别为 0.86、0.25 和 0.08,排在最后的是方案 7、8,分别是-0.93 和-0.98。基于 7 点标度语义差异法对马桶座圈方案进行美观性感意向评估,最终得出方案 1、2、3 和 5 的造型是倾向于美观的。

2 马桶座圈的有限元分析

2.1 人体模型的建立

由于准确的姿势是压力分布模拟的关键因素,本研究模拟的仅是人体腕肌后群、大腿肌后群与马桶座

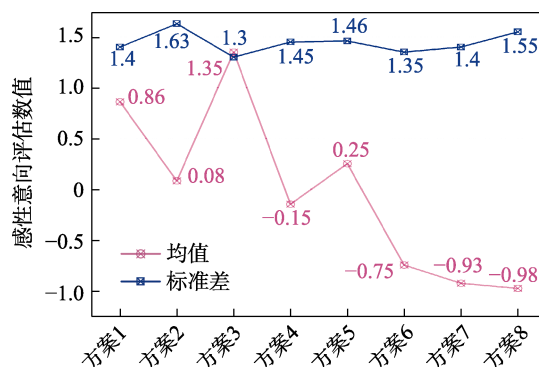


图 3 马桶座圈方案感性意向评估数值

Fig.3 Perceptual evaluation value of toilet seat designs

圈的接触,因此在建模时将人体模型简化。人体是由多个不同的体系组成的,不同的身体部分之间有着明显的生理边界,是一个非线性体^[12]。为了保证仿真结果的真实性,故将人体各部位系统进行合理地划分,人体模型主要划分为 16 个生理环节和 16 个自由度,是一个没有阻尼线性集中参数的生物力学三维模型^[13]。DAZ Studio 软件内有人体数据库,在人体生物力学模型建模中,利用 DAZ Studio 软件获取人体数据和人体表面尺寸,基于人体运动学的坐姿姿态进行调整,此模型的尺寸和真实人体尺寸的准确性是较高的^[14],并利用该尺寸数据重构了人体三维实体模型。

2.2 马桶座圈的有限元分析设置

为了验证马桶座圈方案的安全性及舒适性,本研究采用有限元法对造型倾向于美观的造型方案设计进行静力学仿真分析。将马桶座圈模型与人体模型装配后采用 Workbench 进行静力学分析。首先创建人体与马桶座圈的材料模型,人体模型材料性能参数^[13]见表 2,塑料 (ABS) 材料性能参数见表 3。

人体模型有限元分析设置见图 4。由于人体的髌

表 2 人体模型材料性能参数
Tab.2 Material performance parameters of human body model

身体各部位名称	密度 $\rho / (\text{kg} / \text{m}^3)$	骨骼当量弹性模量 E_{bvi} / GPa	环节当量弹性模量 E_{vi} / GPa
头部	1168.3	22.6000	13.000
躯干、臀部	1276.0	0.0340	0.384
上臂	909.3	8.4890	7.870
前臂	1451.1	8.2600	7.880
手	1058.0	22.600	13.000
大腿	1140.0	8.2860	7.880
小腿	1077.5	8.4120	7.940
脚	1663.3	22.6000	13.000

表 3 塑料 (ABS) 材料性能参数
Tab.3 Material performance parameters of plastics (ABS)

材料	弹性模量 E / Pa	泊松比 μ	质量密度 $P (\text{kg} / \text{m}^3)$	屈服强度 MPa
(ABS)	2.00E+9	0.394	1.02E+3	50

肌后群、大腿肌后群坐在马桶座圈上时会产生相对应的摩擦,因此将人体的髌肌后群、大腿肌后群部分与马桶座圈的接触类型设置为摩擦接触,摩擦系数取 0.3;再根据实际工况对模型施加约束,仅施加重力加速度载荷,有限元分析设置见图 4a。影响仿真精度和稳定性的重要因素是有限元模型的网格质量^[15],因此在进行网格划分时,人体单元网格大小为 15 mm,马桶圈单元网格为 10 mm,髌肌后群、大腿肌后群与马桶座圈的接触部分进一步加密划分,采用 5 mm 单元网格,最后整体模型的网格质量类型良好,有限元分析网格划分见图 4b。

2.3 有限元分析结果

马桶座圈应力见图 5,马桶座圈压力见图 6。其中,马桶座圈的最大应力、接触压力出现在人体髌肌后群的臀大肌骨突出部位,最小应力、压力出现在大腿肌后群的肱二头肌长头处及半腱肌处,接触面积分布趋势从最大应力、压力处开始逐渐向周边减小。

压力分布广泛用于产品的舒适性,舒适性与生物力学、肌肉疲劳因素有关,合理的压力分布让人感到舒适,因此可知肌肉疲劳性与压力大小的分布有关。压力数值越大,表示人体肌肉受到的压迫感越大,会加重人体肌肉的疲劳感,在一定程度上降低了马桶座圈对人体的舒适性。马桶座圈的有限元分析结果见图 7,可直观知道马桶座圈的平均压力值大小,在四个方案中,方案 5 的平均压力值是最小,为 25.63 KPa,说明了方案 5 的压力舒适性更高。

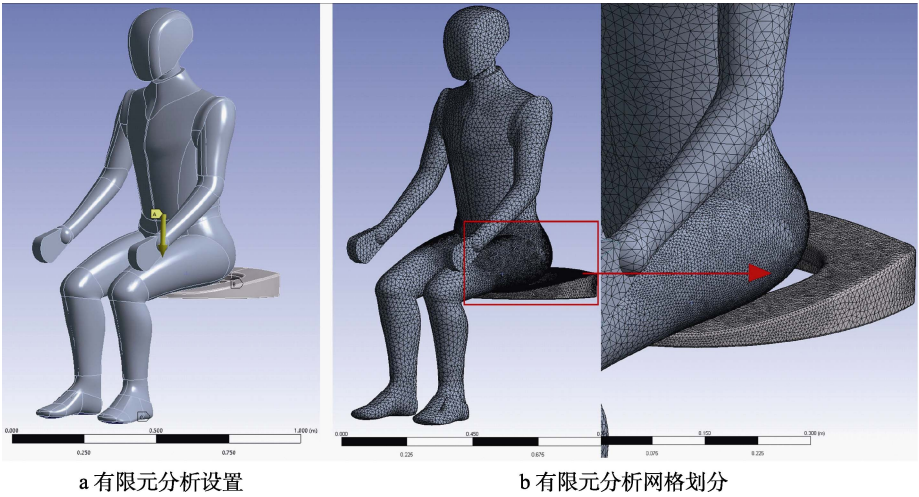


图 4 人体模型有限元分析设置
Fig.4 Setting of finite element analysis of human body model

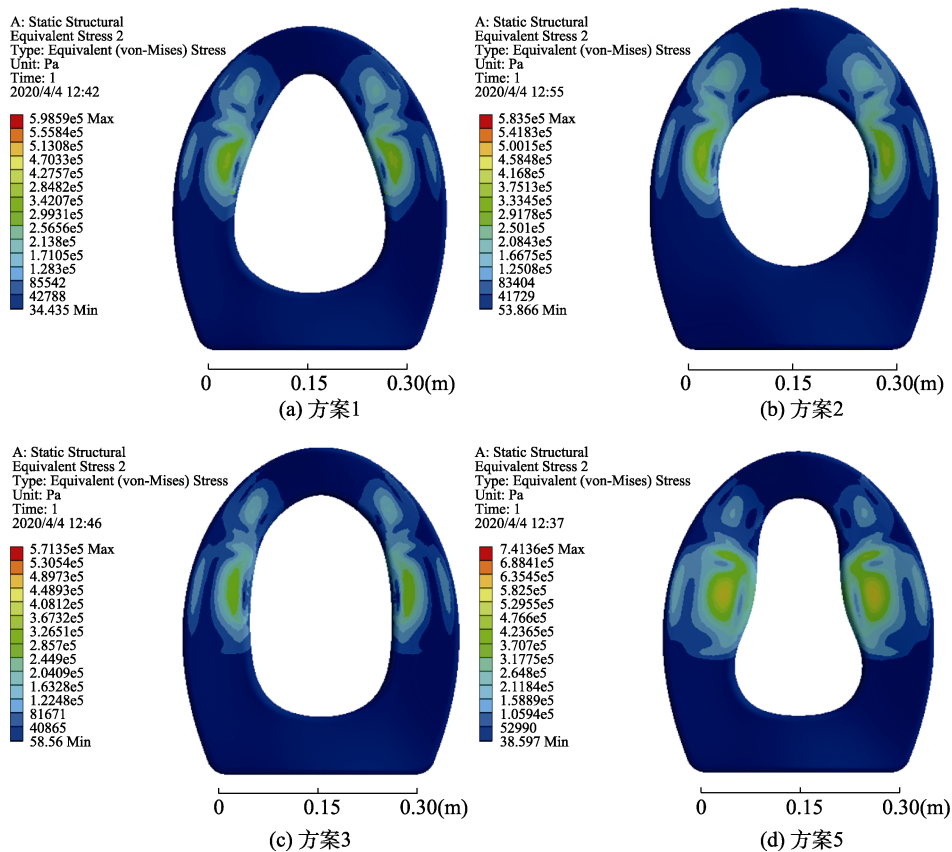


图5 马桶座圈应力

Fig.5 Stress of toilet seat

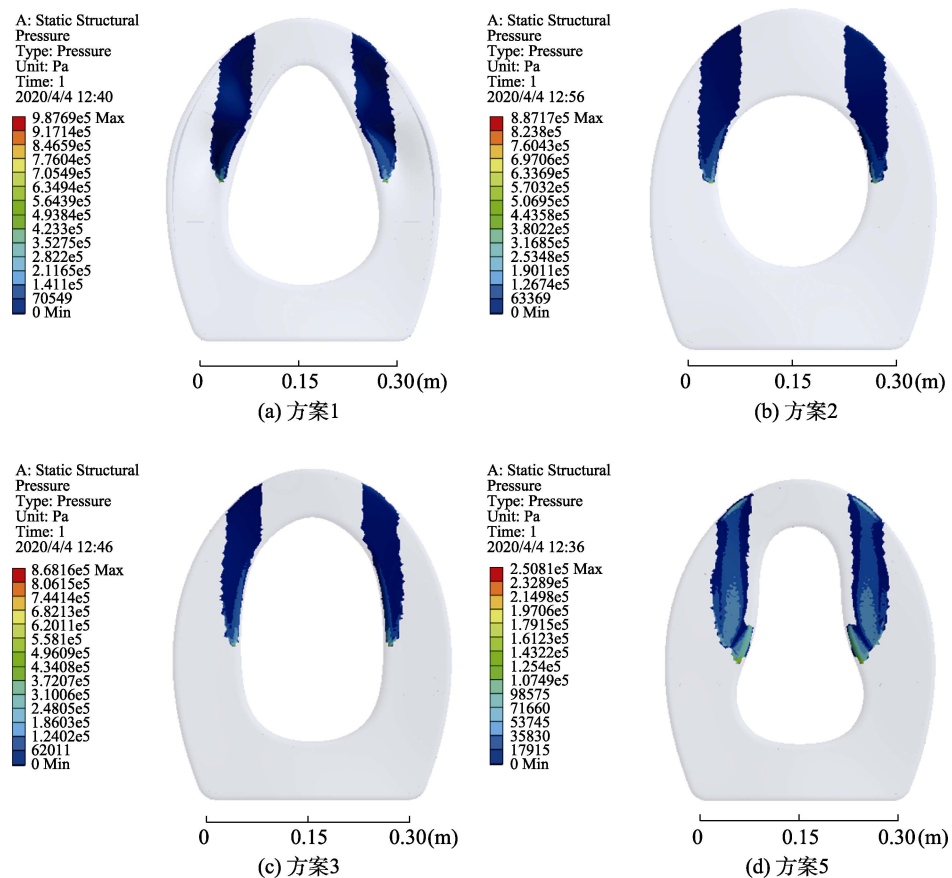


图6 马桶座圈压力

Fig.6 Pressure of toilet seat

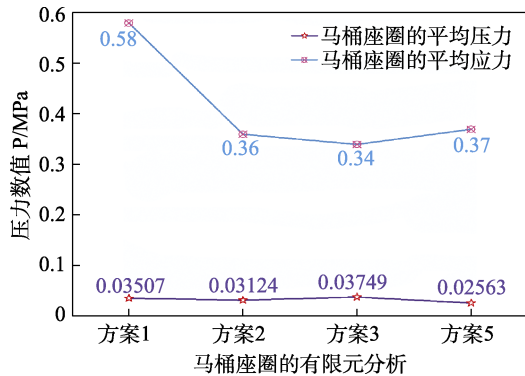


图 7 马桶座圈的有限元分析结果
Fig.7 Finite element analysis results of toilet seats

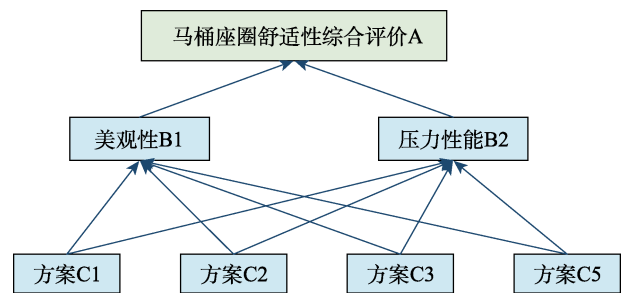


图 8 舒适性评价指标层次结构模型
Fig.8 Hierarchical structure model of comfort evaluation index

表 4 判断矩阵 A—B
Tab.4 Judgment matrix A-B

A	B1	B2
B1	1	1/3
B2	3	1

表 5 判断矩阵 B1—C
Tab. 5 Judgment matrix B1-C

B1	C1	C2	C3	C5
C1	1	5	1/3	4
C2	1/5	1	1/7	1/3
C3	3	7	1	5
C4	1/4	3	1/5	1

3 综合评估与实验验证

3.1 综合评估

为了更全面地对四个方案进行综合评估，在基于美观性评估和有限元分析的基础上采用层次分析法计算每个方案的综合权重。

1) 建立层次结构模型。目标层 A 为马桶座圈舒适性综合评估，准则层 B 为美观性和压力性能，方案层 C 为 4 种方案，舒适性评价指标层次结构模型见图 8。

基于美观性评估与有限元分析的分值，根据判断矩阵标度对每个因素进行判断和比较，以构造判断矩阵。

表 6 判断矩阵 B2—C
Tab. 6 Judgment matrix B2-C

B2	C1	C2	C3	C5
C1	1	1/3	3	1/7
C2	3	1	5	1/5
C3	1/3	1/5	1	1/9
C4	5	5	9	1

判断矩阵 A—B，见表 4，代表相对于舒适性综合评价，准则层相对重要性的比较。

判断矩阵 B1—C，见表 5，代表相对于美观性准则，各个方案相对重要性的比较。

判断矩阵 B2—C，见表 6，代表相对于压力性准则，各个方案相对重要性的比较。

2) 一致性检验。综合实际应用的情况，以上判断矩阵结果不能保证完全具有一致性，需运用一致性检验来判断结果是否合理。公式为：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{4}$$

式中： $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值， n 为判断矩阵的阶数。

判断矩阵的一致性取决于 CI 的数值，当它越接近 0，其满意度越高。衡量 CI 的大小，需将 CI 与 RI 进行比较，如公式(5)所示，当 $CR < 0.1$ ，则表示该判断矩阵满足一致性检验；否则，表示该判断矩阵不符合一致性检验，需对其重新修改。随机一致性指标 RI 标准值见表 7。

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{5}$$

判断矩阵 A—B 的最大特征值为 2，归一化特征向量为 $W = (0.25, 0.75)^T$ ；判断矩阵 B1—C 的最大特征值为 4.1708，归一化特征向量为： $W1 = (0.1354, 0.2913, 0.0657, 0.9447)^T$ ，判断矩阵 B2—C 的最大特征值为 4.1707，归一化特征向量为： $W2 = (0.0942, 0.2027, 0.0457, 0.6574)^T$ ，通过上述公式的计算，可知上述三个判断矩阵均满足一致性检验。

3) 层次总排序。各方案层次总排序见图 9。

最终结果显示如图 9，方案 5 是最优的方案设计，其美观性评估和有限元分析的数值分别为 0.25 KPa 和 25.63 KPa，综合数值为 0.5。该方案整体上线条感与造型更加具有创新性，简洁大方，增加了人体的髂肌后群和大腿肌后群处的接触面积，减轻了人体肌肉的压迫和疲劳感，提升了马桶座圈的使用舒适性。

表 7 随机一致性指标 RI 标准值
Tab. 7 Standard values of random consistency index RI

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

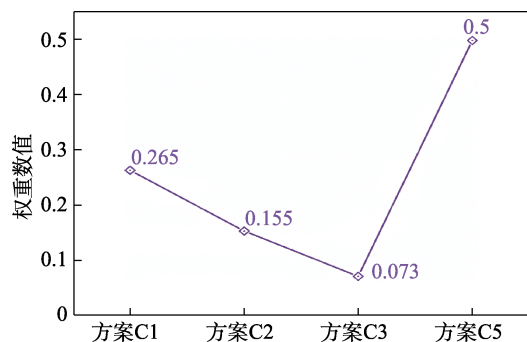


图9 各方案层次总排序

Fig.9 Total ranking of each scheme level

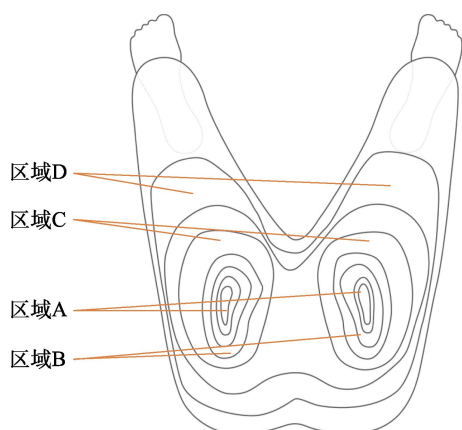


图10 压力测试分布

Fig.10 Stress test distribution

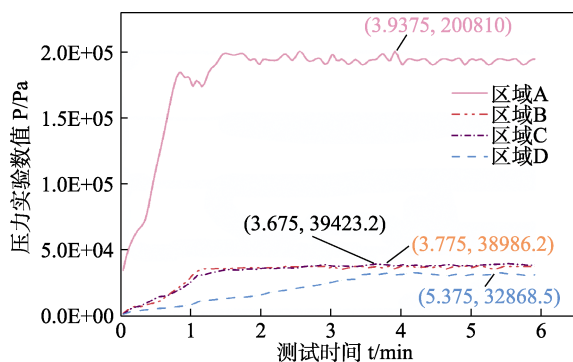


图11 压力实验测试结果

Fig.11 Stress test results

3.2 实验验证

对最优设计方案5进行实验验证,以验证马桶座圈造型设计和舒适性是否合理。将压力传感器放置于马桶座圈表面上与测试者髂肌后群、大腿肌后群的接触位置,开展连续三天的实验,每天对10位年龄分布在50~60岁的不同被测试者(均为健康人士)进行压力测试的数据采集,传感器每秒采集5个数据,且按个体体态差异分为三组:正常体态、略微偏胖体态、略微偏瘦体态。采集数据时,被测试者保持自然的如厕坐姿,测试时间设置为6 min,在测试时不对测试者造成任何干扰。压力测试分布见图10,其中区域A



图12 最终马桶座圈效果

Fig.12 Final rendering of the toilet seat

为臀大肌的位置,B为臀大肌后方肌,C为大腿后群肌,D为肱二头肌后跟,分别将30名被测试者(19名女性,11名男性)的A、B、D、C的四个测量区域的数据进行集中收集后取平均值,压力实验测试结果见图11。

由以上实验数据图可以得知被测试者在进行如厕测试时,其臀部与马桶座圈接触时的最大压力分布在臀大肌骨突出部位,且最大压力为20.08 KPa,与有限元分析数值25.63 KPa相比要小,而测试者的体型与有限元建立的人体模型存在一定差异性,但压力分布的趋势与有限元分析结果近乎一致。表明了采用有限元分析不同造型的马桶座圈所得到的接触压力是可行的,其结果也是合理的。

将最优的马桶座圈方案设计安装在现有的马桶上,最终马桶座圈效果见图12。

4 结语

本文以马桶座圈为研究对象,提出了将造型设计与有限元分析相结合的方法,此方法依据感性工学原理归纳出设计要素并设计马桶座圈,采用语义差异法获得了满足用户需求的设计,同时采用有限元法对模型进行静力学分析以获取接触压力,在此基础上,使用层次分析法对方案和压力进行综合评估得出了最优方案设计,最后进行实验测试验证了合理性,最终得出了美观且舒适的马桶座圈方案设计。且在最终的方案设计中可得知,最美观的造型方案设计,压力值不一定是最小的,而压力值最小的方案设计,造型不一定是美观的,因此在研究马桶座圈时,需综合考虑造型美观性与压力舒适性,该方法为相关的智能如厕产品设计提供了理论指导。

由于老年人在如厕时会存在一定的安全隐患,而本文在研究马桶座圈时仅考虑了造型与使用舒适性,未考虑到安全性因素,如坐姿靠背、坐立辅助装置、

辅助把手等因素对如厕安全性的影响,所以在下一步的研究中将对上述因素进行深入研究,从而更科学地辅助老年人如厕。

参考文献:

- [1] 石鑫, 安茹月. 基于人因工程的老年马桶改善设计研究[J]. 价值工程, 2017, 36(2): 124-127.
SHI Xin, AN Ru-yue, Research on the Improvement Design of Elderly Toilets Based on Human Factors Engineering[J]. Value Engineering, 2017, 36(2): 124-127.
- [2] 夏雅琴, 阙雪晴, 陶梦月, 等. 基于家居生活体验的卫浴产品智能化设计研究[J]. 包装工程艺术版, 2019, 40(12): 54-59.
XIA Ya-qin, KAN Xue-qing, TAO Meng-yue, et al. Research on Intelligent Design of Bathroom Products Based on Home Life Experience[J]. Packaging Engineering Art Edition, 2019, 40(12): 54-59.
- [3] 曹文栋. 基于物联网的老龄化智能马桶设计研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2015.
CAO Wen-dong. Research on the Design of Aging Smart Toilet Based on the Internet of Things[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2015.
- [4] 李彬, 赵杨, 兰爽. 家用马桶的创新设计及仿真分析[J]. 价值工程, 2018, 37(36): 169-170.
LI Bin, ZHAO Yang, LAN Shuang. Innovative Design and Simulation Analysis of Household Toilets[J]. Value Engineering, 2018, 37(36): 169-170.
- [5] MCCLELLAND I L, WARD J S. The Ergonomics of Toilet Seats[J]. Human Factors, 1982, 24(6): 713-25.
- [6] PARK S, RHIE Y L, LEE J H, et al. Development of Affective Modeling for Toilet Seat Comfort[C]. Las Vegas: IEEE, 2016.
- [7] INO S, CHIKAI M, OZAWA E, et al. An Ergonomic Evaluation of Physical and Mental Loads in Standing-up Motion from Forward-Sloping Toilet Seats[C]. Springer, Singapore: World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, 2018.
- [8] WANG Z, WU H, WEI W, et al. Research on User Comfort of Intelligent Toilet Based on Ergonomics[C]. Springer, Cham: International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, 2018.
- [9] YOKOYAMA S, ISHIHARA S, NAGAMACHI M. Kansei Ergonomics Applied to A Toilet Seat Design[J]. Japan Ergonomics Society, 2010(1): 10.
- [10] 罗海妹, 潘祖平. 马桶造型设计演变的研究[J]. 艺术与设计: 理论, 2011, 12(4): 196-198.
LUO Hai-mei, PAN Zu-ping. Research on the Evolution of Toilet Modeling Design[J]. Art and Design: Theory, 2011, 12(4): 196-198.
- [11] 刘炯宙, 李基拓, 陆国栋. 色彩语义驱动的产品交互式遗传配色设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(5): 669-676.
LIU Jiong-zhou, LI Ji-tuo, LU Guo-dong. Product Interactive Genetic Color Matching Design Driven by Color Semantics[J]. Journal of Computer Aided Design and Graphics, 2012, 24(5): 669-676.
- [12] 王贤坤, 徐铭陶. 一种建立人体振动生物力学模型的新方法[J]. 振动工程学报, 1996, 17(2): 107-110.
WANG Xian-kun, XU Ming-tao. A New Method for Establishing Human Body Vibration Biomechanical Model[J]. Journal of Vibration Engineering, 1996, 17(2): 107-110.
- [13] 徐一春, 杨秀萍, 张磊, 等. 自行车鞍座人机耦合模型的有限元分析[J]. 机械设计, 2013, 30(4): 100-102.
XU Yi-chun, YANG Xiu-ping, ZHANG Lei, et al. Finite Element Analysis of Human-machine Coupling Model of Bicycle Saddle[J]. Mechanical Design, 2013, 30(4): 100-102.
- [14] 董瑞春, 郭立新. 基于有限元法的人体座椅系统随机响应分析[J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2016, 37(11): 1660-1663.
DONG Rui-chun, GUO Li-xin. Random Response Analysis of Human Seat System Based on Finite Element Method[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2016, 37(11): 1660-1663.
- [15] DU X, Ren J, SANG C, et al. Simulation of the Interaction between Driver and Seat[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(6): 1234-1242.