

# 基于 Tekscan 压力测量的浴缸曲面 优化设计

李哲林, 姜立军, 黄玉润, 熊志勇

(华南理工大学设计学院, 广东 广州 510006)

**摘 要:** 浴缸逐步成为家居中使用广泛的卫浴产品。由于用户身高和体重的差异化, 缸体内曲面形状设计不合理会导致用户使用该产品的舒适度不高。以设计适合我国成年人使用的浴缸为目标, 将压强和接触面积作为舒适度评价指标, 根据我国成年男性和女性的  $P_5$ 、 $P_{50}$ 、 $P_{95}$  百分位人体尺寸优化缸体曲面。采用 Tekscan 仪器测量用户施加在缸体曲面上的压强和接触面积, 通过对 10 名测试者使用原曲面和优化后曲面的测量数据分析, 表明优化后曲面的峰值压强降低到 58.4%~87.3%, 平均压强降低到 83.6%~99.4%, 接触面积提高到 1.50~2.78 倍, 有效提高了用户的舒适度。

**关 键 词:** 曲面; 优化设计; 压力分布; Tekscan

中图分类号: TP 391

DOI: 10.11996/JGj.2095-302X.2017010028

文献标识码: A

文 章 编 号: 2095-302X(2017)01-0028-06

## Optimal Design of Bathtub Surface Based on Tekscan Pressure Measurement

LI Zhelin, JIANG Lijun, HUANG Yurun, XIONG Zhiyong

(School of Design, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China)

**Abstract:** The bathtub has been widely used as household products. Due to the difference of height and weight of customers, the unreasonable surface shape will lead to low comfortability as using the product. In this paper, the pressure and the contact area are made as the evaluating parameters in order to design a suitable bathtub for adults. The surface of bathtub was redesigned according to percentile  $P_5$ ,  $P_{50}$ ,  $P_{95}$  of Chinese adult. The pressure and the contact area were measured by Tekscan instrument. The data which were captured from the ten testers lying in different bathtub with the original surface and the optimized surface was analyzed. Results shows that the peak pressure reduces to 58.4%~87.3%, the average pressure reduces to 83.6%~99.4%, and the contact area of the optimized surface increases to 1.50~2.78 times. The optimized surface effectively improves the comfortability of users.

**Keywords:** surface; optimal design; pressure distribution; Tekscan

收稿日期: 2016-05-17; 定稿日期: 2016-09-03

基金项目: 广州市科学研究专项(201607010308); 广州市科技计划项目产学研合作专项(2013Y2-0084)

第一作者: 李哲林(1974-), 男, 湖南涟源人, 副教授, 博士。主要研究方向为计算机图形图像处理、设计与人机分析等。

E-mail: zhelinli@scut.edu.cn

通信作者: 姜立军(1968-), 男, 湖南益阳人, 教授, 博士。主要研究方向为创新设计方法与理论、计算机图形学。

E-mail: ljjiang@scut.edu.cn

随着我国城镇化的发展和居住环境的改善, 浴缸逐步成为家居中使用广泛的卫浴产品。目前国外学者从浴缸的包容性设计和科技革新等方面开展研究, HAYASAKA 等<sup>[1]</sup>阐述了日本的浴缸一般会比西方的浴缸设计得更小且深一些; TIDWELL 等<sup>[2]</sup>研究如何为老年人和残障人士设计无障碍通用性浴缸。目前国内浴缸的设计多是从美学角度或是根据现有产品形态做一些结构和功能改进, 没有针对用户生理数据做深入研究和优化设计。朱凤娟<sup>[3]</sup>以科勒水疗按摩浴缸为案例, 从肤觉体验出发, 阐述了卫浴产品的设计要从色彩、造型等方面来创造良好的肤觉体验。王玮<sup>[4]</sup>探讨了卫浴产品在功能、艺术、情感等方面如何给人带来良好体验的。陈四杰<sup>[5]</sup>阐述了在沐浴产品的设计时应考虑对老年人、残疾人或孕妇特殊人群的关怀, 从浴缸尺寸、造型、材质工艺等几个方面做了简要的描述。

可见有关浴缸人机分析与设计的文献大都是简要的阐述或是简单的尺寸相关性分析。由于用户身高和体重的差异化, 当缸体内曲面形状设计不合理时, 导致用户使用该产品的舒适度不高, 国内目前还没有优化缸体曲面来提高舒适度的相关研究。本文以设计适合我国成年人使用的浴缸为目标, 将压强和接触面积作为舒适度评价指标, 根据我国成年男性和女性的  $P_5$ 、 $P_{50}$ 、 $P_{95}$  百分位人体尺寸优化缸体曲面<sup>[6]</sup>。

## 1 用 Tekscan 测量用户压力分布

本文所研究的浴缸材料为亚克力板, 缸体采

用模具热塑成型, 内部曲面为自由曲面, 在曲面上装有喷嘴、排水、吸水口等组件, 喷嘴可喷射气水混合按摩皮肤, 起到保健作用, 外形尺寸为  $1670.96\text{ mm} \times 817.02\text{ mm} \times 498.23\text{ mm}$ 。

用户在使用浴缸时主要是身体腰、背部、臀部和腿部等身体部位接触浴缸缸体内表面, 身体重量大部分通过这几个部位施加在缸体曲面上。通过观察成年人使用浴缸及访谈, 确定影响舒适度的 2 个主要区域是缸体内与背部接触的靠背曲面、和与臀部及大腿部接触的坐垫曲面。本文选择在接触区域内用户施加的压强和接触面积作为舒适度评价指标<sup>[7-8]</sup>, 采用 Tekscan 仪器测量用户施加在缸体曲面上的压强和接触面积。

### 1.1 测试者生理参数

考虑国内家庭主要成员为成年人, 选取 10 名成年测试者(男性 7 名, 女性 3 名)。测试者年龄范围为 22~35 岁、身高( $H$ ) 160~185 cm、体重( $W$ ) 45~100 kg。测试者年龄、身高和体重上均满足国标中对人体尺寸百分位数选择的规定, 即普通工业设计选用和作为尺寸上、下限值, 此时满足度为 90%<sup>[6]</sup>。人体的基本生理参数中身高和体重是两个最能反映人体基本形态的人体尺寸<sup>[8]</sup>, 由于使用浴缸时的舒适性与人体接触面积相关, 因此选用适合中国人的公式来计算人体表面积  $A$ <sup>[9-10]</sup>。

$$A = 71.3989 \times H^{0.7437} \times W^{0.4040} \quad (1)$$

10 名测试者的身高、体重以及表面积数据见表 1。

表 1 测试者的生理参数

| 生理参数                       | 测试者编号          |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                            | M <sub>1</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | M <sub>5</sub> | M <sub>6</sub> | M <sub>7</sub> | F <sub>1</sub> | F <sub>2</sub> | F <sub>3</sub> |
| 性别                         | 男              | 男              | 男              | 男              | 男              | 男              | 男              | 女              | 女              | 女              |
| 身高 $H$ (cm)                | 172            | 178            | 168            | 177            | 173            | 165            | 185            | 160            | 168            | 163            |
| 体重 $W$ (kg)                | 60             | 75             | 58             | 66             | 60             | 63             | 100            | 47             | 51             | 45             |
| 表面积 $A$ (cm <sup>2</sup> ) | 17 164.3       | 19 268.7       | 16 637.2       | 18 222.4       | 17 238.5       | 16 973.4       | 22 273.4       | 14 737.5       | 15 794.7       | 14 682.3       |

### 1.2 压力分布数据采集

本文采用 Tekscan 5300 压力分布测量系统来采集数据<sup>[11]</sup>, 包括平均压强  $p_{\text{avg}}$ 、峰值压强  $p_{\text{max}}$  和接触面积  $S$ 。该仪器部分参数如下: 感测片厚度: 0.1 mm; 压力量程: 0~207 kPa; 取样频率: 100 Hz;

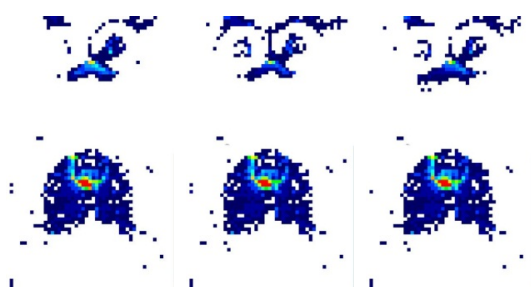
采样精度: 1.0 sensels/cm<sup>2</sup>。

数据采集过程如图 1 所示, ①在按摩浴缸上放置好压力坐垫, 如图 1(a)所示; ②让测试者坐在浴缸中, 调整到自认为最为舒适的姿态, 如图 1(b)所示; ③用 Tekscan 测量测试者稳定姿态下的  $p_{\text{avg}}$ 、

$p_{\max}$  和  $S$ , 共测量 3 次, 取平均值作为测量结果, 如图 1(c)所示。



(a) 压力坐垫安装 (b) 测量  $M_4$  数据



(c) 测试者  $M_4$  的 3 次测量的压力分布图

图 1 使用 Tekscan 压力测量系统进行测量

在图 1(c)中, 上排云图为测试者  $M_4$  的背部接触区域的压力分布的 3 次测量结果, 可见接触面积很小, 没有高亮的峰值点; 下排为臀部和腿部接触区域的压力分布云图, 黄色和红色高亮点表示峰值压强, 在臀部有红色高亮斑块。从云图面积可知,

人体大部分重量被臀部和腿部根部承受。

### 1.3 实验结果分析

10 名测试者的压力分布测量结果如表 2 所示。表 2 中  $p_{\text{avg1}}$ 、 $p_{\text{max1}}$  和  $S_1$  为使用 Tekscan 5300 的直接测量值,  $Rate_1$  表示接触面积占人体表面积的比例, 计算方法如式(2)

$$Rate_1 = S_1 / A \times 100\% \quad (2)$$

其中,  $S_1$  为表 2 中的接触面积,  $A$  为表 1 中的人体表面积。

分析表 2 可知:

(1)  $M_5$  的接触面积  $S$  和  $Rate$  都是最小, 与其身材瘦高有关, 因坐在缸体内腿不方便伸直;  $M_6$  的接触面积  $S$  较大,  $Rate$  为最大, 原因是个子不高, 可将腿伸得较直, 臀部、大腿与按摩浴缸可充分接触;  $M_7$  虽然接触面积  $S$  最大,  $Rate$  并不是最大, 原因是缸体过小使得双腿被迫弯曲且并拢。

(2)  $M_7$  和  $F_2$  的峰值压强  $p_{\max}$  和平均压强  $p_{\text{avg}}$  分别为男性和女性测试者的最大值, 这与两位测试者的  $H$  与  $W$  分别为同性别中的最大值相关。

综上所述, 用户在缸体中姿态影响压强值  $p_{\max}$ 、 $p_{\text{avg}}$  以及接触面积  $S$ , 同时接触面积  $S$  增大可降低  $p_{\max}$ , 提高舒适程度。因此在曲面优化设计时要根据人体背部、腰部和臀部曲线来设计缸体曲面, 增加缸体轮廓与身体的接触面积; 曲面流畅且过渡区平滑能提高用户仰坐时的舒适度, 减少局部压强及使压力均匀分布。

表 2 原始曲面压力分布测量结果

| 测量参数                     | 测试者编号 |       |       |       |       |        |        |       |       |       |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
|                          | $M_1$ | $M_2$ | $M_3$ | $M_4$ | $M_5$ | $M_6$  | $M_7$  | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ |
| $p_{\text{avg1}}$ (kPa)  | 22.3  | 17.0  | 17.8  | 15.8  | 17.6  | 21.3   | 21.5   | 15.2  | 20.1  | 16.3  |
| $p_{\text{max1}}$ (kPa)  | 64.6  | 56.1  | 60.8  | 74.00 | 75.3  | 65.8   | 87.8   | 64.7  | 81.5  | 61.8  |
| $S_1$ (cm <sup>2</sup> ) | 694.4 | 925.6 | 890.8 | 690.2 | 633.5 | 1181.9 | 1297.9 | 649.6 | 914.9 | 753.2 |
| $Rate_1$ (%)             | 4.1   | 4.8   | 5.4   | 3.8   | 3.7   | 7.0    | 5.8    | 4.4   | 5.8   | 5.1   |

## 2 缸体曲面的优化设计

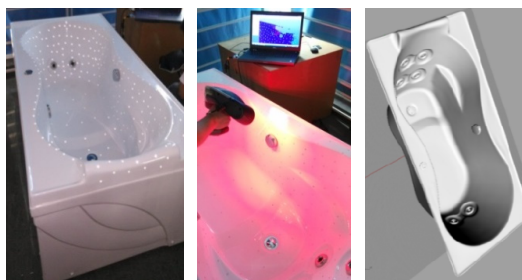
本文根据文献[12]提出的座椅曲面形态, 结合人机分析软件 SAMMIE 中的数字化人体模型, 在 Rhinoceros 中对原有曲面造型进行多次迭代优化缸体曲面。

### 2.1 缸体原始曲面建模

为建立高精度的浴缸数字化模型, 本文采用 Creaform 公司 HandyScan 3D 激光扫描仪采集曲面

点云数据<sup>[13]</sup>, 其扫描分辨率为 0.5 mm, 数据采集和建模过程如图 2 所示。

首先在缸体内曲面上粘贴标记点, 如图 2(a)所示; 然后使用三维扫描仪对按摩浴缸进行扫描, 实时重构点云数据, 如图 2(b)所示; 采用 Geomagic 软件处理原始点云数据并创建三维网格模型, 将三维模型导入到 Rhinoceros 中, 对部分曲面进行修补, 最终重构出浴缸数字化模型, 如图 2(c)所示。

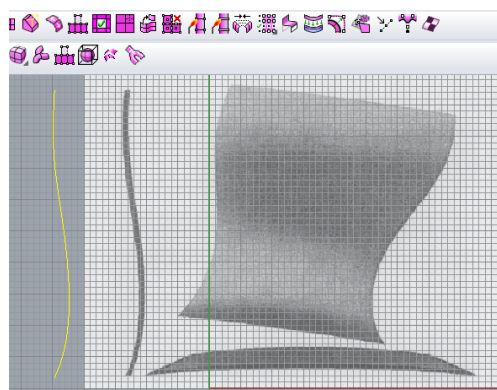


(a) 标记点粘贴 (b) 三维扫描 (c) 建模结果

图 2 重建浴缸曲面模型

## 2.2 曲面优化设计

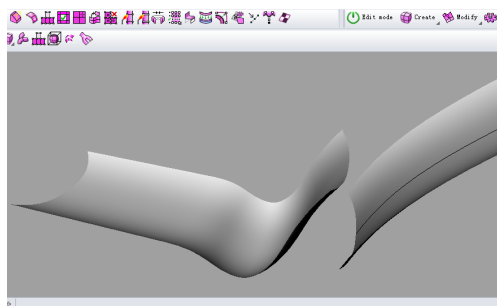
文献[12]中用遗传算法计算出符合人体形态的轮椅靠背曲面, 本文基于这个曲面在 Rhinoceros 提取出多条造型曲线, 如图 3(a)所示; 在 SAMMIE 软件中建立中国男性和女性  $P_5$ 、 $P_{50}$ 、 $P_{95}$  百分位的数字化人体模型<sup>[14]</sup>, 模拟用户仰坐于缸体中姿势, 并提取出此时的背部、腰部、臀部和腿部尺寸参数, 如图 3(b)所示; 采用 Rhinoceros 的 T-splines 的造型功能, 基于多条造型曲线和人体尺寸参数设计出缸体背部与臀部区域初始曲面, 如图 3(c)所示。



(a) 提取造型曲线



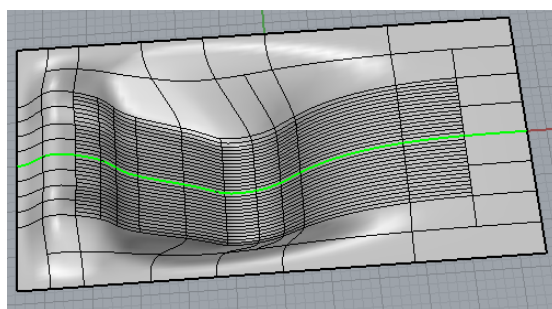
(b) 模拟用户姿态



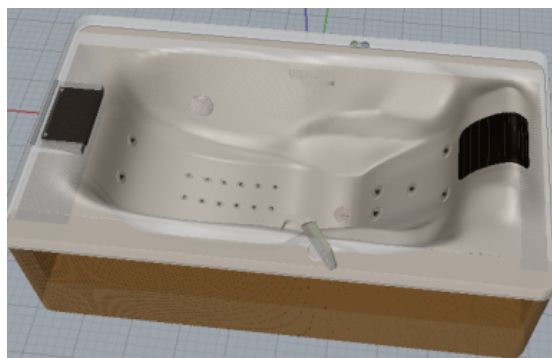
(c) 曲面建模

图 3 创建背部及臀部造型曲线

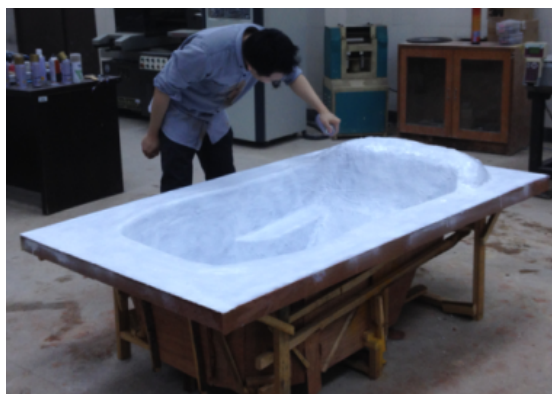
获得背部及臀部的初始曲面后, 结合三维扫描得到的数字化模型, 在 Rhinoceros 中多次迭代创建缸体内部曲面, 如图 4(a)所示; 根据其符合人机工学的浴缸参数完善浴缸其他尺寸, 设计出浴缸整体结构效果图, 如图 4(b)所示; 为评估优化后曲面的舒适性, 用板材、油泥及发泡剂等制作了实物模型, 如图 4(c)所示。



(a) 曲面造型设计结果



(b) 浴缸结构设计效果图



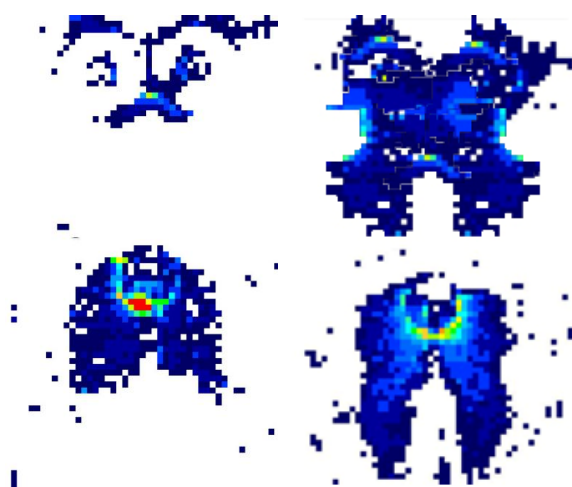
(c) 制作测试模型

图 4 缸体曲面造型设计与制作

### 3 曲面优化后的测量数据分析

使用优化的曲面浴缸实物模型,通过 Tekscan 仪器采集的原 10 名测试者的压力分布数据,优化后曲面的压力分布测量结果如表 3 所示,其中测试者  $M_4$  在原曲面和优化后曲面缸体中的压力分布如图 5 所示。

图 5(a)中  $p_{avg1}=15.8$  kPa,  $p_{max1}=74.0$  kPa,  $S_1=690.2$  cm<sup>2</sup>, 背部接触面积较小,其臀部区域可见一块明显的红色亮斑,此处峰值压强大,腿部接触面积很小;图 5(b)中  $p_{avg2}=14.0$  kPa,  $p_{max2}=58.7$  kPa,  $S_2=1\ 612.0$  cm<sup>2</sup>, 背部接触面积很大,而臀部区域出现几个橙色亮点,腿部接触区域较大。对比测试者  $M_4$  曲面优化前后的压强数据和云图可知,优化后曲面接触面积增大到 2.33 倍,峰值压强降低了 20.1%,其有效提高了使用的舒适度。



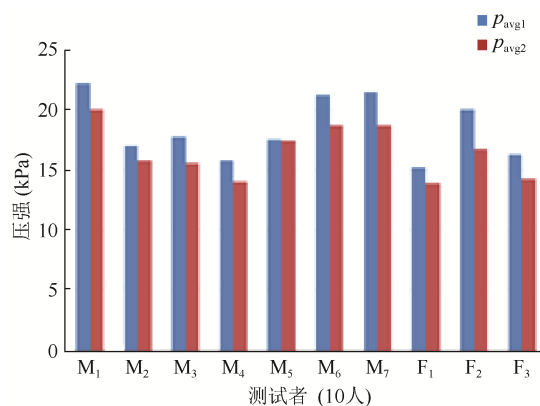
(a) 原曲面 (b) 优化后曲面

图 5 测试者  $M_4$  的压力分布图

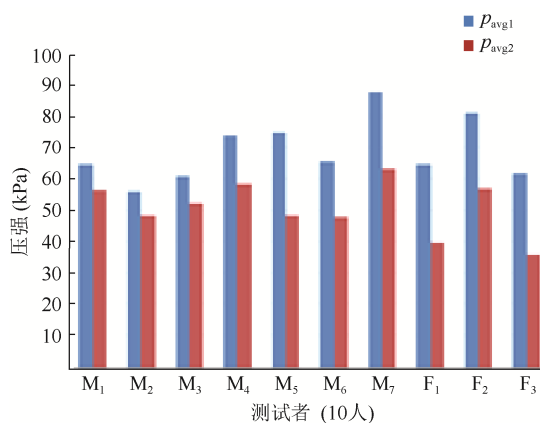
根据表 2 和表 3 的测量结果,分别对压强均值  $p_{avg}$ 、压强峰值  $p_{max}$  和接触面积比  $Rate$  进行对比,如图 6 所示。

从表 3 和图 6 中可知,曲面优化后  $p_{avg}$ 、 $p_{max}$  值有所降低和  $Rate$  值增大较多。在图 6(a)中,除  $M_5$  的平均压强  $p_{avg}$  基本不变,其他 9 人分别降低

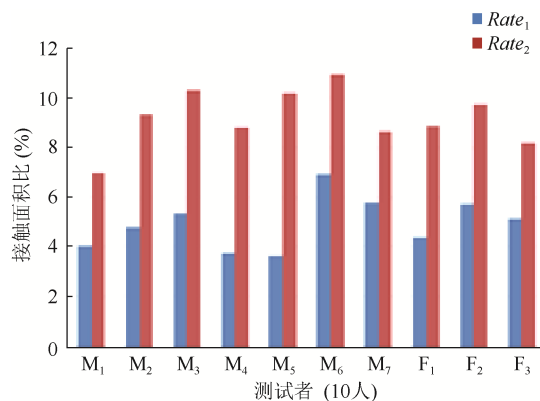
到 83.6%~91.4%;在图 6(b)中,峰值压强  $p_{max}$  降低非常明显,降低到 58.4%~87.3%,能减少局部压迫产生不适感;在图 6(c)中,接触面积比  $Rate$  提高了 1.50~2.78 倍,使接触区域的舒适性得到提高。



(a) 压强均值  $p_{avg}$



(b) 压强峰值  $p_{max}$



(c) 接触面积比  $Rate$

图 6 曲面优化前后的测量结果



表 3 优化后曲面的压力分布测量结果

| 测量参数                     | 测试者编号          |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                          | M <sub>1</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | M <sub>5</sub> | M <sub>6</sub> | M <sub>7</sub> | F <sub>1</sub> | F <sub>2</sub> | F <sub>3</sub> |
| $p_{avg2}$ (kPa)         | 20.1           | 15.8           | 15.6           | 14.0           | 17.5           | 18.8           | 18.8           | 13.9           | 16.8           | 14.3           |
| $p_{max2}$ (kPa)         | 56.4           | 48.6           | 52.1           | 58.7           | 48.7           | 47.9           | 63.4           | 39.9           | 57.2           | 36.1           |
| $S_2$ (cm <sup>2</sup> ) | 1 201.1        | 1 802.3        | 1 721.4        | 1 612.0        | 1 763.3        | 1 863.2        | 1 936.7        | 1 316.7        | 1 545.3        | 1 203.0        |
| $Rate_2$ (%)             | 7.0            | 9.4            | 10.3           | 8.8            | 10.2           | 10.9           | 8.7            | 8.9            | 9.8            | 8.2            |

## 4 讨论与结论

分析优化前后曲面的压力分布数据可知, 压强及接触面积变化可客观反映舒适度的提高; 在对测试者的体验效果访谈中普遍反映使用优化后曲面使身体姿态更为自然和轻松, 主观舒适度有明显提高。接触面积比的引入, 将接触面积与用户身高体重建立关联, 更加客观反映出舒适度的变化, 例如测试者 M<sub>5</sub> 的  $Rate$  值提高了 2.78 倍, 从 3.7 增加到 10.2, 这与试验过程中发现的曲面优化能影响用户姿态的结果相吻合。

本文将压强和接触面积作为舒适度评价指标, 根据  $P_5$ 、 $P_{50}$ 、 $P_{95}$  百分位的人体尺寸参数和曲面形态来优化浴缸的缸体曲面, 并采用 Tekscan 仪器测量用户施加在缸体曲面上的压力分布数据, 实验结果表明了优化后曲面有效提高了用户的舒适度。目前相关研究成果已经用于合作企业的浴缸产品的设计。由于研究进度安排的原因, 本文并未对用户在有水的缸体内的压力分布、洗浴过程的动态压力分布等做研究, 后续将继续开展相关研究。

## 参 考 文 献

- [1] HAYASAKA S, SHIBATA Y, GOTO Y, et al. Bathing in a bathtub and health status: a cross-sectional study [J]. *Complementary Therapies in Clinical Practice*, 2010, 16(4): 219-221.
- [2] TIDWELL D J, EASTWOOD P R, BOYER D, et al. Bathtub for the elderly and handicapped [J]. *Applied Ergonomics*, 1992, 23(4): 284-287.
- [3] 朱凤娟. 卫浴产品中的肤觉体验设计研究[D]. 无锡: 江南大学, 2010.
- [4] 王玮. 现代卫浴产品体验设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [5] 陈四杰. 家用沐浴系统的共用性设计研究[D]. 潍坊: 东华大学, 2007.
- [6] 国家技术监督局. 在产品设计中应用人体尺寸百分位数的通则: GB/T 12985—91[S]. 北京: 国家标准出版社, 2015.
- [7] 张志飞, 袁琼, 徐中明, 等. 基于体压分布的汽车座椅舒适性研究[J]. *汽车工程*, 2014, 36(11): 1399-1344.
- [8] 林凌云. 汽车座椅静态舒适度的主观评价方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [9] YU C Y, LO Y H, CHIOU W K. The 3D scanner formeasuring body surface area: a simplified calculation in the Chineseadult [J]. *Applied Ergonomics*, 2003, 34(3): 273-278.
- [10] 孟京京, 曹平, 吴超. 人体表面积的计算及地理因素的影响[J]. *人类工效学*, 2013, 19(3): 41-44.
- [11] Tekscan, Inc. Pressure mapping sensor 5315 [EB/OL]. [2016-05-20]. <https://www.tekscan.com/products-solutions/pressure-mapping-sensors/5315>.
- [12] 马剑鸿. 产品人机形态设计研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [13] 张嘉欣, 管少平, 李哲林, 等. 基于眼镜作用区域的头部形态参数研究[J]. *图学学报*, 2016, 37(3): 410-416.
- [14] SAMMIE CAD Ltd. Anthropometry: creating size diversity within your human models (2008) [EB/OL]. [2015-07-01]. <http://www.lboro.ac.uk/microsites/lds/sammie/anthro.html>.