

# 基于 COMSOL 的人体下胸围服装压力舒适性研究

李慧<sup>1</sup> 梁宇<sup>1</sup>

1. 北京服装学院信息工程学院, 北京, 中国

\*通讯作者: 梁宇 1198600705@qq.com

**摘要:** 针对女性常有购买到的内衣不合身、穿着不舒适的问题, 本文利用 FLEXIFORCE 薄膜压力传感器测量人体下胸围的服装压力数据, 以号型标准为 160/84A 的人体作为参照, 在人台上进行服装压力数据测量, 通过 COMSOL Multiphysics 建立人体下胸围三维模型, 对不同条件下人体下胸围的应力应变进行分析讨论, 验证仿真所得结果是否与实际情况相符。

**关键词:** 有限元法; 服装压力舒适性; COMSOL Multiphysics; 下胸围; FLEXIFORCE 传感器

## 1 引言

文胸作为一种女性的贴身衣物, 有着极大的存在价值。一方面, 女性的胸部需要文胸给予的外部支撑, 从而增强活动力与舒适性; 另一方面, 文胸为女性提供了塑型的作用, 在美观性上发挥了极大作用, 这也是女性穿着文胸的主要原因。在健康着装的指导下, 人体既需要文胸给出一个合适的力, 使得人们穿起来舒适美观, 又要求压力不能过大, 危害到身体健康。过大的服装压不仅会使人体的内脏、血液循环受到影响, 严重时甚至会增加女性患乳腺癌的风险。设计师在设计文胸的结构时, 需要结合人体各部位受压情况调整其尺寸和制作工艺, 其中最重要的参数就是文胸下胸围的长度和宽度, 它直接影响着文胸穿着的舒适性。

针对女性常有购买到的内衣不合身、穿着不舒适的问题, 本文利用 FLEXIFORCE 薄膜压力传感器测量人体下胸围的服装压力数据, 以号型标准为 160/84A 的人体作为参照, 在人台上进行服装压力数据测量, 通过 COMSOL Multiphysics 建立人体下胸围三维模型, 对模型进行训练, 仿真达到真实情况下人体下胸围受压后应力应变的效果, 对不同条件下人体下胸围的应力应变进行分析讨论, 验证仿真所得结果是否与实际情况相符。

## 2 人体下胸围压力测试

### 2.1 测试设备

采用 FLEXIFORCE 薄膜压力传感器 A201 (美国, 见图 1) 测试下胸围各点的受力, 其量程为 11lbs<sup>[1]</sup>, 传感器极其轻薄, 将其插入人体皮肤和贴身服装之间时, 几乎不影响着衣后人体的物理形态, 故认为可以将所测得数据记为人体皮肤所受压力。本实验在进行服装压力测试前将直接添加标准砝码作为标定的加载方式, 测出输出值, 完成压力测量系统的标定。



图 1 FLEXIFORCE 薄膜压力传感器 A201

根据宋晓霞,董宝云等人<sup>[2]</sup>的研究结果,在静止状态下,选用人台测试的数据是比较可靠,且各部位偏差不大的,同时考虑到人体测量时当文胸底围过紧会引起不舒适感,人会本能的呼气而缩小肋骨,反而造成测试数据不准确,故本次测试选用上海红邦标准 84 立裁女人台,其下胸围为 74cm。整个测试系统由压力测试和放大、数据采集和显示几部分构成<sup>[3]</sup>。本实验在室内进行,将室温控制在 20°C,在标准大气压条件下进行。

由于人体不是规则的物体形状,故在下胸围人体各点的受力大小不同。本课题选取了人体下胸围侧边、下胸围正前后方、底边的上下边界以及钢托五个部位<sup>[4][5][6]</sup>,测量在改变文胸底围长度时,人体的受压情况。服装压力测量系统连接如图 2 所示。

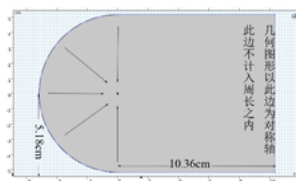


图 2 服装压力测量系统连接图

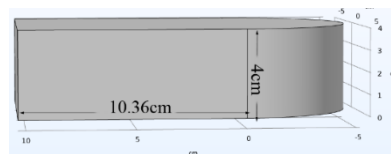
### 3 下胸围受压模型的建立

#### 3.1 三维人体下胸围模型的构建

本模型只构建三维人体下胸围,其高度小,几何结构可以认为是规则的,它由一个半径为 5.18cm 的半圆加边长为 10.36cm 的正方形构成,高为 4cm (见图 3) 图中周长为 37cm,为 84 人台下胸围 74cm 的一半。人体是左右对称的,故研究一半即可。人体模型假设为弹性体<sup>[7]</sup>,下胸围周边的不规则,通过边界受力载荷条件设置来模拟。



(a) 2D



(b) 3D

图 3 人体下胸围模型

#### 3.2 人体与服装接触的理想化假设

把人体和服装都假设为弹性体时,两者接触会产生极为复杂的物理形变。人体的内部生理环境又是一个极为复杂的生态系统,服装的面料拉伸率同样也不是个简单的问题,如若不进行理想化假设,将会使得

问题非常复杂，几乎无法通过有限元法求解。因此，本文在研究人体下胸围受压应力时，将其做如下几方面的理想化假设<sup>[8][9]</sup>。

(1) 物体材料的不变假设，忽略人体皮肤下的骨骼、肌肉以及器官，假设所构建的人体下胸围模型是连续的，整个模型的内部都被一种材料填充，没有任何空隙。

(2) 物体均匀性假设，该模型内部各个部位的弹性常数和力学性能都保持一致状态，不会随着其他条件的改变而改变。

(3) 各向同性假设，该模型的弹性常数和力学性质不随方向的改变而变化。

(4) 完全弹性假设，假设当引起人体形变的外力去除之后，人体能够完全回复到初始状态而没有残余形变。

(5) 小变形假设，人体受到服装压力后，由于服装压本身较小，整个物体模型的位移和形变也当非常微小。

(6) 无初始应力假设，在初始状态下，物体处于自然静止状态，没有外力作用在人体上，人体内部也没有应力。

### 3.3 人体下胸围受压的应力应变的有限元求解<sup>[9][10]</sup>

在对人体下胸围受压的应力应变分析中，将复杂的实际情况抽象为相对简单的力学模型，采用有限元法计算出相对准确可靠的结果，步骤如下：

步骤 1: 合理的网格剖分，对该模型待求解区域进行网格划分，将整个区域分割成若干离散的单元。对于模型在各方向梯度下的离散化如式（1）和（2）所示。

$$\mathbf{0} = \nabla \cdot (F\mathbf{S})^T + \mathbf{F}_V \quad (1)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{1} + \nabla_U \quad (2)$$

步骤 2: 单元分析，将每个连接在一起的单元节点作为插值点，进行分片插值，建立线性插值函数。设人体应力为 $S$ ，应变为 $\epsilon$ ，模型各方向应力求解偏微分方程为：

$$\mathbf{S} = S_{ad} + J_i F_{ine|}^{-1} (\mathbf{C} : \epsilon_{e|}) F_{ine|}^{-T} \quad (3)$$

$$\epsilon_{e|} = \frac{1}{2} (F_{e|}^T F_{e|} - \mathbf{1}) \quad (4)$$

$$F_{e|} = F F_{ine|}^{-1} \quad (5)$$

$$S_{ad} = S_0 + S_{ext} + S_q \quad (6)$$

模型各方向应变求解偏微分方程为：

$$\epsilon = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \nabla \mathbf{u}] \quad (7)$$

其中： $\mathbf{u}$ 是人体受应力后的位移。

步骤 3: 求解近似变分方程, 输出近似解求解结果:

$$C = C(E, v) \quad (8)$$

## 4 人体下胸围压力试验与模拟结果

### 4.1 不同长度下人体的各点受压测试分析及仿真研究

(1) 不同长度下人体的各点服装压测试

将人体下胸围侧边 (A 点)、反侧面 (B 点)、正侧面 (C 点)、织物的上边界 (D 点) 和下边界 (钢托) (E 点) 作为压力测量点 (见图 4)<sup>[11]</sup>, 本实验选取文胸底围宽度为 2.6cm, 改变底围长度, 测量人体各部位受到的服装压 (见表 1)。

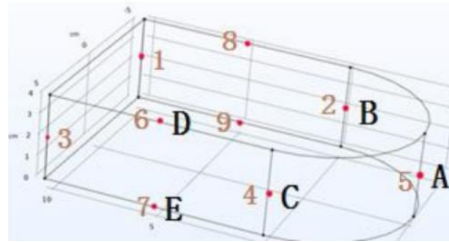


图 4 人体下胸围模型取点分布图

表 1 文胸底围不同长度下各点的服装压力值 (N)

织物长度/cm	A 点	B 点	C 点	D 点	E 点
59	2.47	1.29	0.79	0.31	0.50
59.5	2.41	1.22	0.79	0.31	0.50
60	2.38	1.20	0.79	0.30	0.50
60.5	2.26	1.21	0.74	0.31	0.49
61	2.13	1.17	0.73	0.32	0.50
61.5	2.06	1.13	0.74	0.31	0.49
62	2.00	1.06	0.73	0.31	0.47
62.5	2.00	1.08	0.73	0.30	0.44
63	1.94	1.03	0.69	0.31	0.40
63.5	1.96	0.94	0.69	0.31	0.38
64	1.91	0.91	0.69	0.31	0.37
64.5	1.78	0.89	0.69	0.28	0.35
65	1.66	0.91	0.65	0.31	0.34
65.5	1.30	0.90	0.66	0.30	0.34

表 1 不同织物长度下各点的服装压力值 (N) (续)

织物长度/cm	A 点	B 点	C 点	D 点	E 点
66	1.25	0.81	0.65	0.31	0.31
66.5	1.18	0.76	0.61	0.31	0.31
67	1.00	0.73	0.59	0.29	0.29
67.5	1.05	0.66	0.59	0.29	0.27
68	0.76	0.53	0.54	0.29	0.28
68.5	0.66	0.44	0.52	0.26	0.28
69	0.64	0.41	0.48	0.25	0.25
69.5	0.41	0.39	0.45	0.24	0.25
70	0.56	0.37	0.42	0.24	0.25
70.5	0.40	0.32	0.38	0.22	0.22
71	0.37	0.28	0.33	0.23	0.21
71.5	0.28	0.24	0.27	0.22	0.22

(2) 仿真结果及分析

采用边界条件设置法对人体正面、反面以及侧面添加载荷进行仿真，各部位受到的服装压仿真结果如图 5 和 6 所示。

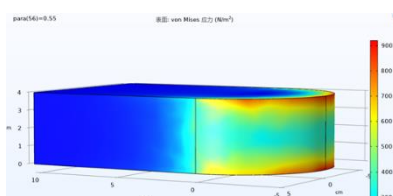


图 5 对人体胸前、背部和侧面进行加载

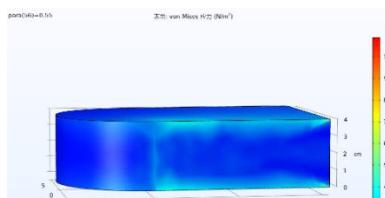


图 6 只对人体背部加载

从图 5 中可知，人体最先感受到服装压是侧面，并且比胸前和背部受到的压力要大得多。在不对特定的边进行约束时，人体各部位都是在文胸的上下边界处受到服装压最大（图 5、6）。

对图 4 中 1 至 9 点在不同载荷下的应力进行计算，不同的载荷对应不同的文胸底围的长度。其压力分布如图 7 所示。可以看出在同一织物长度下，人体侧面即点 5 (A) 处的服装压最大，且远远高于其他点

处压力，其次是点2（C）人体正侧面、点4（B）人体背侧面，与这三个部位对比之下，其余部位人体受到的压力极其微小，几乎可以忽略不计。

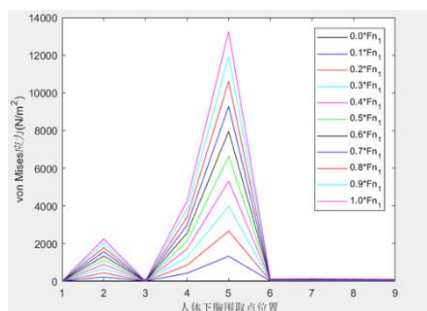


图7 人体下胸围各点受压分布

根据 Do Yoon Park<sup>[12]</sup>和刘红<sup>[13]</sup>对运动背心的研究结论：0.95kPa~1.36kPa 是胸部的舒适范围。本仿真的压力单位 N/m<sup>2</sup>，两者的换算关系是：1kpa 等于 1000N/m<sup>2</sup>。对应本仿真中对人体胸前、背部和侧面加载压力在 1.29N-0.79N 范围内，仿真出最大应力约为 900N/m<sup>2</sup>，相当于 0.9kpa 左右。而对侧边应力 0.79N-1.29N 对应的文胸底围长度为 68-66cm，由于运动文胸的底围宽度比普通文胸要宽，后经过在人体上进行实测评价：下胸围以 74cm 作为参照，文胸底围长度在 67.5-69.5cm 范围内人体感觉舒适。

#### 4.2 人体下胸围受压分布情况研究

为模拟文胸结构中的凸点对人体的压迫，通过给定一点设置点载荷，研究人体下胸围受压分布情况。实际情况中文胸的结构在某些部位是极厚的，如钢托部分，这也是人体在穿着文胸时最容易感到不适的部位。在模型上设置点载荷的位置对应人体受压最大的位置。

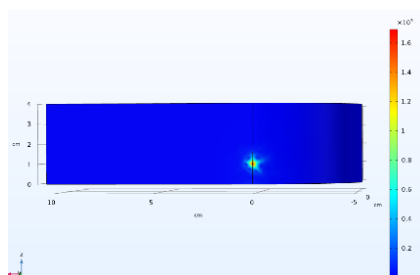


图8 在一点上加载后模型的应力分布

给定物体某处一个压力时，围绕着该点周围，物体都会受到压力。如图8，可以观察到在该点周围约有一个以 0.5cm 为半径的圆形区域会受到压力，圆心处受到的压力最大，在约为 0.2cm 范围内大的圆形区域，从圆心向外模型受到的压力逐渐减小。分别取圆心处，在以 0.15cm 和 3cm 为半径的圆上均匀取 8 点，共 17 点。如图9，在 MATLAB 中绘制人体最大受压点加载后应力分布三维图，其中 x 轴为点的 x 轴坐标，y 轴为点的 z 轴坐标，z 轴为仿真得到该点处的应力。

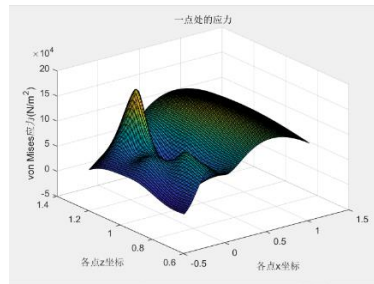


图9 人体最大受压点加载后应力分布

## 5 结论

通过在人体上对最适受压参数条件进行验证, 结合仿真结果, 得出以下结论: ①当改变织物长度和宽度时, 人体下胸围侧面受到的压力最大, 其次是下胸围前侧点(含钢托部分)和后侧点, 随着参数的不断改变, 侧部、前侧点和后侧点的服装压力变化最大。②一点受到压力, 以该点为中心向四周约 0.5cm 范围内产生压力, 本研究为内衣的设计和制作提供理论依据。

## 参考文献

- [1] 费文昌, 陈慰来. 新型服装压力测试装置开发与数据校准[J]. 现代纺织技术, 2017, 25(05):76-80.
- [2] 宋晓霞, 董宝云, 冯勋伟. 瑜伽服上衣压力客观测量与分析[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2010,36(05): 506-511.
- [3] 孟振华. 李津. 一种新型服装压力测试方法的研究[J]. 山东纺织科技, 2006(05):38-41.
- [4] 李世霞. 后比拉力对文胸压力及安定性的影响研究[D]. 东华大学, 2013.
- [5] Makabe H, Momota H, Mitsuno T, et al. Effect of covered area at the waist on clothing pressure[J]. Sen'i Gakkaishi, 1993, vol.49:513-521.
- [6] 梁素贞. 基于三维人体测量的文胸钢圈形态研究[J]. 服装学报, 2020,5(2):107-110.
- [7] Yeung K w, Li Y, Zhang X. A 3D biomechanical human model for numerical simulation of Garment-body dynamic mechanical interactions during wear[J]. J Text Inst, 2004, vol.95:59-79.
- [8] 朱珊. 基于有限元分析的三维人体腰部服装压力舒适性研究[D]. 武汉纺织大学, 2012.
- [9] [德]Klaus-Jürgen Bathe. 有限元法(第2版)下[M]. 轩建平. 北京:高等教育出版社, 2016.8:97-109.
- [G] Klaus-Jürgen Bathe. Finite Element Procedures, 2nd Edition, last of two[M]. XUAN Jianping. Beijing: Higher Education Press, 2016.8:97-109.
- [10] COMSOL. 结构力学简介[OL]. <http://cn.comsol.com/multiphysics/introduction-to-structural-mechanics>, 2018.4.19/2020.5.12.
- [11] 陈虹谕, 陈东生, 袁小红. 动静态下文胸压力分布客观测量分析[J]. 纺织科技进展, 2009(5):84-86.
- [12] Do Yoon Park, Mi Hyang Na. Development of Running-bra Pattern for Mid-aged Women[J]. Indian Journal of Public Health Research & Development 2018(12):
- [13] 刘红. 弹力运动背心的压感舒适性研究[D]. 江南大学, 2012.