

# 人体下肢有限元模型构建及着袜舒适性分析

苏工兵, 陈海英, 张露, 郭翔翔  
(武汉纺织大学 机械工程与自动化学院, 武汉 430073)

**摘要:** 选择人体下肢为研究对象, 以袜对人体下肢的压力舒适性为研究目标, 采用 CT 图像建模法建立人体下肢小腿部分的模型, 选择相应骨骼肌组织的生物力学模型建立本构关系, 建立骨肌生物组织有限元模型, 以此分析着袜对人体下肢的压力分布变化状态的量化指标和具体形态, 为着袜压感舒适性的研究提供基础数据。

**关键词:** 人体下肢; 有限元模型构建; 数值分析; 着袜舒适性

**中图分类号:** TS941      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-024X(2013)06-0032-04

## Building of finite element model of lower limbs and analysis of socks' comfort

SU Gong-bing, CHENG Hai-ying, ZHANG Lu, GUO Xiang-xiang

(Academy of Mechanical Engineering and Automation, Wuhan Textile University, Wuhan 430073, China)

**Abstract:** By choosing the human lower limb as the research object and the pressure comfort of socks for human lower limb as the research target, the model of human lower limb is established with the CT image modeling method. The relevant biomechanical model of skeletal muscle and tissue is chosen to establish the constitutive relation, and then the finite element model of lower limb is builded. Based on it, the pressure distribution on the physical model of lower limbs is analyzed to provide basic data for the study on pressure comfort of socks.

**Key words:** lower limbs; finite element model building; numerical simulation; socks' comfort

袜子的穿着舒适性直接影响人的身心健康。着袜时要求松紧合适, 过大的袜口压力会导致腿部血液循环不畅, 产生疼痛感, 从而使人感到不适, 而过小的袜口压力则会使袜子容易滑脱。谢文颖<sup>[1]</sup>研究了无跟女短袜的袜口压力舒适性, 采用岛津 AG-10 材料试验机对袜口材料的拉伸性能进行测试, 结合穿着感受, 得出袜口对人体没有压迫不舒服感的拉伸张力范围为  $T < 4.9 \cos \phi$  (N) ( $\phi$  为张力  $T$  与压力  $F$  的夹角)。竺敏<sup>[2]</sup>研究了女短袜的袜口压力舒适性, 通过测量成年女性小腿受压部位的腿模尺寸、足跟围尺寸和袜口的压力值, 对不同松紧程度以及不同原料生产的短袜进行了穿着的主观舒适性评价实验。有研究者在对袜口压力与舒适性进行研究后认为, 人的小腿前部表皮下有脚骨, 且肌肉层很薄, 所以压力值比较稳定, 且压力值和压力感的相关系数在腿前部比其他部位大。以上分析主要采用主观实验方法探讨了不同结构组织、编织密度和袜口原料对袜口在压应力下拉伸性能的影响, 并分析了影响袜口压迫感主观评分值的诸多因素, 但是

这些分析没能定量反映袜口压力在人体下肢的分布规律和关键部位的压力大小。本文采用 CT 图像信息作为建模的原始数据, 根据逆向建模和图形处理等相关知识, 以 Pro/E 和 MIMICS 软件作为建模平台, 重构人体下肢的有限元模型, 通过该模型对肌肉软组织在着装压力作用下应力应变的分布状态和量化值进行仿真分析。

## 1 人体下肢有限元模型构建

随着计算机技术的普及和仿真技术的扩展, 人体生物有限元建模法越来越广泛地应用到生物力学、医学假肢和工程的研究当中, 有不少文献<sup>[3-7]</sup>都对医学有限元模型做了研究分析和应用。目前, 人体三维建模的方法大致有: ①线框建模, 直接在 CAD 设计软件中绘制简化的人体模型, 用点、线、面、圆弧、样条曲线构建逼真的人体三维轮廓; ②由人体测量学的数据在 CAD 三维建模软件中绘制人体模型; ③将电脑扫描的

图像 CT 导入到三维建模软件中,根据图像在三维软件中的信息,捕捉点,构建线、面、体,能够获得比较精确的有限元模型.其中,第 3 种方法建模信息最为准确,模型最为逼真.因此,本文采用第 3 种方法进行建模及分析.所用建模软件包括 MIMICS10.0 软件、Pro/Engineer3.0 软件和 ANSYS 13.0,图片材料采用 18 岁女性的小腿 CT 图像,层面间距为 8 mm,图片尺寸 512×512,以 BMP 格式保存,如图 1 所示.

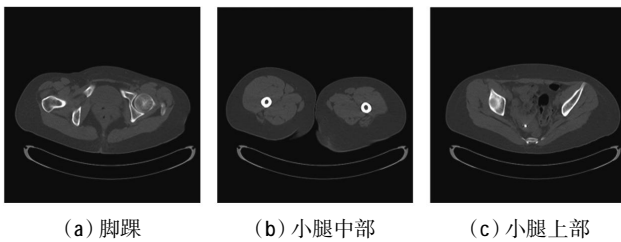


图 1 小腿不同部位的 CT 图片

Fig.1 CT images of different parts of shank

将 CT 图像导入 MIMICS 图像分析软件中,完成人体下肢模型的重建,重构的模型是点云形式,导出点云文件,再将其导入 Pro/Engineer 中,经过曲面建模和逆向建模,由点绘线,由线绘成面,然后面构成体.这样就能建立比较精确的人体下肢几何模型,再导入有限元分析软件 Ansys Workbench 中,建立人体下肢有限元模型,进行数值分析.

### 1.1 小腿模型构建

(1) CT 图像是二维图像,导入 MIMICS 之后设置层距为 8 mm,经过二值化,设置阈值范围,区域生长,然后构建三维模型,这样就构建了云状模型,最后将模型以点云格式输出保存.

(2) 将 MIMICS10.0 建模后输出的点云文件导入 Pro/E,对点云进行编辑,取小腿部分的点云数据作为建模基础.编辑完成后插入到“小平面特征”模块中,进行删除界外值、降低噪音、包络、小平面、小平面特征编辑等操作.完成后插入到“重新建模”模块中,通过相交线命令由点绘线,绘出多条线后,由线绘成面,最后面构成体.

(3) 在 MIMICS 建模中,二值化后骨骼和肌肉模型阈值的选择关系到最终点云模型的准确性;而在 Pro/E 的小平面特征造型包络之后,对不规则小平面的删除以及重新造型过程中选取曲线、编辑曲线的操作关系到最终 Pro/E 实体化后模型的准确性.最终得到骨骼和肌肉的三维几何模型,再将肌肉软组织模型和骨骼模型组装起来,建模完成后隐藏小平面特征,得出的效果图如图 2 所示.

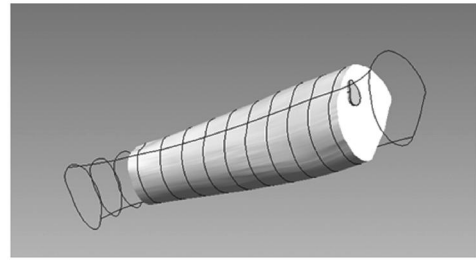


图 2 肌肉和骨组织组合模型

Fig.2 Combination model of muscle and skeleton tissue

### 1.2 材料属性选择

人体骨骼和肌肉的力学性能参数选择采用文献[8]中参数.选取骨骼密度为  $1\ 850\ \text{kg/m}^3$ ,杨氏弹性模量设为 15 GPa,泊松比为 0.3;肌肉和软组织密度为  $1\ 100\ \text{kg/m}^3$ ,杨氏弹性模量设为 150 kPa,泊松比为 0.45.模型导入 Ansys Workbench 后,在 Engineering Data 中进行材料的定义设置.添加材料名称分别为 bone 和 Soft tissue and muscle.在 bone 设置中,密度设为  $1\ 850\ \text{kg/m}^3$ ,杨氏弹性模量设为 15 GPa,泊松比为 0.3;同理在 Soft tissue and muscle 中,密度设置为  $1\ 100\ \text{kg/m}^3$ ,杨氏弹性模量设为 150 kPa,泊松比为 0.45.

### 1.3 网格划分

直接采用默认的形式划分网格.在 Mesh 上点右键,在下拉菜单点击 Generate Mesh,计算机自动完成网格划分.网格总共有 3 962 个节点(Nodes)和 1 758 个单元(Elements).

### 1.4 定义边界条件和载荷

选择插入 Fixed Support 选项,选取骨骼模型的上表面和骨骼模型的下表面,定义模型的边界条件.定义边界后,选择插入 Pressure 选项,左键点击 Gemetry 后按住 Ctrl 选取肌肉和软组织模型的外表面,然后点击 Apply.在压力大小选项(Magnitude)中定义具体的压力数值,根据需要可以定义不同的压力数值以供后面的分析使用.

### 1.5 求解和结果输出

分别对骨骼模型和肌肉及软组织模型定义 Normal Stress(普通应力)、Normal Strain(普通应变)和 Total Deformation(总变形),完成后再以鼠标右键点击 Solution,在弹出的快捷菜单中选择 Solve,这样就可计算出分析结果.

## 2 应力应变分布状态及其量化分析

着装压力的大小主要取决于人体皮肤和皮下软组织的力学性能以及面料的力学性能.Momota 等<sup>[9]</sup>研

究发现, 男性着短袜时感觉舒适的大致压力范围为: 袜口 1.33 kPa, 踝部为 666.5 Pa~1.33 kPa. 中桥美幸等<sup>[10]</sup>研究了青年和中年女性在穿着棉质中统袜时的小腿前部和后部的不同压力值, 发现小腿前部的压力值在 0~25 kPa 时, 人腿的后部还不能明显感受到服装压的变化; 当服装压超过 25 kPa 时, 人腿的后部才能比较敏感的感受服装压的变化; 小腿前部的压力舒适值小于后部, 且小腿前部的受压状态对整个袜子的压力舒适感影响最大. Toshiyuki 等<sup>[11]</sup>着重研究了不同年龄男士穿着短袜时袜口压力值与压力感之间的关系, 认为袜口舒适压力值在  $(2.02 \pm 0.29)$  kPa 之间.

着袜绷紧在人体下肢表面时, 面料会发生相应的形变以适应人体体形及姿势的变化, 面料变形产生的内应力主要包括拉伸、剪切和弯曲等应力, 这些力的合力在接触面的垂直方向上会对人体产生压力. 按照 Momota 的研究结果对人体下肢着袜的压力载荷进行分析, 选取压力值为 1.33 kPa 进行有限元模拟分析, 发现稳态时肌肉软组织的应力在垂直于腿骨方向上为 819.765 ~ 1 734.3 Pa, 如图 3 所示. 此时选择的应力方向为 Y 轴, 力的方向与 Y 轴的正方向相反, 所以显示为负值, 其中单位为 MPa, 下面的分析同理.

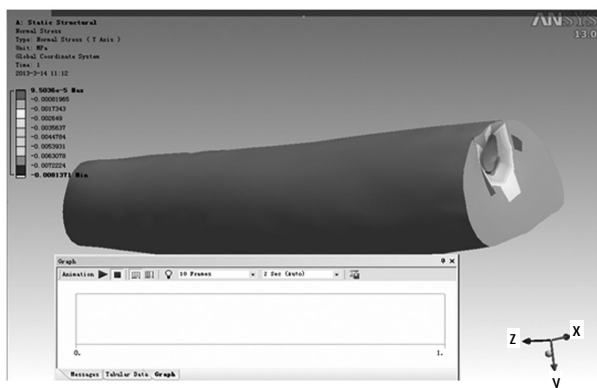


图 3 垂直于腿骨方向应力结果显示

Fig.3 Results showed of stress perpendicular to leg shank direction

沿着腿骨方向(Z方向)可以看出, 稳态时小腿前部和小腿后部的应力大小有所不同, 小腿后部应力约为 317.12~1 098.7 Pa, 小腿前部应力为 1 098.7~1 880.3 Pa, 如图 4 所示.

由图 4 可以看出, 在相同的压力作用下, 小腿前部的压应力值比小腿后部的要大, 小腿前部对压力的感受比小腿后部敏感, 所以, 小腿前部的袜口压力舒适性会小于小腿后部. 这个结论与 1999 年日本中桥美幸等<sup>[10]</sup>的研究结果相同.

肌肉软组织主应变为 0.000 42~0.002 246 8, 结果

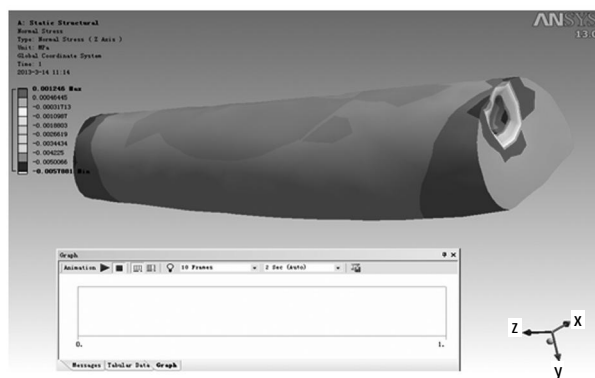


图 4 沿着腿骨方向应力效果显示

Fig.4 Results showed of stress parallel to leg shank direction

如图 5 所示. 小腿肌肉及软组织的变形量为: 小腿前部 0.066 847 mm, 小腿后部 0.133 69~0.334 24 mm, 如图 6 所示.

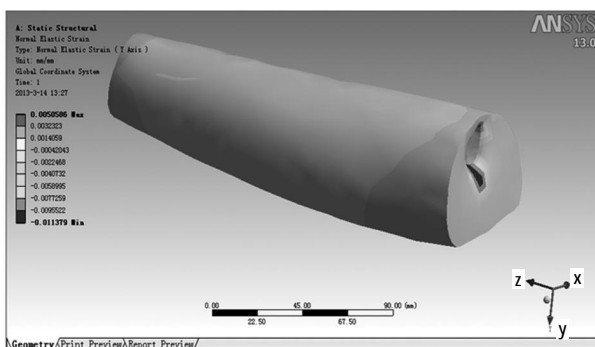


图 5 应变效果显示

Fig.5 Result showed of strain

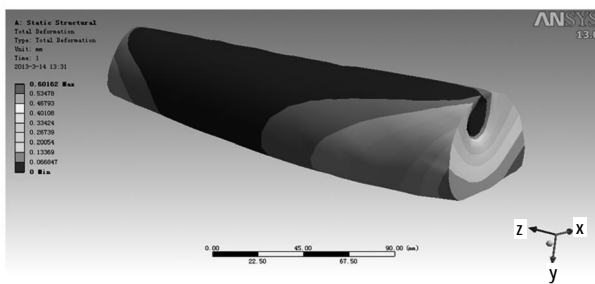


图 6 变形量效果显示

Fig.6 Result showed of deformation

综上所述, 可以得出: 在袜口压力 1.33 kPa 作用下, 小腿肌肉及软组织的应力范围为 317.12~1 880.3 Pa, 应变为 0.000 42~0.002 246 8, 小腿前部变形量为 0~0.066 847 mm, 小腿后部变形量为 0.133 69~0.334 24 mm.

按照 Toshiyuki 的研究结果<sup>[11]</sup>, 压力舒适性的阈值范围为  $(2.02 \pm 0.29)$  kPa, 因此本文分别取袜口压力为 1.73、2.02、2.31 kPa, 针对前文所构建的下肢有限元模型进行分析计算, 从而得到该袜口压力条件下人体下肢的应力应变分布状态, 如表 1 所示.

表1 不同压力值下的数值分析结果

Tab.1 Numerical analysis results under different pressures

压力值/kPa	1.33	1.73	2.02	2.31
应力/Pa	317.12~1 880.3	412.5~2 445.8	481.65~2 855.8	550.8~3 265.7
应变	0.000 42~0.002 2	0.000 54~0.002 9	0.000 64~0.003 4	0.000 73~0.003 9
变形量(前)/mm	0~0.668 47	0~0.086 952	0~0.101 53	0~0.116 1
变形量(后)/mm	0.134~0.334	0.174~0.435	0.203~0.508	0.232~0.580

着装压力舒适性是服装和人体皮肤间相互作用而产生的皮肤压感觉的舒适状态, 主要与皮肤内的压力感受器有关, 并且可能联系痛感和触觉. 袜子压感舒适性可通过主观着装评价和客观压力测定两方面进行分析, 并且客观压力测试结果分析要以主观着装评价为依据, 得出人体穿着袜子感觉舒适的服装压力值数据. 目前通过测量生理、心理参数来建立着袜舒适性的评判指标, 其机理来源是着袜对人体下肢血管和神经末梢的挤压作用. 本文建立了人体下肢有限元模型, 根据现有的着袜压力舒适性阈值, 得出袜压力在人体下肢肌肉的应力和应变分布规律及其量化值, 初步揭示了着袜后人体下肢的舒适性机理. 若能进一步考虑影响人体着袜舒适性的生理和心理因素, 就能建立更加客观可靠的人体着袜舒适性的预测评判指标, 从而对袜子结构设计、材料选择以及压力袜的压力梯度设计提供技术指导.

### 3 结束语

本文构建了人体下肢的有限元模型, 并对在小腿部位施加压力为 1.33、1.73、2.02、2.31 kPa 时达到稳态之后小腿前部和后部的压应力、应变和变形量进行数值仿真分析, 得出: 小腿肌肉及软组织的应力范围为 317.12~3 265.7 Pa; 应变为 0.000 42~0.003 923, 小腿前部的变形量为 0~0.116 1 mm, 小腿后部的变形量为 0.133 69~0.580 51mm; 小腿前部的袜口压力舒适性小于小腿后部. 这一研究结果可为人体下肢的压力舒适性研究以及袜织物结构和袜口弹性力的设计提供一定参考. 该模型仅初步分析了着袜压力所导致的人体肌肉上应力应变的分布规律和变形量化值. 下一步还应建立人体血管和肌肉的流固耦合有限元模型, 分析着袜对人体下肢血液流动形态和肌肉的相互作用机

制, 从而获得更加合理科学的量化指标.

### 参考文献:

- [1] 谢文颖. 无跟女短袜袜口压力舒适性研究[D]. 上海: 东华大学, 2005.
- [2] 竺敏. 女短袜袜口的压力舒适性研究[D]. 上海: 东华大学, 2006.
- [3] BREKELMANS W A, POORT H W, SLOOF T J, et al. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts [J]. *Acta Orthop Scand*, 1972, 43(5): 301-317.
- [4] RHO J Y, HOBATHO M C, ASHMAN R B. Relations of mechanical properties to density and CT numbers in human bone[J]. *Medical Engineering and Physics*, 1995, 17(5): 347-355.
- [5] PRATT J, WEST G. *Pressure Garments: A Manual on Their Design and Fabrication*[M]. Bath city: Bath Press, 1995.
- [6] FALCHI M. A CT of pelroll and igvic fractures[J]. *Eur J Radiol*, 2004, 50(1): 96-105.
- [7] R YBICKI E F, SMONEN F H, WEIS E B Jr, et al. On the mathematical analysis of stress in the human femur[J]. *J Biomech*, 1972, 5(2): 203-215
- [8] 李雨辰. 大腿假肢接受腔设计的优化 [C]//第7届北京国际康复论坛论文汇编. 北京: 首都医科大学生物医学工程学院, 2012: 890-892.
- [9] MOMOTA H, MAKEBEETE H. A study of clothing pressure caused by Japanese men's socks[J]. *Journal of the Japan Research Association for Textile End-Uses*, 1993, 34: 175-186.
- [10] 中桥美幸, 诸桥晴美. 下腿部前面および后面の圧強度が圧感觉到に与る影響 [J]. *Japan Res Assn Text End-Uses*, 1999, 40(10): 49-55.
- [11] TOSHIYUKI Tsujisaka, YOSHIAKI Azumaete. Comfort pressure of the top part of men's socks [J]. *T R J*, 2004, 74(7): 598-602.
- [12] 王革辉, 张潇月, 李静. 短袜袜口压力舒适性研究[J]. *针织工业*, 2009(3): 6-8.