

DOI: 10.13475/j.fzxb.20170902306

# 接触状态下男上装基础版型对人体 压力分布的有限元模型

康雪莲, 应柏安, 张欣, 段锦

(西安工程大学 服装与艺术设计学院, 陕西 西安 710048)

**摘要** 为对男上装基础版型与人体接触状态下的压力分布进行仿真与分析,采用三维人体测量技术获取人体和服装的点云数据,通过逆向工程软件建立人体与服装的几何模型,运用有限元软件进行有限元网格划分,建立人体与服装在接触状态下的有限元模型并进行仿真计算。由仿真结果得出基础版型与人体之间的压力及位移的分布状况:肩部中点的压力值为2.012~4.134 kPa,胸点与背部点压力值为0~1.101 kPa,肩颈点与肩点压力值为0~2.012 kPa;而实测肩部中点压力值为3.14~3.20 kPa,胸点压力值为0.73~0.81 kPa,肩颈点压力值为0.54~0.61 kPa,肩点压力值为1.19~1.23 kPa,背部点压力值为0.61~0.75 kPa;经对比实验验证所建立的有限元模型是合理且有效的。

**关键词** 男上装基础版型;有限元模型;数字化仿真;压力分布;压力测试

中图分类号:K 826.16 文献标志码:A

## Finite element model for evaluating pressure distribution of men's basic pattern on upper body

KANG Xuelian, YING Boan, ZHANG Xin, DUAN Jin

(College of Apparel & Art Design, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract** The finite element model was established to digitally evaluate the pressure when wearing men's basic pattern. The 3-D body measuring technology was adopted to acquire the point cloud data of men's basic pattern and the upper body. The assembly model of human body and man's basic pattern was established by reverse engineering software. Mesh generation, contact mechanics model of human body and basic pattern, and simulation calculation were in the finite element software. The simulation results show that the distribution of pressure and displacement between the base pattern and human body is obtained. And analyzing the pressure distribution can make conclusions that pressure value of middle shoulder is 2.102-4.134 kPa, pressure values of breast and back are 0-1.101 kPa, and pressure values of shoulder and neck point and shoulder point are 0-2.012 kPa. By pressure test, pressure value of middle shoulder is 3.14-3.20 kPa, pressure value of breast is 0.73-0.81 kPa, pressure value of shoulder and neck point is 0.54-0.61 kPa, pressure value of shoulder is 1.19-1.23 kPa, pressure value of back is 0.61-0.75 kPa. This illustrates that the model is available, and the result is correct and effective.

**Keywords** men's basic pattern; finite element model; digital simulation; pressure distribution; pressure test

在现代生活中,穿着舒适性成为越来越重要的服装评价因素之一。利用计算机对基础版型的压力分布做进一步的仿真研究,以及时了解不同材料、不同结构的基础版型穿着后的人体与服装之间的压力

收稿日期:2017-09-08 修回日期:2018-09-23

基金项目:中国纺织工业联合会科技指导性计划项目(2016124);中国纺织工业联合会纺织之光科技教育基金应用基础研究项目(J201606)

第一作者简介:康雪莲(1995—),女,学士。主要研究方向为服装舒适性与功能性的评价以及有限元的仿真研究。

通信作者:应柏安 E-mail:yingba2006@163.com。

分布,为男上装基础版型的穿着压力提供一种数字化模拟和评价方式。采用数字化建模技术和有限元分析方法,分析穿着状态下人体与服装的压力分布情况,使设计人员能够及时了解基础版型对男性上半身产生的影响,成为指导设计的一个重要因素。

基础版型作为简化的服装,其评价方式与服装一样。在基于知识驱动的女茄克装样板设计方法的研究中,陈静<sup>[1]</sup>在制作成衣后拍照进行穿着评价,利用穿着效果进行版型的主观评价。许已超等<sup>[2]</sup>运用模糊数学法、统计方法、小波分析法等方法,对服装测量数据进行分析与评价。齐行祥等<sup>[3]</sup>将平面的服装版型网格化,利用空间几何变换设定衣片的初始位置、匹配人体特征线与衣片特征线来转换成三维立体模型评价服装。戴玮等<sup>[4]</sup>运用模糊数学方法,通过建立理论的隶属函数对衣身等进行评价。徐正艳等<sup>[5]</sup>分析总结有限元方法和智能算法等数字化模拟在服装压力舒适性研究中的应用,并分析对比了服装压的测量方法。在文胸压力分布的数字化模拟研究中,陆璐<sup>[6]</sup>提出人体与文胸的接触模型,利用有限元分析文胸的压力分布。

目前对服装的评价多数在于服装与人体间的几何位置关系,少数在于压力研究。本文通过构建人体与服装的几何模型,对人体与服装进行单元类型的选择、网格划分,以及建立服装与人体的有限元接触力学模型,并利用有限元软件 Marc 进行仿真计算与分析,进而获得男上体穿着基础版型时的压力分布,并利用压力测试对有限元计算的仿真结果进行验证。通过有限元模型的数字化模拟可以得到压力分布以及在重力作用下的位移变化,本文运用有限元技术提供一种可以在计算机中实现基础版型的评价方法。

## 1 服装与人体的几何模型建立

### 1.1 人体的几何模型建立

三维人体和服装形体具有分布不均匀、造型多样的结构特点。利用计算机将三维人体和服装形体描述成计算机可识别的模型的过程为几何建模,即重建物体原型的数据曲面模型。涉及的关键技术主要包括:三维实体几何形状数据采集、离散数据处理、三维实体模型重建<sup>[7-8]</sup>。

人体模型的建立是利用非接触式三维扫描仪扫描男人台表面,获得人体形状的点云数据,如图 1 所示。通过选择体外孤点进行处理,使得表面光滑。经处理后得到多边形模型,删除不规则三角形、多边形的数目,且对物体表面的孔洞利用曲率或者曲面

等方式来填补完整,同时消除填补以后模型的细微特征或钉状物,使得模型表面更加光滑。然后使用精确曲面进行造面,使得整个模型成为面体模型,并对面体进行缝合,如图 2 所示,得到一个完整的人体三维几何实体模型。

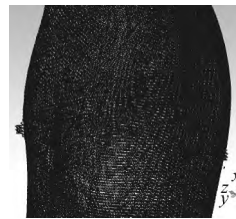


图 1 点云数据

Fig. 1 Point cloud data

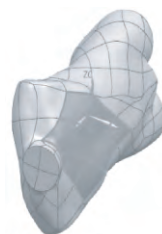


图 2 片体缝合

Fig. 2 Suture facet

### 1.2 服装的几何模型建立

人体是一个不规则曲面,男性的胸部和肩胛骨隆起,男上装服装版型在这些区域产生一定的浮余量。为更好地贴合人体肩胛骨等区域,应设置分割线。在设计分割线位置时,要遵循以下 2 个原则:分割点应与服装真实的省尖点相一致;切线应易于使用。根据这 2 个原理,在男子上衣的三维模型上画出分割线。首先,依据男装基础版型绘制所涉及到的胸围线、腰围线、颈围线、肩线、前中线与后中线以及制版中所涉及到的辅助线,然后从三维数字化人体模型中提取特征曲线的边缘轮廓,需注意边缘轮廓线必须是封闭曲线。其次,根据前、后轮廓体区域中点云的变化趋势对人体特征线进行曲面重建。此外对构建的曲线进行调整,最终基础版型如图 3 所示。

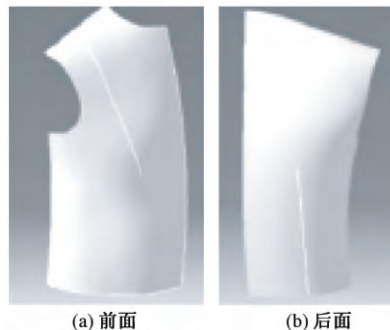


图 3 男上装基础版型

Fig. 3 Men's basic pattern. (a) Front; (b) Back

## 2 有限元模型构建与计算

### 2.1 单元类型

在对人体与服装几何模型进行网格划分前,首先要确定单元类型。人体是不规则曲面的实体模型采用体单元,其中十节点四面体的网格可有任何空间方位,可在不减少人体精度的情况下接受不规则的形状,且计算精度高<sup>[9-10]</sup>。实际人体具有骨头、韧带、肌肉等各部分组织,且分布不均匀。为方便划分网格,假设人体单元均匀分布,并使用单一的网格进行划分。对服装模型可选用三角形网格和四边形网格,四边形网格无论是在计算精度上还是在收敛速度上,都要优于三角网格<sup>[11]</sup>。

考虑到四边形网格与四面体单元具有较好的收敛性与适应性,同时人体与服装几何模型具有不规则曲面结构,故人体选用四面体网格,服装选用四边形的三维壳单元网格。网格大小、疏密的选择会影响应力与应变的效果,与计算结果的精度相关<sup>[12]</sup>,因此,人体的不规则程度较大则选用 15 mm 的网格,服装的曲面程度较小则选用 25 mm 的网格。

### 2.2 网格划分

在进行有限元计算前必须划分网格,网格划分操作包括以下 3 步:

1) 对几何模型进行几何检查,并对其中的问题,如出现自相交面、面与面之间存在缝隙等,多次调整检查使建立的几何模型能够达到网格划分的要求。

2) 使用网格划分工具,经调整参数后对模型进行网格划分。

3) 检查网格质量,若合适则可使用此网格模型;若不合适,则对几何模型进行调整。

经网格划分后,人体与基础版型的网格模型如图 4 所示。

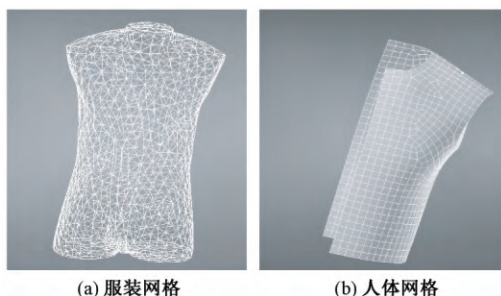


图 4 网格划分

Fig. 4 Meshing. (a) Mesh of men's basic pattern; (b) Mesh of upper body

### 2.3 材料参数

人体具有一定的弹性,同时人体本身具有非均匀性、非线性和黏弹性的材料特性,由于有限元求解中对材料的限制,为简化计算,将人体简化为同质且密度分布均匀的弹性体。实验数据表明本文中材料经纬向的拉伸系数差异不明显,为简化计算,假设服装材料为各向同性,并为其赋予厚度值。人体选用 Mooney 弹性材料<sup>[13]</sup>,其中 C10、C01 代表材料的系数,均是正定常数。人体与服装的参数见表 1、2。

表 1 人体材料参数在 Marc 中的定义

Tab. 1 Material parameters of human body in Marc

单元类型	材料属性	C10	C01
六节点四面体单元	Mooney 材料	-12	17

表 2 基础版型参数在 Marc 中的定义

Tab. 2 Material parameters of basic pattern in Marc

单元类型	材料属性	弹性模量 / (N·mm <sup>-2</sup> )	泊松比	面密度 / (g·mm <sup>-2</sup> )	厚度 / mm
四边形	各向同性	220	0.3	0.000 2	2

### 2.4 服装与人体有限元接触模型的构建

有限元模型构建完成后可在有限元软件 Marc 中按照穿着状态进行服装与人体模型的装配处理,所得模型如图 5 所示。材料属性的定义直接为有限元模型奠定了基础。定义模型为弹性体,对于基础版型制作的服装与人体的接触通过定义服装的材料密度和重力以及服装与人体之间的接触关系来实现。人体与服装为 2 个不同的接触体。

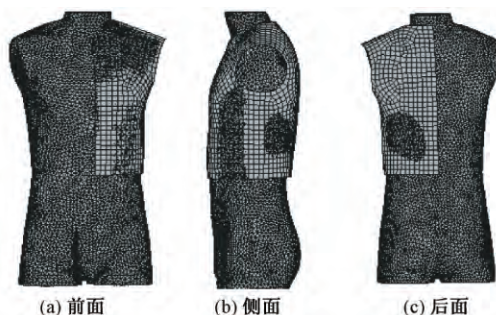


图 5 人体与基础版型的装配图

Fig. 5 Assembled model of men's basic pattern on upper body. (a) Front; (b) Side; (c) Back

#### 2.4.1 边界条件定义

模拟的真实情况为,人体在站姿状态下穿着服装,服装自身所有的重力会使服装具有下垂的特点。穿着服装时,同时要保持服装的肩线与人体保持静止,人体肩部起主要的支撑作用。服装的基本版型一般而言是对称的,为简化计算,选用一半的服装。当人体穿着基础版型时,需保证服装的前中与后中在人体的围度方向没有位移,而此时人体与服装之

间保持相对的静止关系。

在有限元软件中将真实情况转换为给定相应的边界条件,如图 6 所示。图 6(a) 中服装的前中和后中在人体围度方向没有位移;图 6(b) 中服装的肩线在人体的高度、围度、厚度方向均没有位移变化;图 6(c) 中在高度方向给服装整体赋予重

力,为重力加速度  $-0.0098 \text{ mm/s}^2$ ; 图 6(d) 中人体颈部与腰部在身高方向保持没有位移。通过边界条件的组合构成符合真实情况的模拟环境,实现基础版型的服装在三维人体穿着中的压力与位移分析,综合分析人体穿着服装的压力来评价服装的舒适性。

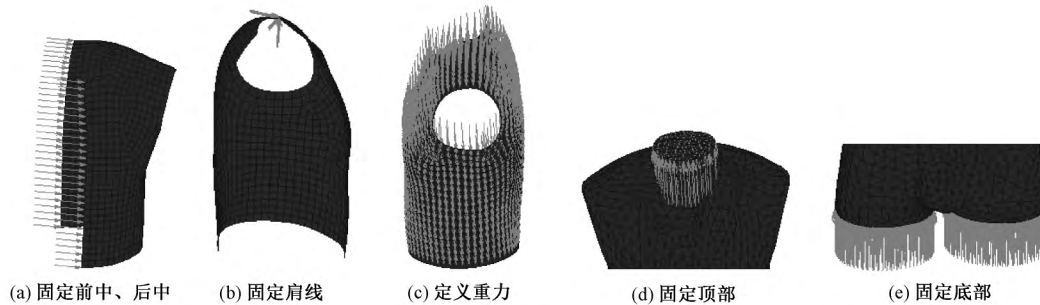


图 6 边界条件

Fig. 6 Boundary conditions. (a) Fix front and back; (b) Fix shoulder; (c) Set gravity; (d) Fix top of upper body; (e) Fix bottom of upper body

### 2.4.2 接触与计算结果定义

服装覆盖在人体的表面,表明人体与服装的接触关系为表面接触,并没有在接触后发生黏结等,二者之间的接触关系为结构中的变形体与变形体之间的接触。接触表中设置人体与服装之间的接触关系为触碰,接触时是通过服装受到重力进而探测到人体。

在有限元分析的弹性静力学中,利用服装的重力得到压力的分布。计算方程式满足人体对服装的力与服装自身的重力总功必定等于零,因此计算的算法选用牛顿-伊夫森算法。为保证计算结果输出内容满足分析结果,需要定义输出的计算结果参数应力、等效米塞斯效应等。

## 3 结果与分析

### 3.1 仿真结果

整个计算完成后得到如图 7 所示的在重力影响下的 X 方向位移云图以及图 8、9 所示的压力云图。图示左边为数值标度,不同颜色代表不同数值的压力与位移。分析人体站立状态下穿着基础版型后,不同部位的压力以及服装的位移状况,主要是肩部、胸部以及肩胛骨等部位。由于织物的密度较小,使服装向着人体的方向发生一定的位移,符合实际情况。根据仿真结果,对比压力测试结果说明有限元模型是否合理。

基础版型重力主要在 X 方向,通过 X 方向位移分析得出,肩部的位移在 X 方向较明显,腰侧部

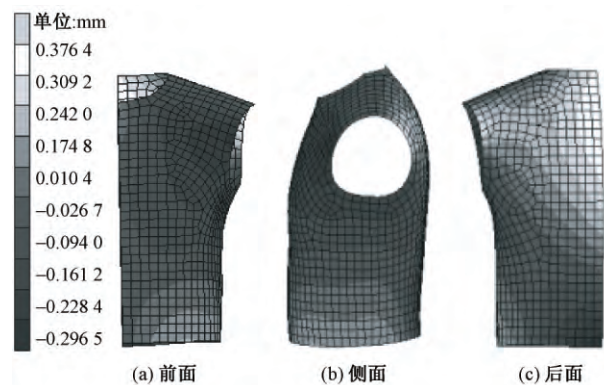


图 7 X 方向位移云图

Fig. 7 Displacement in X direction. (a) Front; (b) Side; (c) Back

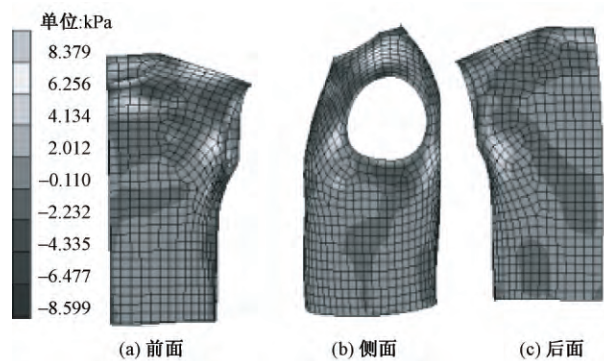


图 8 基础版型压力云图

Fig. 8 Stress of men's basic pattern. (a) Front; (b) Side; (c) Back

有较明显的位移,背部肩胛骨在 X 方向位移较小,但小区域内位移趋向肩胛骨,以上结果均符合真实情况。



图 9 人体压力云图

Fig. 9 Stress of upper body.

(a) Front; (b) Side; (c) Back

通过分析压力云图得出,人体所受到的压力较小,这是因为模拟过程中人体具有一定的刚度,符合真实情况。基础版型在肩部、背部等区域受到的压力较大,理论符合现实情况,需进行压力测试对其进行验证。

### 3.2 压力测试结果

为检验有限元模型计算所得压力值的有效性,本文采用气囊式压力测试仪。当产生压力时,气囊内的气体发生变化,转化为电信号,利用放大器将信号在数显表中显示,并记录压力测试值。

压力测试实验在安静的恒温实验室中进行,温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。依据上述仿真结果,对肩颈点、肩部中点、肩点、胸点及背部凸处 5 点进行压力测试,测量的标记点共 5 个,如图 10 所示。

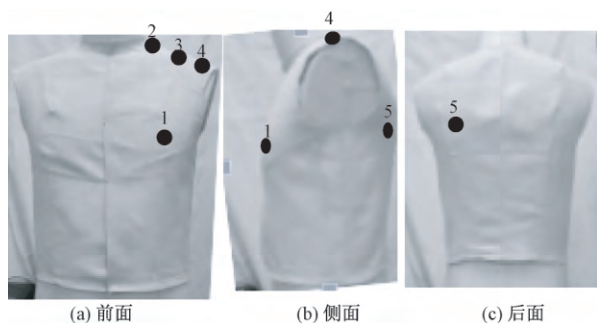


图 10 基础版型的穿着及测试点图

Fig. 10 Wearing state of men's basic pattern and

points of pressure test. (a) Front; (b) Side; (c) Back

在男人台穿着基础版型状态如图 10 所示的情况下,对上述 5 点进行压力测试 3 次,每次测试前服装放置 2 h 以确保服装下一次测试时不发生形变,测试所得的压力均值如表 3 所示。

通过分析表 3 中的数据可看出,人体穿着基础版型时,肩部中点所受的压力最大,而其余 4 点所受到的压力值相差不大。这与仿真结果基本吻合。

表 3 压力值

Tab. 3 Value of pressure

测试点	压力/kPa		
	测试 1	测试 2	测试 3
胸点(1)	0.75	0.73	0.81
肩颈点(2)	0.59	0.61	0.54
肩部中点(3)	3.14	3.08	3.20
肩点(4)	1.23	1.19	1.21
背部凸点(5)	0.69	0.61	0.75

### 3.3 分析与讨论

由图 8 看出,有限元仿真预测的压力变化与测试所得的压力变化规律基本一致。均是肩部中点的压力最大,胸部与背部对于服装有着一定的支持作用。

仿真压力值与实测压力值存在一定的数值差。图 8 显示:肩部中点的压力值为 2.012 ~ 4.134 kPa,胸点与背部点压力值为 0 ~ 1.101 kPa,肩颈点与肩点压力值为 0 ~ 2.012 kPa;而实测肩部中点压力值为 3.14 ~ 3.20 kPa,胸点压力值为 0.73 ~ 0.81 kPa,肩颈点压力值为 0.54 ~ 0.61 kPa,肩点压力值为 1.19 ~ 1.23 kPa,背部点压力值为 0.61 ~ 0.75 kPa。实测数据均在仿真结果的范围之内。上述分析说明本文模型对基础版型的压力预测是合理的,运用此模型也可对其他服装进行压力预测。

仿真压力值不同于实测压力值,原因是本文压力测试实验存在一定的测量误差,以及三维扫描仪扫描过程中会有误差,造成所建立的模型本身存在一定的误差,不能完全模拟人体穿着基础版型的状态。为使 2 种压力值之间的差值减小,应进行大量的实验测量以及对模型中材料选择、几何模型建立等方面进行深入的研究。

## 4 结 论

1) 本文对人体和服装的三维造型和曲面特点进行分析,提出了具有针对性的几何模型的建模方法,包括对扫描所得的点云处理、实体构建、单元类型选择、网格划分以及接触模型建立。

2) 本文通过仿真模拟人体穿着服装的状态,构建人体与服装的有限元接触模型进行仿真计算,并对模拟结果进行分析,为基础版型的压力分布进行数字化评价提供可行性的参考,但由于服装与人体均被视为同一种材质等原因使得仿真分析存在一些不足,有待深入研究。

3) 通过有限元计算得到的压力变化与实测基本规律一致,说明服装基础版型的评价与数字化分析模型的建立较为合理,进而可指导版型的设计过

程, 以及对其他服装的压力进行数字化预测。对模型进行优化, 减少 2 种压力值之间的数值差, 为服装压力预测提供借鉴。 FZXB

#### 参考文献:

- [ 1 ] 陈静. 基于知识驱动的女茄克装样板设计方法的研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2014: 5.  
CHEN Jing. Research on female jacket model design method based on knowledge driven [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2014: 5.
- [ 2 ] 许已超, 丁永生. 服装合体性评价的研究方法与应用[J]. 纺织学报, 2007, 28( 10 ): 127 - 130.  
XU Yichao, DING Yongsheng. Research and application of garment fit assessments [J]. Journal of Textile Research, 2007, 28( 10 ): 127 - 130.
- [ 3 ] 齐行祥, 张文斌. 基于个性化虚拟人台的服装合体性评价模型研究[D]. 上海: 东华大学, 2011: 9.  
QI Xingxiang, ZHANG Wenbin. Research on evaluation model of clothes fit based on individual virtual mannequin [D]. Shanghai: Donghua University, 2011: 9.
- [ 4 ] 戴玮, 张源涓. 服装衣身合体性评价中的模糊数学方法[J]. 东华大学学报, 2003, 29( 3 ): 33 - 35.  
DAI Wei, ZHANG Weiyan. Fuzzy mathematics methodology on clothing fitness evaluation [J]. Journal of Donghua University, 2003, 29( 3 ): 33 - 35.
- [ 5 ] 徐正艳, 宋晓霞. 人体与服装压力关系的研究进展[J]. 上海工程技术大学学报, 2013, 27( 2 ): 170 - 173.  
XU Zhengyan, SONG Xiaoxia. Research progress in relationship between human body and clothing pressure [J]. Journal of Shanghai University of Engineering Science, 2013, 27( 2 ): 170 - 173.
- [ 6 ] 陆璐. 文胸压力分布的数字化模拟研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2013: 2.  
LU Lu. Study on digital simulation of bra's pressure distribution [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2013: 2.
- [ 7 ] 成思源, 吴问霆, 杨雪荣. 基于 Geomagic Studio 的快速曲面重建[J]. 现代制造工程, 2011( 1 ): 8 - 12.  
CHENG Siyuan, WU Wenting, YANG Xuerong. Rapid surface reconstruction based on Geomagic Studio software [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2011( 1 ): 8 - 12.
- [ 8 ] 胡影峰. Geomagic Studio 软件在逆向工程后处理的应用[J]. 制造业自动化, 2009, 31( 9 ): 135 - 137.  
HU Yingfeng. The application of Geomagic Studio software in reverse engineering post processing [J]. Manufacturing Automation, 2009, 31( 9 ): 135 - 137.
- [ 9 ] 张荣. 四面体与六面体网格特征比较[J]. 企业技术开发, 2012, 8( 31 ): 101 - 102.  
ZHANG Rong. Comparison of tetrahedral and hexahedral mesh features [J]. Technological Development of Enterprise, 2012, 8( 31 ): 101 - 102.
- [ 10 ] 姬伟, 李俊乐, 杨俊, 等. 机械手采摘中苹果抓取有限元分析损伤研究[C]// 高万林. 2014 年农业电气化与信息化工程与学科创新发展学术年会会议. 兰州: 甘肃农业大学, 2014: 430 - 435.  
JI Wei, LI Junle, YANG Jun, et al. Research on mechanical damage of apple in robot harvesting using finite element analysis [C]// GAO Wanlin. 2014 Annual conference on electrification and information engineering and discipline innovation and development. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014: 430 - 435.
- [ 11 ] 杨森. 基于特征的四边形网格生成[D]. 大连: 大连理工大学, 2006: 6.  
YANG Sen. Quadrilateral mesh generation based on features [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006: 6.
- [ 12 ] 应世洲, 张建, 王国林, 等. 网格密度对全钢载重子午线轮胎有限元分析的影响[J]. 轮胎工业, 2008, 28( 10 ): 579 - 582.  
YING Shizhou, ZHANG Jian, WANG Guolin, et al. Effects of mesh density on finite element analysis for TBR tire [J]. Tire Industry, 2008, 28( 10 ): 579 - 582.
- [ 13 ] 王欣. 有限元人体模型的分析与应用[J]. 客车技术与研究, 2006, 28( 2 ): 30 - 33.  
WANG Xin. Analysis and application of human-body finite element model [J]. Bus Technology and Research, 2006, 28( 2 ): 30 - 33.