

膝关节三维有限元模型的建立及生物力学分析**

王光达, 张祚福, 齐晓军, 曹春妮, 于娟

Establishment and biomechanical analysis of a three-dimensional finite element model of the knee joint

Wang Guang-da, Zhang Zuo-fu, Qi Xiao-jun, Cao Chun-ni, Yu Juan

Department of Joint,
Yuhuangding
Hospital, Yantai
264000, Shandong
Province, China

Wang Guang-da★,
Master, Associate
professor,
Department of Joint,
Yuhuangding
Hospital, Yantai
264000, Shandong
Province, China
Wgdsh123@sohu.
com

Wang Guang-da and
Zhang Zuo-fu equally
contributed to this
work.

Supported by: the
Natural Science
Foundation of
Shandong Province,
No. Y2008C20

Received: 2010-09-08
Accepted: 2010-10-14

烟台毓璜顶医院
关节科, 山东省烟
台市 264000

王光达★, 男,
1972年生, 黑龙
江省牡丹江市人,
汉族, 2000年牡
丹江医学院毕业,
硕士, 副教授, 主
要从事髌膝关
节疾病与损伤方
面的研究。
Wgdsh123@
sohu.com

并列第一作者: 张
祚福★, 男, 1977
年生, 山东省潍坊
市人, 汉族, 2006
年中南大学湘雅
二院毕业, 硕士,
主治医师, 主要
从事髌膝关
节生物力学研究及疾病的
诊治。
Zhangzuofu@
gmail.com

中图分类号: R318
文献标识码: A
文章编号: 1673-8225
(2010)52-09702-04

收稿日期: 2010-09-08
修回日期: 2010-10-14
(20100908011/M·A)

Abstract

BACKGROUND: Finite element analysis has been frequently used for knee joint biomechanics at abroad. However, there are domestic three-dimensional finite element analyses in China, and the model is simple and rough. There is no report about three-dimensional finite element model of intact knee joint including meniscus, articular cartilage and ligaments.

OBJECTIVE: To establish a three-dimensional finite element model of intact knee joint.

METHODS: SCT scanning data of normal knee joint were used to establish intact three-dimensional finite model of knee joint using Mimics, 3ds Max and ANSYS software. Biomechanics of the knee joint model was analyzed to verify the validity of the model.

RESULTS AND CONCLUSION: An intact three-dimensional finite element model of knee joint was established successfully, and the model provides a precise anatomic morphology of the knee joint. The finite element analysis of the model demonstrated that the forward loading mainly distributed at the anterior cruciate ligament, medial mesoecium bear larger axial loading than lateral mesoecium; the tibiofibula shifted forward for 4.9 mm. Results primarily show that it is reliable and accurate to build three-dimensional finite element models with CT scan data, which is appropriate to establish the three-dimensional finite element model in orthopedics.

Wang GD, Zhang ZF, Qi XJ, Cao CN, Yu J. Establishment and biomechanical analysis of a three-dimensional finite element model of the knee joint. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2010;14(52): 9702-9705. [http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

摘要

背景: 近年来, 采用有限元分析法进行膝关节生物力学分析在国外发展迅速, 但在国内, 关于膝关节的三维有限元分析较少, 且建模简单, 相对粗糙, 目前尚未有文献报道包括半月板、关节软骨及全部韧带等在内的完整膝关节的精细三维有限元模型。

目的: 建立完整的膝关节三维有限元模型。

方法: 获取正常膝关节 SCT 扫描图像数据, 使用 Mimics、3ds Max、ANSYS 等软件建立膝关节三维有限元模型并进行初步的生物力学分析, 以验证模型的有效性。

结果与结论: 建立的膝关节三维有限元模型具有良好的生物形态, 外形与实体标本一致性高。进行生物力学分析结果显示前交叉韧带承受前向载荷最大; 轴负向中, 内侧间室负荷较外侧间室大; 胫腓骨前向移动 4.9 mm。实验初步表明采用 CT 扫描资料建立三维有限元模型切实可行, 特别适用于骨科领域三维有限元模型的建立。

关键词: 膝关节; 半月板; 关节软骨; 韧带; 有限元分析; 模型

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2010.52.004

王光达, 张祚福, 齐晓军, 曹春妮, 于娟. 膝关节三维有限元模型的建立及生物力学分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(52):9702-9705. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

0 引言

膝关节是全身中结构最大、最复杂, 所受杠杆作用力最强的一个关节, 然而由于其形态特征的缘故, 使得膝关节并非十分稳定, 膝关节损伤在临床上十分常见。在保持膝关节的正常功能和稳定性方面, 相对于骨骼结构, 膝关节的韧带及半月板起着更加重要的作用, 因此在膝关节生物力学研究领域, 膝关节周围韧带及半月板的生物力学研究一直是众多临床科研工作者研究的热点。有限元分析在求解三维结构力学问题方面有着无可比拟的优势, 因此, 采用有限元分析法进行膝关节的生物力学

分析在国外的发展非常迅速, 但在国内, 有关膝关节的三维有限元模型建立及进行生物力学分析的文献较少。

1 材料和方法

设计: 获得膝关节CT扫描图像数据, 建立三维有限元模型。

时间及地点: 实验于2010-01-09在烟台毓璜顶医院关节科完成。

材料:

实验标本: 根据国人解剖学数值^[1]选取健康成年男性志愿者1名, 30岁, 身高173 cm, 体重72 kg, 无膝关节疾患及外伤史, 拍摄膝关

节正侧位X射线片排除膝关节异常。

设备: Philip Brilliance 64 SCT扫描机及工作站、高性能计算机。

软件: MATERIALISE MIMICS V10.0、Autodesk 3ds Max 2010、ANSYS 11.0。

方法:

膝关节CT扫描: 志愿者仰卧位, 膝关节处于 0° 伸直位, 于髌上5 cm至膝关节线下10 cm行CT扫描。扫描条件: 140.0 kV, 200 mA, 其层厚0.8 mm, 层距0.4 mm, 最终得到400幅二维扫描断层图像。所得影像数据传入工作站, 刻录光盘保存。

膝关节三维实体模型的建立: 将二维CT扫描图像影像数据导入医学影像处理软件MATERIALISE MIMICS V10.0进行处理, 建立初步的膝关节模型。将模型导入Autodesk 3ds Max 2010进行进一步处理, 逐步生成精细膝关节模型。

膝关节三维有限元模型的建立: 将Autodesk 3ds Max 2010生成的膝关节模型重新导入软件MATERIALISE MIMICS V10.0, 导出膝关节各部件的ANSYS面文件。将面文件导入软件ANSYS 11.0, 生成体文件, 并继续进一步修改模型。严格意义上讲, 骨和软组织都具有黏弹性和各向异性的特性, 即使是同一组织其不同部位的弹性模量也存在变化, 但是, 如果在有限元中逐个单元模拟组织材料的黏弹性和各向异性显然是不切实际的。通过文献检索发现, 采用各向同性特性进行有限元分析同样可以取得很好的分析结果^[2]。模型修改满意后, 定义各组织的材料性质为连续、均质、各向同性、线弹性。采用自由网格划分, 辅助手动控制网格划分, 建立膝关节三维有限元模型。

各结构材料参数:

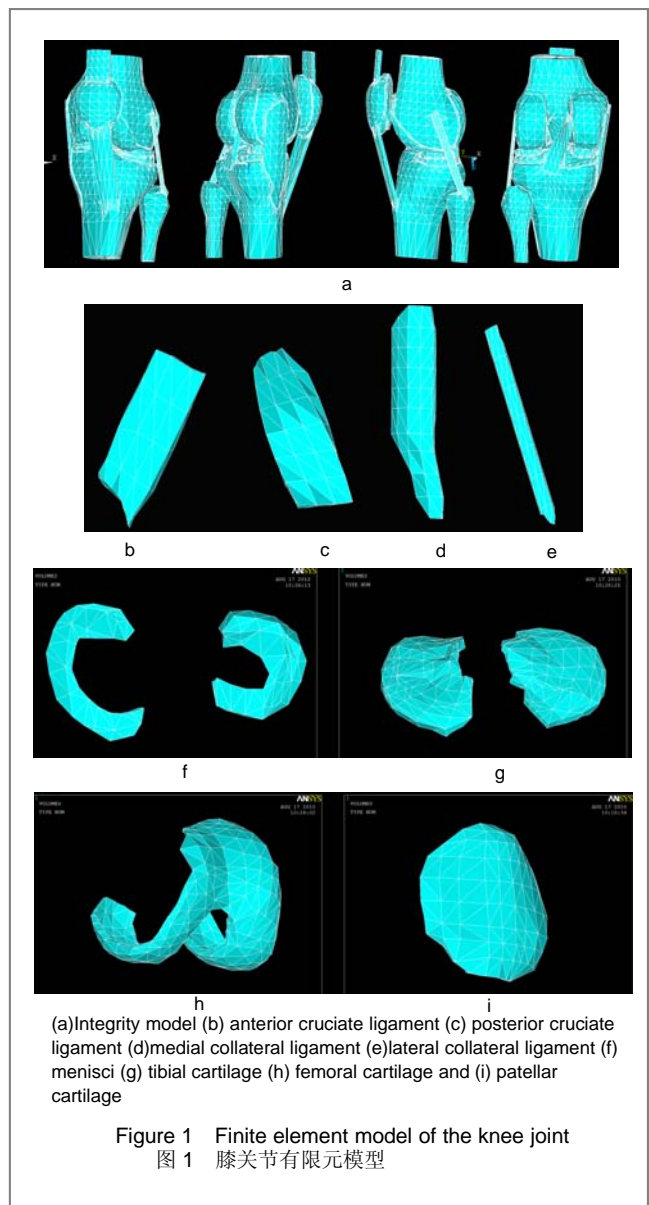
组成	弹性模量(MPa)	泊松比
骨	2.06×10^5	0.30
半月板	59	0.49
关节软骨	5	0.46
韧带	215.3	0.40

检验模型有效性: 各关节设定为无摩擦非线性接触。接触区设定: 膝关节内侧间室和外侧间室各两处(股骨软骨-半月板、股骨软骨-胫骨软骨), 髌股关节一处。股骨前后向移动自由度设置为0(即 $U(Y)=0$), 胫腓骨上下移动自由度设置为0(即 $U(Z)=0$)。在股骨近端面上施加1 150 N载荷, 胫骨施加前后向134 N载荷, 进行计算分析。

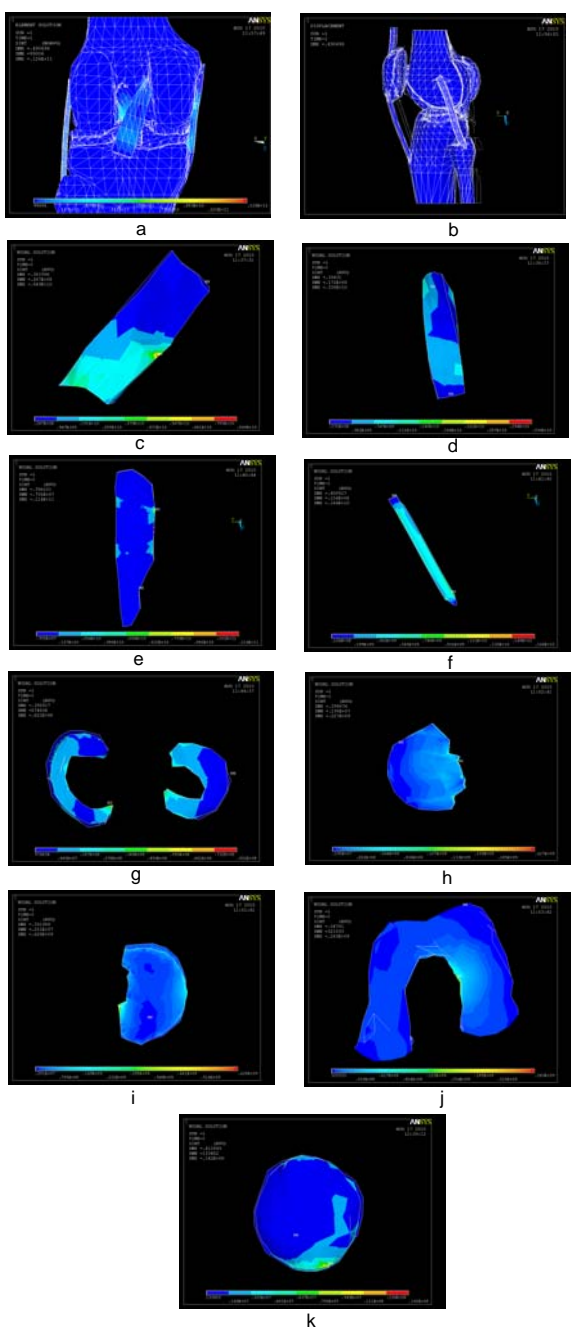
主要观察指标: ①建模外形与实体标本的相似程度比较。②生物力学分析与文献中相关数值的吻合度。

2 结果

2.1 建立了精细的膝关节三维有限元模型 成功建立了一个完整的膝关节三维有限元模型(包括胫骨、股骨、髌骨、内外侧副韧带、前后交叉韧带、髌韧带及双侧半月板), 模型可以任意角度旋转观察, 整体外形及各组成部分均与实体标本具有满意的相似性, 见图1。模型可依不同的研究目的和要求而进行切割, 或删除、填加研究相关的材料和结构。



2.2 膝关节三维有限元模型的有效性检验 进行膝关节三维有限元分析, 结果显示: ①前交叉韧带承受前向载荷最大。②轴向负荷中, 内侧间室负荷较外侧间室大。③胫腓骨前向移动4.9 mm。膝关节各部件的等效力云图, 见图2。



(a) Von Mises stress of the whole model (b) forward shift deformation of tibia. (c)-(k) are Von Mises stresses of every component of knee joint: (c) anterior cruciate ligament (d) posterior cruciate ligament (e)medial collateral ligament (f)lateral collateral ligament (g) menisci (h) medial tibial cartilage (i) lateral tibial cartilage (j) femoral cartilage and (k) patellar cartilage

Figure 2 Results of the finite element analysis
图2 有限元计算结果

3 讨论

3.1 有限元分析在骨科领域的应用现状 与标本实验的内在局限性相比较,有限元分析可通过对实验条件的精确控制,更加准确地模拟活体内的力学情况,因此,对人体的力学行为进行有限元数值模拟就成为深化对

人体认识的一种有效手段。有限元模型显示出作为生物力学模型来研究包含所有骨关节结构的体内与体外状态的优越性,能够以十分真实的方式模拟越来越多的临床状态。尤其是三维有限元方法更优于其他方法,它集各种理论力学方法之长、充分应用当今计算机技术飞速发展的优势。1972年有限元分析方法首次用于骨的应力分析^[3-4],随着计算机技术的发展,三维非线性有限元软件的开发,有限元分析广泛应用于骨、关节软骨及韧带、椎间盘等组织器官的生物力学特性分析,关节假体及内固定设计、材料选择、安装方式等的比较评估等^[5-13]。

中国骨科领域三维有限元分析多集中于腰椎及髋关节的生物力学研究,膝关节的研究较少,据文献检索,目前还没有发现包括半月板、关节软骨及所有韧带(髌韧带、前交叉韧带、后交叉韧带、内侧副韧带、外侧副韧带)在内的完整膝关节三维有限元模型建立及生物力学的研究报道。

3.2 膝关节三维有限元模型建模方法的探讨 建立准确、完善的有限元模型是有限元应力分析的基础,是全面认识膝关节生物力学行为的前提,理想的模型为进一步研究提供了可靠的途径和方法。有限元模型对具体事物的模拟,包括几何模拟、材料模拟和工况模拟等3个方面。就有限元模型而言,几何模拟是建立有限元模型的基础,过于简单粗糙的模型所得出的结果可出现较大的误差,甚至得出错误的结论。

本研究采用健康成人膝关节CT断层密扫,得到400幅二维扫描断层图像,并将扫描的原始计算机数字图像数据传入工作站,刻录在光盘上保存,然后通过MATERIALISE MIMICS V10.0、Autodesk 3ds Max 2010、ANSYS 11.0等软件进行进一步的建模处理。实现了在现代计算机技术辅助下的全程数字化操作,显著减小了工作量与操作的误差性。在网格划分方法上,本项研究既未采用完全自动网格划分的作法,也未选择Miyasaka等^[14]完全手工划分网格的办法。而是利用ANSYS软件采用手动控制自由网格划分的方法,建立了高质量的膝关节三维有限元模型。

3.3 膝关节三维有限元模型网格质量的评估 膝关节有限元模型及有限元计算结果的优劣,很大程度上取决于网格的质量。本研究采用Solid Tet 10node 92单元,手动控制划分网格对感兴趣区域予以细分,保证疏密有度,单元数量适中。避免了单元数目过多造成计算复杂,费时费力,而过少则造成影响计算精度,使应力和位移值变化跳跃性增大的缺陷,最终建立了由91 511个节点、62 823个单元组成的膝关节三维有限元模型,与实体标本相比,其外形相似,可真实地代表原物。

3.4 模型有效性检验 一个有限元模型的有效性取决于数学模型对具体事物的模拟,如上所述,其中包括几何模拟、材料模拟和工况模拟等3个方面。虽然目前已

有许多新的表面提取技术和算法使得几何重建的精度显著提高,但仍旧只能是接近真实而不能完全等同于真实。加之对材料特性的选择是假设某个部位(如松质骨区、皮质骨区)的材料是均质的,这也与实际不相符合,因而有限元模型的建立及在其基础上分析的结果就可能存在着误差。有限元模拟技术改进的根本目的就在于使得几何模拟、材料模拟和工况模拟更加接近于真实,包括使用更加先进的边界和表面提取技术、更加精确的材料属性以及充分考虑到活体组织中各种因素的影响,尽量减少简化和假设等方法。

一个有限元模型是否有效,最终取决于模型能否进行有限元分析并得出符合实际情况的结果。为了验证模型的有效性,本研究利用建立的膝关节三维有限元模型进行了初步的生物力学分析,并与文献中的研究结果进行了比较,结果证实该模型的精确性和表现非常好。比如,在膝关节伸直位,胫骨施加134 N前向负荷时,本模型得到胫骨前向水平移位4.9 mm的结果,在同样负荷下文献中的结果为4.6~5.2 mm^[15-17]。又如,同样在膝关节伸直位,胫骨施加134 N前向负荷状态下,分析前交叉韧带的力学状态,本结果表现为前交叉韧带后外侧束明显的张应力,前内侧束为中度的张应力,最大的应力在前交叉韧带后外侧束股骨止点处。这一结果 Yamamoto等^[18]也在使用光弹法跟踪前交叉韧带表面张力的实验中发现。与DePalma^[19]和 Irizarry等^[20]研究结果也非常接近。

结论:采用间接法以CT扫描资料建立膝关节三维有限元模型简便、高效,切实可行,可以精确地模拟复杂几何形态的实体,符合骨科领域复杂形体建模的需要,特别适用于骨科生物力学理论和临床研究中骨关节组织几何资料的提取和三维有限元模型的建立。

综上所述,本项研究应用高性能的软件和设备,全程数字化操作,采用间接建模及手动优化网格的方法,建立了一个准确有效的膝关节三维有限元模型,为进一步进行膝关节在各种生理状态及病理状态下的生物力学分析奠定了基础。

4 参考文献

- [1] 中国解剖学会体质调查委员会编.中国人解剖学数值[M].北京:人民卫生出版社,2002:27.
- [2] Ramaniraka NA, Saunier P, Siegrist O, et al. Biomechanical evaluation of intra-articular and extra-articular procedures in anterior cruciate ligament reconstruction: a finite element analysis. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2007;22(3):336-343.
- [3] Brekelmans WA, Poort HW, Slooff T.J. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts. Acta Orthop Scand. 1972;43(5):301-317.
- [4] Rybicki EF, Simonen FA, Weis EB Jr. On the mathematical analysis of stress in the human femur. J Biomech. 1972;5(2):203-215.
- [5] Beillas P, Lee SW, Tashman S, et al. Sensitivity of the tibio-femoral response to finite element modeling parameters. Comput Methods Biomech Biomed Engin. 2007;10(3):209-221.
- [6] Mesfar W, Shirazi-Adl A. Computational biomechanics of knee joint in open kinetic chain extension exercises. Comput Methods Biomech Biomed Engin. 2008;11(1):55-61.

- [7] Chantarapanich N, Nanakorn P, Chernchujit B, et al. A finite element study of stress distributions in normal and osteoarthritic knee joints. J Med Assoc Thai. 2009;92 Suppl 6:S97-103.
- [8] Zelle J, Van der Zanden AC, De Waal Malefijt M, et al. Biomechanical analysis of posterior cruciate ligament retaining high-flexion total knee arthroplasty. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2009;24(10):84284-84289.
- [9] Guess TM, Thiagarajan G, Kia M, et al. A subject specific multibody model of the knee with menisci. Med Eng Phys. 2010;32(5):505-515.
- [10] Gislason MK, Stansfield B, Nash DH. Finite element model creation and stability considerations of complex biological articulation: The human wrist joint. Med Eng Phys. 2010;32(5):523-531.
- [11] Frehill B, Crocombe A, Cirovic S, et al. Initial stability of type-2 tibial defect treatments. Proc Inst Mech Eng H. 2010;224(1):77-85.
- [12] Chong DY, Hansen UN, Amis AA. Analysis of bone-prosthesis interface micromotion for cementless tibial prosthesis fixation and the influence of loading conditions. J Biomech. 2010;43(6):1074-1080.
- [13] Hopkins AR, New AM, Rodriguez-y-Baena F, et al. Finite element analysis of unicompartmental knee arthroplasty. Med Eng Phys. 2010;32(1):14-21.
- [14] Miyasaka J, Tanne K, Tsutsumi S, et al. Finite element analysis of the biomechanical effects of orthopedic forces on the craniofacial skeleton. Construction of a 3-dimensional finite element model of the craniofacial skeleton. Osaka Daigaku Shigaku Zasshi. 1986;31(2):393-402.
- [15] Song Y, Debski RE, Musahl V, et al. A three-dimensional finite element model of the human anterior cruciate ligament: a computational analysis with experimental validation. J Biomech. 2004;37(3):383-390.
- [16] Gabriel MT, Wong EK, Woo SL, et al. Distribution of in situ forces in the anterior cruciate ligament in response to rotatory loads. J Orthop Res. 2004;22(1):85-89.
- [17] Fu FH, Bennett CH, Lattermann C, et al. Current trends in anterior cruciate ligament reconstruction. Part 1: Biology and biomechanics of reconstruction. Am J Sports Med. 1999;27(6):821-830.
- [18] Yamamoto K, Hirokawa S, Kawada T. Strain distribution in the ligament using photoelasticity. A direct application to the human ACL. Med Eng Phys. 1998;20(3):161-168.
- [19] DePalma AF. Diseases of The Knee. Philadelphia: JB Lippincott, 1954.
- [20] Irizarry JM, Recht MP. MR imaging of the knee ligaments and the postoperative knee. Radiol Clin North Am. 1997;35(1):45-76.

来自本文课题的更多信息——

基金资助:山东省自然科学基金(Y2008C20), 课题名称: 膝关节三维有限元模型的建立及生物力学分析。

作者贡献:王光达为课题负责人,张祚福负责课题设计、实施、成文,齐晓军负责课题研究评估,曹春妮负责资料的收集整理,于娟负责对文章的修整、审校。王光达与张祚福对文章或实验的贡献相同,故并列为第一作者。

利益冲突:课题未涉及任何厂家及相关雇主或其他经济组织直接或间接的经济或利益的赞助。

伦理批准:实验不涉及患病个体及动物,无伦理学限制。

本文创新性:以“有限元,膝”为关键词,检索1994/2010中国学术期刊网络出版总库,共检索到相关文献3篇。“膝内、外翻畸形对膝关节影响的平面有限元计算分析和光弹实验研究”是利用膝关节影像资料在Super-Sap软件上建立平面有限元模型,属二维模型。“膝内、外翻畸形对膝关节影响的三维有限元计算分析”是利用X射线片及CT片,手工测量提取坐标建模,费时费力,所建模型未在文献中见到图片。“基于MRI的全膝有限元模型建立与前交叉韧带重建技术模拟方案”是利用MRI片在mimics软件建立骨组织的三维模型,软骨、韧带等以梁、杆等代替,模型简单。目前还未见到有关半月板、关节软骨及全部韧带在内的膝关节三维有限元模型建立并进行生物力学分析的文献。本研究应用MATERIALISE MIMICS V10.0、Autodesk 3ds Max 2010、ANSYS 11.0等软件,全程数字化处理,减少误差,方法及技术属国内领先。