

文章编号:1004-7220(2014)06-0530-06

基于 Simpleware 全颈椎三维有限元模型的构建与分析

胡晓晖^{1,4}, 洪翔², 何冰凡³, Fritz-Uwe Niethard⁵, 颜文涛⁶, 张健⁶

(1. 河南省国际中心医院 中德脊柱外科中心, 郑州 451100; 2. 浙江省人民检察院 检察技术处, 杭州 310012;

3. 宁波市人民检察院 检察技术处, 宁波 315016; 4. 中国人民解放军一三三医院, 宁波 315061;

5. German Association of Orthopedics and Orthopedic Surgery (DGOOC), Berlin 10623, Germany;

6. 上海硅步科学仪器有限公司, 上海 200030)

摘要: **目的** 利用 Simpleware 软件构建全颈椎三维有限元模型,并对模型进行验证和分析,为探讨颈椎损伤机制提供可靠模型。**方法** 基于 CT 断层扫描图像,利用医学图像处理软件 Simpleware、逆向工程软件 Geomagic 建立 C1~7 全颈椎三维实体模型,导入 Hypermesh 进行颈椎网格划分、添加韧带并引入小关节突接触关系等,建立 C1~7 全颈椎有限元模型,在 ANSYS 中模拟前屈、后伸、侧弯和轴向旋转工况下颈椎的生物力学性能。**结果** 建立的模型准确可靠,在前屈、后伸、侧弯和轴向旋转时,活动范围与文献中离体实验和有限元分析结果相近。椎间盘应力集中在椎体受压侧,C4/5 最易产生应力集中。**结论** 建立的 C1~7 全颈椎有限元模型能够有效模拟颈椎的生物力学特性,为后续颈椎挥鞭样损伤的生物力学研究奠定良好的基础。

关键词: CT 图像; 颈椎; 有限元分析; 力学特性

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

3D finite element modeling and analysis of the whole cervical spine based on Simpleware

HU Xiao-hui^{1,4}, HONG Xiang², HE Bing-fan³, Fritz-Uwe Niethard⁵, YAN Wen-tao⁶, ZHANG Jian⁶ (1. *Spinal Surgery Center, Henan International Central Hospital, Zhengzhou 451100, China*; 2. *Institute of Forensic Science, the People's Procuratorate of Zhejiang, Hangzhou 310012, China*; 3. *Institute of Forensic Science, the People's Procuratorate of Ningbo, Ningbo 315016, China*; 4. *Chinese PLA 113 Hospital, Ningbo 315061, China*; 5. *German Association of Orthopedics and Orthopedic Surgery (DGOOC), Berlin 10623, Germany*; 6. *Shanghai GaiTech Scientific Instruments Co., Ltd, Shanghai 200030, China*)

Abstract: Objective To build a 3D finite element model of the whole cervical spine by using Simpleware software, as well as validate and analyze the model, so as to provide a reliable model for exploring the mechanism of cervical spine injury. **Methods** The 3D entity model of the whole cervical spine C1-7 was established based on CT tomography images, medical image processing software Simpleware, reverse engineering software Geomagic, which was imported to Hypermesh for meshing, adding ligaments and introducing facet joint contact relation, etc., thus to establish the finite element model of the whole cervical spine C1-7. Biomechanical properties of the cervical spine under flexion, extension, lateral bending and torsion were simulated by ANSYS. **Results** The established model was proved to be accurate and reliable, and its range of motion (ROM) under flexion, extension, lateral bending and axial rotation was similar to *in vitro* experiment and finite element analysis results in re-

收稿日期:2014-04-18; 修回日期:2014-09-10

基金项目:宁波市自然科学基金资助项目(2013A610263),宁波市科技局社发一般项目(2013C50014)。

通信作者:胡晓晖,主治医师, E-mail:weisskopf@hotmail.com。

lated literatures. The stress of intervertebral disc was concentrated on the compression side of the vertebral body, and the cervical spine C4/5 was more prone to have a stress concentration. **Conclusions** The finite element model of the whole cervical spine C1-7 can effectively simulate the biomechanical characteristics of the cervical vertebra, which establishes a good foundation for the follow-up studies on whiplash injury of the cervical spine.

Key words: CT images; Cervical spine; Finite element analysis; Mechanical properties

颈椎是连接头和身体的枢纽,是神经和血管的唯一通道。因此,颈椎在人体中至关重要,由颈椎长期劳损引发的颈椎退行性病变、车祸等外因引起的颈椎损伤等疾病受到国内外学者广泛关注^[1-2]。在对这些疾病机理的研究中,运用数值模拟重塑病变状态探求病理的研究方法,随着计算机技术的不断发展而日益受到学者们青睐。但是,不论是研究治疗颈椎退行性病变的术式方法,还是研究挥鞭样损伤的机理,建立一个高精度颈椎有限元模型至关重要^[3]。

颈椎有限元模型由简单到复杂、由单椎体向多节段、由线性向非线性不断得到丰富和发展。Teo 等^[4]建立结构详细的 C2 椎体有限元模型,但假设整个椎骨均由皮质骨构成。Yoganandan 等^[5]首次报道了 C4~6 节段三维模型,研究小关节分级切除和椎板切除对运动节段稳定性和椎间盘应力的影响。Dauvillier 等^[6]首次建立一个用于动力学仿真的全颈椎有限元模型,头部以刚性体简化,枕骨寰椎关节以及寰枢关节以两个球铰链接简化。Yang 等^[7]建立全颈椎有限元模型,椎骨设为黏弹性材料,韧带用非线性来处理。Zhang 等^[8]建立一个具有详细解剖学结构的非线性有限元头颈部模型,该模型的几何参数通过尸体标本测量获得,椎间盘及韧带数据均取自文献数据。但是在过去的研究中,很多模型的建立并不完整,韧带不够完善,仿真出的结果与实验相差较多。本文在前人的研究基础上,进一步丰富模型,基于 CT 扫描图像数据,对断层图像进行三维逆向重建,选用 Simpleware 作为几何建模软件;它兼备 Mimics 的 CT 分割工具,且自带表面网格自动划分和网格多参数调整等诸多功能,对各有限元后处理软件有很好的接口。在 Simpleware 中可以完美实现几何模型有限单元化,赋予各部分材料属性,建立 C1~7 全颈椎有限元模型,并进行生物力学特性分析。

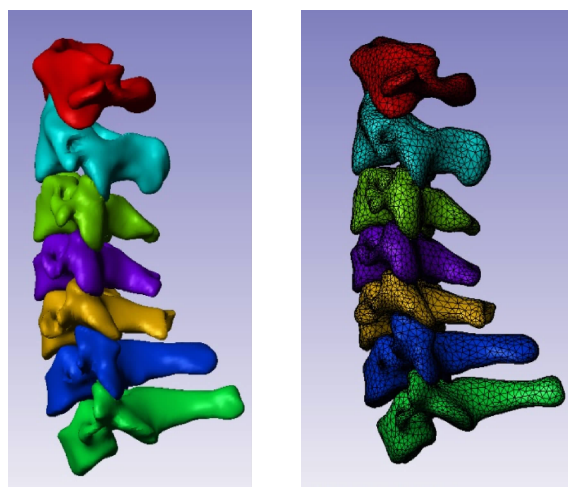
1 材料与方法

1.1 CT 数据

选取一名男性志愿者,利用普通 X 线检查排除颈椎病变、畸形和损伤等异常情况,在自然状态下采用螺旋 CT 机对颅底至第 7 颈椎以层厚 1.0 mm 进行扫描,得到 CT 断层扫描图像 568 张,以 DICOM 标准格式保存。

1.2 几何模型

基于 CT 断层扫描图像,将图片导入数字医学图像处理软件 Simpleware 6.0,利用 Thresholding 工具进行阈值分析、区域增长,得到各张 CT 断层图像骨区以彩色填充的数据集表示,对不完善且边界模糊的显色区域,使用 Simpleware 的图像学闭合工具和递归高斯过滤器进行调整,完成 Surface 模型三维重建,得到 C1~7 全颈椎初步三维模型,再利用 3D 编辑工具重新优化网格和修洁工作,最终建立的颈椎三维模型如图 1 所示。



(a) 三维重构

(b) 三角网格模型

图 1 颈椎 C1~7 模型

Fig. 1 The cervical C1-7 model (a) 3D reconstruction, (b) Triangle mesh model

将上述文件导入逆向工程软件 Geomagic 9.0 中,利用逆向工程软件对模型进行去除噪声、填充孔、修复边界、去除特征和曲面片修复等处理,最终拟合曲面片并形成 NURBS 曲面。参考颈椎间盘的生理参数^[9],使用填充孔(搭桥法)方法创建椎间盘,再进行曲面片编辑等处理,最终拟合成 NURBS 曲面。

1.3 有限元模型的建立

1.3.1 几何清理 将建立后的 C1~7 椎体及椎间盘模型导入有限元分析前处理软件 Hypermesh 10.0 进行几何清理,并将整个椎体分割为前方椎体与后方骨性单元^[10]。

1.3.2 网格划分 网格的划分基于颈椎的解剖形态,总体按先面网格再体网格,先椎间盘再椎体的分网顺序。通过网格偏置、共用面网格等方法,实现皮质骨、松质骨、后方骨性单元、纤维环基质、胶原纤维、髓核、软骨终板及韧带等结构建立以及所有网格

共节点。其中,皮质骨采用平均厚度为 1 mm 的 Solid 187 单元模拟,松质骨和后方结构亦采用能承受大变形的 Solid 187 单元模拟,纤维环基质、髓核及终板用退化的六面体单元 Solid 186 单元模拟。参考文献[11-12]建立 C1~7 颈椎全韧带模型,包括前纵韧带(anterior longitudinal ligament, ALL)、后纵韧带(posterior longitudinal ligament, PLL)、黄韧带(ligamentum flavum, LF)、棘间韧带(intersinus ligament, ISL)、棘上韧带(supraspinous ligament, SSL)、囊韧带(capsular ligament, CL)、翼状韧带(alar ligament, ALL)和横韧带(transversal ligament, TL)8种韧带模型,其中横韧带采用壳单元 Shell 93 模拟,其余韧带均采用只能承受拉伸载荷而在受压时响应为零的杆单元 Link 180 模拟。关节软骨由小关节突接触关系所定义的面-面接触表示,摩擦因数为 0.01^[13]。颈椎 C1~7 三维有限元模型如图 2 所示。

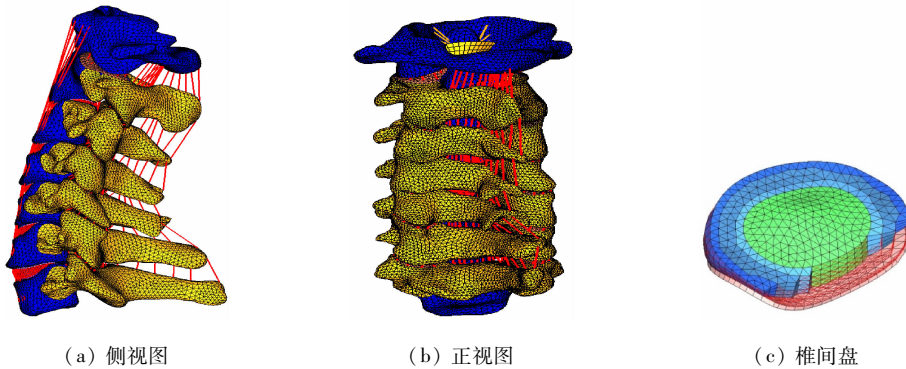


图2 颈椎 C1~7 椎体及椎间盘有限元模型

Fig.2 Finite element model of the cervical spine C1-7 and intervertebral disc (a) Lateral view, (b) Front view, (c) Intervertebral disc

1.3.3 材料属性 颈椎 C1~7 三维有限元模型的单元属性及材料特性见表 1。骨性结构、椎间盘及韧带均取正交各向同性,用弹性模量和泊松比两个参数描述,并考虑韧带和胶原纤维的实常数属性^[14]。

1.3.4 边界与负载条件 提取颈椎 C1 上表面的节点耦合至中性点,从而建立刚性面,在该点施加 50 N 的载荷用于模拟头部的重量,以及 1.0 N·m 力矩用于模拟颈椎的前屈、后伸、侧弯和轴向旋转等生理状态^[20],并约束 C7 椎体下表面所有节点。

2 结果

本文基于 Simpleware 软件建立几何外形真实、组织结构完整、材料属性可靠的颈椎 C1~7 有限元模型,共计 239 688 个单元,369 824 个节点。将所有节点和单元属性等信息导入 ANSYS 12.0 中进行计算和后处理,分析颈椎 C1~7 有限元模型在给定分析工况下椎体和椎间盘等结构的力学行为。

2.1 颈椎 C1~7 活动范围

2.1.1 颈椎 C1~7 有限元分析结果验证 为了验

表 1 颈椎 C1~7 有限元模型的单元类型及材料属性

Tab.1 Element types and material properties for finite element model of the cervical spine C1-7

结构名称	单元类型	弹性模量/MPa	泊松比	截面积/mm ²	单元数量	文献
皮质骨	Solid 187	12 000	0.29		51 592	[8]
松质骨	Solid 187	450	0.29		53 862	
后方骨性单元	Solid 187	3 500	0.29		91 250	
寰椎	Solid 187				14 357	[15]
软骨终板	Solid 186	500	0.40		5 104	[8]
纤维环基质	Solid 187	3.4	0.40		5 700	
胶原纤维	Link 180	357.5 ~ 550	0.30	0.36 ~ 0.76	6 985	[16 - 17]
髓核	Solid 186	1.0	0.49		4 508	[8]
关节软骨	Targe 170/Conta 174	23.8	0.40		5 849	[18]
前纵韧带(ALL)	Link 180	30.0	0.30	75.9	36	[8, 16, 19]
后纵韧带(PLL)	Link 180	20.0	0.30	51.8	6	
黄韧带(LF)	Link 180	10.0	0.30	78.7	60	
棘间韧带(ISL)	Link 180	10.0	0.30	36.3	30	
棘上韧带(SSL)	Link 180	1.5	0.30	75.7	6	
关节囊韧带(CL)	Link 180	10.0	0.30	102.5	120	
翼状韧带(AL)	Link 180	5.0	0.30	20	20	[8, 12]
横韧带(TL)	Shell 93	20.0	0.30		44	

证有限元模型的可靠性,将模型在 50 N 预载荷和 1.0 N·m 力矩作用之下,模拟前屈(flexion)、后伸(extension)、侧弯(bending)和轴向旋转(rotation)工况,测量和计算颈椎 C1~7 有限元模型各节段的运动范围(range of motion, ROM),并与相同条件下离体实验和有限元分析研究文献进行对比(见图 3)。

由图 3 可知,本文有限元模型 ROM 在前屈时最大,后伸明显小于前屈,表明后伸时小关节突的抵作用明显,最小 ROM 出现在轴向旋转工况下。这些模拟值变化趋势与 Panjabi 等^[21]和 Toosizadeh 等^[15]的研究结果基本一致。

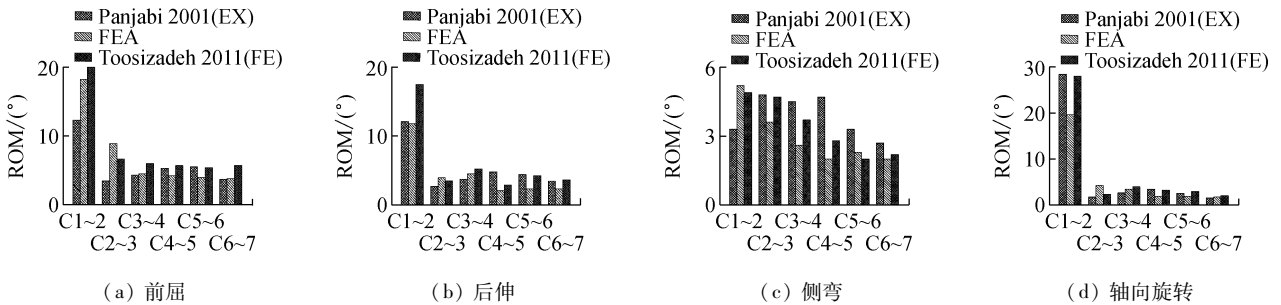


图 3 各工况下颈椎 C1~7 有限元模型各节段的运动范围

Fig.3 ROM of each segment for finite element model of the cervical spine C1-7 under different working conditions (a) Flexion, (b) Extension, (c) Bending, (d) Rotation

2.1.2 颈椎 C1~7 ROM 分析 为了进一步研究颈椎 C1~7 动态加载过程中力矩与 ROM 关系,设置模型在 50 N 预载荷和 0.5、1.0、1.5 N·m 力矩作用

之下,模拟颈椎 C1~7 在前屈、后伸、侧弯和轴向旋转工况下整体 ROM(见图 4)。从图 4 可以看出,随着力矩的增加,颈椎 C1~7 有限元模型整体 ROM

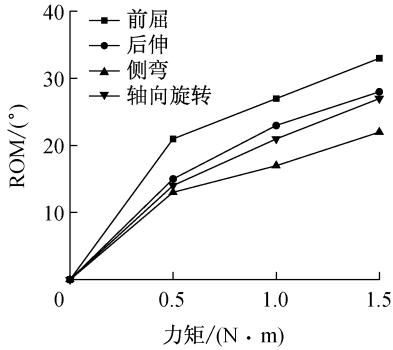


图4 颈椎 C1~7 动态加载过程中力矩和 ROM 关系

Fig. 4 Relationship between force moment and ROM of cervical C1-7 under dynamic loading

也在呈近似线性的增加。前屈仍然是颈椎 ROM 最大的工况,而侧弯是颈椎 ROM 最小的工况。

2.2 颈椎 C1~7 椎体应力分布

颈椎 C1~7 椎体应力分析采用 Von Mises 等效应力作为主要指标,前屈时各节段平均最大等效应力最大,为 13.75 MPa,颈椎应力集中于椎体前部;后伸时各节段平均最大等效应力最小,为 6.05 MPa;侧弯时各节段平均最大等效应力为 12.04 MPa,侧弯侧存在明显的应力集中;轴向旋转时各节段平均最大等效应力为 13.24 MPa,各工况下椎体的应力分布与人体体位结构的应力分布相一致。

2.3 颈椎 C1~7 椎间盘应力分布

椎间盘在力学性能和功能上相当特殊,主要吸收压缩载荷。前屈时,椎间盘应力主要集中在椎间盘前部受压侧,其平均最大等效应力为 0.88 MPa;后伸时,最大压缩应力出现在椎间盘后部,其平均最大等效应力为 0.24 MPa;侧弯时,椎间盘受压侧存在明显的应力集中,椎间盘 C4/5 最大等效应力为 0.73 MPa;轴向旋转时纤维环受到扭力而发生倾斜至牵张,最大应力主要发生在扭转侧,其平均最大应力为 0.58 MPa。

3 讨论

脊柱建模的方法众多,其中利用 CT 获得直接的影像数据是最准确的途径^[22]。本文基于 CT 图像数据,利用数字医学图像处理软件 Simpleware 6.0,准确地三维重建出颈椎三角面片模型;通过逆向处理获得实体模型,在 Hypermesh 软件中实现所有结

构网格共节点,不需要在椎体与椎间盘处进行绑定约束,可以提高模型的收敛性,并极大提高计算速度,同时补充建立韧带和接触关系,完善颈椎 C1~7 模型。

本文建立了逼真的颈椎 C1~7 有限元模型,在有效验证模型的准确性基础上进行分析,发现在各工况下寰枢椎 C1~2 由于其特殊的生理结构 ROM 较大,特别是在扭转时达到最大,而从上颈椎往下颈椎 ROM 存在突变或递减的趋势。后伸时,由于小关节突的抵制作用,明显小于前屈时 ROM。各节段椎间盘在受压侧应力较为集中,并向受拉侧逐渐扩散消释,在各种工况下最大应力分布与体位结构相一致。前屈时各节段椎间盘最大等效应力最大,而后伸时最小。通过仿真本文认为,在后伸时小关节突承载着较大的接触应力,抵制作用明显改善椎间盘的应力分布。而在侧弯和轴向旋转时,椎间盘的最大等效应力介于前屈和后伸之间,因其只受到部分小关节突影响,表明小关节突对抗后伸、侧弯和扭转的作用明显。颈椎小关节突对后伸的拮抗作用明显强于前屈,一旦出现颈椎过伸性损伤,其损伤严重程度要大于前屈性损伤,与“挥鞭样损伤机制主要表现为颈椎过伸性损伤,而非早期临床报告认为的颈椎过屈性损伤”的结论相吻合^[23]。

本文为全颈椎有限元模型提供一种新的准确、详细建模途径,并有效模拟颈椎在 4 种典型工况下的生物力学特性,为分析和研究该模型在各种载荷下的生物力学表现创造条件,为后续颈椎挥鞭样损伤的临床及法医生物力学研究奠定良好的基础。但本研究同时也存在一些不足,尚需要完善和改进:颈椎椎间盘及韧带等结构材料的生物力学特性较为复杂,在材料赋值时往往需要简便处理,使得材质特性与真实情况有所偏离;颈椎 ROM 相对较大,肌肉等软组织在颈椎运动过程中的牵张作用不容忽视,特别是头部与寰椎以及寰枢椎之间,肌肉韧带的作用显得尤为重要。因此,后续有待进一步完善全颈椎三维有限元模型,以进行深入的生物力学特性分析和实证性检验。

参考文献:

[1] Yoganandan N, Kumaresan S, Voo LM, et al. Finite ele-

- ment modeling of the C4-C6 cervical spine unit [J]. *Med Eng Phys*, 1996, 18(7): 569-574.
- [2] Zhang JG, Wang F, Zhou R, *et al.* A three-dimensional finite element model of the cervical spine; An investigation of whiplash injury [J]. *Med Biol Eng Comput*, 2011, 49(2): 193-201.
- [3] 柴晟, 周红梅, 谢冰. 脊柱三维有限元分析模型的研究近况 [J]. *中医正骨*, 2007, 19(6): 59-61.
- [4] Teo EC, Paul JP, Evans JH. Finite element stress analysis of a cadaver second cervical vertebra [J]. *Med Biol Eng Comput*, 1994, 32(2): 236-238.
- [5] Graham RS, Oberlander EK, Stewart JE, *et al.* Validation and use of finite element model of C2 for determination of stress and fracture patterns of anterior odontoid loads [J]. *J Neurosurg*, 2000, 93(1): 117-125.
- [6] Dauvillers F, Bendjellal F, Weiss W, *et al.* Development of a finite element model of the neck [C] //Proceedings of the 38th Stapp Car Crash Conference. Ft. Lauderdale, USA: SAE, 1994: 77-99.
- [7] Yang KH. Development of a finite element model of the human neck [C]// Proceedings of the 42nd Stapp Car Crash Conference. Tempe, USA: SAE, 1998: 195-205.
- [8] Zhang QH, Teo EC, Ng HW. Development and validation of a C0-C7 FE complex for biomechanical study [J]. *J Biomech Eng*, 2005, 127(5): 729-735.
- [9] Yoganandan N, Kumaresan S, Pintar FA. Biomechanics of the cervical spine. Part 2. Cervical spine soft tissue responses and biomechanical modeling [J]. *Clin Biomech*, 2001, 16(1): 1-27.
- [10] 苏晋, 赵文志, 陈秉智, 等. 建立全腰椎有限元接触模型 [J]. *医用生物力学*, 2010, 25(3): 200-205.
Su J, Zhao WZ, Chen BZ, *et al.* Establishing finite element contact model of human L1 ~ L5 lumbar segments [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(3): 200-205.
- [11] 姜广宗, 李学锋, 聂林, 等. 利用 MIMICS 和 ABAQUS 建立正常人颈椎的三维有限元模型 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2013, 21(11): 1114-1120.
- [12] Palomara AP, Calvoa B, Doblare M. An accurate finite element model of the cervical spine under quasi-static loading [J]. *J Biomech*, 2008, 41(3): 523-531.
- [13] Kumaresan S, Yoganandan N, Pintar FA. Finite element modeling approaches of human cervical spine facet joint capsule [J]. *J Biomech*, 1998, 31(4): 371-376.
- [14] 黄菊英, 李海云, 吴浩. 腰椎间盘突出症力学特征的仿真计算方法 [J]. *医用生物力学*, 2012, 27(1): 96-101
Huang JY, Li HY, Wu H. Simulation calculation on biomechanical properties of lumbar disc herniation [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(1): 96-101
- [15] Toosizadeh N, Haghpanahi M. Generating a finite element model of the cervical spine: Estimating muscle forces and internal loads [J]. *Scientia Iranica*, 2011, 18(6): 1237-1245.
- [16] Ha SK. Finite element modeling of multi-level cervical spinal segments (C3-C6) and biomechanical analysis of an elastomer-type prosthetic disc [J]. *Med Eng Phys*, 2006, 28(6): 534-541.
- [17] Holzapfel GA, Schulze-Bauerr CA, Feigl G, *et al.* Single lamellar mechanics of the human lumbar annulus fibrosus [J]. *Biomech Model Mechan*, 2005, 3(3): 125-140.
- [18] Schmidt H, Heuer F, Drumm J, *et al.* Application of a new calibration method provides more realistic results for a finite element model of a lumbar spinal segment [J]. *Clin Biomech*, 2007, 22(4): 377-384.
- [19] 魏威, 廖胜辉, 赖震, 等. 生理曲度变直与正常的颈椎有限元建模与分析 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2011, 30(6): 885-891.
- [20] Zhang QH, Teo EC, Ng HW, *et al.* Finite element analysis of moment-rotation relationships for human cervical spine [J]. *J Biomech*, 2006, 39(1): 189-193.
- [21] Panjabi MM, Crisco JJ, Vasavada A, *et al.* Mechanical properties of the human cervical spine as shown by three-dimensional load-displacement curves [J]. *Spine*, 2001, 26(4): 2692-2700.
- [22] Fagan MJ, Julian S, Mohsen AM. Finite element analysis in spine research [J]. *Eng Med*, 2002, 10(7): 281-297.
- [23] Davis SJ, Teresi LM, Bradley WG Jr, *et al.* Cervical spine hyperextension injuries: MR findings [J]. *Radiology*, 1991, 180(1): 245-251.