

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2015.09.051

有限元分析法在腰椎生物力学研究中的应用及新进展*

王端阳 奚春阳 杨 辉 夏士祺 闫景龙[△]

(哈尔滨医科大学附属第二医院骨六科 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:有限元分析法是指对复杂形态物体的应力及应变进行分析,具有力学性能测试全面、客观、可重复性的特点。目前,有限元分析法已被广泛应用于脊柱畸形、腰椎损伤以及假体植入等人体复杂结构生物力学的研究中。本文主要介绍有限元分析法在腰椎的椎体、间盘、韧带及肌肉组织中的应用,结合其概念、原理、建模方法等,总结该方法在新型内固定物力学特性研究中的优势,探讨其对不同植骨内固定术式选择的临床意义。

关键词:有限元分析;腰椎;植骨融合

中图分类号:R318;R68 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2015)09-1794-04

New Progress and Application of Finite Element Analysis Technology in Lumbar Spine Biomechanics*

WANG Duan-yang, XI Chun-yang, YANG Hui, XIA Shi-qi, YAN Jing-long[△]

(Department of Orthopaedics, the Second Affiliated Hospital of Harbin Medical University, Harbin, Heilongjiang, 150001, China)

ABSTRACT: Stress and strain of objects with complex forms can be analyzed by the Finite Element Analysis. It has a comprehensive, objective and reproducible characteristic of mechanical testing and has been widely used in the biomechanical studies of spine. This paper briefly introduced the concepts, principles, modeling methods, software, the advantages and disadvantages of Finite Element Analysis in terms of the application of the finite element method in the research on vertebral body, intervertebral disc, ligament and muscle, as well as the properties of novel internal fixation and selection of different internal fixation formula.

Key words: Finite element; Lumbar; Fusion

Chinese Library Classification(CLC): R318; R68 **Document code:** A

Article ID:1673-6273(2015)09-1794-04

前言

20 世纪 60 年代初,Clough 首次在结构力学计算中提出了有限元分析的概念,并成功将其用于结构设计中连续物体的力学和物理问题的求解运算。随着有限元分析技术不断的发展完善,其已经发展成为一种被广泛用于模拟并解决电磁场、热学、力学、工程等问题的数学物理方法。1974 年,Belytschko T^[1]等首次将有限元分析法引入到医学领域中,并成功的应用在脊柱生物力学的研究中。随着计算机技术的快速发展及软件开发的不断深入,越来越多的学者利用有限元分析法分析研究脊柱生理、病理状态下脊柱生物力学的变化情况,以及分析脊柱内固定物在植入后应力的变化情况等,并取得了显著的成果。这些成果对于临床实践中手术方式的选择及内固定植入物的设计优化起到了重要的指导作用。

1 "有限元分析法"概述

1.1 概念及原理

有限元分析方法的基本原理是将复杂结构的物体离散成为有限个数的单元,分析每一个单元的特性并建立其物理量之

间的联系,然后依据单元与单元间的联系,将各单元组装成整体以获得一整体方程,再通过多种方程式求解,从而完成对整个问题的分析过程。

1.2 建模方法

有限元模型的建立方法主要有膜片切片法和三维测量法。前者的基本原理是通过对标本模型切片的方法,逐层测量断层轮廓的坐标值,在计算机中完成对截面图像的处理及分析;后者是通过对所要构建的模型进行全息照相和扫描,进而测量其三维数据,再利用计算机建立其三维模型。在 CT 应用于临床检查之后,CT 图像建模法成为建立有限元模型的主要方法,其原理是利用对 CT 胶片的扫描所获得的数据进行建模。现在,DICOM 数据直接建模法成为主流,其原理是将 CT 扫描所获得的数据输入计算机中,利用建模软件建立模型,该方法具有快速、准确、干扰小等特点。

1.3 分析软件

目前,国际通用的有限元分析软件主要有 ANSYS、ADINA 及 ABAQUS 等^[2-4],不同软件具有不同的特点。其中,ANSYS 软件是由美国 ANSYS 公司研发,主要致力于线性问题的分析处理,是该领域最流行的软件。ADINA 软件通过对力学线

* 基金项目:国家自然科学基金重点项目(81472107)

作者简介:王端阳(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向:腰椎生物力学,E-mail:wangduanyang@sina.cn

△ 通讯作者:闫景龙(1964-),男,教授,主要研究方向:骨组织工程学、脊柱外科,E-mail:yjl_1212@sina.cn,电话:15846394620

(收稿日期:2014-12-15 接受日期:2015-01-04)

性、非线性方程组的求解来获得固体、结构力学及温度场问题的数值解,具有流固耦合求解功能的专利。ABAQUS 软件在对非线性问题的处理上具有明显的优势,可以解决不收敛的线性问题。

1.4 优势及局限

有限元分析法自诞生之日起发展至今,经历数次进化,应用范围也从理工领域拓展到医学领域。有限元分析法的优势主要体现在以下几方面:(1)它可以依据需要建立多个模型,并对其修正以便模拟出不同的病理状态。(2)它可以分析腰椎不同组织所受应力情况,对于术式的选择及内固定物的使用具有指导意义。(3)他是从动物实验向人体实验的过渡过程中的"桥梁"。虽然该方法可以解决许多问题,但其局限性也不容忽视:(1)由于人体结构复杂,建模时需对部分骨骼及软组织简化处理,减少运算成本,这会影响结果的精确性。(2)有限元分析过程对操作者的数学逻辑思维能力及计算机操作水平要求高,使其在医学院普及率不高。(3)有限元分析属于理论分析,其结果必须与动物实验结果进行综合分析。

2 "有限元分析法"在腰椎生物力学研究中的应用

2.1 腰椎椎体研究

刘耀升等^[5]通过对有限元模型的研究发现,在腰椎负载的情况下椎体内存在着压应力与张应力两种应力,并存在着承受这两种应力的相互交叉成 90 度的骨小梁。并且研究指出减小终板凹陷程度有助于加强椎间盘对椎体的保护,同时可以通过影响终板的形变减少对椎间盘的营养传递。ZaueI 等^[6]首次利用有限元分析法,分析了单轴向压力作用下人体松质骨骨小梁的形变情况。结果指出,运用线性有限元法分析松质骨骨小梁在单一方向上的变形与拉力情况有着较高的准确性。Yan W 等^[7]利用 CT 图像建立了 L4-5 有限元模型,分别给予模型 500 N、1000 N、1500 N 和 2000 N 的载荷,使模型分别产生了 0.23 mm、0.47 mm、0.76 mm 和 1.02 mm 的轴向位移。其有限元分析结果与类似的体外实验结果相吻合,证明在各种条件下其符合腰椎生物力学特性的应力分布规律,模型真实有效。

2.2 腰椎间盘研究

鲍春雨等^[8]利用有限元法发现腰椎在前屈位时椎间盘的内部应力较后伸位时明显增大,且二者由上至下均呈逐渐增大趋势。Rohlmann 等^[9]在建立了 L3~4 间盘模型的基础上,通过改变腰椎间盘参数(间盘高度及髓核弹性模量)建立了三种不同的退变模型,模型加载负荷后其各项数据与体外力学实验数据相一致,证明模型有效。有学者同样利用有限元法研究发现,在有效的压力作用下腰椎间盘纤维环的退变早于髓核的退变。同时该学者认为纤维环与髓核间的渗透压以及纤维环的强度均对腰椎间盘压力的分布产生影响^[10]。Kim YE 等^[11]在以往的模型的基础上,结合了 T12、L1 运动节段及相应的腰部肌肉建立起一个腰椎退变模型,并利用有限元法结合其优化技术评估腰部肌肉力量的改变。实验通过减少纤维环及髓核的体积及其弹性模量来分析腰椎间盘退变程度与肌肉力量改变之间的关系。结果显示腰椎间盘退变明显增加了表浅肌肉的活性,然而却降低了深部肌肉的活性。而这被认为是功能性的,因为随着表浅肌肉的活化,退变间盘内的压力也随之减轻,这也减慢了间盘退

变的速度。Jacobs NT 等^[12]利用高分辨率三维 MR 图像建立了一个新的 L4-5 间盘有限元模型,在无校准的情况下验证了在椎间盘机械反应中髓核、软骨终板、纤维环材料属性变化的情况。

2.3 腰椎韧带与肌肉研究

Kaminska 等^[13]认为腰椎的稳定性与肌肉及骨骼的紊乱程度有关,并应用有限元法给予了分析。结果显示腰椎间盘应力大小与腰椎负荷程度成正比。其最大应力在腰椎前屈时出现。因此在日常生活中应尽量减少负重及避免不良姿势以减慢腰椎间盘退变速度。Kuo 等^[14]同样应用有限元分析方法证实了腰椎的不良姿势及负重改变了腰椎间盘及关节突的应力分布,加速了腰椎的退变。

3 "有限元分析法"的临床应用价值

3.1 腰椎骨折

Li D 等^[15]用有限元分析法分析对比了青年及老年患者的腰椎应力分布的差异。结果显示二者最大应力分布区基本相同。但与青年人不同的是,老年患者腰椎的应力再分布主要集中于椎体的骨皮质部分,而这可能是老年人易发生腰椎爆裂性骨折的力学机制。李钦亮等^[16]在构建了胸腰段单纯压缩骨折模型的基础上,又模拟包括伤椎的六钉内固定和跨伤椎的四钉内固定两种模型。给予模型垂直压缩、前屈、后伸、左右侧屈及旋转五种载荷后分析其内固定所受应力情况。结果显示两组模型内固定所受到的应力均集中于钉尾部。腰椎在垂直载荷下时螺钉所受应力最小,腰椎在右旋和左侧屈载荷下时螺钉所受应力最大;腰椎在各种载荷下,上位螺钉的应力较下位螺钉大;六钉固定组螺钉所受应力较四钉固定组小。结果表明伤椎附加椎弓根螺钉置入可以减少断钉的可能性。

3.2 腰椎退变

Dou H 等^[17]利用有限元模型分析髓核摘除术对腰椎退变速度的影响。结果指出术后腰椎所受到的剪切力和小关节所承受的应力均有所增加。以此得出髓核摘除术加速腰椎退变的结论。Lipscomb KE 等^[18]利用有限元分析方法探索腰椎间盘穿刺造影后椎间盘的位移和压力变化情况。发现穿刺术后腰椎间盘纤维环的压力大小与形变程度均有所增加。而髓核与之相反,均有所减少。以此得出结论:腰椎间盘穿刺造影术改变了间盘原有的生物力学特性,有可能加速腰椎间盘的退变。黄菊英等^[19]建立了 L4-5 节段的正常和间盘突出两种模型。利用有限元法分析两种模型在前屈、后伸、左侧屈、右旋转和轴向负荷五种状态下椎间盘的生物力学变化。结果显示腰椎间盘突出后,椎间盘的应力分布发生改变,应力主要集中于纤维环的后外侧;在同样的载荷条件下,突出椎间盘的形变量比正常椎间盘大。

3.3 不同内固定材料的有限元研究

随着科学技术的不断进步,材料科学的发展也得到了极大的促进。传统腰椎内固定方法不断发展的同时,也涌现了许多新型的内固定技术,并逐渐被应用于临床实践中。

3.3.1 弹性固定 Oktenoglu T 等^[20]利用有限元法及体外实验探索了动态稳定系统内椎弓根螺钉的生物力学特性,指出完整的脊柱和加装动态稳定系统的脊柱在位移上的差别不具有统计学意义($P<0.05$)。动态钉棒装载进脊柱模型形成动态稳定系

统后,其内固定所受到的应力较非动态固定系统内固定小。Lin HM 等^[21]利用有限元法对 the Dynesys (DY) 和 K-ROD (KD) 系统的生物力学特性进行分析。分析得出的结果是与 DY 系统相比,在脊柱屈曲位时 KD 系统的刚度最大,在伸张位时刚度最小;KD 系统增加了临近节段间盘的应力,但却减少了固定节段内固定所受到的应力。Kim 等^[22]建立了由不同弹性度的钛棒构成的腰椎弹性固定模型。分析指出椎弓根螺钉所受的应力主要集中在钉尾部,其应力大小与棒的弹性度成反比。同时指出,随着棒的弹性度的增加,棒的最大屈服应力也急剧增长。以此得出结论在临床实际应用中选择棒的适合弹性有助于防止棒发生断裂。

3.3.2 新型记忆合金与融合器 Song C 等^[23]发明了一种 "H" 形的中间含有空心柱状物的聚醚醚酮材质的棘突间植入物。他们在利用建模软件建立 L3-S1 有限元模型后,将该植入物牢固植于 L4 和 L5 棘突间,模拟植入手术后的情况。并将其与正常腰椎模型相比较,分析术后腰椎的生物力学变化情况。研究发现棘突间植骨模型不但有效的维持了腰椎的稳定性,同时使腰椎的活动度没有被额外限制。该发现为今后利用有限元方法评估多种脊柱植入物的生物力学特性的研究工作提供了新的方向。有学者在 L3-L5 节段有限元模型的基础上,模拟经椎间孔植入一枚和两枚融合器的椎间植骨融合手术。在加载负荷后分析了腰椎的生物力学变化情况。结果显示在腰椎的活动范围上二者没有明显的区别,虽然单枚融合器植入后融合器及植骨所承受的压力更高,但对腰椎的生物力学影响不大。故单枚椎间融合器的置入不但可以简化手术流程,缩短时间,而且可以降低就医成本,获得满意以手术效果^[24]。

3.3.3 椎弓根螺钉与链接棒 Biswas J 等^[25]利用计算机辅助设计软件 (CAD) 建立腰椎有限元模型后,按照三种不同的体重 (70 kg、90 kg 和 120 kg),分别给予 L3 椎体上表面三种不同的载荷 (420 N、490.5 N 和 588.6 N);并将三种不同直径 (4 mm、5 mm 和 6 mm) 的不锈钢和钛合金 (Ti6Al4V 合金) 椎弓根螺钉植入腰椎模型;依据患者的体质特异性,给模型设定五类骨的相对强度 (非常弱、弱、标准、强、很强);以此建立了 90 个仿真模型,分析移植物界面的 Von Mises 应力和应变、剪切应力和应变情况。结果显示对于大部分模型来说,直径 6 mm 的椎弓根螺钉最适合。田冲等^[26]建立了有松质骨螺钉植入的腰椎模型,在不同的骨密度 (低、中、高) 情况下计算螺钉的应力分布和拔出力变化情况。结果指出在螺钉拔出过程中应力主要集中在钉尾部;螺钉拔出所需力的强度与骨密度成正比。以此提醒在临床上要额外重视骨质疏松的患者,术中可适当采取增强固定效果的措施。

3.4 植骨融合术式的选择

胡日鹤等^[27]分别建立了腰椎后路椎间 (PLIF) 植骨融合模型和腰椎后路外侧 (PLF) 植骨融合模型,比较二者在融合节段的稳定性。结果证实椎间植骨融合模型在融合节段的稳定性优于后外侧植骨融合模型。Kim HJ 等^[28]分别建立了 L3-4 节段的半椎板切除双侧椎弓根螺钉固定 (BF-HL 型) 模型、全椎板切除双侧椎弓根螺钉固定 (BF-TL 型) 模型、半椎板切除单侧椎弓根螺钉内固定 (UF-HL 模型) 模型以及全椎板切除单侧椎弓根螺钉内固定 (UF-TL 型) 模型。在屈曲、伸展、侧弯、旋转载荷情

况下,分析四种术式中手术节段的稳定性及临近节段间盘应力变化的情况。结果显示在腰椎全椎板切除减压后,单侧椎弓根螺钉内固定无法维持腰椎的稳定性;在半椎板切除减压后,单侧椎弓根螺钉内固定不但能够维持手术节段的稳定,同时也减少了临近节段间盘的应力。Ambati DV 等^[29]建立了 L4-5 节段的有限元模型,并在此基础上分别建立了经椎间孔椎间植骨单侧内固定模型和经椎间孔椎间植骨双侧内固定模型。分析两种模型腰椎的稳定性及内固定所受应力的情况。结果显示双侧固定模型中内固定所受到的应力较单侧固定模型有所增加,同时在理论上提出这可能是术后内固定松动和腰椎重建术失败的原因。而单侧内固定不但能够维持手术节段的稳定性,同时也减少了内固定物所受到的应力。Tang 等^[30]通过改变椎间高度建立了三种不同退变程度的腰椎有限元模型。同时又建立了腰椎前路椎间植骨融合内固定模型。在分析比较了邻近节段髓核、纤维环所受应力的变化情况后,得出了前路椎间植骨融合内固定术后上节段椎间盘的退变速度比正常退变速度快这一结论。

4 小结与展望

有限元分析法作为一项新兴的技术,已经广泛的应用于腰椎生物力学的研究中。通过该方法我们可以较为全面的了解各种植骨融合术后腰椎生物力学的变化情况。同时也可以优化内固定设计,预测手术的远期疗效并预防手术并发症。

目前有限元模型已从原始的短节段模型发展到现在的全腰椎模型;由二维线性模型发展到现今的三维非线性模型。在结构上还加入了肌肉、韧带和小关节等附件,使腰椎模型更接近于真实的形态。在动力学上,还模拟了腰椎在损伤、振动等条件下应力的分布情况,这与人体日常的生活状态更加接近。随着人们对腰椎生物力学认识的不断深入,有限元分析法将会有更大的发展空间。但有限元分析法毕竟属于理论分析的范畴,其必须在临床观察与术后随访的基础上才能为疾病的发生、发展和转归提供准确的参考。

参考文献 (References)

- [1] Belytschko T, Kulak RF, Schultz AB, et al. Finite element stress analysis of an intervertebral disc[J]. J Biomech, 1974, 7(3): 277-285
- [2] 付裕, 阮狄克, 霍洪军, 等. 基于 CT 扫描及 CAD 技术建立下腰椎三维有限元模型 [J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(9): 1557-1561
- Fu Yu, Ruan Di-ke, Huo Hong-jun, et al. Construction of a three-dimensional finite element model of lower lumbar spine based on computed tomography images and computer aided design [J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2011, 15 (9): 1557-1561
- [3] 曾至力, 程黎明, 朱睿, 等. 胸腰椎三维非线性有限元模型的建立[J]. 中华医学杂志, 2011, 91(31): 2176-2180
- Zeng Zhi-li, Cheng Li-ming, Zhu Rui, et al. Building an effective non-linear three-dimensional finite-element model of human thoracolumbar spine[J]. National Medical Journal of China, 2011, 91(31): 2176-2180
- [4] 闫家智, 吴志宏, 汪雪松, 等. 腰椎三维有限元模型建立和应力分析 [J]. 中华医学杂志, 2009, 89(17): 1162-1165
- Yan Jia-zhi, Wu Zhi-hong, Wang Xue-song, et al. Finite element analysis on stress change of lumbar spine [J]. National Medical Journal of

- China, 2009, 89(17): 1162-1165
- [5] 刘耀升, 陈其昕, 刘蜀彬, 等. 腰椎运动节段终板凹陷角变化的有限元分析[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008, 12(44): 8765-8770
Liu Yao-sheng, Chen Qi-xin, Liu Shu-bi, et al. Endplate concavity variation of lumbar motion segments[J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue eEngineering Research, 2008, 12(44): 8765-8770
 - [6] Zauel R, Yeni YN, Bay BK, et al. Comparison of the linear finite element prediction of deformation and strain of human cancellous bone to 3D digital volume correlation measurements [J]. J Biomech Eng, 2006, 128(1): 1-6
 - [7] Yan W, Zhao G, Fang X, et al. Construction and analysis of a finite element model of human L4-5 lumbar segment [J]. Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi, 2014, 31(3): 612-618
 - [8] 鲍春雨, 刘晋浩. 人体脊柱腰椎节段三维有限元模型的研究与分析[J]. 机械设计, 2009, 26(9): 61-63
Bao Cun-yu, Liu Jin-hao. Research and analysis of dimensional finite element model in human lumbar spine[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(9): 61-63
 - [9] Rohlmann A, Zander T, Schmidt H, et al. Analysis of the influence of disc degeneration on the mechanical behaviour of a lumbar motion segment using the finite element method[J]. J Biomech, 2006, 39(13): 2484-2490
 - [10] Chagnon A, Aubin CE, Villemure I. Biomechanical influence of disk properties on the load transfer of healthy and degenerated disks using a poroelastic finite element model[J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2010, 132(11): 111006
 - [11] Kim YE, Choi HW. Effect of disc degeneration on the muscle recruitment pattern in upright posture: a computational analysis Effect of disc degeneration on the muscle recruitment pattern in upright posture: a computational analysis[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2014, 15: 1-10
 - [12] Jacobs NT, Cortes DH, Peloquin JM, et al. Validation and application of an intervertebral disc finite element model utilizing independently constructed tissue-level constitutive formulations that are nonlinear, anisotropic, and time-dependent[J]. J Biomech, 2014, 47(11): 2540-2546
 - [13] Kaminska J, Roman-Liu D, Zagrajek T, et al. Differences in lumbar spine load due to posture and upper limb external load[J]. Int J Occup Saf Ergon, 2010, 16(4): 421-430
 - [14] Kuo CS, Hu HT, Lin RM, et al. Biomechanical analysis of the lumbar spine on facet joint force and intradiscal pressure-a finite element study[J]. BMC Musculoskelet Disord, 2010, 11(151): 1-13
 - [15] Li D, Xiao Z, Wang G, et al. Novel, fast and efficient image-based 3D modeling method and its application in fracture risk evaluation[J]. Exp Ther Med, 2014, 7(6): 1583-1590
 - [16] 李钦亮, 刘艺, 诸朝明, 等. 伤椎椎弓根置钉治疗胸腰椎压缩性骨折的三维有限元分析[J]. 中国组织工程研究与临床, 2011, 15(39): 7226-7229
Li Qin-liang, Liu Yi, Chu Zhao-ming, et al. Treatment of thoracolumbar fractures by vertebral pedicle-screws through the fractured vertebrae based on a three-dimensional finite element method [J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2011, 15(39): 7226-7229
 - [17] Dou H, Tang S. Analysis of the influence of nucleotomy on lumbar degeneration of the operated level using the finite element method[J]. Turk Neurosurg, 2014, 24(2): 184-189
 - [18] Lipscomb KE, Sarigul-Klijn N, Klineberg E, et al. Biomechanical effects of human lumbar discography: in-vitro experiments and their finite element validation[J]. J Spinal Disord Tech, 2014, 6[Epub ahead of print]
 - [19] 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 Ju-ying, Li Hai-yun, Wu Hao. Simulation calculation on biomechanical properties of lumbar disc herniation [J]. Journal of Medical Biomechanics, 2012, 27(1): 96-101
 - [20] Oktenoglu T, Erbulut DU, Kiapour A, et al. Pedicle screw-based posterior dynamic stabilisation of the lumbar spine: in vitro cadaver investigation and a finite element study [J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2015, 18(11): 1252-1261
 - [21] Lin HM, Pan YN, Liu CL, et al. Biomechanical comparison of the K-ROD and Dynesys dynamic spinal fixator systems - a finite element analysis[J]. Biomed Mater Eng, 2013, 23(6): 495-505
 - [22] Kim K, Park WM, Kim YH, et al. Stress analysis in a pedicle screw fixation system with flexible rods in the lumbar spine [J]. Proc Inst Mech Eng H, 2010, 224(3): 477-485
 - [23] Song C, Li XF, Liu ZD, et al. Biomechanical assessment of a novel L4/5 level interspinous implant using three dimensional finite element analysis[J]. Eur Rev Med Pharmacol, 2014, 18(1): 86-94
 - [24] Xu H, Ju W, Xu N, et al. Biomechanical comparison of transforaminal lumbar interbody fusion with 1 or 2 cages by finite-element analysis [J]. Neurosurgery, 2013, 73: 198-205
 - [25] Biswas J, Karmakar S, Majumder S, et al. Optimization of spinal implant screw for lower vertebra through finite element studies [J]. J Long Term Eff Med Implants, 2014, 24(2-3): 99-108
 - [26] 田冲, 张美超, 欧阳钧. 不同骨密度下松质骨螺钉生物力学性能的三维有限元分析[J]. 南方医科大学学报, 2010, 30(11): 2466-2468
Tian Chong, Zhang Mei-chao, Ouyang Jun. Three-dimensional finite element analysis of biomechanical characteristics of cancellous screw in different bone densities [J]. J South Med Univ, 2010, 30(11): 2466-2468
 - [27] 胡日鹤, 周初松. 腰椎滑脱不同融合术式的三维有限元研究 [J]. 实用临床医药杂志, 2010, 14(13): 41-45
Hu Ri-he, Zhou Chu-song. A study of different lumbar spondylolisthesis fusion surgeries based on three-dimensional Finite Element analysis [J]. Journal of Clinical Medicine in Practice, 2010, 14(13): 41-45
 - [28] Kim HJ, Kang KT, Chang BS, et al. Biomechanical analysis of fusion segment rigidity upon stress at both the fusion and adjacent segments: a comparison between unilateral and bilateral pedicle screw fixation [J]. Yonsei Med J, 2014, 55(5): 1386-1394
 - [29] Ambati DV, Wright EK Jr, Lehman RA Jr, et al. Bilateral pedicle screw fixation provide superior biomechanical stability in transforaminal lumbar interbody fusion: a finite element study[J]. Spine J, 2014, 28[Epub ahead of print]
 - [30] Tang S, Rebolz BJ. Does anterior lumbar interbody fusion promote adjacent degeneration in degenerative disc disease? A finite element study[J]. J Orthop Sci, 2011, 16(2): 221-228