

# 胸腰椎骨内固定手术仿真模型优化研究

李雨辰, 邹任玲, 孙元良, 范焯杰, 汪圣舟,  
李智超, 胡秀枋

(上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 目前治疗胸腰椎损伤手术常用短节段的坚强内固定方式, 这种方式容易引发关节退变并发症, 为此本文设计了一种可旋动型椎弓根螺钉并利用仿真软件对手术模型进行优化分析。首先采用人体胸腰椎 CT 图像, 利用 Mimics, Geomagic 等软件重建出人体胸腰椎长、短节段模型并分析其不同工况下的活动度及位移情况; 然后基于长节段重建固定手术模型, 与传统手术螺钉的植入进行对比, 探究不同手术植入物对胸腰椎手术治疗效果的影响。结果表明, 微调型 Magerl 进钉方法简便、不易刺穿椎骨; 可旋动螺钉能保证椎间活动度大, 能有效保护术后椎骨康复活动。该模型可为临床手术治疗优化提供一种新的手段。

**关键词:** 胸腰椎; 椎弓根螺钉; 三维重建; 内固定模型

中图分类号: R 318.01

文献标志码: A

## Optimization of simulation model of thoracolumbar internal fixation surgery

LI Yuchen, ZOU Renling, SUN Yuanliang, FAN Xiaojie, WANG Shengzhou, LI Zhichao, HU Xiufang

(School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology,  
Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Currently, the treatment of thoracolumbar injuries is mainly based on short segment strong internal fixation, which is easy to cause joint degeneration and other complications. Therefore, a rotatable pedicle screw was designed in this paper and the surgical model was optimized and analyzed by simulation software. Firstly, Mimics, Geomagic, etc was used to reconstruct long and short segment models of human thoracolumbar spine according to human thoracolumbar spine CT images and their range of motion and displacement under different working conditions were analyzed. Then, based on the long-segment thoracolumbar spine model, the internal fixation model was reconstructed. Compared with the traditional surgical screw implantation, the influence of different surgical implants on the therapeutic effect of thoracolumbar spine surgery was explored. As a result, fine-tuning Magerl method is simple and avoids puncture of the vertebrae. Rotating screws can ensure a large range of intervertebral motion

收稿日期: 2021-04-08

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC2001501); 上海市科技创新行动计划项目 (19441902800); 上海理工大学医工交叉项目 (1019308505)

第一作者: 李雨辰 (1997-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 康复医疗器械. E-mail: 460247206@qq.com

通信作者: 邹任玲 (1971-), 女, 副教授. 研究方向: 康复医疗器械. E-mail: zourcenling@163.com

and effectively protect postoperative rehabilitation activities of the vertebrae. The establishment of this model provides a new means for the optimization of clinical surgical treatment.

**Keywords:** *thoracolumbar spine; pedicle screw; three-dimensional reconstruction; internal fixation model*

人体脊柱由脊椎骨及椎间盘构成, 在整个人体骨骼构造中是人体躯干的支柱, 有着十分重要的作用。作为脊柱中极易受损的节段, 胸腰椎受损约占脊柱受损总数的 50%~70%<sup>[1]</sup>, 椎弓根螺钉内固定方式则是目前应用最广泛的治疗胸腰椎受损的手术方式<sup>[2]</sup>。对于脊柱胸腰椎骨置钉手术的临床效果与损伤分析的研究, 是通过构建内固定系统的置钉胸腰椎三维模型, 并对其进行有限元分析, 获得在脊柱不同运动状态的力学分析结果, 用以观察置钉手术效果<sup>[3]</sup>。手术模型主要有胸腰椎模型和椎弓根螺钉内固定系统, Liu 等<sup>[4]</sup>在 CT 图像数据的基础上重建出腰椎 L3-L4 两节段有限元模型用于螺钉生物力学的评测。贾宏禹等<sup>[5]</sup>利用 CT 图像数据重建出 T12-L1 节段正常椎骨与压缩性骨折模型并进行了模型有效性验证。宋元进等<sup>[6]</sup>重建出 T11-L1 三节胸腰椎有限元模型用来分析不同固定方式对于胸腰段骨折的影响, 这些模型研究多为两节到三节, 但临床研究表明, 内固定手术后路长节段内固定方式相比较于短节段内固定方式来说, 在患者康复过程中康复效果明显优于短节段<sup>[7]</sup>, 因此, 多节段模型的建立对临床分析更具有客观性。手术模型的另一个重要环节是椎弓根螺钉内固定系统, Grob 等<sup>[8]</sup>对于植入 Dynesys 内固定系统的患者康复情况进行了调查总结, 依旧存在临近关节退变术后并发症的发生几率, Lee 等<sup>[9]</sup>采用 Coflex 内固定系统对腰椎管狭窄患者康复情况进行了调查随访, 研究术后患者生理变化, 发现了一些内固定失败的个例。这些固定方式大都采用坚强固定系统, 临床上这种固定方式会引起临近关节退变、内固定失败等一系列术后并发症<sup>[10-12]</sup>, 目前一种新型的可旋动固定系统可以减轻术后并发症。因此, 重建一种可旋动椎弓根螺钉的新型内固定系统, 结合多节段三维胸腰椎模型, 进行有限元方法手术植入方式分析, 并对内固定旋动的影响等问题进行分析, 模拟真实手术过程, 能降低术后影响, 对于提高手术成功率

具有重要的临床意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 多节段胸腰椎三维模型优化

为了更加直观地分析手术前期仿真置钉效果, 克服传统短节段胸腰椎模型不全面、分析受限的缺点, 构建四节长节段胸腰椎模型, 胸腰椎模型采用医院提供的正常人体全脊柱 CT 图像, 共使用 721 张。重建初期采用 Mimics 分析软件, 使用成熟的区域增长法与灰度阈值法提取人体椎骨模型<sup>[13]</sup>。将 721 张 DICOM 格式胸腰椎 CT 图像导入到 Mimics 医学三维重建软件中, 用图像分割技术分离出所需的四节段胸腰椎骨模型<sup>[14]</sup>, 并使用多层提取的方法与布尔操作, 以椎骨上下表面为基础, 利用目标数据点集 (Mask) 填充两节椎骨间的间隙, 单独重建出完全契合的椎间盘, 使模型更加精细真实。然后使用计算 (Calculate) 功能可以由蒙版模型生成三维点云模型, 生成图 1 所示的三维模型。

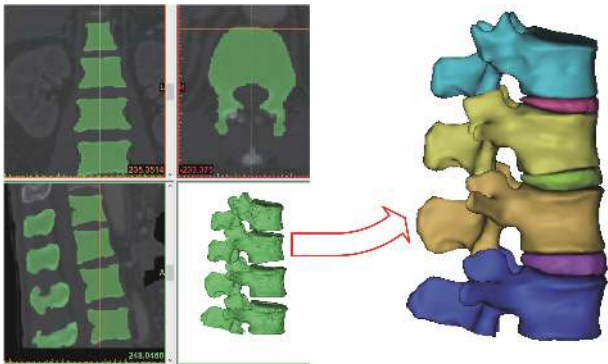


图 1 蒙版-三维模型  
Fig.1 Mask - 3D model

采用 Mimics 导出点云的三维模型必须将其曲面化才能进行后续有限元分析, 而 Geomagic 软件具有曲面化的功能, 可以后续进行有限元分析。本处理将 Mimics 的 T12-L3 胸腰椎骨三维模型分别导出为 STL 格式, 并导入到 Geomagic 软件中进行

光滑、精确曲面等操作,从而得到 NURBS 曲面模型,最后导出为 IGS 格式,方便后续在 SolidWorks 软件中进行置钉手术模拟操作。为了进一步优化胸腰椎骨模型,还需要对其进行网格划分与赋值操作。采用 3-Matic 软件可以对其进行面-体网格划分。在体网格划分中整体采用 10 节点的四面体单元,如图 2 所示。此种四面体单元可以较为契合地完成复杂模型网格划分,对模型的适应性很强,得到的模型更为精细。网格模型建立后在 Mimics 中直接根据灰度值法给胸腰椎骨进行赋值。相较于皮质骨、松质骨等组织单独赋予单一材料,利用 CT 图像中含有的灰度值 HU 数据对人体胸腰椎骨进行赋值具有更加真实的优点<sup>[15]</sup>,这对减少模拟误差、提高手术成功率具有十分重要的意义。Mimics 本身具有人体不同骨组织的经验公式,经验公式主要采用表观密度、弹性模量、泊松比定义材料,是较为完善的材料属性定义,完全可以直接使用经验公式对其进行赋值,如表 1 所示。A-P, M-L, S-I 分别为前-后方向、内-外方向、上-下方向。 $\rho$  为表观密度。

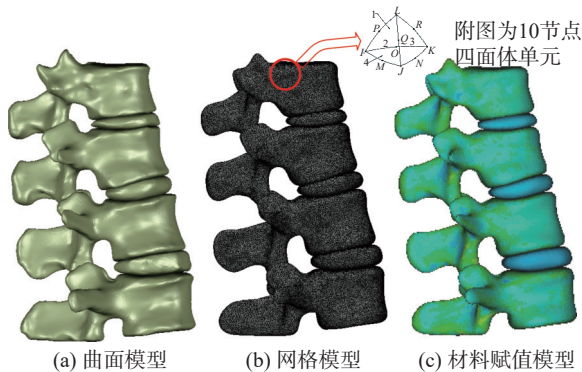


图 2 正常胸腰椎有限元模型

Fig.2 Finite element model of normal thoracolumbar spine

建立的正常腰椎有限元模型如图 2 所示。

### 1.2 长节段胸腰椎骨内固定系统优化

#### 1.2.1 可旋动椎弓根螺钉内固定系统设计

旋动型螺钉可以避免坚强固定手术方式引起的一系列术后并发症,本文设计了一种旋动椎弓根螺钉系统<sup>[16]</sup>,该可旋动椎弓根螺钉内固定系统内含一种可以旋动以及微动的椎弓根螺钉,此种设计可以最大限度地避免患者术后关节活动度过分受限以及容易引起相邻节段椎骨退化的后遗症。可旋动椎弓根螺钉结构如图 3 所示,可旋动

表 1 脊柱表观密度-弹性模量经验公式

Tab.1 Empirical formula of apparent density-modulus of elasticity of spine

| 表观密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 轴线  | 杨氏模量/MPa                   |
|----------------------------|-----|----------------------------|
| 1.122HU+47                 | A-P | 1.92ρ-170                  |
| 1.122HU+47                 | A-P | 0.02ρ <sup>1.69</sup>      |
| 1.122HU+47                 | M-L | 2.20ρ-209                  |
| 1.122HU+47                 | M-L | 0.02ρ <sup>1.75</sup>      |
| HU                         | S-I | 7.136ρ-172.3               |
| 1.122HU+47                 | S-I | 5.82ρ-349                  |
| 1.122HU+47                 | S-I | 0.63ρ <sup>1.35</sup>      |
| —                          | S-I | 8.24ρ <sup>0.95</sup> -489 |

椎弓根螺钉内固定系统的关键部分为可旋动椎弓根螺钉。可旋动椎弓根螺钉整体上由螺钉和钉座组成。螺钉装配在钉座中形成转动副。螺钉可按照装配槽口的不同设置不同的安装角度,并可在钉座内按限定角度实现轻微转动,如图 3(b)中  $\alpha$  与  $\beta$  角之差为微动角度范围。内钉座和外钉座之间可形成转动关系,内钉座和外钉座中间留有一定空隙,可有效减少摩擦力,内钉座和外钉座凹槽内装有滚珠,如图 3(d)所示,红色为滚珠,黑色加深边框为滑槽,滚珠在滑槽内往复滚动,可与内钉座、外钉座形成滚动配合关系,三者共同配合下可在滑槽限定角度内实现内钉座和外钉座间的相对转动,如图 3(c)所示  $\gamma$  与  $\delta$  角之差为转动角度范围。

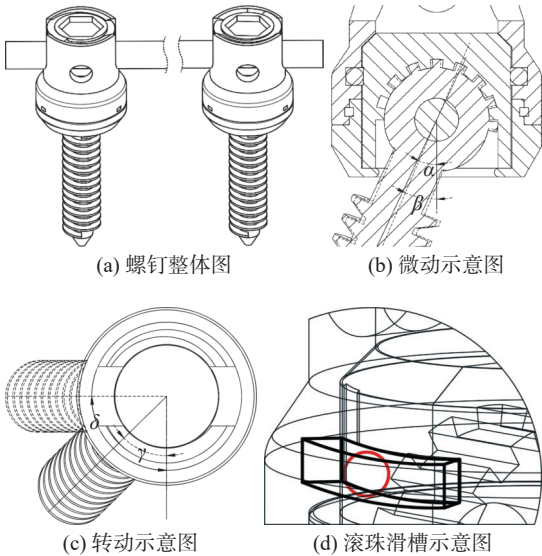


图 3 可旋动椎弓根螺钉及旋动部件

Fig.3 Rotable pedicle screws and rotating components

1.2.2 内固定置钉模型建立与分析

置钉打孔方式会影响手术效果, 一般由医生经验确定, 会造成一定主观失误和偏差, 因此, 采用多种置钉方式模拟手术效果, 能够优化并制定置钉模型, 避免医生的主观错误。本次模型优化采用先进的 Magerl 法<sup>[17]</sup> 和 Krag 法<sup>[18]</sup> 进行置钉打孔。

Magerl 法采用“向前”或“前内”进钉法, 以上关节突外缘的纵垂线与横突中轴线的交点为进钉点, 进钉方向与椎体终板平行, 与矢状面向内成角 15°。而 Krag 法采用“向上方向”法, 进钉点较 Magerl 法更靠外, 其水平线为横突的上 2/3 与下 1/3 交线, 进钉方向朝上, 以不穿破终板为度。由于个体胸腰椎骨间存在差异, 单纯采用某种置钉方法会有偏差, 所以, 在模拟过程中, 根据多节段胸腰椎的个体差异略微修正了打孔位置。图 4 为胸腰椎骨打孔进钉模型。仿真结果表明, 使用 Magerl 法在植入内固定物手术操作时, 螺钉与棘突骨组织间隙大, 阻碍减少, 进钉较为简便。平行终板的进钉方式也不易刺透椎骨造成手术二次损伤, 是研究三维模型优化的最佳置钉方式。采用修正内固定模型可以为医生提供更为

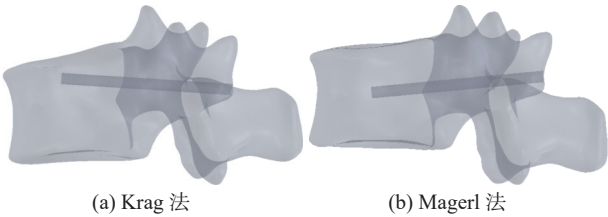


图 4 胸腰椎骨打孔进钉模型  
Fig. 4 Model of thoracolumbar spine perforation and nail insertion

直观可靠的临床手术参考。

2 结 果

2.1 旋动椎弓根螺钉内固定系统手术模型优化

为了进一步分析旋动椎弓根螺钉内固定系统手术疗效情况, 在四节段胸腰椎模型基础上重建传统坚强固定组的内固定系统三维装配模型用于对比研究<sup>[19]</sup>。并将重建出的两种模型分别导入 Ansys 软件进行力学分析。以健康未植入模型作为对照, 以最为典型的脊柱扭转运动作为变量, 分别对 3 组模型施加同等边界条件, 并进行有限元分析, 得到位移应力云图, 并以此分析活动度的差异。结果如图 5 所示。

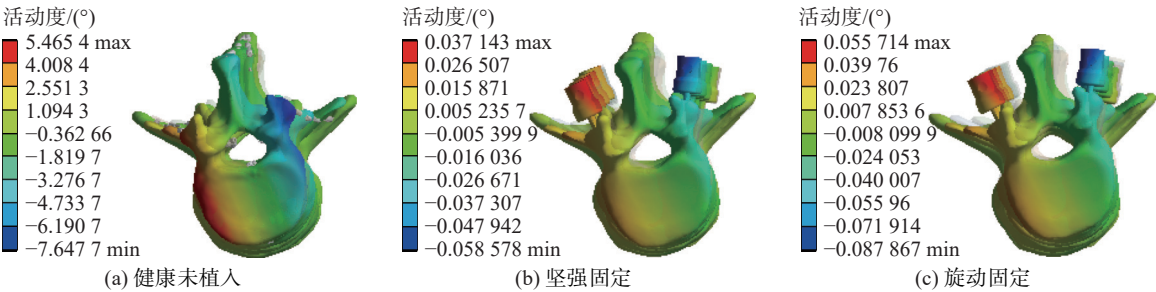


图 5 活动度对比  
Fig.5 Comparison of activity levels

由图 5 可以发现, 相对于传统坚强固定组模型来说, 可旋动椎弓根螺钉内固定系统模型在扭转工况下的活动度比坚强固定组模型活动度更大, 与健康未植入模型更为接近。这说明采用新型内固定系统可以最大限度地避免患者术后关节活动度过分受限而引起的术后并发症, 也可降低椎弓根螺钉的应力峰值, 避免因日常活动造成的手术植入物断裂受损等问题。

2.2 多节段手术模型优化

为了分析后路多节段模型对内固定手术的影

响, 重建基于四节段胸腰椎模型与两节短节段胸腰椎模型可旋动置钉模型。将重建出的四节段胸腰椎模型与两节段胸腰椎模型分别导入 Ansys 进行分析, 将前屈、后伸、侧弯、扭转这 4 种运动状态下的两组模型活动度与位移进行对比分析, 结果如图 6 所示。

由位移云图 6 可知, 长节段胸腰椎模型比两节短节段胸腰椎模型具有更大的活动度与位移, 在前屈、后伸、侧弯、扭转这 4 种运动状态下, 四节长节段胸腰椎模型均比两节短节段胸腰椎模

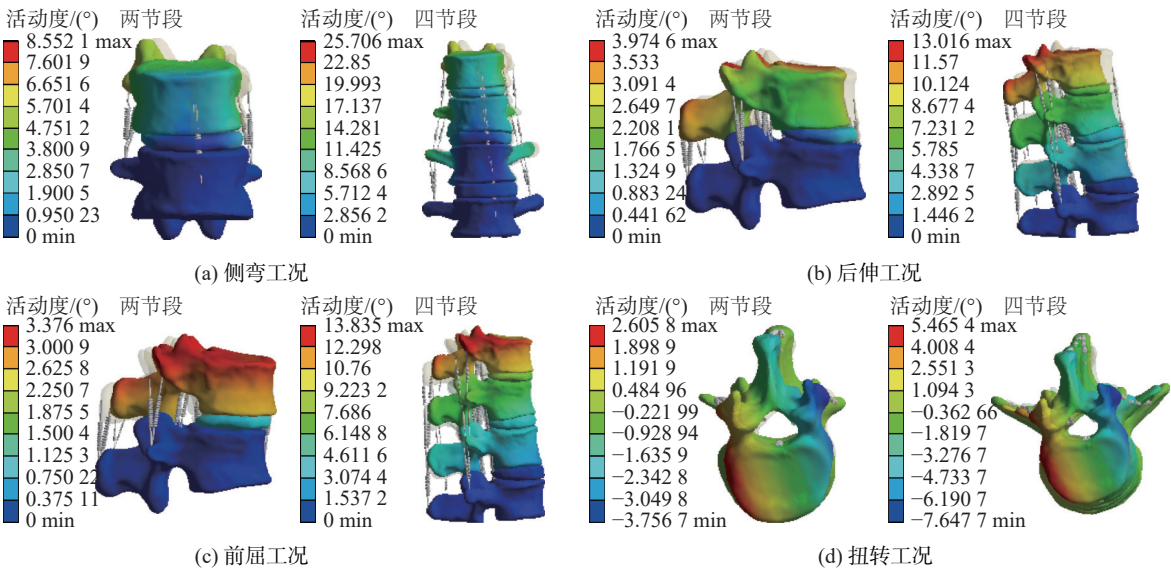


图 6 活动度与位移云图

Fig.6 Activity and displacement nephogram

型的位移大。这说明长节段胸腰椎模型在仿真分析中可以直观地表达出更为明显的胸腰椎活动情况，后路节段越多，活动越明显，在屈伸、侧弯及扭转工况下保留了一定程度的脊柱运动功能，因此，长节段的内固定手术也更有利于术后康复。

3 讨 论

采用 Mimics, Geomagic, SolidWorks 等软件重建了 T12-L3 共四节含椎间盘的胸腰椎骨优化模型，相比较于传统的短节段胸腰椎骨模型，提供了一种更为直观的观察胸腰椎手术治疗结果的方式，在此基础上，采用胸腰椎骨内固定模型进行了手术植入法比较。结果表明，以 Magerl 法进行钉孔轻微调整，进一步确定进钉位置，进钉手术简便，平行的进钉方式也不易刺透椎骨，避免了手术二次损伤。采用可旋动椎弓根螺钉进行了手术过程力学优化分析，并与传统的坚强内固定方式进行对比分析。仿真结果表明，可旋动螺钉能提供更大的椎间活动度，可有效保护置钉脊骨，也进一步说明了新型内固定系统的优越性，为医生提供一定的临床手术模拟结果作为参考。

参考文献:

[1] NING G Z, YU T Q, FENG S Q, et al. Epidemiology of traumatic spinal cord injury in Tianjin, China[J]. *Spinal Cord*, 2011, 49(3): 386–390.

[2] 魏世坤. 经皮椎弓根螺钉内固定术临床应用进展 [J]. *重*

*庆医学*, 2012, 41(32): 3440–3442.

[3] 徐海栋, 刘晓伟, 史新瑞, 等. 胸腰椎骨折伤椎置钉不同运动状态的有限元研究 [J]. *医学研究生学报*, 2017, 30(6): 623–627.

[4] LIU C, KAMARA A, YAN Y H. Investigation into the biomechanics of lumbar spine micro-dynamic pedicle screw[J]. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 2018, 19(1): 231–241.

[5] 贾宏禹, 李孝林, 吕志鹏. 基于正常人体资料建立胸腰椎多椎体压缩性骨折三维有限元模型 [J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2009, 13(52): 10247–10250.

[6] 宋元进, 蔡锦方. 胸腰段骨折不同固定方式的有限元分析 [J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2009, 13(52): 10269–10273.

[7] 丁少成, 曹家俊, 魏学忠, 等. 后路长节段与短节段椎弓根螺钉固定治疗胸腰椎骨折的疗效比较 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2013, 27(6): 690–695.

[8] GROB D, BENINI A, JUNGE A, et al. Clinical experience with the Dynesys semirigid fixation system for the lumbar spine: surgical and patient-oriented outcome in 50 cases after an average of 2 years[J]. *Spine*, 2005, 30(3): 324–331.

[9] LEE N, SHIN D A, KIM K N, et al. Paradoxical radiographic changes of coflex interspinous device with minimum 2-year follow-up in lumbar spinal stenosis[J]. *World Neurosurgery*, 2016, 85: 177–184.

[10] COE J D, ARLET V, DONALDSON W, et al. Complications in spinal fusion for adolescent idiopathic scoliosis in the new millennium. A report of the scoliosis research society morbidity and mortality committee[J]. *Spine*, 2006, 31(3): 345–349.

- inertial proximal algorithm for maximally monotone operators[J]. *Mathematical Programming*, 2020, 184(1): 243–287.
- [9] BOT R I, CSETNEK E R, HENDRICH C. Inertial Douglas-rachford splitting for monotone inclusion problems[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2015, 256: 472–487.
- [10] JIA H, LIU S, DANG Y. An inertial accelerated algorithm for solving split feasibility problem with multiple output sets[J]. *Journal of Mathematics*, 2021, 2021: 1–12.
- [11] CUI F Y, TANG Y C, YANG Y. An inertial three-operator splitting algorithm with applications to image inpainting[J]. *Application of Set-Valued Analysis and Optimization*, 2019, 1(2): 113–134.
- [12] CHEN C H, CHAN R H, MA S Q, et al. Inertial proximal ADMM for linearly constrained separable convex optimization[J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2015, 8(4): 2239–2267.
- [13] ATTOUCH H, SOUEYCATT M. Augmented lagrangian and proximal alternating direction methods of multipliers in Hilbert spaces. Applications to games, PDE's and control[J]. *Pacific Journal of Optimization*, 2008, 5(1): 17–37.
- [14] WANG Y L, YANG J F, YIN W T, et al. A new alternating minimization algorithm for total variation image reconstruction[J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2008, 1(3): 248–272.
- [15] TAO M, YUAN X M, HE B S. Solving a class of matrix minimization problems by linear variational inequality approaches[J]. *Linear Algebra and its Applications*, 2011, 434(11): 2343–2352.
- [16] HE B S, LIAO L Z, WANG X. Proximal-like contraction methods for monotone variational inequalities in a unified framework I: Effective quadruplet and primary methods[J]. *Computational Optimization and Applications*, 2012, 5(1): 649–679.

(编辑: 石 瑛)

[ 上接第 176 页 ]

- [11] HILIBRAND A S, ROBBINS M. Adjacent segment degeneration and adjacent segment disease: the consequences of spinal fusion?[J]. *The Spine Journal*, 2004, 4(S6): S190–S194.
- [12] MARTIN B I, MIRZA S K, COMSTOCK B A, et al. Reoperation rates following lumbar spine surgery and the influence of spinal fusion procedures[J]. *Spine*, 2007, 32(3): 382–387.
- [13] 曾鹏, 王正勇, 滕奇志. 一种基于区域生长算法的脊椎椎体提取方法 [J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(6): 222–225.
- [14] 盛孙仁, 张美超, 朱青安. 中上胸椎皮质骨通道螺钉固定的生物力学有限元仿真研究 [J]. *医用生物力学*, 2019, 34(3): 251–255.
- [15] 李孝林. 基于 CT 图像应用 Mimics 软件快速构建人体胸腰段骨骼有限元模型 [J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2009, 13(39): 7619–7622.
- [16] 邹任玲, 李雨辰, 胡秀枋, 等. 用于脊柱后路的可旋动椎弓根螺钉及固定系统 [P]. 中国, CN112263315A. 2021-01-26.
- [17] MAGERL F P. Stabilization of the lower thoracic and lumbar spine with external skeletal fixation[J]. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 1984(189): 125–141.
- [18] KRAG M H, VAN HAL M E, BEYNNON B D. Placement of transpedicular vertebral screws close to anterior vertebral cortex[J]. *Spine*, 1989, 14(8): 879–883.
- [19] 程哲, 何由, 王卫国, 等. 胸腰段爆裂性骨折内固定治疗的生物力学特点 [J]. *医用生物力学*, 2019, 34(5): 486–492.

(编辑: 石 瑛)