

文章编号:1004-7220(2018)01-0082-07

# 有限元法在腰椎融合术与置换术生物力学研究中的应用进展

张振军<sup>1,2</sup>, 孙艺菊<sup>3</sup>, 廖振华<sup>2</sup>, 孙学君<sup>4</sup>, 刘伟强<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 深圳清华大学研究院 生物医用材料及植入器械重点实验室, 广东 深圳 518057;  
3. 辽宁省海城市中心医院 儿科, 辽宁 海城 114200; 4. 北京盈暖利和科技有限公司, 北京 100085)

**摘要:**回顾近年来有限元法(finite element method, FEM)在腰椎椎间融合术与人工椎间盘置换术生物力学中的研究进展,并对其应用前景进行展望。通过归纳整理,得出FEM在腰椎椎间融合术与人工椎间盘置换术生物力学中的研究要点是手术方案的优化选择、植入器械的性能评价和临床手术的效果预测。最后依据当前的研究要点和发展方向,对FEM在个性化手术模拟、弹性内固定性能评价和新型术式效果预测等方面的应用前景进行展望。通过对FEM在腰椎椎间融合术与人工椎间盘置换术生物力学研究中的应用进展进行回顾和展望,以期对临床腰背痛疾病的手术治疗提供更加全面和系统的理论指导。

**关键词:**有限元法; 腰椎; 椎间融合术; 人工椎间盘置换术; 生物力学

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2018.01.014

## Progress of Finite Element Method Applied in Biomechanical Researches on Lumbar Fusion and Replacement

ZHANG Zhenjun<sup>1,2</sup>, SUN Yitao<sup>3</sup>, LIAO Zhenhua<sup>2</sup>, SUN Xuejun<sup>4</sup>, LIU Weiqiang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Laboratory of Biomedical Material and Implanted Devices, Shenzhen Institute of Tsinghua University, Shenzhen 518057, Guangdong, China; 3. Department of Pediatrics, Haicheng City Central Hospital, Haicheng 114200, Liaoning, China; 4. Beijing Yingnuanlihe Technologies Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** The research progress of finite element method (FEM) applied in biomechanics of lumbar fusion and artificial lumbar disc replacement was reviewed and its prospect was forecasted. The main research directions of FEM are optimal selection of operation plans before the surgery, performance evaluation of implanted devices and prediction of postoperative outcomes. Based on the recent research progress, the application prospects of FEM in simulation of personalized surgery, evaluation of elastic implants and postoperative prediction of novel operation method were discussed. By reviewing and prospecting the application of FEM in biomechanical research of lumbar fusion and artificial lumbar disc replacement, the purpose of this paper is to provide theoretical references and practical guidance for the treatment of lumbar diseases in clinic.

**Key words:** finite element method (FEM); lumbar; lumbar fusion; artificial lumbar disc replacement; biomechanics

收稿日期:2017-02-10; 修回日期:2017-03-19

基金项目:深圳市科技计划基础研究项目(JCYJ20151030160526024),深圳市公共技术服务平台项目(SMJKPT20140417010001)

通信作者:刘伟强,教授, E-mail: weiqliu@hotmail.com

恶劣的工作环境和长期的职业习惯会引起下腰痛(low back pain, LBP),特别是现代人久坐不动的生活方式也是导致腰背痛的重要原因之一。LBP已经成为全球最常见的健康问题之一,造成了大量的个人、社区和全球经济负担;而随着未来几十年的人口老龄化,全球LBP患者可能会大幅增加<sup>[1]</sup>。统计数据表明,LBP在美国的年发生率为15%~45%;在中国,LBP发生率则高达60%~80%<sup>[2]</sup>。除了运动损伤或交通事故,引起腰背痛的主要原因包括退行性椎间盘病变(degenerative disc disease, DDD)和腰椎间盘突出症。多数LBP患者可通过保守治疗达到缓解,但仍有部分患者采用保守治疗无效,需采用外科手术治疗<sup>[3]</sup>。因此,应用腰椎相关的生物力学方法,开展腰椎手术的分析研究和模拟仿真具有重要的临床意义。

针对LBP患者的手术治疗,通常可以分为髓核摘除术、腰椎椎间融合术和腰椎非融合术等几类。腰椎椎间融合术包括前路腰椎椎间融合术(anterior lumbar interbody fusion, ALIF)、后路腰椎椎间融合术(posterior lumbar interbody fusion, PLIF)和经椎间孔腰椎椎间融合术(transforaminal lumbar interbody fusion, TLIF)等。腰椎非融合术包括人工椎间盘置换(total disc replacement, TDR)、弹力棒内固定和棘突间稳定器等。TLIF通常采用椎间融合器辅加椎弓根螺钉来维持腰椎的稳定,其手术疗效获得了临床和体外生物力学研究的证实<sup>[4-5]</sup>。但是椎间融合术后的腰椎节段会丧失活动度(range of motion, ROM),进而引起相邻节段的退变。随着人工腰椎间盘假体开发和临床手术技术的不断进步,关于人工腰椎间盘的力学分析和临床试验也证实了TDR技术的可行性<sup>[6-7]</sup>。由于腰椎椎间融合术可以增加节段稳定性但是可能加速邻近节段的退变,而腰椎人工椎间盘置换术虽然保留运动功能但是可能造成腰椎ROM过大,故也有学者提出了腰椎混合术的概念。针对两节段或多节段以上的腰椎间盘退变,可能存在某些节段适合行人工椎间盘置换术,其他节段则适合行椎间融合术,此时将两种手术同时应用能够互补不足,理论上可以获得优于单独使用人工椎间盘置换或椎间融合术的手术疗效。

鉴于腰椎在人体中特殊的生理环境和承重作用,采用传统的力学实验方法很难进行全面而有效

的手术模拟。而有限元法(finite element method, FEM)具有力学参数模拟全面和可多次重复的优点,故在腰椎手术模拟中已经得到了非常普遍的应用,并为植入器械的设计评估提供了有效的指导。本文归纳近年来国内外腰椎手术模拟中FEM的研究进展,重点阐述FEM在腰椎椎间融合术和人工腰椎间盘置换术的应用现状;总结最新的研究要点和发展趋势,并展望该领域的未来前景。FEM在腰椎个性化手术模拟、弹性内固定性能评估和新型术式效果预测等方面具有广泛的发展前景。通过对FEM在腰椎手术生物力学研究中的应用进展进行回顾和展望,可为临床腰椎手术的术式选择和植入器械的性能评估提供参考和指导。

## 1 FEM在腰椎手术生物力学研究中的应用

随着有限元精确建模技术和临床外科手术方法的不断进步,目前FEM在腰椎手术模拟领域已经得到了广泛的应用。腰椎手术模拟首先需要建立可靠的有限元模型,然后在正常腰椎有限元模型的基础上实现不同手术方案的仿真研究。随着医学图像处理软件的进步,目前的腰椎有限元模型已经做到了相当的逼真和精确。

### 1.1 腰椎椎间融合术

**1.1.1 椎间融合术** 治疗腰椎间盘退变或损伤,传统的临床术式为椎间融合术,也曾被称为治疗腰背痛的“金标准”。椎间融合术通常采用后路的椎弓根钉系统,也可以辅以椎间融合器,使得病变节段不再活动。相比传统ALIF,PLIF采用后路入路方式,其手术难度和风险相对较小,TLIF采用内固定物和椎弓根螺钉也可以获得令人满意的腰椎稳定性<sup>[8-9]</sup>。因此,目前针对PLIF和TLIF的研究较多,特别是针对TLIF稳定性和内置融合器位置等方面的研究比较深入。Huang等<sup>[10]</sup>采用L1~S1节段有限模型对于PLIF进行有限元分析,结果表明,在减压时保留后植入物可以有效防止术后的邻近节段退化。张文等<sup>[11]</sup>采用FEM对于单侧TLIF和双侧TLIF进行对比分析,结果证明单侧TLIF可以令患者获得满意的稳定性。Kim等<sup>[12]</sup>和Ambati等<sup>[13]</sup>的研究也表明,单侧TLIF不仅保持了手术节段的稳定性,同时可以减小相邻节段小关节的应力,进一步验证了单侧TLIF的可行性。颜文涛等<sup>[14-15]</sup>采用

FEM对TLIF中内植物的组合方式进行系统研究,首先建立单侧或双侧椎弓根螺钉内固定辅加单枚或两枚融合器的术式模型,通过生物力学比较发现,单侧TLIF辅加单枚融合器可以满足临床术式的稳定效果,而且在手术时间和经济成本方面也更优;对单侧TLIF时单枚融合器不同植入位置生物力学特性的研究结果表明,融合器植入位置位于入路侧附近时可以获得相对更优的术式效果。为了更加清晰地描述TLIF的不同术式中植入物的组合方式,现将5种组合方式整理汇总,其中组合方式4(入路侧椎弓根螺钉内固定,入路侧植入单枚融合器)为更优(见表1)。

表1 TLIF中内植物的不同组合方式

Tab. 1 Different combinations of the implants in TLIF

组合方式	椎弓根螺钉	融合器
1	双侧固定	1枚斜行植入
2	入路侧固定	2枚平行植入
3	入路侧固定	1枚斜行植入
4	入路侧固定	1枚入路侧植入
5	入路侧固定	1枚入路侧对侧植入

此外,Zhao等<sup>[16]</sup>采用FEM对微创TLIF术中内植物的组合方式进行仿真研究,结果显示,在微创TLIF中单侧椎弓根螺钉辅加单枚融合器可以满足手术节段的稳定性要求。综合上述国内外关于TLIF的研究结果,考虑手术时间、出血量和经济成本等多个因素,可以认为单侧椎弓根螺钉辅加单枚融合器的单侧TLIF是临床稳定性较好的椎间融合术式。

**1.1.2 内固定器** 针对腰椎椎间融合术的生物力学研究,FEM不仅可以提供有效的临床手术模拟,而且也广泛地应用于内植物的结构设计和材料改进等方面。随着生医工程和新型材料的不断发展,在传统腰椎内植物的基础上,出现了一系列新型椎弓根螺钉系统和椎间融合器。Oktenoglu等<sup>[17]</sup>提出了一种新型的铰链式椎弓根螺钉系统,利用FEM对比研究全刚性和半刚性系统,结果显示,在各种工况下这种新型铰链式椎弓根螺钉的生物力学效果更佳。Tsai等<sup>[18]</sup>提出了一种适用于PLIF的多孔增强型椎间融合器,采用FEM和力学实验方法将6种不同结构新型融合器与传统实体融合器进行对比

分析,结果表明,通过优化设计的融合器在抵抗沉降的性能方面明显优于传统结构的融合器。Uribe等<sup>[19]</sup>针对腰椎变形后的前凸角度减小,采用有限元分析不同参数的前倾角融合器对脊柱功能重建的影响,结果显示,采用合适的前倾角融合器可以更好地实现脊柱功能重建。Li等<sup>[20]</sup>提出一种新型的用于微创椎间融合术的椎弓根钉板系统,采用L3~S1节段有限元模型进行验证分析,结果显示,新型椎弓根钉板系统在增强椎间融合术稳定性方面与传统椎弓根钉棒系统具有相仿的效果。此外,余伟波等<sup>[21]</sup>针对后路内固定的多种不同方式进行对比研究,有限元分析结果显示,增加横连的内固定组可以获得相对更优的效果。

上述针对FEM在腰椎椎间融合术中的应用研究,主要研究方向为各种术式方法的对比分析和内固定物的设计评价。通过FEM进行椎间融合术的手术模拟,可以为不同术式的效果预测和内固定物的优化设计提供有效的理论指导。

## 1.2 腰椎人工椎间盘置换术

**1.2.1 人工椎间盘置换术** 腰椎间盘退变疾病施行腰椎椎间融合术后,会使得手术节段丧失ROM,进而引起邻近节段的退变。随着人工椎间盘开发设计和临床手术技术的不断进步,腰椎非融合术得到了长足的发展<sup>[22]</sup>。人工腰椎间盘置换术通常采用前路方式切除发生病变的髓核和椎间盘,并植入人工假体以维持手术节段ROM。Francisco等<sup>[23]</sup>提出一种用于TDR手术的可以实现约束功能选择的椎间盘假体,然后将其植入腰椎活动节段,并采用FEM进行生物力学比较试验;结果表明,选择约束功能时椎间盘假体比球窝状假体更接近于正常生理条件,选择无约束功能时椎间盘假体则更有利于降低韧带及小关节的应力。Shankar等<sup>[24]</sup>采用FEM评估TDR手术中径向间隙对于陶瓷涂层的影响,依据国际标准组织(international standards organization, ISO)18192标准进行了1000万次的循环加载实验;结果显示,采用0.05mm的径向间隙时产生的体积磨损相对较小,从而得出TDR手术中较小的径向间隙有益于减小磨损。Choi等<sup>[25]</sup>为研究球窝状人工腰椎间盘不同曲率对TDR手术效果的影响,采用4种曲率的人工腰椎间盘假体分别进行TDR手术模拟;结果显示,球窝状人工假体的几何形状

对手术节段 ROM、小关节应力和松质骨应力都会产生影响,而且 ROM 和小关节接触应力对球窝状假体的几何结构较为敏感,故认为球窝状人工假体对 TDR 的手术效果可能并不理想。综合上述研究可知,TDR 可能增加腰椎 ROM 并对小关节接触应力产生影响,在有限元分析过程中应着重关注 TDR 手术前后腰椎 ROM 的变化范围,避免腰椎 ROM 过大而导致腰椎失稳。

**1.2.2 人工腰椎间盘** 人工腰椎间盘假体的开发过程通常需要借助 FEM 等体外辅助手段来评估其合理性和安全性,然后才能进入临床实验阶段。表 2 所示为 3 款典型的人工腰椎间盘的结构特点,按照限制类型通常可以分为限制型和非限制型两大类,按照材料类型通常可以分为金属-金属组合和金属-超高分子量聚乙烯(ultra-high molecular weight polyethylene, UHMWPE)组合,而人工腰椎间盘设计的重点在于旋转中心(center of rotation, COR)的位置优化和髓核材料的选择<sup>[26]</sup>。纵观国内外的研究现状,FEM 在人工腰椎间盘假体的结构优化、材料改进和仿生设计等方面均取得了较大的进展。张兰凤等<sup>[27]</sup>在人工椎间盘假体的上下盖板内嵌入硅胶人工髓核,通过有限元分析这种新型人工椎间盘假体的生物力学特性;结果表明,假体的变形运动基本可以实现椎间盘正常 ROM,同时也降低了人工假体植入后的摩擦磨损问题。Noailly 等<sup>[28]</sup>提出一种新型的人工椎间盘假体,该假体包含有仿生复合材料组成的人工髓核;有限元分析结果显示,采用仿生复合材料的新型人工椎间盘比传统的球窝状假体具有更好的临床优势。尽管人工腰椎间盘假体的生物力学性能良好,但是人工椎间盘假体的结构和材料仍然需要进一步改进。此外,目前众多的人工腰椎间盘产品基本都来源于欧美国家,国内的相关研究起步较晚,而且很少能够达到临床应用的水平<sup>[6]</sup>。随着腰椎间盘相关参数测量的深入进行以及新型材料和生物科学的不断进步,国产人工腰椎间盘的临床化也将加快脚步。

综上所述,关于 FEM 在腰椎人工椎间盘置换术中的应用研究,主要研究方向为不同人工假体在置换术后的效果评估和人工腰椎间盘的优化设计。通过 FEM 进行人工椎间盘置换术的手术模拟,可以为腰椎手术治疗提供一种传统椎间融合术之外新

的备选方案,同时也可可为人工腰椎间盘的结构设计和材料改进提供重要的理论指导。

表 2 典型人工腰椎间盘的结构特点

Tab.2 Structure characteristics of the typical artificial lumbar discs

结构特点	ProDisc-L	Maverick	Charite
限制类型	限制型	限制型	半限制型
材料类型	金属-UHMWPE	金属-金属	金属-UHMWPE
COR 上下位置	下椎体	下椎体	假体内
COR 前后位置	假体中心	假体后部	假体中心

### 1.3 应用小结

基于 FEM 的腰椎生物力学研究,首先需要建立正常腰椎有限元模型,然后将正常模型修改而成不同术式的有限元模型。目前主流的建模方式是:首先基于医学图像(如 X 光和 CT 等)可以排除腰椎疾患并进行高精度断层扫描,然后利用 CAD 或逆向工程软件重建几何模型,最后采用 FE 软件设置材料属性和划分网格单元,从而建立完整的有限元模型<sup>[29]</sup>。由于 FEM 具有力学参数测试全面、仿真模型可以多次重复利用和计算高效的优势,其作为一种有效工具正好弥补了传统力学实验的不足,故 FEM 在腰椎椎间融合术与人工椎间盘置换术的仿真模拟方面都取得了很大的进步。

针对椎间融合术与人工椎间盘置换术的效果评估,需要结合 FEM 仿真结果与术后随访数据综合分析。有限元分析结果表明,椎间融合术中手术节段 ROM 的丧失或减小,可能导致或加速邻近节段腰椎间盘的退变;而人工椎间盘置换术可以更好保留手术节段运动功能,故腰椎整体的生物力学性能更加接近自然状态<sup>[6-7]</sup>。Wei 等<sup>[30]</sup>和 Nie 等<sup>[31]</sup>分别进行腰椎椎间融合术与人工椎间盘置换术的对比研究,两年随访结果显示,人工椎间盘置换术与椎间融合术具有几乎相同的安全性和功效;由于人工椎间盘置换术在运动保留和减少再手术率方面具有一定优势,建议可以将 TDR 广泛应用于腰椎间盘退变疾病的治疗中。Ding 等<sup>[32]</sup>对比分析椎间融合术与人工椎间盘置换术发现,人工椎间盘置换术虽然短期效果至少等同于椎间融合术,但考虑到长期的可能并发症,建议外科医生在大规模实施人工椎间盘置换术时应该采取谨慎态度。根据典型器械豁免实验结果,短期随访显示人工椎间盘置换术

明显优于椎间融合术,但是长期随访显示人工椎间盘置换术与椎间融合术无显著性差异,可见腰椎置换术还不能完全替代腰椎椎间融合术<sup>[33-34]</sup>。图1所示为两种术式主要优缺点的对比结果。

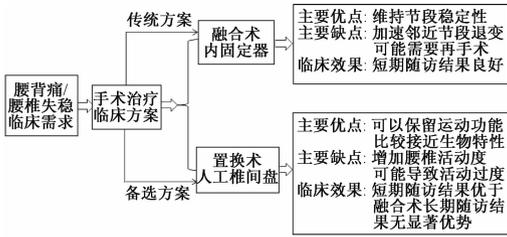


图1 腰椎椎间融合术与人工椎间盘置换术的对比研究结果

Fig.1 Comparison of research results about the lumbar fusion and replacement

随着有限元建模技术的更加精确和完善,针对不同手术的模拟结果也与临床实验结果更加接近。在上述几种腰椎手术基础上,通过FEM可以模拟并衍生出更多的新型术式,有望为腰椎疾病问题提供更多的治疗选择。归纳FEM在人体腰椎手术中的应用进展,可以得知其研究重点主要集中于手术方案的优化选择、植入器械的性能评价和临床手术的效果预测。

## 2 FEM在腰椎手术生物力学中的应用展望

随着有限元分析仿真软件的发展,医学图像处理技术的进步,交叉学科和新型材料的广泛应用,在腰椎手术临床需求的驱动下,FEM在腰椎手术模拟领域的以下几个方面具有广泛而深入的发展前景。

(1) 腰椎个性化手术模拟。有限元分析结果的可靠性主要取决于精确的建模手段,特别是针对不同腰椎手术的特征性建模。由于不同患者之间存在个体差异,而临床普遍采用标准尺寸的人工假体产品,如何选择合适的尺寸型号问题不容忽视。此外,目前已经临床化的人工假体多数来源于欧美发达国家,现有的假体型号规格不一定适合国人的腰椎尺寸和形态。伴随着国人腰椎参数测量工作的加速进行,针对不同腰椎患者进行定制式植入器械的快速开发、手术工具的个性化设计和手术方案的个性化模拟,将是未来有限元模拟仿真的发展方向之一。

(2) 弹性内固定性能评估。近年来由于临床

医生和研究学者对于“应力遮挡”问题的关注,针对各种弹性内固定器械的研究逐渐增多。弹性内固定器械可以在保持脊柱稳定性的前提下使得载荷分享,从而达到减小“应力遮挡”的效果。典型的弹性内固定器械包括Dynesys、K-ROD、Cosmic和“U”型内固定器等多种形式,故FEM可以为弹性内固定器的优化设计及其手术应用提供生物力学指导。

(3) 新型术式的效果预测。针对腰背痛或腰椎失稳等临床腰椎疾病,目前比较通用的治疗方式即腰椎椎间融合术和人工腰椎间盘置换术。随着医学图像技术和手术方式的迅速进步,FEM正逐步应用于微创TLIF、腰椎髓核置换、腰椎混合术等多种新型术式。此外,针对新型术式的效果评估、术后指导和手术翻修等问题的综合模拟和系统仿真,将会是有限元应用研究的另一重要方向。

## 3 结语

作为腰椎生物力学研究的重要方法,FEM具有高效的仿真计算功能,目前已经被广泛应用于各种腰椎手术模拟中,而且成为植入器械性能评价的一个重要工具。FEM在术前的方案选择和术后的效果评估等方面均取得了很快的发展。随着医学图像技术的不断进步,有限元模型将更加逼真精确,而FEM的模拟仿真结果也将更加真实可靠。纵观当前FEM在腰椎手术模拟中的研究现状,FEM将会在腰椎个性化手术模拟、植入器械性能评估、临床手术效果预测等方向得到大力发展。FEM已经成为腰椎手术模拟和不同术式对比的重要工具,将会在未来的腰椎手术应用研究中发挥举足轻重的作用。当然,FEM毕竟是一种数值模拟手段,多数研究都采取了不同程度的线性简化,而且不能完全模拟人体复杂而变化的真实环境,故需要经过体外实验验证,并与临床试验和术后随访相结合,才能为腰椎疾病的产生机制、诊断方法和手术治疗等提供更加准确可靠的理论依据。

## 参考文献:

- [1] HOY D, BAIN C, WILLIAMS G, *et al*. A systematic review of the global prevalence of low back pain [J]. *Arthritis Rheumatism*, 2012, 64(6): 2028-2037.

- [ 2 ] 柯昌保, 廖振华, 刘伟强. 人工腰椎间盘研究进展[J]. 国际骨科学杂志, 2014, 35(6): 371-373.
- [ 3 ] ITZ CJ, GEURTS JW, KLEEF MV, *et al.* Clinical course of non-specific low back pain: A systematic review of prospective cohort studies set in primary care [J]. *Eur J Pain*, 2013, 17(1): 5-15.
- [ 4 ] ZHANG Q, YUAN Z, ZHOU M, *et al.* A comparison of posterior lumbar interbody fusion and transforaminal lumbar interbody fusion: A literature review and meta-analysis [J]. *BMC Musculoskel Dis*, 2014, 15(1): 367.
- [ 5 ] TANG SJ. Comparison of posterior versus transforaminal lumbar interbody fusion using finite element analysis. Influence on adjacent segmental degeneration [J]. *Saudi Med J*, 2015, 36 (8): 993-996.
- [ 6 ] 董可欣, 马德春, 李秋菊, 等. 人工腰椎间盘假体设计原理研究及未来趋势发展[J]. 中国组织工程研究, 2014, 18 (26): 5254-4259.
- [ 7 ] SIEPE CJ, HEIDER F, WIECHERT K, *et al.* Mid- to long-term results of total lumbar disc replacement: A prospective analysis with 5- to 10-year follow-up [J]. *Spine J*, 2014, 14(8): 1417-1431.
- [ 8 ] 张良. PLIF 与 TLIF 对腰椎稳定性影响的有限元分析[D]. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2016.
- [ 9 ] DIVYA V, AMBATI, MS, EDWARD K, *et al.* pedicle screw fixation provides superior biomechanical stability in transforaminal lumbar interbody fusion: A finite element study [J]. *Spine J*, 2015, 15(8): 1812-1822.
- [10] HUANG YP, DU CF, CHENG CK, *et al.* Preserving posterior complex can prevent adjacent segment disease following posterior lumbar interbody fusion surgeries: A finite element analysis [J]. *PLoS ONE*, 2016, 11 (11): e0166452.
- [11] 张文, 王兰, 施勤, 等. 腰椎行椎间孔入路椎间融合术固定的有限元分析[J]. 医用生物力学, 2014, 29(5): 405-410. ZHANG W, WANG L, SHI Q, *et al.* Finite element analysis on transforaminal lumbar interbody fusion treatment [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(5): 405-410.
- [12] 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.
- [13] AMBATI DV, WRIGHT EK, LEHMAN RA, *et al.* Bilateral pedicle screw fixation provides superior biomechanical stability in transforaminal lumbar interbody fusion: A finite element study [J]. *Spine J*, 2015, 15(8): 1812-1822.
- [14] 颜文涛, 赵改平, 方新果, 等. 经椎间孔腰椎椎间融合术式模型的生物力学研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2015, 32 (1): 67-72.
- [15] 颜文涛. 经椎间孔腰椎椎间融合术生物力学特性[D]. 上海: 上海理工大学硕士学位论文, 2014.
- [16] ZHAO C, WANG X, CHEN C, *et al.* Finite element analysis of minimal invasive transforaminal lumbar interbody fusion [J]. *Cell Biochem Biophys*, 2014, 70(1): 609-613.
- [17] OKTENOGU 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.
- [18] TSAI PI, HSU CC, CHEN SY, *et al.* Biomechanical investigation into the structural design of porous additive manufactured cages using numerical and experimental approaches [J]. *Comput Biol Med*, 2016, 76: 14-23.
- [19] URIBE J, HARRIS J, BECKMAN J, *et al.* Finite element analysis of lordosis restoration with anterior longitudinal ligament release and lateral hyperlordotic cage placement [J]. *Eur Spine J*, 2015, 24(Suppl 3): 420-426.
- [20] LI J, SHANG J, ZHOU Y, *et al.* Finite element analysis of a new pedicle screw-plate system for minimally invasive transforaminal lumbar interbody fusion [J]. *PLoS ONE*, 2015, 10(12): e0144637.
- [21] 余伟波, 梁德, 叶林强, 等. 3 种不同后路内固定方式及其横连治疗胸腰段骨折的力学性能比较[J]. 医用生物力学, 2016, 31(2): 142-147. YU WB, LIANG D, YE LQ, *et al.* Comparison of biomechanical properties by different posterior fixation methods with or without crosslink for fixing thoracolumbar fractures [J]. *J Med Biomech*, 2016, 31(2): 142-147.
- [22] 陈小龙, 海涌, 关立, 等. 有限元分析在腰椎人工椎间盘生物力学中的应用[J]. 中国骨与关节杂志, 2015, 4(4): 327-331.
- [23] FRANCISCO GV, FRANCISCO EJ, ANA PB, *et al.* The flexion-extension response of a novel lumbar intervertebral disc prosthesis: A finite element study [J]. *Mech Mach Theory*, 2014, 73(2): 273-281.
- [24] SHANKAR S, KESAVAN D. Wear in ceramic on ceramic type lumbar total disc replacement: Effect of radial clearance [J]. *Biomed Mater Eng*, 2015, 26(1-2): 89-96.
- [25] CHOI J, SHIN DA, KIM S. Biomechanical effects of the geometry of ball-and-socket artificial disc on lumbar spine: A finite element study [J]. *Spine*, 2017, 42 (6): E332-E339.
- [26] DIANGELO DJ, FOLEYA KT. MORROW BP, *et al.* *In vitro* testing of lumbar disc arthroplasty devices [J]. *Open Spine*, 2014, 6(1): 9-25.
- [27] 张兰凤, 董黎敏, 王永清, 等. 新型人工腰椎间盘置换的三维有限元模型[J]. 中国组织工程研究, 2013, 17(30): 5477-5482.
- [28] NOAILLY J, AMBROSIO L, ELIZABETH TK, *et al.* In sili-

- co evaluation of a new composite disc substitute with a L3-L5 lumbar spine finite element model [J]. *Eur Spine J*, 2012, 21(Suppl 5): S675-687.
- [29] 张振军, 李阳, 廖振华, 等. 有限元法在腰椎生物力学应用中的研究进展和展望 [J]. *生物医学工程学杂志*, 2016, 33(6): 1196-1202.
- [30] WEI JB, SONG YM, SUN L, *et al.* Comparison of artificial total disc replacement versus fusion for lumbar degenerative disc disease: A meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Int Orthop*, 2013, 37(7): 1315-1325.
- [31] NIE HF, CHEN G, WANG XD, *et al.* Comparison of total disc replacement with lumbar fusion: A meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *J Coll Phys Surg Pak*, 2015, 25(1): 60-67.
- [32] DING F, JIA ZW, ZHAO ZG, *et al.* Total disc replacement versus fusion for lumbar degenerative disc disease: A systematic review of overlapping meta-analyses [J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(3): 806-815.
- [33] 白文媛, 顾洪生, 廖振华, 等. 人工腰椎间盘置换的临床应用: 现状与未来 [J]. *中国组织工程研究*, 2013, 17(35): 6321-6326.
- [34] ZHANG ZJ, SUN YT, LI Y, *et al.* Recent advances in finite element applications in artificial lumbar disc replacement [J]. *J Biomed Sci Eng*, 2016, 9(10B): 1-8.

## 《医用生物力学》2015 年度“最高被引论文”结果公示

为鼓励作者将创新性、高质量的学术论文发表在《医用生物力学》杂志上,促进学术交流,提高学术水平,本刊从2012年起开展了《医用生物力学》优秀论文评选活动。2017年12月底,本刊编辑部委托中国科学院上海科技查新咨询中心对本刊2015年发表的81篇论著文章进行检索,检索的数据库为中国学术文献网络出版总库(CNKI)、中国科学引文库(CSCD)、万方数据知识服务平台、Science Citation Index Expanded (SCI-E)、Conference Proceedings Citation Index-Science (CPCI-S)。本刊编委会评审专家小组根据检索报告出具的单篇论文被引频次排序,通过综合评定,评选出6篇优秀论文。现对拟获奖论文进行公示。公示无异议后,编辑部将对6篇论文予以表彰,授予“《医用生物力学》2015年度最高被引论文奖”,获奖作者将获得编辑部颁发的证书及奖金1500元。

若有异议,请在公示之日起15日内向本刊编辑部反映。欢迎本刊广大读者、作者就上述论文的任何问题提出反馈意见。电话:(021)23315397,电子邮箱:shengwulixue@163.com

本刊编辑部  
2018年01月31日

## 附《医用生物力学》2015 年度“最高被引论文奖”名单 (\* 为通讯作者)

- |  |   |
|--|---|
| 题名:行走过程中不同背包负重方式对人体生理参数的影响<br>作者:赵美雅,倪义坤,田山,唐桥虹,王丽珍*,樊瑜波<br>单位:北京航空航天大学<br>来源:医用生物力学,2015,30(1):8-13                   | 题名:穿不同鞋与裸足对羽毛球蹬地动作下肢及跖趾关节运动协调特征的影响<br>作者:傅维杰,魏勇,刘宇*<br>单位:上海体育学院<br>来源:医用生物力学,2015,30(2):159-166  |
| 题名:力诱导循环血流中白细胞整合素 LFA-1 的激活机制<br>作者:童洁,刘黎,吴建华,方颖*<br>单位:华南理工大学<br>来源:医用生物力学,2015,30(1):14-20                           | 题名:儿童头部有限元模型的构建及验证<br>作者:崔世海*,陈越,李海岩,曹德晨,阮世捷<br>单位:天津科技大学<br>来源:医用生物力学,2015,30(5):452-457         |
| 题名:颞下颌关节骨骼肌肉系统三维有限元模型的构建<br>作者:刘梦超,吴信雷,林崇翔,潘璐璐,陈龙,朱形好,方一鸣*,吴立军<br>单位:天津医院 温州医科大学附属第一医院<br>来源:医用生物力学,2015,30(2):118-124 | 题名:从生物力学角度评价单髁置换术与腓骨截骨术<br>作者:祁昕征,张家铭,谭传明,张英泽,郑诚功*<br>单位:北京航空航天大学<br>来源:医用生物力学,2015,30(6):479-487 |