

# 人工腰椎间盘置换术与椎间融合术的生物力学仿真

刘 闯<sup>1</sup>, 刘 齐<sup>2</sup>, 颜云辉<sup>1</sup>  
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国医科大学 附属盛京医院, 辽宁 沈阳 110004)

**摘 要:** 利用有限元法评估人工腰椎间盘置换术与椎间融合术的生物力学效果. 基于 CT 图像数据建立腰椎 L2 ~ L5 节段有限元模型, 并在此基础上建立人工腰椎间盘置换和椎间融合 2 种手术模型. 对有限元模型施加模拟生理载荷, 计算两种手术模型各节段椎间活动度和小关节接触应力. 仿真结果表明: 相比椎间融合术, 人工腰椎间盘置换术在手术节段产生了明显的运动保留功能, 但置换节段在后伸和侧弯工况下活动度比正常腰椎增大 40.9% 和 43.1%, 易引起手术节段的轻度失稳; 人工间盘置换术改善了上下邻近节段小关节的受力状态, 但置换节段在扭转工况下会引发较高的小关节接触应力.

**关 键 词:** 人工腰椎间盘置换; 椎间融合; 生物力学; 有限元; 退变

**中图分类号:** TG 156      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)10-1517-04

## Biomechanical Simulation of Artificial Lumbar Intervertebral Disc Replacement and Intervertebral Fusion

LIU Chuang<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>2</sup>, YAN Yun-hui<sup>1</sup>  
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. Shengjing Hospital, China Medical University, Shenyang 110004, China. Corresponding author: LIU Chuang, E-mail: l\_c68@163.com)

**Abstract:** The finite element method was used to evaluate the biomechanical effects of artificial lumbar intervertebral disc replacement and intervertebral fusion. Based on the CT image data, a finite element model of lumbar segments L2 ~ L5 was established, and two kinds of surgical models of artificial lumbar disc replacement and intervertebral fusion were established. The simulated physiological load was applied to the finite element model, and the intervertebral activity and facet joint stress of each segment of the two surgical models were calculated. The simulation results showed that artificial lumbar disc replacement has a significant motion preservation in the surgical segment compared with intervertebral fusion, but the range of motion (ROM) were 40.9% and 43.1% higher than that of the normal lumbar in extension and lateral bending, which may cause mild instability of the surgical segment. Artificial disc replacement improves the stress state of the small joints of the upper and lower adjacent segments, but the replacement segment will induce higher contact pressure of the small joints under torsional conditions.

**Key words:** artificial lumbar disc replacement; intervertebral fusion; biomechanics; finite element; degeneration

腰椎退变性疾病常可引起下腰疼痛, 多数学者认为始发因素是椎间盘退变. 椎间融合术和人工全椎间盘置换术 (TDR) 是目前治疗椎间盘源性腰椎疾病的重要方法<sup>[1]</sup>. 椎间融合术通过植入内固定系统限制病变节段过度运动, 达到维持脊柱解剖消除疼痛的目的, 临床疗效被认为是脊柱手术的金标准. 然而, 内固定系统的介入使原脊柱结构、生理功能及椎间应力传导方式发生改变, 这些异常改变将加速邻近节段椎间盘退行性变化, 从而导致新病变<sup>[2]</sup>. 人工全椎间盘置换术通过切除椎间盘植入人工假体, 其在彻底减轻神经根硬膜囊压迫、消除疼痛的同时, 能够在一定程度

上保留腰椎原有的生物力学状态,因此疗效被越来越多的脊柱外科医生所认可<sup>[3]</sup>. 由于患者的个体化差异、医生的操作手法及术后康复环境的不同,关于人工腰椎间盘置换术的随访研究文献报告差别很大. 有报告显示人工椎间盘置换术与椎间融合术在术后两年内具有几乎相同的安全性和疗效<sup>[4]</sup>,但人工腰椎间盘置换术运动保留的优势和远期并发症情况无法定论<sup>[5]</sup>. 另有学者表示在置入椎间盘假体后,小关节及邻近节段应力比椎间融合后明显下降,似乎可以减缓小关节及邻近节段椎间盘退行性病变的进程<sup>[6]</sup>. 针对这个问题,本文用数值仿真技术对人工椎间盘置换术与椎间融合术进行生物力学分析,为两种术式的临床应用提供理论依据.

# 1 椎间融合术和人工间盘置换术有限元模型的建立

## 1.1 腰椎有限元建模及植入体结构简化

基于中国医科大学附属盛京医院提供的一名健康志愿者(男,25岁,体重70 kg,身高175 cm)的全脊椎 CT 图像数据,应用医学图像、CAD 及有限元前处理技术完成正常腰椎 L2~L5 节段有限元模型的建立并进行有效性验证. 通过改变椎间盘材料属性的方法得到退变腰椎模型<sup>[7]</sup>. 椎间融合术采用临床应用最广泛的椎弓根钉棒内固定系统,人工腰椎间盘选用经美国 FDA 批准及临床累计病例数达到5 000余例的 ProDisc-L 半限制型假体. 为了降低次要因素对结果的影响,文中对椎弓根钉棒系统和人工间盘假体分别进行了细节特征简化,忽略了椎弓根螺钉的螺纹和钉座附属结构,去掉了人工间盘假体上下盖板与椎体固定连接的背刺结构及假体四周的孔隙等细节特征. 假体高度设置为7 mm 以符合腰椎有限元模型的结构,球窝曲率半径为26 mm. 按照临床常规方式对 L3~L4 节段椎体分别进行椎间融合术和人工椎间盘置换术,建立的两种手术模型如图1所示,有限元模型的材料属性参数见表1<sup>[7-8]</sup>.

## 1.2 接触及边界条件

对于椎间融合模型,螺钉没入骨质部分设置嵌入,螺钉与连接棒设置绑定约束. 对于人工腰椎间盘置换模型,假体金属终板的上端面设置与 L3 椎体底面绑定约束,下端面设置与 L4 椎体顶面绑定约束,用来模拟人工间盘与上、下椎体的融合状态;超高分子量聚乙烯髓核固定在下终板上,与上终板设置摩擦接触,摩擦系数为0.07,用来模

拟人工间盘的半限制性动态机制. 两种模型椎体、终板和椎间盘之间均为绑定接触,小关节突之间为非线性摩擦接触,摩擦系数设为0.02. 参考前人对腰椎进行的实验和仿真生物力学研究,本文对 L5 椎体底面所有节点完全约束,在 L2 椎体顶面选择一个控制点,设置该控制点与 L2 顶面所有节点耦合约束,对该控制点施加一个方向垂直向下大小为280 N 的力来模拟人体上半身的躯体质量<sup>[9]</sup>,然后分别施加沿 X 轴、-X 轴、Y 轴和 Z 轴方向,大小为10 N·m 的弯矩模拟腰椎前屈、后伸、侧弯和扭转四种生理工况.

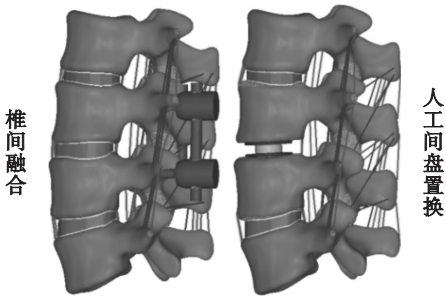


图 1 椎间融合术与人工间盘置换术有限元模型  
Fig. 1 Finite element models of intervertebral fusion and artificial disc replacement

表 1 腰椎有限元模型主要材料参数  
Table 1 Main material parameters of the lumbar finite element model

材料	弹性模量/MPa	泊松比	截面积/mm <sup>2</sup>
皮质骨	12 000	0.3	—
松质骨	100	0.2	—
后部结构	3 500	0.29	—
纤维环	正常 2.56	0.4	—
	退变 12.29	0.35	—
髓核	正常 1	0.499	—
	退变 1.66	0.4	—
前纵韧带	7.8(ε<0.12)	0.45	67.3
	20(ε>0.12)		
后纵韧带	10(ε<0.11)	0.45	20
	20(ε>0.11)		
黄韧带	15(ε<0.062)	0.45	40
	19.5(ε>0.062)		
棘上韧带	8(ε<0.20)	0.45	30
	15(ε>0.20)		
棘间韧带	10(ε<0.14)	0.45	40
	11.6(ε>0.14)		
横突间韧带	10(ε<0.18)	0.45	18
	58.7(ε>0.18)		
钛合金	11 000	0.33	—
金属终板	210 000	0.3	—
聚乙烯髓核	1 016	0.46	—

2 仿真结果

2.1 计算模型各节段椎间活动度 (ROM)

模型各节段椎间活动度计算结果如图 2 所示. 相比正常腰椎模型,人工间盘置换模型上下邻近节段(L2/3,L4/5)在 4 种工况下产生了几乎相

同的活动度;椎间融合模型在前屈、后伸和侧弯工况下上邻近节段活动度增加 18.2% ~ 34.4% ,在扭转工况下,上下邻近节段分别增加 26.7% 和 31.7% . 相比椎间融合模型,人工间盘置换模型在手术节段(L3/4)活动度明显增大,在后伸和侧弯两种工况下活动度已超出正常腰椎模型 40.9% 和 43.1% .

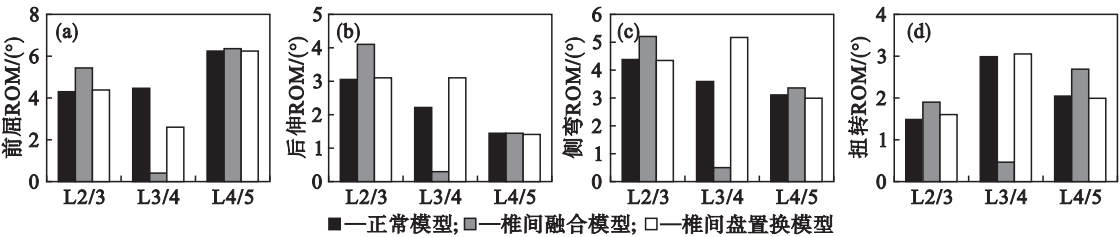


图 2 各节段椎间活动度对比  
Fig. 2 ROM comparison of each segment

2.2 计算模型各节段小关节接触应力

前屈工况小关节处于放松状态,在此不做讨论. 模型各节段小关节应力结果如图 3 所示. 在后伸、侧弯和扭转 3 种工况下,椎间盘置换模型上下邻近节段小关节接触应力与正常腰椎基本相同,

椎间融合模型上下邻近节段比正常腰椎模型增大 8.6% ~ 35.7% ;在手术节段,椎间盘置换模型在侧弯和扭转工况比正常腰椎模型分别增大 22.1% 和 125% ,椎间融合模型在三种工况下小关节接触应力几乎为零.

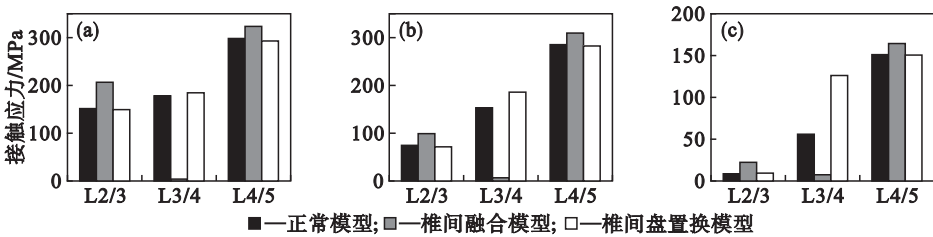


图 3 各节段小关节接触应力对比  
Fig. 3 Contact stress comparison of each segment  
(a) —后伸小关节; (b) —侧弯小关节; (c) —扭转小关节.

3 讨 论

针对椎间盘退变性疾病,人工腰椎间盘置换术是彻底解除患者病痛的一次性治疗方案. 其设计理念是保留手术节段的活动度,维持脊柱的生物力学状态在近似生理水平,以达到阻止或者延缓邻近节段退变的发生. 该技术在临床已应用多年,但相关文献报道其治疗效果相比椎间融合术并没有显著提高. 本文利用数值仿真技术对两种手术模型进行生物力学研究,不但能量化两种治疗方案的生物力学效果,更能基于理论数据对现有技术提出新的思路.

人工腰椎间盘的动态机制实现了手术节段的运动保留功能,在 4 种工况下活动度控制在 2.85° ~ 5.15° 之间,与 Wilke 等<sup>[10]</sup>尸体标本实验

数据对比如图 4 所示. 由于仿真研究对腰椎模型在结构和材料上的简化处理以及标本的个性化差异,本文的仿真结果比 Wilke 数据偏小,但具有相同的趋势. 手术节段运动功能的保留,消除了上下邻近节段活动度的补偿效应,人工腰椎间盘置换模型在上下邻近节段的活动度与正常腰椎模型基本相同,而椎间融合模型在上下邻近节段出现了明显的活动度补偿现象,这个结果表明脊柱的生物力学具有系统性. 相比正常腰椎模型,人工间盘置换模型在后伸和侧弯工况活动度分别增加 40.9% 和 43.1% ,表明半限制型假体 ProDisc - L 的植入在这两种工况下可能因活动度过大引发新的失稳. 针对这个问题,有专家建议脊柱退变重症患者可采用人工间盘置换联合椎间融合术共同治疗. 利用本文的计算结果,可根据发生失稳的工况和活动度增大幅值,在假体的对应部位设计阻尼

结构应对人工间盘置换活动度过大问题.

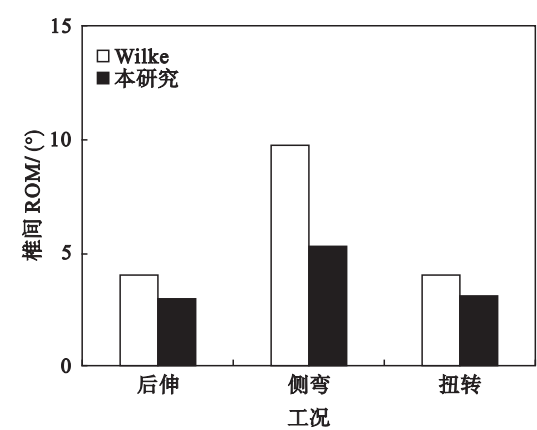


图 4 本研究与 Wilke 标本实验置换节段 ROM 对比  
Fig. 4 ROM of replacement segment in the current study and Wilke's experiments

椎间融合模型在上下邻近节段小关节接触应力比正常腰椎增大 8.6% ~ 35.7%, 在手术节段由于应力遮挡效应小关节接触应力几乎为零, 充分说明椎间融合术破坏了生理载荷在椎体间的正常传递, 长期的应力异常必然引起小关节退变. 人工腰椎间盘置换模型在上下邻近节段小关节接触应力与正常腰椎基本相同, 但是置换节段在侧弯和扭转工况小关节接触力都比正常腰椎大, 特别是在扭转工况增大幅值为 125%, 这与人工腰椎间盘上下金属终板与中间聚合物髓核的球窝状结构密切相关, 导致小关节在控制置换节段扭转活动中提供了主要阻尼作用. 研究结果表明人工间盘置换术的运动保留功能很好地改善了上下邻近节段小关节的受力状态, 但是假体的结构特征引起了置换节段小关节扭转接触应力过大, 可以考虑改进假体结构以增大上终板与髓核之间的旋转阻尼, 同时在临床应用中建议术后患者避免进行腰椎过度扭转.

4 结 论

1) 相比椎间融合术, 人工腰椎间盘置换术在手术节段产生了明显的运动保留功能, 但置换节

段在后伸和侧弯工况活动度比正常腰椎增大 40.9% 和 43.1%, 易引起手术节段的轻度失稳.

2) 人工间盘置换术改善了上下邻近节段小关节的受力状态, 但置换节段在扭转工况会引发较高的小关节接触应力.

参考文献:

[ 1 ] Sasso R C, Foulk D M, Hahn M. Prospective, randomized trial of metal-on-metal artificial lumbar disc replacement; initial results for treatment of discogenic pain [ J ]. *Spine*, 2008, 33 ( 2 ) : 123 – 131.

[ 2 ] Mccullough B J, Johnson G R, Martin B I, et al. Lumbar MR imaging and reporting epidemiology: do epidemiologic data in reports affect clinical management? [ J ]. *Radiology*, 2012, 262 ( 3 ) : 941 – 946.

[ 3 ] Zeegers W S, Bohnen L M L J, Laaper M, et al. Artificial disc replacement with the modular type SB Charité III; 2-year results in 50 prospectively studied patients [ J ]. *European Spine Journal*, 1999, 8 ( 3 ) : 210 – 217.

[ 4 ] Nie H, Chen G, Wang X, et al. Comparison of total disc replacement with lumbar fusion; a meta-analysis of randomized controlled trials [ J ]. *Journal of the College of Physicians and Surgeons-Pakistan; JCPSP*, 2015, 25 ( 1 ) : 60 – 67.

[ 5 ] Wu Y J, Zhu Y, Han X X, et al. A meta-analysis of artificial total disc replacement versus fusion for lumbar degenerative disc disease [ J ]. *European Spine Journal*, 2010, 19 ( 8 ) : 1250 – 1261.

[ 6 ] Tropiano P, Huang R C, Girardi F P, et al. Lumbar disc replacement: preliminary results with ProDisc II after a minimum follow-up period of 1 year [ J ]. *Journal of Spinal Disorders & Techniques*, 2003, 16 ( 4 ) : 362 – 368.

[ 7 ] Natarajan R N, Williams J R, Andersson G B. Recent advances in analytical modeling of lumbar disc degeneration [ J ]. *Spine*, 2004, 29 ( 23 ) : 2733 – 2741.

[ 8 ] Chuang W H, Lin S C, Chen S H, et al. Biomechanical effects of disc degeneration and hybrid fixation on the transition and adjacent lumbar segments [ J ]. *Spine*, 2012, 37 ( 24 ) : 1488 – 1497.

[ 9 ] Choi J, Shin D A, Kim S. Biomechanical effects of the geometry of ball-and-socket artificial disc on lumbar spine; a finite element study [ J ]. *Spine*, 2016, 41 ( 6 ) : 332 – 339.

[ 10 ] Wilke H J, Schmidt R, Richter M, et al. The role of prosthesis design on segmental biomechanics; semi-constrained versus unconstrained prostheses and anterior versus posterior centre of rotation [ J ]. *European Spine Journal*, 2012, 21 ( sup 5 ) : 577 – 584.