

文章编号: 1004-7220(2023)01-0045-07

# 颈椎连续三节段 Hybrid 手术与融合术的生物力学研究

周 维<sup>1</sup>, 张亚丽<sup>1\*</sup>, 戎 鑫<sup>2</sup>, 黄康康<sup>2</sup>, 张小刚<sup>1</sup>, 刘 浩<sup>2\*</sup>, 靳忠民<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031; 2. 四川大学华西医院 骨科, 成都 610041)

**摘要:**目的 比较颈椎连续三节段 Hybrid 手术[颈前路减压植骨融合(anterior cervical discectomy and fusion, ACDF)+人工颈椎间盘置换(cervical disc arthroplasty, CDA)]与三节段 ACDF 对颈椎生物力学的影响。方法 基于 CT 数据建立 C1~T1 颈胸椎有限元模型,通过植入 Prestige LP 和 Zero-P 假体模拟 3 种模型,包括两种 Hybrid 模型(AFA:C3~4、C5~6 节段植入 Prestige LP,C4~5 节段植入 Zero-P;FAF:C3~4、C5~6 节段植入 Zero-P,C4~5 节段植入 Prestige LP)和三节段 ACDF 模型(FFF)。比较各模型前屈、后伸、侧弯以及轴向旋转时相邻节段及整体活动范围(range of motion, ROM)以及相邻节段椎间盘内压力(intradiscal pressure, IDP)及小关节接触力(facet contact force, FCF)的变化。结果 AFA 模型相邻节段及整体 ROM 都更接近完整模型,FAF、FFF 模型相邻节段 ROM 最大增幅分别为 15.0% 和 23.4%。AFA、FAF、FFF 模型相邻节段最大 IDP 最大增幅分别为 19.0%、66.7%、147.6%, FCF 最大增幅分别为 17.4%、55.7%、80.1%。结论 研究结果为三节段 Hybrid 手术治疗连续三节段颈椎病提供生物力学基础。

**关键词:** Hybrid 手术; 颈前路减压植骨融合; 颈椎间盘置换; 三节段颈椎病

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.01.006

## Biomechanical Study on Contiguous Three-Level Cervical Hybrid Surgery and Anterior Cervical Discectomy and Fusion

ZHOU Wei<sup>1</sup>, ZHANG Yali<sup>1\*</sup>, RONG Xin<sup>2</sup>, HUANG Kangkang<sup>2</sup>, ZHANG Xiaogang<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>2\*</sup>, JIN Zhongmin<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Department of Orthopaedics, West China Hospital, Sichuan University, Chengdu 610041, China)

**Abstract: Objective** To compare the biomechanical effects of contiguous three-level cervical Hybrid surgery [anterior cervical discectomy and fusion (ACDF) + cervical disc arthroplasty (CDA)] and three-level ACDF. **Methods** The finite element model of C1-T1 cervical-thoracic spine was developed based on CT data. Three models were simulated by the implantation of Prestige LP and Zero-P prostheses, including two Hybrid models (AFA, Prestige LP implanted at C3-4 and C5-6 segments and Zero-P implanted at C4-5 segment; FAF, Zero-P implanted at C3-4 and C5-6 segments and Prestige LP implanted at C4-5 segment) and three-level ACDF model (FFF). The changes in range of motion (ROM) of adjacent levels during flexion, extension, lateral bending and axial rotation, the overall ROM, as well as the intradiscal pressure (IDP) and facet contact force (FCF) of adjacent levels were compared. **Results** The ROM in adjacent levels and the overall ROM of the AFA model were closer to the intact model, and the maximum increases in the ROM of the adjacent levels for the FAF and FFF models were 15.0% and 23.4%, respectively. For AFA, FAF and FFF models, the maximum increases in

收稿日期:2022-01-15; 修回日期:2022-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51905456,52035012)

通信作者:张亚丽,副教授,E-mail:zhangyali@swjtu.edu.cn;刘浩,教授,E-mail:liuhao6304@163.com

\*为共同通信作者

the maximum IDP of adjacent levels were 19.0%, 66.7%, 147.6%, and the maximum increases in FCF were 17.4%, 55.7%, 80.1%, respectively. **Conclusions** This study provides biomechanical basis for three-level cervical Hybrid surgery in treating patients with the contiguous three-level cervical degenerative disc disease.

**Key words:** Hybrid surgery; anterior cervical discectomy and fusion (ACDF); cervical disc arthroplasty (CDA); three-level cervical degenerative disc disease

作为临床常见疾病,颈椎病的手术治疗方法主要有颈前路减压植骨融合(anterior cervical discectomy and fusion, ACDF)和人工颈椎间盘置换(cervical disc arthroplasty, CDA)手术。Moon等<sup>[1]</sup>研究发现,220例患者中单节段颈椎病的患病率为45.5%,而三节段颈椎病的患病率为15.0%。三节段颈椎病的手术方式除了三节段ACDF、三节段CDA,还出现了ACDF和CDA相结合的Hybrid手术<sup>[2]</sup>。研究显示,三节段ACDF术后患者颈椎的运动显著减少<sup>[3]</sup>。此外,ACDF术后相邻节段运动范围(range of motion, ROM)、椎间盘内压力(intradiscal pressure, IDP)和小关节接触力(facet contact force, FCF)增加,可能加速相邻节段退变<sup>[4-5]</sup>。相较于ACDF,CDA能使颈椎产生接近正常的生理运动,降低相邻节段退变的风险<sup>[6-7]</sup>。但较大的技术难度和并发症的风险以及严格的适应症等使三节段CDA在三节段颈椎病的治疗中应用有限<sup>[2]</sup>。而Hybrid手术可以根据患者颈椎各节段退变的程度,对每个节段提供最合适的治疗,避免长节段融合,降低相邻节段退变的风险<sup>[8]</sup>。Ren等<sup>[2]</sup>研究认为,Hybrid手术与多节段ACDF具有相同的疗效,但保留运动的能力明显更优。因此,Hybrid手术可能是治疗三节段颈椎病的合适方法。

由于手术的复杂性以及缺乏生物力学证据,三节段Hybrid手术对相邻节段的影响优于三节段ACDF尚无理论证明。另外,三节段Hybrid手术有2F1A(包括FFA、FAF、AFF)和2A1F(包括FAA、AFA、AAF)形式,有关不同形式Hybrid手术对颈椎生物力学影响的研究鲜有报道。有限元方法凭借能预测结构内部应力应变场的独特优势,可用于比较不同Hybrid手术与三节段ACDF对颈椎生物力学的影响。Li等<sup>[9]</sup>比较FAA、AFA、AAF形式Hybrid手术对颈椎生物力学的影响,发现选择ROM较小的节段进行ACDF可能减少相邻节段的代偿运动。Xie等<sup>[10]</sup>比较FFA、FAF、AFF形式Hybrid手术

对颈椎生物力学的影响,发现FAF形式Hybrid手术具有更好的理论结果。但上述研究均未对比2A1F、2F1A形式Hybrid手术及三节段ACDF之间的生物力学差异。

本文建立C1~T1颈胸椎有限元模型,并在C3~6模拟AFA、FAF形式的Hybrid手术及三节段ACDF,比较各模型前屈、后伸、侧弯以及轴向旋转时相邻节段和整体ROM、相邻节段IDP及FCF的变化;从而研究不同形式Hybrid手术与三节段ACDF对颈椎生物力学影响的差异,为三节段颈椎病的治疗提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 模型建立

本模型数据来自1名30岁健康男性志愿者,身高170 cm,体重68 kg。将扫描得到的颈部CT数据导入Mimics 19.0,提取出STL格式的C1~T1椎体三维模型。再导入Geomagic Studio 13.0中进行网格医生、松弛、删除钉状物、精确曲面等处理,生成STP格式的实体模型。各节椎体由皮质骨和松质骨组成,皮质骨的平均厚度为1 mm。骨性终板上附着软骨终板,厚度为0.5 mm。椎间盘由髓核和纤维环组成,髓核体积约为椎间盘体积的43%,纤维环呈环形包裹髓核。髓核、纤维环、横韧带和小关节都在CATIA V5-6R 2017中生成,设置小关节面之间的间隙为0.6 mm。将生成模型导入HyperMesh 2019中划分网格,最后在ABAQUS 2018中赋予模型各部分材料属性、设置相互作用属性以及添加韧带。模型各部分的单元类型与材料属性如表1所示。韧带使用仅承受拉力的2节点非线性弹簧单元模拟,C1~2寰枢前膜、寰枢后膜和翼状韧带数分别为7、7和2,其余节段前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、关节囊韧带和棘间韧带数分别为5、5、7、16和4,弹簧附着点、力与长度变化曲线参考文献[11-13]。小关节面采用非线性面对面滑动接触,摩擦因数为

0.01<sup>[14]</sup>。棘突间、齿突与横韧带和枢椎间、钩椎关节间的接触都采用默认硬接触<sup>[12]</sup>。皮质骨与松质骨、椎间盘采用绑定约束,建立的 C1~T1 有限元模型如图 1 所示。

表 1 有限元模型的单元类型和材料属性

Tab. 1 Element types and material properties of finite element model

组织	单元类型	材料属性
皮质骨	C3D4	$E = 12 \text{ GPa}, \nu = 0.29$ <sup>[15]</sup>
松质骨	C3D4	$E = 450 \text{ MPa}, \nu = 0.29$ <sup>[15]</sup>
横韧带	S4R	$E = 20 \text{ MPa}, \nu = 0.3$ <sup>[15]</sup>
软骨终板	C3D8R	$E = 500 \text{ MPa}, \nu = 0.4$ <sup>[15]</sup>
髓核	C3D8R	$C_1 = 0.12 \text{ MPa}, C_2 = 0.03 \text{ MPa}$ $\nu = 0.495$ <sup>[16]</sup>
纤维环	C3D8R	$C_1 = 0.18 \text{ MPa}, C_2 = 0.045 \text{ MPa}$ $\nu = 0.45$ <sup>[16]</sup>
小关节软骨	C3D8R	$E = 10.4 \text{ MPa}, \nu = 0.4$ <sup>[14]</sup>
Prestige LP 终板	C3D4	$E = 110 \text{ GPa}, \nu = 0.3$ <sup>[17]</sup>
Zero-P 钛板	C3D4	$E = 110 \text{ GPa}, \nu = 0.3$ <sup>[17]</sup>
Zero-P 螺钉	C3D4	$E = 110 \text{ GPa}, \nu = 0.3$ <sup>[17]</sup>
PEEK 融合器	C3D4	$E = 3.6 \text{ GPa}, \nu = 0.3$ <sup>[17]</sup>

注:  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比,  $C_1, C_2$  为材料偏变形常数。

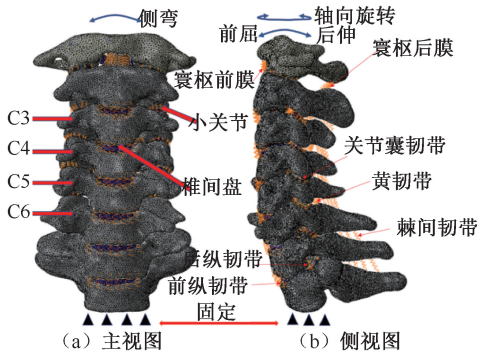


图 1 颈椎有限元模型

Fig. 1 Finite element model of cervical spine

(a) Front view, (b) Side view

本文选择 Prestige LP 椎间盘(Medtronic 公司, 美国)模拟 CDA, 选择 Zero-P 融合系统(Synthes 公司, 瑞士)模拟 ACDF。通过三维坐标仪扫描两种假体, 用所得数据在 CATIA V5-6R 2017 完成假体建模。再导入 HyperMesh 2019 中划分网格, 单元类型为 C3D4。选择 C3~6 作为手术节段, 模拟 Hybrid 手术及三节段 ACDF。去除手术节段的椎间盘和前纵韧带、后纵韧带等结构, 并将假体置于相应位置, 建立 AFA (C3~4、C5~6 模拟 CDA, C4~5 模拟 ACDF)、FAF (C3~4、C5~6 模拟 ACDF, C4~5 模拟

CDA) 和 FFF (C3~6 模拟 ACDF) 模型, 假体植入后的有限元模型如图 2 所示。Prestige LP 的球槽关节面设为面对面滑动接触, 摩擦因数为 0.1<sup>[5]</sup>。为了简化模型, 忽略螺钉的螺纹, 将椎骨与假体、螺钉都设为绑定约束。

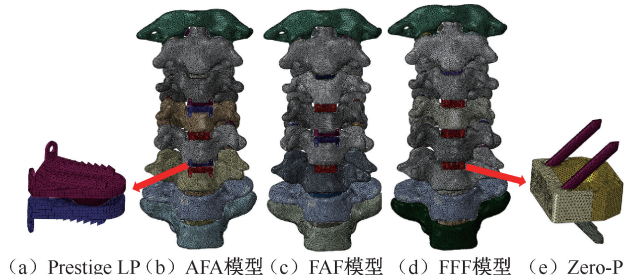


图 2 Hybrid、ACDF 及假体有限元模型

Fig. 2 Finite element model of Hybrid system, ACDF system and prostheses (a) Prestige LP, (b) AFA model, (c) FAF model, (d) FFF model, (e) Zero-P

## 1.2 模型加载

各模型的加载方式相同, 约束 T1 下端 6 个自由度, 在 C1 上小关节面上施加 50 N 随动载荷以及矢状面、冠状面、水平面上 1 N·m 力矩, 以实现颈椎的屈伸、侧弯以及轴向旋转运动。随动载荷的施加参考 Du 等<sup>[18]</sup>方法, 首先将 C1 旋转轴上参考点与 C1 上小关节面耦合, 其余各椎体终板的中间节点与终板表面耦合, 然后通过上述节点建立的连接单元将随动载荷施加到各节段。

## 1.3 模型验证

首先, 进行网格收敛性验证。结果表明, 单元总数分别为 741 376、589 982 和 515 988 的 C1~T1 有限元模型在后伸运动时, 整体 ROM 分别为 36.1°、35.8°和 35.1°。以单元总数为 589 982 的模型为参考, 增加和减少单元总数后, 模型的结果差异在 2% 以内。因此, 单元总数为 589 982 的模型能保证分析精度, 作为完整模型完成后续分析。

然后, 将各节段前屈、后伸运动 ROM 与 Panjabi 等<sup>[19]</sup>和 Liu 等<sup>[20]</sup>的体外实验结果, 屈伸、侧弯、轴向旋转运动 ROM 与 Ito 等<sup>[21]</sup>、Panjabi 等<sup>[22]</sup>的体外实验及 Zhang 等<sup>[15]</sup>的有限元结果进行对比。结果显示, 除 C1~2 轴向旋转运动 ROM 小于参考文献数据外, 本模型其余节段屈伸、侧弯与轴向旋转运动 ROM 都在参考范围以内(见图 3)。因此, 本文所建模型通过有效性验证。

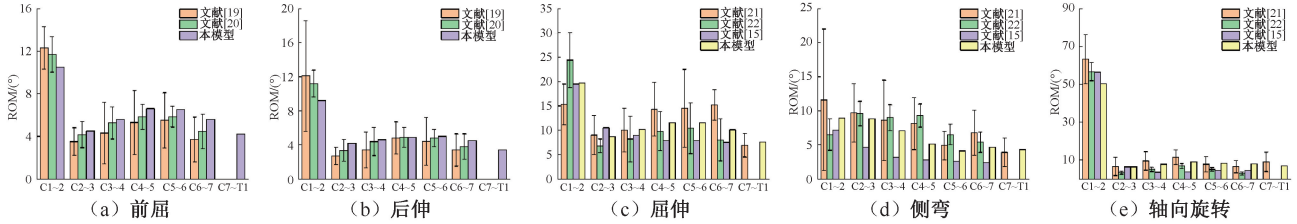


图 3 完整颈椎各节段 ROM 与文献数据对比

Fig. 3 Comparison of ROM in intact cervical spine and data reported in the literature (a) Flexion, (b) Extension, (c) Flexion and extension, (d) Lateral bending, (e) Axial rotation

## 2 结果

### 2.1 ROM

对比不同模型各运动工况下 ROM 发现,完整模型在前屈、后伸、侧弯和轴向旋转运动时整体 ROM 分别为 43.5°、35.8°、42.9°和 96.7°。相较于完整模型,AFA 模型相应的整体 ROM 分别减少了 19.1%、13.1%、12.6%、12.6%,FAF、FFF 模型的整体 ROM 分别减少 24.9%~35.9%和 42.2%~49.9%。各模型融合节段的运动大幅丢失,而 AFA、FAF 模型置换节段 ROM 有不同程度的增加,最大增幅分别为 46.3%和 44.9%。

除了 AFA 模型的后伸、侧弯和轴向旋转运动外,其余运动工况下各模型 C2~3 的 ROM 都增大。其中,前屈运动时 FAF 模型的 ROM 增幅最大,达到了 13.3%。而后伸、侧弯和轴向旋转运动时,FFF 模型 C2~3 的 ROM 增幅最大,分别为 19.0%、14.8%和 23.4%。AFA 模型 C6~7 的 ROM 除了旋转运动时有小幅增加外,其余运动时都减小。FAF 模型 C6~7 的 ROM 前屈和后伸运动时减小,而侧弯和轴向旋转时分别增加了 13.0%和 15.0%。FFF 模型各运动工况下 C6~7 的 ROM 都增加,在轴向旋转运动时增幅最大,增幅为 13.3%(见图 4)。

### 2.2 IDP

从模型的髓核区域记录 IDP<sup>[11]</sup>。对比各模型不同运动工况下相邻节段最大 IDP 发现,完整模型 C2~3 和 C6~7 前屈、后伸、侧弯和轴向旋转运动时最大 IDP 分别为 270、210、240、260 kPa 和 260、230、130、180 kPa。与 FAF、FFF 模型相比,AFA 模型 C2~3 和 C6~7 最大 IDP 变化较小,最大增幅分别

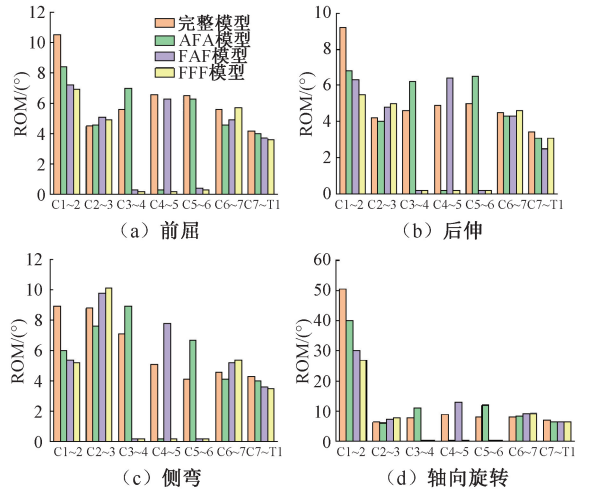


图 4 不同手术模型 ROM 与完整模型对比

Fig. 4 Comparison of ROM in different surgical models and intact model (a) Flexion, (b) Extension, (c) Lateral bending, (d) Axial rotation

为 19.0%和 15.4%。FAF、FFF 模型 C2~3 和 C6~7 最大 IDP 都大幅增加,且 FFF 模型的 IPP 增幅更大。其中,FAF 模型的最大增幅分别为 66.7%和 46.2%,FFF 模型的最大增幅分别为 147.6%和 76.9%(见图 5)。

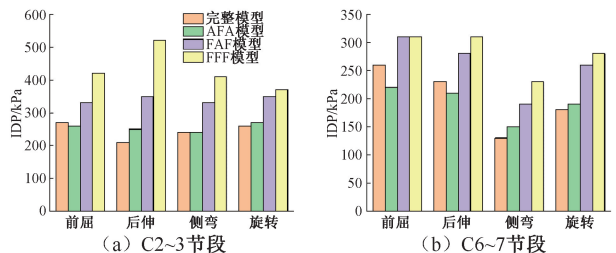


图 5 不同手术模型最大椎间盘内压力与完整模型对比

Fig. 5 Comparison of the maximum intradiscal pressure (IDP) in different surgical models and intact model (a) C2-3 segment, (b) C6-7 segment



### 2.3 FCF

对比各模型不同运动工况下 FCF 发现,融合节段 FCF 大幅减少,而置换节段 FCF 大幅增加,完整模型 C2~3 和 C6~7 后伸、侧弯和轴向旋转运动时 FCF 分别为 27.5、38.6、39.3 N 和 23.0、42.2、37.5 N。与 FAF、FFF 模型相比,AFA 模型相邻节段最大 IDP 的

变化较小,FCF 最大增幅为 17.4%。FFF 模型在后伸、侧弯和轴向旋转时 C2~3 的 FCF 增幅都大于 FAF 模型,分别增加了 33.5%、80.1% 和 51.7%。对于 C6~7 的 FCF,FAF 模型后伸、侧弯和轴向旋转运动时分别增加了 26.5%、31.0% 和 55.7%,而 FFF 模型相应地增加了 29.1%、65.9% 和 47.5% (见图 6)。

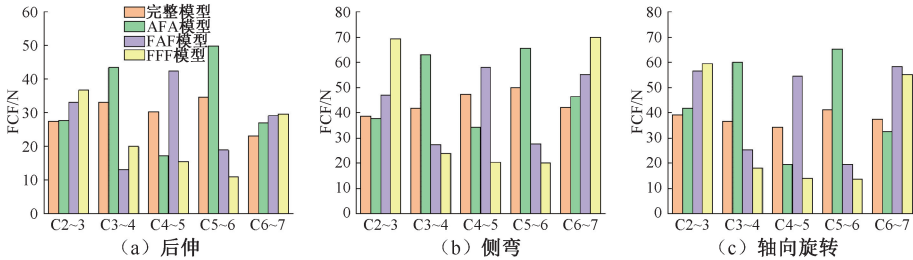


图 6 不同手术模型小关节接触力与完整模型对比

Fig. 6 Comparison of facet contact force (FCF) in different surgical models and intact model

(a) Extension, (b) Lateral bending, (c) Axial rotation

## 3 讨论

颈椎病的最佳手术方式能使术后颈椎的运动与正常颈椎相似,同时在相邻节段产生相似的 IDP 和 FCF,否则有加速相邻节段退变的风险。研究表明,AFA 形式的 Hybrid 手术能保持颈椎正常的耦合运动,FAF 形式的 Hybrid 手术也比 FFA 和 AFF 形式的 Hybrid 手术有更好的理论结果<sup>[10,23]</sup>。因此,本文选择 AFA 和 FAF 形式的 Hybrid 手术分别作为 2A1F 和 2F1A 形式的 Hybrid 手术的代表,研究不同形式 Hybrid 手术与三节段 ACDF 对颈椎生物力学的影响。通过比较相对于完整模型,AFA、FAF 和 FFF 模型相邻节段及整体 ROM,相邻节段 IDP 及 FCF 的变化,得到对颈椎生物力学影响较小的手术方案,为相关疾病的治疗提供指导。

本研究中,各模型整体 ROM 与 Wang 等<sup>[24]</sup>的临床结果相似,相较于 FFF 模型,Hybrid 模型整体 ROM 更大,其中 AFA 模型又比 FAF 模型保留更多的运动。另外,各模型融合节段的 ROM 大幅减少,置换节段的 ROM 增加,在 Wu 等<sup>[17]</sup>的研究中也观察到了相同的结果。本文推测,融合节段中骨与融合器采用绑定约束,而置换节段切除了前纵韧带和后纵韧带等,减小了运动限制。手术节段运动的变化导致节段间 FCF 的变化,正如本文发现各模型融合节段的 FCF 大幅减小,而置换节段的 FCF 大幅增

大。莫中军等<sup>[25]</sup>研究认为,置换节段 ROM 增加,导致 Hybrid 手术后颈椎曲度后伸,经过置换节段椎体的力减少,从而增加置换节段的 FCF。FCF 的增加可能会对小关节造成损伤,加速小关节退变<sup>[26]</sup>。因此,AFA 形式的 Hybrid 手术虽然可以保留更多的颈椎运动,但可能增加置换节段小关节退变的风险。

本文结果表明,AFA 模型相邻节段的 ROM 接近完整模型,而 FAF、FFF 模型相邻节段的 ROM 都增大以补偿融合节段的运动丧失,最大增幅分别为 15.0% 和 23.4%。FAF 模型相邻节段 ROM 的增幅小于 FFF 模型,原因可能是置换节段增加的 ROM 在一定程度上补偿了融合节段的运动损失。不同模型相邻节段的运动不同必然造成作用在相邻节段的载荷及方向不同,导致相邻节段产生不同 IDP 和 FCF。Zhao 等<sup>[27]</sup>研究发现,相较于两节段 ACDF,两节段 Hybrid 手术后相邻节段的 IDP 和 FCF 都更接近完整模型,这与本文结果类似。本文发现,相邻节段 IDP 和 FCF 变化与 ROM 变化一致,AFA、FAF 和 FFF 模型相邻节段最大 IDP 最大增幅分别为 19.0%、66.7%、147.6%,FCF 最大增幅分别为 17.4%、55.7%、80.1%。过量的载荷可能改变椎间盘内部生理结构,导致椎间盘退变<sup>[28]</sup>。FAF、FFF 模型相邻节段 IDP 和 FCF 大幅增加,表明 FAF 形式的 Hybrid 手术和三节段 ACDF 都可能加速相邻节段椎间盘和小关节退变。研究表明,CDA 可在一定

程度上降低相邻节段 IDP 和具有保护相邻节段小关节的潜力<sup>[29-30]</sup>。AFA 模型相邻节段的 IDP 和 FCF 接近完整模型,表明 AFA 形式的 Hybrid 手术可能对相邻节段椎间盘和小关节有保护作用。

本研究的局限性如下:① 骨组织使用各向同性材料特性,忽略了材料的各向异性;② 简化了手术过程,可能无法模拟实际的生物力学环境;③ 选择特定的人工椎间盘和融合器,研究结果可能不适用其他假体。然而,本文主要比较不同模型对颈椎的生物力学影响,各模型都采用上述简化处理,对模型之间的比较影响较小。

## 4 结论

本文通过有限元方法对比 AFA、FAF、FFF 模型在不同运动工况下各节段及整体 ROM,以及相邻节段 FCF 及 IDP 的变化。结果显示:

(1) FAF、FFF 模型相邻节段 ROM 都增大,最大增幅分别为 15.0% 和 23.4%,而 AFA 模型相邻节段及整体 ROM 都更接近完整模型。

(2) AFA、FAF、FFF 模型相邻节段最大 IDP 最大增幅分别为 19.0%、66.7%、147.6%,FCF 最大增幅分别为 17.4%、55.7%、80.1%,AFA 形式的 Hybrid 手术可能对相邻节段椎间盘和小关节有保护作用。

总体来说,与 FAF 形式的 Hybrid 手术和三节段 ACDF 相比,AFA 形式的 Hybrid 手术可能对颈椎生物力学的影响更小。本研究结论可能不适用非 C3~6 连续三节段病变的情况,未来还需要评估不同手术节段和不同形式(如 FAA、AAF、FFA、AFF)的 Hybrid 手术对颈椎生物力学的影响,从而更好指导三节段颈椎病的治理。

## 参考文献:

[ 1 ] MOON MS, YOON MG, PARK BK, *et al.* Age-related incidence of cervical spondylosis in residents of Jeju island [J]. *Asian Spine J*, 2016, 10(5): 857-868.

[ 2 ] REN X, CHU T, JIANG T, *et al.* Cervical disk replacement combined with cage fusion for the treatment of multilevel cervical disc herniation [J]. *Clin Spine Surg*, 2016, 29(6): 218-225.

[ 3 ] WU XD, WANG XW, YUAN W, *et al.* The effect of multilevel anterior cervical fusion on neck motion [J]. *Eur*

*Spine J*, 2012, 21(7): 1368-1373.

[ 4 ] 赵齐通, 靳林煜, 李新锋. 不同单节段颈椎前路椎间融合系统对邻近节段的生物力学影响[J]. *医用生物力学*, 2018, 33(3): 212-217.

ZHAO QT, JIN LY, LI XF. Biomechanical effects of different single-level anterior cervical discectomy and fusion systems on the adjacent segments [J]. *J Med Biomech*, 2018, 33(3): 212-217.

[ 5 ] GANDHI AA, GROSLAND NM, KALLEMEYN NA, *et al.* Biomechanical analysis of the cervical spine following disc degeneration, disc fusion, and disc replacement: A finite element study [J]. *Int J Spine Surg*, 2019, 13(6): 491-500.

[ 6 ] 蒲婷, 吕聪伟, 颜滨, 等. 人工颈椎间盘置换术与融合术的生物力学比较[J]. *医用生物力学*, 2014, 29(2): 105-112.

PU T, LV CW, YAN B, *et al.* *In vitro* study on biomechanical comparison between cervical arthroplasty and fusion [J]. *J Med Biomech*, 2014, 29(2): 105-112.

[ 7 ] CHANG KE, PHAM MH, HSIEH PC. Adjacent segment disease requiring reoperation in cervical total disc arthroplasty: A literature review and update [J]. *J Clin Neurosci*, 2017, 37: 20-24.

[ 8 ] JIA Z, MO Z, DING F, *et al.* Hybrid surgery for multilevel cervical degenerative disc diseases: A systematic review of biomechanical and clinical evidence [J]. *Eur Spine J*, 2014, 23(8): 1619-1632.

[ 9 ] LI Y, ZHU J, LIAO Z, *et al.* Hybrid constructs for performing three-level hybrid surgery: A finite element study [J]. *World Neurosurg*, 2018, 114: E1302-E1309.

[ 10 ] XIE YM, ZHENG YC, QIU SJ, *et al.* The appropriate hybrid surgical strategy in three-level cervical degenerative disc disease: A finite element analysis [J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1): 1-10.

[ 11 ] HERRON MR, PARK J, DAILEY AT, *et al.* Febio finite element models of the human cervical spine [J]. *J Biomech*, 2020, 113: 110077.

[ 12 ] 陈群响, 倪斌, 郭群峰, 等. 带肌肉组织全颈椎三维有限元模型的建立及分析[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2019, 29(4): 348-355.

[ 13 ] WHEELDON JA, STEMPEL BD, YOGANANDAN N, *et al.* Validation of a finite element model of the young normal lower cervical spine [J]. *Ann Biomed Eng*, 2008, 36(9): 1458-1469.

[ 14 ] 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.

[ 15 ] 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.

- [16] EL RICH M, ARNOUX PJ, WAGNAC E, *et al.* Finite element investigation of the loading rate effect on the spinal load-sharing changes under impact conditions [J]. *J Biomech*, 2009, 42(9): 1252-1262.
- [17] WU TK, MENG Y, WANG BY, *et al.* Biomechanics following skip-level cervical disc arthroplasty versus skip-level cervical discectomy and fusion: A finite element-based study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2019, 20(1): 1-9.
- [18] DU CF, GUO JC, HUANG YP, *et al.* A new method for determining the effect of follower load on the range of motions in the lumbar spine [C]//*Proceedings of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. Toronto: Springer, 2015: 326-329.
- [19] PANJABI MM, NIBU K, CHOLEWICKI J. Whiplash injuries and the potential for mechanical instability [J]. *Eur Spine J*, 1998, 7(6): 484-492.
- [20] LIU Q, GUO Q, YANG J, *et al.* Subaxial cervical intradiscal pressure and segmental kinematics following atlantoaxial fixation in different angles [J]. *World Neurosurg*, 2016, 87: 521-528.
- [21] ITO S, IVANVIC PC, PANJABI MM, *et al.* Soft tissue injury threshold during simulated whiplash: A biomechanical investigation [J]. *Spine*, 2004, 29(9): 979-987.
- [22] 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(24): 2692-2700.
- [23] LIAO Z, PU T, GU H, *et al.* Coupled motion of cervical spine in three level hybrid constructs [J]. *Bio-Med Mater Eng*, 2015, 26(s1): S637-S645.
- [24] WANG H, HUANG K, LIU H, *et al.* Is cervical disc replacement valuable in 3-level hybrid surgery compared with 3-level anterior cervical discectomy and fusion? [J]. *World Neurosurg*, 2021, 146: E151-E160.
- [25] 莫中军, 都承斐, 樊瑜波. Hybrid 手术对颈椎力传导方式的影响 [J]. *医用生物力学*, 2015, 30(2): 111-117.
- MO ZJ, DU CF, FAN YB. Effects of Hybrid surgery on load transfer pattern of cervical spine [J]. *J Med Biomech*, 2015, 30(2): 111-117.
- [26] BOGDUK N. On cervical zygapophysial joint pain after whiplash [J]. *Spine*, 2011, 36(25): S194-S199.
- [27] ZHAO Y, LI Q, MO Z, *et al.* Finite element analysis of cervical arthroplasty combined with fusion against 2-level fusion [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2013, 26(6): 347-350.
- [28] ADAMS MA, LAMA P, ZEHRA U, *et al.* Why do some intervertebral discs degenerate, when others (in the same spine) do not? [J]. *Clin Anat*, 2015, 28(2): 195-204.
- [29] 李斌, 赵文志, 陈秉智, 等. 人工椎间盘植入术后颈椎邻近节段生物力学变化的有限元分析 [J]. *医用生物力学*, 2010, 25(2): 94-99.
- LI B, ZHAO WZ, CHEN BZ, *et al.* Finite element analysis on adjacent segments for its biomechanical changes after artificial cervical disc prosthesis [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(2): 94-99.
- [30] FAIZAN A, GOEL VK, BIYANI A, *et al.* Adjacent level effects of bi level disc replacement, bi level fusion and disc replacement plus fusion in cervical spine: A finite element based study [J]. *Clin Biomech*, 2012, 27(3): 226-233.