

有限元方法在脊柱生物力学的临床应用研究进展

袁现营 马朋朋 宗治国 李伟 张鑫

河北北方学院, 河北 张家口 075000

摘要: 有限元方法广泛应用于脊柱生物力学临床研究中。文章阐述其概念、基本原理和建模基础, 包括将复杂结构划分为小单元体模拟力学特性, 建模中网格划分、材料属性设定等关键步骤。重点探讨了有限元方法在脊柱侧弯、骨折、骨质疏松和退行性骨关节病的临床应用情况。此外, 阐述了有限元分析的优势和局限性, 并展望了其在脊柱生物力学临床领域的未来发展。

关键词: 有限元分析; 脊柱; 生物力学

有限元方法 (Finite Element Method, FEM) 最早出现在 20 世纪 40 年代, 并在航空工程领域中得到了初步应用^[1]。随着计算机技术的快速发展, 有限元法逐渐扩展至土木工程和骨科生物力学等领域。1972 年, Brekelmans 首次将有限元法引入到脊柱生物力学研究中, 这一开创性工作标志着有限元法在脊柱及其相关研究中的正式应用^[2]。自此以后, 有限元法的模型构建及分析技术不断完善, 成为骨科尤其是脊柱生物力学研究中不可或缺的重要工具。

1 有限元方法的概念及基本原理

有限元方法作为一种强大的数值分析工具, 在脊柱生物力学研究中展现出了独特优势。基本原理是将复杂的结构或物体划分为有限个小单元体, 以便通过计算机模拟其力学特性和行为^[3]。研究人员可以通过对单元之间的节点施加不同的载荷和边界条件, 精确计算出各个单元的应力与位移。相比传统实验, 这种方法具有显著优势, 能够进行高重复性、低成本且无损耗的计算分析, 使其在生物力学研究中的应用日益广泛^[4]。通过构建高精度的脊柱模型, 有限元方法可以模拟脊柱在不同工况下的力学行为, 为研究者提供对脊柱结构功能及病理机制的深入理解。

2 有限元建模基础

有限元建模是有限元方法应用于脊柱生物力学研究中的核心环节, 其建模过程涉及多个关键步骤, 其中网格划分和材料属性设定尤为关键^[5]。网格划分是有限元建模的首要步骤, 它决定了模型的空间分辨率和计算精度, 在网格划分时, 需要根据不同组件的特点采用不同的策略。材料属性设定是有限元建模的另一重要步骤, 其对模型的物理行为起着决定作用。在脊柱生物力学模型中, 材料属性主要包括弹性模量、泊松比等; 这些属性通常通过实验测量或文献数据获取。在设定材料属性之际, 需留意不同

组件之间的材料差别, 以及同一组件处于不同工况时的材料变化。除网格划分和材料属性设定外, 有限元建模还需要考虑其他因素, 像模型几何形态的精准度、边界条件的设定等。

3 脊柱解剖结构

脊柱作为人体的重要支撑结构, 由多个复杂的解剖结构组成, 包括颈椎、胸椎、腰椎、骶椎和尾椎。这些结构不仅支撑人体的重量, 还保护脊髓和神经根, 同时参与身体的运动和姿势维持^[6]。在生物力学研究中, 脊柱的解剖结构是理解其功能与病理状态的基础。

脊柱的解剖结构还包括韧带、肌肉和椎间盘等软组织。韧带连接相邻的椎体, 为脊柱提供稳定性和弹性。肌肉通过附着在脊柱和骨盆上的肌腱, 控制脊柱的运动和姿势。椎间盘位于椎体之间, 由髓核和纤维环构成, 起到缓冲、减震和维持脊柱高度的作用。

脊柱的解剖结构在生物力学中发挥着重要作用, 它们共同协作, 使脊柱能够承受重量、维持姿势、进行运动和保护脊髓^[7]。脊柱的病变更往往与解剖结构的异常有关, 因此, 深入了解脊柱的解剖结构对于理解其生物力学特性和病理状态具有重要意义。

4 有限元方法在脊柱生物力学中的临床应用

4.1 脊柱侧弯

青少年特发性脊柱侧凸 (AIS) 作为一种常见的脊柱畸形, 对于重度脊柱侧弯或支具治疗无效的患者, 则需要考虑手术治疗, 通过手术来矫正脊柱的弯曲并恢复脊柱的稳定性。对于 AIS 的手术治疗, FEA 探讨了不同手术方式的生物力学特征, 吴浩然等^[8]通过有限元分析, 探讨了不同远端固定椎 (LIV) 选择对青少年特发性脊柱侧凸 (AIS) 矫形术后未融合节段椎间盘应力的影响, 发现对于 Lenke

IBN 型 AIS 患者,选择 LIV 在下端椎下方椎体可以有效降低叠加现象的发生风险,帮助外科医生在手术方案中做出更科学的决策。岳波等^[9]通过有限元仿真分析了横向侧推力和纵向撑开力对青少年特发性脊柱侧凸(AIS)的矫形效果;两种矫形方式均能有效改善脊柱侧凸程度,且横向侧推力的综合矫形效果优于纵向撑开力;为外科医生在选择矫形方式时提供了科学依据。

对于退行性脊柱侧弯^[10],手术治疗是主要方法,但术后并发症较多,包括内置器械相关和影像学相关的并发症^[11]。贺凯等^[12]利用有限元法构建的退行性脊柱侧弯模型得出的生物力学研究结果与体内试验结果一致,证明有限元法在退行性脊柱侧弯中具有较高的实用价值。通过有限元法对退行性脊柱侧弯的病因与治疗进行研究,有利于预防其发生、减缓其进展、制定更合适的治疗方案、减少手术并发症、促进患者术后康复。

成人特发性脊柱侧弯是一种较为复杂的脊柱疾病,需要根据患者的具体病情、身体状况等因素综合考虑选择合适的治疗方案,以达到最佳的治疗效果。Wang DH 等^[13]通过有限元分析,探讨了成人特发性脊柱侧弯(AdIS)矫正手术后相邻节段的生物力学特征;矫正手术后,相邻节段的椎间盘(IVD)应力降低,关节面(FJ)应力增加,且相邻节段的活动范围(ROM)减少;远端相邻节段的最大冯·米塞斯应力降低幅度大于近端相邻节段,表明远端相邻节段更易发生退变;为理解相邻节段退变提供了新的视角。

4.2 脊柱骨折

脊柱骨折通常由外力作用引起,并伴随疼痛、活动受限等多种症状。这类骨折在青壮年中多由高能量损伤引起,而在老年人中多因骨质疏松导致低能量损伤^[14]。随着脊柱生物力学研究的深入,有限元方法(FEM)在脊柱骨折的治疗中越来越受到重视。Guo Y 等^[15]首次探讨了采用蜂窝夹层结构的椎体植入物的设计与分析,利用有限元法对其机械性能进行了评估;优化后的植入物在承受 400N 的负载下,峰值应力降低至 1.041 MPa,轴向变形为 0.1110%,前后变形为 0.0145%,显示出良好的机械性能,提供了一种新颖的解决方案来应对椎体压缩骨折问题。马朋朋等^[16]采用三维有限元模型,建立了 T12-L2 节段脊柱单元的模型。在模拟 L1 椎体在椎体成形术中注入不同体积的骨水泥后,探讨了术后邻椎的应力和形变变化,随着骨水泥体积的增加,邻近椎体的应力逐渐增大,这可能增加邻椎新发骨折的风险,强调了在椎体成形术中合理选择骨水泥体

积的重要性。

骨质疏松使得脊柱弯曲和承载能力大幅下降,易导致椎体压缩骨折,即应用有限元分析评估椎体的承载能力和力学性质,能有效理解不同手术方式治疗骨质疏松性椎体骨折发生的力学机制。Pan H 等^[17]通过三维有限元建模分析精确穿刺椎体增强(PPVA)在治疗楔形变形和塌陷变形的骨质疏松性椎体压缩骨折(OVCF)方面显示出积极的手术效果;PPVA 能够有效改善椎体及其相邻椎体的应力分布,降低高应力集中区域的风险,尤其是在楔形和塌陷变形的椎体中。PPVA 的实施方法相较于传统的椎体增强术进行了改进,强调了个体化的穿刺路径设计,提升了手术的安全性和准确性。

Yan J 等^[18]通过有限元分析,评估保守治疗、经皮椎体成形术(PVP)、经皮后凸成形术(PKP)和开放手术在治疗骨质疏松性胸腰椎骨折中的效果。采用经皮椎体成形术(PKP)和经皮椎体后凸成形术(PVP)的治疗组在最大应力、轴向压缩强度、轴向压缩刚度和横向剪切刚度等方面显著优于保守治疗组和开放治疗组;PKP 和 PVP 不仅满足了正常功能运动学的要求,还恢复了胸腰椎的稳定性。

4.3 骨质疏松

脊柱病理中的骨质疏松是一个重要的研究领域,研究表明,骨质疏松症会导致骨量减少、骨结构退化,从而导致骨折风险显著增加^[19]。有限元方法(FEM)为研究脊柱骨质疏松提供了可靠的工具,通过构建力学模型来评估脊柱在不同病理状态下的生物力学特性。Kang S 等^[20]通过有限元分析比较了正常脊柱与骨质疏松脊柱在不同运动模式下(屈伸、侧弯和轴向旋转)的生理负荷差异。结果显示,骨质疏松患者的椎间盘核(nucleus pulposus)在所有运动模式下的 von Mises 应力均高于正常组,尤其在 L4 和 L5 椎体的皮质骨(cortical bone)应力显著增加。骨质疏松患者的椎间盘和骨骼在屈伸和侧弯运动中承受的应力明显高于正常人,这可能与骨质疏松导致的骨骼强度下降有关。这些结果为解释骨质疏松患者的椎间盘疼痛和退化提供了生理学基础。

随着人口老龄化,脊柱退行性疾病在老年患者中日益普遍,而骨质疏松症则使得椎弓根螺钉的固定稳定性面临更大挑战。Li C 等^[21]研究表明,第二代骨水泥注射式空心椎弓根螺钉(CICPS)在机械测试中表现出比第一代 CICPS 更高的最大轴向拔出力,显示出更好的稳定性;骨水泥的分布在第二代 CICPS 中更为均匀,且与螺钉的结合更为

紧密,没有松动或破裂现象;有限元分析显示,第二代 CICPS 的应力集中在螺钉的近端,而第一代则集中在螺钉的颈部,表明第二代设计在应力分布上更为优越。通过改进螺钉的设计(如双螺纹设计和均匀分布的侧孔),显著提高了螺钉的稳定性和安全性,为骨质疏松症患者的手术治疗提供了新的选择。

骨质疏松性椎体压缩骨折(OVCF)是老年患者中最常见的脊柱骨折类型,通常发生在胸腰椎交界处,导致剧烈的疼痛和活动受限。但经过手术治疗后,其术后并发症也较严重,Huang S 等^[22]介绍了经皮椎体成形术(PVP)作为一种微创手术,通过有限元分析研究表明接受 PVP 的患者在后续可能面临更高的椎体骨折风险,尤其是相邻椎体的骨折风险增加;并模拟了不同活动下的生物力学状态。为临床实践中的术后护理管理提供了生物力学基础;为如何更好地管理和治疗骨质疏松患者提供了重要的理论支持。

4.4 脊柱退行性病变

退行性椎间盘疾病(Degenerative Disc Disease, DDD)是脊柱生物力学领域研究的重要病理状态之一,不仅影响脊柱的生物力学特性,还可能压迫神经根或脊髓,引发疼痛、麻木、无力等症状。导致其应力方向相对于正常椎间盘有很大不同,蔡明等^[23]采用三维有限元分析方法,建立了 L4-5 椎间盘的生物力学模型,通过对比正常与退变椎间盘模型的应力和形变分布,这项研究强调了椎间盘退变与不同方向应力之间的关系,特别是左侧弯曲和后伸动作对椎间盘的影响,提示临床医生在治疗和预防腰椎间盘突出时应考虑这些因素。

在其治疗方面,有限元分析可以用于研究不同治疗策略对 DDD 患者脊柱生物力学特性的影响,如椎间融合、人工椎间盘置换等手术方式的疗效预测。Zhang Y 等^[24]通过有限元方法探讨了微创手术与开放式经椎间孔腰椎间盘融合术(TLIF)在治疗多节段腰椎退行性疾病(LDDs)中的效果和安全性。对比开放式 TLIF 和微创 TLIF(微创椎间盘融合术),微创 TLIF 在多节段腰椎退行性疾病(LDDs)的治疗中表现出更小的侵袭性、更少的出血量和更低的费用;微创 TLIF 组在术后疼痛评分(VAS)和日常生活质量(ODI)方面均显著改善,且恢复时间更短。研究表明微创手术在治疗多节段 LDD 方面是一种有效且安全的选择,具有较小的创伤和较低的术后并发症风险,值得在临床中推广应用。

Sun X 等^[25]通过建立八个基于 CT 图像的有限元模型

(FEM),对非连续颈椎间盘置换术(CDA)和非连续颈椎间盘切除及融合术(ACDF)的颈椎生物力学特性进行了比较,表明非连续 CDA 能够更好地保持颈椎的运动学特性,降低相邻节段的退化风险。在保持椎间盘压力和关节接触力方面优于非连续 ACDF,能够更好地维持颈椎的正常功能。

5 有限元分析的优势及局限性

优点:(1)有限元方法能够精确模拟脊柱在不同载荷下的应力与位移变化。(2)研究人员能够根据患者的具体解剖特征构建个性化模型,从而提供针对性的分析和治疗建议。(3)有限元方法对比尸体实验可轻松模拟人体各种日常姿势,还能模拟不同类型外力,如轴向压缩力、剪力、弯矩等作用时的力学响应。

局限性:(1)有限元模型的构建依赖于准确的几何和材料属性数据,如 CT 或 MRI 获取的数据可能因为个体差异而表现出一定的局限性。(2)有限元分析常常需要假设特定的边界条件和载荷情况,这在临床实际中可能并不完全成立。(3)计算成本也是有限元方法的一项限制。

6 展望

未来,有限元方法在脊柱生物力学领域的研究可能需要在以下几个方面进行进一步探索:其一,开发更高效、更精确的建模技术,以提高模型的精度和计算效率;其二,深入研究脊柱的生物力学特性,以更准确地设定边界条件和载荷;其三,开发新的实验技术和方法,以更准确地验证仿真结果。

参考文献:

- [1]吴浩然,李博,陈绍丰,等.有限元法生物力学分析在青少年特发性脊柱侧凸治疗及病因研究中的应用[J].局解手术学杂志,2022,31(01):77-80.
- [2]刘金玉,张晗硕,崔洪鹏,等.脊柱微创治疗脊髓型颈椎病的有限元生物力学分析及精准化运动康复方案[J].中国组织工程研究,2023,27(09):1359-1364.
- [3]陈钰,秦太平,张晓刚,等.有限元分析法在脊柱生物力学中的研究进展[J].中国疼痛医学杂志,2020,26(03):208-211+216.
- [4]何传正,向峰,张小卫,等.经后路椎弓根螺钉内固定术联合伤椎内植骨术治疗脊柱胸腰段骨折的临床效果[J].临床医学研究与实践,2022,7(27):85-88.
- [5]岳波,曹振华,张云凤,等.有限元仿真分析不同矫形方式治疗青少年特发性脊柱侧凸的生物力学特征[J].中国组织工程研究,2025,29(15):3129-3137.

- [6]秦振书,王朝晖,罗永,等.有限元方法在骨盆后环骨折生物力学研究中的应用[J].创伤外科杂志,2018,20(07):555-557.
- [7]任恩惠,杨亮,杨风光,等.生物力学实验在脊柱内固定发展中的应用进展[J].中国医学物理学杂志,2019,36(03):364-368.
- [8]吴浩然,王玲,张慧杰,等.1例Lenke1BN型青少年特发性脊柱侧凸矫形术后的有限元生物力学分析[J].海军军医大学学报,2024,45(06):700-707.
- [9]岳波,曹振华,张云凤,许阳阳,金凤,苏宝科,王利东,王星,仝玲,刘清华,方源,沙丽蓉,王海燕,李筱贺,李志军等.有限元仿真分析不同矫形方式治疗青少年特发性脊柱侧凸的生物力学特征[J].中国组织工程研究,2025,29(15):3129-3137.
- [10]段煜东,张子程,李博,等.骨质疏松参与退行性脊柱侧凸发病的研究现状[J].第二军医大学学报,2021,42(12):1402-1407.
- [11]李广慧,赵岩.有限元分析法在手术治疗的退行性脊柱侧弯患者生物力学研究中的应用[J].世界最新医学信息文摘,2018,18(18):69-70.
- [12]贺凯,邢文华,刘胜祥,等.有限元法构建退行性脊柱侧弯模型:病因与治疗中的生物力学分析[J].中国组织工程研究,2025,29(03):572-578.
- [13]Wang DH, Wu DN, Xin DQ, Shi Q, Wang WX, Xing WH, Yang HL. Biomechanical analysis of adjacent segments after correction surgery for adult idiopathic scoliosis: a finite element analysis[J]. Sci Rep,2024,14(1):13181.
- [14]郑小波,杨圣,汪峰云.有限元分析在椎弓根钉固定治疗胸腰椎骨折中的应用及进展[J].中国组织工程研究,2023,27(13):2104-2109.
- [15]Guo Y, Liu J, Zhang X, Xing Z, Chen W, Huang D. Structural geometries and mechanical properties of vertebral implant with honeycomb sandwich structure for vertebral compression fractures: a finite element analysis[J]. Biomed Eng Online,2021 Oct 2;20(1):96.
- [16]马朋朋,蔡明,张春林,等.三维有限元建模分析椎体成形术后骨水泥体积对邻近椎体骨折发生的影响[J].中国数字医学,2020,15(7):92-94.
- [17]Pan H, Li H, Liu T, Xiao C, Li S. Finite element analysis of precise puncture vertebral augmentation in the treatment of different types of osteoporotic vertebral compression fractures[J]. BMC Musculoskelet Disord,2024,30(1):599.
- [18]Yan J, Liao Z, Yu Y. Finite element analysis of dynamic changes in spinal mechanics of osteoporotic lumbar fracture. Eur J Med Res. 2022 Aug 6;27(1):142.
- [19]鲁辉,吴启梅,刘融.单侧与双侧入路植入骨填充网袋治疗骨质疏松性椎体压缩性骨折的有限元分析与应用[J].中国组织工程研究,2023,27(03):391-397.
- [20]Kang S, Park CH, Jung H, Lee S, Min YS, Kim CH, Cho M, Jung GH, Kim DH, Kim KT, Hwang JM. Analysis of the physiological load on lumbar vertebrae in patients with osteoporosis: a finite-element study[J]. Sci Rep,2022,12(1):11001.
- [21]Li C, Song L, Xiao J, Wu W, Jiang Y, Zhou R, Dai F. Second-generation bone cement-injectable cannulated pedicle screws for osteoporosis: biomechanical and finite element analyses[J]. J Orthop Surg Res,2023,18(1):343.
- [22]Huang S, Zhou C, Zhang X, Tang Z, Liu L, Meng X, Xue C, Tang X. Biomechanical analysis of sandwich vertebrae in osteoporotic patients: finite element analysis[J]. Front Endocrinol (Lausanne),2023,11(14):1259095.
- [23]蔡明,马朋朋,张春林,等.L4-5椎间盘退变在不同方向应力下有限元建模与分析[J].中国数字医学,2019,14(12):62-64.
- [24]Zhang Y, Zhou T, Gu Y, Che W, Zhang L, Wang Y. Contralateral bridge fixation of freehand minimally invasive pedicle screws combined with unilateral MIS-TLIF vs. open TLIF in the treatment of multi-segmental lumbar degenerative diseases: A five years retrospective study and finite element analysis[J]. Front Surg,2022(1):1049260.
- [25]Sun X, Sun S, Zhang T, Kong C, Wang W, Lu S. Biomechanical comparison of noncontiguous cervical disc arthroplasty and noncontiguous cervical discectomy and fusion in the treatment of noncontinuous cervical degenerative disc disease: a finite element analysis[J]. J Orthop Surg Res,2020,15(1):36.

作者简介:袁现营(2000—),男,汉族,河北省邢台市威县人,研究生在读,职称:实习生,研究方向:骨科。