

•综述•

有限元分析在颈椎生物力学研究中的应用

张强 夏景君

摘要 随着计算机技术的不断发展,骨科虚拟建模也越来越先进。有限元分析是研究颈椎功能、发病机制及选择颈椎疾病治疗方法的重要方法。该方法具有操作简便、模型获取方便、实验可靠性强等优点,近年来在脊柱外科基础和临床研究中获得较大关注。该文就有限元方法在颈椎椎体、颈椎间盘、颈椎韧带、颈椎中医按摩手法、颈椎手术(包括颈前路手术、颈后路手术)等研究中的应用进行综述。

关键词 颈椎;生物力学;有限元分析

DOI: 10.3969/j.issn.1673-7083.2022.06.011

有限元分析是最初应用于工程力学的一种方法^[1],近年来逐渐被应用于医学领域,且在生物力学领域的应用越来越广泛^[2]。这种分析方法可以直观地表达人体结构内部的应力,具有很高的应用价值,节省了成本,没有安全风险,可以大大避免个体差异^[3]。与传统尸体实验相比,有限元分析具有操作简便、模型获取方便、实验可靠性强等优点^[4]。因此,在脊柱外科基础和临床研究中有限元分析方法获得了较大的关注^[5]。

在脊柱方面的初期应用中,国外学者率先建立了腰椎三维有限元模型,并进行了生物力学模拟分析^[6]。1993年,Kleinberger等使用Patran和LS-DYNA三维软件建立了最早的颈椎三维有限元模型,包括脊椎、椎间盘和主要韧带,以研究汽车碰撞中颈椎损伤的机制。此后,颈椎的有限元模型从三维有限元模型显著改进为能够模拟复杂运动条件和研究骨骼和肌肉的模型^[7]。随着颈椎有限元方法的不断发展,它越来越多地被用于颈椎损伤、人工椎间盘置换、椎间融合内固定、颈椎病和颈椎不稳等复杂的力学分析研究中^[8]。

国内的有限元分析研究已从建立独立的椎体模型逐步发展到全脊柱模型,从建立脊柱有限元模型发展到研究脊柱疾病的基本发病机制、术前计划和术后评估^[9]。

1 在颈椎解剖研究中的应用

1.1 颈椎椎体

慢性劳损逐渐增加了上颈椎不稳患者的数量^[10]。

上颈椎不稳是常见的临床脊柱疾病,会引起一系列临床症状如头晕、恶心等^[11]。Wang等^[3]建立颈椎有限元模型分析失稳状态下的韧带应力和相对运动角度,认为上颈椎失稳的动态三维模型与体外标本轨迹数据有较好的一致性,该颈椎生物力学模型能真实、全面地反应颈椎肌肉韧带复合体的相关生物力学特征。Li等^[12]建立了6岁儿童和成人C_{6~7}颈椎节段有限元模型,并进一步研究不同负荷条件下儿童和成人C_{6~7}节段的差异,认为不同韧带的延长率高度依赖于载荷类型。目前有限元分析在颈椎椎体稳定研究中的应用较局限,有待于进一步研究。

1.2 颈椎间盘

椎间盘由纤维环(60%)和髓核(40%)组成^[13]。前环前后方向较后环厚,形成不对称的形状,这是颈椎间盘的典型特征^[14]。椎间盘由于显微结构(性能)的区域性差异、抗力(力矩)的能力以及在保证脊柱柔韧性(稳定性)的同时可以吸收能量,成为自然界引人注目的复合材料之一^[15]。

导致颈痛发生的潜在生物学机制是颈椎间盘进行性退变,有研究明确椎间盘退变与椎间盘环疲劳损伤之间存在很强的相关性^[16]。椎间盘是无血管组织,营养交换主要取决于扩散和渗透梯度^[17]。因此,椎间盘内压力的持续增加可能会影响营养物质扩散,导致椎间盘退变加重。关节活动度异常和椎间盘内压异常可能参与邻近节段退变(ASD)的发生发展^[18]。有研究通过建立正常C_{3~7}节段的三维非线性有限元模型发现,运动加载方式对颈椎间盘退变手术后的关节突关节结合力有显著影响,认为在颈椎间盘手术后小关节结合力与颈椎

作者单位:150001, 哈尔滨医科大学附属第二医院骨科

通信作者:夏景君 E-mail: at12615g@126.com

活动度呈显著正相关^[16]。Chen 等^[19]通过建立三维颈椎模型来研究人工椎间盘设计和节段生物力学之间复杂的相互作用机制,该模型模拟了矢状位上的显著畸形,认为弹性假体提供的节段稳定性对治疗脊柱矢状畸形极为有效;有限元方法是研究脊柱生物力学的理想工具,具有预测不同颈椎间盘假体设计下颈椎生物力学响应的优点。有限元分析在颈椎间盘生物力学的研究已较为成熟,但未来仍需进一步完善。

1.3 颈椎韧带

颈椎韧带在维持稳定性中起关键作用^[20]。连接上颈椎与下颈椎不同椎骨的软组织可以控制节段的运动,同时也保持稳定^[21]。颈椎主要有 5 种韧带,即前纵韧带、后纵韧带、黄韧带、棘间韧带和囊状韧带,它们是该区域的基本支撑结构^[22]。由于各韧带的附着点不同,其对颈椎稳定性的贡献在 3 个解剖平面上有所不同。Wang 等^[23]通过建立颈椎有限元模型研究颈椎对每个颈椎韧带特性变化的力学反应,认为 C₅~₆ 椎间盘对韧带僵硬的变化很敏感。然而,该研究显示关节活动度较小的椎间盘受到的影响较小,尤其是韧带松弛时。这一发现表明,控制颈椎退变患者的体位是防止进一步损伤的关键。但是由于计算机模拟韧带技术较局限,有限元分析应用在颈椎韧带方面的研究较为有限,只进行了个别韧带的研究,随着计算机技术的不断进展,未来会模拟出更接近于人体韧带的三维模型,这是未来研究发展的方向。

2 在颈椎中医按摩手法研究中的应用

手法治疗是治疗无神经体征的颈部疼痛的推荐治疗方法之一^[24]。但有研究指出手术治疗有其有效性,同时也伴随了不良事件的发生如颈动脉夹层、椎间盘破裂,这引起了学者们对手术治疗安全性的担忧^[25]。传统中医颈椎手法(TCCM)是中国传统按摩的特色。中医认为,颈部症状是由经络阻塞和关节移位引起,TCCM 可疏通经络,并恢复关节对齐^[26]。目前该技术作为一种补充和替代医学模式被广泛接受^[27]。Deng 等^[28]建立了 C₂~_{T₁} 有限元模型,并对其模拟 TCCM 或传统中医脊柱手法,提示 TCCM 或传统中医脊柱手法可显著改变颈椎周围应力区的位置和大小,但对降低椎间盘内压可能无直接作用,在确实需要治疗时,棘突根部附近的调整点是较好的选择。目前有限元分析在颈椎中医按摩手法研究中的应用较为局限,

有些中医按摩可能会加重颈椎病的症状,在这方面的研究较缺乏,未来应进行这方面的研究,从而全面而直观地认识中医按摩颈椎,防止颈椎按摩导致不良事件的发生。

3 在颈椎手术研究中的应用

3.1 颈前路手术

有限元分析可以应用于颈前路手术后力学变化研究中,颈椎前路减压融合术(ACDF)是一种标准手术,在治疗神经根型颈椎病和脊髓型颈椎病等方面可以取得良好的临床效果^[29]。然而,有研究证实 ACDF 后会出现 ASD,约 25% 的患者在术后 10 年内发生 ASD^[30]。Li 等^[30]建立完整的 C₂~_{T₁} 节段的三维有限元模型,在 C₅~₆ 椎体切除和融合后,用锚定的零剖面间隔物和标准的钢板-椎间间隔物构建 2 个内固定模型,在融合的头、尾侧水平评估关节盘、终板和小关节的运动模式和应力,认为 ASD 可能与颈椎融合的生物力学效应和(或)颈椎退变的生物学效应有关。Zhao 等^[31]通过对 1 名 22 岁受试者 CT 扫描建立下颈椎(C₃~_{T₁})的三维计算模型,采用有限元软件对完整 C₃~_{T₁} 椎弓根螺钉固定(完整组)、颈椎前路椎弓根螺钉内固定(跨椎弓根螺钉固定组)和颈椎前路椎体切除融合术(传统组)模型进行分析,认为与完整组相比,跨椎弓根螺钉固定组和传统组活动范围减小;跨椎弓根螺钉固定组在关节活动度、钛网植体应力、终板应力、骨钉应力等方面均优于传统组。有研究建立 C₂~₇ 有限元模型进行分析,认为非连续性人工颈椎间盘置换术(ACDR)可以保留相邻和中间节段的椎间压力和小关节力,使颈椎活动度保持在术前水平^[32]。然而,非连续性 ACDR 会增加 ASD 的风险。目前有限元分析在颈椎前路手术中的应用较为成熟,可以为临床手术提供较为合理的依据。

3.2 颈后路手术

颈椎后路手术被认为是治疗颈椎病的安全、有效的治疗方法。王奇等^[33]通过有限元分析软件构建了改良颈椎后路单开门椎管扩大成形术的三维有限元模型,并对其有效性进行了验证。王鹏等^[34]等通过建立颈椎后路单开门模型,研究颈椎后路单开门微型钛板固定的稳定性,认为微型钛板联合 C₃ 椎板切除不仅能够维持开门后椎板的稳定性,而且保留颈后韧带及颈半棘肌的连续性,有效减少中下段颈椎间盘的代偿性应力,避免颈椎前凸

的丢失。目前有限元分析在颈后路手术中应用较为成熟,随着计算机精确度的不断提高,计算机与颈后路生物力学的结合会更加一体化,为未来颈后路手术提供良好的理论依据。

4 在颈椎生物力学研究中的优缺点

与传统的简单物理实验、动物实验和体外实验相比,有限元分析不仅能更真实地反映颈椎的生理或病理特征,而且能提高结果的准确性^[3]。有限元建模还可提供时间和成本效益的方法来解决各种情况^[35]。此外,有限元建模能够简单表示具有复杂载荷和几何形状的系统并结合非线性材料,因此成为一种可行的替代方案。

然而,有限元分析也存在着一定的不足之处,计算模拟的局限性是模型简化,这往往使其很难直接与体外数据进行比较。脊椎各组成部分所包含的材料特性来源于文献,然后被进一步简化。几何形状来源于特定对象,没有考虑任何退化或异常形态。研究报道,年龄和性别对颈椎前凸值和椎间盘高度有影响^[28]。目前研究中普遍存在的限制是在模型的创建和评估中使用专有或商业软件,专利软件的使用对整个领域的研究进展有不利影响^[36]。因为完整的有限元是基于对正常人的扫描。计算模拟的目的是提供趋势,而不是实际数据。有限元分析中的比较不是统计比较,这只是一种生物力学趋势分析和比较。在有限元分析中,颈部肌肉是缺失的。肌肉主要控制颈部的活动范围。颈部肌肉的缺失可能会对应力等有限元生物力学数值产生影响。

5 结语

尽管计算模型在某些领域受到限制,但它在其他领域具有独特的优势。一旦有限元模型被创建和验证,研究人员就可以使用它来执行具有不同边界、载荷条件、材料特性,甚至模型几何形状变化(如手术干预)的新模拟。这样的模拟可以快速容易地设置,且许多模拟可以在单个模型上同时运行。以上原因加上计算能力的增加,导致越来越多的研究人员创建有限元模型来研究颈椎生物力学^[36]。未来希望可以取消模型专利,实现模型共享。随着计算机精确度的提高,相信有限元分析在颈椎生物力学研究中会越走越远。

参考文献

[1] Welch-Phillips A, Gibbons D, Ahern DP, et al. What is finite element

analysis[J]. Clin Spine Surg, 2020, 33(8): 323-324.

- [2] 张美超, 焦培峰. 骨科三维有限元力学仿真的建模[J]. 中华创伤骨科杂志, 2013, 15(1): 10-12.
- [3] Wang XD, Feng MS, Hu YC. Establishment and finite element analysis of a three-dimensional dynamic model of upper cervical spine instability[J]. Orthop Surg, 2019, 11(3): 500-509.
- [4] 肖广润, 杨建东, 林升元, 等. 有限元分析在脊柱外科中的应用及研究进展[J]. 国际骨科学杂志, 2020, 41(6): 347-351.
- [5] Guan W, Sun Y, Qi X, et al. Spinal biomechanics modeling and finite element analysis of surgical instrument interaction[J]. Comput Assist Surg (Abingdon), 2019, 24(sup 1): 151-159.
- [6] Berton A, Salvatore G, Giambini H, et al. A 3D finite element model of prophylactic vertebroplasty in the metastatic spine: Vertebral stability and stress distribution on adjacent vertebrae[J]. J Spinal Cord Med, 2020, 43(1): 39-45.
- [7] Wu W, Han Z, Hu B, et al. A graphical guide for constructing a finite element model of the cervical spine with digital orthopedic software[J]. Ann Transl Med, 2021, 9(2): 169.
- [8] Manickam PS, Roy S. The biomechanical study of cervical spine: a finite element analysis[J]. Int J Artif Organs, 2022, 45(1): 89-95.
- [9] 高军伟, 夏英鹏. 有限元分析法在我国脊柱外科的应用现状及医工合作前景展望[J]. 中国医疗器械信息, 2018, 24(18): 12-13.
- [10] 胡勇, 董伟鑫, 袁振山, 等. 上颈椎结构损伤对 C1-C2 和 C2-C3 节段稳定性影响的生物力学研究[J]. 中华创伤杂志, 2015, 31(4): 360-365.
- [11] Goel A, Kaswa A, Shah A. Role of atlantoaxial and subaxial spinal instability in pathogenesis of spinal “degeneration” –related cervical kyphosis[J]. World Neurosurg, 2017, 101: 702-709.
- [12] Li Z, Song G, Su Z, et al. Development, validation, and application of ligamentous cervical spinal segment C6-C7 of a six-year-old child and an adult[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2020, 183: 105080.
- [13] Sun X, Sun S, Zhang T, et al. 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.
- [14] John JD, Kumar GS, Yoganandan N, et al. Influence of cervical spine sagittal alignment on range of motion after corpectomy: a finite element study[J]. Acta Neurochir (Wien), 2021, 163(1): 251-257.
- [15] Jiang Q, Yan Z, Derrouiche A, et al. Biomechanical response of a novel intervertebral disc prosthesis using functionally graded polymers: a finite element study[J]. J Mech Behav Biomed Mater, 2019, 94: 288-297.
- [16] Subramani AV, Whitley PE, Garimella HT, et al. Fatigue damage prediction in the annulus of cervical spine intervertebral discs using finite element analysis[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2020, 23(11): 773-784.
- [17] 于栋, 刘侃, 时宗庭, 等. 动力失衡模型免颈椎间盘病理改变及终板软骨细胞的迁移凋亡规律[J]. 中国组织工程研究, 2022, 26(11): 1675-1679.
- [18] Hua W, Zhi J, Wang B, et al. Biomechanical evaluation of adjacent segment degeneration after one- or two-level anterior cervical

- discectomy and fusion versus cervical disc arthroplasty: A finite element analysis[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2020, 189: 105352.
- [19] Chen WM, Jin J, Park T, et al. Strain behavior of malaligned cervical spine implanted with metal-on-polyethylene, metal-on-metal, and elastomeric artificial disc prostheses: a finite element analysis[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2018, 59: 19-26.
- [20] 夏天, 孙宇, 王少波, 等. 保留单侧肌肉韧带复合体单开门椎管扩大成形术治疗颈椎后纵韧带骨化症对颈后肌群的影响 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2020, 30(3): 212-218.
- [21] Liao S, Jung MK, Hörnig L, et al. Injuries of the upper cervical spine: how can instability be identified?[J]. *Int Orthop*, 2020, 44(7): 1239-1253.
- [22] Zhao Q, Yang Y, Wu P, et al. Biomechanical study of the C5-C8 cervical extraforaminal ligaments[J]. *J Orthop Surg Res*, 2020, 15(1): 477.
- [23] Wang K, Deng Z, Wang H, et al. Influence of variations in stiffness of cervical ligaments on C5-C6 segment[J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2017, 72: 129-137.
- [24] 陈爽. 按摩推拿治疗神经根型颈椎病的疗效观察 [J]. *继续医学教育*, 2020, 34(11): 165-166.
- [25] Odate S, Shikata J, Soeda T, et al. Surgical results and complications of anterior decompression and fusion as a revision surgery after initial posterior surgery for cervical myelopathy due to ossification of the posterior longitudinal ligament[J]. *J Neurosurg Spine*, 2017, 26(4): 466-473.
- [26] 龙军. 经穴按摩结合颈肩保健操预防颈椎病效果观察 [J]. *中医临床研究*, 2020, 12(29): 93-95.
- [27] Zou G, Wang G, Li J, et al. Danger of injudicious use of tui-na therapy in ankylosing spondylitis[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(Suppl 1): 178-180.
- [28] Deng Z, Wang K, Wang H, et al. A finite element study of traditional Chinese cervical manipulation[J]. *Eur Spine J*, 2017, 26(9): 2308-2317.
- [29] Ramírez León JF, Rugeles Ortiz JG, Martínez CR, et al. Surgical treatment of cervical radiculopathy using an anterior cervical endoscopic decompression[J]. *J Spine Surg*, 2020, 6(Suppl 1): S179-S185.
- [30] Li X, Jin L, Liang C, et al. Adjacent-level biomechanics after single-level anterior cervical interbody fusion with anchored zero-profile spacer versus cage-plate construct: a finite element study[J]. *BMC Surg*, 2020, 20(1): 66.
- [31] Zhao L, Chen J, Liu J, et al. Biomechanical analysis on of anterior transpedicular screw-fixation after two-level cervical corpectomy using finite element method[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2018, 60: 76-82.
- [32] Ren J, Li R, Zhu K, et al. Biomechanical comparison of percutaneous posterior endoscopic cervical discectomy and anterior cervical decompression and fusion on the treatment of cervical spondylotic radiculopathy[J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1): 71.
- [33] 王奇, 杨雍, 费琦, 等. 改良颈椎后路单开门椎管扩大成形术三维有限元模型的建立与验证 [J]. *中华医学杂志*, 2017, 97(21): 1633-1637.
- [34] 王鹏, 汤猛, 周立, 等. 颈椎单开门成形微钛板固定稳定性的有限元分析 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29(22): 2072-2077.
- [35] Nikkhoo M, Cheng C, Wang J, et al. Development and validation of a geometrically personalized finite element model of the lower ligamentous cervical spine for clinical applications[J]. *Comput Biol Med*, 2019, 109: 22-32.
- [36] Herron MR, Park J, Dailey AT, et al. Febio finite element models of the human cervical spine[J]. *J Biomech*, 2020, 113: 110077.

(收稿日期 : 2022-07-20)

(本文编辑 : 卢千语)