

· 综 述 ·

有限元分析法在脊柱推拿手法生物力学研究中的应用

叶宜颖, 高景华, 高春雨

(中国中医科学院望京医院, 北京 100102)

摘 要 脊柱推拿手法属中医推拿手法的一部分, 其历史渊源已久, 临床疗效确切, 但相关基础研究的匮乏使其安全性和理论假说受到一定的质疑。有限元分析法通过图形动态直观表达手法的力学作用机制, 将脊柱推拿手法定量、定性且直观地解析, 可以获得其他实验或模型无法获得的结果, 是研究中医脊柱推拿手法中力学问题的理想方法。目前, 通过有限元分析法来阐明中医推拿手法治疗机理的研究主要集中于脊柱方面。本文就有限元分析法对腰椎、颈椎推拿手法生物力学的研究进行了综述, 以期临床更好地应用中医推拿手法治疗脊柱疾病提供更准确、更科学的依据。

关键词 推拿; 脊柱; 腰椎; 颈椎; 有限元分析; 生物力学; 综述

脊柱推拿手法属中医推拿手法的一部分, 其历史渊源已久, 临床疗效确切, 但对其基础研究匮乏使手法治疗的安全性及其理论假说受到一定的质疑。目前, 应用生物力学阐明中医推拿手法治疗机理的研究主要集中于脊柱方面。常见的脊柱生物力学研究方法可分为体内和体外两种, 其中最常用的体外研究方法为有限元分析法^[1]。有限元分析法通过图形动态直观表达手法的力学作用机制, 获得其他实验或模型无法获得的结果, 是研究中医脊柱推拿手法中力学问题的较为理想的方法。国内专家对推拿手法的量化研究主要集中于脊柱方面^[2-3], 而对四肢部位手法的量化研究则较少; 国外学者多集中于对某一单一手法的力学特征进行研究^[4-5]。本文就有限元分析法在脊柱推拿手法生物力学研究中的应用进展进行了综述。

1 有限元分析法在腰椎推拿手法生物力学研究中的应用

1973 年 Schultz 等^[6]最早将有限元分析法应用于脊柱生物力学的研究中, 建立二维椎间盘模型。最早的腰椎三维有限元模型始于 1975 年, Lin 等^[7]在总结以往研究的基础上模拟腰椎各种活动下, 正常腰椎前半部椎体结构之受力情况, 但其未对椎体的附件如肌肉、韧带等进行详细研究。

吴山等^[8]应用有限元分析法比较定点旋转法与直腰旋转手法的合理性与安全性; 结果发现 2 种推拿手法的椎间盘应力皆集中于椎体、后部结构及外层纤维环上, 而应力点则主要分布于小关节、椎体峡部、椎弓根侧隐窝及上椎体小关节面下部; 脊柱推拿手法最大位移分布在 L₄ 椎体上缘左侧、左侧上关节突及 L₄ 棘突; 2 种推拿手法均能解除周围神经根黏连所造成的椎间盘关节突位移, 但是腰椎定点旋转手法使椎间孔的位移更显著, 所以更具有实用性。李延红等^[9-10]运用有限元分析法对健康人的 L₃ ~ S₁ 椎间盘进行造模并模拟进行拔伸手法, 结果显示拔伸手法会使破裂的椎间盘与神经根的相对位置改变, 从而可以松解突出物与神经根的黏连。杨学锋等^[11-12]采用三维有限元法模拟按压手法对正常腰椎节段与退变腰椎节段产生的应力变化特点, 结果显示当模拟腰椎前屈 30° 时, 椎间盘的位移、应力变化最为显著, 由此得出当采用推拿手法治疗腰椎疾患时, 腰椎前屈 30° 时是相对最安全的。徐海涛等^[13-14]采用压力传感器研究腰椎斜扳手法所致咔嚓声响时, 其力、力矩、推扳力的大小及力与时间曲线的变化情况, 这为手法量化提供了依据; 研究结果显示斜扳手法对椎间盘的应力远小于椎间盘后部结构所受应力。该结果证明腰椎斜扳法对椎间盘是极为安全的, 但对于腰椎椎管狭窄者不宜使用腰部斜扳手法。胡华等^[15]通过研究腰坐位旋转手法时腰椎骨盆与股骨上端各结构的应力特点与位移, 发现腰椎骨盆、股骨上端各个部位间因旋转手法而相对位移, 且在手法操作过程中侧弯、前屈角度有一定范围。此结果说明采用推拿手法治疗腰椎疾病时不可随意加大侧弯、前屈角度, 必须考虑腰椎骨盆和股骨上端的适应证, 推拿手法若超过其正常活动范围可能会引起相应部位的损伤。张晓刚等^[16]针对按

维环上, 而应力点则主要分布于小关节、椎体峡部、椎弓根侧隐窝及上椎体小关节面下部; 脊柱推拿手法最大位移分布在 L₄ 椎体上缘左侧、左侧上关节突及 L₄ 棘突; 2 种推拿手法均能解除周围神经根黏连所造成的椎间盘关节突位移, 但是腰椎定点旋转手法使椎间孔的位移更显著, 所以更具有实用性。李延红等^[9-10]运用有限元分析法对健康人的 L₃ ~ S₁ 椎间盘进行造模并模拟进行拔伸手法, 结果显示拔伸手法会使破裂的椎间盘与神经根的相对位置改变, 从而可以松解突出物与神经根的黏连。杨学锋等^[11-12]采用三维有限元法模拟按压手法对正常腰椎节段与退变腰椎节段产生的应力变化特点, 结果显示当模拟腰椎前屈 30° 时, 椎间盘的位移、应力变化最为显著, 由此得出当采用推拿手法治疗腰椎疾患时, 腰椎前屈 30° 时是相对最安全的。徐海涛等^[13-14]采用压力传感器研究腰椎斜扳手法所致咔嚓声响时, 其力、力矩、推扳力的大小及力与时间曲线的变化情况, 这为手法量化提供了依据; 研究结果显示斜扳手法对椎间盘的应力远小于椎间盘后部结构所受应力。该结果证明腰椎斜扳法对椎间盘是极为安全的, 但对于腰椎椎管狭窄者不宜使用腰部斜扳手法。胡华等^[15]通过研究腰坐位旋转手法时腰椎骨盆与股骨上端各结构的应力特点与位移, 发现腰椎骨盆、股骨上端各个部位间因旋转手法而相对位移, 且在手法操作过程中侧弯、前屈角度有一定范围。此结果说明采用推拿手法治疗腰椎疾病时不可随意加大侧弯、前屈角度, 必须考虑腰椎骨盆和股骨上端的适应证, 推拿手法若超过其正常活动范围可能会引起相应部位的损伤。张晓刚等^[16]针对按

压手法对正常腰椎节段与退变腰椎节段产生的应力变化特点及其量效关系进行研究,从而分析拔伸按压手法对退变的腰椎节段($L_1 \sim L_5$)的力学调衡作用机制。该研究结果显示,运用拔伸按压手法可以改变椎间盘内应力分布,并增大椎管内空间,使受压神经根应力减弱;当后伸位时,腰椎的椎体、小关节与椎弓根的应力皆大于前屈位;但在椎间盘内部的应力则为前屈位大于后伸位;且两侧应力均由上至下呈逐渐增强的趋势。张仁倩等^[17]采用力传感器系统测量三小定点整脊技术中作用于腰椎的力值,进而建立人体腰椎 $L_4 \sim L_5$ 三维有限元模型,用以研究三小定点整脊手法操作时对腰椎的内在应力、变形、矢量和位移等影响。该研究结果显示,当采用三小定点整脊推拿手法操作时,椎体上的位移和应力均大于椎间盘的位移及其所受应力,而两椎体棘突的位移基本相同;腰椎最大位移在椎体的棘突上,最大应力点在 L_4 椎体的左侧下关节突处;椎间盘的位移与应力均相对较小,说明推拿手法并不能使突出椎间盘产生回纳,而是通过对椎体的调整而改善其腰椎的力学平衡状态,减轻椎间盘对神经根的压力和刺激。

利用三维有限元模拟分析腰椎推拿手法具有精确、无侵入性、可重复性验证等优点。目前,有限元分析法在腰椎推拿手法研究中的应用主要集中在腰椎旋转与斜扳手法上^[18]。腰椎有限元分析法通过模拟在腰椎活动角度与姿势变化的情况,关节突关节载荷所发生的变化,来推断腰椎推拿手法的疗效和不良反应。脊柱推拿手法效应点主要集中于椎体关节突关节^[20]。将脊柱前屈、拉伸、扭转等各项推拿手法进行有限元分析,获得在不同脊柱推拿手法作用时,任意部位的应力-应变分布情况以及椎体变形等情况^[20-21]。

2 有限元分析法在颈椎推拿手法生物力学研究中的应用

全颈椎有限元模型最早由 Kleinberger^[22]经解剖几何尺寸模拟而成。Bozic 等^[23]最早用 CT 扫描建立单一 C_4 椎体的三维有限元模型。李义凯等^[24]对手法所发出的咔哒声进行检测,并在量化采集中发现,推扳力的大小与咔哒声响无直接关系。王傅等^[25]研究结果显示,当颈椎向左侧旋转时,孙氏颈椎旋转手法与定点旋转手法的咔哒声响次数较少,单次出现咔哒声的比例也较高;端提旋转手法与单纯旋转手法则较多次产生咔哒声,多次出现咔哒声的比例也较

高。这说明在应用颈椎旋转手法时,采用一定轴向牵引力量能减少咔哒声次数,临床应用上可增加单次声响发声比例,提高正骨复位的准确性、针对性。张明才等^[26]所建立的三维有限元模型显示,错缝可以导致颈椎关节应力异常;对该模型施以虚拟矫正手法治疗错缝椎骨,并比较矫正前后 2 个模型的椎骨关节、椎间盘应力变化,以分析推拿手法可以矫正骨错缝的机理。邬黎平等^[27]建立 $C_{3-4} \sim C_{6-7}$ 颈椎模型,探讨拔伸旋转手法下的颈椎应力变化情况,结果显示应力点集中于 C_{3-4} 关节突关节上;当拇指向 C_4 棘突左推时, C_4 棘突所承受的应力依顺序集中于棘突左下部及根部、棘突左侧根部与椎体结合处;当颈椎向右旋转 40° 时,模型所受压力最大;颈椎活动时关节突关节承受主要应力,但却不会因此损伤正常的颈椎骨性结构。张明才等^[26-27]研究结果显示,如果牵引角度固定不变,牵引力增大,颈椎的位移、各点应力会随牵引力增大,导致椎间隙形变更明显;但如果是牵引力维持不变,牵引角度增大,会使颈椎的位移增大、颈椎最大应力的位置下移,各颈椎椎间隙形变增大;牵引下颈椎出现不同程度位移,各椎间隙后缘随之增宽,前缘变窄,但最大应力点仍在颈椎后缘椎体上。胡勇等^[28]通过建立颈椎有限元模型,分析出齿状突为最易发生骨折部位。

由于研究条件所限,如缺乏新鲜尸体的来源和必要的生物力学仪器设备等,目前学术界对颈椎生物力学的研究较少。临床上最常用的颈椎手法是旋转法^[29],因此有限元分析法对颈椎推拿手法生物力学的研究也集中于不同旋转手法上^[30]。有限元的引入为颈椎手法操作提供有力的安全性依据^[31],对牵引的角度、力量提供有效的参考价值^[32]。

3 小 结

有限元分析法通过计算机模拟图形图像技术,将脊椎推拿手法定量、定性且直观地解析,为阐明脊椎推拿手法的作用机制及其生物力学特性提供科学、有效的依据,是研究脊柱生物力学的一个重要方法^[33]。该方法一方面可以通过建立脊柱有限元模型,分析椎体在生理状态下的运动学特征及受力值,另一方面还可以揭示在推拿手法干预下椎体各结构的应力变化^[34]。目前,由于国内仍缺乏与人体各组织结构生物力学特性相一致的材料,加上椎体、椎间盘、韧带等组织的力学性质又极为复杂,且有限元分析法是对椎

体老化和耗损均忽略不计的情况下建立人体正常脊柱模型,因此通过有限元模型只能反映脊柱某一刻、某一点的力学特性,对脊柱自我调节适应方面的变化显得无能为力,也就很难得到与真实情况一致的数据^[35-36]。文献报道的腰椎和颈椎有限元模型均较为粗糙,涉及软组织的模型较少,但脊柱推拿手法对软组织的力矩载荷、应力变化较骨性结构更具有特异性。因此今后研究应将软组织与骨性结构结合起来建立模型,方能更真实地呈现脊柱推拿手法对椎体的生物力学和运动学特征,才能更好地阐释脊柱推拿手法的作用机制,为日后临床实践提供指导性、科学性依据。

虽然有限元分析法目前在骨科领域中的应用只处于初期验证阶段,其对脊柱生物力学的分析,仍需进一步采用传统生物力学实验或临床疗效来验证;但随着计算机技术的发展及有限元软件的开发和利用,相信运用有限元来模拟真实人体将会越来越接近实体客观本质,也必将会推动脊柱外科生物力学的发展。

4 参考文献

- [1] 原芳,薛清华,刘伟强.有限元法在脊柱生物力学应用中的新进展[J].医用生物力学,2013,28(5):585-590.
- [2] 朱立国,冯敏山,魏戊,等.个体因素对颈椎旋提手法操作影响的在体力学研究[J].中国中医骨伤科杂志,2011,19(9):14-17.
- [3] 朱立国,冯敏山,毕方杉,等.颈椎旋转(提)手法的在体力学测量[J].中国康复医学杂志,2007,22(8):673-676.
- [4] Harms MC, Innes SM, Bader DL. Forces measured during spinal manipulative procedures in two age groups[J]. Rheumatology, 1999, 38(3):267-274.
- [5] Raymond YW. Kinematics of rotational mobilisation of the lumbar spine[J]. Clinical biomechanics, 2001, 16(6):481-488.
- [6] Schultz AB, Belytschko TB, Andriacchi TP, et al. Analog studies of forces in human spine:mechanical properties and motion segment behavior[J]. J Biomech, 1973, 6(4):373-383.
- [7] Liu YK, Ray G, Hirsch C. The resistance of the lumbar spine to direct shear[J]. Orthop Clin North Am, 1975, 6(1):33-49.
- [8] 吴山,张美超,李义凯,等.两种坐位旋转手法腰椎应力及位移的有限元分析[J].广东医学,2010,31(8):992-994.
- [9] 李延红,张晓刚,李具宝,等.腰椎拔伸手法三维有限元模型分析[J].浙江中医杂志,2010,45(12):879-880.
- [10] 张晓刚,董建华,杨学峰,等.三维有限元腰椎节段模型上模拟拔伸按压手法的生物力学分析[J].中国组织工程研究与临床康复,2010,14(22):4000-4004.
- [11] 杨学峰,李具宝,李延红,等.模拟按压手法腰椎运动节段三维有限元模型分析[J].中国中医骨伤科杂志,2009,17(10):18-19.
- [12] 杨学峰,张晓刚.利用腰椎运动节段三维有限元模型云图变化分析按压手法[J].按摩与康复医学(下旬刊),2010,1(2):9-10.
- [13] 徐海涛,李松,刘澜,等.腰椎斜扳手法时椎间盘的有限元分析[J].中国组织工程研究与临床康复,2011,15(13):2335-2338.
- [14] 徐海涛,徐达传,李义凯,等.腰椎斜扳手法所致“咔嚓”声时推扳力的研究[J].中国康复医学杂志,2008,23(3):202-204.
- [15] 胡华,熊昌源,韩国武.旋转手法对腰椎骨盆和股骨上端结构有限元模型的分析[J].中国骨伤,2012,25(7):582-586.
- [16] 张晓刚,秦大平,宋敏,等.拔伸按压手法对退变腰椎节段应力分布影响的有限元分析[J].中华中医药杂志,2013,28(10):3108-3114.
- [17] 张仁倩,赵志恒,王剑歌,等.三小定点整脊法对腰椎间盘突出症的有限元分析[J].湖南中医杂志,2014,30(8):90-92.
- [18] 郭伟,李艺,韩磊,等.脊柱手法的力学研究概况[J].颈腰痛杂志,2014,35(5):385-389.
- [19] 李庆兵,冯跃,罗建,等.有限元分析在手法治疗腰椎间盘突出症中的研究进展[J].南京中医药大学学报,2013,29(1):94-96.
- [20] 苏春涛,睦承志.腰椎三维有限元生物力学分析的技术应用进展[J].中国康复医学杂志,2013,28(5):479-482.
- [21] Brekelmans WA, Poort HW, Slooff JH. A new method to analysis the mechanical behavior of skeletal parts[J]. Acta Orthop Scand, 1972, 43(5):301-317.
- [22] Kleinberger M. Application of finite element techniques to the study of cervical spine mechanics[J]. Elementary English, 1993, 48(3):334-365.
- [23] Bozic KJ, Keyak JH, Skinner HB, et al. Three-dimensional finite element modeling of a cervical vertebra:an investigation of burst fracture mechanism[J]. J Spinal Disord, 1994, 7(2):102-110.

- toms and preliminary evidence[J]. Med Hypotheses, 2014, 82(5): 631 – 635.
- [14] Zuo J, Han J, Qiu S, et al. Neural reflex pathway between cervical spinal and sympathetic ganglia in rabbits: implication for pathogenesis of cervical vertigo[J]. Spine J, 2014, 14(6): 1005 – 1009.
- [15] Hong L, Kawaguchi Y. Anterior cervical discectomy and fusion to treat cervical spondylosis with sympathetic symptoms[J]. J Spinal Disord Tech, 2011, 24(1): 11 – 14.
- [16] Wang ZC, Wang XW, Yuan W, et al. Degenerative pathological irritations to cervical PLL May play a role in presenting sympathetic symptoms[J]. Med Hypotheses, 2011, 77(5): 921 – 923.
- [17] 郎伯旭, 罗建昌, 王罗丹, 等. 内、外因辩证关系原理在颈性眩晕发病机制研究中的应用[J]. 中医正骨, 2014, 26(7): 70 – 71.
- [18] 薛爽, 王国相. 什么是颈性眩晕[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 1999, 9(5): 297.
- [19] Hain TC. Cervicogenic causes of vertigo[J]. Curr Opin Neurol, 2015, 28(1): 69 – 73.
- [20] Sorensen BF. Bow hunter's stroke[J]. Neurosurgery, 1978, 2(3): 259 – 261.
- [21] Quesnele JJ, Triano JJ, Noseworthy MD. Changes in vertebral artery blood flow following various head positions and cervical spine manipulation[J]. J Manipulative Physiol Ther, 2014, 37(1): 22 – 31.
- [22] Sarkar J, Wolfe SQ, Ching BH, et al. Bow hunter's syndrome causing vertebrobasilar insufficiency in a young man with neck muscle hypertrophy[J]. Ann Vasc Surg, 2014, 28(4): 1032.
- [23] Machaly SA, Senna MK, Sadek AG. Vertigo is associated with advanced degenerative changes in patients with cervical spondylosis[J]. Clin Rheumatol, 2011, 30(12): 1527 – 1534.
- [24] Selby G, Lance JW. Observations on 500 cases of migraine and allied vascular headache[J]. J Neurol Neurosurg Psychiatry, 1960, 23: 23 – 32.
- [25] Blaschek A, Milde – Busch A, Straube AA, et al. Self-reported muscle pain in adolescents with migraine and tension – type headache[J]. Cephalalgia, 2012, 32(3): 241 – 249.
- [26] 张宗峰, 姚猛, 滕立臣. 颈源性头痛的研究进展[J]. 中国临床康复, 2003, 7(6): 970 – 971.
- [27] 魏佳军, 章军建, 肖劲松. 颈性眩晕患者血浆内皮素和降钙素基因相关肽测定的临床意义[J]. 卒中与神经疾病, 2005, 12(1): 38 – 39.
- [28] 许印坎, 孙静宜. 颈源性眩晕[M]. 上海: 第二军医大学出版社, 2003: 23.
- [29] 何及, 樊东升, 孙宇. 颈性眩晕[J]. 中国实用内科杂志, 2011, 31(6): 414 – 415.
- [30] Li YC, Peng BG. Pathogenesis, diagnosis, and treatment of cervical vertigo[J]. Pain Physician, 2015, 18(4): E583 – E595.
- [31] 吴学元, 张党锋, 刘洪亮, 等. 椎动脉型颈椎病外科治疗效果的观察[J]. 西安交通大学学报: 医学版, 2013, 34(5): 690 – 691.
- [32] 祝建光, 吴德升, 赵卫东, 等. 颈性眩晕外科治疗的指征及疗效探讨[J]. 脊柱外科杂志, 2007, 5(4): 218 – 220.

(2016-07-06 收稿 2016-08-16 修回)

(上接第 31 页)

- [24] 李义凯, 徐海涛, 王国林, 等. 颈椎定点旋转手法所致咔哒声响与最大推扳动力的量效关系研究[J]. 中国康复医学杂志, 2004, 19(9): 644 – 646.
- [25] 王傅, 陈丽珍, 李义凯, 等. 四种不同方式旋转颈椎所致咔哒声响量化的采集与比较[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(43): 8149 – 8153.
- [26] 张明才, 吕思哲, 詹红生. 颈椎“椎骨错缝”三维有限元模型创建方法的研究[J]. 中国骨伤, 2010, 23(5): 366 – 369.
- [27] 郭黎平, 陈曦, 樊继宏. 颈椎拔伸旋转手法内在应力的实时监测[J]. 中国临床解剖学杂志, 2010, 28(5): 578 – 581.
- [28] 胡勇, 赵红勇, 徐荣明. 有限元方法在上颈椎生物力学研究中的应用进展[J]. 中国骨伤, 2012, 25(3): 262 – 266.
- [29] 汪芳俊, 范炳华, 魏威. 有限元分析法在颈椎病研究中的应用进展[J]. 中医正骨, 2012, 24(4): 71 – 73.
- [30] 马子龙, 朱立国, 冯敏山, 等. 国内脊柱手法生物力学研究进展[J]. 北京中医药, 2013, 32(2): 157 – 159.
- [31] 王友良. 三维有限元分析在颈椎生物力学中的研究现状[J]. 临床骨科杂志, 2011, 14(1): 89 – 92.
- [32] 魏威, 毕大卫, 郑琦, 等. 颈椎有限元分析模型的应用和进展[J]. 中国骨伤, 2010, 23(5): 400 – 402.
- [33] 秦太平, 张晓刚, 宋敏. 有限元分析在中医正骨手法治疗腰椎疾病作用机制中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(26): 4913 – 4917.
- [34] 王艳国, 张琪, 刘凯. 有限元法在腰椎运动学分析中应用的研究进展[J]. 中国康复医学杂志, 2013, 28(7): 688 – 690.
- [35] 张慧, 张军, 钱秀清, 等. 有限元分析法在脊柱生物力学中的应用与进展[J]. 中国中医骨伤科杂志, 2014, 22(10): 71 – 73.
- [36] 李义凯. 脊柱推拿生物力学研究的几个关键问题[J]. 医用生物力学, 2013, 28(3): 255 – 258.

(2016-05-31 收稿 2016-08-01 修回)