

文章编号:1004-7220(2022)04-0766-05

有限元法在足踝生物力学研究中的应用进展

国婷婷, 谢红

(上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201620)

摘要:有限元法以其高效、精确、可重复利用等特点成为生物力学研究的有效工具。由于足踝部位复杂的解剖结构和运动特性,有限元法可以借助强大的仿真建模和数据计算能力解决真实实验难以解决的问题,具有独特的优势并得到了广泛应用。本文归纳整理了近5年来国内外应用有限元法研究足踝生物力学问题的文献资料,从足踝在不同运动状态下的生物力学分析、组织特性研究、临床治疗分析以及支具与鞋的研究4个方面进行综述,为足踝生物力学的研究提供理论参考,并对未来有限元法在足踝生物力学领域的应用发展提供新思路。

关键词:足踝;生物力学;有限元法

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2022.04.029

Applications of Finite Element Methods in Foot and Ankle Biomechanics

GUO Tingting, XIE Hong

(School of Textile Fashion, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Finite element method (FEM) has become an effective tool for biomechanical researches because of its high efficiency, accuracy and repeatability. Due to the complex anatomical structure and motion characteristics of foot and ankle, FEM can solve the problems that are difficult to be solved in real experiments with the help of powerful simulation modeling and data calculation ability, which has unique advantages and has been widely used. In this paper, the literatures on foot and ankle biomechanics using FEM at home and abroad in recent five years were summarized, and the following 4 aspects were reviewed: biomechanical analysis of foot and ankle under different motion states, researches on tissue characteristics, clinical treatment analysis, and researches on orthosis and shoes, so as to provide theoretical references for the study of foot and ankle biomechanics, as well as new ideas for the application and development of FEM in the field of foot and ankle biomechanics in the future.

Key words: foot and ankle; biomechanics; finite element method (FEM)

有限元法是一种有效的离散化数值求解方法,早期在复杂工程力学结构问题分析中得到有效应用。随后,有限元法被引入生命科学的定量研究,并在人体生物力学研究中展现了极大优越性^[1]。

足踝作为人体负重的主要关节,为人体的大部分活动提供动力,在运动中极易损伤。有限元法在各种足踝生物力学的研究中应用非常广泛,可用于分析足踝运动的损伤机制、各种足踝部手术的效果模

收稿日期:2021-08-16; 修回日期:2021-10-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC2000901)

通信作者:谢红,教授,E-mail: xiehong99618@126.com

拟,还可以应用于建立特定足型的有限元分析模型,以针对性定制护具、矫形器或者治疗方案。为进一步了解有限元法在足踝生物力学研究中的应用进展,本文归纳整理了近5年来使用有限元法研究足踝生物力学的主要工作,从足踝在不同运动状态下的生物力学分析、组织特性研究、临床治疗分析以及支具与鞋的研究4个方面进行综述。

1 足踝在不同运动状态下的生物力学分析

在足踝部运动状态的研究中,步态分析是关注的热点,并主要集中在足底落地方式对足踝内部组织的影响。在生物力学研究中,尸体标本试验只能针对步态周期中的某一瞬间进行研究,而有限元模拟可以分析整个步行周期足部各解剖结构的应力、应变及位移变化,可为各种由于步态造成的足部疾病的提供思路。常桐博等^[2]对慢跑时足底不同触地模式进行有限元模拟,结果发现,后足触地和非后足触地模式下,距上关节面软骨上接触应力较为均匀,而非后足触地模式下足底筋膜、楔舟足底韧带和弹簧韧带的受力均大于后足触地模式。张雷雷等^[3]对足部不同姿态进行仿真分析,结果表明,前掌先着地时,足部负荷集中于前掌,导致跖骨应力和足底筋膜受力增加;足跟先着地时,足部负荷集中于后跟,跟骨应力增加。Enrique等^[4]通过有限元模拟足模型在足跟着地、足中着地和足前脚掌着地3种不同着地方式下的奔跑状态发现,后脚着地时高应力集中于距骨和距下关节,足底压力峰值位于足跟处,而足前掌着地和足中着地的高应力集中于跖骨,足底压力峰值位于跖骨下;并且,冲击角度对降低足底压力的作用大于接触面刚度。在步态中,前掌或足中部先着地时,跖骨和足底筋膜的受力增加,容易引起损伤,建议患有足底筋膜炎的人群避免采用这种触地模式,而长期采用后足触地模式可能会提高舟骨和足跟处的损伤风险。不论是何种着陆方式,都应避免长时间高负荷的重复刺激,尤其对于已有相关疾患的人群,应该选择自己合适的运动方式和程度。

有限元法同样被运用于一些足踝部特殊动作的分析。常桐博等^[5]为探究太极拳对踝关节疾病康复的影响,建立足踝部三维有限元模型,对太极拳搂膝拗步动作进行分析,发现在该动作中足踝距

上关节和距下关节的接触应力普遍小于步行时接触应力,但距腓前韧带、跟腓韧带和距腓后韧带最大拉力均高于对应步态中的最大拉力。该研究认为,踝关节炎患者可以适当练习太极拳,但踝关节扭伤患者在练习时应该适当减小足踝的动作幅度。周恩昌等^[6]通过模拟膝盖0°、5°、10°、15°、20°、25°、30°内翻了解踝关节的接触特征,结果表明,随着膝内翻角度的增加,胫距关节的峰值应力增加并外移,足底出现代偿性外翻,有诱发创伤性关节炎及扁平足的风险。

2 足踝组织特性的研究

了解足踝韧带、关节软骨等组织的特性对于帮助保持足踝的健康稳定和功能健全非常重要。Zhu等^[7]模拟后外侧韧带依次被切断后的踝关节运动,与正常踝部的距腓骨、胫距骨、胫腓骨和距跟骨的间隙进行比较。结果显示,踝关节外侧后韧带,尤其是跟腓韧带和胫腓后下韧带,在维持踝关节稳定性方面起着重要作用,胫腓后下韧带对距下关节稳定性有重要影响。Marta等^[8]分别构建健康状态、切除距腓前韧带以及切除距腓前韧带和跟腓前韧带3种模型,使距骨内旋不同角度。结果发现,不论哪种模型,随着内旋角度增大,不仅踝关节软骨的最大接触压力会增加,还会产生新的软骨接触区域,论证了踝关节外侧韧带的损伤与旋转踝关节不稳和病理性软骨损伤的关联性。

Zhang等^[9]构建了裹足后的足部三维模型,将软骨弹性模量分别设为1、5、10、15 MPa,模拟平衡站立时的应力分布。结果发现,随着软骨刚度的增加,第5跖骨的应力峰值明显增加,也导致中足和前足关节接触压力的普遍增加,据此认为由于脚部的束缚,软骨刚度增加,进而增加了足部疼痛和足弓损伤的风险。

3 足踝临床治疗分析

3.1 韧带重建

了解韧带和重建后的内部的应力有助于更好地了解韧带重建的生物力学行为。Wang等^[10]利用有限元模型分别模拟使用腓骨短肌、腓骨长肌肌腱或异体肌腱重建外侧韧带,发现异体肌腱重建显示出与健康踝关节相似等效的应力和应变,在不考虑并

发症的情况下, 异体肌腱重建可能优于踝关节外侧韧带重建。除了肌腱重建外侧副韧带, 非解剖性肌腱固定术也被用于踝关节外侧韧带重建。Xu 等^[11]对弹簧韧带进行 4 种重建方法的仿真, 并对重建模型的距舟背屈和外展、后足外翻和跗横关节的接触特征进行量化, 认为弹簧韧带的非解剖重建是矫正平足的中、后足畸形的最佳方法。

3.2 拇外翻治疗

有研究建立了拇外翻微创截骨手法整复术后的有限元模型, 将“裹帘”外固定绷带对皮肤的应力作为机械载荷分区域施加在皮肤表面, 对 6 种状态下的足部模型进行模拟和实验验证, 发现基于“裹帘”法外固定可有效保持截骨端周围稳定, 有利于骨折愈合^[12-14]。对于截骨手术后的外固定方法, Mao 等^[15]对比克氏针、绷带和玻璃纤维的力学特性和稳定性, 结果表明, 玻璃纤维固定可以更有效地减少截骨端的相对移动, 并且获得更大的压缩应力, 有助于骨折的愈合。

3.3 扁平足治疗

在临床上, 由于扁平足患者的畸形个体差异以及患病程度不同, 外科医生在选择合适的手术方案时面临困难。Wang 等^[16]建立平足有限元模型, 进行跟骨内侧截骨术和外侧柱延长术的手术模拟, 发现两种手术都减轻了距舟关节周围的应力, 但外侧柱延长术的改善效果明显优于跟骨内侧截骨术。进一步分析跟骨内侧截骨术不同参数对术后效果的影响, 发现横向角度和平移距离对手术效果影响较大, 而矢向角度和截骨位置影响较小^[17]。刘付胜华等^[18]对 II 期成人获得性平足三维骨骼模型进行重建, 并模拟内侧柱稳定手术干预后的负重力学分析。结果表明, 单纯内侧柱稳定手术并不能降低 II 期成人获得性平足内侧柱的压力, 它仅可以作为联合使用的手术来稳定过度活动的关节以及纠正前足旋后畸形。

早期成人获得性平足畸形 (I - II a - II b) 的治疗方法主要集中在加强肌腱性能、单独或联合截骨等, 但对于 III 期足畸形刚性需要更严苛的治疗, 如后足关节融合术。Cifuentes 等^[19]模拟了单独关节和三关节融合的扁平足案例, 结果表明, 当关节融合术在原位进行时, 距舟关节融合术能显著降低应力, 其效果优于单独距下关节融合术, 而跟骰关节融合术可显

著降低足底筋膜和弹簧韧带的应力, 但会使融合关节周围产生较高的应力集中。有学者构建了 II a 期成人获得性平足三维有限元模型, 并分别植入合适型号的 I 型及 II 型距下关节制动器, 进行站立状态模拟^[20-21]。结果发现, 两种制动器均可有效地将 II a 期成人获得性平足内侧跖骨的压力转移至外侧并稳定足弓, 但 II 型制动器矫形效果优于 I 型。

4 足踝护具与鞋的研究

应用三维有限元法对足踝护具与鞋进行生物力学分析, 可以高效进行多种材料、多种结构的测试, 并提供个性化定制, 优化护具与鞋的设计。Wu 等^[22]提出一种膝-踝双关节支架, 以减少在落地冲击时高地面反作用力造成的下肢损伤, 该双关节防护支架在没有过度限制关节活动度的情况下有效减少了踝关节和膝关节受伤的风险。柯思成等^[23]建立了足部-鞋底-地面三维有限元仿真模型, 分析鞋底和足底的受力情况, 可对不同材料和结构鞋底的减震性能进行预测。

矫形鞋垫常被设计用来降低足底压力峰值, 关节软骨及足底筋膜的应力等, 在糖尿病足底溃疡及扁平足的治疗和矫正方面应用广泛。Peng 等^[24]建立平足有限元模型, 以穿着不同足弓高度的矫形器时步行的肌力驱动。结果表明, 矫形器足弓支撑高, 可以降低近端足底筋膜的应力和应变, 但同时也导致足中部足底接触压力和足底筋膜负荷度的增加。曹子君等^[25]研究认为, 多孔鞋垫能降低足部软组织表面压力和内部应力。章浩伟等^[26]探究不同结构和材料刚度的矫正鞋垫对足部应力集中和内部关节软骨及筋膜应力的作用效果, 发现足弓高度 30 mm、楔形角度 5°、刚度 1 MPa 的矫正鞋垫的作用效果最优。

鞋类的舒适性是鞋产品设计的重要考虑因素之一, 有限元法可以辅助建立鞋类的舒适性评价体系。胡明宇等^[27]通过模拟鞋类的曲挠度测试论证了有限元方法预测曲挠度的可行性, 而罗向东等^[28]对静止站立状态下足部跖围受力与变形状况进行模拟测试, 对比经大量试穿证明舒适性较好和舒适性较差的男士正装鞋, 结果表明, 影响舒适度的因素包括植底突度、植面曲率、轴线位置, 而舒适的鞋植形成的足部跖围横断面的应力应变表现较相近。

5 有限元分析在足踝生物力学研究中的优势与局限性

三维有限元法为足踝生物力学问题的研究提供了一个很好的手段,其优势在于:①有限元法不仅能重建复杂的足踝结构,模拟各种运动状态,而且还能对足踝内部结构的应力应变及形变进行评估,并得到精确的参数;②人体组织形状及病变具有差异性,有限元法可以有针对性地设计治疗方案,预测治疗效果;③有限元法应用于足踝部支具、矫形器、鞋的研究,可以精确高效地优化产品设计,降低开发成本。

有限元法同样具有局限性:①目前的有限元分析模型数据来源于个体CT、MRI等图像,具有个体特异性,分析结果是否广泛适用还需讨论;②组织材料的力学参数多来自生物实验的测量,尤其是尸体实验,并且在计算过程中,足部的某些组织会被考虑为各向同性、均质的线弹性材料,与真实的人体情况有一定差距;③有限元法是一种理想化数值模拟方法,力的传递依赖接触的设定,而接触关系只能通过公式简单定义,难以实现足踝各内部组织之间以及足与支具、鞋之间的真实接触;④有限元分析的过程中,从模型构建到输出结果,每个步骤都会有一定程度的简化,对于结果的精确度有无法避免的影响;⑤有限元法目前已经成为一种较为成熟的解决生物力学问题的方法,在应用以及文献报道等方面也形成了相应的规范标准,但目前很多已发表的资料在实验过程或文献表述中存在一定的不规范,对于未来模型和数据的共享及拓展造成了限制。

6 展望与结论

随着科技的进步和多学科交叉促进,有限元法的仿真度、精确度和计算效率将进一步提升,对于足踝生物力学方面的研究应用将逐步深入。在技术的推动和需求的引导下,有限元法具有广阔的发展前景。

6.1 运动模拟

有限元分析软件的逐步升级使得模型的运算能力更加强大,模拟人体运动学机制的算法和技术也在不断进步,对足踝复杂的动作的分析,尤其是

连续动态的非线性运动模拟,可以提高人们对足踝在各种运动过程中的生物力学特征的了解,为研究足部运动功能、损伤机制及康复方案提供可靠的依据。

6.2 临床治疗

有限元法是基于实验数据的数值分析方法,随着医学影像技术和生物材料测试技术的发展,可以对细微的结构,如韧带、肌肉等进行精确构建和模拟,使其对于足踝各类疾病及损伤的治疗手段的模拟更加真实,从而分析总结规律,对于个体化的生理和病理条件下的治疗方案的确立有更好的支持。

6.3 护具研发

随着健身成为越来越多人选择的生活方式,运动损伤成为不可忽视的风险,从而促进运动防护产品行业进入新的发展阶段。有限元法的优势在于能够模拟极端情况下的负载响应及其损伤机制^[29]。在产品研发过程中,精确预测足踝护具防护效果,可以为足踝运动损伤防护产品的设计研发提供有效参考。

6.4 通用模型构建

人体组织结构复杂,模型构建过程十分繁琐,未来若是能搭建具有权威性、标准化、可编辑的三维人体有限元模型供研究人员使用,将会节省大量时间和成本,对有限元法的发展有进一步的推动作用。

有限元法为足踝生物力学的研究开辟了新渠道,使对足踝的研究从人体外部的力学特征分析逐渐深入到内部的力学机制探究,在足踝损伤机制研究、治疗效果评估、足踝矫形器研发以及鞋类设计等方面均有所突破。虽然目前有限元法的运用仍然存在一定不足,但是相信随着计算机硬件的进步、有限元软件的升级以及各种用于模拟生物材料分析算法的不断更新,有限元法在足踝生物力学领域的应用将更加高效可靠。将来有限元法的应用也会更加广阔,有望在运动模拟、临床治疗以及护具研发等方面起到促进作用,人体有限元通用模型的构建将更进一步推动有限元法的发展。

参考文献:

- [1] 李建设,顾耀东.有限元法在运动生物力学研究中的应用进展[J].体育科学,2006,26(7):60-62.

- [2] 常桐博, 李岩, 牛文鑫, 等. 不同触地模式慢跑的足踝有限元分析[J]. 上海体育学院学报, 2020, 44(12): 53-59.
- [3] 张雷蕾, 王盟圣, 徐大伟, 等. 足部三维有限元建模及其多姿态生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(30): 4799-4804.
- [4] MORALES-ORCAJO E, VALLEJO R, IGLESIAS ML, *et al.* Foot internal stress distribution during impact in barefoot running as function of the strike pattern [J]. *Comput Method Biomec*, 2018, 21 (7): 471-478.
- [5] 常桐博, 王宽, 黄尚军, 等. 太极拳搂膝拗步动作的踝关节生物力学分析[J]. 生物医学工程学杂志, 2021, 38(1): 97-104.
- [6] 周恩昌, 葛英林, 侯广武, 等. 膝内翻对踝关节接触特征影响的有限元分析[J]. 临床骨科杂志, 2016, 19(4): 504-507.
- [7] ZHU ZJ, ZHU Y, LIU JF, *et al.* Posterolateral ankle ligament injuries affect ankle stability: A finite element study[J]. *Bmc Musculoskel Dis*, 2016, 17(1): 1-7.
- [8] MARTA G, QUENTAL C, FOLGADO J, *et al.* Contact patterns in the ankle joint after lateral ligamentous injury during internal rotation – A computational study [J]. *P I Mech Eng H*, 2020, 235(1): 82-88.
- [9] ZHANG Y, AWREJCEWICZ J, BAKER JS, *et al.* Cartilage stiffness effect on foot biomechanics of Chinese bound foot: A finite element analysis [J]. *Front Physiol*, 2018, 9(1): 1434.
- [10] WANG CW, MUHEREMU A, BAI JP, *et al.* Use of three-dimensional finite element models of the lateral ankle ligaments to evaluate three surgical techniques [J]. *J Int Med Res*, 2018, 46(2): 699-709.
- [11] XU C, LI MQ, WANG CG, *et al.* Nonanatomic versus anatomic techniques in spring ligament reconstruction: Biomechanical assessment via a finite element model [J]. *J Orthop Surg Res*, 2019, 14(1): 114.
- [12] 边蕾, 胡海威, 温建民, 等. 足部相关肌肉、肌腱组织材料弹性模量的测定[J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(12): 1919-1923.
- [13] 毕春强, 温建民, 孙卫东, 等. 静态有限元法分析基于“裹帘”法外固定拇外翻术后截骨端的稳定性[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(22): 3294-3300.
- [14] 谢飞, 常程, 温建民, 等. 拇外翻足有限元模型建立及“裹帘”外固定下的生物力学分析[J]. 中华中医药杂志, 2020, 35(3): 537-541.
- [15] MAO R, GUO JC, LUO CY, *et al.* Biomechanical study on surgical fixation methods for minimally invasive treatment of hallux valgus [J]. *Med Eng Phys*, 2017, 46 (1): 21-26.
- [16] WANG Z, KAN I, KIDO M, *et al.* Study of surgical simulation of flatfoot using a finite element model [J]. *Smart Innov Syst Technol*, 2016, 45(1): 353-363.
- [17] WANG Z, KIDO M, KAN I, *et al.* Towards patient-specific medializing calcaneal osteotomy for adult flatfoot: A finite element study [J]. *Comput Method Biomec*, 2018, 21(5): 1-12.
- [18] 刘付胜华, 许鉴, 赵秉诚, 等. 内侧柱稳定手术治疗Ⅱ期成人胫后肌腱功能不全性平足的三维有限元生物力学分析[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(18): 2805-2810.
- [19] CIFUENTES C, LARRAINZAR-GARIJO R, BAYOD J. Analysis of biomechanical stresses caused by hindfoot joint arthrodesis in the treatment of adult acquired flatfoot deformity: A finite element study [J]. *Foot Ankle Surg*, 2019, 26(4): 412-420.
- [20] 许鉴, 彭亮权, 陆伟, 等. 不同类型距下关节制动器治疗Ⅱ期成人获得性平足的生物力学比较[J]. 中国骨科临床与基础研究杂志, 2019, 11(1): 30-37.
- [21] JIAN X, XIN M, WANG D, *et al.* Comparison of extraosseous talotarsal stabilization implants in a stage II adult-acquired flatfoot model: A finite element analysis [J]. *J Foot Ankle Surg*, 2017, 56(5): 1058-1064.
- [22] WU X, PEI B, WANG W, *et al.* Finite element analysis of a novel approach for knee and ankle protection during landing [J]. *Appl Scil*, 2021, 11(4): 1912.
- [23] 柯思成, 谢红, 李杰聪. 有限元建模技术在预测鞋底减震性能中的应用研究[J]. 皮革科学与工程, 2020, 30(1): 68-73.
- [24] PENG YH, WONG DWC, CHEN TLW, *et al.* Influence of arch support heights on the internal foot mechanics of flatfoot during walking: A muscle-driven finite element analysis [J]. *Comput Biol Med*, 2021, 132(1): 104355.
- [25] 曹子君, 王芳, 何耀广, 等. 糖尿病患者足底压力和鞋垫减压结构的有限元分析[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27(7): 852-858.
- [26] 章浩伟, 杨俊彦, 刘颖, 等. 伴有足中关节炎的扁平足患者矫正鞋垫的生物力学研究[J]. 中国生物医学工程学报, 2020, 39(3): 327-334.
- [27] 胡明宇, 宋颖, 文勇, 等. 利用有限元方法预测女鞋底曲挠度的可行性研究[J]. 皮革科学与工程, 2019, 29(4): 54-57.
- [28] 罗向东, 薛朝华, 段思岐, 等. 面向舒适度评价的正装鞋跟围截面有限元分析[J]. 机械工程学报, 2021, 57(5): 222-230.
- [29] 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.
- YUANG F, XUE QH, LIU WQ. Recent advances about finite element applications in spine biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2013, 28(5): 585-590.