

有限元分析技术在膝关节生物力学研究中的应用现状

陈彦飞¹ 赵勇^{2△} 鲁超¹

【关键词】 有限元分析;膝关节;模型;仿真;假体

【中图分类号】 R684.3 【文献标志码】 A 【文章编号】1005-0205(2019)08-0081-03

有限元分析法(Finite Element Analysis, FEA)是利用有限数量的模拟量去模仿无限单元的真实结构,将各形质构造数字化进行计算的过程,是矩阵结构在力学领域中的延伸。有限元分析技术最初应用于航空领域,Rybicki 等^[1]将其引入到骨科后催生了骨外科学-生物力学这一新生的交叉学科。有限元分析已广泛应用于膝关节生物力学的研究中,对膝关节的康复及外科材料的发展有重要的参考价值。笔者将有限元分析技术在膝关节生物力学研究中的应用现状作一归纳,概述如下。

1 原始数据的采集与提取

有限元分析符合人体生物力学研究的可视化和无创性要求^[2],数字化模型的计算加载及分析则得益于新技术的发展。有限元法的建模格式主要有几何建模、组织切片法、三维坐标法、基于影像资料建模和 DICOM 数据建模法。人体运动系统的建模目前多采用后两者,能更加直观和简单提取模型的基本构造。原始数据采集主要有 CT 和 MRI 两种方式,扫描层厚现在均已降至 1 mm 以下,采集的数据以 DICOM 格式保存,在 Mimics 软件等专业系统中提取界限性数据,并利用 Ansys 分析软件等进行合成加工最终得到有限元模型。CT 和 MRI 提取原始数据的区别在于,CT 对骨性结构的显影敏感,分辨率较高,能有效剔除软组织的干扰,这样就有利于骨骼框架模型的提取和搭建;而 MRI 则对肌肉、韧带等软组织显像较清晰,能分辨各软组织的界限,并对液性物质的显示较清晰。

但无论哪种格式的原始资料,其仿真程度都不能达到百分之百,CT 虽能清晰分辨骨性结构,但其对软骨、皮质骨、松质骨的区别较模糊;MRI 也不能将所有软组织加以区别构造,否则会对其他结构形成覆盖,影响力学加载,某些情况下甚至需要 3D 插补法等手动测绘完成主要测试结构^[3]。为了兼容二者的优势,有研究者^[4,5]将 CT 和 MRI 图像进行混合采集,建立了符合解剖学属性的三维模型并验证其有效性。但 CT 和 MRI 融合搭配使用也存在矩阵变换、定位重合等技术难点,而且还存在伦理学方面的异议,现在较少使用。

2 骨性结构模型的构建及生物力学分析

骨性结构三维模型的构建主要依赖于计算机断层扫描所提取的原始数据合成,磁共振也可作为初始图像供选择。将二维断层影像数据导入 Mimics 系统,采用阈值分割、空腔填充、区域增长以及三维成像等得到几何模型^[6,7]。在膝关节构成中股骨是最早被应用于有限元模拟加载的,骨骼的几何模型确立以后,需要逆向工程形成有限元模型。由于股骨远端、胫骨近端的不规则形态,这就对网格划分提出了较高的要求,如何把握划分密度及处理好网格过渡至关重要。有限元分析模型可将各网格单元塑造成三维性四面体或六面体,网格划分越合理,计算精度也就越高。膝关节的应力承载与传导是与其周围软组织在一个统一的复合体内完成,研究过程中需将范围局限化,条件界限化,所需的框架大致包括股骨下段、胫腓骨上段、髌骨以及半月板和部分韧带。这就要求对模型确定边界以增强模型仿真性,三维网格划分完成后系统会自动测试提醒不合理的网格单元,需反复修改,并最大限度保证生理状态下骨质的厚度。有效的膝关节有限元模型需要赋予各组织相应的材料属性,正常骨质是由钙质和胶原纤维结合的复合材料,骨组织的刚性要大于软组织,但韧性不及软组织,变形性较小,因此将股骨和胫骨设置为弹性时间常数较大的同向性的线弹性材料。赋值过程中还涉及到组织的剪切模量、黏弹性、极限应力、加

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费自主选题
(ZZ11-034)

北京市科委首都临床特色应用研究与成果推广项目
(Z151100004015158)

陕西省科技厅自然科学基金基础研究项目(2017JM8118)

¹ 西安交通大学附属红会医院(西安,710054)

² 中国中医科学院望京医院

△通信作者 E-mail:zhaoyong423@163.com

载时的应变度,以及不同骨质的形态学改变^[8,9]。基于此,模拟过程中又引入了CT的骨密度值,在网格划分后根据个体网格进行赋值,进而增加了有限元分析的精准度。

3 软组织模型的构建及生物力学分析

膝关节模型的加载涉及到半月板、股四头肌肌腱、髌韧带、交叉韧带、侧副韧带等结构。股四头肌腱和髌韧带因为形态较大,不管是CT和MRI,都容易提取,而交叉韧带等因为范围较小,且与周围软组织紧密贴合,不易直接提取,所需手动提取或者在三维模型状态下根据解剖走行进行绘制。王海鹏等^[10]采用金属标记韧带起止点,对膝关节标本进行扫描获得初始图像,并进一步进行三维重建,获得了形态逼真的膝关节韧带模型。王星亮等^[11]则基于MRI成像利用3D Livewire功能提取软组织的目标轮廓构建动态化的髌股关节运动轨迹,在屈膝过程中,韧带能协同关节完成测试。姬林松等^[12]利用MRI二维数据在软件中分割所需软组织,采用Calculate polylines命令计算模型轮廓线,并通过编辑蒙板工具补充不连续的缺损,模拟伸膝状态下的应力分析,发现软骨缺损处的应力明显升高。但无论哪种造模方法,因为都是在提取主要结构、剔除其他附着软组织的基础上进行,因此其实验结果也不能接近真实人体力学,后续研究需要尸体标本或在体实验验证。材料属性的赋值上软骨的黏弹性常数接近骨组织,但其弹性更大,和韧带一同视为同向性线弹性材料,半月板则为横向同性材料^[13]。但对软组织的认知差异和提取方法的不同,就会使提取的软组织形态薄厚不一,如此则加载结果也会有5%~10%的偏差^[14],因此,如何利用影像学资料完整准确地提取软组织并造模成为当下有限元分析研究的难点。

4 有限元分析在膝关节手术中的应用

4.1 内固定手术中的应用

膝关节内固定手术的目的在于重建解剖结构,恢复膝关节的承载和运动功能,分为骨折的固定以及韧带重建等。有限元分析可以模拟膝关节的损伤机制,并对内固定术后对组织结构的应力改变可行数字化解读,对临床使用固定方式的选择大有裨益。由于骨折后形态的随机性以及内固定物的多样性,为了契合临床实用性和模型的仿真性,就需要在模拟过程中合理的划分网格单元,准确把握各应力性结构的力学作用,这有助于提高分析结果的可靠性和准确度^[15]。刘世军等^[16]应用有限元分析模拟不同固定方式治疗胫骨平台后外侧1/2骨折,发现前侧拉力螺钉固定在稳定性方面优势明显,并通过尸体标本验证。赵英红等^[17]建立了胫骨平台骨折模型,并通过胫骨平台外载荷加载发现正常人和骨折患者的应力集中均出现在胫骨中

上1/3,而且患者的骨折部位也会出现应力集中,但应力面的峰值应变方位相反,常人在内侧,而骨折患者在胫骨平台外侧。黄晓燕等^[18]应用髌骨骨折的有限元模型比较不同固定方式的应力分散发现螺栓固定压力更强,而钢丝固定则能更好地集中应力。有限元分析技术的优势不仅体现能反应膝关节的损伤机制,它还可以逆向验证并创新骨科技术及理论。吴慧敏等^[19]通过建立C3型股骨远端骨折模型提出“双柱理论”,并指出骨折的治疗过程中重建内侧柱的稳定性至关重要。Bae等^[20]通过有限元分析模拟发现,切除半月板后会改变膝关节的应力机制,加速关节软骨的退变,而且进一步模拟发现人工软骨治疗退行性骨关节炎的可行性。随着计算机交叉学科的发展,既往少有涉猎的软组织应力研究也成为可能,借助动态模拟膝关节的稳定性可以了解到所涉及韧带的功能以及在屈伸活动中扮演的角色。谢强^[21]通过动态膝关节模拟发现后交叉韧带具有抗内翻和抗外旋的作用,如果后交叉韧带损伤则会引起其他韧带的继发损伤,并会降低膝关节的稳定性。因此,在膝关节的手术治疗过程中,需要关注骨与软组织等结构的完整性,合理的有限元模型可以为临床治疗提供更加逼真的数据参考。

4.2 外固定手术中的应用与价值

骨外固定的作用除了维持骨骼支撑框架的连续性和完整性,还可发挥分散和转移部分生理性应力,从而起到维持膝关节生理性生物力学运转的作用^[22]。目前临床常用的外固定多以基于Ilizarov外固定器代表的外架较多,随着材料技术的不断进步,固定材料的更新换代也为临床治疗提供了更多的治疗选择。如新型碳纤维支架能达到和传统不锈钢支架相同的力学承载,而且便于病人携带。WATSON等^[23]利用有限元测试固定夹对固定杆的影响,发现在维持等张力情况下固定支架的应力会降低。王志杰^[24]进一步研究发现固定针的直径越小,其抗应变的张力也越小。刘峰卫等^[25]利用Ilizarov外架治疗退行性膝关节炎内侧间室病变患者,可准确矫正膝关节内翻畸形,并作为弹性固定有利于促进截骨端骨质愈合,这也印证了外固定器转移膝关节承重应力的有效性,符合张应力法则。另外,中医小夹板和支具也能制动膝关节,增强局部稳定性,但目前有关的生物力学研究较少,未来将成为中医夹板技术走向世界必需开展的研究之一。

4.3 膝关节假体的生物力学分析

膝关节置换手术包含为膝关节表面置换和单髁置换以及肿瘤膝置换,假体型号、使用年限、材料构成等都对手术的成功起着重要作用。有限元分析有助于膝关节生物力学研究的开展,手术前后对假体的选择及改进、手术方式以及患者的康复锻炼都具有重要的指

导作用^[26]。强硕等^[27]对肥胖患者膝关节置换中胫骨延长杆的应力分布研究发现,在三维模型中胫骨延长杆能有效分散来自胫骨近端的压力,而且胫骨平台骨质较差时建议选择 100 mm 延长杆,有助于防止假体松动、延长假体寿命,这与临床研究的结果也相吻合^[28,29],证明了有限元分析的有效性。有限元分析的发展还为新技术的开展提供了疗效鉴别的证据,及时纠正和改进治疗方案能减少不必要的操作。贾笛等^[30]通过单髁置换的有限元分析发现,单髁置换术后会加重对侧间室的压力,加速膝关节的退变进程。Zhu 等^[31]研究胫骨底座放置的不同位置比较,假体的内翻、外翻超过 4° 均会影响其使用寿命和手术质量,相关临床研究^[32,33]也发现假体的接触面越大,越能有效分散人体受力,延缓假体磨损,否则会增加关节的翻修率。借助 3D 打印技术的日趋成熟,有限元分析在关节置换手术中的仿真分析将进一步指导临床走上一个新的台阶。

5 总结与展望

综上所述,有限元分析技术极大地促进了膝关节生物力学研究的发展,涌现出了不少的新技术和成果,为临床研究提供了重要的参考。但仍然存在其局限性,主要表现在软组织塑造、模型构建的差异及有效性验证、新型复合材料属性的确定等。尽管存在不足,但随着计算机技术的革新,膝关节的有限元分析研究将更趋完善和成熟。更精确的有限元模型和计算分析方法的产生将带动生物力学研究的飞跃,为膝关节疾病更加精准化的诊治提供重要的参考。

参考文献

- [1] RYBICKI E F, SIMONEN F A, WEIS E B. On the mathematical analysis of stress in the human femur[J]. J Biomech, 1972, 5(2): 203-215.
- [2] Author's reply to Dr Keating's invited commentary[J]. Journal of Orthopaedic Trauma, 2013, 27(1): 42.
- [3] 鲍春雨, 郭宝川, 孟庆华. 人体膝关节有限元模型建立及其有效性验证[J]. 应用力学学报, 2017, 34(3): 559-563.
- [4] 王傲寒, 董万鹏, 张震, 等. 膝关节三维有限元模型的建立和验证[J]. 计算机辅助工程, 2018, 27(5/6): 68-76.
- [5] 徐志才, 胡广洪, 黄振宇, 等. 胫骨模型对膝关节有限元分析结果影响的探讨[J]. 中国数字医学, 2014, 9(4): 69-72.
- [6] QIN J S, WANG Y, PENG X Q, et al. Three-dimensional finite element modeling of whole lumbar spine and its biomechanical analysis[J]. J Med Biomech, 2013, 28(3): 321-325.
- [7] SHI D, WANG F, WANG D, et al. 3-D finite element analysis of the influence of synovial condition in sacroiliac joint on the load transmission in human pelvic system[J]. Med Eng Phys, 2014, 36(6): 745-753.
- [8] PENA E, CALVO B, MARTINEZ M A, et al. A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint[J]. Journal of biomechanics, 2006, 39(9): 1686-1701.
- [9] RAMANIRAKA N A, SAUNIER P, SIEGRIST O, et al. Biomechanical evaluation of intra-articular and extra-articular procedures in anterior cruciate ligament reconstruction: a finite element analysis[J]. Clin Biomech (Bristol, Avon), 2007, 22(3): 336-343.
- [10] 王海鹏, 容可, 钟砚琳, 等. 膝关节周围韧带三维有限元模型的建立[J]. 上海交通大学学报(医学版), 2008, 28(4): 367-370.
- [11] 王星亮, 刘云鹏, 徐志庆, 等. 基于静态磁共振图像构建髌股关节准动态三维运动模型[J]. 中国临床解剖学杂志, 2017, 35(1): 69-73.
- [12] 姬林松, 李彦林, 黄赞, 等. 三维有限元模拟伸直状态下不同软骨缺损面积对膝关节应力的影响[J]. 中国运动医学杂志, 2015, 34(11): 1048-1053.
- [13] 董跃福, 牟志芳, 蒋胜波, 等. 膝关节有限元解剖模型的构建及其力学分析[J]. 临床骨科杂志, 2015, 18(6): 686-692.
- [14] YANG N H, CANAVAN P K, NAYEB-HASHEMI H, et al. Protocol for constructing subject-specific biomechanical models of knee joint[J]. Computer Methods in Biomechanics & Biomedical Engineering, 2010, 13(5): 589-603.
- [15] WU Y D, CAI X H, LIU X M, et al. Biomechanical analysis of the acetabular buttress plate: are complex acetabular fractures in the quadrilateral area stable after treatment with anterior construct plate-1/3 tube buttress plate fixation? [J]. Clinics, 2013, 68(7): 1028-1033.
- [16] 刘世军, 李治国, 马治国, 等. 三种固定方式治疗胫骨平台后外侧 1/2 骨折的生物力学分析[J]. 创伤外科杂志, 2017, 19(5): 338-342.
- [17] 赵英红, 平杰, 吴仁愿, 等. 胫骨骨折有限元模型建立及生物力学分析[J]. 军事医学, 2016, 40(12): 988-993.
- [18] 黄晓燕, 薛锋, 殷诺, 等. 双螺栓与克氏针张力带固定治疗髌骨横形骨折模型的有限元分析[J]. 生物骨科材料与临床研究, 2018, 15(4): 6-9.
- [19] 吴慧敏, 陈彦胜, 唐华, 等. 建立股骨远端 C3 型骨折有限元模型并提出股骨远端“双柱理论”[J]. 临床骨科杂志, 2018, 21(5): 631-635.
- [20] BAE J Y, PARK K S, SEON J K, et al. Biomechanical analysis of the effects of medial meniscectomy on degenerative osteoarthritis[J]. Med Biol Eng Comput, 2012, 50(1): 53-60.
- [21] 谢强. 三维有限元生物力学分析后交叉韧带断裂后膝关节内翻及外旋时的应力[J]. 中国组织工程研究, 2017, 21(7): 1036-1040.