

有限元分析技术在膝关节生物力学应用中的特点与优势

郭欢萱¹, 康志杰², 白小龙¹, 田晓燕¹, 金凤¹<https://doi.org/10.12307/2025.807>

投稿日期: 2024-05-22

采用日期: 2024-07-01

修回日期: 2024-07-15

在线日期: 2024-08-08

中图分类号:

R452; R318; R605

文章编号:

2095-4344(2025)15-03253-09

文献标识码: A

文章快速阅读: 膝关节生物力学的有限元分析



文题释义:

有限元分析:一种通过计算机模拟复杂结构的物理行为的数值分析方法, 可通过将复杂的连续体划分为有限数量的小单元, 并在这些单元上进行近似求解, 从而得到整个系统的近似解, 该技术广泛应用于工程学和医学等领域。

生物力学:一门应用力学原理和方法研究人体力学问题和现象的学科, 包括人体结构和功能在力学作用的反应, 为疾病的诊断、治疗方案设计及医疗器械开发提供理论基础。

摘要

背景:有限元分析是一种先进的计算机工程技术, 利用数学近似的方法对真实人体进行模拟, 可以真实反映膝关节结构内部的生物力学特征, 为理解膝关节疾病发病机制、优化手术方案以及开发新型植入材料提供了有效的工具。

目的:对膝关节有限元模型的建立及其在膝关节疾病研究中的应用进行综述, 并展望了未来的发展趋势。

方法:第一作者于2024年4月以“Finite Element Analysis, FEA, knee joint, Finite Element Model, Knee Biomechanics, Knee Osteoarthritis, Knee Prosthesis, Knee Ligaments, Meniscus”为英文检索词在PubMed和EI数据库进行检索, 以“有限元分析, 有限元模型, 膝关节, 生物力学, 骨关节炎, 计算模型, 膝关节假体, 膝关节韧带, 半月板”为中文检索词在中国知网和万方数据库进行检索, 最终纳入75篇文献进行分析。

结果与结论:①有限元分析法利用医学影像数据获得三维人体模型, 将复杂的人体关节结构简化为有限且相互连接的单元, 通过对模型施加外部载荷, 直观地显示膝关节内部的应力分布。②研究者通过有限元分析深入研究膝关节在不同工况下的内部应力和应变分布, 可发现膝关节内部载荷分配平衡改变时, 关节软骨的过度负荷及部分区域的负荷下降, 这种长期异常应力会引起软骨变形和磨损, 最终缺失, 对于理解生物力学因素如何引起膝关节退行性变至关重要。③有研究通过有限元分析评估膝骨关节炎患者采用太极拳、步态调整等物理治疗方法的效果, 结果显示这些治疗方法减少了软骨的过度负荷, 为临床治疗提供了科学理论依据。④临床医生通过有限元分析在手术前进行三维重建、数据测量和模拟手术, 能够优化手术治疗策略; 此外, 还可以通过模拟不同假体的力学特征, 改进假体的形状、材料和固定方式, 减少患者的并发症, 提高患者的治疗效果。⑤人工智能与有限元分析相结合使得有限元模型的构建更为精确和易于操作, 极大提高了临床医生医疗实践的效率和患者的治疗效果。⑥有限元分析仅是数字化的模拟, 与真实物理状态仍存在一定差异。

关键词: 膝关节; 关节软骨; 半月板; 生物力学; 有限元分析; 有限元模型; 膝骨关节炎; 关节置换; 人工智能; 综述

Characteristics and advantages in finite element analysis techniques in knee biomechanics

Guo Huanxuan¹, Kang Zhijie², Bai Xiaolong¹, Tian Xiaoyan¹, Jin Feng¹¹Department of Diagnostic Imaging, Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;²Graduate School of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010010, Inner Mongolia Autonomous Region, China

Guo Huanxuan, Master candidate, Department of Diagnostic Imaging, Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010010, Inner Mongolia Autonomous Region, China

Corresponding author: Jin Feng, Chief physician, Department of Diagnostic Imaging, Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010010, Inner Mongolia Autonomous Region, China¹内蒙古医科大学附属医院影像诊断科, 内蒙古自治区呼和浩特市 010010; ²内蒙古医科大学研究生院, 内蒙古自治区呼和浩特市 010010

第一作者: 郭欢萱, 女, 1997年生, 内蒙古自治区包头市人, 汉族, 内蒙古医科大学在读硕士, 主要从事数字医学方面的研究。

通讯作者: 金凤, 主任医师, 内蒙古医科大学附属医院影像诊断科, 内蒙古自治区呼和浩特市 010010

<https://orcid.org/0009-0001-8200-3058> (郭欢萱); <https://orcid.org/0009-0005-0849-0731> (金凤)

基金资助: 内蒙古自治区卫生健康科技项目(202201266), 项目负责人: 金凤; 内蒙古医科大学联合项目(YKD2021LH008), 项目负责人: 金凤

引用本文: 郭欢萱, 康志杰, 白小龙, 田晓燕, 金凤. 有限元分析技术在膝关节生物力学应用中的特点与优势[J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(15):3253-3261.



Abstract

BACKGROUND: Finite element analysis is an advanced computer-based engineering technique that uses mathematical approximations to simulate the human body. This method accurately reflects the biomechanical characteristics within the knee, providing a powerful tool for understanding knee disease pathogenesis, optimizing surgical protocols, and developing new implant materials.

OBJECTIVE: To review the establishment of finite element modelling of the knee joint and its application in the study of knee joint diseases, and look forward to the future development trend.

METHODS: The first author searched the PubMed and EI databases in April 2024 by applying a computer with English search terms “finite element analysis, FEA, knee joint, finite element model, knee biomechanics, knee osteoarthritis, knee prosthesis, knee ligaments, meniscus” and searched CNKI and WanFang databases with Chinese search terms “finite element analysis, finite element model, knee joint, biomechanics, osteoarthritis, computational model, knee prosthesis, knee ligament, meniscus.” Finally, 75 papers were included in the analysis.

RESULTS AND CONCLUSION: (1) Finite element analysis method uses medical imaging data to obtain a three-dimensional human model, simplifies the complex human joint structure into finite and interconnected units, and visually displays the internal stress distribution of the knee joint by applying external loads to the model. (2) The researchers deeply study the internal stress and strain distribution of the knee joint under different working conditions by means of finite element analysis, revealing the overloading of the articular cartilage and the decrease of load in some areas when the balance of the internal load distribution of the knee joint is changed, and that such long-term abnormal stresses cause deformation, wear and tear, and eventual loss of cartilage, which is crucial for understanding how biomechanical factors cause degenerative changes of the knee joint. (3) The effect of physical therapy methods such as Tai Chi and gait adjustment in patients with osteoarthritis of the knee joint was evaluated by finite element analysis, and the results showed that these treatments reduced the overloading of the cartilage, which provided a scientific theoretical basis for clinical treatment. (4) Clinicians are able to optimize surgical treatment strategies by performing three-dimensional reconstruction, data measurement, and simulation of surgery before surgery through finite element analysis. Furthermore, the mechanical characteristics of different prostheses can be simulated to improve the shape, material, and fixation of the prostheses, reduce patient complications, and improve patient outcomes. (5) The combination of artificial intelligence and finite element analysis makes the construction of finite element models more accurate and easy to operate, greatly contributing to the efficiency of clinicians' medical practice and patient outcomes. (6) Finite element analysis is only a digital simulation, which is still somewhat different from the real physical state.

Key words: knee joint; articular cartilage; meniscus; biomechanics; finite element analysis; finite element model; knee osteoarthritis; joint replacement; artificial intelligence; review

Funding: Health Science and Technology Project of Inner Mongolia Autonomous Region, No. 202201266 (to JF); Joint Project of Inner Mongolia Medical University, No. YKD2021LH008 (to JF)

How to cite this article: GUO HX, KANG ZI, BAI XL, TIAN XY, JIN F. Characteristics and advantages in finite element analysis techniques in knee biomechanics. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu.* 2025;29(15):3253-3261.

0 引言 Introduction

膝关节是人体最大、最复杂的关节之一，由于其承受的力学负荷过重，容易受到各种损伤和疾病的影响，例如膝关节退行性变和软组织损伤等，这些病变可以导致明显的力学异常，降低关节的稳定性，影响患者的运动能力，生物力学研究是预防和治疗膝关节疾病的重点^[1-2]。因此，为了更好地了解膝关节疾病的发生机制，许多学者基于尸体标本对膝关节的生物力学进行了探究。尸体研究虽然直观准确，但目前获取尸体标本仍非常困难，且难以保存，这在很大程度上限制了膝关节的生物力学研究^[3]。

有限元分析法作为一种非侵入性的体外研究方法，可以根据医学影像资料和解剖学特征建立人体三维仿真模型，利用有限且相互关联的单元简化人体复杂的关节，通过在模型上施加外部载荷获得生物力学云图，直观准确地展示膝关节内部的应力特征，弥补了传统尸体标本不足的缺陷。有限元分析法是一种计算机工程类技术，其最早应用于航空领域，随着计算机技术的快速发展，逐渐广泛应用于医学、力学和电磁学等领域中^[4-5]。在1972年，BREKELMANS等^[6]和RYBICKI等^[7]首次将有限元分析法引入骨科研究领域，随后CHAND等^[8]首次使用有限元分析法对膝关节生物力学进行研究。该技术无须昂贵设备，且具有可重复模拟操作、高仿真度及准确分析结果等优势，因此，在骨科的生物力学领域得到了广泛的应用^[9]。

近年来，有限元分析法广泛用于探究膝关节疾病的发病机制和治疗方法的力学研究，并且在优化假体设计和指导手术方式等方面发挥了重要作用。然而，尽管有限元分析法在理论上具有显著的应用潜力，但由于其操作步骤的复杂性，临床医生对此方法不熟悉，因此未能在

临床工作中得到广泛应用。既往研究主要集中在论述有限元分析在膝关节手术中的应用，尚无对膝关节疾患进行分类。文章旨在综述膝关节有限元模型构建和有限元分析法在膝关节疾患发病机制和常见治疗方法中的应用，并总结有限元分析法结合人工智能技术在临床实践的研究现状，为后续学者在该领域的研究提供参考。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源

1.1.1 检索人及检索时间 第一作者于2024年4月进行文献检索。

1.1.2 检索文献时限 各数据库建库至今。

1.1.3 检索数据库 PubMed数据库和中国知网。

1.1.4 检索词 以“Finite Element Analysis, FEA, knee joint, Finite Element Model, Knee Biomechanics, Knee Osteoarthritis, Knee Prosthesis, Knee Ligaments, Meniscus”为英文检索词进行检索；以“有限元分析，有限元模型，膝关节，生物力学，骨关节炎，计算模型，膝关节假体，膝关节韧带，半月板”为中文检索词进行检索。

1.1.5 检索文献类型 研究原著和综述。

1.1.6 检索策略 以PubMed、EI、中国知网、万方数据库检索策略为例，见图1。

1.1.7 检索文献量 初步检索到相关英文文献524篇，中文文献625篇。

1.2 入组标准

1.2.1 纳入标准 与有限元分析、膝骨关节炎发病原因、膝关节胫骨平台骨折发病原因、膝关节疾患物理治疗和手术治疗有关的文献。

1.2.2 排除标准 排除与研究内容不符和重复性研究。

PubMed 数据库	中国知网
#1 Finite Element Analysis [Title/Abstract]	#1 有限元分析 in 篇文摘
#2 FEA [Title/Abstract]	#2 有限元模型 in 篇文摘
#3 Finite Element Model[Title/Abstract]	#3 计算模型 in 篇文摘
#4 #1 OR #2 OR #3	#4 #1 OR #2 OR #3
#5 Knee joint [Title/Abstract]	#5 膝关节 in 篇文摘
#6 Knee Osteoarthritis[Title/Abstract]	#6 生物力学 in 篇文摘
#7 Knee Prosthesis[Title/Abstract]	#7 骨关节炎 in 篇文摘
#8 Knee Ligaments[Title/Abstract]	#8 膝关节假体 in 篇文摘
#9 Meniscus[Title/Abstract]	#9 膝关节韧带 in 篇文摘
#10 Knee Biomechanics[Title/Abstract]	#10 半月板 in 篇文摘
#11 #5 OR #6 OR #7 OR #8 OR #9 OR #10	#11 #5 OR #6 OR #7 OR #8 OR #9 OR #10
#12 #4 AND #11	#12 #4 AND #11

图 1 | 中英文数据库检索策略图

1.3 文献质量评估和数据的提取 共检索到 1 149 篇文章，其中英文文献 524 篇，中文文献 625 篇，去除与研究内容不符和类似文献，纳入符合标准的 75 篇文章，其中英文文献 70 篇，中文文献 5 篇。文献筛选流程，见图 2。

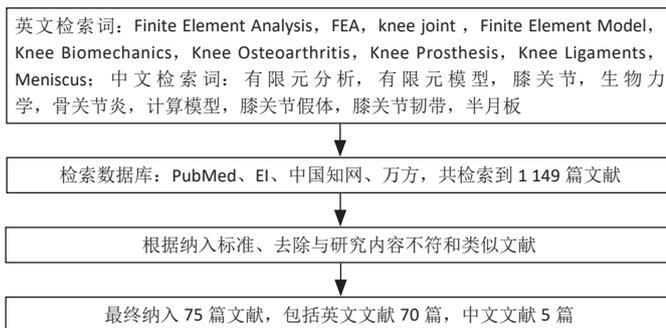


图 2 | 文献筛选流程图

2 结果 Results

2.1 膝关节有限元模型的构建 膝关节的有限元模型是一种数值模拟工具, 可以提供常规影像资料以外的力学生物特征资料, 帮助临床医生更好地了解疾病的力学机制, 评估不同治疗方法的效果以及制定个性化治疗方案, 为膝关节疾病的临床治疗和预防提供理论支持。随着计算机技术的不断发展, 膝关节有限元模型变得更加精细化, 从二维线性模型发展到三维非线性模型; 从单独的骨性结构发展到包括半月板、韧带及关节软骨等软组织在内的解剖模型; 从静态分析到动态分析, 使得研究者们更全面地理解膝关节的生物力学行为。

目前常见的膝关节有限元模型有下肢-骨盆有限元模型、纤维增强多孔弹性有限元模型、肌肉骨骼有限元模型和概率有限元模型等^[10-15], 详情见表 1。构建有限元模型软件种类繁多, 常用软件是 Mimics, Geomagic, Hypermesh 和 Abaqus 软件^[16-18], 具体用途详见表 2, 有限元分析基本步骤包括 7 个重要步骤: 收集影像学数据、重建有限元模型、有限元模型网格化、材料属性定义、设定载荷及应力方向、模型有效性验证、有限元计算, 见图 3。其中计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 图像、核磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 图像为重要的数据来源, CT 能清晰地显示骨组织的形态及病变,

具有定位精确和空间分辨率高等优势; MRI 对关节软骨、半月板、韧带等软组织分辨率高, 可对人体组织进行三维成像^[19-20]。最早由于受到影像技术的限制, 是由成人的 X 射线图像提供影像数据, 所构建的是膝关节 2D 模型^[8]。随着影像技术和计算机技术的进步, BENDJABALLAH 等^[21]应用 CT 图像和测量方法构建了膝关节有限元模型。之后 PEÑA 等^[22]开始使用 MRI 获取更加准确、涵盖更多解剖部位的影像学数据, 利用 CT 和 MRI 图像建立了包括膝关节韧带在内的更完整的三维模型, 使膝关节的模型更接近人体的真实结构。

表 1 | 有限元模型种类及特点

研究者	发表年份	有限元模型种类	特点	研究成果
MO 等 ^[10]	2018	下肢-骨盆有限元模型	包括整个下肢和骨盆的结构	更好地模拟体内组织在各种加载条件下的反应
ESKELINEN 等 ^[11] , JAHANGIR 等 ^[12]	2020, 2023	纤维增强多孔弹性有限元模型	固相中的胶原纤维认为是黏弹性材料, 非纤维部分是高弹性材料	可有效预测关节软骨中纤维和非纤维基质的机械行为和退化性反应
ESRAFILIAN 等 ^[13] , MUKHERJEE 等 ^[14]	2020	肌肉骨骼有限元模型	结合了下肢肌肉骨骼动力学和膝关节有限元分析	准确地模拟个体的肌肉活动和关节负荷
BENNETT 等 ^[15]	2024	概率有限元模型	使用概率有限元模型来确定合适的韧带参数	该模型能复现尸体膝关节在不同屈曲角度下的内外翻和前后力学特征

表 2 | 有限元分析常用软件及用途

有限元分析常用软件	软件用途
MIMICS ^[16, 18]	将 CT 或 MRI 影像数据转化为三维模型
GEOMAGIC ^[16]	对模型中质量较差的曲面进行调整和重建, 并对模型的表面碎片进行平滑处理
CERO ^[17]	去除模型噪声和不规则形、平滑等优化处理
HYPERMESH ^[16]	网格划分工具
MATERIALISE 3-MATIC ^[18]	网格划分工具
ABAQUS ^[16]	对模型材料属性分配以及相关边界条件和载荷定义
ANSYS ^[17]	对模型材料赋值及边界条件设定

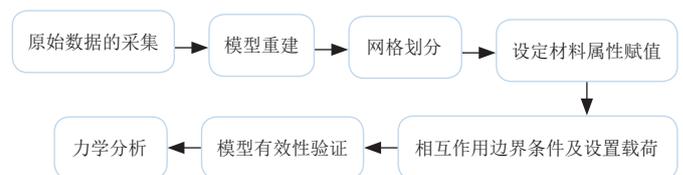


图 3 | 有限元分析基本步骤图

为了准确显示膝关节骨性结构和非骨性结构的特定解剖学特征, 研究者利用图像配准融合技术, 将 CT 和 MRI 影像数据相结合, 得到完整、精准的膝关节三维模型^[23]。而建立准确可靠的有限元模型是评估膝关节生物力学特征的关键, 其中网格划分、材料属性、参数设定和边界条件是构建精确模型的重要因素。Geomagic 和 Hypermesh 软件是目前常用的有限元网格划分软件, 网格划分通常采用四面体或六面体单元, 网格划分的单元数量越多, 计算精度越高, 相应的计算数量、研究时间及成本也越多, 因此网格划分需考虑结构的复杂性和计算的准确性, 目

前研究都简化操作步骤,将不同组织结构视为各向同性、均匀、连续的线弹性材料,以构建简单的膝关节有限元模型,但这种简化的模型只能提供膝关节力学行为的近似信息,而不能完全真实反映其生物力学特点^[24]。因此,国内外研究者不断改进模型,考虑膝关节结构的复杂性,将简单的单一均质、各向同性材料转向非均质、多属性、各向异性材料,从而准确地探究膝关节的生物力学特征^[25]。LAMPEN等^[26]通过T2弛豫时间来定义关节软骨材料属性,相较于均匀材料模型,此模型在大多数软骨区域表现出更高的主应力和剪切应变。此外,研究表明,通过利用T2弛豫时间细化材料属性构建的有限元模型可用于预测哪些区域可能因为应力集中而容易发生组织结构改变,从而有助于临床医生在病变尚未显著之前进行临床干预^[27]。

然而,膝关节有限元模型生物材料参数的设定仍缺乏统一的标准,国内研究多参照国外文献设定的参数,但不同年龄段、不同人群的解剖结构、生理特征存在差异,会影响模型的构建及生物力学分析结果的准确性。此外,目前构建的膝关节有限元模型大多基于青壮年,仅有少部分研究基于儿童与老年人,KARIMI DASTGERDI等^[28]和MALLINOS等^[29]开发了儿童膝关节有限元模型,有助于了解各种儿童膝关节损伤机制。有限元模型的有效性验证是确保力学分析结果科学性的关键步骤,有效性验证虽缺乏统一的标准,但通常可以通过生物力学实验或文献中已验证的膝关节有限元模型进行比较验证。例如SUN等^[30]构建了肥胖儿童内翻膝关节的模型,通过与传统的运动学测量方法对比来验证其有效性。张刘会等^[31]将有限元模型在特定工况下的活动范围与尸体标本生物力学实验结果进行比较,从而验证了模型的有效性。这样的验证过程确保了有限元模型的可靠性,使其在生物力学研究和临床应用具有很高的可信度。目前,膝关节有限元模型的精细化和复杂性方面的研究已有显著进步,在膝关节疾病研究和临床治疗方面发挥了重要作用,但仍需加强针对不同年龄段和不同人群的模型构建,进一步探索膝关节生物力学特征。

2.2 有限元分析法在膝关节关节炎的应用 膝关节关节炎是膝关节最常见的慢性疾病之一,据报道是全球致残的主要原因之一^[32]。45岁以上的成年人每5人中约有一人患病^[33]。膝关节关节炎引起的关节僵硬、慢性疼痛和功能障碍会严重影响患者的生活质量及身心健康^[34]。膝关节的生物力学主要依赖于正常软组织的结构或功能,在正常的膝关节中,内侧和外侧间室的应力分布相对平衡,这有助于膝关节在各种活动中均匀地分散载荷^[35]。无论是由于外部创伤和疾病还是其他因素引起的膝关节软组织损伤或结构的改变,都可能导致关节内的载荷分配发生变化,无法维持正常的平衡状态,导致膝关节关节炎的发生或病情加重。该疾病是以关节软骨、软骨下骨的退行性改变和滑膜炎为特征性改变^[36]。因此,了解膝关节退变的生物力学因素对于制定有效的预防或治疗策略至关重要。有限元分析法已广泛应用于膝关节关节炎的病因研究、保守治疗及手术治疗。

2.2.1 有限元分析法在膝关节关节炎发病机制中的应用

关节软骨及半月板对膝关节关节炎的影响: 关节软骨的机械性退变是膝关节关节炎的标志,也是关节功能障碍的主要原因^[36]。关节软骨的完整性影响着关节的稳定性和承载能力,前人研究表明了当发生膝关节关节炎,关节软骨厚度减少和表面磨损不光整等几何形状的变化会显著降低半月板载荷传递的作用及改变半月板与软骨之间的接触面积^[37]。半月板在保护关节软骨方面起着重要作用,它具有分布压力、吸收冲击、增强一致性以及稳定关节的功能^[38-39]。WILLINGER等^[40]研究发现行膝关节半月板切除后膝关节关节炎的患病率增高,因此半月板切除术后的康复治疗是研究重点。DASZKIEWICZ等^[41]发现膝关节关节炎患者由于关节软骨几何结构发生变化,使得内侧半月板后部环向应力增加,因此发生内侧半月板径向撕裂的概率增大。然而,外伤性半月板纵向撕裂后会改变关节间隙,增加股骨和胫骨软骨下骨的应力,这会加速骨关节炎的发展^[42]。因此,膝关节内各解剖结构存在相互作用的载荷分布,软骨损伤会加重半月板损伤,同时,半月板损伤能导致软骨损伤,两者之间存在紧密的相互依赖和影响的关系,共同促进膝关节关节炎的发生。

韧带及骨对膝关节关节炎的影响: 前交叉韧带通过抑制胫骨相对于股骨的过度向前运动以及防止膝关节的过伸和限制胫骨的内旋来维持膝关节的稳定性^[43],DONG等^[44]利用正常膝关节影像资料构建的有限元模型可模拟前交叉韧带损伤,行应力分析后发现前交叉韧带损伤可引起膝关节屈曲时股骨和胫骨相对位移增大,影响股骨远端与胫骨平台关节软骨接触摩擦运动的稳定性,表现出关节软骨的应力增加和峰值应力集中的重新分布,损害了关节软骨的自然生理和生物特性,从而促进了膝关节关节炎的进展。CHEUNG等^[45]研究发现前交叉韧带撕裂患者行韧带重建术后半数患者在10-14年内会出现明显的膝关节关节炎临床症状,这说明韧带重建术后接受全膝关节置换的患者平均年龄比未接受的患者小10岁。因此SPIERINGS等^[46]利用有限元分析法研究发现行前交叉韧带重建术的患者术后膝关节关节炎患病率高的原因除前交叉韧带断裂同时会伴有关节软骨或半月板损伤,另外的原因是移植物的机械性能的改变导致膝关节运动学改变,移植物的刚度降低和松弛度增加会增加关节前滑和内旋,这些运动是前交叉韧带所限制的,因此改变了关节的正常运动,增加了关节的不稳定性,引发膝关节关节炎的早期发作。ARJMAND等^[47]利用有限元分析法比较了正常人群和膝关节关节炎患者胫骨近端的生物力学差异,发现了膝关节关节炎患者胫骨近端的最小主应力较高,这有助于膝关节关节炎患者早期制定治疗策略。

综上所述,通过有限元分析研究,膝关节各解剖结构间复杂的相互作用和对膝关节关节炎的影响得以揭示,当膝关节内部的正常载荷分配平衡发生改变时,会导致关节软骨的过度载荷及部分区域的负荷下降,关节软骨长期在异常应力作用下会产生变形及磨损,最终导致缺失,这有助于制定更精准的诊断和治疗策略。

2.2.2 有限元分析法在膝骨关节炎保守治疗中的应用 过去数十年间世界各地为改善膝骨关节炎的进展制定了多种治疗策略。在膝骨关节炎的初期,临床医生提倡保守治疗以减轻患者症状、改善功能及延缓病情进展。保守治疗方法主要包括药物治疗和物理治疗,药物治疗在膝骨关节炎管理中扮演着重要角色,例如非类固醇类抗炎药等被广泛应用于缓解疼痛和减轻炎症,然而药物只能缓解膝关节炎患者疼痛的症状,无法延缓病情的进展,并且可能会引起药物的依赖性。随着生物力学理论的深入理解,物理治疗方法变得越来越受重视。物理治疗旨在通过康复运动、器械辅助来改善关节功能,以增强关节稳定性,从而提高患者生活质量^[48]。LIU等^[49]采用有限元法分析了陈氏太极拳典型下肢运动中膝关节软骨和半月板的负荷和应力分布,结果发现陈氏太极拳的特定动作中,例如单鞭、接膝拗步与行走相比,可降低胫骨股骨内侧与总接触力的比率,有助于改善应力分布,并且适度的机械应力有利于保持软骨基质合成代谢和分解代谢之间的平衡,有助于软骨的健康和完整性,此外,特定动作可以增强膝关节周围的肌肉力量和平衡能力,因此,有助于预防和缓解轻度膝关节内侧骨关节炎。然而,该研究受试者主要为青壮年,后续研究应该包括不同年龄段的患者做进一步探究,以全面评估陈氏太极拳对不同年龄段人群的膝关节生物力学影响。

步态调整是一种重要的物理治疗方法,它通过改变膝关节内外侧接触力分布,缓解患者疼痛、改善膝关节的功能。ESRAFILIAN等^[50]结合了运动学分析和有限元分析法,研究了两种不同的常规步态条件(即赤足和穿鞋)和6种步态调整(即0°,5°和10°外侧楔形鞋垫、趾入、趾出和宽站立)对膝关节软骨组织力学的影响,“趾入”“趾出”和“大步”中胫骨内侧和股骨软骨的力学变化明显。步态调整能有效改变胫骨内侧软骨的最大主应力和剪切应变,但由于个体差异,个性化步态调整会对膝关节的组织力学特征产生不同影响,因此在评估疾病时,应根据患者实际情况制定个性化的治疗方案。综上所述,有限元分析研究为理解膝关节在物理治疗手段的力学响应提供了重要见解,有助于临床个体化的治疗方案,然而这些研究仍需在年龄段和更广泛的人群进行验证,以确保治疗方案的普遍性和有效性。

2.2.3 有限元分析法在膝骨关节炎手术治疗中的应用 由于关节软骨不可再生,膝骨关节炎是一种不可逆性的疾病,当疾病发展至终末期,人工膝关节置换是治疗严重膝骨关节炎的首选方法^[51]。人工膝关节置换可以减轻膝骨关节炎患者的疼痛,改善身体功能和生活质量^[52],但术后患者会出现功能障碍和并发症^[53]。在植入假体治疗中,如果假体的弹性模量高于周围骨组织,这会导致应力集中在植入的假体上,会出现应力屏蔽现象,导致周围骨组织吸收,引起骨萎缩及假体松动,而假体松动及假体磨损等术后并发症是骨科医生面临的重大挑战。为了避免和改善这些问题,国内外学者使用有限元分析法进行相关研究,STODDART等^[54]通过有限元分析法研究不同膝关节置换方案对骨负荷转移的影响,研究结果显示,全膝关节置

换导致的平均应力屏蔽比部分膝关节置换和多间室膝关节置换高出3倍以上,这会导致假体承担了大部分的应力,从而减少了邻近骨骼的应力,导致骨骼的负载减少,这会影响骨骼的正常生长和重建,最终导致假体无菌松动。

而有限元分析法可以帮助改进假体设计,以减少应力集中和磨损,提高假体与骨骼之间的支配性,从而提高手术成功率并延长假体的使用寿命。ZHAO等^[55]使用有限元分析法评估正常骨密度受试者和骨质疏松患者中聚醚醚酮和CoCr合金植入物的生物力学性能,结果显示在正常胫骨中,聚醚醚酮和CoCr合金胫骨植入物的应力分布和应力屏蔽程度相似,但聚醚醚酮植入物的应力峰值较低,在骨质疏松患者的胫骨模型中,聚醚醚酮植入物相比CoCr合金植入物在胫骨平台显示出更高的等效应力,减少了应力屏蔽区域,因此可以更好地维持生理条件下的负载平衡,有利于保护植入物周围的骨组织,所以聚醚醚酮有望成为全膝关节置换中的一种替代材料。FILIP等^[56]通过有限元法分析在静态和动态压力下有无胫骨干延长部对于膝关节应力的影响,结果表明在结构受损的骨骼中添加胫骨干延长部,在静态和动态状况下均可使压缩疲劳减少1/2,因此,对于骨骼物理性质降低的患者,应使用胫骨干延长部增强关节稳定性、固定性及延长假体的寿命。

有限元分析法还可帮助外科医生规划最佳的假体位置和固定方式,以减少术后并发症。BORI等^[57]对膝关节股骨假体柄进行的有限元分析法发现,压入式骨干的应力屏蔽效应更大,比骨水泥固定的应力屏蔽高出38.5%,骨水泥结构比压入式结构引起的微动较低,因此骨水泥固定比压入式固定更有优势。综上所述,有限元分析法在膝骨关节炎的治疗中发挥着重要作用,不仅可以帮助临床医生更好地理解膝关节力学特征,指导治疗方案的制定,提高患者的治疗效果,还有助于优化人工膝关节置换的假体设计,提高假体使用寿命,减少术后并发症。然而有限元分析法在临床应用中的普及仍面临操作复杂性等挑战,后续研究应进一步简化操作步骤,以便更多临床医生使用。

2.3 有限元分析法在膝关节胫骨平台骨折中的应用 胫骨平台是膝关节重要的承重结构,胫骨平台骨折是临床常见的膝关节损伤,占成人骨折的1%-2%^[58]。由于胫骨平台骨折属于关节内骨折,需恢复关节面的解剖结构以及正常下肢稳定的关节功能,并且尽可能的恢复膝关节的负重和运动功能,因此治疗难度大。如果处理不当,患者在治疗后易出现创伤性关节炎、畸形愈合和膝关节不稳定等严重的功能障碍^[59]。有限元分析法可以在术前对骨折进行三维重建、数据测量和模拟手术,并优化计算机辅助计划和手术技术,显著提高手术治疗效果,有利于减少术后并发症^[60]。Schatzker II型是胫骨平台骨折中最常见的类型,其特点是胫骨外侧平台劈裂合并中央塌陷骨折,因此治疗时需要填充物进行固定增量,以填补骨内空隙,并为关节面提供机械支撑。BELAID等^[61]通过有限元分析法证明,骨水泥增量可以提高种植体的稳定性,降低再次塌陷的风险。上述研究虽然比较了不同类型填充物的效果,

但研究疾病单一，并没有考虑到 Schatzker II 型自身的形态多样性，骨折形态的多样性会影响术后关节的稳定性。ZENG 等^[62]通过改变碎片的大小来代表 4 种不同的骨折亚型，每个亚型使用了螺钉结合不同类型类型的填充物进行固定，通过计算螺钉的应力分布、凹陷碎片的应变分布，以评估植入物的稳定性和二次下陷的风险，从中得出无论是何种亚型缺损部位使用填充物都可以有效减少种植体应力集中和塌陷块的减少，为治疗 Schatzker II 型骨折提供良好的稳定性；但对于不同亚型填充物的模量对稳定性的影响不同，因此应在患者术前根据影像等数据，选择合适的填充物硬度。有限元分析法不仅可以指导手术材料的选择，还可指导患者术式的选择。FERRE 等^[63]利用有限元技术对 Schatzker V 型胫骨平台的冲击性骨折行生物力学研究，分析两种不同固定方法后发现与有限接触动态加压钢板相比，锁定加压钢板在骨折部位的骨块之间具有更小的相对位移，从而提供了更好的稳定性和低组织应变，这有利于骨的生成，因此，对于 Schatzker V 型胫骨平台骨折锁定加压钢板固定效果更好。综上所述，有限元分析法为膝关节损伤的治疗提供了有力的科学支持，优化了治疗方案，提升患者手术治疗效果。

2.4 人工智能在膝关节有限元分析领域的研究进展 智能化是有限元分析领域发展的必然趋势，人工智能是一门将计算机科学与大量数据集结合起来的学科，用于模仿人类的智能^[64]。深度学习作为人工智能最为广泛的一种人工智能技术，极大地推动了计算机科学的发展^[65]。构建膝关节有限元模型的方法主要有手工建模法、半自动建模法和全自动建模法^[66-68]，见表 3。

表 3 | 有限元分析各建模方法比较

方法	优势	局限性
手工建模法 ^[66]	高精度和细节处理能力 高度定制化 灵活性和适应性	耗时且劳动强度大 依赖工程师的专业知识和经验 重复性低
半自动建模法 ^[67]	较高的效率和精度平衡 灵活性和适应性 减少劳动强度	复杂性和协调需求 依赖工具和软件 精度受限
全自动建模法 ^[68]	高效率和批量处理能力 一致性和标准化 便捷性和易用性	精度和细节处理能力有限 依赖软件功能和算法 缺乏定制化和灵活性

从影像图像中精确分割出膝关节的各解剖结构对于构建模型非常重要，手动分割是最传统的方法，但由于手动分割耗时大、效率低，并且分割的质量取决于操作者的专业知识及经验，容易因阈值设定不当引起结构的丢失，因此受到很大限制。近年来，人工智能技术的出现，为有限元模型的构建提供了新的思路，人工智能广泛应用于图像分割，节省了人工分割的时间，其准确率与手工分割相当。KAKAVAND 等^[69]有效整合了深度学习和有限元建模技术，将 Swin UNETR 与统计形状建模结合，研发了一个半自动化方法来分割膝关节并构建生物力学模型，Swin UNETR 用于初步的 3D 分割，统计形状建模用于进一步模型表面的优化处理，与传统的手动分割相比，这种半自动化方法显著提高了分割效率，同时提高了模型

的精确度，为膝关节疾病的诊治提供了精确的技术支持。BURTON 等^[70]提出了一种基于卷积神经网络的半监督学习方法，用于分割 MRI 图像中膝关节解剖结构，显著提高了图像分割的准确性和效率。AX-FEM 是一个开源的有限元方法库。JAX-FEM 能够利用 GPU 加速进行高性能数值计算，并采用了自动微分技术，可以自动化设置和解决有限元分析问题中的许多复杂步骤。因此，JAX-FEM 能够快速模拟复杂的生物结构（如膝关节），协助临床实现个性化医学、外科计划和医疗设备设计^[71]。另有研究表明，自动病灶分割是一个尚未解决的问题，因此，使用深度学习技术进行病变特征量化仍然具有挑战性^[72]。人工智能除了在有限元建模过程中展现出很大优势外，PAZ 等^[73]提出了一种基于模板的有限元建模方法，通过结合神经网络预测的膝关节在行走过程中的最大载荷，结合个体的软骨厚度，可对膝骨关节炎发展准确预测，此方法减少了传统方法中对复杂运动的捕捉，并提高了软骨图像分割的效率。

综上所述，人工智能在有限元分析领域展现出了巨大价值，特别是在自动化建模、提高分割准确性、个性化医疗方面，未来随着人工智能技术的不断进步和完善，可进一步探索人工智能在膝关节有限元分析的应用潜力，提升有限元模型构建的精确度和实用性，促进其在临床实践中更广泛的应用。

3 讨论 Discussion

3.1 既往他人该领域研究的贡献和存在的问题 有限元分析法作为一种基于数学近似方法的计算机模拟技术，已经广泛应用于膝关节各类疾患的诊疗及科研中，是探究膝关节生物力学的重要研究方式，其可直观地展示膝关节的各个组成部分的应力和应变^[74]，具体时间脉络见图 4。此外，它还能够能够在坐标系中准确量化膝关节运动状态，相比于传统的尸体标本，其能够更好地复制膝关节在生理负荷下的运动过程，弥补了尸体失去生理活性后无法反映真实活体状态下的缺陷，具有可重复利用、可操控性强和影响因素较少等优势^[75]。

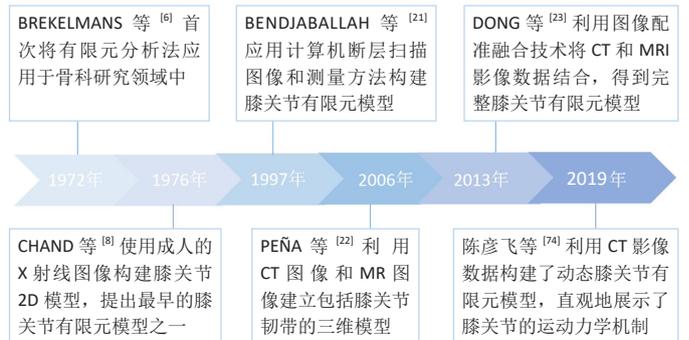


图 4 | 有限元模型发展时间脉络图

3.2 作者综述区别于他人他篇的特点 既往研究在有限元分析应用于膝关节手术方面已有深入探讨，但对有限元分析在膝关节各类疾患应用尚未有全面论述，文章系统

地对有限元分析法在膝关节各类疾患的发病机制、保守治疗和手术治疗的应用进行了详细阐述,不仅深入分析了有限元分析在揭示膝关节疾患生物力学特性、优化治疗方案的价值,还探讨了有限元分析法结合人工智能技术在临床实践的研究现状,为后续学者研究提供参考。

3.3 综述的局限性 有限元分析法仅仅是数字化的模拟,仍然存在一些局限性。首先,膝关节是一个极其复杂的系统,但在构建模型时,为了计算可行性,常需要对复杂结构进行简化,所构建的模型常忽略韧带、肌肉和脂肪等软组织,因此构建的模型与真实的结构存在一定的差异。其次,膝关节模型的有效性验证尚缺乏统一的标准,大多通过生物力学实验或文献中已验证的膝关节有限元模型进行验证,因此可能存在误差或主观性。再次,大多数研究受试者为青壮年,未从不同年龄段和更广泛的人群进行建模分析。最后,有限元分析法操作步骤较为复杂,临床医生尚不能全面掌握操作流程,因此在临床实际工作中未能得以普及。

3.4 综述的重要意义 文章提供了膝关节有限元分析的模型构建和临床应用方面的综述,为未来的研究提供了理论上的指导。膝关节有限元分析法可揭示不同病理状态下膝关节的生物力学行为,有助于理解疾病的发展机制和评估治疗方式,帮助临床医生选择最佳的手术方式和假体设计,优化手术结果,减少术后并发症的发生^[42, 75]。同时,膝关节有限元分析技术可促进新型植入材料的开发,对康复训练和运动训练提供指导,具有重要的临床应用前景。目前,随着计算机技术和人工智能的不断发展,未来将人工智能与有限元分析相结合,借助人工智能技术辅助构建的有限元模型会更加准确、操作更加简便,使医疗实践更加精准、高效和个性化,显著提升了临床医生的工作效率和患者的治疗效果^[69-70]。

3.5 课题专家组对未来的建议 有限元分析技术在膝关节研究中的应用极大地推动了膝关节生物力学的研究进展,通过有限元模型,研究者可以详细模拟膝关节的力学行为,了解疾病的发生机制,评估不同手术方案的效果,以及优化假体设计,从而提高手术的成功率和患者的术后恢复。未来研究者应利用影像高分辨率成像技术获取更加精确的数据建立包括韧带、肌肉和脂肪等软组织的有限元模型,使得膝关节模型更加真实和全面,并深入研究和验证不同生物材料属性对模型表现的影响,通过实验和临床试验收集数据,优化用于模拟的材料参数,建立更加精细的膝关节模型。此外,未来研究应考虑在不同年龄段和更广泛的人群进行研究,以确保研究结果普遍性和有效性。最后,未来研究者应利用人工智能技术,如机器学习和深度学习,进一步优化有限元模型的构建过程,提升有限元模型构建的精确度和实用性,促进其在临床实践中更广泛的应用,为膝关节疾病的诊断和治疗提供更可靠的支持和指导,改善患者的治疗效果和康复进程。

作者贡献: 文章设计和文章撰写者为郭欢莹。资料收集者为康志杰、白小龙和田晓燕。通讯作者金凤审校。

利益冲突: 文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享 4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让: 文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范: 文章撰写遵守了《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA声明)。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

4 参考文献 References

- [1] BENOS L, STANEV D, SPYROU L, et al. A review on finite element modeling and simulation of the anterior cruciate ligament reconstruction. *Front Bioeng Biotechnol.* 2020;8:967.
- [2] HASSEBROCK JD, GULBRANDSEN MT, ASPREY WL, et al. Knee ligament anatomy and biomechanics. *Sports Med Arthrosc Rev.* 2020;28(3):80-86.
- [3] YAN M, LIANG T, ZHAO H, et al. Model properties and clinical application in the finite element analysis of knee joint: a review. *Orthop Surg.* 2024;16(2):289-302.
- [4] POPESCU R, HARITINIAN EG, CRISTEA S. Relevance of finite element in total knee arthroplasty-literature review. *Chirurgia (Bucur).* 2019;114(4):437-442.
- [5] WELCH-PHILLIPS A, GIBBONS D, AHERN DP, et al. What is finite element analysis? *Clin Spine Surg.* 2020;33(8):323-324.
- [6] BREKELMANS WA, POORT HW, SLOOFF TJ. A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts. *Acta Orthop Scand.* 1972;43(5):301-317.
- [7] RYBICKI EF, SIMONEN FA, WEIS EB JR. On the mathematical analysis of stress in the human femur. *J Biomech.* 1972;5(2):203-215.
- [8] CHAND R, HAUG E, RIM K. Stresses in the human knee joint. *J Biomech.* 1976;9(6):417-422.
- [9] SHU L, YAMAMOTO K, YOSHIKAZI R, et al. Multiscale finite element musculoskeletal model for intact knee dynamics. *Comput Biol Med.* 2022;141:105023.
- [10] MO F, LI F, BEHR M, et al. A lower limb-pelvis finite element model with 3D active muscles. *Ann Biomed Eng.* 2018;46(1):86-96.
- [11] ESKELINEN ASA, TANSKA P, FLOREA C, et al. Mechanobiological model for simulation of injured cartilage degradation via pro-inflammatory cytokines and mechanical stimulus. *PLoS Comput Biol.* 2020;16(6):e1007998.
- [12] JAHANGIR S, ESRAFILIAN A, EBRAHIMI M, et al. Sensitivity of simulated knee joint mechanics to selected human and bovine fibril-reinforced poroelastic material properties. *J Biomech.* 2023;160:111800.
- [13] ESRAFILIAN A, STENROTH L, MONONEN ME, et al. EMG-assisted muscle force driven finite element model of the knee joint with fibril-reinforced poroelastic cartilages and menisci. *Sci Rep.* 2020;10(1):3026.
- [14] MUKHERJEE S, NAZEMI M, JONKERS I, et al. Use of computational modeling to study joint degeneration: a review. *Front Bioeng Biotechnol.* 2020;8:93.

- [15] BENNETT KJ, FOROUTAN P, FAIRWEATHER E, et al. Development and validation of a biomechanically fidelic surgical training knee model. *J Orthop Res.* 2024. doi:10.1002/jor.25873.
- [16] REN S, SHI H, LIU Z, et al. Finite element analysis and experimental validation of the anterior cruciate ligament and implications for the injury mechanism. *Bioengineering (Basel).* 2022;9(10):590.
- [17] 刘清华, 蔡永强, 金凤, 等. CT 数据建立 12 岁儿童全颈椎有限元模型及有效性验证 [J]. *中国组织工程研究*, 2023,27(4):500-504.
- [18] ZHU LY, LI L, LI ZA, et al. Design and biomechanical characteristics of porous meniscal implant structures using triply periodic minimal surfaces. *J Transl Med.* 2019;17(1):89.
- [19] SODHI N, JACOFISKY DJ, CHEE A, et al. Benefits of CT scanning for the management of knee arthritis and arthroplasty. *J Knee Surg.* 2021; 34(12):1296-1303.
- [20] OMOUMI P, MERCIER GA, LECOUVET F, et al. CT arthrography, MR arthrography, PET, and scintigraphy in osteoarthritis. *Radiol Clin North Am.* 2009;47(4):595-615.
- [21] BENDJABALLAH MZ, SHIRAZI-ADL A, ZUKOR DJ. Finite element analysis of human knee joint in varus-valgus. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 1997;12(3):139-148.
- [22] PEÑA E, CALVO B, MARTÍNEZ MA, et al. A three-dimensional finite element analysis of the combined behavior of ligaments and menisci in the healthy human knee joint. *J Biomech.* 2006;39(9):1686-1701.
- [23] DONG Y, MOU Z, HUANG Z, et al. Three-dimensional reconstruction of subject-specific knee joint using computed tomography and magnetic resonance imaging image data fusions. *Proc Inst Mech Eng H.* 2013;227(10):1083-1093.
- [24] 张吉超, 董万鹏, 董跃福, 等. 膝关节有限元模型参数设置 [J]. *中国组织工程研究*, 2021,25(30):4781-4786.
- [25] LIU W, SUN X, LIU W, et al. Finite element study of a partial meniscectomy of a complete discoid lateral meniscus in adults. *Med Eng Phys.* 2022;107:103855.
- [26] LAMPEN N, SU H, CHAN DD, et al. Finite element modeling with subject-specific mechanical properties to assess knee osteoarthritis initiation and progression. *J Orthop Res.* 2023;41(1):72-83.
- [27] LAMPEN N, SU H, CHAN DD, et al. T2 mapping refined finite element modeling to predict knee osteoarthritis progression. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2021;2021:4592-4595.
- [28] KARIMI DASTGERDI A, ESRAFILIAN A, CARTY CP, et al. Validation and evaluation of subject-specific finite element models of the pediatric knee. *Sci Rep.* 2023;13(1):18328.
- [29] MALLINOS A, JONES K, DAVIS B. Pivot shift and lachman test simulation-based exploration in juvenile populations for accurately predicting anterior tibial translation. *J Biomech.* 2022;136:111069.
- [30] SUN J, YAN S, JIANG Y, et al. Finite element analysis of the valgus knee joint of an obese child. *Biomed Eng Online.* 2016;15(Suppl 2):158.
- [31] 张刘会, 刘丹平. 膝关节三维有限元模型建立和验证及模拟后交叉韧带重建术 [J]. *生物医学工程与临床*, 2020,24(5):508-513.
- [32] CROSS M, SMITH E, HOY D, et al. The global burden of hip and knee osteoarthritis: estimates from the global burden of disease 2010 study. *Ann Rheum Dis.* 2014;73(7):1323-1330.
- [33] LAWRENCE RC, FELSON DT, HELMICK CG, et al. Estimates of the prevalence of arthritis and other rheumatic conditions in the united states. part II. *Arthritis Rheum.* 2008;58(1):26-35.
- [34] IJIMA H, AOYAMA T, FUKUTANI N, et al. Psychological health is associated with knee pain and physical function in patients with knee osteoarthritis: an exploratory cross-sectional study. *BMC Psychol.* 2018;6(1):19.
- [35] 黄振宇, 董跃福, 胡广洪, 等. 基于有限元方法的正常和早期 OA 膝关节生物力学行为比较 [J]. *中国数字医学*, 2015,10(5):6-9.
- [36] KATZ JN, ARANT KR, LOESER RF. Diagnosis and treatment of hip and knee osteoarthritis: a review. *JAMA.* 2021;325(6):568-578.
- [37] ŁUCZKIEWICZ P, DASZKIEWICZ K, CHRÓŚCIELEWSKI J, et al. The influence of articular cartilage thickness reduction on meniscus biomechanics. *PLoS One.* 2016;11(12):e0167733.
- [38] KRAUSE WR, POPE MH, JOHNSON RJ, et al. Mechanical changes in the knee after meniscectomy. *J Bone Joint Surg Am.* 1976;58(5): 599-604.
- [39] WALKER PS, ERKMAN MJ. The role of the menisci in force transmission across the knee. *Clin Orthop Relat Res.* 1975;(109): 184-192.
- [40] WILLINGER L, FOEHR P, ACHTNICH A, et al. Effect of lower limb alignment in medial meniscus-deficient knees on tibiofemoral contact pressure. *Orthop J Sports Med.* 2019;7(2): 2325967118824611.
- [41] DASZKIEWICZ K, ŁUCZKIEWICZ P. Biomechanics of the medial meniscus in the osteoarthritic knee joint. *Peer J.* 2021;9:e12509.
- [42] LI L, YANG X, YANG L, et al. Biomechanical analysis of the effect of medial meniscus degenerative and traumatic lesions on the knee joint. *Am J Transl Res.* 2019;11(2):542-556.
- [43] PERRIMAN A, LEAHEY E, SEMCIW AI. The effect of open- versus closed-kinetic-chain exercises on anterior tibial laxity, strength, and function following anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2018;48(7): 552-566.
- [44] DONG Z, YANG C, ZHANG D, et al. The application of human medical image-based finite element analysis in the construction of mouse osteoarthritis models. *Heliyon.* 2024;10(4):e26226.
- [45] CHEUNG EC, DILALLO M, FEELEY BT, et al. Osteoarthritis and ACL reconstruction-myths and risks. *Curr Rev Musculoskelet Med.* 2020; 13(1):115-122.
- [46] SPIERINGS J, VAN DEN HENGEL M, JANSSEN RPA, et al. Knee instability caused by altered graft mechanical properties after anterior cruciate ligament reconstruction: the early onset of osteoarthritis? *Front Bioeng Biotechnol.* 2023;11:1244954.
- [47] ARJMAND H, NAZEMI M, KONTULAINEN SA, et al. Mechanical metrics of the proximal tibia are precise and differentiate osteoarthritic and normal knees: a finite element study. *Sci Rep.* 2018;8(1):11478.
- [48] NGUYEN C, LEFÈVRE-COLAU MM, POIRAUDEAU S, et al. Rehabilitation (exercise and strength training) and osteoarthritis: a critical narrative review. *Ann Phys Rehabil Med.* 2016;59(3):190-195.
- [49] LIU H, GONG H, CHEN P, et al. Biomechanical effects of typical lower limb movements of chen-style tai chi on knee joint. *Med Biol Eng Comput.* 2023;61(11):3087-3101.
- [50] ESRAFILIAN A, HALONEN KS, DZIALO CM, et al. Effects of gait modifications on tissue-level knee mechanics in individuals with medial tibiofemoral osteoarthritis: a proof-of-concept study towards personalized interventions. *J Orthop Res.* 2024;42(2):326-338.

- [51] HUNTER DJ, FELSON DT. Osteoarthritis. *BMJ*. 2006;332(7542):639-642.
- [52] SHAN L, SHAN B, GRAHAM D, et al. Total hip replacement: a systematic review and meta-analysis on mid-term quality of life. *Osteoarthritis Cartilage*. 2014;22(3):389-406.
- [53] WISE BL, NIU J, FELSON DT, et al. Functional impairment is a risk factor for knee replacement in the multicenter osteoarthritis study. *Clin Orthop Relat Res*. 2015;473(8):2505-2513.
- [54] STODDART JC, GARNER A, TUNCER M, et al. Load transfer in bone after partial, multi-compartmental, and total knee arthroplasty. *Front Bioeng Biotechnol*. 2024;12:1274496.
- [55] ZHAO G, LUO J, MA J, et al. Decreased stress shielding with poly-ether-ether-ketone tibial implant for total knee arthroplasty- A preliminary study using finite element analysis. *Heliyon*. 2024; 10(5):e27204.
- [56] FILIP AC, CUCULICI SA, CRISTEA S, et al. Tibial stem extension versus standard configuration in total knee arthroplasty: a biomechanical assessment according to bone properties. *Medicina (Kaunas)*. 2022; 58(5):634.
- [57] BORI E, ARMAROLI F, INNOCENTI B. Biomechanical analysis of femoral stems in hinged total knee arthroplasty in physiological and osteoporotic bone. *Comput Methods Programs Biomed*. 2022; 213:106499.
- [58] LI K, ZHANG S, QIU X, et al. Optimal surgical timing and approach for tibial plateau fracture. *Technol Health Care*. 2022;30(S1): 545-551.
- [59] PARKKINEN M, LINDAHL J, MÄKINEN TJ, et al. Predictors of osteoarthritis following operative treatment of medial tibial plateau fractures. *Injury*. 2018;49(2):370-375.
- [60] SHEN QJ, ZHANG JL, XING GS, et al. Surgical treatment of lateral tibial plateau fractures involving the posterolateral column. *Orthop Surg*. 2019;11(6):1029-1038.
- [61] BELAID D, VENDEUVRE T, BOUCHOUCHA A, et al. Utility of cement injection to stabilize split-depression tibial plateau fracture by minimally invasive methods: a finite element analysis. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2018;56:27-35.
- [62] ZENG C, REN X, XU C, et al. Stability of internal fixation systems based on different subtypes of schatzker II fracture of the tibial plateau: a finite element analysis. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022; 10:973389.
- [63] FERRE LS, DI NISIO FG, MENDONÇA CJA, et al. Comparative analysis of tibial plateau fracture osteosynthesis: a finite element study. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2022;134:105392.
- [64] ZUHAIR V, BABAR A, ALI R, et al. Exploring the impact of artificial intelligence on global health and enhancing healthcare in developing nations. *J Prim Care Community Health*. 2024;15:21501319241245847.
- [65] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning. *Nature*. 2015;521(7553): 436-444.
- [66] BARTEL DL, BURSTEIN AH, SANTAVICCA EA, et al. Performance of the tibial component in total knee replacement. *J Bone Joint Surg Am*. 1982;64(7):1026-1033.
- [67] GALBUSERA F, CINA A, PANICO M, et al. Image-based biomechanical models of the musculoskeletal system. *Eur Radiol Exp*. 2020;4(1):49.
- [68] CAPRARA S, CARRILLO F, SNEDEKER JG, et al. Automated pipeline to generate anatomically accurate patient-specific biomechanical models of healthy and pathological fsus. *Front Bioeng Biotechnol*. 2021;9:636953.
- [69] KAKAVAND R, PALIZI M, TAHHIGHI P, et al. Integration of swin unetr and statistical shape modeling for a semi-automated segmentation of the knee and biomechanical modeling of articular cartilage. *Sci Rep*. 2024;14(1):2748.
- [70] BURTON W 2ND, MYERS C, RULLKOETTER P. Semi-supervised learning for automatic segmentation of the knee from MRI with convolutional neural networks. *Comput Methods Programs Biomed*. 2020;189:105328.
- [71] XUE T, LIAO S, GAN Z, et al. JAX-FEM: a differentiable gpu-accelerated 3D finite element solver for automatic inverse design and mechanistic data science. *Comput Phys Comm*. 2023;291:108802.
- [72] ATAEI A, EGGERMONT F, VERDONSCHOT N, et al. The effect of deep learning-based lesion segmentation on failure load calculations of metastatic femurs using finite element analysis. *Bone*. 2024;179: 116987.
- [73] PAZ A, LAVIKAINEN J, TURUNEN MJ, et al. Knee-loading predictions with neural networks improve finite element modeling classifications of knee osteoarthritis: data from the osteoarthritis initiative. *Ann Biomed Eng*. 2024. doi:10.1007/s10439-024-03549-2.
- [74] 陈彦飞, 赵勇, 鲁超. 有限元分析技术在膝关节生物力学研究中的应用现状 [J]. *中国中医骨伤科杂志*, 2019,27(8):81-83, 88.
- [75] ZHANG ZH, QI YS, WEI BG, et al. Application strategy of finite element analysis in artificial knee arthroplasty. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023; 11:1127289.

(责任编辑: WJ, ZN, QY, LJY)