·医学工程·

高屈曲度假体在膝关节置换中的有限元生物力学研究

陈功

（常州信息职业技术学院，常州 213164）

【摘要】 **目的** 深入分析高屈曲度膝关节假体与常规假体在力学性能上的差异，为优化假体设计及提高其临床应用效果提供参考。**方法** 通过有限元分析方法，探究高屈曲度膝关节假体与常规股骨髁假体在力学性能上的差异，进而评估高屈曲度假体的特性及其临床应用价值。构建了股骨髁和胫骨垫片的三维模型，并在ANSYS环境下进行了全面分析。比较常规假体和高屈曲度假体在相同旋转中心和0°、15°、30°、60°、90°、120°、135°、150°不同角度条件下的加载情况，得出各种角度下的接触面积、最大接触应力以及最大冯氏等效应力值。**结果** 在90°以下的屈曲角度中，高屈曲度假体与常规假体在力学性能上基本相近。然而，在大于120°屈曲角度的高屈曲度范围内，高屈曲度假体在仿真测试中展现出优越性能，具有更大的接触面积和更小的接触应力，证明了其设计的有效性。**结论** 本研究的方法和发现可为高屈曲度膝关节假体的设计与制造提供参考。

【关键词】 膝关节置换；有限元分析；生物力学；高屈曲度

【中图分类号】 R687.4 【文献标识码】 A 【DOI】 10.11876/mimt202503006

Finite element biomechanical analysis of high-flexion prostheses in knee arthroplasty

Chen Gong

(*Changzhou College of Information Technology*, *Changzhou 213164*, *China*)

【**Abstract**】 **Objective** To conduct an in-depth analysis of the biomechanical differences between high-flexion and conventional knee prostheses, providing references for optimizing prosthetic design and enhancing clinical outcomes. **Methods** Finite element analysis (FEA) was employed to investigate the mechanical disparities between high-flexion and conventional femoral component prostheses. 3D models of the femoral condyle and tibial insert were constructed and comprehensively analyzed in ANSYS. The contact area, maximum contact stress, and peak von Mises stress were compared under identical rotation centers at flexion angles of 0°, 15°, 30°, 60°, 90°, 120°, 135°, and 150°. **Results** The study revealed comparable mechanical performance between high-flexion and conventional prostheses at flexion angles below 90°. However, in high-flexion regimes beyond 120°, the high-flexion prosthesis demonstrated superior performance in simulations, exhibiting larger contact areas and lower contact stresses, demonstrating the efficacy of its design. **Conclusion** The methodology and findings of this study provide valuable insights for the design and manufacturing of high-flexion knee prostheses.

【**Key words**】 Knee arthroplasty; Finite element analysis; Biomechanics; High flexion

膝关节作为人体运动系统的关键组成部分，负责承载体重并应对多样化的运动需求，对其力学性能进行深入地了解，对于预防和治疗相关病症具有重要意义[1-2]。医学工程学和计算机辅助工程（computer aided engineering, CAE）技术为膝关节功能和健康问题的研究提供了高效的工具，研究人员期望通过创新方案促进膝关节疾病的理解与解决[3-5]。这一研究领域的发展为探索膝关节的生物力学特性

第一作者：陈功，男，博士研究生，高级工程师，研究方向：医疗器械的虚拟设计与先进制造、智能AI机器人技术以及手术机器人

及其适应性提供了强有力的支撑[6-8]。

在临床医学中，膝关节的健康对于维持个体的日常生活功能至关重要。因此，深入研究膝关节的解剖学、生理学和生物力学特性，对于理解其正常功能及防治相关疾病具有重要意义[9-11]。膝关节置换手术作为治疗骨关节炎等疾病的常见且重要手段，通过去除受损关节组织并植入人工关节，有效地缓解疼痛并提升患者生活质量。在膝关节置换领域，研究的进展涵盖了个性化植入物设计、新材料开发、手术技术改进以及术后康复方案的优化，旨在提升植入物的生物相容性、力学性能和手术成功率[12-14]。

膝关节在中立位时完全伸直，而其屈曲度在90°以上时方能满足基本的日常活动需求。然而，临床实践中观察到，许多患者对膝关节活动度有更为广泛的需求，尤其是在一些特定的文化背景和生活习惯中，如一些亚洲国家的跪坐和盘腿坐姿，这些活动往往需要膝关节达到111°～165°的屈曲度[15-17]。近年来，高屈曲度膝关节假体的研究受到了广泛关注，这类假体能够提供更自然和灵活的膝关节运动，从而提升患者对手术结果的满意度[18-19]。高屈曲度膝关节假体的引入，强调了对患者个体差异和需求的精细化关注，为关节置换手术提供了更加个性化和先进的解决方案。这类研究旨在提供更大的屈曲范围，满足患者在日常生活和活动中对关节灵活性的需求，同时改善植入物的生物力学适应性，使之更加贴近天然关节的运动模式[20]。

近年来，膝关节假体的研究取得了显著进展，特别是在有限元分析（finite element analysis, FEA）方面[21]。这种分析方法在模拟和优化假体的生物力学性能方面发挥着关键作用，尤其是在预测假体在负荷下的应力和应变分布上[22-23]。尽管对于医疗植入级零件的优化研究已较为深入，但是对于高屈曲度膝关节假体的具体分析仍相对欠缺，尤其是针对高屈曲度膝关节假体在高屈曲度条件下的力学行为和性能的探讨尚不充分。因此，有必要对高屈曲度膝关节假体的有限元力学性能进行深入研究，以便为假体设计提供更为精确的指导，更好地评估和降低设计风险，优化其性能以提高患者的安全性和满意度，从而推动膝关节假体技术的发展和创新。

1 材料与方法

1.1 设计

对比高屈曲度和常规膝关节假体的三维有限元生物力学仿真性能。

1.2 材料

1.2.1 设备

多层螺旋CT扫描仪(德国Siemens公司)；Dell笔记本电脑1台，Windows 11操作系统。

1.2.2 软件配置

Mimics 18.0（比利时Materialise公司），Geomagic Studio 2020（美国Geomagic公司），UG（德国Siemens公司），ANSYS（美国ANSYS公司）。

1.3 方法

1.3.1 建立膝关节实体模型

将1名健康（无膝关节创伤、肿瘤、感染等疾病）成年男性志愿者（身高178 cm，体重75 kg）的膝关节CT数据导入 Mimics中，采用阈值分割和三维模型计算的方法建立膝关节的三维模型。将模型导入自动逆向工程软件 Geomagic Studio进行平滑及曲面化，获得更优化的膝关节模型。然后，将优化后的模型导入UG，建立膝关节模型。

1.3.2 模型处理

由于假体前部曲线轮廓的复杂性，导致无法在ANSYS中完整导入假体的三维模型。为聚焦研究核心区域，在图1所示的位置对模型进行了截断。截断主要移除了包含髌骨滑道的部分，该区域不属于本研究关注范围。截断操作的核心原则是保持股骨髁假体质心位置不变，以确保施加于质心的载荷条件不受影响。此操作有效排除了与研究目标无关的结构，使分析能够精确集中于股骨—胫骨接触行为。作为接触行为的关键组件，图2展示了与股骨髁配合摩擦的固定平台型半月板植入物，其结构直接影响后续接触面积与接触应力分析。



图1 股骨髁假体的部分截断

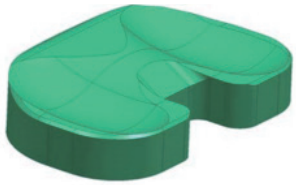


图 2 人工半月板假体模型

1.3.3 设置边界条件

在 ANSYS 软件中，导入有限元网格模型后，通过 Preprocessor 设置材料属性。选用膝关节股骨髁常规假体和高屈曲度假体作为对比研究对象，常规假体与高屈曲度假体的材料构成基本相同，材料均为钴铬钼合金，密度 8.55 g/cm^3；与之配对的人工半月板，材料为超高分子量聚乙烯，密度 0.95 g/cm^3。

采用 20 节点六面体实体单元 SOLID 186 进行有限元建模，该高阶单元每个节点具有 3 个平动自由度，适用于模拟大变形、大应变、应力刚化、蠕变、塑性及超弹性行为，尤其擅长处理近不可压缩亚弹性材料与完全不可压缩超弹性材料。模型参数如下：摩擦系数设为 0.04；网格大小设为 0.9。所有材料均设置为各向同性、均质、线弹性，股骨髁假体弹性模量为 206 GPa，泊松比为 0.25；人工半月板弹性模量为 2 GPa，泊松比为 0.40。

在模型中设置边界条件并施加载荷，选择静态结构分析类型，随后进行求解及后处理，以获取结构的位移、应力等关键力学响应参数。载荷设定基于成年男性膝关节生物力学特性，施加垂直方向集中力 2 060 N。该载荷值依据 70 kg 成年人体重，并考虑直立、上下楼梯及深蹲等动作下膝关节承受的理论最大负载，约为体重的 3 倍计算得出。模拟实验条件未考虑股骨髁和胫骨垫片在下蹲过程中产生的水平旋转，亦在忽略肌肉、部分韧带和关节软骨的摩擦力的情况下，分析接触面积以及等效应力的变化情况。

1.4 主要观察指标

在 0° 、15° 、30° 、60° 、90° 、120° 、135° 和 150° 不同屈曲度情况下进行有限元分析，如图 3 所示，定量评估股骨和胫骨接触面积随屈曲角度的动态变化。该分析旨在揭示不同关节角度下骨骼接触特性的变化规律，为理解关节运动机制提供量化依据。通过有限元分析，可以获得股骨和胫骨的应力分布情况，包括最大接触应力和最大冯氏等效应力等指标。应力分析有助于评估骨骼组织在不同屈曲度下的受力情况，提供关于关节承受负荷的详细信息。

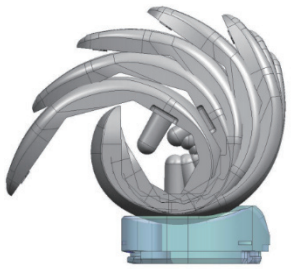


图 3 股骨髁假体在人工半月板假体上的各种角度

2 结果

2.1 有限元模型与验证

有限元网格划分是有限元分析中关键的一步，决定了对结构或装置进行数值模拟时离散化的精度和准确度。对于常规膝关节假体和高屈曲度膝关节假体的有限元模型，采用了四面体单元网格划分，每个四面体单元由 4 个顶点组成，这种单元类型在对于复杂几何形状的建模中通常表现得相对灵活。高屈曲度膝关节假体有限元模型如图 4A 所示，节点数为 541 287 个，单元数为 336 189 个。常规膝关节假体有限元模型如图 4B 所示，节点数为 535 127 个，单元数为 227 142 个。

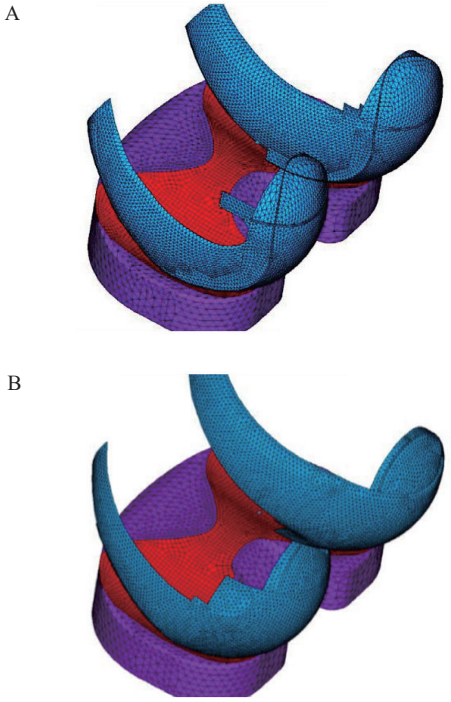


图 4 不同膝关节假体单元划分 A 为高屈曲度假体有限元模型；B 为常规假体有限元模型

0° 位置下，高屈曲度和常规假体接触应力如图5所示。高屈曲度和常规假体最大接触应力均出现在关节假体内部中心位置，切向最大主应力分别为23.46 MPa和22.15 MPa。

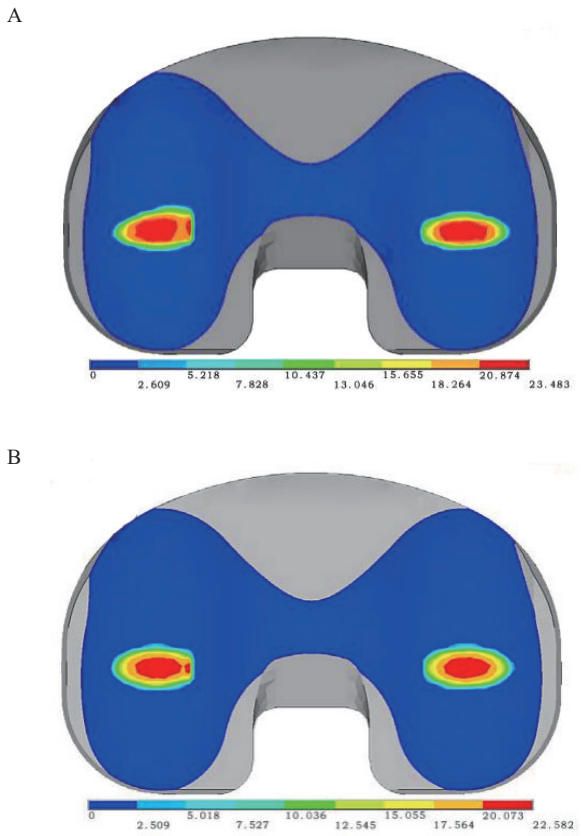
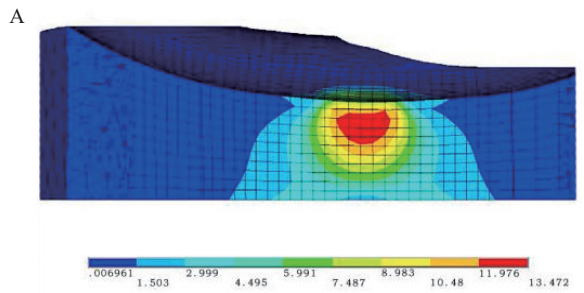


图5 不同膝关节假体接触应力 A为高屈曲度假体；B为常规假体

0° 位置下，高屈曲度和常规假体最大等效应力如图6所示，高屈曲度和常规假体最大等效应力出现位置相同，最大等效应力分别为13.47 MPa和12.98 MPa。



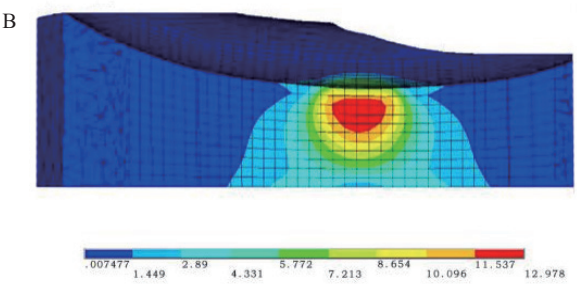


图6 不同膝关节假体最大等效应力 A为高屈曲度假体；B为常规假体

0° 位置下，高屈曲度和常规假体最大冯氏等效应力如图7所示，高屈曲度和常规假体最大冯氏等效应力出现位置相同，最大冯氏等效应力分别为13.47 MPa和12.98 MPa。

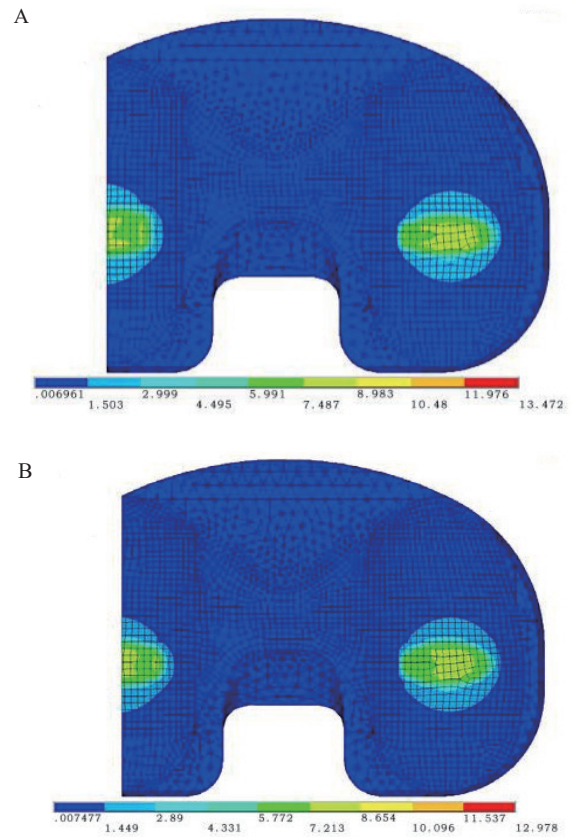


图7 不同膝关节假体最大冯氏等效应力 A为高屈曲度假体；B为常规假体

2.2 不同角度下仿真结果对比

2.2.1 不同假体接触面积对比

随着膝盖屈曲度的增大，常规假体和高屈曲度假体内侧和外侧的接触面积均在减小。在0° ~ 90°范围内，高屈曲度假体和常规假体的接触面积差异

基本在 ± 10%以内，表明在相对较小的屈曲范围内两者的接触面积相对接近。在屈曲度 135° 时，高屈曲度假体的接触面积较常规假体增加了 44.0%，显示了高屈曲度假体在特定屈曲度条件下具有较大的接触面积。在屈曲度 150° 时，由于常规假体无法保证股骨髁假体和人工半月板垫片有平滑的支撑，因此无法计算其接触面积，相比之下，高屈曲度假体更适合这种下蹲的动作，表现出更大的接触面积。在 150° 时，高屈曲度假体的接触面积为 90.8 mm^2，比常规假体 135° 时还大 27.2%，高屈曲度假体在更极端的屈曲条件下表现出更大的接触面积。见表 1。

表 1 不同膝关节假体接触面积对比（mm^2）

角度（°）	常规假体			高屈曲度假体			差异（%）
	内侧	外侧	小计	内侧	外侧	小计	
0	77.8	78.2	156.0	77.1	69.1	146.2	−6.0
15	82.8	84.0	166.8	84.4	84.3	168.7	1.0
30	82.8	84.0	166.8	81.2	81.9	163.1	−2.0
60	63.3	66.4	129.7	62.5	63.7	126.2	−3.0
90	63.3	66.4	129.7	68.5	67.1	135.6	5.0
120	63.3	66.4	129.7	53.0	51.3	104.3	−19.6
135	34.7	36.7	71.4	52.8	50.1	102.9	44.0
150	—	—	—	46.4	44.4	90.8	—

注：差异计算公式为 $\Delta = (A_{高屈曲度} - A_{常规}) / A_{常规}$，其中，$A_{常规}$为常规假体小计接触面积，$A_{高屈曲度}$为高屈曲度假体小计接触面积。

2.2.2 不同假体接触应力对比

在 0° ~ 90° 屈曲度范围内，2种假体的最大接触应力差异保持在 ± 10%以内，临床上认为这是可以接受的。进一步分析表明，在 135° 时，高屈曲度假体的应力相较于常规假体减小了 36.0%，体现了高屈曲度假体在特定关节运动范围内的优越性，如图 8 所示。

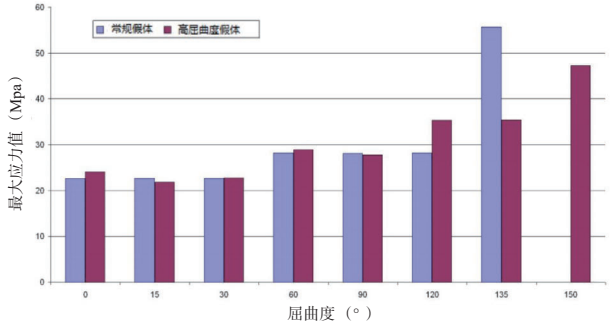


图 8 不同膝关节假体最大接触应力对比

在 0° ~ 90° 屈曲度范围内，2种假体的最大冯氏等效应力差异保持在 ± 5%以内。在 135° 时，与常规假体相比，高屈曲度假体最大冯氏等效应力减小了 19.0%，如图 9 所示。

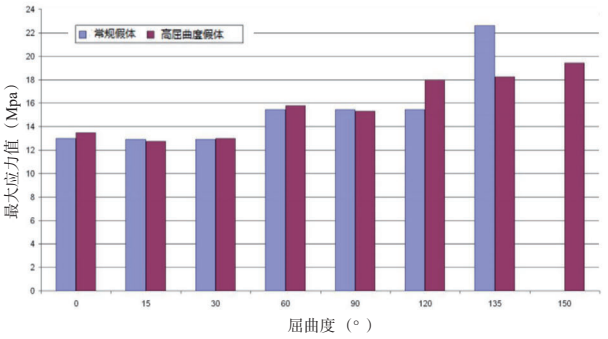


图 9 不同膝关节假体最大冯氏等效应力对比

3 讨论

3.1 高屈曲度膝关节假体研究的重要意义

在高度屈曲的情况下，膝关节具备更大的屈曲角度，这对于一些特殊动作，如蹲、跪或跳跃等活动，具有至关重要的作用。在高屈曲度下，膝关节的后滚和滑移运动特性可能发生变化，这些特性影响关节表面的相对运动。为了满足高屈曲度的需求，一些先进的关节假体设计采用了更大的运动范围、更适应高屈曲度的材料，以及更复杂的滑动表面设计。这些创新设计的目标是减少磨损和摩擦，提高关节假体的耐久性，从而更好地模拟自然膝关节的运动特性。但是之前并没有研究定量分析常规型和高屈曲度型 2 种膝关节假体的优劣及适用性，以及在所有力学指标和角度上的差异大小。通过综合考虑材料的特性、力学性能以及对生理学运动的模拟，本文的研究结果可以帮助医疗器械研究机构更好地设计出满足患者需求的高性能关节假体。

3.2 不同假体对关节接触面积及接触应力的影响

通过建立膝关节的三维有限元模型，分别在 0°、15°、30°、60°、90°、120°、135° 和 150° 情况下分析不同假体的接触面积和接触应力。在 0° ~ 150° 屈曲度范围内，高屈曲度假体表现出整体性接触面积优势。在低屈曲度 0° ~ 90° 区间，2类假体接触面积差异维持在 ± 10% 以内；而在高屈曲度 90° ~ 150° 区间，高屈曲度假体的接触面积显著超越常规假体。

在理论负载 2 060 N 的情况下，高屈曲度假体的

等效应力要小于常规假体。在0° ~ 90° 屈曲度范围内，两者的最大接触应力和最大冯氏等效应力均没有明显差别；然而，在135° 时，高屈曲度假体的最大接触应力比常规假体减小了36.0%，最大冯氏等效应力比常规假体减小了19.0%。高屈曲度假体在大范围屈曲条件下表现出更大的接触面积，且在特定屈曲度下的等效应力较低，相较于常规假体具有更好的力学性能。

3.3 研究意义与不足

通过建立三维有限元模型和进行对比分析，研究发现高屈曲度假体在一些特定屈曲度条件下表现出更大的接触面积和较低的接触应力。本研究为膝关节置换手术提供了力学性能的研究指导，有助于外科医师和医学工程师在选择、设计和优化高屈曲度假体时更好地考虑生物力学特性，提供了对该类假体在膝关节内力学行为的深入理解。结合研究结果，假体制造商和工程师可以设计更具性能优势的高屈曲度假体，这有助于推动关节假体技术的创新，提高膝关节置换手术的效果和患者的生活质量。但是，研究也存在一些局限性，一是未考虑其他可能影响接触面积和接触应力的因素，如关节润滑、软组织的变化等；二是研究主要集中在短期生物力学效果，缺乏对长期临床结果和患者生活质量的全面评估，后续研究可以从这些方面进行更深入研究。

[参 考 文 献]

[1] Australian Orthopaedic Association National Joint Replacement Registry. Hip, knee & shoulder arthroplasty: 2021 annual report [R]. Adelaide: AOA, 2021.

[2] Kang K S, Jung T G. Finite element analysis and mechanical assessment for the constraint of total knee replacement [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2024, 25: 843–849.

[3] Hunt P J, Noori M, Hazelwood S J, et al. A Study on the effects of cementless total knee arthroplasty implants' surface morphology via finite element analysis [J]. BioMedInformatics, 2024, 4(2): 1425–1440.

[4] Pais A, Moreira C, Belinha J. The biomechanical analysis of tibial implants using meshless methods: stress and bone tissue remodeling analysis [J]. Designs, 2024, 8(2): 28.

[5] Kingery M T, Akpinar B, Rynecki N D, et al. Intermediate–term outcomes of hip arthroscopy for femoroacetabular impingement syndrome in patients with global versus isolated lateral acetabular overcoverage [J]. American Journal of Sports Medicine, 2024, 52(1): 45–53.

[6] Abdel–Azim M H, Mohamed S A, Ahmed A A A. Comparative study between dual mobility total hip replacement versus bipolar hemiarthroplasty in the treatment of displaced femoral neck fractures in the elderly [J]. QJM: An International Journal of Medicine, 2024, 117(S2): hcae175.649.

[7] Bugeja J M, Xia Y, Chandra S S, et al. Analysis of cam location characteristics in FAI syndrome patients from 3D MR images demonstrates sex - specific differences [J]. Journal of Orthopaedic Research, 2024, 42(2): 385–394.

[8] Wagner M, Lindtner R A, Schaller L, et al. Hip arthroscopy with initial access to the peripheral compartment for femoroacetabular impingement: midterm results from a large–scale patient cohort [J]. Journal of Orthopaedics & Traumatology, 2024, 25(1): 29.

[9] 陈功, 易红, 倪中华. 三维医学体数据与工程分析集成 [J]. 数据采集与处理, 2006, 21(2): 239–244.

[10] 黄菲, 曲铁兵. 关于当前人工膝关节假体设计的焦点与展望 [J]. 中华关节外科杂志（电子版）, 2012, 6(4): 617–624.

[11] 曲铁兵, 林源, 潘江, 等. 保留后十字韧带在活动衬垫全膝假体置换术中的问题 [J]. 中华骨科杂志, 2004, 24(4): 234–236.

[12] 陈功, 易红, 倪中华. 基于逆向工程的医学器官有限元建模方法 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(1): 139–144.

[13] 靳忠民, 连芩, 王臻, 等. 双动人工半膝关节假体的设计及应用 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 12–20.

[14] 赵合意, 徐生产, 马国驹. 64例应用国产膝关节假体行全膝关节置换术的近期疗效观察 [J]. 中华关节外科杂志（电子版）, 2012, 6(3): 80–81.

[15] 刘艳强, 龙震, 黄荣瑛. 渐变形面膝关节假体设计及接触应力分析 [J]. 航天医学与医学工程, 2017, 30(1): 46–52.

[16] 魏鸿文, 郑诚功. 膝关节高屈曲假体的研究进展 [J]. 中华关节外科杂志（电子版）, 2009, 3(4): 524–528.

[17] 张晗硕, 丁宇, 李土胜, 等. 内镜下经椎板间联合椎间孔入路减压治疗腰椎管狭窄症生物力学评价 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(23): 9843–9849.

[18] Argenson J N A, Scuderi G R, Komistek R D, et al. In vivo kinematic evaluation and design considerations related to high flexion in total knee arthroplasty [J]. Journal of Biomechanics, 2005, 38(2): 277–284.

[19] Bert J M, Hooper J, Moen S. Outpatient total joint arthroplasty [J]. Current Reviews in Musculoskeletal Medicine, 2017, 10(4): 567–574.

[20] Wojtowicz R, Otten V, Henricson A, et al. Uncemented trabecular metal high–flex posterior–stabilized monoblock total knee arthroplasty in patients aged 60 years or younger [J]. The Knee, 2024, 46: 99–107.

[21] Caizares S, Barriga G C C, Jarrín F V, et al. Metallosis after oxinium total knee arthroplasty in a patient with rheumatoid arthritis: a case report [J]. Cureus, 2023, 15(2): e34541.

[22] Wang Z, Chen Y, Gao Q, et al. An analytical method for mechanical analysis of offshore pipelines during lifting operation [J]. Materials, 2023, 16(20): 6685.

[23] Goldstein D I, Theuer P A E, Hopfenzitz N, et al. (179) Simulation of erectile tissue shockwave energy absorption during low LiSWT for erectile dysfunction [J]. The Journal of Sexual Medicine, 2024, 21(S4): qdae041.058.