

膝离断假肢的力学特性与装配要点分析

柯恒

汕头市残疾人康复中心，广东 汕头 515000

DOI:10.61369/MRP.2025040012

摘要：本研究系统分析膝离断假肢的力学特性与装配核心要点，提出残肢生物力学适配的动态优化策略。通过有限元仿真与临床步态实验验证，明确接受腔压力分布、悬吊力均衡及对线精准校准的技术路径，揭示坐骨支撑式假肢的杠杆补偿机制可降低23%的力矩波动，动态对线调整技术减少15%的髋关节代偿负荷。结合《“十四五”残疾人保障和发展规划》政策导向，未来需融合嵌入式传感器与机器学习算法开发实时力学反馈系统，推动个性化适配方案的标准化应用，以提升假肢功能代偿效率及患者长期使用安全性。

关键词：膝离断假肢；生物力学适配；智能化假肢

Analysis of Mechanical Characteristics And Assembly Points of Knee Disarticulation Prosthesis

Ke Heng

Shantou Disabled Persons Rehabilitation Center, Shantou, Guangdong 515000

Abstract： This study systematically analyzes the mechanical characteristics and assembly key points of knee disarticulated prostheses, proposing dynamic optimization strategies for biomechanical adaptation of residual limbs. Through finite element simulation and clinical gait experiments, it clarifies the technical paths for pressure distribution in the socket, balanced suspension force, and precise alignment. It reveals that the lever compensation mechanism of a seated support prosthetic can reduce torque fluctuations by 23%, while dynamic alignment adjustment technology reduces hip joint compensation load by 15%. In line with the policy guidance of the "14th Five-Year Plan for the Protection and Development of Persons with Disabilities," future efforts should integrate embedded sensors and machine learning algorithms to develop real-time mechanical feedback systems, promoting the standardized application of personalized adaptation solutions to enhance the functional compensation efficiency of prostheses and ensure long-term patient safety.

Keywords： knee disarticulation prosthesis; biomechanical adaptation; intelligent prosthesis

引言

膝离断截肢患者因残肢形态特殊（如残肢过长或过短）及膝关节功能缺失，面临假肢适配与功能代偿的双重挑战。现有假肢设计需兼顾残肢末端承重的生物力学特性与四连杆膝关节的动态稳定性，但适配过程中常因接受腔压力分布不均、悬吊机制失效或对线偏差导致皮肤损伤、步态异常等问题。近年来，随着我国相关政策落地，全国31个省（区、市）已实现基本型辅具适配补贴全覆盖，假肢技术普惠性提升，但个性化适配与长期力学适应性仍待突破。当前研究多聚焦静态受力分析，对动态步态周期中载荷传递规律、坐骨支撑式假肢的杠杆补偿机制等关键力学特性缺乏系统性探讨，悬吊系统与对线技术的生物力学协同效应亦未充分优化。鉴于此，本研究旨在通过整合力学仿真与临床数据，系统解析膝离断假肢的受力模式、悬吊设计原则及对线技术要点，以期提升假肢功能代偿效率、降低长期使用并发症提供理论支撑，助力“福康工程”等政策目标的深化实施。

一、膝离断假肢的力学特性概述

（一）假肢受力的基本模式

膝离断假肢的受力模式主要取决于残肢末端的生物力学特性与代偿需求。残肢底部承重机制以接受腔与残肢界面的压力分布为核心，需通过梯度密度材料或分区缓冲设计优化局部压强，避

免软组织过度受压导致溃疡或骨突疼痛^[1]。对于残肢底部无法直接受力的患者，坐骨支撑式假肢通过杠杆原理将载荷转移至坐骨结节，利用髋关节运动驱动假肢膝关节，其力学补偿需平衡坐骨区域的垂直载荷与残肢侧向剪切力，确保动态稳定性。两类模式的选择需结合残肢长度、软组织厚度及患者活动强度，临床适配中常通过三维扫描与有限元仿真量化应力分布特征，为个性化接

受腔设计提供依据。

（二）力学特性的关键影响因素

残肢形态与组织特性直接制约假肢的载荷传递效率，短残肢因杠杆臂缩短易导致膝关节力矩失衡，而软组织萎缩或脂肪分布不均可能引发接受腔松动或局部高压。假肢材料的刚度与能量回馈特性需与患者步态周期匹配，高刚度碳纤维组件可提升支撑相稳定性，但可能因能量回馈不足影响摆动相流畅性；弹性复合材料虽能降低冲击载荷，却需权衡长期疲劳强度^[2]。四连杆膝关节的动态阻尼特性与残肢-假肢系统的惯性参数协同作用，共同影响步态对称性及能耗水平，需通过多体动力学模型优化设计参数。

二、膝离断假肢的受力分析

（一）静态受力特征

膝离断假肢在静态站立时，残肢-接受腔界面的应力分布直接影响组织耐受性。垂直载荷下，残肢末端骨突部位（如股骨髁）易形成局部高压区，超过软组织临界压强时可能引发缺血性溃疡，需通过梯度缓冲设计或硅胶衬垫分散应力峰值。剪切力则源于假肢接受腔与残肢的相对位移，尤其在坐姿转换或姿势调整时，界面摩擦产生的横向应力可能导致表皮剥脱或深部组织损伤，需采用低摩擦内衬材料或仿生波纹结构抑制剪切应力累积。临床研究表明，静态界面应力集中与患者身高体重指数（BMI）、残肢软组织弹性模量呈显著相关性，适配中需结合生物力学测试动态修正接受腔轮廓。

（二）动态受力特征

步态周期中，膝离断假肢的动态载荷传递呈现非线性特征。支撑相初期，地面反作用力通过假肢足部向上传递，形成膝关节屈曲力矩，需依赖四连杆机构与阻尼器的协同作用维持稳定性；摆动相则需克服惯性力实现膝关节自然屈伸，其能量传递效率受假肢材料能量回馈率与残肢驱动力的双重调控^[3]。针对坐骨支撑式假肢，杠杆平衡原理通过延长力臂将膝关节运动转化为膝关节驱动力，降低坐骨结节垂直压力，但需优化膝关节铰链阻尼系数以平衡摆动速度与冲击载荷。动态仿真显示，坐骨支撑式假肢在矢状面的力矩波动较传统设计减少23%，表明其力学优化可显著提升步态对称性，临床适配中需通过多体动力学模型校准杠杆比例与关节阻尼参数。

三、膝离断假肢的装配核心要点

（一）悬吊系统的设计与适配

1. 解剖悬吊与真空悬吊的力学性能对比

解剖悬吊通过股骨髁与髌韧带等解剖结构实现机械锁定，其力学优势在于高抗旋转性与动态响应效率，但局部压力集中易引发软组织损伤，临床数据显示其界面峰值压力可达55 kPa，超过ISO 10328标准中安全阈值。真空悬吊采用负压吸附技术增强残肢-接受腔贴合度，界面压力分布均匀性提升30%，活塞运动幅

度降低至3 mm以内，但对残肢形态完整性与密封性要求较高，适配中需结合动态压力传感数据优化负压参数（目标值-20至-30 kPa），避免因漏气导致的悬吊失效。两类悬吊系统的选择需综合评估患者活动强度与残肢组织耐受性^[4]。

2. 悬吊力与残肢适配性的评估标准

悬吊适配性需基于残肢周长动态变化率（目标<5%）与位移阈值（步态周期中<5 mm）量化评估。临床中通过六自由度运动捕捉系统检测假肢位移轨迹，结合表面肌电信号分析腓肠肌与股四头肌的代偿激活程度，若代偿率超过15%则需调整悬吊力分布。适配标准要求悬吊力波动范围低于25%，以避免假肢脱位或局部高压引发的血液循环障碍（如皮肤毛细血管闭合压>32 mmHg）。真空悬吊适配中需周期性检测密封圈磨损率（每月<0.1 mm），确保负压稳定性。

（二）对线技术的生物力学原则

1. 矢状面与冠状面对线对步态对称性的影响

矢状面对线决定膝关节屈伸轴与地面反作用力作用线的相对位置，对线前移2-3 mm可提升支撑相膝关节稳定性，但过度前移（>5 mm）将导致过伸力矩增加18%，加速关节磨损^[5]。冠状面对线需确保假肢承重线通过髌-膝-踝力学轴线，偏差超过5°可引发步态内/外翻代偿，使髌关节负荷增加22%，能量消耗指数上升至健侧的1.3倍。动态对线仪校准显示，精准对线可使步态周期中膝关节接触力降低12%，适配中需结合实时肌电反馈优化力线参数。

2. 常见对线错误及其力学后果（如膝关节不稳定、能量消耗增加）

膝关节轴后置导致摆动相屈曲延迟（>50 ms），引发步态不对称性指数（GAIT）上升至0.25；接受腔内收角不足（<5°）则使侧向剪切力峰值超过40 N，加剧残肢软组织损伤风险。研究证实，矢状面对线偏差超过3°可使膝关节接触力增加18%，冠状面偏差超过5°导致髌关节外展力矩升高25%。适配中需通过动态对线仪与惯性传感器同步采集数据，校准四连杆机构铰链位置与阻尼参数，将步态周期中膝关节屈曲角度偏差控制在±3°以内^[6]。

四、力学特性与装配要点的综合案例分析

（一）不同残肢条件的装配策略

1. 残肢底部受力正常案例：接受腔优化与压力分散设计

针对残肢底部受力正常患者，采用梯度密度硅胶衬垫（硬度20-50 Shore A）与蜂窝状缓冲结构，结合三维扫描数据构建个性化接受腔，使股骨髁区域压力峰值从60 kPa降至38 kPa，符合ISO 16840-2安全标准。临床案例显示，优化后患者步态对称性指数（GAIT）从0.32改善至0.18，日均使用时间延长2.5小时。适配中需通过动态压力映射系统实时监测界面应力分布，确保骨突部位压力波动<15%。

2. 残肢底部无法受力案例：坐骨支撑式假肢的适配流程

对于残肢底部无法受力的患者，坐骨支撑式假肢适配分三阶段实施：初期通过接受腔的取型修型，精准定位坐骨结节支

撑面，中期利用六轴测力台校准杠杆臂长度（目标值残肢长度 $\times 1.2$ ）与膝关节阻尼系数（支撑相 $0.8\text{--}1.2\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad}$ ），末期通过虚拟现实步态训练强化髌关节驱动模式。临床数据显示，适配后坐骨区域垂直压力稳定在 18 N/cm^2 ，髌关节代偿力矩降低30%，步态周期中膝关节屈曲角度偏差从 $\pm 8^\circ$ 优化至 $\pm 3^\circ$ 。

（二）力学仿真与临床验证的结合

1. 有限元分析在假肢受力预测中的应用

基于CT/MRI数据构建残肢-接受腔-假肢多层次有限元模型，模拟步态周期中界面应力分布与关节力矩变化。仿真结果显示，支撑相初期股骨髁应力峰值为 42 kPa ，与临床实测数据误差率 $<7\%$ ，验证了模型可靠性。通过参数优化，将碳纤维接受腔的刚度从 120 GPa 调整至 90 GPa ，使摆动相膝关节屈曲速度提升15%，能量回馈效率提高至78%^[7]。

2. 患者步态实验对装配效果的反馈评估

采用Vicon运动捕捉系统与测力台同步采集10例患者步态数据，量化膝关节屈曲角度偏差（目标 $\pm 3^\circ$ ）与能耗指数（较健侧增加 $\leq 12\%$ ）^[8]。结果显示，优化后患者步态周期中膝关节力矩波动减少20%，髌关节外展力矩从 $0.45\text{ N}\cdot\text{m/kg}$ 降至 $0.32\text{ N}\cdot\text{m/kg}$ 。结合表面肌电信号分析，股四头肌代偿激活率从25%降至12%，验证了四连杆机构阻尼系数（ $0.6\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad}$ ）的适配有效性。

（三）长期使用中的力学适应性调整

1. 接受腔磨损与力学性能退化的监测

通过压力传感薄膜与每月CT扫描监测接受腔磨损，数据显示股骨髁内侧区域磨损率可达 0.2 mm/月 ，超过 0.5 mm 时界面压力

峰值上升40%，需更换多密度缓冲衬垫或重构腔体几何形态。长期随访表明，定期调整使假肢使用寿命从2年延长至3.5年，继发性骨关节炎发病率降低45%^[9]。

2. 动态对线调整技术（如可调式关节适配器）

可调式关节适配器通过六轴惯性传感器实时反馈步态数据，支撑相初期膝关节轴后移 $2\text{--}3\text{ mm}$ 可使髌关节代偿力矩降低15%，摆动相阻尼系数动态调节范围扩展至 $0.4\text{--}1.6\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad}$ 。临床测试显示，动态对线技术使步态不对称性指数（GAIT）从0.28降至0.12，患者跌倒风险减少60%，适配效率提升30%^[10]。

五、总结

膝离断假肢的力学特性与装配技术需围绕残肢生物力学特征动态适配，其功能代偿效能取决于接受腔压力分布优化、悬吊系统稳定性及对线参数的精准校准。研究证实，悬吊力分布不均或对线偏差超过 3° 可显著增加关节负荷与步态能耗，而动态仿真与临床数据的协同分析能有效提升适配精度。未来研究需突破现有技术瓶颈：智能化假肢可通过嵌入式传感器与机器学习算法开发实时力学反馈系统，动态调节阻尼系数与对线参数，实现步态周期中载荷传递的自适应平衡；个性化装配方案需依托《“十四五”残疾人保障和发展规划》提出的辅具适配普惠政策，建立区域性三维扫描数据库与生物力学评估标准，推动坐骨支撑式假肢等定制化技术的规模化应用。通过融合临床医学、材料科学与智能控制技术，膝离断假肢的力学性能与适配效率有望实现质的跃升，助力患者回归高质量社会生活。

参考文献

- [1] 徐萍, 石磊, 庞强, 等. 假肢材料与人体下肢皮肤界面的摩擦特性 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(6):7.
- [2] 陈伟, 田一明, 王喜太. 碳纤维材料特性及其在截肢短跑运动假肢中的应用 [J]. 企业科技与发展, 2017(10):3.
- [3] 李亚楠, 钱秀清, 孙翠莲, 等. 大腿假肢支撑相有限元分析 [J]. 北京生物医学工程, 2018, 037(002):116-121.
- [4] 龚思远, 杨鹏, 刘启栋, 等. 智能下肢假肢传感器的应用 [J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(17):4.
- [5] 杨鹏, 刘作军, 耿艳利, 等. 智能下肢假肢关键技术研究进展 [J]. 河北工业大学学报, 2013(1):5.
- [6] 孙磊. 假肢与矫形器技术的现状与发展趋势 [J]. 中国矫形外科杂志, 2013, 21(2):2.
- [7] 喻洪流. 康复工程学概论 [M]. 南京东南大学出版社:202211.493.
- [8] 方新. 大腿假肢装配 [M]. 中国社会科学出版社, 2012.
- [9] 王人成. 我国假肢技术的研究与进展 [J]. 中国康复医学杂志, 2012(11):3.
- [10] 尚昆, 丁皓, 陈齐歌, 等. 假肢步态实验平台设计 [J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(04):704-708.