

新型髌膝一体化假肢结构设计与分析

叶应国^{1,2}, 罗胜利^{1,2}, 疏小龙^{1,2}, 李沅桦^{1,2}, 喻洪流^{1,2*}

¹上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

²上海理工大学智能康复工程研究院, 上海

收稿日期: 2025年8月4日; 录用日期: 2025年8月28日; 发布日期: 2025年9月5日

摘要

髌膝一体化假肢是针对髌膝关节截肢患者设计的下肢辅助设备, 旨在帮助患者恢复自然步态并提高在不同环境中的移动能力。然而, 传统髌离断假肢通常采用髌、膝关节独立驱动的设计, 导致运动协调性不足, 影响步态稳定性和能量传递效率。为优化髌膝关节协同运动并克服现有方案的局限性, 本研究提出了一种新型髌膝一体化假肢结构, 其核心创新在于采用可连续变传动机构, 实现单一动力源驱动下的髌膝协同运动, 同时集成自适应腿长调节机构, 以适应不同截肢者腿长的解剖学差异。基于SolidWorks设计髌膝一体化假肢结构与关键部件有限元分析, 结合ADAMS软件完成运动学仿真验证, 结果表明, 该设计能够有效实现髌膝关节的连续协同运动, 显著提升运动协调性和步态自然度。本研究为下肢假肢的仿生设计与运动优化提供了重要的理论依据和技术支撑, 对提高截肢患者的康复效果和生活质量具有积极意义。

关键词

髌膝一体化假肢, 连续变传动, 结构设计, 运动仿真

Novel Integrated Hip and Knee Prosthetic Structure: Design and Analysis

Yingguo Ye^{1,2}, Shengli Luo^{1,2}, Xiaolong Shu^{1,2}, Yuanhua Li^{1,2}, Hongliu Yu^{1,2*}

¹School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²Institute of Intelligent Rehabilitation Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Aug. 4th, 2025; accepted: Aug. 28th, 2025; published: Sep. 5th, 2025

Abstract

The hip-knee integrated prosthesis is a lower-limb assistive device designed for individuals with hip disarticulation amputations, aiming to restore natural gait and enhance mobility across diverse

*通讯作者。

文章引用: 叶应国, 罗胜利, 疏小龙, 李沅桦, 喻洪流. 新型髌膝一体化假肢结构设计与分析[J]. 建模与仿真, 2025, 14(9): 58-66. DOI: 10.12677/mos.2025.149584

environments. However, conventional hip disarticulation prostheses typically employ independently driven hip and knee joints, resulting in inadequate motion coordination, which adversely affects gait stability and energy transfer efficiency. To optimize the coordinated movement of the hip and knee joints and overcome the limitations of existing designs, this study proposes a novel hip-knee integrated prosthesis. Its core innovation lies in the implementation of a continuously variable transmission mechanism, enabling coordinated hip-knee motion driven by a single power source, along with an integrated adaptive leg-length adjustment mechanism to accommodate anatomical variations in leg length among amputees. The structural design of the hip-knee integrated prosthesis and finite element analysis of critical components were conducted using SolidWorks. Kinematic simulations were subsequently performed using ADAMS software. The results demonstrate that the proposed design effectively achieves continuous, coordinated motion of the hip and knee joints, significantly enhancing motion coordination and gait naturalness. This research provides essential theoretical foundations and technical support for the biomimetic design and motion optimization of lower-limb prostheses, offering positive implications for improving rehabilitation outcomes and quality of life for amputees.

Keywords

Hip and Knee Integrated Prosthesis, Continuously Variable Transmission Mechanism, Structural Design, Kinematic Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

下肢假肢作为辅助下肢截肢者恢复行走能力的关键，对于改善患者的生活质量及回归社会具有深远的影响[1]。据相关统计，我国目前存在超过 170 万的下肢截肢者，其中髋关节截肢患者的比例约为 2% [2]-[4]。截肢的主要原因包括车祸等创伤性意外事故以及肿瘤和血管疾病等身体内部疾病[5]。髋膝一体化假肢，作为一款全下肢辅助装置，涵盖了髋关节、膝关节及踝关节，旨在为髋关节离断和半骨盆切除患者提供在特定环境下的移动能力[6]。从生物力学视角分析，现有被动式假肢因缺乏能量供给机制，无法模拟正常人体下肢肌肉在步态周期中通过主动收缩实现的机械能动态补充，导致截肢者需依赖代偿性提髋运动以维持行走功能，这种补偿策略不仅对髋关节功能受限者构成显著挑战，更使多数使用者在行走速度、体能消耗及步态稳定性方面呈现系统性缺陷，尤其在爬楼梯、跨越障碍等需要动态能量调节的复杂运动场景中表现尤为薄弱[7][8]。此外，当前市场上的大多数髋假肢采用的是分离式设计，这类设计在促进关节间的协同运动方面表现不佳，不仅容易导致异常步态模式的发生，还可能因长期使用而引发一系列健康问题，如人体损伤及行走不稳定性增加等[9]。

近年来，越来越多的研究开始关注髋膝一体化假肢的开发。Ueyama [10]等人首先基于机器人技术提出了一种全动力髋膝假肢，集成控制系统，使用两个动力电机分别控制髋关节和膝关节。然而，假肢的重量超过 10 kg，这很难被截肢者接受。Bader [11]等人设计并评估了一种集成动力髋关节和微处理器控制膝关节的髋膝踝足假肢单元，并共享电子设备、传感器和电池，大腿长度可以调整，然而髋膝关节仍是独立控制，没有从结构上考虑髋膝之间的协同运动问题。Luo [7][12]等人设计了一种一体化髋膝假肢，通过远程运动中心结构和四杆结构恢复生理运动中心并在结构上实现关节协同运动，但其髋膝之间的传动比固定，在仿生髋膝协同运动方面效果不理想且远程运动中心机构偏大。

针对上述挑战,本研究提出了一种创新的假肢双关节传动策略,并设计了一款新型髌膝一体化动力假肢。通过优化传统髌膝关节间动力传递路径及协同机制,本研究克服了传统分离式假肢在运动学上的局限性,实现了更接近自然人体步态的仿生运动模式。

2. 下肢运动机理分析

依据人体下肢解剖学关节结构及其运动特性,确定了髌膝关节的活动范围[13]。相关资料表明,髌关节具有屈曲与伸展、内旋与外旋以及内收与外展三个自由度。髌关节屈伸最大活动范围是 $-15^{\circ}\sim 125^{\circ}$ 、内收外展最大活动范围为 $-20^{\circ}\sim 45^{\circ}$;膝关节屈伸最大活动范围为 $-10^{\circ}\sim 135^{\circ}$ 。此外,在穿戴传统髌假肢的患者步行观测中发现,假肢侧的运动仅有髌关节和膝关节的屈曲运动,髌膝假肢之间仅用管材简单连接,截肢者运动时需要实现夸张的提臀动作,导致体力消耗大。为了模拟人体髌膝运动,根据 CGA 数据库[14],研究了正常人步行时的下肢关节运动。如图 1 所示,在一个步态周期内,矢状面髌膝关节之间传动比例存在连续变化,且在不同速度下变化比例也不同,这是传统髌假肢难以实现的。

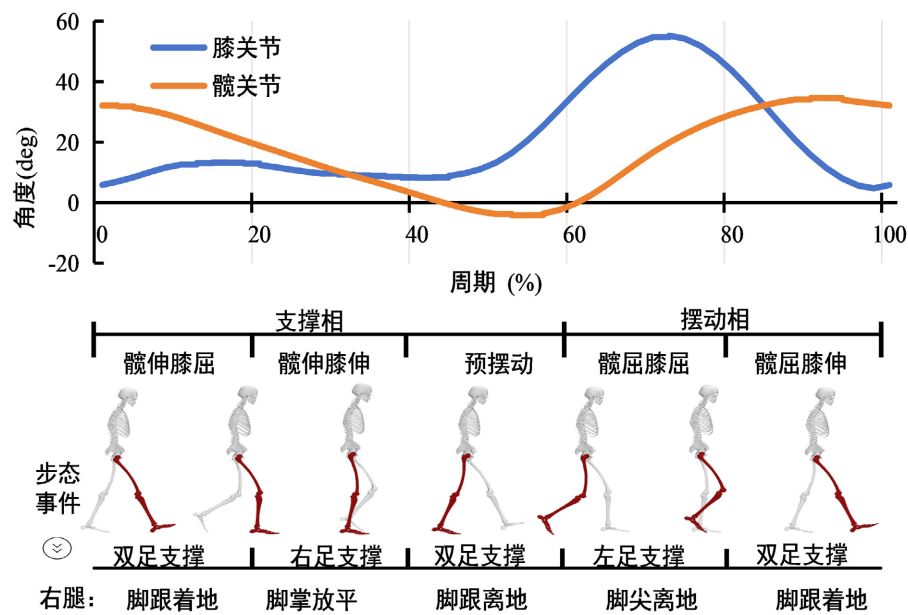


Figure 1. Variation of hip and knee joint angles during normal walking and division of gait cycle events
图 1. 正常步行髌膝角度变化和步态周期事件划分

3. 髌膝一体化假肢结构设计

髌膝一体化假肢可拆分为三个部分,分别是髌膝双关节传动结构、髌关节、膝关节。假肢总体结构如图 2 所示。双关节传动结构具有仿生下肢髌膝协同运动机理的功能,实现单一动力向两端传递且传动速比连续可变,此外,还可以根据个体差异调整大腿长度和力学对线。该设计采用了一种创新的连续变传动机制,确保了在步态周期的不同阶段,髌关节和膝关节能够以最优的比例协同工作。这一机制不仅能提高假肢的运动效率,还可以增强穿戴者的行走舒适度和步态自然度。髌关节采用四连杆结构,实现站立稳定、摆动灵活的运动机理,并加入可变阻尼的液压缓冲元件,在支撑期伸展的过程中起到缓冲的作用,使步行过程中更加柔和,患者更容易控制。膝关节采用四连杆设计,模拟人体膝关节的复杂运动特性,确保膝关节站立期间的安全性和摆动时的灵活性,加入可变阻尼的液压缓冲元件和弹簧元件后,可以实现膝关节的柔顺运动与储能助伸功能。

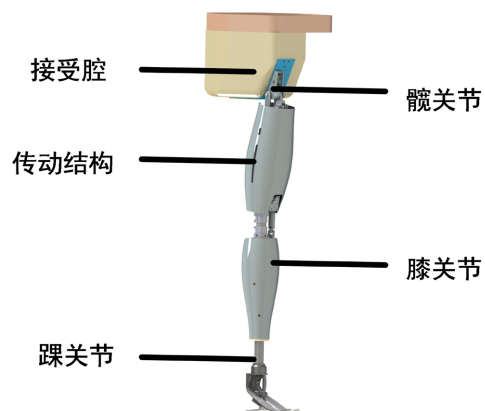


Figure 2. Integrated hip-knee prosthesis overall structure
图 2. 髋膝一体化假肢整体结构

3.1. 髋膝协同传动结构

为了使单一动力向假肢双关节的连续可变传动，仿生髋膝协同运动机理，本文提出了基于行星齿轮的变速方案。当假肢在平地步行时，通过变速系统实时调整传递至膝关节的动力，使髋膝关节的运动轨迹能仿生健侧腿的运动；当假肢上楼梯或上坡时，变速系统提前规划好髋膝位置，调整膝关节至高传动比例，并使用涡轮蜗杆机构的自锁特性固定传动比例，使动力能充分传递至膝关节，以应对上坡上楼梯等高负载需求场景。

髋膝协同传动变速系统主要由行星齿轮、太阳轮、内齿圈和行星架组成。太阳轮与动力源相连，而内齿圈则与调速电机相连，分别作为输入端；行星架与膝关节相连，作为输出端。通过调速电机调整内齿圈的转动速度，可以连续改变动力传递至髋关节和膝关节的比例。为了仿生髋膝协同运动机理，通过传感器实时监测步态周期中的关节角度、速度和负载等参数，然后根据预设的算法调整动力电机和调速电机的速度，确保髋膝关节能够以最优的比例协同工作。传动原理及结构如图 3 所示。

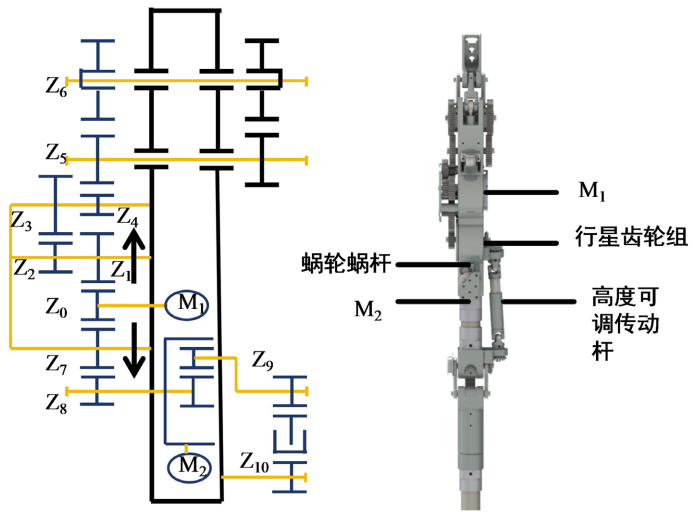


Figure 3. Hip-knee coordinated transmission principle and transmission structure
图 3. 髋膝协同传动原理及传动结构

此外，该假肢还具备高度可调性，能够根据穿戴者的腿长、对线情况以及个人偏好进行个性化调整，

确保最佳的穿戴舒适度和步态效果。这种设计可以提升假肢的实用性和适应性，也可以为穿戴者带来更加自信、自如地行走体验。传动系统关键参数如表 1 所示，包括齿轮系统、主动电机、调速电机、液压元件、高度调节等参数。

Table 1. Key parameters of the transmission system
表 1. 传动系统关键参数

参数类别	参数名称	参数值	备注
齿轮系统	髋减速比($Z_0:Z_6$)	9:1	蜗杆锁定
	膝减速比($Z_0:Z_{10}$)	6:1	
	蜗轮蜗杆减速比	10	
	行星齿轮减速比	4	
动力电机	额定转速	275 rpm	额定值 6 N·m
	峰值扭矩	17 N·m	
	额定电压	36 V	
调速电机	额定转速	555 rpm	
	额定电压	24 V	
	额定扭矩	0.8 N·m	
液压元件	行程	10 mm	
	最大负载	80 kg	
高度调节	调节方式	花键伸缩	依据患者个性化腿管长度而固定
	调节范围	0~25 mm	

3.2. 髋关节

鉴于截肢者行走的特殊性，其运动主要局限于矢状面内的屈曲与伸展，而髋关节的旋内旋外运动幅度相对较小，因此在设计中可予以忽略。本研究仅考虑屈曲伸展以及内收外展两组运动自由度。其中，屈曲与伸展自由度被设定为关键的主动自由度，而内收与外展则被设定为对线安装自由度，采用弧形结构，可以实现 30°的内收外展对线调整。髋关节的机械结构如图 4 所示。

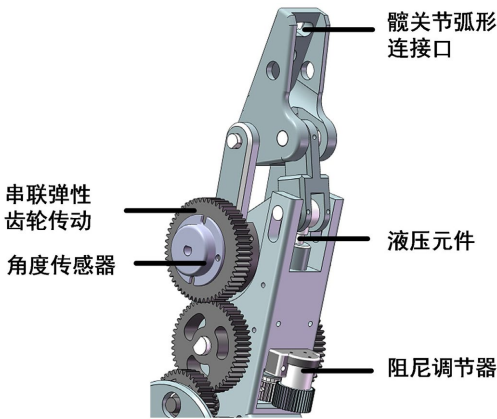


Figure 4. Four-bar linkage hip joint
图 4. 四连杆髋关节

3.3. 膝关节

人体膝关节的生理结构揭示了膝关节并非单一的旋转运动，其运动瞬心呈现出规律性的曲线变化。基于此，本研究采用了典型的四连杆仿生膝关节结构，并在此基础上集成了内置弹簧与可调节阻尼液压元件，以实现膝关节的辅助伸展与顺应性运动，具体结构如图 5 所示。

通过优化机械设计与动力传递机制，该假肢膝关节得以仿生真实膝关节在步行、楼梯等运动模式下的表现。弹簧元件在膝关节伸展阶段实现能量储存与辅助伸展，有助于穿戴者更为轻松地迈步。而可调节阻尼液压元件则能够依据不同的行走速度与负载需求，实时调整阻尼系数，确保膝关节在不同情境下的稳定性和安全性。

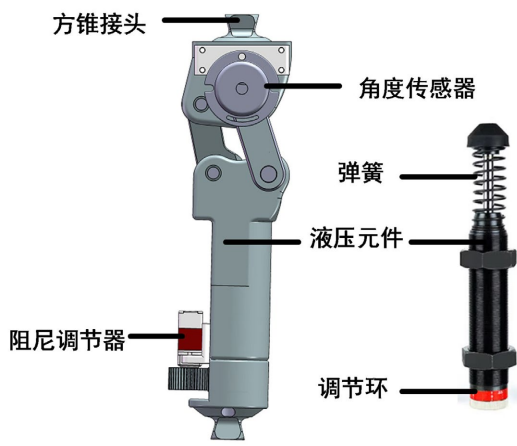


Figure 5. Four-bar linkage knee joint
图 5. 四连杆膝关节

4. 协同运动分析

为了分析新型髌膝一体化假肢的协同运动效果，基于变速模块建立了髌膝协同运动关系，如图 6 所示为变速模块结构简图。

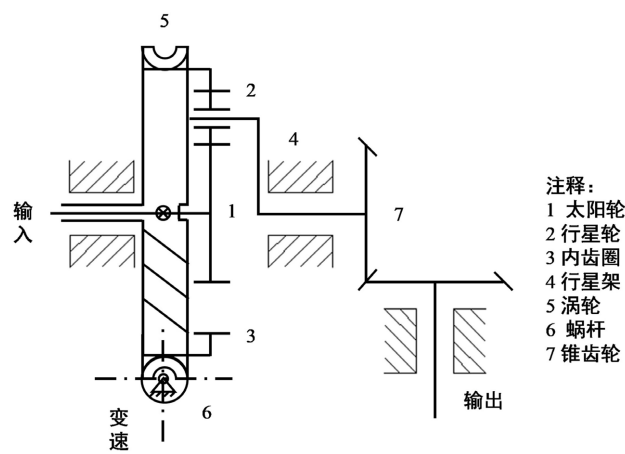


Figure 6. Simplified diagram of the variable speed module structure
图 6. 变速模块结构简图

根据行星齿轮运动关系和协同传动关系，可以得到以下运动关系式：

$$W_C \left(1 + \frac{Z_R}{Z_S} \right) = W_R \left(\frac{Z_R}{Z_S} \right) + W_S \quad (1)$$

$$W_{Knee} = W_C \quad (2)$$

$$6W_{Hip} = W_S \quad (3)$$

其中 C 为行星架、 R 为内齿圈、 S 为太阳轮、 Z 代表齿轮齿数、 W 代表角速度。

5. 仿真分析

为验证髌膝一体化假肢结构的可行性，对关键部件有限元分析和运动仿真。通过有限元分析评估了假肢关键部件在承受负载时的应力分布和变形情况，确保结构设计合理。在 ADAMS 运动仿真中，我们模拟了假肢在不同速度下的动力传递和关节运动。

5.1. 有限元分析

为验证结构强度，校核主要受力的关键零部件。采用 simulation 插件对髌膝一体化假肢的关键零部件进行有限元分析。根据中国成年人体尺寸男性 90 百分位体重数据[15]，零件需要承受最大 80 kg 的重量。材料选择 6061 铝合金，网格划分良好后进行分析。结果如图 7 所示，在施加 800 N 压力的情况下，三个关键零部件的最大应力值分别为 31.29 MPa、44.26 MPa 和 10.41 MPa，低于材料的屈服强度 55.15 MPa，证明了结构设计的有效性和合理性。此外，关键零部件的变形量也在可接受范围内，确保了假肢在使用过程中的稳定性和耐用性。有限元分析的结果为后续的样机制作和实验验证提供了理论依据。

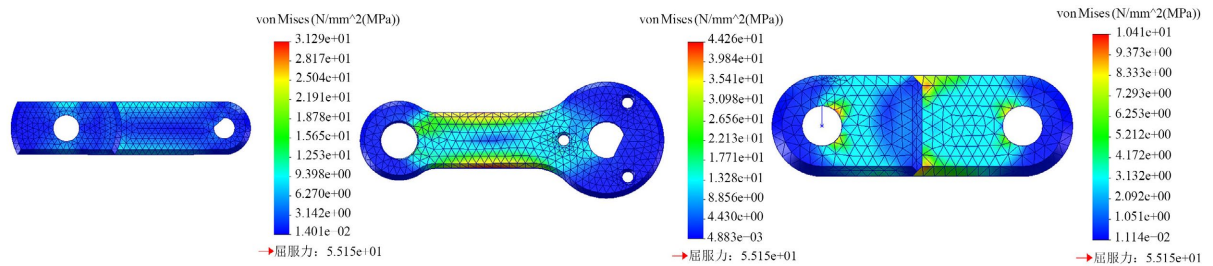


Figure 7. Stress variation cloud diagram of key components

图 7. 关键零部件应力变化云图

5.2. ADAMS 运动仿真

为验证传动系统的有效性，根据前文公式(1)~(3)和数据库数据，用髌膝关节角度变化数据以公式(4)中心差分法得出动力电机速度变化和调速电机速度变化并以此控制，进行运动仿真得到膝关节的仿真速度，与理论膝关节速度对比，验证结构的传动效果。

$$W(t_i) = \frac{\theta(t_{i+1}) - \theta(t_{i-1}))}{2\Delta t} \quad (4)$$

在 ADAMS 平台上构建了髌膝一体化假肢的虚拟原型模型，并设置了与实际步态周期相一致的运动参数。通过仿真实验，对假肢的运动性能进行了分析，并记录了在不同行走速度(0.5 m/s、1 m/s 和 1.5 m/s)下膝关节角度的变化情况。如图 8 所示，展示了膝关节理论角度变化与仿真角度变化的对比，仿真结果表明，膝关节能够实现高度拟合的运动模拟，与健康人体步态趋势具有高度的相似性。需要说明的是，膝关节的理论值是行走运动过程中的一个周期数据，而仿真值是从静止开始驱动一个周期后得到的一个周期数据。因此仿真值与理论值在周期内的同一个阶段下存在角度差。

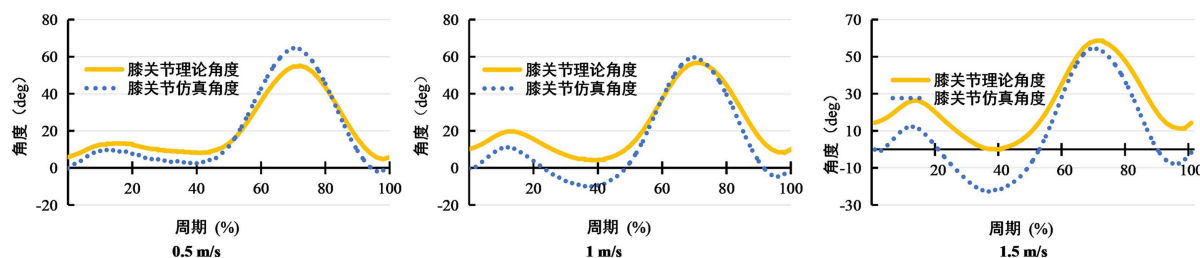


Figure 8. Angle comparison variation diagram of the knee joint at different speeds

图 8. 膝关节不同速度下的角度对比变化图

进一步地, 通过将仿真速度与理论速度进行对比分析, 研究结果表明, 随着速度的提升, 两者之间的误差呈现增长趋势。如图 9 所示, 拟合度的最高值达到 99%, 最低值为 98.85%, 显示出模拟精度在可接受的误差范围内。研究结果表明, 膝关节运动的仿真轨迹与理论轨迹表现出高度的一致性, 从而证实了髌膝协同运动结构的有效性。

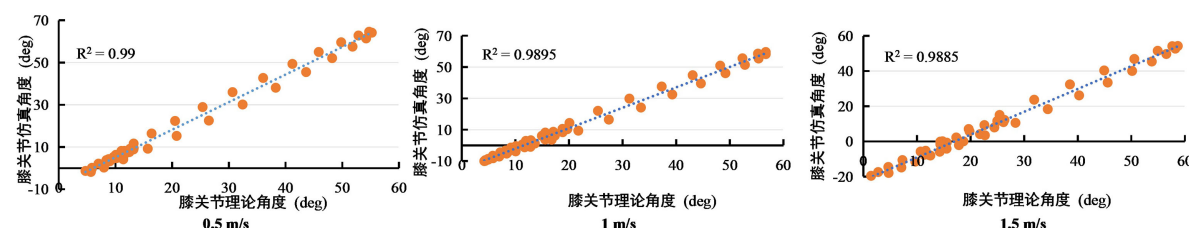


Figure 9. Theoretical and simulation angle fitting effect diagram of the knee joint

图 9. 膝关节理论与仿真角度拟合效果图

6. 结论

本研究提出并设计了一种新型髌膝一体化假肢结构, 该结构通过创新的传动系统实现了髌膝关节之间的连续协同运动。在三维建模软件 SolidWorks 中进行了结构设计并做了关键部件的有限元分析, 确保假肢的各部分组件能够紧密配合且符合穿戴要求, 满足截肢者的实际需求。在 ADAMS 平台上进行了三种速度的运动仿真, 将膝关节仿真值与理论值对比, 验证了假肢在不同速度下的协同运动表现。

提出并设计的基于行星齿轮的协同运动方案, 实现了动力在髌膝关节之间的连续可变传动, 可使假肢能够根据不同的行走速度 and 环境需求进行自适应调整。此外, 通过设计腿长调节机构, 能够根据截肢者的腿长、对线情况以及个人偏好进行个性化设置, 从而确保最佳的穿戴舒适度和步态效果。

尽管本研究提出的髌膝一体化假肢设计在协同运动和步态优化方面具有显著优势, 但仍存在一些潜在挑战。首先, 虽然行星齿轮实现了动力的连续可变传动, 但其复杂的机械结构可能增加制造精度和成本。其次, 尽管自适应腿长调节机构可满足部分个性化需求, 但其调节范围或精度不足, 可能影响穿戴者的舒适度和步态稳定性。最后, 目前的仿真结果是基于理想化模型, 实际使用效果需要截肢者穿戴实验进行验证。针对上述挑战, 首先, 可通过标准模块化设计, 降低行星齿轮组加工精度要求和成本; 其次, 选择高性能电机以减少齿轮传动路径和简化腿长调节机构, 可以用缩减出来的空间增加高度调节范围并减少由于累计误差导致的传动精度问题; 最后, 后续将邀请截肢者进行穿戴实验以验证假肢的性能。

综上所述, 本研究设计的新型髌膝一体化假肢结构在提升髌膝关节协同运动方面取得了显著优势, 为下肢假肢的仿生设计与步态优化提供了重要的理论和技术参考。未来研究可通过标准模块化设计、减少传动路径、简化调节机构及临床验证相结合的方式, 进一步提升假肢的实用性、安全性和有效性, 以期截肢者带来更高效的假肢解决方案。

致 谢

感谢其他成员在研究过程中的建设性意见与指导。

基金项目

国家自然科学基金，新型髌膝一体化智能仿生假肢关节驱动机理与协同控制研究(62473263)。

参考文献

- [1] 王启宁, 郑恩昊, 陈保君, 等. 面向人机融合的智能动力下肢假肢研究现状与挑战[J]. 自动化学报, 2016, 42(12): 1780-1793.
- [2] 罗胜利, 喻洪流, 孟巧玲, 等. 一种新型髌离断外动力假肢的设计方法[J]. 生物医学工程研究, 2021, 40(2): 178-183.
- [3] 白茹, 刘永章. 智能下肢假肢评定方法的研究进展[J]. 中国医疗器械信息, 2023, 29(5): 11-13, 76.
- [4] 中国残疾人联合会. 中国残疾人事业统计年鉴 2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [5] Gholizadeh, H., Baddour, N., Botros, M., Brannen, K., Golshan, F. and Lemaire, E.D. (2021) Hip Disarticulation and Hemipelvectomy Prostheses: A Review of the Literature. *Prosthetics & Orthotics International*, **45**, 434-439. <https://doi.org/10.1097/pxr.0000000000000029>
- [6] 段崇群, 李新伟, 何秉泽, 等. 基于远程运动中心机构的动力髌离断假肢的设计与仿真[J]. 生物医学工程学杂志, 2021, 38(3): 549-555, 562.
- [7] Luo, S., Shu, X., Zhu, H. and Yu, H. (2023) Design and Optimization of a New Integrated Hip and Knee Prosthesis Structure. *Artificial Organs*, **48**, 50-60. <https://doi.org/10.1111/aor.14667>
- [8] Azocar, A.F., Mooney, L.M., Duval, J., Simon, A.M., Hargrove, L.J. and Rouse, E.J. (2020) Design and Clinical Implementation of an Open-Source Bionic Leg. *Nature Biomedical Engineering*, **4**, 941-953. <https://doi.org/10.1038/s41551-020-00619-3>
- [9] Song, M., Li, Z., Jiang, J., Chen, W., Guo, S., Zheng, H., et al. (2024) Design, Simulation and Kinematic Validation of a Hip Prosthetic Mechanism with a Multimotor Function. *Journal of Bionic Engineering*, **21**, 1321-1333. <https://doi.org/10.1007/s42235-024-00490-x>
- [10] Ueyama, Y., Kubo, T. and Shibata, M. (2019) Robotic Hip-Disarticulation Prosthesis: Evaluation of Prosthetic Gaits in a Non-Amputee Individual. *Advanced Robotics*, **34**, 37-44. <https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1705908>
- [11] Bader, Y., Langlois, D., Baddour, N. and Lemaire, E.D. (2023) Development of an Integrated Powered Hip and Microprocessor-Controlled Knee for a Hip-Knee-Ankle-Foot Prosthesis. *Bioengineering*, **10**, Article 614. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10050614>
- [12] 朱禾祥, 罗胜利, 疏小龙, 等. 新型髌膝关节一体化仿生假肢关节的结构设计与优化[J]. 中国康复医学杂志, 2025, 40(5): 748-753.
- [13] (日)竹井仁编, 赵百灵译. 3D 人体解剖图骨骼关节肌肉[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 2023.
- [14] Stansfield, B.W., Hillman, S.J., Hazlewood, M.E. and Robb, J.E. (2006) Regression Analysis of Gait Parameters with Speed in Normal Children Walking at Self-Selected Speeds. *Gait & Posture*, **23**, 288-294. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2005.03.005>
- [15] 全国人类工效学标准化技术委员会. GB/T10000-1988 中国成年人人体尺寸[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.