

文章编号: 1004-7220(2021)05-0692-06

# 摆幅可调型足部康复机器人的生物力学特性分析

彭晨<sup>1</sup>, 卢宗兴<sup>2</sup>, 姚立纲<sup>2</sup>, 戴飞铭<sup>1</sup>

(1.福州职业技术学院 机电工程系, 福州 350108; 2.福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350116)

**摘要:**目的 基于人机工程学和生物力学仿真技术,对人体肌肉进行生物学评价,研究摆幅可调型足部康复机器人的康复策略。**方法** 在 AnyBody 中建立人体和摆幅可调型足部康复机器人的人机耦合模型,并对耦合模型进行运动学仿真,将仿真结果与理论计算结果相比,验证耦合模型的可靠性;再利用 AnyBody 中的参数研究机制对验证后的耦合模型进行生物力学仿真,以足部康复机器人的运动速度和摆幅为变量,分析在不同变量组合下的肌肉活动度和肌肉力。**结果** 在康复运动中足部相关肌肉的拉伸性得到有效训练,不同的运动速度和摆幅对肌肉的影响不同,并得出运动速度和摆幅调节的安全范围。**结论** 实现了不同运动速度和摆幅下肌肉活动度和肌肉力的组合分析,研究结果对足部康复机器人的临床应用和被动康复模式下康复策略的制订具有一定指导意义。

**关键词:**生物力学仿真;足部康复;人机工程;康复策略

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.05.005

## Analysis on Biomechanical Properties of Foot Rehabilitation Robot with Adjustable Swing

PENG Chen<sup>1</sup>, LU Zongxing<sup>2</sup>, YAO Ligang<sup>2</sup>, DAI Feiming<sup>1</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Fuzhou Polytechnic, Fuzhou 350108, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract: Objective** Based on ergonomics and biomechanics simulation technology, the biological evaluations of human muscles and the rehabilitation strategies of foot rehabilitation robot with adjustable swing were carried out and studied. **Methods** The human-robot coupling model of human body and foot rehabilitation robot with adjustable swing were established by using AnyBody software. Through kinematics simulation of the coupling model, the comparison between the simulation result and the theoretical calculation result confirmed reliability of the coupling model. The parameter study of AnyBody software was used to perform the biomechanical simulation of the verified coupling model. By regarding velocity and swing of the foot rehabilitation robot as variables, the muscle activity and muscle force under different combinations of variables were analyzed. **Results** During rehabilitation exercise, stretching performance of the foot related-muscles was effectively trained. The influence of different velocity and swing amplitude on muscles was different, and safety range of the velocity and swing adjustment was obtained. **Conclusions** The combined analysis of muscle activity and muscle force under different velocity and swing was achieved. The results have certain guiding significance on clinical application of foot rehabilitation robot and formulation of rehabilitation strategies in passive rehabilitation mode.

**Key words:** biomechanical simulation; foot rehabilitation; ergonomics; rehabilitation strategy

收稿日期:2020-09-01;修回日期:2020-09-12

基金项目:2018年福建省中青年骨干教师教育科研项目(JZ180621),福建省自然科学基金项目(2018J01762)

通信作者:彭晨,助教,E-mail: pengchen1169@163.com

足是人体负重、行走和吸收震荡的结构,踝关节是全身负重最大的关节,人在跑步和跳跃时,足部的踝关节更是承受了巨大的载荷冲击,导致踝关节损伤在日常生活中比较常见<sup>[1]</sup>。生物机械学是机械学发展的一个新领域,它综合应用现代机械学和生物力学,研究人与机械系统的交互原理与方法、机械与人体功能的相互影响以及人机一体化系统的设计与性能评定<sup>[2]</sup>。在工业界和医学界的领域里,也早已开始通过生物力学技术和机器人技术的结合帮助患者康复<sup>[3-4]</sup>。

近年来,借助康复器械来帮助踝关节加快康复是治疗踝关节损伤的主要方法之一,基于生物力学的足部康复机器人研究已成为国内外的研究热点。Weaver等<sup>[5]</sup>通过研究足踝矫形器发现,姿势摇摆的幅度和频率与肌肉活动度相关,并且踝关节相关肌肉的主动收缩对平衡控制有不同的影响;Benjamin等<sup>[6]</sup>研究机器人辅助康复对踝关节相关肌肉系统生物力学性能的影响,并完成生物肌肉活性和骨骼弹簧刚度的动力学分析。韩亚丽等<sup>[7]</sup>对人体行走过程中踝关节角度-力矩变化关系进行特征分析,设计了一款踝关节假肢机构,通过运动仿真证明了该机构的运动轨迹与理想轨迹基本一致;郭旺旺<sup>[8]</sup>提出了一种P(2-RPS)&U下肢康复机器人,并运用生物力学仿真软件,分析在康复训练中人体的最大肌肉活动量和肌肉群的能量消耗,验证康复机器人的安全性,并得到踝关节附近肌肉的伸缩量。

综上所述,足部康复机器人的生物力学特性分析对确保其安全性来说至关重要。由于传统的实验难度大、成本高,故利用生物力学仿真软件进行生物力学特性分析成为目前最有效的手段。AnyBody生物力学仿真软件最开始是由丹麦奥尔堡大学基于人体肌骨模型库Anyscript Model Repository开发研制,常用于人体肌肉骨骼模型的仿真计算。AnyBody软件采用AnyScript脚本语言进行建模,具有模型建立、模拟仿真、图表显示和数据输出等功能。在AnyBody软件中建立人体和环境的耦合模型是研究生物力学特性的基础,再通过添加驱动程序创建耦合模型的运动,从而进行运动学和逆向动力学分析,并输出人体模型中各肌肉、肌腱、骨骼、关节的受力以及肌肉活动度等相关结果<sup>[9-12]</sup>。本文基于人机工程学,运用AnyBody软件

建立人机耦合模型,并验证耦合模型的可靠性,进而通过生物力学仿真,以机器人运动速度和摆幅为变量,分析在不同变量组合下的肌肉活动度和肌肉力,探讨康复策略。

## 1 材料与方 法

为了更真实地在AnyBody软件中模拟足部的康复运动,对小腿及足部肌肉进行生物力学特性分析,需要在AnyBody生物力学仿真系统中建立人机耦合模型。人机耦合模型的建立分为3个部分,包括人体模型建模、摆幅可调型足部康复机器人模型导入、人机耦合模型连接。

### 1.1 人体模型建模

从AnyBody的模型库(AMMR)中调出1具完整的人体模型,本文根据中国人体尺寸标准,以成年男子为例,设定人体模型身高175 cm,体质量70 kg,其他身体参数随设定身高和体质量后自动修改<sup>[13]</sup>。在选择骨骼肌的类型时,考虑到肌肉被动拉力和肌肉活动度对生物力学特性研究的重要性,选择骨骼肌的类型为AnyMuscleModel3E,因为其更符合人体真实肌肉的特性。足部康复机器人的康复运动主要用涉及人体下肢,即腿部和足部,故去除上肢,只保留头部、躯干以及双腿,以加快运动仿真和生物力学仿真的运行速度,提高效率。按以上要求,通过AnyScript语言设置人体各项生理参数后,得到如图1所示的人体模型。



图1 人体模型

Fig.1 Human model

### 1.2 摆幅可调型足部康复机器人的导入

首先,在SolidWorks 2014建模软件中建立摆幅

可调型足部康复机器人的三维模型(见图2)。该足部康复机器人主要包括电动机、传动机构、按摩踏板和倾斜式机架四部分,电动机通过传动机构带动按摩踏板实现空间绕圈运动,此空间绕圈运动和人体踝关节进行跖屈/背屈、内翻/外翻的复合康复运动一致。同时,传动机构可以调节按摩踏板下端摇杆的偏心距进而调节踏板的摆动幅度,并且按摩踏板可以实现足底按摩功能,倾斜式机架则提高了整体机构的舒适性。然后,在选择构件配合时,去除机器人模型的冗余约束,即保证机器人的自由度总数等于驱动总数。最后,运用 SolidWorks2AnyBody 插件将机器人的三维模型从 SolidWorks 软件导入 AnyBody 中,即将三维模型转化为 Anyscript 语言文件与 STL 文件保存。已知该足部康复机器人为单自由度,因此,在导入 AnyBody 后,足部康复机器人模型仍然只有 1 个自由度。

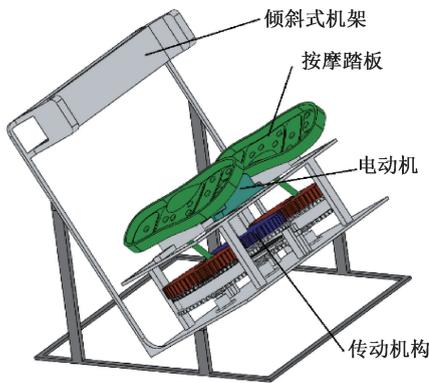


图2 足部康复机器人三维模型

Fig.2 Three-dimensional model of foot rehabilitation robot

### 1.3 人机耦合模型的连接

人体模型和足部康复机器人的连接是通过设置约束和驱动建立的。人体模型共有 16 个自由度,再加上机器人模型的 1 个自由度,共计 17 个自由度。因此,需要添加 16 个约束和 1 个驱动才可以使人体和足部康复机器人正确连接并实现运动,具体方法如下:

(1) 人体骨盆中心添加固定连接副,将人体固定在空间中的某一点,即减去 6 个自由度,剩余 11 个自由度;

(2) 在躯干上添加驱动器,设置驱动速度为 0,分别约束躯干的 3 个转动自由度,即减去 3 个自由度,剩余 8 个自由度;

(3) 在颈部上添加驱动器,设置驱动速度为 0,只约束 1 个转动自由度,即减去 1 个自由度,剩余 7 个自由度;

(4) 在人体的足部与足部康复机器人的按摩踏板之间添加固定连接副,即足部随踏板做任何运动,即减去 6 个自由度,剩余 1 个自由度。

最后,剩余的 1 个自由度由添加在机器人上的驱动电动机的数学函数来确定,从而完成了人机耦合模型的连接。同时,通过对髋部位置坐标以及膝、髌关节弯曲角度的调整,使人体模型处于舒适的位姿。并且踝关节的各初始转动角度为 0,并在骨盆下方添加 1 块坐垫,尽可能模拟现实生活中患者的康复过程。所建人机耦合模型如图 3 所示。

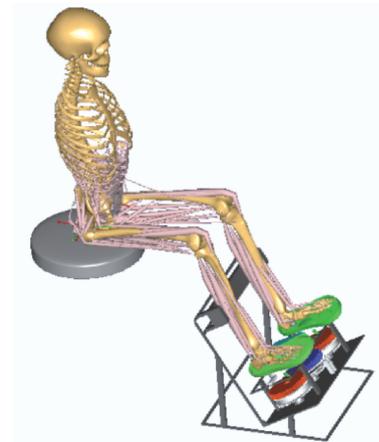


图3 人机耦合模型

Fig.3 Human-machine coupling model

## 2 结果

### 2.1 人机耦合模型的运动仿真与验证分析

在耦合模型的机器人上添加驱动器,设置驱动函数,进行运动仿真。输出人体踝关节的运动角度,与运动学计算的理论结果进行对比分析,验证该耦合模型的有效性和可靠性。

在足部康复机器人的康复运动中,机器人是由电动机驱动中间齿轮,从而带动两侧按摩踏板进行康复运动,因此将驱动器直接添加在人机耦合模型中机器人中间齿轮的转动副上,设置驱动函数为恒定速度驱动,运用 AnyBody 进行运动仿真,即可实现足部康复机器人带动足部踝关节进行跖屈/背屈运动和内翻/外翻运动(见图 4)。

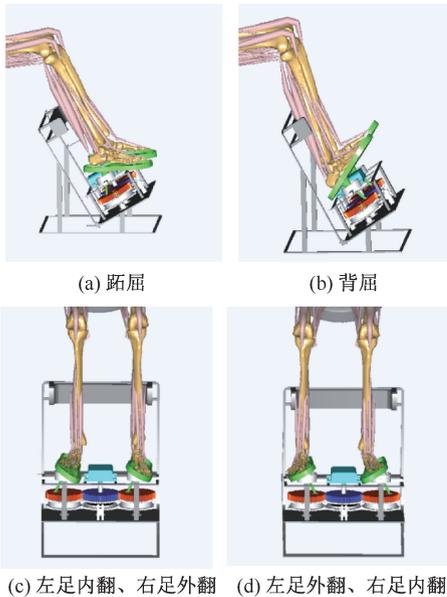


图4 运动仿真实现的踝关节运动

Fig.4 Ankle movement based on motion simulation

(a) Plantarflexion, (b) Dorsiflexion, (c) Inversion of left foot, Eversion of right foot, (d) Eversion of left foot, inversion of right foot

已知该足部康复机器人的摆幅可调,将耦合模型中的机器人设定为摆幅最大时的状态,再设定驱动函数中转速  $v = \pi/2$  rad/s,仿真时间  $t = 4$  s,进行运动仿真。在 AnyBody 中的分析结果中,输出人体踝关节的跖屈/背屈转角  $\alpha$ 、内翻/外翻转角  $\beta$  与时间的变化数据。相同条件下,根据运动学理论计算按摩踏板跖屈/背屈转角  $\alpha$ 、内翻/外翻转角  $\beta$  与时间的运动方程。最后,运用 MATLAB 软件,分别绘制转角  $\alpha$ 、转角  $\beta$  的仿真曲线与理论曲线的对比图。

对于跖屈/背屈转角  $\alpha$ ,仿真曲线与理论曲线的变化范围基本一致,两者相差的最大值是 27 mrad,误差较小[见图 5(a)];对于内翻/外翻转角  $\beta$ ,仿真曲线与理论曲线的变化范围几乎相同,只有最小值处两者相差 27 mrad,误差较小[见图 5(b)]。但是  $\beta$  的仿真曲线比理论曲线向左偏移,这是因为 AnyBody 是一款模拟真实人-环境系统的仿真软件,现实生活中踝关节的内翻/外翻运动没有跖屈/背屈运动的灵活度高,对环境变化的适应性更差。该足部康复机器人踏板转动中心是变化的,膝关节和小腿会根据足部方位的改变稍微调整姿态,从而导致踝关节转角变化时间与理论时间有偏差,但只要

仿真与理论曲线的变化范围大致相同,对康复运动以及康复效果的影响不大。综上所述,该人机耦合模型准确可靠,可进行后续研究。

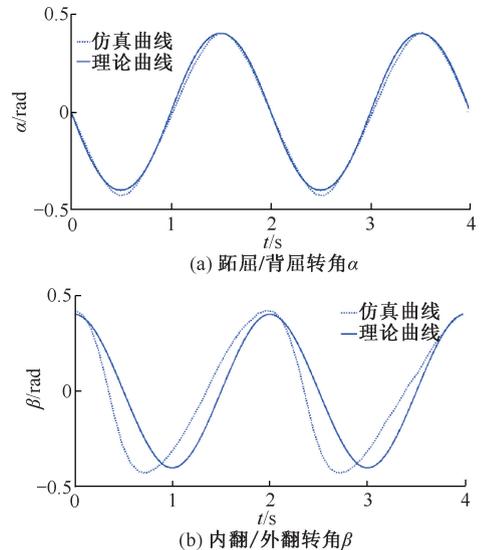


图5 仿真曲线与理论曲线对比

Fig.5 Comparison between simulation curve and theoretical curve (a) Plantar and dorsal flexion angles  $\alpha$ , (b) Inversion and eversion angles  $\beta$

## 2.2 生物力学特性分析

应用人体运动功能检测与评定于康复中是目前最主要的趋势,需要检测的参数主要有肌肉活动度、肌肉力、肌肉功率等。肌肉活动度是指肌肉的最高活性占肌肉强度的百分比,最大值为 100%,超过了最大值肌肉就会发生损坏;肌肉力  $F_p$  又称肌肉被动拉力,是指在运动过程中,肌肉被拉伸时,肌肉的被动力量;肌肉功率  $P_{met}$  是指该运动相关的所有肌肉在进行主动收缩时的总代谢消耗功率。本文研究的是足部康复机器人带动足部进行康复运动,属于被动康复模式。因此,选定肌肉活动度和肌肉力为输出参数,分析此康复运动的康复策略。患者在康复过程中,肌肉活动度和肌肉力都不能急剧增加,以免造成足部疼痛。本文设计的足部康复机器人可带动足部进行跖屈/背屈、内翻/外翻康复运动。足部运动主要是由小腿上的肌肉控制,在足部进行跖屈/背屈、内翻/外翻运动时,起主要作用的肌肉有趾长伸肌、趾长屈肌、胫骨前肌、胫骨后肌、踇长伸肌、踇长屈肌、腓骨短肌和腓肠肌,故选

择以上肌肉作为研究对象。

已知足部康复机器人的运动速度和按摩踏板的摆幅分别由电动机转速  $v$  和偏心距  $R$  决定,在耦合模型上,设置  $v$  和  $R$  为变量,设定  $v$  的变化范围为  $(\pi/8 \sim \pi)$  rad/s,  $\pi/8$  rad/s 为 1 个间隔;  $R$  的变化范围为 30 ~ 38 mm, 1 mm 为 1 个间隔。运用 AnyBody 中的参数研究机制,对人机耦合模型进行生物力学仿真,输出变量转速和变量偏心距在不同组合下的肌肉活动度和肌肉被动拉力。

当  $v \in [1/2\pi, \pi]$  rad/s 且  $R \in [30, 33]$  mm 或者当  $v \in [1/8\pi, 5/8\pi]$  rad/s 且  $R \in [34, 38]$  mm 时,肌肉活动度处在一个稳定状态 9% 左右;当  $v \in [5/8\pi, \pi]$  rad/s 且  $R \in [33, 38]$  mm 时,注意到肌肉活动度有一个较大变化,说明此时相关肌肉的活动量突然增大[见图 6(a)]。肌肉被动拉力的变化范围为 130 ~ 142 N,说明肌肉的拉伸性能得到训练,偏心距对肌肉力有显著影响,转速对肌肉力几乎没有影响[见图 6(b)]。在足部康复前期也就是被动康复时,康复运动过程中应尽量避免跳跃式的运动量变化,以免造成二次损伤。

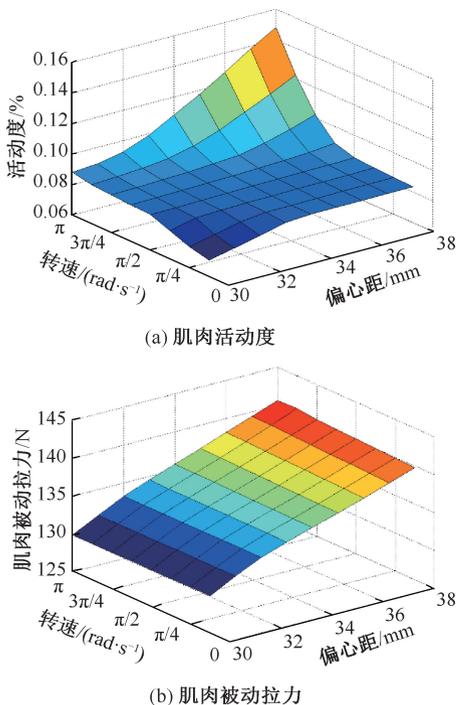


图6 转速和偏心距在不同组合下的肌肉输出参数

Fig.6 Muscle output parameters under different combinations of rotational speed and eccentricity

(a) Muscle activity, (b) Muscle passive force

因此,最好将肌肉活动度维持在一个稳定状态。综合以上分析,摆幅可调型足部康复机器人的运动速度和摆幅的安全范围为: $v \in [1/2\pi, \pi]$  rad/s 且  $R \in [30, 33]$  mm 或者  $v \in [1/8\pi, 5/8\pi]$  rad/s 且  $R \in [34, 38]$  mm。

### 3 讨论与结论

足部康复机器人的研制不仅要根据足部运动特性提出合理的机器人机构设计方案,而且要结合足部康复的实际需求,拟定满足患者的康复方案。因此,以人体对足部康复机器人的生物力学响应为目标,基于足部的运动特性和康复模式,并结合足部肌肉的生物力学性能,来制定康复方案是一种可行有效的方法。但是,由于每个患者的情况不同和不可预见性,导致传统实验难度大、成本大和 risk 高。采用生物力学仿真技术成为目前最主要的方法,其可对人体的肌肉参数包括肌肉活动度、肌肉力、肌肉功率等进行分析,用于康复器械的功能评定以及康复策略的制定。AnyBody 人体建模仿真系统是计算机辅助人机工程学和生物力学分析软件,可建立人体与环境的耦合模型,输出肌肉等相关参数。罗林聪等<sup>[14]</sup>利用 AnyBody 建立人体的骨骼肌肉运动动力学模型,模拟正常人肘关节屈曲运动,从而导出肌肉力、关节力等约束条件,进而利用 ABAUQUS 计算肘关节屈曲运动中肱骨的位移和应力;刘慧等<sup>[15]</sup>利用 AnyBody 建立腰椎-骨盆的仿真肌骨模型,以骨盆周围肌肉的肌力及髋关节力作为加载条件计算髋关节两侧应力变化。因此,运用 AnyBody 进行生物力学特性分析能够有效地体现人机耦合情况,从而为康复器械的设计、控制以及实验提供参考。

本文基于 AnyBody 建立人机耦合模型,通过运动仿真可以看出,足部康复机器人能带动人体踝关节进行跖屈/背屈运动和内翻/外翻运动,再将踝关节运动角度的仿真结果与理论结果对比,验证耦合模型的可靠性。运用 AnyBody 中的参数研究机制,对耦合模型进行生物力学仿真,分析机器人运动速度和摆幅在不同组合下的肌肉活动度和肌肉力。结果表明,在康复运动中足部相关肌肉的拉伸性能得到训练,并且在被动康复模式下,足部康复机器人的转速和偏心距的安全范围为: $v \in [1/2\pi, \pi]$

rad/s 且  $R \in [30, 33]$  mm, 或  $v \in [1/8\pi, 5/8\pi]$  rad/s 且  $R \in [34, 38]$  mm. 在安全范围内, 转速越高或偏心距越大, 康复效果更好. 对于不同患者的实际情况不一样, 在速度和调幅的调节中应遵循从小到大的原则, 避免二次损伤. 本研究结果对被动康复模式下康复策略制订具有一定的指导意义, 为进一步研究摆幅可调型足部康复机器人的控制提供参考.

### 参考文献:

- [ 1 ] 汪家琮. 踝关节和足的康复[J]. 中国康复理论与实践, 2008, 14(12): 1197-1198.
- [ 2 ] 金德闻, 季林红, 杨建坤, 等. 生物机械学研究在康复工程中的应用[J]. 中国医疗设备, 2011, 26(4): 1-4.
- [ 3 ] NAM Y, KOO B, CICHOCKI A, *et al.* GOM-Face: GKP, EOG, and EMG-based multimodal interface with application to humanoid robot control [J]. IEEE T Bio-Med Eng, 2014, 61(2): 453-462.
- [ 4 ] 雷静桃, 唐明瑶, 王君臣, 等. 机器人辅助膝关节置换术的术前规划研究综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(17): 78-91.
- [ 5 ] WEAVER TB, GLINKA MN, LAING AC. Stooping, crouching, and standing: Characterizing balance control strategies across postures [J]. J Biomech, 2017, 53: 90-96.
- [ 6 ] BENJAMIN BD, SAWICKI GS. Influence of parallel spring-loaded exoskeleton on ankle muscle-tendon dynamics during simulated human hopping [C]//Proceedings of 33<sup>rd</sup> Annual International Conference of the IEEE EMBS. Boston: IEEE, 2011: 583-586.
- [ 7 ] 韩亚丽, 贾山, 王兴松. 基于人体生物力学的低功耗踝关节假肢的设计与仿真[J]. 机器人, 2013, 35(3): 276-282.
- [ 8 ] 郭旺旺. 人体肘、膝、踝关节康复机构的可重构设计与康复效果分析[D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [ 9 ] HEJAZI S, ROUHI G, RASMUSSEN J. The effects of gastrocnemius-soleus muscle forces on ankle biomechanics during triple arthrodesis [J]. Comput Method Biomec, 2017, 20(2): 130-141.
- [ 10 ] 高飞, 项忠霞, 赵明, 等. 基于 AnyBody 的自行车骑行运动仿真与试验分析[J]. 机械设计, 2016, 33(1): 105-110.
- [ 11 ] 丁晨, 王君泽, 高瞻. 基于 AnyBody 的汽车驾驶中人体腿部逆向动力学仿真[J]. 中国生物医学工程学报, 2013, 32(1): 124-128.
- [ 12 ] 庞博, 纪仲秋, 姜桂萍, 等. 基于 AnyBody 仿真和肌电测试分析不同体质量指数男性青年球类运动中的生物力学特征[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(3): 383-389.
- [ 13 ] 刘书朋, 司文, 严壮志, 等. 基于 AnyBody~(TM) 技术的人体运动建模方法[J]. 生物医学工程学进展, 2010, 31(3): 131-134.
- [ 14 ] 罗林聪, 马立敏, 林泽, 等. 基于 AnyBody 骨骼肌肉多体动力学分析的有限元仿真[J]. 医用生物力学, 2019, 34(3): 237-242.
- LUO LC, MA LM, LIN Z, *et al.* Finite element simulation of AnyBody-based musculoskeletal multi-body dynamics [J]. J Med Biomech, 2019, 34(3): 237-242.
- [ 15 ] 刘慧, 沈国权, 张喜林, 等. 肌肉加载下腰椎间盘突出体的有限元研究[J]. 医用生物力学, 2019, 34(5): 493-499.
- LIU H, SHEN GQ, ZHANG XL, *et al.* Finite element study of lumbar disc herniation loaded with muscle force [J]. J Med Biomech, 2019, 34(5): 493-499.