

文章编号: 1004-7220(2021)01-0110-06

3-PH/R 踝关节康复机器人的运动轨迹

卢宗兴, 魏湘文, 蔡 灿

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350116)

摘要:目的 研究 3-PH/R 踝关节康复机器人在不同轨迹下对关节及肌肉受力的影响。方法 分析 3-PH/R 踝关节康复机器人的运动学原理,将机器人模型简化后导入生物力学建模软件中,以踝关节康复机器人的实际运动轨迹作为模型驱动,比较在跖背屈、内外翻和章动 3 种不同运动轨迹下关节和肌肉的受力情况,并对 3 种运动轨迹进行相关性分析。结果 章动能同时满足跖背屈和内外翻的功能,并让踝部肌肉群得到充分锻炼;3 种不同的康复轨迹的关节力最大相差 0.3 N;不同的肌肉对于轨迹敏感度不同。结论 实现了 3 种康复轨迹作用下肌肉力和关节力的一个连续性动态分析,研究结果对脚踝康复机器人的临床应用和康复轨迹制定具有一定理论指导意义和临床参考价值。

关键词:运动轨迹; 逆向动力学分析; 脚踝康复机器人; 骨骼肌模型

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.01.018

Motion Trajectory of 3-PH/R Ankle Rehabilitation Robot

LU Zongxing, WEI Xiangwen, CAI Can

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: **Objective** To study the influence of different trajectories of 3-PH/R ankle rehabilitation robot on joints and muscles. **Methods** The 3-PH/R ankle rehabilitation robot was simplified and imported into biomechanical modeling software by analyzing the kinematics principles. Using the actual motion trajectory of ankle rehabilitation robot as model driving, the joint and muscle forces were compared under three different trajectories, namely, dorsiflexion/plantarflexion, inversion/eversion and nutation. The correlation analysis on three motion trajectories was conducted. **Results** Nutation could satisfy the function of both plantar dorsiflexion/plantarflexion, and inversion/eversion, and made the ankle muscles fully exercised. The maximum difference in joint force under three different rehabilitation trajectories was 0.3 N. Different muscles had different sensitivity to trajectories. **Conclusions** The continuous dynamic analysis of muscle force and joint force under three kinds of rehabilitation trajectories was implemented. The results have certain theoretical significance and clinical reference value for the clinical application of ankle rehabilitation robot and the formulation of rehabilitation trajectory.

Key words: motion trajectory; inverse dynamics analysis; ankle rehabilitation robot; musculoskeletal model

踝关节扭伤是一种常见的运动损伤。在跑步或跳跃时,踝关节承受巨大的载荷和冲击,是人体易于受伤的部位^[1-2]。特别是进行篮球和足球运动

时,踝关节的受伤概率较高^[3-4]。对于老年群体,随着年龄增加,身体机能不断衰退,四肢灵活度逐渐下降,老年人踝关节损伤比率大为增加^[5]。因此,

收稿日期:2020-01-15; 修回日期:2020-03-23

基金项目:国家自然科学基金项目(61801122),福建省自然科学基金项目(2018J01762),福建省教育厅科技项目(JK2017002)

通信作者:卢宗兴,硕士生导师,E-mail:luzongxing@fzu.edu.cn

为了满足踝关节康复仪器应用的需求,更好更快地康复踝关节,近年来,市场上研发了一系列踝关节康复机器人。

康复机器人涵盖了机器人和康复医学等领域^[6]。Dai 等^[7]提出一种可实现内外翻、跖背屈的踝关节康复机器人。Jamwal 等^[8]提出一种利用冗余气动肌肉驱动器来实现并联式踝关节 3 个自由度转动的并联踝关节康复机构。Ayas 等^[9]研制的冗余驱动的踝关节康复机器人具有被动和主动两种康复模式。周亮等^[10]设计一种新型生物启发式踝关节康复机器人,由 4 个并联的电动机冗余驱动,以提供踝关节 3 个旋转自由度,具有足够的运动范围和受力能力。Meng 等^[11]提出的顺应性脚踝康复机器人由气动肌肉冗余驱动,可进行踝关节背屈/跖屈、内翻/外翻和内收/外展等训练。

综上所述,目前国内外学者对于踝关节康复机器人的研究主要集中在机器人结构和控制方法方面,忽略了康复机器人运动轨迹对人体踝关节相关肌肉群的影响,有关踝关节在不同康复轨迹下的生物力学研究较少。本文对比 3-PH/R 踝关节机器人的 3 种运动轨迹,探讨不同运动轨迹对肌肉和关节的影响以及运动轨迹之间的联系。

1 材料与方法

1.1 肌肉募集模型

AMS(AnyBody Modeling System) 软件提供了一套完整的骨骼、肌肉、韧带的人体系统,可以进行人体骨骼肌系统的逆运动学分析^[12]。在逆向动力学分析中,人体肌肉系统存在冗余问题,即肌肉系统拥有的肌肉数大于平衡外部负载所需的数量,故涉及肌肉募集的问题^[13]。在逆向动力学中,肌肉募集问题的解决方案通常被转换为数学上的优化问题,通过使目标函数 $G(f^{(M)})$ 的值最小化,来求解肌肉的募集数目。目标函数表示为:

$$G(f^{(M)}) = \sum_{i=1}^{n^{(M)}} \left(\frac{f_i^{(M)}}{N_i} \right)^p \quad (1)$$

$$Cf^{(M)} = d \quad (2)$$

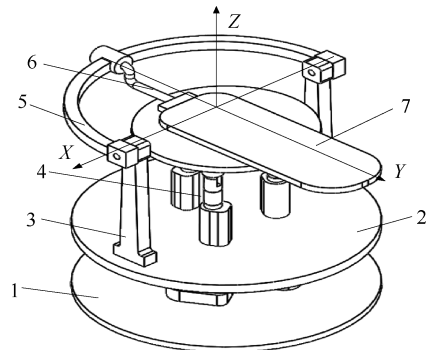
$$0 \leq f^{(M)} \leq N_i; \quad i \in 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式(1)中: G 为目标函数,使募集问题中所有未知的肌肉力最小化; $f^{(M)}$ 为肌肉力,其中 $f_i^{(M)}$ 为第 i 块肌肉的肌肉力; $n^{(M)}$ 为肌肉数量。式(2)为动态平衡

方程,将其作为整个人机耦合系统的约束条件进行优化。式(2)中: C 为未知力的系数矩阵; d 为已知的所有载荷。式(3)表示肌肉只能拉不能推并限制其上限, N_i 为该肌肉最大强度^[11]。为有效增强肌肉的协调性,下肢采用 Hill 模型为基础模型,即多项式肌肉模型, $p=3$ ^[14]。

1.2 耦合模型建立

在建立人机耦合模型前,首先对 3-PH/R 踝关节机器人进行运动学原理分析。该康复机器人由底座、转动平台、支撑杆、电机推杆、摇杆、连杆、和踏板组成。其中,电机推杆通过高副连接推动踏板进行运动,踏板通过连杆支撑在摇杆上。踏板能绕 X 轴实现跖背屈运动和绕 Y 轴实现内外翻运动。而整个并联部分连同电机、支撑杆和踏板绕着 Z 轴进行内收/外展运动(见图 1)。



1-底座,2-转动平台,3-支撑杆,4-电机推杆,5-摇杆,6-连杆,7-踏板

图 1 3-PH/R 踝关节康复机器人结构

Fig.1 Structure of 3-PH/R ankle rehabilitation robot

将康复机器人在保持其功能性的前提下进行结构简化,通过 SolidWorks 建立简化模型的三维建模,最后通过 AMS 的功能插件将模型转化为 AMS 可识别的编程代码。将模型代码导入 AMS 进行人机耦合建模。在此之前,要对模型进行冗余自由度的检查。若机器人模型出现多余自由度,导入 AMS 中的模型也会出现冗余问题,从而不会完成所指定的康复运动。若模型没有出现冗余自由度问题,则通过软件提供的约束关系建立人-机耦合系统,将人体左脚固定在一个踏板上,人体右脚固定于康复机器人的动平台(见图 2)。

本文基于生物力学对 3PH/R 踝关节机器人进行跖背屈、内外翻和章动 3 种运动轨迹进行分析,



图2 人体与3PH/R踝关节康复机器人耦合模型
 Fig.2 Coupling model of human body and 3Ph/R ankle rehabilitation robot

故要求解3种运动的驱动函数。其中,跖背屈的初始状态为背屈,运动趋势由背屈至跖屈再返回背屈;内外翻的初始状态为平放,运动趋势为踝关节逐渐外翻至某角度后返回平放姿态,再逐渐内翻至某角度后返回平放姿态;章动为跖背屈和内外翻两者结合,即同时进行跖背屈和内外翻,从而保证在其他条件相同情况下,肌肉和关节的变化仅受运动轨迹影响(见图3)。各运动轨迹的驱动函数如下:

$$\varphi_x = \sum A_i \cos(\omega_i t + B_i) \quad (4)$$

$$\varphi_y = \sum A_j \sin(\omega_j t + B_j) \quad (5)$$

$$\omega_i = (i - 1)2\pi f, \omega_j = (j - 1)2\pi f \quad (6)$$

式中: φ 为转动角度; A_i 、 B_i 、 A_j 、 B_j 为傅里叶系数,即幅度和相角; f 为基本频率。

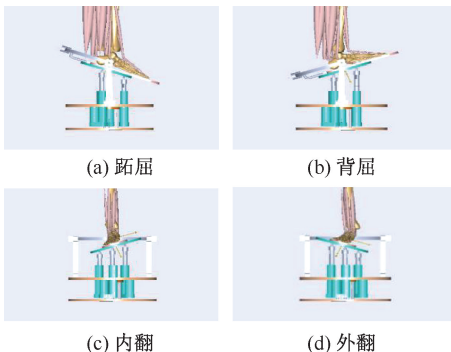


图3 踝关节跖背屈和内外翻生物力学模型
 Fig.3 Biomechanical model of dorsiflexion/plantarflexion and inversion/eversion of ankle

(a) Plantarflexion, (b) Dorsiflexion, (c) Inversion, (d) Eversion

2 结果

踝关节的运动主要由小腿肌肉控制,小腿肌群

可以分为前群、外侧群和后群,各个肌群的肌肉以及主要作用如表1所示。本文选择胫骨前肌、胫骨后肌、腓骨短肌和比目鱼肌,这4块肌肉的主要作用覆盖踝关节的跖背屈和内外翻,避免了对比的失效性,即缺乏某种运动的变化情况。

表1 小腿肌及主要作用^[15]

Tab.1 Calf muscle and its main function^[15]

肌群	肌肉	主要作用
前群	胫骨前肌	背屈、内翻
	趾长伸肌	背屈
	拇长伸肌	背屈
外侧群	腓骨长肌	跖屈、外翻
	腓骨短肌	跖屈、外翻
后群	腓肠肌	跖屈
	比目鱼肌	跖屈
	腓肌	跖屈
	趾长屈肌	跖屈、内翻
	拇长屈肌	跖屈、内翻
	胫骨后肌	跖屈、内翻

2.1 肌肉力对比分析

在康复前期,脚踝进行跖背屈和内外翻的幅度不宜过大,以免脚踝的二次受伤。研究表明,转动角度 30° 可作为一个安全角度的界限^[16]。因此,对于脚踝的转动幅度进行定量选择。图4分别为跖背屈、内外翻转动角度轨迹,章动轨迹为两者结合。

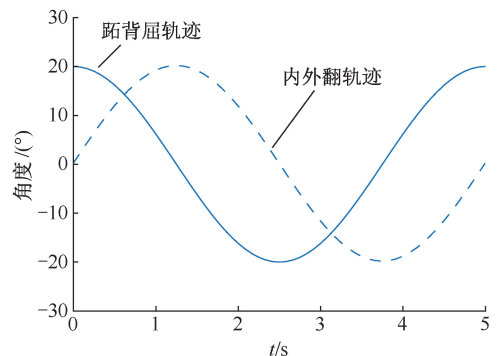


图4 康复机器人运动轨迹
 Fig.4 Trajectory of rehabilitation robot

在康复前期,由于踝关节难以主动运动,故进行由康复机器人带动踝关节做被动运动。将所设置的驱动函数导入到AMS的相应驱动当中,对人机耦合模型进行Inverse Dynamics仿真分析,得到1个运动周期内肌肉力的变化情况。

由肌肉力曲线的变化趋势可得,不同肌肉对不同运动轨迹的敏感度不同,即不同肌肉的主要作用不同。胫骨前肌对背屈和内翻敏感;胫骨后肌对跖屈和内翻敏感;腓骨短肌对跖屈和外翻敏感;比目鱼肌对跖背屈的敏感度较高,且变化幅度较大,峰值约为 200 N。

章动运动轨迹下肌肉力受跖背屈和内外翻的共同影响。胫骨前肌和胫骨后肌的变化趋势主要受跖背屈影响,因内外翻的影响,致使曲线下降趋势介于两者之间,上升趋势高于两者;腓骨短肌的变化趋势与内外翻相似,因跖背屈的作用,致使其变化幅度略高于两者;比目鱼肌的变化趋势由跖背屈主导,因受到内外翻的影响,致使其变化趋势略小于跖背屈。可以看出,章动轨迹运动对肌肉能同时达到跖背屈和内外翻的效果,同时兼顾到不同作用的肌肉,可以充分锻炼踝关节肌肉群,缩短整个康复训练周期(见图 5)。

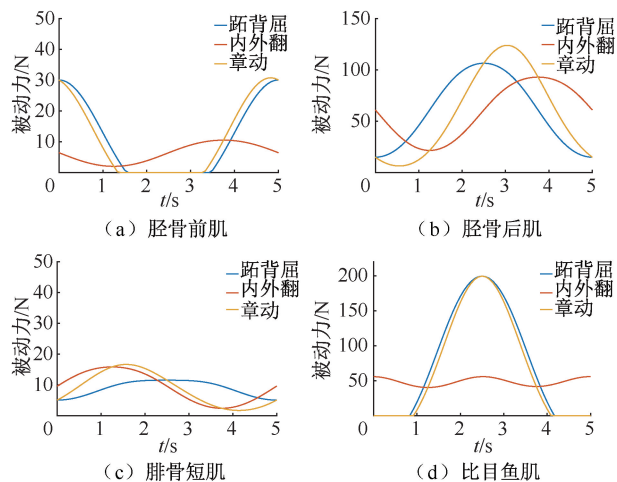


图 5 不同轨迹运动肌肉力变化

Fig.5 Muscle force changes in different trajectories

(a) Tibialis anterior, (b) Tibialis posterior, (c) Peroneus brevis, (d) Soleus

2.2 关节力对比分析

踝关节作为人体最为复杂以及负重最大的关节之一,受伤的概率相对较大^[17]。踝关节的康复不仅涉及肌肉,而且还涉及关节,故根据所定义的轨迹进行仿真分析,得到 1 个运动周期内 3 种不同运动轨迹对关节力的影响变化。3 种轨迹的关节力变化相差不大,最大相差为 0.3 N。在运动周期内,跖背屈和内外翻的变化趋势相反;章动轨迹

下的关节力变化趋势整体显示为先降后升,变化曲线由内外翻主导,同时受跖背屈的影响,致使曲线变化趋势居于两者之间,从而表明章动轨迹下的关节力变化是跖背屈与内外翻两者结合变化,则章动轨迹运动可以同时体现跖背屈和内外翻的效果(见图 6)。

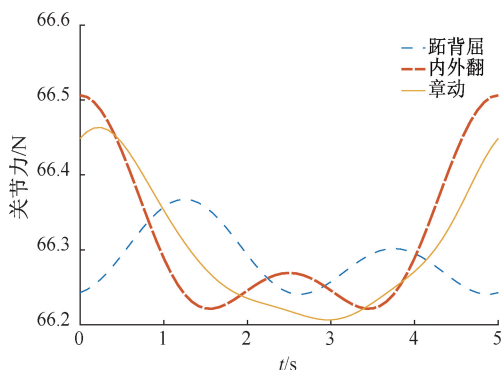


图 6 不同轨迹运动关节力变化

Fig.6 Joint force changes in different trajectories

2.3 相关性分析

通过不同轨迹以及对肌肉力和关节力的影响分析,章动运动轨迹为跖背屈与内外翻组合,能够同时满足跖背屈和内外翻的功效,但在章动轨迹下不同的肌肉受到的影响不同。对 3 种轨迹下的肌肉力进行相关性分析,对比 3 种轨迹关系。

胫骨前肌的章动轨迹与跖背屈轨迹的相关系数为 0.971 ($P < 0.01$),则章动轨迹下的胫骨前肌主要受跖背屈影响;胫骨后肌的章动轨迹与跖背屈和内外翻的相关系数相差不大 ($P < 0.01$),表明章动对于胫骨后肌受到跖背屈和内外翻的影响比率相似;腓骨短肌的章动轨迹与内外翻轨迹的相关系数为 0.890 ($P < 0.01$),即章动轨迹下的腓骨短肌主要受内外翻影响;比目鱼肌的章动轨迹与跖背屈的相关系数为 0.996 ($P < 0.01$),则比目鱼肌在章动下主要受跖背屈影响(见表 2)。

3 讨论与结论

从保护人类的目的考虑,医疗器械安全标准规定医疗器械在进入临床试验之前需要进行生物学评价。但是,传统的临床试验成本高,难度大,效果没有预见性。随着虚拟现实技术的发展,通过分析人机耦合模型来预测肌肉力和关节力的变化,减少

表2 3种运动轨迹相关性分析

Tab.2 Correlation analysis on three motion trajectories

肌肉			跖背屈	内外翻
肌骨前肌	章动	<i>r</i>	0.971 **	0.206
		<i>P</i>	0.000	0.111
胫骨后肌	章动	<i>r</i>	0.791 **	0.602 **
		<i>P</i>	0.000	0.000
腓骨短肌	章动	<i>r</i>	0.448 **	0.890 **
		<i>P</i>	0.000	0.000
比目鱼肌	章动	<i>r</i>	0.996 **	0.258 *
		<i>P</i>	0.000	0.045

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

昂贵而重复的真实人体试验。此外,仿真模型可以避免实验噪声对结果的影响,并且由于受试者之间个体差异而导致的统计差异可能阻碍分析结果的解释^[18-19]。

AnyBody 生物力学仿真软件提供人体与环境的结合,以此进行逆运动学求解,从而可得到肌肉和关节等输出。罗林聪等^[20]通过 AnyBody 将肱骨屈曲运动过程中的肌肉力和关节力以及边界条件导入 ABAQUS 中计算肘关节弯曲是肱骨的位移、应力变化;Hazrati 等^[21]研究自行车可行位置变化对下肢肌肉和关节行为变化。Zee 等^[22]利用 AnyBody 研究下颌骨做不同任务时肌肉与关节的变化,并通过肌电信号验证下颌骨模型。Ashtiani 等^[23]基于 AnyBody 髌关节外展训练肌肉分析表明,AnyBody 能够有效模拟分析肌肉力。刘慧等^[24]通过 AnyBody 将腰椎骨盆周围肌肉的肌力及髌关节力作为边界条件导入 ABAQUS,比较自身加载和正常加载 L4、L5 椎间盘及骶髌关节两侧应力变化。因此,AnyBody 能够有效地反映真实的人机耦合情况,从而对医疗器械的改进以及未来实验提供一定的指导性建议。本文通过分析 3 种运动轨迹对踝关节以及相关肌肉的影响变化发现,单一运动轨迹的肌肉力和关节力变化以及运动轨迹之间的关系,变化趋势可体现肌肉的主要作用,结果与文献^[15]的结论吻合。

对 3-PH/R 脚踝康复机器人进行人机耦合生物力学分析,对比 3 种运动轨迹对肌肉和关节的影响变化。跖背屈和内外翻只能作用于部分肌肉,踝关节肌肉群不能得到全面的训练,而章动运动是两者的结合情况,从而使踝关节更多肌肉群得到更加完善的锻炼。3 种轨迹的关节力变化相差不大,但从

保护患者和维持康复效果出发,章动下的关节力介于其他两种运动之间,在达到康复效果的前提下能避免患者脚踝受伤。根据肌肉力和关节力的变化,可为康复轨迹的定义提供参考,避免踝关节的二次受伤。对于不同脚踝受伤情况要慎重选择康复轨迹,章动适合踝节能同时进行跖背屈和内外翻的情况,而对于单一情况,选择跖背屈或内外翻较合适。本研究结果对脚踝康复机器人的临床应用和康复轨迹的制定具有一定理论指导意义和临床参考价值。

参考文献:

- [1] FONG DT, HONG Y, CHAN L, *et al.* A systematic review on ankle injury and ankle sprain in sports [J]. *Sports Med.* 2007, 37(1): 73-94.
- [2] 侯璐. 踝关节的损伤与预防[J]. *体育科技文献通报*, 2019, 27(7): 163-164.
- [3] BETTIN CC, RICHARDSON DR, DONLEY BG. Ligamentous injuries of the ankle: Sprained ankle [M]// *Sports Injuries*. Berlin: Springer, 2015: 1753-1761.
- [4] CZAMARA A, SZUBA L, KRÓLIKOWSKA A, *et al.* O-25 three-year functional outcomes of ankle joint injuries' treatment in professional soccer players [J]. *Brit J Sports Med.* 2016, 50(Suppl 1): A14-A15.
- [5] ZHENG Y. The study of track and field athletes ankle-joint injury reasons and preventive measures in sport-specific training [C]// *Proceedings of International Conference on Electronics, Mechanics, Culture and Medicine*. Shenyang: Atlantis Press, 2016: 765-772.
- [6] JIANG J, MIN Z, HUANG Z, *et al.* Research status on ankle rehabilitation robot [J]. *Recent Pat Mech Eng.* 2019, 12(2): 104-124.
- [7] SAGLIA JA, TSAGARAKIS NG, DAI JS, *et al.* A high performance 2-dof over-actuated parallel mechanism for ankle rehabilitation [M]// *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA*. Kobe: IEEE, 2009: 2677-2683.
- [8] JAMWAL PK, HUSSAIN S, GHAYESH MH, *et al.* Adaptive impedance control of parallel ankle rehabilitation robot [J]. *J Dyn Syst Meas Control.* 2017, 139(11): 111006.
- [9] AYAS MS, ALTAS IH. Fuzzy logic based adaptive admittance control of a redundantly actuated ankle rehabilitation robot [J]. *Control Eng Pract.* 2017, 59: 44-54.
- [10] ZHOU L, MENG W, LU CZ, *et al.* Bio-inspired design and iterative feedback tuning control of a wearable ankle

- rehabilitation robot [J]. *J Comput Inf Sci in Eng*, 2016, 16(4): 041003. 1-041003. 9.
- [11] MENG W, ZHU C, ZUO J, *et al.* Design and modelling of a compliant ankle rehabilitation robot redundantly driven by pneumatic muscles [C]//Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Hong Kong: IEEE, 2019: 459-464.
- [12] DAMSGAARD M, RASMUSSEN J, CHRISTENSEN ST, *et al.* Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody modeling system [J]. *Simul Model Pract Theory*, 2006, 14(8): 1100-1111.
- [13] PAI DK. Muscle mass in musculoskeletal models [J]. *J Biomech*, 2010, 43(11): 2093-2098.
- [14] MAO JB, JIA XH, WANG RC, *et al.* Neck muscle activity during head flexion [J]. *J Med Biomech*, 2012, 27(5): 577-581.
- [15] CAEL C. Functional anatomy: Musculoskeletal anatomy [M]//Kinesiology and palpation for manual therapists. Pennsylvania: Lippincott Williams and Wilkins, 2010: 452.
- [16] 姚立纲, 廖志炜, 卢宗兴, 等. 踝关节章动式康复运动轨迹规划[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(21): 33-40.
- [17] ZHANG M, DAVIES TC, ZHANG Y, *et al.* Reviewing effectiveness of ankle assessment techniques for use in robot-assisted therapy [J]. *J Rehabil Res Dev*, 2014, 51(4): 517-534.
- [18] OLESEN CG, ZEE M, RASMUSSEN J. Comparison between a computational seated human model and experimental verification data [J]. *Appl Bionics Biomech*, 2014, 11(4): 175-183.
- [19] SHIN YH, CHOI JS, KANG DW, *et al.* A study on human musculoskeletal model for cycle fitting: Comparison with EMG [J]. *Int J Med Sci*, 2015, 9(2): 92-96.
- [20] 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.
- [21] HAZRATI E, AZGHANI MR. The effect of saddle height and saddle position changes from pedal on muscles and joints behaviors in ergometer: A parametric study [J]. *P I Mech Eng H*, 2018, 232(12): 1219-1229.
- [22] ZEE M, DALSTRA M, CATTANEO PM, *et al.* Validation of a musculo-skeletal model of the mandible and its application to mandibular distraction osteogenesis [J]. *J Biomech*, 2007, 40(6): 1192-1201.
- [23] ASHTIANI MN, AZGHANI M, SHAKOURI SK. Biomechanical modeling of hip abduction exercise using optimized inverse dynamics [J]. *Zahedan J Res Med Sci*, 2019, 21(1): e68977. 1-e68977. 7.
- [24] 刘慧, 沈国权, 张喜林, 等. 肌肉加载下腰椎间盘突出有限元研究[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.