

ZHANG Jing, ZHOU Biyun, NIE Jiachen, DONG Xianpeng, DING Li. Advances in the Study of the Musculoskeletal Multi-rigid-body Dynamic Modeling in Manned Space Flight (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(3): 783–794. CSTR:32142.14.cjss.2024-0163. DOI:10.11728/cjss2025.03.2024-0163

肌骨系统多刚体动力学建模在载人 航天领域的研究进展

张 静 周毕云 聂嘉辰
董先鹏 丁 立

(北京航空航天大学生物与医学工程学院 北京 100191)

摘 要 随着中国载人航天事业由近地空间向深空探测推进, 长期空间飞行中航天员肌骨系统损伤防护和地外星球探测中低重力环境适应, 成为航天员健康和安全保障的关切问题. 为解决地面模拟微重力/低重力环境人体运动肌骨系统响应等方面的局限, 基于生物力学原理和计算机辅助设计的肌骨系统建模仿真技术逐渐成为评估航天员锻炼方案和分析微重力/低重力运动特征的新型方法和工具. 本文基于多刚体动力学建模和仿真方法, 综合分析了载人航天领域肌骨系统动力学建模仿真方法的基本原理、可信度评估与研究进展, 并在此基础上讨论了其在航天员锻炼、舱外航天服优化及地外星球任务执行等方面的应用现状, 进而提出未来发展前景与研究方向.

关键词 肌骨系统, 建模, 航天员, 逆动力学, 载人航天

中图分类号 V7

Advances in the Study of the Musculoskeletal Multi-rigid-body Dynamic Modeling in Manned Space Flight

ZHANG Jing ZHOU Biyun NIE Jiachen
DONG Xianpeng DING Li

(School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract With the advancement of China's manned space program from near-Earth space to deep space exploration, the protection of astronauts against musculoskeletal injuries during long-duration space missions and their adaptation to low-gravity environments during extraterrestrial exploration have become critical issues concerning astronaut health and safety. To address the limitations of ground-based experiments in studying human motion and musculoskeletal system responses in microgravity/low-gravity environments, musculoskeletal system modeling and simulation technologies, based on biomechanical

2024-11-15 收到原稿, 2025-04-29 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

principles and computer-aided design, have emerged as novel methods and tools for evaluating astronaut exercise regimens and analyzing the kinematics and dynamics of microgravity/low-gravity environments. This paper introduces the principles of musculoskeletal system multi-rigid-body dynamics modeling in space environments, including forward dynamics-driven and inverse dynamics analysis methods. Taking OpenSim software as an instance, this paper elaborates on the procedure of constructing human-device-environment models in microgravity/low-gravity environments and the solution of muscle forces and joint torques *via* inverse kinematics and inverse dynamics algorithms. Furthermore, to assess the credibility of musculoskeletal modeling and simulation methods for manned spaceflight research, the relationship between experiments and modeling/simulation is analyzed. Based on existing literature, credibility assessment is conducted from eight factors: data pedigrees, input pedigrees, code verification, solution verification, conceptual validation, reference validation, results uncertainty, and results robustness. On this basis, the application of musculoskeletal system dynamics modeling and simulation methods in three key areas is reviewed as follows: assisting astronauts in space exercise by comparing the advantages and disadvantages of different exercise regimens and designing space station-compatible exercise equipment; optimizing extravehicular spacesuit design by calculating joint reaction torques through human-spacesuit coupling biomechanical models and improving spacesuit design to enhance comfort and work performance; and supporting extraterrestrial exploration by focusing on research into human motion characteristics in low-gravity environments and the development of human-spacesuit-exoskeleton systems to confirm the effectiveness of exoskeleton systems in planetary exploration. Finally, the limitations of musculoskeletal system multi-rigid-body modeling and simulation methods are analyzed, and new perspectives on future research directions and application prospects are proposed.

Key words Musculoskeletal system, Modeling, Astronauts, Inverse dynamics, Manned space flight

0 引言

随着中国载人登月工程的推进和未来探索火星设想的提出,深空探测任务对航天员健康和安全保障提出了新的挑战.人类60余年的载人航天实践表明,航天员长期在失重环境下生活会出现肌肉和骨骼系统功能损伤,主要表现肌萎缩和骨丢失^[1-3].空间锻炼已被证明是可对抗肌骨功能下降的有效措施,因此制定科学有效的锻炼方案成为研究人员的关注重点^[4,5].此外,由于人类在长期进化中已适应地面活动承受的机械载荷,当身处月球或地外行星时,低重力环境合并加压舱外航天服的作用,会使人体行走、蹲起等日常活动的肌肉力量激活和关节负载发生变化,进而引发航天员遭遇跌落、摔倒等受伤危险,严重时可能危及生命^[6].基于此,开展低重力环境人体运动特征研究有助于指导航天员采用安全和高效的运动方法完成地外星球探测任务.

鉴于空间飞行实验的高昂成本和有限样本量,有研究者试图在地面复制与空间相似的重力条件.然而,受限于抛物线飞行失重时间短暂、中性浮力水槽

效率低下以及卧床实验的体位限制^[7,8],航天员空间锻炼以及月球探测等舱外活动(Extravehicular Activity, EVA)运动分析的需求推动着研究者寻求新方法以实现微重力/低重力环境航天员肌骨系统研究.近年来,随着生物力学和计算机技术的发展,先进的人体建模和仿真方法由于可以在广泛的生理和病理条件下无创地研究身体运动和内部生物力学负荷之间的关系,逐渐成为深入理解人体物理极限、关节受力、肌肉收缩和运动最佳条件等问题的有力工具^[9,10].由于生物力学建模仿真在改变重力条件和外部环境方面具有优势,目前已被广泛应用于航天员空间站训练评估和地外星球探测运动分析.美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)十多年前启动数字航天员项目(The Digital Astronaut Project, DAP),提出开发和利用空间生理学建模技术,以减轻与长期空间飞行相关的人类健康和任务执行能力方面的风险^[11].在同一时期,中国航天员科研训练中心(China Astronaut Research and Training Center)牵头开展中国航天领域第一个国家重点基础研究发展计划项目——面向长期空间飞行

的航天员作业能力变化规律及机制研究^[12], 确保航天员在长期空间飞行中安全、健康、高效工作, 其中建模仿真作为该项目的重要组成部分, 在肌肉力计算模型和骨骼模型运动驱动等空间生物力学建模和验证方面取得大量成果. 欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 也逐步将生物力学建模仿真技术应用于空间站航天员运动锻炼的验证和评估^[13-15]. 此外, 航天领域相关高校 (美国辛辛那提大学、麻省理工学院、北京航空航天大学等) 也开展了大量关于人-舱外航天服和人-月面/火星外骨骼等方面的建模仿真研究^[16-18].

基于生物力学建模仿真的重要意义和应用价值, 肌骨系统建模仿真技术成为在地面研究微重力/低重力环境运动时骨骼和肌肉响应的重要方法. 在不同的肌骨系统建模仿真方法中, 目前基于具有全身骨骼、关节和肌肉模型的多刚体动力学原理的建模技术已有了较为长足和成熟的发展, 并被广泛应用于载人航天领域^[19,20]. 本文针对航天员肌骨系统多刚体动力学建模这一新兴领域, 分析利用多刚体动力学建模评估航天员锻炼方案、优化舱外航天服设计和分析月球/火星环境人体运动特征的原理、可行性及国内外研究进展, 展望该技术在载人航天领域的未来发展方向和应用前景.

1 空间环境肌骨系统多刚体动力学建模原理

人体肌骨系统多刚体动力学模型中, 骨骼被视为刚性体, 通过连接点 (关节) 与其他骨骼相连; 肌肉被视为能够产生力和力矩的弹性体, 通常被简化为线性或非线性弹簧, 其长度、刚度和阻尼等参数根据尸体实验数据进行设定; 关节是连接骨骼的关键点, 其结构和功能对肌骨系统的运动学特性有重要影响, 通过考虑不同关节的类型 (例如铰链关节、球窝关节等)、自由度以及关节约束等因素, 确定关节的简化类型. 此外, 对与人体接触的外界环境 (例如地面、运动器械等) 建模, 用于确定人体与环境之间的约束界面^[19].

多刚体动力学模型的驱动主要通过两种方式实现: 一是基于正向动力学、最佳控制和开放运动链的假设, 即正向动力学驱动; 二是基于多体动力学方程构建动态平衡方程组, 结合数学规划算法, 通过对肌

肉解剖功能的合理假设对不定方程组进行求解, 即采用逆向动力学驱动的方法. 在正向动力学模型中, 为了驱动模型实现人体执行的实际运动, 关节约束由运动学驱动程序补充. 而在逆向动力学模型中, 驱动通常来自运动捕捉实验数据, 包括基于摄像头和反光标记点的光学运动捕捉系统、惯性测量单元、电子测角仪、深度摄像头和拉伸传感器等测得的数据. 相较于正向运动学驱动, 逆向动力学驱动方法对运动细节和协同性的模拟更接近人体真实运动状态^[21].

在微重力/低重力使用场景中建立的人体肌骨系统多刚体动力学模型 (见图 1) 主要包含人体或其部分 (例如仅下肢), 以及与人体接触的环境. 人体部分通常基于标准模型, 采用动作捕捉数据和几何缩放函数完成模型整体尺寸、单个节段尺寸的缩放, 以实现与航天员测量尺寸的一致性, 建立个性化人体模型. 环境本身包括两部分, 一是机械系统, 例如地板、健身器材、航天服、外骨骼机器人等, 通过设定节段重量和转动惯量等参数, 导入计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) 模型实现其可视化. 环境的另一个重要参数是重力加速度, 基于研究场景 (例如近地轨道、月球或火星) 的重力条件, 设置模型中环境的重力加速度参数, 实现对所关注的微重力或低重力环境的模拟. 通过设定固定铰链或活动铰链, 将缩放后的人体模型与环境链接, 进而创建可分析的生物力学模型. 然后导入采集的空间站或地面模拟实验中航天员运动数据, 通过运动学和逆动力学计算获得人体的肌肉力激活状态和关节所承受的负荷^[22]. 实现地外环境肌骨系统动力学仿真的关键因素在于人体运动数据、人-环境界面相互作用力数据的获取和重力加速度的设置.

以人体多刚体逆动力学建模仿真平台 OpenSim 为例, 解释多刚体逆动力学模型的求解过程. 运动学的求解步骤包括建立超定方程组、计算矩阵的转置矩阵和原矩阵的乘积、求解乘积矩阵的逆矩阵以及求解最小二乘解等^[20]. 根据动作捕捉系统记录的运动轨迹驱动模型, 采用最小二乘法求解超定方程组, 即通过最小化残差平方和, 得到一个使得所有方程的残差平方和最小的解, 这个解具有无偏性、最优性和有效性等重要性质. 使每个时间帧匹配中的实际动作与标记点误差最小化的目标函数为

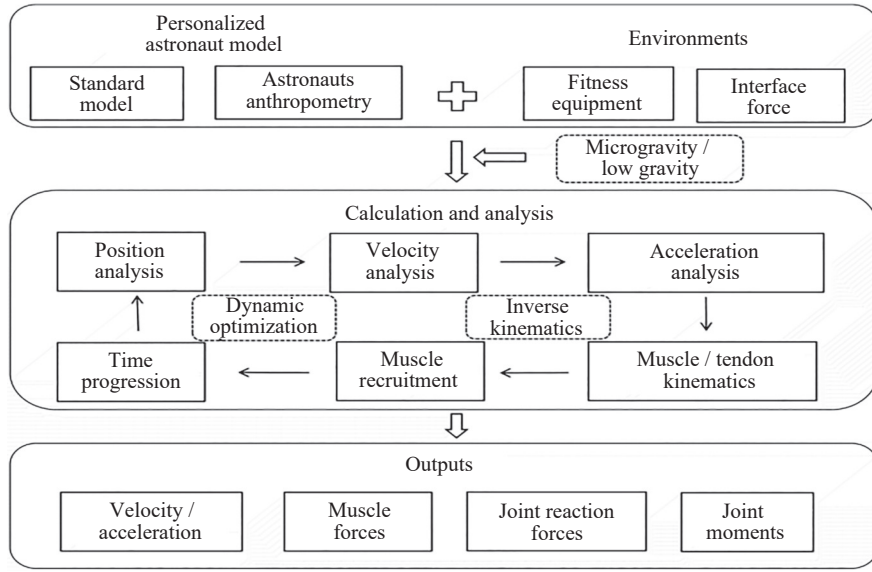


图1 空间环境肌骨系统多刚体动力学建模和仿真流程

Fig. 1 Flowchart of multi-rigid-body dynamic modeling and simulation for the musculoskeletal system in the space environment

$$\min_{\mathbf{q}} \left[\sum_{i \in \text{markers}} w_i (x_{i,\text{exp}} - x_{i\mathbf{q}})^2 + \sum_{j \in \text{unprescribed coords}} w_j (\mathbf{q}_{j,\text{exp}} - \mathbf{q}_j)^2 \right]. \quad (1)$$

其中, $\mathbf{q}$ 为求解的广义坐标向量, w_i 为标记点权重, $x_{i,\text{exp}}$ 为标记点 i 的实验位置, $x_{i\mathbf{q}}$ 为模型上相应标记点的位置; 对于特定的坐标 (锁定关节), $\mathbf{q}_j = \mathbf{q}_{j,\text{exp}}$, w_j 为坐标权重, $\mathbf{q}_{j,\text{exp}}$ 为坐标 j 的实验值。

式 (1) 被称为加权最小二乘求和问题, 是实验标记点和模型标记点之间距离平方的加权和与实验坐标和反向运动学工具计算的坐标之间距离的加权平方和之和的最小值。

在完成运动学求解后, 根据最优化方式募集肌肉 (例如最小化肌肉力) 标准假设, 求解得到肌肉力和关节内力等生物力学参数. 计算肌肉控制算法 (Computed Muscle Control, CMC) 的目标是计算一组肌肉兴奋度, 这组兴奋度能驱动动态肌肉骨骼模型, 利用外界反作用力 (如来自测力板或其他测力设备) 通过逆向动力学生成所需的运动学集合进行追踪. 该过程通过比例-微分控制和静态优化相结合实现, 算法能够生成模型中单个肌肉的兴奋度、肌肉力、肌纤维长度以及每个关节的位置、速度和加速度. 计算肌肉控制算法分为三步. 第一步, 利用比例-微分控制律计算一组期望加速度 $\ddot{\mathbf{q}}'$, 以驱动模型坐标 $\bar{\mathbf{q}}$ 向实验得出

的坐标 $\bar{\mathbf{q}}_{\text{exp}}$ 接近, 表达式为

$$\ddot{\mathbf{q}}'(t+T) = \ddot{\mathbf{q}}'_{\text{exp}}(t+T) + \bar{k}_v [\dot{\mathbf{q}}_{\text{exp}}(t) - \dot{\mathbf{q}}(t)] + \bar{k}_p [\bar{\mathbf{q}}_{\text{exp}}(t) - \bar{\mathbf{q}}(t)]. \quad (2)$$

其中, $\bar{k}_v$ 和 $\bar{k}_p$ 分别是速度反馈增益和位置反馈增益, $\ddot{\mathbf{q}}'_{\text{exp}}(t+T)$ 是期望加速度. 肌肉施加于身体的力不会瞬间改变, 因此通常每 0.010 s 计算一次期望加速度. 该时间间隔既能实现充分控制, 又能让肌肉力量产生变化. 当达到期望加速度时, 模型坐标与经实验推导所得坐标之间的误差会被消除至零. 以临界阻尼的方式可获得用于消除前述误差的速度增益, 表达式为

$$\bar{k}_v = 2\sqrt{\bar{k}_p}. \quad (3)$$

第二步, 使用静态优化方法计算出实现期望加速度的执行器控制量. 第三步, 使用计算出的控制量进行正向动力学模拟. 以上步骤重复进行, 直到时间推进到所需运动区间结束为止^[16].

由此完成运动学求解和动力学优化过程, 计算得到运动过程中各肌肉力、关节力/力矩和运动代谢成本等.

2 肌骨系统动力学模型用于载人航天的可信度评估

由于肌骨系统动力学模型最初是为分析地球表

面运动相关伤害或工效评估而开发、验证和确认的,因此将这些模型应用于载人航天领域时,需进行额外的建模与仿真可信度评估^[23,24]. 肌骨系统动力学模型的验证一般通过分析和比较仿真计算结果与可测量实验数据的相关性实现(见图2). 航天员多刚体动力学模型的输出包含肌肉力、关节力、关节力矩和代谢成本. 鉴于关节力和关节力矩无法通过体内无创方式测量,研究者将模型计算所得的肌肉力和代谢成本,与表面肌电特征值及能量代谢测试仪的测量数据进行对比,通过皮尔逊相关性分析、平均绝对误差等预测模型准确度的参数计算,验证模型对实际情况模拟的可行性^[15,24].

为规范化评估建模仿真方法用于载人航天的可信度, NASA 先后于 2016 年和 2019 年分别发布《建模和仿真标准》(Standard for Models and Simulations, NASA-STD-7009 A)^[25] 和《NASA 模型与仿真手册: NASA-STD-7009 实施指南》(NASA Handbook for Models and Simulations: an Implementation Guide for NASA-STD-7009, NASA-HDBK-7009)^[26], 对仿真建模项目实施流程和输入输出控制做了详细要求, 并对载人航天系统软件和用于基础科研及工程设计的技术软件的设计过程提出控制要求. 因此, Gallo 等^[27] 根据 NASA-STD-7009 A 对 OpenSim 建模和仿真程序进行了可信度评估, 以获知有关模型在模拟 EVA 相关损伤机制中使用的可信度. 对 OpenSim 及其衍生模型的可信度评估可从 8 个因素开展: 数据谱系 (Data pedigrees)、输入谱系 (Input pedigrees)、代码验证 (Code verification)、解决方案验证 (Solution verification)、概念验证 (Conceptual

validation)、参 考 验 证 (Referent validation)、结果不确定性 (Results uncertainty) 及结果稳健性 (Results robustness). 通过综合分析以往使用 OpenSim 模型建立的航天员运动模型或航天员-舱外航天服组合模型及其验证过程, 肯定了 OpenSim 模型应用于载人航天研究的可行性. 来自 NASA、中国航天员科研训练中心和 EAS 及其合作高校等机构的广泛研究亦证实了建模仿真方法的有效性^[11,13-15].

同时, 可信度评估相关研究也指出了当前肌骨系统模型存在的一些局限性, 例如单一肌骨模型难以分析航天员可能在身体上遇到的肌肉应变和韧带损伤所需的所有肌骨解剖特征; 当前使用的航天员-舱外航天服过简化模型, 导致无法体现不同舱外航天服 (例如 Extravehicular Mobility Unit, EMU 或 Exploration Extravehicular Mobility Unit, xEMU) 对人体产生的关节力学影响和肌肉组织反应差异. 针对以上不足, 为了有效预测锻炼方案效果, 以及舱外航天服或 EVA 任务可能导致的机体损伤, 有必要在全身肌骨模型中添加韧带, 并使用在轨航天员视频数据来验证锻炼模型的运动学分析^[28]. 此外, 可通过以往载人飞行任务和卧床实验收集的肌肉和骨骼功能变化特征, 改进模型中的肌骨特征参数, 以实现尽可能高保真度的航天员肌骨系统模拟和仿真.

3 肌骨系统动力学建模在载人航天领域的应用

3.1 助力航天员空间锻炼

为对抗微重力引发的体能失调, 空间站航天员被

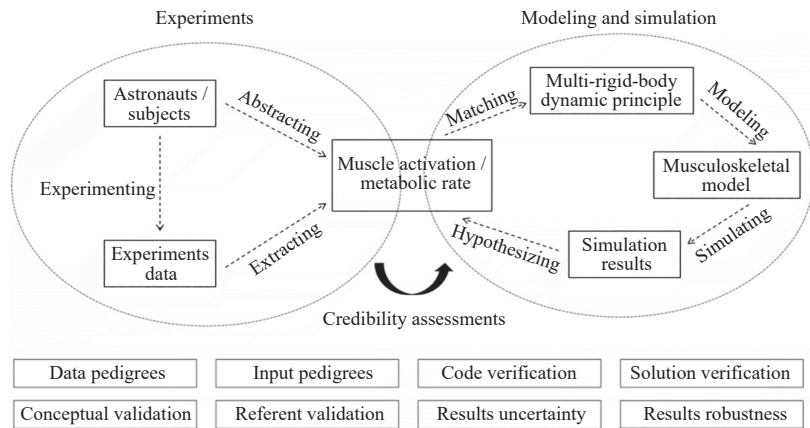


图2 肌骨系统建模仿真用于载人航天的可信度评估

Fig. 2 Credibility evaluation of musculoskeletal modeling and simulation for manned space flight

要求平均每天进行 1.75 h 的锻炼, 通常包括 1 h 的有氧运动和 45 min 的阻力训练^[29,30], 以通过暂时向人体施加机械和代谢刺激, 减缓肌萎缩和骨丢失症状的发展. 为了保证航天员在空间站等地外空间内获得高效锻炼, 各航天机构开发了多种运动器械和设备, 包括跑步机 (Combined Operational Load Bearing External Resistance, COLBERT)、功能自适应运动装置 (Functional Re-adaptive Exercise Device, FRED)、高级阻力锻炼设备 (Advanced Resistive Exercise Device, ARED)、混合举重组件 (Hybrid Ultimate Lifting Kit, HULK) 和阻力超负荷装置 (Resistive Overload Combined with Kinetic Yo-Yo, ROCKY) 等^[11,13,29,31,32], 以协助航天员在有限空间开展有氧和无氧训练.

为明确骨骼每日所受力负荷刺激量以及维持骨骼功能所需的最低刺激量, Ren^[33] 分析了 30 名志愿者在 1g 重力下开展一周正常活动所涉及的动作种类, 统计了坐卧、站立、走跑等动作的占比, 并计算了志愿者在不同动作完成时下肢髋关节、膝关节和踝关节的平均受力. 该研究实现了对人体每日关节受力的量化数据库的建立, 为航天员对抗骨丢失的训练量制定提供了依据. 在此基础上, 为了评估运动设备和锻炼对策对航天员肌骨系统产生的刺激效果, 多刚体动力学模型 (OpenSim, AnyBody, LifeMOD 等) 被用于计算微重力/低重力环境生物力学参数, 为改进对策和运动装置的设计提供支持. 以 ARED 设备为例^[34], 其允许进行多达 29 项练习, 包括正常深蹲、宽距深蹲和硬拉等, 多项建模仿真研究围绕其开展. 为了解国际空间站上 ARED 深蹲运动复刻地球表面深蹲的肌肉激活程度, 或者运动形式的微小变化对肌肉负荷的影响, Fregly 等^[31] 在 OpenSim 中构建了完整的航天员-ARED 系统多体动力学模型, 在使用肌电、地面反作用力和足部压力中心位置数据验证地面仿真结果后, 将 ARED 底座设置为相对于国际空间站自由移动且重力设置为零, 对锻炼策略参考深蹲运动和八种改变姿势的深蹲运动 (涉及踏板前后脚位置或足部压力中心变化) 进行了分析, 结果表明 70% BW (Body Weight) 替代负荷, 产生的肌肉力矩与地球上经历的肌肉力矩相当, 通过在 ARED 踏板上向前或向后移动脚, 同时保持手臂杆垂直于踏板, 可以实现肌肉力矩的大幅变化. NASA 的 Gallo 等^[11] 使用 Open-

Sim 建模分析了空间不同深蹲姿势和负载分布点对肌肉激活的影响, 发现当负载分布在背部多个点, 而不是一个杆接触点时, 后腰部区域的负荷会随之减小, 且空间中的深蹲并不比平行蹲使膝盖承受更大的载荷. 这些研究结果为国际空间站航天员采用深蹲运动, 实现特定肌肉力矩的预期增加或减少提供了潜在的参考信息. 此外, 针对空间跑台运动中约束模式的分析, 中国航天员科研训练中心联合北京航空航天大学生物力学实验室^[14] 使用 AnyBody 模型计算了不同肩部和腰部约束负荷下, 整个步态周期中的下肢肌肉激活状态. 研究发现, 与地球重力环境相比, 空间跑台跑步时肌肉力量增加, 且不同约束负荷模式对跑台运动中的肌肉力量有显著差异, 可通过调整肩部和腰部负荷加载比例来提高空间站跑步肌肉锻炼的效果. 为提升航天员运动训练设备的功能种类和训练效果, Zou^[35] 开展了面向微重力环境的航天员康复训练机器人技术研究, 通过并联柔索机器人辅助航天员失重环境下开展跑步、卧推和负重深蹲训练, 基于拉格朗日法建立人机系统动力学模型, 并采用 Matlab 工具箱和 dSPACE 仿真平台验证了多模式训练机器人的有效性. 这些研究表明, 模型的计算预测有助于修改完善宇航员运动策略, 以达到期望训练效果.

为探究复杂全身协调任务在零重力环境实现时面临的限制及生物力学响应, 日本东京都立大学和慕尼黑工业大学的研究者提出了以空手道运动为对象, 将 Azure Kinect 身体跟踪技术^[36] 集成到生物力学模拟工具 OpenSim, 提出基于正向动力学计算的比例-微分控制算法, 对空手道涉及的旋转、移动、协调和武术动作进行了生物力学分析, 发现多数复杂的全身协调任务可以在零重力下再现, 其中以静态姿势为特征并依赖于身体四肢独立活动的运动在微重力环境中是可最有效执行的. 南京航空航天大学的祝桥桥团队与迈阿密大学合作^[37], 针对航天员在空间中采取周期性“胎儿蜷缩”姿势以缓解腰痛的现象, 采用 AnyBody 建模仿真方法定量比较了微重力下“胎儿蜷缩”姿势与其他三种姿势 (模拟微重力自由漂浮姿势、微重力放松站立姿势和 1g 重力放松站立姿势) 下, 脊柱节段 (椎间盘、肌肉和韧带) 的力学变化, 提出微重力可能增加椎间盘突出和退变、肌肉萎缩和/或韧带损伤风险的原因. 此类研究进一步推广了肌骨系统多刚体模型的应用领域.

虽然航天员采取运动锻炼可在一定程度上对抗肌肉萎缩的进程,但随着空间驻留时间的增加和深空探测任务的推进,航天员生物力学仿真面临的另一关键问题是如何将随时间延长罹患肌萎缩导致的肌肉力量下降,纳入航天员关节和骨骼负荷的定量预测.针对此问题,近年来 NASA 数字航天员计划项目和 Lewandowski 等^[38]提出在生物力学仿真模型中增加时间维度概念,将肌萎缩导致的肌肉力量下降纳入骨负荷预测,初步研究提出可通过补充等长和等速膝关节屈伸运动和腿部按压运动以获得肌肉最大爆发力.这些研究结果与航天数据相结合表明,力的减少不能仅通过肌肉体积的减少来解释,神经运动控制、形态、刚度特性等也是重要的影响因素,这些因素需要在模型中加以考虑.

总体而言,中国在空间站航天员运动锻炼策略的制定和评估方面,起步早,进步快,与国际上主要发达国家的此类研究齐头并进,已开展大量关于动力学仿真建模和微重力环境肌骨系统生物力学分析研究,实现了无创量化人体关节和肌肉受力,部分研究成果已在空间站应用.

3.2 助力航天服设计优化

舱外航天服是航天员执行 EVA 的关键装备,可有效保护航天员免受空间中的危险因素(例如射线、高能粒子等)伤害,为舱外活动任务的完成提供强有力的支持.实践表明,航天服的舒适性受人体与服装相互作用载荷的直接影响.在美国空间飞行计划中,航天员主要损伤机制是疲劳、擦伤、肿胀和关节疼痛,常见的不适部位包括脚、腿、手臂、颈部、躯干、腹股沟和头部.舱外航天服的舒适度通常采用三个特征来评估:静态舒适度指航天员的关节与航天服关节的对齐程度;动态贴合度指这些对齐关系在特定运动过程中的变化情况——当航天服出现不贴合或错位时,会在人体与服装之间产生额外的相互作用点,导致航天员活动流畅度降低;认知拟合度指航天员自我感知、认知与运动选择的相互作用机制.肌骨系统多刚体动力学模型为量化评估人-服相互作用载荷引发的运动行为改变提供了方法,也为航天服的设计优化及航天员伤害预测提供了思路.

基于多刚体动力学原理,已开发出多种人-服交互模型,用于计算航天服作用于人体的力和力矩^[15,17,39,40].中国航天员科研训练中心的 Wang 等^[41]

开发了面向 EVA 的人-舱外航天服耦合运动生物力学模型,通过在 AnyBody 人体模型的右臂部位建立几何刚体模型(模拟加压后的舱外航天服)、关节运动学模型和关节阻尼力矩模型(模拟舱外航天服关节阻尼迟滞特性),以及人体上肢与舱外航天服手臂之间的反作用力元(模拟接触力),采用动力学仿真计算得到舒适区和舒适边界外的推、拉、提、压,获得 8 种功能操作下的上肢三角肌、肱二头肌和肱三头肌的肌肉激活,并通过积分肌电值得以验证.该研究实现了着服状态的肌肉激活预测,为中国开展人-舱外航天服耦合研究树立了标杆.为进一步提高航天服的操控性能,He^[42]从人体工效学角度出发,采用 Abaqus 有限元分析工具和 OpenSim 仿真模型,建立了航天服上肢关节人-服耦合有限元-骨肌生物力学模型,实现了常服、着服不加压和着服加压三种工况下,肘关节和前臂运动等典型任务条件下的关节活动和肌肉力预测,为航天服工效评价积累了基础数据并提供了数字方法.此外, Li 等^[18]开发了包括肌力和力矩模型的航天员上肢模型,并将航天服的反力矩视为边界条件,在已知上肢运动的末端轨迹的情况下,应用逆运动学和 Maggi-Kane 方法计算出关节活动角度、关节力矩和肌肉力. Diaz 等^[17]基于 OpenSim 软件开发了用于 EVA 期间人体-航天服相互作用的肌肉骨骼性能评估模型,为精确测量充压服装对人体的反力矩,采用自研的航天服内一体化机器人测量了不同关节的扭矩角关系,并作为边界条件输入 EMU 和 Mark III 宇航服模型,结果表明膝关节屈曲期间施加的最大肌肉力从不着装到着装 Mark III 再到着装 EMU 显著增加,在“着装”的条件下,股二头肌长头肌、腓肠肌和缝匠肌等膝屈肌的峰值肌力明显更高.此外, Burkhardt 等^[43]使用 OpenSim 躯干模型研究了行星航天服对脊柱负荷的影响,发现在不同脊柱曲率和肩部负荷组合下,航天员的下胸椎和腰椎会承受不同程度的负荷,在行星环境中当航天服产生压缩载荷时,航天员下背痛的风险可能会增加.

在航天服设计方面, Sridhar 等^[16]使用 OpenSim 全身模型建立了人体和航天服便携式生命系统(Space Suit and Portable Life Support System, PLSS)组合,用于判断 PLSS 重心位置对航天员 EVA 任务(搬运、攀爬和行走)性能的影响.仿真计算结果发现,从较低的代谢率和肌肉负荷角度考虑,

PLSS 低前重心设计最适合攀爬, 低后重心设计最适合物体搬运, 而高前重心设计最适用于行走. 中国近年来亦开展了此类研究, Li 等^[44]运用人体五杆模型, 采用 D-H 法和牛顿-欧拉法建立了人体-外骨骼-重物系统和动力学模型, 实现了人体-重物系统中人体肩背的受力变化和腰椎、髌、膝关节力矩分析, 并通过 OpenSim 模型得以验证. 该研究虽针对地面重力环境开展, 但可通过重力参数等设置的改变迁移至航天服的背包位置设计评价.

肌骨系统多刚体模型为全面了解航天服反力矩在全身的分布方式、“着装”条件下肌肉和关节负荷量化分析、EVA 任务期间的身体运动学, 以及完成预期任务的代谢成本的定量表征提供了方法, 有助于开发先进的舱外航天服, 以最大限度地提高服装舒适度和 EVA 任务效率. 综合以上调研结果可以发现, 相较于国外相关研究, 中国在十多年前便开展并实现了人-服耦合运动生物力学模型的研究和应用, 后续人-服交互系统研究和应用场景丰富, 充分体现了中国航天人在该研究领域的预见性和前瞻性.

3.3 助力地外星球探索

随着中国 2030 年载人登月计划、美国重返月球计划的推进, 以及未来火星和小行星探测任务的规划, 针对低重力环境下人体运动特征的研究, 对航天员肌骨系统生物力学分析提出了新需求.

据报道, 在阿波罗任务期间, 航天员在执行 EVA 任务时曾多次发生摔倒或险些摔倒的情况. 为规避此类伤害风险, 美国国家航空航天局 (NASA) 提出开展月球表面活动建模研究, 以保障阿尔忒弥斯计划预期任务中航天员的安全^[45]. 该系列研究的核心思路是, 将基于 OpenSim 的扩展生物力学工具集与运动捕捉技术、人体质量特性分析相结合, 探究在 $1g$ 重力环境下执行的任务是否可在月球重力环境下以相同方式完成, 以及是否需要对此类任务进行相应调整. 在建模过程中, 通过调整模型缩放、在反向运动学中使用额外的动捕标记点, 以及修改关节轴和限制, 减少了由运动伪影引起的模型标记与实际运动标记之间的原始误差. 在此基础上, NASA 与南佛罗里达大学的辅助康复与机器人技术中心共同创建了一个 $1g$ 月球任务数据库^[6], 其中包含运动捕捉和测力板数据、EVA 工具、不同用户姿势/动作以及更广泛的测试对象群体, 用于未来新的建模技术的开发和测

试. 这些措施不仅可用于检验地面测试和训练的有效性, 例如, 在主动响应重力卸载系统 (Active Response Gravity Offload System, ARGOS) 或中性浮力实验室 (Neutral Buoyancy Laboratory, NBL) 开展的月球重力实验, 还可以探索舱外航天服、工具或其他系统属性变化时对航天员月球任务动作的影响, 并解决长期振动隔离与稳定系统 (Vibration Isolation and Stabilization System, VIS) 开发的难题. 此外, 对于月面探测任务中上肢建模和仿真, Zhang 等^[46]使用 AnyBody 人体建模仿真软件建立了典型月面敲击任务模型, 提出了一套在月面重力下, 以肩关节不同角度和上肢敲击速度的组合, 计算上肢肌肉力以确定最省力敲击动作的方法. 上述研究结论有助于为未来月面任务的设计和训练方案的制定提供支持和参考.

另外, 在航天员运动辅助系统研究领域, 相比 50 多年前美国登月时期的技术条件, 近年来快速发展的外骨骼机器人技术, 为低重力环境下行走辅助设备的研制奠定了技术基础. Qiao 等^[47]开展了针对航天员低重力步行训练的被动外骨骼机器人模拟分析, 他们采用弹簧平行四边形机构构建了纯被动的的外骨骼机器人, 将人体各主要部分重力载荷按比例 ($0\sim 100\%$) 转移到外骨骼上, 通过 ADAMS 动力学仿真软件对不同比例的低重力模拟效果动力学仿真结果表明, 该外骨骼机器人系统能够逼真地模拟出不同重力条件下的步行效果. 此后控制技术和动态规划算法的快速发展, 推动了主动型外骨骼机器人设计的实现. Porter 等^[9]与意大利 D-Air Lab 合作, 针对月面环境加压舱外航天服存在的关节僵硬、活动范围有限等问题, 在 BioSuit 机械反压服的基础上, 开发了一种可调节膝关节刚度的软膝关节外骨骼, 并在 OpenSim 2932 下肢模型中使用硬度类似于外骨骼的膝关节弹簧生成肌肉驱动模拟, 比较了分别在 $1g$ 重力与 $0.17g$ 重力环境下有无外骨骼辅助行走时的关节运动学、力矩和肌肉代谢成本. 证实了采用仿真计算模型评估低重力环境下可调节膝关节刚度的有效性, 实现了低时间成本和低经济成本下设计开发 EVA 航天服外骨骼以提高 EVA 活动能力, 降低代谢消耗的目标. 而 Kumar 等^[48]提出, 航天员采用跳跃方式穿越月面时, 可有效降低因沉重的生命支持系统及低重力环境下关节冲击吸收所需的能量消耗. 该团队开发了一种可

提高垂直跳跃高度的电动膝关节外骨骼, 并通过自建的七关节半身动力学模型, 对地面反作用力和人体-外骨骼能耗进行建模分析. 结果表明, 使用外骨骼后跳跃高度增加了 $8\% \pm 1\%$, 同时着陆冲击力减小、动作稳定性提升, 在相同移动距离下跳跃次数降低. 与之思路类似, 为助力火星表面的 EVA 任务执行, Kluis 等^[49] 在 NASA 项目资助下, 使用 OpenSim 建模量化机器人外骨骼驱动器在行星行走过程中对 EVA 活动性能的提升. 其计算了三种行走条件下的代谢成本: 未穿宇航服、穿着 EMU 航天服 (表示为施加在人体关节上的外部力矩), 以及穿着 EMU 并借助能产生 10 Nm 扭矩的机器人驱动器辅助行走. 与未穿宇航服的情况相比, 额外的力矩使总体代谢成本增加了 85%, 而辅助机器人驱动器能够减少由 EMU 阻力引起的代谢成本 15%. 换算到火星 EVA 任务中, 该驱动器可以使一名航天员在 539 天的行星探险中节省多达 418.68 MJ 的能量. 近年来, 中国进行了大量外骨骼相关研究, Zhou 等^[50] 提出了使用下肢人机耦合模型计算人体和外骨骼之间交互力的方法, 通过将 CAD 建立的外骨骼模型与 AnyBody 人体肌骨模型的耦合, 以运动捕捉的步态数据和外骨骼的关节扭矩为输入, 采用逆动力学计算出法向交互力和下肢主要肌肉 (股直肌、股外侧肌、股二头肌等) 的肌肉激活度, 通过比较仿真模型计算与实验测得的数据验证了方法的有效性. 此外, Qiao 等^[51] 设计了主动驱动与被动储能元件相结合的轻型柔性助力外骨骼机器人结构, 使用 OpenSim 仿真方法建立外骨骼机器人的三维模型和运动模型, 开展了下肢步态行走的正逆运动学求解分析, 通过添加行走时与地面的约束进行物理模型的运动学仿真, 证明了外骨骼机器人运动分析的可靠性. 虽然中国关于低重力环境下运动外骨骼设备的报道较少, 但上述研究可在结合人-舱外航天服系统的基础上, 建立人-服-外骨骼系统, 进一步推广至用于地外星球探索的外骨骼设计和性能评估.

以上研究表明, 肌骨系统多刚体建模可量化评估月球/行星探测时航天员使用外骨骼机器人的关节运动学、动力学和代谢成本, 有助于协助制定用于登月或行星探测的各类新型外骨骼的设计标准、制造技术, 以确保航天员短途旅行能够安全穿越更长的距离和不同的地形, 提高航天员的作业效能. 相比于国外同类研究, 当前中国对电动外骨骼的控制算法和设计

制造技术已处于世界前列, 但低重力环境下外骨骼设备助力航天员舱外活动的研究成果鲜少报道, 因此, 未来需进一步开展外骨骼机器人与肌骨生物力学模型的耦合建模仿真研究, 推动新技术在地外星球探索中的应用与发展.

4 结论与展望

基于多刚体动力学原理的人体肌骨系统生物力学建模与仿真技术, 为载人航天领域中航天员失重环境锻炼方案设计、舱外航天服结构优化及行星探测外骨骼装备研发提供了关键计算与评估工具, 已广泛应用于航天员健康保障及舱外活动风险防控. 该方法有力支持了微重力/低重力环境下的生物力学响应研究, 但仍存在一定的局限性: 现有的人体肌骨系统多刚体模型主要基于静态解剖结构构建, 虽有前瞻性研究尝试纳入长期空间暴露导致的肌肉萎缩时变因素^[35], 但普遍缺乏对性别、年龄差异及骨密度时变特征的考量, 这可能导致仿真模型对执行长期任务的航天员肌骨系统响应预测存在偏差.

随着《国家空间科学中长期发展规划 (2024—2050 年)》的发布实施, 未来载人登月和行星探测任务对生物力学建模技术提出了更高要求. 因此, 需充分发挥该方法的显著优势, 深入开展相关理论与技术研究. 目前, 以下方向值得探索.

(1) 完善载人航天肌骨系统多刚体动力学模型库. 结合空间站和未来登月任务实测数据, 开发更精确的人体肌骨模型, 包括纳入肌肉-肌腱驱动单元引入肌骨参数时变模块, 构建多人群特征数据库 (涵盖性别差异, 第 5~95 百分位数体型, 30~50 岁年龄区间), 以及扩展舱外活动任务仿真场景等, 在此基础上实现航天员个性化模型和任务场景的快速耦合建模与动态仿真, 以适配日益复杂的深空探测需求.

(2) 强化肌骨系统多刚体动力学模型与外骨骼机器人的交叉融合技术. 针对国外已聚焦电驱动外骨骼辅助地外星球 EVA 的研究趋势, 结合国内技术基础, 需重点突破人-服-外骨骼耦合建模技术: 建立月球/火星任务特异性人-机-环境耦合模型, 融合舱外航天服机械特性与外骨骼驱动逻辑; 探索多模态控制策略 (例如力反馈、姿态协同), 提升复杂地形下的运动稳定性与能量效率; 开展地面模拟验证实验, 通过重

力卸载设施验证模型对航天员动作补偿的有效性。

(3) 构建多生理系统耦合的航天员全身集总参数模型. 突破单一肌骨系统建模局限, 推动生物力学模型与多生理系统的跨尺度整合. 通过数值模拟方法建立适用于空间环境的航天员心血管系统、体液系统、热生理调节系统和神经认知系统等多物理场交互模型, 有助于揭示地外极端复合环境下生理系统的级联效应, 为航天医学防护方案提供多维度预测。

(4) 深化载人航天领域肌骨系统生物力学研究和航天员健康保障领域的国际科研合作. 中国始终倡导和平利用外层空间, 并将中国空间站向所有联合国会员国开放, 旨在打造成全人类在外空共同的家, 这充分体现了中国载人航天的合作精神和开放胸怀. 未来有必要加强在空间生物力学和建模仿真领域的国际合作研究, 通过开放协作, 整合全球科研资源, 推动中国在航天员健康保障领域研究的跨越式发展。

参考文献

- [1] LEE P H U, CHUNG M, REN Z P, *et al.* Factors mediating spaceflight-induced skeletal muscle atrophy[J]. *American Journal of Physiology Cell Physiology*, 2022, **322**(3): C567-C580
- [2] KELLER T S, STRAUSS A M, SZPALSKI M. Prevention of bone loss and muscle atrophy during manned space flight[J]. *Microgravity Quarterly: MGQ*, 1992, **2**(2): 89-102
- [3] DAI Z Q, LEI X H, YANG C, *et al.* Systematic biomedical research of the NASA Twins Study facilitates the hazard risk assessment of long-term spaceflight missions[J]. *Protein & Cell*, 2019, **10**(9): 628-630
- [4] TANAKA K, NISHIMURA N, KAWAI Y. Adaptation to microgravity, deconditioning, and countermeasures[J]. *The Journal of Physiological Sciences: JPS*, 2017, **67**(2): 271-281
- [5] HARGENS A R, BHATTACHARYA R, SCHNEIDER S M. Space physiology VI: exercise, artificial gravity, and countermeasure development for prolonged space flight[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2013, **113**(9): 2183-2192
- [6] NASA. Lunar surface operations modeling using digital astronaut simulation - nasa technical reports server (NTRS) [EB/OL]. (2021-03-30)[2024-11-08]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210011091>
- [7] QAISAR R, KARIM A, ELMOSELHI A B. Muscle unloading: A comparison between spaceflight and ground-based models[J]. *Acta Physiologica (Oxford, England)*, 2020, **228**(3): e13431
- [8] SINATRA M, QUARANTA M. Biomechanical model and machine learning algorithms comparison for customized training biofeedback on ISS[EB/OL]. (2021-04-28)[2024-10-07]. <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/173951>
- [9] PORTER A P. Design of soft knee exoskeleton and modeling effects of variable stiffness for advanced space suits and planetary exploration[D/OL]. Massachusetts Institute of Technology, (2020)[2024-10-08]. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/129135>
- [10] LEWANDOWSKI B E, PENNLINE J A, STALKER A R, *et al.* Musculoskeletal modeling component of the NASA digital astronaut project[Z/OL]. (2011-04-11)[2024-10-06]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20110011357>
- [11] GALLO C A, THOMPSON W K, LEWANDOWSKI B E, *et al.* Computational modeling using OpenSim to simulate a squat exercise motion[Z/OL]. (2015-01-13)[2024-10-06]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150002700>
- [12] CHEN Shanguang, JIANG Guohua, WANG Chunhui. Advancement in space human factors engineering[J]. *Manned Spaceflight*, 2015(2): 11 (陈善广, 姜国华, 王春慧. 航天人因工程研究进展 [J]. *载人航天*, 2015(2): 11)
- [13] LETIER P, FAU G, MITTAG U, *et al.* SOLEUS: ankle foot orthosis for space countermeasure with immersive virtual reality[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Wearable Robotics. Segovia: Springer, 2016: 305-309
- [14] GUO N, FAN X Y, WU Y T, *et al.* Effect of constraint loading on the lower limb muscle forces in weightless treadmill exercise[J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2018, **2018**: 8487308
- [15] LI H, JIN Y, WANG C H. Modeling and simulation of astronaut motions during extravehicular activity: a complex system based method[J]. *AASRI Procedia*, 2012, **3**: 118-126
- [16] SRIDHAR S, STETZ E, MCFARLAND S M, *et al.* Space suit and portable life support system center of gravity influence on astronaut kinematics, exertion and efficiency [C]// 47th International Conference on Environmental Systems, 2017
- [17] DIAZ A, NEWMAN D. Musculoskeletal human-spacesuit interaction model[C]//2014 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2014: 1-13
- [18] LI J W, YE Q, DING L, *et al.* Modeling and dynamic simulation of astronaut's upper limb motions considering counter torques generated by the space suit[J]. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2017, **20**(9): 929-940
- [19] DAMSGAARD M, RASMUSSEN J, CHRISTENSEN S T, *et al.* Analysis of musculoskeletal systems in the anybody modeling system[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2006, **14**(8): 1100-1111
- [20] DELP S L, ANDERSON F C, ARNOLD A S, *et al.* OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement[J]. *IEEE Transactions on Bio-medical Engineering*, 2007, **54**(11): 1940-1950
- [21] ANDERSEN M S, RASMUSSEN J. Chapter 7 - AnyBody

- modeling system[M]//PAUL G, HAMDY DOWEIDAR M. Digital Human Modeling and Medicine. London: Academic Press, 2023: 143-159
- [22] RASMUSSEN J. Chapter 8 - The AnyBody modeling system[M]//SCATAGLINI S, PAUL G. DHM and Posturography. London: Academic Press, 2019: 85-96
- [23] LI H, WANG C, WANG Z, *et al.* Analysis of the applicability of the anybody modeling system in microgravity environment[C]//Proceedings of the 64th International Astronautical Congress. Beijing: IAC, 2013, 1: 98-103
- [24] JESSUP L N, KELLY L A, CRESSWELL A G, *et al.* Validation of a musculoskeletal model for simulating muscle mechanics and energetics during diverse human hopping tasks[J]. *Royal Society Open Science*, 2023, **10**(10): 230393
- [25] Standard for models and simulations[EB/OL]. [2024-11-12]. <https://standards.nasa.gov/standard/nasa/nasa-std-7009>
- [26] NASA handbook for models and simulations: an implementation guide for NASA-STD-7009[EB/OL]. [2024-11-12]. <https://standards.nasa.gov/standard/nasa/nasa-hdbk-7009>
- [27] GALLO C A, PERKINS R A, IVANOFF, A E, *et al.* Modeling and simulation credibility assessments of musculoskeletal computational models for simulating astronaut injuries due to a poor spacesuit fit - NASA Technical Reports Server (NTRS)[EB/OL]. [2024-11-13]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20240011014>
- [28] CURRELI C, DI PUCCIO F, DAVICO G, *et al.* Using musculoskeletal models to estimate in vivo total knee replacement kinematics and loads: effect of differences between models[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, **9**: 703508
- [29] LINDENROTH L, CAPLAN N, DEBUSE D, *et al.* A novel approach to activate deep spinal muscles in space—Results of a biomechanical model[J]. *Acta Astronautica*, 2015, **116**: 202-210
- [30] HAJJ-BOUTROS G, SONJAK V, FAUST A, *et al.* Impact of 14 days of bed rest in older adults and an exercise countermeasure on body composition, muscle strength, and cardiovascular function: Canadian space agency standard measures[J]. *Gerontology*, 2023, **69**(11): 1284-1294
- [31] FREGLY B J, FREGLY C D, KIM B T. Computational prediction of muscle moments during ared squat exercise on the international space station[J]. *Journal of Biomechanical Engineering*, 2015, **137**(12): 121005
- [32] JAGODNIK K M, THOMPSON W K, GALLO C A, *et al.* Biomechanical modeling of the deadlift exercise on the HULK device to improve the efficacy of resistive exercise microgravity countermeasures[Z/OL]. (2016-02-08)[2024-11-14]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20170000665>
- [33] REN Qichao. Study on Mechanical Properties of Human Lower Limbs Under Normal Gravity[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017 (任启超. 正常重力环境下人体下肢力学特性研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017)
- [34] HUMPHREYS B T, THOMPSON W K, LEWANDOWSKI B E, *et al.* Development of a high fidelity dynamic module of the advanced resistive exercise device (ARED) using adams[Z/OL]. (2012-02-14)[2024-11-14]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150010126>
- [35] ZOU Yupeng. Research on Control of Multimodal Cable Driven Astronaut Training Robot[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014 (邹宇鹏. 多模式柔索驱动航天员训练机器人控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014)
- [36] BÄRLIGEA A, HASE K, YOSHIDA M. Simulation of human movement in zero gravity[J]. *Sensors*, 2024, **24**(6): 1770
- [37] WU B, GAO X, QIN B, *et al.* Effect of microgravity on mechanical loadings in lumbar spine at various postures: a numerical study[J]. *NPJ microgravity*, 2023, **9**(1): 16
- [38] LEWANDOWSKI B E, PENNLINE J A, THOMPSON W K, *et al.* Development of the NASA digital astronaut project muscle model[Z/OL]. (2015-01-13)[2024-11-14]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20150004110>
- [39] SCHAFFNER G, NEWMAN D J, ROBINSON S K. Computational simulation of extravehicular activity dynamics during a satellite capture attempt[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics: A Publication of the American Institute of Aeronautics and Astronautics Devoted to the Technology of Dynamics and Control*, 2000, **23**(2): 367-369
- [40] SCHMIDT P B. An investigation of space suit mobility with applications to EVA operations[D/OL]. Massachusetts Institute of Technology, 2001[2024-11-14]. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/8105>
- [41] WANG Xiaodong, WANG Zheng, LI Hao, *et al.* Predicting muscle activation in typical functional tasks of EVA[J]. *Manned Spaceflight*, 2015, **21**(5): 510-515 (王晓东, 王政, 李昊, 等. 面向出舱活动的典型功能操作肌肉激活预测 [J]. *载人航天*, 2015, **21**(5): 510-515)
- [42] HE Jian. Research on Human-Suit Coupling Characteristics Based on Upper Limb of Spacesuit[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020 (何剑. 航天服上肢关节人服耦合特性研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020)
- [43] BURKHART K A, ANDERSON D E, STIRLING L. Estimating compressive spinal loads due to planetary space suits[C]// 2020 International Conference on Environmental Systems, 2020
- [44] LI Xiyuan, ZHANG Jianjun, AI Cunjin, *et al.* Load-bearing performance analysis of backpack exoskeleton with adaptive adjustment of the weight-gravity center[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2024, **37**(8): 1299-1307 (李希源, 张建军, 艾存金, 等. 重物质心自适应调节背负外骨骼负重性能分析 [J]. *振动工程学报*, 2024, **37**(8): 1299-1307)
- [45] LOSTROSCIO K H, QUIOCHO L J, HUFFMAN K, *et al.* Lunar surface operations modeling using digital astronaut simulation[Z/OL]. (2021-03-30)[2024-11-14]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210011091>
- [46] ZHANG J, ZHOU R, LI J, *et al.* Optimization for lunar

- mission training scheme based on anybody software[M]// DUFFY V G. Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics, and Risk Management. Human Body Modeling and Ergonomics. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013: 169-178. DOI: [10.1007/978-3-642-39182-8_20](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39182-8_20)
- [47] QIAO Bing, CHEN Zhuopeng. A passive exoskeleton robotic simulator for reduced-gravity locomotion training of astronaut[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, **35**(4): 474-480 (乔兵, 陈卓鹏. 航天员低重力步行训练被动外骨骼机器人模拟[J]. 宇航学报, 2014, **35**(4): 474-480)
- [48] KUMAR K, SHAH M, LI Y, *et al.* Electrically-actuated jumping exoskeleton for lunar locomotion[C]// 2024 Regional Student Conferences. 2024: 84209. <https://doi.org/10.2514/6.2024-84209>
- [49] KLUIS L, KELLER N, BAI H, *et al.* Reducing metabolic cost during planetary ambulation using robotic actuation [J]. *Aerospace Medicine and Human Performance*, 2021, **92**(7): 570-578.
- [50] Zhou Zeshi, ZHU Jun, ZHU Yunchao, *et al.* Characteristic analysis on human-machine interaction force of lower limb exoskeleton[J]. *Journal of Medical Biomechanics*, 2022, **37**(2): 305-311 (周泽世, 朱钧, 朱云超, 等. 下肢外骨骼人机耦合交互力特性分析 [J]. 医用生物力学, 2022, **37**(2): 305-311)
- [51] QIAO Junlin, ZHENG Dewei, Hu Ziwei, *et al.* Structural design and kinematics modeling analysis of power-assisted exoskeleton robot[J]. *Journal of Machine Design*, 2024, **41**(1): 21-27 (乔俊淋, 郑德维, 胡梓惟, 等. 助力外骨骼机器人结构设计与运动学建模分析 [J]. 机械设计, 2024, **41**(1): 21-27)

作者简介



张 静 女, 1990 年 10 月出生于山东省聊城市, 现为北京航空航天大学生物与医学工程学院博士研究生, 主要研究方向为航空航天人因工程、运动生物力学等。
E-mail: zhangjing2021@buaa.edu.cn



丁 立 (通信作者) 男, 1971 年 3 月出生于云南省昭通市, 现为北京航空航天大学生物与医学工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为人因工程、航空航天生理学及防护等。
E-mail: ding1971316@buaa.edu.cn