

文章编号:1004-7220(2015)06-0540-07

# 人服系统上肢交互生物力学仿真模型

王晓东, 王春慧, 王政, 李昊, 李凡

(中国航天员科研训练中心 人因工程重点实验室, 北京 100094)

**摘要:** **目的** 通过建立人-舱外服上肢交互生物力学仿真模型计算穿着舱外服后航天员上肢关节力矩和肌肉力, 满足出舱活动风险评估的需求。**方法** 分别建立舱外服手臂的刚体运动学模型和关节阻尼力矩迟滞模型以描述舱外服关节的运动和力学特性。通过对舱外航天服肘部和人体肘部位置进行约束实现人体和舱外服手臂之间的运动学耦合, 利用虚拟反作用力元实现两者之间的动力学耦合, 在反向运动生物力学架构下建立一体化仿真模型。利用该模型对宇航员穿着加压、未加压舱外服和不穿着舱外服3种工况下肘弯曲/伸展进行仿真案例分析。**结果** 3种工况下肱二头肌的预测肌肉激活和积分肌电的相关性分别为0.86、0.71、0.65, 肱三头肌对应的相关性分别为0.75、0.61、0.60, 采用预测肌肉激活和积分肌电的一致性定性验证了模型的正确性, 利用舱外服肘关节阻尼力矩与人体肘关节肌肉承受力矩之间的一致性验证了模型的合理性。**结论** 该人服系统上肢交互生物力学仿真模型能有效计算航天员穿着舱外服后的上肢关节力矩和肌肉力, 且仿真结果和实验表明, 加压后舱外服关节阻尼力矩造成较大的人体关节力矩和肌肉负荷, 为航天员出舱活动中的体力负荷和骨肌风险评估提供方法学支撑。

**关键词:** 宇航员; 人服系统; 出舱活动; 肌肉激活; 上肢; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2015.06.540

## Biomechanical simulation model of upper limb interaction for human-spacesuit system

WANG Xiao-dong, WANG Chun-hui, WANG Zheng, LI Hao, LI Fan (*National Key Laboratory of Human Factors Engineering, China Astronaut Research and Training Center, Beijing 100094, China*)

**Abstract:** **Objective** To calculate joint torques and muscle forces of astronaut in spacesuit by establishing the biomechanical simulation model of upper limb interaction for human-spacesuit system, so as to assess the risk in extra-vehicular activities. **Methods** For spacesuit upper limb, the kinematic model of rigid body rotation and hysteresis model of joint resistant torque were built, respectively, to describe the kinematic and dynamic features of spacesuit joints. Kinematic coupling of human and spacesuit upper limb was fulfilled by restricting the displacement between spacesuit elbow and human elbow, and dynamic coupling was fulfilled by using virtual reaction element. An integrated simulation model was established in the framework of inverse sport biomechanics. With this model, the elbow flexion/extension of the astronaut under pressure-suited, unpressured-suited and unsuited condition was simulated for case study. **Results** The correlation coefficients of predicted muscle activation and iEMG for biceps under the three conditions were 0.86, 0.71 and 0.65, respectively; the corresponding correlation coefficients for triceps were 0.75, 0.61 and 0.60, respectively. The consistency between predicted muscle activations and surface electromyography collected in experiment qualitatively validated the accuracy of this model, and the consistency between human elbow joint torque working on muscles and spacesuit elbow joint resistant torque validated the rationality of the model. **Conclusions** The established biomechanical simulation model of upper limb in-

收稿日期:2015-03-01; 修回日期:2015-04-28

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2011CB711000), 中国航天医学工程预先研究项目(2011SY5405002), 人因工程重点实验室基金项目(HF2013-Z-B-02)。

通信作者:王春慧, 研究员, E-mail: chunhui\_89@163.com。

teraction for human-spacesuit system can effectively calculate the joint torque and muscle force of astronaut in spacesuit. The simulation and experiment results indicate that joint resistant torque in pressured spacesuit has great influence on human joint torque and muscle workload, which offers methodological support for physical workload and musculoskeletal risk evaluation for astronauts in extra-vehicular activity.

**Key words:** Astronaut; Human-spacesuit system; Extra-vehicular activity; Muscle activation; Upper limb; Biomechanics

随着我国空间站建设进入快速发展阶段,空间站组建、维修和科学实验等对于出舱活动的需求也会日益增加。为了实现更为有效的出舱活动工效分析和任务规划,需要评估穿着舱外服后航天员的体力负荷,对出舱活动流程的合理性和航天员的安全性进行验证<sup>[1]</sup>。传统方法采用模拟失重环境仿真的方式验证出舱活动的可实施性,但该方法的实验周期长、成本高、不确定性因素多。人服系统生物力学仿真引入舱外航天服的力学特性和人体的骨肌系统生理特性,采用运动学和动力学方法计算出舱活动典型动作航天员各关节的关节力矩、肌肉力和关节内部反作用力,并且适用于多种重力环境<sup>[2-3]</sup>。在方案设计阶段,该方法从航天员体力负荷的角度快速评估出舱活动的工效性,优化模拟失重环境实验验证流程,从而实现高效的任務规划。由于在空间站出舱活动中,航天员脚部通常处于约束状态,只能使用上肢进行操作,故本研究针对人服系统上肢进行生物力学仿真分析。

目前,该领域尚且缺乏系统性的研究。国内,有学者通过建立人服系统动力学仿真模型计算出舱活动中的关节力矩,但却没有建立有效的舱外航天服关节阻尼力矩迟滞模型,导致仿真结果不够真实<sup>[4-8]</sup>。国外,有学者使用内置舱外服测试机器人(robotic space suit tester, RSST)测量舱外航天服(extra-vehicular mobility unit, EMU)的关节力矩特性,建立关节阻尼力矩迟滞模型,能够实现更为准确的关节力矩计算<sup>[9-12]</sup>。然而,上述方法仍存在以下不足:①没有引入详细的人体骨肌模型;②并没有充分考虑舱外服的关节特性,包括关节位置、转动特性和约束特性。

随着人体测量技术和骨肌模型的发展,国内外已经出现了一些较为成熟的骨肌建模平台,如AnyBody、Simm和OpenSim等。因此,本研究在AnyBody骨肌建模平台的架构下,引入详细的人体

上肢骨肌特性,建立包含详细关节特性的舱外航天服上肢运动学模型和阻尼力矩迟滞模型,并实行人体和舱外服上肢的运动学和动力学耦合,以期为人服系统上肢交互生物力学仿真提供模型支撑。

## 1 上肢骨肌模型

### 1.1 模型组成

上肢骨肌模型由骨骼、关节、肌肉和韧带等构成。骨骼采用刚体表示,包含质量、质心和惯量等信息。骨骼通过关节相连接,模型采用欧拉角描述关节转动。肌肉模型负责提供关节弯曲的动力,采用Hill三元模型。韧带模型模拟人体韧带的支撑力。骨骼、关节、肌肉和韧带的位置和方向等基础参数均依据人体测量学和解剖学相关研究成果进行设置,该部分工作在AnyBody骨肌建模平台上完成。

### 1.2 肌肉募集

人体骨肌系统平衡外在载荷需要肌肉按照一定方式收缩,而骨肌系统的冗余性导致存在多种收缩方式。在反向动力学架构中,求解肌肉收缩力的过程被称为肌肉募集。它可表述为以下优化问题<sup>[13]</sup>:

$$G(f^{(M)}) = \max\left(\frac{f_i^{(M)}}{N_i}\right) \quad (1)$$

式中: $G$ 为目标函数,反映了人体运动神经系统收缩肌肉的募集策略; $f$ 为待求解参数,包括肌肉力 $f^{(M)}$ 和关节反作用力 $f^{(R)}$ ;  $N_i$ 为已知参数,表示肌肉的最大收缩能力; $f_i^{(M)}/N_i$ 表示肌肉的激活程度,通常肌肉激活程度越大,肌肉越容易疲劳。因此,式(1)中的目标函数旨在使最大的肌肉激活程度最小,从而在生理上推迟疲劳的产生。 $f$ 满足如下的约束:

$$Cf = d, \quad f = [f^{(M)T} f^{(R)T}]^T$$

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

式中: $d$ 包括外部载荷和惯性力; $C$ 为依据力臂和转动惯量等确定的参数矩阵。此外,由于肌肉只能产生拉力,故必须满足非负约束。

## 2 舱外航天服上肢模型

### 2.1 刚体运动学模型

舱外航天服上肢刚体运动学模型共有7个关节,利用欧拉角表示旋转<sup>[14]</sup>(见图1)。由于充压后舱外航天服各关节连接的节段均体现出很强的刚性,故各节段均设定为刚体。刚体由关节连接,而每个关节的位置都根据舱外航天服的实际关节位置进行设定。

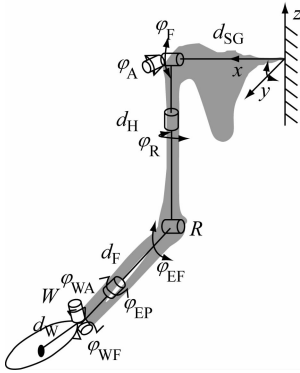


图1 舱外服上肢刚体运动学模型

Fig.1 Kinematic model of rigid upper limb for spacesuit

图1中 $d_{SC}$ 、 $d_H$ 、 $d_F$ 和 $d_W$ 分别为舱外服肩部中心到胸骨坐标系的距离、上臂长度、前臂长度和手腕到手部中心的距离。 $\varphi_F$ 、 $\varphi_A$ 和 $\varphi_R$ 分别为舱外服肩部前屈/后伸轴承、肩部内收/外展软关节和上臂内旋/外旋轴承; $\varphi_{EF}$ 、 $\varphi_{EP}$ 分别为肘弯曲软关节和前臂内旋/外旋软关节; $\varphi_{WF}$ 、 $\varphi_{WA}$ 分别为腕部两个软关节。手部中心在胸骨坐标系中的位移和姿态矩阵可表示为:

$$T_{hand} = G_{SC} G_{CH} G_{EB} G_W \quad (3)$$

式中: $G_{SC}$ 、 $G_{CH}$ 、 $G_{EB}$ 、 $G_W$ 分别为舱外服肩部中心相对胸骨坐标系的位移、肩关节的转动、肘关节的转动和腕关节的转动。

$$G_{SC} = \text{Transl}(x, d_{SC}) \quad (4)$$

$$G_{CH} = \text{Rot}(x, \varphi_F) \text{Rot}(y, \varphi_A) \text{Rot}(z, \varphi_R) \cdot \text{Transl}(z, d_H) \quad (5)$$

$$G_{EB} = \text{Rot}(x, \varphi_{EF}) \text{Rot}(z, \varphi_{EP}) \text{Transl}(z, d_F) \quad (6)$$

$$G_W = \text{Rot}(x, \varphi_{WF}) \text{Rot}(y, \varphi_{WA}) \text{Transl}(z, d_W) \quad (7)$$

### 2.2 关节阻尼力矩迟滞模型

上述运动学模型对舱外航天服各关节的位置、

转动方向和活动范围进行约束,却不包含航天员弯曲舱外航天服关节时需要克服的阻尼力矩,从而无法有效地计算真实的关节力矩和肌肉力。特别在微重力环境下,航天员出舱活动的疲劳主要由克服舱外航天服关节阻尼力矩所引起<sup>[15]</sup>。阻尼力矩是舱外航天服关节的固有特性,体现了关节转动或弯曲的阻力,而相对于轴承关节,软关节的阻尼力矩更大。软关节采用充压织物设计,它的阻尼力矩是体积效应、压力效应和织物摩擦拉伸等结构效应共同带来的,体现出极强的迟滞效应<sup>[16]</sup>。所谓迟滞效应,是指某一角度下的阻尼力矩不仅与当前关节角度有关,而且与历史运动角度有关。因此,为了提高仿真的精度,需要基于舱外航天服关节阻尼力矩数据库建立迟滞模型。

为了建立舱外服关节阻尼力矩数据库,采用自驱动等速测量方法,对舱外航天服肩部软关节和肘部软关节在内部有人工况和无人工况的阻尼力矩进行详细的测量<sup>[17]</sup>。在实施中采用BTE Primus模拟仿真训练系统的连续被动运动模式(continuous passive motion, CPM)开展测量,内部马达驱动舱外服关节等速弯曲,测量系统的力矩和角度传感器分别记录测得的阻尼力矩和角度数据。由于测得的力矩数据不含有方向性,故在后期处理中需要识别力矩值的正负。

在上述测量数据的基础上,采用基于径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络优化的Preisach迟滞模型实现了对阻尼力矩的预测。其中,Preisach迟滞模型由德国物理学家Preisach率先提出,俄国数学家Krasnoselskii对模型进行数学抽象,从而快速精确可解析地描述对应的迟滞特性<sup>[18]</sup>。而RBF神经网络优化方法的引入则有效提高了模型对于阻尼力矩高度非线性特性的预测能力。通过建立关节阻尼力矩迟滞模型,赋予上述关节在运动中的动力学特性。

## 3 人服系统耦合

### 3.1 运动学耦合

运动学耦合采用人体-外骨骼耦合建模的思路<sup>[19]</sup>,使用软关节和位置约束实现两者的连接。将舱外航天服上躯干采用固定关节(没有任何转动自由度)固定于全局坐标系,舱外航天服手臂与自身

上躯干连接,那么舱外航天服的手臂共有 7 个自由度。人体躯干的盆骨采用固定关节与舱外航天服躯干在盆骨位置连接。该关节采用软约束,从而使得运动学求解过程中允许人体躯干与舱外航天服躯干之间产生微小的移动。人体手臂与人体躯干连接,使得人体手臂同样具有 7 个自由度。利用运动捕获系统采集的运动学数据驱动人体手臂或舱外航天服手臂的 7 个自由度后,耦合模型还剩下 7 个自由度需要约束。通过软约束固定关节连接人体手部和航天舱外服手部,约束 6 个自由度。进一步对舱外航天服肘部和人体肘部位置进行单自由度软约束,从而实现人服系统上肢的运动学耦合。

上述软约束的采用是为了模拟皮肤与舱外服织物之间的柔性挤压,在运动学求解时允许软约束产生微小的误差。通过引入权重函数可设置软约束的约束严格程度,其中手部的约束程度要比肘部软约束严格,因为舱外航天服肘部可活动空间相对较大。

### 3.2 动力学耦合

虚拟反作用力元首先应用于预测步态过程中脚底的反作用力<sup>[20-21]</sup>。典型的虚拟反作用力元包括 1 个法向的压力和 4 个方向的摩擦力[见图 2(a)]。 $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向分别表示两个切线方向和一个法线方向。其中,相反方向的摩擦力是不能同时存在的。虚拟力元可被应用于预测舱外航天服和人体手臂之间的反作用力,当两者在某位置发生接触时,该位置的虚拟力元才处于激活状态。由于目前缺乏人体手臂和舱外服手臂之间的接触面信息,而且接触主要以压力为主,故对虚拟力元进行简化,仅包含舱外服手臂和人体手臂之间的压力。手臂椭圆柱体半径方向上的多个压力力元可简化为圆柱中心 4 个垂直方向上的压力力元[见图 2(b)]。

通过对有丰富舱外航天服穿着经验的专家进行访谈,确定穿着舱外服时手臂的挤压位置集中在上臂和前臂末端,靠近刚性轴承位置,故在上臂及前臂末端相应位置分别设置 4 个垂直方向上的虚拟力元。而人体手部和舱外航天服手部之间连接紧密,故在平移和转动 6 个自由度上均设置反作用力。

上述虚拟力元和反作用力均使用虚拟肌肉来实现。当上臂、前臂和手部的反作用力都存在时,反作用力存在一定冗余。虚拟肌肉的引入使得模型在反向动力学求解时,能够求解最优的反作用力组合,使

得人体骨肌模型的肌肉募集效应达到最优协同,推迟疲劳。此外,需要将虚拟肌肉的力量设置为足够大,这样目标函数才会主要考虑人体肌肉的激活程度,而不是虚拟肌肉的激活程度。整体上,肌肉募集优化求解体现为两个过程:① 寻找可产生最佳肌肉募集的反作用力组合;② 寻找该反作用力组合下的最佳肌肉募集。实际优化求解时,两个过程同步进行。

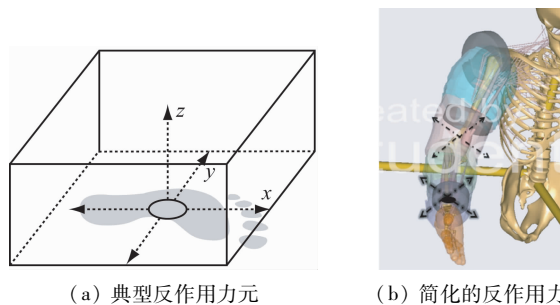


图2 基于虚拟肌肉的反作用力元

Fig.2 Reaction element based on virtual muscle

(a) Typical reaction element, (b) Simplified reaction

## 4 实验

### 4.1 典型任务动作

由于肘关节弯曲/伸展动作在大部分的航天典型任务中均会出现,故选取肘关节  $0^\circ \sim 100^\circ$  的单关节弯曲/伸展动作,角速度约为  $20^\circ/\text{s}$ 。为了减小重力的影响,肘关节弯曲/伸展均在肩部水平面内。

实验包括 3 种工况:① 穿着 40 kPa 加压舱外服 (pressure-suited); ② 穿着未加压舱外服 (unpressure-suited); ③ 不穿着舱外服 (unsuited)。

### 4.2 运动学数据采集

利用 NDI Optotrak 运动捕获系统捕获躯干和右臂的相对位置。其中,每个标志刚体上面固定 4 个标记点,然后将 3 个标志刚体固定于舱外航天服手臂上,3 个刚体共确定 9 个自由度,而手臂只有 7 个自由度,故手臂的运动可完全确定。

### 4.3 肌电采集

肌电信息反映了受试者在舱外服内肌肉用力的真实状态。利用 Noraxon 无线肌电采集系统采集肱二头肌长头和肱三头肌外侧头的表面肌电。在肌电采集过程中,由于舱外航天服对于发射器的蓝牙信

号有一定的屏蔽作用,故接收器位置必须尽可能地接近舱外服面窗。

### 5 模型仿真与实验验证结果

仿真选取的动作和工况与实验保持一致。首先将运动学数据作为模型输入对人体手臂长度和标记点位置进行优化,然后采用已建立的人服系统上肢交互生物力学仿真模型开展仿真。5.1和5.2节采用与该动作紧密相关的肘关节力矩和肱二头肌、肱三头肌的肌肉激活作为主要指标,通过对比3种工况,反映舱外服对人体骨肌系统的影响。由于实验条件的限制,无法采集人体和舱外服之间的接触力,故通过模型仿真与实验测得的肌电信号之间的相关性验证模型。

#### 5.1 不同着装工况下的关节力矩

不同着装工况下的关节力矩如图3所示。图中SIJT(spacesuit-imposed joint torque)表示人服系统肘关节的阻尼力矩,是模型的输入,作为舱外服手臂模型的关节特性参数;MBJT(muscle-bearing joint torque)表示人体肘关节通过肌肉收缩克服该阻尼力矩所承受的关节力矩,由肘关节肌肉的肌肉力与

对应的力臂相乘得到,是模型的输出。可以看出,舱外服加压后肘关节所承受的关节力矩显著增大并和人服系统的肘关节阻尼力矩基本一致,这也验证了模型计算的正确性。

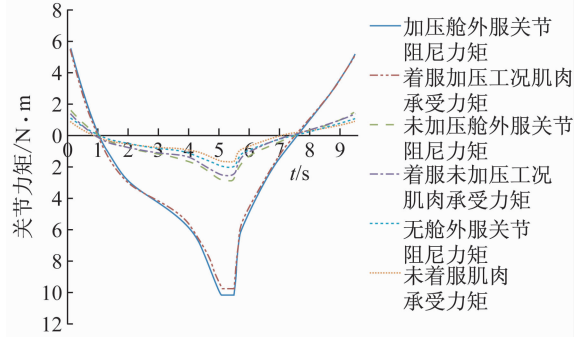
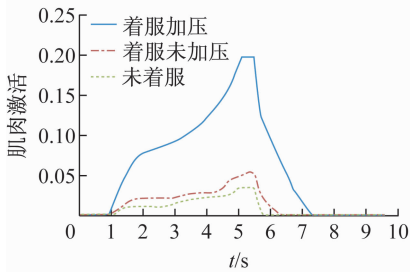


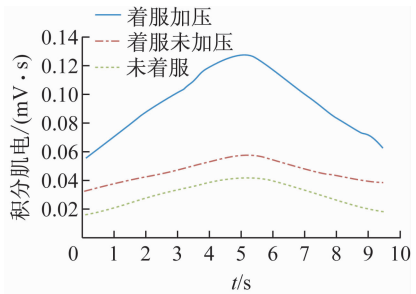
图3 不同工况下的关节力矩  
Fig. 3 Joint torque under different conditions

#### 5.2 不同着装工况下的肌肉活性

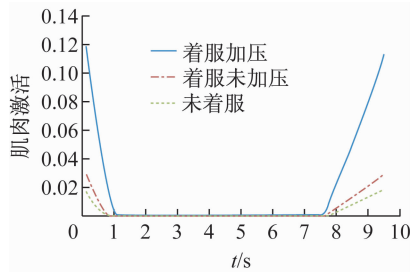
模型仿真的肌肉激活程度预测了肌肉在动作中的活性。采用积分肌电(iEMG)指标表征肌肉的实际活性。图4所示为肱二头肌、肱三头肌的预测激活程度和对应的实测积分肌电。由图可知,模型仿真结果与实际活性具有很好的一致性。



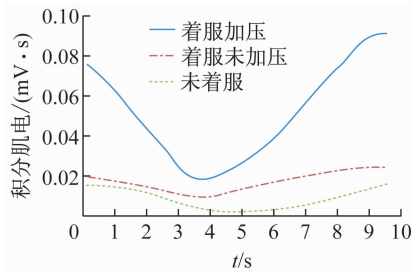
(a) 肱二头肌肌肉激活



(b) 肱二头肌积分肌电



(c) 肱三头肌肌肉激活



(d) 肱三头肌积分肌电

图4 模型预测的肌肉激活与实验测得的积分肌电对比图

Fig. 4 Muscle activation predicted by the model versus iEMG collected in the experiment (a) Muscle activation of biceps, (b) iEMG of biceps, (c) Muscle activation of triceps, (d) iEMG of triceps

由两块肌肉的模型仿真结果与实际活性之间的皮尔逊相关关系可知,3种工况下肱二头肌的预测肌肉激活和积分肌电的相关性分别为0.86、0.71、0.65,肱三头肌对应的相关性分别为0.75、0.61、0.60,两者相关程度较强,从而从肌肉活性的角度定性验证了模型的准确性(见表1)。

表1 模型仿真肌肉活性与积分肌电的相关性

Tab.1 Correlation of iEMG and predicted muscle activation by the model

皮尔逊相关系数	着装加压	着装未加压	未着装
肱二头肌	0.86 **	0.71 **	0.65 **
肱三头肌	0.75 **	0.61 **	0.60 **

注: \*\* 表示显著性水平小于0.01

### 5.3 约束程度对于微重力环境仿真结果的影响

为了分析约束程度的差别,共设置4种工况:局部约束(low-level constraint)、实际约束(realistic constraint)、过度约束(over constraint)和无舱外服(without spacesuit)。设置无舱外服工况作为对照,

并且在微重力环境下仿真,从而去除重力影响。其中,局部约束是指仅包含舱外服手套和人体手部之间的接触反力,该工况下人体通过手部的接触力弯曲舱外航天服肘关节;线段表示人体对舱外服的接触反力,手部的接触反力尽可能指向肩关节从而减小对肩关节影响[见图5(a)]。过度约束是指不仅包含舱外服手套和人体手部之间的接触反力,而且包含人体前臂、上臂与舱外服在多个方向上的接触反力,该约束情况下的部分反力在现实中是不能存在的[见图5(c)]。当手部产生指向肘关节的反力时,说明人体前臂有向肘关节方向运动的趋势,必然会对舱外服上臂的外侧产生挤压,故上臂会产生向外侧的反力而不是内侧的反力;根据反作用力之间的相互依赖关系,结合实际动作去除3个部位个别方向的接触力,使仿真更趋近真实情况,该工况为正常工况,在手部、前臂末端和上臂末端均有接触反力产生[见图5(b)]。上述3个工况下舱外服肘关节均设置了阻尼力矩特性,而无舱外服工况的肘关节不含有阻尼力矩。

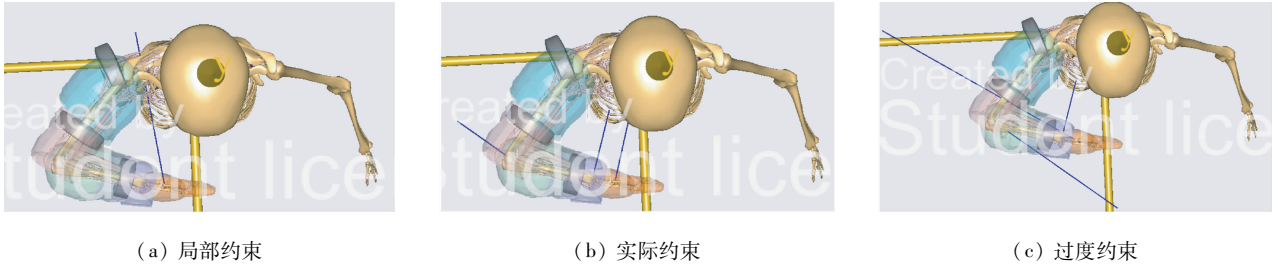


图5 不同约束程度下的仿真反作用力示意图

Fig.5 Schematic of reaction force in different constraint level (a) Low level constraint, (b) Realistic constraint, (c) Over constraint

图6所示为微重力环境不同约束程度下的最大肌肉激活和各关节力矩的仿真结果。结果表明,舱外服关节的阻尼力矩是导致微重力环境下肌肉激活和人体关节力矩的主要因素。此外,舱外服肘关节的阻尼力矩不仅会导致人体肘关节肌肉所承受力矩增大,而且会导致其他关节肌肉所承受力矩的增大(特别当舱外服不适体时),其中主要导致肘关节弯曲/伸展肌肉群承受力矩的增大。相对于实际工况,随着接触反力增多(其中部分不能同时存在),约束程度增高,平均最大肌肉激活出现明显下降,但肘关节肌肉承受的弯曲/伸展力矩没有出现下降,而且部分其他关节肌肉承受的力矩出现了小幅度上升。随

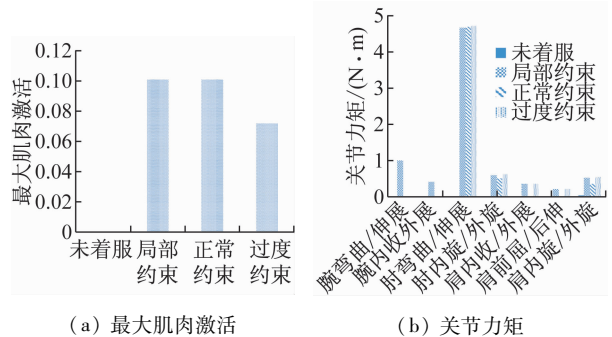


图6 约束程度对最大肌肉激活和各关节力矩的影响

Fig.6 Max muscle activation and joint torques in different constraint levels (a) Maximum muscle activation, (b) Joint torque

着接触位置的减少,约束接触力减少,约束程度降低,平均最大肌肉激活没有出现明显升高,肘关节弯曲/伸展力矩没有增大,但腕弯曲/伸展和腕内收/外展两个关节肌肉所需承受的力矩却出现了明显上升。

## 6 分析与讨论

由仿真和实验结果可以看出,当肘关节在水平面内弯曲/伸展时,由于重力对肘关节影响较小,着未加压舱外服和不穿着舱外服的关节力矩和肌肉激活差别都不是很大。舱外服加压后,关节阻尼力矩显著增大,导致人体关节和肌肉承受的力矩增大,肌肉激活显著增强,从而加速疲劳的产生。并且舱外服各关节的阻尼力矩主要作用于人体的对应关节,人体对应关节肌肉所承受的关节力矩与该阻尼力矩有很好的的一致性。

同时,约束程度会对仿真结果产生一定的影响。约束程度反映了人体和舱外服之间接触力分布的情况。相对于实际情况,随着约束程度的增高,最大肌肉激活减小,但其他关节承受的力矩会增加;反之,最大肌肉激活增加,而且其他关节承受的力矩也会增加。

## 7 结论

本研究所建立的人服系统上肢交互生物力学仿真模型适用于分析人体手臂与舱外服手臂之间的真实相互作用力关系,能够预测着舱外服后人体骨肌系统的关节力矩和肌肉力。

针对具体动作,建模中应当注意反作用力的相互依赖关系,选取最合理的反作用力组合,从而使仿真工况最大程度地接近实际工况。在未来的建模工作中,通过对人体手臂皮肤和舱外服手臂的接触区域进行详细的几何定义,从而在两者相互接触挤压时才将虚拟力元置为激活状态,并结合实际情况考虑是否使用摩擦力力元,可实现更精细的相互作用预测。

模型主要基于肌肉力进行定性验证,并通过舱外服肘关节阻尼输入和人体肘关节肌肉所承受力矩的一致性验证了模型。在后续的验证工作中,可以测量人体手臂和服装之间的接触力,从约束反力的角度定量验证模型。

## 参考文献:

- [1] Frazer A, Pitts B, Hoffman J, *et al.* Astronaut performance: Implications for future space suit design [C]// Proceedings of 34th COSPAR Scientific Assembly. Houston: [s. n.], 2002.
- [2] Mukherjee G, Coombs MT, Brown B, *et al.* Method for estimating muscle forces during simulated space intravehicular and extravehicular lifting tasks [C]// Proceedings of 43rd International Conference on Environmental Systems. Colorado: SAE, 2013.
- [3] 谈诚,夏永明,曹毅,等. 模拟不同重力环境下步态运动的足底受力分析[J]. 医用生物力学, 2014, 29(3): 200-205.  
Tan C, Xia YM, Cao Y, *et al.* Analysis on plantar force parameters of gait under different simulated gravities [J]. J Med Biomech, 2014, 29(3): 200-205.
- [4] 李静文,丁立,杨爱萍. 航天员舱外活动生物力学仿真及验证[J]. 医用生物力学, 2012, 27(4): 438-443.  
Li JW, Ding L, Yang AP. Biomechanical simulation and verification of astronaut extravehicular activities [J]. J Med Biomech, 2012, 27(4): 438-443.
- [5] 杨爱萍,杨春信. 基于 Kane 方法的宇航员舱外活动仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(20): 5646-5650.
- [6] 杨锋,袁修干. 航天员舱外活动计算机动态仿真[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(2): 216-218.
- [7] 杨锋,李银霞,高峰,等. 基于力矩比优化的航天员舱外活动仿真[J]. 航空学报, 2004, 25(5): 433-437.
- [8] 杨锋,袁修干. 舱外航天服动力学模型[J]. 航天医学与医学工程, 2002, 15(6): 453-454.
- [9] Schmidt PB, Newman DJ, Hodgson E. Modeling space suit mobility: Applications to design and operations [C]// Proceedings of International Conference on Environmental Systems. Orlando: SAE, 2000.
- [10] Newman D, Schmidt P, Rahn D. Modeling the Extravehicular Mobility Unit (EMU) space suit: Physiological implications for extravehicular activity (EVA) [C]// Proceedings of International Conference on Environmental Systems. Toulouse: SAE, 2000.
- [11] Schmidt PB. An investigation of space suit mobility with applications to EVA operations [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [12] Frazer AL. Modeling human-spacesuit interactions [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [13] Damsgaard M, Rasmussen J, Christensen ST, *et al.* Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System [J]. Simul Model Pract The, 2006, 14(8): 1100-1111.