

# 防护服活动性及其对职业骨肌损伤影响的研究进展

王诗潭<sup>a</sup>, 王云仪<sup>a, b, c</sup>

( 东华大学 a. 服装与艺术设计学院; b. 同济大学上海国际设计创新研究院; c. 现代服装设计与技术教育部重点实验室, 上海 200051)

**摘要:** 极端环境下穿着的防护服在保护作业人员免受环境因素的威胁时, 也对着装人体的活动性造成了负面影响, 如肢体活动范围下降、任务完成时间增加、步态失衡等。为此, 文章回顾了国内外有关防护服活动性测评研究的发展历程, 从运动学活动表象和动力学活动机制两个层面探讨了防护服活动性的测评方法、适用范围和研究不足。最后, 总结了着装人体活动能力与职业骨骼肌肉损伤风险之间的关系, 包括损伤危险因素、表征指标及评估方法。未来, 利用三维人体扫描技术从服装-人体姿态空间关系的角度, 实现快速便捷的活动性测评; 利用计算机建模仿真技术构建着装人体骨肌模型并获取动力学参数, 实现全面活动性测评和骨肌损伤风险评估将成为新的发展方向。

**关键词:** 防护服; 关节活动度; 步态测试; 操作灵活性; 骨骼肌肉损伤

中图分类号: TS941.16 文献标志码: A 文章编号: 1001-7003(2018)08-0052-08 引用页码: 081110

## Research progress on protective clothing mobility and its impact on musculoskeletal injury

WANG Shitan<sup>a</sup>, WANG Yunyi<sup>a, b, c</sup>

( a. College of Apparel and Art Design; b. Tongji University Shanghai Institute of Design and Innovation; c. Key Laboratory of Clothing Design & Technology Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 200051, China)

**Abstract:** Protective clothing in extreme environments protects wearers from the threat of ambient factors, but also negatively affects the mobility of the wearers, such as decrease in the range of motion, increase of task completion time, and gait unbalance. Therefore, by reviewing the research progress of the protective clothing mobility at home and abroad, the method of mobility test, scope of application and research deficiency are discussed from motion representation of kinematics and motion mechanism of dynamics. At last, the relationship between the human mobility and the occupational musculoskeletal injury was summarized, including risk factors, characterization indexes and assessment methods. It will become a new development direction to evaluate the protective clothing mobility from clothing-body posture space relation by using 3D human body scanning technology, to acquire kinetics parameters and to evaluate musculoskeletal injury by computer modeling & simulation technology.

**Key words:** protective clothing; range of motion(ROM); gait test; operation flexibility test; musculoskeletal injury

防护服的活动性是服装能够允许人体自由运动、减少束缚、根据需保持身体形状的性能。消防服、航天服、防化服等功能防护服装为保护作业人员

免受环境因素的威胁, 多选用厚重的面料, 多层组合的面料配置模式, 全方位包覆的连体结构并配备刚性防护装备。然而这种防护性的提升也相应地降低了防护服的活动性, 增加作业人员的不良姿势和用力程度, 产生职业性骨骼肌肉损伤。例如, 最新研发的防弹衣<sup>[1]</sup>, 使用多层非织造复合材料提供了很好的防弹性能, 同时也增加了军人的身体负重和覆盖率, 极大地限制了军人活动范围和降低了作战能力。重达 15~26 kg 的消防服及装备不仅会束缚消防员活动增加肌肉用力, 还会扰乱步态稳定增加滑跌损

收稿日期: 2017-07-03; 修回日期: 2018-06-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51576038); 中央高校基本科研业务费专项基金(2232018G-08)

作者简介: 王诗潭(1992-), 女, 博士研究生, 研究方向为服装舒适性与功能服装。通信作者: 王云仪, 教授, wangyunyi@dh.edu.cn。

伤几率,NFPA<sup>[2]</sup>有关消防员受伤类型的统计结果显示,拉伤、扭伤和肌肉疼痛是主要受伤类型,比例远超过烧伤。NASA<sup>[3]</sup>的统计数据也表明,航天服肩部的刚性轴承结构和质量已成为航天员肩部损伤的主要原因,其中64%的航天员穿着航天服训练时经历过肩部疼痛。因此,科学评价防护服的活动性并建立其与骨骼肌肉损伤风险之间的关系,有助于个体防护装备的研发和改进、职业损伤的预防及日常训练的科学化。

防护服活动性的研究起源于20世纪50年代,有学者<sup>[4]</sup>发现厚重多层的军用防寒服会降低军人的肢体活动性并增加代谢水平。如何量化着装人体活动性的下降程度成为早期的研究重点。在着装人体活动性量化的基础上,相关学者一方面对比人体着装实验结果,提取影响因素进行防护服的优化设计;另一方面,不断探索更加精确和便捷的测试方法和评价指标,以建立统一的防护服活动性测评体系,这也是目前国内外研究的热点。近两年,有学者结合临床医学和职业卫生学的知识,利用活动性测评参数研究军人、消防员等特种作业人员的职业性骨骼肌

肉损伤风险。

本文从防护服活动性的测评方法、着装人体活动性与职业性骨骼肌肉损伤关系两个方面阐述该领域的研究进展,重点概述并对比各类测评方法,最后展望了防护服活动性研究的趋势。

## 1 防护服活动性的测评

防护服活动性测评即提取防护服和装备影响人体活动性的因素,并判断这些因素是否能够满足人体活动的力学需求。目前测评主要是引用运动生物力学的手段,利用运动学参数描述人体运动的规律,判断着装者穿着服装后整体/局部的可活动性;动力学参数解释人体运动规律的机制,从骨骼、肌肉、关节的角度探讨着装人体活动表象的形成原理。

### 1.1 防护服活动性的影响因素

活动性影响因素的正确识别是进行防护服优化的基础,如随着服装层数或质量的增加,活动性会相应下降,而质量分布会影响活动性下降的程度。图1为目前研究防护服活动性的影响因素。

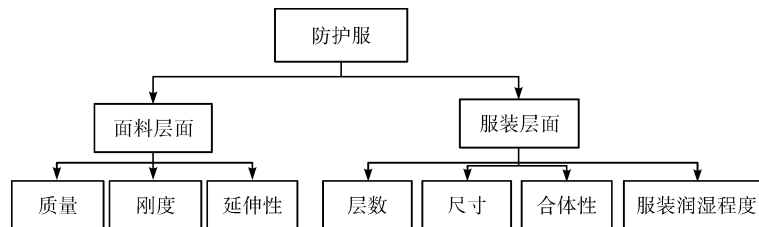


图1 防护服活动性的影响因素

Fig. 1 The influencing factors of protective clothing mobility

目前有关防护服影响因素的研究多是探讨面料的质量、刚度、弹性,以及服装尺寸、合体性、局部结构设计等对受试者活动能力的影响。Adams<sup>[4]</sup>、Dorman<sup>[5]</sup>、Goldman<sup>[6]</sup>分别研究消防服质量、刚度、层数因素对特定关节活动度和能量消耗的影响,总结得出消防服的质量会增加消防员作业时的负载,束缚消防员肩部的屈曲,肘部、臀部、膝和肩部的横向伸展运动,还会导致重心发生偏离,降低腿部活动效率,增加跌倒风险。而关节活动部位的结构优化设计,如肩部造型、后背褶裥量、躯干长<sup>[7]</sup>等因素也会对肢体活动角度和可及距离造成显著影响。

但目前研究仅停留在针对某一独立因素影响的量化,着装人体是一个整体,未来有必要探讨服装各因素的累积效应并对各因素的影响权重进行排序,为更精确的服装优化设计提供参考。

### 1.2 着装人体运动学层面的测评

着装人体运动学层面的测评主要包括肢体活动能力测评和平衡稳定性测评两部分,分别从关节活动范围、重心位置和步态时空参数的角度直接表征防护服的活动性,这是目前最常用的活动性测评方法。

#### 1.2.1 基于关节活动范围的肢体活动能力测试

肢体活动能力测评早期用于判断临床病人的康复效果<sup>[8]</sup>,通过测量各个关节的活动角度(range of motion, ROM),分析病人的肢体动作和步态,从而完善治疗方案。1957年,Nicoloff<sup>[9]</sup>最早将肢体活动能力测试用于防护服活动性的评价中,通过对比着装前后人体完成相应动作时的ROM判断防护服的活动性。目前,肢体活动能力的测试方法及评价指标逐步向准确化和全面化方向发展,已成为评价油罐清洁服<sup>[10]</sup>、高温防护服<sup>[11]</sup>、消防服<sup>[12]</sup>、连体作业

服<sup>[13]</sup>等功能防护服活动性的首要测评手段。

### 1.2.1.1 测试方法的准确化与三维化

ROM测试方法的发展经历了一个逐渐准确化和三维化的过程,从简单的手动测量法到二维摄影测量法再到目前使用的三维动作捕捉法。

早期ROM测试通常使用测角仪,测量人体在静止姿态下某一特定关节与铅垂方向的最大角度差。截至目前,测角仪由于简单易行仍是静态人体关节活动角度测量的重要手段,但其准确度和可靠性存在一些争议。Gajdosik<sup>[14]</sup>针对不同测角仪所测得的肘部ROM数据进行了可靠性分析,得出数据存在显著差异,测量工具本身已构成影响ROM的因素。人工关节节点定位困难和主观读数的差异性造成误差的主要原因,因此对于ROM的测量需要自动化的手段。

Huck<sup>[15]</sup>在草场救火服活动性的评价中采取连续拍照法进行肢体动作捕捉,并输入Hijaak计算机软件中进行图像自动处理,从而计算出关节活动角度。至此,自动化的图像捕捉和数据处理技术进入到ROM测试领域,极大地减少了人工测量误差。但对于厚重服装,如消防服、航天服等,通过拍摄的照片很难定位关节点,并且受试者在完成某一动作时都是快速驱动关节,无法捕捉清晰的图像,这都会对后期图像识别和关节角度计算产生影响。

随着计算机辅助动作分析系统的出现,定量分析人体活动的方式又得到了扩展。近些年,一些国外学者<sup>[16-48]</sup>将三维动作捕捉技术应用到特种服装和装备的活动性测试中,通过摄像机或惯性位置传感器捕捉人体关节部位的标记点,构建人体运动的生物力学模型,并使用专业运动学软件计算人体关节随时间运动的运动学数据,如各方向的角位移及角速度等。与手动测角仪和二维拍照法相比,三维动作捕捉仪一方面可实现同时测量任何状态下关节在3个维度的活动角度,另一方面能以一定的时间间隔进行连续测量,收集完整的复杂关节耦合运动的数据。图2为人体手臂各关节三个维度角度测试示意图。

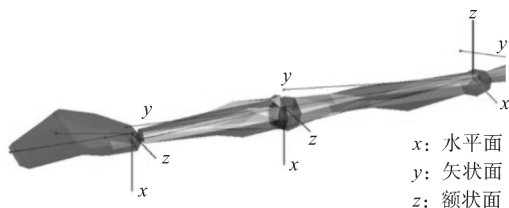


图2 人体手臂各关节三维角度测试示意  
Fig.2 3D angle test of arm joints

2008年,NASA<sup>[18]</sup>首次将光学动作捕捉系统Vicon 612/SV用于航天服活动性的测试中,提出航天服整体活动性的评价需要基于连续动作的多关节活动数据,图3为肘关节矢状面内随时间运动的角度数据<sup>[19]</sup>。目前Vicon动作捕捉系统已成为NASA的主要测试系统,测试结果用于探月车的设计、航天服活动性的评价。

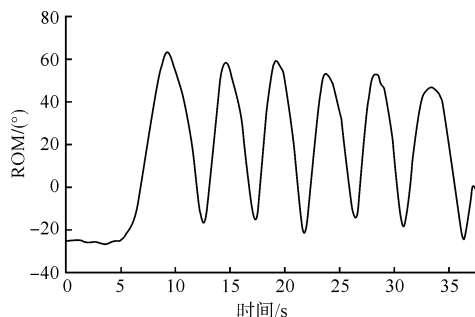


图3 肘关节矢状面内随时间运动的角度数据  
Fig.3 Angle data of elbow joint movements at sagittal plane with time

Park等<sup>[19]</sup>将三维动作捕捉系统的应用范围扩展到防弹衣和消防装备的活动性评价中,并挖掘了动作捕捉系统的应用深度。利用三维动作捕捉仪可测关节不同截面运动学参数的优势,测量了佩戴呼吸器后人体下肢各关节在矢状面及水平面的ROM变化,将对人体活动影响显著的关节角度细化到水平面的范围。随后,Park等<sup>[20]</sup>又将动作捕捉系统与肌电仪(electromyography,EMG)、脚底压力测试系统结合,同步捕捉负重人体运动学参数与动力学参数并尝试建立两者之间关系,进而预测防弹衣对军人活动能力和肌肉疲劳的影响。

### 1.2.1.2 评价指标的精确化和全面化

肢体活动能力的评价指标一般为静态动作时主要关节部位(肩、肘、髋)的ROM。早期由于静态测角仪的限制,ROM的定义局限于“两个相邻身体节段最大可能移动的角位移总量”<sup>[21]</sup>,图4为踝关节最大活动角度<sup>[13]</sup>。

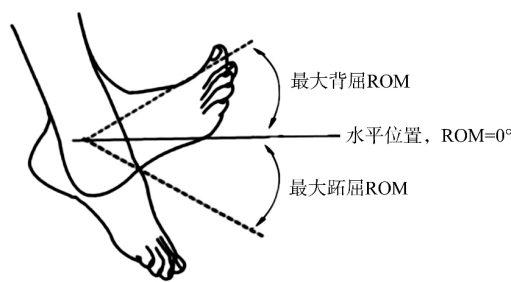


图4 踝关节最大活动角度示意  
Fig.4 Maximum ROM of the ankle

然而,人体运动是多个关节共同作用的结果,并非每一个关节都需达到最大角度,使用最大关节活动角度作为活动性的评价指标会高估防护服的实际需求,还会造成不必要的耗材浪费。随着三维动作捕捉系统的出现,动态 ROM 数据的收集成为可能。目前,防护服活动性的评价指标已从关节最大活动角度向关节舒适活动角度优化,即关节在完成某一连续动作时的平均活动角度。

NASA<sup>[22]</sup>对比了受试者完成 16 个静止动作时的最大关节角度和 49 个连续动作时的舒适关节活动角度。结果显示,同一关节在完成单一分解动作和连续整体动作时的 ROM 有显著性差异,舒适活动角度更符合人体的真实活动状态。

此外,ROM 是多种元素组合的系统概念,除了与关节活动角度相关外,还涉及到肢体可及距离,两者互相补充,全面评价人体活动。关节活动角度可准确表征某一平面内的肢体活动,当涉及多平面内的复杂关节活动时,可使用肢体可及距离进行补充。肢体可及距离是指人体在工作空间内自然状态可以触及的距离<sup>[23]</sup>,如坐姿、站姿状态下手臂抬举过头的距离。目前,肢体可及距离多应用于操作仪器或辅助装备的设计与工效性能评价中,通过判断作业者进行控制的部件是否在可达域范围内对产品设计进行评价,如 NASA STD 3000 标准中提供了上肢可达域范围的标准数据,这为航天服活动性的评价及航天器的设计提供了参考。

### 1.2.2 基于重心位置和步态参数的平衡稳定性测试

平衡稳定性测试主要研究人体负重作业时的身体平衡性和步态稳定性,并探讨其与着装者摔倒、滑

倒产生的足部损伤风险间的关系。如通过研究军人背负武器长途行军、消防员背负呼吸器救援,以及户外运动人员背负装备徒步时的重心变化轨迹、步态模式和肌肉活动等,以达到优化装备及负重分布、降低骨肌损伤风险的目的。

人体的平衡能力由中枢神经系统控制<sup>[24]</sup>,当出现危险因素时该系统整合视觉、躯体和前庭系统的感官输入,表现出一系列行走模式的变化及多关节的协调运动,这皆是平衡控制和步态调整的代偿反应。由于这些补偿措施是本能机械的,可通过步态分析对人体的平衡稳定性进行评价。

初期为简化运算,平衡稳定性测评仅关注人体负重站立状态时的重心偏移或行走过程中单支撑阶段矢状面的屈伸运动,这种简化忽略了负重时长和冠状面内的内(外)翻和水平面的旋内(外),易造成步态稳定的误判<sup>[25]</sup>。

随着研究的深入,步态稳定性评价指标从只考虑重力和惯性力的 ROM 参数向步态时空参数、足部动力学参数优化。Park 等<sup>[20]</sup>使用足底压力传感器和肌电仪收集了足底压力、步行周期、髌关节侧向移动距离和肌肉的肌电振幅峰值等步态参数,研究了防弹衣的质量大小和分布对军人步态模式、腿部肌肉功能的影响。

目前,平衡稳定性的测评主要采用三维动作捕捉系统、测力台、足底压力传感器、EMG 等,收集人体重心的位置和变化轨迹,臀部、膝盖、脚踝等下肢关节活动角度及步长、步速、肌肉力等运动学参数、动力学参数(表 1),定量评价下肢运动的平衡与协调性。

表 1 平衡稳定性的测评内容

Tab. 1 Assessment content of equilibrium stability

测评内容		原因
空间参数	步长、步幅、步宽	步长、步频和步速是步态分析中常用的三种指标,是有关步态生物力学参数的基础
时间参数	步频、步速、步行周期和时间	
运动学参数	关节角度变化、位移、速度、加速度	定量研究躯干和关节的运动角度,可以客观定位
	时间-空间参数	关节的障碍部位和程度
	人体重心位置的变化规律 骨盆位置的变化规律	重心与骨盆位置是身体平衡的关键
动力学参数	足-地接触力(地面反作用力)	决定了足-地间的摩擦系数
	表面肌电	解释了肌肉活动的状态
	关节力、力矩、转动惯量	
	足底压力中心	足部受力分布

整体来看,平衡稳定性的研究处于探索阶段,其测试方法和评价指标已逐步从运动学向动力学层面丰富,测量得到的下肢动力学参数为足部骨肌损伤风险评估和鞋子、装备及负重设计提供了数据依据。但还未建立统一的测试方法和评价指标,未来的研究需深入考虑以下两个问题:一是如何结合生物力学理论,建立通用的步态稳定性评价指标,并建立其与足部损伤发病间剂量-反应的量化关系;二是如何更真实地实现平衡稳定性测评,如模拟真实操作任务,考虑火场等实际路面环境等。

### 1.3 着装人体动力学层面的测评

运动学层面的测评所获取的是人体活动的表象参数,一方面无法可视化地观察人体在完成动态动作过程中服装与运动人体的作用关系,另一方面所得结果是多因素综合作用后的最终表现,无法探讨造成人体活动束缚的动力学机制。

运动生物力学建模仿真技术综合了人体测量学、骨骼肌肉系统解剖学、多刚体系统动力学和计算机仿真学的集成技术,为人-机(服装和装备)的交互关系研究提供了新的思路。着装人体运动生物力学的建模仿真是运动生物力学建模仿真技术的扩展应用,主要用于获取物理测试仪器和数学模型无法得到的着装人体骨骼、肌肉、关节的受力、变形,以及肌腱的弹性性能、抗结肌的作用等动力学参数,这是分析人体活动行为和评估骨肌损伤的直接指标。此外,使用虚拟人体和虚拟服装取代真实人体和真实服装进行有创实验,有助于评估一些制作成本昂贵且易对人体造成骨肌损伤的特种服装。

现阶段,已有一系列商业化的人体骨肌系统生物力学建模平台,如 ANYBODY 平台采用逆向运动学架构,将运动学数据作为边界条件,求解运动时人体肌肉力的募集、关节反应力、韧带负荷等动力学参数。但由于柔性服装的多变性和多维度性,难以准确地对其约束和驱动,目前还没实现柔性服装的参数化建模及其与骨肌运动模型的耦合,只能模拟一些刚性装备、高弹服装或半刚半柔的服装对人体活动的影响,如鞋垫的刚度对足内/外侧纵弓程度的影响<sup>[26]</sup>、高弹泳衣的拉伸力对肌肉发力作用的影响<sup>[27]</sup>、军盔参数对军人头颈部肌肉活动的影响<sup>[28]</sup>、舱外航天服手臂活动范围对肩部肌肉激活的影响<sup>[29]</sup>等。但该方法所提供的技术支持,是未来进行精确化测评特种防护服活动性及评估着装人体骨肌损伤

的方向。

## 2 基于着装人体活动性的职业骨肌损伤风险研究

美国 NIOSH<sup>[30]</sup> 报告显示职业骨骼肌肉损伤(occupational musculoskeletal injuries, OMSI) 的患病率高达 20%~90%,已成为各国劳动力和 GDP 损失的重要原因,其中重体力作业负荷、外部质量负荷、姿势负荷、力量负荷等危险因素与损伤发病率之间存在剂量-效应的关系。

防护服和装备作为一种外部负载,不仅会增加着装者的肌肉用力程度和能量消耗,还会扰乱关节活动和身体的平衡稳定性,增加更多强迫性姿势,这些都是造成骨肌损伤的原因。而骨肌损伤的发生,又不可避免地会产生肌肉系统的疼痛、肿胀,反过来降低人体活动能力。由此可得出,着装人体的活动性描述了人体动作/姿势的运动学表象及肌肉活动的动力学机制,不仅是造成骨肌损伤的原因还是损伤作用效果的表现,可将其作为骨肌损伤研究的切入点。

目前,职业卫生学领域研发了一系列基于生物力学指标的骨骼肌肉损伤评估方法(表2),一是通过现场观察、录像观察或实验室测试判断活动动作/姿势是否存在暴露危险;二是通过肌电测试或建模仿真获取不同危险因素下肌肉激活(肌氧饱和度)和肌肉力进行肌肉负荷和疲劳判断。这种基于生物力学指标的损伤评估方法,将过去仅停留在人体活动分析层面的研究落脚到职业骨肌损伤评估领域,构建了着装人体活动性测评与职业骨肌损伤评估之间的关系。

Cikajlo 等<sup>[31]</sup>测试了消防胶靴的活动舒适性,得出胶靴的质量和刚度会增加踝和跖骨球关节额状面上的侧向位移,有造成脚踝极大扭伤的危险。Park 等<sup>[20]</sup>研究了防弹衣的质量大小和分布对军人下肢活动及损伤的影响,结果表明负重所导致的身体前倾及盆骨前倾会增加背部骨骼肌肉受伤的风险。此外,左右不对称的负重分布(如单侧负重)也是增加慢性腰痛等疾病的重要因素。Son 等<sup>[32]</sup>发现消防裤会对抬腿和内收动作造成约束,增加半腱肌的最大收缩率(maximum voluntary contraction, MVC),加速肌肉疲劳。

表 2 骨骼肌肉损伤评估方法对比  
Tab.2 Comparison of musculoskeletal injury assessment methods

评估方法	代表性的测试手段/仪器	优点	不足	
运动学表象层面的评估	观察法	快速暴露检查法; NOISH 提举公式法; 快速上肢/全身评估	在不打扰作业人员正常作业情况下的现场评估	基于专家法的主观评判不够客观且不适用于下肢损伤评估
	实验室测试法	三轴测角仪; 动作捕捉系统	能提供准确且定量的损伤表征参数 在机制探讨上有很大的优势	实验室模拟实验,非真实作业环境
动力学机制层面的评估	表面肌电法	EMG	获取表面肌电的频域指标(中位频率和平均频率)及时域指标(振幅或积分肌电)	只能获取表层肌肉特性、测试的肌肉数量有限、无法获得关节负荷力
	运动生物力学建模仿真法	ANYBODY; Opensim	获取物理测试仪器无法得到的动力学参数; 求解过程和结果的实时可视化	服装模型需简化; 成本高

对比两种骨骼肌肉损伤的评估方法(图 5),得出基于人体活动姿势的损伤评估是通过获得人体活动表象层面的运动学指标,判断人体活动是否在安全范围内进而预判是否会发生损伤。这种指标比较容易进行

观察、测量和计算,但主观性强、评价不准确,无法使用真人实验达到损伤程度,难以从本质上对损伤机制进行分析 and 理解。研究表明<sup>[33]</sup>,当脊椎矢状面前屈角度超过 24.5°,下背痛的发生率从 5.8% 增加到 25%。

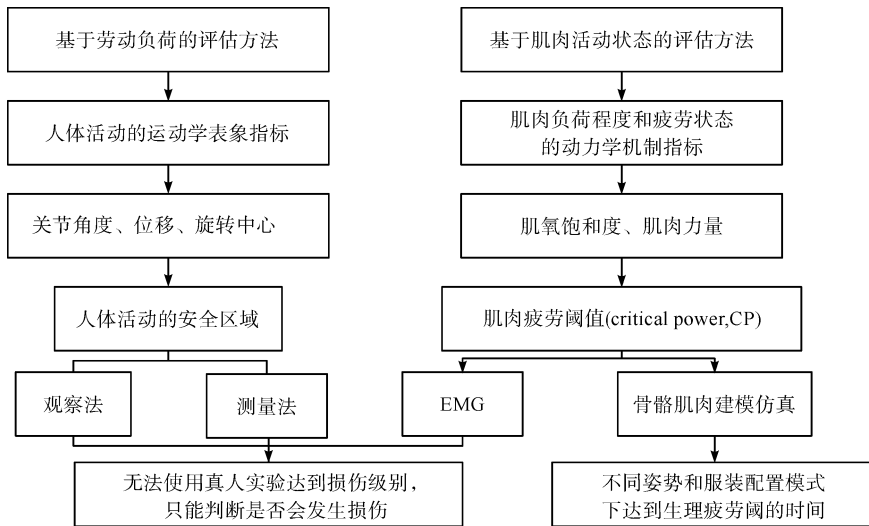


图 5 骨肌损伤的评估方法

Fig. 5 Assessment methods of musculoskeletal injury

基于神经肌肉活动状态的评估是从内部损伤机制层面获取肌肉和关节负荷程度,尤其是使用建模仿真所得的动力学指标可量化到具体某一节段的损伤程度及达到肌肉疲劳阈值的时间,更全面深入地研究损伤的生物力学原理及人体活动与损伤间的关系。Chaffin<sup>[34]</sup>构建了三维静/动态重物提升模型,得出当 L5/S1 椎间盘上的压力超过 3 400 N 下背痛的发病率就会明显升高。

两种骨肌损伤评估方法与活动性测评的手段一一对应,这种结合生物力学和职业卫生学理论的研究,可构建起包括危险因素识别、活动性测评和基于

活动性测评结果的骨肌损伤评估的新型研究体系。将防护服活动性的评价提升到更为全面的分析层次,如将骨肌损伤级别作为评价防护服活动性的评价标准,从减少作业人员职业骨肌损伤的角度为军服、航天服、消防服等个体防护装备的设计提供科学合理的指导。

但目前研究仍存在一些问题和不足,如损伤危险因素分类太粗,尤其是没有系统地考虑防护服和装备层面的影响、损伤实验为有创实验,无法使用活体达到损伤级别;目前常用的运动学层面的损伤表征因子主观性强,评价不准确、未建立损伤表征因子

同发病率定量联系等。今后的研究应重点关注以下几方面:1) 针对不同职业类型的骨肌损伤风险,针对性地确定危险因素与损伤表征因子,加强防护服和装备对人体负荷量、负荷时间及负荷类型等影响的量化研究;2) 建立着装运动人体的骨骼肌肉仿真模型,获取人体肌肉、关节、骨骼、肌腱等受力变化,从损伤形成机制层面建立损伤表征因子与损伤发病之间的量化关系。

### 3 结 论

目前防护服活动性测评主要通过人体着装实验,使用物理仪器获得相关生物力学参数和生理负荷参数,并开始尝试探讨着装人体活动能力与职业骨肌损伤风险间的关系。但目前的活动性测评方法,一方面无法探究着装人体活动受限的过程和原理,另一方面存在受试者自身体质干扰、输出参数单一、高强度活动无法真实还原的问题。未来可探索以下测评方法:

1) 基于服装-人体姿态空间关系的防护服活动性评价。人体在完成相应动作时,身体的外形和尺寸会形成一定的姿态空间。服装包覆在人体上也会随着人体运动形成相应的服装姿态空间,其与人体姿态空间的差值即衣下间隙量。当服装形成的姿态空间能够满足人体运动时的各种姿态空间时,即可认为服装满足人体的活动性。三维人体扫描技术结合逆向工程软件,具有可视化和量化的优势,可通过对齐裸态人体扫描图像和着装人体扫描图像,提取多种二维、三维衣下间隙参数,实现定性和定量的活动性测评。随着可测多样化姿态的三维人体扫描仪的应用,这将成为未来防护服活动性测评发展的必然趋势。

2) 着装运动人体骨骼肌肉模型的构建。如今,应用计算机建模仿真技术进行服装性能测评已成为一种研究趋势,如利用三维虚拟试衣技术评价服装的合体性。而使用建模仿真技术进行全面活动性测评主要解决两个问题:一是人体运动模型与虚拟服装模型的建立;二是人体运动模型与虚拟服装模型的耦合,即服装与人体作用关系的量化。目前,应用ANYBODY等建模软件构建骨肌模型的技术已相当成熟,但对于虚拟服装模型的建立只能采用几何建模的方法。未来,如何构建参数化的柔性服装模型并实现服装模型与人体骨肌模型的动力学耦合是探

索新型活动性测评手段,并从动力学机制层面进行骨肌损伤评估的方向。

#### 参考文献:

- [1] PARK H, BRANSON D. Impact of ballistic body armour and load carriage on walking patterns and perceived comfort [J]. *Ergonomics*, 2013, 56(7): 1167-1179.
- [2] JAHNKE S A, POSTON W S. Injury among a population based sample of career firefighters in the central USA [J]. *Injury Prevention Journal of the International Society for Child & Adolescent Injury Prevention*, 2013, 19(6): 393-398.
- [3] KIM K H, YOUNG K S, BERNAL Y, et al. A parametric model of shoulder articulation for virtual assessment of space suit fit [C]// *International Conference on 3d Body Scanning Technologies*, Lugano, Switzerland, 2016: 201-207.
- [4] ADAMS P S, WM K. The effect of size and fabric weight of protective coveralls on range of gross body motions [J]. *AIHA Journal*, 1995, 56(4): 333-340.
- [5] DORMAN L, HAVENITH G. The influence of clothing weight and bulk on metabolic rate when wearing protective clothing [C]// *Proceedings of the Symposium on Human-Environment System*, Japanese Society of Human-Environment System, 2005.
- [6] TEITELBAUM A, GOLDMAN R F. Increased energy cost with multiple clothing layers [J]. *Journal of Applied Physiology*, 1972, 32(6): 743-744.
- [7] 黄伟伟, 李俊, 郭贝. 高空清洁作业服的设计分析 [J]. *中国个体防护装备*, 2011(3): 18-21.  
HUANG Weiwei, LI Jun, GUO Bei. Analysis of high altitude cleaning overall design [J]. *China Personal Protection Equipment*, 2011(3): 18-21.
- [8] MECAGNI C, SMITH J P. Balance and ankle range of motion in community-dwelling women aged 64 to 87 years: a correlational study [J]. *Physical Therapy*, 2000, 80(10): 1004-1011.
- [9] NICOLOFF C. Effects of Clothing on Range of Motion in the Arm and Shoulder Girdle [R]. USA: Environmental Protection Research Division, Natick, 1957.
- [10] 张龙女, 王云仪, 李亿光. 油罐清洁连体作业服的开发和工效学评价 [J]. *纺织学报*, 2013, 34(8): 105-109.  
ZHANG Longnv, WANG Yunyi, LI Yiguang. Development and ergonomic evaluation of overall for oil tank cleaners [J]. *Journal of Textile Research*, 2013, 34(8): 105-109.
- [11] HAVENITH G, HEUS R. A test battery related to ergonomics of protective clothing [J]. *Applied Ergonomics*, 2004, 35(1): 3-20.
- [12] CIESIELSKAWROBEL I, DENHARTOG E, BARKER R. Measuring the effects of structural turnout suits on firefighter range of motion and comfort [J]. *Ergonomics*, 2017, 60

- (7): 997-1007.
- [13] XUE Lin, LINA Zhai. Ergonomic evaluation of protective clothing for earthquake disaster search and rescue team members [J]. *International Journal of Clothing*, 2016, 28(6): 820-829.
- [14] GAJDOSIK R L, BOHANNON R W. Clinical measurement of range of motion: review of goniometry emphasizing reliability and validity [J]. *Physical Therapy*, 1987, 67(12): 1867-1872.
- [15] HUCK J, KIM Y. Coveralls for grass fire fighting [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 1997, 9(5): 346-359.
- [16] PARK H, BRANSON D, PETROVA A, et al. Effects of body armor and load carriage on lower limb joint movement [J]. *Journal of Human Performance in Extreme Environments*, 2014, 10(2): 3-13.
- [17] BIRRELL S A, HASLAM R A. The effect of military load carriage on 3-D lower limb kinematics and spatiotemporal parameters [J]. *Ergonomics*, 2009, 52(10): 298-304.
- [18] ENGLAND S A, BENSON E A, RAJULU S L. Functional mobility testing: a novel method to create suit design requirements [J]. *Sae International Journal of Passenger Cars Mechanical Systems*, 2008, 1(1): 1071-1077.
- [19] PARK H, TREJO H. Impact of firefighter gear on lower body range of motion [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2015, 27(2): 315-334.
- [20] PARK H, BRANSON D, KIM S. Effect of armor and carrying load on body balance and leg muscle function [J]. *Gait & Posture*, 2013, 39(1): 430-435.
- [21] YOUNG M A. Rehabilitation medicine: principles and practice [J]. *Jama the Journal of the American Medical Association*, 1994, 271(3): 244-245.
- [22] REINHARDT A L. Results and applications of a space suit range-of-motion study [C]// *SAE Intersociety Conference on Environmental Systems*, Moffett Field, United States, 1989: 24-27.
- [23] JONES R L. Evaluation and comparison of three space suit assemblies [R]. *NASA TN D-3482*, 1966.
- [24] JURAS G, SLOMKA K. Evaluation of the limits of stability (LOS) balance test [J]. *Journal of Human Kinetics*, 2008, 19(1): 39-52.
- [25] 武明, 季林红, 金德闻, 等. 人体背部负重对于步态特征的影响及相应补偿策略的实验研究 [J]. *生物医学工程杂志*, 2003, 20(4): 574-579.
- WU Ming, JI Linhong, JIN Dewen, et al. The effects of backpack loading on the gait and corresponding compensatory strategy [J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2003, 20(4): 574-579.
- [26] TORHOLM S, CARBES S. The glasgow-maastricht anybody foot model to predict internal loads in the foot [C]// *Combined Orthopedic Research Societies*, 2013.
- [27] NAKASHIMA M, HASEGAWA T. 3D-CG based musculoskeletal simulation for a swimmer wearing competitive swimwear [J]. *Procedia Engineering*, 2013, 60(2): 367-372.
- [28] 杨洋, 徐诚, 管小荣, 等. 基于逆向动力学的步兵头盔舒适性数值分析 [J]. *兵工学报*, 2015, 36(2): 321-326.
- YANG Yang, XU Cheng, GUAN Xiaorong, et al. Numerical analysis of comfort of military helmets based on inverse dynamics [J] *Acta Armamentarii*, 2015, 36(2): 321-326.
- [29] 王晓东, 王政, 李昊, 等. 舱外航天服关节阻力矩测量与建模方法研究 [J]. *航天医学与医学工程*, 2015, 28(3): 195-202.
- WANG Xiaodong, WANG Zheng, LI Hao, et al. Research on method of extravehicular spacesuit joint torque measurement and modeling [J]. *Space Medicine & Medical Engineering*, 2015, 28(3): 195-202.
- [30] PUTZ-ANDERSON V, BERNARD B P. Musculoskeletal disorders and workplace factors: a critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back [J]. *US: National Institute for Occupational Safety and Health*, 1979: 175-204.
- [31] CIKAJLO I, MATJACIC Z. The influence of boot stiffness on gait kinematics and kinetics during stance phase [J]. *Ergonomics*, 2007, 50(12): 2171-2182.
- [32] SON S Y, XIA Y. Evaluation of the effects of various clothing conditions on firefighter mobility and the validity of those measurements made [J]. *Journal of the Human-Environment System*, 2010, 13(1): 15-24.
- [33] KUSPRADIYANTO E S, BIDA P, MANSYUR M, et al. A critical review of epidemiologic evidence for work related musculoskeletal disorders of low back [C]// *International Petroleum Technology Conference. International Petroleum Technology Conference*, 2008.
- [34] CHAFFIN J D. Production rate as a variable in the job success or failure of educable mentally retarded adolescents [J]. *Except Child*, 1969, 35(7): 533-538.