

文章编号:1004-7220(2020)05-0483-07

基于表面肌电分析老年人负重跨障行走跌倒风险

王新亭^{1,2}, 伊国富^{1,2}, 张峻霞^{1,2}, 苏海龙^{1,2}, 任建平^{1,2}, 邱念^{1,2}

(天津科技大学 1. 机械工程学院; 2. 天津市轻工与食品工程机械装备集成设计与在线监控重点实验室, 天津 300222)

摘要:目的 研究老年人在手部不同负重分布条件下跨越障碍物时导致跌倒风险性增加的因素,并探讨预防老年人在负重跨障时跌倒的步态策略。**方法** 12名老年人和12名青年人(对照组)以日常行走步速在不同负重分布方式下进行跨越障碍物和无障碍物行走任务,采集股外侧肌、股直肌和股内侧肌双侧的表面肌电信号,进行平均肌电值分析对比,同时记录受试者跨越障碍时触碰障碍物的情况。**结果** 年龄、负重及跨障因素均对老年人下肢肌肉的活动水平产生显著影响。1152次跨障试验中共发生9次触障事件。另外,老年人和青年人在完成负重和跨障任务时右股内侧肌的肌肉贡献量最大。**结论** 老年人在负重物均匀分布下利用腿部优势侧率先跨障的情况下跌倒的风险性最低。研究结果为系统评估老年人跌倒风险提供参考,对老年人针对性下肢运动锻炼或康复训练具有一定的指导意义。

关键词:跨越障碍物; 负重分布; 表面肌电; 下肢肌肉

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2020.05.015

Fall Risk Analysis of Elderly People with Different Load Distributions during Obstacle Crossing Based on Surface Electromyography

WANG Xinting^{1,2}, YI Guofu^{1,2}, ZHANG Junxia^{1,2}, SU Hailong^{1,2}, REN Jianping^{1,2}, QIU Nian^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering; 2. Tianjin Key Laboratory of Integrated Design and On-Line Monitoring for Light Industry & Food Machinery and Equipment, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: Objective To study the factors leading to the increased risk of falls when the elderly cross obstacles with different load distributions in their hands, and to explore the gait strategies to prevent falls for elderly people with different load distributions during obstacle crossing. **Methods** Twelve young healthy (control group) and 12 elderly healthy participants performed walking tasks with or without obstacle crossing at their daily speed under different load distributions. Surface electromyography (sEMG) signals were collected from both sides of the lateral femoris, rectus femoris and medial femoris. Then the average sEMG was analyzed and compared. The numbers of contact incident during obstacle touching were also recorded. **Results** Age, weight carrying and obstacle all had significant influences on the activity level of lower limb muscles in elderly people. A total of 9 contact incidents occurred in 1152 obstacle crossing tests. In addition, the contribution of right vastus medialis muscle was the greatest in the elderly and young adults when they completed the weight carrying and obstacle crossing tasks. **Conclusions** The elderly people had the lowest risk of falling down by taking advantage of the

收稿日期:2019-11-11; 修回日期:2019-12-17

基金项目:天津市科技支撑计划资助项目(14ZCDSY00010);天津市应用基础与前沿技术研究计划(16JCZDJC35900)

通信作者:王新亭,副教授,E-mail: xinting1688@163.com

dominant side of the leg to take the lead in obstacle crossing under the uniform distributions of load. The research findings provide references for systematic assessment of fall risk in the elderly and have certain guiding significance for lower limb exercise or rehabilitation training in the elderly.

Key words: obstacle crossing; load distribution; surface electromyography (sEMG); lower extremity muscle

地面障碍物是导致老年人跌倒的直接原因之一^[1]。随着障碍物高度的增加,对肌肉骨骼神经系统的控制要求会有所提高,可能导致跌倒的风险增加,尤其是神经肌肉骨骼控制系统呈逐渐弱化趋势的老年人^[2-3]。同样,负重分布方式会增加老年人跌倒的风险。朱虹佳等^[4]比较手提重物、拉重物和推重物3种不同负重方式对健康女性老年人的影响,结果表明,采取拉重物的方式会明显影响其两侧步态的对称性。黄强民等^[5]研究了躯干均匀负重和非负重状态下腰背部、腹部及臀中肌的肌电活动规律。陈岚岚等^[6]研究表明,年轻人单侧手负重时在高负荷等级下肌肉活动才呈现出显著的对侧增强效应,同负荷等级下背部负荷方式比单侧手负重省力。尽管关于负重、跨障因素分别对老年人步态的影响研究众多,老年人在手部不同负重分布方式下跨障行走对其步态的影响仍旧未知。本文利用表面肌电分析法和触障事件情况探究老年人跌倒风险增加的原因,进而提出降低老年人在面对负重跨障行走任务时跌倒风险的步态策略。

1 试验方法

1.1 试验对象

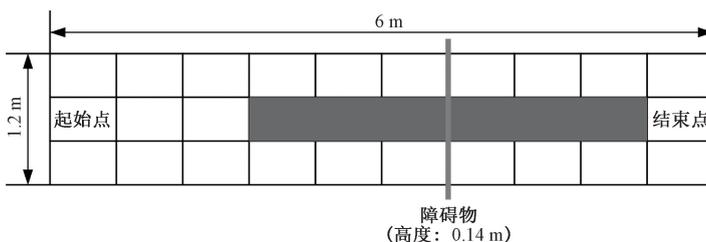
试验对象包括健康老年男性12名,年龄(69.5±4.5)岁、身高(169.9±5.8)cm、体质量(68.2±

13.4)kg和健康青年男性12名(对照组),年龄(27.0±3.0)岁、身高(168.2±9.9)cm、体质量(65.7±12.4)kg。为排除性别差异影响,只招募男性受试者。试验对象排除标准包括:在过去12个月内有任何经历过跌倒损伤、患肌肉骨骼疾病、有任何影响正常步态行走的病症和认知缺陷的受试者。此外,试验对象还排除了左侧优势人群。在试验开始前,所有受试者均签署知情同意书。

1.2 试验设计

在开始试验前,实验人员向受试者介绍试验流程,且允许受试者熟悉试验环境和设备。如图1(a)所示,实验室步道每个格子的尺寸为600mm×400mm×110mm,每位受试者每步不可同时踏在两块金属板上。灰色线为障碍物放置点。如图1(b)所示,步道尺寸为6m×1.2m,距离步道起始点3.6m位置摆放材质为塑料的圆管状障碍物,障碍物距离地面为0.14m^[7]。受试者手持重物为哑铃,负重物的质量分别为2.5、5.0kg^[8]。负重分布方式分为4个组合:无负重、左手持5kg、右手持5kg和双手各持2.5kg。

无障碍物行走试验需要受试者右脚起步,每个负重条件进行8次试验,共计32次;有障碍物行走需要受试者左脚起步,每个负重条件进行16次试验,共计64次。受试者完成试验的步数一致,且以



(a) 实验室步道平面图



(b) 步道场景图

图1 实验室步道布局图

Fig.1 Laboratory trail layout (a) Planar graph of the Laboratory trail, (b) Scene graph of the trail

日常行走速度完成试验。

表面肌肉活动信号采集使用 Telemyo 2400 DTS 无线表面肌电遥测仪,采样频率为 1.5 kHz,一次性心电电极片直径为 50 mm。如图 2(a)所示,6 个双侧电极片放置在左股外侧肌(left vastus femoris, LVL)、右股外侧肌(right vastus femoris, RVL)、左股直肌(left rectus femoris, LRF)、右股直肌(right rectus femoris, RRF)、左股内侧肌(left vastus medialis, LVM)和右股内侧肌(right vastus medialis, RVM)的肌腹隆起位置^[9-10],从左向右依次为 RVL、LRF、RVM、LVM、RRF 和 LVL。图 2(b)所示为肌电片贴放的参考电极。试验前测量每块肌肉的最大等长收缩量(maximum voluntary contraction, MVC)^[11]。为避免受试者肌肉疲劳,每组 MVC 测量及行走试验后给予受试者 2~3 min 休息。

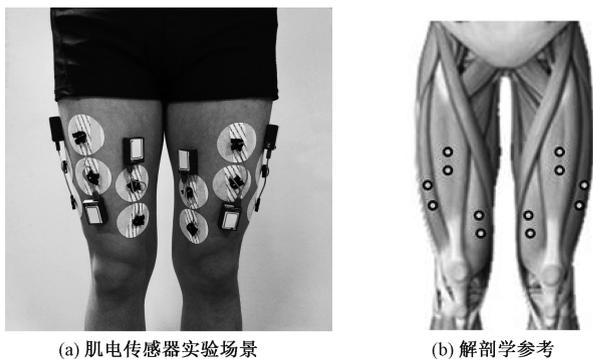


图 2 肌电传感器贴放位置

Fig.2 Placement of sEMG sensors (a) Experiment scene of sEMG sensors, (b) Anatomical reference

1.3 数据处理和统计分析

如图 3 所示,由于步态起始和终止部分稳定性较差从而导致步态起始和终止数据不具有参考性,故通过 Matlab R2016b 程序截取图 1 中阴影区域的 sEMG 数据,其中包括跨障前 2 步、跨障时 1 步和跨障后 2 步。首先,将 sEMG 原始数据进行全波整流,并根据已测得肌肉的 MVC 值进行标准化处理^[12],再进行组间对比。此外,记录被试者跨障期间触障情况。

统计分析软件选用 Minitab 17。运用单因素方差分析(ANOVA)分析具有显著影响的自变量,采用多因素方差分析(MANOVA)调查研究自变量对因变量集的影响^[13]。采用图基(Turkey)事后检验

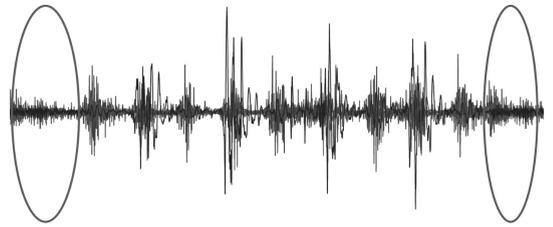


图 3 某被试者某次跨障行走时肌电信号图

Fig.3 Electromyogram of a subject walking across the barrier

分析两种以上水平(负重分布水平:4 种)的显著效应,探讨两种情况的差异。显著性检验标准为 $P < 0.05$ 。

2 结果

根据试验记录统计及 DV 摄像机验证结果,全部 1 152 次跨障试验(每名试验受试者完成 48 次有障碍物行走试验)中发生了 9 次触碰障碍物事件,触碰障碍物事件(触障事件)发生率为 0.78%。触障事件统计结果如表 1 所示。

表 1 触障事件统计

Tab.1 Statistics of touch events

负重方式	青年组		老年组	
	L	R	L	R
无负重跨障行走	2	0	0	0
右手持 5 kg 重物跨障行走	1	0	1	0
左手持 5 kg 重物跨障行走	2	0	0	1
双手各持 2.5 kg 重物跨障行走	0	1	1	0

注:“L”代表左腿为跨障引导腿,“R”代表右腿为跨障引导腿

跨障、负重分布方式及年龄因素均对老年组和青年组的下肢肌肉激活水平产生了显著影响。当受试者无障碍物行走时,6 块测试肌肉 LVL、RVL、LRF、RRF、LVM、RVM 的 sEMG 平均值分别为 20.62%、23.07%、17.13%、16.45%、24.79% 和 34.71%;反之,当被试者有障碍物行走时,sEMG 平均值分别为 24.34%、27.01%、14.30%、16.83%、27.08% 和 38.51%。当受试者手持重物且质量分配不均匀时,肌肉活动水平较高。老年人下肢肌肉活动水平显著低于青年人(见表 2)。

此外,双因素方差分析结果表明,跨障和负重分布的交叉影响对所测肌肉均具有显著影响($P_{LVL} < 0.001$, $P_{RVL} < 0.001$, $P_{LRF} = 0.049$, $P_{RRF} < 0.001$,

表2 sEMG 平均值及单因素方差分析结果

Tab.2 sEMG mean values and results of one-way ANOVA

肌肉	跨越障碍物			负重方式					年龄		
	无	有	<i>P</i>	1	2	3	4	<i>P</i>	青年组	老年组	<i>P</i>
LVL	20.62	24.34	<0.001	21.98 ^B	24.25 ^A	22.91 ^A	23.18 ^A	0.022	13.91	33.48	<0.001
RVL	23.07	27.01	<0.001	24.87 ^B	26.70 ^A	25.35 ^{AB}	25.77 ^A	0.007	18.72	33.56	<0.001
LRF	17.13	14.30	<0.001	15.30 ^B	17.63 ^A	14.62 ^B	13.46 ^B	<0.001	11.91	19.04	<0.001
RRF	16.45	16.83	0.021	16.31 ^C	17.44 ^A	16.77 ^{AB}	16.28 ^{BC}	<0.001	12.20	21.80	<0.001
LVM	24.79	27.08	0.009	22.61 ^C	25.89 ^B	27.60 ^A	29.14 ^A	<0.001	19.52	34.01	<0.001
RVM	34.17	38.51	0.002	31.75 ^B	40.47 ^A	38.54 ^A	38.13 ^A	<0.001	23.40	52.91	<0.001

注：“1”代表无负重物行走，“2”代表右手持5 kg行走，“3”代表左手持5 kg行走，“4”代表双手各持2.5 kg行走，负重分布方式的图基事后检验分析结果如表中负重方式平均值上标处所示。

$P_{LVM}=0.012$ 和 $P_{RVM}<0.001$)。跨障和年龄的交互作用对 LVL、RVL、LRF、RRF 和 RVM 具有显著影响 ($P_{LVL/RVL/LRF/RRF/RVM}<0.001$)。年龄和负重方式对

LRF、RRF、LVM 和 RVM 产生显著影响 ($P_{LRF}=0.021, P_{RRF}=0.044, P_{LVM}=0.018$ 和 $P_{RVM}<0.001$)，见表3~5。

表3 不同跨障和负重分布方式下 sEMG 平均值及双因素方差分析结果(单位:%)

Tab.3 sEMG mean value and results of MANOVA under different obstacles and load distributions

肌肉	障碍物行走				无障碍物行走				<i>F</i>	<i>P</i>
	1	2	3	4	1	2	3	4		
LVL	17.52	19.92	22.82	22.16	24.25	26.41	22.96	23.71	11.88	<0.001
RVL	22.10	22.20	23.52	24.43	26.28	28.94	26.29	26.46	8.30	<0.001
LRF	17.95	21.41	15.44	13.82	13.95	15.75	14.20	13.30	2.63	0.049
RRF	15.45	16.81	17.01	16.54	16.75	17.75	16.66	16.14	6.95	<0.001
LVM	20.59	25.26	27.77	25.52	23.63	26.20	27.51	31.01	3.68	0.012
RVM	26.45	33.18	38.45	40.64	34.34	44.11	38.59	36.83	14.77	<0.001

注：“1”代表无负重物行走，“2”代表右手持5 kg行走，“3”代表左手持5 kg行走，“4”代表双手各持2.5 kg行走。

表4 不同跨障和年龄组 sEMG 平均值及双因素方差分析结果(单位:%)

Tab.4 sEMG mean value and results of MANOVA under different obstacles and age groups

分组	肌肉						<i>F</i>	<i>P</i>
	LVL	RVL	LRF	RRF	LVM	RVM		
无障碍行走								
青年组	12.96	16.99	15.71	11.65	17.27	16.31		
老年组	29.01	29.74	18.68	21.72	33.04	54.89		
有障碍行走								
青年组	14.39	19.58	10.03	12.47	20.65	26.93		
老年组	35.82	35.56	19.22	21.86	34.50	51.86		
<i>F</i>	22.96	19.85	21.06	12.47	0.76	58.72		
<i>P</i>	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.383	<0.001		

表5 不同年龄和负重分布方式下 sEMG 平均值及双因素方差分析结果(单位:%)

Tab.5 sEMG mean value and results of MANOVA under different age groups and load distributions

肌肉	青年组				老年组				<i>F</i>	<i>P</i>
	1	2	3	4	1	2	3	4		
LVL	12.43	14.15	14.43	14.67	33.13	35.92	32.28	32.62	1.02	0.384
RVL	17.84	18.97	19.01	19.05	33.09	35.63	32.34	33.22	1.98	0.115
LRF	11.97	15.01	11.41	9.20	19.18	20.66	18.16	18.18	3.26	0.021
RRF	11.64	12.69	12.25	12.20	21.77	22.93	21.77	20.79	2.70	0.044
LVM	16.86	20.57	20.80	19.90	29.32	32.03	35.09	39.38	3.36	0.018
RVM	20.34	25.79	24.56	22.92	45.07	57.44	53.98	54.98	6.11	<0.001

注：“1”代表无负重物行走，“2”代表右手持5 kg行走，“3”代表左手持5 kg行走，“4”代表双手各持2.5 kg行走

3 讨论

3.1 触障障碍物事件

青年人以左腿为跨障引导腿时触障事件发生了5次,发生率0.43%,而右腿仅发生1次,发生率0.08%。老年人以左腿和右腿为跨障引导腿时触障事件分别发生了2次(0.17%)和1次。该结果表明,跨障引导腿的变化对老年人和青年人触障事件均有显著影响。

从负重分布方式角度分析,右手持5 kg重物跨障行走、左手持5 kg重物跨障行走情况下触障事件共发生了5次(发生率0.43%),无负重跨障行走、双手各持2.5 kg重物跨障行走分别发生了2次。单手负重情况下触障事件概率高于其他负重分布方式,表明不平衡负重分布方式下会导致触障事件增加,从而对跨障行走产生负面影响。

青年人在右手持5 kg重物跨障行走情况下触障事件发生1次,左手持5 kg重物跨障行走发生2次,双手各持2.5 kg重物跨障行走发生1次,无负重跨障行走发生2次。老年人在右手持5 kg重物跨障行走、左手持5 kg重物跨障行走、双手各持2.5 kg重物跨障行走情况下发生触障事件各1次。负重情况下的触障事件大于无负重情况,单手负重时的触障事件大于其他负重分布方式。老年人和青年人的触障事件几率受到负重的影响,且在单手负重的情况下触障事故发生率最高。

从年龄因素分析,青年人和老年人触障事件分别为6、3次,事故发生率分别为1.04%、0.52%。老年人触障后跌倒的可能性大于非触障情况,而为了降低跌倒事件的发生率老年人可能采取保守的步态策略,故老年人触障事件少于青年人。

综合来看,采用弱势侧(左侧)负重和弱势侧为跨障引导腿(即左手持5 kg重物跨障行走)的触障率最高,触障率最低的试验条件是采用双侧负重和优势侧作为跨障引导腿(即双手各持2.5 kg重物跨障行走)或无负重采用优势侧为跨障引导腿。因此,在面临负重和跨障步态任务时,最优的步态策略是手部重物分布均匀,并用身体的优势侧率先跨障。

3.2 跨越障碍物

跨障是在复杂地形上行走时异常步态的一种

特殊情况,而这种复杂的步态环境可能会造成肌肉活动的增加。Voloshina等^[14]研究表明,相比在平坦的地面,年轻人在不平坦的地面跑步时股内侧肌(vastus medialis, VM)、股直肌(rectus femoris, RF)和内侧肌腱(medial hamstring, MH)的sEMG平均值显著提高,分别增长了7%、20%和19% ($P < 0.05$)。本文研究结果表明,相比无障碍物行走,受试者在跨障时下肢肌肉需要输出更多的能量,以成功完成跨越障碍物行走任务(见表2)。其中,RVM影响最为显著,sEMG平均值增加了4.34% ($P = 0.002$)。

3.3 手部负重分布方式

通过研究无负重、单手负重和双手同侧负重对下肢肌肉的影响发现,相比无负重行走,受试者在负重情况下LVL、RVL、LRF、RRF、LVM和RVM的sEMG平均值分别增加了2.27%、1.83%、2.33%、1.13%、3.28%、8.72% ($P_{LVL} = 0.022$, $P_{RVL} = 0.007$, $P_{LRF/RRF/LVM/RVM} < 0.001$)。其中,RVM变化最显著,尤其受试者在单手负重条件下的肌肉活动水平高于其他两种负重情况。由此看来,采用不同的负重方式可能会导致不同的效果。

3.4 年龄因素

年龄是能够影响下肢肌肉活动模式的重要因素之一。本文研究表明,相比青年人,老年人在负重跨障行走时LVL、RVL、LRF、RRF、LVM和RVM的sEMG平均值分别增长了19.57%、14.84%、7.13%、9.60%、14.49%和29.51% ($P < 0.001$)。其原因可能是相比于青年人,老年人需要输出更多的下肢肌肉力量来完成跨障任务。Hahn等^[15]研究表明,老年人在跨障行走过程中,其肌肉力量明显低于青年人,从而导致跨越障碍物对老年人肌肉需求和挑战相对较高;也有可能是由于感觉和认知功能随着年龄的增长而逐渐衰退。研究表明,健康老年人触障时感觉运动的决定因素包括下肢力量衰退以及深度知觉下降^[16-17]。因此,老年人在复杂地形上行走或完成跨障等任务时,需要额外的肌肉力量来保持步态平衡。

3.5 双因素分析

双因素方差分析结果表明,跨障和负重、年龄和跨障、负重和年龄因素均对下肢肌肉激活水平产生了显著影响,尤其对RVM更为显著。在跨障行走时,单手(左手或右手)负重相比无负重RVM的

sEMG 平均值增加了 9.77% ($P < 0.001$)。相比年轻人,老年人在跨障行走时 RVM 的 sEMG 平均值增加了 24.93% ($P < 0.001$)。青年人和老年人在单手持重物时比无负重 RVM 的 sEMG 平均值分别增加了 5.45% 和 12.37% ($P < 0.001$)。RVM 的变化较其他肌肉最为显著的原因可能是在负重和跨障条件下对老年人 RVM 的肌肉贡献量最高。

4 结论

不同的负重分布方式、跨越障碍物因素均对老年人和青年人所测肌肉产生显著影响。跨障引导腿变化对老年人下肢所测肌肉未产生显著影响。交叉分析表明,年龄和负重分布方式、年龄和跨障、负重分布方式和跨障共 3 个组合对所测肌肉产生显著性影响。

4.1 RVM 肌肉贡献量

从肌肉贡献量观察,除去青年人无障碍物行走(肌肉贡献量水平为 $LVM > RVL > RVM > LRF > LVL > RRF$),其他实验条件下的 RVM 肌肉贡献量均高于其他所测肌肉,反之 RRF 的肌肉贡献量均最小。由此可见,老年人或是青年人在面临不同负重分布方式、有障碍物行走和直道行走时需 RVM 提供最大的肌肉力量(相对其他所测肌肉),对 RRF 的肌肉力量要求最小。当老年人完成负重和跨障步态任务时,RVM 的肌肉贡献量越大,表明 RVM 对老年人的步态影响越大。同理可证,RVM 肌肉力量的弱化可能会导致老年人在完成负重和跨障行走时受阻,进而增加步态风险性。当步态危险性增加时,老年人在负重和跨障时跌倒的概率也会有所增加。根据标准化后的肌电平均值分析结果,老年人在单手持重情况下跨越障碍物行走的 RVM 最高,这可能会导致跌倒事故的发生。老年人单手持重物进行跨障行走时触障事件数量最多,均匀分布重物时触障事件数量最少,该触障事件发生数量的结果也从侧面证明了上述结论的合理性。

4.2 优势侧和弱势侧肌肉激活水平

从优势侧肌肉和弱势侧肌肉的激活水平角度来观察,单个因素影响情况下呈现出优势侧肌肉贡献量大于弱势侧肌肉的趋势,交叉分析情况下呈现出优势侧肌肉的激活水平大于弱势侧肌肉的趋势,弱势侧与优势侧的肌肉激活水平基本持平

的情况多出现在老年组和青年组完成无负重或无障碍物行走时。因此,当老年人和青年人完成较简单的步态任务时,不会对优势侧肌肉产生较为明显的挑战。老年人和青年人在完成无负重和无障碍物行走时发生了 2 次触障事件,低于单手负重情况,故触障事件数量间接证明当老年人在完成单手负重和跨障任务时会提高优势侧的肌肉激活水平。

4.3 跌倒风险增加肌电数据表现

对比分析 VL、RF 和 VM 的肌肉贡献量可知,仅在老年人在完成无负重和无障碍物行走的情况下未呈现出 $VM > VL > RF$ 的趋势;在老年人完成单手负重和跨障行走的情况下,VM、VL 和 RF 之间的肌肉激活水平差距较为悬殊。由此表明,VM、VL 和 RF 肌肉激活水平之间的差距增加,可能是老年人跌倒风险增加的数据表现。

4.4 老年人负重跨障时步态策略

从老年人跌倒预防角度来看,可重点对 VM 进行恢复和锻炼,尤其是 RVM。此外,老年人应尽量减少单手持重物行走,在面临障碍物行走时应采取腿部优势侧跨越的步态策略。

4.5 研究局限性

本文研究存在一些不足,例如实验环境设置虽然模拟还原了室外环境的关键因素,但与室外环境仍具有一定的差距。另外,考虑到老年人的安全问题,试验的最大负重质量仅设置为 5 kg。

参考文献:

- [1] KUNIMUNE S, OKADA S. The effects of object height and visual information on the control of obstacle crossing during locomotion in healthy older adults [J]. *Gait Posture*, 2017, 55: 126-130.
- [2] LUTW, CHEN HL, CHEN SC. Comparisons of the lower limb kinematics between young and older adults when crossing obstacles of different heights [J]. *Gait Posture*, 2006, 23(4): 470-479.
- [3] MARJOLEIN V, DORLY JH, Paul L, *et al.* Skeletal muscle mass and muscle strength in relation to lower-extremity performance in older men and women [J]. *Aging Male*, 2000, 3(3): 161-161.
- [4] 朱虹佳, 杜艳艳. 老年人行走过程中不同负重方式对步态的影响[C]// 第十九届全国运动生物力学学术交流大会论文摘要汇编. 北京: [s.n.], 2017: 48-49.

- [5] 黄强民, 王凤湖, 范帅. 静态姿势下均匀负重和非负重时躯干和表面肌电活动[J]. 医用生物力学, 2012, 27(4): 369-374.
HUANG QM, WANG FH, FAN S. Movement of trunk and surface electromyography under symmetric loading and unloading with static posture [J]. J Med Biomech, 2012, 27(4): 369-374.
- [6] 陈岚岚, 王健, 杨锐, 等. 不同方式负重行走时人体腰部竖脊肌和多裂肌平均肌电值特征分析[J]. 中国运动医学杂志, 2014, 33(3): 198-202.
- [7] 中国建筑标准设计研究院有限公司. 民用建筑设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [8] 赵美雅, 倪义坤, 田山, 等. 行走过程中不同背包负重方式对人体生理参数的影响[J]. 医用生物力学, 2015, 30(1): 8-13.
ZHAO MY, NI YK, TIAN S, *et al.* Effects of different load distribution modes on human physiological parameters during walking [J]. J Med Biomech, 2015, 30(1): 8-13.
- [9] KYEONG S, SHIN W, YANG M, *et al.* Recognition of walking environments and gait period by surface electromyography [J]. Front Inform Technol Electron Eng, 2019, 20(3): 40-50.
- [10] 朱亚琼, 彭楠, 周明. 太极拳对老年人下肢肌力及功能的影响[J]. 中国中西医结合杂志, 2016, 36(1): 49-53.
- [11] 贺莹莹. 股四头肌等长收缩肌电动员比例和肌肉收缩力量的关系研究[D]. 北京: 北京体育大学, 2010.
- [12] 王健, 金小刚. 表面肌电信号分析及其应用研究[J]. 中国体育科技, 2000, 36(8): 26-28.
- [13] MONTGOMERY, DOUGLAS C, MONTGOMERY DC. Design and analysis of experiments [M]. USA: Wiley, 2005.
- [14] VOLOSHINA AS, FERRIS DP. Biomechanics and energetics of running on uneven terrain [J]. J Exp Biol, 2015, 218(5): 711-719.
- [15] HAHN ME, LEE HJ, CHOU LS. Increased muscular challenge in older adults during obstructed gait [J]. Gait Posture, 2005, 22(4): 360-361.
- [16] PIJNAPPELS M, BURG PJ, REEVES ND, *et al.* Identification of elderly fallers by muscle strength measures [J]. Eur J Appl Physiol, 2008, 102(5): 585-592.
- [17] MENANT JC, GEORGE RJS, SANDERY B, *et al.* Older people contact more obstacles when wearing multifocal glasses and performing a secondary visual task [J]. J Am Geriatr Soc, 2009, 57(10): 1833-1838.