下肢外骨骼机器人联合功能性电刺激对脑卒中患者步态功能的影响

何晓丽[1,2],汪 杰[1],王颖鹏[1],王丛笑[1],郄淑燕[1*]

1 首都医科大学附属北京康复医院,北京 100144;

2 北京市房山区良乡医院,北京 102401

* 通信作者:郄淑燕,E-mail:shuyanpb@163.com

收稿日期:2026-02-16;接受日期:2026-06-01

基金项目:北京市科技计划项目(Z221100007422113)

DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.10006

摘要 **目的** 观察下肢外骨骼机器人(LERR)联合功能性电刺激(FES)对脑卒中患者步态功能的影响。**方法** 选择2024年8月—2025年7月在首都医科大学附属北京康复医院新住院的脑卒中患者48例。采用随机数字表法分成LERR组、FES组和LERR+FES组,每组16例。所有受试者均在医院接受为期4周的常规康复治疗,4 h/d,5 d/周;LERR组在常规康复治疗的基础上接受LERR治疗;FES组在常规康复治疗的基础上接受下肢FES治疗;LERR+FES组在常规康复治疗基础上联合并同步应用LERR与FES进行干预;3组治疗均20 min/d,每周5 d,持续治疗4周。分别于治疗前和治疗4周后,采用Fugl-Meyer运动功能评定量表(FMA)评分对患者整体运动功能进行评估;采用荷兰STABLE三维平衡姿势训练和评估系统对患者平衡功能进行评估;采用英国VICON三维步态分析系统采集并分析时空参数(步速、步频、步态周期、单步长、支撑期百分比、双支撑期百分比)和下肢关节运动学参数[髋-膝平均绝对连续相对相位(HK-ACRP)和膝-踝平均绝对连续相对相位(KA-ACRP)];采用Delsys Trigno无线表面肌电仪采集并分析股直肌与胫骨前肌积分肌电(iEMG)、肌肉起始时间点、股直肌-股二头肌共同激活指数(RFBF-CI)和胫骨前肌-腓肠肌共同激活指数(TAGL-CI)。**结果** 与治疗前比较,3组治疗后FMA评分均升高($P<0.05$);与LERR组和FES组比较,LERR+FES组治疗后FMA评分均更高($P<0.05$)。与治疗前比较,3组治疗后睁眼站立、闭眼站立、脚跟对脚尖站立、单脚站立时重心移动速度均减小($P<0.05$),稳定时间均缩短($P<0.05$);与LERR组和FES组比较,LERR+FES组治疗后睁眼站立、闭眼站立、脚跟对脚尖站立时重心移动速度均更小($P<0.05$),稳定时间均更短($P<0.05$)。与治疗前比较,3组治疗后步速、步频均加快($P<0.05$),单步长均增长($P<0.05$),KA-ACRP、HK-ACRP值均升高($P<0.05$),步态周期均缩短($P<0.05$),支撑相、双支撑相百分比均降低($P<0.05$);与LERR组和FES组比较,LERR+FES组治疗后步速、步频均更快($P<0.05$),单步长均更长($P<0.05$),KA-ACRP、HK-ACRP值均更高($P<0.05$),步态周期均更短($P<0.05$),支撑相、双支撑相百分比均更低($P<0.05$)。与治疗前比较,3组治疗后股直肌、胫骨前肌iEMG值均升高($P<0.05$),股直肌、胫骨前肌起始时间点、RFBF-CI、TAGL-CI均降低($P<0.05$);与LERR组和FES组比较,LERR+FES组治疗后股直肌iEMG值均更高($P<0.05$),股直肌起始时间点、RFBF-CI、TAGL-CI均更低($P<0.05$);与LERR组比较,LERR+FES组治疗后胫骨前肌iEMG值更高($P<0.05$),胫骨前肌起始时间点更低($P<0.05$)。**结论** LERR联合FES治疗可有效改善脑卒中患者的步行能力与协调功能,且疗效优于单一治疗组。

关键词 脑卒中;下肢外骨骼机器人;功能性电刺激;步态功能;步行能力

引用格式:何晓丽,汪杰,王颖鹏,等. 下肢外骨骼机器人联合功能性电刺激对脑卒中患者步态功能的影响[J]. 康复学报,2026,36(10):723-730,738.

HE X L, WANG J, WANG Y P, et al. Effects of lower-limb exoskeleton rehabilitation robot integrated with functional electrical stimulation on gait function in stroke patients [J]. Rehabil Med, 2026, 36(10): 723-730, 738.

DOI:10.3724/SP.J.1329.2026.10006

©《康复学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND 4.0协议 © *Rehabilitation Medicine*, OA under the CC BY-NC-ND 4.0

脑卒中是目前全球范围内导致严重残疾的首要原因，在我国已成为首位死亡原因[1]。超过半数的幸存者会遗留永久性肢体功能障碍，具体表现为躯干控制能力下降、肌力减退、平衡障碍及骨盆不稳等问题，严重影响步行速度与步态模式，增加足下垂与跌倒风险[2-4]，最终导致整体步态功能减退[5-6]。因此，针对脑卒中患者的下肢步态康复至关重要。

下肢外骨骼机器人（lower-limb exoskeleton rehabilitation robot，LERR）是当前下肢步态康复的主流方法，该方法虽能精确驱动髋、膝关节从而实现步态重建，但其对踝关节主动参与的关注仍显不足[7-8]。功能性电刺激（functional electrical stimulation，FES）能通过诱发肌肉自主收缩，特别是在踝背屈动作中弥补LERR的不足，并促进神经肌肉功能重塑[9]。研究表明，将外骨骼机器人的关节导向训练与FES的主动性运动相结合，在脑卒中后、骨折、脊髓损伤及其他疾病的康复中已显现出积极效果[10-14]。

既往研究发现，脑卒中患者存在特定肌群的过度激活与协调异常，然而目前关于LERR联合FES对脑卒中患者步态协调性及主动肌-拮抗肌协同收缩影响的研究尚不充分[15]。因此，亟须一个能够系统评估神经肌肉协同与运动协调质量的方案，以揭示这种复合干预对运动控制本质的深层作用。本研究旨在探究LERR联合FES对降低脑卒中患者跌倒风险、改善步态协调性及下肢肌肉募集模式的疗效，验证联合治疗的增效优势，并为康复临床实践提供操作依据。

1　临床资料

1.1　病例选择标准

1.1.1　纳入标准　① 符合《中国急性缺血性卒中诊治指南2023》[16]中关于脑卒中的相关诊断标准；② 年龄40～75岁；③ 首次、单侧发病，病程＞1个月且≤3个月；④ 无颅骨修补或神经刺激器等植入；⑤ 治疗部位皮肤无破损或贴片过敏；⑥ 患侧下肢无严重感觉障碍，能在无辅助情况下室内步行30步。

1.1.2　排除标准　① 有脑外伤或颅骨缺损者；② 有严重内脏疾病或恶性肿瘤者；③ 有严重认知障碍，听力、言语障碍，不能配合试验者；④ 下肢骨折、严重肌肉骨骼疾病者。

1.2　一般资料

采用G*Power 3.1，以主要结局指标Fugl-Meyer运动功能评定量表（Fugl-Meyer Assessment，FMA）的组间差异为依据，设定效应量f=0.41、α=0.05、检验效能=0.80，计算得出每组样本量为14例，考虑到15%的脱落率，每组需要纳入16例受试者，3组共计48例。

选择2024年8月—2025年7月在首都医科大学附属北京康复医院新住院的脑卒中患者48例。采用随机数字表法分成LERR组、FES组和LERR＋FES组，每组16例。3组一般资料比较，差异无统计学意义（P＞0.05），具有可比性。见表1。本研究已通过首都医科大学附属北京康复医院伦理委员会批准（审批号：2024bkky-075）。

表1　3组一般资料比较

Table 1　Comparison of general data in three groups

组别	例数	性别		年龄/（$\bar{x}\pm s$，岁）	身高/（$\bar{x}\pm s$，cm）	体质量/（$\bar{x}\pm s$，kg）	脑卒中类型		偏瘫侧	
		男	女				缺血性	出血性	左	右
LERR组	16	8	8	63.00±5.70	163.81±7.51	68.38±9.30	12	4	8	8
FES组	16	9	7	62.94±5.40	164.94±6.96	70.56±8.55	11	5	7	9
LERR＋FES组	16	7	9	65.00±5.90	165.94±7.75	70.81±9.00	11	5	9	7

2　方　法

2.1　治疗方法

所有受试者均在医院接受为期4周的常规康复治疗，每天4 h，5 d/周。常规康复治疗包括：① 脑卒中患者的良肢位摆放；② 上肢主被动康复，功能训练；③ 翻身训练；④ 坐位训练；⑤ 立位训练；⑥ 辅助步行训练；⑥ 上下楼梯训练。

2.1.1　LERR组　在常规康复治疗的基础上接受LERR治疗。采用瑞士Hocoma生产的Lokomat下肢机器人进行训练，外骨骼机械腿精准驱动髋、膝关节，模拟正常的步态周期，确保关节运动轨迹符合人体生物力学特征。选用适配的机械腿支具装备，每次使用LERR时均需根据患者情况对步速、减重系统及引导力进行个体化调节[17]。20 min/d，每周

5 d,持续治疗4周。

2.1.2 FES组 在常规康复治疗的基础上接受下肢FES治疗。采用雅思YSL02P下肢FES系统,动态步态识别算法来检测和分析行走过程中发生的事件。在摆动阶段足尖离开地面时,触发刺激器刺激腓总神经,导致踝背屈,并持续到足跟触地。在站立阶段开始,触发刺激器刺激股四头肌,导致膝关节伸直,并持续到站立阶段结束。刺激器发出对称输出波形,波宽为200 μs,频率为20～50 Hz,FES治疗20 min/d,每周5 d,持续治疗4周[18]。

2.1.3 LERR+FES组 在常规康复治疗基础上,联合应用LERR与FES进行干预。具体操作流程为:先完成FES的佩戴与固定,继而进行LERR的绑定与调试,待两者均准备就绪后同步实施治疗干预。联合训练治疗20 min/d,每周5 d,持续治疗4周。

2.2 观察指标

分别于治疗前和治疗4周后对3组以下指标进行评估。

2.2.1 肢体运动功能评估 采用FMA评分对患者整体运动功能进行评估,包括上肢和下肢。上肢部分主要评定肩、肘、前臂、腕和手的协同运动,反射活动,分离运动及协调性等,共33个小条目;下肢部分主要评定髋、膝、踝的反射活动,协同运动及速度/协调性等,共17个小条目。该量表共16个大条目、50个小条目,总分100分。各条目按0～2分3级计分:0分为不能完成规定动作,1分为可部分完成规定动作,2分为充分完成规定动作。该量表可进一步分为上肢部分(0～66分)和下肢部分(0～34分),FMA总分越高表示肢体运动功能越好[19]。

2.2.2 平衡功能评估 采用荷兰STABLE三维平衡姿势训练和评估系统对患者平衡功能进行评估。其功能模块主要包括静态平衡评估和动态平衡评估。静态平衡评估是指测试患者在睁眼站立、闭眼站立、脚跟对脚尖站立和单脚站立时重心移动速度,速度越大表明平衡功能越差。动态平衡是指患者双脚自然站立在测试平台上,平台将向前、后、左、右4个方向移动,评估者受到扰动导致失衡开始到重新回到并保持平衡所经历的时间为稳定时间,数值越小,表明维持动态平衡的功能越好。

2.2.3 步态能力及协调性评估 采用英国VICON三维步态分析系统(Nexus 1.85,UK),配有8台Vicon T40s红外线高速摄像机(采集频率100 Hz)固定于室内墙上进行动作捕捉,20个反光Markers贴于下肢骨性标志点(双侧股骨中点、胫骨中点、胫骨外上髁、第1和5跖骨头、足跟、内外踝、髂前上棘、髂后上棘)。记录基本信息后,受试者以解剖位站姿建立静态模型,适应步行后开始测试,记录3次有效数据。步态与肌电同步采集,仅分析矢状面数据。使用VICON Nexus 2.10计算步态参数,导入Matlab软件完成信号的处理与数据分析。分析以下指标:① 时空参数:步速、步频、步态周期、单步长、支撑期百分比、双支撑期百分比。② 下肢关节运动学参数:髋关节、膝关节、踝关节在矢状面内的关节面间平均绝对连续相对相位(average absolute continuous relative phase,ACRP),主要包括髋-膝平均绝对连续相对相位(hip-knee average absolute continuous relative phase,HK-ACRP)和膝-踝平均绝对连续相对相位(knee-ankle average absolute continuous relative phase,KA-ACRP)。数值越大,表明下肢关节间的协调能力越强。

2.2.4 肌肉募集及协调控制评定 采用Delsys Trigno无线表面肌电仪,采样频率2 000 Hz,50 Hz陷波滤波器,30 Hz高通滤波器(去除运动伪迹),5 Hz低通滤波器(提取包络)。表面肌电选取下肢各主要关键肌,双侧股直肌、股二头肌(长头)、胫骨前肌、腓肠肌(外侧头),三维步态和表面肌电两者同时同步进行步态采集。分析以下指标:① 股直肌与胫骨前肌积分肌电(integrated electromyography,iEMG),数值越大,表明肌肉在该时间段内的激活程度越高。② 肌肉起始时间点为股直肌和胫骨前肌开始产生明显电活动的具体时刻(通常以步态周期百分比表示)。步态周期百分比越小,表明该肌肉在步态周期中越早开始激活,即更早进入明显电活动状态。③ 主动肌-拮抗肌共同激活指数(co-contraction index,CI),特别是股直肌-股二头肌共同激活指数(rectus femoris-biceps femoris co-contraction index,RFBF-CI)和胫骨前肌-腓肠肌共同激活指数(tibialis anterior-gastrocnemius co-contraction index,TAGL-CI)。数值越低,表明肌肉间的共同激活程度越低,拮抗抑制更合理,肌肉间的协调控制能力越好。

2.3 统计学分析

采用SPSS 22.0统计软件进行数据分析。计量资料服从正态分布以($\bar{x}\pm s$)表示,组内比较采用配对样本t检验,组间比较用单因素方差分析方法;计数资料以频数表示,组间比较采用χ^2检验。$P<0.05$为差异具有统计学意义。

3 结 果

3.1 3组治疗前后FMA评分比较

与治疗前比较，3组治疗后FMA评分均升高（$P<0.05$）；与LERR组和FES组比较，LERR＋FES组治疗后FMA评分均更高（$P<0.05$）。见表2。

3.2 3组治疗前后平衡功能比较

与治疗前比较，3组治疗后睁眼站立、闭眼站立、脚跟对脚尖站立、单脚站立时重心移动速度均减小（$P<0.05$），稳定时间均缩短（$P<0.05$）；与LERR组和FES组比较，LERR＋FES组治疗后睁眼站立、闭眼站立、脚跟对脚尖站立时重心移动速度均更小（$P<0.05$），稳定时间均更短（$P<0.05$）。见表3。

表2 3组治疗前后FMA评分比较（$\bar{x}\pm s$） 分

Table 2 Comparison of FMA scores in three groups before and after treatment（$\bar{x}\pm s$） Scores

组别	例数	治疗前	治疗后
LERR组	16	50.00±2.88	57.56±3.42[1)]
FES组	16	49.50±3.06	55.94±2.49[1)]
LERR＋FES组	16	49.75±2.77	61.00±3.03[1)2)3)]

注：与治疗前比较，1）$P<0.05$；与LERR组比较，2）$P<0.05$；与FES组比较，3）$P<0.05$。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the LERR group, 2) $P<0.05$; compared with the FES group, 3) $P<0.05$.

表3 3组治疗前后平衡功能比较（$\bar{x}\pm s$）

Table 3 Comparison of balance function in three groups before and after treatment（$\bar{x}\pm s$）

组别	例数	时间	重心移动速度/（m/s）				稳定时间/s
			睁眼站立	闭眼站立	脚跟对脚尖站立	单脚站立	
LERR组	16	治疗前	5.32±0.89	5.06±0.78	7.93±1.31	9.49±1.71	22.06±8.63
		治疗后	4.42±0.74[1)]	4.37±0.37[1)]	6.59±0.87[1)]	6.80±2.38[1)]	13.48±3.45[1)]
FES组	16	治疗前	5.30±0.87	5.01±0.79	7.63±1.16	9.75±2.05	20.36±6.44
		治疗后	4.60±0.96[1)]	4.38±0.87[1)]	6.23±1.11[1)]	7.84±0.88[1)]	14.27±2.50[1)]
LERR＋FES组	16	治疗前	5.98±1.63	4.97±0.52	7.97±1.32	10.85±3.95	24.94±4.38
		治疗后	3.66±0.79[1)2)3)]	3.82±0.36[1)2)3)]	5.15±1.32[1)2)3)]	6.57±2.38[1)]	9.12±1.86[1)2)3)]

注：与治疗前比较，1）$P<0.05$；与LERR组比较，2）$P<0.05$；与FES组比较，3）$P<0.05$。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the LERR group, 2) $P<0.05$; compared with the FES group, 3) $P<0.05$.

3.3 3组治疗前后三维步态时空参数和运动学参数比较

与治疗前比较，3组治疗后步速、步频均加快（$P<0.05$），单步长均增长（$P<0.05$），KA-ACRP、HK-ACRP值均升高（$P<0.05$），步态周期均缩短（$P<0.05$），支撑相、双支撑相百分比均降低（$P<0.05$）；与LERR组和FES组比较，LERR＋FES组治疗后步速、步频均更快（$P<0.05$），单步长均更长（$P<0.05$），KA-ACRP、HK-ACRP值均更高（$P<0.05$），步态周期均更短（$P<0.05$），支撑相、双支撑相百分比均更低（$P<0.05$）。见表4。

3.4 3组治疗前后股直肌和胫骨前iEMG值、起始时间点、CI比较

与治疗前比较，3组治疗后股直肌、胫骨前肌iEMG值均升高（$P<0.05$），股直肌、胫骨前肌起始时间点、RFBF-CI、TAGL-CI均降低（$P<0.05$）；与LERR组和FES组比较，LERR＋FES组治疗后股直肌iEMG值均更高（$P<0.05$），股直肌起始时间点、RFBF-CI、TAGL-CI均更低（$P<0.05$）；与LERR组比较，LERR＋FES组治疗后胫骨前肌iEMG值更高（$P<0.05$），胫骨前肌起始时间点更低（$P<0.05$）。见表5。

表4　3组治疗前后三维步态时空参数和运动学参数比较($\bar{x}\pm s$)

Table 4　Comparison of three-dimensional gait spatiotemporal parameters and kinematic parameters in three groups before and after treatment ($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	时间	时空参数			
			步速/(m/s)	步频/(steps/min)	步态周期/s	单步长/m
LERR组	16	治疗前	0.24±0.10	59.94±8.50	2.04±0.37	0.23±0.04
		治疗后	0.29±0.11[1)]	74.75±7.48[1)]	1.75±0.26[1)]	0.34±0.06[1)]
FES组	16	治疗前	0.20±0.11	65.19±9.82	2.00±0.30	0.24±0.08
		治疗后	0.27±0.07[1)]	75.19±6.88[1)]	1.85±0.24[1)]	0.27±0.08[1)]
LERR+FES组	16	治疗前	0.24±0.09	51.56±8.49	2.10±0.43	0.25±0.06
		治疗后	0.40±0.12[1)2)3)]	82.06±7.63[1)2)3)]	1.48±0.18[1)2)3)]	0.42±0.08[1)2)3)]

组别	例数	时间	时空参数		运动学参数	
			支撑相百分比/%	双支撑相百分比/%	KA-ACRP/°	HK-ACRP/°
LERR组	16	治疗前	79.38±5.15	57.55±8.85	6.40±1.61	3.70±1.05
		治疗后	73.96±4.89[1)]	49.64±8.94[1)]	9.63±1.78[1)]	5.29±0.67[1)]
FES组	16	治疗前	81.44±5.72	58.42±4.79	6.59±2.04	3.46±1.11
		治疗后	74.20±3.87[1)]	52.18±4.82[1)]	9.08±1.91[1)]	5.08±0.61[1)]
LERR+FES组	16	治疗前	84.19±4.69	60.84±7.86	5.25±2.16	3.39±0.92
		治疗后	69.44±4.55[1)2)3)]	42.62±7.41[1)2)3)]	11.07±1.06[1)2)3)]	5.87±0.64[1)2)3)]

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与LERR组比较,2) $P<0.05$;与FES组比较,3) $P<0.05$。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the LERR group, 2) $P<0.05$; compared with the FES group, 3) $P<0.05$.

表5　3组治疗前后股直肌和胫骨前iEMG值、起始时间点和CI比较($\bar{x}\pm s$)

Table 5　Comparison of iEMG values of rectus femoris muscle and anterior tibial muscle, starting time point, and CI in three groups before and after treatment ($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	时间	股直肌iEMG值/(mV·s)	胫骨前肌iEMG值/(mV·s)	股直肌起始时间点/%
LERR组	16	治疗前	38.14±6.51	29.87±9.21	29.81±4.98
		治疗后	49.04±9.26[1)]	45.66±4.57[1)]	26.94±4.86[1)]
FES组	16	治疗前	32.83±6.28	24.47±8.48	28.00±5.09
		治疗后	50.88±8.04[1)]	56.56±10.60[1)]	25.13±4.83[1)]
LERR+FES组	16	治疗前	27.90±5.72	24.56±4.81	28.19±3.25
		治疗后	69.77±8.16[1)2)3)]	58.91±6.88[1)2)]	20.75±3.29[1)2)3)]

组别	例数	时间	胫骨前肌起始时间点/%	RFBF-CI	TAGL-CI
LERR组	16	治疗前	82.12±2.55	0.35±0.07	0.36±0.06
		治疗后	76.94±4.17[1)]	0.28±0.06[1)]	0.27±0.06[1)]
FES组	16	治疗前	83.88±2.85	0.34±0.07	0.34±0.05
		治疗后	73.00±3.74[1)]	0.26±0.04[1)]	0.25±0.04[1)]
LERR+FES组	16	治疗前	80.00±5.32	0.37±0.01	0.39±0.03
		治疗后	71.81±4.90[1)2)]	0.21±0.04[1)2)3)]	0.19±0.03[1)2)3)]

注:与治疗前比较,1) $P<0.05$;与LERR组比较,2) $P<0.05$;与FES组比较,3) $P<0.05$。

Note: compared with that before treatment, 1) $P<0.05$; compared with the LERR group, 2) $P<0.05$; compared with the FES group, 3) $P<0.05$.

4 讨 论

约55%～75%的脑卒中幸存者遗留不同程度的肢体功能障碍，而下肢运动功能障碍直接制约其日常活动能力，进而限制其社会参与度和职业发展空间。因此，探究提高脑卒中后患者下肢步行能力训练方式尤为重要[20]。康复工程与技术依托现代科技，通过FES、LERR等手段提供高强度、重复性、任务导向训练，为脑卒中下肢运动及步行功能障碍康复提供了新思路。本研究基于“任务导向性理论”，通过随机对照试验比较LERR组（单一LERR干预组）、FES组（单一下肢FES干预组）以及LERR＋FES组（LERR联合下肢FES干预组）干预4周后的疗效，发现LERR组、FES组和LERR＋FES组均能有效改善脑卒中的下肢步行能力，但LERR＋FES组联合干预的疗效更为显著。然而，LERR＋FES组在单脚站立重心移动速度方面的疗效并不优于其他2组。

LERR通过严格控制髋、膝关节的运动角度，重建正常的关节运动模式，从而增强患者在步行中的预期性姿势调节能力。同时，在步行周期中提供重复性、任务导向性的下肢轨迹引导，提高步行能力[21]。多篇文献中提到，对脑卒中患者进行LERR训练，可以引导髋、膝关节在规范的角速度范围内完成周期性屈伸运动，改善异常关节运动时序，增强脑卒中患者的步行能力[22-23]。本研究中LERR通过针对性负重转移训练，有效增强患侧支撑稳定性并优化步行中重心移动轨迹，固定轨迹约束降低了支撑不稳定诱发的代偿性肌紧张，同时其节律性步态模式可强化本体感觉与前庭信息的整合效率[24]。本研究结果中，LERR组和LERR＋FES组治疗前后FMA评分、动静态平衡指数、步态时空参数、ACRP值、iEMG值、肌肉前肌起始时间点和CI有明显差异，再次验证了LERR疗效的可行性。

FES以功能恢复为导向，是基于运动意图的神经电刺激，要求患者在电脉冲输出前需启动关键肌的活动，使辅助性外周电刺激与下行运动指令在时域上精确锁定，从而将干预模式由被动式电驱动转换为主动驱动。王沐等[25]研究发现FES可以针对性地改善患者下肢步行能力。本研究中的FES依据步态时相触发踝背屈和膝伸展肌群，使瘫痪肌群获得与步态时相一致的节律性辅助收缩，促进主要关键肌的主动参与能力，最大限度地参与和功能恢复[26]。

本研究采用LERR和FES联合干预，LERR引导髋、膝关节在规范的步态过程中完成周期性屈伸运动，针对异常关节运动时序进行改善，同时FES依据步态相位触发股直肌与胫骨前肌，二者联合可能促进远端和近端关节运动之间的协调，表现为关节间平均绝对相对相位的提高，表明髋-膝、膝-踝关节间运动时序协调性得以改善[27]。同时，在本研究中LERR通过专项承重转移训练，明显提升了患侧下肢的支撑能力与步行中的重心移动路径；FES则于站立相精准激活伸肌群，进一步提升患肢负重转移能力与姿势调控水平。但本研究中治疗后3组单脚站立重心移动速度差异无统计学意义，可能与治疗4周尚且只能改善基础平衡，不足以在更高难度的单脚支撑任务中产生明显差异有关。

同时LERR的固定轨迹约束降低了支撑不稳定诱发的代偿性肌紧张，FES的时序性刺激增强了主动肌选择性收缩、减少了拮抗肌过度参与[28-29]。二者的协同干预使主动肌在正确时相获得充足的运动输入、独立完成任务，不再依赖拮抗肌的代偿性辅助，从而使主动肌-拮抗肌CI下降，表明肌肉协同模式更加有效，有助于改善关节运动协调[22]。FES的时序性刺激增强了主动肌选择性收缩，减少了拮抗肌过度参与[30-31]。

本研究结果显示，LERR联合FES可发挥这2种治疗方式的协同优势，改善脑卒中患者步行功能。二者协同作用可能进一步优化关节间运动协调及肌肉协同控制。本研究从功能、生物力学及表面肌电等多个层面为LERR联合FES应用于脑卒中步行康复提供了证据支持。LERR联合FES可改善脑卒中患者的步行功能及协调性，其机制可能在于将LERR提供的近端轨迹引导和重复性步态训练，与FES提供的远端肌肉时序激活，从而促进更协调、更有效的步行控制模式形成。

然而，作为单中心研究，样本量相对有限且随访时间较短，所得结果主要提示短期疗效，尚需通过多中心、大样本及长期随访的临床试验予以验证。与此同时，本研究未涉足机制层面的深入探讨，致使上述康复策略所依赖的神经可塑性基础尚不明确。因此，未来研究应将内在神经调控机制作为重点方向，旨在从源头阐释并优化现有康复方案，为脑卒中后步态功能重建提供更坚实的理论依据。

参考文献

[1] 王拥军,李子孝,谷鸿秋,等.中国卒中报告2020(1)[J].中国卒中杂志,2022,17(5):433-447.
WANG Y J,LI Z X,GU H Q,et al. China stroke statistics 2020(1)[J]. Chin J Stroke,2022,17(5):433-447.

[2] GAO Z R,PANG Z,CHEN Y M,et al. Restoring after central nervous system injuries:neural mechanisms and translational applications of motor recovery [J]. Neurosci Bull,2022,38(12):1569-1587.

[3] 岳圆,张通,刘元旻,等.下肢外骨骼机器人对卒中后小脑性共济失调患者平衡和步行功能的影响[J].中国康复理论与实践,2026,32(1):23-29.
YUE Y,ZHANG T,LIU Y M,et al. Effect of lower extremity exoskeleton robots on balance and walking function of patients with post-stroke cerebellar ataxia [J]. Chin J Rehabil Theory Pract,2026,32(1):23-29.

[4] ZHANG Y T,ZHAO W W,WAN C L,et al. Exoskeleton rehabilitation robot training for balance and lower limb function in subacute stroke patients:a pilot,randomized controlled trial [J]. J NeuroEngineering Rehabil,2024,21(1):98.

[5] 孙思杰,邓罗义,王先斌,等.优势半球卒中患者脑功能与步态特点及相关性分析[J].中国康复医学杂志,2026,41(8):1251-1260.
SUN S J,DENG L Y ,WANG X B,et al. Brain functional characteristics and gait features in patients with dominant hemisphere stroke:a correlation analysis [J]. Chin J Rehabil Med,2026,41(8):1251-1260.

[6] 邢政,刘敏琦,丁宁,等.外骨骼机器人在脑卒中患者康复治疗中的研究进展[J].中国康复,2026,41(1):48-53.
XING Z,LIU M Q,DING N,et al. Research progress on exoskeleton robots in the rehabilitation of stroke patients [J]. Chin J Rehabil,2026,41(1):48-53.

[7] 程洪,黄瑞,邱静,等.康复机器人及其临床应用综述[J].机器人,2021,43(5):606-619.
CHENG H,HUANG R,QIU J,et al. A survey of rehabilitation robot and its clinical applications [J]. Robot,2021,43(5):606-619.

[8] GULER M A,ERHAN B,YILMAZ YALCINKAYA E. Caregiver burden in stroke inpatients:a randomized study comparing robot-assisted gait training and conventional therapy [J]. Acta Neurol Belg,2021,121(3):729-736.

[9] PECKHAM P H,KNUTSON J S. Functional electrical stimulation for neuromuscular applications [J]. Annu Rev Biomed Eng,2005,7:327-360.

[10] 涂细凯.集成功能性电刺激的穿戴式康复机器人研究[D].武汉:华中科技大学,2012:28-37.
TU X K. Research on a wearable rehabilitation robot integrated with function electrical stimulation [D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2012:28-37.

[11] 梁天佳,吴小平,莫明玉.上肢康复机器人结合功能性电刺激对偏瘫上肢功能恢复的影响[J].实用医学杂志,2012,28(13):2230-2231.
LIANG T J,WU X P,MO M Y. The influence of upper limb rehabilitation robots combined with functional electrical stimulation on the functional recovery of hemiplegic upper limbs [J]. J Pract Med,2012,28(13):2230-2231.

[12] HOHL K,SMITH A C,MACALUSO R,et al. Muscle adaptations in acute SCI following overground exoskeleton+FES training:a pilot study [J]. Front Rehabil Sci,2022,3:963771.

[13] 周欢霞,段宏霞,赵忠志,等.上肢机器人训练联合多通道功能性电刺激对老年卒中患者上肢运动功能的影响[J].老年医学与保健,2023,29(4):690-695.
ZHOU H X,DUAN H X,ZHAO Z Z,et al. The effect of upper limb robot training combined with multi-channel functional electrical stimulation on upper limb motor function in elderly stroke patients [J]. Geriatr Health Care,2023,29(4):690-695.

[14] 任勇,张定国.功能性电刺激与机械外骨骼融合的膝关节康复装置的设计与实现[J].中国康复医学杂志,2016,31(3):330-332.
REN Y,ZHANG D G. Design and implementation of a knee joint rehabilitation device integrating functional electrical stimulation and mechanical exoskeleton [J]. Chin J Rehabil Med,2016,31(3):330-332.

[15] 沈新培.三维步态在脑卒中足下垂患者下肢节段协调性分析的应用[D].蚌埠:蚌埠医学院,2021:1-24.
SHEN X P. Application of three-dimensional gait in coordination analysis of lower limb segments in stroke patients with foot drop [D]. Bengbu:Bengbu Medical College,2021:1-24.

[16] 中华医学会神经病学分会,中华医学会神经病学分会脑血管病学组.中国急性缺血性卒中诊治指南2023[J].中华神经科杂志,2024,57(6):523-559.
Chinese Society of Neurology,Cerebrovascular Disease Group of the Chinese Society of Neurology. Chinese guidelines for diagnosis and treatment of acute ischemic stroke 2023 [J]. Chin J Neurol,2024,57(6):523-559.

[17] 樊春晖,刘伟乐,李君,等.多种感觉刺激疗法联合下肢康复机器人治疗脑梗死后偏瘫的临床效果[J].河南医学研究,2026,35(17):3140-3146.
FAN C H,LIU W L,LI J,et al. Clinical efficacy of multisensory stimulation therapy combined with lower limb rehabilitation robot in the treatment of hemiplegia after cerebral infarction [J]. Henan Med Res,2026,35(17):3140-3146.

[18] HORNBY T G,CAMPBELL D D,KAHN J H,et al. Enhanced gait-related improvements after therapist- versus robotic-assisted locomotor training in subjects with chronic stroke:a randomized controlled study [J]. Stroke,2008,39(6):1786-1792.

[19] BUSHNELL C,BETTGER J P,COCKROFT K M,et al. Chronic stroke outcome measures for motor function intervention trials:expert panel recommendations [J]. Circ Cardiovasc Qual Outcomes,2015,8(6 Suppl 3):S163-S169.

[20] 吴维坤,周文强.脑卒中后下肢运动功能障碍的治疗概况[J].

中国医药导刊,2021,23(5):337-341.
WU W K,ZHOU W Q. Overview of the treatment of lower extremity motor dysfunction after stroke [J]. Chin J Med Guide,2021,23(5):337-341.

[21] 金霞,曹迎,汪吴臻. 外骨骼康复机器人训练对亚急性脑卒中患者平衡和下肢功能的影响[J]. 中国康复,2025,40(5):265-270.
JIN X,CAO Y,WANG W Z. Effect of exoskeleton rehabilitation robot training on balance and lower limb function in subacute stroke patients [J]. Chin J Rehabil,2025,40(5):265-270.

[22] 何欧琴,徐蓉贞. 机器人辅助步行训练联合下肢功能性电刺激对脑卒中患者的影响[J]. 机器人外科学杂志,2025,6(6):994-998,1030.
HE O Q,XU R Z. Effects of robot-assisted gait training combined with functional electrical stimulation of the lower limbs in stroke patients [J]. Chin J Rob Surg,2025,6(6):994-998,1030.

[23] 马宇飞,云阳,甄希成. 关于脑卒中后偏瘫患者下肢肌肉功能障碍的研究综述[J]. 世界最新医学信息文摘,2019,19(67):33-34.
MA Y F,YUN Y,ZHEN X C. Review of research on lower-limb muscle dysfunction of patients with hemiplegia after cerebral stroke [J]. World Latest Med Inform,2019,19(67):33-34.

[24] 彭小柯,赵国顺,韩诗雨,等. 外骨骼机器人对脑卒中患者平衡和下肢功能的影响Meta分析[J]. 康复学报,2025,35(2):197-204.
PENG X K,ZHAO G S,HAN S Y,et al. Effects of exoskeleton robots on balance and lower limb function of patients with stroke:a meta-analysis [J]. Rehabil Med,2025,35(2):197-204.

[25] 王沐,刘梅,王倩. 功能性电刺激在脑卒中后足下垂康复中的研究进展[J]. 现代仪器与医疗,2026,32(4):61-69.
WANG M,LIU M,WANG Q. Research progress of functional electrical stimulation in the rehabilitation of foot drop after stroke [J]. Mod Instrum Med Care,2026,32(4):61-69.

[26] 刘加鹏,王卫宁,徐冬艳,等. 多关节联动功能性电刺激联合常规康复治疗对脑卒中患者下肢运动功能的影响[J]. 康复学报,2024,34(4):349-354.
LIU J P,WANG W N,XU D Y,et al. Effect of multi-joint functional electrical stimulation combined with conventional rehabilitation therapy on lower limb motor function of patients with stroke [J]. Rehabil Med,2024,34(4):349-354.

[27] CHEN H M,LI Y Z,XU X D,et al. Acute effects of kinesio taping on lower-limb coordination of gait in hemiplegic patients [J]. Gait Posture,2023,102:43-49.

[28] 罗啸,高德强,章凯旋,等. 表面肌电图在脑卒中患者异常步态分析中的研究进展[J]. 世界复合医学,2025,11(4):195-198.
LUO X,GAO D Q,ZHANG K X,et al. Progress of surface electromyography in abnormal gait analysis in stroke patients [J]. World J Complex Med,2025,11(4):195-198.

[29] 李飏安. 外骨骼机器人对脑卒中患者下肢运动功能的影响及肌肉协同机制研究[D]. 武汉:华中科技大学,2023:16-35.
LI Y A. Effects of exoskeleton-assisted training on lower-limb motor function in stroke survivors and its mechanism of muscle synergies [D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2023:16-35.

[30] BROWN L,STREET T,ADONIS A,et al. Implementing functional electrical stimulation clinical practice guidelines to support mobility:a stakeholder consultation [J]. Front Rehabil Sci,2023,4:1062356.

[31] JIN J F,GUO Z T,ZHANG Y P,et al. Prediction of motor recovery after ischemic stroke using diffusion tensor imaging:a meta-analysis [J]. World J Emerg Med,2017,8(2):99.

Effects of Lower-Limb Exoskeleton Rehabilitation Robot Integrated with Functional Electrical Stimulation on Gait Function in Stroke Patients

HE Xiaoli[1,2], WANG Jie[1], WANG Yingpeng[1], WANG Congxiao[1], QIE Shuyan[1*]
[1] *Beijing Rehabilitation Hospital, Capital Medical University, Beijing 100144, China;*
[2] *Beijing Fangshan District Liangxiang Hospital, Beijing 102401, China*
*Correspondence: QIE Shuyan, E-mail: shuyanpb@163.com

ABSTRACT **Objective** To investigate the effects of lower-limb exoskeleton rehabilitation robot (LERR) integrated with functional electrical stimulation (FES) on gait function in stroke patients. **Methods** A total of 48 stroke patients newly hospitalized in Beijing Rehabilitation Hospital, Capital Medical University from August 2024 to July 2025 were selected. Participants were randomly allocated to an LERR group, an FES group, and an LERR+FES group using a computer-generated random number table, with 16 participants per group. All participants received standard inpatient rehabilitation therapy for 4 weeks, 4 hours/day, 5 days/week. In addition, the LERR group received LERR treatment, the FES group received lower extremity FES treatment; and the LERR+FES group received combined and synchronous application of LERR and FES. All three groups received treatment for 20 min/day, 5 days/week, for 4 consecutive weeks. Before treatment and after 4 weeks of treatment, the Fugl-Meyer Assessment (FMA) was used to evaluate the overall motor function of patients; the Dutch STABLE three-dimensional balance and posture training and assessment system was used to evaluate the balance function of patients; the British VICON three-dimensional gait analysis system was used to collect and analyze spatiotemporal parameters (gait speed, cadence, gait cycle, step length, percentage of stance phase, percentage of double support phase) and lower limb joint kinematic parameters [hip-knee average absolute continuous relative phase (HK-ACRP) and knee-ankle average absolute continuous relative phase (KA-ACRP)]; the Delsys Trigno wireless surface electromyography system

(下转第738页)