

下肢康复机器人的应用对全膝关节置换术患者康复的影响

蔡立柏¹, 刘延锦², 刘阳阳³, 梁郝⁴, 魏泽旭⁴, 白井双⁵, 张玉坤⁶, 王楚⁷, 崔妙然¹

摘要:目的 探讨下肢康复机器人用于全膝关节置换术后患者康复训练的效果。方法 将 96 例全膝关节置换术患者按照入院时间分为对照组与观察组各 48 例。对照组给予常规人工辅助康复训练,观察组实施基于下肢康复机器人的康复训练。比较两组干预前后主动和被动膝关节活动度、美国特种外科医院膝关节评分、改良 Barthel 指数评分以及住院天数和相关费用的差异。结果 出院时观察组主动和被动膝关节活动度、膝关节功能评分及日常活动能力评分显著高于对照组($P<0.05$, $P<0.01$);住院天数及总住院费用显著低于对照组(均 $P<0.01$)。结论 下肢康复机器人用于全膝关节置换术后患者康复训练,可促进膝关节功能恢复,提高康复效果。

关键词: 膝关节置换术; 功能锻炼; 康复机器人; 康复训练; 膝关节功能; 膝关节活动度; 日常生活活动能力

中图分类号: R473.6; R493 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3870/j.issn.1001-4152.2022.05.005

A study of post-total knee replacement arthroplasty using lower limbs robot-assisted training system Cai Libo, Liu Yanjin, Liu Yangyang, Liang Hao, Wei Zexu, Bai Jingshuang, Zhang Yukun, Wang Chu, Cui Miaoran. Department of Orthopedics, The First Affiliated Hospital of Zhengzhou University, Zhengzhou 450046, China

Abstract: **Objective** To explore the application value of the lower limbs robot-assisted training system for post-total knee arthroplasty (TKA) rehabilitation. **Methods** A total of 96 patients following TKA were assigned into a control group or an observation group chronologically, with 48 in each group. The control group was given traditional manual rehabilitation therapy, while the observation group received robot-assisted lower limbs rehabilitation. The active and passive knee range of motion (ROM), the Hospital for Special Surgery (HSS) knee score, the Modified Barthel Index (MBI) score, length of hospital stay and hospitalization expense were compared between the two groups after the intervention. **Results** The observation group had greater active and passive knee ROM, higher HSS knee score and MBI score, whereas shorter length of hospital stay and less hospitalization expense compared with the control group ($P<0.05$, $P<0.01$). **Conclusion** The application of robotic system for lower limbs rehabilitation can promote recovery of knee function after TKA.

Key words: total knee arthroplasty; functional exercise; robot-assisted training system; rehabilitation training; knee function; knee range of motion; activities of daily living

随着我国人口老龄化进程加快,膝关节骨性关节炎发病率也呈逐年上升趋势,约占 65 岁以上人群的 21% 以上^[1]。全膝关节置换术(Total Knee Arthroplasty, TKA)是解决大多数膝关节骨性关节炎患者疼痛和生理功能限制的决定性治疗^[2],已成为重度或终末期膝关节骨性关节炎最主要的治疗方式。目前常规 TKA 术后康复训练的实施主体多以物理治疗师或康复治疗师为主,因其专业知识和技能的差异,使得康复训练的一致性和客观性难以保证^[3];加之 TKA 术后康复训练内容繁多,劳动强度大,相关工作人员易因体力过度消耗而缩短训练时间、降低训练强度,影响康复效果^[4-5]。相对于人工辅助康复训练,下肢康复机器人具有较高的一致性、持久性、精准性,既

可有效防止 TKA 术后患者膝关节僵硬^[6],改善膝关节运动范围^[7]、降低术后疼痛及凝血风险^[8],又可减轻相关工作人员的劳动强度,受到国内外学者和研究机构的广泛关注。国外已在关节置换术患者中应用下肢康复机器人进行康复训练^[9],而国内主要集中于偏瘫患者下肢运动功能与步行能力的研究^[10]。本研究旨在通过构建 TKA 患者下肢康复机器人康复训练干预方案,并探讨其对膝关节活动度、膝关节功能及日常活动能力的影响,从而为 TKA 患者膝关节功能的快速康复提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料 采用便利抽样法,选取 2020 年 1 月至 2021 年 3 月郑州大学第一附属医院骨科病区收治的 96 例 TKA 患者为研究对象,其中 2020 年 1~5 月收治的 48 例为对照组,2020 年 6 月至 2021 年 3 月收治的 48 例为观察组。纳入标准:符合膝关节骨性关节炎的临床诊断^[11];首次行单侧 TKA,术后生命体征平稳。排除标准:存在既往精神病史或脑器质性疾病;存在严重心血管疾病且不易耐受早期康复训练;术后感染。

作者单位:郑州大学第一附属医院 1. 骨科 2. 护理部 3. 康复科 5. 心内科 (河南 郑州, 450046); 4. 郑州大学护理与健康学院; 6. 浙江大学第二附属医院; 7. 中国康复研究中心

蔡立柏:男,硕士,主管护师

通信作者:刘延锦, liu-yanjin@126.com

科研项目:河南省医学科技攻关计划(联合共建)项目(LHGJ20190074)

收稿:2021-10-12;修回:2021-11-29

1.2 干预方法

1.2.1 观察组

1.2.1.1 成立研究小组 由骨科主任担任组长,康复医学科护士长为副组长,成立下肢康复机器人康复训练干预团队。成员包括骨科护士、骨科医生、康复医学科护士各2名;康复治疗师、物理治疗师、机器人工程师、心理咨询师各1名。高级职称5名,中级职称4名,初级职称1名;博士1名,硕士5名,本科4名。骨科主任、康复医学科护士长为总协调,负责研究设计、方案实施的督导检查及质量控制;骨科医生、康复治疗师、物理治疗师及心理咨询师根据患者的性格特点及运动特征共同制订个体化的机器人康复锻炼方案。物理治疗师、康复医学科护士负责协助患者穿戴下肢康复机器人,指导患者使用康复机器人进行康复锻炼,保障患者运动安全;机器人工程师负责初始参数调整及机器人的日常维护和保养;骨科护士负责TKA患者的疼痛管理、健康教育、随访及数据收集整理。

1.2.1.2 制订康复训练干预方案 参照TKA术后康复指南^[12-14]、专家共识^[15-17]及相关文献^[6,18],采取课题组讨论、2轮专家函询(17名专家)制订TKA患者下肢康复机器人康复训练干预方案。

1.2.1.3 组织培训及考核 由康复科护士长组织团队成员以理论授课结合工作坊、情景模拟、案例分析、角色扮演等方式进行培训,每次30~60 min,共4次。培训内容:下肢康复机器人的种类、应用现状及工作原理;TKA患者术后心理和运动行为特点、康复锻炼常见问题及处理对策;使用下肢康复机器人进行康复锻炼的实施步骤及注意事项;下肢康复机器人康复锻炼的情景演练及应急预案。培训后由护士长统一组织理论及技能考核,满分为100分, ≥ 80 分为合格,考试合格率100%。

1.2.1.4 实施康复训练干预方案 采用Hocoma公司生产的Locomat康复机器人(Lokocontrol 4.31版本),主要包括体质量悬吊支持系统和训练跑台两大部分。体质量悬吊支持系统通过磅秤测量患者体质量,并提供悬吊支撑力,可减轻患者自身体质量负荷对膝关节的压迫;训练跑台可通过控制面板及数据监测器实现对TKA患者训练模式、速度、距离、能量消耗以及心率等内容的参数调整及实时监测。当患者术后满足以下任意条件即可使用下肢康复机器人进行康复锻炼^[19]:保持站立平衡Ⅱ级,患侧肌力2级,下肢负重40%~60%,膝关节屈曲度 $>60^\circ$ 。

正式康复训练前,由骨科及康复科护士向患者讲解机器人康复锻炼的流程及训练中的注意事项,消除患者对机器人康复锻炼方式及效果的不确定感。康复医学科护士测量患者大腿和小腿长度及周径,并与机器人绑定位置进行拟合,确定绑带尺寸。物理治疗师辅助患者佩戴躯干悬吊绳及腿部支具,并调节机器

人装置参数。康复治疗师和物理治疗师根据患者体质量和病情,设置机器人参数。减重量初始值一般设定为患者自身体质量的40%~60%,引导力100%,患者系数(患者小腿长度)初始值为0.2~0.7,系统会自行设置。运动跑台起始速度初始值为1.0~1.5 km/h,此后可根据患者膝关节功能改善程度和运动舒适度逐步减少重量、增加跑台速度。干预频次为40~50 min/次,其中安装、拆卸、调整设备约20 min,患者训练时间20~30 min/次,1次/d,共7 d。物理治疗师及康复医学科护士全程参与,保证患者出现特殊情况时第一时间处理,保障安全。患者训练中若出现心率 $>$ 同龄标准心率的75%,血压 $>180/110$ mm-Hg,膝关节疼痛难以忍受和/或心前区不适等症状时,患者本人或物理治疗师可通过按压跑台两侧扶手上的紧急制动按钮,立即停止训练。

1.2.2 对照组 对照组接受TKA术后常规康复锻炼干预,主要包括康复锻炼指导与物理治疗两方面。
①康复锻炼指导。骨科护士向TKA患者发放健康教育手册,讲解早期康复锻炼的意义、方法及注意事项,鼓励患者及早进行康复锻炼,指导患者使用康复器具进行功能锻炼及辅助行走;下肢肌肉力量训练包括股四头肌和腓肠肌等长收缩、直腿抬高等,频率为5~10次/组,3组/d;膝关节持续被动训练一般于术后2~3 d开始,初始活动范围为 $0\sim40^\circ$,根据患者耐受度、屈曲角度逐日增加 $5\sim10^\circ$,每次锻炼30~60 min,2次/d,直至患膝关节屈曲 $105\sim115^\circ$,患膝关节伸直 0° ^[20]。
②物理治疗。采用冷疗、红外偏振光治疗等减轻术后关节肿胀和促进炎症吸收,辅助膝关节功能恢复,其中冷疗20 min/次,2次/d;红外偏振光治疗,照射强度为50%~60%,10 min/次,2次/d;电磁波治疗30 min/次,2次/d。

1.3 评价方法

1.3.1 评价指标 ①关节活动度(Range of Motion, ROM)。由康复医学科护士在相同的时间、地点、光照环境下,使用相同的测量工具和方法,测量两组患者主动活动和被动活动时膝关节伸直及弯曲角度,膝关节活动度=膝关节弯曲角度-膝关节伸直角度^[21]。
②美国特种外科医院膝关节评分(Hospital for Special Surgery Knee Score, HSS)。是目前最常用的膝关节功能评价工具^[22],包含疼痛、关节功能、屈曲挛缩、肌力、关节稳定性等7个项目,总分0~100分,分数越高代表膝关节功能越好。
③改良Barthel指数评定量表(Modified Barthel Index, MBI)^[23]。包括进食、步行、穿衣、洗澡、上下楼等10个项目,总分0~100分,得分越高,表明患者独立性越高,日常生活能力越好^[24]。
④统计两组患者住院天数、治疗费用(由本院结算系统自动显示的治疗费用,包括红外偏振光、冷疗等膝关节术后治疗产生的费用)及总住院费用。

1.3.2 资料收集方法 调查前由康复治疗师对 2 名调查员进行培训,统一指导用语,明确各评价指标的填写及测定方法,考核合格后参与调查。在 TKA 术后第 2~3 天(干预前),由骨科护士收集患者的一般资料、HSS 评分及 MBI 评分,于出院日(干预后)再次收集上述指标并统计两组住院天数及相关费用;康复医学科护士测量干预前后两组膝关节主动及被动活动度。

表 1 两组一般资料比较

组别	例数	性别(例)		年龄 (岁, $\bar{x}\pm s$)	BMI ($\bar{x}\pm s$)	工作状态(例)		文化程度(例)			医保类型(例)					并存疾病(例)			
		男	女			在岗	非在岗	初中及以下	高中或中专	大专及以上	新农合	省、市医保	商业保险	其他	无	1 种	2 种	3 种	
对照组	48	16	32	66.90±6.45	25.31±2.06	9	39	22	21	5	34	8	2	4	10	17	14	7	
观察组	48	18	30	66.48±5.95	24.98±2.13	12	36	21	19	8	30	7	4	7	11	21	11	5	
统计量		$\chi^2=0.182$		$t=0.328$		$t=0.767$		$Z=-0.485$			—					$Z=-0.861$			
P		0.670		0.744	0.445	0.459		0.628			0.632					0.389			

表 2 两组干预前后主动和被动膝关节活动度、膝关节功能评分及日常活动能力评分比较

组别	例数	干预前				干预后			
		主动 ROM(°)	被动 ROM(°)	HSS 评分	MBI 评分	主动 ROM(°)	被动 ROM(°)	HSS 评分	MBI 评分
对照组	48	65.58±9.02	80.17±6.25	51.42±7.87	57.08±8.92	90.17±7.73	99.27±8.27	68.98±7.05	81.67±11.78
观察组	48	64.04±9.26	82.17±7.85	53.65±6.92	55.52±5.95	102.60±7.13	105.33±8.60	74.65±6.13	87.50±10.05
t		0.826	1.380	1.474	0.903	8.194	3.519	4.206	2.610
P		0.411	0.171	0.144	0.369	0.000	0.001	0.000	0.011

2.3 两组住院天数及相关费用比较 见表 3。

表 3 两组住院天数及相关费用比较 $\bar{x}\pm s$

组别	例数	住院天数(d)	治疗费用(万元)	总住院费用(万元)
对照组	48	13.06±2.54	0.25±0.04	7.11±1.32
观察组	48	9.43±1.99	0.26±0.03	6.35±0.63
t		7.804	1.712	3.605
P		0.000	0.090	0.001

3 讨论

3.1 下肢康复机器人的应用可提高 TKA 患者膝关节功能及日常活动能力 下肢康复机器人训练具有精确的重复性、抗阻性和减重支持性等特点。Crizer 等^[25]的研究表明,应用下肢康复机器人进行康复训练有助于提高膝关节周围伸膝肌群的肌肉力量,增强膝关节的稳定性,加速膝关节功能的恢复。本研究结果显示,干预后观察组患者主动和被动膝关节活动度、膝关节功能评分及日常活动能力评分显著高于对照组($P<0.05,P<0.01$),与相关研究结果^[26-27]一致。分析原因可能为:下肢康复机器人可针对 TKA 患者不同的康复阶段给予相应的训练模式。康复初期,TKA 患者术侧膝关节无法负重,采取被动训练模式,即完全由下肢康复机器人提供主导运动和力的输出,带动下肢进行康复训练;康复中期,以 TKA 患者的运动意识为主导,下肢康复机器人提供辅助力,帮助患者完成步态训练、平衡训练及本体感觉等;康复后期,下肢康复机器人可通过阻抗装置为 TKA 患者提供反向阻力来增强膝关节肌肉力量,通过不断的膝关节被动和主动训练,反复牵伸挛缩软组织,软化关节囊、韧带等结构,可刺激机体自然复原力,加速关节软骨和关节周围组织的损伤修

1.4 统计学方法 数据由双人录入 SPSS21.0 软件进行数据分析。行 t 检验、 χ^2 检验、Fisher 精确概率法、Wilcoxon 秩和检验。检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 两组一般资料比较 见表 1。

2.2 两组干预前后主动和被动膝关节活动度、膝关节功能评分及日常活动能力评分比较 见表 2。

复,刺激具有双重分化能力的细胞向关节软骨转化,增加股四头肌肌力,提升膝关节的稳定性。膝关节康复不同阶段的针对性训练,实现了患者被动训练、主动训练的人机柔性交互,从而逐步改善 TKA 患者的膝关节功能^[26];下肢康复机器人可为 TKA 患者提供包括肌力训练、站立训练、转移训练、平衡训练、迈步训练以及步行训练在内的一系列综合训练,可显著增强患者下肢肌肉力量,降低肌张力,提高平衡能力及协调能力^[27],有助于辅助 TKA 患者完成起立、直立行走、坐下及上下楼梯等日常动作,从而提高 TKA 患者日常活动能力。

3.2 下肢康复机器人的应用可缩短 TKA 患者住院时间,降低相关费用 本研究结果显示,干预后观察组平均住院天数显著低于对照组($P<0.01$),与 Kottani 等^[9]的研究结果一致。分析原因可能为:一方面,下肢康复机器人机械腿的膝关节处设有关节角度传感器、力传感器及力矩传感器等位置和力量传感器,可检测由患者下肢肌肉活动产生的生物电信号,并根据患者的预期运动意图精准地提供安全、长期、高强度的交互式下肢运动辅助,突破了传统康复训练中由于物理治疗师或康复治疗师体力消耗所导致训练时间缩短、训练强度不足等问题^[28],有效保障了康复训练的一致性和持续性,从而提高膝关节功能锻炼效果,缩短患者住院时间;另一方面,下肢康复机器人的计算机主机可对膝关节的运动轨迹、运动速度、下肢引导力、关节活动度等进行控制,实时反馈 TKA 患者的运动参数,使康复治疗师、物理治疗师及骨科医生可根据患者康复训练情况,不断修正和调节患者膝关节活动度及膝关节屈伸偏移范围等参数,使康复

运动更具针对性和准确性,减少治疗的盲目性,患者亦可通过机器人反馈了解自身的康复训练情况,激发主动运动意识,提升对康复训练活动的参与感和成就感,增强康复信心,使其能够积极配合进行康复功能锻炼,康复训练依从性提高,从而缩短住院天数,降低相关住院费用。值得注意的是,虽然观察组总住院费用显著低于对照组($P < 0.01$),但两组治疗费用比较,差异无统计学意义($P > 0.05$),分析与目前下肢康复机器人的相关费用暂未纳入医保有关,建议政府及医保部门应充分考虑下肢康复机器人的应用价值及前景,早日将其纳入医保范畴。

4 小结

本研究通过建立与实施基于下肢康复机器人的TKA患者康复训练方案,提高了TKA患者膝关节活动度、膝关节功能及日常活动能力,降低了TKA患者住院时间及住院费用。本研究存在一定的局限性:由于有关下肢康复机器人在TKA中应用的报道较少,可供借鉴的参数设置有限,下肢康复机器人的部分参数设置有待进一步探讨。此外,本研究干预时间较短,未追踪其远期干预效果。后续研究应对TKA患者的下肢康复机器人的干预效果进行纵向研究,延长干预时间,以进一步验证该方案的有效性。

参考文献:

- [1] Sun X, Zhen X, Hu X, et al. Osteoarthritis in the middle-aged and elderly in China: prevalence and influencing factors[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16(23):4701-4719
- [2] 刘思雨,戴付敏,蒋梦蝶,等.全膝关节置换术后老年患者体力活动现状及影响因素研究[J]. *护理学杂志*, 2021, 36(2):31-34.
- [3] 姚玉峰,杨云龙,郭军龙,等.膝关节术后康复训练机器人研究综述[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(5):1-18.
- [4] Darragh A R, Campo M, King P. Work-related activities associated with injury in occupational and physical therapists[J]. *Work*, 2012, 42(3):373-384.
- [5] Davis K G, Kotowski S E. Prevalence of musculoskeletal disorders for nurses in hospitals, long-term care facilities, and home health care: a comprehensive review[J]. *Hum Factors*, 2015, 57(5):754-792.
- [6] Li J, Wu T, Xu Z, et al. A pilot study of post-total knee replacement gait rehabilitation using lower limbs robot-assisted training system[J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2014, 24(2):203-208.
- [7] Koo K I, Hwang C H. Five-day rehabilitation of patients undergoing total knee arthroplasty using an end-effector gait robot as a neuromodulation blending tool for deafferentation, weight offloading and stereotyped movement: interim analysis[J]. *PLoS One*, 2020, 15(12):e241117.
- [8] Kayani B, Konan S, Tahmassebi J, et al. An assessment of early functional rehabilitation and hospital discharge in conventional versus robotic-arm assisted unicompartmental knee arthroplasty: a prospective cohort study[J]. *Bone Joint J*, 2019, 101(1):24-33.
- [9] Kotani N, Morishita T, Saita K, et al. Feasibility of supplemental robot-assisted knee flexion exercise following total knee arthroplasty[J]. *J Back Musculoskeletal Rehabil*, 2020, 33(3):413-421.
- [10] 石男强,刘刚峰,郑天骄,等.下肢康复机器人的研究进展与临床应用[J]. *信息与控制*, 2021, 50(1):43-53.
- [11] 中华医学会骨科学分会关节外科学组. 骨关节炎诊疗指南(2018年版)[J]. *中华骨科杂志*, 2018, 38(12):705-715.
- [12] Amarase C, Tanavalee A, Larbpaiboonpong V, et al. Asia-Pacific venous thromboembolism consensus in knee and hip arthroplasty and hip fracture surgery: Part 2. mechanical venous thromboembolism prophylaxis[J]. *Knee Surg Relat Res*, 2021, 33(1):20-29.
- [13] Mistry J B, Elmallah R D, Bhav A, et al. Rehabilitative guidelines after total knee arthroplasty: a review[J]. *J Knee Surg*, 2016, 29(3):201-217.
- [14] 林庆荣,杨明辉,侯志勇.中国创伤骨科患者围手术期静脉血栓栓塞症预防指南(2021)[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2021, 23(3):185-192.
- [15] 康鹏德,翁习生,刘震宇,等.中国髋、膝关节置换术加速康复——合并心血管疾病患者围术期血栓管理专家共识[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2016, 9(3):181-184.
- [16] 周谋望,王坤正.骨科康复中国专家共识[J]. *中华医学杂志*, 2018, 98(3):164-170.
- [17] 周宗科,翁习生,曲铁兵,等.中国髋、膝关节置换术加速康复——围术期管理策略专家共识[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2016, 9(1):1-9.
- [18] Yoshikawa K, Mutsuzaki H, Sano A, et al. Training with hybrid assistive limb for walking function after total knee arthroplasty[J]. *J Orthop Surg Res*, 2018, 13(1):163-173.
- [19] Geng T, Jia X, Guo Y. Lower limb joint nursing and rehabilitation system based on intelligent medical treatment[J]. *J Healthc Eng*, 2021, 2021:6646977.
- [20] Wirries N, Ezechieli M, Stimpel K, et al. Impact of continuous passive motion on rehabilitation following total knee arthroplasty[J]. *Physiother Res Int*, 2020, 25(4):e1869.
- [21] 陆明,邱贵兴,翁习生.关节角度测量器测量结果准确性及可重复使用性评价[J]. *中国组织工程研究与临床康复*, 2008, 12(30):5845-5848.
- [22] Theodoulou A, Bramwell D C, Spiteri A C, et al. The use of scoring systems in knee arthroplasty: a systematic review of the literature[J]. *J Arthroplasty*, 2016, 31(10):2364-2370.
- [23] Ocaglı H, Cella N, Stivanello L, et al. The Barthel index as an indicator of hospital outcomes: a retrospective cross-sectional study with healthcare data from older people[J]. *J Adv Nurs*, 2021, 77(4):1751-1761.
- [24] Tanaka R, Hayashizaki T, Taniguchi R, et al. Effect of an intensive functional rehabilitation program on the recovery of activities of daily living after total knee arthro-