

智能训练系统在全膝关节置换术患者围术期康复训练中的应用：一项前瞻性随机对照研究

韩媛媛 张泽 薛庆云 闫蕾 常琳 石磊

【摘要】 目的 观察智能训练系统在全膝关节置换术患者围术期康复过程中实施效果。方法 开展一项前瞻性随机对照试验，连续收集北京医院骨科2023年12月至2024年7月收治的40例全膝关节置换术的患者，男性13例，女性27例，平均年龄(70.40±6.22)岁。采用随机数表法，分为对照组与试验组，各20例。对照组给予常规康复训练指导，试验组在常规康复的基础上应用智能训练系统进行康复训练，对比两组在膝关节功能、膝关节活动度、首次下地时间、锻炼依从性、日常生活活动能力、护理满意度以及疼痛情况。结果 试验组和对照组在术后各时间点的HSS、膝关节活动度、Barthel指数、NRS疼痛评分进行了重复测量设计的方差分析显示，不同组别间差异均有统计学意义($P<0.001$)，与对照组相比试验组术后4天及6周膝关节功能评分更高($P<0.001$)，术后第1天、第4天及6周的膝关节活动度更大($P<0.001$)，术后4天及6周的日常生活活动能力评分更高($P<0.001$)，且术后1至4天及术后6周疼痛评分更低($P<0.05$)。组别与时间点间均存在显著的交互作用($P<0.001$)，试验组在术后各时间点间差异均有统计学意义。此外，试验组的锻炼依从性、首次下床时间及护理满意度均显著优于对照组($P<0.001$)。结论 智能可穿戴训练系统在全膝关节置换术围术期的应用效果显著，能有效提高康复效果，值得临床广泛应用及推广。

【关键词】 全膝关节置换； 智能训练系统； 康复； 随机对照试验

Application of intelligent training system in perioperative rehabilitation training for patients undergoing total knee arthroplasty: A prospective randomized controlled study. Han Yuanyuan, Zhang Ze, Xue Qingyun, Yan lei, Chang Lin, Shi Lei. Department of Orthopedics, Beijing Hospital, National Center of Gerontology, Institute of Geriatric Medicine, Chinese Academy of Medical Sciences, Beijing 100730, China
Corresponding author: Xue Qingyun, Email: xueqingyun2018@163.com

【Abstract】 Objective To observe the implementation effect of an intelligent training system in the perioperative rehabilitation of patients undergoing total knee arthroplasty (TKA). **Methods** A prospective randomized controlled trial was conducted. A total of 40 patients who underwent TKA in the Department of Orthopedics, Beijing Hospital, from December 2023 to July 2024. The cohort consisted of 13 males and 27 females, with a mean age of 70.40±6.22 years. Using a random number table, patients were allocated to either the control or experimental group, with each group consisting of 20 patients. The control group received standard rehabilitation training, while the experimental group received rehabilitation training based on an intelligent training system in addition to conventional rehabilitation. Outcomes compared between the two groups included knee joint function, range of motion (ROM), adherence to rehabilitation training, first ambulation time, activities of daily living (ADL), nursing satisfaction, and pain levels. **Results** Repeated measures analysis of variance for HSS scores, ROM, Barthel Index, and NRS pain scores at various postoperative time points indicated statistically significant differences between the groups ($P<0.001$). Compared with the control group, the experimental group showed higher knee function scores at 4 days and 6 weeks postoperatively ($P<0.001$), greater knee range of motion at postoperative days 1, 4, and 6 weeks ($P<0.001$), higher activities of daily living scores at postoperative days 4 and 6 weeks ($P<0.001$), and lower pain scores from

DOI: 10.3877/cma.j.issn.2096-0263.2025.05.005

基金项目: 中央高水平医院临床科研业务费资助(BJ-2023-135)

作者单位: 100730 北京医院骨科, 国家老年医学中心, 中国医学科学院老年医学研究院

通信作者: 薛庆云, Email: xueqingyun2018@163.com

postoperative days 1 to 4, as well as at 6 weeks ($P<0.05$). Significant interactions between group and time point were observed ($P<0.001$), with statistically significant differences noted across all postoperative time points in the experimental group. Furthermore, the experimental group showed significantly superior exercise compliance, time to first ambulation, and nursing satisfaction compared with the control group ($P<0.001$). Conclusion The intelligent wearable training system demonstrates significant efficacy in perioperative rehabilitation for TKA patients, effectively improving rehabilitation outcomes and warranting widespread clinical application and promotion.

【Key words】 Total knee arthroplasty; Intelligent training system; Rehabilitation; Randomized controlled trial

全膝关节置换术(total knee arthroplasty, TKA)作为终末期膝关节疾病的重要治疗手段,通过植入人工关节替代受损关节面,有效缓解疼痛、改善关节功能,显著提升患者生活质量^[1]。然而,TKA术后患者常面临关节僵硬、肌肉萎缩、下肢深静脉血栓形成等并发症,围术期科学系统的康复训练是促进患者快速康复、减少并发症、提高手术成功率的关键环节^[2-3]。传统康复训练模式依赖康复治疗师的经验指导与患者自主执行,存在训练强度难以精准把控、患者依从性参差不齐、康复效果评估滞后等问题^[3-4]。

近年来,人工智能及可穿戴设备的蓬勃发展,为TKA患者围术期康复训练带来新契机^[5-6]。智能训练系统通过整合多模态传感器实时采集患者运动数据,结合人工智能算法进行动作质量评估与训练方案优化,能够为患者提供个性化、精准化的康复训练指导^[7]。探讨智能训练系统在TKA患者围术期康复训练中的应用,对推动康复医学智能化发展、提高TKA术后康复效果具有重要的理论与实践价值。

本研究拟以北京医院骨科收治的40例接受TKA的患者为研究对象,开展一项前瞻性随机对照试验,目的在于探讨可穿戴设备智能训练系统在TKA围手术期康复训练的实施效果。

资料与方法

一、纳入与排除标准

纳入标准:(1)因膝关节骨性关节炎初次行全膝关节置换者;(2)经主诊医生评定,身体基本情况能够耐受相关训练,无影响训练的其他系统疾病;(3)患者及/或陪护人员能够使用智能手机,并会使用或者能够学会使用相关软件;(4)具备基本读写能力,沟通交流无障碍;(5)自愿加入本研究。

排除标准:(1)患有类风湿性关节炎、血友病性关节炎等其他关节疾病,且主诊医生判定影响关节

功能者;(2)患有典型神经肌肉性疾病病史,影响功能锻炼者;(3)3个月内进行其他腰部以下部位的手术;(4)无法配合治疗者及拒绝配合随访者;(5)伴有精神疾病、认知障碍等。

二、样本量计算

本研究以出院时美国特种外科医院(Hospital for Special Surgery Knee Score, HSS)膝关节功能评分^[8]为主要结局指标。按照既往文献报道^[9],两组组间差值为2.2,双侧检验 $\alpha=0.05$, $\beta=0.05$,经计算每组样本量 $n=18$ 例,考虑10%的失访率,每组样本量为20例,共40例。

三、一般资料

根据上述纳入与排除标准,采用前瞻性单盲随机对照研究方法,连续纳入2023年12月至2024年7月北京医院骨科收治的拟行TKA治疗的40例患者,见图1。采用随机数字表法进行分组,采用传统护理方法的20例患者作为对照组,使用智能训练系统的20例作为试验组。本研究无法对操作人员和患者实施盲法,但在评估主要和次要结局时,所有评估人员均对患者分组信息保持盲态。

本研究注册于中国临床试验中心(ChiCTR2500102759)。本研究已通过医院伦理委员会批准(编号:2023BJYYEC-320),所有患者均签署知情同意书。

四、干预方法

本研究中所有纳入患者均接受TAK手术,并根据不同分组采取不同的围手术期康复策略。

(一)试验组

1.智能训练系统构建

智能训练系统程序系统设计采用双端架构:患者端(移动应用)包含注册登录、基本信息录入、个性化训练程序、实时运动监测、进度查看、不适反馈等功能,患者使用穿戴设备连接到移动设备进行训练指导和监测。医护端(管理平台)包含三大模块:①

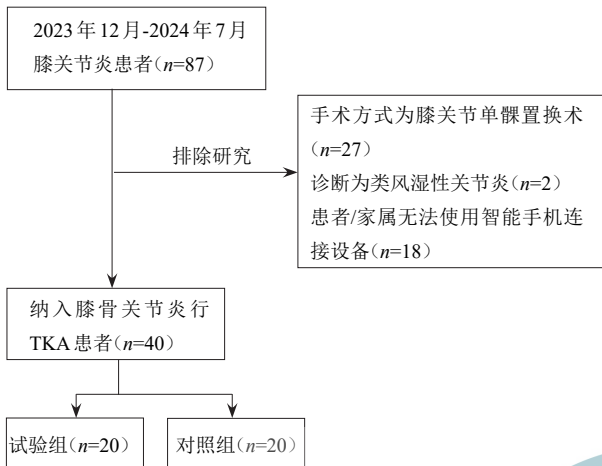


图1 患者入组示意图

患者管理:建立患者列表收集病患者的一般资料信息;②康复疗程管理:预设分阶段训练模板,包括术前阶段、术后一阶段、术后二阶段;③训练记录:记录患者每次训练的动作、时长,统计完成情况及训练中的不适。智能训练系统严格遵循专科疾病医学指南、临床共识和循证实践^[10-11],整合踝泵运动、直腿抬高、股四头肌等长收缩训练、膝关节主动屈伸等围术期康复训练运动,通过医护端程序植入训练模块,见表1。结合内置多维度传感器(加速度计、陀螺仪、磁力计)的穿戴设备,实时监测患者运动幅度、速度与姿势稳定性,精准捕捉关节角度变化及动作质量。设备通过蓝牙与小程序配对,将数据传输至患者端的小程序,利用算法分析运动效果并动态调整训练内容。

2. 干预方法

患者入院时由责任护士指导扫码进入小程序,授权登录填写资料后,选择治疗部位和患侧肢体,连接穿戴设备(两个小型监测器分别置于大腿和小腿中部膝关节上下约20 cm处)即可开始训练。小程序提供教学视频,通过语音提示运动频率与目标,患者可查看运动进度,还能上传膝关节运动功能视频,由系统自动分析评估,训练数据同步上传至医护端。智能训练系统流程示意图见图2。

(二)对照组

传统康复组患者接受常规的围术期训练指导,入院时责任护士发放全膝关节置换术功能锻炼手册,详细讲解内容,手册内容包括锻炼意义、锻炼项目、具体锻炼方法、锻炼时间及数量要求及锻炼视频二维码。术后责任护士根据患者恢复情况每日指导并督促患者进行功能锻炼,并每日记录训练情况。

五、观察指标

记录两组患者的基线资料:性别、年龄、BMI、患侧、入院时血红蛋白及白蛋白水平,以及患者入院后实施干预前的HSS膝关节功能评分、膝关节主动关节活动度(range of motion, ROM), Barthel指数^[12]及数字疼痛评分(numerical rating scale, NRS)^[13]。

观察指标包括:(1)比较两组患者术后4天及6周的HSS膝关节功能评分^[8],满分为100分,分数越高代表膝关节功能越好,评分标准为优秀:≥85分;功能一般:70~84分;中度障碍:60~69分;功能严重障碍≤59分;(2)比较两组术后1天、4天及6周的膝关节主动关节活动度,使用医用量角器测量患者屈膝、伸直时的最大角度,将量角器“0”点对准股骨外侧踝,固定臂与股骨纵轴平行、移动臂与胫骨纵轴平行,评价屈曲-伸展的活动范围;(3)比较两组出院时的功能锻炼依从性,采用谭媛媛等^[14]基于2003年WHO定义的依从性为概念框架编制的骨科患者功能锻炼依从性评分进行评价,该量表包括3个维度和15个条目,条目计分为根本做不到1分、很少做得到2分、偶尔做得到3分、基本做得到4分、完全做得到5分。量表总分越高表明锻炼依从性越高,≤20分为低依从性,≥55分为高依从性,21~54分为部分依从。量表Cronbach's α系数为0.930,内容效度为0.936,有较好的信效度;(4)比较两组首次下床时间,定义为患者术后返回病房的时间至术后第一次下床时间的小时数;(5)比较两组出院时的护理满意度^[15];(6)比较两组术后第4天和6周的Barthel指数,量表内容包括进食、洗澡、修饰、穿衣、控制大便、

表1 TKA围手术期康复训练

阶段	时间范围	训练内容
术前	入院至手术当天	踝泵训练、直腿抬高训练、股四头肌等长收缩训练、膝关节主动屈伸(仰卧位)训练
术后一阶段	术后1~2天	在术前训练内容基础上新增坐下站起训练
术后二阶段	术后3天~出院	在术后一阶段训练内容基础上新增膝关节主动屈伸(坐位)训练、膝关节主动屈伸(站立位)训练、抗重力髌关节外展训练、站立训练、重心转移训练、行走训练

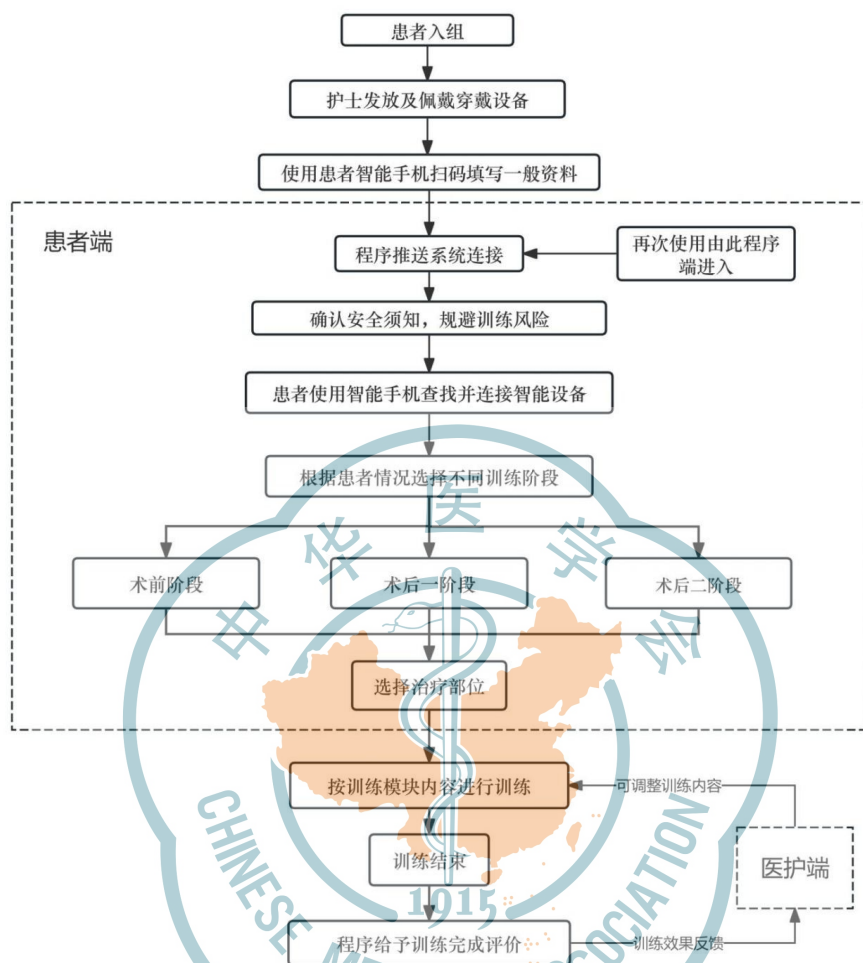


图2 智能训练系统流程示意图

控制小便、如厕、床椅移动、平地移动、上下楼梯 10 个项目, 总分 100 分, 其中 100 分为生活自理、61~99 分为轻度障碍、41~60 分为中度障碍、<41 分为重度障碍。(7) 比较两组术后 1~4 天及 6 周的 NRS, 量表由 0~10 个数字组成, 每个数字分别代表相应的疼痛等级。数字越大则表示疼痛程度越严重。0 分为无痛, 1~3 分为轻度疼痛, 4~6 分为中度疼痛, 7~10 分为重度疼痛。

随访情况: 本研究出院后随访时间点为术后 6 周, 通过门诊复查评估 HSS、关节活动度、Barthel 指数及 NRS 完成随访。

六、统计学分析

本研究运用 SPSS 26.0 (IBM, 美国) 软件进行统计学分析。计量资料中, 符合正态分布的数据以均数±标准差表示, 年龄、BMI、血红蛋白、白蛋白、手术时间、引流量、锻炼依从性、首次下床时间及护理满意度等组间比较采用独立样本 *t* 检验; 计量资料非正态分布以中位数和四分位数间距 (Interquartile

range, IQR) 表示, 术中出血量采用 Mann-Whitney *U* 检验; 性别、患侧等计数资料采用例数描述分布情况, 采用卡方检验进行组间差异分析; HSS、膝关节活动度、Barthel 指数、NRS 等重复测量数据采用重复测量设计的方差分析, 存在交互作用后, 进一步分析单独效应, 多重比较采用 Bonferroni 矫正。以 $P < 0.05$ 作为判断差异具有统计学意义的标准。

结 果

40 例患者均获得完整随访, 随访率 100%, 随访时间 36~52 d, 平均时间为 (42.05±2.19)d, 其中试验组随访时间 36~52 d, 平均 (42.15±3.13)d; 对照组随访时间 41~42 d, 平均 (41.95±0.22)d。

一、两组患者一般资料比较

本研究患者中男性 13 例, 女性 27 例, 平均年龄 (70.40±6.22) 岁。两组患者术前资料比较, 年龄、性别、BMI、患侧、入院时血红蛋白水平、入院时白蛋白

水平、手术时长、术中出血量以及引流量的差异均无统计学意义($P>0.05$),见表2。

二、两组膝关节功能及关节活动度比较

两组HSS经重复测量设计的方差分析结果显示,不同组别间差异有统计学意义($F=56.00, P<0.001$),不同时间点间差异有统计学意义($F=44.61, P<0.001$),组别与时间点间存在交互作用($F=13.85, P<0.001$)。进一步分析单独效应,除入院时两组差别无统计学意义($P>0.05$),试验组术后第4天以及术后第6周的HSS显著优于对照组($P<0.05$);对照组术后6周和入院时差异无统计学意义($P>0.05$),其余各时间点差异均有统计学意义($P<0.05$);试验组各时间点间差异均有统计学意义($P<0.05$),结果见表3。

两组膝关节活动度经重复测量设计的方差分析结果显示,不同组别间差异有统计学意义($F=26.25, P<0.001$),不同时间点间差异有统计学意义($F=163.47, P<0.001$),组别与时间点间存在交互作用($F=17.44, P<0.001$)。进一步分析单独效应,入院

时、术后6周两组差异无统计学意义($P>0.05$),而试验组在术后第1天和第4天显著优于对照组($P<0.05$);对照组术后6周和入院时差异无统计学意义($P>0.05$),其余各时间点间差异均有统计学意义($P<0.05$);试验组各时间点间差异均有统计学意义($P<0.05$),结果见表4。

三、两组首次下床时间、康复依从性及护理满意度的比较

与对照组相比,试验组患者的术后首次下床时间更早,锻炼依从性更高,护理满意度也更高(均 $P<0.001$),见表5。

四、两组患者Barthel指数比较

在日常生活能力恢复方面,两组Barthel指数经重复测量设计的方差分析结果显示,不同组别间差异有统计学意义($F=30.060, P<0.001$),不同时间点间差异有统计学意义($F=139.980, P<0.001$),组别与时间点间存在交互作用($F=4.790, P=0.011$),进一步分析单独效应,除入院时两组差异无统计学意义($P>0.05$),试验组的术后各时间点的Barthel指数

表2 两组全膝关节置换患者的一般资料比较

基线特征	试验组(n=20)	对照组(n=20)	统计值	P值
年龄(岁, $\bar{x}\pm s$)	71.20±5.73	69.60±6.73	$t=-0.810$	0.423
性别[例(%)]			$\chi^2=0.114$	0.736
男	7(35.00)	6(30.00)		
女	13(65.00)	14(70.00)		
BMI($\bar{x}\pm s$)	27.36±3.34	27.45±3.50	$t=0.089$	0.929
患侧[例(%)]			$\chi^2=3.636$	0.057
左	12(60.00)	6(30.00)		
右	8(40.00)	14(70.00)		
入院血红蛋白(g/L, $\bar{x}\pm s$)	128.70±12.96	129.60±12.55	$t=0.223$	0.825
入院白蛋白(g/L, $\bar{x}\pm s$)	37.80±2.76	37.00±3.04	$t=-0.870$	0.390
手术时长(min, $\bar{x}\pm s$)	187.75±27.50	204.25±35.44	$t=1.640$	0.108
术中出血量(ml, $\bar{x}\pm s$)	200(112.50, 200)	200(12.50, 200)	$Z=-1.410$	0.163
引流量(ml, IQR)	352.25±221.10	336.00±167.90	$t=-0.260$	0.795

表3 两组全膝关节置换患者入院时及术后HSS评分比较(分, $\bar{x}\pm s$)

组别	例数	入院时	术后第4天	术后6周	F值	P值
试验组	20	60.79±7.20	65.20±4.65 [*]	77.35±5.56 ^{**}	41.230	<0.001
对照组	20	56.44±13.90	44.02±6.83 [*]	61.63±8.41 [*]	23.170	<0.001
F值		1.548	131.332	48.581		
P值		0.224	<0.001	<0.001		

注：“*”表示与入院时比较 $P<0.05$ ；“**”表示与术后第4天比较 $P<0.05$

显著优于对照组(均 $P<0.01$);对照组各时间点间差异均有统计学意义($P<0.05$);试验组术后6周和入院时差异无统计学意义,其余各时间点差异均有统计学意义($P<0.05$),而,结果见表6。

五、两组患者NRS疼痛评分比较

在TKA置换术后疼痛管理方面,两组NRS疼痛评分经重复测量设计的方差分析结果显示,不同组别间差异有统计学意义($F=45.510, P<0.001$),不同时间点间差别有统计学意义($F=55.270, P<0.001$),组别与时间点间存在交互作用($F=10.950, P<0.001$)。进一步分析单独效应,除入院时两组差别无统计学意义($P>0.05$),试验组在术后第1天至第4天以及术后6周时的NRS疼痛评分均优于对照组($P<0.05$)。提示两组患者的疼痛评分变化趋势不同,试验组疼痛评分下降更为明显,而对照组评分下降幅度较小。对照组术后第1天至2天和入院时、术后第2天和第1天、术后第4天与6周和第3天差异无统计学意义($P>0.05$),其余各时间点间差异均有统计学意义($P<0.05$);试验组各时间点间差异均有统计学意义($P<0.05$),结果见表7。

讨 论

一、围术期智能训练系统有效改善膝关节功能与活动度

本研究结果显示,试验组在术后4天、6周的HSS,以及术后1天、4天的ROM均显著优于对照组,且差异具有统计学意义($P<0.05$),这一结果与国内外多项针对膝关节疾病患者在不同阶段实施智能康复干预的研究成果一致^[16-20]。其背后原因与智能训练系统的技术特性密切相关。该系统基于惯性测量单元,进行精准的运动捕捉,实时监测关节角度、速度与稳定性,并通过人工智能算法动态调整训练方案,从而有效督促患者在术后不同时间段开展个性化的康复训练,促进膝关节功能与生活能力的快速恢复。特别是在术后早期,试验组的ROM显著优于对照组,可能得益于系统对膝关节屈伸角度的实时监测与反馈,帮助患者在安全范围内逐步扩大活动度,避免了传统人工指导可能存在的强度不足或过度训练问题。然而,术后6周两组间的ROM差异无统计学意义($P=0.096$),表明系统干预的优势主要集中在住院急性康复期。未来需要探

表4 两组全膝关节置换患者入院时及术后膝关节活动度比较($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	入院时	术后第1天	术后第4天	术后6周	F值	P值
试验组	20	93.45±11.57	62.85±12.35*	83.30±12.47**	103.84±11.74**&	48.230	<0.001
对照组	20	92.25±21.37	33.15±14.89*	50.60±14.93**	95.50±18.45**&	125.730	<0.001
F值		0.049	47.169	56.520	2.904		
P值		0.827	<0.001	<0.001	0.096		

注:“*”表示与入院时比较 $P<0.05$;“**”表示与术后第1天比较 $P<0.05$;“&”表示与术后第4天比较 $P<0.05$

表5 两组全膝关节置换患者术后首次下床时间、锻炼依从性和护理满意度比较($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	术后首次下床时间(h)	锻炼依从性(分)	护理满意度(%)
试验组	20	32.60±15.60	58.45±5.49	4.95±0.22
对照组	20	49.47±11.78	33.00±4.27	3.60±0.60
t值		3.859	-16.366	-9.453
P值		<0.001	<0.001	<0.001

表6 两组全膝关节置换患者入院及术后Barthel指数比较($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	入院时	术后第4天	术后6周	F值	P值
试验组	20	89.25±8.78	66.25±8.57*	91.50±5.64*	82.950	<0.001
对照组	20	84.25±13.98	50.50±6.26*	77.25±11.75**	67.120	<0.001
F值		1.836	44.076	23.902		
P值		0.185	<0.001	<0.001		

注:“*”表示与入院时比较 $P<0.05$;“**”表示与术后第4天比较 $P<0.05$

表7 两组全膝关节置换患者NRS疼痛评分比较(分, $\bar{x} \pm s$)

组别	例数	入院时	术后第1天	术后第2天	术后第3天	术后第4天	术后6周	F值	P值
试验组	20	5.65±0.93	4.80±1.51 [†]	4.10±0.64 ^{†*}	3.00±0.32 ^{†**}	2.65±0.59 ^{†**%}	2.20±1.01 ^{†**%#}	36.116	<0.001
对照组	20	5.05±1.19	5.80±0.89	5.35±0.81	4.30±0.73 ^{†**}	4.40±0.68 ^{†**}	3.95±1.05 ^{†**%#}	22.461	<0.001
F值		3.144	6.508	29.182	52.635	75.812	28.987		
P值		0.084	0.015	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001		

注：“†”表示与入院时比较 $P<0.05$ ；“†”表示与术后第1天比较 $P<0.05$ ；“*”表示与术后第2天比较 $P<0.05$ ；“%”表示与术后第3天比较 $P<0.05$ ；“#”表示与术后第4天比较 $P<0.05$

索住院过渡到居家阶段的智能康复方案,以维持长期康复效果。膝关节置换术是治疗终末期关节炎的核心手段,通过植入人工金属或高分子材料关节面替代受损软骨及骨质,可达到显著缓解疼痛、矫正关节畸形、恢复关节功能^[21]。本研究中,对照组患者术后第4天的HSS较术前显著降低。我们认为这一现象符合膝关节置换术后早期恢复的普遍规律。术后初期,患者常伴随切口疼痛、关节周围软组织肿胀、僵硬以及依赖支具行走等情况,这些因素均可能对功能恢复产生不利影响,从而导致短期评分低于术前水平。已有研究显示,膝关节功能的显著改善通常发生在术后2周甚至更晚的时间点^[9],因此术后第4天出现功能暂时性下降属于合理范围。此外,本研究的干预时间为住院期间,因而在术后第4天进行功能评价。与对照组相比,试验组在同一时间点功能上升,提示智能穿戴系统通过实时反馈和监督,有助于患者更好地遵循康复训练方案,从而减轻了早期不利因素对功能恢复的负面影响。该发现强调了智能康复手段在术后早期阶段可能具有的临床价值。

二、围术期智能训练系统有效提升TKA患者住院期间康复效率、依从性与患者体验

本研究显示,试验组首次下床时间显著提前($P<0.05$),提示智能康复训练有助于加速康复外科理念的落实^[22-23]。术前适应性训练降低了患者对术后活动的恐惧与不确定性,为其早期下床提供了保障。与对照组相比,试验组的锻炼依从性评分和护理满意度均显著提高($P<0.05$);在术后4天及术后6周,试验组的Barthel指数亦明显优于对照组($P<0.05$)。这一优势可能与智能训练系统的沉浸式交互设计有关,该设计不仅增强了患者的康复动机,还提升了其对康复过程的掌控感和参与感。通过实时可视化反馈,患者能够直观感受到康复进展,从而进一步促进康复效果,同时提升满意度与生活能力^[19,24-25]。此外,系统可自动记录训练数据并同步至医护端,减少了

护理人员的人工督促工作量,使护理干预更加精准与高效。

三、围术期智能训练系统有助于疼痛管理与舒适度提升

本研究显示,智能康复训练组在术后第2~4天及6周的疼痛评分均显著低于对照组($P<0.05$),提示该系统在术后疼痛管理和舒适度改善方面具有积极作用,研究结果与既往研究一致^[16-18,26]。其机制可能与传感器实时监测关节角度与负荷、限制危险动作、防止二次损伤相关。同时,循序渐进的训练模式帮助患者逐步克服对疼痛和活动的恐惧,形成良性循环,提升康复体验。文献指出,术后24~72 h为急性疼痛高峰期,动态监测有助于全面评估干预效果^[27]。本研究结果表明,术后4天内的连续疼痛评估趋势呈现出明显差异,试验组的疼痛评分下降幅度更为显著,进一步验证了智能训练系统在术后疼痛管理中的卓越作用。

四、研究局限性

本研究样本量较小且随访时间较短等局限性,未来需扩大样本量并延长随访周期,进一步验证系统对远期并发症的影响。此外,后续我们将纳入如步态分析、肌力测试等多维评价指标,从而进一步验证智能康复系统在膝关节置换术后患者中的应用价值。

智能训练系统在TKA围术期康复中显著优于传统模式,可通过精准监测、动态指导提升康复效果与患者体验。未来需通过更大样本、更长周期研究进一步验证其长期效益,以推动该技术在骨科康复中的规范化应用。

参 考 文 献

- Fortier LM, Rockov ZA, Chen AF, et al. Activity recommendations after total hip and total knee arthroplasty [J]. J Bone Joint Surg Am, 2021, 103(5): 446-455.
- Haslhofer DJ, Kraml N, Winkler PW, et al. Risk for total knee arthroplasty after tibial plateau fractures: a systematic review [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy, 2023, 31(11): 5145-5153.

- 3 Gränicher P, Mulder L, Lenssen T, et al. Prehabilitation improves knee functioning before and within the first year after total knee arthroplasty: a systematic review with meta-analysis [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2022, 52(11): 709-725.
- 4 Gazendam A, Zhu M, Chang YP, et al. Virtual reality rehabilitation following total knee arthroplasty: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 2022, 30(8): 2548-2555.
- 5 Constantinescu D, Pavlis W, Rizzo M, et al. The role of commercially available smartphone apps and wearable devices in monitoring patients after total knee arthroplasty: a systematic review [J]. *EFORT Open Rev*, 2022, 7(7): 481-490.
- 6 Hameed D, Sodhi N, Dubin J, et al. Integrating smartphone applications and wearable devices for postoperative rehabilitation in total knee arthroplasty: a critical review [J]. *J Arthroplasty*, 2024, 39(8): 2028-2039.e1.
- 7 Gordon AM, Nian P, Baidya J, et al. Randomized controlled studies on smartphone applications and wearable devices for postoperative rehabilitation after total knee arthroplasty: a systematic review [J]. *J Arthroplasty*, 2025, 40(8): 2204-2213.e1.
- 8 Insall JN, Ranawat CS, Aglietti P, et al. A comparison of four models of total knee-replacement prostheses [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1976, 58(6): 754-765.
- 9 Jiao SS, Feng ZC, Huang J, et al. Enhanced recovery after surgery combined with quantitative rehabilitation training in early rehabilitation after total knee replacement: a randomized controlled trial [J]. *Eur J Phys Rehabil Med*, 2024, 60(1): 74-83.
- 10 中国老年医学学会康复分会, 全膝关节置换围手术期康复干预中国专家共识组. 全膝关节置换围手术期康复干预中国专家共识 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2024, 46(02): 97-104.
- 11 中国健康促进基金会骨病专项基金骨科康复专家委员会, 骨科康复中国专家共识 [J]. *中华医学杂志*, 2018, 98(3): 164-170.
- 12 Bouwstra H, Smit E, Wattel E, et al. Measurement properties of the Barthel index in geriatric rehabilitation [J]. *J Am Med Dir Assoc*, 2019, 20(4): 420-425.
- 13 Chapman JR, Norvell DC, Hermsmeyer JT, et al. Evaluating common outcomes for measuring treatment success for chronic low back pain [J]. *Spine (Phila Pa 1976)*, 2011, 36(21 Suppl): S54-S68.
- 14 高彩香, 马琳, 黄雪燕, 等. 腰椎间盘突出症保守治疗患者院外功能锻炼依从性变化的纵向研究 [J]. *中华现代护理杂志*, 2022, 28(29): 4032-4038.
- 15 刘文君, 周艳, 陈亚飞, 等. 住院患者护理满意度量表的研究进展 [J]. *中华护理杂志*, 2016, 51(2): 190-195.
- 16 Yang C, Shang L, Yao SX, et al. Cost, time savings and effectiveness of wearable devices for remote monitoring of patient rehabilitation after total knee arthroplasty: study protocol for a randomized controlled trial [J]. *J Orthop Surg Res*, 2023, 18(1): 461.
- 17 Summers SH, Nunley RM, Slotkin EM. A Home-Based, Remote-Clinician-Controlled, physical therapy device leads to superior outcomes when compared to standard physical therapy for rehabilitation after total knee arthroplasty [J]. *J Arthroplasty*, 2023, 38(3): 497-501.
- 18 Shim GY, Kim EH, Lee SJ, et al. Postoperative rehabilitation using a digital healthcare system in patients with total knee arthroplasty: a randomized controlled trial [J]. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2023, 143(10): 6361-6370.
- 19 Scaturro D, Vitagliani F, Caracappa D, et al. Rehabilitation approach in robot assisted total knee arthroplasty: an observational study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2023, 24(1): 140.
- 20 Osterloh J, Knaack F, Bader R, et al. The effect of a digital-assisted group rehabilitation on clinical and functional outcomes after total hip and knee arthroplasty-a prospective randomized controlled pilot study [J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2023, 24(1): 190.
- 21 Jang S, Lee K, Ju JH. Recent updates of diagnosis, pathophysiology, and treatment on osteoarthritis of the knee [J]. *Int J Mol Sci*, 2021, 22(5): 2619.
- 22 Ljungqvist O, Scott M, Fearon KC. Enhanced recovery after surgery: a review [J]. *JAMA Surg*, 2017, 152(3): 292-298.
- 23 Xie W, He M, Zheng S, et al. Clinical application research of intelligent monitoring system for knee rehabilitation: a randomized controlled trial [J]. *J Orthop Surg Res*, 2024, 19(1): 477.
- 24 Lebleu J, Pauwels A, Anract P, et al. Digital rehabilitation after knee arthroplasty: a Multi-Center prospective longitudinal cohort study [J]. *J Pers Med*, 2023, 13(5): 824.
- 25 Wang QL, Hunter S, Lee RLT, et al. Mobile rehabilitation support versus usual care in patients after total hip or knee arthroplasty: study protocol for a randomised controlled trial [J]. *Trials*, 2022, 23(1): 553.
- 26 Vickyduong P, Robbins SR, Simonedennis B, et al. Combined digital interventions for pain reduction in patients undergoing knee replacement: a randomized clinical trial [J]. *JAMA Network Open*, 2023, 6(9): 12.
- 27 Park R, Mohiuddin M, Arellano R, et al. Prevalence of postoperative pain after hospital discharge: systematic review and meta-analysis [J]. *Pain Rep*, 2023, 8(3): e1075.

(收稿日期: 2025-06-09)
(本文编辑: 吕红芝)

韩媛媛, 张泽, 薛庆云, 等. 智能训练系统在全膝关节置换术患者围术期康复训练中的应用: 一项前瞻性随机对照研究 [J/CD]. *中华老年骨科与康复电子杂志*, 2025, 11(5): 295-302.