

## 基于眼动追踪技术足踝运动认知双重任务评估系统的信效度研究

王小蒙<sup>1,2</sup>, 赵子贺<sup>3</sup>, 彭博<sup>1,2</sup>, 翟晓雪<sup>1,2</sup>, 冯雨桐<sup>1,2</sup>, 高硕<sup>3</sup>, 李翀<sup>2</sup>, 潘钰<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学附属北京清华长庚医院康复医学科 北京 102218; 2. 清华大学临床医学院 北京 100084;  
3. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

**摘要** **目的:** 探讨基于眼动追踪技术的足踝运动认知双重任务评估系统的可靠性和有效性。**方法:** 采用足踝运动认知双重任务评估系统对健康受试者的眼动和足踝运动功能评测, 1周后进行重测, 计算组内相关系数(ICC)和进行Bland-Altman分析; 用该系统对脑卒中患者进行眼动和足踝运动功能评测, 并完成认知和运动功能临床评估, 分析评测参数与临床评分的相关性。**结果:** 健康受试者足踝运动认知双重任务测试的重测 $ICC_{TMT-A \text{ 任务}}=0.509\sim 0.897$ ,  $ICC_{TMT-B \text{ 任务}}=0.493\sim 0.987$ 。Bland-Altman分析显示, 眼动注视次数、眼跳幅度、速度峰个数及平均速度4个主要参数的重测信度均具有较好的一致性。脑卒中患者的效度结果显示, 眼动注视次数、注视的空间密度与蒙特利尔认知评估量表(MoCA)评分呈负性相关; 足踝运动平均速度与下肢运动功能评分、10米步行平均速度呈正性相关, 与计时起立行走-减法计算测试耗时、双任务成本百分比呈负性相关。**结论:** 基于眼动追踪技术的足踝运动认知双重任务评估系统具有良好的信效度, 其中眼动注视次数、注视的空间密度是反映认知功能的稳定参数, 足踝运动平均速度是反映运动功能和双任务成本的稳定参数。该系统为脑卒中患者足踝运动认知功能评估提供了新技术, 有望应用到运动认知功能研究和康复治疗中。

**关键词** 脑卒中; 眼动追踪技术; 运动认知双重任务; 信度; 效度; 足踝功能

**中图分类号** R543 R608 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721(2025)01-0081-09

### Reliability and validity of a dual task evaluation system for foot and ankle motor cognition based on eye tracking technology

WANG Xiaomeng<sup>1,2</sup>, ZHAO Zihé<sup>3</sup>, PENG Bo<sup>1,2</sup>, ZHAI Xiaoxue<sup>1,2</sup>, FENG Yutong<sup>1,2</sup>, GAO Shuo<sup>3</sup>,  
LI Chong<sup>2</sup>, PAN Yu<sup>1,2</sup>

(1. Department of Rehabilitation Medicine, Beijing Tsinghua Changgung Hospital Affiliated to Tsinghua University, Beijing 102218, China; 2. School of Clinical Medicine, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing, 100191, China)

**Abstract** **Objective:** To explore the reliability and effectiveness of a dual task evaluation system for foot and ankle motor cognition based on eye tracking technology. **Methods:** The motor functions of eye, foot and ankle of healthy subjects were tested and evaluated by foot and ankle motor cognition dual task evaluation system, and they were retested 1 week later. Intraclass correlation coefficient (ICC) and Bland-Altman analysis were calculated. The system was used to evaluate the motor functions of eye, foot and ankle of stroke patients, the clinical evaluation of cognitive and motor function was performed, and the correlation between evaluation

**基金项目:** 首都卫生发展科研专项项目(首发2022-2Z-2242); 国家重点研发计划重点专项(2022YFC3601100)

**Foundation Item:** Special Project for Capital Health Development and Scientific Research (Capital Development 2022-2Z-2242); Special Project of National Key R & D Plan (2022YFC3601100)

**通讯作者:** 高硕, Email: shuo\_gao@buaa.edu.cn; 李翀, Email: chongli@mail.tsinghua.edu.cn; 潘钰, Email: panyu@btch.edu.cn

**Corresponding Author:** GAO Shuo, Email: shuo\_gao@buaa.edu.cn; LI Chong, Email: chongli@mail.tsinghua.edu.cn; PAN Yu, Email: panyu@btch.edu.cn

**引用格式:** 王小蒙, 赵子贺, 彭博, 等. 基于眼动追踪技术足踝运动认知双重任务评估系统的信效度研究[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2025, 6(1): 81-89.

**Citation:** WANG X M, ZHAO Z H, PENG B, et al. Reliability and validity of a dual task evaluation system for foot and ankle motor cognition based on eye tracking technology[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2025, 6(1): 81-89.

parameters and clinical scores were analyzed. **Results:** The retested reliability of  $ICC_{TMT-A\ task}$  and  $ICC_{TMT-B\ task}$  were 0.509~0.897 and 0.493~0.987 respectively in the dual task of foot and ankle motor cognition in healthy subjects. Bland-Altman analysis showed that the retested reliability of eye fixations, saccade amplitude, velocity peaks and average velocity had good consistency. The validity results of stroke patients showed that the number of eye fixation and the spatial density of fixation were negatively correlated with the Montreal cognitive assessment (MoCA) score. The average foot and ankle movement speed was positively correlated with the lower limb motor function score and the average 10-meter walking speed, and negatively correlated with the time consuming and the percentage of dual task cost. **Conclusion:** The dual task evaluation system for foot and ankle motor cognition based on eye tracking technology has good reliability and validity, in which the count of eye fixation and the fixation density are stable parameters reflecting cognitive function, and the average foot and ankle movement speed are stable parameters reflecting motor function and dual task cost. This system provides a new technique for the assessment of motor and cognitive function of foot and ankle of stroke patients, and is expected to be applied to the research and rehabilitation of motor and cognitive function.

**Key words** Stroke; Eye Tracking Technology; Dual Task of Motor Cognition; Reliability; Validity; Foot and Ankle Function

脑卒中后足踝功能障碍是常见的康复问题,足踝运动不仅受运动控制神经环路控制,同时受到认知功能影响<sup>[1]</sup>。脑卒中患者行走过程中,足踝执行运动认知双重任务能力下降,从而导致步行能力下降、跌倒风险增加<sup>[2-3]</sup>。日常生活中,步行或肢体活动与记忆、谈话、思考等认知任务常同时进行,因此,具备双重任务能力在日常功能性活动和真实世界中至关重要<sup>[4]</sup>。运动认知双重任务训练是当前脑卒中康复治疗技术的新突破口<sup>[5]</sup>,开展运动认知双重任务评估是识别患者双重任务能力和有效指导其康复的前提。目前评估运动认知双重任务能力多采用量表的定性或半定量方法,缺乏定量分析技术。眼动分析是一种通过实时追踪眼球运动,定量分析大脑的认知加工特征和认知负荷的方法<sup>[6]</sup>。有研究采用眼动追踪技术评估脑卒中患者上肢的运动认知双重任务,发现脑卒中患者的眼跳次数增多与运动表现差显著相关<sup>[7]</sup>。针对脑卒中患者与健康受试者的研究发现,执行运动认知双重任务时两种受试者的眼动凝视存在显著差异<sup>[8]</sup>。研究表明眼动追踪技术可用于监测脑卒中患者的运动认知缺陷,为神经康复策略的探索提供新思路、新方法。因此,本研究采用基于眼动追踪技术的足踝运动认知双重任务评估系统,构建足踝运动认知双重任务评估范式,旨在探讨该方法用于评估运动认知双重任务的可靠性及有效性,为脑卒中的双重任务研究和康复评估提供新技术。

## 1 资料与方法

**1.1 临床资料** 选取 2022 年 3 月—2023 年 10 月清华大学附属北京清华长庚医院的健康受试者

进行信度研究,共 20 例,均为右利足,其中男性 8 例,女性 12 例。纳入标准:①既往身体健康者;②踝关节活动无受限者;③双眼视野在正常范围内;④年龄 30~75 岁。排除标准:①认知、视力、言语、精神障碍,不能配合者;②下肢合并骨折等;③近期服用神经系统兴奋或抑制的药物。

选取 2022 年 3 月—2023 年 10 月清华大学附属北京清华长庚医院的脑卒中患者进行效度研究,共 30 例,其中男性 22 例,女性 8 例;缺血性脑卒中 20 例,出血性脑卒中 10 例;左侧偏瘫 16 例,右侧偏瘫 14 例。纳入标准:①首次发病,病灶限定于大脑中动脉或基底动脉供血区域,发病类型包括缺血性脑卒中和出血性脑卒中;②脑卒中发病时间 1~6 个月;③患侧下肢徒手肌力检查 MMT>3 级(包括跖屈背屈);④患侧下肢布氏分期 $\geq 4$ 期且 SIS 量表下肢部分至少有一项 $<5$ 分;⑤双眼视野在正常范围内;⑥年龄 30~75 岁。排除标准:①合并其他神经系统疾病者;②存在明显的认知障碍,蒙特利尔认知评估量表(Montreal Cognitive Assessment, MoCA)评分 $<20$ 分,严重偏侧忽略,身体失认、失用等;③有严重失语、精神障碍,不能配合者;④下肢合并骨折等;⑤研究者判断依从性差,无法按照要求完成研究者。

**1.2 方法** 采用横断面研究设计,测试前由同一名康复医师向符合条件的受试者说明测试方法及流程,获得受试者的同意,并签署知情同意书。本研究经清华大学附属北京清华长庚医院伦理委员会批准(批件号 22207-0-02)。

**1.2.1 系统介绍** 研究采用自主研发的足踝运动认知双重任务评估系统，该系统可对受试者足踝运动和眼动活动实时记录和定量评价。本研究硬件基础设备主要由两部分组成，第一部分是足踝机器人；第二部分是带有显示器的眼动追踪设备。这两部分之间为非接触式连接，以保证足踝关节机器人带动关节运动时眼动设备的稳定性。眼动设备置于患者前方 60~70 cm 处，以保证眼动数据采集的准确性与有效性。其中眼动追踪设备参数为：①眼动监控支持双屏；②监控分辨率为 1920×1080；③自启动眼动服务（9000 端口，UDP 服务，基于 WIFI 连接）；④兴趣区范围定义为眼动仪最佳有效范围，即眼动视区落在屏幕 56%~64%；⑤可远距离跟踪眼睛（凝视）和头部运动，最大采样频率为 60 Hz/s，精度为 0.5°。足踝机器人包括位置传感器，用于采集足踝运动时的参数数据；眼动追踪装置包括视觉传感器，用于采集眼球运动时的参数数据；处理装置可以基于眼动数据分析受试者在踝关节运动过程中的注意力状态，可

同步采集受试者执行足踝运动认知双重任务过程中的足踝运动及眼动数据。系统组成框架如图 1。

**1.2.2 足踝运动认知双重任务测试** 受试者端坐于距离电脑屏幕 60~70 cm 的位置，根据受试者个人舒适程度调整试验专用椅高度及靠背距离。被测下肢膝关节伸直位，踝关节放于足踝机器人足托中，用绑带妥善固定。进行评估测试前，完成眼动校准。用户注册后设定踝关节主动活动角度，随后进行连线测试（Trail Making Test, TMT）采集眼动即足踝参数数据。首先，进行预测试以指导患者熟悉目标范式，然后进行正式测试，受试者先后完成难度不同的两个测试，即 TMT-A 任务和 TMT-B 任务（如图 2）。以 TMT-A 任务预测试为例：要求受试者按照数字顺序完成足部运动，使得白圈达到对应数字圈中（如图 2A 中从 1 至 2 再至 3），绿色代表成功，红色代表失败，需要回到红色区域继续测试。TMT-B 任务增加难度，要求受试者按照数字 - 字母顺序完成足部运动（如图 2B 中从 1 至 A 至 2 再至 B）。



图 1 足踝运动认知双重任务评估系统组成

Figure 1 Components of the dual task evaluation system for foot and ankle motor cognition

测试完成后,健康受试者需1周后进行复测,脑卒中患者需在同一时间段完成临床功能评估,包括MoCA、下肢运动功能(Fuyl-Meyer Assessment Lower Extremity, FMA-LE)、10米步行平均速度、计时起立-行走测试(Time Up and Go Test, TUG)、TUG-减法计算测试。测试流程如图3。

### 1.2.3 观察指标

1.2.3.1 眼动参数: ①主要指标包括注视次数、眼跳幅度; ②次要指标包括首次注视时间、速度峰之前眼跳数百分比、速度峰之后眼跳数百分比、注视率、凝视时间、注视的空间密度、到达的眼跳次数、停留的眼跳次数。

1.2.3.2 足踝参数: ①主要指标包括速度峰个数、

平均速度; ②次要指标包括总耗时、错误数、速度峰值、平均到达时间、总跨度。

1.2.3.3 临床评估效标指标: ①认知功能指标包括MoCA评分; ②运动功能指标包括FMA-LE评分、10米步行平均速度; ③双任务成本(Dual Task Cost, DTC), 本研究基于TUG测试来计算,  $DTC \text{ 百分比} = 100\% \times [(TUG \text{ 测试时间} - TUG\text{-减法计算测试时间}) / TUG \text{ 测试时间}]^{[9-10]}$ 。

1.3 统计学方法 所有数据均采用SPSS 25.0统计学软件进行统计与分析。符合正态分布的计量资料采用独立样本 $t$ 检验,以均数 $\pm$ 标准差( $\bar{x} \pm s$ )表示; 计数资料采用例数(百分比)[ $n(\%)$ ]表示; 非正态分布的计量资料采用中位数(四

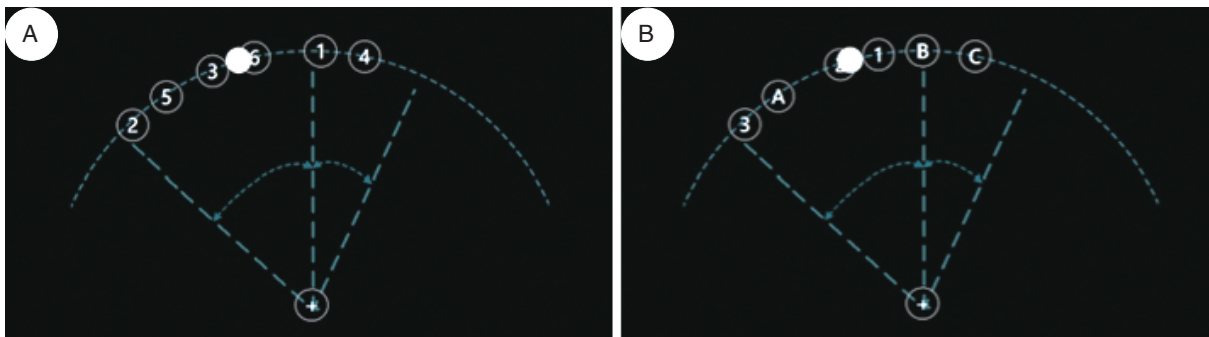


图2 TMT任务

Figure 2 TMT task

注: A.TMT-A任务; B.TMT-B任务

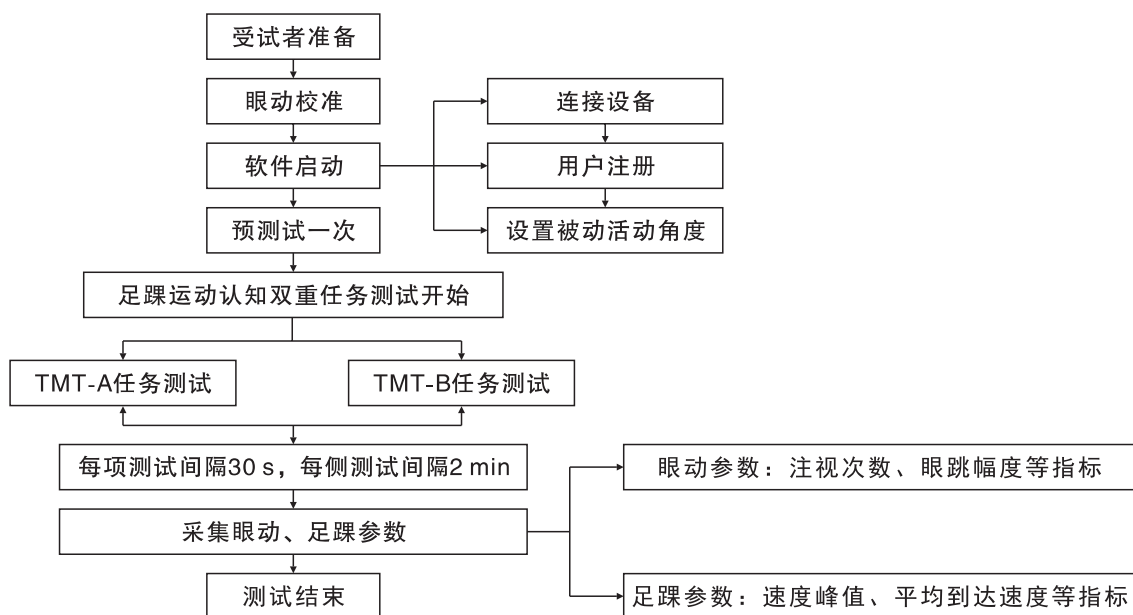


图3 足踝运动认知双重任务测试流程

Figure 3 Foot and ankle motor cognition dual test procedures



分位数间距) [ $M(P25, P75)$ ] 表示。测试参数数据采用 Mann-Whitney 检验, 重测信度采用组内相关系数 (Intraclass Correlation Coefficient, ICC) 及 Bland-Altman 图可视化测试主要指标的测量精度<sup>[11-12]</sup>。效度研究中, 采用 Spearman 相关性分析, 相关度划分标准为:  $|r| < 0.4$  表示低度线性相关,  $0.4 \leq |r| < 0.7$  表示中度线性相关,  $0.7 \leq |r| < 1$  表示高度线性相关。 $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

**2.1 一般资料** 健康受试者与脑卒中患者的性别、年龄、身高、体重等一般资料见表 1。

**2.2 健康受试者重测信度结果** 在 95% 置信区间下, 健康受试者 TMT-A 任务评测参数重测信度的分析结果显示, 注视次数、首次注视时间等 15 个评测参数的 ICC 值为 0.509~0.897, 显示出中等—高度的一致性 (ICC 等级划分标准为<sup>[13]</sup>:  $< 0.40$  为信度差;  $0.40 \sim 0.59$  为信度中等;  $0.60 \sim 0.74$  为信度良好;  $> 0.75$  为信度高)。错误数、总耗时 2 个评测参数在两次测试的组内一致性较差 (ICC 值为 0.319~0.375)。TMT-B 任务测试重

测信度分析结果显示所有参数的 ICC 表现出中等—高度的一致性 (ICC 值为 0.493~0.987), 见表 2。

**2.3 Bland-Altman 分析** Bland-Altman 图分析显示, 健康受试者 TMT-A 任务测试与 TMT-B 任务测试主要指标的数据平均分布在零附近, 结果中没有偏差, 数据中没有异方差, 重测信度具有较好的一致性 (如图 4~5)。

### 2.4 同时性效标效度结果

**2.4.1 脑卒中患者眼动参数效标效度结果分析** 脑卒中患者足踝运动认知双重任务眼动参数的

表 1 健康受试者与脑卒中患者一般资料 [ $\bar{x} \pm s, n(\%)$ ]  
Table 1 General data of healthy subjects and stroke patients [ $\bar{x} \pm s, n(\%)$ ]

项目	健康受试者	脑卒中患者
年龄 (岁)	53.15 ± 6.26	64.13 ± 8.16
性别 (男/女)	8 (40) / 12 (60)	8 (73.33) / 22 (26.67)
身高 (cm)	165.65 ± 5.55	168.76 ± 5.48
体重 (kg)	63.40 ± 7.36	69.93 ± 4.75
AROM (°)	62.25 ± 5.79 (右利足)	42.53 ± 8.16 (患侧足)
病程 (d)	—	63.83 ± 46.18

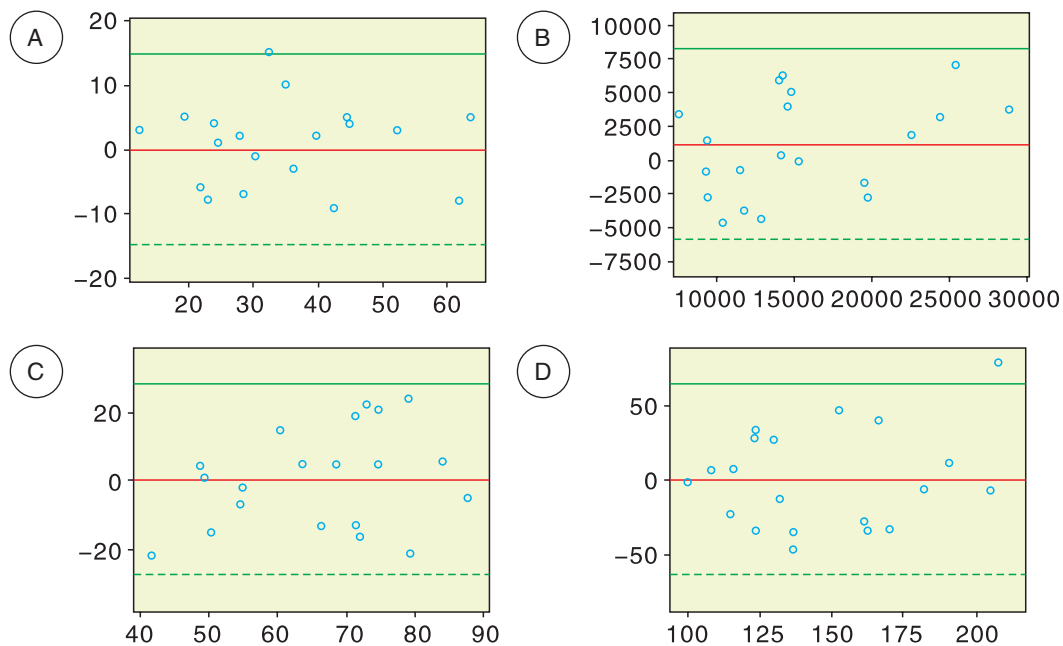


图 4 TMT-A 任务测试主要指标 Bland-Altman 分析

Figure 4 Bland-Altman analysis of TMT-A task

注: A. 注视次数; B. 眼跳幅度; C. 速度峰个数; D. 平均速度; 横坐标表示重测与初测的差值; 纵坐标表示重测与初测的均值

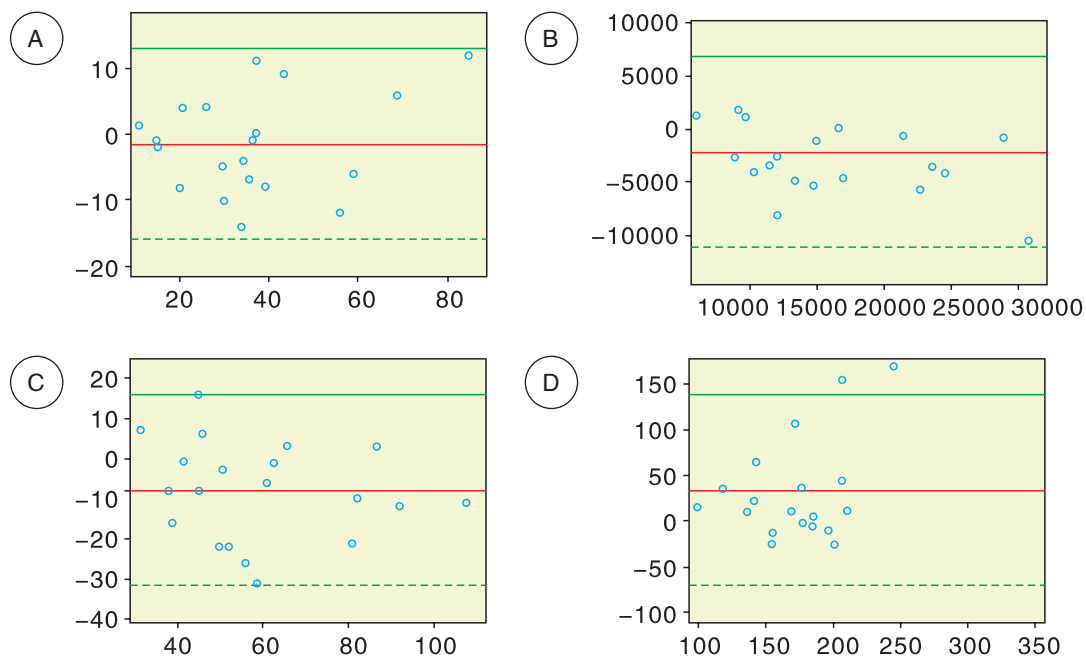


图5 TMT-B 任务测试主要指标 Bland-Altman 分析

Figure 5 Bland-Altman analysis of TMT-B task

注：A. 注视次数；B. 眼跳幅度；C. 速度峰个数；D. 平均速度；横坐标表示重测与初测的差值；纵坐标表示重测与初测的均值

效标效度结果显示，在 TMT-A 任务测试中，注视次数、注视空间密度与 MoCA 评分呈负相关性 ( $P < 0.05$ )；到达的眼跳次数、速度峰之前眼跳数百分比、速度峰之后眼跳数百分比与双任务成本呈正相关性 ( $P < 0.05$ )。在 TMT-B 任务测试中，注视次数、首次注视时间、注视的空间密度与 MoCA 评分呈正相关性 ( $P < 0.05$ )，见表 3。

#### 2.4.2 脑卒中患者足踝参数效标效度结果分析

脑卒中患者足踝运动认知双重任务足踝参数的效标效度结果显示，在 TMT-A 任务测试中，速度峰值、总跨度与 FMA-LE 评分呈正相关性 ( $P < 0.05$ )，总耗时与 TUG- 减法计算测试、双任务成本呈正相关性 ( $P < 0.05$ )，平均速度与 FMA-LE 评分、10 m 步行平均速度呈正相关性 ( $P < 0.01$ )，与 TUG- 减法计算测试、双任务成本呈负相关性 ( $P < 0.01$ )，在 TMT-B 任务测试中，平均到达时间与 TUG- 减法计算测试、双任务成本呈正相关性 ( $P < 0.05$ )，平均速度与 FMA-LE 评分、10 m 步行平均速度呈正相关性 ( $P < 0.01$ )，与 TUG- 减法计算测试、双任务成本呈负相关性 ( $P < 0.01$ )，见表 4。

### 3 讨论

本研究旨在探究基于眼动追踪技术的足踝运动认知双重任务评估系统的信效度。研究表明，该系统具有良好的重测信度与效度，填补了该领域研究的空白。

眼动追踪技术广泛应用于注意力认知机制研究，通过分析眼动指标反映大脑认知加工<sup>[14]</sup>。研究表明，注视次数等指标能有效反映认知负荷和搜索效率<sup>[15]</sup>。TMT 任务是经典的神经心理学测试，同时是一种经典的视觉搜索任务，常用作视觉扫描、运动速度和执行功能的研究<sup>[16-17]</sup>。Singh T 等人<sup>[7]</sup>，Meadmore K L 等人<sup>[18]</sup>发现执行基于 TMT 任务范式的运动认知双重任务的困难受上肢运动与眼动认知之间的干扰作用影响，推测眼动表现可能会影响脑卒中患者康复结局。这些研究均为眼动追踪技术应用于认知评估提供了科学依据，然而目前并没有学者对基于眼动追踪技术的足踝运动认知双重任务评估进行研究，因此本研究采用基于眼动追踪技术的足踝运动认知双重任务评估系统，构建足踝运动认知双重任务的 TMT 评价范式，验证评估系统的重测信度和效度。

表 2 足踝运动认知双重任务评估系统重测信度结果  
Table 2 Retested reliability of foot and ankle motor cognition dual task evaluation system

评测参数	TMT-B 任务 [M (P25, P75)]		Z 值	P 值	ICC 值	TMT-A 任务 [M (P25, P75)]		Z 值	P 值	ICC 值
	初测 (n=20)	重测 (n=20)				初测 (n=20)	重测 (n=20)			
注视次数 (次)	31.50 (25.00, 46.00)	33.50 (25.00, 45.50)	-0.041	0.968	0.854	36.50 (24.00, 42.50)	32.00 (23.50, 46.80)	-0.569	0.570	0.923
首次注视时间 (s)	3.01 (1.90, 5.60)	3.99 (1.60, 5.50)	-0.284	0.776	0.706	3.88 (1.70, 5.20)	2.78 (1.90, 4.90)	-0.582	0.561	0.738
凝视时间 (s)	19.95 (16.90, 26.90)	18.89 (14.50, 26.20)	-0.379	0.705	0.793	20.43 (13.30, 24.90)	16.08 (12.50, 19.30)	-1.258	0.208	0.899
注视的空间密度 (%)	9.00 (4.30, 11.80)	9.50 (7.00, 12.00)	-0.529	0.597	0.751	9.50 (4.30, 13.80)	10.00 (7.00, 12.00)	-0.529	0.597	0.621
注视率 (%)	0.77 (0.60, 0.80)	0.74 (0.70, 0.80)	-0.149	0.882	0.601	0.64 (0.50, 0.80)	0.74 (0.60, 0.80)	-0.703	0.482	0.546
到达的眼跳次数 (次)	2565.50 (2179.00, 3219.00)	2362.50 (1968.50, 3073.50)	-0.784	0.433	0.810	2286.00 (1952.00, 2733.50)	2070.50 (1747.80, 2556.00)	-1.041	0.298	0.785
停留的平均眼跳次数 (次)	1449.00 (953.50, 2195.00)	1523.50 (857.80, 2097.00)	-0.135	0.892	0.897	1484.00 (849.50, 2125.00)	1163.50 (824.00, 1940.00)	-0.906	0.365	0.617
速度峰之前眼跳数百分比	3.63 (2.80, 4.70)	2.52 (2.00, 5.20)	-1.001	0.317	0.76	2.89 (2.30, 4.20)	2.31 (2.10, 2.90)	-1.961	0.050	0.700
速度峰之后眼跳数百分比	5.01 (3.50, 7.40)	4.39 (3.90, 7.80)	-0.041	0.968	0.702	4.23 (3.40, 7.50)	4.27 (3.60, 6.10)	-0.447	0.655	0.823
眼跳幅度 (像素)	13213.71 (11098.60, 20933.20)	15890.59 (9988.40, 18599.40)	-0.203	0.839	0.827	16563.44 (12681.80, 24655.30)	13376.28 (10028.30, 21805.50)	-1.014	0.310	0.804
错误数 (个)	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	0.000	1.000	0.375	0.00 (0.00, 0.80)	0.00 (0.00, 0.00)	0	1.000	0.596
平均到达时间 (s)	28.07 (21.70, 36.20)	26.90 (22.10, 32.20)	-0.622	0.534	0.588	27.32 (20.60, 32.80)	23.32 (18.00, 28.00)	-1.691	0.091	0.698
速度峰值 (cm/s)	331.20 (285.90, 376.80)	348.70 (304.90, 386.10)	-0.609	0.543	0.639	361.30 (321.60, 393.10)	329.40 (284.80, 381.70)	-1.637	0.102	0.493
速度峰个数 (个)	63.00 (56.50, 76.80)	67.00 (51.80, 83.30)	-0.365	0.715	0.509	63.00 (44.00, 82.30)	49.00 (41.00, 69.30)	-1.299	0.194	0.834
总耗时 (s)	31.05 (26.30, 37.20)	27.35 (24.70, 37.30)	-0.906	0.365	0.319	27.65 (22.80, 37.90)	24.67 (20.70, 35.50)	-0.906	0.365	0.792
总跨度 (°)	667.54 (591.30, 753.10)	633.32 (556.90, 724.30)	-0.906	0.365	0.597	666.92 (524.90, 760.20)	545.87 (510.40, 661.60)	-1.839	0.066	0.987
平均速度 (cm/s)	143.85 (113.30, 178.40)	141.45 (115.10, 178.40)	-0.135	0.892	0.583	163.41 (130.60, 187.40)	185.31 (149.10, 222.70)	-1.718	0.086	0.938

表 3 足踝运动认知双重任务眼动参数的效标效度结果

Table 3 Criterion validity of eye movement parameters in foot and ankle motor cognition dual tasks

评测参数	TMT-A 任务		TMT-B 任务	
	DTC ( % )	MoCA	DTC ( % )	MoCA
注视次数 ( 次 )	0.005	-0.450 <sup>a</sup>	-0.049	0.380 <sup>a</sup>
首次注视时间 ( s )	0.19	-0.223	0.19	-0.388 <sup>a</sup>
凝视时间 ( s )	0.241	-0.16	0.202	-0.246
注视的空间密度 ( % )	-0.171	-0.609 <sup>b</sup>	-0.045	-0.389 <sup>a</sup>
注视率 ( % )	-0.099	-0.247	-0.159	-0.116
到达的眼跳次数 ( 次 )	0.390 <sup>a</sup>	0.023	0.33	-0.069
停留的平均眼跳次数 ( 次 )	0.286	0.221	0.254	-0.064
速度峰之前眼跳数百分比	0.543 <sup>b</sup>	0.027	-0.101	0.069
速度峰之后眼跳数百分比	0.506 <sup>b</sup>	0.068	0.135	0.13
眼跳幅度 ( 像素 )	0.357	0.284	0.224	0.209

注: <sup>a</sup> $P<0.05$ ; <sup>b</sup> $P<0.01$ 

表 4 足踝运动认知双重任务足踝参数的效标效度结果

Table 4 Criterion validity of foot and ankle parameters in foot and ankle motor cognition dual tasks

评测参数	TMT-A 任务				TMT-B 任务			
	FMA-LE	10 m 步行 平均速度	TUG-SC	DTC ( % )	FMA-LE	10 m 步行平 均速度	TUG-SC	DTC ( % )
错误数 ( 个 )	-0.142	-0.158	0.327	0.28	-0.172	-0.023	0.043	0.116
平均到达时间 ( s )	0.151	-0.28	0.265	0.229	-0.128	-0.332	0.417 <sup>a</sup>	0.376 <sup>a</sup>
速度峰值 ( cm/s )	0.365 <sup>a</sup>	0.114	-0.165	-0.256	0.171	-0.08	0.058	-0.019
速度峰个数 ( 个 )	0.338	-0.019	0.036	0.006	-0.042	-0.15	0.291	0.254
总耗时 ( s )	-0.018	-0.329	0.416 <sup>a</sup>	0.373 <sup>a</sup>	-0.177	-0.282	0.356	0.311
总跨度 ( ° )	0.424 <sup>a</sup>	0.167	-0.004	-0.07	0.222	0.142	-0.027	-0.076
平均速度 ( cm/s )	0.433 <sup>a</sup>	0.574 <sup>b</sup>	-0.497 <sup>b</sup>	-0.476 <sup>b</sup>	0.498 <sup>b</sup>	0.500 <sup>b</sup>	-0.538 <sup>b</sup>	-0.508 <sup>b</sup>

注: <sup>a</sup> $P<0.05$ ; <sup>b</sup> $P<0.01$ 

本研究对健康受试者足踝运动认知双重任务评估信度分析结果表明,大多数参数具有良好重测信度。通过 Bland-Altman 图分析<sup>[11, 19]</sup>,两次测量的主要参数显示出良好的一致性。其中 TMT-B 任务的足踝评测参数一致性更佳,这可能与任务难度、复杂性及完成顺序等因素有关<sup>[20-22]</sup>。而两种任务的眼动评测参数均表现出良好的一致性,这与 Nie J 等人<sup>[23]</sup>研究发现眼动参数是不受学习效应影响的稳定认知指标的研

究结果一致,为眼动追踪技术应用于运动认知双重任务评估提供了参考依据。

Kahya 等人<sup>[24]</sup>研究发现瞳孔反应是反映执行平衡双重任务期间认知工作量的眼动指标,而目前尚缺乏可以有效反映执行运动认知双重任务期间的认知及运动表现指标。本研究对脑卒中患者足踝运动认知双重任务评估效度分析结果表明,脑卒中患者眼动注视次数、注视的空间密度与认知功能评分相关,足踝运动平均



速度与运动功能、双任务成本相关。这些指标为运动认知双重任务评估提供了新的生理学和生物力学指标，有助于更客观、定量地反映参与者的特征。足踝运动认知双重任务评估打破了传统单一评估方法的天花板效应，为高功能脑卒中患者提供评估新方法。同时测试指标具有双任务效能，测试结果更客观，是一种可靠、有效的运动认知双重任务评估方法。

本研究存在一定的局限性。为避免脑卒中患者临床康复训练对重测结果的影响，本研究仅对健康人群进行信度研究，且足踝运动认知双重任务评估系统主要适用于中度至高功能的脑卒中患者。未来可通过严格控制混杂因素，优化足踝机器人的性能，建立一套更加完整的足踝运动认知双重任务评估方法。

综上所述，基于眼动追踪技术的足踝运动认知双重任务评估系统为脑卒中患者提供了一种新的评估方法，具有客观、多维度的评估优势，可用于定量评估脑卒中患者的足踝运动认知双重任务能力，有望为临床研究及康复疗效评估提供新方法，为康复治疗提供科学指导，具有重要的临床价值和意义。

**利益冲突声明：** 本文不存在任何利益冲突。

**作者贡献声明：** 王小蒙负责设计论文框架，起草论文；王小蒙、彭博负责实验操作，研究过程的实施；王小蒙、翟晓雪、冯雨桐负责数据收集和分析；王小蒙、赵子贺、潘钰负责论文修改；高硕、李聃、潘钰负责拟定写作思路，指导撰写文章并最后定稿。

## 参考文献

- Beerl M S, Leurgans S E, Bennett D A, et al. Diverse motor performances are related to incident cognitive impairment in community-dwelling older adults[J]. *Front Aging Neurosci*, 2021. DOI: 10.3389/fnagi.2021.717139.eCollection 2021.
- Ho J Q, Verghese J, Abramowitz M K. Walking while talking in older adults with chronic kidney disease[J]. *Clin J Am Soc Nephrol*, 2020, 15(5): 665–672.
- Kobayashi T, Orendurff M S, Hunt G, et al. The effects of an articulated ankle-foot orthosis with resistance-adjustable joints on lower limb joint kinematics and kinetics during gait in individuals post-stroke[J]. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 2018, 59: 47–55.
- Jung S H, Hasegawa N, Mancini M, et al. Effects of the agility boot camp with cognitive challenge (ABC-C) exercise program for Parkinson's disease[J]. *NPJ Parkinsons Dis*, 2020, 6(1): 31.
- Pang M Y C, YANG L, OUYANG H X, et al. Dual-task exercise reduces cognitive-motor interference in walking and falls after stroke[J]. *Stroke*, 2018, 49(12): 2990–2998.
- 魏家航, 吕晨燕, 张广华, 等. 眼动仪在神经康复中的应用现状及研究进展[J]. *机器人外科学杂志(中英文)*, 2022, 3(3): 229–234.
- Singh T, Perry C M, Fritz S L, et al. Eye movements interfere with limb motor control in stroke survivors[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2018, 32(8): 724–734.
- Alves J, Vourvopoulos A, Bernardino A, et al. Eye gaze correlates of motor impairment in VR observation of motor actions[J]. *Methods Inf Med*, 2016, 55(1): 79–83.
- Sakurai R, Bartha R, Montero-Odasso M. Entorhinal cortex volume is associated with dual-task gait cost among older adults with MCI: Results from the Gait and Brain Study[J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2019, 74(5): 698–704.
- Montero-Odasso M, Almeida Q J, Bherer L, et al. Consensus on shared measures of mobility and cognition: From the Canadian Consortium on Neurodegeneration in Aging (CCNA)[J]. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2019, 74(6): 897–909.
- Gerke O. Reporting standards for a Bland-Altman agreement analysis: A review of methodological reviews[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2020, 10(5): 334.
- Mansournia M A, Waters R, Nazemipour M, et al. Bland-Altman methods for comparing methods of measurement and response to criticisms[J]. *Glob Epidemiol*, 2021, 3: 100045.
- Clark K, Birch-Hurst K, Pennington C R, et al. Test-retest reliability for common tasks in vision science[J]. *J Vis*, 2022, 22(8): 18.
- Zammarchi G, Conversano C. Application of eye tracking technology in medicine: a bibliometric analysis[J]. *Vision (Basel)*, 2021, 5(4): 56.
- Opeonya J, Doan D N T, Kim S G, et al. Saccadic eye movement in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: A systematic review and Meta-analysis[J]. *Neuropsychol Rev*, 2022, 32(2): 193–227.
- Llinàs-Reglà J, Vilalta-Franch J, López-Pousa S, et al. The Trail Making Test[J]. *Assessment*, 2017, 24(2): 183–196.
- GUO Y. A selective review of the ability for variants of the Trail Making Test to assess cognitive impairment[J]. *Appl Neuropsychol Adult*, 2022, 29(6): 1634–1645.
- Meadmore K L, Exell T A, Burridge J H, et al. Upper limb and eye movement coordination during reaching tasks in people with stroke[J]. *Disabil Rehabil*, 2018, 40(20): 2424–2432.
- Doğan N. Bland-Altman analysis: A paradigm to understand correlation and agreement[J]. *Turk J Emerg Med*, 2018, 18(4): 139–141.
- Piche E, Gerus P, Chorin F, et al. The effect of different dual tasks conditions on gait kinematics and spatio-temporal walking parameters in older adults[J]. *Gait Posture*, 2022, 95: 63–69.
- Ehsani H, Mohler M J, O'Connor K, et al. The association between cognition and dual-tasking among older adults: the effect of motor function type and cognition task difficulty[J]. *Clin Interv Aging*, 2019, 14: 659–669.
- Gills J L, Glenn J M, Madero E N, et al. Validation of a digitally delivered visual paired comparison task: reliability and convergent validity with established cognitive tests[J]. *Geroscience*, 2019, 41(4): 441–454.
- NIE J, QIU Q, Phillips M, et al. Early diagnosis of mild cognitive impairment based on eye movement parameters in an aging Chinese population[J]. *Front Aging Neurosci*, 2020, 12: 221.
- Kahya, Lyons K E, Pahwa R, et al. Reliability and validity of pupillary response during dual-task balance in Parkinson disease[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2021, 102(3): 448–455.

收稿日期：2024-04-22

编辑：崔明瑞