



北京大学

# 本科生毕业论文

题目： 空间视角下的寻路行为与绩效

研究——以首都机场 T3 航站楼

为例

Research on the Relationship Between Wayfinding  
Behavior and Performance Based on Spatial  
Morphology: Taking Terminal 3 of Beijing  
International Airport as an Example

姓 名： 李亦秦

学 号： 1900016617

院 系： 城市与环境学院

专 业： 人文地理与城乡规划

导师姓名： 许立言研究员

二〇二三年五月

## 版权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人，未经本论文作者同意，不得将本论文转借他人，亦不得随意复制、抄录、拍照或以任何方式传播。否则，引起有碍作者著作权之问题，将可能承担法律责任。

## 摘要

大型公共交通空间的认知满意度水平能够反映其城市功能的发挥程度，并且影响旅客对城市的整体评价。目前国内关于旅客在交通空间中的寻路研究侧重静态决策影响因素的定类与定性研究，对动态层面旅客行为的影响因素及旅客行为与寻路效率的定量研究尚有欠缺。针对这些问题，本文基于环境心理学角度，探究空间形态对空间认知行为的影响，以及空间认知的行为特征与寻路绩效的关系。通过北京首都国际机场 T3 航站楼的空间认知实验收集眼动、运动、眼动-运动复合三方面行为数据，并结合寻路效率的评价指标和空间形态评估指标得出以下主要结论：

### （1）寻路效率的特征

较低飞行频率与较低机场熟悉度的乘客存在寻路效率普遍偏低的情况；旅客的教育背景会影响其寻路效率，低学历水平的人群在寻路时表现出更低的寻路效率；短时间内的寻路经验是可学习的，但这种经验不具有良好的迁移性。

### （2）寻路行为与寻路效率

旅客的寻路效率受到其寻路行为的影响；注视方向、注视距离与移动偏好都对旅客的寻路效率产生影响；更熟悉环境的旅客能够更高效地完成寻路任务。

### （3）空间形态与寻路行为

空间形态对寻路行为存在明确的影响，复杂空间中旅客的寻路效率普遍较低；空间形态的转变是造成寻路行为改变的重要因素，旅客会通过调整寻路策略和行为适应不同环境的定位导向需求。

研究大型公共交通空间的环境认知能够为早期建设的交通建筑内环境的优化提供相应的理论基础，同时也为改善城市的服务水平提供理论层面的参考。

关键词：环境心理学，空间认知，寻路，眼动

# Research on the Relationship Between Wayfinding Behavior and Performance Based on Spatial Morphology: Taking Terminal 3 of Beijing International Airport as an Example

Li Yiqin (Human Geography and Urban Planning)

Directed by Prof. Xu Liyan

## ABSTRACT

Cognitive satisfaction of large-scale traffic spaces can reflect the urban functions and affect the overall evaluation of the city. At present, domestic research on large-scale traffic spaces wayfinding focuses on the nominal measures and static decision-making factors, while lacking quantitative research on the influencing factors of dynamic human behavior and wayfinding performance. This article explores the impact of spatial morphology on spatial cognitive behavior from the perspective of environmental psychology, as well as the relationship between spatial behavioral characteristics and wayfinding performance. Based on the field eye-tracking experiment of Terminal T3 of Beijing Capital International Airport, the data of eye tracking and body movement are collected, and are evaluated with the wayfinding performance and spatial morphology. The main conclusions are drawn as follow:

### (1) Characteristics of wayfinding performance

Subjects with low familiarity will have greater wayfinding problems. The short-term wayfinding experience is learnable, but is not replicable when place shifting. Educational level affects wayfinding performance, and the subjects with junior high school diploma perform lower efficiency during wayfinding tasks.

### (2) Wayfinding behavior and wayfinding performance

Wayfinding performance is influenced by wayfinding behavior. The gaze direction, gaze distance and movement preference influence wayfinding efficiency. The subjects with higher familiarity complete wayfinding tasks more efficiently.

### (3) Spatial morphology and Wayfinding Behavior

The spatial morphology has a clear impact on wayfinding behavior. When the wayfinding situation is complex, the efficiency of wayfinding is generally low. The transformation of spatial morphology is an important factor causing changes in wayfinding behavior,

and the subjects tend to adapt their wayfinding strategies according to different orientation needs.

This article can provide theoretical basis for optimizing the internal environment of traffic spaces, and also provide theoretical references for improving the standard of city service.

KEY WORDS: Environmental psychology, spatial cognition, wayfinding, eye tracking

# 目 录

第一章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的与研究问题	1
1.3 研究意义	2
1.4 研究方法	2
1.4.1 空间认知实验	2
1.4.2 数据处理与分析方法	2
1.5 研究框架	3
第二章 理论基础	4
2.1 寻路	4
2.1.1 寻路行为	4
2.1.2 影响寻路的因素	4
2.1.3 寻路绩效	5
2.1.4 寻路中的视觉认知	6
2.1.5 国内外寻路相关研究	6
2.2 眼动实验	7
2.2.1 眼动基础理论	7
2.2.2 眼动测量指标	8
2.2.3 眼动实验的研究应用基础	10
2.3 本章小结	11
第三章 实验设计与数据处理	12
3.1 研究案例地	12
3.2 实验设计与流程	12
3.2.1 实验设计	12
3.2.2 实验流程	15
3.3 实验数据处理	15
3.3.1 寻路绩效判定	15
3.3.2 行为数据指标	16
3.3.3 空间数据指标	17
3.4 被试社会特征统计	18

第四章 任务绩效分析 .....	20
4.1 任务绩效.....	20
4.1.1 各任务步行时间延迟偏差 (T/D) 特征分析 .....	20
4.1.2 各任务步行时间延迟偏差 (T/D) 对比分析 .....	21
4.2 任务绩效的分类差异性分析 .....	22
4.2.1 任务发生条件 .....	22
4.2.2 被试的社会属性差异 .....	23
4.3 本章小结.....	24
第五章 空间寻路实验眼动及行为数据分析 .....	25
5.1 眼动数据指标与实验绩效相关性分析.....	25
5.1.1 瞬时眼动指标 .....	25
5.1.2 时间段眼动指标 .....	27
5.2 运动轨迹指标与实验绩效相关性分析 .....	32
5.2.1 瞬时运动轨迹指标 .....	32
5.2.2 时间段运动轨迹指标 .....	34
5.3 运动-眼动复合指标与实验绩效相关性分析 .....	36
5.3.1 运动-眼动复合指标特征分析 .....	37
5.3.2 运动-眼动复合指标与绩效相关性分析 .....	38
5.4 本章小结.....	38
5.4.1 各寻路任务的行为特征 .....	38
5.4.2 各寻路任务的行为与绩效的关系 .....	39
第六章 空间形态指标与行为数据指标相关性分析 .....	41
6.1 空间形态指标.....	41
6.1.1 空间形态指标特征分析 .....	42
6.1.2 空间形态指标特征对比分析 .....	45
6.2 空间数据指标与行为指标相关性.....	46
6.2.1 空间数据指标与眼动指标相关性 .....	46
6.2.2 空间数据指标与运动轨迹指标相关性 .....	46
6.2.3 空间数据指标与运动-眼动复合指标相关性 .....	47
6.3 本章小结.....	47
6.3.1 空间形态指标特征 .....	47
6.3.2 空间形态指标与行为指标的关系 .....	48
第七章 结论与展望 .....	49

7.1 结论.....	49
7.2 反思与展望.....	50
参考文献.....	52
附录 A.....	58
附录 B.....	59
附录 C.....	65
致谢.....	68
北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明.....	69



# 第一章 引言

## 1.1 研究背景

随着经济交流的愈加频繁以及城市化的进一步发展，以城市为出行背景的交通需求增长至前所未有的数量。目前全球旅行公里数的 60% 以上由城际或市内出行构成，这种城市交通需求在大型城市（Metropolitan）中的占比则更高，因此大型城市的城市形态与无障碍交通系统的发展程度直接关乎该城市的可持续性和宜居性<sup>[1]</sup>以及其居民的福祉<sup>[2]</sup>。

交通枢纽是承担城市公共交通功能的重要功能空间，也是在公共交通中体现城市交通系统友好性的主要载体。大型城市的交通枢纽在具备较大空间容量和高度的可达性<sup>[3]</sup>之外同时具有中心性和中间性两种特征<sup>[4]</sup>，在客运起始、中转与到达中都扮演着重要角色，枢纽、内部设施和枢纽中提供的多式联运共同构成了旅客行程体验中的重要组成部分<sup>[5]</sup>，其友好性直接影响着旅客对整个行程的满意程度。然而，很多大型交通枢纽的规划与运营从起始点上就出现了偏差，已有的城市交通枢纽从规划层面即出现了与友好性设计理念相悖的问题：包括许多机场、火车站等在内的大型公共交通系统早期的设计和规划并非是以社会服务为导向的，而是以市场为导向的<sup>[6]</sup>。这使得经济效益而非友好程度成为这些大型交通枢纽的建设关注重点，这种现象在早期的机场建设中体现尤甚。近年来，旅客出行的自由化和全球化使得交通枢纽的作用发生了变化，旅客性质的多元化和交通不稳定性的上升也要求交通枢纽的规划更加人性化<sup>[6]</sup>。根据国际航空运输协会（IATA）的预测，到 2035 年亚太地区的旅客总量在全球占比将接近 50%，在 31 亿人次的基础上将新增 18 亿亚太区域内的旅客流量<sup>[7]</sup>。这种庞大的客运量对交通枢纽基础设施的便利性与友好性形成挑战，也迫使其规划和运营者正视基于旅客体验的改善和优化。

Caves 认为寻路是影响旅客体验与满意度水平的重要问题之一<sup>[8]</sup>。现有的大型交通枢纽存在人流密集、功能复合化的特征，这使得空间的复杂性提升、信息的载荷量也相应增加。由于早期的枢纽空间中设施相似、均质化严重，且缺乏具有辨识度的明确引导，信息被旅客忽视的可能性也随之上升，从而使旅客在空间内得不到有效引导，增加路径回溯距离<sup>[9]</sup>的同时降低其寻路效率。Chang 指出，尤其对于不熟悉大型交通枢纽或有使用障碍的旅客而言，寻路步行距离的延长增强了其焦虑与疲惫感，而这些负面情绪会对自尊与其之后在陌生无关环境中自由探索的动机产生负面影响<sup>[10]</sup>。

## 1.2 研究目的与研究问题

大型交通设施是城市集散功能的重要承担场所，其中乘客的寻路效率会影响集散功能发挥的有效性，而乘客的寻路效率又会受到寻路行为的影响。因此研究目的是探究城市公共交通设施中乘客的行为表现与寻路特征之间的关系，从而为改善交通空间中的寻路策略与视觉认知问题提供有效的改进建议。

研究问题有：

- （1）大型交通枢纽中乘客的寻路效率有什么特征？

(2) 乘客的寻路行为和表现会对其寻路效率造成何影响?

(3) 交通枢纽的空间形态与乘客的寻路行为之间存在关联吗?

### 1.3 研究意义

健康发展的城市需要具备对城市发展需求的有效响应机制和自适应能力以保障其功能能够被其居民充分使用,因此城市功能利用效率的评估往往被用作衡量一个城市是否具备健康发展的标准<sup>[11]</sup>。作为城市功能的发生场所,城市公共空间的研究存在极高的学术意义和实际价值<sup>[12]</sup>,其中城市交通空间的乘客体验优化是城市公共空间复兴研究中的重要内容<sup>[13]</sup>。在目前的城市发展进程中,机场作为主要的大型交通枢纽承担着城际至洲际规模的旅客集散功能,是典型的高客流量城市交通空间。其运营与服务的效率影响着旅客对该城市交通运输水平的总体印象与评价。就国内而言,我国早期的机场在建设中都对已有的国外案例进行了参考<sup>[14]</sup>,很多内部设施的设计方面更贴近国外的经验和习惯,并没有实现充分的本土化。近年来,随着我国城市化水平的上升与飞行旅客流量的增长,旅客在机场中的寻路困难问题日益明显。已有的研究表明,在航站楼、火车站等城市交通空间中,乘客对设施与服务的满意度感知水平受到寻路效率的影响<sup>[15,16]</sup>,因为不经常飞行所以不熟悉机场设施环境的旅客很容易因为寻路困难产生焦虑情绪,进一步因为情绪波动影响寻路表现,从而陷入寻路困难的恶性循环<sup>[10,15,17]</sup>。在这种情况下,研究旅客在机场内的寻路表现与认知特征对改善机场内的寻路环境与提升旅客的寻路效率有实质性的帮助,从而能够为早期建设的机场建筑内环境的优化提供相应的理论基础。

### 1.4 研究方法

本研究主要采用统计检验法。利用空间认知实验收集关于大型交通空间的行为与空间形态数据,包括眼动数据、移动轨迹数据及环境元素数据,并进行数据分析。上述方法在眼动与行为领域的研究中已有广泛应用<sup>[18-20]</sup>,具备可行性。

#### 1.4.1 空间认知实验

本研究采取空间认知实验进行行为与空间形态数据的收集,具体采用行为观察法、眼动实验法两种方法。在行为观察法中,对被试在空间寻路中的行为及表现进行观察,记录被试在空间中的步行时间、方向、距离、具体轨迹路径及停顿等行为数据,研究被试在寻路任务中的行为特征;同时,根据被试的步行行为对其所处周围环境的空间特征进行记录,研究被试的寻路表现与空间特征之间的关联。在眼动实验法中,本研究使用眼球追踪技术记录被试的眼睛运动方式与注视行为特征,获取被试在寻路过程中产生的眼动数据,并基于此研究被试在寻路任务中的注视行为与寻路环境之间的关系。

#### 1.4.2 数据处理与分析方法

实验中眼动数据由 Tobii Pro Glasses2 采集,通过 Tobii pro lab 进行数据处理并导出至 GIS 进行可视化及进一步坐标测算;行为数据采用行为观察法获得,根据被试的移动行为在 GIS 中进行轨迹点标注,并用 Python 处理轨迹序列的坐标数据,进行时间轴上的扩展标注以对应眼动数据。空间形态数据以建筑平面图为基础来源,结合现场的观察描绘环

境元素的所处位置与类别信息，并用 Fragstats 进行量化处理。本研究使用 SPSS 对实验获得的眼动及轨迹数据进行统计分析，包括正态性检验、描述统计（平均值、标准差）、箱型图、非参数与参数差异性检验、Spearman 相关分析与 Pearson 相关分析。

### 1.5 研究框架

本研究以大型交通空间的寻路行为与注视特征为主题，北京首都机场 T3 航站楼为研究对象，首先对已有的寻路行为和眼动特征实验进行文献研究，依据此收集实验数据并确定分析指标。进而基于实验数据分别对指标进行匹配处理，研究寻路行为中的移动轨迹特征、注视特征与寻路策略的关系、寻路成功率与效率的影响关系。本研究框架如图 1.1 所示。

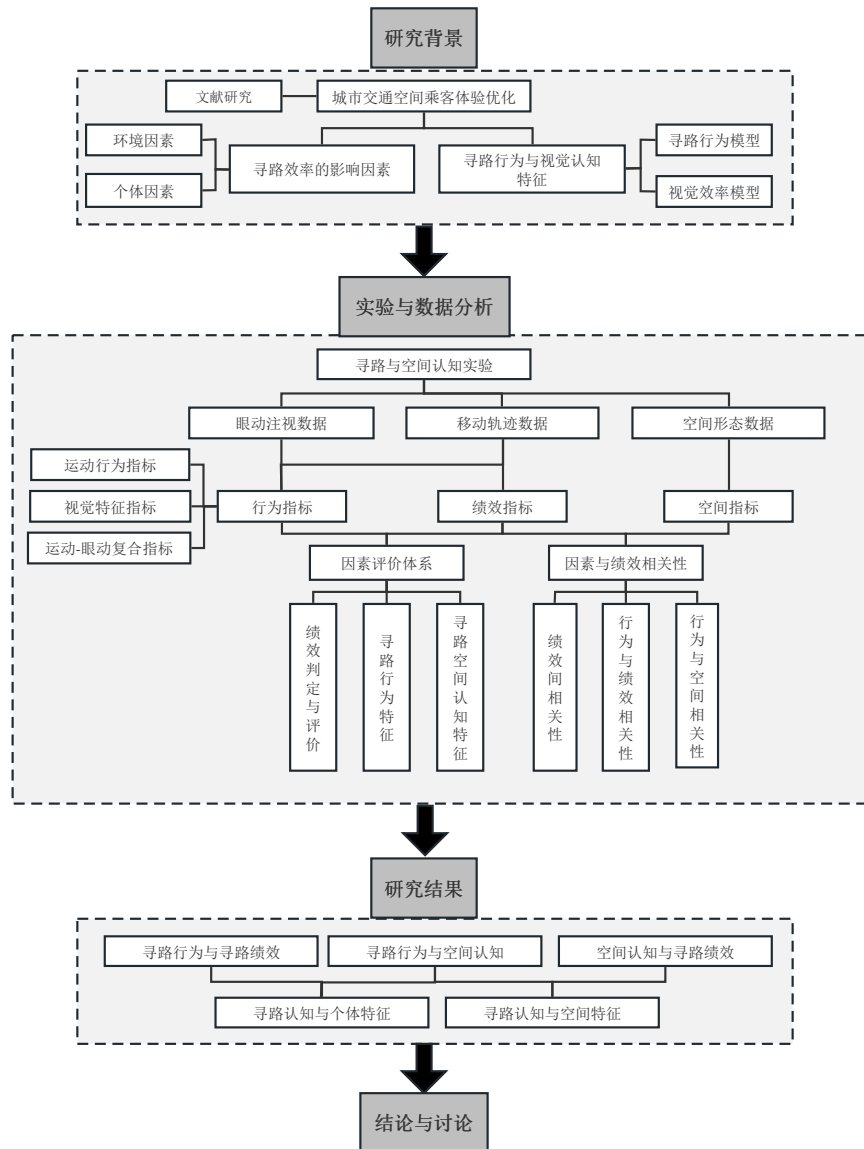


图 1.1 研究框架图

## 第二章 理论基础

### 2.1 寻路

#### 2.1.1 寻路行为

寻路（Wayfinding）的概念由 Lynch 在 1960 年首次正式定义，他强调组织和使用从环境中感知到的线索是寻路的重要特征<sup>[21]</sup>。随后不同研究者分别完善了这个概念，Golledge 将其解释为确定路线、学习路线和根据记忆回溯路线的能力<sup>[22]</sup>；Chen 将其定义为以便捷方式到达并识别出目的地的能力<sup>[23]</sup>；Jamshidi 将其阐述为当目的地不可见时在环境中确定起点并抵达终点的能力<sup>[24]</sup>等等；无论何种解释，认知、定位和定向

（Navigation）都是组成寻路的必须要素。理论层面上，20 世纪早期，研究员主要围绕格式塔理论（Gestalt theory）<sup>[25]</sup>和认知地图（Cognitive map）<sup>[26]</sup>展开研究；20 世纪中期发展至六种主流理论：信息处理论、TOTE 模型、生态感知论、感知循环论、空间发展理论（Piaget's theory of spatial development）和易读与可成像论；20 世纪末期演变至空间知识获取论（Siegel and White's theory of spatial knowledge acquisition）、建构主义、神经网络模型、CPM 和狩猎-采集空间性别差异论五种；随后在 21 世纪又产生了过程监督论<sup>[24]</sup>。

#### 2.1.2 影响寻路的因素

##### （1）环境因素

已有的研究证明，个体在空间中探索的时间并不与认知程度发生直接关联<sup>[27]</sup>；另一方面，寻路发生的环境因素会直接塑造个体的认知，从而影响寻路的效率<sup>[28]</sup>。因此，对环境因素的寻路研究集中在环境引导功能的发挥上<sup>[15,29,30]</sup>。国内近期的相关研究也集中关注了建筑形态、标志对乘客寻路行为的影响<sup>[31-34]</sup>。

利用标识是寻路重要环节。根据 Epstein，寻路定位需要经历四个步骤：识别地标（Landmark）、使用地标确定位置与方向、利用既有经验判断空间关系，综合使用这些信息进行路径规划<sup>[35]</sup>。过往的研究探讨了引导标识颜色的效果，在验证了强烈对比色显示的方位信息能够提供更加高效寻路引导<sup>[36]</sup>的同时，认为应该避免使用彩色标识进行引导，以规避色彩带来的迷惑性和颜色差异造成的视觉忽视<sup>[27]</sup>。除此之外，地标也被认为是寻路定位中最重要线索，Lynch 将其描述为建成环境的五个最基本要素之一<sup>[37]</sup>。地标在视觉、结构和认知上的独特性使它在空间中具有可见性与显著性<sup>[38]</sup>，有效的地标能够帮助行人形成认知地图并增强寻路信心<sup>[39]</sup>。

同时，空间的复杂程度也是影响寻路效率的重要因素。空间的延伸方向、分散程度和聚集模式都对空间复杂度产生影响<sup>[40]</sup>，而楼层数量<sup>[41]</sup>、建筑形体或空间布局<sup>[15]</sup>等都对行人的寻路效率有潜在的影响。行人基于空间观测获得的知识进行寻路行为，再由行为进一步获得空间认知，实现寻路过程的信息递归<sup>[42]</sup>。已有的研究证实了在复杂的空间环境中，由于信息获得的困难增加，行人为了规避决策错误会表现出更强烈的徘徊和小幅度路径回溯意愿<sup>[9]</sup>。这也证实了行人所处空间的复杂度越高、单次可获得的有效信息就越

少、信息的过载和遗忘可能也越大，寻路效率也会随之下降<sup>[28]</sup>。Hassan 研究了人在复杂空间中的寻路偏好，发现由于视觉引导的缺失，大多数行人会同时综合静态和动态导引信息进行寻路，而仅使用静态信息进行寻路的行人表现效率低于静态和动态综合使用者<sup>[43]</sup>。

## （2）个人因素

此外，行人的寻路风格是个性化的<sup>[44]</sup>，个体的差异已被证实在空间定向中存在关键的影响(Jamshidi & Pati, 2021)。通常情况下，这种差异由性别<sup>[45]</sup>、年龄<sup>[46]</sup>、健康<sup>[27,47,48]</sup>、文化差异<sup>[49]</sup>、儿童时期获得的寻路经验<sup>[10]</sup>以及个体对环境的熟悉程度<sup>[41]</sup>等决定，也有研究认为成年人的寻路与旅行经验也会影响其在交通设施中的寻路效率<sup>[10]</sup>。Mendez-Lopez 的研究表明性别对寻路效率产生影响，男性完成任务的平均时间短于女性，同时男性更倾向于使用空间关系导航<sup>[43,45,50]</sup>；Taillade 研究了年龄与寻路效率之间的关系，认为相比年轻人，老年人的学习性和空间表征能力更强<sup>[46]</sup>；Leib 指出不同文化背景的群体在寻路过程中会展现出不同的信息偏好，例如中国旅客更偏爱文本符号组合的导向标识<sup>[49]</sup>；同时 Chang 的研究反映，包括儿童和成年两个时期的寻路经验在个体的寻路过程中发挥了重要作用，有独立海外旅行经历的旅客比没有独立旅行经历的在机场寻路中表现出的焦虑程度更轻，而寻路焦虑会影响寻路表现<sup>[10]</sup>；另一项研究中，Hölscher 证明了对环境的熟悉程度影响行人的寻路定位策略制定：在复杂组合建筑的寻路任务中，相对熟悉环境的参与者优先使用楼层定位策略，而不熟悉建筑的参与者会选择相反的定向导航策略。此外，国内近期的个人因素研究也重点关注了性别、学历背景等要素<sup>[33,51,52]</sup>。

### 2.1.3 寻路绩效

判定寻路绩效是验证因素在寻路过程中产生的影响与确定主导因素的基础。已有的寻路研究中使用的绩效判别指标大致可分为两类：直接获得指标和加工处理指标，前者包括任务完成时间、失误次数等；后者则是直接获得的数据经过处理获得的，包括寻路效率等级（Effectiveness rating）<sup>[53]</sup>、步行时间延迟偏差（Tardity-differential，记为 T/D）<sup>[54]</sup>和超过最佳距离百分比（Percentage above optimal path length，记为 PAO）<sup>[41]</sup>等。

在测量寻路与感知焦虑的实验中，寻路时长和失误次数都是常用的寻路绩效衡量指标。Hund 在关于方向感与寻路焦虑的研究中采用寻路时长和定向失误次数作为效率判别标准，其中对样本的寻路时长与平均值进行比较，定向失误记录包括折返、转向错误、目的地识别错误、原地停留等在内的行为发生次数<sup>[55]</sup>；另一项关于空间焦虑感与寻路策略的研究中，Hund 使用了寻路时长和总失误次数对绩效进行评定<sup>[55]</sup>，此外，Hund 在方向感训练与寻路效率的研究中也使用了时长和总失误次数作为寻路效率的量化表现<sup>[56]</sup>。加工处理指标更常见于多影响因素分析的研究中。在关于性别与方向感对寻路效率影响的实验中，Padgitt 使用寻路效率等级作为绩效判定，等级由基本方向、距离、左右转、非选择与选择节点地标五种指标的七种组合表现作为标准进行划分，共判定七个等级<sup>[53]</sup>。Correia 在研究影响机场航站楼寻路服务水平的要素时提出了步行时间延迟偏差

(T/D) 的概念, 通过比较样本实际步行距离与标准最短步行距离从而得到寻路绩效, 具体而言是以实际步行距离和标准最短步行距离的差值除以标准最短步行时间得到的<sup>[54]</sup>。Hölscher 在复杂组合建筑寻路的研究中引入了新的指标 PAO, 以超出最佳路径长度之外的步行距离比率作为寻路性能的判定指标。

### 2.1.4 寻路中的视觉认知

视觉认知 (Visual recognition) 是关于人对特定物体的识别规律与识别特征的描述 (Correia et al., 2008)。人对环境的识别是在寻路过程中建立的<sup>[58]</sup>, 这种逐步获得的环境感知映射到认知领域则构成由空间信息组成的空间认知, 而空间信息的获取是依靠视觉进行的<sup>[59]</sup>。这种视觉对认知的影响同样适用于空间寻路过程, 注视行为能够对寻路中的信息处理机制和认知策略产生影响<sup>[60]</sup>, 因此寻路背景下的注视行为特征得到了研究者的关注<sup>[41,61,62,62,63]</sup>。视觉与认知能力是寻路过程的基础<sup>[64]</sup>。已有的研究证实了在寻路过程中视觉感知是自下而上的, 即环境刺激驱动视觉注意力, 而非人的自主目标意图驱动视觉注意力<sup>[65]</sup>, 这表明寻路过程中的视觉反应可以用环境因素进行解释, 进一步而言, 环境因素对人与地理信息的交互和空间认知造成影响。因此目前影响寻路效率的主要因素可以被归类为环境和个体两类<sup>[66]</sup>。

根据 Greenroyd 的定义, 一次完整的寻路行为由四个步骤组成: 定位、路线选择、路线遵循和目的地识别。与游览参观等娱乐性寻路相比, 交通枢纽中发生的寻路行为属于目的性与紧急性寻路<sup>[29]</sup>, 因此更加注重在定位与路线选择中的标志、视线可见范围和建筑形态产生的视觉引导准确性<sup>[64]</sup>。尽管乘客的注视模式与特定的空间任务相关<sup>[67]</sup>, 视觉引导的效率仍然可以由接受视觉信息所花费的时间<sup>[61]</sup>与注视时长<sup>[68]</sup>等指标进行评估。已有的视觉效率模型认为注视偏见 (Gaze bias) 同样适用于寻路行为<sup>[68]</sup>。多个基于能见度指数 (Visibility index) 的研究结果均表明, 在建筑设施内旅客偏向于选择有较长视线可见距离的路径<sup>[60,67,69-71]</sup>。同时, 不当的环境也会对注视产生干扰, 从而降低视觉认知效率。在很多情况下, 乘客在路径决策中处理视觉信息所需的背景知识是充足的<sup>[72]</sup>, 但无效的标志<sup>[15]</sup>和复杂的建筑结构<sup>[42]</sup>会扰乱视野范围, 造成视觉信息混乱、过载或有效信息遗忘<sup>[42]</sup>, 从而增大乘客寻路的困难<sup>[29]</sup>。

### 2.1.5 国内外寻路相关研究

国外对室内环境寻路的研究开始相对较早, 主要关注寻路过程中的认知问题<sup>[24]</sup>。实证方面以图书馆、机场、地铁站等场地为背景, 同时, 眼动与虚拟现实实验在研究中也采用较多, 研究者使用以 AOI 为代表的量化手段获得样本的空间感知差异和寻路行为特征信息, 构造了包括能见度指数 (VI)<sup>[71]</sup>、视觉噪声<sup>[64]</sup>、注视角与左墙距离<sup>[63]</sup>等在内的评估指标。研究主题围绕环境心理学展开, 关注其中的视觉认知和信息反馈效率, 但对寻路行为中造成“迷路”的负面原因<sup>[42]</sup>涉及较少。

就国内基于人的视角的寻路研究而言, 早期的寻路研究集中在建筑学领域, 以大尺度公共空间为背景, 根据实地观察与小样本实验定性分析特定空间中的寻路行为, 注重

环境设计、空间结构与设施管理在寻路中产生的影响。近年的相关寻路研究大多以商场、医院、地铁站、动物园等公共设施为背景，研究者采用量化手段基于寻路平面进行路线复杂度<sup>[32]</sup>与空间可达性分析<sup>[73]</sup>，结合主观问卷反馈对空间的寻路引导设施提出改进意见。同时，眼动技术在寻路研究中的使用比例也有所上升，研究者主要采用静态切面截取 AOI 的方式<sup>[74-76]</sup>，结合 AOI 编码标记和注视点分布热力图分析<sup>[51,77]</sup>，引入了虚拟现实技术<sup>[65]</sup>，利用常见的眼动指标分析时间点注视行为特征，从而解释乘客在节点的路径选择。总体而言，国内相关研究在分析层面更关注乘客的在静态节点的寻路选择，但是对连续时间段内的注视行为特征、动态层面注视行为与移动路径之间的关系研究较少；因素解释层面更关注外部直观环境因素，对个体经验、文化差异在寻路中产生的影响及寻路经验的可学习性等方面关注较少。

## 2.2 眼动实验

眼动是眼球的运动的简称，眼动实验的核心是通过记录人眼运动产生的视觉信息以反映人的认知过程，是解决各领域中关于认知研究的有效途径<sup>[78]</sup>。

### 2.2.1 眼动基础理论

眼球的运动使人的视觉注意力与注视点能够被追踪和记录<sup>[59]</sup>，术语“眼动追踪”指对人凝视方向的估计，通常情况下指的是识别人所注视的物体。

Paul Fitts 在 1974 年的实验中使用眼动追踪技术证实了凝视位置能够反映人的行动意图，开创了利用眼动追踪技术进行研究的先河<sup>[79]</sup>。目前主要的眼动追踪技术可以被分为两类：测量眼睛相对于头部整体的角度位置和测量眼睛相对于周围环境的位置；类似地，主要研究的眼动行为也可以被分为稳定运动和扫视运动两种，其中，稳定运动包括注视、平滑追踪和眼球震颤，扫视运动包括眼跳和收缩<sup>[80]</sup>。基于此，常用的眼动分析数据包括注视、眼跳以及注视兴趣区（AOI）内的首次注视时间、注视时长等（表 2.1）。

表 2.1 眼动相关名词解释

概念	含义解释
注视	注视过程中，视网膜上的停留物体保持大致稳定，稳定注视通常持续 100-1000ms，大多数在 200-500ms 之间，时间长短主要取决于处理的信息质量和当前的认知负荷
眼跳	以重新定位视觉为目的的快速眼球移动，速度随扫视的幅度变化，峰值速度大致为 400-600 度/秒，在研究中作为对视觉刺激的反应指标
平滑追踪	眼球非自发性跟移动目标缓慢运动，使物体在视网膜上保持大致稳定，能够跟踪移动 5-30 度/秒的物体，超过 30 度/秒后会出现滞后补偿

眼球震颤 眼球的平滑运动，追踪注视物体之后向反方向快速运动以寻找另一个对象

注视兴趣区 反映人注视特定刺激区域的时间或频率，内部的相关数据包括首次注视时间、持续时间、访问次数、注视总时长等

### 2.2.2 眼动测量指标

在目前已有的注视行为寻路研究中，研究者使用的常规眼动指标可以划分为三个维度：时间、空间、计数<sup>[81]</sup>，包括注视时间、注视次数、眼跳次数、兴趣区（AOI）、兴趣时间段（TOI）与注视热力图等，广泛应用于整体统计和静态切面分析，注视兴趣区反映人注视特定刺激区域的时间或频率，内部的相关数据包括首次注视时间、持续时间、访问次数、注视总时长等<sup>[82]</sup>，因此常规指标的分析主要集中于特定注视兴趣区（AOI）内；其他指标包括视线向量<sup>[62]</sup>、能见度指数<sup>[69]</sup>、注视角与左墙距离<sup>[63]</sup>等，用于动态角度描述注视行为与路径轨迹的关联。根据研究内容和方法的区别，眼动实验考查不同指标，对有关寻路研究的常用眼动测量指标进行汇总，得到以下总结：

表 2.2 寻路研究中常用眼动测量指标选择汇总

时间	作者	研究内容	被试者数量	眼动测量指标选取
2009	Jan M. Wiener, Christoph Hölscher, Simon Büchner, Lars Konieczny	通过眼动实验探索空间决策过程中的视觉注意力特征 <sup>[60]</sup>	20 名 19-25 岁参与者	注视时间、能见度指数
2014	Cave, Andrew R., Blackler, Alethea L.等	通过眼动实验检验机场依靠直觉的寻路过程 <sup>[83]</sup>	30 名 19-67 岁参与者	总注视时间、注视轨迹、注视位置
2014	Daniel Müller-Feldmeth, Sarah Schwarzkopf, Simon J. Büchner, Gregor Kallert	基于眼动探索复杂环境寻路中行为移动的特征 <sup>[62]</sup>	29 名 21-57 岁参与者	视线向量
2016	S. Schwarzkopf, S. J. Büchner, C. Hölscher, L. Konieczny	考察协作寻路中的凝视行为与空间分工理论的协调性 <sup>[63]</sup>	11 名 21-57 岁无建筑背景的参与者	视线向量、注视角、左墙距离
2015	Eloy, Sara	基于空间句法、眼动数据分析人在建筑环境中的运动 <sup>[84]</sup>	18 名 18-45 岁无建筑背景的参与者	注视次数、眼跳次数、平均注视次数、平均眼跳次数
2016	Ohm C, Müller M, Ludwig B.	通过眼动实验寻找室内寻路中的标志物并评价室内行人导航界面 <sup>[85]</sup>	34 名 19-30 岁参与者	注视时间、平均注视时间、注视次数、回视次数



2016	Viaene P, Vansteenkiste P, Lenoir M, et al.	考察通过总注视时间反映室内寻路中使用标志物的有效性 <sup>[86]</sup>	28 名 20-30 岁对实验环境熟悉的参与者	总注视时间
2019	徐建,朱小雷,王朔	地铁站内空间环境界面与乘客路径选择行为之间的关系 <sup>[65]</sup>	8 名建筑学院研究生	首次注视时间、首次注视持续时间、总访问持续时间、平均访问持续时间、平均的注视时间、眼跳次数、注视次数
2019	晋良海, 殷双萍, 尹洁	对放射状购物空间寻路过程分为信息感知、路径选择、目标搜索并进行眼动定量分析 <sup>[52]</sup>	40 名 18-30 岁本科或研究生	注视次数、注视时间、瞳孔直径、眼跳幅度
2019	孙澄、杨阳	通过眼动实验分析商业综合体室内公共空间中主要寻路标志物的视觉显著性水平 <sup>[31]</sup>	66 名 23-35 岁随机选取的被试	注视轨迹、首次注视时间

将表 2.2 中的重要及高频指标与其定义、相关解释按照时间、空间、计数三个维度进行划分,得到的分类汇总结果如表 2.3 所示。

表 2.3 寻路研究中常用眼动测量指标的分类与定义

维度分类	眼动测量指标	定义	基本意义
时间维度	注视时间	注视的时间	注视时间的长短反映被试对不同环境因素认知的难易程度或感兴趣程度, 认知越困难或对目标越感兴趣, 注视时间越长
	总注视时间	注视时间的总和	
	平均注视时间	每个注视点平均停持续的时间	
	首次注视时间	第一次发生注视的时间	首次注视时间代表对环境首次识别过程 and 对其理解的难以程度, 时间越短代表首次被吸引所需时间越短
空间维度	注视位置	注视点在空间中的位置	注视位置标明在空间中被试注视的环境因素的位置
	注视角	视线向量与运动向量产生的夹角	反映被试运动方向与注视方向之间的差值

数的维度	视线向量	被试的位置与注视点之间的矢量连线	能反映被试者的注视位置与移动行为之间的关系，视线向量的模越长，表明被试所处位置与注视点之间距离越远，其运动方向越有可能指向视线向量方向
	注视次数	注视发生的次数	注视次数的差异可反映被试对不同环境因素的兴趣程度或理解的难易程度
	访问次数	访问的次数	访问次数多说明被试对该环境因素重复进行观察，可反应对该环境因素感兴趣或存在认知难度
	眼跳次数	眼跳发生的次数	眼跳次数的差异可反映被试者搜索感兴趣环境因素的难易程度

### 2.2.3 眼动实验的研究应用基础

现有的眼动实验研究主要集中于心理学认知领域，并在环境感知方面有广泛应用，主要可以分为实验室眼动与现场眼动两种类型。实验室眼动能够严格控制变量，常见于驾驶模拟<sup>[87]</sup>、人机交互<sup>[88]</sup>以及康复追踪<sup>[89]</sup>等医学与神经科学研究中。与实验室眼动相比，现场眼动实验不具备严格控制环境的条件，同时受到无关因素干扰的可能性也更大，但参与者在现场实验中能够自由地移动身体并产生正常的视觉透视和方向感知，其结论在应用价值方面更具有真实意义<sup>[90]</sup>。因此现场眼动实验在营销学与广告测试<sup>[80,91]</sup>以及空间认知研究中更常用，其中空间认知研究包括寻路研究。

近期采用了眼动实验的寻路研究中，研究者将眼动要素作为指示环境特征的指标进行分析。Lam 基于旅客的能见度数据（VI）与视线距离（LOS）对香港机场航站楼的设施效率进行评估，其结论证实了旅客对设施进行定位的成功率与能见度指数正相关<sup>[70]</sup>；Rothkopf 在大型复杂空间的寻路研究中使用了注视兴趣区（AOI）、注视点与注视时长等眼动指标，并指出注视行为的特征与参与者的意图有紧密联系<sup>[92]</sup>；Müller-Feldmeth 收集了参与者的位置与注视点并将数据处理为视线向量，并在实验中证明了这是衡量参与者移动行为与眼动注视关系的有效指标<sup>[62]</sup>；Schwarzkopf 等人关于法兰克福机场组合寻路效率的研究中，在视线向量的基础上引入了新的指标注视角，并发现参与者的寻路行为偏好与最有效的理想寻路行为相违背<sup>[63]</sup>。

国内寻路研究中采用的眼动数据则以注视时间、次数、AOI 和 TOI 等常规指标为主。在关于北京西直门地铁站的寻路研究中，夏采用了 AOI、热点图与眼动轨迹图对节点处参与者的选择进行研究，得到了商业广告与换乘效率存在负相关关系的结论<sup>[76]</sup>；刘等人使用瞳孔直径、AOI、注视时间与扫视次数等数据作为视疲劳指标，研究寻路实验中机场照明的视觉功效与舒适性，并发现低照度的环境最有利于提高标志的辨识清晰度且

最不易引起视疲劳<sup>[74]</sup>；此外，徐在关于广州地铁站路径选择的研究中也使用了注视与访问相关的 17 组数据编码，在佐证了虚拟实验环境与现场实验存在差异的同时证实了视觉感知是自下而上的<sup>[65]</sup>。总体而言，国内寻路研究中的眼动实验仍然使用常规指标较多，并且主要截取静态平面进行注视物分析。这种基于节点的眼动特征分析会造成空间行为与视觉认知之间的割裂，并忽视了寻路任务中全局视角与行为的一致性，同时注视行为本身的特征也没有受到关注。

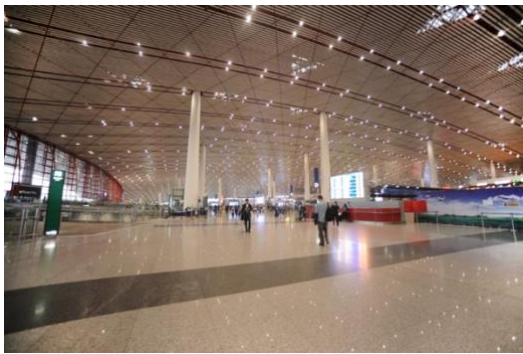
## 2.3 本章小结

理论研究主要从寻路研究与眼动实验两方面展开。以往较多的相关研究表明，寻路行为受到环境特征和个人属性差异的多种因素共同影响，但具体的影响程度尚未有明确的定论。传统的寻路研究中主要使用计时与计次标准判定参与者的寻路效率，同时也有研究者提出了基于时间、次数、距离数据的加工指标作为衡量寻路绩效的标准，然而寻路效率的判断在许多过往的研究中被淡化。视觉认知是环境心理学的重要组成部分，寻路环节中的视觉认知包括对空间信息的认知和运用。已有的研究表明视觉认知受到外部空间环境的驱动，信息的处理与使用能力也会对视觉认知的实际效率产生影响。此外，在影响寻路的个人因素层面，相关研究集中于童年时期寻路经验、性别、年龄等影响因素，对成年后的个体经验与寻路效率之间关系的涉及较少。眼动实验在科学研究中已有长期的广泛应用，近年来眼动成为了解决空间认知领域问题的有效途径。现场寻路研究中常见的眼动指标以注视兴趣区与编码分析为主，研究者能够利用眼动数据同时从定性和定量的角度分析人们寻路行为的特征及其过程。传统眼动实验通常基于选择节点进行分析，注重眼动与空间的关联但对行为与视觉之间的关联和寻路中的注视行为本身较少涉及。其次，有关寻路的眼动研究中，研究者对连续时间内的眼动和行为特征关联研究较少，对眼动与特定环境因素的关联研究较多，缺乏整体层面的空间认知研究。

## 第三章 实验设计与数据处理

### 3.1 研究案例地

北京首都国际机场是服务于北京的两个国际机场之一，过去的十年内其繁忙程度排名在全球迅速上升。在客运量和总交通量方面，北京首都机场是亚洲客流量最大、世界客流量第二大机场<sup>[93]</sup>。就规模上而言，T3 航站楼远大于 T1 和 T2 航站楼，是世界上单期建造的最大机场航站楼，在建成时也是世界上最大的机场客运航站楼<sup>[94]</sup>。根据已有的网络评论数据分析，首都机场 T3 航站楼内部空间大、步行距离远的特点给旅客的寻路体验带来了负面影响；同时评论数据中照片的焦点主题排序显示使用频率最高、活动发生最密集的功能区域为航站楼内的出发大厅与到达大厅<sup>[95]</sup>。其中出发大厅空间近似三角形，面积为 3.2 万平方米，高度达 24 米，面宽 376 米，是一个完整通透的大尺度空间，屋顶轮廓完整，支撑的大跨结构柱距为 36 米，立面为落地的玻璃幕墙保证视线通透，局部有二层<sup>[96-98]</sup>。大厅内共 11 列样式相同的值机柜台，高度 2.9 米，空间均质识别性较差，值机区域功能集中人流较大，环境相对混乱。登机口入闸区位于出发大厅北端中部，旅客流线较长。到达大厅位于出发大厅下一层，以空运客机为整体造型，通过狭长的廊桥与地铁入口相连，承担着到达旅客集散、问询、休息、餐饮、商业等多种复合功能。因此，T3 航站楼的出发大厅与到达大厅作为典型的大型交通集散空间被选取成为本研究对象。



(a) 出发大厅



(b) 到达大厅

图 3.1 北京首都国际机场 T3 航站楼集散空间

### 3.2 实验设计与流程

#### 3.2.1 实验设计

本实验选取北京首都机场 T3 航站楼出发与到达大厅两处空间作为研究场地进行数据采集。寻路实验依据旅客在机场出发与到达大厅的真实需求和寻路需要进行设计。出发大厅中设置任务一“寻找值机柜台”和任务二“寻找登机口”两项基本寻路任务。其中，寻找值机柜台为第一个任务，以出发大厅主要的旅客出入口 6 号门为起点，按照正常值机流程，在任务开始时告知被试一段不包含值机柜台编号的航班信息，被试需要根

据所掌握的航班信息寻找对应的值机柜台并步行至值机柜台区域，任务终点设置在国内出发值机柜台 J，抵达即认为任务完成。在任务一完成后，以所在位置值机柜台 J 为起点开始寻找登机口的任务二，被试会被告知需要前往 C32 登机口登机，任务二的终点设置在 C01-C61 登机口入闸区。任务三和任务四设置在到达大厅中，分别为“寻找卫生间”和“寻找地铁入口”两项基本寻路任务。其中寻找卫生间为任务三，起点为国内旅客到达 C 口，被试需要寻找到到达大厅中距离起点最近的卫生间并到达附近，终点位于到达大厅距离 C 口步行距离最近的卫生间门口。在完成任务三后，以所在位置卫生间门口为起点进行寻找地铁入口的任务四，被试需要在到达大厅内找到通往首都机场线入口的通道，终点设置在北京地铁首都机场线入口区。所有四个任务均为平面楼层寻路任务，不包括多层建筑寻路行为，流程如图 3.4 所示。最短标准寻路时间与距离由测量熟悉实验场地和任务路线的研究员完成任务所用的时间获得，在五天中研究人员每天以正常步速行走该路线，统计五次使用时间的最小值作为任务最短标准寻路时间。具体实验设计请参见《基于环境心理学的大尺度交通建筑集散空间认知研究——以北京首都国际机场 T3 航站楼为例》<sup>[95]</sup>。



图 3.2 北京首都国际机场 T3 航站楼出发大厅最短寻路路线图<sup>[95]</sup>



图 3.3 北京首都国际机场 T3 航站楼到达大厅最短寻路路线图<sup>[95]</sup>

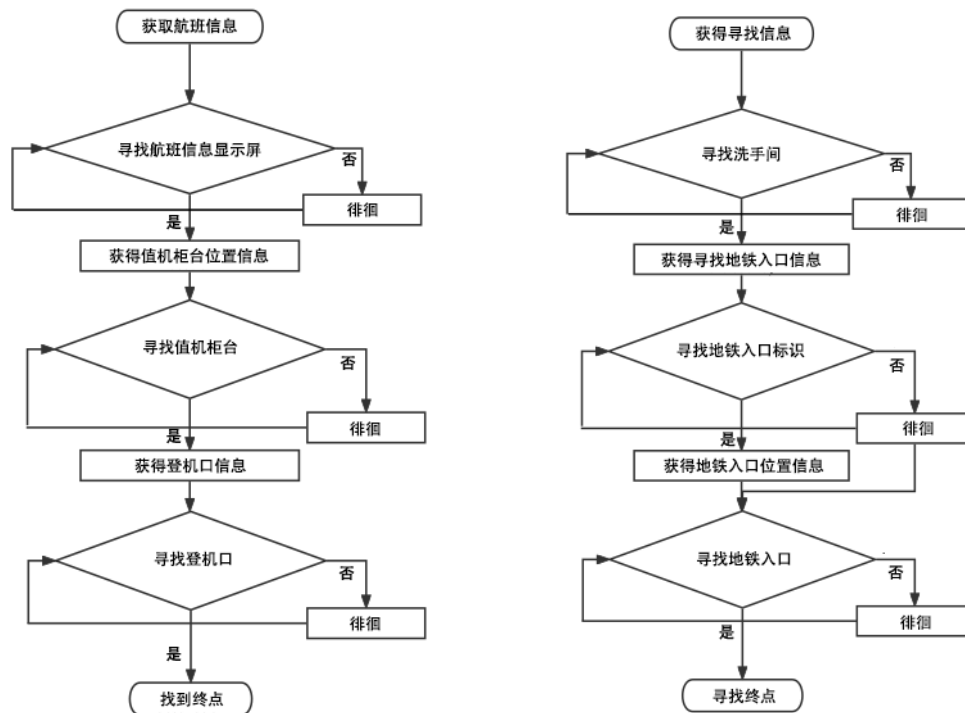


图 3.4 出发大厅与到达大厅寻路任务流程图

### 3.2.2 实验流程

被试的寻路实验四个任务均通过眼动仪记录完成过程，同时通过小米手环与研究人员的现场跟踪和记录加以补充。

#### （1）实验仪器

实验采用 Tobii Pro Glasses2 便携式眼动仪收集寻路过程眼动数据。采样率为 50Hz，内置分辨率为 1920×1080p 的场景摄像机，场景摄像机记录的角度为水平视角 82°，垂直视角 52°，内置麦克风采集声音。同时使用小米手环采集被试完成每个寻路任务的步行时间。

#### （2）被试者选择

研究的平均选择样本量为 29 人，本实验共选择 26 名年龄分布为 21-68 岁的被试。根据已有的研究成果，被试对场地的熟悉程度会影响其寻路行为与效率<sup>[41,83,99]</sup>，因此本实验选取了对实验场地不熟悉的被试，避免因为被试对实验场地熟悉程度较高产生的结果干扰。

#### （3）实验具体步骤

研究人员于实验开始前为被试佩戴小米手环与眼动仪并进行眼动校准。随后研究人员告知被试具体寻路任务，并告知被试在实验过程中可以随意探索实验场地、利用任意环境信息，但不能询问他人，需要独立完成寻路任务。被试于任务起点处开始实验，眼动仪和小米手环同时开始记录产生的眼动和时间数据，研究人员全程保持一米左右距离在被试身后跟随，并录像记录被试完成寻路任务的实际路径与全过程行为。抵达任务终点后，研究人员根据小米手环数据记录被试完成寻路任务所用的时间。出发大厅任务完成后，研究人员带被试前往到达大厅进行寻找洗手间与地铁入口的任务，具体实验流程与出发大厅相同。到达大厅寻路任务结束后，被试完成基本信息填写，全部实验结束。具体实验流程请参见《基于环境心理学的大尺度交通建筑集散空间认知研究——以北京首都国际机场 T3 航站楼为例》<sup>[95]</sup>

## 3.3 实验数据处理

本实验数据指标类型分为任务绩效、行为数据指标与空间数据指标三类。其中绩效指标显示任务完成效率质量，行为数据指标包括眼动数据指标与移动轨迹指标两个方面，空间数据指标展示空间复杂性测度。

### 3.3.1 寻路绩效判定

就相同的任务而言，被试完成寻路任务的时间越长，其寻路效率越低，则反映出被试在过程中接收的空间导向越弱，表明所处空间的集散能力越低；就不同任务而言，被试完成每个任务使用的时间长短可以反映其寻路的效率与熟练程度变化。因此判定被试寻路绩效是直观体现其寻路效率与空间集散能力的有效方式。参考已有的研究中测算被试实际步行距离与最短标准步行距离比较的方法<sup>[54]</sup>，引入指标步行时间延迟偏差

（T/D），量化显示被试实际步行时间与最短标准步行时间的偏离程度。



根据 Dada 的定义，步行时间延迟偏差（T/D）的计算公式如 3.1 式所示。

$$T/D = \frac{T}{\text{专业步行距离}} \quad (3.1)$$

其中，步行时间偏移量 T（Time-differential）为被试的实际步行时间与专业步行时间的差的绝对值，如 3.2 式所示。

$$T = \text{被试实际步行时间} - \text{专业步行时间} \quad (3.2)$$

由于专业步行距离和时间的测量方式与本实验中最短标准步行距离和时间相同，本实验中使用最短标准步行距离和时间替换式 3.1 与式 3.2 中的专业步行距离和时间。根据理论，3.1 式中的 T/D 为非负数时，T/D 的值越大表明寻路的效率越低；T/D 为负数时表明已达到高寻路效率阶段。同时，根据规定，在以专业步行时间和距离为基准的情况下，T 的存在是由建筑的物理参数（Physical parameters）引发的<sup>[100]</sup>，因此这一指标在衡量旅客的寻路绩效以外也可以反映空间环境对旅客寻路效率的影响。

### 3.3.2 行为数据指标

与普通行路过程中的创造性行为不同，寻路过程中产生的所有行为都服务于定位与路径<sup>[101]</sup>，因此被试在寻路任务中的行为可以反映其寻路特征与偏好，这些特征和偏好又可以通过个体或环境因素进行解释。已有的寻路研究使用行为数据指标反映被试在寻路任务中产生的行为特征，这些行为主要包括移动轨迹和眼动规律<sup>[18,41,71]</sup>。

#### （1）移动轨迹指标

参考 2017 年 Schwarzkopf 的寻路实验<sup>[63]</sup>，本实验采用运动向量（Movement vector）和最小障碍距离作为移动轨迹指标。规定出发和到达大厅平面图内向右为 x 轴延伸方向，向下为 y 轴延伸方向，根据定义，运动向量为上一个时间点被试所在位置（ $x_{mf}$ ,  $y_{mf}$ ）指向当前时间点所在位置（ $x_{mc}$ ,  $y_{mc}$ ）的两点间连线。若当前位置相较于上个时间点未发生移动，则以最近的移动前位置与当前位置连线计算，即排除 0 向量情况。

最小障碍距离定义类比 Schwarzkopf 给出的左墙距离指标。在双人寻路实验中，研究者采集左侧被试每次进行注视行为时到最近墙面之间的距离作为位置与注视行为影响的分析因素。因此定义最小障碍距离为当前时间点被试所在位置到最近固定障碍物的垂直距离。其中最近的固定障碍物为立柱、信息牌、墙面、隔断围挡、柜台等位置固定且无法穿越的物体，不考虑悬挂式路标、行人、车辆等。

#### （2）眼动指标

参考 2014 年 Müller-Feldmeth 与 2017 年 Schwarzkopf 在研究中使用的眼动数据<sup>[62,63]</sup>，本实验使用视线向量（Sight vector）、回转半径（ROG）及标准差椭圆相关参数作为眼动指标。其中视线向量为当前时间点被试所在位置（ $x_{mc}$ ,  $y_{mc}$ ）指向当前时间点被试注视点（ $x_{sc}$ ,  $y_{sc}$ ）的两点间连线，揭示了在运动期间被试扫视空间的方式以及其对注视行为的影响。回转半径的定义与计算方式服从物理学公式，见式 3.3。



$$R_g = \sqrt{\frac{I}{M}} \quad (3.3)$$

3.3 式中  $R_g$  为直轴的回转半径,  $I$  为对于此直轴的转动惯量,  $M$  为质量。

标准差椭圆的计算包括质心坐标 ( $x_{\text{mean}}, y_{\text{mean}}$ )、优角弧度、方向角度、长短轴标准距离及离心率等数据, 其中选取方向角度与离心率作为研究指标, 显示被试注视点的分布规律与趋势, 其计算公式如式 3.4 所示。

$$C = \begin{pmatrix} \text{var}(x) & \text{con}(x, y) \\ \text{con}(y, x) & \text{var}(y) \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

其中

$$\text{var}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2 \quad (3.5)$$

$$\text{var}(y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \quad (3.6)$$

$$\text{con}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2 \tilde{x}_i^2 \quad (3.7)$$

### (3) 运动-眼动复合指标

参考 Schwarzkopf 的研究使用注视角 (Gaze angle) 作为移动轨迹与眼动的联合测度。与地理方位角类似, 注视角反映了被试位置移动造成的注视变化, 从空间角度摒弃了语义的使用, 不对被注视物体进行关注, 从而将注视行为尤其是注视方向作为独立的要素进行分析。注视角对被试的移动过程分析具有更大的自由度, 从而使研究者可以对路径中连续的数据进行眼动行为的特征分析。根据定义, 注视角为被试当前位置产生的运动向量与视线向量的夹角<sup>[63]</sup>, 其计算公式如式 3.8 所示。

$$GA = |\text{atan2}(x_{mc} - x_{mf}, y_{mc} - y_{mf}) - \text{atan2}(x_{sf} - x_{mf}, y_{sf} - y_{mf})| \quad (3.8)$$

其中 GA 为注视角角度,  $x_{mc}$ 、 $y_{mc}$ 、 $x_{mf}$ 、 $y_{mf}$ 、 $x_{sf}$ 、 $y_{sf}$  分别为被试当前时间所在位置的坐标、上一个时间点被试所在位置的坐标以及上一个时间点被试注视点坐标,  $\text{atan2}$  为 C 语言中返回方位角函数, 具体算法不多赘述。

### 3.3.3 空间数据指标

寻路行为发生无法脱离地理空间, 环境因素在寻路研究中常被作为行为特征的解释因素<sup>[66]</sup>, 因此空间环境的影响是寻路研究中重点关注的方面。已有的研究在关注环境要素时主要分为两个层面: 局部层面的具体物品类别和整体层面的空间复杂性; 通常情况下, 针对前者的研究采用定性分析手段, 针对后者的研究采用定量分析手段。参考景观指数的计算方式, 本研究中使用周长面积比 (Perimeter-area ratio, 记为 PARA)、香农多样性指数 (Shannon's Diversity Index, 记为 SHDI) 与景观形状指数 (Landscape Shape Index, 记为 LSI) 作为空间复杂性的量化指标。

#### (1) 周长面积比 (PARA)

周长面积比（**PARA**）是用于衡量多边形紧凑度的测度，将此概念延伸至景观生态学中，则表示空间格局中的景观复杂度。根据定义，由于面积只与边界有关而与形状内部的变化无关，面积固定时周长能够区分形状的复杂程度。相同面积的情况下，相对简单的形状周长较短，因此当形状越接近于圆其周长面积比越小，反之形状越接近长条状其周长面积比越大<sup>[102]</sup>。其公式如 3.9 所示，其中 **R** 表示该指数。

$$R = \frac{\text{图形周长}}{\text{图形面积}} \quad (3.9)$$

## （2）香农多样性指数（**SHDI**）

香农多样性指数（**SHDI**）被用于衡量群落中的物种多样性，在景观生态学中特指景观多样性。香农多样性指数对非均衡分布状况敏感，因此能够反映景观的异质性，即反映不同景观类型在空间分布中的均匀程度或同一类别景观的破碎化程度。

$$H = -\sum_{i=1}^m \sum P_i \times \ln(P_i) \quad (3.10)$$

式 3.10 中，**H** 表示该指数（ $H \geq 0$ ），**m** 为景观类型种类，**P<sub>i</sub>** 为景观类型 **i** 所占总面积的比例。**H** 的值越大，空间内的景观多样性越高，各景观类型在空间中越呈均衡化趋势分布或同一类别景观的破碎化程度越高，反之则分布越不均衡或景观地块越完整。当 **H=0** 时，区域中有且仅有一种景观类型<sup>[103]</sup>。

## （3）景观形状指数（**LSI**）

根据定义，景观形状指数（**LSI**）是用于测量空间内某斑块形状复杂得的景观学测度，反映了景观内斑块的形状特点，用该斑块与相同面积的标准图形之间的偏离程度表示（式 3.11）。

$$LSI = \frac{E}{\min E} \quad (3.11)$$

其中，**E** 是景观中的所有斑块的总边长，**minE** 是景观中的最小斑块总边长(景观形状指数 (Landscape Level) — **Lsm\_l\_景观形状指数, n.d.**)，景观生态学的计算中以正方形或圆作为偏离计算的参照几何形状较常见，因此公式 3.11 可以转化为：

$$LSI = \frac{E}{4\sqrt{A}} \quad (3.12)$$

$$LSI = \frac{E}{2\sqrt{\pi A}} \quad (3.13)$$

其中 **A** 为景观总面积，3.12 式表示正方形为参照几何形状的情况，3.13 式表示圆形为参照几何形状的情况。景观形状指数越小，景观内斑块的形状越简单和规则，反之则越复杂<sup>[105]</sup>。

## 3.4 被试社会特征统计

对 26 名被试者样本进行性别、年龄、教育背景、飞行频率、对实验场地熟悉度基本特征统计（表 3.1），其中男 14 人，占 53.85%，女 12 人，占 46.15%，男女比例 1.17:1，较为接近。年龄在 21-68 之间（表 3.2），将年龄分为青年组（21-29 岁），中年组

（30-49 岁），老年组（50-68 岁）。被试平均教育背景（ $M = 3.385$ ,  $SD = 0.684$ ）较低，50%的被试为高中及以下的学历。被试的平均飞行频率（ $M = 2.192$ ,  $SD = 1.359$ ）较低，50%的人从未来坐过飞机。被试对实验场地熟悉度（ $M = 1.462$ ,  $SD = 0.796$ ）普遍较低，其中 73.08%的人从未来过北京首都国际机场 T3 航站楼。

表 3.1 27 名被试者社会特征统计

		样本数 (人)	比例 (%)
性别	男	14	53.85
	女	12	46.15
年龄	青年组 (21-29)	11	42.31
	中年组 (30-49)	9	34.62
	老年组 (50-68)	6	23.08
教育背景	初中	3	11.54
	高中	10	38.46
	大学	13	50
飞行频率	从未坐过飞机	13	50
	两年一次	2	7.69
	一年一次	6	23.08
	六个月一次	3	11.54
	三个月一次	2	7.69
熟悉度	从未来过	19	73.08
	两年一次	2	7.69
	一年一次	5	19.23

表 3.2 27 名被试者年龄分布与统计

	青年组 (21-29)	中年组 (30-49)	老年组 (50-68)
被试数	11	9	6
M	24.18	40.22	56.5
SD	1.722	5.731	6.348

## 第四章 任务绩效分析

### 4.1 任务绩效

根据实验设计中的测量流程进行标准最短步行时间和距离的测定，结果表 4.1 所示。

表 4.1 北京首都国际机场 T3 航站楼寻路任务最短步行距离和时间

	寻路任务 T			
	T1	T2	T3	T4
标准最短步行距离 $SW_D(m)$	157	133	54	47
标准最短步行时间 $SW_T(s)$	118	100	41	34

引入步行时间延迟偏差指数（T/D），T/D 值越接近于 0，说明被试的寻路状况较好，T/D 值越大于 0，说明被试的寻路状况越差。对每个被试四个任务的步行时间延迟偏差进行正态性检验（见附录 A），K-S 检验结果为  $P < 0.01$ ，S-W 检验结果为  $P < 0.01$ ，二者均表明数据不满足正态分布，因此对数据采取非参数分析的方法。

#### 4.1.1 各任务步行时间延迟偏差（T/D）特征分析

以各任务均值为寻路任务成功与否的判定标准，对被试者各任务步行时间延迟偏差进行可视化（图 4.1），具体描述统计见表 4.2，其中有效数据样本共 26 组。除任务 T2 外，各任务平均 T/D 均大于 0.9，整体寻路效率较低。任务 T1 平均 T/D 接近 1.8，为四个寻路任务中平均绩效最低水平。T/D 区间为 0.36~7.55，其中大于 1 的被试共 17 个，占 65.4%，不存在 0 及负值。不同被试个体间效率差异较大，最大值 7.55 高于中位值 640%；次大值 5.29 高于中位值 450%。可见对于不熟悉机场的旅客，初次寻路行为的效率大概率偏低，出行体验也受到较大影响。相较其他任务，任务 T2 的 T/D 平均值与中位数均为四个任务中的最小值，平均值仅略大于 0.5，寻路效率接近正常寻路水平。T/D 区间为 -0.16~3.06，数据较为集中，其中在 0 及 0 以下的被试共 9 个，即 34.6% 的被试能够高效完成此任务。任务 T3 平均 T/D 接近 1，区间为 -0.39~2.96，被试中仅有 1 个 T/D 在 0 及 0 以下，共 10 个被试 T/D 值在 1 以上，占 38.5%，寻路效率相对较低。任务 T4 的 T/D 均值略低于任务三接近 1，分布区间为 0~6.57，同样存在 1 个 0 及 0 以下被试，但

T/D 值在 1 以上的被试数量降至 4 个，仅占总数的 15.4%。同时，任务 T4 也出现了个别异常偏高值，最大值 6.57 高于中位值 1260%；次大值 4.98 高于中位值 950%。

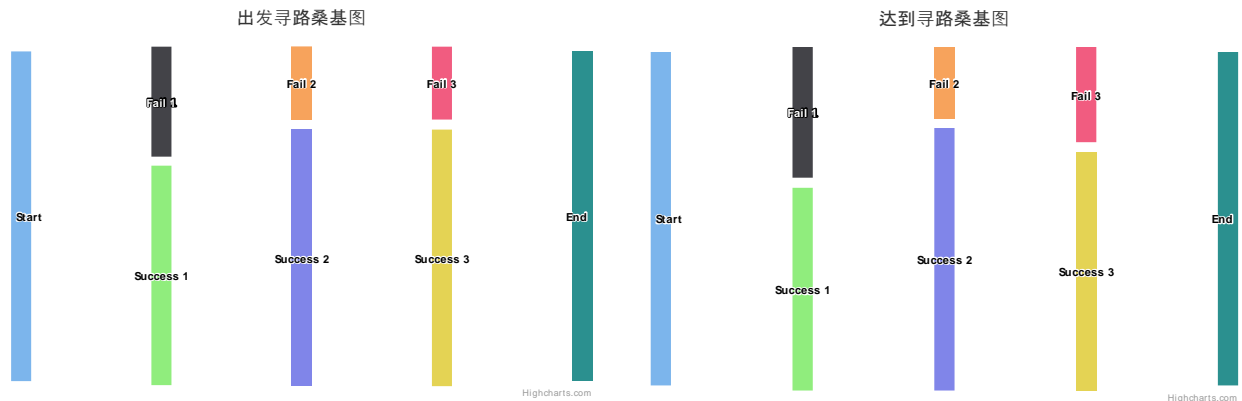


图 4.1 各任务步行时间延迟偏差桑基图

表 4.2 各任务被试步行时间延迟偏差描述统计

	TDtask1	TDtask2	TDtask3	TDtask4
Mean	1.7976	0.4829	0.9423	0.9533
Median	1.1719	0.1353	0.3981	0.5212
Std. Deviation	1.6762	0.8807	1.0315	1.5143

通过单样本 Wilcoxon 符号秩检验将步行时间延迟偏差 (T/D) 与 0 进行差异性分析可得，任务 T1 步行时间延迟偏差 (T/D) 显著高于 0,  $z=351$ ,  $p<0.01$ ；任务 T2 步行时间延迟偏差 (T/D) 显著性高于 0,  $z=269.5$ ,  $p=0.04<0.05$ ；任务 T3 步行时间延迟偏差 (T/D) 显著性高于 0,  $z=338.5$ ,  $p<0.01$ ；任务 T4 步行时间延迟偏差 (T/D) 显著性高于 0,  $z=325$ ,  $p<0.01$  (见附录 A)。出发和到达大厅四项任务步行时间延迟偏差 (T/D) 均显著高于 0，寻路状况较差。这与机场合作研究计划 (ACRP) 报告中关于低熟悉度、不常去旅客在机场出发和到达大厅会面临寻路困难的结论<sup>[17]</sup>是一致的。

#### 4.1.2 各任务步行时间延迟偏差 (T/D) 对比分析

通过相关样本的 Friedman 按秩双向方差分析各项任务之间的步行时间延迟偏差指数差异，四项任务的步行时间延迟偏差存在显著性差异 ( $\chi^2=27.138$ ,  $P<0.01$ )，各项任务步行时间延迟偏差 (T/D) 的秩平均值由大到小依次为 T1 (3.50) > T3 (2.50) > T4 (2.35) > T2 (1.65)。其中，T1 的步行时间延迟偏差 (T/D) 显著大于 T2 ( $\chi^2=1.846$ ,  $p<0.01$ )、T3 ( $\chi^2=1.000$ ,  $p=0.031<0.05$ ) 和 T4 ( $\chi^2=1.154$ ,  $p=0.008<0.01$ )；任务 T2 的步行时间延迟偏差 (T/D) 与 T3 不存在显著差异 ( $\chi^2=-0.846$ ,  $p=0.109>0.05$ )、与 T4 不存在显著差异 ( $\chi^2=-0.692$ ,  $p=0.319>0.05$ )；任务 T3 的步行时间延迟偏差 (T/D) 与 T4 也不存在显著差异 ( $\chi^2=0.154$ ,  $p=1.000>0.05$ )。这表明有且仅有 T1 的步行时间延迟偏差 (T/D) 明显大于 T2、T3、T4，寻路状况在四项任务中最差。从任务发生地点分析，出发大厅中

寻找值机柜台的任务 T1 寻路状况比任务 T2 寻找登机口差；到达大厅中寻找卫生间的任务 T3 与寻找首都机场线入口的任务 T4 表现状况相当。

## 4.2 任务绩效的分类差异性分析

### 4.2.1 任务发生条件

以寻路任务的发生地点和发生次序作为分类标准，将任务分为不同地点任务和不同次序任务两种组合。在不同地点的分组中，出发大厅 T1 与 T2 归为一组，到达大厅 T3 与 T4 归为一组；在不同次序的分组中，出发大厅的首次任务 T1 与到达大厅的首次任务 T3 归为一组，出发大厅的第二次任务 T2 与到达大厅的第二次任务 T4 归为一组。通过 Kruskal-Wallis 单因素 ANOVA 分析进行任务组间的步行时间延迟偏差（T/D）的差异比较。

根据不同地点分组的检验结果，T1、T2 与 T3、T4 之间的步行时间延迟偏差（T/D）不具有显著差异（ $\chi^2=0.198$ ， $P=0.656>0.05$ ），即在出发大厅进行的任务与在到达大厅进行的任务间步行时间延迟偏差（T/D）不具有显著差异；同时，不同次序任务分组的检验结果表明 T1、T3 与 T2、T4 之间的步行时间延迟偏差（T/D）存在显著性差异

（ $\chi^2=13.786$ ， $P<0.01$ ），即不同次序进行的任务间步行时间延迟偏差（T/D）存在显著差异（见图 4.x）。这表明在本研究中任务发生的地点变化对任务的步行时间延迟偏差

（T/D）没有产生影响，而任务发生的次序影响了样本的步行时间延迟偏差（T/D）。进一步根据图 4.2 可以看出，首次任务的步行时间延迟偏差（T/D）明显大于同一地点第二次任务的水平。

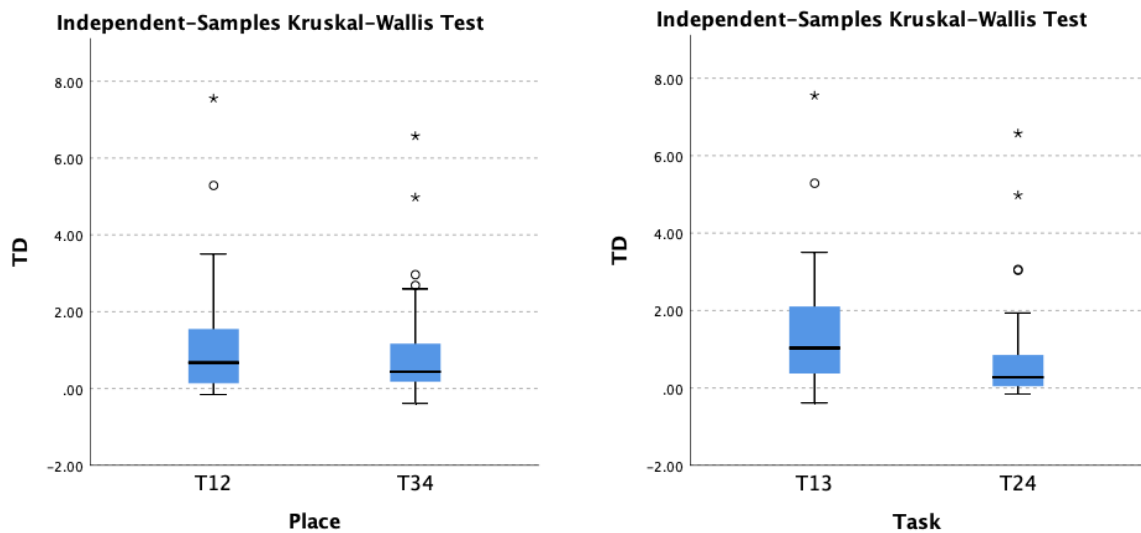


图 4.2 不同地点与不同次序任务间差异性检验箱线图

#### 4.2.2 被试的社会属性差异

分别采用 Mann-Whitney U 检验、Kruskal-Wallis 检验对不同性别、年龄、教育背景、飞行频率及对实验场地熟悉度被试组的步行时间延迟偏差 (T/D) 进行差异性分析 (附录 x)，发现不同性别、年龄、飞行频率和实验场地熟悉度的步行时间延迟偏差均无显著差异。不同教育背景的步行时间延迟偏差存在显著性差异 ( $H=7.012$ ,  $p=0.030<0.05$ )，秩平均值大小比较为初中 (21.00) > 高中组 (15.23) > 大学组 (9.00)。其中，高中组与大学组间不存在显著差异，但显著低于初中组 ( $H=12.000$ ,  $p=0.051$ )，即高中组的寻路状况显著比初中组好。这表明在本研究中，不同性别、年龄、飞行频率和对实验场地的熟悉度对任务的步行时间延迟偏差 (T/D) 没有产生影响，而被试的受教育程度影响了其步行时间延迟偏差 (T/D)，如图 4.3 所示。

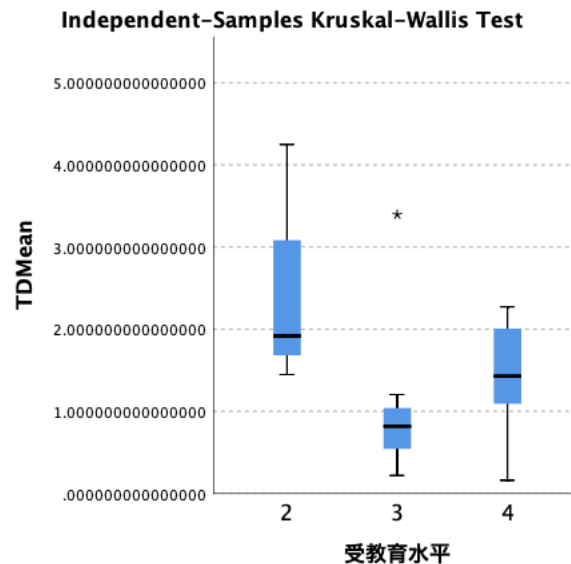


图 4.3 不同受教育程度组间寻路绩效差异性检验箱线图

就教育背景方面，对四个任务分别进行组间差异性检验，发现在 T1 ( $H=6.121$ ,  $p=0.047<0.05$ ) 与 T3 ( $H=6.133$ ,  $p=0.047<0.05$ ) 中，各教育背景组间步行时间延迟偏差存在显著差异；在 T2 与 T4 中，各教育背景组间步行时间延迟偏差无显著差异。就 T1 任务而言，秩平均值大小比较为初中 (23.00) > 大学组 (13.58) > 高中组 (10.55)。其中，高中组显著低于初中组 ( $H=12.450$ ,  $p=0.040<0.05$ )，即高中组的寻路状况显著比初中组好。就 T3 任务而言，秩平均值大小比较为大学 (16.35) > 高中组 (12.50) > 初中组 (4.50)。其中，大学组显著高于初中组 ( $H=11.846$ ,  $p=0.047<0.05$ )，即初中组的寻路状况显著比大学组好。

### 4.3 本章小结

本章采用步行时间延迟偏差 ( $T/D$ ) 作为任务绩效的评价指标, 通过数据分析得出了每个样本各任务寻路绩效的评价、任务间绩效差异关系以及任务组合的差异关系。在各任务寻路绩效的评价方面, 总体而言, 被试在各寻路任务中的实际步行距离显著大于标准最短步行距离, 步行时间也显著大于标准最短步行时间, 步行时间延迟偏差 ( $T/D$ ) 的均值、中位值均大于 0, 各任务的寻路水平都较差, 这证实了较低飞行频率与较低机场熟悉度的旅客在出发与到达大厅的寻路中普遍存在困难。具体有如下结论:

#### (1) 任务绩效的客观概况

就高效完成寻路 ( $T/D < 0.5$ ) 的样本比例和寻路效率过低 ( $T/D > 1$ ) 的样本比例方面来看, 尽管出发大厅内部的两个任务标准完成时间相似, 被试在 T2 任务中的表现水平最佳, 到达大厅中 T3、T4 效率差异不大, T1 表现水平最差。

#### (2) 任务间绩效差异

在任务间绩效的差异关系方面, 四个任务存在显著的差异关系。具体而言, T1 的表现水平与 T2、T3、T4 间存在显著差异, T2、T3、T4 间不存在显著差异, 即寻找值机柜台的任务完成情况显著差于寻找登机口、洗手间和地铁入口的任务, 而后三个任务的完成效率没有显著区别, 这与各任务的寻路绩效统计结果是一致的。

#### (3) 发生地点与次序对任务绩效的影响

在任务组合的差异关系方面, 尽管 T1 与 T2 的标准完成时间远大于 T3 和 T4, 不同发生地点的任务间不存在显著差异; 相比之下, 不同发生次序的任务间存在显著差异, T1 与 T3 的表现显著差于 T2 与 T4 的表现。这反映了建筑内部寻路发生的地点改变或任务持续时长不构成寻路效率的影响因素, 但在不同地点中寻路发生的次序可能对寻路效率产生影响。

#### (4) 个人社会属性对任务绩效的影响

年龄、性别等个人因素均对寻路效率无显著影响, 而受教育程度则显著影响被试的寻路表现, 具体表现为初中学历水平人群的寻路效率普遍较低, 高中及大学学历水平人群的寻路效率相对较高。

综合而言, 被试在各任务中均存在不同程度的寻路困难, 其中在寻找值机柜台时遇到的寻路问题最突出, 但这种寻路困难的造成因素中并不包括完成任务所需的时长与发生任务的地点改变, 也不包括个人社会属性。



## 第五章 空间寻路实验眼动及行为数据分析

### 5.1 眼动数据指标与实验绩效相关性分析

#### 5.1.1 瞬时眼动指标

对被试者各任务过程中产生的视线向量 (SV) 平均模长的值进行具体描述统计 (表 5.1), 其中各任务有效样本共 26 组, 分别产生视线向量数量为 8627 (T1)、6761 (T2)、3310 (T3)、2663 (T4)。引入视线向量 (SV) 的模长标准差作为视线向量的量化特征值进行分析, 对每个被试四个任务的视线向量模长标准差进行正态性检验 (见附录 B), S-W 检验结果为 T2 ( $P=0.082$ ) 的  $P>0.05$ , T1 ( $P<0.001$ )、T3 ( $P=0.007$ ) 与 T4 ( $P<0.001$ ) 的  $P<0.01$ ; K-S 检验结果为 T2 ( $P=0.108$ ) 的  $P>0.05$ , T1 ( $P=0.004$ )、T3 ( $P=0.014$ ) 与 T4 ( $P<0.001$ ) 的  $P<0.01$ 。两种检验结果均表明有且仅有 T2 数据满足正态分布、T1、T3 与 T4 数据不满足正态分布, 因此对全部数据采用非参数分析的方法。

表 5.1 各寻路任务视线向量模长均值描述统计

	T1	T2	T3	T4
N Valid	26	26	26	26
Mean	143.2232	147.3712	284.8472	287.1806
Median	143.1490	145.4323	308.6789	309.8395
Std. Deviation	31.7872	32.0222	72.5644	71.9951
Minimum	80.7353	88.8628	88.7990	88.9290
Maximum	202.0437	238.6777	346.5987	358.4388

##### 5.1.1.1 瞬时眼动指标特征分析

对被试者各任务视线向量平均模长进行可视化 (图 5.1), 具体描述统计见表 5.1, 其中有效数据样本共 26 组。出发与到大厅平均模长的均值表现出明显的组内相似与组间差异性, T1、T2 的视线向量平均模长的均值位于 140~150 区间内, T3、T4 的视线向量平均模长的均值位于 280~290 区间内。任务 T1 视线向量平均模长的区间位于 80.74~202.04, 最小值、最大值、均值及其中位值分别为四个任务的最低限; 同时 T1 标准差近 32, 为所有任务视线向量标准差中的最小值, 其数据分布最集中。与之相反, 任务 T4 视线向量模长的最小值、最大值、均值及其中位值分别为四个任务的最高限。T2、T3 与 T4 均存在数据与主体分布偏离的情况, 即 T2 任务产生的最大值、最大值 T3 与 T4 两任务产

生的最大值、最小值与次小值均与主体数据有较大偏离。此外，所有任务数据分布的分散程度随任务次序上升。

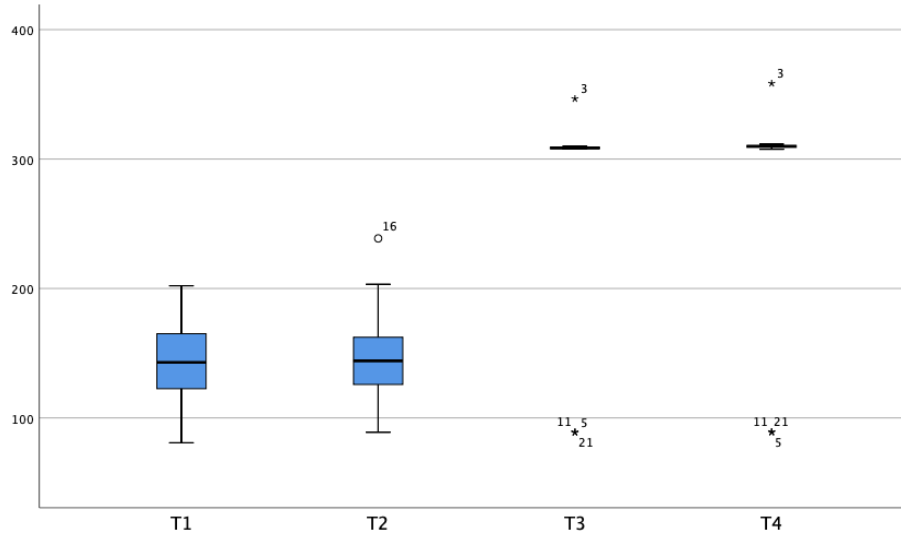


图 5.1 各任务视线向量平均模长箱线图

由于 T1、T3、T4 数据不符合正态分布，故采用 Spearman 分析各项任务之间的视线向量模长相关性。经检验，T1 与 T2 之间存在中等强度的负相关性（ $C=-0.5$ ， $P=0.011<0.05$ ），其他任务产生的视线向量模长间不存在显著相关性。通过相关样本的 Friedman 按秩双向方差分析各项任务之间的视线向量模长差异，四项任务的视线向量模长存在显著性差异（ $\chi^2=53.550$ ， $P<0.01$ ），各项视线向量模长的秩平均值呈逐任务递减趋势，由大到小依次为 T4（3.79）>T3（3.00）>T2（1.92）>T1（1.29）。其中，T1 的视线向量模长显著小于 T3（ $\chi^2=1.875$ ， $p<0.01$ ）和 T4（ $\chi^2=2.500$ ， $p<0.01$ ），与 T2 不存在显著差异（ $\chi^2=0.792$ ， $p=0.202>0.05$ ）；任务 T2 的视线向量模长显著小于 T3（ $\chi^2=1.083$ ， $p=0.022<0.05$ ）和 T4（ $\chi^2=1.708$ ， $p<0.01$ ）；T3 与 T4 间不存在显著差异（ $\chi^2=0.625$ ， $p=0.561>0.05$ ）。从任务发生地点分析，这表明相同场地的任务间视线向量模长不具有显著差异，而不同场地的任务间具有显著差异性；且出发大厅任务视线向量模长明显大于到达大厅任务视线向量模长。

#### 5.1.1.2 瞬时眼动指标与绩效相关性分析

通过相关样本的 Spearman 相关性分析对各项任务的视线向量模长与任务绩效分别进行相关性检验，四项任务中有且仅有 T2 的视线向量模长与步行时间偏差指数（T/D）未呈现出显著的相关性（ $\chi^2=0.143$ ， $p=0.495>0.05$ ），即有且仅有寻找登机口任务的视线向量模长与步行时间偏差指数不具有显著相关性；T1（ $C=0.504$ ， $p=0.010<0.05$ ）、T3（ $C=0.624$ ， $p=0.010<0.05$ ）与 T4（ $C=0.597$ ， $p=0.010<0.05$ ）任务的视线向量模长与步行时间偏差指数均表现出一定的相关性。所有相关任务中产生的相关性均为正向相关，且相关系数均大于 0.5，其相关程度均表现较强。其中 T3 的相关系数 0.624 为最大值，其表

现出的正相关性最强；相较 T3 与 T4，T1 表现出中等水平的相关程度，为所个任务中的相关系数最小值。就存在相关性的任务而言，视线向量的模长越大，其步行时间偏差指数越大，其任务表现出的寻路效率越低。同时，任务发生的次序与指标间相关性程度不存在显著影响；同一地点任务中，首次任务产生的指标间相关性明显大于第二次任务指标的相关性。

根据 Kendall 系数一致性检验的结果，总体数据显著性  $p < 0.01$ ，全部任务在 99% 水平上呈现显著性；同时 W 值趋近 1 ( $W=0.87$ )，即被试间的视线向量模长与步行时间偏差指数之间相关程度呈现几乎完全一致性（图 5.2）。尽管 Spearman 相关性分析中 T2 的视线向量模长与步行时间偏差指数并未展现出显著的相关性，Kendall 系数一致性检验表明全部任务的视线向量模长与步行时间偏差指数仍然存在固定的一致性相关关系。

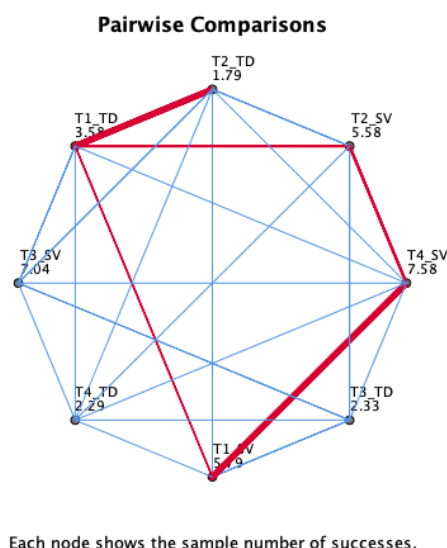


图 5.2 各任务瞬时眼动指标与任务绩效相关性

## 5.1.2 时间段眼动指标

### 5.1.2.1 时间段眼动指标特征分析

#### (1) ROG

对被试者各任务过程中产生的回转半径 (ROG) 均值进行具体描述统计 (表 5.2)，各任务有效样本共 26 组。使用人均回转半径的均值作为回转半径的量化特征值进行分析，对每个被试四个任务的回转半径均值进行正态性检验 (见附录 B)，S-W 检验结果为全部任务 T1 ( $P=0.550$ )、T2 ( $P=0.098$ )、T3 ( $P=0.627$ ) 与 T4 ( $P=0.059$ ) 的  $P > 0.05$ ；K-S 检验结果为 T2 ( $P=0.007$ ) 的  $P < 0.05$ ，其他 T1 ( $P=0.200$ )、T3 ( $P=0.200$ ) 与 T4 ( $P=0.200$ ) 的  $P > 0.05$ 。两种检验结果表明有且仅有 T2 数据满足边缘正态分布，T1、T3 与 T4 数据均完全满足正态分布，因此对全部数据采用参数分析的方法。

表 5.2 各寻路任务回转半径均值描述统计

	T1	T2	T3	T4
N Valid	26	26	26	26
Mean	9223.3720	10031.7649	8664.0659	8618.6963
Median	9223.3720	10173.3468	8613.4845	8652.9334
Std. Deviation	823.4730	945.7011	1323.5033	1598.7231
Minimum	7892.5704	7609.4343	6071.5460	3538.3701
Maximum	11651.7710	11613.9115	11786.1437	10935.3416

对被试者各任务 ROG 均值进行可视化（图 5.3），其中有效数据样本共 26 组。任务 T1 的 ROG 均值区间位于 7892.5704~11651.7710，最小值与最大值分别为四个任务的最低限；T1 标准差 823.4730 为所有任务 ROG 均值标准差中的最小值，其数据分布最集中。任务 T2 的 ROG 均值与中位值均为四个任务中最大值，且其分布分散程度略大于 T1，其中最小值与主体数据分布存在偏离。T3 与 T4 的数据分布的分散程度均小于 T1 与 T2，同时任务 T3 中产生了四个任务中的 ROG 最大值 11786.1437 与最小值 6071.5460。任务 T4 的 ROG 均值分布分散程度最大，且存在最小值与主体数据分布偏离情况。

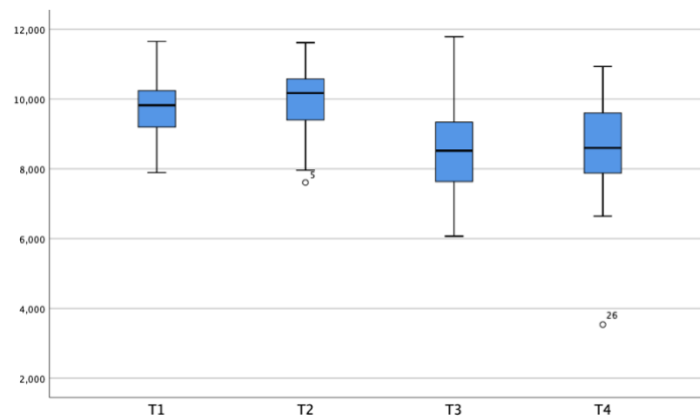


图 5.3 各任务 ROG 均值箱线图

通过配对样本的差异性 T 检验分析各项任务之间的 ROG 均值差异，四项任务的 ROG 存在显著性差异。其中，T1 的 ROG 均值显著大于 T3 ( $t=3.357, p=0.002 < 0.05$ ) 和 T4 ( $t=3.087, p=0.005 < 0.05$ )，与 T2 ( $t=-1.232, p=0.229 > 0.05$ ) 不存在显著差异性；任务 T2 的 ROG 均值显著大于 T3 ( $t=4.652, p < 0.05$ )、T4 ( $t=3.524, p=0.002 < 0.05$ )；任务 T3 的 ROG 均值与 T4 不存在显著差异 ( $t=0.145, p=0.886 > 0.05$ )。这表明相同发生地点内的任务 ROG 均值没有差异，但不同地点间发生任务的 ROG 均存在显著差异，即出发大厅与到达大厅内的任务间 ROG 不存在显著差异，但出发大厅与到达大厅间的任务 ROG 存在显著差异。

## （2）标准差椭圆方向角度

对被试者各任务过程中产生的标准差椭圆方向角度均值进行具体描述统计（表 5.3），各任务有效样本共 26 组。使用人均方向角度的均值作为方向角度的量化特征值进行分析，对每个被试四个任务的方向角度均值进行正态性检验（见附录 B），S-W 检验结果为任务 T1（ $P<0.01$ ）与 T3（ $P=0.016$ ）的  $P<0.05$ ，T2（ $P=0.815$ ）与 T4（ $P=0.082$ ）的  $P>0.05$ ；K-S 检验结果为 T1（ $P<0.01$ ）与 T3（ $P=0.027$ ）的  $P<0.05$ ，T2（ $P=0.200$ ）与 T4（ $P=0.200$ ）的  $P>0.05$ 。两种检验均结果表明 T2 与 T4 数据完全满足正态分布，T1 与 T3 数据不满足正态分布，因此对全部数据采用非参数分析的方法。

表 5.3 各寻路任务标准差椭圆方向角度均值描述统计

		T1	T2	T3	T4
N	Valid	26	26	26	26
Mean		96.2920	108.1547	107.8560	75.5127
Median		96.9361	108.3315	113.3753	78.7986
Std. Deviation		21.8212	16.2498	33.0349	24.2150
Minimum		-.1616	71.2539	.0703	.0868
Maximum		121.5399	144.3749	163.7065	115.6116

对被试者各任务标准差椭圆的方向角度均值进行可视化（图 5.4），其中有效数据样本共 26 组。任务 T1、T3 与 T4 均出现了最小值与主体数据分布偏离的情况；全部任务的最小值-0.1616 产生于 T1，最大值 163.7065 产生于 T3；任务 T2 的方向角度均值与中位值均为四个任务中最大值，同时其数据分布相较其他任务最集中。

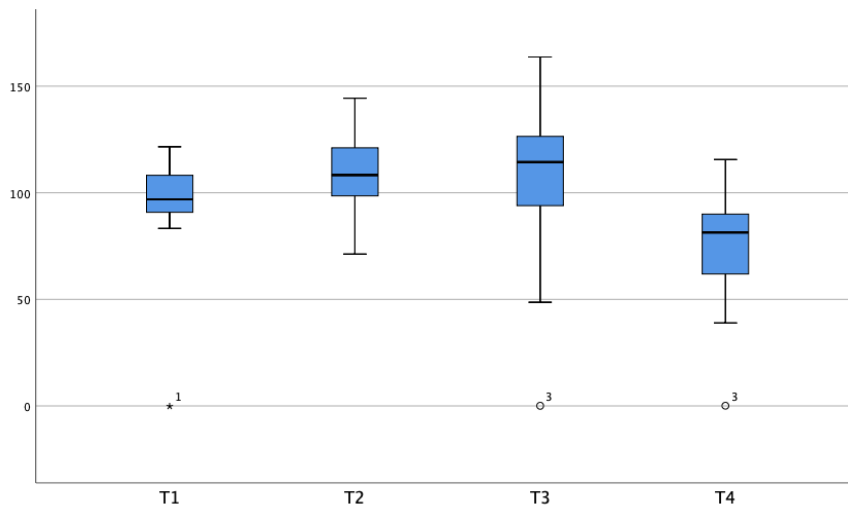


图 5.4 各任务标准差椭圆方向角度均值箱线图

通过相关样本的 Friedman 按秩双向方差分析各项任务之间的标准差椭圆方向角度均值差异，四项任务的标准差椭圆方向角度均值存在显著性差异（ $\chi^2=28.165$ ， $P<0.01$ ），各项任务标准差椭圆方向角度均值的秩平均值由大到小依次为 T3（3.12）>T2

(3.04) > T1 (2.42) > T4 (1.42)。其中, T1 的均值显著大于 T4 ( $\chi^2=1.000, p=0.031 < 0.05$ ), 与 T2 ( $\chi^2=-0.615, p=0.514 > 0.05$ )、T3 ( $\chi^2=-0.692, p=0.319 > 0.05$ ) 不存在显著差异性; 任务 T2 的方向角度均值与 T4 ( $\chi^2=1.615, p < 0.01$ ) 存在显著差异, 与 T3 ( $\chi^2=-0.077, p=1.000 > 0.05$ ) 不存在显著差异; 任务 T3 的方向角度均值与 T4 也存在显著差异 ( $\chi^2=1.692, p < 0.01$ )。这表明有且仅有 T4 的方向角度均值明显小于其他三个任务, 且 T4 的方向角度均值为最小角度值。

### (3) 标准差椭圆离心率

对被试者各任务过程中产生的标准差椭圆离心率均值进行具体描述统计 (表 5.4), 各任务有效样本共 26 组。使用人均离心率的均值作为离心率的量化特征值进行分析, 对每个被试四个任务的方向角度均值进行正态性检验 (见附录 B), S-W 检验结果为全部任务 T1 ( $P=0.522$ )、T2 ( $P=0.632$ )、T3 ( $P=0.379$ ) 与 T4 ( $P=0.233$ ) 的  $P>0.05$ ; K-S 检验结果为全部任务 T1 ( $P=0.200$ )、T2 ( $P=0.200$ )、T3 ( $P=0.200$ ) 与 T4 ( $P=0.200$ ) 的  $P>0.05$ 。两种检验均结果表明所有数据完全满足正态分布, 因此对全部数据采用参数分析的方法。

表 5.4 各寻路任务标准差椭圆离心率均值描述统计

	T1	T2	T3	T4
N	26	26	26	26
Valid				
Mean	.8957	.9008	.8704	.8897
Median	.9010	.8981	.8593	.8838
Std. Deviation	.0363	.0397	.0683	.0768
Minimum	.8328	.8352	.7449	.6857
Maximum	.9929	.9933	.9999	.9999

对被试者各任务标准差椭圆的离心率均值进行可视化 (图 5.5), 其中有效数据样本共 26 组。任务 T1 与 T4 均出现了最值与主体数据分布偏离的情况; T1 与 T2 的标准差明显小于 T3 与 T4 的标准差, 即相对于 T3 与 T4, T1 与 T2 的数据分布更加集中; 任务 T3 的离心率均值与中位值均为四个任务中最小值。

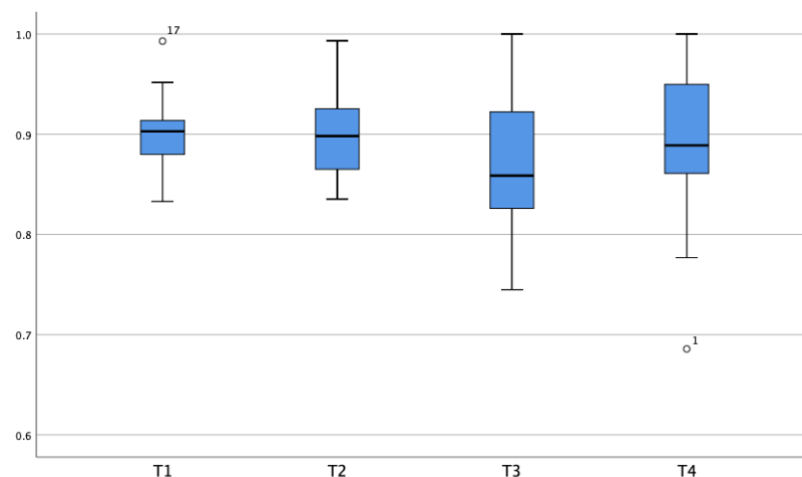


图 5.5 各任务标准差椭圆离心率均值箱线图

根据 Pearson 相关性检验，有且仅有任务 T1 与 T2 离心率均值呈现显著正相关性（ $c=0.423$ ,  $p=0.031 < 0.05$ ），其余任务间不存在显著相关关系；此外，通过配对样本的 T 检验分析各项任务之间的标准差椭圆离心率均值差异，四项任务中有且仅有 T2 与 T3 的标准差椭圆离心率均值存在显著性差异（ $t=2.194$ ,  $p=0.038 < 0.05$ ），其余任务间不存在显著性差异。从任务发生地点来看，出发大厅内的任务 T1 寻找值机柜台与 T2 寻找登机口的标准差椭圆离心率是相关的，而到达大厅内的 T3 寻找洗手间与 T4 寻找地铁站没有表现出显著相关性；同时，相同发生地点的任务离心率间不存在显著差异，不同地点间的任务中 T2 与 T3 的离心率水平表现出了显著差异。

#### 5.1.2.2 时间段眼动指标与绩效相关性分析

根据 Kendall 系数一致性检验的结果，ROG 与标准差椭圆方向角度的总体数据显著性均  $p < 0.01$ ，全部任务在 99% 水平上呈现显著性；同时 ROG（ $W=0.823$ ）与标准差椭圆方向角度（ $W=0.758$ ）的 W 值趋近 1，即被试间的 ROG、标准差椭圆方向角度与步行时间偏差指数之间相关程度呈现几乎完全一致性（图 5.6）。同时，T1（ $p=0.009$ ）与 T2（ $p=0.009$ ）的标准差椭圆离心率数据显著性均  $p < 0.05$ ，在 95% 水平上呈现显著性，W 值趋近 0（ $W=0.27$ ），即 T1 与 T2 的标准差椭圆离心率与步行时间偏差指数之间相关程度呈现弱一致性；T3（ $p=0.239 > 0.05$ ）与 T4（ $p=0.239 > 0.05$ ）的标准差椭圆离心率与步行时间偏差指数之间的一致性不显著。

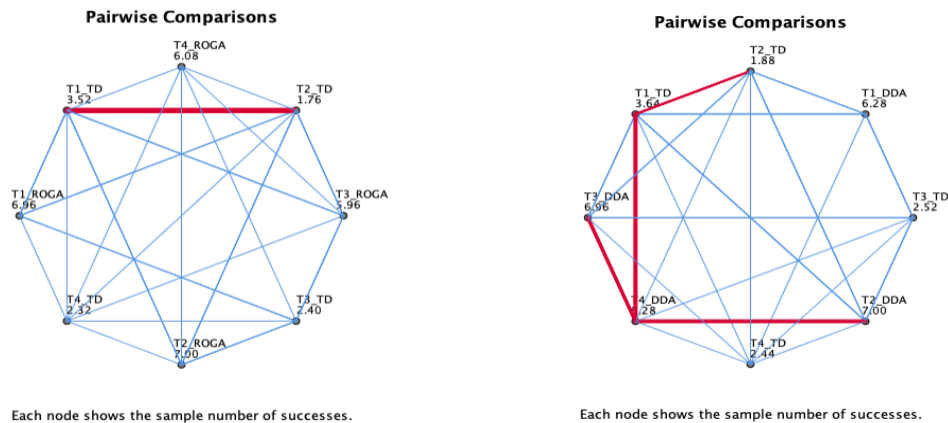


图 5.6 各任务时间段眼动指标与任务绩效相关性

此外，根据标准差椭圆方向角度与步行时间偏差指数 Spearman 相关性检验的结果，四项任务中有且仅有 T3 的标准差椭圆方向角度与步行时间偏差指数（T/D）未呈现出显著的相关性（ $C=0.212$ ,  $p=0.297 > 0.05$ ），即有且仅有寻找洗手间的标准差椭圆方向角度与步行时间偏差指数不具有显著相关性；T1（ $C=-0.406$ ,  $p=0.044 < 0.05$ ）、T2（ $C=-0.543$ ,  $p=0.005 < 0.05$ ）与 T4（ $C=-0.464$ ,  $p=0.017 < 0.05$ ）任务的标准差椭圆方向角度与步



行时间偏差指数均表现出一定的相关性。控制被试的社会属性因素，对标准差椭圆的方向角度与任务绩效进行偏相关检验，有且仅有 T2 在性别 ( $C=-0.608, p=0.002<0.05$ )、年龄 ( $C=-0.650, p=0.001<0.05$ )、教育背景 ( $C=-0.598, p=0.002<0.05$ )、飞行频率 ( $C=-0.618, p=0.001<0.05$ ) 与场地熟悉程度 ( $C=-0.618, p=0.001<0.05$ ) 上均表现出了标准差椭圆方向角度与任务绩效间显著的相关性。所有相关任务中产生的相关性均为负向相关，且相关系数均接近-0.5，其相关程度均表现较强；其中 T2 的相关系数-0.543 为最小值，其表现出的负相关性最强。就存在相关性的任务而言，标准差椭圆方向角度越小，其步行时间偏差指数越大，其任务表现出的寻路效率越低。同时，任务发生的次序、发生地点与指标间相关性程度不存在显著影响。

## 5.2 运动轨迹指标与实验绩效相关性分析

### 5.2.1 瞬时运动轨迹指标

对被试者各任务过程中产生的运动向量 (MV) 平均模长的值进行具体描述统计 (表 6.1)，其中各任务有效样本共 26 组。与视线向量处理方法类似，引入运动向量 (MV) 的模长标准差作为运动向量的量化特征值进行分析，对每个被试四个任务的运动向量模长标准差进行正态性检验 (见附录 B)，S-W 检验结果为全部任务 T1 ( $P<0.001$ )、T2 ( $P=0.006$ )、T3 ( $P=0.001$ ) 与 T4 ( $P<0.001$ ) 均为  $P<0.05$ ；K-S 检验结果为 T1 ( $P<0.001$ )、T2 ( $P=0.03$ )、T3 ( $P=0.002$ ) 与 T4 ( $P<0.001$ ) 的  $P<0.05$ 。两种检验结果均表明全部任务数据均不满足正态分布，因此对全部数据采用非参数分析的方法。

表 6.1 各寻路任务运动向量模长均值描述统计

		T1	T2	T3	T4
N	Valid	26	26	26	26
Mean		151.4749	145.7403	195.1781	212.2004
Median		146.5755	138.2229	185.3197	212.9941
Std. Deviation		34.9834	33.4365	30.8041	14.7453
Minimum		68.5539	81.0083	161.4035	184.1988
Maximum		209.6228	210.5241	286.3993	245.1844



### 5.2.1.1 瞬时运动轨迹指标特征分析

对被试者各任务运动向量平均模长进行可视化（图 6.1），具体描述统计见表 6.1，其中有效数据样本共 26 组。与视线向量类似，出发与到大厅平均模长的均值表现出明显的组内相似与组间差异性，T1、T2 的视线向量平均模长的均值位于 140~160 区间内，T3、T4 的运动向量平均模长的均值 190~220 区间内。任务 T1 运动向量平均模长的区间位于 68.55~209.62，最小值与最大值分别为四个任务的最低限；但 T1 标准差近 35，为所有任务运动向量标准差中的最大值，其数据分布最分散。任务 T2 的运动向量模长均值与中位值均为四个任务中最小值，且其分布分散程度略小于 T1；其中最大值 210.5241 与主体数据分布存在较大偏离。T3 的运动向量模长均值与中位值均大于 T1 与 T2，且数据分布的分散程度略小于 T1 与 T2，同时任务 T3 中产生了四个任务中的模长最大值 286.3993。任务 T4 的运动向量模长均值与中位值均为四个任务中最大值，且其数据集中程度远大于其他三个任务，即在寻路行为中 T4 产生的运动向量模长最大。此外，4 个相同样本同时在任务 T3 与 T4 中出现了与主体数据分布的偏离，即两任务产生的最大值与最小值、次小值均与主体数据有较大偏离。

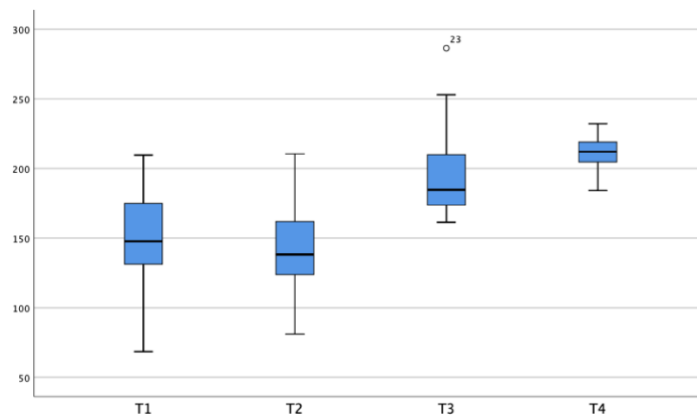


图 6.1 各任务运动向量平均模长箱线图

采用 Spearman 分析各项任务之间的运动向量模长相关性。根据检验结果，有且仅有 T2 与 T3 的运动向量间存在中等强度的正相关性（ $C=0.526$ ， $P=0.007<0.01$ ），其他任务产生的运动向量模长间不存在显著相关性。通过相关样本的 Friedman 按秩双向方差分析各项任务之间的运动向量模长差异，四项任务的运动向量模长存在显著性差异

（ $\chi^2=45.624$ ， $P<0.01$ ），各项运动向量模长的秩平均值由大到小依次为 T3（3.64）>T1（2.72）>T2（2.44）>T4（1.20）。其中，T1 的运动向量模长显著小于 T4（ $\chi^2=1.52$ ， $p<0.01$ ），与 T2（ $\chi^2=0.28$ ， $p=1.00>0.05$ ）、T3（ $\chi^2=-0.92$ ， $p=0.71>0.05$ ）不存在显著差异；任务 T2 的运动向量模长显著小于 T3（ $\chi^2=-1.20$ ， $p=0.006<0.05$ ）和 T4（ $\chi^2=1.24$ ， $p=0.004<0.05$ ）；T3 的运动向量模长显著小于 T4（ $\chi^2=2.44$ ， $p<0.01$ ）。这表明出发大厅内

的任务间运动向量模长不具有显著差异，但到达大厅内的任务间运动向量模长存在显著差异；且相较 T1，到达大厅任务 T3、T4 的运动向量与 T2 具有更显著的差异。

#### 5.2.1.2 瞬时运动轨迹指标与绩效相关性分析

通过相关样本的 Spearman 相关性分析对各项任务的运动向量模长与任务绩效分别进行相关性检验，四项任务中有且仅有 T1 的视线向量模长与步行时间偏差指数（T/D）呈现出显著的负相关性（ $C=-0.423, p=0.035<0.05$ ），即有且仅有寻找值机柜台任务的运动向量模长与步行时间偏差指数具有中等程度的显著负相关性；T2（ $C=-0.053, p=0.798>0.05$ ）、T3（ $C=0.14, p=0.948>0.05$ ）与 T4（ $C=0.241, p=0.235>0.05$ ）任务的视线向量模长与步行时间偏差指数均无明显相关性。控制被试的社会属性因素，对运动向量模长与任务绩效进行偏相关检验，有且仅有 T1 在性别上表现出了显著的相关性（ $C=-0.471, p=0.023<0.05$ ）。就存在相关性的任务而言，运动向量的模长越小，其步行时间偏差指数越大，其任务表现出的寻路效率越低。

根据 Kendall 系数一致性检验的结果，总体数据显著性  $p<0.01$ ，全部任务在 99% 水平上呈现显著性；同时 W 值趋近 1（ $W=0.874$ ），即被试间的运动向量模长与步行时间偏差指数之间相关程度呈现几乎完全一致性（图 6.2）。因此与视线向量类似，尽管 Spearman 相关性分析中 T2、T3 与 T4 的运动向量模长与步行时间偏差指数并未展现出显著的相关性，Kendall 系数一致性检验表明全部任务的运动向量模长与步行时间偏差指数仍然存在固定的一致性相关关系。

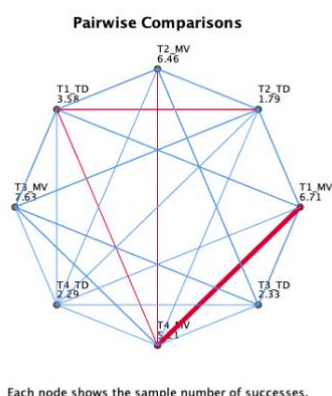


图 6.2 各任务瞬时运动指标与任务绩效相关性

#### 5.2.2 时间段运动轨迹指标

对被试者各任务过程中产生的最小障碍距离的均值进行具体描述统计（表 6.2）并进行正态性检验（见附录 B），其中各任务有效样本共 26 组。S-W 检验结果为全部任务 T1（ $P=0.08$ ）、T2（ $P=0.518$ ）、T3（ $P=0.748$ ）与 T4（ $P=0.476$ ）均为  $P>0.05$ ；K-S 检验结果为 T1（ $P=0.200$ ）、T2（ $P=0.200$ ）、T3（ $P=0.200$ ）与 T4（ $P=0.200$ ）的  $P>0.05$ 。两种检验结果均表明全部任务数据均满足正态分布，因此对全部数据采用参数分析的方法。

表 6.2 各寻路任务最小障碍距离均值描述统计

	T1	T2	T3	T4
N	26	26	26	26
Mean	72.1948	80.1694	26.8441	37.0174
Median	69.2653	80.5104	24.4577	37.0590
Std. Deviation	11.9957	11.3576	11.3861	7.0253
Minimum	54.4901	59.7886	8.0111	24.1185
Maximum	91.3973	110.2357	53.8225	48.9350

### 5.2.2.1 时间段运动轨迹指标特征分析

对被试者各任务视最小障碍距离均值进行可视化（图 6.3），具体描述统计见表 6.2，其中有效数据样本共 26 组。出发与到大厅的最小障碍距离均值同样表现出明显的组内相似与组间差异性，T1、T2 最小障碍距离的均值与中位值均位于 60~80 区间内，T3、T4 的最小障碍距离均值与中位值位于 20~40 区间内。T2 最小障碍距离的最小值与最大值分别为四个任务的最高限，同时有且仅有 T2 存在最大值与主体数据产生偏离。除 T4 以外，其他三个任务的标准差相近，数据分布较 T4 更分散。就同一发生地点不同发生次序的任务而言，T1 最小障碍距离的均值小于 T2，T3 最小障碍距离的均值小于 T4；就不同发生地点的任务而言，出发大厅的 T1、T2 最小障碍距离的均值大于到达大厅的 T3 与 T4。

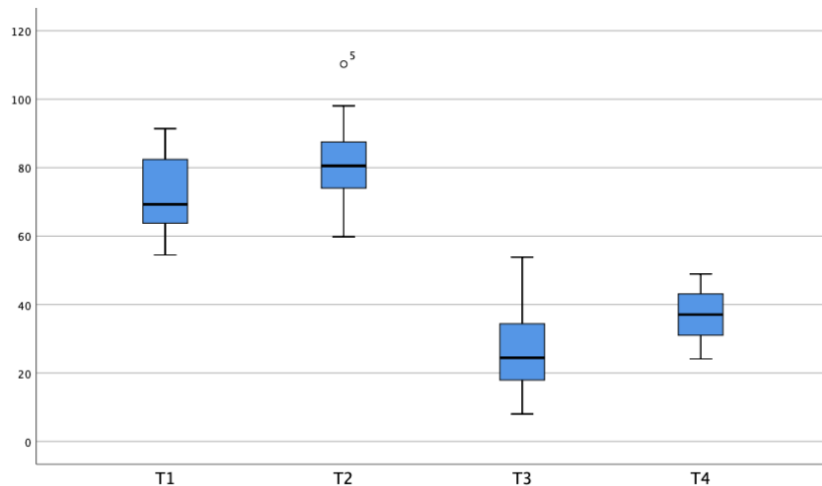


图 6.3 各任务最小障碍距离均值箱线图

由于数据符合正态分布，故通过配对样本 T 差异性检验分析各项任务之间的最小障碍距离均值差异性。根据检验结果，所有任务两两间均存在显著性差异。其中，T1 的最小障碍距离均值显著小于 T2 ( $t=-2.896, p=0.008<0.05$ )，且显著大于 T3 ( $t=13.348, p<0.01$ ) 与 T4 ( $t=14.173, p<0.01$ )；T2 的最小障碍距离均值显著大于 T3 ( $t=16.173, p<0.01$ ) 与 T4 ( $t=16.173, p<0.01$ )。

=16.023,  $p < 0.01$ ); T3 的最小障碍距离均值显著小于 T4( $t = -4.357$ ,  $p < 0.01$ )。这表明 T3 的最小障碍距离均值为所有任务中的最小水平, T2 的最小障碍距离均值为所有任务中的最大水平;同时,任务发生场地与任务发生次序均对最小障碍距离均值产生影响,相同场地中先发生任务的最小障碍距离均值小于后发生任务,不同场地中出发大厅的任务最小障碍距离均值明显大于到达大厅。

#### 5.2.2.2 时间段运动轨迹指标与绩效相关性分析

根据 Kendall 系数一致性检验的结果,总体数据显著性  $p < 0.01$ ,全部任务在 99%水平上呈现统计学显著性;同时 W 值趋近 1 ( $W = 0.905$ ),即被试间的最小障碍距离表现与步行时间偏差指数相关程度呈现几乎完全一致性(图 6.4),被试间时间段运动轨迹指标与任务绩效的成绩存在一致性。Kendall 系数一致性检验的结果表明全部任务的最小障碍距离与步行时间偏差指数存在固定的一致性相关关系。在全部任务中,T2 的最小障碍距离与步行时间偏差指数间存在的一致性关系最强,T3 的一致性关系最弱。

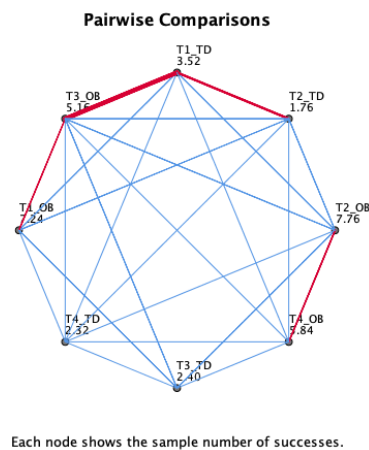


图 6.4 各任务时间段运动轨迹指标与任务绩效相关性

### 5.3 运动-眼动复合指标与实验绩效相关性分析

对被试者各任务过程中产生的注视角均值进行具体描述统计(表 7.1)并对每个被试四个任务的注视角均值进行正态性检验(见附录 B),其中各任务有效样本共 26 组。S-W 检验结果为全部任务 T1 ( $P = 0.228$ )、T2 ( $P = 0.747$ )、T3 ( $P = 0.113$ )与 T4 ( $P = 0.211$ )均为  $P > 0.05$ ;K-S 检验结果为 T1 ( $P = 0.200$ )、T2 ( $P = 0.200$ )与 T4 ( $P = 0.200$ )的  $P > 0.05$ ,T3 ( $P = 0.005$ )的  $P < 0.05$ 。两种检验结果均表明 T1、T2 与 T4 任务数据均满足正态分布,T3 满足边缘正太分布,因此对全部数据采用参数分析的方法。

表 7.1 各寻路任务注视角均值描述统计

T1	T2	T3	T4
----	----	----	----

N	Valid	26	26	26	26
Mean		47.0730	55.5552	118.6875	99.064
Median		46.6787	49.5033	119.4517	89.8099
Std. Deviation		14.2740	19.9504	31.8316	28.0101
Minimum		22.3868	31.6350	61.4849	68.2112
Maximum		87.0171	126.9327	218.5669	212.9941

### 5.3.1 运动-眼动复合指标特征分析

对被试者各任务注视角均值进行可视化（图 7.1），具体描述统计见表 7.1，其中有效数据样本共 26 组。同样地，出发与到达大厅的注视角均值表现出明显的组内相似与组间差异性，T1 与 T2 的注视角范围所在区间明显小于 T3 与 T4 注视角范围所在区间。全部任务均存在与主体数据分布偏离较大的极值，分别为各任务最大值与 T4 的次大值。任务 T1 标准差为四个任务中最小值，其数据分布最为集中；相反地 T3 的标准差大于 31，为所有任务注视角标准差中的最大值。任务 T1 注视角均值的区间位于 22.3868~87.0171，最小值与最大值分别为四个任务的最低限；同时，其均值与中位值均为四个任务中最小值。相反地，T3 注视角的均值与中位值均为四个任务中最大值。

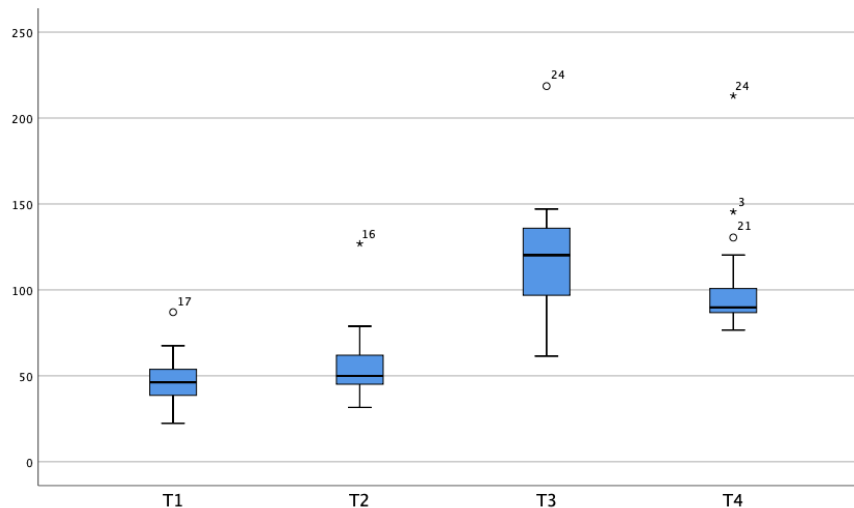


图 7.1 各任务注视角均值箱线图

采用 Pearson 分析各项任务之间的注视角相关性。根据检验结果，有且仅有 T3 与 T4 的注视角均值间存在中等强度的正相关性（ $C = 0.583$ ,  $P = 0.002 < 0.01$ ），其他任务产生的注视角均值间不存在显著相关性。通过配对样本 T 差异性检验分析各项任务之间的注视角均值差异，除 T1 与 T2 外（ $t = -1.868$ ,  $p = 0.074 > 0.05$ ），四项任务的注视角均值两两间存在显著性差异。其中，T1 的注视角均值显著小于 T3（ $t = -9.777$ ,  $p < 0.01$ ）与 T4（ $t = -8.293$ ,  $p < 0.01$ ）；任务 T2 的注视角均值显著小于 T3（ $t = -7.824$ ,  $p < 0.01$ ）与 T4（ $t = -6.269$ ,  $p < 0.01$ ）；T3 的注视角均值显著大于 T4（ $t = 2.824$ ,  $p = 0.009 < 0.01$ ）。这表明 T3 的注视角均值为所有任务中的最大水平，且任务发生场地与任务发生次序均对注视角均值产生影响。到达大厅中，寻找洗手间任务 T3 的注视角均值大于寻找地铁站任务 T4。

### 5.3.2 运动-眼动复合指标与绩效相关性分析

控制被试的社会属性因素，对注视角与任务绩效进行偏相关检验，有且仅有 T1 在性别上表现出了相关性（ $C=-0.441, p=0.051$ ），这表明在寻找值机柜台 T1 任务的注视角与任务步行时间延迟偏差指数存在显著相关。就存在相关关系的任务而言，注视角与步行时间延迟偏差呈负相关关系，即注视角越大，步行时间延迟偏差指数越小，寻路效率越高。根据 Kendall 系数一致性检验的结果，总体数据显著性  $p<0.01$ ，全部任务在 99% 水平上呈现显著性；同时 W 值趋近 1（ $W=0.893$ ），即被试间的注视角均值与步行时间偏差指数之间相关程度呈现几乎完全一致性（图 7.2），被试间运动-眼动复合指标与任务绩效的成绩存在一致性。Kendall 系数一致性检验的结果表明全部任务的注视角与步行时间偏差指数存在固定的一致性相关关系。在全部任务中，T3 的注视角均值与步行时间偏差指数间存在的一致性关系最强。

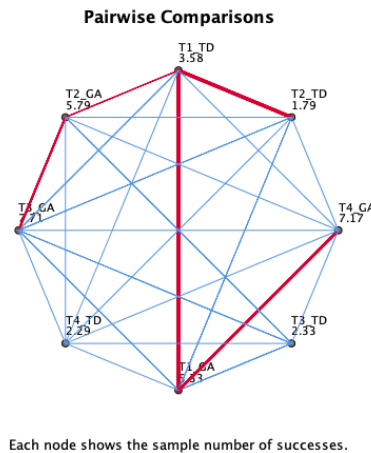


图 7.2 各任务运动-眼动复合指标与任务绩效相关性

## 5.4 本章小结

### 5.4.1 各寻路任务的行为特征

#### （1）注视距离长度

就主体范围内的数据而言，同一场所内先发生任务的被试间注视距离长度差异更大。相较于寻找登机口和寻找地铁站的任务，被试在寻找值机柜台和寻找洗手间的任务中表现出的组内注视距离差异更大。空间引导信息的减少与狭长的空间构造都造成了到达大厅内任务的注视距离显著大于出发大厅的注视距离。相同地点内的注视距离长度不具有显著差异，同时，寻找值机柜台过程中的注视距离越长，寻找登机口过程中的注视距离越短。

#### （2）注视点分布规律



相较出发大厅，到达大厅内的眼动点组内分布规律差异更大，空间环境的转变使得寻找洗手间的任务在眼动点的组内分布规律中表现出更大的差异。此外，出发大厅与到达大厅之间存在显著的眼动点分布稳定性下降，注视点的分布在出发大厅中更加均衡，但在到达大厅中更加集中且趋近圆。

### （3）单次运动距离

对寻路任务熟悉程度的上升使单次的运动距离随任务次序而增加，且组内的运动距离差异随任务次序上升而减少。同时，运动轨迹指标均表现出了出发大厅与到达大厅间的显著差异。

### （4）最近障碍物距离

相比出发大厅，被试与最近障碍物之间的距离在到达大厅中发生明显下降。相同的场地中，被试随着对场地的熟悉而更远离最近的障碍物。在出发大厅中，被试在寻找值机柜台中的最近障碍物距离小于在寻找登机口时的；在到达大厅中，被试在寻找洗手间中的最近障碍物距离小于在寻找地铁站时的。

### （5）视线转动幅度

受到空间形状与能见度的影响，被试的视线转动幅度存在出发大厅与到达大厅之间的显著差异，出发大厅内的视线转动幅度显著小于到达大厅内的注视角度。由于缺乏空间信息的引导，在寻找洗手间和寻找地铁站的任务中，被试更倾向于大幅度的视线转动。在同一场所内，被试的视线转动幅度与其对空间的熟悉程度有关，视线转动的幅度随被试对环境的熟悉程度上升而减小。

## 5.4.2 各寻路任务的行为与绩效的关系

### （1）注视距离长度

被试的注视距离越长，有效信息的获取精确度越低，步行时间偏差指数越大，表明被试表现出的寻路效率越低。受到对环境熟悉程度的影响，同一地点任务的注视距离与寻路绩效相关性随任务次序下降。

### （2）注视点分布规律

注视点的分布越趋向于目的地所在方向，被试的步行时间偏差越小，任务表现出的寻路效率越高。

### （3）单次运动距离

单次运动距离的长度与注视点分布的方向角度存在相关性，而注视点分布的方向角度与注视距离之间存在相关关系。单次运动距离长短体现出被试的方向感、对环境的熟悉程度与寻路时的自信程度，被试的单次运动距离越短，步行时间偏差指数越大，表现出的寻路效率则越低。

### （4）最近障碍物距离

被试与最近障碍物的距离也与注视距离之间存在相关关系。被试与最近障碍物的距离影响视线范围内的能见度，进而影响了信息的获取，被试与最近障碍物的距离越近，其寻路效率越低。

#### （5）视线转动幅度

视线转动幅度与被试的步行时间偏差指数之间存在负相关关系。视线转动的幅度与被试在纠正路径中表现出的修正程度有关，被试的视线转动幅度越小，步行时间偏差指数越大，表现出的寻路效率则越低。



## 第六章 空间形态指标与行为数据指标相关性分析

### 6.1 空间形态指标

类比景观学中的景观指数指标，对空间测度采用周长面积比（**PARA**）、景观形状指数（**LSI**）与香农多样性指数（**SHDI**）作为量化指标。面积周长比衡量所处位置周围障碍形状的紧凑程度，面积周长比值越小障碍形状越趋向于圆且越紧凑；景观形状指数衡量障碍的形状规则程度，景观形状指数越大越不规则；香农多样性指数衡量障碍在规定范围内的分布非均衡或破碎化程度，香农多样性指数越大分布破碎化程度越高。利用 **Fragstats** 进行空间指标计算，出发大厅与到达大厅的栅格图像分辨率均为 96dpi，沿被试的任务路径对空间指标进行取样。对出发大厅的周长面积比和景观形状指数采用边长 0.5m 的正方形移动窗口，香农多样性指数采用边长 1m 正方形移动窗口；对到达大厅的周长面积比和景观形状指数采用边长 0.15m 正方形移动窗口，香农多样性指数采用边长 0.2m 正方形移动窗口。

对每个被试四个任务的三个指标进行正态性检验（见附录 C）。周长面积比的 K-S 检验结果为 T1（ $P=0.026$ ）、T2（ $P=0.047$ ）的  $P<0.05$ ，T3（ $P=0.200$ ）、T4（ $P=0.200$ ）的  $P>0.05$ ；S-W 检验结果为 T1（ $P=0.033$ ）、T2（ $P=0.001$ ）的  $P<0.05$ ，T3

（ $P=0.088$ ）、T4（ $P=0.557$ ）的  $P>0.05$ ，二者的结果均表明 T1、T2 数据不满足正态分布，T3、T4 数据满足正态分布，因此对数据采取非参数分析的方法。景观形状指数的 K-S 检验结果为 T1（ $P=0.183$ ）、T2（ $P=0.200$ ）的  $P>0.05$ ，T3（ $P=0.032$ ）、T4

（ $P<0.001$ ）的  $P<0.05$ ；S-W 检验结果为 T1（ $P=0.247$ ）、T2（ $P=0.175$ ）的  $P>0.05$ ，T3（ $P=0.002$ ）、T4（ $P<0.001$ ）的  $P<0.05$ ，二者的结果均表明 T1、T2 数据满足正态分布，T3、T4 数据不满足正态分布，因此对数据采取非参数分析的方法。香农多样性指数的 K-S 检验结果为 T1（ $P=0.200$ ）、T2（ $P=0.200$ ）和 T4（ $P=0.200$ ）的  $P>0.05$ ，T3

（ $P=0.044$ ）的  $P<0.05$ ；S-W 检验结果为 T1（ $P=0.355$ ）和 T4（ $P=0.162$ ）的  $P>0.05$ ，T2

( $P=0.029$ ) 和 T3 ( $P=0.023$ ) 的  $P<0.05$ ，二者的结果表明 T1、T4 的数据满足正态分布，T2、T3 的数据不满足正态分布，因此对数据采取非参数分析的方法。

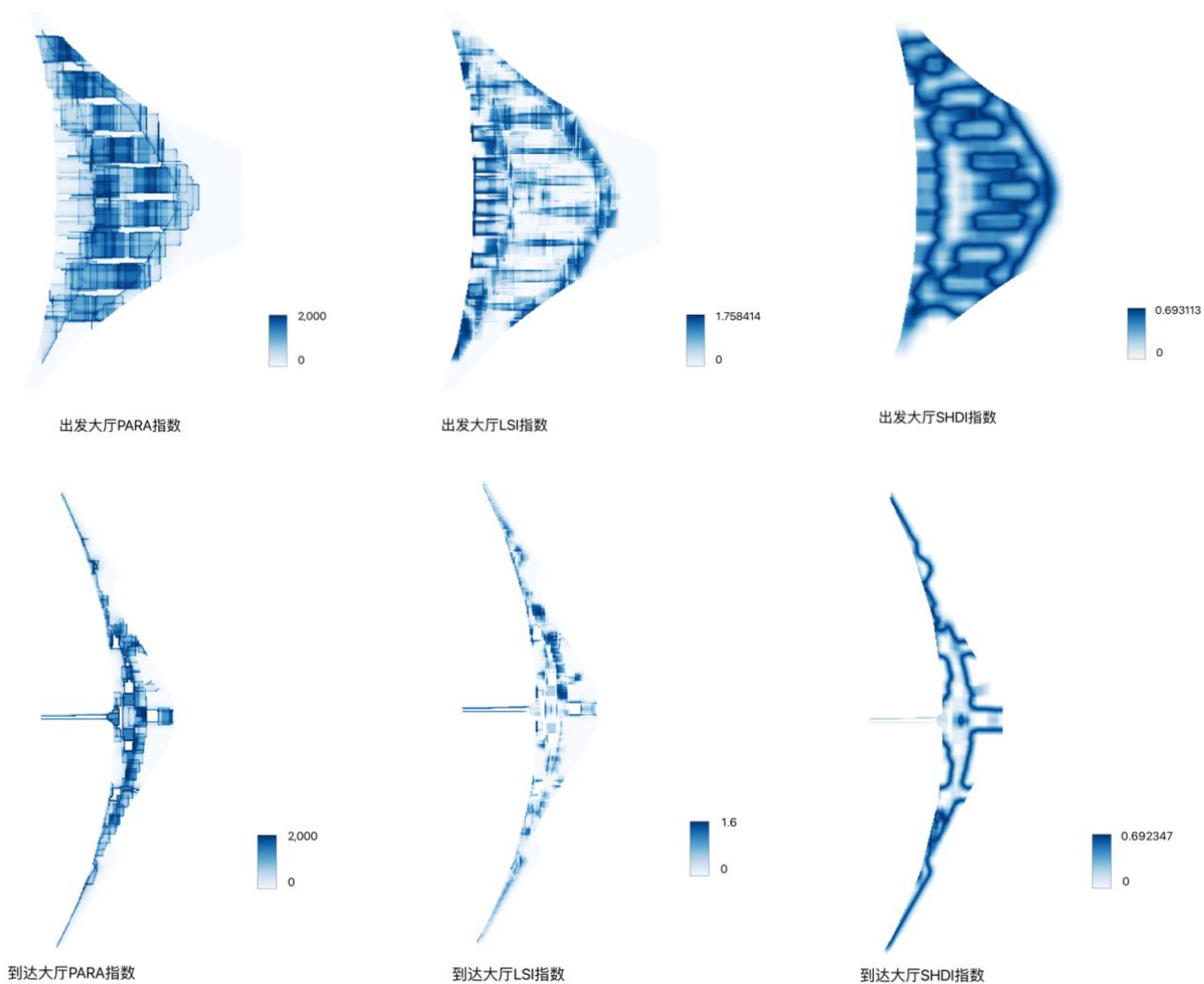


图 6.1 出发大厅与到达大厅空间形态指数图（PARA、LSI、SHDI）

6.1.1 空间形态指标特征分析

分别对周长面积比、景观形状指数与香农多样性指数进行描述性统计（表 6.1-6.3）与数据可视化（图 6.2-6.4），其中有效数据样本共 26 组。

表 6.1 各任务周长面积比描述统计

		T1	T2	T3	T4
N	Valid	26	26	26	26
Mean		1086.7761	1221.7056	1393.6043	1275.8939
Median		1066.1374	1257.6698	1330.6018	1221.8468
Std. Deviation		83.9304	167.5307	360.1075	217.0404

Minimum	993.6019	583.3333	880.8221	794.8718
Maximum	1345.7680	1411.4484	2000.0000	1650.3759

就周长面积比而言，全部任务的最大值与最小值分别发生在任务 T3 与 T2 中。任务 T1 标准差为四个任务中最小值，其数据分布最为集中，且其均值与中位值均为四个任务中最小值；相反地，T3 的均值、中位值与标准差均为四个任务重最大值，其数据分布最分散；四个任务中有且仅有 T2 的最小值与主体数据分布偏离较大。

表 6.2 各任务景观形状指数描述统计

	T1	T2	T3	T4
N Valid	26	26	26	26
Mean	1.1595	1.1035	1.0264	1.0191
Median	1.1700	1.1021	1.0170	1.0026
Std. Deviation	.0466	.0439	.0322	.0269
Minimum	1.0822	1.0200	1.0000	1.0000
Maximum	1.2854	1.2323	1.1069	1.0846

相较周长面积比，景观形状指数中存在的分布脱离主体范围的样本更多，T1、T2、T3 的最大值与 T3 的次大值均与主体数据分布偏离较大。全部任务的最大值与最小值分别发生在任务 T1 与 T3、T4 中。与周长面积比相反地，任务 T1 的景观形状指数标准差为四个任务中最大值，其数据分布最分散，且其均值与中位值同时为四个任务中最大值；T4 的均值、中位值与标准差均为四个任务重最小值，其数据分布最集中。

表 6.3 各任务香农多样性指数描述统计

	T1	T2	T3	T4
N Valid	26	26	26	26
Mean	.3856	.3346	.1865	.1781
Median	.3711	.3377	.2005	.1614
Std. Deviation	.0705	.0575	.1328	.0891
Minimum	.2653	.1861	.0051	.0375
Maximum	.5613	.4330	.4353	.3681

香农多样性指数的分布则在出发与到达大厅中表现出了明显的组内相似与组间差异性，T1 与 T2 的香农多样性指数范围所在区间明显大于 T3 与 T4 范围所在区间。T1 的均值与中位值为四个任务中最大值；T4 的均值和中位值为四个任务中最小值。任务 T2 的景观形状指数标准差为四个任务中最小值，其数据分布最集中；T3 的标准差为四个任务中最大值，其数据分布最分散。同时，仅 T1 的最大值与 T2 的最小值发生了与主体数据分布偏离较大的情况。

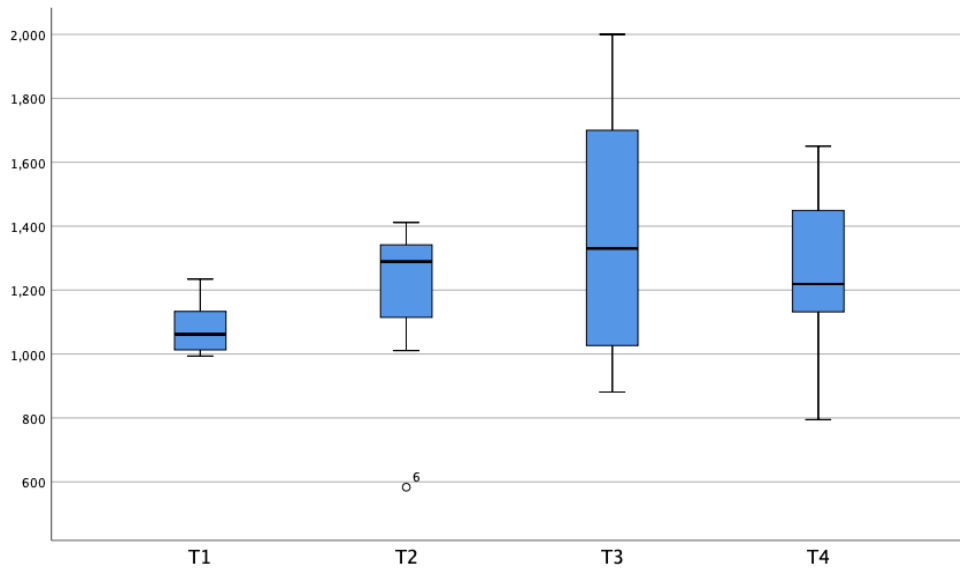


图 6.2 各任务周长面积比均值箱线图

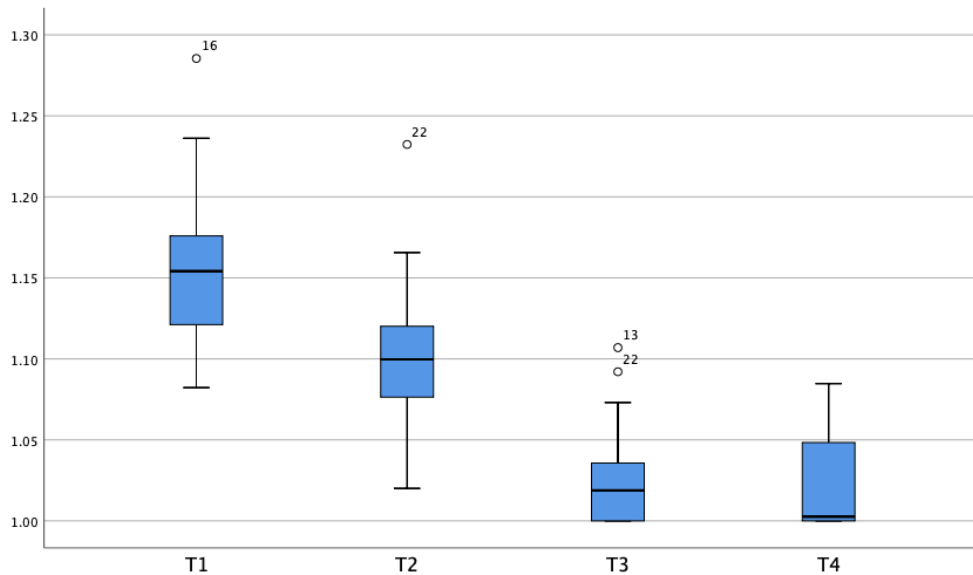


图 6.3 各任务景观形状指数均值箱线图

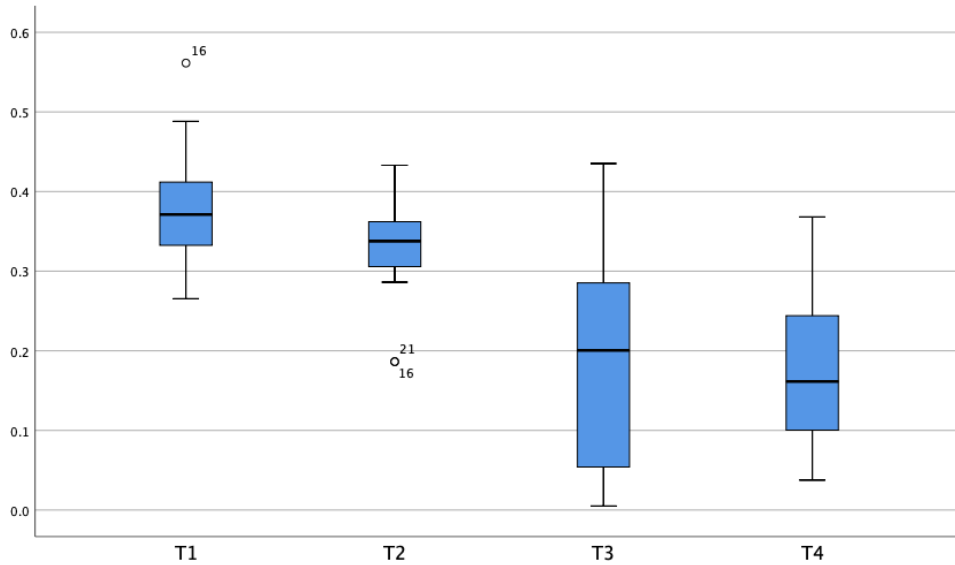


图 6.4 各任务香农多样性指数均值箱线图

### 6.1.2 空间形态指标特征对比分析

对周长面积比的各项任务间相关性进行 Spearman 分析，有且仅有 T2 与 T3 的周长面积比均值存在中等强度的负相关性 ( $C = -0.440$ ,  $P = 0.035 < 0.05$ )，其他任务间无显著相关性。对各任务的周长面积比进行 Friedman 秩和差异性检验，根据检验结果，四项任务的周长面积比间存在显著性差异 ( $t = 13.636$ ,  $p = 0.003 < 0.05$ )。四项任务的周长面积比两两间差异性检验表明 T1 与 T3 ( $t = -1.182$ ,  $p = 0.014 < 0.05$ )、T4 ( $t = -1.273$ ,  $p = 0.006 < 0.05$ ) 存在显著性差异。同时，对四项任务的周长面积比进行 Wilcoxon 秩和符号检验，结果表明 T1 与 T2 间存在显著性差异 ( $t = 320.000$ ,  $p = 0.002 < 0.05$ )。两种检验的结果表明 T1 的周长面积比均值显著小于 T2、T3 与 T4 的周长面积比均值。

对各任务的景观形状指数进行 Friedman 秩和差异性检验，根据检验结果，四项任务的景观形状指数间存在显著性差异 ( $t = 44.825$ ,  $p < 0.01$ )。四项任务的景观形状指数两两间差异性检验表明除 T1 与 T2 ( $t = 0.857$ ,  $p = 0.189 > 0.05$ )、T3 与 T4 ( $t = 0.190$ ,  $p = 1.000 > 0.05$ ) 外，其他任务两两间均存在显著差异，即 T1 的景观形状指数均值显著大于 T3 ( $t = 2.095$ ,  $p < 0.01$ )、T4 ( $t = 2.286$ ,  $p < 0.01$ )，T2 的景观形状指数均值显著大于 T3 ( $t = 1.238$ ,  $p = 0.011 < 0.05$ )、T4 ( $t = 1.429$ ,  $p = 0.002 < 0.05$ )。这表明在本研究中，相同场地的任务发生次序对任务的景观形状指数没有影响，而任务发生地点的变化影响了任务的景观形状指数均值。进一步根据图 6.2 可以看出，出发大厅产生的景观形状指数明显大于到达大厅产生的景观形状指数。

对各任务的香农多样性指数采取 Wilcoxon 秩和符号差异性检验，根据检验结果，四项任务的香农多样性指数间存在显著性差异 ( $t = 46.644$ ,  $p < 0.01$ )。四项任务的景观形状指数两两间差异性检验结果与景观形状指数相似，除 T1 与 T2 ( $t = 0.444$ ,  $p = 1.000 > 0.05$ )、T3 与 T4 ( $t = -0.074$ ,  $p = 1.000 > 0.05$ ) 外，其他任务两两间均存在显著差异，即 T1 的香农多样性

指数均值显著大于 T3( $t=1.926, p < 0.01$ )、T4( $t=1.852, p < 0.01$ )，T2 的香农多样性指数均值显著大于 T3( $t=1.481, p < 0.01$ )、T4( $t=1.407, p < 0.01$ )。与景观形状指数的结论类似地，检验结果表明了在本研究中，相同场地的任务发生次序对任务的香农多样性指数没有影响，而任务发生地点的变化影响了任务的香农多样性指数均值。进一步根据图 6.3 可以看出，出发大厅产生的香农多样性指数明显大于到达大厅产生的香农多样性指数。

## 6.2 空间数据指标与行为指标相关性

### 6.2.1 空间数据指标与眼动指标相关性

对 26 个样本的空间测度指标与其对应的瞬时、时间段眼动指标进行相关性分析，采用 Spearman 相关性检验对周长面积比、景观形状指数、香农多样性指数与视线向量模长、ROG、标准差椭圆方向角度、标准差椭圆离心率进行检验。结果表明，样本的周长面积比与视线向量模长呈现出显著的相关性关系 ( $C=0.309, p=0.002 < 0.05$ )；景观形状指数与 ROG ( $C=0.270, p=0.007 < 0.05$ )、视线向量模长 ( $C=-0.517, p < 0.01$ ) 均呈现出显著的相关性关系；香农多样性指数与视线向量模长呈现出显著的相关性关系 ( $C=-0.528, p < 0.01$ )。具体而言，样本的周长面积比与视线向量模长存在正相关关系，即周长面积比越大，视线向量模长越大；景观形状指数与 ROG 存在正相关关系，与视线向量模长存在负相关关系，即景观形状指数越大，ROG 越大，视线向量模长越小；香农多样性指数与视线向量模长存在负相关关系，即香农多样性指数越大，视线向量模长越小。

更近一步地，对每个样本的四个任务所产生的空间测度指标与其对应的瞬时、时间段眼动指标进行 Spearman 相关性分析。根据结果，景观形状指数与标准差椭圆的离心率在任务 T4 中呈现出显著的相关性关系 ( $C=0.401, p=0.047 < 0.05$ )；香农多样性指数与 ROG ( $C=-0.430, p=0.025 < 0.05$ ) 和标准差椭圆的方向角度 ( $C=-0.388, p=0.045 < 0.05$ ) 在任务 T3 中呈现出显著的相关性关系。其中，景观形状指数与标准差椭圆的离心率存在中等强度的正相关关系，香农多样性指数则与 ROG、标准差椭圆的方向角度均表现出相对较弱的负相关关系。就存在相关性的任务而言，景观形状指数越大，被试周边的障碍形状越不规则，其对应的眼动标准差椭圆离心率越大，注视点的分布越趋向椭圆；香农多样性指数越大，被试周围的障碍分布破碎化程度越高，眼动的 ROG 与标准差椭圆方向角度越小，眼动点分布的稳定性与趋向目的地的可能性越低。

### 6.2.2 空间数据指标与运动轨迹指标相关性

对 26 个样本的空间测度指标与其对应的瞬时、时间段运动轨迹指标进行相关性分析，采用 Spearman 相关性检验对周长面积比、景观形状指数、香农多样性指数与运动向量模长和最小障碍距离进行检验。结果表明，尽管样本的三个空间测度指标均未与运动向量模长表现出显著的相关性，但周长面积比 ( $C=-0.212, p=0.031 < 0.05$ )、景观形状指数 ( $C=0.650, p < 0.01$ )、香农多样性指数 ( $C=0.603, p < 0.01$ ) 均与最小障碍距离呈现出显著的相关性关系，其中景观形状指数、香农多样性指数与最小障碍距离的显著性达到 99% 水平。具体而言，样本的周长面积比与最小障碍距离存在负相关关系，即周长面积比

越大, 最小障碍距离越小; 景观形状指数、香农多样性指数与最小障碍距离存在正相关关系, 即景观形状指数和香农多样性指数越大, 最小障碍距离越大。

更近一步地, 对每个样本的四个任务所产生的空间测度指标与其对应的瞬时、时间段眼动指标进行 Spearman 相关性分析。根据结果, 景观形状指数与最小障碍距离在任务 T3 中呈现出显著的中等强度负相关关系 ( $C=-0.551, p=0.008<0.05$ )。就存在相关性的任务而言, 景观形状指数越大, 被试周边的障碍形状越不规则, 其对应的最小障碍距离越小, 被试与最近的障碍之间的距离越小。

### 6.2.3 空间数据指标与运动-眼动复合指标相关性

对 26 个样本的空间测度指标与其对应的运动-眼动复合指标进行相关性分析, 采用 Spearman 相关性检验对周长面积比、景观形状指数、香农多样性指数与注视角均值进行检验。结果表明, 周长面积比 ( $C=0.315, p=0.001<0.05$ )、景观形状指数 ( $C=-0.723, p<0.01$ )、香农多样性指数 ( $C=-0.632, p<0.01$ ) 均与注视角均值呈现出显著的相关性关系, 三个空间测度指标与最小障碍距离的显著性均达到 99% 水平。具体而言, 样本的周长面积比与注视角均值存在中等偏弱的正相关关系, 即周长面积比越大, 注视角均值越大; 景观形状指数、香农多样性指数与最注视角均值存在较强的负相关关系, 即景观形状指数和香农多样性指数越大, 注视角均值越小。但在进一步对每个样本的四个任务所产生的空间测度指标与运动-眼动复合指标进行 Spearman 相关性分析时, 各任务的对应指标并未表现出显著相关性。因此就整体指标的相关性而言, 周长面积比越大, 障碍形状越不趋近于圆, 障碍分布越不紧凑, 其对应的注视角均值越大, 被试的视线转动幅度越大; 景观形状指数越大, 被试周边的障碍形状越不规则, 其对应的注视角均值越小, 被试的视线转动幅度越小; 香农多样性指数越大, 被试周围的障碍分布破碎化程度越高, 其对应的注视角均值越小, 被试的视线转动幅度越小。

## 6.3 本章小结

### 6.3.1 空间形态指标特征

就主体范围内的数据而言, 由于出发大厅和到达大厅存在不同的空间形状和室内能见度, 出发大厅的景观形状指数比到达大厅的景观形状指数存在更大的组内差异, 而出发大厅的周长面积比与香农多样性指数则比到达大厅的周长面积比与香农多样性指数组内差异更小。具体特征可分为地点差异和次序差异进行总结:

#### (1) 地点差异

就不同场所相同发生次序的任务间而言, 先发生任务的景观形状指数和香农多样性指数显著大于后发生任务的, 即出发大厅与到达大厅之间存在显著的对应景观形状指数值和香农多样性指数值下降。同时, 相同任务发生次序的情况下, 任务 T1 的周长面积比显著大于任务 T3 寻找洗手间的。这表明被试路径范围内的障碍的形状规则程度和紧凑程度都有所上升, 但障碍分布的破碎化程度下降。造成这种情况的原因可能是到达大厅相比出发大厅更加狭长拥挤, 且大厅内部空间的东西向差异也更加明显。

## （2）次序差异

相同地点的情况下，任务 T1 寻找值机柜台的周长面积比显著大于任务 T2 寻找登机口的；同时，景观形状指数和香农多样性指数在相同地点内的均不存在显著差异。这表明在相同场地中，后发生任务途径的障碍更加紧凑。

总体而言，这表明在相同地点或相同的任务次序中，相较先发生的任务，后发生的任务过程中被试途经的障碍都更加紧凑；相比到达到达大厅，出发大厅中被试途经的障碍分布破碎化程度更高且形状更加不规则。

## 6.3.2 空间形态指标与行为指标的关系

空间形态指标与三类行为指标间存在显著的相关性。

### （1）空间形态对眼动行为的影响

在空间形态对眼动行为的影响方面，被试途经的障碍越紧凑、形状越不规则、分布状况破碎化程度越高，其相应的注视距离越短。同时，被试途经的障碍形状越不规则，其注视点分布的稳定性越低，注视点的分布也越趋向椭圆；被试途径障碍的分布状况破碎化程度越高，注视点的分布稳定性与趋向目的地的可能性越低。

被试在特定位置的能见度和信息接收程度都受到周围空间形态的影响，能见度直接影响了可能产生的注视距离，信息接收程度则与被试当下的注意力相关。因此空间形态越复杂，被试的注意力分散可能性越大，其注意力范围就越小；同时复杂或破碎的空间形态也会提升信息过载的可能性，从而导致其注视点的分布更加不稳定。

### （2）空间形态对运动行为的影响

在空间形态对运动行为的影响方面，被试途经的障碍越紧凑、形状越不规则、分布状况破碎化程度越高，其与最近障碍物的间隔距离越大。同时，单次运动距离的长度与空间形态不存在显著关系。

这表明在寻路过程中，尽管位于较空旷地面上的小型立柱、信息牌或承重柱可能会提供更多的引导信息，被试仍然会因为其产生的视线干扰和不确定性而选择倾向于靠近体块更完整或更规则的障碍面行走，例如沿墙面前行。

### （3）空间形态对运动-眼动复合行为的影响

在空间形态对运动-眼动复合行为的影响方面，被试途经的障碍越紧凑、形状越不规则、分布状况破碎化程度越高，其视线转动的幅度越小。

这与被试的本能注视行为有关，在寻路过程中，被试更偏向于注意存在局部几何变化的空间，例如转角或障碍间隙<sup>[67]</sup>。因此在复杂空间内，被试的注意力更容易受到分布集中、形状不规则、单个体块面积较小的障碍的影响，从而将其视线落在这些区域范围内，而非进行大幅度的视线回溯。



## 第七章 结论与展望

### 7.1 结论

本文通过北京首都国际机场 T3 航站楼的空间认知实验,对寻路任务产生的客观和生理数据进行收集和处理。采用步行时间偏差指数判定寻路效率,从运动、眼动和运动-眼动复合三个方面构建行为系统评估指标,类比和采用景观学分析方法评估过程空间形态,并利用该指标评价体系对寻路绩效、行为数据及相关空间形态指标进行统计分析。探究大型交通枢纽中乘客的寻路效率、行为表现及相关空间形态特征,并对空间形态与寻路行为、寻路行为与寻路效率之间的关联进行梳理和分析,有利于认知和评估大型交通空间的认知引导能力,为改善导向设施的服务质量和优化行人友好水平提供了理论支持。本研究主要得出以下结论:

#### (1) 寻路效率的特征

较低飞行频率与较低机场熟悉度的乘客存在寻路效率普遍偏低的情况。乘客在任务中均表现出不同程度的寻路困难,尤其在寻找值机柜台时遇到的问题最突出。短时间内的寻路经验是可学习的,但这种经验不具有良好的迁移性。乘客在同一场所后发生任务中的寻路效率往往高于先发生任务的,然而不同场所的任务在衔接中没有表现出效率水平的继承。乘客的教育背景会影响其寻路效率。相较高中与大学学历水平的人群,初中学历水平的人群在任务中表现出更低的寻路效率。

#### (2) 寻路行为与寻路效率

乘客对任务的熟悉程度与其寻路行为之间存在关联。乘客能够通过已完成的任务熟悉任务环境和进行流程,对寻路环境的熟悉使得其更加明确空间分布情况,从而增强其定位导向的准确性,降低路径规划失误的风险。同时,乘客对任务的熟悉程度也影响了其自信心与安全感,正向情绪的增强削弱了寻路中未知因素带来的不确定性和焦虑情绪影响,有利于其更轻松地自由探索寻路区域,依赖已有的经验进行寻路能够使乘客更加高效地进行信息获取和运用,从而提高了乘客接受和处理信息的效率。随着对任务熟悉程度的上升,乘客与最近障碍物的距离和单次的运动距离都发生增加,而其对应的注视距离和视线转动的幅度都发生减小。

乘客的寻路效率受到其寻路行为的影响。注视方向与距离都对乘客获取信息的能力产生限制,错误的注视方向或过远的距离可能无法向乘客提供有效信息或造成信息忽略,从而造成引导信息缺失,使其寻路效率受到影响。乘客的移动偏好与其情绪状态相关,更熟悉环境的乘客能够以更快的速度对环境进行自由探索,获得更多的定位导向信息,从而在正反馈中提高其寻路的效率。注视距离短、注视点分布趋向于目的地所在方向时,乘客获取有效信息的可能性与精确度更大;单次运动距离越大时,体现出乘客的方向感越强、更加熟悉环境且更加自信,其表现出的寻路效率较高。同时,与障碍物间过

近的距离和较小幅度的视线转动都会影响乘客的视野范围，进而影响其能够获取的信息量和修正路径的及时性，从而导致了寻路效率的降低。

### （3）空间形态与寻路行为

空间形态的转变是造成寻路行为改变的重要因素。在空间形态发生转变时，乘客会对其行为策略进行调整，通过改变回溯次数或调整信息获取范围等行为适应不同环境的定位需求。从视野开阔、信息量丰富、要素分布相对松散的大尺度空间转变为狭长构造、缺少引导信息、要素拥挤的空间后，乘客步行途中沿路的障碍形状规则程度和紧凑程度上升，障碍分布的破碎化程度下降。同时，更加狭长拥挤的空间形态使得乘客的注视距离产生了明显的跟随增长，注视点的分布更加集中，视线转动的幅度变得更大，乘客与最近障碍物之间的距离也相应地发生了缩短。

空间形态对寻路行为存在明确的影响。空间形态越复杂，产生的信息量越大，乘客希望通过更多观察获得尽可能多的信息的意愿越强烈，然而由于信息量的过载，其注意力被分散的可能性也越大，因此乘客能够真正观察的范围越小，利用空间信息的效率越低。同时，在复杂空间中，乘客更倾向于靠近体块规则完整的障碍面前行，远离独立或体块较小的障碍物，更远的距离使得部分引导信息在获取时被忽略或难度增加，从而使乘客的信息利用效率发生损失。此外，由于乘客会本能地关注存在局部几何变化的空间，复杂空间中乘客面对的更多转角和间隙易于吸引注意力，从而导致其回溯的意愿下降，而已有的研究表明回溯是定位和偏航纠正的重要环节，减少回溯的同时乘客的寻路效率也在下降。乘客途经的障碍形状越不规则、分布越破碎和紧凑，乘客与最近障碍物的间隔距离越远，其对应的注视距离和视线转动的幅度越小。障碍形状的不规则同时会使注视点的分布更加分散和不稳定，高度破碎的障碍分布也会造成注视点的分布稳定性下降和远离目的地趋势的可能性增加。

## 7.2 反思与展望

本研究的收获主要为公共交通空间中空间形态、寻路行为与寻路效率之间的传导关系成果，能够为日后大尺度公共交通空间的空间认知导则建立、服务设施优化和行人友好性建设提供相关的理论支持。然而本研究在实验和研究方法上还存在诸多不足。在实验方面，目前国内在空间认知领域的眼动实验研究尚不成熟，本实验仅选取一个案例地作为研究场地，相对单一，期望在未来的研究中增加案例场地的丰富性以进一步获得更具一般性的理论；在研究方法方面，本研究尝试使用量化的形式对寻路效率进行评估，但以时间、距离要素作为寻路效率的判定条件并不能完全反映被试的全部寻路情况，同时本研究对指标间关系探究方法较为单一，期待在日后研究中增加停顿、迂回等要素形成更综合的寻路情况判定体系，并且丰富指标间关系的探究方式，从而构建完整的逻辑模型体系。希望本研究中的空间认知研究方法能够为建立更完善的空间认知评价体系提供相关支持，并为公共交通空间的形态导向优化做出理论层面的贡献。

改善城市生活环境的感知与评价对城市学者而言仍然任重而道远。在城市化飞速发展的当下，城市公共设施的意义不仅在于维持城市功能的正常秩序与运转，同时也在于为其居民提供更加舒适、高效的生活环境。因此，如何提升城市设施空间的人性化与全民友好性值得更多的关注和思考。这种对城市空间的交互性反思不仅体现出城市学者对人与城市关系的解读，也体现出城市规划学科本身所具有的人文关怀。

## 参考文献

- [1] Wey W-M, Huang J-Y. Urban sustainable transportation planning strategies for livable City's quality of life[J]. *Habitat International*, 2018, 82: 9–27.
- [2] Rode P, Floater G, Thomopoulos N, 等. Accessibility in Cities: Transport and Urban Form[A]. 见: G. Meyer, S. Shaheen. *Disrupting Mobility: Impacts of Sharing Economy and Innovative Transportation on Cities*[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 239–273.
- [3] Liu R, Chen Y, Wu J, 等. Mapping spatial accessibility of public transportation network in an urban area – A case study of Shanghai Hongqiao Transportation Hub[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 59: 478–495.
- [4] Fleming D K, Hayuth Y. Spatial characteristics of transportation hubs: centrality and intermediacy[J]. *Journal of Transport Geography*, 1994, 2(1): 3–18.
- [5] Elshater A M, Ibraheem F. From Typology Concept to Smart Transportation Hub[J]. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2014, 153: 531–541.
- [6] Caves R E, Gosling G D. *Strategic Airport Planning*[M]. 1997.
- [7] IATA. 20 Year Passenger Forecast[EB/OL]. 2019/2023-04-23.  
<https://www.iata.org/en/publications/store/20-year-passenger-forecast/>.
- [8] Caves R E, Pickard C D. The satisfaction of human needs in airport passenger terminals[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, Thomas Telford Ltd, 2015.
- [9] Golledge R G, others. *Wayfinding behavior: Cognitive mapping and other spatial processes*[M]. JHU press, 1999.
- [10] Chang H-H. Wayfinding Strategies and Tourist Anxiety in Unfamiliar Destinations[J]. *Tourism Geographies*, Routledge, 2013, 15(3): 529–550.
- [11] DUHL L J. The healthy city: Its function and its future[J]. *Health Promotion International*, 1986, 1(1): 55–60.
- [12] Xue C Q L, Manuel K K, Chung R H Y. Public space in the old derelict city area – a case study of Mong Kok, Hong Kong[J]. *URBAN DESIGN International*, 2001, 6(1): 15–31.
- [13] 郭建祥. 当代与未来: 交通建筑设计思考[J]. *当代建筑*, 2020(10): 5+4.
- [14] 邵韦平. 面向未来的枢纽机场航站楼——北京首都机场 T3 航站楼[J]. *世界建筑*, 2008(8): 16–37.
- [15] Fewings R. *Wayfinding and Airport Terminal Design*[J]. *The Journal of Navigation*, Cambridge University Press, 2001, 54(2): 177–184.
- [16] Kalakou S, Moura F. Bridging the Gap in Planning Indoor Pedestrian Facilities[J]. *Transport Reviews*, 2014, 34(4): 474–500.
- [17] Harding J. A research-based approach for improving the airport wayfinding experience[J]. *Journal of Airport Management*, 2019, 13(2): 133–143.

- [18] Bialkova S, Grunert K G, van Trijp H. From desktop to supermarket shelf: Eye-tracking exploration on consumer attention and choice[J]. *Food Quality and Preference*, 2020, 81: 103839.
- [19] Guo X, Robartes E M, Angulo A, 等. Benchmarking the Use of Immersive Virtual Bike Simulators for Understanding Cyclist Behaviors[J]. *Engineering Archive*, 2021.
- [20] Huddleston P T, Behe B K, Driesener C, 等. Inside-outside: Using eye-tracking to investigate search-choice processes in the retail environment[J]. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2018, 43: 85–93.
- [21] Farr A C, Kleinschmidt T, Yarlaga P, 等. Wayfinding: A simple concept, a complex process[J]. *Transport Reviews*, Routledge, 2012, 32(6): 715–743.
- [22] Golledge R G. HUMAN WAYFINDING AND COGNITIVE MAPS[A]. 见: *The Colonization of Unfamiliar Landscapes*[M]. Routledge, 2003.
- [23] Chen C-H, Chang W-C, Chang W-T. Gender differences in relation to wayfinding strategies, navigational support design, and wayfinding task difficulty[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2009, 29(2): 220–226.
- [24] Jamshidi S, Pati D. A Narrative Review of Theories of Wayfinding Within the Interior Environment[J]. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, SAGE Publications Inc, 2021, 14(1): 290–303.
- [25] Solso R L, MacLin M K, MacLin O H. *Cognitive psychology*, 7th ed[M]. Auckland, New Zealand: Pearson Education New Zealand, 2005: xxi, 602.
- [26] Pati D, Harvey T E, Willis D A, 等. Identifying Elements of the Health Care Environment That Contribute to Wayfinding[J]. *HERD: Health Environments Research & Design Journal*, 2015, 8(3): 44–67.
- [27] Gilbert Beck S. Wayfinding in libraries[J]. *Library Hi Tech*, MCB UP Ltd, 1996, 14(1): 27–36.
- [28] Jerry Weisman. Evaluating Architectural Legibility[J]. *Environment and Behavior*, Sage Publications, 1981, 13(2): 189–204.
- [29] Greenroyd F L, Hayward R, Price A, 等. A tool for signage placement recommendation in hospitals based on wayfinding metrics[J]. *Indoor and Built Environment*, 2018, 27(7): 925–937.
- [30] *Signage and Wayfinding Design*[M]. 第 1 版. John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- [31] 孙澄, 杨阳. 基于眼动追踪的寻路标志物视觉显著性研究——以哈尔滨凯德广场购物中心为例[J]. *建筑学报*, 2019(02): 18–23.
- [32] 王玥, 秦华, 王辉, 等. 基于轮椅使用者的地铁导向标志可达性研究[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(24): 10698–10705.
- [33] 赵莹, 梁锦鹏, 颜力祺, 等. 标识设置对游客寻路行为的影响研究——基于眼动追踪的实验分析[J]. *旅游学刊*, 2020, 35(9): 63–73.
- [34] 齐奕, 张岩桥, 周琼, 等. 基于眼动追踪的大型综合医院门诊部公共空间寻路与优化研究[J]. *当代建筑*, 2021(10): 118–122.
- [35] Epstein R A, Vass L K. Neural systems for landmark-based wayfinding in humans[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, Royal Society, 2014, 369(1635): 20120533.
- [36] Mikellides B. *Color and Physiological Arousal*[J]. *Journal of Architectural and Planning Research*, Locke Science Publishing Company, Inc., 1990, 7(1): 13–20.

- [37] Lynch K. The Image of the City[M]. MIT Press, 1964.
- [38] Yesiltepe D, Conroy Dalton R, Ozbil Torun A. Landmarks in wayfinding: a review of the existing literature[J]. Cognitive Processing, 2021, 22(3): 369–410.
- [39] May A J, Ross T, Bayer S H, 等. Pedestrian navigation aids: information requirements and design implications[J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2003, 7(6): 331–338.
- [40] Papadimitriou F. Spatial Complexity, Visual Complexity and Aesthetics[A]. 见: F. Papadimitriou. Spatial Complexity: Theory, Mathematical Methods and Applications[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020: 243–261.
- [41] Hölscher C, Büchner S J, Meilinger T, 等. Adaptivity of wayfinding strategies in a multi-building ensemble: The effects of spatial structure, task requirements, and metric information[J]. Journal of Environmental Psychology, 2009, 29(2): 208–219.
- [42] Raubal M, Worboys M. A Formal Model of the Process of Wayfinding in Built Environments[A]. C. Freksa, D.M. Mark. Spatial Information Theory. Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science[C]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999: 381–399.
- [43] Iftikhar H, Luximon Y. The syntheses of static and mobile wayfinding information: an empirical study of wayfinding preferences and behaviour in complex environments[J]. Facilities, Emerald Publishing Limited, 2022, 40(7/8): 452–474.
- [44] Passini R. Wayfinding: A conceptual framework[J]. Urban Ecology, 1981, 5(1): 17–31.
- [45] Mendez-Lopez M, Fidalgo C, Osma J, 等. Wayfinding Strategy and Gender – Testing the Mediating Effects of Wayfinding Experience, Personality and Emotions[J]. Psychology Research and Behavior Management, Dove Medical Press, 2020, 13: 119–131.
- [46] Taillade M, Sauzéon H, Dejos M, 等. Executive and memory correlates of age-related differences in wayfinding performances using a virtual reality application[J]. Aging, Neuropsychology, and Cognition, Routledge, 2013, 20(3): 298–319.
- [47] Afif M, ayachi R, Said Y, 等. Recognizing signs and doors for Indoor Wayfinding for Blind and Visually Impaired Persons[A]. 2020 5th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)[C]. 2020: 1–4.
- [48] Symonds P. Wayfinding Signage Considerations in International Airports[J]. Interdisciplinary Journal of Signage and Wayfinding, 2017, 1(2): 60–80.
- [49] Leib S, Dillman B, Petrin D, 等. A Comparison of the Effect of Variations to U.S. Airport Terminal Signage on the Successful Wayfinding of Chinese and American Cultural Groups[J]. Journal of Aviation Technology and Engineering, 2012, 1(2): 79–89.
- [50] Malinowski J C, Gillespie W T. INDIVIDUAL DIFFERENCES IN PERFORMANCE ON A LARGE-SCALE, REAL-WORLD WAYFINDING TASK[J]. Journal of Environmental Psychology, 2001, 21(1): 73–82.
- [51] 叶英奇, 屈海燕, 马艺萌, 等. 基于眼动分析的个人与环境因素对寻路行为的影响研究——以沈阳建筑大学校园为例[J]. 华中建筑, 2022, 40(07): 83–89.
- [52] 晋良海, 殷双萍, 尹洁. 放射状购物空间中寻路行为的眼动特征研究[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2019, 11(2): 121–128.
- [53] Padgitt A J, Hund A M. How good are these directions? Determining direction quality and wayfinding efficiency[J]. Journal of Environmental Psychology, 2012, 32(2): 164–172.

- [54] Correia A R, Wirasinghe S C, de Barros A G. Overall level of service measures for airport passenger terminals[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2008, 42(2): 330–346.
- [55] Hund A M, Minarik J L. Getting From Here to There: Spatial Anxiety, Wayfinding Strategies, Direction Type, and Wayfinding Efficiency[J]. *Spatial Cognition & Computation*, Taylor & Francis, 2006, 6(3): 179–201.
- [56] Hund A M, Nazarczuk S N. The effects of sense of direction and training experience on wayfinding efficiency[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2009, 29(1): 151–159.
- [57] Branson S, Wah C, Schroff F, 等. Visual Recognition with Humans in the Loop[A]. K. Daniilidis, P. Maragos, N. Paragios. *Computer Vision – ECCV 2010*[C]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 438–451.
- [58] Golledge R G. Place recognition and wayfinding: Making sense of space[J]. *Geoforum*, 1992, 23(2): 199–214.
- [59] Kiefer P, Giannopoulos I, Raubal M, 等. Eye tracking for spatial research: Cognition, computation, challenges[J]. *Spatial Cognition & Computation*, Taylor & Francis, 2017, 17(1–2): 1–19.
- [60] Wiener J M, Holscher C. How the Geometry of Space controls Visual Attention during Spatial Decision Making[J]. .
- [61] Kim J Y, Kim M J. Exploring Visual Perceptions of Spatial Information for Wayfinding in Virtual Reality Environments[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(10).
- [62] Müller-Feldmeth D, Schwarzkopf S, Büchner S J, 等. Location Dependent Fixation Analysis with Sight Vectors. Locomotion as a Challenge in Mobile Eye Tracking[J]. 2014.
- [63] Schwarzkopf S, Büchner S J, Holscher C, 等. Perspective tracking in the real world: Gaze angle analysis in a collaborative wayfinding task[J]. *Spatial Cognition & Computation*, Taylor & Francis, 2017, 17(1–2): 143–162.
- [64] Xu R, Su X, Xia H. Understanding and evaluating visual guidance quality inside passenger terminals - a cognitive and quantified approach[J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Taylor & Francis, 2019, 18(4): 362–379.
- [65] 徐建, 朱小雷, 王朔. 基于现场眼动实测及虚拟场景的地铁站路径选择实验——以三个广州地铁站为例[J]. *新建筑*, 2019(04): 26–32.
- [66] Iftikhar H, Shah P, Luximon Y. Human wayfinding behaviour and metrics in complex environments: a systematic literature review[J]. *Architectural Science Review*, Taylor & Francis, 2021, 64(5): 452–463.
- [67] Wiener J M, Holscher C, Büchner S, 等. Gaze behaviour during space perception and spatial decision making[J]. *Psychological Research*, 2012, 76(6): 713–729.
- [68] Wiener J M. Do you have to look where you go? Gaze behaviour during spatial decision making[J]. : 7.
- [69] Braaksma John P., Cook W. Jordan. Human Orientation in Transportation Terminals[J]. *Transportation Engineering Journal of ASCE*, American Society of Civil Engineers, 1980, 106(2): 189–203.
- [70] Lam W H K, Tam M, Wong S C, 等. Wayfinding in the passenger terminal of Hong Kong International Airport[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2003, 9(2): 73–81.
- [71] Tam M L. An optimization model for wayfinding problems in terminal building[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2011, 17(2): 74–79.

- [72] Wiener J M, Büchner S J, Hölscher C. Taxonomy of Human Wayfinding Tasks: A Knowledge-Based Approach[J]. *Spatial Cognition & Computation*, Taylor & Francis, 2009, 9(2): 152–165.
- [73] 张冰, 董一凡, 张帆, 等. 寻路视角下的动物园游径可达性分析及优化[J]. *浙江理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 49(1): 148–156.
- [74] 刘艳雯, 张昕, 赵起超, 等. 基于寻路实验的照明节能潜力——高大候机厅人工光环境的视觉功效与舒适性研究[J]. *照明工程学报*, 2021, 32(5): 101–107.
- [75] 唐玲玲. 寻路视角下医院门诊部公共空间视觉量化研究——以安徽医科大学第二附属医院为例[J]. *住宅产业*, 2023(2): 53–55.
- [76] 夏海山, 赵一锰, 徐然, 等. 地铁站寻路感知眼动试验与空间优化研究[J]. *南方建筑*, 2022(7): 1–9.
- [77] 晋良海, 刘硕, 殷双萍, 等. 商业综合体导向标志空间秩序标定研究[J]. *中国安全科学学报*, 2021, 31(12): 121–128.
- [78] Krafka K, Khosla A, Kellnhofer P, 等. Eye Tracking for Everyone[A]. 2016: 2176–2184.
- [79] Drewes H. Eye Gaze Tracking for Human Computer Interaction[D]. Ludwig-Maximilians-Universität München, 2010.
- [80] Singh H. Human Eye Tracking and Related Issues: A Review[J]. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2012, 2: 1–9.
- [81] 郑玉玮, 王亚兰, 崔磊. 眼动追踪技术在多媒体学习中的应用:2005—2015 年相关研究的综述[J]. *电化教育研究*, 2016, 37(4): 68-76+91.
- [82] Carter B T, Luke S G. Best practices in eye tracking research[J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2020, 155: 49–62.
- [83] Cave A, Blackler A, Popovic V, 等. Examining Intuitive Navigation in Airports[J]. *DRS Biennial Conference Series*, 2014.
- [84] Eloy S, Ourique F, Resende R, 等. Analysing people’s movement in the built environment via space syntax, objective tracking and gaze data[J]. *Analysing people’s movement in the built environment via space syntax, objective tracking and gaze data, eCAADe*, 2015: 341–350.
- [85] Ohm C, Müller M, Ludwig B. Evaluating indoor pedestrian navigation interfaces using mobile eye tracking[J]. *Spatial Cognition & Computation*, Taylor & Francis, 2017, 17(1–2): 89–120.
- [86] Viaene P, Vansteenkiste P, Lenoir M, 等. Examining the validity of the total dwell time of eye fixations to identify landmarks in a building[J]. *Journal of Eye Movement Research*, 2016, 9(3).
- [87] García I, Bronte S, Bergasa L M, 等. Vision-based drowsiness detector for a realistic driving simulator[A]. *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems[C]*. 2010: 887–894.
- [88] Djamasbi S. Eye Tracking and Web Experience[J]. *AIS Transactions on Human-Computer Interaction*, 2014, 6(2): 37–54.
- [89] Barea R, Boquete L, Mazo M, 等. EOG guidance of a wheelchair using neural networks[A]. *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000[C]*. 2000, 4: 668–671 卷 4.
- [90] Daniel T C, Meitner M M. REPRESENTATIONAL VALIDITY OF LANDSCAPE VISUALIZATIONS: THE EFFECTS OF GRAPHICAL REALISM ON PERCEIVED



- SCENIC BEAUTY OF FOREST VISTAS[J]. Journal of Environmental Psychology, 2001, 21(1): 61–72.
- [91] Malhotra N K. Review of Marketing Research[A]. 见: N. K. Malhotra. Review of Marketing Research[M]. Emerald Group Publishing Limited, 2009, 5: ix–xvi.
- [92] Rothkopf C A, Ballard D H, Hayhoe M M. Task and context determine where you look[J]. Journal of Vision, 2016, 7(14): 16–16.
- [93] Preliminary world airport traffic rankings released - ACI World[J]. 2019.
- [94] Beijing Airport, Beijing Capital International Airport - PEK, ZBAA[EB/OL]. /2023-03-29. <http://www.airports-china.com/beijing-zbaa-pek.htm>.
- [95] 聂聪. 基于环境心理学的大尺度交通建筑集散空间认知研究——以北京首都国际机场 T3 航站楼为例[D]. 北京大学, 2020.
- [96] 王春华, 王国庆, 朱忠义, 等. 首都国际机场 T3 号航站楼结构设计[J]. 建筑结构, 2008, 38(1): 16–24.
- [97] 莫扎·马加迪, 罗隽, 邵韦平. 北京首都国际机场 3 号航站楼设计[J]. 北京勘察设计, 2006(3): 107–111.
- [98] 齐晓剑, 曾思成, 蓝剑勋, 等. 北京首都国际机场 3 号航站楼内幕墙设计与施工技术[J]. 建筑施工, 2008, 30(3): 182–184.
- [99] Briggs R. Urban cognitive distance.[A]. 见: Image & environment: Cognitive mapping and spatial behavior.[M]. New Brunswick, NJ, US: AldineTransaction, 1973: 361–388.
- [100] Dada E S. Quantitative measures of orientation in airport terminals[M]. University of Calgary, 1997.
- [101] Bhattacharya D, Barry K. On orientations and adjustments: an exploration of walking, wandering and wayfinding in Brisbane – Meanjin, Australia[J]. Australian Geographer, Routledge, 2021, 52(3): 257–272.
- [102] NNU\_Group. 周长面积比 | Concept & Semantic | OpenGMS[EB/OL]. 2011/2023-04-20. <https://geomodeling.njnu.edu.cn/repository/concept/737e030d-5afc-4c72-9798-8086b001d289>.
- [103] Zach. Shannon Diversity Index: Definition & Example[J]. Statology, 2021.
- [104] LSI (landscape level) — lsm\_1\_lsi[EB/OL]. /2023-04-20. [https://r-spatialecology.github.io/landscapemetrics/reference/lsm\\_1\\_lsi.html](https://r-spatialecology.github.io/landscapemetrics/reference/lsm_1_lsi.html).
- [105] 赵文武. 中国大百科全书[M]. 第 3 版. 中国大百科全书出版社.

## 附录 A

## A. 1 任务绩效正态性检验表格

表 A. 1 T/D Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
TDtask1	.230	26	.001	.771	26	.000
TDtask2	.328	26	.000	.631	26	.000
TDtask3	.271	26	.000	.812	26	.000
TDtask4	.345	26	.000	.577	26	.000

## A. 2 任务绩效差异性检验表格

表 A. 2 T/D Related-Samples Friedman's Two-Way Analysis of  
Variance by Ranks Summary

Total N	26
Test Statistic	27.138
Degree Of Freedom	3
Asymptotic Sig.(2-sided test)	.000

表 A. 3 T/D Pairwise Comparisons

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. <sup>a</sup>
TDtask2-TDtask4	-.692	.358	-1.934	.053	.319
TDtask2-TDtask3	-.846	.358	-2.363	.018	.109
TDtask2-TDtask1	1.846	.358	5.156	.000	.000
TDtask4-TDtask3	.154	.358	.430	.667	1.000
TDtask4-TDtask1	1.154	.358	3.223	.001	.008
TDtask3-TDtask1	1.000	.358	2.793	.005	.031

表 A. 4 T/D&教育水平 Independent-Samples Kruskal-Wallis Test  
Summary

Total N	26
Test Statistic	7.012
Degree Of Freedom	2
Asymptotic Sig.(2-sided test)	.030

## 附录 B

## B.1 行为数据正态性检验表格

表 B.1 视线向量 Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
T1_SV	.218	24	.004	.789	24	.000
T2_SV	.161	24	.108	.927	24	.082
T3_SV	.200	24	.014	.875	24	.007
T4_SV	.275	24	.000	.673	24	.000

表 B.2 标准差椭圆 方向角度 Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
T1	.243	26	.000	.652	26	.000
T2	.091	26	.200*	.977	26	.815
T3	.182	26	.027	.900	26	.016
T4	.135	26	.200*	.931	26	.082

表 B.3 标准差椭圆 离心率 Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
T1	.101	26	.200*	.966	26	.522
T2	.100	26	.200*	.970	26	.632
T3	.136	26	.200*	.959	26	.379
T4	.118	26	.200*	.950	26	.233

表 B.4 ROG Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
T1	.134	26	.200*	.967	26	.550
T2	.203	26	.007	.934	26	.098
T3	.137	26	.200*	.970	26	.627
T4	.098	26	.200*	.925	26	.059

表 B.5 运动向量 Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.

T1	.246	25	.000	.776	25	.000
T2	.183	25	.030	.876	25	.006
T3	.223	25	.002	.835	25	.001
T4	.336	25	.000	.546	25	.000

表 B. 6 最小障碍距离 Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
T1	.120	27	.200*	.933	27	.080
T2	.090	27	.200*	.967	27	.518
T3	.102	27	.200*	.975	27	.748
T4	.091	27	.200*	.965	27	.476

表 B. 6 注视角 Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
T1_GA	.131	25	.200*	.948	25	.228
T2_GA	.115	25	.200*	.974	25	.747
T3_GA	.213	25	.005	.935	25	.113
T4_GA	.134	25	.200*	.947	25	.211

## B. 2 行为数据差异性检验表格

表 B. 7 运动向量 Pairwise Comparisons

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. <sup>a</sup>
T4-T2	1.240	.365	3.396	.001	.004
T4-T1	1.520	.365	4.163	.000	.000
T4-T3	2.440	.365	6.682	.000	.000
T2-T1	.280	.365	.767	.443	1.000
T2-T3	-1.200	.365	-3.286	.001	.006
T1-T3	-.920	.365	-2.520	.012	.071

表 B. 8 最小障碍均值 Paired Samples Test

		Paired Differences			95% Confidence Interval of the Difference		t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	Lower	Upper			
Pair 1	T1 - T2	- 14.3064166370	7.97456074071	2.75327116550	- 13.6339906739	- 2.31513080745	-2.896	26	.008
		3642	09997	5554	76422	0861			

Pair 2	T1 - T3	45.3506635710	17.6548645627	3.39768026927	38.3666317544	52.3346953876	13.348	26	.000
		15600	91520	8023	19150	12050			
Pair 3	T1 - T4	35.1774143774	12.8964855723	2.48192980560	30.0757345974	40.2790941575	14.173	26	.000
		91660	95000	7460	20755	62560			
Pair 4	T2 - T3	53.3252243117	17.1331055093	3.29726769261	46.5475935024	60.1028551209	16.173	26	.000
		29240	01600	6513	70490	88000			
Pair 5	T2 - T4	43.1519751182	13.9935534346	2.69306061414	37.6163097457	48.6876404906	16.023	26	.000
		05290	82024	4360	82360	28240			
Pair 6	T3 - T4	-	11.6511415512	2.24226323698	-	-	-4.537	26	.000
		10.1732491935	11113	6057	14.7822872863	5.56421110071			
		23947			35073	2821			

表 B. 9 视线向量 Pairwise Comparisons

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. <sup>a</sup>
T4_SV-T3_SV	.625	.373	1.677	.094	.561
T4_SV-T2_SV	1.708	.373	4.584	.000	.000
T4_SV-T1_SV	2.500	.373	6.708	.000	.000
T3_SV-T2_SV	1.083	.373	2.907	.004	.022
T3_SV-T1_SV	1.875	.373	5.031	.000	.000
T2_SV-T1_SV	.792	.373	2.124	.034	.202

表 B. 10 标准差椭圆 方向角度 Pairwise Comparisons

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig. <sup>a</sup>
T4-T1	1.000	.358	2.793	.005	.031
T4-T2	1.615	.358	4.512	.000	.000
T4-T3	1.692	.358	4.726	.000	.000
T1-T2	-.615	.358	-1.719	.086	.514
T1-T3	-.692	.358	-1.934	.053	.319
T2-T3	-.077	.358	-.215	.830	1.000

表 B. 11 标准差椭圆 离心率 Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	T1 - T2	-.00371681429	.040988717353	.008038548831	-.02027251552	.012838886930	-.462	25	.648
		6104	470	634	3043	835			
Pair 2	T1 - T3	.025296993098	.067321858395	.012956097689	-.00133464711	.051928633308	1.953	26	.062
		253	900	073	1567	073			
Pair 3	T1 - T4	.005953115765	.085518800396	.016458100809	-.02787699495	.039783226484	.362	26	.720
		265	522	902	3638	167			

Pair 4	T2 - T3	.031062384110	.072203193566	.014160211266	.001898883091	.060225885129	2.194	25	.038
		398	707	937	012	784			
Pair 5	T2 - T4	.008151020957	.087734797829	.017206209467	-.02728583078	.043587872702	.474	25	.640
		413	715	494	7637	462			
Pair 6	T3 - T4	-.01934387733	.090661285335	.017447772497	-.05520828734	.016520532675	-1.109	26	.278
		2988	556	854	1066	091			

表 B. 12 ROG Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	T1 - T2	-	1316.41364178	258.169955669	-	213.676221959	-1.232	25	.229
		318.034754904	1701500	409150	849.745731767	678170			
		039800			757800				
Pair 2	T1 - T3	1036.98304345	1605.01297825	308.884891683	402.061055446	1671.90503146	3.357	26	.002
		4322000	9885000	729170	453000	2191000			
Pair 3	T1 - T4	1082.35265307	1822.11728769	350.666635514	361.547060620	1803.15824552	3.087	26	.005
		0998700	2624100	802400	530500	1467000			
Pair 4	T2 - T3	1404.20231363	1539.08613499	301.839624439	782.551970351	2025.85265691	4.652	25	.000
		3470000	4457000	878260	011200	5928700			
Pair 5	T2 - T4	1429.61561994	2068.35141578	405.637085771	594.190403376	2265.04083652	3.524	25	.002
		9154300	4154000	179440	977000	1331600			
Pair 6	T3 - T4	45.3696096166	1628.95730423	313.492979365	-	689.763657510	.145	26	.886
		76826	2218600	626200	599.024438277	531900			
					178200				

表 B. 13 注视角 Paired Samples Test

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower	Upper			
Pair 1	T1 - T2	-	23.1586519831	4.54178532194	-	.871755463220	-1.868	25	.074
		8.48222650565	56410	6876	17.8362084745	051			
		7884			35820				
Pair 2	T1 - T3	-	36.7705196268	7.35410392537	-	-	-9.777	24	.000
		71.9032626035	81980	6395	87.0813871171	56.7251380899			
		49690			96020	03370			
Pair 3	T1 - T4	-	32.0882336321	6.29302036335	-	-	-8.293	25	.000
		52.1880884366	91860	6561	65.1488064882	39.2273703850			
		70910			64340	77480			

Pair 4	T2 - T3	-	39.9810394627	7.99620789255	-	-	-7.824	24	.000
		62.5639445426	88175	7634	79.0673065105	46.0605825747			
		43030			70280	15780			
Pair 5	T2 - T4	-	35.5482808772	6.97159145645	-	-	-6.269	25	.000
		43.7058619310	55390	3941	58.0641233096	29.3476005524			
		13025			24350	01700			
Pair 6	T3 - T4	18.4367892141	33.2951719079	6.52972043334	4.98857824298	31.8850001853	2.824	25	.009
		53578	17016	2121	5522	21633			

## B. 2 行为数据相关性检验表格

表 B. 14 行为数据 Correlations

			GA	ROG	DIRECTDE	MV	SV	ECC	OBS	TD
Spearman's rho	GA	Correlation Coefficient	1.000	-.444	-.149	.075	.604	-.063	-.714	-.142
		Sig. (2-tailed)	.	.000	.130	.447	.000	.522	.000	.155
		N	105	104	105	105	105	104	105	101
	ROG	Correlation Coefficient	-.444	1.000	.136	.046	-.313	.087	.420	-.020
		Sig. (2-tailed)	.000	.	.164	.640	.001	.374	.000	.841
		N	104	107	106	104	104	107	107	102
	DIRECTDE	Correlation Coefficient	-.149	.136	1.000	.348	-.206	-.042	.119	-.055
		Sig. (2-tailed)	.130	.164	.	.000	.035	.668	.221	.580
		N	105	106	107	105	105	106	107	102
	MV	Correlation Coefficient	.075	.046	.348	1.000	-.164	-.073	-.052	.011
		Sig. (2-tailed)	.447	.640	.000	.	.095	.462	.599	.916
		N	105	104	105	105	105	104	105	101
	SV	Correlation Coefficient	.604	-.313	-.206	-.164	1.000	-.065	-.528	-.230
		Sig. (2-tailed)	.000	.001	.035	.095	.	.509	.000	.021
		N	105	104	105	105	105	104	105	101
	ECC	Correlation Coefficient	-.063	.087	-.042	-.073	-.065	1.000	.168	.033
		Sig. (2-tailed)	.522	.374	.668	.462	.509	.	.084	.741
		N	104	107	106	104	104	107	107	102
	OBS	Correlation Coefficient	-.714	.420	.119	-.052	-.528	.168	1.000	-.006
		Sig. (2-tailed)	.000	.000	.221	.599	.000	.084	.	.953
		N	105	107	107	105	105	107	108	102
	TD	Correlation Coefficient	-.142	-.020	-.055	.011	-.230	.033	-.006	1.000
		Sig. (2-tailed)	.155	.841	.580	.916	.021	.741	.953	.
		N	101	102	102	101	101	102	102	102

表 B. 15 行为数据 Pairwise Comparisons

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig.
TD-ECC	.139	.345	.402	.688	1.000
TD-OBS	2.584	.345	7.497	.000	.000
TD-GA	2.822	.345	8.186	.000	.000
TD-MV	3.228	.345	9.364	.000	.000
TD-DIRECTDE	3.881	.345	11.260	.000	.000
TD-SV	5.158	.345	14.965	.000	.000
TD-ROG	6.545	.345	18.987	.000	.000
ECC-OBS	-2.446	.345	-7.095	.000	.000
ECC-GA	2.683	.345	7.784	.000	.000
ECC-MV	3.089	.345	8.962	.000	.000
ECC-DIRECTDE	3.743	.345	10.858	.000	.000
ECC-SV	5.020	.345	14.563	.000	.000
ECC-ROG	6.406	.345	18.585	.000	.000
OBS-GA	.238	.345	.689	.491	1.000
OBS-MV	.644	.345	1.867	.062	1.000
OBS-DIRECTDE	1.297	.345	3.763	.000	.005
OBS-SV	2.574	.345	7.468	.000	.000
OBS-ROG	3.960	.345	11.490	.000	.000
GA-MV	-.406	.345	-1.178	.239	1.000
GA-DIRECTDE	-1.059	.345	-3.073	.002	.059
GA-SV	-2.337	.345	-6.779	.000	.000
GA-ROG	-3.723	.345	-10.800	.000	.000
MV-DIRECTDE	.653	.345	1.896	.058	1.000
MV-SV	-1.931	.345	-5.601	.000	.000
MV-ROG	3.317	.345	9.623	.000	.000
DIRECTDE-SV	-1.277	.345	-3.705	.000	.006
DIRECTDE-ROG	2.663	.345	7.727	.000	.000
SV-ROG	1.386	.345	4.021	.000	.002



## 附录 C

## C.1 空间数据正态性检验表格

表 C.1 PARA Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
T1	.197	22	.026	.902	22	.033
T2	.186	22	.047	.813	22	.001
T3	.148	22	.200	.923	22	.088
T4	.125	22	.200	.963	22	.557

表 C.2 LSI Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
T1	.158	21	.183	.943	21	.247
T2	.137	21	.200	.935	21	.175
T3	.197	21	.032	.828	21	.002
T4	.294	21	.000	.730	21	.000

表 C.3 SHDI Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
T1	.133	27	.200	.959	27	.355
T2	.133	27	.200	.915	27	.029
T3	.170	27	.044	.910	27	.023
T4	.124	27	.200	.945	27	.162

## C.2 空间数据差异性检验表格

表 C.4 PARA Pairwise Comparisons

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig.
T1-T2	-1.000	.389	-2.569	.010	.061
T1-T3	-1.182	.389	-3.036	.002	.014
T1-T4	-1.273	.389	-3.270	.001	.006
T2-T3	-.182	.389	-.467	.640	1.000
T2-T4	-.273	.389	-.701	.484	1.000
T3-T4	-.091	.389	-.234	.815	1.000

表 C.5 LSI Pairwise Comparisons

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig.
T4-T3	.190	.398	.478	.633	1.000
T4-T2	1.429	.398	3.586	.000	.002
T4-T1	2.286	.398	5.737	.000	.000
T3-T2	1.238	.398	3.108	.002	.011
T3-T1	2.095	.398	5.259	.000	.000
T2-T1	.857	.398	2.151	.031	.189

表 C. 6 SHDI Pairwise Comparisons

Sample 1-Sample 2	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	Sig.	Adj. Sig.
T3-T4	-.074	.351	-.211	.833	1.000
T3-T2	1.481	.351	4.216	.000	.000
T3-T1	1.926	.351	5.481	.000	.000
T4-T2	1.407	.351	4.006	.000	.000
T4-T1	1.852	.351	5.270	.000	.000
T2-T1	.444	.351	1.265	.206	1.000

## C. 3 空间数据相关性检验表格

表 C. 7 空间数据 Correlations

			PARA	LSI	SHDI	GA	ROG	DIRECTDE	MV	SV	ECC	OBS	TD
Spearman's rho	PARA	Correlation Coefficient	1.000	-.390	-.419	.315	-.010	.120	-.015	.309	.024	-.212	-.312
		Sig. (2-tailed)	.	.000	.000	.001	.919	.229	.880	.002	.808	.031	.002
		N	103	96	103	100	102	102	100	100	102	103	97
	LSI	Correlation Coefficient	-.390	1.000	.662	-.723	.270	.116	.147	-.517	.050	.650	.126
		Sig. (2-tailed)	.000	.	.000	.000	.007	.249	.146	.000	.623	.000	.217
		N	96	101	101	99	100	100	99	99	100	101	97
	SHDI	Correlation Coefficient	-.419	.662	1.000	-.632	.152	.074	.103	-.528	.108	.603	.263
		Sig. (2-tailed)	.000	.000	.	.000	.119	.451	.297	.000	.270	.000	.008
		N	103	101	108	105	107	107	105	105	107	108	102
	GA	Correlation Coefficient	.315	-.723	-.632	1.000	-.444	-.149	.075	.604	-.063	-.714	-.142
		Sig. (2-tailed)	.001	.000	.000	.	.000	.130	.447	.000	.522	.000	.155
		N	100	99	105	105	104	105	105	105	104	105	101
	ROG	Correlation Coefficient	-.010	.270	.152	-.444	1.000	.136	.046	-.313	.087	.420	-.020
		Sig. (2-tailed)	.919	.007	.119	.000	.	.164	.640	.001	.374	.000	.841
		N	102	100	107	104	107	106	104	104	107	107	102
	DIRECTDE	Correlation Coefficient	.120	.116	.074	-.149	.136	1.000	.348	-.206	-.042	.119	-.055
		Sig. (2-tailed)	.229	.249	.451	.130	.164	.	.000	.035	.668	.221	.580
		N	102	100	107	105	106	107	105	105	106	107	102

MV	Correlation Coefficient	-.015	.147	.103	.075	.046	.348	1.000	-.164	-.073	-.052	.011
	Sig. (2-tailed)	.880	.146	.297	.447	.640	.000	.	.095	.462	.599	.916
	N	100	99	105	105	104	105	105	105	104	105	101
SV	Correlation Coefficient	.309	-.517	-.528	.604	-.313	-.206	-.164	1.000	-.065	-.528	-.230
	Sig. (2-tailed)	.002	.000	.000	.000	.001	.035	.095	.	.509	.000	.021
	N	100	99	105	105	104	105	105	105	104	105	101
ECC	Correlation Coefficient	.024	.050	.108	-.063	.087	-.042	-.073	-.065	1.000	.168	.033
	Sig. (2-tailed)	.808	.623	.270	.522	.374	.668	.462	.509	.	.084	.741
	N	102	100	107	104	107	106	104	104	107	107	102
OBS	Correlation Coefficient	-.212	.650	.603	-.714	.420	.119	-.052	-.528	.168	1.000	-.006
	Sig. (2-tailed)	.031	.000	.000	.000	.000	.221	.599	.000	.084	.	.953
	N	103	101	108	105	107	107	105	105	107	108	102
TD	Correlation Coefficient	-.312	.126	.263	-.142	-.020	-.055	.011	-.230	.033	-.006	1.000
	Sig. (2-tailed)	.002	.217	.008	.155	.841	.580	.916	.021	.741	.953	.
	N	97	97	102	101	102	102	101	101	102	102	102

## 致谢

不知不觉已经到了离别的时间。回想燕园中的四年，虽然有疫情的影响，但有起有落，有始有终。燕园见证了我得到第一个及格，也见证了我拿到第一笔奖学金；见证了我第一次参与文化节活动，也见证了我第一次凌晨从实验室离开；见证了我离任校青协的职务，也见证了我作为主美收获校庆的工资；见证了我激动地收到研究生录取通知书，也见证了我幸运地成为优秀毕业生。

短短四年，生动而丰富，想要感谢的有太多太多。

感谢许立言老师对我两年学业的指导和帮助，感谢他的耐心与鼓励，感谢他愿意引领我接触环境心理学领域，感谢他带我走入充满有趣实验的科研世界。如果没有他，我不能在申请季中取得心仪的录取，也不能对这个学科保持如此长久的热爱。

感谢我的家人们，感谢我的父母从经济和精神上对我的支持和帮助，感谢我的外祖母、我的舅舅和舅妈、我的姐姐对我的鼓励和安慰。没有他们，我不能勇敢地面对坎坷和挫折，也无从分享喜悦和快乐。

感谢我的老师们，感谢他们在每堂课上的付出，感谢他们为我提供的指导与建议，感谢他们用知识照亮了我的人生道路，感谢他们使我的学习能力在四年中获得了成长。

感谢我的朋友们，感谢我的室友肖怡、禹淑彬和杨雨桐，我的学妹杜诗颖和余燕，感谢校友办的老师和同学们，感谢她们陪伴我度过难忘的大学时光。没有她们，我不能拥有一起打牌五十 K，食堂带饭、深夜海底捞和太多太多的美好回忆。

感谢北京大学，感谢母校思想自由、兼容并包的环境，让我能够探索更多可能，看到更高远的未来，感谢母校为我留下的美好记忆，感谢每个让我热爱这个世界的人。

感谢上帝，凡事包容，凡事相信，凡事盼望，凡事忍耐。愿主指引我未来的路，就像指引我来时的路。

结尾处，虽然俗套，但不妨以《燕园情》作结。

燕园情，千千结，问少年心事，眼底未名水，胸中黄河月。

## 北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明

### 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名：

李亦秦

日期：2023 年 5 月 25 日

### 学位论文使用授权说明

本人完全了解北京大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：

- 按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；
- 学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务，在校园网上提供服务；
- 学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；

论文作者签名：

李亦秦

导师签名：

许心

日期：2023 年 5 月 25 日