

# 人的行为建模在城市人因设计中的应用

## The Application of Human Behaviour Modelling in Urban Ergonomics Design

吴昌旭, 周生琦, 叶亿宁/WU Changxu, ZHOU Shengqi, YE Yining

**摘要:** 人的行为计算模型能够量化人的认知和运动系统间的复杂关系, 提供对人的行为机制的系统性和计算性理解思路。排队网络-人的信息处理计算模型(QN-MHP)通过执行逻辑功能解释行为背后的潜在机制, 能够对人的行为进行有效预测。该模型在城市人因设计中的合理应用有助于为城市交通及家居、工作场所和其他公共场所的设计规划提供更佳的设计思路, 有效保障城市交通的安全性、提升城市生活的便捷度与舒适度。城市人因研究将为促进城市发展、实现人民公共利益最大化做出重大贡献。

**Abstract:** The computational model of human behaviour can quantify the complex relationship between human cognition and motor system and provide a systematic and computational understanding of human behaviour mechanism. Queuing Networking - Model Human Processor (QN-MHP) can effectively predict human behaviour by performing logical functions to explain the underlying mechanism behind behaviours. The rational application of this model in the design based on urban ergonomics will help to provide better design ideas for urban traffic and the design and planning of home, workplace and other public places, effectively guarantee the safety of urban traffic and improve the convenience and comfort of urban life. The research on urban ergonomics will make great contributions to promoting urban development and realising the maximisation of people's public interests.

**关键词:** 人的行为建模, 排队网络-人的信息处理计算模型, 城市人因设计, 交通行为安全建模, 场所设计建模

**Keywords:** human behaviour modelling, QN-MHP, urban ergonomics design, traffic safety behaviour modelling, architectural space design modelling

### 1 引言

近年来, 城市人因研究已成为很多研究者关注的热点。人因研究对提升人们的城市生活质量和幸福度起着重要的作用。比如, 通过调整高铁站自助取票机身份证放置区的坡度设置, 减少旅客身份证的遗漏率; 地铁站等候区设置电子显示屏显示下一班次预计到达时间, 减少乘客的等待焦虑等。该领域涌现的大量研究和实践成果, 为实现人民的公共利益最大化做出了巨大的贡献。

目前的相关研究多是实验研究。实验所获得的研究结果往往是在较短时间内的有限某几个自变量的水平下获得的结果(局部点阵), 对长时间和多变量连续变化的情况把握不足。通过实验归纳的行为机制的语言描述(有时是概念模型)非常重要却不能准确预测人的行为。此外, 由于人的认知和运动系统非常复杂, 语言描述在很多情况下可能无法量化这些复杂的关系。通过建立人的行为计算(通常是数学和计算机模拟)模型可以解决这些问题。它提供了对人的行为机制的系统性和计算性理解, 对预测人的行为, 解释行为背后的潜在机制有着重要的理论和实践价值。

本文主要包括3个部分内容: 首先, 介绍人的行为建模的基本情况和常见模型。其次, 将按照人的主要活动空间(交通、家居、工作场所、其他公共场所), 介绍人的行为建模在城市生活中的应用; 最后, 本文将展望人的行为建模在未来城市生活中的进一步应用。

### 2 人的行为建模

#### 2.1 人的行为建模概述

行为计算模型既是一种整合性的理论, 也是人的行为的计算机仿真程序。只有整合的认知理论才能完整地描述和预测人类的复杂行为, 并定量预测任务绩效<sup>[1]</sup>。通过行为计算模型, 人们一方面可以通过仿真理解人类的认知和学习过程, 同时了解与行为和决策相关的认知过程; 另一方面, 可以通过将认知数据作为机器或系统输入的一部分, 对指定行为或决策做出拟合或预测。正是因为行为计算模型可以实现和支持以上目标的实现, 同时其具有稳定和可复现的特征, 行为计算模型被广泛应用于交通安全、人机交互、决策评估、医疗诊断等多个领域<sup>[2-3]</sup>。

#### 2.2 常见的行为计算模型

目前受到学术界广泛认可的行为计算模型有4个。(1) ACT-R (Adaptive Control of

Thought-Rational) 是一种认知行为的体系结构和认知机制的理论模型, 其通过编程实现特定任务的认知模型构建使系统能够执行人类的各种认知任务, 包括感觉、学习、记忆等<sup>[4-5]</sup>; (2) SOAR (State, Operator and Result) 是较为先进和成熟且广受认可的认知架构之一, 其综合了知识密集型推理、反应式执行、层次推理、规划和经验学习, 目标是创建与人类具有相同认知能力的通用计算系统<sup>[6-7]</sup>。2011年, SOAR扩展了包括视觉空间处理的详细公式, 开发了空间/视觉系统(SOAR/SVS)组件<sup>[8]</sup>。另外, 有研究者也对SOAR/SVS提出了一些修改, 为人类视觉空间推理提供了一定理论基础<sup>[9]</sup>; (3) EPIC (Executive Process-Interactive Control) 适合于模拟人类多模式和多任务性能的认知体系结构, 可用于为各种人机交互情景构建精确的计算模型<sup>[10-11]</sup>; (4) 排队网络-人的信息处理计算模型(QN-MHP, Queuing Network-Model Human Processor), 通过排队网络的结构对大脑的脑区的信息加工进行了架构, 运用运筹学中的排队网络抓取了人脑信息加工的三大特点: 人脑的信息加工是耗时的, 人脑的信息加工是有容量限制的, 以及人脑的信息加工是网络化多个脑区协同工作的结果。因此, 这使它能够对人脑的信息加工进行系统和全面的数学建模<sup>[12-14]</sup>。

2.3 排队网络-人的信息处理计算模型(QN-MHP)

QN-MHP是基于神经学在人脑脑区水平的科学实验发现而发展起来的一种认知架构, 它的处理器的功能和连接都是根据其对应的脑区功能和连接来设计(图1、表1)。

每个QN-MHP处理器都能够执行过程逻辑功能, 并可以生成详细的任务动作和模拟实时行为。更具体地说, 处理器1-8代表感知子网络(处理器1-4: 视觉处理; 5-8: 听觉加工; 如大脑的背侧和腹侧系统, 图2); 处理器A-H代表认知子网络(处理器A: 视觉空间画板; B: 语音回路; C: 中央执行; D: 长时过程记忆; E: 性能监视器; F: 复杂认知功能; G: 目标启动; H: 长时陈述性记忆和空间记忆; 如右半球的后顶叶皮层, 前额叶区); 处理器V-Z和处理器21-25代表动作控制子网络(处理器V: 感觉动作集成; W: 动作程序检索; X: 反馈信息收集; Y: 动作程序装配及错误检测; Z: 向身体部位发送信息; 21-25: 身体部位: 眼睛, 嘴, 四肢)。

作者单位: 清华大学工业工程系

收稿日期: 2021-02-17

当前，QN-MHP 已经在一种通用的工程仿真软件 Promodel 中实现。

QN-MHP 有以下几个特点：

(1) QN-MHP 的建构源于脑区的神经学研究，而 EPIC 和 ACT-R 的建构来源于定性的框架并在框架中添加了一些产生式。

(2) QN-MHP 与其他模型的理论假设不同：QN-MHP 将人类认知视为一个由混合结构组成的系统，该结构同时具有并行和串行的处理特性。EPIC 将人类认知视为一个并行过程（认知模块中的任务可以被并行处理），而 ACT-R 将人类认知视为一个串行过程（认知模块中的任务需要被依次进行处理）。QN-MHP 这种不同于 ACT-R 和 EPIC 的对“排队”和“混合认知结构”的独特理解，使 QN-MHP 能够用有解析解的数学方程对人类多任务处理中的各种实验结果进行预测和建模，并且能够解释和预测其他模型遇到的难以解释的实验结果反例。

(3) QN-MHP 可以用于多任务控制中的行为和绩效的建模，而且当 QN-MHP 在模拟人的多任务并行加工时，不需要第 3 个程序来协调多个并行任务，这个协调会自然而然的发生在排队网络信息实体在等待被服务的过程中。而 ACT-R 因为缺少这个排队网络的结构，建模的研究人员必须再编程第 3 个程序来协调多个并行任务。

(4) QN-MHP 的很多建模工作是基于人的生理和神经科学研究结果的，包括：(a) QN-MHP 模拟了大脑神经递质（去甲肾上腺素等）的作用机制，对视觉-手动跟踪任务中脑电波（事件相关电位，ERP）的振幅和潜伏时进行了计算建模，并与多个实验结果一致；(b) QN-MHP 模拟了大脑动作控制区域的神经元的矢量放电分布，从这个分布预测了人在动作控制中的失误概率和失误发生的空间范围，并与多个实验结果一致。

(5) QN-MHP 对人的工作负荷进行了系统的建模工作，包括工作负荷的问卷测量的计算建模，工作负荷的脑电测量的计算建模，以及反映工作负荷的绩效建模，从操作环境、人的个体因素（比如年龄）和任务等因素综合预测人的工作负荷的变化并把人的工作负荷计算机仿真可视化。

(6) QN-MHP 能够在智能系统中预测人的行为，并且应用于事故预防和人系统设计，包括驾驶员超速预警系统、语音报警设计系统和人机界面可

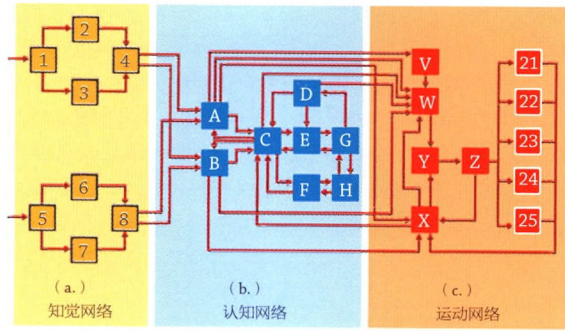


表 1

感知子网络

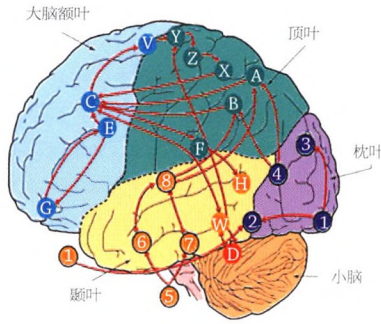
1. 基础视觉处理
2. 物体视觉识别
3. 物体位置视觉处理
4. 视觉识别与位置整合
5. 基础听觉处理
6. 听觉识别
7. 位置听觉处理
8. 听觉识别与位置整合

认知子网络

- A. 视觉空间短时记忆
- B. 语音回路短时记忆
- C. 中央执行短时记忆
- D. 长时程序性知识的记忆
- E. 人的绩效监控
- F. 复杂认知功能
- G. 目标处理
- H. 长时陈述性记忆和空间记忆

动作控制子网络

- V. 感觉动作集成
- W. 动作程序提取
- X. 动作反馈信息收集
- Y. 动作程序装配和错误检测
- Z. 向身体部位发送信息
- 21-25. 身体部位：眼睛、嘴、四肢等



用性预测系统。

(7) QN-MHP 通过基于强化学习的算法模拟人在动作学习（包括人在学习过程中的行为变化）以及脑区的神经学机制。

### 3 人的行为建模在城市人因设计中的应用

城市人因设计的应用领域很多，本文主要是按照人的主要活动空间作为划分标准，从交通、家居、工作场所和公共场所的维度介绍人的行为建模在城市人因设计中的应用。工作场所是一个较为特殊的公共环境，人们每天在工作场所的时间很长，所以单独列出加以说明。本文在此也是抛砖引玉，期望更多学界同仁能关注并加入这一研究领域。

#### 3.1 人的行为建模在城市交通中的应用

交通安全一直是研究者们关注的焦点问题。每年都会因为交通事故给国家和社会带来巨大的生命和财产损失。下文将从行人行为安全建模、汽车驾驶员行为建模两个方面进行展开。

##### 3.1.1 行人行为安全建模

随着世界范围内汽车的日益广泛使用，行人安全是一个亟待解决的问题。根据世界卫生组织发布的报告，2010 年全世界约有 270,000 名行人在交通事故中丧生，占交通事故死亡总数的 22 %<sup>[17]</sup>。

尽管交通事故可能是由于驾驶员的不安全行为引起的，但由于行人对距离和车速的判断能力差等因素而导致的行人不安全行为也受到较多的关注。

通过人的行为建模可以更好地理解行人行为。比如，在非斑马线道路上，行人以不断变化的速度和方向越过马路，导致发生较多的交通事故。我们通过计算模型来解决行人横穿马路时出现弯曲的行动轨迹的机理。在决策过程中，行人试图通过权衡感知风险（PR）和效率来最大程度地减少不适感。感知风险来自车辆和道路上的特定位置。效率则通过与目标的偏离来建模<sup>[18]</sup>。

##### 3.1.2 汽车驾驶员行为建模

驾驶员因素是交通事故当中的重要因素之一。比如，驾驶员的超速行为、工作负荷较高等。

超速行驶的预测对于降低超速行驶速度并防止与超速行驶有关的交通事故和伤害至关重要。我们开发并验证了一种智能超速预测系统（ISPS）来防止超速的发生。通过建模预测，ISPS 可以成功预测大多数（平均测试准确度超过 86 %）无意超速驾驶情况。ISPS 能够在意外发生之前至少 4 秒预测意外的速度。4 秒钟的时间间隔足以发出警告并让普通驾驶员响应<sup>[19]</sup>。



信息过载的驾驶员会大大增加车辆碰撞的概率。我们通过一种基于排队网络理论的新计算方法建模驾驶员绩效和工作负荷,以及工作负荷和绩效的年龄差异,进而实时地将驾驶员工作负荷可视化<sup>[13]</sup>。

此外,我们还通过建模的方法探讨车联网系统中人在环的无线告警信息通知模型<sup>[20]</sup>。

### 3.2 人的行为建模在家居、工作场所和其他公共场所中的应用

人因对建筑设计的影响已在照明、噪音、温度等可测量的环境参数方面有了大量的研究,已有很多业已明确的国家标准,比如《民用建筑隔声设计规范》(GB 50118-2010)。然而,还有大量的人因问题以待研究。人的日常行为常有一定规律,通过行为计算模型明确人的感知、信息处理与行为决策的相互关系,并将数据合理应用,有利于使生活场景的设计在最大程度上满足人因需求。下文将从家居、工作及其他公共场所的人因需求考虑及相关设计进行展开。

#### 3.2.1 家居场所设计建模

家居场所设计常以舒适度、便捷度为重点,旨在通过合理布局规划满足人的日常生活需求。家居场所设计包括空间设计、陈设风格设计等多方面,受到人的生理规律与思想行为的大幅影响。陈设风格设计因人的主观审美不同而个体间差异较大,难

以用统一模型加以概括,而大部分家居室内空间设计有共通之处,这得益于对人的日常行为规律,即从感知到决策的逻辑链的建模分析。

通过建立 ON-MHP 模型基于人的生理和神经进行科学研究,向此系统输入具体感知,令其执行过程逻辑功能,并生成详细的任务动作和模拟实时行为,从而数据化分析适用于绝大部分人的居家行为模式,我们可以合理规划室内空间设计。例如,常见的卧室与盥洗室配套、厨房与餐厅相连的空间设计,满足了绝大部分人规律性的使用需求,符合人的日常生活习惯,即大部分人睡眠前后利用盥洗室更为频繁,特别是长时间睡眠后,卫生间往往成为人的第一使用需求;厨房与餐厅常被连续使用,餐前餐后使用厨房符合绝大部分人的日常生活习惯,因此厨房与餐厅在多数室内设计中相连互通,便于餐前餐品的传递及餐后餐具的收理。建立行为模型能提升家居场所设计的合理性与实用性(图2)。

#### 3.2.2 工作场所设计建模

工作场所设计与家居场所相似,良好的办公环境依托于对人的行为规律的分析总结。在常见的写字楼型工作场所中,从工位的设计、办公室及会议室的布局到茶水间、盥洗室的合理规划,均与人因息息相关。通过传统 SLP 分析方法与人的行为建模相结合,以确定作业单位的布局位置,其思想类似于家居场所依据使用频率及配套关系进行合理布局规划。工厂型的工作场所同样注重车间、工位设计的合理性,流水线模式生产对工位间配合程度具有更高的要求。如在物流行业中,通过人体工程学研究对工作场所设计进行改进,企业可以较好地解决不同员工、客户的即时需求<sup>[21]</sup>。

工作场所的陈设风格及配色设计从心理、生理两方面同时影响着人的行为。依据人性化研究进行的工作场所设计常能使员工实现更优工作效果,如百度家园以设计健康、友好设计环境的方法论,成为以人为本的设计范本<sup>[22]</sup>。

合理的场所设计有助于便捷办公流程、提高员工工作效率,通过对人的行为建模将有利于提升行为绩效。

#### 3.2.3 其他公共场所设计建模

公共场所中的人因影响更为明显。车站、机场、医院、商场等人流量大的场所设计需对人的行为因素进行更多的考虑。要优化车站检票口及机场登机口的布局规划、安检口的位置排布、盥洗室的分布、候车室及候机室的分布情况,就要求设计方对人

流进行正确的预估,对来往人的行为做出合理的分析判断,从而实现合理布局。例如,在火车站及机场中,通过安检口后,旅客的第一需求常为寻找所乘车次或航班的相应检票口,因此提供车次或航班信息的显示大屏幕若安放在进站口附近,能够使进站旅客浏览信息更加便利;而如今大部分车站将显示屏放置在了车站或机场大厅正中间处,加之车站或航站楼楼体较长,容易给旅客寻找信息带来极大不便。类似于此,通过建立 ON-MHP 模型执行逻辑功能,分析人的行为模式,我们能对车站、机场等大型交通场所的设计规划提出更便捷有效的建设方案(图3)。

以医院、商场为例的大型场所中已有部分利用工业工程思想进行优化布局的研究先例。以 SLP 分析法确定作业单位的布局位置,利用建立数据模型对人的行为进行预测、实现结构的合理优化,可以解决常见的人流分布不均、窗口等待队列过长或场所拥挤等规划不合理带来的弊端。

### 4 未来展望

城市的高速发展需要人因研究提供的优化思路。其中以社区层面的群体研究与对公共交通的研究为典型代表。

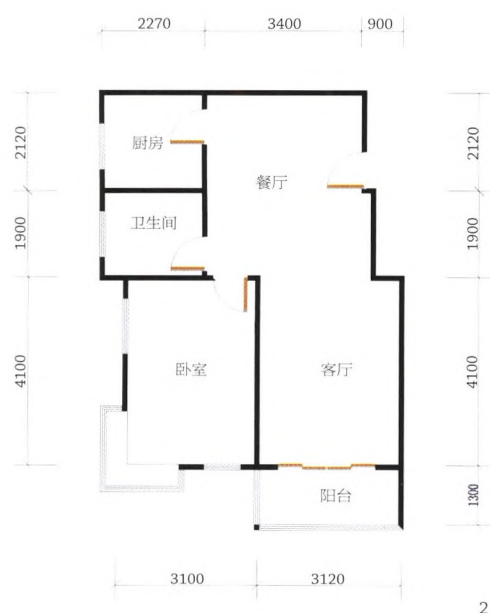
#### 4.1 在社区层面的群体研究

社区是社会有机体最基本的内容,是宏观社会的缩影。通过对社区层面的群体进行研究,建立人的行为模型,建构逻辑关系预测人的行为,并综合考虑人在群体中的行为模式,使所建立的模型适用于绝大部分人以及绝大部分群体,将有利于改善社区规划,并由点及面影响城市布局,从而提升城市居民生活质量及幸福度。

#### 4.2 对公共交通的研究

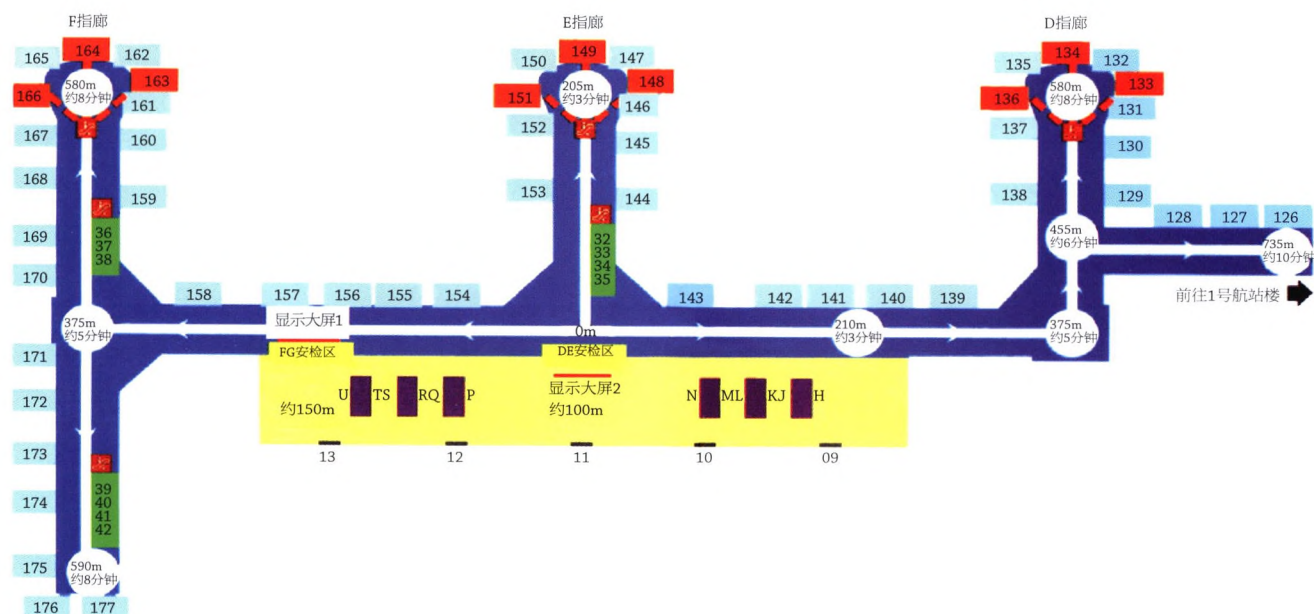
城市交通是居民生活质量的重要影响因素。通过以行人、机动车驾驶员、非机动车驾驶员,尤其是汽车驾驶员为主体进行建模研究,我们可以更好地理解不同研究主体的行为习惯,从而提供可靠方案减小道路交通事故发生率,并有效借助技术手段,通过建立车联网系统中人在环的无线报警信息通知模型、设计车载语音报警系统等方式,减少交通事故带来的生命与财产损失。

通过对城市公共交通系统的建设进行人因化分析,改善如公共汽车站、地铁站、火车站的设计模式,利用人的行为分析模型,我们能增强城市公共交通系统的完备性,提高城市居民乘坐公共交通的舒适度与便捷度。□



2 建筑人因学研究举例:家居场所的设计





### 参考文献

[1] 杨娟, 旷小芳. 认知计算模型在教育领域的构建及应用综述[J]. 当代职业教育, 2020(3):51-59.

[2] CAO S, QIN Y, JIN X, ZHAO L, SHEN M. Effect of driving experience on collision avoidance braking: an experimental investigation and computational modelling[J]. Behaviour Information Technology, 2014, 33(9):929-940.

[3] GUIDO B, YOICHI H. A Rule Extraction Study from SVM on Sentiment Analysis[J]. Big Data Cognitive Computing, 2018, 2(1):6.

[4] ANDERSON J R, BOTHELL D, BYRNE M D, et al. An Integrated Theory of the Mind[J]. Psychological Review, 2004, 111: 1036-1060.

[5] TRAFTON J G, HIATT L M, HARRISON A M, et al. ACT-R/E: an embodied cognitive architecture for human-robot interaction[J]. Journal of Human-Robot Interaction, 2013:30-55.

[6] LAIRD J E. Extending the Soar Cognitive Architecture [C]. Artificial General Intelligence.2008:224-235.

[7] LAIRD J E, NEWELL A, ROSENBLOOM P S. SOAR: an architecture for general intelligence[J]. Artificial Intelligence, 1987, 33:1-64.

[8] LATHROP S D, WINTERMUTE S, LAIRD J E. Exploring the Functional Advantages of Spatial and Visual Cognition from an Architectural Perspective[J].

Topics in Cognitive Science, 2011, 3:796-818.

[9] REED S K. Modeling visuospatial reasoning[J]. Spatial Cognition and Computation, 2019,19:1-45.

[10] KIERAS D E, MEYER D E. An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction[J]. Human-Computer Interaction, 1997, 12:391-438.

[11] MEYER D E, KIERAS D E. A computational theory of executive cognitive processes and multiple-task performance: Part 1. Basic mechanisms[J] Psychological Review, 1997, 104(1):3-65.

[12] WU C, TSIMHONI O, LIU Y. Development of an adaptive workload management system using the queueing network-model human processor (QN-MHP) [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008, 9(3):463-475.

[13] WU C, LIU Y. Queueing Network Modeling of Driver Workload and Performance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2007, 8(3):528-537.

[14] WU C, LIU Y. Queueing Network Modeling of Psychological Refractory Period (PRP)[J]. Psychological Review, 2008, 115(4):913-954.

[15] WU C, LIU Y. Queueing Network Modeling of Transcription Typing[J]. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 2008, 15(1):1-45.

[16] WU C, LIU Y, WALSH C. Queueing Network Modeling of a Real-time Psychophysiological Index of Mental Workload—P300 in Event-Related Potential (ERP)[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics (Part A), 2008, 38 (5): 1068-1083.

[17] SUN R, ZHUANG X, WU C, ZHAO G, ZHANG K. The estimation of vehicle speed and stopping distance by pedestrians crossing streets in a naturalistic traffic environment[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2015,30:97-106.

[18] ZHUANG X, WU C. Modeling Pedestrian Crossing Paths at Unmarked Roadways[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013:1-11.

[19] ZHAO G, WU C. Effectiveness and Acceptance of the Intelligent Speeding Prediction System (ISPS)[J]. Accident Analysis & Prevention, 2013, 52:19-28.

[20] ZHANG Y, WU C, WAN J. A Human-in-the-loop Wireless Warning Message Notification Model and Its Application in Connected Vehicle Systems[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems 2016,21(2):148-166.

[21] GRUCHMANN T, MIES A, NEUKIRCHEN T, et al. Tensions in sustainable warehousing: including the blue-collar perspective on automation and ergonomic workplace design[J]. Journal of Business Economics, 2020.

[22] 李秋晨. 百度家园——健康工作场所设计营造[J]. 绿色科技, 2020(05):15-16+20.

3 成都双流机场T2航站楼信息大屏与进站口位置关系图示