

【交通物流 / Transportation Logistics】

# 基于层次分析与云模型的TOD站点衔接设计评价

王艳丽, 金字宁

同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804

**摘要:**为促进轨道交通区域的公共交通引导开发(transit-oriented development, TOD)模式发展, 需要对轨道站点区域进行一体化衔接设计, 目前尚缺少全面考虑TOD特点的综合评价指标体系. 基于TOD模式特征和乘客换乘满意度, 提出TOD轨道站点与步行、常规公交及非机动车衔接设计的评价指标体系, 获取定量和定性指标的分级标准. 为获得相对客观全面的评价结果, 设计一种优于单一评价方法的层次分析和云模型结合评价方法. 以中国南京市新街口地铁站为案例进行指标与方法应用与检验, 结果显示, 该站与步行、常规公交及非机动车方式衔接等级分别为中等、较好及中等, 基本符合中心商业型站点特点.

**关键词:** 轨道交通; 公共交通导向; 衔接设计; 层次分析法; 云模型; 评价

中图分类号: U239.5 文献标志码: A doi: 10.3724/SP.J.1249.2022.02193

## Evaluation of TOD rail station connection design based on analytic hierarchy process and cloud model

WANG Yanli and JIN Yuning

Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China

**Abstract:** It is necessary to carry out an integrated connection design for the rail station area to promote the development of the transit-oriented development (TOD) mode. There is lack of an evaluation index system that comprehensively considers the characteristics of TOD. Based on the characteristics of TOD mode and passenger transfer satisfaction, we propose an evaluation index system for the design of the connections between TOD rail stations and each of the three transportation modes including pedestrians, conventional buses and non-motorized vehicles, respectively. We formulate the grading standards for quantitative and qualitative indicators through literature research and questionnaire survey, respectively. In order to obtain relatively objective and comprehensive evaluation results, we propose an evaluation method combining analytic hierarchy process (AHP) and cloud model, which is superior to single evaluation methods. Finally, Nanjing Xinjiekou rail station is selected as a case for the application of indexes and the evaluation method. The evaluation results about the connection levels of the three transportation modes are medium, good, and medium, which basically conform to the characteristics of central commercial stations.

**Key words:** rail transit; transit-oriented development; connection design; analytic hierarchy process; cloud model; evaluation

当前城市交通拥堵问题严重, 各大城市积极推广公共交通引导开发(transit-oriented development,

TOD)模式<sup>[1]</sup>, 轨道交通凭借其技术和经济特征成为TOD模式的重要依托. 国内外TOD轨道站点开

Received: 2021-03-22; Accepted: 2021-07-07; Online (CNKI): 2021-11-02

Foundation: National Natural Science Foundation of China (71804127); Shanghai Sailing Program for Young Science and Technology Talents (19YF1451300)

Corresponding author: Senior engineer WANG Yanli. E-mail: wangyanli@tongji.edu.cn

Citation: WANG Yanli, JIN Yuning. Evaluation of TOD rail station connection design based on analytic hierarchy process and cloud model [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(2): 193-200. (in Chinese)



发实例表明, 轨道交通与其他交通方式的一体化衔接, 是实现用地集约化和提供无缝衔接服务的关键. 对 TOD 站点衔接设计的有效评价, 是改善已建成站点衔接设计的前提和依据, 可为后续 TOD 站点的规划设计提供参考.

评价指标的研究大多着重于一般轨道站点的衔接, 强调其连通性和便捷性<sup>[2]</sup>, 而忽略了 TOD 模式对环境和行人友好的要求. CAO 等<sup>[3]</sup>通过表明嗜好 (stated preference, SP) 调查分析, 指出步行距离、步行环境和安全性的重要性, 体现了 TOD 模式的理念, 但没有给出具体评价指标; GALELO 等<sup>[4]</sup>通过分析阿赞布雅轨道线路的 TOD 特性, 建立一系列有效指标, 但仅有少数指标与衔接有关, 尚不全面; DING 等<sup>[5]</sup>明确考虑 TOD 模式, 将 TOD 模式和轨道站点衔接分离, 分别建立指标体系. 因此, 如何构建一套将 TOD 理念与轨道站点衔接相结合的综合评价指标体系, 是需要进一步研究的问题.

在评价方法方面, 传统综合评价方法中的模糊分析法和层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 主观性较强, 易忽略样本的随机性; 数据包络分析法及主成分分析法相对客观, 但难以处理定性指标. 每种评价方法的立足点不同, 组合评价方法可以发挥多种评价方法的优点, 获得更科学、合理的评价结果. 构建相对客观且能够处理定性指标的组合评价方法是评价 TOD 站点衔接设计的关键.

TOD 轨道站点衔接设计, 需体现 TOD 模式的特征, 并为乘客提供良好的接驳服务. 本研究以 TOD 特征要求与乘客满意度为准则, 建立 TOD 站点与主要交通方式的衔接评价指标体系. 采用层次分析法对指标赋权, 考虑到指标评判的随机性和模糊性, 选择云模型评价法进行指标评价, 并结合实际轨道站点进行验证.

## 1 TOD 站点的特征要求与评价要点

### 1.1 TOD 站点的特征与衔接要求

TOD 站点周边土地特征要求符合 TOD 模式的 3Ds (density, diversity, pedestrian-friendly design) 原则, 即站点周边土地高密度和集约化、土地功能多样且混合, 以及行人友好型设计. TOD 站点的交通衔接设计应符合以下要求: ① 换乘设施一体化集约布置, 保证换乘过程的连续性、与周边用地的互动性; ② 面向公交和慢行交通, 根据站点特征对

重要衔接方式进行有序优先引导; ③ 换乘公共空间高质量, 体现绿色生态特性; ④ 换乘设施体现社会公平, 重视无障碍换乘, 确保特殊人群换乘的便利与安全.

### 1.2 评价原则与要点

对站点衔接设计进行评价是 TOD 站点规划设计过程中的必要环节. 建立科学、客观的评价指标体系是实现合理、准确评价的基础. 不同交通方式的衔接要求和客观因素不同, 相应评价指标也不同. 总体来说, 评价指标体系应遵循科学性、全面性、切合 TOD 模式、客观与主观相结合及易实施性等原则. 本研究 TOD 轨道站点衔接设计评价要点如表 1.

表 1 TOD 轨道站点衔接设计评价要点  
Table 1 Key points of evaluation of TOD rail station connection design

评价方面	TOD 轨道站点
评价对象	重点考虑慢行交通和公交的衔接评价, 包括静态的衔接设施状况和动态的客流状况.
指标体系	涵盖面更广, 需体现 TOD 模式特征要求.
指标判定	指标的权重与分级需体现 TOD 的要求, 如生态性权重比一般站点高, 人均占用面积在满足舒适度的情况下受到集约要求的制约.
综合评判	优劣判定并非完全由模型结果决定, 需结合 TOD 轨道站点类型与衔接要求具体分析.

## 2 评价指标体系构建

由于 TOD 模式下步行、常规公交及非机动车是最主要的交通接驳方式, 因此, 本研究针对已建成站点, 重点对其与以上 3 种方式的衔接设计进行评价. 指标准则层重点考虑 TOD 模式的设计原则和接驳乘客换乘满意度. 由于 TOD 模式范围的半径为 400 ~ 800 m, 一般取半径为 500 m<sup>[6]</sup>, 故本研究选择距站点中心 500 m 作为相关指标的计算范围.

### 2.1 与步行衔接的评价指标

步行是 TOD 模式下城市轨道交通最重要的衔接方式, 从站内与站外两方面构建 TOD 站点与步行衔接设计的评价指标, 如表 2.

对部分指标说明如下:

表2 步行衔接评价指标

Table 2 Evaluation indexes for connection between TOD rail stations and pedestrian

决策层	准则层	因素层	指标性质
TOD 轨道站 点与步 行衔接 评价	便捷性 $A_1$	平均换乘距离 $A_{11}$ <sup>1)</sup>	定量
		引导标识易读程度 $A_{12}$ <sup>1)</sup>	定性
	公平性 $B_1$	无障碍换乘设施 完备性 $B_{11}$ <sup>1)</sup>	定量
		通道人均占用面积 $C_{11}$ <sup>1)</sup>	定量
	舒适性 $C_1$	步行设施人均占用面积 $C_{12}$	定量
		步行连续性 $C_{13}$	定性
	安全性 $D_1$	交叉口过街设施覆盖率 $D_{11}$	定量
		可达性 $E_1$	步行道覆盖率 $E_{11}$
			绕路系数 $E_{12}$
	生态性 $F_1$	绿化 $F_{11}$	定性、定量

<sup>1)</sup>与站内步行过程有关的指标

1) 平均换乘距离 $A_{11}$ 为轨道交通下车点到各地面出入口的平均最短步行距离, 用以衡量步行衔接便捷性, 该指标易获取。

2) 无障碍换乘设施完备性 $B_{11}$ 一定程度上反映了衔接过程中对特殊人群的公平性, 对应TOD模式所倡导的“以人为本”理念。无障碍衔接设施包括无障碍直升电梯、盲道、坡道、升降平台及爬楼梯, 每种设施承担不同功能。

3) 步行设施人均占用面积 $C_{12}$ 为高峰时段紧靠站点的步行设施(如集散广场、路边步行道及地下通道等)人均占用面积。该指标与步行舒适度成正比, 但在TOD模式强调集约化的前提下, 应具有合理的上限值。

4) 步行连续性 $C_{13}$ 包括步行设施连续和步行环境景观连续。前者指步行设施之间紧密连接和协调配合, 使步行设施的功能连续; 后者从步行者的视觉感受角度出发, 实现步行环境中绿地及建筑等各类城市设施符合美学规律。

5) 交叉口过街设施覆盖率 $D_{11}$ 为站点周边的500 m范围内, 在繁忙交叉口(一般指主干路与次干路交叉口)有地下通道、天桥等过街设施的比例。繁忙且无过街设施的交叉路口必然会产生步行交通流线与车流的交叉干扰, 威胁行人安全。

6) 步行道覆盖率 $E_{11}$ 为距站点中心500 m范围内步行道长度与整体道路长度之比, 反映步行环境的可达性, 计算为

$$E_{11} = \frac{l_1}{l} \tag{1}$$

其中,  $l_1$ 与 $l$ 分别为步行道与整体道路长度。

7) 绕路系数 $E_{12}$ 为反映步行环境可达性的关键指标。本研究采用Hess法计算TOD站点500 m范围内的绕路系数<sup>[7]</sup>为

$$E_{12} = \frac{\sum_{i=1}^k l_i}{kR} \tag{2}$$

其中,  $k$ 为划分的象限数;  $R$ 为研究范围半径;  $l_i$ 为圆心至各象限交点的最短路径距离。

### 2.2 与常规公交衔接的评价指标

常规公交的衔接评价指标需兼顾步行与公交两方面, 如表3。其中,  $B_{21}$ 同 $B_{11}$ ;  $C_{21}$ 同 $C_{11}$ ;  $C_{22}$ 同 $C_{12}$ 。

表3 常规公交衔接评价指标

Table 3 Evaluation indexes for connection between TOD rail stations and conventional buses

决策层	准则层	因素层	指标性质
TOD轨 道站 点与常 规公 交衔 接评 价	便捷性 $A_2$	平均换乘距离 $A_{21}$	定量
		引导标识易读程度 $A_{22}$ <sup>1)</sup>	定性
	公平性 $B_2$	公交专用道覆盖率 $A_{23}$	定量
		无障碍换乘设施完备性 $B_{21}$ <sup>1)</sup>	定量
	舒适性 $C_2$	通道人均占用面积 $C_{21}$ <sup>1)</sup>	定量
		步行设施人均占用面积 $C_{22}$	定量
	安全性 $D_2$	公交站台拥挤度 $C_{23}$	定性、定量
		平均冲突点数 $D_{21}$	定量
	可达性 $E_2$	公交站点数 $E_{21}$	定量
		公交线路数 $E_{22}$	定量
生态性 $F_2$	绿化 $F_{21}$	定性、定量	
适配性 $G_2$	运能匹配度 $G_{21}$	定量	

<sup>1)</sup>与站内步行过程有关的指标

对部分指标说明如下:

1) 公交专用道覆盖率 $A_{23}$ 指在距站点500 m范围内公交专用道长度与公交线路长度的比值。公交专用道能减少因道路拥堵产生的时间损失, 高覆盖率可以提升常规公交对接驳客流的吸引力, 符合TOD模式下鼓励公共交通的特点。

2) 平均冲突点数 $D_{21}$ 为乘客从下车到某一公交站点的步行过程中, 在站外与其他交通流线产生交叉干扰的平均地点数量, 即通过的平均无过街设施路口个数。

3) 公交线路数  $E_{22}$  指紧邻轨道站点的公交线路数量, 重复线路只算 1 次.

4) 运能匹配度  $G_{21}$  为轨道交通与常规公交的运输能力协调指数. 选取高峰时段计算 (一般情况下, 轨道交通与常规公交的高峰时间段一致), 并假设高峰期内接驳客流量恒定、发车频率恒定、公交车额定人数一定, 以及不考虑其他方式换乘公交车.  $G_{21}$  计算<sup>[8]</sup>为

$$G_{21} = \frac{Q}{C} = \frac{Q_z \beta f}{t q (1 - \alpha) n} \quad (3)$$

其中,  $Q$  为时段内公交接驳量;  $C$  为时段内常规公交运能;  $t$  为选用高峰时段的时长 (单位: min);  $q$  为每辆公交车的额定人数;  $\alpha$  为平均公交满载率;  $n$  为附近公交站点数量;  $Q_z$  为时段内出站轨道交通流量;  $\beta$  为公交分担率;  $f$  为公交发车频率. 由式(3)可见,  $G_{21} \leq 1$  为公交运能满足公交接驳量;  $G_{21} > 1$  为公交运能不满足公交接驳量.

### 2.3 与非机动车衔接的评价指标

非机动车包括自行车与电瓶车等交通方式. 建立 TOD 轨道站点与非机动车衔接设计的评价指标, 如表 4. 其中,  $B_{31}$  同  $B_{11}$ ;  $C_{31}$  同  $C_{11}$ . 非机动车停车点占比  $A_{32}$  为距离站点出入口非机动车的停车点数与出入口数量之比.

表 4 非机动车衔接评价指标

Table 4 Evaluation indexes for connection between TOD rail stations and non-motor vehicles

决策层	准则层	因素层	指标性质
TOD 轨道站点与非机动车衔接评价	便捷性 $A_3$	平均换乘距离 $A_{31}$	定量
		非机动车停车点占比 $A_{32}$	定量
	公平性 $B_3$	无障碍换乘设施连续性 $B_{31}$ <sup>1)</sup>	定量
		通道人均占用面积 $C_{31}$ <sup>1)</sup>	定量
	舒适性 $C_3$	平均冲突点数 $D_{31}$	定量
	安全性 $D_3$	非机动车道覆盖率 $E_{31}$	定量
	可达性 $E_3$	绿化 $F_{31}$	定性、定量
	生态性 $F_3$	共享非机动车易得程度 $G_{31}$	定性
	适配性 $G_3$		

<sup>1)</sup>为与站内步行过程有关的指标

### 2.4 指标数据获取

定量指标可通过实地调研或资料调研的方式获得; 定性指标可通过问卷调查的方式获得. 其中, 绿化指标既可以通过问卷调查获取接驳乘客对衔接过程中绿化情况的评判, 也可以通过资料调研获得站点绿化率数据; 公交站台拥挤度指标既可以通过

问卷调查获得乘客的拥挤感受, 也可以通过实地调研或资料调研获得站台的人均面积数据进行指标评判. 本研究将绿化和公交站台拥挤度作为定性指标, 通过问卷调查方式获取指标数据.

## 3 评价方法

### 3.1 评价方法的选取

评价方法的选取应综合考虑评价对象、指标性质、数据特征及时间等因素, 结合具体情况选取具有信度和效度的评价方法. 在对 TOD 站点衔接设计的评价中, 多数指标为定性属性, 依赖主观判断, 且对指标数据所反映的设计好坏进行评定也存在一定随机性和模糊性. 层次分析法适用于存在不确定性和主观信息的评价; 云模型评价法适用于指标边界模糊、不易量化的情况, 能够避免评价的强主观性, 且结果以期望、熵及超熵 3 个数字特征或散点分布的形式展现, 相比单一数值更可信. 本研究采用 AHP-云模型的组合评价方法, 首先通过 AHP 确定指标权重, 再结合云模型评价法进行联合评价, 能较客观且全面科学地呈现评价结果.

### 3.2 评价流程

#### 3.2.1 AHP-云模型评价步骤

基于 AHP-云模型的衔接评价流程如图 1. 其中, 云模型的建立为关键步骤.

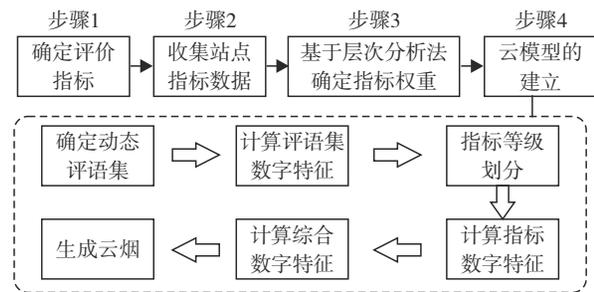


图 1 基于 AHP-云模型的衔接评价流程

Fig. 1 Process of connection evaluation based on AHP-cloud model

#### 3.2.2 云模型的建立

1) 确定动态评语集为使云图更清晰直观, 本研究采用十分制进行指标等级划分, 具体等级为: 差 = [0, 4); 较差 = [4, 6); 中等 = [6, 7); 较好 = [7, 9); 好 = [9, 10]. 评价值的论域  $U = [0, 10]$ .

2) 通过逆向云发生器计算评语集等级数字特

征根据评语集双边约束  $[C_{\min}, C_{\max}]$ , 采用式(4)至式(6)近似计算评语集数字特征. 其中,  $i$ 可根据评语集模糊程度进行调节.

$$E_x = \frac{C_{\min} + C_{\max}}{2} \quad (4)$$

$$E_n = \frac{C_{\max} + C_{\min}}{6} \quad (5)$$

$$H_e = i \quad (6)$$

其中,  $E_x$ ,  $E_n$ 及 $H_e$ 分别为期望、熵及超熵.  $E_x$ 最能代表指标结果的特征, 是论域空间的中间值;  $E_n$ 表示指标的离散程度和取值范围, 云模型中的云滴(散点)主要分布在  $[E_x - 3E_n, E_x + 3E_n]$ ;  $H_e$ 体现 $E_n$ 的不确定度, 直接表现为云的厚度. 评语集数字

特征计算结果如表5.

表5 评价等级数字特征

Table 5 Numerical characteristics of evaluation grades

等级	云模型
差	(2.00, 0.67, 0.10)
较差	(5.00, 0.33, 0.10)
中等	(6.75, 0.25, 0.10)
较好	(8.25, 0.25, 0.10)
好	(9.50, 0.17, 0.10)

3) 指标等级划分8个定性指标由接驳乘客选择其等级; 21个定量指标则通过总结TOD轨道站点衔接设计的参数值以及文献<sup>[6,9-11]</sup>, 确定各指标的等级建议标准, 如表6.

表6 定量指标等级标准

Table 6 Standard of quantitative index grades

指标	差	较差	中等	较好	好
$A_{11}$	> 400	(300, 400]	(200, 300]	(100, 200]	[0, 100]
$A_{21}$	> 200	(150, 200]	(100, 150]	(50, 100]	[0, 50]
$A_{31}$	> 100	(70, 100]	(50, 70]	(20, 50]	[20, 0]
$A_{23}, A_{32}, D_{11}, E_{11}, E_{31}$	[0, 0.40]	(0.40, 0.60]	(0.60, 0.75]	(0.75, 0.90]	(0.90, 1.00]
$B_{11}, B_{21}, B_{31}$	0	1	2, 3	4	5
$C_{11}, C_{21}, C_{31}$	[0, 1.0]	(1.0, 1.5]	(1.5, 2.0]	(2.5, 3.0]	> 3.0
$C_{12}$	[0, 1.0] $\cup$ (8.5, $\infty$ )	(1.0, 1.5] $\cup$ (7.0, 8.5]	(1.5, 2.0] $\cup$ (5.5, 7.0]	(2.5, 3.0] $\cup$ (4.0, 5.5]	(3.0, 4.0]
$D_{21}, D_{31}$	> 1.5	(1.0, 1.5]	(0.5, 1.0]	(0, 0.5]	0
$E_{12}$	> 1.65	(1.50, 1.65]	(1.35, 1.50]	[1.20, 1.35]	< 1.20
$E_{21}$	0; 1	2; 3	4; 5	6; 7	$\geq 8$
$E_{22}$	$\leq 6$	(6, 12]	(12, 18]	(18, 24]	> 24
$G_{21}$	> 0.9	(0.8, 0.9]	(0.7, 0.8]	(0.6, 0.7]	[0, 0.6]

4) 计算指标数字特征定性指标根据问卷打分结果直接计算数字特征; 定量指标根据表6确定其等级后得到数字特征.

5) 计算综合数字特征综合云有多种算子, 考虑到权重影响, 宜采用加权平均算子计算综合数字特征( $E_x, E_n, H_e$ )<sup>[12]</sup>, 公式为

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^m E_{xi} \omega_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i} \quad (7)$$

$$E_n = \frac{\sum_{i=1}^m E_{ni} \omega_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i} \quad (8)$$

$$H_e = \frac{\sum_{i=1}^m E_{ei} \omega_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i} \quad (9)$$

其中,  $m$ 为指标个数;  $\omega_i$ 为指标权重.

6) 通过正向云发生器生成云图为使 $E_x$ 的误差不大于设定的误差值 $\Delta$ , 云滴数应 $\geq 9S^2/\Delta^2$  ( $S^2$ 为方差)<sup>[12]</sup>. 根据综合数字特征生成评价结果的云图, 获得评价结果.

## 4 南京新街口站衔接设计评价

### 4.1 TOD轨道站点案例选取及数据来源

本研究选取中国南京市新街口地铁站作为分析

示例. 该站点为 TOD 站点, 其 TOD 综合指数在《2020 中国城轨 TOD 指数成果报告》中排名第 1<sup>[13]</sup>. 站点位于玄武区(南京市中心区域), 是南京地铁 1 号线与 2 号线的换乘站, 站点规模大, 共有 20 个出口(图 2). 站点 500 m 范围以商业服务设施用地为主, 约占 51.23%<sup>[14]</sup>.

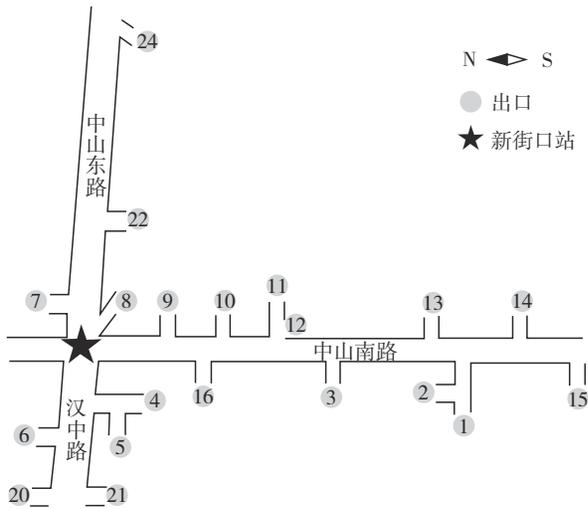


图 2 南京新街口站出入口分布  
Fig. 2 Distribution of entrances and exits of Nanjing Xinjiekou rail station

通过问卷调查获得新街口站接驳乘客对定性指标等级的判定. 问卷设计见表 7, 调研时间为 2020-04-26(工作日), 地点为南京新街口地铁站, 问卷调查时间为 06:30—09:00(含早高峰时段), 共获得有效问卷 142 份. 乘客年龄多数在 18~40 岁; 乘客出行目的以工作和购物为主, 符合新街口站点周边主体用地特征. 实地调研获得的定量指标数据用以确定所属等级及其对应的数字特征. 与客流大小有关的定量指标数据, 均在问卷调查时段进行统计获得.

表 7 问卷设计详情

Table 7 Questionnaire design details

	内容要素	问题数量	题型
第 1 部分	收入、年龄等基本信息	5	单选题
第 2 部分	对接驳因素的重视程度	1	量表题
第 3 部分	3 种方式定性指标评判	10	等级题

#### 4.2 评价过程

首先, 采用 AHP 计算准则层的权重系数. 考虑到 TOD 模式的特征要求, 参考乘客对各准则重要程度的打分结果(如表 8, 满分为 5 分), 以便捷

性和可达性为主, 保证舒适性和安全性, 重视公平性和生态性, 确定判断矩阵标度, 重要程度大致关系为: 便捷性≈可达性>适配性>安全性>舒适性>公平性≈生态性. 以步行衔接为例, 计算指标权重结果如表 9. 进一步采取云模型评价法, 使结果更具说服力.

表 8 接驳乘客对各因素重要程度打分情况

Table 8 The scores of passengers on the importance of each factor

因素	分数
舒适	3.16
费用	3.16
时间	3.71
绿化	2.74
安全	3.53

表 9 与步行衔接评价体系因素权重结果

Table 9 The factor weight of the evaluation system for connection between TOD rail stations and pedestrian

准则层	权重	因素层	权重
$A_1$	0.267	$A_{11}$	0.160
		$A_{12}$	0.107
$B_1$	0.081	$B_{11}$	0.081
		$C_{11}$	0.034
		$C_{12}$	0.034
$C_1$	0.135	$C_{13}$	0.068
		$D_1$	0.168
$D_1$	0.168	$D_{11}$	0.168
		$E_1$	0.267
$E_1$	0.267	$E_{11}$	0.134
		$E_{12}$	0.134
$F_1$	0.081	$F_{11}$	0.081

第 2 步根据调研获得数据, 计算 3 种衔接方式指标数字特征. 与步行衔接的结果如表 10(其余接驳方式省略).

第 3 步将数字特征转化为云滴. 为使误差小于 0.01, 本研究取 2 000 云滴, 得到 3 种衔接方式的云图, 如图 3.

#### 4.3 评价结果分析

新街口站衔接设计评价结果为[步行, 常规公交, 非机动车] = [(7.40, 0.24, 0.10), (7.86, 0.25, 0.10), (6.89, 0.27, 0.10)]. 结合图 3 可见, 比较 3 种交通方式的衔接设计评价结果, 常规公交的衔接设计得分最高, 云滴在 7.86 聚集, 表明分数为 7.86 的概率最大, 属于“较好”, 取值为 [7.11, 8.61], 离 7.86 越远云滴越分散, 云的厚度也逐渐增大, 表明误差也逐渐增大; 步行衔接设

表10 与步行衔接设计云评价结果

Table 10 Evaluation results of design to connection between TOD rail stations and pedestrian based on cloud model

决策层	指标	数字特征
与步行衔接的数字特征 (7.40, 0.24, 0.10)	$A_{11}$	(5.00, 0.33, 0.10)
	$A_{12}$	(8.31, 0.22, 0.10)
	$B_{11}$	(6.75, 0.25, 0.10)
	$C_{11}$	(6.75, 0.25, 0.10)
	$C_{12}$	(9.50, 0.17, 0.10)
	$C_{13}$	(8.25, 0.23, 0.10)
	$D_{11}$	(5.00, 0.33, 0.10)
	$E_{11}$	(9.50, 0.17, 0.10)
	$E_{12}$	(9.50, 0.17, 0.10)
	$F_{11}$	(8.46, 0.23, 0.10)

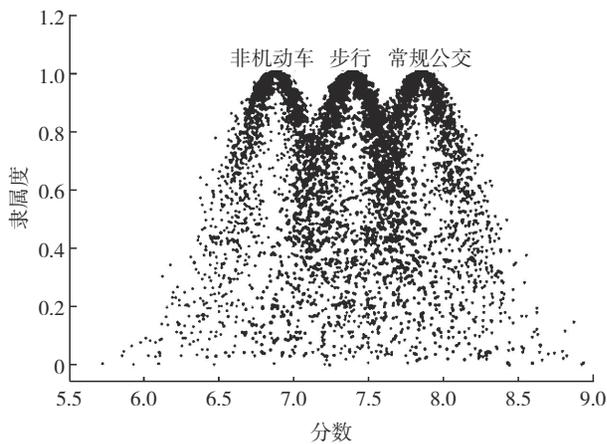


图3 三种模式的评价云图

Fig. 3 Clouds of the evaluation results of three modes

计的分数集中于7.40分, 主要落在[6.68, 8.12], 属于“中等”, 很接近“较好”; 非机动车衔接设计的分最低, 期望为6.89, 属于“中等”, 分数主要落在[6.08, 7.70].

新街口地铁站属于中心商业型TOD站点, 步行作为TOD模式下最重要的接驳方式得分却低于常规公交接驳, 是因为新街口站作为大型地铁站, 在地下形成庞大的活动空间, 使得从下车到地面出入口的步行距离偏长. 但站点周边的步行道和绿化铺设建设较好, 行人满意程度高.

常规公交也是新街口站重要的衔接方式, 其衔接设计得分高, 满足该类型站点的功能定位要求. 新街口站出站均设有公交站点提示标识, 500 m范围内公交站点和线路数量多, 站台宽敞, 但受限于道路宽度小和小汽车流量较大等原因, 公交专用道

设置较少.

非机动车衔接设计的得分略低, 主要原因是新街口站点出入口较多, 部分出入口设于商业建筑内部, 同时由于商业型TOD站点非机动车的衔接需求相对较少, 多数出入口附近未设置非机动车停车点, 使得非机动车换乘整体情况有所欠缺.

总体而言, 所得评价结果符合中心商业型TOD轨道站点的特征, 步行、常规公交和非机动车3种衔接方式的各指标得分和综合得分符合新街口站的实际情况, 模型有效.

#### 4.4 衔接改进建议

步行换乘方主要存在换乘距离过长、高峰期繁忙出入口(如20号口)拥挤的问题. 对于前者, 由于缩短步行换乘距离的难度较大, 因此, 可通过增加换乘过程中的舒适度弥补, 如进一步促进地下商业的发展, 满足部分乘客的购物需求, 或对通道进行装饰增加美观度, 提升乘客在较长步行过程中的心理感受; 对于后者, 可通过增加通道数量进行分流以缓解拥挤.

常规公交的换乘突出问题是没有公交专用道, 考虑到道路扩建的困难, 可设置临时公交专用道, 但具体实施需要进行全面分析.

停车场少、停车秩序乱是非机动接驳的主要问题. 对此可以重新规划停车点位置, 防止停车点分布集中; 采用停车点散而规模小的策略, 缓解大量非机动车无秩序停放造成的拥挤.

## 结 语

本研究兼顾TOD模式特征和乘客满意度, 提出TOD轨道站点与步行、常规公交及非机动车3种主要衔接方式的衔接设计评价体系, 设计层次分析和云模型组合的评价方法, 并以评价云的形式量化定性指标, 以期望、熵及超熵的形式呈现评价结果. 以南京新街口地铁站为案例评价其衔接设计, 结果表明, 新街口地铁站与步行、常规公交及非机动车衔接设计的评价结果分别为[(7.40, 0.24, 0.10), (7.86, 0.25, 0.10), (6.89, 0.27, 0.10)], 期望所对应的等级分别为“中等”、“较好”和“中等”. 结合站点类型认为评价结果总体符合中心商业型TOD轨道站点的功能定位.

由于其他评价方法还需要获取更多数据, 所以并未将本研究评价结果与其他评价方法进行对比,

仅说明了本方法相比单一层次分析或云模型方法的优势, 后续可结合其他案例进行深入研究.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (71804127); 上海市青年科技英才扬帆计划资助项目 (19YF1451300)

**作者简介:** 王艳丽 (1985—), 同济大学高级工程师、博士. 研究方向: 交通规划与管理. E-mail: wangyanli@tongji.edu.cn

**引文:** 王艳丽, 金宇宇. 基于层次分析与云模型的 TOD 站点衔接设计评价[J]. 深圳大学学报理工版, 2022, 39(2): 193-200.

### 参考文献 / References:

- [ 1 ] CALTHORPE P. The next American metropolis: ecology, community, and the American dream [M]. New York: Princeton Architectural Press, 1993.
- [ 2 ] ÖZGÜR-CEVHER Ö, ALTINTASI O, TUYDES-YAMAN H. Evaluating the relation between station area design parameters and transit usage for urban rail systems in Ankara, Turkey [J]. International Journal of Civil Engineering, 2020, 18(4): 951-966.
- [ 3 ] CAO J, DUNCAN M. Associations among distance, quality, and safety when walking from a park-and-ride facility to the transit station in the Twin Cities [J]. Journal of Planning Education and Research, 2019, 39(4): 496-507.
- [ 4 ] GALELO A, RIBEIRO A, MARTINEZ L. Measuring and evaluating the impacts of TOD measures-searching for evidence of TOD characteristics in Azambuja Train Line [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2014, 111(1): 899-908.
- [ 5 ] DING Chuan, WANG Yaowu, XIE Binglei, et al. Evaluation index system on relationship between urban mass rail transit and its surrounding land use based on TOD mode [J]. Advanced Engineering Forum, 2012, 5(1): 123-127.
- [ 6 ] NIU Shaofei, HU A, SHEN Zhongwei, et al. Study on land use characteristics of rail transit TOD sites in new towns-taking Singapore as an example [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2019, 18(1): 16-27.
- [ 7 ] HESS P. Measures of connectivity [J]. Places, 1997, 11(2): 58-65.
- [ 8 ] 樊龙飞. 城市轨道交通与其它交通方式的衔接及评价研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.  
FAN Longfei. Research on urban rail transit and other traffic integration of cohesion and evaluation [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016. (in Chinese)
- [ 9 ] 广州市规划和自然资源局. 轨道交通衔接设施规划标准 DB 4401/T 97—2020[S]. 广州: 广州市市场监督管理局, 2020.  
Guangzhou Municipal Planning and Natural Resources Bureau. Standards for rail transit interchange facilities planning in Guangzhou DB4401/T 97—2020 [S]. Guangzhou: Guangzhou Market Supervision and Administration Bureau, 2020. (in Chinese)
- [ 10 ] 南海超, 胡路, 王文谨. 地铁车站客流服务水平与通道宽度关系的探索[J]. 铁道勘察, 2009, 35(2): 109-113.  
NAN Haichao, HU Lu, WANG Wenjin. Exploration for relationship between service level of passenger flowing volume and passage width at metro station [J]. Railway Investigation and Surveying, 2009, 35(2): 109-113. (in Chinese)
- [ 11 ] 陈泳, 晞晓阳, 高媛媛, 等. 轨道交通站地区宜步行环境评价因素探析[J]. 规划师, 2015, 31(9): 83-90.  
CHEN Yong, XI Xiaoyang, GAO Yuanyuan, et al. An analysis of walkable environmental factors of rail transit terminals [J]. Planners, 2015, 31(9): 83-90. (in Chinese)
- [ 12 ] 李林波, 郭晓凡, 傅佳楠, 等. 基于云模型的城市轨道交通乘客满意度评价[J]. 同济大学学报自然科学版, 2019, 47(3): 82-89.  
LI Linbo, GUO Xiaofan, FU Jianan, et al. Evaluation approach of passenger satisfaction for urban rail transit based on cloud model [J]. Journal of Tongji University Natural Science, 2019, 47(3): 82-89. (in Chinese)
- [ 13 ] 中国城市轨道交通协会, 西南交通大学, 中指研究院. 2020中国城轨TOD指数成果报告[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2020.  
China Association of Metros, Southwest Jiaotong University, China Index Academy. 2020 China urban rail TOD index report [R]. Beijing: China Association of Metros, 2020. (in Chinese)
- [ 14 ] 巫丽娟, 孙世界. 南京新街口地铁站地区的发展初探[C]//中国城市规划年会论文集. 南京: 中国城市规划学会, 2011: 6128-6139.  
WU Lijuan, SUN Shijie. Development of Xinjiekou station area in Nanjing [C]// Proceedings of the Annual National Planning Conference. Nanjing: Urban Planning Society of China, 2011: 6128-6139. (in Chinese)

【中文责编: 方 圆; 英文责编: 淡 紫】