

步行和自行车交通系统评价指标体系

滕爱兵¹, 韩竹斌¹, 李旭宏², 费锦凤¹, 安明娟¹

(1.南京格瑞林交通规划设计有限公司, 江苏 南京 210029; 2.东南大学交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 中国对步行和自行车交通系统的研究主要集中在规划策略及规划方法层面, 对系统评价缺乏标准。首先对步行和自行车出行进行需求分析, 提出步行和自行车交通系统安全性、平等性、便捷性和心情舒畅需求。在对系统组成进行分析的基础上, 以交叉分析法提取初选指标体系, 并逐个检验优化, 最终构建包括10个设施输入指标和6个运行输出指标的评价指标体系。对各个指标进行分析研究, 给出明确定义并确定其计算模型。以江苏省徐州市贾汪区为例, 选取6个区域作为评价单元进行实证分析, 验证了评价方法的有效性。

关键词: 交通规划; 步行交通; 自行车交通; 评价指标体系

Evaluation System for Pedestrian and Bicycle Transportation

Teng Aibing¹, Han Zhubin¹, Li Xuhong², Fei Jinfeng¹, An Mingjuan¹

(1.Nanjing Green Transport Planning Co. Ltd., Nanjing Jiangsu 210029, China; 2.College of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: Existing studies on pedestrian and bicycle transportation in China focus mainly on planning strategies and methods and little on comprehensive evaluation system. Through analyzing pedestrian and bicycle travel demand, this paper discusses the pedestrian and cycling travel requirements for safety, equity, convenience and comfortableness. Based on the system analysis, the paper proposes a primary index system with cross-analysis method. An improved evaluation system including 10 facility indices and 6 operation indices is obtained through test and optimization. The paper presents the functionalities and computational models of each index respectively. Case studies conducted with 6 zones in Jiawang district in Xuzhou, Jiangsu are presented to demonstrate this methodology applicability.

Keywords: transportation planning; pedestrian transportation; bicycle transportation; evaluation system

收稿日期: 2015-01-07

作者简介: 滕爱兵(1983—), 男, 江苏淮安人, 硕士, 工程师, 副总工程师, 主要研究方向: 城市综合交通、轨道交通、公共交通。E-mail: 464615206@qq.com

0 引言

步行和自行车交通是城市交通系统的重要组成部分, 普遍存在于中短距离出行以及中长距离出行的首末端。然而, 随着国民经济水平不断提高, 私人小汽车拥有量逐年上升, 步行和自行车交通空间被蚕食, 出行环境恶化。此外, 以往的交通规划车本位思想严重, 对步行和自行车交通系统不够重视, 步行和自行车出行者的出行权益得不到保障。

近年来, 中国许多城市陆续开展了步行、自行车交通系统规划, 由此促进了步行和自行车交通系统的理论研究^[1-3]。但是, 这些研究主要集中在系统规划策略及规划方法

层面, 缺乏一套针对步行和自行车交通系统的评价标准。

1 步行和自行车出行需求分析

从步行和自行车出行者的角度可将需求分为四个层次: 安全性需求、平等性需求、便捷性需求和心情舒畅需求。

1) 安全性需求。

步行和自行车出行者在城市交通系统中处于交通安全弱势地位, 在交通事故中容易受到伤害。完善的步行和自行车交通系统不仅要满足设施技术层面的安全性需求, 还要考虑出行者心理层面的安全性需求, 例如需

要合理引导机非分离、提供足够的心理安全空间等。

2) 平等性需求。

主要指步行和自行车交通系统与机动车交通系统之间的平等性需求。目前,大多数交通规划都倾向于机动车交通规划,将步行和自行车交通系统规划作为附属结构,从而失去了步行和自行车出行者与其他交通参与者之间的平等性。

3) 便捷性需求。

指步行和自行车出行者可以在已有的条件下顺利或者无阻碍地完成其活动或者到达目的地的需求。具体包含五个方面^[4]:①空间辨识性,便于明确确定自身位置;②路线便捷性,绕行距离、非直线系数均较小;③换乘便捷性,与其他交通方式(如公共交通等)换乘方便;④畅通性,没有不必要的障碍物占用出行空间的现象;⑤连续性,出行空间连成一体,可方便地选择出行路线等。

4) 心情舒畅需求。

城市居民选择步行和自行车出行的路线一般比较固定,同时,步行和自行车速度较低,出行者有富余的时间和精力欣赏道路周边景观,因而要求步行和自行车交通系统能提供优美的路旁景观。

另外,该需求也对景区道路的环境美化提出了更高的要求。城市的休闲道、滨水道、景观道等都是市民休闲旅游的场所,这些场所需要营造良好的环境以满足行人和骑车者休闲健身和旅游的双重需求,使出行者更加舒适惬意。

2 评价指标体系构建

本文通过指标初选、指标体系优化的流程构建评价指标体系。

2.1 指标初选

指标初选思路可归结为“一个系统、两个角度、四条原则、六个模块”,一个系统指步行和自行车交通系统,两个角度指系统的输入(设施水平)和输出(运行水平);四条原则指在保证评价系统功能完善和体现用户感知的前提下,综合考虑安全性、连续性、方便性和舒适性;六个模块指从功能角度划分的6个子模块,包括步行、自行车交通网络,步行、自行车交通空间,步行、自行车交通环境,自行车停车设施,与公共交通的

衔接,与机动化交通的协调(见表1)。

2.2 指标体系优化

在初选指标体系基础上,考虑独立性、可操作性等原则,经过单指标测试和整体测试,对指标体系进行科学优化。单指标测试是分析每个指标的重要性、正确性、可行性,整体测试是分析初选指标体系的完备性和必要性,以此建立步行和自行车交通系统评价指标体系(见表2)。

3 评价指标体系量化

3.1 设施水平指标

1) 步行和自行车道路密度。

步行和自行车道路密度越高说明步行和自行车道路网络越完善,可达性高,居民出行方便。计算公式为

$$y_{11} = \frac{L_1 + L_2}{S}, \quad (1)$$

式中: L_1 为步行道长度/km; L_2 为自行车道长度/km; S 为区域面积/km²。

2) 步行和自行车网络连通度。

步行和自行车网络连通度为规划区域内各节点依靠步行和自行车道路相互连通的强度。网络连通度越高说明路网越完善。计算公式为

$$y_{12} = \frac{L/\epsilon}{nH} = \frac{L/\epsilon}{\sqrt{nA}}, \quad (2)$$

式中: L 为规划区域内步行和自行车道路的总里程/km; ϵ 为非直线系数; n 为规划区域内应连通的节点数; H 为相邻两节点间的平均空间直线距离/km; A 为规划区域面积/km²。

3) 过街设施间距。

过街设施包括交叉口平面过街设施、路段平面过街设施和立体过街设施。其中,立体过街设施能彻底分离步行、自行车与机动交通,避免相互干扰。因而,本文主要考虑平面过街设施。在实际应用中,该指标指研究区域内过街设施间距平均值。

4) 步行道有效宽度。

步行道有效宽度指可供行人通行利用的道路宽度。步行道有效宽度不仅与步行道设计宽度有关,还与道路隔离类型有关。计算公式为

$$y_{14} = D_p \times \alpha_p, \quad (3)$$

式中: D_p 为步行道设计宽度/m; α_p 为入非

隔离修正系数；当人行道与非机动车道不共板或设有分隔带时，自行车对行人几乎没有影响，取 $\alpha_p=1$ ；当共板时，取 $\alpha_p=0.9$ 。

5) 自行车道有效宽度。

$$y_{15} = D_b \gamma \alpha_b, \quad (4)$$

式中： D_b 为自行车道设计宽度/m； γ 为机非隔离修正系数； α_b 为人非隔离修正系数。 γ 与机非隔离形式有关，当机动车道与非机动车道之间有物理隔离时，机动车对非机动车几乎没有影响，取 $\gamma=1$ ；当机动车道与非机动车道之间无物理隔离时，非机动车出行者会主动远离机动车道，降低非机动车道利用率，取 $\gamma=0.9$ 。 α_b 在人非不共板时为 1，人非共板时为 0.9。

6) 人行道和自行车道被占用比例。

人行道和自行车道是行人和骑车者应有的出行空间，基于安全性和连续性的原则，其出行空间理应得到保障。道路被占用比例越小，则出行越顺畅。计算公式为

$$y_{16} = 0.5 \left(\frac{L'_1}{L_1} + \frac{L'_2}{L_2} \right), \quad (5)$$

式中： L'_1 为步行道被占用长度/km； L_1 为步行道总长度/km； L'_2 为自行车道被占用长度/km； L_2 为自行车道总长度/km。

7) 过街设施合理性。

过街设施是否合理需要考虑三方面内容：①道路的几何形式，如相交道路车道数、道路宽度等，这些将影响行人的过街距

表1 初选评价指标体系

Tab.1 The primary evaluation index system

所属子模块	指标名称	系统功能完善	安全性	连续性	方便性	舒适性	用户感知
步行、自行车 交通网络	步行和自行车道路密度/(km·km ²)	√					
	步行和自行车网络连通度	√		√			
	步行和自行车道路平均间距/m	√		√	√		
	非直线系数				√		
	过街设施间距/m			√	√		
设施 水平	步行道有效宽度/m		√				
	自行车道有效宽度/m		√				
	隔离类型		√				
	过街设施合理性		√		√	√	
	无障碍设施合理性		√	√	√		
步行、自行车 交通环境	步行和自行车道被占用比例/%		√				
	休憩设施合理性				√	√	
	照明设施合理性		√		√		
	引导设施合理性				√		
自行车停车 设施	自行车停车供需比/%	√					
步行、自行车 交通网络	绕行距离/m			√	√		
运行 水平	步行、自行车 交通空间	行人空间面积/(m ² ·人 ⁻¹)		√			√
		过街等待时间/s				√	√
	自行车停车设施	步行取车距离/m				√	
	与公共交通的 衔接	换乘距离/m				√	
	与机动化交通的 协调	机非混行程度/%		√			√
		交织程度/%		√			√
	步行、自行车 交通环境	用户满意度/%					
步行和自行车出行比例/%							√

离和行走时间；②道路交通流，如机动车流量、速度等，这些将决定平均车头时距和平均车头间距；③行人过街需求，如行人过街流量等。

合理的过街设施必然保证过街绿灯时长大于行人最短安全过街时间。本文采用熵值法定义过街设施的合理性，熵值越大，行人过街时间越充裕。计算公式为

$$y_{17} = \frac{t_1}{t_2}, \quad (6)$$

式中： t_1 为过街绿灯时长/s； t_2 为最短安全过街时间/s。

过街绿灯时长 t_1 的计算需要分有无信号控制两种情况：①信号控制： t_1 为一个周期内该进口道行人绿灯时长。②无信号控制：行人是否被允许过街取决于相交道路上的双向机动车交通流的平均车头时距，因此过街绿灯时长应为相交道路机动车交通流的车头时距期望值。假设城市道路机动车流的车头时距服从韦布尔模型，则平均车头时距为

$$E_i = \theta + \eta \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right), \quad (7)$$

式中： θ 为位置参数； η 为尺寸参数； m 为形状参数。参数的确定需要结合具体数据进

表2 步行和自行车交通系统评价指标体系

Tab.2 Evaluation system of pedestrian and bicycle transportation

项目	步行和自行车交通系统评价指标体系
设施水平	步行和自行车道路密度 y_{11}
	步行和自行车网络连通度 y_{12}
	过街设施间距 y_{13}
	步行道有效宽度 y_{14}
	自行车道有效宽度 y_{15}
	步行道和自行车道被占用比例 y_{16}
	过街设施合理性 y_{17}
	无障碍设施合理性 y_{18}
	休憩设施合理性 y_{19}
	自行车停车供需比 y_{110}
运行水平	行人空间面积 y_{21}
	过街等待时间 y_{22}
	步行取车距离 y_{23}
	机非混行程度 y_{24}
	用户满意度 y_{25}
	步行和自行车出行比例 y_{26}

行拟合。在实际应用中可直接调查路段上车头时距，也可通过调查分时段交通量确定双向机动车的平均车头时距。

t_2 计算公式为

$$t_2 = \frac{L_3}{v} + l, \quad (8)$$

式中： L_3 为行人横道长度/m，当设有安全岛时为路缘到安全岛边缘的距离； v 为老年人平均步行过街速度/($m \cdot s^{-1}$)，取 $0.98 m \cdot s^{-1}$ ； l 为老年人过街时间损失/s，一般取 $2 s$ 。

8) 无障碍设施合理性。

无障碍设施指为保障残疾人、老年人、伤病人、儿童和其他社会成员的通行安全和使用便利而配套建设的服务设施。本文选取交叉口缘石坡道比例、声控信号比例和盲道连续性 3 个指标表征无障碍设施的合理性。计算公式为

$$y_{18} = k_1 \omega_1 + k_2 \omega_2 + k_3 \omega_3, \quad (9)$$

式中： k_1 ， k_2 ， k_3 为权重，取值 $k_1=0.3$ ， $k_2=0.3$ ， $k_3=0.4$ 。

$$\omega_1 = \frac{\text{设置缘石坡道的交叉口数}}{\text{交叉口总数}}, \quad (10)$$

$$\omega_2 = \frac{\text{设有声控信号的交叉口数}}{\text{交叉口总数}}, \quad (11)$$

$$\omega_3 = \frac{\text{盲道总长度}}{\text{人行道总长度}}, \quad (12)$$

9) 休憩设施合理性。

休憩设施主要包括遮蔽设施和座椅设施两项内容。

遮蔽设施包括行道树、建筑挑檐等。遮蔽设施可以布置在步行道上的设施区，也可以布置在建筑前区，另外在过街等待时间长的道路交叉口设置自行车遮阳棚可大大提高出行舒适性。遮蔽设施中最常见的行道树有助于提高行人和骑车者的出行质量，特别是在下雨或天气炎热的时候，同时还可以美化环境，增强景观欣赏性，愉悦出行者情绪。该内容以行道树绿地率为表征。

座椅设施大多结合公共汽车站、景区绿道等人流量大的场所和路段布置。一般情况下，景区三级驿站设置间距约为 $2 km$ ，内设座椅不少于 5 个，即座椅间距一般小于 $400 m$ ，另考虑到资源配置节约性及合理性，座椅间距下限约为 $200 m$ 。该项内容以设有座椅的公共汽车站比例及景区主要绿道 $200 m$ 内座椅数为表征。

$$y_{19} = k_1 \beta_1 + k_2 \beta_2, \quad (13)$$

式中： k_1 ， k_2 为权重，取 $k_1=0.6$ ， $k_2=0.4$ 。

β_1 为行道树绿地率; β_2 为座椅设施布设率。

$$\beta_1 = \frac{\text{种植大乔木绿化带宽度}}{\text{道路红线宽度}}, \quad (14)$$

$$\beta_2 = 0.5 \frac{\text{有座椅的公共汽车站数}}{\text{总的公共汽车站数}} + 0.5g, \quad (15)$$

式中: g 为景区主要绿道 200 m 内平均座椅数 ($g < 1$)。

10) 自行车停车供需比。

$$y_{110} = \frac{P}{Q}, \quad (16)$$

式中: P 为区域自行车停车设施供给数; Q 为区域自行车停车需求数。

3.2 运行水平指标

1) 行人空间面积。

行人空间面积又称行人空间分配数, 是行人动态密度的倒数, 指每个行走的人平均占用的面积。计算公式为

$$y_{21} = \frac{\text{人行道面积}}{\text{高峰时刻人流量}} = \frac{\text{行人步速} \times \text{人行道宽度}}{\text{行人流动速率}}, \quad (17)$$

其中, 行人流动速率/(人·s⁻¹)指人行道或人行横道上的行人在一定的时间内按照指定方向通过某一断面的数量。

2) 过街等待时间。

指行人交通流在交叉口等节点处因让行对向交通产生的延误。

① 信号控制节点。

行人到达该节点的平均到达率为 λ 。行人到达节点处, 遇到绿灯则认为没有延误; 遇到红灯或黄灯则需要等待。在红灯或黄灯阶段, 假定在第 i 秒初有 λ 个行人到达, 则该 λ 个行人的人均等待时间为 $T_1 - i$, 其中 T_1 为一个信号周期内该进口道的黄灯与红灯时间之和。则该周期内, 所有行人的等待时间之和为^[6]

$$t_{\text{总}} = \lambda \sum_{i=1}^{T_1} (T_1 - i), \quad (18)$$

则一个信号周期内平均过街等待时间

$$t_1 = \frac{t_{\text{总}}}{\lambda T} = \frac{T_1(T_1 - 1)}{2T}, \quad (19)$$

式中: T 为信号周期/s。

② 无信号控制节点。

在无信号控制节点, 行人过街只能穿越机动车车流中的空档。因此, 机动车到达规律对行人过街有重要影响。

假设路段上机动车车头时距服从参数为 ϕ 、 Ω 、 μ 的韦布尔分布。机动车车头时距为

h , 行人穿越机动车流的临界间隙为 τ 。为简化计算, 假设行人采取逐个车道穿越的方式, 则单个行人穿越单条车道平均等待时间^[6]

$$t_2' = \bar{x} \bar{h}_x, \quad (20)$$

$$\bar{x} = \frac{1 - \exp\left[-\left(\frac{\tau - \mu}{\Omega - \mu}\right)^\phi\right]}{\exp\left[-\left(\frac{\tau - \mu}{\Omega - \mu}\right)^\phi\right]}, \quad (21)$$

$$\bar{h}_x = \frac{-\tau \exp\left[-\left(\frac{\tau - \mu}{\Omega - \mu}\right)^\phi\right] - \frac{\Omega - \mu}{\phi} \exp\left(\frac{\tau - \mu}{\Omega - \mu}\right)^\phi + \frac{\Omega - \mu}{\phi} \exp\left(\frac{-\mu}{\Omega - \mu}\right)^\phi}{\exp\left[-\left(\frac{-\mu}{\Omega - \mu}\right)^\phi\right] - \exp\left[-\left(\frac{\tau - \mu}{\Omega - \mu}\right)^\phi\right]}, \quad (22)$$

式中: \bar{x} 为行人穿越 1 条车道需要等待的平均车辆间隔数; \bar{h}_x 为 1 条车道上车头时距小于临界穿越间隙时单个行人穿越的等待时间/s。

文献[6]通过对长春市调查数据的拟合, 建议 $\phi = 1$, $\Omega = 4.8$, $\mu = 0$, τ 取 5 s。得到无信号控制节点单个行人穿越单车道的平均等待时间 t_2' 约为 3.8 s。

则单个行人过街的平均等待时间为 $t_2 = t_2' n$, n 为车道数。

则平均过街等待时间为

$$y_{22} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i}{f}, \quad (23)$$

式中: f 为研究区域内信号控制、无信号控制行人过街节点的个数; t_i 为第 i 个节点的平均等待时间/s。

3) 步行取车距离。

用区域内停车者平均步行距离来衡量, 其值越小说明自行车停车设施布局越合理, 自行车交通便捷性越高。实际应用中可抽样调查自行车停车场与主要商业、办公建筑的距离。

4) 机非混行程度。

该指标的研究对象是机非划线分隔的机动车路段上机非混行情况。混行程度由多种交通流的交通量决定, 混行程度越高, 越不利于交通安全。计算公式为

$$y_{24} = \frac{P}{P + Q}, \quad (24)$$

式中: P 为高峰小时内自行车自然交通量/(辆·h⁻¹); Q 为高峰小时内机动车自然交通量/(辆·h⁻¹)。

5) 用户满意度。

出行者对特定区域的步行和自行车交通水平的整体主观评价, 该指标值以问卷调查方式获取。

6) 步行和自行车出行比例。

指某一空间范围内全日交通流中步行和自行车出行量与全方式出行总量的比值。该指标表征了特定空间范围内步行和自行车出行水平的高低。

4 实证研究

本文以江苏省徐州市贾汪区为例,选取其中6个区域作为评价单元,其中:1,2,3号区域位于老矿老城区,4,5号区域位于泉城新区,6号区域位于夏桥郊区。本文采用基于层次分析法(AHP)的数据包络分析(DEA)评价模型(以下简称“DEAHP”)对步行和自行车交通系统进行评价。

4.1 指标计算

根据前文的指标量化模型,调查、计算的评价指标原始数据值如表3所示。

4.2 综合指标确定

为精简指标结构、便于模型求解计算,将指标归纳为五类:输入类包含两个综合指标,即路网设施和配套设施;输出类包含三个综合指标,即安全类、便捷类和用户感知

类。运用序关系分析法(G1法)确定指标权重(见表4)。

对各评价指标值进行归一化处理,归一化数值范围为[0,100],根据各指标归一化值及指标权重,确定五类综合指标规范值如表5所示,进而代入DEAHP模型求解。

4.3 评价结果

借助MATLAB软件求解DEAHP,得到各决策单元的效率指数 θ_j 、输入指标的松弛变量 s_j^- 、输出指标的剩余变量 s_j^+ 以及判断指数 λ_j 的值(见表6)。

由效率指数和判断指数可知,各决策单元的有效性排序为单元1=单元2=单元3=单元6>单元5>单元4。

从评价结果可见,1,2,3,6单元为DEA有效,4,5单元为非DEA有效。4,5单元步行和自行车系统效率低(效率指数 θ_j 均小于1),规模效应递减,即继续增加设施投入所得产出有限。4,5单元非DEA有效的主要原因不在于投入不足(松弛变量基本为0),而在于产出过剩(剩余变量均大于0)。这也反映了中国城市新区建设中普遍存在的基础设施超前建设而配套产业相对滞后的现象。

对于非DEA有效的4,5单元,计算其

表3 各评价单元评价指标值

Tab.3 Index criteria for different evaluation unit

评价单元	1	2	3	4	5	6
步行和自行车道路密度/(km·km ⁻²)	5.457	10.636	8.390	7.727	8.163	7.872
步行和自行车网络连通度	0.607	1.402	0.229	1.584	1.671	1.717
过街设施间距/m	414	245	251	239	347	301
步行道有效宽度/m	5.326	3.645	3.910	3.937	4.520	5.409
自行车道有效宽度/m	2.845	3.146	2.109	4.672	4.286	3.107
步行道和自行车道被占用比例/%	24.3	42.1	28.8	5.0	6.4	12.4
过街设施合理性	1.233	1.081	0.956	1.246	1.196	0.735
无障碍设施合理性	40.0	49.6	55.0	59.7	66.3	45.0
休憩设施合理性	10	8	13	32	26	14
自行车停车供需比/%	30.6	51.7	36.2	68.6	98.0	41.4
行人空间面积/(m ² ·人 ⁻¹)	2.4	2.8	6.6	10.8	12.6	18.5
过街等待时间/s	7.083	10.271	12.277	10.860	8.628	8.402
步行取车距离/m	120	134	168	220	186	540
机非混行程度/%	73.4	68.2	59.5	24.6	27.7	41.9
用户满意度	0.65	0.73	0.73	0.85	0.92	0.69
步行和自行车出行比例/%	95	86	65	60	75	58

输入剩余和输出亏空(见表7)。评价单元4在路网设施和配套设施方面的剩余为16.322和18.337,在便捷和用户感知方面亏空为4.559和0.277。结合综合指标构成可见,该单元非DEA有效原因在于休憩设施、无障碍设施以及自行车停车设施很完善;而相对于投入,该单元过街等待时间较长,步行和自行车出行比例较低。评价单元5在路网设施和配套设施方面的剩余为12.499和11.914,在安全和便捷方面的亏空为3.969和15.042。结合综合指标构成可见该单元非DEA有效的原因在于步行道和自行车道密度较高、宽度较大;而相对于投入,该单元的步行取车距离及过街等待时间较长。

5 结语

本文在对步行和自行车出行进行需求分析的基础上,从系统输入(设施水平)和系统输出(运行水平)两方面建立步行和自行车交通系统评价指标体系,确定各指标的计算模型,并用实例进行试算和初步验证。由于步行和自行车是两种不同的交通方式,两种设施建设水平不一定一致,在今后的研究中有

必要将二者分开分别评价,有的放矢提高评价的准确度。

表4 评价指标权重

Tab.4 Weighted evaluation index

类别	目标层	指标层	权重
输入指标 (X)	路网设施 (X ₁)	步行和自行车道路密度 X ₁₁	0.184 2
		步行和自行车网络连通度 X ₁₂	0.353 6
		过街设施间距 X ₁₃	0.131 6
		步行道有效宽度 X ₁₄	0.100 5
		自行车道有效宽度 X ₁₅	0.120 5
		步行道和自行车道被占用比例 X ₁₆	0.109 6
配套设施 (X ₂)		过街设施合理性 X ₂₁	0.377 3
		无障碍设施合理性 X ₂₂	0.269 6
		休憩设施合理性 X ₂₃	0.160 5
		自行车停车供需比 X ₂₄	0.192 6
输出指标 (Y)	安全类 (Y ₁)	机非混行程度 Y ₁₁	0.615 0
		行人空间面积 Y ₁₂	0.385 0
	便捷类 (Y ₂)	过街等待时间 Y ₂₁	0.583 3
步行取车距离 Y ₂₃		0.416 7	
用户感知类 (Y ₃)		用户满意度 Y ₃₁	0.545 5
		步行和自行车出行比例 Y ₃₂	0.454 5

表5 综合指标规范值

Tab.5 Comprehensive index criteria

评价单元	1	2	3	4	5	6
X ₁	47	71	47	68	69	79
X ₂	41	43	46	68	66	44
Y ₁	61	69	76	82	82	81
Y ₂	79	68	63	63	64	30
Y ₃	75	80	79	85	93	76

表7 4, 5单元输入剩余和输出亏空值

Tab.7 The input surplus and output deficit of evaluation unit 4 and 5

评价单元	4	5	
输入剩余	Δx_1	16.322	12.499
	Δx_2	18.337	11.914
输出亏空	Δy_1	0.000	3.969
	Δy_2	4.559	15.042
	Δy_3	0.277	0.000

表6 各评价单元DEAHP求解结果

Tab.6 The DEAHP model results for different evaluation unit

评价单元	1	2	3	4	5	6
θ_j	1	1	1	0.76	0.82	1
$\sum \lambda_j$	1.00	1.00	1.00	1.08	1.19	1.00
规模效应	不变	不变	不变	递减	递减	不变
松弛	s_1^-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	s_2^-	0.00	0.00	0.00	1.83	0.00
剩余	s_1^+	0.00	0.00	0.00	0.00	3.97
	s_2^+	0.00	0.00	0.00	4.56	15.04
	s_3^+	0.00	0.00	0.00	0.28	0.00

(下转第55页)