

文章编号: 1003-1421(2026)08-0137-11

引用格式: 陈祖光, 何静, 冯云华. 基于融合改进可拓云模型-IPA方法的地铁服务质量评价及提升策略研究[J]. 铁路运输与经济, 2026, 48(8): 137-147.

CHEN Zuguang, HE Jing, FENG Yunhua. Research on Subway Service Quality Evaluation and Promotion Strategy Based on a Fusion Improved Extension Cloud Model-Importance Performance Analysis Method[J]. Railway Transport and Economy, 2026, 48(8): 137-147.

基于融合改进可拓云模型-IPA方法的地铁服务质量评价及提升策略研究

陈祖光¹, 何 静¹, 冯云华²

(1. 昆明理工大学 交通工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明轨道交通五号线建设运营有限公司 运营管理部, 云南 昆明 650051)

摘 要: 为克服传统地铁服务质量评价方法在处理语言评价的模糊性、指标描述的不确定性及传统云熵计算方法单一性方面的不足, 研究构建了基于融合改进可拓云模型-IPA方法的地铁服务质量评价体系。该体系引入矩阵思想对评价指标进行组合赋权, 同时改进可拓云模型通过非线性规划优化云熵的计算方法, 科学处理评价过程中的模糊性和不确定性; 随后 IPA 方法识别重点改进问题, 为优先整改顺序提供依据。以昆明轨道交通 5 号线为例, 研究结果表明 5 号线整体处于“比较满意”水平。评价结果的可信度因子较传统评价方法更小, 验证了评价结果的可靠性和模型的有效性。通过 IPA 方法, 识别出换乘服务、出行便捷性、实时信息更新和工作人员服务专业性等要素位于重点改进区域。据此, 地铁运营企业可以将资源集中在重点改进区域进行优先整改, 从而更有效地实现服务质量的提升。

关键词: 地铁服务质量; 改进可拓云模型-IPA; 矩阵思想; 非线性规划; 可信度因子

中图分类号: U293.1 **文献标识码:** DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250512004

Research on Subway Service Quality Evaluation and Promotion Strategy Based on a Fusion Improved Extension Cloud Model-Importance Performance Analysis Method

CHEN Zuguang¹, HE Jing¹, FENG Yunhua²

(1. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan, China;

2. Operation Management Department, Kunming Rail Transit Line 5 Construction and Operation Co., Ltd., Kunming 650051, Yunnan, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the traditional subway service quality evaluation method in dealing with the fuzziness of language evaluation, the uncertainty of index description, and the singleness of the traditional cloud entropy calculation method, this study constructed a subway service quality evaluation system based on the fusion improved extension cloud model-importance performance analysis (IPA) method. The system introduced the matrix idea to combine

收稿日期: 2025-05-12

通信作者: 何静(1978—), 女, 云南昆明人, 昆明理工大学交通工程学院正高级工程师。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62362044)

the evaluation indexes and improved the extension cloud model to optimize the calculation method of cloud entropy through nonlinear programming, so as to scientifically deal with the ambiguity and uncertainty in the evaluation process. Then, the IPA method identified the key improvement problems and provided the basis for the priority rectification order. By taking Kunming Rail Transit Line 5 as an example, the research results show that Line 5 is at a “relatively satisfactory” level as a whole. The credibility factor of the evaluation results was smaller than that of the traditional evaluation method, which verified the reliability of the evaluation results and the effectiveness of the model. Through the IPA method, it was identified that factors such as transfer service, travel convenience, real-time information update, and staff service professionalism are located in key improvement areas. Accordingly, subway operation enterprises can focus their resources on key improvement areas for priority rectification, so as to improve service quality more effectively.

Keywords: Subway Service Quality; Improved Extension Cloud Model-IPA; Matrix Idea; Nonlinear Programming; Credibility Factor

0 引言

通常情况下, 地铁服务质量评价每年开展一次, 其评价结果以具体分值的形式呈现, 并明确指出存在的问题。然而, 若不加区分地对所有问题进行整改, 不仅会耗费大量时间和成本, 还可能无法实现彻底整改, 甚至效果不明显。如果能够精准识别并集中资源优先改进关键问题, 整改效果可能会更加显著。因此, 建立科学的地铁服务质量评价体系, 并依据评价结果精准识别需优先改进的关键问题, 不仅是提升地铁服务质量和运营效率的必要手段, 更是企业在合理资源投入的情况下实现可持续发展的紧迫需求。这种方式可以确保资源被有效利用, 避免不必要的浪费, 同时也能更好地满足服务需求, 提升乘客的满意度。

鉴于此, 亟需引入科学、系统的服务质量评价方法对地铁进行全面评估, 从而为精准改进和资源优化配置提供有力支撑。近年来, 服务质量多维评价方法研究在国内外轨道交通领域引发广泛探讨, 逐步形成多学科交叉的研究范畴。屠琪涵等^[1]构建多式联运服务质量评价模型并开展空铁联程运输实证研究; 王才雪等^[2]基于社交网络评论数据, 运用自然语言处理技术量化评估轨道交通服务质量; 陈维亚等^[3]构建决策树-IPA决策模型, 实现服务质量指标的综合考量; 吴天琪等^[4]采用改进IPA方法开展高铁服务质量评价并提出整改措施; 牟能冶等^[5]运用灰色关联度-模糊综合评价法开展客运服务质量评价研究; 唐力等^[6]融合二元语义与灰色关联分析构建模型, 评估高铁货运专列运输服务效能; 林

立等^[7]基于乘客感知视角, 采用修正SERVQUAL方法开展城轨交通服务质量评价; Machado-León等^[8]构建分类回归树与IPA相结合的评估框架, 对轨道交通系统服务质量进行多维评价; 蒋琦玮等^[9]基于混合算法与重要度-满意度矩阵开展地铁车站服务质量评价; 高硕遥等^[10]构建有轨电车服务评估体系, 开展线路运营服务质量专项研究; 谷素斐等^[11]基于三级指标评估模型, 系统评估地铁线路服务质量并形成全网综合评价结果。

上述研究成果为地铁服务质量评价提供了有益的参考, 但是地铁服务质量评价是一个复杂的系统工程, 涉及多个维度的指标和大量主客观因素的综合考量。在实际评价过程中, 由于乘客的主观感受、服务指标的模糊性等因素的存在, 地铁服务质量评价过程中不可避免地存在模糊性和不确定性。而现有的研究方法在处理这些问题时存在一定的局限性。

因此, 鉴于现有研究的不足, 引入改进可拓云模型-重要性-绩效分析(Importance-Performance Analysis, IPA)方法, 对地铁服务质量评价展开研究。相较于传统方法, 改进可拓云模型凭借非线性规划最优云熵计算方法, 既考虑等级划分的明确性, 又兼顾模糊性, 有效应对地铁服务质量评价中的模糊性和不确定性。从重要度-满意度角度构建IPA矩阵, 全面剖析服务质量要素的优劣, 助力地铁运营企业精准定位关键改进因素, 推动服务质量的优化提升。在理论层面, 该方法通过最优云熵计算, 弥补了既有方法在处理模糊性和不确定性方面的缺陷, 并借助可信度因子评估结果的可靠性。在

实践层面,该方法可为地铁运营企业提供改进的优先顺序,制定更具针对性的改进策略,进而提升乘客满意度。

1 评价指标体系构建

服务质量评价的基础是建立评价指标体系,指标的选取应遵循科学性、系统性和可操作性的原则。结合交通运输部发布的《城市轨道交通服务质量评价管理办法》(修订)(交运规[2022]5号),选择从导乘信息、环境舒适、设施效能、换乘服务、人员服务、出行便捷、出行安全7个维度展开研究,以问卷调查的方式直接获取居民对地铁服务的期望与要求,反映乘客的真实感知。通过运用信效度检验、聚类分析等多种方法,对调查数据进行了多维度的分析处理^[12],最终确定26个指标作为地铁服务质量评价指标。在导乘信息维度,乘客主要关注站外指引信息是否清晰准确,服务信息是否具备完整性以及站内实时信息是否能够及时更新;在环境与舒适维度,乘客主要关注车站内部和车厢内部是否整洁、拥挤和空气是否流通以及在站台是否有序排队候车;在设施效能维度,乘客主要关注售票系统、闸机是否安全可靠,列车是否具备平稳性、发车间隔是否过长和是否正点运行;在换乘服务维度,乘客主要关注换乘是否便捷有序和换乘指引是否通俗易懂;在人员服务维度,乘客主要关注工作人员的服务态度是否热情友好,服务效率是否及时准确,服务专业性是否高效专业;在出行便捷维度,乘客比较关注便民设施配置是否合理易用,候车座椅设置是否舒适充足,可达性是否高效便利;

在出行安全维度,乘客主要关注治安环境是否有保障,人流管理是否高效有序,安全提醒是否清晰全面以及安全设施配备是否齐全完善和可靠。

地铁服务质量评价指标体系如图1所示。

2 基于融合改进可拓云模型-IPA方法的评价流程

2.1 评价指标赋权

在确定地铁服务质量评价指标体系之后,为了确保评价结果的准确性,还需要科学合理地确定各项指标的权重。本研究在确定主客观权重时,分别基于层次分析法(Antalytic Hierarchy Process, AHP)和熵权法分别赋予评价指标的主客观权重^[13]。然而,AHP依赖于专家评分,可能导致其存在一定的主观随意性;熵权法是根据各项指标所提供的信息量的大小来确定权重^[14],也可能面临数据失真的问题。鉴于此,本研究运用矩阵思想,将AHP与熵权法相结合,构建了一种组合赋权方法,用于计算指标的组合同权重,从而使两者的权重更加均衡且合理^[15]。

因此,本研究引入 α 和 β 2个参数,分别用来表征主观权重和客观权重的相对重要性。在此基础上利用矩阵思想计算得出主客观权重的重要性系数 α_i 和 β_i ,其中 $i = 1, 2, \dots, n$,计算公式为

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{h'_i}{h'_i + h''_i} \\ \beta_i = \frac{h''_i}{h'_i + h''_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中: h'_i 为层次分析法得到的主观权重; h''_i 为熵权法得到的客观权重。

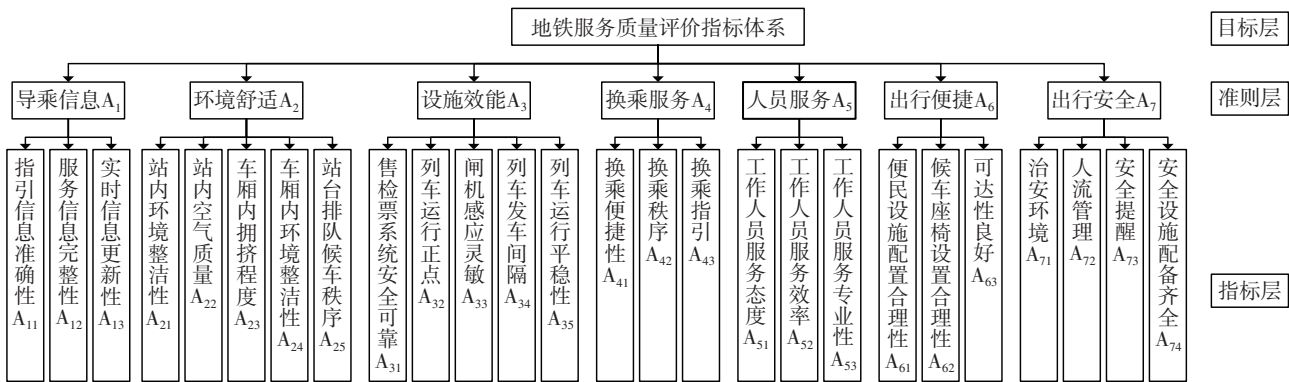


图1 地铁服务质量评价指标体系
Fig.1 Evaluation index system of subway service quality

得到主观权重和客观权重的重要性系数 α_i 和 β_i 后,就可以进一步计算出各项指标的组合权重 h_i ,计算公式为

$$h_i = \frac{h'_i \alpha_i + h''_i \beta_i}{\sum_{i=1}^n (h'_i \alpha_i + h''_i \beta_i)} \quad (2)$$

2.2 基于改进可拓云理论的评价模型

2.2.1 可拓云理论

高斯云模型^[16]具有完成定性与定量之间的信息转换的功能且能够融合信息的随机性与模糊性两者的特征。可基于期望(E_x)、熵(E_n)和超熵(H_e)3个参数构建其云关联度函数,如计算公式(3)所示。

$$\begin{cases} E_x = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \\ E_n = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{6} \\ H_e = \theta \times E_n \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_x 是云模型的中心点,表示数据的集中趋势,体现属性概念的典型特征值; E_n 是衡量数据分散程度的指标,反映了数据的不确定性。熵值越大,数据的分散程度越高,不确定性越大; H_e 描述熵值的离散程度,反映云滴分布的随机性特征; $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 代表某一指标等级范围的上下边界值; θ 是一个由经验确定且通常取值为0.1的常数。

可拓云理论将一组基本物元记为 $R = (N, S, M)$,其中, N 为事物名称、 S 为事物特征和与 S 对应的特征量值 $M^{[17]}$,为提升处理事物双重不确定性的精度,本研究采用正态云模型(E_x, E_n, H_e)来代替可拓理论中的事物特征值 $M^{[18]}$,通过云滴分布同步表征评价过程的随机性特征与模糊性特征。可拓云模型表示为

$$R = \begin{pmatrix} N & S_1 & M_1 \\ N & S_2 & M_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N & S_n & M_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N & S_1 & (E_{x1}, E_{n1}, H_{e1}) \\ N & S_2 & (E_{x2}, E_{n2}, H_{e2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N & S_n & (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: N 为待评价的地铁线路; S_n 为评价指标; (E_{xn}, E_{nn}, H_{en}) 为评价指标 S_n 对应的云模型参数。

2.2.2 最优云熵计算方法

在地铁服务质量评价体系中,构建指标的标准等级云模型是重要的一步。依据可拓云理论,当约束区间为 $[T_{\max}, T_{\min}]$ 时,等级云期望取区间中点值,

即 $E_x = (T_{\max} + T_{\min})/2$,等级云超熵 $H_e = \theta \times E_n$ 。

云熵 E_n 作为云模型评价等级的核心参数,其数值直接表征评价等级概念的模糊程度,对评价结果具有决定性影响。为应对专家在等级划分标准上的认知差异,本研究借鉴了传统模型中的2种计算云熵值的规则,为后文计算最优云熵值提供科学依据。

第一种云熵计算方法基于“ $3E_n$ ”规则,这种方法假设99.7%的数据都集中在 $[E_x - 3E_n, E_x + 3E_n]$ 内,在这个区间之外的数据被认为是“小概率事件”,可以忽略不计。该方法生成的云模型在等级边界处具有显著的分隔特性,基于“ $3E_n$ ”规则的等级标准云模型图如图2所示,能够清晰界定各评价等级边界,计算公式为

$$E'_n = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{6} \quad (5)$$

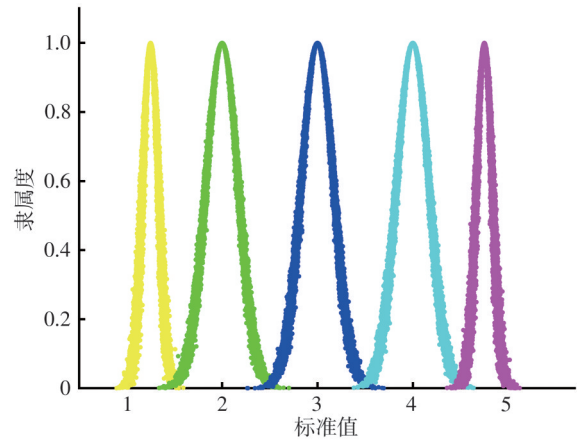


图2 基于“ $3E_n$ ”规则的等级标准云模型图
Fig.2 Hierarchical standard cloud model based on “ $3E_n$ ” rule

第2种云熵计算方法基于“50%关联度”规则,这种方法假设等级边界值和相邻等级具有相等的关联度,都是50%。即如果有一个乘客的评分刚好在2个等级的边界上,那么这个评分有50%的可能性属于上一个等级,也有50%的可能性属于下一个等级,这显著增强了评价等级的模糊性表征,基于“50%关联度”规则的等级标准云模型图如图3所示。计算公式为

$$E''_n = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2.3548} \quad (6)$$

现有2种云熵计算方法从不同维度界定标准等级云模型的熵值参数,区别在于“ $3E_n$ ”规则更注

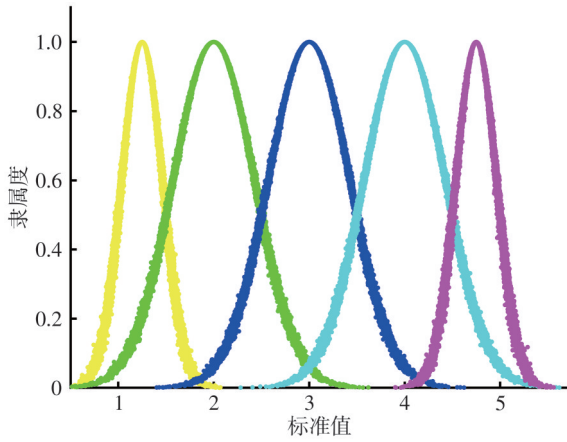


图3 基于“50%关联度”规则的等级标准云模型图

Fig.3 Hierarchical standard cloud model based on “50% relevance” rule

重数据的集中性,认为大部分数据都集中在某个区间内,适合数据分布比较集中的情况;而“50%关联度”规则更注重数据的模糊性,认为数据在等级边界上的分布比较均匀,适合数据分布比较分散的情况。虽各有特点,但计算的差异可能导致关联度计算结果存在冲突,进而影响评价结果。为提升评价体系可靠性,本研究提出了一种最优云熵计算方法,该方法能同时保持等级划分的清晰边界与合理模糊性,基于最优云熵值的等级标准云模型图如图4所示。

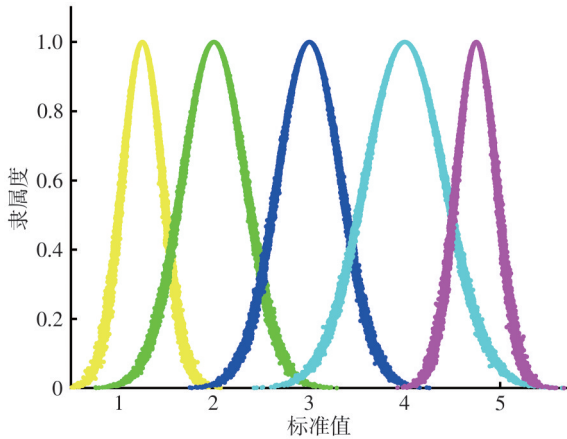


图4 基于最优云熵值的等级标准云模型图

Fig.4 Hierarchical standard cloud model based on optimal cloud entropy

设 x_i 为某指标的分数,该指标被划分为 P 个等级,由此对应生成 P 组等级云模型。其中,云期望集合记为 $(E_x d)_{1 \times p}$,云超熵的集合记为 $(H_e d)_{1 \times p}$,以上两种方法计算得到的熵值集合分别记为 $(E'_n d)_{1 \times p}$ 和 $(E''_n d)_{1 \times p}$,经组合优化后的最优云熵的集合记为

$(E_n d)_{1 \times p}$,等级序号用 $d(d = 1, 2, \dots, p)$ 表示。

在标准可拓云模型中,假设 E_{nn} 为从正态分布中随机抽取的样本值,其均值为 E_n ,标准差为 H_e 。依据正态分布特性,该值通常位于区间 $[E_n - 3H_e, E_n + 3H_e]$ 范围内。基于此概率分布特性,可建立云滴的内外关联度曲线 y_1, y_2 。

$$\begin{cases} y_1 = \exp\left(-\frac{(x - E_x)^2}{2(E_n - 3H_e)^2}\right) \\ y_2 = \exp\left(-\frac{(x - E_x)^2}{2(E_n + 3H_e)^2}\right) \end{cases} \quad (7)$$

针对具有确定值的评价指标,假设各指标的分数 x_i 与 y_1, y_2 的交点分别为对应的最小关联度 $\mu_{\min}$ 和最大关联度 $\mu_{\max}$ 。因此,对于等级 d ,有 $\mu'_{\min} d$ 由 x_i 基于“ $3E_n$ ”规则生成的最小关联度; $\mu''_{\min} d$ 由 x_i 基于“50%关联度”规则生成的最大关联度; μd 由最优云熵计算方法获得的期望关联度^[19]。基于上述定义,可推导出针对等级 d 的三者最大关联度偏差 $\Delta\mu_{\max}$ 的计算公式为

$$\Delta\mu_{\max} = (\mu''_{\max} d - \mu d)^2 + (\mu d - \mu'_{\min} d)^2 \quad (8)$$

最优云熵计算方法的核心目标是使指标分数 x_i 相对于 P 个评价等级的最大关联度偏差最小化。为此,需构建以 $\Delta\mu_{\max}$ 为决策变量的非线性规划模型,通过求解确定单一评价指标在各评价等级上的最优云熵集合 $(E_n d)_{1 \times p}$,计算公式为

$$\begin{cases} \min \Delta\mu_{\max}(E_n) = \sum_{d=1}^p \Delta\mu_{\max} \\ \text{s.t. } E'_n d \leq E_n d \leq E''_n d \end{cases} \quad (9)$$

在地铁服务质量评价流程中,可拓云模型通过计算指标值与标准等级云模型之间的隶属度来构建隶属函数。具体实现步骤为:将指标分数值 x 视为一个云滴,生成服从 $N(E_n, H_e^2)$ 分布的随机数 E_{nn} ,最终通过隶属度计算公式确定指标分数值 x 与可拓云模型的隶属关系 δ 为

$$\delta = \exp\left(-\frac{(x - E_x)^2}{2(E_{nn})^2}\right) \quad (10)$$

2.2.3 改进可拓云模型评价步骤

(1) 确定指标集和评语集。定义 $S = (S_1, S_2,$

..., S_n)表示待评估的指标, $V=(V_1, V_2, \dots, V_p)$ 表示各指标对应的评语等级集合。本研究评语等级依据文献及专家意见,使用非常不满意、较不满意、一般满意、比较满意和非常满意5个等级^[20]。因此, n 取26, P 取5,评价指标等级限界划分如表1所示。

(2) 构造云判断矩阵。综合指标的评价结果,可将隶属度值向量构造云隶属度判断矩阵 $B_{n \times 5}$ 为

$$B_{n \times 5} = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \cdots & \delta_{15} \\ \vdots & & \vdots \\ \delta_{n1} & \cdots & \delta_{n5} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: δ_{ip} 为评价指标 S_i 与第 p 级正态云模型之间的隶属度。

(3) 综合评价。通过矩阵运算将权重向量 $h_{1 \times n}$ 和云隶属度判断矩阵 $B_{n \times 5}$ 相乘,即可获得综合云隶属度矩阵 $F_{1 \times 5}$ 为

$$F_{1 \times 5} = h_{1 \times n} \times B_{n \times 5} \quad (12)$$

(4) 计算评价结果。将综合云隶属度矩阵 $F_{1 \times 5}$ 进行加权平均得到综合评价特征值 F' 为

$$F' = \frac{\sum_{q=1}^5 (qF_q)}{\sum_{q=1}^5 F_q} \quad (13)$$

式中: q 为评价等级 p 所对应的分数, $q=1, 2, \dots, 5$; F_q 为向量 F 对应的分量值。

鉴于云隶属度计算过程中 E_{mn} 的生成具有随机性,需通过多次计算来提升评价结果的可靠度。经过 m 次运算后得到最终的期望值 E_{xF} 和云熵 E_{nF} 分别为

$$\begin{cases} E_{xF} = \frac{F'_1(X) + F'_2(X) + \cdots + F'_m(X)}{m} \\ E_{nF} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (F'_i(X) - E_{xF})^2 / m} \end{cases} \quad (14)$$

式中: m 为计算次数,本研究假设计算1 000次;等级特征值 F'_i 为经过第 i 次计算所得到的数值。

在改进可拓云模型中,可信度因子 ρ 是一个重要的指标,用于衡量评估结果的可信程度。它

通过评估结果的分散程度来反映评估结果的不确定性。可信度因子越小,评估结果越可靠;可信度因子越大,评估结果的不确定性越高^[18], ρ 是通过评估结果的熵 E_{nF} 与期望值 E_{xF} 的比值来计算的,可表示为

$$\rho = \frac{E_{nF}}{E_{xF}} \quad (15)$$

2.3 重要性-绩效分析

重要性-绩效分析(IPA)是由 Martilla 和 James 提出的一种用于分析顾客对服务产品或服务满意度的一种方法^[21]。该方法通过 IPA 矩阵图的可视化展示,可以清楚地区分地铁服务质量当前最需要优先重点改进的区域。据此,地铁运营企业可以将成本和时间集中在重点改进区域进行优先整改,从而更有效地实现服务质量的提升。

在二维空间上,以满意度指标为横轴,重要度指标(权重值)为纵轴,建立平面二维坐标系,将平面二维坐标划分为4个不同的区域,便于采取不同的方法进行处理,IPA矩阵如图5所示。第Ⅰ象限为优势保持区,是满意度和重要度都高的区域;第Ⅱ象限为重点改进区,是满意度低、重要度高的区域;第Ⅲ象限为持续改进区,是重要度和满意度都低的区域;第Ⅳ象限为潜力提升区,是满意度高、重要度低的区域。

3 案例分析

以昆明轨道交通5号线为实例分析,其作为财政部第二批PPP示范项目具有典型的研究价值。该线路总长26.45 km,设站22座,呈南北走向,北起世博园站,经昆明主城核心区纵贯至宝丰站,串联世博园、圆通山、翠湖、滇池等自然人文景观集群,并有效连接云南陆军讲武堂、抗战胜利纪念馆、滇池国际会展中心等历史与现代地标,在昆明轨道交通网络中形成独特的“文化走廊”效应。

表1 评价指标等级限界划分
Tab.1 Evaluation index grade limit division

等级区间	赋分/分	服务质量等级	服务质量等级描述
[1.0, 1.5)	1	非常不满意(Ⅰ)	严重影响乘客的出行体验,必须立即采取改进措施
[1.5, 2.5)	2	较不满意(Ⅱ)	对乘客的出行体验有一定影响,需要加以改进
[2.5, 3.5)	3	一般满意(Ⅲ)	对乘客的出行体验没有明显的正负面影响,但仍需反思并寻找改进点
[3.5, 4.5)	4	比较满意(Ⅳ)	乘客的出行体验得到了积极的影响,需要继续保持
[4.5, 5.0]	5	非常满意(Ⅴ)	乘客的出行体验得到极为正面的影响,需要继续保持

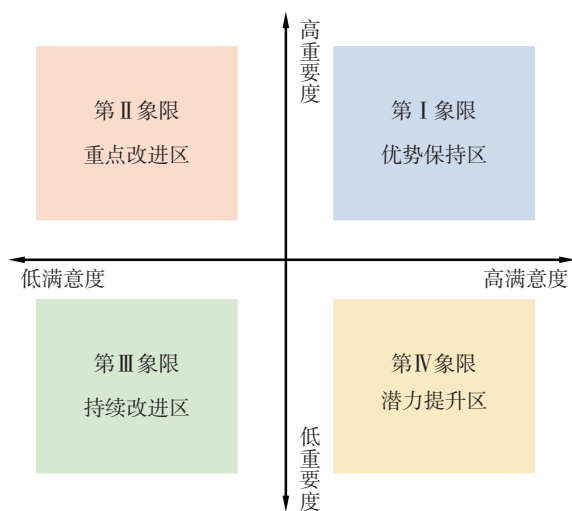


图5 IPA矩阵
Fig.5 IPA matrix

3.1 问卷描述与数据检验

根据服务质量评价指标，采用问卷调查方式收集数据。构建“线上+线下”双通道调研模式。历时6个月(2024年7月—12月)的全周期调查覆盖轨道交通运营全时段，包含工作日、周末及节假日差异化场景，最终线下和线上分别收集到354份和382份问卷调查，经筛选后有效样本为707份(线下341份，线上366份)，样本有效率达96.06%，运用SPSS 26.0对有效问卷进行计量分析，信度检测结果呈现量表Cronbach’s alpha值0.852，各维度信度系数均达到0.850左右的高信度水平；效度分析显示KMO检验值0.816，Bartlett球形检验统计量显著($p<0.01$)，双指标联合验证表明问卷设计既满足内部一致性要求，又具备优良的结构效度特征。样本描述性统计如表2所示。

3.2 确定指标组合权重

基于MATLAB R2023b编程软件分别求解各指标的主观权重 h' 和客观权重 h'' ；依据公式(1)—(2)求解得到各指标的组合权重 h 。评价指标权重如表3所示，不同权重计算方法下的指标权重结果对比如图6所示。

3.3 最优云熵计算

通过公式(5)—(9)可求解得单一指标对各评价等级的最优云熵，进而依据公式(3)—(4)构建出每个指标所对应的每个评价等级的可拓云模型的3个参数(E_x , E_n , H_e)，评价指标云模型参数如表4所示。

表2 样本描述性统计
Tab.2 Sample descriptive statistics

属性	样本特征	百分比/%	属性	样本特征	百分比/%
性别	男	50.35	学历	初中及以下	19.80
	女	49.65		高中/中专	22.20
				本科/专科	49.79
				研究生	8.21
年龄	18岁以下	11.88	每周乘坐地铁频率	2次及以下	23.33
	18~28岁	32.96		3~5次	42.86
	29~50岁	31.82		6~9次	20.09
	50岁以上	23.34		10次及以上	13.72
主要出行目的	上学	20.23	主要出行时间	早高峰(7:00—9:00)	22.73
	上班	37.42		平峰期(9:00—17:00)	37.42
	探亲访友	12.04		晚高峰(17:00—19:00)	23.57
	购物、生活娱乐	30.31		夜间(19:00—末班车)	16.28

表3 评价指标权重
Tab.3 Evaluation metric weights

维度	权重	指标	AHP权重	熵权法权重	组合权重
A ₁	0.140 2	A ₁₁	0.038 2	0.040 5	0.039 3
		A ₁₂	0.038 1	0.040 3	0.039 2
		A ₁₃	0.037 6	0.040 0	0.038 8
A ₂	0.137 7	A ₂₁	0.035 4	0.038 9	0.037 2
		A ₂₂	0.037 5	0.038 3	0.037 9
		A ₂₃	0.036 8	0.038 5	0.037 6
		A ₂₄	0.034 4	0.037 4	0.035 9
		A ₂₅	0.041 2	0.037 5	0.039 4
A ₃	0.131 5	A ₃₁	0.035 7	0.032 5	0.034 1
		A ₃₂	0.034 2	0.037 2	0.035 7
		A ₃₃	0.034 8	0.033 4	0.034 1
		A ₃₄	0.036 4	0.031 5	0.034 1
		A ₃₅	0.039 5	0.038 6	0.039 0
A ₄	0.169 3	A ₄₁	0.045 6	0.047 0	0.046 3
		A ₄₂	0.044 5	0.045 2	0.044 8
		A ₄₃	0.045 8	0.043 2	0.044 5
A ₅	0.138 1	A ₅₁	0.035 1	0.035 4	0.035 2
		A ₅₂	0.034 6	0.037 6	0.036 1
		A ₅₃	0.043 4	0.041 2	0.042 3
A ₆	0.157 1	A ₆₁	0.043 1	0.041 7	0.042 4
		A ₆₂	0.040 2	0.041 1	0.040 6
		A ₆₃	0.040 0	0.040 7	0.040 3
A ₇	0.126 1	A ₇₁	0.037 7	0.039 2	0.038 4
		A ₇₂	0.035 6	0.032 4	0.034 0
		A ₇₃	0.036 4	0.037 3	0.036 8
		A ₇₄	0.038 2	0.033 4	0.035 9

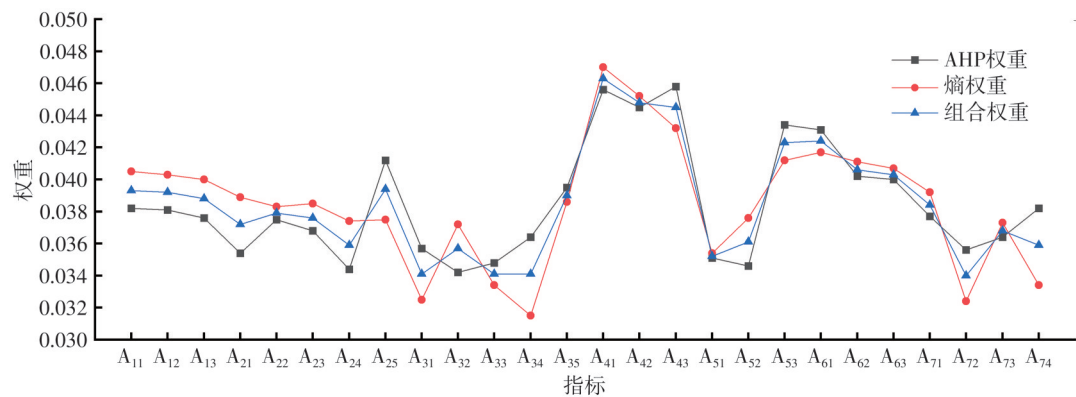


图6 不同权重计算方法下的指标权重结果对比
Fig.6 Comparison of index weight results under different weight calculation methods

表4 评价指标云模型参数
Tab.4 Evaluation index cloud model parameters

指标	非常不满意	较不满意	一般满意	比较满意	非常满意
A ₁₁	(1.25, 0.163 1, 0.016 3)	(2, 0.178 2, 0.017 08)	(3, 0.216 8, 0.021 7)	(4, 0.388 0, 0.038 9)	(4.75, 0.175 4, 0.017 5)
A ₁₂	(1.25, 0.204 0, 0.020 4)	(2, 0.190 5, 0.019 1)	(3, 0.215 6, 0.021 6)	(4, 0.389 5, 0.039 0)	(4.75, 0.127 6, 0.012 8)
A ₁₃	(1.25, 0.177 5, 0.017 8)	(2, 0.202 3, 0.020 2)	(3, 0.309 8, 0.031 0)	(4, 0.284 5, 0.028 5)	(4.75, 0.099 4, 0.009 9)
A ₂₁	(1.25, 0.190 8, 0.019 1)	(2, 0.177 5, 0.017 8)	(3, 0.203 0, 0.020 3)	(4, 0.405 7, 0.040 6)	(4.75, 0.166 7, 0.016 7)
A ₂₂	(1.25, 0.180 0, 0.018 0)	(2, 0.183 6, 0.018 4)	(3, 0.297 0, 0.029 7)	(4, 0.408 6, 0.040 9)	(4.75, 0.134 7, 0.013 5)
A ₂₃	(1.25, 0.124 9, 0.012 5)	(2, 0.212 3, 0.021 2)	(3, 0.207 5, 0.020 8)	(4, 0.338 9, 0.033 9)	(4.75, 0.191 0, 0.019 1)
A ₂₄	(1.25, 0.209 6, 0.021 0)	(2, 0.222 2, 0.022 2)	(3, 0.269 6, 0.027 0)	(4, 0.401 3, 0.040 1)	(4.75, 0.154 5, 0.015 4)
A ₂₅	(1.25, 0.125 9, 0.012 6)	(2, 0.169 2, 0.016 9)	(3, 0.207 5, 0.020 8)	(4, 0.386 5, 0.038 7)	(4.75, 0.154 2, 0.015 4)
A ₃₁	(1.25, 0.129 8, 0.013 0)	(2, 0.167 0, 0.016 7)	(3, 0.219 2, 0.021 9)	(4, 0.352 2, 0.035 2)	(4.75, 0.163 2, 0.016 3)
A ₃₂	(1.25, 0.136 7, 0.013 7)	(2, 0.177 7, 0.017 8)	(3, 0.196 3, 0.019 6)	(4, 0.421 7, 0.042 2)	(4.75, 0.180 9, 0.018 1)
A ₃₃	(1.25, 0.131 5, 0.013 2)	(2, 0.259 8, 0.026 0)	(3, 0.212 1, 0.021 2)	(4, 0.393 9, 0.039 4)	(4.75, 0.112 2, 0.011 2)
A ₃₄	(1.25, 0.165 9, 0.016 6)	(2, 0.243 4, 0.024 3)	(3, 0.238 6, 0.023 9)	(4, 0.361 1, 0.036 1)	(4.75, 0.094 6, 0.009 5)
A ₃₅	(1.25, 0.089 1, 0.008 9)	(2, 0.271 4, 0.027 1)	(3, 0.227 5, 0.022 8)	(4, 0.374 5, 0.037 5)	(4.75, 0.106 6, 0.010 7)
A ₄₁	(1.25, 0.128 1, 0.012 8)	(2, 0.261 5, 0.026 2)	(3, 0.368 6, 0.036 9)	(4, 0.232 4, 0.023 2)	(4.75, 0.176 6, 0.017 7)
A ₄₂	(1.25, 0.132 8, 0.013 3)	(2, 0.199 9, 0.020 0)	(3, 0.337 4, 0.033 7)	(4, 0.259 0, 0.025 9)	(4.75, 0.168 5, 0.016 9)
A ₄₃	(1.25, 0.086 1, 0.008 6)	(2, 0.200 3, 0.020 0)	(3, 0.315 5, 0.031 6)	(4, 0.279 0, 0.027 9)	(4.75, 0.164 2, 0.016 4)
A ₅₁	(1.25, 0.186 6, 0.018 7)	(2, 0.169 2, 0.016 9)	(3, 0.232 4, 0.023 2)	(4, 0.368 6, 0.369 0)	(4.75, 0.200 8, 0.020 1)
A ₅₂	(1.25, 0.188 2, 0.018 8)	(2, 0.194 8, 0.019 5)	(3, 0.263 0, 0.026 3)	(4, 0.333 0, 0.033 3)	(4.75, 0.179 5, 0.018 0)
A ₅₃	(1.25, 0.162 9, 0.016 3)	(2, 0.231 2, 0.023 1)	(3, 0.349 2, 0.034 9)	(4, 0.248 7, 0.024 9)	(4.75, 0.132 7, 0.013 3)
A ₆₁	(1.25, 0.151 7, 0.015 2)	(2, 0.276 3, 0.027 6)	(3, 0.317 0, 0.031 7)	(4, 0.277 7, 0.027 8)	(4.75, 0.157 5, 0.015 8)
A ₆₂	(1.25, 0.115 4, 0.011 5)	(2, 0.210 5, 0.021 1)	(3, 0.280 4, 0.028 0)	(4, 0.314 1, 0.031 4)	(4.75, 0.118 8, 0.011 9)
A ₆₃	(1.25, 0.112 7, 0.011 3)	(2, 0.223 7, 0.022 4)	(3, 0.277 7, 0.027 8)	(4, 0.317 0, 0.031 7)	(4.75, 0.141 6, 0.014 2)
A ₇₁	(1.25, 0.210 5, 0.211 0)	(2, 0.194 5, 0.019 5)	(3, 0.218 6, 0.021 9)	(4, 0.388 0, 0.038 8)	(4.75, 0.186 5, 0.018 7)
A ₇₂	(1.25, 0.152 4, 0.015 2)	(2, 0.179 5, 0.018 0)	(3, 0.196 3, 0.019 6)	(4, 0.414 5, 0.041 5)	(4.75, 0.087 2, 0.008 7)
A ₇₃	(1.25, 0.186 8, 0.018 7)	(2, 0.185 4, 0.018 5)	(3, 0.237 3, 0.023 7)	(4, 0.362 6, 0.036 3)	(4.75, 0.094 5, 0.009 5)
A ₇₄	(1.25, 0.091 9, 0.009 2)	(2, 0.187 0, 0.018 7)	(3, 0.222 7, 0.022 3)	(4, 0.380 5, 0.038 1)	(4.75, 0.150 5, 0.015 1)

3.4 评价结果计算

首先根据公式(10)可计算出26个指标隶属于不同评语等级的隶属度值,并根据公式(11)构建隶属度矩阵B;进而基于公式(12)构建综合云隶属度矩阵F_{1×5}后,结合表1的评价指标等级限界划分的内容,利用公式(13)对综合云隶属度矩阵中的隶属度值与评语等级赋分进行加权平均计算,考虑到随机

因素,基于公式(14)–(15)进行重复运算1 000次,最终收敛结果如下。

$$\begin{aligned} F_{1 \times 5} &= h_{1 \times 26} \times B_{26 \times 5} = [0 \quad 0.003 \ 8 \quad 0.473 \ 9 \quad 0.522 \ 5 \quad 0] \\ E_{x_F} &= 3.521 \\ \rho &= 0.002 \ 8 \end{aligned}$$

3.5 评价结果分析

采用改进可拓云模型对昆明轨道交通5号线的

服务质量进行综合评价后得到分值 $E_{xF} = 3.521$ ，综合云隶属度矩阵中最大隶属度值为0.522 5，由此可知昆明轨道交通5号线的服务质量处于“比较满意”水平，这与实地调研结果呈现高度一致性，验证了该评价模型的有效性及其结果的可信度。进一步基于最终结果的3个参数生成云滴分布图，从而构建出具有空间表征能力的评价结果云模型图，最后将其与标准云模型图进行对比，基于改进可拓云模型的评价结果云模型图如图7所示。

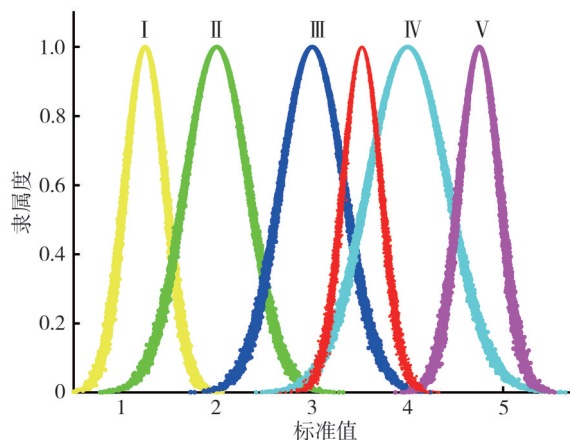


图7 基于改进可拓云模型的评价结果云模型图
Fig.7 Cloud model diagram of evaluation results based on improved extension cloud model

为更好地说明评价结果的可信度，与基于“ $3E_n$ ”云熵可拓云模型和基于“50%关联度”云熵可拓云模型所得到的计算结果进行了对比。各评价模型结果对比如表5所示。

表5 各评价模型结果对比			
Tab.5 Comparison of results of each evaluation model			
评价模型	评价结果/分	可信度因子	评价等级
“ $3E_n$ ”云熵可拓云模型	3.514	0.006 2	比较满意
“50%关联度”云熵可拓云模型	3.498	0.010 1	一般满意
改进可拓云模型	3.521	0.002 8	比较满意

通过对比分析，改进可拓云模型计算结果的可信度因子显著低于传统可拓云模型，这表明通过改进可拓云模型所得到的评价结果具有较高的可信度。地铁运营企业可依据这些精准的评价结果，有效避免因评价不准确而引发的反复整改及资源的盲目投入，进而高效制定并执行整改策略，确保资源得到合理利用，最终实现服务质量的提升。

3.6 IPA象限定位

为了更深入地分析昆明轨道交通5号线的服务质量评价结果，并精确识别需要优先改进的关键问题，本研究采用表3的各指标组合权重值，并结合问卷调查中收集的乘客满意度分数，以满意度和重要度(权重值)的均值(3.528 5, 0.038 5)作为坐标原点，建立了昆明轨道交通5号线IPA矩阵如图8所示。通过矩阵图可视化展示，可以清楚地区分昆明轨道交通5号线服务质量的竞争优劣区域以及需要优先改进的部分。这种方法不仅能够识别服务质量要素的优势和劣势，还为制定针对性的改进措施提供了依据。

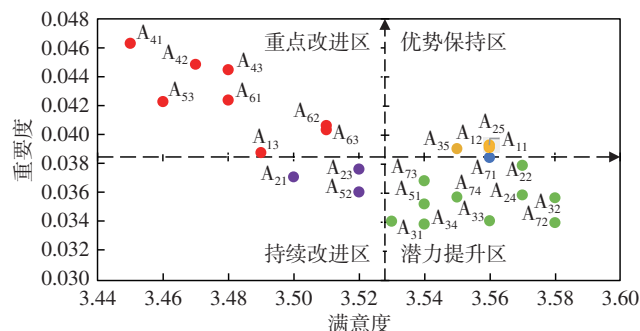


图8 昆明轨道交通5号线IPA矩阵
Fig.8 IPA matrix for subway service quality evaluation

第Ⅰ象限是优势保持区。此区域指标为当前服务的核心优势，应持续巩固。指引信息的准确性与服务信息的完整性，能有效降低乘客出行的不确定性；站台候车秩序与列车运行平稳性则直接提升了乘车体验与舒适度，形成了稳定的乘客体验基础。

第Ⅱ象限是重点改进区。此区域是影响乘客满意度的关键短板，需优先投入资源改进。换乘便捷性、秩序与指引，以及车站设施配置、可达性等问题，是乘客出行体验的主要痛点；实时信息更新不及时、工作人员专业性不足则进一步放大了负面感受。地铁运营企业应优先优化换乘流程与设施，完善便民服务，强化信息更新机制，并通过定期培训提升一线人员服务水平。

第Ⅲ象限是持续改进区。此区域指标对整体满意度影响有限，但仍需长期关注。站内环境整洁度、车厢拥挤程度与工作人员服务效率，共同影响乘客的基础体验。在不占用重点改进资源的前提下，可通过常态化环境维护、客流疏导和服务流程

优化,实现服务质量的稳步提升。

第Ⅳ象限是潜力提升区。此区域指标具备较高的优化潜力,可作为差异化服务的切入点。站内空气质量、车厢环境整洁度、票务与运行系统稳定性、安全管理等指标,目前满意度较高但重要度相对偏低。地铁运营企业可在此基础上,通过精细化管理进一步强化乘客的舒适感与安全感,打造服务亮点。

4 结束语

本研究构建基于融合改进可拓云模型-IPA方法的地铁服务质量评价体系,以云图的形式将地铁服务质量的综合评价结果进行直观呈现。以昆明轨道交通5号线为例,研究结果显示5号线的综合评价分值为3.521,整体处于“比较满意”水平,表明服务质量良好但仍有提升空间。同时评价结果的可信度因子相较传统方法显著降低,进一步验证了评价结果的可靠性和模型的有效性。最后,通过IPA矩阵分析,精准识别了5号线服务质量的优先改进因素,包括换乘服务、出行便捷性、实时信息更新和工作人员服务专业性等。基于此,5号线运营企业可以合理分配资源集中在亟需改进的区域,从而更有效提升服务质量。

研究仍存在局限性。例如,样本未充分考虑不同性别、年龄、乘坐频率等群体对地铁服务质量评价的差异,后续研究应通过分层抽样和针对性问卷调查,分析这些群体的评价差异;未开展对比实验,未来可通过设计严谨的实验方案,与传统可拓云模型、模糊综合评价模型等方法进行对比,凸显改进可拓云模型-IPA方法优势;未探讨主观权重与客观权重比例变化对评价结果的影响,未来可通过调整主客观权重的比例计算组合权重,进而深入剖析权重分配敏感性,为地铁服务质量评价提供更具灵活性与科学性的决策支持。

参考文献:

[1] 屠琪涵,成耀荣. 基于SEM-物元可拓模型的空铁联运服务质量评价研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(7): 2603-2614.

TU Qihan, CHENG Yaorong. Air-Rail Combined Passenger Transport Based on SEM-Matter-Element Modal[J]. Journal of

Railway Science and Engineering, 2024, 21(7): 2603-2614.

[2] 王才雪,陈坚,傅志妍,等. 基于社交网络数据的城市轨道交通服务质量评价模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(5): 1871-1879.

WANG Caixue, CHEN Jian, FU Zhiyan, et al. Evaluation Model of Urban Rail Transit Service Quality Based on Social Network Data[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(5): 1871-1879.

[3] 陈维亚,李嘉佳,康梓轩. 考虑可执行度的地铁服务质量提升策略研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(7): 2090-2099.

CHEN Weiya, LI Jiajia, KANG Zixuan. On Quality Improvement Schemes of Metro Service Considering Feasibility[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(7): 2090-2099.

[4] 吴天琪,刘晓溪,祝继常,等. 基于改进IPA的高速铁路服务质量评价与改善策略研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(12): 33-39.

WU Tianqi, LIU Xiaoxi, ZHU Jichang, et al. Research on Service Quality Evaluation and Improvement Strategy of High Speed Railway Based on Improved IPA[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(12): 33-39.

[5] 牟能治,汪敏,孙越,等. 基于旅客需求的高速铁路客运服务质量评价[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(4): 33-40.

MU Nengye, WANG Min, SUN Yue, et al. Evaluation of High Speed Railway Passenger Transportation Service Based on Passenger Demand[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(4): 33-40.

[6] 唐力,周凌云,许植深. 基于二元语义灰色关联分析法的高铁快运列车运输服务质量评价研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(11): 188-195.

TANG Li, ZHOU Lingyun, XU Zhishen. Quality Evaluation of High Speed Rail Express Train Transportation Service Based on Two-Tuple Linguistic Grey Relational Analysis Method[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(11): 188-195.

[7] 林立,季广港,汤霖. 城市轨道交通运营服务质量评价研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(12): 111-116.

LIN Li, JI Guanggang, TANG Lin. Evaluation of Urban Rail Transit Operation Service Quality[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(12): 111-116.

[8] MACHADO-LEÓN J L, DE OÑA R, BAOUNI T, et al. Railway Transit Services in Algiers: Priority Improvement Actions Based on Users Perceptions[J]. Transport Policy, 2017, 53:

- 175-185.
- [9] 蒋琦玮, 吴小兰, 冯芬玲, 等. 基于 IPSO-XGB 的城市轨道交通车站服务质量评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(4): 1097-1104.
JIANG Qiwei, WU Xiaolan, FENG Fenling, et al. Quality Evaluation of Urban Rail Transit Station Based on IPSO-XGB[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(4): 1097-1104.
- [10] 高硕遥, 陈维亚, 王子超. 有轨电车服务质量评价方法[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(S1): 132-136.
GAO Shuoyao, CHEN Weiya, WANG Zichao. Research on Evaluation Method of Tramcar Service Quality[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(S1): 132-136.
- [11] 谷素斐, 张红云. 城市轨道交通客运服务质量综合评价应用研究[J]. 都市快轨交通, 2020, 33(4): 123-128.
GU Sufei, ZHANG Hongyun. Comprehensive Evaluation of Urban Rail Transit Passenger Service Quality[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(4): 123-128.
- [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): 378-385.
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): 378-385.
- [13] 刘菊美. 广州城市轨道交通客运安全风险识别评价指标体系研究与应用[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(7): 112-117, 124.
LIU Jumei. Research and Application of Risk Identification Index System for Passenger Transport Safety in Guangzhou Metro[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(7): 112-117, 124.
- [14] 徐 菱, 丁小东, 陈 佳, 等. 成都轨道交通产业竞争力水平综合评价研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(7): 65-71.
XU Ling, DING Xiaodong, CHEN Jia, et al. Comprehensive Competitiveness Evaluation of Chengdu Rail Transit Industry[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(7): 65-71.
- [15] 薛 亮, 赵胜川. 基于 PSR 模型及博弈组合赋权的城市轨道交通运营水平评价研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(5): 123-129.
XUE Liang, ZHAO Shengchuan. Urban Transit Operation Evaluation Based on PSR Model and Game Combination Weighting[J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(5): 123-129.
- [16] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.
LI Deyi, LIU Changyu. Study on the Universality of the Normal Cloud Model[J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34.
- [17] 潘寒川, 刘丹阳, 张煜睿, 等. 基于组合赋权-可拓云的城市轨道交通线路运营安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 160-166.
PAN Hanchuan, LIU Danyang, ZHANG Yurui, et al. Urban Rail Transit Line Operation Safety Evaluation Based on Combined Weighting-Extension Cloud Method[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 160-166.
- [18] 陈虹兵, 王多宏. 基于 AHP-熵权-可拓云模型的城市轨道交通跨线运营效果评价[J]. 铁道运输与经济, 2023, 45(2): 118-125.
CHEN Hongbing, WANG Duohong. Evaluation of Cross-Line Operation Effect of Urban Rail Transit Based on AHP-Entropy Weight-Extension Cloud Model[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(2): 118-125.
- [19] 欧阳中辉, 郭遨宇, 刘文彪, 等. 基于改进可拓云的岸舰导弹武器系统训练评估方法[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(4): 58-64.
OUYANG Zhonghui, GUO Aoyu, LIU Wenbiao, et al. Training Evaluation of Shore-to-Ship Missile Weapon System Based on Improved Extension Cloud[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2020, 41(4): 58-64.
- [20] 何 静, 张夕阳, 李延欢, 等. 基于乘客需求的城市轨道交通服务质量评价研究[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(4): 67-73, 79.
HE Jing, ZHANG Xiyang, LI Yanhuan, et al. Research on Urban Rail Transit Service Quality Evaluation Based on Passenger Demand[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(4): 67-73, 79.
- [21] PHADERMROD B, CROWDER R M, WILLS G B. Importance-Performance Analysis Based SWOT Analysis[J]. International Journal of Information Management, 2019, 44: 194-203.

(责任编辑 汪沁萱)