doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.05.009

基于组合赋权-TOPSIS的城市轨道交通运力运量匹配度评估方法

郑恒亮[1]，田婉琪[2]，赵　鹏[3]，乔　珂[3]

（1. 中车长春轨道客车股份有限公司，长春 130062；2. 北京交通大学轨道交通运行控制系统国家工程研究中心，北京 100044；3. 北京交通大学交通运输学院，北京 100044）

摘　要：全面、准确地衡量城市轨道交通运力供给与实际动态多维度客流需求之间时空适应性，是优化现有运力配置和解决网络负荷不均衡问题的有效方式。针对城市轨道交通系统的运输能力与客流需求的匹配度评估的问题，从运输能力供应和乘客服务水平两个维度进行综合评估，不仅仅考虑运输能力利用率，还重点关注乘客服务水平等多个指标(候车时间、拥挤度)；并实现从车站-区间-线路进行三级综合运力运量匹配度评估，采用组合赋权(AHP-熵权)结合理想点法(TOPSIS)构建了一个综合评价模型，用以科学评估线路整体的运力与运量匹配度。最后，以北京地铁的单条线路实际运营数据为例进行实证分析，验证所提出方法的准确性和实用性，并给出一定针对性的提升建议。

关键词：城市轨道交通；运力运量匹配；匹配度评估；乘客服务水平；组合赋权-TOPSIS

中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)05-0064-08

Multi-dimensional Comprehensive Evaluation of Capacity-Demand Matching in Urban Rail Transit Based on Combined Weighting and TOPSIS

ZHENG Hengliang[1], TIAN Wanqi[2], ZHAO Peng[3], QIAO Ke[3]

(1. CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., Changchun 130062; 2. Institute of National Engineering Research Center of Rail Transportation Operation and Control System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044; 3. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: Accurate, comprehensive assessment of the spatiotemporal alignment between supplied capacity and dynamic, multidimensional passenger demand is essential for deploying capacity more effectively and alleviating load imbalances across the network. This study evaluates capacity-demand matching in urban rail transit from two dimensions—transport capacity supply and passenger service quality—by incorporating not only capacity utilization but also key passenger-oriented indicators (e.g., waiting time, crowding). A three-tier (station-segment-line) evaluation framework is established, and a composite assessment model is developed that integrates combined weighting (AHP-entropy) with the TOPSIS ideal-solution approach to quantify overall line-level performance. An empirical case using operational data from a Beijing Metro line verifies the model's accuracy and practicality and yields targeted optimization recommendations.

Keywords: urban rail transit; capacity-demand matching; matching degree evaluation; passenger service level; combined weighting-TOPSIS method

收稿日期：2024-10-11　修回日期：2025-05-30

第一作者：郑恒亮，男，本科，正高级工程师，主要从事轨道交通车辆系统集成技术研究，zhenghengliang.ck@crrcgc.cc

基金项目：国家自然科学基金项目(52202379)

引用格式：郑恒亮，田婉琪，赵鹏，等. 基于组合赋权–TOPSIS 的城市轨道交通运力运量匹配度评估方法[J]. 都市快轨交通，2025，38(5)：64–71.

ZHENG Hengliang, TIAN Wanqi, ZHAO Peng, et al. Multi–dimensional comprehensive evaluation of capacity–demand matching in urban rail transit based on combined weighting and TOPSIS[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(5): 64–71.

在经济快速发展和社会生活水平显著提升的背景下，乘客对于交通出行的服务水平要求也越来越高，轨道交通运营商不断优化调整运输资源的分配，并致力于提高对乘客服务的质量。尽管如此，由于城市轨道交通的建设和发展是一个阶段性的过程，这使得乘客的出行需求与可用的运输能力之间难以实现完全的理想的匹配，进而引发了一系列关于网络负载不均衡的问题[1]。因此，如何精确地衡量运输能力与乘客需求之间的匹配度，科学地分配运输资源，并加强需求管理，已成为轨道交通运营管理中亟须解决的实际问题。

在轨道交通运力运量匹配度评价的相关研究领域中，黄瑜楚[2]针对广铁集团客运运力供给与出行需求的匹配关系，对匹配评价方法进行了定量研究，并引入波动系数表示二者的偏差，以偏差值是否在限定范围内作为评价供需匹配与否的量化标准，从而形成了基于评价结果的运力供给调整模式。李杰[3]以北京地铁6号线实际所提供的运力与区间断面客流需求差异最小来衡量运力运量的匹配程度，并将其作为目标函数，以各交路、各编组列车的发车频率为决策变量实现高匹配度的列车开行方案设计。武瑶璇[4]从乘客出行需求、客流时空分布特征、列车开行方案和基础设施与设备条件等多个角度分析城市轨道交通运力运量匹配的影响因素。闫菲等[5]以运力运量匹配度最大化、运输成本最小化为目标，将运力运量匹配关系由既有“区间”层面细化至“交路”层面，进一步提升轨道交通开行方案。孟宇坤等[6]基于客流匹配对城市轨道交通列车运力运量匹配进行分析，进而优化运行图来提升服务质量。2023年6月，交通运输部发布了《城市轨道交通运力负荷评估规范》(JT/T 1469—2023)[7]，规定了线网、线路、车站3个层面基于运营数据的综合类指标和特征类指标计算方法及相应的负荷等级划分方法，较为全面地给出了城轨负荷程度的评价，但是综合评估方法简单采用加权和形式，且未对服务质量进行量化评价。

总结既有文献研究，大多数研究直接采用定性评估或者从某一角度，如车站层、区间层或者运行图优化等角度进行了一定深入的定量研究，但是运力与运量匹配性评估是一个复杂且多维的过程，涉及时间、空间等多个维度，涵盖网络、线路、区间、车站等多个空间层次，并需从运力利用和服务水平等多个维度进行综合考量。因此，本研究以北京地铁的实际客流数据为基础，从线路运力与运量的匹配度出发，提出了一种新的计算方法，旨在为轨道交通运营商在规划编制和运力资源配置优化方面提供更为科学的决策支持。

1 运力运量匹配度评价框架分析

在城市轨道交通实际运营中，确保运输能力与乘客需求之间的匹配对应是至关重要的。这种匹配关系需综合考量运输供应方和乘客的利益，以实现双方的满意度最大化。评价运力运量匹配度的指标应当涵盖乘客的出行体验和运营方的效率表现。一方面，乘客的出行体验可以通过服务的及时性、舒适度和安全性等方面来衡量，而地铁运营方的效率则可通过运输资源的利用率和成本效益来评价。本文在参考2023年交通运输部发布的《城市轨道交通运力负荷评估规范》(JT/T 1469—2023)[7]的基础上，通过深入分析城市轨道交通系统中运输能力与乘客流量的相互作用，建立了一个综合评价体系，如图1所示。在该体系中，不单单通过运营指标计算直接划分指标等级，而是全面评估运输能力与乘客需求在不同层面的匹配状况。例如，引入理想满载率、平均候车时间、乘车舒适度等指标来表征乘客需求，并对服务质量进行量化。该评价体系不仅评估了线路层面的整体匹配度，还微观分析了各个车站和区间的匹配情况，从而为运输服务的优化提供了多角度的参考依据。

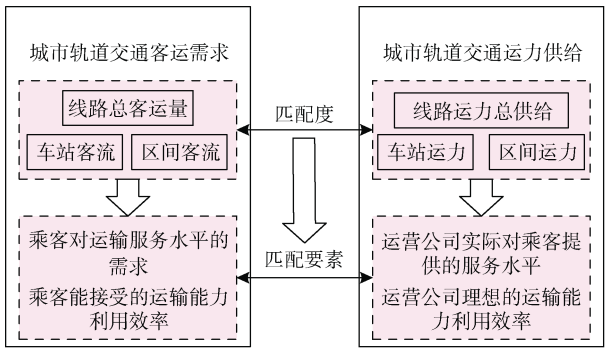


图1 城市轨道交通运力运量匹配度评价框架

Figure 1 Evaluation framework for urban rail transit capacity-demand matching

2 多层次的运力运量综合匹配度评估

运力运量综合匹配度评估需要结合城轨运营体系的典型特征，以车站层面为基本单元，逐步向区间层面和线路层面深入，形成多维度、多层面、多指标的综合评价体系。在对其进行评价时，涉及乘客服务、客运组织、运营效率等多个角度，具有较高的复杂性

和特殊性[8]。

因此，运力运量综合匹配度评价体系是以车站为基本评价单元，在对车站和区间的匹配度程度进行单元模块评价的基础上，对评价指标和元素扩展，进一步评价线路，更进一步评价网络层。

2.1 车站层匹配度模型

车站层匹配度主要考虑车站客流与该站的列车载客能力之间的匹配关系，二者匹配性好，则该站的匹配度高，反之则低。

在车站容纳能力满足车站客流需求的情况下，车站运力运量匹配度 p_i 表达式为

$$p_i = \frac{q_i^{\mathrm{BO}}}{c_i} \tag{1}$$

式中，q_i^{BO} 为车站进站量；c_i 为车站的实际剩余运输能力。

车站的运输能力为在该线路列车额定定员的运输能力下，到达该车站时，扣除该站下车乘客人数后，所剩的实际运输能力，则 t 时段车站 s_i 的运输能力 c_i 计算公式为

$$c_i = C_0 - Q_{i-1} + q_i^{\mathrm{AL}} \tag{2}$$

式中，C_0 为线路上列车额定定员的运输能力；Q_{i-1} 为前一个区间$(i-1)$区间的累计断面量；q_i^{AL} 为在 s_i 站出站的乘客数量。

2.2 区间层匹配度模型

区间运力运量匹配度主要考虑该区间的运力与该区间客流需求的协调程度，需要根据区间客流实际状态进行综合评价。考虑乘客对车厢内拥挤度的厌恶，本文在指标计算时引入理想满载率指标，计算实际满载率与理想满载率的偏离程度，从而得到不同时段的区间运力匹配度。

t 时段区间 α 的区间满载率为

$$l_\alpha(t) = \frac{q_\alpha(t)}{c_\alpha(t)} \tag{3}$$

式中，$l_\alpha(t)$为区间 α 的满载率；$q_\alpha(t)$为断面客流量；$c_\alpha(t)$为区间运力。t 时段区间 α 运力运量匹配度 $f_\alpha(t)$计算公式为

$$f_\alpha(t) = 1 - \frac{\left| l_\alpha(t) - \mu(t) \right|}{\mu(t)} \tag{4}$$

式中，$\mu(t)$为 t 时段的理想满载率。

考虑到平峰和高峰客流量导致满载率的差异性，因此按照时段划分理想满载率的 $\mu(t)$值，在平峰时段和高峰时段分别对应不同的 $\mu(t)$。较高的区间运力匹配度范围一般为 $0.8 \leqslant f_\alpha(t) \leqslant 1.0$。

2.3 线路层匹配度模型

2.3.1 线路层的评价指标选择

整条线路层运力运量匹配度需要进行综合评估，即结合各个区间和车站的情况，综合考虑运能利用程度和服务水平进行评价。

1) 线路运输能力利用率。在实际轨道交通运营中，多采用线路运输能力利用率来反映线路运输能力的利用程度。

t 时段线路运输能力利用率 $L(t)$计算公式为

$$L(t) = \frac{\sum AL(t)}{\sum NL(t)} \tag{5}$$

式中，$\sum NL(t)$ 为 t 时段列车定员公里数；$\sum AL(t)$ 为人公里总数。

2) 线路平均候车时间。乘客在各个车站候车时间是乘客在车站服务水平的主要体现，也是运力供给能否与乘客出行需求及出行满意度高效匹配的关键因素，因此选择线路平均候车时间作为线路层服务水平的指标之一。

通常平均候车时间为发车间隔的一半，即线路乘客平均候车时间在 $t_{\mathrm{w}}(t)$计算公式为

$$t_{\mathrm{w}}(t) = \frac{h(t)}{2} \tag{6}$$

式中，$t_{\mathrm{w}}(t)$ 为线路乘客平均候车时间；$h(t)$ 为线路发车间隔。

3) 乘车舒适度。乘车舒适度为乘客在区间乘车服务水平的直接体现，在轨道交通服务水平评价中至关重要。乘车舒适度主要取决于列车经过每个区间的平均载客量和列车定额。不同于既有研究中单纯采用满载率作为乘车舒适度的表征，本文按照列车是否有空座位、无座位是否拥挤分类量化乘车舒适度 $f_\alpha^{\text{in-veilcle}}(t)$[9]，计算公式为

$$f_\alpha^{\text{in-veilcle}}(t) = \begin{cases} 1 & 0 < P(t) \leqslant P_{\mathrm{a}}(t) \\ \dfrac{P_{\mathrm{b}}(t) - P(t)}{P_{\mathrm{b}}(t) - P_{\mathrm{a}}(t)} & P_{\mathrm{a}}(t) < P(t) \leqslant P_{\mathrm{b}}(t) \\ 0 & P(t) > P_{\mathrm{b}}(t) \end{cases} \tag{7}$$

式中，$P(t)$为 t 时段内区间累计载客量；$P_{\mathrm{a}}(t)$为累计列车座位数；$P_{\mathrm{b}}(t)$为累计列车额定载客量。

2.3.2 运力运量综合匹配度评价模型搭建

本文采用基于组合赋权(AHP-熵权)结合理想点法

(TOPSIS)综合评价方法计算线路综合匹配度。理想点法(technique for order preference by similarity to deal solution，TOPSIS)是一种多指标决策分析方法，已经广泛应用于综合性系统评价领域[10]。但是其缺点是默认各个指标的权重相同，但是实际在轨道交通系统综合评价和规划设计时，会对不同指标侧重程度有一定的考量，如新建线路需要侧重于运输能力的利用程度，既有线路会侧重对乘客服务水平的不断提升。因此本文结合层次分析法(analytic hierachy process，AHP)和熵权法，通过AHP法对主观意愿进行赋权，通过熵权法对客观指标的重要程度进行评估赋权，将主观与客观赋权结合，实现合理的指标权重。

1) AHP-熵权组合赋权法

步骤1：AHP指标主观权重。构建线路层运力运量匹配度评价指标层次分析模型，最上层为目标层，为线路层运力运量匹配度最优代表值；中间层为准则层，为各个评价指标；最下层方案层，为运力运量匹配度所含的指标值。

采用1～9标度法[10]对各级指标的重要性进行对比赋值，建立判断矩阵 $\boldsymbol{C}$。此步骤可以根据线路的实际运营特征进行赋值，体现不同线路特点的对应指标的差异化和重要性程度。

比较优先判断矩阵，通过层次分析法计算得到初始权重向量 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{A}}$。

$$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{A}}=\left[\frac{\sum_{j=1}^{m}\overline{c_{1j}}}{m}\ \frac{\sum_{j=1}^{m}\overline{c_{2j}}}{m}\cdots\frac{\sum_{j=1}^{m}\overline{c_{mj}}}{m}\right]^{\mathrm{T}} \tag{8}$$

式中，c_{ij} 表示矩阵 $\boldsymbol{C}$ 中第 i 行，第 j 列的元素值；m 为指标个数，本文中 m=3。

为验证判断矩阵设计的合理性，需要进行一致性检验，检验公式为

$$\mathrm{CR}=\frac{\lambda_{\max}}{(m-1)\mathrm{RI}} \tag{9}$$

式中，RI为随机一致性指标；CR是一致性比例(consistency ratio)，用于检验判断矩阵的一致性是否可接受；$\lambda_{\max}$ 为矩阵最大特征值。根据判断矩阵的一致性指标，当CR<0.1时，表示矩阵符合一致性检验，各指标权重比例具有科学性。

步骤2：熵权法指标客观权重。熵权法[11]能客观反映不同指标的重要性，通过评估指标数据的离散程度来确定权重，在主观赋权的基础上，真实反映不同指标在数值上体现出的重要程度。第 i 个指标的权重 w_i 计算方法为

$$\begin{cases} w_i=\dfrac{1-H_i}{m-\sum_{i=1}^{m}H_i} \\ H_i=-\dfrac{1}{\ln n}\sum_{j=1}^{n}f_{ij}\ln f_{ij} \\ f_{ij}=\dfrac{y_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}x_{ij}} \end{cases} \tag{10}$$

式中，H_i 为信息熵；f_{ij} 为指标的特征比重。x_{ij} 为第 i 个指标，在第 j 个时段的初始值；n 为第 i 个指标的样本总数。

步骤3：组合权重确定。将AHP主观权重 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{A}}$ 集合与熵权法客观权重集合 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{E}}$ 结合，通过公式(11)计算得到复合权重集合 $\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{S}}$：

$$\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{s}}=\frac{\omega_{\mathrm{E}}\cdot\omega_{\mathrm{A}}}{\sum_{i=1}^{3}\omega_{\mathrm{E}}\cdot\omega_{\mathrm{A}}} \tag{11}$$

通过AHP-熵权法得到3个性能指标的权重之后，使用TOPSIS法对运力运量匹配度进行综合计算，实现对运力运量匹配度的综合评价。

2) TOPSIS方法

步骤1：确定初始矩阵 $\boldsymbol{X}$。令 x_{ij} 表示第 i 个指标在第 j 个时段的初始值。

$$\boldsymbol{X}=\left(x_{ij}\right)_{m\times n}=\begin{bmatrix} x_{11}\cdots x_{1j}\cdots x_{1n} \\ \vdots\quad\vdots\quad\vdots \\ x_{i1}\cdots x_{ij}\cdots x_{in} \\ \vdots\quad\vdots\quad\vdots \\ x_{m1}\cdots x_{mj}\cdots x_{mn} \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中，m 为指标总数；n 为时段总数。本文中 m=3，n=18。

步骤2：标准化决策矩阵。由于运力运量匹配度评价的各个指标的度量单位不同，为了消除不同量纲对评价结果的影响，需要对指标进行归一化处理。

若 x_{ij} 为正向型指标(越大越好)，其标准化处理公式为

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}-\min\left(x_{ij}\right)}{\max\limits_{1\leqslant i\leqslant m}\left(x_{ij}\right)-\min\limits_{1\leqslant i\leqslant m}\left(x_{ij}\right)} \tag{13}$$

若 x_{ij} 为负向型指标(越小越好)，其标准化处理公式为

$$y_{ij}=\frac{\max\left(x_{ij}\right)-x_{ij}}{\max\limits_{1\leqslant i\leqslant m}\left(x_{ij}\right)-\min\limits_{1\leqslant i\leqslant m}\left(x_{ij}\right)} \tag{14}$$

归一化处理后得标准化矩阵 $\boldsymbol{Y}$ 为

$$\boldsymbol{Y}=\left(y_{ij}\right)_{m\times n}=\begin{bmatrix} y_{11}\cdots y_{1j}\cdots y_{1n} \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ y_{i1}\cdots y_{ij}\cdots y_{in} \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ y_{m1}\cdots y_{mj}\cdots y_{mn} \end{bmatrix} \tag{15}$$

步骤 3：TOPSIS 综合评价。设第 i 个指标的正理想解为 V_i^+，负理想解为 V_i^-，其计算方法如下：

$$V_i^- = \min_{1\leqslant j\leqslant n}\left(y_{ij}\right) \tag{16}$$

$$V_i^+ = \max_{1\leqslant j\leqslant n}\left(y_{ij}\right) \tag{17}$$

第 j 个时段与正理想解的距离 d_j^+，负理想解的距离 d_j^- 为

$$d_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}(V_i^+ - r_{ij})^2} \tag{18}$$

$$d_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^{m}(V_i^- - r_{ij})^2} \tag{19}$$

步骤 4：判断综合匹配度的大小。T_j 为第 j 个时段线路综合匹配度与最优匹配度之间的接近程度，其取值范围为[0，1]。根据每个时段的 T_j 大小可以判断线路综合匹配度的高低，并确定匹配度高低顺序，匹配度 T_j 计算公式为

$$T_j = \frac{d_j^-}{d_j^+ + d_j^-} \tag{20}$$

2.4 多层次多维度综合评价指标体系总结

评价指标分为车站层、区间层和线路层，评价要素涵盖了乘客服务水平和运输能力利用率两方面，将各个层次和要素总结，如图 2 所示。其中车站层的关键指标为站台候车时间、车站滞留人数；区间层的关键指标为区间满载率和区间乘车舒适度；线路层的关键指标为线路平均满载率、线路平均候车时间、线路乘车舒服度。

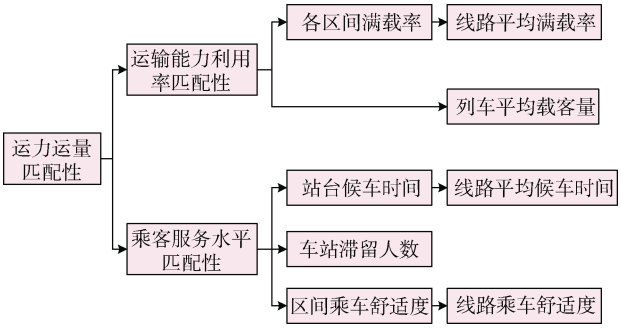


图 2 多层次多维度综合评价指标体系

Figure 2 Multi-level and multi-dimensional comprehensive evaluation index system

3 实证分析

本文选取北京地铁 1 号线某工作日的原始售检票数据和当天的列车时刻表数据为实例进行研究，北京地铁 1 号线站点如图 3 所示。



图 3 北京地铁 1 号线站点

Figure 3 Stations on Beijing Subway Line 1

3.1 关键评价指标计算

基于 AFC 数据和列车时刻表数据进行关键评价指标的计算。图 4 为早高峰 7:00—8:00 时段不同列车载客量变化和区间分布，共计 30 列车。自 7:00 开始列车载客量随列车发车时间推移逐渐变高。图 5 为各个车站分时段进站量，早高峰进站客流多集中在上行车站(苹果园—四惠)，晚高峰进站集中在下行车站(四惠—苹果园)。可以看出该线路客流具有明显的时间分布不均衡性和空间分布不均衡性，因此对于车站和区间运力运量匹配度的评估是非常有必要的。

3.2 车站运力运量匹配度评价

以早高峰 8:00—9:00 为例，对线路上各个车站该小时的运力运量匹配度进行计算，如图 6 所示。可以看出，线路两端的车站运输能力大，线路中间的车站运输能力偏低，这是由于客流的分布导致的。同时，各站运力运量匹配度变化也较大，公主坟—南礼士路连续 4 个车站的匹配度超过理想范围，表明这 4 个车站运输能力不能满足运量，南礼士路站情况最为突出。

3.3 区间运力运量匹配度评价

1 号线苹果园—四惠东各区间全天每小时运力运量匹配度分布如图 7 所示。因为客流空间分布和时间分布较强的不均匀性，导致各个区间和各个时段的区间匹配度差异和变化较大。可以按照时间和空间的变化进行分析。

1) 时间特征：早晚高峰时段和平峰时段的区间运力运量匹配状态有明显差异。总体上早晚高峰时段的匹配度相对平峰时段较高，大部分时间和区间的匹配

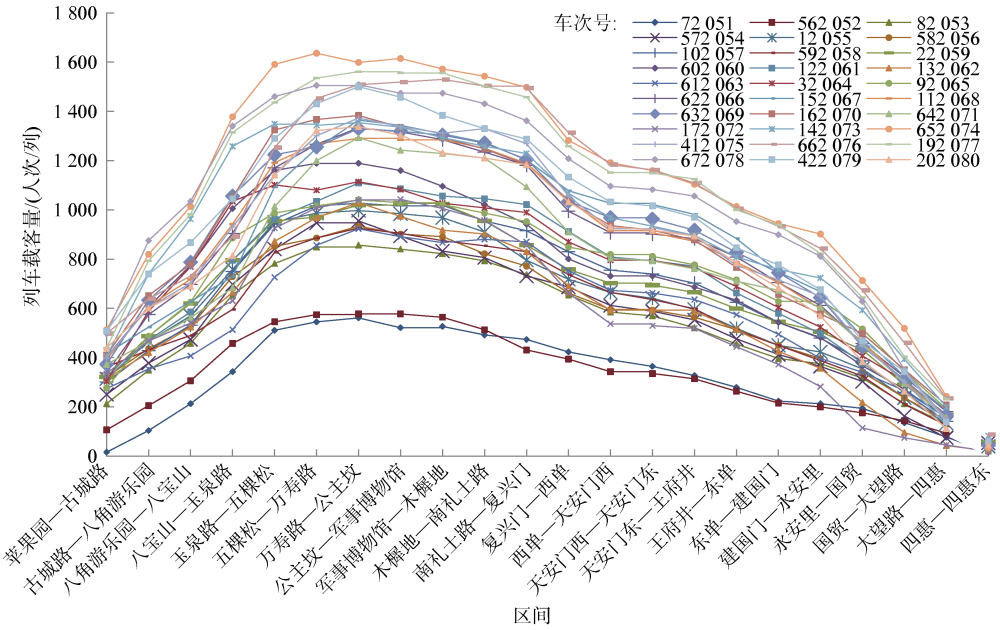
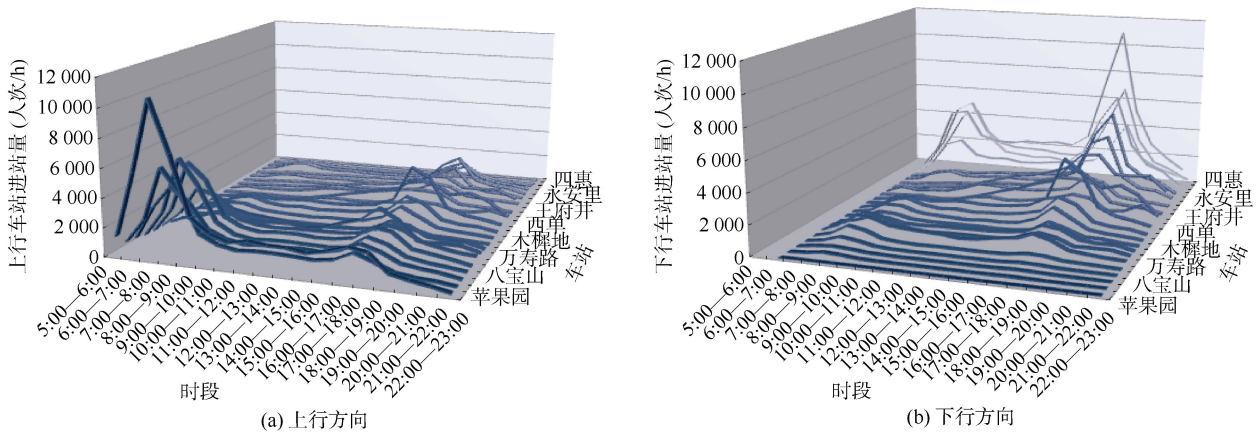


图 4　早高峰小时不同列车区间载客量分布

Figure 4　Distribution of segment passenger loads for different trains during the morning peak hour



(a) 上行方向　　(b) 下行方向

图 5　1 号线全日分时段各车站进站量

Figure 5　Hourly entry volumes of each station throughout the day

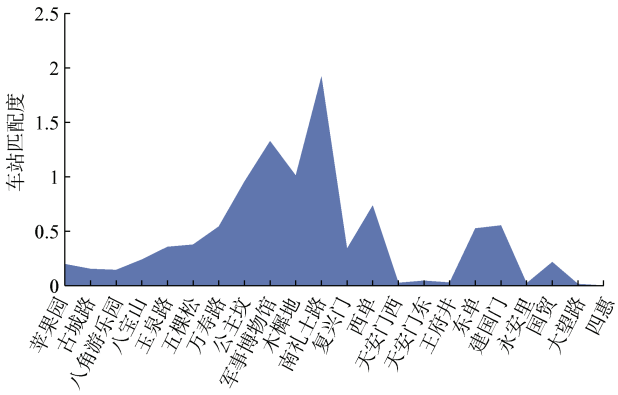


图 6　早高峰一小时各个车站运力运量匹配度

Figure 6　Capacity–demand matching degrees of stations during the morning peak hour

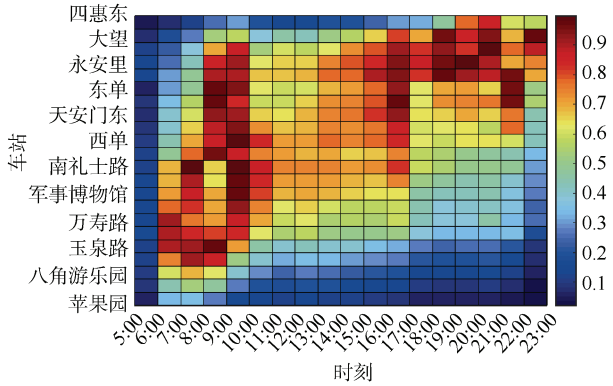


图 7　各区间全日每小时匹配度时空分布

Figure 7　Spatiotemporal distribution of hourly capacity-demand matching degrees by segment

度均大于 0.8，而平峰时段多集中于 0.6～0.7 区间。运营开始时段 5:00—6:00 点的匹配度最低，低至 0.2 以下。这主要受到客流量的影响较大，总体上客流高峰时段的匹配度较高。

2) 空间特征：同一时段内，不同区间的匹配度也有显著差异。可以看出，即使在高峰时段，不同区间的匹配度的变化也很明显。例如，在早高峰时段的 8:00—9:00，万寿路至复兴门区段显示出与邻近区段的显著差异(呈现局部的橘黄色)，该区段运力与乘客需求的匹配度降低，只有 0.6～0.7，主要由于该区段的列车满载率超过 100%，运力不能支撑客流需求。而在晚高峰时段变化更加显著，自苹果园—四惠东匹配度在逐渐增高(由蓝色—红色)，主要是随着客流的增多其匹配度在提高。在平峰时段，不同区间的匹配度的差异不是非常大，中间连续的几个区间的匹配度比较一致，线路两端区间的匹配度最低。

3.4 1 号线运力运量综合匹配度评价

图 8 是 1 号线全日每小时运力运量综合匹配度计算结果。可以看出，随着运营时间推进，线路综合匹配度一直持续性波动。其中，运营开始时段和结束时段是全天匹配度最低的时段；早晚高峰时段的匹配度相对较高，尤其是晚高峰 17:00—19:00 全天匹配度最高。早高峰的 8:00—9:00 匹配度相对相邻时段低了很多。平峰时段 10:00—17:00 一直比较稳定，波动不大。

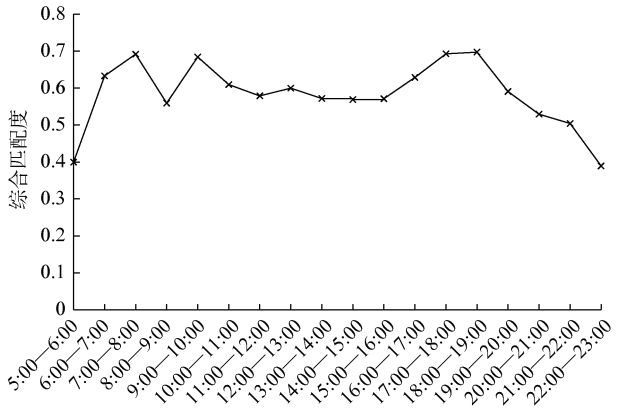


图 8 线路每小时综合运力运量匹配度

Figure 8 Hourly comprehensive capacity-demand matching degree of the line

进一步分析乘客服务水平和运输能力利用率两个要素的匹配度。表 1 是全日各时段服务水平、运输能力利用率和综合匹配度状态，其中各指标值大于 0.6 为正常偏高，低于 0.6 为偏低。

表 1 分时段匹配度

Table 1 Hourly capacity-demand matching degrees

时段	服务水平	运输能力利用率	综合匹配度值
05:00—07:00	0.51	0.01	0.40
07:00—08:00	0.67	0.74	0.69
08:00—09:00	0.40	0.98	0.56
09:00—10:00	0.83	0.47	0.68
10:00—17:00	[0.79，0.85]	[0.31，0.40]	[0.56，0.63]
17:00—18:00	0.72	0.49	0.69
18:00—19:00	0.70	0.54	0.70
19:00—22:00	[0.61，0.72]	[0.32，0.36]	[0.57，0.61]
22:00—23:00	0.44	0.20	0.39

总结全日匹配度变化特点可以大致分为四类情况。各项匹配度结果特征分析如表 2 所示，每一类对应不同的线路能力利用率和服务水平以及综合匹配度状态。根据评价结果表明，注重单一方面的优化无法弥补其他方面的不足，只有综合考虑服务水平和运力利用率，实现两方面的匹配结果均较高时，整体的匹配度才能达到最优。

表 2 1 号线线路全日不同时段匹配度特征总结

Table 2 Summary of capacity-demand matching characteristics of Line 1 by time period

时段	线路能力利用率	服务水平	综合匹配度	原因分析
5:00—6:00/22:00—23:00	偏低	偏低	偏低	候车时间较长、客流过少，导致二者均较差，综合匹配度较低
8:00—9:00	最高	最低	偏低	运输能力无法满足客流需求；服务水平骤降
10:00—17:00	偏低	适中	偏低	客流相对较少，运力利用率偏低，导致综合匹配度也低
7:00—8:00/9:00—10:00/17:00—19:00	偏高	偏高	偏高	运输能力刚好满足客流需求，此时二者匹配度最高

综合图 8 和表 2 可以看出，北京地铁 1 号线工作日全日匹配度特征，7:00—8:00/9:00—10:00/17:00—19:00 三个时段的匹配度较高，实现了运力与运量之间的最高的适应性；平峰 10:00—17:00 时段，匹配度较低，主要是由于客流较少，运力超过运量导致，可以考虑在不影响乘客服务水平的前提下，开行小编组列车，由 6 辆编组改为 3～4 辆编组列车，提升运输能力利用率；8:00—9:00 匹配度也较低，主要是由于运输能力无法满足客流需求，乘客服务水平过低导致，可以适当加开列车，或者优化车站运输组织，提升匹配

度；5:00—6:00/22:00—23:00 时段匹配度低，主要是由于运输能力利用率低，同时乘客服务水平也偏低，可以考虑从设置分时段票价等方式提升服务水平以及均衡客流的时间分布。

4 结论

本文旨在全面评估城市轨道交通运输能力与时空不均衡的客运需求的匹配性。结合轨道交通运力运量匹配性特点的基础上，构建了一个多角度、多层面的综合评价体系。

1) 综合考虑了乘客接受服务的质量和运输能力利用率两方面，并涵盖了从单个车站到区间到整个线路网络的不同层面，采用组合赋权(AHP-熵权)结合理想点法(TOPSIS)构建了一个综合评价模型，用以评估线路整体的运力与运量匹配度，进而形成了一套系统的运力运量匹配评价方法体系。

2) 选取北京地铁 1 号线作为实例，对 1 号线工作日全日不同时间段的运力运量匹配度进行了综合分析，并总结分时段特征给出了建议和策略。

3) 结果表明，该评估模型能够综合考虑多个指标的均衡性，能够兼顾乘客服务水平和运输能力利用率，实现运力运量匹配度科学合理的评估，并给出提升匹配的相应建议。

参考文献

[1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告解读[J]. 城市轨道交通, 2024(4): 15-17.
Urban Rail Transit Association. Interpretation of statistics and analysis report of urban rail transit in 2023[J]. China metros, 2024(4): 15-17.

[2] 黄瑜楚. 广铁集团高速铁路客运供需匹配研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2022.
HUANG Yuchu. Research on matching of passenger transport supply and demand of Guangzhou railway group's high-speed railway[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2022.

[3] 李杰. 基于多编组的城市轨道交通大小交路列车开行方案与时刻表协同优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
LI Jie. Research on collaborative optimization of train operation scheme and timetable of urban rail transit with large and small intersections based on multi-grouping[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.

[4] 武瑶璇. 面向运力运量匹配的城轨复杂多交路列车运行组织优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
WU Yaoxuan. Optimization of operation organization of complex multi-route trains in urban rail transit oriented to capacity matching[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.

[5] 闫菲, 姚向明, 赵鹏, 等. 互通运营模式下轨道交通开行方案编制模型[J]. 铁道学报, 2023, 45(2): 13-21.
YAN Fei, YAO Xiangming, ZHAO Peng, et al. Modelling train operation plan for urban rail transit under interconnection operational mode[J]. Journal of the China railway society, 2023, 45(2): 13-21.

[6] 孟宇坤, 钱广民, 常利, 等. 基于客流匹配的城市轨道交通列车运行图优化研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(9): 185-194.
MENG Yukun, QIAN Guangmin, CHANG Li, et al. Optimization of urban rail transit train diagram based on passenger flow matching[J]. Railway transport and economy, 2024, 46(9): 185-194.

[7] 中华人民共和国交通运输部. 城市轨道交通运力负荷评估规范: JT/T 1469—2023[S]. 北京: 人民交通出版社, 2023.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Urban rail transit capacity load assessment specifications: JT/T 1469—2023[S]. Beijing: China Communications Press, 2023.

[8] 田婉琪. 城市轨道交通运力运量综合匹配评估研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
TIAN Wanqi. Study on comprehensive matching evaluation of urban rail transit capacity and volume[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[9] LAM W H K, CHEUNG C Y, LAM C F. A study of crowding effects at the Hong Kong light rail transit stations[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1999, 33(5): 401-415.

[10] 卓亚娟, 贾志绚, 韩智强, 等. 基于组合赋权-TOPSIS法的城市平面立交交通组织评价研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(9): 140-148.
ZHUO Yajuan, JIA Zhixuan, HAN Zhiqiang, et al. Study on evaluation of urban plane interchange traffic organization based on combined weighting-TOPSIS method[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2022, 39(9): 140-148.

[11] 张明锐, 段宏伟, 徐杰, 等. 基于层次分析法与熵权法的城市轨道交通牵引变压器健康状态评估[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1): 138-143.
ZHANG Mingrui, DUAN Hongwei, XU Jie, et al. Health status evaluation of urban rail transit traction transformers based on analytic hierarchy process and entropy weight method[J]. Urban mass transit, 2025, 28(1): 138-143.

（编辑：傅依萱）