文章编号：1003-1421(2026)01-0015-12
引用格式：杨宇川，陶思宇，彭其渊. 铁路综合客运枢纽客流态势评估与推演研究综述[J]. 铁道运输与经济，2026，48(1)：15-26.
YANG Yuchuan，TAO Siyu，PENG Qiyuan. Review of Research on Passenger Flow Situation Assessment and Deduction of Comprehensive Railway Passenger Transport Hub[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：15-26.

铁路综合客运枢纽客流态势评估与推演研究综述

杨宇川[1, 2, 3]，陶思宇[1, 2, 3]，彭其渊[1, 2, 3]

(1.西南交通大学 交通运输与物流学院，四川 成都 611756；2.西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室，四川 成都 611756；3.西南交通大学 综合交通大数据应用技术国家工程实验室，四川 成都 611756)

摘 要：为提升铁路综合客运枢纽的服务质量和应对能力，针对铁路综合客运枢纽客流态势的动态性、多维性与复杂性特征，提出“评估-推演”协同分析框架，即客流态势评估和推演。系统梳理现有文献，将客流态势评估分为态势表征指标体系构建、指标权重确定及评价模型选择，根据客流态势影响因素类型来选取指标，根据各方法和模型的优劣分析各方法和模型在不同评估场景之间的适配性，通过多维度指标的评估来反映枢纽的客流状态和潜在风险；对客流态势的推演基于方法论完整性与技术特征区分度的双重考量，可分为聚焦多情景演化模拟的概率预测模型、关注客流量具体变化的客流预测方法，以及侧重空间方案验证的行人仿真模型。研究为铁路综合客运枢纽的客流态势评估与推演提供理论支撑与实践参考。

关键词：铁路综合客运枢纽；客流态势；态势表征；态势评估；态势推演
中图分类号：U291 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20241015003

Review of Research on Passenger Flow Situation Assessment and Deduction of Comprehensive Railway Passenger Transport Hub

YANG Yuchuan[1, 2, 3]，TAO Siyu[1, 2, 3]，PENG Qiyuan[1, 2, 3]

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 2. National United Engineering Laboratory of Integrated and Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: To improve the service quality and response capacity of comprehensive railway passenger transport hubs, aiming at the dynamic, multi-dimensional, and complex characteristics of passenger flow situations, this study proposed an “assessment-deduction” collaborative analysis framework, namely passenger flow situation assessment and deduction. This study systematically sorted out existing literature and divided passenger flow situation assessment into three components: construction of situation characterization index systems, determination of index weights, and selection of assessment models. Indexes were selected based on the types of factors influencing passenger flow situations, and the adaptability between different methods, models, and various assessment scenarios was

收稿日期：2024-10-15 **修订日期**：2025-01-30
通信作者：陶思宇(1980—)，男，黑龙江齐齐哈尔人，西南交通大学交通运输与物流学院教授。
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFB4300502)

analyzed. Multi-dimensional index assessment reflected the hub's passenger flow status and potential risks. For passenger flow situation deduction, methodologies were distinguished based on methodological completeness and technical characteristics, including probabilistic prediction models focusing on multi-scenario evolution simulation, passenger flow forecasting methods aimed at specific volume changes, and pedestrian simulation models emphasizing spatial scheme validation. This research provides theoretical support and practical reference for passenger flow situation assessment and deduction in comprehensive railway passenger transport hubs.

Keywords: Comprehensive Railway Passenger Transport Hub; Passenger Flow Situation; Situation Characterization; Situation Assessment; Situation Deduction

铁路综合客运枢纽作为一个集铁路运输、城市轨道交通运输和道路运输等多种交通方式为一体的综合交通枢纽，承载着日均数十万人次的旅客集散与多模式交通接驳功能，枢纽内旅客流动呈现出动态性、时空多样性和突发性等特征。枢纽的高效运行不仅直接关系到旅客出行体验和城市交通效率，更影响着区域经济的协调发展和城市综合服务能力的提升。因此，系统研究铁路综合客运枢纽的客流态势，不仅有助于科学评估枢纽的运行状况和服务水平，还能为枢纽的规划设计、运营管理及应急响应等提供理论支撑和决策依据，具有重要的理论意义和应用价值。一方面，客流态势评估能够全面、动态地反映枢纽当前的运行状态，及时发现潜在的安全隐患和运行瓶颈，为优化设施布局和运营组织提供决策依据；另一方面，态势推演能够基于现有数据和模型，预测客流未来的发展趋势和极端情况下的变化过程，为应急预案制定、资源调度和服务提升提供前瞻性支持。随着大数据、物联网、人工智能等新技术的应用，铁路综合客运枢纽的客流数据获取更加全面，数据分析与管理手段也日益丰富，为深入开展客流态势研究提供了坚实的技术基础和广阔的发展空间。

1　铁路综合客运枢纽客流态势评估与推演概念

态势评估与推演是指在复杂系统中，通过对多源数据的实时感知与分析，全面掌握系统当前的运行状态，并基于科学模型对未来的发展趋势进行预测和推断的过程。通过评估可以实时地了解当前评估对象的客观状况，及时发现和解决潜在的安全风险，通过推演可以预测和分析未来一段时间内系统态势的演化过程，从而为决策提供前瞻性支持。这一方法广泛应用于军事、应急管理、交通运输等领域，旨在实现从被动响应到主动调控的转变，提升系统的整体运行效率与安全保障能力。

在铁路综合客运枢纽领域，客流态势评估与推演是指通过对枢纽内外部客流数据的动态监测与分析，量化反映旅客在枢纽内的时空分布、拥挤程度和换乘效率等核心指标，并利用多种预测与仿真方法，模拟和预测枢纽在不同时间、不同场景下的客流状态，提升系统的整体运行效率与安全保障能力。既有文献较少提到客流态势的概念，大多是在评价枢纽韧性、安全性或经济效益时包含了客流这个因素，但没有单独将其作为一个研究对象深入研究。基于既有研究，创新性地提出不同的态势评估框架如下：①对既有文献的评估指标进行研究，突破传统指标选取的各类局限性；②根据现有的动态评估模型，得到各类方法模型的优劣和适用性，为后续研究提供思路；③利用各类不同的态势推演模型和客流预测模型，对枢纽内不同交通方式的到达客流进行预测，实现未来客流分布的预案优化与仿真验证。

2　铁路综合客运枢纽客流态势评估

2.1　评估指标体系的建立

在铁路综合客运枢纽客流态势评估研究中，指标体系是对枢纽运行状态进行量化描述和比较分析的基础，客流态势往往受诸多因素影响，在众多文献中，这些影响客流态势的主要因素大致被分为“人–机–环”3类，即设施设备因素、环境因素和旅客因素3部分，在综合研究大量综合客运枢纽评估文献后，可以发现针对不同影响因素的评估往往选取不同的评估指标。

（1）设施设备类指标。田健等[1]将出入口数、通道宽度、检票闸机数量等作为客流分布均衡性的量化指标；戢小辉[2]在地铁安全态势评价中，考察

了设备智能化程度对突发客流处置能力的作用；Li 等[3]结合上海虹桥枢纽案例，强调设施智能化水平对高峰期客流调控的关键价值。根据文献梳理枢纽内部功能布局、通行通道、安检设备、导引系统等硬件设施对客流聚集与疏散过程的影响，客流态势表征中设施设备类指标如图 1 所示。

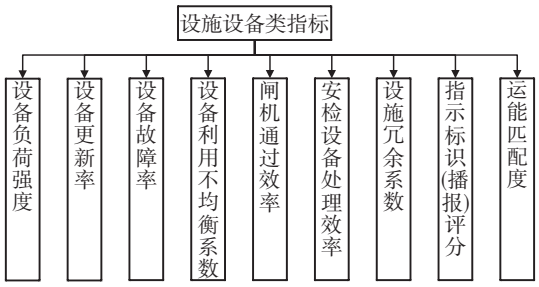


图 1　客流态势表征中设施设备类指标

Fig.1　Equipment indicators in passenger flow situation characterization

（2）环境类指标。外部环境因素包括天气状况、周边交通状况、大型活动等可能影响客流进出量的因素，黄兆国[4]在大型枢纽交通评估中引入了周边道路通行能力和气象条件指标；同样，枢纽的内部环境也会影响客流的态势变化，内部环境因素包括卫生、温湿度和照明等，这些会影响旅客的出行效率和舒适度，进而影响客流分布；刘杰鑫[5]将站前广场人车混行指数与客流拥挤度结合，用于动态评价安全风险；张小辉[6]在多模式枢纽换乘服务水平评价中，进一步细化了内部公共空间环境指标。客流态势表征中环境类指标如图 2 所示。

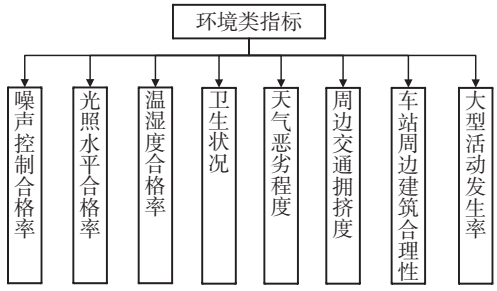


图 2　客流态势表征中环境类指标

Fig.2　Environmental indicators in passenger flow situation characterization

（3）旅客类指标。聂婷婷等[7]和张小辉[6]在对综合客运枢纽旅客换乘服务水平进行评价时，提出从旅客乘车的具体流程来进行分析，包括订票、进站、安检、候车、检票、乘车、换乘和出站等步骤，基于旅客候车时间、换乘距离、旅客排队分布、拥堵持续时长等因素提出高时效性的客流态势表征指标，可以有效分析枢纽的运行效率、服务质量和可能存在的瓶颈，以便全面反映客流在枢纽中的状态。客流态势表征中客流类指标如图 3 所示。

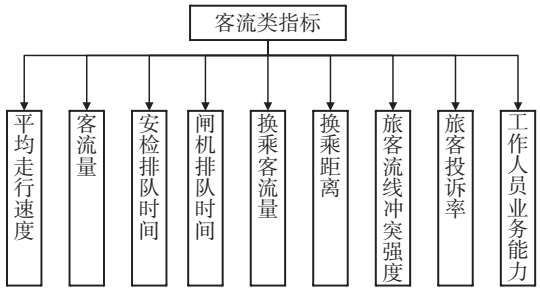


图 3　客流态势表征中客流类指标

Fig.3　Passenger flow indicators in passenger flow situation characterization

2.2　指标权重的确定方法

在进行态势评估前要先确定指标的权重，指标的权重确定可以客观地对不同指标的重要性进行量化，识别和重点关注对于铁路综合客运枢纽发展和运营最为关键的指标，通过赋予关键指标更高的权重，能够确保在评估过程中更加注重这些指标的表现和改善，避免相对次要的指标对评估结果产生较大的影响。在分析了众多态势评价的文献后，可以总结出常用的确定指标权重的方法主要分为 3 类，主观赋权、客观赋权和组合权重赋权法，确定指标权重的常用方法如表 1 所示。

目前的赋权方法主要分为主观赋权法和客观赋权法，如卢虹宇[8]使用层次分析法对通过事故数分析法来确定的评价指标进行了权重的确定；朱国栋[12]使用序关系法对高速铁路综合维修作业的指标进行了权重的确定。通过主观赋权法确定权重可以将主观的判断和经验量化，具有一定的灵活性，但在一定程度上依赖于决策者的主观判断，存在主观性影响，所以此类方法不太适合单独作为指标权重的确定方法。而客观赋权法在诸多文献中的使用常常以熵权法为主，比如刘杰鑫[5]在考虑权重确定时，使用了基于客观赋权的熵权法，对高速铁路运输组织态势评价指标进行了赋权，具有较强的客观性，但未有效融入专家意见，且对于具有明显层次结构的决策问题，熵权法不能适用，无法有效体现不同层次指标之间的关系。

表1　确定指标权重的常用方法

Tab.1　Common methods for determining indicator weights

确定权重的方法		文献	优点
主观赋权法	层次分析法	卢虹宇[8]、Zhao等[9]、田健等[1]、周俊[10]、聂婷婷等[7]、陈帅等[11]	主要是基于专家判断和主观意见来确定指标权重，灵活性较高，能够纳入一些难以通过客观数据量化的因素，如专家的经验和意见
	序关系法	黄兆国[4]、朱国栋[12]	
客观赋权法	熵权法	黄兆国[4]、刘杰鑫[5]	主要通过数学统计方法、数据分析等客观手段来确定指标权重，客观性强，权重计算过程公开、透明，可供复核和验证
组合权重赋权法	层次分析法和熵权法组合	戢小辉[2]、Nie等[13]	主要是将主观赋权法和客观赋权法相结合来确定权重，结合两者的优点，同时考虑客观性和专家意见
	熵权法和变异系数法组合	李璐瑶[14]	
	序关系法和熵权法组合	陈雅欣等[15]、余明泽[16]、李栋[17]	

通过以上分析发现单独使用主观或客观赋权法都有较大的不足，信服度不高，所以部分学者通过组合主观和客观赋权法来确定最终的权重，戢小辉[2]综合利用熵权法和层次分析法确定组合权重，构建了评价地铁运营安全的指标体系；李璐瑶[14]结合熵权法和变异系数法的特点，对动车组运用态势评估指标的权重进行组合权重处理；陈雅欣等[15]在研究编组站的运输态势时，根据列车在编组站的流程将整个系统分为到达、解体、集合、编组和出发子系统，并按照分组共选取了18个表征指标，在确定指标之间的权重时组合运用序关系法和熵权法。

2.3　态势评估的方法

综合评价通常是对其态势的评价，需要根据具体评价的对象和选取的指标来决定使用什么评价方法，不同的综合评价方法的优缺点不同，所以选择正确的评价方法对结果有很大的影响。目前态势评估领域常见的综合评价方法有理想点法(TOPSIS)、灰色关联分析法、模糊综合评价法、层次分析法、物元可拓法等，常用的态势评估模型和方法如表2所示。

（1）理想点法。严少乐等[18]在评价城市客运综合交通枢纽的运营管理时使用了基于改进逼近理想点排序法的评价方法。其中TOPSIS的核心为通过计算每个方案与理想方案和负理想方案的距离来对方案进行排序，其中理想方案和负理想方案是所有方案中最好和最差的2个方案。理想点法的评价过程如图4所示，若A，B为正、负理想点，其他为待评价方案，则可以很直观地发现C，D方案明显优于E，F方案，理想点法计算相对简单，不需要依赖复杂的模型和算法，能够直观地给出评价对象的排序结果。但由于C，D到A，B的距离相同，所以无法判别C，D2种方案的优劣，这也是该方法以欧氏距离来作为判别标准的缺点，距离计算可能掩盖细节，对极端值敏感，所以适合数据经过标准化处理，且需要快速给出排序方案的情况。但理想点法是通过和最优或最差方案之间的距离做比较，得到排名，适用于对多个枢纽或区域之间进行横向比较。

（2）灰色关联分析法。黄兆国[4]、刘杰鑫[5]、黄成等[19]分别在大型铁路综合客运枢纽交通评估、高速铁路运输组织态势评估，以及枢纽换乘研究中

表2　常用的态势评估模型和方法

Tab.2　Common situation assessment models and methods

态势评估方法	文献	优点
TOPSIS	陈雅欣等[15]、严少乐等[18]	通过计算指标与理想解和负理想解之间的距离进行排序，评价结果直观明了
灰色关联法	黄兆国[4]、刘杰鑫[5]、黄成等[19]	能够考虑到数据的局部性和变化趋势，具有较强的自适应性和鲁棒性
模糊综合评价法	Zhao等[9]、黄兆国[4]、田健等[1]、周俊[10]、Wang等[20]	能够处理模糊和不确定性的信息，根据实际情况和需求，灵活地定义模糊集、隶属函数和模糊关系，提供多样化的评价结果
层次分析法	Nie等[13]、黄兆国[4]、陈帅等[11]、聂婷婷等[7]	通过层次结构，有助于理清问题的结构和层次关系，兼顾了专家的主观判断和客观数据的量化分析
物元可拓法	卢虹宇[8]、戢小辉[2]、张小辉[6]、李栋[17]	能够综合考虑多个因素的影响，对指标的重要性和优劣程度进行全面评估
双激励动态综合评价	余明泽[16]	能够考虑指标值的动态变化，适用于评价对象具有时序性的问题

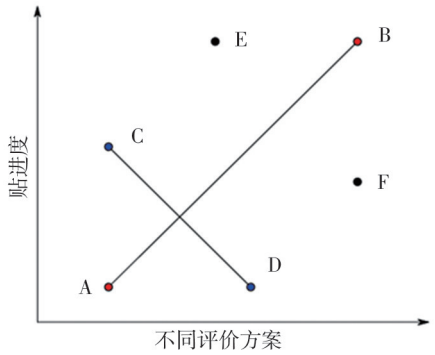


图4　理想点法的评价过程

Fig.4　Assessment process of TOPSIS method

应用灰色关联法，利用这种基于灰色系统理论的方法，先对原始序列进行标准化处理，选取参考序列，再根据灰色关联度公式计算各方案与参考方案的关联系数，最后按综合关联度排序。该方法对小样本、不完整数据具有较强鲁棒性，但关联度对参考序列选择依赖主观判断，难以处理非线性关系，且只适用于比较内部方案优劣，比如当最优方案也较差时，即便其内部排名高也存在总体优劣性较差的情况。适用于样本量少、指标信息不完备或需重点关注趋势相似性的评价场景。

（3）模糊综合评价法。Zhao 等[9]从运输组织、区域服务功能、中转分配、信息引导、辅助服务5个方面构建指标体系，采用模糊综合评价方法对综合客运枢纽功能进行评价。其中模糊运算则是运用模糊运算数学中常用的4种合成算子来进行。但其难以解决各评价指标间的信息重复问题，对于确定隶属函数及模糊相关矩阵等方法还需要继续研究。所以该方法处理模糊语言变量和不确定性指标时较为合适，贴近实际决策逻辑，适合于服务质量评估或需融合多源模糊信息的场景。

模糊综合评价同样用于大客流安全态势评价[1]与综合客运枢纽功能的评价[9]。依据专家经验设置各指标的隶属函数，构建模糊隶属矩阵并引入权重，运用模糊运算合成综合评价结果，最后通过去模糊化得到定量分值。该方法能够处理确定性与不确定性信息、贴近实际决策逻辑；但隶属函数与权重的设定带有较强主观性，指标间可能出现信息冗余，计算过程复杂。

（4）层次分析法。层次分析法不仅可作为赋权方法，同样也能用于评估类模型，如旅客换乘工作的服务水平评价[7]和多式联运客运枢纽评估模型中的应用[13]。建立了评价指标矩阵 $\boldsymbol{X}$ 与权重，其中确定向量 $\boldsymbol{b}$ 的准则是能最大限度地体现出重要度不同的技术方案之间的差异，则可以用层次分析法来确定，通过两两比较法得到判断矩阵，经一致性检验后计算各层权重，再合成方案得分。其公式为

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{b}=(b_1,\ b_2,\ \cdots,\ b_m)^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{X}$ 为待评价向量矩阵；$\boldsymbol{b}$ 为不同的技术方案的重要度；$\boldsymbol{Y}$ 为各方案的评分。

综合此类文献来看，其评价体系的层次结构较为统一，对于不同研究对象的普适性较低，所以层次分析法作为一种多目标决策方法具有结构划分的优势，但当面临较多指标的情况下，决策者往往难以做出正确的判断，会出现判断矩阵的一致性难以通过的问题。层次分析评价法只适合于指标层次明确，数量适中的情况，以及指标层级清晰的评价模型。

（5）物元可拓理论。卢虹宇[8]在对地铁运营安全态势的评价中、李栋[17]对铁路重空车流的分布态势评估时，选取了物元可拓方法。基于物元可拓理论的评价方法用于对多指标进行综合评估和决策，该方法结合了模糊数学和可拓理论的思想，是在建立经典域和节域的基础上，经典域和节域如公式(4)和(5)所示，通过将各个评价指标的物元进行组合，构建一个二维矩阵，即物元矩阵，其中每一行表示一个评价指标，每一列表示一个物元。

$$\boldsymbol{R}_x=\begin{pmatrix} (a_{11},\ b_{11}) & \cdots & (a_{1x},\ b_{1x}) \\ \vdots & & \vdots \\ (a_{i1},\ b_{i1}) & \cdots & (a_{ix},\ b_{ix}) \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{R}_p=\begin{pmatrix} (a_{p1},\ b_{p1}) \\ \vdots \\ (a_{pi},\ b_{pi}) \end{pmatrix} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{R}_x$ 为经典域；$\boldsymbol{R}_p$ 为节域；$(a_{ix},\ b_{ix})$ 表示第 i 个指标在第 x 个评价等级下的取值范围；$(a_{pi},\ b_{pi})$ 表示第 i 个指标在所有评价等级中的取值范围。

对于经典域和节域来说，指标的取值是一个范围，而在待评价物元中则是一个具体的值。然后通过关联函数计算每个物元在评价对象上的关联度即可拓度，关联度是评价对象在某个物元上的表现和得分，可以反映评价对象在某个方面的优劣程度。这个评价方法能够综合考虑多因素的影响，对评价对象的重要性和优劣程度进行全面评估，适合动态变化的系统评估，能够处理指标超过阈值时的突变情况，同时能够处理模糊和不确定性的信息，适用于评价问题中存在不确定性的情况。

（6）其他方法。自20世纪50年代起，国外学者已经开始进行客运交通换乘枢纽规划、设计及政策的研究，如Walker[21]展开了客流态势评价和功能设计等研究；Kim等[22]对于枢纽内的换乘设施，从信息提供、灵活性、舒适度、便捷性和安全性5个方面评估了服务水平，同时开展Rasch分析，并阐述其针对此类评估的优势。

3　铁路综合客运枢纽客流态势推演

对于铁路综合客运枢纽的客流态势推演，目前针对这类问题的研究较少，多数文献只涉及客流的变化或其他对象的态势推演，通过既有文献可以从3个方面开展客流态势推演研究。①对已评估的众多时间点的客流态势进行数据训练和预测，需要通过建立模型等方式来进行。②对需要评估的各个指标数据进行推演预测，在这种方法中客流的变化所造成的影响无疑是最大的，而铁路综合客运枢纽的客流来源主要为铁路、城轨以及两者之间的换乘客流，但两者的客流到达规律不同，所以两者客流预测的方法也存在差异。③利用仿真模型对行人在综合客运枢纽内的轨迹进行仿真，得到客流态势的变化，其优势在于以可视化界面直观呈现设施瓶颈与干预措施成效，并支持实时数据驱动的动态策略调整。这3个方向主要基于方法论完整性与技术特征区分度的双重考量，推演方法聚焦多情景演化模拟，客流预测方法关注客流量的具体变化，行人仿真侧重空间方案验证。

3.1　概率预测模型

在目前对于态势推演的研究中，有学者研究如何利用时空数据和概率模型来进行态势推演，如运用贝叶斯网络、隐马尔可夫模型、条件随机场等，建模预测行为模式、分析移动对象的轨迹和事件的时空关联性等。这些模型可以从观测数据中推断隐藏的态势信息，并进行概率性推断和预测，并通过仿真实现。Hu等[23]将一种分布式计算框架(MapReduce，MR)应用于网络安全态势预测，并利用布谷鸟搜索算法对支持向量机(Support Vector Machine，SVM)参数进行优化，提出了MR-SVM网络安全态势预测模型；安紫菁[24]基于元胞自动机方法构建态势推演模型，用元胞表示事件承灾体的空间位置，结合马尔科夫特性，用状态转移速率确定元胞状态在时间维度的转移规则，对火灾原生事件和衍生事件进行推演仿真分析；马志红[25]构建基于贝叶斯网络的船舶碰撞事故应急态势预测模型，以及基于贝叶斯网络的态势推演模型；毛明磊[26]采用“压力-状态-响应”模型构建长大隧道灾情情景演变路径，并结合贝叶斯网络方法建立长大隧道灾情推演模型；王艳涛[27]提出一种基于数字孪生的交通态势推演算法，将大规模路径协同建模成马尔科夫过程，通过深度学习来评估交通状态，使用蒙特卡洛树搜索算法来模拟未来状态，从而减小搜索空间，并通过剪枝降低维度来实现更高效的搜索。这些研究表明：概率模型在态势推演中具有良好的适应性和预测能力，但通常依赖大量历史数据与复杂参数调优，对计算资源的需求也较高。

3.2　短时客流预测

在对铁路综合客运枢纽的客流预测中，主要涉及城轨和铁路的客流量，以及两者的换乘客流量，而这2种主要交通方式的客流量预测方法有所差异，这主要是因为两者的运营模式不同，相比于公交化运营的城市轨道交通，铁路列车的运行由时刻表决定，乘客通过提前购票进站，客流的到达总量是固定的，所以运用不同的方法来预测这2种客流以及之间的换乘客流。

3.2.1　城轨客流预测

由于地铁列车采用公交化运营，并且乘客的出行以通勤为主，虽然客流总量时有变化，但每段时间的客流量有大致的规律，其客流量的预测往往是利用历史数据来推测未来的数据。由于态势的变化往往体现在瞬时或短时这个时间刻度上，所以对城

轨客流进行短时的预测(未来5~15 min的客流预测)。目前短时客流预测模型可分为以回归分析为主的线性模型和以神经网络为主的非线性模型，如蔡昌俊[28]利用灰色关联分析识别影响客流的关键因素，采用线性回归模型对进、出站客流进行预测，对于需要快速部署、对模型训练资源要求不高的情景，模型具有可解释性，对于白箱问题较为适用；韩皓等[29]利用轻量级梯度提升机(Light Gradient Boosting Machine，LightGBM)算法构建预测模型，并将轨道交通线网结构特征纳入数据集中，此类端到端模型适合于需要较高实时性以及突发客流频繁的预测场景。但目前广泛采用的是“组合预测”的建模理念[30]，短时客流组合预测模型如图5所示。

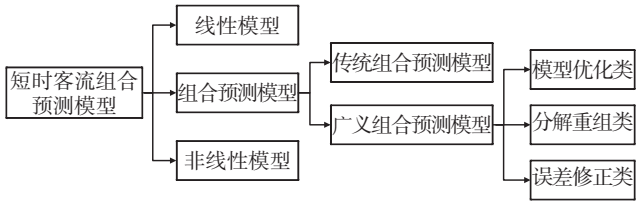


图5　短时客流组合预测模型

Fig.5　Short-term passenger flow combination prediction model

（1）模型优化类模型。在这类模型的A-B组合中，A模型一般为启发式优化算法，模型B为神经网络类预测模型，其原理是通过A模型的原理来优化B模型中的部分结构和参数。此类模型能够综合考虑多个基本预测模型的优势，自适应能力较强，让机器学习过程中可以迭代较低的次数并且寻找最优解的能力更强。如赵明伟等[31]利用粒子群(Particle Swarm Optimization，PSO)算法来确定长短时记忆神经网络(Long Short-Term Memory，LSTM)的参数，IPSO能够有效优化LSTM模型中的关键参数(如迭代次数、学习率和隐含层神经元数)，提升模型的全局搜索能力，避免陷入局部最优，从而增强预测的准确性和泛化能力，提高LSTM模型的预测精度，但同时也带来了模型结构更复杂、计算成本增加的问题。

（2）分解重组类模型。这类模型的原理是先利用A模型来分解待处理数据序列，然后再使用B模型分别预测已分解的各个分量，最后将各个分量的预测结果重组构成最终的预测结果，该类模型主要基于经验模态分解理论[32]。赵明伟等[33]在原有模型的基础上增加经验模态分解模型能够有效分解原始客流数据，降低噪声干扰，提取出不同频率成分，增强数据的平稳性和可预测性。

（3）误差修正类模型。在这类模型的A-B组合中，A模型一般为时间序列模型，B模型常采用极限学习机算法，其原理是首先利用A模型对历史数据进行训练和第1次预测，然后使用B模型对误差中的残差进行第2次预测并校正，但误差修正类模型很难确定误差大小的影响因素。短时客流预测模型总结如表3所示。

3.2.2　铁路客流预测

与城轨客流不同，铁路列车的运行由时刻表决定，并且每列车的旅客人数有上限，铁路旅客的总量是已知的，所以对于综合客运枢纽内铁路客流量的预测，往往是通过旅客在开车前的一段时间内的到达规律来分析的，即研究旅客的到达规律或候车时间，目前学者对旅客候车时间的研究通常是对大量历史数据进行模型拟合来得到分布函数或图像，钟绍林等[36]通过对比几种常见的客流量分布方程对旅客到站规律的拟合程度，如对数正态分布、威布尔分布、复合负指数分布等，得出对数正态分布的误差最小，拟合效果最好；姚加林等[37]对旅客到达时间规律和验票时间规律进行数据拟合，得到其分

表3　短时客流预测模型总结

Tab.3　Summary of short-term passenger flow prediction model

序号	作者	年份	研究对象	模型	模型类型
1	冯　诚等[32]	2019	进站客流	GWO-WNN	模型优化类
2	李和壁等[34]	2021	进站客流	MLPs-dynFWA	模型优化类
3	韩　皓等[29]	2021	进站客流	LightGBM	非线性模型
4	赵明伟等[31]	2022	进站客流	IPSO-LSTM	模型优化类
5	赵明伟等[33]	2022	进站客流	EMD-PSO-LSTM	分解重组类
6	蔡昌俊[28]	2023	进、出站客流	线性回归模型	线性模型
7	孙晓黎等[35]	2023	进、出站客流	XGBoost，ARMA，BP	非线性模型

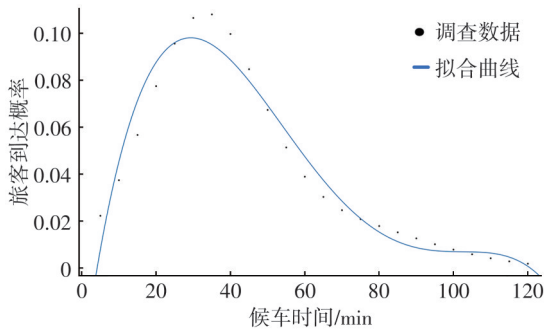
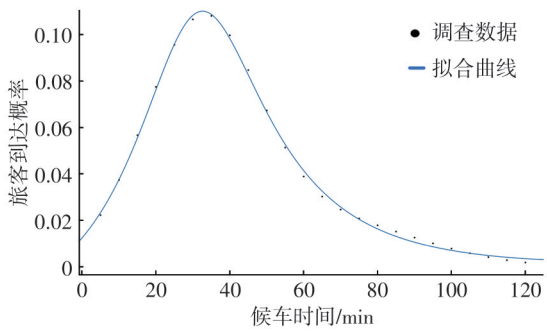
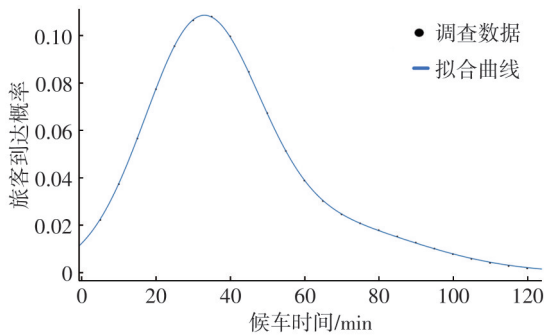
布分别符合负指数分布和二阶爱尔朗分布；幸晓辉[38]和孙晓开[39]利用 Access 数据库对数据进行分析，分别确定出了地铁和铁路旅客到达规律的概率分布，前者利用 Anylogic 软件对行人交通流进行了仿真，后者对基础数据的分析确定了不同种类列车(包括普通列车、快速列车、特快列车、成灌列车和成渝列车5种形式)旅客到达规律的概率分布。在预测候车厅候车人数时，何川[40]考察了几种常见的短时预测方法，发现K近邻非参数回归算法更适合用于航站楼短时客流量的预测，建立了基于航站楼短时客流量预测的双层K近邻模型(T-K近邻)，实验证明T-K近邻模型预测结果相对传统K近邻模型有更高精度以及良好的鲁棒性。通过对旅客候车规律的研究发现，旅客提前到达时间和到达概率之间的关系大致可用以下几种分布来表示，多项式、有理函数、对数正态、高斯曲线等。几种常见分布的拟合情况如表4所示。表4中x为旅客提前到达的时间，即候车时间；f为旅客的到达概率；a_1，a_2，…，a_6为拟合得到的参数。

3.2.3　换乘客流预测

换乘客流预测与单一方式预测不同，在铁路综合客运枢纽内，城轨与铁路的换乘客流预测重点解决的是2种交通方式的动态衔接问题，主要分为2个步骤：首先整合城轨刷卡数据与铁路票务信息，通过时间匹配算法识别换乘客流(例如地铁到站后的15 min内换乘高铁的乘客占比)，构建换乘时间压力模型，来说明乘客根据剩余发车时间动态调整行走速度与路径的选择。如王晓明等[41]采用多项

表4　几种常见分布的拟合情况

Tab.4　Fitting situations of several common distributions

分布	图像
多项式分布：$f(x)a_1x^4+a_2x^3+a_3x^2+a_4x+a_5$	
有理函数分布：$f(x)=\dfrac{a_1x^3+a_2x^2+a_3x+a_4}{x^2+a_5x+a_6}$	
高斯曲线：$f(x)=a_1\cdot e^{-\left(\frac{x-a_2}{a_3}\right)^2}+a_4\cdot e^{-\left(\frac{x-a_5}{a_6}\right)^2}$	

Logit模型建立了换乘需求公式，计算不同交通方式之间的客流换乘量；赵建东等[42]基于图的深度优先搜索算法清洗AFC数据并识别换乘路径，通过乘客进出站时间差来推算换乘时刻。其次建立如“地铁站台–换乘通道–铁路候车厅”的时空网络模型，计算各节点实时客流密度与通行效率，预测高峰时段可能出现的拥堵传导，该方法可提前10~15 min预警换乘瓶颈，为动态开启应急通道、调整安检和检票节奏提供决策支持，如王晓明等[41]结合广义阻抗应用TransCAD重力模型预测城市各交通方式之间的换乘分布；赵建东等[42]构建双层门控循环单元网络，利用时间序列分解方法–门控循环单元组合预测模型对换乘客流进行预测。

3.3　行人仿真方法

在仿真评估方面，目前研究主要以离散事件仿真和基于智能体的建模为主，韩笑宓等[43]引入行人速度对比和行人冲突避让机制，优化社会力模型中的避让作用力，避免仿真中行人重叠的问题，以某高铁站综合枢纽为例，通过Anylogic仿真有效提升了乘客的换乘效率。林莉[44]针对上海虹桥枢纽铁路到达至地铁站二次安检引发的拥堵问题，提出一体化安检方案，并通过Legion仿真验证了一体化安检在提升换乘效率(高峰减少4 100人次/h安检量)和安全性方面的可行性。

在对行人轨迹的预测优化方面，李兴华等[45]提出了一种针对综合客运枢纽的疏散流线优化方法，以个体疏散时间最短、整体疏散时间最短以及通道最大饱和度为目标，构建多目标优化模型，旨在通过动态控制通道开闭状态和通行方向提升疏散效率，而非依赖物理设施的改造。刁雨晨等[46]采用决策与试验评价实验室与解释结构模型融合方法，系统分析了综合客运枢纽换乘流线的影响因素及其层级关系，揭示了因素间复杂作用机制，为枢纽流线设计、设施布局及运营管理提供依据，有助于提升换乘效率和乘客体验。

4　结论

通过梳理综合客运枢纽客流态势评估和推演的理论方法，对比得到不同方法的优劣和适用情况，形成如下结论。

（1）在客流态势评估方面，现有的客流态势评估指标体系构建已从单一维度向多维度、流程化延伸，并且已经注意到时空动态刻画的重要性，现有研究在基于静态或周期性数据的基础上，解决了一些指标评价周期长的问题，逐步加入实时动态的数据，结合实时客流量、客流速度、换乘排队时间等动态指标，与设施设备数量等静态评价指标结合，形成新的指标体系来反映不同时间和事件下的客流演变。而在评价方法上，根据其态势评价的需要、评价的对象和选取的指标来决定使用何种评价方法，可以考虑将不同的方法根据其实用性及特点组合使用，形成更具针对性的方法，比如对于综合枢纽客流态势的评估，可通过组合TOPSIS和灰色关联2种方法来实现对客流态势的评估，TOPSIS侧重距离测度但忽略趋势关联，灰色关联分析关注曲线相似性但弱化空间距离，所以可以结合其方法中的欧氏距离和灰色关联度来判断客流状态的优劣。

（2）态势推演作为一个具备高度动态性、对策性和不确定性的复杂问题，当前关于态势推演的模型精确度较低，无法准确地得出未来某一时刻的状态，并且相关研究更侧重于安全态势评估或应急事件下的态势评估，尚缺乏从日常运输组织角度的研究。而通过客流预测来推演客流态势的研究中，城轨短时客流预测的组合模型较多，其中模型优化类组合模型居多，但传统模型通常只考虑时间维度的变化，未来可以创新性地引入动态时空建模，如时空图卷积网络，同时捕捉空间和时间的交互效应；而对于铁路候车客流的预测，由于运营模式的差异，现有研究旅客候车的到达时间规律侧重于采用统计分布拟合、模型仿真和数据分析等方法，但对于一些复杂的旅客到达时间规律，这些方法可能存在局限性，可以利用机器学习和深度学习算法，从大规模的数据中学习旅客到达时间的模式和规律，并通过注意力机制捕捉跨交通方式的换乘关系。行人仿真研究作为一种直观的预测方法，主要依托社会力模型、智能体与离散事件仿真等方法，在枢纽换乘流线优化、疏散与安检流程设计中取得了良好应用，能真实反映人群在复杂站场中的交互、拥堵与避让行为，弥补纯时间序列模型忽略空间分布的不足，但需精确的空间几何、行人行为参数(步速

分布、舒适距离、决策规则)及高质量轨迹或视频数据进行校准，否则仿真结果可靠性受限。

参考文献：

[1] 田　健，蒲　琪，陈小丽. 基于层次分析法模糊综合评价大客流安全状态[J]. 城市轨道交通研究，2014，17(1)：47-50.
TIAN Jian，PU Qi，CHEN Xiaoli. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Large Passenger Flow Safety Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Urban Mass Transit，2014，17(1)：47-50.

[2] 戢小辉. 地铁运营安全综合评估模型研究[D]. 成都：西南交通大学，2016.

[3] LI L N，LOO B P Y. Towards People-Centered Integrated Transport：A Case Study of Shanghai Hongqiao Comprehensive Transport Hub[J]. Cities，2016，58：50-58.

[4] 黄兆国. 大型铁路综合客运枢纽交通评估方法研究[D]. 南京：东南大学，2021.

[5] 刘杰鑫. 基于多源信息融合的高速铁路运输组织态势表征与评估[D]. 成都：西南交通大学，2021.

[6] 张小辉. 铁路综合客运枢纽交通衔接系统评估指标和方法[C]//中国城市规划学会，东莞市人民政府. 2017 中国城市规划年会论文集(06 城市交通规划). 南京：江苏省城市规划设计研究院，2017：740-748.

[7] 聂婷婷，郑维清，孙　杨，等. 综合客运枢纽旅客换乘服务水平评价方法[J]. 交通运输研究，2019，5(6)：43-49.
NIE Tingting，ZHENG Weiqing，SUN Yang，et al. Evaluation Method for Passenger Transfer Service Level of Comprehensive Passenger Transport Hub[J]. Transport Research，2019，5(6)：43-49.

[8] 卢虹宇. 地铁线路运营安全风险评价研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2019.

[9] ZHAO J Y，LI Y，YE Y T. Functional Evaluation of Integrated Passenger Transportation Hub Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[C]//2020 American Society of Civil Engineers，CICTP 2020：Transportation Evolution Impacting Future Mobility. New York：American Society of Civil Engineers，2020：2669-2680.

[10] 周　俊. 铁路客运站客流安全态势评价[J]. 中国安全科学学报，2019，29(S2)：126-133.

[11] 陈　帅，孙有望. 铁路客运专线与城市交通的衔接及站点选址评价方法研究[J]. 城市轨道交通研究，2006，9(10)：35-39.
CHEN Shuai，SUN Youwang. Link of Railway Passenger Special Line & Urban Traffic and Appraisal of Station Location[J]. Urban Mass Transit，2006，9(10)：35-39.

[12] 朱国栋. 高速铁路综合维修作业态势的表征与评估[D]. 成都：西南交通大学，2021.

[13] NIE T T，ZHENG W Q，LI Q. A Comprehensive Evaluation Method of Multimodal Passenger Transportation Hubs Based on AHP[C]//2021 American Society of Civil Engineers，CICTP 2021：Advanced Transportation，Enhanced Connection. New York：American Society of Civil Engineers，2021：2046-2054.

[14] 李璐瑶. 高速铁路动车组运用态势的分析与评估[D]. 成都：西南交通大学，2021.

[15] 陈雅欣，彭其渊，刘晓薇，等. 基于SPA-TOPSIS方法的编组站运输态势表征与评估[J]. 铁道运输与经济，2023，45(6)：15-23.
CHEN Yaxin，PENG Qiyuan，LIU Xiaowei，et al. Characterization and Assessment of Transportation Situation in Marshalling Stations Based on SPA-TOPSIS Method[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(6)：15-23.

[16] 余明泽. 基于双激励动态综合评价模型的普速铁路列车运行态势评估方法[J]. 综合运输，2023，45(12)：109-113，186.
YU Mingze. Evaluation Method of Train Running Situation of Conventional Railway Based on Dynamic Comprehensive Evaluation Model of Double Incentives[J]. China Transportation Review，2023，45(12)：109-113，186.

[17] 李　栋. 区域铁路重空车流分布态势评估及推演方法研究[D]. 成都：西南交通大学，2022.

[18] 严少乐，刘　炜. 基于改进TOPSIS的城市客运综合交通枢纽评价[J]. 综合运输，2021，43(2)：80-83.
YAN Shaole，LIU Wei. Evaluation of Urban Passenger Comprehensive Transportation Hub Based on Improved TOPSIS[J]. China Transportation Review，2021，43(2)：80-83.

[19] 黄　成，何　山，何　林. 基于多层次灰色评价法的城市综合客运枢纽换乘评价[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2015，34(2)：89-92.
HUANG Cheng，HE Shan，HE Lin. Urban Passenger Hub Transfer Evaluation Based on Multilevel Grey Evaluation Method[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)，2015，34(2)：89-92.

[20] WANG Y，QIAN L，LI H. Dynamic Route Planning Based on Multilayer Fuzzy Comprehensive Evaluation and Applications[J].

Journal of Physics: Conference Series, 2025, 3007(1): 012022-012022.

[21] WALKER M C. Planning and Design of On-Street Light Rail Transit Stations[M]. Washington: Transportation Research Board, 1992.

[22] KIM J, SCHMÖCKER J D, YU J W, et al. Service Quality Evaluation for Urban Rail Transfer Facilities with Rasch Analysis[J]. Travel Behaviour and Society, 2018, 13: 26-35.

[23] HU J J, MA D Y, LIU C, et al. Network Security Situation Prediction Based on MR-SVM[J]. IEEE Access, 2019(7): 130937-130945.

[24] 安紫菁. 基于态势推演模型的应急决策研究[D]南京：东南大学，2021.

[25] 马志红. 海上船舶碰撞事故应急态势预测与推演技术研究[D]. 大连：大连海事大学，2022.

[26] 毛明磊. 长大隧道灾情侦测推演与联动救援系统研究[D]. 西安：长安大学，2023.

[27] 王艳涛. 面向数字孪生的交通态势推演系统的设计与实现[D]. 北京：北京邮电大学，2023.

[28] 蔡昌俊. 基于误差融合模型的地铁车站客流监测方法研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(1)：123-129.
CAI Changjun. Research on Passenger Flow Monitoring Method for Metro Stations Based on Error Fusion Model[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(1)：123-129.

[29] 韩　皓，徐圣安，赵　蒙. 考虑线网结构的LightGBM轨道交通短时客流预测模型[J]. 铁道运输与经济，2021，43(10)：109-117.
HAN Hao，XU Sheng'an，ZHAO Meng. LightGBM Prediction Model of Short-Term Passenger Flow for Rail Transit Considering Network Structure[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(10)：109-117.

[30] 曾　诚，吴佳媛，罗　霞. 城市轨道交通短时客流预测文献综述[J]. 铁道运输与经济，2021，43(8)：105-111，125.
ZENG Cheng，WU Jiayuan，LUO Xia. Literature Review of Short-Term Passenger Flow Forecast for Urban Rail Transit[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(8)：105-111，125.

[31] 赵明伟，张文胜. 基于IPSO-LSTM组合模型的城市轨道交通短时客流预测[J]. 铁道运输与经济，2022，44(2)：123-130.
ZHAO Mingwei，ZHANG Wensheng. Short-Term Passenger Flow Prediction of Urban Rail Transit Based on IPSO-LSTM Combined Model[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(2)：123-130.

[32] 冯　诚，杨　静，周浪雅，等. 基于GWO-WNN模型的城市轨道交通短时进站客流预测[J]. 铁道运输与经济，2019，41(8)：97-102.
FENG Cheng，YANG Jing，ZHOU Langya，et al. Short-Term Passenger Flow Forecast for Urban Rail Transit Based on GWO-WNN Model[J]. Railway Transport and Economy，2019，41(8)：97-102.

[33] 赵明伟，张文胜，王克文，等. 基于EMD-PSO-LSTM组合模型的城市轨道交通短时客流预测[J]. 铁道运输与经济，2022，44(7)：110-118.
ZHAO Mingwei，ZHANG Wensheng，WANG Kewen，et al. Short-Term Passenger Flow Prediction of Urban Rail Transit Based on EMD-PSO-LSTM Combined Model[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(7)：110-118.

[34] 李和壁，梁家健，高　扬. 基于MLPs-dynFWA模型的高速铁路短时客流预测方法研究[J]. 铁道运输与经济，2021，43(6)：28-36.
LI Hebi，LIANG Jiajian，GAO Yang. Short-Term Passenger Flow Prediction of High Speed Railway Based on MLPs-dynFWA Model[J]. Railway Transport and Economy，2021，43(6)：28-36.

[35] 孙晓黎，朱才华，李美妮，等. 时间序列聚类下的城市轨道交通客流预测研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(3)：149-157.
SUN Xiaoli，ZHU Caihua，LI Meini，et al. Research on Passenger Flow Prediction of Urban Rail Transit Based on Time Sequence Clustering[J]. Railway Transport and Economy，2023，45(3)：149-157.

[36] 钟绍林，秦梦瑶，廖时元，等. 基于数据拟合的铁路车站旅客最高聚集人数计算研究[J]. 铁路计算机应用，2022，31(8)：1-6.
ZHONG Shaolin，QIN Mengyao，LIAO Shiyuan，et al. Calculation of Maximum Number of Gathering Passengers in Railway Station Based on Data Fitting[J]. Railway Computer Application，2022，31(8)：1-6.

[37] 姚加林，莫　昕. 大型高铁站实名制验票旅客到达与服务规律研究[J]. 物流科技，2018，41(4)：66-70.
YAO Jialin，MO Xin. Study on the Passenger Arrival and Service Distribution of Real-Name Registration System in Large-Scale High Speed Railway Station[J]. Logistics Sci-Tech，2018，41(4)：66-70.

[38] 幸晓辉. 轨道交通旅客到达规律与候车方式研究[D]. 成都：西南交通大学，2013.

[39] 孙晓开. 铁路客运站出发旅客到达规律研究[D]. 成都：西南交通大学，2011.

[40] 何　川. 基于改进K近邻算法的航站楼离港旅客到达规律研究[D]. 天津：中国民航大学，2019.

[41] 王晓明，万广娣. 枢纽换乘客流预测[J]. 黑龙江交通科技，2021，44(2)：191-195.
WANG Xiaoming，WAN Guangdi. Prediction of Passenger Flow in Hub[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang，2021，44(2)：191-195.

[42] 赵建东，朱　丹，刘佳欣. 基于时间序列分解与门控循环单元的地铁换乘客流预测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2022，50(5)：22-31.
ZHAO Jiandong，ZHU Dan，LIU Jiaxin. Metro Transfer Passenger Flow Prediction Based on STL-GRU[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)，2022，50(5)：22-31.

[43] 韩笑宓，郑维清，杨　权，等. 基于改进社会力模型的客运枢纽行人换乘组织仿真与优化[J]. 交通运输研究，2021，7(5)：80-90.
HAN Xiaomi，ZHENG Weiqing，YANG Quan，et al. Simulation and Optimization of Transfer Operation of Integrated Passenger Transport Hub Based on Improved Social Force Model[J]. Transport Research，2021，7(5)：80-90.

[44] 林　莉. 基于仿真的虹桥枢纽一体化安检行人组织方案[J]. 交通与运输，2021，37(1)：1-5.
LIN Li. Integrated Security Check Pedestrians Organization Scheme in Hongqiao Hub Based on Simulation[J]. Traffic & Transportation，2021，37(1)：1-5.

[45] 李兴华，王天佐，张晓光，等. 综合客运枢纽疏散流线设计优化方法[J]. 交通信息与安全，2023，41(1)：132-139.
LI Xinghua，WANG Tianzuo，ZHANG Xiaoguang，et al. A Method for Optimizing the Design of Evacuation Streamline for Multimodal Passenger Transportation Hubs[J]. Journal of Transport Information and Safety，2023，41(1)：132-139.

[46] 刁雨晨，柳　鑫，纪成嫣，等. 基于DEMATEL与ISM融合的综合客运枢纽换乘流线影响因素研究[J]. 综合运输，2023，45(5)：60-66，74.
DIAO Yuchen，LIU Xin，JI Chengyan，et al. The Influencing Factors of Transfer Streamline of Comprehensive Passenger Transport Terminal Based on DEMATEL-ISM[J]. China Transportation Review，2023，45(5)：60-66，74.

(责任编辑　金　晶)