文章编号：1003-1421(2026)07-0070-10
引用格式：刘鹏，何清昊，潘智成，等. 城市群多层次轨道交通一体化融合评价研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(7)：70-79.
LIU Peng，HE Qinghao，PAN Zhicheng，et al. Research on Integration and Evaluation of Multi-Level Rail Transit in Urban Agglomeration[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(7)：70-79.

城市群多层次轨道交通一体化融合评价研究

刘　鹏[1]，何清昊[1,2]，潘智成[1,2]，黄　戡[1]，翁以萱[1]

(1.广州交通大学(筹) 未来交通学院，广东 广州　510725；2.广东工业大学 土木与交通工程学院，广东 广州　510006)

摘　要：为解决城市群多层次轨道交通融合规划多方案比选的难题，使用目标分析法构建了以网络一体化、通道一体化、枢纽一体化、运营一体化为准则层和17项二级指标为指标层的评价指标体系；结合层次分析法和专家打分法确定了各指标的权重；运用本评价指标体系对某城市群多层次轨道交通融合方案进行了综合评价。评价结果分析表明，运用该评价指标体系及评价方法选取的多层次轨道交通融合方案与实际规划建设方案一致，比较实用有效；研究成果为城市群多层次轨道交通及综合交通网络一体化融合评价提供了一套全新的评价指标体系和评价方法，对于提高融合规划方案比选的科学性与效率具有很好的应用价值。

关键词：城市群；多层次轨道交通；一体化融合；评价指标体系；层次分析法
中图分类号：U113；U293　　**文献标识码**：A　　DOI：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250512001

Research on Integration and Evaluation of Multi-Level Rail Transit in Urban Agglomeration

LIU Peng[1]，HE Qinghao[1,2]，PAN Zhicheng[1,2]，HUANG Kan[1]，WENG Yixuan[1]

(1. School of Future Transportation, Guangzhou Jiao Tong University (in preparation), Guangzhou 510725, Guangdong, China;
2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: To solve the problem of multi-scheme comparison and selection in the integrated planning of multi-level rail transit in urban agglomerations, this paper constructed an evaluation index system by using the objective analysis method, which took network integration, channel integration, hub integration, and operation integration as the criterion layer and 17 secondary indicators as the index layer. The weights of the indicators were determined by combining the analytic hierarchy process (AHP) and the expert scoring method. The evaluation index system was used to conduct a comprehensive evaluation of the multi-level rail transit integration scheme for an urban agglomeration. The results show that the multi-level rail transit integration scheme selected by this evaluation index system and method is consistent with the actual planned and constructed scheme, proving its practicality and effectiveness. This paper provides a new evaluation index system and method for the integration evaluation of multi-level rail transit and comprehensive transport

收稿日期：2025-05-12
通信作者：黄戡(1979—)，男，湖南永州人，广州交通大学(筹)未来交通学院教授。
基金项目：2024年广州市教育局高校科研项目(Tertiary Education Scientific research project of Guangzhou Municipal EducationBureau，2024312403)；广东省哲学社会科学规划项目(GD24CGL24)；广州航海学院引进人才科研启动费项目(K42025004)；广东省普通高校重点领域专项项目(服务“百千万工程”)(2025ZDZX4054)；广州航海学院“青蓝E计划”项目(QLE2025A004)

networks in urban agglomerations, which has great application value for improving the science and efficiency of comparing and selecting integrated planning schemes.
Keywords: Urban Agglomeration; Multi-Level Rail Transit; Integration; Evaluation Index System; Analytic Hierarchy Process

0　引言

随着我国城市化进程的加速推进，城市发展的空间范围逐渐扩大，城市群内部经济联系与要素流动日益紧密，对交通基础设施提出了更高要求。干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通作为重要骨干交通网络，其一体化融合水平直接影响城市群居民的出行效率和区域协同发展质量。近年来，《交通强国建设纲要》与《国家综合立体交通网规划纲要》相继出台，明确提出推动轨道交通“四网融合”[1-2]。然而，如何科学评价多层次轨道交通的一体化融合程度，仍是当前规划与实践中亟待解决的关键问题。

当前，许多学者围绕轨道交通一体化融合评价开展了系列研究。吕颖[3]基于系统工程与多目标评价原理，构建了涵盖线网结构、需求满足等5个维度的都市圈综合轨道交通线网布局的评价指标体系。胡杨[4]结合层次分析法和模糊综合评价法，从交通改善、工程可行性、经营效果和城市发展协调性4个方面建立了城轨规划评价指标。彭其渊等[5]运用分形理论，探讨了城市轨道交通规划网络与城市规划的综合协调性。秦韶阳等[6]则是从综合交通系统的角度，构建了一套面向城市群综合交通系统的可量化评价指标体系，涵盖安全保障、覆盖、快捷顺畅等多个评价维度。胡必松等[7]采用组合赋权与灰色模糊评价模型，提出了包含线网结构、运营效果等维度的城市群轨道交通网络化规划评价体系。郭婷[8]从线网规模化、设施联通化、运营通勤化和统筹一体化4个层面，创新性地构建轨道交通“四网融合”发展程度评价指标体系和评价模型。然而，尽管现有研究在单一层面或局部协同方面取得了显著进展，但在城市群更大范围层面上的“网络-通道-枢纽-运营”全链条一体化融合的系统性评价方面仍显不足。

以城市群多层次轨道交通融合规划方案的比选为应用场景，聚焦于城市群多层次轨道交通一体化融合评价体系的构建与实证研究，构建网络一体化、通道一体化、枢纽一体化和运营一体化4个层面的评价指标体系，并通过层次分析法确定定性与定量指标的综合权重，最后以某城市群进行实证分析，基于结论提出优化建议。

1　评价指标体系构建

1.1　评价指标选取的准则

科学的评价指标体系是实现评价目的必不可少的条件，因此，在对评价指标进行选取时，需要遵循一定的准则与方法，需要在众多相关的指标中选取合适且具有代表性的指标建立评价指标体系，指标选取原则如下。

（1）目的性。不同的评价指标体系的侧重点存在差异，所选取的评价指标也应该有所侧重，作为评价指标体系的基础必须体现评价的目的性、满足评价的要求。

（2）系统性。一体化融合意味着指标需要从线网、通道、枢纽、运营等角度反映城市群多层次轨道交通的融合程度，所选择的指标应该尽可能全面地反映系统的整体特征。

（3）独立性。在满足全面系统性原则的同时，指标的选取应注意指标之间的独立性。同一层次的指标之间应相互独立，避免交叉重叠，如果指标存在相互关联，评价结果会产生较大偏差，影响评价效果。

（4）可拓展性。城市群的空间规划会随着经济发展的需求不断变化，导致评价体系产生一定的偏差，因此所选取的评价指标应该能够进行适应性的局部调整，并且在调整的同时不会对评价指标体系的框架产生影响。

1.2　评价指标体系的建立

在对多层次轨道交通一体化融合程度进行评价时，由于评价对象属性多样，无法单独用定量或定性的评价方法进行分析。因此，采用目标分析法进行一体化融合评价指标体系的拆解，构建城市群多层次轨道交通一体化融合评价指标体系如表1所示，指标体系包含网络一体化、通道一体化、枢纽

表1　城市群多层次轨道交通一体化融合评价指标体系

Tab.1　Evaluation index system for integration of multi-level rail transit in urban agglomeration

目标层	准则层	指标层	指标类别
城市群多层次轨道交通一体化融合	网络一体化(A)	与城市群都市圈规划协调性(A_1)	定性
		与土地利用协调性(A_2)	定量
		线网综合覆盖密度(A_3)	定量
		线网覆盖节点比(A_4)	定量
		乘客平均出行最短时间(A_5)	定量
		线网连通度(A_6)	定量
	通道一体化(B)	通道线路重叠系数(B_1)	定量
		通道功能层次与集约布局合理性(B_2)	定性
		多层次轨道交通通道适应度(B_3)	定量
		综合供给能力系数(B_4)	定量
	枢纽一体化(C)	枢纽衔接分级体系(C_1)	定量
		站城融合程度(C_2)	定性
		平均换乘次数(C_3)	定量
		平均换乘时间(C_4)	定量
	运营一体化(D)	运输组织一体化(D_1)	定性
		售检票一体化(D_2)	定量
		运维资源共享程度(D_3)	定量

一体化、运营一体化4个角度准则层。

2　评价指标释义

2.1　网络一体化

2.1.1　与城市群都市圈规划协调性

多层次轨道交通线网是国土空间规划、综合交通规划等上位规划的重要组成部分[2]，城市群中通常分布若干大城市和特大城市，同时分散诸多小城市、城镇，整个城市群具有多核心、多层次的特性。通常来说，城市群的面积较大，所包含的城市与地区较多，不同的城市或地区拥有不同的城市战略，在上位规划中也有不同的战略目标，轨道交通作为城市骨架应该适应该区域的城镇布局、适应该地的经济发展需要，促进城市之间、城镇之间的经济融合发展与合作，提升城市群的整体经济实力。

该指标是评价体系的战略性、纲领性指标，旨在衡量规划方案与国家、区域等上位规划的战略意图是否一致，是确保轨道交通规划服务于宏观发展大局的必要前提。因此，该指标为定性指标，在对该指标进行评价时，通过制定分级的评分表，并邀请行业领域专家，针对轨道交通线网规划与上层总体规划等多个维度的协调程度进行综合评估。

2.1.2　与土地利用协调性

轨道交通和都市圈土地利用之间互为因果、相互作用，二者的建设发展应具有协调性。该指标从2个层面进行评价：一方面是静态的规划符合性，即轨道交通的工程建设用地规划是否与国土空间总体规划相一致，采用多层次轨道建设规划用地$S_{\text{规划}}$与实际用地$S_{\text{实际}}$之比计算；另一方面是动态的发展引导性，即轨道交通线网的布局能否有效引导沿线形成合理的、职住平衡的土地开发模式，采用线网吸引范围内职住比$\eta_{\text{职住}}$表示[9]。

该指标的计算综合了用地规划协调与职住引导2个方面，其计算方法为

$$A_2=\sqrt{\frac{S_{\text{实际}}}{S_{\text{规划}}}\cdot\eta_{\text{职住}}} \tag{1}$$

该指标为正向指标，其值越大，说明多层次轨道交通与土地利用协调性越好。根据国内实际情况，其取值范围为(0，1)。

2.1.3　线网综合覆盖密度

线网综合覆盖密度是对轨道交通综合线网的总体规模和覆盖深度的综合反映，线网综合覆盖密度越大，线网所能覆盖的范围越广，网络越稠密，线网的服务水平越高。线网综合覆盖密度通过衡量线网的总长度与城市群区域的面积进行衡量，其计算公式为

$$A_5=\frac{L}{S} \tag{2}$$

式中：L为多层次轨道交通线网的总长度，km；S为城市群区域面积，100 km^2。

2.1.4　线网覆盖节点比

线网覆盖节点比旨在评价多层次轨道交通线网在地理空间上服务的广度与公平性，通过计算城市群区域内拟规划线网方案连接城镇节点换算个数与城市群区域内所有城镇节点总数的比例，来衡量轨道交通作为基础公共服务设施的覆盖范围。线网覆盖节点比的值越大，线网所覆盖的城镇节点越多，也就说明线网的服务水平越高[10]，所覆盖的地理范围越大。其计算公式为

$$A_4=\frac{N_{\text{link}}}{N} \tag{3}$$

式中：N_{link}为城市群区域内拟规划线网方案连接城镇节点换算个数，个；N为城市群区域内所有城镇节点换算个数，个。

2.1.5　乘客平均出行最短时间

乘客平均出行最短时间是指选择不同轨道交通方式出行的平均出行最短时间，用以评价多层次轨道交通线网修建对居民出行时间的改善程度，同时也反映了整个区域性轨道交通网络的效率。

$$A_5 = \frac{\sum_{ij} t_{ij} Q_{ij}}{\sum_{ij} Q_{ij}} \tag{4}$$

式中：t_{ij}为第i区到第j区的轨道交通最小出行时间，min；Q_{ij}为第i区到第j区的轨道交通出行分布量，人次。

在对规划方案进行评价时，用于计算该指标的数据并非基于实际运营数据，而是通过构建城市群交通需求预测模型，在拟规划的轨道交通线网方案上进行客流分配计算得出。

2.1.6　线网连通度

城市群多层次轨道交通线网是一张非常庞大且复杂的网络，如果布局结构越合理，其运营的成本越低，所得到的收益也越高[11]。评价布局的合理性，可以通过线网连通度进行评价，连通度越大，说明规划线网的稳定性越高。其计算公式为

$$A_6 = \frac{L}{\xi \sqrt{S \times N}} \tag{5}$$

式中：ξ为线网非直线系数，即节点间线路长度与直线距离的比值，一般取1.1~1.3；L为多层次轨道交通线网的总长度，km；N为城市群区域内所有城市节点换算个数，个。

该指标为正向指标，其值越大，说明规划线网的稳定性越高。根据国内实际，其取值范围为(0，4)。

2.2　通道一体化

2.2.1　通道线路重叠系数

多层次轨道交通区别于单一轨道交通，在通道内可能存在2种及以上层次的轨道交通线路，各线路之间可能存在着相互重叠、功能重复等问题。适度的线路重叠一方面可以增强通道的运营韧性，在线路故障或运输高峰时，能有效分流、缓解单一线路的压力；但另一方面，过高的重叠也可能造成资源的浪费。因此，在进行评价时，应该使通道线路重叠系数在一个合理的区间内，并非简单的正向或逆向指标，定义线路重叠系数为线路重叠长度占路网总长度的百分比[12]，其计算公式为

$$B_1 = \sum_{k=1}^{K} B_1^k \tag{6}$$

$$B_1^k = \frac{\sum_{j=1}^{J} d_{kj-ki}}{d_{ki}} \tag{7}$$

式中：B_1^k为通道k内的线路重叠系数；K为路网中通道数量，条；d_{ki}为通道k内轨道交通i方式的线路长度，km；d_{kj-ki}为通道k内轨道交通j方式相较于i方式的重叠路段长度，km。

2.2.2　通道功能层次与集约布局合理性

通道功能层次与集约布局合理性表现为城市群多层次轨道交通(干线铁路、城际铁路、市域铁路、城市轨道交通)功能结构与城市群区域对外通道、区域内通道、市域内通道、中心城区通道4个空间层次的匹配合理性；在城市群区域对外通道、区域内通道、市域内通道、中心城区通道4个通道发生重叠的客流走廊上，对4种层次轨道交通进行适当的集约布局，以便既能满足城市群主要客流走廊上客流需求和节约通道空间资源，又能避免多条线路承担同一部分客流出现功能重叠、资源浪费现象。

该指标为定性指标，为了对这一综合性概念进行客观评价，在实际计算过程中，将制定一套分级的打分表，邀请专家对每个主要客运通道进行打分。根据专家评估打分结果统计，把该指标所有方案中初始值的最大值设为基准值，每个方案的初始数值与基准值的比值即为每个方案该指标的数值。该指标的取值范围为(0，1]。

2.2.3　多层次轨道交通通道适应度

对通道运输结构内部协调的评价首先应从供需方面是否相互适应进行考虑，因此引入多层次轨道交通通道适应度指标，通过衡量通道各轨道交通方式自身发展状况，在一定程度上反映多层次轨道交通系统内部的协调情况[13-14]，定义适应度的计算方式为

$$B_3 = \sum_{i=1}^{n} P_i \frac{D_i}{S_i} \tag{8}$$

式中：D_i为通道第i种轨道交通方式的需求量，人次；S_i为通道第i种轨道交通方式的供给量，人次；n为城市群区域通道内的轨道交通方式种类；P_i为通道第i种轨道交通方式的权重，其中$\sum_{i=1}^{n} P_i = 1$。

2.2.4　综合供给能力系数

区域运输通道运输结构是否合理会直接反映整个运输通道能否满足社会经济发展需要。通道运输综合供给能力能反映系统运能和运量之间的适应度，反映客运通道客运结构与社会经济的协调程度[13-14]，其计算公式为

$$B_4 = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i l_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i l_i} \tag{9}$$

式中：D_i为通道第i种轨道交通方式的需求量，人次；S_i为通道第i种轨道交通方式的供给量，人次；l_i为通道第i种轨道交通方式运输线路的长度，km。

指标中的客运需求量是在规划阶段，通过交通预测模型，结合区域社会经济发展预测，分析预测出的未来特定年份的OD客流量。供给量则是根据规划方案的线路设计参数计算得出。

2.3　枢纽一体化

2.3.1　枢纽衔接分级体系

枢纽衔接分级体系是指城市群多层次轨道交通系统中综合衔接车站的分级指标，该指标能够对枢纽车站的衔接换乘效率、枢纽承载系数进行评估。通常来说枢纽衔接体系可以分为三级体系，一级枢纽能够紧密衔接多层次轨道交通4张网的“四网融合”枢纽，以承担城市群对外的交通功能为主，同时兼顾城际、市域(郊)、城市轨道交通，主要为大型的铁路枢纽站场；二级枢纽，衔接城际、市域(郊)、城市轨道交通3张网的“三网融合”枢纽，以承担城际交通功能为主；三级枢纽，衔接市域(郊)、城市轨道交通2张网的“两网融合”枢纽[15]。

该指标为定量指标，在进行指标评价时，一级枢纽、二级枢纽、三级枢纽分别赋值为1，0.75，0.5，其他普通站赋值为0；每个方案中所有枢纽和普通站赋值之和即为该指标的初始数值；把该指标所有方案中初始值的最大值设为基准值，每个方案的初始数值与基准值的比值即为每个方案该指标的数值。该指标的取值范围为(0，1]。

2.3.2　站城融合程度

站城融合是轨道交通引导城市发展的核心理念，其融合程度直接影响沿线土地的开发价值与城市活力。多层次轨道交通线网沿线车站与城市或地区在空间规划、商业经济、城市环境、社区生活等各个方面的契合程度，即站城融合程度越高，表明多层次轨道交通系统与该城市的开发建设进程相契合，能够将轨道交通系统很好地融入城市空间结构布局和经济发展需求。

该指标为定性指标，在对该指标进行评价时，通过制定分级的评分表，并邀请行业领域专家，针对多层次轨道交通站点与城市产业、经济、社会等多个维度的融合程度进行综合评估。根据专家评估打分结果统计，把该指标所有方案中初始值的最大值设为基准值，每个方案的初始数值与基准值的比值即为每个方案该指标的数值。该指标的取值范围为(0，1]。

2.3.3　平均换乘次数

平均换乘次数是指乘客在完成一次出行过程中，平均需要进行多少次换乘，其中包括同方式内的换乘和跨方式之间的换乘，该指标直接反映了城市群多层次轨道交通线网的连通性和居民出行的便利程度。具体来说，如果平均换乘次数较低，意味着乘客在出行时通常不需要多次换乘，说明轨道交通具有较好的线网覆盖和直达程度。平均换乘次数作为定量指标，其计算公式为

$$C_3 = \frac{\sum_{O \in S} \sum_{D \in S} V_{OD}^{\text{Transfer}}}{\sum_{O \in S} \sum_{D \in S} V_{OD}} \tag{10}$$

式中：O，D分别为出发车站与到达车站；S为多层次轨道交通线网内所有车站的集合；V_{OD}^{Transfer}为从出发站点到目的站点的换乘次数，次；V_{OD}为从出发站点到目的站点的出行总量，人次。

2.3.4　平均换乘时间

在多层次轨道交通系统中，需要考虑乘客在各个方式的轨道交通系统中的换乘效率，相较于同方式内的换乘，跨方式的换乘可能存在重复安检、售票以及换乘物理距离较长等问题，因此换乘时间也会随之增加。换乘时间越长，乘客出行的时间成本就越高，该指标能够客观反映城市群内多层次轨道

交通系统对乘客的吸引能力，其计算公式为

$$C_4 = \sum_{a=1}^{A} t_a \cdot \frac{T_a}{\sum_{a=1}^{A} T_a} \tag{11}$$

式中：A为多层次轨道交通线网内换乘站总数；t_a为换乘站a的平均换乘时间，s；T_a为换乘站a的日均换乘量，人次。

在对规划方案进行评价时，各OD对之间的出行总量V_{OD}及各换乘站的换乘量T_a同样是基于交通需求预测模型，并通过客流分配计算得到的结果。通过对比不同方案的仿真结果，可有效评价其换乘的便捷性。

2.4　运营一体化

2.4.1　运输组织一体化

目前，城市群轨道交通的发展格局呈现出多层次、多方式、多主体等特点，多层次即干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道4种层次的轨道交通网络，多方式即高速铁路、城际铁路、市域铁路、地铁、有轨电车等多种类型的轨道交通系统，多主体即线网由多间公司进行投资、建设和运营。干线铁路、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通的功能定位、服务对象、系统标准、建设主体等都不尽相同，基于这种情况，在各种轨道交通方式之间采用换乘衔接较为合理，因此，对于城市群多层次轨道交通的一体化融合，提升各运营主体之间的一体化运输组织能力尤为重要，运输组织一体化也是评价多层次轨道交通在跨网运输过程中的关键指标。

该指标为定性指标，在对指标进行评价时，重点评估不同运营主体间在运输组织上的协同程度，可以通过车站服务协同标准(如安检互认、导向协同等)、运营服务时间协同服务标准、旅客信息服务是否共享、运输能力协同服务标准等多个方面进行综合评估。

2.4.2　售检票一体化

票务管理涉及票制和清分，向上承接了乘客便捷出行的需求，向下涉及各运营商的利益，是一体化运营实现的前提条件[16]。售检票系统的差异是制约乘客跨网换乘效率的因素之一，在多层次轨道交通的一体化融合中，售检票一体化的程度一定程度上影响整个系统的运行效率和融合程度，售检票一体化程度越高，乘客在选择出行方式时无需过多考虑在跨网换乘时的时间成本，能够吸引更多的乘客选择，同时，提高售检票一体化程度，对于运营主体来说，能够极大地优化运营流程，提高运营效率，降低运营成本。

该指标为定量指标，在对指标进行评价时，支持干线铁路(含高速铁路)、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通跨层次、跨方式联程票的线路的赋值规则为：支持4种、3种、3种、1种跨层次(跨方式)联程票的线路的赋值分别为1，0.75，0.5，0；每个方案中所有线路赋值之和为该指标的初始数值；把该指标所有方案中的最大值设为基准值，每个方案的初始数值与基准值的比值即为每个方案该指标的数值。该指标的取值范围为(0，1]。

2.4.3　运维资源共享程度

为了满足不同客运量的需求，不同轨道交通方式所使用的轨道车辆不尽相同，车辆的检修资源和检修能力也因不同的运营主体产生差异[17]，具体来说，运维资源共享程度越高，不同线路能够使用的检修资源越丰富，轨道车辆的检修效率也能随之提高，对于运营主体来说，也能降低其运维成本，充分调动线网的运维资源。

该指标为定量指标，在对指标进行评价时，支持干线铁路(含高速铁路)、城际铁路、市域(郊)铁路、城市轨道交通跨层次运维资源(检修资源)共享基地的赋值规则为：支持4种、3种、2种、1种跨层次运维资源(检修资源)共享基地的赋值分别为1，0.75，0.5，0；每个方案中所有运维检修基地赋值之和为该指标的初始数值；把该指标所有方案中的最大值设为基准值，每个方案的初始数值与基准值的比值即为每个方案该指标的数值。该指标的取值范围为(0，1]。

3　实例研究

3.1　层次分析法计算指标权重

层次分析法计算权重采用九标度法构造相对重要度判断矩阵，即通过9个评价等级标度，判断矩阵标度定义如表2所示，其中矩阵元素a_{ij}表示第i个指标x_i相对于第j个指标x_j比较得到的标度值。

对判断矩阵进行一致性检验，通过计算一致性

表2　判断矩阵标度定义

Tab.2　Definition of judgment matrix scale

标度	定义
1	x_i与指标x_j，前者与后者同样重要
3	x_i与指标x_j，前者比后者稍微重要
5	x_i与指标x_j，前者比后者明显重要
7	x_i与指标x_j，前者比后者强烈重要
9	x_i与指标x_j，前者比后者极端重要
2，4，6，8	x_i与x_j的重要性的标度值介于上述2个相邻的等级之间
1~9的倒数	x_i与x_j的反比较，若指标x_i与指标x_j的重要性标度值为a_{ij}，则指标x_j与指标x_i的重要性标度值为$a_{ji}=1/a_{ij}$

比率*CR*进行判断，一致性比率的计算方式如式(12)所示，其中*CI*为一致性指标，计算方式如式(13)所示，*RI*为一致性指标平均标准，平均随机一致性指标RI标准值如表3所示。当*CR*<0.1时即可认为该判断矩阵具有一致性。

$$CR = CI/RI \tag{12}$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{13}$$

表3　平均随机一致性指标*RI*标准值

Tab.3　Standard values of average random consistency index (*RI*)

n	1、2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

邀请政府部门、企业与高等院校的30位专家学者对各指标相对重要性进行评分，通过上述计算方法得到各指标的权重，并依据各指标的权重计算了指标的得分，城市群多层次轨道交通一体化融合评价指标权重计算结果如表4所示。

3.2　实例分析

珠三角城市群多层次轨道交通网络已经初步成网，干线铁路、城际铁路基本成型或具备规模；市域(郊)铁路规划建设也处于快速推进阶段。本研究针对处于建设运营动态过程中的轨道交通网络进行一体化融合与方案评价。研究主要参考《珠江三角洲地区轨道交通同城化规划(2009年修编)》和《粤港澳大湾区城际铁路建设规划(2020—2030年)》，以《广东省铁路主导型综合交通互联互通宏观方案研究(2022年)》中的大湾区多层次轨道交通互联互通融合规划方案数据为基础[18-19]，针对部分缺失数据，结合现有运营数据和规划方案调整因素，利用交通规划软件TransCAD和交通需求预测模型进行补充和完善，从而构建完整的大湾区多层次轨道交通一体化融合规划评价方案。3个方案代表了3种不同的规划思路与发展导向。方案A是一个基础设施优先的方案，其规划重点是通过较大规模的投

表4　城市群多层次轨道交通一体化融合评价指标权重计算结果

Tab.4　Calculation results of evaluation index weights for integration of multi-level rail transit in urban agglomeration

准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	总权重	最大得分
网络一体化(*A*)	0.25	与城市群都市圈规划协调性(A_1)	0.141	0.035	3.5
		与土地利用协调性(A_2)	0.095	0.024	2.4
		线网综合覆盖密度(A_3)/(km/100km^2)	0.214	0.054	5.4
		线网覆盖节点比(A_4)/%	0.175	0.044	4.4
		乘客平均出行最短时间(A_5)/min	0.224	0.056	5.6
		线网连通度(A_6)	0.151	0.038	3.8
通道一体化(*B*)	0.25	通道线路重叠系数(B_1)	0.162	0.040	4.0
		通道功能层次与集约布局合理性(B_2)	0.253	0.063	6.3
		多层次轨道交通通道适应度(B_3)	0.260	0.065	6.5
		综合供给能力系数(B_4)	0.325	0.081	8.1
枢纽一体化(*C*)	0.25	枢纽衔接分级体系(C_1)	0.271	0.068	6.8
		站城融合程度(C_2)	0.246	0.061	6.1
		平均换乘次数(C_3)/次	0.237	0.059	5.9
		平均换乘时间(C_4)/s	0.246	0.062	6.2
运营一体化(*D*)	0.25	运输组织一体化(D_1)	0.531	0.133	13.2
		售检票一体化(D_2)	0.218	0.055	5.5
		运维资源共享程度(D_3)	0.251	0.063	6.3

资，新建贯穿核心区域的战略性线路，构建一个物理性能强大、层级清晰的轨道交通骨架，旨在从根本上提升网络的硬件基础和长远服务潜力。方案B是一个运营服务导向的方案，该方案侧重于优化和盘活存量资产，通过升级改造现有枢纽、打通不同运营主体间的协同壁垒来提升服务质量与效率。其核心在于通过精细化的管理和运营协同等方面的提升，在控制投资规模的同时改善乘客的出行体验。方案C是一个协调均衡发展的方案，通过平衡投资效益与网络覆盖的公平性的方法，扩大线网对外围城镇的覆盖，强调站点与城市功能的深度融合，体现了轨道交通对区域整体协调发展的支撑作用。各规划方案评价指标初始数据如表5所示。

为系统且直观地比较方案A，B，C的表现，对表5中各方案的17项评价指标量纲和性质各不相同的初始数据，采用比率法进行归一化处理，有效消除了不同指标在单位、量纲等方面的差异，将所有指标值转换到统一的可比较尺度上，从而科学准确地展现各方案在不同维度上的相对优劣。

正向指标的计算方法为式(14)。

$$\bar{X}_{ij}=\frac{X_{ij}}{\max(X_{ij})} \tag{14}$$

逆向指标的计算方法为公式(15)，区别在于数值越大则表示得分越低。

$$\bar{X}_{ij}=\frac{\min(X_{ij})}{X_{ij}} \tag{15}$$

$$d_{ij}=C_{\max}\cdot\bar{X}_{ij} \tag{16}$$

式中：$C_{\max}$为各指标的最大得分；X_{ij}为原始的指标值；$\bar{X}_{ij}$为经过归一化处理后的指标值。

随后，将各指标标准化后的数值与通过层次分析法确定的总权重相结合，计算出每个方案在各项指标上的最终得分。最后通过累加所有指标的得分，得到各方案的综合评价总分。各规划方案指标标准化得分与综合评价结果如表6所示。通过该评价体系，实现了2个层面的方案对比，在宏观层面通过对比各方案的得分从总体上判断方案的综合优劣；在微观层面通过对比各方案在网络、通道、枢纽和运营4个方面的得分进一步剖析每个方案具体的优势与短板。

方案A在奠定基础设施方面表现较大优势。在网络与通道一体化层面，该方案几乎在所有关键指标上都处于较好水平，包括与上位规划的协调性、线网覆盖密度、乘客出行效率以及通道综合供给能力等。同时，在枢纽一体化层面，方案A构建了最

表5　各规划方案评价指标初始数据

Tab.5　Initial data of evaluation indicators for various planning schemes

指标层	指标性质	取值范围	方案A	方案B	方案C
与城市群都市圈规划协调性(A_1)	定性	(0，1]	1.00	0.80	0.90
与土地利用协调性(A_2)	定量、正向	(0，1]	0.86	0.74	0.71
线网综合覆盖密度(A_3)/(km/100 km^2)	定量、正向	(0，10]	3.84	3.42	3.62
线网覆盖节点比(A_4)/%	定量、正向	(0，1]	0.27	0.28	0.31
乘客平均出行最短时间(A_5)/min	定量、逆向	(0，60]	19.00	21.00	20.00
线网连通度(A_6)/%	定量、正向	(0，4)	0.60	0.54	0.62
通道线路重叠系数(B_1)	定量、中间	(1.25，2.5)	0.12	0.09	0.18
通道功能层次与集约布局合理性(B_2)	定性	(0，1]	0.80	0.60	0.70
多层次轨道交通通道适应度(B_3)	定量、正向	(0，1]	0.71	0.49	0.62
综合供给能力系数(B_4)	定量、正向	(0，1]	0.66	0.38	0.53
枢纽衔接分级体系(C_1)	定量、正向	(0，1]	1.00	0.68	0.82
站城融合程度(C_2)	定性	(0，1]	0.70	0.60	0.80
平均换乘次数(C_3)/次	定量、逆向	(0，5]	1.03	1.04	1.05
平均换乘时间(C_4)/s	定量、逆向	(0，600]	186.00	164.00	180.00
运输组织一体化(D_1)	定性	—	0.80	0.90	0.80
售检票一体化(D_2)	定量、正向	(0，1]	0.91	1.00	0.73
运维资源共享程度(D_3)	定量、正向	(0，1]	0.82	1.00	0.93

表6　各规划方案指标标准化得分与综合评价结果

Tab.6　Standardized scores and comprehensive evaluation results for various planning schemes

准则层	指标层	方案A	方案B	方案C
网络一体化(A)	与城市群都市圈规划协调性(A_1)	3.50	2.80	3.15
	与土地利用协调性(A_2)	2.40	2.07	1.98
	线网综合覆盖密度(A_3)/(km/100 km^2)	5.40	4.81	5.09
	线网覆盖节点比(A_4)/%	3.83	3.97	4.40
	乘客平均出行最短时间(A_5)/min	5.60	5.07	5.32
	线网连通度(A_6)	3.68	3.31	3.80
通道一体化(B)	通道线路重叠系数(B_1)	3.20	2.40	1.60
	通道功能层次与集约布局合理性(B_2)	5.04	3.15	3.15
	多层次轨道交通通道适应度(B_3)	6.50	4.49	5.68
	综合供给能力系数(B_4)	8.10	4.66	6.50
枢纽一体化(C)	枢纽衔接分级体系(C_1)	6.80	5.78	6.19
	站城融合程度(C_2)	4.27	3.66	4.88
	平均换乘次数(C_3)/次	5.90	5.84	5.79
	平均换乘时间(C_4)/s	5.47	6.20	5.65
运营一体化(D)	运输组织一体化(D_1)	10.56	11.88	10.56
	售检票一体化(D_2)	5.06	5.50	4.79
	运维资源共享程度(D_3)	5.73	6.30	5.61
	得分合计	91.04	81.89	84.13

完善的枢纽衔接分级体系，充分证明了其在构建一个基础设施能力较强的轨道交通骨架方面的系统性优势。

方案B的优势在于运营一体化层面，其运输组织水平和最短的平均换乘时间，体现了通过精细管理提升服务质量的规划思路。

方案C的亮点则在于其均衡性，通过最高的线网覆盖节点比和最佳的站城融合度，体现了其对轨道交通服务公平性以及与城市发展深度融合的重视。

综合评价结果表明，方案A为最优推荐方案。该方案在通道一体化方面表现突出，同时在网络一体化与规划协调性、枢纽一体化的系统性方面也表现优异。这些优势共同构成了方案A在多层次轨道交通一体化融合上的战略性与前瞻性，但突出的换乘时间过长问题，可以在后续的枢纽详细设计和施工优化阶段得到针对性的改善处理。因此，选择方案A最符合城市群长远发展的战略需求。

4　结束语

针对城市群多层次轨道交通一体化融合评价方案比选的复杂性难题，构建了一套包含网络、通道、枢纽、运营4个维度的融合评价指标体系。该体系通过层次分析法量化各指标权重，为系统性、科学化地评估多层次轨道交通一体化水平提供了有效的分析框架。

通过粤港澳大湾区的实例研究表明，本评价体系不仅能有效衡量不同方案的综合优劣，更能精准识别出不同方案在基础设施优先、运营服务导向和均衡协调发展等方向的战略侧重。这一特性证明了该体系具备很强的实践指导价值，能够帮助决策者将宏观规划目标与具体方案选择进行有效匹配，从而显著提升规划决策的科学性与效率。

未来随着城市群多层次轨道交通逐步成网与规模化运营，可进一步研究构建针对后期评价、运营效果评估的评价指标体系，为多层次轨道交通线网融合优化与运营协同评价提供持续的理论支撑。

参考文献：

[1] 新华社. 中共中央 国务院印发《交通强国建设纲要》[EB/OL]. (2019-09-19)[2025-02-17]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.

[2] 新华社. 中共中央 国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》[EB/OL]. (2021-02-24)[2025-02-17]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-02/24/content_5588654.htm.

[3] 吕　颖. 都市圈综合轨道交通线网布局评价指标研究[J].

铁道标准设计，2021，65(4)：25-30，35.
LYU Ying. Research on Evaluation Index of Integrated Rail Transit Network Layout in Metropolitan Area[J]. Railway Standard Design，2021，65(4)：25-30，35.

[4] 胡　杨. 城市轨道交通线网规划方案综合评价指标体系分析[J]. 运输经理世界，2023(7)：1-3.

[5] 彭其渊，刘　杰. 城市轨道交通规划网络与城市规划的综合协调性量化分析[J]. 交通运输工程学报，2019，19(3)：134-144.
PENG Qiyuan，LIU Jie. Comprehensive Coordination Quantitative Analysis of Urban Rail Transit Planning Network and Urban Planning[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2019，19(3)：134-144.

[6] 秦韶阳，赵　德，章国梁，等. 交通强国背景下的城市群综合交通系统评价指标体系构建[J]. 现代交通与冶金材料，2022，2(3)：10-17.
QIN Shaoyang，ZHAO De，ZHANG Guoliang，et al. Construction of Comprehensive Transportation System Evaluation Index System of Urban Agglomeration under Transportation Power[J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials，2022，2(3)：10-17.

[7] 胡必松，肖　畅. 城市群轨道交通网络化规划评价研究[J]. 铁道工程学报，2022，39(2)：7-13.
HU Bisong，XIAO Chang. Research on the Evaluation of Rail Transit Network Planning in Urban Agglomeration[J]. Journal of Railway Engineering Society，2022，39(2)：7-13.

[8] 郭　婷. 我国都市圈轨道交通“四网融合”发展程度评价研究[D]. 北京：北京交通大学，2022.

[9] 张丽丹. 多网融合背景下都市圈市域(郊)铁路网规划方案评价研究[J]. 铁道标准设计，2024，68(4)：27-34.
ZHANG Lidan. Evaluation of Suburban Railway Network Planning Schemes in Metropolitan Areas under Multi-Network Connection[J]. Railway Standard Design，2024，68(4)：27-34.

[10] 张安锋，黄　骁，朱春节. 高质量发展背景下上海市轨道交通网络规划与实践[J]. 交通与运输，2023，39(3)：30-35.
ZHANG Anfeng，HUANG Xiao，ZHU Chunjie. Urban Rail Transit Network Planning and Practicing in Shanghai under the Background of High Quality Development[J]. Traffic & Transportation，2023，39(3)：30-35.

[11] 刘　鹏. 城市群区域城际轨道交通线网规划评价指标体系研究[J]. 现代城市轨道交通，2010(2)：6-8，80.
LIU Peng. Study on Index System for Planning Evaluation of Intercity Railway Line Network in Region[J]. Modern Urban Transit，2010(2)：6-8，80.

[12] 夏　宇，谭衢霖，李　然，等. 城市群高速铁路线网规划评价指标体系研究[J]. 中国铁路，2019(2)：107-113.
XIA Yu，TAN Qulin，LI Ran，et al. Evaluation Indicator System for HSR Network Planning of City Cluster[J]. China Railway，2019(2)：107-113.

[13] 谭健妹，刘金成. 城市群区域运输通道客运结构协调评价指标研究[J]. 山西科技，2020，35(1)：117-119，127.
TAN Jianmei，LIU Jincheng. Research on Coordinated Evaluation Index of Passenger Transport Structure in Urban Agglomeration Transportation Corridor[J]. Shanxi Science and Technology，2020，35(1)：117-119，127.

[14] 巩　梨. 区域交通一体化下的综合运输通道客运结构协调发展研究[D]. 兰州：兰州交通大学，2021.

[15] 潘昭宇，张天齐，唐怀海，等. 多层次轨道交通“四网融合”体系研究[J]. 交通工程，2020，20(4)：1-8.
PAN Zhaoyu，ZHANG Tianqi，TANG Huaihai，et al. Research on the “Four-Network Integration” System of Multi-Level Rail Transit[J]. Journal of Transportation Engineering，2020，20(4)：1-8.

[16] 谭　彬. 都市圈区域轨道交通一体化运营问题与对策：以粤港澳大湾区为例[J]. 综合运输，2022，44(8)：143-148.
TAN Bin. Problems and Countermeasures of Integrated Operation of Regional Rail System in Metropolitan Area：An Example of Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area[J]. China Transportation Review，2022，44(8)：143-148.

[17] 陶志祥. 都市圈轨道交通“四网融合”规划理论与实践[C]//2020年中国城市交通规划年会论文集. 北京，2020：875-883.

[18] 刘　鹏. 粤港澳大湾区多层次轨道交通一体化融合研究[J]. 都市快轨交通，2024，37(6)：1-7.
LIU Peng. Integrated Development of Multi-Level Rail Transit in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Urban Rapid Rail Transit，2024，37(6)：1-7.

[19] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 广东省铁路主导型综合交通互联互通宏观方案研究[R]. 武汉：中铁第四勘察设计院集团有限公司，2022.

(责任编辑　汪沁萱)