

文章编号: 1674—8247(2024)06—0008—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.06.002

铁路枢纽旅客列车时刻表评价方法研究

范丁元^{1,2} 杨 飞³ 张云娇³ 于 波³ 黄心禹³

(1. 国家铁路局规划与标准研究院, 北京 100055; 2. 西南交通大学, 成都 610031;

3. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055)

摘 要:为满足“一日一图”的客运运营改革诉求,本文建立一套更加系统和完善的铁路枢纽旅客列车时刻表评价体系。提供了一种铁路枢纽旅客列车时刻表评价方法,包括获取铁路枢纽的列车时刻表和路网信息;对所述列车时刻表和路网信息进行聚类分析得到枢纽旅客时刻表评价体系;对每个准则层进行评价得到准则层的评价等级和所有评价等级的频数,根据所述评价等级和评价等级的频数计算得到每个准则层的主观评分;为每个准则层建立模糊一致矩阵,并计算得到模糊一致矩阵的客观权向量,根据模糊一致矩阵和客观权向量计算得到每个准则层的客观评分;由所述主观评分和客观评分相加得到每个准则层的总评分,基于各评价指标的隶属和层次关系,建立了一套更加系统和完善的铁路枢纽旅客列车时刻表评价体系,既对指导日常生产的运行图调整方向有重大参考作用,又能作为服务产品为旅客提供选择参考。

关键词:铁路枢纽旅客列车时刻表;评价方法;模糊一致矩阵;运行图

中图分类号:U291.7

文献标志码:A

8

Research on Evaluation Method for Passenger Train Timetable of Railway Hubs

FAN Dingyuan^{1,2} YANG Fei³ ZHANG Yunjiao³ YU Bo³ HUANG Xinyu³

(1. Planning and Standard Research Institute of the National Railway Administration, Beijing 100055, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: To meet the requirements of the passenger transport operation reform featuring “one diagram per day”, this paper established a more systematic and comprehensive evaluation system for passenger train timetables of railway hubs. It provides an evaluation method for passenger train timetables of railway hubs, which includes acquiring train timetables and network information of railway hubs; conducting cluster analysis on the train timetables and railway network information to obtain an evaluation system for hub passenger timetables; evaluating each criterion layer to obtain its evaluation grade and the frequency of all evaluation grades, and then calculating the subjective score for each criterion layer based on the evaluation grades and their frequencies; establishing a fuzzy consistent matrix for each criterion layer and calculating the objective weight vector of the fuzzy consistent matrix, and then calculating the objective score for each criterion layer based on the fuzzy consistent matrix and the objective weight vector; and obtaining the total score for each criterion layer by summing the subjective score and the objective score. Based on the membership and hierarchical relationships of various evaluation indicators, a more systematic and comprehensive evaluation system for passenger train

收稿日期:2024-03-04

作者简介:范丁元(1994-),男,工程师。

基金项目:国家铁路局规划与标准研究院科研项目([350001]FJGGZY[CS]2024001)

引文格式:范丁元,杨飞,张云娇,等.铁路枢纽旅客列车时刻表评价方法研究[J].高速铁路技术,2024,15(6):8-14.

FAN Dingyuan, YANG Fei, ZHANG Yunjiao, et al. Research on Evaluation Method for Passenger Train Timetable of Railway Hubs[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(6):8-14.

timetables of railway hubs was established. It serves as a significant reference for guiding the adjustment direction of the operation diagram in daily production and can also be used as a service product to provide selection references for passengers.

Key words: passenger train timetable of railway hubs; evaluation method; fuzzy consistent matrix; operation diagram

随着铁路客运向市场化运营的不断深入,供给侧改革的不断深化,枢纽地区客运服务效果指标越来越受到重视^[1]。“一日一图”的客运运营改革诉求,也要求工作中需要有一套行之有效的评价指标体系,指导日常生产的运行图调整方向^[2]。所以,对枢纽地区列车时刻表的评价研究尤为紧迫重要。在评价指标体系研究方面,目前对铁路旅客列车的评价研究主要集中在单一讨论运输企业经济效益或者旅客满意度,仅涉及到部分具有典型性的指标,各指标相互平行缺乏层次性和系统性^[3]。因此在实际应用中,有必要对给出的指标进行补充,确定各指标的隶属和层次关系,建立一套更加系统和完善的评价体系^[4]。本研究在总结现有铁路枢纽旅客列车时刻评价的基础上,围绕铁路枢纽旅客列车时刻规划目标^[5],构建具有普遍适用性和客观性的规划评价指标体系,通过模糊统计和德尔非法计算主观指标、熵值模型计算客观指标确定指标权重^[6],构建模糊组合赋权模型实现准则层、执行层的综合评价分析,提高旅客列车开行方案的合理性和科学性,指导日常生产的运行图调整方向,并作为服务产品提供旅客选择参考^[7]。

1 评价方法

枢纽地区旅客列车时刻表评价方法。包括枢纽地区旅客交流表的生成和枢纽地区旅客列车时刻表评价体系2个环节^[8]。通过枢纽地区旅客交流表生成始发车数、通过车数、到向量、发向量等因素,形成客车对数,代入枢纽地区旅客列车时刻表评价体系^[9]。

1.1 枢纽地区旅客交流表的生成

枢纽地区旅客交流表的生成即根据原始列车时刻表通过模式识别和聚类分析读取无固定格式数据,可以读取铁路局收集的铁路列车时刻表数据,并结合图形路网信息,确定详细的运输径路,从而输出枢纽地区旅客列车总对数、始发对数、通过对数,各方向交流^[10]。主要分为枢纽地区选择、枢纽地区结构生成、枢纽地区客车对数计算、枢纽地区客车交流表^[11]。

Step 1:获取铁路枢纽的列车时刻表和路网信息;优选所述铁路枢纽为各车站之间相互连通的区域,所选择的铁路枢纽为车站覆盖均值为1.3的区域,如图1所示,所述铁路枢纽中包括A、B、C、D、E、F车站^[12]。

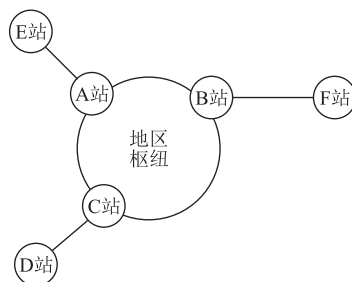


图1 枢纽地区车站交流图

Step 2:对所述列车时刻表和路网信息进行聚类分析得到枢纽旅客时刻表评价体系,枢纽旅客时刻表评价体系包括至少一个准则层^[13]。首先对铁路列车时刻表和路网信息聚类分析确定列车信息和列车的运输路径^[14];根据运输路径计算得到列车开行对数;然后对列车信息进行清洗和处理^[15],获取车次编码、列车类型、列车到达时刻、出发时刻、始发终到站、发向量、到向量^[16];从铁路列车时刻表和路网信息中获取到运量、发向运量、各方向计3类数据^[17],具体步骤如下:

统计始发列车:以A站为例,A站始发的列车构成可以分为A站—E站方向,A站—B站(不停站)—F站方向,A站—B站(不停站)—F站方向,A站—C站(不停站)—D站方向,A站—C站(不停站)—D站方向。以此类推,统计从A站,B站,C站开行列车对数为地区枢纽始发列车合计^[18],并将信息进行存储^[19]。

统计通过列车:以A站为例,A站通过列车构成E站方向中任意1个站—A站(不停站)—B站—F站方向中任意1个站;E站方向中任意1个站—A站(不停站)—B站;E站方向中任意1个站—A站(不停站)—B站—C站;E站方向中任意1个站—A站(不停站)—B站—C站—D站方向中任意1个站;E站方向中任意1个站—A站(不停站)—C站;E站方向中任意1个站—A站(不停站)—C站—D站方向中任意1个站。以此类推,统计从A站,B站,C站开行列车对数为地区枢纽通过列车合计,并将信息进行存储^[20]。

统计发向运量:(1)统计始发车为始发站往终到方向(如A站—E站方向)的列车开行对数;(2)统计

通过车为始发方向去往终到方向(如E站方向开往F站方向,即E站方向—A站—C站—B站—F站方向)的列车开行对数,发向运量的各方向计为枢纽地区去往终到方向的客车对数合计,并将信息进行存储^[21]。

统计到向运量:(1)统计始发车为始发站从终到方向(E站—A站方向)到达的客车对数;(2)统计通过车为终到方向(如F站方向开往E站方向即F站方向—B站—A站—E站方向)发往始发方向的客车对数,到向量的各方向计为枢纽地区从终到方向接入的客车对数合计,并将信息进行存储^[22]。

各方向计:统计始发列车的发向向量、始发列车的到向向量、通过列车的发向向量、通过列车的到向向量四者之和,并将信息进行存储^[23]。车站交流如表1所示。

表1 枢纽地区车站交流量表(列)

| 项目 | 发向向量 | 到向向量 |
|---------|------|------|
| 一、始发列车 | 29 | 50 |
| A站—E站方向 | 5 | 10 |
| A站—F站方向 | 1 | 2 |
| A站—D站方向 | 5 | 8 |
| B站—F站方向 | 2 | 4 |
| B站—E站方向 | 7 | 12 |
| B站—D站方向 | 3 | 6 |
| C站—D站方向 | 2 | 3 |
| C站—E站方向 | 3 | 5 |
| C站—F站方向 | 1 | 2 |
| 二、通过列车 | 12 | 16 |
| E站—F站方向 | 2 | 3 |
| E站—D站方向 | 5 | 6 |
| D站—F站方向 | 5 | 6 |
| 三、各方向合计 | 41 | 66 |
| 一、始发列车 | 79 | |
| 二、通过列车 | 28 | |
| 三、各方向合计 | 107 | |

通过统计表1中的始发列车、通过列车和各方向计得到列车开行对数 C_{23} ,并存入表2中。

Step 3:以车次编码为主节点的信息、列车的到达时刻、出发时刻、始发终到站、发向量、到向量为附节点、机车类型为母节点的树状结构,所述机车类型包括客运普车、客运G车、客运C车及客运D车,树状结构如图2所示。

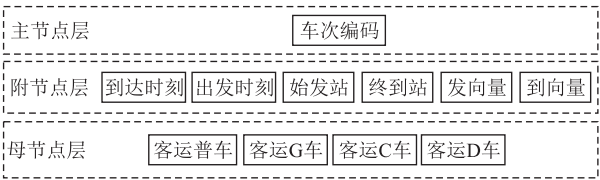


图2 树状结构图

Step 4:错误识别及提取数据。识别表格形式和结

构,以及提取列车时刻表详细数据的方法。首先根据聚类分析确定表格范围;其次,根据先验的表头模式、车站名模式、车次模式、时刻模式确定表格的内部结构;根据已掌握的表格结构提取列车时刻表详细数据;最后,对提取的数据进行合并整理与查错处理,发现问题及时反馈并报告有问题的工作表名和行车号及出错类型。该过程不但可以提取准确的列车时刻表数据,还可找出数据中的错误和可疑位置。

Step 5:原始列车时刻表分为车站、车次、时刻和区段,将枢纽原始时刻表信息存储后,利用图形网络的径路寻找方法,将车站信息和线路名称进行匹配记录,形成车站—线路—车站线路的链式向量,完成对原始列车时刻表的区段分配。

1.2 枢纽旅客列车时刻表评价方法

通过模糊层次分析法建立路网利用率、乘客满意率、盈利率的准则层,以及列车覆盖城市半径等15个执行层指标。根据所述列车开行对数和列车的属性信息构建城市覆盖指标、服务频率指标、路网服务指标、乘客满意指标和盈利能力指标^[24]如表2所示。

表2 枢纽旅客列车时刻表评价方法指标释义表

| 准则层 | 执行层 | 指标释义 |
|-----------------|------------|--|
| 城市覆盖指标 C_1 | 列车覆盖城市半径 | $C_{11} = \sum_{z=1}^Z \frac{l_z}{\pi r_z^2} \quad (1)$ <p>式中,C_{11}表示枢纽网中所有列车覆盖的城市半径,Z表示枢纽的总数,z表示第z个枢纽,l_z表示第z条枢纽所有区段的长度,r_z表示第z条枢纽的覆盖半径</p> |
| | 覆盖车站数量车站间距 | $C_{12} = \sum_{z=1}^Z k_z \quad (2)$ <p>式中,C_{12}表示枢纽网覆盖车站数量,k_z表示第z条枢纽地区中设定的车站个数</p> |
| | 车站间距 | $C_{13} = \sum_{m=1}^M l_m \quad (3)$ <p>式中,C_{13}表示枢纽网中的所有车站间距之和,M表示车站的总数,m表示第m个车站,l_m表示第m个车站的车站间距</p> |
| 服务频率指标 C_2 | 列车停车频率 | $C_{21} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N o_n^m \quad (4)$ <p>式中,C_{21}表示所有列车的停车频率之和,N表示枢纽网中列车的总数,n表示第n列列车,o_n^m表示第n列列车是否在第m个车站停留,停留记1,不停记0</p> |
| | 列车停车平均时段 | $C_{22} = \frac{\sum_{n=1}^N d_n}{\sum_{n=1}^N t_n} \quad (5)$ <p>式中,C_{22}表示枢纽网中所有列车的停车平均时段,d_n表示第n列列车的开行时间段,t_n表示第n列列车的停车次数</p> |
| | 列车对数 | $C_{16} = \sum_{m=1}^M n_m + \sum_{m=1}^M l_m \quad (6)$ <p>式中,C_{16}表示枢纽网中所有列车的开行对数,M表示车站的总数,m表示第m个车站,n_m表示在第m个车站旅客时刻表得到的始发车数,l_m表示在第m个车站旅客时刻表得到的通过车数</p> |

| 续表 2 | | |
|---------------------|------------|---|
| 准则层 | 执行层 | 指标释义 |
| 路网服务 指标 C_3 | 列车定员 | $C_{31} = \sum_{m=1}^M b_m \quad (7)$ <p>式中,C_{31}表示枢纽网中所有列车的总定员,b_m表示在第m个车站得到的总列车的人数/d</p> |
| | 列车运营 长度 | $C_{32} = \sum_{n=1}^N \theta_n \quad (8)$ <p>式中,C_{32}表示枢纽网中所有列车的开行里程,θ_n表示第n列列车的里程长度</p> |
| | 列车停站 个数 | $C_{33} = \sum_{m=1}^M \rho_m \quad (9)$ <p>式中,C_{33}表示枢纽网中所有列车的停站个数,ρ_m表示列车集合在第m个车站的个数</p> |
| 乘客满意 指标 C_4 | 列车运行 速度 | $C_{41} = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{\theta_n}{\alpha_n}}{N} \quad (10)$ <p>式中,C_{41}表示枢纽网中所有列车的平均运行速度,θ_n表示第n辆列车的里程长度,α_n表示第n辆列车的开行时间</p> |
| | 座位等级 比率 | $C_{42} = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{\gamma_n}{\beta_n}}{N} \quad (11)$ <p>式中,C_{42}表示枢纽网中所有列车的座位等级比率,γ_n表示第n列列车的一等座数量,β_n表示第n列列车的总座位数量</p> |
| | 高峰小时 比率 | $C_{43} = \frac{\sum_{n=1}^N \frac{\delta_n}{\epsilon_n}}{N} \quad (12)$ <p>式中,C_{43}表示枢纽网中所有列车的高峰小时比率,δ_n表示第n列列车的高峰小时,ϵ_n表示第n列列车的总时长</p> |
| 盈利能力 指标 C_5 | 旅客发送量 | $C_{51} = \sum_{n=1}^N \tau_n A_n \gamma \quad (13)$ <p>式中,C_{51}表示枢纽网中所有列车的旅客发送量,τ_n表示第n列列车的客车对数,A_n表示第n列列车类型定员,γ表示枢纽网中各客车的平均上座率</p> |
| | 旅客票价 收入 | $C_{52} = \sum_{n=1}^N \mu_n - \vartheta_n - \sigma_n \quad (14)$ <p>式中,C_{52}表示枢纽网中所有列车的旅客票价收入,μ_n表示第n列列车的营运收入,ϑ_n表示第n列列车的固定支出,σ_n表示第n列列车的变动费用</p> |
| | 旅客乘车率 | $C_{53} = \frac{\omega l_z}{C_{51}} \quad (15)$ <p>式中,C_{53}表示所有列车的旅客乘车率,ω表示列车的客流密度</p> |

2 熵值模型构建

2.1 建立评价等级集

对每个准则层进行评价得到每个准则层的评价等级和所有评价等级的频数,根据所述评价等级和评价等级的频数计算得到每个准则层的主观评分;结合模糊统计与德尔菲法,请参与评价的各位专家,按划定的评价等级 $U = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 为各执行层确定评价等级,其中,1、2、3、4、5 分别对应很好、较好、一般、较差、

很差^[25]。
根据执行层的评价等级构建准则层的评价矩阵,邀请 15 名专家打分,得到的准则层的评价矩阵如下:

$$\begin{aligned} U_1 &= (33 \ 35 \ 41) \\ U_2 &= (29 \ 37 \ 23) \\ U_3 &= (48 \ 71 \ 37) \\ U_4 &= (42 \ 43 \ 34) \\ U_5 &= (37 \ 54 \ 29) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: U_1 —— C_1 的评价矩阵;
 U_{11} ——所有专家对 C_{11} 的评价等级之和,以此类推。

统计执行层评价等级的频数,根据所述频数计算得到执行层的隶属度^[26]:

$$\vartheta_{11} = \frac{\tau_{11}}{f} \quad (17)$$

式中: f ——专家参加人数;
 τ_{11} ——执行层 C_{11} 的评价等级的频数;
 ϑ_{11} —— C_{11} 的隶属度,同理,根据式(17)依次计算每个执行层的隶属度。

根据执行层的隶属度构建准则层的主观权重向量^[27]:

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= \{\vartheta_{11}, \vartheta_{12}, \vartheta_{13}\}^T \\ \vartheta_2 &= \{\vartheta_{21}, \vartheta_{22}, \vartheta_{23}\}^T \\ \vartheta_3 &= \{\vartheta_{31}, \vartheta_{32}, \vartheta_{33}\}^T \\ \vartheta_4 &= \{\vartheta_{41}, \vartheta_{42}, \vartheta_{43}\}^T \\ \vartheta_5 &= \{\vartheta_{51}, \vartheta_{52}, \vartheta_{53}\}^T \end{aligned} \quad (18)$$

式中: ϑ_1 —— C_1 的评价矩阵;
 ϑ_{11} —— C_{11} 的隶属度。
由准则层的主观权重向量和评价矩阵的乘积得到准则层的主观评分,即:

$$\begin{aligned} &0.87 \\ U_1 \vartheta_1 &= (33 \ 35 \ 41) \times (0.03) = 2.584 \\ &4.47 \\ &0.47 \\ U_2 \vartheta_2 &= (29 \ 37 \ 23) \times (1.80) = 1.813 \\ &4.40 \\ &1.73 \\ U_3 \vartheta_3 &= (48 \ 71 \ 37) \times (0.80) = 3.859 \quad (19) \\ &1.40 \\ &4.00 \\ U_4 \vartheta_4 &= (42 \ 43 \ 34) \times (2.20) = 2.785 \\ &0.47 \\ &0.47 \\ U_5 \vartheta_5 &= (37 \ 54 \ 29) \times (1.80) = 2.421 \\ &4.40 \end{aligned}$$

利用模糊层次分析法为每个准则层建立模糊一致矩阵,通过计算得到模糊一致矩阵的客观权向量,根据模糊一致矩阵和模糊一致矩阵的客观权向量计算得到每个准则层的客观评分。

利用反正切函数标准化将执行层进行归一化处理。

$$C'_{11} = \frac{\arctan(C_{11}) \times 2}{\pi} \quad (20)$$

式中, C'_{11} 表示归一化处理后的 C_{11} ,同理,根据式(20)依次计算对每个执行层进行归一化处理。

利用归一化处理后的执行层为准则层建立模糊一致矩阵。

$$\begin{aligned} C'_1 &= \begin{pmatrix} C'_{11} \\ C'_{12} \\ C'_{13} \\ C'_{21} \\ C'_{22} \\ C'_{23} \\ C'_{31} \\ C'_{32} \\ C'_{33} \\ C'_{41} \\ C'_{42} \\ C'_{43} \\ C'_{51} \\ C'_{52} \\ C'_{53} \end{pmatrix} \\ C'_2 &= \begin{pmatrix} C'_{21} \\ C'_{22} \\ C'_{23} \end{pmatrix} \\ C'_3 &= \begin{pmatrix} C'_{31} \\ C'_{32} \\ C'_{33} \end{pmatrix} \\ C'_4 &= \begin{pmatrix} C'_{41} \\ C'_{42} \\ C'_{43} \end{pmatrix} \\ C'_5 &= \begin{pmatrix} C'_{51} \\ C'_{52} \\ C'_{53} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

式中, C'_1 表示准则层 C_1 的模糊一致矩阵,以此类推。

2.2 建立熵值模型

根据归一化处理后的执行层,采用熵值法计算得到执行层的熵权,所述熵值法为优化后的熵值法。

Step 1:根据归一化处理后的执行层计算得到执行层比重:

$$p_{11} = \frac{C'_{11}}{C'_{11} + C'_{12} + C'_{13}} \quad (22)$$

式中: p_{11} —— C'_{11} 的比重。

同理,利用式(22)计算得到 p_{12} 和 p_{13} , p_{12} 表示 C'_{12} 的比重, p_{13} 表示 C'_{13} 的比重。

Step 2:根据执行层的比重计算执行层的信息熵:

$$e_{11} = -\left(\frac{p_{11}}{\log_2 p_{11}} + \frac{p_{12}}{\log_2 p_{12}} + \frac{p_{13}}{\log_2 p_{13}}\right) \quad (23)$$

式中: e_{11} —— C'_{11} 的信息熵。

同理,利用式(23)计算得到 C'_{12} 的信息熵 e'_{11} 、 C'_{13} 信息熵 e'_{13} 。

Step 3:计算执行层在准则层内的相关系数之和:

$$r_{11} = r_{12} = r_{13} = \frac{\text{var}(X)}{\sqrt{\text{var}(X)\text{var}(X)}} = 1 \quad (24)$$

式中: X ——矩阵 C'_1 中的行数;

r_{11} —— C'_{11} 的相关系数;

r_{12} —— C'_{12} 的相关系数;

r_{13} —— C'_{13} 的相关系数。

$$K_{11} = r_{12} + r_{13} \quad (25)$$

式中: K_{11} —— C'_{11} 在 C'_1 中的相关系数之和。

Step 4:根据执行层在准则层内的相关系数之和计算执行层的权重:

$$\omega_{11} = \frac{1}{C'_{11} \times K_{11}} \quad (26)$$

式中: ω_{11} —— C'_{11} 的权重。

Step 5:根据执行层的权重计算执行层的信息效用值:

$$v_{11} = \frac{\omega_{11} \times C'_{11}}{C'_{11} + C'_{12} + C'_{13}} \quad (27)$$

式中, v_{11} 表示 C'_{11} 的信息效用值,同理,利用式(27)计算得到 C'_{12} 的信息效用值 v_{12} 、 C'_{13} 的信息效用值 v_{13} 。

Step 6:利用执行层的信息效用值计算执行层的熵权:

$$W_{11} = \frac{v_{11}}{v_{11} + v_{12} + v_{13}} \quad (28)$$

式中: W_{11} —— C'_{11} 的熵权。

指标计算得分如表3所示。

表3 指标计算得分表

| 矩阵 | 元素 | p_{ij} | e_{ij} | r_{ij} | K_{ij} | w_{ij} | v_{ij} | W_{ij} |
|--------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| C'_1 | C'_{11} | 0.226 6 | 0.105 8 | 1 | 2 | 4.726 | 1.071 | 0.439 |
| | C'_{12} | 0.387 1 | 0.282 7 | 1 | 2 | 1.769 | 0.685 | 0.280 |
| | C'_{13} | 0.386 3 | 0.281 5 | 1 | 2 | 1.776 | 0.686 | 0.281 |
| C'_2 | C'_{21} | 0.321 5 | 0.196 4 | 1 | 2 | 2.546 | 0.818 | 0.344 |
| | C'_{22} | 0.337 2 | 0.215 0 | 1 | 2 | 2.326 | 0.784 | 0.330 |
| | C'_{23} | 0.341 3 | 0.220 0 | 1 | 2 | 2.272 | 0.776 | 0.326 |
| C'_3 | C'_{31} | 0.338 7 | 0.216 9 | 1 | 2 | 2.305 | 0.781 | 0.328 |
| | C'_{32} | 0.337 0 | 0.214 8 | 1 | 2 | 2.328 | 0.785 | 0.330 |
| | C'_{33} | 0.324 3 | 0.199 6 | 1 | 2 | 2.505 | 0.812 | 0.342 |
| C'_4 | C'_{41} | 0.762 1 | 1.944 1 | 1 | 2 | 0.257 | 0.196 | 0.059 |
| | C'_{42} | 0.096 1 | 0.028 4 | 1 | 2 | 17.589 | 1.690 | 0.513 |
| | C'_{43} | 0.141 9 | 0.050 3 | 1 | 2 | 9.931 | 1.409 | 0.428 |
| C'_5 | C'_{51} | 0.410 9 | 0.320 2 | 1 | 2 | 1.562 | 0.642 | 0.254 |
| | C'_{52} | 0.411 0 | 0.320 4 | 1 | 2 | 1.561 | 0.641 | 0.254 |
| | C'_{53} | 0.178 1 | 0.071 6 | 1 | 2 | 6.986 | 1.245 | 0.492 |

Step 7:由执行层的熵权建立模糊一致矩阵的客观权向量:

$$\begin{aligned} W_1 &= (W_{11} \quad W_{12} \quad W_{13}) \\ W_2 &= (W_{21} \quad W_{22} \quad W_{23}) \\ W_3 &= (W_{31} \quad W_{32} \quad W_{33}) \\ W_4 &= (W_{41} \quad W_{42} \quad W_{43}) \\ W_5 &= (W_{51} \quad W_{52} \quad W_{53}) \end{aligned} \quad (29)$$

式中: W_1 —— C'_1 的客观权向量;

W_2 —— C'_2 的客观权向量;

W_3 —— C'_3 的客观权向量;

W_4 —— C'_4 的客观权向量;

W_5 —— C'_5 的客观权向量。

S45. 计算模糊一致矩阵和模糊一致矩阵的客观权向量的乘积得到准则层的客观评分,即:

$$W_1 C'_1 = (W_{11} \ W_{12} \ W_{13}) \begin{pmatrix} C'_{11} \\ C'_{12} \\ C'_{13} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.439 & 0.280 & 0.281 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0.995 \\ 0.993 \\ 0.993 \end{pmatrix} = 0.814 \quad (30)$$

$$W_2 C'_2 = (W_{21} \ W_{22} \ W_{23}) \begin{pmatrix} C'_{21} \\ C'_{22} \\ C'_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.344 & 0.330 & 0.326 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0.982 \\ 0.994 \\ 0.994 \end{pmatrix} = 0.970 \quad (31)$$

$$W_3 C'_3 = (W_{31} \ W_{32} \ W_{33}) \begin{pmatrix} C'_{31} \\ C'_{32} \\ C'_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.328 & 0.330 & 0.342 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0.995 \\ 0.957 \\ 0.957 \end{pmatrix} = 0.984 \quad (32)$$

$$W_4 C'_4 = (W_{41} \ W_{42} \ W_{43}) \begin{pmatrix} C'_{41} \\ C'_{42} \\ C'_{43} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.059 & 0.513 & 0.428 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0.126 \\ 0.186 \\ 0.186 \end{pmatrix} = 0.203 \quad (33)$$

$$W_5 C'_5 = (W_{51} \ W_{52} \ W_{53}) \begin{pmatrix} C'_{51} \\ C'_{52} \\ C'_{53} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.254 & 0.254 & 0.492 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1.000 \\ 0.433 \\ 0.433 \end{pmatrix} = 0.721 \quad (34)$$

Step 8: 将所述主观评分和客观评分相加得到每个准则层的总评分,即: $W_1 C'_1 + \vartheta_1 U_1, W_2 C'_2 + \vartheta_2 U_2 \dots$ 。通过对比所述总评分与实际结果,研究发现两者基本吻合,对比结果如表4所示。

表4 模型评价结果对比表

| 评价指标 | 总评分 | 实际结果 |
|--------------|-------|-------|
| 城市覆盖指标 C_1 | 3.398 | 3.396 |
| 服务频率指标 C_2 | 2.783 | 2.784 |
| 服务能力指标 C_3 | 4.843 | 4.845 |
| 乘客满意指标 C_4 | 2.988 | 2.989 |
| 盈利能力指标 C_5 | 3.142 | 3.143 |

根据所有准则层的总评分得到旅客列车时刻表的评价结果,其中总评分越高说明指标的评价越好。

3 结束语

本文运用模式识别和聚类分析方法读取旅客列车时刻表,结合图形路网信息,确定详细的运输径路,输出枢纽地区旅客列车总对数、始发对数和通过对数,完成旅客列车交流表的编制和铁路枢纽地区旅客列车交流表的查询和编制。通过模糊统计和德尔非法计算主观指标,运用熵值模型计算客观指标,最后利用模糊层次赋权模型构建评价对象的递阶结构,以确定指标权重。通过上述步骤,构建时刻表评价模型并据此得出综合评价得分,建立了一套系统的评价指标与评分体系。该体系不仅为日常运行图调整提供了重要参考依据,也为旅客选择服务产品提供一定参考。

参考文献:

- [1] 梅正男, 聂磊, 任广建, 等. 基于空铁联运 OD 服务频率优化的航班时刻表调整模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3581-3589.
MEI Zhengnan, NIE Lei, REN Guangjian, et al. Flight Timetable Adjustment Model Based on Optimization of OD Service Frequency of Air-rail Intermodality [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3581-3589.
- [2] 胡倩芸, 柏赞, 曹耘文, 等. 铁路枢纽站地铁列车运行图的衔接优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(12): 2503-2507.
HU Qianyun, BAI Yun, CAO Yunwen, et al. Optimization of Subway Timetable at the Railway-subway Transfer Station [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(12): 2503-2507.
- [3] 吴翔, 徐瑞华. 编制多径路铁路枢纽列车运行图的数据管理研究[J]. 上海铁道大学学报, 2000(4): 38-42.
WU Xiang, XU Ruihua. Research on Data Management of Computer-aided Train Diagram in Multi-route Terminal [J]. Journal of Shanghai Tiedao University (Natural Science Edition), 2000(4): 38-42.
- [4] 李洪波. 铁路局 OD 运量预测分析系统 [J]. 中国铁路, 2005(8): 60-62.
LI Hongbo. Forecast and Analysis System of OD Traffic Volume of Railway Administrations [J]. China Railway, 2005(8): 60-62.
- [5] 张鹏. 考虑晚间高速铁路列车晚点的城市轨道交通延时加开列车时刻表编制模型与算法 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
ZHANG Peng. Model and Algorithm for Timetable Establishment of Delayed Trains in Urban Rail Transit Considering the Delay of High-speed Railway Trains at Night [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [6] 徐瑞华, 吴翔, 谢超. 铁路枢纽列车运行图结构的数据管理与维护 [J]. 上海交通大学学报, 2000, (S1): 1-4.
XU Ruihua, WU Xiang, XIE Chao. Data Management and Maintenance of Train Diagram Structure in Railway Hubs [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2000, (S1): 1-4.
- [7] 郭根材, 张军锋. 直达与换乘相结合的旅客行程规划模型与算法研究 [J]. 铁道运输与经济, 2019, 41(7): 106-112.

- GUO Gencai, ZHANG Junfeng. A Study on the Model and Algorithm of Travel Planning for Direct and Transfer Service [J]. Railway Transport and Economy, 2019, 41(7): 106–112.
- [8] 罗昊. 铁路枢纽智能运输系统服务水平评价方法研究[D]. 北京交通大学, 2011.
- LUO Hao. Research on Service Level Evaluation Method for Intelligent Transportation Systems in Railway Hubs [D]. Beijing Jiaotong University, 2011.
- [9] 常湃, 何世伟, 孙杨. 基于物元模型的铁路枢纽规划评价方法研究[J]. 铁道货运, 2010, 28(7): 16–21.
- CHANG Pai, HE Shiwei, SUN Yang. Research on Railway Hub Planning Evaluation Based on Matter-element Model [J]. Railway Freight Transport, 2010, 28(7): 16–21.
- [10] 李长淮. 铁路枢纽疏解布置方案的分析及评价方法[J]. 铁道运输与经济, 2010, 32(1): 27–29.
- LI Changhui. Analysis and Evaluation Methods of Untwining Layout Scheme at Railway Hubs [J]. Railway Transport and Economy, 2010, 32(1): 27–29.
- [11] 张琦, 马艳. 基于复杂网络的高速铁路列车服务网络特征[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 559–566.
- ZHANG Qi, MA Yan. High-speed Train Service Network Features Based on Complex Network [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(3): 559–566.
- [12] 姜大元, 徐一鸣, 邓连波, 等. 基于子系统划分的铁路枢纽能力利用率评价方法[J]. 铁路计算机应用, 2021, 30(1): 10–14.
- JIANG Dayuan, XU Yiming, DENG Lianbo, et al. Evaluation Method of Capacity Utilization Rate of Railway Hubs Based on Subsystem Division [J]. Railway Computer Application, 2021, 30(1): 10–14.
- [13] 施福根, 陈韬, 邓波尔, 等. 铁路枢纽解编系统布局规划评价研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(6): 71–77.
- SHI Fugen, CHEN Tao, DENG Boer, et al. A Study on the Evaluation of Layout and Planning of the Decoupling System in a Railway Hub [J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(6): 71–77.
- [14] 周军, 周菁楠, 罗钦, 等. 铁路枢纽城市的客运铁路列车开行计划优化[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(8): 64–68.
- ZHOU Jun, ZHOU Jingnan, LUO Qin, et al. Optimization of Passenger Train Operation Plan in Railway Hub Cities [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(8): 64–68.
- [15] 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 Network Planning for Urban Agglomeration Rail Transit [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(2): 7–13.
- [16] 肖礼淳. 城市群城际铁路网规划评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- XIAO Lizhun. Study on Planning and Evaluation of Intercity Railway Network in Urban Agglomeration [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [17] 李金梅, 聂磊, 郭根材, 等. 高速铁路枢纽衔接服务水平评价体系[J]. 铁道运输与经济, 2014, 36(1): 42–47, 59.
- LI Jinmei, NIE Lei, GUO Gencai, et al. Evaluation System of Connection Service Level of High-speed Railway Hub [J]. Railway Transport and Economy, 2014, 36(1): 42–47, 59.
- [18] 许得杰, 巩亮, 曾俊伟. 考虑客流时变需求的大小交路列车时刻表优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(2): 122–129.
- XU Dejie, GONG Liang, ZENG Junwei. Modeling of Train Timetable with Full-length and Short-turn Routing Considering the Time-varying Demand [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(2): 122–129.
- [19] 张云娇, 王修华, 范丁元, 等. 超高速管道磁浮系统通道规划研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(2): 1–6, 14.
- ZHANG Yunjiao, WANG Xiuhua, FAN Dingyuan, et al. Research on Channel Planning of Ultra-high Speed Pipeline Maglev System [J]. Railway Standard Design, 2024, 68(2): 1–6, 14.
- [20] 叶怀珍, 吴永强. 铁路枢纽内客运站设置方案研究[J]. 铁道运输与经济, 2005, 27(3): 88–89.
- YE Huaizhen, WU Yongqiang. Study on the Passenger Station Setting-up Plan in Railway Terminal [J]. Railway Transport and Economy, 2005, 27(3): 88–89.
- [21] 牛惠民. 铁路枢纽重空车流组织的协调优化模型及遗传算法[J]. 铁道学报, 2001, 23(4): 12.
- NIU Huimin. Coordinated Optimization Model and Genetic Algorithm of Heavy and Empty Car Flow Organization in Railway Hub [J]. Journal of the China Railway Society, 2001, 23(4): 12.
- [22] 叶峻青, 何勋隆. 城市轨道交通与铁路枢纽规划[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(4): 58–62.
- YE Junqing, HE Xunlong. Urban Rail Transit and Railway Terminal Layout [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 58–62.
- [23] 李金梅, 聂磊, 郭根材, 等. 高速铁路枢纽衔接服务水平评价体系[J]. 铁道运输与经济, 2014, 36(1): 42–47, 59.
- LI Jinmei, NIE Lei, GUO Gencai, et al. Evaluation System of Connection Service Level of High-speed Railway Hub [J]. Railway Transport and Economy, 2014, 36(1): 42–47, 59.
- [24] 陈应先. 铁路枢纽总图规划有关问题探讨[J]. 铁道标准设计, 2006, 50(S1): 24–29.
- CHEN Yingxian. Exploration for Some Relevant Issues on General Planning Diagram of Railway Terminals [J]. Railway Standard Design, 2006, 50(S1): 24–29.
- [25] 赵军, 李愈, 任其亮, 等. 铁路枢纽内客运站分工的优化模型及算法[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 148–153.
- ZHAO Jun, LI Yu, REN Qiliang, et al. Optimal Model and Algorithm for Allocation of Arrival and Departure Trains in Railway Passenger Terminal [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 148–153.
- [26] 李敏. 双联联动模式下的高速铁路快运货物城市分拨体系构想[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(1): 26–31.
- LI Min. Conception of Turban Distribution System of High-speed Railway Express Freight under a Bimodal System of High-speed Railway and Metro [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(1): 26–31.
- [27] 任俊桦. 基于类比分析的高速铁路和城际铁路运量预测研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(1): 54–58.
- REN Junhua. A Study on Forecast of Traffic Volume for High-speed Railway and Intercity Railway Based on Analog Analysis [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(1): 54–58.