

基于区域路网整体运输效能的列车运行图质量评价

张龙豪¹, 吴 华², 荣 剑², 周 峰¹, 徐瑞华¹

(1. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804; 2. 中国铁路上海局集团有限公司运输部, 上海 200071)

摘要: 区域路网中线路和区段数量多、运力资源组成复杂、客货运输需求差异大, 区域路网列车运行图质量直接关系到铁路网整体运输效能。基于列车运行图在运输能力、运营效益和服务质量三方面的运输效能表现, 从不同版本运行图质量变化和单个版本运行图质量检验 2 个需求点出发, 构建了区域路网列车运行图整体运输效能 5 级评价指标体系, 提出了融合灰色关联度法、横向拉开档次法的版本对比评价方法, 以及基于 K -MEANS++ 聚类和改进理想解法(TOPSIS)的区段对比评价方法。以上海铁路局 3 个不同版本的全局路网列车运行图为例, 版本对比评价结果显示 0620 图编制质量最佳, 且在区段对比评价中表现良好。本文方法实现区域路网列车运行图多维度多层次评价, 评价结果可为运行图编制调整提供决策依据。

关键词: 列车运行图; 评价指标体系; 灰色关联度法; 横向拉开档次法; K -MEANS++ 聚类; 理想解法
中图分类号: U292.4+1 **文献标志码:** A

Evaluation Method of Train Diagram Quality Based on Overall Transportation Potency of Regional Rail Network

ZHANG Longhao¹, WU Hua², RONG Jian², ZHOU Feng¹, XU Ruihua¹

(1. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Transport Department of China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 200071, China)

Abstract: The regional rail network is characterized by numerous lines and sections, complex composition of transportation capacity resources and great differences in passenger and freight demand. The quality of train diagrams is directly related to the overall transportation potency of the regional rail network. Based on potency in

terms of capacity, efficiency and quality, a five-level evaluation index system is built. For version difference analysis, a version comparison evaluation method is developed, integrating the gray relevancy and the horizontal pull-off grade methods. For quality inspection, a section comparison evaluation method is developed based on the K -MEANS++ and the improved TOPSIS. Case studies on three different versions of the railway network train diagram in Shanghai Railway Group show the 0620 version is the best in version comparison and performs well in section comparison. The evaluation results are multi-dimensional and hierarchical, and provide a decision-making basis for the preparation and adjustment of the train diagram.

Keywords: train diagram; evaluation index system; gray relevancy; horizontal pull-off grade method; K -MEANS++; TOPSIS

列车运行图是铁路运输生产的一项综合性计划, 运行图编制质量直接关系到铁路运输能力、运营效益以及服务质量, 对铁路运输生产至关重要。为适应铁路网络的不断建设完善、客货运需求增长和变化, 我国铁路列车运行图编制、调整十分频繁, 列车运行图质量主要从列车运行图数量和质量指标两方面进行分析评价。为更好地评价分析列车运行图质量, 相关文献从列车运行图的静态与动态指标两方面进行了综合评价方法的研究, 提出了以下 2 类主要的评价方法, 一类是从鲁棒性、稳定性角度对某一区段运行图进行评价, 基于列车晚点传播消散原理, 使用 max-plus^[1]、仿真^[2-3]等方法得到客观评价价值; 另一类为针对不同区段运行图开行效果的综合对比评价, 通过建立指标体系, 采用层次分析^[4]、数

收稿日期: 2023-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(72171174); 广西创新驱动发展专项资金(桂科 AA21077011); 中国铁路上海局集团有限公司科研计划

第一作者: 张龙豪, 博士生, 主要研究方向为轨道交通运营管理。E-mail: zhanglonghao@tongji.edu.cn

通信作者: 徐瑞华, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通运输组织优化。

E-mail: rxu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

据包络法^[5]、模糊评价^[6-7]、灰色关联度^[8]或自定义指标组合计算方法^[9]等评价模型算法,求解不同列车运行图主客观相结合的开行效果评分及排名。现有文献几乎都是对单一区段运行图进行评价,虽已总结出诸多评价指标,但未考虑到不同线路、区段之间的联系,且未对不同类型列车、车底、车站、区段作进一步的分类探讨,使得现有评价方法不适用于区域路网运行图的评价。除此之外,现有文献侧重于不同区段对比,而对版本对比研究较少,但不同版本之间的评价分析往往更能予以编图人员最直接的反馈,故现有评价方法尚不契合铁路局实际生产活动中运行图整体编制调整的需要。

目前列车运行图按照区域路网进行整体编制,以上海局为例,全局管辖范围划分为5个编图子区域进行运行图编制,每个子区域涉及的线路、区段多,且相互间联系紧密。运行图指标计算及分析评价主要基于区段进行。不同子区域、区段之间虽有明确的界限,但列车大多在路网内跨区段运行,受跨线列车、线路及车站能力、运力资源等多重因素影响,因此,子区域运行图是众多相关区段列车运行图的有机结合,而全局路网列车运行图则是子区域运行图间的协同结果。仅以铁路区段为单元进行列车运行图技术指标统计的评价方法,难以全面洞察和反映区域内不同线路与区段在运输组织层面所展现出的独特差异性、紧密关联性以及相互间的动态影响,同时也忽视了编图人员站在路网全局视角,对运输资源进行精心规划与综合协调的深层次考量。此外,这种评价方式也未能展现运行图作为指导运输生产整体规划的综合性计划,在促进路网整体运输效能提升方面所扮演的关键角色与实现的协同效应。因此,对于区域路网而言,列车运行图编制质量评价还需要重点关注以下问题:

(1)列车运行图编制质量需要考虑运行图的综合运输效能。传统的运行图质量主要从运行图自身的技术指标进行评价,难以全面反映运行图作为铁路运输的综合性计划在运输能力利用、运输效益及效率发挥以及运输服务质量提高等方面所起到的综合作用。

(2)区域路网运行图质量评价需要综合考虑各区段列车运行图间的相关性。单个区段运行图编制质量的提升不完全会带来区域路网整体运输效能的同步提升,从整体上看,有时部分区段运行图指标的降低可以激活关联区段运行图更大的运输潜力,从而优化区域路网运行图。

(3)需要考虑不同版本、不同区段列车运行图的特点进行运行图质量的对比分析。由于受到线路技术条件、通过能力、客货流特点及列车开行方案等多重因素影响,不同区段列车运行图所实现的运输效能并不具备可比性,相互间不宜以用同样的评价指标和评价标准进行对比分析。区域路网运行图规模庞大,且路网结构逐年更新,不同版本运行图在评价分析时需制定与当前评价对象相适应的评价标准。

综上,本文基于铁路局运行图整体编制调整工作需求,跳出单一区段限制,从运输能力、运营效益、服务质量3个方面,考虑运输、客货运、移动运力等多专业部门生产实际,分层次、分类型整理和挖掘反映运行图整体运输效能指标,建立区域路网列车运行图整体效能多级评价指标体系,分别从时间、空间2个维度,提出反映运行图质量变化情况的版本对比评价方法以及检验单个版本运行图质量的区段对比评价方法。

1 区域路网列车运行图质量的版本对比评价方法

区域列车运行图质量的版本对比评价是指针对铁路局范围新编列车运行图,对比分析其与以往列车运行图在整体运输效能方面的差异,直观反馈调图前后各指标和评价层次的优劣变化情况,从而确定调整后版本的可行程度。由于不同版本运行图在路网技术条件、运力资源投入以及列车开行种类及数量均存在差异性,且单次对比样本量相对较少,本文融合灰色关联度法、横向拉开档次法、层次分析法评价思路,构建一套适用于区域路网列车运行图的分层次版本对比评价方法,通过将评价版本与正、负理想版本进行关联度对比分析,以综合评价值离散化程度最大为目标,实现指标数值客观转化为评分值,最终通过逐层加权累计得到各层次评价结果。

1.1 指标体系构建及权重计算方法

区域路网运行图质量需要能够反映区域范围内所有区段运行图产生的全部运输效能,因此,设置了运输能力、运营效益、服务质量三方面的评价准则,其中运输能力体现运输能力的合理利用状况;运营效益体现列车开行效率及运营成本;服务质量体现旅客出行体验、货物快捷程度等,以解决引言所指出的指标与综合运输效能对应关系问题。在现有列车运行图技术指标的基础上,为体现引言提及的区段相关性,在版本对比评价中所有指标均从路网层面

进行统计,其次考虑车站、车底在不同区段运行图之间衔接的纽带作用,不同种类列车、不同动力车底以及不同路网作用车站的重要程度等情况,建立了蕴含路网中不同线路、区段列车运行图间关联性的路网层面综合评价指标体系(图1、图2),从目标、准则、对象、种类、指标5个层级分层次评价区域路网列车运行图编制质量。图1中,①在种类层中,圈内所有种类划分为一组,组内每个种类均与上层和下层保持与对应组相同的方式连接,范例区域展开后详细连接关系如图2所示;②普通货物列车、行包行邮班列其下不包含客运相关指标;③关键枢纽车站

为铁路局实际设定的客运重点车站,本体系以上海局为例,包含杭州、杭州东、合肥、合肥南、连云港、南京、南京南、南通、宁波、上海、上海虹桥、上海南、温州南、徐州、徐州东共计15个车站。应用C#语言开发完成基于区域路网整体运输效能的列车运行图质量综合评价系统,录入铁路局路网拓扑信息、列车车次编定表后,通过导入现行铁路运行图编制系统的运行图数据接口文件和铁路局特定格式的交路数据,系统即可从路网层面完成指标层所有指标的计算。限于篇幅,本文侧重于对评价方法的研究,故对系统和指标计算方法不做赘述。

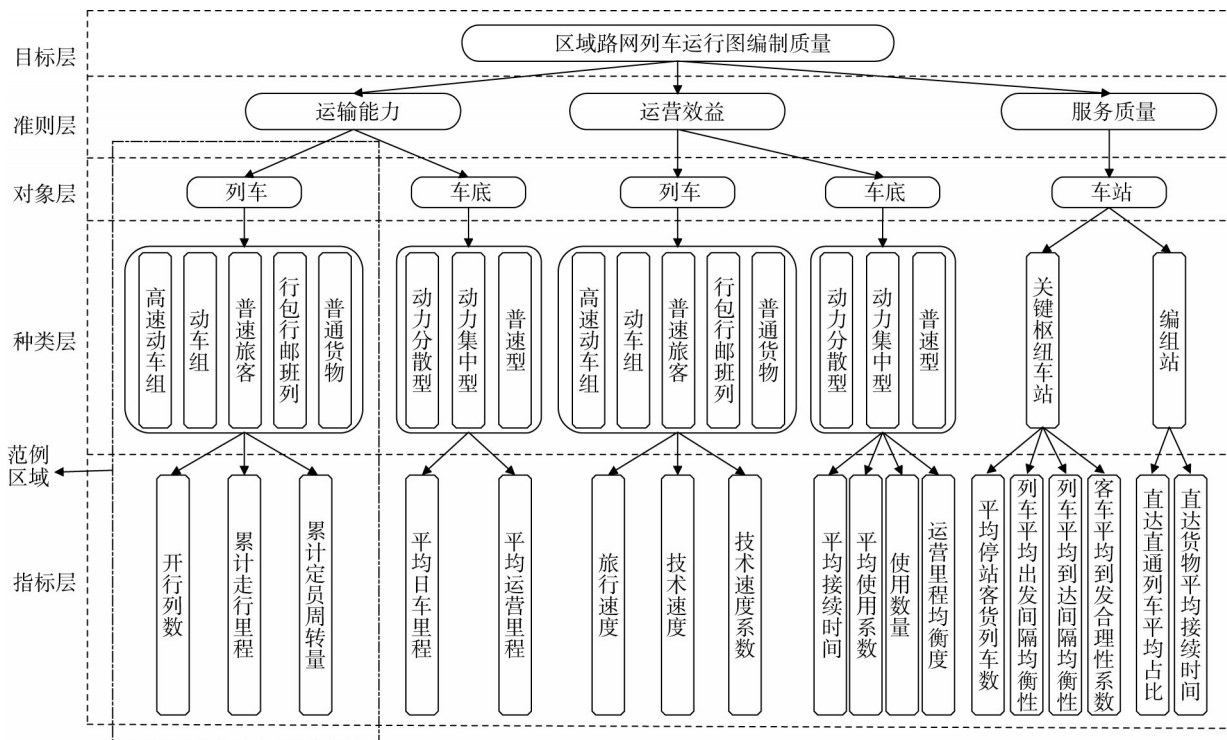


图1 版本对比评价指标体系

Fig. 1 Index system of version comparison evaluation method

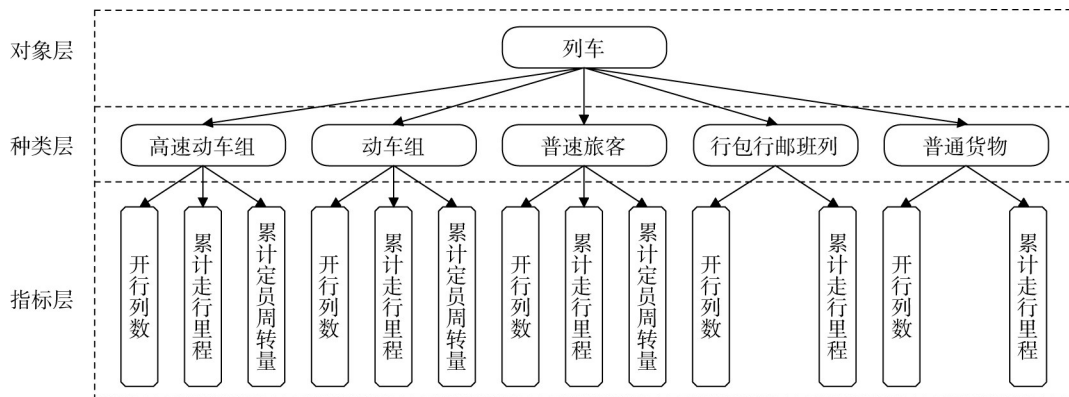


图2 范例区域详细连接关系

Fig. 2 Detailed connection relationships in example area

准则层、对象层、种类层各层包含指标数量较少,且各指标之间于铁路运输上有相对明确的重要度区分,故采用基于功能驱动的层次分析法,以主客观相结合的方式对此3层指标进行权重计算。对于指标层而言,由于各专业部门对各指标的重视程度不一,指标间相对重要程度模糊,故采用基于差异驱动的横向拉开档次法,以从整体上最大程度体现不同运行图之间差异为目标,为指标层进行客观权重赋值。除最底层指标外,上层指标数值均由下层指标数值按一定权重值加权求和得到。每层中需联合加权求和的指标构成一个评价指标集合 H ,集合内

指标需按对应规则计算权重值,且权重值总和为1。如图3所示,指标1为指标1-1和指标1-2的上层指标,其值由这2个下层指标加权求和得到,故指标1-1和指标1-2构成一个评价指标集合,类似地,可知图中共包含4个评价指标集合,分别为评价指标集合0、1、2、3。每层评价指标集合数量等于上层的指标数量。对于评价指标集合 H 而言, Z_H 表示评价指标集合对应至上层指标的值, Z_h 和 ω_h 分别表示本层评价指标集合中指标 h 的数值和权重,则有式(1):

$$Z_H = \sum_{h \in H} \omega_h Z_h \quad (1)$$

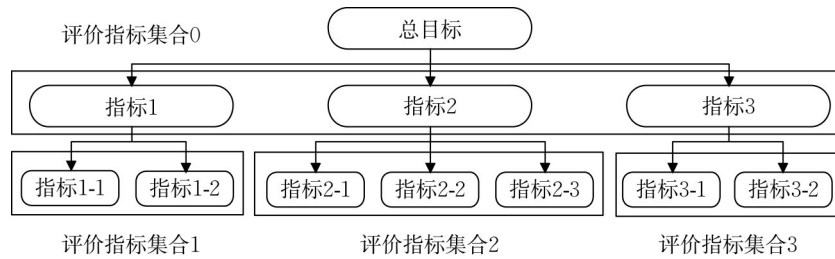


图3 评价指标集合划分示意

Fig. 3 Diagrammatic sketch of evaluation set division

1.2 版本对比评价步骤

(1)数据预处理。将所有指标均转化为效益型指标,即数值越大代表指标越优异。对于成本型指标,按式(2)转化:

$$x_{i,j}^{\text{new}} = \max_{1 \leq i \leq n} (x_{i,j}) - x_{i,j} \quad (2)$$

式中: n 为待评价版本的个数; m 为评价指标集合中指标的个数; $x_{i,j}$ 为版本 i 在评价指标集合中第 j 个指标的数值。在步骤(1)~(5)中,所有数据处理过程均发生在指标层同一个评价指标集合中。在进行版本对比时,通常只会与就近的1至2个版本进行对比分析,尤其在2个版本对比的情况下,0-1变化和标准化处理的归一化结果不随样本值发生改变,只能体现数据间的大小排名而不能反映原数据间的差值比例,在样本量极少的情况下会扩大原数据之间的差距。由于运行图评价指标均为正值,为在归一化结果中保留更多原始数据的数值关系,最终采用向量规范法,按式(3)对数据进行归一化处理:

$$\xi_{i,j} = \frac{\min_{0 \leq u \leq n+1} \min_{1 \leq v \leq m} |x_{0,v} - x_{u,v}| + \rho \max_{0 \leq u \leq n+1} \max_{1 \leq v \leq m} |x_{0,v} - x_{u,v}|}{|x_{0,j} - x_{i,j}| + \rho \max_{0 \leq u \leq n+1} \max_{1 \leq v \leq m} |x_{0,v} - x_{u,v}|}, i=0,1,2,\dots,n+1, j=1,2,\dots,m \quad (4)$$

式中: ρ 为分辨系数, $\rho \in [0,1]$,其值越大分辨率越大,取值为0.5; $\min_{0 \leq u \leq n+1} \min_{1 \leq v \leq m} |x_{0,v} - x_{u,v}|$ 与

$$x_{i,j}^{\text{new}} = \frac{x_{i,j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{i,j}^2}}, i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m \quad (3)$$

(2)确定正、负理想版本。正、负理想版本分别为虚拟的最优和最差版本,其各个指标值为所有评价版本中该指标的最大和最小数值。评价版本的各个指标构成评价数列 $X_i = \{x_{i,j} | j=1,2,\dots,m\}, i=1,2,\dots,n$;类似的,正理想版本构成正参考数列 $X_0 = \{x_{0,j} | x_{0,j} = \max_{1 \leq i \leq n} (x_{i,j}), j=1,2,\dots,m\}$;负理想版本构成负参考数列 $X_{n+1} = \{x_{n+1,j} | x_{n+1,j} = \min_{1 \leq i \leq n} (x_{i,j}), j=1,2,\dots,m\}$ 。正、负理想版本均基于当次对比的评价版本生成,故此方法能在版本对比时自动制定与评价版本相适应的评价标准,以解决引言中提及的版本对比评价标准制定问题。

(3)计算灰色关联度。按式(4)计算各评价数列 X_i 与正参考数列 X_0 在第 j 个指标上的关联系数 $\xi_{i,j}$,为

$\max_{0 \leq u \leq n+1} \max_{1 \leq v \leq m} |x_{0,v} - x_{u,v}|$ 分别为两级最小差和最大差,可理解为每个评价版本的所有指标,逐一与正理

想版本对应评价指标作差后绝对值的最小与最大值, 因 $x_{0,j} = \max_{1 \leq i \leq n} (x_{i,j})$, 则一定

有 $\min_{0 \leq u \leq n+1} \min_{1 \leq v \leq m} |x_{0,v} - x_{u,v}| = 0$, $\rho \max_{0 \leq u \leq n+1} \max_{1 \leq v \leq m} |x_{0,v} - x_{u,v}| = \beta$, β 为一固定常数, 故式(4)可进一步简化为式(5):

$$\xi_{i,j} = \frac{\beta}{|x_{0,j} - x_{i,j}| + \beta}, i=0, 1, 2, \dots, n+1, j=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

最终得到横向拉开档次法输入矩阵, 为

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_{0,1} & \xi_{0,2} & \cdots & \xi_{0,m} \\ \xi_{1,1} & \xi_{1,2} & \cdots & \xi_{1,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \xi_{n,1} & \xi_{n,2} & \cdots & \xi_{n,m} \\ \xi_{n+1,1} & \xi_{n+1,2} & \cdots & \xi_{n+1,m} \end{bmatrix}$$

(4) 基于横向拉开档次法^[10]计算综合评价值。

①采用标准化方法, 按式(6)对矩阵 ξ 进行加工处理, 为

$$\xi_{i,j}^{\text{new}} = \frac{\xi_{i,j} - \bar{\xi}_j}{s_j}, i=0, 1, 2, \dots, n+1; j=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中: s_j 和 $\bar{\xi}_j$ 为第 j 个指标对应的标准差和均值。②构造线性综合评价函数, 如式(7):

$$y_i = \omega_1 \xi_{i,1} + \omega_2 \xi_{i,2} + \cdots + \omega_m \xi_{i,m}, i=0, 1, \dots, n+1 \quad (7)$$

$$Y = [y_0, y_1, \dots, y_{n+1}]^T$$

$$\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m]^T$$

$$Y = \xi \omega$$

式中: Y 为由 n 个评价版本与正、负理想版本对应综合评价值构成的列向量; ω 为 m 个指标所对应权重构成的列向量。③建立线性规划模型: 为了最大限度体现不同版本之间的差异性, 使综合评价值 y_i 在一维空间中分散程度最大, 故设目标函数为综合评价值离差平方和最大, 如式(8):

$$\max \sigma^2 = \sum_{i=0}^{n+1} (y_i - \bar{y})^2 \quad (8)$$

由于①采用标准化方法对原始数据进行处理, 故有 $\bar{y} = 0$, 代入式(8)中可得式(9):

$$\sigma^2 = \sum_{i=0}^{n+1} (y_i)^2 = Y^T Y = \omega^T \xi^T \xi \omega = \omega^T A \omega \quad (9)$$

式中: A 为实对称矩阵, $A = \xi^T \xi$ 。显然, 若不对 ω 进行约束, σ^2 可趋近于无穷大。为了便于求解, 且通常习惯权重取值范围为 0 到 1 之间, 故限制 $\omega^T \omega = \omega_1^2 + \omega_2^2 + \cdots + \omega_m^2 = 1$, 从而保证权重绝对值小于 1, 又

设置约束 $\omega > 0$ 使得各项权重均为正值。最终得到式(10)所示线性规划模型:

$$\begin{aligned} \max \quad & \sigma^2 = \omega^T A \omega \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \omega^T \omega = 1 \\ \omega > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

④求解综合评价值。对于式(10)线性规划模型, 当 ω 为 A 最大特征值所对应的特征向量时, 目标函数取得最大值^[10], 将归一化后得到权重和为 1 的客观权重向量 ω 代入式(7)得到综合评价结果 Y 。

(5) 转化综合评价值为评分值。设定评分范围为 $[Q_{\min}, Q_{\max}]$, 即正、负理想版本的综合评价值分别对应评分为 Q_{\max} 和 Q_{\min} , 按式(11)进行线性转化即可得到各版本 i 对应的评分值 Z_i , 其值是由指标层以评价指标集合为计算单位, 通过前 5 个步骤客观转化而来, 首个得到评分的层次为种类层。遍历所有指标层中的评价指标集合, 重复步骤(1)—(5), 即可得到所有种类层评分。

$$Z_i = \begin{cases} \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{y_0 - y_{n+1}} (y_i - y_{n+1}) + Q_{\min}, & y_0 \neq y_{n+1} \\ Q_{\max}, & y_0 = y_{n+1} \end{cases}, i=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

(6) 计算其余各层评分。基于种类层评分和层次分析法得到的权重值, 按图 1 所示层次关系自下而上, 按式(1)对每个评价指标集合加权求和, 计算得到各层指标评分。

2 区域路网列车运行图质量的区段对比评价方法

区域列车运行图质量的区段对比评价是指针对铁路局范围新编列车运行图, 对比分析相似区段列车运行图在整体运输效能方面的差异, 从而得到区段运行图效能, 进而计算区域路网运行图整体运输效能, 用于区域路网运行图的独立评价, 从各区段效能角度检验区域路网运行图的编制质量, 丰富评价细节, 其评价结果只受自身指标数值影响, 而版本对比评价结果则会因对比样本的不同而发生改变。由于各区段技术条件、列车开行种类及数量等方面差异性较大, 因此, 需要通过抽取区段特征, 形成具有可比性的评价特征值, 通过 K-MEANS++ 聚类得到各区段评价特征值, 改进 TOPSIS 方法计算运行图各层次评价结果。区段对比评价方法所采用的权重均由层次分析法计算得到。

2.1 指标体系调整构建

在区段对比评价方法下,评价对象由区域路网转为各统计区段,由于同一区段下列车、车底种类单一,不再适用原来对象层的分类方法,且正如引言所述,不同类型区段理应有符合其区段特征的评价指标和标准,故需适当调整原有评价指标体系,得到新的目标、准则、等级、区段、指标5层评价指标体系,见图4。图中,① 普铁区段中货运专线区段其下不包含客运相关指标;② 区段层中,圈内所有区段划分为一组,组内每个区段均与上层和下层保持与对应组相同的方式连接;③ 高速动车组旅客列车占比代表高速动车组在旅客列车中所占据的比重,其余类似指标意义同理。其相较于原有评价指标体系,

保留从运输能力、运营效益及服务质量三方面综合评价的核心思想,弱化了列车、车底、车站的种类划分,将其概念部分融入至指标层中;增加等级层强化区段分类,用于区分以动车组运营为主的高铁区段和主要承担普速旅客和货物列车运输任务的普铁区段(普铁分为客货混跑和货运专线2类),分别对应不同的评价指标。通过对区域路网内各区段进一步的聚类分析,将相似区段划分为一类,基于数据分布特征为每一类区段制定确定评价标准,从而在区段对比评价时,每个区段都可根据自身区段等级和聚类结果,匹配与其设施设备等级、客货运需求相符合的评价指标和标准。

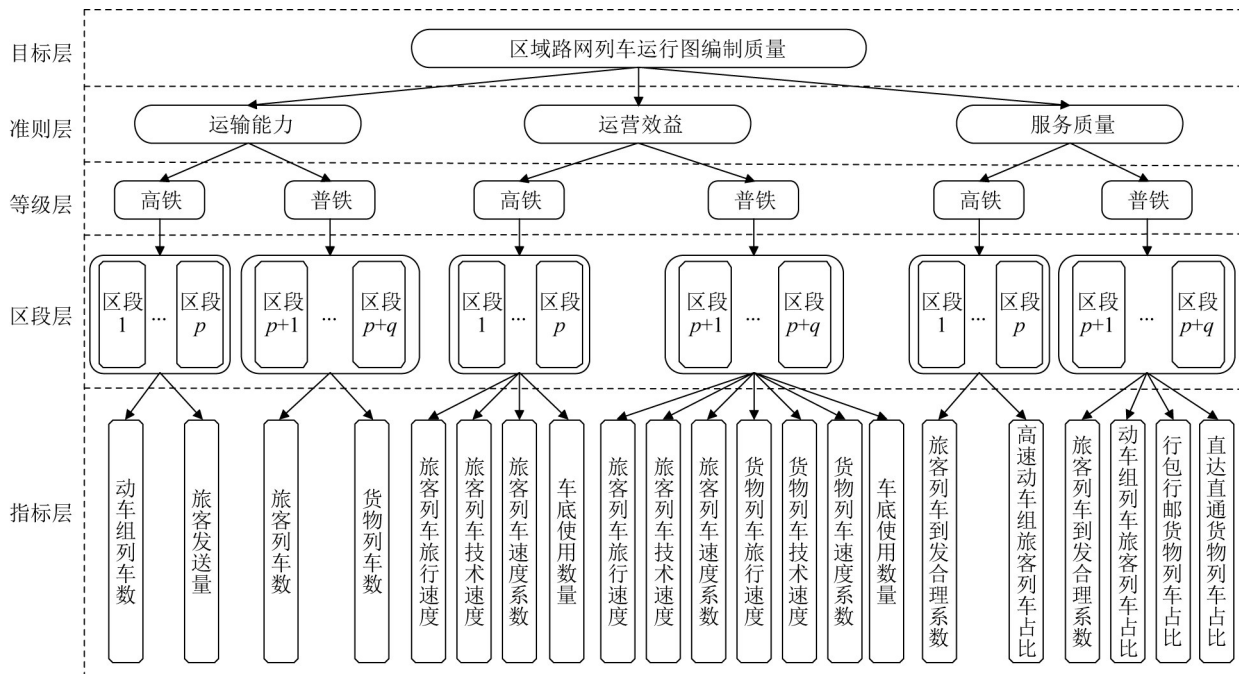


图4 区段对比评价指标体系

Fig. 4 Index system of section comparison evaluation method

2.2 区段聚类

对于高铁区段而言,采用K-MEANS++方法对上海铁路局70个高速区段聚类分析,重点关注其客运表现,选取6个指标(权重)作为聚类特征,分别为动车组列车数(0.29)、旅客发送量(0.10)、旅行速度(0.42)、车底使用数量(0.09)、高速动车组旅客列车占比(0.10)。各指标所占权重初值根据其重要程度由专家打分确定,本文认为所属同一线路的区段相似,根据聚类结果动态调整权重,以使得同一线路的不同区段尽可能归属于同一分类,最后综合误差平方和梯度拐点法和轮廓系数法确定分类数 k 。由图5可知,当 $k=4$ 时,误差平方和出现明显拐点,轮

廓系数对应第二高峰,故综合确定分类数 $k=4$ 。各聚类结果所包含高铁区段的聚类特征均值按大小排名结果如表1所示。

采用 t -SNE方法,将高维空间中的各样本点映射至二维平面(图6),可见其分类效果较为理想。同理对于66个客货混跑区段,选取旅客列车数、货物列车数、旅客列车旅行速度、货物列车旅行速度、货物列车速度系数、动车组旅客列车占比、直达直通货物列车占比7个聚类特征进行聚类分析,得到客货混跑4类;对于20个货运专线区段,选取货物列车数、旅行速度、速度系数、行包行邮货物列车占比、直通直达货物列车占比5个聚类特征进行聚类分析,

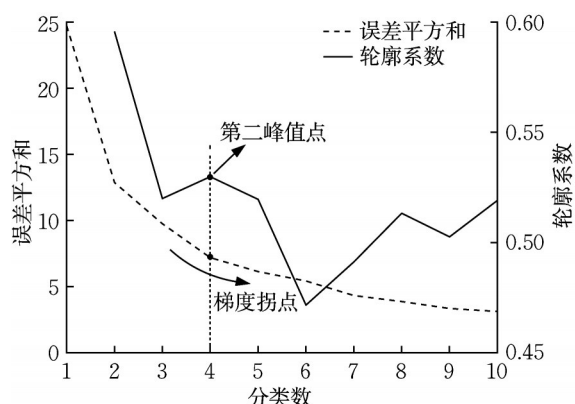


图5 高铁区段聚类误差平方和及轮廓系数

Fig. 5 Sum of squares of error and silhouette coefficient in high-speed railway sections clusters

表1 高铁区段聚类特征均值大小排名

Tab. 1 Ranking of average characteristic values of high-speed railway sections clusters

类别	动车组列车数	旅客发送量	旅行速度	车底使用数量	高速动车组旅客列车占比
高铁类1	4	4	4	4	4
高铁类2	2	2	3	2	3
高铁类3	3	3	2	3	1
高铁类4	1	1	1	1	2

得到货运专线3类。

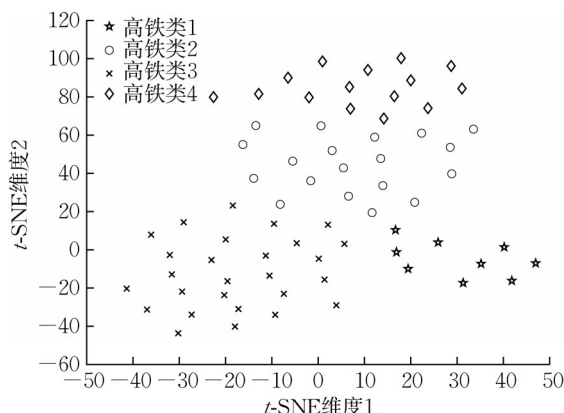


图6 高铁区段聚类结果t-SNE图

Fig. 6 t-SNE graph of high-speed railway sections clusters

最终对全局156个统计区段,按高铁、客货混跑和货运专线3类区段分别计算评价标准,共得到4套高铁区段评价标准、4套客货混跑区段评价标准、3套货运专线评价标准。

2.3 区段对比评价步骤

(1)数据预处理。采用标准0-1变换进行数据归一化预处理。对于隶属于聚类 k 的区段,其效益性指标采用式(12),成本型指标采用式(13):

$$x_j^{\text{new}} = \frac{x_j - x_{k,j}^{\min}}{x_{k,j}^{\max} - x_{k,j}^{\min}}, j = 1, 2, \dots, m; \text{区段隶属于聚类} k \quad (12)$$

$$x_j^{\text{new}} = \frac{x_{k,j}^{\max} - x_j}{x_{k,j}^{\max} - x_{k,j}^{\min}}, j = 1, 2, \dots, m; \text{区段隶属于聚类} k \quad (13)$$

式中: x_j 为评价指标集合中第 j 个指标的数值; m 为评价指标集合中指标的个数; $x_{k,j}^{\max}$ 和 $x_{k,j}^{\min}$ 为聚类 k 下第 j 个指标的上界与下界,是基于某一参考版本运行图聚类 k 下对应指标数值集合上下四分位点确定的定值,从而保证区段指标进行归一化时不受其他区段指标变化的干扰。同样,在步骤(1)~(4)中,所有数据处理过程均发生在指标层同一个评价指标集合中。非参考版本运行图可能出现 $x_{k,j}^{\text{new}} \notin [0, 1]$ 的情况,需按式(14)进行规整:

$$x_j^{\text{new}} = \begin{cases} 1, & x_j^{\text{new}} > 1 \\ x_j^{\text{new}}, & 0 \leq x_j^{\text{new}} \leq 1, j = 1, 2, \dots, m \\ 0, & x_j^{\text{new}} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

(2)确定正、负理想区段。正理想区段第 j 个指标值为 $x_j^+ = 1$,负理想区段为 $x_j^- = 0$,正、负理想区段均不受区段指标值影响。

(3)计算当前区段与正理想区段距离 d 。该距离可统一按式(15)计算,其中 ω_j 表示第 j 个指标的权重,且有 $\sum_{j=1}^m \omega_j = 1$ 。故负理想区段与正理想区段距离按式(16)可化简计算得 $d^- = 1$,正理想区段与自身距离 $d^+ = 0$ 。

$$d = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (x_j - x_j^+)^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (x_j - 1)^2} \quad (15)$$

$$d^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (x_j^- - x_j^+)^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j} = 1 \quad (16)$$

(4)转化综合评价值为评分值。设定评分范围为 $[Q_{\min}, Q_{\max}]$,按式(17)线性转化得到评分值 Z 。同样,评分值是由指标层以评价指标集合为计算单位,通过前4个步骤转化而来,故首个得到评分的层次为区段层。遍历所有指标层中的评价指标集合,重复步骤(1)~(4),即可得到所有区段层评分,为

$$Z = \frac{Q_{\min} - Q_{\max}}{d^- - d^+} (d - d^+) + Q_{\max} = (Q_{\min} - Q_{\max})d + Q_{\max} \quad (17)$$

(5)计算其余各层评分。基于区段层评分和层次分析法得到的权重值,按图4所示层次关系自下而上,按式(1)对每个评价指标集合加权求和,得到各层指标评分。

3 案例分析

3.1 案例选取

选取上海铁路局管辖范围内京沪高铁、沪宁城际、沪昆高铁等主要线路为分析案例,线路主要分布于上海、浙江、江苏、安徽等省市,具有东西向、南北向联通及枢纽转换等重大运输职能。涵盖 156 个统

计区段,单个版本的全局路网运行图包含列车近 7 000 列、动车组交路近 300 条。

3.2 版本对比结果

(1)基于层次分析法的权重确定。通过咨询上海铁路局资深现场工作人员和行业专家,对准则层、对象层和种类层中各比较对象按照九级标度法打分,最终得到以上各层次权重取值如表 2 所示。

表 2 准则层、对象层和种类层权重取值
Tab. 2 Weight values for criteria, object, and category layer

层次(类型)	权重
准则层	运输能力、运营效益、服务质量的权重为 [0.540, 0.297, 0.163]
对象层	列车、车底的权重为 [0.667, 0.333]
种类层(列车类型)	高速动车组、动车组、普速旅客、行包行邮、普通货物的权重为 [0.419, 0.262, 0.160, 0.097, 0.062]
种类层(车底类型)	动力分散、动力集中、普速的权重为 [0.625, 0.239, 0.136]
种类层(车站类型)	关键枢纽车站、编组站的权重为 [0.667, 0.333]

(2)区域路网列车运行图版本对比评价。3 个版本的运行图分别命名为 0110 图、0620 图、1011 图,为体现评价结果对版本之间不同差异度的呈现效果,0110 图路网范围采用上海铁路局管辖范围,0620 图、1011 图路网范围则进行一定扩大,为上海铁路局管辖范围及局分界口外延一站,故两图相关累计里程指标会显著大于 0110 图。由于评价指标体系为 5 层结构,指标层同层指标数量达 52 个,故第 1 节的步骤(1)—(5)仅以运输能力—列车—高速动车组旅客列车为样例,展示部分中间计算结果。

根据第 1 节的步骤(1)、(2)对原始数据进行归一化处理,并求得正、负理想版本,结果如表 3 所示。

根据第 1 节的步骤(3)、(4)计算得到各运行图版本对应的灰色关联度值,并将灰色关联度矩阵导入横向拉开档次法,得到列车开行对数、累计走行里程、累计定员周转量的客观权重为[0.323, 0.353, 0.324],由此得到综合评价值如表 4 所示。

根据第 1 节的步骤(5)设定分数范围为[60, 100],运输能力准则下列车对象层详细评分如表 5 所示。

表 3 高速动车组数据归一化结果
Tab. 3 Normalization results of high-speed multiple unit data

指标	0110 图		0620 图		1011 图		正理想版本	负理想版本
	原始数据	归一化	原始数据	归一化	原始数据	归一化		
开行列数	1 455	0.567	1 480	0.577	1 509	0.588	0.588	0.567
累计走行里程	761 273	0.549	817 079	0.590	820 467	0.592	0.592	0.549
累计定员周转量	591 352 744	0.557	627 778 175	0.591	618 644 854	0.583	0.591	0.557

表 4 高速动车组灰色关联度及综合评价价值
Tab. 4 Grey correlation degrees and comprehensive evaluation values of high-speed multiple unit

指标	0110 图		0620 图		1011 图		正理想版本		负理想版本	
	关联度	标准化	关联度	标准化	关联度	标准化	关联度	标准化	关联度	标准化
开行列数	0.504	−0.907	0.654	−0.311	1.000	1.063	1.000	1.063	0.504	−0.907
累计走行里程	0.333	−1.087	0.896	0.525	1.000	0.825	1.000	0.825	0.333	−1.087
累计定员周转量	0.384	−1.013	1.000	0.986	0.713	0.055	1.000	0.986	0.384	−1.013
综合评价值		−1.005		0.404		0.652		0.954		−1.005

表 5 运输能力准则下列车评分
Tab. 5 Scores of train based on transportation capacity criteria

版本图	高速动车组	动车组	普速旅客	行邮行包	普通货物	列车评分
0110 图	60.00	60.00	71.14	60.00	60.00	61.78
0620 图	88.78	73.67	96.07	100.00	99.22	87.72
1011 图	93.84	100.00	62.79	65.97	97.41	88.00

根据第 1 节里的步骤(6)对各层分数进行逐层加权求和,可得到各层最终评分及排名如表 6 所示。

由各层评价结果可知,最终各版本列车运行图编制质量排名由高到低依次为 0620 图、1011 图、0110 图。0620 图与 1011 图相较于 0110 图而言,在各个评价层次都有显著提升。1011 图相较于 0620 图而言,在列车运输能力方面,尤其是高速动车组与动车组旅客列车运输能力得以优化,但其车底运用

计划效果不佳,导致各准则层下车底对象评价分值较低;在服务质量方面,1011 图关键枢纽车站接发车更加均衡,但编组站直达列车接续时间明显增长,而在关键枢纽车站种类上获得高分,而在编组站评分较低。综上,1011 图整体编制效果评分低于 0620 图。在下次运行图编制时,可考虑优化车底运用计划,并在编组站更加合理安排无改编中转列车,降低其在编组站的接续时间。

表 6 版本对比评价下目标、准则、对象层评分及排名

Tab. 6 Scores and ranking of goal, criteria, and object layer in version comparison evaluation

父层指标	当前层次指标	当前层次权重	0110 图	0620 图	1011 图	评分由高到低版本排名
编制质量	编制质量	1.000	66.25	89.41	81.86	0620 图、1011 图、0110 图
	运输能力	0.540	64.58	90.14	79.90	0620 图、1011 图、0110 图
	运营效益	0.297	66.95	89.63	84.30	0620 图、1011 图、0110 图
	服务质量	0.163	70.52	86.57	83.89	0620 图、1011 图、0110 图
运输能力	列车	0.667	61.78	87.72	88.00	1011 图、0620 图、0110 图
	车底	0.333	70.16	95.00	63.68	0620 图、0110 图、1011 图
运营效益	列车	0.667	67.76	87.75	82.23	0620 图、1011 图、0110 图
	车底	0.333	65.32	93.39	88.43	0620 图、1011 图、0110 图
服务质量	车站	1.000	70.52	86.57	83.89	0620 图、1011 图、0110 图

3.3 区段对比评价结果

(1)权重确定。每一聚类下的区段都有其各自特点,可通过层次分析法为隶属于不同聚类下的评价指标集合赋予差异化的权重。为便于计算结果展示,在本案例中所有评价指标集合中的指标均采用同等权重。

(2)区域路网列车运行图区段对比评价。以 0620 图运行图数据为案例,由于运行图共包含 156 个区段,为表述方便,在每一聚类下选取 3 个区段作为代表(表 7),并在第 2 节的步骤(1)—(4)中以高铁 3 类、高铁 4 类作为样例展示中间计算结果。

根据第 2 节的步骤(1)—(4)得到样例对应的区段标准、归一化结果以及各区段对应与正理想区段的距离及其评分转化如表 8 所示,其中分数范围为

[60,100]。

根据第 2 节的步骤(5)对各层分数进行逐层加权求和,得到各层最终评分如表 9 所示。通过整合中间评价结果,本文评价方法还可得到各区段运行图的编制质量结果。表 10 列举了在本次评价中评分优异(大于 90 分)和评分较低(低于 80 分)的区段。

由最终评分可知,0620 图整体编制质量良好,但其运营效益表现略有不足,其主要受到客货混跑区段影响,该类区段在运输能力方面均有出色表现,但部分区段货运相关效益和质量指标评分较低,可适当均衡客货运组织。高铁区段和货运专线区段整体表现出高质量的编制水平,绝大部分区段均能在 2 个准则方面取得高分评价,但货运专线区段中以宁

表 7 代表区段选择结果

Tab. 7 Selection results for representative sections

类别	区段 1	区段 2	区段 3
高铁类 1	董集—淮安东	赣榆北—连云港	董集—圩洋线路所
高铁类 2	宁波东—温州南	合肥南—肥东	合肥南—长安集
高铁类 3	芜湖—湖州	淮安东—盐城	盐城—南通西
高铁类 4	七宝所—笕桥所	徐州东—蚌埠南	苏州—安北所
普铁货运专线类 1	淮南西—毕家岗	怀宁—安庆	无锡西—长兴南
普铁货运专线类 2	沈家塘—乔司	宁波北—邱隘	宁波东—北仑
普铁货运专线类 3	南翔—何家湾	兰溪—千岛湖南	狮子山—铜陵西
普铁客货混跑类 1	蚌埠东—林场	王楼—阜阳	阜阳北—淮南西
普铁客货混跑类 2	水家湖—蚌埠	八里湾—狮子山	连云港东—连云
普铁客货混跑类 3	泰州—海安	海安—南通	黄渡—封浜
普铁客货混跑类 4	南京—无锡	乔司—笕桥	芜湖东—宣城

表 8 区段对比评价下样例计算中间过程结果及评分

Tab. 8 Intermediate calculation results and scores of samples in section comparison evaluation

类别	指标	动车组列车数			旅客发送量			与正理想区段距离	评分
		归一化	指标上界	指标下界	归一化	指标上界	指标下界		
高铁类 3	芜湖—湖州	0.644			0.710			0.325	87.01
	淮安东—盐城	1.000	118.00	70.25	0.997	80 334	48 521	0.002	99.91
	盐城—南通西	0.874			0.638			0.271	89.17
高铁类 4	七宝所—笕桥所	1.000			1.000			0	100.00
	徐州东—蚌埠南	1.000	316.50	274.00	1.000	266 736	209 020	0	100.00
	苏州—安北所	0.400			0.623			0.501	79.95
理想区段	正理想区段	1.000			1.000			0	100.00
	负理想区段	0			0			1.000	60.00

表 9 区段对比评价下目标、准则、等级层评分

Tab. 9 Scores of goal, criteria, and grade layer in section comparison evaluation

目标层指标	目标层评分	准则层指标	准则层评分	等级层	
				高铁评分	普铁评分
编制质量	87.57	运输能力	90.06	89.81	90.31
		运营效益	85.35	85.95	84.75
		服务质量	87.38	88.99	85.77

波东—北仑为例,其归属高货运量聚类类别,虽其运力数值较高,但在该类别下仍属于中等水平,且其直达直通货物列车占比较低,导致其运输能力和服务质量评分不高。

表 10 评分优异和评分较低区段的详细评分情况

Tab. 10 Scores of some excellent or inferior sections

区段类别	区段名称	运输能力	运营效益	服务质量	编制质量
高铁类	董集—淮安东	97.36	85.72	94.20	92.43
	赣榆北—连云港	100.00	94.80	96.35	97.05
	徐州东—蚌埠南	100.00	96.80	100.00	98.93
普铁货运专线类	无锡西—长兴南	90.00	90.32	100.00	93.44
	南翔—何家湾	100.00	89.76	100.00	96.59
	兰溪—千岛湖南	100.00	85.99	100.00	95.33
	宁波东—北仑	75.93	84.45	76.07	78.81
	蚌埠东—林场	100.00	88.65	90.69	93.11
普铁客货混跑类	王楼—阜阳	100.00	91.28	82.53	91.27
	海安—南通	100.00	84.73	100.00	94.90
	芜湖东—宣城	83.79	78.55	65.50	75.95

4 结论

建立了反映区域路网整体效能的运输能力、运营效益及服务质量三方面的区域路网列车运行图整体效能综合评价指标体系。为反映不同版本路网列车运行图之间的变化情况,融合灰色关联度法、横向拉开档次法,设计了版本对比评价方法,从路网整体角度进行评价,评价结果充分体现铁路实际运营时不同列车、车站、车底等级重要度,并最大限度反应不同版本运行图之间的差异程度。为满足从不同区段运行图角度检验路网运行图质量的评价需求,设计了区段对比评价方法,通过 K-MEANS++ 方法对区段进行种类聚类划分,分类制定评价标准,采用

改进 TOPSIS 得出路网运行图的区段对比评价结果。故实现了从整体路网和区段 2 个角度对运行图的多维度、分层次质量评价。以上海铁路局 3 个不同版本的全局路网列车运行图作为实例分析进行版本对比评价,结果表明 0620 图整体编制质量最佳,但 1011 图在运输能力列车维度表现最优;区段对比评价结果 0620 图在运输能力评分优秀,但运营效益表现略有不足,整体而言编制质量良好。本文侧重基于运行图编完即得的相关指标,在运行图实行之前,实现对区域路网运行图编制质量的敏捷化评价分析,为运行图编制、调整提供依据。基于现有研究成果,今后可进一步融合运行图实行之后对应的客票、实际运行图等运营效果数据,新增列车上座率、

晚点率、开行兑现率、客票收益、OD旅行时间、重要城市铁路通勤圈范围等指标,进一步完善运营效益和服务质量部分的指标体系内容,形成对区域路网运行图更加完整的评价。

作者贡献声明:

张龙豪:评价方法构建,数据分析与计算,论文撰写。

吴 华:评价指标体系建立,案例分析。

荣 剑:运行图数据分析,评价结果验证。

周 峰:需求调研,数据整理。

徐瑞华:研究方法指导,论文审阅与修改。

参考文献:

- [1] 杨意坚,何宇强. 基于Max-plus方法的列车运行图稳定性评价[J]. 铁道学报,2009,31(4):14.
YANG Yijian, HE Yuqiang. Evaluation of stability of railway working diagram based on max-plus algebra[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(4): 14.
- [2] 邢劲宇. 基于冗余时间优化布局的列车时刻表鲁棒性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
XING Jinyu. Research on robustness of train timetable based on optimal layout of redundant time [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [3] 彭其渊,鲍晶晶,文超,等. 高速铁路列车运行图评价理论与方法[J]. 西南交通大学学报,2013,48(6):969.
PENG Qiyuan, BAO Jingjing, WEN Chao, *et al.* Evaluation theory and method of high-speed train diagrams [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(6): 969.
- [4] 马芳. 基于群体灰色层次分析法的列车运行图质量评价[J]. 铁道运输与经济,2017, 39(10): 105.
MA Fang. Quality evaluation of train operation diagram based on group grey AHP method [J]. Railway Transport and Economy. 2017, 39(10): 105.
- [5] 陈璠. 基于效益效率的高速铁路列车运行图的评价研究[D]. 成都:西南交通大学, 2021.
CHEN Jin. Research on evaluation of high-speed railway train operation diagram based on benefit and efficiency [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [6] 李致远,陈钉均. 基于AHP—广义模糊软集的列车运行图评价[J]. 综合运输,2023,45(6):119.
LI Zhiyuan, CHEN Dingjun. Evaluation of train operation diagram based on AHP-generalized fuzzy soft set [J]. China Transportation Review, 2023, 45(6): 119.
- [7] 徐行方,程赞奇. 城际列车开行方案评价模型的适用性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2008(1): 52.
XU Xingfang, CHENG Yunqi. Applicability analysis of two evaluation models of intercity train scheduling [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2008(1): 52.
- [8] 李伟,杨永泰,罗钦. 基于多层灰色关联的地铁列车运行图综合评价[J]. 深圳大学学报(理工版), 2019, 36(6): 682.
LI Wei, YANG Yongtai, LUO qin. Comprehensive evaluation of train schedule on urban rail network based on multilayer grey relational analysis [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2019, 36(6): 682.
- [9] 李思杰,徐瑞华,江志彬. 城市轨道交通列车运行图能力与客流需求匹配度的评价方法[J]. 中国铁道科学,2017, 38(3): 137.
LI Sijie, XU Ruihua, JIANG Zhibin. Evaluation method for matching degree between train diagram capacity and passenger demand for urban rail transit [J]. China Railway Science, 2017, 38(3): 137.
- [10] 郭亚军. 一种新的动态综合评价方法[J]. 管理科学学报, 2002(2): 49.
GUO Yajun. A new dynamic comprehensive evaluation method [J]. Journal of Management Sciences in China, 2002(2): 49.