

文章编号:1005-0523(2020)06-0056-10

快慢车模式下市域轨道交通开行方案综合评价研究

郑翔^{1,2,3}, 王辉^{2,3}, 徐行方^{2,3}, 滕靖^{2,3}

(1.广州地铁设计研究院股份有限公司,广东 广州 510010; 2.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; 3.同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804)

摘要:市域轨道交通的快慢车运营模式在一定程度上有利于改善乘客服务水平、提高市域线路运输效率、降低企业成本,而确定快慢车模式下的开行方案是一个多方案、多目标的决策问题。从乘客和企业两个角度构建开行方案综合评价体系,设计开行方案的优度综合评价模型;运用可拓学原理建立开行方案物元集,给出各项评价指标的动态衡量条件;采用组合赋权的方法确定各项评价指标的综合权重,计算关联度描述各个方案符合各项指标要求的程度;最后依据优度计算结果给出适用于初期、近期的优选方案。

关键词:快慢车模式;市域轨道交通;开行方案;可拓学;组合赋权

中图分类号:U293.4

文献标志码:A

本文引用格式:郑翔,王辉,徐行方,等.快慢车模式下市域轨道交通开行方案综合评价研究[J].华东交通大学学报,2020,37(6):56-65.

Citation format:ZHENG X,WANG H,XU X F,et al. Comprehensive evaluation of the municipality rail transit operation plan under the express and local train mode[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(6):56-65.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.06.008

市域轨道交通凭借其快速、舒适、引导城市发展等优点,受到了越来越多大城市的重视,成为解决大城市居民出行的重要举措^[1]。市域轨道交通可选择快慢车模式,该模式满足了乘客差异性的需求,在一定程度上提高运输质量和乘客服务水平,提高市域线路运输效率^[1-3]。目前,快慢车运营模式已在国内外一些大城市得到广泛的应用,国外如日本筑波快线、纽约长岛通勤线、巴黎 RER 线等,国内如上海地铁 16 号线、上海金山铁路、广州地铁 14 号线等。但在理论层面,国内针对市域轨道交通快慢车运营模式的研究仍处于起步阶段^[4],尤其是开行方案评价和决策方面的研究较少,在方案比选阶段更多的是依赖人工经验,没有形成系统的理论与方法。

VUCHIC 等^[5]对站站停、跨站停、区间停、快慢车等运营模式进行特征描述及应用潜力探索,给出了不同停站方案的运营效果评价方法。国内学者在构建快慢车开行方案的评价体系时,提出了乘客平均收益、平均满载率、上线车组数等一系列指标^[6-9]。总体而言,既有文献的部分指标设计仅从运行图出发,没有结合具体的开行方案下产生的实际乘客路径 OD 客流。例如计算不同开行方案的“快车节约时间”指标,仅考虑实际运行图中一趟快车运行所节约的时间,并未结合乘坐快车的人数进一步计算快车节约总时间,而后者相比前者更实际、综合地反映了快慢车模式的效益。

目前,应用于评价的数学方法有很多,但各自存在一定的缺点,如数据包络分析法容易受到随机干扰项的影响;模糊评价法容易出现严重失真和多峰值现象。快慢车模式下,快车与慢车的服务水平互为矛盾,一个周期内的快车数量与通过能力的抉择也互为矛盾,因此开行方案评价是一个多目标、多方案的决策问题。本文选用可拓学的方法解决快慢车模式下的开行方案评价问题,可拓学适用于研究矛盾问题,将复杂的问题进行分解,其可拓学集合理论为表达矛盾问题的转化提供了定量手段。

本文从乘客和企业两个角度构建开行方案综合评价体系,其中乘客角度的指标结合了 OD 客流,综合

收稿日期:2020-07-10

作者简介:郑翔(1982—),男,高级工程师,博士研究生,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:12163145@qq.com

反映不同开行方案下全体出行者的效益。进一步设计开行方案评价模型,运用可拓学原理建立开行方案物元集,给出各项评价指标的动态衡量条件;采用组合赋权的方法确定评价综合评价指标;最后根据关联度和优度来描述各个方案的优劣情况;最后择优选取开行方案。

1 开行方案评价指标体系

快慢车模式下的乘客出行服务质量和企业运营成本均发生变化。因而本文从乘客和企业方面提出了如图 1 所示的开行方案评价体系。

1.1 乘客方面

1.1.1 人均出行时间

快慢车运行模式下,乘坐快车的乘客,其停站时间少,在车时间因此减少,并且这种效益随着行程距离的延长以及越行车站数量的增加而加大。然而由于快慢车比例问题,乘客在始发站等候快车的平均时间明显高于站站停模式下的候车时间;而选择乘坐慢车的乘客,其候车时间同样因为快慢车交叉运行而增大,并且乘车途中可能会因待避而增加停站时间。

因此,快慢车运营模式是一个乘客出行总时间博弈问题,不同的开行方案因其快慢车比例、停站方案等因素影响乘客出行总时间。故采取人均出行总时间指标综合反映快慢车模式下选择快慢车或选择换乘的乘客出行总体效益。人均出行总时间的算式为

$$t_a = \frac{\sum_{w \in W} N_w^b t_w^b + N_w^a t_w^a + N_w^{a-b} t_w^{a-b} + N_w^{b-a} t_w^{b-a}}{\sum_{w \in W} N_w} \tag{1}$$

式中: w 为 OD 对, W 为 OD 对的集合; N_w^b 为 OD 对 w 之间选择慢车人数; N_w^a 为 OD 对 w 之间选择快车人数; N_w^{a-b} 为 OD 对 w 之间先乘坐快车后换乘慢车人数; N_w^{b-a} 为 OD 对 w 之间先乘坐慢车后换乘快车的人数; t_w^b 为 OD 对 w 之间乘坐慢车的出行总时间; t_w^a 为 OD 对 w 之间乘坐快车的出行总时间; t_w^{a-b} 为 OD 对 w 之间先乘坐快车后换乘慢车的出行总时间; t_w^{b-a} 为 OD 对 w 之间先乘坐慢车后换乘快车的出行总时间; N_w 为出行总人数。

1.1.2 换乘客流

相比站站停模式,快慢车模式中存在部分客流通过同台换乘实现更快速抵达目的地的行为,例如起始站为大站,终点站为小站没有快车停站时,存在部分客流首先选择快车抵达换乘站,下车后在同站台换乘慢车前往最终目的地。通常情况下,快慢车模式下一次完整的出行最多发生一次换乘行为。然而,同台换乘客流一方面会与车站原本候车的客流发生上下车流线交叉,增加站台客流组织压力;另一方面,从乘客出行感知层面,因换乘引发的感知候车时间比实际候车时间长^[10-11]。开行快慢车导致部分客流无法一次性抵达目的地,出行直达性降低,因而提出换乘客流指标,衡量快慢车模式下直达服务水平,换乘客流越大,表明直达服务水平越低。

1.1.3 发车间隔均衡性

由于采用快慢车运行模式,列车在同一车站的发车间隔不均匀。不规律的发车间隔不利于乘客体验,对于较长发车间隔,乘客在站候车时间较长。故定义发车间隔均衡性指标,算式为

$$S = \sum_{i=1}^m \frac{1}{S_i} \ln(N_i) \tag{2}$$

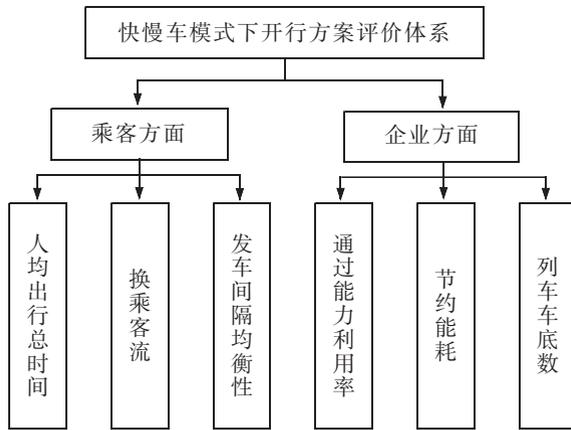


图 1 开行方案评价体系
Fig.1 Evaluation system of operating scheme

式中: S_i 为*i*车站发车间隔的标准差,用来反映发车间隔的离散程度; $\frac{1}{S_i}$ 为一个车站发车的均衡性; N_i 为*i*从车站乘车的人数(单向); $\ln(N_i)$ 为车站均衡权重系数,以客流量大小车站均衡性在全线路的重要性。

1.2 企业方面

1.2.1 通过能力利用率

快慢车模式下,线路通过能力受到追踪间隔时间、快慢车停站次数、开行比例、越行站数量及位置等因素的影响^[2]。实际运营过程中,通过能力利用率过低意味着企业运营成本的浪费,通过能力利用率过高意味着运能利用紧张,在高峰或者突发事件情况下,运能可增长和调整的余地较小。通过能力利用率算式为

$$u = \frac{N_{\text{实}}}{N} \quad (3)$$

式中: $N_{\text{实}}$ 为实际运行时采用的列车对(列)数,列/h; N 为最大通过能力,列/h。

1.2.2 节约能耗

由于列车每起停一次都会产生相应的额外能耗,所以快慢车方案中能耗的节省即是快车减少停站次数与一次停站额外能耗的乘积,算式为

$$e = E \left\{ (p^a + p^b)(n-2) - [p^b(n-2) + p^a \sum_2^{k-1} \zeta_i] \right\} = E p^a (k-2 - \sum_2^{k-1} \zeta_i) \quad (4)$$

式中: E 为列车每起停一次的能耗成本,元/次; k 为线路上车站数量; ζ_i 为快车在车站*i*是否停车,停车取1,否则为0; p^a 为单位时间内快车的发车次数,列/h; p^b 为单位时间内慢车的发车次数,列/h。

1.2.3 列车车底数

快慢车模式下由于车底周转时间的变化,将影响上线车底数量。可分别计算快车和慢车周转时间,再对各类型上线车组数求和^[13]。

慢车周转时间的算式为

$$\theta^b = \sum t_1 + \sum_2^{n-1} t_2 + \sum t_3 + \sum_1^{n-1} t_4 \quad (5)$$

快车周转时间的算式为

$$\theta^a = \sum t_1 + \sum_2^{n-1} \zeta_i (t_2 + t_4) + \sum t_3 + t_4 \quad (6)$$

快慢车模式下各种开行方案单位时间内所需要的列车车底数算式为

$$q = \frac{p^a \theta^a}{3600} + \frac{p^b \theta^b}{3600} \quad (7)$$

式中: t_1 为每个运行区间行驶时间; t_2 为列车在每个车站的停站时间; t_3 为列车折返时间; t_4 为列车起停附加时间。

2 指标权重计算方法

传统熵权法以信息量为依据,充分挖掘各评价指标原始数据本身所包含的信息,其权重计算结果较为客观,忽视了铁路从业人员对开行方案中各项指标重要性的主观感受;而如果单纯使用主观赋值法确定权重,会受到评价者的知识水平、主观偏见等因素的限制,不够全面客观。本文选择层次分析法和熵权法相结合的组合赋权法,将客观计算和主观赋值线性组合起来,得出组合权重值。

2.1 客观熵权法

熵权法在确定各指标的权重最大的优点是能够将各指标的变动程度这一特性反映出来,若一个指标的各个监测数值波动程度较大,则在综合评价时认为该指标的熵较大,故而该指标的权重也相应较大,反之则该指标的权重较小。

设有 m 个待评价方案, n 个指标, 则可以构建矩阵

$$R_{ij}=(r_{ij})_{n \times m}; i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (8)$$

1) 标准化处理。开行方案综合评价指标可以分为正向和负向指标两类, 对每类指标标准化处理的方法如下。

正向指标

$$p_{ij}=\frac{r_{ij}-r_j^{\min}}{r_j^{\max}-r_j^{\min}} \quad (9)$$

负向指标

$$p_{ij}=\frac{r_j^{\max}-r_{ij}}{r_j^{\max}-r_j^{\min}} \quad (10)$$

经上式处理即可得到第 j 个方案在指标 i 上的标准化矩阵 $p_{ij}=(p_{ij})_{n \times m}$ 。

2) 对于标准矩阵 p_{ij} , 计算第 j 个方案的第 i 个指标的权重 f_{ij}

$$f_{ij}=\frac{p_{ij}}{\sum_{j=1}^m p_{ij}} \quad (11)$$

3) 在开行方案抉择的过程中, 第 j 个指标的熵权算式为

$$e_i=-\frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (12)$$

式中 $f_{ij} \neq 0$ 。当 $f_{ij}=0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij}=0$ 。

4) 进一步计算信息熵冗余度 d_i

$$d_i=1-e_i \quad (13)$$

5) 进而得到第 i 个指标的熵权

$$\varphi_2=\frac{d_i}{\sum_{j=1}^n d_i} \quad (14)$$

2.2 主观层次分析法

在快慢车开行方案评价体系的基础上, 利用 1-9 标度法对同一层级的指标进行两两比较, 从而构造判断矩阵记录指标间的相对重要程度。通过求解判断矩阵特征向量的方法, 即可求出第二层指标针对其所属上层指标的权重单排序, 同时需要计算一致性指标 CI 和平均随机一致性指标 RI 的比值 CR , 当值小于 0.1 时, 即为通过一致性检验, 并进一步通过计算各指标对总目标的最终权重, 即 $\omega_i=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 。

2.3 组合赋权法

将熵权法确定的客观权重和层次分析法确定的主观权重进行加权集成, 使最终得到的综合指标权重同时反映主观经验和客观信息。组合赋权法的权重算式为

$$\mu_i=\frac{\omega_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i \varphi_i} \quad (15)$$

3 快慢车模式下开行方案的优度评价模型

优度评价法^[4]是可拓数学中评价一个对象, 包括事物、策略、方法等的优劣的基本方法, 通过建立多指标的综合评判模型、建立关联函数来确定待评对象的合格度和优度, 不仅能够表示一个方案的优劣, 而且能够反映各个方案偏离最佳方案的程度, 为决策者从众多待选方案中确定最佳的方案提供依据。本文优度评模型的构建思路如图 2 所示。

具体步骤如下:

Step1: 确定开行方案集。确定 G 市域轨道交通快线 M 号线快慢车模式下的初始开行方案集 N'_j , 并根据评价指标和指标量值建立物元集, 包括待评价物元 $N_j=(N_1, N_2, \dots, N_j)$, 评价特征指标 C_i 以及每一项指标的量值 V_{ij} , 即

$$R_j = \begin{bmatrix} N_j & C_1 & V_{1i} \\ & C_2 & V_{2i} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{ni} \end{bmatrix}; i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (16)$$

Step2: 首次评价(筛选可行方案)。本报告以通过能力为首轮筛选指标, 对于通过能力, 将其与满足最大断面客流量的列车开行数量进行比较, 凡是低于该标准的视为不可行方案。根据 M 号线高峰时段最大断面客流可计算列车开行对数 N^*

$$N^* = \frac{P_{\max}}{\lambda c_p} \quad (17)$$

式中: P_{\max} 为早高峰初期运营阶段最大断面客流量; c_p 为列车定员; λ 为满载率。

M 号线的初期通过能力最低标准为 12 列/h, 近期通过能力最低标准为 16 列/h。当且仅当开行方案同时满足上述通过能力标准时, 可添加进可行方案集 N_j 。

Step3: 确定衡量条件量值域

量值域在可拓学被用来描述指标合理范围, 通常有两种确定方法, 第一种是以行业内普遍认可的标准作为量值域, 但相对而言较为固定, 当评价场景发生变化时, 指标数值也会发生较大变动, 因而这种方法也会存在标准灵活性较差的缺点; 第二种是结合每轮评估中各项方案的实际情况确定衡量条件。该方法确定的量值域为部分指标避免了没有规范标准的尴尬处境。本报告评估的对象快慢车存在运营时段(初期、近期)的变化, 因而第二种方法也可以体现指标对评估场景的动态适应情况。衡量条件集可以记作 $U=\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, 其中 $U_i=(C_i, V_i)$ 为特征元, V_i 是评价特征 C_i 的量值域, 选用 X_{α} 表示 V_i , 则有 $X_{\alpha}=\langle a_{\alpha}, b_{\alpha} \rangle$ 。

Step4: 确定综合权重。权重的计算是快慢车模式下开行方案评估中较为关键的一步, 本文将层次分析法和熵权法有机结合, 确定开行方案评价指标的组合权重。

Step5: 建立关联函数并计算关联度。关联函数 $K(x)$ 在可拓学中是用来描述事物可变性的工具。本文的量值域 V_i 均使用区间 $X_{\alpha}=\langle a_{\alpha}, b_{\alpha} \rangle$ 来表示。

对于效益型指标, 即指标的期望值要求越大越好, 采用简单关联度函数, 算式为

$$K_i(x) = \frac{x_{ij} - a_{\alpha i}}{b_{\alpha i} - a_{\alpha i}}; i=1, 2, \dots, n \quad (18)$$

对于成本型指标, 即指标的期望值要求越小越好, 采用简单关联度函数, 算式为

$$K_i(x) = \frac{b_{\alpha i} - x_{ij}}{b_{\alpha i} - a_{\alpha i}}; i=1, 2, \dots, n \quad (19)$$

对于合理型的指标, 利用可拓距计算其关联度^[16], 算式为

$$K_i(x) = -\frac{\rho(x_{ij}, X_{\alpha i})}{|X_{\alpha i}|} = -\frac{\left| x - \frac{a_{\alpha i} + b_{\alpha i}}{2} \right| - \frac{b_{\alpha i} - a_{\alpha i}}{2}}{|b_{\alpha i} - a_{\alpha i}|} \quad (20)$$

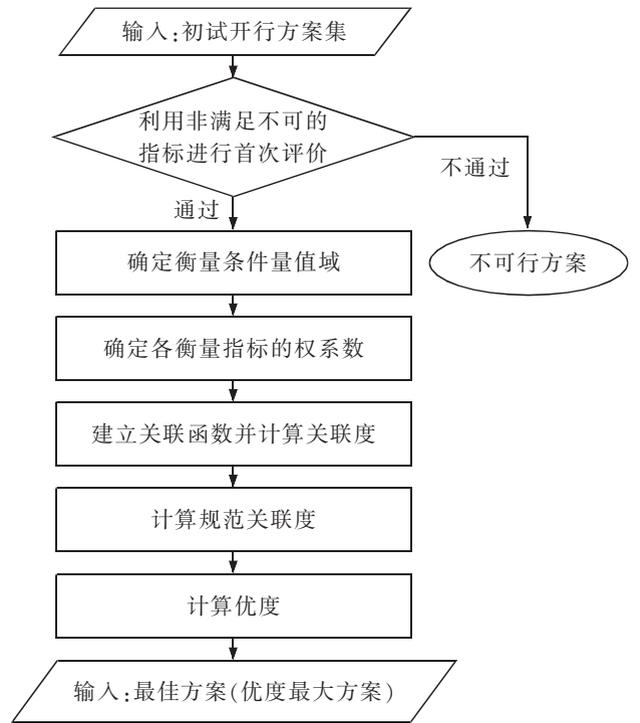


图2 优度评价模型构建思路

Fig.2 Construction ideas of priority degree evaluation model

在可拓学中,利用可拓距 $\rho(x_{ij}, X_{\alpha_i})$ 的概念,可以根据距的值的不同描述出点在区间内的位置的不同,可拓距对点与区间的位置关系的描述,使得评价从“类内即为同”发展到类同也有程度区别的定量描述。

则各方案 $N_j(j=1, 2, \dots, m)$ 关于 U_i 的关联度算式为

$$K_i=(K_i(N_1), K_i(N_2), \dots, K_i(N_m)); i=1, 2, \dots, n \tag{21}$$

Step6: 关联度规范化。由于衡量指标的量纲不同,需对其关联度进行规范,算式为

$$k_{ij}=\frac{K_i(N_j)}{\max_{q \in \{1, 2, \dots, m\}} |K_i(N_q)|}; i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \tag{22}$$

则各方案 $N_j(j=1, 2, \dots, m)$ 关于 U_i 的规范关联度算式为

$$k_{ij}=(k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{im})^T; i=1, 2, \dots, n \tag{23}$$

Step7: 计算优度。在优度评价中, $C(N_j)$ 表示了评价对象的优劣程度,算式为

$$C(N_j)=\mu k(N_j)=\sum_{i=1}^n \mu_i k_{ij}; j=1, 2, \dots, m \tag{24}$$

Step8: 确定较优解。将各个待评方案的优度值进行比较,取优度值最大的作为最佳方案。

4 案例分析

G 市 M 号线规划采用快慢车模式,其线路全长 62.7 km,共设 9 座车站,如图 3 所示。其中 D、E、F 和 G 站为小站,即仅有慢车在这些车站停靠,且快车可能会在这些站越行慢车。该线路计划采用市域 D 型车,起停一次的能耗成本为 200 元/次。此外,由于该线路尚未采用快慢车运营模式,本文以原始 OD 客流为基础,并基于 Logit 模型进行客流分配,该模型综合考虑了等候时间、在车时间以及换乘时间,进而得到该线路各 OD 乘坐快车直达、慢车直达和换乘的客流量作为客流输入。

4.1 建立物元集

本文基于 1:2 和 1:3 的快慢车比例,对越行一次和越行两次的所有越行方案进行组合评估,其中越行站方案如表 1 所示,共生成 20 种初始开行方案集。表格中符号“*”表示该站为越行站。



图 3 G 市市域轨道交通 M 号线示意图
Fig.3 Diagram of municipality rail line M in G City

表 1 越行站方案集
Tab.1 Scheme set of overtaking stations

越行情况	越行一次	越行两次		
		连续越行	间隔(一站)越行	间隔(两站)越行
越行站	D*,E*,F*,G*	D*E*, E*F*,F*G*	D*F*,E*G*	D*G*

进一步考虑通过能力符合标准的开行方案。符合初期设定最低标准 12 列/h 的共有 20 项待评估可行方案;符合近期设定最低标准 16 列/h 共有 9 项待评估可行方案,如表 2 所示。其中, C_1 为 人均出行总时间, s; C_2 为换乘客流, 人; C_3 为发车间隔均衡性; C_4 为通过能力利用率; C_5 为节约能耗, 元; C_6 为列车车底数, 组。

表2 初期、近期可行物元集
Tab.2 Feasible matter element set in initial and recent stage

方案	C ₁		C ₂		C ₃		C ₄		C ₅		C ₆	
	初期	近期	初期	近期	初期	近期	初期	近期	初期	近期	初期	近期
1:2-D*	935	-	2 594	-	0.42	-	0.92	-	3 200	-	17	-
1:2-E*	943	-	2 529	-	0.79	-	0.92	-	3 200	-	17	-
1:2-F*	947	-	2 461	-	0.71	-	0.92	-	3 200	-	17	-
1:2-G*	949	-	2 414	-	0.33	-	0.92	-	3 200	-	17	-
1:2-D*E*	950	872	2 346	3 010	0.29	0.51	0.71	0.94	3 200	3 200	17	17
1:2-E*F*	961	882	2 250	2 864	0.34	0.83	0.63	0.84	3 200	3 200	17	17
1:2-F*G*	959	-	2 221	-	0.49	-	0.80	-	3 200	-	17	-
1:2-D*F*	954	876	2 293	2 929	0.35	0.44	0.67	0.89	3 200	3 200	17	17
1:2-E*G*	960	-	2 240	-	0.67	-	0.80	-	3 200	-	17	-
1:2-D*G*	953	-	2 284	-	0.47	-	0.80	-	3 200	-	17	-
1:3-D*	955	-	2 322	-	0.40	-	0.80	-	2 400	-	16	-
1:3-E*	960	-	2 291	-	0.54	-	0.80	-	2 400	-	16	-
1:3-F*	963	-	2 242	-	0.50	-	0.80	-	2 400	-	16	-
1:3-G*	962	-	2 241	-	0.46	-	0.86	-	2 400	-	16	-
1:3-D*E*	963	884	2 230	2 874	0.26	1.30	0.67	0.89	2 400	2 400	16	16
1:3-E*F*	970	893	2 187	2 771	0.35	0.99	0.67	0.89	2 400	2 400	16	16
1:3-F*G*	975	894	2 165	2 722	0.45	0.65	0.71	0.94	2 400	2 400	16	16
1:3-D*F*	967	889	2 297	2 815	0.34	2.75	0.67	0.89	2 400	2 400	16	16
1:3-E*G*	973	895	2 182	2 741	0.57	2.09	0.71	0.94	2 400	2 400	16	16
1:3-D*G*	965	890	2 203	2 782	0.47	0.67	0.71	0.94	2 400	2 400	16	16

4.2 确定衡量条件

在本案例中,共有三类指标,人均出行总时间、换乘客流、列车车底数都属于极小型指标,因而其量值域为 $(0, b_{0i}]$ (右边界取本轮评估中所有可行方案的指标最大值),如“1:2-D*”方案下的换乘客流指标最大,则视作在区间 $(0, 259.4]$ 上希望换乘人数越少越好;发车间隔均衡性、节约能耗属于极大型指标,因而其量值域为 $[a_{0i}, +\infty)$ (左边界取可行方案的指标最小值),如“1:3-E*D*”方案下的发车间隔均衡性指标最小,则视作在区间 $[0.26, +\infty)$ 上希望发车间隔均衡性越少越好;通过能力利用率属于合理型指标,即指标数值落在某一区间 $[a_{0i}, b_{0i}]$ 时为最佳,对于指标数值落在该区间之外的,则是越趋向于该区间,方案的指标性能越好,本报告给定的通过能力率指标的合理范围为 $[0.50, 0.8]$ 。具体的初期、近期评估动态衡量条件如表3所示。

表3 初期、近期评估动态衡量条件
Tab.3 The dynamic measurement conditions in initial and recent stage

衡量条件	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
初期评估量值域	(0,975]	(0,259.4]	[0.26, +∞)	[0.50,0.8]	[2 400, +∞)	(0,17]
近期评估量值域	(0,895]	(0,301.0]	[0.44, +∞)	[0.50,0.8]	[2 400, +∞)	(0,17]

4.3 确定综合权重

每一轮(初期和近期)评估的主观权重值都相同,客观权重则是基于数据的变化而变化,对于 M 号线初期、近期方案评估的组合权重计算结果如表 4 所示。

表 4 初期、近期评估权重
Tab.4 The evaluation weights in initial and recent stage

评估时间	权重	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
初期评估	主观权	0.55	0.14	0.06	0.18	0.02	0.05
	客观权	0.09	0.05	0.11	0.13	0.31	0.31
	组合权重	0.45	0.06	0.06	0.23	0.06	0.14
近期评估	主观权	0.55	0.14	0.06	0.05	0.02	0.18
	客观权	0.15	0.09	0.16	0.18	0.28	0.14
	组合权重	0.57	0.09	0.07	0.06	0.04	0.18

4.4 确定规范化关联度和优度值

根据式(18)~式(24)计算可行方案 N_j 关于 U_i 的规范化的关联度结果 K_j 和最终优度值 $C(N_j)$,则初期、近期开行方案评估结果如表 5 所示。

表 5 初期、近期可行方案评价结果
Tab.5 The evaluation results of feasible operating scheme in initial and recent stage

方案	乘客方面						企业方面						优度值	
	C_1		S_2		S_3		S_4		S_5		S_6		初期	近期
	初期	近期	初期	近期	初期	近期	初期	近期	初期	近期	初期	近期		
1:2-D*	1.00	-	0.00	-	0.31	-	-0.73	-	1.00	-	0.00	-	0.34	-
1:2-E*	0.80	-	0.15	-	1.00	-	-0.73	-	1.00	-	0.00	-	0.27	-
1:2-F*	0.69	-	0.31	-	0.86	-	-0.73	-	1.00	-	0.00	-	0.28	-
1:2-G*	0.66	-	0.42	-	0.13	-	-0.73	-	1.00	-	0.00	-	0.22	-
1:2-D*E*	0.64	1.00	0.58	0.00	0.06	0.03	0.56	-3.35	1.00	1.00	0.00	0.00	0.51	0.41
1:2-E*F*	0.36	0.55	0.80	0.51	0.15	0.17	1.00	-1.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.50	0.35
1:2-F*G*	0.40	-	0.87	-	0.43	-	0.00	-	1.00	-	0.00	-	0.29	-
1:2-D*F*	0.52	0.80	0.70	0.28	0.17	0.00	0.79	-2.11	1.00	1.00	0.00	0.00	0.52	0.39
1:2-E*G*	0.38	-	0.83	-	0.79	-	0.00	-	1.00	-	0.00	-	0.28	-
1:2-D*G*	0.56	-	0.72	-	0.40	-	0.00	-	1.00	-	0.00	-	0.36	-
1:3-D*	0.49	-	0.63	-	0.27	-	0.00	-	0.00	-	1.00	-	0.40	-
1:3-E*	0.38	-	0.71	-	0.52	-	0.00	-	0.00	-	1.00	-	0.35	-
1:3-F*	0.29	-	0.82	-	0.45	-	0.00	-	0.00	-	1.00	-	0.32	-
1:3-G*	0.31	-	0.82	-	0.38	-	-0.34	-	0.00	-	1.00	-	0.26	-
1:3-E*D*	0.31	0.46	0.85	0.47	0.00	0.37	0.79	-2.11	0.00	0.00	1.00	1.00	0.51	0.38
1:3-E*F*	0.13	0.09	0.95	0.83	0.17	0.24	0.79	-2.11	0.00	0.00	1.00	1.00	0.43	0.20
1:3-F*G*	0.00	0.03	1.00	1.00	0.36	0.09	0.56	-3.35	0.00	0.00	1.00	1.00	0.33	0.09
1:3-D*F*	0.19	0.26	0.69	0.68	0.16	1.00	0.79	-2.11	0.00	0.00	1.00	1.00	0.45	0.32
1:3-E*G*	0.06	0.01	0.96	0.93	0.60	0.71	0.56	-3.35	0.00	0.00	1.00	1.00	0.35	0.12
1:3-D*G*	0.25	0.20	0.91	0.79	0.40	0.06	0.56	-3.35	0.00	0.00	1.00	1.00	0.44	0.17

4.5 结果分析

表5中各方案的各项指标的规范化关联度数值越大,代表该方案的指标性能越好。由于存在通过能力利用率大于0.8或者小于0.5的,所以出现关联度数值为负数;对于其他指标,由于我们放松了量值域左边界和右边界的数值,故每项方案的每一指标的关联度都为正数。在本文,关联度的正负性并不影响计算结果,每一个指标的关联度仅具有大小比较的含义。

对于初期方案的评估,从优度值结果来看,一次越行下“1:3-D*”方案表现较好;两次越行下“1:2-D*、F*”方案表现较好;快慢车比例为1:2时“1:2-D*、F*”方案表现较好;快慢车比例为1:3时“1:3-E*D*”方案表现较好;对于人均出行时间最低的“1:2-D*”方案,由于其最大通过能力仅为13列/h,在最低标准为12列/h的情况下,该方案运行图调整余地较小,故其优度值仅为0.34。综合来看,最佳方案为快慢车比例为1:2时,快车在D站、F站各越行一次,该方案优度值达到0.52,在换乘客流、通过能力利用率、节约能耗方面表现优异。

对于近期方案的评估,两次越行下“1:2-E*D*”方案表现较好;快慢车比例为1:2时仍然是“1:2-E*D*”方案表现较好;快慢车比例为1:3时“1:3-E*D*”方案表现较好;在M号线近期,几乎所有可行的方案的通过能力都超过了0.8的阈值,故其通过能力利用率的关联度均为负数。综合来看,最佳方案为快慢车比例为1:2时,快车在E站、D站各越行一次,该方案优度值达到0.41,在人均出行总时间、节约能耗方面表现优异。

5 结论

本文在构建快慢车模式下开行方案评价指标体系的基础上,运用可拓学原理,以开行方案乘客服务和企业成本最佳为目标,系统地设计了开行方案的评价与决策模型。通过设立首轮评价指标的硬性条件筛选可行方案;通过关联度直观地描述各个开行方案偏离最佳方案的程度,并根据优度计算结果提出了初期和近期的建议开行方案。基于组合赋权的可拓学优度评价方法更符合实际,更容易得到最优解且客观性强。为决策者从众多待选方案中确定满意方案提供了科学的依据。

参考文献:

- [1] 徐行方,左波祥. 市郊铁路运营特点及运输组织方式研究[J]. 城市公用事业, 2010, 24(5): 1-4.
- [2] 高德辉,胡春斌,宗晶. 区域快速轨道交通快慢车运营方案的研究[J]. 铁道运输与经济, 2014, 36(2): 73-78.
- [3] RASHEDI Z, MAHMOUD M, HASNINE S, et al. On the factors affecting the choice of regional transit for commuting in Greater Toronto and Hamilton Area: Application of an advanced RP-SP choice model[J]. Transportation Research Part A Policy & Practice, 2017, 105: 1-13.
- [4] 陈虹兵. 广州地铁快慢车运营模式研究与实践[J]. 中国标准化, 2019(14): 225-226.
- [5] VUCHIC V. Urban Transit: Operations, Planning and Economics[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006: 20-25.
- [6] 丁小兵. 市郊路线快慢车开行方案优化理论与方法[D]. 上海: 同济大学, 2016.
- [7] 孙元广,冉昕晨,杨帆航,等. 城市轨道交通快慢车开行方案设计与评价研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(1): 233-239.
- [8] 赵壹,谭小土,陈福贵,等. 城市轨道交通快慢车运营模式综合评价体系研究[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(9): 65-67.
- [9] 王琳. 城市轨道交通快慢车运营组织研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [10] 四兵锋,毛保华,刘智丽. 无缝换乘条件下城市轨道交通网络客流分配模型及算法[J]. 铁道学报, 2007(6): 12-18.
- [11] 汤莲花,徐行方. 快慢车模式下市郊乘客乘车路径选择行为研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(6): 947-951.
- [12] 赵源,丁小兵,徐行方. 快慢车模式下城市轨道交通线路通过能力分析 with 计算方法[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(10): 16-20.
- [13] 刘茜. 开行快慢车条件下城市轨道交通列车运行组织研究[D]. 重庆: 西南交通大学, 2016.
- [14] 杨春燕,蔡文. 可拓学[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 60-67.

- [15] 刘仕兵,仇智圣,马志方. 基于变权物元可拓模型的接触网健康状态综合评价[J]. 华东交通大学学报,2019,36(1):125-132.
- [16] 杨春燕,蔡文. 可拓集中关联函数的研究进展[J]. 广东工业大学学报,2012,29(2):7-14.

Comprehensive Evaluation of the Municipality Rail Transit Operation Plan Under the Express and Local Train Mode

Zheng Xiang^{1,2,3}, Wang Hui^{2,3}, Xu Xingfang^{2,3}, Teng Jing^{2,3}

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510010, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To certain extent, the express and local train mode of the municipality rail transit is conducive to improving passenger service level and the efficiency of municipality rail transit and reducing enterprises' costs, but there is a multi-objective problem for determining the operation scheme with the express and local train mode. This paper constructed a comprehensive evaluation system of the operating schemes from the perspective of passengers and enterprises, and designed a comprehensive evaluation model for the operating scheme's priority degree. The principle of extenics was used to establish the matter element set of the operating scheme, and the dynamic measurement conditions of each evaluation index were given; What's more, the combined weight method was used to determine the comprehensive weight of each evaluation index; then the degree of compliance of each scheme was described according to the calculated correlation degree; finally, the optimal scheme suitable for the initial, medium term was given based on the results of priority degree.

Key words: express and local train mode; municipality rail transit; operating scheme; extenics; combined weight