

Å1001-8360(2023)02-0013-09

¿ EÐý9RN < 8 D•E€ÑEG- =y æ u 4Cc N ,

K 9¹ w > ;¹ wBç S|¹ wM² 1 w • (i¹

(1. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学 智慧高铁系统前沿科学中心, 北京 100044)

城市轨道交通互通运营模式下行车组织呈多样化与灵活化特点,合理编制开行方案是保障运营组织效果的关键。针对互通运营模式下客流-车流耦合关系复杂化难题,建立基于开行方案的列车服务网络以刻画列车服务的差异性,构建基于乘客出行选择“策略”的客流分配模型以揭示客流-车流间复杂耦合关系;以此为基础,以运力运量匹配度最大化、运输成本最小化为目标,考虑客运服务、通过能力、运力资源及行车组织复杂性约束,将运力运量匹配关系由既有“区间”层面细化至“交路”层面,构建开行方案编制双层规划模型。最后,以北京地铁昌平线-8号线互通运营为背景开展实证分析,结果表明:所构建方法能够有效给出开行方案,满足互通行车组织需求;相比单线实际运营方案,互通方案使运输成本降低4.83,运用车减少3组,运力运量匹配度提高27.12。所构建方法具有良好的实用性,能够为互通运营模式下复杂开行方案编制提供方法支持。

Å开行方案; 互通运营; 城市轨道交通; 双层规划; 循环迭代算法

ÅU239. 5

Å doi Å0. 3969/j. issn. 1001-8360. 2023. 02. 002

9 s•ã ¥V ô—9¥ ã Sã—9Ys¥ × 9¥ •s— —9¥ t 9 ô—9¥ç Yé¥•ã—
Q¥ã—¥¥ã¥s¥ ã Sã—9Ys¥9 9 s•ã

YAN Fei¹, YAO Xiangming^{1,2}, ZHAO Peng¹, HAN Mei¹, QIAO Ke¹

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing100044, China;

2. Frontiers Science Center for Smart High-speed Railway System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

城市轨道交通互通运营模式下行车组织呈多样化与灵活化特点,合理编制开行方案是保障运营组织效果的关键。针对互通运营模式下客流-车流耦合关系复杂化难题,建立基于开行方案的列车服务网络以刻画列车服务的差异性,构建基于乘客出行选择“策略”的客流分配模型以揭示客流-车流间复杂耦合关系;以此为基础,以运力运量匹配度最大化、运输成本最小化为目标,考虑客运服务、通过能力、运力资源及行车组织复杂性约束,将运力运量匹配关系由既有“区间”层面细化至“交路”层面,构建开行方案编制双层规划模型。最后,以北京地铁昌平线-8号线互通运营为背景开展实证分析,结果表明:所构建方法能够有效给出开行方案,满足互通行车组织需求;相比单线实际运营方案,互通方案使运输成本降低4.83, reduces the number of trains by 3 and improves the matching degree between transport capacity and transport volume by 27.12。With good practicability, the proposed method can provide methods for planning complex train operation schemes under interconnection operational mode.

关键词 train operation plan; interconnection operation; urban rail transit; bi-level programming; cyclic iterative algorithm

Å2022-04-22

Å2022-07-12

Å中央高校基本科研业务费(2022JBQY006);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(L2021X003);北京市科技计划项目(Z211100004121011);重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202000704)

Å闫 菲(1998—),女,新疆昌吉人,博士研究生。E-mail:21114052@bjtu.edu.cn

Å姚向明(1987—),男,湖北宜昌人,副教授,博士。E-mail:yaoxm@bjtu.edu.cn

长期以来,我国城市轨道交通普遍采用单线运营模式,对客运服务水平、运力资源利用及运输组织效率产生严重影响,根本原因在于线路间物理层面的分割限制了灵活化行车组织策略的实施。为解决这一问题,2015 年重庆地铁率先启动了互联互通试点工程,2018 年成功试验了 4 条线路的列车跨线互通运行,论证了技术可行性^[1]。互通运营模式下线路运力资源得以共享,为灵活化行车组织创造了有利条件,但同时也对行车组织过程提出了更高要求。科学制定列车运行计划是保障互通运营实施效果的关键,本文将针对开行方案这一顶层运输计划展开研究。

开行方案是衔接客流与车流的纽带,占据列车运行计划的首要地位。开行方案编制已得到了广泛关注和深入研究,尤其在铁路运输领域。相比城市轨道交通开行方案编制研究尚存在不足,与其特殊的线站布局(较少具备越行条件)及行车组织模式(单线独立运营)相关。轨道交通运营实践中开行方案的作用尚未被足够重视,铺画运行图前甚至缺少开行方案制定这一环节,仅通过最大区间断面量确定发车间隔。理论研究方面,于剑等^[2]综述了既有轨道交通开行方案编制方法。针对大小交路模式下开行方案编制,代存杰等^[3]考虑客流需求动态特征和大小交路模式下发车间隔特点,建立开行方案多目标混合整数模型;许得杰等^[4]根据大小交路模式特点构建了开行方案多目标优化模型;王媛媛等^[5]构建了开行方案双目标混合整数非线性规划模型。为满足多样化出行需求,部分学者探索了相对复杂的开行方案编制问题;以上海地铁 16 号线(Y 型)为背景,杨薛臣等^[6]、黄秋瑜等^[7]从减缓乘客滞留、节约运营成本视角对快慢车开行比例进行了研究;谭丽等^[8]构建 Y 型交路模式下开行方案优化模型,有效确定开行区段及开行频率;郭建民等^[9]对共线运营模式下开行方案编制问题展开研究,认为采用主支线嵌套的交路形式能够有效降低运营成本。杨安安等^[10]研究了跨线列车对线路通过能力的影响,建立 Y 型线开行方案优化模型。此外,王家琦^[11]以端点互通为对象,构建了贯通运营模式下优化发车频率的开行方案编制模型;任飞等^[12]基于备选跨线交路集构建优化模型,以确定 X 型线的跨线交路及开行频率。可以看出,既有研究主要针对单线运营模式下的开行方案编制问题,对跨线互通运营、共线运营等模式下的开行方案研究尚存在不足。本质上跨线互通运营是网络化运营的简化形式。我国铁路一直采用网络化行车组织模式,理论上可借鉴铁路开行方案编制方法,但两者仍存在差异。铁路属于严格的计划型运输方式,利用客流计划、票额分配能有效控制运力运量匹配

关系,基于“长流上长车、优先直达流”等原则易实现客流-车流的合理匹配。而轨道交通乘客具有强自主性,当列车服务与乘客预期出现偏差时易出现“有线无流”情形。互通运营模式下客运产品由同质化向异质化转变,乘客面临多样化列车服务时的选择不确定性增强,导致客流-车流互馈耦合关系十分复杂。因此,有效揭示客流-车流间互馈耦合关系是开行方案编制需解决的关键问题。既有研究中多采用基于规则、Logit 模型、客流分类等简单的客流分配方法予以刻画,并未很好地解决这一问题。此外,互通运营模式下开行方案集(如交路组合)剧增,对模型的运算规模、求解效率提出了很高的要求。

本文紧密围绕互通运营模式下开行方案编制的关键问题,建立满足灵活化与复杂化开行需求的开行方案编制模型,主要特点体现在:①建立基于开行方案的列车服务网络,以有效刻画不同列车的服务属性差异;以列车服务网络为基础,基于乘客出行选择“策略”建立复杂开行方案下的客流分配模型,有效揭示客流-车流间耦合关系;②精细化考虑运力运量匹配关系,既有研究常以区间运力大于需求为硬约束,易出现模型无解情形,本研究将运力运量匹配关系由“区间”细化至“交路”层面,模型目标中总体考虑运力运量的合理匹配,更加符合现实需求;③考虑不同主体决策时的独立性、目标制约性,建立开行方案编制双层规划模型,上层以运营管理者为主体,以运输成本最小化及运力运量匹配最大化为目标;下层以乘客为主体,优化目标为出行费用最小化。相比单层模型,双层模型更能体现不同决策主体的交互影响过程。

0t

0+0t

服务区段重叠见图 1,指多条“运输线路”覆盖同一区段,该“运输线路”并非物理线路而指运输服务线路。该现象在公交领域早已被广泛关注,轨道交通领域尚未得到足够重视。服务区段重叠导致乘客出行选择行为复杂化,本质在于乘客选择由同质化向异质化转变。单线运营模式下开行方案普遍简单,以单一交路或大小交路为主,乘客无需过多考虑列车服务属性的差异,遵循“随到随走、来车即上”的原则。然而,互通运营模式下服务区段重叠问题必然产生,当乘客出行起讫点位于重叠区段时将面临多样化的出行选择方案,导致乘客出行选择过程复杂化。

以图 1 为例:①当乘客起讫点位于子区段内时(区段 1、区段 2),虽然存在多种列车服务(本线车、跨线车),但对乘客而言并无差异,最优出行策略即“来

车即上”;②当乘客起讫点跨区段时,假设乘客由 A 站去往 F 站,乘客既可选择“本线列车+换乘+本线列车”完成出行,也可选择跨线列车直达出行。理论上乘客可在重叠区段内任意车站实现站台换乘,出行策略集快速增加,见图 2。乘客究竟会如何选择? 解决该问题是阐明客流-车流交互关系的关键。

图 1 服务区段重叠示意

图 2 典型出行策略集(A→F)

为刻画列车服务的差异性,构建基于开行方案的列车服务网络,其是后续客流分配的基础。列车服务网络以物理网络为基础,根据开行方案对车站及区间虚拟化,建立虚拟弧刻画乘客上下车、区间出行及换乘走行过程。列车服务网络主要包括乘客上下车节点、列车虚拟停站节点、区间运行弧、上下车弧及走行弧。图 1 对应的列车服务网络见图 3(仅描述单一方向),需要注意的是车站 D 为两线换乘车站,需将其虚拟化为两个独立车站,以刻画站内换乘走行过程。

图 3 列车服务网络

采用有向图描述列车服务网络,每一条弧设定两个属性值:弧长(以时间刻画)及服务频率。) $\hat{A}k(\check{Y}, \hat{U}$ 为列车服务网络: \check{Y} 为节点集合, \forall 为节点索引; \hat{U} 为弧集合, g 为弧索引; h_g 为弧 g 的长度; ϑ_g 为弧 g 上对应的服务频率(用于候车时间计算); \hat{U} 为上车弧集合; \hat{U}_k, \hat{U}_k 分别为节点 \forall 的流出弧集和流入弧集。需要注意的是,候车时间仅存在车站候车过程,因此,仅上车弧设置服务频率参数。不同弧的属性值设置规则如下:

- (1)列车运行弧: h_g 取列车区间运行时间, $\vartheta_g = +\infty$;
 - (2)乘客上车弧: $h_g k 0$, ϑ_g 为关联交路对应的列车服务频率;
 - (3)乘客下车弧: $h_g k 0$, $\vartheta_g k j \infty$;
 - (4)换乘走行弧: h_g 取换乘走行时间, $\vartheta_g k j \infty$ 。
- 列车服务网络的规模与列车交路数呈多项式关系。互通运营模式下列车交路组合方案可达数十种,构建服务网络仍是一项较为困难的工作。列车服务网络构造算法见表 1。) $k(\neg)$ 为物理网络; \neg 为车站集合(含换乘站虚拟站点), \bullet 为车站索引; \neg 为换乘通道集合, $\neg \in$; \hat{a} 为区间索引; \hat{a} 为区间 \hat{a} 的列车运行时间或走行时间;假设开行方案已知, t 为列车交路集, \neg 为交路索引; \neg 为 0-1 变量,交路 \neg 覆盖车站 \neg 为 1,反之为 0; $\neg_{\hat{a}}$ 为 0-1 变量,交路 \neg 覆盖区间 \hat{a} 为 1,反之为 0; \bullet 为交路 \neg 的列车服务频率。

输入:物理网络 \neg ,列车交路集 t
输出:列车服务网络 \hat{A}
1:foreach $\forall \in \neg$
2:new $\forall(\neg) \leftarrow \check{Y}, \check{Y} k \check{Y} U \{ \forall \}$; \hat{N} 生成乘客上下车节点
3:end
4:foreach $\neg \in t$:
5:foreach $\forall \in \neg$
6;if $\neg k 1$ then
7:new $\forall(\neg) \leftarrow \check{Y}, \check{Y} k \check{Y} U \{ \forall \}$; \hat{N} 生成虚拟停站节点
8:new $g \hat{A} k g \rightarrow \forall$), $\vartheta_{\hat{A}} k \bullet_{\hat{A}} h_{\hat{A}} k 0, \hat{U} k \hat{U} \{ g \hat{A}$; \hat{N} 生成上车弧
9: $\hat{U}_k k \hat{U}_k \cup \{ g \hat{A}, \hat{U} k \hat{U} \cup \{ g \hat{A}$;
10:new $g \hat{I} k g \forall(\neg) \rightarrow$), $\vartheta_{\hat{I}} k j \infty, h_{\hat{I}} k 0, \hat{U} k \hat{U} \{ g \hat{I}$; \hat{N} 生成下车弧
11: $\hat{U}_k k \hat{U}_k \cup \{ g \hat{I}, \hat{U} k \hat{U} \cup \{ g \hat{I}$;
12:end
13:foreach $\hat{a} \in \neg$:
14;if $\neg_{\hat{a}} k 1$ then
15:new $g \neg \hat{a} \rightarrow \bullet$, $h_g k \bullet_{\hat{a}} \vartheta_g k j \infty, \hat{U} k \hat{U} \{ g$; \hat{N} 生成运行弧
16: $\hat{U}_k k \hat{U}_k \cup \{ g, \hat{U} k \hat{U} \cup \{ g$;
17:end
18:end
19:foreach $\hat{a} \in \hat{\neg}$:
20:new $g \neg \hat{a} \rightarrow \bullet$, $h_g k \bullet_{\hat{a}} \vartheta_g k j \infty, \hat{U} k \hat{U} \{ g$; \hat{N} 生成换乘弧
21: $\hat{U}_k k \hat{U}_k \cup \{ g, \hat{U} k \hat{U} \cup \{ g$;
22:return \hat{A}

服务区段重叠导致乘客出行选择行为复杂化,科学地描述乘客选择过程是关键。借鉴 Spiess 提出的出行“策略”^[13]来解决这一问题,其能够有效描述服务区段重叠下乘客出行选择过程。既有研究在描述乘客出行选择时常采用“最优路径”概念,即乘客从起终点间多条可行路径中选择广义费用最小的路径。然而,轨道交通乘客往往没有明确的“路径”概念,更多是一种“策略”;尤其是服务区段重叠下有多重方案能够同时满足出行需求时,乘客习惯性选择策略集中优先到

达的第一列列车。因此,将出行“径路”拓展为出行“策略”更加符合现实场景。

需要明确的是,乘客出行选择的根本前提并未发生变化,均是希望做出利于自身的“最优”选择使出行费用最小化。不难理解,乘客的选择与第一列列车到达时间紧密相关,而该时间取决于服务频率。以轨道交通为例,不同列车交路的服务频率决定了乘客在站台的候车时间。因此,有效刻画乘客的候车时间是关键。Spiess 等^[13]在考虑节点费用的前提下,基于网络费用流模型提出单终点客流分配模型。本文在其基础上改进为多终点客流分配模型,见式(1)~式(5)。模型目标为网络流总费用最小化,与一般网络流模型的区别在于增加了节点流费用 λ_{φ}^c , φ 为弧 ϑ 中去往车站 φ 的流量,为模型决策变量。式(2)为节点流入流出平衡约束;式(3)表示当起讫点相同时弧流为零;式(4)为弧流与服务频率、节点费用间约束关系,其是非线性约束转换后的约束,推导过程详见文献[13];式(5)为弧流非负约束。利用该模型即可获取每一段弧的客流量(等价于选择特定交路的客流量)。相比基于规则、Logit 的客流分配模型,该模型不涉及径路搜索,具有易于求解的优势,能够显著改善开行方案编制模型的效率。

$$\min \quad \sum_{\vartheta \in \hat{U}} \sum_{\varphi \in \hat{Y}} h_{\vartheta} \varphi \sum_{\varphi \in \hat{Y}} \sum_{\varphi \neq \varphi} \lambda_{\varphi}^c \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{\vartheta \in \hat{U}} \varphi f_{\vartheta} \sum_{\vartheta \in \hat{U}} \varphi k_{\vartheta} V_{\vartheta} \quad \forall \varphi \in \hat{Y} \quad \varphi \in \hat{Y}, \varphi \neq \varphi \quad (2)$$

$$\sum_{\vartheta \in \hat{U}} \varphi k_{\vartheta} = 0 \quad \forall \varphi \in \hat{Y} \quad (3)$$

$$\varphi \leq \frac{2}{\Delta Y} \lambda_{\varphi}^c \quad \forall \vartheta \in \hat{U} \quad \varphi \in \hat{Y} \quad \varphi \in \hat{Y} \quad (4)$$

$$\varphi \geq 0 \quad \forall \vartheta \in \hat{U} \quad \varphi \in \hat{Y} \quad (5)$$

式中: φ 为车站节点编号; λ_{φ}^c 为节点 φ 去往车站 φ 的乘客对应的候车费用; V_{ϑ} 为车站 ϑ 去往车站 φ 的客流量; ΔY 为研究时段长度,一般取 60 min。

开行方案编制模型框架

开行方案编制是以客流为导向确定车流的过程,两者并非主从关系,而是相互影响、交互耦合。开行方案决定乘客可获取的运输产品类型,进而影响客流分布状态;同时,客流状态反向影响开行方案。从决策主体来看,运营管理者期望采用“最少”的运输成本完成运输任务,而乘客则希望以“最少”的成本获得“最好”的运输服务,两者目标相互制约。

为更好地体现不同决策主体间交互影响过程,本研究采用双层规划模型予以刻画。开行方案编制双层模型框架见图 4。

图 4 开行方案编制模型框架

开行方案包含列车交路、开行频率、停站方案、列车等级、编组方案等基本要素。考虑到大部分轨道交通线路不具备越行条件,本研究暂不考虑停站方案。另外,互通运营线路间车型、编组宜保持一致,以适应不同线路的技术条件。因此,本研究主要围绕列车交路及开行频率两个要素展开。此外,互通运营模式下可行方案集(如交路组合方案)剧增,对模型的求解效率、运算规模提出了很高的要求,借鉴备选交路集的思想来缩减决策空间^[14],以提高模型实用性。

合理假设

做如下合理假设:①研究时段内客流需求(OD)已知,且客流到达较为均匀;②列车上下行成对开行,仅选取重客流方向为依据制定开行方案;③不考虑列车越行,列车采用站站停模式;④满足跨线互通运营所需的技术条件,列车可在线路间双向互跨运行;⑤不考虑混编运行,互通线路间列车编组一致;⑥线路间车底运用采用共用模式,不受车底配属制度限制。

ΔY 为研究时段长度,一般取 1 h; ϑ 为互通线路集合, B 为线路索引; ϑ 为备选列车交路集; l_{ϑ} 为交路 ϑ 的周转距离,km; $\hat{\vartheta}$ 为交路 ϑ 的周转时间,h; φ_{ϑ} 为 0-1 关联系数,交路 ϑ 覆盖服务网络中的弧 ϑ 为 1,否则为 0; \sim_{ϑ} 为 0-1 关联系数,交路 ϑ 途径线路 B 为 1,否则为 0; φ_{ϑ} 为决策变量,开行列车交路 ϑ 为 1,反之为 0;另外,交路 ϑ 的开行频率 φ_{ϑ} 也为决策变量。

模型构建

开行方案制定的首要目标是实现运力供给与运输需求的尽可能匹配。既有研究在刻画运力与需求匹配关系时,普遍采用运力大于最大断面客流量这一硬约束形式^[4,9],然而该方式存在一定不足:①当

需求旺盛时并不能保证运力完全满足需求(如高峰时段),此时模型将无解;②当列车开行多样化后需考虑乘客对不同列车的选择差异性,运力运量匹配关系需从“区间”层面细化至“交路”层面,即运力配置应与选择该交路的客流需求匹配。本研究以列车交路运力配置与选择该交路的客流需求偏差最小化为优化目标

$$\min \sum_{i \in I} k \sum_{j \in \hat{U}^i} (\frac{\bullet}{\bullet} \phi_j \epsilon f + \tau_j)^2 \quad (6)$$

$$\tau_j \leq k \sum_{i \in \hat{U}} \phi_j \quad \forall j \in \hat{U} \quad (7)$$

式中: \hat{U}^i 为运行弧集合; ϵ 为列车定员,人/列; τ_j 为服务网络中运行弧 j 的流量,可通过客流分配获取。

另外,运营企业希望通过较少的运输成本来完成任务,实现运力资源的最大化利用。考虑固定成本在一定时期内保持稳定,常采用列车公里来刻画运输成本,即

$$\min \sum_{i \in I} k \sum_{j \in \hat{U}^i} \frac{\bullet}{\bullet} \div \quad (8)$$

式中: \div 为单位列车公里成本,元/km。

##4.1

(1) 客运服务约束

为避免乘客在站台过长时间的等候,列车需保持最低服务频率。根据 GB/30012—2013《城市轨道交通运营规范》^[15],最长发车间隔不宜超过 10 min。针对线路上的每一车站,限定到达该站的列车间隔不超过 10 min,即

$$\frac{\Delta Y}{\sum_{i \in I} \frac{\bullet}{\bullet}} \leq 10 \quad \forall i \in \hat{I} \quad (9)$$

满载率过高将影响乘客出行舒适度,为此限定区间平均满载率需位于合理范围之内,即

$$\frac{\tau_a}{\sum_{i \in I} \frac{\bullet}{\bullet} \epsilon} \leq \hat{i} \quad \forall a \in \hat{A} \quad (10)$$

式中: τ_a 为区间断面量,可利用客流 OD 矩阵直接推算(不涉及路径选择),或者将区间关联的运行弧流量累计得到; \hat{i} 为最大允许的区间平均满载率,一般不超过 130%。

列车开行种类过多时易产生乘客坐错车的问题。为提高乘客出行便捷性、降低站台客流组织难度,对途经车站的列车交路数予以限制

$$\sum_{i \in I} \frac{\bullet}{\bullet} \leq \check{Y}^{\max} \quad \forall i \in \hat{I} \quad (11)$$

式中: \check{Y}^{\max} 为最大列车交路数,根据运营组织经验 \check{Y}^{\max} 不宜超过 4 条(视线路长度而定)。

(2) 通过能力约束

受信号系统及基础设施设备能力限制,列车开行对数需小于通过能力。考虑互通运营模式下不同线路通过能力可能存在差异,需对每一区间的通过能力单独考虑。正线区间通过能力约束为

$$\sum_{i \in I} \frac{\bullet}{\bullet} \epsilon_a \leq \check{Y}_a^{\max} \cdot Y \quad \forall a \in \hat{A} \quad (12)$$

式中: \check{Y}_a^{\max} 为区间最大通过能力,对/h。

折返能力往往是线路通过能力的瓶颈。 p_i 刻画交路 i 与车站 j (假定为折返站)的关联关系,当 $p_i = 1$ 时表示交路 i 的列车在车站 j 折返。在确定备选交路集时可快速建立该关联关系。折返能力约束为

$$\sum_{i \in I} \frac{\bullet}{\bullet} p_i \leq \check{Y}^{\max} \Delta Y \quad \forall j \in \hat{J} \quad (13)$$

式中: \hat{J} 为折返站集合; \check{Y}^{\max} 为车站 j 的单位折返能力,对/h。

列车需经过联络线实现跨线运行,联络线的通过能力一般低于正线区间通过能力。联络线通过能力约束为

$$\sum_{i \in I} \frac{\bullet}{\bullet} \epsilon_a \leq \check{Y}_a^{\max} \Delta Y \quad \forall a \in \hat{A} \quad (14)$$

式中: \hat{A} 为联络线对应的区间集合。

(3) 移动运力资源约束

假定互通运营模式下不同线路间车底可共享,不区分车底配属关系。根据交路周转时间、发车对数即可估算车底需要数。为保障列车顺利开行,运用车底数不应超过配备车底数

$$\sum_{i \in I} \frac{\bullet}{\bullet} \frac{\hat{o}_i}{\Delta Y} \leq E \quad (15)$$

式中: E 为配备车底数,组。

(4) 行车组织复杂性约束

一般而言,开行列车的交路数不宜过多,考量因素包括:①降低行车调度工作难度、提高行车组织稳定性;②降低通过能力损失,交路越多能力损失越大。对互通运营中每一条线路的列车交路数进行限制

$$\sum_{i \in I} \frac{\bullet}{\bullet} \leq \check{Y}_B^{\max} \quad \forall B \in \hat{B} \quad (16)$$

式中: \check{Y}_B^{\max} 为线路 B 允许开行的最大交路数,中短长度线路一般不超过 3 条,长大线路可适当放宽。

(5) 其他约束

$$\frac{\bullet}{\bullet} \geq 0 \text{ 且 } \frac{\bullet}{\bullet} \text{ 为整数} \quad \forall i \in \hat{I} \quad (17)$$

##4.2

结合前述客流分配模型,即可构建完整的开行方案编制双层规划模型

$$\begin{aligned}
 \min_2 \quad & k \sum_{g \in \hat{U}} \sum_{q \in \hat{U}} \left(\frac{\bullet_9}{\bullet_9} \epsilon f_{\bullet_9} \right)^2 \\
 \min_3 \quad & k \sum_{g \in \hat{U}} \frac{\bullet_1}{\bullet_1} \frac{\bullet_2}{\bullet_2} \\
 & \begin{cases} \bullet_9 k \sum_{q \in \hat{Y}} \bullet_9 & \forall g \in \hat{U} \\ \text{式(9) ~ 式(17)} \end{cases} \quad (18) \\
 \min_1 \quad & k \sum_{g \in \hat{U}} \sum_{q \in \hat{Y}} b_g \bullet_9 j \sum_{g \in \hat{Y}} \sum_{q \in \hat{Y}} \backslash \frac{c}{\bullet_9} \\
 & \begin{cases} \bullet_9 = \begin{cases} \frac{\bullet_9}{\bullet_9} & \forall g \in \hat{U} \\ +\infty & \text{其他} \end{cases} \\ \text{式(2) ~ 式(5)} \end{cases} \quad (19)
 \end{aligned}$$

其中,上层模型目标为列车交路运力运量偏差最小化、运输成本最小化,决策变量为 \bullet_9 及对应的服务频率 \bullet_2 ;下层模型目标为网络流费用(即出行成本)最小化,决策变量为弧流 \bullet_9 。上层规划中客流量 \bullet_9 由下层客流分配模型获得,下层规划中弧的服务概率 \bullet_9 由上层开行对数 \bullet_1 确定,以此建立上下层模

型间交互过程,进而有效刻画客流-车流间复杂的反馈耦合关系。

#+ ‡

模型上层为多目标非线性整数规划,可通过理想点法转化为单目标问题。理想点法是一种求解多目标决策的有效方法。首先分别以单目标求得最优目标值,再同时考虑多个目标与“理想值”的偏差。上层模型的目标函数可转化为

$$\min_4 \quad k \left(\frac{f_2^*}{2} \right)^2 + \left(\frac{f_3^*}{3} \right)^2 \quad (20)$$

式中: f_2^* 、 f_3^* 分别为单目标下求得的最优目标函数值。

模型下层为线性规划模型,易于求解且求解效率高。结合模型特点设计循环迭代求解算法,见图 5。其中上层采用遗传算法求解,得出特定开行方案后传递给下层;下层客流分配模型调用 Lingo 进行求解,获取弧流后反馈给上层,进一步对开行方案优化。通过上下层的循环迭代即可完成模型求解。

图 5 算法流程

ú†

ú+Ó†

选取北京地铁昌平线与 8 号线(简称昌-8 线)进行实证分析,验证所提出方法的有效性、准确性。昌-8 线在朱辛庄站同台换乘,两线跨线互通运营改造正在实

施。昌-8 线车站分布见图 6,共计 29 座车站,按照下行方向依次对车站及区间顺序编号。昌平线客流具有明显的潮汐特征,早高峰大量乘客换乘至 8 号线进入市区,跨线流占比超过 50%,适宜开行跨线列车。考虑疫情期间客流量明显降低,本案例以 2019 年某工作日早高峰(7:00—8:00)客流数据为输入进行分析。

图 6 昌-8 线车站分布图

昌-8 线区间长度及列车运行时间见表 2。昌-8 线折返站共计 9 座,其中朱辛庄为双向折返,根据折返线布设形式,理论可开行交路数为 14 条。去除折角交路和开行里程过短的交路,筛出 12 条交路作为本案例的备选交路集,见表 3。研究时段长度 ΔY 为 1 h,列车定员 \acute{e} 为 1 416 人/列,均为 6B 型车,昌平线、8 号线对应区间的通过能力 $\ddot{Y}_{\acute{a}}^{\max}$ 分别为 24 列/h、30 列/h,配备车底总数 E 取 70 组,单位列车公里成本 \div 取 100 元/km。考虑基础数据过于庞大,在此不再详尽罗列,均与昌-8 线实际情况保持一致。

区间长度及运行时间			区间长度及运行时间		
区间编号	里程/m	运行时间/s	区间编号	里程/m	运行时间/s
1	1 213	99	15	1 115	101
2	3 527	211	16	1 895	142
3	2 433	145	17	1 543	120
4	1 683	115	18	1 042	92
5	1 959	148	19	2 553	173
6	5 357	275	20	2 558	172
7	1 965	142	21	1 017	97
8	2 026	140	22	1 667	129
9	3 799	225	23	900	89
10	2 368	160	24	1 009	94
11	5 441	315	25	1 275	113
12	2 319	164	26	1 084	100
13	1 986	141	27	1 188	107
14	2 017	154	28	902	91

交路信息			
交路编号	交路起讫点	周转时间/min	周转距离/km
1	1↔10	62.58	47.92
2	1↔12	80.67	63.54
3	4↔10	44.92	33.56
4	4↔12	63	49.2
5	7↔12	42.23	31.2
6	10↔29	92.68	52.14
7	15↔29	74.27	39.5
8	19↔29	54.3	28.31
9	21↔29	40.87	18.08
10	1↔29	151.52	100.06
11	4↔29	133.85	85.72
12	7↔29	113.08	67.72

图 7 优化开行方案

在运行环境为 Inter (R) Core (TM) i7-11700 @ 2.50 GHz,16 GB 内存的计算机上,采用 Matlab 编制遗传算法对上层模型求解,下层模型调用 Lingo 求解。上层列车开行方案模型求解时种群规模设置为 20,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.05。优化开行方案见图 7,共开行 4 个列车交路,分别为昌平西山口—西二旗(16 对/h)、朱辛庄—南锣鼓巷(15 对/h)、回龙观东大街—南锣鼓巷(5 对/h)和沙河高教园—南锣鼓巷(8 对/h)。2019 年昌平线与 8 号线的实际列车开行方案见图 8。

图 7 优化开行方案

(1)与独立运营对比分析

优化方案与实际方案对比见表 4,可以看出:①优化方案中运用车数由 69 组下降为 66 组,运力资源利用率更高;②优化后运力运量间偏差降低 27.12 ,同时运输成本也有所降低,表明通过方案

优化不仅能够降低运输成本,而且能提高运力与运量间匹配度;③乘客出行总费用略微增加 0.53 ,原因在于开行对数减少导致乘客候车时间增加,且朱辛庄为同台换乘,单线模式下乘客本身的换乘时间小。

图 8 列车昌平线与 8 号线实际列车开行方案

表 1				
方案	运用车 数量/组	运输成 本/元	运力运量 偏差/人	乘客出行 总费用/min
优化方案	66	253 660	65 146	1 711 960
实际方案	69	266 530	89 394	1 702 954
变化率/	-4. 35	-4. 83	-27. 12	0. 53

不同方案下的运力运量匹配情况见图 9,图 9(a)为运力与运量直接匹配情况,图 9(b)为转化后的区间平均满载率。可以看出:①昌-8 线早高峰客流特征与典型市郊线一致,由郊区向市区逐步增大,实际方案在区间 $\bar{a} \sim \bar{b}$ 存在明显的运力浪费,优化方案使区间 $\bar{a} \sim \bar{b}$ 输送能力更匹配客流需求,同时降低区间 $\bar{a} \sim \bar{b}$ 的能力浪费;②8 号线部分区间客流过于旺盛,超出最大运力供给,此时单从运力供给优化角度无法满足客流需求,需结合客流组织手段(如限流);③从满载率来看,优化后的满载率更为均衡,有效缓解了区间 $\bar{a} \sim \bar{b}$ 满载率过高的问题。

(2)交路数敏感性分析

实践中对开行交路数的合理范围一直存在争议。一般而言,交路数少则行车组织过程简单、稳定性高,但同时难以实现运力运量的有效匹配;交路数多易于

图 9 运力运量匹配情况

匹配运输需求,但行车组织难度增大。在此,以昌-8 线为背景,假设交路数可在 2~5 之间变化,分析不同交路数对开行方案和满载率的影响。不同交路数下的优化开行方案对比结果见表 5。

表 5								
交路数	运用车数/组	变化率/	运输成本/元	变化率/	运力运量偏差/人	变化率/	乘客总费用/min	变化率/
2	69	—	266 530	—	89 394	—	1 702 954	—
3	69	—	260 800	-2. 15	73 497	-17. 78	1 708 109	0. 30
4	66	-4. 35	253 660	-4. 83	65 146	-27. 12	1 711 960	0. 53
5	70	1. 45	272 860	2. 37	64 549	-27. 79	1 706 144	0. 19

可以看出:①当交路数为 2 时,即独立运营模式下的单交路方案,此时运输成本高、运力运量匹配度低;②当交路数为 3 时,相比 2 条交路,运输成本降幅 2. 15 ,运力运量偏差降幅 17. 78 ,表明在昌-8 线客流需求分布结构下开行跨线交路是适宜的,能有效达到降本增效的目标;③当交路数为 4 时,相比 3 条交路,运力运量偏差降幅明显,运输成本进一步降低;④当交路数为 5 时,相比 4 条交路,运输成本增加 7. 57 ,运力运量匹配度差别较小,虽然乘客总费用有

所降低,但运输成本增幅较大。总体而言,随着交路数的增多,运力运量匹配性提高,但可能导致运输成本增加。针对昌-8 线线站布局条件及客流特征,其在跨线互通运营模式下开行交路的合理范围为 3~4 条。

1.4

(1)本文针对互通运营模式下开行方案编制复杂化问题,建立了开行方案编制双层规划模型;该模型能够有效刻画不同决策主体间内在交互影响过程,且将

运力运量匹配关系细化至交路层面,更加符合现实需求;模型易于求解,具有良好的实用性和推广价值。

(2)以北京地铁昌-8线为对象进行实证研究,验证了模型与算法的有效性。与实际单线行车组织方案对比,认为互通运营组织能够有效降低运输成本,提高运力供给与客运需求的匹配度;通过对开行交路数的敏感度分析,明确了昌-8线适宜开行的交路数。

(3)本研究仅对高峰时段列车开行方案编制问题进行了研究,未考虑不同时段间方案的衔接问题,后续将进一步研究全日开行方案一体化编制问题。

Ä

- [1] 重庆市轨道交通(集团)有限公司. 重庆轨道交通互联互通CBTC系统的示范应用[J]. 城市轨道交通,2018(4):26-29.
Chongqing Rail Transit(Group) Co., Ltd. Demonstration Application of Chongqing Rail Transit Interconnection CBTC System[J]. China Metros,2018(4):26-29.
- [2] 于剑,张星臣,许璐. 轨道交通开行方案优化模型研究综述[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2016,40(1):195-200.
YU Jian,ZHANG Xingchen,XU Lu. Review on the Optimization Models of the Train Line Plan in Rail Transport[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering),2016,40(1):195-200.
- [3] 代存杰,李引珍,展宗思,等. 考虑动态客流需求和大小交路模式的城市轨道交通列车开行方案优化[J]. 中国铁道科学,2018,39(2):128-136.
DAI Cunjie,LI Yinzhen,ZHAN Zongsi,et al. Optimization of Train Operation Scheme for Urban Rail Transit Considering Dynamic Passenger Demand and Full-length & Short-turn Routing Modes[J]. China Railway Science,2018,39(2):128-136.
- [4] 许得杰,毛保华,雷莲桂. 城市轨道交通大小交路列车开行方案优化研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2017,17(1):120-126.
XU Dejie,MAO Baohua,LEI Liangui. Optimization for Train Plan of Full-length and Short-turn Routing in Urban Rail Transit[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2017,17(1):120-126.
- [5] 王媛媛,倪少权. 城市轨道交通大小交路模式列车开行方案的优化[J]. 铁道学报,2013,35(7):1-8.
WANG Yuanyuan,NI Shaoquan. Optimization of Train Schedules of Full-length & Short-turn Operation Modes in Urban Rail Transit[J]. Journal of the China Railway Society,2013,35(7):1-8.
- [6] 杨薛臣,丁小兵,刘志钢. 城市轨道交通市郊线快慢车开行比例优化研究[J]. 城市轨道交通研究,2019,22(8):98-102.
YANG Xuechen,DING Xiaobing,LIU Zhigang. Optimization of Suburban Speed-to-slow Train Proportion Based on Passenger Flow[J]. Urban Mass Transit,2019,22(8):98-102.
- [7] 黄秋瑜,赵源,丁小兵,等. 基于市域轨道交通线路客流分布的快慢车开行比例方案[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(1):101-105.

- HUANG Qiuyu,ZHAO Yuan,DING Xiaobing,et al. Proportion of Fast and Slow Trains Based on Passenger Flow Distribution on Urban Rail Transit Lines[J]. Urban Mass Transit,2020,23(1):101-105.
- [8] 谭丽,韦子文. 基于CCLPSO算法的Y型交路列车开行方案优化研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(8):2122-2129.
TAN Li,WEI Ziwen. Optimization Research of Train Schedule of Y-type Train Routing Mode Based on CCLPSO Algorithm[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2019,16(8):2122-2129.
- [9] 郭建民,韩林飞,周建国,等. Y形共线模式下轨道交通列车开行方案研究[J]. 铁道工程学报,2017,34(2):87-92.
GUO Jianmin,HAN Linfei,ZHOU Jianguo,et al. Research on the Operation Scheme for Rail Transit with the Y-Shaped Col-linear Mode[J]. Journal of Railway Engineering Society,2017,34(2):87-92.
- [10] 杨安安,汪波,陈艳艳,等. 基于能力影响的城市轨道交通跨线列车开行方案研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2017,17(6):221-227.
YANG Anan,WANG Bo,CHEN Yanyan,et al. Plan of Cross-line Train in Urban Rail Transit Based on the Capacity Influence[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2017,17(6):221-227.
- [11] 王家琦. 城市轨道交通共线运营实施条件及运行方案研究[D]. 北京:北京交通大学,2015.
WANG Jiaqi. Study on the Implementation Conditions and Operation Plan for Joint Operation Mode of Urban Rail Transit[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2015.
- [12] 任飞,王伟,李腾,等. 基于互联互通的城轨网络化运营行车交路策略研究[J]. 铁路计算机应用,2016,25(5):10-13,18.
REN Fei,WANG Wei,LI Teng,et al. Strategy of Traffic Routing of Network Operation for Urban Transit Based on Inter-connection[J]. Railway Computer Application,2016,25(5):10-13,18.
- [13] SPIESS H,FLORIAN M. Optimal Strategies:a New Assignment Model for Transit Networks[J]. Transportation Research Part B:Methodological,1989,23(2):83-102.
- [14] 付慧伶,聂磊,杨浩,等. 基于备选集的高速铁路列车开行方案优化方法研究[J]. 铁道学报,2010,32(6):1-8.
FU Huiling,NIE Lei,YANG Hao,et al. Research on the Method for Optimization of Candidate-train-set Based Train Operation Plans for High-speed Railways[J]. Journal of the China Railway Society,2010,32(6):1-8.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 城市轨道交通运营管理规范:GB/T 30012—2013[S]. 北京:中国标准出版社,2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China,Standardization Administration of the People's Republic of China. Urban Rail Transit Operation Management Specification:GB/T 30012—2013[S]. Beijing:Standards Press of China,2014.

(责任编辑 张航)