

城市轨道交通组合交路优化设置模型

徐文恺, 赵鹏, 姚向明

(北京交通大学交通运输学院, 北京 100044)

摘要: 针对城市轨道交通线路组合交路设置问题, 分析交路设置影响因素, 构建组合交路设置多目标整数规划模型。以北京市轨道交通某线路为对象进行案例分析, 对比当前交路方案, 模型求解的组合交路方案使线路各区间输送能力与客流需求的平均匹配程度提高 7%, 使用车底数减少 42 辆, 降低比例达 9.86%; 车底走行公里减少 1910 千米, 降低比例达 13.39%, 从而验证了模型的有效性和准确性。该方法能够为城市轨道交通线路组合交路方案设置提供决策依据。

关键词: 城市轨道交通; 组合交路设置; 多目标整数规划; 列车运行交路

中图分类号: U239.5

An Optimization Model of Combined Routing Setting for Urban Rail Transit

XU Wenkai, ZHAO peng, YAO Xiangming

(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: Aiming at the problem of combined routing setting of urban rail transit, analyzing the influencing factors of routing setting, constructing a multi-objective integer programming model for combined routing setting. Taking a line of Beijing Rail Transit as object and making case analysis. Compared to the current routing scheme, the combined routing scheme increased 7% of the matching degree between transportation capacity and passenger flow demand, reduced 42 vehicles, 9.86% of rolling stock, decreased 1910 km, 13.39% of running kilometers, and approving the effectiveness and accuracy of the model. This method can provide decision basis for combined routing setting of urban rail transit lines.

Key words: Urban Rail Transit; Combined Routing Setting; Multi-objective Integer Programming; Train Running Routing

0 引言

城市轨道交通网络化运营条件下, 客流规模不断增大、客流时空分布不均衡性更加明显。目前, 我国大多数城市轨道交通线路采用单一交路形式, 难以满足复杂多变的乘客出行需求。为此, 本文在分析列车运行交路(以下简称交路)影响因素的基础上, 利用数学规划方法构建组合交路设置模型, 为编制交路方案提供决策依据。

组合交路是指两种及以上交路形式的组合, 其能够有效提高运输能力与客流需求间协调匹配程度, 降低运营成本。针对交路设置问题许多学者进行了深入研究, Chang Y H 等以企业运营成本和旅客总等待时间最小为目标, 建立了周期化运行条件下高速列车开行方案的多目标整数规划模型^[1]; 田福生等建立了最大程度满足客流需求的最优车底配置模型^[2]; 骆进在降低运营成本、提高客运服务质量基础上, 根据广州地铁 4 号线的特点, 提出两种交路方案^[3]; 李素莹等指出上海轨道交通 1 号线采取大小交路运营方案, 阐述了 1 号线的运营调整措施和客运组织措施^[4]; 徐瑞华、王粉线等提出了市域轨道交通线路运输组织的基本原则,

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51478036); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (20120009110016)

作者简介: 徐文恺 (1992 年-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 轨道交通规划与管理

通信联系人: 赵鹏 (1967-), 男, 教授, 主要研究方向: 交通运输规划与管理. E-mail: pzhaoh@bjtu.edu.cn

研究市域线可能的列车运行交路形式^[5,6]。

综上所述,目前对单一交路形式的研究已较为成熟,对特殊线路交路形式的研究也取得了一定的成果,然而,对组合交路的研究尚未形成成熟的理论和方法。本文通过分析客流分布特征、折返线布置形式、运营成本、服务水平以及列车编组等交路设置影响因素,从能力与需求平衡和运营成本的角度出发,以输送能力与客流需求匹配度最大化、车底总走行公里最小化为目标函数,并考虑列车满载率、使用车底数、覆盖同一区间交路数以及列车发车间隔等约束条件,构建多目标整数规划模型,解决线路组合交路设置问题。

1 交路设置影响因素

交路设置应以线路区间客流特征、行车组织条件以及客运组织条件为基础。交路设置影响因素主要包括客流分布特征、折返线布置形式、运营成本、乘客服务水平、列车编组等。

1.1 客流分布特征

符合客流分布特征是交路设置方案制定的前提条件。一般而言,城市轨道交通线路各区间客流分布不均衡程度越大,进行组合交路设置的必要性越大。线路客流分布的不均衡程度可以由客流分布特征予以体现,主要分为时间分布特征和空间分布特征两个方面。

(1)时间分布特征

受线路沿线土地利用、乘客出行规律等因素影响,进出站客流分布形态在各个时段不完全相同,一般包含单向峰型(a)、双向峰型(b)、全峰型(c)、无峰型(d)和突峰型(e)等五种类型,见图1。

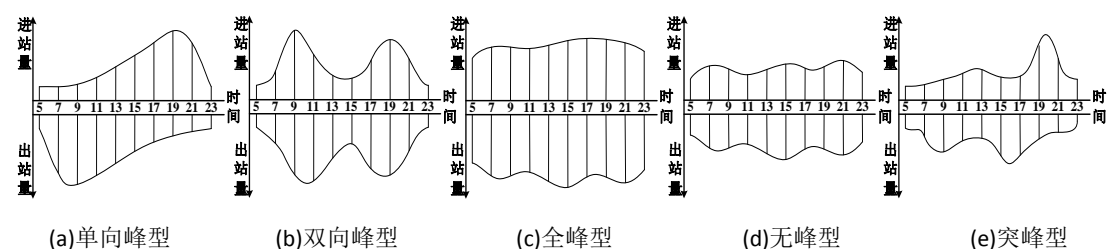


图1 车站进出站客流分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of passenger flow in and out of station

(2)空间分布特征

客流空间分布特征主要是指线路单方向的断面客流分布规律,一般包含凸字型(a)、凹字型(b)、平稳型(c)、渐变型(d)以及不规则型(e)等五种类型,见图2。

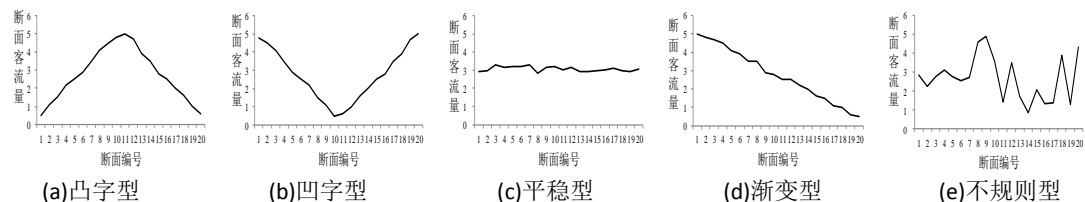


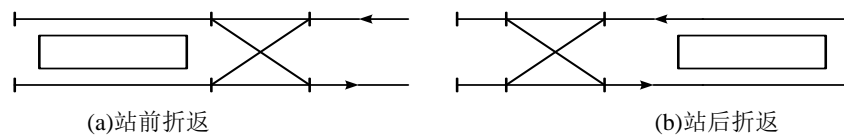
图2 断面客流分布特征

Fig.2 Distribution characteristics of section passenger flow

1.2 折返线布置形式

列车通过车站的调车进路由一条线路至另一条线路称为列车折返,具备列车折返能力的车站称为折返站。折返站折返能力是指单位小时内能够折返的最大列车数,由折返站的最小折返时间决定。折返线布置形式是影响折返能力的主要因素,主要分为站前折返(a)和站后

折返(b), 见图 3。



(a)站前折返

(b)站后折返

图 3 站前折返和站后折返示意图

Fig.3 Schematic diagram of turn-back in front of and behind station

1.3 运营成本

在符合客流规律的前提下, 相比单一交路, 组合交路能够有效提高列车满载率、加快车底周转, 同时减少使用车底数、列车走行公里以及对轮对和钢轨等的磨耗, 从而降低运营成本。但是, 组合交路的设置需要在线路中间设置折返站, 从而增加基础设施建设投资、设备购置成本以及日常运营维护费用。在既有线路基础设施条件下, 当线路客流不均衡程度较大时, 通过设置组合交路可以显著减少列车车底数及运营成本。

1.4 服务水平

当线路断面客流分布不均衡程度较大时, 单一交路设置形式会使列车在部分区间运能虚糜, 而部分区间满载率过高。相比而言, 组合交路能够有效分配线路运力资源, 协调匹配客流需求, 提高运输服务水平, 但同时也存在部分乘客需要换乘才能到达目的地, 增加了乘客的行程时间。因此, 乘客服务水平也是影响交路设置的重要因素。

1.5 列车编组

组合交路运营组织可与列车编组相结合, 采用可变编组或多编组形式, 即不同交路采用不同的列车编组方案。例如, 采用大小交路运营时, 大交路列车采用大编组方案, 而小交路列车则采用小编组方案。

2 组合交路设置优化模型

在线路基础设施固定的情况下, 以既有折返设施、信号设备、断面客流量等为基础, 分析组合交路设置问题, 因此, 所构建模型不考虑折返线、信号设备等基础设施的建设及改造成本。

为简化问题, 作以下基本假设:

(1)研究对象为直线型线路, 即不包括环线以及带有支线的线路;

(2)将线路上所有乘客的出行过程视为“进站→乘车→出站”三个阶段, 对于换乘站的换入客流视为进站客流, 换出客流视为出站客流;

(3)线路除线路两端的尽端式折返站外, 其余中间折返站均为贯通式折返站, 即可以实现双向折返。

定义城市轨道交通线路为 $L = (S, R)$ 。其中 S 为车站集合, $S = \{1, 2, \dots, s, \dots\}$; R 为区间集合, $R = \{1, 2, \dots, r, \dots\}$ 。在以上假设的基础上, 若线路共有 n 个折返站(包括线路两端的折返站), 则该线路共有 C_n^2 条可行交路, 设线路可行交路集合为 $K = \{1, 2, \dots, k, \dots\}$ 。

2.1 模型构建

组合交路设置的目的是使线路上各区间输送能力与客流需求尽可能匹配, 即实现能力与需求的供需平衡, 同时降低运营成本。因此, 本文从供需平衡和运营成本出发, 以输送能力

与客流需求匹配程度最大化和车底总走行公里最小化为模型目标。

(1) 输送能力与客流需求的匹配程度最大化

110 区间输送能力与客流需求的匹配程度采用两者间比值表示, 模型目标表示为:

$$\max \sum_{r=1}^R \frac{V_r}{C_r} \quad \forall r \in R \quad (1)$$

式中: C_r 为区间 r 的输送能力, 见式(2); V_r 为区间 r 的客流需求量, 即断面客流量。

$$C_r = P \times \sum_{k=1}^K f_k \times X_k \times Y_r^k \quad \forall r \in R, \forall k \in K \quad (2)$$

式中: P 为列车定员(人/列); f_k 为交路 k 上的列车发车频率(对/小时); X_k 为 0-1 变量, 当

115 交路 k 使用时为 1, 否则为 0; Y_r^k 为 0-1 变量, 当交路 k 包含区间 r 时为 1, 否则为 0。

(2) 车底总走行公里最小化

从运营管理的角度出发, 在满足客流需求的前提下需降低运营成本, 在此, 选择车底总走行公里最小化作为模型的第二个目标, 即:

$$\min 2 \times M \times \sum_{k=1}^K L_k \times f_k \times X_k \quad \forall k \in K \quad (3)$$

120 式中: L_k 为交路 k 的长度(km); M 为列车编组数(节/列)。

根据城市轨道交通运营的实际情况, 模型考虑的约束条件如下:

(1) 列车满载率约束, 出于安全角度考虑, 列车满载率需控制在一定范围内。

$$\frac{V_r}{C_r} \leq \alpha_{\max} \quad \forall r \in R \quad (4)$$

式中: α_{\max} 为设定的列车满载率上限, 根据线路实际情况进行确定, 一般取 1.2-1.4。

125 (2) 使用车底数约束, 从降低运营成本的角度出发, 使用车底数应限制在一定范围内。

$$M \times \sum_{k=1}^K \left\lceil \frac{f_k \times T_k \times X_k}{60} \right\rceil \leq N_{\max} \quad \forall k \in K \quad (5)$$

式中: T_k 为交路 k 的车底周转时间(分钟); $\lceil \rceil$ 代表向上取整; N_{\max} 代表线路最大的使用车底数。

(3) 覆盖同一区间交路数约束, 覆盖同一区间交路数过多会增加运营组织困难, 易导致乘客乘车选择错误, 因此, 需对区间内交路数进行约束。

130

$$\sum_{k=1}^K X_k \times Y_r^k \leq z_{\max} \quad \forall r \in R, \forall k \in K \quad (6)$$

式中: z_{\max} 代表覆盖同一区间的最大交路数, 在实际情况中一般取 3 或 4。

(4) 列车发车时间间隔约束, 受车站通过能力以及相关规定的限制, 列车发车时间间隔应满足能力约束。

$$135 \quad \frac{3600}{t_{\max}} \leq \sum_{k=1}^K f_k \times X_k \times Y_r^k \leq \frac{3600}{t_{\min}} \quad \forall r \in R, \forall k \in K \quad (7)$$

式中: t_{\max} 为线路最大发车时间间隔(秒); t_{\min} 为线路最小发车时间间隔(秒)。

(5) 模型变量非负整数约束。

$$f_k \in N_+ \text{ 或 } f_k = 0 \quad \forall k \in K \quad (8)$$

2.2 优化模型

综上所述, 本文构建了一个以各交路列车发车频率为决策变量的组合交路设置模型, 如下所示:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{r=1}^R \frac{V_r}{C_r} \quad \forall r \in R \\ & \min 2 \times M \times \sum_{k=1}^K L_k \times f_k \times X_k \quad \forall k \in K \\ \text{s.t. } & \frac{V_r}{C_r} \leq \alpha_{\max} \quad \forall r \in R \\ & M \times \sum_{k=1}^K \left\lceil \frac{f_k \times T_k \times X_k}{60} \right\rceil \leq N_{\max} \quad \forall k \in K \\ & \sum_{k=1}^K X_k \times Y_r^k \leq z_{\max} \quad \forall r \in R, \forall k \in K \\ & \frac{3600}{t_{\max}} \leq \sum_{k=1}^K f_k \times X_k \times Y_r^k \leq \frac{3600}{t_{\min}} \quad \forall r \in R, \forall k \in K \\ & f_k \in N_+ \text{ 或 } f_k = 0 \quad \forall k \in K \end{aligned}$$

本模型为多目标整数规划模型, 首先采用极小化的方法将两个目标函数无量纲化, 然后通过添加目标重要度系数 (λ_1, λ_2) 的方法将双目标规划模型转化为单目标规划模型, 将模型转化为单目标规划模型后即可通过 Lingo 软件求解。

3 案例分析

以北京市轨道交通某线路作为案例对象, 通过调查其高峰小时断面客流量、线路站间距、列车运行时间等基本数据以及折返站设置情况, 运用所构建的交路设置模型分析其高峰小时内最优的交路设置方案。

3.1 基本信息

线路全长约 50km, 共设 35 座车站, 见图 4。其中编号为 1 和 35 的车站为两端的折返站, 编号为 6 和 25 的车站为线路中间的贯通式折返站。基于线路折返条件, 可行交路共有 6 条(编号为 k1,k2,k3,k4,k5,k6), 见图 5。

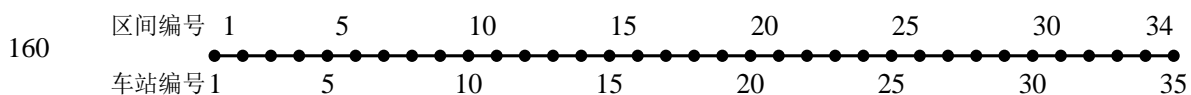


图 4 线路车站、区间示意图

Fig.4 Schematic diagram of stations and sections

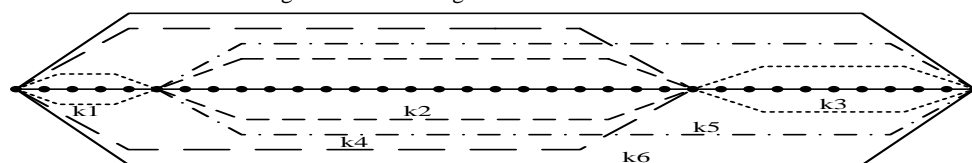


图 5 线路可行交路示意图

Fig.5 Schematic diagram of possible routings

根据案例线路相关运营资料，线路主要客流方向上的区间断面客流量见图 6。

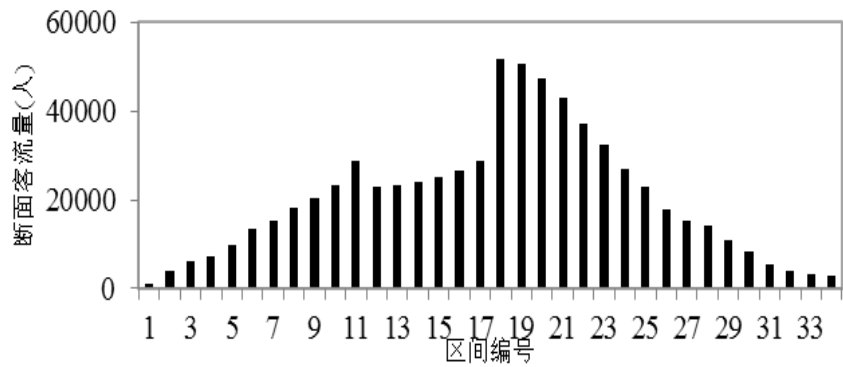


图 6 线路高峰小时断面客流量

Fig.6 Section passenger flow of peak-hours

图 6 可以看出，案例线路存在明显的客流高峰，客流不均衡系数约为 2.53，客流不均衡程度较高，适于组合交路的设置。

通过统计线路站间距及列车运行时间等信息，计算线路可行交路的长度(忽略折返线长度)及列车周转时间(假设列车折返时间为 3 分钟)，见表 1。

表 1 线路可行交路长度及周转时间

Tab.1 Length and turnaround time of possible routings

交路编号	k1	k2	k3	k4	k5	k6
长度(km)	6.632	23.966	19.370	30.598	43.336	49.968
周转时间(min)	26	94	60	114	148	168

模型计算所需的相关参数设置见表 2。

表 2 模型参数设置

Tab.2 Model parameters setting

基础参数	参数取值
列车满载率上限 α_{\max}	$\alpha_{\max}=1.2$
列车定员 P	6 节编组 B 型车 P=1440 人/列
发车间隔	$t_{\max}=600$ 秒, $t_{\min}=120$ 秒
列车折返时间	3min
覆盖同一区间交路数上限 r_{\max}	$r_{\max}=3$
目标重要度系数 λ_1, λ_2	$\lambda_1=\lambda_2=0.5$

3.2 结果分析

通过 Lingo 软件编程求解，结果如下所示：

所采用的交路线路为 k1, k2, k5。组合交路设置方案见图 7。

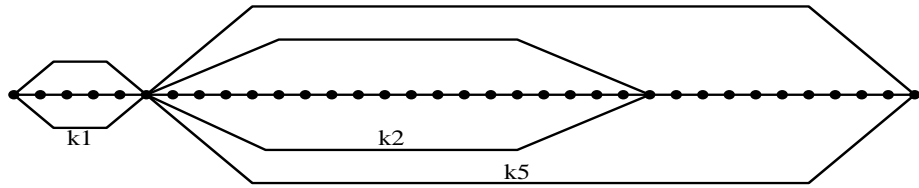


图 7 线路高峰小时交路设置方案

Fig.7 Routing setting scheme in peak-hours

$f_1=6, f_2=16, f_5=14$ ，即案例线路在高峰小时列车开行对数见表 2。

表 3 线路高峰小时列车开行对数
Tab.3 Pairs of trains in peak-hours

交路编号	列车开行对数
k1	6
k2	16
k5	14

目前, 案例线路高峰小时采用大小交路的交路方案, 小交路列车的运行区间为 1 号车站至 25 号车站。根据上述断面客流量数据, 则案例线路高峰小时需开行大交路列车 14 对, 小交路列车 16 对。本文选择输送能力与客流需求匹配程度、使用车底数指标以及车底走行公里指标等 3 个指标来比较大小交路方案和组合交路方案。

(1) 输送能力与客流需求匹配程度

分别计算案例线路在大小交路方案和组合交路方案情况下, 线路高峰小时各区间匹配程度, 其最大值、最小值、平均值见表 4。

表 4 匹配程度

Tab.4 Matching degree

交路方案	最大值	最小值	平均值
大小交路	100%	2%	46%
组合交路	100%	12%	53%

通过以上数据对比得知, 在断面客流量最大的区间, 两方案的匹配程度相同, 而在断面客流量最小的区间, 相对于大小交路方案, 组合交路方案匹配程度提高了 10%, 平均匹配程度提高了 7%, 结果表明, 组合交路方案输送能力与客流需求匹配程度更高。

(2) 使用车底数

大小交路方案高峰小时使用车底数为:

$$N = 6 \times \left(\left\lceil \frac{16 \times 114}{60} \right\rceil + \left\lceil \frac{14 \times 168}{60} \right\rceil \right) = 426 \text{ 辆};$$

组合交路方案高峰小时使用车底数为:

$$N = 6 \times \left(\left\lceil \frac{6 \times 26}{60} \right\rceil + \left\lceil \frac{16 \times 94}{60} \right\rceil + \left\lceil \frac{14 \times 168}{60} \right\rceil \right) = 384 \text{ 辆};$$

组合交路方案比大小交路方案共减少车底数 42 辆, 降低比例约为 9.86%。

(3) 车底走行公里

大小交路方案高峰小时车底走行公里为:

$$L = 2 \times 6 \times (16 \times 30598 + 14 \times 49968) = 14269440 \text{ 米};$$

组合交路方案高峰小时车底走行公里为:

$$L = 2 \times 6 \times (6 \times 6632 + 16 \times 23966 + 14 \times 43336) = 12359424 \text{ 米};$$

组合交路方案比大小交路方案共减少车底走行公里约 1910 千米, 降低比例达 13.39%。

4 结论

本文分析了交路设置的影响因素, 基于数学规划方法构建了组合交路设置的多目标规划模型。以北京市轨道交通某线路为对象进行案例分析, 结果表明: 组合交路方案有效提高了线路各区间输送能力与客流需求的匹配程度, 减少了使用车底数, 降低了车底走行公里, 具有明显的优化效果。因此, 对于客流需求分布不均衡的线路, 采用组合交路设置方案能够更

好地满足客流需求，有效降低运营成本。

[参考文献] (References)

- 220 [1] Chang Y H, Yeh C H, Shen C C. A multi-objective model for passenger train services planning application to Taiwan's High-speed Rail Line[J]. Transportation Research Part B, 2000, 34(2):91.
- [2] 田福生,吕红霞,李致宏.基于车底配置最优的地铁列车交路设计[J].铁道运输与经济,2006,28(1):26-28.
- [3] 骆进.广州地铁四号线大小交路运行模式研究[J].科技创新导报,2008,(29):59.
- [4] 李素莹,陈光华,车永兵.上海轨道交通 1 号线开行大小交路运行方案的实践[J].城市轨道交通研究,2007,(1):50-53.
- 225 [5] 徐瑞华,李侠,陈菁菁.市域快速轨道交通线路列车运行交路研究[J].城市轨道交通研究,2006,(5):36-39.
- [6] 王粉线,边晓春.上海轨道交通市域线列车运行交路及相关问题研究[J].城市轨道交通研究,2006,(6):29-31.