

# 基于城际铁路客流动态分配的 列车开行方案优化生成

王培恒 沈嘉曦

西南交通大学, 交通运输与物流学院, 成都 610031

**摘要:** 为了更合理表达旅客对城际铁路不同等级列车的选择行为, 本文根据城际铁路旅客列车的开行特点划分了列车等级, 并对旅客分类, 定义客流留存率以建立城际铁路客流的动态分配模型。分配模型表达预测客流在某一开行方案的不同等级列车之间分配和预测客流失到其他交通方式的过程, 并定义最小间隔时间解决列车开行时刻和客流预测中的广义费用问题。在客流动态分配模型的基础上构建目标方程和约束方程形成列车开行方案优化模型。最后, 以广清城际铁路为实例, 运用开行方案优化模型生成系列开行时刻及列车等级, 证明了优化模型的有效性。

**关键词:** 城际铁路; 客流动态分配; 开行方案; 双目标; 列车等级

中图分类号: U292.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747 (2016) 01-0081-06

DOI: 10.3969/j.issn.1672-4747.2016.01.014

## Optimal Train Operating Scheme Based on Intercity Railway Passenger Flow Dynamic Assignment

WANG Pei-heng SHEN Jia-xi

School of Transportation and Logistics,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

**Abstract:** In order to rationally indicate the selection of different train ranks by passengers, and according to the train operation characters, the trains and the passengers were classified. Then, the passenger flow reserve rate was defined. After then, a passenger flow dynamic assignment model was established, with which the forecasted passenger flow assignment among the different train ranks of a operation scheme and the process of the forecasted passenger using the other transit ways instead of trains could be indicated. To get the train departure time and the generalized cost of the forecast passenger flow, a minimum train interval time was defined. Finally, based on the model, the objective function and its constraint conditions formed the optimal model for the train operate scheme. An example of Guangqing intercity railway was given to examine the model's effectiveness.

收稿日期: 2015-05-22。

作者简介: 王培恒 (1989-), 男, 汉族, 甘肃人, 西南交通大学交通运输与物流学院在读硕士研究生。

**Key words:** Intercity railway; passenger flow dynamic allocation; train operating scheme; bi-objective programming model; different ranks of trains

## 0 引言

城际铁路在经济发达、人口稠密的城市群内的各大中城市间公交化运营,是快速、舒适的客运轨道交通系统。根据我国《中长期铁路网发展规划》和铁路大发展的思路,到2020年,我国将建成“四纵四横”的铁路快速通道以及环渤海圈、长江三角洲、珠江三角洲三个城际快速客运系统,构成我国高速铁路的基本框架,逐步形成城际快速客运系统。而运营中城际铁路旅客开行方案设计对运营部门和旅客而言至关重要<sup>[1]</sup>。开行方案设计的难点是客流预测、列车开行时刻、停站方案、客流分配等课题<sup>[2-4]</sup>。但目前制定开行方案时,首先预测城际铁路客流量,但客流预测所依据的广义费用中的旅客等待时间因开行方案尚未制定而难以准确获得。因而,本文在已有研究成果的基础上,引入城际铁路客流动态分配模型,重点突出客流预测及列车时刻确定,建立基于城际铁路客流动态分配的列车开行方案优化模型。

## 1 城际铁路不同等级列车间客流的动态分配

### 1.1 城际铁路客流动态分配含义

预测客流量及其时间分布特点决定了制定怎样的城际铁路旅客列车开行方案,反过来,具体的旅客列车开行方案又影响着客流量,列车开行方案与客流量之间呈现动态性。因而客流动态分配包含了预测客流在某一开行方案的不同等级列车之间分配和预测客流流失到其他交通方式两层含义。客流动态分配的结果是客流预测所依据的广义费用与实际广义费用相等,城际铁路预测客流量与实际运载客流量相等。

目前客流动态分配较为成熟的方法是利用循环迭代实现客流预测所依据的广义费用与实际广义费用相等<sup>[5]</sup>。但这种方法面临模型复杂,解算难度大等难题。本文将引入客流留存率,通过建立直观的模型来描述客流动态分配。

### 1.2 城际铁路客流的动态分配模型

设城际铁路沿线共有 $n$ 个车站, $i, j$ 均表示车站编号, $i < j, i \in [1, n-1], j \in [2, n]$ 。 $k = \{X, Y, Z\}$ 表示城际铁路运营的三种不同开行方案的列车。 $X$ 等级为中途不停直达列车; $Y$ 等级为中途大站停车一次列车; $Z$ 等级为站站停列车。 $t$ 时刻城际客运专线两站间的预测客流量 $P = p_{ij}^k$ , $p_{ij}^X$ 表示 $t$ 时刻车站第1站和第 $n$ 站之间的直达客流量; $p_{ij}^Y$ 是指在始发站上车而在中途 $Y$ 等级停车大站下车和在中途 $Y$ 等级停车大站上车而在终点站下车的客流量; $p_{ij}^Z$ 表示除 $p_{ij}^X$ 和 $p_{ij}^Y$ 之外的客流量。由此可知,客流量 $p_{ij}^X$ 可选乘 $X, Y, Z$ 三个等级的列车, $p_{ij}^Y$ 可选乘 $Y, Z$ 两个等级的列车, $p_{ij}^Z$ 只可选乘 $Z$ 等级列车。 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 分别表示当更高等级列车不运行时相应乘客的留存率,可通过问卷调查客流选择低等级列车的概率、客流量变化数据分析等方式获得。 $r_{ij}^k$ 是0-1变量,数值1表示 $t$ 时刻开行的 $k$ 等级列车在车站 $i$ 和 $j$ 同时停站,数值0表示 $t$ 时刻不开行 $k$ 等级列车或开行而不在车站 $i$ 和 $j$ 同时停站。 $s_i^k = 1$ 表示 $k$ 等级列车在车站 $i$ 停站, $s_i^k = 0$ 表示 $k$ 等级列车在车站 $i$ 不停站。城际铁路两站间的实际乘车客流量 $\bar{P} = \bar{p}_{ij}^k$ , $\bar{p}_{ij}^k$ 表示预测客流在不同开行方案列车之间分配及流失到其他交通方式后, $t$ 时刻车站 $i$ 和车站 $j$ 之间的实际乘车的客流量。因此, $t$ 时刻任意两车站 $i$ 和 $j$ 间不同等级列车的客流量动态分配及流失计算方程组,即客流动态分配模型如下所示:

$$\sum_k p_{ij}^k \leq 1 \tag{1}$$

$$p_{ij}^k \leq s_i^k \cdot s_j^k \tag{2}$$

$$\bar{p}_{ij}^X = r_{ij}^X \cdot p_{ij}^X \tag{3}$$

$$\bar{p}_{ij}^Y = r_{ij}^Y \left[ p_{ij}^Y + \varepsilon_1 (1 - r_{ij}^X) p_{ij}^X \right] \tag{4}$$

$$\overline{p_{ij}^z} = r_{ij}^z \left[ p_{ij}^z + (1 - r_{ij}^y) (\varepsilon_2 p_{ij}^x + \varepsilon_3 p_{ij}^y) \right] \quad (5)$$

方程(1)表示  $t$  时刻最多仅能开行一列旅客列车; 方程(2)表示仅当  $k$  等级列车在车站  $i$ 、 $j$  同时停车时  $r_{ij}^k$  才可能等于 1。方程(1)、(2)是方程(3)、(4)、(5)成立的前提条件。而方程(3)、(4)、(5)表示  $t$  时刻任意两车站  $i$  和  $j$  间客流量在不同等级列车间的动态分配及流失过程。在运算过程中, 将不断生成停站方案集合  $r_{ij}^k$ 。

### 1.3 列车始发时刻及客流量预测

列车开行时刻属于开行方案求解问题的难点, 本文将预估的列车最小开行间隔时间的一半称为最小间隔时间, 众多相同时长的最小间隔时间构成列车每天的运行时间长度。显然, 至少两个最小间隔时间内的客流量方可满足开行条件, 并且列车开行时刻只能是某个最小间隔时间末尾时刻。虽然每个最小间隔时间末尾时刻最多允许开行一列旅客列车, 但在开行方案生成模型求解之前做客流预测时, 方程(3)、(4)、(5)的右边均先按列车开行做客流预测, 再以  $r_{ij}^x$  选择调整。因此, 用于详细客流预测的城际列车广义费用按各等级的列车在各最小间隔时间末尾时刻均开行一列计算。城际客运专线两站间的预测客流量为  $P = p_{ij}^{k0}$ ;  $\varepsilon_4$  表示  $t$  时刻不开行列车时客流在  $t+1$  时刻乘车时的留存率, 由用于客流预测的 Logit 模型中广义费用调整计算得来。则

$$p_{ij1}^k = p_{ij1}^{k0} \quad (6)$$

$$p_{ij(t+1)}^k = \varepsilon_4 \left( 1 - \sum_k r_{ij}^k \right) p_{ij}^k + p_{ij(t+1)}^{k0} \quad (7)$$

### 1.4 动态分配模型假设

(1) 采用预测客流量时不考虑列车到达各个车站的具体时刻, 均按列车始发时刻计算。

(2) 城际客运专线为直线型结构, 指研究该线路上某一确定方向的城际列车, 并且不考虑跨线列车及旅客换乘情况。

(3) 本文计算开行方案的城际客运专线上, 只运行本线列车。

## 2 基于客流动态分配的城际列车开行方案优化生成模型

城际客流的主要出行目的以商务、通勤、出差为主, 旅客对运输产品的舒适性和正点率要求较高。应以旅客需求为出发点, 研究不同消费层次的客流对运输产品不同的要求, 从经济性、快捷性、舒适性以及安全性角度考虑, 制定出不同等级的城际列车, 以满足旅客的各层次出行需求。

### 2.1 目标函数

#### 2.1.1 铁路部门营业利润最大化

城际列车的总票价收入为  $C_p$ , 可通过不同旅行距离的旅客量与车票乘积之后的加和所得:

$$C_p = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \sum_{l=1}^m p_{ij} \left( \overline{p_{ij}^x} + \overline{p_{ij}^y} + \overline{p_{ij}^z} \right) \quad (8)$$

式中,  $p_{ij}$  表示车站  $i$  与  $j$  之间的票价, 等于站间距离与票价率的乘积;  $m$  表示一个昼夜运营时长,  $\min$ 。

$$C_c = \sum_k \sum_{l=1}^m r_{lm}^k \left( \sum_{i=1}^n s_i^k c_s^k + d_{ln} c_T^k \right) \quad (9)$$

式中,  $c_s^k$ 、 $c_T^k$ 、 $d_{ln}$  分别表示  $k$  等级列车停站费用、运行费用率、城际铁路总里程。

于是, 铁路部门营业利润  $C_1$  最大化可表示为

$$\max C_1 = C_p - C_c \quad (10)$$

#### 2.1.2 旅客时间支出最小化

旅客在运行过程中的时间消耗取决于区段长度及列车的技术速度, 列车的技术速度与列车等级和线路类别相关。旅客乘坐  $k$  型列车在途总时间消耗为:

$$\min T = \sum_K \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \sum_{l=1}^m \frac{d_{ij}}{v^K} \overline{p_{ij}^K} \quad (11)$$

式中,  $d_{ij}$  表示车站  $i$  与  $j$  之间的距离;  $v^K$  表示包括停站时间在内的  $k$  等级列车平均运行速度。

若设人均时间价值为  $V$ , 则旅客旅行代价为  $C_T = T \cdot V$ 。

那么目标方程(10)、(11)可综合表示为一个目标方程, 代表社会总效益最大化<sup>[6]</sup>:

$$\max C = C_p - C_c - C_T \quad (12)$$

### 2.2 约束条件

在实际运营中,城际铁路旅客列车载客率不能太小,以维持运营效益。但载客率亦不能太大,以保障列车运行安全,并保证旅客舒适度,提高城际铁路的竞争力。也就是说列车载客率须在合理范围内:

$$A_{ij}^k = \sum_{l=1}^{n-1} \sum_{j=l+1}^n \overline{p_{lt}^k} - \sum_{l=1}^{n-1} \sum_{j=l+1}^i \overline{p_{lt}^k} - \sum_{l=j}^{n-1} \sum_{j=l+1}^n \overline{p_{lt}^k} \quad (13)$$

$$Q^k \cdot \beta_1 - A_{ij}^k \geq 0 \quad (14)$$

$$A_{ij}^k - Q^k \cdot \beta_2 \geq 0 \quad (15)$$

公式(13)中的  $A_{ij}^k$  表示  $t$  时刻  $k$  等级列车在  $i、j$  站间的载客量,式中  $l、j$  与  $i、j$  意义相同;公式(14)、(15)中  $Q^k$  表示  $k$  等级列车定员;  $\beta_1、\beta_2$  分别表示列车最大、最小客座利用率。最后两公式对列车载客量进行了限制,表示列车载客量须介于最大、最小载客量之间,  $\beta_1、\beta_2$  可根据实际条件具体确定。

### 3 实例分析

首先对广清城际铁路沿线各站进行客流量粗略估计,可知列车最小开行间隔约为 20 min,故本文以各等级列车每间隔 10min 开行一列的条件对客流量做详细预测。所得广清城际铁路 2015 年“清远——广州北”方向各站间 OD 客流量及站间距分别列示于表 1 和表 2。

表 1 广清城际铁路站间 OD 客流量(人)

Tab. 1 The passengers' OD table of Guangzhou-Qingyuan intercity railway stations (person)

站名及编号	清远(1)	龙塘(2)	银盏(3)	狮岭(4)	广州北站(5)	合计
清远(1)	0	3 489	1 787	3 578	10 926	19 780
龙塘(2)	-	0	653	1 149	3 374	5 176
银盏(3)	-	-	0	1 561	3 363	3 928
狮岭(4)	-	-	-	0	6 286	4 924

表 2 广清城际铁路站间距(km)

Tab. 2 Distances between Guangzhou-Qingyuan intercity railway stations (km)

站名及编号	清远(1)	龙塘(2)	银盏(3)	狮岭(4)	广州北站(5)
清远(1)	0	5.663	13.771	26.389	38.635
龙塘(2)	-	0	8.108	20.726	33.702
银盏(3)	-	-	0	12.618	25.594
狮岭(4)	-	-	-	0	12.976

根据参考文献[7]知,为了更有效地利用模型生产列车开行方案,需对各小时内的客流量累积后绘制拟合曲线。设累积客流量为  $C_{ij}^k$ ,则最小间隔时间内的预测客流量  $p_{ij}^{k0}$  为:

$$p_{ij}^{k0} = C_{ij}^k - C_{ij}^{k(t-1)}$$

累积客流量  $C_{ij}^k$  可根据客流时间分布和客流量计算得到,鉴于统计各站间客流时间分布参数的工作量极其庞大,本文以全线客流的平均时间分布特征近似地表示各站间客流时间分布。图 1 为 2015 年运营时段客流时间分布,累积客流量  $C_{ij}^k$  据此计算。

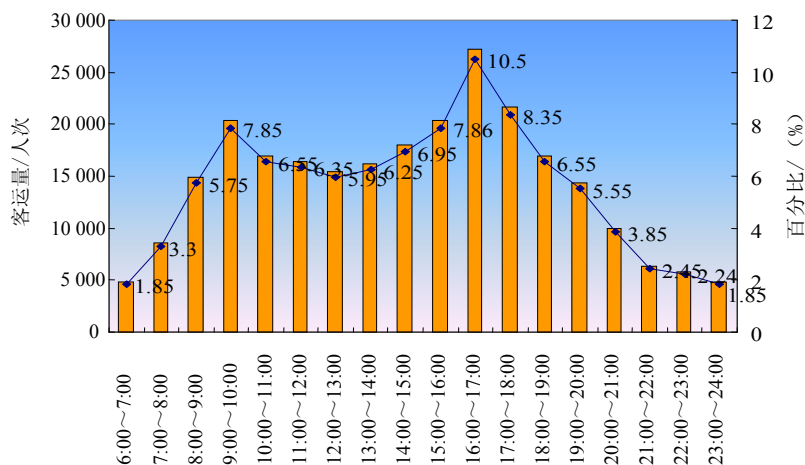


图 1 2015 年运营时段全线客流时间分布

Fig. 1 Time distribution of passenger flow in the whole period of operation in 2015

广清城际铁路设计时速为 200km/h，开行时速 200km/h 及 160km/h 两种动车组，只开行旅客列车，主要沟通广州北站和清远的站，中途大站为狮岭站。由此可知  $s_1^X, s_5^X = 1$ ， $s_1^Y, s_4^Y, s_5^Y = 1$ ， $s_1^X, s_2^X, s_3^X, s_4^X, s_5^X = 1$ 。通过问卷调查方式获取各类客流选择较低等级列车的偏好概率，得到  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$  值分别为 0.85、0.80 和 0.9。根据客流预测 Logit 模型中旅客时间效用值的变化，计算得到  $\epsilon_4$  值为 0.73。广清地区交通发达，旅客运输市场竞争激烈，因而广清城际铁路旅客列车载客率不宜超过 100%，以保证旅客舒适度；考虑列车运营效益，结合运营费用和票价率，本文认为载客率不宜低于 55%。因而， $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别取 1.0 和 0.55。优化模型的基本参数列于表 3。

表 3 优化模型的基本参数

Tab. 3 The basic parameters of the optimization model

列车等级	X	Y	Z
列车运行费用/(元/km)	70	65	55
列车停站费用/(元/站)	500	450	450
票价率/(元/人 km)	0.5	0.4	0.32
停站时间/min	0	4	2
列车定员/人	586	586	1 520
运行速度/(km/h)	200	160	160
停站方式 $s_i^k$	$s_1^X, s_5^X = 1$	$s_1^Y, s_4^Y, s_5^Y = 1$	$s_1^X, s_2^X, s_3^X, s_4^X, s_5^X = 1$
旅客保留率 $\epsilon$	$\epsilon_1=0.85, \epsilon_2=0.80, \epsilon_3=0.9, \epsilon_4=0.73$		
一昼夜运营时长/min	1 080		
客座利用率 $\beta_1, \beta_2$	$\beta_1=1.0, \beta_2=0.55$		

本文所建模型为单目标线性规划模型，采用 CPLEX 程序求解<sup>[8]</sup>，得到广清城际铁路各等级列车最优停站方案如表 4 所示。

参考文献

[1] 田松江. 高速铁路跨线列车开行方案优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014, 31-40.  
 [2] 赵钢. 城际客运专线运输组织相关问题研究[D].

表 4 广清城际各等级列车停站方案及开行时刻

Tab. 4 Each train's stop plan and running time of Guangzhou-Qingyuan intercity railway

时间	等级	时间	等级	时间	等级
6:40	Y	7:20	Y	7:50	Z
8:10	X	8:30	Y	8:50	Z
9:10	Y	9:20	Y	9:40	Z
10:00	X	10:20	Z	10:40	Y
11:10	Y	11:30	Z	11:50	Y
12:10	X	12:30	Y	12:50	Z
13:10	Y	13:30	Z	13:50	Y
14:10	X	14:30	Z	14:50	Y
15:10	Y	15:30	X	15:50	Z
16:10	X	16:20	Y	16:30	Y
16:50	Z	17:00	Y	17:20	X
17:40	Z	18:00	X	18:20	Y
18:40	Z	19:00	Y	20:20	Y
20:50	Z	20:00	Y	21:40	Z
21:20	Z	22:30	Z	23:40	Y

4 结 论

本文根据城际铁路旅客列车的开行特点划分了列车等级，对旅客分类及定义客流留存率以建立城际客运专线客流在不同等级列车间的动态分配模型，并定义最小间隔时间解决列车开行时刻和客流预测中的广义费用问题。在客流动态分配模型的基础上构建目标方程和约束方程形成列车开行方案优化模型。最后，以广清城际铁路为实例，运用开行方案优化模型生成系列开行时刻及列车等级，证明了优化模型的有效性。

本文只考虑了城际客运专线只有三个等级列车时，客流在不同等级列车之间的动态分配，在接下来的研究中，还应该根据客流考虑更多的停站方案，到达停站方案在每天不同时段内随着客流量的变化而不同，以达到城际列车开行方案进一步优化的目的。

成都: 西南交通大学, 2007, 16-26.

[3] 朱郁俊. 基于客流动态分配的城际客运专线列车开行方案研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

- [4] 徐鹏. 城际客运专线列车开行方案研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010, 20-27.
- [5] 黄鉴. 基于客流动态调整的客运专线网络列车开行方案优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013, 41-50.
- [6] Claessens M. T, Vandijk N. M, Zwaneveld P. J. Cost optimal allocation of rail passenger lines[J]. European Journal of Operational Research, 1998, 110(3): 474-489.
- [7] Eva Barrena, David Canca. Single-line rail rapid transit timetabling under dynamic passenger demand[J]. Transportation Research Part B, 2014, 70: 134-150.
- [8] Goossens J, Hoesel S.T, Kroon L. On solving multitype line planning problem[J]. European Journal of Operation Research, 2006, 168(2):403-424.

(中文编辑: 刘娉婷)

上接第80页

## 6 结束语

考虑到客运专线的特点与交通流静态多路径分配适用条件的相似性, 本文提出将静态多路径分配方

法应用于客运专线中的客流分配, 建立了综合阻抗函数模型, 确定了最短路径的计算方法和客流分配的算法研究, 最终得到客运专线网上的客流分配情况, 从而为客运专线开行方案的制定与评价提供参考。

### 参考文献

- [1] 黄鉴, 彭其渊. 弹性需求条件下旅客列车客流分配研究[J]. 铁道运输与经济, 2009, 8(31): 78-80.
- [2] 曾鸣凯, 黄鉴, 彭其渊. 客运专线旅客列车开行方案的客流分配方法[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(5): 571-574.
- [3] 史峰, 邓连波. 旅客换乘网络优化设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1): 78-82.
- [4] 邓连波. 客运专线相关旅客列车开行方案优化研究[D]. 湖南: 中南大学, 2007.
- [5] 闫铭. 基于旅客列车开行及停站方案的客流分配[J]. 交通科技与经济, 2009, 11(4): 32-33, 36.
- [6] 苏娟. 城市轨道交通客流分配研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [7] 蔡晓春. 城市轨道交通网络客流分配模型与计算方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
- [8] 邵春福. 交通规划原理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [9] 周望亮. 静态多路径分配法在城际轨道客流分配预测中的应用[J]. 铁道运输与经济, 2009, (11): 66-68.
- [10] 汪娟. 综合路阻建模与应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [11] 张秋. 交通工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1983.

(中文编辑: 刘娉婷)