

城市轨道交通基于网络瓶颈的运力资源分配研究

陈 慧¹, 汪 波²

(1. 闽江学院 交通学院, 福建 福州 350108; 2. 北京市轨道交通指挥中心, 北京 100101)

摘要: 城市轨道交通网络运力资源分配的目的是实现运输供需平衡, 从解决网络运能瓶颈与服务瓶颈角度出发, 综合考虑旅客平均等待时间、企业运用车组数、列车满载率等因素提出了高峰时段及非高峰时段网络运力资源分配模型, 最后实例验证了模型在独立运行模式下对网络运力分配的有效性。

关键词: 城市轨道交通; 网络; 瓶颈; 运力配置

中图分类号 U239.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0373(2014)04-0064-04

0 引言

伴随着城市轨道交通快速建设与发展, 我国许多城市已逐步建成线与线交错的轨道交通路网(网络化), 极大提高了轨道交通的通达性和方便性, 更有效缓解城市的交通拥堵问题。网络化也给轨道交通运营组织带来诸多挑战, 由于运输需求具有时间和空间分布的不均衡性, 而城市轨道交通企业运力资源有限, 如何将有限的运力资源在网络中合理配置是目前亟待解决的一个问题。

李得伟等提出了城市轨道交通网络瓶颈概念, 并指出网络瓶颈分析能有效体现轨道交通网络的供求关系^[1]; 汪波等通过分析列车运行模式、客流分布特点、乘客服务水平、企业运营成本、列车定员等影响因素, 建立运力配置优化机会约束模型^[2]。徐林等提出了成网条件下基于 K 短路算法的运力资源配置模型^[3]。K. Natchtigall et al 提出了减少旅客换乘等待时间的优化模型, 并通过遗传算法进行优化, 从而求得了网络线路的列车时刻表^[4], 继而提出了以减少旅客换乘等待时间及运输企业成本的多目标优化模型^[5]。重点从解决网络运能瓶颈与服务瓶颈角度出发研究网络运力资源分配模型。

1 城市轨道交通网络瓶颈

城市轨道交通网络瓶颈可分为技术瓶颈和服务瓶颈, 技术瓶颈即通常所指的能力瓶颈, 指网络中能力不协调的地方, 分为区间技术瓶颈与车站技术瓶颈两类^[1], 由于路网运力分配与区间运能供需紧密相关, 本文网络技术瓶颈仅考虑区间技术瓶颈。服务瓶颈指在一定服务水平下网络存在的瓶颈, 即大量乘客没有接收到满意服务的位置^[1]。根据路网客流统计分析, 工作日客流量相对集中, 呈现明显的通勤客流特点, 在网络结构稳定的条件下, 各线路最大断面客流量往往出现在早晚高峰时段, 且分布位置相对固定。周末客流相对均衡, 高低峰断面客流相差不大, 最大断面客流量峰值较工作日低。由此可知, 城市轨道交通网络技术瓶颈往往出现在工作日高峰时段最大断面客流量(即满载率最高)区段。

2 城市轨道交通运力资源分配影响因素分析

2.1 列车运行组织方式

目前城市轨道交通运行方式主要有两种: 独立运行与共线运行。共线运行方式在欧美和日本城市轨

DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2014.04.13

收稿日期: 2013-06-21

作者简介: 陈慧 女 1982 年出生 助教

基金项目: 福建省教育厅 B 类课题(JB11156)

道交通系统中被广泛推广应用,而我国目前大部分仍采用独立运行模式。列车运行方案主要有单一长大交路、大小交路、交错运行等方案。不同的运行组织方式对路网运力分配会产生不同影响。

2.2 其他因素

在研究路网运力分配过程中,除了需要保证路网供需平衡外,还需尽量减少旅客的平均等待时间,提高服务水平,减少企业的运用车组数,将列车满载率维持在一定水平。同时,还与线路列车全周转时间、断面客流量、列车发车最小间隔等因素相关。

3 基于网络瓶颈的运力资源分配数学模型

城市轨道交通网络瓶颈出现的根本原因就是供需矛盾,只有通过合理的运力资源分配才能使整个网络效益最优。根据日常客流分析,高峰时段与非高峰时段客流特点差异较大,对于运输企业来说,其运力资源分配目标与制约因素也不尽相同,因此,本文针对高峰时段与非高峰时段运力分配特点分别建立数学模型。

城市轨道交通路网定义

$$\text{路网} \quad S = \{L_i\} \tag{1}$$

式中, L_i 为城市轨道交通线路 $i = 1, 2, 3, \dots$ 。

$$\text{线路} \quad L = \{Q_j\} \tag{2}$$

式中, Q_j 为区段 $j = 1, 2, 3, \dots$ 。

3.1 高峰时段

对于运输企业来说,高峰时段的运力较为紧张,因此,本模型目标函数着重在于解决路网中各线路运能瓶颈的能力供给问题。

首先,根据线网历史数据找出路网中高峰时段 p 的运能瓶颈集合

$$Q^{Y_p} = \{Q_i^p \mid Q_i^p = \max E(\eta_{ij}^p)\} \tag{3}$$

式中, η_{ij}^p 为线路 i 区段 j 处的列车满载率。由于 η_{ij}^p 为随机函数,在此采用期望值形式表示。

其次,在高峰时段 p 的运能瓶颈集合中,以为瓶颈区段输送更多乘客,降低瓶颈区段列车满载率为目标建立机会约束模型

$$\max \quad z = \sum_{Q^{Y_p}} L_{Y_{ij}}^p CE(\eta_{ij}^p) \tag{4}$$

$$\text{s. t.} \quad \frac{60}{L_{Y_{ij}}^p} \geq t_i^x \tag{5}$$

$$\max \left(\frac{T_i^z L_{Y_{ij}}^p}{60} \right) \leq n_i^p \tag{6}$$

$$\text{Pr}\{\eta_{\min} \leq \eta_{ij}^p \leq \eta_{\max}\} \geq \alpha^p \tag{7}$$

$$\max(\eta_{ij}^p) \leq 120\% \tag{8}$$

式中, $L_{Y_{ij}}^p$ 为 p 时段线路 i 瓶颈区段 j 需开行的列车数量(单位:列); C 为列车定员(单位:人); t_i^x 为线路 i 最小列车开行间隔(单位: min); T_i^z 为线路 i 列车全周转时间(单位: min); n_i^p 为 p 时段线路 i 实际可上线运营的列车数量(单位:列)。

目标函数(4)表示在高峰时段 p 尽可能为运能瓶颈区段输送更多客流。约束条件(5)表示高峰时段 p 列车发车间隔应大于等于线网最小发车间隔。约束条件(6)表示高峰时段 p 运用车组数应满足该线路实际可上线开行列车数量。约束条件(7)表示高峰时段 p 运能瓶颈区段列车满载率以概率 α^p 符合路网对列车满载率要求。为保证各线路列车安全行驶及乘客基本乘坐空间,约束条件(8)要求各线路列车最高满载率限制为 120%。

3.2 非高峰时段

对于运输企业来说,非高峰时段的运力较为充裕,那么该期间运营管理的目标就是尽可能提高网络中服务瓶颈区段的服务质量,即降低旅客的平均等待时间,同时尽可能减少路网中开行的列车数量,从而

减少企业的运营成本。因此,本模型目标函数采用多目标机会约束模型。

首先,根据线网历史数据找出路网中非高峰时段 p 的服务瓶颈集合

$$Q^{Fp} = \{ Q_i^p \mid Q_i^p = \max(u_{ij}^p / v_{ij}^2) \} \quad (9)$$

式中, u_{ij}^p 为线路 i 区段 j 处的断面客流量; v_{ij} 为线路 i 区段 j 处的列车速度。

其次,在非高峰时段 p 的服务瓶颈集合中,以尽可能减少瓶颈区段旅客平均等候时间和减少路网中开行的列车数量为目标建立多目标机会约束模型

$$\min z_1 = \sum_{Q^{Fp}} 0.5 u_{ij}^p \frac{60}{L_{Yij}^p} \quad (10)$$

$$\min z_2 = \sum_L L_{Yij}^p \quad (11)$$

$$\text{s. t. } t_F^p \geq \frac{60}{L_{Yij}^p} \geq t_i^X \quad (12)$$

$$\max\left(\frac{T_i^Z L_{Yij}^p}{60}\right) \leq n_i^p \quad (13)$$

$$\text{Pr}\{\eta_{\min} \leq \eta_{ij}^p \leq \eta_{\max}\} \geq \alpha^p \quad (14)$$

$$\eta_{ij}^p = \frac{u_{ij}^p}{L_{Yij}^p C} \quad (15)$$

式中, t_F^p 为 p 时段网络允许的最大列车开行间隔。

目标函数(10) z_1 表示尽量减少非高峰时段 p 服务瓶颈区段旅客群体平均等候时间。目标函数(11) z_2 表示尽量减少非高峰时段 p 网络中实际上线运行车组数量。约束条件(12) 表示非高峰时段 p 列车发车间隔应大于等于线网最小发车间隔,小于等于线网最大发车间隔。约束条件(13) 要求非高峰时段 p 运用车组数应满足该线路实际可上线开行列车数量。约束条件(14) 表示非高峰时段 p 服务瓶颈区段列车满载率以概率 α^p 符合路网对列车满载率要求。约束条件(15) 表示满载率的计算公式。

4 实例计算

4.1 基础数据及参数取值

某城市路网规模 4 条,总长约 100 km,共 37 个车站,具体路网如图 1 所示。

(1) 运营时段划分。城市轨道交通运营时间基本为:5:00—23:00;运营时段划分:高峰时段:7:00—9:00;17:00—19:00;其他时间段为非高峰时段。

(2) 列车运行方式。在此案例中,路网各线列车采用全交路独立运行。

(3) 路网运营参数设定。该案例中路网运营参数设定如下:列车定员 $C = 1\,428$ 人;高峰时段列车满载率范围: [70%, 120%];非高峰时段列车满载率 η 范围: [0, 70%];置信度 α^p : 0.9;最小行车间隔 t_i^X : 2 min;最大行车间隔 t_F^p : 15 min。其他部分参数设定如表 1 所示。

4.2 计算结果

(1) 高峰时段路网运力分配计算结果。选取某工作日早上 7:00—8:00 时段作为计算时段,经日常客流数据统计,各线路运能瓶颈位置相对固定,产生于 A6-A7、B2-B3、C2-C3、D3-D4 区段。利用 Lingo 11.0 进行求解,该求解模型为非线性整数规划,采用分支定界法求解,求解出目标函数最大值为 42 840 人次。该时段各线路运力运量匹配如图 2 所示。

(2) 非高峰时段路网运力分配计算结果。选取某工作日下午 15:00—16:00 时段作为计算时段,经日

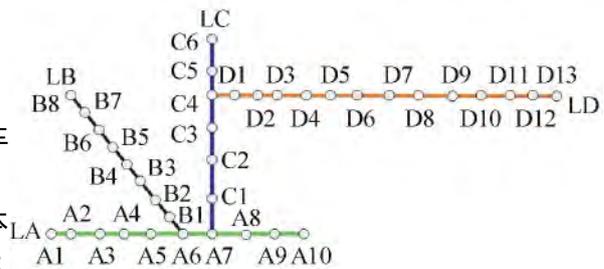


图 1 某城市城市轨道交通路网

表 1 其他路网运营参数

线路	$n_i^p / \text{列}$	T_i^Z / min
LA	8	65
LB	7	56
LC	7	56
LD	11	75

常客流数据统计,各线路服务瓶颈位置通常产生于 A1-A2、B6-B7、C5-C6、D8-D9 区段。利用 Lingo 11.0 进行求解,该模型为多目标规划,根据多目标规划的 LINGO 求解法^[6],计算出该时段各线路运力运量匹配如图 3 所示。

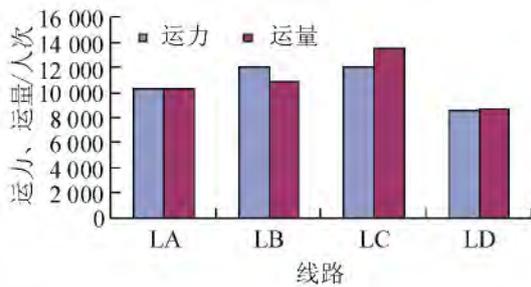


图 2 高峰时段各线路运力运量匹配图

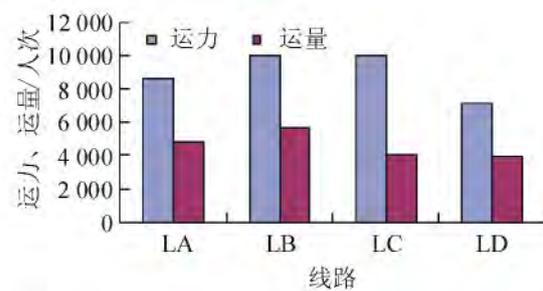


图 3 非高峰时段各线路运力运量匹配图

5 结束语

从解决网络运能瓶颈及服务瓶颈供需矛盾为基础,综合考虑旅客平均等待时间、企业运用车组数、列车满载率等因素提出高峰时段及非高峰时段城市轨道交通线网运力资源分配模型。研究表明:在简单网络采用全交路独立运行模式下,该模型计算结果较为理想。但在城市轨道交通网络化运营实践中,随着线网规模的不断扩大,不同线路可能采用不同的列车运行方式,且线路间换乘对线网运力资源分配的影响也不断加大,这些将是今后进一步研究的方向。

参 考 文 献

- [1]李得伟,韩宝明,鲁放.城市轨道交通网络瓶颈分析[J].城市轨道交通研究 2011(5):49-54.
- [2]汪波,韩宝明,牛丰,等.城市轨道交通网络运力优化配置研究[J].铁道学报 2011,33(12):1-6.
- [3]徐林,何世伟,何必胜,等.基于 K 短路径的城市轨道交通运力资源配置研究[J].物流技术 2011,30(6):122-125.
- [4]Natehtigall K,Voget S. A genetic algorithm approach to Periodic railway synchronization [J]. Computers&Operations Research, 1996,23(5):453-463.
- [5]Natehtigall K,Voget S. Minimizing Waiting Times in Integrated Fixed Interval Timetables By Upgrading Railway Tracks [J]. EuroPeau Journal of Operational Research,1997,103:610-627.
- [6]吴有平,刘杰,何杰.多目标规划的 LINGO 求解法[J].湖南工业大学学报 2012,26(3):9-12.

Study on Transport Capacity Allocation for Urban Mass Transit Network based on Bottlenecks

Chen Hui¹, Wang Bo²

(1. Transportation Engineering Institute, Minjiang university, Fuzhou 350108, China;

2. Beijing Metro Network Control Center, Beijing 100101, China)

Abstract: The objective of transport capacity allocation for urban mass transit network is to achieve the balance between supply and demand. From the viewpoint of network capacity bottlenecks and service bottlenecks, this paper points out the transport capacity allocation model during peak hours and non-peak hours taking into account the passenger's average waiting time, the number of transport trains, train load ratio and so on. In the end, the model is verified by the transport capacity allocation for urban mass transit network based on independent operation.

Key words: urban mass transit; network; bottleneck; transport capacity allocation

(责任编辑 刘宪福)