

文章编号: 1001-8360(2009)03-0011-09

基于换乘站点的轨道交通与常规公交运营协调模型研究

张宇石^{1,3}, 陈旭梅¹, 于雷^{1,2}, 何波¹, 林国鑫¹(1. 北京交通大学 城市轨道交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044;
2. 德克萨斯南方大学, 美国 休斯顿 77004; 3. 北京市公共交通研究所, 北京 100161)

摘要:城市轨道交通与常规公共交通的运营协调是实现公共交通一体化的基本内容,也是提高公共交通系统自身运营效率和服务水平的重要途径。现以系统总成本费用最小为目标,对轨道交通和常规公交的协调运营组织进行优化,详细论述总费用(包括运营商和乘客费用)函数的计算方法,并基于概率论方法,提出4种不同类型换乘站乘客换乘费用的确定方法,最终建立轨道交通与常规公交运营协调模型。研究表明,该模型能够有效降低公共交通系统的总体费用和乘客的换乘时间,且平峰时段相对于高峰时段的运营协调效果更明显。

关键词: 轨道交通; 常规公交; 运营协调; 换乘; 概率; 遗传算法

中图分类号: U491.12 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-8360.2009.03.003

Study on Model of Coordinated Operation between Urban Rail and Bus Systems at Transfer Stations

ZHANG Yu-shi^{1,3}, CHEN Xu-mei¹, YU Lei^{1,2}, HE Bo¹, LIN Guo-xin¹(1. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. Texas Southern University, Houston 77004, U. S. A.; 3. Beijing Public Transport Research Institute, Beijing 100161, China)

Abstract: The coordinated operations of urban rail and bus systems are the premise for an integrated mass transit system and are the solution to improve both operation efficiency and service level of the urban mass transit system. In this paper, the operation of urban rail and bus systems is optimized in order to minimize the total costs. The paper also discusses how to calculate the total costs, including the operation costs and passenger costs, and analyzes the transfer costs regarding four categories of transfer stations on the basis of the probability theory. The coordinated operation model is formulated finally. The conclusion suggests that the coordinated operation model could effectively decrease the total costs of the transit system and the transfer time of passengers. It also suggests that coordination within the non-peak hour is more effective than at the peak hour.

Key words: urban rail; transit; coordinated operation; transfer; probability; genetic algorithm

城市公共交通系统的主体包括城市轨道交通和常规公共交通。只有二者协调发展,实现公共交通一体化,才能最大限度地提高城市公共交通系统的运营效率和服务水平,提高公共交通系统的分担率。

运营协调是城市轨道交通与常规公共交通协调的重要内容,也是两方式协调的微观层次。所谓运营协调,是指通过运能匹配、管理政策等手段达到在轨道交通与常规公交运营组织中乘客出行时间上的连续协

调^[1]。它以方便居民出行为目标,使公共交通乘客以更合理的费用获得更可靠、便捷的公交服务。

目前,国内外关于运营协调方面的研究已在局部的多方式协调领域取得较成熟的研究成果,如 Hurdle 和 Wirasinghe^[2]、Lee 和 Schonfeld^[3]、Chien 和 Schonfeld^[4]等。上述研究通过对发车间隔、车站停留时间、松弛时间等变量的优化,进而确定某一站点内多条线路的协调运营方案。其中,Ching 和 Schonfeld 得出轨道交通与常规公交运营计划协调问题的两个基本结论:①两类运输模式的时刻表协调前提是行车间隔较大且换乘客流较大,当行车密度高时,该协调无实际意义;②服务可靠性较高的公交线路与轨道交通进行协

收稿日期: 2008-04-28; 修回日期: 2009-02-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)

(2007AA11Z220; 2008AA11Z202);

国家自然科学基金资助项目(50208002)

作者简介: 张宇石(1984-),男,北京人,硕士研究生。

E-mail: bd562@163.com

调才具有实际意义^[5]。

然而,以上研究对公交的网络性考虑仍然不够,就换乘站类型对协调优化的影响考虑也不全面。本文基于换乘站,对一个联合公交网络的轨道交通与常规公共交通的运营协调进行研究。

1 运营协调组织原理分析

由于常规公交线路车辆往往不能严格按照时刻表规定的时间到达换乘站点,就有可能造成乘客未能赶上当班轨道交通车辆,从而必须在站台等候下一班次轨道交通列车的到达。为保证换乘的顺畅性、连续性,可通过在常规公交时刻表中设定一段松弛时间 K_i 来实现^[3,6],即在车辆到达延误随机分布下,为增大乘客能够换乘当班轨道交通车辆的概率,而在常规公交时刻表中规定车辆到站提前的一段时间。

当某站接运线路某班次的规定到达时间(若接运线路为常规公交线路,还需要增加松弛时间),加上乘客步行时间后对应的时刻恰好为转运线路某班次在该站的规定到发时刻,则称上述两班次协调。该时刻即为换乘成功与换乘失败的临界点,上述两班次称为协调班次,协调班次各自运行的方向称为协调方向。若使接运线路的所有班次都能与转运线路相协调,则要求两线路发车间隔相等。但由于轨道交通线路和常规公交线路的客流量不同,一般轨道交通线路作为系统内的主要客流走廊,客流量远大于接驳公交线路,如发车间隔相等,则可能导致接驳线路的满载率很低,不利于常规公交运营企业的发展。因此,在协调运营过程中,可要求常规公交发车间隔与轨道交通发车间隔成整数倍关系,使常规公交线路所有班次都能对应轨道交通的协调班次,轨道交通有尽可能多的班次对应常规公交的协调班次,如图 1 所示。

图 1 中, D_j 为站点 j 中轨道交通站台与常规公交站台之间的距离; H_0 为发车间隔; a_0 为到站时刻; d_0 为离站时刻; θ 为交通方式, $\theta=r$ 表示轨道交通, $\theta=b$ 表示常规公共交通, $\theta=i$ 表示第 i 条常规公共交通线路; K_i 为第 i 条常规公共交通线路的松弛时间; t_0 为站点 j 的换乘步行时间。

由于换乘站形式和所处位置不同,各换乘站存在的换乘方向也有所差异。因此,很难保证所有的换乘方向均为协调方向。在协调运营的过程中,应保证主要换乘方向为协调方向,并尽可能实现更多的协调方向。

综上所述,本文研究的轨道交通与常规公交运营协调的组织原理如下:

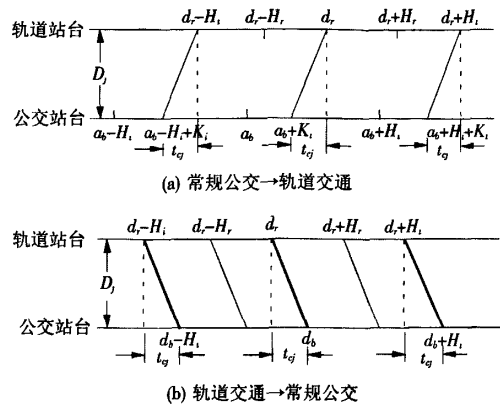


图 1 常规公交发车间隔是轨道交通 2 倍时的协调

- (1) 需要在常规公交时刻表中增加一部分松弛时间;
- (2) 在满足客运需求的条件下,常规公交与轨道交通的发车间隔应尽可能相等,或满足整数倍关系;
- (3) 应保证换乘站内主要客流换乘方向的协调,并实现尽可能多的换乘方向的协调。

2 模型基本假设

为便于运营协调模型的建立和求解的简化,建立如下假设:

- (1) 一个公共交通系统由一条轨道交通线路与若干条常规公交线路组成。
- (2) 换乘协调在于实现轨道交通线路和常规公交线路之间的协调。
- (3) 研究时段内公共交通乘客需求不具有弹性,即不会因为公共交通服务质量的变化而变化。
- (4) 轨道交通线路与各条常规公交线路在研究时段内采用均匀的发车间隔。
- (5) 轨道交通具有很高的准点率,列车在车站的到发延误时间可忽略不计。
- (6) 常规公交线路的运行时间受到道路条件的限制,可能出现到发时刻的提前与滞后,但提前与滞后的时间均不超过一个发车间隔。在首末站,常规公交线路的发车时间是准时的。
- (7) 常规公交线路车站的到达时间以计划到达时间为期望值,并服从正态分布。
- (8) 乘客利益与运营商利益同等重要,即乘客出行成本和运营商经营成本的重要性是等同的。

3 模型的建立

城市轨道交通与常规公共交通的协调调度,应以二者在协调运营中的总费用最低为目标,即将费用函数划分为运营费用和乘客费用两部分。

3.1 运营费用

广义角度来说,运营费用(C_o)包括城市轨道交通运营费用(C_{or})和系统内 N 条常规公交线路运营费用(C_{ob})的总和。即

$$C_o = \sum C_{O\theta} = C_{or} + C_{ob} = v_r T u_r w_r + \sum_{i=1}^N v_i T u_i w_i \quad (1)$$

$$\text{s. t. } H_\theta \leq \frac{60 P_v \theta m_\theta}{f_{\max \theta}} \quad (2)$$

式中, T 为研究时段, $\min; v_i$ 为平均运送速度, km/h; u_θ 为单车运营费用, 元/km; w_θ 为研究时段内的发车次数; P_v 为车辆定员, 人; m 为计划满载率; f_{\max} 为单向最大断面客流量, 人/h。

3.2 乘客费用

乘客费用(C_U)由乘客在出行过程中花费时间而产生,包括候车费用、换乘费用和在车费用 3 部分。

3.2.1 候车费用

候车费用(C_w)即由候车时间所产生的费用。本部分所涉及到的候车时间,指乘客在出行中第一次乘坐公共交通工具前在站台等候的时间。由于各线路发车间隔均一,可得乘客候车时间的期望值为发车间隔的一半。则候车费用为

$$C_w = \sum C_{w\psi} = C_{wn} + C_{wt} = \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j \in S_i} \sum_{k \in S_n} \frac{H_i q_{ojki}}{2} + \sum_{j \in S_i} \sum_{k \in S_n} \frac{H_i q_{ojkr}}{2} + \sum_{i=1}^N \sum_{j \in S_i} \sum_{k \in S_t} \frac{H_i q_{ojki}}{2} + \sum_{j \in S_i} \sum_{k \in S_t} \frac{H_i q_{ojkr}}{2} \right) V_w \quad (3)$$

式中, ψ 为站点类型, $\psi=n$ 时表示非换乘站, $\psi=t$ 时表示换乘站; S 为站点集合; H_θ 为发车间隔, $\min; q_{ojkl}$ 为站点 j 到站点 k 的客流量, 人; V_w 为乘客的时间价值, 元/min。

3.2.2 换乘费用

换乘费用(C_T)是由乘客在换乘过程中消耗时间引起的费用,包括换乘步行时间和换乘候车时间。一般地,换乘步行时间由各站不同站台之间的距离决定且为常数,而换乘候车时间的分布与接运线路车辆到达换乘站的时间分布相关。

对于换乘站点,按照其在轨道交通线路与常规公

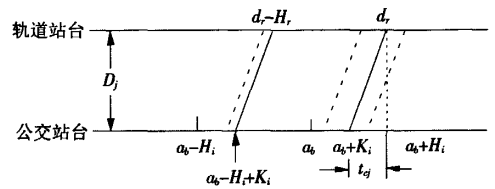
交线路中所处的位置不同,可以分为 4 类:(1) 轨道交通端点站—常规公交端点站(A 类换乘站);(2) 轨道交通中间站—常规公交端点站(B 类换乘站);(3) 轨道交通端点站—常规公交中间站(C 类换乘站);(4) 轨道交通中间站—常规公交中间站(D 类换乘站)。对于这 4 类换乘站,由于轨道交通与常规公交运营特性与换乘特性的不同,各种类型换乘时间的期望值也有所差异。下面对这 4 种情况分别进行讨论^[8]。

(1) 轨道交通端点站—常规公交端点站

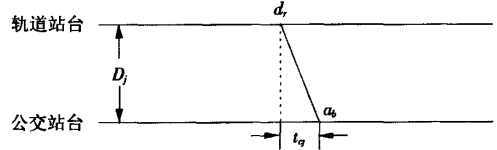
对于该类换乘站,线路在端点站折返,轨道交通与常规公交仅具有一个载客方向,换乘流向单一,是 4 类换乘站中最易于协调的。

① 常规公交→轨道交通

如图 2(a),设 a_b 为常规公交计划到站时间。那



(a) 常规公交→轨道交通



(b) 轨道交通→常规公交

图 2 A 类换乘站发车间隔相等的换乘模式

么,其实际到站时间在 $(a_b - H_i, a_b + H_i)$ 区间是随机的,令 $H_i/H_r = \beta_i$,则乘客可能换乘到在该时段内到达的 $2\beta_i$ 班次轨道交通列车。若乘客能换乘到 m 班次的轨道交通列车,则要求常规公交车辆到站时间落在 $[\max(a_b - H_i, a_b + (m-1)(H_r + K_i)), \min(a_b + mH_r + K_i, a_b + H_i)]$ 范围内。为简化模型,设 a_b 为 0,可得换乘到相应班次的概率及相应换乘时间期望值为

$$p_{Tai} = \int_{\max(-H_i, (m-1)H_r + K_i)}^{\min(mH_r + K_i, H_i)} f(t) dt \quad (4)$$

$$m \in [-\beta_i, \beta_i] \quad m \in Z$$

$$E_{Tai} = K_i + t_{cj} + mH_r -$$

$$\frac{1}{p_{Tai}} \int_{\max(-H_i, (m-1)H_r + K_i)}^{\min(mH_r + K_i, H_i)} t f(t) dt \quad (5)$$

$$m \in [-\beta_i, \beta_i] \quad m \in Z$$

② 轨道交通→常规公交

由于轨道交通的准时性及端点站的特性,可以通过控制折返时间,使轨道交通某些车次的换乘候车时

间为 0。当常规公交与轨道交通发车间隔相等时,如图 2(b)所示,通过控制折返时间,所有车次的换乘候车时间都为 0,则此时换乘时间就是换乘步行时间。推广到发车间隔成整数比例的情况,可得换乘时间为

$$T_{Tarm} = \begin{cases} t_{c_j} & m = 0 \\ t_{c_j} + (\beta_i - m)H_r & m \in (0, \beta_i - 1], m \in Z \end{cases} \quad (6)$$

由于 T_{Tarm} 为离散性随机变量,且乘客乘坐轨道交通各班次的概率相等,可得轨道交通→常规公交换乘时间期望值为

$$E_{Tar} = \frac{T_{Tar0} + T_{Tar1} + \dots + T_{Tar,\beta-1}}{\beta_i} = t_{c_j} + \frac{H_i}{2} - \frac{H_r}{2} \quad (7)$$

综合本部分的讨论,可得轨道交通端点站—常规公交端点站的总换乘费用为

$$C_{Ta} = \left(\sum_{j \in S_{a\eta}} \sum_{i \in S_{\eta}} \sum_{m=-\beta_i}^{\beta_i} E_{Tai} p_{Tai} q_{\eta j} + \sum_{j \in S_{a\eta}} E_{Tar} q_{\eta j} \right) V_w \quad (8)$$

式中, S_{η} 为 η 类换乘站; η 表示换乘站类型,取 a, b, c 或 d ; $S_{a\eta}$ 为途经 η 类换乘站,符合 η 类换乘站线路特征的常规公交线路集合; $q_{\eta j}$ 为站点 j 的换乘客流量,人。

(2) 轨道交通中间站—常规公交端点站

与 A 类换乘站相比, B 类换乘站需考虑轨道交通的上下行方向。若轨道交通方向 1 到站时间为 a_r , 方向 2 到站时间为 $a_r + \Delta t$, 本文定义当 $0 \leq \Delta t \leq 0.5H_r$ 时, 称方向 1 为先到方向, 方向 2 为后到方向; 当 $0.5H_r \leq \Delta t \leq H_r$ 时, 称方向 2 为先到方向, 方向 1 为后到方向。在后面的讨论中, 将所有先到方向定为方向 1, 即要求 $0 \leq \Delta t \leq 0.5H_r$ 。对于常规公交中间站亦应如此。

① 常规公交→轨道交通

确定换乘时间的关键是确定轨道交通的协调方向。首先讨论两方式发车间隔相等的情况。如图 3 所示, 对应轨道交通时间轴的换乘临界点可分别落在 a_{r1} 前、 a_{r1} 点、 a_{r1} 与 a_{r2} 间、 a_{r2} 点和 a_{r2} 后。由于 $0 \leq \Delta t \leq 0.5H_r$, 则一般情况下, 临界点落在 a_{r1} 点时的换乘候车时间最少, 故将方向 1 选择为轨道交通的协调方向, 方向 2 选择为轨道交通的非协调方向。

对于协调方向, 换乘到各班次的概率 p_{Tb1} 及其换乘时间期望值 E_{Tb1} 与 A 类换乘站相同。对于非协调方向, 由于 Δt 的取值不同, 在研究时段内所可能换乘到的轨道交通班次不尽相同。

当 $\Delta t \leq H_r - K_i$ 时, 乘客可以换乘到相应班次及

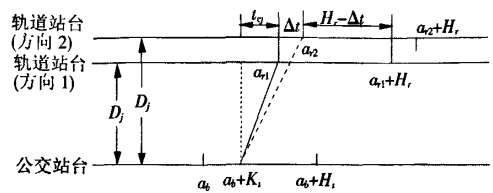


图 3 B 类换乘站发车间隔相等时换乘协调方向的选择

其前一班次的轨道交通线路, 则换乘到相应班次的概率及相应换乘时间期望值分别为

$$p_{Tb12} = \int_{\max(-H_i, (m-1)H_r + K_i + \Delta t)}^{\min(mH_r + K_i, H_i)} f(t) dt \quad (9)$$

$$m \in [-\beta_i, \beta_i] \quad m \in Z$$

$$E_{Tb12} = K_i + t_{c_j} + \Delta t + mH_r - \frac{1}{p_{Tb12}} \int_{\max(-H_i, (m-1)H_r + K_i + \Delta t)}^{\min(mH_r + K_i + \Delta t, H_i)} tf(t) dt \quad (10)$$

$$m \in [-\beta_i, \beta_i] \quad m \in Z$$

当 $\Delta t \geq H_r - K_i$ 时, 乘客可以换乘到相应班次及其前两班次的轨道交通线路, 此时换乘到相应班次的概率及相应换乘时间期望值为

$$p_{Tb12} = \int_{\max(-H_i, (m-1)H_r + K_i + (\Delta t - H_r))}^{\min(mH_r + K_i + (\Delta t - H_r), H_i)} f(t) dt \quad (11)$$

$$m \in [-\beta_i, \beta_i] \quad m \in Z$$

$$E_{Tb12} = K_i + t_{c_j} + \Delta t + (m-1)H_r - \frac{1}{p_{Tb12}} \int_{\max(-H_i, (m-1)H_r + K_i + (\Delta t - H_r))}^{\min(mH_r + K_i + (\Delta t - H_r), H_i)} tf(t) dt \quad (12)$$

$$m \in [-\beta_i, \beta_i] \quad m \in Z$$

但当方向 2 的换乘量远大于方向 1 的换乘量时, 方向 1 少量的换乘量节省下来的时间将小于方向 2 大量换乘量花费的时间。这时将方向 2 作为协调方向, 使总换乘时间最小。该部分的计算方法与前文所述计算方法相似, 不再赘述。

② 轨道交通→常规公交

当协调方向为方向 1 时, 两方向换乘到常规公交的换乘时间期望值分别为

$$E_{Tbr1} = \frac{T_{Tbr1,0} + T_{Tbr1,1} + \dots + T_{Tbr1,\beta-1}}{\beta_i} = t_{c_j} + \frac{H_i}{2} - \frac{H_r}{2} \quad (13)$$

$$E_{Tbr2} = \frac{T_{Tbr2,0} + T_{Tbr2,1} + \dots + T_{Tbr2,\beta-1}}{\beta_i} = t_{c_j} + \frac{H_i}{2} - \frac{H_r}{2} + \Delta t \quad (14)$$

协调方向为方向 2 时换乘时间期望值的计算方法与之类似, 不再赘述。

综上所述, 可得轨道交通中间站—常规公交端点站总换乘费用为

$$C_{Tb} = \sum_{j \in S_b} V_w \min \left(\sum_{i=S_b, m=-\beta_i}^{\beta_i} \sum_{\delta=1}^2 E_{Tb\delta} p_{Tb\delta} Q_{vj\delta} + \sum_{\delta=1}^2 E_{Tb\delta} Q_{vj\delta}, \sum_{i=S_b, m=-\beta_i}^{\beta_i} \sum_{\delta=1}^2 E'_{Tb\delta} p'_{Tb\delta} Q_{vj\delta} + \sum_{\delta=1}^2 E'_{Tb\delta} Q_{vj\delta} \right) \quad (15)$$

式中, δ 为换乘方向, 取 1 或 2。

(3) 轨道交通端点站—常规公交中间站

同 B 类换乘站相似, 在计算 C 类换乘站换乘时间时, 也要首先确定换乘协调方向, 并分别求出两个协调方向的换乘时间, 将其与换乘客流量相乘后, 选择较小值所对应的换乘方向为协调方向。但与 B 类换乘站不同的是, C 类换乘站的协调方向是轨道交通→常规公交或常规公交→轨道交通。

I. 协调方向为轨道交通→常规公交

由于常规公交的到达时间是一个随机变量, 根据其到站时间不同, 换乘时间应分两大类情况考虑。

① 当班公交车辆到达时间落在区间 $(a_b - H_i, a_b)$ 时, 乘客未能赶上当班公交车辆, 需要等候下一班车辆。设 a_b 为 0, 则此情况发生的概率及其相应的换乘时间期望值分别为

$$p_{Tcr1} = \int_{-H_i}^0 f(t) dt \quad (16)$$

$$E_{Tcr1} = t_{cj} + H_i \quad (17)$$

② 当班公交车辆到达时间落在区间 $(a_b, a_b + H_i)$ 时, 此时又可以根据下一班车到达时间的不同继续分为两种情况: 当下一班车辆晚于当班车辆到达, 乘客乘坐当班车辆离开换乘站; 当下一班车辆早于当班车辆到达时, 乘客乘坐的是本应下一班到达的车辆。由于两相邻常规公交车辆的到站时间均服从同一正态分布, 因而两车到站时间的差值也服从正态分布, 且其期望值为 H , 方差为 $2\sigma^2$ 。设 a_b 为 0, 则上述情况发生的概率及其相应的换乘时间期望值分别为

$$p_{Tcr21} = \int_{\max(0, mH_r)}^{\min((m+1)H_r, H_i)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-t^2/(2\sigma^2)} dt \cdot \left[1 - \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma}} e^{-(t-H_i)^2/(4\sigma^2)} dt \right] \quad (18)$$

$$p_{Tcr22} = \int_{\max(0, mH_r)}^{\min((m+1)H_r, H_i)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-t^2/(2\sigma^2)} dt \cdot \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{\pi\sigma}} e^{-(t-H_i)^2/(4\sigma^2)} dt \quad (19)$$

$$E_{Tcr21} = t_{cj} + \int_{\max(0, mH_r)}^{\min((m+1)H_r, H_i)} \frac{t}{p_{Tcr21}} f(t) dt \quad (20)$$

$$E_{Tcr22} = t_{cj} + \int_{\max(0, mH_r)}^{\min((m+1)H_r, H_i)} \frac{t}{p_{Tcr22}} f(t + H_i) dt \quad (21)$$

综上所述, 该情况下协调方向的换乘时间期望值为

$$E_{Tcr} = E_{Tcr1} p_{Tcr1} + E_{Tcr21} p_{Tcr21} + E_{Tcr22} p_{Tcr22} \quad (22)$$

对于非协调方向, 即常规公交→轨道交通换乘时间的确定, 其与 B 类换乘站中协调方向为方向 1 时非协调方向确定换乘时间的思路和计算方法完全相同, 不再赘述。其中 Δt 在这里被赋予了特定的含义, 即轨道交通的折返时间 t_r 。

II. 协调方向为常规公交→轨道交通

此时协调方向换乘到各车次的概率 p_{Tci} 及其换乘时间期望值 E_{Tci} 与 A 类换乘站相同。对于非协调方向即轨道交通→常规公交的换乘, 应首先确定由于非协调造成的附加时间 t_{dj} 。如图 4, t_r 为轨道交通折返时

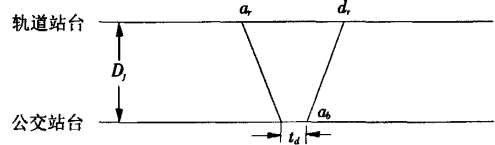


图 4 C 类换乘站轨道交通→常规公交延误时间的确定

间, 则可由几何关系得到

$$t_{dj} = t_r - 2t_{cj} \quad (23)$$

当 $t_d > 0$ 时, 表示乘客步行到达常规公交车站的时间早于常规公交协调换乘轨道交通的临界时间; $t_d = 0$ 时, 表示乘客步行到达常规公交车站的时间恰好等于常规公交协调换乘轨道交通的临界时间; 当 $t_d < 0$ 时, 表示乘客步行到达常规公交车站的时间晚于常规公交协调换乘轨道交通的临界时间。根据 t_d 取值范围的不同, 轨道交通→常规公交的换乘情况也有所不同。

当 $K_i - t_{dj} \geq 0$ 时, 换乘时间分两种情况考虑。

① 当班公交车辆到达时间落在区间 $(a_b - H_i, a_b + K_i - t_{dj})$ 时, 乘客未能赶上当班车辆, 需要等候下一班公交车辆。设 a_b 为 0, 则此情况发生的概率及其相应的换乘时间期望值分别为

$$p_{Tcr1} = \int_{-H_i}^{K_i - t_{dj}} f(t) dt \quad (24)$$

$$E_{Tcr1} = t_{cj} + H_i - K_i + t_{dj} \quad (25)$$

② 当班公交车辆到达时间落在区间 $(a_b + K_i - t_{dj}, a_b + H_i)$ 时, 此时又可以根据下一班车到达时间的不同继续分为两种情况: 当下一班车辆晚于当班车辆到达, 乘客乘坐当班车辆离开换乘站; 当下一班车辆早于当班车辆到达时, 乘客乘坐的是本应下一班到达的车辆。同样设 a_b 为 0, 则上述情况发生的概率及其相应的换乘时间期望值分别为

$$p_{Tcr21} = \int_{\max(K_i - t_{dj}, mH_r + K_i - t_{dj})}^{\min((m+1)H_r + K_i - t_{dj}, H_i)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-t^2/(2\sigma^2)} dt \cdot$$

$$\left[1 - \int_{-\infty}^0 \frac{1}{2\sqrt{\pi\sigma}} e^{-\frac{(\tau-H_i)^2}{4\sigma^2}} dt \right] \quad (26)$$

$$p_{Ter22} = \int_{\max(K_i-t_d, mH_r+K_i-t_d)}^{\min((m+1)H_r+K_i-t_d, H_i)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt \cdot \int_{-\infty}^0 \frac{1}{2\sqrt{\pi\sigma}} e^{-\frac{(\tau-H_i)^2}{4\sigma^2}} dt \quad (27)$$

$$E_{Ter21} = t_{cj} + \int_{\max(K_i-t_d, mH_r+K_i-t_d)}^{\min((m+1)H_r+K_i-t_d, H_i)} \frac{t}{p_{Ter21}} f(t) dt - K_i + t_{dj} \quad (28)$$

$$E_{Ter22} = t_{cj} + \int_{\max(K_i-t_d, mH_r+K_i-t_d)}^{\min((m+1)H_r+K_i-t_d, H_i)} \frac{t}{p_{Ter22}} f(t+H_i) dt - K_i + t_{dj} \quad (29)$$

此时轨道交通→常规公交的换乘时间期望值 E_{Ter} 亦可由式(22)表示。

当 $K_i - t_{dj} < 0$ 时, 换乘时间分 3 种情况考虑。

① 当班公交车辆到达时间落在区间 $(a_b - H_i, a_b + K_i - t_{dj})$ 时, 乘客未能赶上当班车辆, 需要等候下一班公交车辆。此时 p_{Ter1} 与 E_{Ter1} 的表达式同式(24)、式(25)。

② 当班公交车辆到达时间落在区间 $(a_b + K_i - t_{dj}, a_b)$ 时, 此时又可以根据上一班车到达时间的不同继续分为两种情况: 当上一班车辆晚于当班车辆到达, 乘客应乘坐当班车辆离开换乘站; 当上一班车辆早于当班车辆到达时, 乘客乘坐的是本应上一班到达的车辆。则上述情况发生的概率及其相应的换乘时间期望值分别为

$$p_{Ter31} = \int_{K_i-t_d}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt \cdot \left[1 - \int_{-\infty}^0 \frac{1}{2\sqrt{\pi\sigma}} e^{-\frac{(\tau+H_i)^2}{4\sigma^2}} dt \right] \quad (30)$$

$$p_{Ter32} = \int_{K_i-t_d}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt \cdot \int_{-\infty}^0 \frac{1}{2\sqrt{\pi\sigma}} e^{-\frac{(\tau+H_i)^2}{4\sigma^2}} dt \quad (31)$$

$$E_{Ter31} = t_{cj} + \int_{K_i-t_d}^0 \frac{t}{p_{Ter31}} f(t) dt - K_i + t_{dj} \quad (32)$$

$$E_{Ter32} = t_{cj} + \int_{K_i-t_d}^0 \frac{t}{p_{Ter32}} f(t-H) dt - K_i + t_{dj} \quad (33)$$

③ 当班公交车辆到达时间落在区间 $(a_b, a_b + H_i)$ 时, 此时又可以根据下一班车到达时间的不同继续分为两种情况: 当下一班车辆晚于当班车辆到达, 乘客乘坐当班车辆离开换乘站; 当下一班车辆早于当班车辆到达时, 乘客乘坐的是本应下一班到达的车辆。则上述情况发生的概率及其相应的换乘时间期望值分别为

$$p_{Ter21} = \int_{\max(0, mH_r+K_i-t_d)}^{\min((m+1)H_r+K_i-t_d, H_i)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt \cdot \left[1 - \int_{-\infty}^0 \frac{1}{2\sqrt{\pi\sigma}} e^{-\frac{(\tau-H_i)^2}{4\sigma^2}} dt \right] \quad (34)$$

$$p_{Ter22} = \int_{\max(0, mH_r+K_i-t_d)}^{\min((m+1)H_r+K_i-t_d, H_i)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt \cdot \int_{-\infty}^0 \frac{1}{2\sqrt{\pi\sigma}} e^{-\frac{(\tau-H_i)^2}{4\sigma^2}} dt \quad (35)$$

$$E_{Ter21} = t_{cj} + \int_{\max(0, mH_r+K_i-t_d)}^{\min((m+1)H_r+K_i-t_d, H_i)} \frac{t}{p_{Ter21}} f(t) dt - K_i + t_{dj} \quad (36)$$

$$E_{Ter22} = t_{cj} + \int_{\max(0, mH_r+K_i-t_d)}^{\min((m+1)H_r+K_i-t_d, H_i)} \frac{t}{p_{Ter22}} f(t+H_i) dt - K_i + t_{dj} \quad (37)$$

此时轨道交通→常规公交的换乘时间期望值为

$$E_{Ter} = E_{Ter1} p_{Ter1} + E_{Ter21} p_{Ter21} + E_{Ter22} p_{Ter22} + E_{Ter31} p_{Ter31} + E_{Ter32} p_{Ter32} \quad (38)$$

综上所述, 轨道交通端点站—常规公交中间站的总换乘费用为

$$C_{Te} = \sum_{j \in S_{jk}} V_w \min \left\{ \sum_{i \in S_{id}^{m=-\beta_i}} \sum_{m=-\beta_i}^{\beta_i} E_{Ter} p_{Ter} q_{ij} + \frac{1}{\beta_i} \sum_{m=0}^{\beta_i-1} E_{Ter} q_{vj}, \sum_{i \in S_{id}^{m=-\beta_i}} E'_{Ter} p'_{Ter} q_{ij} + \frac{1}{\beta_i} \sum_{m=0}^{\beta_i-1} E'_{Ter} q_{vj} \right\} \quad (39)$$

(4) 轨道交通中间站—常规公交中间站

该类换乘站是 B、C 两类换乘站的综合, 其确定换乘时间的思路也与 B、C 两类基本相同, 即首先确定协调方向。该类换乘站共有 3 组协调方向, 每组协调方向中分别又有 4 个换乘方向。分别求出各种协调方向下的换乘时间, 将其与换乘客流量相乘后, 选择较小值所对应的换乘方向为协调方向。即

$$C_{Td} = \sum_{j \in S_{jd}} V_w \min \left(\sum_{i \in S_{id}^{m=-\beta_i}} \sum_{\delta=1}^2 \sum_{\delta=1}^2 E_{Td\delta}^{(1)} p_{Td\delta}^{(1)} q_{ij\delta} + \sum_{m=0}^{\beta_i-1} E_{Td}^{(1)} q_{vj}, \sum_{i \in S_{id}^{m=-\beta_i}} \sum_{\delta=1}^2 \sum_{\delta=1}^2 E_{Td\delta}^{(2)} p_{Td\delta}^{(2)} q_{ij\delta} + \sum_{m=0}^{\beta_i-1} E_{Td}^{(2)} q_{vj}, \sum_{i \in S_{id}^{m=-\beta_i}} \sum_{\delta=1}^2 \sum_{\delta=1}^2 \sum_{\delta_1=1}^2 E_{Td\delta\delta_1}^{(3)} p_{Td\delta\delta_1}^{(3)} q_{ij\delta\delta_1} + \sum_{m=0}^{\beta_i-1} \sum_{\delta=1}^2 \sum_{\delta_1=1}^2 E_{Td\delta\delta_1}^{(3)} q_{vj\delta\delta_1} \right) \quad (40)$$

以上分别讨论了 4 种换乘站形式的换乘费用。将 4 种形式的换乘费用相加, 即可得到具有以上 4 种换乘站的系统内乘客的总换乘费用。

$$C_T = C_{T_a} + C_{T_b} + C_{T_c} + C_{T_d} \quad (41)$$

3.2.3 在车费用

在车费用(C_I)由乘客在车时间产生。在同一车辆上,所有乘客在同一运行区间所花费的时间是相同或近似相同的,因此系统内所有乘客的在车时间只与各断面的运行时间 t_{Sj} 及其断面客流量 q_{Sj} 相关。

$$C_I = \left(\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^{l_{S_i}} t_{S_i} q_{S_i} + \sum_{l=1}^{l_{S_r}} t_{S_r} q_{S_r} \right) V_w \quad (42)$$

式中, l_{S_i} 为途经断面的数目。

3.3 模型的表示形式

将运营费用、候车费用、换乘费用和在车费用相加,即得到系统内乘客的总费用。将总费用最小化,即为模型建立的总目标。该模型最终可表示为

$$\min: C = C_o + C_U = C_o + C_w + C_T + C_I \quad (43)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} H_\theta \leq \frac{60P_{\theta}m_\theta}{f_{\max\theta}} \\ 0 \leq K_i < \frac{H_i}{2} \end{cases} \quad (44)$$

式中, C_o 、 C_w 、 C_T 、 C_I 可分别由式(1)、式(3)、式(41)、式(42)得到。

4 算例

4.1 联合公交网络的建立

本算例中,联合公交网络由一条轨道交通线路、4条常规公交线路及 12 个站点组成,如图 5 所示。

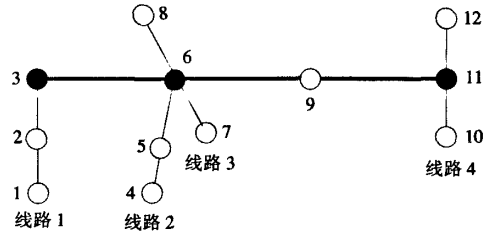


图 5 轨道交通与常规公交联合网络

—— 轨道交通线路; —— 常规公交线路; ● 换乘站; ○ 非换乘站。

4.2 基本输入参数的设定

4.2.1 研究时段的选定

为便于计算结果的分析,算例分别选取一高峰小时和平峰小时为研究时段。

4.2.2 各站上、下车客流量

设各站高峰、平峰小时上、下车客流量分别如表 1、表 2。

表 1 各站高峰小时上、下车客流量

单位:人

车站	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ΣO_i
1	0	20	60	136	117	55	99	69	110	94	59	142	961
2	42	0	117	61	148	69	74	94	137	92	65	134	1 033
3	129	83	0	97	147	3 844	83	61	3 532	88	5 393	107	13 564
4	140	96	86	0	56	105	0	0	66	83	115	139	886
5	77	96	51	43	0	104	0	0	66	100	78	75	690
6	61	51	4 796	129	122	0	51	104	4 453	172	5 235	119	15 293
7	77	78	191	0	0	223	0	32	227	220	120	92	1 260
8	130	131	90	0	0	63	55	0	159	127	84	222	1 061
9	131	124	3 820	72	56	4 050	232	60	0	152	3 978	83	12 758
10	77	57	57	117	112	61	117	244	140	0	75	32	1 089
11	54	131	4 614	144	76	5 170	206	130	3 792	227	0	144	14 688
12	143	117	154	140	117	80	107	66	245	69	164	0	1 402
ΣO_i	1 061	984	14 036	939	951	13 824	1 024	860	12 927	1 424	15 366	1 289	64 685

表 2 各站平峰小时上、下车客流量

单位:人

车站	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	ΣO_i
1	0	13	32	20	29	27	32	26	25	41	40	38	323
2	16	0	18	39	41	23	30	37	47	29	21	41	342
3	46	34	0	39	32	1 287	42	33	1775	54	1 954	56	5 352
4	41	36	19	0	33	27	0	0	33	25	18	46	278
5	43	11	22	13	0	33	0	0	38	46	21	30	257
6	49	27	1916	29	40	0	29	68	1 573	67	1 862	40	5 700
7	40	47	39	0	0	31	0	12	54	75	76	71	445
8	29	48	29	0	0	26	25	0	66	75	70	63	431
9	50	33	1 935	39	41	1 761	94	41	0	74	1 376	65	5 509
10	27	38	21	54	54	28	74	49	52	0	49	11	457
11	40	49	1761	41	47	1 542	120	57	1 386	88	0	73	5 204
12	50	25	42	37	63	53	71	54	73	58	54	0	580
ΣD_i	431	361	5 834	311	380	4 838	517	377	5 122	632	5 541	534	24 878

4.2.3 相关运营参数的设定和计算

假设 4 条常规公交线路所用车型定员均为 90 人,轨道交通线路单车定员 240 人,4 辆编组,允许最高满载率均为 120%。根据表 1、表 2,可分别求得高峰小时各公交线路满足客流需求情况下的发车间隔为: $H_1 \leq 3.3 \text{ min}$, $H_2 \leq 3.6 \text{ min}$, $H_3 \leq 5.1 \text{ min}$, $H_4 \leq 4.6 \text{ min}$,轨道交通发车间隔为 $H_r \leq 3.2 \text{ min}$ 。平峰小时各公交线路满足客流需求情况下的发车间隔分别为: $H_1 \leq 8.5 \text{ min}$, $H_2 \leq 10.1 \text{ min}$, $H_3 \leq 12.5 \text{ min}$, $H_4 \leq 10.3 \text{ min}$ 。轨道交通发车间隔为 $H_r \leq 8.2 \text{ min}$ 。

由于约束条件下的轨道交通与常规公交发车间隔的取值范围相差不大,因此上述两情况下都可按照轨道交通与常规公交发车间隔相等的情况进行优化。

4.2.4 其它输入参数的设定

设轨道交通线路平均运送速度为 42 km/h,总周转时间为 24 min,单车运营成本 u_r 为 48 元/km。4 条常规公交线路平均运送速度均为 15km/h,总周转时间为 16 min,单车运营成本 u_b 为 4.8 元/km。所有换乘站的换乘步行时间 t_c 均为 1 min;乘客的时间价值 V_w 为 1.5 元/min;乘客到达各个车站均服从标准正态分布,即 $\sigma=1$ 。

4.3 求解结果

运用遗传算法求解。设定种群规模为 40,根据变量精度确定码长为 10,以 0.9 为交叉率,0.06 为变异率,以压差 2 为目标函数线性分配适应度值,经过 500 次迭代后输出结果,可分别得到高峰、平峰小时优化结果,如表 3。

表 3 求解结果

数据项	计算结果		数据项	计算结果		数据项	计算结果				
	高峰	平峰		高峰	平峰		高峰小时	平峰小时			
发车 间隔/ min	H_1	3.2055	8.0162	K_1	0.8489	0.4304	C	1 595 625	698 567		
	H_2	3.2055	8.0162	松弛	K_2	1.3914	0.8165	C_0	1 054 080	397 440	
	H_3	3.2055	8.0162	时间/ min	K_3	1.5382	1.7496	费用 /元	C_w	155 358	149 345
	H_4	3.2055	8.0162	K_4	0.7196	2.4857	C_T	56 901	27 828		
	H_r	3.2055	8.0162				C_I	329 286	123 954		

4.4 协调与非协调状态下的费用对比

以满足客流需求情况下的常规公交和轨道交通的发车间隔作为发车间隔,可分别得到非协调情况下高峰、平峰小时的各项费用。如表4所示。

定义一个参数 λ ,表示协调状态与非协调状态相比各项费用的节约情况,称为费用降低率。

$$\lambda = \frac{\text{非协调状态费用} - \text{协调状态费用}}{\text{非协调状态费用}} \times 100\% \quad (45)$$

协调与非协调状态下高峰、平峰小时各部分的费用及

费用降低率,如表5。

表4 非协调状态下系统各部分的费用值

项目	高峰小时	平峰小时
运营费用/元	1 045 440	397 440
候车费用/元	167 091	159 294
换乘费用/元	68 104	37 514
在车费用/元	329 286	123 954
总费用/元	1 609 921	718 202

表5 协调、非协调状态下系统各部分的费用值及费用降低率

项目		运营费用/元	候车费用/元	换乘费用/元	在车费用/元	总费用/元
高峰小时	协调状态	1 054 080	155 358	56 901	329 286	1 595 625
	非协调状态	1 045 440	167 091	68 104	329 286	1 609 921
	费用差额	-8 640	11 733	11 203	0	14 296
	费用降低率	-0.83%	7.55%	19.69%	0.00%	0.90%
平峰小时	协调状态	397 440	149 345	27 828	123 954	698 567
	非协调状态	397 440	159 294	37 514	123 954	718 202
	费用差额	0	9 949	9 686	0	19 635
	费用降低率	0.00%	6.66%	34.81%	0.00%	2.81%

5 结论

本文利用运营协调模型对轨道交通和常规公交进行运营协调优化,可得到如下结论:

(1) 通过该运营协调模型,可以实现轨道交通和常规公交联合网络的总体优化。

(2) 运营协调能够明显提高乘客的换乘效率,乘客的换乘费用在高峰时段和平峰时段均明显降低。

(3) 协调状态下的候车费用低于非协调状态下的候车费用。

(4) 运营协调不会降低运营费用,相反有可能使运营费用增加。

(5) 运营协调的优化效果,平峰时段明显优于高峰时段,这说明平峰时更需要进行运营协调。

参考文献:

- [1] 黄文娟. 轨道交通与常规公交换乘协调研究[D]. 西安: 长安大学. 2004.
 [2] Hurdle V F, Wirasinghe S C. Location of Rail Stations for

- Many to One Travel Demand and Several Feeder Model[J]. Journal of Advanced Transportation. 1980, 14(1): 29-45.
 [3] Lee K T, Schonfeld P. Optimal Slack Time for Transfers at a Transit Terminal[J]. Journal of Advanced Transportation. 1991, 22(3): 281-308.
 [4] Chien S, Schonfeld P. Joint Optimization of a Rail Transit Line and Its Feeder Bus System[J]. Journal of Advanced Transportation. 1997, 31(3): 251-284.
 [5] Ching J, Schonfeld P. Schedule Coordination in a Multiple Hub Transit Network[J]. ASCE Journal of Urban Planning and Development. 2005, 131(2): 112-124.
 [6] Lee K T. Optimization of Timed Transfers in Transit Terminals[D]. Maryland: University of Maryland College Park, 1993.
 [7] 姚振平, 宋瑞, 等. 城市公共交通运营调度管理[M]. 北京: 中国铁道出版社. 2002.
 [8] 张宇石. 城市轨道交通和常规公交运营调度协调研究[D]. 北京: 北京交通大学. 2006.

(责任编辑 李淑萍 刘梅林)