

轨道交通接运公交发车间隔及票价优化模型

许旺土,何世伟,宋 瑞

(北京交通大学,交通运输学院,北京 100044)

摘要:考虑轨道交通接运公交发车间隔及票价的乘客需求弹性,对接运公交系统的成本及收入进行分析,建立了以最大系统总收益值为目标函数、轨道客运量份额为主要约束条件的非线性规划模型,并探讨了它的求解方法。算例结果和参数灵敏度分析表明,优化模型在约束条件内存在局部最优解,系统总收益值随着平均单个乘客等待时间和票价的增加以不同的速度减少,乘客对票价增减的敏感性比对发车间隔增减的敏感性强。

关键词:交通运输系统工程;轨道交通;接运公交;发车间隔;票价;系统总收益

中图分类号:U491.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2009)06-1469-06

Headway and fare optimization model for feeder bus of rail transit

XU Wang-tu, HE Shi-wei, SONG Rui

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

Abstract: The cost and income of the feeder bus system of the rail transit were analyzed in consideration of the elasticity of the passenger demand for the headway and the fare of the feeder bus, and a nonlinear programming model as well as its solution method was proposed taking the maximization of the gross system profit as the target function and the passenger volume share of the rail transit as the constraint conditions. The numerical case study and the parametric sensitivity analysis showed, there is a local optimingation solution of the model in the frame of constraint conditions. The gross system profit gradually decreases in various rates with the increase of the average single passenger waiting time and the bus fare. The sensitivity of the passenger to the increase or decrease of the fare is more strong than that of the headway.

Key words: engineering of communication and transportation system; rail transit; feeder buses; headway; fare; gross system profit

接运公交线路(Feeder bus routes)指专门为轨道交通接送乘客的公共交通线路的总称,它可以是常规街道公交、中运量公交(如BRT)、短距离的地面公交支线等。建设接运公交线路的目的是为了保证现有轨道交通线路有足够的客流量,充分发挥轨道交通的运能^[1]。近几年,国外对接

运公交系统的关注日益增多,并形成了两种主要的研究方法:收益分析和网络优化。收益分析模型通常基于道路网络的物理和几何特性,借助乘客需求时空分布函数对接运公交系统进行收益水平的探讨,其目标函数大多为求解最优收益值, Kuah 和 Perl^[2], Chien 和 Schonfeld^[3], Chien^[4]等

收稿日期:2008-02-25.

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA11Z203);霍英东基金项目(104007);北京交通大学重点基金项目(2006XZ004).

作者简介:许旺土(1981-),男,博士研究生.研究方向:城市交通规划与管理. E-mail:ato1981@163.com

分别提出了各自的接运公交收益分析模型,从各个不同的角度求解接运公交所能带来的最大社会效益或系统效益;网络优化模型不以街道的几何特性分析为侧重点,而是将接运服务区域视为不同的点,将乘客需求集中于这些点之上,并根据不同的算法将需求分配在公交线网上,用于求解最佳的接运公交网络结构,或用于评价现有接运公交网络的可靠度和易达性^[5]。

目前,我国在轨道交通接运公交线路的规划和建设方面取得了一定的研究成果^[6-7],然而,这些研究主要侧重接运公交的规划方法、网络优化、设施设计及运营效益,多数未能考虑接运线路的服务水平(如发车间隔、票价、乘客舒适度等)和乘客需求的关系。当今轨道交通的运营系统和客源(乘客需求)已经比较稳定,研究接运公交线路的合理服务水平、乘客的需求弹性则成为重点,基于此,本文对接运公交的发车间隔和票价水平的优化方法及其对乘客需求的影响进行了研究,旨在为相关决策部门提供参考。

1 接运公交线路系统分析

1.1 基本假设及符号定义

针对一双向开行的轨道交通线路,在轨道交通的运营状况比较稳定的条件下,确定相应的接运线路的发车间隔和票价水平为本文的主要研究目的。

将一天的运营时间分为高峰和非高峰 2 个时段,并做如下假设:①轨道交通服务水平不受其接运公交运营状况的影响,且不存在发车间隔方向不均现象;②所有接运公交线路由同一部门统一调度,即所有接运公交线路的票价水平和发车间隔都相同,且它的票价为均一票价;③接运公交线路仅仅为轨道交通接运乘客服务,不考虑它们与其他交通方式的接驳情况,且接运公交的乘客需求弹性仅仅与其发车间隔和票价有关,与其他因素(如舒适度、拥挤度等)无关。

论文模型所用到的符号定义: $h_m^b(h_m^q)$ 为(非)高峰时段轨道交通线路的发车间隔, min; c_m 为轨道交通线路单节车辆的定额载客能力, prs/veh; $h_b^p(h_b^q)$ 为高峰(非高峰)时段接运公交线路的发车间隔, min; c_b 为接驳公交车辆的定额载客能力, prs/veh; $T_p(T_q)$ 为高峰(非高峰)时段的长度, h; F 为接运公交线路均一票价, 元; $q_{ir}^p(q_{ir}^q)$ 为高峰(非高峰)时段第 i 个轨道车站第 r 条接运公交线路单位时间, 单位里程内的潜在乘客需求 prs/

(km · min⁻¹); l_{ir} 为第 i 个轨道车站第 r 条接运公交线路的长度, km; $z_b(z_m)$ 为接运公交线路(轨道交通)的平均单个乘客等车时间与发车间隔的比例, 无量纲, 对于接运公交线路而言, $z_b h_b^*$ 表示在采用发车间隔为 h_b^* 的情况下, 单个乘客的平均等车时间为 $z_b h_b^p$; e_{ub} 为接运公交发车间隔的乘客需求弹性因子, 无量纲; e_{pb} 为接运公交票价的乘客需求弹性因子, 无量纲; R_i 为第 i 个轨道交通车站的接驳公交线路数; K 为设置接运公交服务的轨道交通车站数; p 为接运公交所必须承担接运的轨道交通乘客量份额。

1.2 接运公交系统收入及成本分析

在轨道交通客源比较稳定的条件下,其接运公交系统的乘客需求存在弹性,而需求弹性和接运公交系统的服务水平相关^[3,5];另一方面,服务水平越高所需的运营成本就越高,并直接影响接运系统的总收益。接运公交系统运营一天的总收益可定义为接运系统的票价收入与政府补贴之和减去车辆运营成本及所有乘客浪费的时间成本。即接运公交系统收益由 4 部分构成:票价收入、政府补贴、运营成本、乘客时间浪费成本。

接运公交系统的票价收入指一个运营天内,全体乘客总数与均一票价的乘积,分为高峰和非高峰两个时段计算。

高峰时段第 i 个轨道交通车站的接运公交乘客量, Q_{bi}^p , 可以由下式表示

$$Q_{bi}^p = 60 T_p \sum_{r=1}^{R_i} q_{ir}^p l_{ir} (1 - e_{ub} z_b h_b^p - e_{pb} F) \quad (1)$$

式中: $(1 - e_{ub} z_b h_b^p - e_{pb} F)$ 为接运公交发车间隔及票价的乘客需求弹性的量化指标, 根据 1.1 节第 ③条假设, e_{ub} 、 e_{pb} 取 0 表示乘客需求不受接运公交发车间隔和票价变化的影响, 所有的潜在乘客需求都会使用接运公交完成出行。因此, 高峰时段轨道交通所有接运公交线路上的乘客量 Q_b^p 为

$$Q_b^p = 60 T_p \sum_{i=1}^K \sum_{r=1}^{R_i} q_{ir}^p l_{ir} (1 - e_{ub} z_b h_b^p - e_{pb} F) = 60 T_p (1 - e_{ub} z_b h_b^p - e_{pb} F) \sum_{i=1}^K \sum_{r=1}^{R_i} q_{ir}^p l_{ir} \quad (2)$$

同理可得, 非高峰时段轨道交通所有的接运公交线路上的乘客量 Q_b^q 为

$$Q_b^q = 60 T_q (1 - e_{ub} z_b h_b^q - e_{pb} F) \sum_{i=1}^K \sum_{r=1}^{R_i} q_{ir}^q l_{ir} \quad (3)$$

故全天运营时段内, 轨道交通所有接运公交

线路上的乘客量 Q_b 为

$$Q_b = Q_b^p + Q_b^q = \sum_{i=1}^K \sum_{r=1}^{R_i} 60 [T_p(1 - e_{wb} z_b h_b^p - e_{pb} F) q_{ir}^p + T_q(1 - e_{wb} z_b h_b^q - e_{pb} F) q_{ir}^q] l_{ir} \quad (4)$$

由此,全天运营时段内,轨道接驳公交系统的票价收入 I_b 可表示为

$$I_b = Q_b F = 60 F \sum_{i=1}^K \sum_{r=1}^{R_i} [T_p(1 - e_{wb} z_b h_b^p - e_{pb} F) q_{ir}^p + T_q(1 - e_{wb} z_b h_b^q - e_{pb} F) q_{ir}^q] l_{ir} \quad (5)$$

设接运公交单位乘客的政府补贴为 s ,则全天运营时段,接运公交系统得到的政府补贴 S_b 为

$$S_b = Q_b s = 60 s \sum_{i=1}^K \sum_{r=1}^{R_i} [T_p(1 - e_{wb} z_b h_b^p - e_{pb} F) q_{ir}^p + T_q(1 - e_{wb} z_b h_b^q - e_{pb} F) q_{ir}^q] l_{ir} \quad (6)$$

接运公交系统的乘客时间浪费成本包括乘客等待接运公交车的时间成本和接运公交与轨道交通之间的乘客换乘时间成本。

全天运营时段内全体乘客的等待接运公交车的时间成本 C_w ,可表示为:

$$C_w = \mu(T_w^p + T_w^q) = \mu(Q_b^p z_b h_b^p + Q_b^q z_b h_b^q) \quad (7)$$

式中: μ 为单位时间、单个乘客单位等车时间的平均成本,元/(min·prs⁻¹),文献[8]中建议取 $\mu = 0.06 \text{ \$/}(\text{min} \cdot \text{prs}^{-1})$ (约0.42元/(min·prs⁻¹); $z_b h_b^p$ ($z_b h_b^q$)为(非)高峰时段单个乘客等待接运公交车的时间(min); T_w^p (T_w^q)为高峰(非高峰)时段所有乘客等待接运公交车的时间(min)。

同理,在不计乘客换乘的步行时间情况下,全天运营时段内接运公交与轨道交通之间全体乘客的换乘时间成本 C_t 可表示为

$$C_t = \eta(T_t^p + T_t^q) = \eta(Q_b^p z_m h_m^p + Q_b^q z_m h_m^q) \quad (8)$$

式中: η 为单个乘客单位换乘时间的平均成本,元/(min·prs⁻¹),文献[8]中建议取 $\eta = 0.05 \text{ \$/}(\text{min} \cdot \text{prs}^{-1})$ (约0.35元/(min·prs⁻¹); $z_b h_m^p$ ($z_b h_m^q$)为高峰(非高峰)时段每个乘客从接运公交换乘到轨道交通线的平均时间(不计步行时间),min; T_t^p (T_t^q)为高峰(非高峰)时段所有乘客的换乘时间,min。

全天开行的全部接运公交车辆的运营成本 C_v 可以表示为

$$C_v = \rho(n_p + n_q) = \rho(60 T_p/h_b^p + 60 T_q/h_b^q) \quad (9)$$

式中: ρ 为开行一辆接运公交车辆的平均成本,元/veh,本文取 60 元/veh^[8]; $n_p = T_p/h_b^p$ 为高峰时段开行的接运公交车数(veh); $n_q = T_q/h_b^q$ 为非高峰时段开行的接运公交车数(veh)。

2 优化模型及其求解算法

2.1 优化模型

从第 1.2 节的分析可知,接运公交系统总收益不仅考虑了运营者的收入($I_b + S_b - C_v$),同时包括乘客等待接运公交车的时间成本和换乘时间成本($C_w + C_t$),因而可以体现公共交通的公众服务特性。基于接运系统的收入成本分析,可建立如下的发车间隔及票价的优化模型

$$\left. \begin{aligned} \max f(h_b^p, h_b^q, F) &= I_b + S_b - (C_w + C_t + C_v) \\ \text{s. t.} \\ Q_b &\geq p Q_m \\ h_{\min} &\leq h_b^p \leq h_{\max} \\ h'_{\min} &\leq h_b^q \leq h'_{\max} \\ F_{\min} &\leq F \leq F_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中:目标函数是为了实现接运公交系统总收益的最大化;以 h_b^p, h_b^q, F 为决策变量; I_b, S_b, C_w, C_t, C_v 分别如式(5)~式(9)所示;第一个约束条件为接运公交系统的载客量约束,它表明接运公交系统一天之内所接运的乘客量必须达到轨道交通全天最大可能客运量的某个比例,其中 p 为此份额比例, Q_m 为轨道交通全天最大可能的客运量,假设每列轨道交通列车均配备 6 节每节容量为 c_m 的车厢,则 $Q_m = Q_m^p + Q_m^q = 6 c_m (T_p/h_m^p + T_q/h_m^q)$;第二、三个约束是接运公交发车间隔的上、下限约束,其中 h_{\min} (h'_{\min})为(非)高峰时段的最小允许发车间隔, h_{\max} (h'_{\max})为(非)高峰时段的最大允许发车间隔;第四个约束是接运公交票价的上下限约束,其中 F_{\min} 为最小允许票价, F_{\max} 为最大允许票价。

2.2 求解算法

将式(10)写成如下标准最小非线性规划模型:

$$\left. \begin{aligned} \min h(\mathbf{x}) \\ \text{s. t.} \\ -Q_b + p Q_m &\leq 0 \\ -h_b^p + h_{\min} &\leq 0 \\ h_b^p - h_{\max} &\leq 0 \\ -h_b^q + h'_{\min} &\leq 0 \\ h_b^q - h'_{\max} &\leq 0 \\ -F + F_{\min} &\leq 0 \\ F - F_{\max} &\leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: x 表示决策变量的向量, $x = [h_b^l; h_b^h; F]$; $h(x) = (C_w + C_i + C_v) - (I_b + S_b)$; 用 $g_i(x)$ 表示各个不等式约束, 则式(11)可写为

$$\begin{cases} \min h(x) \\ \text{s. t.} \\ g_i(x) \leq 0, i=1, 2, \dots, 7 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)为一个标准的不等式约束的非线性规划模型, 该类模型的解法有很多, 典型的有可行方向法、梯度法、罚函数法、乘子法^[9]等。由于不能保证式(12)目标函数在可行域内为凸函数, 为了在求解过程中获得二次或超线性收敛^[9-10], 本文通过逐次二项规划法 (Successive Quadratic Programming, SQP) 求解, 具体过程参见文献[10]。

3 算例分析

如图 1 所示, 针对某一条轨道交通线路, 沿线在 3 个站分别布设一条接运公交线路, 设全天运营时间 T 为 18 h, 其中的高峰时间 $T_p = 5$ h, 非高峰时间 $T_q = 13$ h; 并假设轨道交通高峰时段发车间隔 $h_m^p = 3$ min, 非高峰时段发车间隔 $h_m^q = 8$ min; 最大允许发车间隔分别为 12 min 和 20 min; 由接驳公交所承担的轨道交通线路最大可能客运量的比例必须大于 0.1, 即 $p = 0.1$; 接运公交系统最小和最大许允均一票价为 1.0 元和 6.0 元。优化模型中所需的其他参数如表 1 所示。

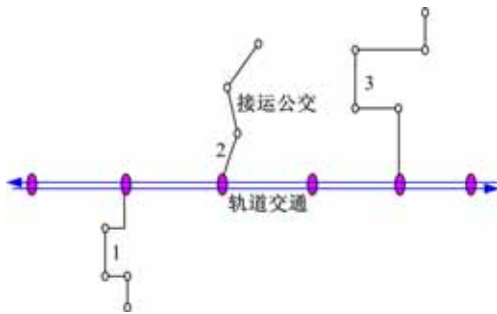


图 1 接运公交线路(实例)
Fig. 1 Feeder bus routes for case analysis

采用 $x_0 = [5; 15; 1.5]$; $\gamma = 1 \times 10^{-6}$, 将所有参数代入式(12)中, 借助 Matlab 软件进行求解, 经过 26 次迭代之后得最优解为 $\hat{x} = [3.32; 9.00; 1.89]$; 目标函数 $h(\hat{x}) = -314\ 250$ 元, 即 $f(\hat{x}) = 314\ 250$ 元; 目标函数值迭代过程如图 2 所示; 取整之后得到最优解为 $\hat{x} = [3.5; 9.0; 2.00]$ 。

从图 2 可知, 式(12)的目标函数随迭代次数的增加而趋于平稳, 这说明在约束条件下, 该非线性规划目标函数局部收敛, 即存在局部最优解。

表 1 算例部分参数值

Table 1 Partial parameters of numerical case

参数	值
$c_m / (\text{prs} \cdot (\text{veh})^{-1})$	180
$c_b / (\text{prs} \cdot (\text{veh})^{-1})$	90
z_b	0.5
z_m	0.5
e_{ub}	0.05
e_{pb}	0.2
$q_1^h (q_1^l) \text{prs} / (\text{km} \cdot \text{min}^{-1})$	10(5)
$q_2^h (q_2^l) \text{prs} / (\text{km} \cdot \text{min}^{-1})$	20(10)
$q_3^h (q_3^l) \text{prs} / (\text{km} \cdot \text{min}^{-1})$	30(20)
l_{11} / km	10
l_{21} / km	8
l_{31} / km	5
$s / (\text{元} \cdot (\text{prs})^{-1})$	0.8

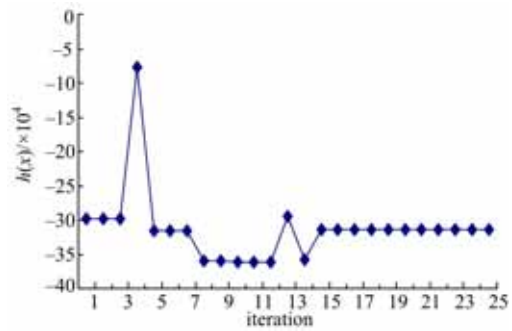


图 2 算例中优化模型目标函数的收敛特征
Fig. 2 Convergence process of objective function for numerical case

为了描述接运公交系统的乘客行为, 分别对接运公交系统等车时间与发车间隔的比值 z_b 、乘客需求弹性的影响因子 e_{ub} 、 e_{pb} 进行灵敏度分析。令 z_b 在区间 $(0, 2)$ (假设平均单个乘客等车时间不超过 2 个发车间隔长度) 之间取随机值, e_{ub} 、 e_{pb} 在区间 $[0, 1)$ 之间取随机值, 并同时保持表 1 中其他参数值不变, 将各个参数代入式(12)分别进行求解, 可得到如表 2~表 4 所示的计算结果。

表 2 表 1 中参数不变, 不同 z_b 值对应的最优解及目标函数值

Table 2 Optimal solution & objective function value for various z_b with fixed parameters in table 1

z_b	$x^* = [h_b^l; h_b^h; F]^*$	$h(x^*)$	$f(x^*)$
0.01	[8.01; 16.13; 2.10]	-496 010	496 010
0.03	[7.00; 14.00; 2.09]	-483 150	483 150
0.05	[6.82; 10.09; 2.08]	-475 270	475 270
0.10	[4.88; 9.56; 2.07]	-454 310	454 310
0.30	[3.69; 9.04; 2.02]	-379 630	379 630
0.50	[3.32; 9.00; 1.89]	-314 250	314 250
0.80	[3.06; 8.00; 1.81]	-245 600	245 600
1.00	[3.00; 8.00; 1.77]	-199 390	199 390
1.50	[3.00; 8.00; 1.75]	-106 610	106 610

z_b 与乘客到达的均一程度相关,当乘客均匀到达时, z_b 取 0.5^[11]。由表 2 可知,接运公交的最大系统收益值随着单个接运公交乘客平均等车时间与其发车间隔的比值 z_b 的增大而减少,这说明平均单个乘客等车时间 $\tau_{wb} = z_b h_b$ 越小,系统的总收益越大;在 z_b 很小的情况下,如 $z_b = 0.01$,即使使用较大的发车间隔(对应 $[h_b^l; h_b^q]^* = [8.01; 16.13]$),乘客的等车时间仍然很小,所以同样能获得较大的目标收益值并满足乘客的需求;相反,随着 z_b 的增大,说明平均等待时间增大,则乘客要求的发车间隔就越短; $z_b > 1$,平均乘客的等待时间比发车间隔大的情况下,则系统要求使用尽量短的发车间隔来满足乘客的需求,所以最优解中的发车间隔达到了最小允许限制值($h_{\min} = 3 \text{ min}, h'_{\min} = 8 \text{ min}$)。

表 3 中, $e_{ub} = 0.1$ 表示每增加 1 min 的平均乘客等待时间(或发车间隔),接运线路将减少 10% 的客流量;表 4 中, $e_{pb} = 0.1$ 表示每增加 1 元

表 3 表 1 中参数不变,不同 e_{ub} 值对应的最优解及目标函数值

Table 3 Optimal solution and objective function value for various e_{ub} with fixed parameters fixed parameters in Table 1

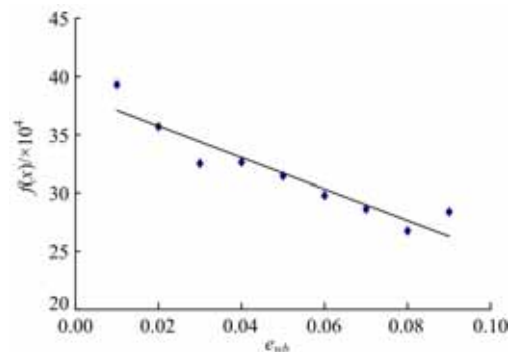
e_{ub}	$x^* = [h_b^l; h_b^q; F]^*$	$h(x^*)$	$f(x^*)$
0.01	[6.18; 11.50; 2.19]	-392 620	392 620
0.02	[5.81; 12.00; 2.13]	-356 140	356 140
0.03	[5.59; 11.74; 2.08]	-325 380	325 380
0.04	[3.43; 10.00; 2.02]	-326 280	326 280
0.05	[3.32; 9.00; 1.89]	-314 250	314 250
0.06	[3.23; 8.58; 1.83]	-298 150	298 150
0.07	[3.17; 8.00; 1.78]	-286 220	286 220
0.08	[3.11; 8.00; 1.75]	-267 250	267 250
0.09	[3.06; 8.00; 1.74]	-284 470	284 470
≥ 1.00	无可行解	-	-

表 4 表 1 中参数不变,不同 e_{pb} 值对应的最优解及目标函数值

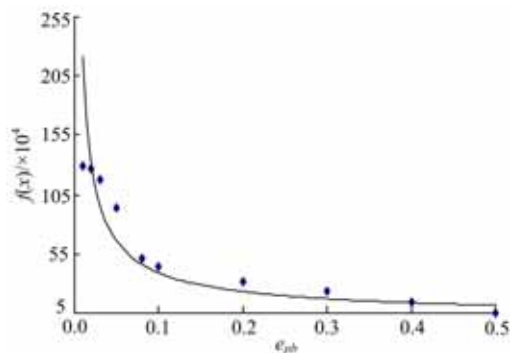
Table 4 Optimal solution and objective function value for various e_{pb} with fixed parameters fixed parameters in Table 1

e_{pb}	$x^* = [h_b^l; h_b^q; F]^*$	$h(x^*)$	$f(x^*)$
0.01	[7.44; 12.64; 6.00]	-1 293 300	1 293 300
0.02	[7.00; 10.05; 6.00]	-1 268 200	1 268 200
0.03	[6.82; 9.46; 6.00]	-1 174 500	1 174 500
0.05	[6.60; 9.23; 6.00]	-940 100	940 100
0.08	[5.37; 9.00; 2.36]	-517 800	517 800
0.10	[3.43; 9.00; 1.89]	-447 030	447 030
0.20	[3.32; 9.00; 1.89]	-314 250	314 250
0.30	[3.00; 8.00; 1.50]	-229 680	229 680
0.40	[3.00; 8.00; 1.50]	-140 230	140 230
0.50	[3.00; 8.00; 1.50]	-50 790	50 790
≥ 0.51	无可行解	-	-

钱的票价,接运线路将减少 10% 的客流量。由表 3 和表 4 可知,最优解和目标函数值对应于 e_{ub} 变化的速度没有对应于 e_{pb} 变化的速度快,即当 e_{ub} 、 e_{pb} 分别从 0.01 变化到 0.1 以上时, e_{ub} 对应的目标函数值变化幅度比 e_{pb} 对应的目标函数值变化幅度小,且 e_{ub} 对应的有可行解变化范围比 e_{pb} 对应的有可行解变化范围小。这说明,乘客对接运公交发车间隔的敏感性没有其对票价敏感性对系统总收益的影响范围大。 e_{ub} 在有解范围内对应的最大值为 0.09,说明发车间隔增大 1 min 至多使 9% 的乘客会因为发车间隔的增大而不选择接运公交系统;而 e_{pb} 在有解范围内对应的最大值为 0.51,说明票价增加 1 元,最多可能有 51% 的乘客会流失。这也说明了接运公交票价的乘客需求弹性大于发车间隔的需求弹性,即乘客有时不会在意调度单位增加或缩短 1 min 的发车间隔,但是对是否增加或减少 1 元票价十分敏感。由表 3 和表 4 可以得到图 3(a)(b)。



(a)



(b)

图 3 表 1 中参数不变, e_{ub} 、 e_{pb} 和 $f(x)$ 的拟合关系曲线图
Fig. 3 Curve fitting between $f(x)$ and e_{ub} , e_{pb} with fixed parameters in Table 1

从图 3(a)(b) 得知,在其他参数确定的情况下, $f(x)$ 和 e_{ub} 的关系大致呈负线性相关关系,即 e_{ub} 越大,所获得的接运系统收益越小;而 $f(x)$ 和

e_{pb} 的关系大致呈负指数相关关系,且 e_{cb} 变化的范围比 e_{pb} 小,这说明发车间隔的变化没有票价变化那么容易引起接运系统收益的下降和乘客选择接运公交行为的改变。

4 结束语

探讨了由接运系统发车间隔和票价决定的乘客需求弹性,并计算了一个运营天数之内的接运公交乘客量,依此分析了接运公交的收入及成本,以系统总收益目标函数建立了非线性优化模型,通过算例测试了决策变量——发车间隔及票价的求解结果和灵敏度,并得到如下结论:

(1)以系统总收益为目标函数的规划模型在其约束范围内存在局部最优解,模型可以转化为标准非线性规划模型进行迭代求解;

(2)乘客等待时间的增减使得接运公交系统总收益相应地同向增减,等待时间越大,则系统总收益越低,反之越高;

(3)乘客对接运公交发车间隔的敏感性没有其对票价敏感性对系统总收益的影响范围大;且系统总收益与乘客对发车间隔的敏感性大致呈负线性相关关系、与乘客对票价的敏感性大致呈负指数相关关系。

本文未能对单位政府补贴的增减对最优解的影响、受时变乘客需求制约的动态发车间隔确定模型、按距离定价的接运公交票价优化方案进行研究;也没有分析接运公交系统其他因素,如舒适度、速度等对乘客需求弹性和系统总收益的影响;另外,论文模型中探讨的乘客时间仅考虑了接运公交的等候时间和换乘时间,而不是选择反映乘客出行成本的全程出行时间对接运公交发车间隔的弹性进行探讨。这些都是将继续研究的内容。

参考文献:

- [1] 蒋冰蕾,孙爱充.城市快速轨道交通接运公交线路网规划[J].系统工程理论与实践,1998(3):130-134.
Jiang Bing-lei, Sun Ai-chong. Urban rapid rail transit feeder buses routes planning[J]. System Engineering - Theory & Practice, 1998(3):130-134.
- [2] Kuah G K, Perl J. Optimization of feeder bus routes and bus-stop spacing[J]. Journal of Transportation Engineering, 1988, 114(3):341-54.
- [3] Chien S, Schonfeld P. Joint optimization of a rail transit line and its feeder bus system[J]. Journal of Advanced Transportation, 1998, 32(3):253-84.
- [4] Chien S, Yang Z, Hou E. Genetic algorithm approach for transit route planning and design[J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(3):200-217.
- [5] Vuchic V R. Urban Transit: Operation, Planning, and Economics[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Son, 2004.
- [6] 吴友梅,张秀媛.城市轨道交通的公交换乘问题与对策分析[J].铁道运输与经济,2005,27(8):19-21.
Wu You-mei, Zhang Xiu-yuan. The transfer with bus system and counter measurements of urban mass transit[J]. Railway Transport & Economy, 2005, 27(8):19-21.
- [7] 周剑峰,杨兆升. GIS在城市交通共用信息平台中的应用[J].吉林大学学报:工学版,2005,35(3):183-186.
Zhou Jian-feng, Yang Zhao-sheng. Application of GIS in integrated traffic information platform [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2005, 35(3):183-186.
- [8] Whright A. Urban transit systems-Guidelines for examining options[R]. Washington, D C: The International Bank for Reconstruction And Development, 1986:20-71.
- [9] Bazaraa M S, Sherali H D, Shetty C M. Nonlinear Programming[M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [10] Zhu Z B, Zhang K. A new SQP method of feasible directions for nonlinear programming [J]. Applied Mathematics and Computation, 2004, 148:121-134.
- [11] Ting C J, Schonfeld P. Schedule coordination in a multiple hub transit network[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2005, 131(1):112-134.