

文章编号:1671-1637(2017)01-0070-10

公路客运门到门运营模式下的末端线网优化

杨忠振¹, 王文娣¹, NOTTEBOOM Theo^{2,3}

(1. 大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026; 2. 安特卫普大学 应用经济学院, 安特卫普 安特卫普 2000; 3. 根特大学 法学院, 东弗兰德 根特 9000)

摘要:为解决高铁时代公路客运难的问题,提出门到门的公路客运运营模式,并构建了双层规划模型,上层模型以公路客运服务商的日运营总利润最大为目标,优化门到门模式下公路客运的末端线网,下层模型计算均衡状态下交通网络上的客流量,最后基于大连至沈阳运输区段的实际数据进行了案例分析。计算结果表明:公路客运的日运营总利润随末端线路数的增加先升后降,运营4条末端线路、日发车25班最佳;高铁开通后原有运营模式下公路客运服务商的日运营总利润为7 270元,票价为99元,日均客流量为130人次;门到门运营模式下公路客运服务商的日运营总利润为37 755元,票价区间为[88,105]元,日均客流量将达到778人次。可见公路客运门到门运营模式可以有效提高公路客运的市场份额和运营利润,在保证公路客运服务商利润的前提下,大幅度提高整体客运服务水平。

关键词:公路客运;门到门运输;末端线网;双层规划模型

中图分类号:U492.431

文献标志码:A

Optimization of end line network with door to door operation mode of highway passenger transport

YANG Zhong-zhen¹, WANG Wen-di¹, NOTTEBOOM Theo^{2,3}

(1. School of Transportation Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China;
2. School of Applied Economics, University of Antwerp, Antwerp 2000, Antwerp, Belgium;
3. School of Law, Ghent University, Ghent 9000, East Flanders, Belgium)

Abstract: In order to solve the problem of operation dilemma for highway passenger transport in high-speed railway era, the door to door operation mode of highway passenger transport was proposed, and a bi-level programming model was built. The maximum total daily operating profit of highway passenger transport provider was taken as the object to optimize the end line network of highway passenger transport with the door to door mode in the upper model. The lower model calculated the passenger flow of transport network at equilibrium state. Case analysis was carried out based on real data from Dalian to Shenyang transport section. Calculation result shows that the total daily operating profit of highway passenger transport increases firstly and then decreases with the increase of end line number. Operating 4 lines and dispatching 25 coaches daily are best. The total daily operating profit of highway passenger transport provider with original operation mode after the opening of high-speed railway is 7 270 yuan with 99 yuan for ticket price and 130 person-time for average daily passenger flow. The total daily operating profit of highway passenger transport provider with door to door operation mode is 37 755 yuan with [88, 105]

收稿日期:2016-08-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51078049)

作者简介:杨忠振(1964-),男,辽宁凌海人,大连海事大学教授,工学博士,从事交通运输规划与管理研究。

yuan for ticket price region and 778 person-time for average daily passenger flow. The door to door operation mode of highway passenger transport can effectively improve the market share and operating profit of highway passenger transport. With the profit of highway passenger transport provider guaranteed, this mode can significantly improve overall service level of passenger transport. 4 tabs, 6 figs, 26 refs.

Key words: highway passenger transport; door to door transport; end line network; bi-level programming model

Author resume: YANG Zhong-zhen(1964-), male, professor, PhD, +86-411-84726756, yangzhongzhen@263.net.

0 引 言

高铁的快速发展改变了城际客运的供给体系,凭借快速、安全、舒适等优势,高铁使得相同走廊上公路客运的客流量大幅下降。数据显示,高铁开通后在高铁和公路 2 种运输方式并存的通道上,公路客运班线的实载率仅为 20%~50%,运营收益减少 40%~55%,因此,如何应对高铁挑战,维持市场份额,保证运营利润是公路客运服务商亟待解决的关键问题。

国内学者已经关注到这一问题,并从公路客运创新发展模式的角度进行了诸多研究,提出的对应方法主要有 6 种:改善候车环境和服务,推进票务信息化建设,提高服务质量;组建跨地区、跨行业的大型运输集团,实现规模化、集约化和专业化经营;发挥公路门到门的优势,提供市区延伸接送服务,并向高铁覆盖不到的地区拓展市场,吸引末端和支线客流;推进综合客运枢纽建设,实现与其他运输方式的有效衔接,成为高铁和航空运输的末端手段;关注旅游客运等细分市场,转型发展;行管部门宏观调控运力总量,适当放宽配客限制。

从上述应对方法可以发现:目前学者多从宏观调控的角度探讨公路客运的创新发展,提出的竞争策略过于宽泛,较少有基于模型的定量研究;提出的建议与对策未能有效发挥公路客运独有的灵活特性作用,比如门到门等。虽然指出高铁时代下公路客运有必要基于门到门优势创新发展模式,但没有给出具体的实施方案,更没有针对案例进行定量研究,例如没有人给出具体的网络形态、票价体系等优化方案。

目前,很难找到有关公路客运门到门模式的线网设计的研究。由于门到门模式的线网设计范围限定在发车城市的市内,即延伸公路客运服务线路进入发车城市的市内并合理设置站点,因此,可以借鉴

理论体系较为成熟的城市公交线网优化设计方法。

国内外很多学者对公交线网优化设计问题进行过研究。国外早期采用经验法设计公交线网,就是凭借专业经验和主观认识来判断公交线网合理与否。而后随着运筹学的发展,学者们多基于运筹学方法,在既有的目标函数下进行公交线网的优化设计。Lampkin 等将乘客舒适度与出行时间作为公交线网设计的目标函数,建立网络设计模型^[1];Hirsch 等针对固定费用的公交网络优化问题进行研究,并将模型设计成一个固定需求模型^[2];Silman 等以出行时间和拥挤度最小为目标,通过增减线路条数和发车频率,优化公交线网^[3]。之后的研究注重于将规划方法与计算机技术相结合,运用遗传算法和神经网络等技术求解公交线网优化问题。Baaj 等利用基于人工智能的启发式算法求解公交线网优化问题,取得良好效果^[4];Xiong 等提出累计遗传算法,改进了普通的遗传算法,用神经网络替代旅客出行分配算法来评估适值函数,从而得到更加准确的结果^[5];Pattanaik 等以公交乘客出行费用和运营费用总和最小为目标进行公交线网设计,首先生成候选路网,然后基于遗传算法从候选路网中选择并确定路网^[6];Bielli 等应用适度函数在不增加乘客出行时间的前提下,以提高原网络的效率和减少车辆数为目标,提出公交网络优化的遗传算法^[7]。

国内最初的研究比较系统地叙述了有关城市公共线网优化问题的模型和方法。张启人等根据不同的约束条件建立了不同的公交线网优化模型^[8];吴稼豪总结了公交线网优化模型的建立及求解方法,并通过分解的办法将多目标公交网络设计问题分解为多个目标子问题,以降低求解难度^[9]。随着公交的重要性的关注度的增加,公交线网规划的研究越来越深入。林柏梁等综合考虑乘客的出行时间和公交网络的资金投入,在满足车站容量限制条件下进行公交线网的优化^[10];韩印等对公交线网优化中涉

及到的主要指标进行总结和归纳,提出预选、搜索、优化成网算法,用以对线网进行优化调整,取得了很好的结果^[11]。

近年来,在公交线网优化模型和求解方面的研究都取得了很大的成就。单连龙等提出用双层规划模型来描述连续平衡公交网络设计问题^[12];冯树民等从节点、线路和线网三方面对公交线网优化约束条件和目标函数进行研究^[13];汤可夫等采用改进遗传算法对公交线网进行优化设计^[14];常玉林等综合考虑旅客出行时间、公交线网密度和公交企业的利益等因素,建立了公交线网优化设计的线性规划模型^[15];于滨等从乘客出行路线选择的角度出发,综合考虑乘客的换乘次数和公交线网单位长度运送的客流量,以直达客流密度最大为目标函数建立线网优化模型^[16-17]。

已有的关于公交线网优化设计的研究为公路客运门到门模式下末端线网的优化设计问题提供了很好的方法和思路,但公路客运与城市公交之间存在一定的差异。城市公交线网的优化设计具有公共性质,其首要目的不是盈利,而是解决城市交通拥挤问题和满足旅客出行需求,但公路客运的末端线网优化设计是在保证企业利益的前提下满足旅客出行需求,因此,公路客运门到门运营模式的末端线网优化设计具有其特殊性,应在城市公交已有的规划理论与方法的基础上,结合公路客运自身特点进行研究。将公路客运票价设定纳入到末端线网设计中,实现公路客运线网的整体优化,是门到门模式下的公路客运末端线网设计问题的重点所在。

考虑到在城际客运方式中,除小汽车外高速大巴最具有门到门的无缝对接功能,而高铁有点对点运营的局限性,城际旅客在两端城市内的出行也影响各种客运方式的竞争力,本文以公路客运门到

优势为突破点,研究高铁时代下公路客运实施门到门服务的创新发展模式,向出行起终点有效延伸客运线路,使出行者可以就近选择站点乘车,乘客在起点乘车后无需再次换乘,而能够直接到达目的地城市。为实现门到门运营,公路客运线路在城市内的末端线网设计成为新模式能否成功的关键。基于此,本文兼顾公路客运企业和旅客双方利益,研究公路客运门到门运营模式下的发车城市内末端线网优化设计问题,旨在提出优化模型,得到优化的公路客运线网和运营票价。为使模型能够应用于实际,以哈大高铁开通后的大连至沈阳运输区段为实例进行研究,论证门到门运营模式的可行性和有效性。本文提出的公路客运门到门运营模式会提高公路客运服务商的运营效率和旅客的乘车效用,很有可能成为解决高铁时代公路客运难题的有效方法。

1 问题描述

门到门公路客运线网优化设计问题是一个复杂的决策问题,需要综合权衡公路客运服务商和旅客双方的利益,公路客运服务商以运营利润最大为行为准则,旅客是服务的需求者,他们以出行效用最大或出行费用最小为行为准则。公路客运服务商与旅客之间的博弈可以视为具有主从递阶结构的双层规划问题^[18],因此,可以用双层规划模型来优化设计公路客运线网。设计时在上层模型给出门到门的公路客运线网,在下层模型基于用户平衡原理为出行者指派路径,从而得到公路客运线路的市场份额、票价收入以及利润情况。设计者可以根据利润以及乘客的出行效用判断上层模型给出的线网方案是否合理,并将结果反馈到上层模型。

城际客运网络见图 1,显示在上下层模型互动一次过程中,公路客运网络及出发地 G_1 的乘客选

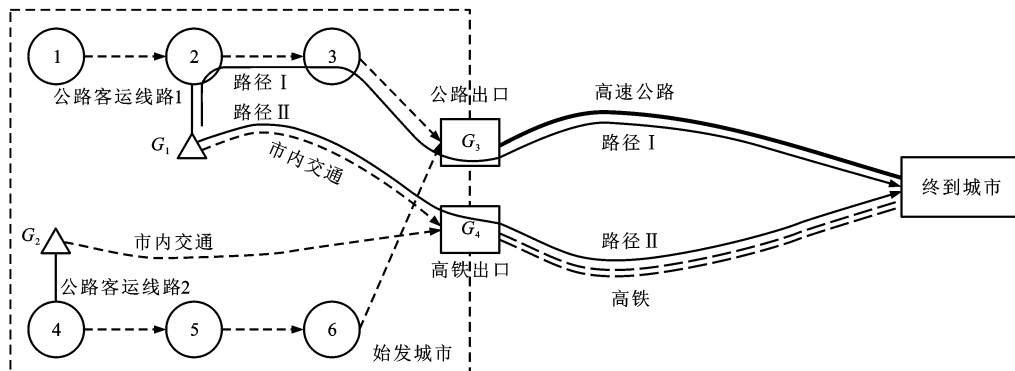


图 1 城际客运网络

Fig. 1 Intercity passenger transport network

择路径的情况。 G_1 、 G_2 为出发地, G_3 为公路出口,即公路客运末端线网的终点, G_4 为高铁出口,1~6为始发城市内的发车站点,路径Ⅰ为乘客选择公路客运的路径,路径Ⅱ为乘客选择市内交通、高铁的路径。以 G_3 、 G_4 为界限,界限以左代表始发城市的站点和线路情况,界限以右代表城际客运线路,分别为由公路出口连接终到城市的高速公路线路和高铁出口连接终到城市的高铁线路。

公路客运末端线网(公路客运线路1、2)是由上层模型基于始发城市内部出行发生地的分布给出的方案。由出发地 G_1 出发的乘客根据交通阻抗分别选择路径Ⅰ和路径Ⅱ出行,在此过程中,由于路径的交通阻抗随路段的流量变化,部分乘客选择路径Ⅰ出行时,另外的乘客就会选择路径Ⅱ出行。上层模型中的线路方案可以基于启发式算法生成,下层模型中的路径选择可以由用户均衡交通分配模型计算获得。

需要指出的是上层模型在给出公路客运线路走向和站点选址的同时,还会确定由始发城市不同站点出发的乘客到终到城市的票价。计算时为方便起见,假设终到城市只有1个停靠站点,并认为两城市

间高铁的票价和发车频率保持不变,该假设并不影响模型的有效性。由于上下层模型的输出结果之间相互影响,因此,计算过程需要反复循环,即上下层模型的计算需要反复迭代进行,当上下层模型之间的互动关系达到平衡状态时,得到的公路客运末端线网则是最优的公路运营线路方案。

上层模型的首要任务和难点是确定公路客运在始发城市内部的线路走向及站点位置。由于之前的公路客运在末端城市只有1个站点,提供的不是门到门的服务,乘客需利用城市交通与其接驳。而本文研究的公路客运末端线网,旨在实现运营效益最大化,同时覆盖尽可能多的出行者,使他们能够就近上车,从而实现门到门服务,因此,确定公路客运在始发城市内部的线路走向及站点位置尤为重要。目前,公路客运末端线网结构可为3类:放射型线网、网格型线网和环线型线网^[19]。相比后2种线网结构,放射型线网的优点更加突出,因其呈全方位或扇形放射覆盖,可达性更高。本文借鉴放射型线网结构来确定公路客运末端线网的可行方案。放射型线网结构又可细分为均匀放射型、两侧放射型、多侧放射型和扇形放射型,见图2^[20-26]。

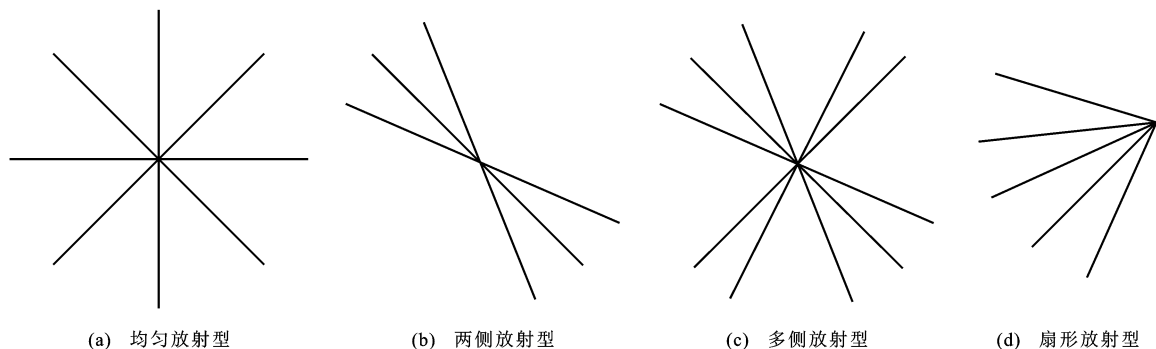


图2 放射型线网结构

Fig. 2 Radial line network structures

由于公路客运末端线网的终点为出城的高速公路口,而高速公路口大都位于城市外缘,只向市内方向单侧辐射,在以上4种放射型线网结构中,公路客运末端线网结构应属于扇形放射型,即可行线路的走行方向呈扇形放射,因此,上层模型在确定公路客运末端的可行线路时,可以以出城高速公路口为圆心,用放射扇形覆盖整个城市区域,每一个子扇形内可能有一条末端线路,它们构成公路客运末端线网的备选集。公路客运末端线网的走行方向和站点设置见图3,扇形a、b、c代表研究区域内的3个子扇形,各子扇形覆盖的交通小区的的中心就是不同方向的末端线路的备选站点集。

2 模型结构

上层模型的目标函数是公路客运服务商利润最大,下层模型的目标函数为旅客广义出行费用最小。模型的假设条件为:只考虑高速大巴和高铁2种城际客运方式,且高铁的运营票价和发车频率保持不变;出发小区到最近的公路客运站点和最近的前往高铁车站的公交站点的阻抗忽略不计;各路段高速大巴均有可用容量,其票价随乘客数量增加而上升;高速大巴有容量限制,在容量范围内运营成本只与运距有关。

2.1 变量说明

O 为始发城市备选发车站点集合; t_1 为公路出

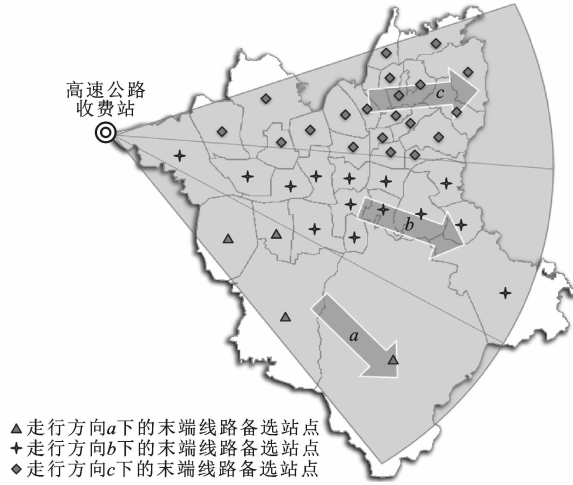


图 3 公路客运末端线网的走行方向和站点设置

Fig. 3 Travel directions and site setting of end line network for highway passenger transport

口(高速公路收费站); t_2 为高铁出口(高铁站); d 为终到城市; K 为始发城市内可行的公路客运末端线路集合; S_k 为第 k 条可行线路上的发车站点集合; l_{ijk} 为第 k 条可行线路上发车站点 i 和发车站点 j 之间的距离; $l_{\min}$ 为相邻发车站点间的最短距离; $l_{\max}$ 为相邻发车站点间的最长距离; $l_{\alpha_1 k}$ 为第 k 条可行线路上起点 o 到公路出口 t_1 的直线距离; $Z_{\max}$ 为可行线路的最大非直线系数; $D_{\max}$ 为旅客最大停站次数; q_{ik} 为第 k 条可行线路上发车站点 i 所在小区的出行总量; q_{ik1} 为第 k 条可行线路上发车站点 i 所在小区的公路出行量; q_{ik2} 为第 k 条可行线路上发车站点 i 所在小区的高铁出行量; P_{ik} 为第 k 条可行线路上发车站点 i 的公路出行票价; m 为单条可行线路上的发车站点个数; n 为各个末端线网方案中的可行线路条数; W 为高速大巴单车容量; A 为高速大巴实载率; F 为每条可行线路的日最少发车班数; C 为高速大巴日均单车成本; Q_k 为第 k 条可行线路的日发车班数; B 为集合 $\{O, t_1, d\}$; H 为集合 $\{O, t_2, d\}$; R 为公路客运与高铁线路集合; z_{ij} 为路段 ij 的阻抗函数; $z_{ij1}(w)$ 为路段 ij 的公路客运阻抗函数, w 为路段交通量; $z_{ij2}(w)$ 为路段 ij 的高铁阻抗函数; p_{ij} 为路段 ij 的票价; p_{ij1} 为路段 ij 的公路客运票价; p_{ij2} 为路段 ij 的高铁票价; $p_{ij1'}$ 为公路客运的基础票价; $p_{ij2'}$ 为高铁的基础票价; q_{ij1} 为路段 ij 的公路客运客流量; q_{ij2} 为路段 ij 的高铁客流量; L_{ij} 为路段 ij 的公路客运能力; U_{ij} 为路段 ij 的高铁客运能力; E_{od} 为发车站点 o 到终到城市 d 的总客流量; $f_{\alpha r}$ 为从发车站点 o 到终到城市 d 间的第 r 条路径上的客流量; V 为时间价值; T_{ij} 为路段 ij 的所需时长; α, β 为票价

更新参数; $\delta_{ij, \alpha r}$ 为 0-1 变量,如果路段 ij 属于从发车站点 o 到终到城市 d 间的第 r 条路径,其值为 1,否则为 0; x_{ik} 为 0-1 变量,如果备选发车站点 i 被选为第 k 条可行线路上的发车站点,其值为 1,否则为 0; y_{ijk} 为 0-1 变量,如果路段 ij 在第 k 条可行线路上,其值为 1,否则为 0; σ_k 为 0-1 变量,如果可行线路 k 为运营线路,其值为 1,否则为 0。

2.2 上层模型

首先,确定公路客运在始发城市内可行线路的走行方向。这里以出城高速公路口为圆心,用放射扇形覆盖始发城市,每一个放射子扇形代表一个走行方向,可以在扇形内设置独立的末端线路,从而得到可行的末端线路集合,任何线路都必须满足以下约束

$$\frac{\sum_{i \in O} \sum_{j \in O} l_{ijk} y_{ijk} + \sum_{i \in O} l_{i t_1 k} y_{i t_1 k}}{l_{\alpha_1 k}} \leq Z_{\max} \quad k \in K \quad (1)$$

$$\frac{\sum_{i \in O} x_{ik} q_{ik} \left(1 + \sum_{j > i} x_{jk}\right)}{\sum_{i \in O} x_{ik} q_{ik}} \leq D_{\max} \quad k \in K \quad (2)$$

$$l_{\min} \leq l_{ijk} \leq l_{\max} \quad k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in O} x_{ik} = m \quad k \in K \quad (4)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad i \in O, k \in K \quad (5)$$

$$\begin{cases} y_{ijk} \in \{0, 1\} & i \in O, j \in O \\ \text{或} & j = t_1, k \in K \end{cases} \quad (6)$$

式(1)为末端可行线路的非直线系数约束;式(2)为旅客最大停站次数限制,停站次数为每个发车站点的客流量与该发车站点客流量所要面对的停站次数乘积的加和与总客流量的比值,因停站次数是旅客能直观感受的,因此,需设置停站次数约束来提高旅客满意度;式(3)为停靠站点间距约束;式(4)为发车站点数量约束;式(5)、(6)为变量约束。

在确定末端可行线路集合后,通过组合不同的可行线路得到不同的末端线网方案,然后,以公路客运日运营总利润最大为目标,优化设计末端线网方案。模型为

$$\max G_1 = \sum_{k \in K} \sum_{i \in S_k} P_{ik} q_{ik1} \sigma_k - \sum_{k \in K} C Q_k \sigma_k \quad (7)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{k \in K} \sigma_k = n \quad (8)$$

$$Q_k = \left\lceil \frac{\sum_{i \in S_k} q_{ik1}}{AR} \right\rceil \quad k \in K \quad (9)$$

$$\sigma_k \in \{0, 1\} \quad k \in K \quad (10)$$

式(7)为目标函数,表示最大化公路客运服务商的日运营总利润 G_1 ,其中 $\sum_{k \in K} \sum_{i \in S_k} P_{ik} Q_{ik1} \sigma_k$ 表示公路客运服务商的日运营总收入, $\sum_{k \in K} CQ_k \sigma_k$ 表示公路客运服务商的日运营总成本;式(8)表示末端线路的条数;式(9)表示公路客运服务商的日发车班数;式(10)为变量约束。

2.3 下层模型

下层模型在客运线网上为出行者指派走行路径。由于公路客运客流与票价之间存在互动关系,所以可以基于用户均衡交通分配模型来模拟乘客的选择行为,把客运出行起终点分配到客运网络上,模型为

$$\min G_2 = \sum_{i \in B} \sum_{j \in B} \int_0^{q_{ij1}} z_{ij1}(\omega) d\omega + \sum_{i \in H} \sum_{j \in H} \int_0^{q_{ij2}} z_{ij2}(\omega) d\omega \quad (11)$$

$$\text{s. t. } \sum_{r \in R} f_{odr} = E_{od} \quad o \in O \quad (12)$$

$$f_{odr} \geq 0 \quad o \in O \quad (13)$$

$$q_{ij1} \leq L_{ij} \quad i, j \in B \quad (14)$$

$$q_{ij2} \leq U_{ij} \quad i, j \in H \quad (15)$$

$$q_{ij1} + q_{ij2} = \sum_{o \in O} \sum_r f_{odr} \delta_{ij, odr} \quad (16)$$

$$z_{ij} = p_{ij} + VT_{ij} \quad (17)$$

$$p_{ij1} = p_{ij1'} \left[1 + \left(\frac{q_{ij1}}{\alpha L_{ij}} \right)^\beta \right] \quad (18)$$

$$p_{ij2} = p_{ij2'} \quad (19)$$

式(11)为目标函数,表示用户均衡交通分配模型的目标值 G_2 ;式(12)表示起终点间各条路径上的

客流量之和等于起终点间的客流总量;式(13)为变量约束;式(14)、(15)表示各路段的客流量不能超过其载客能力;式(16)表示各路段流量等于各个起终点对的途经该路段的路径流量之和;式(17)表示路段 ij 的阻抗函数;式(18)表示路段 ij 的公路客运票价,由基础票价和路段 ij 上的流量以及通过能力决定;式(19)表示路段 ij 的高铁票价,为方便起见,这里设为定值。

3 实证分析

为定量论证公路客运门到门模式的可行性,探究该模式下的最佳运行线网,本文以哈大高铁开通后的大连至沈阳运输区段为实例进行研究,合理向大连市内各处延伸公路客运线路的发车站点,确定最佳运行线网,使得旅客可以就近选择发车站点乘车,乘车后无需再次换乘,可直接到达目的地城市。

3.1 研究区域与基础数据

以大连市主城区为研究区域(图4),包括甘井子区、高新园区、沙河口区、西岗区、中山区和旅顺口区。该区域有51条街道,根据人口数量由大到小进行编号,依据各街道的人口条件和地理位置等,剔除不必要的街道,将剩余的36条街道作为36个交通小区与实际的空对象。按照人口规模再由大到小进行编号,编号为1、2、...、36,并将末端线路的终点即高速公路收费站以及高铁线路的起点即大连北站分别编号为37和38,将终到城市沈阳编号为39。然后,以高速公路收费站为圆心,基于扇形放射型线路走行方向确定末端线路集合。结合研究区域的实际情况以及交通小区分布情况,基于经济性和便利性原则,选用3个子扇形覆盖研究区域,但受限于大

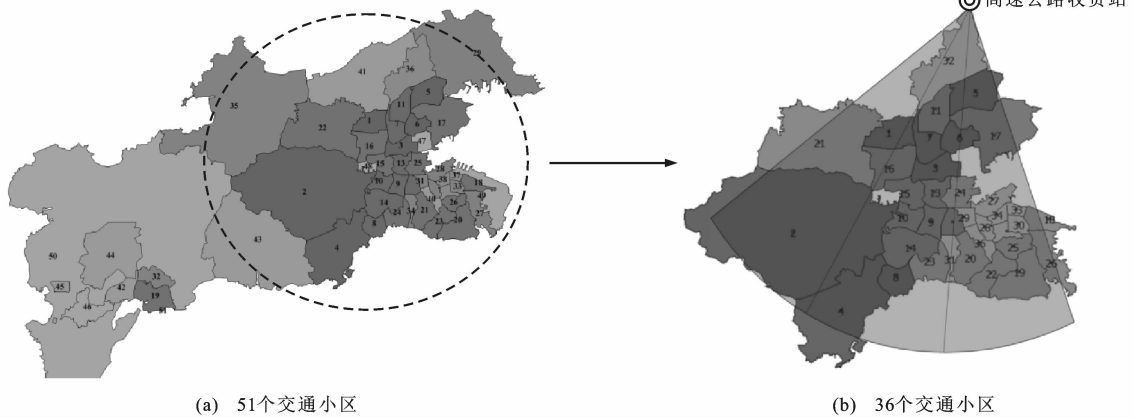


图4 研究区域
Fig. 4 Study area

连市地理条件,区域子扇形并不规则并且彼此之间存在交叉。根据 3 个子扇形可以得到 3 个线路走行方向,需要在 3 个走行方向下布设可行的末端线路,构成公路客运末端线网的备选集,在每条可行线路上设置 3 个发车站点。

大连至沈阳的高速大巴单程过路费为 550 元,燃油成本为 500 元;由于长途客运车辆使用期为 8 年,以价格为 80 万元计算,则每天车辆折旧约为 300 元,单程折旧成本为 150 元;高速大巴的人员费用为 $400\text{ 元}\cdot\text{d}^{-1}$,单程人员费用为 $200\text{ 元}\cdot\text{d}^{-1}$ 。则从大连发往沈阳的高速大巴单车单程成本约为 1 400 元。

假设高速大巴在市内的平均运行速度约为 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,单车容量为 50 人,实载率为 70%,路段 ij 的公路客运能力 1 000 人,公路客运的基础票价为 85 元。公交车在市内的平均运行速度约为 $15\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,高铁票价为 180 元。票价更新参数 α 为 0.60, β 为 0.27。2015 年 4 月 36 个交通小区前往沈阳的日均客流量数据见表 1。

3.2 求解结果

针对上层模型设计遗传算法求解,针对下层模

表 1 各小区前往沈阳的日均客流量
Tab. 1 Daily passenger flow to Shenyang for each area 人次

小区	客流量	小区	客流量	小区	客流量	小区	客流量
1	495	10	324	19	263	28	203
2	462	11	322	20	261	29	150
3	456	12	317	21	240	30	146
4	442	13	300	22	237	31	137
5	377	14	293	23	237	32	136
6	373	15	279	24	232	33	135
7	336	16	278	25	217	34	134
8	334	17	276	26	217	35	203
9	331	18	268	27	206	36	150

型用 F-W 算法求解,所得运营可行线路条数 n 为 2、3、4、5 时公路客运的末端线网方案见图 5、表 2。可以看出:当 n 为 2 时,日运营总利润最小,为 21 047 元;当 n 为 5 时,日运营总利润最大,为 41 725 元,因此,运营 5 条公路客运末端线路为最佳方案。

但需要指出的是,计算运营成本时假定每辆大巴的实际载客量为其容量与实载率的乘积,然后将各发车站点的客流量按照单车实际载客量进行配车,得出所需的发车班数,如式(9)所示。但是,实际

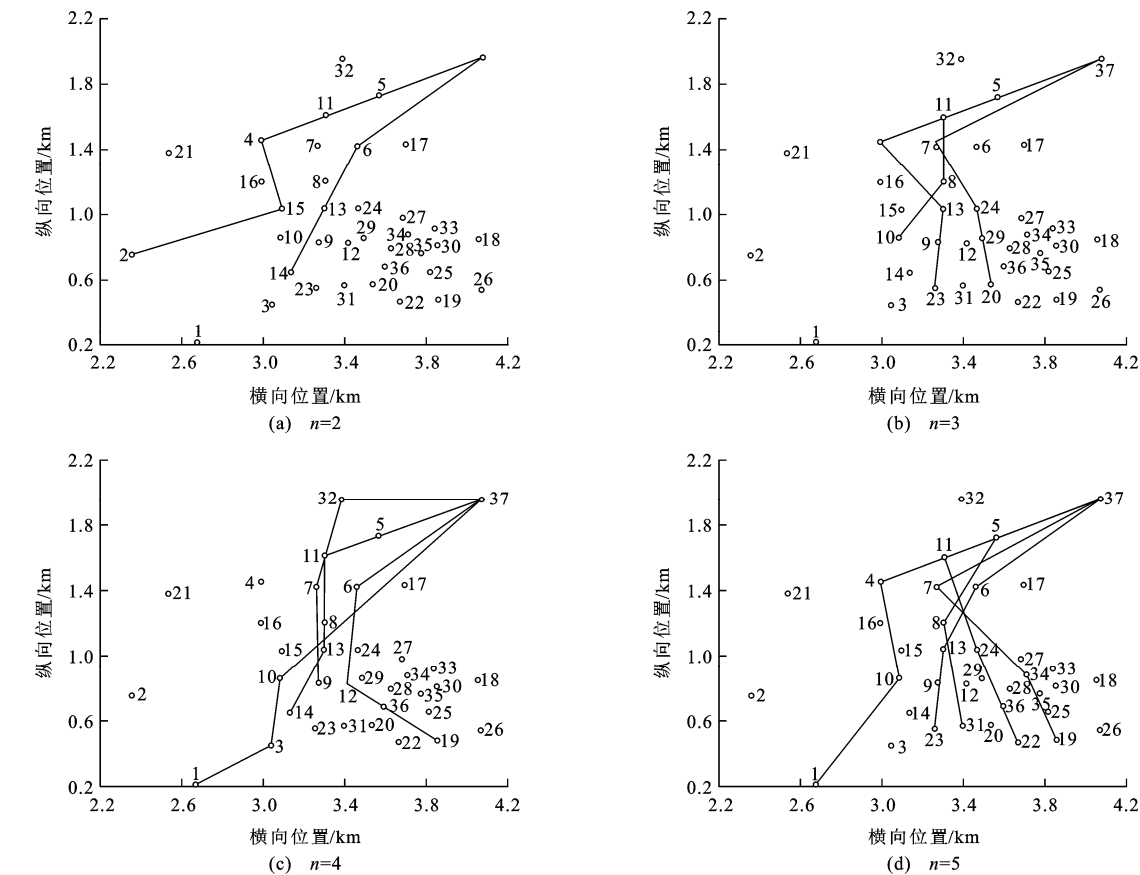


图 5 公路客运末端线网的优化方案

Fig. 5 Optimized schemes of end line network for highway passenger transport

表 2 公路客运末端线网的优化结果

Tab. 2 Optimized result of end line network for highway passenger transport

可行线路条数	线路	站点	日均客流量/人次	票价/元	日运营总利润/元
2	线路 1	2、15、14	83、134、223	91、94、105	21 047
	线路 2	14、13、6	53、107、174	90、88、99	
3	线路 1	10、8、11	62、149、210	89、94、102	29 606
	线路 2	23、13、4	44、101、196	90、88、102	
	线路 3	20、24、7	56、113、181	90、90、89	
4	线路 1	1、8、10	88、154、219	92、97、105	37 755
	线路 2	14、13、11	58、118、192	90、88、97	
	线路 3	9、7、32	66、133、178	89、90、93	
	线路 4	19、12、6	52、115、189	91、89、99	
5	线路 1	1、10、4	115、160、240	92、95、100	41 725
	线路 2	23、13、6	47、107、182	90、88、97	
	线路 3	31、8、5	27、119、180	90、88、98	
	线路 4	22、24、11	48、92、156	90、89、93	
	线路 5	19、34、7	52、72、135	91、89、87	

计算发车班数时,需考虑每日最少发车班数的限制,因为任何一种客运模式都要保证最低的服务水平,即最小发车频次,也就是说在旅客随机到达的整个区间内,即使某一时段到达的旅客数量再少也要发车,低于这个发车频次,这种运输模式将完全被市场所淘汰,因此,在设计公路客运末端线网时,需要设定日最少发车班数,以便客运服务商能够维持其市场生存。那么,在计算运营成本时,每日发车班数应取值为当日应发车班数与最少发车班数中的最大值,该值 $Q_{k'}$ 为

$$Q_{k'} = \max \left\{ \left[\frac{\sum_{i \in S_k} q_{ik1}}{AR} \right], F \right\} \quad k \in K \quad (20)$$

3.3 敏感性分析

将日最少发车班数 F 分别设置为 6、8、10 进行敏感性分析。通过对比不同 F 值下的线网日运营总利润、日发车班数和单车日运营利润情况,可以得出最佳的公路客运末端线网。不同 F 值下的线网日运营总利润见图 6,日发车班数见表 3。

表 3 不同 F 值下的日发车班数

Tab. 3 Daily departure numbers with different F values

F 值	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
6	13	18	25	31
8	16	24	32	40
10	20	30	40	50

由图 6、表 3 可知:日最少发车班数分别设置为 6、8、10 时,公路客运末端线网的日运营总利润都随

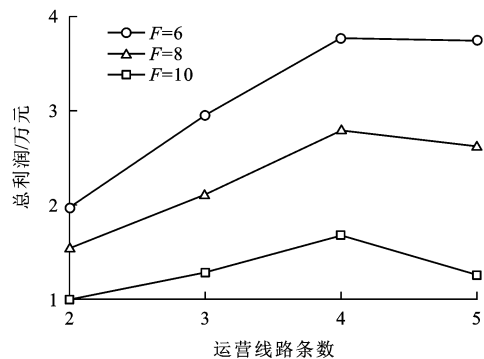


图 6 不同 F 值下的线网日运营总利润

Fig. 6 Total daily operating profits of line networks with different F values

运营线路数量的增加先升后降,且都在运营线路条数为 4 时达到最大,说明在日最少发车班数分别设置为 6、8、10 三种情况下,都是运营 4 条线路的公路客运末端线网方案最好,而不是运营线路条数越多越好。对于运营 4 条线路的最佳公路客运末端线网方案而言,设置不同的日最少发车班数的日运营情况不同。当运营线路条数为 4 时,日最少发车班数为 6、8、10 时所对应的日运营总利润分别为 37 755、27 955、16 755 元,日发车班数分别为 25、32、40,单车日运营利润分别约为 1 510、874、419 元。很明显,日最少发车班数为 6 时单车日运营利润最大,说明发车班数的增加在提高公路客运服务水平的同时,增加了运营成本,结果导致运营利润下滑,因此,针对本文的案例,设置 4 条公路客运末端线路时,日均发车 25 班是最佳的运营方案,此时公路客运服务

商的日运营总利润为 37 755 元。

3.4 优化效果分析

以大连某公路客运公司为例,针对高铁开通前、高铁开通后、高铁开通后依据本文设计的末端线网运营等 3 种运营状态,所得大连至沈阳运输区段公路客运的各项指标见表 4。由表 4 可以看出:在票价方面,高铁开通前公路客运票价为 115 元,开通后现状票价为 99 元,而依据本文设计的线网运营时,票价区间为[88,105]元,说明末端线网票价在合理范围内。

表 4 大连某公路客运公司三种运营情况下各项指标的变化

Tab. 4 Index variations of one highway passenger transport company in Dalian under three operation situations

运营状态	票价/元	日均客流量/人次	日发车班数	日运营总利润/元
高铁开通前的状态	115	680	22	47 400
高铁开通后的状态	99	130	4	7 270
高铁开通后本文设计的末端线网运营状态	[88,105]	778	25	37 755

客流量方面:高铁开通前公路客运的日均客流量为 680 人次,高铁开通后日均客流量锐减到 130 人次,而依据本文设计的线网运营时,公路客运的日均客流量将达到 778 人次,市场份额明显增加。

发车班数方面:高铁开通前公路客运日发车班数为 22,高铁开通后日发车班数减少为 4,而依据本文设计的线网运营时,每日应发车 25 班,几乎与高铁开通前持平。

运营利润方面:高铁开通前,公路客运的日运营总利润为 47 400 元,高铁开通后下降到 7 270 元。高铁开通后,如果依据本文设计的线网运营,公路客运的日运营总利润为 37 755 元。可见提供门到门服务后,公路客运的盈利能力大幅提升。高铁开通前,公路客运的单车日运营利润约为 2 155 元,高铁开通后依据本文设计的线网运营时,公路客运的单车日运营利润约为 1 510 元,比高铁开通前下降了约 645 元。依据本文设计的线网运营时,公路旅客享受的服务质量大幅度上升,因为他们可以就近上车,且发车频次增加,票价降低。

综上所述,优化的末端线网可切实有效地增加公路客运的客流量和运营利润,且在保证公路客运服务商利润的前提下,能提高整个运输通道的客运服务水平,因此,根据出行起终点数据优化末端线网,提供门到门服务是公路客运服务商应对高铁挑战、保持市场份额、寻找新的盈利点的有效方法。

4 结 语

(1)针对高铁时代下的公路客运,提出发展门到门服务的创新运营模式,研究该模式下公路客运末端线网的优化设计问题。以公路客运服务商的日运营总利润最大为目标构建双层优化模型,并利用大连至沈阳运输区段的客运数据进行数值计算,得到门到门模式下的公路客运末端线网优化方案。

(2)依据末端线网优化方案提供门到门服务,公路客运服务商的市场份额将会增加,运营利润得到保证,与高铁开通后的公路客运现状相比,市场份额与运营利润都有大幅度提高。对于旅客而言,公路客运票价下降,发车频次上升,且能就近上车,公路客运服务水平将大幅度上升。

(3)本文给出了高铁时代下公路客运创新发展模式的具体实施方案,解决了高铁时代下公路客运运营难的问题,构建的模型为公路客运实施门到门运营模式时末端线网的优化设计提供了理论依据与实用方法。

参考文献:

References :

- [1] LAMPKIN W, SAALMANS P D. The design of routes, service frequencies, and schedules for a municipal bus undertaking: a case study[J]. Operational Research Quarterly, 1967, 18(4): 375-397.
- [2] HIRSCH W M, DANTZIG G B. The fixed charge problem[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1968, 15(3): 413-424.
- [3] SILMAN L A, BARZILY Z, PASSY U. Planning the route system for urban buses[J]. Computers and Operations Research, 1974, 1(2): 201-211.
- [4] BAAJ M H, MAHMASSANI H S. An AI-based approach for transit route system planning and design[J]. Journal of Advanced Transportation, 1991, 25(2): 187-209.
- [5] XIONG Yi-hua, SCHNEIDER J B. Transportation network design using a cumulative genetic algorithm and neural network[J]. Transportation Research Record, 1992(1364): 37-44.
- [6] PATTNAIK S B, MOHAN S, TOM V M. Urban bus transit route network design using genetic algorithm[J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(4): 368-375.
- [7] BIELLI M, CARAMIA M, CAROTENUTO P. Genetic algorithms in bus network optimization[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2002, 10(1): 19-34.
- [8] 张启人,熊桂林. 公共交通大系统建模与优化[J]. 系统工程, 1986, 4(6): 25-39.

ZHANG Qi-ren, XIONG Gui-lin. Modeling and optimization

- of large public transport system[J]. Systems Engineering, 1986, 4(6): 25-39. (in Chinese)
- [9] 吴稼豪. 城市公共交通车线网络优化模型[J]. 上海机械学院学报, 1987, 9(2): 7-13.
WU Jia-hao. A model for the urban transit network optimization and evaluation[J]. Journal of Shanghai Institute of Mechanical Engineering, 1987, 9(2): 7-13. (in Chinese)
- [10] 林柏梁, 杨富社, 李 鹏. 基于出行费用最小化的公交网络优化模型[J]. 中国公路学报, 1999, 12(1): 79-83.
LIN Bo-liang, YANG Fu-she, LI Peng. Designing optimal bus network for minimizing trip times of passenger flows[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(1): 79-83. (in Chinese)
- [11] 韩 印, 李维斌, 李晓峰. 城市公交线网调整优化 PSO 算法[J]. 中国公路学报, 1999, 12(3): 100-104.
HAN Yin, LI Wei-bin, LI Xiao-feng. The algorithm PSO of adjustment and optimization for public traffic network[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(3): 100-104. (in Chinese)
- [12] 单连龙, 高自友. 城市公交系统连续平衡网络设计的双层规划模型及求解算法[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(7): 85-93.
SHAN Lian-long, GAO Zi-you. A bilevel programming model for continuous equilibrium network design and its solution algorithm for urban transit system[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2000, 20(7): 85-93. (in Chinese)
- [13] 冯树民, 陈洪仁. 公共交通线网优化研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(5): 691-693.
FENG Shu-min, CHEN Hong-ren. Study of public transit network optimization method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(5): 691-693. (in Chinese)
- [14] 汤可夫, 吴大为. 基于改进遗传算法的公交线网整体优化方法[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(6): 97-101.
TANG Ke-fu, WU Da-wei. Study on the optimization methods of bus network based on adapted genetic algorithm[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004, 23(6): 97-101. (in Chinese)
- [15] 常玉林, 胡启洲. 城市公交线网优化的线性模型[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 95-98.
CHANG Yu-lin, HU Qi-zhou. Optimal line model on urban public traffic line network[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 95-98. (in Chinese)
- [16] 于 滨, 杨永志, 杨忠振, 等. 基于直达客流密度最大的公交线网优化[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(2): 205-207.
YU Bin, YANG Yong-zhi, YANG Zhong-zhen, et al. Transit network optimization based on direct passenger flow density maximization[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(2): 205-207. (in Chinese)
- [17] 于 滨, 刘鸿婷, 闫 博, 等. 公交线路网优化的双层模型及其解法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2010, 40(2): 402-405.
YU Bin, LIU Hong-ting, YAN Bo, et al. Bi-level model for bus route network optimization and its solution[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010, 40(2): 402-405. (in Chinese)
- [18] 刘伟铭, 姜 山, 付凌峰. 多车型高速公路离散平衡网络设计的双层规划模型[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 94-99.
LIU Wei-ming, JIANG Shan, FU Ling-feng. Bi-level program model for multi-type freeway discrete equilibrium network design[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 94-99. (in Chinese)
- [19] 马嘉琪, 白 雁, 韩宝明. 城市轨道交通线网基本单元与复杂网络性能分析[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(4): 65-70, 102.
MA Jia-qi, BAI Yan, HAN Bao-ming. Characteristic analysis of basic unit and complex network for urban rail transit[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(4): 65-70, 102. (in Chinese)
- [20] 沈景炎. 城市轨道交通线网规划的结构形态基本线形和交点计算[J]. 城市轨道交通研究, 2008(6): 5-10.
SHEN Jing-yan. Basic liner structure and intersection's calculation of URT network structure [J]. Urban Mass Transit, 2008(6): 5-10. (in Chinese)
- [21] YAO Jia, SHI Feng, AN Shi, et al. Evaluation of exclusive bus lanes in a bi-modal degradable road network[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 60: 36-51.
- [22] PANASYUK M V, PUDOVNIK E M, SABIROVA M E. Optimization of regional passenger bus traffic network[J]. Procedia Economics and Finance, 2013, 5: 589-596.
- [23] AMIRIPOUR S M M, CEDER A A, MOHAYMANY A S. Designing large-scale bus network with seasonal variations of demand[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 48: 322-338.
- [24] YU Bin, KONG Lu, SUN Yao, et al. A bi-level programming for bus lane network design[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 55: 310-327.
- [25] LI Qiang, WANG Yun-jing, ZHOU Yang. Readjustment effect analysis of public bus network in Beijing[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(2): 27-33.
- [26] ROCA-RIU M, ESTRADA M, TRAPOTE C. The design of interurban bus network in city centers[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2012, 46(8): 1153-1165.

