

文章编号:1003-207(2016)06-0106-09

DOI:10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2016.06.013

基于系统最优的城市公交专用道网络 设计模型及算法

四兵锋,杨小宝,高亮

(北京交通大学城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室,北京 100044)

摘要:设置公交专用道是实现“公交优先”的重要手段,然而,专用道设置将改变不同交通方式的道路通行能力,进而影响交通网络的整体性能。本文试图提出一种基于系统最优思想的公交专用道网络设计方法,既保证出行者的利益,又能满足交通系统总费用最优的目标。首先,本文分析了公交专用道设置对公交车辆和社会车辆这两种交通方式道路通行能力的影响,基于经典的BPR函数,构造了考虑专用道设置的不同方式的路段阻抗函数。其次,分析了出行者在多方式交通网络中的模式选择和路径选择问题,采用用户平衡理论分析了城市多方式交通平衡配流问题,给出了相应的变分不等式模型。更进一步,采用双层规划方法构造了基于系统最优的城市公交专用道网络设计模型,该模型以交通网络总费用最小为优化目标,并考虑了不同交通方式的平衡流量约束,采用分支定界算法对该双层规划模型进行求解。最后,通过一个简单算例对模型及算法的可行性和有效性进行了分析和验证。

关键词:多方式;公交专用道;网络设计;双层规划;分支定界法

中图分类号:F570.7 **文献标识码:**A

1 引言

目前,我国许多城市通过在道路上施划公交专用道,实现“公交优先”的交通策略。随着城市公交专用道数量的增加,将逐步形成公交专用道网络。在这种情况下,为了提高公交专用道的使用效率,必须对公交专用道设置进行系统化、网络化、规模化的优化和管理。事实上,有些道路上设置了公交专用道,不仅公交车辆的效率没有明显提高,而且社会车辆因为道路能力的降低而拥堵,使得整个交通系统的整体性能下降。因此,在城市道路交通网络中,哪些路段应设置公交专用道,以达到城市交通网络的系统最优,这就是城市公交专用道网络设计问题。

传统的城市交通网络设计问题是寻找用于道路网络新建或改善的交通投资方案,使整个交通网络某种指标达到最优。根据决策变量的性质,该问题

可分为三种类型:连续网络设计问题^[1-3]、离散网络设计问题^[4-5]以及混合网络设计问题。其中混合网络设计问题由于其求解非常困难,目前相关研究很少。然而,无法将传统的交通网络设计方法应用在公交专用道网络设计问题上。首先,公交专用道网络设计问题既不是对道路能力的扩展,也不是增加新道路。其次,公交专用道的实施不需要太多投资成本。此外,传统的城市交通网络设计问题面向的是单一模式的交通网络,而公交专用道网络设计则需要考虑公交车和小汽车两种交通模式。目前,国内外对公交专用道的研究主要集中在道路工程方面,包括公交专用道及停靠站的设置条件^[8]、公交专用道对道路能力的影响^[9-10]以及公交专用道的效果评价^[11-12]等方面。这些研究主要面向单一道路而非整个道路网络,所采用的方法通常为仿真和模拟方法。尽管有些学者对公交专用道条件下的模式选择问题进行了研究^[13-14],但这些研究仅仅把公交专用道作为一个道路条件,对不同模式之间的分离问题进行分析,而没有考虑公交专用道对道路流量的影响。有些学者考虑了公交专用道设置对道路流量的影响,提出了基于公交专用道的交通网络流量分配模型^[15-16],尽管这些研究分析了公交专用道对

收稿日期:2014-11-07; 修订日期:2015-10-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71571013, 71210001);
科技部“973”项目(2012CB725400)

通讯作者简介:四兵锋(1972-),男(汉族),河北邢台人,北京交通大学教授,研究方向:交通规划,E-mail:bfsl@bjtu.edu.cn.

不同方式流量的影响,却没有涉及公交专用道网络设计问题。近年来,一些学者开始研究基于网络的公交专用道设计和优化问题,例如,Mesbah 等^[17]基于多方式用户平衡配流模型,提出了公交专用道设计的双层规划模型;Miandoabchi 等^[18]在传统的交通网络设计问题中,考虑了公交专用道等车道设置问题,提出了综合网络设计的双层规划模型;Yao Jia 等^[19]将公交专用道设置以及公交发车频率作为决策变量,以出行者出行费用和公交运营成本最小为优化目标,提出了多模式交通网络系统优化的双层规划模型。然而,在前面的这些研究中,没有考虑专用道设置对不同方式道路能力的影响,所采用的路段阻抗函数仍是传统的 BPR 函数。另一方面,这些研究均采用遗传算法等数值模拟方法对所提出的双层规划模型进行求解,无法保证其收敛效果。

本文尝试提出一种公交专用道网络设计问题的新思路,充分考虑专用道设置对公交车辆及社会车辆的出行影响,以及多方式交通网络中出行者的交通选择行为,基于交通网络的整体性能,构造城市公交专用道网络设计优化模型。本文的主要工作包括:(1)分析了公交专用道设置对公交车辆和社会车辆道路通行能力的影响,基于传统的 BPR 函数构造了考虑公交专用道设置变量在内的多方式路段阻抗函数;(2)分析了多方式交通网络中出行者的模式选择问题和路径选择问题,基于变分不等式提出了多方式城市交通平衡配流模型;(3)以交通系统总费用最小为优化目标,考虑了不同方式网络平衡流量的约束,采用双层规划构造了基于系统最优的城市公交专用道网络设计模型,并给出了求解算法。通过一个简单算例对本文提出的模型及算法进行了验证和分析,结果表明,专用道设置可在一定程度上提高公交出行比例,但并非在全部路段上都设置专用道才使得交通系统的整体性能达到最优,本文所提出的方法具有可行性和有效性。

2 考虑公交专用道的路段阻抗函数

根据交通工程学的定义,道路通行能力是指在理想条件下,每条车道(道路)在单位时间内能够通过的最大交通量。既有研究表明^[20],专用道设置将提升路段公交通行能力。假设在路段 a 上有 n_a 条标准车道,每条车道的通行能力都是 C_a ,在没有设置公交专用道的情况下,整个道路的通行能力为 $n_a C_a$ 。如果在这样的路段上设置一个车道为公交专用道,对社会车辆而言,由于不能占用公交专用

道,因此,可使用的车道数为 $n_a - 1$,其通行能力显然会降低。对于公交车辆而言,由于公交车可以在所有车道上行驶,所以,公交车辆的通行能力相对于社会车辆而言将会提升。

用一个简单例子说明,如图 1 所示,在这条路段上共有 4 条车道,假定每条车道上的通行能力都是 C_a ,如果在该路段上不设置公交专用道,则社会车辆和公交车辆共用这 4 条车道,社会车辆和公交车辆的通行能力都为 $4C_a$;如果设置一条车道为公交专用道(图中虚线部分),则公交车可使用的车道数不变,为 4 条,而社会车辆能够使用的车道数降低为 3 条,因此,不同交通方式的道路通行能力在设置公交专用道后会发生改变。通常,由于可使用车道数的差异,公交车辆的通行能力将高于社会车辆的通行能力。



图 1 考虑公交专用道的路段能力

可以用变量 λ_a 表示在路段 a 上是否设置公交专用道,即:

$$\lambda_a = \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \forall a \quad (1)$$

根据上面分析,在考虑设置公交专用道的条件下,路段 a 上公交车及社会车辆的通行能力可表示如下:

$$C_a^{\text{bus}} = n_a \eta_{\text{bus}} C_a, \forall a \quad (2)$$

$$C_a^{\text{car}} = (n_a - \lambda_a) \eta_{\text{car}} C_a, \forall a \quad (3)$$

其中 $\eta_{\text{bus}}, \eta_{\text{car}}$ 为校正参数,在实际中,可通过调查数据用统计方法进行估计。

根据四兵锋和钟鸣等^[21]所提出的城市混合交通网络路段费用函数,在此提出了考虑公交专用道的城市混合交通的路段费用函数:

$$t_a^{\text{car}} = t_a^{\text{car}(0)} [1 + \alpha_1 \left\{ \left(\frac{v_a^{\text{car}}}{(n_a - \lambda_a) \eta_{\text{car}} C_a} \right)^{\beta_1} \right\}] [1 + \alpha_2 \left(\frac{v_a^{\text{bus}}}{n_a \eta_{\text{bus}} C_a} \right)^{\beta_2}] \quad (4)$$

$$t_a^{\text{bus}} = t_a^{\text{bus}(0)} [1 + \alpha_1 \left(\frac{v_a^{\text{bus}}}{n_a \eta_{\text{bus}} C_a} \right)^{\beta_1}] [1 + \alpha_2$$

$$\left\{ \frac{v_a^{\text{car}}}{(n_a - \lambda_a) \eta_{\text{car}} C_a} \right\}^{\beta_2} \quad (5)$$

其中 t_a^{car} 和 t_a^{bus} 分别表示小汽车和公交车这两种交通方式在路段 a 上的费用; $t_a^{\text{car}(0)}$ 和 $t_a^{\text{bus}(0)}$ 分别表示小汽车和公交车在路段 a 上的零流费用; v_a^{car} 和 v_a^{bus} 分别表示小汽车和公交车在路段 a 上形成的道路流量; $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2$ 和 β_2 为校正参数。

假定路段 a 上的不同交通方式的出行者需求分别为 x_a^{car} 和 x_a^{bus} 。由于各种交通方式的平均承载人数不同,因此,选择不同交通方式的出行者数量所形成的道路流量也是不同的。假定用 A^{car} 和 A^{bus} 分别表示这两种交通方式的平均承载人数, γ^{car} 和 γ^{bus} 分别表示小汽车和公交车的流量折算系数,则各种交通方式的道路流量可表示为:

$$v_a^{\text{car}} = \gamma^{\text{car}} \frac{x_a^{\text{car}}}{A^{\text{car}}}, v_a^{\text{bus}} = \gamma^{\text{bus}} \frac{x_a^{\text{bus}}}{A^{\text{bus}}}, \forall a \quad (6)$$

3 多方式城市交通网络平衡配流模型

假定用 T_m^{rs} 表示城市多模式交通网络中 O-D 对 rs 之间第 m 种方式的广义费用,则:

$$T_m^{\text{rs}} = t_m^{\text{rs}} + \epsilon_m^{\text{rs}}, \forall r, s, m \quad (7)$$

式中, t_m^{rs} 表示 O-D 对 rs 之间第 m 种方式的可确定费用,包括时间、价格、方便和舒适等; ϵ_m^{rs} 是随机误差项。可确定费用值 t_m^{rs} 可用下式来表示:

$$t_m^{\text{rs}} = \sum_n a_m^{(n)} \omega_m^{\text{rs}(n)}, \forall r, s, m \quad (8)$$

式中, $\omega_m^{\text{rs}(n)}$ 表示第 m 种方式的第 n 种特性值,比如平均时间、花费、方便舒适等; $a_m^{(n)}$ 是待定参数。

根据最小费用原则,某种方式被选择的概率就是其费用在所有出行方式的费用中为最小的概率,即

$$P_m^{\text{rs}} = \Pr(T_m^{\text{rs}} \leq T_l^{\text{rs}}, l \neq m), \forall r, s, m \quad (9)$$

式中, P_m^{rs} 表示 O-D 对 rs 之间出行者选择第 m 种方式的选择概率。

显然, P_m^{rs} 取决于费用函数的特性以及随机误差项 ϵ_m^{rs} 的分布,如果随机误差项 ϵ_m^{rs} 互相独立并且服从 Gumbel 分布,则可得出如下 Logit 模型:

$$P_m^{\text{rs}} = \frac{e^{-\theta t_m^{\text{rs}}}}{\sum_l e^{-\theta t_l^{\text{rs}}}}, \forall r, s, m \quad (10)$$

式中, θ 为校正参数。

假定 O-D 对 rs 之间总的需求量 q^{rs} 保持不变,则不同方式之间的流量分离满足以下约束条件:

$$q_m^{\text{rs}} = q^{\text{rs}} P_m^{\text{rs}}, \forall r, s, m \quad (11)$$

$$\sum_m q_m^{\text{rs}} = q^{\text{rs}}, \forall r, s \quad (12)$$

式中, q_m^{rs} 表示 O-D 对 rs 之间选择第 m 种方式的出行者数量。

根据 Wardrop 平衡原则,可采用如下的数学形式来描述城市多模式交通网络用户平衡状态^[22]:

$$\mu_m^{\text{rs}} - c_{mk}^{\text{rs}} \begin{cases} = 0, & f_{mk}^{\text{rs}} > 0 \\ \leq 0, & f_{mk}^{\text{rs}} = 0 \end{cases}, \forall r, s, k, m \quad (13)$$

式中, μ_m^{rs} 表示平衡状态下第 m 种方式在 O-D 对 rs 之间的出行时间; c_{mk}^{rs} 表示 O-D 对 rs 之间第 m 种方式在第 k 条路径上的出行时间; f_{mk}^{rs} 表示 O-D 对 rs 之间选择第 m 种方式以及第 k 条路径的出行者数量。

路径出行时间可用路段出行时间来表示:

$$c_{km}^{\text{rs}} = \sum_a t_a^m \delta_{a,k}^{\text{rs}}, \forall r, s, k, m \quad (14)$$

式中, $\delta_{a,k}^{\text{rs}}$ 为网络中路段与路径之间的相关系数,若路段 a 在 O-D 对 rs 之间第 k 条路径上,其取值为 1,否则为 0。

可用如下变分不等式模型来描述城市多模式交通网络的用户平衡问题^[22],即寻找 $(\tilde{x}, \tilde{q}) \in \Omega$ 满足如下关系:

$$\sum_{rs} \sum_m g_m^{\text{rs}}(\tilde{q}) \times (q_m^{\text{rs}} - \tilde{q}_m^{\text{rs}}) + \sum_a \sum_m t_a^m(\tilde{x}) \times (x_a^m - \tilde{x}_a^m) \geq 0 \quad (15)$$

$$\Omega = \{(x, q) \mid \sum_m q_m^{\text{rs}} = q^{\text{rs}}, \sum_k f_{m,k}^{\text{rs}} = q_m^{\text{rs}}, x_a^m = \sum_{rs} \sum_k f_{m,k}^{\text{rs}} \delta_{a,k}^{\text{rs}}, q_m^{\text{rs}} \geq 0, f_{m,k}^{\text{rs}} \geq 0, \forall r, s, m, k, a\} \quad (16)$$

式中, x 和 q 分别表示 x_a^m 和 q_m^{rs} 的列向量形式; $g_m^{\text{rs}}(q)$ 表示 O-D 对 rs 之间第 m 种交通方式的广义费用与其需求之间的函数关系。

目前求解变分不等式问题的常用方法是对角化算法,此算法是基于求解一系列数学优化子问题,即每次迭代都求解一个数学优化问题。对于上面的变分不等式模型,在第 n 次迭代中要解的规划问题可表示为:

$$\min_{(x, q) \in \Omega} Z(x, q) = \sum_m \sum_a \int_0^{x_a^m} t_a^m(x_1^{1(n)}, x_2^{1(n)}, \dots, w) dw + \sum_m \sum_r \sum_s \left[\int_0^{q_m^{\text{rs}}} g_m^{\text{rs}}(q_1^{1(n)}, q_1^{2(n)}, \dots, w) dw \right] \quad (17)$$

为了使不同方式之间的流量分离满足 logit 形式(10),上面优化模型中 $g_m^{\text{rs}}(q)$ 可取如下形式^[22]:

$$g_m^{\text{rs}}(q) = \frac{1}{\theta} \ln(q) + t_m^{\text{rs}}, \forall r, s, m \quad (18)$$

关于此模型的等价性证明以及求解算法可参阅四兵锋等^[22],在此不再赘述。

4 城市公交专用道网络优化设计模型

可以把双层规划方法应用在城市公交专用道网络的设计问题中,其中上层决策者是交通管理部门,下层决策者为出行者。交通管理部门通过设置公交专用道来降低系统总费用,而出行者则根据公交专用道方案,基于最小费用原则来进行方式选择和路径选择。这种关系可用如下的双层规划模型来描述:

$$\text{上层模型} \quad \min Z(\lambda) = \sum_m \sum_a x_a^m(\lambda) \cdot t_a^m[x_a^m(\lambda)] \quad (19)$$

其中 λ 表示公交专用道设置方案,是模型的决策变量; x_a^m 表示平衡条件下的路段流量,对于不同的公交专用道设置方案 λ ,将会产生不同的交通平衡状态 x_a^m ,因此, x_a^m 和 λ 之间存在对应关系,即 $x_a^m(\lambda)$ 。这种对应关系不是通过函数来表示的,而是通过下层带参数的变分不等式模型给出:

$$\sum_{rs} \sum_m g_m^r[\tilde{q}(\lambda)] \times [q_m^r - \tilde{q}_m^r(\lambda)] + \sum_a \sum_m t_a^m[\tilde{x}(\lambda)] \times [x_a^m - \tilde{x}_a^m(\lambda)] \geq 0 \quad (20a)$$

$$(\tilde{x}, \tilde{q}) \in \Omega \quad (20b)$$

上层规划问题是通过设置公交专用道来降低城市交通的总费用,达到系统最优;下层规划问题则是描述出行者在设置公交专用道条件下的出行方式选择和路径选择问题,其最优解满足 Logit 分离关系和用户平衡条件。

5 求解算法

双层规划方法已被大量应用在交通研究领域,然而,由于双层规划问题是一个 NP-hard 问题,因此求解双层规划较为困难。目前,在实际应用中,求解双层规划的算法主要是基于灵敏度分析的下降类方法和非数值优化方法。对于本文所提出的双层规划模型,其决策变量为 0-1 变量,无法采用灵敏度方法得出反应函数的导数关系,因此,无法采用基于灵敏度分析的下降类方法。Mesbah 等^[17]和 Mian-doabchi 等^[18]均采用遗传算法对离散双层规划模型进行求解,然而,由于这类算法在理论上无法得到上层问题的最优解甚至局部最优解,在求解过程中存在大量参数,且参数取值难以确定,因此这些算法的计算效果也不理想。

Bard 和 Moore^[23-24]采用分枝定界方法求解整数

双层规划问题,本文也采用分枝定界方法来求解带有 0-1 变量的双层规划模型(19)-(20)。分枝定界方法的基本思想为^[25]:先将可行域分割成小的子集,然后,在各个子集上求解相应的最优值,在这些最优解中得出原问题的最优解。需要指出的是,在求解可行域子集对应的优化问题时,还可以利用上述思想进行分析。此外,可以采取多种方法对子问题进行分析。例如,可以估计子问题最优值的边界,将它与已得到的原问题可行值进行比较,如果能够确定子问题无法获得更好的可行值,那么就不需要对子问题进行求解。

分枝定界方法的关键在于每次迭代中分枝的确定。对于上述双层规划问题,每一个备选分枝都会使上层的目标函数发生改变,相当于每一个解都会产生一个新的双层规划问题,而这个新问题是建立在上一次迭代基础之上的。所以,初始解的确定非常重要。若初始解的选择不合适,会使得含有最优解的分枝被提前剪掉,而无法得到原问题的最优解。

对于一个给定的初始解 λ^0 ,通过分枝定界法至少能得到一个备选的解 λ^* ,使得 $Z(\lambda^*) \leq Z(\lambda^0)$ 。当达到某一初始值所确定的最优解时,再进行任何的分支运算都无法降低目标函数值,此时算法即可停止。当通过多组初始解找到同一个最优解时,可以认为此解就是目标函数的最优解,分枝定界算法的具体步骤如下。

步骤 1:初始化。令 $\lambda^0 = 0$,即所有路段都不设置专用道,将 λ^0 代入到下层模型中,求得不同交通方式在各路段上的平衡流量,计算系统总费用 Z^0 。令 $i = 1, d = 1$;

步骤 2:计算设置方案的目标函数值。逐一改变各条路段公交专用道的设置状态,即令 $\lambda_i = 1 - \lambda_i$,并计算相应的 Z^i 。若新设置方案更优,即 $Z^i < Z^{i-1}$,令 $i = i + 1$,检测下一条路段;若 $Z^i > Z^{i-1}$,即新设置方案无效,则恢复 λ_i 的原始设置,令 $i = i + 1$,继续检测下一条路段。若所有路段均检测完毕,令 $d = d + 1$,转到下一步;

步骤 3:收敛性判断。检查设置方案是否重复,即 $\lambda^i = \lambda^{i-1}$,如果是,则修改初始值,例如,令 $\lambda^0 = 1$,即所有路段都设置专用道,转步骤 2;若已经达到预先设定的检测次数,即 $d = M$ (M 为预设最大迭代次数),则停止迭代,输出设置方案;否则,重新检测各条路段,令 $i = 1, d = d + 1$,转到步骤 2。

分枝定界法的基本求解过程见图 2。从图中可以看出,剪枝条件非常严格,从初始条件为所有路段都设置专用道开始,若任何一条路段在设置专用道后

没有使系统总费用降低,则该路段就不设置专用道,即剪掉该分枝。但是,网络中路段的各种组合十分复杂,虽然单独设置该路段上的专用道会导致系统总费用上升,但不能排除与其他路段的专用道组合起来使系统总费用降低。因此,单独使用该算法很有可能将包含最优解的分枝提前剪掉,需要对其加以改进。

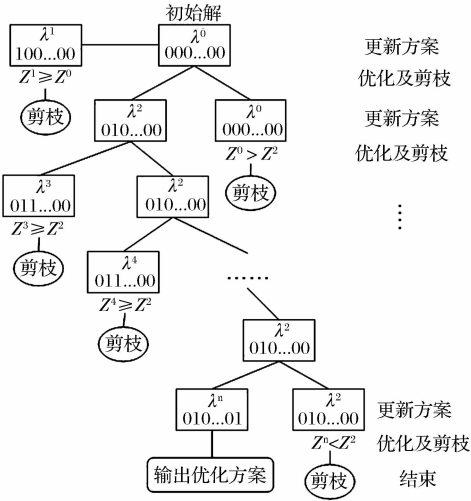


图2 分枝定界法求解过程

在图2中的分枝定界法的求解过程中,可在每一步保留使系统总费用减小的方案,当从第一条路段逐个检测直到最后一条路段时,再将所得到的局部最优解作为新的初始解,重新从第一条路段开始检测,直到测试完所有路段,都不会使系统总费用降低为止。为减少错误剪枝的发生,在这里,我们以当前求得的局部最优解为基础,对其逐位取反,作为另一组初始解,重复以上分枝求解过程。若新得到的局部最优解更小,则继续重复以上过程,直到无法取得更小的局部最优解为止。

6 算例分析

通过一个简单算例对模型及算法进行验证和分析。网络结构如图3所示,共有1个O-D对(A-D)、4个节点、5条路段,每条路段上都有2个车道,两种交通方式分别为私家车和公交车。表1给出了路段相关数据。

表1 路段相关数据

路段编号	$t_a^{car(0)}/(h)$	$t_a^{bus(0)}/(h)$	$C_a/(P \cdot h^{-1})$
1	0.111	0.178	1000
2	0.128	0.194	700
3	0.100	0.167	1500
4	0.106	0.172	700
5	0.089	0.156	700

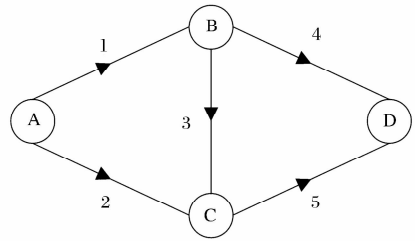


图3 算例网络结构

A-D之间不同交通方式的确定费用可表示如下:

$$t_m^{AD} = \mu_m^{AD} + aC_m^{AD} - bE_m^{AD}, \forall m \quad (18)$$

其中 C_m^{AD} 和 E_m^{AD} 分别表示第 m 种出行方式在 A-D 之间的价格费用和方便舒适性成本; a 和 b 为参数,在本算例中取 $a = 0.2, b = 0.1$ 。表2给出了各出行方式的相关数据。相关参数的取值分别为: $\eta_{bus} = 1, \eta_{car} = 1, \alpha_1 = 0.15, \beta_1 = 4, \alpha_2 = 0.1, \beta_2 = 4, \theta = 1$ 。

表2 出行方式相关数据

出行方式	PCU 折算系数	平均载客数(人/车)	C_m^{AD}	E_m^{AD}
私家车	1.00	4	10	10
公交车	1.50	20	4	5

首先,假定所有路段均不设置公交专用道,当出行总需求为 $10000 \text{ Person} \cdot h^{-1}$ 时,求解下层模型,得出各路段上各方式的平衡流量与费用,如表3所示。此时,选择公交的出行者比例为 63.47% ,系统总费用为 $3353.52h$ 。

表3 未设置专用道时各路段平衡流量及费用

路段	$x_a^{car}/(\text{Person} \cdot h^{-1})$	$x_a^{bus}/(\text{Person} \cdot h^{-1})$	$t_a^{car}/(h)$	$t_a^{bus}/(h)$
1	2167.0796	2602.4424	0.1159	0.1859
2	1458.8782	3771.5998	0.1421	0.2153
3	0	0	0.1000	0.1670
4	2167.0796	2602.4424	0.1255	0.2037
5	1458.8782	3771.5998	0.0988	0.1731

假定出行需求保持不变,若每条路段都设置公交专用道,类似的,可得出各路段上各方式的平衡流量与费用,如表4所示。此时,选择公交车的出行者比例上升为 70.48% ,系统总费用为 $4439.81h$ 。

表4 所有路段都设置专用道时各路段平衡流量及费用

路段	$x_a^{car}/(\text{Person} \cdot h^{-1})$	$x_a^{bus}/(\text{Person} \cdot h^{-1})$	$t_a^{car}/(h)$	$t_a^{bus}/(h)$
1	2078.4602	3115.3182	0.1968	0.1866
2	1397.3464	3408.8752	0.2994	0.2102
3	219.4874	0	0.1000	0.1670
4	1858.9728	3115.3182	0.3581	0.1976
5	1616.8338	3408.8752	0.2577	0.1745

若其他条件均不变,只在路段 1 上设置公交专用道,各路段上各方式的平衡流量与费用如表 5 所示。此时,选择公交车的出行者比例为 64.36%,系统总费用为 3323.323h。

表 5 仅路段 1 设置专用道时各路段平衡流量及费用

路段	$x_a^{car} /$ (Person · h ⁻¹)	$x_a^{bus} /$ (Person · h ⁻¹)	$t_a^{car} /$ (h)	$t_a^{bus} /$ (h)
1	554.8650	6355.5185	0.1492	0.1818
2	3051.8608	37.7557	0.1555	0.2357
3	0	0	0.1000	0.1670
4	554.8650	6355.5185	0.1155	0.1874
5	3051.8608	37.7557	0.1081	0.1895

从上面的结果可以看出,若所有路段都设置专用道,虽然出行者选择公交出行的比例会上升,但由于私家车行驶费用的增加,会导致整个系统的总费用增加。因此,公交专用道的设置并不是越多越好。如果只在路段 1 上设置专用道,虽然选择公交车的出行者比例上升幅度不大,但系统总费用却会下降。

图 4 给出了不同需求条件下,不同公交专用道设置方案对公交出行分担率的影响趋势。可以看出,当出行需求较小时,如 $q_{AD} < 7000 \text{ Person} \cdot \text{h}^{-1}$,是否设置公交专用道或在什么路段进行设置,对出行者的方式选择没有明显影响。随着需求量的增加,如 $q_{AD} = 17000 \text{ Person} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,所有路段上都设置公交专用道可以明显地提高公交出行分担率。如果所有路段都不设置公交专用道,公交出行分担率会随着出行需求的增加而下降,这是因为在混合交通路段上,随着需求的增加,网络拥挤效应越来越大,公交车由于行驶速度较慢,且没有其专用道,受到社会车辆的干扰会随着拥挤的增加而增加,使得其出行费用变大,从而导致其吸引力下降。无论是所有路段上还是一条路段上设置公交专用道,都会降低公交车的出行时间,网络拥挤越高,设置公交专用道对于提高公交出行分担率的效果也就越明显。

图 5 给出了不同需求条件下,不同公交专用道设置方案对网络总费用的影响趋势。可以看出,当网络拥挤程度较低时,如 $q_{AD} < 20000 \text{ Person} \cdot \text{h}^{-1}$,所有路段都设置专用道的系统总费用比不设专用道有所增加。当网络拥挤程度较严重时,如 $q_{AD} > 28000 \text{ Person} \cdot \text{h}^{-1}$,则相反。这是因为,当网络拥挤程度较低时,私家车由于速度较快,其分担率的提高会使得系统总费用下降,而专用道的设置会降低私家车的通行能力,使得私家车行驶费用增加并降低

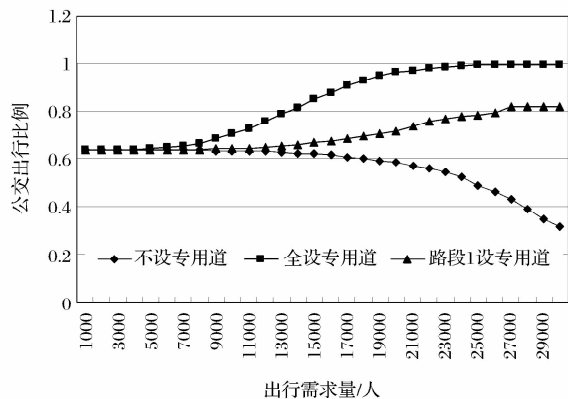


图 4 不同需求下不同设置方案对公交分担率的影响

其分担率,从而系统总费用增加;当网络拥挤程度较高时,如果选择私家车的需求太多,则会产生过多的道路流量,使得私家车和公交车的运行速度都下降,因此,提高私家车的分担率会导致系统总费用的上升,而公交车由于其单位车辆载客量远远大于私家车,因此,提高公交车分担量可以减少道路流量,从而降低网络拥挤。在这种条件下,设置公交专用道可以有效地减小私家车对公交车的干扰,从而提高公交车的分担率,进而降低系统总费用。

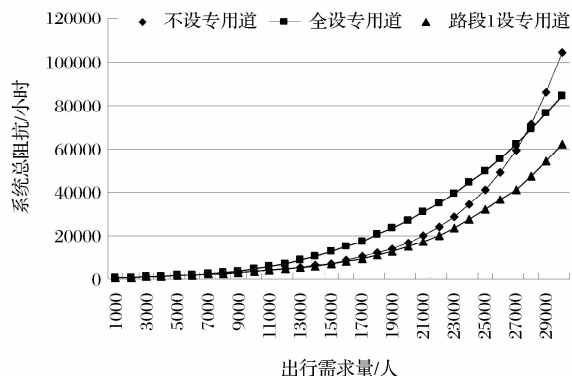


图 5 不同需求下不同设置方案对网络总费用的影响

下面,我们来分析通过求解双层规划模型来确定公交专用道设置方案的优化过程(假定 $q_{AD} = 10000 \text{ Person} \cdot \text{h}^{-1}$)。首先,可采用穷举法找到该算例的最优方案。穷举法通过逐个尝试可能的专用道设置方案,计算出所有方案的系统总费用,然后在这些结果中找出系统费用最小的方案,即为双层规划模型的最优解。对于本算例的简单网络,共有 5 条路段,因此,公交专用道设置方案有 $2^5 = 32$ 种。图 6 给出了穷举法的计算结果。图中横坐标表示的是专用道设置方案,是指将 5 条路段的设置变量按从左到右的顺序依次排列,这样可以得到一个 5 位

的二进制码,如路段 1 设置专用道而其他路段都不设置,可以表示为 00001(对应方案 5),若所有路段都设置专用道,则表示为 11111(对应方案 32)。

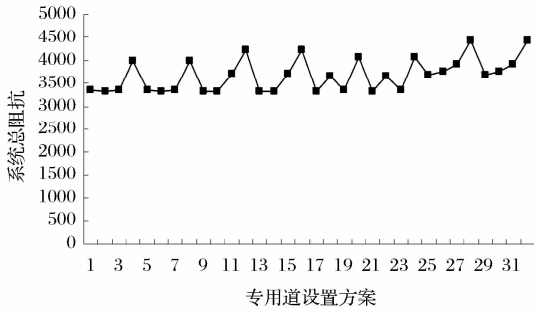


图 6 穷举法求解专用道设置方案

根据穷举法可以得到两个最优方案,分别对应图 6 中的方案 2 和 6。这两个方案对应的系统总费用及出行方式分担率由表 6 给出。可以看出,路段 3 是否设置专用道对于最优方案没有影响。

表 6 公交专用道设置最优方案

方案	路段编号					系统总阻抗/ h	出行方式比例(%)	
	1	2	3	4	5		公交车	私家车
2	0	0	0	0	1	3316.063	64.711	35.289
6	0	0	1	0	1	3316.063	64.711	35.289

显然,这种方法受网络规模的限制,对于路段数量巨大的城市道路网络来说并不适用。下面采用分支定界法来求解最优方案。

首先,设定出行需求 $q_{AD} = 10000 \text{ Person} \cdot \text{h}^{-1}$, 初始方案 $\lambda^0 = (0,0,0,0,0)^T$, 即所有路段均不设置专用道。图 7 给出了算法的迭代过程,在第 1 次迭代中,即 $\lambda^1 = (1,0,0,0,0)^T$, 已达到对应初始值 λ^0 的局部最小点,此时系统总费用为 3323.323h,其后对每一条路段的测试都无法降低该最小值,在此条件下,将 $\lambda^1 = (1,0,0,0,0)^T$ 逐位取反,再次进行上述计算。可以看出,当进行第 4 次迭代时,系统总费用达到最优值 3316.063h,此时对应的专用道设置方案为 $\lambda^4 = (0,0,0,0,1)^T$ 。同样,以 $\lambda^1 = (1,1,1,1,1)^T$ 为初始方案,当进行第 5 次迭代时,系统总费用达到最优值,此时对应的专用道设置方案为 $\lambda^5 = (0,0,1,0,1)^T$ 。显然,采用分支定界法所得到的最优解与穷举法得到的最优解完全一致。

7 结语

本文分析并研究了公交专用道对不同交通方式

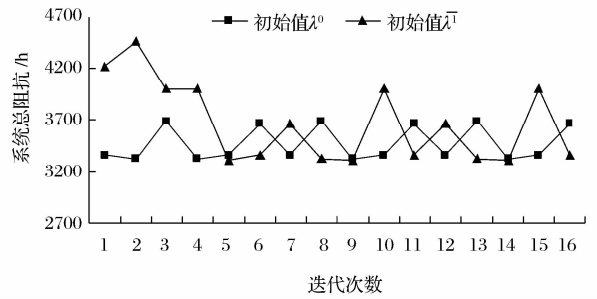


图 7 分枝定界法求解过程

路段通行能力的影响,并在此基础之上提出了公交专用道路段的阻抗函数。分析了城市多模式交通网络中的出行者方式选择和路径选择问题,提出了城市多模式交通均衡配流模型。在此基础上,以公交专用道设置参数为决策变量,从城市交通系统最优的角度出发,构造了公交专用道网络优化设计的双层规划模型,并提出基于分支定界思想的求解方法。最后,采用一个简单算例对本文所提出的模型和算法进行了说明和验证。

本文的研究结果表明,公交专用道的设置可以在一定条件下提高公交出行比例,但并不是在所有的路段上都适用,而应从交通网络的整体出发来考虑专用道网络的优化设计问题。而专用道网络的优化设计是一个 NP-Hard 问题,本文虽然给出了分枝定界的求解方法,但没有验证该算法对于求解实际交通网络的可行性和有效性。此外,本文在分析与研究的过程中将一部分条件理想化。如假设道路上仅有公交车与小汽车两种交通方式,没有考虑出行者交通选择时的等车、换乘、车内拥挤等因素,在算例中只是简单把方便舒适性因素用常数来表示。在实际中,对于出行者选择公交方式来说,等车、换乘和车内拥挤是重要影响因素,国内外专家学者在这个方面做了大量研究^[26-28]。在今后研究中,应把这些因素模型化,用更加符合实际的计算方法来进行量化处理,同时,还应改进相应的优化算法,使研究结果更接近实际情况。

参考文献:

[1] 高自友,宋一凡,四兵锋. 城市交通连续平衡网络设计:理论与方法[M]. 北京:中国铁道出版社,2001.

[2] 许良,高自友. 基于路段能力可靠性的城市交通网络设计[J]. 中国公路学报,2006,19(2):86-90.

[3] Chinu S W. Bi-level programming for the continuous transport network design[J]. Transportation Research-B, 2005, 39(4):361-383.

- [4] 赵彤, 高自友. 最优信号控制条件下城市交通离散网络设计问题的备用能力模型[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(8): 118—123.
- [5] Gao Ziyou, Wu Jianjun, Sun Huijun. Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem[J]. Transportation Research-B, 2005, 39(6): 479—495.
- [6] 黄艳君, 陈学武, 张卫华. 公交专用道设置前后路段交通流模型比较[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2003, 20(4): 68—70.
- [7] 周智勇, 黄艳君, 陈峻, 等. 公交专用道设置前后无港湾公交停靠站特性研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(7): 103—107.
- [8] Arasan V T, Vedagiri P. Micro-simulation study of the effect of exclusive bus lanes on heterogeneous traffic flow[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2010, 136(1): 50—58.
- [9] 胡兴华, 刘咏. 设置公交专用道道路的交通脆弱性分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2006, 4(3): 128—133.
- [10] Chen Xumei, Yu Lei, Zhu Lin, et al. Microscopic traffic simulation approach to the capacity impact analysis of weaving sections for the exclusive bus lanes on an urban expressway[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(10), 895—902.
- [11] 白玉, 薛昆, 杨晓光. 公交专用车道效益评价方法探讨[J]. 公路交通科技, 2004, 21(1): 102—105.
- [12] 雷莲桂, 孙全欣. 公交专用道路段长度与运行效果关系研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(5): 160—165.
- [13] Vedagiri P, Arasan V T. Modeling modal shift due to the enhanced level of bus service[J]. Transport, 2009, 24(2): 121—128.
- [14] McDonnell S, Zellner M. Exploring the effectiveness of bus rapid transit a prototype agent-based model of commuting behavior[J]. Transport Policy, 2011, 18(6): 825—835.
- [15] Abdelghany K F, Mahmassani H S, Abdelghany A F. A modeling framework for bus rapid transit operations evaluation and service planning [J]. Transportation Planning and Technology, 2007, 30(6): 571—591.
- [16] Li Shugang, Ju Yongfeng. Evaluation of bus-exclusive lanes[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2009, 10(2): 236—245.
- [17] Mesbah M, Sarvi M, Ouveysi I, et al. Optimization of transit priority in the transportation network using a decomposition methodology [J]. Transportation Research Part C, 2011, 19(2): 363—373.
- [18] Miandoabchi E, Dullaert W, Farahani R Z, et al. Hybrid evolutionary metaheuristics for concurrent multi-objective design of urban road and public transit networks[J]. Networks and Spatial Economics, 2012, 12(3): 441—480.
- [19] Yao Jia, Shi Feng, Zhou Zhao, et al. Combinatorial optimization of exclusive bus lanes and bus frequencies in multi-modal transportation network[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(12): 1422—1429.
- [20] 美国交通运输研究委员会. 公共交通通行能力和服务质量手册[M]. 杨晓光, 滕靖, 等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [21] 四兵锋, 钟鸣, 高自友. 城市混合交通条件下路段阻抗函数的研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(1): 68—73.
- [22] 四兵锋, 杨小宝, 高亮, 等. 基于出行需求的城市多模式交通配流模型及算法[J]. 中国公路学报, 2010, 23(6): 85—91.
- [23] Bard J F, Moore J T. A branch and bound algorithm for the bilevel programming problem[J]. Journal of Scientific Computing, 1990, 11(11), 281—292.
- [24] Bard J F, Moore J T. An algorithm for the discrete bilevel programming problem[J]. Naval Research Logistics, 1992, 39(39): 419—435.
- [25] 黄红选, 韩继业. 数学规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [26] Tian Lijun, Huang Haijun. Modeling the modal split and trip scheduling with commuters' uncertainty expectation. European[J]. Journal of Operational Research, 2015, 244(3): 815—822.
- [27] Si Bingfeng, Zhong Ming, Gao Ziyou, et al. Urban transit assignment model based on augmented network with in-vehicle congestion and transfer congestion[J]. Journal of System Science and Systems Engineering, 2011, 20(2): 155—172.
- [28] Liu Tianliang, Huang Haijun, Yang Hai, et al. Continuum modeling of park-and-ride services in a linear monocentric city with deterministic mode choice[J]. Transportation Research-B, 2009, 43(6): 692—707.

System Optimization based Bus-lane Network Design Model and Algorithm

SI Bing-feng, YANG Xiao-bao, GAO Liang

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: It is one of the important means to set bus lane on certain roads for “bus priority” strategy, however, the road capacity for different means of transportation will be changed by setting bus lane. In this paper, the effects of bus lane on the travel times of buses and cars are analysed and then the corresponding travel cost functions are formulated while considering the change of road lanes. Simultaneously, the complex travelers’ choice behaviors (including mode choice and route choice) are analyzed in urban multimodal network consisting of bus and car. A variational inequality model is proposed to describe user equilibrium assignment for such a system. Further, a bi-level model is proposed to describe the urban bus-lane network design problem, in which the minimum travel cost of whole system is regarded as optimization objective and the equilibrium flows of both bus and car on the road are considered. The branch and bound algorithm is also given for solving 0-1 bi-level programming. Finally, a numerical example is provided to illustrate the model and algorithm.

Key words: multimodal; bus lane; network design; bi-level programming; branch-and-bound method