

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.05.016

低碳排放约束下城市多方式交通网络道路收费研究

张鑫¹, 李佳杰², 俞灏³, 刘攀³

(1. 北京市交通委员会政务服务中心(北京市船舶检验所), 北京 100161;

2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 3. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 为控制和降低城市交通碳排放, 研究了低碳排放约束下的城市多方式交通网络道路收费问题。以私家车、常规公交和地铁组成的多方式交通网络为研究对象, 以 CO₂ 预期减排量和 CO 环境容量为约束, 建立了最小化 CO₂ 排放总量和用户出行总时间的双目标道路收费模型。模型采用基于博弈论的双层优化方法刻画决策者和出行者间的领导-跟随关系, 上层为决策者在低碳排放约束下制定道路收费方案以权衡双目标, 下层为出行者根据收费措施做出交通方式及路径选择。运用变分不等式描述了交通方式间的不对称影响及出行者的出行行为。针对所构建的非线性双目标道路收费模型, 设计了改进型非支配排序遗传算法进行求解。算例结果表明: 道路收费措施可有效地调节各种交通方式的出行比例, 使得私家车出行者转移至公共交通(常规公交和地铁), 从而缓解路网拥堵且达到低碳减排的目标; 相比于道路收费前的初始状态, 收费措施可至少提升 43% 的公共交通出行量, 且使 CO₂ 减排量达到 32% 以上; Pareto 前沿验证了 2 个目标之间的负相关关系, 若不增加初始状态的出行总时间, 路网能够达到的最大减排比例为 32%~59%; 若欲达到高于 60% 的 CO₂ 预期减排目标, 需提高公共交通的供给水平, 减少由私家车转移至公共交通的时间损失, 提高系统的运输效率。

关键词: 城市交通; 道路收费; 双目标优化; 多方式交通网络; 碳减排; 改进型非支配排序遗传算法

中图分类号: U491.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2022)05-0131-08

Study on Road Pricing for Urban Multi-modal Transport Network with Low Carbon Emission Constraints

ZHANG Xin¹, LI Jia-jie², YU Hao³, LIU Pan³

(1. Government Service Center of Beijing Municipal Transport Commission (Beijing Boats Inspection Center), Beijing 100161, China;

2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

Abstract: In order to control and reduce the carbon emission of urban transport, the road tolls for urban multi-modal transport network under the constraint of low carbon emission is studied. Taking the multi-modal transport network composed of private cars, conventional buses and subways as the research object, and with the expected CO₂ emission reduction and CO environmental capacity as constraints, a bi-objective road pricing model that minimizes the total CO₂ emissions and the total travel time of users is established. The model uses a 2-layer optimization method based on game theory to describe the leader-follower relationship between decision makers and travelers. The upper layer is the decision makers to formulate road pricing scheme under the constraints of low carbon emissions to balance the dual goals, and the lower layer is the travelers to make traffic mode and route choices according to the pricing measures. The asymmetric influence

收稿日期: 2021-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51561135003)

作者简介: 张鑫(1988-), 女, 吉林吉林人, 硕士. (zhangxin1@jtw.beijing.gov.cn)

of transport modes and travel behaviors are analyzed by variational inequality. The NSGA-II is designed to solve the proposed nonlinear bi-objective road pricing model. The result of the numerical examples shows that (1) road pricing measures can effectively adjust the travel proportion of various transport modes, so that private car travelers will transfer to public transport (regular buses and subways), thereby alleviating road network congestion and reducing low carbon emission; (2) compared with the initial state before road pricing, the volume of public transport is increased by 43% at least, and carbon emissions is decreased more than 32%; (3) the result of Pareto front demonstrated the negative correlation of the 2 objectives, so that the maximum ratio of emission reduction is 32%–59% without increasing the total travel time; (4) to achieve the expected CO₂ emission reduction by more than 60%, it is necessary to increase the supply level of public transport, reduce the time loss of transferring from private cars to public transport, and improve the transport efficiency of the system.

Key words: urban traffic; road pricing; bi-objective optimization; multi-modal transport network; carbon emission reduction; non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II)

0 引言

《国家综合立体交通网规划纲要》提出：“加快推进绿色低碳发展，交通领域二氧化碳排放尽早达峰”。据统计，交通运输领域碳排放年均增速保持5%以上，约占全国终端碳排放总量的15%，其中城市交通占比约为37%。因此，优化城市出行结构、提升城市交通出行效率是交通低碳发展的主要路径^[1]。道路收费作为一种需求管理措施，将环境影响和交通拥堵等负外部成本内部化，促使出行者向公共交通转移，从而提高公共交通分担率、优化路网运行效率、推进交通节能降碳发展^[2]。

为确定合理有效的道路收费策略，国内外学者提出了一系列道路收费模型。模型大多考虑了收费措施实施后出行者的交通方式及路径选择行为，从而更真实地评价收费策略的效益。同时，鉴于环境保护的需要，学者们建立了考虑环境因素的道路收费模型，以引导交通可持续发展。早期的研究集中在CO等有害气体控制方面。例如，Nagurney^[3]建立了基于固定CO排放因子的单一模式尾气排污许可证收费的最优定价模型。Yin等^[4]建立了以系统出行时间和路网污染物最小化为目标的道路收费模型，得到系统最优和排放最优不能同时达到的结论。随着交通低碳发展成为关注热点，学者们陆续考虑CO₂温室气体减排约束。Li等^[5]以降低碳排放与系统延误为目标，研究了随机需求下的单一模式交通网络道路收费方案。Yang等^[6]研究了排放总量约束条件下单一交通网络的道路收费问题。Sharma等^[7]建立了考虑CO₂减排约束的多目标排放收费模型，采用多目标遗传算法求解Pareto解集，然而模型仅考虑

了单一的私家车交通网络，未考虑常规公交等其他交通方式。在此基础上，部分学者构建了多方式交通网络下的道路收费模型，主要包括：私家车和常规公交^[8]、私家车和地铁^[9]、私家车和常规公交及地铁^[10]。通过多方式交通网络的构建，可以考虑出行者在交通方式间的实际选择行为，提高道路收费方案的应用效果。

上述研究主要针对单一含碳排放物进行控制，且对综合考虑多目标优化的多方式交通网络道路收费研究较少。因此，本研究以城市交通网络中运输量最大且具有典型特点的私家车、常规公交和地铁为研究对象，结合不同含碳排放物的特点，以CO₂预期减排量和CO环境容量为约束，建立综合考虑CO₂排放总量和出行总时间的双目标道路收费模型。

1 含碳排放物约束

1.1 CO₂减排量约束

多方式交通网络中地铁以电力驱动，将其碳排放视为0，暂不考虑电力消耗所产生的碳排放量。私家车和常规公交则假设均为传统燃油车辆（暂不考虑新能源车辆）。根据不同的适用范围和应用需求，机动车尾气模型可分为宏观、中观和微观3个层次。基于平均速度的宏观模型适用于计算区域路网的排放总量；基于典型工况的中观模型侧重于分路段、分时段的排放量计算；而基于瞬时工况的微观模型则常用于计算单车的逐秒排放量^[11]。由于本研究考虑宏观交通流分布及路网整体排放量，因此，采用基于平均速度的宏观尾气模型计算路网CO₂排放总量。无收费情况下初始状态的路网CO₂排放总量 F_{base} 为各交通方式出行量与单位里程排放量及行驶

里程的乘积(式(1))。实施道路收费后,路网CO₂预期排放总量需达到减排目标,即将初始状态排放量与预期减排量的差值作为上限值(式(2))。

$$F_{\text{base}} = \sum_{a \in A} RF_1(v_a) x_a^* l_a / \omega_1 + \sum_{a \in \hat{A}} RF_2(\hat{v}_a) \hat{x}_a^* l_a / \omega_2, \quad (1)$$

$$\sum_{a \in A} RF_1(v_a) x_a l_a / \omega_1 + \sum_{a \in \hat{A}} RF_2(\hat{v}_a) \hat{x}_a \cdot l_a / \omega_2 \leq F_{\text{base}} (1 - \alpha), \quad (2)$$

式中, F_{base} 为现状路网CO₂排放量; $RF_1(v_a)$ 和 $RF_2(\hat{v}_a)$ 分别为小汽车和公交车的单位里程CO₂排放量与平均速度的多项式拟合曲线^[12]; v_a 和 $\hat{v}_a$ 分别为路段 a 上私家车和公交车的平均速度; x_a^* 和 $\hat{x}_a^*$ 分别为无收费情况下初始状态路段 a 上私家车和常规公交的出行量; l_a 为路段 a 的长度; ω_1 和 ω_2 分别为私家车和公交车的平均车载人数; x_a 和 $\hat{x}_a$ 分别为实施道路收费后路段 a 上私家车和常规公交的出行量; 集合 A 和 $\hat{A}$ 分别为所有路段的集合和含有公交线路的路段集合; α 为CO₂排放量预期下降比例, 其为交通系统CO₂减排的最低需求, 由规划者或政策制定者根据交通区域特性确定。

1.2 CO 环境容量

为保证道路使用者的身体健康, 引入路段的CO环境容量限值, 其为道路两侧CO浓度满足环境二级标准时所对应的最大路段交通量^[13]。参照文献[13], 由箱型尾气扩散模式可得道路两侧CO浓度与道路几何设计、气象因子、交通量以及不同交通方式的CO排放因子等的关系式。基于箱型尾气扩散模式, 结合具体的道路几何设计、气象因子等参数, 将CO浓度设为二级标准限值反推得到路段的交通量(以标准小汽车表示, 单位为pcu), 即为路段 a 的CO环境交通容量 V_a^{co} 。通过环境容量换算系数 β_j^{co} , 将不同类型的车辆换算为标准小汽车, β_j^{co} 的计算公式为:

$$\beta_j^{\text{co}} = \frac{EF_j^{\text{co}}}{EF_{\text{car}}^{\text{co}}}, \quad (3)$$

式中, EF_j^{co} 为第 j 种车辆类型的固定CO排放因子; $EF_{\text{car}}^{\text{co}}$ 为标准小汽车的固定CO排放因子。

含有公交线路的路段 ($a \in \hat{A}$) 的CO环境容量约束见式(4), 其余路段 ($a \in A - \hat{A}$) 的CO环境容量约束见式(5):

$$x_a / \omega_1 + \beta_{\text{bus}}^{\text{co}} \hat{x}_a / \omega_2 \leq V_a^{\text{co}}, \quad a \in \hat{A}, \quad (4)$$

$$x_a / \omega_1 \leq V_a^{\text{co}}, \quad a \in A - \hat{A}, \quad (5)$$

式中, $\beta_{\text{bus}}^{\text{co}}$ 为公交车相对于标准小汽车的环境容量换算系数; V_a^{co} 为路段 a 的CO环境容量。

2 双目标道路收费模型

以私家车、常规公交和地铁组成的多方式交通网络为研究对象, 建立了双目标道路收费模型。上层为决策者制定道路收费方案, 下层为出行者根据收费方案做出交通方式及路径选择。上、下层迭代变量为路段收费费率 e_a , 其取值范围在0和1之间, 用以表示出行时间增加比例, t_a 为路段 a 上私家车行驶时间, $e_a t_a$ 为路段 a 的道路收费。上层模型中各交通方式的路段出行量及出行需求为道路收费费率 e_a 的隐函数, 隐函数关系可由下层交通方式与交通分配组合模型求得。

上层模型考虑效率指标(以用户出行总时间 TST 表示)和环境指标(以CO₂排放总量 TSE 表示), 从而实现出行效率与环境保护的平衡。 TST 为私家车、常规公交和地铁的出行时间总和(式(6))。 TSE 为私家车和常规公交产生的CO₂排放量总和(地铁的碳排放视为0), 见式(7)。寻找满足约束条件式(8)的各路段最佳收费费率 e_a 使双目标达到约束条件下的最优值。

$$\min_{0 \leq e_a \leq 1} TST = \sum_{a \in A} x_a t_a(x_a, \hat{x}_a) + \sum_{a \in \hat{A}} \hat{x}_a \hat{t}_a(x_a, \hat{x}_a) + \sum_{rs} \bar{q}_{rs} t_d, \quad (6)$$

$$\min_{0 \leq e_a \leq 1} TSE = \sum_{a \in A} RF_1(v_a) x_a l_a / \omega_1 + \sum_{a \in \hat{A}} RF_2(\hat{v}_a) \cdot \hat{x}_a l_a / \omega_2, \quad (7)$$

$$\text{s. t. 式(2), 式(4) ~ 式(5),} \quad (8)$$

式中, TST 为用户出行总时间; TSE 为CO₂排放总量; e_a 为路段 a 的收费费率; $t_a(x_a, \hat{x}_a)$ 为路段 a 上私家车行驶时间, $\hat{x}_a = 0 (a \in A - \hat{A})$; $\hat{t}_a(x_a, \hat{x}_a)$ 为路段 a 上公交车的行驶时间; $\bar{q}_{rs}$ 为起讫点 rs 之间地铁出行需求; t_d 为地铁的固定出行时间。

下层模型为私家车、常规公交和地铁的交通方式与交通分配组合模型。假设地铁网络与地面交通网络完全分离, 3种交通方式的划分比例服从logit模型(式(9)), 私家车和常规公交的路径选择行为满足用户均衡条件(式(10)~(11))。地面交通网络中考虑公交车和私家车相互不对称影响, 且出行量对其自身阻抗的影响大于另一种交通方式^[14]。混合网络交通方式和交通分配组合模型的变分不等

式表达形式见式 (12), 该变分不等式问题等价于多方式交通配流的平衡条件^[8]。私家车和公交车的出行需求平衡约束分别见式 (13) 和式 (14), 路径出行量的非负约束见式 (15), 各交通方式的出行需求总量约束见式 (16)。

$$P_m^{rs} = \frac{\exp(-\theta c_m^{rs})}{\sum_{i \in M} \exp(-\theta c_i^{rs})}, \quad \forall r, s, m \in M, \quad (9)$$

式中, M 为交通方式的集合; P_m^{rs} 为起讫点 rs 之间选择第 m 种交通方式出行的概率; c_i^{rs} 为起讫点 rs 之间第 i 种交通方式的最小出行阻抗; θ 为非负的经验参数。

$$(c_{rs}^k - c_{rs}^l) f_{rs}^k = 0, \quad c_{rs}^k - c_{rs}^l \geq 0, \quad f_{rs}^k \geq 0, \quad \forall r, s, k, \quad (10)$$

$$(\hat{c}_{rs}^l - \hat{c}_{rs}^k) \hat{f}_{rs}^l = 0, \quad \hat{c}_{rs}^l - \hat{c}_{rs}^k \geq 0, \quad \hat{f}_{rs}^l \geq 0, \quad \forall r, s, l, \quad (11)$$

式中, c_{rs}^k 和 $\hat{c}_{rs}^l$ 分别为起讫点 rs 之间第 k 条私家车出行路径和第 l 条常规公交线路的出行阻抗; c_{rs} 和 $\hat{c}_{rs}$ 分别为起讫点 rs 之间私家车和常规公交的最小出行阻抗; f_{rs}^k 和 $\hat{f}_{rs}^l$ 分别为起讫点 rs 之间路径 k 上的私家车出行量和线路 l 上的常规公交出行量。

$$\begin{aligned} & \sum_{rs} \sum_{k \in K} t_{rs}^{k*} (1 + \sum_{a \in A} e_a \delta_{a,k}^{rs}) (f_{rs}^k - f_{rs}^{k*}) + \\ & \sum_{rs} \sum_{l \in L} \hat{c}_{rs}^l (\hat{f}_{rs}^l - \hat{f}_{rs}^{l*}) + \sum_{rs} (\bar{q}_{rs} - \bar{q}_{rs}^*) \cdot \\ & \bar{c}_{rs}^* + \sum_{rs} \frac{1}{\theta} \ln \frac{q_{rs}^*}{q'_{rs}} (q_{rs} - q_{rs}^*) + \sum_{rs} \frac{1}{\theta} \cdot \\ & \ln \frac{\hat{q}_{rs}^*}{\hat{q}'_{rs}} (\hat{q}_{rs} - \hat{q}_{rs}^*) \geq 0, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \sum_k f_{rs}^k = q_{rs}, \quad \forall r, s, k, \quad (13)$$

$$\sum_l \hat{f}_{rs}^l = \hat{q}_{rs}, \quad \forall r, s, l, \quad (14)$$

$$f_{rs}^k \geq 0, \quad \hat{f}_{rs}^l \geq 0, \quad \forall r, s, k, l, \quad (15)$$

$$q_{rs} + \hat{q}_{rs} + \bar{q}_{rs} = q'_{rs}, \quad \forall r, s, \quad (16)$$

式中, K 为私家车的出行路径集合; L 为公交线路集合; t_{rs}^{k*} 为网络达到平衡状态时起讫点 rs 之间第 k 条私家车出行路径上的出行时间; $\delta_{a,k}^{rs}$ 为表示路径和路段关系的 0, 1 变量, 如果路段 a 在连接起讫点 rs 之间第 k 条路径上, 其值为 1, 否则为 0; $\hat{c}_{rs}^l$ 为网络达到平衡状态时起讫点 rs 之间第 l 条公交线路的出行阻抗; $\bar{c}_{rs}^*$ 为网络达到平衡状态时起讫点 rs 之间地铁交通方式的出行阻抗; f_{rs}^{k*} 和 $\hat{f}_{rs}^{l*}$ 分别为网络达到平衡状态时起讫点 rs 之间路径 k 上的私家车出行量和线路 l 上的常规公交出行量; q_{rs}^* , $\hat{q}_{rs}^*$, $\bar{q}_{rs}^*$ 分别为网

络达到平衡状态时私家车、常规公交和地铁的出行需求; q'_{rs} , $\hat{q}_{rs}$, q_{rs} , $\bar{q}_{rs}$ 分别为起讫点 rs 之间的总需求量、常规公交出行需求、私家车出行需求和地铁出行需求。

3 算法设计

基于 Sterberg 博弈的双目标道路收费模型属于 N-P hard 问题, 上层目标函数与 CO₂ 排放总量约束条件均为非线性形式, 因此无法采用传统的利用目标函数梯度信息的求解算法。遗传算法具有较强的全局搜索能力、不依赖于目标函数的梯度信息等优点, 适于求解复杂实际问题。为加快收敛速度, 保持种群多样性, 避免早熟收敛, 将“精英与协同思想”引入传统的遗传算法中, 设计改进型非支配排序遗传算法 (NSGA-II)^[15] 求解双目标道路收费模型。在约束处理方面, 采用距离测度加约束惩罚项的适应度函数构造方法^[16]。本研究中距离测度为加入约束违反程度的标准化目标函数, 约束惩罚项为考虑可行解比例的约束惩罚值。在流量均衡分配中考虑私家车和公交车之间的相互影响, 下层模型采用精简对角化算法^[17]。该算法对每次迭代的用户均衡子问题进行“全有全无”分配, 分配结果作为下一个用户均衡子问题的初始解, 从而加快了算法的收敛速度。模型的迭代求解算法如图 1 所示。

具体求解步骤如下。

步骤 1: 初始化参数和种群。定义种群规模 pop 、最大迭代代数 G 、交叉概率 p_c 、变异概率 p_m 。令代数 $N=0$, 初始化产生 2 倍数量的种群, 即产生 $2pop$ 个收费费率向量 e_a^N , 对于向量中的任一元素均有 $0 \leq e_a^N \leq 1$ 。

步骤 2: 将收费费率向量 e_a^N 带入下层模型中, 利用精简对角化算法求得网络达到均衡状态时私家车和常规公交的路段出行量 x_a , $\hat{x}_a$ 及私家车、常规公交、地铁的出行需求 q_{rs} , $\hat{q}_{rs}$, $\bar{q}_{rs}$ 。在精简对角化算法中, 设 n 为迭代次数, 给定路段出行量及出行需求的初始值 $\{x_a^{n-1}, \hat{x}_a^{n-1}, q_{rs}^{n-1}, \hat{q}_{rs}^{n-1}, \bar{q}_{rs}^{n-1}\}$ ($n=1$), 结合路段收费费率 e_a^N , 求得起讫点 $r-s$ 之间 3 种交通方式的最小出行阻抗 $\{c_{rs}^{n-1}, \hat{c}_{rs}^{n-1}, \bar{c}_{rs}^{n-1}\}$ 。进而利用 logit 模型 (式 (9)) 求得 3 种交通方式的出行需求 $\{g_{rs}^{n-1}, \hat{g}_{rs}^{n-1}, \bar{g}_{rs}^{n-1}\}$, 利用“全有全无”分配方法将私家车和常规公交的出行需求分配至最短路径上, 得到路段附加出行量 $\{y_a^{n-1}, \hat{y}_a^{n-1}\}$ 。以 $1/n$ 为迭代步长对路段出行量及出行需求进行更新。按如上步骤

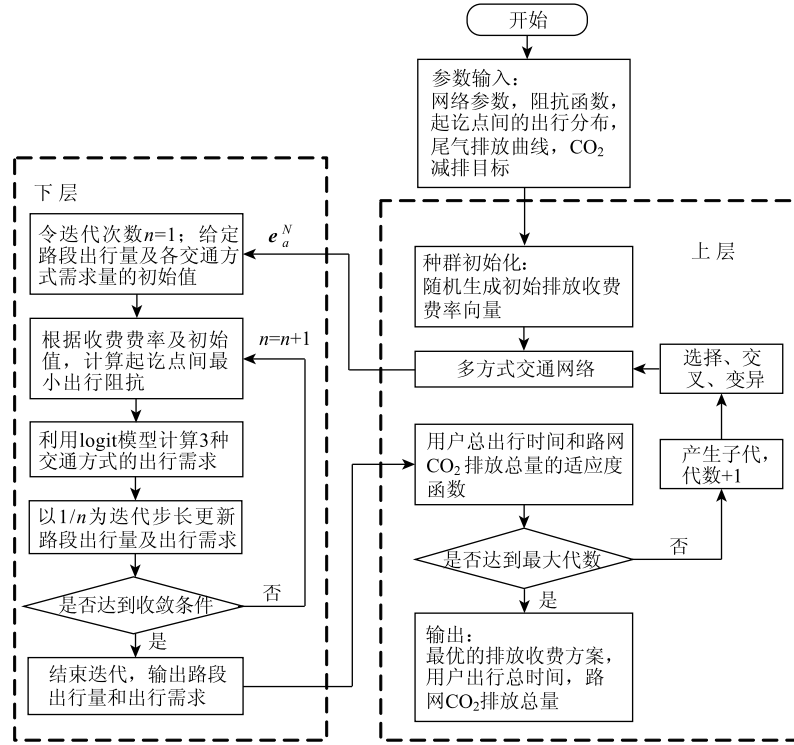


图1 模型的迭代求解算法

Fig. 1 Iterative solution methodology for proposed model

反复迭代直至满足收敛条件, 即2次迭代的路段出行量变化率小于0.001。

步骤3: 计算双目标函数值并进行个体排序。对应于 $2pop$ 个 e_a^N , 将步骤2得到的路段出行量及出行需求代入式(17)的适应度函数 $F_i(i=1, 2)$ 中, 适应度函数包括距离测度 $d_i(\mathbf{x})$ (式(18))和惩罚测度 $p_i(\mathbf{x})$ (式(19)~(21))。由支配关系确定个体非劣级别, 计算相同非劣级别个体动态拥挤距离^[18], 级别靠前且拥挤距离大的个体排序靠前, 即具有较小的排序序号。

$$F_i = d_i(\mathbf{x}) + p_i(\mathbf{x}), \quad (17)$$

$$d_i(\mathbf{x}) = \begin{cases} v(\mathbf{x}), & r_f = 0 \\ \sqrt{\bar{f}_i(\mathbf{x})^2 + v(\mathbf{x})^2}, & \text{其他} \end{cases}, \quad (18)$$

$$p_i(\mathbf{x}) = (1 - r_f)X_i(\mathbf{x}) + r_f Y_i(\mathbf{x}), \quad (19)$$

$$X_i(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & r_f = 0 \\ v(\mathbf{x}), & \text{其他} \end{cases}, \quad (20)$$

$$Y_i(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0, & \mathbf{x} \text{ 为可行解} \\ \bar{f}_i(\mathbf{x}), & \text{其他} \end{cases}, \quad (21)$$

式中, $F_i(i=1, 2)$ 为第 i 个目标的适应度函数; $d_i(\mathbf{x})$ 为第 i 个目标的距离测度; $p_i(\mathbf{x})$ 为第 i 个目标的惩罚测度; $\mathbf{x}$ 为路段出行量及出行需求组成的向

量; $\bar{f}_i(\mathbf{x})$ 为第 i 个标准化后的目标函数; $v(\mathbf{x})$ 为标准化后的约束违反程度, 即对低碳约束条件式(8)的违反程度, 标准化处理过程详见文献[16]; r_f 为可行解比例; $X_i(\mathbf{x})$ 为惩罚测度中的第1惩罚项; $Y_i(\mathbf{x})$ 为惩罚测度中第2惩罚项。

步骤4: 遗传操作产生子代并进行种群更新。引入“精英与协同思想”, 从非劣级别为1的层级中选择相异的2个精英个体, 分别作为子种群A和子种群B的进化核心, 进而进行选择子种群、交叉变异、更新种群等操作。为避免第1层级个体数量增长过快引起早熟现象, 在更新种群时对全部保留非劣级别较优层级个体的方法进行改进, 按式(22)确定层级 j 所需保留的个体数 n_j :

$$n_j = pop \times \frac{1 - r}{1 - r^L} \times r^j, \quad (22)$$

式中, n_j 为层级 j 所需保留的个体数; r 为比例因子, $r \in (0, 1)$, r 值越大, 第1层级选择的个体越多; L 为层级总数。

步骤5: 终止条件判断。若迭代代数达到最大迭代代数 G , 则算法结束, 输出 pop 个最优个体以及子代与其父代的合并种群。否则转至步骤3。

4 算例分析

算例路网包括9个路段、2条公交线路和1条地

铁线路,有1个OD对(1,6),算例网络图如图2所示。路段参数见表1。模型及算法参数取值见表2。考虑交通方式间的相互影响,含有公交线路的路段的私家车和公交车的阻抗函数^[19]见式(23)和式(25),其余路段的私家车阻抗函数采用BPR函数,如式(24)所示。

私家车的路段阻抗函数为:

$$t_a(x_a, \hat{x}_a, e_a) = (1 + e_a)t_a^0 \left[1 + \left(\frac{x_a}{2C_a} \right) \right] \cdot \left[1 + 0.1 \left(\frac{\hat{x}_a}{35\hat{C}_a} \right) \right], \quad a \in \hat{A}, \quad (23)$$

$$t_a(x_a, \hat{x}_a, e_a) = (1 + e_a)t_a^0 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x_a}{2C_a} \right)^4 \right], \quad a \in A - \hat{A}, \quad (24)$$

公交车的路段阻抗函数为:

$$\hat{t}_a(x_a, \hat{x}_a) = \hat{t}_a^0 \left[1 + \left(\frac{\hat{x}_a}{35\hat{C}_a} \right) \right] \cdot \left[1 + 0.1 \left(\frac{x_a}{2C_a} \right) \right], \quad a \in \hat{A}, \quad (25)$$

式中, $t_a(x_a, \hat{x}_a, e_a)$ 和 $\hat{t}_a(x_a, \hat{x}_a)$ 分别为路段 a 上私家车和公交车的路阻函数; t_a^0 和 $\hat{t}_a^0$ 分别为路段 a 上私家车和公交车的自由流行驶时间; C_a 为路段 a 私家车实际通行能力; $\hat{C}_a$ 为路段 a 公交车的实际通行能力。

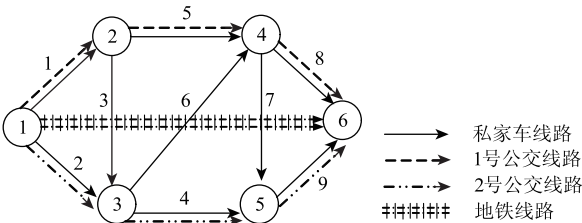


图 2 算例网络图

Fig. 2 Test network

表 1 路段属性
Tab.1 Link properties

参数	路段编号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l_a/km	2	2.25	1.75	2	3	3.5	0.8	4.5	4
t_a^0/min	2	3.5	2	3.5	4.5	3	1.25	6.5	5
$C_a/(\text{veh} \cdot \text{h}^{-1})$	600	600	350	450	500	500	600	600	600
$\hat{C}_a/(\text{veh} \cdot \text{h}^{-1})$	43	53	33	25	23	33	33	43	53
$\hat{t}_a^0/\text{min}$	3.5	4.5	—	5	5	—	—	8	6
$V_a^{\text{co}}/\text{veh}$	600	600	350	450	500	500	500	600	600

表 2 模型及算法参数取值

Tab. 2 Parameter values for model and algorithm

参数	取值	参数	取值	参数	取值	参数	取值
t_d/min	26.8	$\omega_2/(\text{人} \cdot \text{veh}^{-1})$	35	$\alpha/\%$	30	p_c	0.9
$q_{\text{ts}}'/(\text{人} \cdot \text{veh}^{-1})$	4 000	θ	0.5	pop	100	p_m	0.1
$\omega_1/(\text{人} \cdot \text{veh}^{-1})$	2	$\beta_{\text{bus}}^{\text{co}}$	1.26	G	200	r	0.6

采用 NSGA-II 求解双目标道路收费模型,经迭代输出全部可行解,如图 3 所示。位于最前端的 Pareto 前沿即为模型的最优解集,如图 4 所示。

为对比方案指标差异,选取 Pareto 前沿中 3 个典型结果,优化结果 1 和优化结果 3 分别为最左侧解和最右侧解,分别代表出行总时间和 CO₂ 排放量最低的方案。优化结果 2 为折中方案,其 2 项目标值均取得中间水平。将上述 3 个典型结果与初始状态进行对比分析,收费费率和路段(线路)出行量见 3 表,道路收费前后的路网指标对比见表 4。

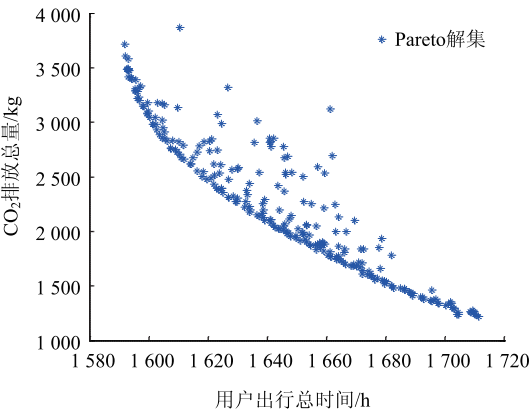


图 3 Pareto 可行解集

Fig. 3 Feasible Pareto solutions

由图 3 和图 4 可知,相比于单目标模型的唯一最优解,双目标道路收费模型求解结果为不损失任一目标的 Pareto 解集。Pareto 前沿验证了路网 CO₂ 排放量(环境指标)和用户出行总时间(效率指

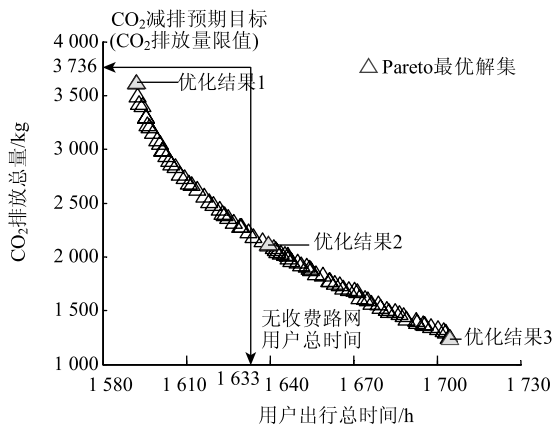


图 4 Pareto 最优解集 (Pareto 前沿)

Fig. 4 Optimal Pareto solutions (Pareto front)

表 3 收费费率 and 路段 (线路) 出行量

Tab. 3 Road pricing rate and link (route) volume

路段/线路	初始状态		优化结果 1		优化结果 2		优化结果 3	
	出行量/ (人·h ⁻¹)	行驶时间/ min	出行量/ (人·h ⁻¹)	收费费率	行驶时间/ min	出行量/ (人·h ⁻¹)	收费费率	行驶时间/ min
1	1 292	4. 29	939	0. 11	3. 71	435	0. 67	2. 85
2	1 045	6. 79	679	0. 4	5. 72	472	0. 47	5. 12
3	794	2. 5	589	0. 81	2. 15	243	0. 38	2
4	520	5. 95	293	0. 62	5. 07	121	0. 68	4. 39
5	497	7. 15	350	0. 66	6. 53	192	0. 49	5. 82
6	1 319	4. 65	975	0. 91	3. 63	594	0. 81	3. 26
7	823	1. 29	708	0	1. 27	438	0. 17	1. 25
8	994	12. 27	617	0. 06	10. 23	348	0. 64	8. 77
9	1 342	10. 98	1 001	0	9. 57	559	0. 68	7. 69
公交线路 1	492	25. 10	600	—	26. 07	684	—	26. 68
公交线路 2	672	25. 10	806	—	26. 07	910	—	26. 68
地铁线路	499	26. 8	976	—	26. 8	1 499	—	26. 8

注: 收费费率 e_a 与路段行驶时间的乘积即为各路段的道路收费值。

表 4 道路收费前后的路网指标对比

Tab. 4 Comparision of network indicators before/after road pricing

路网	初始状态	优化结果 1	优化结果 2	优化结果 3
公共交通出行量/ (人·h ⁻¹)	1 663	2 382	3 093	3 531
变化率/%	—	43. 24	86. 00	112. 33
TST/h	1 633. 47	1 592. 10	1 638. 61	1 704. 36
变化率/%	—	-2. 53	0. 31	4. 34
TSE/kg	5 336. 43	3 605. 35	2 106. 95	1 240. 55
变化率/%	—	-32. 45	-60. 52	-76. 75
平均速度/(km·h ⁻¹)	28. 18	31. 90	35. 62	37. 46
变化率/%	—	13. 20	26. 40	32. 93
车辆行驶总里程/km	12 417. 37	8 788. 86	5 146. 73	2 748. 37
变化率/%	—	-29. 22	-58. 55	-77. 87

注: 1. 平均速度及车辆行驶总里程为地面交通系统指标 (私家车和常规公交组成网络); 2. 公共交通出行量、TST 和 TSE 指标值包括私家车、常规公交和地铁 3 种交通方式。

标) 的负相关关系, 二者不能同时达到最小值, 因此, 为使道路收费措施达到最优管理效果, 需综合考虑并合理兼顾环境指标和效率指标。由于存在 30% 的 CO₂ 减排目标约束, 图 4 中 Pareto 前沿中的所有解的 CO₂ 排放量均小于 3 736 kg 的排放量限值。

由表 3 和表 4 可知, 在未采取收费措施的初始状态下, 路段 1、路段 3、路段 6、路段 9 均呈现拥堵状态 (出行量大于通行能力) 且超过路段 CO 环境容量约束, 用户出行总时间为 1 633. 47 h, CO₂ 排放总量为 5 336. 43 kg。采取道路收费措施后, 优化结果 1~3 促使大量私家车出行者向公共交通转移 (常规公交和地铁), 公共交通出行量至少提升了 43%, 有效地缓解了路段拥堵和CO造成的环境污染,

同时 CO₂ 排放总量下降幅度超过了 32%。较初始状态, 优化结果 1~3 的用户出行总时间呈现先下降后上升的现象。这种现象的原因在于随着道路收费费率的增加, 私家车出行者将向公共交通转移, 初始阶段常规公交和地铁运输能力存在一定富余, 可以及时运送转移客流, 同时由于私家车数量的减少, 路段平均车速得到了较大提高, 使得出行总时间得到一定程度的下降。然而, 随着转移客流的进一步增加, 公共交通能力不足, 将产生较大的出行阻抗, 导致出行总时间的增加。

最后, 为保证不增加初始的用户出行总时间且满足碳减排 30% 的预期目标, 决策者可结合后验决策准则确定道路收费候选方案。算例中, 在不损失初始的用户出行总时间且满足减排约束情况下, 路网 CO₂ 减排比例为 32%~59%, 对应的用户出行总

时间降低比例为 2.53%~0.07%，候选方案共包括 33 个 Pareto 最优解，如图 4。决策者可结合实际情况从标记区域内选择收费方案作为交通需求管控措施。

需要指出的是，针对本算例有限的道路资源环境，欲达到高于 60% 的 CO₂ 预期减排目标且不增加用户出行总时间，需提高公共交通的供给水平，采取公交优先措施，从而减少由私家车转移到公交出行的那部分出行者的时间损失，提高系统的运输效率。

5 结论

为了能够有效控制和降低城市交通碳排放，构建了低碳排放约束下的城市多方式交通网络道路收费模型。针对约束处理方法，采用了距离测度加约束惩罚项的适应度函数，设计了嵌套精简对角化算法的改进型非支配排序遗传算法（NSGA-II），对双目标道路收费模型进行求解，并通过算例分析验证了算法的有效性。算例结果表明，道路收费措施可促使私家车出行者向常规公交和地铁转移，从而降低出行总时间和 CO₂ 排放量。值得注意的是，道路收费措施的优化效果受到公共交通供给水平的影响，在算例的公共交通供给水平下，当碳减排比例超过 60% 时将增加出行总时间。因此，欲进一步降低出行总时间和 CO₂ 排放量，需提高公共交通的供给水平。最后，通过 NSGA-II 可计算双目标道路收费模型的最优 Pareto 前沿，从而有效权衡效率指标（用户出行总时间）和环境指标（CO₂ 排放总量），辅助决策者制订合理的道路收费方案，并为优化城市交通出行结构和分析道路收费措施实施效果等提供依据。随着电子收费技术的发展，道路收费方法与电子收费技术的相互衔接尚需进一步研究。在私家车、常规公交和地铁组成的多方式交通网络的基础上，未来可进一步考虑加入自行车和新能源车辆等其他交通方式。

参考文献：

References:

- [1] 王元庆, 李若彤. 城市群交通碳达峰与碳中和研究综述与展望 [J]. 交通运输研究, 2021, 7 (5): 2-9.
WANG Yuan-qing, LI Ruo-tong. Review and Prospects of Carbon Dioxide Emissions Peak and Carbon Neutrality in Urban Agglomeration Traffic [J]. Transport Research, 2021, 7 (5): 2-9.
- [2] CAVALLARO F, GIARETTA F, NOCERA S. The Potential of Road Pricing Schemes to Reduce Carbon Emissions [J]. Transport Policy, 2017, 67: 85-92.

- [3] NAGURNEY A. Alternative Pollution Permit Systems for Transportation Networks Based on Origin/Destination Pairs and Paths [J]. Transportation Research Part D: Transportation and Environment, 2000, 5 (1): 37-58.
- [4] YIN Y F, LAWPHONGPANICH S. Internalizing Emission Externality on the Road Networks [J]. Transportation Research Part D: Transportation and Environment, 2006, 11 (4): 292-301.
- [5] LI Z C, LAM W H K, WONG S C, et al. Environmentally Sustainable Toll Design for Congested Road Networks with Uncertain Demand [J]. International Journal of Sustainable Transportation, 2012, 6 (3): 127-155.
- [6] YANG Y N, YIN Y F, LU H P. Designing Emission Charging Schemes for Transportation Conformity [J]. Journal of Advanced Transportation, 2014, 48 (7): 766-781.
- [7] SHARMA S, MISHRA S. A Study on Effect on GHG Emissions by Addition of Transit Mode in Existing Road Network and Optimal Emission Pricing Models for Reducing Carbon Footprints [C] // 92th Transportation Research Board Annual Meeting. Washington, D. C.: TRB, 2013.
- [8] 徐薇, 范名才, 徐红利. 多模式交通网络下考虑尾气排放的道路收费研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36 (9): 2345-2354.
XU Wei, FAN Ming-cai, XU Hong-li. Road Pricing for a Multi-modal Transportation Network with Emission Considerations [J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2016, 36 (9): 2345-2354.
- [9] 王培迪. 交通系统碳排放收费研究 [J]. 综合运输, 2020, 42 (9): 31-36, 78.
WANG Pei-di. Carbon Emission Charging of Transportation System Based on Bottleneck Model [J]. China Transportation Review, 2020, 42 (9): 31-36, 78.
- [10] ZHONG S P, JIANG Y, NIELSEN O A. Lexicographic Multi-objective Road Pricing Optimization Considering Land Use and Transportation Effects [J]. European Journal of Operational Research, 2021 (3): 1-29.
- [11] 郝艳召, 王宏图, 宋国华, 等. 中观机动车尾气模型在中国的适用性 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2016, 36 (1): 112-119.
HAO Yan-zhao, WANG Hong-tu, SONG Guo-hua, et al. Suitability of Meso-level Vehicle Emission Model in China [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2016, 36 (1): 112-119.
- [12] 管菊香. 基于生态交通的城市交通方式结构优化研究

- [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- GUAN Ju-xiang. Urban Traffic Mode Structure Optimization Based on Eco-transport [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [13] 王振报, 曲璠. 关于路段环境交通容量的探讨 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2005, 3 (1): 111-115.
- WANG Zhen-bao, QU Fan. Discussion of the Environment Traffic Capacity of Highway Section [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2005, 3 (1): 111-115.
- [14] 胡郁葱, 宫曼琳, 谢映辰, 等. 网络预约出租汽车营运模式的四方博弈模型 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (2): 130-136.
- HU Yu-cong, GONG Man-lin, XIE Yi-chen, et al. A Four-side Game Model for Operational Mode of Online Car-hailing System [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (2): 130-136.
- [15] DEB K, GOEL T. Controlled Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithms for Better Convergence [C] // Proceedings of First International Conference on Evolutionary Multi-criterion Optimization. Berlin: Springer, 2001: 67-81.
- [16] WOLDESENBET Y G, YEN G, TESSEMA B G. Constraint Handling in Multiobjective Evolutionary Optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13 (3): 514-524.
- [17] KIM B J, KIM W. An Equilibrium Network Design Model with a Social Cost Function for Multimodal Networks [J]. Annual on Regional Science, 2006, 40 (3): 473-491.
- [18] LUO B, ZHENG J H, XIE J L, et al. Dynamic Crowding Distance: A New Diversity Maintenance Strategy for MOEAs [C] // 2008 Fourth International Conference on Natural Computation. Jinan: IEEE, 2008.
- [19] 黄柯. 考虑环境污染控制的交通网络的优化模型与算法 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- HUANG Ke. Optimization Model and Algorithm of Urban Traffic Network Considering Environmental Pollution Control [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
-
- (上接第 111 页)
- [12] YUAN Z Q, XIA D D, LIN X B, et al. Influence Mechanism of a Bridge Wind Barrier on the Stability of a Van-body Truck under Crosswind [J]. Atmosphere, 2022, 13 (2): 360. <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/2/360>.
- [13] LIN X B, LIN B, XIA D D, et al. Effects of Wind Barriers on Wind Fields and Vehicle Stability on Bridges [J]. Atmosphere, 2022, 13 (2): 318. <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/2/318/htm>.
- [14] LIU J, GU Z Q, HUANG T M, et al. Coupled Analysis of the Unsteady Aerodynamics and Multi-body Dynamics of a Small Car Overtaking a Coach [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233 (14): 3684-3699.
- [15] 黄泰明, 谷正气, 万忠民, 等. 基于动态双向耦合的高速汽车侧风稳定性控制研究 [J]. 北京理工大学学报, 2018, 38 (9): 927-933.
- HUANG Tai-ming, GU Zheng-qi, WAN Zhong-min, et al. Control of High-speed Vehicle Crosswind Stability Based on the Dynamic Two-way Coupled Method [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38 (9): 927-933.
- [16] GUILMINEAU E, DENG G B, LEROYER A, et al. Assessment of Hybrid RANS-LES Formulations for Flow Simulation around the Ahmed Body [J]. Computers & Fluids, 2018, 176: 302-319.
- [17] 马芳武, 余烁, 吴量, 等. 基于时间系数的单点预瞄驾驶员模型分析 [J]. 汽车工程, 2019, 41 (3): 340-345.
- MA Fang-wu, SHE Shuo, WU Liang, et al. The Analysis of Single-point Preview Driver Model Based on Time Coefficient [J]. Automotive Engineering, 2019, 41 (3): 340-345.
- [18] 管欣, 陈永尚, 贾鑫, 等. 预瞄跟随驾驶员模型校正环节参数求解方法 [J]. 汽车工程, 2016, 38 (8): 941-946, 1000.
- GUAN Xin, CHEN Yong-shang, JIA Xin, et al. The Determination Method of Parameters in Correction Link of Preview-follower Driver Model [J]. Automotive Engineering, 2016, 38 (8): 941-946, 1000.