

基于双层规划模型的单向交通组织优化设计

郭丹丹^{1*}, 朱美宣^{2#}

¹上海虹桥国际机场有限责任公司交通管理部, 上海

²上海市浦东新区建设(集团)有限公司第七项管部, 上海

收稿日期: 2024年12月26日; 录用日期: 2025年1月18日; 发布日期: 2025年1月28日

摘要

一种基于双层规划模型的单向交通组织优化方法, 旨在通过最小化车辆绕行系数来提高交通效率。上层模型以车辆绕行系数和交通效率为优化目标, 并引入主干道和微循环支路的饱和度约束。下层模型基于随机用户平衡配流模型(SUE), 通过计算路径阻抗, 模拟驾驶员在路网中的行为分配过程。为了求解该双层模型, 采用遗传算法加Frank-Wolfe算法进行交通流分配。仿真结果表明, 本文提出的模型能够有效优化单向交通方案, 显著降低绕行系数, 分流交通流量, 提升交通效率, 并为城市交通管理提供新的理论支持。

关键词

绕行系数, 交通效率, 双层模型, 单向交通

Optimization Design of Unidirectional Traffic Organization Based on Two-Layer Programming Model

Dandan Guo^{1*}, Meixuan Zhu^{2#}

¹Traffic Management Department of Shanghai Hongqiao International Airport Co., Ltd., Shanghai

²Seventh Management Department of Shanghai Pudong New Area Construction (Group) Co., Ltd., Shanghai

Received: Dec. 26th, 2024; accepted: Jan. 18th, 2025; published: Jan. 28th, 2025

Abstract

This paper presents an optimization method for unidirectional traffic organization based on a bi-

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 郭丹丹, 朱美宣. 基于双层规划模型的单向交通组织优化设计[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 1168-1176.

DOI: 10.12677/mos.2025.141106

level programming model, aiming to improve traffic efficiency by minimizing the vehicle detour coefficient and maximizing the number of parking spaces. The upper-level model takes the vehicle detour coefficient and traffic efficiency as optimization objectives, and introduces constraints on the saturation of main roads and microcirculation branch roads. The lower-level model, based on the Stochastic User Equilibrium (SUE) model, simulates the behavior allocation process of drivers in the road network by calculating path impedance. To solve this bi-level model, a genetic algorithm combined with the Frank-Wolfe algorithm is used for traffic flow allocation. Simulation results show that the model proposed in this paper can effectively optimize unidirectional traffic schemes, significantly reduce the detour coefficient, divert traffic flow, enhance traffic efficiency, and provide new theoretical support for urban traffic management.

Keywords

Detour Coefficient, Traffic Efficiency, Two-Layer Model, One-Way Traffic

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

对于内部路网密度较高, 交通环境复杂且道路较为狭窄的道路, 现有的双向两车道在一定程度上满足了出行需求, 但由于对向车辆之间的冲突、路内停车不规范等问题, 交通效率大幅下降。针对这些问题, 实行单向交通组织可以有效规避上述现象。中国单行道的组织形式多种多样[1][2]。实行单向交通可以减少交叉路口的冲突点, 便于信号灯的协调与绿波带的实现, 在调节交通通畅、提升道路利用效率方面具有显著的效果[3]。现代社会中, 优化决策已成为研究热点[4][5]。在复杂的管理系统中, 通常存在上下级决策者的分层管理结构[6]。其中双层规划模型是一种具有递阶结构的双层决策系统的优化模型[7]。该模型下层各子系统在上层决策者给出决策变量后, 再将下层决策优化结果, 将最佳决策反馈给上层决策者, 上层决策者再在下层最优基础上, 求得整体最优解[8]-[10]。

交通网络设计可以视为两个相互关联的过程: 一方面, 交通管理者根据目标进行科学的网络规划[11]; 另一方面, 出行者会依据交通网络的变化调整自己的出行路径, 选择最小化出行费用的路线[12]。交通管理者无法直接控制出行者的行为, 而出行者的路径选择又影响着管理者的决策[13][14]。通过双层规划模型, 在上层约束条件基础上, 通过综合考虑下层出行者的路径选择行为, 从而得到最为合理的路网优化方案[15]。

住宅区内的交通组织具有独特的复杂性, 交通流量在上下班高峰期集中爆发, 导致主干道与支路双向拥堵现象尤为突出[16]。通过对拥堵路段附近实施单向交通组织, 可以有效分流干路上的交通压力, 同时优化支路通行能力[17]。此外, 合理的单向交通组织还可以为路内停车提供更多弹性空间, 从而进一步提升交通运行效率[18]-[20]。即本文以单向交通组织为研究对象, 构建了一个双层规划模型。该模型考虑了交通流的均衡分配和路径优化问题, 同时满足停车泊位数最大化要求。

2. 双层规划模型

单向交通组织优化双层规划模型如下:

城市道路网络: $N = (V, A \cup P)$;

N ——路网;

V ——节点集合;

P ——单向交通组织的微循环支线道路集合。

路段 $a=(v_r, v_s)$ 为节点 v_r 到 v_s , 长度为 l_a , $a \in (A \cup P)$; 交通需求为 $Q_{rs} (n \times n)$, 其中 Q_{rs} 表示节点 r 到节点 s 的交通需求; 记 x_a 为路段 a 的车流量, $a \in (A \cup P)$; 记 C_a 为路段 a 的通行能力, $a \in (A \cup P)$ 对微循环道路的通行能力具体表达式为:

$$C_a = \begin{cases} 0, & a \in P \text{ 对向方向单行} \\ C_a, & a \in P \text{ 当前方向单行} \end{cases} \quad (1)$$

2.1. 优化目标

(1) 车辆绕行系数最小

实施单向交通组织方案以后, 司机必然会改变原有的出行路径, 如果新的出行路径使司机行驶距离增加, 不但会使交通拥堵更加严重, 还会令司机更难以接受新的出行路径。所以有必要将车辆绕行系数放在模型中。为使得路网交通总体改善, 采取所有出行司机的总行驶距离比值法计算车辆绕行系数, 用 K_D 表示:

$$K_D = \frac{D'}{D} = \frac{\sum_{a \in (A \cup P)} x_a \times l_a}{\sum_{a \in (A \cup P)} x'_a \times l_a} \quad (2)$$

其中, D' ——采用单向交通后的总出行距离;

D ——采用单向交通前的总出行距离;

x_a ——采用单向交通后的路段 a 的车流量;

x'_a ——采用单向交通前的路段 a 的车流量;

l_a ——路段 a 的长度。

(2) 交通效率最高

交通效率最高指所有车辆通过路网的时间最少。

$$\min \sum_{a \in P} x_a \times t_a \quad (3)$$

式中, t_a 为车辆通过路段 a 的时间。

2.2. 约束条件

(1) 主干道饱和度约束

实施微循环交通组织的首要目的是提高主干道交通运行效率, 降低车辆延误时间, 缓解交通堵塞等情况。因此必须使主干道饱和度维持在饱和度容许最大值以下, 达到单向交通微循环的理想效果, 公式为:

$$S_a = \frac{x_a}{C_a} \leq \overline{S}_a, a \in A \quad (4)$$

其中, \overline{S}_a ——主干道饱和度理想值上限。

(2) 微循环支路饱和度约束

为保证微循环支路网交通运行通畅, 支路饱和度也需要维持在饱和度容许最大值以下, 公式为:

$$S_a = \frac{x_a}{C_a} \leq \overline{S}_a, a \in P \quad (5)$$

根据城市道路服务水平划分表, 要求服务水平 V/C 不大于 0.9 (国内部分教授认为 $V/C \leq 0.75$ 较好), 本文折中选取 0.85 为饱和度理想值上限, 故 $\bar{S}_a = 0.85$ 。

3. 双层规划算法

上层规划遗传算法求解流程图如下图 1 所示:

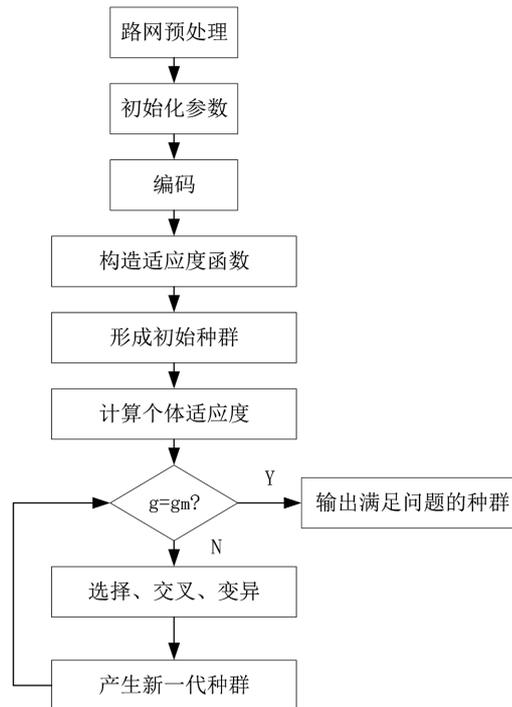


Figure 1. Flowchart of genetic algorithm solution
图 1. 遗传算法求解流程图

程序设计:

步骤 1: 道路网络数字化。

步骤 2: 编码。采用二进制编码。

步骤 3: 构造适应度函数。取 $F(x) = Z_{\max} - Z(x)$, 其中 $F(x)$ 为适应度函数, Z_{\max} 为目标函数理论最大值, $Z(x)$ 为目标函数。

步骤 4: 初始化。种群规模 $m = 50$, 交叉概率 $p_c = 0.7$, 变异概率 $p_m = 0.1$, 终止进化代数 $g_{\max} = 40$ 。

步骤 5: 随机生成初始种群。种群规模为 50, 个体长度为 30。

步骤 6: 进入进化迭代循环。

步骤 7: 定义转换规则。将现有种群编码转换为高级模型的决策变量, 并结合这些变量, 依据预先设定的各级道路和交叉口参数, 依次为道路设计速度矩阵 V 、道路容量矩阵 C_{\max} 和交叉口容量矩阵 $C_{\max S}$ 分配值。

步骤 8: 设置 OD 交通量矩阵。

步骤 9: 确定初始阻抗值, 创建初始的行程时间成本矩阵。

步骤 10: 全面搜索路径, 使用路径查找函数来探索所有 OD(起点-终点)对之间的路径。

步骤 11: 实施交通分配, 运用弗兰克-怀特方法进行交通分配, 得到交通分配矩阵 N 、阻抗矩阵 t 和

交通分配的精确度 e 。

步骤 12: 评估适应度, 利用适应度计算函数来确定种群中每个个体的适应度。

步骤 13: 通过最佳值选择函数, 识别出种群中适应度最高的个体及其对应的值。

步骤 14: 应用遗传算法操作, 通过选择函数进行配对; 通过交叉函数执行杂交; 通过变异函数执行变异。

步骤 15: 循环终止判断。

下层规划拟采用 Frank-Wolfe 算法, 以下为 Frank-Wolfe 求解步骤如图 2 所示:

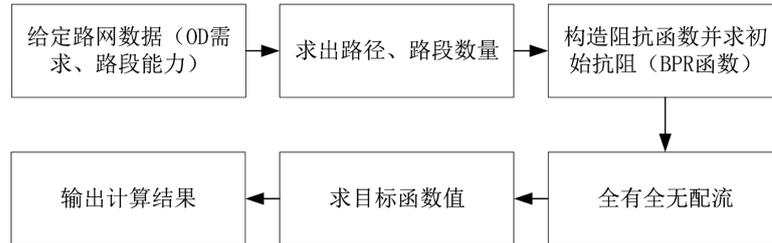


Figure 2. Flowchart of Frank-Wolfe
图 2. Frank-Wolfe 求解步骤

4. 数值仿真

本节将基于前文提出的双层优化模型, 结合遗传算法(Genetic Algorithm, GA)与 Frank-Wolfe 算法进行数值仿真, 旨在通过优化单向交通组织方案以最小化车辆绕行系数和提高交通效率。具体仿真参数、约束条件及仿真结果如下所述。路网节点数量为 5, 路段数量为 8, OD 需求矩阵为 4 对 OD (起终点对) 需求:

$$OD = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 100 \\ 5 & 1 & 80 \\ 2 & 4 & 60 \\ 4 & 2 & 50 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, 每行表示一个 OD 对, 分别为起点、终点和交通需求量。

每条路段的长度 l_a (单位: 公里)为:

$$links = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 2 & 3 & 4 \\ 3 & 4 & 6 \\ 4 & 5 & 5 \\ 5 & 1 & 7 \\ 2 & 4 & 8 \\ 4 & 2 & 8 \\ 1 & 3 & 9 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, 每行分别表示起点、终点及对应路段长度。

种群规模 $m = 50$; 进化代数 $g_{max} = 10$; 交叉概率 $p_c = 0.8$; 变异概率 $p_m = 0.1$; 最大进化代数 $g_{max} = 100$ 。

Frank-Wolfe 算法参数为最大迭代次数: 100; 路阻函数 BPR 函数, 参数取 $\alpha = 0.15$, $\beta = 4$; 收敛精

度设置为 1×10^{-6} 。

仿真过程中, 首先通过遗传算法优化上层模型, 继而在下层模型中使用 Frank-Wolfe 算法进行交通流量分配。以下为具体步骤:

1. 遗传算法初始化: 根据车辆绕行系数和交通效率目标进行适应度评估。
2. 交通分配: 将每一代种群代入下层模型, 通过 Frank-Wolfe 算法进行交通流量分配, 计算每条路段的交通流量和行驶时间。
3. 适应度计算: 根据上层模型目标函数, 计算个体的适应度, 并进行选择、交叉和变异操作, 生成新种群。
4. 终止判断: 当系统达到最大代数时, 为最优解。

通过上述仿真过程, 得到最优的单向交通组织方案, 在重新算出各路段的交通流量、行驶时间及相关性能指标。具体结果如下:

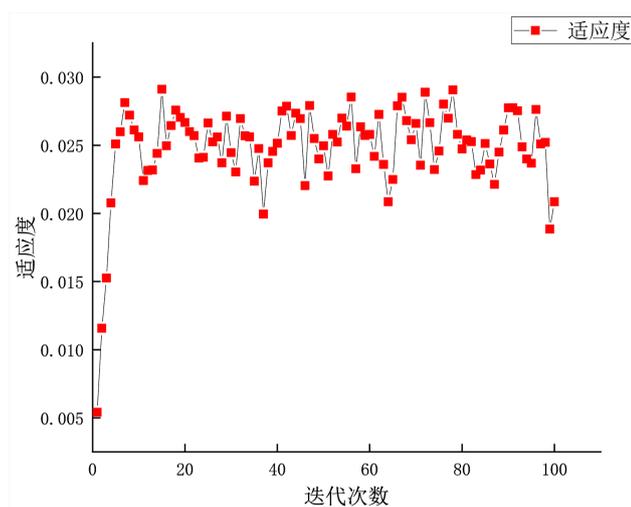


Figure 3. Adaptive evolution

图 3. 适应度进化

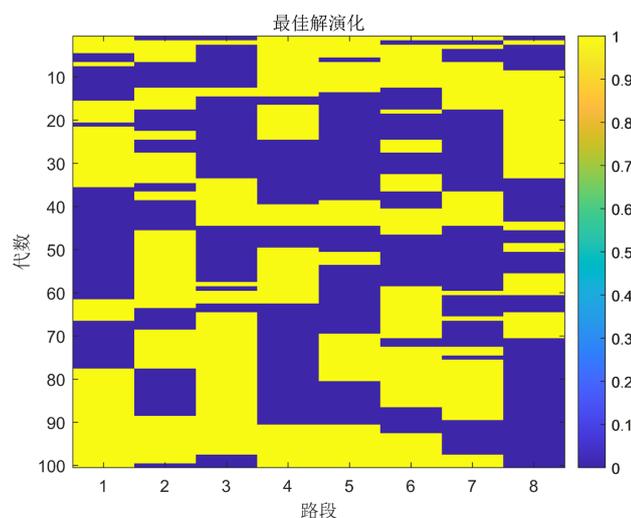


Figure 4. The optimal solution evolution process

图 4. 最佳解演化过程

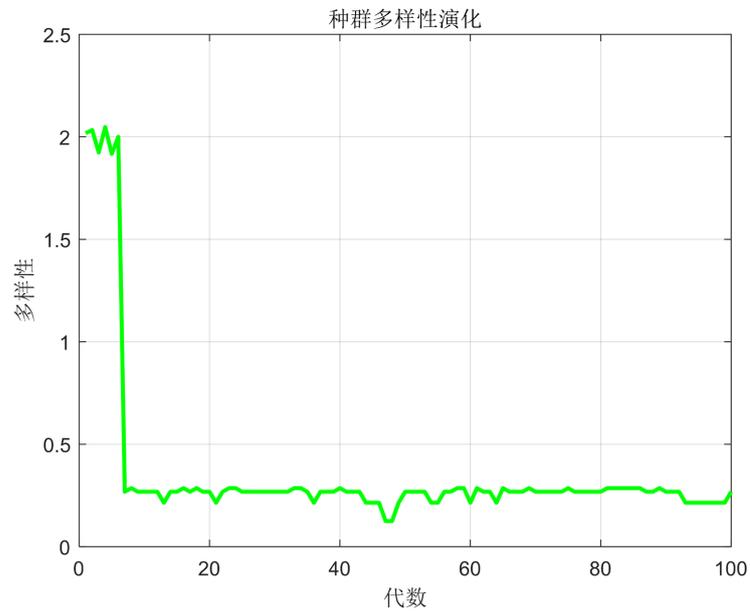


Figure 5. Evolution process of population diversity
图5. 种群多样性演化结果

从图3、图4、图5可知，遗传算法表现出良好的收敛性，最终的适应度值较高，表明找到了合理的优化方案。

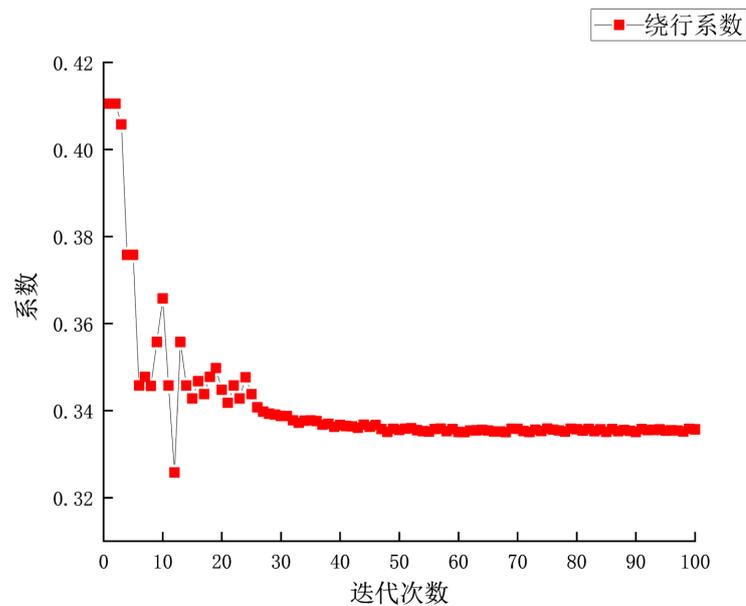


Figure 6. Evolution process of detour coefficient
图6. 绕行系数演化过程

从图6可知，在单向交通组织设计中，随着迭代次数增加，车辆的绕行系数在优化过程中逐渐减小，表明驾驶员能够以更短的距离到达目的地，减少了无效出行路径。

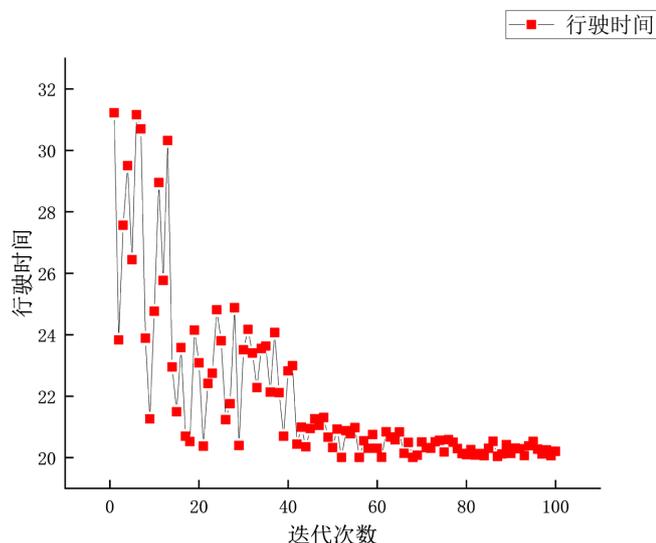


Figure 7. Evolution process of travel time
图 7. 行使时间演化过程

在上述绕行系数的前提下, 得到该单向交通组织的总行驶时间如图 7 所示, 行驶时间从开始的 31 min 降为 20 min 左右, 最终行程时间比原始出行时间减少了 35.48%, 降低了出行时间成本, 提高了交通效率。

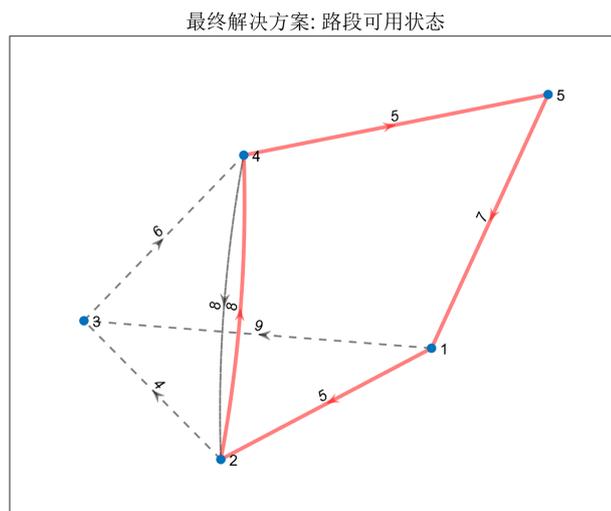


Figure 8. Optimization results of driving path
图 8. 行驶路径优化结果

在单向交通组织中, 通过双层规划模型, 使得交通流量更加均衡地分布在网络中, 减轻了主干道的压力, 充分利用了微循环支路的通行能力。最终行驶路径如图 8 所示。

5. 结语

基于双层优化模型, 提出了一种针对城市道路单向交通组织的优化方法。上层模型以最小化车辆绕行系数和最大化交通效率为优化目标, 同时引入主干道和微循环支路的饱和度约束, 保证主干道的高效运行和支路的合理利用。通过遗传算法对上层模型进行求解, 下层模型采用随机用户平衡配流模型(SUE),

通过路径阻抗模拟驾驶员的出行选择行为, 并利用 Frank-Wolfe 算法进行交通流分配。结果表明:

- (1) 优化后的交通组织方案能够显著降低绕行系数, 提升整体交通流的分配效率。
- (2) 该模型在满足最小绕行系数的同时, 缩短了车辆在路网中的行驶时间。最终行程时间减少了 35.48%, 提高了交通效率。
- (3) 该双层规划模型, 改善了交通效率, 有效缓解了主干道的交通运行压力, 提高了微循环支路利用率, 实现交通流的均衡分配。对于城市较为封闭的单向交通组织设计较为合理。

参考文献

- [1] 刘志明. 交通管理与规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [2] Smith, J. and Johnson, M. (2016) Urban Traffic Control Systems. *Journal of Transport Studies*, **18**, 123-136.
- [3] 王强, 赵明辉. 单向交通组织的优化设计与实施[J]. 交通科技, 2017, 23(1): 45-52.
- [4] 高亮, 刘峰. 城市交通决策中的双层规划模型及其应用[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 42(8): 118-125.
- [5] Thompson, R. and Watkins, P. (2018) Bi-Level Programming in Network Design Problems. *Journal of Advanced Transport Systems*, **34**, 201-216.
- [6] 张伟, 李刚. 双层决策模型的理论研究与应用[J]. 运筹与管理, 2015, 34(3): 132-142.
- [7] Bothe, D. and Granville, P. (2017) Hierarchical Decision-Making in Traffic Systems. *International Journal of Transport*, **28**, 101-109.
- [8] 赵敏, 林涛. 基于双层规划的交通流模型优化研究[J]. 交通与信息科学, 2018, 38(4): 59-67.
- [9] Leader, L. and Follower, F. (2020) Traffic Optimization through Bi-Level Modelling. *Journal of Network Optimization*, **22**, 203-217.
- [10] 高鹏. 双层规划模型在交通管理中的应用探讨[J]. 城市交通, 2018, 30(2): 54-61.
- [11] Xu, X. and Lee, S. (2019) Traffic Flow Optimization Using Hierarchical Models. *Journal of Urban Planning*, **45**, 78-89.
- [12] 李国强. 交通网络设计中的用户平衡与系统优化[J]. 交通研究, 2017, 27(6): 98-107.
- [13] Zhang, Z. and Liu, H. (2020) Bi-Level Programming and Its Applications in Transport Management. *Journal of Operations Research*, **31**, 411-423.
- [14] Brown, R. and Green, K. (2017) Managing Traffic with Bi-Level Optimization Techniques. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, **19**, 154-168.
- [15] 王波, 刘静. 基于双层规划的城市道路优化研究[J]. 道路工程技术, 2019, 29(3): 27-35.
- [16] 李华. 住宅区交通组织研究及优化分析[J]. 城市交通规划, 2016, 35(2): 120-126.
- [17] 王志刚. 住宅区内部交通流量分析与优化研究[J]. 城市建设理论研究, 2018, 19(8): 83-90.
- [18] Zhao, Y. and Wang, L. (2020) Parking Space Management in Residential Areas through Traffic Optimization. *Journal of Urban Management*, **24**, 98-106.
- [19] Xu, L. and Tang, H. (2017) Network Flow Optimization in Residential Communities. *International Journal of Traffic Systems*, **16**, 88-99.
- [20] 李明. 基于交通流优化的住宅区交通组织研究[J]. 现代交通, 2021, 36(1): 45-52.