

高速公路绿色通行优先的交通量分配模型及算法

杨昱泽¹, 谭振东², 张忠义³, 卢妍晖⁴, 杭虹利⁵, 张小宁⁶

¹桂林电子科技大学建筑与交通工程学院, 广西 桂林

²河北石太高速公路开发有限公司, 河北 石家庄

³河北交投衡德高速建设发展有限公司, 河北 衡水

⁴河北省高速公路数字化技术与装备重点实验室, 河北 石家庄

⁵上海外国语大学国际工商管理学院, 上海

⁶同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2025年7月24日; 录用日期: 2025年9月10日; 发布日期: 2025年10月21日

摘要

交通是重要的碳排放源, 优先发展低碳或零碳的绿色交通, 是城市和国家实现碳达峰、碳中和目标的关键策略, 对减缓全球气候变化至关重要。高速公路绿色交通优先通行的管理和模型研究非常重要。本文提出了一种绿色交通优先通行的交通量分配模型, 并给出对应的求解方法。在高速公路上, 绿色交通的择路行为服从古诺特集团法则, 与其他交通相比可以优先通行, 联合体的共同目标是绿色交通运输总时间和碳排放加权总量最小; 非绿色车辆在选择路径时须给绿色车辆让行。文章最后通过一个算例证明了开发模型的有效性。

关键词

高速公路, 绿色通行, 交通分配, UE-CN混合均衡

Traffic Assignment Model and Algorithm Based on Priority of Green Traffic on Freeways

Yuze Yang¹, Zhendong Tan², Zhongyi Zhang³, Yanhui Lu⁴, Hongli Hang⁵, Xiaoning Zhang⁶

¹School of Architecture and Transportation Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi

²Hebei Shitai Expressway Development Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei

³Hebei Transportation Investment Cooperation Hengde Expressway Construction and Development Co., Ltd., Hengshui Hebei

⁴Key Laboratory of Highway Digital Technology and Equipment of Hebei, Shijiazhuang Hebei

文章引用: 杨昱泽, 谭振东, 张忠义, 卢妍晖, 杭虹利, 张小宁. 高速公路绿色通行优先的交通量分配模型及算法[J]. 可持续发展, 2025, 15(10): 66-72. DOI: 10.12677/sd.2025.1510286

⁵School of Business and Management, Shanghai International Studies University, Shanghai

⁶School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: July 24, 2025; accepted: September 10, 2025; published: October 21, 2025

Abstract

Transportation is a significant source of carbon emissions. Prioritizing the development of low-carbon or zero-carbon green transportation is a critical strategy for cities and nations to achieve carbon peak and carbon neutrality goals, playing a vital role in mitigating global climate change. Research on the management and modeling of green transportation priority on highways is therefore highly important. This paper proposes a traffic assignment model for green transportation priority and presents a corresponding solution method. On the transportation network, the route choices of green vehicles follow the Cournot-Nash (CN) principle and enjoy priority passage rights, while collectively forming a community aimed at minimizing the total travel time and weighted total carbon emissions. Other social vehicles fully cooperate with the priority of green transportation. Finally, a simple case study verifies the effectiveness of the model and algorithm.

Keywords

Freeway, Green Priority Passage, Traffic Assignment, Hybrid UE-CN Equilibrium

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

交通系统是一个涉及多方利益的复杂巨系统，其内在目标具有多样性和冲突性，无法用单一指标衡量，所以交通网络流量优化常采用多目标优化。若仅追求单一目标(如最短总行程时间)，其解决方案往往在其他维度上表现较差，甚至引发严重后果(如为提速导致某些区域无法出行，或因畅通行驶但车速过高反而增加污染)，因而缺乏现实可行性。多目标优化通过同时权衡多个竞争性目标(如效率上的总行程时间、环保上的尾气排放、公平性的服务均衡、经济性的建设运营成本)，能够提供一系列“帕累托最优”解集。这些解集揭示了目标间的内在权衡关系(例如，想减少多少排放，就需要牺牲多少通行效率)，而非给出一个绝对最优解。这为决策者提供了一个清晰的“方案菜单”，使其能根据具体政策偏好和现实约束(如优先治堵或优先减排)做出科学、灵活且更具可接受度的决策，从而真正实现交通系统整体效益的提升，而非局部指标的优化。因此，多目标优化是应对交通系统固有复杂性、使优化结果从理论走向实用的必然选择。

在高速公路上优先通行零排放车辆(如新能源车、低排放车辆)具有重要的环保意义，能够有效减少交通领域的碳排放和空气污染。这类车辆通常采用电力或清洁能源驱动，优先通行可鼓励更多人选择绿色出行方式，从而推动交通行业的低碳转型，助力国家实现“双碳”目标。此外，优先政策还能提升零排放车辆的使用体验，增强公众对绿色技术的认可度。

从交通管理角度看，零排放车辆优先通行有助于优化道路资源分配，改善道路周边环境。例如，在拥堵时段或特定路段给予新能源车优先权，可减少高污染车辆的密集通行，改善空气质量。当然，此类

政策需结合智能交通系统,确保公平性和可操作性,避免影响整体交通秩序。长远来看,这一措施能促进绿色交通发展,形成更可持续的出行模式。

交通部发布了《绿色交通“十四五”发展规划》,系统阐述了绿色交通优先通行的重要性[1]。Yang & Wang (2022) [2]开发了公路上电动车车道分配通行的动态优化模型。Ghosh 和 Pal (2023) [3]开发了基于物联网的货运绿色交通走廊管理。李等(2023) [4]基于车联网技术,提出零排放车辆动态优先车道的优化算法。张和刘(2022) [5]通过人工智能实现公交信号优先,减少电动公交延误。

本文提出了一种绿色交通优先通行的交通量分配模型,并给出对应的求解方法。在高速公路上,绿色交通的择路行为服从古诺特集团法则,与其他交通相比可以优先通行,联合体的共同目标是绿色交通运输总时间和碳排放加权总量最小;非绿色车辆在选择路径时须给绿色车辆让行。文章最后通过一个算例证明了开发模型的有效性。

2. 绿色通行优先的交通量分配模型

推动绿色出行、降低交通排放的极端重要性,源于其对人类生存与发展面临的三大核心挑战——气候变化、公共卫生和可持续性——所起到的决定性作用。交通运输部门是全球温室气体排放的主要来源之一(约占全球能源相关碳排放的四分之一),同时也是城市空气污染和噪音污染的首要贡献者。因此,交通领域的绿色转型并非仅仅是一种可供选择的环保策略,而是一项关乎地球生态安全、公众健康福祉和经济长远发展的紧迫性战略任务。

从全球尺度看,降低交通排放是应对气候危机的关键环节。燃烧化石燃料产生的二氧化碳等温室气体是全球变暖的主因。极端天气事件的频发、海平面的上升以及生态系统的紊乱,无不与之密切相关。国际社会在《巴黎协定》框架下确立了将全球温升控制在 1.5°C 以内的宏伟目标,这意味着全球经济必须在世纪中叶前后实现“碳中和”。作为排放大户,交通系统能否成功脱碳,直接决定了这一目标的成败。

从城市与国民健康视角看,绿色出行是保障公众生命质量的生死攸关之举。传统燃油车尾气排放的氮氧化物(NOx)、颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)等污染物是雾霾的主要成因,长期暴露于其中会显著加剧呼吸道疾病(如哮喘、肺癌)、心血管疾病和中风的风险,导致巨大的公共卫生负担和过早死亡。推广绿色出行,不仅能直接从源头减少有害污染物排放,净化城市空气,还能创造出一个更健康、更宜居的城市环境,降低全社会的医疗成本。

从经济与能源安全维度看,绿色出行代表着更高效、更具韧性的发展路径。当前交通系统严重依赖进口石油,这使得国民经济极易受到国际油价波动和地缘政治冲突的冲击。发展以电力为驱动的绿色交通(如电动汽车、轨道交通),其能源可以来源于本土化的可再生能源(如 solar、风能),能极大增强国家的能源自主性和安全性。同时,绿色出行能够有效降低拥堵损失,提升整体交通系统的运行效率,节省巨大的时间成本和物流成本。此外,绿色交通产业本身(如新能源汽车、智能交通系统)也是全球新一轮科技与产业革命的核心竞争领域,率先转型将为国家带来巨大的经济增长新动能和就业机会。

绿色出行与降低交通排放的重要性是全方位、多层次的。它远不止于一个环保口号,而是一场深刻的系统性变革,是应对气候变化、保护公众健康、保障能源安全、激发经济活力以及构建更加公平、宜居和可持续城市的必然选择和核心支柱。其紧迫性和必要性要求政府、企业和公民社会形成合力,通过政策引导、技术创新和公众参与,共同推动这场至关重要的交通革命。

本文考虑在高速公路交通网络上,一部分车辆兼顾行程时间和行驶中碳排放两个目标的最小化,我们称这些车辆为绿色通行车辆,他们的路径选择服从古诺特原则。另外,高速上还有一些普通车辆,用符号 U 表示,它们在满足绿色车辆优先的前提下遵守用户最优(UE)原则。

用户均衡原则描述的是在给定信息下,自私的出行者个体自主选择所必然趋近的稳定状态,它是一

种对现实行为的预测模型；而古诺特原则则定义了一个从管理者视角出发、追求社会总福利最大的理想规划目标。它们的差异性植根于理论基础、决策机制、效率结果及实现路径等多个维度。

用 W_U 表示用户服从 UE 原则的 OD 对集。用 K 表示高速上的绿色通行车辆群，它们服从古诺特 (Cournot Nash, 简称 CN) 原则，成为 CN 群。用 W_K 表示车辆遵循 CN 行为的 OD 对集。令 $W \equiv W_U \cup W_K$ 。用 v_{Ua} 表达 W_U 中经过路段 a 的所有路径的流量和，用 v_{Ka} 表示集合 W_K 中经过路段 a 的全部路径流量的和，另外我们定义 $v_a \equiv v_{Ua} + v_{Ka}$ ， $v_U = \bigcup_a v_{Ua}$ ， $v_K = \bigcup_a v_{Ka}$ 。

高速公路路网上，假定 $t_a(v_a)$ 为弧 $a \in A$ 上的旅行时间成本，该旅行时间随着该弧交通量严格递增，且不受其他路段弧的交通量影响；本文还假设该函数是一个凸函数。另外，假设函数 $t_a(v_a)$ 二阶可导。类似地，一条弧上的污染排放 $e_a(v_a)$ 也只是该路段的流量的增函数，且不受其他路段弧的交通量影响，函数 $e_a(v_a)$ 也是二次可导的凸函数。在衡量总体出行成本中， m 是时间成本的权重， n 是排放成本的权重。

本文中我们考虑固定出行需求，及绿色交通和社会车辆的出行需求是固定的，UE 博弈者的路段交通量 Ω_U 满足以下条件：

$$\Omega_U = \{v_U \mid v_U \text{ 满足约束条件 (1)~(3)}\},$$

$$v_{Ua} = \sum_{w \in W_U} \sum_{p \in P_w} f_{wp} \delta_{wap}, a \in A \quad (1)$$

$$\sum_{p \in P_w} f_{wp} = d_w, w \in W_U \quad (2)$$

$$f_{wp} \geq 0, p \in P_w, w \in W_U \quad (3)$$

绿色交通的弧流量集合 Ω_K 满足下列式子：

$$\Omega_K = \{v_K \mid v_K \text{ 满足约束条件 (4)~(6)}\},$$

$$v_{Ka} = \sum_{w \in W_K} \sum_{p \in P_w} f_{wp} \delta_{wap}, a \in A \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P_w} f_{wp} = d_w, w \in W_K \quad (5)$$

$$f_{wp} \geq 0, p \in P_w, w \in W_K \quad (6)$$

这里 P_w 表达 w 代表的起讫对的路径集合， f_{wp} 表示路径 p (连接起讫点对 w) 上的流量， d_w 为起讫点对 w 的总出行需求。 δ_{wap} 为 0-1 变量，如果路径 p 经过路段 a 则 $\delta_{wap} = 1$ ，否则 $\delta_{wap} = 0$ 。

更短的路径、更少拥堵或更平稳行驶的路线不一定意味着更低的油耗和碳排放，因为二者并不完全重合。绿色出行驾驶员在高速公路路径选择中同时追求最小化旅行时间和碳排放成本，主要基于双重考量。首先，时间是最宝贵的资源之一，缩短旅行时间直接降低驾驶员的机会成本(如节省的工作或休闲时间)、体力消耗以及车辆运行成本(如燃油费、磨损)。其次，环境责任与外部成本的最小化，碳排放是气候变化的主要推手，产生巨大的社会和环境成本(如污染、健康问题、气候灾害)。虽然这些成本通常不由驾驶员直接支付(外部性)，但环保意识增强、潜在碳定价机制(如碳税)以及社会责任感促使驾驶员开始考虑其选择的生态足迹。绿色车辆通行费用最小化的双目标模型(A)如下所示：

$$\min_{v_K \in \Omega_K} \sum_{a \in A} [m t_a(v_{Ua} + v_{Ka}) + n e_a(v_{Ua} + v_{Ka})] v_{Ka} \quad (7)$$

$$v_{Ka} = \sum_{w \in W_K} \sum_{p \in P_w} f_{wp} \delta_{wap}, a \in A \quad (8)$$

$$\sum_{p \in P_w} f_{wp} = d_w, w \in W_K \quad (9)$$

$$f_{wp} \geq 0, p \in P_w, w \in W_K \quad (10)$$

$$v_{Ua} = \sum_{w \in W_U} \sum_{p \in P_w} f_{wp} \delta_{wap}, a \in A \quad (11)$$

$$\sum_{p \in P_w} f_{wp} = d_w, w \in W_U \quad (12)$$

$$f_{wp} \geq 0, p \in P_w, w \in W_U \quad (13)$$

根据变分不等式原理, 这个模型可以拆分为两个子模型, 分别对应到绿色交通和一般交通的择路行为。

子模型 1 是绿色交通的行为, 即下述模型(B):

$$\min_{v_K \in \Omega_K} \sum_{a \in A} [mt_a(v_{Ua} + v_{Ka}) + ne_a(v_{Ua} + v_{Ka})] v_{Ka} \quad (14)$$

$$v_{Ka} = \sum_{w \in W_K} \sum_{p \in P_w} f_{wp} \delta_{wap}, a \in A \quad (15)$$

$$\sum_{p \in P_w} f_{wp} = d_w, w \in W_K \quad (16)$$

$$f_{wp} \geq 0, p \in P_w, w \in W_K \quad (17)$$

以上模型的 F.O.C 为:

$$\begin{aligned} & \sum_{a \in A} \{ [mv_{Ka} t'_a(v_{Ua} + v_{Ka}) + nv_{Ka} e'_a(v_{Ua} + v_{Ka})] + [mt_a(v_{Ua} + v_{Ka}) + ne_a(v_{Ua} + v_{Ka})] \} \delta_{wap} \\ & = \mu_w, \text{ if } f_{wp} > 0, p \in P_w, w \in W_U \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{a \in A} \{ [mv_{Ka} t'_a(v_{Ua} + v_{Ka}) + nv_{Ka} e'_a(v_{Ua} + v_{Ka})] + [mt_a(v_{Ua} + v_{Ka}) + ne_a(v_{Ua} + v_{Ka})] \} \delta_{wap} \\ & \geq \mu_w, \text{ if } f_{wp} = 0, p \in P_w, w \in W_U \end{aligned} \quad (19)$$

子模型 2, 即模型(C), 为一般车辆的择路行为模型, 在保障绿色交通的总出行成本最小化的原则下, 考虑每个驾驶员自身的出行时间最短, 由下列式子构成:

$$\min_{v_U \in \Omega_U} [mt_a(v_{Ua} + v_{Ka}) + ne_a(v_{Ua} + v_{Ka})] v_{Ka} \quad (20)$$

$$v_{Ua} = \sum_{w \in W_U} \sum_{p \in P_w} f_{wp} \delta_{wap}, a \in A \quad (21)$$

$$\sum_{p \in P_w} f_{wp} = d_w, w \in W_U \quad (22)$$

$$f_{wp} \geq 0, p \in P_w, w \in W_U \quad (23)$$

上述模型的 F.O.C 为:

$$\sum_{a \in A} [mv_{Ka} t'_a(v_{Ua} + v_{Ka}) + nv_{Ka} e'_a(v_{Ua} + v_{Ka})] \delta_{wap} = \mu_w, \text{ if } f_{wp} > 0, p \in P_w, w \in W_U \quad (24)$$

$$\sum_{a \in A} [mv_{Ka} t'_a(v_{Ua} + v_{Ka}) + nv_{Ka} e'_a(v_{Ua} + v_{Ka})] \delta_{wap} \geq \mu_w, \text{ if } f_{wp} = 0, p \in P_w, w \in W_U \quad (25)$$

上述变分不等式中的映射是凸函数的梯度(即 $F(x) = \nabla f(x)$), 求解该变分不等式可以等价地转化为求解凸优化问题。这种转化的核心依据是凸优化问题的一阶最优性条件与这种特殊结构变分不等式的一致性。这种等价性为求解一大类具有实际应用背景(如网络均衡、博弈论纳什均衡、工程优化等)的变分不等式提供了强有力的工具——利用成熟的凸优化算法。不难理解, 解开本模型也只要求解一个经典的交通分配问题, 其中路段阻抗函数变更为 $v_{Ka} t'_a(v_{Ua} + v_{Ka})$ 。如果一般社会车辆可以绕开绿色交通使用的路段,

即 $v_{ka} > 0$ 的路段, 则第 2 个子模型的目标函数为 0, 可以做到一般社会车辆交通对绿色交通完全没有干扰。

由于存在两类不同行为的驾驶员, Harker (1988) [6] 证明了这类混合行为无法建立最优化模型, 而必须建立上述的变分不等式模型。与丁蕾和杭虹利(2022) [7] 不同, 本文模型考虑了多目标优化决策。

3. 算例

如图 1, 本例子的计算基于一个平行路径构成的高速公路网, 起终点由三条路段组成。每条路的行程时间是自身交通量的线性函数

$$t_i(v_i) = a_i + b_i v_i, \quad i = 1, 2, 3$$

每条路径的参数 a_i 和 b_i 在表 1 中。

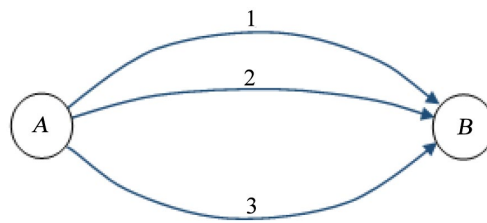


Figure 1. Freeway network
图 1. 高速公路网

Table 1. Network parameters
表 1. 路网参数

Path	a_i	b_i
1	20	1
2	6	2
3	28	3

各路段的碳排放成本函数为

$$e_i(v_i) = c_i v_i^{d_i}, \quad i = 1, 2, 3$$

式中 e_i 为第 i 条路径的行程时间, 是路径流量 v_i 的函数; c_i 和 d_i 为与路径相关的参数。 a_i 和 b_i 的值如表 2 所示。

Table 2. Parameters of the path emission function
表 2. 各路径排放参数

路径编号	c_i	d_i
1	0.1	2
2	0.08	2
3	0.12	2

起终点之间的交通需求为: 绿色交通需求 ($d_k = 20$) 和一般交通需求 ($d_u = 30$)。建立变分不等式(A)表达两类交通混合行为。计算结果为: 绿色车辆使用路径 1 和路径 2, 两条路径的流量相等, 即 $v_{k1} = v_{k2} = 10$ 。一般车辆使用路径 3, $v_{u3} = 30$, 对绿色车辆不形成干扰。这就说明, 该变分不等式模型把绿色交通安排

在行程时间和碳排放较小的路径 1 和 2，可以保证绿色通行车辆的优先通行。一般交通使用路段 3，以避免对绿色交通的干扰。

4. 结语

本文假定，在高速公路交通网络上，一部分车辆兼顾行程时间和行驶中碳排放两个目标的最小化，我们称这些车辆为绿色通行车辆，他们的路径选择服从古诺特原则。另外，高速上还有一些普通车辆，它们在满足绿色车辆优先的前提下遵守用户最优(UE)原则。本文提出了一种绿色交通优先通行的交通量分配模型，并给出对应的求解方法。在高速公路上，绿色交通的择路行为服从古诺特集团法则，与其他交通相比可以优先通行，联合体的共同目标是绿色交通运输总时间和碳排放加权总量最小；非绿色车辆在选择路径时须给绿色车辆让行。文章最后通过一个算例证明了开发模型的有效性。

为保证车辆行驶碳排放减少而适度牺牲某些车辆的行驶速度，其合理性根植于从“个体局部最优”转向“系统全局最优”的决策思维。交通系统是一个复杂的整体，若每辆车都追求自身最高速度，常会引发集体性的急加速、急刹车和拥堵，反而导致系统总排放飙升。主动通过流量控制、流速管理(如设置绿色波带车速)或路径诱导等方式，引导部分车辆以更平稳、中等速度行驶，虽可能略微增加其行程时间，却能大幅减少频繁启停带来的高燃油消耗和尾气排放。这是因为车辆发动机在匀速中速工况下热效率最高，排放最低。这种策略本质上是将交通流从“不稳定-高耗能”状态调节至“稳定-高效能”状态，用微小的个体效率代价换取巨大的环境效益，符合社会公共利益最大化的原则。它并非无差别地限制所有车辆，而是通过智能化的系统管理，实现环境目标与通行效率之间更优的帕累托平衡，是应对气候变化和城市污染问题的必要且科学的举措。

基金项目

国家自然科学基金项目“面向疫情防控的人力资源、物流、场地共享和协同管理”(72274125)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 绿色交通“十四五”发展规划[M]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [2] Yang, H. and Wang, X. (2022) Optimizing Lane Allocation for Electric Vehicles on Highways: A Dynamic Traffic Model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **105**, Article ID: 103230.
- [3] Ghosh, B.K. and Pal, A. (2023) An Automated IoT-Based Green Corridor Integrated with Smart Traffic Management System for Patients Transfer. *Proceedings of International Conference on Data Analytics and Insights, ICDAI 2023*, Vol. 727, Springer, 65-76. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3878-0_6
- [4] Li, X., et al. (2023) Dynamic Lane Management for Mixed Traffic Flow with Connected EVs. *Transportation Research Part C*, **136**, Article ID: 103541.
- [5] Zhang, Y. and Liu, P. (2022) AI-Based Traffic Signal Priority for Electric Buses. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, **23**, 4567-4578.
- [6] Harker, P.T. (1988) Multiple Equilibrium Behaviors on Networks. *Transportation Science*, **22**, 39-46. <https://doi.org/10.1287/trsc.22.1.39>
- [7] 丁蕾, 杭虹利. 应急物流优先的交通分配模型及算法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 630-634.