



拥堵车源的区域多层交通网络混合 路径诱导策略

王璞*, 王天浩, 李明伦, 郭宝, 吴紫健, 肖健和

(中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075)

摘要 为了缓解高速公路交通拥堵, 利用国道和省道实现交通分流, 并有针对性地实施路径诱导策略, 建立了考虑拥堵车源的区域多层交通网络混合路径诱导模型。首先, 构建了由国道、省道以及湖南省高速公路组成的区域多层交通网络, 标定网络链接权重。然后, 定位交通拥堵车源, 建立了考虑拥堵车源的混合路径诱导模型, 对从拥堵车源出发的车辆实施有针对性的路径诱导, 在保障缓解交通拥堵效果的同时, 尽可能减少对出行者的影响。研究表明, 该模型能够实现多层网络有效分流, 有效减少路网中车辆的平均出行时间。在实际应用中, 可以只对少数出行者提供路径诱导信息以降低模型的实施难度, 并通过调查出行者对建议路径的接受率, 制定合适的路径诱导信息发布方案。

关键词 复杂网络; 拥堵车源; 拥堵缓解; 混合路径诱导模型; 多层网络

中图分类号 U491 文献标志码 A DOI 10.12178/1001-0548.2023121

Hybrid Routing Strategy of Regional Multi-Layer Transportation Network Considering the Congested Driver Sources

WANG Pu*, WANG Tianhao, LI Minglun, GUO Bao, WU Zijian, and XIAO Jianhe

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract In order to alleviate traffic congestion on freeways, national highways and provincial highways are used to achieve traffic diversion, and a targeted route guidance strategy is implemented. A hybrid routing model for regional multi-layer transportation network is established, which considers the congested driver sources. Firstly, a regional multi-layer transportation network composed of Hunan freeway, national highway and provincial highway is constructed, and the link weight is calibrated. Next, the congested driver sources are located, a hybrid routing model is established by considering the congested driver sources, and the targeted routing guidance is implemented for vehicles from the congested driver sources, so as to reduce the impact on travelers as much as possible while ensuring the mitigation effect of traffic congestion. Results show that the proposed route guidance model can effectively achieve traffic diversion and reduce the average travel time of vehicles in the multi-layer transportation network. In practical applications, the route guidance information can be only sent to a few drivers to reduce the difficulty of model implementation. The acceptance rate of drivers to the suggested routes can be analyzed to develop appropriate plans for disseminating route guidance information.

Key words complex network; congested driver sources; congestion alleviation; hybrid routing model; multi-layer network

路径诱导是缓解高速公路交通拥堵的重要途径之一, 相关学者针对路径诱导进行了大量研究^[1-9]。文献 [1] 通过模糊认知图对高速公路网络上的交通流进行建模, 并提出了不同场景下的路径诱导策略; 文献 [2] 将路径诱导与匝道控制结合在一起, 提出了一种集成控制算法, 该方法的优势在于可以

在不同的交通需求下建立用户平衡; 文献 [3] 提出了一种多路径搜索算法寻找最优路径, 该方法不只局限于提供单一的路径方案, 并且能够考虑乘客出行路径选择的心理复杂性; 文献 [4] 通过物联网技术获取车辆实时信息, 计算路网中的动态交通压力分布, 以实现多阶段路径诱导。不过以往研究较少

收稿日期: 2023-04-01; 修回日期: 2023-07-21

基金项目: 湖南省自然科学基金杰出青年基金 (2022JJ10077); 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划 (202102)

作者简介: 王璞, 博士, 教授, 主要从事交通大数据、智能交通与复杂网络等方面的研究。

*通信作者 E-mail: wangpu@csu.edu.cn

考虑使用混合路径诱导模型,而近年来,混合型路径诱导模型成为了一个新的研究方向,文献[8]以最短路径和最小成本模型为基础,根据不同出行者对拥堵的贡献程度建立混合模型,对地铁客流进行路径诱导研究;文献[9]借助宏观基本图将城市道路网络分为上、下两层,在上、下层区域的路径诱导中分别使用不同方案。

出行者经常会使用多种交通网络完成出行,或根据交通状态信息选择不同的交通方式(使用不同的交通网络)。因此,多层交通网络已成为近年来的重要研究方向^[10-17]。文献[15]分析了由高铁、普铁组成的双层铁路网络的鲁棒性;文献[16]应用高阶多变量马尔可夫模型,预测多层路网中的交通拥堵;文献[17]借助多层交通网络,研究交通网络、人类移动性与流行病传播的密切关系。现有研究较少涉及由高速公路和普通公路组成的多层公路交通网络。

在高速公路车辆路径诱导研究方面,以往方法模型大多建立在单层高速公路网络之上^[18]。国家级干线公路(国道)、省级干线公路(省道)与高速公路共同组成了区域多层交通网络,不仅为出行者提供了多种出行路径选择方案,还能在高速公路发生严重拥堵或突发交通状况时提供替代路径。

基于上述考虑,本文借助多层网络建模方法构建由国道、省道和高速公路组成的区域多层交通网络。进一步通过定位高速公路的拥堵车源,分析来自不同地区的车辆对交通拥堵的影响,建立考虑拥堵车源信息的、有针对性的混合路径诱导模型,在保障缓解交通拥堵效果的同时,减少路径诱导措施对出行者的影响,降低模型的实际实施难度。

1 区域多层交通网络模型构建

1.1 路网地理信息数据获取

路网的地理信息数据从 OpenStreetMap 网站(<https://download.geofabrik.de/asia/china.html>)获得,在所有级别公路中筛选出除高速公路以外的国道、省道(公路等级为一级公路或二级公路)以及高速公路,并使用少量其他路段补全其中的断路,使之成为一个完整、连通的路网。为了简化路网结构,将高速公路中的收费站作为高速公路网络的节点,将除高速公路以外的国道、省道中所有路段的端点作为次级别公路网络的节点,将连接各个节点的路段作为交通网络中的链接。

1.2 路段通行能力计算

路网中路段的属性信息从国道、省道官网(<http://tools.2345.com/jiaotong/guodao.htm>)和百度地图获得,获取的属性信息包括路段限速 s 、车道数 n 、道路宽度 w 、路段的长度 l 、公路等级等。获得相应的路网属性信息后,通过查询高速公路以及其他等级公路的基本通行能力标准^[19],计算每个路段的基本通行能力 M 。

1.3 网间链接构建

在区域多层交通网络模型中,网内链接为连接单层网络(如高速公路网络)内节点的边,网间链接为连接高速公路网络和次级别公路网络的边。车辆通过网间链接的过程为车辆从高速公路进入次级别公路或从次级别公路进入高速公路的过程。将车辆通过某路段所用的时间设置为网内链接的权重;将车辆通过高速公路匝道和收费站所需的时间^[20]设置为网间链接权重。区域多层交通网络示意图如图1所示,图中网络 a 、 b 分别代表高速公路网络和次级别公路网络。其中,红色线段代表高速公路,蓝色线段代表次级别公路,绿色圆点代表高速公路互通出入口(高速公路与其他公路的交会点),绿色虚线代表网间链接。

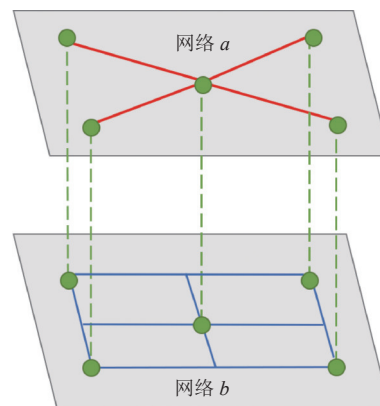


图1 区域多层交通网络示意图

2 混合路径诱导模型构建

以最短路径(Shortest Path, SP)模型和最小成本(Minimum Cost, MC)模型为基础,建立 SP-MC 混合路径诱导模型。

2.1 SP 模型

SP 模型假设每个出行者选择自由流状态下起、终点间的最短时间路径出行,其中路段自由流出行时间 T_f 为路段长度 l 与限速 s 之比:

$$T_f = \frac{l}{s} \quad (1)$$

SP模型体现了非拥堵状态下的出行者路径选择行为。以往研究表明即使在高速公路发生交通拥堵的情况下, 很多出行者仍然会选择最短路径^[8], 导致交通拥堵状况更加严重。

2.2 MC模型

MC模型则为每个出行者规划路径, 使交通网络的总出行时间(总出行成本)达到最小。

为了量化交通拥堵对出行时间的影响, 使用BPR函数^[21-22]计算路段出行时间 $T_a(f)$:

$$c_{ij}(f) = T_a(f) = \left(1 + \alpha \left(\frac{f}{M}\right)^\beta\right) T_f \quad (2)$$

式中, $c_{ij}(f)$ 为通过路段所需的时间(出行成本); i, j 为路段的起点和终点; f 为路段交通量; M 为路段基本通行能力; T_f 为路段自由流出行时间; α 和 β 为常数, 通常情况下 $\alpha = 0.15$, $\beta = 4$ ^[21-22]。

MC模型为:

$$C_{MC} = \sum_{i,j} f_{ij} c_{ij}(f_{ij}) = \sum_{i,j} \int_0^{f_{ij}} c_{ij}^{\sim}(f) df \quad (3)$$

式中, C_{MC} 为总出行成本, MC模型由Frank-Wolf算法^[23]求解。式(3)推导为:

$$\int_0^{f_{ij}} c_{ij}^{\sim}(x) dx = \int_0^{f_{ij}} \left[c_{ij}(x) + x \frac{dc_{ij}(x)}{dx} \right] dx = \int_0^{f_{ij}} d[xc_{ij}(x)] = f_{ij} c_{ij}(f_{ij}) \quad (4)$$

相比于SP模型, MC模型的优点在于能够从路网全局出发, 实现总出行成本最小的目标。但不足之处是需要所有出行者按规划路径行驶, 难以实施。

2.3 SP-MC混合路径诱导模型

本文提出结合SP模型和MC模型的SP-MC混合路径诱导模型。该模型能够识别少数对拥堵贡献较大的出行群体, 并对该部分出行者实施路径诱导(应用MC模型), 其余出行者仍选择最短时间路径(应用SP模型), 降低路径诱导措施的实施难度。

为了量化出行者对交通拥堵的贡献, 首先计算车辆在路网中任意两个节点 i, j 间出行承担的额外出行成本 $C_E(i, j)$, 即车辆因交通拥堵而承担的额外出行时间总和:

$$C_E(i, j) = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{L_n} \alpha \left(\frac{f^l}{M^l}\right)^\beta T_f^l \quad (5)$$

式中, N 为路网中分别以节点 i, j 为起点和终点的车辆总数; L_n 为第 n 辆车按照最短路径行驶时经过的路段总数; f^l 为第 l 条路段的交通量; M^l 为第 l 条路段的通行能力; T_f^l 为自由流状态下通过第 l 条路段所需的时间。如果出行者的额外出行成本较大, 则说明车辆使用了大量拥堵路段。可以认为这部分出行者对于交通网络的拥堵贡献较大。

SP-MC混合路径诱导模型的计算流程如下。

1) 为了筛选额外出行成本较大的出行者, 首先应用SP模型进行交通分配, 计算得到此时路网中每个路段的交通量;

2) 获得路段交通量后, 代入式(5), 计算每个OD对之间的额外出行成本 $C_E(i, j)$;

3) 按额外出行成本 $C_E(i, j)$ 由大到小的顺序对OD对排序, 排名越靠前的OD对的拥堵贡献越大, 反之则越小;

4) 将OD对按照上述排序结果划分为两部分, 额外出行成本 $C_E(i, j)$ 较大的OD对的占比为 P , 而额外出行成本 $C_E(i, j)$ 较小的OD对的占比为 $1-P$;

5) 对于额外出行成本 $C_E(i, j)$ 较小的占比为 $1-P$ 的OD对应用SP模型, 随后将SP模型的分配结果代入式(2), 更新通过每个路段所需的出行成本 $c_{ij}(f)$, 再对额外出行成本 $C_E(i, j)$ 较大的占比为 P 的OD对应用MC模型为其规划最小成本路径, 最后将两个模型计算的路段交通量相加, 得到应用SP-MC混合路径诱导模型时的路段交通量, 以及此时出行者的平均出行时间 $\langle T_a \rangle$ 和平均额外出行时间 $\langle T_e \rangle$ 。

当 $P=0$ 时, 所有出行者使用最短时间路径, 此时SP-MC混合路径诱导模型等同于SP模型; 而当 $P=1$ 时, 所有出行者使用最小成本路径, 此时SP-MC混合路径诱导模型等同于MC模型。通过对比不同 P 值下SP-MC混合路径诱导模型的计算结果, 可以确定合适的 P 值或 P 值区间, 此时路径诱导策略仅实施于部分出行者, 但仍然能实现良好的拥堵缓解效果。

3 结果分析

在本节中, 对比并分析SP模型、MC模型、SP-MC混合路径诱导模型以及其他常用的基线方

法的计算结果。其他基线方法包括：最短出行距离模型（SD 模型），该模型假设每个出行者选择起、终点之间出行距离最短的路径；SD-MC 混合路径诱导模型，该模型由 SD 模型和 MC 模型组成，模型构建方式与 SP-MC 混合路径诱导模型类似。

3.1 湖南省区域多层交通网络构建

本文研究的区域多层交通网络由湖南省高速公路和次级别公路（国道、省道）两部分构成。其中，高速公路网络包含 506 个节点和 1 100 条路段，次级别公路网络包含 22 931 个节点和 23 972 条路段。在高速公路与次级别公路之间的高速互通出入口设置网间链接，将网间链接权重设置为 $2.5 \text{ min}^{[20]}$ 。构建的区域多层交通网络共有 238 个网间链接，包含 23 437 个节点和 25 072 条路段。湖南省高速公路和国道、省道组成的区域多层交通网络如图 2 所示，图中红色代表高速公路网络，蓝色代表次级别公路网络，绿色代表区域多层交通网络之间的网间链接。

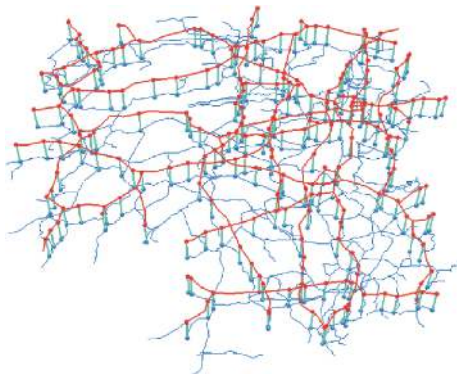


图 2 湖南省区域多层交通网络示意图

3.2 交通出行量数据处理

本文使用的交通需求 OD 数据由湖南省交通科学研究院提供，记录了 2019 年 5 月 13 日至 19 日湖南省高速公路各收费站之间的交通需求信息。由于在原 OD 数据中存在部分节点编号信息缺失的情况，因此删除了存在信息缺失的 OD 数据。以 2019 年 5 月 15 日 13 时至 14 时的 OD 数据为例，筛选前 OD 数据有 13 246 条，OD 出行总量为 54 504，经过预处理后得到的有效 OD 数据为 12 801 条，OD 出行总量为 52 639。

首先在单层高速公路网络上应用 SP 模型进行初步计算，估计各个路段的交通量。由路段交通量与基本通行能力之比（Volume Over Capacity, VOC）的数值高低判断拥堵程度：

$$\text{VOC} = \frac{f}{M} \quad (6)$$

式中， f 为路段交通量； M 为路段基本通行能力。

结果表明，路网整体交通量偏小，交通分配后的 VOC 均值约为 0.05，与实际情况不符，这说明原始 OD 数据需要进行数据扩样处理。通过查询湖南省交通运输厅的高速公路交通流统计数据，并结合湖南省各条高速公路的实际里程，计算得出 2019 年 5 月 13 日至 19 日全省高速公路的 VOC 均值为 0.3~0.35，是通过 OD 数据计算得到的 VOC 均值的 6~7 倍，故可以确定现有 OD 数据仅为实际交通需求总量的一部分。因此，在后续分析中，将各 OD 对间的出行量扩样为初始值的 6 倍。

3.3 SD、SP 以及 MC 模型结果分析

首先，在区域多层交通网络上分别应用 SD、SP 以及 MC 这 3 种模型，计算应用各模型时的平均出行时间 $\langle T_a \rangle$ 和平均额外出行时间 $\langle T_e \rangle$ ，其中 $\langle T_e \rangle = \langle T_a \rangle - \langle T_f \rangle$ ， $\langle T_f \rangle$ 为平均自由流出行时间，结果如表 1 所示。对比表 1 中的计算结果发现：应用 SD 模型时出行者的平均出行时间 $\langle T_a \rangle$ 和平均额外出行时间 $\langle T_e \rangle$ 最长，应用 SP 模型时 $\langle T_a \rangle$ 和 $\langle T_e \rangle$ 略低于 SD 模型，这表明应用 SD 模型与 SP 模型时，虽然每个出行者都选择了出行距离最短或自由流出行时间最短的路径，但路网中的交通拥堵较为严重；而应用 MC 模型时， $\langle T_a \rangle$ 和 $\langle T_e \rangle$ 明显降低，路网拥堵程度较低，但 MC 模型需要对所有出行者进行出行路径规划，理论上的最优方案在现实中难以实现。

表 1 不同基线方法计算结果对比

模型	$\langle T_a \rangle / \text{min}$	$\langle T_e \rangle / \text{min}$
SD模型	68.12	19.46
SP模型	65.10	17.77
MC模型	53.74	6.07

3.4 混合路径诱导模型结果分析

在区域多层交通网络上应用 SP-MC 与 SD-MC 混合路径诱导模型，两种混合路径诱导模型的计算步骤类似，下文以 SP-MC 混合路径诱导模型为例进行详细描述，具体步骤如下。

1) 以 SP 模型的计算结果为基础，获得路网中所有路段的交通量。

2) 计算每个 OD 对的额外出行成本 $C_E(i, j)$ 。

3) 按照额外出行成本由大到小对 OD 对进行排序，如图 3 所示。可以看到图 3 中少数排名较高的 OD 对的额外出行成本数值较大，而其他大部

分 OD 对的额外出行成本较小。在 12 801 个 OD 对中, 排名前 100 的 OD 对的额外出行成本之和达到了全部 OD 对额外出行成本之和的 50%。这表明了识别对路网拥堵贡献较大的出行群体, 并对其实施针对性路径诱导策略的必要性。

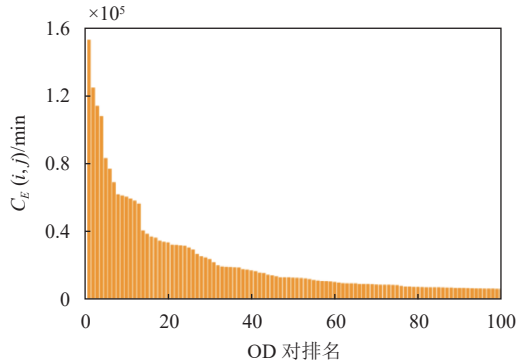
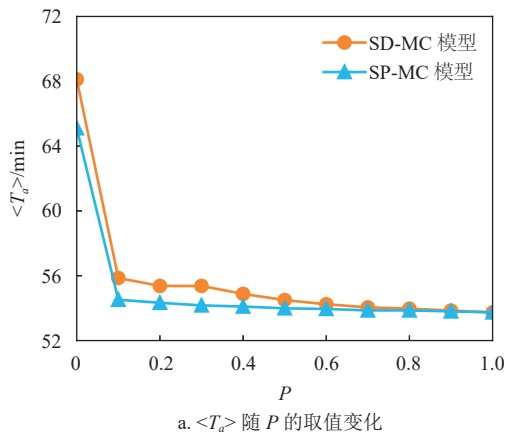


图 3 额外出行成本 C_E 最大的 100 个 OD 对

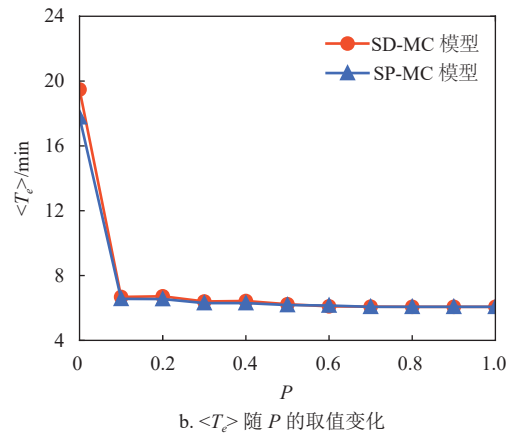
4) 将 OD 对划分为额外出行成本 $C_E(i, j)$ 较大的 OD 对 (占比为 P) 和额外出行成本 $C_E(i, j)$ 较小的 OD 对 (占比为 $1-P$)。

5) 完成 OD 对划分后, 分别选取 $P=0.0, 0.1, \dots, 1.0$ 共 11 个不同的数值依次进行计算, 其中 $P=0$ 时, SP-MC 混合路径诱导模型等同于 SP 模型, $P=1$ 时, SP-MC 混合路径诱导模型等同于 MC 模型。额外出行成本 $C_E(i, j)$ 较大的 OD 对 (占比为 P) 应用 MC 模型, 额外出行成本 $C_E(i, j)$ 较小的 OD 对 (占比为 $1-P$) 应用 SP 模型, 将两个模型计算出的路段交通量相加, 获得应用 SP-MC 混合路径诱导模型时的路段交通量。

如图 4 所示, 在 SD-MC 混合路径诱导模型和 SP-MC 混合路径诱导模型中, 随着 P 从 0 增加至 1, 出行者的平均出行时间 $\langle T_a \rangle$ 和平均额外出行时间 $\langle T_e \rangle$ 均呈现出下降趋势, 且下降的速度先快后慢, 最终趋于平缓。



a. $\langle T_a \rangle$ 随 P 的取值变化



b. $\langle T_e \rangle$ 随 P 的取值变化

图 4 应用两种混合路径诱导模型时 $\langle T_a \rangle$ 和 $\langle T_e \rangle$ 随 P 的取值变化

对比多种路径诱导模型中出行者的平均出行时间 $\langle T_a \rangle$ 和平均额外出行时间 $\langle T_e \rangle$ 可以发现, MC 模型与 SD-MC、SP-MC 混合路径诱导模型的 $\langle T_a \rangle$ 与 $\langle T_e \rangle$ 明显低于 SD 模型与 SP 模型, 说明这 3 种模型均可有效缓解交通拥堵。而当 P 取相同值时, 应用 SP-MC 混合路径诱导模型时的 $\langle T_a \rangle$ 和 $\langle T_e \rangle$ 比应用 SD-MC 混合路径诱导模型时的 $\langle T_a \rangle$ 和 $\langle T_e \rangle$ 更小, 说明 SP-MC 混合路径诱导模型的拥堵缓解效果更好。当 $P=0.1$ 时, 应用 SP-MC 混合路径诱导模型能够使 $\langle T_a \rangle$ 与 $\langle T_e \rangle$ 的降幅分别达到 MC 模型的 93.13% 与 95.81%, 说明 SP-MC 混合路径诱导模型只需要对小部分出行者实施路径诱导, 就可以实现良好的缓解拥堵效果, 易于实施; 当 $P \geq 0.1$ 后, $\langle T_a \rangle$ 与 $\langle T_e \rangle$ 几乎不再随 P 的增加而降低, 而 P 越大意味着需要实施路径诱导策略的车辆越多, 实施难度也越大, 故 P 取值不宜过大。因此, 在湖南省区域多层交通网络中应用 SP-MC 混合路径诱导模型时, $P=0.1$ 较为合理。

综上所述, 在区域多层交通网络中, SP-MC 混合路径诱导模型综合了 SP 模型与 MC 模型的优点, 兼具较高的实用性和良好的路径诱导效果。

3.5 路径诱导信息发布策略

在混合路径诱导模型的实际应用中, 很难做到为每个出行者推送路径诱导信息, 因此, 可以只对那些通过调整出行路径能够显著缓解交通拥堵的少数出行者提供路径诱导信息, 以降低混合路径诱导策略的实施难度。路径诱导信息可以通过公路上的交通信息电子屏幕或车辆导航系统进行发布, 考虑到出行者不一定会接受建议路径, 假设接受建议路

径的出行者的占比为 Q ，进一步分析 Q 取不同值时混合路径诱导策略的实施效果。

以 SP-MC 混合路径诱导模型为例，分别选取 $C_E(i, j)$ 最大的前 20 个、前 100 个、前 1 280 (10%) 个 OD 对生成路径诱导信息，3 种方案中 OD 对包含的起始节点个数、出行者占全部出行者的比例如表 2 所示。以情况 1 为例，需要发布路径诱导信息的收费站包括：长沙西、道仁、朝阳、巴陵、宁乡、幸福渠、羊楼司、德山、常德东、太子庙、云溪、小塘、金洲、金盆山共 14 个收费站，其中 8 个收费站集中分布在长沙、益阳、常德市沿线，其空间位置如图 5 所示。其中，长沙西收费站发布的信息最多（6 条，共涉及 5 352 位出行者）。

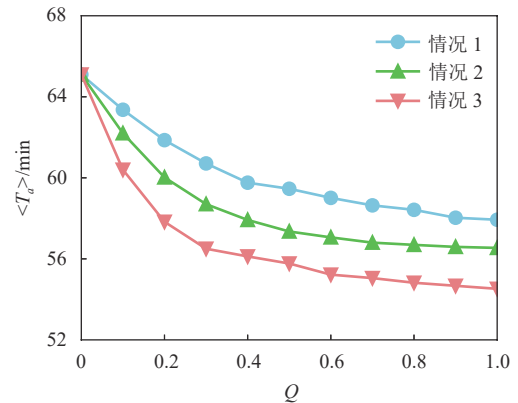
表 2 发布路径诱导信息的不同方案

情况	实施路径诱导策略的 OD 对数量	发布路径诱导信息的位置数量	接收到路径诱导信息的出行者占比/%
1	20	14	5.11
2	100	57	11.25
3	1 280	221	26.12

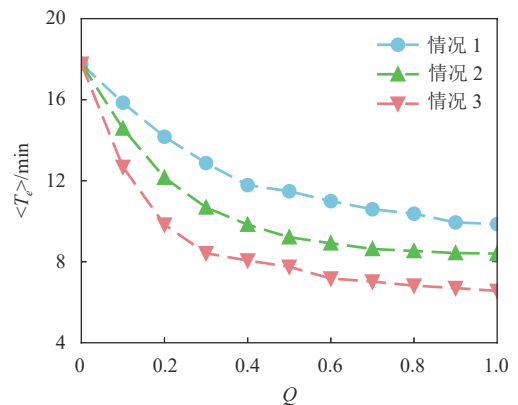


图 5 发布路径诱导信息的收费站位置（以方案 1 为例）

在 3 种路径诱导中分别考虑 $Q = 0.0, 0.1, \dots, 1.0$ 情况下的拥堵缓解效果。如图 6 所示，随着 Q 从 0 增加至 1，出行者的平均出行时间 (T_a) 和平均额外出行时间 (T_e) 均呈现出下降趋势。计算结果表明，随着出行者对路径诱导信息接受率的增加，混合路径诱导模型的拥堵缓解效果也随之提高；另一方面，对越多的出行者发布路径诱导信息，模型的拥堵缓解效果越好，不过实际实施的难度也会增加，因此需要结合实际情况选择合适的方案。



a. $\langle T_a \rangle$ 随 Q 的取值变化



b. $\langle T_e \rangle$ 随 Q 的取值变化

图 6 3 种路径诱导方案中 $\langle T_a \rangle$ 和 $\langle T_e \rangle$ 随 Q 的取值变化

在混合路径诱导模型的实际应用中，可以通过调查出行者对建议路径的接受率确定需要在多少收费站发布路径诱导信息。如图 6 所示，以 SP-MC 混合路径诱导模型的拥堵缓解效果达到 MC 模型（理论上的最优方案）的 50% 以上为目标，如果调查显示出行者对路径诱导信息的接受率大于 0.6，选择方案 1 即可；如果调查显示出行者对路径诱导信息的接受率低于 0.2，则需要选择方案 3。

4 结束语

本文构建了国道、省道和湖南省高速公路组成的区域多层交通网络，并在高速互通出入口所在位置建立网间链接，考虑了车辆进出高速公路所用的时间，更接近实际情况。通过对比 SP 模型、MC 模型和 SP-MC 混合路径诱导模型以及其他常用的基线方法的计算结果可知，应用 SP-MC 混合路径诱导模型可以有效缓解交通拥堵。在选取合适 P 值的情况下，应用混合路径诱导模型可以使出行者的平均出行时间和平均额外出行时间大幅减少，拥堵缓解效果能够达到 MC 模型（理论上的最优方案）的 90% 以上；而且此时混合路径诱导模型仅需要对拥堵贡献较大的小部分出行者实施路径诱

导,相比于MC模型实施难度更小,具有更好的实用性。另外,在实际应用中可以只对少数出行者提供路径诱导信息,并根据出行者对建议路径的接受率,制定合适的路径诱导信息发布策略。研究结果可以为缓解区域高速公路交通拥堵提供有针对性的交通管控策略。未来可以将异常交通需求和突发交通状况下的路径诱导策略作为研究方向。

参考文献

- [1] AMINI M, HATWÁGNER F M, MIKULAI G C, et al. Developing a macroscopic model based on fuzzy cognitive map for road traffic flow simulation[J]. *Infocommunications Journal*, 2021, 13(3): 14-23.
- [2] MAJID H, LU C, KARIM H. An integrated approach for dynamic traffic routing and ramp metering using sliding mode control[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2018, 5(2): 116-128.
- [3] 闫小勇, 尚艳亮. 基于二部图模型的公交网络路径搜索算法[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(5): 246-248.
YAN X Y, SHANG Y L. Path-finding algorithm of public transport networks based on bipartite graph model. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(5): 246-248.
- [4] 刘敦敏. 车联网环境下多阶段路径诱导系统设计[J]. *工业控制计算机*, 2021, 34(2): 26-29.
LIU D M. Multi-stage route guidance system in connected vehicle network environment[J]. *Industrial Control Computer* 2021, 34(2): 26-29.
- [5] SINGH R K, KUMAR M. Route guidance system for the road network-a review[J]. *Wireless Personal Communications*, 2021, 119(2): 1161-1177.
- [6] 刘张, 王心迪, 闫小勇. 面向复杂城市道路网络的GPS轨迹匹配算法[J]. *电子科技大学学报*, 2016, 45(6): 1008-1013.
LIU Z, WANG X D, YAN X Y. Map-matching algorithm for GPS trajectories in complex urban road networks[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2016, 45(6): 1008-1013.
- [7] XU T D, HAO Y, PENG Z R, et al. Anticipatory traveller information system for freeway-arterial networks[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2014, 8(3): 286-297.
- [8] HE K, XU Z Z, WANG P, et al. Congestion avoidance routing based on Large-Scale social signals[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(9): 2613-2626.
- [9] WEI D, YANG Z S. Bi-level route guidance method for large-scale urban road networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, 2019(1): 1-9.
- [10] 吴桐雨, 王健. 基于多层复杂网络的物流枢纽城市多尺度分析及发育评价[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2019, 19(1): 33-39.
WU T Y, WANG J. Multi-scale analysis and development evaluation of logistics hub cities based on multi-layer complex networks[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2019, 19(1): 33-39.
- [11] 马夏夏, 蔡永明. 基于复杂网络的铁路-航空多层网络的鲁棒性研究[J]. *山东科学*, 2017, 30(5): 70-78.
MA X X, CAI Y M. Study on the robustness of Chinese railway and airline multilayer networks based on complex network theory[J]. *Shandong Science*, 2017, 30(5): 70-78.
- [12] 刘泽羲, 王文俊, 潘林. 基于多层复杂网络理论的海洋货运网络的抗毁性研究[J]. *海洋通报*, 2018, 37(6): 652-658.
LIU Z X, WANG W J, PAN L. Research on the invulnerability of marine freight networks based on the multilayer complex network[J]. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37(6): 652-658.
- [13] KALUZA P, KÖLZSCH A, GASTNER M T, et al. The complex network of global cargo ship movements[J]. *Journal of the Royal Society Interface*, 2010, 7(48): 1093-1103.
- [14] 李妍羲. 多层网络耦合的城市交通拥堵传播模型研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
LI Y X. Research on urban traffic congestion propagation model on multilayer coupled network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [15] 孙晓璇, 吴晔, 冯鑫, 等. 高铁-普铁的实证双层网络结构与鲁棒性分析[J]. *电子科技大学学报*, 2019, 48(2): 315-320.
SUN X X, WU Y, FENG X, et al. Structure characteristics and robustness analysis of multi-layer network of high speed railway and ordinary railway[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2019, 48(2): 315-320.
- [16] 刘张, 李坚, 王超, 等. 基于复杂城市道路网络的交通拥堵预测模型[J]. *电子科技大学学报*, 2016, 45(1): 17-25.
LIU Z, LI J, WANG C, et al. A prediction model for traffic congestion in complex urban road networks[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2016, 45(1): 17-25.
- [17] HAN X P, ZHAO Z D, HADZIBEGANOVIC T, et al. Epidemic spreading on hierarchical geographical networks with mobile agents[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2014, 19(5): 1301-1312.
- [18] BOCCALETTI S, BIANCONI G, CRIADO R, et al. The structure and dynamics of multilayer networks[J]. *Physics Reports*, 2014, 544(1): 1-122.
- [19] 徐吉廉. 交通工程总论[M]. 第4版. 北京: 人民交通出版社, 2015: 95.
XU J L. Fundamentals of traffic engineering[M]. 4th ed. Beijing: China Communications Press, 2015: 95.
- [20] 杨鹏飞. 取消省界收费站对高速公路车辆运行影响分析研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
YANG P F. Analysis and research on the influence of canceling provincial border toll stations on expressway vehicle operation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [21] GAO Z Y, SUN H J, SHAN L L. A continuous equilibrium network design model and algorithm for transit systems[J]. *Transportation Research Part B*, 2004, 38(3): 235-250.
- [22] HAMDOUCH Y, SZETO W Y, JIANG Y J. A new schedule-based transit assignment model with travel strategies and supply uncertainties[J]. *Journal of Transportation*, 2014, 67: 35-67.
- [23] FRANK M, WOLFE P. An algorithm for quadratic programming[J]. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1956, 3(1-2): 95-110.