

基于转弯约束下的车辆排放监测器优化布局策略

江洪棱, 刘俊

(杭州师范大学 信息科学与技术学院, 杭州 311121)

摘要: 城市空气质量的及时全面监测对于交通车辆排放管理和居民身心健康至关重要, 文章基于该问题针对交通车辆排放监测部署进行了研究; 移动污染源监测设备在城市道路网络中能够精准追踪和评估机动车排放的污染物, 但设备成本昂贵, 因此需要在满足监测效率的同时控制成本; 同时研究中引入了转弯限制, 以更好地贴合实际交通路况并减少监测设备冗余; 目的是找到能够最大限度监测到整个交通路网汽车排放的监测器部署位置; 采用了将路网中的闭合路径(回路)与开放路径(非回路)进行分离的方法, 基于虚拟节点以及最大流算法, 确定最终的监测器布设位置, 并引入覆盖率来衡量部署方案的效果; 实验结果表明, 在真实路网情况下该方法的监测器部署数量为 31 个, 少于其余对比方法, 覆盖率达到了 92.37%, 在车辆排放监测器部署的应用中, 满足了高效监测的需求并节约了成本。

关键词: 监测器布设; 交通路网; 转弯限制; 网络流; 移动污染源

Optimized Layout Strategy for Vehicle Emission Monitors Based on Turning Constraints

JIANG Hongyan, LIU Jun

(School of Information Science and Technology, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

Abstract: It is crucial for urban air quality to timely and comprehensively monitor the management of traffic vehicle emissions and the physical and mental health of residents. Based on this issue, this paper studies the deployment of emission monitoring for traffic vehicles; mobile pollution source monitoring equipment can accurately track and evaluate the exhaust pollutants emitted by motor vehicles in urban road networks; Due to the expensive equipment, it is necessary to control the cost while meeting the monitoring efficiency requirements; Thus introducing turning restrictions to better match actual traffic conditions and reduce redundant monitoring equipment; The aim is to find the location of monitors that can maximize the monitoring of vehicle emissions throughout the entire transport network; Based on a virtual node and maximum flow algorithm, a method for separating closed paths (loops) and open paths (non-loops) in the road network is used to determine the final monitor deployment location, and the coverage rate is introduced to measure the effectiveness of the deployment plan; Experimental results show that under real road network conditions, the deployment number of monitors for this method is 31, which is less than that of other comparative methods, and the coverage rate reaches up to 92.37%. In the application of deploying vehicle emission monitors, it meets the requirements of efficient monitoring and saves costs.

Keywords: monitor deployment; traffic network; turning constraints; network flow; mobile pollution source

0 引言

随着全球机动车辆保有量的激增, 截至 2023 年底, 全球机动车总量已接近突破 15 亿辆大关, 城市道路网络承受的压力与日俱增。汽车尾气排放问题日益严峻,

其中主要污染物如一氧化碳 (CO)、氮氧化物 (NO_x) 以及未完全燃烧的碳氢化合物 (HC), 对空气质量公众健康构成了严重威胁。据世界卫生组织估计, 每年因空气污染导致的疾病和早死人数高达 700 万人。鉴于此, 采用先进的遥感技术进行汽车尾气排放的实时监测

收稿日期:2024-07-20; 修回日期:2024-08-30。

基金项目:国家自然科学基金(62273126)。

作者简介:江洪棱(1997-),男,硕士研究生。

通讯作者:刘俊(1988-),男,博士,讲师。

引用格式:江洪棱,刘俊. 基于转弯约束下的车辆排放监测器优化布局策略[J]. 计算机测量与控制,2025,33(9):200-207,301.

显得尤为关键。遥感监测系统能在数秒内分析通过监测点的车辆排放情况, 为环保部门提供即时、准确的数据, 助力政策制定者实施更为精准的车辆减排策略。然而, 高昂的设备成本这一非常现实的问题便成为推广遥感监测技术的一大障碍。一台高性能的遥感监测设备价格可能超过 50 万人民币, 这使得在城市路网中广泛部署面临巨大的经济挑战。

面对这一现实问题, 城市规划者和广大研究学者正在探索创新的解决方案, 力求在成本最小化的前提下, 实现对整个路网汽车尾气排放的有效监控。

在已有研究中, 大部分都着力于研究路网空气质量、交通流量^[1]以及交通传感器^[2]布设方面, 在移动污染源遥测方面研究国内尚处于起步阶段。相关文献基于图论以及文献[3]等提出的4个路网位置规则, 通过OD对来为交通路网上的监测器进行布设。部分文献会基于布设前是否有初始监测节点进而采取部署方案。

目前对于移动污染源遥测部署方面的相关研究较少, 文献[4]和文献[5]等都将监测器选址问题转为求超图的最小截面。最近有文献[6]通过不平衡节点来进行遥测网络部署。但上述文献在考虑交通路网结构的时候, 大部分并未考虑现实路网中存在一定的转弯限制, 而该情况可能导致某些路段的车流量减少, 以及车辆行驶路线的改变。这些可能会导致在某些路段部署监测器的必要性降低, 并可能影响整体的监测器数量。本文在基于路网中的闭合路径与开放路径的条件下引入了转弯限制, 能够进一步减少监测器冗余, 降低成本, 同时更全面的对城市路网及城市交界处进行监测, 并在文章最后加入覆盖率作为监测效果的衡量指标。该方法作为遥测监测器布设优化具有较强的适应性以及现实意义。

1 部署条件与假设

1.1 交通路网描述

交通路网是由多个道路路口以及其相连的路段组成。本文需要将其抽象成有向图进行研究。一般来说一个交通路网转化有向图后可以用 $N(V, E)$ 来表示。其中 V 代表有向图中的节点集合, 即实际路网中的路口; E 代表有向图中的各个边集合, 即实际路网中的路段。 $|V|$ 和 $|E|$ 分别表示节点数目以及路段数。对于整个路网模型可以表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} N = (E, V, R) \\ E = \{< v_x, v_y > | v_x, v_y \in V, \text{且 } L(v_x, v_y)\} \\ V = \{< e_1, e_2 > | L(e_1, e_2), \text{其中 } e_1, e_2 \in E, \text{且 } e_1 \text{ 与 } e_2 \text{ 存在公共节点}\} \\ R = \{< a, b > | L'(a, b), \text{其中 } a, b \in V, \text{且 } a \text{ 与 } b \text{ 存在公共节点}\} \end{array} \right.$$

其中: N 代表交通路网。 E 代表路段集合。其元素是有向对 $< v_1, v_2 >$, $L(v_1, v_2)$ 表示由节点 v_1 到节点 v_2 存在一条有向通路。如图1所示, 若 v_1, v_3 分别表示节点1和节点3, 那么 $< v_1, v_3 >$ 则表示节点1到节点3有一条有向路段 a 。

V 是关于道路网络中两条路段连接方式的信息集合, 有向对 $< e_1, e_2 >$ 表示连接路段 e_1 到路段 e_2 的道路节点, $L(e_1, e_2)$ 代表路段 e_1 可通行到路段 e_2 。如图1所示, 有向路段 c 可行驶至有向路段 b , 则 $< c, b >$ 代表 c 路段到 b 路段的节点3。

R 表示转弯限制的集合。 $L'(a, b)$ 表示从有向路段 a 无法到达有向路段 b , 即转弯限制。如图1所示, 若 R 存在 $< g, e >$, 则表示在可转弯路口节点3禁止从有向路段 g 右转驶入有向路段 e 。

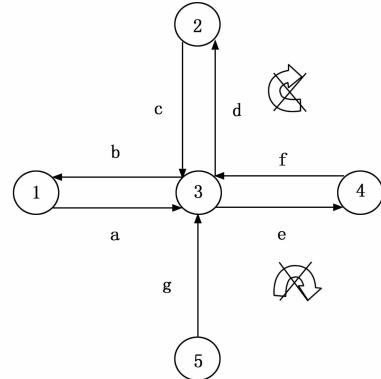


图1 路网转弯限制示意图

1.2 监测器部署相关数学公式

本文中, 为了使监测器投资成本最小化, 在基于文献[3]提出的整数规划公式思想上, 采用相关的数学约束, 以确保在车辆排放遥感监测器部署过程中, 所有选定的路径都符合道路交通规则。具体如下:

$$\min c = \sum_{a \in A} c_a \quad (1)$$

其中: c_a 是二进制决策变量, 表示在路段 a 上是否安装监测器, 若安装, 则 $c_a=1$; 否则, $c_a=0$:

$$\sum_{a \in A} \beta_s a^p c_a \geqslant 1 \quad \forall p \in P, s \in S_p \text{ 且 } s \text{ 满足所有转弯限制} \quad (2)$$

$$x_a b \leqslant 1 - \delta_a b^t \quad \forall t \in T, (a, b) \in R_t \quad (3)$$

$$c_a \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A; x_a b \in \{0, 1\} \quad \forall (a, b) \in \text{路径中的所有可能转弯} \quad (4)$$

对于公式(2)中 P 表示所有 O-D 对的集合, S_p 代表 O-D 对 P 所有可能路径的集合。如果路段 a 在路径 s 上, 则 $\beta_s a^p = 1$; 否则 $\beta_s a^p = 0$ 。这样确保了任意路径 s 必须覆盖至少一个安装有监测器的路段 a 。而公式(3)确保了在路径中不会出现任何被禁止的转弯, 其中 T 表示所有有转弯限制的节点集合; R_t 表示在节点 t 上

的受限转弯集合，具体为从路段 a 到路段 b 的转弯不允许，当在节点 t 上不允许从路段 a 转到路段 b ，则 $\delta_a b' = 1$ ；否则 $\delta_a b' = 0$ 。若路径中包含路段 a 到路段 b 的转弯，此时 $x_{ab} = 1$ 否则为 0。

1.3 假设条件

同时，针对存在转弯限制的排放监测器选址部署问题，进一步考虑到实际交通路网的情况，本文还提出了以下假设：

- 1) 车辆从某一交通节点出发后，不存在到达中途某个路段后停止。车辆只存在驶回原先的出发点或直接驶出路网，即车辆路径为闭合路径与开放路径两种。

- 2) 每个若包含转弯限制的路网节点，只存在限制右转、限制左转两种情况。

- 3) 对于每条路段无论长短，只需布设一个排放监测器就可以监测到整条路段上通过的车辆排放信息。

- 4) 为防止频繁地捕捉到短途车辆的重复数据，减少冗余，规定车辆在整个行驶过程中经过的路段大于两条。

2 基于转弯限制的排放监测器部署方法

在本节中将会对基于转弯限制的排放监测器部署方法步骤进行描述。在之前的假设中已经声明：车辆在路网完成自己的行驶路程中，只存在重新驶回出发点以及驶出路网两种情况，在路网结构中，相应的两种情况对应路径分别为闭合路径和开放路径。其中闭合路径即路网抽象为有向图后的有向回路，在有向回路中某路段放置一个监测器后即可监测到满足该闭合路径的车辆的排放信息。

需要注意，原本路网中的有向回路在存在转弯限制的情况下，并不一定能够再次构成回路，如图 2 所示。

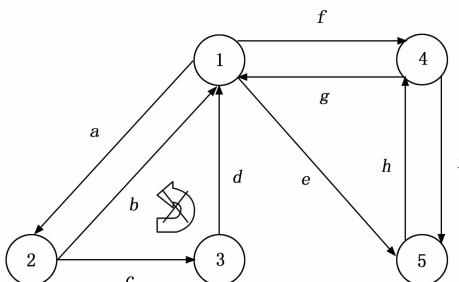


图 2 转弯限制对回路的影响

图 2 中有向路径 $a \rightarrow c \rightarrow d$ 原本可以构成一条回路，但是在节点 3 存在由路段 c 禁止转向路段 d 的转弯限制信息，导致原有的回路不存在。这时候需要重新考虑原本路网中的回路与非回路。

2.1 相关概念定义

2.1.1 平衡节点与不平衡节点

参考以往研究的文献 [7]，可以得知：在路网中车

辆从某节点驶出后再次回到该节点，进入该节点的流量总和等于从该节点流出的流量总和。简言之，该节点上的交通流量是守恒的，称为平衡节点。对于经过某节点驶出路网的车辆，该节点的进入流量与流出流量不相等，则称为不平衡节点。这种情况可能出现在一些特殊的交通节点，比如某些边界节点（流入或流出网络的节点）。

对于路网中所有路段 $\forall e \in E$ ，将其路段上的流量记为 $L(e)$ ，将以节点 v 作为起点的路段集合记为 $E^+(v)$ ，以节点 v 作为终点的路段集合记为 $E^-(v)$ 。故图 N 中所有节点 v 存在两种情况。

- 1) 平衡节点，流入量与流出量相等：对于路网中所有路段 $\forall e \in E$ ，将其路段上的流量记为 $L(e)$ ，将以节点 v 作为起点的路段集合记为 $E^+(v)$ ，以节点 v 作为终点的路段集合记为 $E^-(v)$ 。故图 N 中所有节点 v 存在两种情况。

平衡节点，流入量与流出量相等：

$$\sum_{e \in E^+(v)} L(e) = \sum_{e \in E^-(v)} L(e) \quad (5)$$

2) 不平衡节点，流入量与流出量不相等：

$$\sum_{e \in E^+(v)} L(e) \neq \sum_{e \in E^-(v)} L(e) \quad (6)$$

2.1.2 虚拟节点

为了实现最大流思想，通过构建虚拟节点来建立源点和汇点。对于某节点有两个相邻节点并且与每个相邻节点都存在双向回路，如图 3 (a)。那么可以将其转化为图 3 (b) 的有向图，转化后图 3 (b) 中的节点 1 可看作源点，节点 3 看作汇点，而节点 2、4 均为虚拟节点。

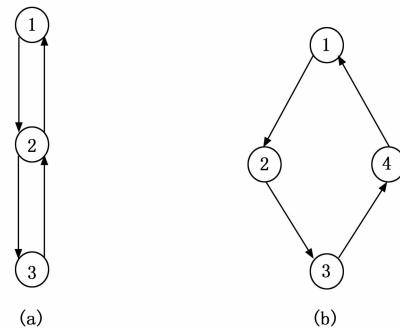


图 3 示意图

2.2 部署方法

2.2.1 闭合路径与开放路径的处理

在整个交通排放监测器部署中，将闭合路径（回路）与开放路径（非回路）分离处理是所有工作的关键前提。对于简单路网来说，回路与非回路的区分非常容易。但是目前的城市路网大多庞大复杂，想通过观察直接区分非常困难。此时就需要相应的算法对其进行分离识别。而同时介于现实交通路况的复杂多变，路段的禁

行可能会导致某些路段的监测器浪费从而造成冗余, 故需要考虑节点的转弯限制对有向回路的影响, 也能使最终的部署方案在实际应用中更加灵活和贴合实际。表 1 的算法能够在考虑转弯限制的情况下有效分离有向回路与非回路。

具体过程如下:

1) 首先, 根据交通路网结构以及交通流量方向, 将路网抽象成有向图。并根据有向图及其弧集和转弯限制集合, 初始化 3 个数组 edge [] (未确定的弧)、edgeC [] (有向回路弧集) 和 edgeT [] (有向非回路弧集), 并设置计数器 t 为 0。

2) 从有向图中的每条弧 $edge [i]$ 出发, 以其终点 $p = edge [i]. p2$ 为起点, 沿着有向图的弧和邻接顶点遍历有向路径, 直到回到起始点或不能继续访问下一个顶点为止。若回到起始点 (即构成有向回路), 则检查该回路是否符合转弯限制。

3) 在判断回路时, 遍历回路中的每一对弧, 如果弧符合转弯限制, 则记录该回路中的所有弧到 edgeC [], 并依据定理和推论更新 edge [] 和计数器 t 否则, 记录该弧到 edgeT [].

4) 若未找到回路或回路不符合转弯限制, 则回退到上一顶点, 并继续搜索和拓展新的有向路径。重复此过程, 直到遍历完所有的顶点和路径。

5) 当回到起始顶点并且已无新的路径可供搜索时, 选择下一条未遍历的弧, 重复 2)、3)、4) 步骤, 直到处理完所有的弧, 最终得到有向回路弧集 edgeC [] 和有向非回路弧集 edgeT [].

表 1 基于转弯限制的有向回路非回路分离

算法 1: TR-DAS

```
// 输入: G = (V, A), R
// 输出: 有向非回路集 edgeT[] 和有向回路集 edgeC[]

// 定义 3 个数组
int edge[]; // 未确定的弧
int edgeC[]; // 能够找到回路的弧
int edgeT[]; // 不能找到回路的弧
int t = 0; // 计数器
Node * p; // 节点指针
bool get; // 回路标记

// 转弯限制集合, 元素是有序对 <a, b>
Set<Pair<int, int>> R; // R 中的 <a, b> 表示从弧 a 到
弧 b 有转弯限制
// 处理每一条弧
while (t < n) {
    p = edge[i]. p2; // 从弧的终点开始
    get = false;
    // 搜索回路
    do {
        ... (algorithm logic)
    }
}
```

```
if (p == edge[i]. p1) { // 找到回路
    // 检查回路是否符合转弯限制
    if (符合转弯限制(p, edge[i])) {
        记录回路上的弧到 edgeC[];
        更新 edge[], t;
        get = true;
        依据定理和推论更新 edgeC[], edge[], t;
        break;
    }
} else if (可以继续搜索) {
    p = 下一个节点;
} else {
    p = 前一个节点;
}

if (!get && p == edge[i]. p2) { // 未找到回路
    记录弧 i 到 edgeT[];
    更新 edge[], t;
    break;
}
} while (p != edge[i]. p1);

// 检查回路是否符合转弯限制
bool 符合转弯限制(Node * p, Edge currentEdge) {
    // 遍历当前回路中的每一对弧
    for (每一对弧 <a, b> in 回路) {
        // 如果 <a, b> 在转弯限制集合 R 中, 则不符合限制
        if (R.contains(<a, b>)) {
            return false;
        }
    }
    return true;
}
```

2.2.2 有向回路部署

针对闭合路径, 基于文献 [8] 的启发, 在分离对应的有向回路后, 将采用结合虚拟节点和最大流的方法来对于监测部署方案进行求解。对于闭合路径中的平衡节点, 可以按照之前的定义引入虚拟节点, 构建源点和汇点, 应用于 O-D 对从而简化了对于 O-D 对的选取。并在处理转弯限制的基础上, 利用最大流算法来得到最终的部署方案。相关伪代码如表 2、表 3 所示。

表 2 考虑转弯限制的最大流算法

算法 2: MF-CMS

```
// 输入: G = (V, A), W, R
// 输出: M (监测器位置集合)
// 初始化监测器位置集合 M
M = []
// 处理转弯限制并更新网络 G
for each (a, b) in R do
    移除边(a, b) from G
end for
```

```

// 对每个 O-D 对进行最大流分析
for each (O, D) in W do
    初始化流量 f(a) = 0 对所有 a ∈ G.edges
    G_residual = G.copy()

    while (存在从 O 到 D 的增广路径 p 满足转弯限制 in G_residual) do
        min_capacity = min(G_residual[a] for a in p)
        for each 边 a in p do
            f[a] += min_capacity
        更新边 a 的残余容量(G_residual, -min_capacity)
        if a 是反向边 then
            更新反向边的残余容量(G_residual, +min_capacity)
        end if
        end for

        // 处理已达到最大容量的边
        for each 边 a in p if f[a] = 最大容量(a) then
            删除边 a from G_residual

        // 计算最大流后的割集 (C, T)
        C = 从 O 可达的节点集合 in G_residual
        T = V - C
        // 在割边的端点添加监测器
        for each 边 (u, v) in G where u ∈ C and v ∈ T do
            M.append(u) or M.append(v)
        end for
        end for
    end while
end for
return M

```

表 3 路径优化算法

算法 3: TR-LS-DFS

```

// 输入: G = (V, A), M, R
// 输出: updateM

updateM = M

for arcR in M:
    随机选择 arcR
    从 updateM 中删除 arcR

    for v in V:
        if 存在新回路 C 满足:
            - C 使得某节点 v 的度数 > 2
            - C 不违反转弯限制 R
        then
            将 arcR 添加回 updateM
            break

        if arcR 未被添加回:
            保持其删除状态
return updateM

```

通过最大流分析来确定交通路网中需要安装监测器的位置，以确保对关键的交通排放进行监测。算法的具体过程如下：

首先，算法处理图中的转弯限制，并将违反转弯限制的边从网络 G 中移除。接下来，对于每一个起点—终点对 (O, D) 进行最大流分析。在分析之前，将图中每条边的流量 $f(a)$ 初始化为零，并创建网络的残差图 $G_residual$ ，以此来记录在最大流量计算过程中每条边的剩余容量。在每次迭代中，算法会搜索从起点 O 到终点 D 的一条增广路径 p ，该路径不仅必须满足从 O 到 D 的连通性，还需要满足转弯限制条件。对于找到的路径，计算其最小容量，并更新路径上每条边的流量值。此时，如果路径中的某条边达到其最大容量，算法会从残差图 $G_residual$ 中移除该边。之后，算法通过残差图计算最大流量后的割集 (C, T) ，其中 C 是从起点 O 出发可以到达的节点集合，而 $T = V - C$ 则是与 C 不连通的节点集合。算法在这些割边的端点上放置监测器，以确保能监测到所有关键路径。对于所有 $O-D$ 对 W ，算法以相同的方式重复上述操作，直到所有路径都被处理完毕，最终返回包含所有监测器位置的集合 M 。

在实际交通路网中，极少有车辆会频繁地在两个节点之间来回穿梭（即两个节点之间形成的直接循环），而在这类路径上布设监测器容易造成冗余，导致资源浪费。并且若在路网中如果遇到大量的简单回路，算法可能会陷入无意义的循环，反复处理这些低价值的路径，尤其在有转弯限制的情况下，原本含有较多节点的回路，有可能只存在两个节点直接来回的路径。故在之前考虑转弯限制的最大流求解算法的基础之上，做出相应的优化来避免类似路径。先从初始监测器集合 M 中随机选择一个监测器 $arcR$ ，并将其从更新后的集合 $updateM$ 中移除。接下来，对于交通网络中的每个节点 v ，算法检查是否因为删除了 $arcR$ 而形成了新的回路 C 。该回路需要满足两个条件：一是使某节点 v 的度数超过 2，二是不违反预定的转弯限制集合 R 。如果检测到这样的回路，算法会将刚才移除的监测器 $arcR$ 重新添加回 $updateM$ 中，以维持监测器对关键路径的覆盖。

如果没有发现符合条件的回路，则保持 $arcR$ 被删除的状态，并继续随机选择和删除其他监测器，直到遍历了初始集合 M 中的所有监测器。通过这样的迭代过程，算法最终返回一个经过优化的监测器位置集合 $updateM$ ，其中保留了足够的监测器以监控路网中关键路径，但去除了不必要的监测器，从而实现了监测器数量的减少和资源的优化利用。将得到最终的部署集合记为 M_1 。

2.2.3 有向非回路部署

通过算法将闭合路径即有向非回路分离出来后，对

其的部署只需要单独进行即可。根据上述假设中, 路径中只存在闭合路径和开放路径, 针对行驶的交通路径为闭合路径的部署方案 M_1 已经获取。那么对于开放路径即有向非回路的部署方案 M_2 , 在驶离路网的交通路段上进行部署即可。

可以得到部署集合 $M = M_1 + M_2$, 即为最终的车辆尾气排放监测器的部署方案。从而达到想通过尽可能少的监测器数量, 实现对整个交通路网中机动车尾气排放的有效监控的目的。

3 实验结果与分析

该部分将对 4 个模拟路网以及现实中杭州东站附近的交通路网都进行部署实验。并将部署方案与以往的研究^{[4]、[7]、[9-10]}进行对比, 以此来验证方法的有效性。并为了能够更加直观的展示部署方案的效果, 将加入了覆盖率 F 来表示排放监测器的效果。具体公式如下:

$$F = \frac{D_f}{D} \times 100\% \quad (7)$$

其中: D_f 表示所布设方案中监测器所能够覆盖监测到的路段数, D 则代表整个路网的所有路段数。

3.1 模拟交通路网

在这一部分将采用 4 个模拟的由简单到复杂的交通路网并对其抽象成图 4 (a) ~ (d) 的图网络进行实验。

给出了图 (a) ~ (d) 4 个模拟交通路网, 同时将本文方法与相对应的另外 4 种方法进行对比。其中文献 [7], 文献 [4], 文献 [9] 以及文献 [10] 的方法分别简称为 GMD、D-HMS、PHSC、HTC-MO。最终得到的不同部署方案如表 4 所示, 并通过图 5 柱状图展示。

可以看出在简单网络中, 上述 5 种方法的效果并无相差, 但是对于相对复杂的网络, 本文所提到的方法的效果有着比较明显的优势。

对图 4 (a)、图 4 (b)、图 4 (c)、图 4 (d) 依次进行分析, 我们可以看到对于图 4 (a) 这类简单型路网来说, 包括本研究方法在内的 5 种方法对应监测器部署数量均为 2; 而本研究方法在后续不同复杂程度的路网图 4 (b) ~ (d) 中均能达到最少的监测器数量, 分别为 6、10、16。

另外 4 种方法中, 文献 [4] 团队基于堆栈的求超图最小截面的方法也是在车辆排放监测器部署定位方面研究里较为创新的一种方法, 所得到的监测器数量分别为 2、7、13、18, 效果处于中段水平。PHSC 算法在效果方面并不是特别优秀, 尤其在面对大型复杂网络的时候, 效果相比于其他 4 种方法均处于末位, 比如应用于图 4 (d) 网络时, 监测器布设数量达到了 22 个, 对比本文方法的 16 个监测器有着较大的差距。

虽然在存在转弯限制的前提下, 有一些原本的回路转而变成了有向非回路, 会在一定程度上少量的增加监

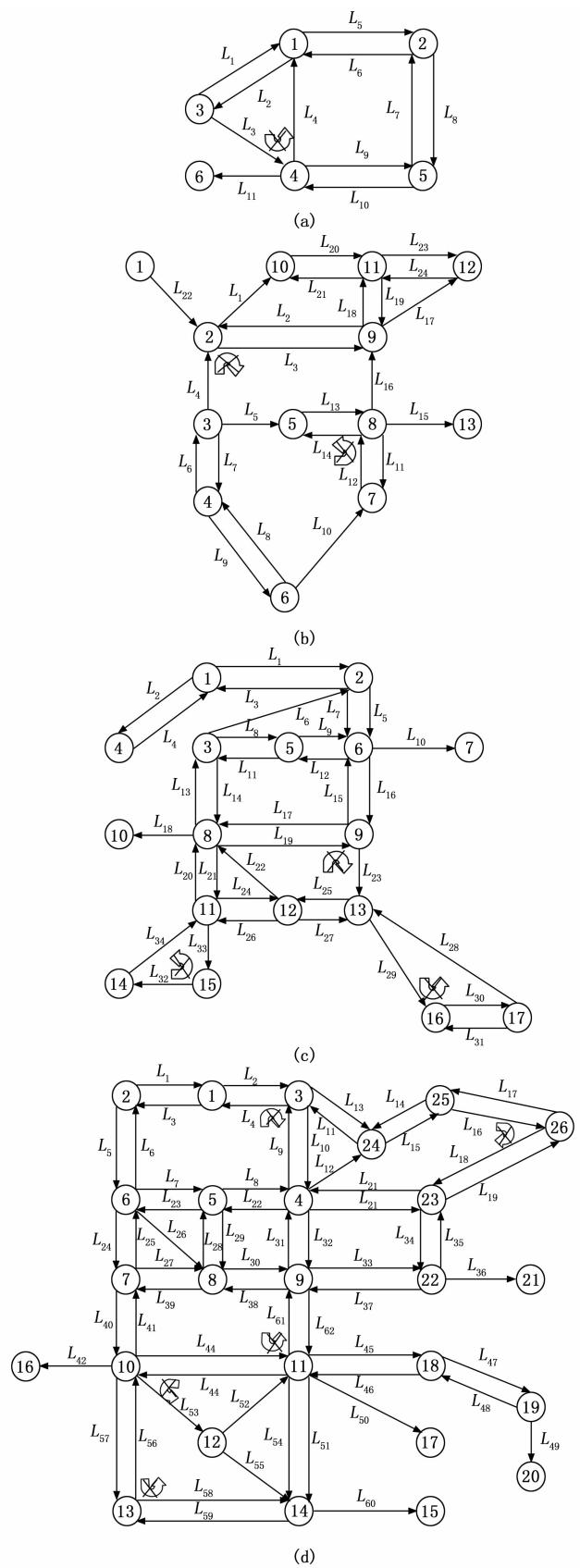


图 4 模拟交通路网

测器数量, 但是对于整个路网排放监测器定位更加具有现实意义, 并且能够灵活的应对路网中的突发状况。同

表 4 不同部署方案的部署结果

	路网(a)	路网(b)	路网(c)	路网(d)
本文方法	(L5, L11)	(L1, L7, L11, L15, L16, L23)	(L2, L5, L10, L14, L16, L18, L22, L23, L29, L33)	(L2, L6, L7, L10, L14, L19, L21, L23, L31, L36, L38, L42, L43, L49, L56, L60)
GMD	(L2, L8)	(L2, L3, L12, L13, L16, L20, L24)	(L3, L6, L9, L11, L14, L19, L25, L26, L28, L33, L34)	(L1, L5, L8, L10, L12, L16, L21, L24, L30, L35, L39, L43, L46, L48, L54, L57, L61)
D-HMS	(L5, L9)	(L4, L5, L9, L15, L17, L19, L20)	(L4, L5, L8, L11, L15, L18, L19, L24, L26, L29, L30, L32, L33)	(L1, L6, L10, L13, L15, L18, L23, L27, L33, L36, L41, L45, L49, L52, L57, L59, L60, L62)
PHSC	(L4, L7)	(L1, L3, L5, L8, L11, L13, L16, L20, L23)	(L1, L5, L6, L9, L10, L14, L17, L19, L22, L23, L25, L27, L28, L30, L32, L34)	(L3, L4, L8, L12, L17, L19, L23, L25, L26, L31, L34, L37, L40, L44, L46, L49, L50, L51, L54, L56, L59, L61)
HTC-MO	(L3, L9)	(L1, L4, L7, L10, L15, L16, L18, L22)	(L2, L4, L5, L9, L15, L18, L21, L23, L24, L26, L29, L30, L32, L33)	(L1, L5, L9, L10, L13, L14, L18, L20, L22, L27, L30, L33, L36, L41, L42, L44, L47, L52, L53, L58)

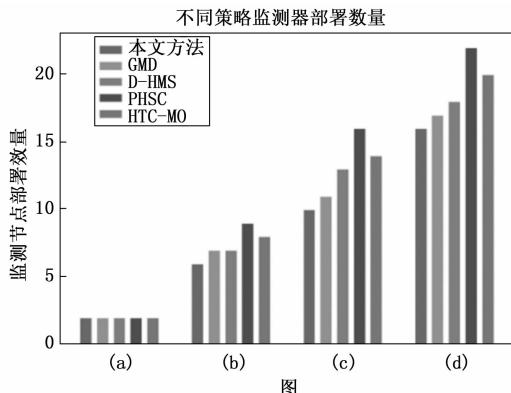


图 5 不同部署策略对应部署数量

时部署点的数量并不能完全代表方法的好坏，因此还通过公式(7)得到图 6 的覆盖率来进一步验证 5 种方法的差异性。

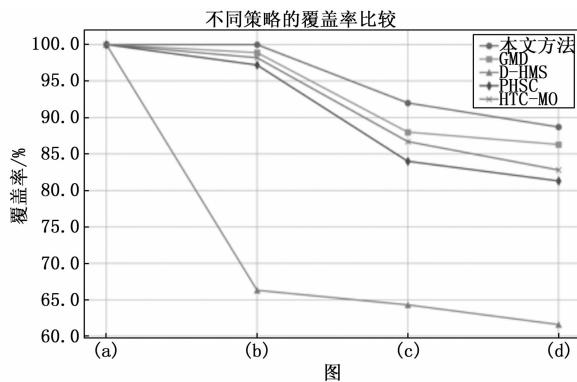


图 6 不同策略的覆盖率

从图 6 依旧可以看出对于较为小型简单网络来说，5 种方法的覆盖率都能够达到 100%，但是对于稍为复杂网络，相比于部署方案中监测器数量的差异，覆盖率方面的差距相对更大。由结果可以看出，D-HMS 方法在随着路网复杂程度的增加时，覆盖率由 100% 骤减到 66.3% 并持续下降，也是因为 D-HMS 虽然采用了图转

换超图的方法，但是没有考虑有向非回路，从而一定程度上导致了覆盖率的下降。相反，本文方法与 HTC-MO 有着较为突出的表现。因此仅针对覆盖率而言，本文方法与 HTC-MO 是最佳的部署方案。

综合上述 4 个模拟路网的实验来看，本文所提出的算法在监测器数量以及覆盖率方面都优于其他 4 个定位方法。

3.2 真实交通路网

在该部分将对现实杭州东站的路网进行抽象，如图 7 所示。因为杭州东附近自身乘客流量以及车流量较大，对此也会添加一定的转弯限制来贴合实际，并同样的会使用上述 5 种方法对抽象后的路网图进行部署方案的求解。



图 7 杭州东站附近路网

如图 8 所示，是抽象完成的路网。并在该抽象的路网上再次采用上述 5 种方法对部署方案进行求解。最终的监测器部署结果和覆盖率如图 9~10 所示。

由图可以看出，PHSC 方法在该抽象路网下覆盖率 为 77.68%，但部署数量达到了 38 个，与其余 4 种方法得到的部署数量差异较大。虽然 D-HMS 的部署数量在 5 个方法中也有着一定的优势，只需部署 33 个，可是覆盖率并不令人满意，只达到了 61.93%。另外两种方法 GMD 和 HTC-MO 在部署数量和覆盖率也能达到相

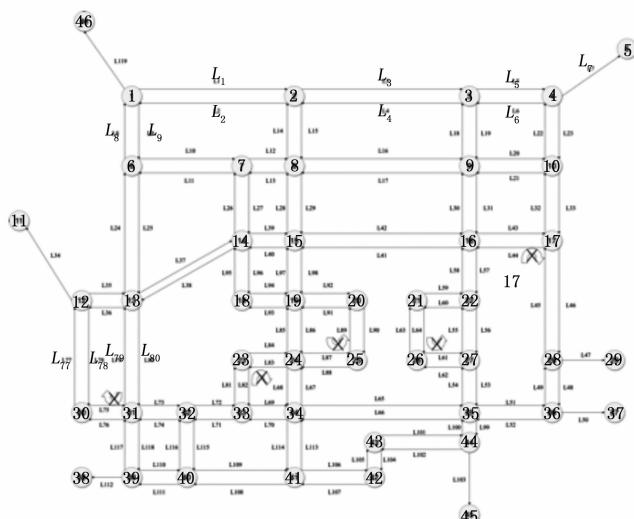


图8 杭州东站附近路网抽象图

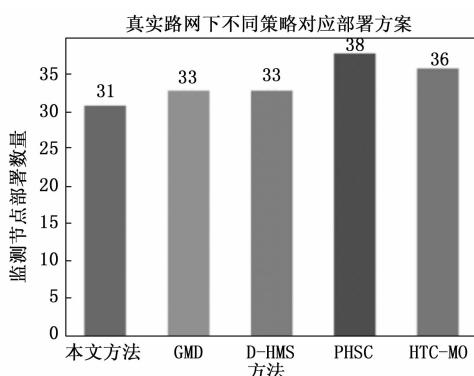


图9 杭州东站不同策略部署方案

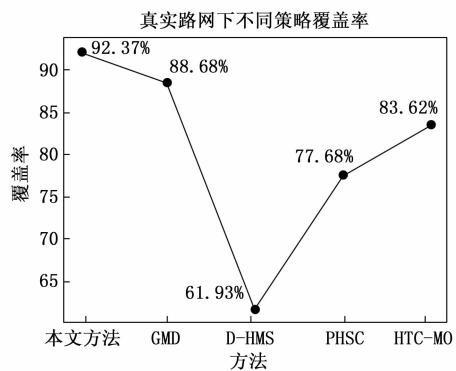


图10 覆盖率

对理想的结果, 但本文方法不仅在保持部署数量最少的31个情况下, 覆盖率达到了90%以上。

因此, 本研究方法能够很好的实现用尽可能少的监测器数量达到覆盖率尽可能最优的效果。

4 结束语

车辆排放监测不仅是环境保护的基石, 也是维护公共健康的重要举措。精准地辨识并定位路网中那些排放

超标的车辆, 成为了这场环保战役中的关键一环。鉴于监测设备高昂的成本, 如何以有限的资源实现高效的覆盖, 成为了亟待解决的问题。这不仅要求在有限的监测点位上做出最优化的选择, 还需确保这些布点能够充分捕捉到高排放车辆的行踪, 无论它们行驶在哪条道路上。

因此在构建监测网络时, 考虑交通网络的复杂性的同时还将道路网中的转弯限制考虑进来, 并且路网中交界处和边缘区域通常是主要交通干道的交汇点或城市进入和退出的关键节点, 这些地点车辆会存在频繁的起停、加速和减速, 所以交界处和边缘区域往往是高排放的热点区域, 也需要着重去考虑。针对此问题可以将车辆驶出交界处和边缘区域的路径视为有向非回路, 对整个路网进行回路与非回路的分离, 并通过虚拟节点构建源点与汇点从而通过最大流算法对监测器布设进行操作。

在最后实验中还通过与其他4个已有方法进行对比, 从而进一步验证了本文方法的有效性和实用性。结果表明该方法不仅适用于简单的小型网络, 同样对于复杂的大型网络也有非常不错的表现。这样便可以通过较为合适的方式来控制排放监测器的数量, 并且保证道路车辆上的排放得到有效的监控。

交通路网的复杂性与可变性不止于此, 面对监测器故障等更多约束条件将是下一阶段的研究方向。

参考文献:

- [1] ZHU N, FU C, ZHANG X, et al. A networksensor location problem for link flow observability and estimation [J]. European Journalof Operational Research, 2022, 300 (2): 428 – 448.
- [2] GENTILI M, MIRCHANDANI P B. Locating sensors on traffic networks: Models, challenges and research opportunities [J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2012, 24: 227 – 255.
- [3] YANG H, ZHOU J. Optimal traffic counting locations for origin-destination matrix estimation [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1998, 32 (2): 109 – 126.
- [4] YANG Y, LI Z, KANG Y. A location strategy for traffic emission remote sensing system based on bus routes [C] // Dalian, China: 2017 36th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2017: 9988 – 9992.
- [5] KANG Y, LI Z, ZHAO Y, et al. A novel location strategy for minimizing monitors in vehicle emission remote sensing system [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 48 (4): 500 – 510.

(下转第301页)