

信号控制交叉口机动车排放源强计算方法

黄艳玲, 蔡铭, 余志, 徐伟嘉

(中山大学智能交通研究中心, 广东 广州 510275)

摘要:在 CAL NE4 线源扩散模型的基础上, 考虑信号控制对交叉口机动车排放的影响, 对机动车排放源强计算方法进行了改进。改进方法可反映出信号控制对交叉口处污染物排放的影响, 但定量分析算法改进的效果有待观察。

关键词:机动车; 排放; 源强计算; 信号交叉口

中图分类号: X823 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006 - 2009 (2008) 06 - 0054 - 05

A Calculation Method for Vehicle Emission Source Intensity at Signalized Intersection

HUANG Yan-ling, CAI Ming, YU Zhi, XU Wei-jia

(ITS Research Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract: Considering the effect of traffic signal control, the calculating method for the vehicle emission on signalized intersection was improved based on the CAL NE4 source intensity model. The new method showed the traffic signal control related to vehicle pollutions but the improving effect for the quantitative analysis needs to be confirmed in additional studies.

Key words: Vehicle; Emission; Source intensity calculation; Signalized intersection

机动车排放是城市大气污染的主要贡献之一^[1]。2003 年全国城市环境空气质量监测结果表明, 广州、北京、上海等机动车排放的 CO、HC、NO_x、细颗粒物所占平均比例为 80%、75%、68%和 50%^[2]。城市道路是机动车排放污染物的主要场所, 道路交叉口作为车流交汇处更是环境污染容易超标的热点地区。国内外对交叉口机动车尾气污染的模拟有许多成熟的模型, 美国 EPA 的 CAL NE 系列模型^[3] (如 CAL NE3, CAL3QHC, CAL3QHCR), 加州大气资源部的 CAL NE4 模型^[4], 李铁柱^[5]对风向与街道不同夹角情况下的交叉口污染物扩散进行了研究, 金陶胜等^[6]从交通拥挤特性和街道交叉角度等方面建立了适用于道路交叉口的扩散模型。

现有扩散模型根据小时或日均车流量和平均车速计算排放源强, 忽略了信号控制下车辆加速、减速和怠速等工况导致的机动车尾气排放的空间分布不均匀性^[7]。现在 CAL NE4 线源扩散模型^[8]基础上, 考虑车辆加速等的额外排放, 同时根据交

叉口信号配时对机动车排放源强进行计算。

1 线源扩散模型

CAL NE4 扩散模型根据接受点与路段的位置及风向 - 道路夹角, 将交叉口道路划分为一系列长度不等的路段单元^[8], 见图 1。

每个路段单元等效成为与风向垂直的有限线源, 单条道路对接受点的质量浓度贡献等效为所有有限线源对接收点质量浓度的贡献之和。计算单条道路的质量浓度贡献公式为^[9]:

$$c = \frac{1}{\sqrt{2}} \prod_{i=1}^n \int_{z_i^k = -CNL}^{CNT} \left[\exp \left\{ \frac{-(Z - H + Z \times k \times L)^2}{2 z_i^2} \right\} + \exp \left\{ \frac{-(Z + H + Z \times k \times L)^2}{2 z_i^2} \right\} \right] \times_{j=1}^6 (WT_j \times QE_j \times$$

收稿日期: 2008 - 05 - 09; 修订日期: 2008 - 10 - 25

基金项目: 2007 年广东省科技计划基金资助项目 (2007B030102003)

作者简介: 黄艳玲 (1984—), 女, 广东佛山人, 硕士研究生, 从事交通环境方面研究。

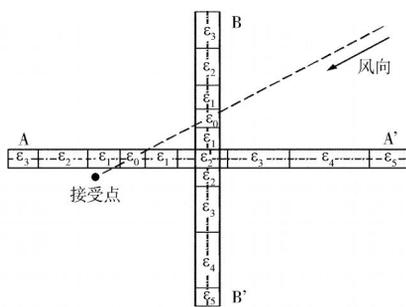


图 1 交叉口路段单元划分

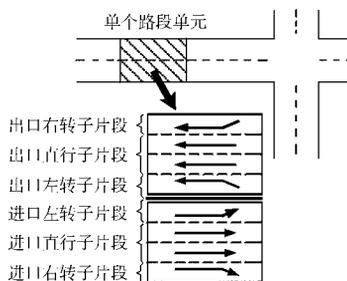


图 2 单个路段单元的子片段划分

$$PD_{ij}) \} \quad (1)$$

- 式中: n ——单元格的数目;
- CNT ——地面反射的次数;
- L ——混合层的高度;
- σ_i ——第 i 个有限源线在垂直方向的扩散参数;
- QE_j ——第 i 个有限线源的中心子单元的排放强度;
- WT_j ——第 i 个有限线源的第 j 段子单元的排放强度权重因子。

组成交叉口的两条道路对接受点的质量浓度贡献总和即接受点的污染物质量浓度。

2 改进的排放源强计算方法

现有的扩散模型将构成交叉口的道路视为平均排放的线源,未能考虑车辆在交叉口处的排放特征。现在上节所述的 CAL NE4 扩散模型划分的路段序列基础上,对每个路段单元的排放源强计算方法进行修正。考虑信号控制影响下车辆在各路段上的行驶特征,对路段进一步划分,把排放源强分为绿灯时间和红灯时间 2 种类型,并以交叉口信号绿信比(有效绿灯时间与信号周期时长的比值)为权重对两者进行加权平均^[10],计算每个路段单元的排放源强。

2.1 路段单元的子片段划分

在 CAL NE4 扩散模型划分的路段序列基础上,考虑单个路段单元在多相位信号控制下排放源强的空间分布不均匀的情况,根据车流方向和车道功能(直行、左转、右转),将单个路段单元划分为 6 个子片段,见图 2。

每个子片段可含有 1 条或多条车道,单个子片段中车辆的行驶行为具有一致性。考虑信号控制对单个子片段排放的影响,将其排放源强分为绿灯

时间排放源强和红灯时间排放源强 2 种类型。

2.2 单个子片段绿灯时间排放源强

绿灯时间排放源强指单个子片段内车辆一直处于有效绿灯时间状态下,每小时排放污染物的总质量。绿灯信号的实际显示时段与有效绿灯时间区段是错开的,有效绿灯时间的起算点滞后于绿灯实际起点,终止点也滞后于绿灯实际结束点^[10]。即有效绿灯时间不包括信号变换时车辆的启动时间,车辆在有效绿灯时间内都为以正常速度行驶的状态。计算单个子片段的绿灯时间平均排放源强的公式为:

$$Q_g = N_l \times N_c \times q \quad (2)$$

式中: Q_g ——单个子片段绿灯时间排放源强, mg/h;

N_l ——子片段包含车道数;

N_c ——每个小时包含的信号周期数, h^{-1} ;

q ——在单个信号周期内,一条车道中车辆的排放量总和, mg。

式中 q 由下式计算:

$$q = E_v \times N_g \times \frac{L_{HLS}}{V} \quad (3)$$

式中: E_v ——每辆车正常行驶速度下的排放率, mg/s;

N_g ——计算车道绿灯时间内每辆车每周期的平均到达率;

L_{HLS} ——路段单元长度;

V ——正常行驶速度;

$\frac{L_{HLS}}{V}$ ——绿灯信号下车辆通过子片段的平均时间, s

2.3 单个子片段红灯时间排放源强

红灯时间排放源强指单个子片段内车辆一直处于非有效绿灯时间状态下,每小时排放污染物的

质量。红灯时间均指一个子片段在一个相位周期内,除有效绿灯时间外的其余时间。与绿灯时间内不同,在红灯时间内,车辆由于受交叉口信号控制的限制影响,会出现多次的减速、停车、加速过程。现参考 CAL NE4 扩散模型^[8]中的交叉口模块对单个子片段的红灯时间排放源强进行模拟。

假设每一辆车的排放量是加速、减速、怠速、正常行驶 4 部分排放量的总和。计算单个子片段每小时的红灯时间排放源强公式为:

$$Q_r = N_l \times \sum_{i=1}^4 q_i \quad (4)$$

式中: Q_r ——单个子片段绿灯时间排放源强, mg/h;
 N_l ——子片段包含车道;
 N_c ——每个小时包含的信号周期数, h^{-1} ;
 q_i ——在单个信号周期中,一条车道内所有车辆第 i 种情况下的排放量总和, i 包括加速、减速、怠速、正常行驶 4 种情况, mg

与绿灯时间内不同,单个周期一条车道内车辆的排放量 q 与车道所属路段单元的位置密切相关。如果所属路段单元靠近平均排队长度的末尾,则该车道内车辆的减速排放量较高而加速排放则较少,如果所属路段单元靠近停车线,则排放量情况相反。为计算每种排放量 q_i ,根据车流行驶方向把交叉口分为四条连接(AA', A'A, BB', B'B)。把每个路段单元包含的两个道路横截面称为路段单元的端点,每一个路段单元的端点对应一条连接的起点的距离称为起点距离(D),见图 3。

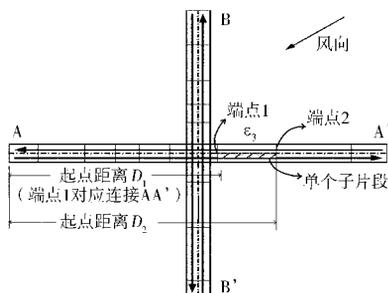


图 3 红灯时间排放源强计算示意

引入以起点距离为自变量的函数——累积扩散因素 (ECUM)^[8],表示计算车道在起点距离范围

内所有车辆由于某种行驶行为而产生的污染物排放量总和 (mg/h),与单个周期一条车道内车辆的排放量 q_i [式 (4) 中 q_i] 对应,将累积扩散因素分为:加速累积扩散因素、减速累积扩散因素、怠速累积扩散因素、正常行驶累积扩散因素 4 种类型。如加速累积扩散因素,表示计算车道在起点距离范围内所有车辆由于加速而产生的污染物排放量总和,等于该车道在起点距离范围内所有车辆数目、车辆加速时间、加速排放率三者的乘积。

由累积扩散因素定义可知,在单个信号周期中,子片段内一条车道内车辆第 i 种情况下的排放量总和 q_i 由下式计算:

$$q_i = ECUM_i(D_2) - ECUM_i(D_1) \quad (5)$$

式中: D_1 、 D_2 ——路段单元两端点的起点距离, m;
 $ECUM_i$ ——第 i 种情况下的累积扩散因素, mg

下面以加速累积扩散因素为例,叙述累积扩散因素的计算方法。当一个路段单元端点的起点距离 (D) 确定后,根据其排队长度、停车线的位置关系,车辆的加速时间有不同的取值,加速累积扩散因素也不同。根据路段单元端点位置的不同,累积扩散因素有以下 3 种情况。

(1) 当端点在排队末尾之前,即起点距离包含在 a 区,见图 4。

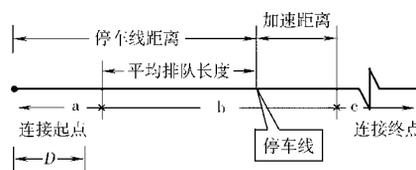


图 4 加速累积扩散因素计算示意

则起点距离内的车辆仍未进入排队,车辆并未经历停车等候,故没有加速过程。此时加速累积扩散因素等于零。

(2) 加速距离指车辆从速度为零匀加速至正常行驶车速所需的距离。当端点在排队长度之内但没有超过停车线外一个完整加速距离的范围,即 b 区,见图 5。

此时计算加速累积扩散因素的公式为:

$$ECUM_i(D) = E_a \times \sqrt{\frac{2}{R_a}} \times \prod_{i=n}^m \sqrt{D' - (i-1)L_v} +$$

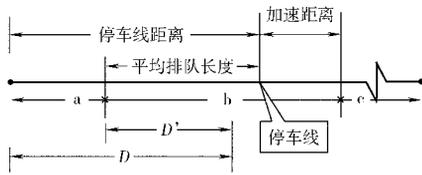


图 5 加速累积扩散因素计算示意

$$E_a \times (n - 1) \times T_a \tag{6}$$

式中: $D' = D - (L_{stop} - L_Q)$

$$n = \max \left\{ \left\lceil \frac{D' - L_a}{L_v} \right\rceil + 1, 1 \right\}$$

$$m = \min \left\{ \left\lceil \frac{D}{L} \right\rceil + 1, N \right\}$$

式中: $ECUM_i$ ——加速累积扩散因素, mg/h ; D ——起点距离, m ; E_a ——加速排放率, mg/s ; R_a ——车辆平均加速度, m/s^2 ; L_v ——平均每辆车头时距, m ; T_a ——车辆以平均加速度从速度为零加速至正常行驶速度所需时间, s ; L_{stop} ——停车线距离, m ; L_Q ——平均排队长度, m ; L_a ——加速距离, m ; N ——排队车辆数。

式中根据运动学公式 $t = \sqrt{2 \times \frac{1}{a} \times s}$ 计算每一辆车在起点距离范围内的加速时间。

(3)当端点超过停车线外一个加速距离的范围,即 c 区,见图 6。

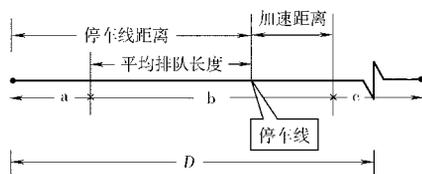


图 6 加速累积扩散因素计算示意

则在整个起点距离内的车辆均能完成完整加速,加速累积扩散因素等于加速排放率、排队车辆数、完整加速时间三者的乘积。

$$ECUM_1(D) = E_a \times N \times T_a \tag{7}$$

减速、怠速、正常行驶累积扩散因素的计算方法与此类似。

2.4 路段单元平均排放源强

计算得到一个子片段的绿灯时间排放源强和红灯时间排放源强。该子片段包含车道的有效绿灯时间为 T_g ,绿灯时间排放源强以绿信比为权重,红灯时间排放源强以 1 减绿信比为权重,对该子片

段的排放源强进行加权平均得到单个子片段的平均排放源强。同一个路段单元的 6 个子片段的平均排放源强之和即为该路段单元的平均排放源强,以下列公式计算。

$$\bar{Q} = \frac{1}{6} \left[Q_{gi} \times \frac{T_{gi}}{T} + Q_{ri} \times \left(1 - \frac{T_{gi}}{T} \right) \right] \tag{8}$$

式中: \bar{Q} ——单个路段单元平均排放源强, mg/h ; Q_{gi} ——一个子片段的绿灯时间排放源强, mg/h ; Q_{ri} ——一个子片段的红灯时间排放源强, mg/h ; T_{gi} ——一个子片段包含车道的有效绿灯时间, s ; T ——信号周期时长, s

3 算例及结果分析

为检验以上排放源强的计算方法,以广州市林乐路-天寿路交叉口为例,模拟其 CO 污染情况。模拟的气象条件为:风速 $1.2 m/s$,正北风,温度为 25 ,大气压为 $1007 Pa$ 。

根据广州市区域信号控制系统 SCATS 系统 2006 年 7 月 22 日检测结果,应用微观交通仿真软件 Paramics 建立路网,对例子交叉口的交通流状况进行仿真,从而获取交叉口的交通流状况。建立的仿真路网见图 7。

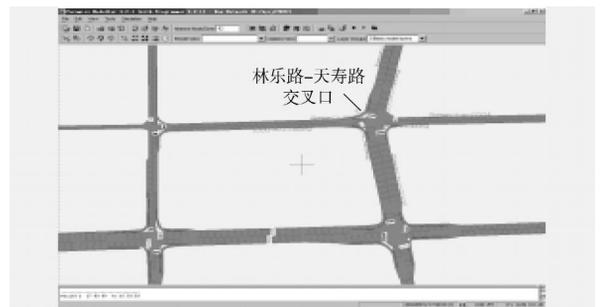


图 7 Paramics 中建立的路网

因为缺乏广州详细排放因子的研究资料,所以在算例中使用了南京 1999 年以 MOBILE-5 模型计算得到的排放因子结果^[11],以此换算出基本排放率和怠速排放率。20 km/h 每辆小汽车的 CO 排放因子为 $77.0 g/km$, 10 km/h 每辆小汽车的 CO 排放因子为 $122.9 g/km$ 。以行驶速度和排放因子的乘积作为排放率,即取基本排放率 (E_{base}) 等于 $427.6 mg/s$,怠速排放率 (E_i) 等于 $314.5 mg/s$ 。根据改进后的源强计算方法得到交叉口 CO 污染结果 ($\mu g/m^3$) 见图 8。

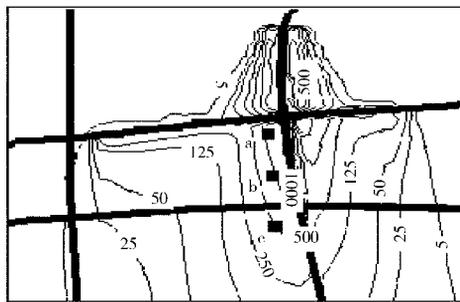


图 8 改进源强算法的计算结果

为分析结果的合理性,同时将交叉口看作 2 个线源叠加计算,得到的未改进源强算法的污染结果 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 见图 9。

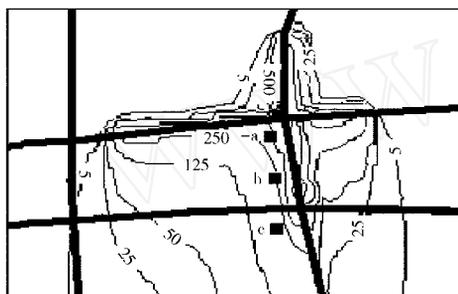


图 9 未改进源强算法的计算结果

例子共模拟计算了 6 643 个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的网格,经过源强算法改进的模拟结果中,有 5 256 个网格的污染质量浓度值比未经源强算法改进的模拟质量浓度值要高。而且越接近道路交叉点,改进后的模拟质量浓度值比未改进的模拟质量浓度值的增加率越大。从点 a 到点 c 离开道路交叉点越远,改进后的模拟结果的质量浓度增加率越大,污染物质量浓度分布更集中在道路交叉点附近。算例表明提出的源强计算方法能反映出信号控制对交叉口处污染物排放的影响,但定量分析算法改进的效果有待进一步研究,模拟结果见表 1。

表 1 模拟结果

点号	经源强算法改进 的模拟值 $/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	未经源强算法改进 的模拟值 $/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	质量浓度 增加率 /%
a	1.07	0.316	239
b	0.731	0.247	196
c	0.479	0.195	146

质量浓度增加率 = (经源强算法改进的模拟质量浓度值 - 未经

源强算法改进的模拟质量浓度值) / 未经源强算法改进的模拟质量浓度值

4 结论

综合考虑车辆在交叉口的行驶特性,将排放源强分为绿灯时间排放源强和红灯时间排放源强 2 种类型,并依据信号配时对两者进行加权平均,从而加入交叉口信号控制的影响。计算方法可应用于不同信号配时方案下的交叉口排放源强计算。该研究所提出的源强计算方法计算信号控制十字路口(广州市林乐路 - 天寿路交叉口)2006 年 7 月 22 日晚高峰机动车排放源强,并结合 CAL NE4 扩散模型模拟了该交叉口附近 CO 质量浓度分布。信号控制交叉口机动车排放源强计算方法是可行的,能反映信号控制对交叉口处污染物排放的影响,但定量分析算法改进的效果有待观察。

[参考文献]

- [1] 吴忠标,李伟,王莉红. 城市大气环境概论 [M]. 北京:化学工业出版社,2002.
- [2] 孙艳君,包芸. 广州市全城交通污染宏观仿真模拟研究 [J]. 中山大学学报(自然科学版),2005,44(6):127-130.
- [3] 李莉,陈长虹,黄成,等. CALRoads 模式在上海市典型道路 CO 扩散预测中的应用 [J]. 环境监测管理与技术,2006,18(4):7-11.
- [4] JIE L, GE Y E. Impacts of traffic heterogeneity on roadside air pollution concentration. Transportation Research [J/OL]. Elsevier, 2006, D(11):166-170 [2008-07-18]. <http://www.elsevier.com/locate/trd>
- [5] 李柱钰. 城市交通大气环境影响评价及预测技术研究 [D]. 南京:东南大学,2001.
- [6] 金陶胜,余志. 城市十字路口汽车尾气污染扩散模型 [J]. 中山大学学报(自然科学版),2003,42(6):130-131.
- [7] JIE L, NIEMEIER D A. Regional driving characteristics, regional driving cycles. Transport Research. Transportation Research [J/OL]. Elsevier, 2003, B(8):361-381 [2008-07-18]. <http://www.elsevier.com/locate/trd>
- [8] BENSON P E. CALNE4 - A dispersion model for predicting air pollutant concentrations near roadways [R]. US Sacramento: California State Department of Transportation, 1984.
- [9] 刘永红,余志,田丰,等. 一种线源扩散模型的建立及算法实现 [J]. 环境科学与技术,2006,29(10):13-15.
- [10] 全永燊. 城市交通控制 [M]. 北京:人民交通出版社,1989.
- [11] 李修刚,杨晓光,王伟,等. 用于城市交通规划的机动车污染物排放因子 [J]. 交通运输工程学报,2001,1(4):87-91.