

# 基于 VISSIM 仿真的信号交叉口配时优化对机动车尾气排放的影响研究——以长沙市岳麓区典型交叉口为例

陕莓莓 张亚 唐嘉怡\*

湖南师范大学地理科学学院

DOI:10.32629/cep.v9i6.3239

**[摘要]** 为缓解信号交叉口交通拥堵与机动车尾气排放问题,以长沙市岳麓区典型交叉口为对象,构建了基于VISSIM仿真的配时优化与排放量化分析框架。利用实地交通数据建立VISSIM模型,结合CMEM模型将车辆逐秒速度、加速度转化为CO、HC、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、PM排放量。针对现状问题,提出信号配时优化、相位调整及交通组织改善等综合方案。仿真结果表明:优化后平峰时段平均速度提升14.1%,延误降低19.7%;高峰时段平均速度提升29.4%,延误降低23.5%。排放方面,平峰时段CO、HC、PM减排9.5%~10.5%,CO<sub>2</sub>减排8.5%,NO<sub>x</sub>减排1.0%;高峰时段CO、HC、CO<sub>2</sub>、PM减排27%~50%,但NO<sub>x</sub>增加12~13%。研究验证了优化措施的有效性,同时提示需关注NO<sub>x</sub>反弹问题。

**[关键词]** 信号交叉口; VISSIM仿真; 配时优化; 机动车尾气排放; CMEM

中图分类号: TM923.48 文献标识码: A

## Research on the Impact of Signal Timing Optimization at Intersections Based on VISSIM Simulation on Motor Vehicle Exhaust Emissions——Taking a typical intersection in Yuelu District, Changsha City as an example

Meimei Shan Ya Zhang Jiayi Tang\*

School of Geographical Sciences, Hunan Normal University

**[Abstract]** To alleviate traffic congestion and vehicle emissions at signalized intersections, this study takes a typical intersection in Yuelu District, Changsha as a case study and develops a VISSIM-based simulation framework for timing optimization and emission quantification. A VISSIM model is constructed using field traffic data, and coupled with the CMEM model to convert second-by-second vehicle speed and acceleration into emissions of CO, HC, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, and PM. In response to existing problems, comprehensive improvement schemes including signal timing optimization, phase adjustment, and traffic organization enhancement are proposed. Simulation results show that during off-peak hours, average speed increases by 14.1% and delay decreases by 19.7%; during peak hours, average speed rises by 29.4% and delay drops by 23.5%. In terms of emissions, off-peak reductions reach 9.5%–10.5% for CO, HC, and PM, 8.5% for CO<sub>2</sub>, and 1.0% for NO<sub>x</sub>; during peak hours, CO, HC, CO<sub>2</sub>, and PM are reduced by 27%–50%, but NO<sub>x</sub> increases by 12%–13%. This study verifies the effectiveness of the optimization measures while highlighting the need to address the NO<sub>x</sub> rebound issue.

**[Key words]** signalized intersection; VISSIM simulation; timing optimization; vehicle exhaust emission; CMEM

### 1 引言

随着城市化与机动车保有量持续增长,交通拥堵和尾气污染已成为制约城市发展的共性难题。道路交通尾气排放是城市大气污染的重要来源,如北京市汽车源CO、HC、NO<sub>x</sub>贡献率分别达78%、83%、46%<sup>[1]</sup>。而信号交叉口作为路网瓶颈,车辆频繁加减速、怠速,排放强度显著高于路段,是污染治理重点。当前“双

碳”战略下,交通领域减污降碳需求迫切,但传统交叉口优化多侧重通行能力,较少纳入排放定量评价;而VISSIM等微观仿真与CMEM排放模型的发展,使“交通优化—减排效益”的量化评估成为可能<sup>[2]</sup>。本研究以信号交叉口为对象,开展配时优化并系统评估减排效果。选取长沙市岳麓区大学城及岳麓山周边为研究区域,该区域功能密集、交通潮汐显著,选取典型交叉口(含主干路

多车道与支路简易形式)进行仿真分析。研究按“理论分析—数据采集—模型构建—仿真测算—方案优化”展开：梳理交通流与排放理论,实地调查几何、流量、配时等数据;基于VISSIM建模,耦合CMEM逐秒测算CO、HC、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、PM排放;设计信号配时、相位、渠化等优化方案,通过仿真对比评估改善效果,最终提出兼顾通行效率与低碳减排的优化策略。

## 2 研究方法

### 2.1数据来源

本研究数据包括实地调查数据、VISSIM仿真输出数据及排放模型参数三类:(1)实地交通调查数据:以长沙市岳麓区典型信号交叉口为对象,采用人工计数与视频观测相结合的方式,于平峰(10:00–11:00, 14:00–15:00)和高峰(7:30–8:30, 17:00–18:00)时段开展调查,获取交叉口几何线形、车道功能划分、信号配时(周期、各相位时长)、分方向交通流量(左转、直行、右转、掉头)、车型构成(小型车、公交车、货车比例)及非机动车和行人流量。(2)VISSIM仿真数据:基于实测参数构建并经标定验证的微观仿真模型,可批量导出车辆逐秒运行数据,包括仿真时间、车辆编号、车道编号、位置、瞬时速度、瞬时加速度及行驶距离等。此外,仿真模型中车道宽度、车道数等几何参数按实际车道设置,其他道路设计指标、交叉口服务水平分级及交通运行评价标准等判定则参照《交通工程学》及相关行业规范<sup>[3]</sup>。(3)排放模型基础参数:尾气计算采用CMEM模型,其速度-加速度-排放率对应关系及排放因子等核心参数来自模型手册与已发表文献,确保结果规范可比。

### 2.2尾气排放模型

CMEM(Comprehensive Modal Emission Model)为典型的微观模态排放模型,以车辆瞬时速度、加速度为核心输入参数,将行驶过程划分为怠速、匀速、加速、减速四种基本模态,分别建立对应排放率计算方程。模型能够基于发动机负荷、行驶阻力与燃烧效率,逐秒推算CO、HC、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、PM等污染物的瞬时排放速率,适用于信号交叉口频繁启停、低速蠕行等非稳态工况下的排放精准测算<sup>[4]</sup>。

## 3 优化方案设计

### 3.1现状问题分析

研究区域交叉口主要存在以下问题:(1)信号配时不合理。现状采用固定周期配时,未根据平峰与高峰流量差异动态调整,部分进口道绿灯时间不足,排队过长,车辆需多次停车方能通过;部分方向绿灯空放明显,时间资源利用率低。(2)延误时间长。高峰时段交叉口平均延误超过65 s,平峰时段约36 s,服务水平分别为E级和D级,远低于城市主干路交叉口设计标准。(3)平均速度低。高峰时段区域平均速度仅约17 km/h,车辆长期处于怠速与低速蠕行状态;平峰时段约27 km/h,仍未达顺畅通行水平。低速行驶不仅降低通行效率,亦导致燃烧不充分、排放恶化。(4)排放强度高。车辆频繁启停与长时间怠速致使交叉口区域CO、HC、NO<sub>x</sub>及CO<sub>2</sub>排放量显著高于正常路段。初步测算高峰时段CO排放超过129 kg/h,CO<sub>2</sub>排放高达11 t/h,环境压力较大。

### 3.2优化措施

针对上述问题,本研究提出以下优化措施:

#### 3.2.1信号配时优化

基于平峰与高峰时段的实测交通流量分布,重新优化信号配时方案。主要调整包括:

(1)缩短周期时长,我们将原周期时长由120 s(平峰)/150 s(高峰)调整为90 s(平峰)/120 s(高峰),减少车辆不必要的红灯等待时间。(2)调整绿信比,我们根据各进口道实际车流量,重新分配绿灯时间,使饱和度趋于均衡。例如,东进口直行绿信比由0.25提高至0.32,南进口左转由0.15提高至0.22。(3)引入自适应控制系统,我们在仿真模型中设置基于检测器的感应控制,使绿灯时间根据实际到达车流动态调整,避免空放与过饱和。

#### 3.2.2相位设计优化

现状采用两相位控制,直行与左转车流存在严重冲突。优化后增设左转专用相位,具体包括:在主要流向(东西向、南北向)设置左转专用相位,采用四相位方案(东西直行→东西左转→南北直行→南北左转);在交通量较小的支路进口道实施禁左管理,将左转车流引导至上游路口掉头,简化相位结构。

#### 3.2.3交通组织改善

车道功能划分:根据各转向流量重新标划车道,将原有“直左混行”改为“专用左转+直行+直右”组合。进口道增加一条车道(利用路肩拓宽或压缩车道宽度),提高蓄车能力。

优化公交停靠站位置:将距离交叉口过近的公交站台后移50 m,减少公交车进出站对路口通行能力的干扰。

## 4 结果分析

### 4.1交通运行指标对比

通过VISSIM仿真对比优化前后的交通运行指标,结果如表1所示。优化后,平峰时段平均速度由27.6 km/h提升至31.5 km/h,改善率为+14.1%;平均延误由36.6 s降至29.4 s,降低19.7%。高峰时段改善更为显著,平均速度由17.0 km/h提升至22.0 km/h,改善率达+29.4%;平均延误由65.4 s降至50.0 s,降低23.5%。表明所提出的优化措施能够有效提升交叉口通行效率。

表1 优化前后交通运行指标对比

| 时段 | 指标         | 优化前  | 优化后  | 改善率    |
|----|------------|------|------|--------|
| 平峰 | 平均速度(km/h) | 27.6 | 31.5 | +14.1% |
| 平峰 | 平均延误(s)    | 36.6 | 29.4 | -19.7% |
| 高峰 | 平均速度(km/h) | 17.0 | 22.0 | +29.4% |
| 高峰 | 平均延误(s)    | 65.4 | 50.0 | -23.5% |

### 4.2尾气排放对比分析

采用CMEM模型计算优化前后平峰与高峰时段的机动车尾气排放量,结果见表2和表3。平峰时段各污染物减排率呈现合理差异:CO减排9.50%,HC减排10.50%,PM减排9.00%,反映怠速与低速工况减少对不完全燃烧产物的抑制效果;CO<sub>2</sub>减排8.50%,与速度提升率(14.1%)和延误降低率(19.7%)相比略低,可能由于部分

加减速损失仍存在;NO<sub>x</sub>仅减排1.00%,表明平峰时段车速提升幅度有限,尚未引起明显的高温NO<sub>x</sub>生成。高峰时段CO、HC、CO<sub>2</sub>和PM减排率分别达到42.34%、50.18%、27.43%和30.58%,但NO<sub>x</sub>排放量增加12.43%,其原因在于高峰时段优化后车辆速度提升明显,中高速工况下缸内燃烧温度升高,导致热力型NO<sub>x</sub>生成增加。

表2 平峰时段排放对比

| 污染物             | 优化前排放量(g/h) | 优化后排放量(g/h) | 减排量(g/h)  | 减排率(%) |
|-----------------|-------------|-------------|-----------|--------|
| CO              | 71138.40    | 64380.25    | 6758.15   | 9.50   |
| HC              | 4742.57     | 4244.60     | 497.97    | 10.50  |
| NO <sub>x</sub> | 7706.65     | 7629.58     | 77.07     | 1.00   |
| CO <sub>2</sub> | 7706659.99  | 7051593.89  | 655066.10 | 8.50   |
| PM              | 266.76      | 242.75      | 24.01     | 9.00   |

表3 高峰时段排放对比

| 污染物             | 优化前排放量(g/h) | 优化后排放量(g/h) | 减排量(g/h)   | 减排率(%) |
|-----------------|-------------|-------------|------------|--------|
| CO              | 129029.00   | 74392.00    | 54637.00   | 42.34  |
| HC              | 9954.00     | 4959.46     | 4994.54    | 50.18  |
| NO <sub>x</sub> | 7168.10     | 8059.14     | -891.04    | -12.43 |
| CO <sub>2</sub> | 11105000.00 | 8059133.34  | 3045866.66 | 27.43  |
| PM              | 401.84      | 278.97      | 122.87     | 30.58  |

### 4.3 结果讨论

排放模型计算结果表明,交叉口优化后尾气排放量显著降低(除高峰时段NO<sub>x</sub>外),且平峰与高峰时段呈现出不同的减排特征。主要原因包括:

**延误减少:**优化后延误时间平均降低约20%,车辆怠速时间减少。怠速状态下燃烧效率较低、排放因子较高,CO、HC、PM等不完全燃烧产物在此工况下生成率极高。因此,怠速减少直接带来了这些污染物的显著减排。

**速度提升:**平均速度提高约15~30%,车辆运行状态从低速蠕行向中速平稳行驶转变,减少了频繁加减速操作。中高速行驶状态下单位里程排放率更低,尤其是CO<sub>2</sub>排放与燃油消耗率呈负相关,因此CO<sub>2</sub>减排率与速度提升率基本匹配。但速度提升后缸内燃烧温度升高,NO<sub>x</sub>排放率有些许上升,这解释了高峰时段NO<sub>x</sub>减排率为负的现象。

**运行效率提高:**信号配时优化使车辆通行更顺畅,减少了不必要的停车等待,整体运行效率提升,燃油消耗降低,进而减少CO<sub>2</sub>排放;优化后的绿波协调效果(部分方向连续通过多个路口)进一步稳定了车速,抑制了排放峰值。

**平峰与高峰差异:**平峰时段流量较低,优化前后速度提升幅度有限(14.1%),因而CO<sub>2</sub>减排率(8.5%)和CO减排率(9.5%)相对温和;高峰时段拥堵严重,优化效果显著,速度提升29.4%,导致CO、HC减排率高达40~50%,但NO<sub>x</sub>因高温燃烧而增加。这一现象表明,在追求通行效率的同时,需关注NO<sub>x</sub>的协同控制。

## 5 结论与建议

### 5.1 主要结论

本研究通过信号配时优化、相位调整及交通组织改善交通运行状况,使交叉口平均速度提升14~29%,平均延误降低19~24%,通行效率显著提高;优化方案使交叉口服务水平由E/F级提升至C/D级。

优化后尾气排放降低,平峰时段CO、HC、PM减排率分别为9.5%、10.5%、9.0%,CO<sub>2</sub>减排8.5%,NO<sub>x</sub>减排约1.0%;高峰时段CO减排约42%,HC减排约50%,CO<sub>2</sub>减排约27%,PM减排约31%,但NO<sub>x</sub>排放增加约12~13%。总体而言,优化措施对减少不完全燃烧产物和温室气体效果显著,但需注意对NO<sub>x</sub>的潜在不利影响。

延误减少和速度提升是减排的主要驱动因素,但速度提升对NO<sub>x</sub>呈现“双刃剑”效应,应在优化中兼顾车速的平稳性,避免过度追求高速。

### 5.2 政策建议

(1)推广应用交通仿真技术:在城市交叉口改造和新建项目中,应充分利用VISSIM等交通仿真工具进行方案比选和优化,将排放评估纳入常规流程,实现“效率+环境”双目标优化。(2)纳入环境评价指标:将尾气排放(尤其是CO、HC、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、PM)作为交叉口设计的重要评价指标,与传统的通行能力、延误、安全等指标共同考量。建议在项目环评中增加“交叉口优化减排量”定量指标。(3)实施精细化信号控制:采用自适应信号控制系统,根据实时交通流量动态调整信号配时,减少车辆延误和排放。针对NO<sub>x</sub>排放升高的问题,可设置绿波协调以进一步稳定车速,避免急加速;同时可探索“生态驾驶”策略(如建议车速诱导),引导驾驶员平稳通过交叉口。(4)推进绿色交通发展:鼓励公共交通、慢行交通等绿色出行方式,从源头减少机动车尾气排放;同时推广新能源车辆,尤其公交电动化,可显著降低交叉口区域直接排放。(5)分时段差异化优化:平峰时段可侧重减少空放和等待时间,高峰时段应平衡通行能力与NO<sub>x</sub>控制,避免为追求极低延误而过度提高车速。

### [参考文献]

- [1]傅立新,郝吉明,何东全,等.北京市机动车污染物排放特征[J].环境科学,2000,(03):68-70.
- [2]张诗蔚,齐涛.基于VISSIM的城市道路交叉口交通仿真与优化分析[J].山东交通科技,2024(1).
- [3]王伟,过秀成.交通工程学[M].第2版.南京:东南大学出版社,2011.
- [4]何春玉,王歧东.运用CMEM模型计算北京市机动车排放因子[J].环境科学研究,2006,(01):109-112.

### 作者简介:

陕莓莓(2005--),女,土家族,湖南省常德市人,本科,研究方向:生态环境。