

考虑混动车 NO_x 排放工况影响的 交叉口信号配时优化模型

陈兴辉¹, 刘皓冰^{1,2}, 胡兴华³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海创智学院, 上海 200231; 3. 重庆交通大学交通运输学院, 重庆 400074)

摘要: 基于机动车比功率(VSP)模型, 重点考虑了插电式混合动力车型特性, 分别针对其电量消耗和电量维持两种模式提出 NO_x 排放因子的计算方法。以交叉口范围内车均 NO_x 排放最小为优化目标, 以车均延误、平均停车次数等为约束条件, 建立以燃油车与混动车构成的混合交通环境下交叉口信号配时优化模型。分析结果表明, 本文模型优化后的车均 NO_x 排放减少率达到 31.29%, 同时车均延误以及平均停车次数与车均 NO_x 排放呈同向变化趋势, 其减少率分别为 43.99% 和 28.88%, 优于仅考虑交通流量条件的 Webster 模型。最后, 通过参数敏感性分析发现, 不同交通量水平、左转车辆比例以及混动车渗透率对车均 NO_x 排放的影响较为显著。本文提出的平衡环境效益和通行效率的交叉口信号配时优化方法为城市交通管理和政策制定提供了有效依据。

关键词: NO_x 排放; 交叉口信号配时优化; 燃油车与混动车 VSP; 参数敏感性分析

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)08-2137-13

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250034

Intersection signal timing optimization model considering influence of hybrid vehicles NO_x emission conditions

CHEN Xing-hui¹, LIU Hao-bing^{1,2}, HU Xing-hua³

(1. The Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Innovation Institute, Shanghai 200231, China; 3. College of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Based on the vehicle specific power(VSP) model, with particular emphasis on the characteristics of plug-in hybrid electric vehicles(PHEVs), this study proposes NO_x emission factor calculation methods for both charge-depleting and charge-sustaining modes. With the objective of minimizing average per-vehicle NO_x emissions within the intersection area, and subject to constraints including average per-vehicle delay and average number of stops, a signal timing optimization model is established for intersections under mixed traffic environments comprising conventional fuel vehicles and hybrid electric vehicles. Analysis

收稿日期: 2025-01-10.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB3906900); 国家自然科学基金青年基金项目(52202420).

作者简介: 陈兴辉(1998-), 男, 博士研究生. 研究方向: 机动车能耗与排放模型. E-mail: chenxinghui@tongji.edu.cn

通信作者: 刘皓冰(1988-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 交通、能源与大气环境. E-mail: liuhaobing@tongji.edu.cn

results indicate that the proposed model achieves a 31.29% reduction in average per-vehicle NO_x emissions. Meanwhile, average per-vehicle delay and average number of stops exhibit consistent variation trends with average per-vehicle NO_x emissions, with reduction rates of 43.99% and 28.88%, respectively, outperforming the Webster model which considers only traffic flow conditions. Finally, parameter sensitivity analysis reveals that traffic volume levels, left-turn vehicle proportions, and hybrid vehicle penetration rates exert significant influences on average per-vehicle NO_x emissions. The intersection signal timing optimization method proposed in this study, which balances environmental benefits and traffic efficiency, provides an effective basis for urban traffic management and policy formulation.

Key words: NO_x emissions; intersection signal timing optimization; VSP for fuel and hybrid vehicles; parametric sensitivity analysis

0 引言

在机动车排放的多种污染物中, NO_x 被认为是环境对人体健康危害最大的主要污染物之一。因此,降低城市道路交通中车辆 NO_x 排放,特别是在交叉口这一车辆频繁启停的高排放区域,已成为城市交通管理与环境保护的一个重要方向。车辆在到达信号交叉口时,行驶工况发生改变,交叉口范围内机动车多种工况、车型以及能源类型共存,其污染物排放远高于同一时间内的巡航行驶工况。此外,已有研究表明,车辆在交叉口上游路段行驶中受信号阻滞影响而导致的延误,占行程时间的10%~20%,同时占运行过程中总延误的一半以上^[1]。因此,优化交叉口信号配时方案,以降低污染物排放并提升通行效率,对推动城市交通系统绿色可持续发展有着重要意义。

交叉口信号配时优化研究一方面是考虑交通运行效率,以交叉口范围内车辆通行能力、延误、停车次数等为优化目标。如 Akcelik^[2]于1981年首次提出将车辆的停车次数与延误作为优化目标,并引入了停车补偿系数的概念。Liu等^[3]在此基础上考虑了行人在交叉口处的时间成本,以车均延误、平均排队长度及过街行人的等待时间3个指标为信号交叉口的控制优化目标。随着全球对环境保护重视程度的加深,在对信号交叉口进行配时优化时,污染物排放控制成为了除交通运行效率以外考虑最为重要的优化目标。Fan等^[4]以 CO 、 NO_x 、 HC 和 VOC 为优化目标,分析了交叉口绿波优化前后对交通环境效益以及道路通行能力的影响。

自20世纪七十年代以来,欧美发达国家开始通过模拟和测算燃油车排放因子,对排放模型开展了相关研究。最早开发的是基于固定行驶周期类的排放模型,主要包括 MOBILE (Mobile source emission factor model) 模型^[5]和 EMFAC (Emission factor model) 模型^[6]。这类模型由于没有综合考虑车辆行驶工况以及相关阻力系数对排放因子的影响,因此不适用于研究交通信号控制对车辆尾气排放的分析。针对上述模型存在的局限性,美国环保署(EPA)基于 MOBILE6 与非道路移动源排放模型开发出了新一代燃油车排放模型 MOVES (Motor vehicle emission simulator)^[7], 其将宏观、中观和微观层次预测融合在一起,能够综合考虑车速自身速度、加速度、质量以及阻力系数对其排放因子的影响。姜壁刚^[8]和吉喆等^[9]分别将 MOVES 模型应用于估算机动车的 CO_2 和 NO_x 排放。

近年来,能源紧缺和环境保护等问题日趋严重,电动汽车因其在运行阶段可以实现低排放甚至零排放而受到各国青睐。学者们纷纷从汽车运行工况^[10]以及能耗影响因素^[11]的角度提出了相应的能耗与排放计算模型。然而,上述研究大多聚焦在燃油车与纯电动车的能耗与排放计算,鲜有研究能够探讨交叉口信号控制对混动车污染物排放特性的影响。在交叉口范围内,由于机动车多种车型以及能源类型共存,不同类型车辆的污染物排放因子存在差异,势必会影响信号配时的优化结果。因此,构建多车型 NO_x 排放模型,研究混合交通流的排放特性,对制定交叉口最优信号配时方案具有重要价值。

本研究的主要贡献如下:①基于机动车比功

率 (Vehicle specific power, VSP) 模型,重点探究混动车的 NO_x排放工况影响,构建其电量消耗和电量维持两种模式下的 NO_x排放因子模型;②为更加真实刻画车辆到达-驶离信号交叉口的行驶轨迹以更好反映模型的优化结果,提出考虑车辆在停车和启动过程中的减速与加速工况为变加速运动;③以车均 NO_x排放为优化目标,以车均延误以及平均停车次数等为约束条件,构建以燃油车与混动车构成的混合交通环境下交叉口信号配时优化模型,并采用遗传算法运用实际案例对其进行求解。最后,通过参数敏感性分析,识别交通量水平、左转车辆比例以及混动车渗透率等主要参数对模型优化目标的影响,并提出相应的优化建议。

1 问题描述

在城市交通系统中,由于车辆类型和能源种类的多样性,不同类型车辆的污染物排放因子存在较大差异,交叉口处车辆的频繁启停和加速行为将导致污染物排放显著增加。NO_x作为机动车的主要污染物排放之一,对环境健康的影响程度较大,且由于其排放总量与其他某些污染物之间存在共线性关系,在一定程度上可以表征其他污染物的构成。因此,以 NO_x作为车辆排放的代表性污染物开展研究。而如何有效优化交叉口信号配时参数,控制交叉口范围内不同类型车辆的 NO_x排放,提升车辆通行效率,已成为交通控制领域的研究重点。本研究旨在针对不同类型车辆(小型燃油车、小型混动车、大型燃油车)在信号交叉口的 NO_x排放特性,构建 NO_x排放模型。综合考虑 NO_x排放、车辆延误以及停车次数,并结合实际交通流数据,提出一种优化后的交通信号控制方法,优化交通信号周期以及各相位绿灯时间,以实现混合交通流环境效益和通行效益的最大

化。交叉口信号控制对车辆 NO_x排放与通行效率的影响如图 1 所示。

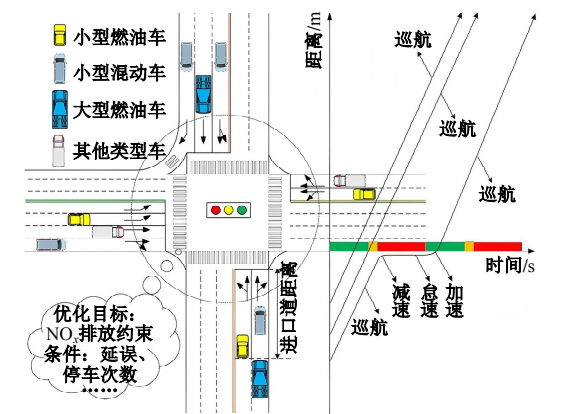


图 1 交叉口信号控制对车辆排放与通行效率的影响

Fig. 1 Impact of intersection signal control on vehicle emissions and traffic efficiency

为更好地反映模型的本质问题,本研究需对构建的交叉口信号配时优化模型做出如下假设:

- (1)在计算车均 NO_x排放时,仅考虑小型燃油车、小型混动车和大型燃油车,且混动车类型为插电式混合动力汽车。
- (2)研究的交叉口与周围其他交叉口的信号配时是独立的,即不考虑多路口的信号协同问题。
- (3)在交叉口范围内,行人和非机动车的影响忽略不计。
- (4)混动车经过交叉口前后的运行模式不会发生变化。

本研究中的主要变量及参数的符号说明如表 1 所示。

2 燃油车-混动车 NO_x排放因子计算

以交叉口范围内小型燃油车(Light-duty gasoline vehicle, LDGV)、小型混动车(Light-Duty hybrid vehicle, LDHV)和大型燃油车(Heavy-duty diesel truck, HDDT)为研究对象,基于机动车

表 1 主要变量及参数的符号说明

Table 1 Symbolic description of main variables and parameters in model

符号	说明	单位
i	信号相位的索引	—
j	交叉口进口道方向的索引	—
α	车型的索引, $\alpha = 1$ 时表示小型车, $\alpha = 2$ 时表示大型车	—
β	车辆能源类型的索引, $\beta = 1$ 时表示燃油车, $\beta = 2$ 时表示混动车	—
$\bar{D}$	车辆通过交叉口的车均延误	s/pcu
D_{ij}	相位 i 进口道 j 的车均延误	s/pcu
$\bar{E}$	车辆通过交叉口的车均 NO _x 排放	g/pcu

续表

符号	说明	单位
$e_{\delta,a,1,k}$	小型燃油车和大型燃油车在减速和加速工况下所处工况区间 k 的 NO_x 排放因子, $\delta=1$ 时表示减速过程, $\delta=2$ 时表示加速过程	g/s
$e'_{\delta,1,2}, e''_{\delta,1,2}$	小型混动车在减速和加速工况下分别处于 CD 和 CS 模式下的 NO_x 排放因子	g/s
$e_{3,\alpha,1}, e_{4,\alpha,1}$	车型为 α 的燃油车分别在怠速和巡航工况下的 NO_x 排放因子	g/s
$e'_{3,1,2}, e''_{3,1,2}$	小型混动车在怠速工况下分别处于 CD 模式和 CS 模式下的排放因子	g/s
$e'_{4,1,2}, e''_{4,1,2}$	小型混动车在巡航工况下分别处于 CD 模式和 CS 模式下的排放因子	g/s
f	交叉口进口道数量	个
h_i	相位 i 车辆的平均停车次数	次
$\bar{h}$	交叉口范围内每辆车的平均停车次数	次
L	交叉口进口道长度	m
q_{ij}	相位 i 进口道 j 的实际交通量	pcu/h
$q_{\alpha,\beta,ij}$	相位 i 进口道 j 车型为 α 能源类型为 β 的实际交通量	pcu/h
$t_{\delta,1}$	小型车完成一次停车减速的时长以及启动加速到巡航速度的时间	s
$t_{\delta,a,1,k}$	车型为 α 的燃油车在减速和加速工况下处于不同 VSP 区间 k 的时间	s
S_{ij}	相位 i 进口道 j 的饱和流率	pcu/h
v_0	车辆到达信号交叉口处的初速度	m/s
VSP	机动车比功率	kW/t
y_{ij}	相位 i 进口道 j 的流量比, 即实际交通量与饱和流量之比	—
ω, ξ	混动车分别处于 CD 与 CS 模式下的占比	%
C	信号周期时长	s
g_i	相位 i 的绿灯时间	s

比功率 (Vehicle specific power, VSP)^[12], 分别对不同能源类型车辆的 NO_x 排放因子进行标定。VSP 计算方法的一般表达式如式 (1) 所示:

$$\text{VSP} = \frac{Av + Bv^2 + Cv^3 + mv(a + g \sin(\theta))}{m} \quad (1)$$

式中: A 为滚动阻力系数; B 为加速阻力系数; C 为空气阻力系数; m 为车辆质量; v 为车速; a 为车辆加速度; g 为重力加速度; θ 为道路坡度。

(1) 燃油车排放因子

有关研究表明^[13], LDGV 和 HDDT 的 VSP 模型如式 (2) 所示:

$$\begin{cases} \text{VSP}_{\text{LDGV}} = v(1.1a + 0.132) + 0.000\ 302v^3 \\ \text{VSP}_{\text{HDDT}} = v(a + 0.091\ 99) + 0.000\ 169v^3 \end{cases} \quad (2)$$

车辆的瞬时 VSP 值可通过车载 GPS 获得的瞬时速度和加速度进行计算。基于 Frey 等^[14]对 VSP 区间的划分方法, 将 LDGV 的 VSP 划分为 14 个区间, HDDT 的 VSP 划分为 10 个区间, 每个区间对应的 NO_x 排放因子为 LDGV (国 VI) 和 HDDT (国 V) 实测数据的算术平均值。不同类型燃油车 VSP 区间与其 NO_x 排放因子的对应关

系如表 2 所示。

表 2 不同类型燃油车 VSP 区间对应的 NO_x 排放因子
Table 2 NO_x emission factors corresponding to VSP intervals of different types of fuel vehicles

序号	VSP 区间/ (kW·t ⁻¹)	NO_x 排放因子/(g·s ⁻¹)	
		LDGV	HDDT
1	< -2	0.000 139 501	0.056 210 565
2	$[-2, 0)$	0.000 459 870	0.072 015 277
3	$[0, 1)$	0.001 056 453	0.065 285 324
4	$[1, 4)$	0.001 182 000	0.120 159 943
5	$[4, 7)$	0.001 344 693	0.155 863 268
6	$[7, 10)$	0.001 557 108	0.200 919 449
7	$[10, 13)$	0.001 957 662	0.222 890 678
8	$[13, 16)$	0.002 641 883	0.256 653 830
9	$[16, 19)$	0.003 205 142	0.247 436 625
10	$[19, 23)$	0.002 766 194	0.228 227 500
11	$[23, 28)$	0.002 080 366	—
12	$[28, 33)$	0.001 501 203	—
13	$[33, 39)$	0.000 487 878	—
14	≥ 39	0.000 725 076	—

(2) 混动车排放因子

目前针对混动车 NO_x 排放因子的测算模型研究较少, 对此, 本研究使用便携式排放测量系统 (Portable emission measurement system, PEMS)

对比亚迪秦 PLUS DM-i 开展实车试验,实时监测其尾气中 NO_x 的逐秒排放、瞬时速度和加速度。PEMS 实车试验设备如图 2 所示。

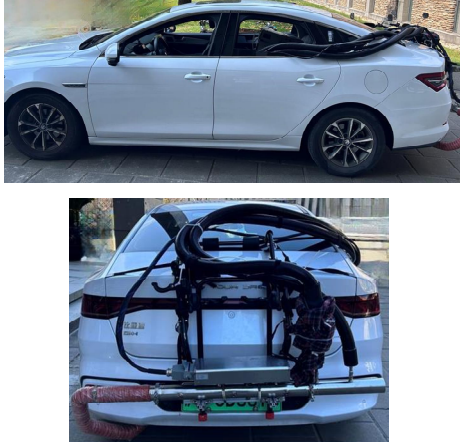


图2 PEMS 实车试验设备

Fig. 2 PEMS vehicle test equipment

混动车的运行模式可分为电量消耗 (Charge-depleting, CD) 和电量维持 (Charge-sustaining, CS) 两种模式^[15]。在电量充足的情况下,混动车通常以 CD 模式运行,此时混动车的电机可主导或分担做功。当电池的荷电状态 (State of charge, SOC) 下降至 25% 以下时^[16],车辆会从 CD 模式切换至 CS 模式,此时内燃机成为主要的驱动来源。因此,为了更精确刻画混动车的 NO_x 排放特性,需分别构建 CD 和 CS 模式下的 NO_x 排放因子模型。

对实车试验获得的样本数据进行处理后,分别得到 CD 模式和 CS 模式下的有效样本数据为 16 034 条和 11 125 条。基于式(1)中的 VSP 模型,标定车辆的滚动阻力系数为 0.156 461,加速阻力系数为 0.002 002,空气阻力系数为 0.000 493^[17],车辆质量为 1.875 t,重力加速度 g 为 9.8 m/s²,道路坡度 θ 为 0,得到混动车的 VSP 模型如式(3)所示:

$$\text{VSP}_{\text{混动车}} = \frac{0.156461v + 0.002002v^2}{1.875} + \frac{0.000493v^3 + 1.875va}{1.875} \quad (3)$$

结合采集的瞬时速度和加速度样本数据,计算车辆的瞬时 VSP 值。最后,对瞬时 NO_x 排放因子与 VSP 进行三次多项式拟合,得到混动车在 CD 和 CS 两种模式下 NO_x 排放因子拟合模型和拟合关系曲线,如式(4)和图 3 所示。

$$\begin{cases} e_{\text{NO}_x-\text{CD}} = -(2.41489 \times 10^{-7}) \cdot \text{VSP}^3 + \\ (9.58668 \times 10^{-6}) \cdot \text{VSP}^2 + (1.70650 \times 10^{-4}) \cdot \\ \text{VSP} + 4.07739 \times 10^{-4} \\ e_{\text{NO}_x-\text{CS}} = -(1.55560 \times 10^{-7}) \cdot \text{VSP}^3 + \\ (8.20299 \times 10^{-6}) \cdot \text{VSP}^2 + (2.04278 \times 10^{-4}) \cdot \\ \text{VSP} + 5.18403 \times 10^{-4} \end{cases} \quad (4)$$

图 3 为 CD 与 CS 模式下 NO_x 排放因子与 VSP 的三次多项式拟合曲线图。

根据图 3 的拟合结果可以发现,CD 模式下拟合后的决定系数 (R^2) 为 0.714 33,残差平方和 (RSS) 为 0.004 45;CS 模式下拟合后的 R^2 为 0.708 65, RSS 为 0.005 13。表明模型能够较好地解释混动车 NO_x 排放因子与 VSP 间的关系,拟合效果较好。

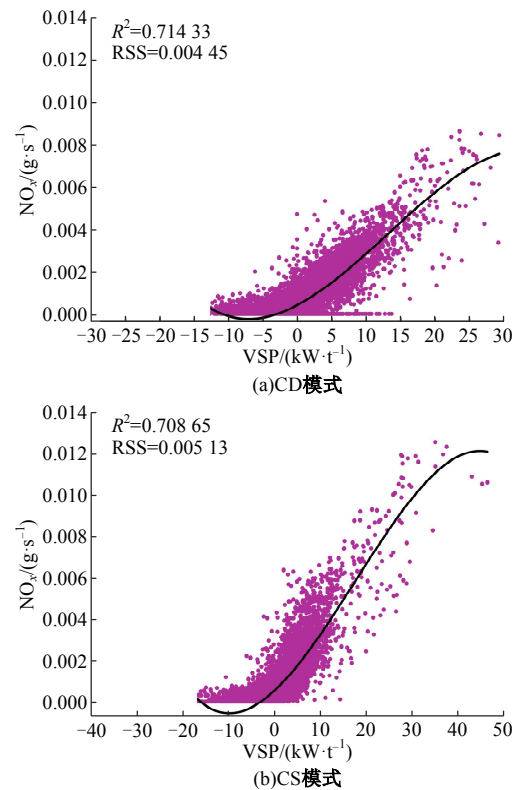


图3 CD与CS模式下NO_x排放因子与VSP的三次多项式拟合曲线图

Fig. 3 Third-degree polynomial fitting curves of NO_x emission factors to VSP in CD and CS modes

3 考虑混动车 NO_x 排放工况影响的交叉口信号配时优化模型

为提升城市道路信号交叉口的环境效益和通行效益,保证各进口道交通流能够绿色、高效、安

全通行,本研究以信号交叉口不同类型车辆的车均 NO_x 排放最小为优化目标,以信号周期时长和各相位绿灯时间为决策变量,以车均延误、平均停车次数等为约束条件,构建混合交通环境下交叉口信号配时优化模型。

3.1 交叉口 NO_x 排放模型

车辆在到达一驶离信号交叉口的过程中,由于受到信号控制的影响,其存在 4 种不同的行驶工况,即减速、怠速、加速、巡航,如图 4 所示。在不同行驶工况下,对应的车辆 NO_x 排放计算方法如下。

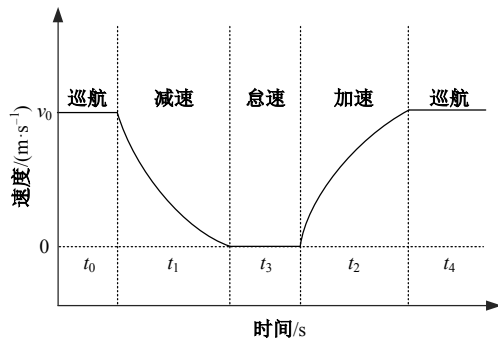


图 4 车辆到达-驶离信号交叉口的行驶工况

Fig. 4 Vehicle arrival and departure conditions at a signal intersection

(1) 减速与加速排放

当车辆到达交叉口处,遇到信号灯为红灯时,车辆需减速,而当信号灯变为绿灯时,车辆需加速通行。为更好地刻画车辆实际行驶工况,这里采用 Fernandes 等^[18]提出的车辆变加速运动方法,如式(5)所示:

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + \frac{\zeta}{\varphi} t + \left(\frac{v_0}{\varphi} - \frac{\zeta}{\varphi^2} \right) (e^{-\varphi t} - 1) \\ \dot{x}(t) = \frac{\zeta}{\varphi} (1 - e^{-\varphi t}) + v_0 e^{-\varphi t} \\ \ddot{x}(t) = (\zeta - \varphi v_0) e^{-\varphi t} \\ \ddot{x}(t) = \zeta - \varphi \dot{x}(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $x(t)$ 为 t 时刻的位移; $\dot{x}(t)$ 和 $\ddot{x}(t)$ 分别为位移对时间 t 的一阶和二阶导数; ϕ 、 φ 为常系数。

基于式(5),车型为 α 的车辆减速时间 $t_{1,\alpha}$ 及加速时间 $t_{2,\alpha}$ 的计算如式(6)所示:

$$\begin{cases} \frac{a_{1,\alpha}}{b_{1,\alpha}} (1 - e^{-b_{1,\alpha} t_{1,\alpha}}) + v_0 e^{-b_{1,\alpha} t_{1,\alpha}} = 0 \\ \frac{a_{1,\alpha}}{b_{1,\alpha}} (1 - e^{-b_{1,\alpha} t_{2,\alpha}}) - v_0 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:参数 $a_{1,\alpha}$ 和 $b_{1,\alpha}$ 的取值可通过相应的实测轨迹数据对其进行标定,其中, $\alpha=1$ 表示小型车, $\alpha=2$ 表示大型车。

考虑到车辆在驶离信号交叉口的过程中会存在二次停车,其平均停车次数 $\bar{h}$ 的计算如式(7)所示:

$$\bar{h} = \sum_{i=1}^n h_i \cdot q_i / \sum_{i=1}^n q_i \quad (7)$$

其中:

$$h_i = \sum_{j=1}^f 0.9 \cdot \frac{C - g_i}{C(1 - y_{ij})} \quad (8)$$

因此,针对 LDGV 和 HDDT,其在减速和加速两种工况下的 NO_x 排放量 $E_{\delta,\alpha,1}$ 的计算如式(9)所示:

$$E_{\delta,\alpha,1} = \sum_{k=1}^l e_{\delta,\alpha,1,k} \cdot t_{\delta,\alpha,1,k} \cdot \bar{h} \quad (9)$$

式中: $\delta=1$ 和 2 分别表示减速和加速工况。

针对 LDHV,其在减速和加速两种工况下的 NO_x 排放量 $E_{\delta,1,2}$ 的计算如式(10)所示:

$$E_{\delta,1,2} = \int_0^{t_{\delta,1}} [\omega \cdot e'_{\delta,1,2}(\text{VSP}_{\delta,1,2}) + \xi \cdot e''_{\delta,1,2}(\text{VSP}_{\delta,1,2})] dt \cdot \bar{h} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} e'_{\delta,1,2} = -(2.41489 \times 10^{-7}) \cdot \text{VSP}_{\delta,1,2}^3 + (9.58668 \times 10^{-6}) \cdot \text{VSP}_{\delta,1,2}^2 + (1.70650 \times 10^{-4}) \cdot \text{VSP}_{\delta,1,2} + 4.07739 \times 10^{-4} \\ e''_{\delta,1,2} = -(1.55560 \times 10^{-7}) \cdot \text{VSP}_{\delta,1,2}^3 + (8.20299 \times 10^{-6}) \cdot \text{VSP}_{\delta,1,2}^2 + (2.04278 \times 10^{-4}) \cdot \text{VSP}_{\delta,1,2} + 5.18403 \times 10^{-4} \\ \text{VSP}_{\delta,1,2} = \text{VSP}_{\delta,1,2}(a, v) = \frac{0.156461v + 0.002002v^2 + 0.000493v^3 + 1.875va}{1.875} \\ a = a(t) = (a_{1,1} - b_{1,1}v_0) e^{-b_{1,1}t} \\ v = v(t) = \frac{a_{1,1}}{b_{1,1}} (1 - e^{-b_{1,1}t}) + v_0 e^{-b_{1,1}t} \end{cases} \quad (11)$$

(2) 怠速排放

在绿灯启亮前,车辆需停车等待,此时速度和加速度均为 0,故 $\text{VSP}=0$ 。车辆的怠速延误时间可由车辆总延误减去加减速延误表示。

针对 LDGV 和 HDDT,其在怠速工况下的 NO_x 排放量 $E_{3,\alpha,1}$ 的计算如式(12)所示:

$$\left\{ \bar{D} - \left[t_{1,a} + t_{2,a} - \frac{x(t_{1,a}) + x(t_{2,a})}{v_0} \right] \cdot \bar{h} \right\} \cdot e_{3,a,1} \quad (12)$$

其中:

$$x(t) = \frac{a_{1,a}}{b_{1,a}} t + \left(\frac{v_0}{b_{1,a}} - \frac{a_{1,a}}{b_{1,a}^2} \right) \cdot (e^{-b_{1,a}t} - 1) \quad (13)$$

针对LDHV,其在怠速工况下的NO_x排放量 $E_{3,1,2}$ 的计算如式(14)所示:

$$E_{3,1,2} = \left\{ \bar{D} - \left[t_{1,1} + t_{2,1} - \frac{x(t_{1,1}) + x(t_{2,1})}{v_0} \right] \cdot \bar{h} \right\} \cdot (\omega e'_{3,1,2} + \xi e''_{3,1,2}) \quad (14)$$

基于 Webster 延误和 HCM 延误计算方法^[19],提出信号交叉口车辆延误计算模型,如式(15)所示:

$$D_{ij} = \frac{(C - g_i)^2}{2C(1 - y_{ij})} + \frac{C - g_i}{2Cq_{ij}} + \frac{q_{ij}C^2}{2S_{ij}g_i(S_{ij}g_i - q_{ij}C)} \quad (15)$$

则研究时间内通过信号交叉口的车均延误 $\bar{D}$ 的计算如式(16)所示:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_{ij} q_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{ij}} \quad (16)$$

(3) 巡航排放

车辆从恢复到初始速度并驶离交叉口停车线这一过程称为巡航行驶。在巡航工况下,车辆的加速度 $a=0$ 。

针对LDGV和HDDT,其在巡航工况下的NO_x排放量 $E_{4,a,1}$ 的计算如式(17)所示:

$$E_{4,a,1} = \frac{L - [x(t_{1,a}) + x(t_{2,a})] \cdot \bar{h}}{v_0} \cdot e_{4,a,1} \quad (17)$$

针对LDHV,其在巡航工况下的NO_x排放量 $E_{4,1,2}$ 的计算如式(18)所示:

$$E_{4,1,2} = \frac{L - [x(t_{1,1}) + x(t_{2,1})] \cdot \bar{h}}{v_0} \cdot (\omega e'_{4,1,2} + \xi e''_{4,1,2}) \quad (18)$$

综上所述,研究时段内车辆从到达驶离信号交叉口过程中平均每辆车的NO_x排放量 $\bar{E}$ 的计算如式(19)所示:

$$\bar{E} =$$

$$\frac{\sum_{a=1}^o \sum_{\beta=1}^p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (E_{1,a,\beta} + E_{2,a,\beta} + E_{3,a,\beta} + E_{4,a,\beta}) q_{a,\beta,ij}}{\sum_{a=1}^o \sum_{\beta=1}^p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q_{a,\beta,ij}} \quad (19)$$

式中: m 为进口道数量; n 为相位数量; o 为车型数量; p 为车辆的能源类型数量。

3.2 交叉口信号配时优化模型

以信号交叉口车均NO_x排放最小为模型优化目标,以信号周期时长和各相位绿灯时间为决策变量,以车均延误、平均停车次数等为约束条件,构建交叉口信号配时优化模型,如式(20)所示:

$$\begin{cases} F(C, g_i) = \min \bar{E} \\ \begin{cases} D_0 - \bar{D} > 0 \\ h_0 - \bar{h} > 0 \\ \sum_{i=1}^n g_i + \eta_i = C \\ 15n \leq C \leq 180 \\ g_{i_{\min}} \leq g_i \leq g_{i_{\max}} \\ 0.6 \leq \frac{y_i}{g_i/C} \leq 0.9 \end{cases} \end{cases} \text{ s.t. } \quad (20)$$

式中: η_i 为相位 i 的信号损失时间; $g_{i_{\min}}$ 、 $g_{i_{\max}}$ 分别为相位 i 的最小绿灯时间和最大绿灯时间; D_0 为优化前的车均延误; h_0 为优化前的平均停车次数。

3.3 模型求解算法设计

本研究中的信号交叉口配时优化问题可采用遗传算法进行求解,具体求解步骤如下:

步骤1:染色体编码。根据信号相位的数量设置基因长度 $L_{\text{gene}}=4$,分别代表3个不同信号相位的有效绿灯时间和总的信号周期时长,其表达式如式(21)所示:

$$\text{Chromosome} = [g_1, g_2, g_3, C] \quad (21)$$

步骤2:种群初始化。设置种群规模为100,并通过随机生成一组满足约束条件的可行解,初始化信号配时方案。初始方案包含 $g_{1,0}$ 、 $g_{2,0}$ 、 $g_{3,0}$ 和 C_0 ,共同组成初始种群。

步骤3:适应度函数构造。根据信号交叉口的实际交通量、饱和流率、流率比以及NO_x排放因子等参数,构建适应度函数 $F(g_{1,i}, g_{2,i}, \dots, g_{3,i}, C_i)$,以评估每个配时方案的效果。

步骤4:选择、交叉与变异操作。基于每个个体的适应度值(车均NO_x排放),对种群进行非支

配排序,并计算拥挤距离以保持种群的多样性。从排序后的种群中随机选取若干个体作为父代,使用模拟二进制交叉法生成新的子代,并对部分个体进行非均匀变异操作,通过引入新的解以防止早熟收敛。

步骤 5:生成新一代种群。通过选择、交叉和变异操作生成新的种群。新种群不仅包含通过交叉和变异生成的子代,还保留了上一代的精英个体,以确保最优解不会在进化过程中丢失,进而保持解的稳定性。

步骤 6:判断是否满足收敛条件。重复执行选择、交叉、变异和评估过程,直到满足收敛条件(达到最大迭代次数),进而输出模型最优解及适应度值,得到最优信号配时方案。

综上所述,设计交叉口信号配时优化问题的遗传算法求解流程如图 5 所示。

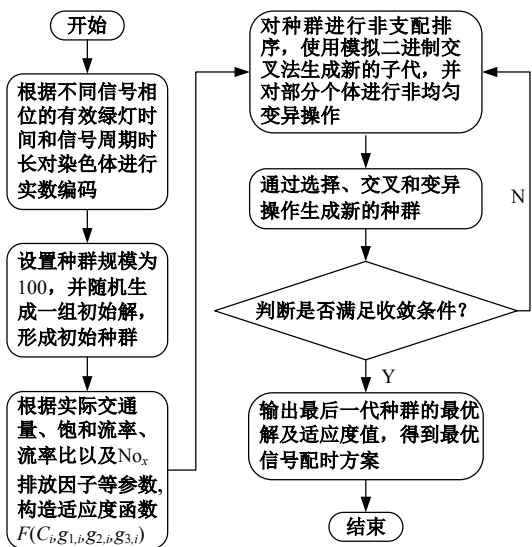


图 5 交叉口信号配时优化问题的遗传算法求解流程
Fig. 5 Genetic algorithm solution flow for intersection signal timing optimization problem

4 实例分析

4.1 数据来源与参数标定

以上海市嘉定区某工作日晚高峰时段嘉松北路与昌吉东路的一个三相位信号交叉口为研究对象,经实地调查获得该交叉口的基础数据如下:信号周期时长为 160 s,交叉口进口道长度为 120 m,车辆到达交叉口进口道的初速度 v_0 为 13 m/s,右转车辆不受信号控制。每个相位的信号损失时间为 2 s,最大绿灯时间为 100 s^[20]。信号交叉口车道分布及信号相位配时如图 6 所示。根据交叉口

拍摄的视频以及纯电动车和混动车车牌号码的不同标识(新能源车牌以字母 A/B/C/D/E 开头代表纯电动车,F/G/H/J/K 开头为插电混动车或非纯电动车),准确获取各进口道实际交通量和饱和流量如表 3 所示。表 3 中已将各车型实际交通量转化为标准小客车当量交通量。基于车辆的实测轨迹数据对式(5)中的常数 ζ 、 φ 进行标定,标定结果为小型车的系数 $a_{1,1}=-0.253$, $b_{1,1}=3.039$,大型车的系数 $a_{1,2}=-0.081$, $b_{1,2}=0.776$ 。基于上海市新能源汽车公共数据采集与监测研究中心提供的数据,获取研究时段内该交叉口所在的嘉定区混动车的 SOC 情况,从统计学角度确定 CD 和 CS 两种模式下混动车的历史比例。最后,根据交叉口统计时段内的混动车交通量数据,结合该比例,进一步计算出 CD 和 CS 模式下混动车各自的交通量。

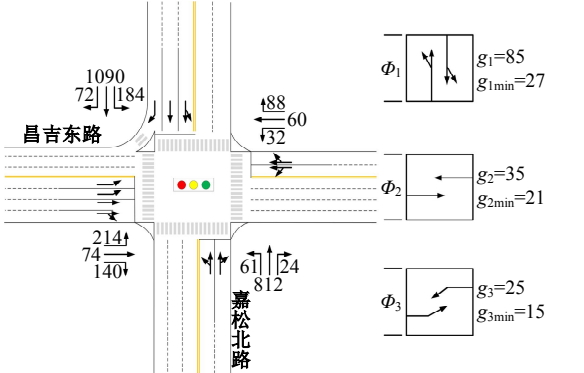


图 6 信号交叉口交通量分布及信号相位配时
Fig. 6 Signal intersection traffic distribution and signal phase timing

表 3 各进口道方向不同车型与能源类型的实际交通量和饱和流量
Table 3 Actual traffic volume and saturation flow of different vehicle and energy types in entrance directions

进口道方向		不同车型与能源类型的 实际交通量/(辆·h ⁻¹)			饱和流量/ (pcu·h ⁻¹)
		小型 燃油车	大型 燃油车	小型 混动车	
南进口	直行	308	92	116	3 265
	左转	26	6	10	1 555
北进口	直行	297	49	112	3 350
	左转	44	36	17	1 430
东进口	直行	33	4	12	3 015
	左转	13	5	5	1 405
西进口	直行	35	7	13	3 020
	左转	101	12	38	3 170

4.2 结果分析

基于上述基础数据以及本文求解算法,采用数值仿真的形式分别将其应用于仅考虑流量条件的 Webster 延误模型和本研究构建的交叉口信号配时优化模型,结果如图 7 所示。从图 7 中可以发现,随着交叉口信号周期时长的增加,两者的车均 NO_x 排放均呈现出先减少后增加的趋势,当信号周期时长为 140 s 时,目标函数车均 NO_x 排放均取得最小值。因此,可以说明 C=140 s 为交叉口的最佳信号周期,是该信号控制系统在保证环境效益和通行效率方面的最佳选择。此外,可以看出,本研究构建的交叉口信号配时优化模型的车均 NO_x 排放减少率可达到 31.29%,明显优于 Webster 模型。

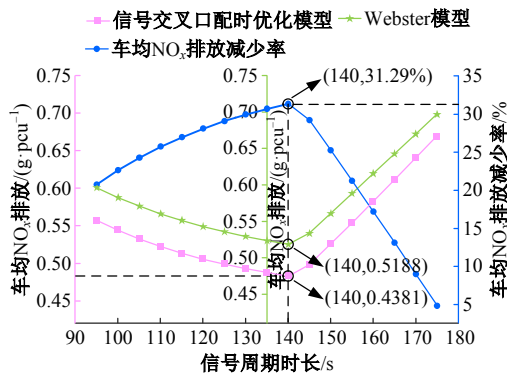


图 7 信号周期时长对目标函数的影响
Fig. 7 Impact of signal cycle length on objective function

最佳信号周期下对应的信号配时方案以及优化前后的结果分别如图 8 和表 4 所示。图 8 表明,优化后的信号配时方案为:南北直行与左转相位的绿灯时间 $g_1=98$ s,东西直行相位的绿灯时间 $g_2=21$ s,东西左转相位的绿灯时间 $g_3=15$ s,信号周期时长 $C=140$ s。通过表 4 可以发现,优化前后的信号周期时长 C 由 160 s 缩短至 140 s,车均 NO_x 排放量由 0.703 2 g/pcu 减少到 0.483 1 g/

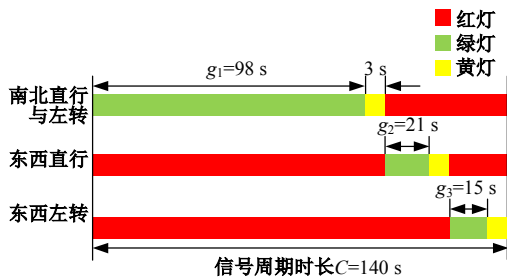


图 8 优化后的最佳信号配时方案
Fig. 8 Optimal signal timing scheme after optimization

pcu,减少率达到 31.29%。可以说明,通过优化交叉口信号配时方案可以显著降低车辆尾气排放,有效提升环境效益,具有一定的实际意义与应用价值。

表 4 交叉口信号配时优化前后的结果

Table 4 Results before and after intersection signal timing optimization			
配时方案	信号周期/s	车均 NO _x 排放/(g·pcu ⁻¹)	车均 NO _x 排放减少率/%
现状控制方案	160	0.703 2	—
Webster 模型	140	0.518 8	26.22
信号交叉口配时优化模型	140	0.483 1	31.29

在以车均 NO_x 排放最小为控制目标进行信号配时优化后,从图 9 中可以发现,车均延误和平均停车次数也同时得到改善。当信号周期时长 C 为 140 s 时,两者分别下降了 43.99% 和 28.88%。此外,图 10 表明,在不同信号周期时长下,交叉口范围内的大型燃油车 NO_x 小时排放量占比均超过 90%,显著高于其他两种车型。

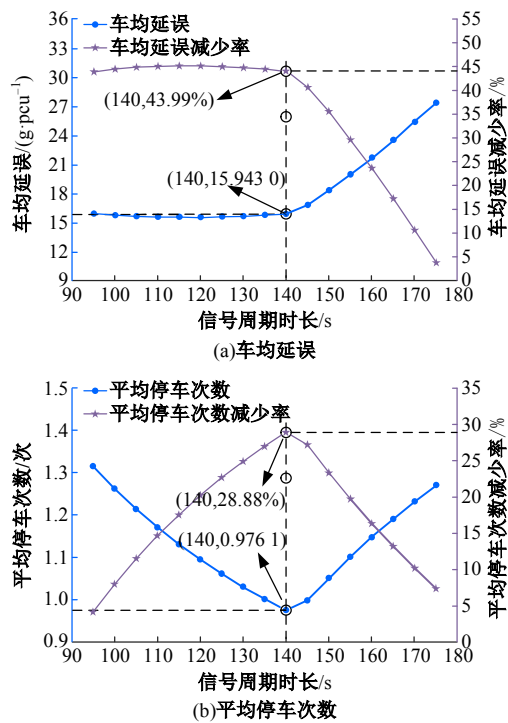
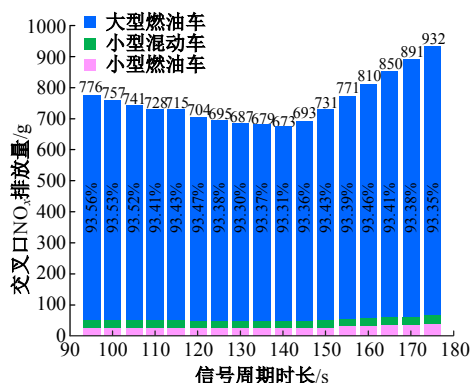


图 9 信号周期时长对车均延误及平均停车次数的影响
Fig. 9 Effect of signal cycle length on average vehicle delay and average number of stops

4.3 主要参数敏感性分析

(1) 交通量水平对 NO_x、延误及停车次数的影响

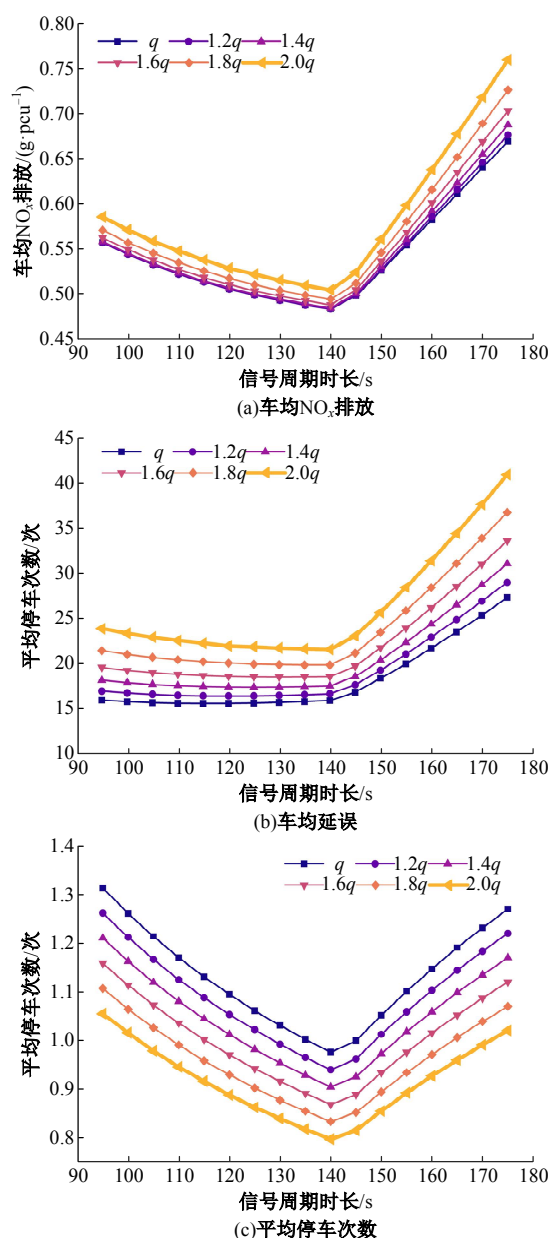
随着未来年机动车保有量的逐年增长,假设

图10 交叉口不同类型车辆NO_x排放情况Fig. 10 NO_x emission of different types of vehicles at intersection

交通量水平在现状交通量 q 的基础上分别增长20%、40%、60%、80%和100%，以此研究不同交通量水平对车均NO_x排放、车均延误以及平均停车次数的影响，结果如图11所示。可以看出，随着交通量的增加，在同一信号周期下车均NO_x排放和车均延误呈现逐渐增加的趋势，且相邻两条曲线间的间距也逐渐增大，而平均停车次数则呈现逐渐减少的趋势。究其原因，针对车均NO_x排放和车均延误，当交通量逐渐增大时，车流密度增加，车辆间的相互干扰增强，车速降低，导致车均延误增加。而延误时间越长，车辆在低速或怠速工况下停留的时间越长，燃油消耗增加，NO_x排放也因此上升。同时也反映了交通流密度的增加对车辆NO_x排放和通行效率的非线性放大效应。相对而言，平均停车次数的减少可以理解为在高交通量下，车头间距减小，整个交通流趋于饱和，车辆反而更有可能保持在一个相对低速但连续的状态，从而减少了停车次数。这一现象体现了交通流的“饱和效应”。

(2) 左转车辆比例对NO_x、延误及停车次数的影响

该交叉口采用三相信号控制方案，南北进口道直行与左转车辆位于同一相位，导致左转车辆与对向直行车辆存在冲突点，进而对交叉口范围内的NO_x排放与通行效率造成一定影响。假设南北进口道方向左转车辆比例分别为20%、40%、60%和80%，以此探究其对交叉口范围内车均NO_x排放、车均延误以及平均停车次数的影响，结果如图12所示。可以看出，在同一信号周期时长下，当左转车辆比例在40%左右时，车均NO_x排放和车均延误达到最低，而当左转车辆比

图11 不同交通量水平对车均NO_x排放、车均延误及平均停车次数的影响Fig. 11 Effect of different traffic levels on average vehicle NO_x emissions, average vehicle delay and average number of stops

例在80%左右时，两者显著增加，表明在高左转车辆比例下，左转车辆与对向直行车辆的冲突增加，导致车辆在交叉口内的停留时间延长，从而增加了NO_x排放和延误。而针对平均停车次数，随着左转车辆比例的增加，其呈现出逐渐减少的趋势。究其原因，主要是因为左转弯车辆比例较高的情况下，直行车辆的相对比例减少，左转弯车辆能够更有效地利用信号相位，减少了信号周期内的停车次数。

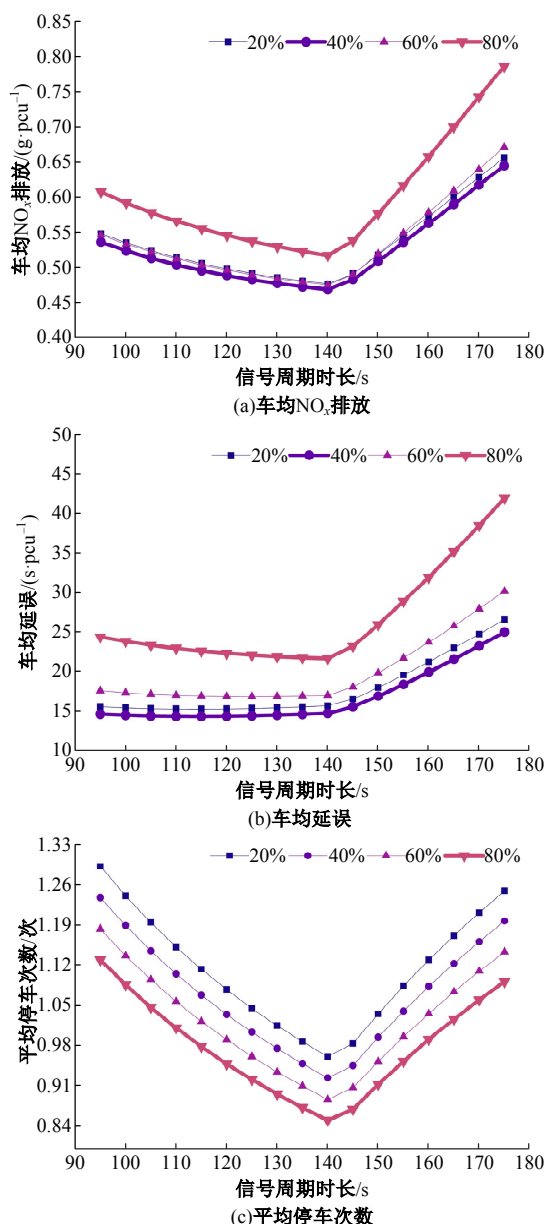


图12 不同左转车辆比例对车均 NO_x 排放、车均延误及平均停车次数的影响

Fig. 12 Effect of different percentages of left-turning vehicles on vehicle-averaged NO_x emissions, vehicle-averaged delay, and average number of stops

(3) 混动车渗透率对 NO_x 、延误及停车次数的影响

在电动车市场占有率不断增加的情形下,混动车渗透率也将呈现出逐渐上升的趋势。假设混动车渗透率分别为10%、15%、20%和25%时,探究其对车均 NO_x 排放的影响,结果如图13所示。可以看出,在同一信号周期时长下,混动车渗透率从10%增加到25%时,交叉口范围内车均 NO_x 排放显著降低。这一趋势在不同信号周期时

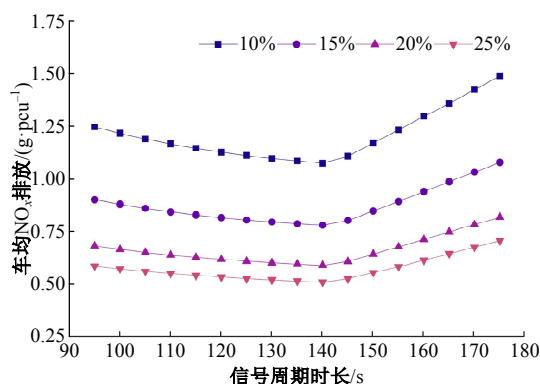


图13 混动车不同渗透率对车均 NO_x 排放的影响

Fig. 13 Effect of different penetration rates of hybrid vehicles on vehicle average NO_x emissions

长下也均表现出一致性。这一结果表明,提升混动车渗透率对降低 NO_x 排放具有显著的正面效应,而优化信号周期配时方案可以进一步增强这一效果。对于城市交通管理和环保政策的制定,这一结果具有重要的参考价值。表明通过增加混动车的市场占有率优化交通信号配时,可以有效减少城市空气污染。

4.4 优化建议

基于上述分析结果,针对交叉口信号配时方案给出以下优化建议:

(1) 针对不同的交通量水平,在低交通量下,可以适当缩短信号周期,以减少车辆不必要的停车次数和怠速时间,从而降低 NO_x 排放;而在高交通量下,应适当延长信号周期时长,较长的绿灯时间可以让更多的车辆在一次绿灯期间通过路口,从而减少频繁启停。这有助于减少交通拥堵、降低车辆排队时间,并减少因频繁刹车和启动产生的污染物排放。同时也可通过引入智能交通控制系统,实时监测交通流量并动态调整信号周期。

(2) 针对交叉口直行与左转车流位于同一信号相位的情形,应适当控制左转车流比例,使其尽可能处于一个最优值。当进口道左转车流比例较高时,可通过优化信号周期时长来维持该比例在一个合理的范围内,或者在交叉口上游路段提前分离部分左转车流,降低当前交叉口处左转车流的比例,实现更加均衡的交通流分布,最终达到提升交叉口整体环境效益和通行效率的目标。

(3) 政府和交通管理部门可以通过采用政策激励和基础设施建设等措施,进一步提升纯电动车和混动车的市场占有率。例如,提供购车补贴、减免通行费、增加充电桩布局、设立纯电动车和混

动车优先通行车道等措施,鼓励更多驾驶者选择纯电动车和混动车。此外,为降低混动车的 NO_x 排放,驾驶员在行驶过程中可通过优化驾驶行为和策略,尽可能长时间保持车辆在CD模式运行,以充分发挥其环保效益。

5 结 论

(1)以交叉口范围内车均 NO_x 排放最小为优化目标,以车均延误以及平均停车次数等为约束条件,提出了减速、加速、怠速、巡航4种不同工况下车辆 NO_x 排放的计算方法,构建了以燃油车与混动车构成的混合交通环境下交叉口信号配时优化模型,并运用遗传算法通过实例验证了其在混合交通场景中的有效性。分析结果表明,车均 NO_x 排放、车均延误以及平均停车次数的减少率分别达到31.29%、43.99%和28.88%,显著优于传统Webster模型。充分验证了本文方法的适用性和可行性。

(2)对不同交通量水平、左转车辆比例以及混动车渗透率等主要参数进行了敏感性分析。结果表明,为减少车均 NO_x 排放,同时协同性降低车均延误和平均停车次数,在低交通量下,可适当缩短信号周期,而在高交通量下,应适当延长信号周期;当进口道左转车流比例较高时,可通过优化信号周期时长或在交叉口上游路段提前分离部分左转车流,降低当前交叉口处左转车流的比例;政府和交通管理部门可以通过政策激励和增加充电设施建设,进一步提升电动车的市场占有率。

(3)信号交叉口配时优化问题是一个不断深入研究的过程,本文仅对其部分内容开展了研究,后续可在现有研究的基础上,基于智能网联技术的不断发展,实时获取道路交通中每辆混动车的SOC状态,以对该问题开展更进一步研究。此外,本研究仅探讨了单一交叉路口的信号配时优化问题,在后续研究中可针对区域路网分析交叉口群信号配时方案对交通环境效益和通行效益的影响。

参考文献:

- [1] Hu X, Chen X, Guo J, et al. Optimization model for bus priority control considering carbon emissions under non-bus lane conditions[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 402: No. 136747.
- [2] Akcelik R. Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis[M]. Melbourne: Australian Road Research Board, 1981.
- [3] Liu H, Gayah V V, Levin M W. A max pressure algorithm for traffic signals considering pedestrian queues[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2024, 169: No. 104865.
- [4] Fan J, Baumann M, Jokhio S, et al. Evaluating the impact of signal control on emissions at intersections [C]//Proceedings of KES-STIS International Symposium, Singapore, 2022: 104-111.
- [5] Harrington W. A Behavioral Analysis of EPA's Mobile Emission Factor Model[M]. Washington DC: Federal Highway Administration, 1998.
- [6] Barth M, Malcolm C, Younglove T, et al. Recent validation efforts for a comprehensive modal emissions model[J]. Transportation Research Record, 2001, 1750(1): 13-23.
- [7] U. S. EPA. Draft motor vehicle emission simulator (MOVES) 2009: software design reference manual [R]. Washington DC: Environmental Protection Agency, 2009.
- [8] 姜壁刚, 何超, 王艳艳, 等. 道路坡度对轻型柴油车二氧化碳排放的影响[J]. 公路交通科技, 2025, 42(2): 207-214.
Jiang Bi-gang, He Chao, Wang Yan-yan, et al. Influence of road gradient on CO_2 emission from light-duty diesel vehicles[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42(2): 207-214.
- [9] 吉喆, 王鑫, 尹航, 等. 考虑实际路况下排气温度的重型柴油车 NO_x 排放模型[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2024, 52(2): 136-144.
Ji Zhe, Wang Xin, Yin Hang, et al. NO_x emission model of heavy-duty diesel vehicles considering exhaust temperature under real-world driving conditions [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(2): 136-144.
- [10] Xu J, Tu R, Ahmed U, et al. An eco-score system incorporating driving behavior, vehicle characteristics, and traffic conditions[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 95: No. 102866.
- [11] 杨楠, 肖军. 序列二次规划算法下城市智能交通运行节能优化控制[J]. 吉林大学学报:工学版, 2024, 54(8): 2223-2228.
Yang Nan, Xiao Jun. Energy saving optimization con-

- trol of urban intelligent transportation under sequential quadratic programming algorithm[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024, 54(8): 2223-2228.
- [12] Chen J, Wang K, Yu H, et al. A novel VSP-based CO_2 emission model for ICEs and HEVs based on internally observable variables: engine operating speeds [J]. Energy, 2024, 313: No. 133892.
- [13] 彭飞, 宋国华, 尹航, 等. 面向实际交通状态的混合动力汽车能耗和 CO_2 排放模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 316-326.
- Peng Fei, Song Guo-hua, Yin Hang, et al. Energy consumption and CO_2 emission model for hybrid vehicles in real traffic conditions[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(6): 316-326.
- [14] Frey H, Unal A, Chen J. Methodology for developing modal emission rates for EPA's multi-scale motor vehicle & equipment emission system[R]. Washington DC: Environmental Protection Agency, 2022.
- [15] 张硕, 曹自强, 张春梅, 等. 插电式混合动力汽车全生命周期评价及情景模拟[J]. 环境科学, 2025, 46(6): No. 202405052.
- Zhang Shuo, Cao Zi-qiang, Zhang Chun-mei, et al. Life cycle assessment and scenario simulation of plug-in hybrid electric vehicles[J]. Environmental Science, 2025, 46(6): No. 202405052.
- [16] 曾小华, 王星琦, 宋大风, 等. 考虑电池寿命的插电式混合动力汽车能量管理优化[J]. 浙江大学学报:工学版, 2019, 53(11): 2206-2214.
- Zeng Xiao-hua, Wang Xing-qi, Song Da-feng, et al. Battery-health conscious energy management optimization in plug-in hybrid electric vehicles[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2019, 53(11): 2206-2214.
- [17] Hu J, Frey H C, Sandhu G S, et al. Method for modeling driving cycles, fuel use, and emissions for over snow vehicles[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(14): 8258-8265.
- [18] Fernandes P, Ferreira E, Macedo E, et al. Unraveling roundabout dynamics: Analysis of driving behavior, vehicle performance, and exhaust emissions[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 133: No. 104308.
- [19] 赵慧雄, 陈艳艳, 张斌, 等. 考虑交通和环境效益的公交优先信号配时研究[J]. 公路交通科技, 2024, 41(2): 212-222.
- Zhao Hui-xiong, Chen Yan-yan, Zhang Bin, et al. Study on transit signal priority timing considering traffic and environmental benefit[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41(2): 212-222.
- [20] Niroumand R, Tajalli M, Hajibabai L, et al. Joint optimization of vehicle-group trajectory and signal timing: Introducing the white phase for mixed-autonomy traffic stream[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 116: No. 102659.