



研究与开发

C-V2X 网联环境下应急优先的绿灯补偿模型研究

张长隆, 韩发荣, 魏吉敏, 戴金钢, 杨晓东, 瞿仕波
(长沙智能驾驶研究院有限公司, 湖南 长沙 410023)

摘要: 针对在路口实施应急车辆优先策略会对非优先相位交通造成影响的问题, 在蜂窝车联网 (C-V2X) 环境下进行了均衡非优先相位通行效益的绿灯补偿模型研究。搭建了相应的算法模型, 并对一辆应急车辆的场景进行了模拟。该模型在不影响应急车辆优先通行的前提下, 根据非优先相位实时交通需求计算补偿绿灯时间, 从而最小化应急优先对非优先相位的车辆通行影响。仿真结果证明, 所提模型在不同的饱和度状态下均可有效地降低应急车辆通过后非优先相位车辆的平均延误时间和平均排队长度。所提模型对于应急车辆通过红绿灯路口的策略进行了优化, 提高了通行效率。

关键词: 应急车辆优先; C-V2X; 非优先相位; 绿灯补偿; 排队长度

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024003

Research on green light compensation model for emergency preemption in C-V2X environment

ZHANG Changlong, HAN Farong, WEI Jimin, DAI Jingang,
YANG Xiaodong, QU Shibo
Changsha Intelligent Driving Institute, Changsha 410023, China

Abstract: To reduce the impact of the emergency vehicle preemption strategy on vehicles in non-priority phases at intersections, an emergency preemption green light compensation model in C-V2X environment was proposed. The proposed model doesn't affect the emergency vehicle preemption strategy. The green time of the non-priority phases was calculated according to the real-time traffic demand to minimize the adverse impact on vehicles in non-priority phases. The proposed model was verified with simulation using an emergency vehicle. The results demonstrate that the proposed method can effectively decrease the queue lengths and reduce the average delay in non-priority phases after applying the emergency vehicle preemption strategy. The proposed method can improve traffic efficiency by optimizing the signal timing after the emergency vehicle passes through an intersection.

Key words: emergency vehicle preemption, C-V2X, non-priority phase, green light compensation, queue length

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2024-01-08

通信作者: 韩发荣, han.fr@cidi.ai



0 引言

在现代社会,自然灾害、意外灾害、公共卫生事件、社会安全事件等突发事件频繁发生,给人民群众生命和财产安全带来巨大损失,应急响应成为社会公共服务中最重要的内容之一。应急车辆,如消防车、救护车、警车,是应急响应系统中基本的组成部分。确保应急车辆及时到达现场,对高效完成应急任务意义重大^[1-2]。应急车辆优先(emergency vehicle preemption, EVP)系统可降低应急车辆的响应时间,提高应急交通和应急救援的效率,确保应急车辆安全且快速地通过交叉口^[3-5]。

传统的应急车辆优先系统通过在路口一定范围内部署固定检测器(射频识别(radio frequency identification, RFID)、摄像机、线圈等)实现,系统的优先时间与灵活性受限^[6]。近年来,蜂窝车联网(cellular-vehicle to everything, C-V2X)技术发展迅速,该技术可弥补传统交通检测手段在信息交互方面的弊端^[7-8]。V2X技术与应急车辆优先系统的结合,使信号控制设备可更及时、更全面地掌握应急车辆及路口实时状态,确保应急优先服务更加高效与安全^[9-10]。然而,尽管应急车辆优先减少了应急车辆的行程时间和路口延误,但对路口整体交通产生了一定的负面影响,甚至打乱了控制系统的协调性^[11-12]。当应急车辆通过目标路口后,如何给予非优先方向绿灯补偿来满足其正常交通需求以及如何从优先控制状态转移到正常状态,是应急车辆优先系统重要的一环。本文针对应急优先对非优先方向车辆的影响问题,开展 C-V2X 网联环境下应急优先的绿灯补偿模型研究。

1 研究现状

C-V2X 技术的发展推动了新环境下应急车辆优先系统的研究,基于 C-V2X 的优先控制使应急车辆更加安全与高效。在路口,基于车路(vehicle to infrastructure, V2I)通信,信号机可

实现对应急车辆位置的全程跟踪,交通信号状态切换更加灵活且准确^[13],同时也可动态优化应急车辆的行驶路径^[14-15]。在路段,基于车车(vehicle to vehicle, V2V)通信可实现应急车辆与普通车辆的协作让道与车道预留,保证应急车辆在路段的绝对优先^[16-17]。

然而,现阶段大量研究主要集中在应急优先如何高效地为应急车辆服务上,而忽略了对非优先方向通行效益的考虑。关于非优先车辆利益的研究主要集中在 3 个方向:一是当应急车辆通过路口后采用不同的恢复策略尽快、平滑地从优先状态恢复到正常控制状态,该过程不考虑对非优先车辆进行补偿;二是对应急车辆制定优先策略时兼顾对非优先车辆造成的影响,实现应急车辆与非优先车辆的利益均衡;三是优先保证应急车辆最短时间通过路口,然后对非优先车辆损失的时间进行补偿。

应急车辆通过路口后采用恢复策略直接恢复正常控制状态,目的在于减少优先对路口稳态造成的扰动。文献[18]提出了固定退出相位、动态退出相位、协调相位时长调整等机制,当应急车辆通过目标路口后控制机根据不同的机制将优先状态切换到正常控制方案。文献[19]为了降低应急车辆优先对路口交通流的影响,当应急车辆通过路口后基于线性规划模型计算每个相位的最短绿灯时间,信号机运行该方案保证尽快恢复到正常状态。尽管通过有效的恢复机制可以保证信号机以最短的时间或最小的扰动从优先状态切换到正常状态,但应急车辆优先策略对非优先方向造成的影响依然没有解决。特别是当路口交通需求较大时,部分因应急车辆优先未及时通过路口的非优先方向车辆在路口滞留,即使恢复到正常控制状态也无法短时清空。

将非优先方向的交通需求考虑到应急车辆优先系统设计中,是一种解决上述问题较好的思路。文献[20]在应急车辆优先决策阶段搭建了混合整数线性规划模型,将非优先方向请求考虑在内,通过最小化优先请求延误和非优先方向通行请求的总

权值, 输出最优运行方案以满足应急车辆和其他车辆的需求。文献[21]基于应急车辆到达路口的时间和社会车辆排队的消散时间, 精准计算出信号机开始执行应急车辆优先的时刻, 通过将优先执行周期降到最小间接减少对社会车辆的影响。应急车辆优先决策时考虑非优先交通的效益是在应急车辆优先和对社会车辆影响之间实现均衡处理, 这会导致应急车辆优先的性能无法得到绝对保证^[22]。

部分研究提出了一种新的思路用于解决上述问题, 即在应急车辆通过路口后到路口恢复正常控制状态之间加入一个“过渡阶段”, 该阶段用于非优先相位绿灯时间补偿, 弥补非优先方向因执行应急车辆优先损失的通行时间。在文献[23-24]中, 当应急车辆通过路口后, 控制机根据非优先相位总压缩时长、优先相位和非优先相位初始绿灯时长比计算非优先相位需返还时长, 最终将该时长加到非优先相位初始时长上。文献[13]比较当前信号相位时长与一半周期时长的大小, 分别执行非优先相位主动绿灯补偿或被动绿灯补偿。文献[11]也强调, 当应急车辆经过路口后需要返还部分绿灯时间给非优先相位, 但未涉及具体算法。然而, 根据某种固定规则补偿非优先相位的绿灯时间无疑是有意义的但不是绝对的, 当非优先相位交通需求较小甚至无交通需求时绿灯补偿是否必要值得商榷。文献[25]考虑应急车辆优先执行后非优先方向的效率与公平, 以转移周期单位时间内最大的通过车辆数和最小的排队长度差为目标函数、以各相位绿灯时长和信号转换标志为决策变量搭建优化模型, 最小化应急车辆优先对非优先方向交通造成的影响。文献[26]在应急车辆通过交叉口后, 根据各交叉口不同相位的社会车辆排队长度建立信号过渡模型, 模型根据应急车辆通过交叉口后的实际交通需求进行绿灯时间分配。

为弥补应急车辆优先执行后对非优先方向车辆造成的利益损失, 本文提出了一种 C-V2X 网联环境下的应急优先绿灯补偿模型, 模型利用 V2I

实现不同信号状态下的实时排队车辆监测, 基于相位的饱和度 (volume to capacity ratio, VCR) 实时判断非优先方向通行需求, 搭建了以增量排队累积 (incremental queue accumulation, IQA) 延误算法为基础的信号补偿模型均衡多个非优先相位的通行效益。同时, 模型考虑了方案恢复机制保证路口信号配时可以顺利转换到优先前的正常状态。

2 模型建立

基于 C-V2X 的应急车辆优先系统架构如图 1 所示, 系统主要由车载单元 (on board unit, OBU)、路侧单元 (road side unit, RSU)、交通信号控制机 (traffic signal controller, TSC)、交通信号灯 (traffic signal light, TSL)、云中心 (cloud center, CC) 和人机界面 (human machine interface, HMI) 6 个部分组成。其中 OBU、HMI 部署在车端, RSU、TSC、TSL 部署在路侧。当装有 OBU 的应急车辆接近目标路口时会根据自车的运动状态数据 (包括位置、航向、速度等) 和来自云中心的地图数据判断是否发送应急优先请求。RSU 收到应急车辆的优先请求后根据请求方向和 TSC 实时推送的灯态数据确定优先策略并向 TSC 发送控制请求, TSC 根据当前运行模式判断是否可控。若可控, TSC 执行优先方案, 同时向 RSU 发送控制响应反馈, 最后, 优先结果经 OBU 显示到 HMI 界面告知驾驶员。

应急车辆优先系统的核心内容是优先控制算法, 该算法在 RSU 中运行。RSU 接收并解析来自 TSC 的灯态信息、来自应急车辆的优先请求数据和来自云中心的地图数据。如果当前运行相位 (即绿灯相位) 与应急车辆请求相位一致, 则保持当前相位绿灯直到应急车辆通过交叉口。如果当前运行相位与应急车辆请求相位不一致, 则判断当前运行相位已运行时长是否满足该相位最小绿灯时长 $g_{\min}$, 如果满足则当前运行相位执行黄灯, 应急车辆请求相位转换为绿灯; 如果不满足则保持当前运行相位绿灯直到已运行时长大于或等于 $g_{\min}$ 。

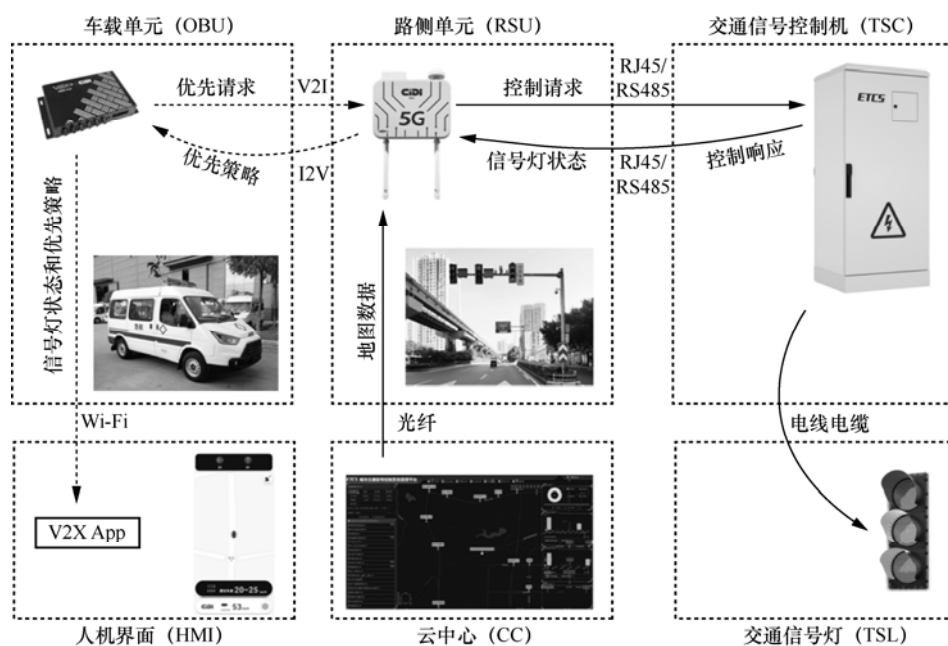


图1 基于C-V2X的应急车辆优先系统架构

执行应急车辆优先策略会调整路口原配时方案, 优先相位受益而非优先相位的通行时间会被压缩或延迟。为减少应急车辆优先对非优先相位车辆的影响, 本文设计了非优先相位绿灯补偿模型对其绿灯时长进行补偿。在C-V2X网联环境下, 模型假设所有车辆均为网联车辆, 接近路口的车辆(包括应急车辆、一般车辆)可将自身状态数据发送到RSU。当应急车辆经过路口后, RSU根据当前路口的排队通行需求判断是否给予非优先相位绿灯补偿。如果需要补偿则执行补偿逻辑, 待所有非优先相位运行完毕, 恢复信号机初始控制方案; 否则, 直接恢复初始控制方案。应急车辆优先系统信号补偿模型流程如图2所示, 模型主要分为非优先相位排队车辆数计算、绿灯补偿需求判断、目标函数搭建和遗传算法求解、最优方案执行和初始方案恢复, 具体计算方法将在本节给出。

2.1 非优先相位实时排队车辆数计算

考虑排队车辆数相比于车辆延误、停车次数、行程时间等更具实时性, 且可更直接反映各相位通行需求, 本文基于非优先相位实时排队车辆数建立信号补偿模型。定义非优先相位 i 在当前时间点时停止线前

车道 k 的排队车辆数 $q_{s,i,k}$ 由两部分组成, 分别为上周期黄灯结束剩余排队车辆数 $q_{y,i,k}$ 和上周期黄灯结束至当前时间点到达车辆数 $q_{r,i,k}$, 具体如式(1)所示。

$$q_{s,i,k} = q_{y,i,k} + q_{r,i,k} \quad (1)$$

当确定非优先相位各车道排队车辆数 $q_{s,i,k}$ 后, 取 $q_{s,i,k}$ 值最大的车道为关键车道, 后文所提非优先相位排队车辆数、车辆到达率、车辆延误均针对关键车道。其中非优先相位 i 在当前时间点时停止线前排队车辆数 $q_{s,i}$ 如式(2)所示, num为非优先相位 i 对应的车道数。

$$q_{s,i} = \max(q_{s,i,1}, \dots, q_{s,i,k}, \dots, q_{s,i,num}) \quad (2)$$

RSU基于接收的网联车状态数据和信号机推送的灯态数据计算非优先相位 i 的排队车辆数 $q_{s,i}$, 并计算 $q_{s,i}$ 对应车道的 $q_{y,i}$ 。定义当前时间点所有相位已等待红灯时长集合 R 为各相位上周期黄灯结束到当前时间点的时间, $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, 其中应急车辆请求相位 p 的 $r_p = 0$, n 为总相位数。则非优先相位 i 的车辆到达率 λ 由式(3)计算。

$$\lambda_i = (q_{s,i} - q_{y,i}) / r_i \quad (3)$$

假设非优先相位绿灯启亮时 $t=0$, 则相位 i 在

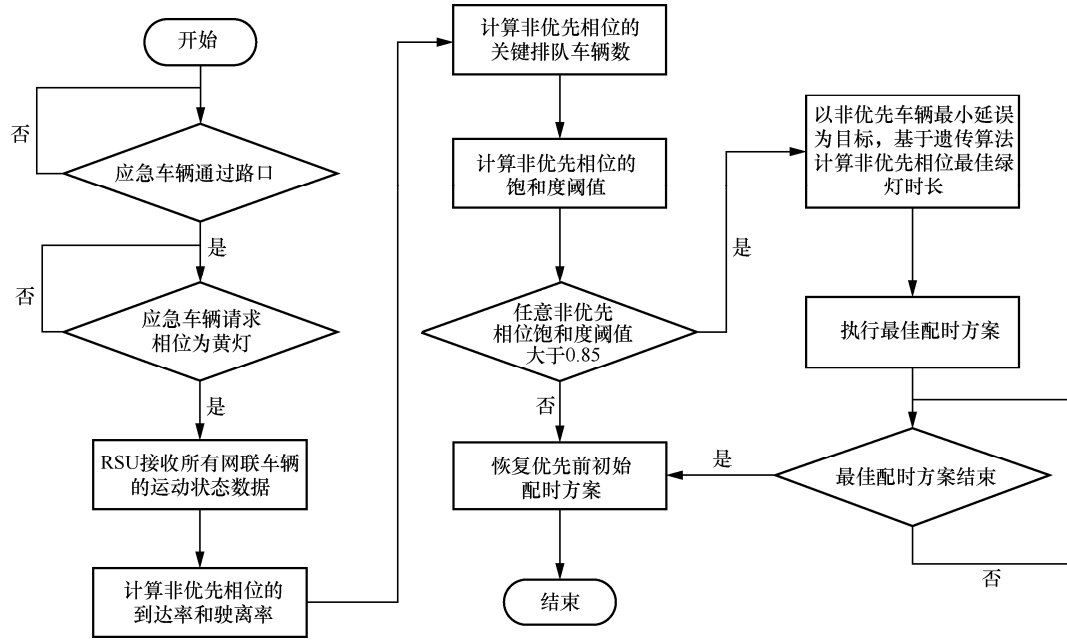


图2 应急车辆优先系统信号补偿模型流程

绿灯 t 时刻的排队车辆数可由式 (4) 计算。

$$q_{i,t} = q_{s,i} + \lambda_i t - \mu_i t \quad (4)$$

其中, $q_{i,t}$ 为非优先相位 i 在 t 时刻的排队车辆数, λ_i 为非优先相位 i 的车辆到达率, μ_i 为非优先相位 i 的车辆驶离率。非优先相位车辆驶离率 μ_i 可由式 (5) 计算, 其中 h 为车头时距。

$$\mu_i = 1/h \quad (5)$$

信号控制路口车头时距计算可依据 HCM2000^[27] 中对信号交叉口引道车道交通间断情况下的车头时距分布模型确定, 信控路口绿灯车头时距分布概念图如图 3 所示。由于路口信号从红灯转为绿灯后, 首车需要反映这一状态切换并加速通过路口, 这时首车车头时距较大, 后续车辆逐步缩短直到以稳定的速度通过停止线, 此时车头时距达到饱和车头时距。车头时距由式 (6) 计算。

$$h = \begin{cases} h_s + t_1, & t \leq h_s + t_1 \\ h_s + t_2, & h_s + t_1 < t \leq 2h_s + t_1 + t_2 \\ h_s + t_3, & 2h_s + t_1 + t_2 < t \leq 3h_s + t_1 + t_2 + t_3 \\ h_s + t_4, & 3h_s + t_1 + t_2 + t_3 < t \leq 4h_s + t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \\ h_s, & t > 4h_s + t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \end{cases} \quad (6)$$

其中, h_s 为饱和车头时距。前 4 辆车的平均车头时距大于 h_s , 用 $h_s + t_k$ 表示, 其中 t_k 是绿灯启亮后第 k 辆车由于启动反应和加速产生的车头时距增量, k 从 1 到 4, t_k 则逐渐减小。

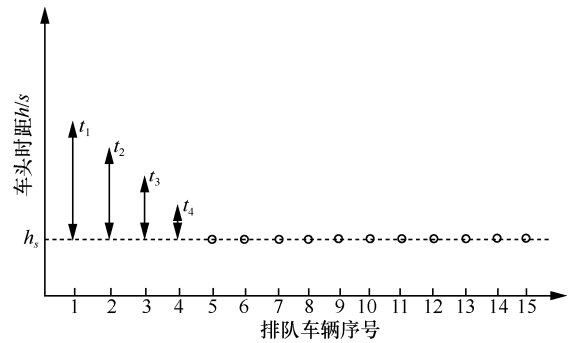


图3 信控路口绿灯车头时距分布概念图

2.2 非优先相位绿灯信号补偿

2.2.1 补偿需求判断

非优先相位绿灯信号补偿的目的在于降低优先策略对非优先相位车辆通行效率的影响, 然而当非优先方向交通需求较低时, 即使不对非优先方向进行补偿, 路口通行能力也能满足当前需求, 所以信号补偿的触发时机非常关键。本文选取流量与通行能力的比值 VCR 作为判断是否执行信



号补偿的阈值参数,因为流量容易通过传感器获取且可实时反映交叉口通行需求。根据 HCM2000^[27],当 VCR 小于或等于 0.85 时交叉口状态低于通行能力,当 VCR 大于 0.85 时交叉口状态接近或者大于通行能力。所以本文选取 0.85 为 VCR 控制阈值,当执行优先策略后非优先相位 VCR 小于或等于该值则认为路口通行能力可满足该需求而无须执行补偿,此时应急车辆优先未对非优先方向造成消极影响;当非优先相位 VCR 大于该值时说明该方向已接近通行能力,此时绿灯补偿是必要的。VCR 计算如式 (7) 所示。

$$vcr_i = v_i c / (s_i g_i) \quad (7)$$

其中, vcr_i 为非优先相位 i 补偿前的 VCR; v_i 为非优先相位 i 的小时交通量,单位为 pcu/h; c 为补偿前的周期长度; s_i 为非优先相位 i 的饱和流率,单位为 pcu/h; g_i 为非优先相位 i 补偿前的绿灯时长,单位为 s。其中, v_i 如式 (8) 所示。

$$v_i = 3\,600(q_{s,i} + \lambda_i g_i) / c \quad (8)$$

然而,非优先相位可能不止一个,本文规定如果任意一个非优先相位的 VCR 大于 0.85,则对所有非优先相位进行补偿计算。

2.2.2 绿灯补偿模型

综合考虑执行优先策略后对路口的效率提升和均衡调控,采用非优先相位车辆总延误最小作为信号补偿模型的控制指标计算绿灯补偿时长。针对单点信号控制,该指标适用于非饱和与饱和的交通环境。本文采用 IQA 延误计算模型^[28],该模型可通过累计排队车辆数计算交叉口非优先相位车辆的累计延误。

IQA 计算模型示意图如图 4 所示,假设统计间隔为 Δ ,则图 4 中“X”表示为一辆排队车辆且其延误时间为 Δ 。 $T_{i, \text{redEnd}}$ 、 $T_{i, \text{greenEnd}}$ 分别表示相位 i 红灯结束时间和绿灯结束时间, $T_{i, \text{clear}}$ 为相位 i 对应车道排队清空时间, $Q_{\max}$ 为最大排队车辆数。

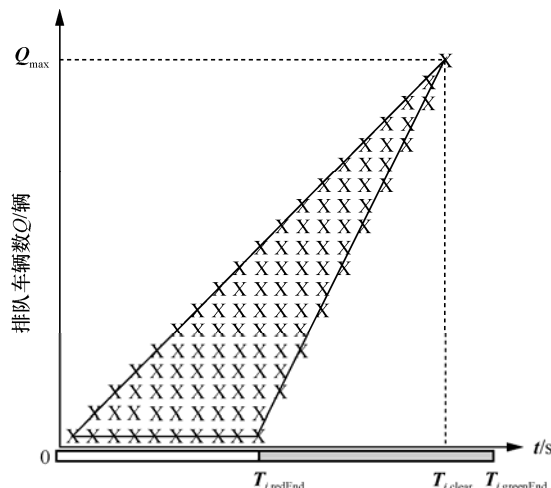


图 4 IQA 计算模型示意图

IQA 延误计算模型示例见表 1,该示例中 $\Delta=2$ s。综上, IQA 延误计算模型可由式 (9) 计算。

$$\bar{d} = \sum_{\text{index}=1} (\text{IQA} \times \Delta) / \sum_{\text{index}=1} \ln \quad (9)$$

其中, $\bar{d}$ 为相位车均延误, $\ln$ 为每次统计间隔新增排队车辆数,表 1 示例中总延误为 72 s,车均延误为 72 s/12=6 s。

信号补偿决策示意图如图 5 所示,定义应急车辆请求相位 p 的黄灯结束时刻(非优先相位开始)为 $t=0$ 时刻,该时刻为信号补偿决策点。非优先相位集合 $\text{PN}=\{1, 2, \dots, m\}$, m 为非优先相位个数且 $m=n-1$, T 为非优先相位 PN 的总时长。时间离散步长取值为 1 s,因此,每个时间步长的排队车辆数等于车辆的总延误值。相位绿灯延误可用式 (10) 计算。

$$d_{g,i} = \sum_{t=1}^{t=g'_i} (q_{s,i} + \lambda_i t - \mu_i t) \quad (10)$$

其中, $d_{g,i}$ 为非优先相位 i 的累计绿灯延误; g'_i 为非优先相位 i 补偿后的绿灯时长,其中包括 3 s 黄闪。然而,在决策时长 T 内为均衡各非优先相位排队车辆延误,需要同时考虑相位绿灯延误和红灯排队延误,则非优先相位 i 的累计延误 d_i 可用式 (11) 计算。

$$d_i = \sum_{t=1}^{t=G_{\text{sum},i}} (q_{s,i} + \lambda_i t) - \sum_{t=1}^{t=g'_i} \mu_i t + \sum_{t=1}^{t=T-G_{\text{sum},i}} \lambda_i t \quad (11)$$

表 1 IQA 延误计算模型示例

统计次数 编号	统计时间间隔/s	每次统计间隔 新增排队车辆数	每次统计间隔 驶离车辆数	每次统计间隔的累计 排队车辆数 (IQA)	每次统计间隔的 累计延误(IQA×Δ)	
1	0~2	1	0	1	2	红灯开始
2	2~4	1	0	2	4	
3	4~6	1	0	3	6	
4	6~8	1	0	4	8	
5	8~10	1	0	5	10	
6	10~12	1	0	6	12	
7	12~14	1	2	5	10	绿灯开始
8	14~16	1	2	4	8	
9	16~18	1	2	3	6	
10	18~20	1	2	2	4	
11	20~22	1	2	1	2	
12	22~24	1	2	0	0	
	合计	12	12	36	72	

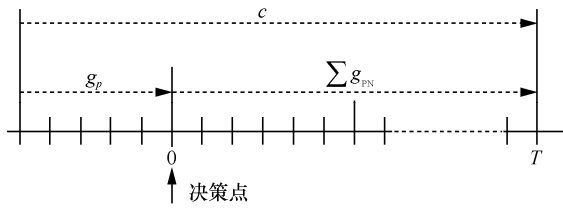


图 5 信号补偿决策示意图

其中,

$$G_{\text{sum},i} = \sum_{j=1}^i g'_j, i, j \in \text{PN} \quad (12)$$

$$T = \sum_{i=1}^m g'_i, i \in \text{PN} \quad (13)$$

为最小化公交优先给非优先相位带来的影响,考虑以非优先相位排队车辆总延误最低为目标函数建立绿灯补偿模型,决策变量为非优先相位补偿后的绿灯时长,目标函数如式(14)所示。

$$\min D = \sum_{i=1}^m \left\{ \sum_{t=1}^{t=G_{\text{sum},i}} (q_{s,i} + \lambda_i t) - \sum_{t=1}^{t=g'_i} \mu_i t + \sum_{t=1}^{t=T-G_{\text{sum},i}} \lambda_i t \right\} \quad (14)$$

式(14)化简得式(15)。

$$\min D = \sum_{i=1}^m \left(q_{s,i} G_{\text{sum},i} + \sum_{t=1}^{t=T} \lambda_i t - \sum_{t=1}^{t=g'_i} \mu_i t \right) \quad (15)$$

其中, D 为非优先相位关键排队车辆的总延误,单位为 s。

模型考虑非优先相位车辆效益,需要尽可能保证非优先相位排队车辆不造成二次排队,即非优先相位绿灯时长需要保证相位初始排队车辆可在本周周期通过路口。初始排队车辆通过路口所需绿灯时长 $g_{s,i}$ 如式(16)所示。

$$g_{s,i} = (q_{s,i} + \lambda_i (G_{\text{sum},i} - g'_i)) / s_i \times 3600 \quad (16)$$

同时,各非优先相位绿灯期间通过路口的车辆数应不大于相位初始排队车辆数和绿灯期间到达车辆数之和。综上,补偿模型目标函数式(15)的约束条件如式(17)所示。

$$\text{s.t.} \begin{cases} g_{s,i} \leq g'_i \\ \mu_i g'_i \leq q_{s,i} + \lambda_i G_{\text{sum},i} \\ g_{\min} \leq g'_i \leq g_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

其中,最小绿灯时长 $g_{\min}$ 、最大绿灯时长 $g_{\max}$ 用以保证路口车辆、行人的基本通行需求。

2.2.3 模型求解算法

遗传算法模拟了自然选择和遗传过程中发生的选择、交叉和变异等规则,从任一初始种群出发,通过随机选择、交叉和变异操作,产生一群更适应环境



的个体,使群体进化到搜索空间中越来越好的区域,这样一代一代地迭代进化,最后收敛到一群最适应环境的个体,得到问题的最优解^[29]。本文搭建的绿灯补偿模型具有不规则、不连续的特点,遗传算法适应度函数的强适应性使得即使是非规则、不连续的情况下也可找到全局最优解,因此本文采用遗传算法对模型求解。遗传算法相关参数设置见表2。

表2 遗传算法相关参数设置

参数名称	参数取值
种群大小	50
进化次数	300
交叉概率	0.8
生成函数	Uniform Distribution
选择函数	Stochastic Uniform Selection
交叉函数	Scattered Crossover
变异函数	Adaptive Feasible Mutation

2.3 信控状态恢复

信控状态恢复是指信号机执行应急车辆优先策略后需要及时恢复优先执行前的控制方案,避免对交通流造成大的波动。本文信控状态恢复机制流程如图6所示,若非优先相位需要绿灯补偿,在最后一个补偿相位的黄灯期间执行恢复;否则,在优先相位的黄灯期间直接恢复初始方案。

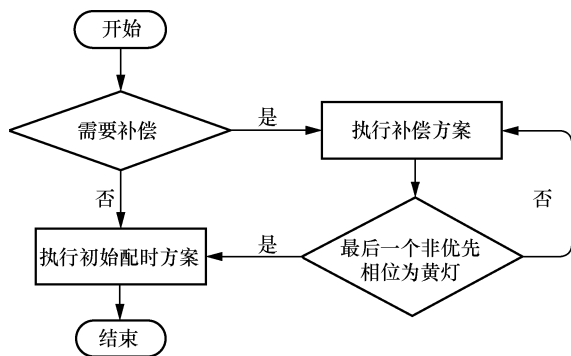


图6 信控状态恢复机制流程

3 仿真验证与实例分析

3.1 仿真环境搭建

为验证本文所建模型的有效性,基于微观

仿真软件 VISSIM 和 MATLAB 搭建仿真平台。通过在 VISSIM 中建立路网、设置路径决策、输入车辆(包括网联车辆和应急车辆)、添加信号灯、布设数据检测器等可模拟城市信控交叉口, MATLAB 利用 COM 接口可实时读取路口车辆排队数据与信号灯状态数据,并通过运行应急车辆优先算法与信号补偿算法对路口信号灯实现控制。模型仿真验证平台示意图如图7所示。

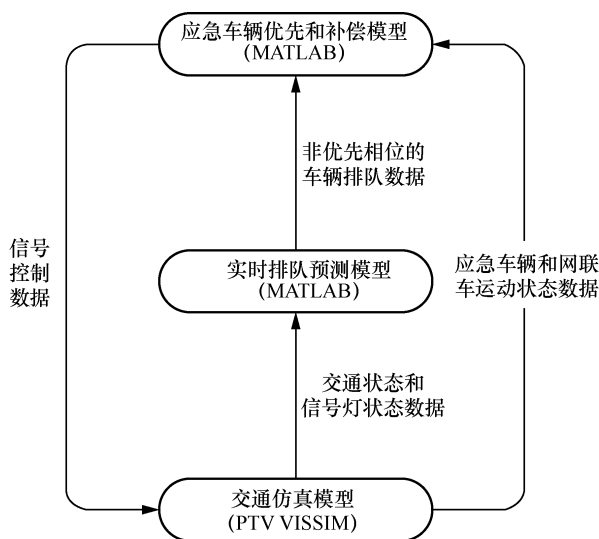


图7 模型仿真实验平台示意图

模型验证以十字路口为例,基础路网搭建符合信号交叉口设计规范,各进口车道分左转、直行和右转3条车道,车道宽3 m。仿真时长共2 h,延误数据采集间隔为200 s,排队长度采集间隔为1 s。应急车辆发车时刻设置如图8所示。

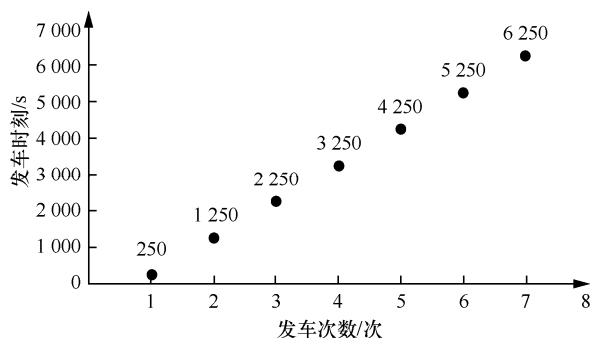


图8 应急车辆发车时刻设置

3.2 模型验证分析

为验证本文模型的控制效果,本文以路口非优先相位车均延误和平均排队长度为基本评价指标。仿真实验在不同流量状态下(即非饱和状态到饱和状态)对有补偿模型(EVP-DC)与无补偿模型(EVP-NC)两种工况进行对比分析。EVP-DC指应急车辆优先后采用本文模型对非优先相位绿灯进行补偿,完成补偿后再恢复初始配时方案;EVP-NC指信号控制机执行完优先相位后直接恢复初始信号配时方案,不对非优先相位进行绿灯补偿。

非优先相位车均延误对比见表3,实验收集了应急车辆通过路口后EVP-DC和EVP-NC两种工况下的非优先相位车均延误。分析结果显示,当路口交通流量在非饱和到饱和状态下,基于本文所述绿灯补偿模型可有效降低非优先相位车均延误, $v/c=0.7$ 时可优化17.79%, $v/c=1.0$ 时也可优化6.11%,延误随流量饱和度增大而增加,延误优化效率在饱和状态下有所降低。

非优先相位平均排队长度对比如图9所示,路口流量饱和度 v/c 从0.7到1.0时EVP-NC工况下非优先相位平均排队长度分别为29.16 m、40.80 m、52.58 m、57.54 m,EVP-DC工况下分别为17.12 m、28.00 m、32.95 m、47.88 m。相比之下本文绿灯补偿模型可分别降低平均排队长度41.29%、31.37%、37.33%、16.79%,优化效果比

较明显。

从两个评价指标来看,本文所述模型在降低应急优先对非优先相位车辆影响方面具有一定优势。其原因主要体现在以下两个方面:本文的模型通过V2I通信可实时获取排队数据,可对路口进行动态监测以适应交通状况和非优先车辆需求;本文通过考虑多个非优先相位车辆在红灯、绿灯期间的累积延误均衡考虑通行效益,保证通行时间最短。

4 结束语

针对在路口应急车辆优先策略对非优先相位交通的影响问题,本文进行了C-V2X网联环境下均衡非优先相位通行效益的绿灯补偿模型研究。该模型在不影响应急车辆优先通行的前提下,基于非优先相位实时交通需求计算出补偿绿灯时间,最小化应急优先对非优先相位的车辆通行影响。结果证明,本文所述模型在不同的饱和度状态下均可有效地降低应急车辆通过后非优先相位车辆的平均延误时间和平均排队长度。

然而,本模型只考虑了单一应急车辆通过路口后非优先方向的绿灯补偿,当多辆应急车辆从不同方向通过路口后对其他车辆造成的影响未在本文分析,后续研究将重点考虑。另外,本文假设全部车辆均为具备C-V2X通信能力的网联车,

表3 非优先相位车均延误对比(单位:s)

序号	$v/c=0.7$		$v/c=0.8$		$v/c=0.9$		$v/c=1.0$	
	EVP-NC	EVP-DC	EVP-NC	EVP-DC	EVP-NC	EVP-DC	EVP-NC	EVP-DC
1	52.05	38.86	57.30	45.26	67.90	55.75	67.23	57.13
2	56.00	45.55	59.00	53.56	62.53	43.23	69.61	62.33
3	50.70	39.30	49.54	44.70	63.35	62.00	66.44	65.80
4	61.60	40.67	61.93	56.32	68.35	55.28	67.13	58.40
5	49.92	43.75	56.23	45.61	57.62	39.80	73.15	79.50
6	42.76	47.85	60.98	48.02	57.17	56.74	64.36	68.42
7	56.95	48.15	64.28	52.64	65.27	51.07	67.05	54.40
均值	52.85	43.45	58.47	49.44	63.17	51.98	67.85	63.71
优化	↓17.79%		↓15.43%		↓17.71%		↓6.11%	

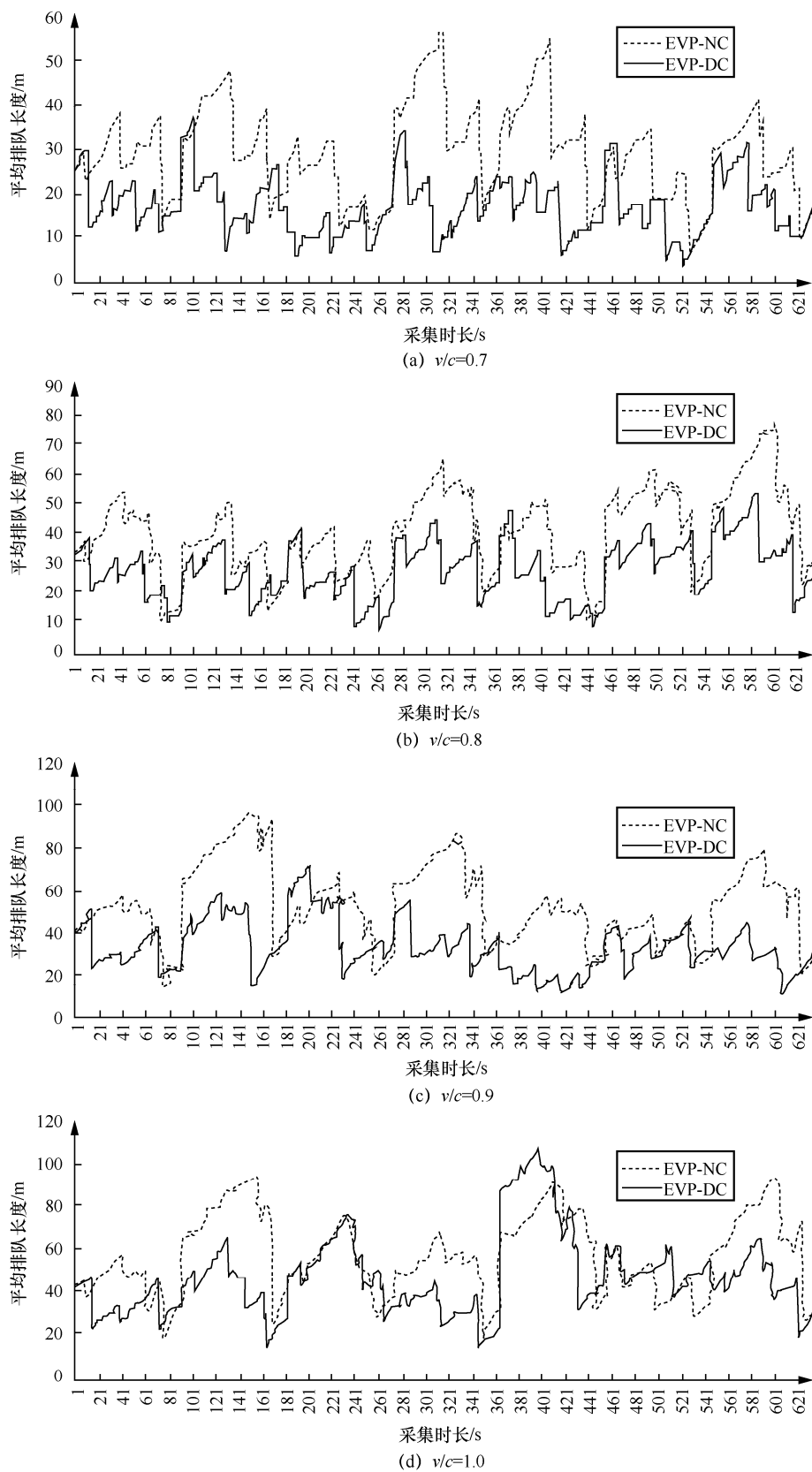


图9 非优先相位平均排队长度对比

而网联车辆渗透率提升需要较长的过程, 不同的网联车辆渗透对应急车辆优先影响是未来的研究方向。

参考文献:

- [1] YASMIN S, ANOWAR S, TAY R. Emergency vehicles and traffic safety[J]. *International Encyclopedia of Transportation*, 2021: 247-254.
- [2] NGUYEN V L, HWANG R H, LIN P C. Controllable path planning and traffic scheduling for emergency services in the internet of vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(8): 12399-12413.
- [3] YU W Q, BAI W C, LUAN W J, et al. State-of-the-art review on traffic control strategies for emergency vehicles[J]. *IEEE Access*, 2022(10): 109729-109742.
- [4] CAO M M, LI V O K, SHUAI Q Q. A gain with no pain: exploring intelligent traffic signal control for emergency vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(10): 17899-17909.
- [5] 张立立, 于沛, 李晶, 等. 交通拥堵情况下应急救援车辆优先通行主动控制方法[J]. *实验室研究与探索*, 2022, 41(5): 104-107.
ZHANG L L, YU P, LI J, et al. Research on the active control method of emergency vehicle priority under traffic congestion[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2022, 41(5): 104-107.
- [6] KAMBLE S J, KOUNTE M R. A survey on emergency vehicle preemption methods based on routing and scheduling[J]. *International Journal of Computer Networks and Applications*, 2022, 9(1): 60-71.
- [7] CHEN S Z, HU J L, SHI Y, et al. A vision of C-V2X: technologies, field testing, and challenges with chinese development[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(5): 3872-3881.
- [8] 陈山枝. 蜂窝车联网 (C-V2X) 及其赋能智能网联汽车发展的辩思与建议[J]. *电信科学*, 2022, 38(7): 1-17.
CHEN S Z. Critical thinking and suggestions on C-V2X with the developments of intelligent connected vehicles[J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(7): 1-17.
- [9] XIE J, WU J M, YANG R K. On the impact analysis of emergency vehicles preemption on signalized intersections with connected vehicles[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 151-160.
- [10] 张立立, 王力, 刘建东, 等. 基于车路协同的城市应急车辆优先控制: 概述与展望[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(34): 14484-14491.
ZHANG L L, WANG L, LIU J D, et al. Priority control of urban emergency vehicles: overview and prospect[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(34): 14484-14491.
- [11] SALIH A A, LEWIS A, CHUNG E. Dynamic preemption algorithm to assign priority for emergency vehicle in crossing signalised intersection[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 518(2): 022038.
- [12] ROSAYYAN P, PAUL J, SUBRAMANIAM S, et al. An optimal control strategy for emergency vehicle priority system in smart cities using edge computing and IoT sensors[J]. *Measurement: Sensors*, 2023(26): 100697.
- [13] LEE W H, CHIU C Y. Design and implementation of a smart traffic signal control system for smart city applications[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 508.
- [14] LOUATI A, ELKOSANTINI S, DARMOUL S, et al. Multi-agent preemptive longest queue first system to manage the crossing of emergency vehicles at interrupted intersections[J]. *European Transport Research Review*, 2018, 10(2): 52.
- [15] SU H R, ZHONG Y D, CHOW J Y J, et al. EMVLight: a multi-agent reinforcement learning framework for an emergency vehicle decentralized routing and traffic signal control system[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023(146): 103955.
- [16] WU J, KULCSÁR B, AHN S, et al. Emergency vehicle lane pre-clearing: from microscopic cooperation to routing decision making[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2020(141): 223-239.
- [17] HANNOUN G J, MURRAY-TUITE P, HEASLIP K, et al. Facilitating emergency response vehicles' movement through a road segment in a connected vehicle environment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, 20(9): 3546-3557.
- [18] SHIRKE C. Emergency vehicle priority (preemption): concept and advancements[J]. *International Encyclopedia of Transportation*, 2021: 221-226.
- [19] ZHONG L, CHEN Y. A novel real-time traffic signal control strategy for emergency vehicles[J]. *IEEE Access*, 2022(10): 19481-19492.
- [20] DAS D, ALTEKAR N V, HEAD K L, et al. Traffic signal priority control strategy for connected emergency vehicles with dilemma zone protection for freight vehicles[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2022, 2676(1): 499-517.
- [21] OBRUSNÍK V, HERMAN I, HURÁK Z. Queue discharge-based emergency vehicle traffic signal preemption[J]. *IFAC-Papers OnLine*, 2020, 53(2): 14997-15002.
- [22] CAO M M, SHUAI Q, LI V O K. Emergency vehicle-centered traffic signal control in intelligent transportation systems[C]// 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 4525-4531.



- [23] KAPUSTA B, MILETIC M, IVANJKO E, et al. Preemptive traffic light control based on vehicle tracking and queue lengths[C]//2017 International Symposium ELMAR. Piscataway: IEEE Press, 2017: 11-16.
- [24] 刘震东. 车联网环境下城市应急车辆优先通行协同控制方法[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- LIU Z D. Coordinated control method for city emergency vehicle priority passage in the internet of vehicles environment[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [25] MU H B, LIU L Z, SONG Y B, et al. Control strategy of signal transition after emergency vehicle signal preemption[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2020(2020): 1-11.
- [26] 杨帅. 智能网联环境下应急车辆信号优先策略研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- YANG S. Research on signal priority control strategy of emergency vehicle under connected and automated vehicle environment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022.
- [27] 美国交通研究委员会. 道路通行能力手册[M]. 任福田, 刘小明, 荣建, 等译. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- Transportation Research Board of USA. Highway capacity manual[M]. Translated by REN F T, LIU X M, RONG J, et al. Beijing: China Communication Press, 2007.
- [28] STRONG D W, NAGUI R M, COURAGE K. New calculation method for existing and extended HCM delay estimation procedure[C]//The 85th Annual Meeting of the Transportation research Board. 2006.
- [29] 陆颖, 林丽. 基于遗传算法的平面交叉口信号配时优化[J]. 森林工程, 2020, 36(6): 103-109.
- LU Y, LIN L. Signal timing optimization of intersections based on genetic algorithm[J]. Forest Engineering, 2020, 36(6): 103-109.

[作者简介]



张长隆 (1976-), 男, 博士, 长沙智能驾驶研究院有限公司车路协同首席科学家, 主要研究方向为 V2X、车联网、协作式 ITS。



韩发荣 (1994-), 男, 长沙智能驾驶研究院有限公司 V2X 算法工程师, 主要研究方向为 V2X 车路协同应用设计与开发、智能交通信号控制等。



魏吉敏 (1989-), 男, 长沙智能驾驶研究院有限公司高级工程师, 主要研究方向为传感器标定、多传感器融合、V2X、C-ITS、人工智能等。



戴金钢 (1988-), 男, 现就职于长沙智能驾驶研究院有限公司, 主要研究方向为 ADAS、V2X、网联车场景应用、智能交通等。



杨晓东 (1994-), 男, 长沙智能驾驶研究院有限公司算法工程师, 主要研究方向为智能交通、车路协同等。



瞿仕波 (1988-), 男, 现就职于长沙智能驾驶研究院有限公司, 主要研究方向为 V2X 通信、车联网场景开发、智能交通系统等。