文章编号:1671-4598(2023)12-0130-08　DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2023.12.020　中图分类号:U491　文献标识码:A

车联网环境下高速公路合流区换道协调决策与控制系统设计

王正琼
(云南云通数联科技有限公司,昆明　650000)

摘要: 为了降低高速公路合流区车辆换道碰撞风险、提高道路通行质量,在车联网环境下,优化设计高速公路合流区换道协调决策与控制系统;通过安装车联网终端芯片、改装协调控制器,完成硬件系统的优化;根据高速公路合流区的物理结构,设置换道区域约束条件;在车联网环境下采集高速公路合流区车路信息,根据换道紧迫程度、跟随车辆换道行为、车间距离安全性的计算结果,作出换道协调决策;规划合流区最优协调换道轨迹作为系统控制目标,最终计算位置、速度控制量,在控制器支持下,实现高速公路合流区换道协调控制功能;通过系统测试得出结论:所设计系统的车辆换道碰撞概率和道路拥塞程度分别为0.15%和0.20%,道路车流量得到明显提升,车流量的平均值为356 pcu/d;车辆速度控制误差为0.05 km/h,实验结果表明所设计系统在决策与控制性能方面具有明显优势。

关键词: 车联网环境;高速公路;合流区换道;协调决策

Design of Lane Changing Coordination Decision and Control System in Expressway Confluence Areas under the Internet of Vehicles Environment

WANG Zhengqiong
(Yunnan Yuntong Digital Link Technology Co., Ltd., Kunming　650000, China)

Abstract: In order to reduce the risk of vehicle lane changing collision in the merging area of highways and improve the quality of road traffic, a coordinated decision-making and control system for lane changing in the merging area of highways is optimized and designed in the context of vehicle networking. The hardware system is optimized by installing the Internet of Vehicles terminal chip and modifying the coordination controller. The constraints for lane changing areas are set by the physical structure of the highway confluence area. The vehicle route information on the confluence area of highways is collected in the context of vehicle networking, and the lane changing coordination decisions are determined by the calculation results of lane changing urgency, following vehicle lane changing behavior, and workshop distance safety. The optimal coordinated lane change trajectory of the merging area is planned as a system control objective to ultimately calculate the position and speed control variables. With the support of the controller, the coordinated lane change control function is achieved in the expressway merging area. The testing results show that the designed system has a lane change collision probability of 0.15% and road congestion degree of 0.20%, respectively. The road traffic flow has been significantly improved, with an average value of 356 pcu/d. The vehicle speed control error is 0.05 km/h, and the experimental results show that the designed system has significant advantages in decision-making and control performance.

Keywords: vehicle networking environment; expressway; changing lanes in the confluence area; coordinate decision-making

0　引言

合流区高速公路主线车道与匝道的交汇路段,包括匝道、加速车道以及与之相连接的主线车道部分。由于匝道与主线在这一区域内汇合,交通流量在时空上急剧增加,容易造成交通流速减慢、秩序混乱等现象,成为制约高速公路通行能力提升的“瓶颈”,也是交通事故频发的重要因素[1]。因此,如何提高匝道合流段的通行效率,对于保证道路交通的畅通至关重要。合流区包括上游路段、合流区和下游路段,其中,上游路段和下游路段为主路的基本路段,合流区段是产生大量车辆换道行为的区域。车辆换道的实质是司机与周边车辆的交互、决策与执行的过程[2]。换道可分为强制换道和自由换道,强制换道会在车道终止时进行,而自由换道则会在希望获得更好的车道时进行。在合流区,因换道决策的复杂性,导致驾驶人在换道时会产生错误,并伴随着多种不确定因素,特别是在交通拥堵时,会导致换道效率与安全性得不到保障,进而导致行车环境恶化。车联网是车载设备通过无线通信技术,高效地利用信息网络平台中的所有车辆动态信息,在车辆运行过程中提供多种功能服务。车联网可以保证车辆间的安全距离,减少车辆间的碰撞概率,车联网能够辅助用户进行实时导航,并且能够与其他车辆及其他网络进行通讯,从而提高道路的运营效率。以车联网为运行环境,对换道协调

收稿日期:2023-05-12;　**修回日期:**2023-06-16。
作者简介:王正琼(1979-),女,大学本科,高级工程师。
引用格式:王正琼.车联网环境下高速公路合流区换道协调决策与控制系统设计[J].计算机测量与控制,2023,31(12):130-137.

决策与控制系统进行优化，以期能够提升系统的控制效果，间接地提升高速公路合流区的通行效率[3]。为了辅助驾驶员在高速公路合流区的换道行为，在保证交通安全的前提下，提高车辆换道效率，缓解交通拥塞程度，设计并开发了合流区换道协调决策与控制系统。

合流区换道协调决策与控制系统的设计目的是辅助驾驶人员，结合当前路况、车辆行驶状态等因素，得出最佳的换道方案，并控制车辆行驶参数与换道方案输出参数一致。当前已有相关领域研究学者对高速公路合流区换道协调决策与控制方法做出了研究。其中，文献［4］基于模仿学习和强化学习的智能车辆换道行为决策系统，采用模拟学习方法，建立极限梯度上升模型，并依据输入信息，在保持、左换道、右换道 3 种方式中，选取相应的宏观决策命令，从而决定需要解决的换道行为决策问题。文献［5］提出基于规则与机器学习融合的换道决策建模方法，分析了换道决策中的换道必要性、安全性、收益等影响因素，并将其转换成新的特性和新的安全约束，以扩展已有的训练样本。文献［6］提出基于事件触发机制的双编队车辆换道决策模型，以车辆的换道行为为事件触发机制，判断当前车辆是否允许换道，在一致性控制协议的支持下，完成换道控制，同时减少控制器的频繁更新数量。文献［7］提出基于可变限速和换道控制的高速公路合流区车流密度优化模型，根据合流区瓶颈通行能力和匝道车流密度的变化规律，确定换道过程中的可变限速。文献［8］提出多车道提前换道与入口匝道协同控制策略。

采用主线分流式分流方式，引导更多的主线车辆进入合流区，通过对主线双车道外进入的进口匝道进行控制，动态调节其进入主线的时间与数目，实现合流区总体运行效率的优化，从而提高合流区的通行能力。文献［9］提出基于编队的协同合流策略。在合流区上行匝道段设定特定编队区，编队区中车辆数目达到特定数目时，启动协同合流策略，包括：匝道编队区车辆和主路车辆初始汇合时间的计算，匝道编队区车辆与主路车辆的编队规划，以及首辆车辆的航迹规划。文献［10］提出考虑安全间距的合流区可变限速协调控制方法，建立能够满足合流要求的匝道内车辆的安全间隔计算模型，将其融入到可变速度限制的控制体系中，构建网络环境下的可变速度限制协同控制理论与模型，采用元胞自动机建立了网络车辆在上游控制区域内的速度协调控制系统。然而上述系统在高速公路合流区的实际换道过程中，存在明显的控制效果不佳的问题，主要体现在车辆换道碰撞、车辆拥塞风险大等方面，为此在车联网环境下，对高速公路合流区换道协调决策与控制系统进行优化设计。

结合上述研究，本文设计一种车联网环境下高速公路合流区换道协调决策与控制系统，通过安装车联网终端芯片、改装协调控制器，优化高速公路合流区换道协调决策与控制系统的硬件系统，实现了更加智能化和精准化的换道控制。基于高速公路合流区的物理结构，设置了换道区域约束条件，并在车联网环境下采集车路信息，利用计算结果进行换道协调决策，据此提高系统的响应速度和稳定性，大幅降低了车辆换道碰撞风险。本文还提出了规划合流区最优协调换道轨迹的概念，将位置、速度控制量纳入系统控制目标范畴，进一步提高了系统的控制精度和可靠性。

1　高速公路合流区换道协调决策与控制系统整体架构设计

高速公路合流区的车流速度较快，车辆换道时可能会造成交通堵塞和拥堵，从而影响整个路段的通行质量，合流区域的路况复杂，包括车道数量变化、道路宽度变窄等情况，需要驾驶员具备较高的驾驶技能和经验。在高速公路合流区换道时，驾驶员需要同时注意前方和后方的车辆，容易分心或疏忽驾驶，容易发生碰撞事故，特别是在高速公路车流量大、交通拥堵等情况下。因此，为了提高高速公路合流区换道的安全性和效率，需要采用智能化的控制和管理方法，利用车联网技术等先进技术手段，对合流区域的车辆进行实时监测和控制，避免车辆之间的碰撞和交通拥堵等问题。

本文设计车联网环境下高速公路合流区换道协调决策与控制系统，旨在解决高速公路合流区车辆换道碰撞风险大、道路通行质量低等问题。高速公路合流区换道协调决策与控制系统整体架构如图 1 所示。

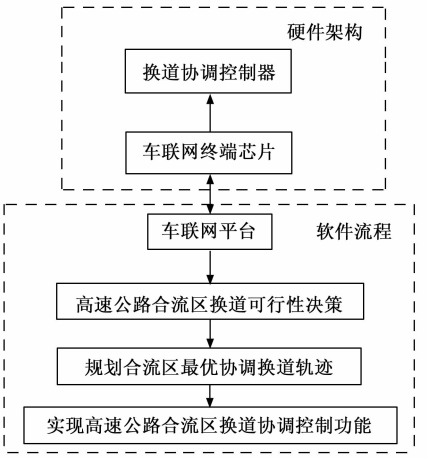

图 1　高速公路合流区换道协调决策与控制系统整体架构

根据图 1 所示，本文设计的高速公路合流区换道协调决策与控制系统。硬件部分由安装车联网终端芯片及换道协调控制器构成，实现对车辆的精准控制和管理，提高换道控制的响应速度和稳定性。系统软件部分利用车联网技术技术对合流区域的车辆进行实时监测和控制，实现对高速公路合流区车辆位置、速度等信息的实时采集和处理，根据采集到的车路信息，进行换道紧迫程度、跟随车辆换道行为、车间距离安全性等计算，作出换道协调决策。划合流区最优协调换道轨迹，以实现高速公路合流区换道协调控制功能。设置换道区域约束条件，防止车辆换道时出现危险情况，从而保障交通安全。

2 高速公路合流区换道协调决策与控制硬件系统设计

优化设计的高速公路合流区换道协调决策与控制系统中的硬件系统设计内容包括车联网终端芯片和换道协调控制器，终端芯片用来实现车联网的信息传输功能，换道协调控制器用来执行换道协调控制功能，为系统软件功能的运行提供硬件支持。

2.1 车联网终端芯片

车联网终端芯片主要用来实现高速公路合流区域所有车辆的运行数据以及路况状态信息数据，因此要求安装在系统中的车联网终端芯片满足环境感知、网络通信以及自主定位等功能。优化设计的车联网终端芯片由传感器元件、通信网络模块以及定位元件等部分组成。车联网终端芯片的内部连接情况如图 2 所示。

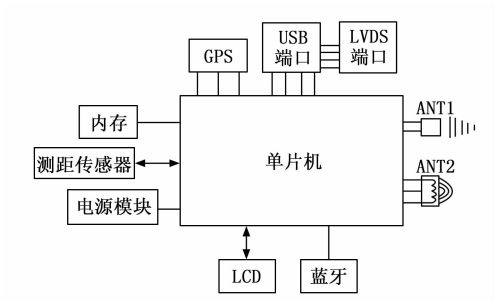

图 2 车联网终端芯片内部连接示意图

车联网终端芯片中传感器元件主要用来感知自身及前后车的速度、加速度、横摆角速度、距离等信息，利用 CAN 总线技术，实现了车内数据的共享，并将采集到的数据传送到车联网服务器，使汽车能够根据实际情况进行自主决策。为了提升系统硬件的工作效率，在传感器元件的内部，增加了一个信息处理模块，该模块主要用于对采集结果进行处理，对无用的信息进行过滤，保留有用的信息，并利用指定的算法，完成对车道线、交通灯、行人、障碍物等的识别和距离测算等。优化设计车联网终端芯片中传感器元件的工作电路如图 3 所示。

通过车联网终端芯片中的传感器元件能够检测车辆的速度和加速度，实时监测车辆的运动状态；检测车辆的角速度和角位移，可以监测车辆的转弯和旋转等运动状态；检测车辆的温度变化，可以监测车辆的发动机、轮胎等部件的温度情况，提醒驾驶员进行维护保养；检测车辆所处的地理位置和方向，可以实现车辆的导航和定位功能。将车联网终端芯片作为车联网中的一个通信节点，利用传输元件能够完成实时运行数据的传输与通信。除此之外，还需要加设一个自主决策单元，利用传感器元件与网络通信装置所获得的信息，作出符合交通规则与行车要求的信息。同时，针对不同的行驶决定，将特定的操纵命令传递给控制器。车联网终端芯片中的自主决策单元与云连接，在其驾驶决策与云命令发生冲突的情况下，智能网联汽车必须遵守云命令，确保整体交通流正常运行，并确保特定车辆

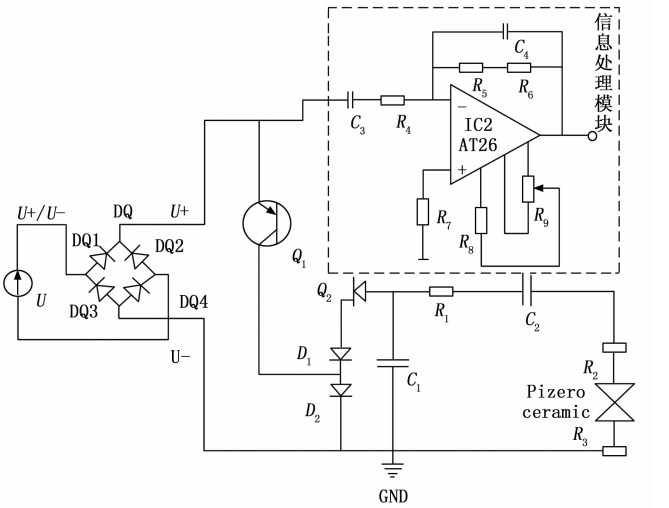

图 3 车联网终端芯片中传感器元件工作电路图

优先通行。

2.2 换道协调控制器

换道协调控制器由变速器、转向器、制动与驱动等元件组成，优化设计换道协调控制器的内部结构如图 4 所示。

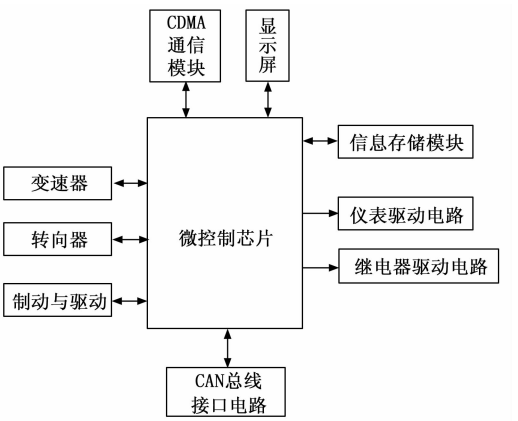

图 4 换道协调控制器结构图

图 4 为换道协调控制器内采用两个 10 MHz 工作频率的晶片上振荡器，不仅可以提供三倍的冗余度，而且可以把误差的精确度控制在±1%以内。控制器内 DSP 使用单电源供电，内部使用上电复位电路，外接阻容即可工作。控制器具有 6 台完全比较器，3 台简易比较器，能实现高精度占空比、周期、相位控制；另外，可程控死区产生及故障分离区探测等功能，可有效地实现故障及电涌保护。车联网终端芯片生成换道协调决策指令，换道协调控制器根据决策指令的生成结果，实现车辆的加速、制动、转向等驾驶操作，从而实现车辆的换道行为。

3 基于车联网的高速公路合流区换道协调决策与控制功能设计

在系统硬件设备的支持下，根据当前高速公路合流区的运行状态和前后车辆的行驶状态，判断是否满足换道条件，并生成相应的协调决策任务。结合当前车辆的实际行

驶参数，确定与目标参数之间的差距，生成换道控制指令并执行，完成系统的换道决策与控制功能。

3.1　设置高速公路合流换道区域约束

高速公路合流区由匝道、加速车道和主干线车道 3 个部分组成，其中匝道是指将高速公路与其它道路相连的一段，主要应用在互通入口、出口及闭合路面上，使匝道车辆能够顺利进入主车道。在合流区设计中，必须保证其通行能力，使车辆能够在高速公路上实现汇流与分叉。加速区位于干线车道的最右边，车辆从匝道入口进入加速区后，可以通过调节车速，使其以比较理想的速度进行换道。主干道一般是 4～8 个车道，两个方向的交通以中间分隔带分开。车辆的换道行为主要在匝道和加速车道执行，因此设置匝道和加速车道区域作为系统合流换道区域的约束条件，具体设置结果如下：

$$w_{\text{Acceleration-Left}} \leqslant w \leqslant w_{\text{Ramp-Right}} \tag{1}$$

式中，$w_{\text{Acceleration-Left}}$ 和 $w_{\text{Ramp-Right}}$ 分别为高速公路合流区中加速车道的最左侧位置和匝道的最右侧位置，w 为处于换道状态的车辆位置。由此完成确定高速公路合流的换道区域约束条件。

3.2　利用车联网采集高速公路合流区车路信息

为了减少系统的数据计算量，提高运行效率，在设置的高速公路合流换道区域内，利用车联网终端芯片及其技术，采集换道区域内的车路信息。高速公路合流换道区域对应的车联网区域可以表示为：

$$W_{\text{net}} = \kappa_{\text{shine upon}} \left| w_{\text{Acceleration-Left}} - w_{\text{Ramp-Right}} \right| \tag{2}$$

在式（2）表示的区域内，利用图 5 表示的车联网技术，采集车路信息。

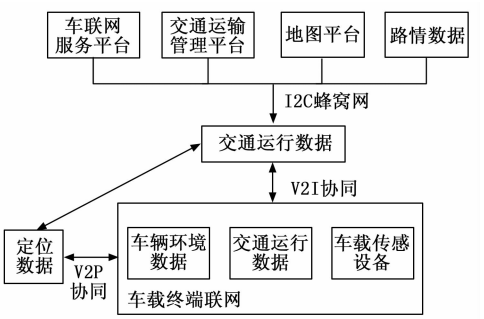

图 5　车联网技术架构图

待采集的车路信息具体包括：当前车辆的位置和速度、前后车辆位置和速度和交通流量等，其中当前车辆的位置和速度可以通过装设在车联网终端芯片中的传感器直接得出，分别标记为 $(w_x(i), w_y(i))$ 和 $v(i)$。在此基础上，得出前方车辆位置的采集结果为：

$$\begin{cases} w_x(i+1) = w_x(i) + d_{\text{ahead}} \cdot \cos\theta \\ w_y(i+1) = w_y(i) + d_{\text{ahead}} \cdot \sin\theta \end{cases}, i, i+1 \in W_{\text{net}} \tag{3}$$

式中，d_{ahead} 和 θ 分别为当前车辆与前方车辆之间的距离和位置偏向角，其中变量 d_{i+1} 的计算公式为：

$$d_{\text{ahead}} = \frac{v_c \times t_{\text{signal}}}{2} \tag{4}$$

式中，v_c 为测距信号的传播速度，t_{signal} 表示测距信号的传输时间。将式（4）的计算结果代入到式（5）中，即可得出前方车辆位置信息的采集结果。另外前方车辆速度信息的采集结果如下：

$$v_{\text{ahead}} = \frac{\Delta m_{\text{ahead}}}{\Delta t_{\text{ahead}}} \tag{5}$$

式中，Δm_{ahead} 表示前方车辆在 Δt_{ahead} 时段内的位移，同理可以得出后方车辆位置和速度信息的采集结果。另外道路流量信息的采集结果为：

$$\lambda = T \cdot \bar{v}(d_{\text{vehicle}} + \bar{L}), j \in W_{\text{net}} \tag{6}$$

式中，变量 $\bar{v}$ 和 $\bar{L}$ 表示高速公路合流区中车辆的平均速度和平均车长，d_{vehicle} 为平均车距，T 为单位时间。由于高速公路合流区的车辆均处于行驶状态，路况以及车辆行驶信息会实时发生变化，因此需要按照一定的采集频率获得任意时段内的信息采集结果[11]。为方便数据的统计管理，需要对上述采集数据进行融合处理，最终得出高速公路合流区车路信息综合采集结果如下：

$$X = \sum_{k=1}^{t_{\text{gather}}} (w(k) + w(k) + w(k-1)) + v_{\text{ahead}} + v_i + v_{\text{behind}} + \lambda \tag{7}$$

式中，t_{gather} 为高速公路合流区车路信息的采集时长。通过所有采集数据的整合，得出高速公路合流区车路信息的最终采集结果。

3.3　高速公路合流区换道可行性决策

实时的路况和周围车辆运动状态信息是换道决策的依据，以采集的高速公路合流区车路信息为分析对象，从必要性和安全性两个方面判断当前车辆是否满足换道条件，进而得出高速公路合流区换道可行性的决策结果。

3.3.1　检测车道拥塞状态计算换道紧迫程度

在车联网环境下，根据当前高速公路合流区的车辆分布密度判断区域是否处于拥塞状态，车辆分布密度参数的求解结果为：

$$\rho = \frac{\lambda}{W_{\text{net}}} \tag{8}$$

在此基础上，根据拥塞概率反映出合流区的拥塞状态，拥塞概率的求解结果如下：

$$P_{\text{jam}} = P\left(\sum_{i=1}^{n_{\text{vehicle}}} \delta_i < \delta_{\text{extra}} + \rho * \delta_{\text{critical}}\right) \tag{9}$$

式中，δ_i、δ_{extra} 和 δ_{critical} 分别对应的是第 i 辆后随车量的车头时距、合流汇入扰动消散对主线后随车辆的总车头时距及临界车头时距[12]。若式（9）的计算结果高于 0.8，说明当前合流区处于拥塞状态，否则认为当前合流区处于正常通行状态。车道拥塞状态与换道紧迫程度之间存在直接关系，拥塞概率越高，说明当前车道行驶的碰撞风险越高，换道的紧迫程度越大，结合拥塞状态的量化检测结果，利用式（10）完成车辆换道紧迫程度的计算。

$$\gamma = v_{\text{end}} t_{\text{success}} + \kappa_{\text{Space occupancy}} + P_{\text{jam}} \tag{10}$$

式中，变量 v_{end} 为到达匝道合流区末端的预计车速，t_{success} 代表车辆进行一次成功换道所需的时间，$\kappa_{\text{Space occupancy}}$ 为车道空

间占有率的折算系数[13]。通过式（9）与式（10）的联立，得出任意时刻合流区车道换道紧迫程度的计算结果。

3.3.2 识别跟随车辆换道行为

综合考虑前方车辆的行驶轨迹特征和速度特征，判断前方跟随车辆是否执行换道操作。假设车辆的换道轨迹特征为 $\tau_{\text{Changing lanes}}$，以采集的合流区车路信息中的车辆位置信息为研究对象，利用式（11）提取前方车辆的航行轨迹特征：

$$\tau_{\text{locus-ahead}} = \frac{N_{w_{t+1}}\left(\frac{1}{N_{w_{t+1}}}\sum_{i=1}^{N_{w_{t+1}}}\sqrt{|w_{t+1}|}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N_{w_{t+1}}}|w_{t+1}|} \tag{11}$$

那么跟随车辆换道行为的识别结果可以量化表示为：

$$s = \frac{\tau_{\text{locus-ahead}} \cdot \tau_{\text{Changing lanes}}}{\|\tau_{\text{locus-ahead}}\| \cdot \|\tau_{\text{Changing lanes}}\|} \tag{12}$$

如果式（12）的计算结果高于设置阈值 s_0，则说明当前车辆的跟随车辆正执行换道操作，否则认为跟随车辆处于正常行驶状态[14]。除换道轨迹外，在跟随车辆换道行为识别过程中，还需要考虑跟随车辆的行驶速度和加速度，判断车辆是否存在减速行为，从而保证换道行为识别的精准度。

3.3.3 判断车间距离安全性

车辆在高速公路上行驶时，为了防止与前车相撞，必须保证与前车之间的距离。在对车流进行跟踪时，要考虑到车流的趋同性、传递性、时滞性等因素对车流的影响。趋同性是指车辆在横向上受前车约束，要求车辆在横向上保持一定的距离，同时要求车辆保持一定的间距，以避免碰撞[15]。在交通流中，当车辆处于非自由状态时，车辆的运行状态将被依次传递到车辆。延迟性是指当后车驾驶员察觉到前车的驾驶状态改变时，驾驶员需要一定的反应时间才能操纵车辆。图 6 表示的是车辆换道场景中的安全距离。

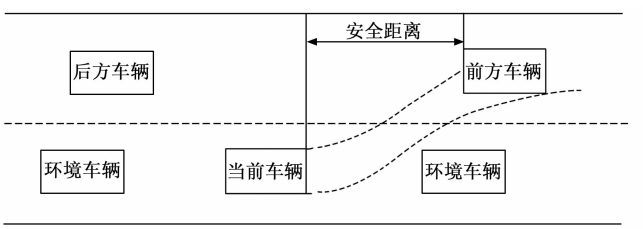

图 6 换道场景下车间安全距离示意图

从图 6 中可以看出，当前车辆要执行换道操作，需要同时与目标车道前、后方车辆保持安全距离。当前车辆与目标车道前、后方车辆的最小安全距离可以表示为：

$$\begin{cases} d_{\text{safe,ahead}} = \int_0^t [a(t) - a_{\text{ahead}}(t)]\mathrm{d}t + [v(t) - v_{\text{ahead}}(t)]t_{\text{rea}} \\ d_{\text{safe,behind}} = \int_0^t [a(t) - a_{\text{behind}}(t)]\mathrm{d}t + [v(t) - v_{\text{behind}}(t)]t_{\text{rea}} \end{cases} \tag{13}$$

式中，$a(t)$、$a_{\text{ahead}}(t)$ 和 $a_{\text{behind}}(t)$ 分别表示 t 时刻当前车辆、目标车道前方车辆以及后方车辆的加速度，$v(t)$、$v_{\text{ahead}}(t)$ 和 $v_{\text{behind}}(t)$ 对应的是该时刻 3 个车辆的行驶速度，而 t_{rea} 为当前车辆驾驶员的反应时间[16]。在此基础上，得出车间距离安全性的判断结果为：

$$\begin{cases} U_{\text{safe}} = d_{\text{ahead}} > d_{\text{safe,ahead}} \quad \& \quad d_{\text{behind}} > d_{\text{safe,behind}} \\ U_{\text{unsafe}} = d_{\text{ahead}} \leqslant d_{\text{safe,ahead}} \quad \text{or} \quad d_{\text{behind}} \leqslant d_{\text{safe,behind}} \end{cases} \tag{14}$$

式中，U_{safe} 和 U_{unsafe} 分别表示当前车辆换道安全和不安全的两种状态集合，通过式（14）可以看出，如果车辆与目标车道前后车辆均保持安全距离，则换道安全，否则则判定当前车间距离不安全。

综合换道紧迫程度、跟随车辆换道行为和车间距离安全性的分析结果，得出高速公路合流区换道可行性决策条件为：

$$\begin{cases} \gamma \geqslant \gamma_0 \\ v > s \cdot v_{\text{safe}} \\ \chi_d \in U_{\text{safe}} \end{cases} \tag{15}$$

式中，γ_0 为换道紧迫程度阈值，v_{safe} 表示车辆的安全行驶速度，χ_d 为当前车辆的安全距离状态[17]。若当前车辆满足式（15）中表示的可行性决策条件，则决策结果显示：允许车辆换道，否则决策结果为：不允许车辆换道。

3.4 规划合流区最优协调换道轨迹

决策执行换道操作的车辆需要根据目标车道的车辆分布情况，规划最优的换道路线，保证高速公路合流区行驶的协调性。车辆换道大体可以分为 3 个阶段，分别为调整、接近和进入调整，因此规划得出的合流区最优协调换道轨迹表达式为：

$$l_{\text{Changing lanes}} = \begin{cases} \frac{\zeta_{\max} t^3}{6}, 0 \leqslant t \leqslant t_1 \\ \frac{\zeta_{\max} t_1 t^2}{2} - \frac{\zeta_{\max} t_1^2 t}{2} + \frac{\zeta_{\max} t_1 t_2^2}{2}, t_1 \leqslant t \leqslant t_2 \\ \frac{\zeta_{\max}(t_1 + t_2)t^2 - \zeta_{\max}(t_1^2 + t_2^2)t}{2} - \\ \quad \frac{\zeta_{\max} t^3 + \zeta_{\max} t_1^3 + \zeta_{\max} t_2^3}{6}, t_2 \leqslant t \leqslant t_3 \end{cases} \tag{16}$$

式中，$\zeta_{\max}$ 为车辆横向加速度的变化率，t_1、t_2 和 t_3 分别表示当前车辆换道过程中 3 个阶段的切换时间点，时间节点参数的计算公式为：

$$\begin{cases} t_1 = \frac{a_{\max}}{\zeta_{\max}} \\ t_2 = \sqrt{\frac{a_{\max}^2}{4\zeta_{\max}^2} + \frac{G}{a_{\max}}} - \frac{a_{\max}}{2\zeta_{\max}} \\ t_3 = t_1 + t_2 \end{cases} \tag{17}$$

将式（17）的计算结果代入到式（16）中，即可得出合流区最优协调换道轨迹的规划结果[18]。在实际的换道轨迹规划过程中，可以结合车联网采集的实时车路信息，若检测发现合流区的切换目标车道无车辆通行，可直接执行换道操作，在单位时间内能够完成换道操作的轨迹均为最优换道轨迹，否则需要按照上述方式，得出协调换道轨迹的规划结果。

3.5 实现高速公路合流区换道协调控制功能

通过规划最优协调换道轨迹与当前车辆之间位置、速度等行驶参数的差异，计算高速公路合流区换道过程中，

任意时刻的行驶参数控制量。定义车辆换道过程中的期望速度和期望位置为：

$$\begin{cases} v_{\text{hope}}(t) = min\{v_i(t) + a \times b, v_{\text{safe}}\} \\ w_{\text{hope}}(t) = l_{\text{Changing lanes}}(w_i + v_i(t) \times b) \end{cases} \tag{18}$$

式中，b 为车辆的移动步长。结合车联网环境下采集的车辆实时行驶数据，得出高速公路合流区换道速度控制量为：

$$\Delta v = v_i(t) - v_{\text{hope}}(t) \tag{19}$$

若式（19）的计算结果为正数，说明在换道过程中，车辆需执行减速操作，若 Δv 取值为负数，则需要执行加速处理。同理换道位置控制量为：

$$\Delta w = w_i(t) - w_{\text{hope}}(t) \tag{20}$$

根据式（20）计算得出 Δw 的正负情况，确定车辆的换道与行驶方向[19]。重复上述操作，可以得出整个换道操作环节所有时刻的控制量计算结果。将控制量计算结果输入到硬件系统中的换道协调控制器中，生成控制指令，实现系统的高速公路合流区换道控制功能。高速公路合流区换道行为的产生可以分解为 3 个阶段：产生换道意图、判断安全条件、执行换道动作。在车联网环境的支持下，通过对实时路况与车辆行驶信息的分析，判断是否需要执行换道操作，并得出相应的换道决策结果。以系统生成的决策指令为换道控制子程序的启动条件，在换道协调控制器的作用下，执行换道协同控制指令。控制系统下合流区的车辆换道原理如图 7 所示。

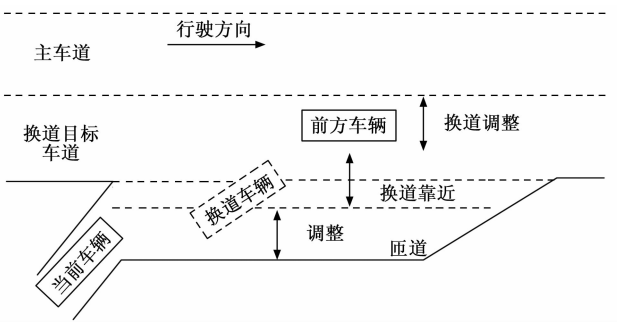

图 7　合流区车辆换道原理图

在合流区车辆换道控制过程中，将车辆的左前引擎盖垂直地点与车道线相接触的位置作为换道起点，将车辆从驶过车道线到车辆完全离开车道线，将其作为换道终点[20]。在控制程序执行过程中，利用车联网对合流区内的车路信息进行实时更新，并及时调整决策结果与控制指令，直至车辆完成换道操作为止。

4　系统测试

为了验证优化设计的车联网环境下高速公路合流区换道协调决策与控制系统在实际交通控制与车辆驾驶工作中的应用效果，设计系统测试实验。此次实验从驾驶车辆和路段交通两个方面验证系统的决策与控制性能，基本测试思路为：采用人为控制的方式得出高速公路合流区域的不同路况，得出换道情况下车辆行驶参数的控制目标。运行优化设计的换道协调决策与控制系统，得出换道协调决策结果，通过交通拥塞情况、车辆碰撞等指标反映出系统换道协调决策功能的测试结果，针对决策为换道的车辆，收集其后期行驶数据，判断车辆的实际运行数据是否与控制目标一致，从而体现出优化设计系统在控制性能方面的测试结果。

4.1　选择高速公路合流区路段

此次系统测试实验以某高速公路的入口合流区作为实验环境，合流区上游即高速公路主路是一条三车道路段，主路长度为 2.2 km，静态限速值为 90 km/h，车道容量为 6 000 veh/h。匝道为单车道，长度为 0.8 km，静态限速为 60 km/h，容量为 600 veh/h。高速公路中每个车道宽度均为 3.75 m，路缘带宽度 0.8 m，应急车道宽度为 3.5 m。

4.2　设定高速公路合流区路况场景

在选择高速公路合流区的主线和匝道环境中分别输入 30 辆小型车作为环境车辆，其中车辆进入主线的初始速度范围 80 km/h，车辆进入匝道的初始速度范围 50 km/h，车辆加速度限制在区间［－10 m/s，3 m/s］。实验中准备的小型车品牌、大小以及型号均相同，车辆质量均为 4.6 t，车身长度约为 4.2 m，质心与前、后轴之间的距离分别为 1.2 m 和 1.8 m，前、后轮侧偏刚度均为 82 563 N/rad。实验路段装设的小型车均由驾龄为 3 年的司机驾驶，驾驶人员的反应时间约为 0.8 s。此次实验分别设置目标车道无车和目标车道有车两种实验场景，每个实验场景分别分为 4 组，每组实验环境车辆的具体行驶位置存在区别。控制驾驶人员将环境车辆行驶到主路的左侧两车道，即得出目标车道无车场景的设定结果，在此基础上，将部分环境车辆调整至主线的右侧车道上，此时生成的场景即为目标车道有车场景。除 30 辆环境车辆外，还需要添加一辆相同型号的车辆作为测试车辆，设定该车辆的初始行驶位置为合流区匝道，该车辆进入匝道的初始速度为 82 km/h。在高速公路合流区路况场景的设定过程中，确定各个环境车辆的实际位置数据，以此作为换道决策的判据。

4.3　布设车联网与系统运行环境

由于优化设计高速公路合流区换道协调决策与控制系统在车联网环境下进行优化与开发，因此在系统测试过程中需要搭建相应的车联网环境。在所有的环境车辆以及测试车辆中安装车联网终端芯片，将高速公路合流区的所有车辆接入到车联网环境中。

为了实现优化设计系统的换道协调决策与控制功能，利用 python 工具对优化设计系统进行开发。在每次发起一次换道决策与控制服务请求之后，会创建一个空的步长列表，也就是 flagStepList，将当前步长添加到 flagStepList 中，在判断是否处理合流请求时，要判断当前仿真步是否在 flagStepList 中，若在，则不能进入处理服务请求的程序，从而实现了车辆长度问题导致的系统多次处理服务请求的问题。

4.4　生成高速公路合流区换道协调决策与控制任务

车辆传感器数据采集：利用安装在车辆上的传感器实时采集车辆的位置、速度、加速度、转向角度等行驶参数

数据，并将其上传到云端服务器进行处理和分析。利用车联网技术，实现车辆与道路基础设施之间的信息交互和数据共享，获取道路限速、交通拥堵等相关信息，从而更好地了解当前路况和交通状况。综合以上方法，得到高速公路合流区域的不同路况。

合流区换道可分为自由换道和强制换道，但自由换道大多为驾驶员的自发行为，在高速公路合流区无必要性，因此此次系统测试只考虑强制换道情况。结合高速公路合流区路况场景的设定结果，生成换道协调决策与控制任务，任务的具体内容如表 1 所示。

表 1 合流区换道协调决策与控制任务表

实验组别	目标车道无车场景			目标车道有车场景		
	决策结果	换道期望位置坐标	换道期望速度/(km/h)	决策结果	换道期望位置坐标	换道期望速度/(km/h)
1	允许换道	(127,6.8)	92	允许换道	(127,6.8)	92
2	允许换道	(242,6.6)	92	允许换道	(242,6.6)	92
3	允许换道	(185,7.0)	92	允许换道	(185,7.0)	92
4	允许换道	(202,6.3)	92	不允许换道	/	92

将表 1 设置任务信息作为判断高速公路合流区换道协调决策与控制系统运行功能的比对标准。

4.5 描述系统测试过程

在布设的车联网环境下，利用开发工具实现对优化设计高速公路合流区换道协调决策与控制系统的开发，分别在不同的路况场景下，输出测试车辆的决策结果，并根据决策结果执行相应的控制指令。图 8 为高速公路合流区换道协调决策与控制系统在目标车道无车场景下输出的决策与控制结果。

图 8 合流区车辆换道决策与控制系统输出界面

为体现出优化设计系统对道路交通的影响，在系统的控制作用下，收集高速公路合流区研究路段的实际交通情况，重复上述操作，可以得出两种实验场景下所有组别的系统输出结果以及实际执行结果。为体现出优化设计系统在决策、控制功能以及应用性能等方面的优势，设置文献[4]提出的基于模仿学习和强化学习的智能车辆换道行为决策系统和文献[5]提出的基于规则与机器学习融合的换道决策控制系统作为实验的两个对比系统，分别标记为对比系统一和对比系统二，按照上述方式实现对比系统的开发与运行，并记录对比系统的输出与应用结果。

4.6 设置系统测试指标

为实现对系统换道协同决策与控制效果的量化测试，设置碰撞概率、拥塞程度和车流量作为系统换道协同决策效果的量化测试指标，其中碰撞概率和拥塞程度指标的测试结果为：

$$\begin{cases} P_{\text{collide}} = \exp\left[-\dfrac{1}{2\sigma^2}\left(\dfrac{Q}{\varphi\sin^2\theta}\right)\right] \\ \bar{\omega} = -\dfrac{\sum\left[e^{-d(i+1)}\left(1-\dfrac{v}{v_{\text{hope}}}\right)\right]}{d(i+1)} \end{cases} \tag{21}$$

式中，σ 和 φ 分别为车辆密度分布因子和车道容量，$d(i+1)$ 为测试车辆与其前方车辆之间的距离。另外车流量指标的数值结果为：

$$Q = \sum\nolimits_{\Delta t_{\text{test}}} n_{\text{vehicle}} \tag{22}$$

式中，n_{vehicle} 为在合流区内通行的车辆数量，Δt_{test} 为测试时间。最终计算得出车流量越大、碰撞概率和拥塞程度越小，说明对应系统的决策效果越优。另外，设置速度控制误差作为系统控制性能的测试指标，测试结果如下：

$$\varepsilon_{\text{velocity}} = |\, v - v_{\text{hope}} \,| \tag{23}$$

式中，v 和 v_{hope} 对应的是换道车辆的实际速度和期望速度。计算得出速度误差越大，证明对应系统的控制功能越差。

4.7 系统测试结果与分析

在 3 种不同决策与控制系统运行下，统计相关车路数据，通过式（21）的计算，得出系统作用下碰撞概率和拥塞程度指标的测试结果如表 2 所示。

表 2 系统作用下碰撞概率和拥塞程度测试数据表

实验组别	对比系统一		对比系统二		优化设计系统	
	碰撞概率/%	拥塞程度	碰撞概率/%	拥塞程度	碰撞概率/%	拥塞程度
W_1	1.85	0.6	1.28	0.4	0.21	0.2
W_2	1.93	0.8	1.36	0.6	0.16	0.3
W_3	1.96	0.7	1.44	0.5	0.11	0.3
W_4	1.74	0.6	1.51	0.4	0.13	0.2
Y_1	1.58	0.6	1.17	0.3	0.15	0.1
Y_2	1.69	0.7	1.35	0.5	0.20	0.3
Y_3	1.71	0.6	1.42	0.3	0.14	0.1
Y_4	1.88	0.7	1.29	0.3	0.12	0.1

表 2 中实验组别 W 和 Y 分别表示实验的两种场景，通过平均值计算得出对比系统一和对比系统二应用下合流区车辆的平均碰撞概率分别为 1.79% 和 1.35%，车道拥塞程度的平均值分别为 0.66 和 0.41，而在优化设计系统的决策与控制下，平均碰撞概率和拥塞程度分别为 0.15% 和 0.20。

综合两种实验场景，通过式（22）的计算得出车流量指标的测试结果，如图 9 所示。

从图 9 中可以直观地看出，在优化设计系统作用下，

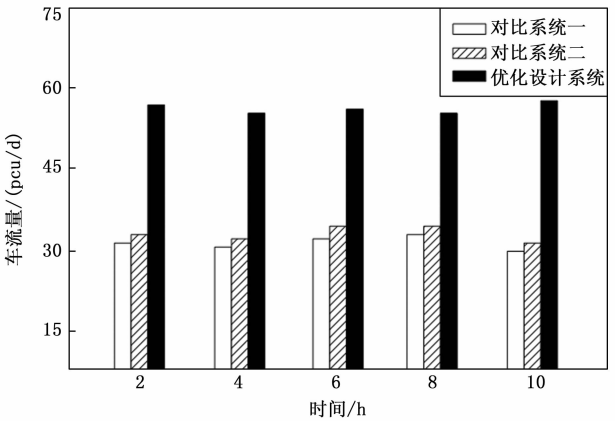

图 9　协同决策与控制系统下车流量统计结果

高速公路合流区的车流量明显高于文献对比系统下的车流量，对比系统一、对比系统二和优化设计系统应用下车流量的平均值分别为 32 pcu/d、34 pcu/d 和 56 pcu/d。

系统速度控制误差的测试结果如表 3 所示。

表 3　车辆换道速度控制误差测试数据表

实验组别	目标车道无车场景			目标车道有车场景		
	对比系统一控制下的实际换道速度/(km/h)	对比系统二控制下的实际换道速度/(km/h)	优化设计系统控制下的实际换道速度/(km/h)	对比系统一控制下的实际换道速度/(km/h)	对比系统二控制下的实际换道速度/(km/h)	优化设计系统控制下的实际换道速度/(km/h)
1	91.5	92.3	92.0	91.2	92.4	92.2
2	91.1	92.5	92.1	92.5	91.4	92.0
3	92.4	91.7	91.9	92.8	91.3	92.1
4	92.6	91.5	92.0	91.0	92.7	91.8

将表 1 和表 3 中的数据代入到式（23）中，计算得出目标车道无车场景下，对比系统一、对比系统二和优化设计系统控制下速度控制误差的平均值分别为 0.60 km/h、0.40 km/h和 0.05 km/h，而在目标车道有车场景下，对比系统一、对比系统二和优化设计系统控制下的平均速度控制误差分别为 0.78 km/h、0.60 km/h 和 0.13 km/h，由此证明在两种实验场景下，优化设计系统的速度控制误差始终低于两种对比系统，即优化设计系统具有更好的控制性能。

5　结束语

高速公路合流区是事故的多发区域，换道协调决策与控制为车辆行驶安全提供有效手段。高速公路合流区交通状况较为复杂，给车辆的换道行为带来较大难度，驾驶员在换道过程中如果存在决策失误，则会严重影响换道效率，甚至行驶安全也无法得到保证。在此次研究中，以车联网作为技术支持，利用交互协作驾驶的概念，解决换道过程中可能出现的碰撞以及拥塞等安全问题。从实验结果中可以看出，通过换道协作决策与控制系统的应用，不仅能够降低车辆的碰撞概率，同时能够提升道路的车流量，对于行驶车辆以及道路交通均具有积极意义。

参考文献：

[1] 秦雅琴，钱正富，谢济铭，等. 基于社会力的交织区突发瓶颈段协同换道决策模型［J］. 华南理工大学学报（自然科学版），2022，50（7）：66－75.

[2] 焦朋朋，云　旭，安　玉. 车路协同环境高速公路瓶颈车辆换道引导方法［J］. 重庆交通大学学报（自然科学版），2021，40（11）：53－59.

[3] 温惠英，李秋灵，赵　胜. 快速路合流区大型车换道时空特征及风险研究［J］. 华南理工大学学报（自然科学版），2022，50（5）：11－21.

[4] 宋晓琳，盛　鑫，曹昊天，等. 基于模仿学习和强化学习的智能车辆换道行为决策［J］. 汽车工程，2021，43（1）：59－67.

[5] 贾寒冰，刘　鹏，张　雷，等. 基于规则与机器学习融合的换道决策建模方法研究［J］. 机械工程学报，2022，58（4）：212－221.

[6] 谢光强，戴金刚，李　杨，等. 基于事件触发机制的双编队车辆换道决策模型［J］. 计算机应用研究，2021，38（10）：2941－2947，2973.

[7] 李巧茹，王少航，陈　亮. 高速公路合流区可变限速和换道协同控制研究［J］. 重庆交通大学学报（自然科学版），2022，41（2）：35－43.

[8] 何廷全，宋　浪，俞山川. 高速公路主线提前换道与入口匝道协同控制研究［J］. 公路，2023，68（3）：288－293.

[9] 高志军，王江锋，陈　磊，等. 基于智能网联车辆编队的高速公路协同合流控制方法［J］. 东南大学学报（自然科学版），2022，52（2）：335－343.

[10] 吴文静，战勇斌，杨丽丽，等. 考虑安全间距的合流区可变限速协调控制方法［J］. 吉林大学学报：工学版，2022，52（6）：1315－1323.

[11] 张方方，王长君，王俊骅. 城市快速路匝道合流区车辆交互行为模式［J］. 中国公路学报，2022，35（9）：66－79.

[12] 姚昌宇，柳祖鹏，何雅琴，等. 基于 NEMA 双环相位与合流相位的感应控制策略［J］. 公路交通科技，2021，38（3）：105－112.

[13] 陈林彬，唐　岚，谭鹏宇. 智能车辆换道路径跟踪协同控制研究［J］. 中国测试，2022，48（1）：108－115.

[14] 付　斌，朱煦晗，涂宁宁. 基于 XGBoost 的智能驾驶车辆换道决策研究［J］. 汽车技术，2022（11）：10－15.

[15] 杨　达，吕　蒙，戴力源，等. 车联网环境下自动驾驶车辆车道选择决策模型［J］. 中国公路学报，2022，35（4）：243－255.

[16] 顾金刚，蒲科辰，杨　达，等. 基于前景理论的换道决策模型研究［J］. 重庆交通大学学报（自然科学版），2022，41（6）：30－36.

[17] 曲大义，黑凯先，郭海兵，等. 车联网环境下车辆换道博弈行为及模型［J］. 吉林大学学报（工学版），2022，52（1）：101－109.

[18] 李　洋，潘兵宏，梅　杰，等. 基于合流视距的高速公路主线合流路段圆曲线最小半径研究［J］. 铁道科学与工程学报，2022，19（11）：3283－3292.

[19] 陈林彬，唐　岚，谭鹏宇. 智能车辆换道路径跟踪协同控制研究［J］. 中国测试，2022，48（1）：108－115.

[20] 石振新，冯剑波，王衍学. 基于 ANFIS 及 MPC 的车辆转向换道控制系统设计［J］. 现代制造工程，2022（2）：70－78.