随着感知模式、通讯技术与计算范式的发展，传统汽车正朝着智能化、网联化、协同化方向迅猛演进。

以智能网联汽车为抓手，车联网驱动的智能交通系统（Intelligent Transportation System, ITS）有望于实现更加安全、高效、可持续发展的交通运输。

车载信息物理融合系统（Vehicular Cyber-Physical System, VCPS）是实现ITS应用的基础和关键。

然而，车联网的高异构、高动态、分布式的特征和ITS应用的多元化需求都给实现 VCPS 带来了巨大的挑战。

首先，面向高动态异构车联网研究创新的服务架构并建立高效的数据感知与质量评估模型是 VCPS 的架构基础与驱动核心。

其次，面对动态异构节点资源，提出先进的任务调度与资源分配是进一步优化 VCPS 服务质量的技术支持。

再次，面向多元 ITS 应用需求，设计系统质量-开销均衡策略是实现高质量可扩展 VCPS 的理论保障。

最后，面向真实复杂车联网环境，基于 VCPS 设计并实现原型系统是验证 VCPS 的必要手段。

因此，本文面向车载信息物理融合系统，从质量指标设计、协同资源优化、质量-开销均衡，以及原型系统实现四个方面进行了理论创新，主要创新成果包括：

\circled{1} 基于分层车联网架构的车载信息物理融合质量指标设计与优化。

首先，提出了面向下一代车联网的分层服务架构，旨在车联网中有机融合软件定义网络和移动边缘计算范式，并最大化其在信息服务方面的协同效应。

在此基础上，提出了车辆协同感知和异质信息融合场景，其中边缘节点融合由车辆协同感知的异构信息并构建逻辑视图。

其次，基于多类M/G/1优先队列建立了感知信息排队模型，并基于异质信息的时效性、完整性和一致性对车载信息物理融合质量进行建模。

具体地，设计了一个新颖的评估指标 Age of View（AoV）来定量评估边缘视图的质量。

再次，提出了一个基于差分奖励的多智能体深度强化学习（Multi-Agent Difference-Reward-based Deep Reinforcement Learning, MADR）算法来最大化 AoV。

特别地，系统状态包括车辆感知信息、边缘节点缓存信息和视图需求。

车辆动作空间包括信息感知频率和上传优先级。

边缘节点根据预测的车辆轨迹和视图需求给车辆分配车与基础设施通信（Vehicle-to-Infrastructure, V2I）带宽。

最后，构建了仿真实验模型并进行了全面的性能评估，证明了MADR算法的优越性。

\circled{2} 面向车载信息物理融合的通信与计算资源协同优化关键技术。

首先，提出了基于非正交多址接入（Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA）技术的 VEC 架构，其通过异构边缘节点协同进行实时任务处理。

其次，考虑 NOMA 车联网中域内和域间的干扰并建立了V2I传输模型，并形式化定义了协同资源优化问题，其旨在最大化服务率。

再次，将协同资源优化分解为两个子问题，即任务卸载和资源分配。

特别地，将任务卸载子问题建模为严格势博弈，并提出了多智能体分布式深度确定性策略梯度（Multi-Agent Distributed Distributional Deep Deterministic Policy Gradient, MAD4PG）算法来实现纳什均衡；

资源分配子问题被分解为两个独立的凸优化问题，并使用基于梯度的迭代方法和KKT条件得到了最优解。

最后，构建了仿真模型并进行了全面的性能评估，证明了MAD4PG算法的优越性。

\circled{3} 面向车载信息物理融合的质量-开销均衡优化关键技术。

首先，建立了协同感知模型和 V2I 上传模型，考虑边缘视图中异质信息的及时性、一致性建立了车载信息物理融合质量模型，并考虑视图信息冗余度、信息感知能耗，以及传输能耗建立了车载信息物理融合开销模型。

在此基础上，形式化定义了双目标优化问题，以最大化VCPS质量和最小化开销。

其次，提出了多智能体多目标深度强化学习（Multi-Agent Multi-Objective Deep Reinforcement Learning, MAMO）算法来实现质量-开销均衡，其中提出了决斗评论家网络，其基于状态价值和动作优势来评估智能体动作。

最后，进行了全面的性能评估，证明了MAMO算法的优越性。

\circled{4} 基于车载信息物理融合的超视距碰撞预警原型系统设计与实现。

首先，介绍了超视距（None-Light-of-Sight, NLOS）碰撞预警场景，其中交叉路口中的车辆由于视线遮挡而具有潜在碰撞风险，而传统基于视距的碰撞预警已不适用。

其次，提出了 V2I 应用层时延拟合模型和数据包丢失监测机制，并提出基于视图修正的碰撞预警算法，通过丢包检测与时延补偿实现更加精准的逻辑视图以提高碰撞预警性能。

再次，建立了基于真实车辆轨迹的仿真实验模型并进行了全面性能评估，证明了所提碰撞预警算法的优越性。

最后，搭建了基于车载终端和路侧设备的硬件在环试验平台，并搭建了基于无人小车的验证平台，进一步在真实的车联网环境中验证了超视距碰撞预警原型系统的有效性。