随着感知模式、通讯技术和计算范式的发展，传统汽车正朝着智能化、网联化和协同化方向迅速演进。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）有望实现更安全、高效和可持续的交通运输。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、高动态和分布式特征以及ITS应用的多元化需求都给VCPS的实现带来了巨大的挑战。首先，面向异构车联网高动态物理环境，设计创新服务架构并建立高效数据感知与质量评估模型是VCPS的架构基础和驱动核心。其次，面向动态分布式车联网节点资源，提出先进任务调度与资源分配是进一步优化VCPS服务质量的技术支撑。再次，面向智能交通系统多元应用需求，设计系统质量和开销的均衡策略是实现高质量低成本可扩展VCPS的理论保障。最后，面向真实复杂性车联网通信环境，设计和实现原型系统是针对VCPS必要的验证手段。因此，本文针对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和系统创新。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，本文设计了融合软件定义网络和移动边缘计算范式的分层服务架构，以最大化其协同效应。 在此基础上，提出了分布式感知和异质信息融合场景，其中边缘节点融合感知信息并构建逻辑视图。其次，本文建立了基于多类M/G/1优先队列的信息排队模型，并针对异质信息多元需求对车载信息物理融合质量进行建模。具体地，设计了指标Age of View 来定量评估视图质量，并形式化定义了VCPS质量最大化问题。再次，提出了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，以实现VCPS质量最大化。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。车辆的动作空间包括信息感知频率和上传优先级，而边缘节点则根据车辆预测轨迹和视图需求来分配车与基础设施通信（Vehicle-to-Infrastructure, V2I）带宽。最后，本文构建了仿真实验模型并进行了性能评估，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，本文提出了协同通信与计算卸载场景，其中边缘节点协同调度通信与计算资源来实现VCPS实时任务处理。其次，本文考虑非正交多址接入（Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA）车联网中边缘内和边缘间的干扰，并建立了V2I传输模型。形式化定义了协同资源优化问题，旨在最大化服务率。再次，本文提出了基于博弈理论的多智能体深度强化学习（Multi-Agent Game-Theoretic Deep Reinforcement Learning, MAGT）算法，以实现异构资源协同优化。具体地，将协同资源优化分解为任务卸载和资源分配两个子问题。任务卸载子问题建模为严格势博弈，并通过MAGT算法实现纳什均衡。资源分配子问题分解为两个独立凸优化问题，并分别使用基于梯度的迭代方法和KKT条件得到最优解。最后，本文构建了仿真实验模型并进行了性能评估，证明了MAGT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，本文提出了协同感知与 V2I 上传场景，其中基于车辆协同感知与上传，边缘节点构建高质量低成本的视图。其次，本文考虑边缘视图中异质信息的及时性和一致性，建立了VCPS质量模型。同时，考虑到视图信息冗余度、感知开销以及传输开销，建立了VCPS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VCPS开销。再次，本文提出了基于多目标的多智能体深度强化学习（Multi-Agent Multi-Objective Deep Reinforcement Learning, MAMO）算法来实现质量-开销均衡。具体地，系统奖励为包含VCPS质量和VCPS利润的一维向量。本文还提出了决斗评论家网络，基于状态价值和动作优势来评估智能体动作。最后，本文构建了仿真实验模型并进行了性能评估，证明了MAMO算法的优越性。

\circled{4} 面向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，本文介绍了超视距（None-Light-of-Sight, NLOS）碰撞预警场景，其中交叉路口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，本文提出了 V2I 应用层传输时延拟合模型和数据包丢失检测机制，并提出基于视图修正的碰撞预警（View-Calibration-based Collision Warning, VCCW）算法，通过丢包检测与时延补偿实现实时准确的逻辑视图以提高系统性能。再次，本文构建了仿真实验模型并进行了性能评估，证明了 VCCW 算法的优越性。最后，本文搭建了基于车载终端和路侧设备的硬件在环试验平台，并进一步在真实的车联网环境中实现了超视距碰撞预警原型系统，并验证了所提系统的可行性与有效性。