

## 可编程道路交通控制系统：概念、体系架构与关键技术

王长君<sup>1</sup>, 胡伟超<sup>1</sup>, 吕宜生<sup>2</sup>, 戴星原<sup>2</sup>, 于鹏程<sup>1</sup>, 赵红霞<sup>2</sup>, 李小松<sup>1</sup>, 刘雨桐<sup>1</sup>, 王飞跃<sup>2</sup>

(1. 公安部道路交通安全研究中心, 北京 100176;

2. 中国科学院自动化研究所, 北京 100190)

**摘要:** 随着道路交通基础设施和汽车网联化的快速发展, 构建面向大规模路网的安全、灵活、高效的新一代交通控制系统已成为行业关注的重要问题。针对当前交通控制系统中存在的异构基础设施、软硬件耦合、物理调控为主带来的系统连通性、协同性、扩展性挑战, 在虚实互动的平行交通基础上, 引入软件定义的可编程交通控制系统。该系统通过集中控制器、应用开发框架、虚拟化交通设施与平行控制, 可实现对网联交通实体的高效协调与灵活调度。首先阐述了可编程交通控制系统的概念与特征, 然后论述其体系架构与关键技术, 之后介绍了该系统在交通信号控制、特勤车辆优先、标志标线控制、网联车辆诱导中的应用, 最后总结并展望可编程交通控制系统及相关技术的发展前景。可编程交通控制系统可作为新一代交通控制系统的重要组成部分, 为推动交通治理的数字化与智能化转型提供架构支持与技术路径。

**关键词:** 可编程交通控制系统; 平行交通系统; 数字孪生; 智能交通系统; 社会物理信息系统

**中图分类号:** U491

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-6652.202504

## Programmable traffic control systems: concepts, architecture, and key technologies

WANG Changjun<sup>1</sup>, HU Weichao<sup>1</sup>, LYU Yisheng<sup>2</sup>, DAI Xingyuan<sup>2</sup>, YU Pengcheng<sup>1</sup>, ZHAO Hongxia<sup>2</sup>,

LI Xiaosong<sup>1</sup>, LIU Yutong<sup>1</sup>, WANG Fei-Yue<sup>2</sup>

1. Research Institute for Road Safety of MPS, Beijing 100176, China

2. Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract:** With the rapid development of road traffic infrastructure and vehicle connectivity, the construction of a safe, flexible, and efficient next-generation traffic control system for large-scale road networks has become a critical issue in the industry. To address the challenges of system connectivity, coordination, and scalability in current traffic control systems caused by heterogeneous infrastructure, tight coupling of software and hardware, and a predominantly physical control approach, this paper introduces a software-defined programmable traffic control system based on the concept of parallel transportation with virtual-physical interaction. This system integrated centralized controllers, an application development framework, traffic facility virtualization, and parallel control. These features enable efficient coordination and flexible scheduling of intelligent and connected traffic entities. First, the concept and characteristics of programmable traffic control systems were introduced. Then, the architecture and key technologies were discussed. Furthermore, the system's applications in traffic signal control, priority for emergency vehicles, adaptive traffic sign and marking control, and connected vehicle guidance were discussed. Finally, the development prospects of programmable traffic control systems and

收稿日期: 2024-12-10; 修回日期: 2025-02-15

通信作者: 王长君, wcj121@sina.com; 王飞跃, feiyue.wang@ia.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2023YFB4301803); 国家自然科学基金项目 (No.62271485, No.62303462)

**Foundation Items:** The National Key R&D Program of China (No.2023YFB4301803), The National Natural Science Foundation of China (No.62271485, No.62303462)

related technologies were summarized and prospected. This system can support the next-generation of traffic control systems and provide a foundation for the digital and intelligent transformation of traffic governance.

**Key words:** programmable traffic control system, parallel transportation system, digital twin, intelligent transportation system, cyber-physical-social system

## 0 引言

随着道路网建设不断推进和交通需求的持续增长,保证道路畅通与安全成为交通管理者和参与者共同关注的核心问题<sup>[1-2]</sup>。交通控制是解决道路拥堵、提升交通安全性的重要手段。随着技术的不断发展,交通控制方式日益多样化,从最初的标志标线设置、交通信号控制、交通诱导,到如今备受关注的车路、车云协同控制。当前,智能化与网联化的发展使车辆、道路基础设施等交通实体逐渐成为具备远程通信能力的多元感知与控制终端,在此基础上形成的网联交通控制,通过融合多种控制方式,将进一步提升道路的安全性及通行效率,满足多样化交通需求<sup>[3-4]</sup>。

网联交通系统包含众多控制实体,按短期内状态是否可变,分为标志、标线、临时管制设施等静态实体,以及信号灯(机)、可变信息板、网联车等动态实体。这些控制实体的有效协同将带来交通控制性能的跃升,然而在现有软硬件高度耦合的交通控制体系架构下,实现高效、灵活的大规模交通控制仍面临诸多挑战。①纯“硬件”的静态交通控制设施难以灵活调整与扩展。以标志、标线、临时管制设施为代表的基础设施目前尚未完全实现数字化,其设置和调整需要耗费大量人力物力。从前期规划论证到设计施工,再到后期维护更新,整个流程涉及较高的成本投入。此外,由于这些设施缺乏数字化接口和通信能力,难以与现有的智能交通控制系统(如信号灯、网联车等动态实体)实现高效对接和统一协调。②来自不同厂商的动态交通控制设施难以互联。在软件驱动的控制设施(如信号灯)中,不同设备厂商可能采用仅适配自家硬件的通信协议,由于这种“协议鸿沟”的存在,不同厂商的设备之间难以直接互联互通,最终导致在道路交通控制中,这些异构设施难以通过统一方式进行高效灵活的协调。③控制节点分散,难以进行大规模有效协同。无论是接入网联交通系统的动态控制节点,还是未接入系统的静态节点,由于通信协议鸿沟、协同优化算法复杂性等问题的存在,控制节

点仍处于分散状态。加之现有控制方式通常关注单点或局部控制,即使能够考虑多种控制实体,如信号灯与网联车协同控制,仍局限在局部范围,难以协同大规模、大范围的控制实体以实现全局优化。综上所述,传统“硬编码”交通控制系统难以满足大规模、高效、灵活的控制需求,“软件定义”的交通控制系统将为智能交通建设提供新的解决方案,并最终实现虚实互动的平行交通控制<sup>[5]</sup>。

在平行交通系统中,软件定义的交通控制需要将交通要素数字化、交通设施网联化、控制体系标准化。其最初研究可追溯到21世纪初提出的基于代理的网络化交通控制<sup>[6]</sup>,这种控制范式以现场可编程与可配置(field-programmable and configurable)设备为基础,通过软件定义的代理之间的协调组织,满足不同场景下的交通控制需求。随着交通系统日趋复杂,软件定义的交通控制逐渐成为当前及未来一段时间内国内外智能交通系统发展的共同战略指向。国家“十四五”规划中提出以数字化转型整体驱动生产方式、生活方式和治理方式变革;《国家车联网产业标准体系建设指南(智能网联汽车)(2023版)》提出构建跨领域协同开放的智能网联汽车技术标准体系;欧盟在《可持续与智能交通战略》中强调通过数字化和智能化技术的应用,提升交通系统的效率、安全性和可持续性;日本在《2023年日本国土交通白皮书》中提出推进交通基础设施的数字化转型以提升交通管理效率与服务水平。如今,随着我国网联交通基础设施建设的不断完善,软件定义的交通控制系统将迎来新的发展机遇,而软件定义的关键是实现控制实体的可编程,进而服务于高效、灵活的大规模交通控制<sup>[7]</sup>。

本文引入可编程交通控制系统的概念,其采用软件定义的交通控制设施形成对网联交通实体的虚实映射,通过集中控制器和应用开发框架,实现对交通实体高效、灵活的统一协调控制。相比传统“硬编码”交通控制系统,可编程交通控制系统的创新性主要体现在3个方面:①采用软硬件解耦架构,通过标准化接口与通信协议、软硬件分层解耦与即插即用机制,实现交通控制的灵活性与可扩展

性，提升不同厂商设备的兼容性，支持系统的灵活升级与功能扩展；②构建交管业务全流程平行管控架构，基于数字孪生交通模型，实现交通实体的虚拟化与虚实映射，支持虚实互动的全网动态优化与控制策略协同部署，提升调控的精准性、协同性与执行效率；③构建面向道路交通控制的应用开发框架与生态体系，通过标准化二次开发接口、集成开发框架与交通控制策略库，支持多场景交通控制应用的高效开发，赋能交管部门、科研机构与行业开发者，推动智能交通技术创新与生态建设。

## 1 概念与特征

道路交通控制系统是随着城市化进程和汽车数量的增加而逐步发展起来的一套技术手段，旨在优化交通流运行，减少拥堵，提高道路使用效率和安全性。从最初的手动交通信号灯控制，到20世纪中叶的自动化交通信号控制系统，再到智能交通系统，当前交通控制系统集成了先进传感器、通信技术、数据分析和智能控制策略，能够实时监测交通态势，调控交通运行，协调网联车辆<sup>[2,8]</sup>。随着平

行交通系统理论的引入和虚实融合交通控制理念的发展，智能网联交通建设将“车辆-道路-环境”的物理与数字空间融为一体，使可编程交通控制系统成为可能，交通控制系统的发展进入了新阶段<sup>[8-9]</sup>。

### 1.1 可编程交通控制系统概念

可编程交通控制系统是一种基于软件定义的交通控制理念，通过交通要素数字孪生、设施及车辆通信协议标准化、交通运行数据视图化、感知控制硬件虚拟化等技术手段，实现硬件即插即用、软硬件分层解耦、控制策略灵活编程、数据治理场景自适应等功能，兼有集中控制器和应用开发框架的交通控制系统。可编程交通控制系统体系架构如图1所示。

可编程交通控制系统基于软件定义的交通控制理念，将交通控制设施的控制平面与底层设施进行解耦，利用集中控制器整合分散在路网交通设施及车辆上的控制界面，使底层设施和网联车辆能够根据上层指令执行感知与控制任务，进而实现交通控制的虚拟化和可编程。

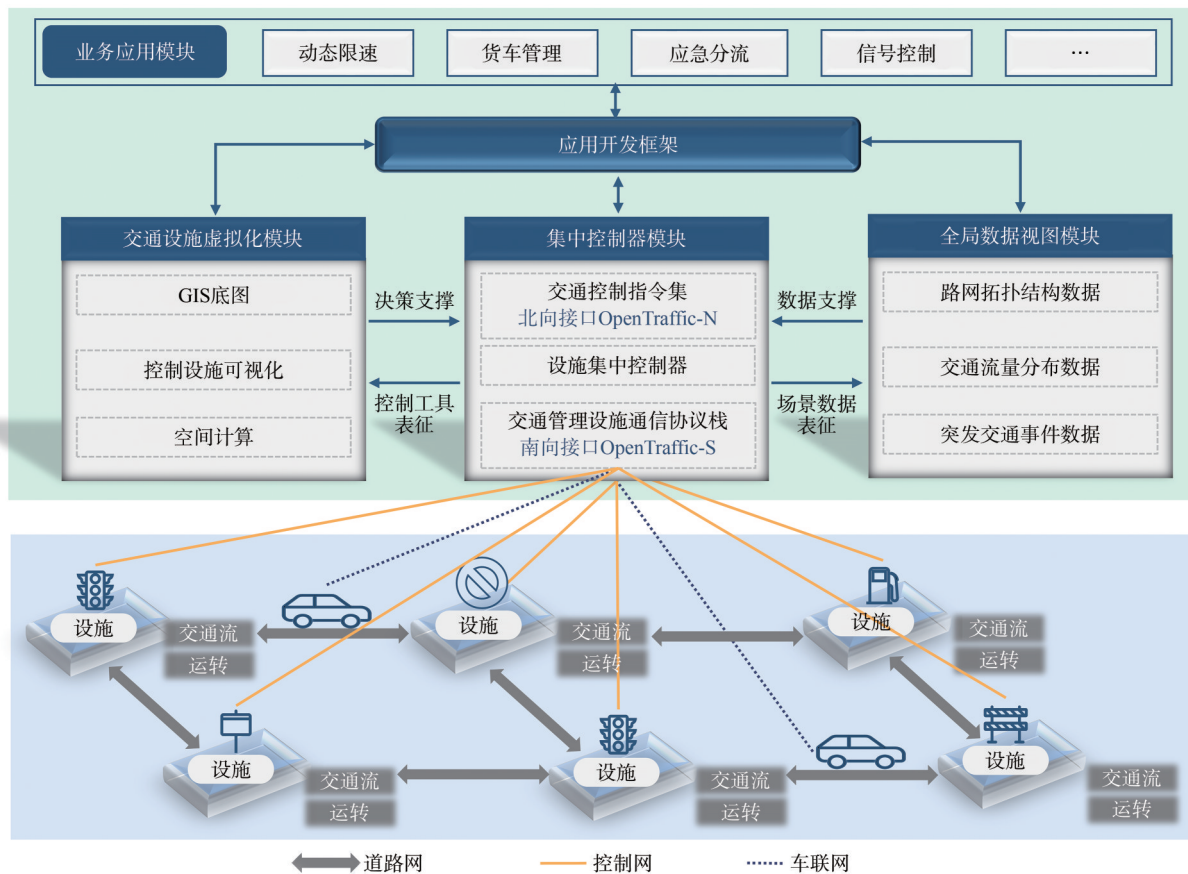


图1 可编程交通控制系统体系架构

## 1.2 可编程交通控制系统特征

作为新一代交通控制的架构,可编程交通控制系统具有交通要素虚拟化、运转和控制解耦、控制过程平行化、开放可编程等特征,使个体动态限速、全局可变车道、路网饱和式利用等前瞻性交通控制策略的实现成为可能。

### (1) 交通要素虚拟化

通过虚拟化和标准化数据定义构建交通系统的数字孪生,将车辆、道路、信号灯、标志等转化为虚拟数字模型,“以虚映实”动态映射物理系统的运行状态。这种实时的虚实融合能够精确感知交通系统的全息变化,同时支持交通现象的因果溯源与交通控制的策略优化。虚拟化技术以统一的标准化数据规范为基础,覆盖交通基础设施、车辆和控制指令,实现对交通要素的统一数字定义。通过标准化的数据架构,不同系统和设备之间能够实现高兼容性和互操作性,有效打破传统交通管控系统中的信息孤岛,为多系统的协同运作提供技术保障。虚拟化技术还实现了交通要素的一致性对齐和资源整合,形成虚实交互的闭环管理模式<sup>[10]</sup>。交通管理者能够在虚拟环境中模拟复杂场景,预测交通流量变化,优化信号配时策略,并进行交通事故预警,从而提高交通系统的运行效率和安全性。

### (2) 运转与控制解耦

“转控解耦”的理念将交通系统的控制层(交通控制中心)与执行层(现场设备)的功能和责任分离,进而实现“本地(现场设备)简单、远程(交通控制中心)复杂”的控制范式<sup>[6]</sup>。控制层通常指交通控制中心或指挥中心,负责制定策略、监控交通状况、分析数据和执行决策。它通过智能交通控制系统实现对整个交通网络的宏观调控,如调整信号周期、发布交通信息和指导应急响应。执行层包括现场的交通信号灯、摄像头、传感器等设备,它们直接与交通参与者交互,执行控制层发出的具体指令。例如,根据控制中心的指令,现场信号灯可以改变灯态以控制交通流,或者摄像头可以捕捉交通违法行为。这种分离模式的优势在于允许交通系统更加灵活和迅速地响应各种控制需求。控制层可以集中处理复杂的交通态势和数据,而执行层则专注于执行具体的操作任务。此外,这种分离还有助于提高系统的可靠性和安全性,因为控制层可以在不影响执行层操作的情况下进行维护和升级。通过转控解耦,交通控制方式将实现“从点到

面”的转变,独立交叉口的单一交通控制将过渡为路网层面的全局混合交通控制。交通控制中心将路网数据集中分析,利用大规模计算与智能算法优化,进行全局态势推演与混合交通控制策略生成,所生成策略将按需下发至相应路口,并确保控制策略的及时性与有效性。全局调度系统还能够与公共交通、应急救援运输和自动驾驶车辆等其他交通要素进行协同,最终面向“一网统管”“调度一体化”,实现灵活、高效、可靠的交通控制目标。

### (3) 控制过程平行化

通过交通要素的全数字化,交通指令的全标准化,道路网、控制网、车联网的全时空融合,构建面向信息-物理-社会系统(cyber-physical-social system, CPSS)的人工交通系统,利用基于人工系统的计算实验与虚实互动的平行执行,实现可信、可靠、高效的平行交通控制<sup>[11-12]</sup>。在平行交通控制中,人工交通系统将作为交通控制的“试验场”与“控制中枢”,承担交通控制的核心功能<sup>[13]</sup>。基于人工交通系统的计算实验,通过知识驱动的场景工程,实现对现实世界交通管理者的技能培训与交通控制策略的优化与评估。在平行控制阶段,交通管理者以标准化方式调用上层应用与服务,在统一控制平台监控全局路网交通状态,通过“以虚控实”实时响应交通事故和拥堵,优化信号灯控制,预测并调整交通流量,实现指挥调度、勤务安排的集中协同与执法资源的灵活分配,同时结合区块链<sup>[14]</sup>与联邦智能技术<sup>[15]</sup>,保证交通控制过程可信、可靠与高效。

### (4) 系统开放可编程

可编程交通控制系统面向开放与可扩展的应用开发需求,支持标准化交通设施的灵活接入与控制功能的二次开发。标准化交通设施如信号灯、可变交通标志、可变交通标线、移动式隔离设施、路侧传感器等,在可编程交通控制系统中实现即插即用。系统提供的统一接口与虚拟化技术保证了不同硬件的横向兼容与交互操作。系统支持通过软件编程实现交通控制业务指令的自定义扩展,允许研究人员和开发者试验新的算法和控制策略。系统控制功能可根据不同的城市、道路类型和交通状况进行定制,灵活满足特定的管理目标和用户需求。可编程交通控制系统通过打破传统封闭交通控制硬件设施的技术壁垒,推动交通资源的标准化和高效利用,为交通控制技术的不断迭代和创新提供了平台

支持，满足未来城市交通控制与出行服务的多样化需求。

## 2 体系架构

可编程交通控制系统体系架构包含4个主要模块：集中控制器模块、交通设施虚拟化模块、全局数据视图模块、业务应用模块。集中控制器作为整个系统的中间件，通过通信网络接收来自交通控制设施与网联车辆的感知数据，进行统一的数据集成与调控，并将道路数据分别映射到交通设施虚拟化模块与全局数据视图模块，实现交通系统的数字化、可视化呈现及场景数据的结构化表达。该虚拟系统与结构化数据集成在应用开发框架中，向业务应用模块开放，允许交通管理者、工程师及研究人员灵活编写面向交通控制的上层应用及算法。这些应用最终将通过集中控制器模块实现对道路交通控制设施与网联车辆的协同控制。

### 2.1 集中控制器模块

集中控制器模块是可编程交通控制系统的中枢软件平台，包含南向接口与北向接口，负责统筹协调整个交通控制系统的运行，如图2所示。集中控制器模块通过南向接口与网联车辆、交通控制设施通信，接收路侧感知信息，并向下转发交通控制指令和策略；通过北向接口向上层应用开放编程接口，提供实时感知数据和设备控制能力，实现感知控制功能的抽象和集中。

南向接口与北向接口均采用标准化设计。在南

向设施控制标准化方面，集中控制器通过标准化的接口协议与交通控制设施和网联车辆通信，确保所有设施和车辆都能按照统一的控制规则操作。这种标准化能够提高不同厂商设备之间的互操作性，同时确保控制指令在整个交通系统中的一致性和准确性。南向接口中设计了可编程交通管理设施通信协议栈，支持在集中控制条件下根据指令对路侧设施和车辆进行灵活管理，使系统能够迅速响应不同的交通状况和需求，实现动态调整和优化。同时，通过设备的统一标准化，确保所有接入系统的交通控制设施和网联车辆都能按照统一的标准进行集成和调控。标准化的设备接口和集成调控机制将简化系统的部署和维护，并提高系统整体的稳定性和可靠性。

北向业务指令标准化通过提供统一的编程接口和开源的交通控制指令集，支持预警、建议和强制3类指令的设定及应用开发。预警指令用于提前告知潜在的交通安全风险，建议指令为驾驶者或系统提供操作建议，强制指令用于在紧急和管制情况下执行强制性操作。北向接口的标准化设计确保了系统兼容性，使得不同上层应用能够顺利集成并利用这些指令接口。这种标准化提高了交通控制系统的兼容性和扩展性，并使控制策略的开发和部署变得更加高效、灵活。统一的北向业务指令标准化和南向设施控制标准化共同构成了集中控制器模块的重要基础，使整个可编程交通控制系统能够在复杂多变的环境中保持稳定和高效的运行。

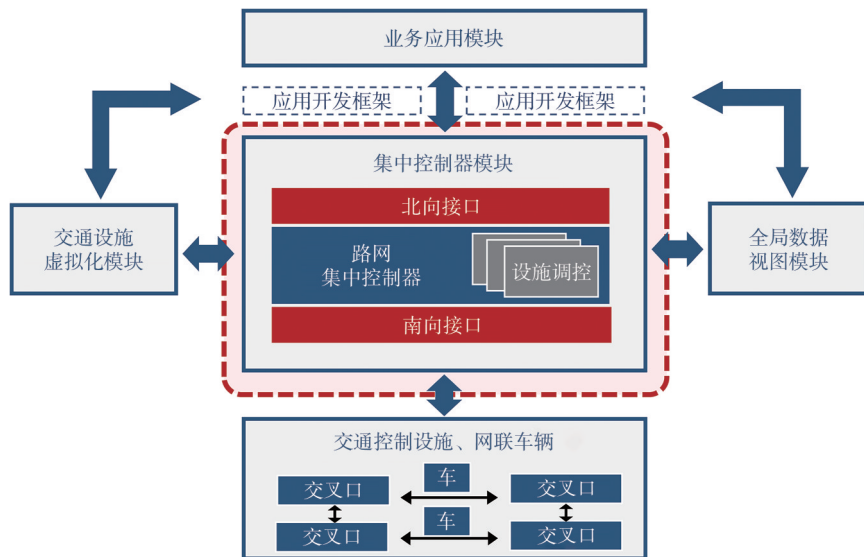


图2 集中控制器模块及其关联模块

在大规模交通控制场景下,集中控制器模块支持分层控制架构,以实现高效的交通资源调度。分层控制架构如图3所示。这种分层控制通过多级控制器的协同配合,能够在复杂的交通环境中进行有效的资源管理和优化调度<sup>[16]</sup>。分层控制架构包括全局控制器、区域控制器和本地控制器等多个层级,每个层级负责不同范围和粒度的交通控制任务。全局控制器负责全网络的整体协调和调度,确保交通流量的宏观均衡;区域控制器管理特定区域内的交通资源,优化区域交通流;本地控制器直接与交通信号灯、路侧感知设备等硬件设施交互,执行具体的控制策略。通过这种分层控制架构,系统能够在更高层次上实现全局优化,同时保持对局部交通状况的敏捷响应,能有效提升交通系统的整体运行效率,并增强系统的灵活性和适应性,有助于应对突发事件和动态变化的交通状况。

## 2.2 交通管理设施虚拟化模块

交通管理设施虚拟化模块通过将不同类型交通要素数据统一定义,实现物理实体与虚拟化数字实体在状态与性能上的一致性映射。该模块将GIS地图、基础设施、规则和控制指令3类交通要素进行数字化和结构化,构建出统一的数据规范,实现交通控制工具的可视化并支撑灵活的调度与管理。

在虚拟化模块的3种交通要素中,GIS地图要素提供了路网的基础结构信息,包括道路信息、路口信息、建筑物信息、路网拓扑结构等。这些数字

化数据将支持精确的交通流模拟,同时为交通规划与管理提供重要的基础数据。基础设施要素涵盖标志、标线、可变信息标志、隔离设施、信号机、感知设施、路侧单元等各种交通管理设施的数字化定义。基础设施要素的数字化实现了其物理属性、动态状态和性能指标的统一描述,这对于交通系统的全局管理和实时监控至关重要。指令要素包括交通规则和控制指令的数字化处理,涵盖交通信号控制、车速限制、车道使用规则等内容。通过数字孪生技术,这些指令得以在虚拟环境和现实环境中实现同步控制,提供精准的交通管理和实时响应能力。

交通设施虚拟化如图4所示。交通设施的虚拟化流程如下。首先,通过高精地图采集与制作,对道路、路口、建筑等交通要素进行精确的数字化与标准化建模,构建虚拟世界的基础。其次,接入动态交通规则、实时交通信息和设施状态的数字化表达,构建与实际交通系统平行运行的数字孪生模型。在此基础上,系统可以进行动态交通规则与交通控制设定,将这些规则下达至虚拟世界中的交通设施和车辆,并完成基础设施孪生模型的更新。最后,在物理世界中,车辆根据接收到的动态规则执行相应的操作,物理交通设施状态也会根据虚拟世界的调整进行同步更新。这种虚实结合的流程不仅保证了虚拟世界与物理世界的实时一致性,还将极大提升交通管理的灵活性和响应能力。

交通设施虚拟化模块构建了物理世界对应的虚

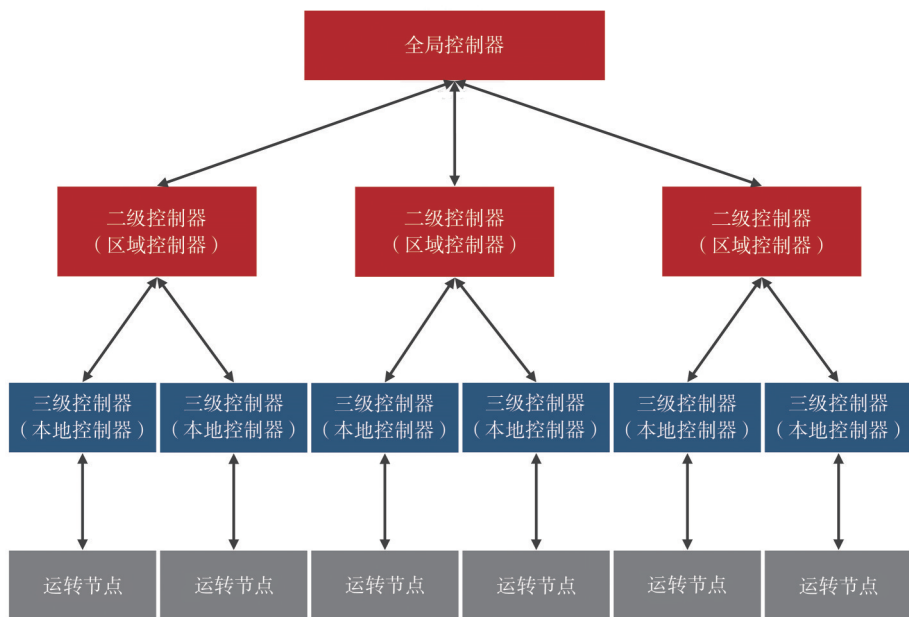


图3 分层控制架构

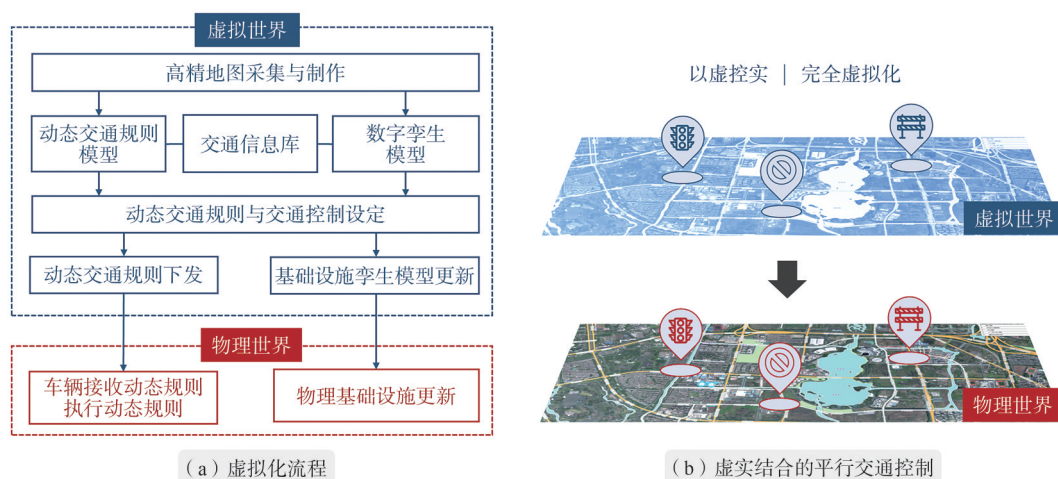


图4 交通设施虚拟化

拟世界，在此基础上，采用两阶段渐进方式实现虚实结合的平行交通控制。第一阶段以虚控实：通过交通指挥中心的调度，实时调整虚拟世界中的交通控制设施，进而同步影响物理世界的交通运行。这一阶段的核心在于在交通指挥中心即可控制物理世界的交通设施，实现虚拟与现实的实时联动。第二阶段完全虚拟化控制：随着物理世界的交通设施与车辆全面数字化与网联化，车辆将依据虚拟化的交通标志和标线运行，而不再依赖于物理交通设施。这一阶段标志着交通管理完全依托于虚拟指令，网联车辆无须再识别现实中的交通标志、标线，从而实现更加精准、灵活和时空全覆盖的交通控制。

### 2.3 全局数据视图模块

全局数据视图模块是可编程交通控制系统的核心组成部分，提供了业务策略开发和应用的關鍵数据基础。它通过构建场景化的数据结构，为系统提供实时交通态势的感知、预测和评估功能。全局数据视图模块能够与交通设施虚拟化模块无缝集成，实现对交通系统运行状况的全要素可视化和地图匹配，涵盖从宏观路网交通流到微观单体车辆的各种交通信息。这种全方位的数据支持将有效提升系统对交通流量和交通事件的监控能力，同时为交通管控决策提供科学依据，有助于优化资源配置并提升系统应对突发事件的能力。

全局数据视图模块包含来自路侧传感器、车端传感器和环境传感器的多样化数据，涵盖了交通系统中的各类动态信息。路侧传感器包括路侧摄像头、雷达等设备，用于实时监测车流、车速、车距等交通状况；车端传感器采集网联车辆运行状态和

周围环境信息，其传输与接收过程经过加密处理；环境数据包括天气状况、光照情况等外部因素。这些数据通过场景化数据结构进行统一验证与管理，以保证数据的准确性和一致性，同时便于被不同应用模块调用分析。

全局数据视图模块的场景化数据涵盖时间、空间和内容等多个维度。时间维度提供了年、月、日、实时数据等多个时间尺度的全覆盖，为长时间跨度的交通模式分析和即时响应提供了基础。空间维度数据覆盖从区域、路段到具体的交叉口和个体车辆，能够展现路网各个尺度的交通信息。内容维度整合了交通流参数、交通事件、车辆运动状态等多种场景数据。这种多维度数据视图，为灵活高效的交通控制提供了全面、深度的数据支撑，有助于进行复杂场景下的综合分析和优化决策。

全局数据视图模块具备强大的数据抽象和建模能力，能够对全网交通流及个体状态进行数字化抽象，构建出一个详尽的路网运行状态视图。这种视图能够展示全网的拓扑结构和交通流量分布，同时具有实时监测和预警突发交通事件的功能。全局视图中的信息通过标准化接口向控制层提供，为预警、诱导、管制、信号周期调整等多种交通控制决策提供支持。例如，当系统检测到交通事故或其他突发事件时，可以通过全局视图迅速识别受影响的区域和道路，并根据实时数据快速制定应急响应措施，减轻交通拥堵和提高道路安全性。这使得全局数据视图模块不仅是数据展示和监控的工具，也将为交通管理和决策提供灵活有力的支持。

## 2.4 业务应用模块

业务应用模块负责实现各种交通控制应用,如动态限速、货车管理、应急分流、信号控制等。该模块为交通管理者提供了丰富的控制手段,同时为工程师和研究者提供了开发和测试新控制策略的平台。通过开放式架构,业务应用模块允许第三方开发者利用集中控制器提供的统一 SDK 接口进行开发,充分利用系统的灵活性和扩展性。

在具体应用中,业务应用模块能够基于交通设施虚拟化模块提供的虚拟化场景和全局数据视图模块提供的场景化数据结构,实现对交通系统中各种设施和网联车辆的统一协调控制。开发者可以通过 SDK 接口,调用虚拟化场景中的数字孪生设施模型,获取实时的交通流量、道路状况等数据,并根据实际需求编写和部署交通控制应用。例如,动态限速功能可以根据实时交通流量和道路条件自动调整限速标志,优化车辆行驶速度;货车管理功能则能够对特定路段的货车进行限制或引导,避免对城市交通造成过大压力;应急分流功能则在突发事件发生时,快速制定分流方案,保障应急车辆的优先通行和普通车辆的安全疏散。

此外,业务应用模块还支持信号控制的智能化管理。通过与集中控制器和全局数据视图模块的协作,系统可以实时监控交通信号的运行状态,并根据交通流量的动态变化调整信号配时,提高交通效率和通行能力。开发者和研究者还可以利用该模块进行新控制算法(如自适应信号控制、智能车道管理等)的测试和验证,为未来交通系统的升级提供高效、灵活的解决方案。

## 3 关键技术

可编程交通控制系统作为全新一代交通控制体系架构,涉及多项关键技术,如集中控制技术、数字孪生技术、下一代网络通信技术、安全与隐私保护技术。本节将对这4项关键技术进行阐述。

### 3.1 集中控制技术

智能资源调度技术和多控制器协同技术是集中控制器的关键技术。智能资源调度技术用于南北向多终端并发的高效通信,多控制器协同技术用于支持复杂、分层的交通控制结构,以实现有序、协同控制。集中控制设计保证可编程交通控制系统的稳定运行及对突发交通事件的及时响应。

智能资源调度技术在可编程交通控制系统中负

责单个集中控制器的南北向通信任务。通过动态优化网络资源的分配与管理,该技术确保了高并发通信场景下的性能稳定性和资源利用效率。针对终端设备和传感器的大规模数据交互需求,智能资源调度利用实时流量监控与弹性资源配置策略,动态调整通信优先级和带宽分配,最大化网络吞吐量并减少延迟。该特性能够提升单控制器的通信性能,并在数据密集型场景中支撑集中化交通管理的高效运行,确保各类终端设施的即时响应和协同操作。

多控制器协同技术面向可编程交通控制系统的大规模分层管理需求,通过控制器间的高效交互和协作,实现资源的优化分配与联合决策<sup>[17-18]</sup>。该技术引入权限管理机制,确保控制任务在不同层级间的有序分工,并通过高效的通信协议实现信息共享与联合执行。在交通事件处理场景中,多控制器协同机制能够快速整合区域数据、调整控制策略,实现对交通流量的动态优化和突发事件的精准应对。这种协同模式可提升交通管控的灵活性,同时为复杂场景下的智能调度提供技术保障。

### 3.2 数字孪生技术

数字孪生技术通过对现实交通系统的建模、推演和引导,为交通控制提供了精准、智能的技术支撑<sup>[19]</sup>。基于数字孪生的建模利用仿真模型和计算模型协同驱动,将道路、信号灯、标志等静态设施与车辆、行人等动态要素数字化为高精度的孪生体。仿真模型基于计算机图形学和虚拟化技术,结合路网拓扑和交通流等多源异构数据,构建宏观、中观、微观多尺度模型,真实还原交通运行特性;计算模型依托数据驱动的生成模型,对复杂交通场景进行高效描述与可控生成,计算模型与仿真模型形成优势互补,为实时交通管理提供完备的数据基础和灵活的建模能力。

面向可编程交通控制的动态需求,基于数字孪生的交通推演能够实现对交通系统的超实时动态分析与决策支持。结合实时轨迹数据、车联网信息等动态交通数据,系统能够解析交通流的时空变化趋势,识别潜在的拥堵区域或瓶颈路段,并评估信号配时和路径优化策略的效果。通过孪生系统的动态推演技术,系统可在虚拟环境中预测未来交通态势,模拟多种应对方案,并选择最优策略缓解交通压力。交通推演不仅提升了交通管理的精准性和前瞻性,还为突发事件响应和实时调度提供了可靠依据,为可编程交通控制系统在复杂环境中的智能化

运行奠定了基础。

引导环节通过虚实互动与平行执行, 将建模与推演的成果在线转化为对实际交通系统的智能调控。可编程交通控制系统利用数字孪生技术, 模拟多种控制策略的实施效果, 通过基于自我博弈的强化学习优化调控方案, 并将其应用于实际交通系统, 实现资源的动态分配与精准管理。同时, 人机协同与大模型技术将进一步提升系统的认知水平与响应能力<sup>[20-21]</sup>, 交通管理者通过数字孪生平台实时调整策略, 与系统共同完成精准高效的交通管理。将建模、推演、引导三者深度结合, 数字孪生技术赋予可编程交通控制系统从静态建模到动态优化的全生命周期能力, 为智能交通管理向高效、安全、可持续发展提供了有力保障。

### 3.3 下一代网络通信技术

下一代网络通信技术是可编程交通控制系统的核心支撑, 涵盖车路、车云、路侧设备间以及路侧与云端(中心控制器)之间的多层次通信链路<sup>[22]</sup>。通信设施建设和通信资源优化两大关键技术, 可保障系统的高效运行和突发交通事件的快速响应。

在通信设施建设方面, 部署高容量、高可靠、低时延的移动通信网络是关键。为支持交通控制中心与其他终端之间的大量数据传输和实时交通管理应用, 需要采用先进的光纤通信技术构建高速数据传输通道, 同时引入优化路由算法和短路径交换技术, 确保数据传输路径的高效性和低时延。此外, 针对建筑物遮挡、隧道等复杂环境中的通信稳定性问题, 可结合漏缆技术为隧道内部提供均匀分布的无线信号覆盖。高楼密集区和无视距场景可采用卫星通信技术, 通过卫星直连保障地面通信链路的稳定性, 避免遮挡对车路及车云通信的影响。

通信资源优化是提高可编程交通控制系统性能的另一重要技术方向。动态频谱管理通过智能算法实时调整频谱资源分配, 有效降低无线通信中的干扰, 提高频谱利用率。此外, 自适应通信资源管理策略基于智能技术, 结合历史和实时流量数据动态优化交通控制资源配置, 实现网络性能的最大化。该策略能够预测高流量区域的通信需求并提前分配资源, 避免网络拥堵, 同时在突发交通事件中提供优先级保障, 确保重要数据的及时传输。

通过通信设施建设与资源优化的双向改进, 并针对复杂环境设计创新的解决方案, 下一代网络通信技术为可编程交通控制系统的高效、可靠和实时

运行提供了全面支撑, 也为智能交通在极端场景中的应用拓展了更多可能性。

### 3.4 安全与隐私保护技术

可编程交通控制系统作为一个开放平台, 将网络安全、数据安全与用户隐私保护置于核心地位。其架构特性要求在保障通信链路安全的同时, 全面保护数据的完整性与用户隐私, 以应对复杂的交通环境和动态控制需求<sup>[23]</sup>。

在网络安全方面, 可编程交通控制系统重点确保车路、车云和路侧设备之间的通信链路不受威胁, 同时保障指令传输的完整性与合法性。为此, 网络安全技术需结合系统特性, 采用端到端加密与动态权限管理策略。在动态调整信号灯或分配路权时, 端端加密技术可以确保指令在传输过程中即使被截获也无法解读, 从而有效防止数据被篡改。此外, 部署入侵检测与防御系统实时监控潜在的攻击行为, 能够迅速识别并响应异常活动。这些技术的结合有效防止了恶意数据包的注入与非法指令的执行, 确保交通设施虚拟化场景中的通信安全<sup>[24]</sup>。

在数据安全方面, 可编程交通控制系统需对存储和传输的交通数据, 尤其是敏感数据, 进行全面保护。结合系统的动态控制需求, 采用分层加密和基于角色的访问控制策略, 可以有效防止未经授权的用户接触核心数据。例如, 动态加密算法能够为实时上传的交通流量数据提供多重保护, 避免中间人攻击带来的安全隐患。同时, 数据完整性验证机制通过校验算法对虚拟化数据流和控制指令进行验证, 确保传输过程中的数据未被篡改或损坏。在信号灯优化过程中, 需要验证机制可检测控制数据的合法性, 以避免错误数据对交通系统的运行造成干扰。

在用户隐私保护方面, 可编程交通控制系统需满足以人为中心的合规要求, 特别是在用户行为数据和个性化服务的处理过程中。隐私保护技术需紧密结合系统的开放特性, 通过匿名化和数据脱敏技术对个人身份信息进行安全处理。例如, 将车牌号、位置信息等敏感数据替换为不具标识性的随机代号, 在数据分析和共享时有效隐藏用户隐私。在此基础上, 采用联邦学习技术, 允许多方协同训练模型而无须直接共享原始数据。例如, 在多区域交通系统中, 各地数据保存在本地, 通过加密模型参数进行协同优化, 从而避免用户数据暴露于中心服务器。

## 4 应用与展望

在当今快速发展的城市交通环境中,可编程交通控制系统凭借其可靠、可信、灵活、高效的特点,将改变管理和优化交通流的方式。本节以交通信号控制、特勤车辆优先、标志标线控制和网联车诱导为例,探讨可编程交通控制系统的实际应用场景。

### 4.1 交通信号控制

交通信号控制在可编程交通控制系统中扮演着核心角色。交通管理者可在应用模块构建先进信号控制算法,借助集中控制器与数字孪生技术,实现大规模路网的全方位动态交通管理<sup>[25]</sup>。

可编程交通控制系统具备全时空动态限速功能。在道路条件或天气状况发生变化时,如雨雪天气或事故场景,系统可以即时调整路段的速度限制,通过可变信息板直接向驾驶员显示更新的速度限制信息,确保驾驶安全。这种高度的灵活性和响应速度是传统交通控制系统难以实现的。可编程交通控制系统能够实时接收来自网联汽车和交通监控设施的数据,包括车辆位置、速度、行驶方向以及周边交通流。通过分析实时数据,可编程交通控制系统可以动态调整信号灯的变换周期,优化交通流并减少拥堵。例如,在交通高峰期,系统可能会延长主要道路的绿灯时间,以缓解交通压力。此外,系统还能响应特殊情况,如道路施工或突发事件,快速调整信号策略,绕行交通或优先清理事故影响区域。

在更宏观的层面,可编程交通控制系统能够进行路网资源的全局优化。通过模拟和优化算法,系统可评估不同信号方案对整个城市或区域交通流的影响,从而制定最优交通调控策略<sup>[26]</sup>。这种全局优化可以实现更加高效和平衡的交通流分配,减少总体延误,提高路网的整体通行能力。

### 4.2 特勤车辆优先

在可编程交通控制系统中,确保特勤车辆(如警车、救护车和消防车)在执行紧急任务时能够快速安全通行是一个重要应用场景。该过程涉及识别路网中的特勤车辆,并通过一系列智能控制手段赋予它们更高的通行优先权。

一旦特勤车辆被系统识别,可编程交通控制系统将自动调整路口的信号灯,为这些车辆提供绿灯优先。如可通过延长绿灯时间、缩短红灯时间或在

特勤车辆接近时,临时改变信号灯序列等方法对信号灯进行调整。这种动态调整确保特勤车辆在紧急情况下能够快速通行,大幅减少因交通信号引起的延误。例如,如果系统检测到一辆救护车正在接近某个路口,可延长该方向的绿灯时间,或者提前切换到绿灯,以确保救护车不会因红灯而停留,进而降低特勤车辆到达现场的延误。

可编程交通控制系统可通过集中控制器与交通管理设施虚拟化模块进行更复杂的操作,如在多路口交叉时,协调各个路口的信号灯,为特勤车辆创造一条“绿波带”。这意味着特勤车辆在行进过程中,将尽可能遇到连续的绿灯,从而无须停车等待信号灯变换<sup>[27]</sup>。此外,对于拥有多个车道的道路,系统可指示其他车辆避让最左侧或特定车道,确保特勤车辆畅通无阻。在特勤车辆执行紧急任务时,交通控制系统还会实时收集和反馈道路状况信息给车辆驾驶员,帮助他们避开严重拥堵或事故路段。系统中的应急响应机制也能够与其他紧急服务进行信息共享,确保多部门协作的效率和时效性。

### 4.3 标志标线控制

在可编程交通控制系统中,标志标线控制通过动态调整相关交通设施,实现对交通流的精细化调控和资源的优化配置。系统利用可变交通标志和动态标线技术,根据实时交通状况和环境变化动态调整交通引导和管理策略。例如,基于电子显示屏的可变标志可实时更新限速信息、车道使用状态或临时交通指令,而动态标线技术则依托新型材料和光学显示技术,允许标线颜色、形状和用途的灵活变化,从而适应高峰交通流或突发事件需求<sup>[28]</sup>。通过这种动态调控,系统有效提升了交通资源的利用效率和路网运行的灵活性。

随着车联网技术的普及和自动驾驶的逐步实现,标志标线控制将进一步迈向虚拟化。通过车载抬头显示器或增强现实技术,虚拟标志标线信息将直接呈现于驾驶者的视野中,为驾驶行为提供即时、精准的指引。自动驾驶车辆则通过车联网接收虚拟标志标线信息,直接在数字化环境中规划路径、调整行驶行为,无须依赖传统物理设施。虚拟化标志标线技术可实现动态车道分配、路径优化、流量引导等复杂功能,为交通控制提供高效的解决方案。

基于虚拟化的标志标线控制不仅为交通资源的灵活调度提供了技术支撑,也为未来智能交通系统

的进一步发展奠定了基础。该技术将显著提升交通管理的精确性与灵活性, 同时降低传统物理设施的部署与维护成本, 为现代交通系统的智能化管理提供重要保障。

#### 4.4 网联车辆诱导

在可编程交通控制系统中, 网联车辆诱导是利用车路协同感知、协同决策、车路云一体化等技术, 实现实时路径规划和导航优化的关键应用场景。系统通过综合分析全网拓扑结构、路网流量分布及突发交通事件等信息<sup>[29]</sup>, 为网联车辆提供精准、优化的行驶指导, 从而提升路网整体运行效率和交通安全性。

依托传感器网络采集的综合数据, 网联车辆诱导系统能够动态生成或更新车辆行车路线, 帮助车辆避开拥堵、事故现场或因维修和天气影响而关闭的道路<sup>[30]</sup>。系统实时向车辆发送导航更新, 引导其沿最佳路线行驶, 从而减少行程时间, 避免潜在延误<sup>[31]</sup>。同时, 系统在路径规划中充分考虑全网拓扑结构, 不仅关注单一路段的拥堵情况, 还通过优化多辆车的行驶路径来平衡路网流量分布, 缓解特定路段的过载压力, 实现整体交通负荷的动态平衡。

借助下一代网络通信、平行车联网、车路云一体化等技术, 网联车辆诱导在路径优化基础上, 可支持智能网联汽车信息服务并形成面向 CPSS 的交通管理模式<sup>[13,32]</sup>。例如, 在视距盲区预警场景中, 系统通过车路协同感知, 为车辆提供视线外的潜在危险信息预警, 如突然进入盲区的行人或车辆。在复杂路口环境下, 系统能够向车辆实时推送红绿灯状态和交叉口优先权信息, 使车辆安全通过, 进而提升道路安全性和交通运行效率。

## 5 结束语

本文针对传统交通控制系统在灵活性、扩展性及全局优化能力上的不足, 在虚实互动的平行交通基础上, 引入软件定义的可编程交通控制系统。该系统通过集中控制、交通设施虚拟化、全局数据视图与业务应用模块的协同设计, 构建了一个高度灵活、高效可靠的下一代交通控制框架。围绕集中控制技术、数字孪生技术、下一代网络通信技术及安全与隐私保护技术等核心领域, 本文系统分析了这4项关键技术的实现路径及其对交通治理的技术支撑。

可编程交通控制系统为构建面向 CPSS 的新一代交通管理模式提供了有效解决方案。通过软硬件解耦和交通要素数字化, 系统可实现多类型交通设施的统一协同和灵活调度; 利用平行交通的虚实融合和全局态势感知, 能够支持复杂场景下的动态优化与智能决策; 通过开放的应用开发框架与标准化设计, 为个性化、精细化的交通控制策略提供了广阔的创新空间。可编程交通控制系统可在智能网联交通的发展中发挥重要作用, 为缓解交通拥堵、提升交通安全提供技术支撑, 同时为交通治理向数字化、智能化和可持续化方向的逐步转型提供可行路径。

#### 参考文献:

- [1] WANG F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 630-638.
- [2] 王长君, 李瑞敏. 城市交通智能管控20年发展反思[J]. 城市交通, 2020, 18(5): 1-7, 33.  
WANG C J, LI R M. A review of intelligent urban traffic management development in the past two decades[J]. Urban Transport of China, 2020, 18(5): 1-7, 33.
- [3] 王长君, 胡伟超, 于鹏程, 等. 自动驾驶系统交通规则符合性仿真验证方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(9): 13-25.  
WANG C J, HU W C, YU P C, et al. Compliance validation of traffic rules for automated driving system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(9): 13-25.
- [4] 李力, 王飞跃. 地面交通控制的百年回顾和未来展望[J]. 自动化学报, 2018, 44(4): 577-583.  
LI L, WANG F Y. Ground traffic control in the past century and its future perspective[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(4): 577-583.
- [5] WANG F Y, LIN Y L, IOANNOU P A, et al. Transportation 5.0: the DAO to safe, secure, and sustainable intelligent transportation systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(10): 10262-10278.
- [6] WANG F Y. Agent-based control for networked traffic management systems[J]. IEEE Intelligent Systems, 2005, 20(5): 92-96.
- [7] KREUTZ D, RAMOS F M V, VERÍSSIMO P E, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 14-76.
- [8] 廖青海, 吕宜生. 元宇宙下的平行交通系统[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(1): 32-40.  
MIAO Q H, LYU Y S. Parallel transportation systems in era of meta-universe[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(1): 32-40.
- [9] 吕宜生, 王飞跃, 张宇, 等. 虚实互动的平行城市: 基本框架、方法与应用[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(3): 311-317.  
LYU Y S, WANG F Y, ZHANG Y, et al. Parallel cities: framework, methodology, and application[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(3): 311-317.
- [10] MOUBAYED A, SHAMI A. Softwarization, virtualization, and machine learning for intelligent and effective vehicle-to-everything com-

- munications[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2022, 14(2): 156-173.
- [11] 吕宜生, 陈圆圆, 金峻臣, 等. 平行交通: 虚实互动的智能交通管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 21-33.  
LYU Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 21-33.
- [12] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489, 514.  
WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- [13] 杨静, 王晓, 王雨桐, 等. 平行智能与CPSS: 三十年发展的回顾与展望[J]. 自动化学报, 2023, 49(3): 614-634.  
YANG J, WANG X, WANG Y T, et al. Parallel intelligence and CPSS in 30 years: an ACP approach[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(3): 614-634.
- [14] 袁勇, 王飞跃. 平行区块链: 概念、方法与内涵解析[J]. 自动化学报, 2017, 43(10): 1703-1712.  
YUAN Y, WANG F Y. Parallel blockchain: concept, methods and issues[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(10): 1703-1712.
- [15] ZHAO C, DAI X Y, LYU Y S, et al. Decentralized autonomous operations and organizations in TransVerse: federated intelligence for smart mobility[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(4): 2062-2072.
- [16] MIRCHANDANI P, WANG F Y. RHODES to intelligent transportation systems[J]. IEEE Intelligent Systems, 2005, 20(1): 10-15.
- [17] WU T, ZHOU P, LIU K, et al. Multi-agent deep reinforcement learning for urban traffic light control in vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(8): 8243-8256.
- [18] XI J H, ZHU F H, YE P J, et al. Auxiliary network enhanced hierarchical graph reinforcement learning for vehicle repositioning[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(9): 11563-11575.
- [19] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(11): 2001-2031.  
YANG L Y, CHEN S Y, WANG X, et al. Digital twins and parallel systems: state of the art, comparisons and prospect[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [20] 卢经纬, 郭超, 戴星原, 等. 问答ChatGPT之后: 超大预训练模型的机遇和挑战[J]. 自动化学报, 2023, 49(4): 705-717.  
LU J W, GUO C, DAI X Y, et al. The ChatGPT after: opportunities and challenges of very large scale pre-trained models[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(4): 705-717.
- [21] LYU Y S. Large transportation models on the horizon: challenges and issues[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2023, 15(6): 3-5.
- [22] TATARIA H, SHAFI M, MOLISCH A F, et al. 6G wireless systems: vision, requirements, challenges, insights, and opportunities[J]. Proceedings of the IEEE, 2021, 109(7): 1166-1199.
- [23] 陈晓光, 韩金朋, 杨满智, 等. 灵境卫士: 基于ACP的网络安全平行监管研究[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(2): 247-253.  
CHEN X G, HAN J P, YANG M Z, et al. ParaDefender: the parallel supervision for cybersecurity based on ACP[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(2): 247-253.
- [24] HAN J P, JU Z Y, CHEN X G, et al. Secure operations of connected and autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(11): 4484-4497.
- [25] LI L, LYU Y S, WANG F-Y. Traffic signal timing via deep reinforcement learning[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(3): 247-254.
- [26] JIN J C, RONG D D, PANG Y Q, et al. PRECOM: a parallel recommendation engine for control, operations, and management on congested urban traffic networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 7332-7342.
- [27] TANG Y Q, DAI X Y, LYU Y S. Large language model-assisted arterial traffic signal control[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2024, 8: 322-326.
- [28] LIU C X, YANG H, KE R M, et al. Toward a dynamic reversible lane management strategy by empowering learning-based predictive assignment scheme[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(12): 23311-23323.
- [29] 胡焱松, 王长君, 郑金子, 等. 面向交通事故现场三维实景建模的无人机航拍参数[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(7): 194-201.  
HU Y S, WANG C J, ZHENG J Z, et al. Key parameters of UAV photography for 3D real scene reconstruction of traffic accident site[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(7): 194-201.
- [30] 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.  
ZHANG F F, WANG C J, WANG J H. Vehicle interaction patterns at on-ramp merging area of urban expressway[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(9): 66-79.
- [31] HU W C, CHEN Y Y, XU W X, et al. Modeling human-like driving behavior at a signal intersection based on driver risk field model[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2024(99): 2-16.
- [32] 李瑞敏, 王长君. 智能交通管理系统发展趋势[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(3): 509-515.  
LI R M, WANG C J. Development of advanced traffic management systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(3): 509-515.

# [作者简介]



王长君 (1965- ), 男, 公安部道路交通安全研究中心主任、研究员, 主要研究方向为智能交通、交通事故预防和智能车辆运行安全。



胡伟超 (1987- ), 男, 公安部道路交通安全研究中心副研究员, 主要研究方向为智能交通、交通安全和交通仿真建模。



吕宜生 (1983- ), 男, 中国科学院自动化研究所研究员, 主要研究方向为人工智能、机器学习、深度学习、智能驾驶、智能交通和交通大数据。



**戴星原**（1993- ），男，博士，中国科学院自动化研究所助理研究员，主要研究方向为平行交通、平行驾驶、强化学习。



**李小松**（1996- ），男，公安部道路交通安全研究中心研究实习员，主要研究方向为交通安全技术。



**于鹏程**（1986- ），男，公安部道路交通安全研究中心副研究员，主要研究方向为智能交通、交通安全和驾驶行为。



**刘雨桐**（1997- ），女，公安部道路交通安全研究中心研究实习员，主要研究方向为车联网、智能交通和交通安全。



**赵红霞**（1982- ），女，博士，中国科学院自动化研究所副研究员，主要研究方向为智能系统、交通大数据。



**王飞跃**（1961- ），男，博士，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任，主要研究方向为平行系统的方法与应用、社会计算、平行智能、知识自动化。