

智能网联交通系统中的信息物理映射与系统构建

张雷^{1,2}, 沈国琛², 秦晓洁², 成诚^{2,3}, 欧冬秀², 李兴华^{2,3,4}, 施莉娟²

(1. 同济大学上海自主智能无人系统科学中心, 上海 201210; 2. 同济大学交通运输工程学院, 上海 201804; 3. 同济大学中国交通研究院, 上海 200092; 4. 浙江省交通运输科学研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 提出将人工智能和信息物理融合系统(CPS)的理论与方法集成融入智能交通系统及其应用, 探索“人工智能+交通”的交叉创新领域, 在交通物理与信息空间映射、网络通信与时空数据规约、交通安全与可信可控关联等关键问题上形成相关的解决方案和技术体系, 推进实现交通信息物理融合系统及其应用的精准治理。

关键词: 人工智能; 信息物理交通系统; 智能网联交通; 数据精化

中图分类号: U495; TP393.2

文献标志码: A

Information Physical Mapping and System Construction of Intelligent Network Transportation

ZHANG Lei^{1,2}, SHEN Guochen², QIN Xiaojie², CHENG Cheng^{2,3}, OU Dongxiu², LI Xinhua^{2,3,4}, SHI Lijuan²

(1. Shanghai Research Institute for Intelligent Autonomous Systems, Tongji University, Shanghai 201210, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. China Transportation Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Zhejiang Scientific Research Institute of Transport, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: This paper proposes to integrate the theories and methods of artificial intelligence and cyber-physical fusion systems into intelligent transportation systems and their applications, and explore the cross-innovative fields of “artificial intelligence + transportation”, in terms of transportation physics and information space mapping, network communication and spatiotemporal data protocols. It forms relevant solutions and technical systems on key issues such as traffic safety and credible and controllable associations to promote the precise management of traffic information and physical integration systems and their applications.

Key words: artificial intelligence; cyber-physical fusion system-transportation; intelligent network transportation; data refinement

交通伴随人类文明一路走来。人、车、路为核心的交通要素在每一个发展阶段, 均以信号和系统的方式存在。以汽车为代表的交通运输工具日新月异, 使得道路交通日趋复杂, 也推进法制化的完善。近二十年, 汽车从机械化、电子化、信息化和新能源化为特征逐步演变, 智能交通系统的设计、运行和管理也在复杂交通应用场景与多传感器融合中创新迭代。人工智能对交通系统及其应用既是发展性技术赋能, 又是融合性技术挑战。智能交通系统将进一步迫使交通深度感知、交通信息泛在、交通数据普适和交通安全高效, 这将在技术与法规层面上共同考验着当前智能交通体系和未来无人驾驶的全面推广。

把高清视觉、毫米波雷达、激光雷达、超声波、红外夜视、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)接收器、惯性导航单元和高精度地图软件等产品与技术集成于车辆, 并构成一个完整的交通感知系统。该系统使得车辆在复杂的交通环境中能及时感应周围的环境和收集数据, 实现静态与动态物体的辨识、侦测和追踪。尤其在导航仪和地图数据的支撑下, 通过实时交互的运算处理, 达到交通的安全性和驾驶的舒适性。这也是车辆电子信息化在智能交通系统中的技术呈现, 由此也产生了多样性、高度异构性、离散性和移动性极强的车联网数据。这种静态感知的交通信息系统在算力无法实时支撑、非深度学习和无数据云控的情况下, 容易丢弃绝大部分现场数据, 甚至主动丢弃全部

收稿日期: 2021-01-06

基金项目: 浙江省重点研发计划(2021C01011); 上海市科技创新行动计划(20511106400)

第一作者: 张雷(1978—), 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为信息物理融合与人工智能应用。

E-mail: reizhg@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

数据。这无法满足交通运营和管控的需求,也是云控数据管理和人工智能处理所不容许的。所幸学术界和产业界已经关注到了这一问题的严重性。凭借云计算、大数据和人工智能等技术处理,这些交通实时感知数据的高可信计算与处理将发挥越来越重要的预测与决策作用。

海量的交通数据具有异构、高维、冗余、时空相关性等特点。交通场景映射成数据资源,并服务交通管理,是目前热点研究方向。关注到交通应用场景的数据复杂性,不仅仅是视频、图像、语音、多媒体信号、文本与标识等,甚至含有多个数据形式的隐含信息与噪声数据。这些原始数据也具有冗余、互补、不正确或者模糊等特点,不适合计算机采用数据库检索方法来直接完成相关分析、处理与决策。这就需要信息物理融合系统理论迁移至智能交通系统,形式化语义来表达交通中人、车、交通基础设施和交通事件各要素,并使其更具关联性、一致性和完整性,实现简化智能交通系统的数据交互、动态推理和可信计算。

近些年,相关研究备受科技界和产业界青睐。Hartenstein等^[1]国内外学者发表了基于自组织网络的诸多车辆通信研究。Sun等^[2]和Chandra等^[3]国内外学者发表了几十篇车辆通信信息接入技术。Li^[4]和郭静秋等^[5]国内外学者发表了百余篇有关车联网及其应用的学术论文。张雷等^[6]国内外学者发表了基于GNSS信号在智能交通中的多项应用,尤其是中国北斗定位导航技术应用。研究的重点主要集中在单一技术的深化、多项技术的集成、应用性能的提升和综合管理的高效等方面,但并没有系统地涉及交通物理的信息建模、技术集成的标准化融合、计算机语义表述的统一框架、数据驱动的可信推理和人工智能决策机制等核心问题。

本文从智能交通系统中的人与车辆、车辆与基础设施、车辆与车辆、车辆与互联网4对交通要素耦合关系出发,创新地提出建立基于信息物理融合系统的智能网联交通研究模式,在时空事件分析的基础上重构智能交通系统数据映射关系和信息融合模型,重点研究交通数据约束表达、数据精化多分辨率处理、交通要素数据交互和交通数据云控归一的技术机理。根据智能网络交通中道路上人或非机动车安全警告标识、交通灯信号时序等道路管理信息、车辆间信息交互和提醒、互联网发布多媒体和功能性内容来约束、提取和归一化交通异构时空数据源,反馈与优化交通时空数据表达方式和精化策略,最终

形成基于智能网联交通的信息物理融合系统及其时空数据云控应用,以满足自动驾驶和无人驾驶的全面普及。

1 智能网联交通的系统分析

交通系统的研究场景或区域既是一个开放的系统,又是一个封闭系统。人和车辆在交通运行中,已从原始的自我认知演变成综合感知系统的判识与交互。交通设施和交通工具,已从传统的物理标识演变成综合枢纽系统的智能调度与引导。交通信号与交通信息,已实现了“卫星-空中-近地面-地面-水面-水下”的无线电、光电和感应等多源异构综合交通信息与控制体系。交通管理和交通服务,已从单一的人为指挥演变成智能信息技术的态势预测与决策。智能交通系统应用的开放,在于不断与社会生活融合,吸纳新理念与技术,产生新管理方式和服务体系,成为生活态度和社会生态。智能交通系统的物理封闭性,更多地体现在人、车、设施、信息和管理等要素的不断耦合^[7],更趋近于工业级的信息物理融合系统,甚至是“数字孪生”的综合智能交通系统。智能交通系统并不完全依赖于互联网,只需要将交通基础设施、交通信息处理平台、交通工具以及人通过网络通信能力嵌入到物理世界^[8],实现信息物理的融合与交互。智能交通系统更主要的是应用场景的深度感知,将可控、可信、可扩展的网络化物理设备系统通过计算进程和物理进程相互影响的反馈循环实现深度融合和实时交互^[9]。交通的信息化和智能化,本身就要求交通物理实体和交通信息世界的双重安全、可靠、高效和绿色。因此,综合智能交通系统是一个要素异质融合、多系统集成、信息互联互通、多层次互操作、动态实时管控的复杂系统。

将综合智能交通异质集成系统通过信息物理融合系统的构建^[10],将基于物联网的交通要素感知和基于信息物理融合的交通数据驱动进行系统耦合,实现第一层次的交通信息物理系统映射。在交通结构化或非结构化数据处理的基础上,针对交通应用场景的物理模型和时空(或非时空)信息的形式化语义表达,实现第二层次的信息物理原型系统。根据智能交通系统海量繁杂的时空数据,利用5G/GNSS等先进通信方式和技术应用无缝集成,在智能交通系统分析、仿真模拟、管控预测、综合决策和方案优化等环节,实现基于时空数据云的智能交通应用服务平台。如图1所示,通过物联网中间件和信息物理中间件将交通要

素及其场景、设备和设施等相关数据汇聚,在交通动态信息同步映射与综合处理后,以标准化原型系统的方式支撑不同时延要求下的智能交通应用,从而形成面向智能网联交通的分析、模拟、预测、决策和优化。在

信息物理融合系统理论及其技术方法中需要重点关注的实时网络传输、信息时间同步、数据隐私保护和信息安全策略等协议或机制,仍是交通信息物理融合系统的关键技术问题。

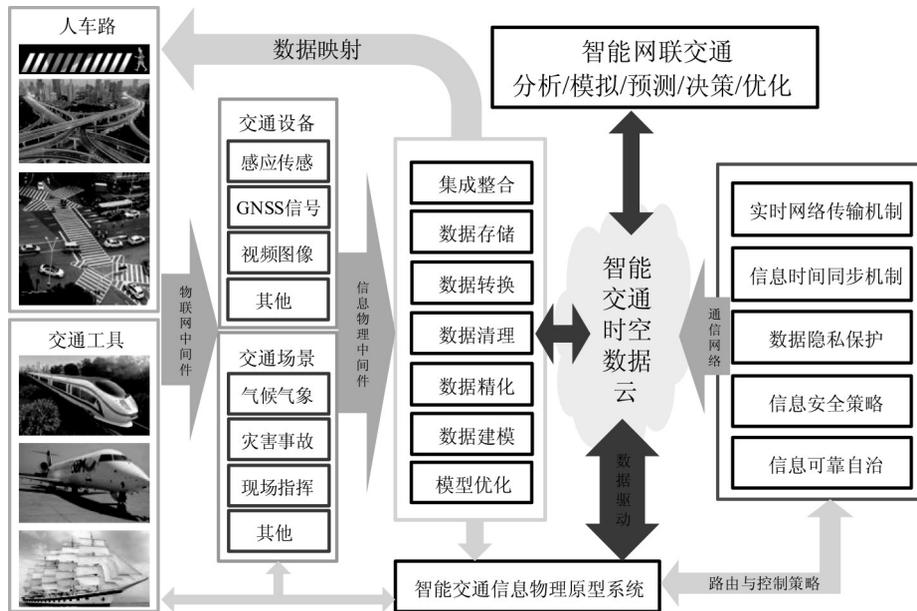


图 1 智能网联交通的系统构建

Fig. 1 System construction of intelligent network transportation

由此可见,智能网联交通是建立在数据与智能应用之上的交通系统工程,其技术特征表现为:①信息化交通系统的形式化表达;②数据驱动的全周期交通模式;③边缘自治的交通全域管控;④同步实时的交通数据治理;⑤诱导干预性的交通数据安全。在全域全网数据管控模式下的智能交通系统,更是需要交通系统与信息系统的协作融合。相关技术特征的界定将是信息物理交通系统(CPS-T)技术体系建立和管控应用的核心。

2 信息物理交通系统

信息物理融合系统不局限于物联网的感知功能,更突出通信、计算和控制^[10]。在大数据和人工智能技术支撑下,信息物理融合系统更具安全和自治功能。智能交通系统正是信息物理融合系统的典型应用。“智能”泛在于人、信号设备、交通工具、基础设施及其应用场景。智慧终端及其系统服务的普适性,使得交通信息越来越不可忽略社会数据。例如,手机发布的实时路况照片和文字等。视频监控及其特征提取的实时性,使得交通管控越来越依赖于智能辅助决策。例如,路测闯红灯大屏幕展示牌发布

的人脸对应身份证号、语音警告提醒等。城市间或城市内交通态势发布的精准性,使得交通大数据越来越直接参与社会治理。例如,节假日交通临时管制的信息实时推送等。

“人-车-路”三者构成的智能交通应用基本单元,体现了分布式感知单元(或设备)在交通规则驱使下相互协作并完成复杂的管理任务^[11]。每个交通感知单元本身具有处理能力,在5G/4G通信网络支持下,实时执行与发布分析治理后的数据。如图2所示,基于信息物理融合系统的综合交通应重心在于计算、治理及其数据发布。交通管控过程对物理环境产生反馈,作用的大小取决于交通感知单元的多少及其特征融合能力。由于存在着规模与种类的不同,信息映射后在通信网络中的协议和标准也不同。在整个信息物理映射过程中,交通中的“人-车-路”已不处于主导地位,只是被自动感知、实时传输、计算分析和反馈执行的“数据对象”。因此,交通信息物理融合系统具有数据自主治理能力。

交通物理实体与交通信息数据的时空关联是CPS-T的本质特性。交通信息物理融合系统在交通物理实体方面由全息感知进化为系统接口、通信标准、网络协议和层次控制等,在信息方面由数据传输

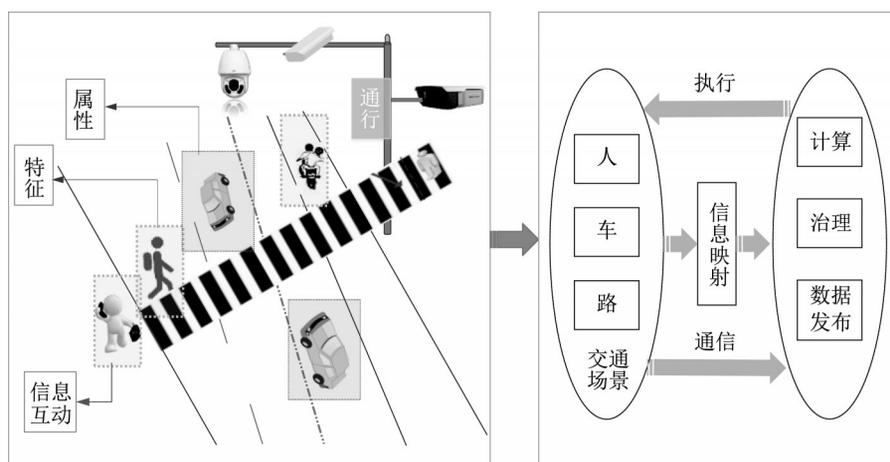


图2 数据驱动的道路交通应用案例

Fig. 2 Example of data-driven traffic application

进化为边缘计算、云交互、远程推送等,在数据方面由数据库管理进化为规约精化、数据挖掘、深度学习、可靠防护和可信验证等,通过各类交通场景与应用模型的智能训练,形成基于信息物理融合系统理论方法及其技术机理的交通决策反馈。如图3所示,智能交通系统围绕着交通事件的发展过程和阶段状态,在时间同步及其演变下由系统模型转化为数据模型,将交通对象、属性、空间和时间4大数据集合对应建立成计算机语义表达的相关基类。在智

能网联交通应用中,将以往车联网、车路协同、智能网联车等研究的V2X(Vehicle to Everything)关键技术演进为C2X(Cloud to Everything),即构建云-人(Cloud to pedestrian)、云-车辆(Cloud to Vehicle)、云-设施(Cloud to Infrastructure)、云-管理(Cloud to Government)和云-云(Cloud to Cloud)各个时空数据应用单元,最终完成智能网联交通信息物理过程及其时空数据云应用。

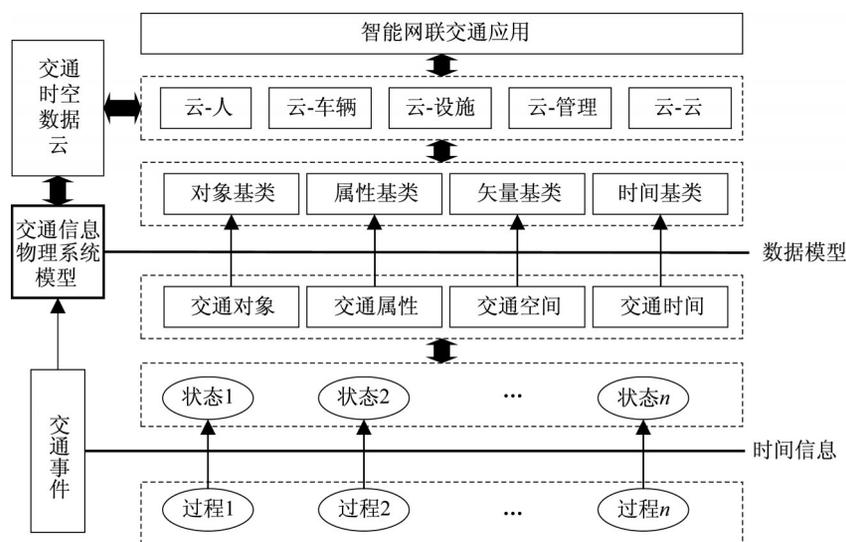


图3 智能网联交通的信息物理过程

Fig. 3 Cyber-physical process of intelligent network transportation

3 CPS-T 数据精化

交通时空数据精化需要把交通要素与社会信息资源按照形式化规约转化成时空数据变量,降低数

据的不一致性和不完整性等^[12],形成字符、符号、数据包、数据序列等精化结构,保证“人-车-路-云”数据的可靠性和完备性。云平台将交通系统各要素状态信息按照交通信息物理融合系统运行模式进行数

据分层,实时信息映射后统一成不同交通场景应用的实时基础数据。面向智能网联交通将“人-车-路-云”信息进行时空数据模型化,以实时基础数据为汇聚规范,实现云平台控制下的交通历史数据和实时交通场景数据等多维度基础汇总数据。结合V2X和交通时空数据控制,通过“云、边、端”协同,开展终端计算、边缘计算与云计算引擎进行交通数据挖掘、大数据计算与多维交互式分析,以交通信息物理融合系统标准化API形式推送宏观交通数据分析的基础数据与数据增值服务,实现智能交通系统的性能提升与交通全链路数据运营的精准管理。交通信息物理融合系统中产生的时空数据存在着多重冗余与动态丢失问题,在动态状态预处理后设计数据精化的修正与补偿策略,实现时空数据驱动的信息域和物理域综合表征。时空数据精化消除交通海量数据的不确定性,将交通时空数据抽象成交通信息物理模型,功能描述精准与数据结构完整的模型有助于深度学习与特征挖掘。

参照空间信息时空大数据约束表达方法^[13],在交通信息物理融合系统中将时空数据精化的分辨率取 2^j ,其中 $j=0,1,2,\dots$ 。交通时空数据序列为 $x(t)$, t 为数据样本获取时间间隔,即 $1 \leq t \leq \infty$ 。信息映射过程中, V_j 是交通时空数据集 $V_2(R)$ 的一个子集,且满足 $V_j \subset V_2(R)$ 。其中, R 表示实数集, V 表示交通时空数据的矢量集和 L 表示多维度交通数据集。 V_j 为在 2^j 分辨率上逼近交通信号与系统 $f(t)$ 的线性投影高维数据集,即 $f(t) \in V_j(R)$ 。交通时空数据精化首先要满足时空数据无损,将高维时空元数据 f_j 映射为一个低维度 f_{j+1} ,则交通时空数据序列在 $f_j(t) \rightarrow f_{j+1}(t)$ 的映射过程中所损失的信息由细节特征 $(y_j, j=0,1,2,\dots)$ 来表示。反之,通过 $\{f_0=f, f_1, f_2, \dots\}$ 和 $(y_j, j=0,1,2,\dots)$ 来重构交通时空数据序列,可实现交通时空数据精化的结构融合与无损表达。交通时空数据精化需要结合交通中点、线和面时空元数据拓扑关系,这有利于构建交通时空数据矢量和栅格相兼容的数据结构。因此,交通时空数据精化也要满足时空数据伸缩性。 $\{V_j\} \subset V_2(R)$ 是 $V_2(R)$ 的多分辨率表征,也就是交通时空数据在信息映射过程中存在着多尺度函数 $\varphi(x) \in V_2(R)$ 。将伸缩系列函数定义为 $\Phi_j(x) = 2^{-j}\Phi(2^j x)$, $j \in Z$,平移伸缩系 $2^{\frac{j}{2}}\Phi_j(x - 2^j n)$ 是 V_j 的规范正交基。便于计算机的数据精化多分辨率处理,给定一个有限长交通数据时间序列 $x(n\tau)$ 来

构造一个交通时空大数据精化函数 \bar{f}_N, τ 是指交通信息物理融合系统时间同步信号。使 $\bar{f}_N[x(n\tau), \dots, x(n+m-1)\tau] = x((n+m)\tau)$,实现时空数据精化中的无限逼近约束, $f = \bar{f}_\infty = \lim_{N \rightarrow \infty} \bar{f}_N$ 。由此可见, \bar{f}_∞ 在交通时空数据表征上无限放大了精化过程中 $x(n\tau)$ 的细节伸缩变化。

4 CPS-T数据云控

在智能网络交通中,数据是交通信息化资源。正如交通网络通信的发展实现了从车辆内部传输,到车辆与交通基础设施通讯,再到交通要素与社会信息资源的互联互通。交通信息物理融合系统的构建也是一个把交通物理世界、交通信息空间和人类社会活动^[14]三者系统化、泛在化和普适化的动态过程。以交通管控事件和交通安全策略为导向,将部署在交通应用场景中的数据采集设备、通信设施和计算系统进行扁平归一化,在高速率、低时延和大容量等特征的5G技术支撑下实现基于交通信息物理融合系统的“云-边-端”交通应用。数据驱动的交通信息物理融合系统一方面集成当前科技技术及其未来发展趋势,另一方面赋能未来交通应用,例如无人驾驶。网络通信技术的泛在,在5G之外需要GNSS、低轨物联网卫星、数字多媒体广播、无线局域网和专用短程通信等。

交通网络通信系统的构建为交通信息物理融合系统计算、调度和控制等功能的实现提供了可能。低时延、高数据速率与大容量等特性^[15]正是解决交通实时网络传输协议、高可靠系统同步算法、人车路云数据融合策略等关键技术核心。如图4所示,泛在交通系统的网络通信主要由车与车通信(vehicle-to-vehicle, V2V)、车辆与基础设施通信(vehicle-to-infrastructure, V2I)和车与外界通信(vehicle-to-everything, V2X)组成。云平台通过响应实时请求来完成个体交通行为数据、交通信息网络交互和交通态势综合管控等。从数据流、控制流和大数据交互三方面来满足交通信息物理融合系统中多应用支持、拥塞控制、资源配置、快速移动、无缝覆盖和信息安全等需求,如图5所示。

“人-车-路-云”交互的数据流和控制流可以由具备计算和处理的交通终端要素实时采集和上传云平台,也可以将边缘计算汇聚的大数据通过5G/GNSS等网络通信直接上传云平台。云平台控制全域范围内综合交通系统的“人-车-路-云”各异构数据节点,通过网络

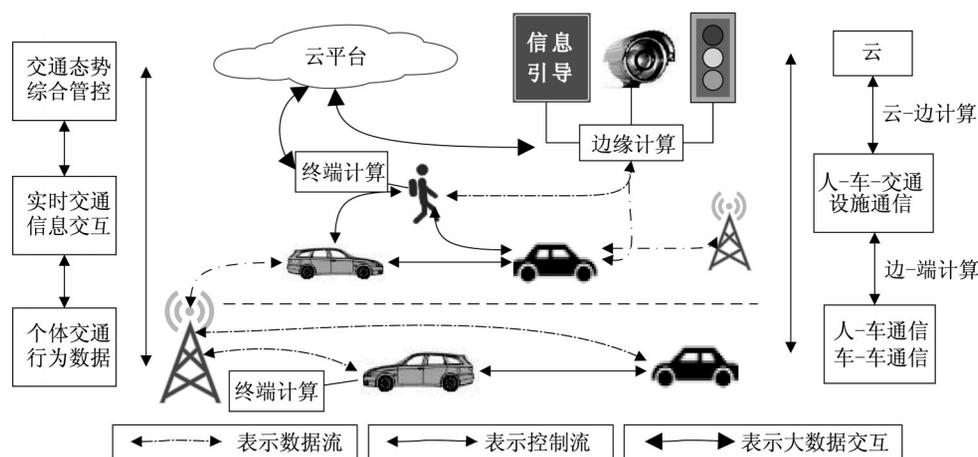


图4 “人-车-路-云”云控架构

Fig. 4 Cloud control structure of “person-vehicle-road-cloud”

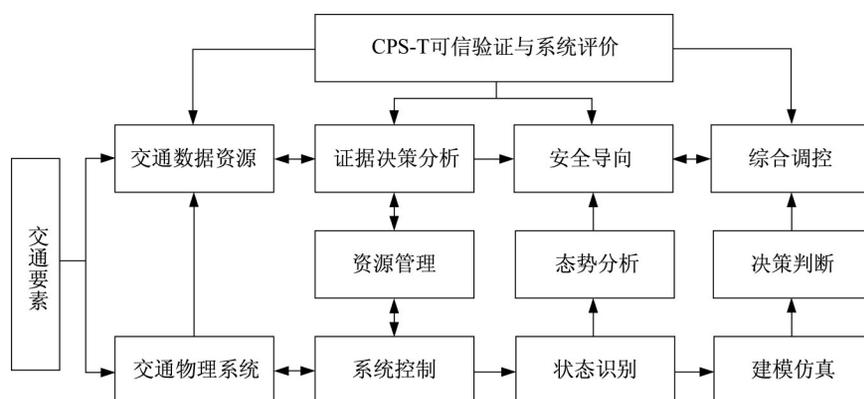


图5 信息物理交通态势管控流程

Fig. 5 Process of cyber-physical traffic situation control

通信进行泛在互联,在交通信息物理融合系统中构建支持协同控制的闭环交通通信链路。将实时网络通信、实时数据映射、实时协同交互和实时计算处理融为一体,实现交通信息物理系统响应的数据传输实时低时延与高并发请求,确保“人-车-路-云”网络数据交互在智能交通应用中满足无人驾驶控制的可用性与信息安全需求,最终实现网络通信与云平台的归一化。

5 CPS-T 综合调控

智能交通系统应用已经和城市建设发展融为一体。城市空间的物质流动和能量交换,均是交通工具与方式的协同变动。社会活动的整体与个体、全局与局部,均是交通要素的时空变迁。随着信息技术的感知、处理、传输、计算、融合和决策能力提高,智能交通系统将达到物理交通与数字交通的系统级数字孪生。两者构建的信息物理融合系统将实现交通虚实信息交互,共同完成决策-控制-管理功能,如图6所示。CPS-T架

构下的交通数据与人工智能是以交通云控数据为核心资源的证据决策分析与综合调控过程,这将有效提升交通战略、政策、规划、建设、管理和控制等技术环节的效能,最终实现CPS-T数据池和态势管理的综合决策效果。

交通运输工具、交通运输方式、城市交通多模式、城市交通空间通过泛在网络通信实现智能交通实体之间的互联互通,通过大数据、云计算和人工智能技术对交通数据进行动态交互、信息挖掘和智能决策等关键技术处理,为车辆、驾驶人、管理者等交通参与者提供安全高效的信息服务,如图7所示。交通信息物理系统融合,本质上就是物理交通与数字交通的信息映射,极大程度地形成数据驱动的安全运行模式。未来的无人驾驶正是基于交通信息物理融合系统的事件检测、故障诊断、态势预测、安全评估、运维指挥和系统优化等环节的交通信息系统。更为复杂的综合交通应用,例如集飞机场、磁悬浮、高速铁路、地铁、长途汽车站、公交设施等于一体的国际综合交通枢纽、城市综合立

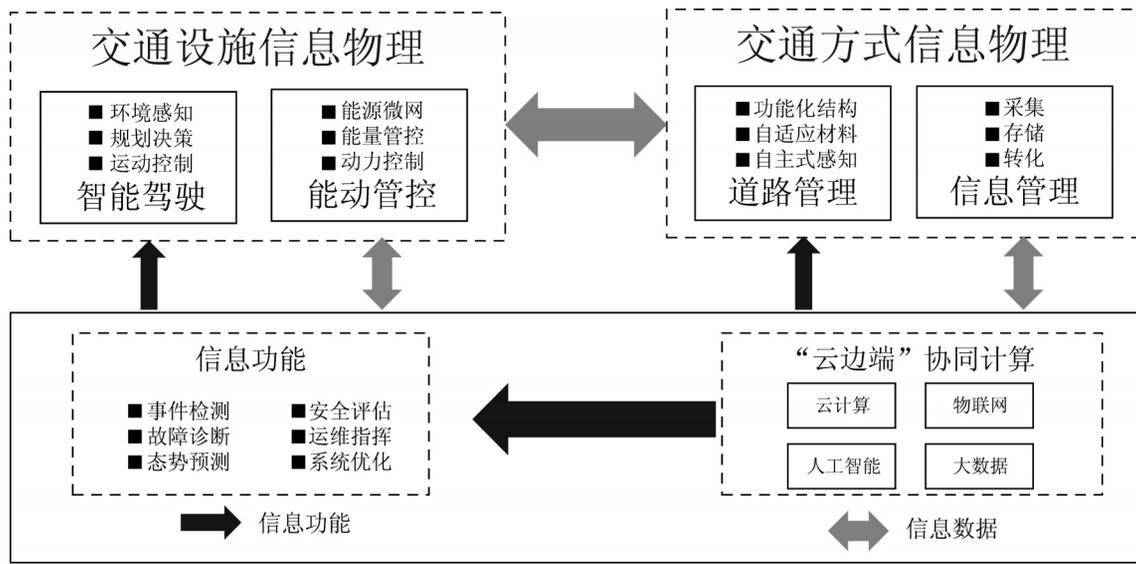


图 6 CPS-T综合调控架构

Fig. 6 Comprehensive regulation architecture of CPS-T

体交通换乘枢纽,这仍然是基于交通信息物理融合系 统的信息功能级联与嵌套。

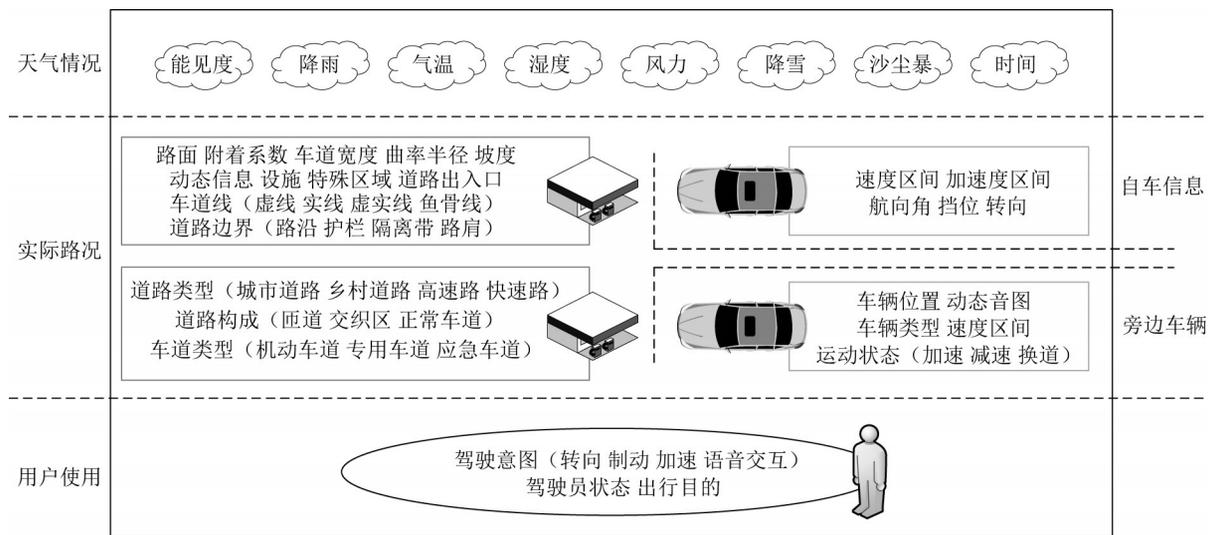


图 7 CPS-T综合交通场景

Fig. 7 Comprehensive traffic scenario of CPS-T

以往的研究关注交通要素及其事件的感知。在发展交通信息物理融合系统及其应用中,需要考虑智能交通系统的开放、灵活和可扩展性等特点,将获取的交通原始数据在模型约束和数据精化后信息抽象成信息技术领域的高层表达。综合交通应用在信息物理融合理论方法和技术体系的构建下,将贯通交通微观基本单元、交通中观枢纽管控和交通宏观时空演变,在数据流和控制流的云处理下实现网络通信与云交互的协作与一体化。将交通事件监测、车辆故障诊断、流量预测评估、管控系统优化和安全运维等形成交通综合决策系统,提高交通信息推送和交通管理决策的精准度。

6 结论

交通物理实体和交通信息世界经过融合、映射和精化等过程,将“人-车-路-云”规约成交通时空数据,可信性度量使得交通社会活动被有效地分析、构造和评价,实现交通信息物理融合系统模型层面的管理控制、数据层面的验证测试和应用层面的预测演化。交通信息物理融合系统更多地在于计算过程和控制过程等联合协作,形成交通场景的信息智能判决、实时反馈控制与交通响应服务。由此可见,交通信息物理融合系统及其云平台彻底打破了交通设

备与系统的数据独立管理,能充分实现交通事件、过程及其状态的监控、调度和配置。

由于交通工程系统是一个复杂的巨系统,交通信息物理融合及其时空数据精化的研究需要构建信息物理融合系统的交通智能中间件、信息流循环优化模式、时空数据同步算法、零信任信息安全、可信测试与验证、系统评估与效能评价等方面的设计、研究和开发。交通信息物理融合及其时空数据精化研究的提出,有助于完善智能交通系统技术与应用,研究形成的理论与方法、技术体系和应用模式也是信息物理融合系统学科交叉发展的最大探索。

智能网联交通在网络通信和云交互下,实时实现交通物理实体之间的信息联通。在个体智慧终端、路测边缘设施和云端网络通信等的大规模部署下,交通事件、状态与数据呈现既关联又独立的处理和运维趋势,这有助于在时空上实时引导和分流交通流量,也能有效支撑无人驾驶与人工驾驶的并存发展。经过交通动态交互、数据挖掘、智能决策与云控制等一系列处理,全面为人、驾驶员、车辆、管理者等提供高效信息服务。但仍需进一步关注智能网联交通中的网络动力学、网络攻击和信息防护等研究问题,以保障交通运输行业朝着安全、智能、高效和绿色等方向发展。本文倡导的研究方向旨在推进智能网联交通的系统级智能交通模型向交通时空数据云发展,这有助于无人驾驶的大规模发展及其技术标准的制定,也有助于交通管控与信息服务在社会公共安全中的精准治理。

作者贡献声明:

张雷:模型构建、系统设计、算法设计。
沈国琛:文献综述、研究方法、论文修改。
秦晓洁:思路梳理、分析与讨论。
成诚:参与模型构建。
欧冬秀:参与研究方法。
李兴华:参与系统设计。
施莉娟:参与研究方法。

参考文献:

- [1] HARTENSTEIN H, LABERTEAUX L P. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(6): 164.
- [2] SUN Shaohui, HU Jinling, PENG Ying, *et al.* Support for vehicle-to-everything services based on LTE [J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(3): 4.
- [3] CHANDRA Deykakan, ANJAN Rayamajhi, MASHRUR Chowdhury, *et al.* Vehicle-to-vehicle (V2V) and vehicle-to-infrastructure (V2I) communication in a heterogeneous wireless network — Performance evaluation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 68: 168.
- [4] LI Yan, CAO Yiqing, QIU Hong, *et al.* Big wave of the intelligent connected vehicles[J]. China Communications, 2016, 13(S2): 27.
- [5] 郭静秋,方守恩,曲小波,等. 基于强化协作博弈方法的双车道混合交通流特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(7): 976. GUO Jingqiu, FANG Shouen, QU Xiaobo, *et al.* Characteristics of mixed traffic flow in two-lane scenario based on cooperative gaming method [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(7): 976
- [6] ZHG Rei. Entanglement difference of GNSS carrier phase for vehicle attitude determination [J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2021, 10(1): 69.
- [7] UBIERGO Gerardaguilar, JIN Wenlong. Mobility and environment improvement of signalized networks through vehicle-to-infrastructure (V2I) communications [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 68: 70.
- [8] POOVENDRAN Radha. Cyber - physical systems: Close encounters between two parallel worlds [point of view] [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(8): 1363.
- [9] 何积丰. 信息物理融合系统[J]. 中国计算机学会通讯, 2010, 6(1): 25.
HE Jifeng. Cyber-physical systems[J]. Communications of CCF, 2010, 6(1): 25
- [10] 管晓宏,关新平,郭戈. 信息物理融合系统理论与应用专刊序言 [J]. 自动化学报, 2019, 45(01): 1.
GUAN Xiaohong, GUAN Xinping, GUO Ge. Preface of the special issue on theory and applications of cyber-physical systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(1): 1
- [11] 李克强,戴一凡,李升波,等. 智能网联汽车(icv)技术的发展现状与趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1.
LI Keqiang, DAI Yifan, LI Shengbo, *et al.* State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1): 1
- [12] HE Jifeng. Service refinement [J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2008, 51(6): 661.
- [13] 张雷,张春霞,杜德慧,等. 空间信息时空大数据约束表达方法[P]. 中国: CN201910826804.X. 2020-11-03.
ZHANG Lei, ZHANG Chunxia, DU Dehui, *et al.* Spatio-temporal big data constraint expression method for space information[P]. China: CN201910826804.X. 2020-11-03.
- [14] SHETH A, ANANTHARAMP, HENSON C. Physical-cyber-social computing: An early 21st century approach [J]. IEEE Intelligent Systems, 2013, 28(1): 78.
- [15] SIDDIQI M A, YU H, JOUNG J. 5G Ultra-reliable low-latency communication implementation challenges and operational issues with IoT devices[J]. Electronics (Basel), 2019, 8(9): 981.