

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.07.015

# 智慧高速公路技术体系构建

岑晏青, 宋向辉, 王东柱, 孙玲, 刘楠

(交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

**摘要:**我国智慧高速公路已有多年的试点工程探索,目前其技术研究和工程实践正在从点状的技术试点验证向系统化的技术集成示范转变。本研究提出了智慧高速公路的概念、主要特征和技术内涵,构建了支撑“三网合一”智能基础设施和云边端协同云控平台建设的智慧高速公路技术体系,凝练出3类、5个子集、33项技术组成的智慧高速公路技术集及其性能要求,用于实现高速公路车路协同安全预警、车道级车辆管控、自由流收费、自动驾驶货车编队行驶、准全天候通行等创新服务。最后,对应用该技术体系开展的杭绍甬智慧高速公路设计进行了介绍,可为我国智慧高速公路的设计与建设、关键技术研发和相关设备研制提供指导和参考。

**关键词:**智能交通;智慧高速公路;技术体系;车路协同;云控平台

中图分类号:U491.1<sup>+</sup>2

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2020)07-0111-11

## Establishment of Technology System of Smart Expressway

CEN Yan-qing, SONG Xiang-hui, WANG Dong-zhu, SUN Ling, LIU Nan

(Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Smart expressway has been developing in China for many years by implementing pilot projects. At present, its technology research and engineering practice are transforming from the pilot verification of single technology to the systematic demonstration of integrated technologies. The concept, the main characteristics and the technical connotation of smart expressway are proposed, the technology system of smart expressway that supports the construction of “three networks in one” intelligent infrastructure and the cloud control platform for cloud-edge-terminal collaboration is studied and constructed. The technology set of smart expressway composed of 3 categories, 5 subsets and 33 technologies is proposed to implement the innovative services for expressways such as safety warning based on vehicle-infrastructure collaboration, lane level vehicle management and control, free flow toll collection, autonomous driving truck platoon, quasi all-weather traffic, etc. Finally, the design of Hangzhou - Shaoxing - Ningbo smart expressway based on this technology system is introduced. It can provide guidance and reference for the design and construction of smart expressway, the R&D of key technologies and the development of related equipment in China.

**Key words:** intelligent transport; smart expressway; technology system; vehicle-infrastructure collaboration; cloud control platform

## 0 引言

1988年,我国第一条高速公路上海沪嘉高速公路正式通车。随后的30多年我国的高速公路建设得

到迅猛发展,截至2019年底,我国高速公路总里程已达到15万km,建成了一张全世界规模最大的国家高速公路网,对我国经济社会发展起到了至关重要的支撑作用<sup>[1]</sup>。受人口密度、经济发展水平等因

收稿日期:2020-02-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1600800)

作者简介:岑晏青(1971-),男,浙江慈溪人,博士,研究员。(yq.cen@rioh.cn)

素影响,我国不同地区的高速公路交通量差异较大。2018年,全国高速公路平均交通量为2.55万pcu/d,拥挤度为0.42,而北京、上海和广东的高速公路交通量达到6.54,7.79和4.36万pcu/d,拥挤度为0.92,1.08和0.66,是全国高速公路拥挤度的2.2倍,2.6倍和1.6倍<sup>[2]</sup>,可以说已经处于拥挤甚至堵塞的状态。按照我国全面建设社会主义现代化国家的战略部署,从目前到2035年,我国的客货运输需求仍将保持2%~3%的年均增长速度,长三角、珠三角和京津冀等东部地区的增长速度将会更高。如何防止我国东部地区交通运输对社会经济发展再次出现“瓶颈制约”,是整个交通运输行业需要面对的重大战略课题。而受限于土地供给、环保要求等刚性约束条件,我国东部地区已不可能再继续采用大规模建设高速公路的发展模式。因此,建设智慧高速公路,有效提升高速公路的通行能力,成为当前和今后一个阶段我国高速公路建设的必然选择和重要方向。

国外在高速公路的主动交通管理、车路协同技术应用、出行和物流信息共享服务等方面开展了大量试验验证,主要包括:美国的智慧通道(Smart Corridor)<sup>[3]</sup>建设和互联车辆(Connected Vehicle)计划,欧洲的Easyway<sup>[4]</sup>项目和跨国智能交通走廊(ITS Corridor)示范工程,日本的ETC2.0<sup>[5]</sup>战略和韩国的智慧公路(Smart Highway)<sup>[6]</sup>项目。“十三五”期间,交通运输部组织开展了“新一代国家交通控制网和智慧公路试点”,在全国9个省市进行基础设施数字化、路运一体化、北斗高精度定位综合利用等6大主题的试点<sup>[7]</sup>。2017年底,浙江省按照“现有技术用足、未来技术预留”的原则,启动了全长170 km的杭绍甬智慧高速公路建设工程,标志着智慧高速公路技术研究和工程实践已从点状的技术试点验证向系统化的技术集成示范转变。

## 1 智慧高速公路概念及主要特征

### 1.1 智慧高速公路概念

在我国,“智慧高速公路”这个名词来源于智慧城市。2011年,浙江省开展智慧城市建设试点工作,将智慧高速公路建设作为2012年首批启动的13个示范试点项目之一<sup>[8]</sup>。2014年初,交通运输部党组提出加快推进“四个交通”发展,即综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通的发展,各地的智慧高速公路建设试点项目明显增多,比如,湖南和云南都是在省政府领导的直接要求下,于2014年启动

智慧高速公路试点工程。

根据工程实践,不少专家学者对智慧高速公路的概念和内涵进行了研究探讨。王少飞等<sup>[9]</sup>提出,智慧高速公路就是要构建以数据为核心的高速公路协同管控与创新服务体系,利用“人的智慧思维+先进的技术手段+协同的运行机制+创新的模式”实现对高速公路管理与服务的提升,认为智慧高速公路是持续利用新理念、新技术、新机制、新模式,实现管理和服务更加智慧的高速公路。张纪升等<sup>[10]</sup>认为,智慧高速公路概念尚没有统一的定义,与传统智能交通定义相比,更加强调平台性、互联性以及终端化概念。在服务功能上,智慧高速公路是为充分发挥高速公路的功能属性,集成应用先进的感知技术、传输技术、信息处理技术、控制技术等,形成开放共用的基础平台;它以安全、高效、便捷、绿色为目标,结合多样、开放的运营管理与服务模式,为人和货物的快速运输提供可靠的网络化通行服务,为车车/车路交互提供自由的通信管道服务,为应急事件提供全时可响应的应急服务,为出行者提供精细化、自主化的出行服务。

由此可见,智慧高速公路已有多年的试点工程建设实践,积累了不少研究成果和工程经验。本研究根据杭绍甬智慧高速公路建设工程可行性研究和工程设计过程中的深入思考,认为智慧高速公路概念的提出需要遵循以下两条原则:

(1) 智慧高速公路的基础和本质是高速公路。我国现行《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)对高速公路进行了明确定义,高速公路是专供汽车分向行驶、分车道行驶,全部控制出入的多车道公路。智慧高速公路是突出了数字化、信息化和智能化特征的高速公路,但其基础和本质仍是高速公路。因此,提出智慧高速公路概念,必须首先坚持其基础和本质,即智慧高速公路,是具有智慧化特征的高速公路,而不能将智慧高速公路表述为一个管理控制系统或者一套管理体系。

(2) 从技术支撑和功能实现两个角度明确智慧高速公路的智慧化水平。智慧高速公路不同于普通高速公路的核心特征是“智慧”,但仅表述为“更加智能”或“更加智慧”的高速公路,显然不是严谨的智慧高速公路概念。提出智慧高速公路概念,需要从技术支撑和功能实现两个角度,对高速公路的智慧化水平给出明确的表述。

据此,本研究对智慧高速公路给出如下定义:

智慧高速公路,是在高速公路沿线布设相应设

施设备并建有交通运行控制中心,集成应用感知、通信、控制和绿色能源等先进技术,实现汽车更加安全、快速和绿色行驶的高速公路。

## 1.2 智慧高速公路主要特征

本研究认为智慧高速公路有以下3个主要特征:

(1) 强调对现有先进技术的集成应用。智慧高速公路的智慧能力(或智慧化水平)都需要几种技术集成后才能体现出来,比如:高速公路车道级管控能力(包括对车辆的车道级导航能力)需要应用基础设施数字化、高精度电子地图、厘米级高精度定位、低时延无线通信、大数据实时分析和云控制系统等多项技术,且涉及在路侧设备、车辆侧终端和云控中心侧数据信息和控制指令的处理传递逻辑。自由流收费、准全天候通行、危险路段安全预警等功能实现都需要多项技术集成应用。因此,通过集成应用感知、通信、信息、云计算、大数据、人工智能和绿色能源等先进技术,来实现其整体智慧能力,是智慧高速公路在技术支撑方面的最显著特征。

(2) 以实现更加安全、快速、绿色的人员出行和货物运输为根本目标。交通运输的初衷是实现人和物的位移,高速公路作为交通运输过程的组成要素,其核心功能必须服从和服务于交通运输的初衷。智慧高速公路是新一代高速公路,其功能目标不仅是实现人和物的位移,而是要在确保安全的前提下,能够实现更加快速、绿色的人员出行和货物运输,这是智慧高速公路在功能实现方面的最显著特征,也是智慧高速公路的根本性特征。

智慧高速公路的首要目标是更加安全,以“零死亡”为愿景,在同等条件下比普通高速公路的安全性有显著性提高。智慧高速公路的核心目标是更加快速,表征为在同等条件下比普通高速公路上的车辆平均行驶速度有显著性提高,或者在同等条件下人员出行和货物运输时间比使用普通高速公路有明显缩短。智慧高速公路的刚性约束目标是更加绿色,表征为与普通高速公路相比,在同等条件下单位人员出行量和货物运输量的环境影响程度有显著性下降,或者资源综合利用率有明显提高。

(3) 对正在发生的道路交通颠覆性变革具有先导和引领作用。具体表现为智慧高速公路支持自动驾驶技术应用落地,探索“聪明的车+智能的路”这种未来公路交通模式的实现路径。从社会发展史来看,人类经历了农业革命、工业革命,正在经历信息革命。与之相对应,人类交通发展史也已经历了两次革命,第1次交通革命是以马车、牛车出现

为标志,人类利用畜力,并随后出现了土夯石筑的马路,我国的秦驰道就是当时的高速路;第2次交通革命是以火车和汽车出现为标志,人类利用机械力,并随后出现了铁路和公路,以及目前我们熟悉的高速公路和高速铁路。前两次交通革命的特点是:新的运载工具先发明,并随后带动形成与之相适应的交通基础设施。在目前的信息革命阶段,以自动驾驶车辆出现为标志的第3次交通革命(颠覆性变革)正在发生,人类利用信息通信、大数据和人工智能等技术,正在带动智慧道路的出现。

当前,全球范围已形成广泛共识的是:未来道路交通的基本形态是“聪明的车+智能的路”,将深刻改变车辆拥有、交通组织、人员出行和货物运送等方面的道路交通模式和方式。智慧高速公路具备的车路协同能力,目前已能够支持自动驾驶车辆在专用车道上开展车辆编队行驶(自动驾驶L3级)。积极支持自动驾驶技术应用落地,探索“聪明的车+智能的路”这种未来公路交通模式的具体实现路径是对智慧高速公路的时代性要求,也是智慧高速公路表现出具有先导和引领道路交通颠覆性变革的鲜明特征。

## 2 智慧高速公路的技术内涵

我国的高速公路沿线是建有通信、监控和收费等设施设备的,统称为机电系统。机电系统与路基、路面、桥隧等主体工程是一体化规划、设计和建设的,是高速公路的重要组成部分。高速公路机电系统的建设和运营积累了大量经验,也形成了完整的工程技术规范和相关产品标准,为实现智慧高速公路技术能力奠定了良好基础。但现有高速公路机电系统在技术架构、功能设计及运维管理等方面也都面临着挑战,主要表现为:系统技术架构的开发性不够,协同性不足;系统功能设计上信息交互与控制方式相对单一,精准及时的信息服务功能较弱,数据智能汇聚、分析及应用能力亟待提高,智能决策控制能力尚未建立;在运维管理方面,硬件系统资源利用率不高、部分设备设施存在闲置,数据中心设备过于陈旧、兼容性和扩展性不强<sup>[11-13]</sup>。

与现有普通高速公路相比,智慧高速公路主要升级改造的就是其机电系统。目前高速公路机电系统面临的上述挑战,就是智慧高速公路需要重点解决的问题。从智慧高速公路的技术能力来看,其核心内容是高速公路的智慧化系统。因此,本研究认为,智慧高速公路的技术内涵,集中体现为如何建

设“三网合一”智能基础设施和云边端协同的云控平台<sup>[14-15]</sup>。具体为:

(1) “三网合一”智能基础设施。即高速公路网、感知通信控制网、绿色能源网3个网络化基础设施叠加融合所形成的高速公路基础设施,其组成如图1所示。

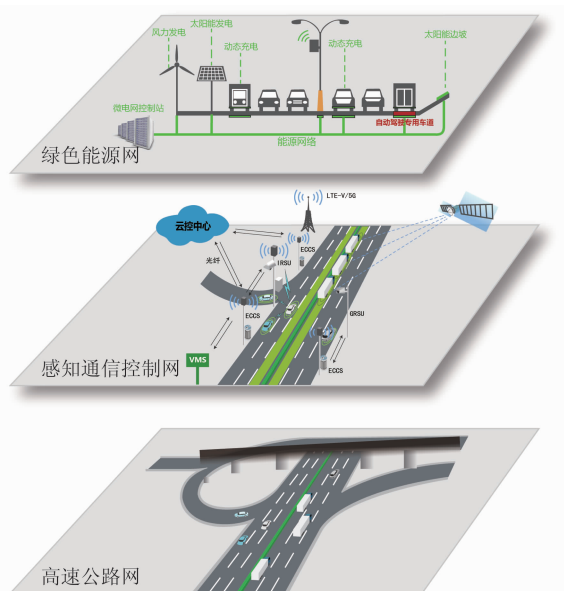


图1 智慧高速公路“三网合一”智能基础设施组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of composition of “three networks in one” intelligent infrastructure of smart expressway

高速公路网是指承载汽车行驶、完成客货运输功能的高速公路土木结构物网络(包括路基、路面、桥隧等),即目前普通高速公路网络。

感知通信控制网是指在高速公路沿线布设的通信设施、感知设备和监控设备所组成的,完成人、车、路协同控制功能的设施设备网络。

绿色能源网是指充分利用高速公路沿线空间资源,布设太阳能、风能等发电设施,以及优化配置供配电系统,实现对传感通信控制网绿色、可靠供电功能的能源供给设施设备网络。

(2) 云边端协同的云控平台。是指由端设备、边子系统、云子系统组成,具有自下而上逐级数据处理与管控指令传递逻辑架构的高速公路云控制系统,其总体架构如图2所示。所谓端设备是指高速公路上有稳定可靠网络连接、能实时在线的终端设备,主要包括路侧终端设备和车辆侧智能终端设备。所谓边子系统是指高速公路沿线部署的具有边缘计算能力的设施,主要包括两类:路侧边缘计算控制站(Edge Computing & Control Station, ECCS)和路

段云控中心(Cloud Control Center - Road Section, CCC-RS),ECCS部署在高速公路沿线路侧,路段云控中心可简称为路段云,根据实际功能需求一般部署在路段管理处机房。所谓云子系统,是指云计算技术架构的高速公路运行控制中心,即云控中心。按照所管理的高速公路路网数量多少、所属行政区划不同或运营管理层级差别,云控中心可分为3级,分别为路段云控中心(CCC-RS)、区域云控中心(Cloud Control Center-Roads Regional, CCC-RR)、路网云控中心(Cloud Control Center-Road Network, CCC-RN),简称为路段云、区域云和路网云。

### 3 智慧高速公路技术体系构建方法

智慧高速公路技术体系构建需要兼顾稳定性及开放性,以适应不断演进的技术形态及不变升级的服务要求。从结构视角看,智慧高速公路是由智能交通系统(ITS)传统的采集、传输、处理、应用等自下而上的各种系统组成,各个系统相关联系、相互作用,以达到最优的协同运行效果。因此,智慧高速公路技术体系构建方法可借鉴国内外ITS体系框架构建方法<sup>[16]</sup>。

#### 3.1 体系构建方法比较

构建体系框架主要有两种方法:面向过程的结构化分析方法和面向对象分析构建方法<sup>[17]</sup>。面向过程的结构化分析方法是20世纪70年代由美国的Yourdon提出<sup>[18]</sup>,主要利用抽象模型的概念,按照系统内部信息的传输关系、变换的关系,以数据为中心,按照自顶向下逐步求精的原则进行系统功能的分解与设计,最终找到并设计出满足用户需求的可实现的物理模型。面向对象分析方法是在面向对象程序设计语言的基础上发展起来的,最早出现在20世纪80年代,主要是从系统的组成上来进行建模,将系统的各个功能抽象成具体事例、属性和行为对象,通过这些对象之间的协调工作实现系统功能<sup>[19]</sup>。

面向过程的结构化分析方法和面向对象分析方法本质上并无优劣之分。由于结构化分析方法采用面向过程的分析思路,符合人们的思维习惯,易于理解和接受,本研究选用面向过程的结构化分析方法开展智慧高速公路技术体系的构建。

#### 3.2 智慧高速公路技术体系构建过程

采用结构分析方法,从分析高速公路用户需求入手,明确高速公路服务功能,建立智慧高速公路逻辑框架和物理框架,并最终提出智慧高速公路技

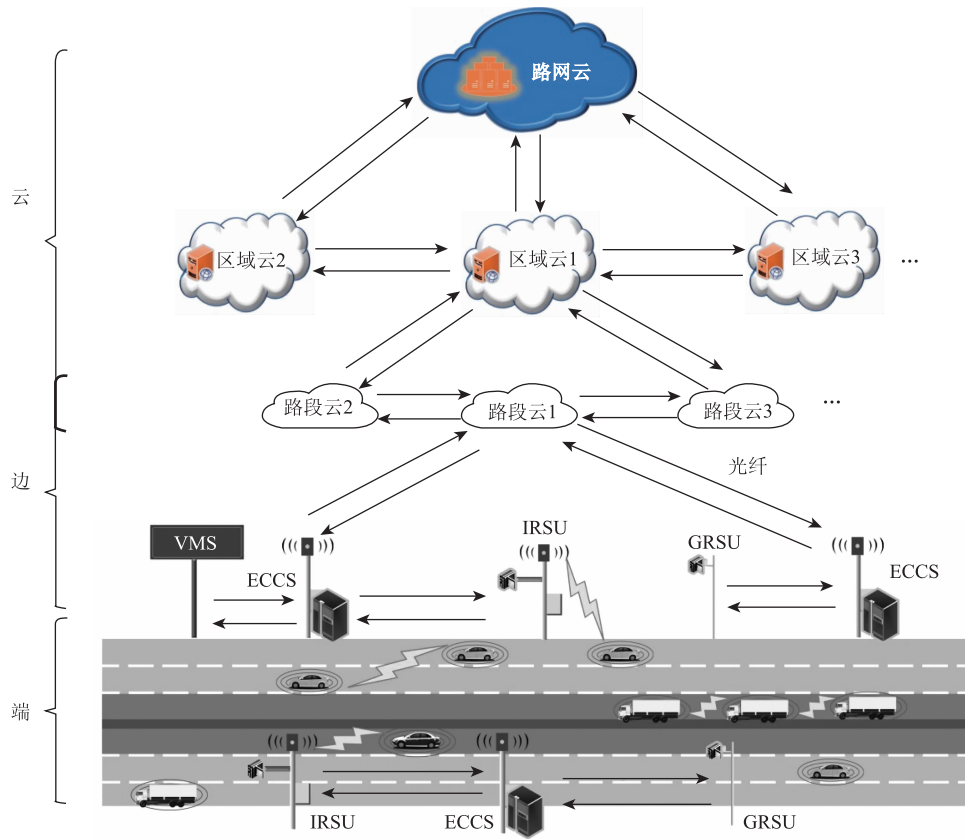


图2 智慧高速公路云边端协同的云控平台总体架构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of overall architecture of cloud control platform of smart expressway for cloud-edge-terminal collaboration

术集。

第1步：确定用户服务。从用户需求的角度，对智慧高速公路应能提供的服务内容进行描述，得到智慧高速公路应提供的服务功能，牵引智慧高速公路逻辑框架和物理框架构建。

第2步：建立智慧高速公路逻辑框架。以实现用户服务为目标，提出智慧高速公路逻辑框架。将智慧高速公路视为一个系统，通过设计逻辑数据流图，分层描绘各功能域间、功能间，及各元素与终端间的数据流联系，构建其逻辑框架。再通过对智慧高速公路逻辑框架图的分析，抽取逻辑框架图中各个连接关系中共性的元素，进行数据流联系及数据内容的定义。

第3步：建立智慧高速公路物理框架。以逻辑框架为基础，提出智慧高速公路物理框架。考虑逻辑框架中各逻辑元素数据流关系，从如何具体实现各项功能的角度对各逻辑元素进行组合形成物理元素，得到物理元素框架流，从而构建其物理框架。

第4步：提出智慧高速公路技术集。通过对智慧高速公路逻辑架构和物理架构的分析，凝练出实

现用户服务所必需的、且有技术指标约束的智慧高速公路技术集。

#### 4 智慧高速公路技术体系

智慧高速公路技术体系是智慧高速公路建设、养护和运营中所需的各种主要技术，以及它们相互作用和联系来实现用户服务的一个技术整体。

##### (1) 用户服务

智慧高速公路能够提供的创新服务主要包括：高精度信息服务、自由流收费服务、自动驾驶货车编队服务、车路协同安全预警服务、准全天候通行服务、电动车续航服务、应急处置服务、车道精准管控服务，以及智慧隧道和智慧服务区，详见表1。智慧高速公路的用户可按照使用者和管理者分类。使用者是指使用高速公路通行的用户，按照车辆驾驶者的不同，使用者可分为人工驾驶车辆用户和自动驾驶车辆用户（智能网联车辆用户）；按照车辆使用燃料的不同，使用者可分为传统能源车用户和新能源车用户。按照管理监督职责，管理者可分为政府监管部门、高速公路运营企业、社会媒体和运输



企业等。

表 1 智慧高速公路用户服务内容列表

Tab. 1 List of smart expressway user service contents

服务名称	服务内容及功能
高精度信息服务	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 高效精准的路径诱导及导航服务</li> <li>· 个性化微观车辆信息服务</li> <li>· 高精度宏观交通流状态信息服务</li> </ul>
自由流收费服务	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 基于 ETC 的自由流收费服务</li> <li>· 基于射频、视频等技术综合应用的自由流收费服务</li> <li>· 基于车路通信或高精度北斗移动定位技术的完全自由流收费服务</li> </ul>
自动驾驶货车编队服务	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 自动驾驶专用车道服务</li> <li>· 营运车编队自动驾驶服务</li> </ul>
车路协同式安全预警服务	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 在分合流区等事故多发地, 提供车路协同式安全预警服务</li> <li>· 为自动驾驶车辆提供车路协同式安全控制</li> <li>· 实现车路协同式自动驾驶及货车编队行驶的示范应用</li> </ul>
准全天候通行服务	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 部分路段或专用车道的“准全天候”通行</li> <li>· 高速公路全线的“全天候”快速通行</li> </ul>
电动车续航服务	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 静态充电服务</li> <li>· 移动充电服务</li> </ul>
应急处置服务	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 紧急交通事件快速发现、快速反应和快速处理</li> <li>· 紧急交通事件快速感知, 结合数据处理、辅助决策、智能化调度</li> <li>· 区域路网协调联动应急指挥调度与处置</li> </ul>
高速公路精准管控服务	<ul style="list-style-type: none"> <li>· “客货分离”、“分车道限速”等管控措施</li> <li>· 基于云控平台精准计算和决策对交通流进行管控</li> <li>· 对全路网交通流及车辆精准管控</li> </ul>
智慧隧道	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 隧道内、隧道间智慧照明</li> <li>· 隧道出入口、隧道内安全预警与控制</li> <li>· 隧道交通事件预警与紧急救援</li> </ul>
智慧服务区	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 车辆管控服务、停车诱导服务</li> <li>· 服务能力动态信息发布</li> <li>· 高速公路动态信息服务</li> </ul>

## (2) 智慧高速公路逻辑框架

根据用户服务内容和具体服务功能需求, 建立的智慧高速公路逻辑框架图如图 3 所示, 用于描述用户服务内容与技术支持能力两两之间的对应和连接关系。

通过对智慧高速公路逻辑框架的分析, 抽取其各个连接关系中共性的元素, 进行数据流联系及数据内容的定义, 形成以智慧高速公路云控中心、边缘控制中心、智能路侧终端、智能车载终端等 4 个部分为典型组成要素的数据流关系和数据内容定义, 如图 4 所示。

## (3) 智慧高速公路物理框架

智慧高速公路物理框架是上述智慧高速公路逻辑要素的实体表达。以逻辑元素为基础, 考虑各逻辑元素数据流关系, 从如何具体实现各项逻辑功能的角度对各逻辑元素进行组合形成物理元素, 得到物理元素框架流。智慧高速公路将在路侧建设集感知、通信、边缘计算及决策于一体的智能路侧系统, 在中心侧部署与智能路侧系统对接的云端管理与计算平台, 并针对车路协同、自动驾驶、自由流收费、准全天候通行、车道精准管控等智慧高速公路的创新服务设计具体的物理框架, 如图 5 所示。

## (4) 智慧高速公路技术集

根据智慧高速公路逻辑框架中云控中心、边缘控制中心、智能路侧终端、智能车载终端四要素及相互之间的数据流关系, 凝练出数据传输与发布、信息交互两个技术子集。通过对智慧高速公路物理框架的分析, 凝练出路侧技术子集和中心侧技术子集, 并形成面向创新应用的集成技术子集。再进一步对每个技术项进行能力需求分析, 形成有技术指标约束的智慧高速公路技术集, 详见表 2。

## 5 应用案例

杭绍甬高速公路经杭州、绍兴、宁波三地, 是横贯杭州湾南岸的主要通道, 全线长约 175 km, 双向 6 车道, 是《长三角都市圈高速公路网规划方案》中杭州湾地区“十横七纵”路网布局中的组成部分。2017 年底, 浙江省政府提出要将杭绍甬高速公路建设成一条全线智慧高速公路, 并随后开展了系统性的智慧高速公路建设方案研究、工程可行性研究和工程设计, 是我国智慧高速公路工程实践走向系统化技术集成示范的标杆性工程。2019 年 12 月, 中共中央、国务院印发的《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》明确提出“率先推进杭绍甬智慧高速公路建设”。杭绍甬智慧高速公路采用了本研究提出的智慧高速公路技术体系, 主要内容包括:

(1) 构建了“三网合一”智能基础设施与“云边端”协同云控平台组成的智慧高速公路体系。通过全线部署全要素感知设施和车路协同设施、全覆盖的无线通信网络、高精定位系统, 定制高精地图系统等, 提升智慧高速感知控制能力。为满足感知通信控制网的部署及设备能源供给要求, 杭绍甬智慧高速公路主体工程建设时, 同步建设基础设施预留条件: 沿高速公路全线路段每隔 2~4 km (与自由流收费门架复用) 布设 1 增强型节点, 每隔 0.2 km 布设 1 普通型节点, 增强性节点较普通型节点的区别

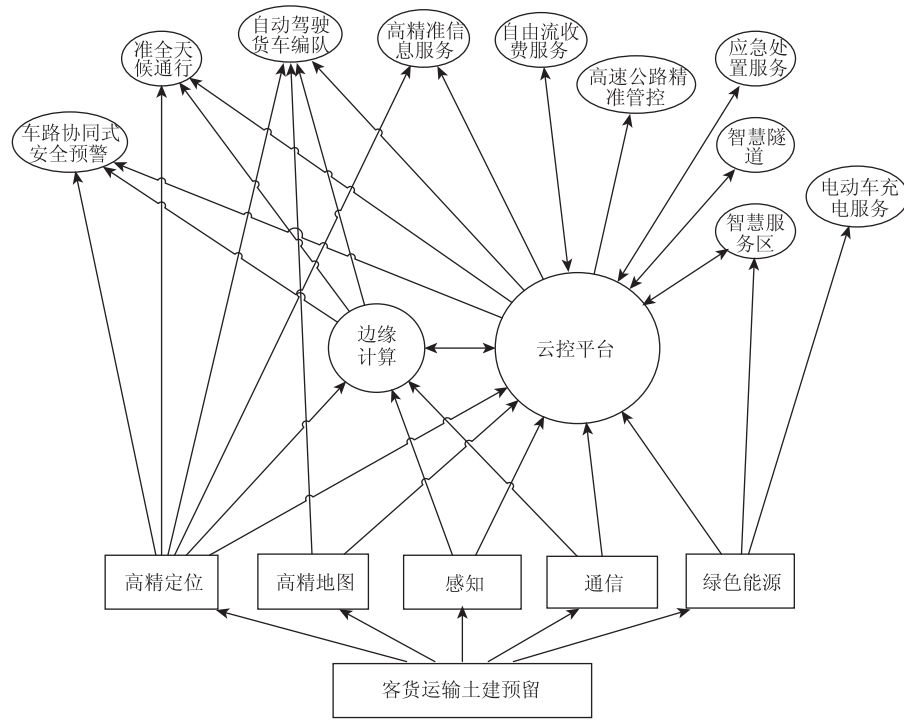


图 3 智慧高速公路逻辑框架简要示意图

Fig. 3 Schematic diagram of logical framework of smart expressway

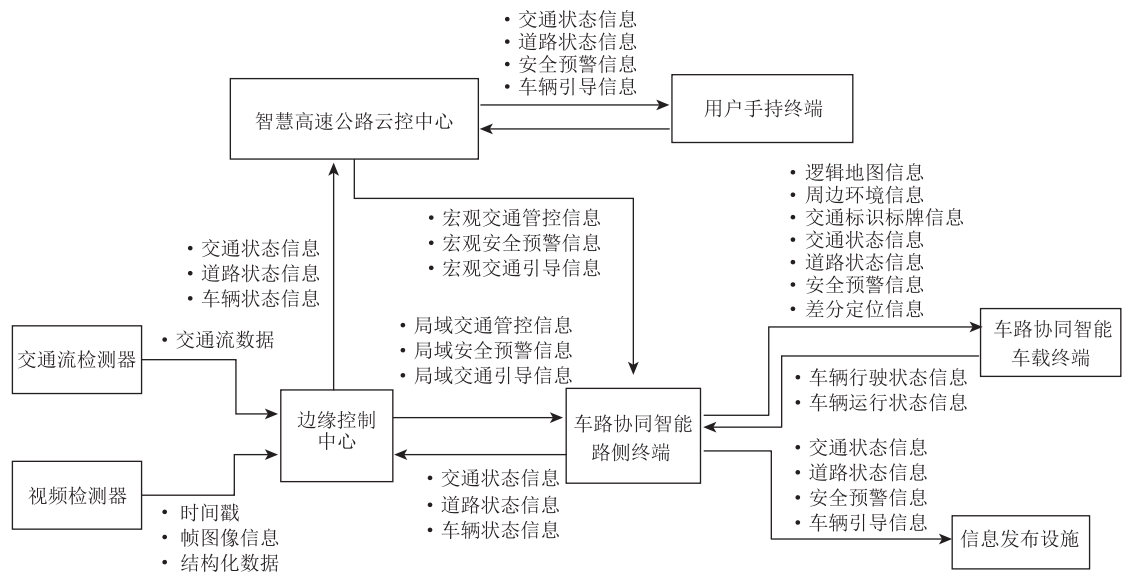


图 4 智慧高速公路顶层逻辑数据流图

Fig. 4 Diagram of top layer logical data flow of smart expressway

在于增加了边缘计算与控制能力。沿途以 0.2 km 为间隔对光缆及电缆接入点进行全线预留。如图 6 所示。

感知通信控制网部分, 为用户提供 ETC-DSRC、LTE-V、4G/5G 等可按需选择的融合通信网络服务, 具备集成路侧交通信息采集、发布等系统的能力, 根据管理需要全线具备北斗地面增强等位置信息服

务功能, 结合车路交互中响应速度快、时延小的要求, 具备本地边缘计算能力, 即能实现本地小范围动态感知和反馈信息的计算、处理与指令自动化执行功能。绿色能源网方面, 充分利用路域新能源资源, 在服务区设置动态及静态充电设施, 创新高速公路电动车能源供给服务。

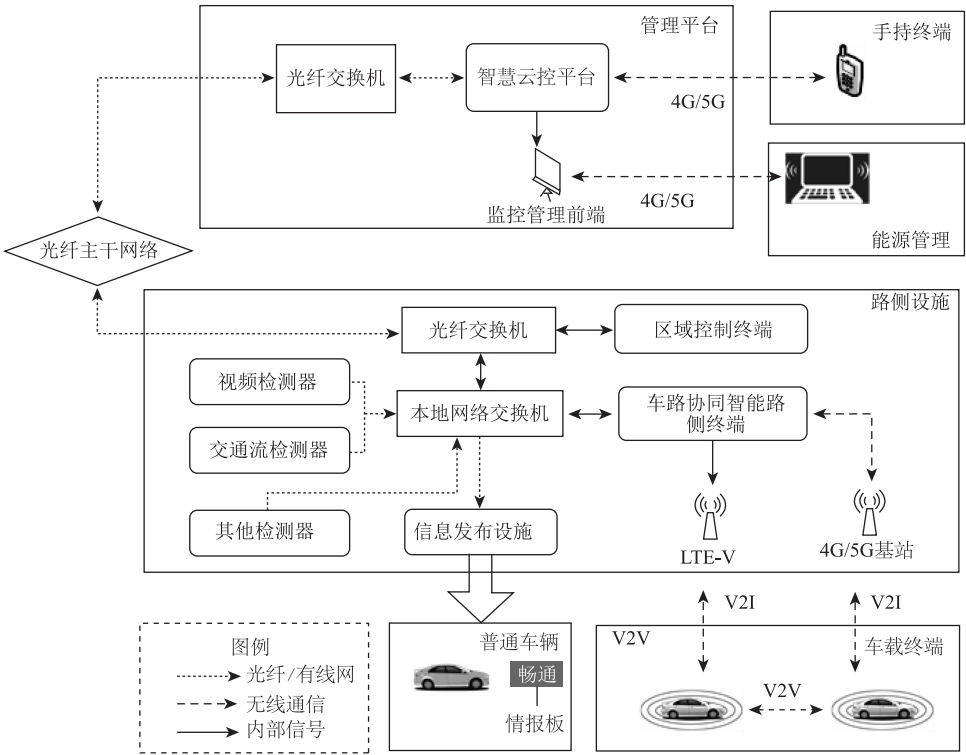


图 5 智慧高速公路总体物理框架

Fig. 5 Overall physical framework of smart expressway

表 2 智慧高速公路技术集列表

Tab. 2 List of technology set of smart expressway

技术分类	技术子集	技术项	技术能力要求
基于系统逻辑架构的技术	交通数据传输与信息发布技术	交通采集数据传输技术	传输文本、语音、图像等数据 数据格式标准化 图像传输带宽不高于 $2 \times 2 \text{ Mbit/s}$
		智能路侧终端信息发布技术	车路信息交互 信息广播空口时延不大于 $10 \text{ ms}$ 安全交互空口时延不大于 $1 \text{ ms}$
		云控中心信息发布技术	实现不大于 $30 \text{ s}$ 的信息更新发布
	云边端信息交互技术	车路协同智能路侧终端与智能车载终端信息交互技术	信息广播空口时延不大于 $10 \text{ ms}$ 安全交互空口时延不大于 $1 \text{ ms}$
		车路协同智能路侧终端与边缘控制中心信息交互技术	实时信息交互
		车路协同智能路侧终端与云控中心信息交互技术	实时信息交互
		云-边协同控制技术	区域协同控制 关键路段协同控制
基于系统物理架构的技术	高速公路网技术	基础设施数字化技术	重要构件统一标识编码 重要结构物及设施数字档案
		自动驾驶专用车道构建技术	机器可识认的标志标线等交安设施 感知、通信、控制等智慧化设施 沿线照明系统
		高速公路土建指标预留技术	为通信、供电等提供土建接口能力 为绿色能源设施提供土建接口能力
	感知通信控制网技术	感知技术	车流量检测准确度不低于 $95\%$ 平均车速、占有率检测精度不低于 $90\%$ 事件检测准确率不低于 $96\%$
		通信技术	多模通信技术 信息广播空口时延不大于 $10 \text{ ms}$ 安全交互空口时延不大于 $1 \text{ ms}$



续表 2

技术分类	技术子集	技术项	技术能力要求
面向创新应用的集成技术	绿色能源网技术	定位技术	提供实时厘米级、事后毫米级位置信息
		地图技术	提供道路、车道、标志标线等数据 相对精度不大于 20 cm 绝对精度不大于 1 m
		边缘计算技术	接入多源数据进行融合分析处理 避碰等服务时延小于 10 ms 预警服务时延小于 50 ms
		智慧高速公路网沿线设施设备用电负荷计算技术	单台机电设施用电负荷计算 机电设备组用电负荷计算 多组机电设备用电负荷计算
		电动汽车充电负荷计算技术	电动汽车充电功率 电动汽车充电电网损耗
		新能源与智能电网能源融合技术	能源分级储能 基于分级储能单元的能源互联网技术
		高速公路网用能需求与电网供给融合技术	高速公路网用电负荷计算 能源网供给能力
		智能分布节能传输技术	电力电缆用量计算 高速公路配电系统功率因数计算 供配电电源负载均衡
	平台技术	信息接入技术	接入全线交通运行状态数据 接入公安、消防、气象等外部数据 网络虚拟化、网络安全等能力
		数据融合技术	海量数据存储能力 复杂任务计算处理能力 数据跨层交互能力
		预测决策技术	计算迁移能力 高速公路统一运行监测和综合管理能力 不同层级交通运行精准管理和控制能力
		信息协同共享技术	路段级、路网级信息共享 与相关平台间信息协同共享 宏观路网信息服务
		高精度信息服务技术	通信时延小于 20 s 厘米级高精定位 本地边缘计算
面向创新应用的集成技术	集成服务技术	自由流收费技术	交易成功率不小于 99% 单点车牌识别准确率不小于 90% 通信链路带宽不小于 2 Mbit/s
		自动驾驶货车编队行驶技术	通信时延小于 20 s 高精地图和厘米级高精定位 本地边缘计算
		车路协同安全预警技术	通信时延低于 10 ms 本地边缘计算 路侧和车载终端
		服务区电动车充电技术	车牌识别率不低于 98% 服务区 4 桩充电桩 路径诱导信息服务
		应急处置技术	应急事件接警 应急资源数据规划 最优化应急预案
		车道级精准管控技术	高精地图和厘米级高精定位 无线通信全覆盖 交通运行状态更新频率不大于 30 s
		智慧隧道技术	隧道内交通运行状态实时感知 隧道内车道级路径规划 隧道内边缘计算
		智慧服务区技术	车牌识别准确率达到 98% 厘米级高精度定位 诱导信息更新频率不大于 30 s

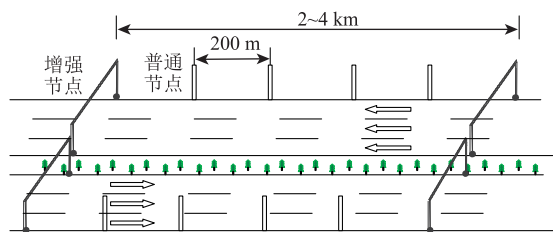


图6 杭绍甬智慧高速基础条件预留示意图

Fig. 6 Schematic diagram of basic conditions reserved for Hangzhou-Shaoxing-Ningbo smart expressway

采用“云边端”协同控制的逻辑架构，建设云控平台，实现感知信息处理、智能决策分析和分级协同管控等功能，支撑智慧高速公路各项创新服务的实际落地。

(2) 提出了智慧高速公路可实现的创新服务。基于上述“三网合一”智能基础设施和“云边端”协同的云控平台，杭绍甬智慧高速公路可实现创新服务主要包括：① 车路协同安全预警服务，在合流区、分流区、弯道、上下坡道等区域，通过部署的视频、雷达、车路协同等路侧感知设备，实施感知交通运行状态、交通气象等信息，并在本地边缘计算节点完成安全预警和控制决策服务。② 车道级交通控制服务，杭绍甬高速公路全线，基于高精度定位、高精地图、全覆盖的传感及通信，实现车道车速管控、危险状态下的车道级车辆运行管控，以及自动驾驶专用车道管控服务等。③ 自由流收费服务，根据《取消高速公路省界收费站总体技术方案》要求，建设收费子系统、ETC门架系统、收费车道等系统，实现主线自由流收费。④ 货车编队行驶服务，在杭绍甬高速公路上修建专用于自动驾驶汽车的智能车道，建立自动驾驶车路协同传感通信控制系统，加密视频监控点，在自动驾驶专用道沿路段纵向间距0.03~0.05 km 布设照明设施，结合货车编队控制策略，实现卡车编队运行服务。⑤ 准全天候通行服务，基于沿途全线覆盖的传感通信控制网，在易出现团雾和路面结冰路段增加布设路面状态检测器、气象传感器等感知设备；高速公路沿线中央分隔带及路侧设置智能诱导装置，根据现场能见度和雨雪等气象条件，调控智能诱导灯状态，以诱导车辆安全行驶。⑥ 交通应急指挥调度与处置服务，发生突发事件时，管理者通过先进的感知系统及时发现事故，通过视频监控、公众等移动视频等方式及时数字孪生事故现场，基于现场情况和路网运行演变态势，实时判定事故等级并进行事件处理，并基于知

识决策进入精细化服务推送场景提供相关交通诱导服务。

## 6 结论

本研究提出的智慧高速公路技术体系不仅应用在杭绍甬智慧高速公路，也已应用在几条服务于国家重大战略和国际重要活动高速公路，如京雄高速公路、延崇高速公路等。与高速公路传统的机电系统技术体系相比，该技术体系能更好地支撑互联传感、LTE-V/5G多模无线通信、高精定位和高精地图、车路协同自动驾驶以及绿色能源等新技术应用，以实现高速公路交通要素的泛在感知、实时交互、精准控制；“云边端”协同云控平台促进了信息跨系统、跨路段、跨区域的使用。

根据交通强国建设要求，智慧高速公路建设正在步入快速发展阶段，本研究提出的智慧高速公路技术体系，也将随着四川、山东等地智慧高速公路建设中的应用和借鉴而进一步完善。

## 参考文献：

## References:

- [1] 交通运输部公路局. 2019 全国公路统计资料摘要 [R]. 北京：交通运输部公路局，2020.  
Highway Bureau of Ministry of Transport. 2019 National Highway Statistics Summary [R]. Beijing: Highway Bureau of Ministry of Transport, 2020.
- [2] 交通运输部规划研究院. 2018 国家干线公路交通情况分析报告 [R]. 北京：交通运输部规划研究院，2019.  
Transport Planning and Research Institute of Ministry of Transport. 2018 Analysis Report on Traffic Situation of National Trunk Highway [R]. Beijing: Transport Planning and Research Institute of Ministry of Transport, 2019.
- [3] SENGUPTA R, HONGOLA B. Estimating ATIS Benefits for the Smart Corridor [R]. Berkeley: California PATH Program, 1998.
- [4] SORIANO F R, TOMÁS V R, PLA-CASTELLS M. Deploying Harmonized ITS Services in the Framework of EasyWay Project: Traffic Management Plan for Corridors and Networks [C] //2012 6th Euro American Conference on Telematics and Information Systems (EATIS). Valencia: IEEE, 2012: 1-7.
- [5] FUJIMOTO A, SAKAI K, OGAWA M, et al. Toward Realization of Smartway in Japan [C] //15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS

- America's 2008 Annual Meeting. New York: [ s. n. ], 2008.
- [6] CHO W, OH H S, PARK B J. Wireless Access Technologies for Smart Highway: Requirements and Preliminary Results [J]. The Journal of the Institute of Webcasting, Internet and Telecommunication, 2011, 11 (2): 237 - 244.
- [7] 岑晏青. 数字交通发展报告(2018) [R]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- CEN Yan-qing. Digital Transport Development Annual Report 2018 [R]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [8] 编委会. 智慧高速公路建设探索与实践 [M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014.
- Editorial Committee. Exploration and Practice of Smart Expressway Construction [M]. Beijing: China Communications Press. 2014.
- [9] 王少飞, 谯志, 付建胜, 等. 智慧高速公路的内涵及其架构 [J]. 公路, 2017 (12): 170 - 175.
- WANG Shao-fei, QIAO Zhi, FU Jian-sheng, et al. Connotation and Architecture of Smarter Expressway [J]. Highway, 2017 (12): 170 - 175.
- [10] 张纪升, 李斌, 王笑京, 等. 智慧高速公路架构与发展路径设计 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (1): 88 - 94.
- ZHANG Ji-sheng, LI Bin, WANG Xiao-jing, et al. Design of Architecture and Development Roadmap of Smart Expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (1): 88 - 94.
- [11] 江长秋. 高速公路机电管理系统物联网云平台的设计与研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
- JIANG Chang-qiu. Design and Research of IOT Cloud Platform for Expressway Electromechanical Management System [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [12] 陈晨. 云南省高速公路交通机电系统设计优化研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- CHEN Chen. Study on Design Optimization of Expressway Traffic Electromechanical System in Yunnan Province [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [13] 薛明. 高速公路机电设备管理系统的设计与实现 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- XUE Ming. Design and Implementation of Expressway Electromechanical Equipment Management System [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [14] 岑晏青. 智能交通助力交通强国建设 [R]. 青岛: 中国智能交通协会, 2019.
- CEN Yan-qing. Intelligent Transportation Assistant to Build a Powerful Transportation Country [R]. Qingdao: China Intelligent Transportation Systems Association, 2019.
- [15] 夏元清, 闫策, 王笑京, 等. 智能交通信息物理融合云控制系统 [J]. 自动化学报, 2019, 45 (1): 132 - 142.
- XIA Yuan-qing, YAN Ce, WANG Xiao-jing, et al. Intelligent Transportation Cyber-physical Cloud Control Systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45 (1): 132 - 142.
- [16] 《中国智能运输系统体系框架》专题组. 中国智能运输系统体系框架 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- National Intelligent Transport System Architecture Project Team. National Intelligent Transport System Architecture [M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [17] 张可. 智能交通系统体系框架构建方法与应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- ZHANG Ke. Theories and Applications for Developing Intelligent Transport System Architecture [M]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [18] BRUZA P D, DER WEIDE TH P. The Semantics of Data Flow Diagrams [R]. Nijmegen: University of Nijmegen, 1989.
- [19] RUMBAUGH J E, BLAHA M R, PREMERLANI W J, et al. Object-oriented Modeling and Design [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1991.