

“5G+智慧公路” 交通运营与安全白皮书 (2020 年)

中交第一公路勘察设计研究院有限公司
中兴通讯股份有限公司

目 录

| | |
|-----------------------------------|---------------|
| 版权说明 | - 3 - |
| 前 言 | - 4 - |
| 1 现状及问题 | - 1 - |
| 1.1 国省干线公路运营与安全现状 | - 3 - |
| 1.1.1 基础设施运营现状 | - 3 - |
| 1.1.2 交通安全运营现状 | - 5 - |
| 1.2 通信技术现状 | - 7 - |
| 1.2.1 5G 通信技术现状 | - 7 - |
| 1.2.2 车联网技术现状 | - 9 - |
| 1.2.3 物联网技术现状 | - 10 - |
| 2 建设目标 | - 13 - |
| 3 智慧国省干线公路解决方案 | - 14 - |
| 3.1 基于物联专网的智慧养护与工程健康监测系统 | - 14 - |
| 3.1.1 系统架构 | - 14 - |
| 3.1.2 智慧养护监测 | - 15 - |
| 3.1.3 工程健康监测 | - 16 - |
| 3.1.4 数据价值应用 | - 20 - |
| 3.2 基于车路协同的无信号控制平交口实时风险预警系统 | - 20 - |
| 3.2.1 系统架构 | - 20 - |
| 3.2.2 全向无缝监测 | - 21 - |
| 3.2.3 瞬时边缘计算 | - 22 - |
| 3.2.4 可靠网络传输 | - 24 - |
| 3.2.5 醒目安全预警 | - 25 - |
| 3.2.6 部署方案选择 | - 27 - |
| 4 展望 | - 29 - |
| 4.1 挑战 | - 29 - |
| 4.2 趋势 | - 29 - |

版权说明

本白皮书版权属于中交第一公路勘察设计研究院有限公司和中兴通讯股份有限公司，并受法律保护。转载、摘编和利用其它方式使用本白皮书文字或者观点的。应注明“来源：中交第一公路勘察设计研究院有限公司、中兴通讯股份有限公司”。

联合编写单位及作者

中交第一公路勘察设计研究院有限公司：

吴明先、刘建蓓、王文博、张志伟、靳媛媛、沈鹏、徐葳、马小龙、许甜、燕崇麒、单东辉、骆中斌、刘国图、邱磊、刘玮蔚、赵超杰、赵斌、马媛媛、邓涵月、王路明、王恒、林长轩

中兴通讯股份有限公司：

张军、赵泽、安治国、张慧、李学骏、李溪昂、胡倩、魏文强、姜永湖、丁成远、徐曦、周科理、甘智勇、刘豪、李文元、张利民、刘增坤、普文凯、陈继军、范音豪、刘炼

前 言

截止 2019 年，我国公路通车总里程已达到 501.25 万公里，公路基础设施网络日趋完善，有效支撑了改革开放 40 年来我国国民经济的快速发展。然而，我们应该清醒的认识到，虽然我国公路建设质量不断提高，但公路运维养护压力依然较大，特别是庞大的国省干线公路依旧是公路管理的难点和痛点。另外，虽然我国公路的交通安全保障水平不断提高，但交通安全现状依然严峻，特别是广大国省干线公路交通事故比例依旧较高，群死群伤事故经常发生。由此可见，提升国省干线公路运营与安全水平已成为促进我国交通行业高质量发展的重要推动力。

随着 5G、物联网、人工智能等技术的发展，为解决国省干线运营与安全的问题提供了新的路径和手段。打造智慧的国省干线公路，就是以智慧为引领、变被动为主动，利用现代化技术手段提升国省干线公路运营安全水平，让每一位公路管理者 and 使用者能够切实感受到公路为稳增长、促改革、调结构、惠民生、防风险作出的积极贡献。

近年来，中交第一公路勘察设计研究院有限公司（以下简称“中交一公院”）以及中兴通讯股份有限公司（以下简称“中兴通讯”）作为交通基础设施及信息网络建设领域的龙头企业，双方将通过强强联合，优势互补，践行交通强国战略，加速交通基础设施网与信息网络融合发展，为支撑智慧国省干线公路运营安全建设提供优质解决方案。

中交一公院与中兴通讯联合编制《“5G+智慧公路”交通运营与安全白皮书》，本白皮书系统地分析了国省干线公路的发展现状及主要运营安全问题，结合 5G、物联网、车联网等技术实现赋能应用，降低交通事故率。希望与业界分享，切实提升 5G 网络技术在交通领域融合发展与应用水平。

1 现状及问题

2020 年，国务院政府工作报告提出重点支持“两新一重”（新型基础设施建设，新型城镇化建设，交通、水利等重大工程建设）建设。随后国家发改委和交通运输部相继发文，首次明确新型基础设施的范围，包括以 5G、物联网为代表的通信网络基础设施，并提出结合 5G 商用部署，统筹利用物联网、车联网、光纤网等，推动交通基础设施与公共信息基础设施协调建设。逐步在高速公路和铁路重点路段、重要综合客运枢纽、港口和物流园区等实现固移结合、宽窄结合、公专结合的网络覆盖。协同建设车联网，推动重点地区、重点路段应用车用无线通信技术，支持车路协同、自动驾驶等。在重点桥梁、隧道、枢纽等应用适用可靠、经济持久的通信技术，支撑设施远程监测、安全预警等应用。

目前，我国公路建设总里程截止 2019 年末已达到 501.25 万公里，其中，高速公路里程 14.96 万公里，国道里程 36.61 万公里，省道里程 37.48 万公里，农村公路里程 420.05 万公里。然而，伴随着我国公路建设的高速发展，汽车保有量的飞速增加，道路交通安全形势却日益严峻——我国每年道路交通事故死亡人数位居世界第一，远高于欧美发达国家交通事故死亡人数。这其中中国省干线公路的交通安全问题尤为突出，我国国省道公路总里程虽然只占公路建设总里程的 14.8%，但在国省干线公路上的交通事故的发生起数、死亡人数、受伤人数占事故总数的比例却在交通事故总数的 50%以上。

国省干线公路交通事故多发、交通安全水平低的原因，一方面是交通承载量大，但线形指标总体偏低、线形条件复杂多样、路侧干扰大，对驾驶员的安全驾驶的要求更高，同样也更容易发生交通事故。另一方面由于国省干

线公路建设成本、运营成本总体偏低，其交通安全保障能力主要依靠静态的交通标志、标线、护栏等安全设施，交通安全保障措施偏被动、交通运营管理偏事后，其交通管理能力与其承载的大交通量、“两极化”明显的交通组成特征有显著差距。

而随着以 5G、车联网、物联网为代表的通信技术不断发展，为国省干线公路的交通运营管理质量和效率的提升带来了新的动力。5G 网络的大带宽、低时延、海量连接等特性，赋能国省干线全面数字化转型。车联网技术可充分实现“人车路云”的数据交互，使国省干线的交通出行更安全、更高效。物联网技术可以全面感知交通运输基础设施、交通运载工具的建设运营状况，同时获取整个交通流的运行状况。

总体上，虽然我国智慧公路建设才刚刚起步，5G、物联网、北斗、人工智能等技术在公路上的应用实施成本还比较高，难以在高速公路上大范围推广，更难以在国省干线公路上进行应用。但面对我国国省干线公路严峻的交通安全形势，我们认为有必要在国省干线公路的重点路段、重要节点应用智慧设施来提升基础设施以及交通运行的智能化、精细化、实时化管理，并按照技术进步的程​​度、应用效果的体现分步实施、由点及面、逐步推进。同时，在实施国省干线公路智慧化升级改造的过程中还应考虑不同地区的差异性，对于经济发展程度较高、城镇化水平高的地区，可以在全路段或者路网推行智慧化升级改造。因此，首先需要对我国国省干线公路的分布特征、交通安全特点进行分析，从而为明确智慧国省干线公路的实施重点和方向提供支撑。

1.1 国省干线公路运营与安全现状

1.1.1 基础设施运营现状

我国地域辽阔，国省干线道路分布呈现出点多、线长、面广的特征，很多交通基础设施都是穿山而建、遇水而架，地理环境、地质条件、地形地貌复杂，在洪水暴雨等自然灾害发生时，极易出现边坡滑坡垮塌、路面路基下沉塌陷、桥梁墩台位移等险情。同时，一些交通主干线路面长期受超重超载车辆碾压，超负荷运行，造成路面过早出现病害。

通过对国省干线道路灾害成因分析，交通基础设施的安全问题一般都不是突然发生的，都有预先的征兆，是由小险逐渐积累最后发生大险，造成交通阻断、路产损毁等经济损失。如果能够做到对交通基础设施的安全状态进行实时监测，通过布设在路面、路基、桥梁、隧道等位置的传感监测设备及时发现隐患、及时预警、及时处置，做到未雨绸缪，防患于未然，就可以有效防范滑坡垮塌、下沉塌陷等险情的发生，确保在交通基础设施安全的基础上，保障整个交通运输过程的人畅其行、货畅其流。



图 1-1 强降雨引起路基边坡滑塌



图 1-2 岩质边坡崩塌滚石



图 1-3 回填压实不足引起路面坍塌

图 1-4 土质高边坡潜在裂缝

但目前的状况显然并不容乐观，对交通基础设施安全状态的监测，除了在机电设施条件比较完善的高速公路、重要桥梁、长大隧道外，绝大多数设施还不能实现传感设备的全面部署，进行实时监测，而是仅仅靠养护部门的日常巡检发现隐患问题，这样必然是效率低下，而且一些隐蔽工程的隐患并不容易被发觉。之所以不能大量布设传感设备对交通基础设施进行实时监测，最重要原因是成本太高，一是设备成本高，二是布设成本高，三是运维成本高，尤其是在普通国省干道、县乡村道，既不具备供电条件，也不具备网络条件（移动运营商网络流量费贵，存在信号覆盖盲区），更是难上加难。

目前国省干线常规检测存在以下不足：

（1）国省干线采用经常性、定期等检测方法，无法全天候对重要基础设施的安全运行情况进行数据采集。

（2）自然环境（暴雨、台风、沙尘暴、地质变化等）、人为因素（撞击、超载等）、自身结构（结构变形、设备老旧等）等多种因素影响，基础设施安全随时都有可能发生变化。

（3）检测数据大部分采用纸质报送方式，数据反馈周期较长，时效性相对较差；数据相对分散，缺乏连续，无法对检测数据进行准确评判并加以综合分析应用，不能及时发现变形、沉降、塌陷等征兆，难以预警和防范。

（4）传统检测技术采用人工借用便携式仪器进行现场检测，在检测选点、设备部署合理性、设备使用熟练程度不同、检测项不全面、不同检测人员等因素影响，采集的数据受人为影响因素较大。

（5）传统检测需安排检测团队进行现场检测，人员数量较多，检测周期较长，加之国省干线交通复杂多变特点，需对部分基础设施的交通进行管制，在车流量较大，路况复杂的地段，对检测人员安全形成一定的威胁。

1.1.2 交通安全运营现状

从历年国省干线交通事故统计结果来看，我国国省干线公路交通事故发生数量最多、最为集中的路段主要是在人口密度较高的城镇周边以及交通量较大的交通枢纽路段。近年来，随着我国道路建设步伐的加快，很多国、省道都通到了边远乡村。在农村地区，由于农业生产和农民出行的需要，数不胜数的乡间小道与国、省道形成了众多的平交口，特别是在穿村路段，沿线的每一条大小支路几乎都与主干道形成了平交口，加之又无必要的道路交通安全设施，人、畜与过往车辆争道抢行现象严重，不仅影响了主干道的通行能力，而且交通安全隐患特别突出，极易发生群死群伤交通事故。

一般来说，在城市的平交口一般都会设置信号灯进行管控，但在广大农村地区的平交口，由于支路来车少，平交口处仅设置少量交通标志标线进行管理，村民不执行交通标志标线内容的交通行为经常发生。加之一些新修建的道路状况较好、视野开阔，驾驶人易麻痹，极易导致车辆超速行驶，这些综合因素致使平交口处事故发生率较高。



图 1-5 典型国省道无信号控制平交口事故现场图

平交口交通事故高发的主要原因是驾驶员行车视线影响,从近年来交通事故成因分析,发生在平交口的交通事故主要特点是次干道机动车或行人突然进入主干道,并与主干道车辆发生冲突碰撞。由于在次干道行驶的机动车或行人进入主干道,视线受到一定的影响,特别是一些两边都是山傍的次干道,根本看不到主干道上行驶的车辆,导致平交口范围出现视觉盲区,成为平交路口的“隐形杀手”。一些从支路上往主路行驶的摩托车和行人,由于目标小、速度快、突然性强,极易造成主路与支路车辆、行人的交通冲突,这也是在国省干线公路上摩托车事故占比最大(约占事故总数的 25%以上)的主要原因之一。在城区,平交路口四角的广告牌、违法停放的大型车辆等都能够不同程度地遮挡过往交通参与者的视线,成为视觉盲区。在农村地区,特别是在穿村路段的平交路口,四角的房屋、树木以及农民堆放的草垛、杂物等也都能形成一定范围的盲区,稍不留神就会引发交通事故。在雨雾等恶劣气象条件下,由于地面湿滑、以及视线受限等环境因素的影响,降低了驾驶员对于前后车辆、周边环境的判断准确性,导致前后车距不足、驾驶员容易发生误操作,这也是为什么在恶劣气象条件下追尾事故比较多的一个主要原因。



图 1-6 平交口通视三角区有植被、建筑物等障碍物导致视距不良

综上所述，破解国省干线公路平交口、出入口交通事故多、危害严重的问题已成为提升国省干线公路交通安全水平的核心关键点。因此，对于无信号控制平交口应加强对通视不良的支路方向来车和行人的监测，利用路侧设施对不让行主路的车辆或行人发送警示信息，并提醒主路驾驶员提前控制车速，从而降低平交口发生交通冲突事故的可能性。

1.2 通信技术现状

国省干线公路进行数字化建设，离不开稳定的通信网络。目前，国省公路沿线主要覆盖运营商的 3G/4G 无线网络，在不同场景的数字化建设过程中，需要 5G 网络、车联网、物联网等通信技术进行数据传输。本节将对目前主流的 3 种通信技术进行介绍。

1.2.1 5G 通信技术现状

5G 作为新一代蜂窝移动通信技术，在带宽、时延、频谱效率、连接数量等主要性能指标方面相较于 4G LTE 网络都有了较大提升。从而能够更好的满足行业用户差异化场景下对于移动网络性能的要求。

ITU（国际电信联盟）定义了 5G 应用的三大业务类型：eMBB、URLLC、mMTC。

➤ 增强移动宽带(Enhanced Mobile Broadband, eMBB)

增强型移动宽带有着更好的传输速率和移动性,不仅能提高现有通信业务的传输速率和用户体验,并且可进一步开拓新的应用领域,满足更高的业务通信需求。这种宽频应用情境可涵盖不同的传输范围,包括广域覆盖和热点传输。对于广域覆盖的情况下,连续广覆盖以及较高的移动性是主要需求,对于数据传输速率也有着更高的需求。

热点应用,主要针对高用户密度的区域,其对于移动性的需求较低,但数据密度较大,对数据传输量的需求较大,因此热点应用的数据传输率比广域覆盖高。增强型移动宽频预期将传输速度再提升至下行 20Gbit/s、上行 10Gbit/s。

➤ 超高可靠与低时延通信(Ultra-reliable and Low Latency Communications, URLLC)

此类应用对于数据传输速率、时延及可靠性有着严格的要求。例如智能电网配电自动化、工业自动化制造、生产过程的无线控制、远程医疗手术、运输安全、车路协同、无人驾驶等,需要高可靠性达到 99.999%,端到端时延小于 10ms。

➤ 海量机器类通信(Massive Machine Type Communications, mMTC)

该应用的特征在于连接大量元件设备,约每平方公里内有 100 万个设备的机器间通信需求,其发送数据量较低且对于传输资料延迟有较低需求。此外,此元件设备须具有非常低的制造成本,且须有很长的电池寿命。

除此之外，不同的行业应用对于网络的需求千差万别，因此对于未来的通信网络服务，要求网络具有较强的弹性、灵活性以满足日益增长的差异化行业需求。

5G 三大场景的典型应用如下图所示：

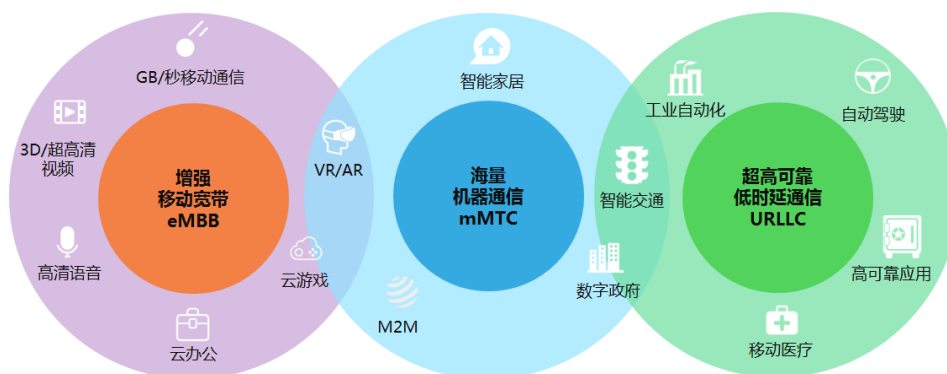


图 1-7 5G 三大场景

1.2.2 车联网技术现状

我国政府已将车联网提升到国家战略高度，国务院及相关部委对车联网产业升级和业务创新进行了顶层设计、战略布局和发展规划。发布了《交通强国建设纲要》、《数字交通发展规划纲要》、《推进综合交通运输大数据发展行动纲要（2020—2025 年）》等一系列政策文件，多次强调交通运输基础设施和运载装备全要素、全周期的数字化升级迈出新步伐，完善数字化采集体系和网络化传输体系，推动车联网产业链成熟。

目前，国际上主流的车联网无线通信技术有 802.11p 和 C-V2X 两条技术路线，2018 年工信部印发《车联网（智能网联汽车）产业发展行动计划》，明确支持我国 LTE-V2X、5G-V2X 研发与产业化。

C-V2X 中的 C 是指蜂窝（Cellular），它是基于 3G/4G/5G 等蜂窝网通信技术演进形成的车用无线通信技术，包含了两种通信接口：一种是车、人、路之间的短距离直接通信接口（PC5），另一种是终端和基站之间的通信接口（Uu），可实现长距离和更大范围的可靠通信。C-V2X 是基于 3GPP 全球统一标准的通信技术，包含 LTE-V2X 和 5G-V2X，从技术演进角度来说，LTE-V2X 支持向 5G-V2X 平滑演进。



图 1-8 RSU 设备

1.2.3 物联网技术现状

物联网技术包括无线局域网（WLAN）物联网和低功耗广域（LPWAN）物联网等技术。WLAN 物联网包含 Wi-Fi、Zigbee、蓝牙等技术，LPWAN 物联网包含 LoRa、NB-IoT 等技术。近些年，LPWAN 物联网凭借其功耗低、传输距离长的特点广泛被市场认可。据 IHS 预测，到 2021 年 LoRaWAN 的连接数在物联网 LPWAN 技术中将占比超过 50%，NB-IoT 次之。相较于公网覆盖，运营商主导的 NB-IoT 技术。数据自主，按需区域部署的 LoRa 技术更适合国省干线场景。

LoRa 是 LPWAN 低功耗广域网无线通信技术中的一种，是一种基于扩频技术的低功耗窄带远距离通信技术，LoRa 是 Long Range 的简称。LoRa 技术目前主要在全球 Sub1G 免费频段运行，不同国家和地区的免费频段不同，例如欧洲的 433MHz，868MHz，北美的 915MHz，中国是 780MHz 和 470MHz 等。

LoRa 技术的主要特征是远距离、大容量、低功耗、安全。可提供通信距离大于 15 公里，容纳 100 万个节点，电池供电 10 年以上，抗干扰能力强的物联网网络。

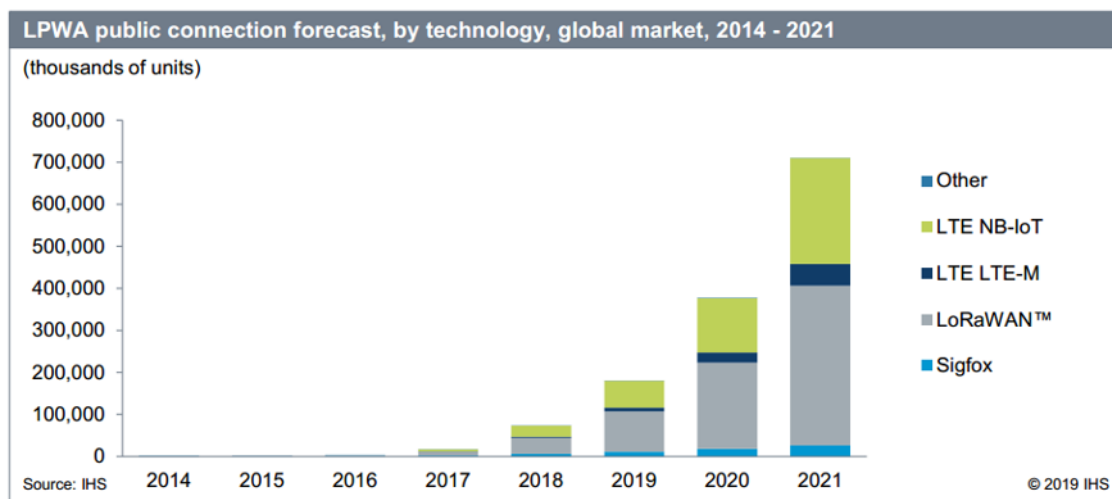


图 1-9 IHS 预测物联网 LPWA 技术连接数

相对于依托运营商网络，自建物联专网更适合公路场景下各类终端设备收发数据。具体优点如下：

表 1-1 运营商专网与自建物联专网对比

| 比较项目 | 依托运营商专网 | 自建物联专网 |
|------|--|---------------------------------|
| 通讯费用 | 每一个传感器终端均产生流量费用 | 只有网关会有流量费，终端没有流量费。而一个网关可连接上万个终端 |
| 信号覆盖 | 运营商网络信号存在盲区；连接物联网的信号基站覆盖不足，目前只有部分城市有覆盖 | 采用免授权频段，可独立组网。只需保证网关可接入运营商的信号即可 |
| 传输功耗 | 信号灵敏度、终端功耗问题较差 | 信号灵敏度、终端功耗问题均优于运营商物联网 2-3 倍 |
| 业务扩展 | 后续传感器终端数量和类型的增加需通过运营商 | 可直接扩容、复用终端的数量和类型 |

综上，LoRa 技术、C-V2X 技术、5G 技术都已成熟可商用。由于国省干线公路周边终端电力供给不便、监测点多等特点，LoRa 技术更适合作为无线物联网的布设选择。可利用车联网技术，对车辆驾驶员进行近距离传输信息。对于具备 5G 网络部署条件的区域，5G 网络可用于传输国省干线高清摄像头数据。

2 建设目标

智慧国省干线应同时满足管理者和出行者对公路“安全、便捷、高效、绿色、经济”的运输服务要求，切实落实“交通强国”、“新型基础设施建设”新要求，坚持点线面结合、近远期结合，以“增强道路主动防控能力”为抓手，充分利用 5G、云计算、大数据、物联网、人工智能、移动互联网等新一代信息技术及装备，在重点路段、重要节点能够实现精细化、实时化的运营管理、控制，优先解决国省干线公路的交通安全问题，实现重点路段、重要节点感知体系完善、主动防控有效、管理决策科学、应急调度高效，为打造人-车-路高度协同、云-边-端深度融合的智慧国省干线公路奠定基础。

3 智慧国省干线公路解决方案

3.1 基于物联专网的智慧养护与工程健康监测系统

建立“可管控+低功耗”的泛在感知物联专网，在数字世界重构出可视、可感、可控的“数字公路”。公路管理者通过“数字公路”可进行全量化的智慧养护与工程健康监测。解决监测路边护栏倾斜、凸面镜丢失、路边指示牌倾斜丢失等问题，以及进行路基沉降、边坡、桥梁等工程健康监测。

3.1.1 系统架构

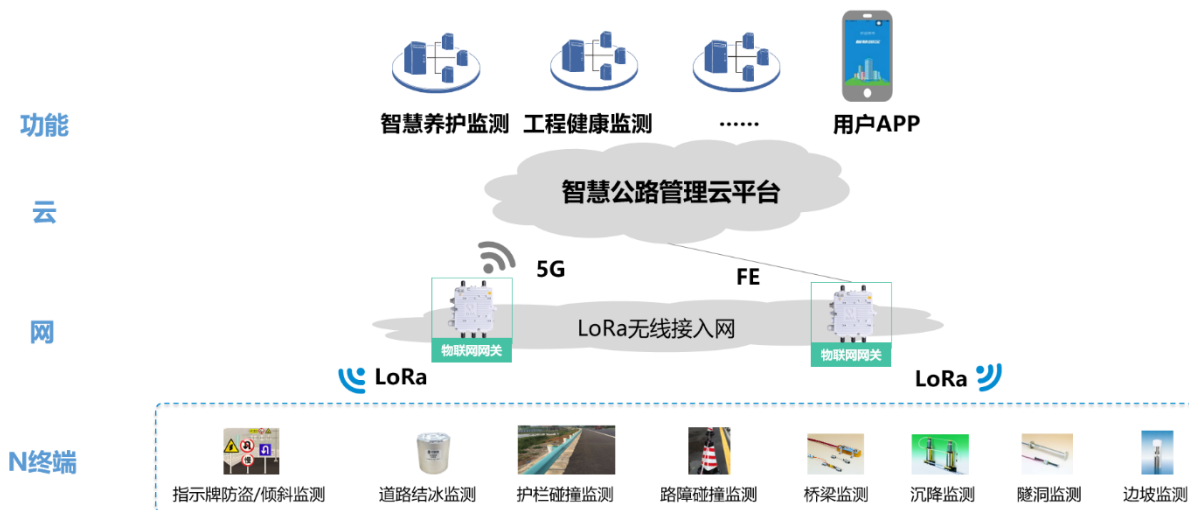


图 3-1 基于物联专网的智慧养护与工程健康监测结构图

整体架构图分为云、网、N 终端 3 个部分。终端侧，部署各类智能传感设备，将公路物联成网，对公路各个空间、时间的核心系统进行多维立体的实时感测。网络部分，通过 LoRa 技术采集国省干线公路海量的智能传感设备数据，实现通信范围超 15 公里、网关容量超 100 万节点、电池供电超 10 年的稳定连接。云端，利用 5G 网络，将特定的数据传输至按需部署的边缘云、公路管理云平台，进行存储、分析，支撑上层应用，实现智慧养护监测、工程健康监测等功能，充分发挥数据价值。

3.1.2 智慧养护监测

智慧养护监测主要通过物联网技术，实时监测国省干线养护难点问题，包括道路结冰、路边指示牌防盗、护栏碰撞、养护管理等，达到以科技代替人力的效果。

（一）道路结冰监测

各单位业主管辖国省道公里数大，严寒天气下，道路积水结冰难以及时定位清楚，极易造成安全事故。通过部署结冰监测传感器，对空气温湿度、路面温湿度、积水状态、路面介电特性的综合检测，可对道路结冰厚度、时间进行实时监测和预测，预防交通事故发生。

（二）路边指示牌防盗监测

国省干线公路路侧部署有各类指示牌，随着智慧化公路的推进，路侧部署的设备数量也会增加，做好路侧设备的防盗监测不可或缺。通过部署倾斜检测器，测量路边指示牌倾斜角度和 GPS 定位来监测指示牌/雪糕筒是否倾斜，是否非法移动。监测数据可实时反馈给道路管养中心，实时监测，保护路产。

（三）护栏碰撞监测

国省干线路况监测盲区多，为了做到事故发生及时响应，在事故多发路段的隔离绿化带、公路边界上安装倾斜角度监测仪和位置传感器，可监测绿化带、护栏是否被碰移动。在部署绿化带、护栏的路段形成 24 小时感知网络，出现事故第一时间预警。

3.1.3 工程健康监测

主要围绕国省干线易出现工程健康的场景进行实时监测，包括路基路面沉降监测、边坡监测、桥梁监测，实现公路安全实时保障。

（一）路基沉降监测

由于路基自身质量、水文气候以及施工等原因，易导致路基出现不均匀沉降，引起路面出现裂缝、桥头跳车等危害。

根据公路工程线路长、沿线构筑物多、施工条件相对较差等特点，主要监测公路路基的沉降、土壤墒情以及环境温湿度、风速风向等。通过监测系统长期不间断监测，对公路路基监测数据实时观察，摸清路基沉降状态，当监测指标超过阈值时第一时间报警，及时发现问题，排除隐患，避免可能出现的重大安全事故，降低损失。

表 3-1 沉降监测设备表

| 设备名称 | 监测内容 |
|-------------|------------------------|
| 北斗 GPS 定位系统 | 沿公路监测段全线布置，整体变形监测 |
| 沉降传感器 | 局部相对沉降监测 |
| 土壤墒情计 | 土壤温湿度监测 |
| 温湿度传感器 | 环境温湿度监测 |
| 风速风向仪 | 环境风速风向监测 |
| 雨量计 | 降雨量监测 |
| 线缆 | 以现场实际使用为准 |
| PU 连接水管 | 以现场实际使用为准 |
| 结构健康监测系统 | 数据展示、存储、历史数据查询、超限自动报警等 |

（二）边坡监测

边坡健康监测系统设计时，应该根据每座边坡的实际特点，考虑边坡的环境、等级及实际危险截面等，再进行监测设计。现场监测及采集系统的监测参数包括边坡本体位移变形、支护结构应力（应变）、边坡地下水状态、环境等监测项。

- （1）环境监测：包括边坡所处环境中的降雨量、温湿度等。
- （2）边坡位移变形：包括边坡表面位移和内部位移。
- （3）支护结构应力（应变）监测：对于支护结构的边坡而言，包括支护结构受到的土压力和锚杆应力、锚杆内力。
- （4）地下水位监测：包括浸润线等。
- （5）视频监控：包括坡体影像等（边坡处于速变、剧变阶段）。

表 3-2 边坡监测设备表

| 监测项 | 传感器 | 安装位置 |
|--------|------------|----------|
| 表面位移 | GPS/拉线式位移计 | 边坡关键位置 |
| 内部位移 | 导轨式固定测斜仪 | 土体内部 |
| 降雨量 | 雨量计 | 边坡本体上 |
| 温湿度 | 温湿度传感器 | 边坡附近或本体上 |
| 浸润线 | 孔隙水压计 | 土体内部 |
| 侧向岩土压力 | 土压力盒 | 支护结构 |
| 锚杆应力 | 锚索计 | 锚固端 |
| | 应力（应变）计 | |
| 视频 | 视频摄像机 | 边坡外部 |

（三）桥梁健康检测

桥梁健康监测系统包括现场监测及采集系统、数据传输及分析系统、预警系统和结构评估系统，本节主要介绍现场监测部分。

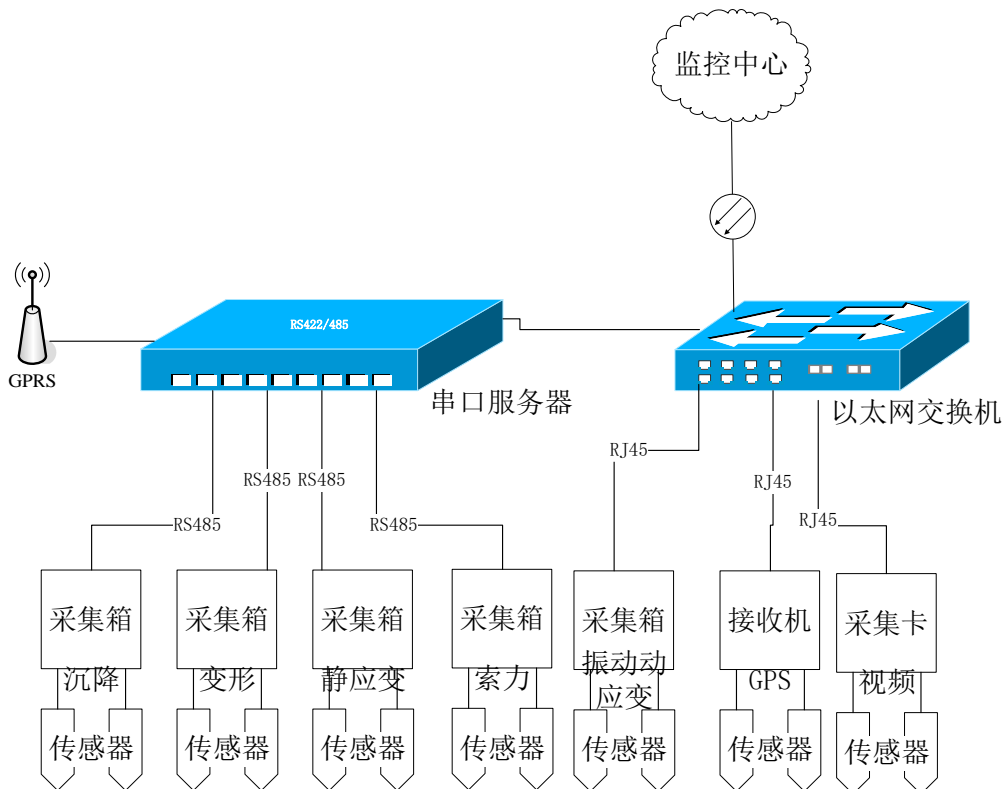


图 3-2 桥梁健康监测系统拓扑图

根据监测项目、测试手段、测点优化、信号传输等方面因素分析研究，桥梁健康监测系统的拓扑结构组成可分三层：第一层由各监测内容所属的各监测项目(参数)的测量系统构成，第二层为监测外场数据采集站与通信系统外场，第三层为桥梁质量监控中心的结构安全系统工作站。

监测系统设计时，应该根据每座桥梁的结构型式、大桥工作环境、养护管理系统、桥梁事故率、桥梁重要程度这 5 方面来确定监测系统的规模、参数的类型以及数量。

监测系统的监测参数包括变形、应力（应变）、索力、振动性能、裂缝、工作环境、交通状况等。

- （1）结构变形监测：包括桥塔、基础的沉降与倾斜，桥梁的变形等。
- （2）结构应力（应变）监测：桥梁重要部位（桥塔、主要承重构件、桥身关键部位等）的动态和静态的应变测试。
- （3）索力监测：对于有索桥梁，需要对关键拉索的索力进行监测。
- （4）振动性能监测：包括桥塔、桥体的振动幅值以及振动特性。
- （5）裂缝监测：裂缝是结构安全的晴雨表，当结构出现裂缝时，需要对裂缝的扩展情况进行监测，防止裂缝恶性扩展而没有采取措施。
- （6）环境监测：包括环境温度、湿度、风力风向等多方面的监测。
- （7）交通与视频监控：包括车辆荷载、车牌号码识别等多方面的监测。

表 3-3 桥梁健康监测设备表

| 监测项 | 传感器 | 安装位置 |
|-----------|---------------|----------------|
| 风速 | 风速仪 | 塔顶、跨中 |
| 振动 | 力平衡传感器 | 桥塔、桥墩、桥身等 |
| 倾斜 | 盒式固定测斜仪 | 桥墩、桥塔、梁体、拱圈等位置 |
| 挠度 | 压差式变形测量传感器 | 桥墩、桥塔、梁体、拱圈等位置 |
| 应变 | 表面式/内埋式应变计 | 梁身、桥塔、桥墩等 |
| 索力 | 磁通量传感器、加速度传感器 | 主塔拉杆、主跨吊杆 |
| 裂缝 | 裂缝计/表面应变计 | 最大缝宽处 |
| 温湿度 | 温湿度传感器 | 桥面、桥底、梁体 |
| 车辆荷载、号牌识别 | 动态称重传感系统 | 桥端面行车道上 |

3.1.4 数据价值应用

物联网技术可以全面感知国省干线基础设施状况，同时获取整个交通的运行状况。大数据技术可以充分挖掘和利用信息数据的价值，盘活现有数据，在此基础上进行应用、评价、决策，服务于交通部门的管理与决策。在本场景中，智慧养护与工程健康监测系统通过泛在的物联网传感器采集数据，通过网络，交通云数据中心协同计算高效处理公路的海量运行数据，全要素数字感知可精准的刻画出“数字孪生国省道”，做到可视化管控、最大化通行、智慧化决策，从而推演智慧国省道未来演进趋势。

3.2 基于车路协同的无信号控制平交口实时风险预警系统

干线公路无信号控制平交口，作为最重要的公路组成部分之一，也是国省干线上最容易出现交通事故的地方。具有摄像机部署少、附近居民横穿公路需求大、夜间光照不足等特性。发生事故的原因主要是驾驶员未提前观测到横穿马路的行人、车辆等。

本预警系统通过前端摄像头检测行人、摩托车、农用车等，利用路边可变信息牌、车载终端，给驾驶员提醒的方式，来降低交通事故率。

3.2.1 系统架构

整体架构图分为云、边、管、端 4 个部分。端侧，路侧部分包括电子标志标线、可变指示牌、雷视一体机、RSU、路侧传感器；车载部分包括车辆搭载 OBU 及智能车载终端。管侧，通过部署 C-V2X、有线网络、4G/5G 网络实现不同类型的数据传输。边缘侧，部署边缘计算服务器，实现数据的实时处理。通过该系统，实现白天、黑夜的平交口过街行人、农用车监测，路侧

大屏预警、车载大屏预警。云端，部署云计算平台及大数据平台，实现数据的海量存储及分析。



3.2.2 全向无缝监测

（一）检测主路行驶的机动车

该系统通过在平交口部署雷视一体机，监测国省干线主路双向行驶的车辆，考虑到国省干线存在大量车流量较低的路段，从节能的角度出发，整个预警系统设置为触发模式。雷视一体机若检测有车辆经过，系统则进行行人检测，再进行预警。若无车辆经过，整个系统进入休眠模式，节约能耗。

雷视一体机提供基于视频与雷达融合的车辆位置精确检测。通过将雷达检测技术与人工智能图像识别技术相互融合，可实时追踪车辆的坐标位置，对雷达波束覆盖范围内车辆的轨迹跟踪式检测。不受光线与气象条件的影响，可在夜间、雨天、雾天等能见度低的环境下正常工作。

单台雷达最远检测距离可达 500 米，通过对每台雷达位置精确定位，多台雷达建立统一的坐标系，在重叠区域通过坐标位置的匹配，实现相邻雷达对同一车辆目标的实时稳定跟踪。该技术极大的提升了国省干线公路交通流

状态与交通事件检测范围，实现整个路段检测范围的连续覆盖，使得开展整个路段范围内车辆微观行为、宏观交通流运行风险状态分析成为可能。

（二）检测行人、摩托车、农用车

业界主流的红外摄像机可广泛应用于需要大范围高清画质视频采集的路段。普遍采用深度学习算法，提供精准的人车分类报警。可提前设定无信号控制平交口的报警区域，摄像头进行区域入侵检测，若有行人、摩托车、农用车进入报警区域，进行入侵信息的输出。

3.2.3 瞬时边缘计算

在本系统中，需要对无信号控制平交口进行实时的支路过街风险预警分析，故建设边缘计算平台 MEC（Multi-Access Edge Computing）。前端雷视一体机及各类型摄像头传回的速度、坐标、车道编号、车辆类型、视频画面等数据，通过边缘计算平台 MEC 进行 AI 算法分析，判断进入平交口区域的行人、摩托车、农用车及其行驶轨迹等，对 AI 判断出碰撞可能性大的事件，进行预警信息的输出。

部署边缘计算平台可以解决网络的延迟、拥塞和安全等问题。应用服务和内容部署在本地边缘，可以减少数据传输环节，提高数据安全性，降低端到端时延，减少带宽占用，并降低功耗。在本系统中，各个平交口会产生大量视频数据，低时延、低带宽占用、低功耗的特性，使得边缘计算技术更适合解决国省道平交口的数据处理需求。

5G 时代，各类新业务对带宽、时延、安全性等方面的需求越来越苛刻，云计算的集中部署方式已经无法满足业务需求，边缘计算平台 MEC 正好提供计算能力的下沉。车联网正是这类复杂、对时延要求苛刻的新业务之一，

MEC 成为车联网解决方案的重要组成部分。MEC 一方面通过灵活的部署，可以让云端业务更靠近用户侧进行部署，降低端到端的时延；另一方面，MEC 可以配置丰富的异构计算能力，解决车联网业务中对大量 AI 计算的需求，降低对单车智能的依赖，实现车路协同，实现路侧计算资源的共享。正如本系统中，需要通过 MEC 对平交口的视频数据及时分析，迅速发出预警信号。车端的行驶数据也可提供给 MEC，进行全方位判断，形成更精确的预警信息。

除了本系统中对 MEC 的应用，MEC 与车联网的融合场景可按照“路侧协同”与“车辆协同”的程度进行分类。

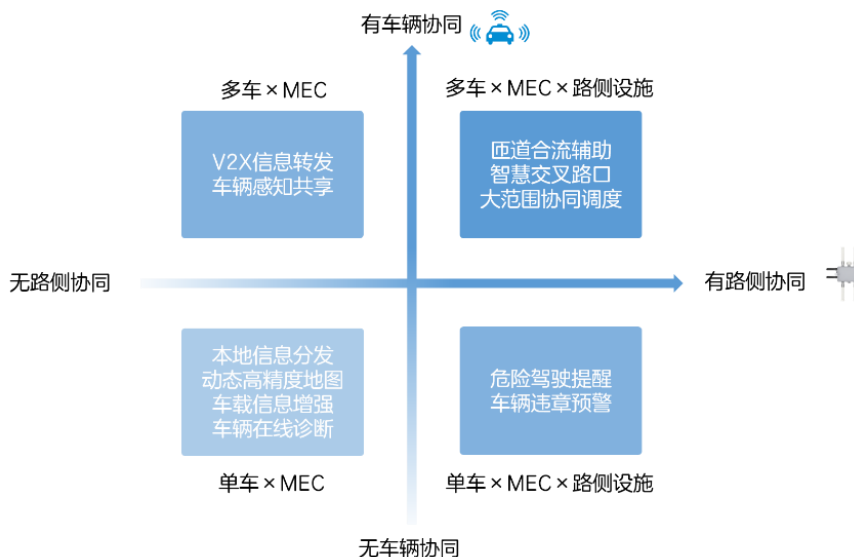


图 3-4 基于 MEC 的车路协同应用

MEC 与车联网融合具有网络信息开放、低时延、本地服务等特性。不同的车联网场景可能需要其中某一个或数个方面的能力；同一个车联网场景也可能通过 MEC 与不同通信技术的组合来实现。

（一）网络信息开放

在网络管理允许的情况下，MEC 能够承载网络信息开放功能，通过标准化接口开放边缘网络的实时状态信息，包括无线网络信息、位置信息、用户信息等。例如，在车联网的应用中，对高精度定位的需求较大，利用 MEC 的

位置信息开放可以辅助车载终端实现快速定位，有效提高定位效率和精度。另外，利用 MEC 开放的无线网络信息也可以对 TCP 传输的控制方法进行优化，有效规避高清视频等多媒体数据传输过程中发生的网络拥塞。

（二）低时延

MEC 运行在靠近用户终端的网络边缘位置，能够显著降低车联网业务的传输时延、提供强大的计算与存储能力、改善用户体验。例如，驾驶安全类车联网业务对通信时延提出了苛刻的要求，将此类业务部署在 MEC 上，相比部署在中心云上可以显著降低业务响应时间。另外，MEC 也可以为车载/路侧/行人终端提供在线辅助计算功能，实现快速的任务处理与反馈。

（三）本地服务

MEC 具备本地属性，可以提供区域化、个性化的本地服务，同时降低回传网络负载压力；也可以将接入 MEC 的本地资源与网络其它部分隔离，将敏感信息或隐私数据控制在区域内部。例如，在平交口场景中，MEC 可以融合和分析多个路侧及车载传感器采集的数据，并对大量数据提供实时、精确和可靠的本地计算与分析。

3.2.4 可靠网络传输

在本系统中，边缘计算平台输出的预警信息，通过有线网络传输至路侧可变显示屏，通过车联网传输至车载大屏。各类前端摄像头采集的平交口视频数据，可通过 5G 网络传输至边缘计算平台进行预警分析，也可传输至交通大数据中心进行存储。

（一）5G 网络覆盖方案

国省干线公路使用宏基站进行覆盖，尽量利旧现网站址新建 5G 站点，在现网覆盖不足的区域，在公路沿线新建站址，站点交错部署在公路两侧，有利于信号的均匀分布，同时可以改善切换区域覆盖，为减小多普勒频移的影响，建议站点离道路垂直距离在 10~20 米之间。站点尽量部署在内拐弯。天线挂高高度为 10~15 米以上。如下图所示：

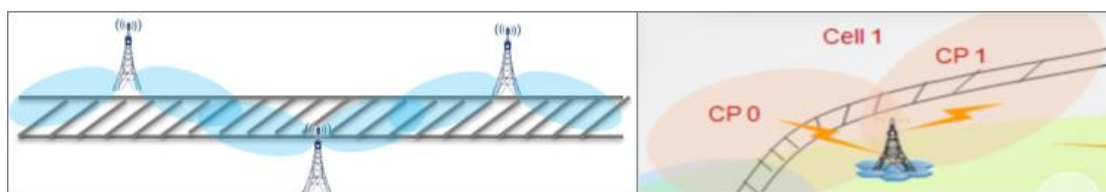


图 3-5 国省干线公路 5G 网络覆盖示意图

（二）C-V2X 网络覆盖技术

业界主流的 RSU 覆盖范围为 800 米~1000 米，实际部署时，RSU 的部署间隔可根据现场环境进行调整。

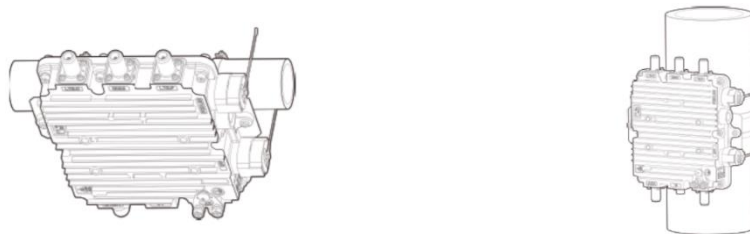


图 3-6 RSU 的 2 种安装方式，横杆和竖杆

3.2.5 醒目安全预警

（一）可变显示屏



图 3-7 路边可变显示屏

在主干道两个方向距离交叉口 300 米处分别安装可变的动态 LED 显示器，用来提前提醒主干道上车辆支路的交通情况。该设备采用“组合设计、综合控制”的原则，集成“黄闪灯、动态预警信息、可变限速、路口警示标志”等预警要素，预警显示牌上部分的颜色设置为黑底，红圈，白字，下部分为黄底黑标志。

（二）车载显示屏

在装有 OBU 的车载端，通过车路协同网络，将行人过街信息提前传至车载显示屏，对驾驶员用“近身提醒”的方式，提高驾驶员注意力，降低事故发生概率。



图 3-8 车载显示屏

车联网技术可充分实现“人车路云”的数据交互，使交通出行更安全、更高效。在本场景中，无信号控制平交口实时风险预警系统采集公路重要平交口交通数据。云数据中心对这类数据进行存储、分析，充分发挥数据价值。通过云数据中心，彻底实现信息资源共享、系统互联互通，最终形成成规模、成体系的交通行业大数据集。

3.2.6 部署方案选择

不同地区根据当地部署条件，可选择合适的部署方案。干线公路无信号控制平交口实时风险预警系统提供 3 种部署方案，分别是简配版、车路协同版、5G+车路协同版。

简配版系统造价最低，适合部署在运营商网络条件差，经济不发达地区。该方案通过高清摄像机及边缘计算平台进行平交口行人分析，若有行人出现，通过自建有线网络，在可变指示牌上对过往车辆进行警示。

车路协同版是基于车路协同的预警系统，摄像机数据传输至边缘计算平台进行平交口分析，若支线有行人、摩托车、农用车出现，在可变指示牌上警示的同时。通过雷视一体机判断是否有车辆通过，若有车辆经过，将警示信息通过路边单元 RSU，经车联网传输至车载终端，对干线来往车辆的驾驶员近身提示。若无车辆经过，则不进行提示。

5G+车路协同版是基于 5G+车路协同的预警系统，需要引入运营商网络，系统造价较高，适宜部署在经济发达、网络基础条件好的地区。充分利用 5G 网络大带宽、低时延的特性，在多个交叉口的场景中，将前端高清摄像头的视频数据传输至边缘计算平台，进行分析。除此之外，还可以为驾驶员提供超视距、高精度地图下载等应用。通过建设省级、市级交通大数据中心，采集视频卡口数据、车辆数据，发挥数据价值。

表 3-4 平交口预警系统 3 种版本配置一览表

| 设备 \ 版本 | 简配版 | 车路协同版 | “5G+车路协同”版 |
|----------|-----|-------|------------|
| 高清摄像机 | ● | ● | ● |
| 可变指示牌 | ● | ● | ● |
| 有线网络 | ● | ● | ● |
| 边缘计算服务器 | ● | ● | ● |
| 雷视一体机 | | ● | ● |
| V2X 云控平台 | | ● | ● |
| RSU | | ● | ● |
| OBU | | ● | ● |
| 智能车载终端 | | ● | ● |
| C-V2X | | ● | ● |
| 电子标志标线 | | | ● |
| 路侧传感器 | | | ● |
| 4G/5G 网络 | | | ● |
| 交通大数据中心 | | | ● |

4 展望

改革开放 40 年来，我国公路信息化已取得巨大进步，但仍处于智慧公路发展的起步阶段。根据中交一公院与中兴通讯对行业需求及技术发展的洞察，判断我国智慧公路发展面临的挑战及发展趋势如下：

4.1 挑战

商业模式不成熟。缺乏对用户需求深度洞察的应用，由于 5G 基站价格高、车载 OBU 部署渗透率低等客观条件，导致用户购买服务意愿不强，主要由政府出资建设，所以智慧公路未能大规模普及。

数据安全问题有待完善。公路场景下，数据类型多、链路复杂，涉及信息安全、隐私管理等领域，根据中汽数据有限公司研究表示，不安全生态接口、未经授权访问、系统存在后门、不安全的车载通讯、系统固件可被提取及逆向、存在已知漏洞的组件、车载网络未做安全隔离、敏感信息泄露、不安全加密、不安全配置成为车联网信息安全面临的十大风险。

4.2 趋势

随着云计算、物联网、车联网、5G、人工智能、大数据等技术的发展，整个公路行业正在经历对交通信息与数据的互联互通、挖掘分析阶段，为公路管理者、机动车驾驶员提供多元化服务。

未来，智慧公路发展一方面要紧盯公路当前的迫切需求，另一方面要高屋建瓴，具备前瞻性，紧紧围绕“安全”与“质量”发展，深化信息化技术在公路领域的应用，降低交通事故率，提高公路运营质量，最终实现“零伤亡”、“零拥堵”、“零管制”的智慧公路。