

# 传感器如何赋能公路交通？

九三学社中央科技委副主任、中国传感器与物联网产业联盟常务副理事长 郭源生

当前我国正处于公路交通从“数字化”迈向“智能化”的关键阶段。随着全国高速公路联网里程突破17万公里，桥梁、隧道等关键设施占比超40%，传统人工监测模式已难以应对结构老化、极端天气、交通拥堵等多重挑战，亟须以智能传感器为核心的全域监测体系，支撑公路交通的主动预警、精准养护与车路协同。聚焦桥梁、隧道、路面等核心场景，系统剖析传感器在结构安全、环境预警、通行效率提升中的应用方案，结合北斗定位、C-V2X通信等技术，为公路智能化升级提供可落地的感知层解决方案至关重要。

## 桥梁健康监测：结构安全的传感器应用

桥梁作为公路交通的关键节点，其结构安全直接关系到通行车辆与人员的生命财产安全，需通过部署智能传感器实现桥梁结构参数的长期实时监测，提前1~3个月预警结构损伤，为养护维修提供精准数据支撑，避免桥梁过载坍塌等重大事故发生。

针对桥梁健康监测的核心需求，不同监测指标需匹配特定类型的传感器，其技术参数需满足公路桥梁长期户外服役的环境要求。

其中，位移传感器主要用于

监测桥梁主梁挠度、支座沉降，需具备高精度、低漂移的特性。推荐采用光纤光栅位移传感器，采用全光纤结构，无电磁干扰，适用于跨江、跨谷等强电磁环境的大跨度箱梁桥。相较于传统电阻式位移传感器，其耐疲劳寿命提升至200万次以上，避免频繁更换传感器导致的维护成本增加。

应变传感器用于监测桥梁主梁、桥墩等关键结构的应力集中情况，及时发现混凝土开裂、钢结构应力过载等问题。选用电阻应变式传感器，可精准

捕捉混凝土微小应变，具备温度补偿功能，可消除极端温度对测量精度的影响，适用于北方严寒地区或南方高温高湿环境的桥梁监测。

振动传感器用于监测桥梁的模态频率，识别桥梁共振风险。当车辆荷载频率与桥梁固有频率接近时，易引发共振导致结构损伤。采用压电式振动传感器，当监测到桥梁固有频率变化超过5%时自动触发报警；同时，传感器支持多轴测量，可全面捕捉桥梁在车辆横向、纵向及垂直方向的振动情况，适用于斜

拉桥、悬索桥等易受风荷载影响的大跨度桥梁。

倾角传感器用于监测桥墩倾斜角度，预防桥墩基础冲刷风险。选用MEMS倾角传感器，可直接安装于桥墩侧面，具备低功耗特性，其内置滤波算法，可消除车辆通行产生的振动干扰，确保倾斜角度测量的准确性。

“十五五”时期，桥梁健康监测传感器将向“高精度、自诊断、AI融合”方向升级，进一步提升监测效率与预警准确性。

## 组网与数据应用

公路交通全域监测的核心优势，不仅在于各类传感器的单点精准感知，更依赖于多设备、多场景、多维度的组网联动与数据互通。传统公路传感器多为单点、碎片化部署，存在数据孤岛、覆盖盲区、传输卡顿、组网僵化等问题，无法适配智慧公路全域感知、实时预警、协同决策的发展需求。为此，需依托新一代通信与信息技术，全方位优化传感器组网架构，搭建高可靠、高灵活、全覆盖、智能化的感知网络，打通多源数据传输壁垒，最大化挖掘监测数据价值，为公路智能化管控、车路协同落地、交通主动运维提供核心网络与数据支撑。

空地一体化组网：引入低空无人机、卫星遥感技术，与地面传感器组网形成“空地”立体监测网络——无人机搭载高清摄像头、激光雷达，定期对偏远路段进行巡检；卫星遥感数据用于获取大范围公路沿线气象、地质数据，与地面传感器数据互补，提升监测全面性。

智能自愈组网：开发传感器网络自愈算法，当某台传感器或通信节点故障时（如路侧RSU损坏），自动切换通信路径（如通过相邻RSU转发数据），保障数据传输不中断；同时，支持传感器动态加入/退出网络（如临时部署的施工区域传感器可快速接入现有网络），提升组网灵活性。

边缘云协同深化：推动边缘计算节点与云端平台的深度协同，将部分AI模型（如长期交通流量预测、桥梁使用寿命评估）部署在云端，边缘节点负责实时数据采集与短期分析，云端负责长期趋势预测与宏观决策，形成“边缘快响应、云端深分析”的协同模式，提升数据应用价值。

车网数据双向交互：实现公路传感器组网与车载终端的双向数据传输——传感器网络向车载终端推送实时路况、气象、事故预警信息；车载终端向传感器网络反馈车辆状态（如刹车状态、故障信息），形成“路到车-车到路”的数据闭环，支撑更高阶的车路协同应用（如自动驾驶车辆的协同避障）。

在公路交通传感器组网体系下，海量监测数据涵盖桥梁结构、隧道环境、路面状态、交通流量、气象环境、车辆运行

等多维度类型，各类数据并非独立存在，而是具备极强的关联性、耦合性与互补性。依托统一的智慧公路数据平台，可实现多源异构数据的融合汇聚、关联分析、分类应用与联动赋能，打破传统单一数据维度的监测局限，实现从“单点数据监测”向“全域数据赋能”的升级，全面提升公路交通管控的精细化、智能化、科学化水平。其核心关联应用特征主要体现在以下三方面。

多源数据融合关联，实现全场景态势感知。平台可整合结构监测、环境监测、交通监测、气象监测等各类传感器数据，打破场景数据壁垒。将桥梁形变、隧道气体浓度、路面结冰、道路车流、雨雪天气等异构数据进行融合关联分析，能够精准研判单一数据无法识别的潜在风险，例如结合低温气象数据与路面状态数据，预判道路结冰风险；结合隧道车流数据与空气质量数据，动态调节通风、照明设备，实现全场景、立体化的公路运行态势感知。

时空数据联动关联，支撑动态预警与精准养护。所有传感器采集数据均附带时间、空间坐标属性，平台可基于时空维度对数据进行串联关联，构建公路设施全生命周期数据档案。通过对比不同时段、不同路段的监测数据变化规律，能够精准识别设施老化、性能衰减、路况突变等问题，实现从被动抢修向主动预判、精准养护的转变。同时，依托时空数据联动，可快速定位事故、病害、灾害的发生位置与影响范围，为应急处置、指挥调度、交通疏导提供精准数据支撑。

业务数据闭环关联，赋能全域智慧管控升级。数据平台打通感知数据、运维数据、管控数据、车载交互数据的关联通道，形成“数据采集-分析研判-指令下发-落地执行-数据反馈”的完整业务闭环。一方面，通过传感器监测数据指导公路养护、交通管制、应急预警等业务工作；另一方面，将业务执行结果、车辆反馈数据反向纳入平台分析体系，持续优化监测模型、预警算法与管控策略，不断提升公路交通智能化运营水平，为车路协同、智慧路网、交通全域治理提供坚实的数据支撑。

## 产业现状及未来趋势

近年来，随着公路智能化建设加速，公路交通传感器市场规模持续扩大。据中国智能交通产业联盟数据，2025年我国公路交通传感器市场规模达158.7亿元，同比增长23.4%，其中高速公路领域占比超60%，普通国省道及城市公路领域占比约30%，农村公路领域占比约10%。预计2026-2030年，市场将保持18%~20%的复合增长率，到2030年规模有望突破400亿元，核心驱动因素包括：“十五五”公路智能化专项规划落地、车路协同示范工程向全国推广、极端天气频发推动气象传感器需求提升。

从产业链布局来看，公路交通传感器产业链已形成“上游核心元件-中游传感器制造-下游系统集成与应用”的完整布局。上游核心元件主要涉及芯片、敏感材料、封装组件等。中游传感器制造分为通用传感器与专用传感器两类。下游系统集成与应用主要包括智能交通系统集成商、公路建设养护企业、交通管理部门等。

从区域发展格局来看，产业呈现“东部集聚、中西部跟进”的格局。

东部地区以长三角、珠三角为核心，集聚了超60%的公路交通传感器企业。长三角地区侧重高端传感器研发与系统集成，依托汽车产业、电子信息产业基础，形成“传感器-车路协同-智能交通”全产业链生态；珠三角地区侧重通用传感器制造与物联网通信，凭借供应链优势，实现传感器规模化生产。

中西部地区以北京、湖北、四川为代表，依托高校与科研院所，在专用传感器

研发领域形成特色，同时借助西部大开发、长江经济带等政策，推动传感器在中西部公路建设中的应用。

当前，公路交通传感器产业面临高端技术国产化不足、成本与运维压力大、标准体系不健全等挑战，但随着“十五五”期间国家政策持续加码、核心技术逐步突破、产业链协同深化，未来将实现从“局部智慧”到“全域智慧”的跨越——不仅能支撑高速公路、普通国省道的智能化升级，还将延伸至农村公路、跨界服务低空经济等领域，为提升公路通行效率、保障交通安全、推动交通强国建设提供坚实的技术底座。

从技术突破方向来看，一是核心元件本土化，二是多传感器融合技术升级，三是低功耗与长使用寿命技术发展。从市场拓展趋势来看，一是从高速公路向普通公路延伸，二是从新建公路向存量改造渗透，三是跨界融合应用增多。

在产业生态升级方面，一是产学研用协同深化，二是产业链整合加速，三是国际化发展提速。

在政策支持与引导方面，一是专项政策持续出台，二是标准体系逐步完善，三是数据共享机制建立。

面向未来，公路交通传感器需进一步强化“以需求为导向、以技术为核心、以应用为瓶颈”的发展逻辑，持续突破关键技术瓶颈，降低部署与运维成本，完善标准体系，最终实现“人-车-路-环境”的深度协同，让公路交通更安全、更高效、更智能。

## 隧道安全监测：环境与结构的传感器应用

隧道作为公路交通的特殊封闭场景，其安全监测需兼顾结构健康与通行环境两大维度，需通过智能传感器实现“结构+环境”协同监测，实时预警衬砌损伤、火灾隐患、空气质量异常等风险，保障隧道24小时安全通行。

针对监测的双重需求，需部署结构监测与环境监测两类传感器，其技术参数需满足隧道内潮湿、粉尘多、电磁环境复杂的

服役要求。

第一类是结构监测传感器。其中，裂缝传感器用于监测隧道衬砌裂缝的宽度变化，及时发现结构损伤，推荐采用振弦式裂缝传感器。锚杆应力传感器用于监测隧道围岩支护锚杆的应力状态，预防锚杆松动导致的围岩失稳，可选用光纤光栅锚杆应力传感器。沉降传感器用于监测隧道仰拱的沉降量，防止仰拱沉降导致路面开裂、车辆颠

簸，可采用激光沉降传感器。

第二类是环境监测传感器。其中，一氧化碳(CO)传感器用于监测隧道内CO浓度，避免车辆尾气堆积导致人员中毒，可选用电化学CO传感器。能见度传感器用于监测隧道内烟雾、粉尘导致的能见度下降，预警火灾及行车安全风险，可采用激光散射能见度传感器。路面状态传感器用于监测隧道内路面湿滑、结冰情况，提醒驾驶员减速慢

行，可选用电容式路面状态传感器，能识别干燥、潮湿、积水、结冰四种状态。火灾传感器用于监测隧道内火灾隐患，实现早期预警，可采用红外火焰传感器+烟雾传感器组合方案，当同时检测到火焰与烟雾时触发火灾报警，避免单一传感器误报。

隧道安全监测传感器将向“多参数融合、低功耗、智能联动”方向升级，进一步提升隧道监测的全面性与应急响应效率。

## 路面状态监测：通行效率与安全的传感器应用

路面作为公路交通的基础载体，其状态直接影响行车安全与通行效率。通过智能传感器可实现路面状态的实时监测，及时预警病害风险，支撑精准养护，减少因路面问题导致的交通拥堵与事故。

针对路面状态监测的核心需求，需匹配适用于户外路面严

苛环境的传感器，技术参数需满足路面病害识别精度与实时性要求。

其中，车辙传感器用于监测路面车辙深度，预警高温季节车辆打滑风险。推荐采用激光车辙传感器，可连续测量路面轮迹带的纵向剖面。裂缝传感器用于监测路面横向、纵向裂缝的宽

度与长度，及时发现路面结构性损伤，可选用视觉裂缝传感器，集成高清摄像头与AI识别算法，识别准确率≥95%，适用于长距离干线公路的分段监测。坑槽传感器用于监测路面坑槽的深度与面积，预警车辆爆胎风险，可采用超声波坑槽传感器。路面结冰/积雪传感器用于监测

冬季路面结冰、积雪状态，支撑融雪除冰作业决策，可选用介电常数式结冰传感器，能区分干、湿、雪、冰四种状态。

路面状态监测传感器将向“高精度、自修复、车路协同”方向升级，进一步提升路面监测的智能化水平与对通行效率的支撑能力。

## 车路协同监测：智能化通行的传感器应用

车路协同是“十五五”公路智能化升级的核心方向，旨在通过路侧传感器与车载终端的实时数据交互，实现“人-车-路-云”协同决策，提升公路通行效率与安全水平。传统“车端单独感知”模式存在感知范围有限、决策滞后等弊端。因此，需在路侧部署多类型传感器，实现对交通流量、车辆状态、道路环境的全域感知，并将

数据实时传输至车载终端与云平台，支撑车辆自动驾驶辅助、交通流量智能调控，推动公路交通从“被动管理”向“主动服务”转变。

车路协同对传感器的感知精度、响应速度、数据传输能力要求极高，需满足毫秒级响应、厘米级定位、多目标同时识别等需求。

其中毫米波雷达用于路侧

实时监测车辆位置、速度、行驶方向，支撑车辆碰撞预警，可选用77GHz毫米波雷达，适用于高速公路、城市快速路等复杂交通场景。激光雷达(LiDAR)用于构建路侧三维交通场景，实现高精度车辆轮廓识别、车道线检测，可采用128线固态激光雷达，适用于户外路侧长期部署。高清摄像头用于路侧交通流量统计、违章行为识别及事件检

测，可选用800万像素高清智能摄像头。北斗高精度定位基站采用北斗三号双模定位基站，可在隧道、高架桥等信号遮挡区域保持定位连续性，与路侧传感器组网后，可实现车辆位置与路况数据的精准匹配。

车路协同传感器将向“超融合、低成本、广覆盖”方向升级，推动车路协同从示范段向全国高速公路普及。

能见度低于200米时自动触发雾天预警。

风速风向传感器采用超声波时差法。路面状况传感器采用红外遥感测量技术，可识别路面干燥、潮湿、积水、积雪、结冰、冰水混合6种状态。

多要素一体式气象传感器采用集成二极管结电压法(温度)、电容式(湿度)、压阻式(气压)等多种原理，可同时监测温湿度、气压等基础气象要素，为极端天气综合研判提供数据支撑。

## 公路气象环境监测：极端天气下预警传感器应用

公路交通受气象条件影响极大，极端天气是导致公路拥堵、事故率飙升的重要因素，需在公路沿线部署高密度气象传感器，实现对降水、能见度、路面温度、风向风速、结冰/积雪等气象参数的实时监测，结合预警算

法及时推送道路气象预警信息，支撑交通管制决策与公众出行指引，降低极端天气对公路交通的影响。

其中，能见度传感器的测量原理是采用气溶胶前散射法，可在团雾高发路段密集部署，当能