全息隧道交通智能预警系统在海底隧道中的应用

于忠刚[1]，纪春萌[2]，崔天镭[2]
（1. 中交一航局安装工程有限公司；2. 大连市市政工程质量安全监督站）

摘　要：为了加强隧道内车辆安全隐患管控，对可能存在安全隐患的车辆进行预警、追踪、处置、追溯，研发一套全息隧道交通工程智能预警系统，采用基于雷达、视频融合的多维感知智能融合分析技术结合高精地图和三维模型相融合的隧道数字孪生模型，通过深度学习和交通事件智能分析，打造完整体系的智能隧道监控解决方案，实现全方位管控，全面降低风险，提升隧道安全管理效能。该系统在大连湾海底隧道项目中的应用表明：隧道交通安全管理水平得到了显著提升，有效减少了交通事故的发生，并为隧道事故的快速处理和责任判定提供有力支持。

关键词：全息隧道；智能预警；海底隧道；雷达；视频监控；系统平台

0　引言

随着我国经济的高速增长，为满足社会发展的需求，城市隧道、山体隧道、水下隧道等各类隧道的建设发展迅速。目前，我国每年各类隧道新建数量增长率高达 20%，已成为世界范围内隧道建设数量最多，通车里程最长的国家[1]。但随着隧道数量的增加，尤其是长、大隧道的增多，也使得隧道交通事故出现多发、加重趋势，给隧道的安全运行带来了极大的挑战。由于我国在公路隧道营运管理、事故处置、抢险救援等方面的研究起步较晚，缺乏相关经验和解决办法，致使公路隧道内重特大交通事故特别是隧道内重特大火灾事故屡有发生，造成大量人员伤亡和经济损失。因此，建立健全良好的隧道安全行车环境成为了公路业界关注的重点。

全息隧道交通工程智能预警系统的开发旨在提升隧道安全风险管控效能，构建一套完整的智能化隧道监控解决方案。与传统模式相比，该系统通过感知设备与态势监测数据的联动，实现从全域治理到精细化管理的过渡，有效提升全息路网的场景精细化和应用协同化。系统包含事前预防、事中处置和事后回溯的全息路网行车安全管理应用，助力减少交通事故的发生，并提升隧道运营单位的应急处置能力。

1　系统技术应用原理

雷达视频融合的多维智能感知技术通过深度融合雷达、可见光视频等传感器技术，实时感知隧道交通信息，获取包括路况、车辆位置、车流数据及隧道内外交通状况等应用数据[2]。该技术的核心目的是提升隧道安全风险管控效能，构建智能化隧道监控解决方案，推动感知设备与态势监测数据与全域交通管理的联动，从而实现精细化管理与全域治理。系统涵盖事前预防、事中处置、事后回溯的全息路网行车安全管理，助力道路安全运营，减少交通事故，并提升应急处置能力。与传统隧道监控模式相比，全息隧道交通工程智能预警系统通过构建隧道交通数字孪生体系，结合泛感知体系、边缘计算、云计算、大数据分析和高精度地图数据，实现全时、全量、全要素、全天候的精细化感知和治理。系统能够基于实时动态时空数据，采集和分析车辆轨迹数据，建立多维度的交通运行评估体系，服务于交通治理场景，优化信控，并改善实际管理问题。同时，系统能够全天候记录车辆运行冲突点，实时监测逆行、超速等安全事件，及时预警并主动响应，辅助事故定责与快速处置，提升隧道交通安全预防治理能力。

隧道数字孪生技术可通过场景空间位置信息建立三维模型，对孪生隧道实景细致展示，对道路标线、区域等创建真实质感模型，实现多感应器融合感知[3]。将实际隧道场景中车辆的行驶轨迹、位置等进行展示，精准定位，详尽回溯隧道事件。车路协同级别车辆接力跟踪技术主要以高清视频画面结构化与动态目标追踪技术为基础，将虚拟画面与现实环境建立匹配关系，并将不同空间位置的摄像机按照与特勤线路建立匹配关系，

使得车辆追踪能够跨设备、跨面面、无缝化、零盲区、无延迟连贯追踪，实现危险车辆的隧道前连续视频跟踪与事件告警。交通事件智能分析技术由线性或非线性变换的处理单元组成，且具有层次结构，通过构建多层神经网络结构，模仿人脑对信息进行分析和处理[4]。通过数据驱动的自动迭代，完成高效的交通事件智能分析算法，实现自主提升和效果优化的交通事件智能分析技术。

2　系统构成

2.1　硬件选型

全息隧道交通工程智能预警系统包括前端子系统、传输子系统以及后端平台。前端子系统实现对车辆特征数据预警、车辆轨迹跟踪接力。通过传输子系统将各前端设备间获取的数据打通，并按需传输到后端平台子系统，实现各类数据的汇聚、分析、展现、存储等功能。

通过 3 个子系统的建设和互联互通，实现隧道行车安全管理系统的业务应用[5]。

新建全息隧道平台实现车辆全息感知，包括区间及实时测速感知子系统和隧道态势感知子系统。区间及实时测速感知子系统主要是设置卡口抓拍单元，实现区间测速功能。抓拍记录设备分别设置在区间进站口，用于记录特征信息和通过车辆的时间。区间测速软件根据特定车辆的属性信息，结合已知的区间距离，对车辆进出区间的时间进行整合，将区间进出口点的设备统一管理，进行测速。如果有超速行为的车辆会被自动记录并触发警报，系统会自动计算车辆在该区间内的平均行驶速度，并与相应车型的限速值进行比较。自动合成车辆驶过封闭区间进出口处与区间测速数据的实景抓拍画面，并进行叠加。隧道态势感知子系统由雷视测序一体机、卡口抓拍单元以及测序终端服务器组成，主要实现基于背向的车辆检测与轨迹跟踪、车辆识别及特征提取、跨场景车辆匹配、拥堵检测、速度检测、交通参数检测、异常停车检测、非机动车/行人检测等功能。

2.2　前端设备布置

前端设置雷视测序一体机用于感知路段隧道车辆，雷视安装于隧道靠内侧(快车道上方)洞壁上的预设机电设备安装支架上，每隔 200 m 设置 1 台，单台可管理 4 条车道，采集的数据通过光缆上传到机房交通网。在隧道口距离第一台雷视 70 m 处部署 1 台卡口抓拍单元，与第一台雷视存在 30 m 左右的重叠监测区域，通过测序终端根据视域范围内车辆的时空关系关联到同一车辆，卡口抓拍单元安装于隧道路面两侧洞壁上的预设机电设备安装支架上。采用 1 台 900 万像素的抓拍单元覆盖 3 个车道(国标宽度 3.75 m)，保证视场范围的全覆盖，除了能够捕获在车道上正常行驶的车辆外，还具备捕获跨线行驶车辆的功能。抓拍单元与补光灯安装在同一根立杆上，立杆高度一般为 6 m，900 万像素抓拍单元投影位置与触发位置相距 24 m。

2.3　软件系统

软件基于全息路网态势监测系统，主要提供城市、辖区、道路、路口交通态势全息监测，识别拥堵道路、异常路口、交通事件，构建实时预警机制。全息路网安全态势，对路网安全态势实时监测预警并统计当日安全事件类型及数量。事件类型包括路口冲突点、急加速、急减速等 15 类事件[6]；全息路网交通流态势，显示路网活跃流量、路网进入、流出流量，同时对路网交通流按照重型货车、中型客车、小型轿车和其他类型进行分类并展示其数量。

基于地图展示道路起终点和交通流向，并对重点道路通行能力排名，展示道路名称、路段起终点、理论通行能力、实时流量、平均车速。支持对当日道路实际交通流量、理论通行能力和近 2 个月最大流量的对比分析，以及当日平均车速的变化趋势分析。拥堵溯源对隧道拥堵点溯源分析车流来源与去向，为交通流疏导提供大数据支持，并可指导道路网格优化。

基于地图展示道路名称、路线位置、进出口分布，动态演示道路历史流量变化，分析任一出口的流量来源入口名称及流量占比、流量去向的区域名称及流量占比。路网安全评价模块提供路网静态渠化诊断、路网安全事件统计、路口动态交通事件检测、道路动态交通事件检测等服务，提供事件上报接口。主要检测事件包括疑似事故、蛇形驾驶、违规变道、违规停车、大货车右转、三急一速、冲突点等，可回放事件的轨迹和视频。

系统平台开发遵循模块化、框架化、集群化、服务化的设计理念，以实现各种系统的接口整合、应用兼容和可持续发展需求为目标，提升系统的稳定性、扩展性和维护性。平台按照不同的功能模块进行部件划分，每个部件之间的界限清晰，

接口和流程设计固定，系统复杂度明显简化。坚持实用性第一的原则，系统应最大限度地满足隧道行车安全管理各项业务要求以及系统管理人员和使用人员的业务需求，适应新技术的发展，同时降低建设费用。

3　系统架构体系与功能

全息隧道路网形成了四横一纵的架构体系，如图 1 所示。“四横”自下而上分别为数据层、指标层、算法引擎层及应用服务层；“一纵”为平台统一运维管理。



图 1　四横一纵构架体系

1）数据层：通过前端感知及边缘计算设备提供相应能力，实时解析视频、雷达数据，输出车辆高频、高精轨迹数据，包括车牌、车速、位置、属性和行驶姿态。

2）指标层：基于高精轨迹数据和高精地图数据构建路网、进出口、流向、车道多个空间维度的指标评价体系，全面有效地支撑拥堵评价指标、流量评价指标、运行效率指标、安全评价指标及信控评价指标体系的建立。

3）算法引擎层：依托地图引擎及大数据分析引擎进行交通分析模型构建及场景分析。

4）应用服务层：提供具体交通业务场景分析，主要包括交通态势监测研判、路网流量监测研判、交通安全评价以及交通信控优化评价等服务，助力隧道交通综合治理。

四横一纵的架构体系实现的功能主要包括：

1）数字全息隧道功能：通过场景空间位置信息还原，构建数字孪生隧道实景细节刻画，实现道路标线、路域真实纹理模型搭建，展示真实场景下车辆过车轨迹和位置，实现高精度定位和高还原回溯隧道事件，同时提升隧道行车管理的精细化程度。

2）实时车辆跟踪功能：对目标车辆在车道上的探测跟踪并获取完整轨迹，采用视频图像处理技术、雷达探测技术和视频雷达集成技术。对车辆目标进行实时监控，同时向高精度地图和图像输出车辆的真实位置，实现在同一画面下的连续追踪。

3）交通事件检测功能：通过视频、雷达、线圈等数据，自动识别交通事故、拥堵、车辆停驶、逆行、抛洒物等异常事件，实现实时报警、定位与分类，帮助交通管理中心快速响应，降低拥堵和二次事故风险。

4）交通态势感知功能：通过建立涵盖隧道全域的综合多维度车流指标的隧道交通运行指标评价体系，将雷达视频一体机获取的流量数据进行整合计算分析，对不同空间粒度的流量、速度、拥堵情况、服务水平等指标进行监测和显示，如隧道入口、隧道内部区段、隧道出口等，以便管理人员对隧道运行状况进行实时了解。为实现隧道交通精细化管理，为高速运营管理部门提供数据支撑，剖析隧道交通问题根源，制定相应管控措施。

5）数据概览功能：通过图表直观地呈现隧道特征基因，如路上行驶的车辆总量、不同车辆类型的数量、交通流量的变化趋势以及交通事件的统计等信息为管理人员提供工具，全面掌握隧道车况。

6）事件回放功能：通过将视频轨迹数据与事件关联，将所关联事件的历史进程以纪录片的形式还原给用户，实现跨画面目标按时间进度连续追踪，演示车辆在重点路段的轨迹，事件发生的全过程。

4　工程应用

全息隧道交通智能预警系统已经在大连湾海底隧道项目中得到了成功应用。

大连湾海底隧道工程充分利用海域空间构建大连市区南北交通新格局，旨在改善大连城市主干道的交通状况，工程全长 5.1 km，通过大连港码头间港池向北以沉管隧道形式下穿海域，顺接光明路，隧道为 18 节跨海预制沉管结构组成，双向六车道，设计时速 60 km/h。通过全息隧道交通智能预警系统的应用，有效提高了交通管控效率和应急处置能力。

本项目建立全线三维实景地图、高精地图、二维地图及道路平面示意图相结合的坐标统一的多维综合显示数字底盘，供全息路网应用场景使用。根据不同应用的展示效果与最佳视角需求，在应用中灵活切换各类地图，实现三维与二维、实景与虚拟融合展现，形成隧道数字交通孪生。用户可通过地图服务平台便捷、快速地使用和管理自己的数据资源，包括自有业务数据、地图方案、各类地图服务；可以将多元业务数据进行融合发布，通过地图的方式进行统一展示管理。同时，平台还提供在线制图和创建应用的能力，通过内置的多套地图模版，帮助用户实现业务数据的快速上图，配置专属的行业应用地图，支持地图方案的一键发布，实现组织机构内部的资源协同共享。在项目应用中实现以下功能：

1）实时监控与预警：该系统能够实时监测隧道内的交通状况，包括超速、逆行、拥堵等安全事件。一旦出现异常，系统会立即发出警报，通知隧道管理人员进行干预。系统通过前端的雷视测序一体机和卡口抓拍单元等设备，能够在车辆通过时精准捕捉其行驶速度和轨迹，对超速行为进行自动识别并触发警报。

2）交通流量与安全管理优化：通过多维感知技术，系统实现了对隧道内车辆流量的精准分析。管理人员可以通过系统平台实时了解隧道的交通流量、车速和其他关键指标，进而优化信号控制，提升交通管理效率。尤其在高峰时段或事故频发时，系统能够有效调节车流，缓解拥堵，提高隧道通行能力。

3）应急处置和事故回溯：在发生交通事故时，系统能够及时提供事故现场的实时视频和轨迹回放，帮助快速准确地判定事故责任，同时为后续的事故调查和处理提供有效支持。

5　结语

本文通过全息隧道交通工程智能预警系统的设计与应用，深入分析该系统的技术特点和功能架构，通过多维智能感知、数字孪生技术、车路协同技术等先进方法，实现隧道内交通安全的实时监测、精准预警和高效应急响应。与传统监控模式相比，该系统通过集成前沿的感知设备、数据分析和计算技术，为隧道管理提供了更加精细和智能化的解决方案，具有显著的实践意义和应用价值。

尽管研究在隧道安全管理系统的设计与功能应用方面取得了一定成果，但仍存在待改进之处，包括：1）在前端设备的安装和数据采集方面，未来研究的重点仍是进一步优化设备布局，以提高数据采集的准确性和全面性。2）系统的兼容性与扩展性在应对不断变化的隧道交通环境时，可能面临一定的挑战，因此在系统的可持续发展上还需要进一步探讨。3）本研究虽然提供了多种技术方案和应用场景，但在实际操作中如何确保系统稳定运行和持续优化，还需要进行更多的实地验证与试验。

未来的研究可进一步探索如何将该系统与智能交通系统、智慧城市等宏观框架相结合，提升整体交通安全保障能力。同时，随着隧道建设的不断发展，系统的应用场景将不断扩展，系统的功能也有望进一步增强，为我国隧道交通安全管理领域提供更加坚实的技术支撑。

参考文献：

[1] 沈志云. 交通运输工程学[M]. 北京：人民交通出版社，2008.
[2] 黄卫，陈里德. 智能运输系统[M]. 北京：人民交通出版社，2008.
[3] 史其信. 21 世纪的智能交通系统 ITS 下[J]. 交通世界，2001(4)：30–33.
[4] 史忠植. 智能科学[M]. 北京：清华大学出版社，2006.
[5] 周伟. 计算机在高速公路管理工作中的应用研究[J]. 中国新通信，2015，17(7)：94.
[6] 王振业. 关于我国高速公路管理现状的研究[J]. 交通世界(工程技术)，2015(3)：44–45.