

高速公路团雾天气下主动安全预警系统设计研究

刘文君

山东高速威海发展有限公司 山东 威海 264200

摘要: 本文聚焦高速公路团雾天气下主动安全预警系统设计研究。先阐述团雾形成机制、特点及危害,接着从传感器、数据处理与分析、预警模型与算法三方面介绍系统设计理论基础,详细说明系统分层架构及各层设计要点,包括感知层布局、网络层架构、数据处理层协同模式、应用层功能模块。最后阐述系统在团雾监测、数据传输存储、预测与风险评估方面的功能实现,为保障高速公路团雾天气行车安全提供有效方案。

关键词: 高速公路;团雾天气;主动安全预警系统;系统设计

1 高速公路团雾天气特征及危害

1.1 团雾的形成机制

团雾的形成是多种气象条件与地理环境共同作用的结果,核心在于水汽饱和与稳定层结的构建。首先,充足的水汽是基础,高速公路沿线若存在湖泊、河流、稻田等水体,或雨后地面湿度饱和,会持续向近地面大气输送水汽,使空气相对湿度达到90%以上。其次,逆温层是关键触发条件,夜间地面辐射冷却导致近地面气温下降,当上层空气温度高于下层时,形成逆温层,抑制空气垂直对流,使水汽难以扩散。再者,地形与地貌会加剧团雾形成,高速公路经过桥梁、隧道出入口、低洼路段时,气流通受阻,水汽易在局部聚集^[1]。另外,昼夜温差大的季节更易出现团雾,尤其是秋冬季节的清晨,地面辐射降温强烈,逆温层厚度增加,水汽迅速饱和凝结成微小水滴,形成浓度较高的团雾。

1.2 团雾的特点

团雾具有显著区别于普通雾的鲜明特点,对高速公路行车安全构成极大威胁。其一,局地性强,团雾多集中在直径数百米至数千米的小范围区域,往往在一段高速公路上局部出现,周围天气可能晴朗,使得驾驶员难以提前预判。其二,突发性高,团雾形成时间短,通常在夜间或清晨快速生成,从水汽聚集到形成能见度低于200米的团雾仅需十几分钟,驾驶员来不及做出反应。其三,浓度不均且能见度极低,团雾内部能见度多在50米以下,部分区域甚至不足20米,同时雾滴浓度分布不均,会出现能见度骤升骤降的情况。其四,持续时间不稳定,短则十几分钟,长则数小时,受风向、光照等因素影响,消散时间难以预测。其五,发生时段集中,多出现于夜间22时至次日清晨8时,此时高速公路交通流量虽有所减少,但驾驶员易疲劳,对团雾的感知和应对能力下降。

2 高速公路团雾天气下主动安全预警系统设计的理论基础

2.1 传感器技术

传感器技术是主动安全预警系统感知团雾的核心支撑,通过多种传感器协同工作实现对团雾相关参数的精准采集。能见度传感器是核心设备,采用散射式测量原理,通过发射特定波长的激光,检测激光遇到雾滴后的散射光强度,进而换算出能见度数值,其测量范围覆盖10米至2000米,可满足团雾不同浓度的检测需求。温湿度传感器用于采集近地面大气温度和相对湿度数据,为团雾形成条件判断提供基础参数,采用电容式测量原理,温度测量精度为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,湿度测量精度为 $\pm 2\%\text{RH}$ 。风速风向传感器采用超声波原理,实时监测风速和风向变化,判断团雾的移动趋势,风速测量范围为0至60m/s,风向测量精度为 $\pm 3^{\circ}$ 。另外,部分系统还配备路面状况传感器,通过微波反射原理检测路面是否因团雾伴随积水或结冰,进一步完善安全预警参数。

2.2 数据处理与分析技术

数据处理与分析技术是实现团雾精准识别和预测的关键,通过多环节处理将原始数据转化为有效预警信息。数据预处理阶段主要完成数据清洗、去噪和标准化,采用卡尔曼滤波算法消除传感器采集数据中的随机噪声,通过异常值检测算法剔除因设备故障导致的错误数据,再将不同传感器的异构数据(如能见度、温湿度、风速等)转换为统一格式和量级^[2]。数据融合阶段采用多源数据融合技术,结合贝叶斯估计理论,将不同传感器采集的同一参数数据进行融合,提高数据可信度,同时融合交通流量数据,分析团雾对交通流的影响。数据挖掘阶段运用时间序列分析、关联规则挖掘等算法,挖掘能见度变化与温湿度、风速等参数的关联关系,提取团雾形成和发展的特征规律,为预警模型提供数据支

撑。整个处理过程采用边缘计算与云计算协同模式，边缘节点实现实时数据预处理，云计算中心完成大规模数据深度分析，确保数据处理的实时性和准确性。

2.3 预警模型与算法

预警模型与算法是主动安全预警系统的核心大脑，实现团雾的精准预测和风险等级评估。团雾预测模型采用机器学习与传统气象模型结合的方式，基于历史监测数据（能见度、温湿度、风速等）和历史团雾发生记录，训练随机森林回归模型，实现对未来1至3小时内的能见度变化预测，预测精度可达85%以上。对于短期实时预警，采用阈值判断与趋势分析结合的算法，设定能见度阈值（如200米、100米、50米），当传感器检测到能见度低于对应阈值且呈下降趋势时，触发相应等级的预警。风险评估算法综合考虑团雾浓度、持续时间、影响范围以及交通流量、车辆行驶速度等因素，采用层次分析法确定各因素权重，建立风险评估指标体系，将风险等级划分为一般、较重、严重、特别严重四个等级。

3 高速公路团雾天气下主动安全预警系统架构设计

3.1 系统总体架构

系统采用分层架构设计，自上而下分为感知层、网络层、数据处理层和应用层，各层之间职责清晰、协同联动，确保系统功能的高效实现。感知层作为数据采集终端，部署在高速公路沿线关键路段、桥梁、隧道出入口等易发生团雾的区域，通过各类传感器实时采集能见度、温湿度、风速风向等环境参数以及交通流量、车辆行驶状态等交通参数。网络层承担数据传输任务，通过有线以太网与无线4G/5G、C-V2X通信技术结合的方式，构建高速、可靠的通信网络，实现感知层数据向数据处理层传输以及处理层预警信息向应用层推送。数据处理层是系统的核心处理单元，由边缘计算节点和云计算中心组成，边缘节点负责实时数据预处理和短期预警判断，云计算中心负责大规模数据存储、深度分析和长期预测。应用层面向不同用户群体提供服务，包括面向驾驶员的车载预警终端、面向高速公路管理部门的监控平台以及面向交通警察的执法辅助系统，实现预警信息的多渠道推送和可视化展示。整个架构采用模块化设计，具备良好的扩展性和兼容性，可根据实际需求增减设备和功能模块^[3]。

3.2 感知层设计

感知层采用“定点监测+移动补充”的布局模式，实现对高速公路团雾的全面、精准感知。定点监测设备按照“5公里间隔、关键区域加密”的原则部署，在普通路段每5公里设置一个监测站点，在桥梁、隧道出入口、低

洼路段等易发生团雾的区域，将监测间隔缩短至1至2公里。每个监测站点配备能见度传感器、温湿度传感器、风速风向传感器和交通流量检测器，部分站点增设路面状况传感器。移动监测主要通过安装在巡逻车和运营车辆上的车载传感器实现，车载传感器可实时采集行驶路线上的能见度和环境参数，弥补定点监测的覆盖盲区。感知层设备采用工业级设计标准，具备防水、防尘、抗低温、抗电磁干扰等性能，可适应高速公路零下30℃至60℃的极端温度环境以及暴雨、暴雪等恶劣天气。

3.3 网络层设计

网络层采用“骨干网+接入网+车联网”的三级架构设计，确保数据传输的高效性和可靠性。骨干网采用光纤以太网，连接各边缘计算节点和云计算中心，传输速率为1000Mbps，采用双链路冗余设计，当一条链路出现故障时，另一条链路自动接管，保障核心数据传输的连续性。接入网负责将感知层设备的数据接入骨干网，对于定点监测站点，采用有线以太网接入，对于移动监测设备和偏远区域的定点站点，采用4G/5G无线通信接入，无线接入采用流量控制和数据压缩技术，降低通信成本。车联网采用C-V2X通信技术，包括路侧单元（RSU）和车载单元（OBU），路侧单元部署在监测站点和高速公路出入口附近，与车载单元进行实时通信，实现预警信息向车辆的精准推送。网络层配备网络管理模块，实时监测网络运行状态，包括带宽占用率、链路连通性、数据传输延迟等，当出现网络拥堵或故障时，自动调整传输策略，优先保障预警信息的传输。

3.4 数据处理层设计

数据处理层采用“边缘计算+云计算”的协同处理模式，兼顾数据处理的实时性和深度分析需求。边缘计算节点部署在高速公路沿线的监测站点附近，采用工业级服务器，具备较强的实时数据处理能力。边缘节点的主要功能包括数据预处理（清洗、去噪、标准化）、实时预警判断（基于阈值和短期趋势）以及数据缓存，对于紧急预警信息，可直接通过车联网推送至车辆，缩短预警延迟，延迟时间控制在1秒以内。云计算中心部署在高速公路管理中心，采用分布式服务器集群，具备大规模数据存储和深度分析能力。云计算中心的功能包括数据永久存储（存储周期为3年）、历史数据挖掘（分析团雾发生规律）、长期预测（预测未来1至3天的团雾发生概率）以及模型优化（根据新数据优化预警模型参数）。边缘计算与云计算之间通过骨干网进行数据同步，边缘节点将预处理后的历史数据定期上传至云计算中心，云计算中心将优化后的模型参数下发至边缘节点，实现两

者的协同联动。

3.5 应用层设计

应用层面向不同用户群体设计专用功能模块,实现预警信息的精准推送和高效应用。面向驾驶员的车载应用模块,通过车载终端(OBU)接收预警信息,采用语音提示和显示屏弹窗的方式提醒驾驶员,信息内容包括团雾位置、浓度、持续时间以及建议行驶速度,同时与车辆自适应巡航系统联动,当预警等级较高时,自动降低车辆行驶速度。面向高速公路管理部门的监控平台模块,采用可视化界面展示全路段团雾监测数据、预警信息和交通流状态,支持地图缩放、区域选择等操作,管理人员可通过平台发布交通管制指令、调度巡逻车辆和应急救援设备。面向交通警察的执法辅助模块,实时推送团雾区域的交通违法信息(如超速、应急车道占用),辅助交警开展精准执法,同时提供团雾区域的交通流量统计数据,为交通疏导决策提供支持。

4 主动安全预警系统的功能实现

4.1 团雾监测与数据采集

团雾监测与数据采集靠感知层设备协同达成,采集全面、实时且精准。系统启动,传感器自动工作,能见度传感器每0.5秒采集一次能见度数据,温湿度与风速风向传感器每1秒采集一次,交通流量检测器每2秒采集交通流量、车速和车型数据。定点监测站点的传感器将数据实时传至附近边缘计算节点,移动监测设备车载传感器通过4G/5G网络传至最近边缘节点。系统有数据质量控制功能,边缘节点实时校验数据,超出正常范围(如能见度为负、风速超60m/s)则标记剔除并触发自检。连续3次异常,系统向管理平台发设备故障报警。另外,支持手动采集,管理人员可远程控制传感器密集采集,用于专项监测分析。

4.2 数据传输与存储

数据传输与存储靠网络层和数据处理层协同实现,保障数据安全稳定传输与可靠存储。传输采用“实时+批量”模式,能见度低于200米的预警和设备故障数据实时传输,走高优先级通道;普通数据每30秒打包批量传输,降低带宽占用。传输中用AES加密算法加密,防篡改

窃取,还有校验码验证确保完整性。存储采用“边缘缓存+云端存储”,边缘节点缓存7天实时数据供快速查询和短期分析;云计算中心用分布式数据库存历史数据,容量超100TB,存3年,支持快速查询^[4]。系统有备份功能,云计算中心每天凌晨增量备份,每周全量备份,备份数据存异地服务器防丢失。

4.3 团雾预测与风险评估

团雾预测与风险评估借助数据处理层的预警模型和算法,为用户提供精准信息。团雾预测分短期和长期,短期由边缘计算节点完成,基于最近30分钟实时数据,用优化后的随机森林模型预测未来1小时能见度变化,每5分钟更新结果;长期由云计算中心实现,基于历史数据和气象预报,预测未来1-3天团雾发生概率和影响区域,每天更新两次。风险评估结合预测结果和实时交通数据,用层次分析法算风险值,划分四个等级:一般、较重、严重、特别严重风险,对应不同能见度和交通流量情况。系统自动推送预警和评估结果至对应模块,为驾驶员、管理人员和交警提供决策支持。

结束语

高速公路团雾天气严重影响行车安全,主动安全预警系统的设计研究具有重要意义。本文通过深入剖析团雾特征与危害,构建了涵盖多技术领域的系统设计理论基础,并完成了系统架构与功能设计。该系统实现了团雾的精准监测、高效数据传输存储以及准确预测与风险评估。未来,随着技术不断发展,系统将进一步优化完善,提升高速公路在团雾天气下的安全保障能力,减少交通事故发生。

参考文献

- [1]马瑾,李薇,罗忠祥,施泽.暴雨团雾多发公路交通工程设施设置技术[J].交通节能与环保,2022,18(04):148-151.
- [2]李明,王强.高速公路隧道气象监测技术研究[J].交通运输工程学报,2020,20(4):45-52.
- [3]张华,刘杰.智能交通控制系统在隧道安全管理中的应用探讨[J].公路交通科技,2021,38(6):112-118.
- [4]卢振礼,杨成芳,郑宗杰,等.高速公路团雾分级预警研究[J].气象与环境科学,2022,45(1):103-111.