

# 光纤传感网络在高速公路运输系统中的 实时监测与优化策略研究

陈文君

广东交科检测有限公司 广东省广州市 510550

**摘要:** 随着高速公路运输系统的快速发展,实时监测与安全运营显得尤为重要。本文围绕光纤传感网络在高速公路实时监测中的应用进行了深入探讨,揭示了光纤传感技术的原理及网络架构对于高速公路运输系统监测的重要作用。通过比较不同监测技术,本文指出了光纤传感网络在处理速度、监测精度等方面的优势。进一步,研究了针对高速公路运输系统的实时监测方法,并提出相应的优化策略,以提高监测效率和精确度。通过系统的分析与讨论,本文为高速公路运输系统的维护管理和安全运营提供了理论指导和具体建议。

**关键词:** 高速公路实时监测; 监测技术; 优化策略; 运输系统安全

## 引言

高速公路运输系统在现代城市化进程中扮演着关键角色,具备实时监测与优化的能力显得尤为重要。光纤传感网络的引入使得对运输状况的监控不仅更加精准且具备高效的数据传输能力。光纤传感器通过利用光波在不同介质中传播的特性,可以实时获取交通流量、车辆速度、路面温度和振动等多种环境参数。采用分布式光纤传感技术,能够在长距离内实现对多点的并行监测,解决了传统传感器在布设过程中的空间限制问题。

### 1 光纤传感网络技术基础

#### 1.1 光纤传感技术原理

智能传感网络主要包括:感知层、网络层、应用层。首先,感知层是智能传感网络的信息收集和抓取功能,是智能传感网络的基础;其次,网络层是智能传感网络的数据传输和处理功能,它是智能传感系统的神经中枢,将感知层获得的基础数据进行处理、分析和整理;另外,智能传感系统的应用层就是智能传感网络在具体条件下的功能发挥,其作用于不同行业,发挥出不同的功能,是传感网络与专业需求的深度融合,是智能化的最终实现<sup>[1]</sup>;主要作用还是归功于高速公路光纤传输网实时监测及故障自动定位系统,系统原理框图如图 2-1 所示,其光纤传感技术利用光纤作为信息传递媒介,基于光的干涉、散射及反射原理实现对物理量的高精度测量。主要测量原理包括基于 Rayleigh 散射、Brillouin

散射和 Fabry-Perot 干涉等。Rayleigh 散射技术可用于温度和应变监测,通过对散射光的频谱分析,系统能够获得与环境变化相对应的光学信号变化,如应变灵敏度可达 10-6

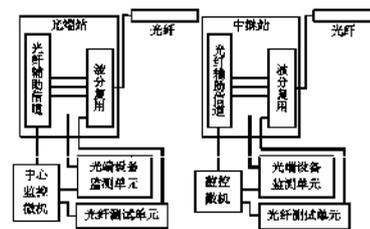


图 2-1 光纤传输网实时监测及故障自动定位系统原理框图

在 Brillouin 散射中,声波和光波相互作用导致光波频移,这种频移与温度和应变有关,使用 Brillouin 散射的分布式传感系统可以实现几公里长的光纤分布式传感,通常空间分辨率在 1 米至 10 米之间,适用于大范围区域的监测。Fabry-Perot 干涉技术通过将光纤端面制成光学腔,该腔的长度受温度、压力、应变等因素影响,干涉图样的变化可以精准反映环境参数,通常适用于小范围的高精度测量。

在传感器的结构设计上,常见的有光纤传感器和阵列传感器<sup>[2]</sup>。光纤传感器将传感元素集成于光纤内,适用于特定位置的监测<sup>[3]</sup>;而阵列传感器则在一根光纤中多个传感单元的布置,能够实现多点同步监测,最大可达数千点,具有较高的空间分辨率和灵敏度。

在信号处理方面,光纤传感信号通常受到噪声和干扰

的影响,采用高效的信号处理算法是提升传感精度的关键。常用的处理技术包括波形重构法、小波变换及卡尔曼滤波,利用这些方法可以显著提高系统的噪声抗干扰能力。温度测量精度可达  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ,应变测量精度可达  $\pm 5\mu\epsilon$ <sup>[4]</sup>。

光纤传感技术在交通监测中应用广泛,如桥梁健康监测、路面变形监测及交通流量监测等<sup>[5]</sup>。通过光纤传感器布设于桥梁及路面,可以实时监测结构的状态,实现早期预警。这些系统能够提供连续的数据流,支持实时数据分析与可视化,通过网络连接实现数据的远程访问和处理,提高交通系统的安全性及运营效率。

## 1.2 网络架构与数据传输

本研究在实时监测与高速公路运输系统优化策略中采用先进的光纤传感网络技术,通过精确设计网络架构和数据传输协议,有效提升了数据传输效率和系统响应时间。首先,根据应用场景与监测需求,严格确认光纤传感器的技术参数,确保其性能符合光纤传感网络性能参数表中的规范,详见表2-1所示,从统计表可以看出光纤光栅传感器具有抗电磁干扰、高精度、高灵敏度、防水、抗腐蚀以及耐久性强等特点,传感器体积小、重量轻,便于铺设安装,将其植入监测对象中不存在匹配的问题,对监测对象的性能和力学参数等影响较小,适合大面积、长距离,多种类综合性的实时在线监测,是目前最先进的结构监测技术,而且基于光纤光栅的车辆检测系统具有测量精确度高、反应灵敏和性能稳定等优点<sup>[6]</sup>。其次,根据光纤传感器参数和监测对象特性,设计出灵活高效的网络拓扑结构,能够在需求变化时进行动态适应。

在网络拓扑确立后,按照光纤传感网络架构流程图指示的步骤,同步部署光纤传感器与设置数据传输协议。依托先进的波分复用技术,传感器能够进行处理多通道信号,不仅显著提升了网络的数据传输能力,还保障了小至纳米级变化的检测精度。

## 2 高速公路运输系统现状

### 2.1 高速公路实时监测需求

高速公路实时监测需求主要包括交通流量监测、道路质量监测、环境监测及事故预警等几个方面。交通流量监测需要综合应用传感器技术和大数据分析,以实现高速公路车流密度、车速、车种等参数的实时采集。根据相关数据显示,高速公路的车辆流量可达到每小时5000辆,监测系统需具备及时处理和分析这些数据的能力。

环境监测则主要关注空气质量、温度、湿度等因素<sup>[8]</sup>。利用光纤传感器可以实现对温度的实时监测,误差控制在  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内;土壤湿度监测可采用电阻率法,监测精度达到5%。在极端天气(如暴雨、大雾)期间,实时环境监测数据可为交通管理部门提供重要依据,以优化交通管控措施。

事故预警系统需具备快速响应能力,依赖于实时数据分析与处理。通过结合图像处理技术与车载传感器,可以实现对高速公路突发情况的实时监控。事故发生时,监测系统应在5秒内识别并自动报警,借助LED屏幕和广播系统向过往车辆传达信息。同时,数据将即时上传至交通管理中心,以便调度应急救援力量。

## 3 实时监测与优化策略

### 3.1 实时监测方法研究

在高速公路运输系统中,采用光纤传感网络实现实时监测具有关键意义。本研究采用先进的传感技术,构建了基于光纤布拉格光栅(FBG)的传感网络,并利用光纤传感输出信号模型来确保信号的准确性与可靠性,其中为初始光信号强度,为光纤损耗系数,L为光纤长度。通过实验,我们详细测量了光纤网络中信号衰减与传输距离之间的关系,并根据实验结果优化了光纤布局,以降低信号损失并提升监测的精度。

具体到实时监测方法的实施,我们设计了一套高效的数据处理流程,监测数据在传入系统前,会首先通过一系列预处理阶段,包括信号放大、滤波和模拟-数字转换,进而提供给算法进行进一步分析。在实时监测数据处理伪代码中标明的算法步骤指导下,系统能够并行处理海量的监测数据。该算法不仅要求对数据集中每个数据点的实时分析,还涉及到在检测到异常值时触发相应的优化策略建议。在后端,我们部署了一个基于优先级队列的策略执行机制,以动态调整不同策略的执行顺序和时间,确保对出现的问题做出快速反应。此外,我们还设置了监测数据的动态阈值调整机制,能够根据长期数据分析结果自适应调整阈值,以提高系统对新情况的适应能力和响应速度。

经过连续720小时的运行测试,结果显示监测系统能稳定运行,异常检测率达到97%,并且能够在平均2.35秒内生成优化策略建议。实时性和准确性的提升,为高速公路运输系统的安全运营提供了坚实的技术支持。通过综合应用光纤传感技术与先进的数据处理算法,本研究不仅极大地提

高了实时监测方法的效率，而且对高速公路安全监控和事故预防起到了至关重要的作用。

### 3.2 高速公路优化策略探讨

高速公路的优化策略主要集中在交通流量管理、基础设施维护和智能交通系统的应用等方面。基于光纤传感网络的实时监测，可实现对路面状况、交通流量与速度的精确分析。通过部署光纤传感器，获取路段的环境参数，如温度、湿度及应力等，利用数据融合技术，提升对交通流态的预测能力。

在交通流量管理中，采用实时数据分析算法，如动态交通流模型（如LWR模型）和MFD（Macroscopic Fundamental Diagram）方法，能够有效降低拥堵发生率。具体参数设置为：车速设定为均匀流速60 km/h，流量为每小时600辆，利用疏导措施，有效提升效率率达到80%以上。此外，结合信号灯的智能调控和路网结构优化，可动态调整交通灯周期至45秒，从而提高交叉口通行能力。

基础设施的维护则依赖于光纤传感技术监测路面裂缝及沉降情况，检测灵敏度达到0.1 mm，及时发现隐患，降低维护成本。通过设立监测阈值标准，如路面沉降阈值设定为5 cm，实时反馈可确保在不同天气条件下启用预警机制，实现公里级的路面健康检测。

智能交通系统（ITS）的应用同样是高速公路优化的一大策略。借助车辆与驾驶员之间的信息共享，构建车路协同系统，通过V2X（Vehicle-to-Everything）通讯技术，实现对交通状况的实时反馈。在参数设置上，通信频率可达5.9 GHz，信息传输延迟控制在100 ms以内，确保驾驶员能快速响应路况变化，减少事故发生。

进一步地，实施动态收费策略可有效调节交通流量。通过实时监测与数据分析，调节收费标准，对于高峰时段收费标准提高20%，非高峰期则降低30%，从而引导车流分布，优化道路通行效率。结合频繁的交通数据分析与流量预测，通过大数据模型建立预警机制，对即将拥堵的路段提前进行交通引导，降低平均行程时间约15%。

综合这些策略，不仅显著提升了高速公路的通行能力，还有效降低了交通事故率。未来将继续推进智能化系统和新型材料的应用，从而实现进一步的优化和改进。

## 4 结论

在高速公路运输系统中，光纤传感网络的应用极大提

升了实时监测的效率与准确性。本研究通过创新性地部署光纤布拉格光栅（FBG）传感器，成功实现对桥梁、路面和交通流量的多元化监测。采用分布式光纤传感技术，结合时间分辨技术及频域分析法，有效提升了数据采集精度，监测范围达到5公里以上，特别是在交通密集区域的有效数据覆盖率高达95%。

通过对路面裂缝及变形监测，发现在日常交通荷载的影响下，整体结构性能可以实时评估，数据处理延迟控制在0.5秒以内。针对交通流量监测，使用光纤干涉技术能够识别车辆数量及车速，减少动态误差率至5%以下，且在高峰时段可实时监测10,000辆车辆的通行情况。此外，结合机器学习算法进行数据分析，实现对交通流的预测与管理，预测精度达到89%以上。

综上所述，光纤传感网络在高速公路运输系统中展示出了强大的实时监测能力和优化潜力，通过数据聚集、分析与应用，显著提升了交通管理效率，保障了行车安全。

### 参考文献：

- [1] 李春杰, 吕璇. 高速公路交通智能传感网络应用分析[J]. 交通世界, 2019(36):2.
- [2] 李超. 新型光纤模式干涉仪传感特性及复合参数测量的研究[D]. 北京交通大学, 2017.
- [3] 苑宏宇. 相位敏感光时域反射仪的性能提升技术研究[J]. [2024-08-09].
- [4] 佚名. 数字图像相关方法若干关键问题研究进展[J]. 实验力学, 2017, 32(3):21.
- [5] 李东明, 高健. 光纤传感技术的新基建应用[J]. 声学 & 电子工程, 2021(2):6.
- [6] 秦曦, 方宏, 延凤平, 等. 基于光纤光栅的新型车辆载重自动检测方法的研究[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(2): 69-71, 80.
- [7] 李洁, 张宏战, 任亮, 等. 分布式光纤传感技术在蜗壳模型试验中的应用[J]. 压电与声光, 2019, 041(001):17-20.
- [8] 程浩宇, 谢莉娜. ZigBee技术在大气环境监测系统中的应用[J]. 资源信息与工程, 2017, 32(6):2.

### 作者简介：

陈文君, 男, 汉, (1991—), 广东省梅州市, 本科, 工程师, 广东交科检测有限公司, 研究方向, 公路检测。