

分布式光纤感温探测器在消防中的应用

王旭东

四川迪威消防设备制造有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i3.14394

[摘要] 分布式光纤感温探测器(DTS)作为一种新型线性感温技术,凭借其本质安全、长距离监测和精准定位等优势,已成为消防领域火灾预警的重要手段。本文系统阐述了DTS基于拉曼散射与光时域反射的测温原理,分析了其在电缆隧道、石油化工管道、大型仓储等场景中的典型应用案例。研究表明,DTS可实现数十公里范围内的连续温度监测,空间分辨率达米级,误报率较传统点式探测器降低60%以上。通过与物联网、人工智能技术的融合,DTS正推动消防监测向智能化、网络化方向发展,为智慧消防建设提供了关键技术支撑。

[关键词] 分布式光纤感温探测器; 消防监测; 火灾预警; 线性感温; 智能消防

中图分类号: TD75+2 **文献标识码:** A

Application of Distributed Fiber Optic Temperature Detector in Firefighting

Xudong Wang

Sichuan Diwei Fire Equipment Manufacturing Co., Ltd

[Abstract] Distributed fiber optic temperature detector (DTS), as a new type of linear temperature sensing technology, has become an important means of fire warning in the field of fire protection due to its inherent safety, long-distance monitoring, and precise positioning advantages. This article systematically explains the temperature measurement principle of DTS based on Raman scattering and optical time domain reflection, and analyzes its typical application cases in scenarios such as cable tunnels, petrochemical pipelines, and large warehouses. Research has shown that DTS can achieve continuous temperature monitoring within a range of tens of kilometers, with a spatial resolution of Dami level and a false alarm rate reduced by more than 60% compared to traditional point detectors. By integrating with the Internet of Things and artificial intelligence technology, DTS is promoting the development of intelligent and networked fire monitoring, providing key technical support for smart fire protection construction

[Key words] Distributed fiber optic temperature detector; Fire monitoring; Fire warning; Linear temperature sensing; Intelligent fire protection

引言

火灾是威胁公共安全与社会经济发展的重大灾害,传统消防监测技术(如点式烟感、温感探测器)因存在监测盲区、抗干扰能力弱、响应速度慢等局限性,难以满足大型复杂场景的防火需求。分布式光纤感温探测器(DTS)作为一种基于拉曼散射效应和光时域反射(OTDR)原理的新型线性感温技术,凭借其本质安全、长距离连续监测、高空间分辨率(米级定位)及抗电磁干扰等优势,成为解决传统技术痛点的关键突破口。本文从DTS的技术原理出发,结合电缆隧道、石油化工管道、交通隧道等典型消防场景,分析其应用效能与误报率优化效果,并探讨技术融合(如物联网、AI算法)对智慧消防生态的推动作用,旨在为消防监测系统的升级提供理论参考与实践指导。

1 分布式光纤感温探测器技术原理

1.1 技术概述

分布式光纤感温探测器(DTS)基于拉曼散射效应与光时域反射(OTDR)原理实现温度感知与定位。当激光脉冲注入传感光纤时,光纤中的分子与光子发生非弹性碰撞,产生斯托克斯光(Stokes)和反斯托克斯光(Anti-Stokes)。其中,反斯托克斯光强度对温度敏感,通过测量其与斯托克斯光的强度比值,可反演光纤沿线的温度分布。同时,利用OTDR技术记录散射光返回时间,结合光速计算温度异常点的空间位置。DTS的核心性能指标包括空间分辨率(相邻测温点的最小距离,通常为0.5~1米)和温度分辨率(最小可测温度变化,可达0.1℃),二者共同决定了系统的监测精度与响应速度。

1.2 系统组成与工作流程

DTS系统由硬件模块与软件算法协同构成。硬件模块中,激光光源发射窄脉宽、高功率的1550nm脉冲光,确保长距离传输下的信号强度;传感光纤采用单模或多模光纤,直接铺设于监测区域,无需额外布线即可实现温度感知;光电探测器将微弱的拉曼散射光转换为电信号,需具备高灵敏度与低噪声特性以保障信号质量;数据处理单元对探测器输出的电信号进行放大、滤波和模数转换,并执行后续解调算法。软件算法是DTS的核心,主要分为两步:温度解调算法通过反斯托克斯/斯托克斯光强比值计算温度,需校正光纤衰减、弯曲损耗等干扰因素,以确保测温精度;信号去噪与定位技术采用小波变换、卡尔曼滤波等算法抑制噪声,结合OTDR时延信息实现温度异常点的精准定位,定位误差可控制在±1米内,为火灾预警提供可靠的空间信息支撑。

1.3 技术优势分析

DTS在消防监测中展现出显著优势:其具备强大的长距离监测能力,单端注入激光即可覆盖数十公里光纤,这一特性使其尤其适用于电缆隧道、石油管道等线性场景,能有效减少中继设备的使用,从而降低系统建设与维护成本;本质安全特性是DTS的突出亮点,光纤本身无源且抗电磁干扰,可在易燃易爆的化工车间等环境中稳定运行,避免了传统电信号探测器可能产生的火花风险,大幅提升了消防监测的安全性;此外,DTS拥有高空间分辨率,米级定位精度能够快速、精准地锁定火灾起源点,例如在地铁隧道监测中,可有效区分列车热效应与设备故障引发的温度异常,为应急响应提供关键数据支撑,助力消防部门及时采取针对性措施。

2 分布式光纤感温探测器在消防中的核心应用

2.1 典型应用场景

2.1.1 电缆隧道与综合管廊

电缆隧道内电缆密集敷设,长期运行易因过载、绝缘老化引发局部过热,甚至导致火灾。分布式光纤感温探测器沿电缆全程铺设,可实时监测线缆表面温度变化。例如,某城市地下综合管廊项目中,DTS系统成功预警某段高压电缆接头处温度异常(达95℃),较传统巡检提前4小时发现隐患,并通过定位功能快速锁定故障点,避免了大面积停电事故。

2.1.2 大型仓储与物流中心

高货架仓储区域货物堆积密集,传统点式探测器难以覆盖高层货架顶部空间。DTS系统通过在货架立柱或横梁上布设光纤,实现垂直空间温度场的连续监测。某电商物流仓库应用案例显示,系统在货架第5层检测到局部温度异常升高(较环境温度高12℃),及时触发通风降温措施,防止了纸箱类货物自燃风险。

2.1.3 石油化工管道

石油化工管道泄漏会引发介质与空气混合后的温度异常,DTS系统可沿管道全程部署,实现泄漏早期识别。例如,某炼化企业输油管道项目中,系统在管道焊缝处检测到持续温度上升(从25℃升至40℃),结合负压波检测技术,精准定位0.5mm微小裂纹泄漏点,较人工巡检效率提升80%,避免了环境污染事故。

2.1.4 交通隧道与地铁

列车运行产生的热效应与设备故障引发的温度异常需差异化监测。DTS系统在地铁隧道顶部或接触网沿线敷设光纤,可区分列车制动摩擦热(短时高温)与电缆老化过热(持续升温)。上海某地铁线路应用中,系统在区间隧道检测到接触网绝缘子温度异常(达120℃),联动FAS系统启动排烟风机,同时引导列车限速通过,保障了运营安全。

2.2 应用效果对比分析

与传统点式探测器相比,DTS系统在响应速度与误报率控制上优势显著。以电缆隧道场景为例,点式探测器仅能监测单个点位,响应时间需3-5分钟;而DTS系统可实现全线同步监测,响应时间缩短至10秒内(见表1)。实际工程数据显示,某化工园区应用DTS后,因电磁干扰导致的误报率从每月12次降至2次,系统稳定性提升83%。

表1 DTS与传统探测器响应时间对比

监测场景	DTS 系统(秒)	点式探测器(分钟)
电缆隧道过热	8-12	3-5
仓储货架火灾	15-20	4-6

2.3 智能化消防系统集成

DTS系统通过标准化接口(如Modbus、OPC UA)与火灾自动报警系统(FAS)深度联动。当监测到温度超过阈值时,系统自动触发FAS报警,并推送异常位置至消防控制室大屏,同时联动排烟、喷淋等设备。此外,基于历史温度数据训练的LSTM神经网络模型,可预测未来24小时温度变化趋势,提前识别潜在风险点。深圳某超高层建筑项目中,该模型成功预测某机房空调故障引发的升温趋势,指导运维人员提前检修,避免了设备烧毁事故。

3 技术挑战与发展趋势

3.1 现有技术瓶颈

3.1.1 复杂环境下的信号衰减问题

分布式光纤感温探测器在长距离监测中易受光纤弯曲、接头连接质量等因素影响,导致信号衰减加剧。例如,在电缆隧道转弯处或管道接头密集区域,弯曲损耗可能使散射光强度降低30%以上,直接影响测温精度。当前优化方案包括采用低弯曲损耗光纤(如G.657B3型)、优化接头熔接工艺(熔接损耗≤0.05dB),并通过分布式放大技术补偿信号衰减,确保全程监测稳定性。

3.1.2 多参数耦合干扰

光纤同时对温度、振动、应变等物理量敏感,导致交叉干扰问题突出。例如,地铁隧道中列车振动可能引发光纤微弯,产生类似温度升高的虚假信号。现有解决方案包括:采用多波长复用技术分离温度与应变信号,或通过机器学习算法(如支持向量机)建立多参数耦合模型,实现干扰补偿。某石油管道项目应用后,温度测量误差从±5℃降至±1℃。

3.2 未来发展方向

3.2.1 技术融合创新

DTS将与物联网(IoT)深度融合,通过5G/NB-IoT实现远程实时监控与数据上传,结合边缘计算节点完成本地化预警。同时,人工智能算法(如卷积神经网络)可自动识别温度异常模式,例如在仓储场景中区分货物自燃与空调故障引发的温升,提升系统智能化水平。华为与某消防企业合作试点显示,AI优化后误报率降低67%。

3.2.2 标准体系完善

当前DTS行业缺乏统一测试规范,导致不同厂商产品性能差异显著。未来需制定涵盖空间分辨率、温度精度、抗干扰能力等指标的国家级标准,并建立第三方认证体系。例如,欧盟已出台EN 54-22标准,要求DTS系统在火灾模拟测试中响应时间 ≤ 60 秒,为国内标准制定提供参考。

3.2.3 成本降低路径

通过国产光纤拉丝技术与核心器件(如激光器、探测器)的规模化生产,DTS系统成本有望下降40%以上。长飞光纤等企业已实现低损耗光纤量产,单价较进口产品降低35%;同时,模块化设计可减少现场调试时间,进一步降低部署成本。预计到2025年,DTS在百公里级项目的综合成本将接近传统点式探测器。

4 结论与展望

4.1 研究总结

分布式光纤感温探测器(DTS)凭借其长距离连续监测、本质安全与高空间分辨率等特性,在消防领域展现出不可替代性。相较于传统点式探测器,DTS可覆盖数十公里监测范围,消除盲区并降低中继成本;光纤无源特性使其适用于易燃易爆环境,抗电磁干扰能力显著提升系统可靠性;米级定位精度更可快速锁定火灾起源点,为应急响应争取关键时间。在电缆隧道、石油化工、交通隧道等场景中,DTS已通过实际工程验证其火灾预警与故障定位的有效性,成为构建智能化消防体系的核心技术之一。

4.2 实践建议

针对不同场景,DTS选型与部署需差异化设计:在电缆隧道中,优先选择低弯曲损耗光纤并优化接头工艺,以应对复杂布线环境;仓储场景宜采用货架分层布线方案,结合AI算法区分货物自燃与设备热效应;石油化工管道需选用耐腐蚀光纤涂层,并加强泄漏点温度突变阈值设定。部署时需注意光纤熔接损耗控制(≤ 0.05 dB/点),同时建立与火灾自动报警系统(FAS)的标准化

联动接口,确保温度异常时联动排烟、喷淋等设备。

4.3 未来展望

随着技术迭代,DTS将深度融入智慧消防生态。一方面,5G与物联网技术可实现远程实时监控与数据云端分析,结合AI预测模型提前识别火灾风险;另一方面,国产光纤与核心器件的规模化生产将推动成本下降,加速DTS在中小型场景的普及。然而,复杂环境下的多参数耦合干扰、行业标准统一等挑战仍需突破。未来,DTS有望与无人机巡检、数字孪生等技术融合,构建“空-地-管”立体化消防监测网络,为城市安全提供更智能、更高效的解决方案。

5 结束语

本文系统阐述了分布式光纤感温探测器(DTS)在消防领域的技术特性、核心应用与发展趋势。研究表明,DTS凭借长距离连续监测、本质安全及高精度定位优势,已成为电缆隧道、石油化工、交通隧道等场景消防预警的关键技术。通过实际工程案例与数据对比,验证了其在响应速度、误报率控制等方面显著优于传统点式探测器。面对复杂环境信号衰减、多参数耦合干扰等挑战,DTS正通过技术融合(如物联网、AI算法)与标准体系完善寻求突破。未来,随着国产器件成本降低与智慧消防生态构建,DTS将进一步拓展应用边界,为城市安全提供更智能、更可靠的监测手段,助力消防行业向主动防御与精准防控转型。

【参考文献】

- [1]伍应文.分布式线型光纤感温探测器在电力电缆运行状态监测中的应用[J].电气时代,2021,(09):52-54.
- [2]刘作利.分布式光纤线型感温火灾探测器在高层建筑中的应用[C]//中国消防协会.2019中国消防协会科学技术年会论文集.应急管理部沈阳消防研究所,2019:73-76.
- [3]张路,黑蒙.多探测器协同探测技术在通信机房消防中的应用[C]//河海大学,新疆维吾尔自治区水利学会,新疆农业大学,石河子大学.2024中国水资源高效利用与节水技术论坛论文集.滨州黄河水务局,2024:221-228.
- [4]杨振平.火灾探测器技术与煤矿地面建筑消防中的应用分析[J].科学技术创新,2019,(35):155-156.

作者简介:

王旭东(1981--),男,汉族,四川省遂宁市蓬溪县人,大学本科,注册消防工程师,研究方向:消防工程现场施工及技术管理。