分布式光纤传感技术在水利隧洞结构健康监测中的应用

严　勇
深圳市原水有限公司　广东　深圳　518000

摘　要：本文聚焦分布式光纤传感技术在水利隧洞结构健康监测中的应用。阐述了水利隧洞结构健康监测的重要性，分析了传统监测技术的局限性。介绍了分布式光纤传感技术的原理与技术分类。探讨了该技术在水利隧洞监测中的具体应用，涵盖温度、应变、裂缝监测及火灾预警。通过实际案例分析，展示了该技术的可行性与有效性。最后，对技术面临的挑战进行了分析并提出了应对策略，同时展望了其未来发展方向。

关键词：分布式光纤传感技术；水利隧洞；结构健康监测；技术优势

引言

水利隧洞是水利工程关键，承担输水调水重任，其结构健康影响工程安全与效率。近年水利工程建设规模扩大，隧洞数量增多、结构复杂，受多因素影响易出现裂缝等问题，威胁安全运行。传统监测依赖点式传感器，存在监测范围有限、布设难、维护成本高、无法连续实时监测等缺点。分布式光纤传感技术作为新型传感技术，能分布式、长距离监测，抗干扰、耐腐蚀，可全生命周期连续实时监测隧洞，提高准确性可靠性，保障安全运行，具重要价值。

1 水利隧洞结构特点

水利隧洞通常位于地下或山体中，其结构特性及工作条件决定了它具有以下特点。

从结构方面来看，隧洞是处于岩层中的地下建筑物，与周围岩层密切相关。在岩层中开挖隧洞后，会破坏原有的平衡状态，引起洞孔附近应力重新分布，导致岩体产生新的变形，严重时甚至会导致岩石崩塌。因此，隧洞中常需要设置临时性支护和永久性衬砌，以承受围岩压力。围岩除了会产生作用在衬砌上的围岩压力外，还具有一定的承载能力，可以与衬砌共同承受内水压力等荷载[1]。围岩压力与岩体承载能力的大小主要取决于地质条件，所以做好隧洞的工程地质勘探工作至关重要，应尽量使隧洞避开软弱岩层和不利的地质构造。

在水流方面，枢纽中的泄水隧洞进口多在水下深处，属深式泄水洞，泄水能力与作用水头H的1/2次方成正比，H增大时泄流量增大慢，但进口低可提前泄水、提高水库利用率，常配合溢洪道泄洪。因水头高、流速大，若隧洞体型或衬砌不佳易气蚀破坏，要求设计施工良好。其出口冲刷力强，须消能防冲。灌溉隧洞多无压，可按需设计形式，但同一洞段要避免明满流交替，以防不利流态。施工方面，隧洞是地下建筑物，与地面建筑物相比，洞身断面小，施工场地狭窄，洞线长，施工作业工序多、干扰大、难度也较大，工期一般较长。尤其是兼有导流任务的隧洞，其施工进度往往控制着整个工程的工期。因此，采用新的施工方法，改善施工条件，加快施工进度和提高施工质量在隧洞工程建设中需要引起足够的重视。

2 分布式光纤传感技术原理与分类

2.1 技术原理

DFOS技术基于光波在光纤中的散射效应，通过分析背向散射光（RBS）的强度、频率、相位等参数变化，实现对外界物理场的感知。光纤中主要存在三种散射机制：①瑞利散射：由光纤折射率不均匀性引起，散射光频率与入射光相同，对振动敏感，常用于振动监测。②布里渊散射：光子与光纤中的声学声子相互作用产生，散射光频率发生偏移（布里渊频移），其变化量与光纤应变和温度呈线性关系，是应变/温度监测的核心机制[2]。③拉曼散射：光子与光纤分子热运动相互作用产生，散射光分为斯托克斯光（频率低于入射光）和反斯托克斯光（频率高于入射光），两者强度比与温度相关，用于分布式温度监测。

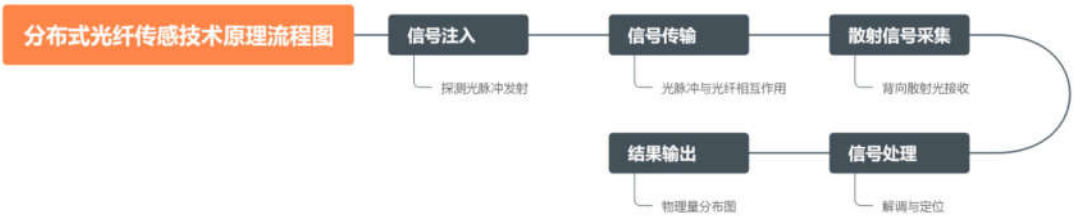

图1　分布式光纤传感技术原理流程图

2.2 技术分类

根据散射机制与信号解调方式，DFOS技术可分为以下类型：

表1 DFOS技术分类

技术类型	核心原理	关键参数	典型应用场景
BOTDR（布里渊光时域反射）	基于自发布里渊散射，采用直接检测	应变/温度分辨率：±10με/±1℃	隧洞长期应变监测
BOTDA（布里渊光时域分析）	基于受激布里渊散射，采用泵浦-探测光	空间分辨率：0.1-1m	高精度隧洞变形监测
DTS（分布式温度传感）	基于拉曼散射强度比	测温范围：-50℃~+120℃	隧洞渗漏定位与火灾预警
DAS（分布式声波传感）	基于瑞利散射相位变化	振动频率范围：0-10kHz	

3 分布式光纤传感技术在水利隧洞监测中的具体应用

3.1 温度监测

在水利隧洞中，温度的变化可能会影响隧洞结构的稳定性和安全性。例如，温度过高可能导致混凝土膨胀，产生应力，进而引发裂缝；温度过低则可能使混凝土收缩，同样对结构造成不利影响。分布式光纤传感技术可以通过拉曼散射效应实现对隧洞内温度的分布式测量。以新疆石门子碾压砼拱坝为例，在该拱坝内设置了分布式光纤温度监测系统。由于分布式光纤监测测点多，信息量大，能够准确测定光纤沿线任一点的温度，较全面地反映了大坝温度场的分布情况。通过实时监测拱坝的温度变化，工程人员可以及时了解拱坝的热胀冷缩情况，评估温度对拱坝结构的影响，为拱坝的安全运行提供重要依据。在水利隧洞中，同样可以借鉴这种应用方式，将分布式光纤沿隧洞轴线或周边布置，实时监测隧洞内的温度分布，及时发现温度异常区域，采取相应的措施保障隧洞结构的安全。

3.2 应变监测

水利隧洞在运行过程中，会受到内水压力、围岩压力等多种荷载的作用，导致结构产生应变。如果应变超过一定限度，就会对隧洞结构造成损伤。分布式光纤传感技术可以通过布里渊散射效应实现对隧洞结构应变的分布式测量。布里渊光频域分析（BOFDA）技术是一种常用的应变测量方法[3]。在布伦纳基线隧道项目中，通过BOFDA技术检测传感光纤网络，该技术能够在几分钟内完成长达25km的分布式测量，空间分辨率为0.5m，应变可重复性约为2-10μm/m，具体取决于传感光纤的性能。在水利隧洞中，可以将分布式光纤嵌入隧洞结构内部，如衬砌中，实时监测隧洞结构在不同荷载作用下的应变变化。通过对应变数据的分析，可以评估隧洞结构的受力状态，及时发现结构的薄弱环节，为隧洞的维修和加固提供依据。

3.3 裂缝监测

裂缝是水利隧洞结构常见的病害之一，裂缝的出现和发展会严重影响隧洞的结构安全。分布式光纤传感技术可以通过监测光纤的微弯损耗来检测隧洞结构的裂缝。当光纤所处部位结构出现裂缝时，光纤会产生微弯，光在光纤弯曲段中传输时会产生较大的能量辐射，即微弯损耗效应，表现为光功率下降。利用瑞利散射原理和光时域反射仪（OTDR），对后向散射光加以接收、分析，可以检测出微弯损耗出现的部位，并得出衰减波形，从而确定裂缝的位置。例如，在古洞口面板堆石坝周边缝面板间缝设置了准分布式光纤测缝计监测系统，通过监测获得了光纤测缝计埋设处缝宽变化的较好效果。在水利隧洞中，可将分布式光纤布置在隧洞容易产生裂缝的部位，如隧洞的顶部、两侧等，实时监测裂缝的出现和发展情况，为隧洞的安全评估提供数据支持。

3.4 火灾预警

水利隧洞内一旦发生火灾，将会造成严重的后果。分布式光纤传感技术可以通过拉曼散射效应实现对隧洞内温度的实时监测，从而进行火灾预警。基于拉曼散射的分布式光纤测温系统具有测量距离长、测温精度高、定位精确等优点。当隧洞内某区域发生火灾时，该区域的温度会迅速升高，分布式光纤测温系统能够及时检测到温度的异常变化，并在短时间内发出火灾预警信号。例如，汕梅高速公路北斗至清潭段隧道群安装使用了分布式光纤温度监测火灾报警系统，经过包括火盆试验在内的各种试验，证明系统反应灵敏、数据可靠、报警位置准确。经过半年多来的运行结果显示，系统运行正常稳定，达到了预期的效果。在水利隧洞中引入分布式光纤测温系统，可以有效提高隧洞的火灾预警能力，减少火灾造成的损失。

3.5 隧洞渗漏定位与评估

渗漏是隧洞运营期的常见病害，长期渗漏会导致混凝土碳化、钢筋锈蚀，甚至引发衬砌剥落。DFOS技术通过拉曼散射效应，可实现渗漏点的精准定位与渗漏量评估。在隧洞衬砌表面或内部预埋感温光纤，当渗漏发生时，光纤周围温度场发生变化。通过分析DTS系统采集的

温度分布曲线，结合热传导模型反演渗漏通道位置。例如，在某水电站引水隧洞中，该隧洞已运营多年，存在一定程度的渗漏问题。光纤监测显示K18+200断面处温度异常下降，最低温度较周围区域低3.2℃。经钻孔验证，该位置存在直径约5cm的渗漏通道，日渗漏量达12m³。工程人员根据定位结果对渗漏点进行了封堵处理，处理后再次监测，该区域温度恢复正常，渗漏问题得到解决。

3.6 隧洞振动与地质活动监测

水利隧洞穿越地震活跃区或断层带时，需监测地质活动对结构的影响。DAS技术通过检测瑞利散射光的相位变化，可实现隧洞沿线振动信号的高精度捕捉。在某长距离输水隧洞中，该隧洞穿越多条断层带，地质条件复杂。布设DAS系统监测范围达25km，空间分辨率0.5m。2024年某次微震事件中，系统成功捕捉到震中位于K45+600处的振动信号，振动频率集中在2-8Hz，衰减系数为0.03dB/m。结合地震波传播模型，反演得到震源深度为12km，震级为ML3.2。此次监测为隧洞抗震设计提供了实证数据，工程人员根据监测结果对隧洞局部结构进行了加固，提高了隧洞的抗震能力。

4 技术面临的挑战与应对策略

4.1 技术挑战

分布式光纤传感技术在水利隧洞结构健康监测中的应用虽然具有诸多优势，但也面临一些技术挑战。光纤的封装和保护是一个重要问题。水利隧洞环境复杂，存在地下水、岩石摩擦等因素，容易对光纤造成损坏。如果光纤封装不好，可能会导致信号衰减或中断，影响监测效果。信号处理和分析的复杂性也是一个挑战。分布式光纤传感系统会产生大量的数据，如何从这些海量数据中提取有用的信息，准确判断隧洞结构的健康状况，需要先进的信号处理和分析算法。目前，虽然已经有一些信号处理方法，但在实际应用中，还需要进一步提高算法的准确性和效率。多物理场耦合监测的难度较大。水利隧洞结构健康受到温度、应变、渗流等多个物理场的影响，这些物理场之间相互耦合，增加了监测和分析的难度。如何实现多物理场的同时监测和准确分析，是当前分布式光纤传感技术需要解决的问题之一。

4.2 应对策略

针对光纤封装和保护问题，可以采用高性能的封装材料和工艺，提高光纤的抗损坏能力。例如，采用金属套管、塑料护套等对光纤进行保护，同时优化光纤的布设方式，避免光纤与尖锐物体接触。在施工过程中，加强对光纤的保护，设置专门的保护装置，防止施工对光纤造成破坏。对于信号处理和分析的复杂性，可以引入人工智能和机器学习算法。通过对大量监测数据的学习和分析，建立准确的模型，实现对隧洞结构健康状况的自动判断和预警[4]。例如，利用深度学习算法对分布式光纤传感数据进行特征提取和分类，提高信号处理的准确性和效率。为实现多物理场耦合监测，可以开展多物理场耦合监测技术的研究。通过理论分析和实验研究，深入了解各物理场之间的耦合关系，开发能够同时测量多个物理场的分布式光纤传感器。结合多物理场耦合模型，对监测数据进行综合分析，准确评估隧洞结构的健康状况。

5 结语

本文深入探讨了分布式光纤传感技术在水利隧洞结构健康监测中的应用，该技术基于多种散射原理，有诸多优势，可广泛应用于温度、应变、裂缝监测及火灾预警等，通过实际案例证明了其在保障水利隧洞结构安全方面的可行性和有效性。展望未来，随着物联网、5G等技术融合，该技术将向智能化、网络化发展，实现数据实时传输与远程监控；多参数融合监测是重要方向；新型光纤传感器的研发也将推进，不断提高监测的准确性和可靠性。

参考文献

[1]陆岸典,黄井武,姚晓庆,等.分布式光纤传感技术在输水隧洞工程中的应用[J].广东土木与建筑,2021,28(10):10-13.

[2]李胜存,范青豪,黄星.分布式光纤监测技术在长大深埋水工隧洞中的应用[J].河南科技,2023,42(21):9-12.

[3]黄晓燕.探讨分布式传感光纤在输水隧洞工程监测中应用[J].陕西水利,2021,(07):198-200.

[4]白玉龙.分布式光纤在水工长隧洞安全监测中的应用[J].甘肃水利水电技术,2021,57(07):44-47.