

第 1 章

绪 论

1.1 拉曼散射分布式光纤传感原理、系统架构与优势

分布式光纤传感技术,是近代光学工程与传感领域的一项里程碑式成就。它从根本上颠覆了传统点式传感器的概念,实现了光纤从单纯的“传输媒介”向全域“感知媒介”的革命性跨越^[1]。这一转变,使得一条纤细的光纤不仅能传递信息,更能化身为一根连续不断的感知“神经”,以极高的空间分辨率感知沿线分布的各种物理量(如温度、应变、振动等),从而实现对大规模基础设施和周界环境的全天候、实时的健康监测与安全预警^[2-4]。

在众多基于不同散射机理^[5-8](包括瑞利散射、布里渊散射、拉曼散射,如图 1.1.1

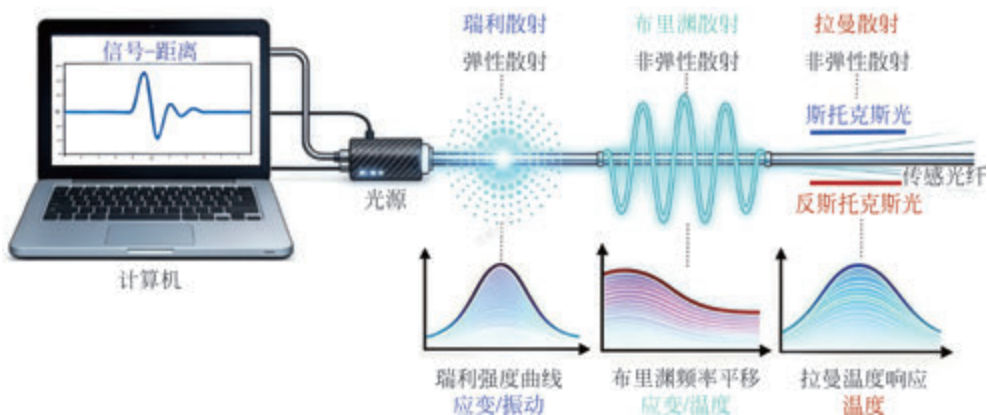


图 1.1.1 不同散射类型的分布式光纤传感技术

所示)的分布式光纤传感技术中,基于拉曼散射的分布式光纤传感技术,凭借其原理的直观性、系统的成熟度以及对温度参量测量的专一性与高可靠性,成为其中最早实现大规模商业化与工程化应用的技术典范。该技术无需复杂的频率扫描或相位解调,仅通过探测与温度存在确定依赖关系的自发拉曼散射光强度,即可直接反演出绝对温度值。这一独特优势,使该技术自理论概念提出以来,便迅速从实验室走向了广阔的市场,在电力、消防、煤矿、油气、交通等多个关乎国计民生的关键领域扮演着不可替代的角色。

本章作为全书的开篇,旨在系统而深入地阐述这一经典技术。本章将首先回溯其物理基础——拉曼散射效应的微观机理,阐明其如何将温度信息编码于光波之中;继而,剖析其传感系统的核心原理与典型架构,揭示其如何通过光时域反射技术实现精准的时空定位;然后,本章将客观分析该技术在发展过程中所面临的核心技术挑战与其所具备的独特优势,以理解其工程化应用的边界与潜力;最后,本章将梳理其从理论发现、技术突破到产业爆发的完整发展脉络,并展望其未来的演进趋势。通过这一完整的论述,读者不仅能够掌握拉曼散射分布式光纤传感技术全貌,更能深刻领会其内在逻辑关系。

1.1.1 理论基础：拉曼散射效应

拉曼散射的发现,为分布式光纤测温提供了物理基石。这一非弹性散射效应,本质是光与物质分子间发生能量交换的量子过程。当一束高功率激光在传感光纤中传播时,会与构成光纤的二氧化硅分子发生相互作用。绝大部分光子发生的是弹性碰撞,即瑞利散射,其散射光频率与入射光相同,能量保持不变,虽然后向瑞利散射是光时域反射定位技术的物理基础,但其本身并不携带直接的温度信息。为了更直观地理解不同散射机制在频率域中的分布,图 1.1.2(a)给出散射光光强频率分布图,其中瑞利散射位于中心峰,两侧依次出现布里渊散射及拉曼散射的频移结构。

然而,有极少数光子会与分子发生非弹性碰撞,进行有效的能量交换,从而导致散射光频率发生改变,这一现象即拉曼散射。从量子力学的视角看,这一过程对应于光子与分子振动能级之间的相互作用:光子将一个量子化的能量包(声子)转移给分子或从分子处获得。正是这种能量的“得失”,造就了拉曼散射光谱中两个对温度传感至关重要的关键组分^[9-10]。

(1) 拉曼斯托克斯光:在此过程中,光子将一部分能量传递给分子,诱导分子振动能级升高,导致散射光子自身能量降低、频率减小、波长变长。由于这一过程起始于分子的基态,而基态在任何平衡温度下都拥有大量的分子布居,因此拉曼斯托克斯光的强度虽然很强,但对环境温度的变化相对不敏感。

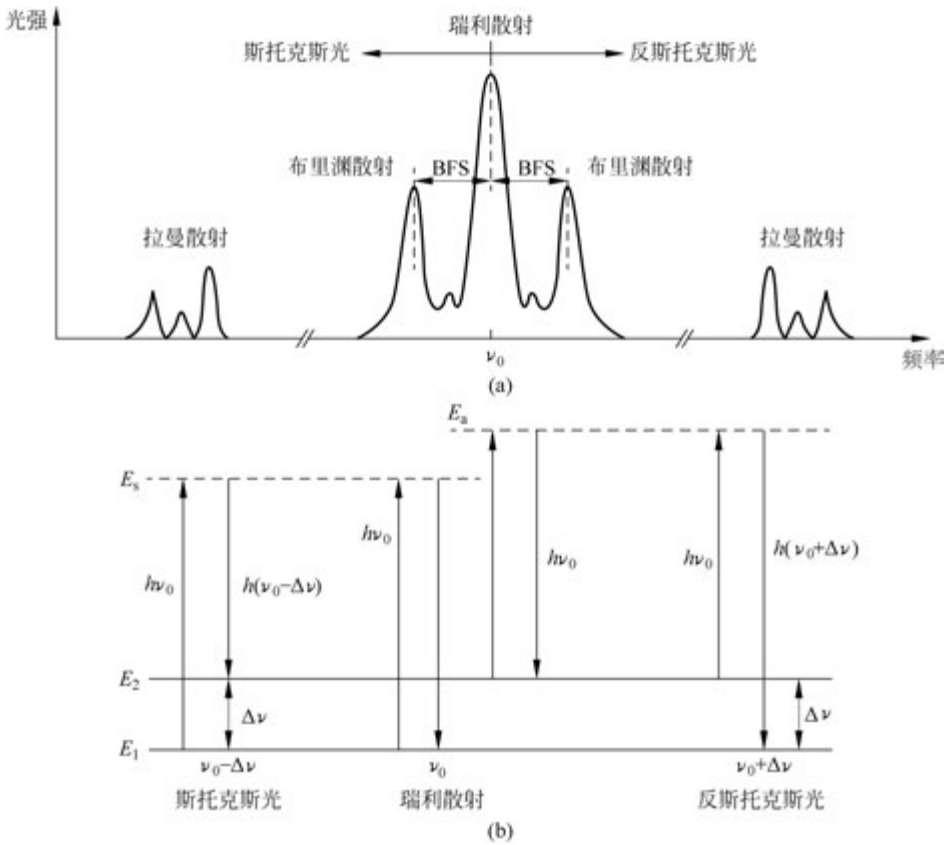


图 1.1.2 光纤散射原理图

(a) 散射光谱示意图；(b) 拉曼散射光子能级结构示意图

(2) 拉曼反斯托克斯光：在此过程中，光子从分子的热振动中汲取能量，导致分子振动能级降低，散射光子因而获得更高能量、频率增加、波长变短。其内在机理在于，拉曼反斯托克斯光的产生强烈依赖于初始时刻就处于高振动能级的“热”分子数量。根据统计物理中的玻尔兹曼分布规律，处于该激发态的分子数量是温度的指数函数，随环境温度的升高而呈指数式显著增加。

上述拉曼散射光子的能量变化以及对应的能级跃迁关系可由图 1.1.2(b) 的能级结构清晰展示。其中 E_1 与 E_2 表征光纤介质中的不同能级。当入射光子与处于基态 E_1 的电子发生相互作用时，通过受激吸收过程，电子将跃迁至激发态 E_s 。由于该激发态属于亚稳态，系统会通过非辐射弛豫机制而迅速向低能级 E_2 跃迁。在此能量弛豫过程中，系统以斯托克斯光子的形式释放能量 $h\nu_s$ ，其频率 ν_s 对应的能量差满足 $\Delta E = E_s - E_2$ 的量子化关系。在这一过程中，由于电子从高能

级向低能级跃迁时所释放的能量通常小于从低能级向高能级跃迁时所吸收的能量,从而形成频率低于入射光的拉曼斯托克斯光。同理,当入射光子与处于较高能级 E_2 的电子相互作用时,介质中的电子可被提升至更高的虚拟能级 E_a ,随后又跃迁回原始 E_1 能级,并释放出能量为 $h\nu_a$ 的光子。在这个过程中,由于电子从高能级向低能级跃迁时所释放的能量大于其从低能级向高能级跃迁时所吸收的能量,因此散射光的频率高于入射光,即拉曼反斯托克斯光。这两种散射现象共同构成了拉曼散射效应。

因此,拉曼反斯托克斯光的强度随温度升高而急剧增强,而拉曼斯托克斯光的强度则仅呈现微弱的反方向变化。正是这种不对称的温度依赖性,使得拉曼反斯托克斯光与拉曼斯托克斯光的强度比成为一个对温度极其敏感且可靠的“标尺”。通过精确测量这一光强比率,可以有效消除光源功率波动、光纤弯曲损耗等共模干扰,实现不依赖于绝对光强而只关乎内在物理规律的绝对温度测量。这一物理机制,构成了整个拉曼散射分布式光纤传感技术最核心理论依据。

1.1.2 传感原理与系统架构

基于上述拉曼散射的温度依赖性特性,拉曼散射分布式光纤传感技术的核心原理在于:通过实时、精确地解调背向拉曼反斯托克斯光与斯托克斯光的强度比值,来实现对被测温度的绝对测量。这一“比率测温法”可从根本上消除测量过程中由光源功率起伏、光纤微弯损耗、连接器劣化等引起的共同路径光强波动,将测量结果的稳定性提升到了一个全新的高度。

为实现这一原理并赋予其空间定位能力,该技术经典地结合了光时域反射技术^[11],构成了一套完整的拉曼散射分布式光纤传感系统^[12]。其系统架构如图 1.1.3 所示,主要由以下几个核心模块构成。

(1) 脉冲激光光源:作为系统的“心脏”,它产生高功率、窄宽度的光脉冲,其脉冲宽度直接决定了系统的空间分辨率,而其波长稳定性则对长期测量的准确性至关重要。

(2) 传感光纤:作为系统的“神经”,它既是传导光脉冲的通道,也是感知温度的媒介。传感光纤的材质(通常为掺杂石英)决定了拉曼散射的效率。

(3) 波分复用与探测单元:这是系统的“感官”。返回的微弱背向拉曼散射光首先通过一个高精度的波分复用器,被精确地分离成拉曼斯托克斯光和拉曼反斯托克斯光两个独立的光学通道。随后,这两个通道的光信号分别由高灵敏度、低噪声的光电探测器(如雪崩光电探测器)转换为电信号。

(4) 高速数据采集与信号处理单元:这是系统的“大脑”。它同步采集两个通道的电信号,并执行核心的运算与重构任务。

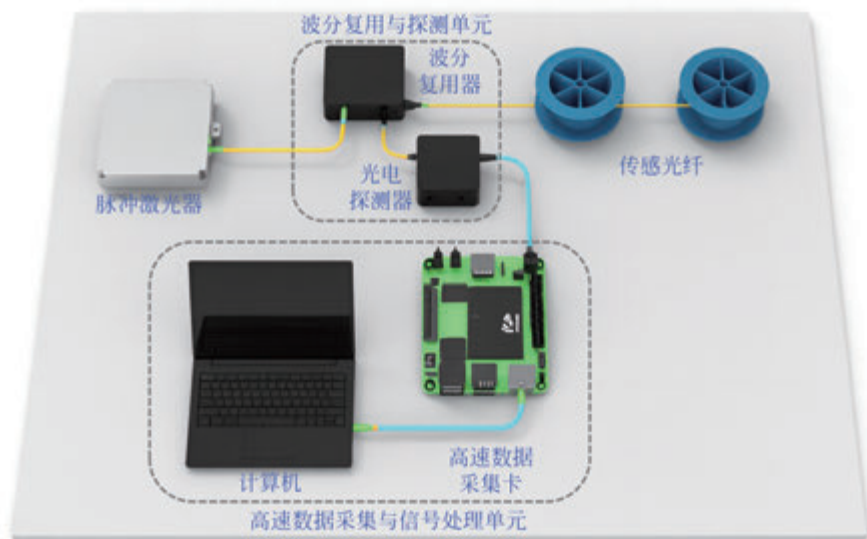


图 1.1.3 拉曼散射分布式光纤传感系统典型架构

拉曼散射分布式光纤传感系统的工作流程可以概括为一个精密的时空编码与解码过程。脉冲激光器向传感光纤注入一个纳秒量级的窄光脉冲。此脉冲以光速在光纤中传输,其能量在沿途每一点都与光纤分子相互作用,激发出包含拉曼斯托克斯光和拉曼反斯托克斯光成分的、极其微弱的自发背向拉曼散射光。这些来自传感光纤不同位置的散射光信号,如同按时间先后返回的“回声”,连续不断地传回光纤始端。系统的空间定位能力源于光时域反射原理,温度事件定位功能是通过精确计算其散射信号时间差来实现的。系统记录下从光脉冲发射到散射信号被接收的时间延迟 Δt ,由于光在光纤中的传播速度 c/n_f 是已知的,这个 Δt 便直接地、唯一地对应着散射事件发生的具体位置。因此,每一个返回的瞬时信号都携带了光纤上一个特定“事件”的温度信息。在 Δt 时间内,脉冲光先经过 L 距离到达散射点,再经过 L 距离返回起始点,则散射事件距光纤起点的传输距离 L 可表示为

$$L = \frac{c \Delta t}{2n_f} \quad (1.1.1)$$

其中, c 为真空光速; n_f 为光纤折射率。

最终,系统对采集到的大量数据进行处理:对于每一个空间位置点,它计算出该点对应的拉曼反斯托克斯光与拉曼斯托克斯光信号的强度比值,再通过预先标定的温度-比率曲线,将这个比值精确地转换为温度值。通过这种方式,系统能够逐点重构出整根光纤上连续、实时的温度分布曲线,完美实现了从离散“点”测量到连续“线”感知的分布式监测。

1.1.3 技术优势与挑战

拉曼散射分布式光纤传感技术之所以能在众多传感方案中脱颖而出并实现大规模工程应用,源于其一系列固有的技术优势,然而,在其发展与优化过程中,也始终伴随着若干核心的技术挑战。

首先,其最根本的优势在于真正意义上的分布式测量。与传统点式传感器或准分布式传感网络相比,该技术将整根光纤转化为数以万计、连续分布的传感器。它无需预先定义传感点位,能够捕捉光纤沿线任意位置的温度异常,实现了从“盲人摸象”到“全局透视”的转变。这种无缝的监测能力,对于探测随机发生的热点、渗漏或火灾隐患至关重要,避免了由传感器布设疏漏而导致的监测盲区。

其次,该技术具备卓越的环境适应性。其本质安全性源于传感单元本身由石英玻璃制成,是一种全介质、无源器件,在工作过程中不产生任何电火花或需要外部供电,这使其成为石油、化工、煤矿等易燃易爆危险环境下的理想选择。同时,它拥有极强的抗电磁干扰能力,光纤信号传输不受高压电场、强磁场、雷电或无线信号的影响,能够在变电站、高压电缆廊道、轨道交通等复杂电磁环境中稳定运行。

最后,该技术展现出极高的监测经济性与广域覆盖能力。单根纤细的光纤即可替代大量传统点式传感器及其复杂的布线系统,显著降低了材料、安装和维护成本。目前,先进的拉曼散射分布式光纤传感系统能够实现超过 70 km 甚至更长的监测距离,这意味着仅用一套系统即可守护隧道、管道、边界等大范围线性资产,其“一纤多用”的特性带来了极高的性价比。

尽管优势突出,但该技术自诞生之初就面临着严峻的物理限制与工程挑战。首当其冲的挑战是拉曼信号极其微弱。自发拉曼散射的强度通常比瑞利散射低 3 个数量级,这导致返回到探测端的信号十分微弱,极易被探测器的本底噪声淹没^[13]。因此,如何从噪声背景中提取出有效的拉曼散射信号,是系统设计面临的重大难题,直接决定了系统的测温精度、测量速度与最大传感距离。

其次,双通道一致性的要求极为苛刻。比率测温法的准确性高度依赖于对拉曼斯托克斯光和拉曼反斯托克斯光两个独立探测通道的精确校准^[14]。任何微小的差异,如波分复用器的通道特性、两个探测器的响应效率、放大器增益的漂移等,都会直接引入测温误差。因此,系统需要精密的硬件设计和复杂的软件算法进行动态补偿与校准,以维持长期测量的稳定性。

最后,系统性能参数之间存在固有的权衡关系,需要进行复杂的系统优化设计。高空间分辨率要求使用更窄的激光脉冲,但这会降低单脉冲能量,削弱本已微弱的拉曼散射信号;长传感距离要求更高的脉冲能量以补偿传输损耗,但这可能引发非线性效应并受限于激光器安全标准;而提升温度精度则需要更长的信号累

积时间,又会牺牲系统的快速响应能力^[15-16]。研究人员必须在这些相互制约的性能指标之间,根据具体应用场景找到最优的平衡点。

1.2 拉曼散射分布式光纤传感技术研究历程

拉曼散射分布式光纤传感技术的发展历程,是一部交织着基础物理创新、关键技术突破与前沿应用牵引的演进史。它清晰地展示了一项实验室原理如何逐步转化为支撑现代基础设施安全运行的支柱性技术。其发展脉络,深刻反映了工程学界在解决信噪比、空间分辨率与测量距离等核心矛盾方面所做出的持续努力。

1.2.1 理论奠基与概念验证

20世纪80年代是拉曼散射分布式光纤传感技术的理论萌芽期。在拉曼散射物理机理已被充分认识、光纤制备技术趋于成熟的背景下,研究人员的核心贡献在于完成了两大理论的创造性融合:自发拉曼散射的温度效应与光时域反射计的空间定位原理。

英国南安普顿大学发表的开创性论文,首次系统地提出了利用背向拉曼散射的反斯托克斯光与斯托克斯光光强比进行绝对温度测量,并结合光时域反射定位技术实现距离定位的整体方案^[17]。这一构想奠定了所有现代分布式温度传感技术的理论原型。该阶段的研究主要集中于原理性实验验证,受限于当时的光源与探测技术,系统信噪比极低,测量距离短,尚不具备工程应用价值。然而,它成功地指明了技术发展的方向,即通过提升光源脉冲能量与探测器灵敏度来克服拉曼信号极其微弱这一根本性挑战。拉曼散射分布式光纤传感技术自诞生以来,其发展脉络如图1.2.1所示,从最初的概念验证逐步演进为能够支撑工程应用的成熟技术体系。

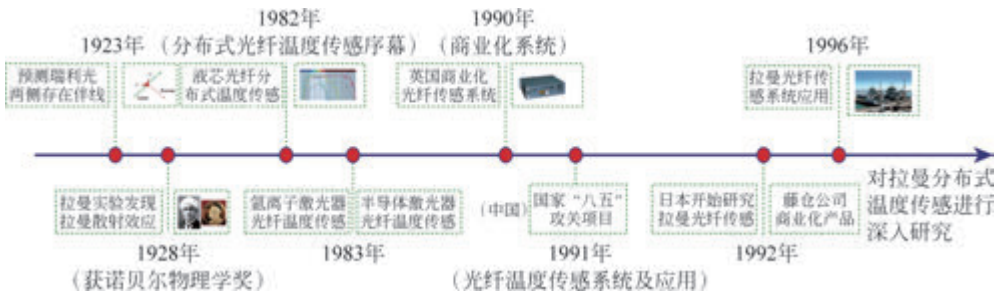


图 1.2.1 拉曼散射分布式光纤传感的发展历程

1.2.2 技术突破与商用启航

20世纪90年代是拉曼散射分布式光纤传感技术从理论走向实践的关键十年。其驱动力主要来自于光电元器件领域的显著进步。大功率半导体泵浦的脉冲激光器的成熟,为系统提供了高功率、高稳定性的激发光源,有效增强了初始拉曼散射信号的强度。与此同时,高灵敏度、低噪声的雪崩光电二极管及其配套的低噪声放大电路的应用,极大地提高了系统对微弱信号的探测能力,改善了信噪比。

此外,光子计数等先进探测技术的引入,进一步提升了系统对单光子级别信号的提取能力。在这些技术的共同推动下,拉曼散射分布式光纤传感系统的性能参数实现了量级上的飞跃:测量距离从实验室的百米级延伸至千米级,温度精度和空间分辨率也达到了可满足部分工业场景需求的水平。由此,拉曼散射分布式光纤传感系统开始了其商业化进程,推出了第一代商用仪器,并在电力电缆温度在线监测、大型建筑火灾报警系统等对温度敏感且监测范围线性的领域实现了初步应用^[18],证明了其独特的工程价值。

1.2.3 性能优化与应用深化

步入21世纪,拉曼散射分布式光纤传感技术以“性能优化、系统集成与应用深化”为特征的成熟与拓展期。研究者不再满足于实现基本功能,而是致力于逼近该技术方案的物理极限,并解决其在复杂应用场景下的工程化问题^[19]。

编码技术的应用:为了在不牺牲空间分辨率(即不增加脉冲宽度)的前提下提升信噪比,脉冲编码技术^[20](如 Simplex 码)被成功引入拉曼散射分布式光纤传感系统。该技术通过发射一组特定编码序列的激光脉冲,而非单个脉冲,然后在接收端利用相关运算进行解码。此举在不增加峰值功率的情况下,显著提高了平均入纤功率,从而将系统信噪比提升了数倍,有效扩展了测量距离或提高了测量速度。

系统架构的网络化与智能化:单一的线性监测已无法满足大型基础设施全域感知的需求。因此,多通道光纤切换器成为标准配置,使得一套主机系统能够循环监测数十条光纤回路,极大地提升了经济性和监测效率。同时,系统从单纯的“数据采集器”向“智能感知节点”演变,通过与物联网平台和大数据分析算法的深度融合^[21],实现了从海量温度数据中自动识别异常点、定位故障、预测趋势,完成了从“感知”到“认知”的跨越。

性能指标的持续精进:在各国研究人员共同努力下,拉曼散射分布式光纤传感技术性能不断提升。目前,先进系统的温度测量精度可达 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,空间分辨率优于 1 m ,最大监测距离超过 70 km ,测量时间也从分钟级缩短至秒级。这些指标的提升,不断拓宽其应用边界。

1.3 拉曼散射分布式光纤传感技术的应用研究进展

分布式光纤传感技术作为现代传感领域的革命性技术,以其独有的全分布式、抗电磁干扰、本征安全、长距离监测等优势,在大型基础设施健康监测、能源安全、国防安全等领域展现出巨大的应用潜力。其典型应用场景如图 1.3.1 所示,涵盖交通、能源、水利、矿山及电力等多个关键行业^[22-25]。本节将梳理拉曼散射分布式光纤传感技术的相关应用原理,并重点综述其在不同领域的应用研究进展与未来趋势。



图 1.3.1 拉曼散射分布式光纤传感技术典型应用场景

1.3.1 电力电缆与输电线路安全监控

在智能电网领域,拉曼散射分布式光纤传感技术已成为高压电力电缆状态监测的核心手段^[22]。通过将传感光纤直接铺设或内置于电缆中,可以实时监测电缆全线的工作温度。如图 1.3.2 所示,信号经拉曼散射分布式光纤传感主机实时解调,并在监控终端上以温度分布曲线与空间定位结果的形式进行可视化展示,从而实现输电线路运行状态的连续感知。其研究进展主要体现在以下方面。

热点精确定位与负荷动态管理:通过对温度分布数据的分析,能够精准定位由局部过载、接触不良或外部破坏导致的“热点”,并基于实时温度数据动态调整输电负荷,预防由过热引发的绝缘老化甚至火灾事故。

隧道综合监控:在电缆隧道中,拉曼散射分布式光纤传感系统不仅能监测电缆本体温度,还能与感温火灾探测系统联动,实现对隧道内火灾隐患的早期预警和火源定位。



图 1.3.2 面向高压电力电缆状态监测的拉曼散射分布式光纤传感系统

1.3.2 油气管道泄漏监测与周界安防

长距离油气输送管道的安全是能源工业的生命线。分布式光纤传感法作为一种新型传感技术,被称为地下智慧管廊安全监测体系的“城市脉搏”^[23],如图 1.3.3 所示。拉曼散射分布式光纤传感系统在此领域的应用取得了显著成效。

泄漏点精准识别:当管道发生泄漏时,泄漏的油品或气体在周围土壤中会由节流效应(气体)或置换作用(液体)导致局部温度异常^[24]。拉曼散射分布式光纤传感系统的传感光纤能够敏锐捕捉到这种微小的温度变化,并准确定位泄漏点,为快速抢修赢得宝贵时间。

管道伴热监测:对于需要伴热保温的管道,拉曼散射分布式光纤传感系统可以实时监测伴热系统的运行状态,确保其工作正常,防止介质凝固。

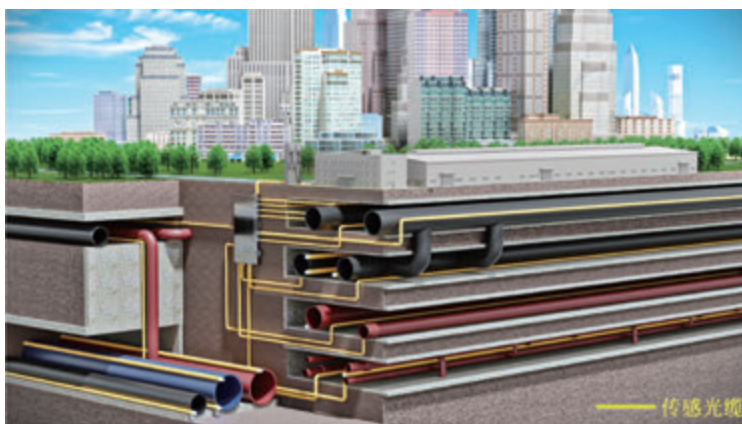


图 1.3.3 面向管道泄漏检测的拉曼散射分布式光纤传感系统