

# 光纤传感器在油田测井中的应用研究

邱嘉辉

中石化江汉石油工程有限公司页岩气开采技术服务公司，湖北武汉，430075；

**摘要：**由于科学技术的快速发展，石油行业慢慢地呈现出智能化、自动化等发展趋向。光纤传感器在油田测井等项目中的应用愈发广泛，它能够对温度、压力、流量、振动、位移等指标进行动态性测量，受到全球各大石油生产企业、光纤传感研发单位的高度重视。本文着重论述了光纤传感器在油田测井领域中的应用，希望基于光纤传感原理的各类光纤传感器为油气田开发带来更多的技术支持。

**关键词：**光纤传感器；石油测井；应用研究

**DOI：**10.69979/3060-8767.25.04.052

## 前言

20世纪70年代光纤通信技术正式应用，随后光纤传感技术在此基础上逐渐衍生出来，欧美国家最先将光纤传感器运用到石油勘测领域，该技术能够在油田开发过程中更精准地分析井内流体特性、状态变化等。与传统的电子传感器相比，其能够抵御高温、高压、腐蚀、地磁等造成的干扰，且耐受极端环境，进而精准、快速地测量井筒相关环境参数。因此，通过对该技术的合理利用，光纤传感器在油田测井中的需求逐步提升。

## 1 光纤传感器在油田测井中的应用原理及优势

### 1.1 应用原理

光纤传感器在石油测井项目中的应用备受关注，作用原理是指基于传统光学理论下，利用光的全反射来测量物理指标。其内部结构主要有三大部分，即：光源、光导纤维、光检测器。光纤传感器感受到外界的物理量波动会传输特定的光学信号，利用解码算法将其转变为电信号，由此确定其监测的物理指标变化。

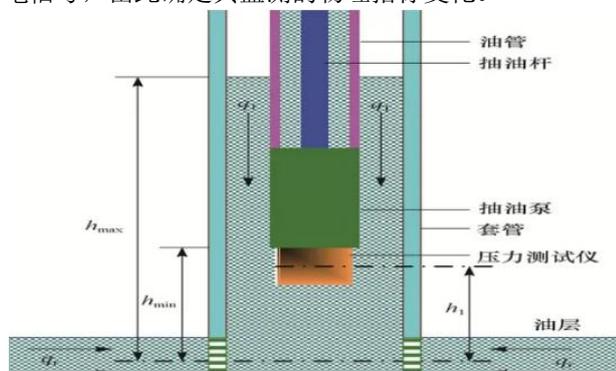


图1 光纤传感器在油井中安装图示

光纤传感器一般属于传感单元，也可以称作是传输单元。在油田测井中，整根光纤也能够当作是传感器件，

突出分布式特点，能够对参数实现整体感知与光路测量。基于光纤的三大散射效应，从而对温度、压力、声波等物理参数进行动态测定。

### 1.2 优势

具备较高的精度。光纤传感器在物理参数监测过程中具备高精度优势，失误率低，这对于精准评价油井的生产性能、衡量运行效率等具有一定的引导作用。其次，具备较强的扩展性，能够适应不同应用环境，并且伴随着科学技术的持续发展，其功能在持续完善及提升。另外，光纤传感器对长期的动态监测与分析具有先天优势，稳定性高且抗电磁干扰。

## 2 光纤传感器在石油测井中的应用研究

### 2.1 流体含水率和密度测量

光纤传感器测量含水率和密度的基本原理是基于混合流体的折射率变化。油、水、气等不同介质的折射率存在显著差异，混合流体的综合折射率会随着各成分比例的变化而变化，在实际应用中，光纤传感器通常采用U型弯曲光纤结构，当混合流体通过光纤时，光纤传输功率会随着流体折射率的变化而发生改变，通过测量光纤传输功率的变化，可计算出各相流体的持率和密度。

为了验证光纤传感器在测量流体含水率和密度方面的准确性，我们设计了一系列实验，并对比了传统测量方法与光纤传感器的测量结果。实验装置包括光纤传感器（U型弯曲光纤结构）、传统电容式含水率计、密度计、混合流体样本（油、水、气按不同比例混合）、数据采集系统，在恒温恒压的条件下将油水比例分别为10:90、30:70、50:50、70:30、90:10比例的混合流体注入实验装置，使用光纤传感器和传统仪器分别测量流体的含水率和密度，记录并对比测量结果如表1所示。

表 1 含水及密度测试表

流体比例 (油:水)	传统含水率计测量值 (%)	光纤传感器测量值 (%)	传统密度计测量值 (g/cm <sup>3</sup> )	光纤传感器密度测量值 (g/cm <sup>3</sup> )
10:90	89.4	89.5	1.1	0.99
30:70	69.8	70.4	0.92	0.94
50:50	49.7	50.4	0.89	0.89
70:30	29.9	31.2	0.84	0.85
90:10	9.8	10.0	0.80	0.81

光纤传感器的测量结果与传统含水率计的测量结果基本一致，但在高含水率（90%）和低含水率（10%）条件下，光纤传感器的测量精度更高，误差小于 0.5%。

光纤传感器在密度测量方面具有与传统仪器相当的精度，光纤传感器的优势在于无需直接接触流体，避免了传统密度计因机械磨损导致的测量误差。

### 2.2 温度测量

在油田测井中，温度变化是一个不可忽视的物理参数，对其展开动态性监测，有利于更全面地了解井下液体特性。在温度监测方面，其计算式是：

$$T = (V_m - V_n) / P + \text{温度零点}$$

其中， $V_m$  为传感器输出电压， $V_n$  为传感器零点电压， $P$  为光纤传感器的灵敏度，指单位电压变化对应的温度变化，其单位是  $mV/^\circ C$  或者  $\mu V/^\circ C$ ；温度零点指在  $0^\circ C$  的情况下电压输出值。

现阶段井下温度测量仪的类型相对比较多样，包括电阻式温度仪、热电偶温度仪等，但在应用时缺少可靠性，例如精度、稳定性等方面。如图所示，与传统传感器相比，光纤传感器在温度测量方面的优势非常明显，主要有：响应快、高精度、动态监测等。通过端面式光纤传感器能够对井下内部温度实现非接触式的持续性测量；随后能够对油井测温场实现三维重构，更系统、精准地反馈出井下环境与地层特征。

美国 CIDRA 公司在对光纤温度传感器进行研究，设计出了喇曼反应散射分布式温度探测器，它在监测井筒温度剖面中的应用优势非常明显，能够兼容测量点数、连接器衰减等方面需求。选择布喇格光纤光栅传感器并尽量减少光纤连接器数量能有效减少衰减。

### 2.3 流量测量

光纤传感器通过分析光信号的时间和强度，能够精确测定流量值。这得益于光在光纤传输中的独特特性，其变化趋势与流量密切相关，当测试流体流动的冲击力会作用在压力靶盘上，靶盘推动使光纤产生形变致使发

生中心波长的漂移，基于这种差动结构，既解决了温度和应变传感的交叉敏感问题，还提高了传感器的测量精度、灵敏度，成为现代石油测井中不可或缺的技术手段。其核心原理在于利用光的特性，结合光电转换技术，实现对流量的高效监测。

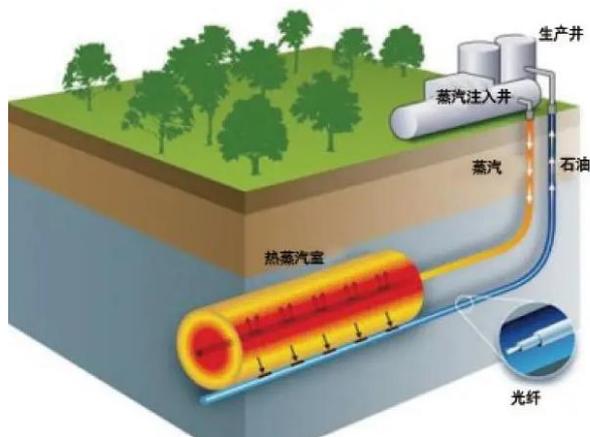


图 3 光纤传感器在流量监测中的应用结构图

### 2.4 压力测量

压力测量在油田勘测项目中是一项基础任务。目前，常见的压力计主要包括石英晶体压力计和应变压力计等。这些设备在温度测量和压力监测中各有优劣，但普遍存在易受外部环境的影响，导致测量精度下降。因此，在油田测井中，选择合适的仪器至关重要。现有设备往往存在精度不足的缺陷，而光纤传感器则因其独特的优势逐渐受到关注。与传统的传感器相比，光纤传感器无需复杂的井下电子线路，体积小，抗干扰能力强，能够更精确地测量井下的温度和压力，为油田测井提供了更为可靠的解决方案。从作用原理上来看，它能够直接把机箱里的压力变化转化为光信号，随之再将其转化为电信号，最终确定压力大小。例如：延长式光纤传感器能够利用细微的光程差变化，对油井内部的压力场进行精准检测；并且借助于多点传感器则能够对地层中不同深度、方位的压力值进行监测。

那么在光纤传感器的应用中，力一般是利用测量小质量循环激振器的位置变化来确定的，其又称为电压信号驱动，它能够与光信号之间实现傅里叶变换，由此确定加速度信号的频谱，然后对其进行压力值计算。

德国CIDRA石油探测企业在应用光纤传感器技术方面积累了丰富的实践经验，其科研人员借助于布喇格光纤光栅传感器对压力值进行线性响应，且确保光纤传感器在检测压力过程中具备较强的抗高压与高温等特性。又如，斯伦贝油田服务公司 D011 带领“Tsutomu Yamate”等技术人员对光纤传感器实施井下压力监测展开了长期地观察与研究，最后研制出一种对高温不敏感的侧孔布喇格光纤光栅传感器，其耐高温、耐高压的上限分别是 300℃、88Mpa，能够适用各种苛刻环境下的油井压力监测。

## 2.5 声波测量

随着钻井环境的日益复杂化，对地层构造的精确测量变得尤为重要。当前采用的地质测量方法，如地震测量法（包括拖曳等浮电缆检波器组等技术），虽然能够提供一定的测量数据，但在实际应用中存在明显的局限性。这些方法不仅容易受到周围环境的干扰，还伴随着高昂的作业成本，如地震测量法（拖曳等浮电缆检波器组等），不但耗资不低，而且无法下入深井中，且极易受到环境因素的制约；最关键的是其提供的图像不够全面、连续，缺乏较强的辨别性，无法对其声波等参数进行动态监测。通过对光纤地震检波器系统的合理利用，可以实现稳定操作，同时安装方面具有一定的便利性，有利于为最终结果的准确性提供保证。声波计算式中包含的参数主要有：声速、声波传播时间、声波速度、声波衰减系数等。在具体应用中，需要按照不同的常见确定最适宜的公式。一般在油井工程检测中，其计算式是： $C=f*\lambda$

其中，C——声速；f——声波频率； $\lambda$  ——波长

在具体应用中，需要按照不同的声波频率、介质类型等，经查表来确定其声速值。

在我国西北某石油勘测工程中，永久井下光纤传感器——重量地震测量仪的一体化融合具备较强的灵敏性、方向性等优势，不但能够获得更加精准的空间图像、完整的近井眼结构图，而且还能够对井眼周围的底层结构图进行分析，正常来说，其测量范围能够超过数千英尺。其在油井项目的整个运行中有效启动，能够耐受各

种恶劣环境，没有井下电子设备能够经受着强烈的外部振动与冲击，通常安装于结构简单的完井灌注或者狭小空间内。最关键的是，该设备具备较强的动态辐射性能，而且信号频带宽，在 3-800HZ 范围内，可以精准地记录由最低至最高频率的等效响应。

## 2.6 形变或振动测量

石油测井设备在运行期间不可避免地出现振动，为了确保工程能够顺利开展，对其振动参数进行动态监测是非常必要且重要的。探究其原因，则是由于机械设备的振动会对井下地质结构、生产计划等造成一定的影响，甚至也会对设备自身的使用性能、寿命等带来影响，进一步会破坏监测结果的精准性与稳定性。通过光纤传感器对其进行振动值监测，能够获得精准的数据。其作用原理是光纤传感器通过光学影像、相移测量技术、数字图像处理技术等来分析其振动性质，并计算其振动频率；由此能够确定振动的幅值与相位，为接下来精准地获得相关振动参数做铺垫。

## 3 结论

作为当前石油测井项目中的新应用技术，光纤传感器的应用范围不断扩大，且受重视地位持续提升。它可以动态性、精准性地对井下内部的温度、压力、形变、流量等物理参数进行动态分析，为石油行业的技术发展带来极大支持。不过需要注意的是，虽然这一项技术的应用优势比传统技术更明显，但是依旧需要不断地转与升级，方可动态性地满足石油行业在开采、探测等方面的应用需求。

### 参考文献

- [1] 探讨光纤传感器在石油测井中的应用[J]. 张亚旭. 粘接, 2021(10)
- [2] 分析光纤传感器在石油测井中的应用[J]. 周亮亮. 中国石油和化工标准与质量, 2020(14)
- [3] 光纤传感器在油田开发测井中的应用探析[J]. 芦光睿. 石化技术, 2016(07)
- [4] 光纤传感器在石油测井中的应用分析[J]. 杨英男. 化学工程与装备, 2015(09)

作者简介：邱嘉辉（1997-）男，汉，重庆江津，助理工程师，本科，现从事油气井光电传感应用研究工作。