

# 光纤测井的特性及应用

蒋鹏志



## 1. 引言

测井技术又称为地球物理测井技术,是一种井下油气勘探的重要手段,是在钻探井中使用反映热、声、电、光、磁和核放射性等物理性质的仪器测量地层的各种物理信息;通过对这些信息按各自的物理原理和它们之间相互联系进行数据解释,辨别地下岩石的孔隙性、渗透性和流体性质及其分布,用于发现油气藏,评估油气储量及其产量。测井技术在油气田开发和钻井工程中有广泛的用途,是勘探煤、盐、硫、石膏、金属、地热、地下水、放射性等矿产资源的重要方法和有效手段,并应用到工程地质、灾害地质、生态环境等领域。在油气藏勘探开发中测井技术是地质家和油气藏开发工程师的“眼睛”,通过测井获得的资料是测井评价、地质研究和油气藏开发的科学依据。

在油田的开发过程中,需要知道在产液或注水过程中有关井内流体的特性与状态的详细资料,其可靠性和准确性是至关重要的。因此测井,是石油勘探开发过程中不可缺少的重要环节。矿场地球物理测井是通过定量测定井下钻穿地层的电、声、光、核、热、力等物理信息,用以判断地层的岩性及流体的性质,确定油、气、水层的位置,定量解释油、气层的厚度,含水饱和度和储层的物性等参数,了解井下状况的一整套技术。但传统的电子基传感器无法在井下恶劣的环境(诸如高温、高压、腐蚀、地磁地电干扰)下工作,而光纤传感器可以克服这些困难。光纤传感器具有灵敏度高、可靠性好、原材料硅资源丰富、抗电磁干扰、抗腐蚀、耐高压(几十兆帕以上)、电绝缘性能好、可绕曲、防爆、频带宽、损耗低等优点,可以高精度地测量井筒和井场环境参数。同时,光纤传感器具有分布式测量能力,可以给出被测量空间的剖面信息。而且,光纤传感器横截面积小,外形短,在井筒中占据空间极小。它还便于与计算机相连,实现智能化和远距离监控。

20 卷第 6 期 (总 120 期)

## 2. 理论上的预期优势

### (1) 温度监测

井内检测区剖面的温度变化可以与其他地面采集的资料(流量、含水、井口压力等)以及裸眼测井曲线对比,从而为操作者提供井下各种参数变化的定性和定量信息。

传统的测温工具只能在任何给定时间内测量某个点的温度,要测试全范围的温度,点式传感器只能在井中来回移动才能实现,不可避免地对井内环境平衡造成影响。

分布式光纤温度传感器具有通过沿整个完井长度连续性采集温度资料,来提供一条监测生产和油层的新途径。光纤分布式温度传感器的优势在于光纤无须在检测区域内来回移动,从而保证井内的温度平衡状态不受影响。而且由于光纤被置于毛细钢管内,因此凡毛细钢管能通达的地方都可进行光纤分布式温度传感器测试。

### (2) 压力监测

由于开发方案的需要,对油藏压力的管理需要特别谨慎,这样做的目的是减少因在低于泡点压力的状态下开采所造成的原油损失,减少在注气过程中因油藏超压将原油挤入含水层所造成的原油损失。

传统的井下压力监测采用的传感器主要有应变压力计和石英晶体压力计,但应变式压力计受温度影响和滞后影响,而石英压力计会受到温度和压力急剧变化的影响。在压力监测时,这些传感器还涉及安装困难、长期稳定性差等问题。

井下光纤传感器没有井下电子线路、易于安装、体积小、抗干扰能力强等优点,而这些正是井下监测所必需的。

### (3) 多相流监测

为了做好油藏监控和油田管理,最关键的环节是获得生产井和注水井稳定可信的总流量剖面和各相流体的持率。然而,大多数油井分层开采,每层含水量不同,而且有时流速较大,给利用常规生产测井设备测量和分析油井的生产状况带来了巨大的困难。液体在油管中的摩阻和从油藏中向井筒内的喷射使得压差密度仪器无法准确测量,电子探头更

是无法探测到液体中的小油气泡。

传统的流体分析方法依赖于定期的生产测试，但随着流动条件的变化会产生误差。当气油比不太高并且井口有空间安装时，地面多相流量计比较适用。但是，许多情况下，地面流量计的应用也有问题，因为当液流上升到井口时产生高含量的伴生气，使确定油和水的体积变得复杂。而在平台上，没有空间在每口井安装一台流量计，就不能对每口井连续测量流量和含水率。变化的流动条件，同样能引入相同的不确定性。另一种方法是在井中尽可能深的位置监测油和水，将含气量降到最低。过去，井下多相流量计依赖于一个简单的文丘里装置及其上方 30~90 米处的一个压力计。在文丘里装置和压力计之间的压差敏感于液柱的静水压力及其密度和流体相的体积百分含量。跨越文丘里装置的液柱内液体的密度和压差给出总的的质量流量。这种流量计有两个问题：首先在高斜度井或水平井中或在有多个储层的井中，对于实际的密度读数，流体静压头不足；其次，简单的静水密度测量忽略了流体相之间的滑动影响。在高斜度井和水平井中流体相之间的滑动产生非常复杂的流型，也使生产测井仪在这种环境下工作变得复杂。经验的滑动模型能够帮助拟合油水两相流间的差距，但在三相流中的应用有限。一个原因是，井下气体密度可能比地面条件下高出几个数量级，并且滑动定律基于取自地面条件下的数据。

光纤测量多相流有两种方法，第一种是美国斯伦贝谢公司的持气率光纤传感仪，该仪器能直接测量多相流中持气率。其四个光纤探头均匀地分布在井筒的横剖面中，其空间取向方位可用一个集成化的相对方位传感器准确测量，在气液混合物中，通过探头反射的光信号来确定持气率和泡沫数量（这二者与气体流量相关联）。此外，利用每个探头的测量值来建立一种井中气体流动的图像，这些图像资料特别适用于斜井和水平井，可以更好地了解多相流流型以及解释在倾斜条件下这些流型固有的相分离。

#### （4）声波测量

声波测井：是通过测量环井眼地层的声学性质来判断地层的特性、井眼工程状况的测井方法，包括声速测井、声幅测井、声波全波列测井等多种测井方法。

与过去相比，勘探开发公司如今面临更大的风

险和更复杂的钻井环境，要想实现更全面有效的监测，地震等声波的测量对于获得准确的地层构造图和油藏机理有着重要意义。

传统的地震测量方法，如拖曳等浮电缆检波器组、临时海底布放地震检波器和井下电缆布放地震检波器等，能提供目的产油区域的测量，但这些方法具有相对高的作业费用，不能下入井内或受环境条件的限制等，而且提供的图像不全面、不连续，分辨率不是很高，因此难于实现连续实时油藏动态监测。

基于光纤的井下地震检波器系统能够解决这些问题，它能提供整个油井寿命期间永久高分辨率四维油藏图像，极大方便了油藏管理。这种井下地震加速度检波器能接收地震波，并将其处理成地层和流体前缘图像。

永久井下光纤 3 分量地震测量具有高的灵敏度和方向性，能产生高精度空间图像，不仅能提供近井眼图像，而且能提供井眼周围地层图像，在某些情况下测量范围能达数千英尺。它在油井的整个寿命期间运行，能经受恶劣的环境条件（温度达 175°C，压力达 100MPa），且没有可移动部件和井下电子器件，被封装在直径 2.5cm 的保护外壳中，能经受强的冲击和振动，可安装到复杂的完井管柱及小的空间内。此外，该系统还具有动态范围大和信号频带宽的特点，其信号频带宽度为 3Hz—800Hz，能记录从极低到极高频率的等效响应。

#### （5）激光光纤核测井技术

核测井 又称为放射性测井，它是根据地层岩石及其孔隙流体的核物理性质，研究地层性质、探测石油、天然气等的一类测井方法。根据使用的放射性源或测量的放射性类型以及所研究的岩石物理性质，可将核测井方法分为两类：以研究伽马辐射为基础的核测井方法称为伽马测井；以研究中子与岩石及其孔隙流体相互作用为基础的核测井方法称为中子测井。包括自然伽马测井、自然伽马能谱测井、密度测井、中子孔隙度测井等。

激光光纤核传感器用于充有原油和泥浆等非透明流体的井中，是在光纤通信和光纤传感器的基础上产生的。它利用了光致损耗和光致发光等物理效应，比常规核探测器具有更多的优越性。光纤核测井技术，实际上就是在特定的环境下的核探测技术，其典型的优点为：

1. 可以针对不同的核探测的能级范围, 研制在该范围的敏感探头。

2. 因为应用了光致发光效应, 可使探头位于千米的井下, 而光电倍增管由传输光缆相连置于井上, 远离了恶劣的井下环境 (高温高压), 从而延长其的使用寿命。

3. 光纤具有高速率、大容量传输能力, 还能搭载其他井下仪器信号。

然而, 激光光纤核探测器也有缺点, 主要表现在耐高温和承受高压的保护涂层、传输光缆的机械强度以及耐辐射的传输光缆低衰减损耗。

传统的油田联合站存在着诸多问题: 检测手段落后, 工作效率低, 没有建立起全站的各项工艺配套技术, 整体的生产协调运行, 设备不是在高效经济状态下运行, 能耗高。原油罐区缺少安全监控系统; 原油稳定和脱水装置采用传统的气动控制仪表, 气信号在传输过程中存在堵、漏、冻现象, 灵敏性和稳定性差使系统运行过程中各类事故频发。

将光纤传感技术引入联合站, 运用光纤传感技术具有的无污染、高绝缘性、抗电磁干扰能力强、检测精度高等特点, 实现非电检测, 非接触式检测, 真正达到本质安全、防爆; 光纤传感器主要应用于光纤液位计, 光纤液位变送器, 光纤流量发讯器, 光纤负压报警器等解决了原油储罐液位检测和报警, 储罐负压检测和报警, 原油流量检测和信号远传, 三相分离器油、水液位检测与信号远传等一系列传统方法无法解决的问题。

系统由外输控制站、内输控制站 (三相分离和稳定控制站)、总控站、原油罐区安全监控系统、事故预案管理等几部分组成, 其中外输控制系统、内输控制系统与总控部分以及原油罐区安全监控系统既具有相对的独立性, 又有着密切的联系构成一个有机整体。系统构成见图 1。

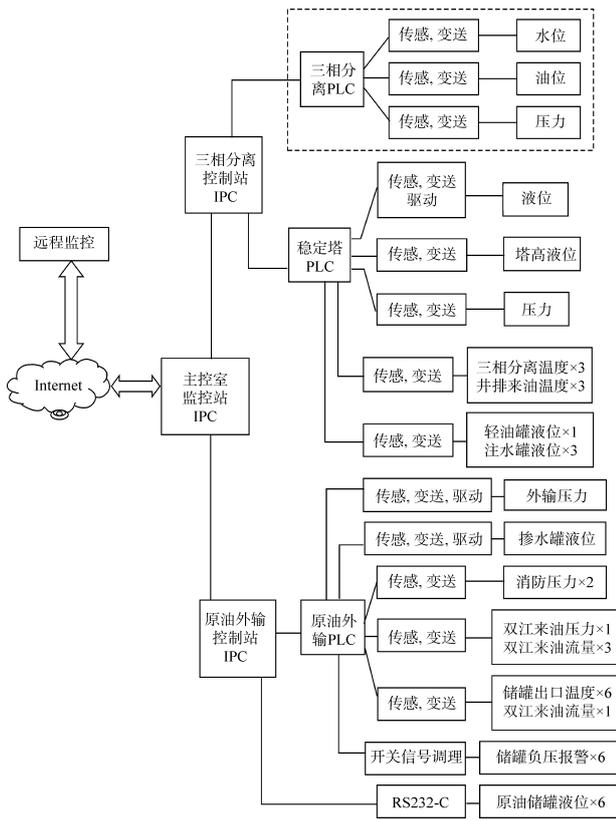


图 1

### 3. 光纤传感的综合应用——油田联合站

油田联合站是原油生产过程中重要的环节之一, 是集原油脱水、原油稳定、污水处理、高压注水、油井掺水拌热、原油储运等工艺于一体的综合生产厂点, 是“一级防火, 甲级防爆”连续生产的要害单位, 其生产过程的检测与监控不仅直接关系到成品原油的产品质量、关系到设备的能耗大小, 更重要的是决定着生产过程的安全平稳运行及原油生产的经济效益。

### 4. 结语

经过了几十年的发展, 我国石油测井仪器的研制开发已具备相当的技术储备。随着新技术在仪器设计上的不断应用, 知识的更新也相应加快, 客观上对技术发展也提出更高的要求。

我国测井技术的发展应致力于以下两个方面:

a) 加强测井仪器的基础理论研究

加强测井仪器的基础理论研究工作, 对于仪器的改进、开发进而拥有自主知识产权具有较大的现实意义。

b) 加强创新与开发工作

利用技术、人才和研究条件的优势, 加大开发力度, 研制新产品。在这方面, 我们要借鉴国外大型石油技术服务公司的做法, 重视科研投入; 注重科研与生产的密切结合; 注重科研协作, 开放式进行重大技术的开发。在技术发展方向上, 密切关注石油公司勘探开发的要求, 搞好超前研究以及做好技术引进等几个方面工作。

(国防科技大学 410072)