

光纤可视化测井技术优化提升与经济效益评价

彭增义（胜利油田分公司油藏动态监测中心，山东 东营 257000）

摘要：光纤可视化成像测井是一种光学测井技术，利用数字图像处理技术，直观、清晰、真实的反映井下管柱内层损伤状况，在井下事故排查及落鱼打捞工作中，具有无可比拟的优越性。本文通过利用光的吸收及损耗定律，确定渡越时间，对光纤链路损耗进行分析，定量评价光纤传输系统性能指标，应用图像增强处理技术，建立图像分析与处理模型，进行图像优化增强处理，提高光电视像的图像清晰度和分辨率等一体化优化路径，使光纤可视化成像测井技术得到全方位、系统化提升，为该技术进一步推广奠定基础，并对油田应用情况进行效益评价，具有广泛的应用价值。

关键词：光纤可视化成像测井；光纤通信；数字图像处理；浊度；可视化距离；接口码率；辅助结构；效益评价

0 引言

按照胜利油田“十四五”重点工作实施方案要求，油田将加强精细注水工作，强化停产停注井、双低单元治理，以提升地层能量、降低递减率为核心，强化夯实老区稳产基础工作，精细油藏描述，提高经济采收率，“十四五”末稀油自然递减率控制在10%以内，稠油油气比保持在0.55以上，化学驱增油140万吨。井筒完整性是保障重点工作顺利实施的重要保障。受地质、工程、开发方式和井身结构等综合因素影响，井筒技术状况随着开发年限的增加而变差，井下故障呈逐年增加趋势，且故障复杂程度及井下故障排查难度增大，导致作业难度增大。光纤可视化测井技术能够直观指导作业措施的实施，大幅降低复杂井作业成本，缩短占井周期，提高时率时效。

1 仪器结构

1.1 地面部分

地面部分由地面计算机采集显示、深度测量、地面光端机（光接收机）、光电滑环组成。

1.2 井下部分

井下部分由光纤测井电缆、光电一体化鱼雷接头、井下光端机（光发射机）、CCD成像、后置LED光源组成。

该仪器像素高，视频流畅，达到高清视频标准，采用过油管测试技术，施工示意图如1-1。

2 技术原理及性能评价

光纤通信系统是由光纤和光端机组成。光纤作为最底层的承载网络，已成为现代通信的主要支撑，已成熟应用于各种数据传输场景，光纤可视化成像测井技术就是其中之一。

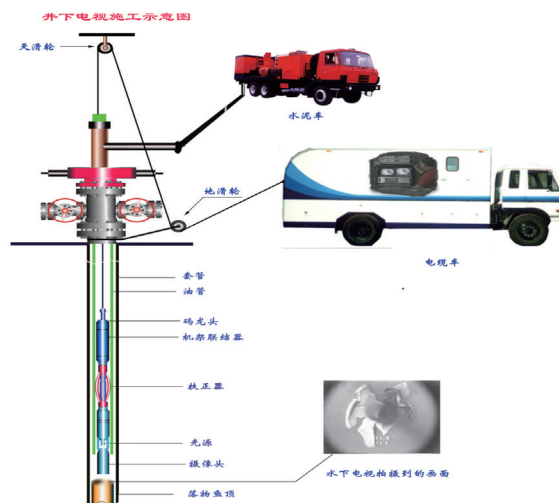


图 1-1 测井施工示意图

2.1 光纤结构及性能评价

光纤通信原理是依靠光的全反射进行传输，具有通信容量大、传输距离远的特点。光纤通信的工作波段位于近红外区，受光纤传输特性的影响，存在4个低损耗窗口光纤通信的工作波段位于近红外区，波长介于760nm~3000nm之间。主要原因是光纤损耗随波长增加而减小，通信窗口中损耗和散射相对较低。SiO₂中硅基对波长 $\lambda > 1700\text{nm}$ 的光吸收强烈。

2.1.1 光纤结构及性能特点

光纤的结构主要包括纤芯、包层、涂覆层。纤芯采用高折射率玻璃纤芯，纤芯主要采用高纯度的SiO₂，掺有少量的掺杂剂（锗），提高纤芯的光折射率 n_1 。包层采用低折射率的SiO₂，降低包层的光折射率 n_2 。当 $n_1 > n_2$ ，光信号在光纤和包层界面发生全发射。涂覆层是紫外光固化的一层弹性涂料。涂覆层能够保护光纤表面不受水解反应和应力损伤，赋予光纤提高

抵抗微弯性能,降低光纤的微弯损耗。

2.1.2 光纤传输特性:损耗

光纤链路损耗主要包括吸收损耗、散射、反射、弯曲损耗和接续损耗,光纤链路损耗是光纤传输的重要指标,直接决定光纤通信的传输距离。吸收损耗主要为材质吸收、金属离子的吸收、光纤杂质吸收等,能够用于确定光纤通信窗口。散射主要表现为背向散射。散射光中,部分光逆向传播,强度小,是时域反射仪的主要原理,能够进行光纤性能评价。弯曲损耗:分为宏弯损耗和微弯损耗。宏弯恢复后,宏弯损耗消失。光纤受到水解反应或应力损伤,产生微裂纹,造成微弯损耗,无法恢复。

2.1.3 光纤性能评价

光纤衰减系数 α 是评价光纤损耗的关键参数,每公里光纤对光信号功率的衰减值 α (dB/km)。利用时域反射技术,实现事件 A、B 之间的光纤衰减系数 α 测量。其公式为: $\alpha = 10 \lg P_1/P_2/L$, 其中, α : 光纤衰减系数; P_1 、 P_2 : A、B 事件点的光功率值; L: 间距。利用光纤衰减系数能够实现对事件点的精确定位以及对光纤性能定量评价。

2.2 光端机性能评价

接口码率计算光纤通信系统线路编码 PCM: 对连续变化的信号进行抽样、量化和编码产生光纤传输的数字编码信号。编码规则及目的是确定取样频率,按照取样定理进行取样,防止出现信号失真。利用分时复用技术增加带宽、提升数据传输速率。

2.3 CCD 成像原理及技术优势

利用二极管的光电效应,CCD 图像传感器将光信号转换为数字信号,通过分层采集、数字化处理技术,实现了图像的高清采集,其原理是井下物体反射光通过 CCD 图像传感器,传感器内部二极管的光电效应,受到光线的激发释放出电荷,将光信号转化为电信号,通过多级处理转化成数字信号。图像技术优势是像素高、图像清晰。

3 应用场景及实例

光纤可视化测井主要应用于以下场景: ①井下套管监测; ②井下落鱼监测; ③指导井下作业和井下作业效果评价; ④射孔质量检查,可清晰观测到射孔孔眼的分布; ⑤油水井出砂、出油、出气、出水位置以及探测砂面位置。

应用实例 1: XXX 井井下落鱼的观测

利用光纤可视化成像,对 XXX 井水泥桥塞顶面

进行监测,确定水泥桥塞状况。

测井成果: 2022.7.14 日测井,水泥桥塞顶部残留水泥、螺母、水泥块、堆积物等杂物。

应用实例 2: 井下故障的诊断 --- 油管错段

该井长停恢复,井下管柱不明,通井遇阻,大修队搬上,根据铅印形状,怀疑井下套管错断。测井成果: 2022.7.22 日测井,确定遇阻部位为油管断面、油管挤扁,非套管错段。

4 测试成功率影响因素分析及措施

4.1 测试成功率影响因素分析

测试成功率的影响因素主要分为两类: 一是测试遇阻影响。工序管内壁结垢,造成摩阻增大,导致测试遇阻; 二是水质因素影响。水质不达标,井液浊度高,造成可视化距离短。

4.2 分类优化、一体化提升的路径

提升井下可视化电视成功率主要有以下办法: 一是依托 MATLAB 软件应用,提高混浊井液中图像清晰度和分辨率; 二是空间域图像增强技术,直方图均衡化处理技术。

4.2.1 图像增强处理技术——灰度变换

通过构建灰度变换模型,采用 MATLAB 软件进行模型运算,实现图像增强。利用反转函数将黑色部分变为白色,白色部分变为黑色; 利用不变函数实现输入亮度与输出亮度相等,图像灰度未进行更改; 利用不变/恒等函数使输入亮度与输出亮度相等。

4.2.2 灰度变换模型的构建

幂函数的计算 $s = cr^\gamma$, 其中: C- 调整参数; γ -伽马为指数

幂函数变化效果分析:

$\gamma < 1$ 时,随着 γ 值的减小,灰度区域迅速变亮,达到 $3/4L$ 亮度值。

$\gamma > 1$ 时,图像灰度值 $< 3/4L$ 亮度值,输出图像亮度迅速减小,整幅画面变暗。

利用幂函数为模型,对图像进行灰度反向调整,随着 γ 值的减小,灰度区域逐渐变亮,效果明显。

4.3 原油物性影响及粘滞阻力定量计算

粘滞阻力的计算,为测试井进行了定量优选。仪器从下放到遇阻状态,为低雷诺系数下的运动,随着速度降低,雷诺系数逐渐减小,仪器所受的阻力由型阻变为粘滞阻力,原油粘度与粘滞阻力成正比,直接影响仪器的粘滞阻力大小。

低雷诺系数条件下,物体的阻力为粘滞阻力:

$$F_d = 1/2 C_D \rho V^2 s = 1/224 / Re \rho V^2 s = 1/224 \mu / \rho v d \rho V^2 s = 3 \pi \mu V D$$

μ : 液体的运动粘度; D : 物体半径; v : 速度。

仪器所受粘滞阻力 F_{dmin} 临界值计算: 以现场测试数据为基础进行计算

$$F_{dmin} = 3 \pi \mu V D = 3 \times 3.14 \times 2576 \times 600 / 3600 \times 54 / 2 / 1000 = 100.75 N$$

4.4 扶正器性能评价及优化设计

形扶正器的优化设计, 减少摩阻, 降低测试遇阻率。通过弓形扶正器模型构建及受力分析, 可以看出仪器所受摩阻 $F_{摩}$ 与扶正器外径 D_0 成线性关系, 扶正器外径 D_0 越大, 仪器所受摩阻 $F_{摩}$ 越大。

仪器过油管测试中, 仪器遇阻受力状况分析:

$$mg \cos \alpha \leq F_{摩} = 2EJ \mu (D_0 - D_{管柱}) / kh + F_{浮力}$$

$$60 \times 9.8 \times 1 \leq F_{摩} + 3.14 \times 54 \times 54 / 4 / 1000 / 1000 \times 6 \times 0.98 \times 1000$$

弓形扶正器形成的摩擦阻力 $F_{摩}$: $F_{摩} \geq 352.29 N$

$$k(200-62) \geq 352.29$$

计算系数 k : $k \geq 2.55$, D_0 : 弓形扶正器支撑臂自然状态下的尺寸 200mm;

摩擦阻力与扶正器外径的关系: $F_{摩} \geq 2.55 \times (D - 62)$

进行扶正器的优化设计:

针对不同施工工艺, 对扶正器分类优化, 定量计算

$$\frac{200-124.26}{200} = \frac{D_{优化}-62}{D_{优化}}$$

$$D_{优化} = 99.79 mm$$

数据结论: 按照施工工艺, 对扶正器进行分类优化、定量计算:

过套管测试施工应用 $D_{外径} = 200 mm$ 扶正器。

过油管测试施工扶正器外径由 $D_{外径} = 200 mm$ 优化到 $D_{优化} = 100 mm$, 仪器摩阻由 352N 减少到 97N, 摩阻减小 255N, 效果明显。

扶正器分类优化的效果: 明显减小仪器摩阻, 降低测试遇阻率; 拓宽仪器应用范围, 提高仪器适应性, 测试井的原油粘度由 2576 mPa·s 提高到 9742 mPa·s。

4.5 光的吸收及返出液浊度影响

光在液体中的吸收, 决定了光的传播距离。光纤可视化测井的可视化距离取决于井液浊度, 井液浊度成为测试成功率的关键因素。

返出液浊度	可视化距离 D	提升成功率措施
浊度 < 10	$D < 1.2 m$	满足测试要求, 测试效果较好
$10 < \text{浊度} < 50$	$D < 0.9 m$	基本满足测试要求
$50 < \text{浊度} < 100$	$D < 0.5 m$	建议采用过油管测试技术、实施边测边洗施工工艺: 喇叭口下放至距离落鱼 0.3m, 满足可视化距离 $D < 0.5 m$ 的要求, 配套正循环洗井, 可有效提高图像清晰度及可视化距离。
浊度 > 100	$D < 0.1 m$	需大排量洗井, 洗井完成后, 进行测试

对前期测试施工进行总结, 通过浊度与可视化距离相关性探讨, 利用浊度梯度显示, 总结出了浊度与可视化距离的关系以及针对性措施, 提出了根据不同浊度进行优化施工的建议, 指导现场施工, 提高测试成功率。

5 经济效益分析

经济效益: 自 2022 年 7 月份引进光纤可视化测井技术以来, 在胜利油田东部油区共实施测井 53 井次, 成功 48 井次, 成功率 90.1%, 按照 8.5 万元 / 井次计算, 经营收入 $8.5 \times 48 = 408$ 万元, 单井节约占产时间 4 天, 累计节约作业费用 384 万元, 引进仪器设备成本为 225 万元。经济效益为 $408 + 384 - 225 = 567$ 万元。

6 结语

随着油田开发难度加大, 对动态监测技术的要求也越来越高。光纤可视化成像测井具有像素高、视频流畅、“所见即所得”等优点。在指导复杂井打捞、套管井问题诊断、射孔效果评价等方面具有无可比拟的优势, 能够辅助作业提质提速提效。

下步将实施一体化优化, 及时有效解决现场应用中存在的问题, 同时强化施工流程及过程监督, 提高井下电视测试成功率, 同时进一步拓宽仪器应用场景, 使井下电视成为胜利监测的品牌业务和新的创效增长点。

参考文献:

- [1] 郭海敏. 生产测井导论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003(08):24-26.
- [2] 张家田. 可视化测井技术的发展、装备及应用 [J]. 测井技术, 2018(10).
- [3] 王旭. 连续油管井下影像测井在套变诊断中的应用 [J]. 开采工艺, 2022, 6(12):96-99.