

深井摄像测井系统关键技术研究

郑黎^{3,4} 刘玉珊² 何俊华¹ 卢笛¹ 张新政³ 张勇³ 陈良益¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所水下光电探测研究室, 西安 710068)

(2 濮阳市巨业石油技术发展有限责任公司, 濮阳 457001)

(3 宝浪油田开发项目经理部, 库尔勒 841000)

(4 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 介绍了深井摄像测井系统的总体结构和工作过程, 研究了系统的耐高温、高压, 密封防护和视频信号无中继远距离传输等关键技术. 现场试验表明该系统总体性能指标达到了设计要求.

关键词 耐高温; 井下电视; 测井; 水下探测

中图分类号 TB853.1+8 **文献标识码** A

0 引言

长期以来, 人们一直在试图寻求获取井下套管技术状况的手段, 以便对井下一些特殊问题进行研究, 并先后开发出了多种井下技术状况检测仪表. 如以检测井下套管变形状况为主的 XY 井径仪和多臂井径仪, 以检测套管腐蚀状况为主的垂直测井仪, 以检测井下套管破损和变形状况为主的井下超声成像测井系统等. 这些测井系统虽然都能获得井下套管技术状况的某一方面的信息, 但所获取的信息不直观, 解释准确度差, 误差大, 尚没有获得普遍应用. 1991~1994年, Arco Alaska 公司和 Halliburton 公司研制了一种新型的光纤电缆井下电视探测系统, 用于普鲁得霍湾进行井下诊断, 它可以清楚地观察射孔孔眼的流入状况, 油水剖面以及油套管的完整性. 井下摄像测井系统能通过摄像机把油井内部的情况拍摄下来, 并实时传送, 从而准确、直观、清晰地显示井内任何位置的图像, 是一种非常重要的测井手段. 在国内, 对它的研究较少^[1]. 通过对 Arco Alaska 和 Halliburton 公司产品的分析, 我们对系统的耐高温、高压, 密封防护和远距离及信号传输等一系列问题作了研究, 开发了潜龙-I型深井下摄像测井系统, 通过工业性现场试验表明, 该系统运行稳定, 总体性能指标达到国外同类产品先进水平.

1 系统结构和工作过程

该系统包括井下工作部分和井上部分, 见图 1. 工作过程是: 将井下工作部分用电缆和地面仪器相连; 由地面上的电源供电, 检查整个系统的工作状态是否良好; 用缆车由专用电缆将井下工作部分置入

测井目的井中, 根据测井设计要求对目的井段进行检测, 一般情况下采用下放测试, 也可采用上提测试; 根据得到的图像并结合深度指示器对井壁进行观察, 发现问题后, 可采用反复检测或停留检测, 并将对目标井段的测试图像记录在录像机磁带上或由计算机采集在计算机硬盘上; 完成测井任务后, 对所存储的图像资料进行回放、分析或处理, 并编写测井解释报告.

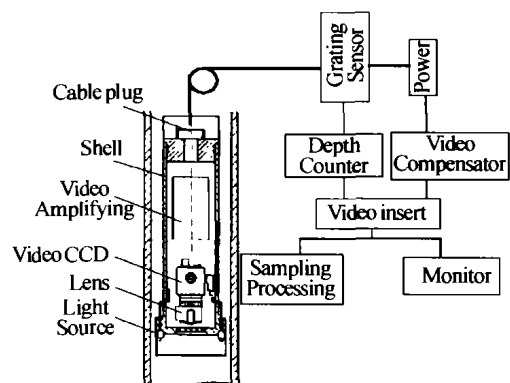


图1 井底摄像测井系统结构
Fig. 1 The scheme of down-hole video system

2 关键技术研究

2.1 照明系统

水对光的吸收(衰减)非常大, 而且水中存在着各种悬浮物, 这些悬浮物对光有散射作用, 当光强较大时, 散射更严重. 因此, 光在水中不能远程传输^[2]; 虽然水中光衰减大的问题可以用加大光强的方法解决, 但水中悬浮物引起光散射, 增大光照强度不起作用. 故照明灯的位置应尽可能接近目标以减少散射光对图像质量的影响. 由于在井中作业, 空间有限, 径向尺寸要求尤其严格, 我们将光源和摄像机做成一体, 光源放置在摄像机的最前端, 匀布在镜头的周围, 使照明均匀, 以减小照明光束与摄像机视场的重叠区域, 同时消除照明中的灯丝成像, 进而降低了背向散射光对成像光束的干扰, 提高了图像的

衬度和分辨率,提高了整个系统的图像质量和可视距离;使用卤素灯作为井下照明光源,充分利用其发射光谱与井下光学透射窗口相匹配的特性,达到发光效率高、功耗小、提高目标图像细节分辨能力的目的. 照明方式有三种(见图2):a)对照式:即将照明光源作为独立部分通过固定架固定于井下摄像机的前端. 这种照明方式的优点是结构简单,摄像机的尺寸容易控制,光源可根据不同情况进行更换;其缺点是图像的中央有暗斑和支架的影像,同时对于观察井中落物不方便. b)采用光纤传光束的照明方式:它由光源、耦合透镜、照明光纤组成照明系统. 耦合透镜负责将光源的光能进行会聚,并投射到照明光纤的输入面上,最终经分束光纤传输至系统的最前端,将光照射到井壁. 这种照明方式的优点是结构完整,井下摄像机的外形尺寸容易满足要求,图像中无其他干扰,便于观察;其缺点是更换光源困难,光能利用率低,技术复杂,且使系统内部温度较高,如处理不当,会直接影响摄像机的正常工作. c)前端照明方式:它是将多个体积较小的照明灯泡固定在摄像机的周围,直接对井壁进行照明. 这种照明方式的优点是光能利用率高,维修更换方便,照度均匀,不会对摄像机产生影响;其缺点是对灯泡本身的耐压要求高.

经论证:方案c)最具有可行性和实用性,方案b)次之,但其主要缺点是造价高,方案a)基本不予考虑.

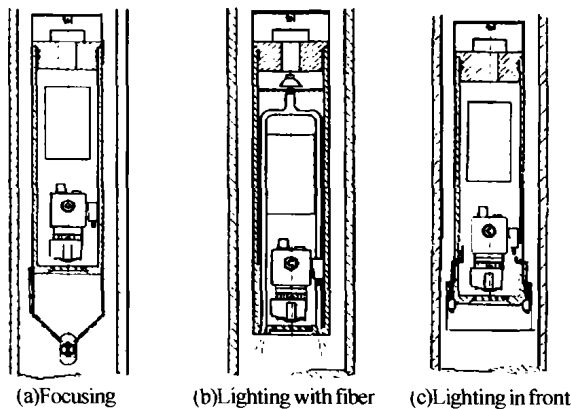


图2 系统的灯光照明
Fig. 2 Kinds of lighters of the well-logging video system

2.2 成像系统

成像系统是整個系统的关键部分,主要有成像物镜、光电成像器件 CCD. 成像物镜是将所成的井壁图像成在光电成像器件 CCD 的靶面上,由于深井摄像测井系统是在注水井或采油井中工作,周围介质为油水混合物(90%以上的水),由于水的折射比空气大,所以在水中,摄像机的视角比在空气中小1/4. 为了获得与空气中同样大小的视场角,需选用水下专用成像物镜^[3]. 又考虑到井下油水混合物的

折射率对光学成像质量、油水混合物对光的散射与吸收的影响,以及成像镜头与光学壳窗的配合等问题,我们专门研制出专用井下作业摄像镜头,在研制过程中,还考虑了壳窗的耐压与防腐等多种因素,同时采用自动光圈、遥控调焦和自动增益等技术,以适应深井下特殊环境的使用要求. 其中摄像机和自动光圈等关键器件均采用进口器件,该光学系统具体设计指标如下:

图像类型:黑白,实时,视频制式(PAL);分辨率:420 TVL(水平);灵敏度0.02Lux,可视距离:≥0.1 m(与水质有关);视场角:70°;工作方式:自动光圈,固定焦距;工作深度:3000 m;工作温度:-5 ~ +120℃;耐压35 MPa.

2.3 信号无中继远距离传输系统

信号传输系统主要包括视频信号传输、控制信号传输和电力传输. 由于传输距离远(≥3000 m),视频信号的传输是本项目的难点之一. 通过适当的方式实现长距离、低失真的视频信号传送是保证电视监控系统基本质量和应用范围的关键. 视频传输一般有下面三种形式,同轴电缆传输、射频方式传输、光纤传输. 射频方式传输理论上是可以的,但实际上由于要将视频/射频调制器装在井下摄像机内,而摄像机外径有限,所以实现起来困难很大;同样光纤传输方法需要光发送端机,其体积不仅大,而且摄像机外径尺寸不允许,造价也高,还要解决继流环的连接问题. 但采用同轴电缆传输要保证宽带信号具有高的S/N和低失真是很困难的,必需解决好信号衰减及信号补偿的问题.

设计电缆时对具体电缆的信号衰减特性进行了大量的工作,一方面保证电缆有很小的衰减,另一方面对不同频率的衰减量进行了实际测量. 在视频补偿电路中,对不同频率的衰减量进行反向补偿,达到恢复原视频信号的目的. 控制信号和电力传输采用高压直流电源,避免大电流造成电源损失及对视频信号的干扰.

2.4 密封防护系统

密封防护系统是本系统的另一个关键部分,它由密封壳体、隔热层和石英玻璃防护窗组成,负责对其内部设备的防水和隔热保护. 其中密封壳体选用不锈钢材料制成,以保证有足够的强度和耐腐蚀性,形状选为圆柱体,设外圈受均匀压力 q_b ,外圆半径 b ,内圆半径 a ,则径向压力为式(1),周向压力为式(2),轴向压力为式(3)

$$\sigma_r = -\frac{q_b b^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \tag{1}$$

$$\sigma_{\theta} = -\frac{q_b b^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (2)$$

$$\sigma_t = -\frac{q_b b^2}{b^2 - a^2} \quad (3)$$

根据材料力学的第四强度理论^[4], $\sigma_{d4} < [\sigma]$, ($[\sigma]$ 为某材料的许用拉应力), 即

$$\sigma_{d4} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_r - \sigma_{\theta})^2 + (\sigma_{\theta} - \sigma_t)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2]} \quad (4)$$

将式(1)、(2)、(3)代入式(4)得

$$\sigma_{d4} = \frac{q_b b^2}{b^2 - a^2} \sqrt{3 \frac{a^4}{r^4}} \quad (r = a, \sigma_{d4} \text{取最大值}) \quad (5)$$

壁厚由式(5)计算出 a, b 和 $[\sigma] = 196 \text{ Mpa}$ (不锈钢材料)为已知的, 根据仪器设计工作压力和所选用材料的许用应力, 由上式计算所得到的为 5.8 mm , 为安全起见取 7.5 mm .

隔热层采用保温瓶方式, 其外壁与壳体内壁相贴, 隔热层为 10 mm 厚, 双层绝热层外还包有多层航天专用绝热纸. 此外, 在双层绝热筒内还装有特殊吸热材料. 通过上述综合绝热措施, 可以确保在外部环境温度为 120°C 的情况下, 正常工作 3 h 以上, 满足仪器内部温度低于 55°C 的要求. 防护窗选用石英玻璃制成, 因为石英玻璃的硬度高, 耐压性能好, 抗磨损. 石英玻璃作为成像系统的一部分和光学镜头一起设计. 其强度核算如下

$$[\sigma] = \sigma_{\max} = \frac{1.24 q_b a^2}{t^2} \quad (6)$$

式中: $[\sigma] = 98 \text{ Mpa}$ 为石英玻璃许用拉应力, t 为厚度. 经核算, 石英玻璃的厚度 $t = 17 \text{ mm}$. 壳体前后部分的密封采用多道“O”型圈密封方法, 以保证井下部分在深井中安全工作.

3 现场工业性试验

2003年7~8月, 在新疆宝浪油田进行了工业性试验, 先后测井3口(注水井2口, 采油井1口), 均圆满地完成了预定的测井任务. 本次试验的最大测试深度 2500 m , 根据井深和地温梯度测算, 仪器工作时的环境压力为 25 MPa , 温度为 110°C 左右, 仪器在井下工作时间长达 5 h , 主要技术指标与国外同类产品比较, 见表1.

表1 与国外同类产品性能参数比较

型号	潜龙-I型	Sondex (英国)	DHV (美国)	Hitwell (美国)
外径/mm	89	54	43	60
长度/mm	850	2030	2850	1460
最大工作压力/MPa	40	103	69	69
最大工作温度($^\circ\text{C}$)	120	150	107	200
最大工作深度(M)	3000	4100	4267	5486
图像类型	黑/白	黑/白	黑/白	黑/白
视场角($^\circ$)	50	68	73	63
分辨率(TVL)	420	420	550	400
最小成像距离/cm	15	25	20	25
图像观测方式	实时	非实时	非实时	非实时
光圈控制	自动	自动	自动	手动

从表1的数据可以看出, 潜龙-I型深井井下电视摄像系统主要技术指标已经达到或接近国外同类产品水平, 部分技术指标, 如图像传输速度, 超过国外产品水平.

3 结论

井底摄像测井系统克服了水下摄影机的缺点, 具有低照度性能好、视场大、图像清晰、动态范围宽、实时性好、体积小、操作方便等特点. 它直观地获取井下有关资料, 进而对测井结果进行确切解释. 此系统填补了国内空白, 可以替代进口产品.

参考文献

- 孙传东, 李驰, 陈良益. 新型水下电视系统的研制和应用. 电视技术, 1998, (12): 21~24
Sun C D, Li C, Chen L Y. *TV Engineering*, 1998, (12): 21~24
- 孙传东, 陈良益, 高立民, 等. 水下微光高速光电成像系统作用距离的研究. 光子学报, 2000, 29(2): 185~189
Sun C D, Chen L Y, Gao L M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(2): 185~189
- 孙传东, 李驰, 张建华, 等. 水下成像镜头光学设计. 光学精密工程, 1998, 6(5): 5~11
Sun C D, Li C, Zhang J H, et al. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(5): 5~11
- 苏翼林. 材料力学(第二版, 上册). 北京: 高等教育出版社, 2001. 193~204
Su Yilin. *Materials and Mechanics (Second Edition, I)*. Beijing: Higher Education Press, 2001. 193~204

Study on Key Techniques of Down-hole Well-logging Video System

Zheng Li¹, Liu Yushan², He Junhua¹, Lu Di¹, Zhang Xinzhen³, Zhang Yong³, Chen Liangyi¹

*1 Department of Underwater Photoelectric Detection, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068*

2 Puyang Juye Petroleum Technology Co., Ltd., 457001

3 Baolang Oilfield Development Manager's Department 841000

4 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2003-09-26

Abstract The architecture and work procedure of the well-logging video system are introduced. The key techniques of high-temperature resistance, high-pressure resistance, seal, and long-distance video signal transmission with no delay are analyzed. On the field test, it indicates that general performances meet requirements of the system's design.

Keywords High temperature resistance; Down-hole TV; Well logging; Underwater detecting



Zheng Li was born in 1973, in Henan Province. He received his BSc degree from Jilin University in 1996 and M. S. degree from National University of Defense Technology in 2001. Now he is a Ph. D. candidate in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His interests are electro-optical technology and optical fiber sensors.