

'94 国际石油与石油
化工科技研讨会论文

UCT——新型固井质量检测系统

郑侠光 周锦清
(江汉石油管理局)

1994年9月 北京

UCT——新型固井质量检测系统

摘 要

UCT 是能同时检测固井水泥第一界面和第二界面胶结质量的新型测井设备。本文介绍了其测井方法、仪器、刻度、解释及现场试验情况。依据多层介质反射波理论和半波层原理,选用了超声单探头井下垂直旋转扫描;以实体模型实验为基础,研究了水泥胶结特征信号的获取和识别方法;高速数字采样、频谱分析和人工神经网络等技术研究了仪器硬件和软件;配置了标准的刻度模型井群。UCT 不但具备国内外同类仪器工程测井的功能,而且具备独特的“第二界面检测”功能。

引 言

固井质量检测,是石油勘探开发中必不可少的工程测井作业。国内外普遍采用声波测井方法检查固井质量。主要测井装备为:

1. CBL 在套管井井轴上放置源距 1m 的单发单收声系,记录“套管波”首波幅度,根据幅度变化估判水泥返高位置,确定套管接箍位置,估判水泥与套管之间(第一界面)胶结质量。这种估判有时不准确。

2. CBL-VDL 在测井原理上与 CBL 相同,但增加了接收探头的数目,除了记录“套管波”首波幅度,还用变密度显示记录若干后续波列,改进了解释方法,能判别第一界面胶结,并能估判水泥与地层之间(第二界面)胶结,但对第二界面估判是定性的、粗略的。

3. CET 和 PET 采用 8 个高频声学探头互差 45° 方位构成声系,记录每个探头在套管井壁附近的反射信号,对信号开窗积分估算水泥抗压强度,评价第一界面胶结质量,对微环空间不敏感。其方法原理明显优于 CBL。

4. SBT 采用 6 个滑板 12 个定向高频声学探头的声系,测量套管井周围 6 个 60° 区块纵、横向声幅衰减,具有 CBL 和 VDL 的功能,可评价第一界面同时估判第二界面胶结质量。

5. USI 采用超声脉冲单旋转探头测井,确定水泥声阻抗,评价井周第一界面水泥胶结质量

及套管腐蚀情况。

上述固井质量检测仪器虽然工作原理各异,但都仅具备检测第一界面固井质量及套管参数等功能,无法准确检测第二界面的固井质量。检测第二界面,是石油工业生产中亟待解决的课题。

中国石油天然气总公司江汉测井研究所,于 1992 年研制的超声固井质量检测系统(UCT),是在对比分析了国内外同类测井技术的基础上推出的新型测井装备。采用满足套管透射特性的超声脉冲单探头旋转声系,垂直井下扫描记录井周全波列反射信号,运用时域频谱分析和人工智能解释技术,能可靠检测两个界面水泥胶结质量及各种井参数。本文对此作一介绍。

UCT 测井方法

1. 测井原理

固井后的套管井模型如图 1 所示,由泥浆、套管、间隙(第一界面)、水泥、间隙(第二界面)、地层组成。换能器作为发射器和接收器,在其井轴定位,向套管垂直发射出短的超声脉冲波群,在套管中波前聚焦成圆筒状,透射套管外介质,并在各介质界面反射,按相反路径返回,被换能器接收。换能器为 1 英寸圆板状声源,在超声波的频率范围,来自这种声源的波前较好地近似于平面波;在换能器的几何尺寸范围,套管井各介质较好地近似平面层状模型^[1]。

UCT 检测方法依据的是平面波在平面层状

• 参加研究的还有陈铁汉、应兆闾、宋永华、胡恒山、强毓明、雷芙蓉、魏宗周等人。

模型中的透射特性和半波层原理。设有如图 1 所示的平面层系,图 1a 为两半空间介质,其密度和声速分别为 $\rho_i, V_i (i=0,1)$,平面波从 0 介质向 1 介质垂直入射,在分界面上的反射系数 R 和透射系数 W 为^[2]:

$$R_{10} = \frac{\rho_1 V_1 - \rho_0 V_0}{\rho_1 V_1 + \rho_0 V_0} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (1)$$

$$W_{01} = \frac{\rho_0}{\rho_1} (1 + R_{10}) \quad (2)$$

脚码 0、1 表示声波传播方向从 0 介质指向 1 介质, Z 为介质声阻抗。图 1b 为中间增加层厚 d 、密度 ρ_i 、声速 V_i 的平行介质,则平面波的反射系数 R 和透射系数 W 为

$$R = \frac{R_{10} + R_{1t} \exp(2ik_t d)}{1 + R_{10} R_{1t} \exp(2ik_t d)} \quad (3)$$

$$W = \frac{4Z_1 Z_t}{(Z_1 + Z_t)(Z_t + Z_0)} \cdot \frac{1}{\exp(-ik_t d) + R_{1t} R_{10} \exp(ik_t d)} \quad (4)$$

式中, $R_{ij} = \frac{Z_j - Z_i}{Z_i + Z_j}$, $Z_i = \rho_i V_i (i=0, t, 1)$, $K_t = \frac{f_t}{V_t}$ 为波数,当

$$d = \frac{m}{2} \lambda \quad (m = 1, 2, \dots) \quad (5)$$

即 $2K_t d = 2\pi m$ 时, (3) 式和 (4) 式分别为

$$R = \frac{R_{10} + R_{1t}}{1 + R_{10} R_{1t}} = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} = R_{10} \quad (6)$$

$$W = \frac{4Z_1 Z_t}{(Z_1 + Z_t)(Z_t + Z_0)} \cdot \frac{1}{1 + R_{1t} R_{10}} = 1 + R_{10} \quad (7)$$

对照 (6) 式与 (1) 式、(7) 式与 (2) 式可知,此时厚 d 的 t 介质相当于一个透明层,这就是半波层原理。

UCT 对换能器的超声频率范围进行了选择,以保证厚度 d 的套管具备最大透射特性:使到达套管的波前能最大限度透射套管,进入水泥环和地层;使两个界面反射回来的波前又能最大限度透射套管,被换能器接收。这是获取第一、二界面反射波信息的决定性条件。

2. 模拟研究

在图 1 所示的套管井模型中,可能有下述四种区分十分明显的水泥胶结界面状态和自由套管井(FP),其相应介质结构及层数 N 为

$G_1 G_2$ ——套管、水泥、地层; $N=3$

$G_1 B_2$ ——套管、水泥、间隙(水或气)、地层; $N=4$

$B_1 G_2$ ——套管、间隙(水或气)、水泥、地层; $N=4$

$B_1 B_2$ ——套管、间隙(水或气)、水泥、间隙(水或气)、地层; $N=5$

FP——套管、水、地层; $N=3$

G 、 B 分别为胶结好、胶结不好标志,脚码 1、2 代表第一、二界面。在这种多层平面介质系统中,文献[2]给出了反射系数的普遍形式

$$R = \frac{Z_{\text{输入}}^{(n)} - Z_{n-1}}{Z_{\text{输入}}^{(n)} + Z_{n-1}} \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

$$Z_{\text{输入}}^{(n)} = \frac{Z_{\text{输入}}^{(n+1)} - iZ_n \text{tg}(k_n d_n)}{Z_n - iZ_{\text{输入}}^{(n+1)} \text{tg}(k_n d_n)} \cdot Z_n$$

如果入射到井壁的声压波形为 $f(t)$,其复频谱为 $F(\omega)$,则反射波复频谱为 $F(\omega)R(\omega)$;其中的反射波频谱 $R(\omega)$,反映了多层介质中各层的厚度特性、阻抗特性、衰减特性及层间界面胶结状态等特征信息,但 $R(\omega)$ 是一个繁复的解析表达式,可采用计算机数值模拟计算的方法来实现。图 2 为泥岩地层模型模拟计算的开窗反射波谱,参数列于图侧。

从频谱图中可以看出,各种界面胶结状态的特征信息明显,主要反映在谱陷(或负峰)的数量和形状上(在套管的谐振频率 f_0 附近的谱区范围内)。若层系介质界面胶结良好,则谱陷可能只在 f_0 处有一个,谱陷形状宽而平滑,谱陷较浅,若层系介质界面胶结不好,则谱陷可能有多个,这些谱陷形状窄而尖锐,谱陷较深。分析这些谱陷特征,其四种胶结状态区别较明显。进一步分析反射波频谱幅度也可以看出:胶结良好,其谱峰低;胶结不好,其谱峰高。这些反映了层系介质界面处的超声波透射性能。

模拟研究结果表明,套管井水泥胶结两个界面的特征信息是可以提取和识别的,这为方法研究指出了方向:通过反射波频谱分析方法,可以判别第一界面和第二界面水泥胶结质量。模拟研究对进一步开展实物模型的实验研究,具有指导意义。

3. 模型井实验研究

(1) 胶结质量识别

建造四种胶结状态的模型井,在模型井中测量记录的反射波,是套管外各介质界面反射波和干扰波迭加的结果,其幅度或谱峰、谱陷常因这些干扰波迭加而比模拟计算的复杂得多,直接识别胶结特征较为困难。

采取褶积滤波方法^[3]可以提取两个界面的特

征信息。根据模拟计算研究的套管谐振频谱区域 ($f_0 \pm \Delta f$), 设置褶积因子 $H(\omega) \leftrightarrow h(t)$, 对反射波记录 $X(t)$ 进行褶积运算

$$X(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) X(t - \tau) d\tau \quad (9)$$

褶积滤波的 $\hat{X}(t)$ 和 $\hat{X}(\omega)$ 绘于图 3、图 4, 开窗褶积滤波的 $\hat{X}(t)$ 及 $\hat{X}(\omega)$, 绘于图 5、图 6。 $\hat{X}(t)$ 曲线由于滤掉部分干扰波, 其随时间衰减变化的幅度呈现较规则的包络, $\hat{X}(\omega)$ 的谱峰、谱陷特征比较突出。对 $X(t)$ 褶积滤波后, 第一界面特征较为明显; 对 $X(t)$ 开窗截取, 能突出第二界面特征, 开窗截取的范围由实验和经验得出。

从这些图中可看出, 四种胶结状态的区别较为明显。一般的, 胶结良好, 则时域包络积分值小, 谱峰陷比值大; 胶结不好, 则时域包络积分值大, 谱峰陷比值小。而且, 在这些数值上也可看出滤波后的第一、二界面特征是互相影响、互相制约的。

(2) 间隙影响

模型井的两个界面, 胶结良好(G)的间隙趋于零, 胶结不好(B)的间隙为 1~2mm。为了定义微间隙, 开展了界面间隙实验, 研究间隙对胶结质量判别方法的影响。实验表明, 当间隙厚度 $t_w > 0.1\text{mm}$ 时, 其胶结质量判据在胶结不好的范围内; 当间隙厚度 $t_w < 0.1\text{mm}$ 时, 其胶结质量判据在胶结好的范围内。国外有关资料报道, 微间隙厚度 $t_w \leq 0.07\text{mm}$ 时, 只相当于入射波波长的极小一部分, 满足声能透射, 显示良好的水力密封, 理论计算也表明超声波能穿透厚度微小的夹层(微间隙)。实验验证了这一结论, 并为确定胶结中等提供了判据范围。

(3) 井参数实验

在模型井实验中, 还研究了套管井径、套管厚度等井参数的检测方法, 开展了井下温度、井下压力、水泥声阻抗、地层声阻抗影响实验。这些为 UCT 的研究打下了扎实的基础。

UCT 测井仪器

UCT 井下仪器总长为 4780mm, 外径 90mm, (其中声系最大外径 102mm), 其机械结构主要由电子线路仓和声系组成。电子线路仓由两部分组成, 上部为 CPU 控制和 A/D 转换部分, 下部为信号预处理和发射机部分, 中间为 28 芯接插件, 由接头和接箍相联。电子线路仓上端与马笼头相联,

下端与声系相联, 在线路仓与声系压力平衡部件之间, 装有裸露在泥浆中的参考换能器。各部分组成如图 7 所示。

井下仪发射单脉冲, 接收井下反射的全波列信号, 数字化传输地面设备的计算机。计算机和高速数字信号处理板对反射波信号进行变换、分析和处理, 完成全波列数字信号频谱分析等任务。

单探头旋转扫描, 是 UCT 仪器的一大特点。井下仪器垂直井下以每秒 2 圈速度、每圈 16 点采样。井下仪的声系采用金属动密封技术, 使其具有耐高温高压、恒速旋转灵活、密封性能良好等特点。

主要技术指标

(1) 工作频率	320~400kHz
(2) 采样间隔	0.4 μ s
(3) 量化精度	10bit
(4) 水平分辨力	16 方位/周(22.5°)
(5) 垂直分辨力	5cm
(6) 可测井径	130~220mm
(7) 最高测速	360m/h
(8) 电缆最大长度	7000m
(9) 可测井液密度	1.0~1.3g/cm ³
(10) 频率分辨力	2.5kHz
(11) 耐压	80MPa
(12) 耐温	155℃

UCT 刻度标准

江汉测井研究所建造了固井质量刻度模型井群, 具备高、中、低四种声阻抗地层, 每种地层均具备四种胶结界面状态和自由状态(无水泥)的统一标准套管井模型。各模型井均为套管直径 5.5" (厚 8mm), 水泥厚度 25mm 和 50mm。胶结良好(G)的界面间隙趋于零, 水力密封性能良好; 胶结不好(B)的界面间隙为 1~2mm, 间隙填充淡水。刻度井置于水中护养。

刻度模型井地层为直径 500mm, 高度 500~1000mm 的圆柱体形, 几何尺寸满足 UCT“空间无限”的要求, 并眼居中。

刻度模型井群建造工艺技术, 经工业 CT 扫描检测, 证明其胶结质量可靠, 可以作为仪器刻度标准。

仪器首先在这些刻度模型井中模拟测井, 进行量值标准的训练。这些刻度量值标准就是仪器

测井解释的依据。

随着测井仪器的现场推广服务,又配置了现场刻度器。所谓现场刻度器,就是中等声阻抗地层(砂岩)的微型刻度井,配置了现场操作支架及封装桶,运输、使用方便。其地层有效厚度,基本满足“半空间无限”的尺寸要求。

UCT 测井解释

利用信号处理技术,从反射波信号中提取频域和时域特征参数,通过人工神经网络对固井质量第一、第二界面的胶结状况进行判别。人工神经网络采用三层二级 BP(反向传播)网络,输入网络的信号是这些特征参数,约 30 个左右。从网络四个输出端输出的信号指示出第一、第二界面胶结的四种不同情况: B_1B_2 、 B_1G_2 、 G_1B_2 、 G_1G_2 ,除胶结好与不好之外,还划分了一类胶结中间情况。

人工神经网络适于套管、水、水泥厚度等参数在一定范围内的变化,经刻度模型井群检验证明,它的准确度一般在 90% 以上,实际测井考核也证明了它的良好效果。

UCT 测井解释是地面仪绘制的测井成果图。成果图包括:

1. 第一界面胶结辉度图。将井周按 16 方位平面展开,给出好、中、差三种胶结质量,并绘出第一界面胶结指数。

2. 第二界面胶结辉度图。将井周按 16 方位平面展开,给出好、中、差三种胶结质量,并绘出第二界面胶结指数。

3. 井深标志;

4. 井温曲线;

5. 井径曲线;

6. 套管椭圆度曲线;

7. 套管厚度曲线。

测井成果图如图 8 所示。测井操作实现数控和人机对话,测井解释由软件包完成。

UCT 已投入现场试测 8 井次(江汉油田 6 井 7 次,华北油田 1 井次),均取得合格的测井资料。这些井中,除油田标准井外,有新固的探井和 1979 年固的老井,许多是油田亟待查明目的层段两个界面胶结状况的疑难井。

现场测井试验已证明,UCT 具有:

1. 准确检测第一界面水泥胶结状况的能力
2. 独特检测第二界面水泥胶结状况的能力
3. 解决其它工程问题的能力

UCT 能准确判别第一界面水泥胶结质量。这一能力可同目前油田常规固井质量测井 CBL 和 CET 相比较。图 9 列出了华北任×井 UCT 与 CBL、CET 三种仪器解释成果图(局部)。对照这些图可以看出,UCT、CET、CBL 测井解释反映出的水泥返高面,都是一致的。UCT 能更好地反映水泥顶渐变段及其胶结状况。还可看出,第一界面胶结质量的判断,三者符合的井段很多。这些可以证明,目前常规固井质量测井 CBL 和 CET 能解决的工程测井能力,UCT 已完全具备。

对第二界面胶结状况的解释,CET 和 CBL 不能做出,而 UCT 对所测井段都做出了胶结好坏的判断,这种判断的依据,来源于相同井参数模型井的刻度量值。UCT 检测第二界面固井质量的能力,目前尚无可比拟的依器或测井资料。

用 ^{131}Ba 同位素测井找窜证实,UCT 判断第一界面胶结质量准确、可靠,能力明显优于 CBL,且具备检测第二界面水泥胶结质量的独特功能,还可以检测井内温度、深度、井径、套管厚度、套管变形、水泥抗压强度、水泥渐变规律和水泥返高面位置等井参数。

结 语

UCT 是一种能同时检测第一界面和第二界面及套管腐蚀变形等多种井参数的新型固井质量检测装备,其检测第二界面胶结质量的技术,迄今尚无可比拟的同类仪器。

UCT 正处于国内测井服务的初级阶段,其装备也在作进一步的改善,争取在近期内扩展功能,增加测井内容,同其它测井装备挂接,发展成一机多功能系统。

参 考 文 献

- 1 R. M. 哈维拉. 超声波水泥胶结评价. 章兆琪译
- 2 布列霍夫斯基. 分层介质中的波(中译本), 科学出版社, 1960
- 3 牟永光. 地震勘探资料数字处理方法, 石油工业出版社

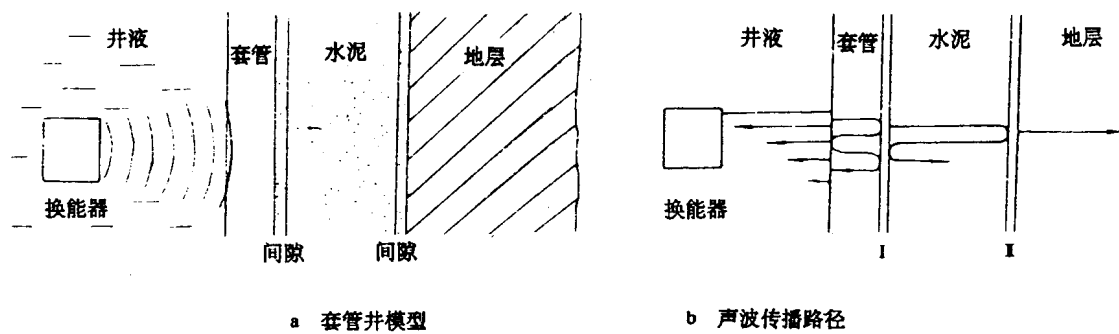


图 1 固井质量检测方法原理

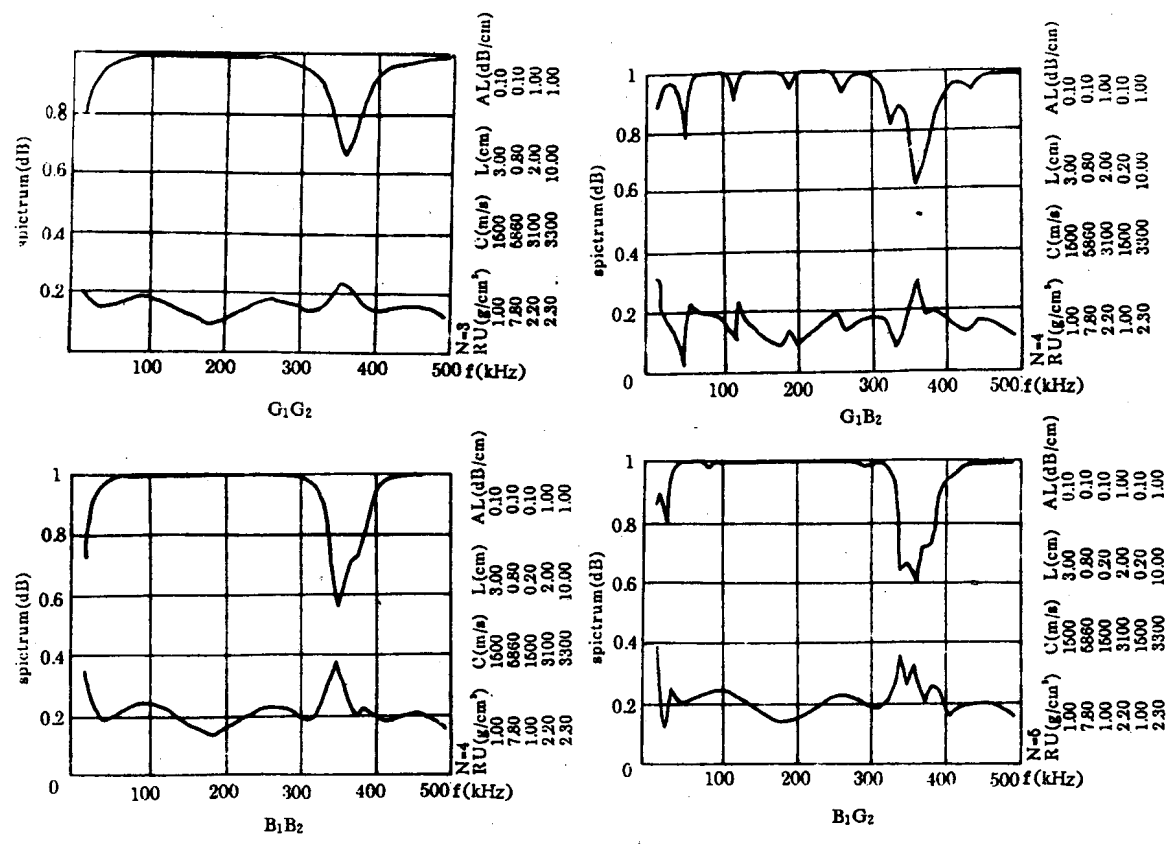


图 2 模拟计算的开窗反射波谱(泥岩)

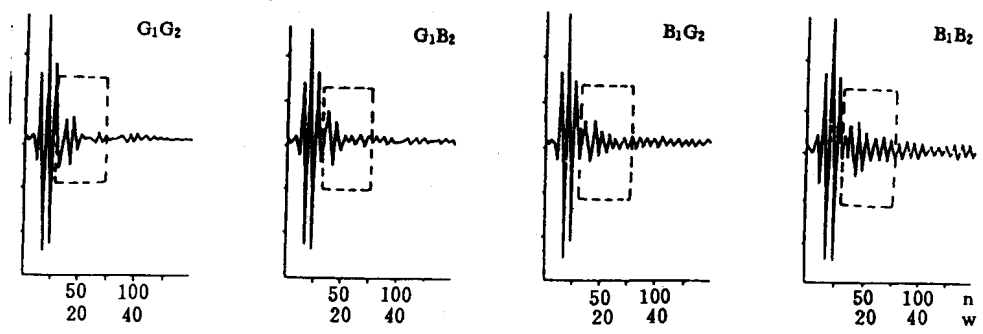


图 3 突出第一界面特性的 $X(t)$

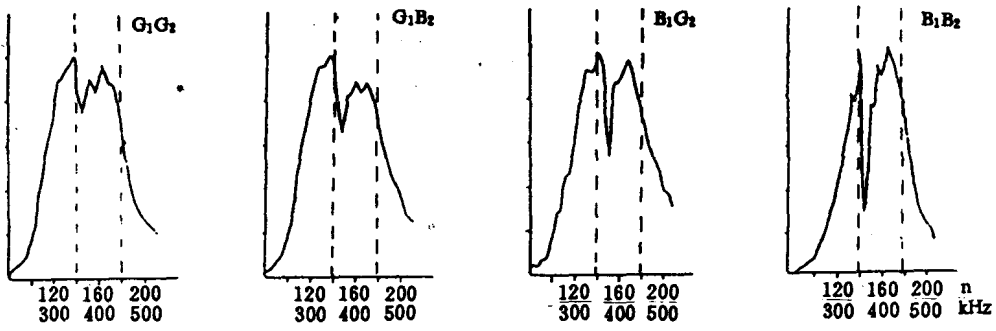


图 4 突出第一界面特性的 $\dot{X}(w)$

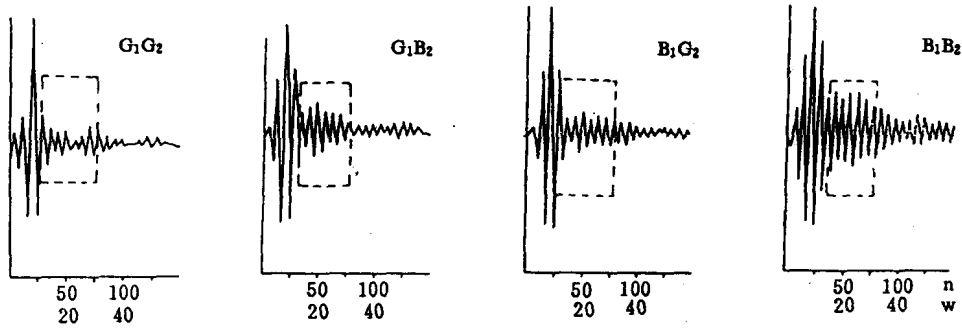


图 5 突出第二界面特性的 $\dot{X}(t)$

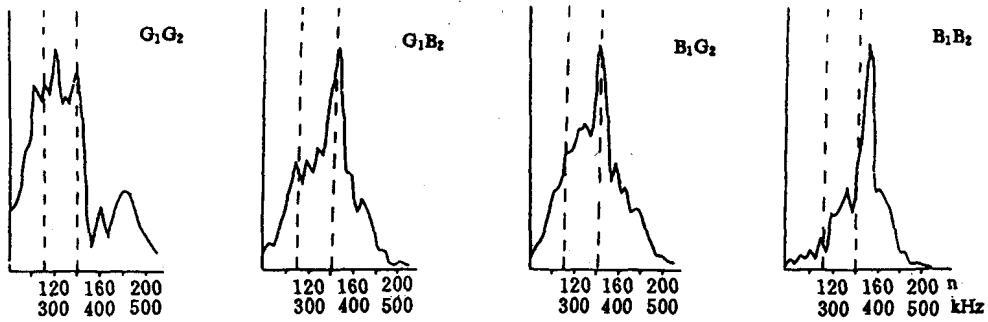
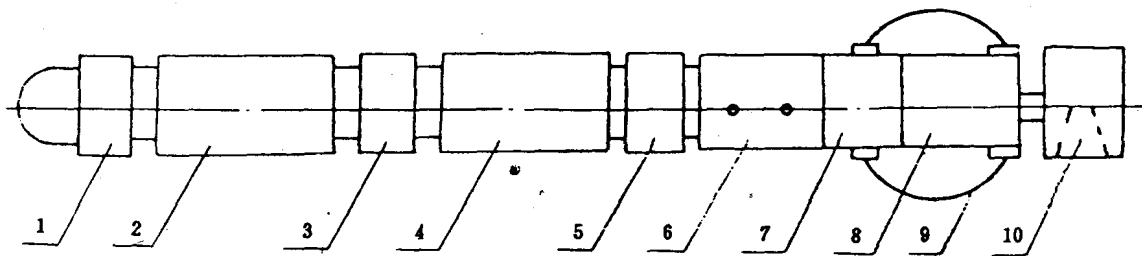


图 6 突出第二界面特性的 $\dot{X}(w)$



1. 仪器帽 2. CPU 控制线路仓 3. 接箍 4. 发射线路仓 5. 接箍 6. 参考换能器
7. 压力平衡部件 8. 声系传动部件 9. 弹簧扶正器 10. 探头

图 7 UCT 机械结构示意图

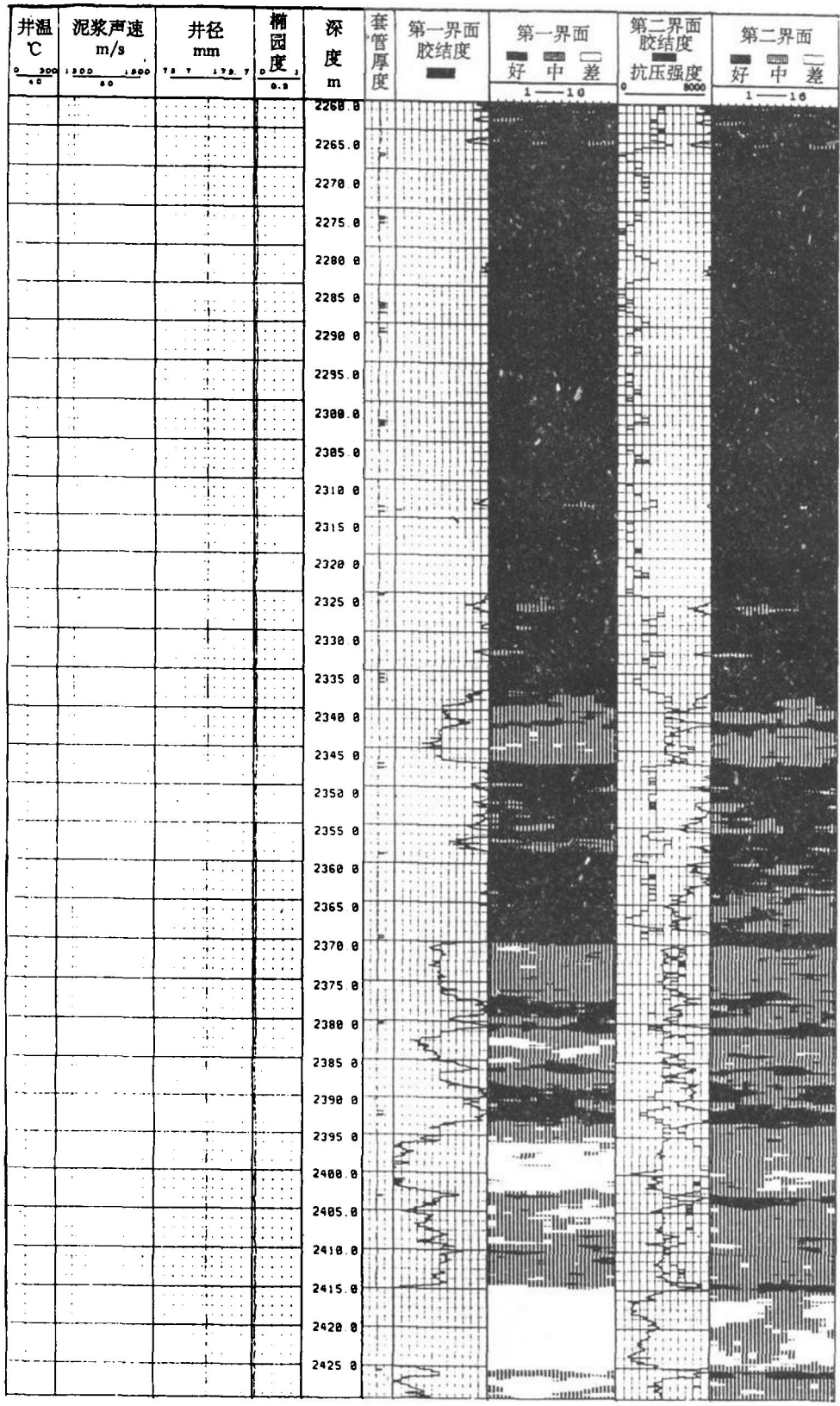


图 8 UCT 测井解释图(局部)

石油物探局制图印刷厂
照排印刷