

矿场地球物理

第 3 集

燃料化学工业部石油勘探开发规划研究院编

一九七四年一月

目 录

声波变密度测井仪的 矿场应用.....西安石油仪器二厂 (1)

关于感应测井问题讨论 提要.....燃化部感应测井经验交流会 (11)

感应测井基值漂移的消除方法.....辽河石油勘探局 (19)

减少感应测井基值漂 移的影响.....胜利油田 (25)

感应线圈系对仪器稳定 性影响的分析.....胜利油田 (27)

感应测井仪的改进和刻度范 围的扩大.....江汉石油管理局 (34)

感应线圈系性能的改善和 刻度.....胜利油田 (40)

感应测井仪的使用与改进.....大港油田 (45)

孔隙度——电阻率交会法..... (52)

井下电视的现状..... (60)

在落矶山地区的核磁测井..... (72)

声波变密度测井仪的矿场应用

西安石油仪器二厂

摘要 声波变密度测井在我国首次使用。它在检查油井压裂效果、判断水泥与套管、水泥与地层的胶结好坏程度和在套管井中测量地层声速等方面，初步见到了较好的效果。声波变密度测井也是探测地层裂缝和寻找含气层的有效方法之一，有待进一步研究和试验。

我厂试制的声波变密度测井仪，在长庆油田大力协助下进行试验，获得了九口井（次）的资料。通过分析，发现该仪器在检查压裂效果、判断水泥和地层胶结情况、套管井中测量地层声速等方面，都见到了一些较好的效果。

一、原 理

声波测井仪发射器发射的声波，以不同的振动形式和传播路径到达接收器，得到的是一串随时间变化的声波波列。在裸眼井中，声波波列包括经过折射和反射的纵波、横波及表面波等。在套管井中，则可分为沿着地层传播及沿着套管传播两种信号。目前国内在裸眼井内广泛使用的声速测井仪，是通过记录首波到达两个接收器的时差，测得地层的声波传播速度以求得地层的孔隙度。声幅固井质量检查仪，则是通过记录沿着套管传播的声波信号首波幅度大小来判断水泥和套管的胶结情况。可惜的是，除首波以外，声波波列大量的续至波部分还未被记录和研究。

实践和理论研究证实，认识和分析整个声波波列的性质，将大大增强对地层的岩石、结构特征以及油井的技术状态的了解。声波变密度测井（简称变密度）则是记录整个声波波列的有效形式。

用目前国内普遍使用的声系部分，加上改造过的电子线路得到的井下信号，在地面利用电容器充电的原理，把声波波列的正半周部分（或负半周部分）转变成方波（二者幅度成正比），然后用它去调节示波管的亮度，于是屏幕上显示的是若干段亮度不同的扫描线段（图1）。幅度调辉的结果，使得扫描线段的亮与暗正比于对应相位的幅度大小。对不同的井段，扫描线段位置和亮度的不同，表达了声波波列的到达时间、幅度、频率的变化。连续照相机构把这些扫描线段直接成象在宽为120毫米，感光度为21度的照相纸上。连续照相机构的传动部分用一个和井口马达同步的微型电机来带动。为保证线段有足够的亮度在照相纸上成象，采用兰色亮光的13SJ39A示波管。当井下仪器在井中上提测量时，照相纸同步地走动，连续地把这些线段的位置和亮度变化记录下来，成为一条条亮

度不同的“相线”。井下仪器包括1米和1.5米源距两道。用一米源距记录声幅曲线，和变密度记录一起解释。下面分三个方面介绍声波变密度测井仪的试验结果。

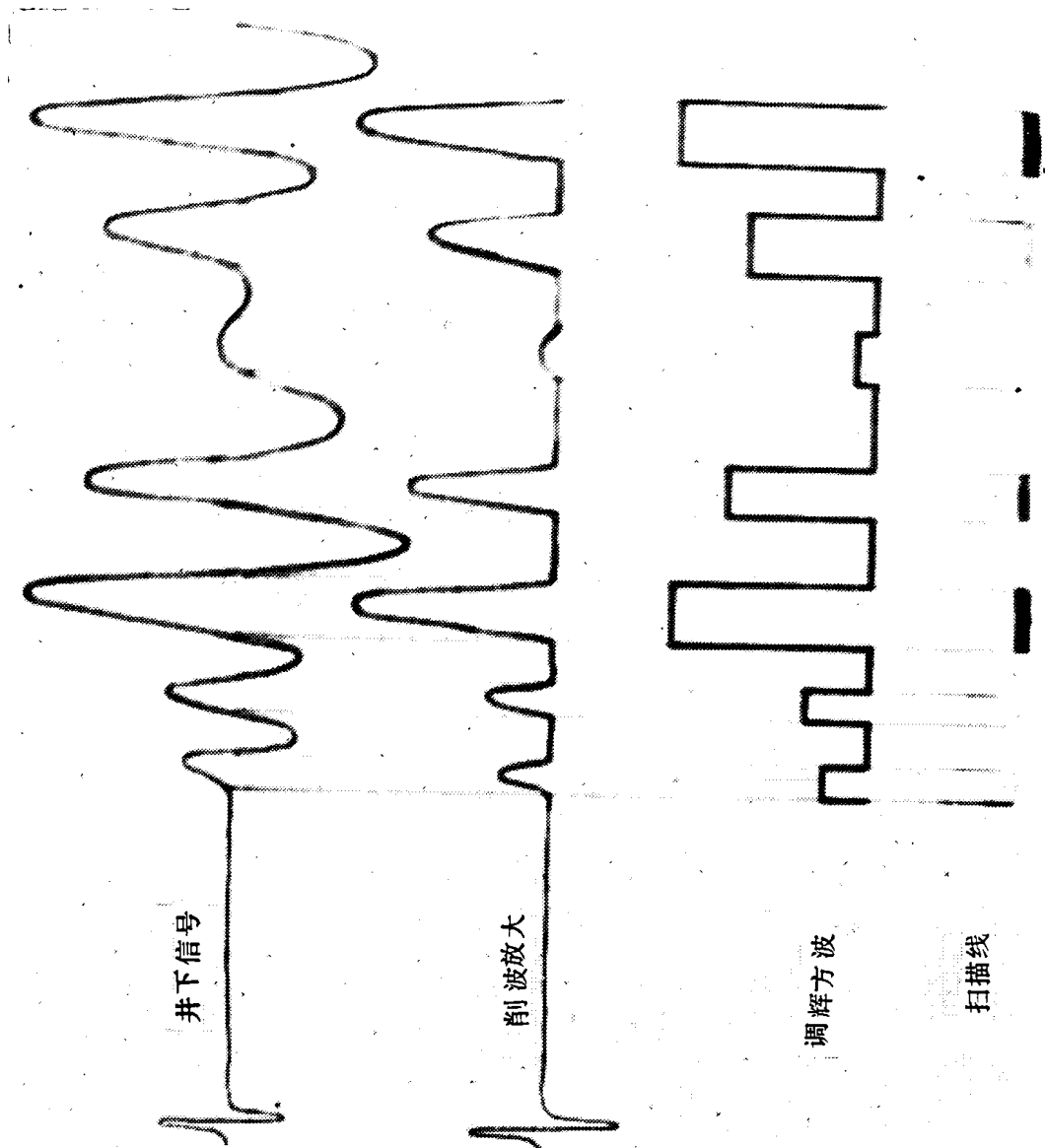


图 1 幅度调辉式变密度记录波形示意图

二、检查压裂效果

对油层进行压裂是一项有效的增产措施，目前不少油田正在大力推广。如何运用地球物理测井方法检查压裂效果，已成为急待解决的问题。

声波在因压裂而产生裂缝的地层内幅度会发生很大的衰减。因而，有可能在压裂前后进行两次变密度测井，通过地层信号(沿着地层传播的声波)幅度的对比来检查压裂效果。试验结果初步证实了这一点。

图 2 是岭 221 井的实例。C 层、D 层和 E 层分两次进行了压裂。从变密度记录看 C 层，压裂前后对比，整个地层信号发生了明显的衰减，尤以续至波为甚。D 层和 E 层则

基本没有变化。因此，变密度记录认为：C层压裂效果好，而D、E两层基本没有变化。这和压裂施工情况是符合的。D、E两层压裂时，由于含砂比过高，油管堵塞，致

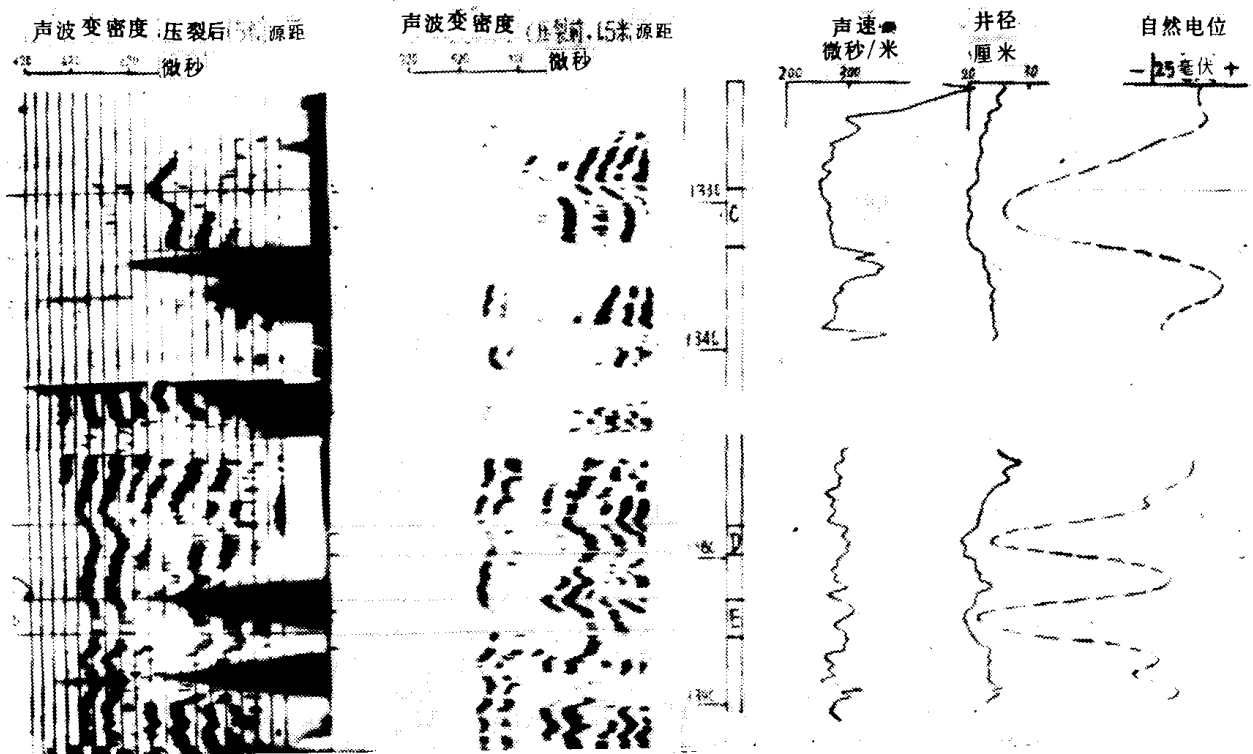


图 2 岭211井压裂前后变密度记录对比

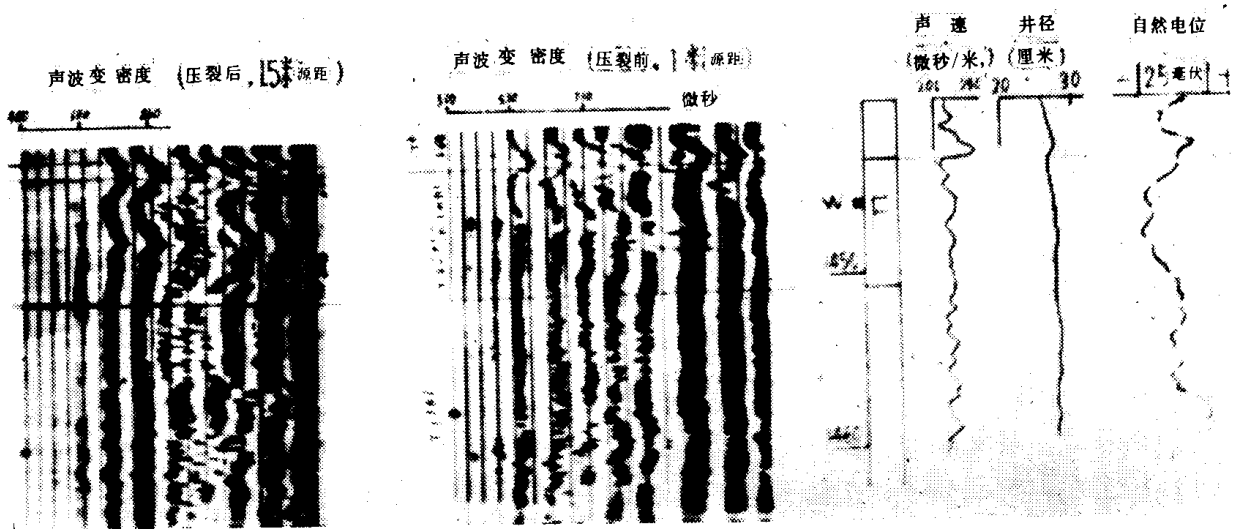


图 3 城22井压裂前后变密度记录和声速曲线对比

使施工中途停止；而且加入的砂子大部分沉入井底，仅有0.8方进入地层。C层的压裂较为顺利，有1.5方砂子进入地层。试油结果证明了变密度记录判断是正确的。C层压裂前日产油2.4方，压裂后日产油24.4方，大幅度增产。而D、E两层合试，压裂前日产油6方，压裂后日产油4.5方，没有增产。

城22井的变密度记录则是说明地层被压开后，地层信号到达时间会发生延迟。地层出现裂缝，声波传播时间当然要增加。F层较为致密，平均渗透率为0.23毫达西，压裂前试油确定为干层，压裂后日产油700公升。裸眼井声速曲线表明F层声速较为均匀，最高是210微秒/米，最低是225微秒/米，相差15微秒。压裂前后变密度记录表明，1米源距时声速最高和最低相差30微秒，1.5米源距则为50微秒。显然在压裂后不会出现地层速度增高的现象，所以该井段地层声速不均匀性的增加只能说明，有的部位地层声速发生了延迟。而且这个部位恰恰是在间隔为0.5米的喷砂射孔部分W的附近(图3)。

用声波方法检查压裂效果和放射性方法相比的优越性在于，无需加入示踪物质，更不会带来放射性污染。

三、判断水泥和地层的胶结情况

目前在现场大量使用的声幅固井质量检查仪记录一条声幅曲线，只能判断套管和水泥之间的胶结好坏，不能判断水泥和地层之间的胶结情况，所以有时出现解释错误的现象。而声波变密度则可以解决这一问题。

为叙述简便，称沿着套管传播的声波为套管信号，水泥和套管之间的界面为第一界面，水泥和地层之间的界面为第二界面，声幅曲线为第一界面胶结曲线。

图4显示的是岭255井水泥过渡带上下的情况。在源距为1米的变密度记录中，开始几条平直，整齐的“相线”是套管信号。在套管接箍处，出现幅度减弱和时间延迟的异常。深度比例为1:200的记录上，每隔20米，在发射器被激发后一定时间(可调)开始出现矩形的深度记号。时标用间隔为50微秒的细线来表示。水泥面上，第一界面胶结曲线幅度大，变密度记录中套管信号首波的“相线”的颜色就深(图4上部所示)。反过来，在水泥面以下，第一界面胶结好的井段，其曲线呈低值，套管信号首波的“相线”颜色就浅，甚至完全没有显示(图4下部所示)。过渡带井段则也有相应的显示。可见，变密度记录的套管信号首波的“相线”和第一界面胶结曲线能很好的符合。

第一界面胶结好时，套管信号很弱。第二界面胶结的好坏决定了这个界面的声耦合性质，直接影响到声波能量是否能通过这个界面到达地层进行滑行。第二界面胶结好，声耦合也好，声波通过时，能量损失小，于是变密度就能记录到较强的地层信号，如图5上部所示(图5的变密度记录为在第一界面普遍胶结都好的岭255井中所得)。第二界面胶结不好，声耦合也不好，声波通过时，能量损失大，于是地层信号的首波部分(包括第二、第三个相位)就很弱，如图5下部不包括高速层的井段所示。所以说第二界面的胶结情况可由地层信号的首波部分的强弱来判断。

图6是庆17井的变密度记录实例。试油过程中发现该井A、B两层之间窜槽。从第一界面胶结曲线来看，1259.8米~1264米之间和1274米~1279.2米之间二段胶结良好，且每段均超过5米，可见液体不可能从这二段的水泥和套管之间通过。在第一界面胶结曲线无法解释的矛盾面前，着手来分析变密度记录。在1259.8米~1264米及1274米~1279.2米的两个井段内，地层信号，特别是其首波部分很弱，则表示第二界面胶结不好。总起来说，A、B两层之间，不存在二个界面胶结都好的井段。这就是窜槽的原因。

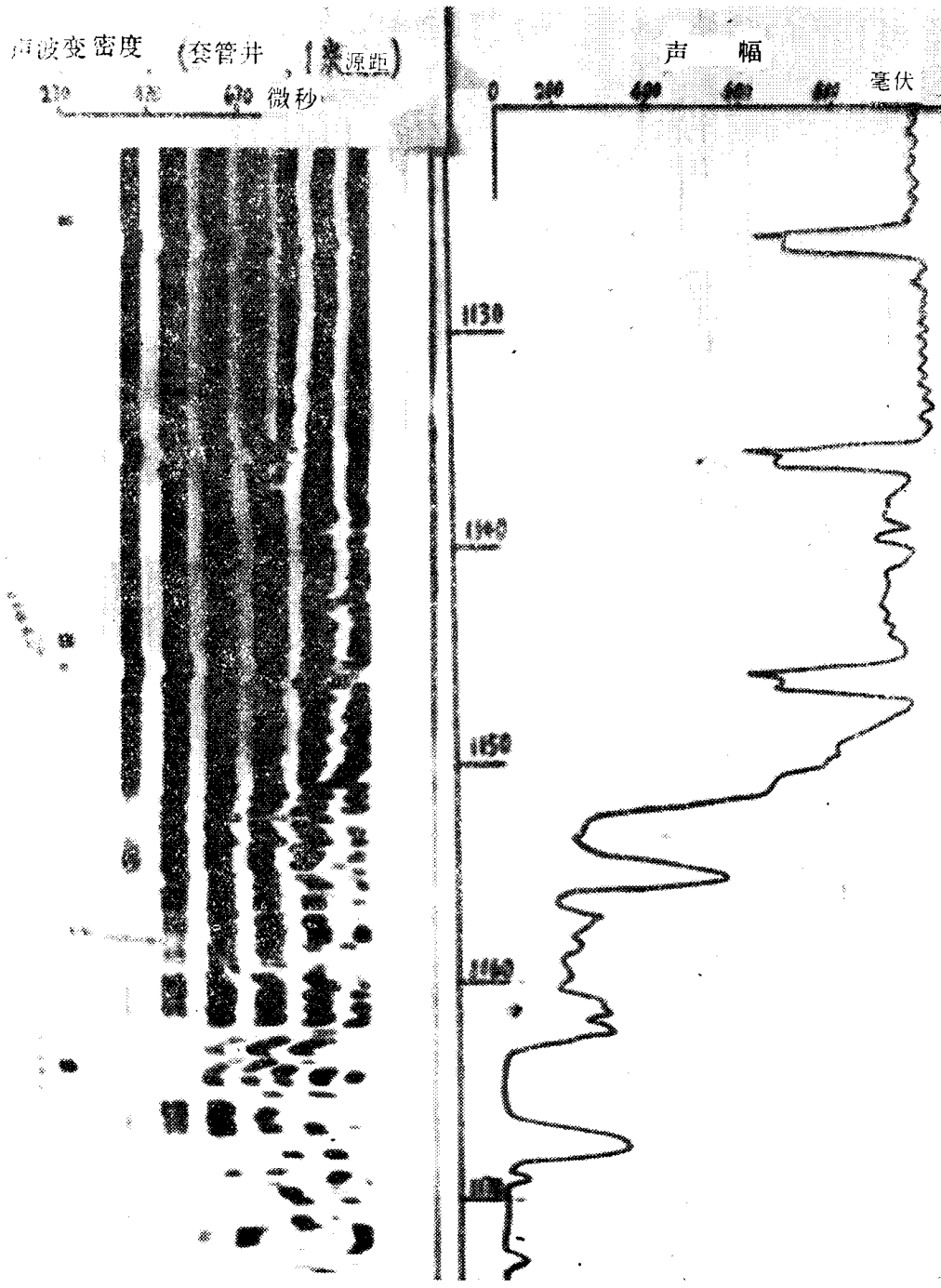


图 4 岭225井变密度记录和声幅曲线对比

通过这个实例，第一界面胶结曲线加上变密度记录综合判断两个界面胶结情况的必要性和优越性就显得十分明显了。

基于地层本身的衰减通常低于胶结好的套管的衰减，再加上地层速度一般低于套管速度，因此在实际生产中应采用较长的1.5米源距进行变密度记录，以便于区分套管信号和地层信号。一次界面胶结曲线仍以1米源距记录为好。

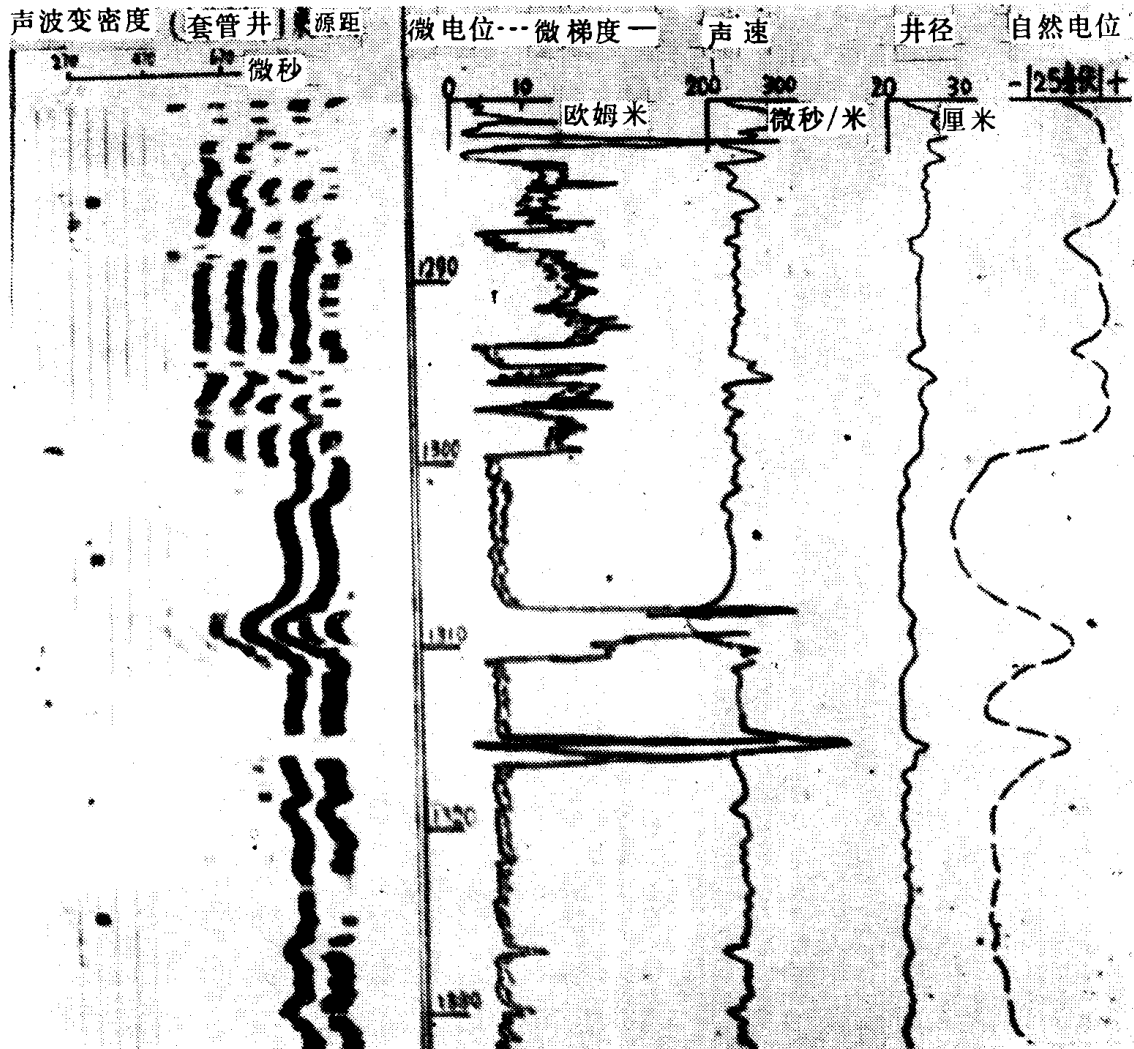


图 5 岭255井地层信号幅度大小及高速地层的显示
(图中270, 470, 670应改为220, 420, 620微秒)

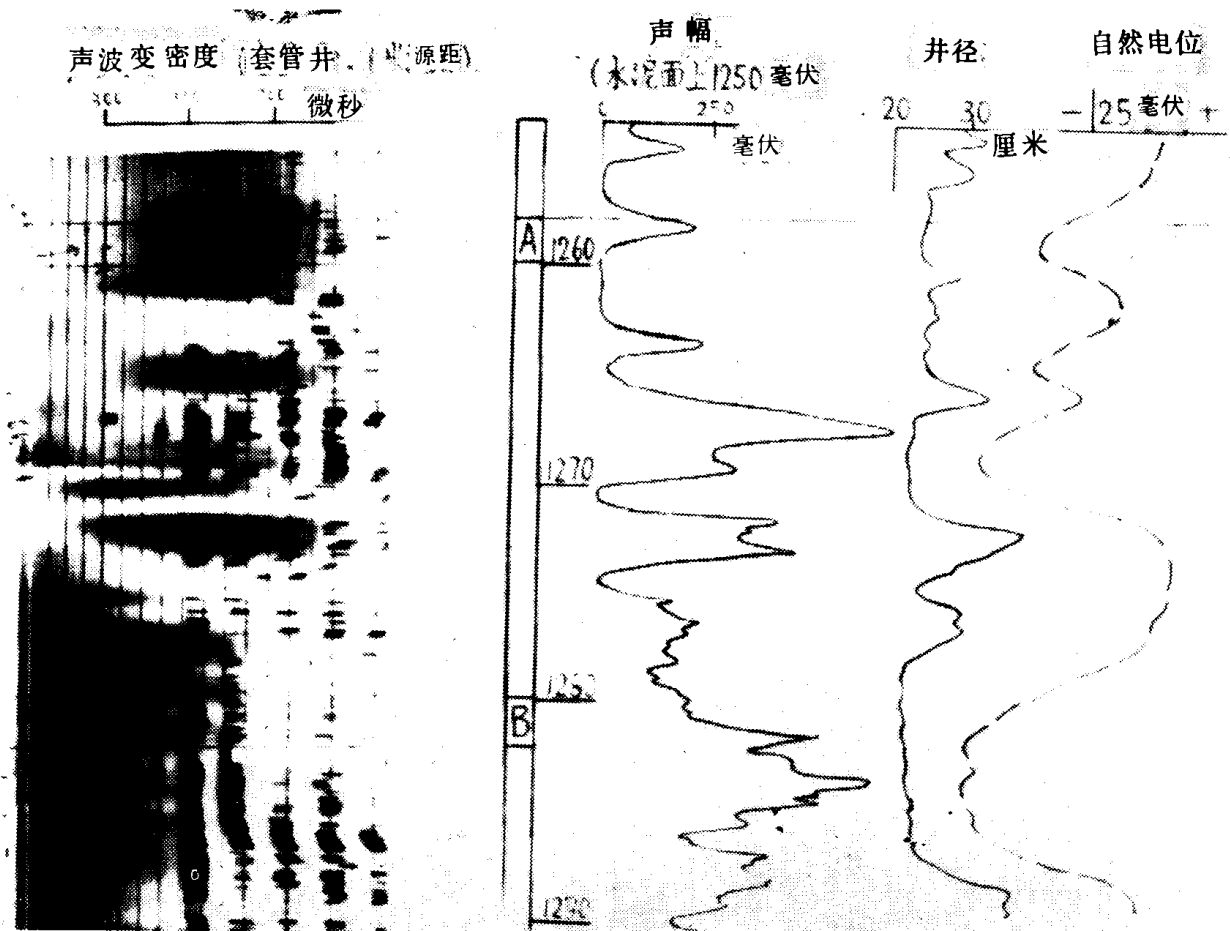


图 6 声幅曲线和变密度记录综合解释庆17井窜槽实例

四、在套管井中测量地层声速

在城22井第一界面和第二界面胶结好的井段分别用1米源距和1.5米源距的变密度记录读得地层信号到达时间 t_1 和 t_2 ，然后相减得到在0.5米间隔内声波传播时间 Δt 。从表1可知 $2 \times \Delta t$ 和裸眼井声速时差 $\Delta \bar{t}$ 十分接近。

表 1

深度(米)	t_1 (微秒)	t_2 (微秒)	$\Delta t \times 2 = 2 \times (t_2 - t_1)$ (微秒/米)	$\Delta \bar{t}$ (微秒/米)
1443	560	690	260	255
1418~1420	515	625	220	225
1438~1440	515	630	230	225
1443~1445	510	620	220	212
1370~1374	525	640	230	235

变密度测量地层声速可以避免周波跳跃带来的错觉。岭255井有一井段，裸眼井声速曲线读数为160微秒/米，超过了钢的速度，怀疑是周波跳跃，在综合测井图上只得用虚线描上。对变密度记录进行计算，该层声速时差为170微秒/米，确属高速层（图5中

部)。在下套管井中，变密度把这个疑点消除了。

只要第一、二界面胶结是好的，变密度就可以帮助判断地层声速。这对没有声速资料的老井和漏测声速资料的套管井，是十分可贵的。

用变密度在套管井中测量地层速度，在一定条件下其精度可能比裸眼井的声速时差曲线要高。在裸眼井中，如果第二道接收器处的井径比第一道接收器处要大4公分，那末到达第二道接收器的声波比第一道在泥浆中要多走2公分。泥浆的声速以670微秒/米计算，这样就带来了 $6.7 \times 2 = 13.4$ 微秒的误差。而在套管井中的误差仅为 $3.3 \times 2 = 6.6$ 微秒(水泥声速以330微秒/米计算)，缩小了一倍。目前声速测井操作中，鉴别不同引起触发电平的不一，也会引入误差，特别是在一些接收信号频率很低的井中更是严重(最低能到10千周，这样1/4周期就有25微秒)。而变密度是从半周期开始就对电容器充电，于是到达时间的计算就十分准确。实际上，以上两点正是表一中二个数据不一致的原因所在。

五、几个问题

(1) 如何区分变密度记录中的套管信号和地层信号

第一界面胶结不好或水泥面以上的井段，一般来说，有三条代表套管信号的“相

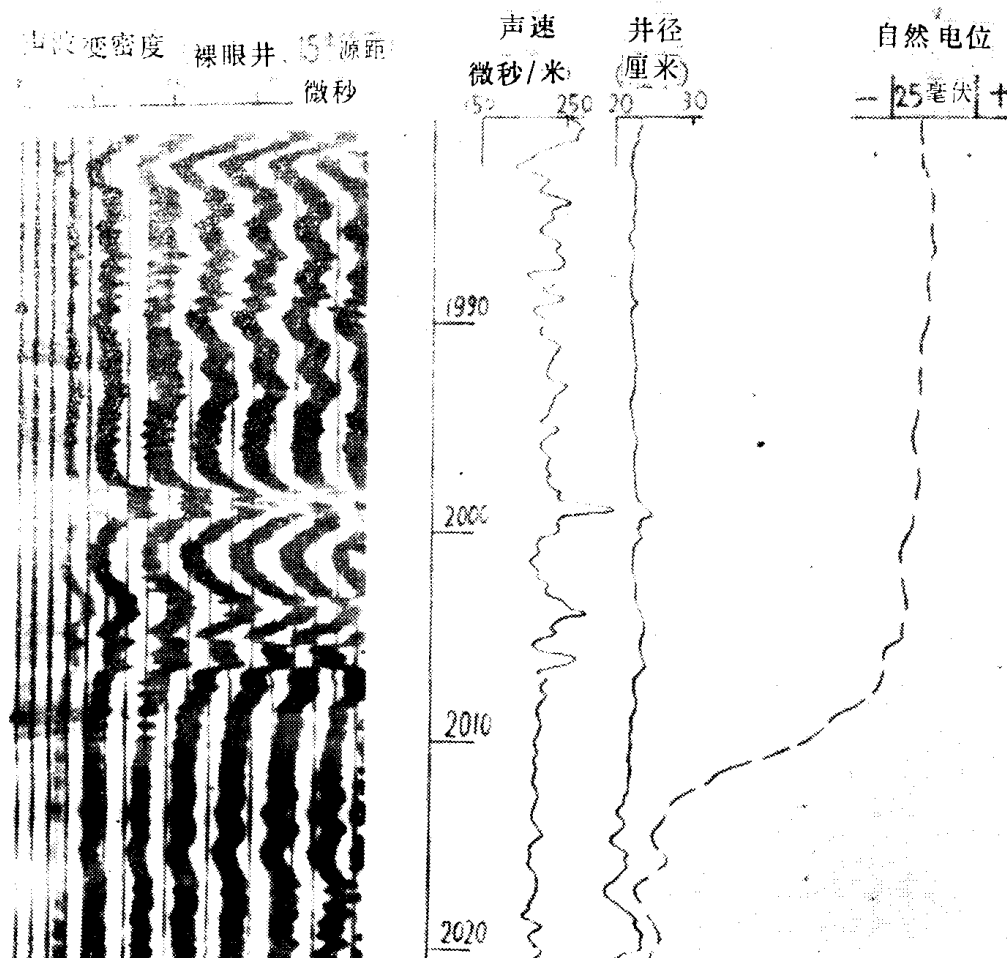


图 7 剖7井裸眼井变密度记录和声速曲线对比

线”，并带有明显的接箍显示。偶而，第二，第三条“相线”的到达时间也有变化，是地层信号叠加上去的缘故，但基本上还是以套管信号的面貌出现。

地层信号是若干条形状基本一致的“相线”，和声速曲线很相似。裸眼井的变密度记录更是如此(图7中的变密度记录为在剖7井所取)。在套管井中，对速度为220~270微秒/米的砂岩段，地层信号一般是第三条“相线”开始到达。总之，对照裸眼井声速曲线，就容易识别套管信号和地层信号。

(2) 如何区分第二界面胶结不好和地层裂缝所造成的地层信号幅度衰减

从变密度记录可普遍的观察到，均匀、较纯的砂岩段，在相当的时间以后，一般都能得到较强的地层信号续至波，而和水泥胶结情况关系不大。试看图8的悦6井变密度

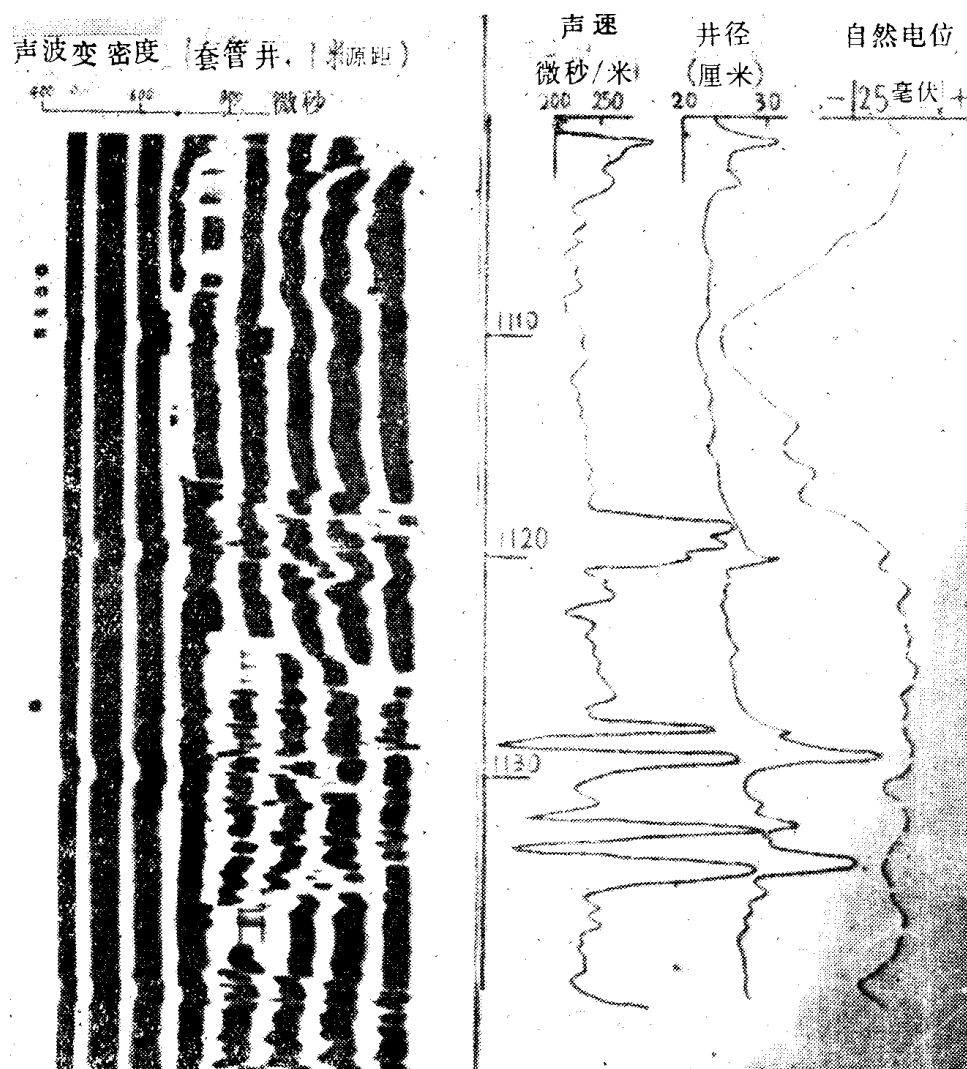


图8 悦6井水泥面上变密度记录和声速曲线对比

(图中400, 600, 800应改为: 350, 550, 750微秒)

记录，在水泥面以上的井段，当然说不上胶结如何，但在800微秒以后，还是能观察到较强的地层信号续至波(形状和声速曲线相似)。岭255井在均匀较纯的砂岩段皆有较强的地层信号续至波，只是在首波部分(一般也包括第二，第三条“相线”)有幅度大小的

差别。这可能是由于泥饼的存在影响了第二界面的胶结，造成首波部分幅度减弱（图 5 下部除高速层以外的井段所示）。岭 211 井 C 层，压裂后引起的声波衰减一直延续了很长的时间，当然也包括地层信号的续至波部分。

综上所述，在均匀较纯的砂岩井段，第二界面的胶结好坏主要靠地层信号首波部分（包括第二、第三条“相线”）的幅度大小来判断，而地层信号的续至波幅度大小主要反映地层衰减特性（如裂缝）。

以上全部资料均属在砂泥岩剖面的井中取得。

（3）展望

有关资料介绍，在裸眼井中，变密度测井可用来寻找裂缝和含气地层。在盐水泥浆井中，普通电法测井有不同程度的失灵，导致划分渗透层的困难，可用变密度测井来解决。这些应用意义很大，都有待于进一步试验研究。

关于感应测井问题讨论提要

燃化部感应测井经验交流会

编者按 现将燃化部感应测井经验交流会《关于感应测井问题讨论提要》及其附件一、二、三登载如下。《感应测井仪技术指标》和“感应测井资料验收及解释细则》作为试行草案，希各单位提出意见，以便今后修订。

燃化部感应测井经验交流会于1973年9月20日至9月29日在大港油田召开。

参加这次会议的有，大庆油田、大港油田、胜利油田、吉林省石油会战指挥部、长庆油田、南阳石油勘探指挥部、辽河石油勘探局、江汉石油管理局、新疆石油管理局、青海石油管理局、玉门石油管理局、四川石油管理局、西安石油仪器二厂、华东石油学院、江汉石油地质学校等15个单位。并邀请了江苏省石油勘探指挥所、国家计委地质局627工程、上海地质仪器厂、南开大学、总后3525厂等单位参加。共20个单位，82名代表。

会议由辽河石油勘探局等第六个单位介绍了经验。同时还由各单位带来的10支仪器，进行了仪器的“三性一化”工作和现场测井对比。

会议遵循伟大领袖毛主席“**要认真总结经验**”的教导，回顾了十年来我国感应测井发展的历史，总结了主要经验。

在毛主席“**独立自主、自力更生**”的方针指引下，我国于1963年对感应测井方法开始研究，65年制出感应测井仪器样机，66年在胜利油田试生产，67年正式投产。之后相继在各油田推广使用。现在已有15个单位，使用了感应测井方法。

目前，感应测井的基值漂移问题，已得到一定程度的克服，一般达到了10—15毫姆欧/米的水平。测井成功率达到70%以上，其中胜利油田达到了85%左右。就这次港49井试验结果来看，10支井下仪器的一致性是比较好的，一般只相差3—5毫米，个别的差到1公分以上。

在解释上，正从定性向定量解释方面发展，已有五个矿区使用感应一声速组合解释图版，求解地层的含油饱和度，从而提高了判断油水层的符合率。

十多年来，广大的测井工作者，遵照伟大领袖毛主席的“**实践，认识，再实践，再认识**”的教导，从仪器的研制，“三性一化”，方法研究，定性和定量的解释方面，都积累了不少的经验，归纳如下：

(一) 敢于实践，不断创新，始终抓住主要矛盾，狠攻感应测井仪器的基值漂移问题，获得了一些新的认识和克服办法

与会代表一致认为，基值漂移问题，是感应仪器的主要问题，而线圈系是影响感应仪器基值漂移的重要原因之一。

近几年来，在线圈系方面，各厂矿都作了大量的工作，其主要经验是：

1. 从材料、结构、制作工艺上加以认真的考虑，反复的实践，挑选最合适的方案，组成线圈系；

2. 采用固定居中走线，有利于将无用讯号和干扰都调得较小；

3. 加强屏蔽效应，捆铅丝的线圈系，对稳定基值有一定的效果；

4. 加温考查，使主、辅线圈的代数和愈小，基值愈稳定的经验，仍然是有效的。

此外，电子线路是影响基值漂移的又一个重要原因，在这方面已有新的发展。如：

1. 西仪二厂的新型感应仪器，采用了无用信号控制器（即变感器）和稳定的相敏检波器；

2. 辽河油田的双相敏检波器；

3. 大港油田的移相器。

这些新的办法和措施，对稳定基值都有一定的效果。这是广大的测井工人、技术人员敢于实践、不断创新的结果。

(二) 为了解决仪器真实基值，必须把对基值有影响的因素尽可能地减少

影响基值的因素虽然很多，但经过长期的反复的实践，总是可以被人们认识的。线圈系在未装油和装油后基值不一样，下井后，装了油的线圈又受高温高压的影响，引起介质介电常数的变化，使基值产生漂移。为此，会议认为：一体化不装油的仪器应进一步推广使用。

(三) 认真抓好“三性一化”工作，是推广应用感应测井的一个重要环节

仪器的“三性一化”工作，对于保证测井资料的质量起着主要作用。为此，必须抓紧抓好。近几年来，这方面也有很大的进展，特别在标准化方面，重要的办法是：

1. 以“吊零”值为主，作为仪器的基值，并在本油田选用高电阻率地层，对仪器基值进行校正，是一种行之有效的好办法；

2. 大港油田的“标准井”为仪器的标准化提供了条件。

(四) 把好质量关，严格要求，一丝不苟，制订明确的质量验收标准，是使感应测井资料得到广泛应用的一个关键

测井资料要得到广泛的应用，首先必须使资料具有一定的可靠性，否则就将失去对资料分析的意义和失去它的应用价值。而要使资料可靠，又必须严格要求，把好质量关，制订明确的质量验收标准。这方面，各矿区都有了一些规定，值得今后继续发扬。

会议认为，上述经验各单位可根据具体情况，分别选用并建议西安石油仪器二厂，选用部分经验，进行试生产。

到会代表，遵循毛主席“一分为二”的教导，在肯定成绩的基础上，又分析了当前感应测井存在的问题，其中主要是：感应仪器基值变化还比较大，测量电阻率上限还

小，刻度方法还不完善，“三性一化”还没有普遍开展，感应测井仪器的系列还不配套。为此：我们除了继续研制高稳定性能的线圈系和电子线路之外，还要建立一套完善的三级刻度标准，抓紧深、浅感应组合测井系列的研制，并作出相应的解释图版。会议对今后的任务采取了措施，明确了分工。

代表们一致表示：在毛主席革命路线指引下，把我国感应测井技术发展到一个新水平，为石油勘探与开发作出更多的贡献。

附件一 感应测井技术指标(试行)

根据目前各厂、矿感应测井的质量情况，暂定技术指标如下：

一、仪器的一般指标

1. 仪器钢壳及各密封位置要求耐压 600kg/cm^2 达30分钟。
2. 仪器耐温 100°C 。
3. 仪器测量范围 5 毫姆欧/米~1000毫姆欧/米。
4. 仪器潮湿影响小于2.5毫姆欧/米。
5. 仪器低温影响（常温~ 15°C 内基值变化）应小于15毫姆欧/米。

二、仪器的三性一化

（一）仪器稳定性

1. 常温下连续工作 4 小时，基值飘移不超过2.5毫姆欧。
2. 常温下整体仪器在360度方位内反复转动，颤动基值变化应小于2.5毫姆欧/米。
3. 电子线路整体加温 100°C 恒温半小时，基值变化应小于10毫姆欧/米，灵敏度变化应小于2.5%。
5. 家吊零，井场测前吊零和测后吊零基值变化应小于15毫姆欧/米。

（二）仪器的直线性

统一按一米刻度环为准，如横向比例按 50 毫姆欧/公分，要求如下表 5 ~20 Ω —

Ω —M	2—5	5	10	20
光点m/m	80	40	20	10

M，允许误差不超过 0.5m/m ； 2.5Ω —M，允许误差不超过 1.5m/m 。

（三）仪器的重复性

1. 在 5Ω M 以上的地层，仪器单井重复，误差应小于 10毫姆欧/米（重复性井段最小相隔500米）；在 5Ω M 以下的地层，重复误差应小于 7 %。
2. 仪器灵敏度（相对幅度）重复误差应小于 5 %。

(四) 仪器的标准化

不同仪器在同一口井中测量, 在 $5 \Omega \cdot \text{m}$ 以上地层, 一致性误差为 20 毫姆欧。曲线相对幅度误差 $\leq 5\%$ 。

附件二 感应测井资料验收及解释细则(试行)

一、感应测井资料验收标准

1. 所使用的感应仪器必须用本队绞车, 在家里进行刻度和吊零、卧零及一致性校验, 其数据均应有记录。

2. 测井前须在井场进行刻度, 刻度范围包括 4 厘米、2 厘米、1 厘米三种。刻度范围在 1 与 2 厘米之间, 刻度误差应在小于 0.5 毫米; 在 2 与 4 厘米之间, 刻度误差应在 0.5—1.5 毫米, 并照 2.5 欧姆米刻度线。井场卧零及刻度均应有照象记录, 曲线首末两端必须照机械零。

3. 测井前后均需在井场进行吊零, 并照象记录, 其误差不超过 3 毫米 (15 毫姆欧/米)。吊零时需使感应仪器远离钻台, 至少要大于 3 米。

4. 感应测井曲线在刻度范围内, 重复误差应小于 3 毫米 (15 毫姆欧/米); 相对幅度在刻度范围内, 重复误差不超过 3 毫米 (15 毫姆欧/米); 在刻度范围外, 重复误差不大于 7%。重复曲线应在目的层上端选择有高、低电阻的井段进行测量, 测量重复曲线至少在 50 米以上。

5. 在淡水泥浆中, 选择层厚大、岩性均匀、无高电阻致密夹层的渗透层, 用感应测井曲线与电阻率曲线 (2.5 米或 4 米梯度) 进行比较, 找出各地区的统计规律, 以检查感应曲线的正确性。

6. 基值的确定, 以吊零为主。

二、感应测井资料解释细则

1. 分层原则

分层以微电极及短电极曲线为主, 并参考感应、自然电位及井径曲线。一般对于厚地层, 感应曲线分层基本上为半幅点, 对于薄地层略偏上。对于夹层大于 0.5 米者, 应分为两层。

2. 围岩电阻率的选取

(1) 均匀单一层。取目的层上下各 3—4 米处围岩平均值, 如图 1(a) 所示。

(2) 多目的层围岩选取, 如图 1(b) 所示。A、B 为 C_1 的围岩, A'、B 为 C_2 的围岩, 均取上下围岩平均值, 但多考虑高电导值。

(3) 目的层电阻率低于围岩层, 如图 1(c) 所示。选 A、B 段平均值。

3. 目的层电阻率的取值

(1) 岩性均匀层取极大值, 如图 2(a) 所示。

(2) 有明显泥岩夹层者, 分段取值, 如图 2(b) 所示, 选取 (A_1, A_2) 。