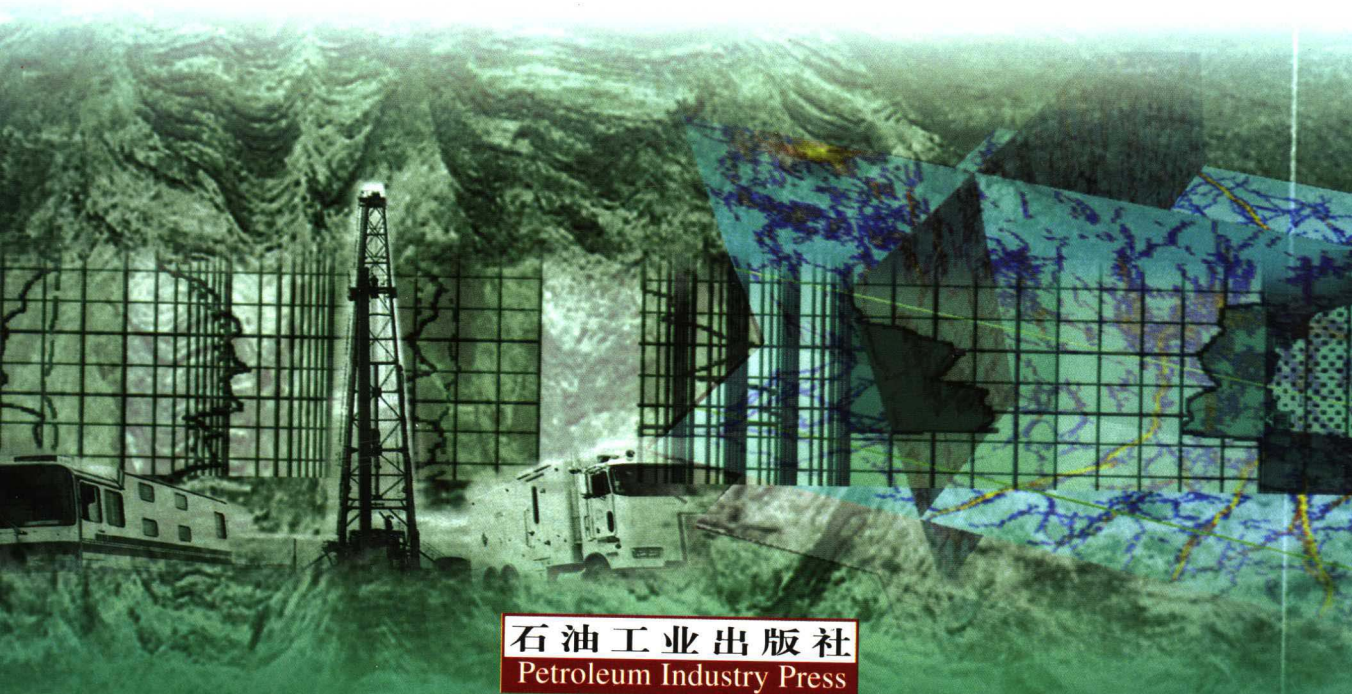


高等学校教材

地层倾角测井原理与应用

陈科贵 谌海云 孙嘉戌 编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等学校教材

地层倾角测井原理与应用

陈科贵 湛海云 孙嘉戌 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要讲述了地层倾角测井原理、处理方法及应用,另外还介绍了成像测井的基本原理及应用、层序地层学的相关内容。全书内容丰富,由浅入深,阐述清楚,脉络分明,便于教学与自学。

本书可作为石油高等院校勘查技术与工程专业、资源勘查工程专业学生的教学用书,也可供从事地质、测井和油藏工程的科技工作者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

地层倾角测井原理与应用/陈科贵, 谌海云, 孙嘉戌编.

北京: 石油工业出版社, 2008. 5

(高等学校教材)

ISBN 978-7-5021-6577-2

I. 地…

II. ①陈…②谌…③孙…

III. 地层倾角测井—高等学校—教材

IV. TE15

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 059407 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

编辑部: (010) 64523580

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2008 年 5 月第 1 版 2008 年 5 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 11.25

字数: 280 千字

定价: 17.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

地层倾角测井主要用来测量地层的倾角和倾斜方位角（常简称为方位角），进而研究各种地质问题。它对指导油气田勘探和开发具有重要意义。

在以往的勘探工作中，特别是新区勘探时，有时由于构造复杂，地震工作搞不清地下构造的确切情况，或由于任务紧迫，来不及作详细的地震勘探，就进行了预探井的钻井。钻探获得的结果较好时，通过第二批、第三批继续钻井，就可以逐步搞清地下地质情况。但如果第一口井的钻探结果不太理想，就很难作出正确的判断。是否钻到地下构造的高点，地下构造是否有变化，上下构造是否符合，到底钻到的是构造的哪一翼；地下是否存在断层，是什么样的断层，断面的倾斜方向如何等等。这一系列问题，对在该区如何进行下一步钻探有着十分重要的影响，但仅凭一口井的资料难以正确回答。这种情况曾不止一次地给勘探工作带来过困难，或增加了勘探工作量，或延误了油气田发现的时间。

有时即使钻到了工业性油气流，也需要对地下构造情况作出正确的判断，以指导进一步的勘探工作，例如，这口井究竟钻到地下构造的什么部位？已发现的油气藏可能有多大规模？下一步的探井应该部署在什么地方？在地震资料不理想的情况下，这些都是勘探人员必须回答而又难以回答的问题。

另一方面，对于有开采价值的矿物资源，要估计其分布范围及经济价值，就必须搞清楚地下沉积时的古地理条件和沉积环境，查清沉积体的岩相、几何形状以及邻近地层的垂向和横向关系。但随着油藏埋藏深度增加及地质目的层变得更复杂（例如地层圈闭、渗透性阻挡等等），仅凭常规的方法很难解决这些问题。

为了解决上述问题，勘探人员和地质学家们更加重视由钻井和地球物理资料而获得的信息。从井内取得的岩样包括岩屑和岩心。岩屑很少能使勘探人员和地质学家们重新正确地作出岩石柱状图。由于岩屑上返时被钻井液搅乱，或某些成分（粉砂、盐）在岩屑上返时被漏失，故经常失掉与层序及层厚有关的信息。另外，岩屑尺寸很小，一般不能使勘探人员和地质学家们作出在较大的岩心上所能作到的分析和观察。尽管岩心尺寸较大，对岩心的观察和分析也确实能得到大量必需的数据，然而取心很费时间，代价也是昂贵的。这样由测井获得的信息就越来越重要了。

在测井解释课程中已经讲述过，测井资料是研究储集层主要特性（岩性、物性、含油气性）的手段。本书主要讲述地层倾角测井的原理及其在构造地质研究和沉积研究方面的应用方法。地层倾角测井是认识大规模构造现象及确定沉积构造现象的重要工具，也是探测裂缝储集层的有效方法。地层倾角测井技术是基于石油勘探和开发的实际需要发展起来的。在国外，它的起步几乎与最早使用的测井方法差不多，1930年就第一次成功地使用了地层倾角测井仪。它是利用沉积岩特别是泥岩的各向异性进行测量，测得的资料只能给出地层的倾斜方向。1942年在美国海湾油田砂泥岩剖面中，使用自然电位式地层倾角测井仪取得良好的测井资料，在这些油田的砂泥岩剖面中，自然电位曲线的幅度大，变化明显。1945年在自

然电位不明显的地区,开始使用电阻率式地层倾角测井仪,当时测量的是三条电极距等于3ft的梯度视电阻率曲线,它适用于软、硬地层,但只是在选择的层段进行测量。这时使用的地层倾角测井仪器中,井斜测量是点测。由于仪器在井内旋转,连续测量的井段一般不超过40~50ft(1ft=0.3048m)。1952年,斯仑贝谢公司开始使用CDM-T型连续地层倾角测井仪,记录三条 $1\text{in}\times 1\text{in}$ ($1\text{in}=25.4\text{mm}$)的微梯度电阻率或电导率曲线;1956年又使用CDM-P型地层倾角测井仪,记录三条微聚焦电阻率或电导率测井曲线,用磁针和重力摆锤带动电位器进行连续的井斜测量;1961年开始使用磁带记录,并用电子计算机处理测井资料;1963年发展了一种四臂式地层倾角测井仪,这样电极的垂直分辨率就明显提高了(约 $1/2\text{in}$);为了进一步提高记录质量,又将电缆速度校正改为电极速度校正;20世纪80年代又使用了高分辨率地层倾角测井仪和六臂地层倾角测井仪,能在严重不规则的井眼及仪器本身不居中的情况下,得到可靠的资料。20世纪90年代,各大公司相继推出了各具特色的成像测井仪,如地层微电阻率扫描测井仪(FMS)、全井眼地层微电阻率扫描测井仪(FMI)、阵列感应成像测井仪(AIT)、方位电阻率成像测井仪(ARI)、脉冲式超深探测感应成像测井仪、电抗成像测井仪、介电成像测井仪、自然电位成像测井仪、井下声波电视(BHTV)、超声波成像测井仪(USI)、偶极横波成像测井仪(DSI)、组合式地震成像测井仪(CSI)、阵列地震成像测井仪(ASI)、井间地震成像测井仪、声阻抗成像测井仪、阵列核成像测井仪(NPLT,或称核孔隙度岩性成像测井仪)、碳氧比能谱成像测井仪、地球化学成像测井仪、核磁共振成像测井仪、元素(含量)成像测井仪、同位素成像测井仪、组件式地层动态测试仪、地应力成像测井仪、流量成像测井仪、井下重力成像测井仪等。在数据处理方面,在相关对比基础上提出了图形识别法,这样就使地层倾角测井资料不仅能够研究地质构造,而且还能研究沉积环境,识别裂缝,找出油气勘探最有利的地区。

全书共分五章,第一章、第二章及附录由谌海云编写;第三章由陈科贵编写;第四章由陈科贵、孙嘉戌编写;第五章由孙嘉戌编写。在编写过程中大量引用和参考了国内外公开出版的著作、论文以及有关文献资料,在此谨向引用参考了相关著作及相关文章的作者表示感谢!

编 者
2008年2月

目 录

第一章 地层倾角测井的基本原理	1
第一节 地层倾角仪测量原理	1
第二节 确定地层面倾角和倾向的几种方法	12
第二章 地层倾角测井的数据处理	31
第一节 数据记录	31
第二节 测井质量控制	34
第三节 地层倾角测井曲线的相关对比分析法	38
第四节 地层倾角测井曲线的图形识别法	57
第五节 地层倾角测井曲线的频率分析处理法	63
第三章 地层倾角测井的应用	70
第一节 地层倾角测井的成果显示	70
第二节 地层倾角测井资料在研究构造地质方面的应用	79
第三节 地层倾角测井资料在研究沉积学方面的应用	97
第四节 地层倾角测井在裂缝性储集层中的应用	107
第四章 成像测井技术及应用	114
第一节 成像测井技术概述	114
第二节 电声成像测井仪及基本原理	115
第三节 成像测井技术的应用	122
第五章 地层倾角测井资料在层序地层学和储层横向预测中的应用	140
第一节 测井资料在层序地层学研究中的意义、层序的概念	140
第二节 测井资料的层序地层分析方法及其应用	142
第三节 测井资料的储层横向预测研究方法及其应用	147
附录	157
附录 I 目前所使用的高分辨率地层倾角测井仪器 HDT 常用型号	157
附录 II 矢量图模式地址解释模型	158
参考文献	174

第一章 地层倾角测井的基本原理

第一节 地层倾角仪测量原理

一、地层产状

地层产状，通常是指地层的倾角和倾斜方位角。原始地层在沉积过程中，在漫长的地质年代里，经历了各种地壳运动，形成了倾斜、变形、褶曲和断裂岩层等。一般用以下几个概念对地层产状进行描述。

（一）地层面的走向

地层面的走向是地层面与水平面交线的方向，用它与正北方向的夹角（顺时针）表示，如图 1-1 所示， CD 与正北方向的夹角（顺时针）即为地层面的走向。

（二）地层面的倾向

地层面的倾向是地层面由高到低变化最大的方向，用它在水平面上的投影与正北方向的夹角（顺时针）表示，又称倾斜方位，如图 1-1 所示， BE 与正北方向的夹角（顺时针）就是地层面的倾向。

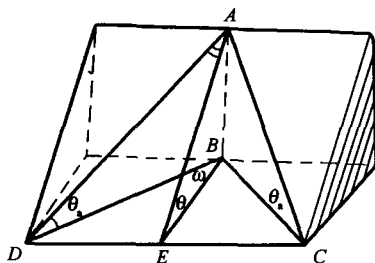


图 1-1 真倾角与视倾角

（三）地层面的倾角

地层面的倾角是在倾斜方向上地层面与水平面的夹角；或倾斜线与倾向线之间的夹角；又称真倾角，是倾斜地层的最大倾角，如图 1-1 所示， $\angle AEB$ 为真倾角 θ 。

（四）视倾向

任意方向的铅直面与地层面相交，其交线称视倾斜线，它的水平投影称视倾向线，它的倾斜方向称视倾向，如图 1-1 所示， BD 、 BC 与正北方向的夹角（顺时针）均为视倾向。

（五）视倾角

任意方向的铅直面与地层面相交，其视倾斜线与视倾向线的交角称视倾角，视倾角总是小于真倾角，视倾角 θ_a 与真倾角 θ 的关系为：

$$\tan \theta_a = \tan \theta \cos \omega \quad (1-1)$$

式中 ω ——视倾向与真倾向之间的夹角（图 1-1）。

二、地层倾角仪的类型、结构及测量信息

地层倾角和倾斜方位角不是直接测量的，地层倾角测井依靠贴井壁的几个极板（三个、四个、六个）所测量的微聚焦电导率或电阻率曲线来计算井眼穿过的地层面的产状。由于这种方法的探测深度很浅，使得地层倾角测井所能探测到的地层面范围也只是比井眼的直径略大一些。在这样有限的范围内，不论与井眼相交的地层面形态如何，都可以把它设想为一个平面，利用同一地层面上电阻率或电导率的相似性，可确定井眼穿过地层面的单位法向矢量，然后再计算出地层面的倾角和倾斜方位角。当井倾斜时，还要进行井斜角和井斜方位角校正。

目前使用的地层倾角测井仪器有五种，即德莱赛公司的地层倾角测井仪、斯仑贝谢公司的高分辨率地层倾角测井仪 HDT、地层学高分辨率地层倾角测井仪 SHDT、地层微电阻率扫描仪 FMS 及六臂地层倾角测井仪。不论哪一种地层倾角测井仪，总是由两个主要部分组成的，一是极板系统，二是测斜系统，现分别介绍如下。

(一) 德莱赛公司的地层倾角测井仪

德莱赛公司的地层倾角测井仪原理如图 1-2 所示，它的主要测量结果有以下几种。

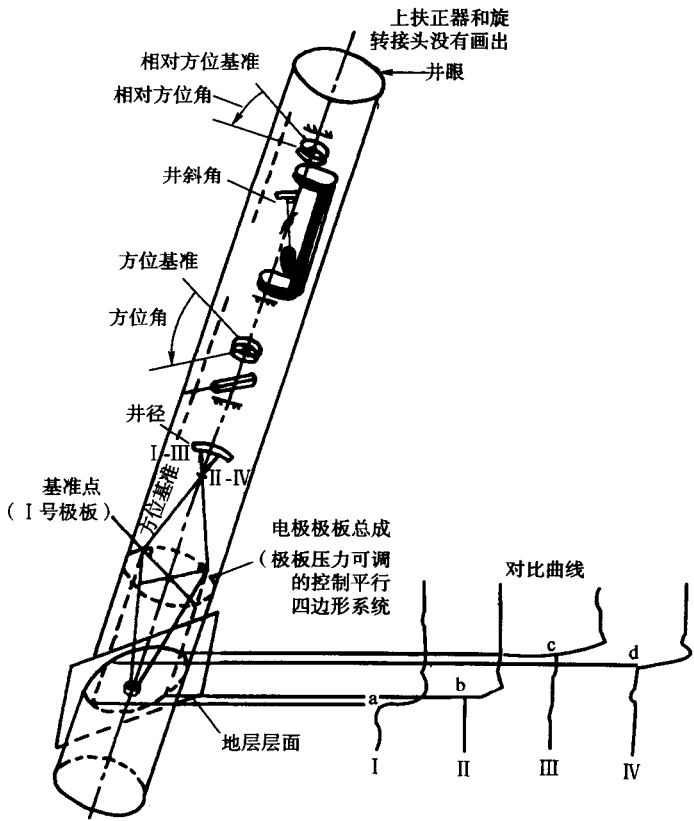


图 1-2 地层倾角测井仪器原理图

(引自《测井工程师进修丛书》)

1. 四条微聚焦电阻率（或电导率）测井曲线

地层倾角测井仪上有四个贴井壁的极板，两两相隔 90° ，按顺时针方向依次编号为 I、II、III、IV 号极板。每个极板上都装有一个微聚焦电极系，其记录点始终处于垂直于仪器轴的同一平面内，该平面称为仪器平面或电极平面，仪器与仪器平面构成仪器坐标系。当仪器在井内移动时，可测出四条微聚焦电阻率或电导率测井曲线，通过曲线对比可确定岩层层面上四个点 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 沿井轴方向的高度 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 。

2. 两条井径曲线

两套井径测量装置分别由 I、III 号极板和 II、IV 号极板组成。当井径发生变化时，四个极板产生横向位移，通过机械传动装置改变电位器的电阻值，进而反映 I、III 号极板方向和 II、IV 号极板方向的井径 d_{13} 和 d_{24} 的大小。

当仪器轴与井轴重合时，一般也能满足这个条件，因为仪器上方加有扶正器，这时岩层层面上四个点 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 在径向上的位置分别为 $\frac{d_{13}}{2}$ 、 $\frac{d_{24}}{2}$ 、 $\frac{d_{13}}{2}$ 、 $\frac{d_{24}}{2}$ ，在仪器坐标系中的坐标分别是 $M_1\left(0, \frac{d_{13}}{2}, Z_1\right)$ 、 $M_2\left(\frac{d_{24}}{2}, 0, Z_2\right)$ 、 $M_3\left(0, -\frac{d_{13}}{2}, Z_3\right)$ 、 $M_4\left(-\frac{d_{24}}{2}, 0, Z_4\right)$ 。因井眼可能不规则，则 $\frac{d_{13}}{2}$ 不一定等于 $\frac{d_{24}}{2}$ 。

3. I 号极板方位角曲线

I 号极板方位角 μ 定义为 I 号极板方向的水平投影与正北方向的夹角（顺时针），变化范围 $0 \sim 360^\circ$ 。德莱赛公司的地层倾角测井仪用磁针罗盘测量 I 号极板的方位角，其测量原理如图 1-3 所示。图中 A 点与井轴 O 点的连线 OA 与 I 号极板同方位，称 A 点为 I 号极板方位的基准点，因此，电阻 R_{AB} 随 I 号极板方位角 μ 变化而变化，根据 R_{AB} 的大小就可确定 I 号极板方位角 μ 。需要说明的是，当井斜角 $\delta \leq 20^\circ$ 时，此种测量方法能满足要求；当井斜角 δ 较大时，必须采取一定的校正方法。

方位角 μ 是从正北方向开始顺时针计量的，四个极板顺时针方向排列，并以 90° 等间隔分布，所以地层层面上四个点 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 在柱坐标系 ϕ 方向的角度为：

$$\mu, \mu + \frac{\pi}{2}, \mu + \pi, \mu + \frac{3\pi}{2}.$$

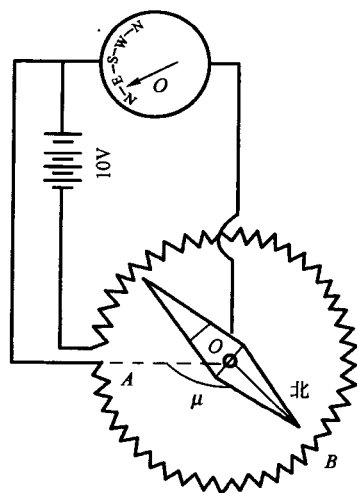


图 1-3 I 号极板方位角测量原理图

在柱坐标系中，根据地层层面在仪器平面上的四个点 $M_1\left(\frac{d_{13}}{2}, \mu, Z_1\right)$ 、 $M_2\left(\frac{d_{24}}{2}, \mu + \frac{\pi}{2}, Z_2\right)$ 、 $M_3\left(\frac{d_{13}}{2}, \mu + \pi, Z_3\right)$ 、 $M_4\left(\frac{d_{24}}{2}, \mu + \frac{3\pi}{2}, Z_4\right)$ 就可以确定层面方程 $Z = AX + BY + C$ ，并进一步计算出地层面在仪器平面上的倾角和倾斜方位角。

如果井是铅直的，则上面计算的倾角和倾斜方位角就是地层面相对于大陆坐标系的倾角和倾斜方位角；如果井是斜的，就要进行井斜校正。为了便于仪器制造和数字推导，设计测量 I 号极板相对方位角代替井斜方位角。I 号极板相对方位角又称仪器的相对方位角、井轴

相对方位角,是指仪器平面上 I 号极板方向与井斜方向的夹角,顺时针为正,变化范围 $0\sim 360^\circ$,也是 I 号极板与仪器高侧边的夹角,用 β 表示。

4. 井斜角与 I 号极板相对方位角曲线

井斜角就是井轴或仪器轴与铅垂线之间的夹角。德莱赛公司的地层倾角测井仪用弧形电位器及铅锤来确定井斜角,如图 1-4 所示。当井铅直时,电阻 $R_{CC}=0$,井斜角 δ 越大, R_{CC} 就越大,用 R_{CC} 上的电位差值来测量井斜角 δ 。

I 号极板相对方位角 β 是用定位摆及环形电位来测量的,如图 1-5 所示,定位摆由于重力作用而下垂,它的连接线 OD 为井轴截面上的倾斜线, OA 与 I 号极板同方位, OA 与 OD 的夹角就是 I 号极板相对方位角,相对方位角 β 越大,电阻 R_{AD} 也越大,根据电阻 R_{AD} 上的电位差值就可测出 I 号极板相对方位角 β 。

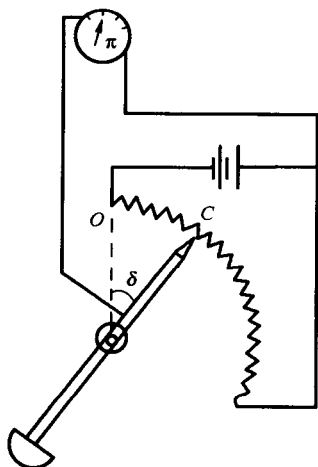


图 1-4 井斜角测量原理

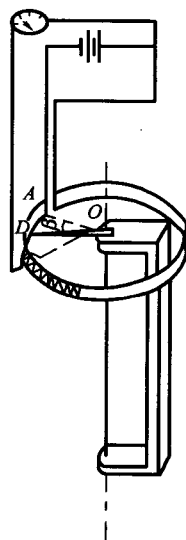


图 1-5 I 号极板相对方位角测量原理

当井斜不大,即当 $\delta \leq 20^\circ$ 时,根据 I 号极板方位角 μ 、相对方位角 β 可以近似计算出井斜方位角 γ 。井斜方位角 γ 定义为井斜方向在水平面上的投影与正北方向的夹角(顺时针),变化范围是 $0\sim 360^\circ$,其计算公式为:

$$\gamma = \mu - \alpha \approx \mu - \beta \quad (1-2)$$

$$\alpha = \arctan \frac{\sin \beta}{\cos \beta \cos \delta} \quad (1-3)$$

当 $\delta \leq 20^\circ$ 时, $\cos \delta \geq 0.94$, 则 $\alpha \approx \beta$ 。

例一:已知 $\mu \approx 240^\circ$, $\beta = 80^\circ$, 求井斜方位角 γ 。

解: $\gamma = 240^\circ - 80^\circ = 160^\circ$ 。

例二:已知 $\mu = 40^\circ$, $\beta = 240^\circ$, 求井斜方位角 γ 。

解: $\gamma = 40^\circ - 240^\circ = -200^\circ$ 或 $\gamma = -200^\circ + 360^\circ = -160^\circ$ 。

综上所述,这种地层倾角仪一次下井可以测得九条曲线(图 1-6),即四条微聚焦电阻率(或电导率)测井曲线、两条井径曲线、三条角度曲线。

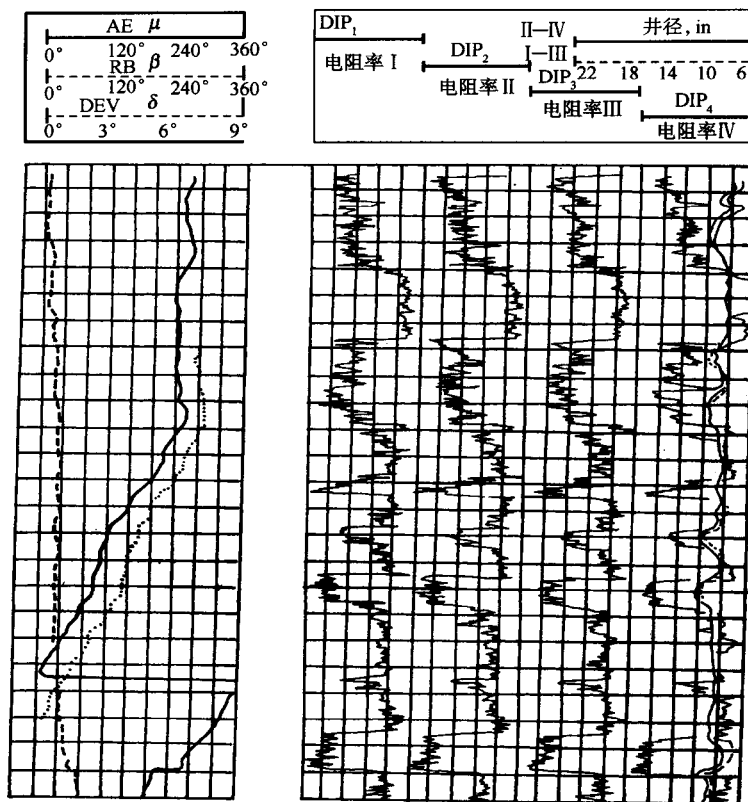


图 1-6 德莱赛公司地层倾角测井曲线图

(二) 斯伦贝谢公司的高分辨率地层倾角测井仪 HDT

斯伦贝谢公司的高分辨率地层倾角测井仪 (HDT) 在测井信息设计方面基本上与德莱赛公司的仪器相同, 但有以下几点改进。

1. 极板部分的改进

在 I 号极板上镶嵌两个纵向排列的电极, 两电极相距 4.5cm, 上方的电极称为“校速”微电极。如图 1-7 所示, 沿着同一路径测出两条曲线, 如果仪器速度与电缆速度一致时, 则两条曲线上同一异常值之间的距离应等于 4.5cm; 当仪器在测井过程中遇阻或解卡时, 仪器速度与电缆速度不一致, 这时两条曲线同一异常值之间的距离就不等于 4.5cm, 可用校速微电极测得的微聚焦电阻率曲线对高程差进行速度校正。校正过程如下所述。

设校速电极与标准电极的纵向距离为 H , 这里为 4.5cm, 通过曲线对比计算出某一地层面在这两条曲线上的高程差 h , 则其他任何两条对比曲线的高程差 h_{ij} 与实际高程差 H_{ij} 的关系为:

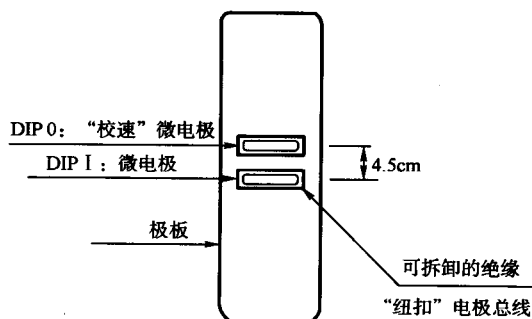


图 1-7 HDT I 号极板示意图

(引自《高分辨率地层倾角测井》)

$$\frac{H_{ij}}{h_{ij}} = \frac{H}{h}$$

所以：

$$H_{ij} = \frac{H}{h} h_{ij}$$

2. 测斜部分的改进

测量三个角度时，HDT 有高角度和低角度两种类型，低角度测斜系统的井斜角测量范围为 $-4^{\circ} \sim 35.5^{\circ}$ ，高角度测斜系统的井斜角测量范围为 $-8^{\circ} \sim 72^{\circ}$ 。低角度装置测量原理如图 1-8 所示。

高角度测斜系统与低角度系统的不同之处，是把仪器方位角系统置于定位摆系统中（图 1-9）。此时圆环形电位器的起点与井斜方向一致（在通过井轴的铅垂面内），故磁针北极带动滑动臂测出的角度是井斜方位角 γ ，而不是 I 号极板方位角 μ 。

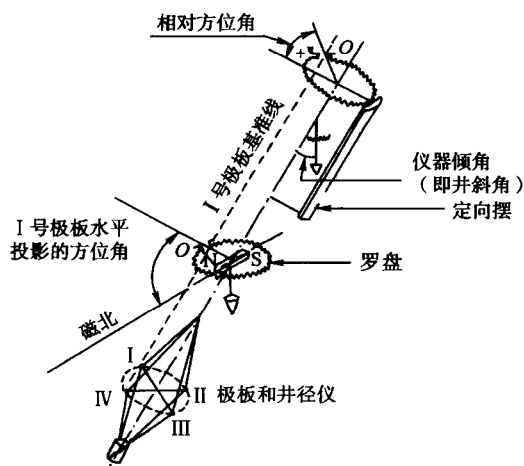


图 1-8 HDT 低角度地层倾角测井仪测量原理

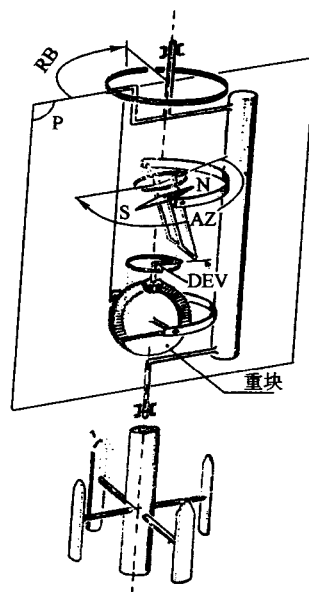


图 1-9 HDT 高角度地层倾角测井仪测量原理

高分辨率地层倾角测井仪一次下井可以测量十条曲线，即五条电阻率（电导率）曲线、两条井径曲线和三条角度曲线。

（三）斯仑贝谢公司的地层学地层倾角测井仪

斯仑贝谢公司的地层学地层倾角测井仪 SHDT 又有不少改进，如图 1-10 所示。

1. 极板部分

SHDT 的四个极板都具有两个水平距离为 3cm 的并列电极（图 1-11）。因这两个并列电极靠得很近，所以它们记录的电阻率（电导率）曲线非常相似。当进行相关对比时，它们所得结果的精度非常高，在图 1-12 中可以看到这样的结果。图中给出了沿着 12ft 长的井段用极板 II 和 III 所记录的曲线，图中虚线表示并列对比，在同一间隔中找到的极板与极板的对

比以粗线表示。由于电极的空间位置非常靠近，由并列对比所得到的位移比极板与极板对比所得到的位移小，因而可以测量很高的地层倾角，而使用极板与极板对比就不能达到这个目的。这样用并列对比就能解决沉积学方面的问题和对垂直裂缝的测量。

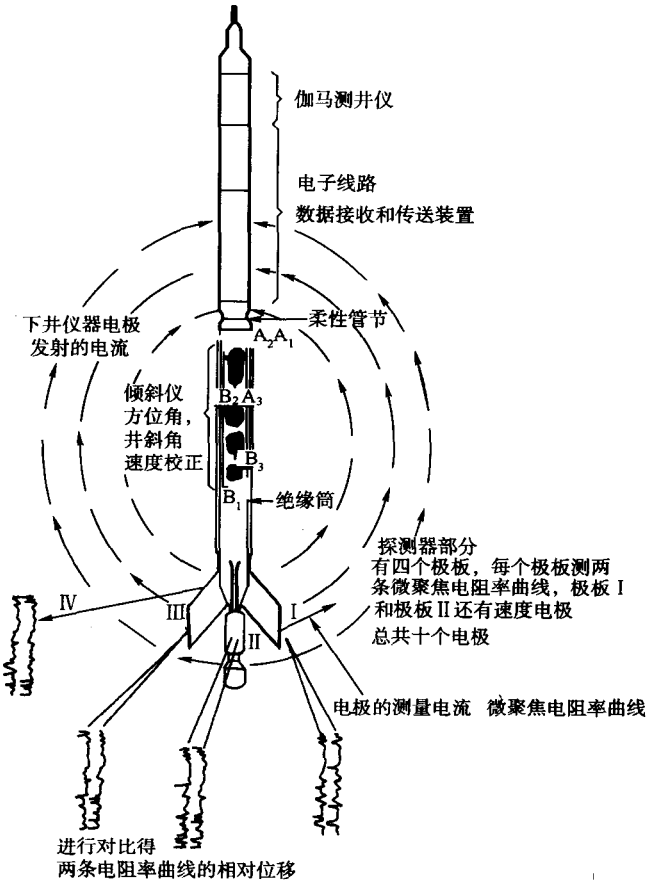


图 1-10 SHDT 地层倾角测井仪

(第 25 届测井年会)

A_1 、 A_2 、 A_3 —三维加速度计； B_1 、 B_2 、 B_3 —磁力计

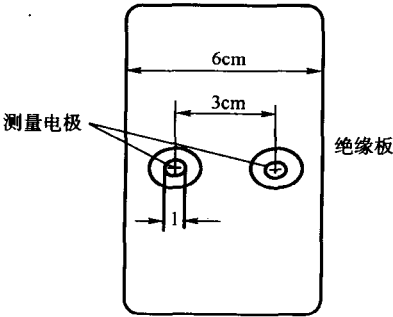


图 1-11 SHDT 地层倾角测井仪极板示意图

(第 25 届测井年会)

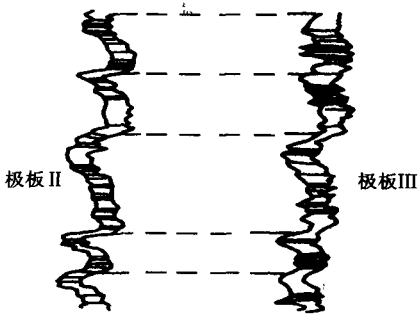


图 1-12 并列对比和极板与极板对比

(第 25 届测井年会)

2. 速度校正

因为并列位移很小，基本上能用最大的精度测量并列位移。除了增加采样率（比HDT数据获得率大一倍）之外，还改善了速度校正，能补偿井下仪器瞬时速度对地面电缆速度的变化。利用装在井下仪器上的三轴加速度计的连续读数能够进行速度校正，因为，对这些速度积分就可以计算井下仪器的瞬时速度，再积分就可求得在任意时间间隔中井下仪器的旅行长度，如图1-13所示。图中显示了平均测井速度为1.0ft/s的一段井眼处的速度变化。

可以看出，井下仪器看起来好像是均匀地移动着，事实上它的速度经常在平均值附近发生小的波动变化。若不进行校正，将引起计算位移的误差，也必然导致测量地层计算倾角的误差。尤其是遇阻受卡和解卡时，井下仪器从一个停止到另一个停止跳跃式地移动，这种情况下的记录如图1-14所示。由图1-14可以看出，所有的有用信息都被压缩在井下仪器移动期间窄小的间隔中，测井曲线的其他部分是由不含信息（井下仪器停止移动期间）的直线组成。把井下仪器的瞬时速度与地面仪器稳定的记录速度进行比较，就相当于把记录的数据进行压缩或扩张。这样就需要进行速度校正，将记录数据还原成真实深度下的数据，再进行地层倾角的计算（如图1-14的下半部所示）。

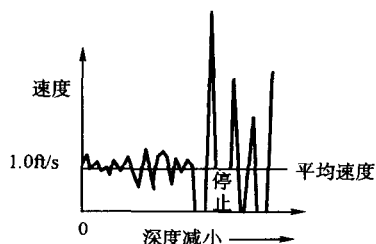


图1-13 根据加速度计的数据
计算的速度变化

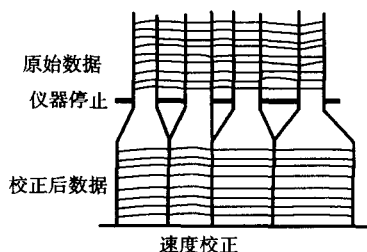


图1-14 速度校正

SHDT 仪器 I 号极板和 II 号极板的电极对方上方 4cm 处都分别安装有校速电极，所测曲线供速度校正使用。

3. 井斜部分

SHDT 仪器用一个三维加速度计和三个磁力计进行测量并计算四个角度，即 I 号极板方位角 μ 、I 号极板相对方位角 β 、井斜角 δ 、井斜方位角 γ 。与常规的装置相比，减少了井下的可动部分，也比使用重锤、罗盘提高了测量精度。

4. 自动调节测量电流

SHDT 仪器可以随地层电阻率的变化自动调节测量电流，这样就可以保证地层倾角曲线在高、低电阻率地层中都有最佳的活度，同时也不需要经常地人工调节和监视电流强度。

5. 简化了井下仪器臂的结构

当仪器臂张开和合拢时，电极沿圆弧运动，这样就避免了连接问题和由于井径突然缩小而遇卡的问题。两个相对的极板彼此独立，就可在椭圆形井眼或斜井中进行可靠的测量，也可以在不规则井眼中较好地跟踪井眼大小的变化。

综上所述，地层学地层倾角测井仪 SHDT 能记录的信息有：十条电阻率曲线、三条加速度曲线、三条磁力曲线、两条井径曲线、探测器的偏斜角曲线（由于 SHDT 的探测器部分与下井仪上部之间采用活动接头，致使探测器的轴与井轴不一致，其夹角称为探测器轴对井轴的偏斜角）、I 号极板方位角 μ 、I 号极板相对方位角 β 、井斜角 δ 、井斜方位角 γ 、电缆张力、自动调节的测量电流和电压信号等。

(四) 地层微电阻率扫描仪

地层微电阻率扫描仪（又称 FMS），是近年来斯仑贝谢公司研制的最新类型的地层倾角仪器。它是在 SHDT 仪器的基础上发展改进而成的。它描述井壁电阻率的微小变化，将测得的资料在计算机中心处理成井壁电图像，这种图像和岩心柱子极为相似，能非常直观地记录井眼所穿过地层的沉积、构造、裂缝特征。除电子线路部分外，FMS 与 SHDT 的差别仅在Ⅲ号和Ⅳ号极板的结构不同。

FMS 的极板结构如图 1-15 所示，在Ⅲ号和Ⅳ号极板上分别装有 27 个纽扣电极，它们的直径为 0.2 in，间距为 0.4 in，排列成矩阵系统，下边是 SHDT 的两个并排电极。在井下工作时，这 27 个纽扣电极向地层发射电流，对井壁进行电扫描，其宽度为 2.8 in（7cm）。两个极板在 8.5 in 井眼中测量一次可获得覆盖率为 20% 的井壁电扫描图像。如果在某井段重复测量 2~3 次，由于电缆扭力作用，仪器不会同步一个路径，因此可达到 30%~50% 的覆盖率。如果测量效果好，这种图像分析时就像看到岩心柱子一样，相当直观。

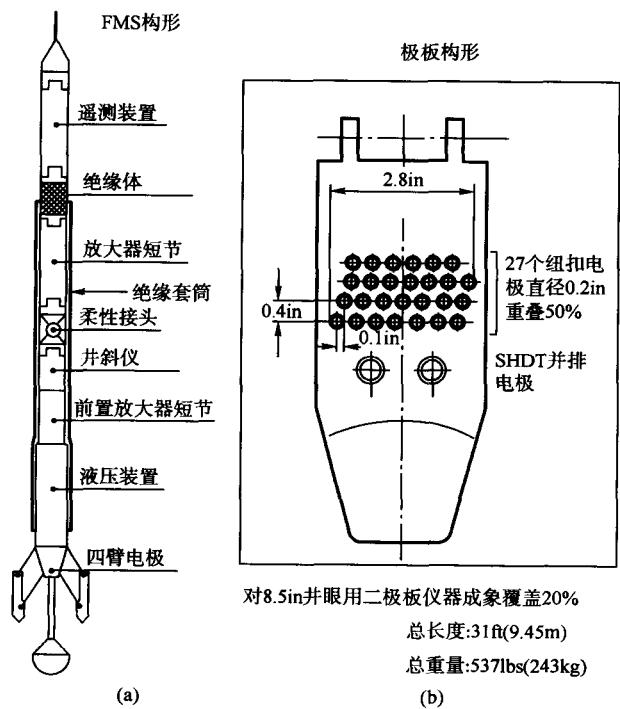


图 1-15 FMS 极板结构

除此以外，FMS 仪器还具有 SHDT 的所有功能。测井时，FMS 的 54 个电极信号和 SHDT 的所有信号都记录在磁带上，而模拟记录是分开的。

(五) 六臂地层倾角测井仪

六臂地层倾角测井仪是新一代的地层倾角测井仪，它在研究倾斜地层及沉积层的成层性方面有突出优点，其设计的新颖性主要表现在以下几个方面：

(1) 这种仪器具有六个臂。由于计算平面层的倾角只需要三个点，用该仪器所测资料计算倾角的冗余度系数明显增大，提高了寻求真倾角的统计概率（为四臂倾角测井仪的五倍）。

(2) 在地层倾角测量中，最关键的要素是曲线的相似性，而要提高曲线相关对比的质量，必须要求各极板与井壁保持良好的接触。在斜井中，由于仪器不居中，在四臂倾角仪的结构中，电极作垂直和平行移动，且相对两臂是彼此联动的（图 1-16），所以很难保持每个极板与井壁的良好接触；而六臂地层倾角仪允许每一个臂能各自独立地伸缩（图 1-17），这样就解决了在任何情况下接触良好的问题。当然，这又出现了一个新的问题，那就是每个电极的测量点在不同的纵向深度上，即六个电极的记录点不在同一平面。这必然引起测量点纵向深度的位移差别，因此必须对此进行校正校正，校正一般用程序实现，这样才能得到一个实际倾斜层面的真倾角。斜井及狗腿子井中，极板常常以一定的角度偏离井壁，致使四臂地层倾角仪所测曲线之间没有相似的对比关系，而在六臂倾角仪中，由于它将电极系装在垂直旋壁上，在有限的范围内可以转动，因此，彼此平行的极板表面都能面向井壁，如图 1-18 所示。

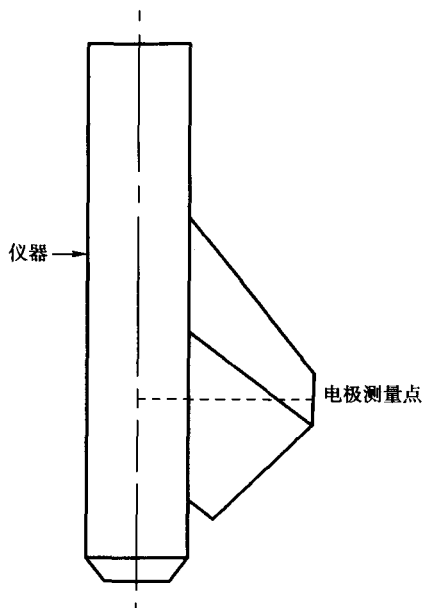


图 1-16 标准平行四边形臂对仪器的移动示意图

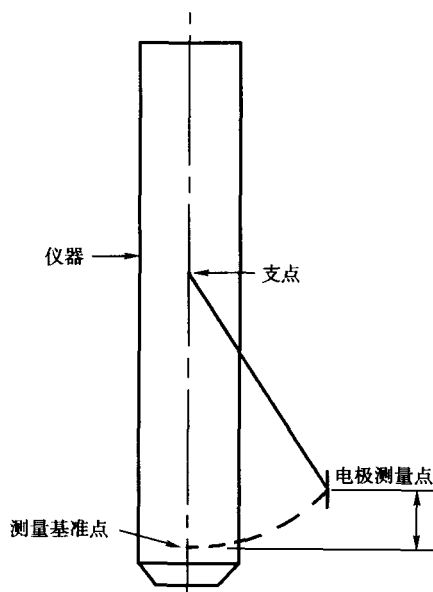


图 1-17 支点臂运动路径示意图

(3) 为了在垂直方向上获得最佳的极板接触状态，六臂倾角仪的极板设计得很短（大约 4in 左右），这大大改善了仪器在极不规则井眼条件下的接触特性。

(4) 对所有极板型和居中型仪器来说，仪器的不规则运动或者上下乱动是一个严重的问题，地层倾角仪更是如此，这会导致所记录的位移加长或缩短。不管井斜为几

度，重力迫使仪器壳体紧贴井眼的下侧边。在井眼增大的顶部边缘上，联动结构的井径仪在仪器不居中时迫使井径仪产生动力来举起整个仪器的重量，这样就会使仪器产生不规则运动。六臂地层倾角仪的设计，使仪器各臂在活动彼此独立，从而使这种问题的影响变得最小，仪器在沿井眼运动时，各个臂不会太大地影响仪器壳体的正常运动。

(5) 电阻率已成为一种十分灵敏的参数，它可以鉴别沉积物在地层中的变化，也能进行可靠的曲线对比。老式的地层倾角仪所记录的是未加刻度的曲线，操作员通过调节输出电压在不同电阻率范围内来取得理想的曲线。六臂地层倾角仪不必这样调节，仪器能测量动态范围很大的电阻率，测得的电阻率以欧姆米为单位记录在对数坐标上。曲线的记录分别来自井眼圆周的六个方向，其原始记录曲线如图 1-19 所示。

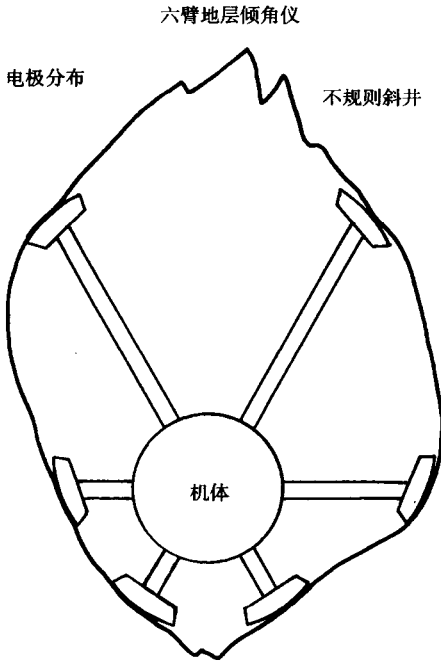


图 1-18 即使在井眼严重不规则及仪器不居中的情况下，六臂地层倾角仪仍能保持极板对井壁的良好接触

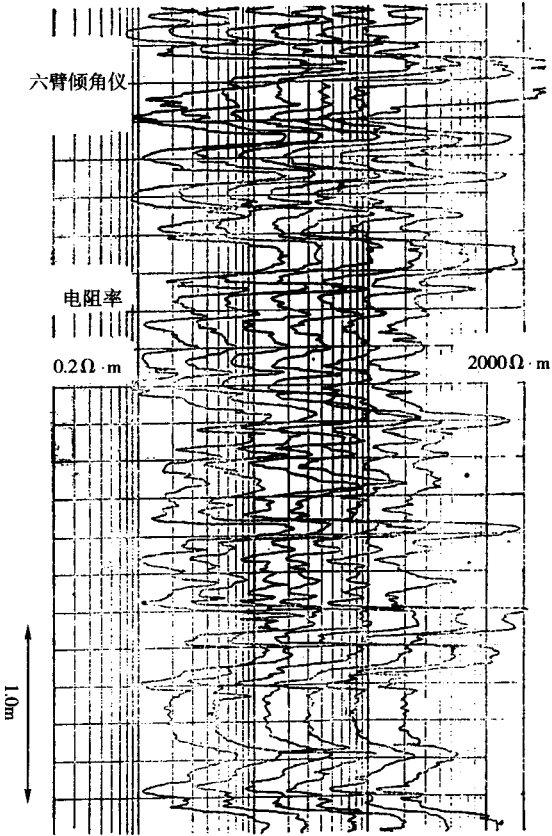


图 1-19 六臂地层倾角仪所测的六条放大比例的电阻率曲线
(第 28 届测井年会)

(6) 六臂地层倾角仪内含有一个完全固化的导向单位，其输出描述了该仪器在空间中的方位。它的传感器是由一组相互垂直安装的三个磁通量计和一个三维加速度计组成的，这六种测量结果的滤波信息，由地面计算机处理成能表示方位的常规曲线（具体处理方法后面介绍）。另外，对不加滤波的 Z 轴加速度的输出也作了记录，因为它代表仪器沿井眼运动的图形记录，因此可用它来对仪器进行速度校正，方法前面已介绍过。