

## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 1573013 B

(45) 授权公告日 2010.09.01

(21) 申请号 200410045748.X

第30行—第12栏第49行, 第15栏第36行—第

(22) 申请日 2004.05.24

16栏第18行, 附图1、7、15—20.

## (30) 优先权数据

US 4980643 A, 1990.12.25, 全文.

60/472686 2003.05.22 US

US 6304086 B1, 2001.10.16, 全文.

10/709212 2004.04.21 US

审查员 焦红芳

(73) 专利权人 施卢默格海外有限公司

地址 巴拿马巴拿马城

(72) 发明人 Q·李 L·仇 D·奥梅拉吉克

L·杨 A·杜蒙特 L·胡

(74) 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公

司 72001

代理人 龚海军 王忠忠

## (51) Int. Cl.

E21B 49/00 (2006.01)

E21B 47/12 (2006.01)

## (56) 对比文件

US 6476609 B1, 2002.11.05, 说明书第7栏

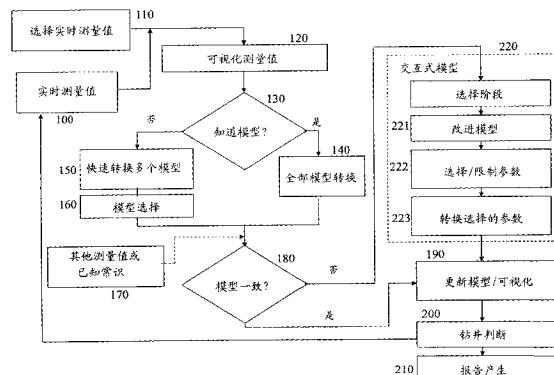
权利要求书2页 说明书20页 附图12页

## (54) 发明名称

用于特征化地下地质构造的方法

## (57) 摘要

一种用于根据钻孔内的测井工具所获得的定向测量值的方位角变化提取出信号的新颖的快速数据处理技术。通过将该测量电压的方位角变化与一些正弦函数相匹配,从地质构造响应中提取出相关分界、各向异性和片断信号。从而也获得了矿层的方向。所提取出的方向信号可用于获得分界距离并进行地质导向判断。根据分界的属性,可以使用包括转换和交会图的两种技术。系统的一部分包括图形用户接口(GUI),以便于灵活的定义转换目标,改进转换结果,并使地质构造模型和转换测量值可视化。



1. 一种特征化地下地质构造的方法,包括以下步骤:

将测井仪器放入钻孔内,该测井仪器至少装备有彼此间隔第一距离的第一发射器和接收器天线,第一发射器天线和第一接收器天线中的至少一个具有相对于该仪器的纵轴倾斜的磁偶极子,所述第一发射器天线和第一接收器天线绕测井仪器的轴取向,从而至少一个倾斜的磁偶极子对应于第一方位角;

使该测井仪器在钻孔内进行方位角旋转;

在测井仪器旋转的同时,驱动第一发射器天线向地质构造发送电磁能量;

在测井仪器旋转的同时,利用第一接收器天线定向测量与所发射的电磁能量相关的第一电压信号,该第一电压信号作为测井仪器的方位角方向的函数,以判断所测量到的第一电压信号的方位角变化;和

将所测量到的第一电压信号的方位角变化与函数相匹配。

2. 如权利要求 1 所述的方法,其中在测量第一电压信号的同时执行匹配步骤。

3. 如权利要求 2 所述的方法,还包括当所计算的错误小于预定的阈值时停止匹配的步骤。

4. 如权利要求 1 所述的方法,其中匹配函数为正弦曲线,通过将第一接收器天线的方向向量和第一发射器天线的磁偶极子的分量相耦合来定义该正弦曲线。

5. 如权利要求 4 所述的方法,其中匹配分量的系数是地球地质构造参数的函数,这些参数至少包括地质构造矿层的电阻率、测井仪器的位置、钻孔偏差、测井仪器位置处的方位角以及它们的组合的其中之一。

6. 如权利要求 5 所述的方法,其中匹配分量的系数包括常数、 $\sin\Phi$ 、 $\cos\Phi$ 、 $\sin 2\Phi$ 、和  $\cos 2\Phi$  项,它们定义用于确定定向测量值方位角相关性的迭代匹配算法,其中  $\Phi$  表示方位角。

7. 如权利要求 6 所述的方法,其中迭代匹配算法用于在地质导向中使用的被选择的实时定向测量值。

8. 如权利要求 1 所述的方法,其中测井仪器还配备了彼此分隔第一距离的第二发射器天线和第二接收器天线,该第二发射器天线具有一磁偶极子,该磁偶极子的倾角对应于第一接收器天线的倾角,第二接收器天线具有一磁偶极子,其倾角对应于第一发射器天线的倾角,这样第二发射器天线和第二接收器天线中的至少一个具有倾斜的磁偶极子,第二发射器天线和第二接收器天线绕测井仪器的轴取向,从而至少一个倾斜的磁偶极子对应于第二方位角,还包括以下步骤:

在测井仪器旋转的同时,驱动第二发射器天线向地质构造中发射电磁能量;

在测井仪器旋转的同时,利用第二接收器天线定向测量作为测井仪器的方位角方向函数且与所发射的电磁能量相关的第二电压信号,从而确定所测量到的第二电压信号的方位角变化;

将从第二接收器天线所测量到的第二电压信号的方位角变化与函数相匹配。

9. 如权利要求 8 所述的方法,其中第二方位角与第一方位角相差 90 度。

10. 如权利要求 8 所述的方法,其中匹配函数为正弦曲线,通过将第一接收器天线的方向向量和第一发射器天线的磁偶极子的分量相耦合,并通过将第二接收器天线的方向向量和第二发射器天线的磁偶极子的分量相耦合来定义该正弦曲线。

11. 如权利要求 10 所述的方法,其中匹配分量的系数是地球地质构造参数的函数,这些参数包括地质构造矿层的电阻率、测井仪器的位置、钻孔偏差、测井仪器位置处的方位角。

12. 如权利要求 11 所述的方法,其中所测量到的第一和第二电压信号为复电压信号;还包括以下步骤:

根据测量到的第一和第二电压信号的匹配分量的系数来计算相位偏移和衰减值;

将对于所测量到的第一和第二电压信号而计算出的相位偏移和衰减值合并从而产生对称或反对称的测量值。

13. 如权利要求 11 所述的方法,其中:

在第一发射器天线和第一接收器天线中仅有一个具有倾斜的磁偶极子;且还包括以下步骤:

利用二次谐波系数来表征所测量到的第一和第二电压信号的噪声。

14. 如权利要求 11 所述的方法,其中:

在第一发射器天线和第一接收器天线中每一个都具有倾斜磁偶极子和横向磁偶极子其中之一;且

匹配系数包括三次谐波系数;以及

所述方法还包括以下步骤:

利用三次谐波系数来表征所测量到的第一和第二电压信号的噪声。

15. 如权利要求 11 所述的方法,还包括通过将测量到的第一和第二电压信号合并来表征测量到的第一和第二电压信号的噪声。

16. 如权利要求 11 所述的方法,其中第二发射器天线和第二接收器天线相对于第一发射器天线和第一接收器天线对称,所述方法还包括以下步骤:

暂停测井仪器的旋转;

通过将第一和第二发射器天线和接收器天线耦合组合,来确定所关注的地质构造矿层的方位角;

根据当仪器不旋转时所获得的测量到的第一和第二电压信号来确定所述常数和一次谐波系数;

当仪器旋转时,利用所述常数系数来执行匹配步骤。

17. 如权利要求 16 所述的方法,还包括以下步骤:

更新测量到的第一和第二电压信号的方位角变化;和

当工具在地质构造矿层平面内时计算等效电压。

18. 如权利要求 1 所述的方法,还包括计算在垂直于矿层分界的假设法线方向上测量到的电压信号的幅度和相位的步骤。

19. 如权利要求 8 所述的方法,还包括利用对所述第一和第二方位角的传播测量值来确定相位位移和衰减的步骤。

## 用于特征化地下地质构造的方法

### 1. 技术领域

[0001] 本发明涉及测井领域。特别是，本发明涉及一种改进的技术，其中使用具有天线系统的设备来进行地下地质构造的电磁测量以及用于相对储油层中的地质边界来定位井，该天线系统具有横向或倾斜的磁偶极子表示。本发明通常应用于测井领域，但是在钻井同时进行测井操作中也很有用。

### 2. 背景技术

[0002] 在碳氢化合物探测和生产领域中已经有多种测井技术。这些技术通常使用装备有发射源的设备或工具，该发射源用于向钻孔所穿透的地下地质构造中发射能量。在上述描述中，“设备”和“工具”可互换地指示，例如电磁设备（或工具），有线工具（或设备）或钻井同时测井工具（或设备）。所发射的能量与周围的地质构造相互作用，从而产生后面将由一个或更多传感器所检测和测量的信号。通过处理所检测到的信号数据，可以获得地质构造属性的分布图。

[0003] 电磁(EM)感应和传播测井是公知的技术。将该测井设备置于钻孔中从而测量该钻孔周围的陆地地质构造的电导率（或它的倒数，即电阻率）。在本发明说明书中，任何对电导率的描述都包含它的倒数，电阻率，相反也是。典型的电磁电阻率工具包括一发射器天线和一个或更多（通常为一对）接收器天线，所述接收器天线被置于沿工具轴线距离发射器天线一定距离（见图1）。

[0004] 感应工具通过测量由流经发射（或发射器）天线的电流所感应出的电磁通量在接收器天线中感应出的电压，来测量地质构造的电阻率（或电导率）。一EM传播工具以相似的方式操作，但是其操作频率比对应类似天线间隔的感应工具的频率更高（传播工具的频率大约为 $10^6$ Hz，相比之下感应工具为大约 $10^4$ Hz）。通常传播工具可以在1kHz-2MHz的频率范围内操作。

[0005] 传统的发射器和接收器都是由线圈形成的天线，这些线圈包括围绕一支撑物的一匝或多匝绝缘导线。这些天线通常作为信号源和/或接收器来操作。本领域技术人员应当理解相同的天线可以在某一时间作为发射器而在另一时间作为接收器。很明显这里所披露的发射器—接收器的结构可以根据互易性原理而互相交换，即“发射器”可用作“接收器”，反之亦然。

[0006] 天线工作的原理是承载电流的线圈（例如发射器线圈）产生磁场。将发射器天线产生的电磁能量发射到周围的地质构造中，这种发射将在发射器周围的地质构造中感应出涡电流（见图2A）。地质构造中感应出的涡电流作为地质构造的电阻率的函数，可以产生一个磁场，该磁场又在接收器天线中感应出一电压。如果使用了一对分离的接收器，则由于周围地质构造的几何扩散和吸收，在两个接收器天线中感应到的电压将具有不同的相位和幅度。这两个接收器的相位差（相位位移 $\Phi$ ）和振幅比（衰减， $A$ ）可用于导出地质构造的电阻率。所检测到的相位位移（ $\Phi$ ）和衰减（ $A$ ）不仅取决于两个接收器之间的间隔以及发射器与接收器之间的距离，还取决于发射器所产生的EM波的频率。

[0007] 在传统的感应和传播测井设备中,发射器和接收器天线的轴沿该设备的纵向轴安装。因此,这些工具都是由具有纵向磁偶极子 (LMD) 表示的天线来实现。在测井领域中新兴的技术是使用包括具有倾斜或横向线圈的天线的设备,即线圈轴线不与工具的纵向轴平行。这样,这些设备是使用具有横向或倾斜磁偶极子 (TMD) 天线来实现。本领域技术人员很明白还有多种方法来倾斜或弄歪这些天线。装备有 TMD 天线的测井设备在美国专利 No. 6163155 ;6147496 ;5115198 ;4319191 ;5508616 ;5757191 ;5781436 ;6044325 和 6147496 中都有描述。

[0008] 图 2A 示出从测井器械中流出的涡流和电磁 (EM) 能量的简化后表示,该测井器械置于在垂直于沉积层的方向上穿过地下地质构造的钻孔部分或片断中。但是,这并不是构成钻孔的所有无数段的精确描述,特别是当该钻孔按照如下方式定向钻孔时。因此,如图 2B 所示,钻孔的某一段经常按照非 90 度的另一角度穿透地质构造层。当这种情况发生时,地质构造平面将具有一相对倾斜角。该相对倾斜角  $\theta$  被定义为钻孔轴 (工具轴) BA 和所关注的地质构造层的平面 P 的法线 N 之间的角度。

[0009] 本领域已知的钻孔技术包括从地球表面的选定地理位置沿选定的轨迹进行钻孔。该轨迹可以延伸到该井孔内特定深度的另一选定地理位置。这些技术都被归类为“定向钻孔”技术。定向钻孔的一个应用是在相对较薄的烃层地质构造 (称为“产油区”) 内或沿着该地质构造在较大的距离上钻出具有较大偏离 (相对于垂直)、甚至水平的井孔。与“垂直”穿透产油区的“传统”钻孔 (如图 2A 所示,基本垂直于地质构造层) 相比,这些高度偏离的钻孔可能极大地增加烃从产油区的泄漏。

[0010] 在产油区中进行高度偏离或水平钻孔的过程中,保持钻孔的轨迹从而使其保持在产油区的特定位置非常重要。本领域中公知的定向钻孔系统使用“泥浆马达”和“弯接头”以及其他装置来控制井孔相对于地标的轨迹,这些地标例如是磁北、地球重心 (垂直)、以及地球的旋转速度 (相对于惯性空间)。但是,地质构造的层并不会使产油区位于距离钻孔的表面位置具有特定地理位置距离的预定轨迹。通常钻孔操作者会使用在钻孔期间所获得的信息 (例如 LWD 日志),将钻孔的轨迹保持在产油区内,从而事实上进一步验证该钻孔在产油区内进行。

[0011] 本领域公知的用于保持轨迹的技术已经在例如 2001 年 9 月 30 的石油工程师世界的第 71396 页中由 Tribe 等所著的“利用可控制旋转系统和 LWD 测量精确定位井位”中被描述。在该参考文章中描述的技术基于 LWD 传导率感应响应。作为一个例子,如果在钻孔穿透之前已经知道产油区的传导率,且如果上层和下层区域的传导率与产油区的传导率具有显著的不同,则在钻井的同时可以使用地质构造传导率的测量值作为“控制”钻孔使其保持在产油区内的标准。特别是,如果所测量到的传导率显著偏离了产油区的传导率,则表明钻孔接近或甚至已经穿透了上层或下层地球地质构造的分界面。作为一个例子,饱和含油沙的传导率显著小于典型的上层和下层页岩的传导率。钻孔附近的传导率增加可以解释为表示该钻孔接近于上层或下层地质构造层 (本例子中的页岩)。使用地质构造特性测量值作为轨迹调节指导的定向钻孔技术通常被称为“地质导向”。

[0012] 除了 EM 测量,还可以使用声音和放射性测量作为地质导向的手段。下面再次使用具有上层和下层页岩的产油区的例子,产油区内的自然伽马放射性通常显著小于产油区下面和上面的页岩层的自然伽马放射性。因此, LWD 伽马射线传感器测量到的自然伽马射线

放射性的增加表示钻孔已经偏离的产油区的中心并接近或者甚至穿透了上面或下面的页岩分界面。

[0013] 在前面的例子中,如果上层和下层的页岩地质构造的传导性和自然放射性彼此相似,则前面描述的地质导向技术仅能指示钻孔正在偏离产油区,而不能指示该钻孔是从产油区转向该区域的上部还是该区域的下部。这就为钻井操作者提出了难题,该钻井操作者必须纠正钻孔轨迹使其在产油区内保持所选定的位置。

[0014] EM 感应测井仪器非常适用于地质导向应用,因为它们在该钻孔周围地质构造中进行调查的横向(径向)深度非常大,特别是与核仪器相比。更深度的径向调查可以使感应仪器能够“看到”距离钻孔轴非常大的横向(或径向)距离。在地质导向应用中,较大的调查的深度可以检测到距离钻孔更大横向距离的所接近地质构造层边界,从而可以使钻孔操作者能够有更多的时间来进行必要的轨迹纠正。传统的传播类型的仪器可以分辨该仪器周围地质构造的传导性的轴向和横向(径向)变化,但是这些仪器的响应通常不能分辨该仪器周围的地质构造的传导性的方位变化。另外,这种仪器不能感应到垂直井中的非均质性。

[0015] 两个重要的新兴市场使得克服这些缺点变得更为迫切。第一个新兴领域是对精确井位定位的需要增加,这要求定向测量对储油层中最佳的钻孔位置进行指导性决定。第二个是在层叠的多个地质构造中的较低电阻率沙层,其中在不知道电阻率的非均质性的前提下,不可能进行储烃层的精确认别和特征化。很多近期的专利都披露了进行定向测量并获得电阻率各向异性的方法和装置。对于钻井的同时测井的申请, Sato 等的美国专利 No. 5508616 公开了一种具有两个线圈的感应类型工具,这些线圈按照不同的方向倾斜,所述方向与工具的轴向方向不一致。该测量的方向性是通过这样的简单论点来说明的,即两个倾斜线圈的灵敏度函数将向每个线圈的灵敏度区域的重叠区域集中。通过这种工具的旋转, Sato 等声称可以得到地质构造的深度方位角电阻率图像。但是,该专利参考文件不能对怎样得到方位角电阻率进行详细说明,也不能进一步描述作出定量地质导向决定时所需的边界检测 / 特征化技术。

[0016] Hagiwara 和 Song 的美国专利 No. 6181138 将 Sato 等的单独固定的定向线圈扩展为在发射器和接收器位置处的协同定位的三个一组的正交感应线圈。由于可以通过正交线圈响应的线性合成,将聚焦方向调节为任意方向,因此其中没有说明需要工具旋转。但是这里不清楚其中是否有一个屏蔽设计,该设计可以使所有所需的 EM 分量通过而不会使“钻孔同时”应用中的波形产生严重的且不能控制的失真。

[0017] 由 Clark 等申请且已经出让给本发明受让人的美国专利 No. 6297639 公开一种利用多种屏蔽设计来进行定向测量,从而为轴向、倾斜、和横向天线线圈提供所选择的 EM 波能量衰减的方法和装置。该专利参考文件描述了在对非平凡的测量进行钻孔补偿处理的同时,利用倾斜的线圈和适当的屏蔽进行的通常的定向感应和传播测量。Clark 等描述了一个轴向和一个倾斜发射器 / 接收器线圈的组合,以及通过研究在工具旋转时所感应到的信号的方位角变化来检测地层界面。该耦合的方位角变化可用于在钻井时进行指导。还有更多已经授权的屏蔽专利,包括 Rosthal 等的美国专利 No. 6351127 和 Omeragic 等的美国专利 No. 6566881,它们都已经被出让给本发明的受让人。

[0018] Bittar 的美国专利 No. 6476609 将其较早的美国专利 No. 6163155 中描述的发射器和接收器都可以具有倾斜角的各向异性专利扩展为地质导向应用领域。通过两个不同方向

上的信号的差或比值,来描述向上 / 下倾斜的感应和传播装置的矿层响应,但是其中并没有提到屏蔽。也没有各向异性或可观的倾斜所带来的后果。而且也没有描述怎样使用这些测量值来得到距离地质构造矿床界面的精确距离。该 No. 6476609 专利中隐含假设已经准确的知道矿层走向,从而可以计算该向上 / 向下响应。但是,并没有已经公开的技术可以在计算上 - 下方向信号之前来精确的定位该上或下方向。

[0019] 由 Minerbo 等提出且已经出让给本发明受让人的美国专利申请公开 No. 2003/0085707 公开工具结构和对称技术,它可以将方向测量值的响应简化到变得几乎与各向异性或倾斜角度无关。对具有不同倾斜角和各向异性的矿床界面距离的响应基本上重叠,除非靠近矿床界面。两个线圈 (一个发射器和一个接收器 :“TR”) 感应形式和三个线圈 (一个发射器和两个接收器 :“TRR”) 传播形式的测量值可以被对称化,从而实现这种简化。这种对称是在两个倾斜且具有相同间隔的 TR 对之间实现的,但是发射器的倾斜角度和接收器的倾斜角度互换。只有当发射器和接收器的磁矩处于同一平面上的情况才会被考虑。此时的缺点是不能在变化的同时总是提供用于地质导向所需要的信号,这是在轨迹上角度增加期间利用泥浆马达进行定位井的情况。如果工具的磁矩在变化的同时正好与矿层平行,则产生的上 / 下方向信号为 0,与距离界面的距离无关。这样就可以不监视距离界面的距离。

[0020] 同样由 Omeragic 等提出且已经出让给本发明受让人的美国专利申请公开 No. 2003/0200029 中公开一种利用钻孔补偿在近似垂直的井中进行各向异性判断的传播类型定向测量。也可以利用相反的技术来获得各向异性地质构造属性。Omeragic 和 Esmersoy 提出且已经出让给本发明受让人的美国专利申请公开 No. 2003/0184302 也公开了利用定向测量来预测的技术。

[0021] Itzkovicz 等的美国专利申请公开 No. 2004/0046560A1 和 2004/0046561A1 中公开了与传统的综合偶极子 XZ 响应具有相似的定向特征的四极天线、横向偶极子 - 四极耦合和感应类型测量方法的使用。但是对金属轴环以及这种天线的适当屏蔽的实际实现并不清楚。而且,这种测量方法的钻孔效应以及它与边界效应的相互作用 / 耦合都与 XY 类型的测量不同。

[0022] 上述专利参考文件都没有公开对测量到的信号的方位角响应的使用或提取这种响应的技术。这些参考文件也没有教导怎样使用这些定向测量值来得到用于地质导向使用的边界距离。他们仅提到了所谓的上 / 下测量,但这在工具朝向或远离地质构造床层之间的测量信号中存在不同。在钻井之前通常并不能精确的知道床层倾斜和方位角信息,在进行地质导向所需要的井位定位中这些信息经常变化。当床层方位角突然变化时,利用预先定义的床层上 / 下方向在最佳下降的测量和最差测量的产生值将导致错误的地质导向判断。原则上,可以在向下钻井中采集存储方位测量值。该技术有很多缺点,包括很难在地质构造床层方向上精确的将顶部和低部采集箱排列,以及不能使用 (浪费) 不处于上和下采集箱中的数据。记录这些具有足够精度的方位数据所需的很大的内存也是一个问题。

[0023] 更为重要的是,利用定向测量用于地质导向的已有技术仅能用于指导向上和向下。但还存在很多情况使得井孔需要变动方位角以避免离开产油区。

[0024] 因此需要一种方法和技术,从而可以利用在所有方位角度得到的测量值,提取和分析定向测井测量值的方位相关性,以便使地质构造特征化并在钻井期间高精度地指导钻

井。

[0025] 还需要根据定向测量值来提供矿层方位角，并产生可用于井的向上 / 向下定位或水平方位指导的测量值。

[0026] 还需要提供一种方法从而可以利用实时的定向测量值来获得地层界面距离以及获得精确的地质模型，这样就可以实现用于定位井的地质导向判断。

[0027] 还需要提供一种方法来检测在近似垂直的井的附近的地质构造层中是否存在传导率各向异性。

[0028] 还需要提供一种有效系统，它可以提供这些定向测量值，在井下分析它们，并将相关信息发送到表面以便于在定位井期间执行向上 / 向下或水平的地质导向。如果该系统可以在钻孔滑动相位（即钻杆没有旋转）期间以及当系统 / 工具旋转时提供距离分界的距离信息，则更为有利。

[0029] 定义

[0030] 在本说明书中将在特定词汇第一次使用时对其进行限定，其他特定词汇将作如下限定：

[0031] “收敛”是指当随着迭代循环次数的增加，迭代计算的值接近所观察到的值或有限极限时的情况。

[0032] “总计图”是指一个图表或该种图标生成，它表示对相同目标或样本进行的两个不同测量值之间的关系。

[0033] “转换”或“转换”表示从测量到的数据（例如测井数据）导出一个模型（也叫做“转换模型”），它可以描述井下地质构造并与所测量到的数据一致。

[0034] “工具表面”是指器械的纵轴的角度取向，且表示工具的壳体（例如钻套）上所选择的参考值与钻孔的重心最上壁或地理北之间的角度。

[0035] “对称”或“对称的”是指这样一种结构，其中发射器 - 接收器设备组沿工具的纵轴向相反方向提供，从而可以利用相对于工具轴上的一点或垂直于工具轴的对称平面的标准对称操作（即平移、镜像平面、反转和旋转），使这些发射器 - 接收器组相互关联。

### 3. 发明内容

[0036] 在一个方面中，本发明提供了一种新颖的快速数据处理技术，从而根据与地质构造特征化和地质导向使用相关的定向测量的方位角变化，可以提取出信号。与传统成像以及其他人提出的技术方案中将测井数据存储到方位角采集箱然后判断与上和下方向相关的值不同，本发明简化了测井响应的物理性。特别是，通过将测量到的电压值的方位角变化与某些正弦函数相匹配，可以从地质构造响应中提取出相关分界、各向异性和裂缝信号。还可以得到矿层的走向。由于使用了所有方位角方向或角度的数据，且没有根据特定角度进行量化，因此这种快速处理提高了测量值的精确性。这种大规模处理可以在数字信号处理器 (DSP) 中通过整数计算来实现，这也是实现中的一种改进。

[0037] 通过按照相关电压耦合的方位角相关性的顺序提取出这些相关电压耦合，本发明可以仅利用一个发射器和接收器对来计算传播类型测量值。本发明也可对不同方位角方向的不同 TR 对的测量值进行重叠，从而产生具有唯一属性的其他测量值，例如对称或不对称的测量值。

[0038] 本发明还提供了一种改进的测量顺序,以增强对不规则旋转、谐波面元、甚至粘滑的容忍度。使用快速启动顺序,该顺序在每个采集循环中都是随机的以便减少特定旋转速度下的旋转死锁。

[0039] 相应地,本发明提出一种特征化地下地质构造的方法,包括以下步骤:

[0040] 将测井仪器放入钻孔内,该测井仪器至少装备有彼此间隔第一距离的第一发射器和接收器天线,第一发射器天线和第一接收器天线中的至少一个具有相对于该仪器的纵轴倾斜的磁偶极子,所述第一发射器天线和第一接收器天线绕测井仪器的轴取向,从而至少一个倾斜的磁偶极子对应于第一方位角;

[0041] 使该测井仪器在钻孔内进行方位角旋转;

[0042] 在测井仪器旋转的同时,驱动第一发射器天线向地质构造发送电磁能量;

[0043] 在测井仪器旋转的同时,利用第一接收器天线定向测量与所发射的电磁能量相关的第一电压信号,该第一电压信号作为测井仪器的方位角方向的函数,以判断所测量到的第一电压信号的方位角变化;和

[0044] 将所测量到的第一电压信号的方位角变化与函数相匹配。

[0045] 重复执行启动、测量和匹配步骤以执行随后的采集循环。

[0046] 在特定的实施例中,在测量第一电压信号的同时执行匹配步骤,当所计算的错误小于预定的阈值时停止匹配。最好利用快速傅立叶变换来确定该匹配系数。

[0047] 在特定实施例中,匹配函数为正弦曲线,通过将第一发射器天线的磁偶极子的分量和第一接收器天线的方向向量相耦合来定义该正弦曲线。匹配分量的系数最好是地球地质构造参数的函数,这些参数至少包括地质构造矿层的电阻率、测井仪器的位置、钻孔偏差、测井仪器位置处的方位角以及它们的组合。匹配分量的系数最好包括常数、 $\sin\Phi$ 、 $\cos\Phi$ 、 $\sin^2\Phi$ 、和  $\cos^2\Phi$  等,它们可以定义用于确定定向测量值方位角相关性的迭代匹配算法,其中  $\Phi$  表示方位角。

[0048] 如上所述,本发明用于将不同发射器 - 接收器 (“TR”) 对的测量值重叠。因此,在特定实施例中,测井仪器还包括彼此分隔第一距离的第二发射器天线和接收器天线。该第二发射器天线具有一磁偶极子,该磁偶极子的倾角对应于第一接收器天线的倾角,第二接收器天线具有一磁偶极子,其倾角对应于第一发射器天线的倾角,这样第二发射器和接收器天线中的至少一个具有倾斜的磁偶极子。第二发射器和接收器天线绕测井仪器的轴取向,从而至少一个倾斜的磁偶极子对应于第二方位角。因此,在测井仪器旋转的同时,第二发射器天线向地质构造中发射电磁能量,利用第二接收器天线定向测量作为测井仪器的方位角方向函数且与所发射的电磁能量相关的第二组电压信号。这些定向测量值可以确定所测量到的第二电压信号的方位角变化。与利用所测量到的第一电压信号一样,将所测量到的第二电压信号的方位角变化与适当的函数相匹配。

[0049] 在特定实施例中,第二方位角与第一方位角的差别为 90 度。或者,第二方位角基本上等于第一方位角。

[0050] 在特定实施例中,匹配函数为正弦曲线,通过将第一发射器天线的磁偶极子的分量和第一接收器天线的方向向量相耦合,并通过将第二发射器天线的磁偶极子的分量和第二接收器天线的方向向量相耦合来定义该正弦曲线。匹配分量的系数最好是地球地质构造参数的函数,这些参数例如为地质构造矿层的电阻率、测井仪器的位置、钻孔偏差、测井仪

器位置处的方位角。匹配分量的系数最好包括常数、 $\sin\Phi$ 、 $\cos\Phi$ 、 $\sin 2\Phi$ 、和  $\cos 2\Phi$  等，它们可以定义用于确定定向测量值方位角相关性的迭代匹配算法。所测量到的第一和第二电压信号最好为复数电压信号。因此，在本实施例中，所发明的方法还包括根据用于测量到的第一和第二电压信号的匹配系数来计算相位偏移和衰减值，以及将对应所测量到的第一和第二电压信号而计算到的相位偏移和衰减值合并从而产生对称或反对称的测量值的步骤。通过对根据从在两个方位角匹配表达中获得的复数电压信号的比率的对数来得到相位偏移和衰减值，这两个方位角最好为相对确定的床层方位角为 0 和 180 度的方位角。

[0051] 在另一方面中，本发明还用于表征在定位测量中的噪声。因此，在第一发射器和接收器天线中仅有一个具有倾斜的磁偶极子的实施例中，可以利用二次谐波系数来表征所测量到的第一和第二电压信号的噪声。在第一发射器和接收器天线中每一个都具有倾斜和横向磁偶极子中的一个，且匹配系数包括三次谐波系数的实施例中，可以利用三次谐波系数来表征所测量到的第一和第二电压信号的噪声。在其他情况下，可以通过将第一和第二测量到的电压信号合并来表征第一和第二测量到的电压信号的噪声。

[0052] 本发明还可用于测井仪器没有旋转的条件，例如当利用泥浆马达设备进行定向钻井时在钻井杆旋转停止期间。在这种条件下，第二天线最好相对于第一天线对称。可以通过将第一和第二天线耦合合并（如上所述），并根据当仪器不旋转时所获得的测量到的第一和第二电压信号来确定该常数和第一谐波系数，从而确定所关注的地质构造矿层的方位角。然后当仪器再次旋转时，所确定的系数可用于执行匹配步骤。

[0053] 在另一方面，本发明提供了一种利用提取出的定向信号来获得分界距离并进行地质导向判断的方法和系统。该提取出的定向信号用于利用两种技术来提取距离分界的距离。简单的交会图可用于简单的一个分界情况或公知的地质构造电阻率剖面，而转换技术可用于更为复杂的情况并用于建立相一致的结构模型。二维交会图包含对电阻率敏感的测量和对距离敏感的测量，如果围岩电阻率已知。或者利用二维交会图测量值来得到对应公知矿层电阻率的围岩的距离和电阻率。对于一个分界情况也可以产生三维交会图，其中地质构造电阻率、围岩电阻率和距离分界面的距离中的每一个都可以被产生。转换技术使用多个测量值对不同模型进行转换，并找到最佳匹配。这种转换可以在井下或在地表完成。

[0054] 图形用户接口 (GUI) 是用于将地质构造模型以及测量和转换结果可视化的系统中的一部分。该 GUI 便于转换参数的交互定义、测量值和模型的选择，以便于改进说明并产生一致的结构模型。

[0055] 迭代匹配算法最好包括以下步骤：

[0056] 初始化  $P_0$  和  $U_0$ ；

[0057] for  $m = 1$  to Nsamples

$$[0058] P_m \leftarrow P_{m-1} - \frac{P_{m-1} \cdot r_{m-1}^T \cdot r_{m-1} \cdot P_{m-1}}{1 + r_{m-1} \cdot P_{m-1} \cdot r_{m-1}^T}$$

$$[0059] U_m \leftarrow U_{m-1} - P_m \cdot r_{m-1}^T \cdot (y_{m-1} - U_{m-1}^T \cdot r_{m-1}^T)^T;$$

[0060] next  $m$ ；

[0061] return ( $U$ )；

[0062] 其中：

[0063] Nsamples 是在一个循环中所获得的采样的总数目，

- [0064] M 是近似函数向量的维（近似函数的编号），  
 [0065] U 是维 M 的匹配系数的向量，  
 [0066] r 是在维 M 的各测量位置处近似函数值的向量，和  
 [0067] P 是 MxM 维的矩阵。

[0068] 在一个实施例中，迭代匹配算法判断匹配误差是否低于预定阈值，U 是否收敛到代表匹配系数的一个值。

[0069] 在一个实施例中，迭代匹配算法为整数实现。最佳地，当测井仪器以相对较高速率旋转且大量数目的响应信道需要匹配时，使用整数实现。

[0070] 在一个实施例中，匹配系数用于确定地质构造矿层的方向。测量到的第一和第二电压信号最好为复数电压信号。根据下面公式来确定地质构造矿层相对于对应各定向测量信道的方位角参考值的方向：

$$[0071] \phi_{bed} = \tan^{-1} \left[ \frac{\left| C_{1s}^0(\theta_T, \theta_R) \right|}{\left| C_{1c}^0(\theta_T, \theta_R) \right|} \right],$$

[0072] 其中  $C_{1s}$  为系数  $\sin \Phi$  的实部或虚部， $C_{1c}$  为  $\cos \Phi$  的系数。可以利用所测量到的电压信号的实部和虚部的匹配系数的加权平均值来计算第一和第二电压信号的公共方位角。可以在假设的所感兴趣的矿层分界的正交方向上计算所测量到的电压信号的幅度和相位。通过对两个方位角度例如  $\Phi_{bed}$  和  $\Phi_{bed} + 180^\circ$  进行传播测量来确定相位位移和衰减。最好将对应第一和第二电压测量值的匹配系数的信号合并从而产生确定距离感兴趣的矿层分界的距离所需的信号。

[0073] 本发明的其他方面涉及利用交会图来进行地质构造特征化。一个方法包括这样一个步骤，该步骤通过对从置于与地质构造层相交叉的钻孔中的仪器中获得的两个方向的测井测量值绘制交会图，得到距离至少一个地质构造分界的距离以及对应至少一个地质构造矿层的电阻率。该绘制交会图可以利用单分界模型来实现。所获得的电阻率为围岩电阻率，所获得的距离为距离围岩的最近距离。

[0074] 其他方法包括这样一个步骤，该步骤通过对利用置于与地质构造层相交叉的钻孔中的仪器所确定的电阻率和方向测量值绘制交会图，得到距离至少一个地质构造分界的距离以及对应至少一个地质构造矿层的电阻率。该绘制交会图可以利用单分界模型来实现。所获得的电阻率为围岩电阻率，所获得的距离为距离围岩的最近距离。

[0075] 另一方法包括这样一个步骤，该步骤通过对利用置于与地质构造层相交叉的钻孔中的仪器所确定的电阻率和两个方向测量值绘制交会图，得到距离至少一个地质构造分界的距离以及对应至少两个地质构造矿层的电阻率。该绘制交会图可以利用单分界模型来实现。所获得的电阻率为矿层电阻率和围岩电阻率，所获得的距离为距离围岩的最近距离。所确定的分界距离和矿层电阻率可用于进行钻孔判断。

[0076] 本发明的另一方面涉及使用转换技术来解释用于地质导向应用的定向测量。这里，迭代匹配算法对于在地质导向中有用的所选择的实时定向测量非常有用。对该被选择的实时定向测量值选择适当的转换模型。一旦验证该被选择的模型与其他信息一致，则可利用它来进行钻孔判断。

[0077] 该模型选择步骤最好包括运行包括以下模型类型的多个模型：

[0078] 同质各向同性（单独参数：电阻率）；

- [0079] 同质各向异性（两个参数 :Rh 和 Rv）；
- [0080] 单分界各向同性地质构造, 分界以上或以下（三个参数 :Rbed, Rshoulder 和距离分界的距离）；
- [0081] 单分界各向异性地质构造, 分界以上或以下（四个参数 :Rbed\_h, Rbed\_v, Rshoulder 和距离分界的距离）；
- [0082] 两个分界各向同性地质构造三个参数：(五个参数 :Rbed, Rshoulder\_up, Rshoulder\_down 和距离工具以上和以下的分界的距离)；
- [0083] 两个分界各向异性地质构造三个参数：(六个参数 :Rbed\_h, Rbed\_v, Rshoulder\_up, Rshoulder\_down 和距离工具以上和以下分界的距离)。
- [0084] 该模型选择步骤最好还包括为被选择定向测量值产生可视化。
- [0085] 在特定实施例中, 该模型选择步骤包括识别已知地质构造参数, 迭代地选择转换被选择定向测量值的模型, 以及选择匹配已知信息的最简单的模型。
- [0086] 该模型检验步骤包括将所选择的模型与已知的地质特征和其他测量到的地质构造参数相比较, 如果所选择到的模型与已知信息不一致, 则更新所选择的模型。
- [0087] 该更新步骤包括根据趋势、已有技术、外部信息中的一个以及它们的结合来改进该被选择模型。选择适当的转换参数, 并定义所选择的参数的范围。最好通过增加更多的地质构造矿层来更新该转换模型。可以将某些实时定向测量值重新加权或者将其删除, 所产生的实时定向测量值可以被重新转换为更新模型。
- [0088] 本发明的交会图绘制方法最好包括定义一个适当的模型, 选择适当的定向测量值, 将所选择的测量值输入到所定义的模型中从而产生交会图, 并产生该交会图的可视表示。可以利用其他实施测量值来更新该交会图。
- [0089] 本发明的另一方面涉及一种用于测量钻孔周围地球地质构造的特征的装置。该装置包括一置于钻孔内的测井仪器。该测井仪器具有纵向轴且装备有第一和第二发射器 - 接收器天线对。第一发射器 - 接收器天线对包括具有磁偶极子的第一发射器天线和距离第一发射器天线为第一距离且具有磁偶极子的第一接收器天线, 该第一发射器天线的磁偶极子的方向相对测井仪器的纵向轴为第一方向, 第一接收器天线的磁偶极子的方向为第二方向。第一和第二方向彼此不同。第一发射器和接收器天线的磁偶极子定义了一个平面, 该平面包括测井仪器的纵轴。第二发射器 - 接收器天线对包括一第二发射器天线和一第二接收器天线, 该第二发射器天线具有相对于测井仪器的纵轴为第二方向的磁偶极子, 第二接收器天线距离第二发射器天线为第一距离, 且具有第一方向的磁偶极子。第二发射器和接收器天线的磁偶极子定义了一个包括测井仪器纵轴的平面。该装置还包括工具面传感器和一控制器, 该工具面传感器用于连续的指示测井仪器的方位角方向, 该控制器用于控制第一和第二发射器 - 接收器天线对, 从而选择性地向地质构造发射电磁能量, 并测量与该被发射电磁能量相关的电压信号, 该电压信号作为测井仪器的方位角方向的函数。
- [0090] 在特定实施例中, 第二发射器 - 接收器天线对的方向与关于测井仪器纵轴的第一发射器 - 接收器天线对具有第一方位角度（例如 90 度）。
- [0091] 在不同实施例中, 测量到的地质构造特征包括电阻率、和地球地质构造地质信息, 例如深度、方位和矿层厚度。
- [0092] 第一和第二方向是可变的, 且可以例如与测井仪器的纵轴基本共线或基本与测井

仪器的纵轴成 45 度角。

[0093] 在特定实施例中,第一和第二发射器 - 接收器天线对与测井仪器位于同样的物理位置。

[0094] 在特定实施例中,发射器和接收器中的每一个都具有发射接收能力。

[0095] 工具面传感器可以使用磁力计来指示测井仪器相对于地球磁北的方位角方向,还可以使用重力传感器来指示测井仪器相对于地球重力向量的方位角方向。

[0096] 本发明装置最好还包括一用于处理在钻孔中所测量到的电压信号的 CPU,一用于将测量到的信号和 CPU 处理后的结果从钻孔发送到地表的遥测装置,以及用于对测量到的信号与其他测量值一起进行处理从而产生并显示一致的地质模型的被选择参数的地表系统。

#### 4. 附图说明

[0097] 为了对本发明的上述特征和优点进行更好地理解,可以参照附图中所示的对实施例的更为详细的描述。但是应当注意,附图仅示出了本发明的典型实施例,它们并不对本发明范围进行限定,因为本发明还可以允许其他等效实施例。

[0098] 图 1 示现有技术中感应或传播工具的示意性图。

[0099] 图 2A 和 2B 分别示出由没有穿透地质构造和穿透地质构造一定深度的钻孔中的测井工具所感应到的涡流的前视图。

[0100] 图 3 示出传统旋转钻井柱的前视图,其中可以使用本发明。

[0101] 图 4 示出具有对称发射器和接收器天线对的基本定向测量测井工具的示意性表示。

[0102] 图 5A 示出根据本发明一个方面,具有对任何倾角处的各向异性不敏感的 TRR 结构的定向测量测井工具的示意性表示。

[0103] 图 5B 示出利用根据图 5A 的测井工具,对应三层地质构造的定向传播响应所作的图。

[0104] 图 6 示出装箱技术和根据本发明一个方面的快速匹配技术之间的图形比较。

[0105] 图 7 示出表示根据本发明一个方面的匹配技术产生的目标系数组中的收敛和误差的图,该匹配技术根据本发明另一方面的数字信号处理器中的整数算法来实现。

[0106] 图 8 示出表示传统电阻率测量和定向测量的交会图,对于已知的围岩电阻率而言,这两个测量用于获得地质构造矿层的电阻率和距离矿层分界的距离。

[0107] 图 9 示出用于获得地质构造矿层的电阻率和逐点分界位置的转换技术的结果。

[0108] 图 10 示出用于解释定向电阻率测量的基于转换技术的交会图。

[0109] 图 11 示出根据本发明一个方面来进行地质导向的工作流程图。

[0110] 图 12 示出根据本发明另一方面,可以确定矿层分界距离并在实时地质导向中提供该距离的工作流程图。

[0111] 图 13 示出用于显示基于转换的地质构造矿层模型的 GUI 的结构的方块图。

[0112] 图 14 示出计算机产生的与图 13 中 GUI 相联系的地质导向转换的可视化结果。

#### 5. 具体实施方式

[0113] 图 3 示出传统的钻机和钻杆,本发明可应用其中以产生良好效果。地基平台和井

架设备 10 位于钻孔 11 之上, 该钻孔穿透地下地质构造 F。在所示实施例中, 通过公知的方式利用旋转钻孔的方式形成钻孔 11。但是本领域技术人员可以知道, 本发明也可以用于定向钻井应用和旋转钻井中, 而且并不局限于地基钻机。

[0114] 钻杆 12 位于钻孔 11 内, 且在其最低端包括钻头 15。该钻杆 12 由钻台 16 旋转, 并由未示出的装置来激励, 该装置与钻杆上端的传动钻杆 17 接合。钻杆 12 从与移动块 (未示出) 连接的钩子 18 开始, 通过传动钻杆 17 以及旋转接头 19 悬挂下来, 该旋转接头 19 可以允许钻杆相对于钩子旋转。

[0115] 钻探液体或泥浆 26 储存在钻井位置附近形成的深坑 27 中。一个泵 29 将钻探液体 26 经过旋转接头 19 的一部分运送到钻杆 12 的内部, 将钻探液体引导经过钻杆 12 沿方向箭头 9 所示的方向向下流动。该钻探液体通过钻头 15 中的部分流出钻杆 12, 然后在方向箭头 32 的指示下, 经过钻杆外侧和钻孔壁之间的称为环面的区域向上循环。这样, 钻探液体就可以润滑钻头 15, 并将地质构造碎屑运到地表, 使其返回到深坑 27 中进行再次循环。

[0116] 钻杆 12 还包括位于钻头 15 附近的底孔构件 (换句话说, 在距离钻头几个钻套长度内), 通常表示为 34。该底孔构件包括测量、处理和存储信息以及与地表进行通信的能力。底孔构件 34 包括一测量和局部通信装置 36, 用于确定和通知该钻井 11 周围的地质构造 F 的电阻率。通信装置 36 还可作为电阻率工具, 包括第一发射 / 接收天线对 T, R 以及第二发射 / 接收天线对 T', R'。第二天线对 T', R' 相对于第一天线对 T, R 对称, 这将在下面详细说明。电阻率工具 36 还包括一控制器, 用于根据本领域公知技术控制数据的获取。

[0117] BHA34 还包括位于钻套 38、39 内的仪器, 用于执行多种其他的测量功能, 例如对自然辐射、密度 (伽马射线或中子) 以及地质构造 F 的孔隙压力的测量。如本领域公知, 至少一些钻套装备有稳定器 37。

[0118] 地表 / 局部通信部件 40 也可以包括在 BHA34 中, 就在钻套 39 上。该部件 40 包括用于与电阻率工具 36 进行局部通信的环形天线 42 (虽然也可以使用其他公知的通信装置) 以及公知类型的声学遥测系统, 该声学遥测系统可以通过钻探液体或泥浆中携带的信号与地表的相似系统 (未示出) 进行通信。因此, 该部件 40 中的声学遥测系统包括可以在钻探液体中产生声学信号 (也称为“泥浆脉冲”) 的声音发射器, 该声学信号代表测量到的井下参数。

[0119] 通过幅图标记为 31 的地表传感器来接收到产生的声学信号。该传感器例如压电传感器可以将接收到的声学信号转换为电信号。传感器 31 的输出与井上接收子系统 90 耦合, 该子系统 90 可以解调所发射的信号。接收子系统 90 的输出与计算机处理器 85 和记录器 45 耦合。该处理器 85 可用于在测井的同时实时地或者随后通过访问记录器 45 中存储的记录数据来确定地质构造电阻率情况 (除了其他事以外)。计算机处理器与监视器 92 耦合, 该监视器 92 使用图形用户接口 (“GUI”), 所测量到的井下参数和从中得到的特定结果 (例如电阻率情况) 通过该 GUI 以图形形式提供给用户。

[0120] 井上发射系统 95 也可以从用户处接收到输入命令 (例如通过监视器 92 中的 GUI), 并且可以选择性地中断泵 29 的操作, 部件 40 中的传感器 99 可以检测到这种方式。这样, 部件 40 和井上设备之间就有两种通信方式。在美国专利 No. 5235285 和 5517464 中对适当的部件 40 进行了很详细的描述, 这两个专利已经出让给本发明的受让人。本领域技术人员应当知道其他声学技术以及其他遥感监测装置 (例如, 电动机械、电磁) 都可以用于与

地面通信。

[0121] 定向测量的方位角相关性和新的传播类型等效物

[0122] 使用了两种类型的线圈天线来构成对方向灵敏度的测量。一种类型通过使天线例如与测井工具的纵轴中心偏离或者局部覆盖来实现方向灵敏度。也可以利用这样的天线结构，即天线的磁矩不与具有天线的工具的纵轴平行，来实现定向测量。本发明涉及第二种类型的方向灵敏天线。

[0123] 图 4 示意性地示出了用于定向电磁 (EM) 波测量的基本电阻率工具 36。该工具 36 包括一发射器天线 T 和一接收器天线 R，该发射器天线 T 发射具有某一频率 f 的 EM 波，接收器天线 R 与发射器天线 T 的距离为 L。还示出了根据美国专利申请公开 No. 20003/0085707 (“Minerbo 等”) 提出的对称对 (T' 和 R')，该美国专利申请公开并已出让给本发明受让人。为了清楚和简便起见，下面的描述主要局限于发射器天线 T 和接收器天线 R，虽然通常也可用于对称天线对 T' 和 R'。应当注意虽然在图 4 中，两个对称对的倾斜磁矩在同一平面内，但是本发明中并不需要这样。在下面的说明中将会清楚，如果在对称操作中使用了提取出的系数或定向相位位移或衰减，则磁矩处于不同平面内的两对天线所发出的信号仍然可以彼此相加从而实现相同的结果。

[0124] 在操作中，接收器天线 R 将记录发射器天线 T 发出的 EM 波所感应出的电压  $V_{RT}$ ，以及由包含测井工具 36 且被钻孔穿透的地质构造中所产生的第二电流。天线 T 和 R 都固定在工具 36 上，因此与工具一起旋转。可以假设天线方向为对于发射器天线 T 形成角度  $\theta_T$ ，对于接收器天线 R 形成角度  $\theta_R$ 。随着工具旋转，耦合电压的方位角变化也可表示为磁偶极子的 Cartesian 分量的偶和：

$$[0125] V_{RT}(\phi) = [V_{xz} \cos \theta_T \cos \theta_R + \frac{1}{2}(V_{xx} + V_{yy}) \sin \theta_T \sin \theta_R] + [V_{xz} \sin \theta_T \cos \theta_R + V_{zx} \cos \theta_T \sin \theta_R] \cos \phi + [V_{yz} \sin \theta_T \cos \theta_R + V_{zy} \cos \theta_T \sin \theta_R] \sin \phi \quad (1.1)$$

$$[0127] + [\frac{1}{2}(V_{yx} + V_{xy}) \sin \theta_T \sin \theta_R] \sin 2\phi + [\frac{1}{2}(V_{xx} - V_{yy}) \sin \theta_T \sin \theta_R] \cos 2\phi$$

$$[0128] = C_0(\theta_T, \theta_R) + C_{1c}(\theta_T, \theta_R) \cos \phi + C_{1s}(\theta_T, \theta_R) \sin \phi + C_{2c}(\theta_T, \theta_R) \cos 2\phi + C_{2s}(\theta_T, \theta_R) \sin 2\phi$$

[0129] 其中已经定义了一组复数系数  $C_0, C_{1c}, C_{1s}, C_{2c}, C_{2s}$  来表示所测量到的地质构造响应的不同成分的幅度。该复数系数被定义为：

$$[0130] C_0(\theta_T, \theta_R) = [V_{xz} \cos \theta_T \cos \theta_R + \frac{1}{2}(V_{xx} + V_{yy}) \sin \theta_T \sin \theta_R]$$

$$[0131] C_{1c}(\theta_T, \theta_R) \equiv [V_{xz} \sin \theta_T \cos \theta_R + V_{zx} \cos \theta_T \sin \theta_R] \quad (1.2)$$

$$[0132] C_{1s}(\theta_T, \theta_R) \equiv [V_{yz} \sin \theta_T \cos \theta_R + V_{zy} \cos \theta_T \sin \theta_R]$$

$$[0133] C_{2c}(\theta_T, \theta_R) \equiv [\frac{1}{2}(V_{yx} + V_{xy}) \sin \theta_T \sin \theta_R]$$

$$[0134] C_{2s}(\theta_T, \theta_R) \equiv [\frac{1}{2}(V_{yx} + V_{xy}) \sin \theta_T \sin \theta_R]$$

[0135] 根据本发明的一个方面，应当认识到这些系数都是工具位置处地质构造电阻率、钻孔偏离以及方位角度的函数。

[0136] 通过对称操作，即 ( $\theta_T \leftrightarrow \theta_R$ )，可以将公式 (1.1) 简化为：

$$[0137] \mathcal{V}(\phi) \equiv V_{RT}(\phi, \theta_T, \theta_R) - V_{RT}(\phi, \theta_R, \theta_T) =$$

$$[0138] 2[V_{xz} - V_{zx}] \sin(\theta_T - \theta_R) \cos \phi + 2[V_{yz} - V_{zy}] \sin(\theta_T - \theta_R) \sin \phi \quad (1.3)$$

[0139]  $\equiv C_{ls}(\theta_T, \theta_R) \cos \phi + C_{ls}^*(\theta_T, \theta_R) \sin \phi$

[0140] 所有的二次谐波 ( $C_{2e}$ ,  $C_{2s}$ ) 在相减后都消失, 因为他们相对于发射器和接收器倾角的交换对称。这样, 反对称就会简化反对称后信号的方位角变化。

[0141] 在这个阶段, 方位角的参考点是任意的。对于设计几何学来说, 如果我们选择角度  $\Phi$  参考点为矿层平面的法线方向, 则通过对称,  $V_{yz} = V_{zy} = 0$  且  $V^{\%}(\Phi)$  将具有纯  $\cos \Phi$  相关性。在实际应用中, 矿层的方向是未知的。但是, 举出任何参考, 都可以通过下面公式来计算矿层的方向:

[0142]  $\phi_{bed} = \tan^{-1} \left| \frac{C_{ls}(\theta_T, \theta_R)}{C_{ls}^*(\theta_T, \theta_R)} \right| = \tan^{-1} \left| \frac{V_{yz} - V_{zy}}{V_{xz} - V_{zx}} \right| \quad (1.4)$

[0143] 其中旋转  $\Phi_{bed}$ ,  $\hat{x}$  与矿层垂直, 因此除了倍增常数  $2\sin(\theta_T - \theta_R)$  以外,  $V^{\%}(\Phi)$  正好为  $[V_{xz} - V_{zx}]$ 。

[0144] 一旦各发射器线圈导致的各接收器线圈的电压被确定, 就可以确定总的测量值: 在一个感应工具情况下通过将电压相加; 或者在一个传播工具的情况下通过得到电压的复数比。例如, 对于图 4 所示的传播测井设备, 可以通过对复数电压的实部和虚部平方和取均方根(公式 1.1), 来获得各接收器处的电压绝对值, 绝对值的比率提供了衰减, 根据这些可以获得由衰减决定的电阻率  $R_{ad}$ (接收器周围相对较深深度处地质构造的电阻率)。从复数电压的虚部和实部的比率的反正切可以得到各接收器的相位, 相位位移为两个接收器相位之间的差。然后可以获得该相位位移决定的电阻率  $R_{ps}$ (接收器周围较浅深度的地质构造的电阻率)。

[0145] 对于传播类型的测量值, 可以取两个测量值之间的电压的对数差(或比率)。在 Minerbo 等的教导下, 我们可以取电压响应最大时计算得到的方位角响应的幅度, 即角度  $\Phi$  和角度  $(\Phi+180)$  处的相位位移差和测量衰减。这将从公式 (1.1-2) 得到:

[0146]  $\frac{V_{RT}(\phi)}{V_{RT}(180+\phi)} = \frac{C_0(\theta_T, \theta_R) + C_{ls}(\theta_T, \theta_R) \cos \phi + C_{ls}^*(\theta_T, \theta_R) \sin \phi + C_{2e}(\theta_T, \theta_R) \cos 2\phi + C_{2s}(\theta_T, \theta_R) \sin 2\phi}{C_0(\theta_T, \theta_R) - C_{ls}(\theta_T, \theta_R) \cos \phi - C_{ls}^*(\theta_T, \theta_R) \sin \phi + C_{2e}(\theta_T, \theta_R) \cos 2\phi + C_{2s}(\theta_T, \theta_R) \sin 2\phi}$

[0147]  $\approx 1 + 2 \frac{C_0(\theta_T, \theta_R) + C_{ls}(\theta_T, \theta_R) \cos \phi + C_{ls}^*(\theta_T, \theta_R) \sin \phi}{C_0(\theta_T, \theta_R) + C_{2e}(\theta_T, \theta_R) \cos 2\phi + C_{2s}(\theta_T, \theta_R) \sin 2\phi}$

[0148]

$$\approx 1 + 2 \frac{[V_{xz} \sin \theta_T \cos \theta_R + V_{zx} \cos \theta_T \sin \theta_R] \cos \phi + [V_{yz} \sin \theta_T \cos \theta_R + V_{zy} \cos \theta_T \sin \theta_R] \sin \phi}{V_{zz} \cos \theta_T \cos \theta_R + \frac{1}{2}[V_{xx} + V_{yy}] \sin \theta_T \sin \theta_R + \frac{1}{2}[[V_{yx} + V_{xy}] \sin \theta_T \sin \theta_R \sin 2\phi + \frac{1}{2}[[V_{xx} - V_{yy}] \sin \theta_T \sin \theta_R \cos 2\phi]}$$

[0149] 如果选择  $x$  为矿层的法线方向, 则在  $\Phi = 0$  时可以得到  $|V|$  的最大值。在角度  $\Phi = 0$  时计算, 公式 (1.5) 可以得到:

[0150]  $\frac{V_{RT}(0)}{V_{RT}(180)} \approx 1 + 2 \frac{C_0(\theta_T, \theta_R) + C_{ls}(\theta_T, \theta_R)}{C_0(\theta_T, \theta_R) + C_{2e}(\theta_T, \theta_R)}$

[0151]  $\approx 1 + 2 \frac{[V_{xz} \sin \theta_T \cos \theta_R + V_{zx} \cos \theta_T \sin \theta_R]}{V_{zz} \cos \theta_T \cos \theta_R + V_{xx} \sin \theta_T \sin \theta_R}$

[0152] 但是, 这仍然不是所需要的纯  $xz-zx$  类型的响应, 即它仍然对矿层各向异性和倾角不敏感。

[0153] 本发明涉及定向测量,它在很广的倾角范围和很大的频率范围内对地质构造的各向异性不敏感。如上所述,本发明的特定实施例基于反对称的天线结构或系统。现在利用如 Minerbo 等已经描述的对称过程 ( $\theta_T \Leftrightarrow \theta_R$ ), 可以得到:

$$[0154] \frac{V_{RT}(0, \theta_T, \theta_R)}{V_{RT}(180, \theta_T, \theta_R)} - \frac{V_{RT}(180, \theta_R, \theta_T)}{V_{RT}(0, \theta_R, \theta_T)} \approx 1 + 2 \frac{[V_{xz} - V_{zx}] \sin(\theta_T - \theta_R)}{V_{zz} \cos \theta_T \cos \theta_R + V_{xx} \sin \theta_T \sin \theta_R} \quad (1.7)$$

[0155] 这又与感应类型的响应相似,虽然分母仍然为不是简单的 [xz-zx] 的一些分量。这证明对于传播类型的测量来说,对称过程可以产生与对称后感应类型相似的响应,但仍然不是纯的类型。而且在方位角响应的两个任意方向上,都可以实现传播测量。

[0156] 该分析的最终响应包含不同类型耦合产生的分量,根据传统测井技术,该响应开始看起来并不需要。但是,该响应可以实现一进行传播测量的改进方法,它简单且更接近感应类型。通过观察不同类型的耦合可以自然分离不同类型方位角相关性,从而可以实现本发明的定向测量。注意我们可以使用  $C_0, C_{lc}, C_{ls}$  来更清楚地进行定向测量。

[0157] 通过公式 (1.4) 可以假设确定的矿层方向  $\Phi_{bed}$ ,这样所有的角度  $\Phi$  以及  $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$  都可以通过这个方向来定位。在这种情况下,公式 (1.1) 可以简化为:

$$[0158] V_{RT}(\phi) = [V_{zz} \cos \theta_T \cos \theta_R + \frac{1}{2}(V_{xx} + V_{yy}) \sin \theta_T \sin \theta_R]$$

$$[0159] + [V_{xz} \sin \theta_T \cos \theta_R + V_{zx} \cos \theta_T \sin \theta_R] \cos \phi$$

$$[0160] + [\frac{1}{2}(V_{xx} - V_{yy}) \sin \theta_T \sin \theta_R] \cos 2\phi$$

$$[0161] \equiv \bar{C}_0(\theta_T, \theta_R) + \bar{C}_{lc}(\theta_T, \theta_R) \cos \phi + \bar{C}_{2c}(\theta_T, \theta_R) \cos 2\phi$$

[0162] 然后,可以通过下面公式来简单定义传播测量:

$$[0163] \frac{\bar{C}_0(\theta_T, \theta_R) + \bar{C}_{lc}(\theta_T, \theta_R)}{\bar{C}_0(\theta_T, \theta_R) - \bar{C}_{lc}(\theta_T, \theta_R)} \quad (1.9)$$

[0164] 和

$$[0165] \frac{\bar{C}_0(\theta_T, \theta_R) + \bar{C}_{2c}(\theta_T, \theta_R)}{\bar{C}_0(\theta_T, \theta_R) - \bar{C}_{2c}(\theta_T, \theta_R)}$$

[0166] 现在利用对称,可以获得第一表达式:

$$[0167] \frac{\bar{C}_0(\theta_T, \theta_R) + \bar{C}_{lc}(\theta_T, \theta_R)}{\bar{C}_0(\theta_T, \theta_R) - \bar{C}_{lc}(\theta_T, \theta_R)} \cdot \frac{\bar{C}_0(\theta_R, \theta_T) + \bar{C}_{lc}(\theta_R, \theta_T)}{\bar{C}_0(\theta_R, \theta_T) - \bar{C}_{lc}(\theta_R, \theta_T)}$$

[0168]

$$\approx 1 + 2 \frac{[V_{xz} - V_{zx}] \sin(\theta_T - \theta_R)}{V_{zz} \cos \theta_T \cos \theta_R + \frac{1}{2}[V_{xx} + V_{yy}] \sin \theta_T \sin \theta_R} \quad (1.10)$$

[0169] 该公式 (1.10) 与公式 (1.7) 仅有一些不同。

[0170] 因此,对于两个线圈 (TR) 测量的感应和传播类型来说,应当根据电压  $V_{RT}(\Phi)$  电平来执行对不同分量的分析。这样会产生精确的  $\sin \Phi$ 、 $\cos \Phi$ 、 $\sin 2\Phi$  和  $\cos 2\Phi$ ,它们都可以通过下面描述的新颖处理算法被提取出来。

[0171] 这里需要再次注意的是在当  $\theta_T = 0$  或  $\theta_R = 0$  时的特定情况下,  $\sin 2\Phi$  和  $\cos 2\Phi$

项都变为零。电压相关性仅简单地基于  $\sin\Phi$  和  $\cos\Phi$  项。

[0172] 相位位移和衰减的传播类型测量的一个重要方面是它很适于“钻孔的同时”进行的测量,对于它来说,在井下条件下很难实现热电子漂移的详细特征化。这里定义的定向相位位移和衰减测量都具有传统的钻孔补偿的传播电阻率工具的优点:发射器和接收器天线特征以及接收器电子的漂移都不影响测量。

[0173] 还应当注意,在本发明中利用提取出的系数来实现对称处理,该系数可以独立于两个 TR 对的实际相对方位角来处理。如果 TR 对方向绕工具轴额外物理旋转了角度  $\Phi_0$ ,则除了将  $\Phi$  替换为  $\Phi+\Phi_0$  以外,可以利用相同的表达式来描述该响应。这对实际线圈结构有很重要的含义。通过利用两对 TR 测量值,而不是利用不同的方位角方向,可以实现旋转期间的对称处理,就像两个对处于同一平面一样。但是,当工具滑动时,可以通过简单地假设工具的方位角和矿层在工具仍然旋转时相比没有变化,来使用两个方向上测量到的信号构成所需的定向测量值。这样,我们就可以使用公式 1.3 来获得构成传播测量值所需的幅度 C1c 和 C1s。

[0174] 这些分析可以直接扩展到传统的 TRR 类型的测量值,如 Minerbo 等中所述那样。本领域技术人员很容易知道这个过程实质上产生了与上述相同的响应,只是当接收器对之间的间隔远小于 TR 间隔时,信号加倍。这两个接收器输出的定向信号简单地相加。

[0175] 图 5A 示出在任何倾斜角度都对各向异性不敏感的 TRR 结构,图 5B 示出根据该结构的响应。启动发射器天线 T1 并测量接收天线 R11、R12 的相位位移和衰减。然后,启动发射器天线 T2 并测量接收器天线 R21、R22 的相位位移和衰减。工具数据对应于这两组测量值之间的差。由于在均匀介质中任何角度和任何各向异性下,各测量值都相同,因此在任何深度下均匀介质中的工具数据都为零。

[0176] 图 5B 中示出了三层各向异性地质构造中的测量响应。在远离分界的任何深度下工具数据都为零,在靠近分界的时候对各向异性几乎不敏感。如果发射器和接收器位置互换时传播响应不对称,则将导致对响应进行分割。向上 / 向下测量仅包含定向信息,即使接近于分界也一样。应当发现与理想的 XZ-ZX 感应测量(上面所述)相似,如果所有的天线处于同一介质中则对于不同深度的衰减响应将实际上重叠。虽然响应为导电层中的两倍值(1S/m),但是相位位移测量值也相互重叠。

[0177] 根据方位角相关性来提取信号的数字信号处理器(DSP)算法

[0178] 从上面的分析中很明显可以看出提取定向测量值的最好方法就是分析电压信号并提取相关的测量值,然后根据对称化结果将它们合成以用于最终的地质导向目的。传统上处理方位角数据的方法是将它们存储在具有相等方位间隔的小箱中(见图 6 的左半部分),就像利用电阻率或密度钻孔图像所作的一样。然后,通过定位最大和最小来识别上面和下面的采集箱。但是,该技术的缺点在于:

[0179] 1. 装箱降低了测量的角度分辨率;

[0180] 2. 装箱导致数据浪费,原因是上面和下面采集箱以外的数据中没有用于对距离分界的距离进行计算;

[0181] 3. 在卡住或滑动发生时,装箱并不均匀,因此上面和下面采集箱可能是空的或具有很少的采样,这样会在上 / 下测量中引起误差并在最糟的情况下可能产生峰值的错误识别;

[0182] 4. 装箱占用大量的内存。

[0183] 本发明的一个方面主要涉及确定  $\sin \Phi$ 、 $\cos \Phi$ 、 $\sin 2\Phi$  和  $\cos 2\Phi$  项的系数, 本发明定义了一种新的算法来代替传统的装箱。这种新的技术采用迭代方式, 根据定向测量值的相关  $\sin$  和  $\cos$  项的提取值对方位角响应进行“快速”匹配 (见图 9 中标绘出的点)。这种匹配算法是在 DSP 中利用整数算法实现的, 因此它的执行非常快, 可以在 4ms 的采样时间内对所有的信道执行。对方位角信息的精确使用和对捕获序列的随机化使得算法可以适应不规则的工具旋转以及在粗糙的钻井条件下的停滞和滑动。这样, 所有的数据都可用于获得上 / 下信号, 而不仅是两个采集箱中的数据, 从而改进了测量中的信噪比。对精确方位角的使用还使得所确定的矿层方向更为精确。

[0184] 下面详细说明该算法。

[0185] 浮点运算: 从矩阵  $P_0$  和向量  $U_0$  的初始化开始, 然后利用测量值  $y(\Phi_i)$  和基础  $r = (1 \cos \Phi_i \sin \Phi_i \cos 2\Phi_i \sin 2\Phi_i)^T$  执行下面的算法 (同样在图 6 的右半部分示出), 其中  $P$  为  $M \times M$  维的矩阵且  $U$  和  $r$  是维  $M$  的向量。 $M$  是基础函数的维。在迭代  $N$  次之后,  $U$  收敛到表示该表达式系数的一个值。该算法非常稳定, 通常在 10-15 次迭代后可实现收敛。

[0186] 详细的算法如下所述:

[0187] 初始化  $P_0$  和向量  $U_0$ ;

[0188] for  $m = 1$  to  $N_{samples}$

$$[0189] P_m \leftarrow P_{m-1} - \frac{P_{m-1} \cdot r_{m-1}^T \cdot r_{m-1} \cdot P_{m-1}}{1 + r_{m-1} \cdot P_{m-1} \cdot r_{m-1}^T}$$

$$[0190] U_m \leftarrow U_{m-1} - P_m \cdot r_{m-1}^T \cdot (y_{m-1} - U_{m-1}^T \cdot r_{m-1})^T;$$

[0191] next  $m$ ;

[0192] return( $U$ );

[0193] 其中

[0194]  $N_{samples}$  是在一个循环中所获得的采样的总数目,

[0195]  $M$  是近似函数向量的维 (近似函数的编号),

[0196]  $U$  是维  $M$  的匹配系数的向量,

[0197]  $r$  是在维  $M$  的各测量位置处近似函数值的向量, 和

[0198]  $P$  是  $M \times M$  维的矩阵。

[0199] DSP 中的整数算法

[0200] 在很多情况下, 由于有成百个信道需要匹配且为了在高速旋转下使得角度精确, 对应各方位角的数据获取需要很短时间 (ms) 完成, 因此对于井下 CPU 来说浮点运算太过浪费。在这种情况下, 可以通过某些修改提供整数运算以提高精度 (例如使用 32 位乘法), 改变比例以避免溢出, 从而加快收敛。该基本函数的值也可被预先产生并存储在内存中, 从而可以以后结合它来获得对应真实角度  $\Phi_i$  的值。总的来说该整数算法为:

[0201] ●根据利用 32 位整数中间变量的 16 位整数数据表示;

[0202] ●效率更高但精度稍差;

[0203] ●适用于提高精度和收敛速度: 缩放、初始化和重新初始化;

[0204] ●适合用于 DSP 环境: 除法和四舍五入。

[0205] 图 7 中示出了算法的整数版本的收敛流。应当注意匹配相当精确且误差通常小于

1%。匹配中非常重要的一点是几乎所有的数据都用于得到系数（定向测量信号），从而显著地提高了信噪比。例如，如果使用了32个采集箱，然后如果执行了上/下装箱，则仅使用了数据的1/16。相反使用快速匹配，将几乎所有的数据都考虑在内（除了初始收敛部分）。

[0206] 由于在匹配技术中仅提取了相关信号（如上所述），因此仅需要存储有用的系数。因此，在这种情况下，与利用32个采集箱来存储所有的数据相比，仅需要存储5个系数。本领域技术人员应当知道本发明技术的优点在于包括提取出信号的精度和对方位角的精度的特定改进。

[0207] 在另一方面中，本发明提供了定向测量中的噪声表征。因此，在第一天线对（TR）中仅有一个具有倾斜磁偶极子的实施例中，可以利用二次谐波系数来表征所测量到的电压信号的噪声。在第一天线中的每一个都具有倾斜或横向磁偶极子的实施例中，匹配系数包括三次谐波系数，可以利用三次谐波系数来表征所测量到的电压信号的噪声。在其他情况下，可以通过合并这些信号来表征所测量到的电压信号的噪声。

[0208] 本发明还可适用于测量仪器不旋转的条件，例如当利用泥浆电机设备定向钻孔时钻杆旋转停止期间。在这种条件下，第二天线对（T'，R'）最好相对于第一天线对对称。通过将这些天线耦合合并（如上所述），并根据当仪器不旋转时所获得的测量到的电压信号来确定常数和一次谐波系数，从而确定感兴趣的地质构造矿层的方位。然后当测井仪器再次旋转时，所确定的系数可用于执行迭代匹配。

#### [0209] 用于地质导向的边界距离

[0210] 根据本发明的另一方面，可以使用确定的系数来获得地质构造矿层的方向。对于定向测量的各信道来说，可以通过公式1.4来确定矿层的方向。还应当注意由于该方向对于所有的信道来说都是一样的，因此还可以使用很多信道的平均值来增加精度，其中根据包括测量值的各信道的相对信号强度的函数进行加权。然后可以计算出矿层法线方向上电压信号 $V_{RT}(\Phi_{bed})$ 的幅度和相位。

[0211] 利用公式1.10可以计算出定向相位位移和衰减。然后执行对称从而产生找到距离分界的距离所需的最终信号。但是应当明白可以随着相似或相同的响应改变这些步骤的顺序。

[0212] 为了实时地获得分界距离，可以使用两个技术。对于简单的模型（仅有一个分界），两个方向的测量值交会图可以使我们同时得到距离分界的距离和一个矿层的地质构造电阻率。在图8中示出典型的图表，使用84英寸、100kHz的衰减的响应对应28英寸、2MHz的相位位移电阻率（围岩电阻率为 $R_h = 0.8 \Omega m$ ,  $R_v = 3.6 \Omega m$ ）。这里对称有效地去除了对其他参数的考虑，例如各向异性和倾斜。对称化测量的过程很简单。使用成对测量值的不同组合来获得一致的图像将增加解释的说服力。

[0213] 图9示出了利用基于转换的交会图来解释定向测量。使用两个方向的84英寸400kHz的测量值来解释该使用单分界模型的测量，该模型具有 $100 \Omega m$ 的固定矿层电阻率和变化的围岩电阻率（工具以下）和距离。该响应对矿层电阻率并不敏感，主要根据围岩电阻率和距离来确定信号。所捕获的屏幕画面上的点指示围岩电阻率测量值和距离数据。可以从该交会图中得到电阻率和距离的值并将其输出在屏幕上。

[0214] 对于一个矿层分界的情况，其中分界两侧的矿层的电阻率都已知，人们可以使用三个输入，其中至少一个输入是工具（例如图3中工具36）周围电阻率的测量值。

[0215] 对于包含更多分界的更为复杂的模型,可以使用基于 US 专利 No. 6594584 所公开的技术的转换程序。在地质构造的初始模型上设计钻孔的轨迹。将测井工具置于该钻孔轨迹的分段内,并测量沿该分段的响应。根据该模型,还可确定该工具的预期响应。然后使用沿该分段得到的预期响应和测量到的响应之间进行比较所产生的差,来调节该模型,重复该比较和条件的循环直到该差别落入所选择的阈值之内为止。利用多个开始点和物理标准来区分结果从而提高该转换模型的稳定性。

[0216] 然后提供转换算法。该算法可以将任何测量值接受作为输入,然后找到与该数据最为一致的模型。运行多个模型,最后自动选择出最佳模型。在图 10A 中示出了典型的电阻率分布再造图,而图 10B 中示出了对应的分界(结构)再造图。这些结果表明接近导体矿层时的结果比接近高阻层时的结果更为精确。由于定向响应主要是由导体层来确定的,因此可以预期对导体层以上和以下的电阻率变化比对高阻围岩的电阻率变化更为敏感。

[0217] 本发明的另一方面是使用确定的分界距离来进行地质导向判断。可以参照图 11 来说明整体的地质导向工作流程。首先,在方框 110 中利用上述的快速匹配技术实时选择定向测量值。然后在方框 120 中通过显示原始测井响应或使用图 8 和 10 中的交会图来将定向测量值可视化(其它地方将描述)。

[0218] 然后判断单元 130 根据是否已经识别到最合适的模型来指导流程。如果已知了地质构造层或其他一些参数,则接近让用户固定这些已知参数。例如可能已知上部围岩电阻率或地层是稳定的,则可以高度确定下面没有分界。这种信息可以例如利用单分界和固定的围岩电阻率来选择模型。数学上,这意味着仅需要转换三个参数,即矿层的水平和垂直电阻率( $R_h$  和  $R_v$ )以及距离上面分界的距离。方框 140 是一个完整模型转换的例子,它可以确保一致的解释,并避免在极限情况中出现的混乱,在这些极限情况下存在一些与被选择测量数学匹配更好的非物理模型。

[0219] 或者,按照自动模型选择算法(方框 160)对多个模型进行快速近似转换(方框 150)。该算法运行不同的模型,这些模型从简单(没有分界、各向同性地质构造)到最复杂(两个距离且各向异性地质构造),包括:

[0220] ● 同质各向同性(单独参数:电阻率);

[0221] ● 同质各向异性(两个参数: $R_h$  和  $R_v$ );

[0222] ● 单独分界各向同性地质构造,分界以上或以下(三个参数: $R_{bed}$ ,  $R_{shoulder}$ , 距离分界的距离);

[0223] ● 单独分界各向异性地质构造,分界以上或以下(四个参数: $R_{bed\_h}$ ,  $R_{bed\_v}$ ,  $R_{shoulder}$  和距离分界的距离);

[0224] ● 两个分界各向同性地质构造三个参数(五个参数: $R_{bed}$ ,  $R_{shoulder\_up}$ ,  $R_{shoulder\_down}$  和距离工具以上和以下的分界的距离);

[0225] ● 两个分界各向异性地质构造三个参数:(六个参数: $R_{bed\_h}$ ,  $R_{bed\_v}$ ,  $R_{shoulder\_up}$ ,  $R_{shoulder\_down}$  和距离工具以上和以下分界的距离)。

[0226] 对各模型都获得一个答案。

[0227] 模型选择算法对定向测量值使用基于物理的限制,并强加选择“匹配数据的简单模型”的条件(贝尔的剃刀)。可以使用传统的 Akaike 信息标准(AIC)或 Bayesian 信息标准来降低模型的复杂度。

[0228] 然后在判断框 180 执行模型有效化,以判断所选择的模型是否与前面获得的关于地质构造或其他测量值例如伽马射线的知识或者由方框 170 表示的其他实时测量值一致。如果模型与其他数据一致,则将其作为方框 190 的输入直到方框 200 进行钻井判断,在方框 210 中产生适当的报告。钻井判断的执行将导致进一步的实时定向测量(方框 100),而这将再次输入到方框 110 和 120 中的匹配和可视化步骤中。如果所选择的转换模型与方框 170 输出的其他测量值不一致,则最好更新该模型。在这种情况下,执行与‘584 专利中的复杂转换程序一致的交互式模式子程序 220。

[0229] 通常,自动转换会产生不一致的解释。这可能是由于电子引起的测量噪声以及“模型噪声”所致的,即实际上真实的模型与转换中运行的所有模型都不同。例如,钻孔、侵入、薄层、交叉矿层和有限工具尺寸都没有包含在模型中,它们可以导致匹配过程中的不匹配。

[0230] 用户交互地选择对应数据片断的公共模型的灵活性和能力是成功解释测量值的关键。软件定义的交互模式子程序(方块 220)具有以下特征:根据趋势、现有知识或外部信息源来进行模型改进(方块 221);限制或固定一些转换参数(方块 222);去除某些可能更易受到不包括在模型内的环境影响的测量值;对数据进行再次处理(方块 223)。

[0231] 图 12 示出生成可以提供分界距离的定向测量值交会图的流程图,如其他地方所述。交会图的生成或修改由子程序 20 表示,该子程序从定义适当的模型开始(方块 30)。然后根据确定/预测围岩电阻率的能力来选择适当的定向测量值(方块 40)。如果就像大多数情况下在一个大的区域有很多井中那样已知该围岩电阻率时,根据一个电阻率和一个定向测量值就可以确定真正的矿床电阻率(校正后的围岩)和距离分界的距离(方块 50)。如果没有已知围岩电阻率,则如图 9 所示最好使用两个方向的测量值的交会图(方块 60)来确定围岩电阻率和距离分界的距离。在方块 70,将所选择的测量值输入到定义的模型中从而产生响应,按照图 8 和 9 所表示的方式将该响应可视化(方块 80)。在电阻率未知而它们的差已知的情况下,可以通过将一个电阻率和两个方向的测量值合成为生成三维的交会图。

[0232] 一旦已经生成或更新了交会图(子程序 20),则可以利用其他的实时测量值连续地对其进行更新(方块 100)并进行可视化(方块 120')。对方向测量值的交会图进行处理可以产生距离一个或更多地质构造分界的距离以及一个或更多矿层的电阻率(方块 220),在方块 200 中可以输出并将这些结果可视化(方块 230)来指示钻孔判断。

[0233] 根据本发明的另一方面,图形用户接口(GUI)用于使用程序并将转换后的矿层模型可视化。图 13 中示出了 GUI 的结构的方块图和处理数据的不同方式。因此,该 GUI 可以:

- [0234] - 对于给定层运行模型
- [0235] - 对测量值敏感性分析绘制交会图
- [0236] - 实时数据转换,其特征在于:
- [0237] - 对一个电阻率和一个距离进行基于交会图的转换(对于给定围岩或矿床电阻率)
- [0238] - 利用基于单分界响应的重叠和自动模型选择、物理限制,结合 Akaike 信息标准或模型混合的快速变换(inversion),自动解释
- [0239] - 根据从三层模型(矿层和两层围岩-两个距离和四个电阻率)得到的任何参数

(最多为 6 个) 的全部转换进行交互式解释, 在转换循环中运行全部分层的介质模型, 改进模型, 选择 / 放弃某些转换参数并限制它们和 / 或选择和重新权衡可用测量值。

[0240] - 在快速和交互模型间切换, 以改进模型。

[0241] - 对测量和转换可视化

[0242] 图 14 中示出了解释屏幕的一个例子。在屏幕上同时显示了在转换中所使用的测量值和钻孔轨迹。该转换后的结果被图形化显示, 这些结果包括距离上部和下部分界的距离、矿层和两层围岩的电阻率。该结果可以是一项一项地示出, 并基于分界的重组后位置。也可以推断地层倾角。应当注意即使在转换循环中运行的模型为一维分层的介质, 也可以建立更为复杂的地质构造图像, 包括:

[0243] - 非平行分界

[0244] - 检测错误, 包括井下地震断层

[0245] 各向异性估算

[0246] 根据美国专利申请公开 No. 2003/020029 (“Omeragic 等”) 的教导, 可以利用具有发射器天线和至少一个倾斜的接收器天线的 TRR 结构来执行各向异性测量。将检测到的与相位差或增益比相关的 EM 信号合并以确定各向异性。注意 Omeragic 等公开了新颖的钻孔补偿技术来进行这种测量。

[0247] 可以按照与上述相同的方式分析合并后的测量值的方向部分。因此, 根据 US 专利 No. 6594584 (也已经在上面描述) 的教导, 可使用分量系数通过转化来得到各向异性。这对于所有的倾角都适用。

[0248] 本领域技术人员应当明白在高度偏离的钻孔中, 传统的利用轴线圈的传播测量已经提供了可接受的各向异性灵敏度, 从而避免了在这些钻孔中使用钻孔补偿技术。

[0249] 对于本领域技术人员, 很明显可以利用一个或更多适当的通用计算机来实现本发明, 这些计算机具有适当的硬件和程序来执行本发明的处理。通过利用可由计算机处理器读取的一个或更多程序存储装置和由执行上述操作的计算机执行的一个或更多程序指令进行编码来完成编程。该程序存储装置可以采用例如软盘、CD ROM 和其他光盘、磁带、只读存储器 (ROM) 中的一种或多种形式以及其他本领域公知形式和将要发展的形式。指令程序可以是“目标码”, 即由计算机直接执行的二进制形式, 需要执行前编译或解释的“源代码”形式或例如局部编译码的中间形式。程序存储设备和指令编码的精确形式在此并不重要。因此, 这些处理装置可以用于地面设备、工具中, 或如本领域公知由它们两个共享。很明显任何类型的测井系统都可以使用本发明的技术, 这些系统例如有线工具、LWD/MWD 工具或 LWT 工具。

[0250] 从上面的描述应当理解在不脱离本发明精神的情况下可以对本发明最佳和其他实施例进行多种修改和变化。

[0251] 本说明书仅用于示意性说明的目的, 并不进行限定。本发明的范围仅由权力要求进行限定。权利要求中的词汇“包括”应当理解为表示“至少包括”, 这样权利要求中的元件的列表就是开放的。“一个”和其他单数的词汇都表示包括多种形式, 除非另有说明。

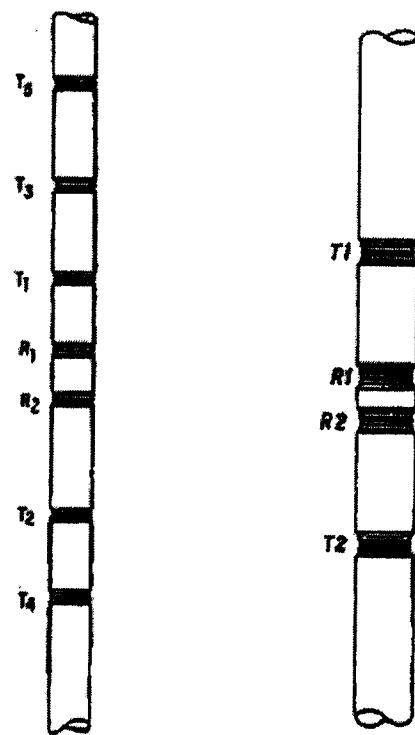


图 1 (现有技术)

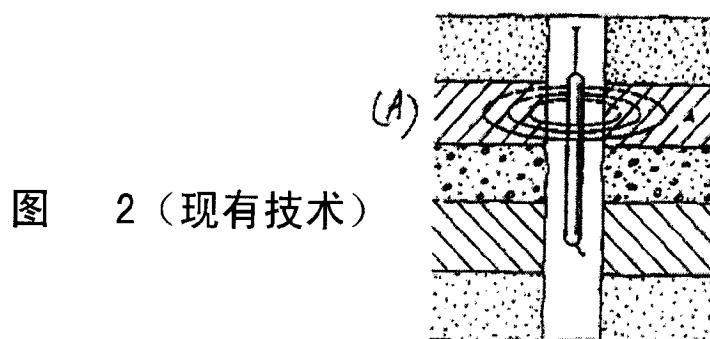
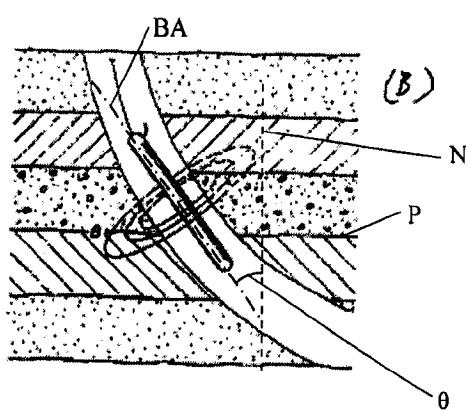


图 2 (现有技术)



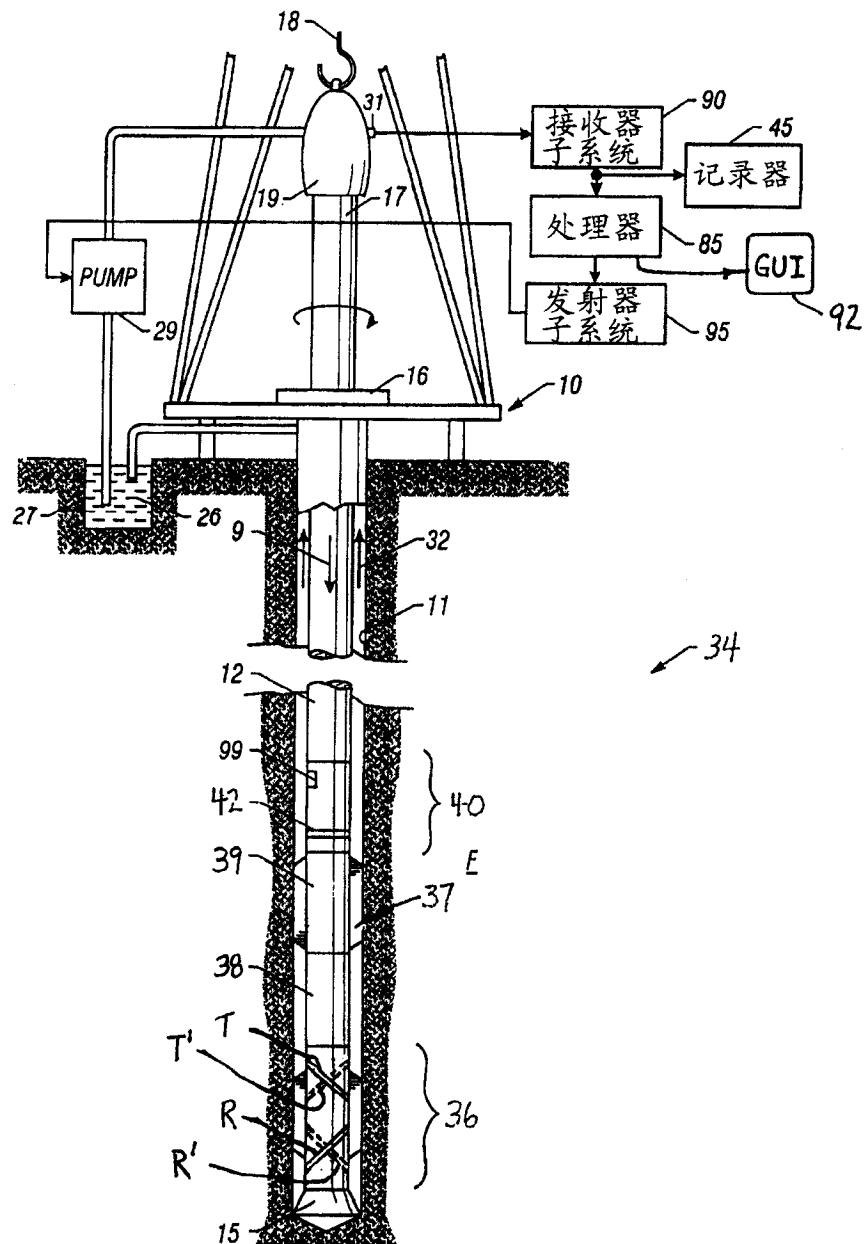


图 3

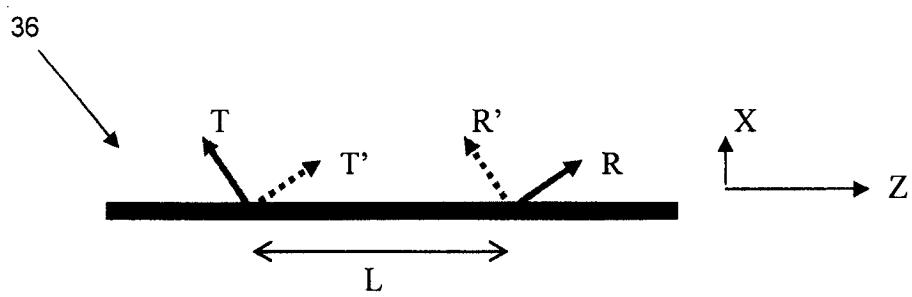


图 4

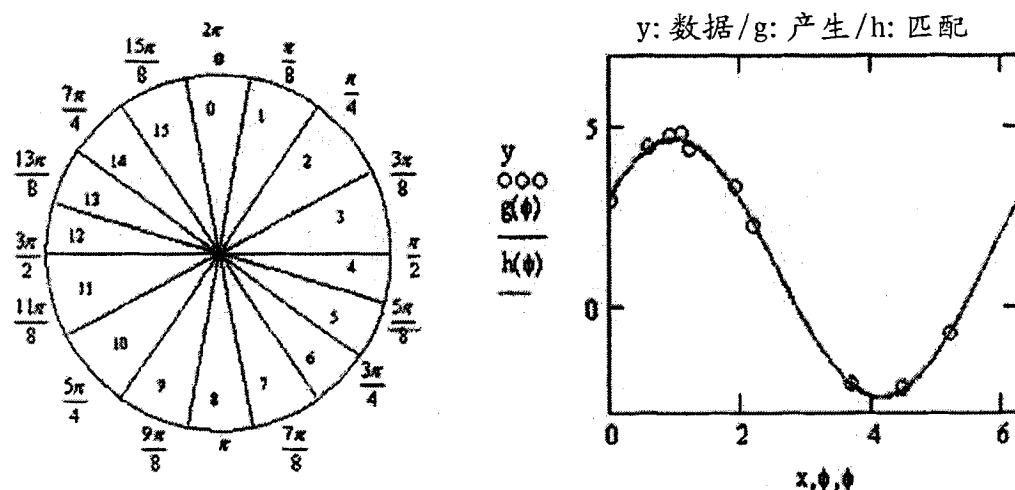


图 6

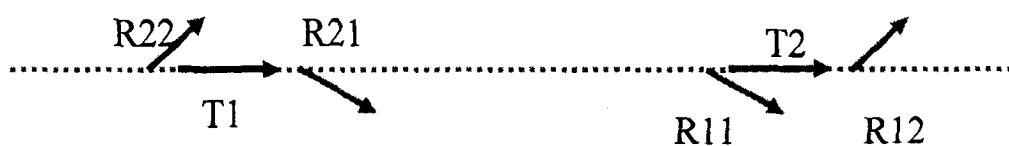


图 5A

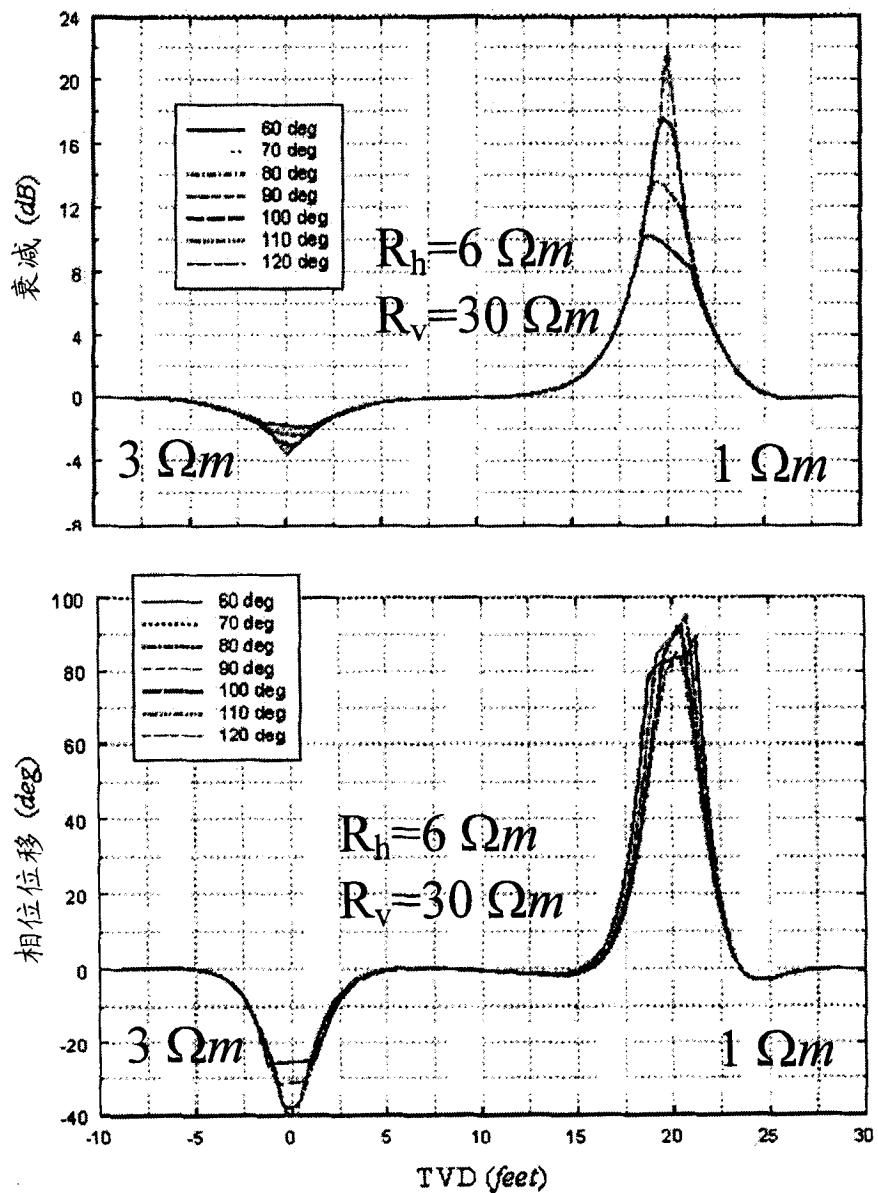


图 5B

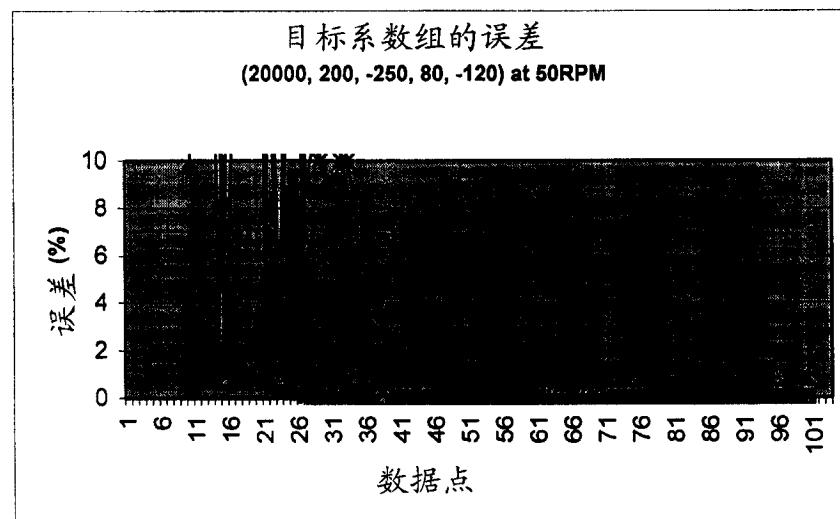
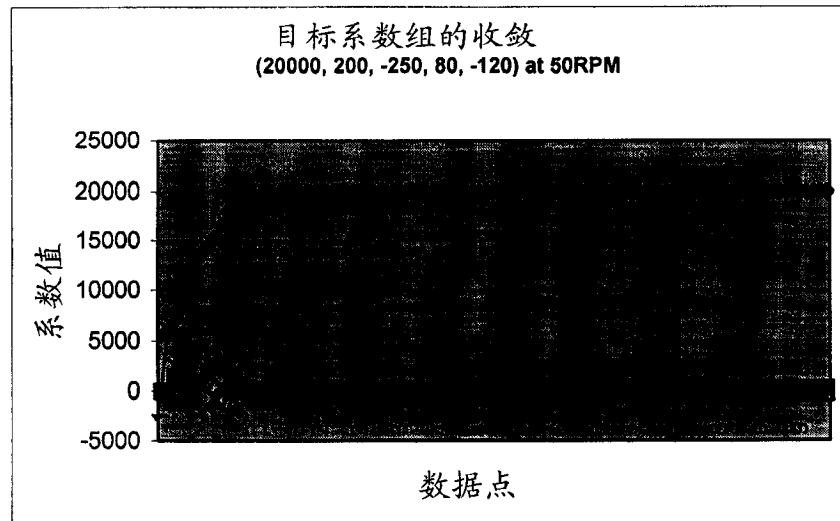


图 7

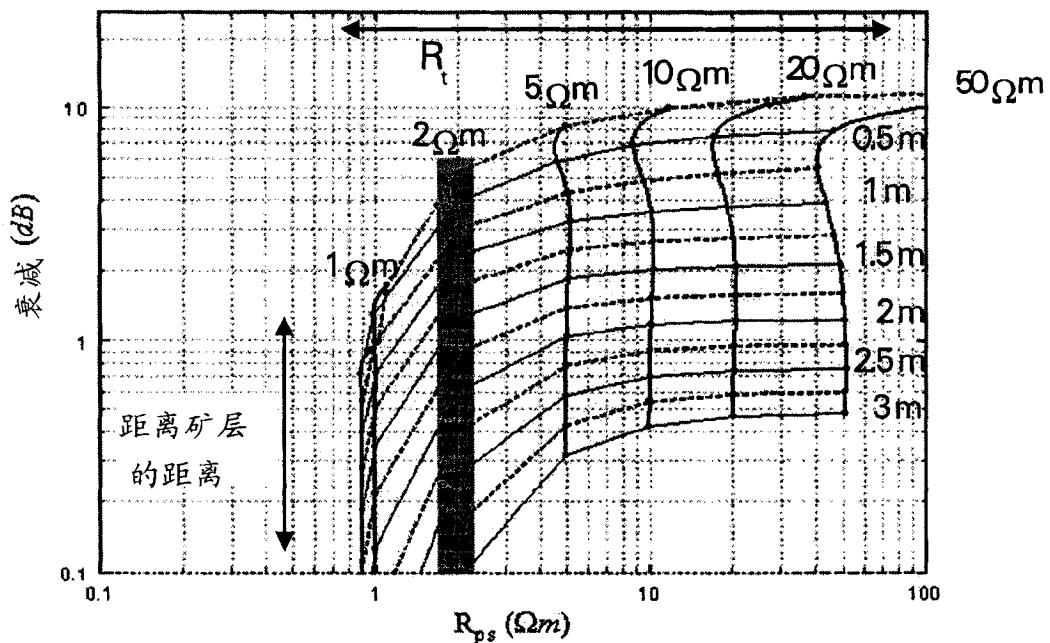


图 8

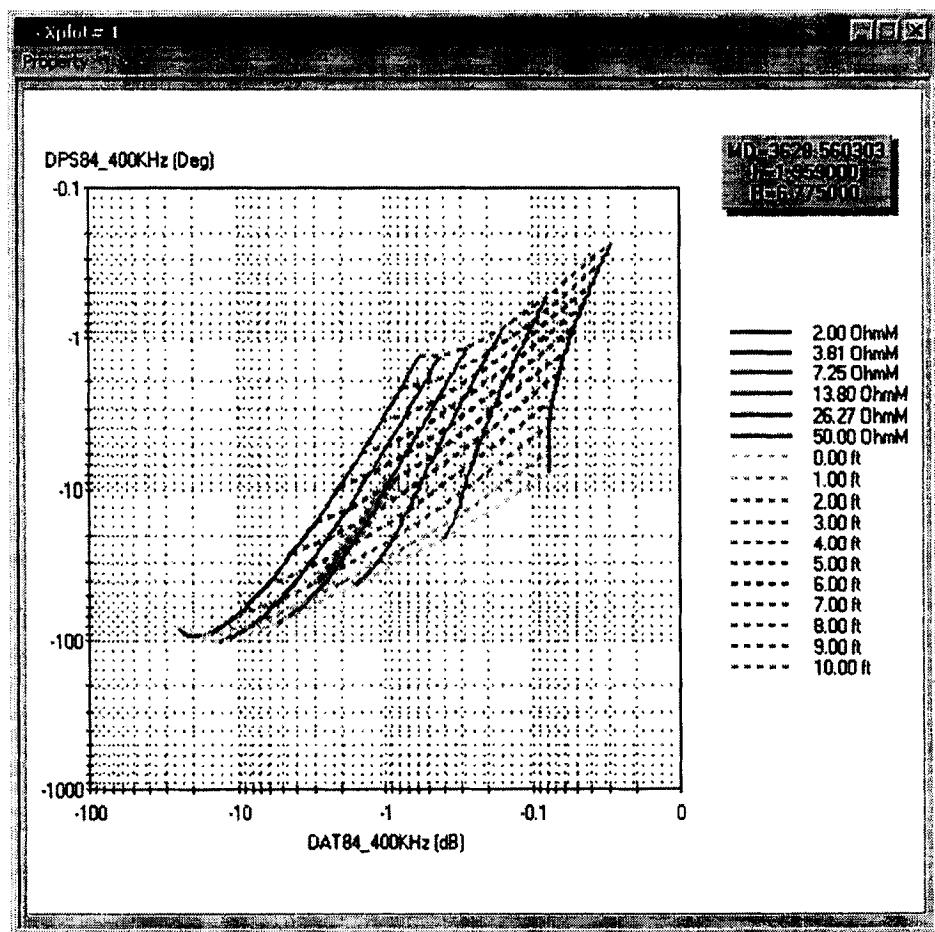


图 9

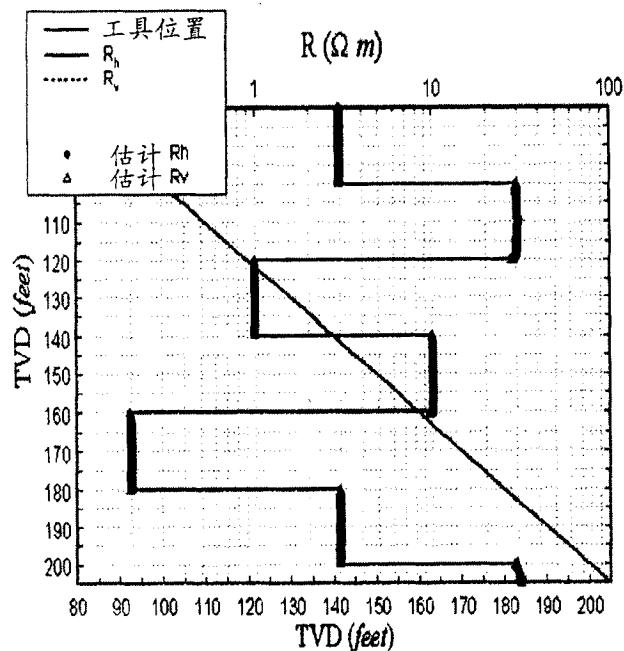


图 10A

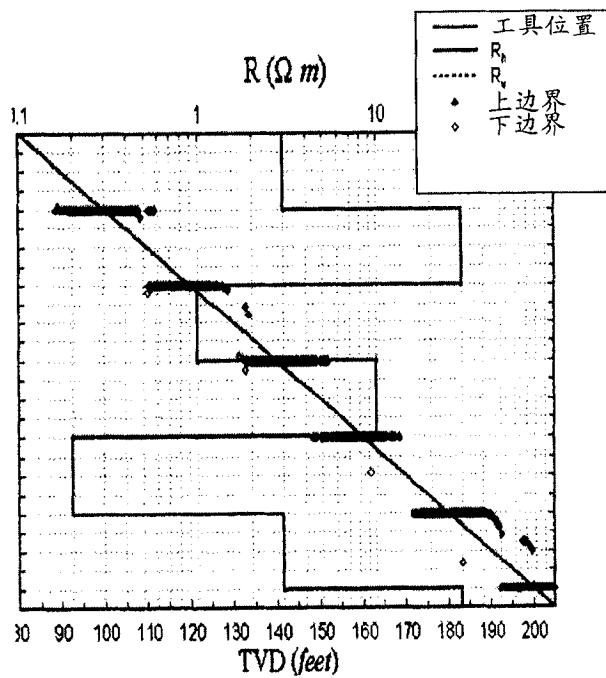


图 10B

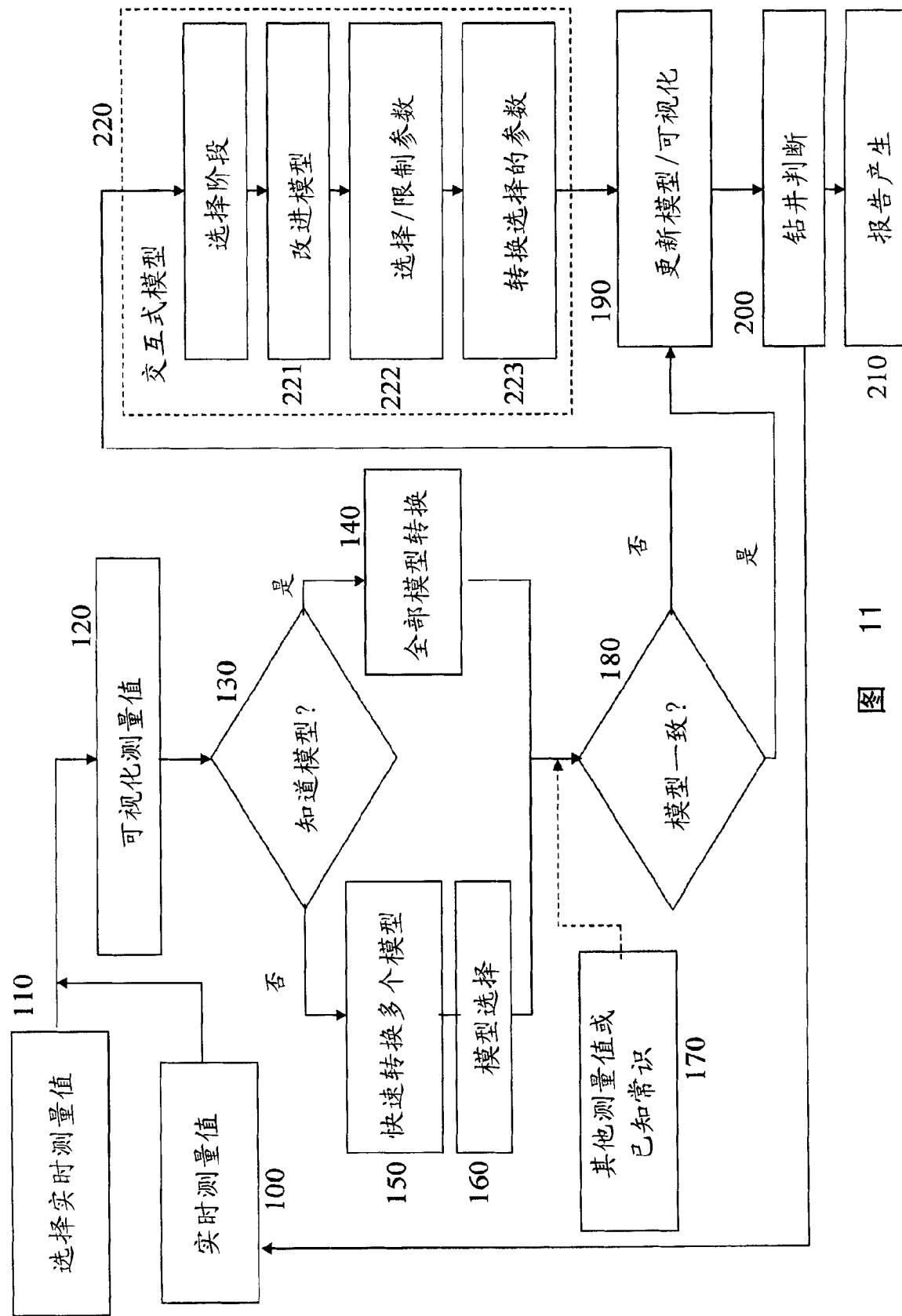


图 11

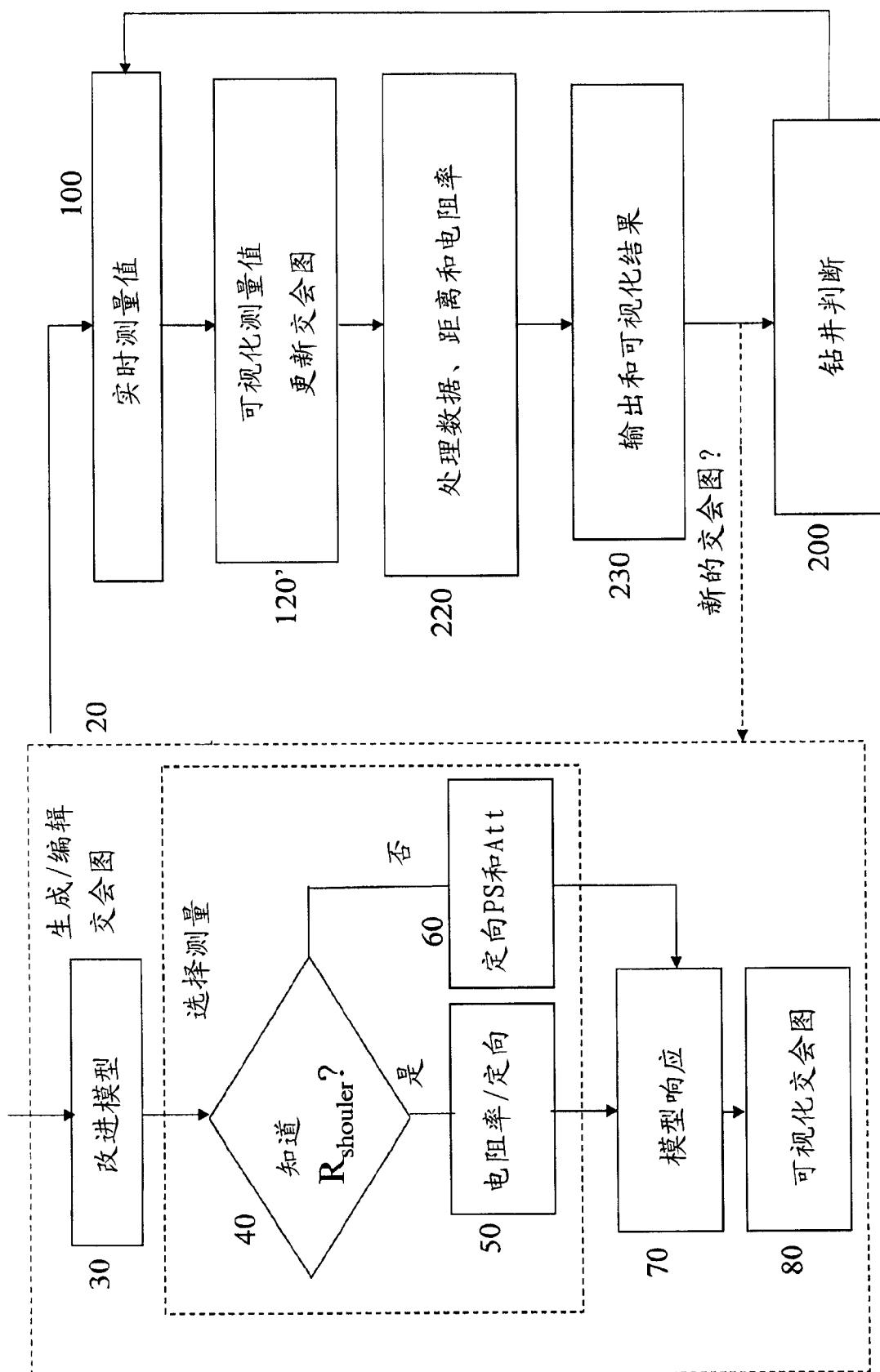


图 12

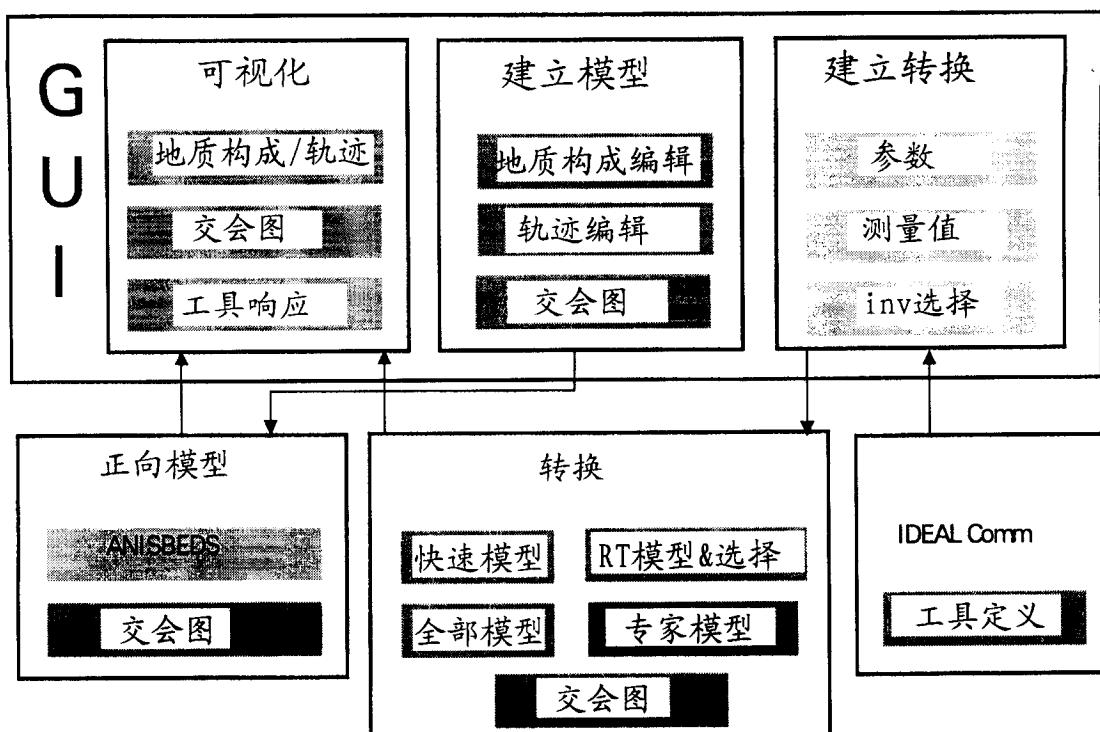


图 13

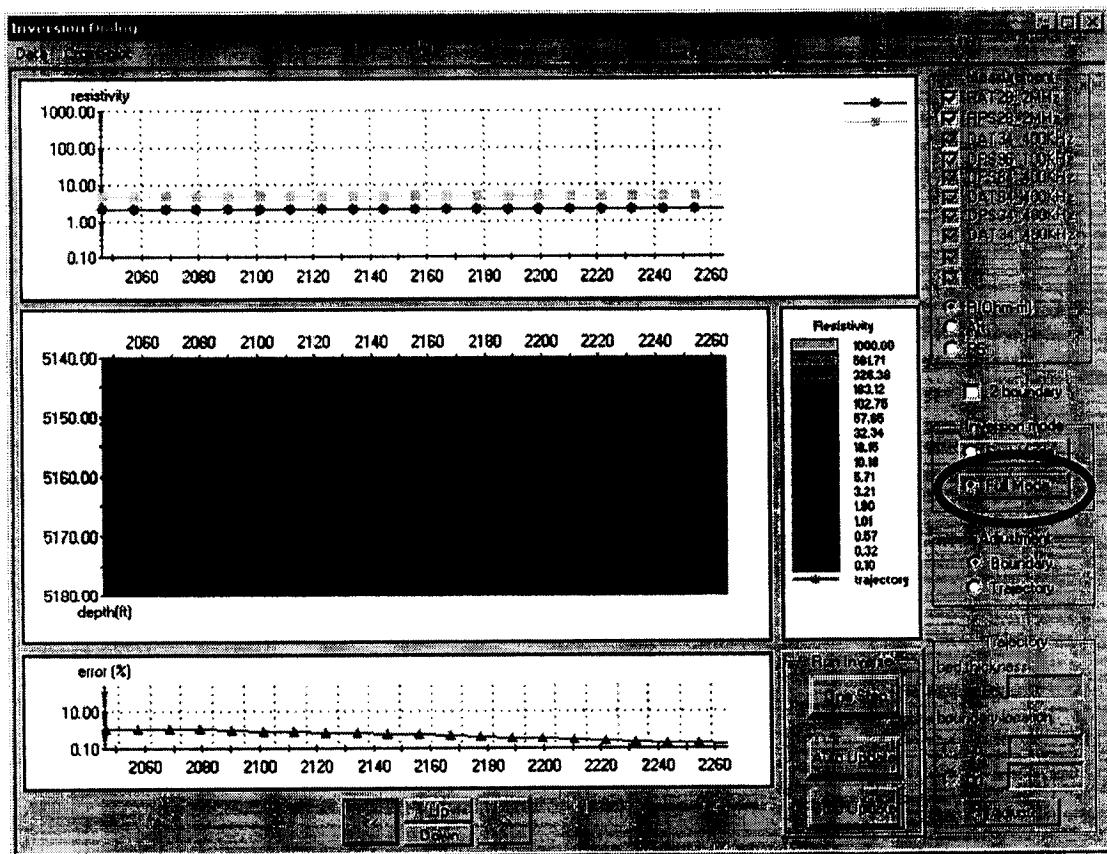


图 14