



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 101238367 B

(45)授权公告日 2016.08.10

(21)申请号 200680029272.8

(22)申请日 2006.07.27

(30)优先权数据

20053801 2005.08.11 NO

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2008.02.05

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/N02006/000286 2006.07.27

(87)PCT国际申请的公布数据

W02007/018434 EN 2007.02.15

(73)专利权人 FMC康斯伯格海底股份公司

地址 挪威康斯伯格

(72)发明人 安斯汀·维基

(74)专利代理机构 北京安信方达知识产权代理有限公司 11262

代理人 颜涛 郑霞

(51)Int.Cl.

G01N 33/28(2006.01)

G01N 22/00(2006.01)

G01N 33/18(2006.01)

(56)对比文件

US 4942363 A, 1990.07.17,

US 5103181 A, 1992.04.07,

US 5576974 A, 1996.11.19,

US 4902961 A, 1990.02.20,

CN 1266184 A, 2000.09.13,

审查员 董春艳

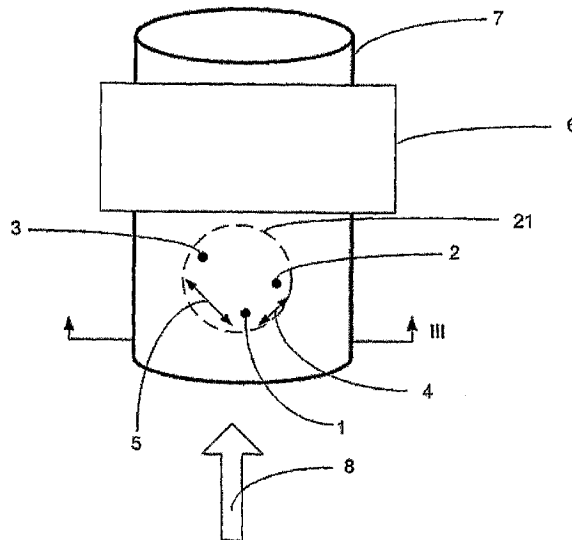
权利要求书1页 说明书12页 附图9页

(54)发明名称

用于测量含水多相混合物的水电导率和水体积分数的方法和装置

(57)摘要

一种用于确定管中的水和至少一种额外的液体或气体的多组分混合物的水电导率和水体积分数的方法,该方法包括下述步骤:a.在位于离发送天线不同距离处的两个接收天线之间,进行至少两个测量频率下的电磁相位测量,b.根据由经验确定的常数和上述测量,确定实和虚介电常数,c.确定温度和压力,d.根据流体混合物各组分的实和虚介电常数的知识以及从上述步骤a-c获得的结果,确定水电导率/或水的体积分数。还公开了实施该方法的装置。



1. 一种用于确定管中的水和至少一种额外的液体和气体的多组分混合物的水电导率和水体积分数的方法,所述方法包括下述步骤:

a. 在位于离发送天线不同距离处的两个接收天线之间,进行至少两个测量频率下的电磁相位测量,

b. 根据由经验确定的常数和上述测量来确定实和虚介电常数,

c. 确定温度和压力,

d. 根据流体混合物各组分的实和虚介电常数的知识以及从上述步骤a—c获得的结果来确定水的电导率和/或水的体积分数,

其中所述由经验确定的常数是通过测量具有已知水电导率/盐度的多个水样品的相位差vs. 频率而经验获得的倍增因子,或通过测量相位差和多相混合物的电导率而经验获得的校准常数。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中所述多组分混合物含有油、气和水。

3. 根据权利要求1或2所述的方法,其中电磁相位测量的所述步骤在10Mhz到10000Mhz之间的频率范围内进行。

4. 根据权利要求1或2所述的方法,其中电磁相位测量的所述步骤在所述管的壁附近进行。

5. 根据权利要求3所述的方法,其中电磁相位测量的所述步骤在所述管的壁附近进行。

6. 根据权利要求1所述的方法,其中根据统计学方法来计算水的体积分数和水电导率。

7. 一种用于确定管中的水和至少一种额外的液体和气体的多组分混合物的水电导率和水体积分数的装置,所述装置包括管状部分和下面的元件:

a. 用于在位于离发送天线不同距离处的两个接收天线之间进行至少两个测量频率下的电磁相位测量的设备,

b. 用于根据上述测量和至少一个由经验确定的常数来计算实和虚介电常数的计算机,

c. 用于确定温度和压力的设备,

d. 用于根据流体混合物各组分的实和虚介电常数的知识以及特征a—c来计算水电导率和/或流体混合物的水的体积分数的设备,

其中所述由经验确定的常数是通过测量具有已知水电导率/盐度的多个水样品的相位差vs. 频率而经验获得的倍增因子,或通过测量相位差和多相混合物的电导率而经验获得的校准常数。

8. 根据权利要求7所述的装置,其中所述管状部分包括位于沿着所述管的壁的大体相同的区域内的至少一个发射天线和至少两个接收天线。

9. 根据权利要求7所述的装置,其包括电子装置,所述电子装置用于当时在至少一个发射天线上发射至少两种频率并记录至少两个接收天线对所述频率的相位差。

## 用于测量含水多相混合物的水电导率和水体积分数的方法和装置

[0001] 本发明涉及测量管中的多相混合物的水电导率(water conductivity)和水体积分数(volume fraction)的方法和装置。本发明以多相混合物的复介电常数的测量为基础。此复介电常数是通过测量在管内壁附近传播的平面电磁波的波相常数 $\beta$ 来确定的。 $\beta$ 的测量以位于离第三发射天线不同距离处的管内部的两个接收天线之间的相位差的测量为基础。此相位测量在10Mhz和10Ghz之间的至少两个频率下进行。

[0002] 此方法和装置特别适合于高精度地测量分散在连续水相中的流动的烃流体的水电导率和水体积分数,如本发明可以用于测量管中流动的两相油水混合物的体积分数和水电导率,其中油分散在连续的水相中。另一个实施例是确定含有油、气和水的多相混合物中的水相的水电导率,其中油和气分散在连续的水相中。

[0003] 油水和气的流动的混合物或冷凝物、水和气的流动的混合物在石油工业中是普遍出现的,为未加工的井流的产物。这样的井流通常称为多相混合物,其中油、水和气称为单相或组分。水相的电导率(通常称为水的盐度)可以影响用于测量混合物特征的测量系统的测量结果精确性,如用于测量油、水和气的体积和/或质量流量的多相流量计。因此对这样的仪器来说,采用水相的电导率或盐度作为校准/配置参数是普遍的做法。在许多情形中,水电导率并不是已知的。如流送管(flow line)中的水可能是以具有不同水盐度的多口井或具有多个产物区且其中每个区具有不同水盐度的一口井的混合产物为基础的。在其他情形中,海水、淡水或蒸汽可以注入存储库(reservoir)中以便提高井的产量,这也具有随时间改变存储库和井内的水的盐含量的作用。在这种情形下,通常难以或几乎不可能获得一段时间内的可靠的水电导率值。对海底(海床)的设施来说,获得来自相关位置的样品以便分析水相的电导率是有困难的且代价高昂。

[0004] 利用了本发明的多相流量计能够测量水组分的电导率和盐度,并由此提供甚至是多口井或水盐度随时间变化的混合流送管的油、水和气的流量的可靠测量结果。

[0005] 本发明还可以用于确定其中水是连续相的二相油水混合物的水体积分数和水电导率。这是烃加工厂和石油输送管线中普遍存在的流动条件。用于测量油/水混合物的水体积分数的装置通常称为水分析仪或持水率计(watercut meter)。许多这样的仪器都依赖于作为校准常数的水电导率。在多种应用中,水电导率并不是已知的,因为流送管中的水可能是以具有不同水盐度的多口井的混合产物为基础的。因此,水体积分数的测量结果可能并不精确。基于本发明的水分析仪将提供水体积分数的可靠的测量结果,而与水电导率的任何变化无关。

[0006] 微波广泛用于多相混合物的组分和水盐度的测量。美国专利US4,458,524(1984)公开了一种测量介电常数(电容率)、密度、温度和压力的多相流量计。这种设备使用两个接收天线间的相移来确定介电常数。另外已知其他技术是基于共振频率测量。这样的技术的例子公开在W03/034051和美国专利US6,466,035中。美国专利US5,103,181描述了一种基于管中的相长干涉图和相消干涉图的测量的方法。

[0007] 然而,上述方法中没有一种方法能够测量复介电常数以便能够确定多相混合物的

水盐度。

[0008] 众所周知,通过测量电磁波经过介质的相移和衰减,可确定所述介质的复介电常数。美国专利US4,902,961描述了一种基于相移和功率衰减的测量结果来测量复介电常数的方法。该测量在两个不同(固定)的频率下进行,一个在X带,另一个在S带。NO 200 10 616中存在其他的实施例,该专利公开了一种基于微波频率下的功率和相位测量结果来测量多相混合物中的连续相的水电导率的方法。美国专利US5,314,100描述了一种用于根据电磁波的相移和衰减(功率)的测量结果来测量流体电导率和烃体积的方法和装置,以及美国专利US5,107,219描述了一种用于根据微波能量(功率/损耗)和相移的测量结果来测量流体的电导系数的方法和装置。

[0009] 上述方法和装置的主要缺陷限制了感测小幅变化的精确性和能力,因为它们依赖精确的功率或损耗测量结果。在微波频率下难以精确地测量功率和损耗,部分原因是阻抗失配,部分原因是电子器件本身的限制,阻抗失配对基于微波的测量介电常数用的工业设备来说是常见的现象。因此,由于阻抗失配而引起的测量电子器件和驻波的限制性使得难以获得为精确测量分数和/或水盐度/电导率所要求的精确性、再现性和灵敏性。

[0010] NO 20043470描述了一种用于只根据相位测量结果来确定水盐度的方法和装置。然而,这种方法并不能用于分散在连续相盐水中的流动的烃流体。

[0011] 本发明的独特性在于提供复介电常数的精确的且可重复的测量结果的能力,以及其无需进行任何功率和/或损耗测量就能够感测复介电常数中的小幅变化的能力。相反,复介电常数是基于在至少两个不同频率下进行的相位的差动测量来测量的。因为与功率/损耗测量相比,相位受到阻抗失配的影响小得多,所以可以对复介电常数进行高度精确地测量。通过使用相同物理长度的两通道,可容易地去除传感器、电缆和电子测量通道中的任何偏差。因此,与基于电功率和/或电损耗的技术相比,本发明受到测量电子传感器/天线装置中的频谱和驻波(波动)中的与功率变化有关的测量失真的影响小的多。测得的相位受到因沿多相混合物中的液滴或气泡传播方向的透射波的散射而引起的散射损耗(如瑞利(Rayleigh)散射)的影响也很小。此额外的散射损耗将未知的测量误差引入功率/损耗测量中,功率/损耗测量是测量频率和散射目标的尺寸的函数。因此,基于功率/损耗测量的方法受到管内的流型(如液滴/气泡尺寸)更多的限制。本发明特别适合于对分散在连续水相中的流动的烃流体的水电导率和/或水体积分数进行精确地测量。

[0012] 本发明的目的是克服现有解决方案的上述限制。

[0013] 本发明的目的是提供复介电常数的精确测量结果。

[0014] 本发明的目的是对多相混合物中的水相的盐度和/或电导率进行精确地测量。

[0015] 本发明的目的是对管中的环形气体浓度下的多相混合物中的水相的盐度和/或电导率进行精确地测量。

[0016] 本发明的目的是对多相混合物的水体积分数进行精确地测量。

[0017] 本发明的目的是对分散在连续水相中的流动的烃流体的水电导率和/或水体积分数进行精确地测量。

[0018] 本发明的目的是对分散在连续水相中的流动的烃流体的水电导率和/或水体积分数进行精确地测量,其中测量结果不受多相混合物中的气泡和液滴尺寸的影响。

[0019] 本发明的目的是获得用于进行测量的紧凑的机械设备。

[0020] 根据本发明的方法包括下述步骤：

[0021] a. 在位于离发送天线不同距离处的两个接收天线之间，进行至少两个测量频率下的电磁相位测量，

[0022] b. 根据由经验确定的常数和上述测量结果，确定实和虚介电常数，

[0023] c. 确定温度和压力，

[0024] d. 根据流体混合物各组分的实和虚介电常数的知识以及从上述步骤a-c获得的结果，确定水电导率和/或水的体积分数。

[0025] 根据本发明的装置的进一步特征在于由独立权利要求7所界定的特征。

[0026] 从属权利要求2-6和8-9界定本发明的优选实施方案。

[0027] 下面将参照附图进一步描述本发明，其中：

[0028] 图1根据本发明显示了用于测量水体积分数和水电导率的示例性实施方案的示意性纵向剖面图，

[0029] 图2显示了沿着图1中的线III-III的示意性剖面图，

[0030] 图3显示了紧凑的天线机械单元(探针组件)的示意图，

[0031] 图4显示了水的介电常数的实部的曲线图，

[0032] 图5显示了水的介电常数的虚部的曲线图，

[0033] 图6显示了装置的理论相位vs. 频率响应的曲线图，

[0034] 图7显示了装置的测量相位vs. 频率响应的曲线图，

[0035] 图8显示了装置的 $\beta/\omega$ 的理论值vs. 频率的曲线图，

[0036] 图9显示了装置的 $\beta/\omega$ 的测量值vs. 频率的曲线图，

[0037] 图10显示了装置的由经验得到的校正因子(倍增因子)的曲线图，

[0038] 图11显示了具有连续水相和低的水盐度的通常流动的流体在宽范围的水电导率和五种不同的测量频率下测得的水分数的曲线图，

[0039] 图12显示了在图11中的5种测量频率下计算得的水分数标准偏差vs. 水电导率的曲线图，

[0040] 图13显示了具有连续水相和高的水盐度的通常流动的流体在宽范围的水电导率和五种不同的测量频率下测得的水分数的曲线图，

[0041] 图14显示了在图13中的5种测量频率下计算得的水分数标准偏差vs. 水电导率的曲线图，

[0042] 图15显示了装置的校准因子Zvs. 相位的曲线图，

[0043] 图16显示了在0.5%-25%NaCl范围的盐度和30-100%液相范围的水分数时测得的水分数vs. 参照的水分数的曲线图，

[0044] 图17显示了在0.5%-25%NaCl范围的盐度和30-100%液相范围的水分数时测得的电导率vs. 参照的电导率的曲线图。

[0045] 下面是确定多相混合物中的水电导率和水体积分数所涉及的主要元件的概述。

[0046] 1) 发送天线1和两个接收天线2和3略微伸入管中，如图2所示。两个接收天线2和3位于离发射天线1距离 $d_{14}$ 和 $d_{25}$ 的位置。天线1、2和3可以形成一个单元21，类似紧凑的测量探针，如图3所示。对于发送天线1上发射的至少两种频率，测量了天线2和3之间的相位差。假设在管内部接近天线的区域具有足够的损耗，那么在发送天线1以及接收天线2和3之间

传播的电磁波的行为将会根据平面波理论来表现。因为水的复介电常数也是测量频率的函数,所以基于在至少两种频率下的相位测量结果,对于水的至少两个不同的复介电常数值,可以确定管内的流体的复介电常数的实部和虚部。

[0047] 2)基于所确定的温度和压力以及水和烃的复介电常数的知识,计算可能的宽范围水电导率的所有测量频率下的水分数。

[0048] 3)确定为pt.2的所有测量频率提供相同的水体积分数测量结果的水电导率值,且该水电导率值是衡量管内的水电导率的量度。

[0049] 4)利用在pt.3中获得的水电导率值计算出所有测量频率下的水体积分数测量结果的平均数。这代表管内水体积分数的量度。

[0050] 电磁波在有耗介质中传播的基本原理在文献(如Field and Waves in Communication Electronics by S.Ramo,J.R.Whinnery and T.V.Duzer)中已经得到了很好的描述。用于具有电场的x分量和y分量的正向传播的电磁波的电场在z方向传播的一般等式通过下面的等式进行描述:

[0051] 等式1:

$$[0052] \quad E = (\hat{x}E_1 + \hat{y}E_2 e^{j\psi}) e^{-jkz}$$

[0053] 其中:

[0054] E=电场矢量

[0055] E<sub>1</sub>=x方向的电场

[0056] E<sub>2</sub>=y方向的电场

[0057]  $\psi$ =x分量和y分量之间的相位角

[0058] k=相位常数或波数

[0059] 对在有耗介质中,如在分散于水中的油和/或气体的混合物中传播的电磁波来说,波数k变成复数,如下面的等式2所显示的。

[0060] 等式2:

$$[0061] \quad k = \alpha + j\beta$$

[0062] 其中:

[0063]  $\alpha$ =波衰减系数

[0064]  $\beta$ =波相位常数

[0065] 等式3:

$$[0066] \quad e^{-jkz} = e^{-\alpha z} e^{-j\beta z}$$

[0067] 其中 $\alpha$ 和 $\beta$ 可以根据下面的等式4和5计算:

[0068] 等式4:

$$[0069] \quad \alpha = \omega \sqrt{\left(\frac{\mu \epsilon'}{2}\right) \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right]}$$

[0070] 等式5:

$$[0071] \quad \beta = \omega \sqrt{\left(\frac{\mu \epsilon'}{2}\right) \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} + 1 \right]}$$

[0072] 其中：

[0073]  $\epsilon'$  =介质的复介电常数的实部

[0074]  $\epsilon''$  =介质的复介电常数的虚部

[0075]  $\omega$  =频率

[0076]  $\mu$  =介质的渗透率

[0077] 其中介质的复介电常数 $\epsilon$ 可以根据下面的等式6来描述：

[0078] 等式6：

[0079]  $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$

[0080] 对于空气、气体、油和冷凝物来说,实际上,介电常数的虚部是等于零的。对于水来说,复介电常数可以通过单德拜弛豫定律(single Debyerelaxation law)来描述,如下所示：

[0081] 等式7：

$$[0082] \quad \epsilon_{\text{水}} = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau} - j \frac{\sigma_{\text{水}}}{\omega\epsilon_0}$$

[0083] 其中

[0084]  $\epsilon_{\text{水}}$  =水的复介电常数

[0085]  $\epsilon_{\infty}$  =无穷大频率下的介电常数

[0086]  $\epsilon_s$  =静态介电常数

[0087]  $\omega$  =频率

[0088]  $\sigma_{\text{水}}$  =水的电导率

[0089]  $\epsilon_0$  =玻尔兹曼常数

[0090] 等式7可以重新排列以用于计算水的介电常数的实部( $\epsilon'$ )和虚部( $\epsilon''$ ),如以下等式8和等式9所示的：

[0091] 等式8：

$$[0092] \quad \epsilon' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2}$$

[0093] 等式9：

$$[0094] \quad \epsilon'' = \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2} (\omega\tau) + \frac{\sigma_{\text{水}}}{\omega\epsilon_0}$$

[0095] 其中：

[0096]  $\epsilon_s$  =静态介电常数

[0097]  $\epsilon_{\infty}$  =无穷大频率下的介电常数

[0098]  $\sigma_{\text{水}}$  =水的电导率

[0099]  $\tau$  =偶极子弛豫时间

[0100]  $\omega$  =频率

[0101]  $\epsilon_0$  =玻尔兹曼常数

[0102] 水的静态介电常数、偶极子弛豫时间和无穷大频率下的介电常数的测量和等式在文献中得到了充分的描述。可以在J.B.Hasted中找到一些实施例,J.B.Hasted已经对可在Aqueous Dielectrics(1973)中获得的数据进行了主要的评论。Udo Kaatz在

J.Chem.Eng.Data,1989 p371-374中以及Meissner和Wentz在Report from Boeing/AER investigation for CMIS中公布了更新的数据。

[0103] 也有证据表明水的静态介电常数、偶极子弛豫时间和无穷大频率下的介电常数还依赖于水的盐度。对淡水来说,水的静态介电常数、偶极子弛豫时间和无穷大频率下的介电常数可以乘上与盐度相关的校正因子以便获得盐水的 $\epsilon_s$ 、 $\epsilon_\infty$ 和 $\tau$ 值。Meissner和Wentz在Report from Boeing/AER investigation for CMIS第17页中和在J.B.Hasted,Aqueous Dielectrics(1973)中已经公布了用于水盐度校正因子的 $\epsilon_s$ 、 $\epsilon_\infty$ 和 $\tau$ 。

[0104] 图4显示了25℃时,根据等式8的盐水(NaCl盐)的介电常数的实部,其中盐水是具有按重量计为1%、5%、10%和20%NaCl的盐度的盐水10、11、12、13的曲线图。图6显示了25℃时,根据等式9的盐水的介电常数的虚部,其中盐水是具有按重量计为1%、5%、10%和20%NaCl的盐度的盐水10、11、12、13的曲线图,此曲线图与图4中的曲线图按相同的比例绘制。通过比较图4和5,可以清楚地看出盐水的介电常数的虚部值比介电常数的实部值受到盐度或频率变化的影响更大。

[0105] 介电常数的有效实部是:

[0106] 等式10:

$$[0107] \quad \epsilon_{\text{有效}} = \frac{\epsilon'}{2} * \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} \right\}$$

[0108] 其中:

[0109]  $\epsilon'$ :介电常数的实部

[0110]  $\epsilon''$ :介电常数的虚部

[0111] 在混合模式(mixture model)中,多相混合物的介质电容率以每一种构成组分的介电常数的有效实部和它们的体积分数来表示。介质混合模式的若干种广泛的观点已经公开在文献中(van Beek,1967;Tinga等人,1973;Wang & Schmutge,1980;Shutko & Reutov,1982;Hallikainen等人,1985;Sihlova,1989)。Hanai-Bruggeman等式最初由Bruggeman(1935)推导出,且日后被Hanai(1936)修正以形成复介电常数,该等式将两组分混合物的介电常数与两组分的体积分数联系起来。如果两组分混合物是作为内相被分散在外相的连续介质中的液滴,那么此等式变成:

[0112] 等式11:

$$[0113] \quad \frac{\epsilon_{\text{内}} - \epsilon_{\text{混}}}{\epsilon_{\text{内}} - \epsilon_{\text{外}}} * \left( \frac{\epsilon_{\text{外}}}{\epsilon_{\text{混}}} \right)^{\frac{1}{3}} = 1 - \frac{\Phi_{\text{内}}}{\Phi_{\text{内}} + \Phi_{\text{外}}}$$

[0114] 其中:

[0115]  $\epsilon_{\text{内}}$ =内相(分散相)的介电常数

[0116]  $\epsilon_{\text{外}}$ =外相(连续相)的介电常数

[0117]  $\epsilon_{\text{混}}$ =所测得的混合物的介电常数

[0118]  $\Phi_{\text{内}}$ =内相(分散相)的体积分数

[0119]  $\Phi_{\text{外}}$ =外相(连续相)的体积分数

[0120] 因此,通过测量多相混合物的介电常数和已知混合物的单独组分(如水和烃)的有



效介电常数,就可以计算出水和烃的体积分数。

[0121] 除了别的外,水的介电常数是水电导率和测量频率的函数。然而,因为水分数不依赖于水电导率和测量频率,所以可通过以下方式来确定水电导率,通过在至少两种不同的测量频率下进行水分数测量,并调整等式9的水电导率,直到在所有测量频率下根据等式11计算出的水分数都给出相同的值。

[0122] 可以在任何预先确定的频率下实施以获得水分数测量结果的一种方法是使用图1所示的装置。

[0123] 所述装置包括管7,管具有含有水和烃的流动的流体。箭头8指示流动方向。出于补偿的目的,测量温度和压力6,但剩余的讨论中将忽略这些测量结果。发送天线1和两个接收天线2和3略微地穿透到管中,如图2所示。两个接收天线2和3位于离发射天线1距离 $d_1$ 和 $d_2$ 的位置。天线1、2和3可以形成一个单元21,类似于紧凑的测量探针,如图3所示。天线1、2和3可以模制成介质9,如玻璃填充的陶瓷模具。 $d_1$ 的优化尺寸在8-12mm的范围,且 $d_2$ 的优化尺寸通常是 $d_1$ 尺寸的两倍。天线通常会穿透管道数mm。测量了发送天线1上发射的至少两种频率下的天线2和3之间的相位差。还应该将频率选择成使得介电常数的虚部在最高频率和最低频率之间具有足够的差别,以使水分数测量值vs.电导率曲线的斜率(如图11和13所示)是充分不同的以获得对图12和14中的水分数标准偏差计算值所要求的灵敏度。频率通常选择在500-5000Mhz的范围内,但是还可以采用10Mhz到10Ghz范围的频率。最低频率和最高频率之间的比将取决于所选择的测量频率和测量电子器件的能力。对大多数应用来说,当最高频率和最低频率之间的差大于2Ghz时,两个频率之间的比就足够了。然而,增加更大的频率能显著地提高所测得的水电导率和水分数的精确性。假设在管内接近天线的区域处有足够的损耗,那么在发送天线1以及接收天线2和3之间传播电磁波的行为将会根据平面波理论来表现。在本文中,足够的损耗通常意味着水的连续多相混合物,在给定温度下,此多相混合物中水的电导率在约7mS/cm以上。通常在湿气井中出现的沿着管壁的导电水膜也可以提供足够的损耗,使得在发射天线和接收天线之间传播波的行为将根据平面波理论来表现。

[0124] 根据平面波理论,接收天线2和3之间的相位差可以被描述成:

[0125] 等式12:

$$[0126] \quad \Delta \varphi = \beta * k_1$$

[0127] 其中:

[0128]  $\Delta \varphi$  = 接收天线2和3之间的相位差

[0129]  $\beta$  = 传播的波的相位常数(参考等式5)

[0130]  $k_1 = d_2 - d_1$

[0131]  $d_1$  = 发送天线1到接收天线2的距离

[0132]  $d_2$  = 发送天线1到接收天线3的距离

[0133] 通过测量相位差 $\Delta \varphi$ 和已知系统的 $k_1$ 值,可以确定从发送天线传播到接收天线的波的相位常数 $\beta$ 。因为 $\beta$ 也是频率( $\omega$ )的函数,所以 $x$ 可以是更合宜的测量参数,为了本专利申请的目的是, $x$ 定义为:

[0134] 等式13:

[0135] 
$$x = \frac{\beta}{\omega}$$

[0136] 其中:

[0137]  $\beta$  = 传播的波的相位常数(参考等式5)

[0138]  $\omega$  = 频率(拉德(rad))

[0139] 于是,  $x$  可以根据等式14, 由所测得的相位差、测量频率和  $k_1$  值计算得出, 等式14如下:

[0140] 等式14

[0141] 
$$x = \frac{\Delta\varphi}{k_1\omega}$$

[0142] 将等式5、12、13和14合并提供了下面的等式, 用于管内的介电常数的实部( $\epsilon'$ )和虚部( $\epsilon''$ ):

[0143] 等式15:

[0144] 
$$x = \sqrt{\left(\frac{\mu\epsilon'}{2}\right) \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} + 1 \right]}$$

[0145] 图6显示了对  $k_1 = 0.008$  的从发送天线传播到接收天线的平面波来说, 在接收天线处的理论相位差。在0.1到3500Mhz的频率范围内计算了相位差, 其中水分数为1.0且水盐度按重量计为1%、1.75%、2.5%、5%、7%、9%和15%的盐(NaCl), 分别以曲线14、15、16、17、18、19、20显示。

[0146] 图7显示了图1中的装置的相应的测量相位差, 该装置具有相应的  $k_1$  值和水盐度。

[0147] 图8显示了  $x$  的理论值(即,  $\beta/\omega$ ), 其中频率范围为750Mhz-3500Mhz且水盐度按重量计为1%、1.75%、2.5%、5%、7%、9%和15%的盐(NaCl), 分别以曲线14、15、16、17、18、19、20显示, 以及图9显示了图1中的装置的相应的  $x$  的测量值, 该装置具有相应的  $k_1$  值和水盐度。

[0148] 从图7和8可以看出, 在高于, 如2000Mhz以上的频率时, 对所有水盐度来说, 以及在大约整个频率范围时, 对更高的水盐度来说, 理论值和测量值完全一致。对低的水盐度且当测量频率减小到低于2000Mhz以下时来说, 假设在发射天线和接收天线之间传播的是平面波, 那么  $x$  的测量值偏离  $x$  的理论值。此偏差是因为管内的波导模式违反了有关发送天线和接收天线之间传播的纯平面波以及发射天线和接收天线之间距离短的假设, 使得接收天线实际上位于发射器天线的近场中。

[0149] 然而,  $x$  的理论值和测量值之间的偏差可以通过采用与水盐度或电导率有关的校正因子(倍增因子)进行校正。与盐度/电导率有关的倍增因子可以通过测量具有已知水电导率/盐度的多个水样品的相位差 vs. 频率而依经验获得, 如下面举例说明的。

[0150] 图10显示了通过由  $x$  的理论值分开的测量值而获得的校正因子(倍增因子)的曲线, 其中水盐度按重量计为1%、1.75%、2.5%、5%、7%、9%和15%的盐(NaCl), 分别以曲线14、15、16、17、18、19、20显示且频率范围为750Mhz-3500Mhz。校正因子是频率和水盐度的函数, 且可以推导出来用于只插入在各曲线之间的频率和水盐度的任何组合。

[0151] 利用倍增因子来校正测量结果, 那么  $x$  的测量值就变成:

[0152] 等式16:

$$[0153] \quad x = M(\omega, \sigma_w) * \frac{\Delta \varphi}{k_1 \omega}$$

[0154] 其中:

[0155]  $M(\omega, \sigma_w)$  = 与频率和水电导率相关的倍增因子

[0156]  $\Delta \varphi$  = 所测得的接收天线2和3之间的相位差

[0157]  $k_1 = d_2 - d_1$

[0158]  $d_1$  = 发送天线1到接收天线2的距离

[0159]  $d_2$  = 发送天线1到接收天线3的距离

[0160]  $\omega$  = 频率(拉德)

[0161] 为了确定水电导率和水(体积)分数所涉及的步骤在下面列出,忽略了温度和压力补偿测量所涉及的步骤:

[0162] 1)以预先确定的频率  $\omega$  测量相位差  $\Delta \varphi$

[0163] 2)假定  $\sigma_1$  的水电导率  $\sigma_w$

[0164] 3)计算倍增因子  $M(\omega, \sigma_w)$

[0165] 4)根据等式16计算  $x$

[0166] 5)根据等式9计算管内部的介质的介电常数的虚部( $\epsilon''$ )

[0167] 6)根据等式15计算管内部的介质的介电常数的实部( $\epsilon'$ )

[0168] 7)根据等式10计算所测得的管内部的介质的有效介电常数( $\epsilon_{\text{有效}}$ )

[0169] 8)根据等式11计算水的体积分数,其中内相是烃,外相是水,以及所测得的介电常数是上述步骤7中计算出的有效介电常数

[0170] 9)重复步骤2-8以用于多个电导率( $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \dots$ )。对在管内流动的流体来说,水电导率通常以,如1-5mS/cm的程度从最低期望频率变化到最高期望频率

[0171] 10)以其他频率或多个频率重复步骤1-9

[0172] 图11显示了管内部,水电导率为29.1mS/cm且水分数为1.0时,根据步骤1-10,以1mS/cm的步长计算的5种不同测量频率时所得到的水分数计算值vs.水电导率。在此情形中所采用的测量频率是800Mhz、1100Mhz、1500Mhz、2100Mhz和3400Mhz,分别为22、23、24、25和26。从图12的曲线看出,在不同的测量频率下,水分数测量值具有不同的斜率vs.水电导率,且水分数测量结果在水电导率值约29mS/cm时截取。即,对水电导率为29mS/cm时,水分数测量结果对所有测量频率都是一样的,这再次提供了水分数和水电导率的测量结果。统计学方法也可以用于确定截取点或水分数测量结果在最小值延伸的点。如,通过在每一个水电导率值时,计算水分数测量结果之间的标准偏差可以得到图12所示的曲线。图12显示了所有测量频率下,所计算的水分数之间的计算得到的标准偏差的曲线。从图12看出,此曲线具有相应于水的电导率的约29mS/cm的最小值。确定图12中的曲线的最小值的位置的一种方法是对计算得到的标准偏差vs.水电导率进行曲线拟合(如,5<sup>th</sup>级多项式曲线拟合),并利用计算机以数学方法找到曲线拟合的函数的最小值。

[0173] 图13和14显示了水电导率为127.4mS/cm时,所测量的水分数vs.水电导率(图13),以及计算得到的水分数测量结果的标准偏差vs.水电导率(图14)。从图14看出,此曲线具有约127mS/cm的最小值。图15显示了多个水电导率时,所测量的水电导率。

[0174] 根据上述讨论,下面的额外步骤涉及确定水电导率和水(体积)分数:

[0175] 11)确定各水分计算值之间的截取点的电导率值,可替代地确定水分标准偏差曲线vs.水电导率的最小值点的电导率值。此电导率值是多相混合物的水的电导率的度量。

[0176] 12)计算所有测量频率下的水分测量结果的平均值和步骤11的水电导率。利用步骤11确定的水电导率,可以按照上面的步骤1-10进行水分的计算。水分的平均值是多相混合物的水分的度量。

[0177] 已经发现了校准测量结果的稍微简单的方法,其通过将相位有关的校准因子Z作为替换等式12的校准常数 $k_1$ 的有效天线距离。这是由于事实:有效的天线距离Z是发射波长的函数,其又是两个接收天线之间的所测得的相位差的函数。有效距离Z还依赖于多相电导率,且Z可以按照下面显示的来计算:

[0178] 等式17:

$$[0179] \quad Z = f(\Delta \varphi, \sigma_{mix})$$

[0180] 其中:

[0181] Z:有效的天线距离(校准常数)

[0182]  $\Delta \varphi$ :所测得的相位差

[0183]  $\sigma_{混}$ :多相混合物的电导率

[0184] 这类函数的例子显示在图15中,其中水盐度按重量计为0.47%、5.21%和16.08%,分别以曲线30、31、32显示。根据所测量的水电导率选择合适的曲线,且所测量的相位差界定曲线上的点。曲线之间的内插值可以用于媒介的电导率。通过用已知水电导率的盐水填充传感器并在期望的频率范围内测量相位vs.频率而依经验得到上面的曲线。

[0185] 油/水混合物的电导率可以根据Maxwell Garnett混合公式计算得到,该公式显示在下面:

[0186] 等式18:

$$[0187] \quad \sigma_{混} = \sigma_{水} + 3 * \Phi_{油} * \sigma_{水} * \frac{\sigma_{油} - \sigma_{水}}{\sigma_{油} - 2 * \sigma_{水} - \Phi_{油} * (\sigma_{油} - \sigma_{水})}$$

[0188] 其中:

[0189]  $\sigma_{混}$ :油水混合物的电导率

[0190]  $\sigma_{油}$ :油的电导率

[0191]  $\sigma_{水}$ :水的电导率

[0192]  $\Phi_{油}$ :液相中油的分数

[0193] 可以迭代计算指令确定复介电常数。当进行这些迭代时,假定介电常数的实部和虚部之间的常数比可简化计算。实验已经显示适用于水和油混合物的纯水的介电常数的实部和虚部之间的比能提供体积分数的精确计算。此近似只引入了小的测量误差,因为Bruggeman混合公式是几乎线性的函数。

[0194] 因此,介电常数的实部和虚部之间的比界定为:

[0195] 等式19:

$$[0196] \quad K = \frac{\epsilon''_{水}}{\epsilon'_{水}}$$

[0197] 随后可以通过将等式19和5合并来计算混合物的介电常数的实部,如下所示:

[0198] 等式20:

$$[0199] \quad \varepsilon' = \frac{2 * \beta^2}{\omega^2 * (\sqrt{1 + K^2} + 1) * \mu}$$

[0200] 为了确定水电导率和水(体积)分数而涉及的步骤在下面列出,忽略了温度和压力补偿测量所涉及的步骤:

[0201] 1)以预先确定的频率 $\omega$ 测量相位差 $\Delta \varphi$

[0202] 2)假定 $\sigma_1$ 的水电导率 $\sigma_w$

[0203] 3)根据等式8和9计算水的实和虚介电常数

[0204] 4)根据等式19计算K

[0205] 5)利用等式18,基于油分数以及水和油的电导率的最后一次计算,计算油/水混合物的电导率

[0206] 6)利用等式17计算有效的天线距离Z

[0207] 7)利用等式12并用Z替换 $k_1$ 计算所测得的 $\beta$ 值

[0208] 8)利用等式20计算油/水混合物的介电常数的实部

[0209] 9)利用等式19(虚部)和等式10(有效实部)计算油/水混合物的介电常数的虚部和有效实部

[0210] 10)利用等式11,基于水油和油/水混合物的介电常数的有效实部计算水的体积分数

[0211] 11)重复步骤5-10,直到水分数的计算值接近界限点

[0212] 12)重复步骤2-11用于下一个测量频率

[0213] 13)重复步骤2-12以用于多个电导率( $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \dots$ )。对在管内流动的流体来说,水电导率通常以,如1-5mS/cm的步长从最低期望频率变化到最高期望频率。

[0214] 基于前述讨论所涉及的对水分数标准偏差曲线的计算,下面的额外步骤涉及确定水电导率和水(体积)分数:

[0215] 14)确定各水分数计算值之间的截取点的电导率值,可替代地,确定水分数标准偏差曲线vs.水电导率的最小值点的电导率值。此电导率值是多相混合物的水的电导率度量

[0216] 15)计算所有测量频率下的水分数测量结果的平均值和步骤14的水电导率。可利用步骤11确定的水电导率和所有频率测量的平均水分数,按照上面的步骤1-12进行水分数的计算。水分数的平均值是多相混合物的水分数的度量。

[0217] 图16显示了测量的水分数vs.参照的水分数的曲线图,其中盐度在0.5%-25% NaCl的范围内,且液相中的水分数在30-100%的范围内以及图17显示了测量的电导率vs.参照的电导率,其中盐度在0.5%-25% NaCl的范围内,且液相中的水分数在30-100%的范围内,根据上述步骤。

[0218] 因为天线位于靠近壁的位置,所以测量的水电导率和水分数将表示沿着管壁的水分数值和水电导率值。因为水中的盐完全溶解在水中,所以管的整个截面内的水电导率都是一样的。对两相油/水混合物来说,水分数可不均匀地分布在管的截面内。为了获得管截面的水分数的代表性测量结果,可以在测量设备的上游要求混合或均匀化设备(homogenizing device)。

[0219] 对向上流动的管线中的含有水油和气体或水、冷凝物以及气体的多相流体来说，管中间的气体浓度通常比沿着管壁的气体的量更大。这种效应可以称为环形气体浓度。在极端情形中，差不多所有的液体都将沿着管壁分布成环形，而所有的气体在管中间流动。这种情形通常指环形流。在环形流中或以环形气体浓度，水分数的测量结果并不会表示管整个截面中的水分数，但会表示管壁附近的水分数的测量结果。然而，因为水中的盐完全溶解，所以水电导率将不会受到管截面内液体和气体分布的影响。

[0220] 已知水的电导率，就可以确定水的盐含量。电导率vs. 盐含量的表可以在CRC Handbook of Chemistry and Physics中找到。用于计算电导率vs. 盐含量以及温度的算法可以在Robinson and Stokes, Electrolyte Solutions(1959)和A.L.Horvath, Handbook of Aqueous Electrolyte Solutions(1985)中找到。

[0221] 本发明可以用于确定两相油水混合物的水分数和水电导率或盐度，混合物中水是通常出现在烃加工厂和输送管线中的连续相。许多用于测量油水混合物的水分数的仪器依赖水电导率作为校准常数。在许多应用中，水电导率并不是已知的，因为流送管中的水是基于许多可能具有不同水盐度的井的混合产物。在其他情形中，海水、淡水或蒸汽注入存储库可以改变井在一段时间内的盐含量。因为本发明测量了水分数和水的盐度，所以水分数的测量结果不受水盐度的任何变化的影响，且盐度测量结果还可以用于确定来自井的形成纯黑色的位置。如，当已知存储库中的水和注入水的盐度时，可以确定井所产生的水中注入水和存储库的水的量。

[0222] 除了用于确定在含有气体的多相混合物的管壁附近的水分数之外，本发明还可以用于确定含有气体的多相混合物的水电导率或水盐度。水电导率或水盐度通常是大多数多相计的校准参数。在许多应用中，特别对海底/海床装置来说，由于多口井或具有多个产物区且其中每个区都具有不同水盐度的一口井的混合流，水电导率可能并不是已知的。在这种情形下，通常难以或几乎不可能获得一段时间内的可靠的水电导率值。因此，多相流量计的校准会是错误的，这严重影响了流量计的流量测量结果的精确性。利用了本发明的多相流量计能够测量水组分的电导率和盐度，并由此提供甚至用于多口井或用于水盐度随时间变化的混合流送管的油、水和气体的流量的可靠测量结果。

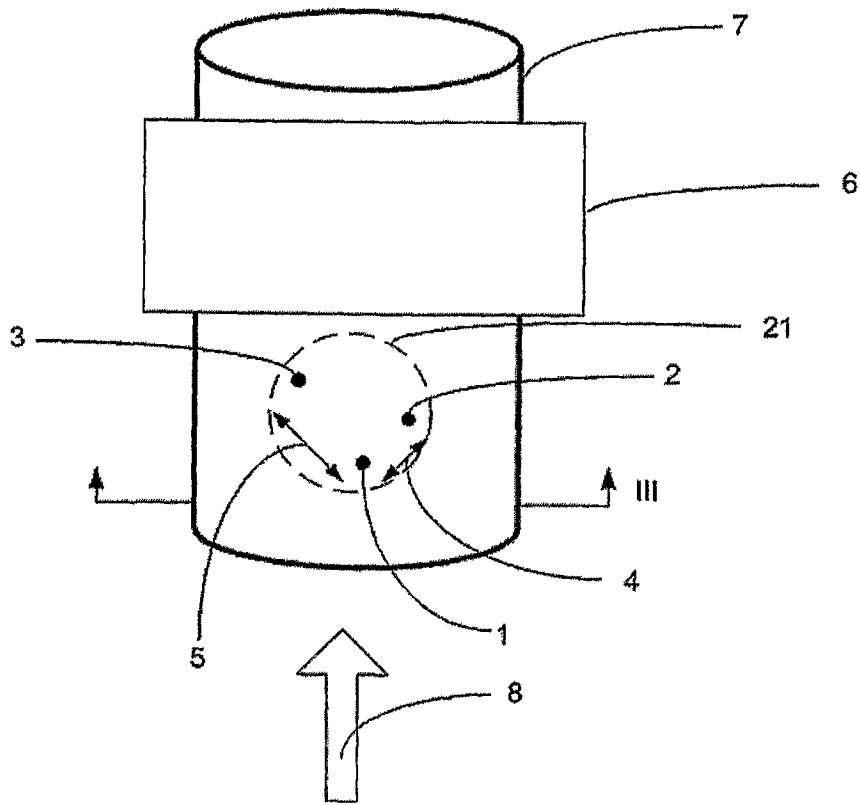


图1

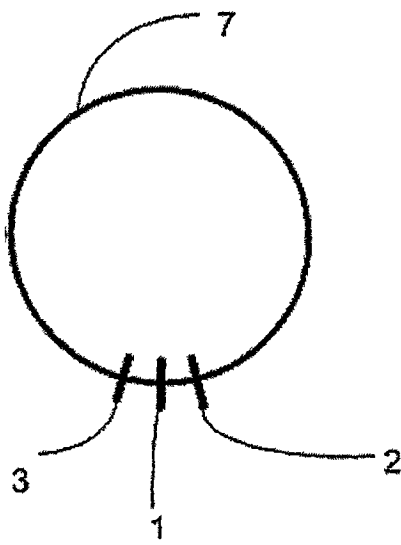


图2

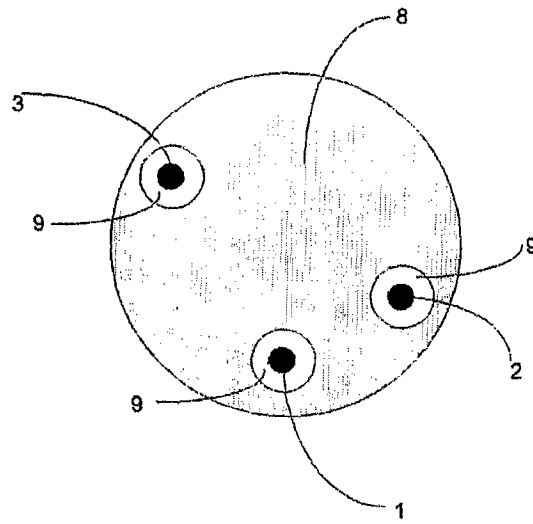


图3

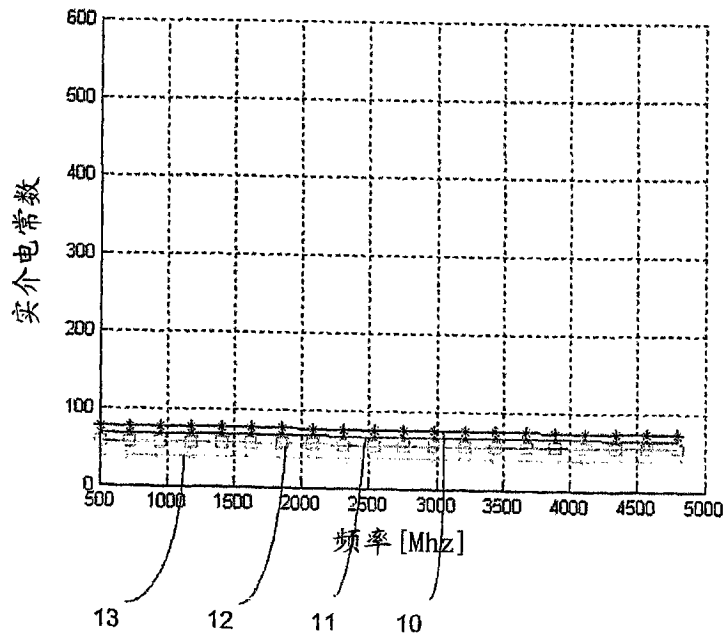


图4



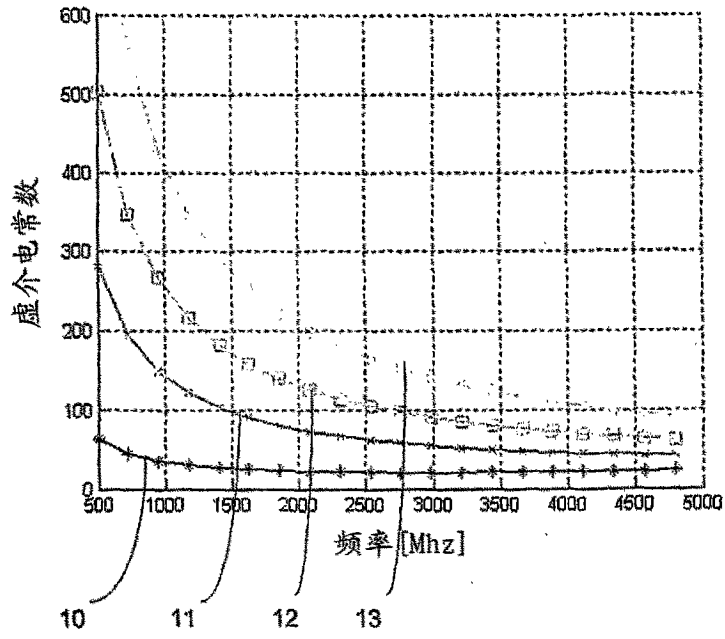


图5

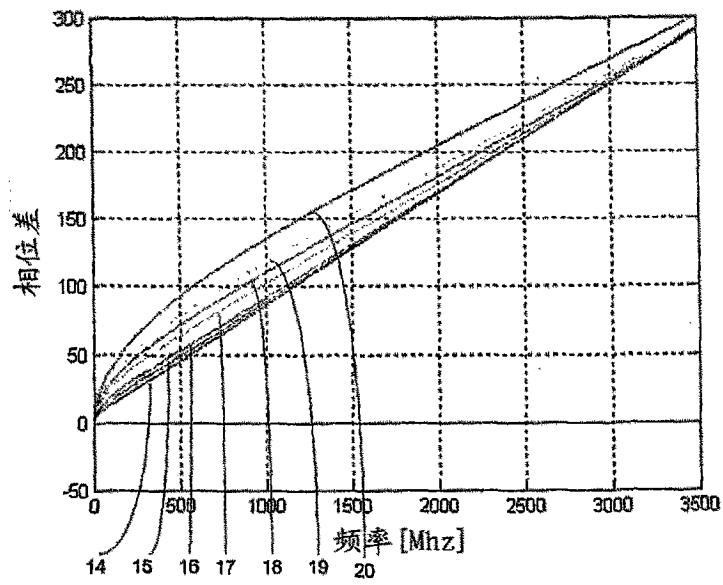


图6

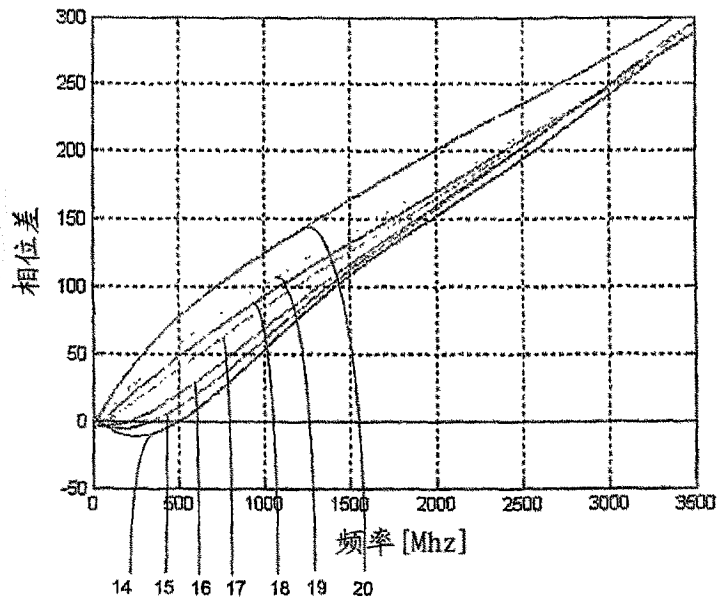


图7

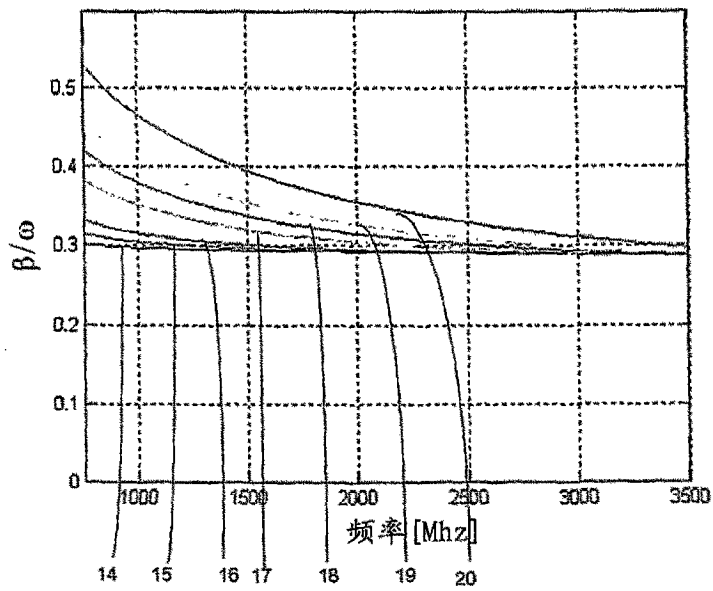


图8

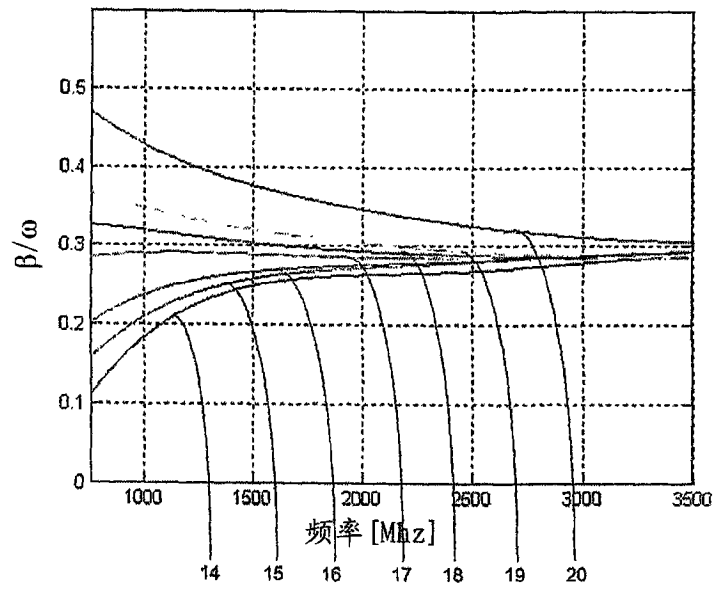


图9

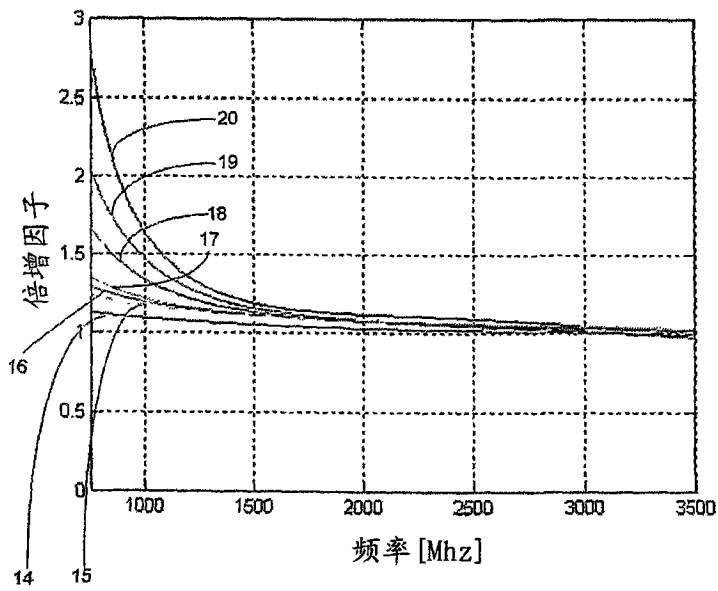


图10

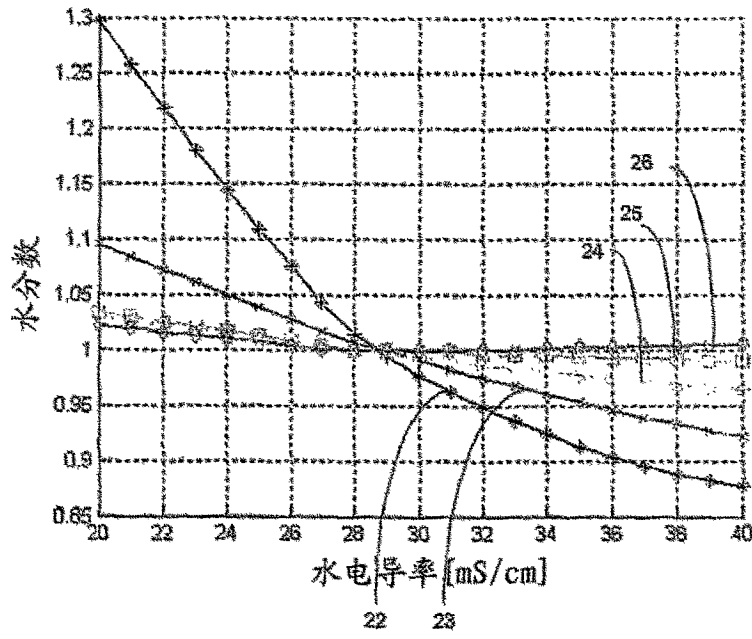


图 11

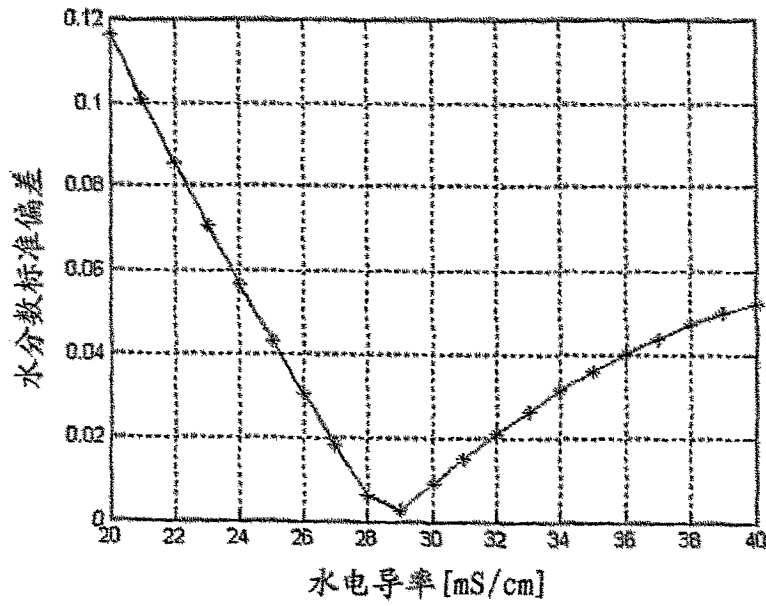


图 12

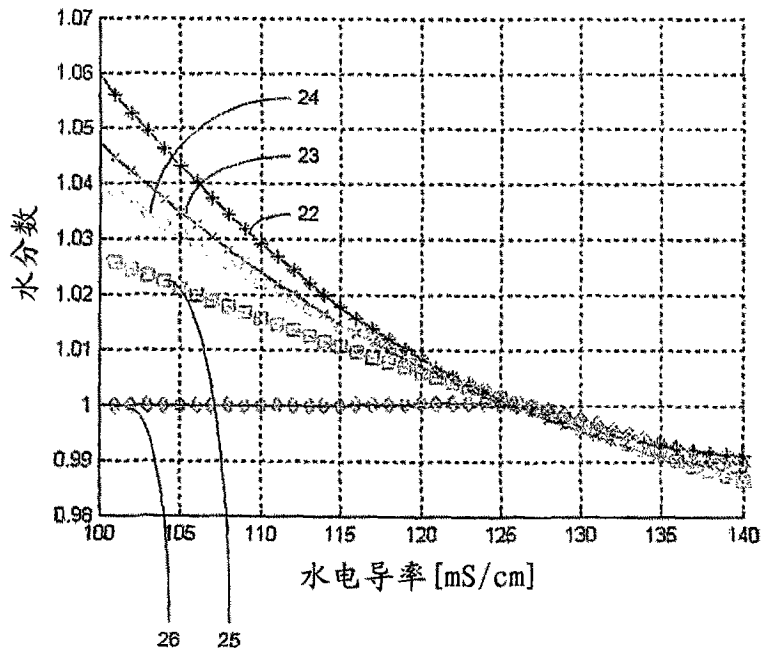


图13

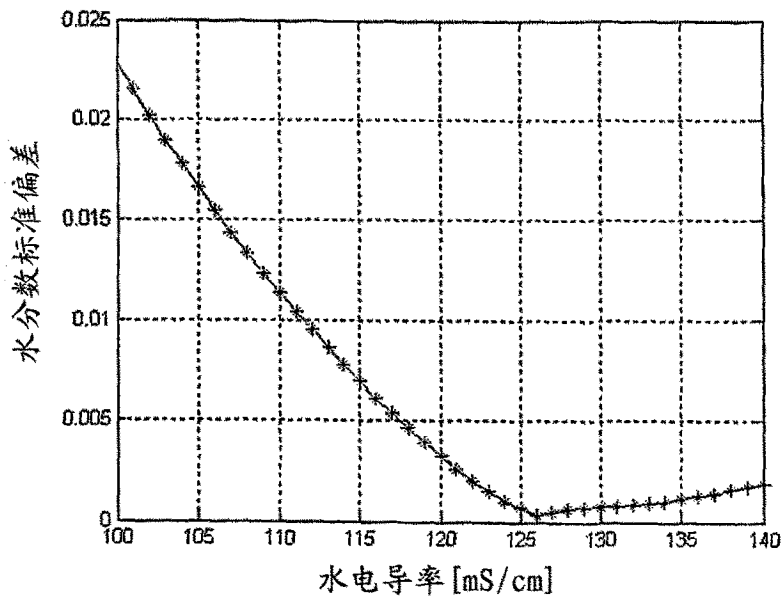


图14

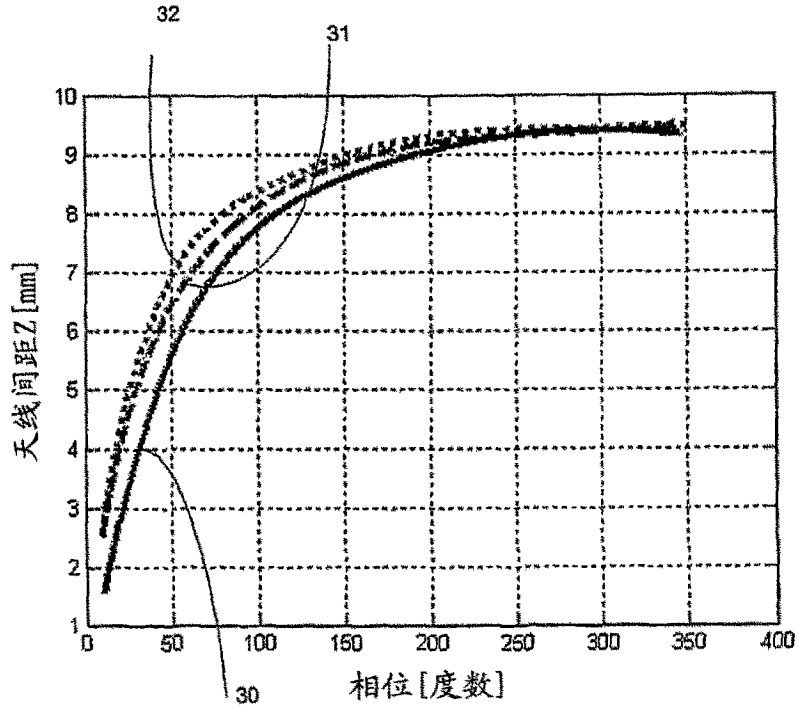


图15

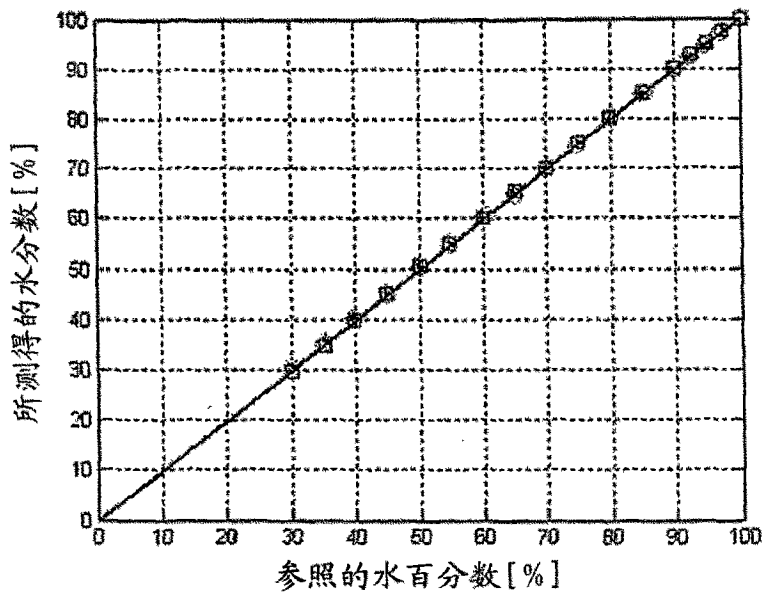


图16

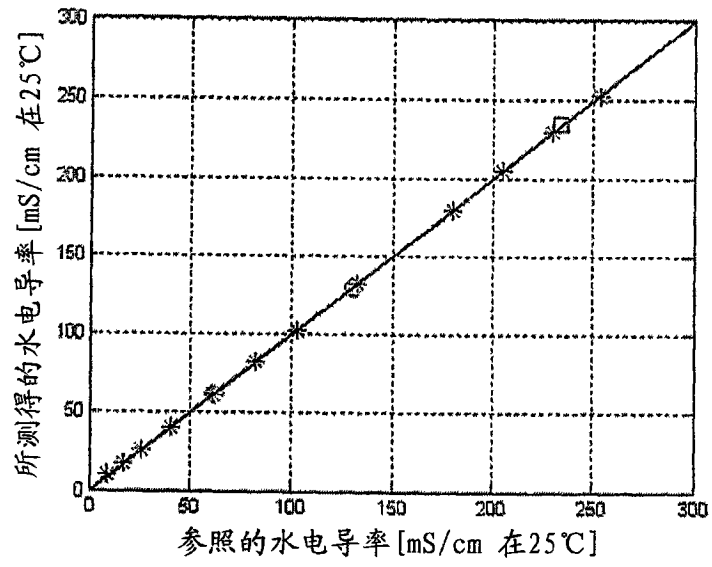


图17