

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷

G01R 15/18

G01R 15/20



[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 99815572.1

[45] 授权公告日 2004 年 6 月 16 日

[11] 授权公告号 CN 1153976C

[22] 申请日 1999. 11. 12 [21] 申请号 99815572.1

[30] 优先权

[32] 1998. 11. 13 [33] IE [31] S980937

[32] 1999. 3. 31 [33] IE [31] S990255

[86] 国际申请 PCT/IE1999/000114 1999. 11. 12

[87] 国际公布 WO2000/029858 英 2000. 5. 25

[85] 进入国家阶段日期 2001. 7. 11

[71] 专利权人 苏派鲁尔斯有限公司

地址 爱尔兰利默里克

共同专利权人 诺埃尔·派特里克·托平

[72] 发明人 诺埃尔·派特里克·托平

审查员 王晓萍

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所

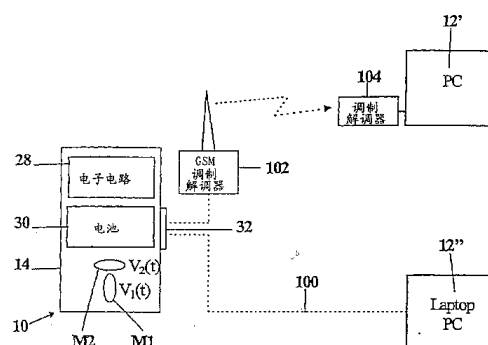
代理人 孙敬国

权利要求书 1 页 说明书 18 页 附图 9 页

[54] 发明名称 遥感电流装置和方法

[57] 摘要

本发明揭示一种遥感电流装置，所述电流流过一个具有 N 个独立的 AC 电流的实质上平行的导体，包括 N 个磁场传感器 M1、M2，所述 N 个磁场传感器位于相互独立地测量由导体产生的磁场的位置，并提供相应的信号。处理装置 12 或者 12'，所述处理装置根据相对于每个导体的每个传感器的感测信号和位置以及角度方向，得到相应于导体电流的进一步的信号。



1. 一种遥感电流装置，所述电流流过一组具有 N 个独立的 AC 电流的平行导体，其特征在于，包括
- 5 N 个磁场传感器，所述 N 个磁场传感器位于相互独立地测量由导体产生的磁场的位置，并提供相应的信号，和
- 处理装置，所述处理装置将相对于每个导体的每个传感器的感测信号和位置及角度方向的数据进行线性变换，以得到相应于导体电流的进一步的信号。
2. 如权利要求 1 所述的遥感电流装置，其特征在于，
- 10 所述处理装置包括用于得到进一步信号的谐波成分的装置，这种装置调整谐波成分的幅度，以便减小在所述传感器中由所述谐波成分产生的失真，并对调整频率成分和基波频率成分进行重组，以便产生具有失真小的所述进一步信号。
3. 如权利要求 2 所述的遥感电流装置，其特征在于，
- 所述得到传感器信号的谐波频率成分的装置，包括富里埃分析装置。
- 15 4. 如权利要求 1 至 3 任一项所述的遥感电流装置，其特征在于，
- 每个传感器的平面平行于导体。
5. 如权利要求 1 至 4 任一项所述的遥感电流装置，其特征在于，
- 所述遥感电流装置具有 3 个磁场传感器，以便遥感流包括 4 根具有 3 个独立 AC 电流的导线的电源线上的电流。
- 20 6. 如权利要求 5 所述的遥感电流装置，其特征在于，
- 2 个传感器的轴线相互平行，并且第 3 个传感器的轴线垂直于第 1 和第 2 个传感器的轴线。
7. 如权利要求 1 至 6 任一项所述的遥感电流装置，其特征在于，
- 所述磁场传感器是线圈。
- 25 8. 一种遥感电流方法，所述电流流过一组具有 N 个独立的 AC 电流的平行导体，其特征在于，所述方法包括
- 决定 N 个磁场传感器的位置，以便相互独立地测量由导体产生的磁场，并提供相应的信号，和
- 将相对于每个导体的每个传感器的感测信号和位置及角度方向的数据进行
- 30 线性变换，以得到相应于导体电流的进一步的信号。

遥感电流装置和方法

- 5 本发明涉及一种遥感交流电流(AC)装置和方法, 根据在导体附近由这些电流产生的磁场, 遥感一组实质上平行的导体的交流电流。

本发明的遥感电流(remotely sensing the currents)装置, 所述电流流过一个具有 N 个独立的 AC 电流的实质上平行的导体, 包括

- 10 N 个磁场传感器, 所述 N 个磁场传感器位于相互独立地测量由导体产生的磁场的位置, 并提供相应的信号, 和

处理装置, 所述处理装置根据相对于每个导体的每个传感器的感测信号和位置以及角度方向, 得到相应于导体电流的进一步的信号。

- 较佳的是进一步信号包括导体电流的基波频率的谐波成分, 处理装置包括用于得到进一步信号的谐波成分的装置, 这种装置调整谐波成分的幅度, 以便
15 减小在所述传感器中由所述谐波成分产生的失真, 并对调整频率成分和基波频率成分进行重组, 以便产生具有失真小的所述进一步信号。

较佳的是为得到传感器信号的谐波频率成分的装置包括富里埃分析装置。

- 前述“位于相互独立地测量的位置”是表示没有 1 个传感器提供与其它传感器提供的数据实质上相同或者这些数据简单地线性组合的数据。实际上, 这是表示没有 2 个传感器具有相对于导体相同角度方向的坐标轴, 并在正好投影
20 在垂直于导体的平面上时接近。

在这一点应该理解为, 磁传感器的轴线是相对于该传感器, 当即向平行于通过传感器的变化磁场的磁力线时, 在传感器中具有对于该磁场最大的感应信号的方向, 并且传感器的平面是通过正交(normal)于它的轴线的传感器的平面。

- 25 较佳的是每个传感器的平面实质上平行于导体。

传感器较佳的是线圈, 线圈平面是通过线圈的几何尺寸中心平行于线圈的线匝 (turns) 的平面, 并且线圈轴线是在通过线圈中心的正交于该平面的方向上。

- 30 本发明的遥感电流的方法, 所述电流流过一个具有 N 个独立的 AC 电流的实质上平行的导体, 所述方法包括

决定 N 个磁场传感器的位置, 以便相互独立地测量由导体产生的磁场, 并

提供相应的信号, 和

根据相对于每个导体的每个传感器的探测信号和位置以及角度方向, 得到相应于导体电流的进一步的信号。

下面, 参照附图对本发明的实施例进行说明。

5 图 1 表示本发明实施例 1 的装置测量具有 2 条从上支持着的悬链线的 AC 轨道牵引系统中的电流和在轨道中返回电流的原理图。

图 2 表示用图 1 所示的装置和按照附录 1 的算法测量的几何尺寸参数。

图 3 表示图 1 的设备 (instrument) 中的电子电路的方框图。

图 4 表示在实施例中在设备和 PC 之间如何分开从传感器线圈来的信号的处理。
10 理。

图 5 表示在电源线从上支持着的的场合用电流的遥感测量几何尺寸参数。

图 6 表示对由传感器线圈得到的信号进行富里埃分析。

图 7 表示本发明实施例 2 的包括后安装设备和相应的 PC 的装置的原理图。

图 8 表示按照附录 2 的算法测量的几何尺寸参数。

15 图 9 表示图 7 所示设备中的电子电路的方框图。

图 10 表示在实施例 2 中在设备和 PC 之间如何分开从传感器线圈来的信号的处理。

实施例 1

参照图 1 到图 6, 测量在双轨 AC 轨道牵引系统场合的电流的装置, 包括设备 10 和相应的 PC 12' 或者 12' '。设备 10 包括含有 2 个磁场传感器 M1 和 M2 的机箱或者外壳 14。在本实施例中, 传感器是线圈。设备 10 安装在 AC 轨道牵引系统的悬链线支架 (未图示) 上, 或者安装在 AC 轨道牵引系统邻近的柱子上。
20

如图 2 所示, 在本实施例中, 牵引系统包括 2 个在上面实质上平行的悬链线 50-1、50-2, 每个对应于一对平行的轨道 52-1、52-2, 每个悬链线及其相应的一对轨道构成悬链线中的起始电流和轨道中的返回电流的电流回路。因为 2 个悬链线 50-1、50-2 中的电流是独立的, 所以在本发明中 2 个传感器线圈、即线圈 M1 和 M2 位于相互独立地测量的位置是必要的。
25

但是, 本发明能适用于具有任意数 N 的独立电流平行导体 AC 系统。在这种场合采用磁场传感器数 N 位于相互独立地测量的位置。附录 1 给出了本发明的这种一般化。当然, 本发明不限于 AC 轨道牵引系统中的电流传感器, 并且本发
30 明的申请能一般化到从上支持着的电源线 (overhead power line), 特别例如参

照图 5 在附录 1 中给出了具有需要 3 个磁场传感器的 4 根导线(导体)的 3 相从
上支持着的电源线。

回到参照图 2, 设备 10 具有参考点 P 和抽象的但是可知的通过点 P 的参考
平面 S。固定设备 10, 使得参考平面 S 实质上平行于悬链线 50—1、50—2 和轨
5 道 52—1、52—2(下面, 都称为导体)。实际上, 如图所示参考平面 S 近似于垂
直, 但这并不是必须的。将线圈 M1 和 M2 设置在外壳 14 中, 使得每个线圈的平
面也实质上平行于导体。

在外壳 14 中, 每个线圈 M1 和 M2 相对于参考点 P 的位置是已知的(在制造
时确定)。每个线圈位置由 ΔX_c 和 ΔY_c (图 2)给出, ΔX_c 和 ΔY_c 是各个线圈 M1
10 和 M2 的中心离开设备参考点 P 的偏移, 平行于设备参考平面 S 测量 ΔY 值, 垂
直于设备参考平面 S 测量 ΔX 值。在传统意义上这些值是正的、即参考点右上
方是正的。每个线圈相对于参考面 S 的角度方向 Θ_c 是已知的, Θ_c 是线圈 M1
和 M2 平面与设备参考点 S 之间的角度。这些角度在参考平面的逆时针方向是正
的。

15 一般地在感测 N 个独立电流的场合, 设置并调整 N 个传感器线圈的方向,
以便在导体的附近获得独立的磁场测量。为此, 典型地使线圈方向角度变化 90° ,
以便在靠近相同的位置获得不同的磁场测量。然后, 将线圈设置在完全不同的
位置, 以便获得读之间的附加的区别。这种位移适合于根据外部导体排列对特
别应用调整所要的灵敏度和所要的调整小型化。为了便于数据分析, 使线圈的
20 方向具有它们的平面平行以及垂直于设备参考平面、即在 0° 和 90° 的方向角度
 Θ_c 上。但是, 它们的方向也可以是所要的使得它们的平面实质上平行于导体的
任意的方向角度 Θ_c 。关键在于所有的线圈精确地定向, 或者能精确地测量它
们的方向, 并且能精确地知道它们的位置, 最好至少精确到 1mm。在本实施例
中, 2 个线圈 M1 和 M2 分别平行和垂直于参考平面定向。线圈能在平行于导体
25 的方向分开, 以避免相互干扰。

当将外壳 14 固定在前述的位置上时, 有必要知道每个导体离开参考点 P 的
径向距离 R_w , 以及每个导体离开参考平面 S 的各个角度偏移 α_w 。这最好由提
供具有对接站(docking station)的设备 10 来实现, 在这种对接站中能安装超
声测量器件, 以便测量到导体的距离, 并能将其旋转, 以便测量角度。这些角
30 度在参考平面的逆时针方向是正的。

在已知所有这些值后, 应理解已具有相对于每个导体的每个线圈 M1、M2 的

位置和角度方向的准确的知识。

- 在使用中，在每个线圈 M1、M2 中感应的瞬时电压 $V_c(t)$ 正比于在各个线圈处的磁场的瞬时值。在线圈传感器的场合，感应的电压还正比于磁场中各个元件的频率或者谐波。能将线圈绕在铁氧体磁芯上，以便改善在相当接近的 2 个
- 5 线圈之间不会引起相互失真的灵敏度。

- 机箱 14 包含由电池 30 供电的电子电路 28，并具有用于通过电缆 100 连接 PC 12'、例如 laptop PC 的串联口进行通信的标准 RS232 接口 32，或者通过在 PC 处调制解调器 104，将例如调制解调器或者 GSM 模块 102 通信连接到 PC 12'。可见，PC 12' 和 PC 12' 说明将 PC 连接到设备 10 的 2 种不同的方法，
- 10 并且一般地，在任何给定的时间仅使用 1 个这种 PC。端口 32 对于波特率范围 (1200—33000bps) 是可编程的，并且执行适当的流程控制和错误检查。

设备 10 能与 PC 12' 或者 PC 12' 中的主程序 106 (图 4) 进行通信，并根据请求下载数据到 PC。它还能接收从 PC 用户可选的参数、例如将要述及的具有设备时钟检查或者复位的、表示登录数据的时间跨度的积分时间间隔等。

- 15 而主程序 106 能与设备 10 进行通信，用于评估设备的状态及其数据内容。它还能初始化来自设备的数据的下载和控制数据流。它还能对有问题的地方接收和处理几何尺寸数据 (将要述及)。它还能根据需要将原始的设备数据转换成电流值。它还能在数据库入口处归档所有的数据。它还能根据需要恢复、显示和图形化数据。

- 20 图 3 是电子电路 28 的方框图。来自线圈 M1、M2 的电压首先在保护电路 34 中被箝位，以提供过电压保护，避免因故障损坏设备的电子电路。它们能对于等效于 20000amp 的故障电流进行保护。设备并不需要测量这种电流。它仅需要避免被其损害。

- 来自线圈的电压然后由滤波器 36 进行适当地滤波，以便 50—60Hz 的基波
- 25 电流和所要的谐波电流通过。这通常包括直到第 40 次的例如 2—2.4kHz 的谐波。通带 30—2500Hz 是合适的。

接着，在同时采样和保持电路 38 中获得下一个传感器线圈电压。相继的采样将导致相应于延迟的相位角度错误，这将影响结果的精度。所以，最小采样频率最好使用 5000Hz。

- 30 对数据块进行采样。这一般地为 5 个周期，但也能根据特殊的应用增加或减少到 1 个周期。为了在接着的 rms 计算和数据的富里埃变换中的精确性，重

要的是采样整数的基本周期。采样频率应该适应于供给频率，以对于变化的供给频率达到数据块中采样和周期的完整数。这可以使用分开的模拟滤波器，以便从 1 个线圈提取基波 50—60Hz 成分，并对该信号进行零通过计数，以测量频率。

- 5 采样信号通过多路器 40，并由 AD 变换器 42 变换成数字形式，用于进一步的数字处理。重复这种周期。连续地监视需要平行地运行 2 个处理。一个是不不断地采样线圈数据块并将其传输到缓存器中。另一个是读这些缓存器并对数据进行处理，以便导出工程结果、即电流值。

- 10 在处理器 44 中数字地处理瞬时数字值 $V_c(t)$ ，首先用线圈常数 F_c 对电压进行按比例标定，以给出磁场强度 $H_c(t)$ ，然后通过线性变换，消除导体几何尺寸对于线圈的效应，参照图 4 的块 60。详细的参照附录 1。比例因子结合能外部定义的校正因子，实施设备的周期性的再校正。这产生接近于各导体电流的信号 $hw(t)$ 。

- 15 线性变换 60 需要一定的几何尺寸因子 G^{-1}_{wc} 。如附录 1 所述，对于导体它们由外部几何尺寸参数 R_w 、 a_w 、得到，对于线圈则由内部几何尺寸数据 ΔX_c 、 ΔY_c 、 θ_c 等得到。人工地将外部几何尺寸数据输入到装载在 PC 12' 或者 PC 12' ' 中的主程序 106。内部几何尺寸数据存储在设备的内部。主程序计算组合几何尺寸因子(图 4 中 72)，并将它们装载到设备 10 中。

- 20 在线圈作为磁传感器的场合，在传感器线圈 M1、M2 中感应的电压除去由导体电流的幅度外还由频率决定。探测到的电压正比于电流幅度和频率的乘积。因此，谐波电流产生信号成分，这种信号成分由它们的频率或者谐波阶数放大，例如 10 次谐波产生大于 10 倍等效基波电流的信号。调节这种信号 $hw(t)$ 以补偿由这种谐波放大产生的失真，以精确完整地得到起始的电流。

- 25 更加详细的如图 6 所示，信号 $hw(t)$ 经过富里埃分析 62。当数据块中的采样数是 2 的幂、即 2^N ，其中 N 是整数时，能用快速富里埃变换。能将采样频率设置成这样。例如，对于通常的 50Hz 电流和 5 个周期数据块，能用 5120Hz 采样频率或者每块 512 采样实现。富里埃变换分离信号 $hw(t)$ 中的各个频率成分。例如，信号的基波成分一般地作为 FFT 变换数据中的第 5 个元素，而每个数据块有 5 个周期。谐波成分驻留在该位置的整数倍上，例如位置 10 用于每个数据块 5 个周期的场合的 2 次谐波等。每个频率成分的幅度能被谐波阶数整除，即 f/f_s 其中 f_s 是供给频率，以消除频率放大效果。
- 30

然后, 进行逆富里埃变换来调节数据, 以便再建初始电流。注意到 FFT 变换在每个频率产生多个值, 以便在每个频率结合信号的幅度和相位角度。逆 FFT 变换结合调节的幅度和初始相位角度, 以便精确地再现导体电流作为对于时间的序列值。

- 5 FFT 变换及其逆变换是标准的数学方法。它们被记载在数字信号处理 (DSP) 书本中, 并且在大部分 DSP 软件库中作为标准函数。能用 DSP 芯片或者在合成控制器的 DSP 成分中安装 DSP 元件来实现补偿谐波放大效果的数字信号处理。也能用安装在 PC 环境或者高功率微控制器中的软件实现。

- 10 结果的值 $I_w(t)$ 将独立的导体电流表示为对于采样块覆盖的的期间的瞬时值的序列。作为 FFT 变换副产品还对于每个导体产生谐波电流幅度和相位角度。对于 3 相从上支持着的电源线的场合的 3 相电流, 能将基波频率值转换成 (图 4 中 64) 对称成分值, 即描述导体电流的正、负和零的序列成分。这能用描述在公式概括中的以往的相位到序列变换实现。对于导体电流的谐波成分, FFT 变换还产生幅度和相位角度。任何或者所有的这些数据能用于进一步的处理, 例如
- 15 如电源质量分析或者事件记录, 负载记录或者故障分析等。如图 4 的块 66 到 70 所示, 例如能相应于事件触发存储瞬时电流值, 来记录与扰动或者例如故障的事件相关的电流波形, 即记录在扰动/事件记录器或者示波法应用中。正和零序列电流能被监视, 以指示在指示器应用的故障阶段中的故障等, 例如能将任何数据标上时间并存储在存储器 46 中, 以便以后检索和处理。

- 20 另一方面, 能够对于用户定义的典型地为 10 分钟的时间间隔, 通过平均来浓缩数据。在这种场合, 能集合瞬时值来计算开始用于每个块然后用于感兴趣的时间间隔内的均方根 (rms) 值。将感兴趣的电流信息或者参数结果的 rms 值标上时间, 或者构造在确定的时间序列中, 并存储在存储器 46 中以便进一步检索和分析。在这种场合, 要有充分的存储器以存储至少 4 星期的 10 分钟间隔的数据。
- 25

根据主程序的 106 请求, 设备 10 通过电缆连接 100 或者通信连接 102/104, 将存储在存储器 46 中的数据上装到 PC 12' 或者 PC 12' ' 中, 并存储在 74 中。然后用于进一步的处理 76 和/或归档或者显示 78。主程序 106 可以执行 1 个或者多个 66 到 70 的功能, 以代替设备 10。

- 30 除去由设备 10 对数据进行计算和分析外, 主程序还提供用于传感器线圈的可编程的软件校正因子, 因为这对于周期性地再校正设备是必须的。

此外,要求在设备 10 中要有低电池电压软件标记,以便在下一次连接时向主程序标记条件。

设备 10 以额定测量 0—1000amp 导体电流为佳,并能构造成运行在用户自选的范围、例如 0—500 和 0—1000 amps。

- 5 设备 10 能处理来自传感器线圈的信号,以达到相对于平衡线电流 1%的设备精度。考虑到外部几何尺寸因子和主程序中的处理,最后的精度是 5%。

如前所述,在实际上,将线圈平面和设备参考平面 S 之间的角度 θ_c 设置成 0° 或者 90° 。其理由是在这种场合,在附着的方程中 $\cos \theta_c$ 和 $\sin \theta_c$ 为 0 或 1,使得执行项被相应地简化。这使得计算容易和加快。但是,如前所述,

- 10 线圈能对于参考平面 S 具有任意的角度方向,并能给出全部方程。

即使如此,附着的方程仅处理每个线圈平面平行于导体的场合。但是,也可能方程进一步适合于不必平行于导线的线圈平面,而且本发明能扩展到包括这种情况。

- 前面已经说明了一般地根据情况变化能够测量电流的设备,例如如前所述
15 的 AC 轨道牵引系统或者从上支持着的电源线。

实施例 2

下面,对本发明的实施例 2 进行说明。本实施例是用于遥测流过具有 4 个实质上平行的导线的 AC 从上支持着的电源线的电流。

- 参照图 7—图 10,本发明第 2 发明的遥感电流装置包括设备 110 和相应的
20 PC112' 或者 112' '。设备 110 包括包含 3 个磁场传感器 a, b 和 c 的机箱或者外壳 114。在本实施例中,传感器是线圈。将设备 110 安装在具有 4 个实质上平行的导线 R、Y、B 和 N 的 AC 从上支持着的电源线的下面的柱子上(未图示),这些导线的电流被测量。在安装设备的柱子可以是具有导线的相同的电杆或者铁塔。

- 25 虽然遥感电流装置能测量在使用少于 4 根从上支持着的导线的 AC 电源分布系统中的导线电流,但由图可见,遥感电流装置用于使用 4 个实质上平行的导线 R、Y、B 和 N 的系统,其中导线 R、Y、B 分别流过 3 相电流,导线 N 是中线。这些导线能任意地构成,使它们实质上相互平行。将这些导线典型地安装成水平地相互隔开 1m,并且在这种场合,较佳的是将设备 110 安装在其下面 3 到 5m,
30 典型的是 4m。对于设备 110,不必将设备 110 位于对导线对称。

参照图 8,设备 10 具有参考点 P 和抽象的但是可知的通过点 P 的参考平面

S。固定设备 110 使得参考平面 S 平行于导线 R、Y、B 和 N。实际上如图所示，参考平面 S 接近于垂直，但是这不是必须的。将线圈 a、b、c 设置在外壳 114 内，使得每个线圈平面都平行于导线。

在外壳 114 中，每个线圈对于参考点的位置是已知的(在制造时决定)。线圈位置由 $(\Delta X_a, \Delta Y_a)$ 、 $(\Delta X_b, \Delta Y_b)$ 和 $(\Delta X_c, \Delta Y_c)$ 给出，它们分别是线圈 a、b、c 的中心离开设备参考点 P 的偏移， ΔY 值由平行于设备参考平面 S 测量， ΔX 值由垂直于设备参考平面 S 测量。

每个线圈对于参考平面 S 的角度方向是已知的。 θ_a 、 θ_b 和 θ_c 分别是线圈 a、b、c 的平面与设备参考平面 S 之间的角度。实际上如图 8 所示，如后所述为了简化起见，将线圈设置成， $\theta_a=0^\circ$ 、 $\theta_b=90^\circ$ 和 $\theta_c=0^\circ$ ，但这不是必须的，可以将线圈设置成对于平面 S 的任意的方向，只要这些平面仍然实质上平行于导线就行。较佳的但是不是必须的是按照封装的方便，在小型的外壳 114 中线圈使 a、b 位置接近并且相互成直角，而线圈 c 位于线圈 a、b 的上面或者下面。能在平行于导线的方向上分开线圈，以避免相互干扰。

当将外壳 114 固定在前述的位置上时，必须知道参考点 P 离开每根导线 R、Y、B 和 N 的径向距离 R1、R2、R3 和 R4，以及每根导线 R、Y、B 和 N 离开参考平面 S 的相应的角度位移 α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 。这最好由具有对接(docking)站的设备 110 实现。在这种对接站中能够安装超声测量器件以便测量对导线的径向距离和将其旋转以测量角度。

另一方面，能将设备对准电杆地安装在电杆上，即其参考平面沿着电杆的轴。使用例如超声设备测量中心线下面的高度。由制造标准可知导线离开电杆中心的侧向的位移以及中心线上线下的垂直位移。将这种数据输入到 PC 主程序中，用于得到相对于设备的导线几何尺寸。

当已知所有这些值时，应该理解已具有每个线圈 a、b 和 c 相对于每根导线 R、Y、B 和 N 的位置和角度方向的精确知识。

在使用中，在每个线圈 a、b 和 c 中感应相应的瞬时电压值 $H_a(t)$ 、 $H_b(t)$ 和 $H_c(t)$ 正比于在相应的线圈中的磁场的瞬时值。能将线圈绕在铁氧体磁芯上，以便改善在相当接近的 2 个线圈之间不会引起相互失真的灵敏度。

机箱 114 包含由电池 130 供电的电子电路 128，并具有用于通过电缆 200 连接 PC 112'、例如 laptop PC 的串联口进行通信的标准 RS232 接口 132，或者通过在 PC 的调制解调器 204，将例如调制解调器或者 GSM 模块 202 通信连接

到 PC 112'。可见, PC 112' 和 PC 112' ' 说明将 PC 连接到设备 110 的 2 种不同的方法, 并且一般地, 在任何给定的时间仅使用 1 个这种 PC。端口 132 对于波特率范围(1200—19200bps)是可编程的, 并且执行适当的流程控制和错误检查。

- 5 设备 110 能与 PC 112' 或者 PC 112' ' 中的主程序 206(图 10)进行通信, 并根据请求下载数据到 PC。它还能接收从 PC 用户可选的参数、例如将要述及的具有设备时钟检查或者复位的、表示登录数据的时间跨度的积分时间间隔等。

而主程序 206 能与设备 110 进行通信, 用于评估设备的状态及其数据内容。它还能初始化来自设备的数据的下载和控制数据流。它还能对有问题的地方接
10 收和处理几何尺寸数据(将被说明)。它还能根据需要, 将原始的设备数据转换成电流值。它还能在数据库入口处归档所有的数据。它还能根据需要恢复、显示和图形化数据。

图 9 是电子电路 128 的方框图。来自线圈 a、b、c 的电压首先在保护电路 134 中被箝位, 以提供过电压保护, 避免因故障损坏设备的电子电路。它们能
15 从上支持着的线对于等效于 20000amp 的对称故障电流进行保护。设备并不需要测量这种电流。它仅需要避免被其损害。

来自线圈的电压然后由低通滤波器 136 进行适当地滤波, 以便 50—60Hz 的基波电流, 并截断这种频率范围以上的谐波。

接着, 在同时采样和保持电路 138 中获得下一个传感器线圈电压。相继的
20 采样将导致相应于延迟的相位角度错误, 这将影响结果的精度。所以, 最小采样频率用 500Hz, 最好采样频率为 1000Hz。然后, 采样数据通过多路器 140, 以便在 AD 变换器 142 中变换成数字形式。在图 10 的步骤 300 中, 处理器 144 从 3 个瞬时数字线圈值 $H_a(t)$ 、 $H_b(t)$ 和 $H_c(t)$ 的集合, 得到 6 个导出的数字值和 $h_1(t)$ 、 $h_2(t)$ 、 $h_3(t)$ 、 $h_{12}(t)$ 、 $h_{13}(t)$ 和 $h_{23}(t)$ 的集合。附录 2 给出了从
25 瞬时数字线圈值得到导出值的公式。

由附录 2 可见, 导出值的计算需要一定的几何尺寸因子 $\Delta 1a$ 、 $\Delta 1b$ 、 $\Delta 1c$ 、 $\Delta 2a$ 、 $\Delta 2b$ 、 $\Delta 2c$ 、 $\Delta 3a$ 、 $\Delta 3b$ 、 $\Delta 3c$ 。这些可以由先前涉及的几何尺寸参数 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 得到。人工地将这些几何尺寸数据输入到装载在 PC 112' 或者 PC 112' ' 中的主程序 206(图 10)。主程序计算几何
30 尺寸参数, 并将它们装载到设备 110 中。

在图 10 步骤 302, 由处理器 144 汇总计算得到的数字值, 以得到对于用户

选择的时间间隔等效的 rms 值。时间间隔选择是 5、10、15、20 和 30 分钟，并且在建立时将它们从主程序 206 编程到设备 110 中。在步骤 304，将 rms 数据标记时间并登录到存储器 146 中，或者用确定的时间序列构造到存储器中以便以后检索。要有充分的存储器以存储至少 4 星期的 10 分钟间隔的数据。在溢出存储器空间时，设备重写最早存储的数据。

直到主程序 206 通过电缆连接 200 或者通信连接 202/204 进行请求，设备 110 将存储器 146 中的 rms 值装载到 PC 112' 或者 PC 112' '。参照图 10 的步骤 306，主程序使用 rms 值计算 3 个所谓的时序电流，在故障或者 4 根导线电路中的中线电流的场合，正时序电流 I_+ 影响导线中平均电流，负时序电流 I_- 影响负载不平衡电流，零时序电流 I_0 影响对地漏电流。在步骤 308，主程序 206 由这些时序电流以安培计算导线中的实际电流 I_R 、 I_Y 、 I_B 和 I_N 。附录 2 给出了主程序用于进行计算的公式。

在步骤 310，由主程序 206 将计算得到的电流值显示在 PC 监视器上，或者存储在 PC 存储器中。

除去计算导线中的电流外，主程序还提供用于传感器线圈的可编程的软件校正因子，因为这对于周期性地再校正设备是必须的。

此外，要求在设备 110 中要有低电池电压软件标记，以便在下一次连接时向主程序标记条件。

设备 110 以在从上支持着的全部 3 根线测量 0—1000 amps 作为平衡电流、或者在任何 1 根具有返回到地的导线中的故障电流为佳，并具有 2 个或者多个用户可选择的范围、例如 0—500 和 0—1000 amps。用户能在制造时在它们之间进行选择。

设备 110 能处理来自传感器线圈的信号，以达到相对于平衡线电流 1%的设备精度，考虑到外部几何尺寸因子和主程序中的处理，最后的精度是 5%。

虽然如前所述，全部 3 个线圈 a—c 位于导线 R、Y、B 和 N 的下面，但这仅仅是为了容易地将它们安装到单个较小的外壳 114 中。每个线圈能够位于导线的上面或者下面，只要它们能满足前述指定的位置要求就可。

虽然，实施例 2 能用于 4 个从上支持着的导线 R、Y、B 和 N 的大部分要求的情况，但也能用于测量 2 根或者 3 根电源分布系统的电流。在 2 线或者 3 线电源分布系统的场合，例如使用导线 R 和 N 或者 2 个相位，并将几何尺寸参数 R_3 和 R_4 设置成无穷大，而在 3 线系统中，使用导线 R、Y 和 B，并将几何尺寸

参数 R4 设置成无穷大。

如前所述，在实际上，将各线圈 a、b、c 的平面和设备参考平面 S 之间的角度 θ_a 、 θ_b 和 θ_c 设置成 $\theta_a=0^\circ$ 、 $\theta_b=90^\circ$ 和 $\theta_c=0^\circ$ 。其理由是在这种场合，在附着的方程中 $\cos \theta_a$ 和 $\sin \theta_a$ 为 0 或 1，使得 $\cos \alpha_1$ 等项被相应地简化。

- 5 这使得计算容易和加快。但是，如前所述，线圈能对于参考平面 S 具有任意的角度方向，并能给出全部方程。

即使如此，附着的方程仅处理每个线圈平面平行于导体的场合。但是，也可能方程进一步适合于不必平行于导线的线圈平面，而且本发明能扩展到包括这种情况。

- 10 安装设备 10 或者 110 的外壳 14 或者 114 是能在现场使用的坚固的外壳。随着面板的关闭，能保护具有 IEC 标准 529 的线上的 IP64。外壳和密封能够承受连续暴露在阳光、雨水和雾气等，而不会过度地降低 10 年的寿命。

- 安装设备 10 或者 110 安排支架的形式，支架能用方头螺丝固定在电杆上。另一方面，突出部分和安装带能将设备固定在任何种类的电杆上。在安装时应
15 该容易取下设备。安装安排应该将设备保持在电杆上牢固的位置，使得在风中不会移动或者倾斜。

除了外部通信口 32 或者 132，设备还有接通/断开开关。接通/断开开关能用作复位开关，以复制在设备安装时可能的锁定。通信口和接通/断开开关可以位于例如有机玻璃门的后面。并能对门进行标准的线密封，以避免设备损坏。

- 20 设备最好具有 2 个指示 LED，1 个用于指示电源导通，另一个指示设备完全地起动并且登录数据。它们也能安装在有机玻璃门的后面。

设备 10 或者 110 由电池 30 或者 130 供电，以便支持连续的正常运行 5 年以上。电池具有标准和现成有效的尺寸。能用标准的工具在现场更换电池。能从电杆取下设备，以便更换新的电池。

- 25 设备 10 或者 110 最好在以下工作条件内精确地运行：

最大温度：40 °C

最小温度：-10 °C

相对湿度：0—85%

海拔高度：0—1000m

- 30 最大风速：50m/s

本发明不限于在现场设备和远地处理器之间分开处理的装置。整个装置能

够安装在现场的单个外壳内。数据处理部分和设备与 PC 中的主机软件之间的功能能随着特殊的应用变化。此外，能将基本电流测量功能作为分开的实体，并用作前置或者与其它以往的设备一起，将遥感探测的电流数据提供给设备，以便进一步分析或者处理，例如电源质量分析、故障指示等。

- 5 此外，装置不必固定在电线杆那样的位置上。也能用手持设备的形式实施。在这种场合，能由测量设备例如超声、激光等测量几何尺寸参数，并构造在设备中，并且与磁场读出的同时进行读出。

本发明不限制于前述的实施例，只要在本发明精神的范围内能进行修改和变化。

10 附录 1

几何尺寸因子：

给出：

- 15 承载 N 个独立电流的一组导体(导线)。每个电流流过用下标 w 表示导线的主导体中。每个电流能够返回到用下标 w' 表示这种第 1 返回导体和用下标 w'' 表示接着的导体的 1 个或者多个返回导体中。

R_w 、 α_w 测量与设备相关的主导体之一的导体几何尺寸。这些值分布是从设备参考点到导体中心的径向距离 R_w 和导体离开设备参考平面的角度位移 α_w 。从设备参考平面逆时针方向，测量角度位移为正。 $R_{w'}$ 、 $\alpha_{w'}$ ， $R_{w''}$ 、 $\alpha_{w''}$ 等测量相应的返回导体相对于设备的导体几何尺寸。这样，给出一组

- 20 以下的几何尺寸：

$$\begin{array}{ccccccc} R_1, \alpha_1, & R_2, \alpha_2, & R_3, \alpha_3, & \dots & R_N, \alpha_N. \\ R_{1'}, \alpha_{1'}, & R_{2'}, \alpha_{2'}, & R_{3'}, \alpha_{3'}, & \dots & R_{N'}, \alpha_{N'}. \\ R_{1''}, \alpha_{1''}, & R_{2''}, \alpha_{2''}, & R_{3''}, \alpha_{3''}, & \dots & R_{N''}, \alpha_{N''}. \\ : & : & : & & : \end{array}$$

此外，对于任何返回导体定义参数 $\lambda_{w'}$ ， $\lambda_{w''}$ 等，这些参数确定这些导体返回讨论中电流的系数。例如，对于双轨的返回电流，一般地使得 $\lambda_{w'} = \lambda_{w''} = 0.50$ 。

- 25 一组 N 个磁场传感器或者感测线圈。用下标 C 表示线圈。 ΔX_c ， ΔY_c 表示从设备参考点到这些感测线圈的几何尺寸中心的线圈偏移。在传统的意义上参考点的右上方为正。 θ_c 是这些线圈的平面与设备参考平面的方向的交角。在从设备参考平面、例如根据极性具有平行于参考平面的线圈为 $\theta_c = 0^\circ$ 或者 180° 逆时针方向测量为正。这样，给出一组以下的几何尺寸：

$$\Delta X_1, \Delta Y_1, \theta_1, \quad \Delta X_2, \Delta Y_2, \theta_2, \quad \Delta X_3, \Delta Y_3, \theta_3, \quad \dots \quad \Delta X_N, \Delta Y_N, \theta_N.$$

将测量到的导体几何尺寸变换成以下的探测线圈之一：

$$\begin{aligned} R_{cw} &= \sqrt{R_w^2 + \Delta X_c^2 + \Delta Y_c^2 + 2 \cdot R_w \cdot (\sin \alpha_w \cdot \Delta X_c - \cos \alpha_w \cdot \Delta Y_c)} \\ \cos \alpha_{cw} &= [(R_w \cdot \cos \alpha_w - \Delta Y_c) \cdot \cos \theta_c + (R_w \cdot \sin \alpha_w + \Delta X_c) \cdot \sin \theta_c] / R_{cw} \\ C &= 1 \dots N \text{ 和 } W = 1 \dots N. \end{aligned}$$

这样，得到分开的一组几何数据，这些数据适合每个感测线圈的方向和位置。这样，对于 N 个感测线圈，全部外部导体几何尺寸变换 N 次。

计算几何尺寸项：

$$\begin{aligned} G_{cw} &= \cos(\alpha_{cw}) / 2\pi R_{cw} - \lambda_w \cdot \cos(\alpha_{cw}) / 2\pi R_{cw} - \lambda_w \cdot \cos(\alpha_{cw}) / 2\pi R_{cw} - \dots \\ C &= 1 \dots N \text{ 和 } W = 1 \dots N. \end{aligned}$$

这样，得到对应于 N 个感测线圈和 N 个导体组中的独立电流的 $N \times N$ 矩阵。

对前述矩阵求逆，得到几何尺寸因子 G^{-1}_{cw} 。

10 注意到特殊的 3 相 4 导体电路(图 5)的情况，仅有 3 个独立电流。在第 4 个导体中的电流依赖于 3 相导体。所以，能仅仅用 3 个感测线圈就能得到全部导体的全部电流特征。

在这种场合，对于每个相位电流不必分开返回导体。大部分电流、即正和负的时序电流对于负载来说其和为零。第 4 个导体用作共同返回导体，作为全部 3 相的剩余或者零时序电流。在这种场合，几何尺寸方程式稍微有点不同。用 λ 表示返回到第 4 或者中线导体中的剩余或者零时序电流的系数。其缺省值为 1.0。

对于 4 个导体测量与设备相关的外部导体几何尺寸 R_w 、 α_w 。这样给出 4 对值。将这些数据变换成以下给出的 3 个感测线圈的每一个：

$$\begin{aligned} R_{cw} &= \sqrt{R_w^2 + \Delta X_c^2 + \Delta Y_c^2 + 2 \cdot R_w \cdot (\sin \alpha_w \cdot \Delta X_c - \cos \alpha_w \cdot \Delta Y_c)} \\ \cos \alpha_{cw} &= [(R_w \cdot \cos \alpha_w - \Delta Y_c) \cdot \cos \theta_c + (R_w \cdot \sin \alpha_w + \Delta X_c) \cdot \sin \theta_c] / R_{cw} \\ C &= 1 \dots 3 \text{ 和 } W = 1 \dots 4. \end{aligned}$$

20 这种场合，取 $\theta_1 = 0^\circ$ ， $\theta_2 = 90^\circ$ 和 $\theta_3 = 0^\circ$ ，使得前述的 $\cos \theta_c$ ， $\sin \theta_c$ 为 0 或者 1。这样能简化表达式 $\cos \alpha_{cw}$ 。

这样，得到 12 对值。并能如前所述地计算几何尺寸：

$$\begin{aligned} G_{cw} &= \cos(\alpha_{cw}) / 2\pi R_{cw} \\ C &= 1 \dots 3 \text{ 和 } W = 1 \dots 4. \end{aligned}$$

25 这样能得到 3 行 4 列矩阵。第 4 导体中的电流是从 3 相导体来的剩余电流，即全部 4 个导体的电流总和为 0。其中一些剩余电流实际上返回到地，因此有：

$$\lambda(I_1 + I_2 + I_3) + I_4 = 0.$$

现在，将这个方程的系数加入到几何尺寸矩阵中，即 $G4w = (\lambda, \lambda, \lambda, 1)$ 。

对 4×4 矩阵求逆，得到 $G^{-1}w4$ 。因为这些项乘以 0，所以去除 4×4 矩阵的最右一列。这样，得到 4×3 矩阵 $G^{-1}wc$ ，用于从 3 个线圈读数得到 4 个导体电

流的每一个。

在这种场合，能得到由于消除从感测线圈读数对导体几何尺寸的影响的几何尺寸因子 $G^{-1}wc$ 。结果的值直接与导体电流相关。

去除几何尺寸：

首先用线圈的比例因子将信号、例如电压即伏变换成磁场强度、即 A/m 单位。这些比例因子或者常数 F_c 提供每个线圈的圈数、校正常数等。

因此， $H_c(t) = F_c * V_c(t)$

用比例后的感测线圈读数 $H_c(t)$ 变换这些读数，以便消除导体几何尺寸：

$$hw(t) = \sum_{c=1}^N G^{-1}wc \times H_c(t) = G^{-1}w1 \times H_1(t) + G^{-1}w2 \times H_2(t) + \dots + G^{-1}wN \times H_N(t)$$

$$W = 1 \dots N.$$

其中，基波频率 (50/60Hz) 仅在这些值 $hw(t)$ 为实际导体电流 $I_w(t)$ 时被处理。因此， $I_w(t) = hw(t)$ 。

富里埃分析：

在进一步的应用中，所要的电流也可以含有谐波或者瞬时成分。设备监视线圈中感应的电压。它们不仅正比于电流幅度，也正比于频率。因此，在基波频率上下与电流成分相关的信号成分以正比于这些频率对于基波频率的比例、即 f/f_s 进行放大。这里， f_s 是基波频率。因此，必须补偿由于这种影响引起的失真。

用富里埃分析来分离电流信号的频率成分。用比例 f/f_s 分开幅度，以便取消谐波放大。并且，能用逆富里埃变换来重新对调节值进行组合，以便产生全部补偿代表真正导体电流的信号。图 6 原理上说明了这种处理。

注意到能对于每个电流分别进行前述的处理。但是，在 3 相电流的场合，每个相位时序变换导出对称成分电流值，对于讨论中的 3 相电流数据必须对于变换处理有效。

选择数据块中的采样数为 2 的整数幂，使得能使用快速富里埃变换 (FFT) 及其逆变换。这样，能减少数据处理中的计算。

处理数据:

谐波放大调节处理产生一组描述各个导体电流 $I_w(t)$ 的瞬时值。这能有效地描述导体电流对于采样率决定的精度的波形形状。这种瞬时数据能够被直接地存储、显示或者对于设备中的其它的处理，或者用于进一步分析的其它设备。

5 如果如下所述能特定的整数期间计算所要的 rms 值:

$$I_w^{rms} = \sqrt{[\sum_{t=1}^M I_w^2(t) / M]}.$$

则这种数据能典型地被时间标记并存储在存储器中。

作为富里埃分析副产品，在数据块采样期间提取谐波电流和它们的相位角度。这种数据能被存储、显示或者用于设备中的其它的处理，或者用于进一步分析的其它设备的其它处理。能在特定的整数期间计算所要的 rms 值。并且，
10 这种数据能时间标记并存储在存储器中。

时序电流

作为富里埃分析副产品，在数据块采样期间还提取基波电流 I_F 和它们的相位角 θ_F 。对于 3 相电流，能将这种数据变换成讨论中的数据块的时序或者对称成分电流。相位电流幅度 I_ϕ 和相角 θ_ϕ 是最一般的组合，其中 ϕ 相位有 1、2、
15 3 或者 R、Y、B 的下标，以便形成以 $X+iY$ 形式的相位电流的复数表示。取

$$\alpha = -\frac{1}{2} + i\sqrt{3}/2 \text{ 和 } \alpha^2 = -\frac{1}{2} - i\sqrt{3}/2 \text{ 然后}$$

$$I_+ = (I_R + \alpha \cdot I_Y + \alpha^2 \cdot I_B)/3$$

$$I_- = (I_R + \alpha^2 \cdot I_Y + \alpha \cdot I_B)/3$$

$$I_0 = (I_R + I_Y + I_B)/3$$

其中， I_+ 是表示平衡负载条件下的正时序电流， I_- 是表示在 3 相电流中负载不平衡下的负时序电流， I_0 是表示零时序电流，这种时序列电流无论作为来自负载的不平衡的中线电流或者来自 1 个或者多个相的故障电流或者两者的组合都表示剩余电流。
20

这些对称成分电流也能在用户指定的时间间隔进行积分或者平均，以便提供 rms 值作为对于时间的分布。这种数据也能被时间标记和存储。

25 附录 2

几何尺寸因子:

给出:

λ = 零时序电流返回到中线导体中的部分，其缺省值为 1.0。

(R1, α_1), (R2, α_2), (R3, α_3)和(R4, α_4)测量相对于设备的导线几何尺寸。R1, R2, R3 和 R4 是从设备参考点 P 分别到导线 R, Y, B 和 N 的径向距离, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 是导线 R, Y, B 和 N 离开设备参考平面 S 的角度偏移, 并以逆时针方向为正。

- 5 $(\Delta X_a, \Delta Y_a)$, $(\Delta X_b, \Delta Y_b)$ 和 $(\Delta X_c, \Delta Y_c)$ 是线圈 a, b 和 c 的中心分别离开参考点 P 的位移, 平行于设备参考平面 S 测量 ΔY 值, 垂直于设备参考平面 S 测量 ΔX 值。在传统意义上这些值是正的、即参考点右上方是正的。

θ_a 、 θ_b 和 θ_c 分别是线圈 a、b、c 的平面与设备参考平面 S 之间的角度, 并以逆时针方向为正。在实际上取 $\theta_a=0^\circ$ 、 $\theta_b=90^\circ$ 和 $\theta_c=0^\circ$ 。使得 $\cos \theta_a$

- 10 和 $\sin \theta_a$ 为 0 或 1。因此, $\cos \alpha_1$ 等项被相应地简化。

将测量的导线几何变换成每个线圈位置:

$$\begin{aligned}
 R_{a1} &= \sqrt{[R_1^2 + \Delta X_a^2 + \Delta Y_a^2 + 2 \cdot R_1 \cdot (\sin \alpha_1 \cdot \Delta X_a - \cos \alpha_1 \cdot \Delta Y_a)]} \\
 R_{a2} &= \sqrt{[R_2^2 + \Delta X_a^2 + \Delta Y_a^2 + 2 \cdot R_2 \cdot (\sin \alpha_2 \cdot \Delta X_a - \cos \alpha_2 \cdot \Delta Y_a)]} \\
 R_{a3} &= \sqrt{[R_3^2 + \Delta X_a^2 + \Delta Y_a^2 + 2 \cdot R_3 \cdot (\sin \alpha_3 \cdot \Delta X_a - \cos \alpha_3 \cdot \Delta Y_a)]} \\
 R_{a4} &= \sqrt{[R_4^2 + \Delta X_a^2 + \Delta Y_a^2 + 2 \cdot R_4 \cdot (\sin \alpha_4 \cdot \Delta X_a - \cos \alpha_4 \cdot \Delta Y_a)]} \\
 \cos \alpha_{a1} &= (R_1 \cdot \cos \alpha_1 - \Delta Y_a) / R_{a1} \cdot \cos \theta_a + (R_1 \cdot \sin \alpha_1 + \Delta X_a) / R_{a1} \cdot \sin \theta_a \\
 \cos \alpha_{a2} &= (R_2 \cdot \cos \alpha_2 - \Delta Y_a) / R_{a2} \cdot \cos \theta_a + (R_2 \cdot \sin \alpha_2 + \Delta X_a) / R_{a2} \cdot \sin \theta_a \\
 \cos \alpha_{a3} &= (R_3 \cdot \cos \alpha_3 - \Delta Y_a) / R_{a3} \cdot \cos \theta_a + (R_3 \cdot \sin \alpha_3 + \Delta X_a) / R_{a3} \cdot \sin \theta_a \\
 \cos \alpha_{a4} &= (R_4 \cdot \cos \alpha_4 - \Delta Y_a) / R_{a4} \cdot \cos \theta_a + (R_4 \cdot \sin \alpha_4 + \Delta X_a) / R_{a4} \cdot \sin \theta_a \\
 R_{b1} &= \sqrt{[R_1^2 + \Delta X_b^2 + \Delta Y_b^2 + 2 \cdot R_1 \cdot (\sin \alpha_1 \cdot \Delta X_b - \cos \alpha_1 \cdot \Delta Y_b)]} \\
 R_{b2} &= \sqrt{[R_2^2 + \Delta X_b^2 + \Delta Y_b^2 + 2 \cdot R_2 \cdot (\sin \alpha_2 \cdot \Delta X_b - \cos \alpha_2 \cdot \Delta Y_b)]} \\
 R_{b3} &= \sqrt{[R_3^2 + \Delta X_b^2 + \Delta Y_b^2 + 2 \cdot R_3 \cdot (\sin \alpha_3 \cdot \Delta X_b - \cos \alpha_3 \cdot \Delta Y_b)]} \\
 R_{b4} &= \sqrt{[R_4^2 + \Delta X_b^2 + \Delta Y_b^2 + 2 \cdot R_4 \cdot (\sin \alpha_4 \cdot \Delta X_b - \cos \alpha_4 \cdot \Delta Y_b)]} \\
 \cos \alpha_{b1} &= (R_1 \cdot \cos \alpha_1 - \Delta Y_b) / R_{b1} \cdot \cos \theta_b + (R_1 \cdot \sin \alpha_1 + \Delta X_b) / R_{b1} \cdot \sin \theta_b \\
 \cos \alpha_{b2} &= (R_2 \cdot \cos \alpha_2 - \Delta Y_b) / R_{b2} \cdot \cos \theta_b + (R_2 \cdot \sin \alpha_2 + \Delta X_b) / R_{b2} \cdot \sin \theta_b \\
 \cos \alpha_{b3} &= (R_3 \cdot \cos \alpha_3 - \Delta Y_b) / R_{b3} \cdot \cos \theta_b + (R_3 \cdot \sin \alpha_3 + \Delta X_b) / R_{b3} \cdot \sin \theta_b \\
 \cos \alpha_{b4} &= (R_4 \cdot \cos \alpha_4 - \Delta Y_b) / R_{b4} \cdot \cos \theta_b + (R_4 \cdot \sin \alpha_4 + \Delta X_b) / R_{b4} \cdot \sin \theta_b \\
 R_{c1} &= \sqrt{[R_1^2 + \Delta X_c^2 + \Delta Y_c^2 + 2 \cdot R_1 \cdot (\sin \alpha_1 \cdot \Delta X_c - \cos \alpha_1 \cdot \Delta Y_c)]} \\
 R_{c2} &= \sqrt{[R_2^2 + \Delta X_c^2 + \Delta Y_c^2 + 2 \cdot R_2 \cdot (\sin \alpha_2 \cdot \Delta X_c - \cos \alpha_2 \cdot \Delta Y_c)]} \\
 R_{c3} &= \sqrt{[R_3^2 + \Delta X_c^2 + \Delta Y_c^2 + 2 \cdot R_3 \cdot (\sin \alpha_3 \cdot \Delta X_c - \cos \alpha_3 \cdot \Delta Y_c)]} \\
 R_{c4} &= \sqrt{[R_4^2 + \Delta X_c^2 + \Delta Y_c^2 + 2 \cdot R_4 \cdot (\sin \alpha_4 \cdot \Delta X_c - \cos \alpha_4 \cdot \Delta Y_c)]} \\
 \cos \alpha_{c1} &= (R_1 \cdot \cos \alpha_1 - \Delta Y_c) / R_{c1} \cdot \cos \theta_c + (R_1 \cdot \sin \alpha_1 + \Delta X_c) / R_{c1} \cdot \sin \theta_c \\
 \cos \alpha_{c2} &= (R_2 \cdot \cos \alpha_2 - \Delta Y_c) / R_{c2} \cdot \cos \theta_c + (R_2 \cdot \sin \alpha_2 + \Delta X_c) / R_{c2} \cdot \sin \theta_c \\
 \cos \alpha_{c3} &= (R_3 \cdot \cos \alpha_3 - \Delta Y_c) / R_{c3} \cdot \cos \theta_c + (R_3 \cdot \sin \alpha_3 + \Delta X_c) / R_{c3} \cdot \sin \theta_c \\
 \cos \alpha_{c4} &= (R_4 \cdot \cos \alpha_4 - \Delta Y_c) / R_{c4} \cdot \cos \theta_c + (R_4 \cdot \sin \alpha_4 + \Delta X_c) / R_{c4} \cdot \sin \theta_c
 \end{aligned}$$

计算几何项:

$$\begin{aligned}
A &= \{\cos(\alpha_{a1})/2\pi R_{a1} - 1/2 \cos(\alpha_{a2})/2\pi R_{a2} - 1/2 \cos(\alpha_{a3})/2\pi R_{a3}\} \\
B &= \{-\sqrt{3}/2 \cos(\alpha_{a2})/2\pi R_{a2} + \sqrt{3}/2 \cos(\alpha_{a3})/2\pi R_{a3}\} \\
C &= \{\cos(\alpha_{a1})/2\pi R_{a1} + \cos(\alpha_{a2})/2\pi R_{a2} + \cos(\alpha_{a3})/2\pi R_{a3} - 3\lambda \cos(\alpha_{a4})/2\pi R_{a4}\} \\
D &= \{\cos(\alpha_{b1})/2\pi R_{b1} - 1/2 \cos(\alpha_{b2})/2\pi R_{b2} - 1/2 \cos(\alpha_{b3})/2\pi R_{b3}\} \\
E &= \{-\sqrt{3}/2 \cos(\alpha_{b2})/2\pi R_{b2} + \sqrt{3}/2 \cos(\alpha_{b3})/2\pi R_{b3}\} \\
F &= \{\cos(\alpha_{b1})/2\pi R_{b1} + \cos(\alpha_{b2})/2\pi R_{b2} + \cos(\alpha_{b3})/2\pi R_{b3} - 3\lambda \cos(\alpha_{b4})/2\pi R_{b4}\} \\
G &= \{\cos(\alpha_{c1})/2\pi R_{c1} - 1/2 \cos(\alpha_{c2})/2\pi R_{c2} - 1/2 \cos(\alpha_{c3})/2\pi R_{c3}\} \\
H &= \{-\sqrt{3}/2 \cos(\alpha_{c2})/2\pi R_{c2} + \sqrt{3}/2 \cos(\alpha_{c3})/2\pi R_{c3}\} \\
I &= \{\cos(\alpha_{c1})/2\pi R_{c1} + \cos(\alpha_{c2})/2\pi R_{c2} + \cos(\alpha_{c3})/2\pi R_{c3} - 3\lambda \cos(\alpha_{c4})/2\pi R_{c4}\}
\end{aligned}$$

对前述项的 3×3 矩阵求逆, 得到几何因子:

$$\begin{aligned}
\Delta &= A.(E.I - F.H) + B.(F.G - D.I) + C.(D.H - E.G) \\
\Delta_{1a} &= (E.I - F.H) / \Delta \\
\Delta_{1b} &= (H.C - B.I) / \Delta \\
\Delta_{1c} &= (B.F - C.E) / \Delta \\
\Delta_{2a} &= (F.G - D.I) / \Delta \\
\Delta_{2b} &= (A.I - C.G) / \Delta \\
\Delta_{2c} &= (C.D - A.F) / \Delta \\
\Delta_{3a} &= (D.H - E.G) / \Delta \\
\Delta_{3b} &= (B.G - A.H) / \Delta \\
\Delta_{3c} &= (A.E - B.D) / \Delta
\end{aligned}$$

这些几何尺寸计算仅在设备建立或者如果设备移动、例如在移动单元的场

5 合进行。

瞬时值:

用线圈读数 $H_a(t)$, $H_b(t)$ 和 $H_c(t)$ 变换读数, 以便消除几何尺寸:

$$\begin{aligned}
h_1(t) &= \Delta_{1a} \cdot H_a(t) + \Delta_{1b} \cdot H_b(t) + \Delta_{1c} \cdot H_c(t) \\
h_2(t) &= \Delta_{2a} \cdot H_a(t) + \Delta_{2b} \cdot H_b(t) + \Delta_{2c} \cdot H_c(t) \\
h_3(t) &= \Delta_{3a} \cdot H_a(t) + \Delta_{3b} \cdot H_b(t) + \Delta_{3c} \cdot H_c(t) \\
h_{12}(t) &= h_1(t) \cdot h_2(t) \\
h_{13}(t) &= h_1(t) \cdot h_3(t) \\
h_{23}(t) &= h_2(t) \cdot h_3(t)
\end{aligned}$$

由 h_1 , h_2 , h_3 , h_{12} , h_{13} 和 h_{23} 求得 rms 值, 即

$$h_1 = \sqrt{[\sum_1^N h_1^2(t)] / N}, \text{ etc.}$$

10

时序电流:

用 h_1 , h_2 , h_3 , h_{12} , h_{13} 和 h_{23} 求得时序电流值:

$$\begin{aligned}
\chi &= (h_1^2 + h_2^2) / 2 \\
\delta &= \sqrt{[(h_1^2 - h_2^2)^2 / 4 + h_{12}^2]} \\
I_+ &= \frac{1}{2} \{ \sqrt{[\chi + \delta]} + \sqrt{[\chi - \delta]} \} \\
I_- &= \frac{1}{2} \{ \sqrt{[\chi + \delta]} - \sqrt{[\chi - \delta]} \} \\
I_0 &= h_3 \\
\sin \theta_+ &= h_{12} / (2 \cdot I_+ \cdot L) \\
\cos \theta_+ &= (h_1^2 - h_2^2) / (4 \cdot I_+ \cdot L) \\
\varepsilon &= h_{13} / (h_1 \cdot h_3) \\
\gamma &= h_{23} / (h_2 \cdot h_3) \\
W &= (I_+ + I_- \cos \theta_+) / h_1 \\
X &= L \sin (\theta_+) / h_1 \\
Y &= (I_+ - I_- \cos \theta_+) / h_2 \\
Z &= -L \sin (\theta_+) / h_2 \\
\sin (\theta_0) &= (Z \cdot \varepsilon + W \cdot \gamma) / (W \cdot Y + X \cdot Z) \\
\cos (\theta_0) &= (Y \cdot \varepsilon - X \cdot \gamma) / (W \cdot Y + X \cdot Z)
\end{aligned}$$

导线电流:

用 I_+ , I_- , I_0 , $\sin \theta_+$, $\cos \theta_+$, $\sin (\theta_0)$, $\cos (\theta_0)$ 得到各个导线电流:

$$\begin{aligned}
I_R &= \sqrt{[(I_+ + I_- \cos (\theta_+) + I_0 \cos (\theta_0))^2 + (I_- \sin (\theta_+) + I_0 \sin (\theta_0))^2]} \\
I_Y &= \sqrt{[(I_+ + I_- (-\frac{1}{2} \cos (\theta_+) + \sqrt{3}/2 \sin (\theta_+)) + I_0 (-\frac{1}{2} \cos (\theta_0) - \sqrt{3}/2 \sin (\theta_0)))^2 + \\
&\quad (I_- (-\frac{1}{2} \sin (\theta_+) - \sqrt{3}/2 \cos (\theta_+)) + I_0 (-\frac{1}{2} \sin (\theta_0) + \sqrt{3}/2 \cos (\theta_0)))^2]} \\
I_B &= \sqrt{[(I_+ + I_- (-\frac{1}{2} \cos (\theta_+) - \sqrt{3}/2 \sin (\theta_+)) + I_0 (-\frac{1}{2} \cos (\theta_0) + \sqrt{3}/2 \sin (\theta_0)))^2 + \\
&\quad (I_- (-\frac{1}{2} \sin (\theta_+) + \sqrt{3}/2 \cos (\theta_+)) + I_0 (-\frac{1}{2} \sin (\theta_0) - \sqrt{3}/2 \cos (\theta_0)))^2]} \\
I_N &= 3 \lambda I_0
\end{aligned}$$

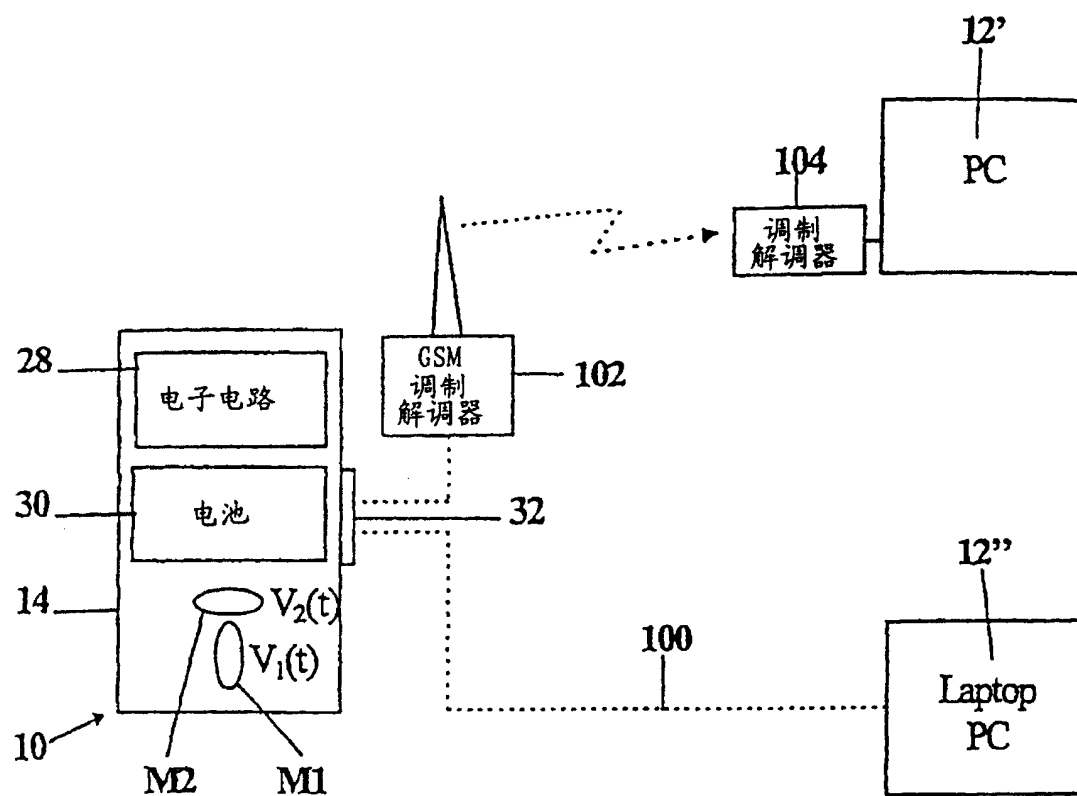


图 1

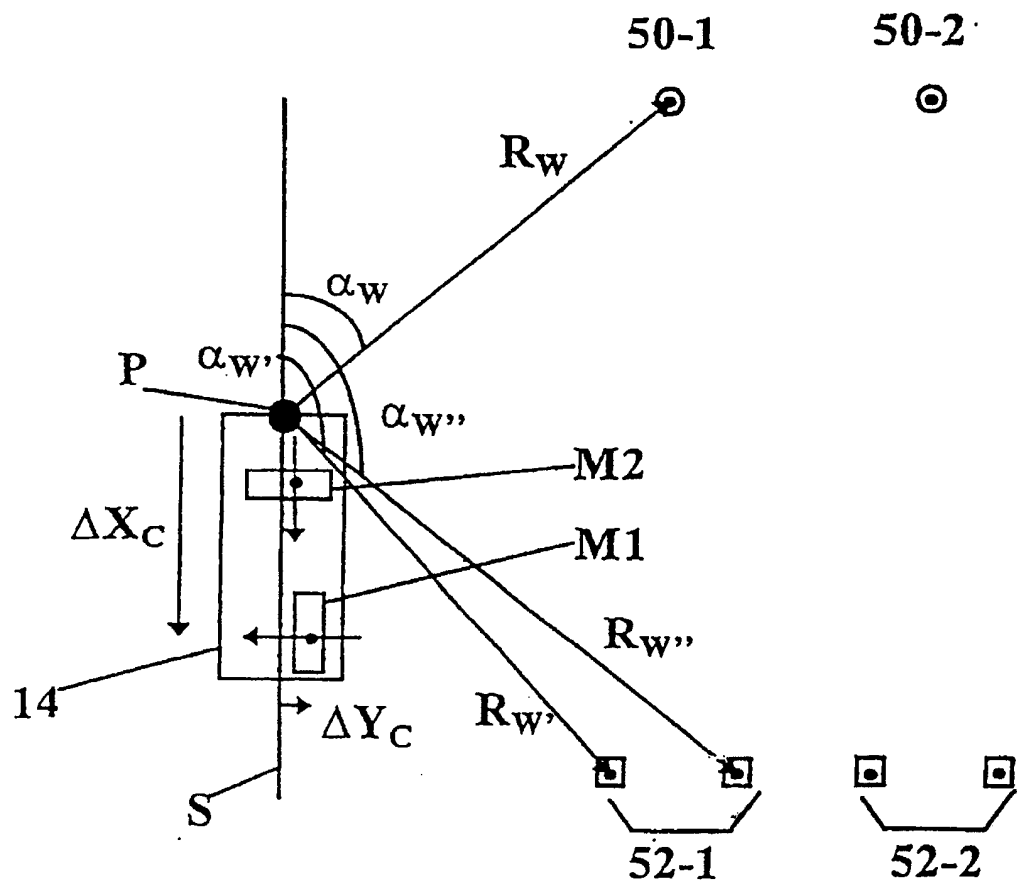


图 2

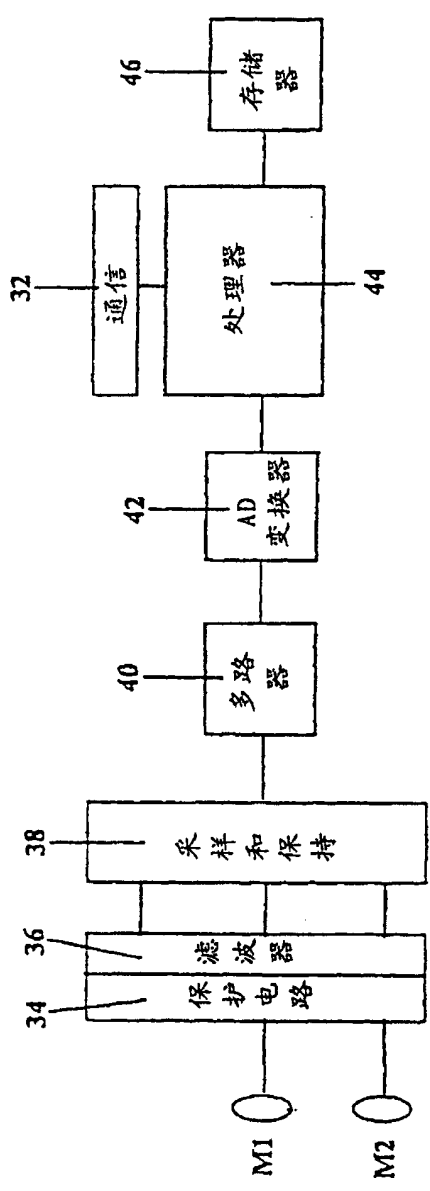


图 3

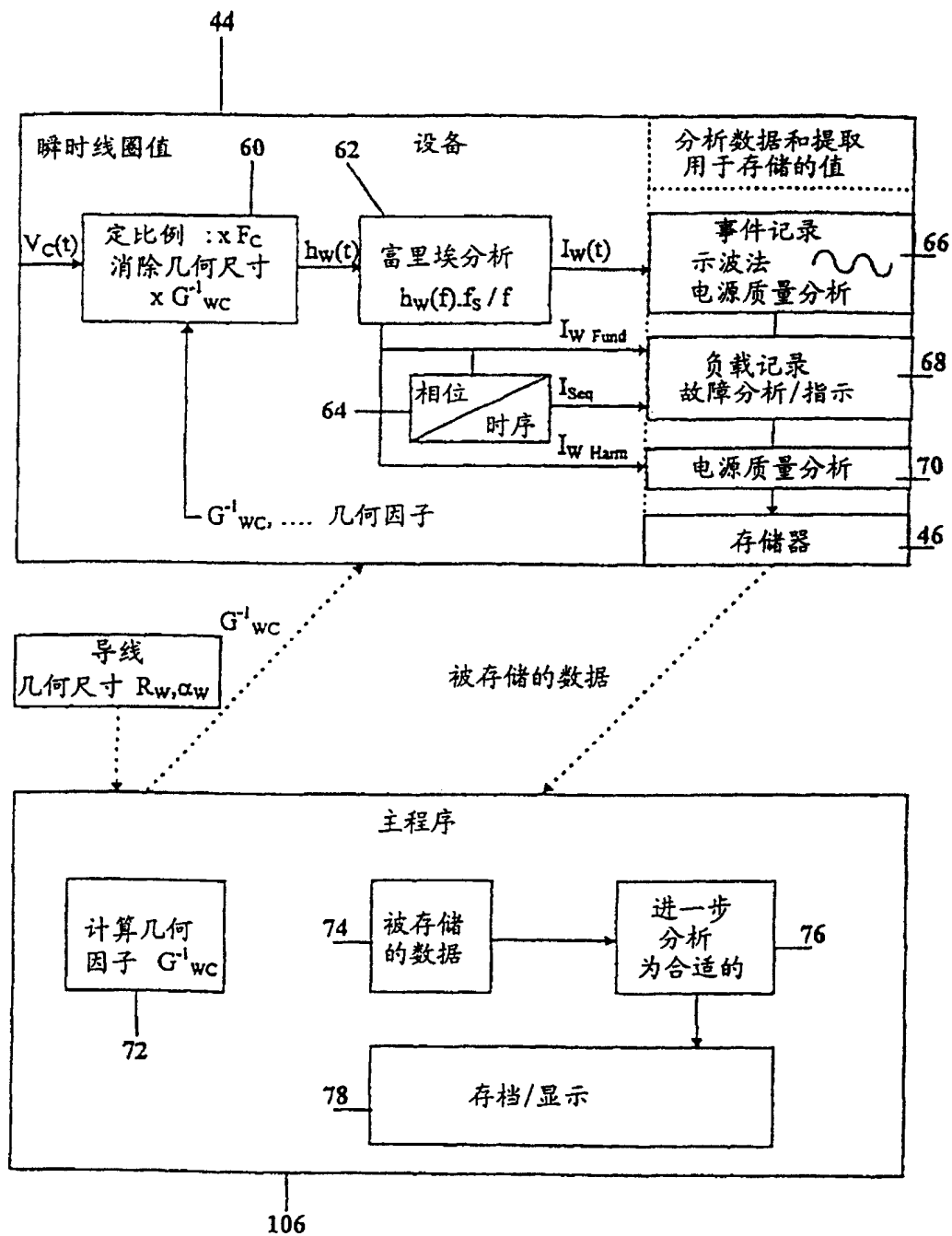


图 4

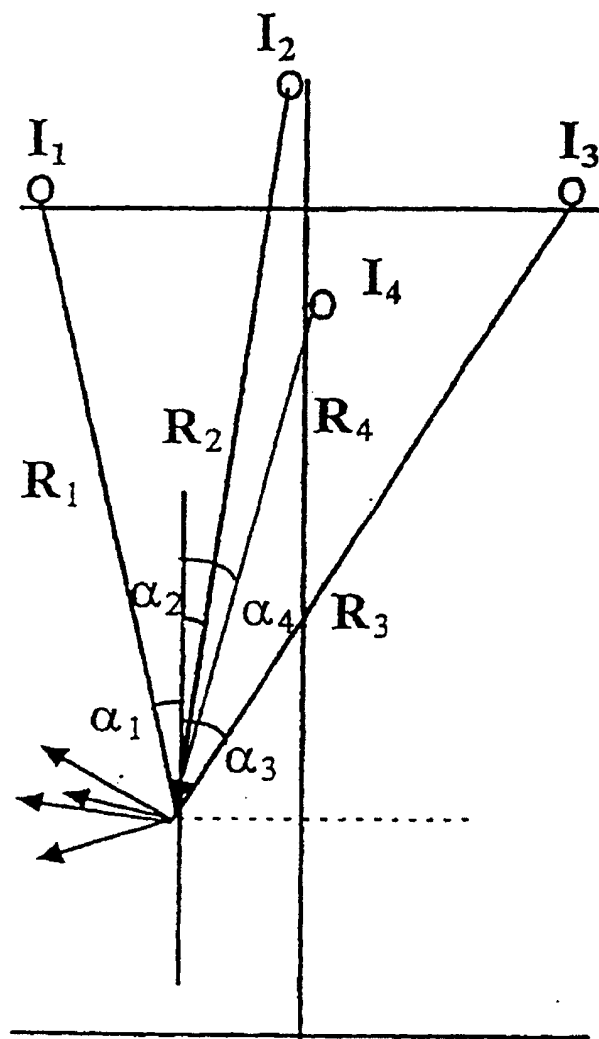


图 5

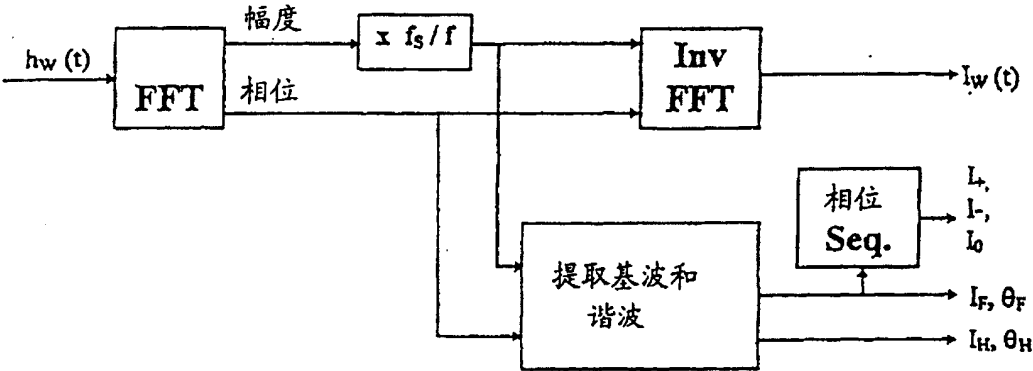


图 6

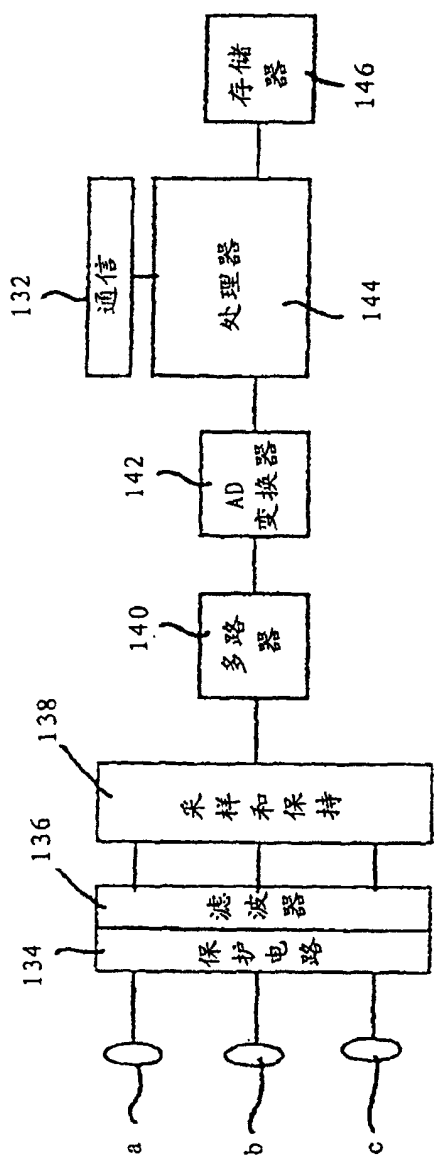


图 9

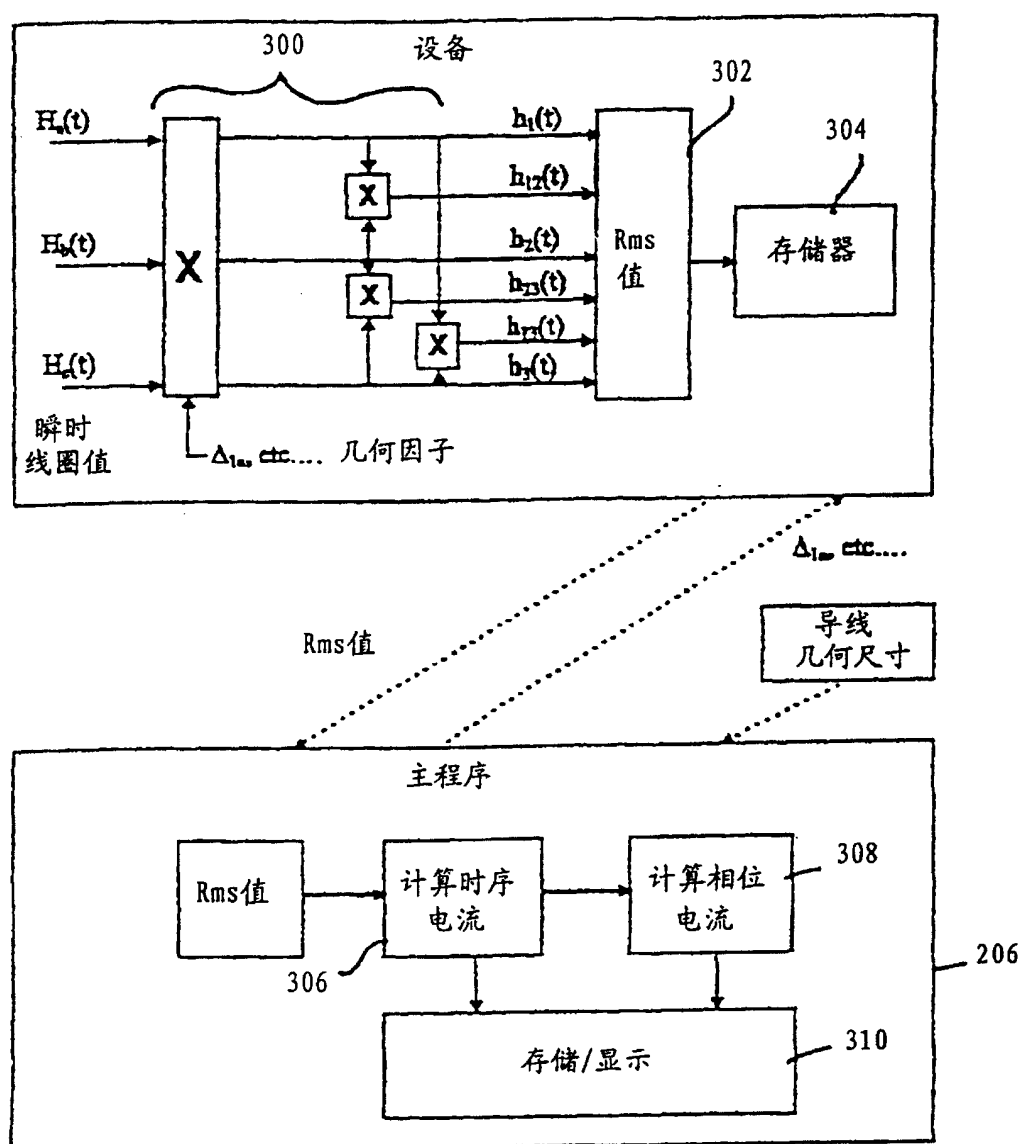


图 10