

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G01R 15/18 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200480014112.7

[45] 授权公告日 2009年3月18日

[11] 授权公告号 CN 100470249C

[22] 申请日 2004.3.29

[21] 申请号 200480014112.7

[30] 优先权

[32] 2003.3.27 [33] IE [31] S2003/0227

[86] 国际申请 PCT/IE2004/000048 2004.3.29

[87] 国际公布 WO2004/086063 英 2004.10.7

[85] 进入国家阶段日期 2005.11.22

[73] 专利权人 苏派鲁尔斯有限公司

地址 爱尔兰利默里克郡

[72] 发明人 托马斯·索伦森

[56] 参考文献

US5473244A 1995.12.5

JP6-43189A 1994.2.18

WO0179869A1 2001.10.25

US5652506A 1997.7.29

审查员 时 鹏

[74] 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

代理人 黄小临 王志森

权利要求书 2 页 说明书 14 页 附图 8 页

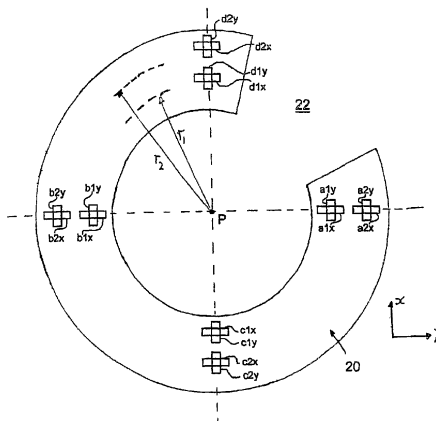
[54] 发明名称

用于测量电缆中的交流电电流的装置

[57] 摘要

一种用于测量在导线中的交流电流的装置，所述装置包括第一和第二线圈部件 a_{1x} 、 d_{1x} ，它们具有大致相同的匝数面积乘积和大致平行的轴，所述第一和第二线圈部件位于一个圆的圆周上，并且第一线圈部件的轴与所述圆相切，第二线圈部件的轴在圆的径向延伸，所述装置还包括第三和第四线圈部件 a_{1y} 、 d_{1y} ，它们也具有大致相同的匝数面积乘积和大致平行的轴，所述第三和第四线圈部件位于所述同一圆的圆周上，并且分别靠近第一和第二线圈部件，但是它们的轴与其正交。所述线圈被安装在支撑部件(20)上，所述支撑部件被配置来使得导线可以被引入所述圆的中心，并且所述导线的轴与包含所述线圈的平面垂直。所述第一和第二线圈部件反相串联，并且将第三和第四线圈部件反相串联，在所述导线中的交流电流被得出，它作为在串联的第

一和第二线圈部件和串联的第三和第四线圈部件中的感应的电压的函数。另外的线圈被提供来用于干扰抑制和信号增强。



1. 一种用于测量在导线中的交流电流的装置, 所述装置包括第一和第二线圈部件, 它们具有大致相同的匝数面积乘积和大致平行的轴, 所述第一和第二线圈部件位于一个假想圆的圆周上, 并且第一线圈部件的轴与所述圆相切, 第二线圈部件的轴在圆的径向上延伸, 所述装置还包括第三和第四线圈部件, 它们也具有大致相同的匝数面积乘积和大致平行的轴, 所述第三和第四线圈部件位于所述假想圆的圆周上, 并且分别靠近第一和第二线圈部件, 第三线圈部件的轴在圆的径向上延伸, 第四线圈部件的轴与所述圆相切, 以便第一和第三线圈部件形成具有大致正交的轴的紧密相邻的第一对线圈部件, 第二和第四线圈部件形成具有大致正交的轴的紧密相邻的第二对线圈部件, 所述第一到第四线圈部件被安装在一个支撑部件上, 所述支撑部件被配置来使得导线可以被引入所述圆的中心, 并且所述导线的轴与包含第一到第四线圈部件的平面垂直, 所述装置还包括将第一和第二线圈部件反相串联电连接并且将第三和第四线圈部件反相串联电连接的部件、用于得出在所述导线中的交流电流的部件, 所述交流电流作为在串联的第一和第二线圈部件和串联的第三和第四线圈部件中的感应的电压的函数。

2. 按照权利要求 1 的装置, 还包括第五和第六线圈部件, 它们具有大致相同的匝数面积乘积和大致平行的轴, 所述第五和第六线圈部件位于第二假想圆的圆周上, 所述第二假想圆与第一假想圆同心并且具有比其大的直径, 第五线圈部件位于第一线圈部件的径向外外部, 并且其轴与所述第二圆相切, 第六线圈部件位于第二线圈部件的径向外外部, 并且其轴在所述第二圆的径向上延伸, 所述装置还包括第七和第八线圈部件, 它们也具有大致相同的匝数面积乘积和大致平行的轴, 所述第七和第八线圈部件位于第二假想圆的圆周上, 所述第七和第八线圈部件位于所述第二假想圆的圆周上, 并且分别靠近第五和第六线圈部件, 第七线圈部件的轴在第二圆的径向上延伸, 第八线圈部件的轴与所述第二圆相切, 以便第五和第七线圈部件形成具有大致正交的轴的紧密相邻的第三对线圈部件, 第六和第八线圈部件形成具有大致正交的轴的紧密相邻的第四对线圈部件, 所述装置还包括将第五和第六线圈部件反相串联电连接并且将第七和第八线圈部件反相串联电连接的部件、用于得出在所述导线中的交流电流的部件, 所述交流电流作为在串联的第一和第二线

圈部件、串联的第三和第四线圈部件、串联的第五和第六线圈部件和串联的第七和第八线圈部件中的感应的电压的函数。

3. 按照权利要求1的装置，其中，每对正交线圈部件具有大致相同的一对正交线圈部件，它们对称地位于在第一假想圆的中心的完全相对的侧上，并且与其对称对方具有相同的方向，每个线圈部件和与其对称对方同相串联。

4. 按照权利要求1的装置，其中，所有的线圈部件具有大致相同的匝数面积乘积。

5. 按照权利要求4的装置，其中，所有线圈部件的匝数面积乘积相同，误差在1%内。

6. 按照前述的任何权利要求的装置，其中，每个线圈部件被形成为在至少一个绝缘基底上的导电线圈形成的轨道，并且所述支撑部件包括绝缘母板，所述基底垂直直立在所述板上，并且在所述基底上的线圈形成轨道通过在母板上的导电轨道而连接。

7. 按照权利要求6的装置，其中，至少一对正交线圈部件包括：第一绝缘基底，用于承载第一线圈形成轨道，所述第一线圈形成轨道限定所述一对的正交线圈部件之一；第二和第三绝缘基底，它们与第一基底大致垂直设置，并且分别承载第二和第三线圈形成轨道，所述第二和第三线圈形成轨道串联在一起，并且一起限定所述一对正交线圈部件的另一个。

8. 按照权利要求7的装置，其中，第二和第三线圈形成轨道具有与第一线圈形成轨道大致相同的组合匝数面积乘积。

9. 按照权利要求6的装置，其中，至少两个线圈形成轨道被形成在一个公共的基底上。

用于测量电缆中的交流电电流的装置

技术领域

本发明涉及一种用于测量在电缆，例如交流电电力网电缆中流动的交流电电流的装置。

背景技术

在美国专利 5,652,506 中描述了测量在两条或三条圆形芯缆中的电流的现有技术的当前状态。图 1 示出了在这种现有的装置中使用的线圈结构的一部分。

在上述结构中总共使用了 8 个由相同的导线缠绕的线圈。为了清楚，仅仅在图 1 中示出了这些线圈中的四个线圈。所示出的四个线圈仅仅从电缆 10 拾取磁场的 x 分量 H_x 。在本图中未示出的另外四个相同的线圈位于与所示出的四个线圈相同的中心上；但是，它们在与所示出的四个线圈的平面垂直的平面上被缠绕，以便仅仅拾取磁场的 y 分量 H_y 。

线圈 1 和线圈 2 是磁场的 H_x 分量的主要拾波线圈，并且同相地连接。线圈 3 和线圈 4 与线圈 1 和线圈 2 反相地连接。线圈 3 和线圈 4 仅仅用于减小来自所述线圈结构外部的其它可能干扰电流源的杂散磁场的拾取。

线圈 1 和线圈 2 从要被测量的电流源的磁场拾取大于线圈 3 和线圈 4 的拾取，这是因为线圈 3 和 4 离所述电流源更远。因此，当从线圈 1 和 2 减去来自线圈 3 和 4 的输出时，结果不为零。因此，在放大器 AMP1 的输入上存在与来自电流源的磁场的 H_x 分量成比例的电压拾取。

但是，对于在线圈结构外部并且离该线圈结构更远的源，在线圈附近所产生的磁场在幅度和方向上更为均匀，并且来自线圈 3 和 4 的拾取几乎完全抵消了来自线圈 1 和 2 的拾取，这大大地降低了由于在装置附近的其它干扰电流源而导致的任何误差。

在放大器 AMP1 的输出上，存在电压 V_x ，所述电压 V_x 与由在电缆 10 的一条导线中流出并且在另一条导线中返回的电流所产生的磁场分量 H_x 成

比例。

拾取 H_y 分量的另外四个线圈与所示出的四个线圈相同地连接，并且被未示出的类似的放大器 AMP2 独立地放大。因此，在 AMP2 的输出上，存在电压 V_y ，它与磁场的 H_y 分量成比例。

在这个阶段，检查由在电缆 10 的一条导线中流出并且在所述电缆的第二条导线中返回的电流 I 产生的磁场的 H_x 和 H_y 分量是有益的，所述电缆的第二条导线与第一条导线相距 d ，如图 2 所示。目前，假定所述两条导线在沿着电缆长度方向延伸时不扭绞或旋转。

因为电缆是圆形的，不能获得关于所述线圈与导线的方位角 θ 的信息，并且将 θ 作为变量。在这些情况下

$$H_x = \frac{Id \cos \theta \sin \theta}{\pi r^2 \left[\left(1 + \frac{d^2}{4r^2}\right)^2 - \frac{d^2}{r^2} \sin^2 \theta \right]} \quad \text{方程 (1)}$$

$$H_y = \frac{Id \left(\sin^2 \theta - \frac{1}{2} - \frac{d^2}{8r^2} \right)}{\pi r^2 \left[\left(1 + \frac{d^2}{4r^2}\right)^2 - \frac{d^2}{r^2} \sin^2 \theta \right]} \quad \text{方程 (2)}$$

返回图 1，如果线圈 1 与承载电流的导线的角度是 θ ，则与线圈 1 完全相对地设置的线圈 2 与所述导线具有角度 $\theta + 180^\circ$ ，并且从方程 1 看出，对于角度 θ 和 $\theta + 180^\circ$ ， H_x 相同。因此，当线圈 1 和线圈 2 同相连接时，拾取电压是这些线圈之一本身的拾取电压的两倍。

如方程 (2) 所示，类似的分析被应用到用于拾取磁场的 H_y 分量的其它线圈。

如果随后从分别由方程 (1) 和 (2) 给出的 H_x 和 H_y 分量计算磁场的幅度 $|H|$ ，则获得下面的结果：

$$|H| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2} = \frac{Id}{2\pi r^2} \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{d^2}{4r^2}\right)^2 - \frac{d^2}{r^2} \sin^2 \theta}} \quad \text{方程 (3)}$$

现在，AMP1 的输出电压 V_x 与 H_x 成比例，而 AMP2 的输出电压 V_y 与 H_y 成比例。

从 V_x 和 V_y 如下求 V 的值：

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = K |H| = \frac{KId}{2\pi r^2} \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{d^2}{4r^2}\right)^2 - \frac{d^2}{r^2} \sin^2 \theta}} \quad \text{方程 (4)}$$

其中， K 是不变的，它依赖于线圈的面积和匝数以及放大器增益。

所计算的电压 V 在 $\theta = 90^\circ$ 最大, 并且通过

$$V_{\max} = \frac{KId}{2\pi r^2(1 - \frac{d^2}{4r^2})} \quad \text{方程 (5)}$$

给出, 并且 V 在 $\theta = 0^\circ$ 最小

$$V_{\min} = \frac{KId}{2\pi r^2(1 + \frac{d^2}{4r^2})} \quad \text{方程 (6)}$$

V 的平均值大约是

$$V = \frac{KId}{2\pi r^2} \quad \text{方程 (7)}$$

方程 (7) 是用于求取电流 I 的方程, 因为 K 和 r 是已知的, 并且在前述的专利技术中可以相当精确地估计 d 。

但是, 对于固定的 I , 当在电缆周围的线圈位置改变时, 在所测量的电压 V 中存在固有的变化, 如方程 (5) 和 (6) 所示。来自方程 (7) 的最大变化依赖于 $d^2/4r^2$ 的值。对于 $d/r = 1/2$, 有 $\pm 6.3\%$ 的最大变化 (误差)。对于 $d/r < 1/2$, 在理论上, 所述变化 (误差) 较小。但是, 实际上, 在圆形电缆中可以使用这个前述的装置获得的最佳精度是 $\pm 11\%$ 的级别。

性能比方程 (4) 所示差的原因主要是由于这样的事实: 在圆形电缆中, 导线在它们沿着电缆长度方向延伸时扭绞, 在导出方程 (4) 中假定导线平行并且沿着电缆是直的。

方程 (4) 指示当角度 $\theta = 90^\circ$ 时出现最大的拾取, 而当角度 $\theta = 0^\circ$ 时出现最小的拾取。当导线扭绞到超过某一极限时, 这个结果本身相反, 使得在 $\theta = 0^\circ$ 时出现最大拾取, 而在 $\theta = 90^\circ$ 时出现最小拾取。当线圈围绕扭绞的导体来回移动时, 这个前述的装置的拾取中的变化依赖于扭绞率、间隔 d 和到线圈的距离 r 。

如果对于图 1 所示的线圈结构从 $V = \sqrt{(V_x^2 + V_y^2)}$ 来计算 V , 则当线圈围绕电缆旋转时在读数中的变化在电缆之间不同, 但是可以超过 $\pm 15\%$ 。

发明内容

因此, 图 1 所示的线圈结构在精度上受到限制, 本发明的目的是提供一种能够提供更大精度的新装置。

通过在权利要求 1 中所述的本发明来实现所述目的。在从属权利要求中

说明了本发明的优选实施例。

在本说明书中，线圈的轴表示相对于线圈的方向，其在与通过线圈的波动磁场的方向平行时将提供那个磁场在线圈中的最大感应电压。

附图说明

现在参照附图通过举例来说明本发明的一个实施例，其中：

前述的图 1 示出了现有技术装置的一部分。

图 2 是辅助理解现有技术的操作和限制的图。

图 3 是本发明的一个基本实施例的线圈结构的示意图。

图 4 是图解干扰源的效果的、图 3 的实施例的图。

图 5 是图 3 的实施例的进一步发展。

图 6 示出了抑制了干扰的本发明的一个实施例。

图 7 是图 6 的实施例的电路图。

图 8 示出了图 6 的正交线圈的替代结构。

具体实施方式

如上所述，图 1 中所示的装置的线圈 1 和 2 拾取磁场的 H_x 分量。这些线圈也在图 3 中所示的装置中存在，图 3 是本发明的一个基本实施例的线圈结构的电路图，但是所述线圈在那里被称为线圈 a_x 和 b_x 。图 3 的装置也包括另外两个线圈 c_x 和 d_x ，它们也拾取磁场的 H_x 分量。这两个另外的线圈 c_x 和 d_x 位于与线圈 a_x 和 b_x 距离电缆 10 的中心的距离相同的距离上，但是位于电缆的上方和下方，以便联结线圈 a_x 和线圈 b_x 的线与联结线圈 c_x 和线圈 d_x 的线成 90° 。因此，所有四个线圈 a_x 到 d_x 位于一个平面中，所述平面与电缆 10 的轴垂直，所有四个线圈 a_x 到 d_x 位于半径为 r 的假想圆(notional circle)的圆周上，所述圆的中心与电缆 10 同轴。所有四个线圈 a_x 到 d_x 具有大致平行的轴；因此线圈 a_x 和 b_x 的轴与假想圆相切，而线圈 c_x 和 d_x 的轴沿着假想圆的径向延伸。所有四个线圈 a_x 到 d_x 具有大致相同的匝数面积乘积(turns-area product)。

因此，参照图 2，如果线圈 a_x 与电缆 10 的两条导线成角度 θ ，则线圈 d_x 成 $90^\circ + \theta$ ，线圈 b_x 成 $180^\circ + \theta$ ，线圈 c_x 成 $270^\circ + \theta$ 。如果所述线圈以下述的方式

在正确的极性上串联,则本装置相对于前述装置的优点是拾取每旋转 90° 重复其本身,因此在 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 的拾取相同。在前述的装置中,在 $\theta = 0^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$, 出现在读数之间的最大变化。

现在使用方程 (1) 来检查在围绕平行的一对导线的四个线圈 a_x 到 d_x 的每个上发生的、磁场的 H_x 分量的拾取中的变化,如图 3 所示。

如果线圈 a_x 与所述导线对的角度是 θ , 则通过方程 (1) 给出在线圈 a_x 的 H_x 如下:

$$H_x(a_x) = \frac{Id \cos \theta \sin \theta}{\pi r^2 \left[\left(1 + \frac{d^2}{4r^2}\right)^2 - \frac{d^2}{r^2} \sin^2 \theta \right]} \quad \text{方程 (8)}$$

对于线圈 d_x , 它与导线的角度是 $90^\circ + \theta$, 并且从方程 (1) 再次获得的那里的 H_x 分量是

$$H_x(d_x) = - \frac{Id \cos \theta \sin \theta}{\pi r^2 \left[\left(1 + \frac{d^2}{4r^2}\right)^2 - \frac{d^2}{r^2} \cos^2 \theta \right]} \quad \text{方程 (9)}$$

对于线圈 b_x , 它与导线的角度是 $180^\circ + \theta$, 因此

$$H_x(b_x) = \frac{Id \cos \theta \sin \theta}{\pi r^2 \left[\left(1 + \frac{d^2}{4r^2}\right)^2 - \frac{d^2}{r^2} \sin^2 \theta \right]} \quad \text{方程 (10)}$$

对于线圈 c_x , 它的角度是 $270^\circ + \theta$, 得到

$$H_x(c_x) = - \frac{Id \cos \theta \sin \theta}{\pi r^2 \left[\left(1 + \frac{d^2}{4r^2}\right)^2 - \frac{d^2}{r^2} \cos^2 \theta \right]} \quad \text{方程 (11)}$$

线圈 a_x 到 d_x 以下列极性全部串联。线圈 a_x 和 b_x 具有同相的连接, 线圈 c_x 和 d_x 与线圈 a_x 和 b_x 反相地连接, 因此, 在线圈 a_x 到 d_x 的串联中感应的电压 $V(x)$ 与

$$H_x(a_x) + H_x(b_x) - H_x(c_x) - H_x(d_x)$$

成比例。

代入来自方程 (8)、(9)、(10) 和 (11) 的这些磁场的值并且化简得到

$$H_x(a_x) + H_x(b_x) - H_x(c_x) - H_x(d_x) = \frac{4Id \cos \theta \sin \theta \left(1 + \frac{d^4}{16r^4}\right)}{\pi r^2 \left[\left(1 + \frac{d^2}{4r^2}\right)^2 - \frac{d^2}{r^2} \cos^2 \theta \right] \left[\left(1 + \frac{d^2}{4r^2}\right)^2 - \frac{d^2}{r^2} \sin^2 \theta \right]} \quad \text{方程 (12)}$$

图 3 的结构也包括另外四个线圈 a_y 、 b_y 、 c_y 和 d_y , 每个具有与线圈 a_x 到 d_x 的每个大致相同的匝数面积乘积。每个线圈 a_y 到 d_y 只要物理上实用都可以

位于与线圈 a_x 到 d_x 的对应的一个相同的位置，但是其轴旋转 90° ，以便线圈 a_y 和 b_y 的轴与假想圆相切，而且线圈 c_y 和 d_y 的轴沿着假想圆径向延伸。因此，存在四对紧密定位的线圈 a_x/a_y 、 b_x/b_y 、 c_x/c_y 和 d_x/d_y ，并且在每对中的线圈具有大致垂直的轴。可以例如使用 US5,652,506 的图 9 中所示的线圈的垂直对来获得在同一位置的线圈 a_x/a_y 等的线圈对的这种紧密定位，但是，后面将说明使用 PCB 技术的替代结构。对于读者显然，线圈 a_y 到 d_y 的每个被定位来在相应的位置拾取由电缆 10 产生的磁场的 y 分量 H_y 。

设 $H_y(a_y)$ 是由线圈 a_y 拾取的磁场的 y 分量。

设 $H_y(b_y)$ 是由线圈 b_y 拾取的磁场的 y 分量。

设 $H_y(c_y)$ 是由线圈 c_y 拾取的磁场的 y 分量。

设 $H_y(d_y)$ 是由线圈 d_y 拾取的磁场的 y 分量。

从方程 (2)

$$H_y(a_y) = \frac{Id}{\pi r^2} \frac{(\sin^2 \theta - \frac{1}{2} - \frac{d^2}{8r^2})}{[(1 + \frac{d^2}{4r^2})^2 - \frac{d^2}{r^2} \sin^2 \theta]} \quad \text{方程 (13)}$$

$$H_y(d_y) = \frac{Id}{\pi r^2} \frac{(\cos^2 \theta - \frac{1}{2} - \frac{d^2}{8r^2})}{[(1 + \frac{d^2}{4r^2})^2 - \frac{d^2}{r^2} \cos^2 \theta]} \quad \text{方程 (14)}$$

$$H_y(b_y) = \frac{Id}{\pi r^2} \frac{(\sin^2 \theta - \frac{1}{2} - \frac{d^2}{8r^2})}{[(1 + \frac{d^2}{4r^2})^2 - \frac{d^2}{r^2} \sin^2 \theta]} \quad \text{方程 (15)}$$

$$H_y(c_y) = \frac{Id}{\pi r^2} \frac{(\cos^2 \theta - \frac{1}{2} - \frac{d^2}{8r^2})}{[(1 + \frac{d^2}{4r^2})^2 - \frac{d^2}{r^2} \cos^2 \theta]} \quad \text{方程 (16)}$$

拾取磁场的 H_y 分量的这四个线圈 a_y 到 d_y 以与拾取 H_x 分量的四个线圈 a_x 到 d_x 相同的极性串联；即线圈 a_y 和 b_y 同相串联，而线圈 c_y 和 d_y 以与线圈 a_y 和 b_y 相反的相位连接。为了避免图 3 过分复杂，在该附图中未示出在线圈 a_y 到 d_y 之间的连接。

因此，在所述串联中感应出与 $H_y(a_y) + H_y(b_y) - H_y(c_y) - H_y(d_y)$ 成比例的电压 $V(y)$ 。

代入来自方程 (13) 至 (16) 的这些磁场的值并且化简得到

$$H_y(a_y) + H_y(b_y) - H_y(c_y) - H_y(d_y) =$$

$$\frac{2Id}{\pi r^2} \frac{(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta)(1 - \frac{d^4}{16r^4})}{[(1 + \frac{d^2}{4r^2})^2 - \frac{d^2}{r^2} \sin^2 \theta][(1 + \frac{d^2}{4r^2})^2 - \frac{d^2}{r^2} \cos^2 \theta]} \quad \text{方程 (17)}$$

现在求得 V 为

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{V(x)^2 + V(y)^2} \\ &= K \sqrt{[Hx(a_x) + Hx(b_x) - Hx(c_x) - Hx(d_x)]^2 + [Hy(a_y) + Hy(b_y) - Hy(c_y) - Hy(d_y)]^2} \end{aligned} \quad \text{方程 (18)}$$

其中 K 同上是常数。

在方程 (18) 中代入方程 (12) 和 (17)，并且化简得到

$$V = \frac{2KId}{\pi r^2} \frac{1}{\sqrt{(1 - \frac{d^4}{4r^4})^2 + \frac{d^4}{r^4} \sin^2 \theta \cos^2 \theta}} \quad \text{方程 (19)}$$

当 $\theta = 45^\circ$ 时出现 V 的最小值，并且通过

$$V_{\text{MIN}} = \frac{2KdI}{\pi r^2 (1 + \frac{d^4}{16r^4})} \quad \text{方程 (20)}$$

而给出这个值。

当 $\theta = 0^\circ$ 或 $\theta = 90^\circ$ 时出现 V 的最大值，并且通过

$$V_{\text{MAX}} = \frac{2KdI}{\pi r^2 (1 - \frac{d^4}{16r^4})} \quad \text{方程 (21)}$$

而给出这个最大值。

平均值大约是

$$V_{\text{AV}} = \frac{2KdI}{\pi r^2} \quad \text{方程 (22)}$$

除了系数 4，新装置的方程 (22) 与前述装置的方程 (7) 完全相同。但是，当传感器旋转时前述装置从最大到最小的变化依赖于 $d^2/4r^2$ 的幅度，而对于新线圈结构，它依赖于 $d^4/16r^4$ 的幅度。因此，对于 $d/r = 1/2$ ，前述装置的读数改变 $\pm 6.3\%$ ，而新装置对于 $d/r = 1/2$ 仅仅改变 $\pm 0.4\%$ 。

与由方程 (4) 给出的前述装置相比较的、由方程 (19) 给出的使用新线圈结构的改善仅仅对于当沿着电缆长度方向延伸时不扭绞的导线是严格真实的。但是，所述新装置不太易于有由电缆旋转或导线扭绞引起的误差，并且对于该新线圈结构，当电缆旋转 360° 时，在 V 中记录的变化小于 2%。而前述装置当同一电缆在仪器的钳夹(jaw)中旋转时记录 15% 或更大的改变。

在图 1 所示的前述线圈结构中，线圈 3 和线圈 4 以与线圈 1 和线圈 2 相反的相位连接，并且它们的目的是减小来自在仪器附近的其它电流源的干扰的拾取。现在参照图 4 来查看图 3 所示的线圈结构的干扰拾取。

图 4 示出了位于半径 r 的圆上的线圈 a_x 到 d_x 。也示出了电缆 10，电缆 10 承载电流，并且位于两个可能的位置：位置 A 和位置 B。位置 A 是当进行电缆的电流 I 的测量时的电缆的位置。位置 B 示出了相同的电缆，位于与所述圆的中心的距离 r_1 上，承载相同的电流 I ，但是在所述线圈结构之外，其中它作为干扰源。所述线圈结构的干扰抑制 S 被定义为：

$$S = \frac{\text{在位置 B 的拾取}}{\text{在位置 A 的拾取}} \quad \text{方程 (23)}$$

S 的值越小，所述抑制越好。在位置 A 的拾取由方程 (22) 给出

$$\text{在位置 A 的拾取 } A = \frac{2KdI}{\pi r^2}$$

可以示出，由

$$\text{在位置 B 的拾取 } B = \frac{6r^2 KdI}{\pi(r_1^4 - r^4)} \quad \text{方程 (24)}$$

给出在位置 B 的拾取。因此

$$S = \frac{3r^4}{r_1^4 \left(1 - \frac{r^4}{r_1^4}\right)} \quad \text{方程 (25)}$$

可以从方程 (25) 看出， $\frac{r}{r_1}$ 的值越小，则抑制越好。

如果由于线圈和装置外壳而假定干扰源可以相距所述线圈结构最近的距离是 $r_1 = 2r$ ，则从方程 (25) 得到的 S 的最大值是 $S = 0.2$ 或 20%。当干扰源进一步移远时， S 相当快地减小，对于 $r_1 = 3r$ ， $S = 4\%$ ，而对于 $r_1 = 4r$ ， $S = 1\%$ 。这个最大值 20% 一般是不能接受的，并且通过使用下述技术而显著地减小。

从方程 (24) 注意到干扰拾取主要与 r^2 成比例，其中， r 是线圈相距所述中心的距离。因此考虑图 5 所示的情况。在这种结构中，使用两组线圈来拾取磁场的 H_x 分量，所述两组线圈是位于围绕半径 r 的圆的圆周并且以 90° 为间隔的内部组 a_{1x} 到 d_{1x} 、位于围绕半径 r_2 的圆——它与第一个圆同心——的圆周并且以 90° 为间隔的外部组 a_{2x} 到 d_{2x} 。所述四个内部线圈 a_{1x} 到 d_{1x} 对应于图 3 所示的线圈 a_x 到 d_x ，并且以相同的方式串联，所述四个外部线圈 a_{2x} 到 d_{2x} 也以图 3 所示的方式串联。每个外部线圈 a_{2x} 到 d_{2x} 位于与内部线圈 a_{1x} 到 d_{1x} 的对应一个相同的径向线上，并且所有 8 个线圈具有基本平行的轴和

基本相同的面积匝数乘积。

设 V_{1x} 是内部线圈组从距离为 r_1 的干扰源得到的拾取，它由 $r=r_1$ 情况下的方程 (24) 给出。

$$V_{1x} = \frac{6r_1^2 Kdl}{\pi(r_1^4 - r_1^4)} \quad \text{方程 (26)}$$

设 V_{2x} 是外部线圈组从同一干扰源得到的拾取。

$$V_{2x} = \frac{6r_2^2 Kdl}{\pi(r_1^4 - r_2^4)} \quad \text{方程 (27)}$$

为了减小来自这个干扰源的拾取，从内部电压减去外部电压的一小部分 $\frac{r_1^2}{r_2^2}$ 以得到 V_x ，其中

$$V_x = V_{1x} - \frac{r_1^2}{r_2^2} V_{2x} \quad \text{方程 (28)}$$

代入方程 (26) 和 (27) 得到

$$V_x = \frac{6r_1^2 Kdl}{\pi(r_1^4 - r_1^4)} - \frac{r_1^2}{r_2^2} \left[\frac{6r_2^2 Kdl}{\pi(r_1^4 - r_2^4)} \right]$$

化简得到

$$V_x = \frac{6Kdl r_1^2}{\pi r_1^8} \frac{(r_1^4 - r_2^4)}{(1 - \frac{r_1^4}{r_1^4})(1 - \frac{r_2^4}{r_1^4})} \quad \text{方程 (29)}$$

因为这是来自在距离 r_1 的干扰源的拾取，将这个电压称为 V_{xB} 。

$$\text{即 } V_{xB} = \frac{6Kdl r_1^2}{\pi r_1^8} \frac{(r_1^4 - r_2^4)}{(1 - \frac{r_1^4}{r_1^4})(1 - \frac{r_2^4}{r_1^4})} \quad \text{方程 (30)}$$

现在考虑当从方程 (28) 再次计算总的电压拾取时来自位于 (在线圈系统的中心) 测量位置的同一电流源的拾取。

通过在 $r=r_1$ 情况下的方程 (22) 给出内部线圈组的拾取电压 V_{1x} 。

$$V_{1x} = \frac{2Kdl}{\pi r_1^2}$$

类似地，通过在 $r=r_2$ 情况下的方程 (22) 给出外部组的拾取电压 V_{2x} 。

$$V_{2x} = \frac{2Kdl}{\pi r_2^2}$$

通过将 V_{1x} 的这些值代入方程 (28) 来获得在所述测量位置的电缆的总拾取电压 V_{xa} 。

$$V_{xA} = \frac{2Kdl}{\pi r_1^2} - \frac{r_1^2}{r_1^2} \frac{2Kdl}{\pi r_2^2}$$

$$V_{xB} = \frac{2Kdl}{\pi} \frac{(r_2^4 - r_1^4)}{r_1^2 r_2^4}$$

方程 (31)

由方程 (23) 给出的对于具有内部和外部线圈组的这个新装置的干扰比 S 是

$$S = \frac{V_{xB}}{V_{xA}} = \frac{6Kdlr_1^2(r_1^4 - r_2^4)}{\pi r_1^8(1 - \frac{r_1^4}{r_1^4})(1 - \frac{r_2^4}{r_1^4})} \times \frac{r_1^2 r_2^4 \pi}{(r_2^4 - r_1^4)2Kdl}$$

化简得到

$$S = \frac{3r_1^4 r_2^4}{r_1^8(1 - \frac{r_1^4}{r_1^4})(1 - \frac{r_2^4}{r_1^4})}$$

方程 (32)

如果仅仅使用内部组本身, 则通过如下在 $r = r_1$ 下的方程 (25) 预先给出该结构的干扰比,

$$S(\text{仅仅 } r_1) = \frac{3r_1^4}{r_1^4(1 - \frac{r_1^4}{r_1^4})}$$

方程 (33)

由方程 (32) 给出的新装置的干扰比 S 比由方程 (33) 给出的内部组本身的小下述系数

$$\frac{r_2^4}{r_1^4} \frac{1}{(1 - \frac{r_1^4}{r_1^4})}$$

例如, 当 $r = 2r_2$ 时, 这个系数是 0.067, 使得干扰拾取降低大约系数 16。因此, 当在由方程 (28) 给出的比率、即 r_1^2/r_2^2 下将内部和外部电压相减时, 最差的干扰从内部组本身的 20%降低到 1.25%。当干扰源更远时, 降低系数更大。可以使用电阻分压网络或作为放大器输入级的一部分——将参照图 7 说明——来实现从内部电压减去外部电压的系数 r_1^2/r_2^2 。

同样地考虑用于检测磁场的 H_y 分量的线圈。

图 6 是并入如上所述的干扰抑制的本发明的一个实施例的平面图, 图 7 是其电路图。

在图 6 中, 四个内部线圈 a_{1x} 到 d_{1x} 围绕半径 r_1 的假想圆的圆周以 90° 的间隔而被安装在“C 形”的绝缘母板 20 上, 而四个外部线圈 a_{2x} 到 d_{2x} 围绕半径 r_2 的假想圆的圆周以 90° 的间隔而被安装在母板 20 上, 所述两个圆是同心的。所有 8 个线圈 a_{1x} 到 d_{1x} 和 a_{2x} 到 d_{2x} 具有大致相同的面积匝数乘积和大致

平行的轴，并且大致位于一个公共的平面上。

也安装在母板 20 上的是另外 8 个线圈：内部线圈组 a_{1y} 到 d_{1y} 和外部线圈组 a_{2y} 到 d_{2y} 。线圈 a_{1y} 到 d_{1y} 和 a_{2y} 到 d_{2y} 具有基本上平行的轴和与线圈 a_{1x} 到 d_{1x} 和 a_{2x} 到 d_{2x} 基本上相同的匝数面积乘积。但是，它们的轴与线圈 a_{1x} 到 d_{1x} 和 a_{2x} 到 d_{2x} 的轴垂直。因此，每个线圈 a_{1x} 到 d_{1x} 和 a_{2x} 到 d_{2x} 与线圈 a_{1y} 到 d_{1y} 和 a_{2y} 到 d_{2y} 的对应的一个形成正交的一对线圈，其中，在每个正交对中，所述两个线圈、即线圈对 a_{1x} 和 a_{1y} 在母板 20 上的基本相同的位置，只要这在使用所选择的技术的情况下是物理上实用的，但是，所述线圈之一的轴相对于另一个线圈旋转 90° ，因此一个线圈的轴与它所位于的假想圆相切，而另一个线圈的轴在同一个圆的径向上延伸。因此，母板 20 承载 8 对正交的线圈、四个内部对 a_{1x}/a_{1y} 、 b_{1x}/b_{1y} 、 c_{1x}/c_{1y} 、 d_{1x}/d_{1y} 、以及四个外部对 a_{2x}/a_{2y} 、 b_{2x}/b_{2y} 、 c_{2x}/c_{2y} 、 d_{2x}/d_{2y} 。如上所述，可以使用在 US5,652,506 的图 9 中所示的正交线圈对来实现在基本上相同的物理位置上的线圈对 a_{1x}/a_{1y} 、 b_{1x}/b_{1y} 、... 的该紧密定位。

在 C 形母板 20 中的间隙 22 使得在图 6 中未示出的电缆 10 可以被引入支撑物中以便定位在半径 r_1 和 r_2 的圆的中心的点 P 上，所述电缆与包含所述线圈的平面垂直（即与图 6 的平面垂直）地延伸。在实际中，母板 20 与其上安装的线圈将被容纳在一个外壳（未示出）中，所述外壳可以包含夹具或其他机械器件以将电缆定位在点 P。清楚地，线圈 a_{1x} 到 d_{1x} 和 a_{2x} 到 d_{2x} 的每个被定位以拾取由电缆 10 产生的磁场的 x 分量 H_x ，而线圈 a_{1y} 到 d_{1y} 和 a_{2y} 到 d_{2y} 的每个被定位以拾取由电缆 10 产生的磁场的 y 分量 H_y 。

如图 7 所示来连接线圈：

- 线圈 a_{1x} 和 b_{1x} 彼此同相连接，而线圈 c_{1x} 和 d_{1x} 虽然彼此同相连接但是与线圈 a_{1x} 和 b_{1x} 反相连接，以在输入端向电阻器 R_{1x} 提供总的输出电压 V_{1x} 。
- 线圈 a_{2x} 和 b_{2x} 彼此同相连接，而线圈 c_{2x} 和 d_{2x} 虽然彼此同相连接但是与线圈 a_{2x} 和 b_{2x} 反相连接，以在输入端向电阻器 R_{2x} 提供总的输出电压 V_{2x} （电压 V_{2x} 被示出为负，这是因为线圈 a_{2x} 到 d_{2x} 的整体串联以反极性连接到线圈 a_{1x} 到 d_{1x} ）。
- 线圈 a_{1y} 和 b_{1y} 彼此同相连接，而线圈 c_{1y} 和 d_{1y} 虽然彼此同相连接但是与线圈 a_{1y} 和 b_{1y} 反相连接，以在输入端向电阻器 R_{1y} 提供总的输出电压 V_{1y} 。

-线圈 a_{2y} 和 b_{2y} 彼此同相连接, 而线圈 c_{2y} 和 d_{2y} 虽然彼此同相连接但是与线圈 a_{2y} 和 b_{2y} 反相连接, 以在输入端向电阻器 R_{2y} 提供总的输出电压 V_{2y} (再一次, 电压 V_{2y} 被示出为负, 这是因为线圈 a_{2y} 到 d_{2y} 的整体串联以反极性连接到线圈 a_{1y} 到 d_{1y})。

电阻器 R_{1x} 和 R_{2x} 共同地连接到放大器 AMP1 的负输入端, 并且被选择使得:

$$\frac{R_{1x}}{R_{2x}} = \left(\frac{r_1^2}{r_2^2}\right)$$

因此, V_{outX} 被给出为

$$V_{outX} = \frac{-R}{1 + j\omega cR} \left(\frac{V_{1x}}{R_{1x}} - \frac{V_{2x}}{R_{2x}}\right)$$

对于感兴趣的频率范围, $j\omega Rc$ 比 1 大得多, 因此

$$\begin{aligned} V_{outX} &= \frac{-1}{j\omega c} \left(\frac{V_{1x}}{R_{1x}} - \frac{V_{2x}}{R_{2x}}\right) \\ &= \frac{j}{\omega c R_{1x}} \left(V_{1x} - \frac{R_{1x} V_{2x}}{R_{2x}}\right) \end{aligned}$$

类似地, 电阻器 R_{1y} 和 R_{2y} 共同地连接到放大器 AMP2 的负输入端, 并且被选择使得:

$$\frac{R_{1y}}{R_{2y}} = \left(\frac{r_1^2}{r_2^2}\right)$$

因此, V_{outY} 被给出为

$$V_{outY} = \frac{-R}{1 + j\omega cR} \left(\frac{V_{1y}}{R_{1y}} - \frac{V_{2y}}{R_{2y}}\right)$$

对于感兴趣的频率范围, $j\omega Rc$ 比 1 大得多, 因此

$$\begin{aligned} V_{outY} &= \frac{-1}{j\omega c} \left(\frac{V_{1y}}{R_{1y}} - \frac{V_{2y}}{R_{2y}}\right) \\ &= \frac{j}{\omega c R_{1y}} \left(V_{1y} - \frac{R_{1y} V_{2y}}{R_{2y}}\right) \end{aligned}$$

最后, 通过求取

$$V_{out} = \sqrt{(V_{outX})^2 + (V_{outY})^2}$$

和在诸如 LCD 板 (未示出) 的显示器上显示的所测量电流来在处理器 30 中计算在电缆中流动的电流。可以通过使用在使用印刷电路板 (PCB) 技术的母板 20 上布置的导电轨道 (未示出) 来实现在各种线圈之间的连接。可以由集成电路技术和在母板 20 上或在设备外壳中的其它位置上定位的 IC 芯片来形成放大器 AMP1 和 AMP2 以及处理器 30。

在本实施例中使用总共 16 个线圈，并且理想的，这些线圈的匝数面积乘积应当在至少 1% 内相同以获得精确的结果。精确到这个容许偏差的 16 个线圈绕线圈的成本对于许多应用会太昂贵。平面磁印刷电路板线圈制造起来便宜得多和更精确。但是，对于在图 6 和 7 中所示的装置的实际实现方式，在每对正交线圈中，用于拾取 H_x 分量的线圈 a_{1x} 、 b_{1x} 等的每个的几何中心应当位于与用于拾取 H_y 分量的对应线圈 a_{1y} 、 b_{1y} 等的几何中心相同的位置上。使用 US5,652,506 的图 9 中所示的技术但是不带有平面磁线圈，则这是可能的，因为轨道被限制到一个平面上，并且使用当今的技术不可能同时具有在同一印刷电路板中的正交平面上的轨道。但是，对于平面磁印刷电路板线圈的略为折中效果很好，这种结构被示出在图 8 (a) - 8 (c) 中。图 8 实际上示出了两个正交线圈对 a_{1x}/a_{1y} 和 a_{2x}/a_{2y} 的印刷电路板实现方式，但是同一原理适用于在母板 20 的其它三个象限的每个上的、相同半径的两个正交线圈对。

线圈 a_{1y} 和 a_{2y} 基本上相同，并且每个被形成为在绝缘基底 42 上的导电轨道 40。虽然在图 8 (c) 中看到了仅仅基底的一侧，但是轨道 40 被形成在基底的每个相对表面上，并且通过中央通孔 44 来串联。两个轨道 40 形成其相对端连接到相应的焊盘 46 的线圈，所述焊盘 46 形成在从基底 42 的主体向下延伸的垂片上。

通过对比，每个线圈 a_{1x} 和 a_{2x} 以两个部分形成。考虑线圈 a_{1x} ，它形成为两个部分 $a_{1x}(1)$ 和 $a_{1x}(2)$ 。所述部分 $a_{1x}(1)$ 和 $a_{1x}(2)$ 形成为在相应的绝缘基底 52 上的导电轨道 50。但是，所述部分 $a_{1x}(1)$ 和 $a_{1x}(2)$ 的每个具有线圈 a_{1y} 的一半的匝数面积乘积。这可以通过提供两倍于在部分 $a_{1x}(1)$ 和 $a_{1x}(2)$ 上的匝数的在线圈 a_{1y} 上的匝数来实现。

类似地，所述线圈 a_{2x} 形成为两个部分 $a_{2x}(1)$ 和 $a_{2x}(2)$ ，它们再次被形成为在相应的绝缘基底 52 上的导电轨道 50，并且每个具有为线圈 a_{2y} 的匝数面积乘积的一半的匝数面积乘积。实际上，在这个实施例中，在一个公共的基底 52 上形成 $a_{1x}(1)$ 和 $a_{2x}(1)$ ，并且同样，在另一个公共基底 52 上形成 $a_{1x}(2)$ 和 $a_{2x}(2)$ ，但是这不是必须的。

基底 42、52 被通过向母板中的槽中插入焊片 46、56 而垂直直立地安装在母板 20 中，并且被焊接到在母板上的轨道上。所述结构如在图 8(a) 所示。线圈 a_{1y} 在每侧上被与其垂直的线圈 $a_{1x}(1)$ 和 $a_{1x}(2)$ 包围，线圈 a_{2y} 在每侧上被与其垂直的线圈 $a_{2x}(1)$ 和 $a_{2x}(2)$ 包围。通过在母板 20 上的导电轨道连接焊片

56 以将线圈 $a_{1x}(1)$ 和 $a_{1x}(2)$ 同相串联而形成线圈 a_{1x} , 并且将线圈 $a_{2x}(1)$ 和 $a_{2x}(2)$ 同相串联而形成线圈 a_{2x} 。因为被组合的线圈部分 $a_{1x}(1)$ 和 $a_{1x}(2)$ 具有与线圈 a_{1y} 相同的匝数面积乘积, 并且在线圈 a_{1y} 的任何一端等距相间, 所以, 作为一对, 它们具有与线圈 a_{1y} 相同的几何中心。类似地, 作为一对, 线圈部分 $a_{2x}(1)$ 和 $a_{2x}(2)$ 具有与线圈 a_{2y} 相同的几何中心。剩余的连接如图 7 所示。

可以对上述实施例进行修改。例如, 线圈 a_{2x} 到 d_{2x} 的匝数面积乘积可以与线圈 a_{1x} 到 d_{1x} 不同, 只要在电阻器 R_{1x} 和 R_{2x} 的相对值或在电路中的其它位置对此留余量。类似地, 线圈 a_{2y} 到 d_{2y} 的匝数面积乘积可以与与线圈 a_{1y} 到 d_{1y} 不同, 只要在其它位置留适当的余量。而且, 如果来自外部源的干扰在使用中可能要遇到的情况中是不可能的, 则可以省略外部线圈组、即在图 6 中位于半径 r_2 的圆上的正交线圈对。而且, 因为在完全相对的线圈组主要被提供来提供较大的信号、并且还降低外部干扰以及降低由于电缆从中心点 P 的移动而导致的误差, 因此可以仅仅使用两组以 90° 为间隔的线圈来实现本发明, 例如在图 6 的 3 点和 6 点位置的线圈组。

本发明不限于在此所述的实施例, 可以在不脱离本发明的范围的情况下修改或改变所述实施例。

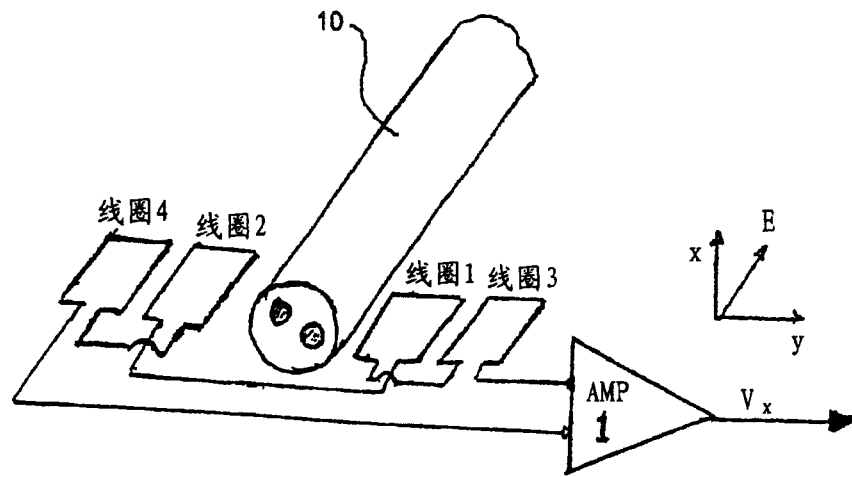


图 1

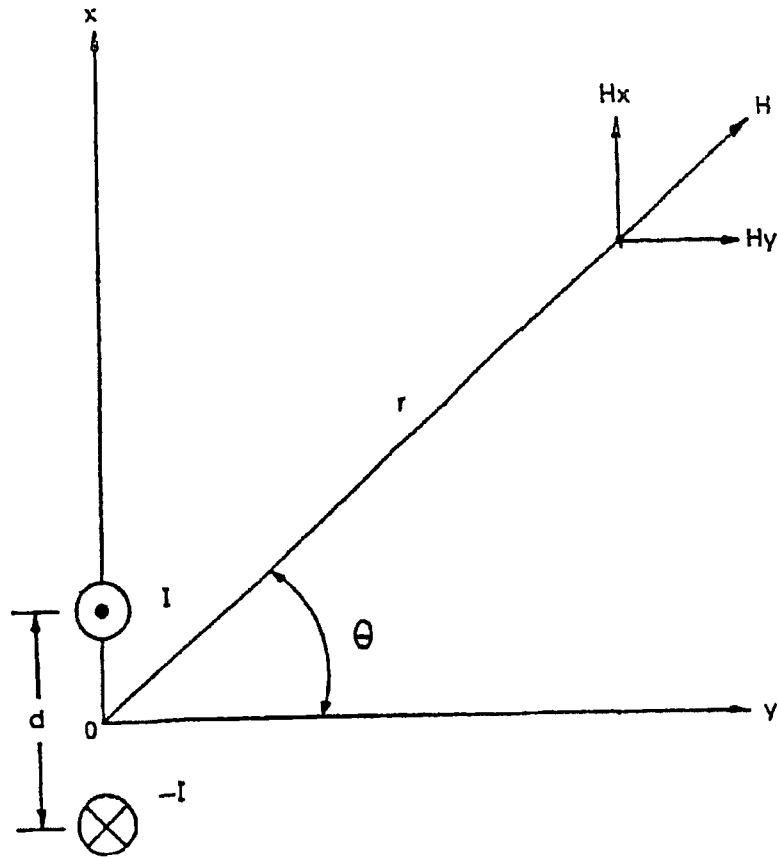


图 2

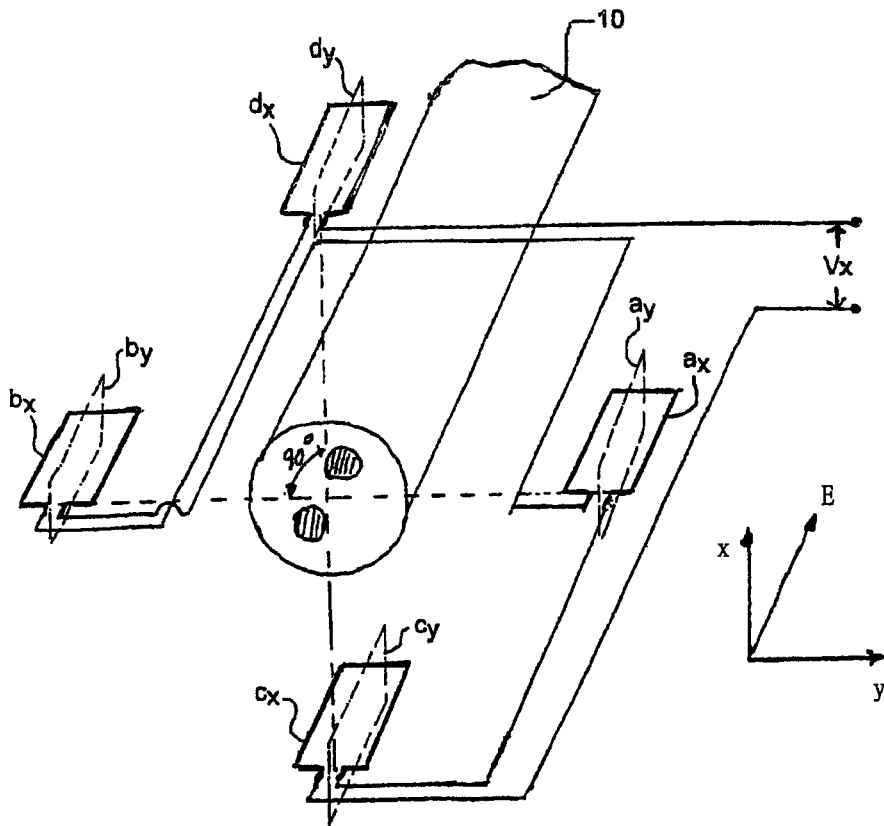


图 3

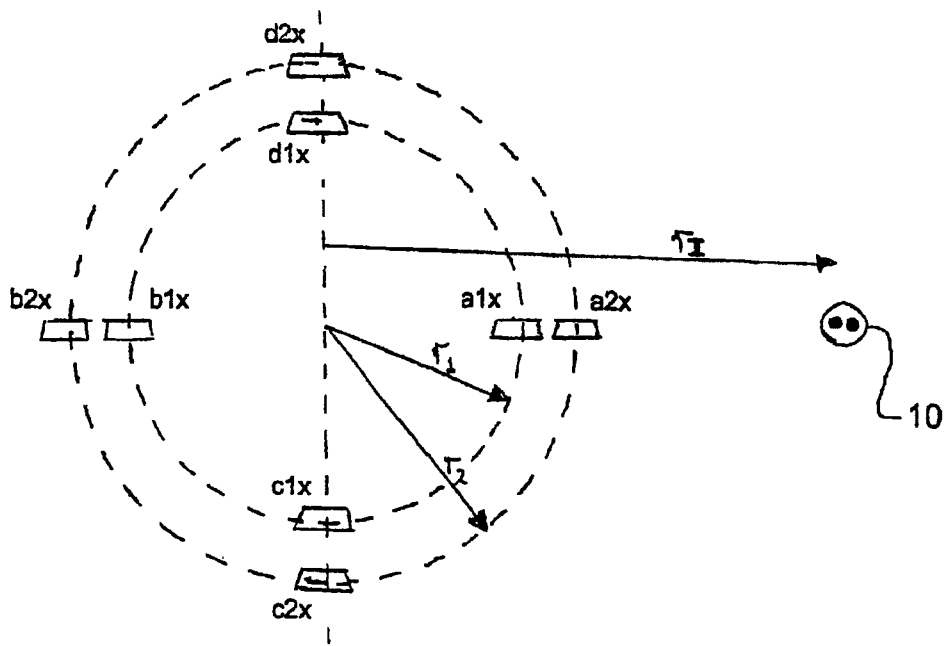


图 5

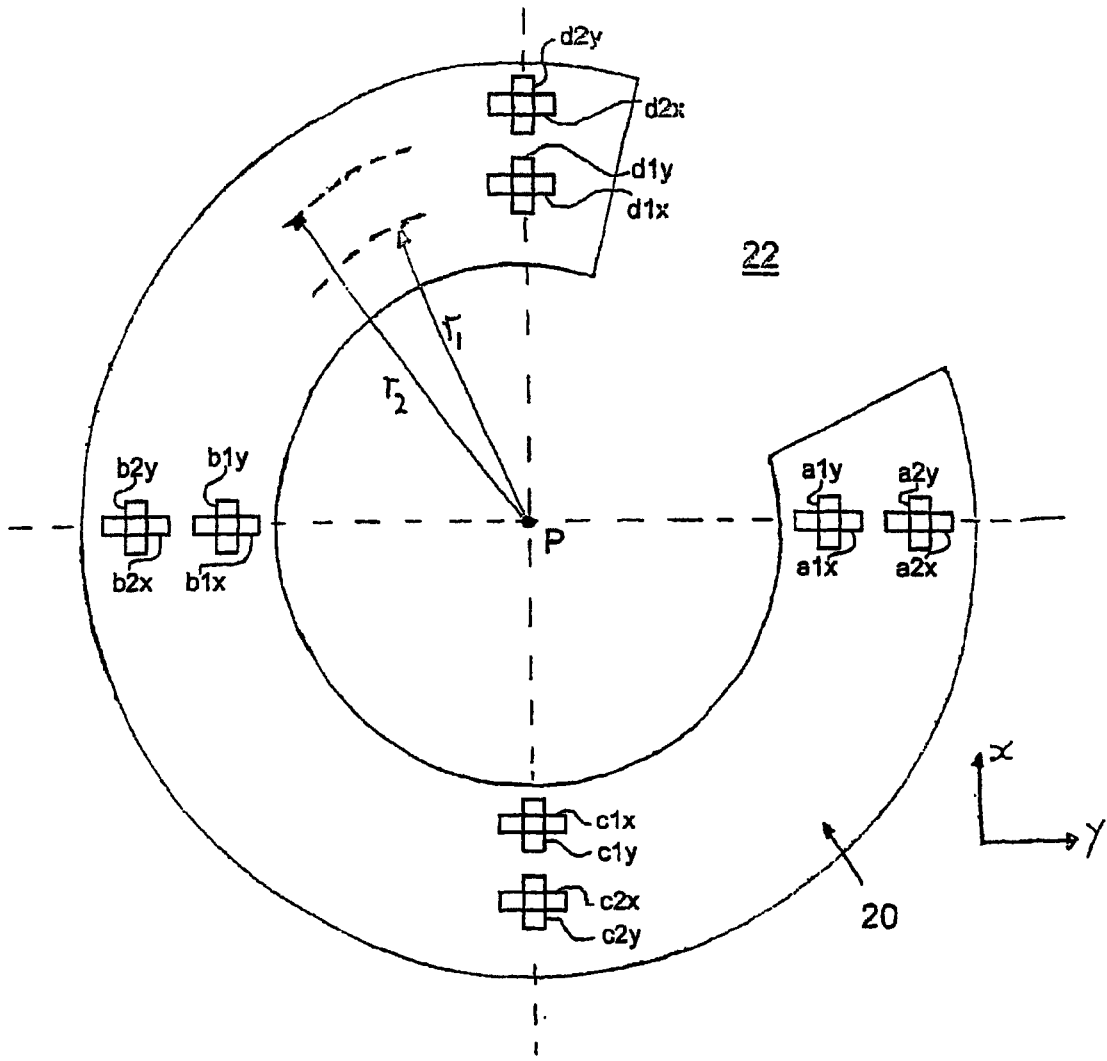


图 6

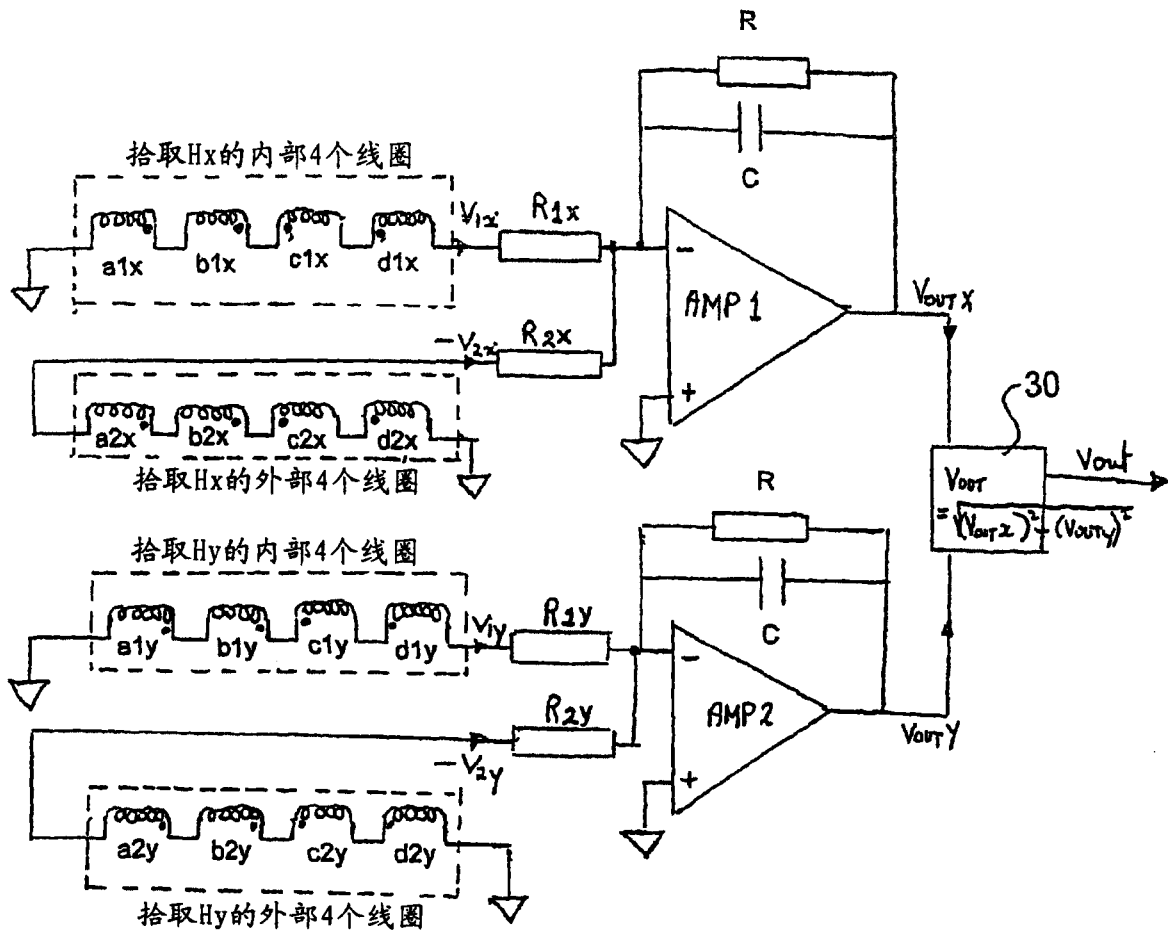


图 7

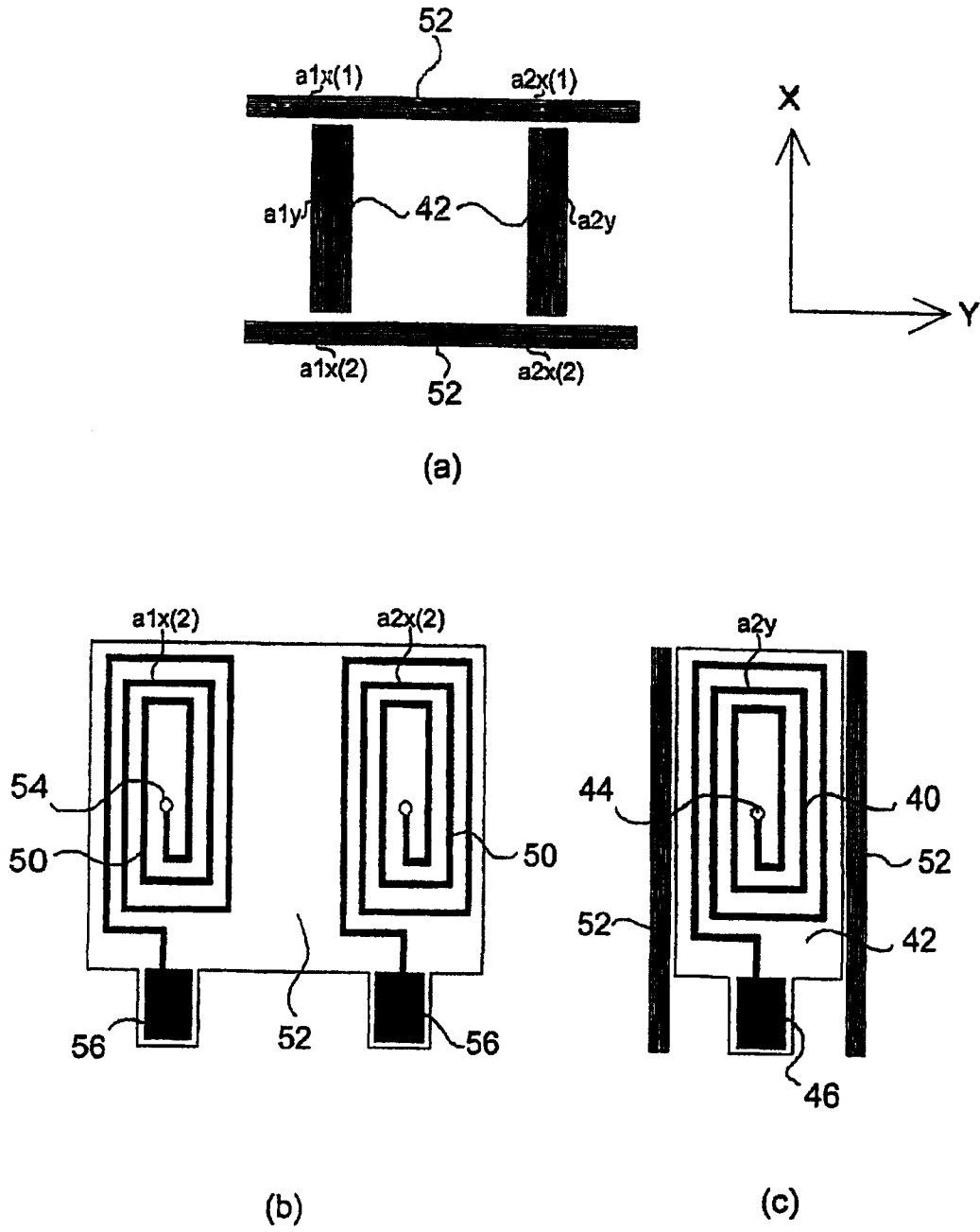


图 8