

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

A61B 5/055 (2006.01)

G01R 33/44 (2006.01)



# [12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200610144181.0

[43] 公开日 2008年6月4日

[11] 公开号 CN 101190127A

[22] 申请日 2006.11.29

[21] 申请号 200610144181.0

[71] 申请人 北京万东医疗装备股份有限公司

地址 100022 北京市朝阳区建国门外郎家园6号

共同申请人 北京大学

[72] 发明人 王为民 黄开文 李培 周德开

[74] 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司  
代理人 周国城

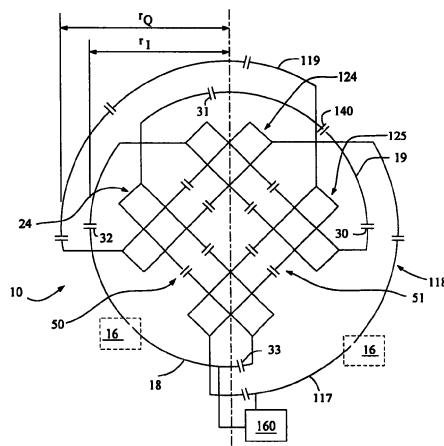
权利要求书3页 说明书15页 附图7页

## [54] 发明名称

一种平板结构的射频线圈

## [57] 摘要

一种平板结构的射频线圈，涉及磁共振成像技术，用于开放式磁共振成像系统，该射频线圈由安装在成像区域上下正对的两个平行放置的平板线圈组成。两个线圈结构类似，都是双通道正交结构，每通道由若干段导体带和电容等元件连接而成。导体带分为两类，一类为分布在线圈中央的直线导体带，一类是分布在四周的圆弧导体带。圆弧导体带与直线导体带首尾连接，形成电流回路。线圈被激发后，各导体带上产生一定比例的电流，在成像区域产生一圆极化的射频场。本发明射频线圈的导体带中电流的大小和导体带的位置、形状决定了射频场在成像区域内的大小、均匀性及在非成像区域的衰减速度。本发明中的射频线圈由于其独特的双电流回路结构，达到比较高的性能。



1、一种平板结构的射频线圈，用于开放式磁共振成像系统，成对组合使用，分别位于成像区域靠近磁极的两侧，相互平行放置；其特征在于，为平板圆盘结构的正交双通道射频线圈；

射频线圈包含两个通道，通道之间相互正交布置；

各通道均包含由直线导体带组成的第一、第二前向电流通路和由弧形导体带组成的第一、第二反向电流通路，在第一、第二前向电流通路和第一、第二反向电流通路中，还串有数个电容，两前向电流通路和两反向电流通路相互串联形成第一、第二电流回路，两回路中的电流在所需成像区域产生均匀的射频场；

同一通道中两前向电流通路相互平行，位于射频线圈中部，成像区域的射频场由前向电流通路中的电流产生，射频场的均匀性取决于前向电流通路中各直线导体带的位置和电流分配关系；

同一通道中两反向电流通路对称分布在圆盘的圆周附近，共一圆心，反向电流通路上的电流使射频场在成像区域外快速衰减。

2、如权利要求 1 所述的射频线圈，其特征在于，所述第一、第二前向电流通路，各有 1~4 根直线导体带，各导体带相互平行，以圆盘平分线为对称轴左右对称分布。

3、如权利要求 1 所述的射频线圈，其特征在于，所述第一、第二反向电流通路，至少各有一根弧形导体带，分别与第一前向电流通路的一端和第二前向电流通路的另一端相连，同一通道中的两反向电流通路位于半

径相同的圆周上，不同通道的反向电流通路半径不同，反向电流通路的结构决定着成像区域外的射频场衰减量。

4、如权利要求 1 或 2 所述的射频线圈，其特征在于，所述第一、第二前向电流通路中的直线导体带，其电流大小的比例、直线导体带的数量、到平分线的距离和到中心点的距离，决定了成像区域的射频场的大小和均匀性，其具体数值按给定要求，由毕奥—萨法尔定律列方程求解确定。

5、如权利要求 1 或 3 所述的射频线圈，其特征在于，所述组成第一、第二反向电流通路的导体带，为椭圆弧、矩形或三角形。

6、如权利要求 1 所述的射频线圈，其特征在于，所述射频线圈的两通道之间，还连有隔离电路，隔离电路由电感和可调电容并联构成，隔离电路两端分别与各通道的反向电流通路连接。

7、如权利要求 1 所述的射频线圈，其特征在于，所述射频线圈，包括各通道串连于第一或第二反向电流通路中间的位置的输入/输出（I/O）端口，该端口由三个可调电容组成  $\pi$  型电路，连接着导体带以及馈入同轴线的外皮和芯线；输入/输出（I/O）端口和串于各电流通路中的电容，共同决定着线圈的谐振频率和阻抗特性。

8、如权利要求 1 所述的射频线圈，其特征在于，所述两通道的前向电流通路，分别位于一双面电路板的顶、底两层，且相互正交，反向电流通路分别位于另一双面电路板的顶、底两层；两双面电路板不在同一平面上，含有前向电流通路的双面电路板位于内侧，也即靠近成像区域的一侧；两双面电路板相互平行放置，之间有一空隙，同一通道中位于不同电路板上的前向电流通路和反向电流通路之间，通过连线连接，连线为铆钉、螺

---

钉或导线。

9、如权利要求 8 所述的射频线圈，其特征在于，所述双面电路板厚度为 1mm 到 2mm。

10、如权利要求 1 所述的射频线圈，其特征在于，所述前向电流通路和反向电流通路，是由铜皮或其他导体带连接固定而成的电路结构。

---

## 一种平板结构的射频线圈

### 技术领域

本发明涉及磁共振成像技术领域，是一种用于磁共振成像系统的平板圆盘结构射频线圈。

### 背景技术

由于原子核固有磁矩的存在，在外加静磁场  $B_0$  的作用下，核会以频率  $f$  绕  $B_0$  进动。若此时再施加方向与  $B_0$  垂直的频率同为  $f$  的射频场  $B_1$ （由射频线圈产生），则核会与射频场相互作用而产生能量交换的共振现象，我们称之为核磁共振（Nuclear Magnetic Resonance，即 NMR）。为了削弱人们对“核”的恐惧心理，一般都把核磁共振的“核”字去掉而成为磁共振（MR）。共振状态下的核会发射出频率  $f$  的射频信号，此信号被射频线圈接收后（再进行一定的处理）就可以得到处于成像区域的人或物体的内部结构图像，这一过程就叫做磁共振成像（Magnetic Resonance Imaging，简称 MRI）。

主磁体、梯度线圈、射频线圈是磁共振成像（MRI）系统不可或缺的几部分。主磁体在所要的成像区域内产生一稳恒的静态磁场 $B_0$ 。成像过程中，梯度线圈在成像区域沿各坐标（ $x$ ， $y$ ， $z$ ）方向产生所需的梯度磁场，射频线圈在成像区域产生与静场 $B_0$ 正交的射频场 $B_1$ ，原子核在 $B_0$ 、 $B_1$ 的作用下将产生磁共振。由于梯度场的存在，这些位于不同空间位置的共振核会发出各自不同的射频信号，这种射频信号可以被射频线圈检测到并回传给成像系统。系统对各路射频线圈传回来的信号进行合成和处理后就可以生成所要的图像。

为了获得清晰而又无畸变的图像，无论是静磁场 $B_0$ 、梯度场还是射频场 $B_1$ 都要求在成像区域有高度的均匀性。而为了使场均匀，通常都把线圈设计成紧紧环绕患者的螺线管形状。这种磁共振成像（MRI）系统的静磁场 $B_0$ 一般沿着水平方向，同时也是螺线管的轴心方向。螺线管线圈虽然能产生高度均匀的场，但由于其紧密环绕着患者，让其他人比如医护人员很难接近患者或成像区域，这就使介入式治疗很难甚至不可能进行。此外螺线管式结构会让某些患者产生幽闭恐惧症，还有一些体型过大的患者也无法被螺管内空间容纳，这样就在一定程度上限制了磁共振成像（MRI）的应用。因此，有必要对螺线管式线圈结构进行改变，开放式磁共振成像（MRI）系统就很好的适应了这种要求。开放式磁共振成像（MRI）系统能让医护人员充分的接近患者，同时也在很大程度上降低了幽闭恐惧症患者发病的可能性。一类开放式磁共振成像（MRI）系统的磁极为平面圆盘状，成像区域的上下方各分布一个，静磁场 $B_0$ 为铅垂方向。与磁极类似，梯度、射频线圈都是平板圆盘结构。

开放式磁共振成像（MRI）系统的缺点是难以在成像区域产生高度均匀的场，由于磁极和线圈都是平板结构，而不是像螺线管那样包围着成像区域或患者，因而无论是静磁场 $B_0$ 、梯度场还是射频场 $B_1$ 都难获得高度的均匀性。在 $B_0$ 为竖直方向的开放式磁共振成像（MRI）系统中，常用一种蝶形结构的平面射频线圈，这种线圈产生的场也很不均匀，特别是靠近线圈平面附近的区域。我们知道，成像区域 $B_1$ 场的均匀性和图像的均匀性是密切相关的，只有 $B_1$ 场均匀，才能产生均匀的图像。如果 $B_1$ 场不均匀，那么射频信号发射时，不均匀区的原子核共振的程度会不一样，由此产生的射频信号大小也不一样；在接收阶段，其接收灵敏度也会大小不一，接收到的射频信号的差别更大，因而重建出来的图像就会出现明暗不均。比如，特别靠近射频线圈中导体带的区域，接收灵敏度极高，这些区域的图像就发亮，而远离导体带的区域的图像则暗的多。

平板射频线圈另外一个缺点就是其灵敏度或者说射频场 $B_1$ 在成像区域外不能急剧下降，由于在图像重建过程中的折叠效应，这也会影响图像质量。很多时候在成像区域，我们能尽量保证 $B_0$ 场、梯度场、 $B_1$ 场的均匀性，但在成像区域外则不容易控制。这样就有可能出现成像区域外的某些地方会产生和成像区域内的某个地方相同频率的射频信号。而同时，射频线圈在成像区域外的灵敏度并没有下降到足够低的程度，因而能接收到所有地方发出的射频信号。这些不同来源的同频信号相加的最终结果就是在图像上产生折叠伪影或斑点。如果射频线圈在成像区域外的灵敏度急剧下降，则区域内外混叠的影响就小多了。在传统的平板线圈设计中，电流是直接通过射频屏蔽板形成回路的，由于趋肤效应等原因，屏蔽板上的反向

电流主要集中在直线导体带的正下方，这样相当于在线圈中心附近直接回流，这样的反向电流是不可能使射频场在成像区域外急剧下降的。由于在成像区域外，还存在一定大小的射频场，此射频场再遇上不均匀的静磁场和非线性的梯度场的组合，就可能在成像区域外激发出和区域内某点相同频率的射频场，进而产生折叠伪影。总之，要想成像区域外的信号不对成像区域内的图像产生影响，射频线圈的射频场或者说灵敏度在区域外必须急剧下降才行。

通常开放式磁共振成像（MRI）系统中平板线圈的发射效率较封闭式磁共振成像（MRI）系统螺管线圈要低，如果要在成像区域产生相同大小的射频场，需要提供更大的电流或功率，因而开放式系统需要比封闭式更大功率的射频放大器，这无疑增加了其成本。另外发射功率的增加也不是随意的，首先各种电子元器件的功耗是有限制的，电压、电流或功率过大都会对其造成损害；其次有关部门对这种可能被处于成像区域中或其附近的患者和医护人员吸收的射频场的大小是有严格规定的，以防止过量电磁辐射对人体造成伤害。因此，在保证射频场成像区域均匀性和外面衰减特性的同时，还要尽量提高其发射效率、降低功耗。

此外，开放式磁共振成像（MRI）系统的射频线圈设计还受到一些其它因素的限制，比如磁极间的距离、磁极的直径大小、梯度线圈的厚度、成像区域的大小等等。一般来讲，射频线圈、梯度线圈和磁极的直径都基本相同，而射频线圈的直径大小和成像区域到线圈平面的距离大小对成像区域射频场的均匀性有很大影响。

综上所述，射频线圈需要解决的问题有发射效率、场的均匀性和衰减



特性等。

## 发明内容

本发明的目的在于为开放式磁共振成像（MRI）系统提供一套高性能的射频线圈，射频线圈的性能主要是指其射频场的分布特性（作为发射线圈）或者说灵敏度（作为接收线圈）。在信号源提供相同的输入功率时，如果射频线圈产生的射频场在成像区域高度均匀且幅度极大，在成像区域外快速衰减，则认为此线圈性能高。本发明中的射频线圈由于其独特的双电流回路结构，达到了比较高的性能。

本发明为一种用于磁共振成像（MRI）系统的平板圆盘结构射频线圈，该线圈各通道包含由直线导体带组成的第一、第二前向电流通路和由弧形导体带组成的第一、第二反向电流通路，这些电流通路相互串联形成第一、第二电流回路，两回路中的电流可在所需成像区域产生均匀的射频场 $B_1$ 。两前向电流通路相互平行，成像区域的射频场 $B_1$ 主要由前向电流通路中的电流产生，射频场 $B_1$ 的均匀性取决于前向电流通路中各直线导体带的位置和电流分配关系。两反向电流通路对称分布在圆盘的圆周附近，反向电流通路上的电流可使射频场 $B_1$ 在成像区域外快速衰减。各路前向电流通路中的直线导体带都互相平行放置，以提高场的均匀性。通常，前向电流通路和反向电流通路分别位于不同的平面，前向电流平面距成像区域较近，反向电流平面距成像区稍远。这样做的目的是在不降低线圈效率的情况下，减小线圈表面附近的射频场，保证患者和医护人员不受过量的电磁辐射。

本发明中的平板圆盘结构射频线圈只能用于开放式磁共振成像（MRI）

系统，此开放式系统应该在成像区域两侧相对的位置各有一个圆盘状磁极，每个磁极都对应有一个正交双通道射频线圈。此射频线圈的每个通道都包含由多个导体带以及串于其中的电容组成的第一、第二电流回路，每个回路又可分为前向电流通路和反向电流通路。各回路中的前向电流能在成像区域产生所需的均匀射频场。各前向电流通路相互平行对称放置，前向电流通路中的直线导体带都位于同一个平面内，记此平面为平面 A。各反向电流通路呈圆周分布，由一系列弧形导体带组成，弧形导体带与第一、第二回路中的直线导体带首尾相连。各反向电流通路中的弧形导体带也位于同一个平面内，记此平面为平面 B。平面 B 与平面 A 平行且保持一段距离，平面 A 更接近成像区域。

本发明线圈的任意一电流回路中的前向电流通路中的直线导体带可以只有一根，也可以是两根或多根并联，但反向电流通路中的弧形导体带一般为一根。直线导体带上的电流比例分布和各带间的距离以及弧形导体带的电流分布和位置尺寸等决定了成像区域内射频场  $B_1$  的大小和均匀性，也决定着非成像区域射频场  $B_1$  的衰减快慢。

本发明线圈的两个通道在空间上互相垂直正交，因而互感比较小，隔离可以做到很高。高隔离的正交双通道线圈产生的总射频场不仅均匀性好，而且幅度也大，对发射效率的提高贡献很大。

对应于开放式磁共振成像（MRI）系统，本发明中的平板圆盘结构射频线圈较好的解决了现有技术存在的几个问题。为了提高发射效率和成像区域射频场  $B_1$  的均匀性，采取了四通道正交线圈结构，每通道又包含第一、第二电流回路。每个电流回路前向电流通路部分又采用两根或多根直线导

体带，以降低损耗，提高发射效率。通过调节直线导体带的数目和不同直线导体带中的电流比例，可以调节射频场 $B_1$ 在成像区域的大小和均匀性。每个电流回路中反向电流通路部分为圆周分布的弧形导体带，一方面圆周分布保证了射频场 $B_1$ 的各向同性（均匀性的一部分），另一方面也可以使射频场 $B_1$ 在成像区域外快速的衰减。为了减小过量射频场对人体的危害，电流较大的反向电流通路导体带分布在一个离成像区域稍远的平面内。反向电流通路上均匀分布着调谐电容，适当改变这些电容值，也可以在一定程度上改善射频场 $B_1$ 在成像区域的大小和均匀性，提高射频线圈的效率和稳定性。

由上所述，本射频线圈有如下的优点：

1. 平板圆盘结构，可用于开放式磁共振成像（MRI）系统。
2. 双盘四通道正交布局，提高了发射效率和均匀性。
3. 双电流回路，优化了射频场的分布特性。
4. 多直线导体带并行，提高了成像区域射频场的幅度和均匀性。
5. 反向电流通路四周分布，提高了成像区域外射频场的衰减速度。
6. 反向电流通路远离成像区域，降低了可能对人体有害的电磁辐射。

#### 附图说明

图 1 为常用开放式磁共振系统磁极、线圈、成像空间分布示意图；

图 2 为 I、Q 双通道正交射频线圈电路结构示意图；

图 3 为射频线圈 I 通道导体带和电流分布示意图；

图 4 为射频线圈 I 通道导体带上电容分布示意图；

- 图 5 为射频线圈 I、Q 两通道间隔离电路图；
- 图 6 为射频线圈各通道输入端口调谐电路图；
- 图 7 为双通道射频线圈立体爆炸工程示意图；
- 图 8 为双通道射频线圈前向导体带分布平面示意图；
- 图 9 为双通道射频线圈反向导体带分布平面示意图；
- 图 10 为双通道射频线圈导体带分布轴截面示意图；
- 图 11 为射频线圈射频场  $B_1$  在  $Z=0$  的水平面分布示意图；
- 图 12 为射频线圈射频场  $B_1$  沿 Y 轴分布曲线图。

### 具体实施方式

本发明所适用的开放式磁共振成像（MRI）系统磁极和线圈部分结构如图 1 所示。圆盘状磁极 1、2 对称分布在成像区域 12 的上下两侧，磁极一般由钕铁硼磁钢块紧密拼接而成，磁钢的磁场特性大体上确定了静磁场 14 的大小。磁极 1 下侧的区域 5 和磁极 2 上侧的区域 6 为静磁场 14 的调节区，或叫匀场区。通过调节匀场区 5、6 的匀场部件，能使成像区域 12 的静磁场 14 达到所需要的均匀度。匀场区 5 的下方和匀场区 6 的上方分别是梯度上盘 3 和梯度下盘 4，每个梯度盘里均含有能产生 x、y、z 三个方向梯度的梯度线圈，在成像时，它们可以组合出所需要的任意方向的梯度。射频线圈上盘 9 位于梯度上盘 3 的下侧，射频线圈下盘 10 位于梯度下盘 4 的上侧，射频线圈被激发后在成像区域 12 产生一均匀水平圆极化射频场 15，射频场 15 围绕着静磁场 14 旋转，同时激发患者 13 位于成像区域 12 的原子核，使其产生磁共振信号。夹在梯度上盘 3 和射频上盘 9

中间的薄层是射频屏蔽板 7, 梯度下盘 4 和射频下盘 10 中间是射频屏蔽板 8, 射频屏蔽板可防止射频场 15 向梯度盘 3、4 方向的渗入, 也就是说让射频场 15 能量维持在成像区域 12, 不至于泄漏到梯度盘后造成能量的损耗。点 0 为成像区域 12 的中心, 13 为待成像的患者示意图, 11 为成像区域外空间。

如图 2 所示, 射频下盘 10 为 I、Q 双通道正交线圈, 通道 I 50 和通道 Q 51 电路结构基本相同, 只是二者的前向电流通路直线导体带互相垂直放置, 且基本位于同一平面内。射频上盘 9 与下盘 10 呈镜像结构, 也是 I、Q 双通道正交线圈。在射频线圈工作时, 上下盘的对应镜像通道电流方向相反, 就是说相位差为 180 度, 而同一盘内 I、Q 两路除空间上互相正交外, 相位上也差 90 度, 这样上下盘的四个通道工作时相位分别为 0 度、90 度、180 度、270 度。射频线圈这样的相位分布才能保证在成像区域 12 产生沿水平方向的均匀圆极化射频场 15。矩形框 16 表示线圈各通道 I/O 接口 (具体结构见图 6), 分别接在各通道反向电流通路部分的弧形导体带 18、118 上。矩形框 160 表示 I、Q 两通道间的外加隔离电路 (具体结构见图 5), 接在 I 通道的弧形导体带 18 和 Q 通道的弧形导体带 117 之间。

射频盘 9、10 各自的几何结构, 以及它们和成像区域 12 的中心点 0 的相对位置关系对成像区域 12 的射频场 15 的均匀性以及成像区域外 11 的场的衰减快慢起着至关重要的作用。具体的说, 射频线圈各前向电流通路直线导体带 26、27、28、29 (见图 3) 的位置和其中电流  $I_1$ 、 $I_2$  的大小和比例基本决定了成像区域 12 的射频场 15 的大小和均匀性, 射频线圈各

反向电流通路弧形导体带 17、18、19 的位置则决定了成像区域外 11 场的衰减快慢。值得一提的是，各导体带包括直线和弧线段与相应射频屏蔽板的距离大小  $Z_2$ 、 $Z_3$ （见图 10）也对射频场 15 的分布起着决定性作用。

射频线圈各路通道的结构都是类似的，下面我们以下盘 10 的 I 通道 50 为例来做详细说明，见图 3 和图 4。前向电流通路 24 和反向电流通路 17、18 组成了第一电流回路，前向电流通路 25 和反向电流通路 19 组成了第二电流回路。前向电流通路可以只有一根直线导体带由 20 连到 22 或者由 21 连到 23，也可以有多根直线导体带，导体带根数越多越容易取得所要射频场 15 的均匀性，但同时也会增加电路的复杂性，本发明按两根导体带的情况进行说明。这样前向电流通路 24 就由 20、22、26、27 等直线导体带组成，前向电流通路 25 由 21、23、28、29 等直线导体带组成。前向电流通路 24 和 25 中的各导体带以圆盘平分线为对称轴左右对称分布，其中各外侧导体带中的电流  $I_1$  和内侧导体带中的电流  $I_2$  也呈对称分布。电流  $I_1$ 、 $I_2$  的大小比例以及直线导体带 26、27、28、29 到平分线的距离  $X_1$ 、 $X_2$  和它们到中心点 0 的距离  $Z_1$ （见图 10）决定了成像区域 12 的射频场 15 的大小和均匀性，具体数值关系可由毕奥-萨法尔定律确定。电流  $I_1$ 、 $I_2$  的比例又主要取决于直线导体带中电容 34、35、36、37 的大小，同时它和距离  $X_1$ 、 $X_2$  也有一定的关系。一般我们最低要求成像区域 12 的射频场 15 的均匀性要好于  $\pm 6\text{dB}$ ，稍高的要求是  $\pm 3\text{dB}$ ，也有更高要求达到  $\pm 1.5\text{dB}$  的。

第一、第二反向电流通路 17、18、19 串接着第一、第二前向电流通路 24、25，形成完整连续的电流回路，反向电流通路中的电流  $I_3 = I_1 + I_2$ 。

反向电流通路 19 连接着前向电流通路 25 的一端 21 和前向电流通路 24 的另外一端 22，类似地，反向电流通路 17 连着前向电流通路 24 的一端 20，反向电流通路 18 则连着前向电流通路 25 的另一端 23。这样交叉串接的结果就是第一、第二前向电流通路 24、25 中的电流方向相同，这些同向的电流各自在成像区域 12 产生方向相同的射频场，总的射频场 15 为它们的代数和。反向电流通路 17、18、19 一般为圆弧形状，而且半径相同为  $r_i$ ，即分布在同一个圆周之上。这样做的结果是使射频场 15 在水平面内的分布趋于各向同性，无论是在成像区域 12 还是成像区域外 11。业内人士知道，反向电流通路也可以用其它的形状，比如椭圆弧、矩形、三角形等等。不过与标准圆弧相比，其它形状反向电流通路可能会造成更大的衰减、灵敏度下降或各向异性。但是业内人士应该明白，无论反向电流通路采取什么形状，均应属于本发明范围内。

Q 通道 51 前向电流通路、反向电流通路都和 I 通道 50 类似，见图 2 到图 4，各通路上串接的电容主要作用是调谐，即让线圈各通道分别谐振在所需频率上。反向电流通路所在圆周的半径  $r_i$  和  $r_o$  的数值决定着射频场 15 在成像区域外 11 的衰减快慢。成像区域外 11 的射频场衰减的越厉害，成像时可能导致折叠的噪声信号就越小。一般要求这个衰减在 10dB 以上，严格一点的是 20dB，最高要求可达到 30dB。

通常  $r_i$  和  $r_o$  大小不同，图 2 中  $r_o > r_i$ ，I、Q 两通道的反向电流通路所在圆周间有一定间距，这样可以提高两通道间的隔离，减小能量损耗。如果两通道半径大小一样，反向电流通路导体带只能在两间隔很小的平行平面内正对放置，这将会出现很大的耦合电容，从而导致隔离很差或者出现额

外的噪声和损耗。由于 $r_i$ 和 $r_o$ 差值的合理存在,我们希望能把隔离保持在15dB到20dB以上。

线圈实际制作过程中由于材料的不均匀、加工精度不够等原因会造成一些不对称因素,导致隔离变差,这样需要在适当的地方加一个隔离电路160来提高I、Q两路间的隔离,见图5。隔离电路160是一简单的由电感41和可调电容40组成的并联电路,选择合适的电感和电容调节范围,可以把隔离调到20dB以上。

线圈的各通道输入/输出(I/O)端口16均连接于反向电流通路17、18中间的位置,其内部结构如图6所示,由三个可调电容42、43、44组成 $\pi$ 型电路,连接着同轴线45的外皮和芯线,这些电容再加上图4中的电容30~37,共同决定着线圈的谐振频率和输入输出阻抗特性。

本发明中,见图7、图8、图9、图10,前向电流通路直线导体带都分布在A平面84附近,反向弧形导体带都分布在B平面114附近,A、B两平面相互平行,有一定距离Z2。B平面114远离成像区域12,也远离患者13,这样比较大的反向电流通路电流 $I_3$ 就远离患者,不至于对患者或附近的医护人员造成过量的电磁辐射。同时,适当调整距离Z2、Z3仍可以改进成像区域12的射频场15的均匀性和它在成像区域外11的衰减特性。

因此,我们可以把所有的前向电流通路都做一个双面电路板67上,所有的反向电流通路都做一个双面电路板69上。两电路板67、69分别位于A平面84、B平面114处。其中,电路板67的顶层全部放置I通道50的直线导体带,底层全部放置Q通道51的直线导体带;电路板69的顶层全部放置I通道50的弧形导体带,底层全部放置Q通道的弧形导



体带，见图 7 到图 10。不过业内人士应当清楚，用其它方法比如直接用铜带或者其它导体带连接固定在绝缘骨架上形成类似的电路结构也在本发明范围内。电路板一般用介质为 FR4 的覆铜板制作而成，厚度为 1mm 到 2mm，在分析射频线圈在成像区域的射频场分布时，可以忽略不计，认为所有前向电流通路都位于 A 平面 84 内，而所有反向电流通路都位于 B 平面 114 内。同一通道中位于不同平面内的前向电流通路和反向电流通路通过连线 108~111 等连接，连线可采取铆钉、螺钉、导线等多种形式。

归结起来，决定着射频场 15 在成像区域 12 的均匀性和成像区域外 11 的衰减特性的主要因素如下：

1. 反向电流通路平面 114 和屏蔽板 8 的距离  $Z_3$
2. 前向电流通路平面 84 和屏蔽板 8 的距离  $Z_2+Z_3$
3. 反向电流通路的几何分布情况， $r_i$  和  $r_o$  的大小
4. 前向电流通路直线导体带的数量和位置分布  $X_1$ 、 $X_2$
5. 前向电流通路各直线导体带的电流分配比例
6. 成像区域的大小以及中心点 0 到线圈的距离  $Z_1$

结合毕奥—萨法尔定律，按给定的要求，可以列出一系列方程，由这些方程即可求出各参数的大小。

## 实施例

下面给出一套根据本发明制作出的射频线圈的实际结果。

本射频线圈用于开放式磁体中，静磁场  $B_0$  为铅垂方向，成像区域为直径 40cm 的球，要求射频场  $B_1$  在球内的均匀性好于  $\pm 3\text{dB}$ ，在球外距球心

35cm 的地方衰减大于 20dB。射频线圈单盘（包括屏蔽板）的厚度（ $Z_2+Z_3$ ）不超过 23mm。磁极直径，也就是射频线圈最大直径，为 92cm，上下射频盘间距 50cm，即  $Z_1$  为 25cm。线圈每个前向电流通路中直线导体为两根，如图 2 所示，可以算出两直线到平分线的距离  $X_1$  为 4cm， $X_2$  为 15cm，距离偏差为  $\pm 1$ cm。外侧直线导体上电流  $I_1$  为 34A，内侧导体上电流  $I_2$  为 17A，反向电流通路电流  $I_3$  为 51A，电流大小偏差为  $\pm 2$ A。不过实际需要电流的大小由系统所需的射频场  $B_1$  大小决定，不会固定为上面给出的值。I 通道半径  $r_I$  即其反向电流通路所在圆周半径为 38cm，Q 通道半径  $r_Q$  为 40cm。前向、反向电流通路距离  $Z_2=13$ mm，反向电流通路与屏蔽板距离  $Z_3=10$ mm。

通过 I/O 端口 16 调谐电容 42、43、44 可以将输入阻抗调到 50 欧纯阻状态，此时反射最小，发射效率最高。由于所需频率  $f$  不同，电容值变化范围比较大，结合调节电容 30~37，一般最后电容 42、43 在 100pF 到 200pF 之间，电容 44 在 200pF 到 400pF 之间比较合适。隔离电路 160 中，电感 41 一般为  $2\mu\text{H}$  到  $3\mu\text{H}$ ，电容 40 为 10pF 到 20pF，这些值除了与频率  $f$  有关外，与电路板加工精度、材料均匀性、反向电流通路中电容分布等都有一定关系。

图 11 给出了此线圈在包含中心点 0 的  $x$ - $y$  平面内的射频场  $B_1$  分布相对大小，取中心点最大值为 1，可以看出 3dB（对应线性值为 0.5）等高线基本上为半径 20cm 的圆。在 3dB 线内，磁场分布是比较均匀的，在该线外，磁场衰减很快。

图 12 给出了过中心点 0 的  $y$  轴上的射频场  $B_1$  分布的 dB 数，从这幅图可以更明显的看出磁场在中心区的均匀性和成像区域外的快速衰减特性。

本例中，每个通道只有四条平行直线导体带，业内人士知道，直线导体带的数目越多，磁场分布可调自由度越大，可达到的均匀性和衰减特性也越高，当然同时线圈设计的复杂度也会提高，因此从工程角度讲，也不是导体带数目越多越好。在一般场合下，四条直线导体带基本上能达到所要的磁场分布特性。此外，各电容、电感等元件的数值，各电流通路导体带数量和位置与具体磁共振系统磁极间空间大小、静磁场 $B_0$ 大小都是相关的。因此上面所给例子并不能说明本发明只适用于这些特定值。

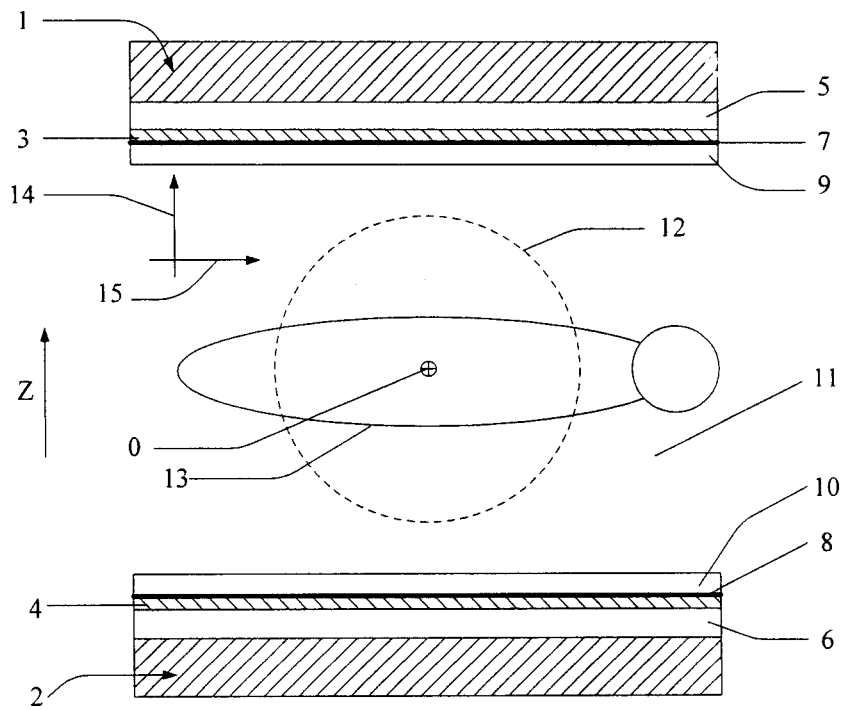


图 1

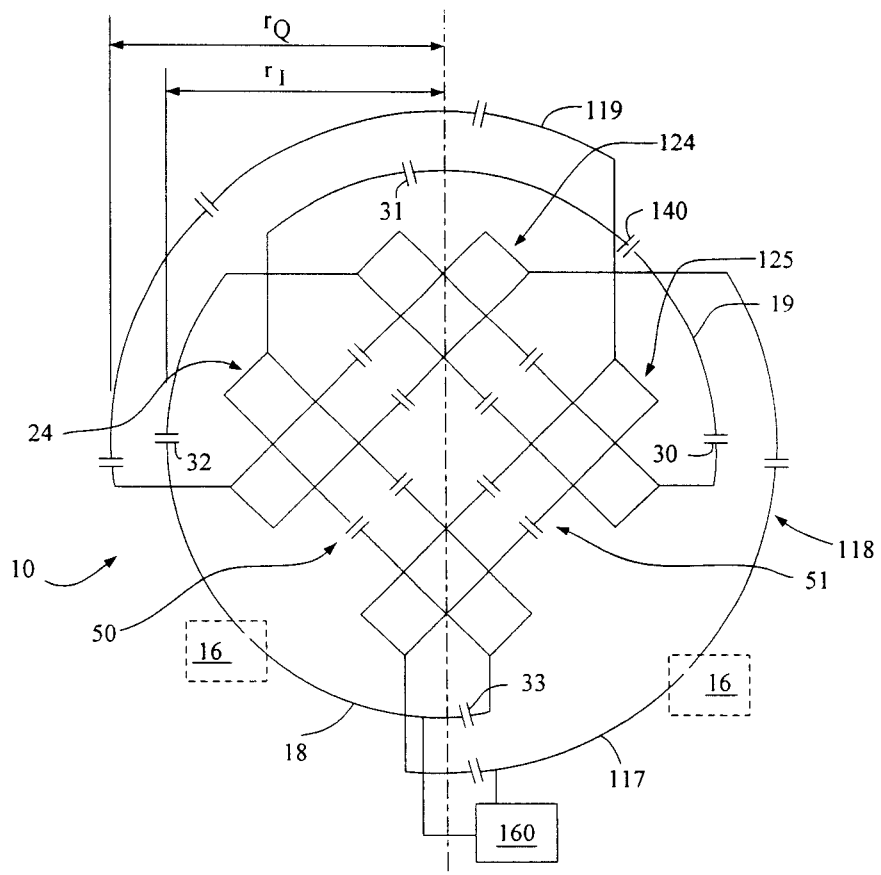


图 2

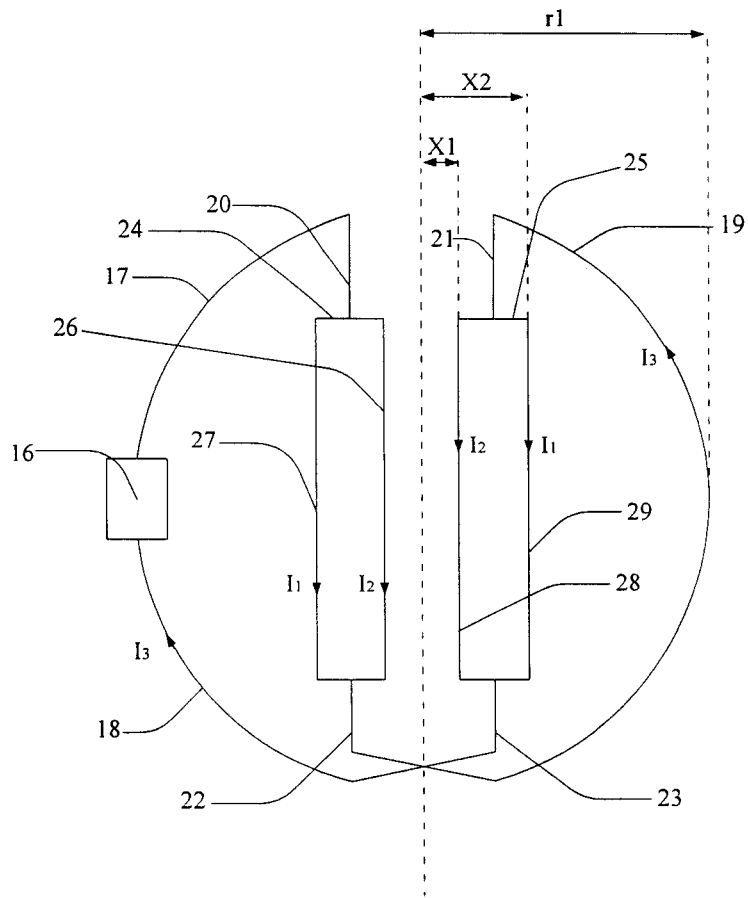


图 3

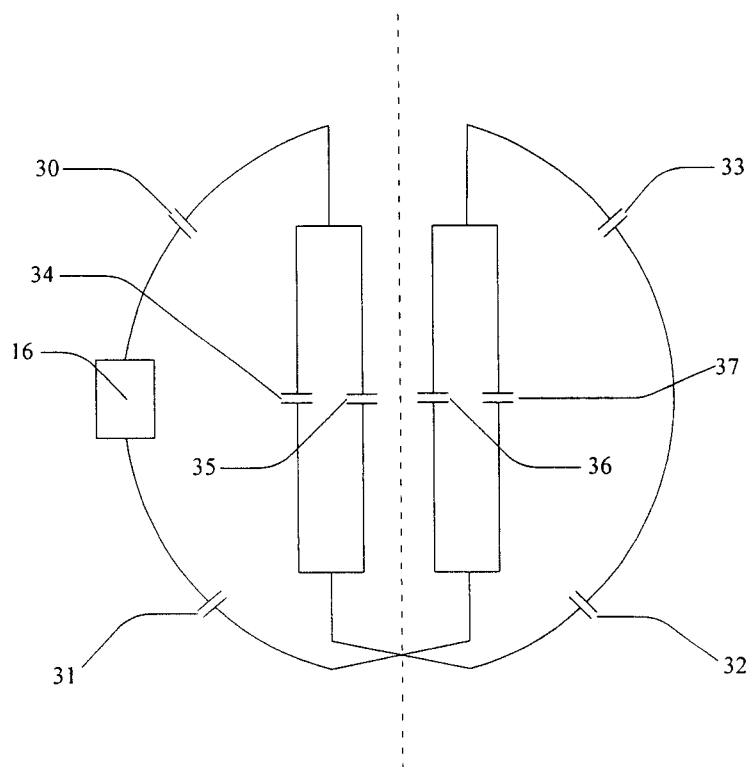


图 4

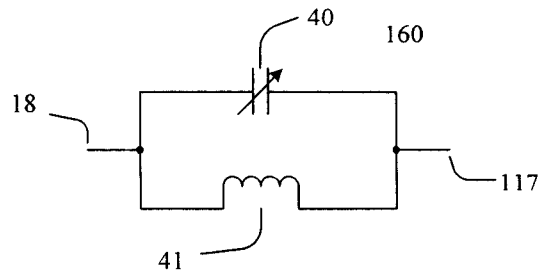


图 5

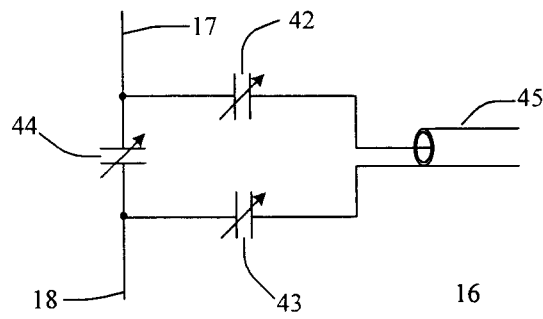


图 6

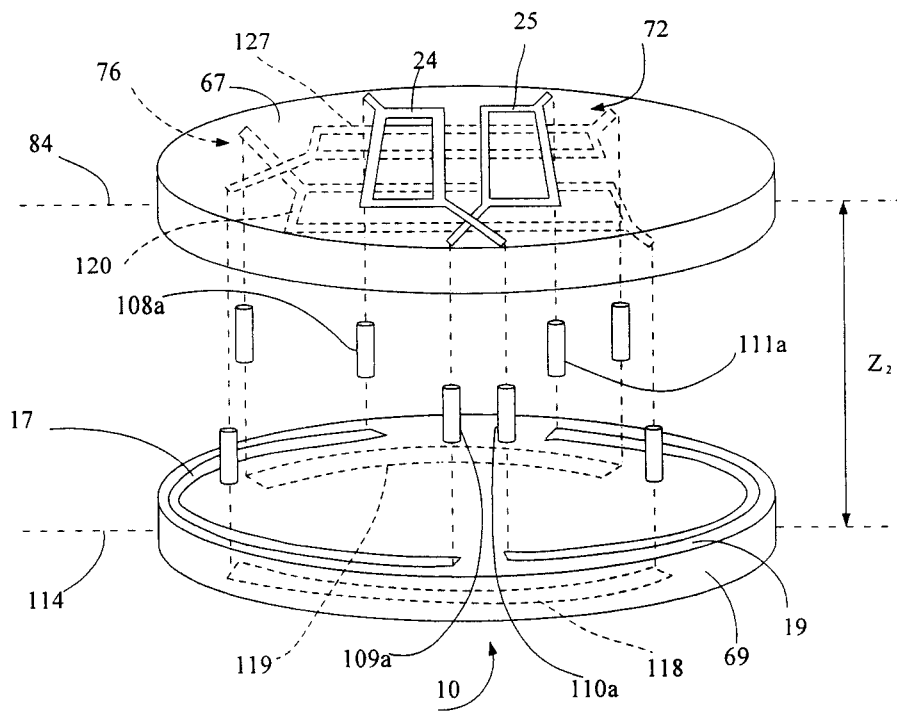


图 7

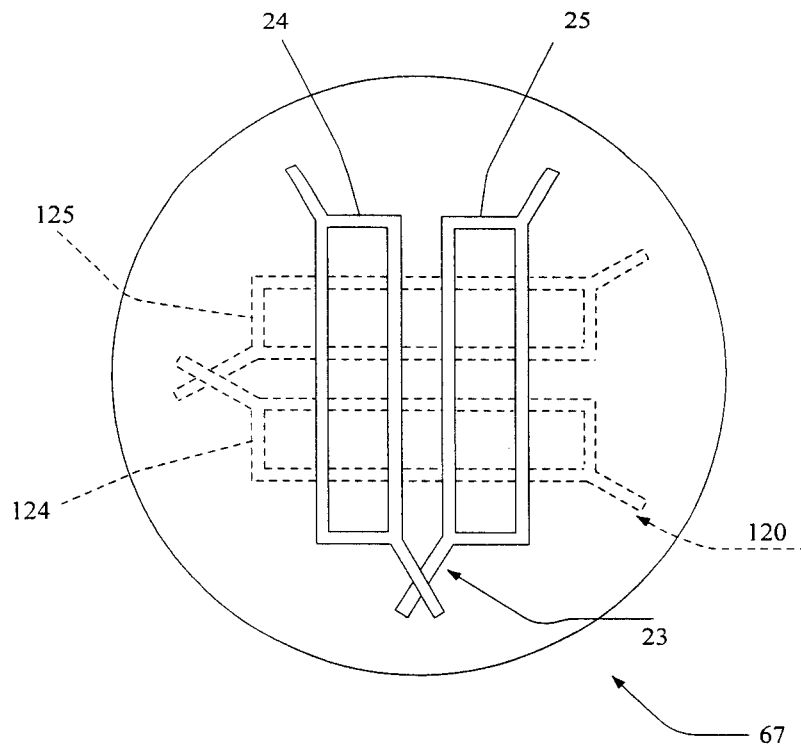


图 8

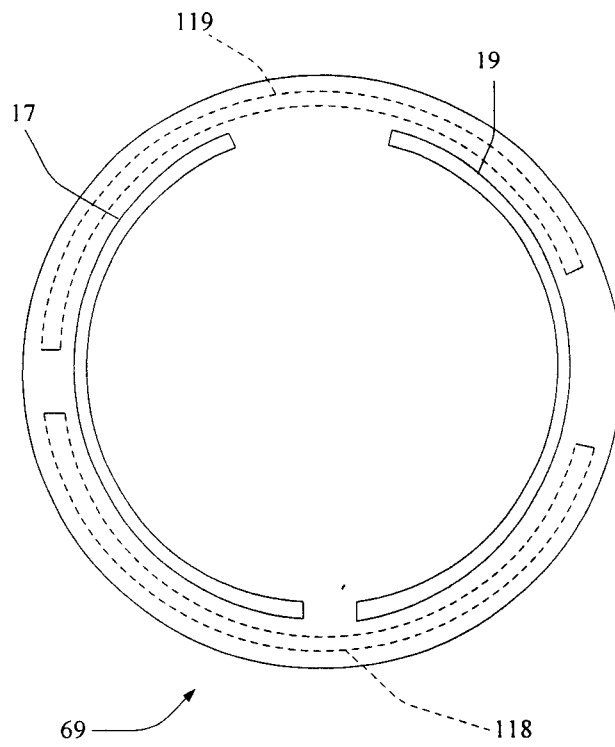


图 9



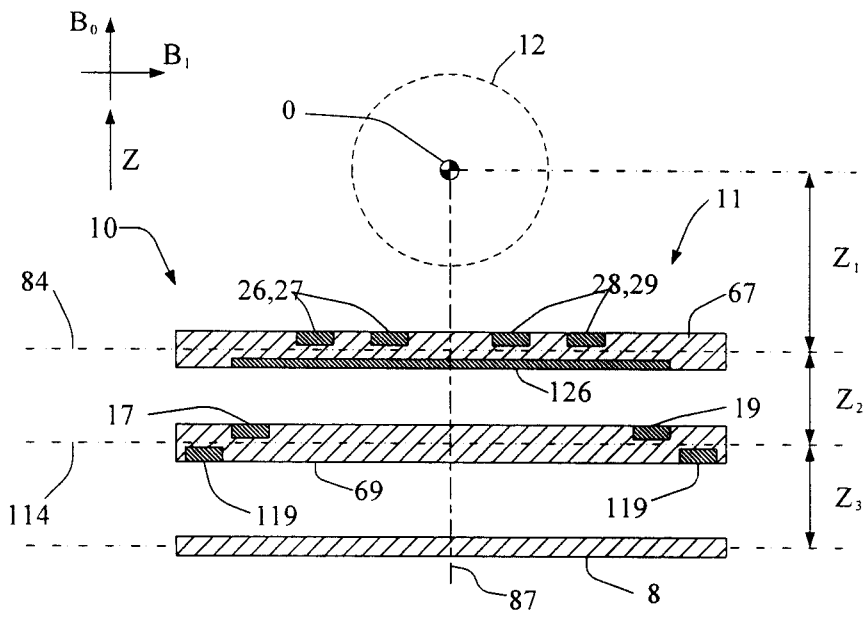


图 10

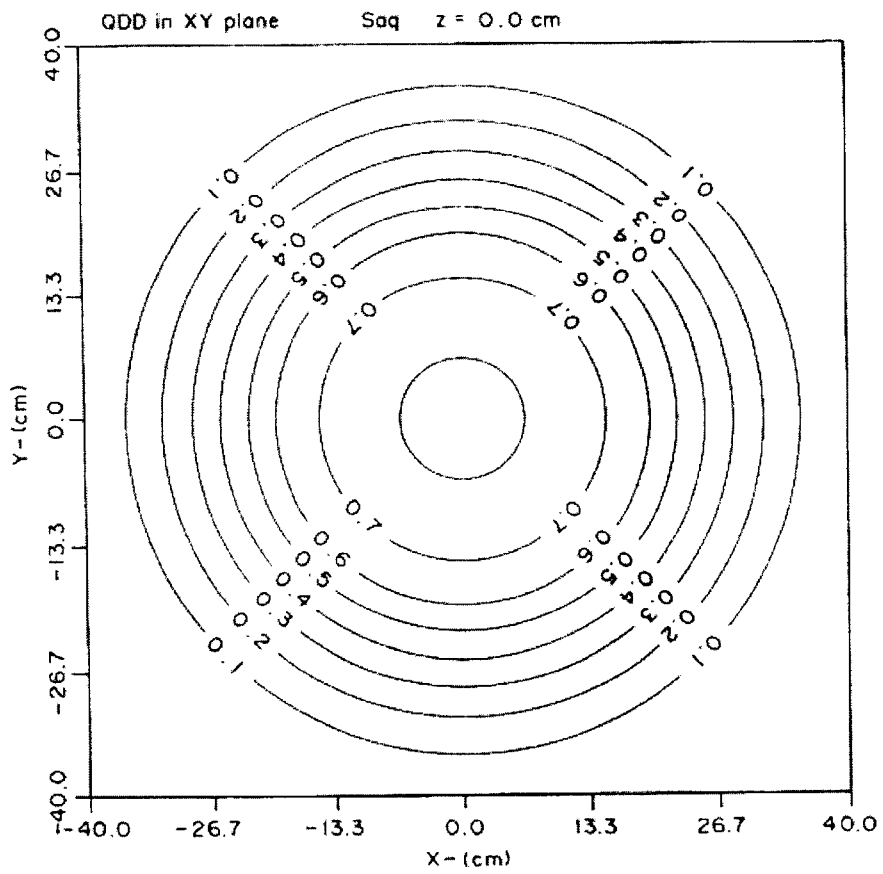


图 11

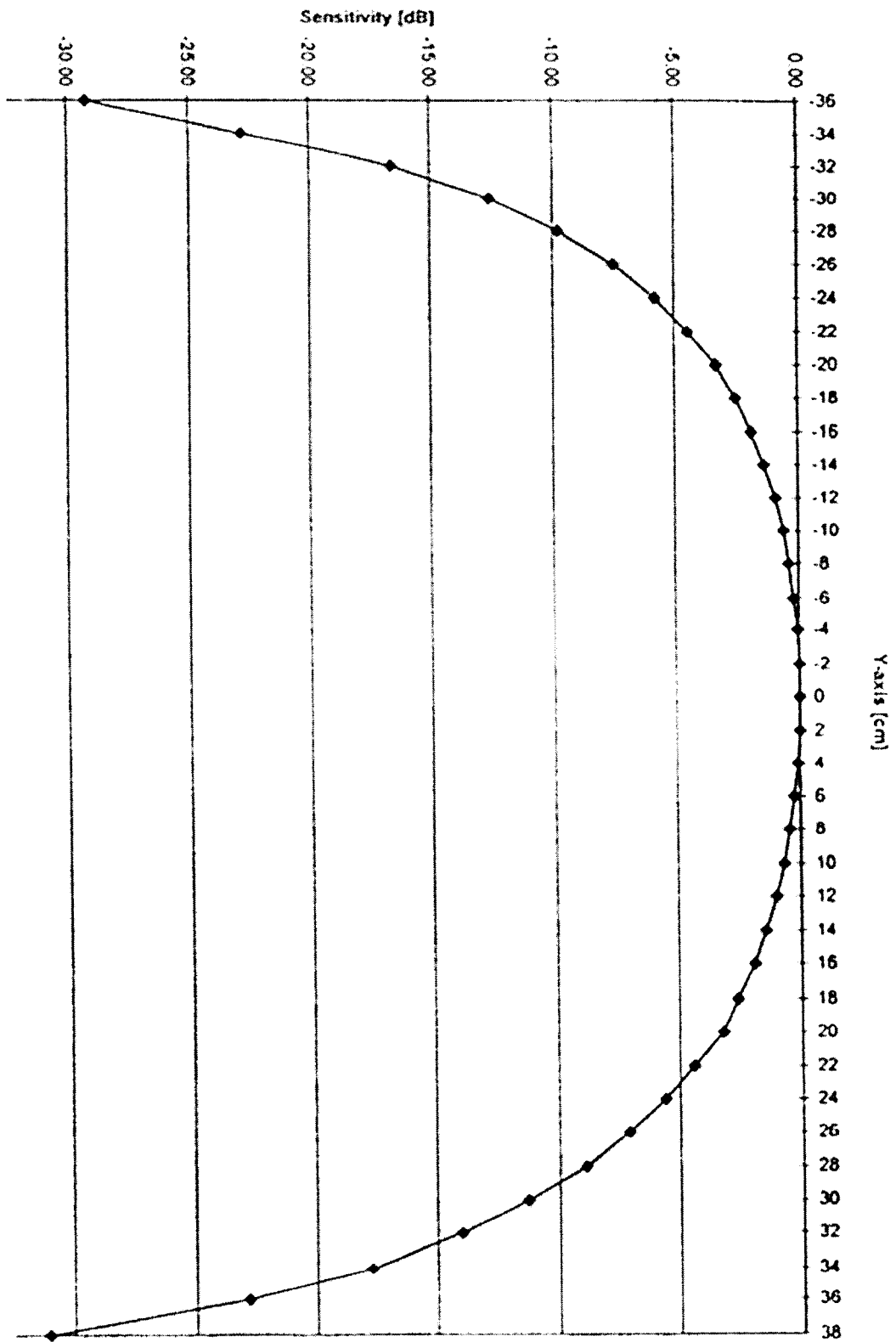


图 12