[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl[7]
G01R 33/385

[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 99805431.3

[45] 授权公告日 2004 年 2 月 18 日

[11] 授权公告号 CN 1138986C

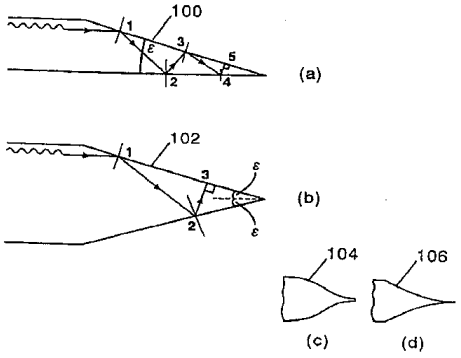
[22] 申请日 1999.3.8 [21] 申请号 99805431.3
[30] 优先权
[32] 1998. 3. 7 [33] GB [31] 9804829.1
[86] 国际申请 PCT/GB99/00692 1999.3.8
[87] 国际公布 WO99/45407 英 1999.9.10
[85] 进入国家阶段日期 2000.10.24
[71] 专利权人 彼得·曼斯菲尔德
地址 英国诺丁汉
[72] 发明人 彼得·曼斯菲尔德
审查员 王晓萍
[74] 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所
代理人 王志森

权利要求书 3 页 说明书 20 页 附图 15 页

[54] 发明名称 对于磁共振成像梯度线圈结构中声音产生的有效控制

[57] 摘要

一种用于磁共振成像系统的静声梯度线圈结构，所说的线圈结构包括一个或多个导体，它们置入一个传声材料板中，所说的板有一个或多个边缘表面，其特征在于；所说板至少一个边缘表面(100、102、104、106)是倒棱的。所说的板包括多孔材料的复合多孔结构，这种材料有正的和负的泊松比 σ，因此总的泊松比 σ 基本上是0。



ISSN1008-4274

1. 一种用于磁共振成像系统的静声梯度线圈结构，所说的线圈包括一个或多个电导体和包括一个传声材料板，所说的电导体或者直接置入该板中或者置入附着在该板的边缘上的头套条中，所说的板有多个表面，其特征在于，所说的板的至少一个边缘表面形成有至少一个尖顶形、锯齿形或倒棱的表面特征，以抑制声波在该板内部的反射。

2. 如权利要求 1 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,传声材料是各向异性的，它沿一个轴是高速的，沿正交轴是低速的。

3. 如权利要求 2 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,传声材料是多孔的。

4. 如前述权利要求 中任何一个所述的静声梯度线圈结构，其特征在于，所说的板包括一个多层的塑料复合物结构。

5. 如权利要求 4 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,多层的塑料复合物结构的所有层都是编织的玻璃纤维织物加固的塑料。

6. 如权利要求 4 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,多层的塑料复合物结构的所有层都是编织的碳纤维织物加固的塑料。

7. 如权利要求 4 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,经导线和纬导线是具有不同波传播常数的不同的材料。

8. 如权利要求 7 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,经导线材料是玻璃纤维，纬导线材料是碳纤维。

9. 如前述权利要求 5-8 中任何一个所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,多个层形成一个叠层，板是由一组叠层形成的，每个叠层都具有不同的波传播常数 k。

10. 如前述权利要求 9 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,所说的倒棱包括单尖端边缘倒棱。

11. 如前述权利要求 9 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,所说的倒棱包括双尖端边缘倒棱。

12. 如前述权利要求 9 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,所说的倒棱包括喇叭口形倒棱。

13. 如前述权利要求 9 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,所说的

倒棱包括尖端顶形倒棱。

14. 如权利要求 10 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,确定倒棱角ε，以使所说板内的声波在垂直内部反射之前已反射 n 次，服从表达式 $n\varepsilon = 90^{\circ}$。

15. 如权利要求 11 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,确定双倒棱的倒棱角ε，以使所说板内的声波在垂直内部反射之前已内部反射 n 次，服从表达式 $(n+1)\varepsilon/2 = 90^{\circ}$。

16. 如权利要求 14 或 15 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,n 大于 5。

17. 如前述权利要求 16 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,将一个或多个吸声材料块加到一个或多个所说倒棱边缘上。

18. 如前述权利要求 17 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,所说的板包括第一低密度材料，第一 低密度材料在外部边缘结合到第二高密度材料，第二高密度材料加工形成一个声腔，所说的声腔包括多个倒棱的表面。

19. 如权利要求 18 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,所说的声腔包括圆形横断面的腔，是从所说的高密度材材形成的。

20. 如权利要求 11 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,对所说的双倒棱的窄端进行改进，以形成一个棱柱形腔，所说的棱柱形腔与所说的倒棱结合起来提供多个声反射表面。

21. 如权利要求 11 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,对所说的双倒棱的窄端进行改进，以形成一个半圆形腔，所说的半圆形腔与所说的倒棱结合起来提供多个声反射表面。

22、如前述权利要求 21 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,包括多个倒棱，从而可以形成第一多尖端形状的结构。

23. 如权利要求 22 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,包括另一个板，所说的另一个板包括第二多个倒棱，从而可以形成第二多尖端形状的结构，所说的另一个板的位置靠近所说的板，从而使第一和第二多尖端形的结构相互锁紧。

24. 如权利要求 23 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,至少一个所说电导体置入在一个状条头套中，所说的状条头套附着到所说的传声材料板中的所说倒棱部分上，形成所说状条头套的材料具有比所说的板材料低的声速。

25. 如权利要求 24 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,所说状条头套设有一个或多个倒棱的边缘。

26、如权利要求 25 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,对于所说的线圈进行冷却。

27. 如前述权利要求 26 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,线圈结构是从一个圆柱形的支撑材料上形成的，其表面带有沿圆柱体轴延伸的多组锯齿、凹槽、或切口。

28. 如前述权利要求 26 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,线圈结构是从一个圆柱形的支撑材料上形成的，其表面带有沿所说表面的圆周方向延伸的多组锯齿、凹槽、或切口。

29. 如前述权利要求 28 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,板安装在一个抗振固定件上。

30. 如权利要求 1 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,所说板包括由多孔材料组成的复合多孔结构，具有正的和负的泊松比 σ 的值，从而使总的泊松比 σ 基本为 0。

31. 如权利要求 30 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,正的和负值的材料包括六边形的和反六边形的管状结构。

32. 如权利要求 31 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,一个或多个导体包括用于产生磁场的一个第一载流导体和用于消除声波的一个第二载流导体。

33. 如权利要求 32 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,

两个导体都置入在板中，而且二者略微间隔开一点并且相互平行。

34. 如权利要求 32 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,两个导体都置入在板中，而且同轴地间隔开。

35. 如权利要求 33 或 34 所述的静声梯度线圈结构，其特征在于,第二导体的返回路径位于板的外侧，并且安装在一个抗振板上。

对于磁共振成像梯度线圈结构中声音产生的有效控制

本发明涉及静声的梯度线圈的结构设计，具体来说，本发明涉及用于磁共振成像（MRI）的静声的梯度线圈的结构设计。

在当代的MRI扫描设备中，为了更加快速地扫描病人，有一种增高梯度强度和加快切换时间的趋势。增高梯度强度和加快切换时间的组合意味着产生极大的洛伦兹力，所说的洛伦兹力是在存在大的静磁场的情况下进行切换时和电流同时产生的，并且还意味着在梯度线圈结构中产生极大的对应数量的振动，这又将产生有潜在危险的噪声电平。我们的解决噪声问题的第一个方案就是根据洛伦兹力的平衡。(有效的声屏蔽：在 MRI 中静声梯度线圈的结构设计原理，P.Mansfield, P. Glover 和 R. Bowtell, Meas Sci Technol 5 ,1021-1025(1994)。 有效的声屏蔽：通过洛伦兹力平衡减小梯度线圈中的噪声，P.Mansfield, B L W Chapman , R. Bowtell, P.Glover, R Coxon, P R harvey, Mag-Res Med 33,276-281(1995)。静声梯度线圈：有效的声和机械屏蔽的分布式横向梯度设计，B L W Chapman 和 P. Mansfield, Meas Sci Technol 6,349－354(1995)。横向静声梯度线圈：使用几何相似原理的洛伦兹力平衡的结构设计，R.W Bowtell 和 P.Mansfield, Mag-Res Med 34,494－497(1995)。使用优化的、力屏蔽的、分布式的、线圈结构设计的一种静声梯度线圈装置，B L W Chapman 和 P. Mansfield, J. Magn Reson B107,152-157(1995)。对于横向静声梯度线圈的结构设计的分析方案，R. Bowtell 和 P. Mansfield, Prod 3rd Sci Mtg SMR, Nice,1,310(1995)。然而，这些方案的效率都是相当差的。

最近已经提出涉及梯度结构内有效消除噪声的两种方案(在 MRI 的静声梯度线圈结构设计中的有效声控，P Mansfield,英国专利申请，95068298. 2，优先权日：1995 年 4 月 1 日，PCT WO96／31785，公开日：1996 年 10 月 10 日；在梯度线圈中声音输出的有效控制，P. Mansfield,英国专利申请，9620138. 9，优先权日：1996 年 9 月 27 日，PCT WO98／13821，公开日：1998 年 4 月 2 日)，它们在原理上完全解决了声音问题。然而，声波在实心支撑结构中的传播特征在实践中表明，实际上要完全消除噪声还必须需要一些诀窍。本发明的目的就是讨论这些诀窍，并且提出可演变成实际实施方

案的方案。

5332972 号美国专利公开了一种用于 MRI 的梯度磁场式磁场发生器的筒管(bobbing)结构。形成该筒管因而使筒管轴向中心部分的厚度比轴向端部部分的厚度要厚，用以增强筒管轴向中心部分的刚度。

本发明提供一种磁共振成像系统的一种静声梯度线圈结构，所说的线圈包括一个或多个电导体和包括一个传声材料板，所说的电导体或者直接置入该板中或者置入附着在该板上的头套条(capping strip)中，所说的板有多个表面，其特征在于，所说的板的至少一个表面形成有至少一个尖顶形、锯齿形或倒棱的表面特征，以抑制声波在该板内部的反射。

本发明还提供用于磁共振成像系统的一种静声梯度线圈结构，所说的线圈包括置入一个板材料中的一个或多个导体，所说的板包括多孔材料的复合多孔结构，这种材料有正的和负的泊松比σ，因此总的泊松比σ基本上是0。现在参照附图描述本发明，其中：图 1 是一个声板的示意图，具有传输电流 I_1 的单个的长方形的电流回路;

图 2 是一个示意图，表示公知的在先技术的从宽度为 d 的发射体表面的发声过程的细节。还表示出在位置 x 的一个发射体表面元 dx,和至一个远点 P 的声路径长度差 $x\sin\theta$,所说的 P 点在和原点 O 成一个角度θ的 x'平面内。对于小的角度，$r \approx r_0$ 是两个平面 x,x'之间的距离。图中还表示出声衍射图案，峰值在沿 x'轴的 $\pm c$ 处。声干涉图案的形成被认为是夫琅禾费衍射过程，尽管没有使用透镜将所有的成分聚焦在点 P。

图 3 是一个声板，表示一个具有电流 I_1 的外部电流回路和一个传输电流 $I_2e^{i\phi}$ 的重新进入的内部回路 32，重新进入的内部回路 32 安装在一个刚性的非导电板上（现有技术）。此外，还有一个空气间隙 34，空气间隙占据穿过这个板的中间通路的大部分。板的每一端留下一小段 36、38 不开缝，以保持两个半边的完整性。

图 4 是一个示意图，表示一短段声板，它是由交替的塑料材料条 42 和金属条 40 制成的，声波 44 在一侧入射;

图 5 一个示意图，表示自一个塑料板的声波发射，所说的塑料板具有内置的导线导体，传输电流为 I_1、$I_2e^{i\phi}$，整个组件置入一个磁场 B 中，磁场方向垂直于板表面。（a）平板具有激发(blazed)输出 R_1、R_2，以及二次激发输出 R'_1、R'_2，R_1 来源于 I_1、R_2 来源于 I_2。（b）为使 R_1 和 R_2 平行激发输出来自在中心铰接(hinge)的一个板。（c）来自如以上（b）中所述的铰接板的激发声输出射线，但其中使用两个小型反光镜产生附加的反射，以使 R'_1、R'_2 和主射线 R_1 和 R_2 平行;

图 7 表示自一个垂直于磁场 B 的平板发射体的激发声波输出，其中结

合一个声的凹透镜，以使射线 R_1、R_2 平行。还包括一个中央反射器板，这个中央反射器板反射与主输出 R_1 和 R_2 平行的交替的激发输出 R'_1、R'_2。声在空气中的速度是 v',声在声透镜中的速度是 v",并且，v'<v";

图 7 是传输电流 I_1、$I_2e^{i\phi}$ 的声发射器板的示意图，其中，将表面加工成交替的楔形断面，在图中用 1 和 2 表示。还表示出加工的表面的侧视图。

图 8 是一个可移动的发射体板，它带有一个外部电流回路 I_1 和一个重新进入的内部回路 $I_2e^{i\phi}$。结重新进入的内部回路插入到一带有中心缝成楔形的定子。(a) 板的外侧部分绕定子穿过枢轴转动点 87、88 转动。(b) 侧视图表示发射体板的定子和可转动外侧部分。

图 9 是用于叠层板结构的一个梯度线圈板支装置。(a) 环形支撑表示用于长方形板 x 梯度结构设计。可以使用相同的长方形的板装置产生 x 或 z 梯度。Y 梯度板和 x 或 z 梯度板相同，只是要转动 90 度。(b) 表示板沿 z 轴分布的板叠置的平面图。

注意：长方形板用作梯度装置结构设计的一个例子。通过弧形板结构设计、或通过对于 x 和 y 梯度进行弧形结构设计并且对于 z 梯度进行圆形结构设计、或通过长方形、弧形、和圆形结构设计的混合，都可产生所有的 3 梯度。

图 10 表示通过一个发射体板边缘的成形部分。(a) 单尖端倒棱表示出 5 次内部反射，最后一次反射垂直于这个单尖端表面。(b) 具有和以上所述相同倒角的双倒棱，并且表示出入射声波的 3 次内部反射，第三次内部反射垂直于倒棱的边缘。(c) 可替换的喇叭口形边缘。(d) 另一个可替换的尖端顶形边缘;

图 11 表示出穿过声发射体板的边缘的剖面图，这个声发射体板为单尖端倒棱形状的倒棱，它结合到较软的吸声材料上。(a) 声吸收体粘结到一个尖端形表面上。(b) 声吸收材料粘结到两个尖端形表面上。

图 12 是一个示意图，表示穿过一个发射体板的边缘的一个剖面，这个发射体板逐渐变细，并且通过致密材料进入声腔;

图 13 是一个示意图，表示穿过一个发射体板的边缘的一个剖面，这个发射体板逐渐变细，并且一个双锥体进入声腔。(a) 声腔是棱柱形状，并且表示出一个入射声波的 12 次内部反射，最后一次反射垂直于一个棱柱表面。(b) 半圆柱形声腔表示出一个入射声波的 10 次内部反射，最后一次反射垂

直于半圆柱形腔的表面;

图 14 是穿过声发射体板的边缘的一个剖面图。(a)边缘具有多个尖端边缘锯齿。(b) 双尖端形齿相互锁紧，但不接触一个第二板。两个板表示出传输电流 $I_2e^{i\phi}$和 $-I_2e^{i\phi}$;

图 15 (a) - (c) 是示意图，表示具有不同的边缘头套(cap)结构设计的倒棱边缘的板的不同方案。(a) 长方形头套，具有载流 I 导线，靠近倒棱的顶部放置，但由头套材料支撑。(b) 类似于以上 (a) 所述的头套装置，但长方形各角顶成一定角度，以减少向回反射到主板材料; (c) 上述 (b) 的另一种改进其中一些锯齿形成在头套材料上，以便进一步减少向回反射到主板材料;

图 16 是一个板的端视图，外导体传输的电流为 I_1 和 $I_2e^{i\phi}$。板的表面在一侧外形如图所示的形状。图中还表示出坐标轴;

图 17 (a) - (e) 是示意图，表示用于内和外圆柱体上的锯齿或翅片的结构，所说的圆柱体形成成套磁屏蔽和声屏蔽的梯度系统。(a) 两个圆柱体的端视图的特写部分分别表示初级线圈、初级线圈的声屏蔽、磁屏蔽声屏蔽、和磁屏蔽的平均半径 a、b、b'、c。(b) 翅片在所有的内部和外部圆柱体表面上沿圆柱体的轴延伸。(c) 切线方向结构的翅片沿内和外圆柱体的全部表面延伸。翅片可以形成单独的槽或形成具有小间距的螺旋状(threadlike)的结构。(d) 如以上 (a) 中所述的内部和外部圆柱体的端视图表示出纵向有翅片的结构的一个小的部分的细节。(e) 翅片外形的细节，它可以是带单锥度的尖端(chisel)形式或带双锥度的楔形形式;

图 18 (a) - (c) 是示意图，表示出用于在梯度线圈内运行冷却管的 3 种结构。(a) 冷却板带有插入的冷却管，用于叠置的长方形板的梯度线圈。在弧形板设计中可以使用类似的结构。(b)冷却管沿如图 17 中所示的圆柱形梯度线圈的圆柱体轴延伸。(c)冷却箔按螺旋方式包在如图 17 所示的一个圆柱形梯度线圈的内和外两个圆柱体的梯度板之间;

图 19 表示(a)具有置入的单个外部电流回路或传输电流 I_1 的初级回路。横向导线通道在板后通过，并且由一个抗振固定件支撑。平行于初级导线还要置入压电式或磁式换能器，如图 20 (b) 板的端视图所示的，其中表示横向导线支撑以及初级导线和换能器在板中的位置。换能器的驱动器相对于 I_1 有可变的幅度和相位;

图 20（a）-（c）是示意图，表示各种换能器结构。（a）一种双极性／双压电晶片陶瓷压电型换能器的示意图。（b）一种磁换能器，从一对由绝缘的可弯曲材料分隔开的导体形成，传输电流 I_2 和 $-I_2$ 的导体形成一个磁偶极子。外部磁场 B 垂直于穿过这对导体的平面。（c）背靠背地放置如以上（b）中所示的两对导体，从而使两对导体中的外部的电流具有相同的电流 I_2 并且内部的一对导体都传输电流 $-I_2$。可以改变 I_2 的相位和幅度。

图 21 表示（a）一个边缘倒棱的并且具有缝隙的声板，所说的声板具有传输电流 I_1 的单个外部回路和具有电流 $I_2e^{i\phi}$ 的两个内部二次导线，两个内部二次导线靠近并且沿板的长轴平行于外部回路导线放置。用于 I_1 的横向导线路径在板的后边通过，板由一个抗振固定件支撑。（b）板结构的端视图，表示置入的外部导线和传输电流 $I_2e^{i\phi}$ 的二次导线，外部导线在回路中形成电流 I_1 的固有的返回回路，二次导线也置入板材料中，它们的返回路径在导体中，导体通过在 A 和 B 以及在 A′ 和 B′ 的两个支撑柱弱耦合到板上。（c）如以上（b）中所述的板结构的端视图，但其中的导体 PQ 和 AB 以及 P′ Q′ 和 A′ B′ 已由如图所示的两对同轴的导体代替。还要注意的是，板的每一半可以分开支撑，如图中示意所示的，从而使板的每一半可以自由的独立振动。

图 22 表示一个示意图，表示声板的一部分，包括 3 个叠层，每个叠层均有一个不同的声传播常数 k_1、k_2、k_3。组合的板可以由传输电流 I_1 的单个导体驱动，或者由传输有 3 个独立电流 $I_1^{\ 1}$、$I_1^{\ 2}$、和 $I_1^{\ 3}$ 的 3 个导体驱动；

图 23 表示挤压成型的塑料管，（a）（c）表示六角形和圆形的横断面，它们的泊松比是正的。（b）（d）是反六角形和反圆形，它们的泊松比 σ_{xy} 是负的。

可以看出，放在垂直于板平面的一个大的静磁场 B 中的长方形板 10 在受到横向压缩或膨胀的洛伦兹力作用时要产生板的厚度的变化，即变厚或变薄，这种板的厚度的变化要沿所加静磁场的方向在垂直于板平面的空气中发射声波。压缩型洛伦兹力的产生是由于在图 1 的形成长方形回路 12 的板平面中插入有导线。如果与板的长度相比板的宽度是窄的，我们将忽略沿板长轴的声传输，并且我们将着重讨论波在横向方向的传播。

进一步可以看出，由于声在板中的传输性质决定，发射的声是作为两个激发函数出现的，这两个激发函数以与法线成略微不同的角度 $\pm\theta_c$ 离开同一

一个板。这一状况由下式表示:

$$|A_{SAP}| = a[\text{sinc } b(x' - c) + \text{sinc } b(x' + c)]. \quad [1]$$

其中：近似地有 $\sin\theta_c \approx \theta_c = c/r_0$ 并且 $\pm c$ 是在一个平面中平行于这个板的辐射状输出的峰值移动，并且移动了距板一个 r_0 的距离。其幅度由下式给出:

$$a = \frac{\alpha\bar{d}\sigma\tau\beta\bar{k}F_m\Lambda(\omega)}{r_o} = \frac{2\sigma\tau F_m\Lambda(\omega)}{r_o} \quad bc = \Gamma_1 b_o c_o \alpha\beta = \Gamma_1 bc \quad [2]$$

其中 Γ_1 由下式给出:

$$\Gamma_1 = F_m\Lambda(\omega)2\sigma\tau/r_o \quad [3]$$

并且，其中 $\Lambda(\omega)$ 由下式给出:

$$\Lambda(\omega) = \frac{1}{\omega\left[\left((\omega_o/\omega)^2 - 1\right)^2 + K^2/\omega^2\right]^{1/2}} \quad [4]$$

方程控（2）中的其它量的定义如下:

d 是板宽度，$\bar{d}$ 是板平均宽度，σ是泊松比，τ是板的半厚度，F_m 是每单位长度的比洛伦兹力的最大值，v 是板中的波速，$\bar{v}$ 是板中的平均波速，f 是所加的电流的频率，$\bar{f}$ 是平均频率，$\omega = 2\pi f$，ω_0 是板的基本机械共振角频率，K是板的粘性阻尼常数。在固体中的平均波传播常数 $\bar{k}$ 由下式给出:

$$k = \gamma\beta\bar{k}. \quad [5]$$

分别引入因子α、β、γ是为了计及不精确知道 d、v、f 产生的微小的不确定性，并且将因子α、β、γ定义为 $\alpha = 1 \pm d/\bar{d}$、$\beta = 1/(1 \pm \Delta v/\bar{v}) \approx 1 \mp \Delta v/v$、$\gamma = 1 \pm \Delta\bar{f} = f$ 从误差分析可知，形成的不确定性由下式给出:

$$\alpha\beta\gamma = 1. \quad [6]$$

在以下所述的大部分内容中，我们取 $\Delta f = 0$，所以 $\bar{f} = f$ 并且 $\gamma = 1$。在方程（2）中的其它项由下式定义:

$$b = \frac{\bar{d}k'\alpha}{2r_o p} = b_o\frac{\alpha}{p} \quad [7]$$

k′是空气中的声波传播常数。正弦函数围绕衍射原点移动了 ±c，其中 c 由下式给出:

$$c = \frac{\bar{k}r_o p\beta}{k'} = c_o p\beta. \quad [8]$$

项 p 是无量纲的，由下式给出:

$$\frac{1}{p} = q - 1 \qquad [9]$$

其中 q 由下式给出:

$$q = \frac{2k\pi_o}{\bar{a}dck'} \qquad [10]$$

应该指出，$F_m = BI\sin\xi/\rho$,其中 B 是静磁场，I 是流过回路的电流，ξ 是磁场方向和电流方向之间的角度，ρ 是每单位长度板材料的密度。

对于夫琅禾费衍射，我们从方程（1）注意到，当 x' 是 0，在点 O' 点接收的声幅度 A_{SAP} 简化成我们以前的结果（有效的声屏蔽：在 MRI 中静声梯度线圈的设计原理，P. Mansfield, P. Glover, R. Bowtell, Meas Sci Technol 5 ,1021-1025(1994)。

从方程序（1）显然可以看出，声输出包括有一个衍射图案，其两个峰值发生在 $x' = \pm c$。在图 2 中示意表示发射体板的结构和衍射图案的形成。

在我们的现有技术（在 MRI 的静声梯度线圈设计中的有效声控，P. Mansfield, 英国专利申请，95068298. 2，优先权日：1995 年 4 月 1 日，PCT WO96／31785，公开日：1996 年 10 月 10 日；在梯度线圈中声音输出的有效控制，P. Mansfield, 英国专利申请，9620138. 9，优先权日：1996 年 9 月 27 日，PCT WO98／13821，公开日：1998 年 4 月 2 日）描述的一个新的实施例中，已经提出如下的建议：板应该有两个回路，即传输电流 I_1 的一个大的外部电流回路 30 和传输电流 $I_2e^{i\phi}$ 的一个重新进入的内部回路 32，所说的板应该有一个中心缝隙 32，图 3。在这种结构中，两个电流的幅度和相位是可变的。在该工作过程中，对于中心的垂直板平面的声波进行考虑，并且表明，借助于适当的电流和相位，有可能在 $x' = 0$ 这一点在极大的程度上消除声波。

对于这里给出的结构进一步理论研究表明，对于图 1 的单回路板，重新进入的内部回路结构设计也产生可用正弦函数近似描述的声输出，在这种情况下，有 4 个声输出，每半个板组件产生两个声输出，由下式给出:

$$A_{SAP} = A\left\{\operatorname{sinc}\frac{d}{2}(j\sin(\theta+\theta_o)+k)+\operatorname{sinc}\frac{d}{2}(j\sin(\theta-\theta_o)-k)\right\}$$

$$+Be^{i\Psi}\left\{\operatorname{sinc}\frac{d}{2}(j\sin(\theta+\theta_o)-k)+\operatorname{sinc}\frac{d}{2}(j\sin(\theta-\theta)+k)\right\} \qquad [11]$$

是每半个板相对于O点的环形位移。幅度A和B分别正比于外部回路电流I_1和重新进入的内部回路电流I_2。角度ϕ是I_1和I_2之间的相对相位。通过考虑声输出的空间分布，从以上所述的表达式在理论上我们可以得出结论：对于每半个板组件，在正确的实验条件下，完全消除声波在理论上是可能的。在这项工作的某些细节方面对这些条件进行考察，从这些条件可以研究出一组实施例，从而实现不同程度的声波消除。

激发(blazing)

为了反复逼近上述结果，对于图3的重新进入的回路设计，用方程（11）表示的4个正弦函数来描述声输出。这些正弦函数的形式表明，每个正弦输出都有一个非零的激发角。为了实现完全的声波消除，这个激发角在理想情况下应该是零。这就是说，在板材料内的声速v应该是无穷大。对于大多数的塑料材料，v在1－3千米／秒范围内。通过形成复合材料，如填充玻璃的环氧树脂或填充金属的环氧树脂，可以显著提高这个速度。通过如图4所示使用交替的金属条40和塑料条42制造板，还可以提高板中的声波的有效速度。一个优选实施例使用编织的碳纤维或玻璃纤维织物层作为环氧树脂中的加强部件。但一般情况下，人们必须面对这种现实：v总是有限的。因此，问题就是人们是否能采取另外的措施进一步减小激发角(blaze angle)。图5（a）示意地表示出来自图3的通电的板10的每个半板的声输出射线R_1、R_1'。如果相对于R_1来说R_2的相位是180度，因为射线在空间没有重合，所以没有任何声音消除。图5（b）所示的板10发生了弯曲，从而使R_1和R_2平行。然而，单靠这个过程还不能产生破坏性的干涉现象，因为二次射线R_1'和R_2'都有效加倍了它们的激发角。在图5（c）中，在靠近板平面处引入小型反光镜50、52，现在产生了完全平行的输出。

在图6中，表示出一个可替换实施例，其中使用一个声透镜62将来自平板60的发散射线变为平行输出，在所说的声透镜62中的声速v"大于空气中的声速v′。为使这一结构能够工作，要从定位在中央的反光镜64的两侧反射二次射线。

在图7中表示出另一个固定式的结构。这里，将发射板表面70加工形成一组相互交错的楔形物，从而使由电流I_1产生的固体中的声波被限制在图7中标为1的这些条上，并且以相似的方式使由I_2产生的声波限制在图7中标为2的这些条上。这样一种结构可能在板上产生平行的输出，并且，破坏性

标为 2 的这些条上。这样一种结构可能在板上产生平行的输出，并且，破坏性的干涉过程的效果取决于条的宽度和发射的声波在空气中的扩展。这个固定式的结构的一个困难是它需要知道激发角才能加工楔形物的角度。

在图 8 中表示出一种可替换的结构，这种结构可以用于一个完整的双板结构 80，这个双板结构 80 可实现机械方式的调节。这个结构有一个重新进入的回路结构，具有外部和内部电流 I_1 和 $I_2e^{i\phi}$。加工发射板以产生一个中央定子 82。板的外部堞形部分 84、86 绕枢轴 87、88 转动，并且沿正确的激发方向产生波，从而可以产生消除作用，如图 8（b）所示。就图 7 的讨论情况而论，波消除的效果取决于定子 82 中指状物部分的数目和它们的宽度。

内部反射

为了进一步实现这一步骤，还必须考虑声波在固体中传播的细节。在至今已经研究的所有理论中，都忽略或忽视了波的内部反射。这在说明正弦函数输出的细节方面，尤其是正弦函数的宽度方面，变为极其重要。这些考虑导致双板组件的一个新的表达式，由下式给出：

$$\begin{aligned} A_{SAP} = A\{&S_1(\theta+\theta_o,k)\,\mathrm{sinc}\frac{d}{2}(j\sin(\theta+\theta_o)+k) \\ &+S_1(\theta+\theta_o,-k)\,\mathrm{sinc}\frac{d}{2}(j\sin(\theta-\theta_o)-k)\} \\ Be^{i\phi}\{&S_2(\theta+\theta_o,-k)\,\mathrm{sinc}\frac{d}{2}(j\sin(\theta+\theta_o)-k) \\ &S_2(\theta-\theta_o,k)\,\mathrm{sinc}\frac{d}{2}(j\sin(\theta-\theta_2)+k)\} \end{aligned} \qquad [12]$$

其中

$$S_1(\theta\pm\theta_o,\pm k)=\frac{\sin(Nd(j\sin(\theta\pm\theta_o)\pm k))}{N\,\mathrm{sind}(j\sin(\theta\pm\theta_o)\pm k)} \qquad [13]$$

和

$$S_2(\theta\pm\theta_o,\mp k)=\frac{\sin(Md(j\sin(\theta\pm\theta_o)\mp k))}{M\,\mathrm{sind}(j\sin(\theta\pm\theta_o)\mp k)} \qquad [14]$$

在这个表达式中的 N 和 M 是每半个板组件中的反射次数。对于相同的材料，人们期望 N 等于 M。在声速大于 2 千米／秒的大多数塑料复合材料中，观察到许多次反射，反射次数是通过输出的正弦函数的宽度判断的。在与此类似的情况下，I_1 和 I_2 通常接近相等，但取决于导线固定在板中的牢固程度。通常的作法是，在板中研磨出一个槽，槽中插入导线，并将导线与环

从对于方程（12）的整个表达式的详细分析，将会注意到，当 $I_1 = I_2 e^{j\phi}$ 并且$\phi = 2\pi$，并且当 k=0 时，可以使整个表达式为零。k=0 这一条件意味着板材料中的声速 v 为无穷大。这个条件在实践中显然是不能实现的。为了扩充我们较早些时候的说法，通过考虑复合塑料材料是可以逼近这个无穷大的速度的，为此要在复合塑料材料中选择填充物以增加在基本树脂材料上总的声速。惰性填充物材料的范围包含玻璃和碎细的金属。前述的一种替换方案是用交替的金属条和塑料条制造所说的板，如图 4 所示。金属条越宽，穿过板的平均声速越高。如果整个板都由金属制成，则可以实现的最高速度对于铝为 5.1 千米／秒，对于铜为 3.6 千米／秒。如果整个板都由玻璃制成，则可以实现的最高速度为 5.0 千米／秒。这些数字是填充玻璃的环氧树脂为基础的复合物的最高速度的两倍或更高，但仍旧没有满足无穷大速度的要求。如果我们接受有限速度这一事实，根据以上所述就可能通过机械激发得到声波消除的结果。

另一种可替换的方案

至今，我们已经讨论了在一个梯度线圈系统中的板的特定段中所发生的声现象。对于整个梯度线圈组件，我们已经设想出许可沿着 z 轴适当分开的板，从而沿着所有 3 个轴可以产生一个均匀梯度场。在图 9a 中实例表示出使用在支撑环 92、94 上支撑的一个长方形板 90 的特定的板组件。支撑板中各段的方案意味着必须能调节成各种板间隔，以实现上述的梯度均匀性。因此，在板之间将存在潜在的空气间隙 96。这种情况如图 9（b）所示。

因为对于指定的频率存在关系λ=v/f,所以波长λ正比于声速。因此，对于低的空气中的声速，波长是短的，一般情况下为 11.4 厘米。这就是说，存在从不同的板发出声波沿声的传播轴产生建设性的或破坏性的干涉的可能性。有两种方案是可行的。第一种方案是适当的定位板中各段以消除在操作频率的声波。对于这种结构，我们假定，在线圈组件中产生的声波穿过空气并且穿过其它的板中各段传播，因此，在任何有关干涉的计算,不仅需要包括空气中的声速，而且包括在板的叠层中的传播声速。

一种可替换实施例是用具有高的声波衰减能力的橡胶状的材料填充空气间隙，其目的在于在内部吸收大部分在板之间的内部声波传播。诸如聚苯乙烯之类的较硬的和较少的吸收材料具有约 1 千米／秒的声波传播速度，并且在 3 千赫将得到 33 厘米的波长，但衰减较少。在一般情况下，用某些固体材

料填充空气间隙似乎较好，这种材料还有助于将板中各段表面的反射减至最小。到达梯度线圈组件的端表面的声波和同时来源于梯度线圈组件内的不同深度的声波共同作用导致产生破坏性的干涉，于是，可以将其加到在各个板中实现的总衰减上。对于较高的频率这种情况得以改善，但在较低频率由于干涉产生的反向轴向衰减将要减小，因而，当组合的板中的段和间隔结构中的波长等于线圈长度的一半时，实质上不存在破坏性干涉。从每个板中的段输出的声波，对于均匀隔开的板来说，以非破坏性干涉方式叠加，增加了沿轴向方向输出的噪声，这个噪声约为单板输出的 N 倍，其中 N 是在每半个梯度线圈组件内的板中的段数。

正弦函数的宽度控制

早些时候我们已经说过，正弦函数的宽度和声波在前、后穿过板时遭遇反射的次数相关。当 N，M = 1 时，产生最宽的正弦函数。这意味着没有反射。为了实现这种情况，必须在声波首次通过时完全吸收声波。如果可能作到这一点，则可以看出，对于与相当小的 k 值对应的很大的但有限的 v 值来说，对于立体角接近 2π 弧度的双板组件，可以在一个极大的程度上实现消除声波。这种说法的基础是我们使用方程（12）和值 k = 6 的计算，值 k 又是基于使用编织的玻璃纤维织物填充的环氧树脂得到的。然而，从我们较早的评论可以看出，由于板使用编织的碳纤维织物加强的塑料，可以使 k 值较小。应该强调的是，这个结果是基于如下的假设:固体中的声波在边缘处不经受反射。现在我们着手讨论实现这结果的方案。

内部反射的减小

有几种方案可以实现几乎没有或根本没有内部反射的板结构设计。最简单的也是最直观的方案是由填充有合适的高弹性体的塑料树脂制作所说的板。加入高弹性体的目的是为了吸收声能，并且如果声波幅度在第一次通过时就降到零，则不存在任何反射。表达式方程（12－14）如所给出的不包括波的吸收项，但也可以以简单的方式包括这些吸收项，并且，增加能量损耗的机构的结果是：来源于各个板部件的声波的相位产生了严重的变化，因此，波的消除变得很困难。因此，我们要寻求一个变通的方案，既减小了内部反射，又不使用板中的损耗的机构。

为此，要对于板的边缘进行整形或倒棱处理，并且迫使倒棱内的波经过多次内部反射，从而在板的边缘实际上完全吸收这个声波。在图 10 中表示出

为此，要对于板的边缘进行整形或倒棱处理，并且迫使倒棱内的波经过多次内部反射，从而在板的边缘实际上完全吸收这个声波。在图 10 中表示出这个过程。我们表示出两种可能性，图 10（a）表示的是单倒棱，图 10（b）双倒棱边缘。对于单倒棱或尖端边缘 100，我们表示出，倒棱角ε与垂直反射前的内部反射次数 n 有关，由下式给出：

$$n\varepsilon = 90^\circ . \qquad [15]$$

对于一个双倒棱边缘 102，如图 10（b）所示,内部反射到垂直方向的次数较少，并且由下式给出：

$$\left(\frac{n+1}{2}\right)\varepsilon = 90^\circ . \qquad [16]$$

为了有效防止内部反射穿过所说的板，n≥5 似乎是必要的，对于尖端边缘，这给出 18 度的倒棱角。双倒棱的形状变形是图 10c 的喇叭口形式 104 和图 10（d）的尖端顶形式 106。为了改善在一个楔形物或其它形式边缘内每次反射的声波吸收，可以向如图 11（a）所示的方块 110 形式的或如图 110（b）所示的薄片 112 形式的一个或两个锥形表面上添加吸声材料。

声匹配

限制或避免内部反射的另一种方案是在板的边缘进行声匹配。对于平直的未进行倒棱的边缘，固体的空气界面没有实现声的匹配。声匹配的条件是穿过界面的能量通量是一个常数。如果用另一种固体代替空气，则声匹配的条件是：$a_1\rho_1A_1^2V_1 = a_2\rho_2A_2^2V_2$。其中，$a_t$, ρ_t, A_t, V_t 分别是第 t 种介质横截面积、密度、波幅度、和波速度。因此这个方程意味着，为了维持穿过界面的通量密度从高速到低速不变，必须增加在低速介质中的声幅度和／或密度。声阻抗 $Z = \rho v$。我们还注意到，在两种介质之间的界面上的反射系数 $\Gamma = (Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2)$，因此，对于 $\Gamma = 0$，$Z_1 = Z_2$。因此，当两种材料是阻抗匹配时，将较硬的材料形成锥度，使之与较密的低速材料平接，就可以实现声匹配。因为已经实现了声匹配，所以必然能够完全吸收致密材料中的能量。为此，既要使尖端形成锥度，又要在较低速度的材料中实现大的声衰减。用于高速介质的合适的材料可以是叠置的玻璃纤维或碳纤维编织的用环氧树脂浸渍的织物。低速介质可以是铅合金或铅锡锑合金。

声吸收的另一种方案是让截获在低速介质 122 中的声波辐射进入声腔 120 中，如图 12 所示。

在图 13 中表示出几个锥形结构和腔室。图 13（a）所示的双锥形结构提供一个棱柱形腔 130。在这种结构中，有可能实现多达 12 次入射声波的反射。双锥形结构可防止某些输入的辐射直接进入腔内。在图 13（b）中表示一个半圆形腔 132，还有一个双锥形部分。所示的内部反射次数类似于上述图 13（a）。

上述这种腔结构的困难之一是：它们延伸板的宽度只有几个厘米。一般来说，这不是一个期望值，但可以实现的衰减却是极高的。对于腔的结构和以及对于单尖端边缘的结构这两者的替换是使用如图 14（a）所示的多尖端边缘或锯齿边缘 140。这里，在不扩大板宽度太多的情况下也可以实现期望的锥度角。实现锯齿的方案是加工一个固体块，或者按另一种方式，制作一个叠层的片结构，其中，在装配之前在片上加工出各个尖端的锥。

可以使用带有锯齿的边缘以有助于互锁式结构，如图 14（b）中对于重新进入的内部回路所示的。其中没有表示出来外部电流回路。互锁式结构使内部回路宽度能明显减小。

在图 15 中表示的是图 11 的简单方案的扩展。这里，高速板 10 材料的带锥度的边缘配对装入还容有有效的导线 152 的低速材料的第二边缘状条头套 150（阴影部分）的 V 形槽内。从主板进入状条头套 150 的声波在其内部得以反射和衰减，图 15（a）。通过使状条头套的顶角 154、156 转变角度，可以改善这个内部反射过程，图 15（b）。为了进一步改善内部反射和衰减效率，可以将状条头套的边缘作成锯齿形 158，如图 15c 所示。

板的外形加工

在导出的方程（11）或（12）中，假定板的厚度 2τ是常数。然而，如果外形加工的板的厚度τ（x）是距离的函数，从而有

$$\tau(x)\sin kx=h \qquad [17]$$

其中 h 是常数，则对于一个特定的 k 值，有

$$\tau(x)=\frac{h}{\sin kx}\ . \qquad [18]$$

在这种情况下可以看出，在方程（11）或（12）中的 k 有效地消除了，所有的激发角全都是零。这就立即将 A_{SAP} 降为零。在图 16 中表示出一个外形加工的板的横断面 160。

实际的梯度线圈结构

如果在支撑介质中声速约为 2.5 千米／秒或更高，并且如果所有的内部

装成有 3 个轴（x、y、z）的梯度线圈组件。在我们的现有技术中（在 MRI 的静声梯度线圈设计中的有效声控，P. Mansfield,英国专利申请，95068298. 2，优先权日：1995 年 4 月 1 日，PCT WO96／31785，公开日：1996 年 10 月 10 日；在梯度线圈中声音输出的有效控制，P. Mansfield,英国专利申请，9620138. 9，优先权日：1996 年 9 月 27 日，PCT WO98／13821，公开日：1998 年 4 月 2 日），给出了使用长方形的、圆形的、或弧形结构板中各段的梯度线圈的实例。

这种类型的梯度 set 包含叠装到一完整的梯度 set 中的上述板，通常产生相对短的梯度线圈，以及这种结构设计常用于制造头部梯度线圈。为了利用声控线圈整体成像，由于空间包含在例如 1.0 米孔径磁铁中，最好，考虑圆柱形的扇型分布式线圈结构。

圆柱形分布式线圈

圆柱形分布式线圈在一般情况下将包括平均半径为 a 的用于支撑初级线圈 x、y、z 的一个内部圆柱体和平均半径为 c 用于支撑 3 个磁屏蔽线圈的外部圆柱体 172。插在这些磁线圈之间的是两组声屏蔽线圈，每组声屏蔽线圈有 3 个声屏蔽线圈，它们分别由平均半径为 b 和 b'的内和外圆柱体支撑。这种结构示意地画在图 17（a）中。为了根据这个声控原理受益，必须确保：在固体支撑介质中产生的圆柱形波完全被吸收在圆柱体表面。这就是说，必须在所有的表面上加工出如图 17（b）所示的沿圆柱体的轴延伸的各组锯齿形槽、凹槽、滚花、或翅片 174。外半径为 b、声传播速度为 v_1 的内圆柱体也有锯齿形槽或翅片 176，锯齿形槽或翅片 176 与在声传播速度为 v_2 外圆柱体的内表面上的类似的一组锯齿形槽 178 啮合但不接触。内和外圆柱体 170、172 不得轻易振动，这将要求两个圆柱体之间有某种相当轻微的耦合支撑。合适的材料可能是软橡胶，这种软橡胶可粘结在关键点的两个翅片之间的间隙中。在两个圆柱体的之间的大部分间隙将留空。可在模注后将这些翅片加工成圆柱体表面，或者按另一种方式，在圆柱体放在一个形状合适的模具内的条件下模注这些翅片。另一个可替换的方案是将翅片粘结到平滑的圆柱表面上。

在图 17（c）中表示出的一种可替换的结构是：翅片 171 沿切线方向延伸到圆周表面，在所有的圆周表面形成一个螺旋状结构。

在图 17（d）和 17（e）表示出适合于上述（a）、（b）两种结构的两种翅

片形状。凹槽的角度和深度由方程（15）和（16）控制。

冷却

在所有的实际梯度线圈结构中，如果使用极大的电流，则可能必须冷却绕组。由于声控原理的精确性和精密性，如果使用分段叠置的板的方案，则对于所有的绕组都使用相当小直径的铜导线。对于圆柱形分布的梯度线圈设计，实现绕组的最好方案是：在相关厚度的铜的连续薄片上蚀刻、冲印、冲压出导线的路径。对于 3 个轴的铜片必须适当地使它们相互绝缘。再有，铜片要相当地薄，以便在声学设计中调节关键尺寸。因此，在一般情况下，这将要求某种流体冷却管为圆柱形盘管和叠置的板状盘管。

最好通过使用适当的交错插入梯度板之间的附加的冷却板 180 来实现叠置的板 181 的冷却，并且，其中的冷却盘管 182 可以是薄的铜管，铜管的卷绕应该与实际的载流绕组密切地一致。这种结构示于图 18（a）中。

对于圆柱形的盘管结构，由 3 个铜片导体组成的每一个组都可以包括两层冷却。在一种结构中，冷却管 184 可以是沿圆柱体的轴线前后延伸的铜管，如图 18（b）所示。因为有 4 组铜片，每一组铜片有 3 个冲压的铜片，所以必须有 4 个冷却盘管结构。

一种可替换的结构是有螺旋式走向但在梯度绕组之间的铜管 186，图 18（c）。

定位的换能器

虽然上述的有关消除声波的构思已经证实是可行的，但正如我们已经说过的，效率的大小取决于 k 的值。进而，实际的消除过程是在介质 k'下发生的。当这个介质是空气时，这由于通过空气的传输过程可能出现问题，并且由于存在定位的物体、反射、等可能出现扰动。

我们现在研究在包括梯度支撑系统在内的固体内真正声消除的可能性。为了实现这一点，我们的理想要求是另有一种波，这种波和想要消除的波相比具有相同的幅度和相同的行进方向，但具有不同的相位。一种方案可以是包括第二根导线，第二根导线靠近第一根导线，但具有和第一根导线大小相等的并且方向相反的电流流动。这的确可能抵消想要消除的波，但所付出的代价可能只是梯度线圈中的零梯度强度。然而，晚些时候我们再回到这种结构。因此，我们不是讨论引入一根导线，而是研究在导线的附近设置换能器(trasducer)（一个或多个）的可能性，其目的在于使换能器在固体中产生必要

的消除波。

在我们的现有技术中，已经描述了结合梯度线圈设计使用压电换能器。然而，在这项工作中，压电换能器主要用来代替中心设置的重新进入的内部回路结构，用于梯度线圈的声消除。但正如以上所述，这种结构在梯度线圈组件的固体结构中事实上没有产生声波消除效果。

在下面，我们具体涉及在固体中声波消除的情况。在一个梯度线圈组件中靠近梯度产生导线适当地设置压电换能器，从原理上看，有可能产生足够大强度的声波以消除在固体中的波。如果这种情况发生，梯度线圈组件立即变为静声的。在图 19（a）中示意地表示出我们现在正在考虑的这个原理。在这种结构中，我们有两个初级导线 190，它们形成初级回路传输电流 I_1 的一部分。横向返回导线 192 设置在板后方的一个单独的抗振固定件 194、195 上，图 19（b）。初级导线置入在板中，在板的中央开有缝隙，并且在所有的内和外纵向边缘都倒成斜角。略微离开初级导线机加工开出一些缝隙，这些缝隙相互平行地延伸，以容纳换能器 196、198。使用环氧树脂置入这些换能器。

在图 20（a）中表示出一种适宜的压电换能器器件 196、198，包括两个导体板 1961、1962，一个中央浮动的导体 1965，和两个压电材料板 1963、1964。

虽然我们上面已经提到压电器件 196、198，如图 20 的剖面图所示，但使用也完全是可能的，并且甚至可能更好；所说的磁电流换能器包括两个薄的铜导体条 200、202，在它们的中间夹持一个可弯曲的垫片 204。这种换能器由于以下的事实可能是优选的：a）构造简单，和 b）在整个线圈系统连续分布，而压电器件必须放在线圈组件内的特定的关键点。显然，在图 20（b）端视图中表示的磁电流换能器在原理上可以产生振动，这些振动有可能消除按以上所述产生的声波，然而，如果我们考察从单根导线产生的声波，并且然后考察从一个磁换能器产生的声波，则我们可以看到，在置入在固体中的单根导线的情况下，所产生的前后方向的声波连续地通过导线所在位置的原始点。这就是说，向前传播的波总是伴随有向后方向传播的幅度为负的波。和磁电流换能器相比，这实际上是一个磁偶极子。在这种情况下，从换能器产生的前向和后向的波两者全是正值。因此，靠近单根导线放置图 20（b）所示的这种类型的磁换能器,在向前的方向或在向后的方向都将产生抵消作用，但是不是在同一时间。尽管如此，如果发生向前传输的空间大于向后传

产生的前向和后向的波两者全是正值。因此，靠近单根导线放置图 20（b）所示的这种类型的磁换能器,在向前的方向或在向后的方向都将产生抵消作用，但是不是在同一时间。尽管如此，如果发生向前传输的空间大于向后传输的空间，这还可能剩有某些值。可能有限制向后的波使之按较高的幅值进入支撑结构的有限体积内的效果，在支撑结构内声波在没有产生过大噪声的情况下就消散掉。

这种方案的另一个实施例可以是按这样一种方式使用两个磁电流换能器，即它们的前和后表面传输相同的电流。在图 20（c）的端视图中表示出这样一种结构，并且清楚地表示出背靠背的磁偶极子结构。如果单根导线中的电流具有与换能器的前和后位置的电流相同的相位，由单根导线和双换能器这两者在固体中传送类似的向前和向后的声波。在这种情况下，在固体内完全抵消声波似乎是可能的。

双磁电流换能器的压电等效物是简单地利用一个双极性器件或双压电晶片器件，它包括两个背靠背的压电陶瓷器件，在两个内表面之间有一种导体材料。外表面应该包括导电表面，并且与包括梯度线圈支撑在内的固体材料牢固接触。早些时候参照图 20（a）提出的压电器件就是这种双极性器件。

现在我们回到使用一对次级导线，这对次级导线极其靠近单个长方形导线回路的梯度产生初级导线，例如图 21（a）所示的结构。初级导线 PQ 和 P'Q'置入入板内，为电流 I_1 提供一个固有的返回路径。I_1 的横向导体路径在板的后方延伸，单独地支撑在一个抗振支架 212 上，图 21（b）。次级导线 AB 和 A'B'也置入在板中，每一个次级导线都有电流 $I_2e^{i\phi}$ 的返回路径，将这个返回路径取为一种在很大程度上没有得到支撑的导体的形式，这些导体通过抗振支撑杆或柱 210 的形式隔开所说的板，（见图 21（b））,这样就将与板的耦合减至最小。这后一点是通过使用抗振固定件形式的适宜部件实现的。图 21（c）表示和图 21（b）类似的一种结构，但导体 PQ 和 AB 以及导体 P'Q' 和 A'B'由同轴的导体对 214、216 代替。

如果次级导线的电流返回路径接近所说的板，由 $I_2e^{i\phi}$ 产生的磁场将在梯度线圈组件的中心抵消。

考虑板的 1／2，图 21。在固体内部，从导体 PQ 发出一个从左到右行进的平面波，这个平面波由下式给出：

$$A_1 = A_{10}e^{i(kx+\omega t)} \quad [19]$$

类似地,从导体 AB 发出一个波，它具有由下式给出的幅度和相位:

$$A_2 = A_{20} e^{i(k[x+\Delta x]+\phi+\omega t)} . \qquad [20]$$

因此，在固体内总的波幅度 A_{tot} 是

$$A_{tot} = \left\{A_{10} + A_{20} e^{i(k\Delta x+\phi)}\right\} e^{i(kx+\omega t)} \qquad [21]$$

其中Δx 是两根导线之间的距离。波的幅度 A_{10} 和 A_{20} 正比于电流的幅度 I_1 和 I_2，因此可以用实验方案得到。如果 $A_{10} = A_{20}$，则在总相位 $k\Delta x+\phi=2\pi$ 的条件下可使 A_{tot} 消失。在这些条件下，这个板应该是宁静的。

在声控方面的进一步改进

在大多数平板设计中，都是将板的两半相互固定到顶部和底部以维持它们的整体性。在这种结构的一种改进中，板的每一半是自由的，因此可以按自由振子方式振动。通过在一对板的后边的顶部和底部的支撑条来维持一对板的整体性。支撑条以粘结垫的形式通过一个抗振固定件轻轻地附着到每个板上。

叠层板

如果板的声输出和 k 无关，则可能改进消声效率。图 22 表示出板的一个剖面图，所说的板包括 3 个或多个叠层，这些叠层形成一个复合物。每个叠层是从多层编织织物加强的塑料复合物形成的，所说的复合物具有不同的波传播常数，即，$k_1k_2k_3\cdots k_n$,其中 $k_n=nk$。对于 n 为奇数，可以看出，声输出包括描述总的板结构变形的傅里叶分量。通过选择 k 值有可能改变总的板变形形状，使其变为板坐标 x 的任何期望的函数。驱动板系统的电流可以是一个正弦函数或是一个余弦函数。两种简单的板变形是: 当各傅里叶分量的和产生随距离 x 的变化而变化的一个均匀的板表面的位移，或一个板表面的线性斜坡位移。在这种情况下，板外形的傅里叶变换或者给出一个正弦函数，或者给出一个微分的正弦函数，二者都和 k 无关。

各向异性材料

我们从方程（3）注意到，声输出取决于泊松比σ。如果σ是零，显然没有任何输出。在大多数材料中，σ不是零，并且有一类材料，它的σ可以是负的并且可以是正的。因此，可能存在其中负和正值共存的组合，从而可以使总的泊松比为零。这些材料就是多孔固体。通常在多孔固体中，σ是高

轴施加应力时，ε_i、ε_j是分别沿 i 和 j 轴的应变。对于包括多个细管的多孔固体，其中的管轴是 z,我们希望 $\sigma_{xy} \approx \sigma_{yx} = \sigma$；$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$，$\sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 1$。

天然的多孔固体是木材。在这种材料中，多个近似的管沿树干轴方向 A 延伸。相对于树干轴的径向和切向方向分别记为 R 和 T。对于许多种类型的木材，$\sigma_{RA} \approx \sigma_{TA} \approx 0$。在理论上，$\sigma_{AR} \approx \sigma_{AT} = \sigma$，并且 $\sigma_{TR} = \sigma_{RT} = 1$。在实践中，对于木材来说，$\sigma_{RT} = 0.75$、$\sigma_{TR} \approx 0.35$、$\sigma_{AR} \approx 0.45$、$\sigma_{AT} \approx 0.5$。这就意味着，如果我们的梯度板是由木材制成的，从而使在木纹的轴向加上洛伦兹力，则 σ_{RA} 或 σ_{TA} 基本上是零。在这种情况下，方程（3）规定：极大地减小了声输出幅度。在不加声控的情况下，如果 σ_{RA} 减小 10 倍，则噪声减小 20 分贝。使用声控原理可实现噪声的进一步减小。在我们的实例中，我们考虑的是木材。当然，还可以使用制造的多孔固体取而代之，并且有可能更好地逼近期望的 $\sigma = 0$。

制造的多孔材料可能有负的 σ 值。因此我们建议使用组合的多孔材料，它既包括正的 σ 值又包括负的 σ 值，从而使总的 $\sigma = 0$。图 23 表示出 4 种管的横断面，图 23（a）和（c）具有正的 σ，图 23（b）和（d）具有负的 σ。包括具有这些横断面的管的交替层的蜂窝结构应该具有接近于零的总 σ 值，其中的每个层对具有一个正的 σ 和一个负的 σ。箭头（ ±F）代表产生应变的力，ε_x、ε_y,代表沿 y 轴的对应应变。

以上所述是展示各向异性（在这种情况下是泊松比的各向异性）的材料的特定实例。这种各向异性还能产生沿两个或多个轴具有不同声速的材料。声速的各向异性在设计声控板中可能是一个有用的特征。可以对于这些板进行配置，使其沿一个轴有高的速度，沿垂直于这个轴的另一个轴有低得多的速度。借助于这种材料，可以使一个板例如沿长轴方向凭借它的低速发生共振，但沿着高声速的短轴可使声激发最小。

先前我们已经提到，组合材料包括多层编织玻璃纤维和编织碳纤维的塑料组合叠层，当然，这种材料沿两个轴 x 和 y 是各向同性的，但沿垂直于层的方向大体上是各向异性的。如果要求在 x－y 平面是各向异性的，则可能编织出新型材料，其中经线纤维和纬线纤维是不同的材料，例如，玻璃纤维作经线导线，碳纤维作纬线导线。这种材料在 x－y 平面展示出极大的各向异性，从而有可能设计出沿 x 和 y 轴具有不同的声波传播速度的声板。

总括泊松比的各向异性效果，我们期望的 $\sigma_{TA} = \sigma_{RA} = 0$ 的情况是挤压塑料形式的管束、木材、和泡沫复合物。如果我们使用挤压塑料情况的组合挤压形式，则还有可能得到至少一个另外的分量 $\sigma_{RT} = 0$。如果考虑板的本身，则重要的设计参数是辐射因子 $f_T=\sqrt{(E/\rho^3)}$。替换声速，可以有：$f_t=V/\rho$。这将给出建议：对于最小值 f_t=和指定的声速 v,则应该考察 ρ。

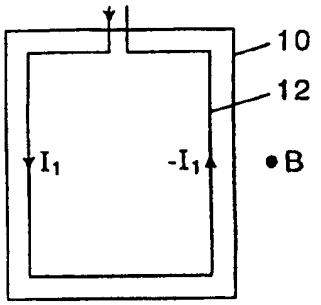

10
12
I_1
$-I_1$
•B

图 1

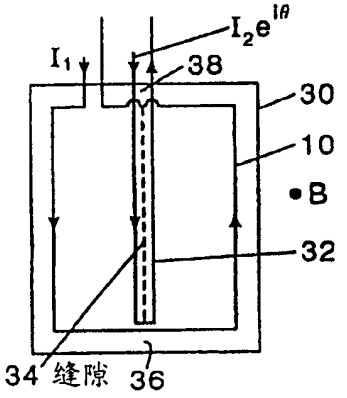

$I_2e^{i\theta}$
I_1
38
30
10
•B
32
34
缝隙
36

图 3

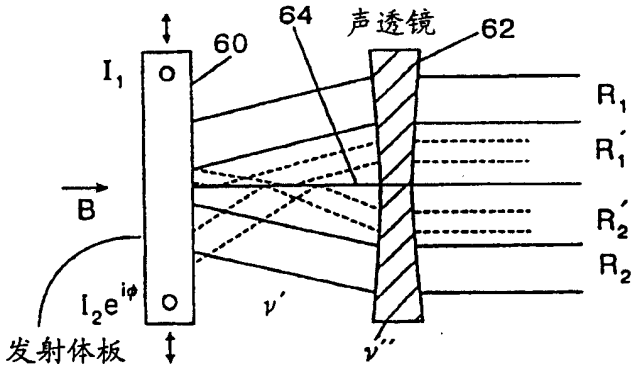

64
声透镜
62
60
I_1
B
$I_2e^{i\phi}$
发射体板
ν'
ν''
R_1
R_1'
R_2'
R_2
$\nu' < \nu''$

图 6

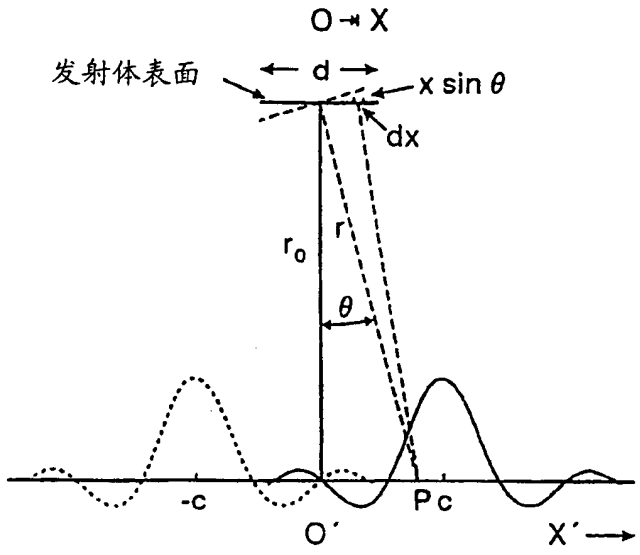


图 2

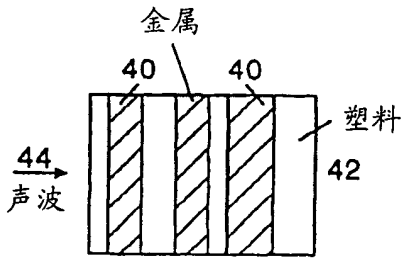
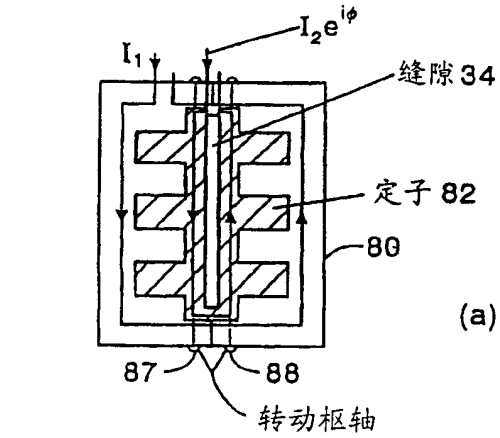


图 4



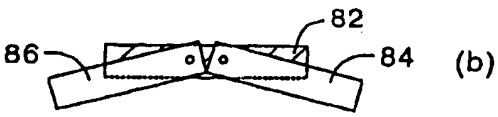


图 8

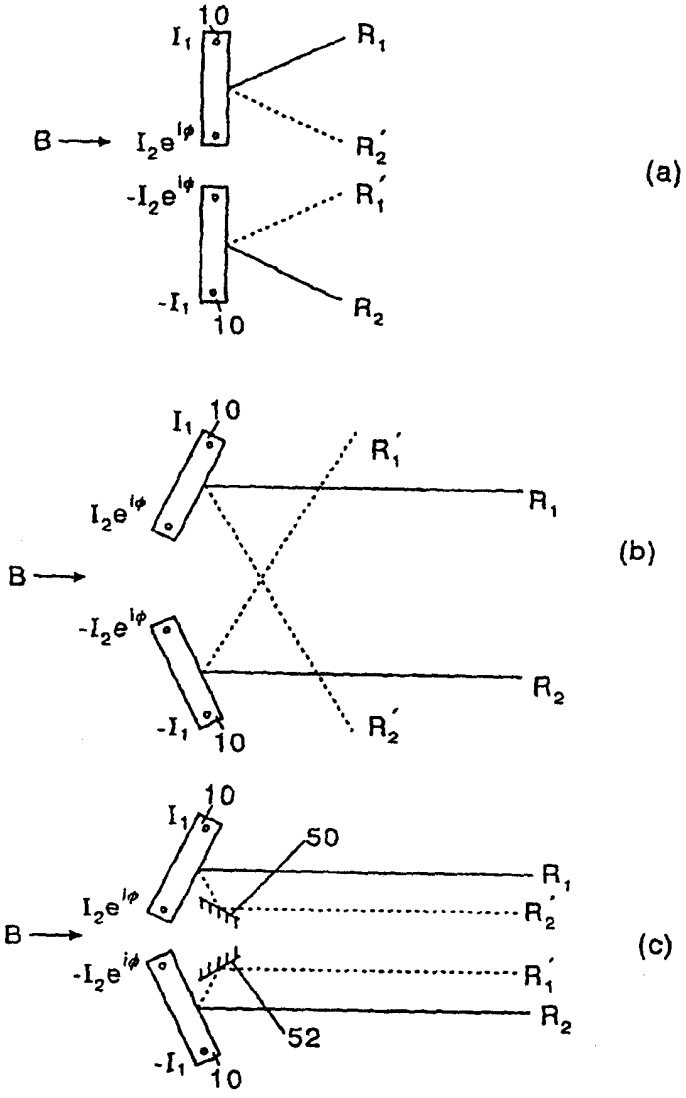

10
I_1
R_1
B
$I_2e^{i\phi}$
R_2'
$-I_2e^{i\phi}$
R_1'
$-I_1$
10
R_2
(a)
I_1
10
R_1'
$I_2e^{i\phi}$
R_1
B
(b)
$-I_2e^{i\phi}$
R_2
$-I_1$
10
R_2'
10
I_1
50
R_1
$I_2e^{i\phi}$
R_2'
B
(c)
$-I_2e^{i\phi}$
R_1'
R_2
52
$-I_1$
10

图 5

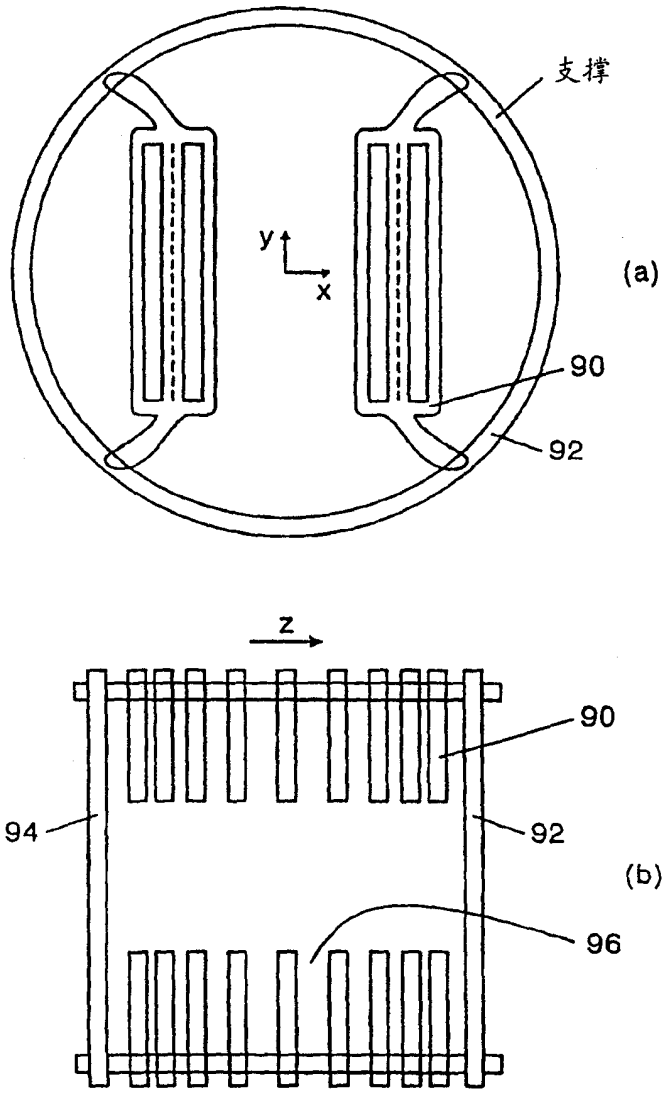


图 9

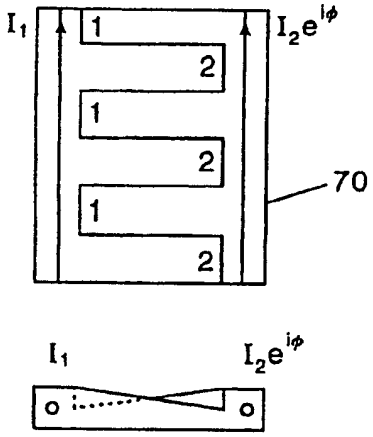
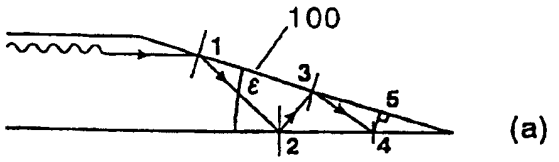
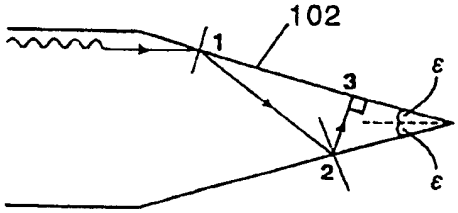


图 7

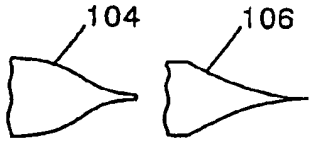


(a)

图 10



(b)



(c) (d)

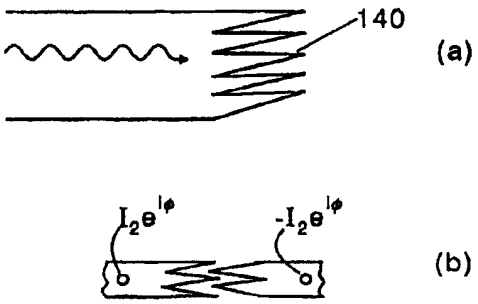


图 14

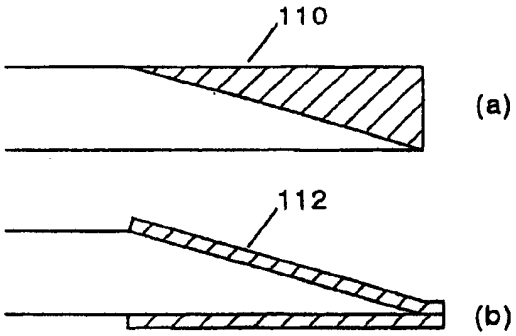


图 11

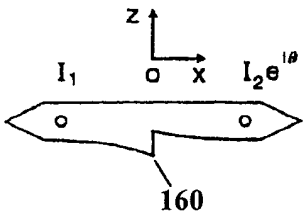
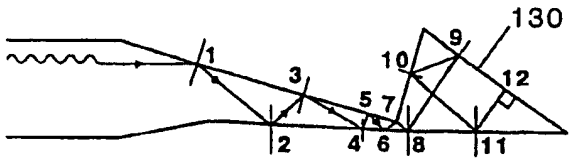
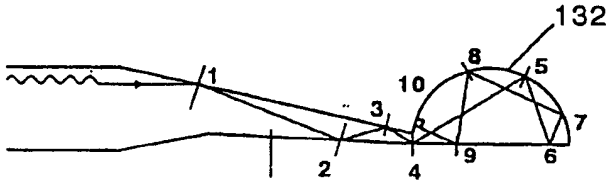


图 16


130
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12

(a)

图 13


132
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

(b)

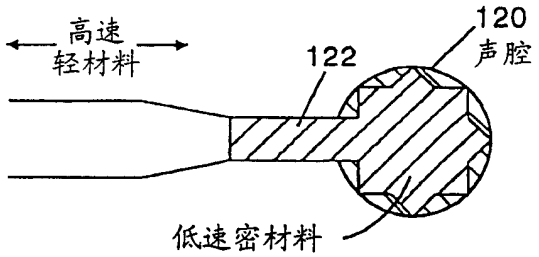

高速
轻材料
122
120
声腔
低速密材料

图 12

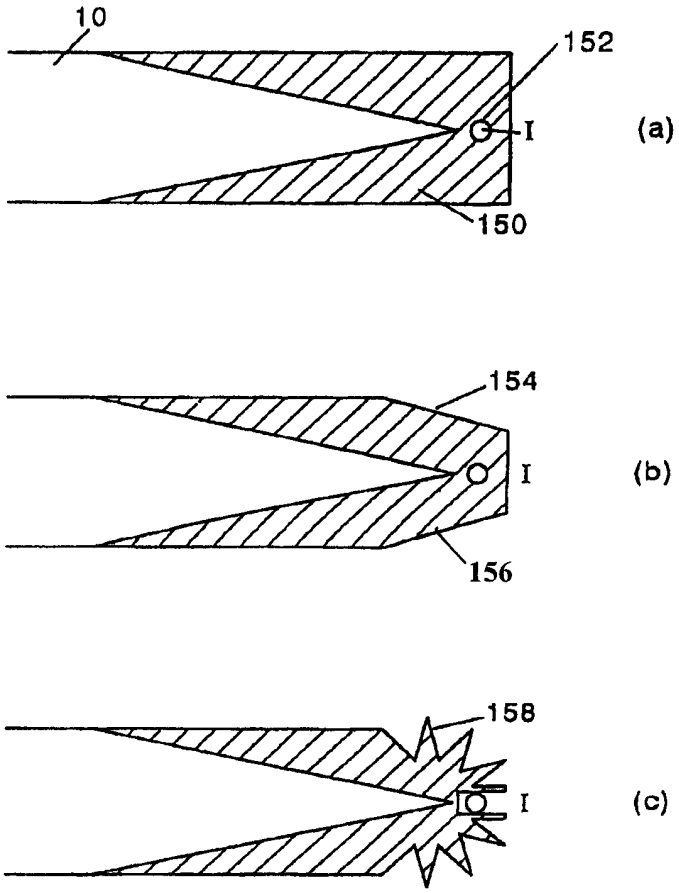


图 15

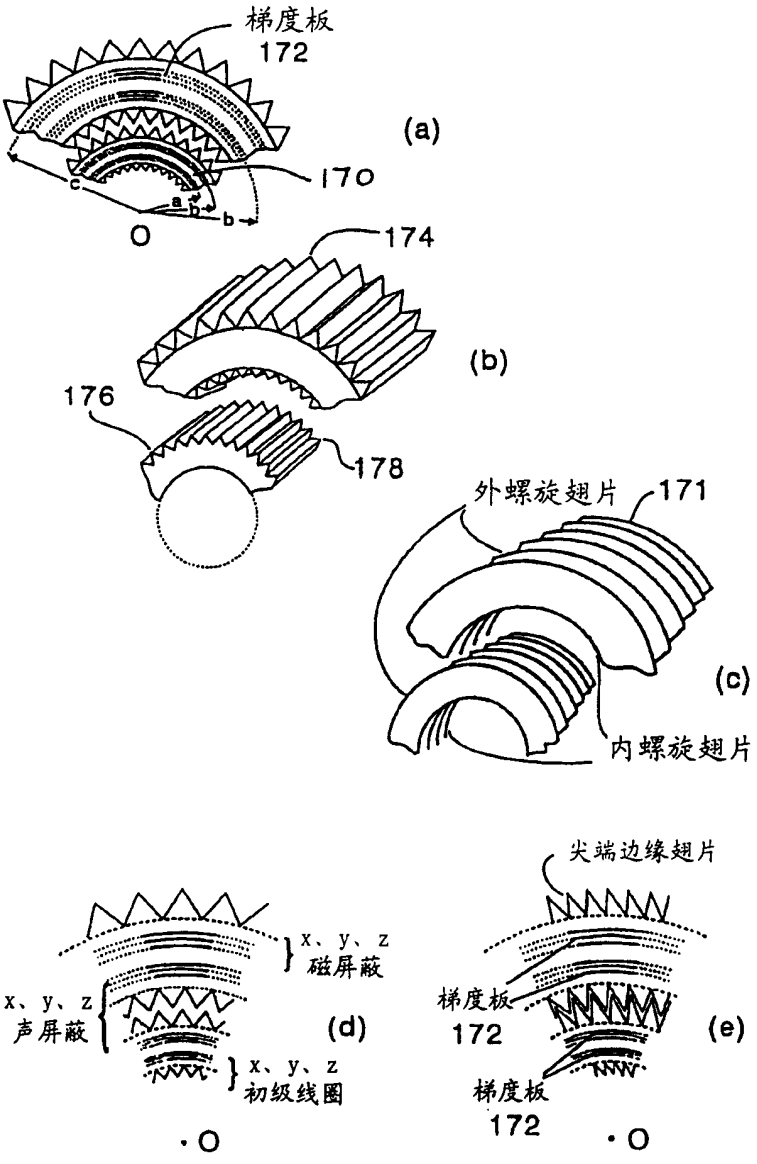

梯度板
172
(a)
170
c
a
b
O
174
(b)
176
178
外螺旋翅片
171
(c)
内螺旋翅片
x、y、z
磁屏蔽
x、y、z
声屏蔽
(d)
x、y、z
初级线圈
·O
尖端边缘翅片
梯度板
172
(e)
梯度板
172
·O

图 17

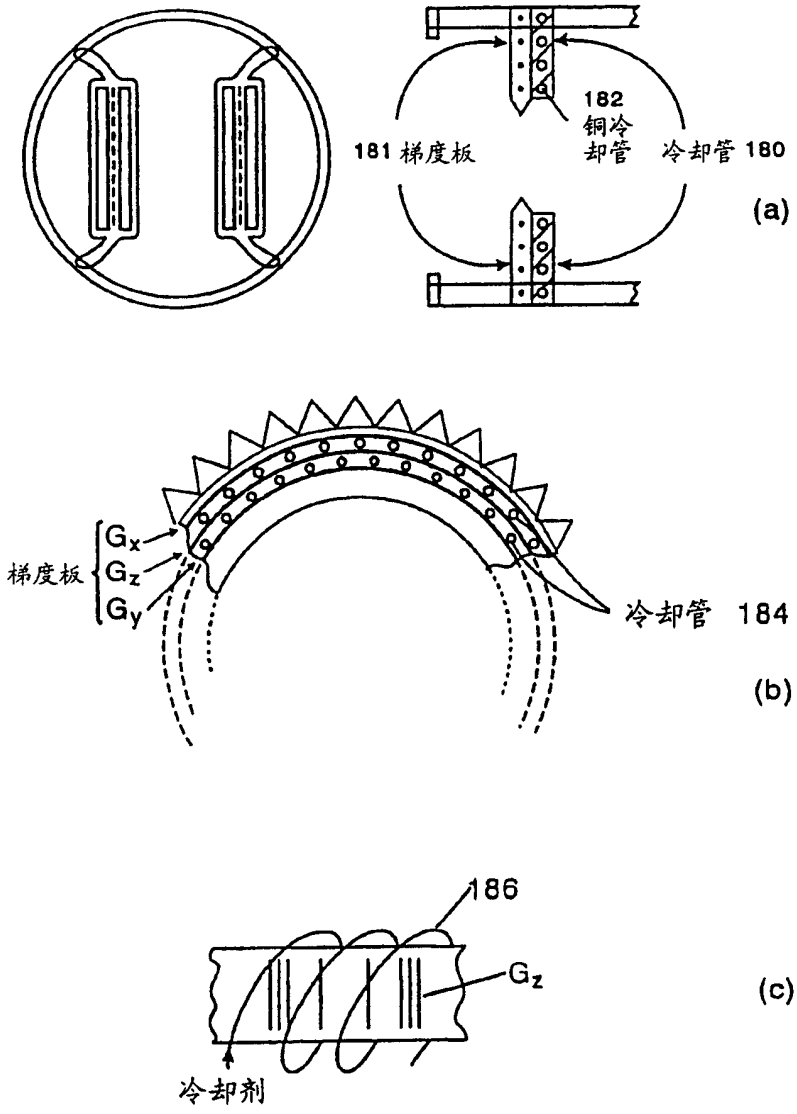


图 18

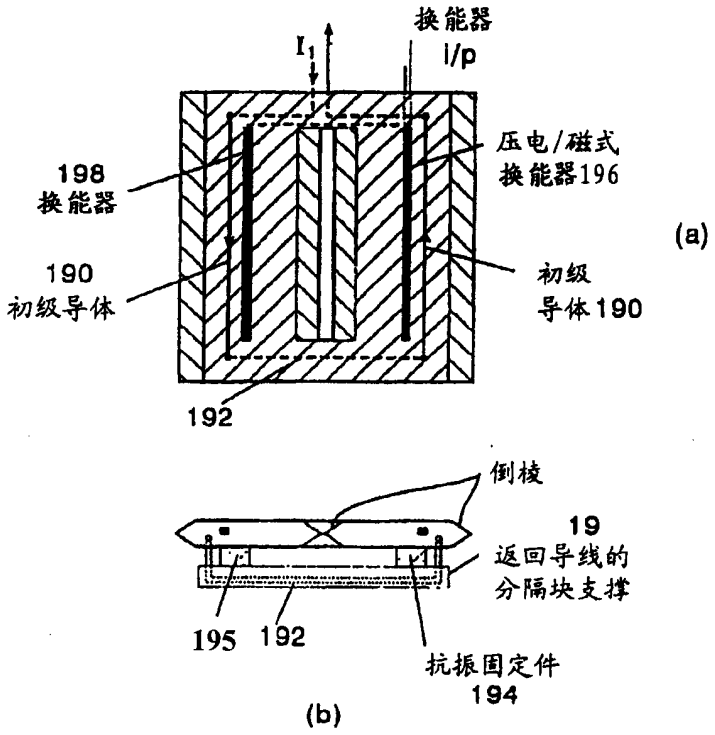

换能器
I/p
I_1
198
换能器
压电/磁式
换能器196
(a)
190
初级导体
初级
导体190
192
倒枝
19
返回导线的
分隔块支撑
195
192
抗振固定件
194
(b)

图 19

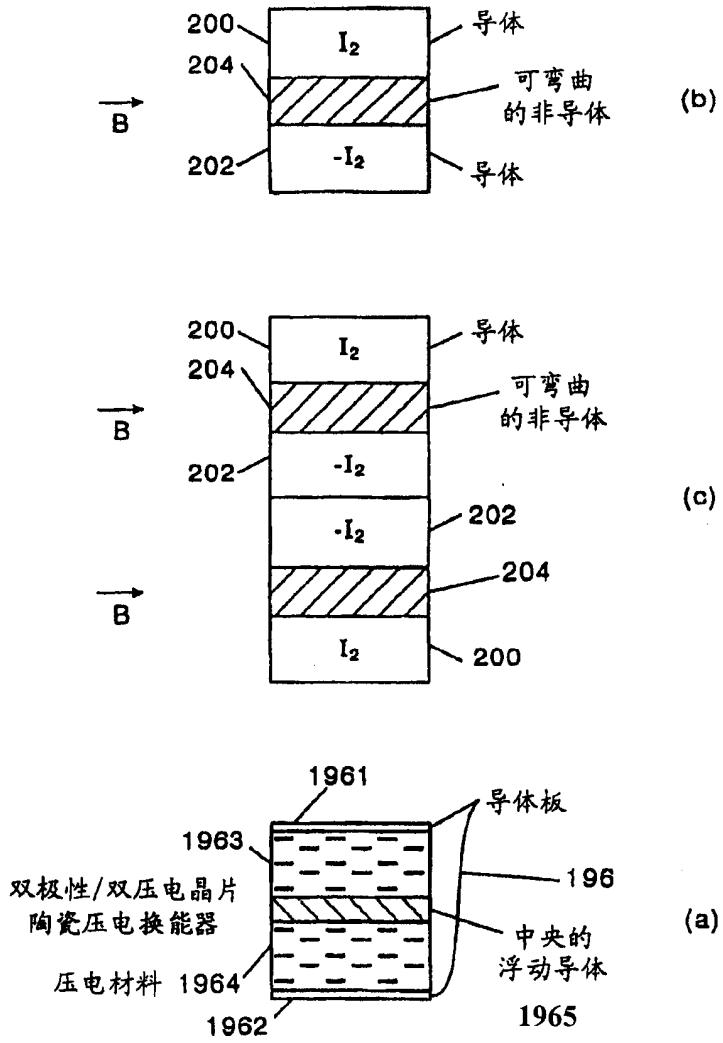

200
I_2
导体
204
可弯曲
的非导体
B
(b)
202
$-I_2$
导体
200
I_2
导体
204
可弯曲
的非导体
B
202
$-I_2$
(c)
$-I_2$
202
204
B
I_2
200
1961
导体板
1963
196
双极性/双压电晶片
陶瓷压电换能器
中央的
浮动导体
(a)
压电材料 1964
1962
1965

图 20

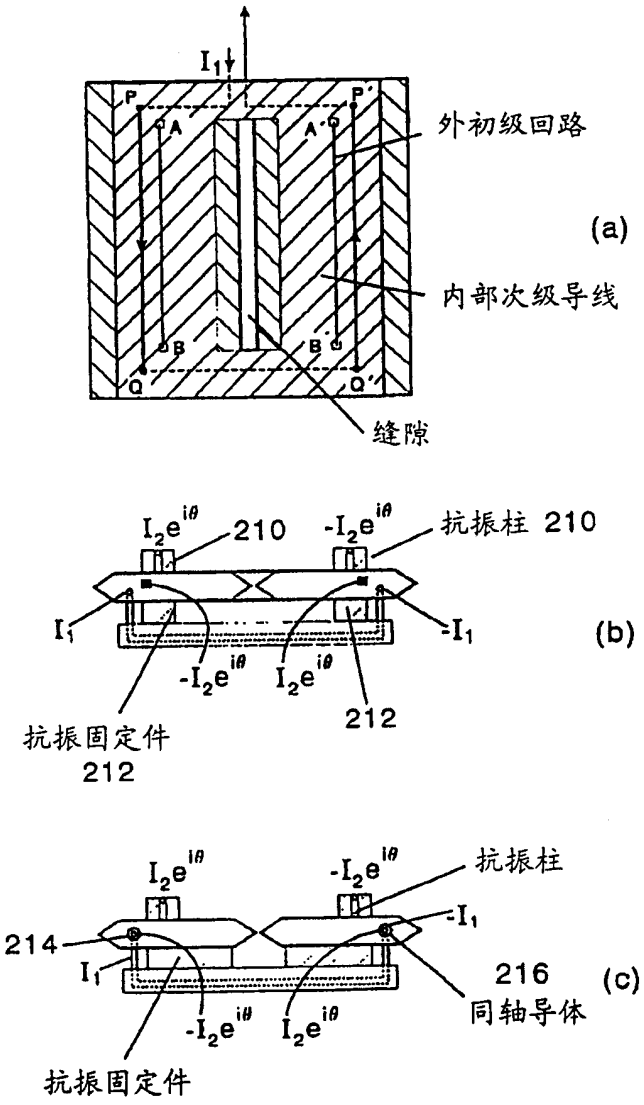

I_1
P
P'
A
A'
外初级回路
(a)
内部次级导线
B
B'
Q
Q'
缝隙
$I_2e^{i\theta}$
210
$-I_2e^{i\theta}$
抗振柱 210
I_1
$-I_1$
(b)
$-I_2e^{i\theta}$
$I_2e^{i\theta}$
212
抗振固定件
212
$I_2e^{i\theta}$
$-I_2e^{i\theta}$
抗振柱
$-I_1$
214
I_1
216
(c)
同轴导体
$-I_2e^{i\theta}$
$I_2e^{i\theta}$
抗振固定件

图 21

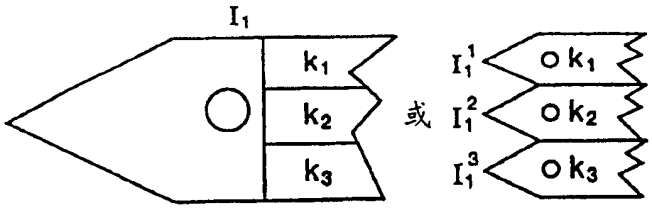

I1
k1
k2
k3
或
I1 1
I1 2
I1 3
k1
k2
k3

图 22

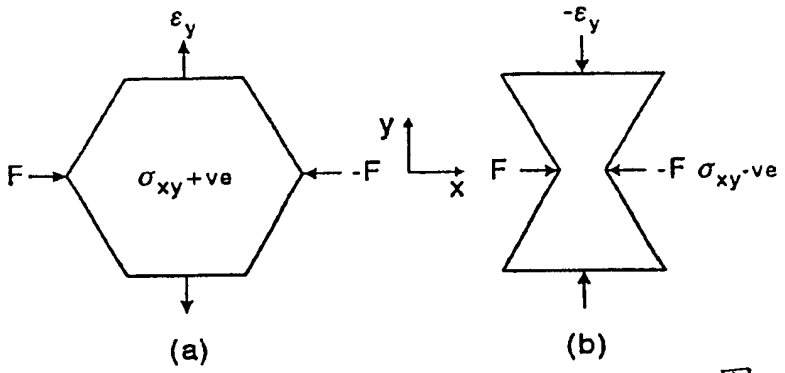
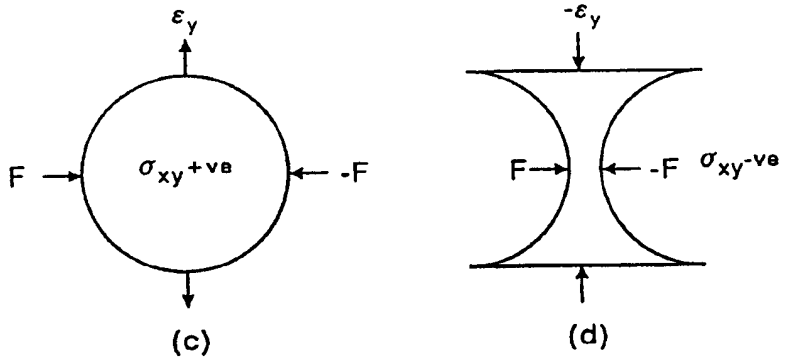

εy
F
σxy+ve
-F
(a)
y
x
-εy
F
-F σxy-ve
(b)

图 23


εy
F
σxy+ve
-F
(c)
-εy
F
-F σxy-ve
(d)