



[12] 发明专利申请公开说明书

[21]申请号 94192781.4

[51]Int.Cl⁶

G01R 33/28

[43]公开日 1996 年 7 月 17 日

[22]申请日 94.6.1

[30]优先权

[32]93.6.2 [33]GB[31]9311321.5

[32]PCT/GB94[33]01[31]87 94.6.1

[32]WO94/284[33]0 [31]英 94.12.8

[32]96.1.15[33]00[31]79 95.3.8

[71]申请人 英国技术集团有限公司

地址 英国英格兰伦敦

[72]发明人 P·曼斯菲尔德 B·L·W·查普曼

P·M·格罗弗

R·W·包特尔

[74]专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司

代理人 董巍 张志醒

G01R 33/38 G01R 33/42

权利要求书 5 页 说明书 60 页 附图页数 22 页

[54]发明名称 声屏蔽

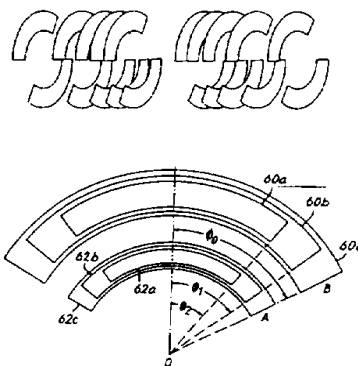
[57]摘要

本发明记载了对磁场线圈进行有源声屏蔽和组合的有源声和磁屏蔽的装置及方法,线圈中流有随时间变化的电流并设置在典型大于约 0.1T 的相对强的静磁场中。本发明特别适合于对磁共振成像(MRI)中所使用的磁场梯度线圈进行声屏蔽。

在一个最佳实施例中,设置流有电流的闭合回路以使回路的两个不同部分彼此相互机械耦合,选定尺寸和设置,以明显降低磁性设备所受的洛仑兹力,最好是被抵消。

在一个不同的实施例中,本发明有所改变以便同时进行磁和声屏蔽。

本发明解决非声屏蔽线圈在强磁场中使用时存在的问题,是通过在梯度线圈结构中抵消振动的力来降低它们,而不是通过衰减或吸收发射的高水平的声音噪声。



(BJ)第 1456 号

权 利 要 求 书

1. 一种声屏蔽磁性线圈, 其适合放在静磁场中, 该线圈包含一条导电通路, 该通路具有传输第一和第二电流的第一和第二部分, 以使作用在通路第一部分上的第一洛仑兹力显著减少了作用在通路第二部分上的第二洛仑兹力, 其特征在于第一和第二部分是机械耦合的。

2. 如权利要求 1 所述的一种线圈, 其中使用一种封装材料使第一和第二部分产生机械耦合。

3. 如权利要求 1 或权利要求 2 所述的一种线圈, 其中该线圈包括一个闭合回路以使第一电流基本等于第二电流。

4. 如权利要求 3 所述的一种线圈, 其中闭合回路包括第一和第二弧形部分。

5. 如权利要求 4 所述的一种线圈, 其中弧形部分所对的角度基本为 120° 。

6. 如前面任何一个权利要求所述的包括多个线圈的一种装置, 其中这些线圈分布在多个基本垂直于静磁场的平面内。

7. 一种如权利要求 6 所述的装置, 其中线圈所位于的这些平面距基准面的距离为 Z , Z 是使用关于通路在空间中的位置的互易空间体系表达式分析计算得出的并导致磁场变化。

8. 如前面任何一个权利要求所述的一种包括多个线圈的装置, 其中这些线圈是组合嵌套的。

9. 如前面任何一个权利要求所述的装置, 其中由每个闭合回路包围的投影到垂直于磁场方向的平面上的标称面积与由一个

组合回路包围的投影到所说平面上的标称面积基本相等。

10. 如权利要求 9 所述的一种装置, 其中把各通路的第一和第二部分埋在第一材料中, 以形成第一和第二厚片, 在厚片之间设置第二材料, 第一和第二材料关于声速具有不同的传播常数。

11. 如权利要求 10 所述的一种装置, 其中厚片能够彼此相对移置。

12. 如权利要求 11 所述的一种装置, 其中厚片在它们所位于的平面内是可移置的, 所说的平面是平行或共平面的。

13. 如权利要求 1 所述的一种声屏蔽磁性线圈, 其中该线圈由第一和第二导电通路所限定, 并设置成开路回路关系, 第一电流与第二电流基本相等。

14. 如权利要求 12 所述的一种线圈, 其中开路回路包括第一和第二弧形部分。

15. 如权利要求 13 所述的一种线圈, 其中弧形部分所对的角度基本为 120° 。

16. 如权利要求 12 到 14 任何一个权利要求所述的包括多个线圈的一种装置, 其中线圈是组合嵌套的。

17. 如权利要求 15 所述的一种装置, 其中各线圈分布多个与一个静磁场基本垂直的平面中。

18. 如权利要求 16 所述的一种装置, 其中线圈位于的这些平面距基准面的距离为 Z , Z 是使用关于通路在空间中的位置的互易空间体系的表达式分析计算得出的, 并导致磁场变化。

19. 如权利要求 13 - 18 中任何一个所述的一种装置, 其中由每一个闭合回路所包围的投影到垂直于磁场方向的平面上的标

称面积与由一个组合回路包围的投影到所说平面上的标称面积基本相等。

20. 如权利要求 18 所述的一种装置, 其中把各通路的第一和第二部分埋在第一材料中, 以形成第一和第二厚片, 在厚片之间放置第二材料, 第一和第二材料关于声速具有不同的传播常数。

21. 如权利要求 20 所述的一种装置, 其中厚片可以彼此相对移置。

22. 如权利要求 1 所述的一种声屏蔽磁性线圈, 其中第一和第二导电通路形成一个开路回路关系, 第一电流与第二电流明显不同。

23. 如权利要求 22 所述的一种线圈, 其中开路回路包括有第一和第二弧形部分。

24. 如权利要求 23 所述的一种线圈, 其中弧形部分具有不同的曲率半径。

25. 如权利要求 23 或 24 所述的一种包括多个线圈的装置, 其中线圈是组合嵌套的。

26. 如权利要求 25 所述的一种包括多个线圈的装置, 其中这些线圈分布在多个与一个静磁场基本垂直的平面上。

27. 如权利要求 23 所述的一种装置, 其中这些线圈所位于的这些平面距基准面的距离为 Z , Z 是使用关于通路在空间中的位置的互易空间体系表达式分析计算得出的, 并导致磁场变化。

28. 如权利要求 22-27 中任何一个所述的装置, 其中由每个闭合回路包围的投影到垂直于磁场方向的表面上的标称面积与由一个组合回路包围的投影到所说表面上的标称面积基本相等。

29. 如权利要求 28 所述的一种装置, 其中把通路的第一和第二部分埋在第一材料中, 以形成第一和第三厚片, 在厚片之间放置第二材料, 第一和第二材料关于声速具有不同的传播常数。

30. 如权利要求 29 所述的一种线圈装置, 其中把每条通路都埋在一种材料中, 以使材料的厚片可以彼此相对移动。

31. 如权利要求 30 所述的一种装置, 其中厚片可以彼此相对移置。

32. 如权利要求 1 所述的一种声屏蔽磁性线圈, 其中第一和第二导电通路形成一种开路回路关系, 第一和第二通路形成在第一和第二圆柱形表面上, 这些圆柱形表面同心, 第一电流与第二电流明显不同。

33. 如权利要求 32 所述的一种线圈, 其中线圈是一个姆指纹(或指纹)型的分布线圈。

34. 如权利要求 32 所述的一种线圈, 其中开路回路包括第一和第二弧形部分。

35. 如权利要求 34 所述的一种线圈, 其中这些开路回路具有不同的曲率半径。

36. 如权利要求 32 至 35 所述的一种包括多个线圈的一种装置, 其中线圈是组合嵌套的。

37. 如权利要求 32 所述的一种装置, 其中使用关于通路在空间中的位置及合成磁场变化的互易空间形式体系表达式来分析计算得出线圈所位于的这些圆柱形表面。

38. 如前面任何一个权利要求所述的一种线圈或装置, 其中线圈或每一个线圈是有源磁屏蔽的。

39. 如权利要求 38 所述的一种线圈, 其中用权利要求 1 至 37 任何一个所规定的一个线圈对有源磁屏蔽线圈或一些线圈进行声屏蔽。

说明书

声屏蔽

本发明涉及一种线圈的声和磁屏蔽的装置和方法，其中，与周围静磁场相互作用的迅变电流经过线圈以产生强洛伦兹力。下面称为有源声屏蔽或声屏蔽的本发明特别适合在磁共振成像(MRI)以及公知的核磁共振(NMR)成像中使用。更确切地说，本发明尤其涉及一种对任何线圈结构的有源声屏蔽装置和方法，其中，线圈结构位于静磁场中并由于可变电流驱动流过线圈而使线圈结构产生不希望的噪声。此外，还提供一种具体实施例，其能够对静磁场中的线圈结构同时进行有源声屏蔽和有源磁屏蔽。

本发明具体应用于MRI或NMR设备中，其中，在静磁场存在的情况下对梯度线圈施加脉冲。虽然，在任何场强下都会产生噪声，但本发明特别涉及的是场强为0.1T(特斯拉)或更高时的MRI中的情况。为一致起见，NMR设备下面也称为MRI设备。

磁场梯度线圈是MRI必须具有的(如Mansfield p. 和Morris P. G. 在Biomedicine Academic Press(1982) N. Y. 中的NMR成像技术中讨论的那样)而且还在包括扩散研究及流动的应用领域得到应用。在医学成像方面，静磁场场强越强，伴随快速梯度转换所产生的声音噪声越严重，最好的情况是对病人产生刺激，最坏的情况会对病人造成损伤。采用耳朵保护装置会给与成人和儿童以某种程度的保护。但是，在胎儿研究、使用动物进行研究以及在一般的兽医学方面，声保护即使不是不可能做到，可也

是很困难的。

已经出现一些方法来缓解声音噪声问题。例如，通过把线圈轻轻安装在橡胶垫上，或增加梯度装置的总质量，以及通过使用采用吸声泡沫材料的吸收技术来消声。公开的欧洲专利申请 EP - A1 - 431216, EP - A2 - 350640 和 EP - A1 - 304127 已经涉及到声音噪声问题。而且，US - A - 4680545, US - A - 5018359 和申请号为 WO - A1 - 8607459 的公开的国际专利申请也涉及到声屏蔽。这些文件下面将作简要介绍。

US - A - 4680545 记载了一种对电流脉冲进行整形的方法，用以减少或消除高频分量。这样可以减少一些高频噪声。

EP - A1 - 431216 记载了一种通过对脉冲进行整形来减少脉冲上升和下降时间的技术。这样就去除了高频噪声分量。

EP - A1 - 304127 记载了一种所包括的一组层叠的弓形导体连接到以刚性自我支承配置的构架的装置。该装置减少了弓形导体间的相对移动，从而减少了会引起声音噪声的振动的程度。

WO - A1 - 8607459 记载了一种线圈嵌入环氧树脂和/或挂在橡胶减震器上的装置。在一个实施例中，在一个线圈上附装一块不锈钢钢块，用以降低系统的特征频率。通过声吸收和/或对振动设备进行减振来减少噪声。

EP - A2 - 350640 记载了一种梯度线圈嵌在粘弹性材料层中的装置。在线圈间夹入这种粘弹性材料层以对线圈进行约束限制。

US - A - 5018359 记载了一种深冷冷却装置，其中采用磁屏蔽对超导线圈产生的磁场进行屏蔽，深冷冷却装置通过一个振动

吸收装置与一个真空容器相连。

还提出了一些抵消声音噪声的技术。在这类方法中，采用耳机或声管在病人头部区域发射与声音噪声等值反向的声音，由此，在一个限制区域上抵消噪声。这种抵消技术取决于频率和位置，并可能导致意外，即不是抵消噪声而是增加噪声幅度。

US - A - 5198769 号美国专利记载了一种设置在磁性线圈中的等轴梯度线圈。梯度线圈包括多个设置成闭环的线圈以减少在被查对象中所感应产生的涡流。

公开的国际专利申请 WO - A1 - 9119209 记载了一种对磁性线圈进行声屏蔽的装置。该装置包括至少两个支承一个或多个线圈的基本同轴的圆柱形部件。这两个圆柱形部件通过在它们之间放置填充物而结合在一起。另一方面，支承在每一个圆柱形表面上的线圈可以通过层叠材料的连续层，然后去掉材料的某些部分并由留下的余下部分限定出一个电流回路来形成。如果该电流回路例如遵循一种简单的沿着圆柱形表面的螺旋线，就象比方可以由车床或铣床很容易形成的路径一样，这是不困难的。但是，梯度线圈经常具有需要仔细缠绕的复杂形状的路径。采用车床或铣床切割材料来形成这种复杂非螺旋形的路径是困难的。

上述现有技术的装置没有考虑到由径向和挠曲应力产生振动的问题。

所有上述技术可以被称为试图降低噪声的消极或者最好为“半消极”的办法，而没有真正注意到产生噪声的原因，即，磁性线圈的振动。因此，上述技术限于使用材料的吸收特性或可以事先成形的脉冲或弹性减震器的频率响应的准确性。当对经过线圈结

构的电流进行调制时，特别是正在使用强磁场的情况下，在线圈结构中振动的问题仍然存在。虽然本发明可以在弱一些的磁场中使用，但是，对那些高于约 0.1T (特斯拉) 的磁场一般被认为是强磁场。

本发明就是为解决上述问题而产生的。

根据本发明，提供一种声屏蔽的磁性线圈，该线圈适合放置在一个静磁场中，该线圈包括一条导电回路，该回路具有这样的传输第一和第二电流的第一和第二部分，即作用在回路第一部分上的第一洛伦兹力明显减少作用在回路第二部分上的第二洛伦兹力，其特征在于第一和第二部分是机械耦合的。

第一第二部分最好这样机械耦合，即其分量有两个或更多洛伦兹力的合成力在数值上明显减小，最好为零。这可以通过使用一种合成塑料或树脂这样的封装材料来实现。另一方面，其它材料在其上面形成槽用以装入限定出第一和第二部分的电导体，该材料形成有一个厚片以接住导体，使其留在槽内。

上述公开的国际申请 WO-A1-9119209 虽然能够产生磁屏蔽，但只能实现局部声屏蔽，合成的洛伦兹力仍然对线圈结构产生作用。

同样也不能认为 US-A-5198769 号美国专利记载了一种合适的技术，作为一种在一个开环系统的恒定电流(例如，如图 11 的实施例所示) 与本发明的根本不同在于其不能抵消洛伦兹力。因此，不能认为这样一种用于减少噪声的技术的参考文件记载了一种能够解决问题的方案。

声屏蔽磁性线圈最好包括一个闭环，一个限定第一回路的内

部部分和一个限定第二回路的外部部分。但是，也可以采用开环线路，其中用分离的电线限定形成回路。

可以使多条第一和第二导电回路具有这样的大小和设计安排以形成一系列嵌套的、闭合的回路。在这样一种装置中，闭合环路最好包括一个由闭合环路的第一弧形部分限定形成的第一导电通路和一个由闭合环路的第二弧形部分限定形成的第二导电通路。如下面定义的那样，各弧形部分最好在径向排齐。

可以使两个或更多的线圈相叠加以减小装置的尺寸和体积。该装置可以用在磁共振成像方面，例如用于产生一个梯度磁场。相似地，再采用一些线圈可以提供附加的声屏蔽。

根据本发明的又一个方面，提供一种使磁场梯度线圈声屏蔽的方法，包括的步骤有：通过使电流这样流过导电回路的第一部分和使电流这样流过导电回路的第二部分，即，作用在第一部分上的第一洛伦兹力基本上被作用在第二部分上的第二洛伦兹力所抵消，并使这两个部分机械耦合在一起，由此建立一个磁场梯度。

根据本发明的另一个方面，提供一种对磁性线圈产生有源磁屏蔽和有源声屏蔽的方法，包括的步骤有：用第一个线圈装置建立一个磁场梯度，用第二个线圈装置对第一个线圈装置进行有源声屏蔽（如上所述），用第三个线圈装置对第一和第二个线圈装置进行有源磁屏蔽；用第四个线圈装置对第三个线圈装置进行有源声屏蔽，所说的第一和第二个线圈装置相互机械耦合在一起，所说的第三和第四线圈装置相互机械耦合在一起。

此外还可以按可供选择的方式对线圈装置进行附加的一个

或更多的声屏蔽。

最好把产生磁场梯度的方法合并到磁共振成像方法中来，包括的步骤是同时设置一个物体使其受由第一个线圈提供的第一磁场梯度的作用；用第二个线圈所产生的第二磁场梯度对第一磁场梯度进行有源磁屏蔽；由第三个线圈建立第三磁场梯度，第三个线圈产生的洛伦兹力基本抵消了由第一和第二磁性线圈所产生的洛伦兹力。

由第三个磁性线圈产生的洛伦兹力最好与第一和第二个线圈所产生的洛伦兹力之和基本上大小相等，方向相反，从而消除振动。

可采用刚性连接部件或支柱实现线圈的机械耦合。但是最好通过把线圈封装或灌注在适宜的合成塑料材料中来实现。

一种最佳组合的声屏蔽和有源磁屏蔽技术可以应用于一种与已经授权的英国专利 2180943B 记载的装置类似的有源磁屏蔽装置中。该专利的内容在本申请中用作参考。本发明可以对这种装置作这样的改进，即平衡各个振动力，由此提供一种声屏蔽。其结果是进行有源磁和声屏蔽的磁性线圈装置适合与 MRI 装置一起使用，并能在 0.1T (特斯拉) 以上的范围工作，同时使声音噪声比以前已经达到的降低程度还要低。

由于洛伦兹力被抵消确保了没有合成力产生，所以，声屏蔽有助于消除径向力和扭力。

这些线圈和屏蔽可以是绕一个轴的同轴和同心式的。一个适合在磁场中使用，或适合产生使用时和静磁场结合在一起的磁力梯度的消音线圈是这样有助于力平衡的，即对于初级线圈中的每

一条通路，在声屏蔽中都设置有一条径向排齐的导线通路，在机械耦合后，该导线通路传输的电流其极性与初级线圈中电流的极性相反，其幅值设置得使作用在通路上的各洛伦兹力严格平衡，其中声衰减是一个 $\sin(\pi fx/v)$ 的函数，这里 f 为声频， v 为声在连接材料中的速度。

一个声屏蔽线圈最好包括一个初级线圈和多个平衡的声屏蔽线圈 (n)，每个屏蔽线圈包括一个组合的分段声屏蔽线圈，以减少形成初级线圈的导线与其各自的声屏蔽线圈之间的间隔，由此提高声衰减并通过采用安培环路定理扩展其频率范围。这是通过确保梯度场强度来获得的，通过在距初级声屏蔽结构距离为 x 的地方设置一个单独的声屏蔽结构来使线圈结构的效益在整个线圈结构上不会降低，其中声衰减在频率为 f 的情况下为 $\sin(\pi fx/v)$ 的函数，其中 v 是关于组合式声屏蔽结构的每一段(纵)压缩波在连接材料中的声速。下面说明这个实施例的理论。

产生磁场梯度的装置最好包括一个用于产生磁场梯度的第一线圈；一个第二线圈，其适合于环绕第一线圈的至少一部分，并能建立起一个磁场梯度，其产生的力与第一线圈装置产生的洛伦兹力相反；以及一个第三线圈装置，它适合环绕第一和第二线圈装置的至少一部分，并对第一线圈装置进行有源磁屏蔽。

还可能对线圈进行组合以使第一线圈成为初级线圈，第二线圈对初级线圈进行组合的声和磁屏蔽，而第三线圈对初级线圈进行磁屏蔽。

效果最佳的装置是通过线圈的叠加把两个提到过的线圈合成一个线圈。这样尽管预计可以使用四个或更多的线圈，但是

最少用三个独立的线圈就可以同时实现声和磁屏蔽。实际上两个线圈叠加，因而电流分布的结果是减少了材料用量并使装置更小，使制造更容易，更便宜。

最好把第一、第二和第三线圈（或第四和更高次的线圈装置的组合）所产生的径向力的矢量和组合起来以使合成的力为零。当实现这一点时，消除了所有的机械振动并使装置保持安静。只有当构成每一个线圈的导线导体用在所需工作频率下具有高声速的材料与其它线圈上的相应导线机械相连时才会发生这种情况。导线导体的设置最好是径向排齐的。即各线圈位于各同心圆柱形面上并通过一个由连接到所说各圆柱共用轴一端处的一条边界线所限定的，且基本落在一个半径方向的非导电连接器彼此相连。

因此，上述的一个最佳装置是把径向排齐、力平衡的线圈装置封装或包入一种象环氧树脂或任何其它相似的很硬并具有高的声传播速率的填充材料这样的固化树脂中。各导线仍会有极微小的运动。加热会改变线圈装置的尺寸。因此，为加强声屏蔽，线圈装置可以进一步封装或包在一种和声吸收材料一起构成能吸收高频噪声分量的合成填充材料的环氧树脂中。

还可以把类似的其它脉冲成形技术与该线圈装置结合使用，这可以进一步降低声输出。根据本发明可以预计可以制造出线圈装置用于现有的 MRI 或其它设备，在这种情况下，它们对于这种现有设备适合于作为标准部件出售。

可以设置线圈装置以产生轴向和/或横向磁场梯度。可以提供分离的磁和声屏蔽线圈装置以便可以沿不同的轴建立梯度。这

些轴可以是正交的。

要很好地为线圈装置选择尺寸和设计，以使线圈弧形部分的至少一部分在其位于磁场中时不受场的影响。具体讲，这样一种嵌套线圈的装置可以非常好地用作一种插入梯度线圈。

线圈装置优选的是包括多个弧形闭合回路。这些弧形回路所对的角度最好基本为 120° 。

虽然已经提到闭合回路装置，但是可以预计本发明可以同等地用于开路回路线圈装置，或所谓的分布线圈装置。这类分布线圈装置有时为已知的指纹或姆指纹线圈。同样，开路和闭合回路线圈可以用于产生梯度磁场。开路和闭合回路线圈可以根据安培定律进行分段，和/或可以嵌套这两种线圈。

安培环路定律在物理上可以设想多个相对小的闭合回路的总面积等于一个单独的相对大的闭合回路的面积。因为由一个电导体形成的闭合回路可以不用严格地位于一个平面内，所以为了计算一个平面内的有效面积，需要与磁轴正交，以把限定到闭合回路之内的面积投影到上述正交平面上。可以预计当所谓开路回路线圈遵守安培环路定律时，这种投影面积实际上是一种标称面积。就是说限定在由第一和第二通路所围绕的区域之内的标称面积被投影到与磁轴正交的平面上。

下面参照附图和实验结果的表说明各种装置的实施例，其中：

图 1 示意性地表示了作用在传输电流 I 并放置在磁场 B 中的导线基元 al 上的力 F ；

图 2 示意性地表示了通过由弹性系数为 k 的弹簧所代表的

压缩支杆使传输有电流 I 、质量为 m 的导线基元 dl 固定到一个不可移动物上的支承物;

图 3 表示了两个质量 m 相等并传输等值反向电流的耦合的导线基元;

图 4a 表示了一个放置在磁场 B 中传输电流 I 的矩形导体回路, 以使回路平面垂直于 B , 力 F 和 F' 平衡;

图 4b 示意性地表示了具有防止导体移动的支杆和连接杆的矩形电流传输回路;

图 4c 表示了为防止导体移动而封装在聚合物树脂中的导体回路;

图 5 是一个示意图, 表示的是设置四个矩形电流回路以沿 x 轴产生磁场梯度, 各中心部分的线中的所有电流方向相同;

图 6 是一个平面图, 表示了一组传输电流 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 的矩形电流回路, 以近似一种沿 x 轴产生磁场梯度的分布电流阵列;

图 7 表示了四个电流回路变形为相连的弧形回路, 每个弧形回路传输电流 I 并设置以沿 x 轴产生磁场梯度;

图 8 表示了两个未连接的电流弧形回路, 它们具有公共原点 O , 且半径分别为 a 和 b 并分别传输电流 $+I_a$ 和 $-I_b$, 角位移 Φ_a 和 Φ_b 不相等;

图 9a 是半径为 a , 传输电流 I_p 的 N_p 匝初级线圈的总图, 其用传输电流 I_s , 半径为 b 的 N_s 匝线圈进行有源屏蔽;

图 9b 表示一个用半径为 b 的屏蔽线圈 (实线) 对其进行有源屏蔽的半径为 a 的初级线圈 (实线); 又一个线圈 (虚线) 和屏蔽线圈 (虚线) 形成声屏蔽结构;

图 10 是关于一个具有形成所谓指纹线圈的分布弧形结构的有源屏蔽的 x 或 y 梯度线圈系统的典型的线圈连线布置的示意图;

图 11 是表示圆柱形坐标系的示意图;

图 12 是一个示意图, 表示的是成对地产生沿轴向即 z 轴的线性磁场梯度的麦克斯韦线圈;

图 13 是表示有四个弧形回路的简单的横向梯度线圈组的示意图;

图 14 表示的是包括四个具有共面返回弧形回路的内部弧形回路的横向梯度装置组;

图 15 表示了一组图 14 所示的 120° 弧形回路, 其中弧形回路平面沿圆柱形轴的间隔不相等;

图 16 表示的是角位移变化的分布弧形回路, 及沿圆柱轴不相等的平面间隔;

图 17 表示一对封装在塑料树脂中的弧形回路(虚线);

图 18 表示的是在一个平稳的 x 或 y 梯度线圈设计中的一些分布离散的 120° 弧形回路的位置;

图 19 示意性地表示了在一个平稳的 x 或 y 梯度线圈设计中的一些分布离散的弧形回路的位置或各种弧角位移;

图 20 表示了关于一个分布的整体平稳梯度线圈装置的一个象限的导线通路, (a) 表示了初级线圈的导线位置; (b) 表示了组合的初级/磁屏蔽声屏蔽结构的导线位置; (c) 表示了有源磁屏蔽结构的导线位置;

图 21 表示了说明声屏蔽实施例的单匝, 其在进行声屏蔽时

作为关于初级梯度线圈的返回通路 (声屏蔽也可以用来对于磁屏蔽提供返回通路);

图 22 是一个示意图, 表示了关于一个对各电流返回通路采用声屏蔽的另一个分布式的整体平稳梯度线圈设计一个象限的导线通路 (见图 21)。a) 关于初级线圈的位置, (b) 关于组合的初级/磁屏蔽声屏蔽结构的导线位置, (c) 关于有源磁屏蔽的导线位置;

图 23 (a) 到 (d) 表示的是用图 7、12、14 和 17 所示并具有表 2 给定参数的平稳梯度结构组, 在 3.0 特斯拉 T 的场强下得到的回波响应平面的“快照”图像;

图 23 (a) 表示了玻璃与水的影像, 其平面分辨率为 0.75 毫米, 图像阵列尺寸为 256×256 像素。切片厚度 2.5 毫米;

图 23 (b、c 和 d) 表示了一个正常声源者头部的图像, 表示了一组具有脑室, 灰白质和脑干细节的图像; 其平面分辨率为 1.5 毫米;

图 24a 是与图 24b 机械等效的弹簧质量的示意图, 其中如果弹性系数相等, 则系统的质量中心保持固定;

图 24b 表示了一个放置在磁场 B 中传输电流 I 的矩形导体回路, 以使回路平面垂直于 B;

图 25a 是一个示意图, 表示了四个回路一组的第 n 组 4 个矩形电流回路的平面图, 其沿 x 轴产生磁场梯度, 其中在第 n 组 4 电流回路的中心导线中的所有电流方向相同;

图 25b 表示了包括两个宽度为 a、长度为 b 的矩形回路的测试线圈的平面图, 其中线圈之间隔开一个距离 x, 线圈的平面平行

于 B;

图 26 是一个示意图, 表示当由峰值为 10A 的正弦电流驱动时, 关于图 25 所示的测试线圈装置的声压电平衰减 A (dB) 与频率 (Hz) 之间的函数关系:

曲线 A 与当测试装置中的一个线圈通电时由在一个适当位置的话筒所接收的发出声音相对应;

曲线 B 是当两个线圈通电时降低了的由话筒所接收的声信号电平;

衰减曲线 C 与曲线 A 和 B 不同;

曲线 D 是理想的衰减 A, 公式 (10);

图 27 到 29 表示弧形的闭合回路构形;

图 30 到 32 表示不同实施例的线圈绕制和构形; 以及

图 33 到 41 表示线圈绕制的不同实施例。

参照图 1, 在一个 $B = Bk$ 的均匀磁场中的流有 $I = I\alpha$ 电流的导体基元 dl (10) 每单位长度所受到的洛伦兹力 F 为

$$\begin{aligned} F &= -B \times I \\ &= -BI\beta \sin \theta \end{aligned} \quad (1)$$

其中, θ 是导体与磁场方向的夹角, α 、 β 和 k 是分别沿导体方向、作用力方向和磁场方向 (z 轴) 的单位矢量。当 $\theta = 0$ 时, $F = 0$ 而当 $\theta = 90^\circ$ 时, F 最大。

图 2 表示了一个质量为 m 的导体 dl 基元 10, 它通过一个弹性支承物 12 固定在一个不能转动的物体 14 上。弹性支承物 12 由一个弹性系数为 k 的弹簧来代表。因此, 导体基元 10 起一个角频率为 ω 的谐振器的作用。在实际安装中要考虑到各种阻尼; 在这

种情况下, 该系统的运动方程为:

$$F(t) = m \frac{d^2x}{dt^2} + \eta \frac{dx}{dt} + kx \quad (2)$$

其中 η 为阻尼系数。

作用在导体基元 10 上的磁力会使其加速进入由如下对于位移为 x 的一般解所表示的强迫振动模式

$$x(t) = x_0 + (A_1/a)(e^{at} - 1) + (A_2/b)(e^{bt} - 1) + B_1 e^{at} \int_0^t e^{-at} F(t) dt + B_2 e^{bt} \int_0^t e^{-bt} F(t) dt \quad (3)$$

其中

$$a = -\eta/2m + [(\eta^2/4m^2) - k/m]^{1/2} \quad (3a)$$

$$b = -\eta/2m - [(\eta^2/4m^2) - k/m]^{1/2} \quad (3b)$$

A_1 、 A_2 、 B_1 和 B_2 是由系统特性决定的常数。

在实际的线圈系统中当然不可能把线圈安装在不能移动的物体上。可以增加线圈构架的质量以试图使线圈不能活动, 但是在高速成像技术中就要采用强的静磁场和很大的电流来产生磁场梯度, 这样就会使磁力太大以致于不可能形成有效的不可动质量。

图 3 表示了一个由两个“背靠背”振动块 10 和 11 组成的谐振系统。在该系统中, 对不可动质量不再有要求, 而且质量块 10 和 11 相等, 弹簧 12 和 13 的弹簧系数 k_1 和 k_2 也相等, 图 3 所示的系统保持系统的质量中心恒定。这里部分说明了这种机械模式, 本发明的磁力屏蔽原理如前所述。

如图 4a 所示, 对于一个流有电流 I 并位于磁场 B 中的矩形回路的导体 16 使用上述磁力屏蔽原理。倘若线圈回路 16 的平面与磁场 B 的方向正交, 作用在导体 16 上的所有作用力 F 、 F' 对任何方向的电流都是数值相等、方向相反的。如果这些力通过非压缩支杆 18 和螺栓 20 耦合在一起, 即如图 4b 所示, 则在该系统中所有力被抵消。此外所有力矩、力偶, 因而力矩也被抵消。这种机械模式说明了本发明的原理, 即有源声屏蔽或线圈的力平衡原理。

如果使用的是非压缩材料, 导体 16 就不能移动。在这种情况下, 在这种线圈 22 系统中不会有声音产生。如图 4c 所示, 可以把整个线圈 22 的结构灌注或封装在一种合适的塑料树脂 24 中, 从而通过使支杆有效地连成一体而取代各单个独立的支杆。

但是, 所有材料都可能受某种程度的压缩。这就意味着, 从这一点上上述声屏蔽会有一些实际限制, 导体会有一些残余的运动。但是, 本发明显著地降低了声音噪声。

导体的突然运动会产生一个压缩波穿过材料。这样一种波 v 的速度为

$$v = (E/\rho)^{1/2} \quad (4)$$

其中 E 是杨氏模量, ρ 是材料密度。为了使导体的等值反向运动和/或导体在不同时刻的运动不出现问题, 支杆长度最好是 $l \leq \lambda/12$ 。

速度与波长 λ 关系为

$$v = f \lambda \quad (5)$$

其中 f 是传播波的频率。使用提供的 E 和 ρ 值, 可以计算多种通

用材料的波速。对于玻璃, $v = 5.0 \text{ kms}^{-1}$ 。对于典型的硬木, $v = 4.5 \text{ kms}^{-1}$ 。对于铝, $v = 5.1 \text{ kms}^{-1}$ 。对于黄铜, $v = 3.4 \text{ kms}^{-1}$ 。采用关于木材的速度值并取 0.15 米的支杆长度则得到 (从公式 (5)) $f = 2.0 \text{ KHz}$ 的最大频率。这个频率以上的传播相位的影响能够导致声波不能被抵消。在这种情况下, 可以把更多的传统吸声材料与有源声屏蔽物相结合使用。耳朵保护器的使用总是一种附加的选择, 但是如上所述, 这在胎儿扫描或兽医使用领域是没有什么作用的。

上述讨论表明要想获得最好效果, 支杆材料, 或合成塑料树脂封装材料应该具有大数值的 E 和小数值的密度 ρ 。这样一种结合会得到一种高的纵(压缩)波的速度。因此, 与直觉相反, 要求有一种高强度的轻耦合结构。使用具有重填充材料的加载塑料树脂, 由于明显增加了线圈结构的重量, 因此可能是合乎需要的并表明增加了 v (声音的速度)。

在梯度线圈的设计中采用上述线圈力平衡的原理。下面参照图 5 到 10 对此进行详细说明。在最简单的结构中, 如图 5 和 6 所示, 一个横向梯度线圈由四个矩形回路 26 构成。

在图 5 中, 回路 26 产生 x 梯度 G_x 。在这种结构中, 每个回路包含 N 匝导体, 每个回路所有臂中的电流都为 I 。在这样一种线圈结构中力和力矩被抵消了。

下面从一个实验的结果来说明声屏蔽的功能。

图 5 所示的结构可以扩展为如图 6 平面图所示的多重回路, 其中可以改变电流和/或导体 28 各顺序弧形回路的间隔, 以在空间产生更均匀的磁场或磁场梯度。各回路平行平面间的间隔可以

不相等。由于绝大多数整体MRI 成像系统具有圆柱形静磁场对称性，所以，图 5 和 6 所示的矩形回路可以变形为图 7 所示的弧形回路 30。倘若弧形回路 30 构成闭合回路，以及倘若各回路的平面与磁场 B 正交，和矩形回路的情况一样，所有力矩和力都是平衡的。对任何闭合回路都是如此。

研究这样两个弧形回路，其到公共原点 O 的半径为 a 和 b，具有的角位移为 Φ_a 和 Φ_b ，并流有电流 +I_a 和 -I_b。这两个弧形回路没有形成闭合回路。这种结构如图 8 所示。在这种结构中为了使力和力矩达到平衡，在 $\Phi_a = \Phi_b$ 情况下，我们要求

$$I_b = -\frac{a}{b}I_a = -I_a/\alpha \quad (6)$$

只有当两个弧形回路结合在一起构成闭合回路的时候，弧形回路电流才相等。有必要指出对于所有圆柱形梯度线圈的设计，力平衡原理即公式 (6) 只适用于线圈结构的弯曲或成方位角的部分。洛伦兹力不作用在沿静磁场 B₀ 方向 (z 轴) 的电流分量上。

图 7 所示的弧形回路 30 可以是串联或并联结构，或者是两者的结合。在所有情况下，必须这样实现弧形回路的连接，即馈电和连接器导线或导体以成对方式与主磁场 B₀ 平行。这种平行导线结构可以取紧密同轴成对、平行载流条对、甚至是缠绕在一起的一对导线的形式。平行载流条的好处是可以隔开并用螺栓固定精确平行的载流条以防止或减少导体的残余移动。由于缠绕的导线对是柔软的，因此，在最终的连线结构中必须把其设置在环氧树脂或某种类似的树脂中。

在超导磁铁的闭合区域内部转换各线圈时，由一个梯度线圈

组产生的外部磁场会与一个低温箱的四周金属结构发生很强的相互作用。所以，这种相互作用会在低温箱和超导线圈自身产生涡流。由于小电阻衰减得极慢，这种作用反过来又会产生破坏原基本梯度特性的不希望出现的附加的随时间产生的梯度。有源磁屏蔽是由 Mansfield 和 Chapman 围绕涡流问题提出的，见 Mansfield P. and Chapman Mag. Res, 66, 573 - 576 (1986), Mansfield P and Chapman B., J. Phys, E. 19, 540 - 545 (1986), Mansfield P. and Chapman B. Mag. Res. 72, 211 - 223 (1987)。在目前这种情况下以及产生有源力或声屏蔽的情况下，还需要具有有源磁屏蔽的整个梯度线圈组。

作为一个简单的例子，对图 9a 所示的，由设置在半径为 b 的圆柱上的屏蔽线圈磁屏蔽半径为 a 的单个回路 32 的情况进行讨论。从上述有源磁屏蔽的理论知道，在这样一种结构中，屏蔽电流 I_s 与初级电流 I_p 的关系为

$$I_s = (N_p/N_s) [a/b]^2 I_p \quad (7)$$

其中 N_p 和 N_s 分别是初级和屏蔽线圈匝数。但是，这种结构没有声屏蔽。对半径为 a 的内部线圈需要进行声屏蔽而且对于半径为 b 的磁屏蔽线圈需要第二声屏蔽。在初级线圈只有一匝的情况下，声屏蔽线圈自身在与初级线圈相同的平面内也只是一匝。设其半径为 αa ，在这种情况下 $\alpha > 1$ 。对于要进行磁屏蔽的声屏蔽线圈来说，所需要的全部就是要把其屏蔽线圈设置在半径为 αb 的圆柱表面上。就是说原始屏蔽线圈组按比例系数 α 沿半径扩展，但其长度保持不变。这由图 9b 示意表示并且是从一匝初级线圈到分布的初级线圈是对齐的。如果所谓初级声屏蔽线圈和对声屏蔽

线圈进行磁屏蔽的屏蔽线圈的长度与要进行声屏蔽的各线圈的各自的长度保持相等，那么，借助屏蔽磁场特性和强度的略微变化可以折衷声屏蔽线圈的磁场屏蔽性能。这种情况可以通过如下所述改变场屏蔽模式和/或保持 α 较小来得到改善，由此，线圈的绕制以及它们各自的声屏蔽可以有较小的径向不对齐。

在上述结构中，声屏蔽初级线圈和屏蔽电流 I_{pf} 和 I_{sf} 根据公式 7 来定标。就是说 $\alpha I_{pf} = I_p$ 和 $\alpha I_{sf} = I_s$ 。声屏蔽线圈的位置是任意的。这样一种情况可以这样安置线圈，即初级声屏蔽线圈半径与初级线圈磁屏蔽半径相一致。就是说， $\alpha a = b$ ，在这种情况下，磁屏蔽的声屏蔽半径 b' 为

$$b' = \alpha b = \alpha^2 a \quad (8)$$

这意味着对于 a 和 b' 都是固定的一种最佳设计的系统来说， α 由几何条件决定。各线圈，屏蔽和声屏蔽的电流方向遵循下列安排： $+I_p$ 、 $-I_{pf}$ 、 $-I_s$ 、 $+I_{sf}$ ，这样，在初级线圈声屏蔽半径 αa 与初级线圈磁屏蔽的半径 b 相一致的情况下，不会发生电流不连续的情况。

对于一种典型整体梯度装置， $a = 65\text{cm}$ 、 $b' = 94\text{cm}$ ，故得出 $\alpha = 1.2$ 。 α 的这个数值足够小，从而不会明显改变初级和初级声屏蔽绕组或初级屏蔽及其声屏蔽绕组的径向对齐。术语“径向对齐”的意思是在内部线圈表面的导体的位置径向突出到外部同轴圆柱体的表面上，由此，限定这个线圈上绕组的位置。是以这样一种方式突出的，即内部绕组图形的长度与外部绕组图形的长度相等。上述这个具体实施例会使得梯度结构的磁屏蔽性能受到某种程度的牺牲。但是，当磁屏蔽线圈及其声屏蔽线圈中的电流发生变

化时,通过保持初级及其声屏蔽线圈中的电流,来使其得到某种程度的补偿。后者通过保持屏蔽比率和屏蔽电流恒定来实现,由此保持力平衡。

为了恢复磁屏蔽性能和保持声屏蔽,可能考虑的是整个屏蔽表面上的力平衡(集合力),而不是各径向对齐的导线对和组的细节的力平衡。在这种设计安排中,净力和净力矩等于零,后面在理论部分还要作进一步说明。磁屏蔽也可以得到极大改进。在这种情况下,力的集合是通过把三个或四个线圈封装在一种适宜的固定树脂中,由此使整个线圈结构具有刚性。

附加的声屏蔽还要从其自由空间数值 B_1 中减去屏蔽场的作用。对于所讨论的系统,有效的初级场 B_{1e} 近似为

$$B_{1e} = -B_1 \left(1 - \frac{N_p}{N_s} \left[\frac{a}{b}\right]^2\right) (\alpha^2 - 1) / \alpha^2 \quad (9)$$

很明显可以构成几个有源力或声屏蔽回路的结构以建立一个麦克斯韦型的线性梯度线圈或一个亥姆霍兹型的均匀场线圈。圆柱形的磁屏蔽的(或不屏蔽)横向梯度线圈也可以用上述发明进行声屏蔽。对于一个有源屏蔽横向梯度线圈,一个第二定标的屏蔽梯度装置组与上述第一屏蔽梯度线圈组相交错。这种结构由图 9b 表示,其中第一屏蔽梯度组由实线示意表示。第二屏蔽梯度装置组由虚线表示。

图 10 表示了一个关于产生横向梯度的有源屏蔽梯度线圈的导线布置的例子。绕制图形呈现为一种铺开平面或展开表面。初级和屏蔽绕组都是所谓的指纹图形的分布绕组。初级和屏蔽连线图形沿 $a\theta$ 和 $b\theta$ 轴进行定标,以便为一个屏蔽线圈装置提供声屏蔽。

初级线圈布置中的象限标记 Q 表示从一个等值线到另一条等值线的连线路径在一个串联结构中是如何相连的。根据力平衡原理,用于对初级和屏蔽线圈进行声屏蔽的连线布置方式可以和图 10 所示相似,但要按系数 α 沿 a 和 b 轴扩展。

通过把线圈绕在三个或更多的轻圆柱体的表面上,可以实现初级线圈、声屏蔽绕组和磁屏蔽绕组的定位。为了获得合适的力平衡,整个结构集中在一个装放圆柱筒中,然后用一种高弹性模量和低密度的适且固定的聚合物树脂进行灌注或封装。在树脂固定之前,用泵去除气泡以在线圈系统中产生一个真空。象聚碳酸酯这样的聚合物应该是最好的材料,但是,由于象环氧树脂、丙烯酸树脂、甚至聚苯乙烯这样的其它材料在相对低一些的频率下具有良好的声学性能,所以也可以使用这些材料。

磁屏蔽和有源声屏蔽的组合作用会对来自梯度线圈驱动器的电流产生附加的要求。降低 B_{1c} 会降低梯度线圈组的感抗,以便使附加匝数可以有某种程度的增加,从而使感抗恢复到其所要求的数值。反过来增加 B_{1c} 对此也有所帮助。但是,由于 L 随 N_p^2 变化,而 B_{1c} 线性地取决于 N_p , 故恢复感抗所增加的匝数不能完全补偿 B_{1c} 的损失。因此,一般需要用更多的电流来驱动系统以获得所需的梯度强度。与这种额外电流伴随产生的大的力会使所降下来的声音又有些增大。这在下面的实验结果将进行说明。

在本发明的又一个实施例中,对声屏蔽和磁屏蔽的理论方面进行了说明。这些都会导致屏蔽性能的提高。

现在对这种理论简要说明如下。

作用在位于磁场中的长度为 l 的导体上的合力的洛仑兹表达

式为

$$F = -IB \times l \quad (10)$$

在一种最佳轴向磁场中, 该力整个使用在径向平面上。在一个系统的情况下, 磁场 $B = 3T$ 、 l 典型的为 $0.5m$ 的数量级, 在质量为 $0.0765kg/m$ 的铜导体中 $I = 200A$ 。这导致一个 $600v(N)$ 的力作用在产生 $800g$ 加速的导线上。电流通常以多模式, Mansfield P., Harvey P. R. 和 Coxon R. J. (1992) . Meas. Sci. Techmol. 2, 1051 - 1058, 梯形方式, 典型地以 $500Hz$ 速率进行转换, 以在人类听力的峰值敏感区产生谐音。

在球面谐波弧形回路中, 标准线元设计理论按照 Legendre (勒让多) 多项式 (P_{nm}), 采用磁场的球面谐波函数展开式, 以规定一系列弧形回路的角度和位置, 这些弧形回路可以提供结构中心点所需场的可能的最好的近似, Romeo and Hoult (1984) 磁场分布: 分析与校正, 线圈设计. Mag. Res. in Med. Vol. 1, No, 1, 44 - 65. Chapman B. and Mansfield P. (1984) . A simple shimming strategy for whole body MRI imaging magnets. 22nd Congress Ampere on Mag. Res. and Related phen. Proc. 512 - 513。当在一个球前上向外移向线元时, 环绕的场偏离理想值。对于 MRI, 最方便的结构是圆柱形表面, 见图 11, 对于这种结构场的表达式为

$$dB_0 = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sin \alpha \int_{n=0}^{\infty} \int_{m=0}^n [F_{n,m-1} G_{n,m-1} + F_{n,m+1} J_{n,m+1}] r^n P_{nm}(\cos \theta) \cos m(\phi - \psi) d\psi \quad (11)$$

其中

$$F_{nm} = \varepsilon_m (n - m + 1)! P_{n+1,m}(\cos \alpha) / (n + m + 1)!$$

$$G_{nm} = -(1 + \delta_{m,0}) / 2f^{n+1}$$

$$J_{nm} = (1 - \delta_{m,0}) (n + m + 1) (n + m) / 2f^{n+1}$$

且此外对于 $m = 0$ 和 2 , $\varepsilon_m = 1$ 。

关于一个轴向梯度, 即 $m = 0$, 系统关于中心平面是不对称的。因此, 解是一对在轴的两侧距轴等距离并流有相反电流的环的形式。这可以直接消除表达式中的所有偶数项。对一个单独一对的半径为 a 的导体在半个间距为 b 的情况下进行积分并求解, 得到如下展开式:

$$B = 3\mu_0 n I a^2 b / (a^2 + b^2)^{5/2} [r P_1(\cos \theta) + (20b^2 - 15a^2) r^3 P_3(\cos \theta) / (a^2 + b^2)^2 + O(r^5) + \dots] \quad (12)$$

当立方项即 T_3 为零时, 在这种情况下也就是当 $b = (a\sqrt{3}) / 2$ 时, 在中心产生的最佳梯度为

$$B = 0.6413 \mu_0 n I z / a^2 + O(r^5) \quad (13)$$

这是标准的麦克斯韦解 (并由图 12 表示)。在图 12 所示的实施例中, 作用在由与 B_z 相互作用所产生的每一个环上的洛伦兹力是平衡的。环间的磁偶极力虽然不平衡但相对较小。

尽管使用更多的环会使问题很快变的极为复杂, 但是, 通过对于第五项和更高次项同时为零的情况进行求解可以找到更好的解。通过关于表面电流分布对 Biot - Savart 公式直接进行求和

解可以得到一个更好更直接的解, Bangert V. and Mansfield P. (1982). 关于 MRI 成像的磁场梯度线圈, J. Phy. E.: Sci. Instrum., 15, 235 - 239。Mansfield P. and Chapman B. (1987)。MRI 中的梯度线圈的多重屏蔽的有源磁屏蔽, J. May. Res. 72, 211 - 223。Turner R. J. (1986)。接近最佳线圈设计的目标场, J. Phy. D: Appl. Phys. Vol. 19, L147 - L151。这种方法在下面讨论。

一般是通过使导体所对的角 $\Delta\psi = 2q\pi/m$ (如图 11 所示) 来消除所有次数 m 的谐波, 其中 q 是正整数, ψ 是方位角。此外, 如果这些弧形回路与交流电流方向都是隔开 π/m 弧度, 那么, 消除所有偶次谐波和次数小于 m 的所有谐波。对于横向梯度即 $m=1$, 电流必须是对称的, 那么具有相差 180° 的反向电流的 120° 弧形回路要消除除了 T_{11} 、 T_{13} 等以外的谐波。和上述麦克斯韦线圈的例子一样, 通过对 T_{13} 求零以提供最佳的间隔/直径之比, 这可以很容易求解, 即

$$F(a) = a/(b^2 + a^2)^{5/2} [35b^4/(b^2 + a^2)^2 - 35b^2/(b^2 + a^2) + 4] = 0 \quad (14)$$

立即得出 $\tan^{-1}(a/b) = 21.3^\circ$ 和 68.7° 。因此, 第二个解提供了图 13 所示的返回路径的位置。两个存在的解可以同时用来消除 T_{15} 。但是, 场质量的改进可能很小。

当把这些线圈结构设置在一个轴向磁场中时, 作用在这些线圈结构上的力是径向的, 由于弧形部分之间的连接部分与磁场平行, 因此不受磁场作用。同样它们不会对 B_z 场有所贡献。对于麦克

斯韦线圈, 力是平衡的, 没有净力作用 (如图 12 所示)。因此, 对于很好固定的导线, 来自麦克斯韦线圈的声音噪声是由整个结构扩展和收缩引起的局部微观运动整体产生的。对于横向线圈, 力沿结构的长度方向产生可观的净力矩, 因为所有位于一特定轴向位置的弧形部分在同一方向作用一致, 见图 13。作用在该结构上的力沿结构的长度产生一个净力矩。

如上所述提出另一种线圈结构, 其中回转弧形部分安装在与初级线圈中相同的轴向位置上。因此, 每一部分上的净力和力矩都为零。

这方面最简单的实施例采用线元设计, 即使用在线圈上的力平衡。从 Legendre 展开式的分析, 图 14 以及忽略连接弧形部分的作用可以得知, 最佳弧长是面对 120° 的角度, 最佳间隔由下式求零得出

$$F(a) - F(c) = 0 \quad (15)$$

其中 a 、 c 分别是初级和回转弧形部分的半径。图 14 中的装置确保没有净力或力矩作用在每一个弧形回路上。

方程 (15) 有两个解, 但是为有效起见, 最小间隔是 b 。对于任何给定的半径 a 和 c 所需的最佳间隔 b 可以用数字方式得到。可以任选这些数值的两个。

根据和通过寻找围绕点 b 的间隔距离, 并计及径向连接弧形部分的作用, 可以改进场的质量。这很容易通过如下步骤来完成:

(i) 对于位于一个轴向位置的单个线圈对, 对于在一个所要研究的内部区域 (ROI) 上的且径向延伸以包容寻找空间的一些网格点处的场强进行计算,

(ii) 在围绕点 b 的各种位置, 使所计算的场强自身进行卷积, 和

(iii) 在整个 ROI 上寻找与理想梯度场的最小的偏差。通过提供两个弧长有自由度可以有进一步的微小改进, 尽管引入两个附加的自由度对这个问题的益处不大。径向弧部分的问题也可以通过分析与直线 (straight line) 弧的精确表达式相结合来进行处理, Bangert V. and Mansfield p. (1982). 关于 MRI 成像的磁场梯度线圈, J. Phy. E. : Sci. Instrum., 15, 235 - 239。

另一种方法是采用以表面电流梯度线圈形式的表面分布电流。对于轴向梯度, 采用任何标准方法都可以很容易求解, Mansfield P. and Chapman B. (1987), 在 MRI 中梯度线圈的多重屏蔽式有源磁屏蔽, 记载于 J. Mag. Res. 72, 211 - 223; Turner R. J. (1986), 接近最佳线圈设计的目标场, 记载在 J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 19, L147 - L151; Chapman B., Doyle M. and Pohost G. M. (1992), 优选电磁线圈设计理论, IEEE proceedings Southeastcon, 2, 757 - 762, 这是因为在所有情况下都可以设法使净力平衡。同样, 可以很容易地采用所有来提供具有或没有有源磁屏蔽的声屏蔽的有源磁屏蔽。下面的分析关于 Chapman 的方法说明了这一点, Chapman B, Doyle M. and Pohost, G. M. (1992)。优选电磁线圈设计理论, IEEE proceedings Southeastcon, 2. 757 - 762, 具有最佳场和方法的限定长度的屏蔽的电磁线圈。

反映电流与磁场关系的基本 Biot - Savart 方程是一个卷积, 因此在付利叶域中最容易处理。对于长度有限的圆柱形表面, 强迫电流 I 沿方位角和轴向方式流动, Chapman B, Doyle M. and

Pohost, G. M. (1992), 优选电磁线圈设计理论, IEEE proceedings, Southestcon, 2, 757-762, 研究基本单元电流环路。允许的谐波模式为 $\cos(m\theta)$ 的形式, 其中 m 是整数。相对应的在轴向场的轴向的付里叶变换在半径为 r 时为:

$$B_a(r, k) = \sum_m B_a(r, m, k) \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned} B_a(r, m, k) &= \mu_0 k a I_m'(ka) K_m(kr) & r > a \\ &\mu_0 k a K_m'(ka) I_m(kr) & r < a \end{aligned} \quad (17)$$

同样, 许可的轴向谐波 J_n 在长度为 l 的圆柱形的情况下为:

$$J_n(z) = C_n H(z) \cos(2\pi n z / l + \phi) \quad (18)$$

其中 C_n 是第 n 次谐波的电流幅度, 和

$$\begin{aligned} H(z) &= 1 & |z| \leq l/2 \\ &0 & |z| > l/2 \end{aligned} \quad (19)$$

公式(18)的付里叶变换得到

$$J_n = \pi l C_n [e^{i\phi} \text{sinc}(kl/2 - n\pi) + e^{-i\phi} \text{sinc}(kl/2 + n\pi)]. \quad (20)$$

合成的轴向场的付里叶变换是公式(18)和(20)这两个项的乘积, 为

$$B_z = \sum_n \sum_m J_n(k) B_a(r, m, k) \quad (21)$$

我们总是只对一种谐波模感兴趣, 即对于轴向场 $m=0$, 对于横向场 $m=1$ 。然后, 通过最小平方可以求出与由在和付里叶空间相比

为实空间的ROI上的有效模所产生的场相配的幅度 C_n 。注意这样所有设计问题减至一维研究，假若关于线圈结构长度 l 是预先确定的。

为了使净力为零增加第二表面。有一些根据构成技术来完成这一任务的办法。下面将对其中的一些办法进行说明。

固定弧长的平衡力回路

图 15 表示了一组都具有 120° 固定角位移的弧形回路。如上所述，以通过消除球面谐波函数展开式中的高次 Legendre 项来确定回路的位置。一种更直接和更一般的近似方法是使这些回路如下接近连续分布：例如通过对 Biot - Savart 公式进行直接的数字积分，来确定所要研究的轴向扩展区域上 (ROI) 的由位于单独一个位置上的一对回路所产生的磁场

$$B_1(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J(r') \times (r - r')}{|r - r'|^3} d\tau' \quad (22)$$

其中醒目的字母表示矢量的量， $d\tau'$ 表示单位体积。

然后对于关于 m 的合适值确定连续分布是通过最小二乘法，在下面展开式中确定 C_n 来实现的

$$B_z = \sum_n J_n(k) B_1(r, m, k) \quad (23)$$

其中 $B_1(r, m, k)$ 是单独一对回路所产生场的轴向分量的付里叶变换。然后回路确定位置以便每一回路需要相等的电流。另一方面，可以由一个公共电源利用和每个回路都并联的电阻器电路或者一组不同的电流源向每个回路提供不同的电流。这种设计方法的优点是考虑了连接的径向弧形部分。

另一种方法是从一对力平衡表面计算全部表面电流, 即从关于圆柱形线圈的公式 (21) 我们得到

$$B_z = \sum_n J_n(k) [B_a(r, m, k) - B_c(r, m, k)]. \quad (24)$$

形成的弧形部分具有各种弧长, 见图 16, 这可以通过在电流分布的相邻等势线 (流线) 之间设置弧形部分很容易地得出。这可以提供比由方程 (22) 所得到的更好的解, 但是由于方程 (24) 没有考虑径向弧形部分, 所以, 它非常依赖于这些弧形部分影响程度。

除了平衡力极大减少低频声音噪声之外, 还可以如图 17 所示在设计中使用吸声材料。这可以衰减剩余的高频噪声。实芯芯体将力平衡弧形部分径向连接部耦合到初级弧形部分。此外, 柔软的吸声材料 (黑色) 减少剩余的高频噪声。

平衡力表面电流分布

还有另外一种方法是采用标准表面电流分布方法, 其中线圈整体嵌入表面中。在这种情况下通过使两个表面整个面积, 或在一些重要点上进行耦合来实现力平衡。然后, 方程 (24) 必须改形以按等于各半径之比的比例系数减小力, 从而与外侧的半径较长的长度相适应, 即,

$$B_z = \sum_n J_n(k) [B_a(r, m, k) - \frac{a}{c} B_c(r, m, k)]. \quad (25)$$

对于这种方法连接弧形部分没有影响, 因为没有连接弧形部分。

有源磁屏蔽

通过对总屏蔽环路场进行置换, 在这些方程中加入磁屏蔽因素是很简单的事, 即对于未屏蔽场

$$B_s = \mu_0 k a I_m(kr) [K'_m(ka) - K'_m(ks) I'_m(ka) / I'_m(ks)] \quad (26)$$

如果需要还可以对磁屏蔽自身进行声屏蔽。则总的磁场分量 (B_n) 为:

$$B_n = \mu_0 k I_m(kr) [J_a(k) a K'_m(ka) + J_c(k) c K'_m(kc) + J_t(k) t K'_m(kt) + J_s(k) s K'_m(ks)] \quad (27)$$

其中 a 是初级线圈半径, c 是初级线圈声屏蔽线圈半径, s 是磁屏蔽线圈半径, t 是磁屏蔽力屏蔽线圈半径。方程 (27) 中的变量定义如下:

$$J_c(k) = -\frac{a}{c} J_a(k), \quad (28a)$$

$$J_s(k) = \frac{a}{s} J_a(k) [I'_m(ka) - I'_m(kc)] / [I'_m(kt) - I'_m(ks)] \quad (28b)$$

和

$$J_t(k) = -\frac{s}{t} J_s(k) \quad (28c)$$

通过使 $c = t$, 可以使两个声屏蔽电流分布相叠加。这样就提供了一种更紧凑、电阻更低和更容易制造的结构。

采用几何相似性的声或力屏蔽

研究对整个屏蔽的数学处理, 初级线圈和磁屏蔽线圈半径为 a 和 b 的完全声屏蔽圆柱形梯度装置组, 用半径为 f 、 t 的附加圆

柱形线圈使力平衡。还参考在 MRI 中梯度线圈的多重屏蔽式有源磁屏蔽, P. Mansfield and B. Chapman J. Mag. Res 72, 211 - 223 ; Turner R. J. (1986) . 接近最佳线圈设计的目标场, J. Phys. D : Appl. Phys. Vol. 19, L147 - L151, 这是关于圆柱形分布导线线圈的。

用通量(stream)函数 $S(\Phi, Z)$ 来说明半径为 a 的圆柱体上的 x 梯度线圈。路径由 S 的等线值给出。电流分布为

$$\mathbf{J} = -\nabla S \cdot \mathbf{n} \quad (29)$$

其中 $\mathbf{n}$ 是圆柱形表面上任意一点上的法线。 $\mathbf{J}$ 具有如下分量。

$$J_z = \frac{1}{a} \frac{\partial S}{\partial \phi} \quad (30)$$

$$J_\phi = -\frac{\partial S}{\partial z} \quad (31)$$

在方程(31)的付里叶变换中的第 m 次分量为

$$J_\phi^m(k) = ik S^m(k) \quad (32)$$

其中

$$J_\phi^m(k) = \text{FT} \{J_\phi(\phi, z)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dz \int_{-\pi}^{\pi} d\phi e^{-im\phi} e^{-ikz} J_\phi(\phi, z) \quad (33)$$

和

$$S^m(k) = \text{FT} \{S(\Phi, z)\} \quad (34)$$

对于一个 x 梯度线圈, 只有 S^1 和 S^{-1} 不为零。

这个内部场为

$$B_z = \frac{-\mu_0}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk \, ik^2 a \cos \phi \, S^1(k) K'_1(ka) I_1(kr). \quad (35)$$

外部场由下式给出

$$B_z = \frac{-\mu_0}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} ak \, ik^2 a \cos\phi \, S^1(k) I'_1(ka) K_1(kr). \quad (36)$$

其中 r 是径向极坐标。

带有第二线圈的声屏蔽

所加的第二线圈由关于半径为 f 的圆柱形的通量函数 $S(\Phi, z)$ 来描述。那么, 对于力平衡, 我们要求

$$S(\Phi, z) = -\frac{a}{f} S(\Phi, z) \quad (37)$$

这就确保了导线路径在每个线圈上具有相同的 Z, Φ 值和正确的电流比 $1: a/f$ 。也就是说, 线路是径向对齐的。

声屏蔽和有源屏蔽

讨论四个绕在半径为 a, b (是初级和磁屏蔽的) 和 f, F (实质上是初级声屏蔽和磁屏蔽的) 圆柱形表面上的线圈。图 9 (b) 表示了一种总体线圈结构的布置。使用原符号, $f = \alpha a, F = \alpha b$, 这种结构的相关流函数为:

半径	电流通量函数	作用
a	S_a	原线圈
f	S_f	初级力屏蔽
b	S_b	有源屏蔽
F	S_F	有源屏蔽的力屏蔽

对于也称作力屏蔽的声屏蔽, 我们要求

$$S_f = -\frac{a}{f} S_a \quad (38)$$

以及

$$S_F = -\frac{b}{F} S_b \quad (39)$$

要在半径 $r > d$ 时取消场, 我们需要

$$a I_1'(ka) S_a^1(k) + f I_1'(kf) S_f^1(k) + b I_1'(kb) S_b^1(k) + F I_1'(kF) S_F^1(k) = 0 \quad (40)$$

在 k 空间使用方程 (38) 和 (39), 我们发现

$$a[I_1'(ka) - I_1'(kf)] S_a^1(k) = -b[I_1'(kb) - I_1'(kF)] S_b^1(k). \quad (41)$$

整理后我们得到

$$S_b^1(k) = -\frac{a[I_1'(kf) - I_1'(ka)]}{b[I_1'(kF) - I_1'(kb)]} S_a^1(k). \quad (42)$$

内部场由下式给出

$$B_z = \frac{-\mu_0}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dk \, ik^2 \cos\phi \, I_1(kr) T \quad (43)$$

其中

$$T = \sum_l \varrho \, S_l^1(k) \, K_1'(kl). \quad (44)$$

而且其中 $l = a, b, f$ 和 F 。使用方程 (38) 和 (39) 得出

$$T = a S_a^{-1}(k) [K_1'(ka) - K_1'(kf)] + b S_b^{-1}(k) [K_1'(kb) - K_1'(kF)]. \quad (45)$$

使用方程(41)和(42)得出

$$T = S_a^{-1}(k) T' \quad (46a)$$

$$T' = a \{ [K_1'(ka) - K_1'(kf)] - [K_1'(kb) - K_1'(kf)] \} \quad (46b)$$

$$x \frac{[I_1'(kf) - I_1'(ka)]}{I_1'(kF) - I_1'(kb)} \}.$$

现在可以采用目标场近似, Turner R. J. (1986), 最佳线圈设计的目标场近似, J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 19, L147-L151, 其中场 $B_z(c, \phi, z)$ 是规定的。然后关于半径 c 进行付里叶变换得到 $B_z(c, k)$ 。使方程(43)的被积函数等于 $B_z^1(c, k)$, 并对于 $S_a^{-1}(k)$ 进行反相得到表达式

$$S_a^{-1}(k) = \frac{-2\pi}{\mu_0 k^2 I_1(kc) T'} B_z^1(c, k). \quad (47)$$

采用总屏蔽电流平衡实现全部力屏蔽和有源磁屏蔽

为了设计一种包含有源和力屏蔽的系统, 尽管关于每个线圈圆柱体的回转弧形部分都落在其它圆柱形面的一个上, 但是也需要关于所有各圆柱形面总电流之和为零。只有三个线圈圆柱形在原理上是做不到这一点的。但是电流平衡, 采用四个线圈圆柱形

面上的电流分布,就可以设计声屏蔽和有源磁屏蔽线圈装置。

讨论半径为 a, b, f 和 F ($a < f < b < F$) 的圆柱形面上的电流分布,这些电流分布用在付里叶空间中由 $S_a^m, S_f^m(k), S_b^m(k)$ 和 $S_F^m(k)$ 代表的通量函数进行描述。

要满足的三个条件是

a) 对于电流平衡

$$S_a^m + S_f^m + S_b^m + S_F^m = 0 \quad (48)$$

b) 对于力平衡

$$aS_a^m + fS_f^m + bS_b^m + FS_F^m = 0 \quad (49)$$

c) 和对于有源磁屏蔽

$$a I_m'(ka) S_a^m + f I_m'(kf) S_f^m + b I_m'(kb) S_b^m + F I_m'(kF) S_F^m = 0 \quad (50)$$

对这些方程进行求解,我们通过如下公式发现通量函数 S_b^m, S_f^m 和 S_F^m 与 S_a^m 的关系

$$\frac{S_f^m}{S_a^m} = \frac{a(b-F)I_m'(ka) + b(F-a)I_m'(kb) + F(a-b)I_m'(kF)}{f(F-b)I_m'(kf) + b(f-F)I_m'(kb) + F(b-f)I_m'(kF)} \quad (51)$$

$$\frac{S_b^m}{S_a^m} = \frac{a(f-F)I_m'(ka) + f(F-a)I_m'(kf) + F(a-f)I_m'(kf)}{b(F-f)I_m'(kb) + f(b-F)I_m'(kf) + F(f-b)I_m'(kF)} \quad (52)$$

$$\frac{S_F^m}{S_a^m} = \frac{a(b-f)I_m'(ka) + b(f-a)I_m'(kb) + f(a-b)I_m'(kf)}{F(f-b)I_m'(kF) + b(F-f)I_m'(kb) + f(b-F)I_m'(kf)} \quad (53)$$

如果 $f \rightarrow b$, 如预料的那样我们会发现 $S_F^m \rightarrow \infty$, 这意味着对于 3 个线圈圆柱形面没有解。这样就使得近似工作严格要求 4 个线圈圆柱形面。但是, 如下面所述, 我们可以找到近似满足所要求的电流值的 3 个圆柱形面的结构。

这样, 我们可以规定 $B_z(c, \Phi, z)$, 用公式 (47) 计算 $S_a^1(k)$, 然后用公式 (38、39、41 和 42) 计算 $S_f^1(k)$ 、 $S_b^1(k)$ 和 $S_F^1(k)$ 。

有源声屏蔽可以与有源磁屏蔽相结合以形成至少用三个圆柱形表面支承三个线圈的线圈结构。为实现这一点, 需要在圆柱形表面之间适当产生力平衡。这是通过确保所有三个圆柱形面上的导线径向对齐来实现的。

电感

线圈

任何闭合的平面, 或近似平面的回路的电感 L_f 是由等效的环形回路, 即包围相同面积的环形回路来近似表示。在这种情况下

$$L_f = \mu_0 \left(\frac{A}{\pi} \right)^{1/2} n^2 \ln \left(\frac{16}{d} \left(\frac{A}{\pi} \right)^{1/2} - 2 \right) \quad (54)$$

其中 A 是所包围的面积, d 是导体在径向的厚度, n 是匝数而 A 是所包围的面积。

分布线圈

关于分布线圈的一个有用的近似方案是由一个短的均匀螺线管的电感 L_s 来提供的

$$L_s = \mu_0 n^2 \frac{A}{l} E \quad (55)$$

其中 l 是结构长度, A 是平均横截面积, E 是端部修正系数, E 由表示关于表面电流分布的修正系数的表 1 给出。

关于电感的总方程为

$$L_{pq} = -\mu_0 \pi^2 pq / (D_p D_q) \sum_m \int J_p(-k, -m) J_q(k, m) I_m'(kp) K_m'(kq) dk \quad (56)$$

其中 p 和 q 是两个在其上分别流有电流分布 J_p 和 J_q 的表面的半径, D_p 和 D_q 是它们各自的幅值。

结果

1. 离散的弧形回路设计

参见图 14, 对于一个插入梯度线圈实现这种设计, 它和 3T 整体 MR 系统中的 EPI 结合使用, 目前在 Nottingham 大学的 MR 中心使用。该线圈结构封装在一种加有碳酸钙的聚苯乙烯树脂中并包括有 x 、 y 和 z 梯度线圈。

表 2 给出了设计中关于尺寸、存取、现有电源供应以及上述所有制造性能的具体规定的细节。

即对于一个没有磁屏蔽的系统, 关于 50cm 的半径外部场为:

a) 对于麦克斯韦线圈: $2.4 \times 10^{-7} \text{T/安-匝}$ (在接近 $z = \pm 20\text{cm}$ 处),

b) 对于横向梯度线圈: $3.6 \times 10^{-7} \text{T/安-匝}$ (在 $z = 0\text{cm}$ 处)。

这是一些最不好的点, 但在可允许范围内。

采用这种设计明显减少了声音噪声, 从而可以按彩像形式获得 EPI 结果并且是在 3.0T 下关于志愿者头部的。第一结果的一些内容表示在图 23b、c 和 d 中。

横轴快照表示了具有脑室、灰白质和脑干细节的大脑的连续

的图像。(a) 玻璃和水的影像。平面分辨率 0.75 毫米。图像阵列大小 256×256 像素。切片厚度 2.5 毫米。(b、c 和 d) 正常志愿者的头部图像。这些图像的平面分辨率为 1.5 毫米。图像阵列尺寸 128×128 像素。切片厚度 5 毫米。所有图像都是单独的快照而且每张都是用接近 140 毫秒的时间拍得的。线圈参数由表 2 给出。

对于横向梯度装置也已经提出了理论设计, 这些横向梯度装置采用了: 2. 恒定 (120°) 弧长的分布弧形回路; 3. 弧长变化的分布弧形回路; 4. 平衡力表面电流分布; 5. 全部力平衡屏蔽表面电流分布, 和 6. 对于返回线路采取力屏蔽的全部力平衡屏蔽表面电流分布。

为了比较, 对这些设计要限制使用上述离散的弧形回路所形成的线圈装置的尺寸。这些线圈装置长度和直径都是 40 厘米, 并且定义 ROI 为其长度和直径都为 20 厘米的中央圆柱形区域。为此, 采用限定长度的初级线圈优化方法, Turner R. J. (1986)。目标场逼近优化线圈设计。J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 19, L147-L151。在覆盖了最大梯度平面的一个代表性象限的点阵 ($r = 0, 2, \dots, 10$ 厘米; $z = 0, 0.2, \dots, 10$ 厘米) 上实现优化。

恒定 (120°) 弧长的离散弧形回路

在延伸的轴向范围确定 $z = 0$ 处的由单独一对基本弧形回路产生的场。然后把这些场与连续的轴向电流谐函数进行卷积。按 ROI 上的合成场的最小二乘法的拟合使由第一组四个轴向谐波组成的电流分布得到优化。合成的 (20) 回路的位置如图 18 所示。弧长变化的离散的弧形回路。

使用方程 24 并忽略连接弧形部分的影响, 最小二乘法优化

导致求出一个有 4 个系数 (0 - 3) 的解。形成 (20) 回路的位置如图 19 所示。通过在等势流线之间确定弧形部分的位置来确定长度。

力平衡表面电流分布

这种具体设计范例不适合于限制初级表面。因此, 采用公式 25 产生的设计在这种具体情况下不是特别起作用。长度有所限制的这种设计的一个具体实施例只对长度为 10 厘米数量级的要研究的区域有可能, 但是效果也不如离散的弧形回路方法。

全部力平衡屏蔽表面电流分布

由于电流返回线路的要求, 设计一个更长的整体系统, 其中初级线圈的长度限制可以有些放松。从实际考虑选择线圈尺寸。典型的是要受到病人出入的空间和电流供给的限制。尺寸为:

1. 初级线圈半径 (a) 为 30 厘米,
2. 初级线圈长度为 120 厘米 ($2 \times$ 直径)
3. 屏蔽半径为 5 厘米 ($1.5 \times a$)
4. 半径为 20 厘米 (66%, a) 和长度为 40 厘米的圆柱形 ROI。

要使初级线圈和磁屏蔽线圈的力屏蔽线圈相一致, 同时确定单独的合成电流分布。通过在方位角方向上分别对初级线圈和磁屏蔽线圈布置进行径向定标来简单地提供各电流分布, 从而提供通路。

选择力屏蔽表面的半径以使梯度效益最大。这可以通过关于第一电流谐波使自感最小来实现。这得出 39.75 厘米的优化半径。在这个区域关于半径实现由公式 (27) 和 (28) 得出的梯度场的全部最小二乘法优化, 从而产生在 38 厘米处的优化, 见表 5。图 (20a)、(20b) 和 (20c) 分别给出了关于初级线圈一个象限的综合

的表面线圈布置、组合的力屏蔽和磁屏蔽。

表 3 给出了每个表面中所要求的电流。

对返回通路采取力屏蔽的全部力平衡屏蔽表面电流分布

在上述实施例中, 在每个表面上电流分布的积分为零。从表 3 得知, 在力屏蔽线圈中流动的总电流几乎是其它两个绕组中电流的总和。一般来说是这样并具有图 21 所示的可靠性, 即其中对其它两个线圈的返回通路进行力屏蔽。在连接弧形部分的位置上要求在电流中留有不平衡用以平衡由这些弧形部分产生的径向力。进行几何证明很简单, 当满足 kirchoff (克希荷夫) 定律时力则精确平衡。通过讨论 $r - \theta$ 平面上的投影 (在图 21 中, $I = I' + I''$) 可以立刻清楚这一点。

如上所述, 为了电流完全平衡, 力平衡和磁屏蔽的附加规定是至少要求 4 个绕有 4 个分离线圈的表面同时满足方程 (48 - 50) 要求的条件。与这一点的任何不同就是要兼顾磁屏蔽或力平衡或电流平衡。后者在第一个例子中近似得到实现, 然后引入附加小电流通路以处理任何产生不平衡的其它部分。

设计的比较

下面的表 4 包含对这些各种设计在场质量、性能和电感方面的比较。

离散的弧形回路设计

合成线圈是轴向上极为紧凑的。这就使得它们非常适合用作插入梯度线圈。这些线圈还相对容易构成并可以方便地和具有进一步减少声音噪声特征的结构相结合 (如图 17 所示的装置)。

恒定 (120°) 弧长的分布弧形回路

这些线圈也很紧凑, 而且它们仍然能够在更大的轴向延伸范围上提供梯度场。因此, 这些线圈也适合设计成插入梯度线圈。

弧长变化的分布弧形回路

这些实施例具有和弧长恒定的那些分布弧形回路相似的特性, 即在线圈轴向范围的大的比例范围上提供梯度场。因此, 它们非常适合设计成插入梯度线圈。

通过改变径向间隔能够优化设计的效益。

平衡力表面电流分布

对于横向梯度, 这些线圈的轴向长度一般需要比上述回路设计得更长, 以容纳每个单独的表面上的返回通路。这些线圈特别适合设计成允许整个人体出入的标准梯度线圈。

这种无屏蔽的例子会导致无效设计。这是由于这样的事实, 即关于初级和力屏蔽线圈的电流返回通路分别受到它们表面的各自限制。

当磁屏蔽时, 借助由屏蔽线圈提供的附加场可以提高这种设计的性能。

所有这些设计都可以进行磁屏蔽, 而且这种屏蔽自身能够与可以和初级力屏蔽相一致的二级力屏蔽相结合。

全部力平衡屏蔽表面电流分布

附加磁屏蔽的作用是改善可用场的范围和改善性能。力屏蔽表面的一个次要作用是部分屏蔽初级磁场。由于电流比比磁屏蔽 ($(a/b)^2$) 要求的要高 (a/b), 所以, 在力屏蔽表面上更对初级外部场进行补偿。因此, 磁屏蔽电流对于力屏蔽的外部场进行基本补偿并把初级场加到 ROI 上。

为效益最大，磁屏蔽和力屏蔽表面应该尽可能地远离初级线圈。屏蔽线圈的半径通常由 MRI 系统的自由腔限定。必须采取其它物理量限制以确定力平衡表面的最佳定位，例如，导体的最大电流载流量。例如，其上能流过电流的磁屏蔽和组合的力屏蔽表面的轴向长度比初级线圈的现有长度要长（通常为两倍的数量级）。因此，用两倍的匝数线圈传输与初级线圈相同的电流可以是很方便的，另一些做法是选择力屏蔽表面的位置以使总电感最小或效益最大。

对于普通的磁屏蔽线圈，系统的总电感只是初级线圈的电感和屏蔽线圈的互感之和。

如果加入力屏蔽线圈并选择其位置使其自感为零，那么，其它表面的互感可以被忽略。这样，总电感 L 可以和一般屏蔽情况相比。这又会使效益最大，其中效益 (η) 定义为

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{LI}} \quad (57)$$

其中 I 是每单位梯度的电流。

整体线圈

这种设计提供每安-匝 $1.2 \mu\text{T/m}$ 的梯度场。与之相比，类似的优化屏蔽线圈提供每安-匝 $2.6 \mu\text{T/m}$ 的梯度场。全部力平衡屏蔽线圈在屏蔽中要求非常大的电流，尽管这可以很容易用附加的屏蔽匝数来调节而且不会对电感有任何影响。

把力屏蔽表面从这个最佳位置移向初级或磁屏蔽表面会使电流在两者表面渐近增加。

对返回通路采取力屏蔽的全部力平衡屏蔽表面电流分布

图 22 (a)、22 (b) 和 22 (c) 表示了这种设计的初级、力屏蔽和

磁屏蔽线圈的导线分布，其参数由后面的表 5 给出。没有返回通路会使其特别适合缩短线圈。这与结构的几何条件结合在一起会显著地降低系统的电感，这是一个高效益的选择。在这种设计中，连接部分和力屏蔽电流（其全部都小）的必需的附加返回通路的影响被忽略不计。如果需要可以把这些特性的全部结合到这种设计中。

上述在一般 4 个圆柱形面中的“以总屏蔽电流平衡实现的全部力屏蔽和有源磁屏蔽”是求得方程 (48-50) 精确解所必需的。在这个部分指出的这个例子中只采用了 3 个圆柱形面，这就意味着电流平衡要好，就要损失磁屏蔽，或者换句话说，如果磁屏蔽要好，那么就要牺牲力平衡。

关于连接导线可以使用力抵消的相同原理。流进和流出电流的导线应该尽可能紧密地设置在一起，以使磁场的影响被忽略不计。对于这样一种结构净力自动为零，但是在小量级上这些力可能会很明显。三种选择是扭绞线对、平行的导线或同轴电缆。扭绞线对产生的外部场小但产生的移动明显。此外没有力为零的定向性。扭绞线对可以被看作一对交错的线圈。因此，线对的主轴对准磁场仍然会在最坏的定向上好像保留了有效的线圈部分。

对于平行导线，只有当平行对准磁场时，每条导线才有绝对为零的力，但是在其它取向上尽管作用在每条导线上的力是平衡的但却是值得注意的。此外，有一个尽管小但却存在的净磁偶极矩。

对于同轴电缆，尽管力的取向取决于一个导体套入另一导体在两者之间的力的优化分布，但是，因为其没有磁场，即自身屏蔽

很好,所以同轴电缆是优选的;当然净力也为零。标准的同轴电缆是为高电压小电流设计的。而MR 却要求大电流、电压适中。因此,我们通过把 12 AWG 线束电缆套入6.35 毫米铜管中来构成我们自己适用的大电流、低阻抗导体。然后整个结构展平以使导线固定就位并套入绝缘用的软塑料管 (Porfe $\times$ 7 毫米 $\times$ 10.5 毫米)。

减少高频声音噪声的一个措施是把成对的力平衡线对密封在吸收材料中。图 17 表示的就是这样一个关于球面谐波式弧形回路的例子。

由于初级和力屏蔽线圈产生的场有一定程度的抵消,所以,即使无磁屏蔽设计也有部分自身屏蔽。当初级线圈的长度具有严格限制时,和插入线圈的情况一样,使用弧形回路设计具有显著的优点。当不是这种情况时,由于选取表面分布线圈,制造非常容易和场质量更好,使其成为一种较好的选择。在对于一种具体应用、具体实施方案作出最终决定之前,总是必须考虑现有空间和总的线圈电感。

通过选取力屏蔽设计是能够明显减少声音噪声的,已证明在强磁场系统中会提高益处并增加梯度强度和转换速率。这些设计不会有任何降低效益且超过普通屏蔽线圈的不合理的开支。

其它设计优化方法,如 J. W. Carlson, K. A. Derby, K. C. Hawrlyszko and M. Weideman (1992), 屏蔽梯度线圈的设计与评估, Mag. Res. Med. 26, 191 - 206, 象总电感最小化,效益最大化等,与使用降低声音噪声力屏蔽完全兼容。

分布弧形回路设计与一般设计相比在长度的更大范围上提

供均匀性,以使这设计用作插入梯度线圈很理想。除了其高效益,这还使得这些设计非常适合用在象 FLASH 和 EPI 这样的急需 MR 成像技术中。除总力平衡外,弧形回路设计还使力矩完全抵消。弧形回路设计使得场的轴向分量在幅值比两个横向分量大一个或两个数量级。这与普通横向梯度设计中轴向分量小于横向分量中的一个形成对比。这就使得这种设计本质上就具有确保施加到对象上的梯度场的水平更安全的特性。

分布表面设计本质上就具有非常易于制造的特性。虽然这类设计不能使力矩完全抵消,但是和弧形回路设计一样,也是只有小的剩余力矩作用在小段的方位角区的距离上。这与普通设计中如图 13 所示的大力矩作用分布在轴向长度的每一半形成对比。

所有设计都很容易进行变化以进行有源磁屏蔽。

有源力屏蔽线圈的原理已经说明过并表明这样一种方法能够抓住 MRI 所使用的磁屏蔽和未屏蔽梯度线圈所产生的噪声的主要原因。虽然在这种方法中主要任务是由静梯度线圈改进的,即对病人和所使用的动物是安全而没有损害的,但是在线圈移动会成为一个问题 的情况下力屏蔽线圈还是有价值的。在要求空间分辨率非常高的图像的 MRI 显微术中存在这样一种情形。梯度线圈结构的微小移动会对最终得到的分辨率造成破坏和/或限制。

下面参照所包括的图 24 至 26 以及方程 58 至 63 对试验结果作进一步说明。

从以上讨论清楚地知道,具有最好效果的支杆材料和包覆用的塑料树脂应该有大数值的 E 和小数值的密度 ρ 。这样一种组合

会得到一个高纵波速。这样在直觉上有一个比较，高强度的轻耦合结构的作用和重一些的材料一样好；在每一种情况下的决定性的因素是高波速。添加使用了重填充材料的塑料树脂可以明显增加线圈结构的重量并显示出特别大的强度。

可以把力平衡线圈的原理直接在梯度线圈的设计中使用。在这种最简单的结构中，可以用其中的一个为图 24b 所示的矩形回路的四个或更多的矩形回路来设计图 5 的横向梯度线圈以产生 x 梯度 G_x 。为形成更理想的梯度，如图 25a 的平面图所示，可以用 n 组四个一组的回路构成梯度线圈。在这种结构中，每个四个回路组具有宽度为 a_1 、长度为 b_n 和为 N_n 匝的导体。在依次的四个一组的回路中的电流等于 I_n 。第 n 个四回路组的平面间隔为 $2Z_n$ 而且回路在平面上的位移为 $a_n + X_n$ 。在这样一种线圈结构中，力和力矩被抵消了。 $n > 1$ 就可获得一个在空间更均匀的磁场或场梯度。

由于绝大多数整体成像系统利用的圆柱形静磁场的对称性，所以，所说明的矩形回路可以变为弧形。倘若用弧形构成闭合回路，回路的平面与磁场 B 正交，倘若线圈导线通过支杆或封装在树脂中而进行机械耦合，和矩形回路的情况完全一样，所有力矩和力都平衡。对于任何限定在一个平面内而且 $\theta = 90^\circ$ 的流有电流 I 的闭合回路都是这种结果，这是因为环绕回路的线积分为：

$$\oint d\mathbf{F} = 0. \quad (58)$$

这个结果可以推广到线积分，其中回路中的电流是变化的，即

$$\sum_i \int_i d\mathbf{F}_i = - \sum_i \int_i \mathbf{B} \times \mathbf{I}_i d\mathbf{l} = 0 \quad (59)$$

其中 I_i 是在等值线的第 i 段流过的电流。在这种形式中，用开路式电流回路也能实现力平衡。

弧形回路可能按串联或并联相连接，或两种的组合。在所有情况下，对弧形部分的连接必须使供电装置和连接器的导线或导体成对地与主磁场 B 平行，而且最终连线，最好是设置在塑料树脂中。

在现在所说明的具体试验结构中，两个平面矩形线圈 50 和 51 的每一个都是由 10 匝导线构成，而且线圈尺寸为 $a = 40$ 厘米， $b = 40$ 厘米。两个线圈同轴安装，它们的平面平行于 B ，而且隔开 7.5 厘米。这种结构由图 25b 的平面图表示。两个线圈（分别与未声屏蔽和声屏蔽结构相对应）或其中之一经连接要能够被一个电流源（没有表示）所驱动。图 25b 的两个阴影区被封装在固态聚苯乙烯 52 中，以包围流有相反电流的导线 50 和 51。阴影表示通过封装在树脂中而在线圈间形成的机械耦合。电流在每个线圈中都是相等和相反的。在导体中与 B 平行的电流不产生力。因此，这种结构是一个开路电流回路的例子，其中返回的电流在 $x-y$ 平面内为零。由于线圈长度 b 大于平面间隔 x ，所以，所讨论的两个导线 50 和 51（来自每一个线圈的）位移的缩小/扩大是等值反向的。为简单起见，假设导线 50 和 51 的每一个在该实芯体中连续发射平面声波。在屏蔽情况下，该波会增加导线位置处的总横向声源幅值 A_1 ，由下式给出：

$$A_1' = \pm A_1 e^{2i\pi f t} (e^{ikx} e^{-\alpha x} - 1) \quad (60)$$

其中 A_1 是在每个导线位置处的初始波幅， f 是施加到线圈中的

电流脉冲的频率, k 是在聚苯乙烯块中的波传播常数, 为

$$k = 2\pi f/v \quad (61)$$

α 是每单位长度波衰减系数。作为一种简化取 $\alpha = 0$ 。假设这种横向运动可能通过块的转换作用, 沿 z 轴引起与方程 (60) 形式相似的波传播。用两个或一个通电的线圈进行声测量。

只对一个线圈, 未屏蔽的声源幅值 A_0 为

$$A_0' = A_0 e^{2i\pi ft} \quad (62)$$

因此, 根据方程 (60) 和 (62) 以 dB 表示的噪声衰减 A 为

$$A = -20\log_{10}([2A_1/A_0] \sin(\pi \times f/v)) \quad (63)$$

图 26 表示的是当用由一个 TECHRON (商标) 放大器 (没有示出) 提供的 10A 正弦电流向一个线圈 (曲线 A)、或两个线圈 (曲线 B) 施加脉冲时的实验的声音噪声衰减数据。使用一个 EK3033 型 (没有示出), KNOWLES (商标) 的驻极体话筒, 把其输出经一个 20 分贝增益前置放大器传送给 HEWLETT PACKARD (商标) 网络分析仪 (HP8751A) 就可以获得这些结果。曲线 C 是实验衰减曲线, 是曲线 A 和 B 之间有差。图 26 表示的曲线 D 是根据在 $A_1/A_0 = 0.0707$, $v = 0.975 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$ 和 $x = 0.075 \text{ m}$ 情况下的理论表达式方程 (10) 画出的。

与比 A_1/A_0 的单位偏离是与当只有一个线圈通电时的力不平衡相联系的, 它有效地增加了声波幅值 A_0 。另外, 它可能是由导线产生的圆柱形波而引起的。带状导体可以更好地接近发射平面波。选择最佳适配的 v 的数值。在 $(1.15 - 2.02) \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$ 的范围计算关于聚苯乙烯的 v 的数值。

数据表明在 100 赫兹处的约 40dB 下降到 3.5 赫兹下的 0dB

的正衰减。理论表达式与平滑处理的数据相当好地符合并证实下面说明的理论逼近的基本正确性。在一种低损耗材料中，A 在更高频率处周期性地达到峰值。在实验中没有观察到这种情况，估计可能是因为 $\alpha \neq 0$ 。

在梯度线圈设计中的声屏蔽的扩展方面的一个要着重考虑的是梯度有效率。声屏蔽不可避免地要降低梯度强度。因此，问题是当线圈电流增加以补偿梯度幅值不够时是否会损害所得到的声衰减。

实验表明在图 25b 的点 P 处，即在到一个线圈平面中心的垂直距离为 10 厘米的地方，从未屏蔽到屏蔽的相对磁场改变为 3.16T，这表明在电流驱动中需要增加近 3 倍以在该点恢复完全的磁场强度。在分开的实验中，建立起声衰减随线圈电流驱动的线性变化关系。这样增加 3 倍电流使可获得的声衰减减少 9.5dB。但是，由这些结果得知，在约 1 赫兹以下的频率的情况下仍应具有声衰减的优点。为了改善，需要能产生更高传播速率 v 的导线包围/封装材料。在取决于尺寸的完全梯度线圈设计中，可以很好地设置为恢复不用声屏蔽就可获得的梯度强度所需要的电流，电流增加只为 2 倍，在这种情况下使可获得声衰减为 6dB。

在上述线圈结构中，强调了为形成初级线圈和各种力屏蔽和磁屏蔽所使用的术语“各个导线”。可以同等使用另外的制造方法。例如，对于线圈结构的每一个圆柱形表面的导体通路布置可以由一整块铜或其它金属片材经蚀刻而形成。还有其它的方法就是使用铣刀或流体喷射切削刀具从铜或其它金属片材切割出导线通路。

下面参照图 27 到 29 说明本发明的又一个实施例, 其包括有有源声屏蔽和有源磁屏蔽而且作为上述参照附图 4、5、6、7、14、15、16、17、18 和 19 所述内容的概括是对本发明的扩展。虽然能够对图 4-7 和 14-19 所包含的任何一种线圈结构进行磁屏蔽, 但是, 为了获得磁屏蔽的有源声屏蔽, 需要两个附加的圆柱形表面。第一表面用于支承有源磁屏蔽线圈, 第二个表面用于确定有源磁屏蔽的有源声屏蔽线圈。现在说明本附加实施例中的一种对根据了上述图 4-7 和 14-19 任何一个的类型的梯度线圈结构进行磁屏蔽的系统方法。具体讲, 这种结构能够与包括例如图 7、图 15 和图 16 所示的闭合弧形回路的圆柱形对称梯度结构的情况相结合。

讨论图 27 对理解这个附加的实施例是有帮助的, 图 27 表示了一个单独的夹角为 $2\phi_0$ 的流有电流 I 的闭合弧形回路, 其中内部半径为 ρ_s , 电流沿半径 ρ_F 返回。我们讨论整体位于 x 、 y 平面内的闭合线圈回路, 并发现一个关于沿垂直于 x 、 y 平面的 z 轴的磁场强度 B_z 的表达式。对于 $\rho < \rho_s$, 场 B_z 由下式给出:

$$B_z = \frac{\mu_0}{\sqrt{(2\pi^3)}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} (1-e^{-im\pi}) \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ikz} e^{im\phi} c(k) \frac{\sin m\phi_0}{m} k I_m(k\rho) \times \int_{\rho_s}^{\rho_F} d\rho' k\rho' K_m(k\rho') \quad (64)$$

其中 $I_m(k\rho)$ 和 $K_m(k\rho)$ 是变形的贝塞尔函数, $m=1, 3, 5\cdots$ 是场在极角为 ϕ_0 时的谐波次数。 μ_0 是自由空间的磁矩。对于 $\rho > \rho_F$, 磁场由下式给出:

$$B_z = \frac{\mu_0}{\sqrt{(2\pi^3)}} \sum_{m=-\infty}^{\infty} (1-e^{-im\pi}) \int_{-\infty}^{\infty} dk e^{ikz} e^{im\phi} c(k) \frac{\sin m\phi_0}{m} k K_m(k\rho) \quad (65)$$

$$\times \int_{\rho_S}^{\rho_F} d\rho' K_m(k\rho')$$

其中 $c(k)$ 是空间付里叶变换, 由下式给出:

$$c(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dz e^{-ikz} c(z) \quad (66)$$

其中 $c(z)$ 是弧形回路沿 z 轴的分布, 这里 k 是 z 的共轭或互为空间位移。在一种实际的梯度线圈中, 如图 7 所示, 要设置至少四个闭合的弧形回路的对称装置。也可以采用图 15 和 16 所示的另一种多于四个回路的布置。

如前面强调的那样, 倘若电流的回路是闭合的, 在每个分开的回路中总力和力矩是平衡的, 用合适的支杆或支承材料来约束和包围弧形回路导线。图 27 与方程 64 和 66 一起表示怎样用闭合形式的表达方式来设计嵌套的闭合弧形回路的结构。图 28 表示了四个回路为一组的一个象限。在这种结构中, 对于 m 的具体值可以选择角位移以优化 B_z 的所需要的特性。通过消除以 m 表示的各高次项, 可以提高线圈结构内所产生的磁场的纯化度 (purity)。关于线圈结构内外的磁场强度可以产生闭合形式的表达方式这一事实使得能够采用相同的数学模式来建立一组能够设置对初级线圈结构进行磁屏蔽的嵌套回路。图 29 表示了这样的一个例子, 其中又是表示了梯度线圈结构的一部分。嵌套回路

60 代表了产生一个具体次数为 m 而且特征标为 Φ_2 的梯度的初级梯度线圈系统的一部分。线圈回路 62 具有有源磁屏蔽并具有图 29 所示的对于初级线圈相似的极角位移。但是, 如图 29 所示, 设置回路 60 的电流和半径以对相似的初级线圈结构 62a、b 和 c 进行磁屏蔽。采用这种结构可以进行有源磁屏蔽, 而且在初级线圈, 或在磁屏蔽线圈中的每个闭合的弧形回路总是力平衡 (因此力矩平衡) 的, 倘若所有梯度线圈结构都位于垂直于所施加的静磁场的平面内, 在这里静磁场是沿 z 轴方向的。

另一种对图 27 到 29 所示的结构进行有源磁屏蔽的方法是在位于半径 ρ_F 之外的一个半径为 b 的圆柱形上建立一个屏蔽线圈。在这种情况下, 为屏蔽初级梯度线圈 (包含一组闭合弧形回路) 所需的电流分配由下式给出:

$$J_{\phi}^m(k) = 2 \left(\frac{2}{\pi} \right)^{1/2} \frac{\sin m\phi}{m} \int_{\rho_S}^{\rho_F} \frac{k\rho' I_m(k\rho') d\rho'}{b I'_m(kb)} c(k) \quad (67)$$

其中空间付里叶变换 $J_{\phi}^m(k)$ 定义为

$$J_{\phi}^m(k) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} dz \int_{-\pi}^{\pi} d\phi J_{\phi}(z, \phi) e^{-ikz} e^{-im\phi}. \quad (68)$$

尽管是用导线在其表面上所遵循的通量函数来取代连续函数, 但是在实空间 $J_{\phi}(z, \rho)$ 中的极电流密度仍然表述了有源屏蔽的实际电流密度。使用单个的有源磁屏蔽会对在这个结构中的初级线圈处获得的声屏蔽有某种程度的破坏, 但是, 如果有源屏蔽线圈的半径 b 足以大于表面电流密度而使屏蔽线圈中的电流能够非

常小, 那么就可以使对该屏蔽线圈的洛伦兹力最小。

如上所述, 一个屏蔽的最佳方法是通过闭合弧形回路的第二布置部分来对初级线圈进行屏蔽, 在这种情况下, 对内部线圈的完全磁屏蔽的条件是

$$d(k) = c(k) \times \frac{\int_{\rho_S}^{\rho_F} k\rho' I_1(k\rho') d\rho'}{\int_{\rho_S'}^{\rho_F'} k\rho' I_1(k\rho') d\rho'} \quad (69)$$

其中 ρ_s' 和 ρ_F' 分别是图 29 中标记为 B 的磁屏蔽弧形回路的内外半径, 而且

$$d(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dz d(z) e^{-ikz} \quad (70)$$

其中 $d(z)$ 是对包括初级梯度线圈的闭合回路的空间分布 $c(z)$ 进行磁屏蔽所需的屏蔽弧形沿 z 轴的空间分布。方程 69 表明只有在 $m=1$ 时屏蔽条件才予以评述。初级弧形回路和屏蔽弧形回路位于同一平面内不是必要条件。为产生更纯或更高次的磁场或磁场梯度, 如图 28 和 29 所示, 需要极角为 Φ 范围的附加弧形回路。所有直到并包括 $(\alpha N + 1)$ 次的项变为零的条件是须满足下列表达式:

$$\sum_{l=0}^l \sin m\phi_l = \delta_{m,1} \quad (71)$$

对于 m 的一些特定数值可以满足这个表达式; 一个例子是对

于 $\phi_0 = \pi/3$ 。在方程 (64) 中第三次项 $m = 3$ 变为零, 留下 $m = 5$ 作为场扩展中最低不为零次项。

初级和磁屏蔽线圈的闭合弧形回路的结构本身, 适合于一种单独的弧形回路结构的简单方法。取代把整个线圈结构灌注在封装树脂中的另一种结构是, 在弧形回路中的每根导线采取的是扁平条带的形式, 其由合适材料的片材机械加工后放入一合理紧密配合的缝槽中。这种结构由图 30a 表示。如果如上所述正确选择材料, 那么, 这种结构确保各安装的导线产生非常小的声音噪声。如果在一个具体的弧形回路中需要多于一根的导线, 则建议采用另一种结构, 即每根导线紧密地装入各自的支承板的凹槽中, 如图 30b 所简要表示的, 板安装在间隔件和支撑棒上, 在这种方法中, 完全消除了彼此缠绕在一起的导线间的相对运动, 而无需使用使塑料树脂等完全渗透导线束的真空浸渍技术。上述概括的方法本身还可以更易于适合采用更吸引人的支撑材料, 象一定类型的陶瓷片和耐热岩盐 (pyrothallite) 块。这后一种材料在烧制前, 最好是可机械加工的并可以机械加工出缝槽、孔洞, 和类似的结构。在烧制后, 这种材料就会变成再也不能进行机械加工的与陶瓷类似的材料。还可以以相似的方法使用玻璃或透明材料。

在上述安装方法中, 把矩形或环形部分导体插入缝槽中, 并灌入合适的粘接材料, 可能是环氧树脂, 或一些其它的非常硬的凝固聚合的树脂, 以防止导线在磁场中当接收到脉冲时产生残余的运动。使用陶瓷的好处是在这样的材料中声速非常高, 如上述实验部分所说明的那样, 在力平衡线圈中可以更好地抵消高频声。

根据声传播理论和与实验结果的一致性, 电平衰减 A (公式 63) 是 $\sin(\pi \times f/v)$ 的函数。到目前我们已着重强调使 $\sin(\pi \times f/v)$ 的自变量保持对所有频率都小, 我们理想地要求波传播速率 v 要大。上面说明用选择合适的材料来满足这种要求的多种可能性。但是, 在得到的实验结果中, 使用的是载荷聚苯乙烯树脂, 对于这种材料典型的波速约为 1 公里/秒。实验结果表明, 对于 $x = 7.5$ 厘米, 块(block) 在 6 或 7 千赫处变成共振。记住波速很高的材料机械加工困难而且昂贵, 另一种方法是使用聚苯乙烯, 但要减小正弦自变量中 x 的值。在正常情况下, 减小 x 会急剧降低所能获得的磁场梯度, 因此, 迫使需要非常大的驱动电流。

本发明的又一个实施例中, 其中和图 5、6、7、12、14、15、16 和 17 一样, 磁场梯度由一组闭合的弧形回路产生, 但是, 每一个大的回路由一些小一些的回路所取代以形成组合力屏蔽。小一些的闭合回路结构的总面积理想地等于它们所替代的单个大回路的面积。

图 33a 表示了这个实施例的一个例子, 并包括有宽度为 $2x$ 的基本为矩形的闭合回路, 见图 33b。如果两个回路的相邻导线彼此合理地靠近, 那么, 这与图 33a 至 33b 所示的宽度为 x 的两个回路磁等效。这遵守安培环路定理。然而, 尽管两种线路磁等效, 但是在声学上不等效。组合线圈的每一小段由具有传播常数 k 的合适材料所包围。相邻线圈间的间隔 g 由具传播常数 k_1 的材料轻轻地耦合。在这种结构中, 重要的是要确保每一段上的导线位于非波节点的位置。这就意味着在一个特定频率 f 下, 理想的是 $x = \lambda/2$ 而且 $g = \lambda/2$, 如图 34 所示。但是, 根据安培环路定理,

要使 $g \ll x$ 。这又意味着在间隔中的传播速度 v_1 必须为 $v_1 = (g/x)v$ 。寻找波速低的材料相对容易一些, 因此, 这后一个条件更容易满足。

另一种方法是不填充间隙, 见图 33c, 而是留有小的气隙, 以使两个组合线圈自由移动。重要的一点是如果线圈相接触, 或者如果装置作为一个整体压制而成, 那么, 两条具有等值反向电流的相邻导线实质上会形成一个破坏这种结果的声波节点。

还有另外一种方法是以图 35 的形式把每个副线圈安装在自己的板上。如果板和导线都足够薄, 则一个导线厚度取代两个平线圈不会破坏磁等效。总之我们已说明, 用一组 n 个回路代替单独一个回路的作用是结构共振频率从 v/λ 推到 nv/λ 。这又意味着对于相同的封装材料在图 26 中的 0dB 相交点被推向非常高的频率。就是说, 对于 n 个回路, 电平衰减 A (公式 63) 变成 $\sin(\pi fx/nv)$ 的函数。采用这种方法能够在更宽的频率范围保持高的声衰减。

图 36 到 42 表示了各种关于组合力屏蔽闭合回路结构的原理的实施例。图 36a、b 和 c 表示了一个由三部分构成的组合矩形回路及其磁等效单个回路。还以平面图的方式表示了一个使用滑动搭接接头的可能的构成方法。图 37a、b 和 c 表示了一个由三个闭合弧形部分构成的组合弧形回路及其磁等效的单个回路。还以侧视图的方式表示一个使用滑动搭接接头的可能的构成方法。图 38a、b 和 c 表示一个与其磁等效回路一起的由两个力平衡环路组成的组合环形线圈。还表示一个使用如图 38c 所示的滑动搭接接头的可能的构成方法。

要强调的是在闭合矩形和闭合弧形回路中，所有部分的电流相等。对于合适的力平衡环路，电流应该为下列比值：对于分段的环， $I_2 = -I_1 (a/b)$ ；如图 38a 和 b 所示，对于磁等效力屏蔽线圈 $I_3 = -I_1 (a/c)$ 得出 $I_3 = I_2 (b/c)$ 。

可以使用相似的分段以构成组合力屏蔽开路结构。图 39 到 41 表示了这种结构的例子。图 39a、b 和 c 一起表示分段直线开路力平衡结构及其磁等效结构，和使用滑动搭接接头原理的可能的构成方法。图 40a、b 和 c 一起表示了一种分段开路弧形回路力平衡结构及其磁等效结构，和使用滑动搭接接头原理的可能的构成方法。图 41a 和 b 表示了一种关于构成圆柱形表面电流分布一部分的开路弧形结构的组合分段力屏蔽结构。在这种结构中，关于初级线圈的力屏蔽结构是由两个圆柱形分段构成的。把两个圆柱形分段合适地封装在聚合物材料中，但彼此用薄橡胶条隔开，以使每个分段中的相邻导体形成声的非波节点的圆柱形表面。

图 36a 表示了三个组合的闭合回路，它们与图 36b 中的单个闭合回路磁等效。图 36c 是埋入封装材料厚片中的三个回路的端视图。每个回路相对其它两个是可以移动的。每个厚片移动的方向在厚片所在的平面内。

图 37a 表示与图 37b 中的闭合回路等效的组合闭合回路。组合的闭合回路是弧形的。图 37c 是图 37a 的侧视图。

图 38a 表示的是环形的组合闭合回路，这些闭合回路等效于图 38b 所示的单个环路。图 38c 是图 38a 的侧视图。图 39a 和 40a 表示的是开路弧形组合回路。图 39c 和 40c 分别是其端部视图。图 39b 和 40b 分别表示了其等效的开路组合回路。图 40a 和 40c 所

示的开路回路线圈的组合弧形对着相同的角度。

图 41b 表示的是一种包括线圈 210、212、230 和 232 的结构 200 的部分截面图。这些线圈埋在封装材料中。使用可压缩的橡胶隔片 250 把外封装线圈支承物 220 与内封装线圈支承物 240 分开。内直径 260 由成像物体(例如一个病人)决定。

应该清楚上面只是以举例的形式对本发明的实施例进行了说明,在不离开本发明范围的情况下可以作改变。

表 1

短螺线管电感校正系数

	0	0.5	1	10
E	1	0.8	0.7	0.2

表 2

插入梯度线圈细目表

<u>类型</u>	<u>轴向(麦克斯韦)</u>	<u>横向 X</u>	<u>横向 Y</u>
初级结构半径 (米 $\times 10^{-2}$)	22.25	22.5	22.5
力屏蔽结构半径 (米 $\times 10^{-2}$)		32.5	32.5
第一弧形位置 (米 $\times 10^{-2}$)	19.25	7	8
弧长(度)	360	120	120
梯度(Tm $^{-1}$ A $^{-1}\times 10^{-6}$)	130	61	61
匝数	8	9	9
导线(轴向宽度)	4.5	4.5	4.5

(米 $\times 10^{-3}$)

导线(径向深度)	2.24	2.24	2.24
----------	------	------	------

(米 $\times 10^3$)

电阻率 (ohm m $^{-1}\times 10^{-3}$)	1.78	1.78	1.78
------------------------------------	------	------	------

总电阻 (ohm)	0.16	0.34	0.34
-----------	------	------	------

电感 (亨 $\times 10^{-6}$)	192	2269	269
--------------------------	-----	------	-----

表 3

全部力平衡屏蔽表面电流分布

<u>表面</u>	<u>半径(厘米)</u>	<u>总电流(安培)[*]</u>
初级(图 20(a))	30	8.313
力屏蔽(图 20(b))	38	-10.245
磁屏蔽(图 20(c))	45	3.199

★对于每初级安匝为 10mT/m 或 0.0012mT/m 的场。

表 4

回路设计的比较

<u>类目</u>	<u>1. 直线元</u>	<u>2. 回路(120°)</u>	<u>3. 回路</u>
梯度 (Tm $^{-1}$ A $^{-1}\times 10^{-6}$)	61	49	51
质量(最大)	*89	51	72
质量(最小)	*23	46	30
匝数(每个象限)	9	20	20
电感 (亨 $\times 10^{-6}$)	269	184	93
电阻(欧姆)	0.34	0.76	0.44

★这是在一个长度和直径都为 20 厘米的圆柱形 ROI 上的，该区域轴向延伸至这个线圈结构的边界。关于这个线圈有用的区域是直径为 20 厘米，长为 10 厘米的圆柱形。最大 (10、10、8) 和最小 (10、10、0) 两个点在这个区域之外。包括它们只为进行比较。

表 5

对返回通路采取力屏蔽的全部力平衡
屏蔽表面电流分布

表面	半径(厘米)	总电流(安培) [★]
初级(图 22(a))	30	8.421
力屏蔽(图 22(b))	38	-12.832
磁屏蔽(图 22(c))	45	5.239

★关于每初级安匝 10mT/m 或 0.0012mT/m 的场。

说明书附图

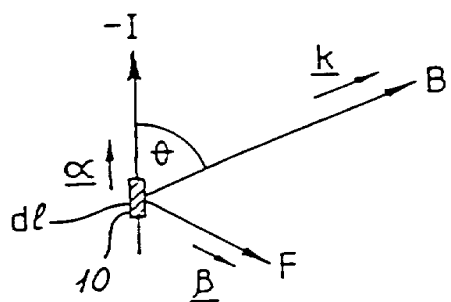


图 1

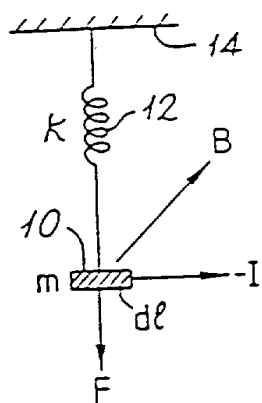


图 2

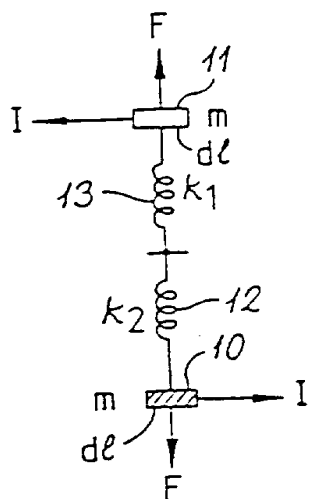


图 3

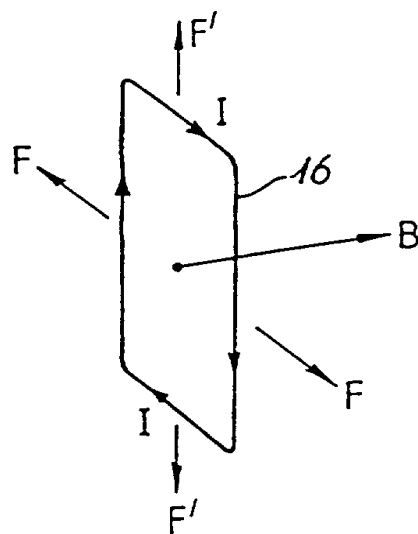


图 4a

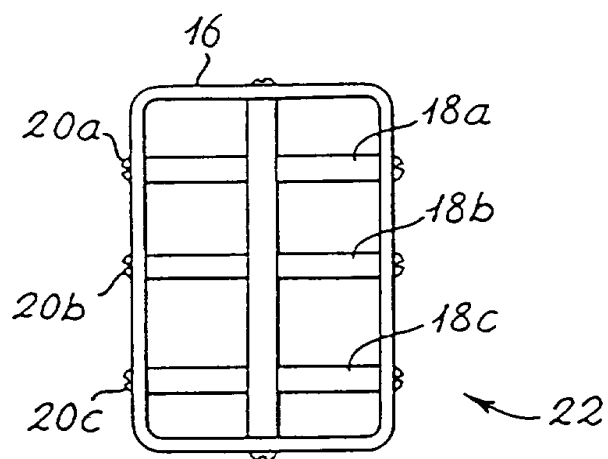


图 4b

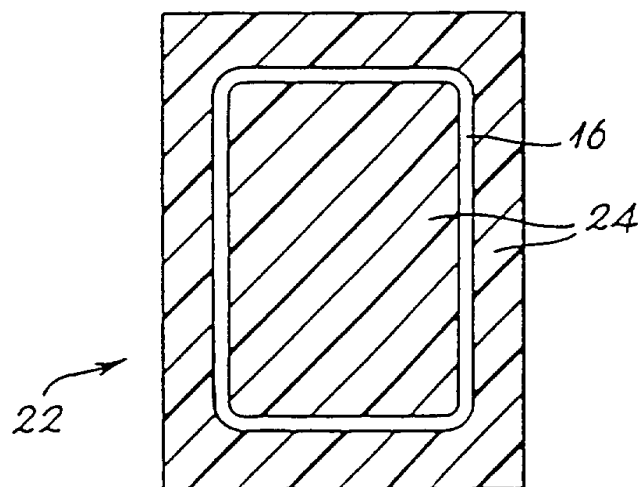


图 4c

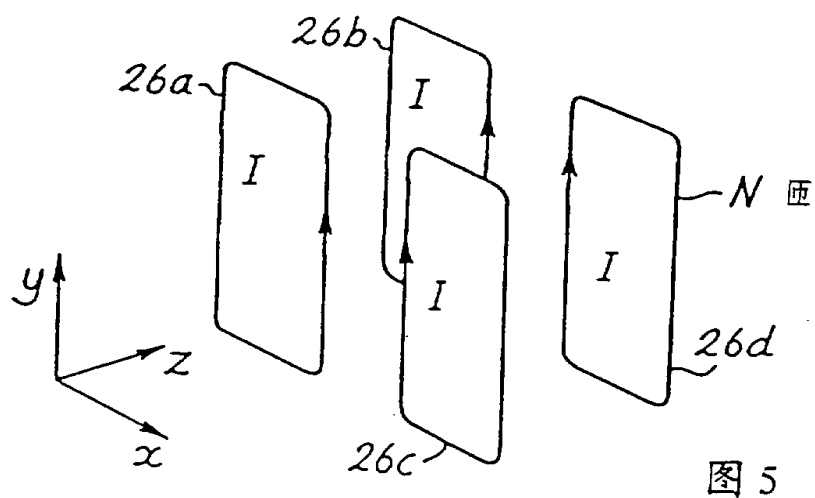


图 5

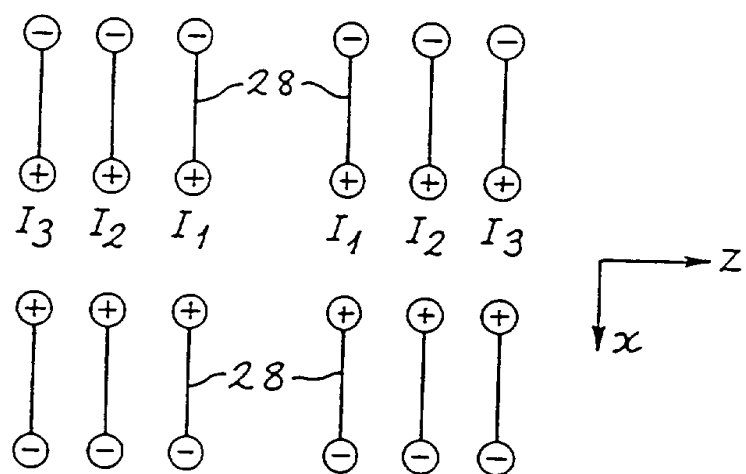


图 6

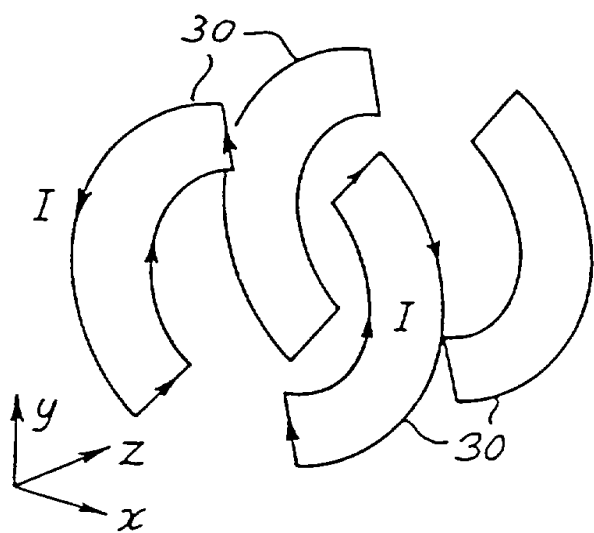


图 7

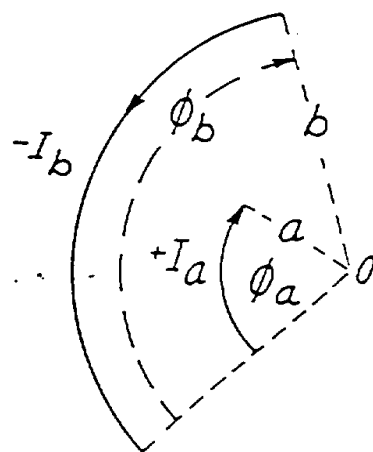


图 8

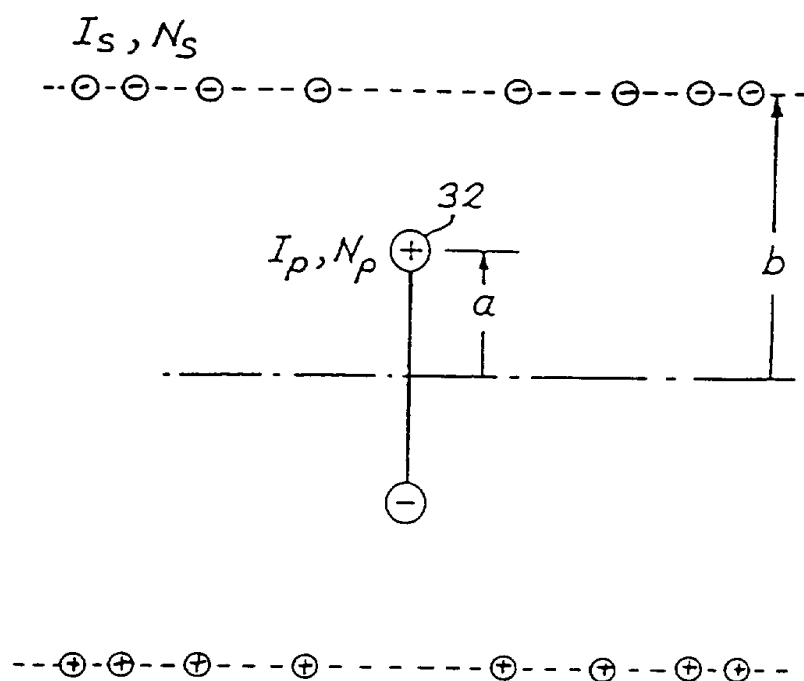


图 9a

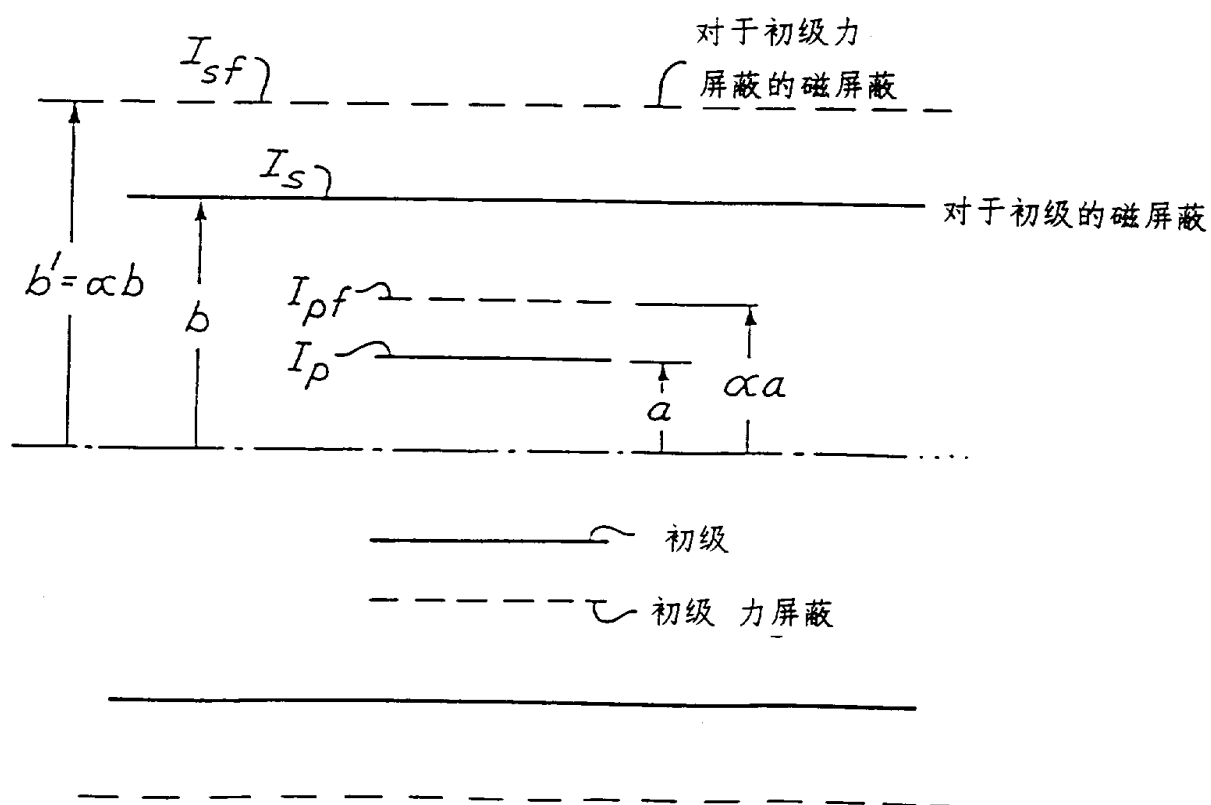


图 9b

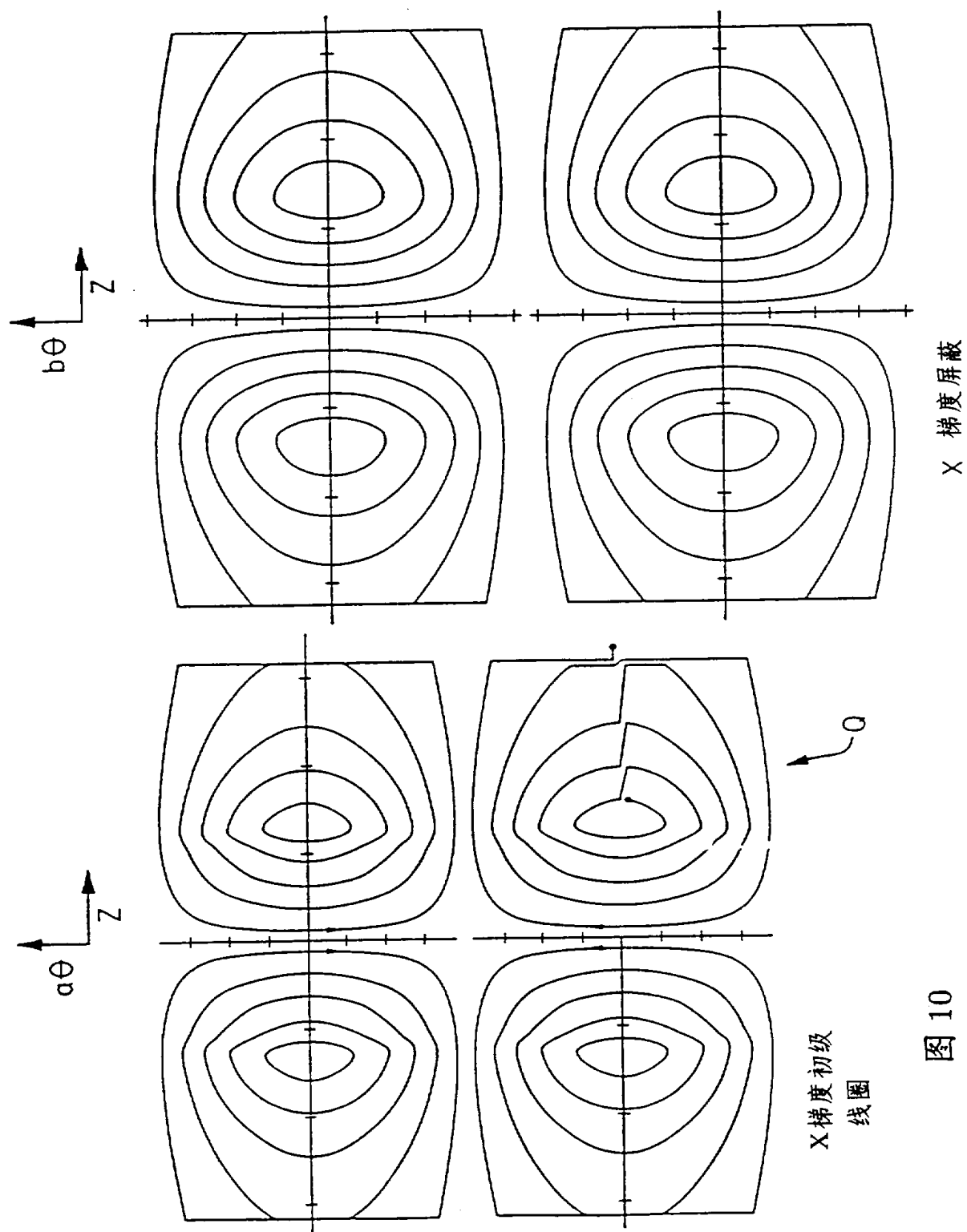


图 10

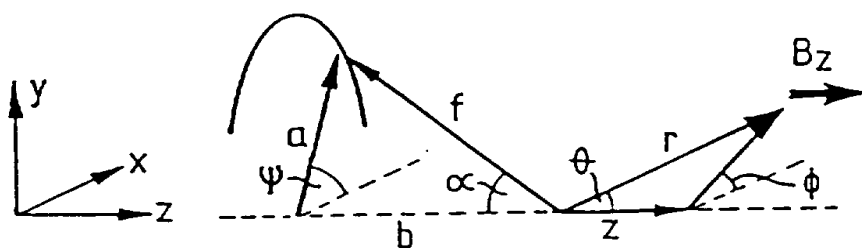


图 11

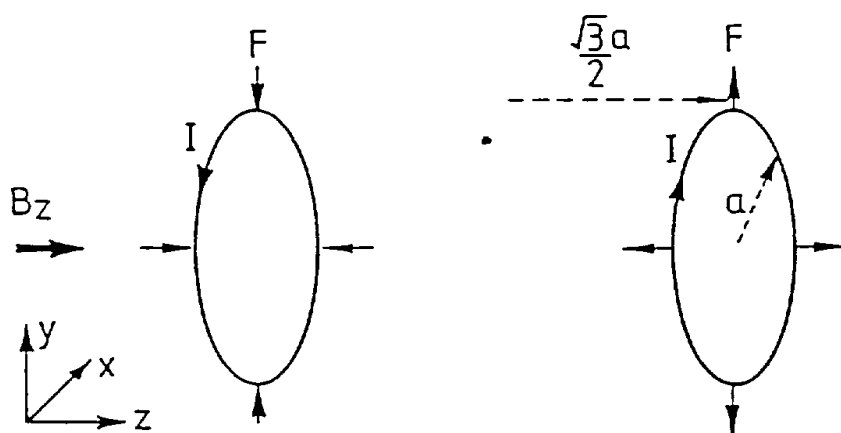


图 12

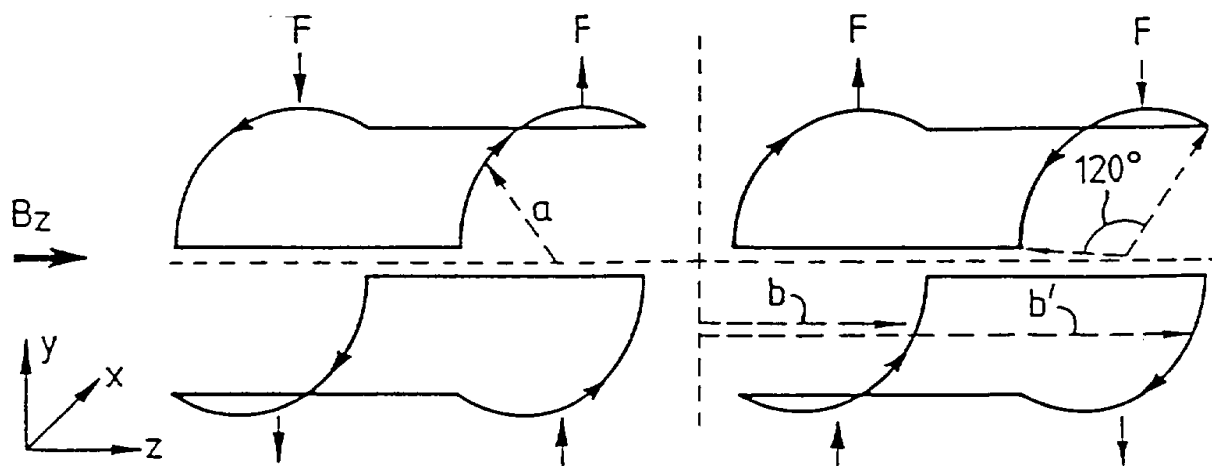


图 13

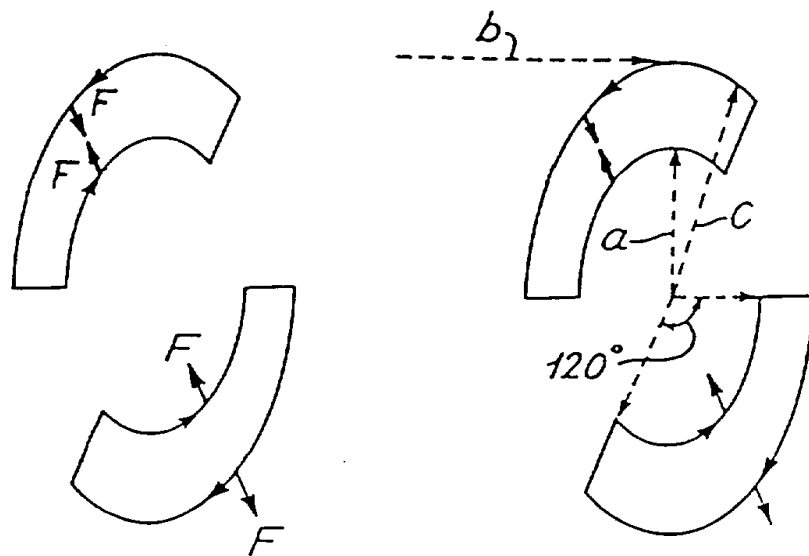


图 14

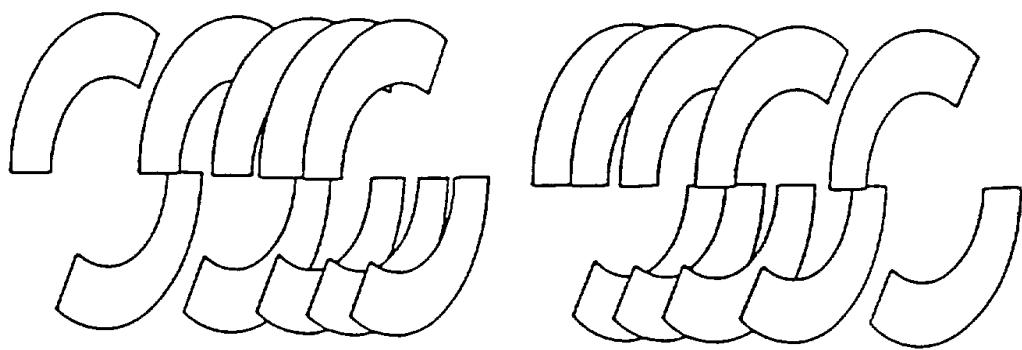


图 15

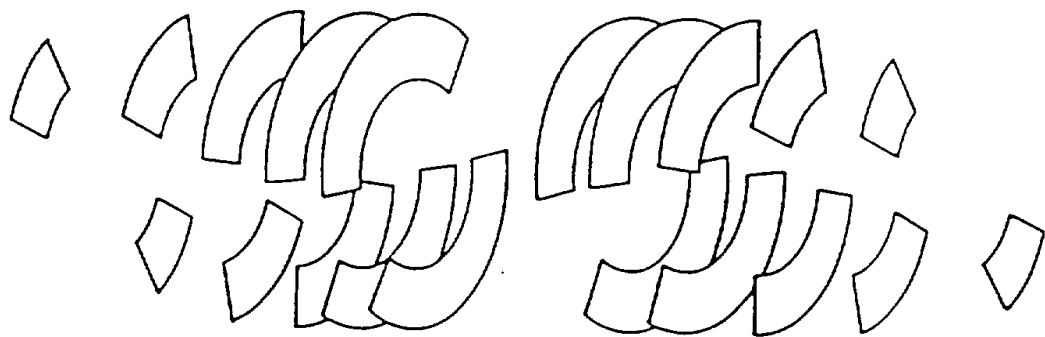


图 16

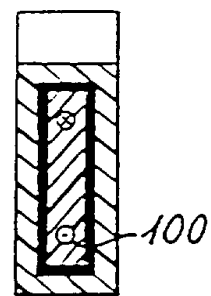
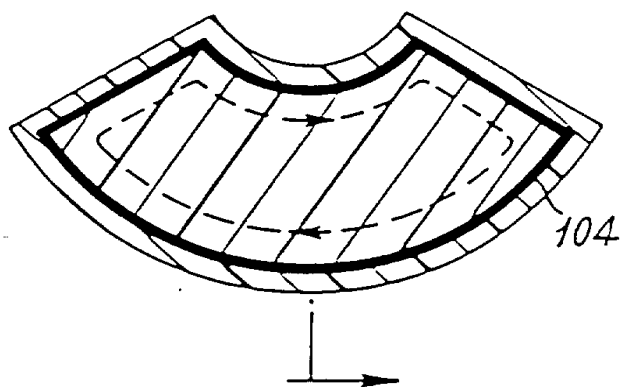
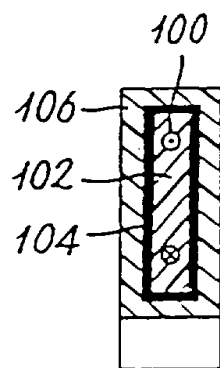
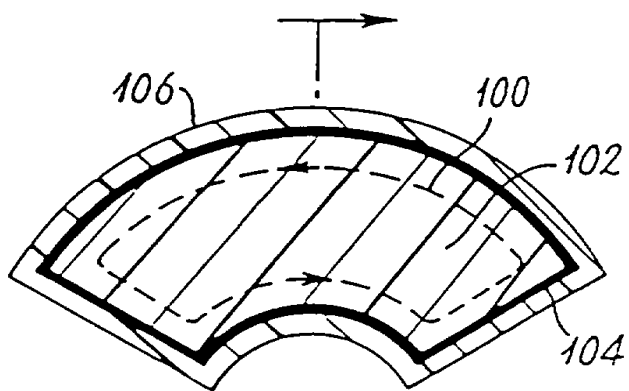


图 17

图 17a

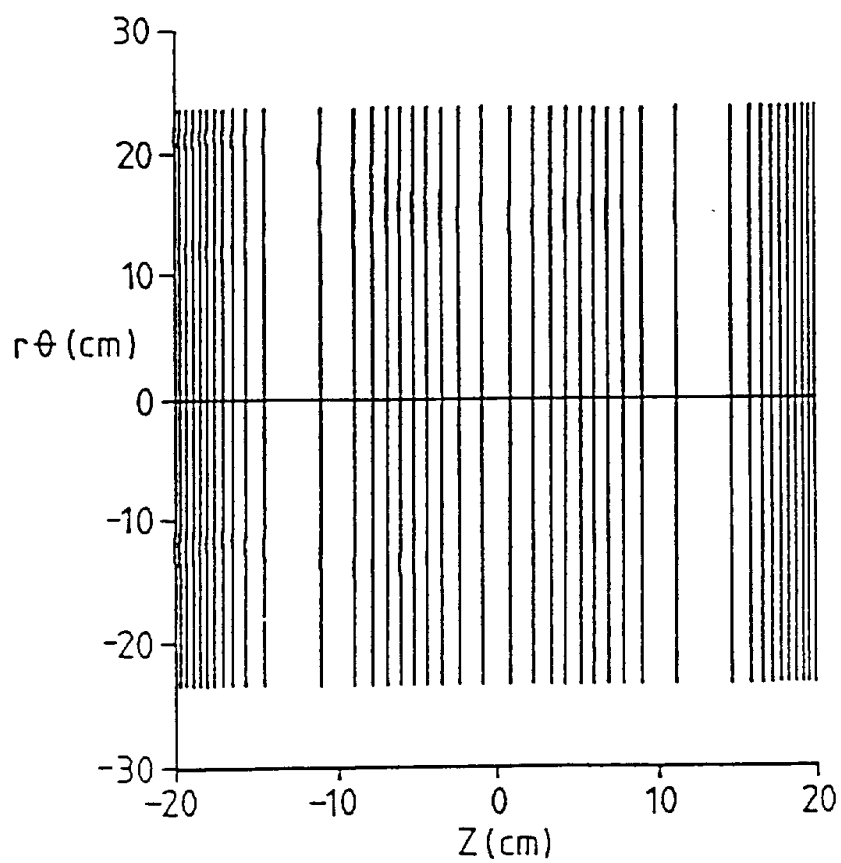


图 18

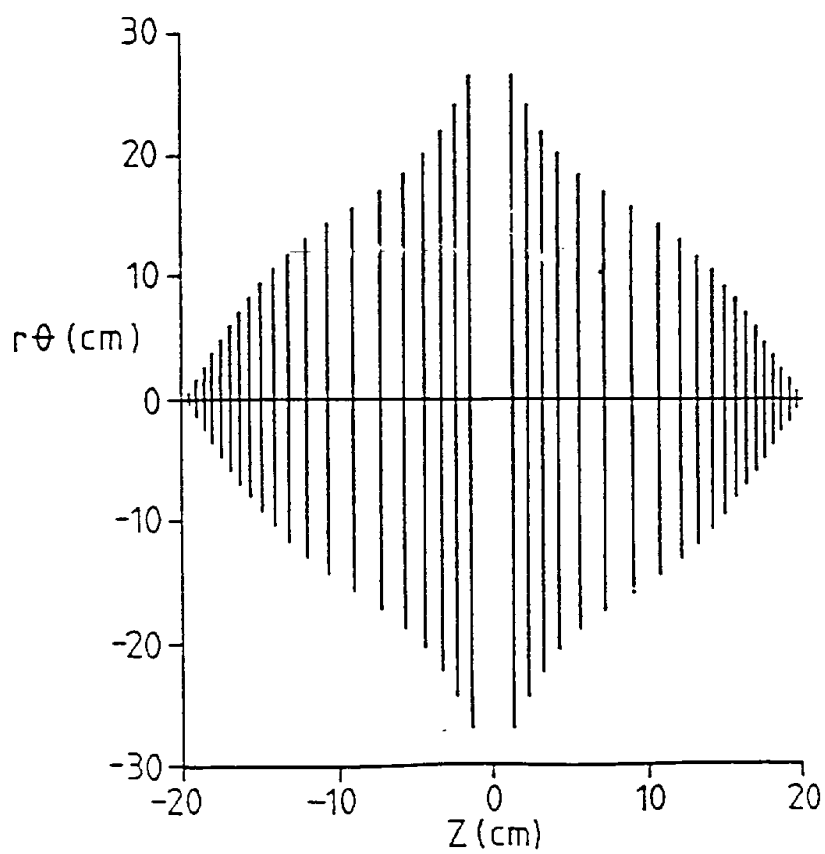


图 19

体初级

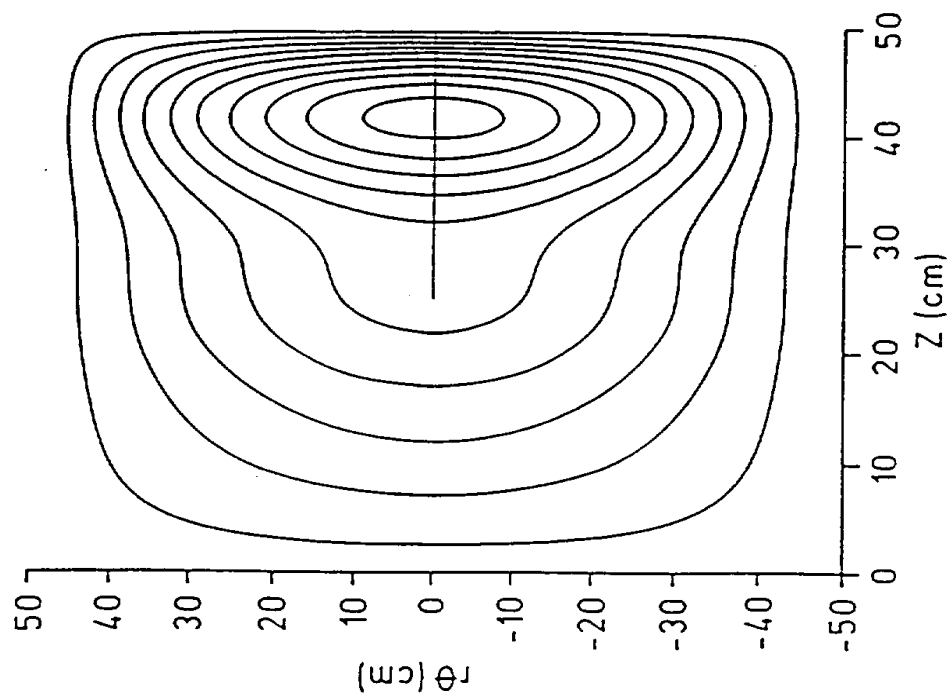


图 20 a

体力屏蔽

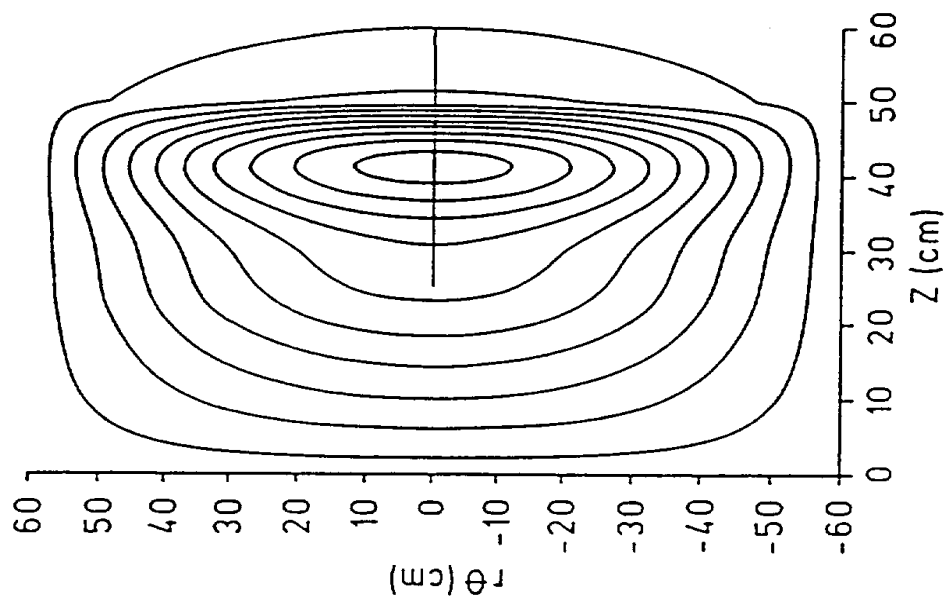


图 20 b

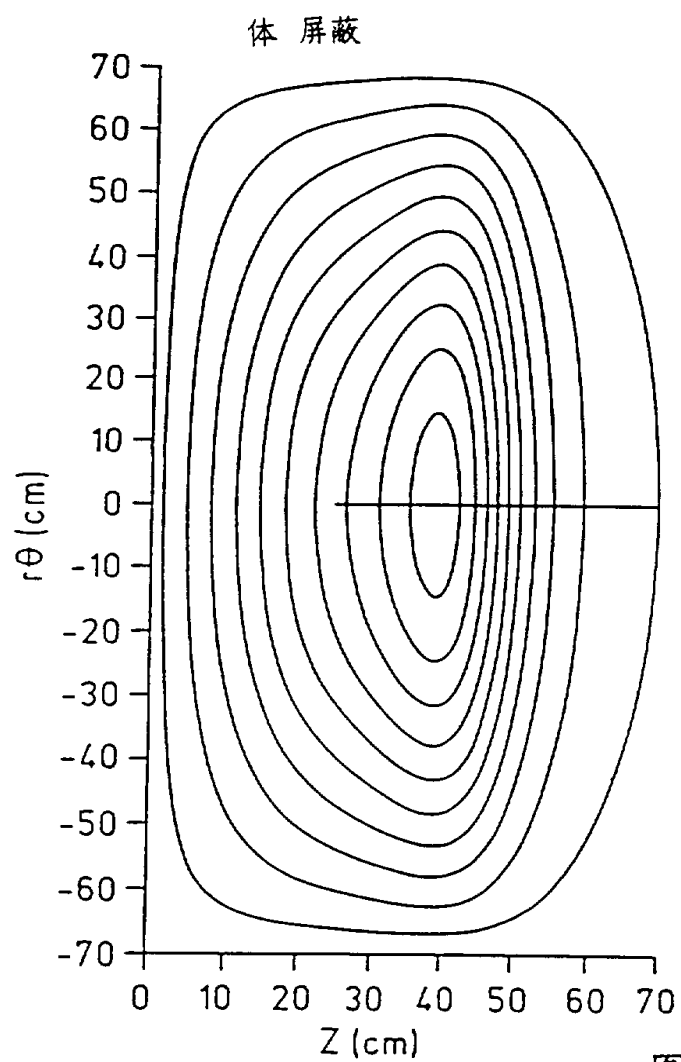


图 20c

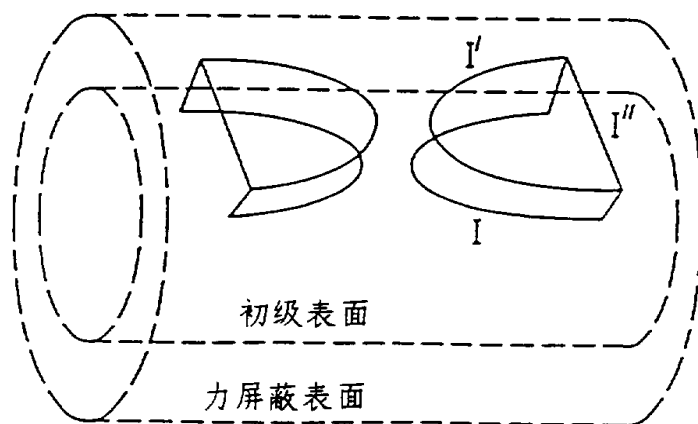


图 21

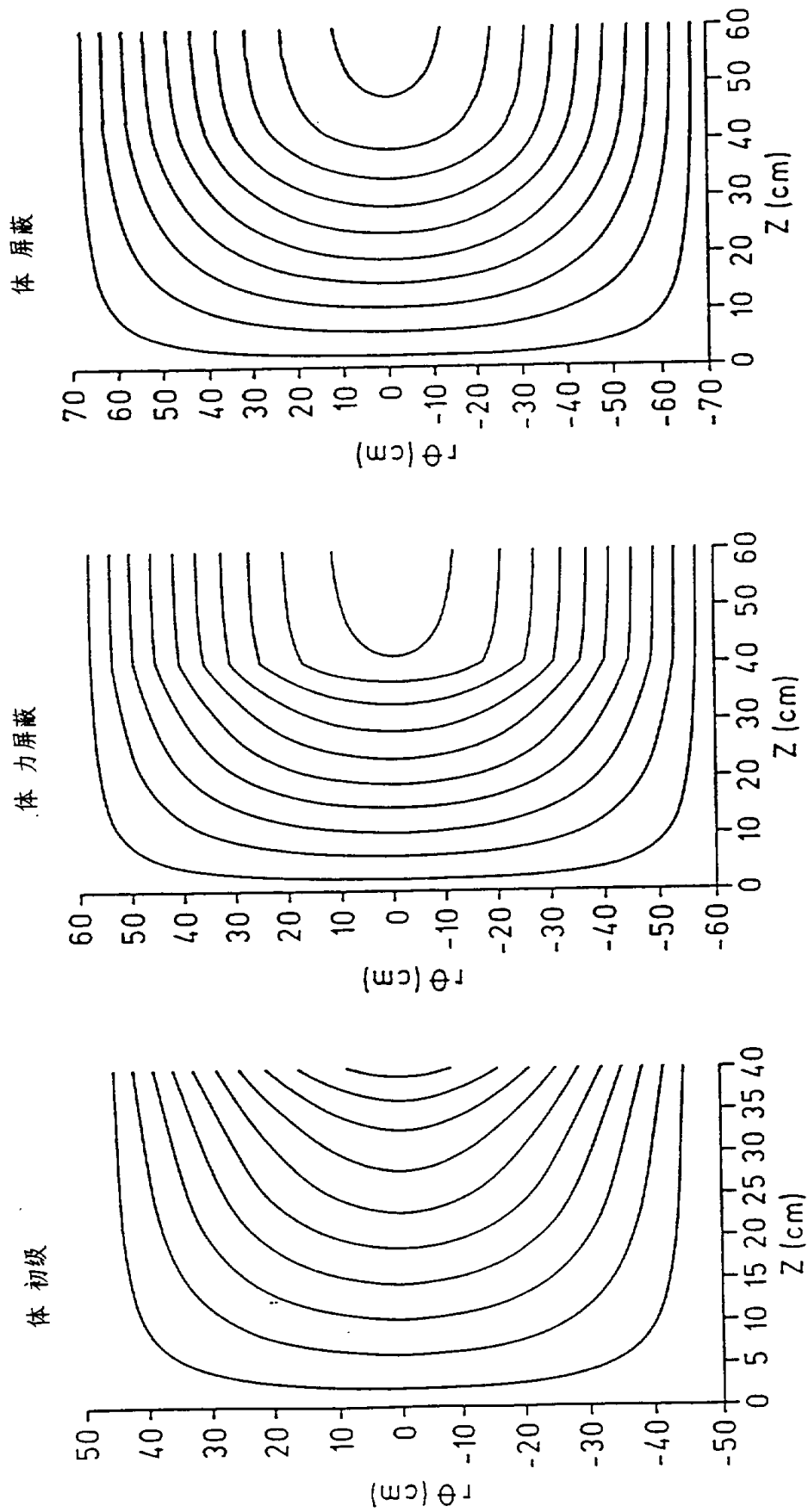


图 22a

图 22b

图 22c

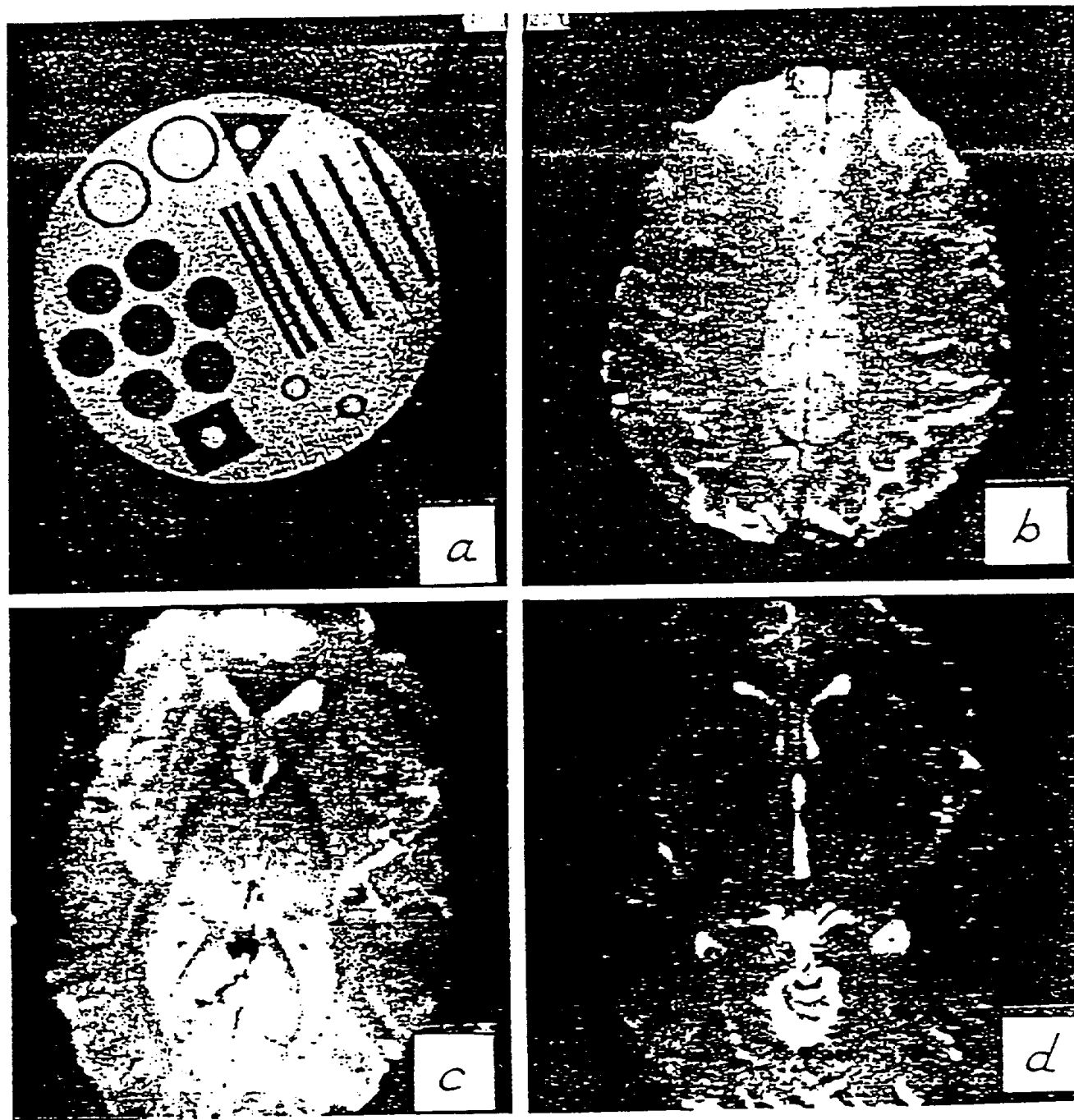


图 23

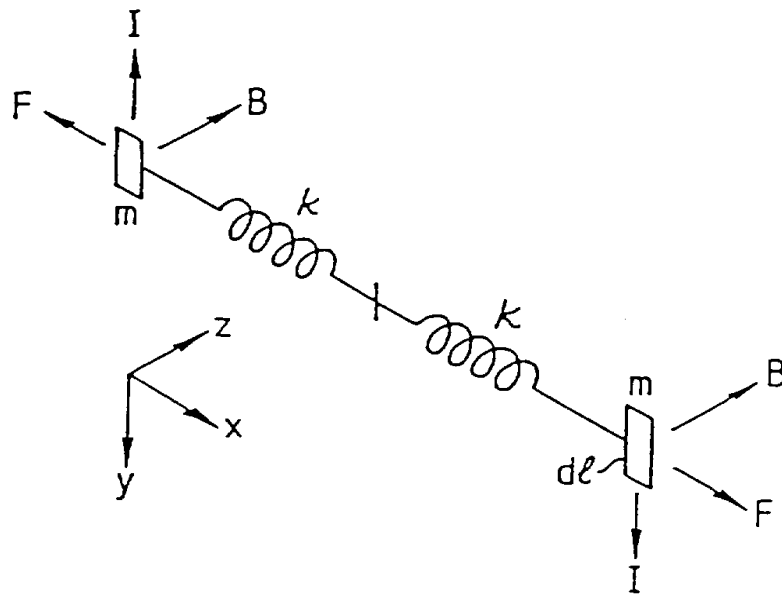


图 24a

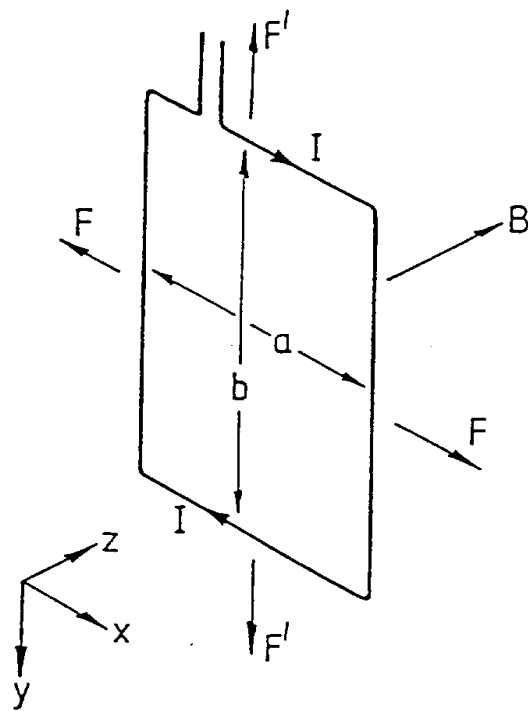


图 24b

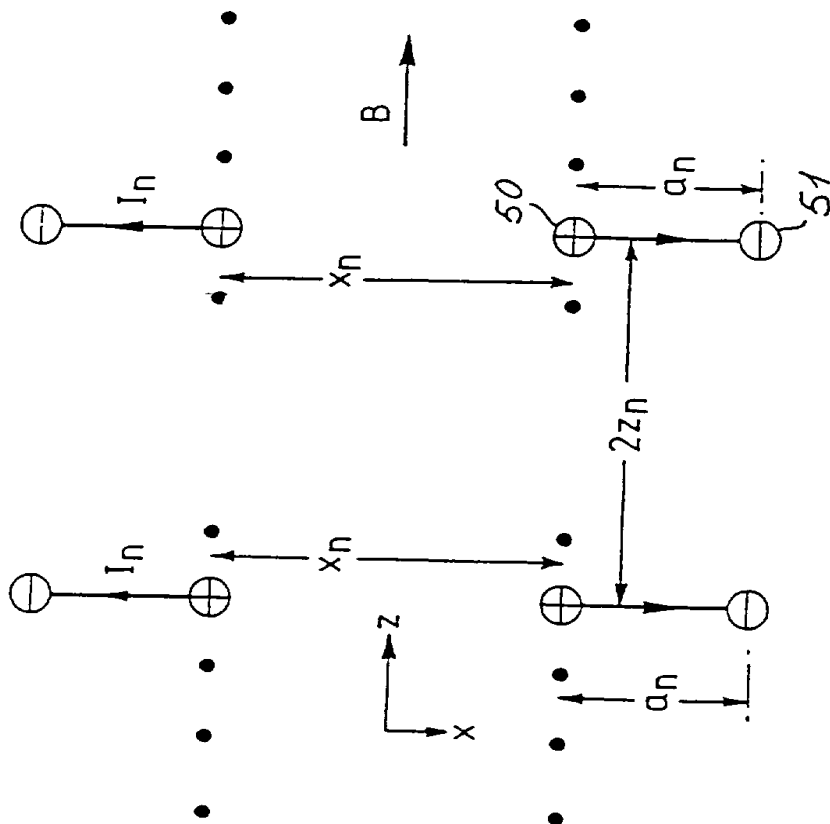


图 25a

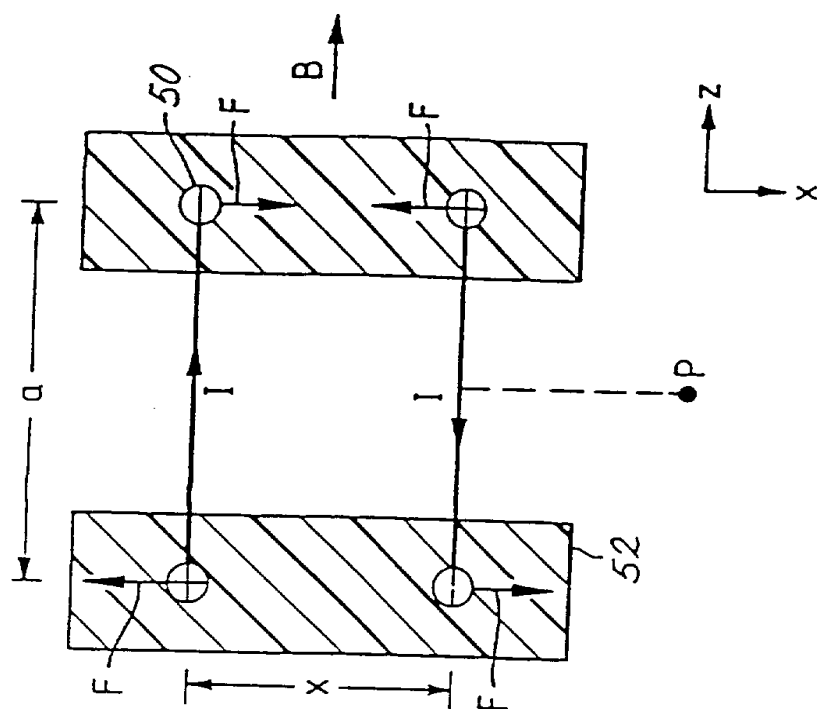


图 25b

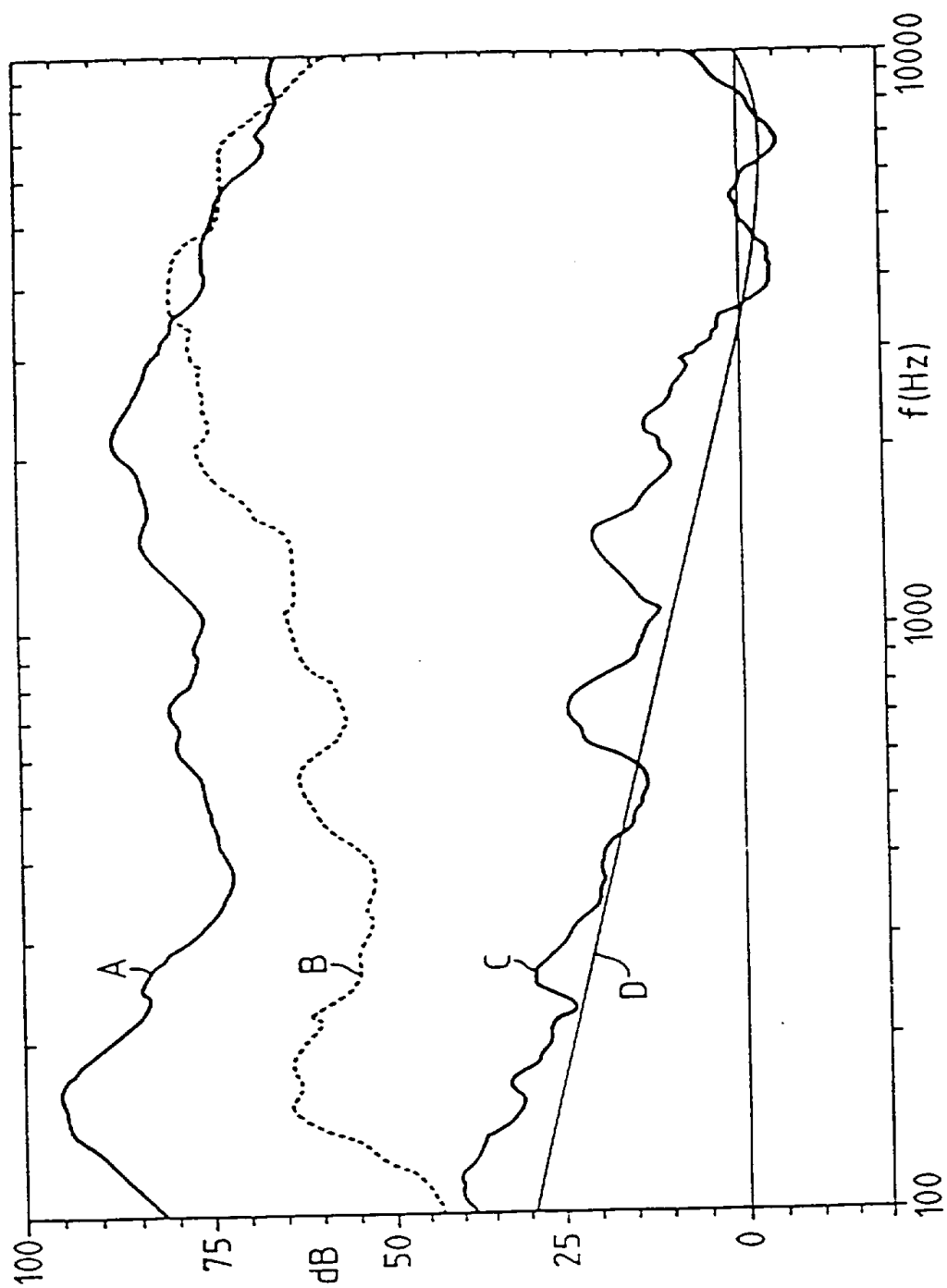


图 26

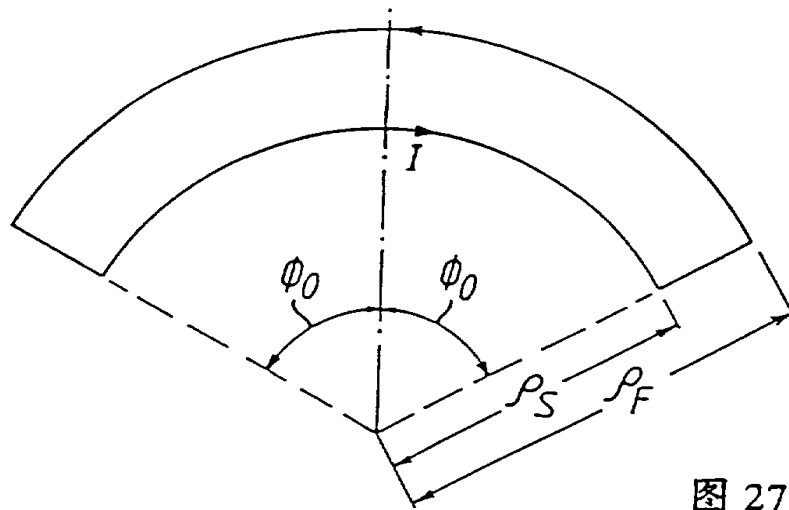


图 27.

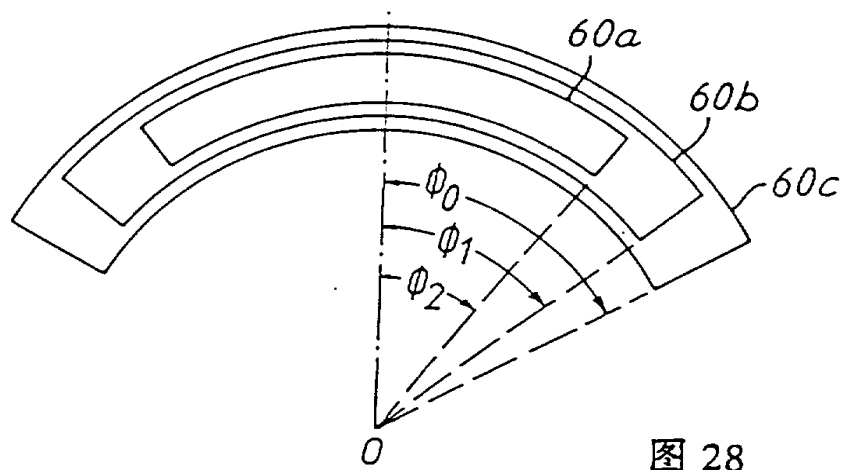


图 28

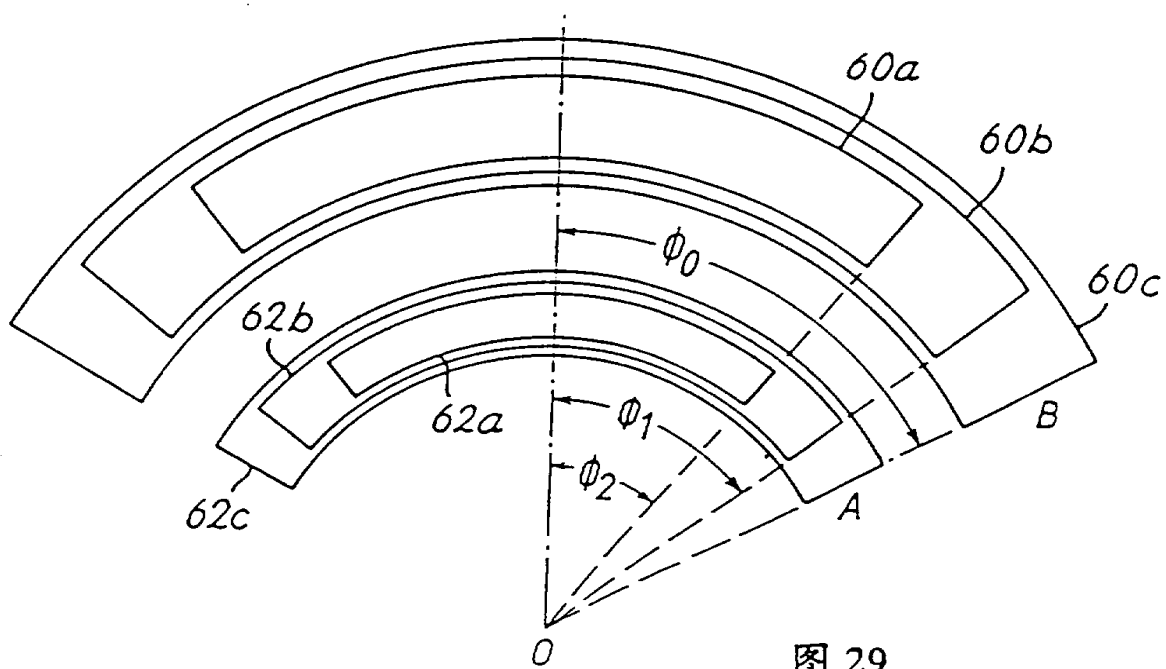


图 29

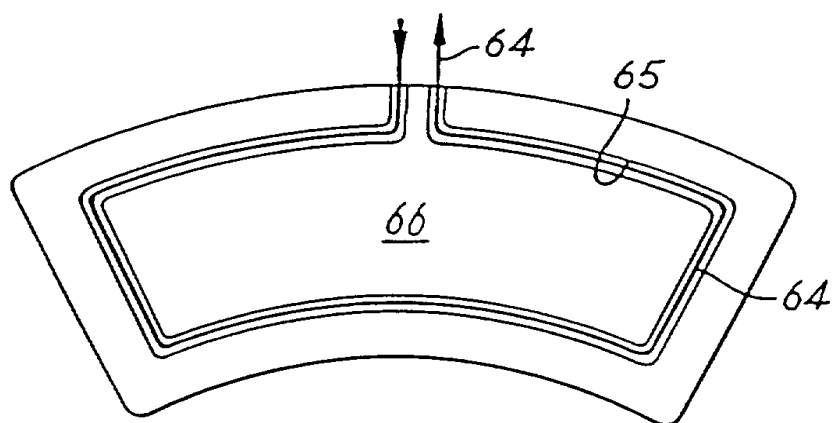


图 30 a

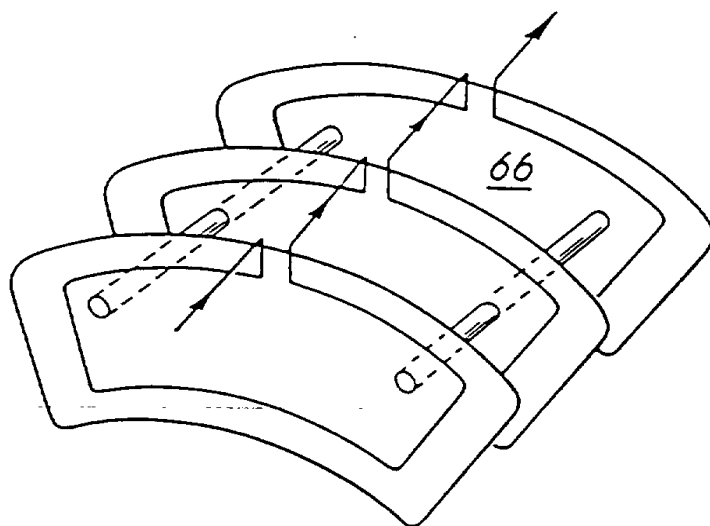


图 30b

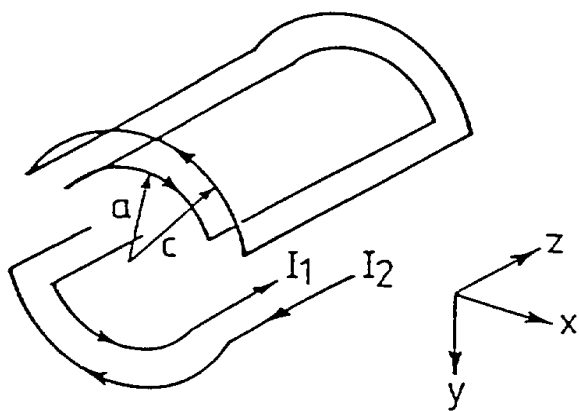


图 31

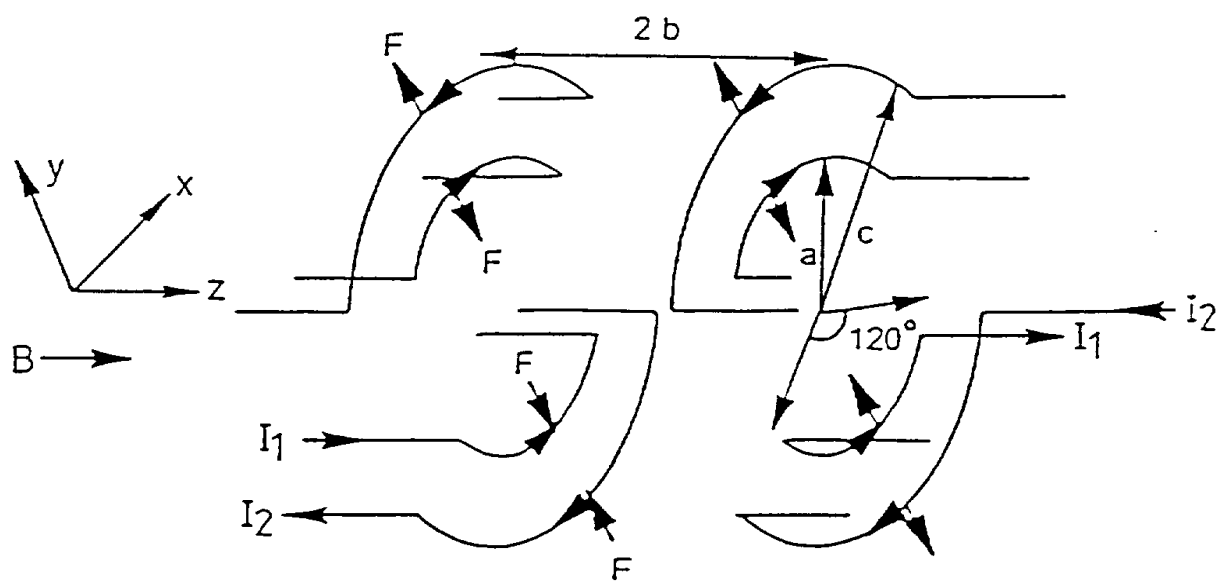


图 32

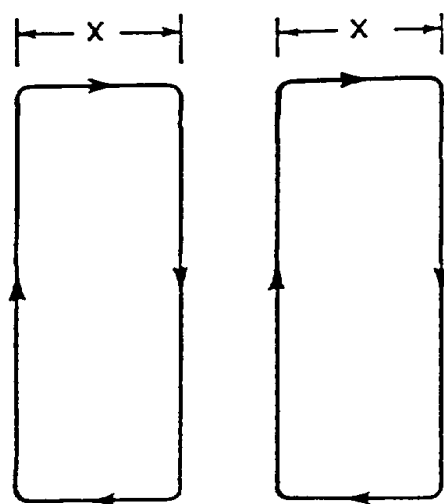


图 33a

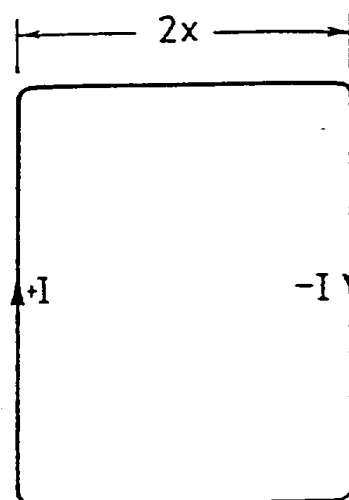


图 33b

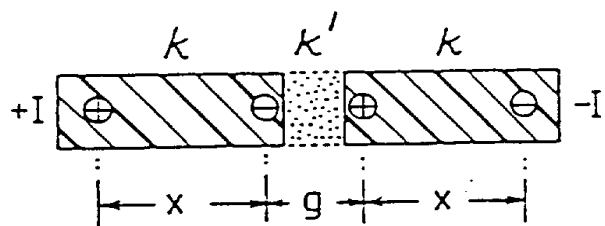


图 33c

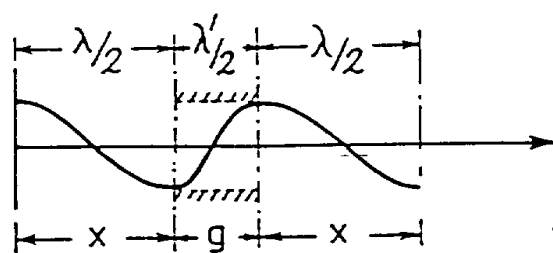


图 34

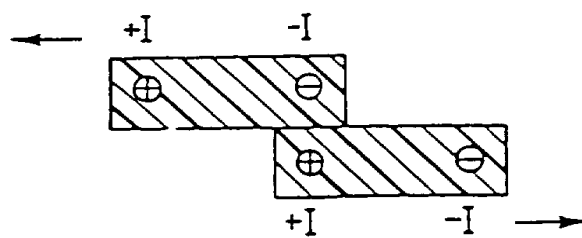


图 35

图 36a

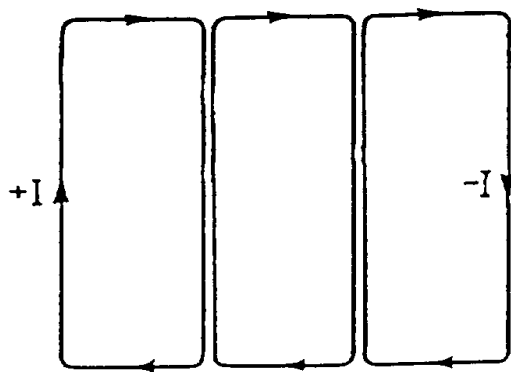


图 36b

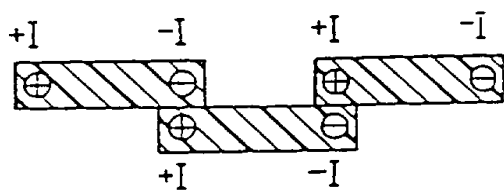
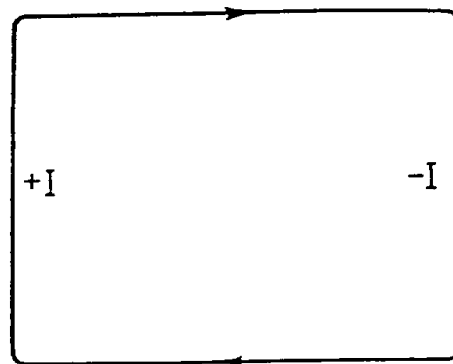


图 36c

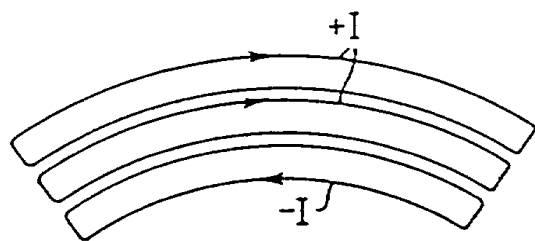


图 37a

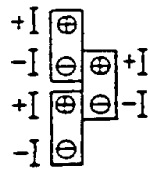


图 37c

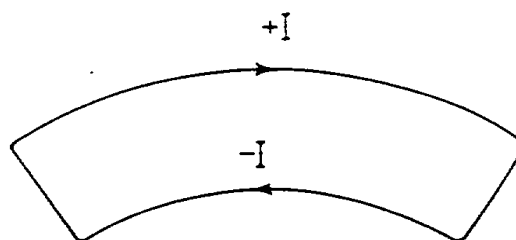


图 37b

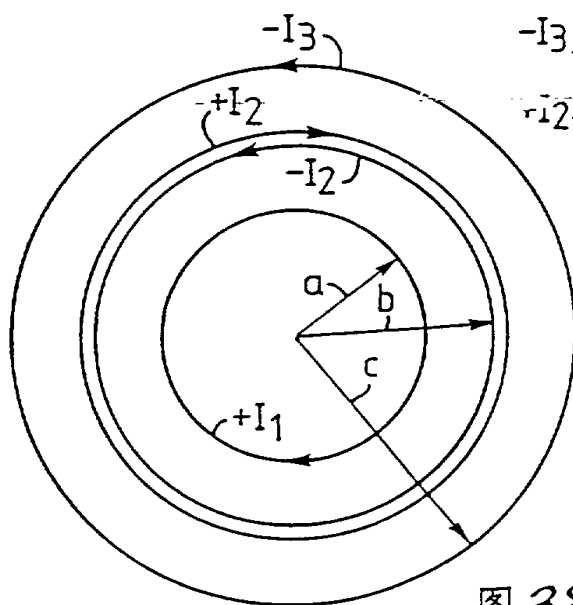


图 38a

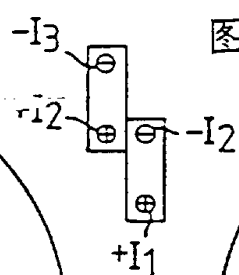


图 38c

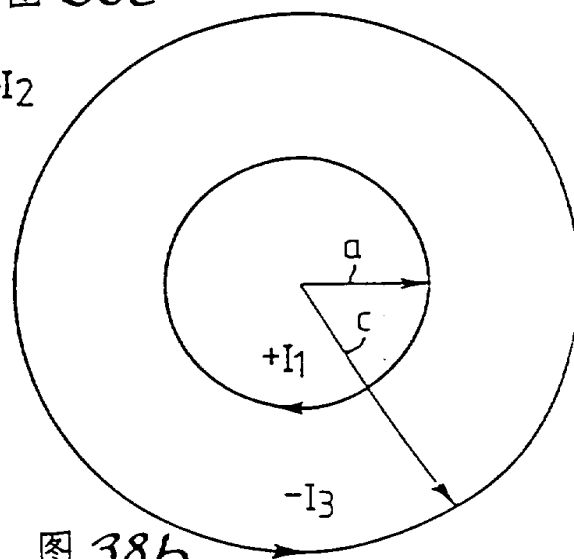


图 38b

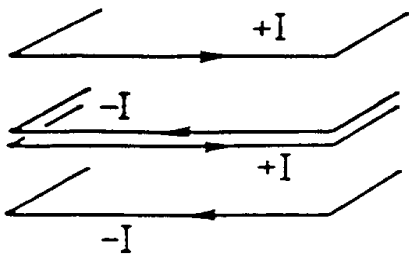


图 39a

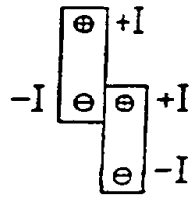


图 39c

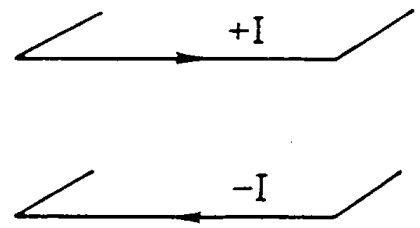


图 39b

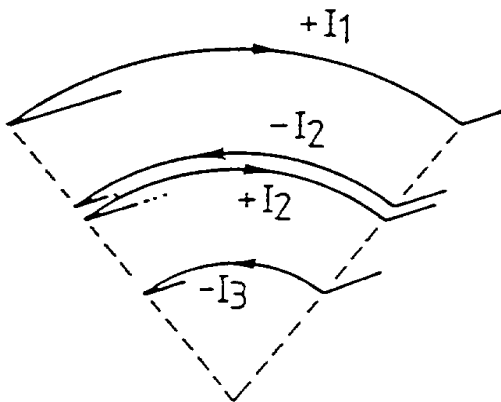


图 40a

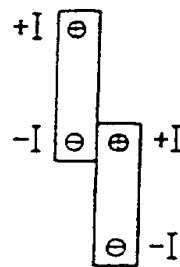


图 40c

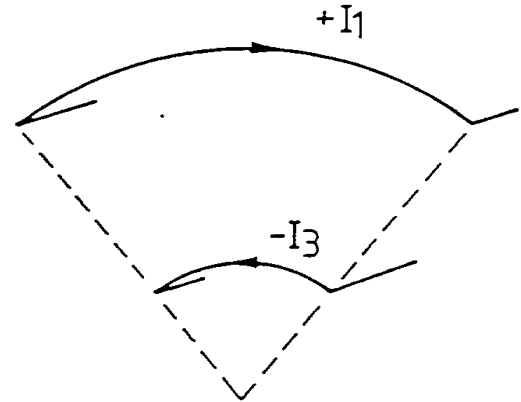


图 40b

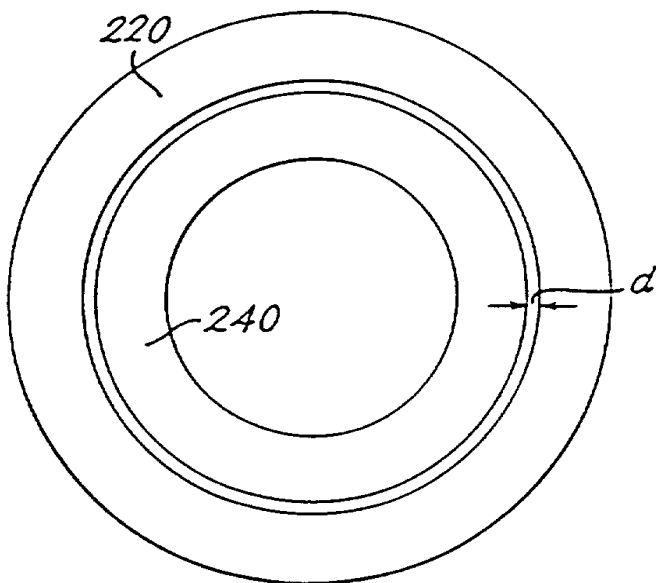


图 41a

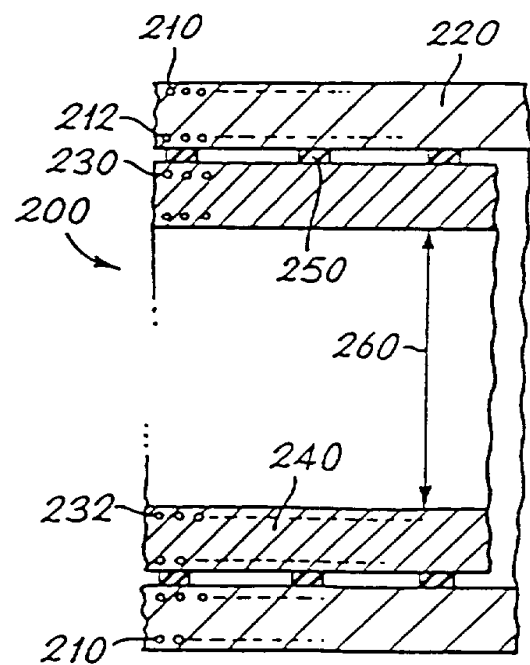


图 41b