



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102439669 B

(45) 授权公告日 2015. 11. 25

(21) 申请号 201080016702. 9

M · P · 克斯勒 M · 索尔亚奇克

(22) 申请日 2010. 02. 13

E · R · 吉勒

(30) 优先权数据

(74) 专利代理机构 中国专利代理 (香港) 有限公司 72001

代理人 刘春元 卢江

61/152390 2009. 02. 13 US

61/156764 2009. 03. 02 US

61/163695 2009. 03. 26 US

61/169240 2009. 04. 14 US

61/172633 2009. 04. 24 US

61/173747 2009. 04. 29 US

61/178508 2009. 05. 15 US

61/182768 2009. 06. 01 US

12/567716 2009. 09. 25 US

12/639489 2009. 12. 16 US

12/647705 2009. 12. 28 US

(51) Int. Cl.

H01F 27/42(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101316053 A , 2008. 12. 03,

CN 101330230 A , 2008. 12. 24,

CN 101340113 A , 2009. 01. 07,

US 2009/0160261 A1 , 2009. 06. 25,

审查员 张浩

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2011. 10. 13

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2010/024199 2010. 02. 13

(87) PCT国际申请的公布数据

W02010/093997 EN 2010. 08. 19

(73) 专利权人 韦特里西提公司

地址 美国马萨诸塞州

(72) 发明人 A · B · 科斯 K · L · 霍尔

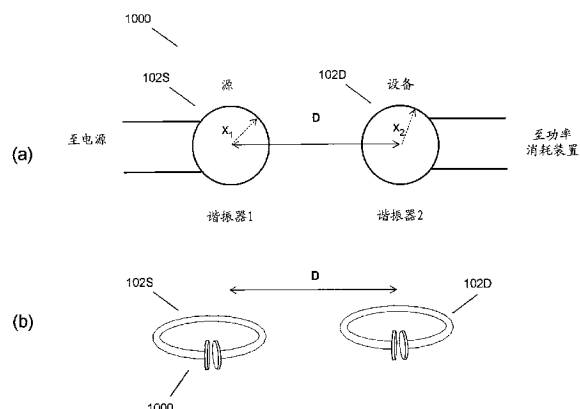
权利要求书2页 说明书91页 附图71页

(54) 发明名称

有损环境中的无线能量转移

(57) 摘要

在此描述的是用于电子设备的无线功率转移的改进配置,其包括:至少一个源磁谐振器,包括耦合到功率源并且被配置成生成振荡磁场的电容加载的导电环路;和至少一个设备磁谐振器,远离所述源谐振器,包括被配置成将所述振荡磁场转换成电能的电容加载的导电环路;其中至少一个所述谐振器具有在谐振器周围的遮挡区,其用非有损材料层包围谐振器。



1. 一种无线功率转移系统,包括:
具有多个不同尺寸的电感元件的可调整磁谐振器;
控制电路,被配置成通过选择性地激活所述多个不同尺寸的电感元件的第一子集来调整所述可调整磁谐振器的有效尺寸;
与所述可调整磁谐振器分离的附加磁谐振器;和
测量电路,被配置成测量所述可调整磁谐振器和所述附加磁谐振器的至少一个参数,
其中所述控制电路被配置成基于由测量电路测量的至少一个参数来激活所述多个不同尺寸的电感元件的第一子集;并且
其中所述控制电路被配置成从与所述附加磁谐振器相对应的谐振频率解调谐所述多个不同尺寸的电感元件的第二子集。
2. 根据权利要求 1 所述的系统,其中可调整磁谐振器是源谐振器。
3. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述可调整磁谐振器是设备谐振器并且所述多个不同尺寸的电感元件被配置成向连接到电感元件的负载递送从源接收的能量。
4. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述至少一个参数包括所述可调整磁谐振器与所述附加磁谐振器之间的距离。
5. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述至少一个参数包括所述可调整磁谐振器与所述附加磁谐振器之间的功率转移效率。
6. 根据权利要求 5 所述的系统,其中所述控制电路被配置成调整所述可调整磁谐振器的有效尺寸以最大化所述可调整磁谐振器与所述附加磁谐振器之间的功率转移效率。
7. 根据权利要求 6 所述的系统,进一步包括所述可调整磁谐振器与所述附加磁谐振器之间的通信链路并且其中使用所述通信链路在谐振器之间交换至少一个参数的值。
8. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述至少一个参数包括所述可调整磁谐振器的输入阻抗。
9. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述至少一个参数包括耦合系统的阻抗,所述耦合系统包括所述可调整磁谐振器和所述附加磁谐振器。
10. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述至少一个参数包括所述控制电路中的电压测量。
11. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述至少一个参数包括所述控制电路中的电流测量。
12. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述控制电路被配置成通过使所述电感元件的各部分开路来去激活所述多个不同尺寸的电感元件的成员。
13. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述控制电路被配置成通过使所述多个不同尺寸的电感元件的一个或多个部分短路来去激活所述多个不同尺寸的电感元件的成员。
14. 根据权利要求 1 所述的系统,其中所述附加磁谐振器是可调整的并且包括多个不同尺寸的电感元件。
15. 一种用于无线功率转移的可调整有效尺寸磁谐振器,包括:
多个不同尺寸的电感元件;
控制电路,被配置成通过选择性地激活所述多个不同尺寸的电感元件的第一子集来调整所述可调整磁谐振器的有效尺寸;和

测量电路,被配置成测量所述可调整磁谐振器的至少一个电气参数,

其中所述控制电路被配置成基于所述至少一个电气参数来激活所述多个不同尺寸的电感元件的第一子集;并且

其中所述控制电路被配置成从与所述多个不同尺寸的电感元件的第一子集功率转移相对应的谐振频率解调谐所述多个不同尺寸的电感元件的第二子集。

16. 根据权利要求 15 所述的谐振器,其中所述至少一个电气参数包括所述多个不同尺寸的电感元件中的一个或多个的特性阻抗。

17. 根据权利要求 15 所述的谐振器,其中所述至少一个电气参数包括所述多个不同尺寸的电感元件中的一个或多个上的电压和电流。

18. 根据权利要求 15 所述的谐振器,其中所述控制电路被配置成通过使所述电感元件的各部分开路来去激活所述多个不同尺寸的电感元件的成员。

19. 根据权利要求 15 所述的谐振器,其中所述控制电路被配置成调整所述磁谐振器的有效尺寸以最大化所述磁谐振器和第二磁谐振器之间的耦合系数。

20. 一种用于无线功率转移的可调整有效尺寸磁谐振器,包括:

多个电感元件;

控制电路,被配置成通过选择性地激活所述多个电感元件的第一子集来调整所述磁谐振器的有效尺寸;和

测量电路,被配置成测量所述可调整磁谐振器的至少一个电气参数,

其中所述控制电路被配置成基于所述至少一个参数来激活所述多个电感元件的第一子集;并且

其中所述控制电路被配置成从与所述多个电感元件的第一子集功率转移相对应的谐振频率解调谐所述多个电感元件的第二子集。

21. 一种用于无线功率转移的可调整有效尺寸磁谐振器,包括:

多个电感元件;

通信电路,接收关于来自或到磁谐振器的功率转移的信息;以及

控制电路,被配置成通过从与来自或到所述多个电感元件的子集功率转移相对应的谐振频率解调谐所述多个电感元件的子集而基于所接收的信息调整所述谐振器的有效尺寸。

有损环境中的无线能量转移

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求以下美国专利申请的优先权, 其中的每一个整体地通过引用结合到本文中: 2009 年 9 月 25 日提交的美国专利申请号 12/567, 716; 2009 年 5 月 15 日提交的美国专利申请号 61/178, 508; 2009 年 6 月 1 日提交的美国专利申请号 61/182, 768; 2009 年 3 月 2 日提交的美国专利申请号 61/156, 764; 2009 年 2 月 13 日提交的美国专利申请号 61/152, 390; 2009 年 3 月 26 日提交的美国专利申请号 61/163, 695; 2009 年 4 月 24 日提交的美国专利申请号 61/172, 633; 2009 年 4 月 14 日提交的美国专利申请号 61/169, 240; 2009 年 4 月 29 日提交的美国专利申请号 61/173, 747; 2009 年 12 月 16 日提交的美国专利申请号 12/639, 489; 以及 2009 年 12 月 28 日提交的美国专利申请号 12/647, 705。

[0003] 背景

技术领域

[0004] 本公开涉及亦被称为无线功率传输的无线能量转移 (transfer)。

背景技术

[0005] 可以使用多种已知辐射或远场和非辐射或近场技术来无线地转移能量或功率。例如, 可以将使用低方向性天线的辐射无线信息转移 (诸如在无线电和蜂窝式通信系统和家用计算机网络中使用的那些) 视为无线能量转移。然而, 此类辐射转移是非常低效的, 因为仅获取了供应或辐射的功率的很小一部分, 即沿着接收机的方向并与之重叠的那部分。大多数功率沿着所有其它方向被辐射开并损耗在自由空间中。此类低效率功率转移对于数据传输而言是可接受的, 但是对于为了做工目的 (诸如为了向电气设备供电或充电) 而转移有用量的电能而言是不实际的。改善某些能量转移方案的转移效率的一种方式是使用定向天线来约束并优选地指引辐射能量朝向接收机。然而, 这些定向辐射方案在移动发射机和 / 或接收机的情况下可能要求不中断的视线和潜在地复杂的跟踪和转向机构。另外, 此类方案可能对正在传送中度或大量功率时穿过或横穿射束的对象或人造成危险。常常称为感应或传统感应的已知非辐射或近场无线能量转移方案并非 (故意地) 辐射功率, 而是使用流过初级线圈的振荡电流来产生在附近接收或次级线圈中感生电流的振荡磁近场。传统感应方案已经证明了适中到大量功率的传输, 然而仅仅是在非常短的距离上, 并且在主电源单元与辅助接收机单元之间具有非常小的偏移容差。电变压器和接近充电器 (proximity charger) 是利用此已知近程、近场能量转移方案的设备的示例。

[0006] 因此, 需要一种能够在中程 (mid-range) 距离或对准偏移内传送有用量的电功率的无线功率转移方案。此类无线功率转移方案应能够相较传统感应方案所实现的那些在更大的距离和对准偏移内实现有用能量转移, 但是没有辐射传输方案所固有的限制和风险。

发明内容

[0007] 本文公开了一种能够在中程距离和对准偏移内传送有用量的功率的非辐射或近

场无线能量转移方案。本发明的技术使用具有长寿命的振荡谐振模的耦合电磁谐振器来从电源向功率消耗装置 (power drain) 转移功率。该技术是全面的,并且可以应用于大范围的谐振器,即使在本文公开的涉及电磁谐振器的特定示例的情况下。如果谐振器被设计使得由电场存储的能量被主要约束在结构内且由磁场存储的能量主要在谐振器周围的区域中。则主要由谐振磁近场来调解 (mediate) 能量交换。可以将这些类型的谐振器称为磁谐振器。如果谐振器被设计使得由磁场存储的能量被主要约束在结构内且由电场存储的能量主要在谐振器周围的区域中。则主要由谐振电近场来调解能量交换。可以将这些类型的谐振器称为电谐振器。还可以将两种中任一类型的谐振器称为电磁谐振器。在本文中公开了这两种类型的谐振器。

[0008] 我们公开的谐振器的近场的全向但固定(无损耗)性质在很宽的方向和谐振器取向的范围内实现在中程距离上的高效无线能量转移,适合于充电、供电或同时对多种电子设备供电和充电。结果,一种系统可以具有多种可能的应用,其中,被连接到电源的第一谐振器在一个位置,并且潜在地连接到电气/电子设备、电池、供电和充电电路的第二谐振器等处于第二位置,并且其中,从第一谐振器到第二谐振器的距离约为几厘米至几米。例如,连接到有线电力网的第一谐振器可以位于房间的天花板上,而被连接到诸如机器人、交通工具、计算机、通信设备、医疗设备等设备的其它谐振器等在房间内来回移动,并且其中,这些设备恒定地或间歇地从源谐振器无线地接收功率。对于这一个示例而言,一个人可以想象许多应用,其中本文公开的系统和方法可以跨越中程的距离提供无线功率,包括消费者电子装置、工业应用、基础设施供电和照明、运输交通工具、电子游戏、军事应用等。

[0009] 当谐振器被调谐至基本相同的频率且系统中的损耗最小时,能够使两个电磁谐振器之间的能量交换最优化。无线能量转移系统可以被设计使得谐振器之间的“耦合时间”比谐振器的“损耗时间”短得多。因此,本文所述的系统和方法可以利用具有低固有损耗率的高品质因数(高Q)谐振器。另外,本文所述的系统和方法可以使用具有明显比谐振器的特性尺寸更长地延伸的近场的亚波长谐振器,使得交换能量的谐振器的近场在中程距离处重叠。这是之前尚未实践的操作区,并且明显不同于传统感应设计。

[0010] 重要的是认识到这里公开的高Q磁谐振器方案与已知近程或接近感应方案之间的差别,即那些已知方案按照惯例没有利用高Q谐振器。使用耦合模理论(CMT)(参见例如 Waves and Fields in Optoelectronics, H. A. Haus, Prentice Hall, 1984), 可以显示高Q谐振器耦合机制能够实现比传统感应方案所实现的间隔开中程距离的谐振器之间的功率递送高几个数量级的高效功率递送。耦合高Q谐振器已经证明了在中程距离上实现高效能量转移及在短程能量转移应用中改善效率和偏移容差。

[0011] 本文所述的系统和方法可以提供经由强耦合高Q谐振器的近场无线能量转移,一种具有安全地且在比使用传统感应技术实现的大得多的距离上转移从皮可瓦到千瓦的功率水平的潜力的技术。针对强耦合谐振器的多种一般系统,可以实现高效的能量转移,诸如强耦合声谐振器、原子能谐振器、机械谐振器等系统,如最初由 M. I. T. 在其出版物“Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer”, *Annals of Physics*, vol. 323, Issue 1, p. 34 (2008) 和“Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances”, *Science*, vol. 317, no. 5834, p. 83, (2007) 中描述的那样。本文公开的是电磁谐振器和耦合电磁谐振器的系统,更具体地也称之为耦合磁谐振器和耦

合电谐振器,具有 10GHz 之下的工作频率。

[0012] 本公开内容描述了也称为无线功率传输技术的无线能量转移技术。综观本公开内容,我们可互换使用术语无线能量转移、无线功率转移、无线功率传输等。我们可以提到将来自源、AC 或 DC 源、电池、源谐振器、电源、发电机、太阳能电池板和集热器等的能量或功率供应给设备、远程设备、多个远程设备、一个或多个设备谐振器等。我们可以描述中间谐振器,其通过允许能量跳跃、转移通过、被临时存储、被部分地耗散、或允许以任何方式来调解从源谐振器到其它设备与中间谐振器的任何组合的转移来扩展无线能量转移系统的范围,从而可以实现能量转移网络或串或延长的路径。设备谐振器可以从源谐振器接收能量,将该能量的一部分转换成用于对设备供电和充电的电功率,并同时将接收到的能量的一部分传到其它设备或移动设备谐振器上。能量可以从源谐振器转移至多个设备谐振器,显著地延长可无线地转移能量的距离。可以使用多种系统架构和谐振器设计来实现无线功率传输系统。该系统可包括向单个设备或多个设备传送功率的单个源或多个源。可以将谐振器设计为源或设备谐振器,或者可以将其设计为重发器(repeater)。在某些情况下,谐振器可以同时是设备和源谐振器,或者可以将其从作为源进行操作切换至作为设备或重发器进行操作。本领域的技术人员将理解的是可以由在本申请中描述的大范围的谐振器设计和功能来支持多种系统架构。

[0013] 在我们描述的无线能量转移系统中,可以使用无线供应的功率或能量直接对远程设备供电,或者可以将设备耦合到诸如电池、法拉电容器、超级电容器等的储能单元(或其它种类的功率消耗装置),其中,可以无线地对储能元件充电或再充电,和/或其中,无线功率转移机制仅仅是设备的主电源的补充。可以由诸如具有集成存储电容器等的混合电池/储能设备来对设备供电。此外,可以将新型电池和储能设备设计为利用由无线功率传输系统实现的操作改进。

[0014] 其它功率管理方案包括使用无线地供应的功率来对电池再充电或对储能单元充电,同时其进行供电的设备被关断、处于空闲状态、处于睡眠模式等。可以以高(快)或低(慢)速率对电池或储能单元充电或再充电。可以对电池或储能单元涓流充电或浮动充电。可以并行地同时对多个设备充电或供电,或者可以使到多个设备的功率递送串行化,使得一个或多个设备在其它功率递送被切换到其它设备之后的一段时间内接收功率。多个设备可以同时地或以时间复用方式或以频率复用方式或以空间复用方式或以取向复用方式或以时间和频率和空间和取向复用的任何组合来与一个或多个其它设备共享来自一个或多个源的功率。多个设备可以相互共享功率,至少一个设备被连续地、间歇地、周期性地、偶尔地或临时地重新配置以作为无线功率源进行操作。本领域的技术人员应理解的是存在向设备供电和/或充电的多种方式,并且所述多种方式可以应用于本文所述的技术和应用。

[0015] 无线能量转移具有多种可能的应用,包括例如将源(例如连接到有线电力网的一个)放置在房间的天花板上、在地板下或在墙壁中,同时将诸如机器人、交通工具、计算机、PDA 等放置在室内或其在室内自由地移动。其它应用可以包括对电引擎交通工具供电或再充电,诸如公交车和/或混合汽车和医疗设备,诸如可穿戴或可植入设备。附加示例性应用包括对独立电子装置(例如膝上型计算机、蜂窝电话、便携式音乐播放器、家务机器人、GPS 导航系统、显示器等)、传感器、工业和制造设备、医疗设备和监视器、家用器具和工具(例如灯、风扇、钻、锯、加热器、显示器、电视、柜台上器具等)、军用设备、保暖或照明衣物、通信

和导航设备,包括嵌入交通工具、衣物和保护性衣物中诸如头盔、防弹服和背心的设备等供电或再充电的能力,以及向被物理隔离的设备传送功率的能力,诸如向植入的医疗设备,向隐藏、掩埋、植入或嵌入的传感器或标签,和 / 或从屋顶太阳能电池板向室内配电盘等。

[0016] 在一个方面,在此公开的是一种系统,其包括具有品质因数 Q_1 和特性尺寸 x_1 并且利用直接电连接而耦合到发电机的源谐振器;和具有品质因数 Q_2 和特性尺寸 x_2 、利用直接电连接而耦合到负载、并且位于与源谐振器相距距离 D 的第二谐振器,其中所述源谐振器和第二谐振器被耦合以在源谐振器和第二谐振器之间无线地交换能量以便从发电机向负载传送功率,并且其中 $\sqrt{Q_1 Q_2}$ 大于 100。

[0017] Q_1 可以大于 100 并且 Q_2 可以小于 100。 Q_1 可以大于 100 并且 Q_2 可以大于 100。可以在从 0 到 D 的操作距离上保持有用能量交换,其中 D 大于 x_1 和 x_2 中的较小的一个。源谐振器和第二谐振器中的至少一个可以是连接到第一电容器网络的至少一匝导电材料的线圈。第一电容器网络可以包括至少一个可调谐电容器。源谐振器到发电机的接地端子和第二谐振器到负载的接地端子中至少一个的直接电连接可以在第一电容器网络的电气对称轴上的点实现。第一电容器网络可以包括至少一个可调谐蝶式电容器,其中到接地端子的直接电连接在至少一个可调谐蝶式电容器的中心端子上实现。源谐振器到发电机和第二谐振器到负载中至少一个的直接电连接可以通过第二电容器网络来实现,其中第一电容器网络和第二电容器网络形成阻抗匹配网络。阻抗匹配网络可以被设计为使线圈与发电机的特性阻抗或在发电机的驱动频率下的负载匹配。

[0018] 第一电容器网络和第二电容器网络中的至少一个可以包括至少一个可调谐电容器。第一电容器网络和第二电容器网络可以是可调整的以改变阻抗匹配网络在发电机的驱动频率下的阻抗。第一电容器网络和第二电容器网络可以是可调整的以使线圈与发电机的特性阻抗或在发电机的驱动频率下的负载匹配。第一电容器网络和第二电容器网络中的至少一个可以包括降低至少一个可调谐电容器两端的电压的至少一个固定电容器。源谐振器到发电机和第二谐振器到负载中至少一个的直接电连接可以被配置成基本上保持谐振模。源谐振器和第二谐振器中的至少一个可以是可调谐谐振器。源谐振器可以在物理上与发电机分离并且第二谐振器可以在物理上与负载分离。第二谐振器可以耦合到功率转换电路以向负载递送 DC 功率。第二谐振器可以耦合到功率转换电路以向负载递送 AC 功率。第二谐振器可以耦合到功率转换电路以向负载递送 AC 和 DC 功率这二者。第二谐振器可以耦合到功率转换电路以向多个负载递送功率。

[0019] 在另一个方面,在此公开的系统包括具有品质因数 Q_1 和特性尺寸 x_1 的源谐振器,和具有品质因数 Q_2 和特性尺寸 x_2 、并且位于与源谐振器相距距离 D 的第二谐振器;其中源谐振器和第二谐振器被耦合以在源谐振器和第二谐振器之间无线地交换能量;并且其中 $\sqrt{Q_1 Q_2}$ 大于 100,并且其中谐振器中的至少一个被封闭在低损耗角正切材料中。

[0020] 在另一个方面,在此公开的系统包括具有品质因数 Q_1 和特性尺寸 x_1 的源谐振器,和具有品质因数 Q_2 和特性尺寸 x_2 、并且位于与源谐振器相距距离 D 的第二谐振器;其中源谐振器和第二谐振器被耦合以在源谐振器和第二谐振器之间无线地交换能量;并且其中 $\sqrt{Q_1 Q_2}$ 大于 100;并且其中谐振器中的至少一个包括连接到电容器网络的多匝导电材料的线圈,其中所述多匝位于共同平面中,并且其中所述谐振器中的至少一个的特性厚度比所

述谐振器中的至少一个的特性尺寸小得多。

[0021] 纵观本公开内容,我们可以将诸如电容器、电感器、电阻器、二极管、开关等某些电路组件称为电路组件或元件。我们还可以将这些组件的串联和并联组合称为元件、网络、拓扑结构、电路等。我们可以将电容器、二极管、变抗器、晶体管和 / 或开关的组合描述为可调整阻抗网络、调谐网络、匹配网络、调整元件等。我们还可以提到使电容和电感这二者遍及整个对象分布 (或部分地分布,与单独地集总相反) 的“自谐振”对象。本领域的技术人员将理解的是在电路或网络内调整和控制可变组件可以调整该电路或网络的性能,并且那些调整可以一般描述为调谐、调整、匹配、修正等。除调整诸如电感器和电容器或成组的电感器和电容器的可调谐组件之外,其它调谐或调整无线功率转移系统的方法可以单独使用。

[0022] 除非另外定义,本文所使用的所有技术和 / 或科学术语具有与本公开所属领域的技术人员通常理解的意义相同的意义。在与出版物、专利申请、专利和通过引用在本文中提及或结合到本文中的其它参考文献冲突的情况下,本说明书 (包括定义) 将具有支配权。

[0023] 在不脱离本公开的范围的情况下,可以单独地或组合地使用任何上述特征。通过以下详细说明和附图,本文公开的系统和方法的其它特征、目的和优点将是显而易见的。

附图说明

[0024] 图 1(a) 和 (b) 描绘了包含以距离 D 分隔开的源谐振器 1 和设备谐振器 2 的示例性无线功率系统。

[0025] 图 2 示出根据本公开中描述的加标签惯例被加标签的示例性谐振器。请注意,在谐振器 1 的附近未示出无关对象或附加谐振器。

[0026] 图 3 示出在存在“加载”对象的情况下,根据本公开中描述的加标签惯例被加标签的示例性谐振器。

[0027] 图 4 示出在存在“扰动”对象的情况下,根据本公开中描述的加标签惯例被加标签的示例性谐振器。

[0028] 图 5 示出效率 η 对比强耦合系数 $U = \kappa / \sqrt{\Gamma_s \Gamma_d} = k \sqrt{Q_s Q_d}$ 的绘图。

[0029] 图 6(a) 示出谐振器的一个示例的电路图, (b) 示出电容加载电感器环路磁谐振器的一个示例的图示, (c) 示出具有分布式电容和电感的自谐振线圈的图, (d) 示出与本公开的示例性磁谐振器相关联的电场和磁场线的简化图, 以及 (e) 示出电谐振器的一个示例的图示。

[0030] 图 7 示出可以用于 MHz 频率下的无线功率传输的示例性谐振器的作为频率的函数的“品质因数”Q (实线) 的图。吸收性 Q (短划线) 随着频率增加, 而辐射性 Q (点线) 随着频率减小, 因此, 促使总的 Q 在特定频率处达到峰值。

[0031] 图 8 示出谐振器结构的图, 其特性尺寸、厚度和宽度均被指示。

[0032] 图 9(a) 和 (b) 示出示例性感应环路元件的图。

[0033] 图 10(a) 和 (b) 示出在印刷电路板上形成并用来实现磁谐振器结构中的电感元件的迹线 (trace) 结构的两个示例。

[0034] 图 11(a) 示出平面磁谐振器的透视图, (b) 示出具有各种几何结构的两个平面磁谐振器的透视图, 以及 (c) 示出以距离 D 分隔开的两个平面磁谐振器的透视图。

[0035] 图 12 是平面磁谐振器的示例的透视图。

[0036] 图 13 是具有圆形谐振器 (circular resonator) 线圈的平面磁谐振器布置的透视图。

[0037] 图 14 是平面磁谐振器的有效区域 (active area) 的透视图。

[0038] 图 15 是无线功率转移系统的应用的透视图,其中处于桌子中心处的源对放置在源周围的多个设备供电。

[0039] 图 16(a) 示出由绕其中心处的阻塞点的电流的正方形环路驱动的铜和磁性材料结构的 3D 有限元模型。在本示例中,结构可以由用诸如铜的导电材料制成、被一层磁性材料覆盖并通过一块磁性材料连接的两个盒子组成。本示例中的两个导电盒子的内部将与在盒子外面产生的 AC 电磁场屏蔽开来,并且可以容纳可能降低谐振器的 Q 的有损耗对象或可能被 AC 电磁场负面地影响的敏感组件。还示出了所计算的由此结构生成的磁场流线,指示磁场线趋向于遵循磁性材料中的较低磁阻路径。图 16(b) 示出如图 (a) 所示的两个相同结构之间的如所计算的磁场流线所指示的交互作用。由于对称性以及为了降低计算复杂性,仅对系统的一半进行建模 (但是,该计算假定了另一半的对称布置)。

[0040] 图 17 示出包括绕结构缠绕 N 次的导线的磁谐振器的等效电路表示,可能包含可透磁材料。使用绕包括磁性材料的结构缠绕的导电环路来实现电感,并且电阻器表示系统中的损耗机构 (R_{wire} 用于环路中的电阻损耗, R_{p} 表示被环路围绕的结构等效串联电阻)。可以将损耗最小化以实现高 Q 谐振器。

[0041] 图 18 示出频率 6.78MHz 的外部磁场中的由有损耗电介质材料组成的圆盘之上和之下的两个高导电率表面的有限元法 (FEM) 模拟。请注意,磁场在圆盘之前是均匀的,并且导电材料被引入模拟环境。在圆柱形坐标系中执行此模拟。图像是绕 $r = 0$ 轴方位角对称的。有损耗电解质圆盘具有 $\epsilon_r = 1$ 和 $\sigma = 10\text{S/m}$ 。

[0042] 图 19 示出在其附近具有被高导电率表面完全地覆盖的有损耗对象的磁谐振器的图。

[0043] 图 20 示出在其附近具有被高导电率表面部分地覆盖的有损耗对象的磁谐振器的图。

[0044] 图 21 示出在其附近具有被设置在高导电率表面之上的有损耗对象的磁谐振器的图。

[0045] 图 22 示出完全无线投影仪的图示。

[0046] 图 23 示出沿着包含圆形环路电感器的直径和沿着环路电感器的轴的电场和磁场的幅值。

[0047] 图 24 示出磁谐振器及其外壳以及被放置在 (a) 外壳的角落中,尽可能远离谐振器结构或 (b) 在被磁谐振器中的电感元件封闭的表面的中心上的必需但有损耗的对象的图。

[0048] 图 25 示出具有在其上方的高导电率表面和有损耗对象的磁谐振器的图,所述有损耗对象可以被带到谐振器的附近,但是在高导电率片材上方。

[0049] 图 26(a) 示出被暴露于沿着 z 轴的最初均匀的外加磁场 (灰色磁通线) 的薄导电 (铜) 圆柱或圆盘 (直径为 20cm, 高度为 2cm) 的轴向对称 FEM 模拟。对称轴在 $r = 0$ 处。所示的磁流线在源于 $z = -\infty$, 其中,其被以 1cm 的间隔间隔开 $r = 3\text{cm}$ 至 $r = 10\text{cm}$ 。轴刻度以米为单位。图 26(b) 示出与在 (a) 中相同的结构和外加场,除导电圆柱已被修改为在其外表面上包括具有 $\mu_r' = 40$ 的 0.25mm 的磁性材料层 (不可见)。请注意,磁流线偏转远离

圆柱的程度明显比在 (a) 中小。

[0050] 图 27 示出基于图 26 所示的系统的变化的轴对称视图。有损耗材料仅有一个表面被铜和磁性材料的分层结构覆盖。如图所示,电感器环路被放置在与有损耗材料相对的铜和磁性材料结构的一侧。

[0051] 图 28(a) 描绘了包括到高 Q 电感元件的间接耦合的匹配电路的一般拓扑结构。

[0052] 图 28(b) 示出了包括导体环路电感器和可调谐阻抗网络的磁谐振器的方框图。可以将到此谐振器的物理电连接进行至端子连接。

[0053] 图 28(c) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件的匹配电路的一般拓扑结构。

[0054] 图 28(d) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并被反对称地驱动(平衡驱动)的对称匹配电路的一般拓扑结构。

[0055] 图 28(e) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并在主谐振器的对称点处接地(非平衡驱动)的匹配电路的一般拓扑结构。

[0056] 图 29(a) 和 29(b) 描绘了被耦合(即间接地或电感地)到高 Q 电感元件的匹配电路变压器的两个拓扑结构。(c) 中的史密斯图的突出显示部分描绘了在 $\omega L_2 = 1/\omega C_2$ 的情况下从可以被图 31(b) 的拓扑结构匹配到任意实阻抗 Z_0 的复数阻抗(从电感元件的 L 和 R 产生)。

[0057] 图 30(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并包括与 Z_0 串联的电容器的匹配电路的六个拓扑结构。用输入端子处的共模信号来驱动图 30(a)、(b)、(c) 所示的拓扑结构,而图 30(d)、(e)、(f) 所示的拓扑结构是对称的,并接收平衡驱动。图 30(g) 中的史密斯图的突出显示部分描绘了可以通过这些拓扑结构匹配的复数阻抗。图 30(h)、(i)、(j)、(k)、(l)、(m) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并包括与 Z_0 串联的电感器的匹配电路的六个拓扑结构。

[0058] 图 31(a)、(b)、(c) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并包括与 Z_0 串联的电容器的匹配电路的三个拓扑结构,其在电容器的中心点处接地并接收不平衡驱动。图 31(d) 中的史密斯图的突出显示部分描绘了可以通过这些拓扑结构匹配的复数阻抗。图 31(e)、(f)、(g) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并包括与 Z_0 串联的电感器的匹配电路的三个拓扑结构。

[0059] 图 32(a)、(b)、(c) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并包括与 Z_0 串联的电容器的匹配电路的三个拓扑结构。其通过电感器环路的中心点处的分接(tapping)接地并接收不平衡驱动。(d) 中的史密斯图的突出显示部分描绘了可以被这些拓扑结构匹配的复数阻抗,(e)、(f)、(g) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并包括与 Z_0 串联的电感器的匹配电路的三个拓扑结构。

[0060] 图 33(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并包括与 Z_0 并联的电容器的匹配电路的六个拓扑结构。用输入端子处的共模信号来驱动图 33(a)、(b)、(c) 所示的拓扑结构,而图 33(d)、(e)、(f) 所示的拓扑结构是对称的,并接收平衡驱动。图 33(g) 中的史密斯图的突出显示部分描绘了可以被这些拓扑结构匹配的复数阻抗。图 33(h)、(i)、(j)、(k)、(l)、(m) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并包括与 Z_0 并联的电感器的匹配电路的六个拓扑结构。

[0061] 图 34(a)、(b)、(c) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并包括与 Z_0 并联的电容器

的匹配电路的三个拓扑结构。其在电容器的中心点处接地并接收不平衡驱动。(d) 中的史密斯图的突出显示部分描绘了可以被这些拓扑结构匹配的复数阻抗。图 34(e)、(f)、(g) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并包括与 Z_0 并联的电感器的匹配电路的三个拓扑结构。

[0062] 图 35(a)、(b)、(c) 描绘了被直接耦合到高 Q 电感元件并包括与 Z_0 并联的电容器的匹配电路的三个拓扑结构。其通过电感器环路的中心点处的分接接地并接收不平衡驱动。图 35(d)、(e) 和 (f) 中的史密斯图的突出显示部分描绘了可以被这些拓扑结构匹配的复数阻抗。

[0063] 图 36(a)、(b)、(c)、(d) 描绘了被设计为在可变电容器上产生具有更细调谐分辨率的总可变电容和某些具有降低的电压的固定和可变电容器的四个网络拓扑结构。

[0064] 图 37(a) 和 37(b) 描绘了被设计为产生总可变电容的固定电容器和可变电感器的两个网络拓扑结构。

[0065] 图 38 描绘了无线功率传输系统的高级方框图。

[0066] 图 39 描绘了示例性被无线供电的设备的方框图。

[0067] 图 40 描绘了示例性无线功率转移系统的源的方框图。

[0068] 图 41 示出了磁谐振器的等效电路图。通过电容器符号的短斜线指示所表示的电容器可以是固定或可变的。可以将端口参数测量电路配置为测量某些电信号,并且可以测量信号的幅值和相位。

[0069] 图 42 示出其中用电压控制电容器来实现可调谐阻抗网络的磁谐振器的电路图。可以由包括可编程或可控电压源和 / 或计算机处理器的电路来调整、调谐或控制此类实施方式。可以响应于由端口参数测量电路测量并由测量分析和控制算法和硬件处理的数据来调整电压控制电容器。电压控制电容器可以是开关电容器组。

[0070] 图 43 示出了端到端无线功率传输系统。在本示例中,源和设备都包含端口测量电路和处理器。标记为“耦合器 / 开关”的方框指示可以由定向耦合器或开关将端口测量电路连接到谐振器,使得能够与功率转移功能相结合地或分开地进行源和设备谐振器的测量、调整和控制。

[0071] 图 44 示出端到端无线功率传输系统。在本示例中,仅源包含端口测量电路和处理器。在这种情况下,所述设备谐振器工作特性可以是固定的,或者可以由模拟控制电路来调整,并且不需要由处理器生成的控制信号。

[0072] 图 45 示出端到端无线功率传输系统。在本示例中,源和设备这二者都包含端口测量电路,但是仅源包含处理器。通过可以用单独天线或通过源驱动信号的某种调制来实现的无线通信信道来传送来自设备的数据。

[0073] 图 46 示出端到端无线功率传输系统。在本示例中,仅源包含端口测量电路和处理器。通过可以用单独天线或通过源驱动信号的某种调制来实现的无线通信信道来传送来自设备的数据。

[0074] 图 47 示出可以使用利用处理器或计算机实现的算法来自动地调整其频率和阻抗的耦合磁谐振器。

[0075] 图 48 示出变抗器阵列。

[0076] 图 49 示出由源无线地供电或充电的设备(膝上型计算机),其中,源和设备谐振器在物理上与源和设备分离,但是被电连接到源和设备。

[0077] 图 50(a) 是被无线地供电或充电的膝上型计算机应用的图示, 其中设备谐振器在膝上型计算机外壳内且不可见。

[0078] 图 50(b) 是被无线地供电和充电的膝上型计算机应用的图示, 其中谐振器在膝上型计算机底座下面且通过线缆电连接到膝上型计算机功率输入端。

[0079] 图 50(c) 是被无线地供电或充电的膝上型计算机应用的图示, 其中谐振器被附着于膝上型计算机底座。

[0080] 图 50(d) 是被无线地供电和充电的膝上型计算机应用的图示, 其中谐振器被附着于膝上型计算机显示器。

[0081] 图 51 是具有无线功率转移的屋顶 PV 板的图示。

[0082] 图 52a) 是分层 PCB 中的四层中的单独迹线的布线 (routing) 的图, b) 是示出单独迹线和通孔连接 (via connection) 的布线的三维透视图。

[0083] 图 53a) 是分层 PCB 的四层中的单独迹线的布线的图, 其中单独迹线之一被突出显示以示出其通过该层的路径, b) 是示出导体迹线和通孔连接的布线的三维透视图, 其中导体迹线之一被突出显示以示出其通过绞合 (stranded) 迹线的各层的路径。

[0084] 图 54 是单独迹线的可替换布线的例子。

[0085] 图 55 是 PCB 的一层中的单独迹线的布线的图示。

[0086] 图 56 是 PCB 的导电层之间的布线方向的图示。

[0087] 图 57 是示出彼此接近地布线的两个绞合迹线的通孔间距的共享的图示。

[0088] 图 58(a)-(d) 是具有各种特征尺寸和高宽比的绞合迹线的横截面的图示。

[0089] 图 59(a) 是作为分离距离的函数的固定尺寸设备谐振器和不同尺寸源谐振器之间的无线功率转换效率的绘图, 并且 (b) 是用于生成该绘图的谐振器结构的图示。

[0090] 图 60(a) 是作为横向偏移的函数的固定尺寸设备谐振器和不同尺寸源谐振器之间的无线功率转换效率的绘图, 并且 (b) 是用于生成该绘图的谐振器结构的图示。

[0091] 图 61 是示例性系统实施例的导体布置的图示。

[0092] 图 62 是示例性系统实施例的另一导体布置的图示。

[0093] 图 63 是包括相等尺寸的谐振器的阵列的源的示例性系统实施例的图示。

[0094] 图 64 是包括多种尺寸的谐振器的阵列的源的示例性系统实施例的图示。

[0095] 图 65 是包括平面谐振器结构的可调整尺寸的源的示例性实施例的图示。

[0096] 图 66(a)-(d) 是示出用于可调整源尺寸的使用方案的图示。

[0097] 图 67(a-b) 是具有不同遮挡区 (keep out zone) 的谐振器的图示。

[0098] 图 68 是具有对称遮挡区的谐振器的图示。

[0099] 图 69 是具有不对称的遮挡区的谐振器的图示。

[0100] 图 70 是无线功率转移的应用的图示。

[0101] 图 71(a-b) 是用于减少源和设备之间的横向和角对准依赖性的谐振器阵列的图示。

[0102] 图 72 是由于谐振器位移所引起的谐振器定向对效率的影响的绘图。

[0103] 图 73(a-b) 是示出谐振器之间的横向和角失准的图示。

具体实施方式

[0104] 如上所述,本公开涉及具有可以从电源向功率消耗装置无线地转移功率的长寿命振荡谐振模的耦合电磁谐振器。然而,本技术不限于电磁谐振器,但是具有一般性,并且可以应用于多种谐振器和谐振对象。因此,我们首先描述一般技术,然后公开用于无线能量转移的电磁示例。

[0105] 谐振器

[0106] 可以将谐振器定义为能够以至少两种不同的形式储存能量的系统,并且其中储存的能量在两种形式之间振荡。谐振具有特定的振荡模,其具有谐振(模态)频率 f 和谐振(模态)场。可以将角谐振频率 ω 定义为 $\omega = 2\pi f$, 可以将谐振波长 λ 定义为 $\lambda = c/f$, 其中, c 是光速,并且可以将谐振周期 T 定义为 $T = 1/f = 2\pi/\omega$ 。在不存在损耗机制、耦合机制或外部能量供应或消耗机制的情况下,总谐振器储存能量 W 将保持固定,并且两种能量形式将振荡,其中,一个在另一个是最小值时将是最大值,反之亦然。

[0107] 在不存在无关材料或对象的情况下,图 1 所示的谐振器 102 中的能量可能衰减或被固有损耗所损耗。谐振器场则服从以下线性等式:

$$[0108] \quad \frac{da(t)}{dt} = -i(\omega - i\Gamma)a(t),$$

[0109] 其中,变量 $a(t)$ 是谐振场振幅,其被定义使得由 $|a(t)|^2$ 来给定包含在谐振器内的能量。 Γ 是固有能量衰减或损耗率(例如由于吸收和辐射损耗)。

[0110] 表征能量衰减的谐振器的品质因数或 Q 因数或 Q 与这些能量损耗成反比。可以将其定义为 $Q = \omega * W/P$, 其中, P 是在稳态下损耗的时间平均功率。也就是说,具有高 Q 的谐振器 102 具有相对低的固有损耗,并且能够相对长时间地储存能量。由于谐振器以其固有的衰减速率 2Γ 损耗能量,所以由 $Q = \omega/2\Gamma$ 来给定也称为其固有 Q 的其 Q 。质量因数还表示振荡周期 T 的数目,其使得谐振器中的能量以 e 的因数衰减。

[0111] 如上所述,我们将谐振器的品质因数或 Q 定义为仅仅是由于固有损耗机制引起的。诸如 Q_1 的下标指示 Q 所指代的谐振器(在这种情况下为谐振器 1)。图 2 示出根据此惯例标记的电磁谐振器 102。请注意,在本图中,在谐振器 1 的附近不存在无关对象或附加谐振器。

[0112] 根据诸如谐振器和对象或其它谐振器之间的距离、对象或其它谐振器的材料组成、第一谐振器的结构、第一谐振器中的功率等多种因数,在第一谐振器附近的无关对象和/或附加谐振器可以对第一谐振器造成扰动或加载,从而对第一谐振器的 Q 造成扰动或加载。可以将谐振器附近的非故意的外部能量损耗或到无关材料和对象的耦合机制称为对谐振器的 Q 造成“扰动”,并且可以由圆括号 $()$ 内的下标来指示。可以将与经由到无线能量转移系统中的其它谐振器和发电机和负载的耦合所进行的能量转移相关联的预期外部能量损耗称为对谐振器的 Q 进行“加载”,并且可以由方括号 $[]$ 内的下标来指示。

[0113] 可以将被连接或耦合到发电机 g 或负载 302 1 的谐振器 102 的 Q 称为“被加载品质因数”或“被加载 Q ”,并且如图 3 所示,可以用 $Q_{[g]}$ 或 $Q_{[1]}$ 来表示。通常,不止一个发电机或负载 302 可以连接到谐振器 102。然而,我们未单独地列出那些发电机或负载,而是使用“ g ”和“ 1 ”来指代由发电机和负载的组合施加的等效电路加载。在一般性说明中,我们可以使用下标“ 1 ”来指代被连接到谐振器的发电机或负载。

[0114] 在本文的某些讨论中,我们将由于被连接到谐振器的发电机或负载而引起的“加

载品质因数”或“加载 Q”定义为 $\delta Q_{[1]}$, 其中 $1/\delta Q_{[1]} = 1/Q_{[1]} - 1/Q$ 。请注意, 发电机或负载的加载 Q、即 $\delta Q_{[1]}$ 越大, 被加载 Q、即 $Q_{[1]}$ 越少地偏离谐振器的无载 Q。

[0115] 在存在并非意在作为能量转移系统的一部分的无关对象 402 p 的情况下, 谐振器的 Q 可以称为“被扰动品质因数”或“被扰动 Q”, 并且如图 4 所示可以用 $Q_{(p)}$ 来表示。通常, 可以存在被表示为 p1、p2 等的许多无关对象或对谐振器 102 的 Q 造成扰动的一组无关对象 {p}。在这种情况下, 可以将被扰动 Q 表示为 $Q_{(p1+p2+\dots)}$ 或 $Q_{(\{p\})}$ 。例如, $Q_{1(\text{brick+wood})}$ 可以表示在存在砖或一块木材的情况下, 用于无线功率交换的系统中的第一谐振器的被扰动品质因数, 并且 $Q_{2(\text{office})}$ 可以表示在办公室环境中的用于无线功率交换的系统中的第二谐振器的被扰动品质因数。

[0116] 在本文的某些讨论中, 我们将由于无关对象 p 而引起的“扰动品质因数”或“扰动 Q”定义为 $\delta Q_{(p)}$, 其中 $1/\delta Q_{(p)} = 1/Q_{(p)} - 1/Q$ 。如上所述, 扰动品质因数可以是由于多个无关对象 p1、p2 等或一组无关对象 {p} 引起的。对象的扰动 Q、即 $\delta Q_{(p)}$ 越大, 被扰动 Q、即 $Q_{(p)}$ 越少地偏离谐振器的未扰动 Q。

[0117] 在本文的某些讨论中, 我们还定义了 $\Theta_{(p)} \equiv Q_{(p)}/Q$ 并在存在无关对象的情况下, 将其称为谐振器的“品质因数不灵敏度”或“Q 不灵敏度”。诸如 $\Theta_{1(p)}$ 的下标指示被扰动或未扰动品质因数所指的谐振器, 即 $\Theta_{1(p)} \equiv Q_{1(p)}/Q_1$ 。

[0118] 请注意, 还可以在必要时将品质因数 Q 表征为“未扰动”以将其与被扰动品质因数 $Q_{(p)}$ 区别开, 并在必要时将其表征为“无载”以将其与被加载品质因数 $Q_{[1]}$ 区别开。同样地, 还可以在必要时将被扰动品质因数 $Q_{(p)}$ 表征为“无载”, 以将其与被加载被扰动品质因数 $Q_{(p)[1]}$ 区别开。

[0119] 耦合谐振器

[0120] 通过其近场的任何部分被耦合, 具有基本上相同的谐振频率的谐振器可以交互并交换能量。存在可以用来理解、设计、优化并表征此能量交换的多种物理图片和模型。描述两个耦合谐振器并对其之间的能量交换进行建模的一种方式是使用耦合模理论 (CMT)。

[0121] 在耦合模理论中, 谐振器场服从以下线性方程组:

$$[0122] \quad \frac{da_m(t)}{dt} = -i(\omega_m - i\Gamma_m)a_m(t) + i \sum_{n \neq m} \kappa_{mn} a_n(t)$$

[0123] 其中, 指数表示不同的谐振器, 并且 κ_{mn} 是谐振器之间的耦合系数。对于相反系统, 耦合系数可以服从关系 $\kappa_{mn} = \kappa_{nm}$ 。请注意, 出于本说明书的目的, 将忽视远场辐射干扰效应, 并因此将耦合系数视为实值。此外, 由于在本说明中的系统性能的所有后续计算中, 耦合系数几乎以其平方 κ_{mn}^2 出现, 所以我们使用 κ_{mn} 来表示实耦合系数的绝对值。

[0124] 请注意, 来自上述 CMT 的耦合系数 κ_{mn} 通过 $k_{mn} = 2\kappa_{mn}/\sqrt{\omega_m \omega_n}$ 与谐振器 m 和 n 之间的所谓耦合因数 k_{mn} 相关。我们用 $U_{mn} = \kappa_{mn}/\sqrt{\Gamma_m \Gamma_n} = k_{mn}\sqrt{Q_m Q_n}$ 将“强耦合系数” U_{mn} 定义为谐振器 m 和 n 之间的耦合和损耗率的比率。

[0125] 以与由所连接的功率生成或消耗设备对谐振器进行加载的类似方式, 可以由该谐振器 n 或附加谐振器对存在类似频率的谐振器 n 或附加谐振器的情况下的谐振器 m 的品质因数进行加载。可以由谐振器 n 对谐振器 m 进行加载且反之亦然这一事实, 仅仅是以不同方式看待谐振器被耦合。

[0126] 可以将这些情况下的谐振器的被加载 Q 表示为 $Q_{m[n]}$ 和 $Q_{n[m]}$ 。对于多个谐振器或加载源或设备而言,可以通过将每个负载建模为电阻损耗并以适当的并行和 / 或串行组合将多个负载相加以确定系统的等效负载来确定谐振器的总加载。

[0127] 在本文的某些讨论中,我们将由于谐振器 n 而引起的谐振器 m 的“加载品质因数”或“加载 Q_m ”定义为 $\delta Q_{m[n]}$, 其中 $1/\delta Q_{m[n]} \equiv 1/Q_{m[n]} - 1/Q_m$ 。请注意,谐振器 m 也来对谐振器 n 造成加载,并由 $1/\delta Q_{n[m]} \equiv 1/Q_{n[m]} - 1/Q_n$ 来给定其“加载 Q_n ”。

[0128] 当一个或多个谐振器被连接到发电机或负载时,将线性方程组修改为:

$$[0129] \quad \frac{da_m(t)}{dt} = -i(\omega_m - i\Gamma_m)a_m(t) + i \sum_{n \neq m} \kappa_{mn}a_n(t) - \kappa_m a_m(t) + \sqrt{2\kappa_m}s_{+m}(t)$$

$$[0130] \quad s_{-m}(t) = \sqrt{2\kappa_m}a_m(t) - s_{+m}(t),$$

[0131] 其中, $s_{+m}(t)$ 和 $s_{-m}(t)$ 分别是从小发电机到谐振器 m 中并从谐振器 m 出来朝着发电机返回或进入负载的场的振幅,其被定义使得由 $|s_{+m}(t)|^2$ 和 $|s_{-m}(t)|^2$ 来给定其载送的功率。加载系数 κ_m 涉及在谐振器 m 和与之相连的发电机或负载之间交换能量的速率。

[0132] 请注意,来自上述 CMT 的加载系数 κ_m 通过 $\delta Q_{m[1]} = \omega_m/2\kappa_m$ 与原先定义的加载品质因数 $\delta Q_{m[1]}$ 相关。

[0133] 我们将“强加载因数” $U_{m[1]}$ 定义为谐振器 m 的加载和损耗率的比 $U_{m[1]} = \kappa_m/\Gamma_m = Q_m/\delta Q_{m[1]}$ 。

[0134] 图 1(a) 示出两个耦合谐振器 1000、即被配置为源谐振器的第一谐振器 102S 和被配置为设备谐振器的第二谐振器 102D 的示例。可以在谐振器之间的距离 D 上转移能量。可以由电源或发电机(未示出)来驱动源谐振器 102S。可以由功率消耗装置或负载(例如,负载电阻器,未示出)来从设备谐振器 102D 提取功。让我们将下标“s”用于表示源、“d”用于表示设备,“g”用于表示发电机,并且“1”用于表示负载,并且由于在本示例中仅存在两个谐振器且 $\kappa_{sd} = \kappa_{ds}$, 让我们放弃 κ_{sd} 、 κ_{ds} 和 U_{sd} 上的下标,并分别将其表示为 κ 、 k 和 U 。

[0135] 发电机可以以对应于角驱动频率 ω 的恒定驱动频率 f 来恒定地驱动源谐振器,其中 $\omega = 2\pi f$ 。

[0136] 在这种情况下,从发电机到负载(经由源和设备谐振器)的功率传输的效率 $\eta = |s_d|^2/|s_{+s}|^2$ 在以下条件下被最大化:必须使源谐振频率、设备谐振频率和发电机驱动频率匹配,即

$$[0137] \quad \omega_s = \omega_d = \omega.$$

[0138] 此外,必须使由于发电机而引起的源谐振器的加载 $Q\delta Q_{s[g]}$ 与由于设备谐振器和负载而引起的源谐振器的被加载 $Q_{s[d1]}$ 匹配(相等),并且相反地,必须使由于负载而引起的设备谐振器的加载 $Q\delta Q_{d[1]}$ 与由于源谐振器和发电机而引起的设备谐振器的被加载 $Q_{d[sg]}$ 匹配(相等),即

$$[0139] \quad \delta Q_{s[g]} = Q_{s[d1]} \text{ 且 } \delta Q_{d[1]} = Q_{d[sg]}.$$

[0140] 这些等式将通过发电机的源谐振器,以及通过负载的设备谐振器的最佳加载率确定为

$$[0141] \quad U_{d[l]} = \kappa_d/\Gamma_d = Q_d/\delta Q_{d[l]} = \sqrt{1+U^2} = \sqrt{1+(\kappa/\sqrt{\Gamma_s\Gamma_d})^2} = Q_s/\delta Q_{s[g]} = \kappa_s/\Gamma_s = U_{s[g]}.$$

[0142] 请注意,以上频率匹配和 Q 匹配条件在电气工程中被一起称为“阻抗匹配”。

[0143] 在上述条件下,最大化效率是源与设备谐振器之间的仅强耦合因数的单调递增函数, $U = \kappa / \sqrt{\Gamma_s \Gamma_d} = k \sqrt{Q_s Q_d}$, 并且由 $\eta = U^2 / (1 + \sqrt{1 + U^2})^2$ 给出, 如图 5 所示。请注意, 耦合效率 η 在 U 大于 0.2 时大于 1%, 在 U 大于 0.7 时大于 10%, 在 U 大于 1 时大于 17%, 在 U 大于 3 时大于 52%, 在 U 大于 9 时大于 80%, 在 U 大于 19 时大于 90%, 并且在 U 大于 45 时大于 95%。在某些应用中, 可以将其中 $U > 1$ 的操作区称为“强耦合”区。

[0144] 由于在某些情况下期望大的 $U = \kappa / \sqrt{\Gamma_s \Gamma_d} = (2\kappa / \sqrt{\omega_s \omega_d}) \sqrt{Q_s Q_d}$, 所以可以使用高 Q 的谐振器。每个谐振器的 Q 可以是高的。谐振器的 Q 的几何平均数 $\sqrt{Q_s Q_d}$ 也可以是或替代地是高的。

[0145] 耦合因数 k 是 $0 \leq k \leq 1$ 之间的数, 并且其可以独立于 (或几乎独立于) 源和设备谐振器的谐振频率, 确切地说, 其可以主要由其相对几何结构和调解其耦合的场的物理衰变定律来确定。相比之下, 耦合系数 $\kappa = k \sqrt{\omega_s \omega_d} / 2$ 可以是谐振频率的强函数。可以优选地将谐振器的谐振频率选择为实现高 Q 而不是实现低 Γ , 因为这两个目标在两个单独的谐振频率区处是可实现的。

[0146] 可以将高 Q 谐振器定义为具有 $Q > 100$ 的谐振器。两个耦合谐振器可称为高 Q 谐振器的系统, 当其中每个谐振器具有大于 100 的 $Q_s, Q_d > 100$ 且 $Q_d > 100$ 时。在其它实施方式中, 当谐振器的 Q 的几何平均数大于 100 时, $\sqrt{Q_s Q_d} > 100$, 可以将两个耦合谐振器称为高 Q 谐振器的系统。

[0147] 可以将谐振器命名或编号。可以将其称为源谐振器、设备谐振器、第一谐振器、第二谐振器、重发器谐振器等。应理解的是虽然在图 1 中示出两个谐振器, 但在以下许多示例中, 其它实施方式可以包括三个 (3) 或更多谐振器。例如, 单个源谐振器 102S 可以将能量转移至多个设备谐振器 102D 或多个设备。可以将能量从第一设备转移至第二个, 然后从第二设备转移至第三个, 以此类推。多个源可以将能量转移至单个设备或连接到单个设备谐振器的多个设备或连接到多个设备谐振器的多个设备。谐振器 102 可以交替地或同时地作为源、设备, 或者其可以用来将功率从一个位置上的源中继到另一位置上的设备。可以使用中间电磁谐振器 102 来扩展无线能量转移系统的距离范围。多个谐振器 102 可以被菊链式连接在一起, 在扩展的距离上与大范围的源和设备交换能量。高功率水平可以被在多个源 102S 之间拆分, 转移至多个设备并在远距离位置处重新组合。

[0148] 可以单个源和单个设备谐振器的分析扩展至多个源谐振器和 / 或多个设备谐振器和 / 或多个中间谐振器。在此类分析中, 结论可以是所述多个谐振器的至少某些或全部之间的大的强耦合因数 U_{mn} 对于无线能量转移中的高系统效率而言是优选的。再次地, 实施方式可以使用具有高 Q 的源、设备和中间谐振器。每个谐振器的 Q 可以是高的。用于谐振器对 m 和 n (对于它们而言期望大的 U_{mn}) 的 Q 的几何平均数 $\sqrt{Q_m Q_n}$ 也可以或替代地是高的。

[0149] 请注意, 由于可以由两个谐振器之间的耦合机制和每个谐振器的损耗机制的相对幅值来确定两个谐振器的强耦合因数, 所以可以在如上所述的谐振器附近存在无关对象的情况下扰动任何或所有这些机制的强度。

[0150] 延续来自前面部分的用于标记的惯例, 我们将 k 描述为在不存在无关对象或材料的情况下的耦合因数。我们将存在无关对象的情况下的耦合因数 p 表示为 $k_{(p)}$, 并且将其

称为“被扰动耦合因数”或“被扰动 k ”。请注意,必要时还可以将耦合因数 k 表征为“未扰动”,以与被扰动耦合因数 $k_{(p)}$ 区别开。

[0151] 我们定义 $\delta k_{(p)} \equiv k_{(p)} - k$, 并且我们将其称为由于无关对象 p 而引起的“耦合因数的扰动”或“ k 的扰动”。

[0152] 我们还定义 $\beta_{(p)} \equiv k_{(p)} / k$, 并且我们将其称为“耦合因数不灵敏度”或“ k 不灵敏度”。诸如 $\beta_{12(p)}$ 的下标指示被扰动和未扰动耦合因数所涉及的谐振器, 即 $\beta_{12(p)} \equiv k_{12(p)} / k_{12}$ 。

[0153] 同样地, 我们将 U 描述为不存在无关对象的情况下的强耦合因数。我们将存在无关对象的情况下的强耦合因数 p 表示为 $U_{(p)}$, $U_{(p)} = k_{(p)} \sqrt{Q_{1(p)} Q_{2(p)}}$, 并且我们将其称为“被扰动强耦合因数”或“被扰动 U ”。请注意, 必要时还可以将强耦合因数 U 表征为“未扰动”, 以与被扰动强耦合因数 $U_{(p)}$ 区别开。请注意, 必要时还可以将强耦合因数 U 表征为“未扰动”, 以与被扰动强耦合因数 $U_{(p)}$ 区别开。

[0154] 我们定义 $\delta U_{(p)} \equiv U_{(p)} - U$ 并将其称为由于无关对象 p 而引起的“强耦合因数的扰动”或“ U 的扰动”。

[0155] 我们还定义 $\Xi(p) \equiv U_{(p)} / U$ 并将其称为“强耦合因数不灵敏度”或“ U 不灵敏度”。诸如 $\Xi_{12(p)}$ 的下标指示被扰动和未扰动耦合因数所涉及的谐振器, 即 $\Xi_{12(p)} \equiv U_{12(p)} / U_{12}$ 。

[0156] 可以由给出未扰动系统的效率的相同公式给出被扰动系统中的能量交换的效率, 其中, 诸如强耦合因数、耦合因数和品质因数的所有参数由其被扰动等价参数所代替。例如, 在包括一个源和一个设备谐振器的无线能量转移的系统中, 可以将最佳效率计算为 $\eta_{(p)} = \left[U_{(p)} / \left(1 + \sqrt{1 + U_{(p)}^2} \right) \right]^2$ 。因此, 在被无关对象扰动的无线能量交换的系统中, 对于无线能量转移中的高系统效率而言, 可能期望至少某些或全部的多个谐振器之间的大的扰动强耦合因数 $U_{mn(p)}$ 。源、设备和 / 或中间谐振器可以具有高 $Q_{(p)}$ 。

[0157] 某些无关扰动有时对于被扰动强耦合因数而言是不利的 (经由耦合因数或品质因数的大的扰动)。因此, 可以使用技术来减少无关扰动对系统的影响并保持大的强耦合因数不灵敏度。

[0158] 能量交换效率

[0159] 有用能量交换中的所谓“有用能量”是必须被转移至一个或多个设备以便对设备供电或充电的能量或功率。对应于有用能量交换的转移效率可以是系统或应用相关的。例如, 转移几千瓦的功率的高功率交通工具充电应用可能需要具有至少 80% 的效率以便供应有用的功率量, 带来足够向交通工具电池重新充电的有用能量交换, 而不显著地对转移系统的各种组件加热。在某些消费者的电子装置应用中, 有用能量交换可以包括任何大于 10% 的能量转移效率, 或者任何其它可接受的保持可再充电电池“填满 (topped off)”并长时间运行的量。对于某些无线传感器应用而言, 比 1% 小得多的转移效率可能适合于从位于距离传感器相当远的距离处的单个源向多个低功率传感器供电。对于不可能有线功率转移或有线功率转移不切实际的其它应用而言, 大范围的转移效率对于有用能量交换而言可以是可接受的, 并且可认为是向那些应用中的设备供应有用功率。通常, 操作距离是根据本文所述的原理保持或能够保持有用功率交换的任何距离。

[0160] 用于供电或再充电应用中的无线能量转移的有用能量交换可以是高效、高度高效

或足够高效的,只要浪费的能量水平、热耗散和相关场强度在可容许极限内即可。可容许极限可以取决于应用、环境和系统位置。用于供电或再充电应用中的无线能量转移的有用能量交换可以是高效、高度高效或足够高效的,只要对于合理的成本限制、重量限制、尺寸限制等而言可以获得期望的系统性能即可。可以相对于使用非高 Q 系统的传统感应技术所能实现的来确定高效的能量转移。然后,如果递送了比在传统感应方案中由类似尺寸的线圈结构在类似距离或对准偏移内可以递送的能量更多的能量,则可以将能量转移定义为高效、高度高效或足够高效的。

[0161] 请注意,即使某些频率和 Q 匹配条件可以使能量转移的系统效率最优化,也不需要完全满足这些条件以便具有用于有用能量交换的足够高效的能量转移。只要谐振频率的相对偏移($|\omega_m - \omega_n|/\sqrt{\omega_m \omega_n}$)小于 $1/Q_{m(p)}$, $1/Q_{n(p)}$ 和 $k_{mn(p)}$ 之中的近似最大值,就可以实现高效的能量交换。对于高效能量交换而言, Q 匹配条件可以不像频率匹配条件那么严格。由发电机和/或负载而引起的谐振器的强加载因数 $U_{m[1]}$ 可以偏离其最优值但仍具有足够高效的能量交换的程度取决于特定的系统,是否所有或某些发电机和/或负载都是 Q 不匹配的等。

[0162] 因此,谐振器的谐振频率可以不是完全匹配的,而是在以上容差内是匹配的。由于发电机和/或负载而引起的至少某些谐振器的强加载因数可以不是完全与其最优值匹配的。电压水平、电流水平、阻抗值、材料参数等可以不处于在本公开中描述的精确值,但是将在那些值的某些可接受容差内。除效率、 Q 、频率、强耦合因数等考虑因素之外,系统最优化可以包括成本、尺寸、重量、复杂性等考虑因素。某些系统性能参数、规格和设计可能远非最佳的,以便使其它系统性能参数、规格和设计最优化。

[0163] 在某些应用中,至少某些系统参数可以在时间上改变,例如因为诸如源或设备的组件可能移动或老化,或者因为负载可能是可变的,或者因为扰动或环境条件正在改变等。在这些情况下,为了实现可接受匹配条件,可能需要至少某些系统参数是可动态地调整或调谐的。所有系统参数可以是可动态地调整或调谐的以实现近似的最佳工作条件。然而,基于上述讨论,即使某些系统参数不是可变的,也可以实现足够高效的能量交换。在某些例子中,至少某些设备可以不被动态地调整。在某些例子中,至少某些源可以不被动态地调整。在某些例子中,至少某些中间谐振器可以不被动态地调整。在某些例子中,系统参数中没有一个是可以被动态地调整。

[0164] 电磁谐振器

[0165] 用来交换能量的谐振器可以是电磁谐振器。在此类谐振器中,由谐振器的吸收(或电阻)损耗和辐射损耗来给出固有能量衰变率 Γ_m 。

[0166] 可以将谐振器构造为使得由电场存储的能量被主要约束在结构内且由磁场存储的能量主要在谐振器周围的区域中。然后,主要由谐振磁近场来调解能量交换。可以将这些类型的谐振器称为磁谐振器。

[0167] 可以将谐振器构造为使得由磁场存储的能量被主要约束在结构内且由电场存储的能量主要在谐振器周围的区域中。则主要由谐振电近场来调解能量交换。可以将这些类型的谐振器称为电谐振器。

[0168] 请注意,由谐振器存储的总电能和磁能必须是相等的,但是其局部化可以是相当不同的。在某些情况下,可以使用在距谐振器一定距离处指定的平均电场能与平均磁场能

的比来表征或描述谐振器。

[0169] 电磁谐振器可以包括电感元件、分布电感或具有电感 L 的电感的组合、以及电容元件、分布电容、或具有电容 C 的电容的组合。在图 6a 中示出了电磁谐振器 102 的最小电路模型。谐振器可以包括电感元件 108 和电容元件 104。被提供诸如存储在电容器 104 中的电场能的初始能量, 系统将随着电容器放电而振荡, 将能量转移至存储在电感器 108 中的磁场能中, 电感器 108 又将能量转移回至存储在电容器 104 中的电场能。

[0170] 可以将图 6(b) (c) (d) 所示的谐振器 102 称为磁谐振器。对于居住环境中的无线能量转移应用而言, 磁谐振器可能是优选的, 因为包括动物、植物和人的大多数日常材料是非磁性的 (即 $\mu_r \approx 1$), 因此其与磁场的交互是最小的, 并且主要是由于由磁场的时变而感生的涡流 (其为二阶效应)。由于安全原因, 并且由于其降低了与可能改变系统性能的无关环境对象和材料的交互的可能, 此特性是重要的。

[0171] 图 6d 示出与示例性磁谐振器 102B 相关联的某些电场和磁场线的简化图。磁谐振器 102B 可以包括充当电感元件 108 和电容元件 104 (在导体环路的末端处) 的导体环路。请注意, 本图描绘了被存储在磁场中的谐振器周围区域中的大部分能量和被存储在电场中的谐振器中 (电容器极板之间) 的大部分能量。由于边缘场、自由电荷和时变磁场而引起的某些电场可以被存储在谐振器周围的区域中, 但是可以将磁谐振器设计为使电场局限于尽可能地接近于谐振器或在谐振器本身内。

[0172] 电磁谐振器 102 的电感器 108 和电容器 104 可以是体电路元件, 或者电感和电容可以是分布式的, 并且可以由在结构中对导体进行形成、成形和定位的方式而产生。例如, 如图 6(b) (c) (d) 所示, 可以通过将导体成形为封闭表面面积来实现电感器 108。可以将此类谐振器 102 称为电容加载环路电感器。请注意, 我们可以使用术语“环路”或“线圈”来泛指导电结构 (导线、管、条带等), 其以任何匝数封闭任何形状和尺寸的表面。在图 6b 中, 封闭的表面区域是圆形的, 但是该表面可以是多种其它形状和尺寸中的任何一个, 并且可以被设计为实现某些系统性能规格。作为指示电感如何随着物理尺寸缩放的示例, 用于被布置为形成圆形单匝环路的一段圆形导体的电感近似为

$$[0173] \quad L = \mu_0 x \left(\ln \frac{8x}{a} - 2 \right),$$

[0174] 其中, μ_0 是自由空间的磁导率, x 是封闭的圆形表面区域的半径, 并且 a 是用来形成电感器环路的导体的半径。可以分析性或数值性地计算环路的更精确电感值。

[0175] 可以分析性或数值性地计算用于被布置为形成其它封闭表面形状、面积、尺寸等并具任何匝数的其它横截面导体的电感, 或可以通过测量来确定该电感。可以使用电感器元件、分布式电感、网络、阵列、电感器和电感的串联和并联组合等来实现电感。电感可以是固定的或可变的, 并且可以用来改变阻抗匹配以及谐振频率工作条件。

[0176] 存在多种方式来实现为达到谐振器结构的期望谐振频率所需的电容。可以如图 6b 所示地形成和利用电容器极板 110, 或者如图 6c 所示, 可以在多环路导体 114 的相邻绕组之间分布并实现电容。可以使用电容器元件、分布式电容、网络、阵列、电容的串联和并联组合等来实现电容。电容可以是固定的或可变的, 并且可以用来改变阻抗匹配以及谐振频率工作条件。

[0177] 应理解的是电磁谐振器 102 中的电感和电容可以是集总的、分布式的或集总和分

布式电感和电容的组合,并且可以通过本文所述的各种元件、技术和效果的组合来实现电磁谐振器。

[0178] 电磁谐振器 102 可以包括电感器、电感、电容器、电容以及诸如电阻器、二极管、开关、放大器、二极管、晶体管、变压器、导体、连接器等附加电路元件。

[0179] 电磁谐振器的谐振频率

[0180] 电磁谐振器 102 可以具有由其物理性质确定的特性、自然或谐振频率。此谐振频率是谐振器存储的能量在电场存储的能量 W_e ($W_e = q^2/2C$, 其中, q 是电容器 C 上的电荷) 与谐振器的磁场存储的能量 W_b ($W_b = Li^2/2$, 其中, i 是通过电感器 L 的电流) 之间振荡的频率。在系统中不存在任何损耗的情况下, 将连续地在电容器 104 中的电场与电感器 108 中的磁场之间交换能量。交换此能量的频率可以称为谐振器的特性频率、自然频率或谐振频率, 并且由 ω 给出,

$$[0181] \quad \omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

[0182] 可以通过调谐谐振器的电感 L 和 / 或电容 C 来改变谐振器的谐振频率。可以将谐振频率设计为在由 FCC 指定的所谓 ISM (工业、科学和医疗) 频率下操作。可以将谐振器频率选择为满足某些场极限规格、比吸收率 (SAR) 极限规格、电磁兼容性 (EMC) 规格、电磁干扰 (EMI) 规格、组件尺寸、成本或性能规格等。

[0183] 电磁谐振器的品质因数

[0184] 图 6 所示的谐振器 102 中的能量可以衰减, 或者由于包括吸收性损耗 (也称为欧姆或电阻损耗) 和 / 或辐射性损耗在内的固有损耗而被损耗。表征能量衰减的谐振器的品质因数或 Q 与这些损耗成反比。吸收性损耗可以是由用来形成电感器的导体的有限电导率以及谐振器中的其它元件、组件、连接器等中的损耗引起的。可以将由低损耗材料形成的电感器称为“高 Q 电感元件”, 并且可以将具有低损耗的元件、组件、连接器等称为具有“高电阻 Q ”。通常, 可以将谐振器的总吸收性损耗计算为构成谐振器的各种元件和组件的电阻性损耗的适当串联和 / 或并联组合。也就是说, 在不存在任何显著的辐射性或组件 / 连接损耗的情况下, 可以由 Q_{abs} 来给出谐振器的 Q ,

$$[0185] \quad Q_{abs} = \frac{\omega L}{R_{abs}},$$

[0186] 其中, ω 是谐振频率, L 是谐振器的总电感, 并且例如可以由 $R_{abs} = l\rho/A$ 给出用于用来形成电感器的导体的电阻 (l 是导线的长度, ρ 是导体材料的电阻率, 并且 A 是电流在导线中流动的横截面面积)。对于交流电而言, 电流在其上流动的横截面面积可以由于趋肤效应而小于导体的物理横截面面积。因此, 高 Q 磁谐振器可以由具有高导电性、相对大的表面面积和 / 或具有具体设计的轮廓 (例如利兹线) 的导体组成以使接近效应最小化并减小 AC 电阻。

[0187] 磁谐振器结构可以包括由高导电性导线、涂层线、利兹线、带、条或板、管、涂料、凝胶、迹线等组成的高 Q 电感元件。磁谐振器可以是自谐振的, 或者其可以包括诸如电容器、电感器、开关、二极管、晶体管、变压器等的外部耦合元件。磁谐振器可以包括分布式和集总电容和电感。通常, 将由谐振器的所有单独组件的 Q 来确定谐振器的 Q 。

[0188] 由于 Q 与电感 L 成比例, 所以可以将谐振器设计为在某些其它约束内增加 L 。例

如,增加 L 的一种方式是使用多于一匝的导体的来形成谐振器中的电感器。设计技术和权衡可以取决于应用,并且在高 Q 磁谐振器的设计中可以选择多种结构、导体、组件和谐振频率。

[0189] 在不存在显著吸收损耗的情况下,可以主要由辐射损耗来确定谐振器的 Q,并且由 $Q_{\text{rad}} = \omega L / R_{\text{rad}}$ 来给出,其中, R_{rad} 是谐振器的辐射损耗,并且可以取决于谐振器相对于操作的频率 ω 或波长 λ 的尺寸。对于上文讨论的磁谐振器而言,辐射损耗可以随着 $R_{\text{rad}} \sim (x/\lambda)^4$ (磁偶极子辐射的特性) 而缩放,其中, x 是谐振器的特性尺寸,诸如图 6b 所示的电感元件的半径,并且这里 $\lambda = c/f$,其中, c 是光速且 f 是如上文所定义的。磁谐振器的尺寸可以比操作的波长小得多,因此辐射损耗可以非常小。可以将此类结构称为子波长谐振器。辐射可以是用于非辐射无线能量转移系统的损耗机制,并且可以将设计选择为减小 R_{rad} 或使其最小化。请注意,对于非辐射无线能量转移方案而言,高 Q_{rad} 可能是期望的。

[0190] 还请注意,用于非辐射无线能量转移的谐振器的设计不同于出于通信或远场能量传输的目的设计的天线。具体地,可以使用电容加载导电环路作为谐振天线(例如,在蜂窝电话中),但是对于那些在远场区中操作的,其中辐射 Q 被故意地设计成小的以使得天线在辐射能量下是高效的。此类设计不适合于在本申请中公开的高效近场无线能量转移技术。

[0191] 包括辐射和吸收损耗两者的谐振器的品质因数是 $Q = \omega L / (R_{\text{abs}} + R_{\text{rad}})$ 。请注意,对于特定谐振器而言可以存在最大 Q,并且可以出于对谐振器的尺寸、用来构造谐振器的材料和元件、工作频率、连接机构等的特殊考虑来设计谐振器,以便实现高 Q 谐振器。图 7 示出可以用于 MHz 频率处的无线功率传输的示例性磁谐振器(在这种情况下,为由具有 4cm 的外径(OD)的铜管制成的具有 60cm 的直径的线圈)的 Q 的绘图。吸收性 Q(虚线)702 随着频率增加,而辐射性 Q(点线)704 随着频率减小,因此,促使总的 Q 在特定频率处达到峰值 708。请注意,此示例性谐振器的 Q 在大频率范围内是大于 100 的。可以将磁谐振器设计为在一定的频率范围内具有高 Q,并且可以将系统工作频率设置为该范围内的任何频率。

[0192] 当在损耗率方面来描述谐振器时,如前所述,可以使用固有衰变率 2Γ ,来定义 Q。固有衰变率是未耦合和未驱动谐振器损失能量的速率。对于上述磁谐振器而言,可以由 $\Gamma = (R_{\text{abs}} + R_{\text{rad}}) / 2L$ 来给出固有损耗,并且由 $Q = \omega / 2\Gamma$ 来给出谐振器的品质因数 Q。

[0193] 请注意,可以将仅与特定损耗机制有关的品质因数表示为 $Q_{\text{mechanism}}$ (如果未指定谐振器)或 $Q_{1, \text{mechanism}}$ (如果指定了谐振器(例如谐振器 1))。例如, $Q_{1, \text{rad}}$ 是用于谐振器 1 的品质因数,与其辐射损耗有关。

[0194] 电磁谐振器近场

[0195] 在这里公开的近场无线能量转移系统中使用的高 Q 电磁谐振器可以是子波长对象。也就是说,谐振器的物理尺寸可以比对应于谐振频率的波长小得多。子波长磁谐振器可以将谐振器周围的区域中的大部分能量存储在其磁近场中,并且还可以将这些场描述为固定不动或不传播的,因为其不远离谐振器进行辐射。通常由波长来设置谐振器周围区域中的近场的范围,因此对于子波长谐振器而言,近场的范围可以延伸超过谐振器本身很多。可以将其中场特性从近场特性变成远场特性的限制表面称为“辐射焦散曲面(radiation caustic)”。

[0196] 更加远离谐振器时,近场的强度减小。虽然谐振器近场的场强度随远离谐振器而衰减,但是场仍可以与进入谐振器的一般附近区域的对象相交互。场进行交互的程度取决

于多种因素,其中的某些是可以控制和设计的,而某些不可以。当耦合谐振器之间的距离使得一个谐振器在另一个的辐射焦散表面内时,可以实现本文所述的无线能量转移方案。

[0197] 电磁谐振器的近场分布可以类似于一般与偶极子谐振器或振荡器相关联的那些场分布。可以将此类场分布描述为全向的,意味着场的幅值在离开对象的所有方向上是非零的。

[0198] 电磁谐振器的特性尺寸

[0199] 足够Q的空间分离和/或偏移的磁谐振器可以在比在现有技术中所见的大得多的距离上实现高效的无线能量转移,即使谐振器结构的尺寸和形状是不同的。还可以操作此类谐振器以实现在较短范围距离上的比前述技术可实现的更高效能量转移。我们将此类谐振器描述为能够实现中程能量转移。

[0200] 可以将中程距离定义为比转移中涉及的谐振器中的最小的一个的特性尺寸大的距离,其中,测量从一个谐振器结构的中心到空间分离的第二谐振器结构的中心的距离。在此定义中,当由其电感元件限制的区域未相交时,二维谐振器是空间分离的,并且当其体积未相交时,三维谐振器是空间分离的。当由二维谐振器限制的区域在三维谐振器的体积之外时,前者与后者被空间分离。

[0201] 图8示出其特性尺寸被标记的某些示例性谐振器。应理解的是可以在导体的尺寸和由磁谐振器中的电感元件限制或封闭的面积及形成电谐振器的电容元件的导体的长度方面定义谐振器102的特性尺寸802。然后,谐振器102的特性尺寸 $802x_{char}$ 可以等于能够分别拟合在磁或电谐振器的电感或电容元件周围的最小球体的半径,并且谐振器结构的中心是该球体的中心。谐振器102的特性厚度 $804t_{char}$ 可以是其所在的平坦表面测量的磁或电容谐振器各自的电感或电容元件的最高点的最小可能高度。谐振器102的特性宽度 $808w_{char}$ 可以是最小可能圆圈的半径,磁或电谐振器各自的电感或电容元件可以在沿着直线行进的同时通过该最小可能圆圈。例如,圆柱形谐振器的特性宽度808可以是圆柱的半径。

[0202] 在本发明的无线能量转移技术中,可以在大的距离范围内高效地交换能量,但是本技术以在中程距离上并在具有不同物理尺寸、组件和取向的谐振器之间交换有用能量以便对设备进行供电或再充电的能力而著名。请注意,虽然在这些情况下k可能是小的,但是可以通过使用高Q谐振器来实现高U而实现强耦合和高效的能量转移, $U = k\sqrt{Q_s Q_d}$ 。也就是说,可以使用Q的增加来至少部分地克服k的减小,以保持有用的能量转移效率。

[0203] 还请注意,虽然可以将单个谐振器的近场描述为全向的,但两个谐振器之间的能量交换的效率可以取决于谐振器的相对位置和取向。也就是说,可以针对谐振器的特定相对取向使能量交换的效率最大化。可以在k或κ的计算中捕捉转移效率对两个无补偿谐振器的相对位置和取向的灵敏度。虽然可以在相互之间偏移和/或旋转的谐振器之间实现耦合,但交换的效率可以取决于定位的细节和在操作期间实现的任何反馈、调谐和补偿技术。

[0204] 高Q磁谐振器

[0205] 在子波长电容加载环路磁谐振器的近场区中($x \ll \lambda$),与由N匝导线(其半径大于趋肤深度)组成的圆形导电环路电感器相关联的电阻约为 $R_{abs} = \sqrt{\mu_0 \rho \omega / 2} \cdot Nx / a$ 和 $R_{rad} = \pi / 6 \cdot \eta_0 N^2 (\omega x / c)^4$,其中, ρ 是导体材料的电阻率且 $\eta_0 \approx 120 \pi \Omega$ 是自由空间的阻抗。用于此类N匝环路的电感L约为先前给出的单匝环路的电感的 N^2 倍。此类谐振器的

品质因数 $Q = \omega L / (R_{\text{abs}} + R_{\text{rad}})$ 对于由系统参数 (图 4) 确定的特定频率而言是最高的。如前所述,在较低频率处,主要由吸收损耗来确定 Q ,并且在较高频率处,主要由辐射损耗来确定 Q 。

[0206] 请注意,上文给出的公式是近似的,并且意在说明 R_{abs} 、 R_{rad} 和 L 对结构的物理参数的函数依赖关系。对于谐振器结构的精确设计而言,将与严格准静态极限 (例如沿着导体的非均匀电流 / 电荷分布) 的偏差考虑在内的这些参数的更准确数值计算可能是有用的。

[0207] 请注意,可以通过使用低损耗导体来形成电感元件而使吸收性损耗最小化。例如,可以通过使用诸如电感管、条、带、机械加工对象、板等的大表面面积导体、通过使用诸如利兹线、编织线、任何横截面的导线和具有低接近损耗的其它导体的特别设计导体 (在这种情况下上述频率缩放性质可也是不同的) 以及通过使用诸如高纯度铜和银的低电阻率材料来使导体的损耗最小化。在较高工作频率处使用导电管作为导体的一个优点是其可以比类似直径的实心导体更便宜且更轻,并且可以具有类似的电阻,因为大部分电流由于趋肤效应而沿着导体的外表面行进。

[0208] 为了获得由铜线或铜管制成并适合于在微波区中操作的可实现的谐振器设计的粗略估计,可以计算用于由各种横截面的铜线 ($\rho = 1.69 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$) 的一个圆形电感元件 ($N = 1$) 组成的谐振器的最佳 Q 和谐振频率。然后,对于具有特性尺寸 $x = 1 \text{cm}$ 和导体直径 $a = 1 \text{mm}$ 的电感元件 (例如适合于蜂窝电话) 而言,当 $f = 380 \text{MHz}$ 时,品质因数在 $Q = 1225$ 处达到峰值。对于 $x = 30 \text{cm}$ 和 $a = 2 \text{mm}$,可能适合于膝上型计算机或家用机器人的电感元件尺寸而言,在 $f = 17 \text{MHz}$ 处, $Q = 1103$ 。对于例如可能位于天花板中的较大源电感元件而言, $x = 1 \text{m}$ 且 $a = 4 \text{mm}$,在 $f = 5 \text{MHz}$ 处, Q 可以高达 $Q = 1315$ 。请注意,许多实际示例在 $\lambda/x \approx 50-80$ 处提供 $Q \approx 1000-1500$ 的预期品质因数。比上述的更多种类的线圈形状、尺寸、材料和工作频率的测量显示,使用一般可获得的材料,可以针对多种磁谐振器结构实现 $Q > 100$ 。

[0209] 如上所述,可以由 κ 来给出用于具有特性尺寸 x_1 和 x_2 且在其中心之间分离距离 D 的两个谐振器之间的能量转移的速率。为了给出定义参数如何缩放的示例,在三 (3) 个距离处,考虑来自上文的蜂窝电话、膝上型计算机和天花板谐振器示例; $D/x = 10, 8, 6$ 。在这里考虑的示例中,源和设备谐振器是相同的尺寸 ($x_1 = x_2$) 和形状,并且如图 1 (b) 所示地取向。在蜂窝电话的示例中,分别地, $\omega/2\kappa = 3033, 1553, 655$ 。在膝上型计算机示例中,分别地, $\omega/2\kappa = 7131, 3651, 1540$, 并且对于天花板谐振器示例而言, $\omega/2\kappa = 6481, 3318, 1400$ 。相应的耦合损耗比在其中电感元件 Q 达到峰值的频率处达到峰值,并且,对于上述的三个电感元件尺寸和距离而言, $\kappa/\Gamma = 0.4, 0.79, 1.97$ 和 $0.15, 0.3, 0.72$ 和 $0.2, 0.4, 0.94$ 。使用不同尺寸的电感元件的示例是分开距离 $D = 3 \text{m}$ (例如房间高度) 的 $x_1 = 1 \text{m}$ 电感器 (例如天花板中的源) 和 $x_2 = 30 \text{cm}$ 电感器 (例如,地板上的家用机器人)。在本示例中,对于近似 14% 的效率而言,在 $f = 6.4 \text{MHz}$ 的最佳工作频率处,强耦合质量因数 (figure of merit), $U = \kappa / \sqrt{\Gamma_1 \Gamma_2} = 0.88$ 。这里,最佳系统工作频率在单独谐振器 Q 的峰值之间。

[0210] 可以形成在高 Q 磁谐振器中使用的电感元件。我们已经示范了基于被形成为封闭表面的电感元件的铜导体的多种高 Q 磁谐振器。可以使用以多种形状布置的多种导体 (封闭任何尺寸或形状的区域) 来形成电感元件,并且它们可以是单匝或多匝元件。在图 9 中示出示例性电感元件 900A-B 的图。可以将电感元件形成为封闭圆形、矩形、正方形、三角形、

具有圆角的形状、遵循特定结构和设备的轮廓的形状、遵循、填充或利用结构或设备内的专用空间的形状等。可以针对尺寸、成本、重量、外观、性能等使设计最优化。

[0211] 这些导体可以被弯曲或形成为期望的尺寸、形状和匝数。然而,可能难以使用手动技术来准确地再现导体形状和尺寸。另外,可能难以在电感元件的相邻匝中的导体段之间保持均匀或期望的中心间距。例如,准确或均匀的间距在确定结构的自电容以及任何接近效应感生的 AC 电阻的增加方面可能是重要的。

[0212] 可以使用模具 (mold) 来复制用于高 Q 谐振器设计的电感器元件。另外,可以使用模具来准确地将导体成形为任何种类的形状而不在导体中产生扭结、扣子或其它潜在的有害效果。可以使用模具来形成电感器元件,并且然后可以从这些模板 (form) 中去除电感器元件。一旦被去除,就可以将这些电感元件构建成可以容纳高 Q 磁谐振器的外壳或设备。所形成的元件还可以或替代地保持在用来形成它们的模具中。

[0213] 可以使用标准 CNC (计算机数控) 打槽 (routing) 或磨铣工具或用于成块地切割或形成凹槽的任何其它已知技术来形成模具。还可以或替代地使用机器加工技术、注塑成型技术、铸造技术、浇铸技术、真空技术、热成型技术、原位切割技术、压缩成型技术等来形成模具。

[0214] 可以从模具去除所形成的元件,或者其可以保持在模具中。可以用内部的电感元件来修改模具。可以对模具进行覆盖、机器加工、附着、涂漆等。可以将模具和导体组合集成到另一外壳、结构或设备中。切割到模具中的凹槽可以是任何尺寸,并且可以被设计以将导电管、导线、条、带、块等形成为期望的电感器形状和尺寸。

[0215] 在磁谐振器中使用的电感元件可以包含不止一个环路,并且可以向内或向外或向上或向下或沿着某些方向组合螺旋。通常,磁谐振器可以具有多种形状、尺寸和匝数,并且其可以由多种导电材料组成。

[0216] 磁谐振器可以是独立式的,或者其可以被封闭在外壳、容器、套筒或壳体中。磁谐振器可以包括用来制造电感元件的模板。这些不同的模板和外壳可以由几乎任何种类的材料组成。对于某些应用而言,诸如特氟隆、REXOLITE、苯乙烯等低损耗材料可能是优选的。这些外壳可以包含保持电感元件的固定装置。

[0217] 磁谐振器可以由铜线或铜管的自谐振线圈组成。由自谐振导线线圈组成的磁谐振器可以包括长度为 l 的导线和半径为 a 的横截面,被缠绕成半径 x 、高度 h 和匝数 N 的螺旋形线圈,其可以例如被表征为

$$[0218] \quad N = \sqrt{l^2 - h^2} / 2\pi x。$$

[0219] 可以将磁谐振器结构配置为使得 x 约为 30cm, h 约为 20cm, a 约为 3mm 且 N 约为 5.25,并且在操作期间,被耦合到磁谐振器的电源可以以谐振频率 f 驱动谐振器,其中 f 约为 10.6MHz。在 x 约为 30cm, h 约为 20cm, a 约为 1cm 且 N 约为 4 的情况下,可以以频率 f 驱动谐振器,其中 f 约为 13.4MHz。在 x 约为 10cm, h 约为 3cm, a 约为 2cm 且 N 约为 6 的情况下,可以以频率 f 驱动谐振器,其中 f 约为 21.4MHz。

[0220] 可以使用印刷电路板迹线来设计高 Q 电感元件。与机械地形成的电感元件相比,印刷电路板迹线可以具有多种优点,包括可以使用已确定的印刷电路板制造技术将其准确地再现并容易地集成,可以使用自定义设计的导体迹线来减小其 AC 电阻,并且可以显著地降低对其进行大量生产的成本。

[0221] 可以在诸如 FR-4(环氧树脂 E-型玻璃)、多功能环氧树脂、高性能环氧树脂、双马来酰亚胺三嗪树脂/环氧树脂、聚酰亚胺、氰酸盐酯、聚四氟乙烯(Teflon)、FR-2、FR-3、CEM-1、CEM-2、Rogers、Resolute 等任何 PCB 材料上使用标准 PCB 技术来制造高 Q 电感元件。可以在具有较低损耗角正切的印刷电路板材料上形成导体迹线。

[0222] 导体迹线可以由铜、银、金、铝、镍等组成,并且其可以由油漆、油墨或其它固化材料组成。电路板可以是柔性的,并且其可以是可挠式电路。可以通过化学沉积、蚀刻、平版印刷、喷雾沉积、切割等来形成导电迹线。可以应用导电迹线来形成期望的图案,并且其可以使用晶体和结构生长技术来形成。

[0223] 可以将导电迹线的维度以及包含导电迹线的层的数目、那些迹线的位置、尺寸和形状以及用于将其互连的架构设计为实现某些系统规格或使其最优化,诸如谐振器 Q 、 $Q_{(p)}$ 、谐振器尺寸、谐振器材料和制造成本、 U 、 $U_{(p)}$ 等。

[0224] 作为示例,如图 10(a) 所示,使用矩形铜迹线图案在四层印刷电路板上制造三匝高 Q 电感元件 1001A。用黑色示出铜迹线并用白色示出 PCB。本示例中的铜迹线的宽度和厚度分别约为 1cm(400mils) 和 $43\mu\text{m}$ (1.7mils)。单层上的导电迹线的匝之间的边缘间距约为 0.75cm(300mils),并且每个板层厚度约为 $100\mu\text{m}$ (4mils)。在板的每个层上重复图 10(a) 所示的图案,并且并联地连接导体。3 环路结构的外部尺寸约为 30cm 乘 20cm。此 PCB 环路的测量电感为 $5.3\mu\text{H}$ 。使用此电感器元件和可调谐电容器的磁谐振器在 6.78MHz 的其设计谐振频率处具有 550 的品质因数 Q 。可以通过改变磁谐振器中的电感和电容值来调谐谐振频率。

[0225] 作为另一示例,如图 10(b) 所示,使用矩形铜迹线图案在四层印刷电路板上制造两匝电感器 1001B。用黑色示出铜迹线并用白色示出 PCB。本示例中的铜迹线的宽度和高度分别约为 0.75cm(300mils) 和 $43\mu\text{m}$ (1.7mils)。单层上的导电迹线的匝之间的边缘间距约为 0.635cm(250mils),并且每个板层厚度约为 $100\mu\text{m}$ (4mils)。在板的每个层上重复图 10(b) 所示的图案,并且并联地连接导体。双环结构的外部尺寸约为 7.62cm 乘 26.7cm。此 PCB 环路的测量电感为 $1.3\mu\text{H}$ 。以约 0.635cm(250mils) 的垂直间隔将两个板堆叠在一起并将两个板串联地连接一起产生具有约 $3.4\mu\text{H}$ 的电感的 PCB 电感器。使用此堆叠电感器环路和可调谐电容器的磁谐振器在 6.78MHz 的其设计谐振频率处具有 390 的品质因数 Q 。可以通过改变磁谐振器中的电感和电容值来调谐谐振频率。

[0226] 可以使用任何尺寸、形状、厚度等的磁性材料和具有大范围的磁导率和损耗值的材料来形成电感元件。这些磁性材料可以是实心块,其可以封闭空心体积,其可以由许多被平铺或堆叠在一起的小片的磁性材料形成,并且可以将其与由高度导电的材料制成的导电片材或外壳集成。可以绕磁性材料缠绕导线以产生磁近场。可以将这些导线绕结构的一个或不止一个轴缠绕。可以将多个导线绕磁性材料缠绕且并联地或串联地或经由开关来组合以形成自定义近场图案。

[0227] 磁谐振器可以包括绕 3F3 铁氧体材料的 $19.2\text{cm} \times 10\text{cm} \times 5\text{mm}$ 平铺的块缠绕的 15 匝利兹线。可以沿着任何方向或方向的组合将利兹线绕铁氧体材料缠绕以实现期望的谐振器性能。导线的匝数、匝之间的间距、导线的类型、磁性材料的尺寸和形状及磁性材料的类型全部是可以针对不同的应用方案改变或最优化的设计参数。

[0228] 使用磁性材料结构的高 Q 磁谐振器

[0229] 可以使用组装的磁性材料来形成开放磁路（虽然是具有约为整个结构的尺寸的空隙的一个），以实现磁谐振器结构。在这些结构中，将高导电性材料绕由磁性材料制成的结构缠绕以形成磁谐振器的电感元件。可以将电容元件连接到高导电性材料，然后如上所述地确定谐振频率。这些磁谐振器在二维谐振器结构的平面中（而不是像在电容加载电感器环路谐振器的情况中一样与之垂直）具有其偶极矩。

[0230] 在图 11(a) 中示出单个平面谐振器结构的图。平面谐振器结构由磁性材料 1121 的芯 (core) 构成，诸如具有绕芯 1121 缠绕的导电材料 1122 的一个或多个环路的铁氧体。可以使用该结构作为转移功率的源谐振器和捕捉能量的设备谐振器。当被用作源时，可以将导体的末端耦合到电源。流过导体环路的交流电流激发交变磁场。当使用该结构来接收功率时，可以将导体的末端耦合到功率消耗装置或负载。改变磁场在绕芯磁性材料缠绕的导体的一个或多个环路中感生电动势。这些类型的结构的偶极矩在结构的平面中，并且例如沿着如图 11(a) 中的结构的 Y 轴定向。当基本上被放置在同一平面（即图 11 的 X、Y 平面）中时，两个此类结构具有强耦合。图 11(a) 的结构在当谐振器沿着其 Y 轴在同一平面对准时具有最适宜的取向。

[0231] 对于某些应用而言，所述平面谐振器的几何结构和耦合取向可能是优选的。平面或平坦谐振器形状可能更容易被集成到相对平坦和平面的许多电子设备中。可以在不要求设备的几何结构变化的情况下将平面谐振器集成到设备的整个背面或侧面。由于许多设备的平坦形状，在被放置在平面上时设备的自然位置是平放于与其所被放置的表面平行的其最大维度上。被集成到平坦设备中的平面谐振器自然地平行于表面的平面，并且相对于被放置在平坦表面上的其它设备的谐振器或平面谐振器源而言处于适宜的耦合取向。

[0232] 如所述的，平面谐振器的几何结构可以允许更容易的集成到设备中。其小断面 (low profile) 可以允许将谐振器集成到设备的整个侧面中或作为其整个侧面的一部分。当设备的整个侧面被谐振器覆盖时，磁通可以在不被可以是设备或设备电路的一部分的有损耗材料所阻碍的情况下流过谐振器芯。

[0233] 平面谐振器结构的芯可以具有多种形状和厚度，并且其可以是平坦或平面的，使得最小尺寸不超过结构的最大尺寸的 30%。芯可以具有复杂的几何结构，并且可以具有缺口、凹口、脊等。可以使用几何增强来减少对取向的耦合依赖性，并且它们可以被用来促进到设备、封装、包装、外壳、盖、表皮等的集成。在图 11(b) 中示出芯几何结构的两个示例性变化。例如，可以将平面芯 1131 成形为使得末端比结构的中间宽很多以产生用于导体绕组的缺口。芯材料可以具有变化的厚度，其中末端比中间粗且宽。芯材料 1132 可以具有各种深度、宽度和形状的任何数目的凹口或切口 1133 以容纳导体环路、外壳、封装等。

[0234] 还可以由被集成到其中的设备的尺寸和特性来规定芯的形状和尺寸。芯材料可以弯曲以遵循设备的轮廓，或者可以要求非对称的凹口或切口以允许有益于设备各部分的余隙。芯结构可以是单片整体的磁性材料，或者可以由被布置在一起的多个瓦 (tile)、块或片组成以形成较大结构。结构的不同的层、瓦、块或片可以是类似的材料，或者可以是不同的材料。可以期望在结构的不同位置上使用具有不同磁导率的材料。具有不同磁导率的芯结构可以对引导磁通、改善耦合并影响系统的有效区域的形状或范围有用。

[0235] 可以将平面谐振器结构的导体绕该芯缠绕至少一次。在某些情况下，可以优选的是缠绕至少三圈。导体可以是任何良导体，包括导线、利兹线、导电管、片、条、凝胶、墨、迹线

等。

[0236] 还可以通过使用阻挡、屏蔽或引导磁场的材料来进一步增强、改变或修改源的有效区域的尺寸、形状或维度。为了在源周围产生非对称有效区域,可以用磁屏蔽来覆盖源的侧面以减小沿特定方向的磁场的强度。该屏蔽可以是能够用来远离特定方向引导磁场的导体或导体与磁性材料的分层组合。由导体和磁性材料层组成的结构可以用来减少可能由于源的屏蔽而发生的能量损耗。

[0237] 可以将所述多个平面谐振器集成或组合成一个平面谐振器结构。可以将一个或多个导体绕芯结构缠绕,使得由两个导体形成的环路不是共轴的。此类结构的示例在图 12 中示出,其中,两个导体 1201、1202 被以正交角绕平面矩形芯 1203 缠绕。芯可以是矩形的,或者其可以是具有多个延伸部分或突出部分的各种几何结构。突出部分可以对导体的缠绕有用,减小芯的重量、尺寸或质量,或者可以用来增强谐振器的方向性或全向性。在图 13 中用内部结构 1310 示出具有四个突出部分的多缠绕平面谐振器,其中,四个导体 1301、1302、1303、1304 被绕芯缠绕。芯可以包含具有一个或多个导体环路的延伸部分 1305、1306、1307、1308。可以绕芯缠绕单个导体以形成不共轴的环路。例如,可以用一个连续的导体片或者使用其中使用单个导体来实现所有共轴环路的两个导体来形成图 13 的四个导体环路。

[0238] 可以通过用不相同参数来驱动某些导体环路而生成包括多个导体环路的谐振器周围的不均匀或不对称场分布。可以由具有不同频率、电压、功率水平、占空比等的电源来驱动具有多个导体环路的源谐振器的某些导体环路,其全部可以用来影响由每个导体产生的磁场的强度。

[0239] 可以将平面谐振器结构与电容加载电感器谐振器线圈组合以提供全面的全向有效区域,包括在源之上和之下,同时保持平坦谐振器结构。如图 13 所示,可以在与平面谐振器结构 1310 共同的平面中放置包括一个或多个导体环路的附加谐振器环路线圈 1309。外部谐振器线圈提供基本上在源之上和之下的有效区域。谐振器线圈可以布置有任何数目的平面谐振器结构和本文所述的布置。

[0240] 可以将平面谐振器结构封闭在可透磁封装中或集成到其它设备中。单个公共平面内的谐振器的平面轮廓允许到平坦设备中的封装和集成。在图 14 中示出举例说明谐振器的应用的图示。包括一个或多个平面谐振器 1414 的平坦源 1411(每个具有一个或多个导体环路)可以向与其它平面谐振器 1415、1416 集成并被放置在源的有效区域 1417 内的设备 1412、1413 转移功率。设备可以包括多个平面谐振器,使得无论设备相对于源的取向如何,源的有效区域不变。除对于旋转失准的不变性之外,可以在基本上不影响有效区域的情况下将包括平面谐振器的平坦设备完全翻转,因为平面谐振器仍在源的平面中。

[0241] 在图 15 中示出举例说明使用平面谐振器结构的功率转移系统的可能使用的另一图示。放置在表面 1525 之上的平面源 1521 可以产生覆盖基本表面区域的有效区域,其产生“赋能(energized)表面”区域。诸如计算机 1524、移动电话 1522、游戏机以及被耦合到其各自平面设备谐振器的其它电子装置 1523 的设备可以在被放置在源的有效区域内(其可以在表面之上的任何地方)时从源接收能量。可以在没有严格的放置或对准约束的情况下将具有不同尺寸的多个设备放置在有效区域中并在从源充电或供电的同时正常地使用。可以将源放置在桌子、柜台、书桌、柜等的表面下面,允许其在对桌子、柜台、书桌、柜等的顶

面赋能的同时被完全隐藏,在表面上产生比源大得多的有效区域。

[0242] 源可以包括显示器或其它视觉、听觉或振动指示器以示出充电设备的方向或什么设备正在被充电、充电的错误或问题、功率水平、充电时间等。

[0243] 可以将源谐振器和电路集成到任何数目的其它设备中。可以将源集成到诸如时钟、键盘、监视器、相框等设备中。例如,可以使用与平面谐振器和适当功率和控制电路集成的键盘作为用于被放置在键盘周围的设备(诸如计算机鼠标、网络照相机、移动电话等)的源,而不占用任何附加书桌空间。

[0244] 虽然已经在移动设备的背景下描述了平面谐振器结构,但是本领域的技术人员应清楚的是用于具有延伸超过其物理尺寸的有效区域的无线功率转移的平坦平面源具有许多其它消费者和工业应用。所述结构和构造可以对其中通常基本上在相同的平面和对准中对电子或电气设备和电源进行定位、设置或操纵的许多应用有用。某些可能的应用情形包括墙壁、地板、天花板或任何其它基本上平面的表面上的设备。

[0245] 可以将平坦源谐振器集成到相框中或悬挂在墙壁上,从而在墙壁的平面内提供有效区域,其中,可以在没有导线的情况下安装诸如数字相框、电视、灯等其它电子设备并进行供电。可以将平面谐振器集成到地板中,导致能够在上面放置设备以接收功率的赋能地板或地板上的有效区域。可以将音频扬声器、灯、加热器等放置在有效区域内并无线地接收功率。

[0246] 平面谐振器可以具有耦合到导体的附加组件。可以将诸如电容器、电感器、电阻器、二极管等的组件耦合到导体并可以用来调整或调谐用于谐振器的谐振频率和阻抗匹配。

[0247] 可以例如用 100 或更高的品质因数 Q 和甚至 1000 或更高的 Q 来产生上文所述和图 11(a) 所示的类型的平面谐振器结构。如图 11(c) 所示,可以在比谐振器的特性尺寸大的距离上无线地将能量从一个平面谐振器结构转移到另一个。

[0248] 除利用磁性材料来实现具有与磁谐振器中的电感元件类似的性质之外,还可以使用良导体材料和磁性材料的组合来实现此类电感结构。图 16(a) 示出磁谐振器结构 1602,其可以包括由被至少一层磁性材料围绕并被磁性材料块 1604 链接的高导电率材料(其内部可以与外面产生的 AC 电磁场屏蔽开来)制成的一个或多个外壳。

[0249] 结构可以包括在一侧被一层磁性材料覆盖的高导电率材料片。可以替代地将该分层结构共形地应用于电子设备,使得设备的各部分可以被高导电率和磁性材料层覆盖,同时可以使需要被容易地接近的其它部分(诸如按钮或屏幕)不被覆盖。该结构还可以或替代地仅包括磁性材料片的层或块体。因此,可以将磁谐振器结合到现有设备中,而不显著地与其现有功能相干扰且几乎不需要大范围的重新设计。此外,可以将良导体和/或磁性材料层制成足够薄的(一毫米左右或更小),使得其将几乎不增加成品设备的额外重量和体积。可以使用如所图 16 的结构中心上的正方形环路所示的应用于绕结构缠绕的一段导体的振荡电流来激励与此结构相关联的电磁场。

[0250] 结构的品质因数

[0251] 可以用约 1000 或更高的品质因数 Q 来产生上述类型的结构。如果跟与对象相关联的总磁能相比,磁性材料内的磁能的部分是小的,则即使磁性材料中的损耗是高的,此高 Q 也是可能的。对于由导电材料和磁性材料层组成的结构而言,可以通过如前所述的磁

性材料的存在来减少导电材料中的损耗。在其中磁性材料层的厚度约为系统的最大尺寸的 $1/100$ (例如,磁性材料约为 1mm 厚,而结构的面积约为 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$) 且相对磁导率约为 1000 的结构中,可以使得包含在磁性材料内的磁能的部分仅为与对象或谐振器相关联的总磁能的百分之几。为了看看那如何发生,请注意,用于包含在体积中的磁能的表达式是 $U_m = \int_V dV B(r)^2 / (2 \mu_r \mu_0)$, 只要 B (而不是 H) 是跨越磁性材料-空气界面保持的主要场 (在开放磁路中通常情况如此), 与在空气中相比,可以显著地减小包含在高 μ_r 区中的磁能的分

[0252] 如果用 frac 来表示磁性材料中的磁能的分,并且材料的损耗角正切是 $\tan \delta$, 则谐振器的 Q 是 $Q = 1/(\text{frac} \times \tan \delta)$, 假设磁性材料是唯一的损耗源。因此,甚至对于高达 0.1 的损耗角正切而言,对于这些类型的谐振器结构也可以实现约 1000 的 Q 。

[0253] 如果用绕其缠绕的 N 匝导线来驱动该结构,则如果 N 是足够高的,则可以忽视激励电感器环路中的损耗。图 17 示出用于这些结构及损耗机制和电感随着绕由导电和磁性材料制成的结构缠绕的匝数 N 的缩放的等效电路 1700 示意图。如果能够忽略接近效应 (通过使用适当的绕组,或被设计为使接近效应最小化的导线,诸如利兹线等),则由于环路导体中的导线而引起的电阻 1702 随着环路的长度线性地缩放,环路的长度又与匝数成比例。另一方面,这些特殊结构的等效电阻 1708 和等效电感 1704 两者与结构内部的磁场的平方成比例。由于此磁场与 N 成比例,所以等效电阻 1708 和等效电感 1704 两者与 N^2 成比例。因此,对于足够大的 N 而言,导线的电阻 1702 比磁性结构的等效电阻 1708 小得多,并且谐振器的 Q 渐进于 $Q_{\max} = \omega L_\mu / R_\mu$ 。

[0254] 图 16(a) 示出由结构 1604 的中心处的缩窄段周围的正方形电流环路驱动的铜和磁性材料结构 1602 的图和由此结构产生的磁场流线 1608。此示例性结构包括被铜封闭并随后被具有性质 $\mu'_r = 1,400$ 、 $\mu''_r = 5$ 和 $\sigma = 0.5\text{S/m}$ 的 2mm 磁性材料层完全覆盖的两个 $20\text{cm} \times 8\text{cm} \times 2\text{cm}$ 空心区域。这两个平行六面体间隔开 4cm , 并被相同磁性材料的 $2\text{cm} \times 4\text{cm} \times 2\text{cm}$ 块连接。激励环路被绕此块的中心缠绕。在 300kHz 的频率处,此结构具有计算的 890 的 Q 。可以将导体和磁性材料结构成形为使某些系统参数最优化。例如,被激励环路封闭的结构的尺寸可以是小的,以减小激励环路的电阻,或者其可以是大的,以减轻与大磁场相关联的磁性材料中的损耗。请注意,与由磁性材料组成的相同结构相关联的磁流线和 Q 将仅类似于这里所示的层导体和磁性材料设计。

[0255] 电磁谐振器与其它对象交互

[0256] 对于电磁谐振器而言,扰动固有 Q 的非固有损耗机制可以包括附近无关对象的材料内部的吸收损耗和与来自附近无关材料的谐振场的散射有关的辐射损耗。可以使吸收损耗与在感兴趣的频率范围内具有非零但有限的电导率 σ (或等价地电介质电容率的非零且有限的虚部) 的材料相关联,使得电磁场能够穿透它并在其中感生电流,这随后通过电阻损耗而耗散能量。如果对象至少部分地包括有损耗材料,则可以将其描述为有损耗的。

[0257] 考虑包括电导率 σ 和磁导率 μ 的均质各向同性材料的对象。由趋肤深度来给出此对象内部的电磁场的穿透深度 $\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma}$ 。可以根据 $P_d = \int_V dV \sigma |E|^2 = \int_V dV |J|^2 / \sigma$ 来确定在对象内部耗散的功率 P_d , 其中,我们利用欧姆定律 $J = \sigma E$, 并且其中, E 是电场且 J 是电流密度。

[0258] 如果在感兴趣的频率范围内,组成对象的材料电导率 σ 足够低,使得可以认为

材料的趋肤深度 δ 是长的 (即, δ 比对象的特性尺寸长, 或者 δ 比对象的有损耗部分的特性尺寸长), 则电磁场 E 和 H (其中, H 是磁场) 可以显著地穿透至对象中。然后, 这些有限值的场可以产生随着 $P_d \sim \sigma V_{ol} \langle |E|^2 \rangle$ 缩放的耗散功率, 其中, 在正在考虑的体积中, V_{ol} 是有损耗的对象的体积且 $\langle |E|^2 \rangle$ 是电场平方的空间平均值。因此, 在电导率下限处, 耗散功率与电导率成比例地缩放并在不导电 (纯电介质) 材料的极限处归零。

[0259] 如果在感兴趣的频率范围内, 组成对象的材料电导率 σ 足够高, 使得可以认为材料的趋肤深度是短的, 则电磁场 E 和 H 可以仅向对象中穿透短的距离 (即, 其停留在材料的 ‘表皮’ 附近, 其中, δ 小于对象的有损耗部分的特性厚度)。在这种情况下, 在材料内部感生的电流可以与材料表面非常接近地集中, 近似在趋肤深度内, 并且可以用表面电流密度 (主要由入射电磁场的形状确定, 并且只要导体的厚度比趋肤深度大得多, 则独立于第一阶的频率和电导率) $K(x, y)$ (其中, x 和 y 是将表面参数化的坐标) 与呈指数地向表面中衰减的函数: $\exp(-z/\delta)/\delta$ (其中, z 表示局部地垂直于表面的坐标) 的乘积来近似其幅值: $J(x, y, z) = K(x, y) \exp(-z/\delta)/\delta$ 。然后, 可以用下式来估计耗散功率 P_d ,

$$[0260] \quad P_d = \int d\tau |\mathbf{J}(\mathbf{r})|^2 / \sigma \approx \left(\int d\mathbf{x} d\mathbf{y} |\mathbf{K}(\mathbf{x}, \mathbf{y})|^2 \right) \left(\int_0^\infty dz \exp(2z/\delta) / (\sigma \delta^2) \right) = \sqrt{\mu\omega / 8\sigma} \left(\int d\mathbf{x} d\mathbf{y} |\mathbf{K}(\mathbf{x}, \mathbf{y})|^2 \right)$$

[0261] 因此, 在高电导率极限处, 耗散功率与电导率的平方根成反比地缩放, 并在理想导电的材料极限处归零。

[0262] 如果在感兴趣的频率范围内, 组成对象的材料电导率 σ 是有限的, 则材料的趋肤深度 δ 可以向对象中穿透一定的距离, 并且在对象内可能耗散一定量的功率, 还取决于对象的尺寸和电磁场的强度。可以将此描述广义化为还描述包括具有不同性质和电导率的多个不同材料的对象的一般情况, 诸如在对象内部具有电导率的任意不均质和各向异性分布的对象。

[0263] 请注意, 上述损耗机制的幅值可以取决于无关对象相对于谐振器场的位置和取向以及无关对象的材料组成。例如, 高电导率材料可以使谐振器的谐振频率移位, 并将其与其它谐振对象解调谐 (detune)。可以通过向谐振器施加修正其频率的反馈机制来固定此频移, 诸如通过谐振器的电感和 / 或电容变化。可以使用可变电容器和电感器来实现这些变化, 在某些情况下通过谐振器中的组件的几何结构的变化来实现。还可以使用下述其它新型调谐机制来改变谐振器频率。

[0264] 在外部损耗高的情况下, 被扰动 Q 可以是低的, 并且可以采取步骤来限制此类无关对象和材料内的谐振器能量的吸收。由于耗散功率对电磁场强度的函数依赖关系, 可以通过将系统设计为使得用在源谐振器处较短且在设备谐振器处较长的渐逝谐振场尾来实现期望耦合来使系统性能最优化, 使得存在其它对象情况下的源的被扰动 Q 最优化 (或者如果需要使设备的被扰动 Q 最优化, 则反之亦然。)

[0265] 请注意, 诸如人、动物、植物、建筑材料等许多常见的无关材料和对象可以具有低电导率, 并因此可以几乎对这里公开的无线能量转移方案没有影响。与我们描述的磁谐振器设计有关的重要事实是可以将其电场主要约束在谐振器结构本身内, 因此其应可以在在中程距离上提供无线功率交换的同时在用于人类安全的一般接受方针内操作。

[0266] 具有减少的交互的电磁谐振器

[0267] 用于近场无线功率传输的一个感兴趣的频率范围在 10kHz 与 100MHz 之间。在此频率范围内, 例如多个类型的木材和塑料的多种普通非金属材料可以具有相对低的电导率,

使得仅少量的功率可以在其内部被耗散。另外,具有低损耗角正切 $\tan \Delta$ (其中 $\tan \Delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$, 并且 ε'' 和 ε' 分别是电容率的虚部和实部) 的材料也可以使仅少量的功率在其内部被耗散。诸如铜、银、金等具有相对高的电导率的金属材料也可以几乎不具有在其中被耗散的功率,因为如前文所讨论的,电磁场不能显著地穿透这些材料。这些非常低和非常高电导率的材料和低损耗角正切材料和对象可以对磁谐振器的损耗具有可忽略的影响。

[0268] 然而,在感兴趣的频率范围内,存在诸如某些电子电路和某些低电导率金属的材料和对象,其可以具有中度(通常非均质且各向异性)的电导率和/或中至高的损耗角正切,并且其可以具有相对高的耗散损耗。在其内部可以耗散相对较大的功率。这些材料和对象可以耗散足够的能量以将 $Q_{(p)}$ 减少显著的量,并且可以称为“有损耗对象”。

[0269] 减少有损耗材料对谐振器的 $Q_{(p)}$ 的影响的一种方式是使用高电导率材料来对谐振器场进行成形,使得其避开有损耗对象。可以通过将高电导率材料设想为使场偏转或重新成形的材料来理解使用高电导率材料来对电磁场进行调整以使得它们避开其附近的有损耗对象的过程。此构想在质量上是正确的,只要导体的厚度大于趋肤深度,因为用于良导体的表面处的电磁场的边界条件迫使电场接近于完全垂直于导体平面且磁场接近于完全与导体平面相切。因此,垂直磁场或相切电场将从导电表面“偏转开”。此外,甚至可以迫使相切磁场或垂直电场在一侧和/或特别是导电表面的位置在幅值上减小,其取决于场的源和导电表面的相对位置。

[0270] 作为示例,图 18 示出频率 $f = 6.78\text{MHz}$ 的外部、最初均匀的磁场中的有损耗电介质材料 1804 之上和之下的两个高电导率表面 1802 的有限元法(FEM)模拟。系统是绕着 $r = 0$ 轴方位角对称的。在此模拟中,有损耗电介质材料 1804 被夹在两个导体 1802(被示为近似 $z = \pm 0.01\text{m}$ 处的白色线)之间。在电介质圆盘之上和之下不存在导电表面的情况下,磁场(用描绘的磁场线表示)仍将是基本上均匀的(场线笔直并与 z 轴平行),指示磁场将笔直地通过有损耗电介质材料。在这种情况下,功率将已在有损耗电介质圆盘中耗散。然而,在存在导电表面的情况下,此模拟显示磁场被重新成形。迫使磁场与导体的表面相切,并因此在那些导电表面 1802 周围偏转,使可能在导电表面后面或之间的有损耗电介质材料 1804 中耗散的功率量最小化。如本文所使用的,电学对称的轴指的是任何轴,绕着该轴,固定或时变电场或磁场在如本文公开的能量交换期间基本上是对称的。

[0271] 即使使用在电介质圆盘之上或之下的仅一个导电表面,也观察到类似的效果。如果电介质圆盘是薄的,则电场在表面处基本上为零且连续且平滑地接近它这一事实意味着电场在接近于表面的任何地方(即在电介质圆盘内)是非常低的。用于使谐振器场远离有损耗对象偏转的单个表面实施方式对于其中不允许覆盖有损耗材料或表面的两侧的应用(例如 LCD 屏幕)而言可能是优选的。请注意,在存在有损耗材料的情况下,甚至与几个趋肤深度的导电材料的非常薄的表面可以足以(6.78MHz 处的纯铜中的趋肤深度是 $\sim 20\ \mu\text{m}$, 并且在 250kHz 处是 $\sim 100\ \mu\text{m}$) 显著地改善谐振器的 $Q_{(p)}$ 。

[0272] 有损耗无关材料和对象可以是其中将集成高 Q 谐振器的设备的部分。可以用许多技术来减少这些有损耗材料和对象中的能量耗散,包括:

[0273] 通过将有损耗材料和对象定位为远离谐振器,或者处于相对于谐振器的特殊位置和取向。

[0274] 通过使用高电导率材料或结构来在谐振器附近部分地或完全覆盖有损耗材料和

对象。

[0275] 通过将高电导率材料的闭合表面（诸如片材或网）放置在有损耗对象周围以完全覆盖有损耗对象并将谐振器场成形为使得其避开有损耗对象。

[0276] 通过将高电导率材料的表面（诸如片材或网）放置在有损耗对象的仅一部分周围，诸如沿着对象或材料的顶部、底部、沿着侧边等。

[0277] 通过将高电导率材料的甚至单个表面（诸如片材或网）放置在有损耗对象之上或之下或一个侧面上以减小有损耗对象的位置处的场的强度。

[0278] 图 19 示出形成磁谐振器 102 的电容加载环路电感器和被放置在环路电感器内部的完全围绕有损耗对象 1804 的高电导率材料 1802 的盘状表面。请注意，某些有损耗对象可以是诸如电子电路的组件，其可能需要与外界环境交互、通信或相连并因此不能被完全地电磁隔离。用高电导率材料部分地覆盖有损耗材料仍可以在使得有损耗材料或对象适当地起作用的同时减少额外损耗。

[0279] 图 20 示出被用作谐振器 102 的电容加载环路电感器和被放置在电感器环路内部的围绕损耗对象 1804 的仅一部分的高电导率材料 1802 的表面。

[0280] 通过将高电导率材料的单个表面放置在有损耗对象或材料之上、之下或侧面上等，可以减少但不可以完全地消除无关损耗。在图 21 中示出示例，其中，电容加载环路电感器被用作谐振器 102，并且高电导率材料 1802 的表面被放置在有损耗对象 1804 下面的电感器环路内部以减小有损耗对象位置处的场的强度。由于成本、重量、组装复杂化、气流、视觉可达性、实体近用等的考虑，仅覆盖材料或对象的一侧可能是优选的。

[0281] 可以使用高电导率材料的单个表面来避开不能或不应都被从两侧覆盖的对象（例如 LCD 或等离子体屏幕）。可以使用光学透明的导体来避开此类有损耗对象。作为光学透明导体的替代或除光学透明导体之外，可以替代地将高电导率光学不透明材料放置在有损耗对象的仅一部分上。单面覆盖相对于多面覆盖实施方式的适合性和其中固有的设计权衡可以取决于无线能量转移情形的细节和有损耗材料和对象的性质。

[0282] 下面，我们描述使用高电导率表面来改善在无线能量转移系统中使用的集成磁谐振器的 Q 不灵敏度 $\Theta_{(p)}$ 的示例。图 22 示出无线投影仪 2200。无线投影仪可以包括如所示地布置的设备谐振器 102C、投影仪 2202、无线网络 / 视频适配器 2204 和功率转换电路 2208。设备谐振器 102C 可以包括被布置为封闭表面的三匝导体环路，和电容器网络 2210。可以将导体环路设置为使得设备谐振器 102C 在其工作谐振频率下具有高 Q （例如， > 100 ）。在完全无线的投影仪 2200 中的集成之前，此设备谐振器 102C 在 6.78MHz 的设计工作谐振频率下具有约 477 的 Q 。在集成并将无线网络 / 视频适配器卡 2204 放置在谐振器环路电感器的中心上时，谐振器 $Q_{(integrated)}$ 被减小至约 347。从 Q 至 $Q_{(integrated)}$ 的减小中的至少某些归因于扰动无线网络 / 视频适配器卡中的损耗。如上所述，与磁谐振器 102C 相关联的电磁场可以在无线网络 / 视频适配器卡 2204 中和其上感生电流，该电流可以在组成该卡的有损耗材料中的电阻性损耗中被耗散。我们观察到根据放置在谐振器附近的对象和材料的组成、位置和取向，可以不同地影响谐振器的 $Q_{(integrated)}$ 。

[0283] 在完全无线的投影仪示例中，用薄铜袋（覆盖无线网络 / 视频适配器卡的顶部和底部的折叠铜片，但不是通信天线）来覆盖网络 / 视频适配器卡将磁谐振器的 $Q_{(integrated)}$ 改善为约 444 的 $Q_{(integrated+copper\ pocket)}$ 。换言之，使用铜袋来使谐振器场偏离有损耗材料，可以

消除大部分由于由无关网络 / 视频适配器卡引起的扰动所造成的 $Q_{(\text{integrated})}$ 的减小。

[0284] 在另一完全无线的投影仪示例中,用放置在卡下面的单个铜片来覆盖网络 / 视频适配器卡提供约等于 $Q_{(\text{integrated+copper pocket})}$ 的 $Q_{(\text{integrated+copper sheet})}$ 。在该示例中,可以用被用来使谐振器场远离有损耗适配器卡的单个高电导率片材来保持系统的高被扰动 Q 。

[0285] 使有损耗材料和对象(其为包括高 Q 电磁谐振器的设备的一部分)定位或定向在由谐振器产生的场相对弱的位置可能是有利的,使得几乎没有功率在这些对象中被耗散,因此 Q 不灵敏度 $\Theta_{(p)}$ 可以是大的。如更早地示出的,不同电导率的材料可以不同地对电场对比磁场进行不同的响应。因此,根据无关对象的电导率,定位技术可以专用于一个或另一个场。

[0286] 图 23 示出在 10MHz 处谐振的沿着包含圆形环路电感器的直径的线的电场 2312 和磁场 2314 和沿着用于半径 30cm 的导线的电容加载圆形环路电感器的环路电感器的轴的电场 2318 和磁场 2320 的幅值。可以看到谐振近场的幅值在接近导线处达到其最大值并在远离环路 2312、2314 处衰减。在环路电感器 2318、2320 的平面中,场在环路的中心处达到局部最小值。因此,给定设备的有限尺寸,可能的是场在设备的极值处最弱,并且可能的是场幅值在设备内的某些地方具有局部最小值。此论证适用于任何其它类型的电磁谐振器 102 和任何类型的设备。在图 24a 和 24b 中示出示例,其中,电容加载电感器环路形成磁谐振器 102,并且无关有损耗对象 1804 位于电磁场具有最小幅值的位置处。

[0287] 在示范示例中,使用被布置为封闭正方形表面(具有圆角)的三匝导体环路和电容器网络来形成磁谐振器。谐振器的 Q 在 6.78MHz 的设计工作谐振频率下为约 619。此谐振器的扰动 Q 取决于扰动对象(在这种情况下为口袋式投影仪)相对于谐振器的放置。当扰动投影仪被放置在电感器环路内部和其中心处或电感器线匝之上时, $Q_{(\text{projector})}$ 为约 96, 比在扰动投影仪被放置在谐振器外面时低(在这种情况下, $Q_{(\text{projector})}$ 为约 513)。这些测量结果支持显示电感器环路内部的场可以比在其外部的那些场大的分析,因此放置在此类环路电感器内部的有损耗对象与有损耗对象被放置在环路电感器外部时相比可以为系统提供较低的扰动 Q 。根据谐振器设计和有损耗对象的材料组成和取向,图 24b 所示的布置可以提供比图 24a 所示的布置高的 Q 不灵敏度 $\Theta_{(\text{projector})}$ 。

[0288] 可以将高 Q 谐振器集成在设备内部。高电介质电容率、磁导率或电导率的无关材料和对象可以是高 Q 谐振器将被集成到其中的设备的一部分。对于在高 Q 电磁谐振器附近的这些无关材料和对象而言,根据其相对于谐振器的尺寸、位置和取向,谐振器场分布可变形并显著地偏离谐振器的原始未扰动场分布。谐振器的未扰动场的此类变形可以显著地将 Q 减小至较低的 $Q_{(p)}$,即使无关对象和材料是无损耗的。

[0289] 将高电导率对象(其为包括高 Q 电磁谐振器的设备的一部分)放置在使得这些对象的表面的取向尽可能地垂直于由未扰动谐振器产生的电场线并平行于由未扰动谐振器产生的磁场线的取向、因此以可能的最小量使谐振场分布变形可能是有利的。可以被设置为垂直于磁谐振器环路的平面的其它常见对象包括屏幕(LCD、等离子体等)、电池、外壳、连接器、辐射天线等。谐振器的 Q 不灵敏度 $\Theta_{(p)}$ 可以比在对象被设置在相对于谐振器场的不同取向的情况下大得多。

[0290] 不属于包括高 Q 谐振器的集成设备的一部分的有损耗无关材料和对象可位于或被带到谐振器附近,例如在设备的使用期间。在某些情况下,使用高电导率材料来调整谐振

器场,使得其避开有损耗无关对象所位于或被引入的区域以减少这些材料和对象中的功率耗散并增加 Q 不灵敏度 $\Theta_{(p)}$ 可能是有利的。在图 25 中示出示例,其中,使用电容加载环路电感器和电容器作为谐振器 102,并且高电导率材料 1802 的表面被放置在电感器环路之上以减小谐振器之上的区域中的场的幅值,有损耗无关对象 1804 可以位于或被引入该区域。

[0291] 请注意,被带到谐振器的附近以使场重新成形的高电导率表面也可以引起 $Q_{(\text{cond. surface})} < Q$ 。被扰动 Q 的减小可能是由于有损耗导体内部的能量耗散或与匹配导体表面处的场边界条件相关联的未扰动谐振器场的变形而引起的。因此,虽然可以使用高电导率表面来减少由于无关有损耗对象内部的耗散而引起的额外损耗,但在某些情况下,尤其是在其中这是通过显著地使电磁场重新成形来实现的某些情况下,使用此类高电导率表面使得场避开有损耗对象可以有效地得到 $Q_{(p+\text{cond. surface})} < Q_{(p)}$ 而不是期望的结果 $Q_{(p+\text{cond. surface})} > Q_{(p)}$ 。

[0292] 如上所述,在存在感生损耗的对象的情况下,如果与磁谐振器相关联的电磁场被重新成形以避免感生损耗的对象,则可以改善磁谐振器的被扰动品质因数。使未扰动谐振器场重新成形的另一个方式是使用高磁导率材料来完全地或部分地封闭或覆盖感生损耗的对象,从而减少磁场与感生损耗的对象的交互。

[0293] 先前已例如在 *Electrodynamics 3rd Ed.*, Jackson, pp. 201 ~ 203 中描述了磁场屏蔽。其中,示出了将其内部与外部磁场屏蔽开来的可透磁材料的球形壳。例如,如果内径 a 、外径 b 和相对磁导率 μ_r 的壳放置在最初均匀的磁场 H_0 中,则壳内部的场将具有恒定的幅值 $9\mu_r H_0 / [(2\mu_r + 1)(\mu_r + 2) - 2(a/b)^3(\mu_r - 1)^2]$ 如果 $\mu_r \gg 1$, 则其趋向于 $9H_0 / 2\mu_r (1 - (a/b)^3)$ 。此结果显示入射磁场(但不一定是入射电场)在该壳内部可以被大大地衰减,即使壳是相当薄的,条件是磁导率足够高。在某些情况下,使用高磁导率材料来部分地或完全覆盖有损耗材料和对象、使得其被谐振器磁场避开并因此几乎没有功率在这些材料和对象中被耗散可能是有利的。在这种方法中, Q 不灵敏度 $\Theta_{(p)}$ 可以比在材料和对象未被覆盖的情况下大,可能大于 1。

[0294] 可期望保持电场和磁场两者远离感生损耗的对象。如上所述,以这种方式使场成形的一种方法是使用高电导率表面来完全地或部分地封闭或覆盖感生损耗的对象。可以在高电导率表面上或周围放置一层可透磁材料,也称为磁性材料(具有显著磁导率的任何材料或元材料)。该附加磁性材料层可以呈现供已偏转磁场遵循的较低磁阻路径(与自由空间相比),并且可以部分地将其下面的电导体与入射磁通屏蔽开来。此设置可以减少由于高电导率表面中的感生电流而引起的损耗。在某些情况下,由磁性材料呈现的较低磁阻可以改善结构的被扰动 Q 。

[0295] 图 26(a) 示出被暴露于沿着 z 轴的初始均匀、外加磁场(灰色磁通线)的薄导电 2604(铜)圆盘(直径为 20cm,高度为 2cm)的轴向对称 FEM 模拟。对称轴在 $r = 0$ 处。所示的磁流线源于 $z = -\infty$, 其中,这些磁流线以 1cm 的间隔间隔开 $r = 3\text{cm}$ 至 $r = 10\text{cm}$ 。轴刻度以米为单位。例如,设想着此导电圆柱将感生损耗的对象封闭在由图 19 所示的无线能量转移系统中的磁谐振器所限定的区域内。

[0296] 此高电导率外壳可以增加有损耗对象的扰动 Q , 并因此增加系统的总的被扰动 Q , 但是被扰动 Q 由于导电表面中的感生损耗和电磁场分布的变化而可能仍小于未扰动 Q 。可以通过沿着高电导率外壳的一个或多个外表面包括一层磁性材料来至少部分地恢复与高电导率外壳相关联的被扰动 Q 的减小。图 26b 示出来自图 26a 的薄导电 2604A(铜)圆盘

(直径为 20cm, 高度为 2cm) 的轴向对称 FEM 模拟, 但是具有被直接放置在高电导率外壳的外表面上的附加磁性材料层。请注意, 磁性材料的存在可以为磁场提供较低磁阻路径, 从而至少部分地屏蔽底层导体并减少由于导体中感生的涡流而引起的损耗。

[0297] 图 27 描绘了对图 26 所示的系统的修改 (在轴对称视图中), 其中, 可能不是所有的有损耗材料 2708 都被高电导率表面 2706 覆盖。在某些情况下, 诸如由于成本、重量、组装复杂度、气流、视觉可达性、实体近用等的考虑, 仅覆盖材料或对象的一侧可能是有用的。在图 27 所示的示例性布置中, 有损耗材料 2708 的仅一个表面被覆盖, 并且谐振器电感器环路被放置在高电导率表面的相对侧。

[0298] 使用数学模型来模拟被放置在由磁谐振器限定的区域内的由铜制成且形状类似于 20cm 直径乘 2cm 高的圆柱形圆盘的高电导率外壳, 所述磁谐振器的电感元件是具有环路半径 $r = 11\text{cm}$ 且导线半径 $a = 1\text{mm}$ 的单匝导线环路。用于施加的 6.78MHz 电磁场的模拟表明此高电导率外壳的扰动品质因数 $\delta Q_{(\text{enclosure})}$ 是 1,870。当高电导率外壳被修改为包括具有实相对磁导率 $\mu'_r = 40$ 和虚相对磁导率 $\mu''_r = 10^{-2}$ 的 0.25cm 厚的磁性材料层时, 模拟显示扰动品质因数被增加至 $\delta Q_{(\text{enclosure+magnetic material})} = 5,060$ 。

[0299] 如果高电导率外壳填充由谐振器的环路电感器 2704 限定的区域的较大部分, 则由于添加磁性材料 2702 的薄层而引起的性能改善甚至可以更显著。在上述示例中, 如果减小电感器环路 2704 的半径, 使得其距离高电导率外壳的表面仅 3mm, 则可以通过在外壳外部添加一层磁性材料 2702 的薄层来将扰动品质因数从 670 (仅导电外壳) 改善至 2,730 (具有磁性材料薄层的导电外壳)。

[0300] 可以使用例如屏蔽或分布式电容器 (例如, 其效率高 (yield high)) 将谐振器结构设计为具有高度受限的电场, 即使当谐振器非常接近于通常将感生损耗的材料时。

[0301] 耦合电磁谐振器

[0302] 可以由强耦合质量因数来确定两个谐振器之间的能量转移的效率, $U = \kappa / \sqrt{\Gamma_s \Gamma_d} = (2\kappa / \sqrt{\omega_s \omega_d}) \sqrt{Q_s Q_d}$ 。在磁谐振器实施方式中, 可以用 $\kappa_{12} = \omega M / 2\sqrt{L_1 L_2}$ 使两个谐振器之间的耦合因数与谐振器中的每一个中的电感元件的电感 L_1 和 L_2 和其之间的互感 M 相关。请注意, 此表达式假设存在通过电偶极子耦合的可忽略的耦合。对于其中由具有 N 匝、分开距离 D 并如图 1(b) 所示地取向的圆形导电环路来形成电感器环路的电容加载电感器环路谐振器而言, 互感是 $M = \pi / 4 \cdot \mu_0 N_1 N_2 (x_1 x_2)^2 / D^3$, 其中, x_1 、 N_1 和 x_2 、 N_2 分别是第一和第二谐振器的导体环路的特性尺寸和匝数。请注意, 这是准静态结果, 因此假设谐振器的尺寸比波长小得多, 并且谐振器的距离比波长小得多, 而且其距离是其尺寸的至少几倍。对于在准静态极限处和中程距离处操作的这些圆形谐振器而言, 如上所述, $k = 2\kappa / \sqrt{\omega_1 \omega_2} \sim (\sqrt{x_1 x_2} / D)^3$ 。当谐振器的品质因数大到足以补偿中程距离处的小 k 时, 可以建立中程距离处的谐振器之间的强耦合 (大 U)。

[0303] 对于电磁谐振器而言, 如果两个谐振器包括导电部分, 则耦合机制可以是由于从另一个谐振器产生的电场和磁场而在一个谐振器上感生电流。耦合因数可以与跨越第二谐振器的高 Q 电感元件的封闭区域的一个谐振器中的高 Q 电感元件产生的磁场的通量成比例。

[0304] 具有减少的交互的耦合电磁谐振器

[0305] 如前文所述,可以使用高电导率材料表面来使谐振器场成形,使得其避开谐振器附近的有损耗对象 p,从而减少总额外损耗并保持谐振器的高 Q 不灵敏度 $\Theta_{(p+cond. surface)}$ 。然而,此类表面可能在谐振器之间导致被扰动耦合因数 $k_{(p+cond. surface)}$,其小于被扰动耦合因数 $k_{(p)}$ 并取决于高电导率材料相对于谐振器的尺寸、位置和取向。例如,如果高电导率材料被放置在由无线能量转移系统中的磁谐振器中的至少一个的电感元件限定的平面中和区域内,则可以阻挡通过谐振器的区域的部分磁通(调节耦合),并且可以减小 k。

[0306] 再次考虑图 19 的示例。在不存在高电导率圆盘外壳的情况下,一定量的外部磁通量可以穿过环路的限定区域。在存在高电导率圆盘外壳的情况下,此磁通量中的某些可能被偏转或阻挡,并且可能不再穿过环路的该区域,因此导致较小的被扰动耦合因数 $k_{12(p+cond. surfaces)}$ 。然而,由于偏转磁场线可能紧密地遵循高电导率表面的边缘,所以通过限定圆盘的环路的通量的减少可能小于圆盘的面积与环路的面积的比。

[0307] 可以单独地或与磁性材料组合地使用高电导率材料结构来使被扰动品质因数、被扰动耦合因数或被扰动效率最优化。

[0308] 考虑图 21 的示例。使有损耗对象具有等于电容加载电感器环路谐振器的尺寸的尺寸,由此填充其区域 A 2102。可以将高电导率表面 1802 放置在有损耗对象 1804 下面。让此谐振器 1 在两个耦合谐振器 1 和 2 的系统中,并且让我们考虑随着导电表面的面积 A_s 2104 的增加 $U_{12(object+cond. surface)}$ 与 U_{12} 相比如何缩放。在有损耗对象 1804 下面没有导电表面 1802 的情况下,k 不灵敏度 $\beta_{12(object)}$ 可以约为 1,但是 Q 不灵敏度 $\Theta_{1(object)}$ 可以是小的,因此 U 不灵敏度 $\Xi_{12(object)}$ 可以是小的。

[0309] 在有损耗对象下面的高电导率表面覆盖电感器环路谐振器的整个面积时 ($A_s = A$), $k_{12(object+cond. surface)}$ 可以接近于零,因为几乎不允许通量穿过电感器环路,因此 $U_{12(object+cond. surface)}$ 可以接近于零。对于高电导率表面的中间尺寸而言,非固有损耗的抑制和相关联的 Q 不灵敏度 $\Theta_{1(object+cond. surface)}$ 与 $\Theta_{1(object)}$ 相比可以是足够大的,而耦合的减少可能不是显著的,并且相关联的 k 不灵敏度 $\beta_{12(object+cond. surface)}$ 可能不比 $\beta_{12(object)}$ 小得多,使得与 $U_{12(object)}$ 相比,可以增加总 $U_{12(object+cond. surface)}$ 。在无线能量转移系统中经由高电导率表面来避开无关有损耗对象的最佳程度可以取决于系统配置和应用的细节。

[0310] 我们描述了使用高电导率材料来完全地或部分地封闭或覆盖高 Q 谐振器附近的感生损耗的对象作为实现用于系统的高被扰动 Q 的一种潜在方法。然而,单独地使用良导体来覆盖对象可以如上所述地减少谐振器的耦合,从而降低无线功率转移的效率。随着导电表面的面积接近于磁谐振器的面积,例如,被扰动耦合因数 $k_{(p)}$ 可以接近于零,使得导电表面的使用与高效无线功率转移不相容。

[0311] 解决上述问题的一种方法是在高电导率材料周围放置一层磁性材料,因为附加的这层可透磁材料可以呈现供已偏转磁场遵循的较低磁阻路径(与自由空间相比),并且可以部分地将其下面的电导体与入射的磁通量屏蔽开来。在某些情况下,由磁性材料呈现的较低磁阻路径可以改善谐振器到其它谐振器的电磁耦合。可以通过沿着导电材料的一个或多个外表面包括一层磁性材料来至少部分地恢复与使用导电材料来调整谐振器场使得其避开高 Q 磁谐振器中和周围的有损耗对象相关联的被扰动耦合因数的减小。磁性材料可以相对于其初始未扰动值增加被扰动耦合因数。

[0312] 请注意,图 26 中的模拟结果显示与单独的导电结构相比,分层磁性材料和导电结

构可以使入射磁场较小偏转。如果具有仅比图 26(a) 和图 26(b) 所示的圆盘略大的半径的磁谐振器圆环限定圆盘,则很明显,与图 26(a) 中所示出的情况相比,在图 26(b) 所示的情况下更多的磁通线将被捕获,因此对于图 26(b) 所示的情况而言, $k_{(\text{disk})}$ 将较大。因此,在导电材料上包括一层磁性材料可以改善总体系统性能。可以执行系统分析以确定这些材料是否应被部分地、全部地或最低限度地集成到谐振器中。

[0313] 如上所述,图 27 描绘了可以适合于在不是所有有损耗材料 2708 都可以被导体和/或磁性材料结构覆盖时使用的分层导体 2706 和磁性材料 2702 结构。先前示出了对于具有由具有 11cm 的电感器环路半径和 $a = 1\text{mm}$ 的导线半径的谐振器限定的 20cm 直径和 2cm 高度的铜导体圆盘而言,针对铜圆柱计算的扰动 Q 是 1.870。如果谐振器和导电圆盘壳被放置在均匀磁场中(沿着电感器环路的对称轴对准),我们计算了铜导体具有 0.34 的相关耦合因数不灵敏度。为了比较,我们对相同的布置进行建模,但是包括具有实相对磁导率 $\mu'_r = 40$ 和虚相对磁导率 $\mu''_r = 10^{-2}$ 的 0.25cm 厚的磁性材料层。使用上述相同的模型和参数,我们发现通过向导体的表面添加磁性材料,耦合因数不灵敏度被改善至 0.64。

[0314] 可以将磁性材料放置在被磁谐振器限定的区域内以增加无线能量转移系统中的耦合。考虑被放置在最初均匀磁场中的具有相对磁导率 μ_r 的磁性材料的实心球。在本示例中,由磁性材料提供的较低磁阻路径可以促使磁场集中在该球的体积中。我们发现通过添加磁性材料,通过由球的中纬线限定的区域的磁通量被增加到 $3\mu_r/(\mu_r+2)$ 倍。如果 $\mu_r \gg 1$,则此增强因数可以接近于 3。

[0315] 还可以显示包括由磁谐振器中的电感元件限定的磁性球体的系统的偶极矩将使其磁偶极子增强到相同的倍数。因此,具有高磁导率的磁性球体实际上使谐振器的偶极子磁耦合增至三倍。如果我们使用具有 a 的内径和 b 的外径的磁性材料的球形壳体,可以保持耦合中大部分的该增加,即使此壳体在由高度导电材料制成的块体或外壳之上。在这种情况下,通过中纬线的通量的增强是

$$[0316] \quad \frac{3\mu_r \left(1 - \left(\frac{a}{b}\right)^3\right)}{\mu_r \left(1 - \left(\frac{a}{b}\right)^3\right) + 2 \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{b}\right)^3\right)}.$$

[0317] 对于 $\mu_r = 1,000$ 且 $(a/b) = 0.99$ 而言,此增强因数仍是 2.73,因此甚至用薄层磁性材料,也可以显著地改善该耦合。

[0318] 如上所述,可以使用包含磁性材料的结构来实现磁谐振器。图 16(a) 示出了由在其中心处的阻塞点周围的正方形电流环路驱动的铜和磁性材料结构 1600 的三维模型。图 16(b) 示出具有与图 16(a) 所示的一个相同的性质的两个相同结构 1600A-B 之间的由磁场流线指示的交互。由于对称,并且为了降低计算复杂性,仅对系统的一半进行建模。如果我们固定了两个对象之间的相对取向并改变其中心距离(所示的图像处于 50cm 的相对间隔),我们发现在 300kHz 处,耦合效率随着结构之间的间隔从 30cm 变成 60cm 而从 87% 变成 55%。所示的每个示例性结构 1600A-B 包括被 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 2\text{cm}$ 磁性材料块接合并完全被 2mm 的相同磁性材料层(被假设为具有 $\mu_r = 1,400 + j5$) 覆盖的由铜制成的两个 $20\text{cm} \times 8\text{cm} \times 2\text{cm}$ 平行六面体。忽略驱动环路中的电阻性损耗。每个结构具有计算的 815 的

Q。

[0319] 电磁谐振器和阻抗匹配

[0320] 用于低损耗电感元件的阻抗匹配架构

[0321] 出于本讨论的目的,电感元件可以是有或没有(有间隙或无间隙)由磁性材料制成的芯的任何导电材料的任何线圈或环路结构(‘环路’),其还可以被电感地或以任何其它无接触方式耦合到其它系统。元件是电感的,因为其阻抗(包括环路的阻抗和任何被潜在地耦合的系统的所谓‘反射’阻抗这二者)具有正电抗 X 和电阻 R 。

[0322] 考虑电感元件可以被连接到的诸如驱动电路或被驱动负载或传输线的外部电路。外部电路(例如驱动电路)可以向电感元件递送功率,并且电感元件可以向外部电路(例如被驱动负载)递送功率。在期望频率处在电感元件与外部电路之间递送的功率的效率和量可以取决于相对于外部电路的性质而言的电感元件的阻抗。可以使用阻抗匹配网络和外部电路控制在期望频率 f 处调节外部电路与电感元件之间的功率递送。

[0323] 外部电路可以是配置为形成 A、B、C、D、DE、E、F 类等的放大器的驱动电路,并且可以在驱动具有特定阻抗 Z_o^* 的谐振网络时以最大效率递送功率(即,以驱动电路内的最小损耗),其中, Z_o 可以是复数,并且 $*$ 表示复数共轭。外部电路可以是配置为形成 A、B、C、D、DE、E、F 等类的整流器的被驱动负载,并且可以在其被具有特定阻抗 Z_o^* 的谐振网络驱动时以最大的效率接收功率(即以被驱动负载内的最小损耗),其中, Z_o 可以是复数。外部电路可以是具有特性阻抗 Z_o 的传输线,并且可以在被连接到阻抗 Z_o^* 时以最大效率(即以零反射)交换功率。我们将把外部电路的特性阻抗 Z_o 称为可以被与之相连以便以最大效率进行功率交换的阻抗的复数共轭。

[0324] 通常,电感元件的阻抗 $R+jX$ 可以与 Z_o^* 相差悬殊。例如,如果电感元件具有低损耗(高 X/R),其电阻 R 可以比外部电路的特性阻抗 Z_o 的实部低得多。此外,电感元件本身可以不是谐振网络。连接到电感元件的阻抗匹配网络通常可以产生谐振网络,可以调节其阻抗。

[0325] 因此,可以将阻抗匹配网络设计为使在外部电路与电感元件之间递送的功率的效率最大化(包括任何耦合系统的反射阻抗)。可以通过在期望频率处使阻抗匹配网络和电感元件的组合的阻抗与外部电路(或传输线)的特性阻抗匹配来使递送功率的效率最大化。

[0326] 可以将阻抗匹配网络设计为在外部电路与电感元件之间递送指定功率量(包括任何耦合系统的反射阻抗)的。可以通过在期望的频率处调整阻抗匹配网络和电感元件的组合的阻抗与外部电路(或传输线)的阻抗的复数比来确定递送功率。

[0327] 被连接到电感元件的阻抗匹配网络可以产生磁谐振器。对于诸如使用强耦合的磁谐振器的无线功率传输的某些应用而言,谐振器可能期望高 Q 。因此,可以将电感元件选择为具有低损耗的(高 X/R)。

[0328] 由于匹配电路通常可以在谐振器内部包括附加损耗源,所以还可以将匹配电路的组件选择为具有低损耗。此外,在高功率应用中和/或由于高谐振器 Q ,大的电流在谐振器电路的一部分中行进,并且跨越谐振器内的某些电路元件存在大的电压。此类电流和电压可以超过用于特定电路元件的指定容差,并且对于特定组件而言可能太高而不能承受。在某些情况下,可能难以找到或实现具有足以实现用于某些应用的高 Q 和高功率谐振器的尺寸、成本和性能(损耗和电流/电压额定值)规格的组件(例如,诸如可调谐电容器)。我

们公开了可以在降低对低损耗和 / 或高电流 / 电压额定值的组件要求的同时保持用于磁谐振器的高 Q 的匹配电路的设计、方法、实施方式和技术。

[0329] 可以设计使对匹配电路的某些元件的损耗和电流额定值要求最小化的匹配电路拓扑结构。可以将使低损耗电感元件与阻抗 Z_0 匹配的电路的拓扑结构选择为使得其组件中的一些在与外部电路串联的相关联的高 Q 谐振器外部。可以降低对用于这些组件的低串联损耗或高电流额定值的要求。减轻电路元件上的低串联损耗和 / 或高电流额定值要求在元件需要可变和 / 或具有大的电压额定值和 / 或低并联损耗时特别有用。

[0330] 可以设计使对匹配电路的某些元件的电压额定值要求最小化的匹配电路拓扑结构。可以选择将低损耗电感元件与阻抗 Z_0 匹配的电路的拓扑结构为使得其组件中的一些在与 Z_0 并联的相关联高 Q 谐振器外部。可以降低对用于这些组件的低并联损耗或高电压额定值的要求。减轻电路元件上的低并联损耗和 / 或高电压要求在元件需要可变和 / 或具有大的电流额定值和 / 或低串联损耗时特别有用。

[0331] 可以选择将低损耗电感元件与外部特性阻抗 Z_0 匹配的电路的拓扑结构为使得在将谐振器耦合到外部阻抗时保持相关联谐振模式的场图和因此其高 Q。否则,可能发生到期望谐振模式的低效耦合(可能由于到其它非期望谐振模式的耦合),导致谐振器 Q 的有效降低。

[0332] 对于其中低损耗电感元件或外部电路可能表现出变化的应用而言,可能需要动态地调整匹配电路以在期望频率 f 处使电感元件与外部电路阻抗 Z_0 匹配。由于通常可以存在两个调谐目标,其在期望频率 f 处匹配或控制阻抗水平 Z_0 的实部和虚部,所以在匹配电路中可能存在两个可变元素。对于电感元件而言,匹配电路可能需要包括至少一个可变电容元件。

[0333] 可以由使用两个可变电容器或两个可变电容器的网络的拓扑结构来匹配低损耗电感元件。例如,可变电容器可以是可调谐蝶式电容器,其具有例如用于连接到电源或负载的地线或其它引线的中心端子和至少一个其它端子,跨越该端子,能够改变或调谐可调谐蝶式电容器的电容,或者可以是具有用户可配置、可变电容的任何其它电容器。

[0334] 可以由使用一个可变电容器或可变电容器的网络和一个可变电感器或可变电感器的网络的拓扑结构来匹配低损耗电感元件。

[0335] 可以通过使用一个可变电容器或可变电容器的网络和一个可变互感或可变互感的网络的拓扑结构来匹配低损耗电感元件,所述可变互感将电感元件变压器耦合到外部电路或其它系统。

[0336] 在某些情况下,可能难以找到或实现具有足以实现高 Q、高功率和潜在地高速度、可调谐谐振器设计的尺寸、成本和性能规格的可调谐集总元件。可以将使可变电感元件与外部电路匹配的电路的拓扑结构设计为使得通过改变施加于外部电路中的晶体管、二极管、开关等的驱动信号的频率、振幅、相位、波形、占空因数等来对外部电路赋予某些可变性。

[0337] 可以仅部分地补偿或根本不补偿在谐振频率处的电感元件的电阻 R 和电感 L 的变化。因此,可以由被设计到其它系统组件或规格中的容差来保持适当的系统性能。使用较少可调谐组件或不那么有能力的可调谐组件实现的部分调整可能是足够的。

[0338] 可以设计在使其可调谐元件上的电压 / 电流额定值要求最小化并实现更细(即更

精确,具有较高的分辨率)的总体可调谐性的同时在高功率条件下实现阻抗匹配电路的期望可变性的匹配电路架构。使可变电感元件与阻抗 Z_0 匹配的电路的拓扑结构可以包括固定和可变元件的适当组合和放置,使得可以降低对可变组件的电压/电流要求,并且可以用更细的调谐分辨率来覆盖期望的调谐范围。可以降低不可变的组件上的电压/电流要求。

[0339] 可以使用公开的阻抗匹配架构和技术来实现以下各项:

[0340] 使从功率驱动发电机递送到源低损耗电感元件(和与之无线地耦合的任何其它系统)的功率最大化,或者使其之间的阻抗失配最小化。

[0341] 使从设备低损耗电感元件(和与之无线地耦合的任何其它系统)递送到功率驱动负载的功率最大化,或者使其之间的阻抗失配最小化。

[0342] 从功率驱动发电机向源低损耗电感元件(和与之无线地耦合的任何其它系统)递送受控量的功率,或者在其之间实现一定的阻抗关系。

[0343] 从设备低损耗电感元件(和被与之无线地耦合的任何其它系统)向功率驱动负载递送受控量的功率,或者在其之间实现一定的阻抗关系。

[0344] 用于模分布保持的拓扑结构(高 Q)

[0345] 可以将谐振器结构设计为无线地(间接地)或用硬接线连接(直接地)连接到发电机或负载。

[0346] 考虑诸如由图 28(a) 中的框图所示的一般间接耦合匹配拓扑结构。在那里,标记为 (R, L) 并由用于电感器的电路符号表示的电感元件 2802 可以是在本公开中或在本文提供的参考文献中讨论的任何电感元件,并且其中,阻抗匹配电路 2402 包括部分 A 和 B 或由部分 A 和 B 组成。B 可以是经由无线连接(电感或电容耦合机制)将阻抗 2804、 Z_0 连接到电路的其余部分(A 和电感元件的组合(A+(R, L)))的匹配电路的一部分。

[0347] A 和电感元件 2802 的组合可以形成具有相关联的电流和电荷分布的谐振器 102,该谐振器 102 可以单独地支持高 Q 谐振器电磁模。外部电路 Z_0 和 B 与谐振器 A+(R, L) 之间的有线连接的缺失可以保证高 Q 谐振器电磁模及其电流/电荷分布可以采取其固有(隔离)分布的形式,只要无线耦合的程度不太大即可。也就是说,使用间接耦合匹配拓扑结构,可以自动地保持电磁模、电流/电荷分布和由此的谐振器的高 Q。

[0348] 在其中在外部电路与电感器环路之间使用电感耦合的情况下,可以将此匹配拓扑结构称为间接耦合或变压器耦合或电感耦合。在参考的 Science 文章中描述的中程距离内的无线能量转移的论证中,使用此类耦合类型来将电源耦合到源谐振器并将设备谐振器耦合到灯泡。

[0349] 接下来考虑其中电感元件可以包括电感元件和任何间接耦合的系统的示例。在这种情况下,如上文公开的,并且再次由于外部电路或耦合系统与谐振器之间的有线连接的缺失,耦合系统在对不太大程度的间接耦合的良好近似的情况下可以不影响谐振器的谐振器电磁模分布和电流/电荷分布。因此,如本文定义的,间接耦合匹配电路对于作为谐振器的一部分的任何一般电感元件而言以及无线地耦合到其它系统的电感元件而言可以同样起作用。遍及本公开,我们公开的匹配拓扑结构指的是用于此类一般电感元件的匹配拓扑结构,也就是说,其中,可以将任何附加系统间接地耦合到低损耗电感元件,并且应理解的是那些附加系统不会大大地影响谐振器的谐振器电磁模分布和电流/电荷分布。

[0350] 基于上述讨论,在任何数目的耦合源谐振器、设备谐振器和中间谐振器的无线功

率传输系统中,谐振器之间的无线磁性(电感)耦合不影响每一个谐振器的电磁模分布和电流/电荷分布。因此,当这些谐振器具有高(无载和未扰动) Q 时,在存在无线耦合的情况下可以保持它们的(无载和未扰动) Q 。(请注意,在存在到另一谐振器的无线耦合的情况下可以减小谐振器的被加载 Q ,但是我们可能对保持无载 Q 感兴趣,其仅涉及损耗机制而不涉及耦合/加载机制)。

[0351] 考虑诸如图 28(b) 所示的匹配拓扑结构。图 28(b) 所示的电容器可以表示电容器电路或网络。可以使用所示的电容器来形成谐振器 102 并调整源和设备谐振器的频率和/或阻抗。可以使用标记为“端子连接”2808 的端口将此谐振器 102 直接耦合到阻抗 Z_0 。图 28(c) 示出一般化直接耦合匹配拓扑结构,其中,阻抗匹配电路 2602 包括部分 A、B 和 C 或由其组成。这里,可以将 A、B 和 C 中的电路元件视为谐振器 102 的一部分以及阻抗匹配 2402(和频率调谐)拓扑结构的一部分。B 和 C 可以是经由每个单线连接是将阻抗 Z_0 2804(或网络端子)连接到电路的其余部分(A 和电感元件)的匹配电路 2402 的部分。请注意, B 和 C 可以是空的(短路)。如果我们将部分 B 和 C(即那些单线连接)断开连接或开路,则 A 和电感元件(R, L)的组合可以形成谐振器。

[0352] 高 Q 谐振器电磁模可以使得沿着电感元件的电压分布的分布具有节点,即其中电压为零的位置。一个节点可以近似地在电感元件的长度的中心处,诸如用来形成电感元件的导体的中心(有或没有磁性材料),并且至少一个其它节点可以在 A 内。电压分布可以近似地相对于其电压节点沿着电感元件是反对称的。可以通过将匹配拓扑结构(A、B、C)和/或端子电压(V_1 、 V_2)设计为使得可以在电感元件上近似地保持此高 Q 谐振器电磁模分布来保持高 Q 。可以通过保持电感元件的电压节点(近似地在中心处)近似地在电感元件上保持此高 Q 谐振器电磁模分布。本文提供了实现这些设计目标的示例。

[0353] A、B 和 C 可以是任意的(即不具有任何特殊对称),并且可以选择 V_1 和 V_2 为使得电感元件两端的电压是对称的(中心电感处的电压节点)。可以使用简单的匹配电路但潜在地复杂的端子电压来实现这些结果,因为在两个端子上可能要求依赖拓扑结构的共模信号 $(V_1+V_2)/2$ 。

[0354] 考虑连接谐振器的所有电压节点的‘轴’,其中,再次地,一个节点近似地在电感元件的长度的中心处且其它的在 A 内。(请注意,‘轴’实际上是电路拓扑结构内的一组点(电压节点)且可能不一定对应于实际物理结构的直线轴。‘轴’在物理结构具有对称性的情况下可以与物理轴对准。)如果在两个点中的每一个与‘轴’上的点(即谐振器的电压节点)之间看到的阻抗是相同的,则谐振器的两个点相对于‘轴’是电气对称的。

[0355] B 和 C 可以是相同的($C = B$),并且如图 28(d) 所示,可以将两个端子连接到相对于上文定义并由相反的电压($V_2 = -V_1$)驱动的‘轴’而言电气对称的谐振器(A+(R, L))的任何两个点。谐振器 102 的两个电气对称点可以是电感器环路上的两个电气对称点。谐振器的两个电气对称点可以是 A 内部的两个电气对称点。如果两个电气对称点(相等的部分 B 和 C 中的每一个被连接到该点)在 A 内部,则可能需要将 A 设计为使得这些电气对称点可作为电路内的连接点接入。可以将此拓扑结构称为‘平衡驱动’拓扑结构。这些平衡驱动示例可以具有优点,即例如由于外部电路或电力网处的扰动,可以自动地拒绝可以出现在地线上的任何共模信号(并且其可以不到达谐振器)。在某些平衡驱动示例中,此拓扑结构可能要求比其它拓扑结构更多的组件。

[0356] 在其它示例中,可以将C选择为短路,并且相应的端子被连接到地 ($V = 0$) 和谐振器的电气对称 (零电压) ‘轴’上的任何点,并且B被连接到不在电气对称 ‘轴’上的谐振器的任何其它点,如图 28(e) 所示。电气对称 ‘轴’上的接地点可以是电感元件上的电压节点,近似地在其导体长度的中心处。电气对称 ‘轴’上的接地点可以在电路A内部。在电气对称 ‘轴’上的接地点在A内部的情况下,可能需要将A设计为在电气对称 ‘轴’上包括可电气接入的一个此类点,即可以进行连接的地方。

[0357] 可以将此拓扑结构称为 ‘不平衡驱动’ 拓扑结构。可以近似地保持沿着电感元件的电磁模的近似反对称的电压分布,即使谐振器可能未被完全对称地驱动。原因是高Q和大的相关R对比 Z_0 不匹配需要使得与可以在谐振器 ($A+(R, L)$) 内部流动的大得多的电流相比,小电流可以穿过B和地。在这种情况下,谐振器模上的扰动可以是弱的,并且电压节点的位置可以近似地保持在电感元件的中心位置处。这些不平衡驱动示例可以具有优点,即可以使用简单的匹配电路来将其实现,并且不存在对V1端子处的驱动电压的限制。在某些不平衡驱动示例中,可能要求附加设计以减少可能出现在接地端子处的共模信号。

[0358] 可以将如图 28(c) 所示的一般包括部分A、B和C或由其组成的直接耦合阻抗匹配电路设计为使得电路的导线和组件不扰动电感元件和 / 或谐振器的电磁模的电场和磁场分布并因此保持高谐振器Q。可以使电路的导线和金属组件取向为垂直于电磁模的电场线。可以将电路的导线和组件放置在其中电磁模的电场和磁场弱的区域中。

[0359] 用于减轻元件上的低串联损耗和高电流额定值要求的拓扑结构

[0360] 如果可以认为被用来使低损耗电感元件的小电阻R与外部电路的较大特性阻抗 Z_0 匹配的匹配电路是无损耗的,则 $I_{Z_0}^2 Z_0 = I_R^2 R \leftrightarrow I_{Z_0} / I_R = \sqrt{R / Z_0}$, 并且流过端子的电流比流过电感元件的电流小得多。因此,与端子 (诸如在直接耦合的B、C(图 28(C)) 中) 直接串联地连接的元件可以不载送高电流。然后,即使匹配电路具有有损耗元件,出现在与端子串联的元件中的电阻性损耗可以不导致谐振器的高Q的显著减小。也就是说,那些串联元件中的电阻性损耗可以不显著地降低从 Z_0 到电感元件或相反的功率传输的效率。因此,对于这些组件而言,可能不需要用对低串联损耗和 / 或高电流额定值的严格要求。通常,此类降低的要求可以得到可以被设计到高Q和 / 或高功率阻抗匹配和谐振器拓扑结构中的组件的更广泛选择。这些降低的要求在扩展可以在这些高Q和 / 或高功率阻抗匹配电路中的使用的可变和 / 或高电压和 / 或低并联损耗组件的种类方面尤其有帮助。

[0361] 用于减轻元件上的低并联损耗和高电压额定值要求的拓扑结构

[0362] 如果如上所述用来使低损耗电感元件的小电阻R与外部电路的较大特性阻抗 Z_0 匹配的匹配电路是无损耗的,则使用前述分析,

[0363] $|V_{Z_0} / V_{load}| = |I_{Z_0} Z_0 / I_R (R + jX)| \approx \sqrt{R / Z_0} \cdot Z_0 / X = \sqrt{Z_0 / R} (X / R),$

[0364] 并且,对于低损耗 (高 X/R) 电感元件而言,端子两端的电压通常可以比电感元件两端的电压小得多。因此,被直接并联到端子的元件可能不需要耐受高电压。然后,即使匹配电路具有有损耗元件,出现在与端子并联的元件中的电阻性损耗可以不导致谐振器的高Q的显著减小。也就是说,那些并联元件中的电阻性损耗可以不显著地减小从 Z_0 到电感元件或相反的功率传输的效率。因此,对于这些组件而言,可能不需要用对低并联损耗和 / 或高电压额定值的严格要求。通常,此类降低的要求可以得到可以被设计到高Q和 / 或高功

率阻抗匹配和谐振器拓扑结构中的组件的更广泛选择。这些降低的要求在扩展可以在这些高 Q 和 / 或高功率阻抗匹配和谐振器电路中使用的可变和 / 或高电流和 / 或低串联损耗组件的种类方面尤其有帮助。

[0365] 请注意,上述设计原理可以不同地减小各种元件上的电流和电压,因为其以不同的方式建议使用与 Z_0 串联的网络(诸如直接耦合的 B、C)或使用与 Z_0 并联的网络。用于给定应用的优选拓扑结构可以取决于低串联损耗 / 高电流额定值或低并联损耗 / 高电压额定值元件的可用性。

[0366] 用于实现细可调谐性并减轻可变元件上的高额定值要求的固定和可变元件的组合

[0367] 电路拓扑结构

[0368] 获得具有令人满意的低损耗和高电压或电流额定值的可变电路元件可能很难或花费太大。在本公开中,我们描述了可以结合固定和可变元件的组合、使得可以向电路中的固定元件(其更有可能具有适当的电压和电流额定值)分配大的电压或电流并减轻电路中的可变元件上的电压和电流额定值要求的阻抗匹配拓扑结构。

[0369] 可变电路元件可以具有比给定阻抗匹配应用所要求的那些更大的调谐范围,并且,在那些情况下,仅使用此类大范围元件可能难以获得细的调谐分辨率。在本公开中,我们描述了结合固定和可变元件两者、使得可以用相同的可变元件来实现更细的调谐分辨率的阻抗匹配拓扑结构。

[0370] 因此,使用固定和可变元件两者的组合的拓扑结构可以同时产生两种优点:电路中的灵敏调谐组件两端的减小的电压或从中通过的电流及更细的调谐分辨率。请注意,可以使最大可实现调谐范围与电路设计中的可调谐组件两端的电压或从中通过的电流的最大减小相关。

[0371] 元件拓扑结构

[0372] 可以由使用被串联地或并联地连接的固定和可变组件的组合来实现可变组件的额定值要求的降低和更细的调谐分辨率的拓扑结构来实现单个可变电路元件(与上文所讨论的元件的网络相反)。这可以通过以下事实用数学方式来证明:

[0373] 如果 $x_{|total|} = x_{|fixed|} + x_{|variable|}$,

[0374] 则 $\Delta x_{|total|} / x_{|total|} = \Delta x_{|variable|} / (x_{|fixed|} + x_{|variable|})$,

[0375] 并且 $x_{variable} / x_{total} = x_{variable} / (x_{fixed} + x_{variable})$,

[0376] 其中, $x_{|subscript|}$ 是任何元件值(例如电容、电感), x 是电压或电流,“+sign”表示元件的适当组合(串联加法或并联加法)。请注意,用于 $x_{|subscript|}$ 的下标格式被选择为容易将其与由圆形电感元件封闭的区域的半径区别开(例如, x 、 x_1 等)。

[0377] 此外,通过使用不同类型的可变元件,此原理可用来实现某种类型的可变电气元件(例如,电容或电感),如果不同类型的可变元件被适当地与其它固定元件组合。

[0378] 总之,可以应用拓扑结构最优化算法,其判定具有要求的可调谐范围的固定和可变元件的要求数目、位置、放置、类型和值作为最优化约束并判定可变元件上的电流和 / 或电压的最小化作为最优化目标。

[0379] 示例

[0380] 在以下示意图中,我们示出了用于低损耗电感元件的阻抗匹配和用于低损耗电感

元件的谐振器设计的不同的特定拓扑结构实施方式。另外,我们对每个拓扑结构指出:使用上述原理中的哪些、给出可以用来实现匹配的可变元件的值的等式、可以匹配的复阻抗的范围(使用不等式和史密斯图描述)。对于这些示例而言,我们假设 Z_0 是实数,但是对具有非零虚部的特性阻抗的扩展是简单的,因为其仅仅暗示着匹配网络的组件的要求值的小调整。我们将使用量上的下标 n 暗示到 Z_0 的归一化(除以 Z_0) 的惯例。

[0381] 图 29 示出变压器耦合阻抗匹配电路的两个示例,其中,两个可调谐元件是电容器和两个电感元件之间的互感。如果我们分别定义了用于图 29(a) 的 $X_2 = \omega L_2$ 和用于图 29(b) 的 $X_2 = \omega L_2 - 1/\omega C_2$, 和 $X \equiv \omega L$, 则可调谐元件的要求值是:

$$[0382] \quad \omega C_1 = \frac{1}{X + RX_{2n}}$$

$$[0383] \quad \omega M = \sqrt{Z_0 R (1 + X_{2n}^2)}.$$

[0384] 对于图 29(b) 的拓扑结构而言,特别简单的设计可以是选择 $X_2 = 0$ 。在这种情况下,这些拓扑结构可以匹配满足以下不等式的阻抗:

$$[0385] \quad R_n > 0, X_n > 0,$$

[0386] 其由图 29(c) 的史密斯图上的粗线封闭的区域来示出。

[0387] 给定预先选择好的固定的 M , 可以使用上述提到的具有可调谐 C_2 的匹配拓扑结构替代。

[0388] 图 30 示出直接耦合阻抗匹配电路的六个示例 (a) ~ (f) (其中,两个可调谐元件是电容器) 和直接耦合阻抗匹配电路的六个示例 (h) ~ (m) (其中,两个可调谐元件是一个电容器和一个电感器)。对于图 30(a)、(b)、(c)、(h)、(i)、(j) 的拓扑结构,在两个端子处可能需要共模信号以保持在电感元件的中心处的谐振器的电压节点并因此保持高 Q 。请注意,可以将这些示例描述为图 28(c) 所示的一般拓扑结构的实施方式。对于图 30(d)、(e)、(f)、(k)、(l)、(m) 的对称拓扑结构而言,可能需要反对称地驱动两个端子(平衡驱动)以保持在电感元件的中心处的谐振器的电压节点并因此保持高 Q 。请注意,可以将这些示例描述为图 28(d) 所示的一般拓扑结构的实施方式。将认识到的是本文所使用的电容器的网络通常可以指的是包括一个或多个电容器的任何电路拓扑结构,包括但不限于在此特别公开的使用电容器任何电路或任何其它等效或不同的电路结构(一个或多个),除非明确地规定了或从上下文可清楚另一意义。

[0389] 让我们分别定义用于图 30(a)、(d)、(h)、(k) 的 $Z = R + j\omega L$ 、用于图 30(b)、(e)、(i)、(l) 的 $Z = R + j\omega L + 1/j\omega C_3$ 和用于图 30(c)、(f)、(j)、(m) 的 $Z = (R + j\omega L) \parallel (1/j\omega C_3)$, 其中,符号“ $\parallel$ ”意指“...的并联组合”,并且然后 $R \equiv \text{Re}\{Z\}$, $X \equiv \text{Im}\{Z\}$ 。然后,针对图 30(a) ~ (f),可以由下式来给出可调谐元件的要求值:

$$[0390] \quad \omega C_1 = \frac{X - \sqrt{X^2 R_n - R^2 (1 - R_n)}}{X^2 + R^2},$$

$$[0391] \quad \omega C_2 = \frac{R_n \omega C_1}{1 - X \omega C_1 - R_n},$$

[0392] 并且这些拓扑结构可以匹配满足以下不等式的阻抗:

$$[0393] \quad R_n \leq 1, X_n \geq \sqrt{R_n (1 - R_n)}$$

[0394] 其由图 30 (g) 的史密斯图上的粗线封闭的区域来示出。

[0395] 针对图 30 (h) ~ (m), 可以由下式来给出可调谐元件的要求值:

$$[0396] \quad \omega C_1 = \frac{X + \sqrt{X^2 R_n - R^2(1 - R_n)}}{X^2 + R^2},$$

$$[0397] \quad \omega L_2 = -\frac{1 - X\omega C_1 - R_n}{R_n \omega C_1}.$$

[0398] 图 31 示出直接耦合阻抗匹配电路的三个示例 (a) ~ (c) (其中, 两个可调谐元件是电容器) 和直接耦合阻抗匹配电路的三个示例 (e) ~ (g) (其中, 两个可调谐元件是一个电容器和一个电感器)。对于图 31 (a)、(b)、(c)、(e)、(f)、(g) 的拓扑结构而言, 接地端子被连接在两个相等值的电容器 $2C_1$ 之间 (即在主谐振器的对称轴上), 以保持电感元件的中心处的谐振器的电压节点并因此保持高 Q。请注意, 可以将这些示例描述为图 28 (e) 所示的一般拓扑结构的实施方式。

[0399] 让我们分别定义用于图 31 (a)、(e) 的 $Z = R + j\omega L$ 、用于图 31 (b)、(f) 的 $Z = R + j\omega L + 1/j\omega C_3$ 和用于图 31 (c)、(g) 的 $Z = (R + j\omega L) \parallel (1/j\omega C_3)$, 并且然后 $R \equiv \text{Re}\{Z\}$, $X \equiv \text{Im}\{Z\}$ 。然后, 针对图 31 (a) ~ (c), 可以由下式来给出可调谐元件的要求值:

$$[0400] \quad \omega C_1 = \frac{X - \frac{1}{2}\sqrt{X^2 R_n - R^2(4 - R_n)}}{X^2 + R^2},$$

$$[0401] \quad \omega C_2 = \frac{R_n \omega C_1}{1 - X\omega C_1 - \frac{R_n}{2}},$$

[0402] 并且这些拓扑结构可以匹配满足以下不等式的阻抗:

$$[0403] \quad R_n \leq 1, \quad X_n \geq \sqrt{\frac{R_n}{1 - R_n}}(2 - R_n)$$

[0404] 其由图 31 (d) 的史密斯图上的粗线封闭的区域来示出。

[0405] 针对图 31 (e) ~ (g), 可以由下式来给出可调谐元件的要求值:

$$[0406] \quad \omega C_1 = \frac{X + \frac{1}{2}\sqrt{X^2 R_n - R^2(4 - R_n)}}{X^2 + R^2},$$

$$[0407] \quad \omega L_2 = -\frac{1 - X\omega C_1 - \frac{R_n}{2}}{R_n \omega C_1}.$$

[0408] 图 32 示出直接耦合阻抗匹配电路的三个示例 (a) ~ (c) (其中, 两个可调谐元件是电容器) 和直接耦合阻抗匹配电路的三个示例 (e) ~ (g) (其中, 两个可调谐元件是一个电容器和一个电感器)。对于图 32 (a)、(b)、(c)、(e)、(f)、(g) 的拓扑结构, 可以在电感元件的中心处连接接地端子以保持在该点处的谐振器的电压节点并因此保持高 Q。请注意, 可以将这些示例描述为图 28 (e) 所示的一般拓扑结构的实施方式。

[0409] 让我们分别定义用于图 32 (a) 的 $Z = R + j\omega L$ 、用于图 32 (b) 的 $Z = R + j\omega L + 1/j\omega C_3$ 和用于图 32 (c) 的 $Z = (R + j\omega L) \parallel (1/j\omega C_3)$, 然后 $R \equiv \text{Re}\{Z\}$, $X \equiv \text{Im}\{Z\}$ 。然后, 针对图 32 (a) ~ (c), 可以由下式来给出可调谐元件的要求值:

$$[0410] \quad \omega C_1 = \frac{X - \sqrt{\frac{X^2 R_n - 2R^2(2 - R_n)}{4 - R_n}}}{X^2 + R^2},$$

$$[0411] \quad \omega C_2 = \frac{R_n \omega C_1}{1 - X \omega C_1 - \frac{R_n}{2} + \frac{R_n X \omega C_1}{2(1+k)}},$$

[0412] 其中,由 $M' = -kL'$ 来定义 k ,其中, L' 是每一半电感器环路的电感,并且 M' 是两半之间的互感,这些拓扑结构可以匹配满足以下不等式的阻抗:

$$[0413] \quad R_n \leq 2, \quad X_n \geq \sqrt{2R_n(2 - R_n)}$$

[0414] 其由图 32(d) 的史密斯图上的粗线封闭的区域来示出。

[0415] 针对图 32(e) ~ (g),可以由下式来给出可调谐元件的要求值:

$$[0416] \quad \omega C_1 = \frac{X + \sqrt{\frac{X^2 R_n - 2R^2(2 - R_n)}{4 - R_n}}}{X^2 + R^2},$$

[0417] 在图 30、31、32 的电路中,电容器 C_2 或电感器 L_2 (或者两个电容器 $2C_2$ 或两个电感器 $L_2/2$) 与端子串联连接,并且可以不需要具有非常低的串联损耗或耐受大的电流。

[0418] 图 33 示出直接耦合阻抗匹配电路的六个示例 (a) ~ (f) (其中,两个可调谐元件是电容器) 和直接耦合阻抗匹配电路的六个示例 (h) ~ (m) (其中,两个可调谐元件是一个电容器和一个电感器)。对于图 33(a)、(b)、(c)、(h)、(i)、(j) 的拓扑结构,在两个端子处可能需要共模信号以保持在电感元件的中心处的谐振器的电压节点并且因此保持高 Q 。请注意,可以将这些示例描述为图 28(c) 所示的一般拓扑结构的实施方式,其中, B 和 C 是短路且 A 是不平衡的。对于图 33(d)、(e)、(f)、(k)、(l)、(m) 的对称拓扑结构而言,可能需要反对称地驱动两个端子 (平衡驱动) 以保持在电感元件的中心处的谐振器的电压节点并且因此保持高 Q 。请注意,可以将这些示例描述为图 28(d) 所示的一般拓扑结构的实施方式,其中, B 和 C 是短路且 A 是平衡的。

[0419] 让我们分别定义用于图 33(a)、(d)、(h)、(k) 的 $Z = R + j\omega L$ 、用于图 33(b)、(e)、(i)、(l) 的 $Z = R + j\omega L + 1/j\omega C_3$ 和用于图 33(c)、(f)、(j)、(m) 的 $Z = (R + j\omega L) \parallel (1/j\omega C_3)$, 并且然后 $R \equiv \text{Re}\{Z\}$, $X \equiv \text{Im}\{Z\}$ 。然后,针对图 33(a) ~ (f),可以由下式来给出可调谐元件的要求值:

$$[0420] \quad \omega C_1 = \frac{1}{X - Z_o \sqrt{R_n(1 - R_n)}},$$

$$[0421] \quad \omega C_2 = \frac{1}{Z_o} \sqrt{\frac{1}{R_n} - 1},$$

[0422] 并且这些拓扑结构可以匹配满足以下不等式的阻抗:

$$[0423] \quad R_n \leq 1, \quad X_n \geq \sqrt{R_n(1 - R_n)}$$

[0424] 其用由图 33(g) 的史密斯图上的粗线封闭的区域来示出。

[0425] 针对图 35(h) ~ (m),可以由下式来给出可调谐元件的要求值:

$$[0426] \quad \omega C_1 = \frac{1}{X + Z_o \sqrt{R_n(1-R_n)}},$$

$$[0427] \quad \omega L_2 = \frac{Z_o}{\sqrt{\frac{1}{R_n} - 1}}.$$

[0428] 图 34 示出直接耦合阻抗匹配电路的三个示例 (a) ~ (c) (其中, 两个可调谐元件是电容器) 和直接耦合阻抗匹配电路的三个示例 (e) ~ (g) (其中, 两个可调谐元件是一个电容器和一个电感器)。对于图 34(a)、(b)、(c)、(e)、(f)、(g) 的拓扑结构而言, 接地端子被连接在两个相等值的电容器 $2C_2$ 之间 (即在主谐振器的对称轴上), 以保持电感元件的中心处的谐振器的电压节点并因此保持高 Q。请注意, 可以将这些示例描述为图 28(e) 所示的一般拓扑结构的实施方式。

[0429] 让我们分别定义用于图 34(a)、(e) 的 $Z = R + j\omega L$ 、用于图 34(b)、(f) 的 $Z = R + j\omega L + 1/j\omega C_3$ 和用于图 34(c)、(g) 的 $Z = (R + j\omega L) \parallel (1/j\omega C_3)$, 然后 $R \equiv \text{Re}\{Z\}$, $X \equiv \text{Im}\{Z\}$ 。针对图 34(a) ~ (c), 可以由下式来给出可调谐元件的要求值:

$$[0430] \quad \omega C_1 = \frac{1}{X - Z_o \sqrt{\frac{1-R_n}{R_n}}(2-R_n)},$$

$$[0431] \quad \omega C_2 = \frac{1}{2Z_o} \sqrt{\frac{1}{R_n} - 1},$$

[0432] 并且这些拓扑结构可以匹配满足以下不等式的阻抗:

$$[0433] \quad R_n \leq 1, \quad X_n \geq \sqrt{\frac{R_n}{1-R_n}}(2-R_n)$$

[0434] 其由图 34(d) 的史密斯图上的粗线封闭的区域来示出。

[0435] 针对图 34(e) ~ (g), 可以由下式来给出可调谐元件的要求值:

$$[0436] \quad \omega C_1 = \frac{1}{X + Z_o \sqrt{\frac{1-R_n}{R_n}}(2-R_n)},$$

$$[0437] \quad \omega L_2 = \frac{2Z_o}{\sqrt{\frac{1}{R_n} - 1}}.$$

[0438] 图 35 示出直接耦合阻抗匹配电路的三个示例, 其中, 两个可调谐元件是电容器。对于图 35 的拓扑结构而言, 可以在电感元件的中心处连接接地端子以保持在该点处的谐振器的电压节点并因此保持高 Q。请注意, 可以将这些示例描述为图 28(e) 所示的一般拓扑结构的实施方式。

[0439] 让我们分别定义用于图 35(a) 的 $Z = R + j\omega L$ 、用于图 35(b) 的 $Z = R + j\omega L + 1/j\omega C_3$ 和用于图 35(c) 的 $Z = (R + j\omega L) \parallel (1/j\omega C_3)$, 然后 $R \equiv \text{Re}\{Z\}$, $X \equiv \text{Im}\{Z\}$ 。然后, 可以由下式给出可调谐元件的要求值:

$$[0440] \quad \omega C_1 = \frac{2}{X(1+a) - \sqrt{Z_o R(4-R_n)(1+a^2)}},$$

$$[0441] \quad \omega C_2 = \frac{2}{X(1+a) + \sqrt{Z_o R(4-R_n)(1+a^2)}},$$

[0442] 其中, 由 $M' = -kL'$ 来定义 $a = \frac{R}{2Z_o - R} \cdot \frac{k}{1+k}$ 和 k , 其中, L' 是每一半电感元件的电感, 并且 M' 是两半之间的互感。这些拓扑结构可以匹配满足以下不等式的阻抗:

[0443]

$$R_n \leq 2 \& \frac{2}{\gamma} \leq R_n \leq 4,$$

$$[0444] \quad X_n \geq \sqrt{\frac{R_n(4-R_n)(2-R_n)}{2-\gamma R_n}},$$

[0445] 其中

$$[0446] \quad \gamma = \frac{1-6k+k^2}{1+2k+k^2} \leq 1$$

[0447] 由针对 $k=0$ 的图 35(d)、针对 $k=0.05$ 的图 35(e) 和针对 $k=1$ 的图 35(f) 所示的三个史密斯图上的粗线封闭的区域来示出。请注意, 对于 $0 < k < 1$ 而言, 此拓扑结构能够匹配史密斯图的两个不连接区域。

[0448] 在图 33、34、35 的电路中, 电容器 C_2 或电感器 L_2 (或两个电容器 $2C_2$ 中的一个或两个电感器 $2L_2$ 中的一个) 被与端子并联, 因此可以不需要具有高电压额定值。就两个电容器 $2C_2$ 或两个电感器 $2L_2$ 来说, 两者可能不需要具有高电压额定值, 因为近似相同的电流从其中流过, 因此它们在其两端经历近似相同的电压。

[0449] 对于使用电容器 C_3 示出的图 30 ~ 35 的拓扑结构而言, 电容器 C_3 的使用可以导致频率和阻抗的更细调谐。对于图 30 ~ 35 的拓扑结构而言, 与电感元件串联的固定电容器 C_3 的使用可以保证大部分的高电感元件电压将在此固定电容器 C_3 两端, 因此, 潜在地减轻了对阻抗匹配电路的其它元件 (其中的某些可以是可变的) 的电压额定值要求。此类拓扑结构是否是优选的取决于适当固定的、可调谐组件的可用性、成本和规格。

[0450] 在所有上述示例中, 可以使用成组电容器或被偏压并控制以作为系综来调谐其值的变抗器或二极管组或阵列来实现没有公共端子的一对等值可变电容器。可以使用可调谐蝶式电容器或任何其它可调谐或可变电容器或被偏压并控制以作为系综来调谐其电容值的变抗器或二极管组或阵列来实现具有一个公共端子的一对等值可变电容器。

[0451] 在选择阻抗匹配网络时可以考虑的另一标准是网络对与期望工作频率不同的频率的响应。在电感元件被耦合到的外部电路中生成的信号在期望频率下可以不是单调的 (monochromatic), 而是具有期望频率的周期性的, 例如开关放大器的驱动信号或开关整流器的反射信号。在某些此类情况下, 可能期望抑制进入电感元件的高阶谐波的量 (例如, 以减少来自此元件的这些谐波的辐射)。然后, 阻抗匹配网络的选择可以是充分地抑制进入电感元件的此类谐波的量的一个。

[0452] 阻抗匹配网络可以使得当外部周期信号是可以被视为起到电压源信号 (诸如具有串联谐振负载的 D 类放大器的驱动信号) 的作用的信号时, 外部电路在比基波高的频率下经历的阻抗是高的, 使得在较高的频率下几乎没有电流流过电感元件。在图 30 ~ 35 的拓扑结构之间, 使用电感器 L_2 的那些则可以是优选的, 因为此电感器在高频处呈现出高阻

抗。

[0453] 阻抗匹配网络可以使得当外部周期信号是可以被视为起到电流源信号的作用的信号时,外部电路在比基波高的频率下经历的阻抗是低的,使得在较高频率处在电感元件两端几乎不感生电压。在图 30 ~ 35 的拓扑结构之间,使用电容器 C_2 的那些则是优选的,因为此电容器在高频处呈现出低阻抗。

[0454] 图 36 示出使用一个可变电容器和其余固定电容器的网络的可变电容的四个示例。使用这些网络拓扑结构,可以实现总电容器值的细可调谐性。此外,图 36(a)、(c)、(d) 的拓扑结构可以用来减小可变电容器两端的电压,因为大部分电压可以被分配在固定电容器两端。

[0455] 图 37 示出使用一个可变电感器和固定电容器的网络的可变电容的两个示例。特别地,这些网络可以提供用于可变电抗的实施方式,并且在感兴趣的频率下,可以使用可变电感器的值,使得每个网络符合于净负可变电抗,其可以有效地是可变电容。

[0456] 诸如可调谐电容器和可调谐电感器的可调谐元件可以是可机械地调谐的、可电气地调谐的、可热调谐的等。可调谐元件可以是可变电容器或电感器、变抗器、二极管、肖特基二极管、反向偏置 PN 二极管、变抗器阵列、二极管阵列、肖特基二极管阵列等。二极管可以是 Si 二极管、GaN 二极管、SiC 二极管等。GaN 和 SiC 二极管对于高功率应用而言可能特别具有吸引力。可调谐元件可以是电开关电容器组、电开关机械可调谐电容器组、电开关变抗器阵列组、电开关变压器耦合电感器组等。可调谐元件可以是上列元件的组合。

[0457] 如上所述,耦合的高 Q 磁谐振器之间的功率传输的效率可能受到谐振器在谐振频率处多紧密地匹配和其阻抗多好地与系统中的电源和功率消耗装置匹配的影响。由于包括系统中的无关对象或其它谐振器的相对位置或那些相对位置的变化等多种外界因素可以改变高 Q 磁谐振器的谐振频率和 / 或输入阻抗,所以可能要求可调谐阻抗网络在各种环境或操作情形中保持足够的功率传输水平。

[0458] 所示的电容器的电容值可以被调整以调整磁谐振器的谐振频率和 / 或阻抗。可以电气地、机械地、热学地或用任何其它已知方法来调整电容器。可以手动地或自动地、诸如响应于反馈信号对其进行调整。可以对其进行调整以实现电源与功率消耗装置之间的某些功率传输效率或其它工作特性。

[0459] 可以调整谐振器中的电感器和电感元件的电感值以调整磁谐振器的频率和 / 或阻抗。可以使用包括诸如可调谐电容器、电感器和开关之类的可调谐组件的耦合电路来调整电感。可以使用变压器耦合调谐电路来调整电感。可以通过开启和关闭电感元件中的导体的不同区段和 / 或使用铁磁调谐和 / 或动铁调谐等来调整电感。

[0460] 可以将谐振器的谐振频率调整为或者可以允许其变成更低或更高的频率。可以将谐振器的输入阻抗调整为或者允许其变成更低或更高的阻抗值。可以将由源递送和 / 或由设备接收到的功率的量调整为或者允许其变成更低或更高的功率水平。可以将被递送到源和 / 或由设备从设备谐振器接收到的功率的量调整为或者可以允许其变成更低或更高的功率水平。可以根据系统中的功率消耗装置和根据谐振器附近的对象或材料来调整谐振器输入阻抗、谐振频率和功率水平。可以手动地或自动地调整谐振器输入阻抗、频率和功率水平,并且可以响应于反馈或控制信号或算法而进行调整。

[0461] 可以将电路元件直接地(亦即通过物理电接触)连接到谐振器,例如连接到形成

电感元件和 / 或端子连接器的导体的末端。可以将电路元件焊接到、熔接到、卷曲至、粘合至、夹紧至或紧密地定位于导体,或者使用多种电气组件、连接器或连接技术来将其附着。可以直接地或间接地或电感地将电源和功率消耗装置连接到磁谐振器。可以通过端子连接向谐振器供应电信号或从谐振器获取电信号。

[0462] 本领域的技术人员应理解的是在本文所述的原理的实际实施方式中,可能存在实际组件(电容器、电感器、电阻器等)的值与经由上述等式计算的值、实际信号(电压、电流等)的值与通过对称性或反对称性提出的值以及点(诸如接近于电感元件中心的接地端子的连接点或‘轴’点等)的真实几何位置的值与由对称性或反对称性提出的位置的相关联容差或可接受变化。

[0463] 示例

[0464] 系统方框图

[0465] 我们公开了用于可以在中程距离处无线地对设备供电或充电的无线功率传输系统的高 Q 谐振器的实施例。高 Q 谐振器无线功率传输系统还可以用在尺寸、形状、组成、布置等方面与系统中的任何源谐振器不同的磁谐振器无线地对设备供电或充电。

[0466] 图 1(a) (b) 示出了两个示例性双谐振器系统的高级图示。这些示例性系统中的每个都具有单个源谐振器 102S 或 104S 和单个设备谐振器 102D 或 104D。图 38 示出具有被突出显示的一些特征的系统的高级方框图。被无线地供电或充电的设备 2310 可以包括设备谐振器 102D、设备功率和控制电路 2304 等,以及 DC 或 AC 或 AC 和 DC 两者的功率被转移到的一个或多个设备 2308,或者由其组成。用于系统的能量或功率源可以包括源功率和控制电路 2302、源谐振器 102S 等。从设备谐振器 102D 及功率和控制电路 2304 接收功率的一个或多个设备 2308 可以是如前所述的任何种类的设备 2308。设备谐振器 102D 和电路 2304 在处于源谐振器 102S 附近时向一个或多个设备 2308 递送功率,其可以用来对所述一个或多个设备的电池重新充电、直接地对所述一个或多个设备供电或两者同时进行。

[0467] 源和设备谐振器可以分离很多米,或者其可以相互非常接近,或者其可以在中间分离任何距离。源和设备谐振器可以横向地或轴向地相互偏离。源和设备谐振器可以直接地对准(无横向偏移),或者其可以偏移几米,或者是其之间的任何情况。可以使源和设备谐振器取向为使得由其电感元件封闭的表面面积近似地相互平行。可以使源和设备谐振器取向为使得由其电感元件封闭的表面面积近似地相互垂直,或者可以使其针对其之间的任何相对角(0 至 360 度)取向。

[0468] 源和设备谐振器可以是独立式的,或者可以将其封闭在外壳、容器、套筒或壳体中。这些不同的外壳可以由几乎任何种类的材料组成。对于某些应用而言,诸如特氟隆、REXOLITE、苯乙烯等低损耗角正切材料可能是优选的。可以将源和设备谐振器集成在电源和功率消耗装置中。例如,可以将源和设备谐振器集成到键盘、计算机鼠标、显示器、蜂窝电话等中,使得其在这些设备外面是不可见的。源和设备谐振器可以与系统中的电源和功率消耗装置分开,并且可以通过标准或定制导线、线缆、连接器或插头将其连接。

[0469] 可以从包括计算机的 USB 端口的许多 DC 或 AC 电压、电流和功率源对源 102S 供电。可以从电力网、从墙壁插头、从电池、从电源、从引擎、从太阳能电池、从发电机、从另一源谐振器等对源 102S 供电。源功率和控制电路 2302 可以包括将源电子装置与电源隔离的电路和组件,使得任何反射功率或信号不会通过源输入端子被耦合到外面。源功率和控制电路

2302 可以包括功率因数修正电路,并且可以被配置为监视功率使用以便监视帐户、帐单、控制和类似功能。

[0470] 系统可以是双向操作的。也就是说,在设备谐振器中生成或存储的能量或功率可以被反馈到包括电力网、电池、任何种类的储能单元等电源。源功率和控制电路可以包括功率因数修正电路,并且可以被配置为监视功率使用以便监视用于双向能量流动的帐户、帐单、控制和类似功能。无线能量转移系统可以实现或促进交通工具到电网 (V2G) 的应用。

[0471] 源和设备可以具有允许工作点的调整以补偿变化的环境条件、扰动和负载条件 (其能够影响源和设备谐振器的操作和能量交换的效率) 的调谐能力。调谐能力还可以用来将功率递送复用到多个设备、从多个源到多个系统、到多个重发器或中继器等。可以手动地控制或自动地控制调谐能力,并且可以连续地、周期性地、间歇地或以预定的时间或间隔执行该调谐能力。

[0472] 例如,可以将设备谐振器及设备功率和控制电路集成到设备的任何部分中,诸如电池舱或设备盖或套筒或母板上,并且可以集成在标准可再充电电池或其它储能元件旁边。设备谐振器可以包括设备场重新成形器,其可以将设备谐振器元件与设备功率和控制电子装置的任何组合与用于功率转移的电磁场屏蔽开来,并且其可以使谐振器场偏转远离有损耗设备谐振器元件以及设备功率和控制电子装置。磁性材料和 / 或高电导率场重新成形器可以用来增加谐振器的被扰动品质因数 Q 并增加源和设备谐振器的被扰动耦合因数。

[0473] 可以将源谐振器及源功率和控制电路集成到任何类型的家具、结构、垫子、地毯、相框 (包括数字相框、电子框)、插件、电子设备、交通工具等中。源谐振器可以包括源场重新成形器,其可以将源谐振器元件与源功率和控制电子装置的任何组合与用于功率转移的电磁场屏蔽开来,并且其可以使谐振器场偏转远离有损耗源谐振器元件以及源功率和控制电子装置。磁性材料和 / 或高电导率场重新成形器可以用来增加谐振器的被扰动品质因数 Q 并增加源和设备谐振器的被扰动耦合因数。

[0474] 在图 39 中示出了无线供电设备的示例中的子系统的方框图。可以将功率和控制电路设计为变换来自设备谐振器 102D 的交流电功率并将其转换成适合于对设备供电或充电的稳定直流电功率。可以将功率和控制电路设计为将来自设备谐振器的一个频率处的交流电功率变换成适合于对设备供电或充电的不同频率处的交流电功率。功率和控制电路可以包括阻抗匹配电路 2402D、整流电路 2404、限压电路 (未示出)、限流电路 (未示出)、AC 至 DC 转换器 2408 电路、DC 至 DC 转换器 2408 电路、DC 至 AC 转换器 2408 电路、AC 至 AC 转换器 2408 电路、电池充电控制电路 (未示出) 等,或者由其组成。

[0475] 可以将阻抗匹配 2402D 网络设计为在期望频率处使在设备谐振器 102D 与设备功率和控制电路 2304 之间递送的功率最大化。可以选择并连接阻抗匹配元件,使得保持谐振器的高 Q 。根据操作条件,可以改变或调谐阻抗匹配电路 2402D 以控制从源向设备、从源向设备谐振器、在设备谐振器与设备功率和控制电路之间等递送的功率。可以在设备电路中的任何点处监视功率、电流和电压信号,并且可以使用反馈算法电路和技术来控制组件以实现期望的信号水平和系统操作。可以使用模拟或数字电路技术来实现反馈算法,并且电路可以包括微处理器、数字信号处理器、现场可编程门阵列处理器等。

[0476] 图 39 的第三方框示出可以将来自设备谐振器的 AC 电压功率整流成 DC 电压的整流器电路 2404。在此结构中,整流器 2404 的输出功率可以是到电压钳位电路的输入。电压

钳位电路（未示出）可以限制到 DC 至 DC 转换器 2408D 或 DC 至 AC 转换器 2408D 的输入端处的最大电压。通常，可能期望使用具有大的输入电压动态范围的 DC 至 DC/AC 转换器，使得可以在足够的功率被递送到设备的同时容忍设备位置和操作的大变化。例如，整流器的输出端处的电压水平可以随着设备的功率输入和负载特性的变化而波动并达到高水平。在设备执行不同的任务时，其可以具有变化的功率需求。变化的功率需求能够随着负载特性的变化在整流器的输出端处引起高电压。同样地，在使设备和设备谐振器更接近于和更加远离源时，递送到设备谐振器的功率可以改变，并引起整流器的输出端处的电压水平的变化。电压钳位电路可以防止来自整流器电路的电压输出超过在 DC 至 DC/AC 转换器的工作范围内的预定值。可以使用电压钳位电路来扩展无线能量转移系统的工作模式和范围。

[0477] 设备的功率和控制电路的下一个方框是可以产生稳定的 DC 输出电压的 DC 至 DC 转换器 2408D。DC 至 DC 转换器可以是升压转换器、降压转换器、升压降压转换器、单端初级电感转换器 (SEPIC) 或符合特定应用的要求的任何其它 DC-DC 拓扑结构。如果设备要求 AC 功率，则可以用 DC 至 AC 转换器代替 DC 至 DC 转换器，或者在 DC 至 DC 转换器后面可以跟着 DC 至 AC 转换器。如果设备包含可再充电电池，则设备功率和控制电路的最后方框是可以管理电池供电设备中电池的充电和维护的电池充电控制单元。

[0478] 设备功率和控制电路 2304 可以包含处理器 2410D，诸如微控制器、数字信号处理器、现场可编程门阵列处理器、微处理器或任何其它类型的处理器。可以使用处理器来读取或检测功率和控制电路和设备谐振器的状态或工作点。处理器可以实现算法以解释并调整电路、元件、组件、子系统和谐振器的工作点。可以使用处理器来调整无线供电设备的阻抗匹配、谐振器、DC 至 DC 转换器、DC 至 AC 转换器、电池充电单元、整流器等。

[0479] 处理器可以具有到其它设备或源的无线或有线数据通信链路，并且可以传送或接收可以用来调整系统的工作点的数据。可以在设备电路中的任何点处监视单个频率处或频率范围内的功率、电压和电流信号的任何组合。可以使用模拟或数字或组合模拟和数字技术来监视这些信号。可以在反馈环路中使用这些监视信号，或者可以以多种方式将其报告给用户，或者可以将其存储并在稍后的时间获取。这些信号可以用来向用户警告系统故障，以指示性能或向系统的用户提供音频、视觉、振动等反馈。

[0480] 图 40 示出被配置为向单个或多个设备供应功率的示例性无线功率转移系统的源功率和控制电路 2302 的组件。可以从诸如家用插座的 AC 电压源 2502、诸如电池的 DC 电压源、计算机的 USB 端口、太阳能电池、另一无线功率源等对示例性系统的源功率和控制电路 2302 供电。源功率和控制电路 2302 可以用交流电（诸如用大于 10kHz 并小于 100MHz 的频率）来驱动源谐振器 102S。源功率和控制电路 2302 可以用小于 10GHz 的频率的交流电来驱动源谐振器 102S。源功率和控制电路 2302 可以包括 DC 至 DC 转换器 2408S、AC 至 DC 转换器 2408S、或 AC 至 DC 转换器 2408S 和 DC 至 DC 2408S 转换器两者、振荡器 2508、功率放大器 2504、阻抗匹配网络 2402S 等。

[0481] 可以从多个 AC 至 DC 电压源 2502 对源功率和控制电路 2302 供电，并且其可以包含 AC 至 DC 和 DC 至 DC 转换器 2408S 以提供用于电路组件的所需电压水平以及用于可以用来驱动源谐振器的功率放大器的 DC 电压。可以调整 DC 电压，并且其可以用来控制功率放大器的输出功率水平。源可以包含功率因数修正电路。

[0482] 振荡器 2508 输出可以用作到驱动源谐振器 102S 的功率放大器 2504 的输入。振

荡器频率可以是可调谐的,并且可以改变振荡器信号的振幅作为控制来自功率放大器的输出功率水平的一种手段。可以由模拟电路、由数字电路或由模拟和数字电路的组合来控制振荡器信号的频率、振幅、相位、波形和占空比。控制电路可以包括处理器 2410S,诸如微处理器、数字信号处理器、现场可编程门阵列处理器等。

[0483] 可以使用源和设备调谐器的阻抗匹配块 2402 来调谐源和控制电路及源和设备谐振器。例如,可以针对由于无关对象或系统中的源与设备之间的距离变化而引起的源或设备谐振器的品质因数 Q 的扰动来调整这些电路的调谐。还可以使用这些电路的调谐来感测工作环境,控制到一个或多个设备的功率流,控制到无线功率网络的功率,在检测到不安全或故障模式条件时减少功率等。

[0484] 可以在源电路中的任何点处监视功率、电压和电流信号的任何组合。可以使用模拟或数字或组合模拟和数字技术来监视这些信号。可以在反馈电路中使用这些监视信号,或者可以以多种方式将其报告给用户,或者可以将其存储并在稍后的时间获取。这些信号可以用来向用户警告系统故障,以向用户警告超过的安全阈值,指示性能或向系统的用户提供音频、视觉、振动等反馈。

[0485] 源功率和控制电路可以包含处理器。可以使用处理器来读取功率和控制电路及源谐振器的状态或工作点。处理器可以实现算法以解释并调整电路、元件、组件、子系统和谐振器的工作点。可以使用处理器来调整阻抗匹配、谐振器、DC 至 DC 转换器、AC 至 DC 转换器、振荡器、源的功率放大器等。可以使用系统的处理器和可调整组件来实现频率和 / 或时间功率递送复用方案。处理器可以具有到设备及其它源的无线或有线数据通信链路,并且可以传送或接收可以用来调整系统的工作点的数据。

[0486] 虽然在这些方框图中示出了详细和特定的设计,但本领域的技术人员应清楚的是在示例性系统的精神内可以进行组件和构建块的许多不同修改和重新布置。出于说明的目的概述了电路的划分,并且本领域的技术人员应清楚的是还可以将每个块的组件进一步划分成更小的块或合并或共享。在等效示例中,功率和控制电路可以由单独的离散组件或较大的集成电路组成。例如,整流器电路可以由离散二极管组成,或者使用被集成在单个芯片上的二极管。根据诸如功率或尺寸或成本或应用的设计标准,可以在设计中替换许多其它电路和集成器件。可以将整个功率和控制电路或源或设备电路的任何部分集成到一个芯片中。

[0487] 设备和 / 或源的阻抗匹配网络可以包括电容器或电容器的网络、电感器或电感器的网络、或电容器、电感器、二极管、开关、电阻器等的任何组合。阻抗匹配网络的组件可以是可调整 and 可变的,并且可以被控制以影响系统的效率和工作点。可以通过控制谐振器的连接点、调整磁性材料的磁导率、控制偏压场、调整激励的频率等来执行阻抗匹配。阻抗匹配可以使用或包括任何数目的变抗器、变抗器阵列、开关元件、电容器组、开关和可调谐元件、反偏压二极管、空隙电容器、压缩电容器、BZT 电调谐电容器、MEMS 可调谐电容器、电压可变电介质、变压器耦合调谐电路等或其组合。可变组件可以被机械地调谐、热学地调谐、电气地调谐、压电地调谐等。阻抗匹配的元素可以是硅器件、氮化镓器件、碳化硅器件等。可以将元件选择为耐受高电流、高电压、高功率或电流、电压和功率的任何组合。可以将元件选择为高 Q 元件。

[0488] 可以通过对设备供电的 USB 端口在外部设备上执行源的匹配和调谐计算。设备可

以是计算机、PDA 或其它计算平台。

[0489] 示范系统使用被耦合到设备谐振器的源谐振器来无线地对多个电子消耗设备进行供电 / 再充电, 所述电子消耗设备包括但不限于笔记本计算机、DVD 播放器、投影仪、蜂窝电话、显示器、电视、投影仪、数字相框、灯、TV/DVD 播放器、便携式音乐播放器、断路器、手持式工具、个人数字助手、外部电池充电器、鼠标、键盘、照相机、有源负载等。可以同时地从单个设备谐振器对多种设备供电。设备谐振器可以同时作为源谐振器进行操作。被提供给设备谐振器的功率可以在被转移到其预定设备谐振器之前穿过附加谐振器。

[0490] 监视、反馈和控制

[0491] 所谓的端口参数测量电路可以测量或监视系统中的某些功率、电压和电流信号, 并且处理器或控制电路可以基于那些测量来调整某些设定或工作参数。除这些端口参数测量结果之外, 还可以访问通过系统的电压和电流信号的幅值和相位及功率信号的幅值以测量或监视系统性能。遍及本公开提到的被测量信号可以是端口参数信号以及电压信号、电流信号、功率信号等的任何组合。可以使用模拟或数字信号来测量这些参数, 可以对其进行采样和处理, 并且可以使用许多已知模拟和数字处理技术对其进行数字化或转换。被测量或监视信号可以在反馈电路或系统中用来控制谐振器和 / 或系统的操作。通常, 我们可以将这些被监视或测量信号称为参考信号或端口参数测量或信号, 虽然有时也将其称为错误信号、监视器信号、反馈信号等。我们将把用来控制电路元件的信号 (例如, 用来驱动电压控制电容器的电压) 称为控制信号。

[0492] 在某些情况下, 可以调整电路元件以实现用于源和设备谐振器的指定的或预定的阻抗值。在其它情况下, 可以调整阻抗以在设备谐振器被连接到一个或多个功率消耗装置时实现用于源和设备谐振器的期望阻抗值。在其它情况下, 可以调整阻抗以减少谐振频率的变化、由于源和 / 或设备谐振器的移动而引起的阻抗或功率水平的变化或谐振器附近的环境的变化 (诸如交互材料或对象的移动)。在其它情况下, 可以将源和设备谐振器的阻抗调整为不同的阻抗值。

[0493] 耦合谐振器可以由不同的材料制成, 并且可以包括不同的电路、组件和结构设计, 或者其可以是相同的。耦合谐振器可以包括性能监视和测量电路、信号处理和控制电路或测量和控制电路的组合。某些或所有的高 Q 磁谐振器可以包括可调谐阻抗电路。某些或所有的高 Q 磁谐振器可以包括自动控制的可调谐阻抗电路。

[0494] 图 41 示出具有被配置为测量谐振器的某些参数的端口参数测量电路 3802 的磁谐振器。端口参数测量电路可以测量结构的输入阻抗或反射功率。端口参数测量电路可以被包括在源和 / 或设备谐振器设计中, 并且可以用来测量两个端口电路参数, 诸如 S 参数 (散射参数)、 Z 参数 (阻抗参数)、 Y 参数 (导纳参数)、 T 参数 (传输参数)、 H 参数 (混合参数)、 $ABCD$ 参数 (链、级联或传输参数) 等。这些参数可以用来在施加各种类型的信号时描述线性电力网的电气性能。

[0495] 在不同的工作或耦合方案中可以使用不同的参数来表征电力网络。例如, 可以使用 S 参数来测量匹配和不匹配负载。另外, 可以在多种点处监视磁谐振器内和 / 或源和设备本身内的电压和电流信号的幅值和相位以提供系统性能信息。可以经由灯、读数、喇叭、噪声、振动等用户接口将此信息呈现给系统的用户, 或者可以将其作为数字信号呈现, 或者可以将其提供给系统中的处理器并在系统的自动控制中使用。可以记录、存储此信息, 或者

其可以被高级监视和控制系统使用。

[0496] 图 42 示出其中可以用电压控制电容器 3902 或电容器网络来实现可调谐阻抗网络的磁谐振器的电路图。可以由诸如可编程电压源 3908 等之类的电路和 / 或计算机处理器来调整、调谐或控制此类实施方式。例如,可以响应于由端口参数测量电路 3802 获取并由测量分析和控制算法子系统 3904 处理的数据来调整电压控制电容器。可以从端口参数测量电路或被设计为测量与期望系统工作点的偏差度的其它监视电路导出参考信号。所测量的参考信号可以包括系统中的单个或多个点处和单个频率或多个频率处的电压、电流、复阻抗、反射系数、功率水平等。

[0497] 可以将参考信号提供给测量结果分析和控制算法子系统模块,其可以生成控制信号以改变可调谐阻抗匹配网络中的各种组件的值。控制信号可以改变磁谐振器的谐振频率和 / 或输入阻抗或由源供应的功率水平或由设备吸取的功率水平以实现电源 / 发电机与功率消耗装置 / 负载之间的期望的功率交换。

[0498] 可以使用调整算法来调整磁谐振器的频率和 / 或阻抗。所述算法可以接受关于与用于系统的期望工作点的偏差度的参考信号并输出与该偏差有关的控制系统的可变或可调谐元件的修正或控制信号以使得系统朝着一个或多个期望的工作点返回。可以在谐振器正在无线功率传输系统中交换功率的同时获取用于磁谐振器的参考信号,或者可以在系统操作期间将其从电路中切换出来。可以连续地、周期性地、在越限时、数字地、使用模拟方法来施加或执行对系统的修正。

[0499] 图 43 示出了端到端无线功率传输系统。源和设备两者可以包括端口测量电路 3802 和处理器 2410。标记为“耦合器 / 开关”4002 的方框指示可以由定向耦合器或开关将端口测量电路 3802 连接到谐振器 102,使得能够与功率转移功能相结合地或分开地进行源和设备谐振器的测量、调整和控制。

[0500] 端口参数测量和 / 或处理电路可以与系统中的某些、任何或所有谐振器处于一起。端口参数测量电路可以利用功率传输信号的一部分或者可以利用一定频率范围内的激励信号来测量源 / 设备谐振器响应 (即系统中的任何两个端口之间的传输和反射),并且可以包含振幅和 / 或相位信息。可以用扫频单频信号或多频信号来实现此类测量。可以由包括数模转换器 (DAC)、模数转换器 (ADC)、放大器、信号发生芯片、无源组件等的一个或多个处理器和标准输入 / 输出 (I/O) 电路来生成用来测量和监视谐振器和无线功率传输系统的信号。可以使用诸如网络分析器之类的测试设备或使用自定义电路来实现测量。可以由 ADC 将所测量的参考信号数字化并使用在计算机、微处理器、DSP 芯片、ASIC 等上运行的自定义算法来进行处理。可以在模拟控制环路中处理所测量的参考信号。

[0501] 测量电路可以测量两个端口参数的任何集合,诸如 S 参数、Y 参数、Z 参数、H 参数、G 参数、T 参数、ABCD 参数等。可以使用测量电路来表征驱动和谐振器电路中的各种点处的电流和电压信号,系统的相对两端处的源和设备谐振器的阻抗和 / 或导纳 (即朝着设备向源谐振器匹配网络中看 (图 43 中的“端口 1”)且反之亦然)。

[0502] 该设备可以测量相关信号和 / 或端口参数,解释测量数据,并调整其匹配网络以独立于源的动作使向耦合系统中看的阻抗最优化。源可以测量相关端口参数,解释测量数据,并调整其匹配网络以独立于设备的动作使向耦合系统中看的阻抗最优化。

[0503] 图 43 示出了无线功率传输系统中的源和设备的方框图。可以将系统配置为执行

控制算法,该控制算法主动地调整源和设备调谐器中的任一者或两者中的调谐 / 匹配网络以使耦合系统中的性能最优化。端口测量电路 3802S 可以测量源中的信号并将那些信号传送到处理器 2410。处理器 2410 可以在性能最优化或稳定化算法中使用所测量的信号并基于那些算法的输出来生成控制信号。可以将控制信号施加于调谐 / 阻抗匹配电路 2402S 中的可变电路元件以调整源的工作特性,诸如谐振器中的功率和到设备的耦合。可以将控制信号施加于电源或发电机以开启或关闭电源,增加或降低功率水平,调制供应信号等。

[0504] 在源与设备之间交换的功率可以取决于多种因素。这些因素可以包括源和设备的有效阻抗、源和设备的 Q、源和设备的谐振频率、源和设备之间的距离、源和设备附近的材料和对象的交互等。端口测量电路和处理算法可以同时地工作以在动态和稳态工作条件下调整谐振器参数以使功率转移最大化,保持功率转移恒定,可控制地调整功率转移等。

[0505] 系统实现中的某些、所有或没有源和设备可以包括端口测量电路 3802S 和处理 2410 能力。图 44 示出其中仅源 102S 包含端口测量电路 3802 和处理器 2410S 的端到端无线功率传输系统。在这种情况下,设备谐振器 102D 工作特性可以是固定的,或者可以由模拟控制电路来调整,并且不需要由处理器生成的控制信号。

[0506] 图 45 示出端到端无线功率传输系统。源和设备这二者可以包括端口测量电路 3802,但是在图 45 的系统中,仅源包含处理器 2410S。源和设备可以相互通信,并且某些系统参数的调整可以响应于已经在源与设备之间诸如通过无线通信电路 4202 无线传送的控制信号。无线通信信道 4204 可以与无线功率转移信道 4208 分离,或者其可以是相同的。也就是说,用于功率交换的谐振器 102 还可以用来交换信息。在某些情况下,可以通过调制源或设备电路的组件并感测端口参数或其它监视设备的变化来交换信息。

[0507] 其中源仅包含处理器 2410 的实现可以对其中源能够处理所有调谐和调整“判定”并简单地将控制信号传送回设备(一个或多个)的多设备系统有益。此实现可以使得设备更小且更便宜,因为该实现可以消除对设备中的处理器的需要,或者降低其要求的功能。可以将来自每个设备处的每个端口测量的整个数据集的一部分送回到源微处理器以进行分析,并且可以将控制指令送回到设备。这些通信可以是无线通信。

[0508] 图 46 示出端到端无线功率传输系统。在本示例中,源仅包含端口测量电路 3802 和处理器 2410S。源和设备可以诸如经由无线通信电路 4202 相互通信,并且某些系统参数的调整可以响应于已经在源与设备之间无线地传送的控制信号。

[0509] 图 47 示出可以使用处理器或计算机来自动地调整其频率和阻抗的耦合电磁谐振器 102。可以用包含在被示为图 47 中的 C1、C2 和 C3 示出的电容器网络内的反向偏置二极管、肖特基二极管和 / 或变抗器元件来实现源和设备谐振器的谐振频率调谐和连续阻抗调整。已被构建且说明并在这里描述的电路拓扑结构是示例性的,并且并不意图以任何方式限制自动系统调谐和控制的讨论。可以与在本公开中讨论的测量和控制架构一起利用其它电路拓扑结构。

[0510] 可以用网络分析器 4402A ~ B 或用上述其它手段来测量并用控制器(诸如用 Lab View 4404)来实现设备和源谐振器阻抗和谐振频率。测量电路或设备可以向计算机或处理器输出数据,所述计算机或处理器实现反馈算法并经由可编程 DC 电压源动态地调整频率和阻抗。

[0511] 在一个布置中,用来实现可调谐电容的反向偏置二极管(肖特基、半导体结等)几

乎不吸取 DC 电流,并且可以被具有大的串联输出电阻的放大器反向偏置。此实现可以使得能够在保持磁谐振器中的非常高的 Q 的同时直接向谐振器电路中的可控电路元件施加 DC 控制信号。

[0512] 如果所要求的 DC 偏置电压是不同的,则可以用如图 47 所示的隔直流电容器将 C2 偏置信号与 C1 和 / 或 C3 偏置信号隔离。可以使偏置放大器的输出旁路至电路地以将 RF 电压与偏置放大器隔离,并防止非基波 RF 电压被注入到谐振器中。可以替代地通过谐振器本身中的电感元件来施加用于某些电容器的反向偏置电压,因为电感元件在 DC 下充当短路。

[0513] 端口参数测量电路可以与作为反馈或控制系统的一部分的处理器(包括任何要求的 ADC 和 DAC) 交换信号,所述反馈或控制系统用来自动地调整谐振频率、输入阻抗、由谐振器储存或捕捉的能量或由源递送到设备负载的功率。处理器还可以向在磁谐振器中或被附着于磁谐振器的调谐或调整电路发送控制信号。

[0514] 当利用变抗器或二极管作为可调谐电容器时,在调谐 / 匹配电路中设置与在高反向偏压下操作的可调谐电容器并联和串联的固定电容器可能是有益的。此布置可以通过使可调谐电容器上的工作电压最优化来提供电路和系统稳定性及功率处理能力的改进。

[0515] 可以使用变抗器或其它反向偏置二极管作为电压控制电容器。当要求比单个变抗器组件更高的电压一致性或与之不同的电容时,可以使用变抗器阵列。可以将变抗器布置为被串联地和并联地连接并被视作具有与阵列中的单独变抗器不同的特性的单个双端子组件的 N 乘 M 阵列。例如,可以使用相等变抗器的 N 乘 N 阵列(其中,每个行中的组件被并联地连接并且每个列中的组件被串联地连接)作为具有与阵列中的任何单个变抗器相同的电容但具有是阵列中的单个变抗器的 N 倍的电压一致性的双端子器件。根据阵列中的单独变抗器的参数的可变性和差异,可能需要由电阻器、电感器等组成的附加偏置电路。图 48 中示出了可以适合于磁谐振器应用的未偏置变抗器 4502 的四乘四阵列的示意图。

[0516] 可以通过被设置为与可调谐(变抗器 / 二极管 / 电容器)元件并联和 / 或串联的固定值电容器(一个或多个)的谨慎选择来实现系统性能的进一步改善。切换到电路中或从电路切换出来的多个固定电容器可以能够补偿在测试、开发和可操作无线功率转移系统中可能遇到的谐振器 Q、阻抗、谐振频率、功率水平、耦合强度等的变化。可以使用开关电容器组及其它开关元件组来保证到系统设计所要求的工作频率和阻抗值的收敛。

[0517] 可以针对图 47 所示的电路和系统元件来描述用于隔离和耦合磁谐振器的示例性控制算法。一个控制算法首先“孤立地”调整每个源和设备谐振器环路,也就是,系统中的其它谐振器被“短路”并从系统“去除”。实际上,可以通过使得谐振器在低得多的频率处谐振(诸如通过使 C1 和 / 或 C3 的值最大化)来使谐振器“短路”。此步骤有效地减少谐振器之间的耦合,从而在特定频率和阻抗下有效地将系统简化为单个谐振器。

[0518] 孤立地调谐磁谐振器包括改变调谐和匹配电路中的可调谐元件,直至由端口参数测量电路测量的值处于其预定、计算或测量的相对值为止。可以基于期望的匹配阻抗、频率、强耦合参数等来选择由端口参数测量电路测量的量的期望值。对于下文讨论的示例性算法而言,端口参数测量电路测量一定频率范围内的 S 参数。用来表征谐振器的频率范围可以是所获得的系统性能信息与计算 / 测量速度之间的折衷。对于下文描述的算法而言,频率范围可以是工作谐振频率的近似 $\pm 20\%$ 。

[0519] 可以如下调谐每个隔离谐振器。首先,使不被调整的谐振器短路。接下来,使正被

表征和调整的谐振器中的 C1、C2 和 C3 最小化。在大多数情况下,将存在与 C1、C2 和 C3 并联的固定电路元件,因此,此步骤不将电容值减小至零。接下来,开始增加 C2 直至谐振器阻抗在上述测量频率范围内的任何频率处与“目标”实阻抗匹配为止。初始“目标”阻抗可以小于用于耦合系统的预期工作阻抗。

[0520] 可以调整 C2,直至针对测量范围内的频率实现初始“目标”阻抗为止。然后,可以调整 C1 和 / 或 C3,直至环路在期望工作频率处谐振为止。

[0521] 可以根据上述算法来调整每个谐振器。在孤立地调谐每个谐振器之后,可以应用第二反馈算法以使用于在耦合系统中无线转移功率的谐振频率和 / 或输入阻抗最优化。

[0522] 可以通过测量并处理来自图 43 所示的任一个和 / 或两个“端口”的输入阻抗的实部和虚部的值来确定对耦合系统中的每个谐振器中的 C1 和 / 或 C2 和 / 或 C3 的所要求调整。对于耦合谐振器而言,改变一个谐振器的输入阻抗可以改变另一谐振器的输入阻抗。控制和跟踪算法可以基于一个端口的测量结果来将该端口调整至期望的工作点,并且然后基于另一端口的测量结果来调整该另一端口。可以重复这些步骤直至两侧收敛至期望的工作点为止。

[0523] 可以在源和设备端口两者处测量 S 参数,并且可以进行以下系列的测量和调整。在随后的说明中, Z_0 是输入阻抗且可以是目标阻抗。在某些情况下, Z_0 是 50 欧姆或接近于 50 欧姆。 Z_1 和 Z_2 是可以是与 Z_0 相同的值或者可以不同于 Z_0 的中间阻抗值。 $\text{Re}\{\text{value}\}$ 意指值的实部且 $\text{Im}\{\text{value}\}$ 意指值的虚部。

[0524] 下面阐述可以用来调整两个耦合谐振器的输入阻抗和谐振频率的算法:

[0525] 1) 如上所述地“孤立地”调整每个谐振器。

[0526] 2) 调整源 C1/C3 直至在下, $\text{Re}\{S_{11}\} = (Z_1 + / - \epsilon_{\text{Re}})$ 如下:

[0527] - 如果 $\text{Re}\{S_{11}@ \omega_o\} > (Z_1 + \epsilon_{\text{Re}})$, 则减小 C1/C3。如果 $\text{Re}\{S_{11}@ \omega_o\} < (Z_0 - \epsilon_{\text{Re}})$, 则增加 C1/C3。

[0528] 3) 调整源 C2 直至在 ω_o 下, $\text{Im}\{S_{11}\} = (+/- \epsilon_{\text{Im}})$ 如下:

[0529] - 如果 $\text{Im}\{S_{11}@ \omega_o\} > \epsilon_{\text{Im}}$, 则减小 C2。如果 $\text{Im}\{S_{11}@ \omega_o\} < -\epsilon_{\text{Im}}$, 则增加 C2。

[0530] 4) 调整设备 C1/C3 直至在 ω_o 下, $\text{Re}\{S_{22}\} = (Z_2 + / - \epsilon_{\text{Re}})$ 如下:

[0531] - 如果 $\text{Re}\{S_{22}@ \omega_o\} > (Z_2 + \epsilon_{\text{Re}})$, 则减小 C1/C3。如果 $\text{Re}\{S_{22}@ \omega_o\} < (Z_0 - \epsilon_{\text{Re}})$, 则增加 C1/C3。

[0532] 5) 调整设备 C2 直至在 ω_o 下, $\text{Im}\{S_{22}\} = 0$ 如下:

[0533] - 如果 $\text{Im}\{S_{22}@ \omega_o\} > \epsilon_{\text{Im}}$, 则减小 C2。如果 $\text{Im}\{S_{22}@ \omega_o\} < -\epsilon_{\text{Im}}$, 则增加 C2。

[0534] 我们已通过重复步骤 1 ~ 4 直至 $(\text{Re}\{S_{11}\}, \text{Im}\{S_{11}\})$ 和 $(\text{Re}\{S_{22}\}, \text{Im}\{S_{22}\})$ 两者在 ω_o 下收敛到 $((Z_0 + / - \epsilon_{\text{Re}}), (+/- \epsilon_{\text{Im}}))$ 为止实现了工作系统,其中, Z_0 是期望匹配阻抗且是期望工作频率。这里, ϵ_{Im} 表示 ω_o 下的虚部与 0 的期望值的最大偏差,并且 ϵ_{Re} 表示实部与 Z_0 的期望值的最大偏差。应理解的是可以调整 ϵ_{Im} 和 ϵ_{Re} 以便以系统性能(效率)的潜在代价来增加或减少到收敛的步骤数目。还应理解的是可以按照除上述之外的多种序列并以多种方式来执行步骤 1 ~ 4 (即,首先调整源虚部,然后是源实部;或者首先调整设备实部,然后是设备虚部等)。可以在步骤 1 ~ 4 期间调整中间阻抗 Z_1 和 Z_2 以减少收敛所需的步骤的数目。期望或目标阻抗值可以是复数,并且在时间方面或在不同的操作方案中可以改变。

[0535] 可以按照任何次序、以任何组合和任何次数来执行步骤 1~4。已经描述了上述算法,对步骤或所述实施方式的修改对于本领域的技术人员来说可以是显而易见的。以与能够替换地使用阻抗或导纳来分析线性电路以导出相同结果的相同方式,可以用任何等效线性网络端口参数测量(即,Z 参数、Y 参数、T 参数、H 参数、ABCD 参数等)或上述其它监视信号来实现上述算法。

[0536] 由于由源和设备谐振器之间的互感 M (耦合)的变化引起的“加载”电阻 R_s 和 R_d 的变化,可能需要重新调谐谐振器。电感元件本身的电感 L_s 和 L_d 的变化可以是由外部对象的影响引起的(如先前所讨论的),并且还可能要求补偿。可以用上述调整算法来缓解此类变化。

[0537] 可以使用定向耦合器或开关来将端口参数测量电路连接到源谐振器和调谐/调整电路。端口参数测量电路可以在其在无线功率传输系统中交换功率的同时测量磁谐振器的性质,或者可以在系统操作期间将其从电路中切换出来。端口参数测量电路可以测量参数且处理器可以在启动时或在某些间隔或响应于某些系统工作参数的变化来控制磁谐振器的某些可调谐元件。

[0538] 无线功率传输系统可以包括改变或调谐源和设备谐振器的阻抗和/或谐振频率的电路。请注意,虽然在源和设备谐振器两者中示出了调谐电路,但可以替代地仅在源或设备谐振器中包括该电路,或者可以仅在某些源和/或设备谐振器中包括该电路。还请注意虽然我们将该电路称为“调谐”谐振器的阻抗和/或谐振频率,但此调谐操作仅仅意味着正在改变诸如结构的电感或电容的各种电气参数。在某些情况下,可以改变这些参数以实现特定的预定值,在其它情况下,可以响应于控制算法将其改变或者稳定正在变化的目标性能值。在某些情况下,参数可以根据温度、区域中的其它源或设备、环境等而变。

[0539] 应用

[0540] 对于每个所列应用而言,本领域的技术人员应认识到存在可以将用来实现无线功率传输的谐振器结构与正在进行供电或被供电的对象连接或集成的多种方式。谐振器可以在物理上与源和设备对象分离。谐振器可以使用传统电感技术或通过用例如导线或线缆的直接电连接供应功率或从对象去除功率。所述电连接可以是谐振器输出到对象上的 AC 或 DC 功率输入端口。所述电连接可以是对象的输出功率端口到谐振器输入。

[0541] 图 49 示出在物理上与电源分离的源谐振器 4904 和在物理上与设备 4900(在此图示中为膝上型计算机)分离的设备谐振器 4902。通过电连接,可以将功率供应给源谐振器,并且可以直接从设备谐振器获取功率。本领域的技术人员通过经引用结合的材料将理解的是上述谐振器的形状、尺寸、材料组成、布置、位置和取向是以非限制性示例的方式提供的,并且可以由针对多种应用公开的技术来支持任何和所有这些参数的广泛变化。

[0542] 继续膝上型计算机的示例,并且在没有限制的情况下,可以将设备谐振器在物理上连接到其正在供电或充电的设备。例如,如图 50a 和图 50b 所示,可以将设备谐振器 5002(a) 集成到设备 5000 的外壳中或 (b) 可以由适配器来将其附着。谐振器 5002 可以是(图 50b~d)或者可以不是(图 50a)在设备上可见的。可以将谐振器附着于设备、集成到设备中、用插头插入设备中等等。

[0543] 可以将源谐振器在物理上连接到向系统供应功率的源。如上文针对设备和设备谐振器所述,存在可以将谐振器附着于、连接到电源或与电源集成的多种方式。本领域的技术

人员将理解的是存在可以在无线功率传输系统中集成谐振器的多种方式,并且源和设备可以利用相似或不同的集成技术。

[0544] 再次继续技术膝上型计算机的示例,并且在没有限制的情况下,可以由无线功率传输系统来对膝上型计算机供电、充电或再充电。可以使用源谐振器来供应无线功率,并且可以使用设备谐振器来捕捉无线功率。可以如图 50d 所示将设备谐振器 5002 集成到屏幕(显示器)的边缘中,和/或如图 50c 所示集成到膝上型计算机的底座中。可以将源谐振器 5002 集成到膝上型计算机的底座中,并且可以将设备谐振器集成到屏幕的边缘中。还可以或替代地将谐振器附着于电源和/或膝上型计算机。还可以或替代地将源和设备谐振器在物理上与电源和膝上型计算机分离,并且可以用线缆进行电连接。还可以或替代地将源和设备谐振器在物理上与电源和膝上型计算机分离,并且可以使用传统电感技术来进行电耦合。本领域的技术人员将理解的是虽然先前的示例涉及到膝上型计算机的无线功率传输,但针对本申请公开的方法和系统可以适当地适合于与其它电气或电子设备一起使用。通常,源谐振器可以在源的外部并向设备谐振器供应功率,所述设备谐振器又为设备供应功率,或者可以将源谐振器连接到源并向设备谐振器供应功率,设备谐振器又向设备的一部分供应功率,或者源谐振器可以在源内部并向设备谐振器供应功率,设备谐振器又向设备的一部分供应功率,以及这些的任何组合。

[0545] 在一些系统中,源,或源谐振器可以是可移动的或活动的并且可以跟踪、遵循或附着于源或源谐振器。对于可移动设备,可能优选的是保持源谐振器和设备谐振器之间的对准以最大化功率转移效率。在设备移动时,源或源谐振器可以跟踪设备或设备谐振器的位置并且调整其位置以确保最优或改进的对准。通过该源进行的设备跟踪可以是自动的。源可以包括用于确定设备的位置的传感器和用于例如通过致动器、电动机、磁体等等来调整其位置的装置。源可以通过测量功率效率、磁场、所述设备所生成的信号、光学识别等等来感测设备的位置。在一些实施例中,源可以部分地附着于设备。源和设备可以包括将源和设备附着在一起的磁体。磁性附件(magnetic attachment)可以通过诸如桌子之类的支承结构来起作用。磁性附件将通过支承结构来附着该源,从而使得可自由移动的源跟随设备移动而移动。例如,继续膝上型计算机示例,安装在可自由移动的结构上的源可以安装在诸如桌表面、坞站(dock)、盒子等等之类的支承结构下面。具有被置于桌表面之上的磁性附件的膝上型计算机将把源附着在支承结构下面并且导致准确对准。此外,当具有设备谐振器的膝上型计算机被移动,或在支承结构之上滑动时,由于源和设备之间的磁引力,在不需要主动运动机制的情况下可自由移动的源和源谐振器可以跟随膝上型计算机的设备谐振器。在一些实施例中,可以使用主动和被动运动机制的组合,以使得例如将源移动到与设备初始对准,于是磁性附着装置确保源可以被动地跟随设备移动而移动。

[0546] 本文公开的系统或方法可以向电气或电子设备提供功率,所述电气或电子设备诸如但不限于电话、蜂窝电话、无绳电话、智能电话、PDA、音频设备、音乐播放器、MP3 播放器、无线电、便携式无线电和播放器、无线头戴式受话器、无线耳机、计算机、膝上型计算机、无线键盘、无线鼠标、电视、显示器、平面屏幕显示器、计算机显示器、嵌入家具中的显示器、数字相框、电子书(例如 Kindle、电子墨水、杂志等)、遥控单元(也称为控制器、游戏控制器、命令器、表决器等,并用于多个电子设备的遥控,诸如电视、视频游戏、显示器、计算机、视听设备、灯等)、照明设备、冷却设备、空气循环设备、净化设备、个人助听器、电动工具、安全系

统、警报、钟、闪光灯、警报器、传感器、扩音器、电子锁、电子键区、照明开关、其它电气开关等。这里，术语电子锁用来指示位于门上的以电子方式操作（例如，具有电子组合钥匙、磁卡、RFID 卡等）的门锁而不是机械钥匙锁。此类锁常常是电池操作的，具有当电池耗尽时所可能停止工作、将用户锁在外面的可能性的风险。在用如本文所述的无线功率传输实施方式来对电池充电或完全替换的情况下可以避免这一点。

[0547] 这里，术语照明开关（或其它电子开关）意图指示开启 / 关闭房间的另一部分中的设备（例如天花板的中心处的照明灯具）的房间的一个部分中的任何开关（例如，在房间的墙壁上）。为了用直接连接来安装此类开关，将必须一路铺设从设备到开关的导线。一旦此类开关被安装在特定地点处，则其可能非常难以移动。可替换地，可以设想‘无线开关’，其中，“无线”意指无线地传送开关（开 / 关）命令，但是此类开关传统上需要电池以进行操作。通常，在房子周围具有太多电池操作的开关可能是不切实际的，因为那么多电池将需要周期性地更换。因此，无线通信开关可能更方便，条件是无线地对其进行供电。例如，已经存在电池供电的通信无线门铃，但是其中，仍必须周期性地更换其中的电池。可以使得远程门铃按钮完全是无线的，其中，可能不会再次需要不断地更换电池。请注意，在这里，术语‘无绳’或‘无线’或‘通信无线’用来指示在设备与另一电气组件之间存在无绳或无线通信装置，诸如用于无绳电话的基站、用于无线键盘的计算机等。本领域的技术人员将认识到任何电气或电子设备可以包括无线通信装置，并且本文所述的系统和方法可以用来向设备添加无线功率传输。如本文所述，到电气或电子设备的功率可以是来自外部或内部源谐振器递送来，到设备或设备的一部分。无线功率传输可以显著地减少对用于进入源谐振器附近区域的设备的电池进行充电和 / 或更换的需要并从而可以减少常常与电池相关联的停机时间、成本和处理问题。

[0548] 本文所述的系统和方法可以在不需要有线功率或电池的情况下向灯提供功率。也就是说，本文所述的系统和方法可以在没有到任何电源的有线连接的情况下向灯提供功率，并且跨越中程距离（诸如跨越四分之一米、一米、三米等的距离）非辐射地向灯提供能量。本文所使用的‘灯’可以指的是光源本身，诸如白炽灯泡、荧光灯泡灯、卤素灯、气体放电灯、荧光灯、霓虹灯、高强度放电灯、钠蒸气灯、汞蒸气灯、电致发光灯、发光二极管（LED）灯等；作为灯固定装置的一部分的灯，诸如台灯、落地灯、吊灯、轨道灯、凹陷灯固定装置等；与其它功能集成的灯固定装置，诸如灯具 / 吊扇固定装置和照明相框等。同样地，本文所述的系统和方法可以降低用于安装灯的复杂性，诸如通过最小化电气布线的安装，并允许用户对有线功率源的最小注意力来放置或安装灯。例如，可以将灯放置在源谐振器附近的任何地方，其中，可以相对于灯的位置将源谐振器安装在多个不同的位置上，诸如在上面房间的地板上（例如，在吊灯的情况下，并且尤其是当上面房间是阁楼时）；在隔壁房间的墙壁上、在下面房间的天花板上（例如，在落地灯的情况下）；如本文所述的在房间内的组件中或在房间的基础设施中；等等。例如，常常将灯 / 吊扇组合安装在主卧室中，并且主卧室常常具有在其上面的阁楼。在这种情况下，用户可以更容易地将灯具 / 吊扇组合安装在主卧室中，诸如通过简单地将灯 / 吊扇组合安装到天花板，并将源线圈（用插头插入房屋有线 AC 电源）放置在安装的固定装置之上的阁楼中。在另一示例中，灯可以是外部灯，诸如泛光灯或安全灯以及安装在结构内部的源谐振器。安装照明的方式可以特别地对租用房子的用户有益，因为现在其可能能够在不需要安装新的电气布线的情况下安装灯和此类其它电气

组件。还可以通过如本文所述的近场通信或由传统无线通信方法来传送对于灯的控制。

[0549] 本文所述的系统和方法可以从源谐振器向被嵌入设备组件中或在设备组件外面的设备谐振器提供功率,使得设备组件可以是传统电气组件或固定装置。例如,可以用被集成到固定装置中的设备谐振器来设计或改装吊灯,或者吊灯可以是传统有线固定装置,并用插头插入装配有设备谐振器的单独电气装置。在示例中,电气机构可以是被设计为具有用于例如从被放置在上面房间(例如阁楼)的地板上的源谐振器接收无线功率的设备谐振器的无线分线盒,并且其包含从设备谐振器供电的许多传统电源插座(outlet)。安装在天花板上的无线分线盒现在可以向天花板上的传统有线电气组件提供功率(例如,吊灯、轨道灯、吊扇)。因此,现在可以在不需要将导线穿过建筑物的基础设施的情况下将吊灯安装到天花板。可以在多个应用中使用到传统电源插座分线盒的此类设备谐振器,包括被设计成用于建筑物的内部或外部、被制成便携式的、被制成用于交通工具等。无线功率可以被转移通过诸如木材、壁板、绝缘、玻璃、砖头、石头、混凝土等常见建筑物材料。降低的安装成本、可重配置性和增加的应用灵活性的益处相对于传统有线安装而言可以为用户提供显著的益处。用于传统电源插座分线盒的设备谐振器可以包括用于促进从设备谐振器到传统电源插座的功率转移的多个电气组件,诸如将实现高效的功率转移所需的特定频率转换成线电压的电源电子装置、可以将高频 AC 转换成可用电压和频率(AC 和 / 或 DC) 的功率捕捉电子装置、使捕捉设备和功率输出同步并保证一致、安全且最大程度地高效的功率转移的控制等。

[0550] 本文所述的系统和方法可以为在潮湿、严酷、受控等的环境中(其在外面且暴露于雨)、在游泳池/桑拿浴/淋浴中、在海洋应用中、在密闭组件中、在防爆间中、在外部标志上、挥发性环境中的严酷工业环境(例如来自挥发性蒸气或空气传播有机物,诸如在谷粮仓或面包店中)等操作的灯或电气组件提供优点。例如,安装在游泳池的水位下面的灯正常地难以用导线接起,并且需要是水封的,尽管需要外部导线。但是,使用本文公开的原理的游泳池灯可以被更容易地制成水封的,因为可以不需要外部导线。在另一示例中,诸如包含挥发性蒸气的防爆间可能不仅需要是密闭的,而且可能需要使所有电接点(其可以产生火花)被密封。再次地,本文公开的原理可以提供为此类应用供应密封电气组件的方便方式。

[0551] 本文公开的系统和方法可以向游戏控制器应用提供功率,诸如向远程手持式游戏控制器。这些游戏控制器传统上可能已经单独地由电池来供电,其中,游戏控制器的使用和功率分布导致了电池、电池组、可再充电电池等的频繁更换,这对于在游戏控制器的一贯使用而言可能是不理想的,诸如在延长的玩游戏期间。可以将设备谐振器放置到游戏控制器中,并且可以将连接到电源的源谐振器放置在附近。此外,游戏控制器中的设备谐振器可以在没有电池的情况下直接向游戏控制器电子装置提供功率;向电池、电池组、可再充电电池等提供功率,其随后向游戏控制器电子装置提供功率;等等。游戏控制器可以利用多个电池组,其中每个电池组装配有设备谐振器,因此,无论是否用插头接通游戏控制器电源,在处于源谐振器附近时就可以不断地再充电。源谐振器可以位于用于游戏的主游戏控制器装置中,其中可以从 AC ‘房屋’电源向主游戏控制器装置和源谐振器供应功率;位于扩展装置形式的 AC 电源中,诸如在被集成到‘延长线’中的源谐振器中;位于游戏椅中,其是被用插头插入墙壁 AC 中、用插头插入主游戏控制器装置、由游戏椅中的电池组供电中的至少一种方

式;等等。可以以本文所述的任何配置来设置并实现源谐振器。

[0552] 本文公开的系统和方法可以将设备谐振器集成到电池组中,诸如可与其它电池组互换的电池组。例如,某些便携式设备可能以高速率耗尽电能,使得用户可能需要在手边具有多个可互换电池组以供使用,或者用户可能在源谐振器范围之外操作设备并需要额外的电池组以继续操作,诸如电动工具、便携式灯、遥控交通工具等。使用本文公开的原理不仅提供了设备谐振器使能的电池组在使用中且在范围内时被再充电的方式,而且提供了用于不在使用中且被放置在源谐振器的范围内的电池组的再充电的方式。这样,电池组可以在用户耗尽正被使用的电池组的电量时随时准备好被使用。例如,用户可能正在用无线电动工具进行工作,其中,当时需求可能大于直接从源谐振器供电所能够实现的。在这种情况下,尽管本文所述的系统和方法可以向处于范围内的使用中的电池组提供充电功率,电池组仍可能耗尽,因为功率使用可能已超过再充电速率。而且,在使用设备时,用户可能仅是移入和移出范围,或者完全在范围外。然而,用户可以将额外电池组放置在源谐振器附近,其已在未使用时被再充电,并且现在被充分地充电以供使用。在另一示例中,用户可能正在用远离源谐振器附近的电动工具进行工作,但是留下补充电池组在源谐振器的附近充电,诸如在具有便携式源谐振器或延长线源谐振器的房间中、在用户的交通工具中、在用户的工具箱中等等。这样,用户可能不用担心花费时间和/或记住将其电池组插上电源以供将来使用。用户可能只需用已充电的电池组来替换已使用的电池组并将已使用的一个放置在源谐振器附近以再充电。可以将设备谐振器构建到具有已知电池形状因数和覆盖区的外壳中,并且可以替换已知设备中的应用中的传统化学电池。例如,可以将设备谐振器构建到具有相当于AA电池、AAA电池、D电池、9V电池、膝上型计算机电池、蜂窝电话电池等的机械尺寸的外壳中。除设备谐振器之外,该外壳可以包括较小的“纽扣电池”以存储电量并在时间或距离方面提供延长操作。除纽扣电池之外或作为其替代,可以将其它储能设备与设备谐振器或任何相关联的功率转换电路集成起来。这些新的能量组可以提供与传统电池所提供的类似的电压和电流水平,但是可以由设备谐振器、能量转换电子装置、小电池等组成。这些新的能量组可以比传统电池更持久,因为其可以被更容易地再充电,并且可以在其位于无线功率区中时不断地再充电。另外,此类能量组可以比传统电池更轻,使用和储存起来可以更安全,可以在更广的温度和湿度范围内操作,在被丢弃时对环境的损害更少等等。如本文所述,当在如本文所述的无线功率区中使用这些能量组时,其可以超过产品的寿命。

[0553] 本文所述的系统和方法可以用来为视觉显示器供电,诸如膝上型计算机屏幕的情况,但是更一般地,将包括现在的电气和电子组件中利用的大量各种各样的显示器,诸如在电视、计算机监视器、台式计算机监视器、膝上型计算机显示器、数字相框、电子书、移动设备显示器(例如在电话、PDA、游戏机、导航设备、DVD播放器上)等中。可以通过本文所述的无线功率传输系统中的一个或多个来供电的显示器还可以包括嵌入式显示器,诸如被嵌入电子组件(例如,音频设备、家用电器、汽车显示器、娱乐设备、现金出纳机、遥控器)中、家具中、建筑物基础设施中、交通工具中、物体的表面上(例如在交通工具、建筑物、衣物、标志、运输工具的表面上)等。显示器可以是非常小的,具有微小的谐振器件,诸如在如本文所述的智能卡中,或者是非常大的,诸如在广告牌中。使用本文公开的原理供电的显示器还可以是多种成像技术中的任何一个,诸如液晶显示器(LCD)、薄膜晶体管LCD、无源LCD、阴极射线管(CRT)、等离子体显示器、投影仪显示器(例如,LCD、DLP、LCOS)、表面传导电子

发射显示器 (SED)、有机发光二极管 (OLED) 等。源线圈配置可以包括通过如本文所述的无线延长线附着于主电源, 诸如建筑物电源、交通工具电源等; 附着于组件电源, 诸如电气组件的底座 (例如, 计算机的底座、TV 的线缆箱); 中间继电器源线圈等等。例如, 将数字显示器悬挂在墙壁上可能是非常吸引人的, 诸如无线的或通过便携式存储器件来接收其信息信号的数字相框的情况, 但是由于需要不雅观的电源线可使得其不美观。然而, 使用嵌入数字相框中的设备线圈 (诸如被缠绕在框架部分内) 可以允许在根本没有导线的情况下悬挂数字相框。然后可以将源谐振器放置在数字相框附近, 诸如在墙壁另一面的隔壁房间中, 通过诸如本文所述的无线延长线、通过房间中央源谐振器等直接用插头插入传统电源插座中。

[0554] 本文所述的系统和方法可以提供电子装置的不同部分之间的无线功率传输。继续膝上型计算机的示例, 并且在没有限制的情况下, 膝上型计算机的屏幕可能要求来自膝上型计算机的底座的功率。在这种情况下, 在传统上已经通过屏幕与底座之间的膝上型计算机的铰链连接部分从膝上型计算机的底座到屏幕直接电连接来传送电功率。当利用有线连接时, 有线连接可能易磨坏并破损, 膝上型计算机的设计功能可能受到要求的直接电连接的限制, 膝上型计算机的设计美感可能受到要求的直接电连接的限制等等。然而, 可以在底座与屏幕之间进行无线连接。在这种情况下, 可以将设备谐振器放置在屏幕部分中以对显示器供电, 并且可以由第二设备谐振器、由传统有线连接、由谐振器 - 电池 - 直接电连接的混合等来对底座供电。这样, 不仅由于去除物理有线连接而可以改善功率连接的可靠性, 而且, 由于没有与铰链相关联的物理导线, 可以允许设计师来改善膝上型计算机的铰链部分的功能和 / 或美学设计。在这里已经再次地使用膝上型计算机来举例说明本文公开的原理如何可以改善电气或电子设备的设计, 并且不应以任何方式将其视为限制性的。例如, 具有分离的物理部分的许多其它电气设备可以受益于本文所述的系统和方法, 诸如在门上具有电气功能件的冰箱, 包括制冰机, 传感器系统、灯等; 被接头分离的具有活动部分的机器人; 汽车的动力系统和汽车门中的组件等等。本领域的技术人员将认识到经由设备谐振器从外部源谐振器向设备提供功率或经由设备谐振器从外部或内部源谐振器向设备的一部分提供功率的能力可跨越电气和电子设备的范围广泛地适用。

[0555] 本文公开的系统和方法可以提供设备之间 (诸如已充电设备与未充电设备之间) 的电功率的共享。例如, 已充电设备或器具可以充当源并向附近的设备或器具发送预定量的能量、拨入量的能量、请求和批准量的能量等。例如, 用户可能具有蜂窝电话和数字式照相机, 两者都能够通过嵌入式源和设备谐振器来传送和接收功率, 并且发现设备中的一个 (例如蜂窝电话) 的电量是低的。用户然后可以从数字式照相机向蜂窝电话转移电量。这些设备中的源和设备谐振器可以利用相同物理谐振器进行传输和接收, 利用单独的源和设备谐振器, 可以将一个设备设计为接收并传送, 并将另一个设计为仅接收, 可以将一个设备设计为仅传送并将另一个设计为仅接收等等。

[0556] 为了防止完全耗尽设备的电池, 可以具有允许用户指定接收设备有权获得多少电源的设定。例如, 对可用于外部设备的功率的量施加限制并有能力在电池功率降低到低于阈值时关闭功率传输可能是有用的。

[0557] 本文所述的系统和方法可以向与电气装置相关联的附近电气或电子组件提供无线功率转移, 其中, 源谐振器在电气装置中且设备谐振器在电子组件中。还可以将源谐振器连接到、用插头插入、附着到电气装置, 诸如通过电气装置的通用接口 (例如, USB 接口、

PC 卡接口)、附加电源插座、万用附着点等。例如,源谐振器可以在书桌上的计算机的结构内部,或者被集成到某一对象、垫子等中,其被连接到计算机,诸如到计算机的 USB 接口之一中。在被嵌入对象、垫子等中并通过 USB 接口供电的源谐振器的示例中,可以在不需要集成到任何其它电子设备中的情况下容易地将源谐振器添加到用户的台式计算机,因此,方便地提供无线能量区,在该无线能量区周围可以对多个电气和 / 或电子设备供电。所述电气装置可以是计算机、照明灯具、专用源谐振器电气装置等,并且所述附近组件可以是计算机外围设备、外围电子组件、基础设施设备等的,诸如计算机键盘、计算机鼠标、传真机、打印机、扬声器系统、蜂窝电话、音频设备、对讲机、音乐播放器、PDA、灯、电动削铅笔器、风扇、数字相框、计算器、电子游戏等。例如,计算机系统可以是具有利用‘无线键盘’和‘无线鼠标’的集成源谐振器的电气装置,其中,使用术语无线在这里意在表明每个设备与计算机之间存在无线通信装置,并且其中,每个设备仍必须包含单独的电池电源。结果,将需要周期性地更换电池,并且在大公司中,可能为支持人员造成用于电池更换、电池成本和电池的适当处理的相当大的负担。可替换地,本文所述的系统和方法可以提供从计算机的主体到这些外围设备中的每一个的无线功率传输,如本文所述,包括不仅到键盘和鼠标的功率,而且到诸如传真机、打印机、扬声器系统等其它外围组件的功率。被集成到电气装置中的源谐振器可以提供到多个外围设备、用户设备等的无线功率传输,使得对于源谐振器集成电气装置附近区域中的设备的电池进行充电和 / 或更换的需要显著减少。电气装置还可以为调整电气装置与无线供电设备之间的功率转移参数提供调谐或自动调谐软件、算法、装置等。例如,电气装置可以是用户桌面上的计算机,并且可以将源谐振器集成到计算机中或用插头插入计算机中(例如,通过 USB 连接),其中,计算机提供用于提供调谐算法的装置(例如,通过在计算机上运行的软件程序)。

[0558] 本文公开的系统和方法可以提供到与机构基础设施组件相关联的附近电气或电子组件的无线功率转移,其中,源谐振器被安装在机构基础设施组件中或其上,并且设备谐振器在电子组件中。例如,机构基础设施组件可以是一件家具、固定墙壁、活动墙壁或分隔物、天花板、地板和被附着或集成到桌子或书桌中的源谐振器(例如,刚好在表面之下 / 之上、在侧面上、被集成到桌面或桌腿中)、放置在地板上的垫子(例如,在书桌下面、放置在书桌上)、车库地板上的垫子(例如,将对汽车和 / 或汽车中的设备充电)、在停车场 / 车库中(例如,在停车处附近的柱子上)、电视(例如用于对遥控器充电)、计算机监视器(例如将对无线键盘、无线鼠标、蜂窝电话供电 / 充电)、椅子(例如用于对电热毯、医疗设备、个人健康监视器供电)、图画、办公室家具、常见家用电器等。例如,机构基础设施组件可以是办公室隔间中的照明灯具,其中,源谐振器和照明器具内的灯这二者可以被直接连接到该机构的有线电源。然而,用现在在照明灯具中提供的源谐振器,被连接到设备谐振器或与设备谐振器集成的那些附近电气或电子组件将不需要具有任何附加有线连接。另外,如本文所述,可以减少对更换具有设备谐振器的设备的电池的需要。

[0559] 使用本文所述的系统和方法来从中央位置(诸如从电气装置中的源谐振器、从机构基础设施组件等)向电气和电子设备供应功率可以使周围工作区域的电气布线基础设施最小化。例如,在企业办公空间中,通常存在需要由有线连接来供电的大量电气和电子设备。在利用本文所述的系统和方法的情况下,可以消除此布线的大部分,为企业节省安装成本,降低与具有电气布线的办公室墙壁相关联的物理限制,使对电源插座和电源板的需要

最小化等等。本文所述的系统和方法可以通过减少与安装、重新安装（例如重配置办公空间）、维护等相关联的电气基础设施来为企业省钱。在另一示例中，本文公开的原理可以允许在房间当中无线地设置电源插座。在这里，可以将源放置在期望在其上放置电源插座的地板的位置之下的地下室的天花板上。可以将设备谐振器放置在正好在其上面的房间的地板上。由于相同的原因，在天花板的中心处安装新的照明灯具（或关于此方面的任何其它电气设备，例如照相机、传感器等）现在实质上是更容易的。

[0560] 在另一示例中，本文所述的系统和方法可以“通过”墙壁来提供功率。例如，假设在一个房间中（例如，在墙壁上）具有电源插座，但是想要在隔壁房间中具有电源插座，不需要呼叫电气工人或钻通墙壁或在墙壁周围牵引导线等。于是可以将源谐振器放置在一个房间中的墙壁上，并且在墙壁的另一侧放置设备谐振器电源插座/拾波器 (outlet/pickup)。这可以对平面屏幕 TV 或立体音响系统等供电（例如，一个人可能不想在起居室中具有爬上墙壁的丑陋的导线，但是不介意在隔壁房间中具有沿着墙壁走的类似导线，例如储藏室或壁橱，或有使看不到沿着墙壁铺设的导线的家具的房间）。本文所述的系统和方法可用来在不需要通过外墙钻孔或在其中安装导管的情况下从室内源向在家庭或建筑物外面的各种电气设备转移功率。在这种情况下，可以在没有美学或结构损坏或与通过墙壁和墙板钻孔相关联的风险的情况下在建筑物外面对设备无线地供电。另外，本文所述的系统和方法可以提供放置传感器以帮助为装配有外部设备谐振器的电气组件放置内部源谐振器。例如，家的主人可以在他们家的外面放置安全灯，其包括无线设备谐振器，并且现在需要适当地或最佳地将源谐振器放置于家的内部。在源和设备谐振器之间起作用的放置传感器可以通过诸如以视觉指示、音频指示、显示指示等来指示何时放置是好的或好到什么程度来使得该放置更好。在另一示例中，并且以相似的方式，本文所述的系统和方法可以提供设备在家庭或建筑物的屋顶上的安装，诸如无线电发射机和接收机、太阳能电池板等。在太阳能电池板的情况中，可以将源谐振器与电池板相关联，并且可以在不需要通过屋顶钻孔的情况下向建筑物内部的配电板无线地转移功率。本文所述的系统和方法可以允许在不需要钻孔的情况下跨越交通工具的墙壁（诸如通过顶棚）来安装电或电气设备，诸如用于汽车、船舶、飞机、火车等。这样，可以在不钻孔的情况下保持交通工具的壁完整，因此保持交通工具的价值、保持水密性、消除对布线的需要等。例如，将警报器或灯安装到警车的顶棚减少了汽车将来的转售，但是用本文所述的系统和方法，可以在不需要钻孔的情况下将任何灯、喇叭、警报器等附着于顶棚。

[0561] 本文所述的系统和方法可以用于从太阳能光伏 (PV) 电池板无线转移功率。具有无线功率转移能力的 PV 电池板可以具有多个益处，包括更简单的安装、更灵活、可靠和防风雨设计。可以使用无线功率转移来从 PV 电池板向设备、房屋、交通工具等转移功率。太阳能 PV 电池板可以具有允许 PV 电池板直接对被使能以接收无线功率的设备供电的无线源谐振器。例如，可以将 PV 电池板直接安装到交通工具、建筑物等的顶棚上。可以将由 PV 电池板捕捉的能量直接无线地转移至交通工具内部或建筑物屋顶下面的设备。具有谐振器的设备可以无线地从 PV 电池板接收功率。可以使用来自 PV 电池板的无线功率来向被耦合到房屋、交通工具等的有线电气系统的谐振器转移能量，从而在不要求外部 PV 电池板与内部电气系统之间的任何直接接触的情况下允许常规设备的传统配电和供电。

[0562] 用无线功率转移，可以实现屋顶 PV 电池板的明显更简单的安装，因为可以无线地

从电池板向房屋中的捕捉谐振器传送功率,从而消除所有室外布线、连接器和导管以及通过结构的屋顶或墙壁的任何孔。与太阳能电池一起使用的无线功率转移可以具有这样的益处,即其能够减少屋顶危险,因为其消除了对电气工人在屋顶上工作以将电池板、线和分线盒互连的需要。安装与无线功率转移集成的太阳能电池板可以要求不那么熟练的工人,因为需要进行较少的电接触。用无线功率转移,可以需要较少的现场具体设计,因为该技术为安装者提供了对每个太阳能 PV 电池板单独地进行最优化和定位的能力,从而显著地减少了对昂贵的工程和电池板布局服务的需要。可能需要谨慎地平衡每个电池板上的太阳能负载,并且不需要专用的 DC 布线布局和互连。

[0563] 对于 PV 电池板的屋顶或墙上安装而言,可以将捕捉谐振器安装在屋顶的下侧,在墙壁内部,或者在太阳能 PV 电池板的一个底部或两个内的任何其它容易接近的内部空间。在图 51 中示出了示出可能的一般屋顶 PV 电池板安装的图。可以将各种 PV 太阳能收集器安装在屋顶的顶部,其中无线功率捕捉线圈被安装在屋顶下面的建筑物内。PV 电池板中的谐振器线圈能够通过屋顶将其能量无线地转移至无线捕捉线圈。可以收集来自 PV 电池的捕捉能量并将其耦合到房屋的电气系统以对电气和电子设备供电或在产生比需要的更多功率时耦合到电力网。在不要求穿透建筑物的屋顶或墙壁的孔或导线的情况下从 PV 电池捕捉能量。每个 PV 面板可以具有被耦合到交通工具或建筑物内部上的相应谐振器的谐振器。多个电池板可以利用相互之间的无线功率转移来向被耦合到交通工具或房屋内部上的谐振器的一个或多个指定电池板转移或收集功率。电池板可以在其侧面或在其周界中具有无线功率谐振器,其能够耦合到位于其它类似电池板中的谐振器,允许从电池板向电池板转移功率。可以提供附加总线或连接结构,其从建筑物或交通工具外部上的多个电池板无线地耦合功率并将功率转移至建筑物或交通工具内部上的一个或多个谐振器。

[0564] 例如,如图 51 所示,可以将源谐振器 5102 耦合到安装在建筑物的屋顶 5104 之上的 PV 电池 5100。相应的捕捉谐振器 5106 被放置在建筑物内部。然后能够在不具有通过建筑物的直接孔和连接的情况下从外面的源谐振器 5102 向建筑物内部的设备谐振器 5106 转移由 PV 电池捕捉的太阳能。

[0565] 具有无线功率转移的每个太阳能 PV 电池板可以具有其自己的逆变器,通过单独地对每个电池板的功率产生效率进行最优化来显著地改善这些太阳能系统的经济效益,支持单个安装中的电池板尺寸和类型的混合,包括单个电池板“按需付费”系统扩展。安装成本的降低可以使得对于安装而言单个电池板是经济的。消除了对电池板串设计和多个电池板的小心定位和定向的需要,并消除了系统的单点故障。

[0566] PV 太阳能电池板中的无线功率转移可以实现更多的太阳能部署方案,因为风雨的太阳能 PV 电池板消除了用于通过诸如汽车顶棚和船甲板的密封表面布线而钻孔的需要,并消除了将电池板安装在固定位置的要求。用无线功率转移,可以临时地部署 PV 电池板,然后移动或去除,而不留下对周围结构的永久性变更。可以在阳光充足的日子将其放置在院子中,并跟随者太阳来回移动,或者例如带到内部以进行清洁和储存。对于后院或移动太阳能 PV 应用而言,可以在地面上投掷具有无线能量捕捉器件的延长线或放置在太阳能单元附近。捕捉延长线能够相对于元件被完全密封并被电隔离,使得可以在任何室内或室外环境中使用它。

[0567] 用无线功率转移,可能不需要导线或外部连接,或者 PV 太阳能电池板可以是完全

防风雨的。能够预期显著改善在太阳能 PV 功率产生和传输电路中的电气组件的可靠性和寿命,因为防风雨外壳能够保护组件免受 UV 辐射、湿度、天气等的影响。用无线功率转移和防风雨外壳,可以使用不那么昂贵的组件,因为其将不再被直接暴露于外部因素和天气要素,并且其可以降低 PV 电池板的成本。

[0568] PV 电池板与建筑物或交通工具内部的捕捉谐振器之间的功率转移可以是双向的。可以从房屋电力网向 PV 电池板传送能量以在电池板不具有足以执行某些此类任务的能量时提供功率。相反的功率流动可以用来从电池板融化雪,或对将相对于太阳能将电池板定位于更适宜的位置的电动机进行供电。一旦雪被融化或电池板被重新定位且 PV 电池板能够产生其自己的能量,功率转移的方向就能够恢复正常,从 PV 电池板向建筑物、交通工具或设备递送功率。

[0569] 具有无线功率转移的 PV 电池板可以包括安装时的自动调谐以保证到无线收集器的最大且高效的功率转移。不同安装中的屋顶材料的变化或 PV 电池板与无线功率收集器之间的距离变化可能影响无线功率转移的谐振器的性能或扰动其性质。为了降低安装复杂性,无线功率转移组件可以包括自动地调整其工作点以补偿由于材料或距离而引起的任何效应的调谐能力。可以调整频率、阻抗、电容、电感、占空比、电压水平等以保证高效且安全的功率转移。

[0570] 本文所述的系统和方法可以用来临时地或在传统电源插座到无线功率区的扩展中提供无线功率区,诸如通过使用无线功率延长线。例如,可以将无线功率延长线配置为用于连接到传统电源插座的插头、诸如在传统功率延长线中的长导线和在另一端的谐振器源线圈(例如,代替扩展部分的传统插座的替代或除此之外)。还可以配置其中在沿着无线延长线的多个位置处存在源谐振器的无线延长线。然后,此配置可以替换其中存在无线功率配置设备的任何传统延长线,诸如向不存在方便的电源插座的位置(诸如其中不存在电源插座的起居室中的位置)提供无线功率、其中不存在有线功率基础设施的临时无线功率(例如施工现场)、到其中不存在电源插座的院子中(例如,对于被无线地供电以减少切断传统电线的机会的各方或庭院装饰设备)等。还可以使用无线延长线作为墙壁或结构内的落差(drop)以在该落差附近内提供无线功率区。例如,可以在新的或整修的房间的墙壁内敷设无线延长线以在不需要安装传统电气布线和电源插座的情况下提供无线功率区。

[0571] 可以利用本文所述的系统和方法来在交通工具的活动部分或旋转组件、机器人、机械设备、风力涡轮机或具有活动部分的任何其它类型的旋转设备或结构(诸如机器人臂、建筑用运输工具、活动平台等)之间提供功率。传统上,可以由例如集电环或由旋转接头来提供此类系统中的功率。使用如本文所述的无线功率转移,可以显著地改善这些设备的设计简化、可靠性和寿命,因为能够在没有可能随着时间的推移磨损或损坏的任何物理连接或接触点的情况下在一定范围的距离内转移功率。特别地,源和设备线圈内的优选共轴和平行对准可以提供不会严重地受到两个线圈的相对旋转运动所调制的无线功率传输。

[0572] 可以利用本文所述的系统和方法通过提供一系列的源-设备-源-设备谐振器来扩展超过单个源谐振器的范围的功率需要。例如,假设现有独立车库不具有电源且所有者现在想要安装新的供电服务。然而,所有者可能不想遍及车库敷设导线,或者不得不打入墙壁中以遍及该结构对电源插座进行布线。在这种情况下,所有者可以选择将源谐振器连接到新的供电服务,使得能够遍及车库的后面将无线功率供应至设备谐振器电源插座。然后,

所有者可以安装设备—源‘中继器’以向在车库前面的设备谐振器电源插座供应无线功率。也就是说,功率中继器现在可以从主源谐振器接收无线功率,然后向第二源谐振器供应可用功率以向在车库前面的第二组设备谐振器供应功率。可以反复地重复此配置以扩展供应的无线功率的有效范围。

[0573] 可以使用多个谐振器来扩展能量阻挡材料周围的功率需要。例如,可能期望将源谐振器集成到计算机或计算机监视器中,使得谐振器可以对放置在监视器或计算机的周围且尤其是前面的设备供电,诸如键盘、计算机鼠标、电话等。由于美学、空间约束等,可以将用于源谐振器的能量源仅定位于或连接到监视器或计算机的后面。在计算机或监视器的许多设计中,在设计和封装中使用包含电路的金属和金属组件,这可能限制和阻止从在监视器或计算机后面的源谐振器到监视器或计算机前面的功率转移。可以将附加重发器谐振器集成到监视器或计算机的底座或基座中,其耦合至监视器或计算机后面的源谐振器并允许到监视器或计算机前面的空间的功率转移。被集成到监视器或计算机的底座或基座中的中间谐振器不要求附加电源,其从源谐振器捕捉功率并将功率转移至监视器或计算机的阻挡或功率屏蔽金属组件周围的前面。

[0574] 可以将本文所述的系统和方法构建到空间的结构部分中、放置在空间的结构部分上、从空间的结构部分悬挂、嵌入空间的结构部分中、集成到空间的结构部分中等,所述空间诸如为交通工具、办公室、家庭、房间、建筑物、室外结构、道路基础设施等。例如,可以将一个或多个源构建到、放置于、悬挂于、嵌入或集成到墙壁、天花板或顶棚嵌板、地板、分隔物、门口、楼梯、隔室、道路表面、人行道、坡道、围栏、外部结构等。可以将一个或多个源构建到结构内或周围的实体中,例如床、书桌、椅子、地毯、镜子、钟表、显示器、电视、电子设备、柜台、桌子、一件家具、一件艺术品、外壳、隔间、顶棚嵌板、地板或门板、挡泥板、树干、轮舱、支柱、横梁、支撑体或任何类似实体。例如,可以将源谐振器集成到用户的汽车的挡泥板中,以便可以从挡泥板源谐振器为装配有或被连接到设备谐振器的任何设备供应功率。这样,被带进或集成到汽车中的设备可以在处于汽车中的同时被不断地充电或供电。

[0575] 本文所述的系统和方法可以通过诸如船、汽车、卡车、公交车、火车、飞机、卫星等交通工具的壁来提供功率。例如,用户可能不想通过交通工具的壁钻孔以便向在交通工具外面的电气设备提供功率。可以将源谐振器放置在交通工具内部,并且可以将设备谐振器放置在交通工具外面(例如,在窗户、墙壁或结构的相对侧)。这样,用户可以实现使外部设备到交通工具的放置、定位和附着最优化方面的更大灵活性(诸如不考虑供应或敷设到设备的电气连接)。另外,用无线地供应的电功率,可以将外部设备密封,使得其是水密的,使得其在电气设备被暴露于天气(例如雨)、或者甚至被淹没在水中的情况下是安全的。可以在多种应用中采用类似技术,诸如在对混合动力交通工具、导航和通信设备、施工设备、遥控或机器人设备等充电或供电时,其中由于暴露的导体而存在电学风险。本文所述的系统和方法可以通过真空室或其它封闭空间的墙壁来提供功率,诸如在半导体生长和处理、材料涂敷系统、养鱼池、危险物品搬运系统等中使用的那些。可以向转换级、机器人臂、旋转级、操纵和收集设备、清洁设备等提供功率。

[0576] 本文所述的系统和方法可以向厨房环境提供无线功率,诸如向台面器具,包括混合器、咖啡壶、烤面包器、烤面包器烘箱、烤架、烘培盘、电煮锅、电热壶、电炒锅、松饼机、搅拌器、食物加工机、瓦罐锅、电热餐盘、电磁炉、灯、计算机、显示器等。本技术可以改善设备

的移动性和 / 或定位灵活性,减少储存在和散布在整个台面上的电源线的数目,改善设备的可洗性等。例如,电煮锅传统上可以具有单独的部分,诸如可浸入水中以便清洗的一个和不可浸入水中的一个,因为其包括外部电连接(例如,线缆或用于可去除线缆的插座)。然而,用被集成到该单元中的设备谐振器,所有电连接可以是密封的,因此现在可以将整个设备浸没以进行清洁。另外,外部线缆的不存在可以消除对可用电气壁装电源插座的需要,并且不再需要跨越台面放置电源线或将电烤盘的位置局限于可用电气壁装电源插座的位置。

[0577] 本文所述的系统和方法可以提供到装配有设备谐振器的设备的持续供电 / 充电,因为该设备不离开原谐振器的附近,诸如固定电气设备、个人计算机、内部通信系统、安全系统、家庭机器人、灯具、遥控单元、电视、无绳电话等。例如,可以经由无线功率对家庭机器人(例如 ROOMBA)供电 / 充电,因此在没有再充电的情况下任意地工作。这样,可以修改用于家庭机器人的电源设计以利用此持续的无线功率源,诸如将机器人设计为在不需要电池的情况下仅使用来自源谐振器的功率,使用来自源谐振器的功率来对机器人的电池再充电,使用来自源谐振器的功率对机器人的电池进行涓流充电,使用来自源谐振器的功率来对电容储能单元充电等。对于本文公开的任何和所有设备,可以启用、设计和实现电源和电源电路的类似最优化。

[0578] 本文所述的系统和方法可以向电热毯、加热垫 / 片等提供无线功率。这些电热设备可以用于多种室内和室外用途。例如,可以从与附近交通工具、建筑物、电线杆、交通灯、便携式电源单元等相关联或被构建到其中的源谐振器对提供给诸如保安、警察、建筑工人等室外工作人员的手和脚取暖器远程地供电。

[0579] 本文所述的系统和方法可以用来对包含设备谐振器且可以在信息设备处于包含源谐振器的信息源附近时被上电的便携式信息设备供电。例如,信息设备可以是在用户的口袋、钱夹、钱包、交通工具、自行车等中携带的卡(例如,信用卡、智能卡、电子卡等)。便携式信息设备可以在其在信息源附近时被上电,所述信息源随后向便携式信息设备传送信息,所述便携式信息设备可以包括电子逻辑、电子处理器、存储器、显示器、LCD 显示器、LED、RFID 标签等。例如,便携式信息设备可以是具有在处于信息源附近时“开启”的显示器的信用卡,并且为用户提供诸如“您刚刚接收到用于您下一次购买可口可乐的扣除 50% 的赠券”的某些信息。信息设备可以存储诸如可以在后续购买时使用的赠券或折扣信息的信息。便携式信息设备可以被用户编程为包含任务、日历约会、备忘录、警报和提示等。信息设备可以接收现时价格信息并将先前选择和识别的项目的位置和价格的信息告知用户。

[0580] 本文所述的系统和方法可以提供无线功率传输以直接地对传感器中的电池供电或充电,所述传感器诸如为环境传感器、安全传感器、农业传感器、电器传感器、食物腐败传感器、功率传感器等,其可以被安装到结构内部、结构外部、掩埋在地下、安装在墙壁中等。例如,此能力可以取代将旧的传感器掘出以在物理上更换电池或由于旧的传感器没有能力且不再可操作而掩埋新传感器的需要。可以通过使用便携式传感器源谐振器充电单元周期性地对这些传感器充电。例如,承载装配有源谐振器的电源(例如提供 ~ kW 的功率)的卡车可以在几分钟内向 ~ mW 传感器提供足够的功率以将传感器的操作持续时间延长超过一年。还可以直接对传感器供电,诸如对处于难以用导线将其连接但其仍处于源谐振器附近区域内的位置处的传感器供电,诸如在房屋外面的设备(安全照相机)、在墙壁另一面上、在门上的电动锁上等。在另一示例中,可以通过本文所述的系统和方法对原本可能需要为

其提供有线功率连接的传感器供电。例如,接地故障中断器断路器将残余电流和过电流保护组合在一个设备中以便安装到维修面板中。然而,传统上必须独立地对传感器进行布线以便供电,并且这使安装变得复杂。然而,用本文所述的系统和方法,可以用设备谐振器对传感器供电,其中,在维护面板内提供单个源谐振器,由此简化维护面板内的安装和布线配置。另外,单个源谐振器可以对安装在被安装在维护面板内、遍布维护面板、安装到附加的附近维护面板等的源谐振器的任一侧上的设备谐振器供电。本文所述的系统和方法可以用来向与配电板、电气室、配电等相关联的任何电气组件提供无线功率,诸如在配电盘、配电板、断路器、变压器、备用电池、火警控制面板等中。通过使用本文所述的系统和方法,可以更容易地安装、维护和修改配电和保护组件和系统安装。

[0581] 在另一示例中,由电池供电的传感器可以连续地运行而不需要更换电池,因为可以供应无线功率以周期性地或连续地对电池进行再充电或涓流充电。在此类应用中,甚至低水平的功率可以充分地使电池再充电或保持电池中的电量,显著地延长其寿命和扩展其有用性。在某些情况下,可以将电池寿命延长至比其供电的设备的寿命更长,使其本质上成为“用不完”电池。

[0582] 本文所述的系统和方法可以用于对植入的医疗器件电池充电,诸如在人工心脏、起搏器、心脏泵、胰岛素泵、用于神经或针压止血/穴位刺激的植入线圈等中。例如,使导线粘在病人体外可能是不方便或不安全的,因为导线可以是可能的传染的恒定来源,并且通常对于病人来说是非常令人不愉快的。本文所述的系统和方法还可以用来从外部源对病人身体里或身体上的医疗器件充电或供电,诸如从具有源谐振器的病床或医院墙壁或天花板。此类医疗器件可能更容易附着、读取、使用和监视病人。本文所述的系统和方法可以缓解对将导线附着于病人和病人的床或床边的需要,使得病人来回移动和起身离开床更加方便,而没有无意中断开医疗器件的连接的风险。这可以例如有用地用于具有对其进行监视的多个传感器的病人,诸如用于测量脉搏、血压、葡萄糖等。对于利用电池的医疗和监视器件而言,可能需要相当频繁地更换电池,可能一周多次。这可以引起与人们忘记更换电池、未注意到设备或监视器由于电池耗尽而不工作、与电池盖和舱室的不适当清洁相关联的感染等相关联的风险。

[0583] 本文所述的系统和方法可以降低医疗器件植入程序的风险和复杂性。现在,诸如心室辅助器件、起搏器、除颤器等许多可植入医疗器件由于其器件外形因素而要求手术植入,这可能在很大程度上受到被集成在器件中的长寿命电池的体积和形状的影响。在一方面,本文描述了对电池再充电以使得电池尺寸可以被大大地减小且可以诸如经由导管来植入整个器件的非侵入式方法。导管可植入器件可以包括集成捕捉或设备线圈。可以将导管可植入捕捉或设备线圈设计为使得其可以诸如在植入之后在内部进行布线。可以经由导管来部署捕捉或设备线圈作为卷起的柔性线圈(例如,卷起的例如两个卷轴,在内部用简单的扩展器(spreader)机构容易地展开)。电源线圈可以被穿戴在被裁减为适合将源放置在适当位置的背心或衣物中;可以被放置在椅垫或床垫里;可以被集成到床或家具中等。

[0584] 本文所述的系统和方法可以使得病人能够具有‘传感器背心’、传感器补丁等,其可以包括可以在处于源谐振器附近时被供电或充电的设备谐振器和多个医学传感器中的至少一个。传统上,此类医疗监视机构可以具有要求的电池,因此使得背心、补丁等沉重且可能不切实际。但是,使用本文公开的原理,可以不要求电池(或较轻的可再充电电池),

因此使得此类设备更加方便和实际,尤其是在可能没有带子的情况下(诸如在没有电池或具有明显更轻的电池的情况下用粘合剂)将此类医疗设备固定就位的情况下。医疗机构可以能够远程地读取传感器数据,目的是预见中风、心脏病发作等(例如提前几分钟)。当由在远离医疗机构的位置处(诸如在其家中)的人来使用背心时,则可以将背心与蜂窝电话或通信设备集成以在事故或医学事件的情况下呼叫救护车。本文所述的系统和方法在背心将被老年人使用时的情况下可能特别有用,其中,可能未按要求遵循传统的非无线再充电实践(例如,更换电池、在晚上插上电源等)。本文所述的系统和方法还可以用于对残障或残废人(其可能具有更换电池或对电池再充电方面的困难)使用或对其进行帮助的设备充电,或可靠地向其享用或依赖的设备供应功率。

[0585] 本文所述的系统和方法可以用于假肢的充电和供电。假肢在取代原始肢体(诸如手臂、腿、手和脚)的功能方面已变得非常有能力。然而,电动假肢可能要求相当大的功率(诸如 10 ~ 20W),其可以转换成相当大的电池。在这种情况下,截肢者可以在持续时间不是很长的轻电池和持续时间长得多但更加难以来回‘携带’的重电池之间进行选择。本文所述的系统和方法可以使得能够用设备谐振器对假肢供电,其中,源谐振器由用户携带并被附着于可以更容易地支撑重量的身体的一部分(例如,诸如腰周围的带子)或位于其中用户将花费大量的时间以保持设备被充电或供电的外部位置上,诸如在其书桌处、其汽车中、其床上等。

[0586] 本文所述的系统和方法可以用于电动外骨骼的充电和供电,诸如在工业和军事应用中使用的那些,以及用于老年/体弱/生病的人。电动外骨骼可以向一个人提供“力量”的高达 10 至 20 倍的增加,使得那个人能够在没有太多疲劳的情况下在物理上反复地执行辛苦的任务。然而,外骨骼在某些使用情形中可能要求超过 100W 的功率,因此电池供电操作可能局限于 30 分钟或更少。本文所述的无线功率的递送可以为外骨骼的用户提供用于对外骨骼的结构运动供电和用于对遍及该结构分布的各种监视器和传感器供电的连续功率供应。例如,可以从本地源谐振器为具有(一个或多个)嵌入式设备谐振器的外骨骼提供功率。对于工业外骨骼而言,可以将源谐振器放置在机构的墙壁中。对于军用外骨骼而言,可以由装甲车来承载源谐振器。对于用来帮助老年人护理者的外骨骼而言,可以将(一个或多个)源谐振器安装或放置在一个人的家的(一个或多个)房间中。

[0587] 本文所述的系统和方法可以用于便携式医疗设备的供电/充电,诸如供氧系统、通风机、除颤器、注药泵、监视器和救护车或移动医疗单元中的设备等。能够将病人从事故现场运送到医院,或者为了将病人从其床上移动至其它房间或区域,并带着与之附着并始终被供电的所有设备为病人的健康和最后的康复提供很大的益处。当然,能够理解因为其电池耗尽或因为必须在以任何方式运送或移动病人的同时将其拔出插头而停止工作的医疗设备引起的风险和问题。例如,在汽车事故现场的紧急医疗队可能需要在现场的病人的紧急护理中利用便携式医疗设备。此类便携式医疗设备必须被适当地维护,使得存在足够的电池寿命以在紧急状态的持续时间内对设备供电。然而,情况常常是设备未被适当地维护,使得电池未充满电,并且在某些情况下,所需的设备对于第一反应者不可用。本文所述的系统和方法可以以自动地且在没有人工干预的情况下提供电池和功率包的充电和维护的方式来向便携式医疗设备(和病人身体上的相关联传感器输入端)提供无线功率。此类系统还受益于不受被附着于在病人的治疗中使用的许多医疗监视器和设备的多种电源线

妨碍的改善的病人移动性。

[0588] 本文所述的系统和方法可以用于对个人助听器进行供电/充电。个人助听器需要小且轻以配置到人的耳朵中或周围。尺寸和重量约束限制能够使用的电池的尺寸。同样地,设备的尺寸和重量限制由于组件的精密而使得难以进行电池更换。设备的尺寸和卫生问题使得难以集成附加的充电端口以允许电池的再充电。本文所述的系统和方法可以被集成到助听器中并可以减小所需电池的尺寸,这可以允许有甚至更小的助听器。使用本文公开的原理,可以在不要求外部连接和充电端口的情况下对助听器的电池再充电。充电和设备电路和小型可再充电电池可以被集成到常规助听器电池的外形因素中,允许对现有助听器进行改装。可以在助听器被人使用和佩戴的同时对其进行再充电。可以将能量源集成到垫子或杯子中,允许在助听器被放置在此类结构中时进行再充电。可以将充电源集成到助听器干燥器盒中,允许在助听器正在干燥或被消毒的同时进行无线再充电。所述源和设备谐振器还可以用来将设备加热,减少或消除对附加加热元件的需要。可以使用由电池或AC适配器供电的便携式充电外壳作为储存和充电站。

[0589] 用于上述医疗系统的源谐振器可以在某些或所有医疗设备的主体中,设备谐振器在病人的传感器和设备上;源谐振器可以在救护车中,设备谐振器在病人的传感器和某些或所有设备的主体上;主源谐振器可以在救护车中以便在医疗设备处于救护车中的同时向医疗设备上的设备谐振器转移无线功率,并且当设备远离救护车时,第二源谐振器可以在医疗设备的主体和病人传感器上的第二设备谐振器中等等。本文所述的系统和方法可以显著地改善医务人员能够将病人从一个位置运送到另一位置的容易性,其中,现在可以减少电线和更换相关电池或手动地对其充电的需要。

[0590] 本文所述的系统和方法可以用于军用交通工具或机构内部的设备的充电,诸如坦克、装甲运输车、移动式掩体等。例如,当士兵在“行动”或任务之后返回交通工具中时,其通常可以开始对其电子设备充电。如果其电子设备装配有设备谐振器,并且在交通工具内部存在源谐振器(例如,集成在交通工具的座位中或顶棚上),则其设备将立即开始充电。事实上,相同交通工具可以向站在外面或在交通工具旁边行走的士兵/机器人(例如来自iRobot的packbot)提供功率。此能力可能在以下方面是有用的:使与其他人的意外电池交换最小化(这可能是重要的问题,因为士兵趋向于仅信任其自己的电池);使得能够快速离开受到攻击的交通工具;对坦克内部的膝上型计算机或其它电子设备供电或充电,因为坦克内部的过多导线可能引起在降低在“有麻烦”和/或能见度降低的情况下快速地来回移动的能力方面的危险。本文所述的系统和方法可以提供与在军用环境中对便携式电力设备供电相关的显著改善。

[0591] 本文所述的系统和方法可以向诸如高尔夫球车或其它类型的手推车、全地形车、电动自行车、小型摩托车、汽车、割草机、bobcats和通常用于施工和景观美化等的其它交通工具的移动交通工具提供无线供电和充电能力。本文所述的系统和方法可以向微型移动交通工具提供无线供电或充电能力,诸如微型直升机、无人驾驶机、遥控飞机、遥控船、遥控或机器人飞行器、遥控或机器人割草机或设备、炸弹检测机器人等。例如,在军用交通工具之上飞行以增加其视场的微型直升机在标准电池情况下可以飞行几分钟。如果这些微型直升飞机装备有设备谐振器,并且控制交通工具具有源谐振器,则微型直升飞机可能能够无限期地飞行。本文所述的系统和方法可以提供对电池进行再充电或更换以便在微型移动交通

工具中使用的有效替换。另外,本文所述的系统和方法可以向甚至更小的设备提供功率/充电,诸如微型机电系统(MEMS)、纳米机器人、纳米器件等。另外,可以通过将源设备安装在移动交通工具或飞行设备中以使其能够充当野外或飞行中再充电器(其可以自己自发地定位于装配有设备谐振器的移动交通工具附近)来实现本文所述的系统和方法。

[0592] 本文所述的系统和方法可以用来提供用于临时机构的电力网,诸如兵营、石油钻探布置、外景拍摄场所等,其中要求电功率,诸如用于发电机,并且其中通常在临时设备周围敷设电力线缆。当需要设立要求功率的临时机构时存在许多情况。本文所述的系统和方法可以使得能够实现快速地设立并拆掉这些设备的更高效的方式,并且可以减少必须遍及这些设备敷设以供应功率的导线的数目。例如,当特种部队移动至一个区域中时,他们可以支起帐篷并在驻地周围牵引许多导线以提供要求的电力。替代地,本文所述的系统和方法可以使得提供有电源和源谐振器的军用交通工具停泊在驻地的中心处,并将所有的功率提供给其中可以将设备谐振器集成到帐篷中的附近帐篷,或与每个帐篷或区域相关联的某件其它设备。可以使用一系列的源-设备-源-设备谐振器来将功率扩展到更远的帐篷。也就是说,距离交通工具最近的帐篷然后可以向其后面的帐篷提供功率。本文所述的系统和方法可以提供对可以设立和拆掉临时安装的效率的显著改善,由此提高相关联设备的移动性。

[0593] 本文所述的系统和方法可以在交通工具中使用,诸如用于更换导线,安装新设备,对被带入交通工具中的设备供电,对交通工具的电池充电(例如,用于传统气体供电引擎,用于混合动力汽车,用于电车等),对被安装到交通工具内部或外部的设备供电,对在交通工具附近的设备供电等。例如,本文所述的系统和方法可以用来更换导线,诸如用来对遍布于交通工具的灯、风扇和传感器供电。作为示例,典型的汽车可以具有与之相关联的 50kg 的导线,并且本文所述的系统和方法的使用可以使得能够消除相当数量的此布线。诸如飞机或卫星的较大且更加重量敏感的交通工具的性能可以大大地受益于使必须遍布于交通工具敷设的线缆的数目减少。本文所述的系统和方法可以允许在不需要电线的情况下用电动和电气设备来适应交通工具的可去除或附加部分。例如,摩托车可以具有在骑车人正在进行长途旅行时充当临时行李箱容积的可去除侧箱。这些侧箱可以具有外部灯、内部灯、传感器、自动设备等,并且如果没有装配有本文所述的系统和方法,则可能要求电连接和配线。

[0594] 交通工具内无线功率传输系统可以对在汽车中使用的一个或多个移动设备充电或供电:手持移动电话、蓝牙耳机、蓝牙免提扬声器电话、GPS、MP3 播放器、用于经由 FM、蓝牙等通过汽车用立体声系统来流式传输 MP3 音频的无线音频收发机。交通工具内无线功率源可以利用以多个可能结构中的任何一个布置的源谐振器,包括对仪表板上的垫子充电、对安装在地板上或在座位与中央控制台之间的垫子充电、对装配在杯架中或仪表板上的“杯子”或插孔充电等。

[0595] 无线功率传输源可以利用可再充电电池系统,使得所述电源电池每当交通工具电源被开启时被充电,使得当交通工具被关闭时,无线电源能够从电源电池吸取功率,并且能够继续无线地对仍在汽车中的移动设备充电或供电。

[0596] 未来的带插头电动汽车、混合动力汽车等需要被充电,并且用户可能需要在其回家时或去充电站时插入电源充电。基于一次夜间再充电,用户可能能够在次日驾驶达到 50

英里。因此,在混合动力汽车的情况下,如果一个人在大多数日子驾驶路程小于 50 英里,则将其主要靠电力来驾驶。然而,如果其不必记住在晚上将汽车插上电源将是有益的。也就是说,简单地行驶到车库中并使汽车自己负责其自己的充电将是美好的。为此,可以将源谐振器构建到车库地板和 / 或车库侧壁中,并且可以将设备谐振器构建到汽车的底部(或侧面)中。甚至几 kW 的转移可能足以在夜间对汽车进行再充电。交通工具内设备谐振器可以测量磁场性质以提供反馈以帮助交通工具(或任何类似设备)到固定谐振源的对准。交通工具可以使用此位置反馈来自动地对其本身进行定位以实现最佳对准,因此实现最佳功率传输效率。另一方法可以是使用位置反馈来帮助人类操作员适当地对交通工具或设备进行定位,诸如通过在其被很好地定位时使 LED 点亮,提供噪声等。在其中正在传送的功率的量可能对侵入有源场体积的人或动物造成安全威胁的情况下,源或接收器设备可以装配有能够感测到有源场体积的入侵且能够关掉源设备并警告人类操作员的有源照明幕或某个其它外部设备。另外,源设备可以装配有自动感测能力,使得其可以检测到其预期功率传输速率已被入侵元素中断,并且在这种情况下,关掉源设备并警告人类操作员。可以将诸如铰链门或可膨胀气囊的物理或机械结构作为物理障碍结合以防止不期望的入侵。还可以使用诸如光学、磁性、电容、电感等传感器来检测源和设备谐振器之间的外来结构或干扰。可以将源谐振器的形状成形为防止水和碎屑积聚。可以将源谐振器放置在锥形外壳中,或者其可以具有带有有角度顶部以允许水和碎屑滚落的外壳。系统的源可以使用交通工具的电池功率或其自己的电池功率来将其存在传送到源以发起功率传输。

[0597] 可以将源谐振器安装在嵌入式或悬挂支柱上、墙壁上、支架上等以便耦合到安装在电动交通工具的减震器、盖、主体面板等上的设备谐振器。可以将源谐振器封闭或嵌入到诸如靠垫、垫子、波纹管、弹簧加载外壳等柔性外壳中,使得电动交通工具可以在不以任何方式损坏汽车的情况下与包含源线圈的结构进行接触。包含源的结构可以防止对象到达源和设备谐振器之间。由于无线功率转移可能对源和设备线圈之间的失准相对不敏感,所以多种柔性源结构和停泊程序可能适合于此应用。

[0598] 本文所述的系统和方法可以用来对电动、混合动力或内燃机交通工具的电池进行涓流充电。交通工具可能需要少量的功率以保持或补充电池功率。可以将功率无线地从源转移至可以被结合到交通工具的正面格板、顶棚、底部或其它部分的设备谐振器。可以将设备谐振器设计为符合交通工具的正面或格板周围的徽标的形状,从而不妨碍气流通过辐射体。设备或源谐振器可以具有附加操作模式,其允许谐振器被用作能够用来融化交通工具上雪或冰的加热元件。

[0599] 电动交通工具或混合式动力交通工具可能要求多个设备谐振器,从而增加交通工具接近源谐振器以便充电的容易性(即,设备谐振器的数目和变化位置越大,交通工具能够进站并与多种充电站对接的机会越大),增加能够在一段时间内递送的功率量(例如,可以要求附加设备谐振器以阻止由于将电流充电至可接受水平而引起的局部加热),帮助将交通工具停泊/停靠于充电站等。例如,交通工具可以具有具有反馈系统的多个谐振器(或单个谐振器),所述反馈系统向驾驶员或自动化停泊/停靠结构提供针对最优化充电条件的交通工具停泊的指导(即,交通工具的设备谐振器到充电站的源谐振器的最佳定位可以提供更大的功率转移效率)。自动化停泊/停靠设备可以允许基于交通工具被多好地耦合的交通工具的自动停泊。

[0600] 功率传输系统可以用来对交通工具的设备和外围设备供电。可以在交通工具正在充电的同时或不在充电的同时向外围设备提供功率,或者可以向不需要充电的常规交通工具递送功率。例如,可以将功率无线地转移至常规非电动汽车以在被停泊的同时对空调、制冷单元、加热器、灯等供电以避免运行引擎,这对于避免在车库停车位或装载站台中耗尽积累是非常重要的。例如可以在公交车停泊的同时无线地向其转移功率以允许灯、外围设备、乘客设备等的供电,避免机载引擎或电源的使用。可以在飞机停在停机坪上或吊架中的同时无线地向其转移功率在不使用机载引擎或电源的情况下对仪器、气候控制机构、除冰设备等供电。

[0601] 交通工具上的无线功率传输可以用来实现交通工具至电网(V2G)的概念。交通工具至电网是基于利用电动交通工具和插电式混合电动交通工具(PHEV)作为分布式储能设备,在电力网被利用不足时的夜间充电,并且可用于在日间发生的峰值需求时段期间向电力网放电。可以使得能够在不要求连接插头的情况下实现双向能量流动—使得能量从交通工具回流至电力网—的方式来实现交通工具和各基础设施上的无线功率传输系统。可以将停泊在工厂、办公室、停车场处的巨大的交通工具队视为智能电力网的“峰值功率容量”。车辆上的无线功率传输能够使此类V2G设想成为现实。通过简化将交通工具连接到电力网的过程(即,通过简单地将其停泊在无线充电使能停车场),一定数目的交通工具在电力网需要分接其功率时将是“可派遣的”变得更加可能。没有无线充电,电和PHEV所有者可能将在家里为其交通工具充电,并在工作时将其停在常规停车场中。谁想在工作时将其交通工具插上电,如果其不需要充电的话?用能够处理3kW的无线充电系统,100,000台交通工具能够向电力网返回300兆瓦—使用以成本效益基准负载发电能力在前一天晚上产生的能量。使其成为可行V2G能量源的是无声自动充电PHEV和电动交通工具的流线型人类工程学。

[0602] 本文所述的系统和方法可以用来对交通工具上的传感器供电,诸如轮胎中的传感器以测量气压,或运行交通工具中的外围设备,诸如蜂窝电话、GPS设备、导航设备、游戏机、音频或视频播放器、DVD播放器、无线路由器、通信设备、防盗设备、雷达设备等。例如,可以将本文所述的源谐振器构建到汽车的主舱中,以便向位于汽车主舱内部和外部的多种设备供应功率。在交通工具是摩托车等的情况下,可以将本文所述的设备集成到摩托车的主体中,诸如在座位下面,并且可以在用户的头盔中提供设备谐振器,诸如用于通信、娱乐、信令等,或者可以在用户的夹克中提供设备谐振器,诸如用于出于安全着想向驾驶员显示信号等。

[0603] 本文所述的系统和方法可以与运输基础设施相结合地使用,诸如道路、火车、飞机、船等。例如,可以将源谐振器构建到道路、停车场、铁轨线等中。可以将源谐振器构建到交通灯、信号等中。例如,使用嵌入道路中的源谐振器和构建到交通工具中的设备谐振器,可以在交通工具沿着道路行驶时或在其被停在停车场中或道路的一侧时为其提供功率。本文所述的系统和方法可以提供在交通工具穿过道路网络或道路网络的一部分的同时为交通工具中的电气系统供电和/或充电的有效方式。这样,本文所述的系统和方法可以对自主交通工具、自动导向交通工具等的供电/充电有所贡献。本文所述的系统和方法可以向在交通工具通常空闲或停止的位置处的交通工具提供功率,诸如在交通灯或标志附近、在公路斜坡上或在停车场中。

[0604] 本文所述的系统和方法可以在工业环境中使用,诸如在工厂内部以便对机器供电、对机器人供电/充电、对机器人臂上的无线传感器供电/充电、对工具供电/充电等。例如,使用本文所述的系统和方法来向机器人臂上的设备供应功率可以帮助消除跨越机器人臂的接头的直接导线连接。这样,可以减少此类直接导线连接的磨损,并增加机器人的可靠性。在这种情况下,设备谐振器可以在机器人臂上的外面,并且源谐振器可以在机器人的底座处,在机器人附近的中心位置处,集成到机器人正在提供服务的工业设施中等等。本文所述的系统和方法的使用可以帮助消除原本与工业设施内的配电相关联的布线,并因此有益于设施的总体可靠性。

[0605] 本文所述的系统和方法可以用于地下应用,诸如钻孔、采矿、挖掘等。例如,与钻孔或挖掘相关联的电气组件和传感器可以利用本文所述的系统和方法来消除与挖掘机构、钻头等相关联的线缆敷设,由此消除挖掘点附近的线缆敷设或使其最小化。在另一示例中,可以使用本文所述的系统和方法来向采矿应用中的挖掘设备提供功率,其中,对设备的功率要求可能是高的且距离是大的,但是其中,没有人将经受相关的要求场。例如,挖掘区域可能具有谐振器供电挖掘设备,其具有高功率要求,并且可以相对距离源谐振器更远地进行挖掘。结果,源谐振器可能需要提供高场强度以满足这些要求,但是人员足够远地在这些高强度场之外。此高功率无人员方案可以适用于多个工业应用。

[0606] 本文所述的系统和方法还可以使用近场非辐射谐振方案进行信息转移而不是功率转移(或除此之外)。例如,由近场非辐射谐振技术传送的信息可能对窃听不敏感,因此与传统无线通信方案相比可以提供增加的安全水平。另外,由近场非辐射谐振技术传送的信息可以不与EM辐射谱相干扰,因此可以不是EM干扰源,从而允许扩展频率范围内且完全在由任何管理组织设定的极限内的通信。可以在远程、不可接近或难以到达的位置之间提供通信服务,诸如在远程传感器之间、在设备或交通工具的各部之间、在隧道、洞穴和井中(例如,油井、其它钻场)和水下或地下设备之间等。可以在其中磁场比电场经历较少的损耗的地方提供通信服务。

[0607] 本文所述的系统和方法可以实现无线功率传输系统中的源和设备之间的功率和通信信号的同时传输,或者其可以实现在不同时间段期间或不同的频率处进行功率和通信信号的传输。可以可控地改变谐振器的性能特性以优先地支持或限制能量或信息传送的效率或范围。例如,可以控制谐振器的性能特性以通过缩小信息传送的范围来改善安全性。可以连续地、周期性地、根据预定、计算或自动调整的算法来改变谐振器的性能特性。例如,可以以时间复用或频率复用的方式来提供由本文所述的系统和方法实现的功率和信息传送。源和设备可以通过调谐、改变、改动、抖动等谐振器阻抗来相互发送信号,所述谐振器阻抗可以影响能够检测的其它谐振器的反射阻抗。如本文所述地传送的信息可以包括关于设备识别、设备功率要求、握手协议等的信息。

[0608] 源和设备可以感测、传送、处理和利用关于电力网中的任何其它源和/或设备的位置和定位信息。源和设备可以捕捉或使用来自可以被构建到源和设备中或者可以是源或设备连接的组件的多种传感器和源的信息,诸如海拔、倾斜度、经度和纬度等。定位和取向信息可以包括诸如全球定位传感器(GPS)、指南针、加速度计、压力传感器、常压气压传感器、使用Wi-Fi或蜂窝式网络信号的定位系统等源。源和设备可以使用位置和定位信息来找到附近的无线功率传输源。源可以广播或与识别其位置的中央站或数据库通信。设备可

以获得来自中央站或数据库或来自本地广播的源位置信息,并且可以借助于听觉、振动或音频信号来将用户或操作员引导至源。源和设备可以是电力网、通信网络、传感器网络、导航网络等中或各种组合功能网络中的节点。

[0609] 位置和定位信息还可以用来使功率递送最优化或协调功率递送。可以使用关于源和设备的相对位置的附加信息来使磁场方向和谐振器对准最优化。例如,可以使用可以从加速度计和磁性传感器等获得的设备和源的取向来识别谐振器的取向和磁场的最适宜方向,使得磁通不被设备电路阻挡。用此类信息,可以使用具有最适宜的取向的源或源的组合。同样地,可以使用位置和取向信息来移动或给设备的用户或操作员提供反馈以将设备置于适宜的取向或位置以使功率传输效率最大化、使损耗最小化等。

[0610] 源和设备可以包括功率计量和测量电路和能力。可以使用功率计量来跟踪多少功率被递送到设备或由源传递了多少功率。可以处于开帐单的目的在基于费用的功率递送布置中使用功率计量和功率使用信息。还可以使用功率计量来使得功率递送策略能够保证根据特定的标准来向多个设备分配功率。例如,功率计量可以用来基于接收到的功率的量将设备分类并在递送方面优先考虑已接收到最少功率的那些。功率计量可以用来提供可以被以单独的费率开帐单的分层递送服务,诸如“保证功率”和“尽力服务功率”。功率计量可以用来组成并实行分级功率递送结构,并且可以使得优先权设备在某些情况下或使用方案下能够要求并接收更多功率。

[0611] 功率计量可以用来使功率递送效率最优化并使吸收和使辐射损耗最小化。源可以将关于由设备接收到的功率的信息与关于源的功率输出的信息相结合地使用来识别不适宜的工作环境或频率。例如,源可以将由设备接收到的功率的量与其传送的功率的量相比较以确定传输损耗是否可能异常地或不可接受地大。大量的传输损耗可能是由于从源接收功率的未授权设备而引起的,并且源和其它设备可以发起谐振频率的跳频或其它防范措施以防止或阻止未授权使用。大的传输损耗可能是由于例如吸收损耗而引起的,并且设备和源可以调谐至交变谐振频率以使此类损耗最小化。大量的传输损耗还可以指示不想要或不明对象或材料的存在,并且源可以关小或关闭其功率水平,直至去除或识别了不想要或不明对象,在这时,源可以重新开始对远程设备供电。

[0612] 源和设备可以包括认证能力。认证可以用来保证仅兼容的源和设备能够传送和接收功率。认证可以用来保证仅是特定制造商的可信设备且不是克隆或来自其它制造商的设备和源或仅作为特定订阅或计划的一部分的设备能够从源接收功率。认证可以基于加密请求和应答协议,或者其可以基于允许其基于与物理上不可克隆功能类似的性质被使用和认证的特定设备的扰动的唯一签名。可以用本地通信在每个源与设备之间本地地执行认证,或者可以将其与第三人认证方法一起使用,其中,源和设备用通信向中央权威机构进行认证。认证协议可以使用位置信息来向真正设备的本地源报警。

[0613] 源和设备可以使用跳频技术来防止无线功率源的未授权使用。该源可以连续地调整或改变功率递送的谐振频率。可以以已知、可再现或被传送到授权设备但难以预测的伪随机或预定方式来执行频率改变。跳频的速率和所使用的各种频率的数目可以大量且频繁到足以保证未授权使用是困难且不切实际的。可以通过调谐阻抗网络、调谐任何驱动电路、使用被调谐或可调谐至多个谐振频率的多个谐振器等来实现跳频。

[0614] 源可以具有用户通知能力以示出关于源是否被耦合到设备谐振器并正在传送功

率、其是否处于待机模式或者源谐振器是否解调谐或被外部对象扰动的源状态。通知能力可以包括视觉、听觉和振动方法。该通知可以如三色灯一样简单,每个状态一个,并且可选地是扬声器在操作错误的情况下提供通知。可替换地,通知能力可以涉及显示源的状态并可选地提供关于如何确定或解决所识别的任何错误或问题的指令的交互式显示器。

[0615] 作为另一示例,可以使用无线功率转移来改善电子爆炸雷管的安全性。可以以电子雷管、电气雷管或激波管雷管来引爆爆炸设备。用传导地或通过无线电传送的低能量触发信号,电子雷管利用所储存的电(通常在电容器中)来激活点火器电荷。电气雷管利用高能量传导触发信号来提供激活点火器电荷所需的信号和能量两者。激波管通过涂敷有爆炸物的空心管将受控爆炸从发电机发送到点火器电荷。存在与电气和电子雷管相关联的安全问题,因为存在意外的电磁能引起非故意激活的情况。经由锐谐振磁耦合的无线功率转移能够改善此类系统的安全性。

[0616] 使用本文公开的无线功率转移方法,可以构建不具有本地储存的能量的电子起爆系统,因此减少非故意激活的风险。可以将无线功率源放置在雷管附近(几米内)。雷管可以装配有谐振捕捉线圈。可以在无线功率源已被触发时传送激活能量。可以由任何数目的机制来发起无线功率源的触发:无线电、磁性近场无线电、传导性信号、超声波、激光。基于谐振磁耦合的无线功率转移还具有能够通过诸如岩石、土壤、混凝土、水及其它稠密材料之类的材料来转移功率的益处。使用非常高 Q 的线圈作为接收机和源(具有非常窄带的响应并被锐调谐至专用频率)进一步保证雷管电路不能捕捉意外的EMI和非故意地激活。

[0617] 无线供电设备的谐振器可以在设备外部或外面,并被接线到设备的电池。可以修改设备的电池以包括适当的整流和控制电路以接收设备谐振器的交流电。这可以使得能够实现具有较大外部线圈的结构,诸如可以被构建到键盘或鼠标或数字式静止照相机的电池门中,或者具有被附着到设备但被是用带状线缆背接线到电池/转换器的甚至更大线圈。可以修改电池门以提供从外部线圈到电池/转换器的互连(其将需要能够接触电池门触点的暴露触点)。

[0618] 绞合印刷电路板迹线

[0619] 如先前部分中所描述的,磁谐振器中的高 Q 电感元件可以由利兹线导体形成。利兹线是成捆的较细绝缘线,其以特别设计的图案编织在一起以使得较细的单独导线在任何有效长度上并不占据较大捆内的相同径向位置。编织图案以及多个较小直径导线的使用有效地增加趋肤深度并且减小导线在一定频率范围内的AC电阻。

[0620] 磁谐振器中的高 Q 电感元件还可以由印刷电路板(PCB)迹线形成。印刷电路板迹线可以具有多种有吸引力的特征,包括准确的可再现性、容易的集成以及成本有效的大量生产。在本部分中,我们公开了低AC电阻绞合PCB迹线,包括多个较窄的绝缘迹线,其可能地在多个板层上分布,并且不保持在编织图案内的固定位置,并且可以使用标准制造技术来制造。这些绞合迹线的AC电阻可以通过在所设计编织图案中的较窄单独迹线的数目、尺寸和相对间距,以及通过编织图案被印刷并互连于其上的板层的数目来确定。单独迹线绝缘可以通过空气、电路板材料、涂层、软片材、固化材料等等来提供。

[0621] 在实施例中,用于PCB制造的绞合迹线编织图案可以被设计为容易地可再现且可伸缩,以及实现高单独迹线密度。可实现的迹线密度可以通过单独迹线的窄度(narrowness),编织图案的几何结构,以及例如在编织图案中包括其他可能更大结构或特

征（例如“通孔”）的需要来确定。在实施例中，放置用于连接 PCB 的多层之间的单独迹线的通孔或透孔的方法和设计可以优选地被放置在多迹线编织图案的外周长上。通孔的外部位置实现图案的容易的缩放和复制以及紧密且均匀的单独迹线放置和密度，因为在编织图案本身内不使用通常较大特征尺寸的通孔，从而可能破坏图案的均匀性和编织的密度。

[0622] 如在本部分的描述中所使用的，术语‘绞合迹线’意指由一组多个较小或较窄的单独迹线、迹线段或导线来形成的导体。在本部分中，我们描述用于在多层 PCB 上对单独迹线进行布线以形成具有比等效尺寸的实心导体迹线将具有的 AC 电阻更低的 AC 电阻的绞合迹线。

[0623] 分层 PCB 板上单独迹线的编结可以通过以特定图案对绞合迹线的每个单独迹线进行布线以使得它跨越并且通过 PCB 的各层而起伏来实现。单独迹线的编织图案可以被设计为使得绞合迹线中所有单独迹线基本上具有相同的阻抗。也就是说，应用于绞合迹线的交流电将基本上以相等量流入单独迹线中的每一个。因为电流可以均匀分布在股线（strand）上，所以可以减小 AC 电阻。注意到绞合导体可以最优地被设计用于针对特定 AC 频率的最小化电阻。在实施例中，诸如单独迹线的数目和尺寸、PCB 的层数、连接复杂度、板空间等之类的系统权衡可以被考虑以确定最优编织图案和设计。

[0624] 在本部分中，我们可以讨论具有特定层数的分层 PCB 板的示例。在一个示例中，特定数目的层被用于阐明方法和设计并且不应该视为限制性的。所述方法和设计可以被扩展并且缩放为具有更多或更少层的 PCB。

[0625] 在本部分中，我们可以讨论和描述提到特定分层 PCB 技术或实施方式的示例。在此描述的所有技术、方法、算法和实施方式可以是一般性的并且可以适用于包括柔性电路板等等的大范围的分层印刷电路板技术和实施方式。

[0626] 用于对单独迹线进行布线以形成绞合迹线的方法包括将单独迹线或迹线段布线在 PCB 的不同层上以及改变每个单独迹线或段在所得到的绞合迹线内的相对位置。绞合迹线的每个单独迹线可以改变其在每个 PCB 层上的位置，或者单独迹线可以在不同 PCB 层上的图案内的两个或更多位置交替。可能优选的是绞合迹线的每个单独迹线起伏通过分层 PCB 的所有各层。

[0627] 在分层 PCB 技术中，可以利用通孔或透孔来使得迹线通往不同的导体或 PCB 层。通孔的尺寸可以大于单独迹线的最小可能尺寸、单独迹线之间的最小间距，或在所感兴趣的频率处 AC 电流的趋肤深度。在实施例中，所设计的编织图案和布线方法可以通过将通孔置于绞合迹线或编织图案的外边缘或外部来实现。在实施例中，给定单独迹线和迹线间距的制造约束可以尽可能紧密地包装单独迹线并且仍实现适合于高 Q 电感元件的 AC 电阻值。

[0628] 用于在 PCB 上形成绞合迹线的方法和设计可以包括单独导体迹线在每个层上的特定布线以及在每个 PCB 层之间的特定布线。

[0629] 所述布线方法和设计可以利用图 52 中所示的示例来图示和描述，所述图 52 示范所述方法和设计的一些主要特征。图 52 描绘了用于可以在四层印刷电路板的每层上形成的单独迹线的示例性编织图案。跨该板的四层连接单独迹线可以形成包括七个单独迹线的绞合迹线。这七个单独迹线可以以所示的图案布置并且可以重复以达到绞合迹线的期望长度。每层上的单独迹线由图 52(a) 中的黑线描绘并且通孔由迹线任一侧上的黑点表示。为了清楚起见，图 52(a) 并排描绘了单独导体层。在 PCB 中，四个层被堆叠在一起，一个在另

一个上面,并且通过PCB的绝缘体层而分离。绞合导体的侧面上的通孔可以通过(或跨越)所有层而共享。对于该示例性实施例,图52中的第一底部通孔5201在各层在彼此之上堆叠时是相同的通孔。紧挨着每个通孔的两个数字表示具有通过该通孔所连接的单独迹线的层。例如,第一底部通孔5201(被标记为4-1)把连接到该通孔的第四导电层和第一导电层上的单独迹线段连接起来。

[0630] 图52(b)示出了来自图52(a)的图案的等距三维视图。每层上的单独迹线利用黑线来描绘并且由各层之间的通孔所形成的连接利用短划线和虚线来描绘。在本例中四层图案在彼此之上堆叠。各层的间距和尺度(scale),以及每层上的单独迹线之间的分离已经被放大以改进附图的清楚性。通孔连接两层之间的单独迹线段。在本例中,来自每层的所有单独迹线段穿过绞合迹线的宽度并且利用通孔而被布线到相邻层。

[0631] 绞合迹线可以通过编织图案的两侧上的通孔行而位于侧面。在每个PCB层上,单独迹线可以穿过有效绞合迹线的宽度。每个单独迹线段可以从绞合迹线一侧上的通孔布线到绞合迹线另一侧上的通孔。在每个PCB层上,每个被布线的单独迹线可以从连接该单独迹线的通孔布线到另一PCB层上的单独迹线。所述单独迹线可以以这样的方式被布线以使得它们穿过有效绞合迹线的宽度并且还穿过相对于绞合迹线的轴的距离。绞合迹线的轴是沿着绞合迹线的长度行进并且平行于位于绞合迹线侧面的通孔行的虚拟线。示例性绞合迹线的轴在图52(a)中以箭头5203图示。

[0632] 在实施例中,每个单独迹线可以有效地以相对于绞合迹线的轴基本上对角线方向(diagonal direction)布线。在PCB的每个导电层中,所述单独迹线可以以基本上相同方向布线。在图52(a)和52(b)的示例性实施例中,第1层的所有单独迹线可以以从绞合迹线的一侧上的通孔到另一侧上的通孔的基本上对角线方向布线。在通孔处,单独迹线可以被布线到PCB的另一层。来自某一层的所有单独迹线可以在通孔处以类似、不同的、变换的、反向等编织图案而被布线到另一层。在下一层上,单独迹线可以再次例如以基本上对角线图案从绞合迹线的一侧上的通孔布线到绞合迹线的另一侧上的通孔,并且以此类推到达其他层。该图案可以继续直到单独迹线可以穿过PCB的所有或一些导电层,于是单独迹线可以返回到起始导电层或中间导电层。依赖于编织图案、PCB中导电层的数目、绞合迹线的期望长度等,单独迹线可以以用这种方式起伏达任意数目的循环。在实施例中,绞合迹线的端点可以被设计成驻留于PCB的顶层和/或底层,因此它们易接近以容易连接到其他电路元件或导体。

[0633] 在实施例中,在每个连续导体层上,单独迹线可以以相对于绞合迹线的轴基本上对角线方向布线。在实施例中,在每个后续导体层上,单独导体迹线可以以与前一导体层的方向基本上正交的方向布线。该图案可以在图52(a)和图52(b)中看到。第1层中的单独迹线以基本上对角线方向布线,在图中从左至右穿过绞合迹线。在后续层(第2层)中,单独迹线以基本上对角线方向布线并且从绞合迹线的右到左布线,所述对角线方向与第1层的导体迹线基本上正交。

[0634] 通过各个导体层的一个单独导体迹线的布线或路径可以在图53(a)中更容易地辨认出,其中单独迹线之一的路径通过黑虚线被突出显示。开始于连接第4层和第1层的底部通孔5201,单独迹线从绞合迹线的左侧被布线到连接第1层和第2层的右侧的通孔。在该示例性实施例中,第1层上的所有单独迹线被从连接第4层和第1层的通孔被布线到

连接第 1 层和第 2 层的通孔。单独迹线通过通孔被布线到第 2 层并且在第 2 层中从右向左布线到连接第 2 层和第 3 层的通孔。在第 2 层上,单独迹线被布线到连接第 3 层和第 4 层的通孔。在第 4 层上,单独迹线被布线到连接第 4 层和第 1 层的通孔,使得单独迹线回到第一层。该图案可以根据需要被重复多次达特定长度的绞合迹线。

[0635] 在图 53(b) 中描绘了通过一个示例性实施例的导体层的一个单独导体迹线的布线或路径的等距视图。通过粗黑线突出显示单独迹线之一的路径。单独迹线从绞合迹线一侧上的一个通孔到绞合迹线另一侧上的通孔穿过绞合迹线的宽度。单独迹线通过通孔被布线到其他层。在穿过所有四层之后,单独迹线返回起始层并且该图案继续。

[0636] 尽管图 52 和图 53 中示出的示例性布线图案在形成编织图案的单独迹线中以 90 度角为特征,并且基于单独迹线的直线性的布线图案,但是可以使用各种其他编织和布线图案。在示例性实施例中,其他编织和布线方案可以产生可以相对于绞合迹线的轴沿着基本上对角线方向的单独迹线图案。例如,单独迹线可以以较浅角度(例如 45 度)弯曲以帮助减少迹线之间的间隙。在一些实施例中,可能有利的是使得每个单独迹线成为直接连接在两个通孔之间的倾斜直线。在其它实施例中,单独迹线的各种弯曲可以在绞合迹线并不遵循沿电路板的直线路径而是例如以某一方向转动或成环时使用。在图 54 中示出用于单独迹线的若干可替换示例性对角线编织和布线图案,但是可以得出许多其他图案。在一些应用中,一些对角线布线方法可能是优选的。例如,对于图 54(a) 中示出的布线,单独迹线是可能优选的直线,因为它可以导致最短的整体导线长度且同时保持相邻单独迹线之间的一致间距。在实施例中,在 PCB 中的一些或所有导体层之间编织图案可以不同。对于图 52 中示出的示例性绞合迹线,偶数层上的编织图案不同于奇数层上的编织图案。在图 52 中示出的示例性绞合迹线中,单独迹线在奇数层中以绞合迹线的轴的方向上四个通孔的距离布线,而在偶数层中仅仅以三个通孔的距离布线。

[0637] 如图 52 中所举例说明的,本发明的方案将通孔集中于单独迹线阵列或组的任一侧。因此,(与迹线和迹线之间的间隙相比可能具有更大最小特征尺寸)的通孔并不占据单独迹线内或之间的空间。通孔的这种布置可能引起迹线的较高整体密度并且因此引起每横截面积较低的 AC 电阻。

[0638] 上面描述的示例性布线结构可以被一般化用于包括分层 PCB 的各种数目的导电层以及各种数目的单独迹线的绞合迹线。布线方法的一般特性可以由整数 N (表示导体层的数目)和整数 M (表示构成绞合迹线的单独导体迹线的数目)表征。

[0639] 对于这里所公开的设计和方法,可能优选的是具有偶数数目的导体层。对于一些特定编织和布线图案,可以使用连接两层上的迹线的通孔。具有 N 个导体层的绞合迹线应该具有 N 种类型的连接不同层的通孔,如果每个通孔仅连接两层的话。每一种类型的通孔区别或差别在于它所连接的层。如果每个通孔仅连接两层,对于单独迹线穿过 PCB 板的所有 N 个层,在绞合迹线中应该有 N 种类型的通孔。优选地,在绞合迹线的任一侧上可以存在以固定重复次序布置的 $N/2$ 种类型的通孔。在图 52 中示出的示例性图案中,在四种类型的通孔中,两种类型的通孔,即连接第 4 层和第 1 层以及第 2 层和第 3 层的那些通孔仅仅位于绞合迹线的一侧,而另外两种类型的通孔,即连接第 1 层和第 2 层以及第 3 层和第 4 层的那些通孔位于绞合迹线的另一侧。在每层上,单独迹线可以优选地相对于绞合迹线的轴以基本上对角线方向布线,以使得它具有相当于至少 $N/2$ 个通孔的距离的位移。层上的所有单

独导电迹线在绞合迹线的轴上可以具有相同的位移。

[0640] 构成绞合迹线的单独迹线的数目可以至少部分地由总位移来确定,有时由经过的通孔数目,即单独迹线在行进通过 PCB 的所有导体层之后所经过的通孔数目来表征。如果在已经穿过所有层之后的位移是 D 个通孔,那么绞合迹线可以包括多达 $D/(N/2)$ 个单独迹线。这一关系能够在图 53 中的示例中看到。由虚线表示的单独迹线在穿过所有导体层之后沿着绞合迹线的轴位移相当于 14 个通孔的距离。因为该示例具有 $N = 4$ 层,所以构成绞合导体的单独导体的总数目是 $M = 14/2 = 7$ 。

[0641] 绞合迹线能够通过考虑包括在该股线中的单独迹线的数目来优化。单独迹线的数目越大,每个单独迹线在任何一层上所花费的就越长,这会减少编织图案对于减少趋肤/接近效应而言的有效性。

[0642] 如果单独迹线的数目和导体层的数目被适当地选择,则可以确保每个单独迹线将沿着绞合导体的轴在每个层中位移相同的距离。为了使之发生的充分条件是选择 $M(N/2)$ 以使得它可被 N 除尽并且选择 M 以使得 $(M/2) \bmod (N/2)$ 和 $N/2$ 是互素数,其中“mod”是模运算。

[0643] 图 55 示出所提出方法的编织单独迹线的部分图案的另一示例。该图描绘了十层绞合迹线设计的第一层的单独迹线。十层绞合迹线包括 136 个单独的导体。绞合迹线的参数可以允许绞合导体的所有十层中的完全对称。每个导体层图案可以是前一层的变换的镜像。也就是,奇数编号层上的迹线的图案可以与经过以下方式变换的第一层是相同的图案,所述方式即单独迹线段的各端连接到正确的通孔。用于偶数编号层的图案可以通过反射对称和用于该示例的类似变换来恢复。

[0644] 图 56 是表示多层 PCB 的导电层的横断面视图。每层上的单独迹线段(不可见),因此它们所传导的电流可以主要流入页面,但是它们沿每个层具有附加的横向位移,如图中水平箭头所指示的。该水平位移使得每个迹线能够从给定层上的编织图案的一侧移动到编织图案的相对侧。一旦单独迹线段到达特定层上的编织图案的边缘,它就通过(如垂直箭头所指示的)通孔而连接到该板的下一层上的另一迹线段并且在相反方向上跨越编织图案而回归。该图案自身重复使得每个单独迹线在沿着编织图案的横截面的每个位置花费近似相等的时间量。可替换地,单独迹线可以以非连续方式在各层之间布线。可以使用层次序的任何排列。可能优选的是每个单独迹线在一股迹线中遵循相同的层次序或排列。注意到该图案可以通过将底层上的迹线段连接到顶层上的迹线段,或通过遵循上面描述的交错排列而上下地对迹线进行布线而继续。

[0645] 优选地,构成 PCB 上的绞合迹线的单独迹线的横截面尺寸足够小(优选地小于一个趋肤深度 $\delta = \sqrt{2 / \omega \mu_r \mu_0 \sigma}$) 这样它们使得由一个单独迹线或迹线段对其邻元素所引入的损耗与隔离的单独迹线或迹线段的损耗相比很小(对于小于趋肤深度的单独迹线而言其将接近于直流(DC)损耗)。股线的编结有助于确保所有股线可以具有基本上相同的阻抗,使得如果在捆绑股线两端施加相同电压(即股线是并联驱动的),则股线可以分别地传导基本上相同的电流。因为 AC 电流可以跨越股线均匀地分布,所以 AC 电阻可以被进一步最小化。

[0646] 作为以上的说明,对由在 250kHz 驱动的由方形横截面的单独铜迹线制成的绞合迹线执行有限元分析模拟。对具有变化的高宽比以及单独导体的不同尺寸的绞合迹线执

行所述模拟。以灰色示出单独迹线的横截面的绞合迹线的横截面在图 58 中示出。在该频率,纯铜的趋肤深度是 $\sim 131\ \mu\text{m}$ 。如果我们将横截面 5801 的为 $152\ \mu\text{m}\times 152\ \mu\text{m}$ (稍大于一个趋肤深度)的单独迹线布置到 8 层的方形阵列中使得沿所述层和在所述层之间的最接近的迹线之间的间隙是 $76\ \mu\text{m}$,如图 58(a) 中所示,我们发现与图 52 中的图案类似地编结的绞合迹线导体的每米的电阻可以是 $18.7\text{m}\Omega/\text{m}$,其比该结构每长度 DC 电阻, $11.4\text{m}\Omega/\text{m}$ 高 64%。相比之下,如果迹线没有编结或者全都平行于绞合迹线的轴,则该结构每长度的电阻是 $31.2\text{m}\Omega/\text{m}$,几乎是 DC 值的 3 倍。

[0647] 如果我们在横截面 5802 中制造绞合迹线 $76\ \mu\text{m}\times 76\ \mu\text{m}$ 的单独迹线并且将它们布置到 16 层的方形阵列中使得如图 58(b) 中的迹线之间的间隙是 $38\ \mu\text{m}$ (整体横截面因此与先前的示例未改变),我们发现编结结构的 AC 电阻可以是 $13.2\text{m}\Omega/\text{m}$,比 DC 值高大约 16%。

[0648] 在迹线的横截面尺寸不能被制造得比趋肤深度小得多的情况下(例如因为制造方面的限制),可以通过增加单独迹线的高宽比来减少接近损耗。在该上下文中高宽比是单个迹线上的绞合导体的有效宽度除以构成绞合迹线的导电和绝缘层的堆叠的厚度。在某些情况下,绞合迹线的厚度大致由 PCB 的厚度给出。模拟表明如果上面描述的 $152\ \mu\text{m}\times 152\ \mu\text{m}$ 迹线的股线的高宽比被改变使得在每层上存在两倍多的迹线段,但是如图 58(c) 中所描绘的一半多的层,则在 250kHz 的 AC 电阻可以从 $18.7\text{m}\Omega/\text{m}$ 减小到 $16.0\text{m}\Omega/\text{m}$ 。对于具有 $76\ \mu\text{m}\times 76\ \mu\text{m}$ 迹线的结构,再次保持单独导体的数目相同,但是如图 58(d) 中所描绘的以因子 2 来减小该结构的厚度把 AC 电阻从 $13.2\text{m}\Omega/\text{m}$ 降低到 $12.6\text{m}\Omega/\text{m}$ 。在这两种情况中每长度的 DC 电阻是 $11.4\text{m}\Omega/\text{m}$ 。在实施例,中,绞合迹线的优选的高宽比可以是应用相关的。在实施例中,在针对特定高 Q 电感元件设计确定最好的编织图案时可以考虑各种因素。

[0649] 所提出的方法的好处是在绞合迹线中使用的通孔可以完全地贯穿该板。也就是,不需要半导通孔(partial vias)或埋孔(buried vias)。使用完全贯穿该板的通孔可以简化制造过程。例如,若干板可以被堆叠在一起,并且同时被穿孔。半导通孔或仅通过 PCB 的一些连续层的通孔通常需要在组装单独层之前进行穿孔。同样,埋孔,或者连接或通过 PCB 的一些内部层的通孔需要在制造期间在组装 PCB 的外部层之前进行穿孔和制备。

[0650] 在此所描述的方法和设计的另一好处是在编织图案的外边缘处的通孔的位置可以允许多匝或较高密度绞合迹线图案之间较小的分离。当两个绞合迹线在 PCB 上彼此接近地行进时,或当单个绞合迹线被成形、图案化、折叠、转动和/或布线以使得该绞合迹线的不同部分在 PCB 上彼此接近地行进,这些迹线之间的分离可以通过重用或占据附近通孔之间(interspace)而减小。例如,图 57 示出具有共享相同行通孔的两个绞合迹线 5701、5702 的 PCB 的顶层,其中为了清楚起见,右绞合迹线 5702 的通孔被描绘为白色实心圈而左绞合迹线 5701 的通孔被描绘为黑圈。两个绞合迹线 5701、5702 之间的通孔 5703 全都处于相同行中并且在两个绞合迹线之间基本上没有间距。借助于埋孔或盲孔,其分别不穿过或通过整个厚度,或者 PCB 的所有层可以被在彼此之上堆叠并且单独导体迹线的布线密度可以被进一步增加,因为通孔之间的间距可能不需要被增加以容纳相邻绞合迹线的通孔。

[0651] 对于本领域技术人员将会清楚的是,可以对在本发明的精神内示出的示例进行许多改变或修改。例如,虽然贯穿 PCB 的过孔(through via)可以用于所述方法,但是也可以使用盲孔或埋孔。还可能的是,使多于一个通孔在彼此之上堆叠并且一个通孔位置可以被用于将多于两组导体层连接在一起,这可以被用于增加绞合迹线中导体迹线的密度。同样,

虽然示例使用仅将两个板（导体）层连接在一起的通孔，但是可以对该布线方法进行修改以使得每个导体迹线同时地在多个层上布线。在所提出方法的精神中的其他修改可以包括从一个通孔到多个通孔对单独导体迹线进行布线，从多个通孔到每层上的一个通孔进行布线，使用多个导体迹线以从一个通孔到每个导体层上的另一个通孔进行布线，或其任何组合。

[0652] 在一些实施例中，可能有利的是使得各层之间的导体迹线不对准以确保迹线全都呈现基本上相同的阻抗。

[0653] 绞合迹线对于大的多样的应用集合而言可能是有用的并且在通常使用传统编结利兹线的任何应用中可以作为代替。绞合迹线可以以各种形状和尺寸的一个或多个环路进行布线以产生可以用于磁场功率转移系统中的线圈，所述磁场功率转移系统例如传统的基于感应的功率转移系统或近场磁谐振功率转移系统。在绞合迹线可以被用作谐振器的一部分的一些实施例和应用中，迹线尺寸、高宽比、布线图案等等可以被选择和优化以最大化谐振器的 Q 。在实施例中，高 Q 谐振器的谐振频率可以被选择以利用特定编织图案和 / 或绞合迹线设计。

[0654] 在实施例中，PCB 绞合迹线环路可以被布线以使得磁性材料的芯可以被置于环路的中央以产生有芯环路。PCB 可以具有多个断流器、沟道、袋 (pocket)、管脚 (mount) 或孔以容纳芯。

[0655] 在实施例中，绞合迹线的 PCB 另外可以被用于承载和集成其他电子设备或电子组件。用于对由绞合迹线所形成的谐振器进行供电或驱动的电子器件可以位于与迹线相同的 PCB 上。

[0656] 可调整源尺寸

[0657] 无线功率转移方法的效率随着源和设备之间的分离距离而降低。在源和设备谐振器之间的某些分离处的无线功率转移效率可以利用具有可调整尺寸的源而提高。本发明人已经发现在固定分离处的无线功率转移的效率可以通过调整源和设备谐振器的相对尺寸来优化。对于设备谐振器的固定尺寸和几何结构，源谐振器可以被定尺寸以优化在某些分离、位置和 / 或定向的无线功率转移效率。当源和设备谐振器彼此接近时，功率转移效率可以在谐振器的特性尺寸或有效尺寸类似时得到优化。在更大的分离处，功率转移效率可以通过相对于设备谐振器增加源谐振器的有效尺寸来优化。源可以被配置成在设备移动接近或远离源时改变或调整源谐振器尺寸以便优化功率转移效率或实现特定期望功率转移效率。

[0658] 在本部分中的示例中，我们可以描述仅源具有可调整尺寸的无线功率转移系统和方法。将要理解的是，设备也可以具有可调整尺寸并且获得许多相同的好处。在一些系统中，源和设备这二者可以具有可调整的尺寸，或者在其他系统中，仅源或仅设备可以具有可调整的尺寸。仅源具有可调整尺寸的系统在某些情形中更为实际。在许多实际设计中，设备尺寸可以被固定或限制，例如通过设备谐振器必须被集成于其中的设备的物理尺寸，通过成本、通过重量等等，从而使得可调整尺寸设备谐振器不切实际的或更难以实施。然而，对于本领域技术人员应该很明显的是，在此所描述的技术可以用于具有可调整尺寸设备、可调整尺寸源或两者的系统中。

[0659] 在本部分中，我们会提到谐振器的“有效尺寸”而不是谐振器的“物理尺寸”。谐振

器的物理尺寸可以通过谐振器的特性尺寸来量化（例如包围例如有效地二维谐振器的最小圈的半径）。有效尺寸指的是由谐振器结构中的载流电感元件所限定的表面区域的尺寸或范围。如果电感元件包括一系列具有递减半径的同心环路（通过开关集合而彼此连接），例如谐振器的物理尺寸可以由该结构中的最大环路的半径给出，而谐振器的有效尺寸将由被“接入（switched into）”电感器并且载流的最大环路的半径来确定。

[0660] 在一些实施例中，谐振器的有效尺寸可以小于谐振器的物理尺寸，例如当构成谐振器的导体的一小部分被赋能时。同样，谐振器的有效尺寸可以大于谐振器的物理尺寸。例如，如以下在本发明实施例之一中所描述的，当具有给定物理尺寸的多个单独谐振器被布置以产生谐振器阵列、网格（grid）、多元图案（multi-element pattern）时，谐振器阵列的有效尺寸可以大于任何单独谐振器的物理尺寸。

[0661] 无线功率转移效率与源-设备谐振器分离之间的关系在图 59(a) 中示出。图 59(a) 中的绘图示出图 59(b) 中示出的配置的无线功率转移效率，其中源 5902 和设备 5901 电容加载的导体环路谐振器在轴 5903 上（置于中心）并且彼此平行。针对固定尺寸 5cm 乘 5cm 的设备谐振器 5901 和三个不同尺寸源谐振器 5902 5cmx5cm、10cmx10cm 和 20cmx20cm 对于分离距离范围 5906 示出了绘图。注意到，在不同分离的无线功率转移设备谐振器效率可以取决于源和设备谐振器的相对尺寸。也就是，产生最高效无线功率转移的源谐振器的尺寸对于源和设备谐振器之间的不同分离而言可能不同。对于由图 59(a) 中的绘图所捕获的配置，例如在较小的分离，所述效率在源和设备谐振器的尺寸被定为基本上相等时最高。对于较大的分离，无线功率转移效率在源谐振器比设备谐振器大得多时最高。

[0662] 发明人已经发现对于其中源和设备谐振器之间的分离发生改变的无线功率转移系统，对于能够被配置成具有各种有效谐振器尺寸的源而言可能是有利的。当设备被带到接近或远离源时，源谐振器可以改变其有效谐振器尺寸以优化功率转移效率或以一定范围的期望转移效率进行操作。有效谐振器尺寸的这种调整可以是手动或自动的，并且可以是整体系统控制、跟踪、操作、稳定化和优化架构的一部分。

[0663] 具有可调整源尺寸的无线功率转移系统还可以在所有将由源供电的设备不具有类似尺寸的设备谐振器时是有益的。在源和设备之间的固定分离处，具有两个不同尺寸的设备谐振器的设备对于不同尺寸的源谐振器可以实现最大转移效率。然后，依赖于充电协议和设备功率要求和分级，源可以改变其尺寸以优先地对设备之一、一类设备或所有设备等等进行充电或供电。

[0664] 此外，在可能需要单个源同时对多个设备供电时可以获得来自可调整尺寸源的附加好处。在多个设备需要功率时，源谐振器所限定的空间位置或区域或源谐振器的有效区域可能需要改变。例如，如果多个设备位于一个区域中但是彼此分离，则源可能需要被扩大以便对包括所有多个设备的更大区域赋能。在需要功率的设备数目改变时，或它们的空间分布和位置相对于源改变时，可调整尺寸源可以改变其尺寸以改变源周围的磁场的特性和空间分布。例如，当需要源向单个设备转移功率时，具有适当的磁场空间分布的相对较小源尺寸可以被用于实现期望的无线功率转移效率。当需要源向多个设备转移功率时，较大的源尺寸或具有不同磁场空间分布的源可能是有益的，因为设备可能处于源周围的多个位置。在需要功率的设备数目改变时，或它们的分布或功率要求改变时，可调整尺寸源可以改变其尺寸以调整、最大化、优化、超过或满足其操作参数和规范。

[0665] 可调整源尺寸的另一可能的好处可以是减少与设备相对于源的位置的不确定性或可变性相关联的功率转移无效。例如,相对于源具有某一横向位移的设备可能经历降低的功率转移效率。图 60(a) 中的绘图示出图 60(b) 中所示的配置的无线功率转移效率,其中源 6002 和设备 6001 电容加载的导体环路谐振器彼此平行但是在它们的中心轴 6006、6005 之间具有横向偏移 6008。图 60(a) 中的绘图示出与并行定向的 5cmx5cm 源谐振器 6002(粗线)或 20cmx20cm 源谐振器 6002(虚线)分离 2cm 6008 的 5cmx5cm 设备谐振器 6001 的功率转移效率。注意到在从 5cmx5cm 源谐振器的大约 5cm 的横向偏移 6007 处(从设备谐振器的中心到源谐振器的中心),存在功率转移效率的“死点(dead spot)”。也就是,转移效率在特定源设备偏移处最小或逼近零。图 60(a) 中的虚线示出在相同分离和相同横向偏移但是具有调整到 20cm 乘 20cm 的源尺寸的相同设备的无线功率转移效率可以大于 90%。源尺寸从 5cmx5cm 到 20cmx20cm 的调整将“死点”的位置从大约 5cm 的横向偏移移动到大于 10cm 的横向偏移。在本例中,调整源尺寸将无线功率转移效率从几乎零增加到大于 90%。注意到,当两个谐振器在轴上或置于中心或横向偏移少于大约 2 到 3cm 时,20cmx20cm 源较低效地向 5cmx5cm 设备谐振器转移功率。在实施例中,源尺寸的改变可以被用于移动充电或供电死点或转移效率最小值的位置,从而允许设备的更大的定位灵活性和/或到设备的更高耦合效率。

[0666] 在一些实施例中,具有可调整尺寸的源可以被实现为选择性地由功率源或由功率或控制电路驱动的各种尺寸的谐振器库。基于根据来自监视、感测或反馈信号、通信等的信息的预定要求,计算要求,适当尺寸的源谐振器可以由功率源和/或由功率和控制电路驱动并且该尺寸可以在源和设备谐振器之间的要求或距离改变时被调整。不同尺寸的谐振器的库的可能布置在图 61 中示出,其描绘了三个不同尺寸谐振器的库。在图 61 的示例中,三个谐振器 6101、6102、6103 被同心地布置并且耦合到功率和控制电路 6104。谐振器的库可以具有其他配置和布置。不同的谐振器可以被并排地放置,如在图 62 中以阵列布置,等等。

[0667] 多尺寸谐振器库中的每个谐振器可以具有其自己的功率和控制电路,或者它们均可以通过开关、继电器(relay)、晶体管等等接入或选择性地连接到一个或多个功率和控制电路。在一些系统中,谐振器中的每一个可以感应地耦合到功率和控制电路。在其他系统中,谐振器中的每一个可以通过电子组件的附加网络耦合到功率和控制电路。具有附加电路 6201、6202、6203 的三谐振器配置在图 62 中示出。在一些系统中,附加电路 6201、6202、6203 可以用于谐振器 6101、6102、6103 中的每一个与功率和控制电路 6204 之间的阻抗匹配。在一些系统中,可能有利的是使得从功率和控制电路来看,谐振器中的每一个和它相应的附加电路具有相同的有效阻抗。在一些实施例中,可以使每个谐振器和附加阻抗匹配网络的有效阻抗与功率源或功率和控制电路的特性阻抗相匹配。用于所有谐振器的相同有效阻抗可以使得谐振器库中的谐振器之间的切换更容易、更高效、或更快速并且在功率和控制电路中可能需要较少的调谐或可调谐组件。

[0668] 在具有多尺寸谐振器库的系统的一些实施例中,附加电路 6201、6202、6203 还可以包括附加的晶体管、开关、继电器等等,其在谐振器不被功率和控制电路驱动或供电时禁用、去激活或解谐谐振器。在该系统的一些实施例中,并非源的谐振器库中的所有谐振器都可以被同时供电或驱动。在系统的此类实施例中,可能希望的是禁用或解谐非活动的谐振器以减少由于该源的未供电谐振器的能量吸收而引起的功率转移中的能量损耗。该源的未

供电谐振器可以通过开路、扰乱 (disrupting)、接地或切断谐振器的导体而从其他谐振器的谐振频率去激活或解谐。晶体管、开关、继电器等等可以被用于选择性地打开或闭合谐振器的导体部分中的电通路。未供电谐振器同样也可以通过向具有开关、晶体管、继电器等等的谐振器除去或增加电容或电感而被解谐或去激活。在一些实施例中,单独谐振器的自然状态可以将系统操作频率解谐并且在它在所述库中激活时使用来自驱动信号的信号或功率来适当地调谐谐振器。

[0669] 在具有多尺寸谐振器库的源的系统的一些实施例中,多个谐振器可以同时由一个或多个功率和控制电路来驱动。在该系统的一些实施例中,供电的谐振器可以异相地驱动以扩展或引导无线功率转移。同相或异相地或在一个或多个任何相对相位驱动多个谐振器的振荡磁场之间的相长干涉和相消干涉可以被用于产生特定“热点”或集中磁能区域。在实施例中,这些热点的位置可以是可变的并且可以四处移动以实现到四处移动的设备期望无线功率转移效率或寻到 (address) 处于不同位置、定向等等的设备。在实施例中,多尺寸源谐振器可以被调整以实施功率分配和 / 或共享算法和 / 或协议。

[0670] 在多尺寸谐振器库的一些实施例中,谐振器全都可以具有类似参数或特性,尽管在它们的尺寸上有差异。例如,谐振器全都可以具有类似的阻抗、谐振频率、品质因数、线规、绕组间距、匝数、功率水平等等。谐振器的属性和特性可以在它们的值的 20% 内。

[0671] 在多尺寸谐振器库的其他实施例中,谐振器可以具有针对每个谐振器的尺寸而修整或优化的不同的参数和特性。例如,在一些实施例中,较大谐振器的导体的匝数可以少于最小谐振器的匝数。同样,因为较大的谐振器可以预定用于对远离谐振器的设备供电,大的谐振器的无载阻抗可以不同于预定用于对更接近于谐振器的设备供电的小谐振器的无载阻抗以补偿由于分离的差异引起的相应谐振器上的有效负载的差异。在其他实施例中,谐振器可以具有不同或可变的 Q,它们可以具有不同的形状和厚度,它们可以由不同的电感和电容元件和不同的导电材料组成。在实施例中,可变源可以针对特定应用进行定制设计。

[0672] 在其他实施例中,具有可调整尺寸的源可以被实现为类似尺寸谐振器的阵列或网格。该阵列的功率和控制电路可以选择性地驱动一个或多个谐振器以改变谐振器的有效尺寸。例如,谐振器的网格的可能配置在图 63 中示出。类似尺寸的谐振器 6301 的网格可以以网格布置并且耦合到一个或多个功率和控制电路 (未示出)。该阵列的谐振器 6301 中的每一个可以被单独供电或者任意数目的谐振器可以被同时地供电。在该阵列中,谐振器的有效尺寸可以通过控制被供电谐振器的数目、位置和驱动特性 (例如,驱动信号相位、相位偏移、振幅等等) 而改变。例如,对于图 63 中的谐振器阵列,谐振器的有效尺寸可以通过改变对阵列中的哪些单独谐振器供电来控制。谐振器可以仅对谐振器之一供电,导致等于单独谐振器之一的尺寸的有效谐振器尺寸 6304。可替换地,该阵列的左上部分中的四个单独谐振器可以被同时赋能,产生可以近似单独谐振器中的每一个的长度的两倍的有效谐振器尺寸 6303。所有谐振器还可以被同时赋能,导致可以近似单独谐振器中的每一个的物理长度的三 (3) 倍大的有效谐振器尺寸 6302。

[0673] 在实施例中,单独谐振器阵列的尺寸可以被缩放到任何尺寸。在更大的实施例中,由于成本、配线约束等等,对于每个单独谐振器具有功率和控制电路可能是不实际的。十字开关的开关柄可以被用于连接任何单独谐振器到根据需要的少数的功率和控制电路。

[0674] 在单独谐振器阵列的实施例中,单独赋能谐振器的图案可以被修改或优化。有效

谐振器的形状可以是长方形、三角形、正方形、圆形或任何任意形状。

[0675] 在谐振器阵列的实施例中,哪些谐振器获得赋能可以取决于设备谐振器和源谐振器之间的分离或距离、横向偏移、定向等等。可以被驱动的谐振器的数目可以例如取决于设备谐振器和源谐振器之间的距离和 / 或定向,设备谐振器的数目,它们的各种功率要求等等。阵列或网格中被赋能谐振器的位置可以根据设备相对于源的横向位置来确定。例如,在可以覆盖房间的地板或桌子表面的较小单独谐振器的大阵列中,被赋能谐振器的数目可以随着设备与地板或书桌之间的距离改变而改变。同样,当设备在房间或桌子四处移动时,阵列中被赋能谐振器的位置可以改变。

[0676] 在另一个实施例中可调整尺寸源谐振器可以利用多尺寸谐振器阵列来实现。若干小的等尺寸谐振器可以被布置以产生小的谐振器的小组合体 (assembly)。小阵列可以被较大尺寸谐振器包围以产生更大的组合体。该更大的组合体本身可以以阵列来布置,形成再更大的阵列,其具有包围本身可以以阵列布置的该更大阵列的甚至更大的谐振器,诸如此类。在该布置里,源谐振器包括遍及该阵列分布的各种物理尺寸的谐振器。谐振器的布置的示例图在图 64 中示出。较小的谐振器 6401 可以以 2 乘 2 阵列来布置并且由具有更大物理尺寸的另一谐振器 6402 包围,从而形成谐振器的组合体。谐振器的该组合体可以以 2 乘 2 阵列布置并且由具有甚至更大物理尺寸的谐振器 6403 包围。该模式可以重复以产生更大的阵列。每个谐振器或谐振器的组合体被重复的次数可以被配置并优化并且可以是对称的或可以不是对称的。在图 64 的示例中,每个谐振器和组合体可以以 2 乘 2 阵列来重复,但是任何其他阵列尺寸可以是适当的。注意到,所述阵列可以是圆形、正方形、长方形、三角形、菱形等等,或形状和尺寸的任何组合。在阵列中使用多尺寸谐振器可能具有的好处是它可能不需要对多个谐振器赋能以产生较大的有效谐振器。该特征可以简化源的功率和控制电路。

[0677] 在实施例中,可调整源尺寸还可以使用平面或有芯谐振器结构来实现,所述结构具有用电容加载的导体缠绕的磁性材料的芯,其示例在图 11、12 和 13 中示出并且在此描述。在一个实施例中,如图 65(a) 中所描绘的,可调整源可以利用磁性材料芯 6501 和绕该芯缠绕的多个导体 6502、6503 和 6504 来实现以使得不同导体的环路不重叠。谐振器的有效尺寸可以通过对不同数目的导体赋能来改变或调整。较大的有效谐振器可以在若干相邻导体被同时驱动或赋能时实现。

[0678] 具有有芯谐振器的可调整尺寸源的另一实施例在图 65(b) 中示出,其中磁性材料芯 6505 被多个重叠导体 6506、6507、6508 缠绕。所述导体可以被缠绕以使得每个导体跨越磁芯 6505 延伸不同的距离。例如,对于图 65(b) 中的谐振器,导体 6508 覆盖芯 6505 的一部分或最短距离而导体 6507 和 6506 均覆盖较长距离。谐振器的有效尺寸可以通过对不同的导体赋能来调整,其中在覆盖磁芯的最小距离的导体被赋能时出现最小有效尺寸并且在覆盖芯的最大距离的导体被赋能时出现最大有效尺寸。导体中的每一个可以被缠绕以实现类似的电感、阻抗、电容等等。导体可以全都是相同的长度,其中覆盖距离通过改变导体的多个环路之间的密度或间距而修改。在一些实施例中,每个导体可以以相等间距缠绕,由此对于每个绕组需要不同长度的导体。在其他实施例中,导体的数目和每个导体的缠绕可以被进一步优化具有不恒定或变化的缠绕间隔、量规、尺寸等等。

[0679] 具有有芯谐振器的可调整尺寸源的另一实施例在图 65(c) 中示出,其中多个磁

芯 6509、6510、6511 被间隔开、或不接触,并且利用多个导体 6512、6513、6514 而缠绕。磁芯 6509、6510、6511 中的每一个以间隙 6515、6516 隔开,并且导体绕每个磁芯缠绕,延伸过所述间隙并且环绕相邻磁芯。不跨越两个磁芯之间的间隙的导体,例如图 65(c) 中的导体 6513 可以用于一些实施例中。谐振器的有效尺寸可以通过同时对绕所述芯缠绕的不同数目的导体赋能来调整。绕磁芯之间的间隙缠绕的导体可以被赋能,从而将磁场从一个芯引导到另一个芯,延长了谐振器的有效尺寸。

[0680] 如本领域技术人员将会理解的,在图 65 中描绘的方法和设计可以被扩展到具有各种形状和突出部分的平面谐振器和磁芯,其可以实现在多个维度上具有可变尺寸的可调整尺寸谐振器。例如,多个谐振器可以绕如在图 13 中成形的芯的延伸部分缠绕,从而实现具有在两个或更多维度上具有可变尺寸的可调整尺寸谐振器。

[0681] 在实施例中,可调整尺寸源谐振器可以包括控制和反馈系统、电路、算法和架构以用于确定用于在环境中配置设备或对象的最有效源尺寸。控制和反馈系统可以使用各种传感器、通信信道、测量等等以确定最高效源尺寸。在实施例中,来自传感器、测量电路、通信信道等等的的数据可以由选择适当源尺寸的各种算法进行处理。

[0682] 在实施例中,源和设备可以包括无线通信信道,例如蓝牙、WiFi、近场通信,或者可以被用于传送允许选择最适当或最高效源尺寸的信息的磁场调制。例如设备可以向源传送所接收功率、电流或电压,其可以被源使用来确定功率转移效率。该设备可以传送其位置或相对位置,所述位置可以被用于计算源和设备之间的分离距离,并且用于确定源的适当尺寸。

[0683] 在实施例中,源可以测量谐振器的参数或功率转移的特性以确定适当的源尺寸。源可以采用任意数目的电或电子传感器以确定源的源谐振器的各种配置或各种谐振器的参数。源可以监视每个配置、谐振器的阻抗、电阻、谐振频率、电流和电压的振幅和相位等等,或源的尺寸。这些参数或这些参数的改变可以被源使用以确定最有效的源尺寸。例如,表现出其无载状态和当前状态之间的最大阻抗差异的源配置对于系统状态而言可能是最适当的或最高效的。

[0684] 源的尺寸和操作参数可以被连续地、周期性地或根据需求(例如响应于设备或系统的操作者的请求)而改变。设备可以请求或提示源在特定时间间隔期间或当设备处的功率或电压降低到低于阈值时寻找最适当的源尺寸。

[0685] 图 66 描绘了在一个可能的系统实施例中以设备谐振器 6602 的若干配置和定向所进行的操作期间无线功率转移系统可以使用包括两个不同尺寸谐振器 6601、6605 的可调整源尺寸 6604 的可能方式。当具有小谐振器 6602 的设备被对准并且非常接近时,源 6604 可以对较小谐振器 6605 赋能,如图 66(a) 中所示。当具有小谐振器 6602 的设备被对准并且位于更远处时,源 6604 可以对较大的谐振器 6601 赋能,如图 66(b) 中所示。当具有小谐振器 6602 的设备失准时,源 6604 可以对较大的谐振器 6602 赋能,如图 66(c) 中所示。最后,当具有大谐振器 6602 的设备存在时,源 6604 可以对较大的谐振器 6601 赋能(如图 66(d) 所示)以最大化功率转移效率。

[0686] 在实施例中,用于确定适当源尺寸的算法可以在作为源的一部分、连接到源或与源通信的处理器、门阵列或 ASIC 上执行。在实施例中,该算法可以顺序地对所有可能的源配置或尺寸或其子集赋能,测量所述配置的操作特性并且选择具有最期望特性的源尺寸。

[0687] 利用浸入式 (Immersed) 谐振器的无线功率转移

[0688] 在实施例中,无线功率转移系统可以被设计成在一个、两个或更多谐振器被浸入液体、浆、泥、冰、盐溶液等等,嵌入可能是有损耗的和 / 或导电的材料或被这些材料所包围时操作。在实施例中,可以在位于水下、地下、溪流中、路面中、水泥中、浆中、泥中、材料的混合物中、或任何类型的液体或粘性材料池中、在诸如水井、气井、油井等之类的井中的一个或多个谐振器之间无线转移功率。

[0689] 在实施例中,无线功率转移系统的源和 / 或设备谐振器可以被设计成减少可能位于包围谐振器的区域中的有损耗或导电材料或对象中或其处的电场的幅度,尤其是最接近谐振器的那些材料和区域,以便实现期望的被扰动 Q 。在实施例中,相对于磁谐振器的电气组件和导电环路具有特定尺寸和位置的外壳可以被用于改进相对于无外壳实施方式的被扰动 Q 。这样的外壳可以通过在电场强度相对高并且有损耗或导电材料可能位于的位置之间提供间距而在浸入式谐振器应用中支持较高的被扰动 Q 谐振器。例如,在其中谐振器可以浸入水、咸水、油、气体或其他有损耗材料中的应用中,可能有利的是对磁谐振器进行封装以确保有损耗材料和谐振器的电气组件之间的最小分离距离。

[0690] 谐振器的封装、结构、材料等等可以被设计成提供离开磁谐振器中的导电环路的间距或“避开 (keep away)”区。在一些实施例中,该避开区可以小于在谐振器周围 1 毫米。在其他实施例中,避开区可以小于在谐振器周围 1cm 或小于 10cm。在实施例中,避开区的尺寸可以取决于被转移功率的水平,周围材料的损耗性、谐振器的操作频率、谐振器尺寸等等。在实施例中,避开区的尺寸可以由应用的物理约束而受到限制并且避开区可以被设计为使得由于避开区外的有损耗材料而引起的谐振器的被扰动 Q 为谐振器的未扰动 Q 的至少 50%。在实施例中,避开区可以被设计为使得谐振器的被扰动 Q 大于未扰动 Q 的 1%。

[0691] 在实施例中,在谐振器周围的避开区可以通过包围谐振器并且还可以包围谐振器的功率和控制电路的封装来提供。优选地,所述封装可以用诸如某些塑料、复合材料、塑料复合材料、特氟隆、Rexolite、ABS、陶瓷、石料等等之类的非有损材料制造。谐振器和电路可以包裹在这样的封装中或者所述封装可以提供具有填充封装内的避开区的另一非有损材料的外部障碍。可替换地,该封装内的避开区可以包括真空、空气、气体、沙子等等。在实施例中,避开区可以由谐振器或电路的组件提供。在实施例中,谐振器和电路的元件对于一些应用可以提供足够的避开区,或者谐振器的组件可以被选择以自然地提供足够大的避开区。例如,在一些应用中,谐振器的导体上的电气绝缘可以提供适当的避开区并且可能不需要额外的分离。在图 67 中示出了具有在谐振器周围提供避开区 6710 的封装 6702 的谐振器 6704 的图示。谐振器 6704 可以完全由外壳 6702 包围,所述外壳提供如图 67(a) 中所示的分离和避开区。在其他实施例中,所述封装 6702 可以包围并且遵循谐振器 6704 的形状以提供谐振器的内外边缘周围的避开区,如图 67(b) 所示。

[0692] 在图 68 中描绘的示例性实施例中,在有限元分析中对在 100kHz 由沿着较长维度之一缠绕的并且浸入具有电阻率 $\rho = 0.2 \Omega \cdot \text{m}$ 的介质 6808 中的均匀间距 1cm 的 10 匝导体 6806 激励的 15cmx15cmx5mm 磁性材料平板 6804 进行建模以示出添加避开区的效果。当没有避开区时,由于有损耗介质引起的扰动 Q 是 66。利用从磁性材料的每个面延伸 1cm 的类似平行六面体成形的避开区 6802 的添加,扰动 Q 被升高到 86。当磁性材料 6804 与避开区 6802 的边缘之间的最短距离被增加到 2.5cm 时,扰动 Q 被计算为 119,并且当该距离被增

加到 10cm 时,扰动 Q 提高到 318。

[0693] 在实施例中,避开区可以不提供在谐振器周围的均匀避开区而是可以是非均匀的并且在可能具有较大外部电场的谐振器的区域(例如所述区域可能接近电容器或接近导体绕组或接近谐振器的角)中更大或更厚。这可以通过扩展上述示例并且利用以下事实来说明,所述事实即电场沿着横贯该结构的磁矩的方向可以是最大的。如图 69 中所描绘的,如果沿着谐振器的磁矩的避开区从 10cm 减小到 1cm,而同时沿着所有其他方向的避开区被保持在 10cm,则扰动 Q 从 318 减小到 255,而同时谐振器和避开区 6802 所占的体积与避开区是在谐振器四周 10cm 的情况相比减少了超过 51%。

[0694] 在实施例中,无线功率转移系统的谐振频率可以被选择以改进系统的被扰动 Q。例如,尽管示例性谐振器的固有 Q 可以在较高频率处提高,但是被扰动 Q 在较高频率处可能降低。因此,在示例性实施例中,可能优选的是选择与最大化固有 Q 相对应的频率相比较低的操作频率。在实施例中,操作频率可以被选择为最优 Q 频率的二分之一到十分之一。在其他实施例中,操作频率可以被选择为最优 Q 频率的 10 分之一到 100 分之一。在又其他实施例中,操作频率可以被选择为最优 Q 频率的一百分之一到一万分之一。在实施例中,操作频率可以在 100kHz 和 500kHz 之间。在其他实施例中,操作频率可以被选择为在 10kHz 和 100kHz 之间。在又其他实施例中,操作频率可以在 500kHz 和 30MHz 之间。

[0695] 在示例性实施例中,环路半径为 15cm、谐振频率 100kHz 并且被具有电阻率 $\rho = 30 \Omega \cdot \text{m}$ 的流体所包围的电容加载导电环路谐振器被建模以显示谐振器和外壳设计对被扰动 Q 的影响。在图 67(a) 中示出建模的实施例。电容加载的导电环路 6704 被封闭在填充以空气 6708 的盒子 6702 中。图 67(a) 中的导电环路或线圈 6704 的外边缘与外壳 6702 的外边缘之间的间距是避开区。该间距 6708 可以填充以空气,它可以由外壳材料本身填充,和/或它可以由优选地非有损材料(例如塑料、复合材料、塑料复合材料、陶瓷、石料、空气、气体、沙子等等)填充。在实施例中,外壳材料的损耗角正切可以足够低使得它不扰动谐振器的 Q。在实施例中,材料的损耗角正切可以足够低使得它提高相对于在谐振器直接地浸入周围的材料中时的被扰动 Q 的封闭谐振器的被扰动 Q。

[0696] 对于图 67(a) 中示出的示例性系统,谐振器的固有 Q 随着谐振器线圈的匝数增加而增加。然而,谐振器的被扰动 Q 随着匝数增加而降低。被扰动 Q 可以通过增加线圈 6704 的边缘与外壳 6702 的边缘之间的遮挡区 6710 的尺寸而增加。在该示例性实施例中,对于大于 1cm 的遮挡区,4 匝谐振器的被扰动 Q 被提高到两倍多,并且当间距超过大约 2.5cm 时逼近其固有 Q。因此,具有大于 1cm 的遮挡区的外壳可以实现高效无线功率转移,即使当源和设备谐振器被浸入有损耗材料或可以在有损耗材料附近时。

[0697] 当前可以使用直接配线解决方案来实现其中至少一个谐振器浸入不同于空气的某种材料中的无线功率转移的一些应用。例如,电线可以沿着水塘的底部行进,通过建筑材料,下到竖井,通过船的船体等等。然而,可以被用于提供跨越配线的不同段的电气连续性的这些配线和连接器可能易于故障并且在它们故障时替换起来可能很昂贵和/或困难。另外,因为安装过程中位置和旋转的不确定性并且因为该过程可能损害支撑谐振器的结构的完整性,它们可能难以或不可能安装。在这些应用中无线功率转移可能是有利的,因为它可以适应能量源和能量消耗设备或连接之间的间隙,由此消除在多个位置处对配线或电连接器的需要,在所述位置处这样的配线或连接器可能受压,危险或易于故障。

[0698] 图 70 示出用于水下传感器应用的无线功率转移系统的示例性实施例。在本例中，无线功率源 7008 被容纳在包围管 7002 的环形壳体 7004 中，所述管 7002 可以容纳用于从远程发电机向源提供功率以及用于将源谐振器 7008 引导到水下传感器 7010 的一般附近的配线。该管 7002 由各种材料制成，包括钢、塑料、橡胶、金属等等，并且可以包含各种电子组件、强力构件、管、阀、导管等等。源 7008 可以被用于向可以耦合到传感器 7010 的设备谐振器 7012 无线地转移功率。在实施例中，多个传感器可以被布置在不同位置和深度并且无线功率源 7008 可以被灵活地定位以同时或一次一个寻到多个传感器。

[0699] 图 71 示出电容加载导电环路源谐振器的两个示例性实施例，一个包括磁性材料（图 71(b)），位于旋转对称外壳 7004 中。在图 71(b) 中所示的实施例中，谐振器可以具有依赖于绕磁性材料芯 7108 缠绕的导体环路 7106 的定向或者平行于所述管（在此定义为 z 轴，即谐振器 7104）或者平行于 x 轴或 y 轴（即分别为谐振器 7104 和 7110）而对准的偶极矩。在该示例性实施例中，当类似尺寸源和设备谐振器具有 z 定向偶极矩并且谐振器被对准时可以实现最高能量转移效率。然而，对于该偶极定向，在恢复并且以较大偏移落下 (fall off) 之前，效率可能在这些谐振器的相对小的平移 (translational) 失准处变化通过零。如果这两个谐振器是 y 定向的，则最大耦合效率可能不如 z 定向偶极一样高，但是转移效率仅在谐振器相对远离时才达到零。如图 12 中所示的包括正交缠绕的电容加载导电环路并且能够被建模为具有 z 定向或 y 定向偶极这二者的谐振器可以在一定范围的操作情形内产生最高转移效率。在实施例中，正交环路可以被同时使用，或者选择器或开关可以被用于在 y 定向和 z 定向偶极谐振器之间进行选择以实现最优性能。注意到不同的系统考虑可能影响源谐振器和设备谐振器包括哪种类型的谐振器。

[0700] 当源或设备谐振器被安装、定位或激活时，在源谐振器相对于设备谐振器的偏移和旋转中可能存在不确定性。在图 73(a) 和 73(b) 中描绘了示例性位置的和旋转的不确定性。源 7008 和设备 7012 谐振器可以具有如图 73(a) 中所示的旋转失准或如图 73(b) 中所示的横向或垂直失准。对于单谐振器设计，谐振器的失准可能降低功率转移效率。在实施例中，源和设备谐振器尺寸和材料以及它们的偶极矩相对于它们的物理尺寸的对准可以被选择以最大化其上可以实现足够高效能量转移的位置和旋转失准的范围。

[0701] 在其他实施例中，与位置和旋转不确定性相关联的潜在降低效率可能是无法接受的。在那些实施例中，多个源谐振器可以被包含在壳体中，从而增加那些源谐振器中的至少一个被定位得足够接近设备谐振器以产生足够性能的概率。在图 71 中示出了这种源阵列的示例性实施方式。多个谐振器可以以环状布置在环形壳体 7004 中，使得谐振器绕壳体的每隔若干度定位，以使得不管旋转不确定性如何，至少一个源和设备可以具有部分对准。另外，谐振器的多个环形布置可以被组合以增加谐振器阵列的垂直高度。源的垂直长度的增加可以提高系统容许垂直失准（沿 z 轴）的能力。在实施例中，环形壳体的外半径可以被增加以提高系统容许水平失准（沿 y 轴）的能力。注意到，各种源谐振器设计和阵列图案可以被用于实施该构思。这里所示的阵列图案并不意在以任何方式进行限制。阵列可以包括电容加载环路谐振器（图 71(a)）。阵列可以包括平面谐振器。在一些实施例中，可以使用包括绕磁性材料芯缠绕的导体的平面谐振器。在平面谐振器阵列中，对于不同的谐振器，一些谐振器的导体可以以正交方向缠绕，如图 71(b) 中所描绘的。

[0702] 另外，容纳谐振器的外壳可以是任何形状和尺寸并且可以是应用特定的。在一些

应用中,外壳可以被成形为立方体、长方形盒子、灯泡 (bulb)、球、圆柱、片等等,并且可以是空心的、实心的,或者可以在其中心包括不同材料。在实施例中,主要壳体和阵列设计考虑因素可以是壳体强度、尺寸、外观、可操纵性、可控性、水、风或接地电阻等等。

[0703] 在实施例中,多个源谐振器可以经由开关连接,以使得在源谐振器阵列被安装或定位之后源谐振器中的仅仅一个或几个可以被赋能以实现无线功率转移。在此讨论的系统监视和控制能力可以被用于确定哪些源谐振器可以被赋能并且包括在无线功率转移系统中。在实施例中,未使用谐振器的 Q 可以被损坏或降低以最小化这些谐振器与被赋能的谐振器之间的交互作用。谐振器 Q 可以通过可遥控开关、熔丝、连接等等来改变。

[0704] 注意到,上面描述的源谐振器的设计还可以用于设备谐振器。

[0705] 在实施例中,可以选择用于无线功率转移的各种谐振器设计。在示例性钻井应用中,源和设备谐振器可以包括具有气芯或具有包括磁性材料的芯的电容加载的导电环路,如图 68 中所示。所述谐振器可以包括导电表面以重定向和 / 或引导谐振器场以减少钢或金属管、结构、仪器、套管等等的影响。导电表面和磁性材料可以被成形以遵循某些井身结构的形式,例如向外弯曲以顺应可能沿井的中心升起的圆管和套管。在实施例中,最靠近由金属或钢制成的结构的磁性材料的表面可以包括较高导电率材料层以便减少由于损耗更大的结构上的涡流引起的损耗。导电材料的形状和尺寸可以与磁性材料相同,或者它们可以不同。在实施例中,导电层可以顺应磁性材料的表面或外壳的内表面或已经被构建到该外壳中的特征。在实施例中,导电层可以附着于磁性材料或者与它们分离。在实施例中,场成形可以被用于针对有损耗材料或结构引导谐振器场离开和 / 或引导或将谐振器场指向功率转移系统中的其他谐振器。在实施例中,例如图 11-14 和图 16 中所示的绕磁性材料缠绕的电容加载导电环路可以被选择以用于从井中的主钻孔向横向钻孔转移功率。

[0706] 注意到,用于浸入式谐振器应用的无线转移系统可以包括在此所描述的谐振器、外壳、阵列、电子设备、监视与控制方法的任何组合。在实施例中,设备谐振器还可以以阵列安装,其中可用谐振器的子集被选择用于无线功率转移系统。

[0707] 虽然已经结合某些优选实施例描述了本发明,但本领域的技术人员将认识到其它实施例,并且其意在落入以法律允许的最广泛意义来解释的本公开的范围。

[0708] 本文参考的所有文献通过引用结合到本文中。

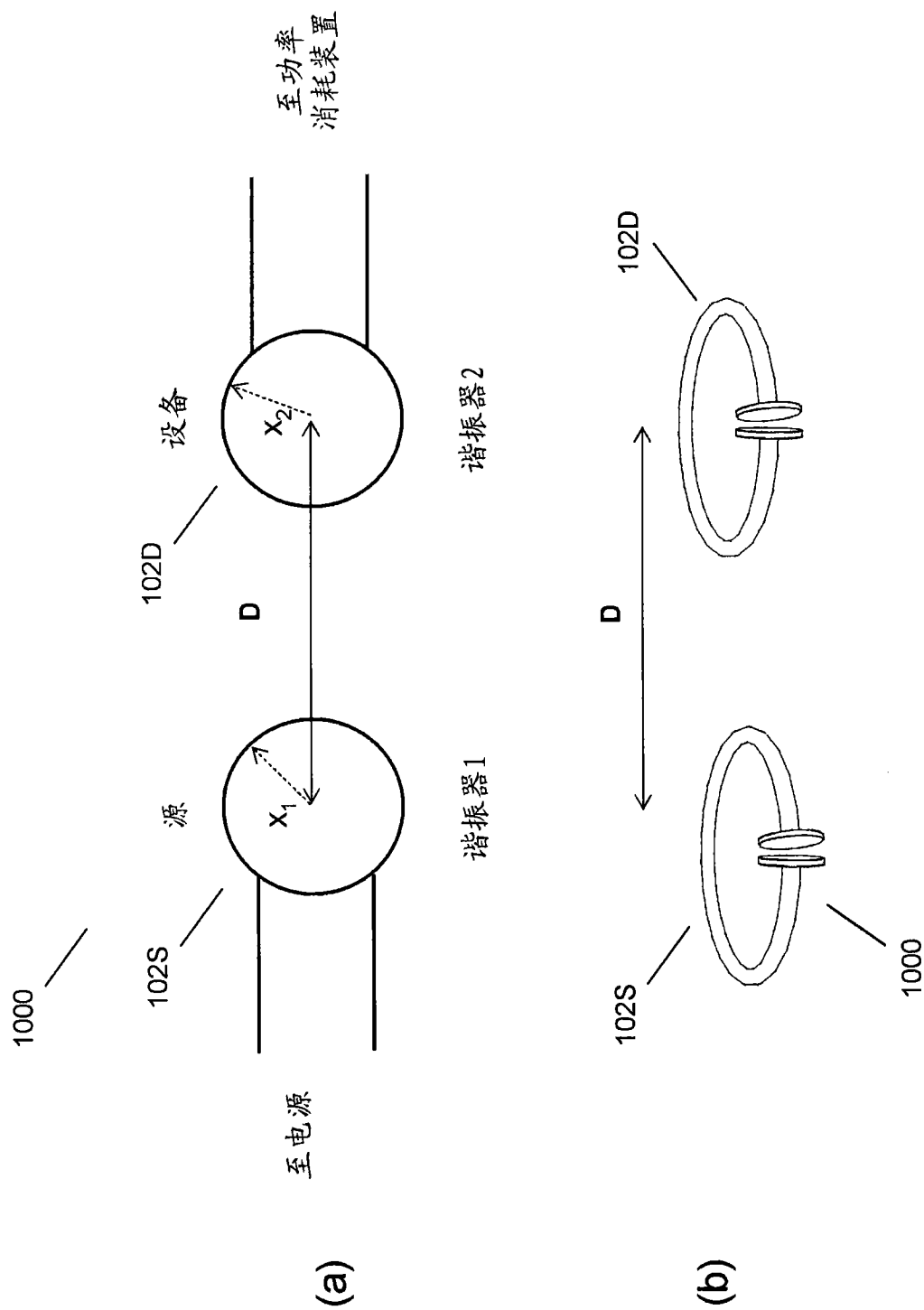


图 1

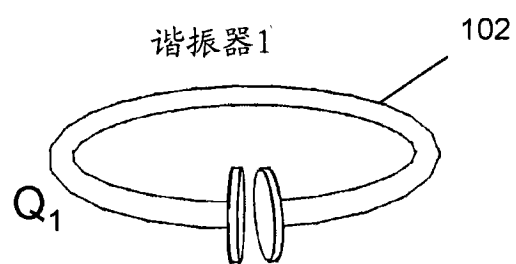


图 2

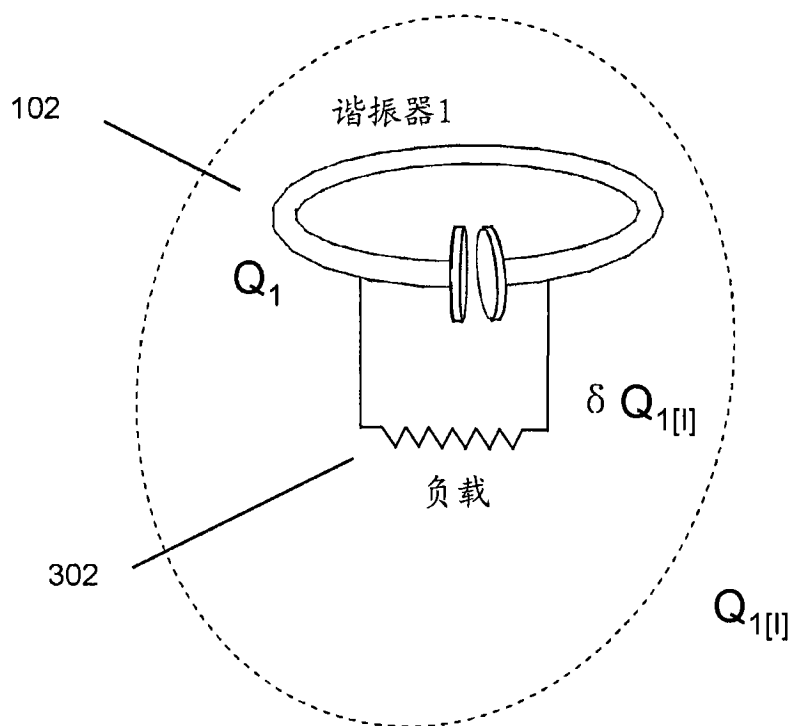


图 3

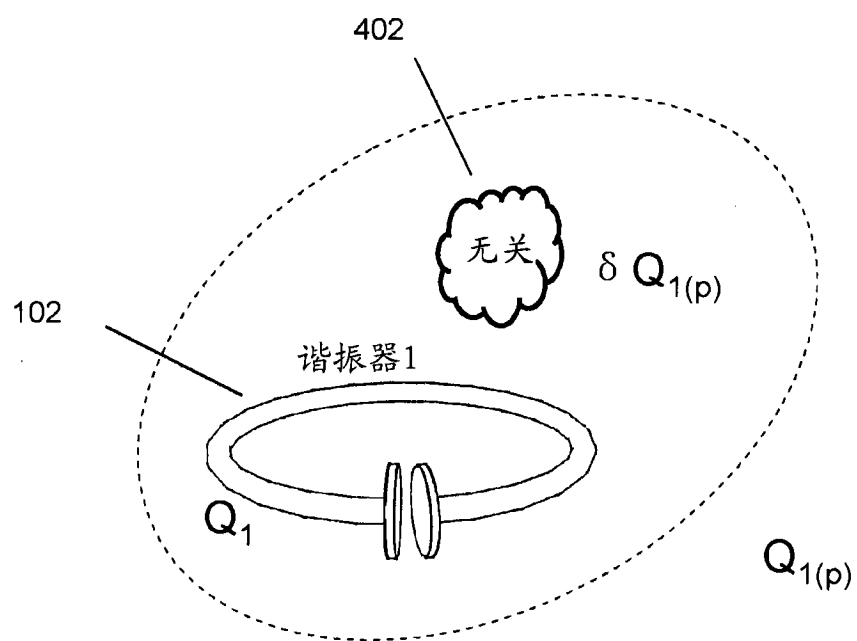


图 4

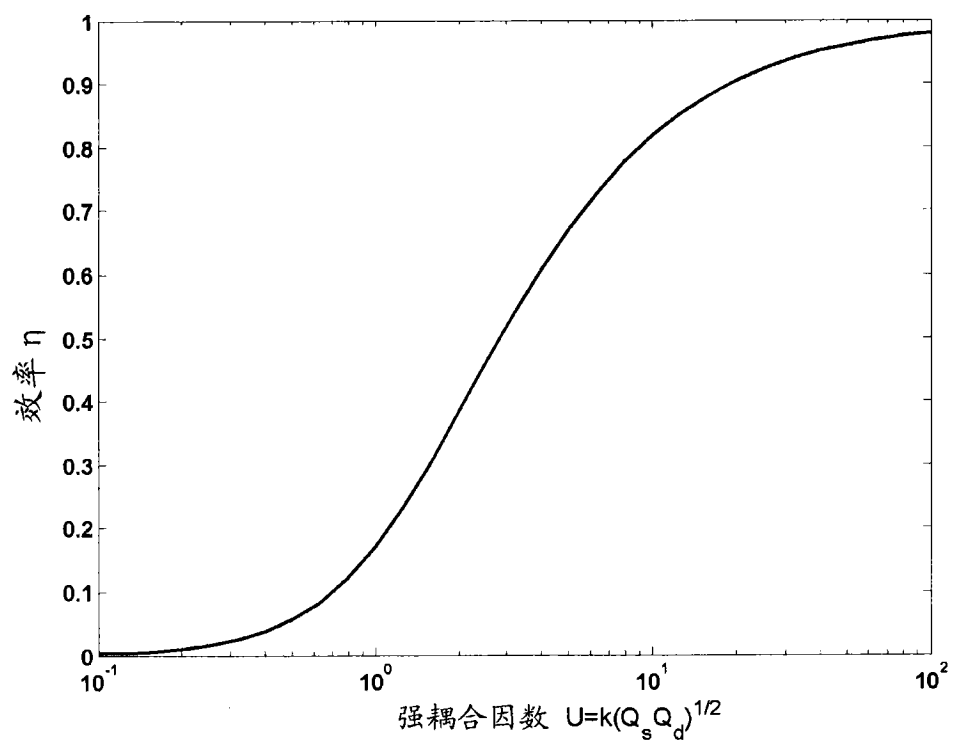


图 5

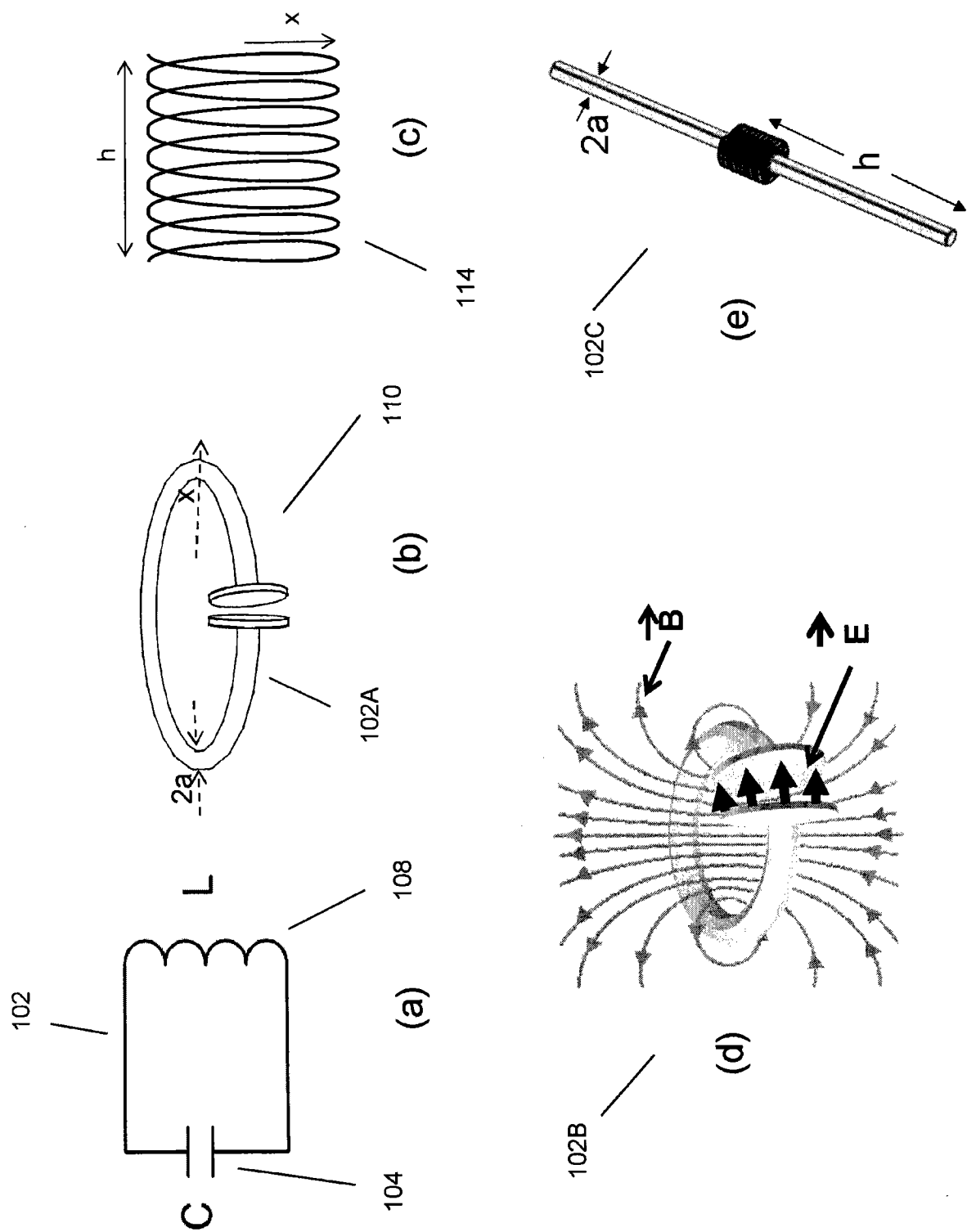


图 6

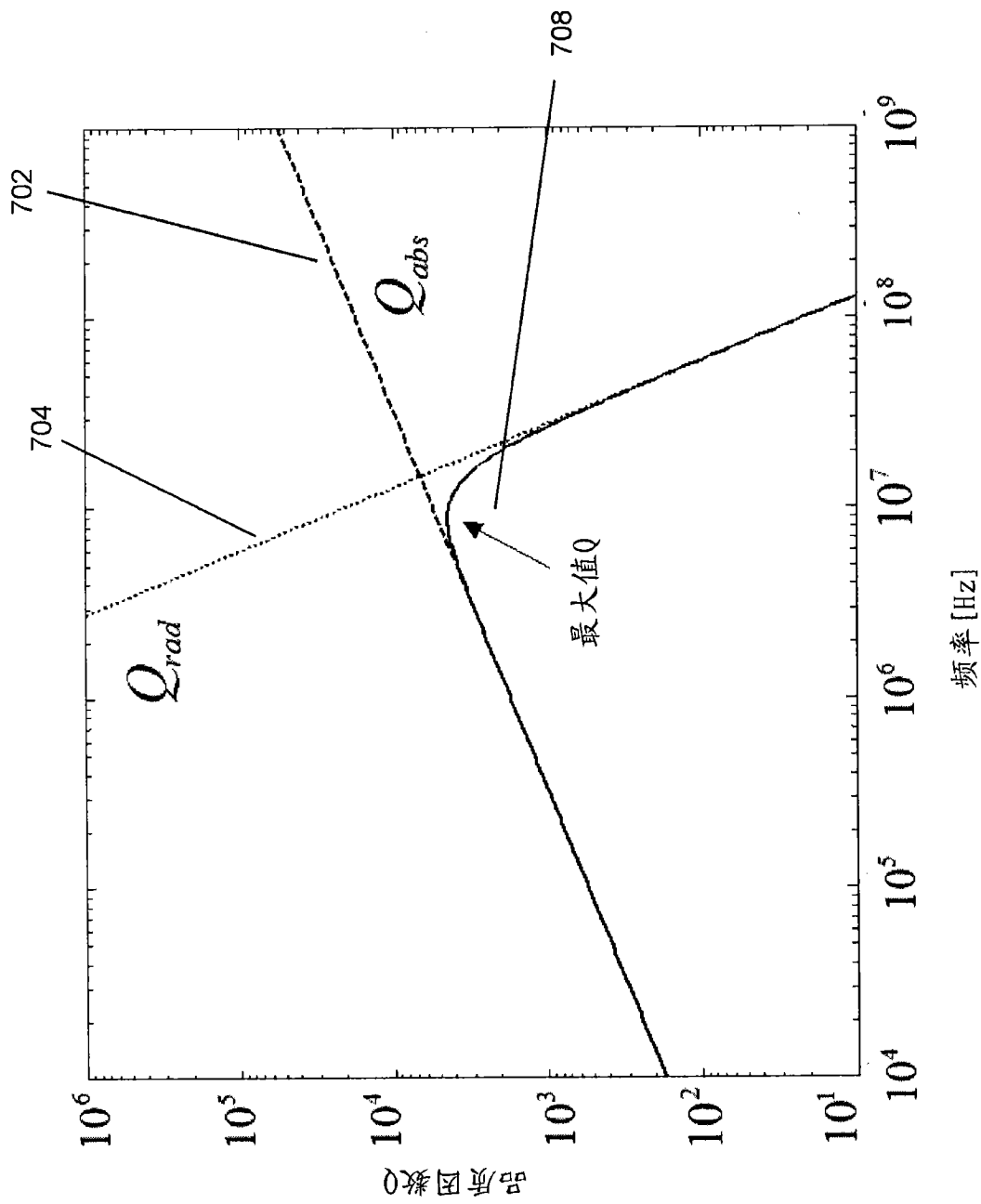


图 7

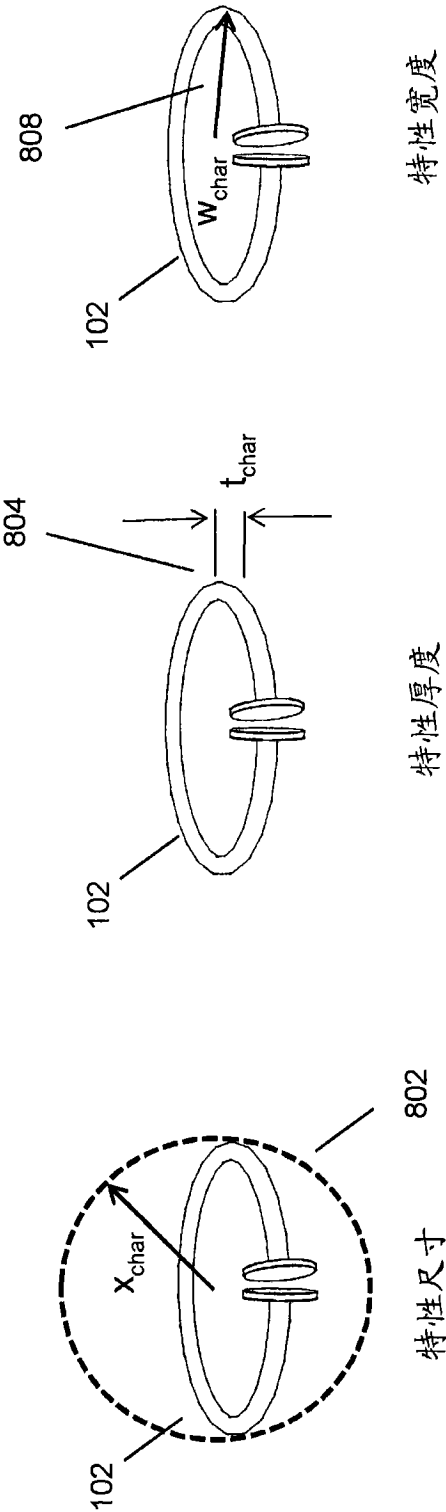


图 8

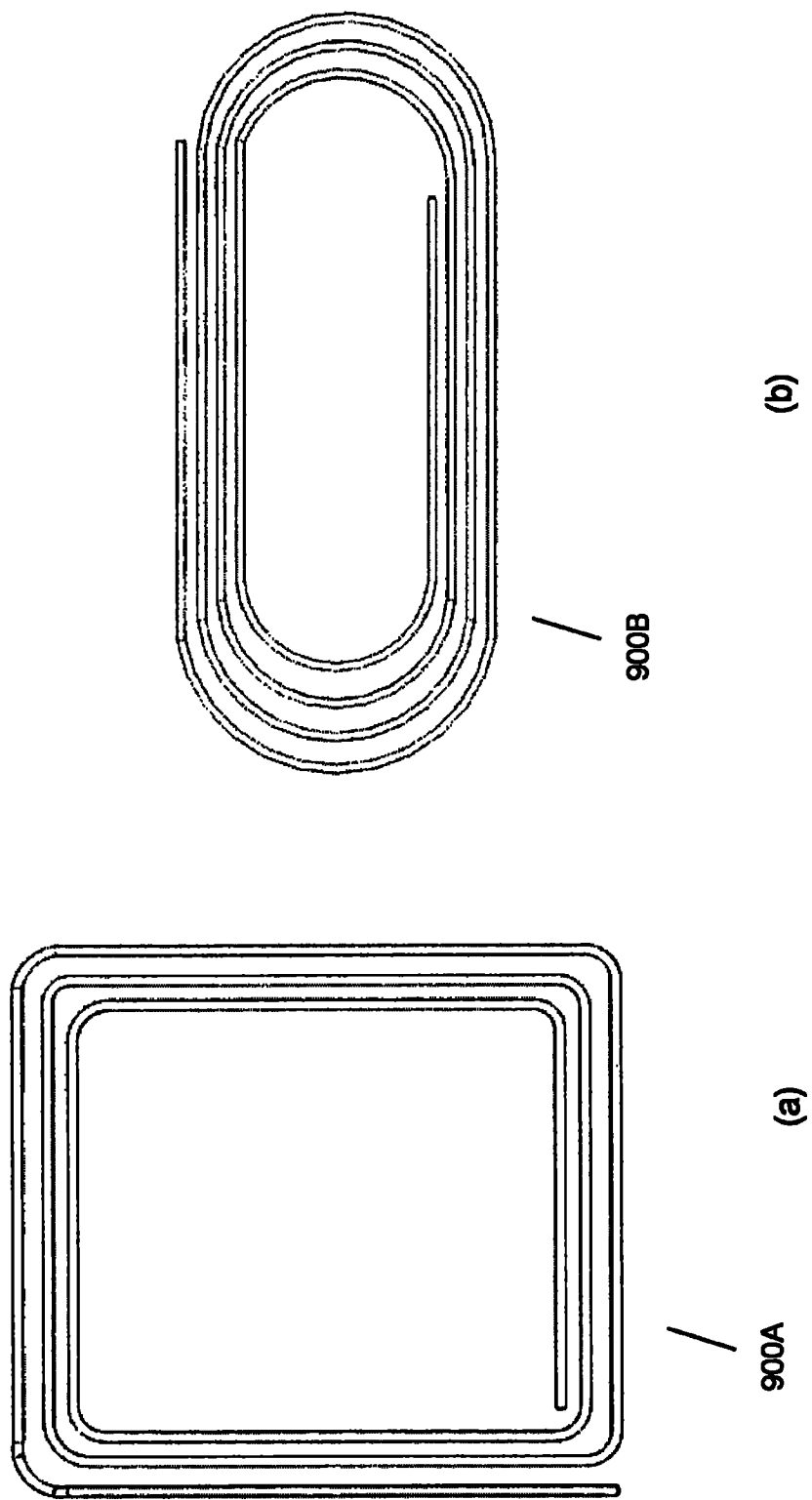


图 9

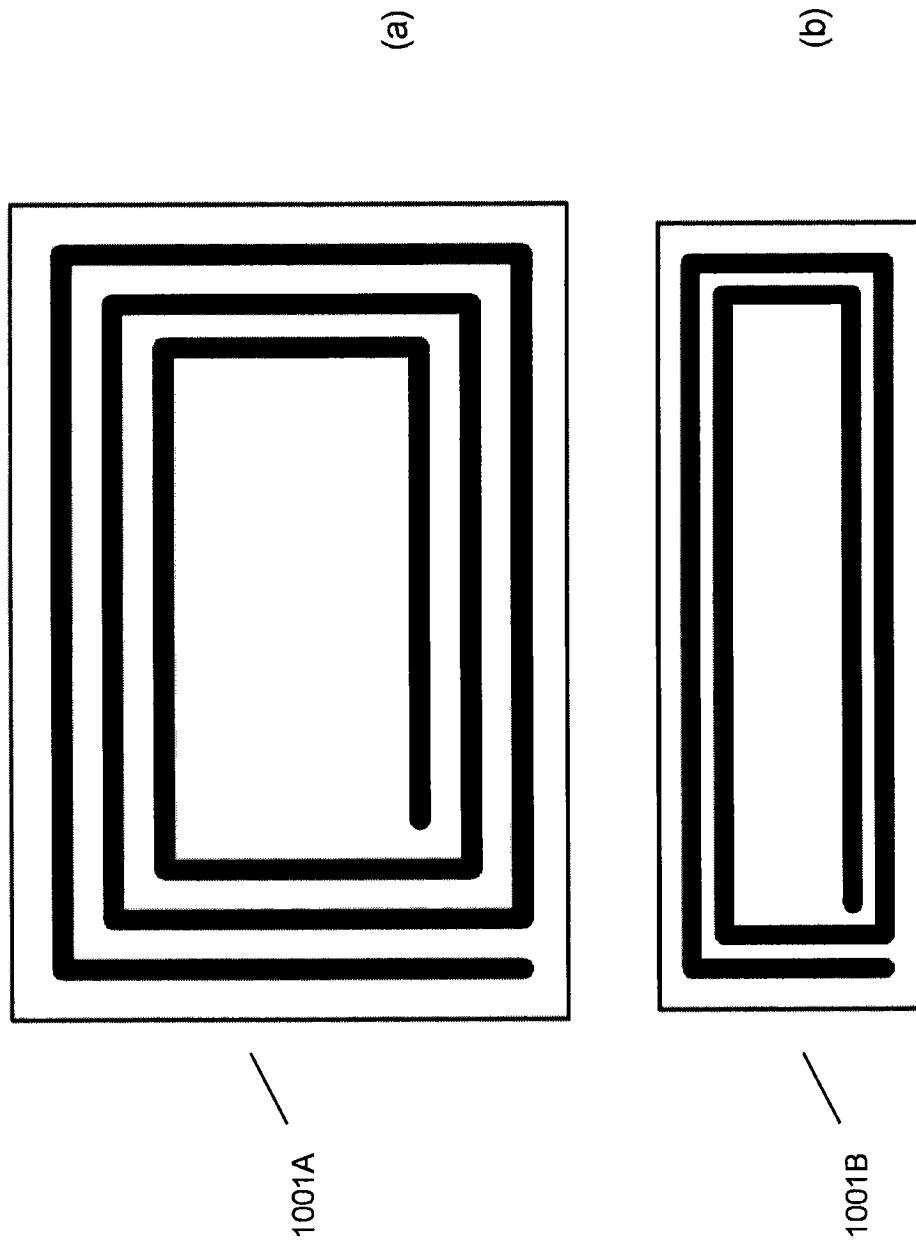


图 10

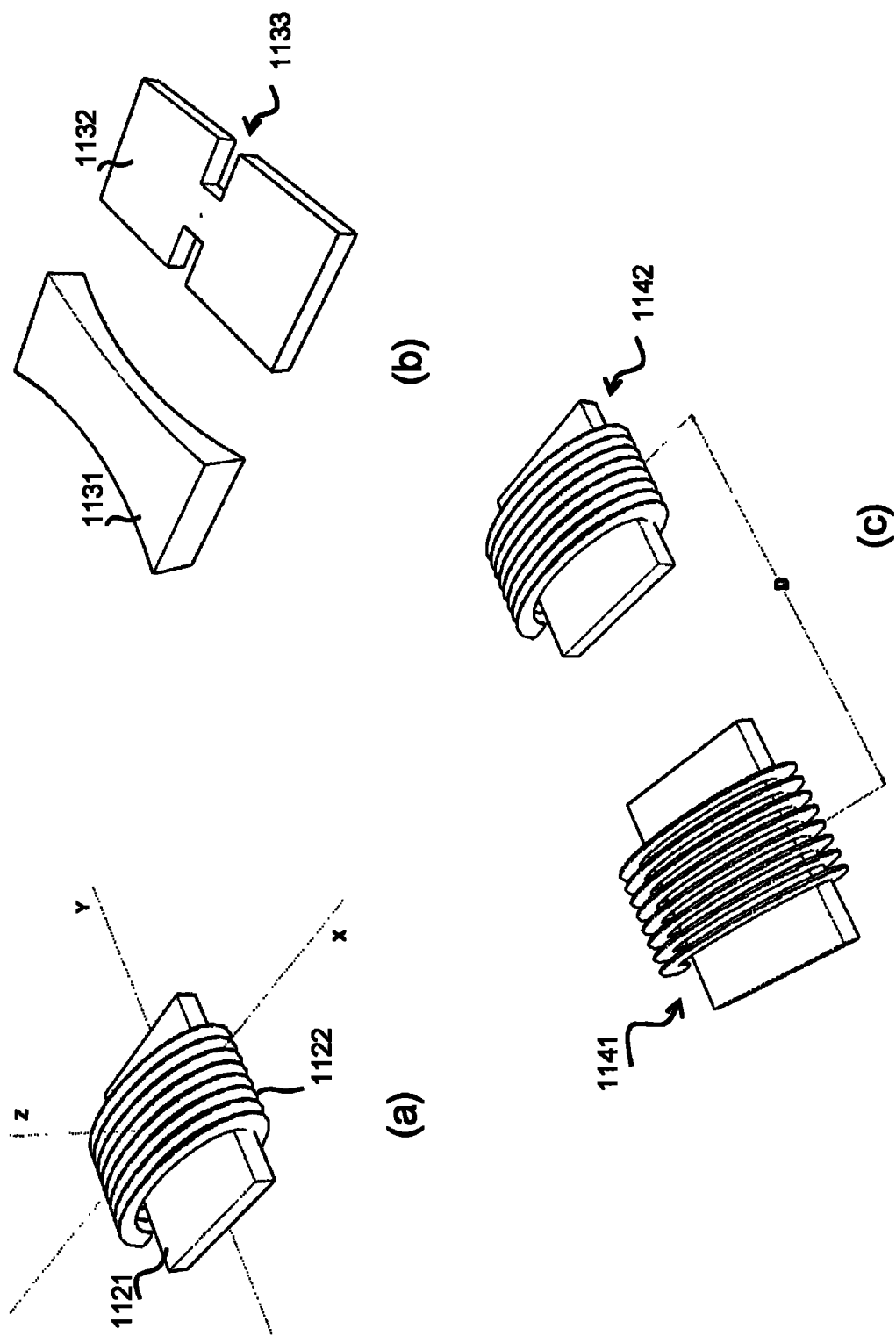


图 11

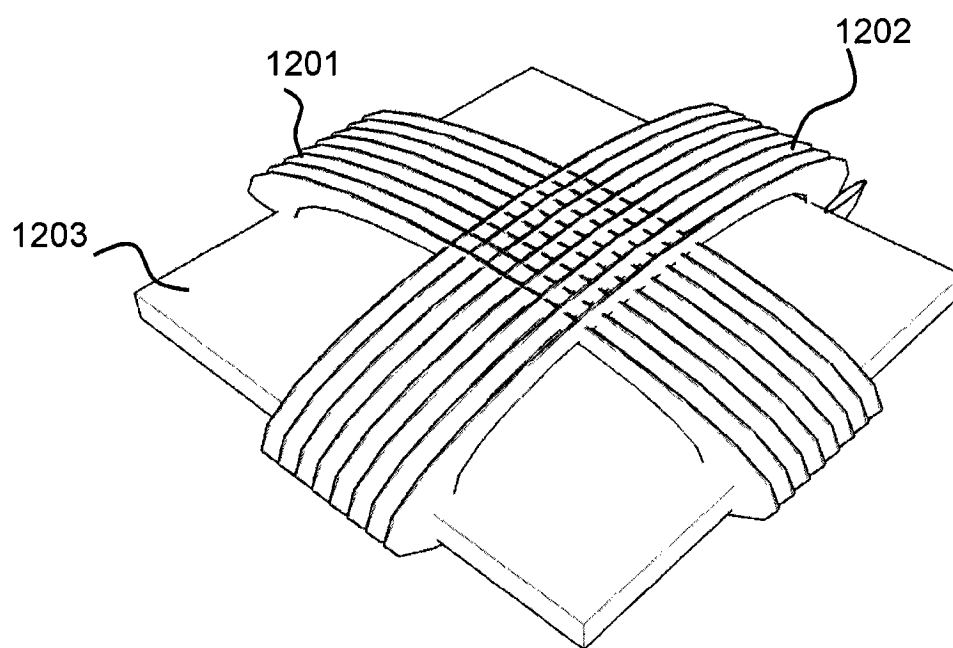


图 12

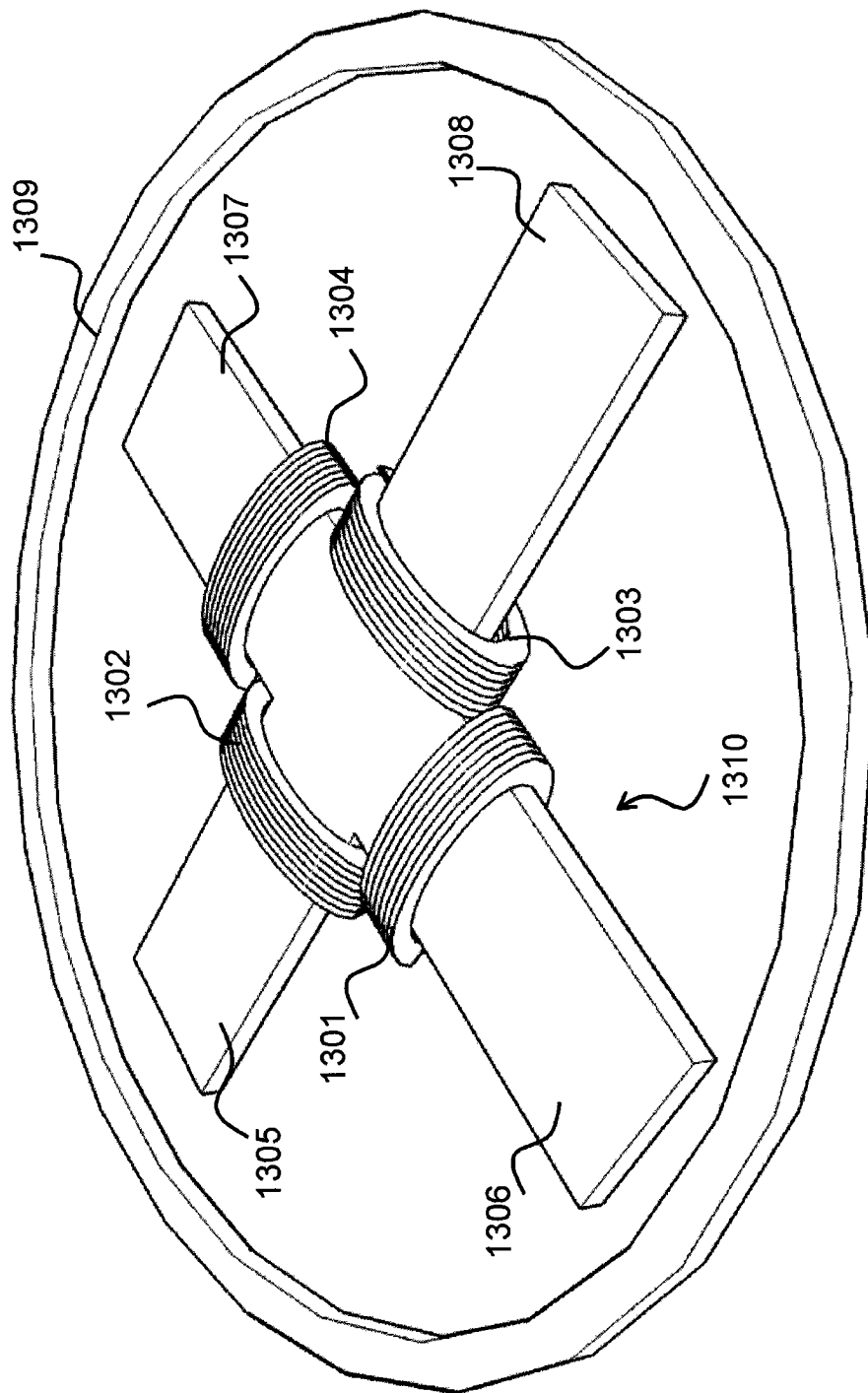


图 13

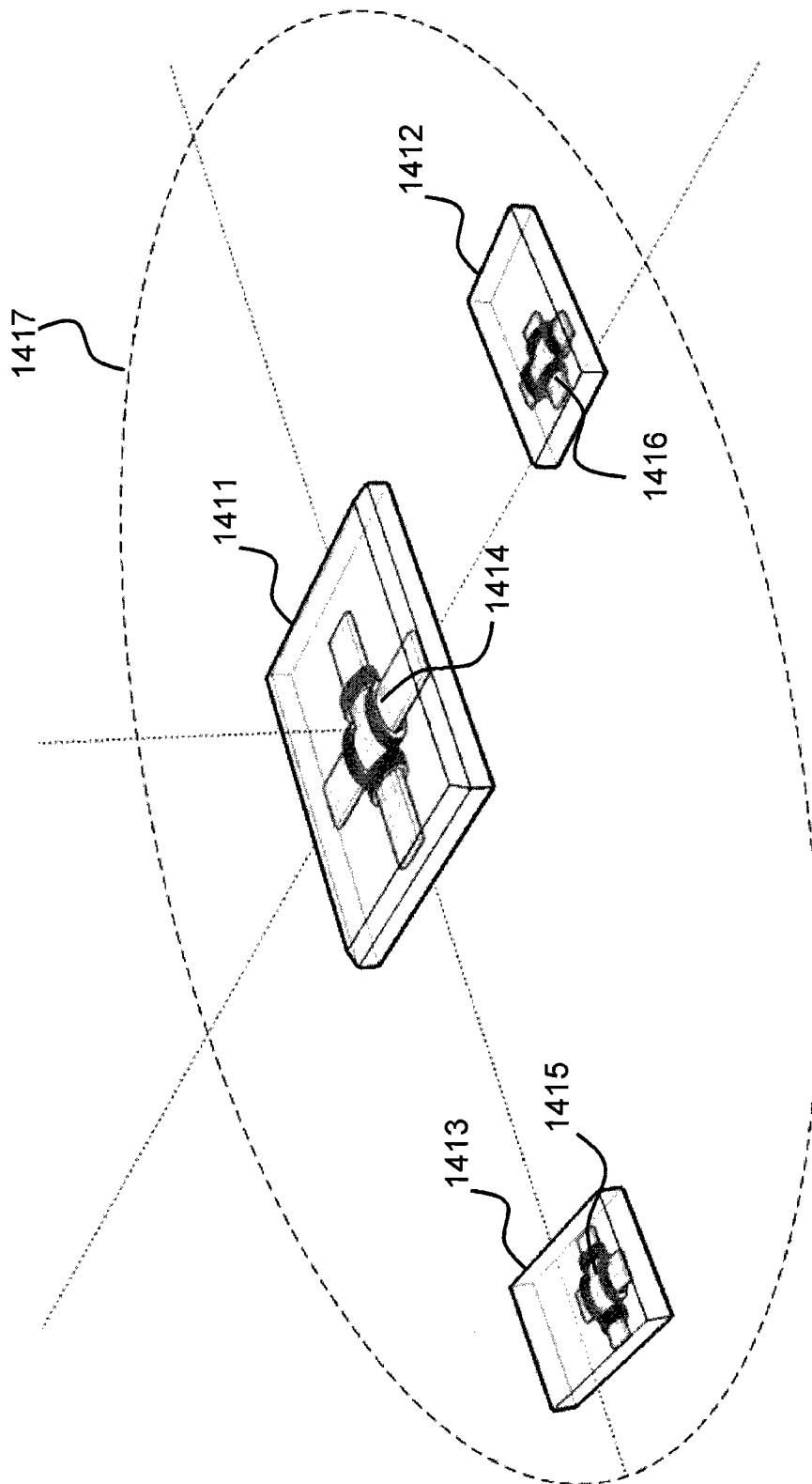


图 14

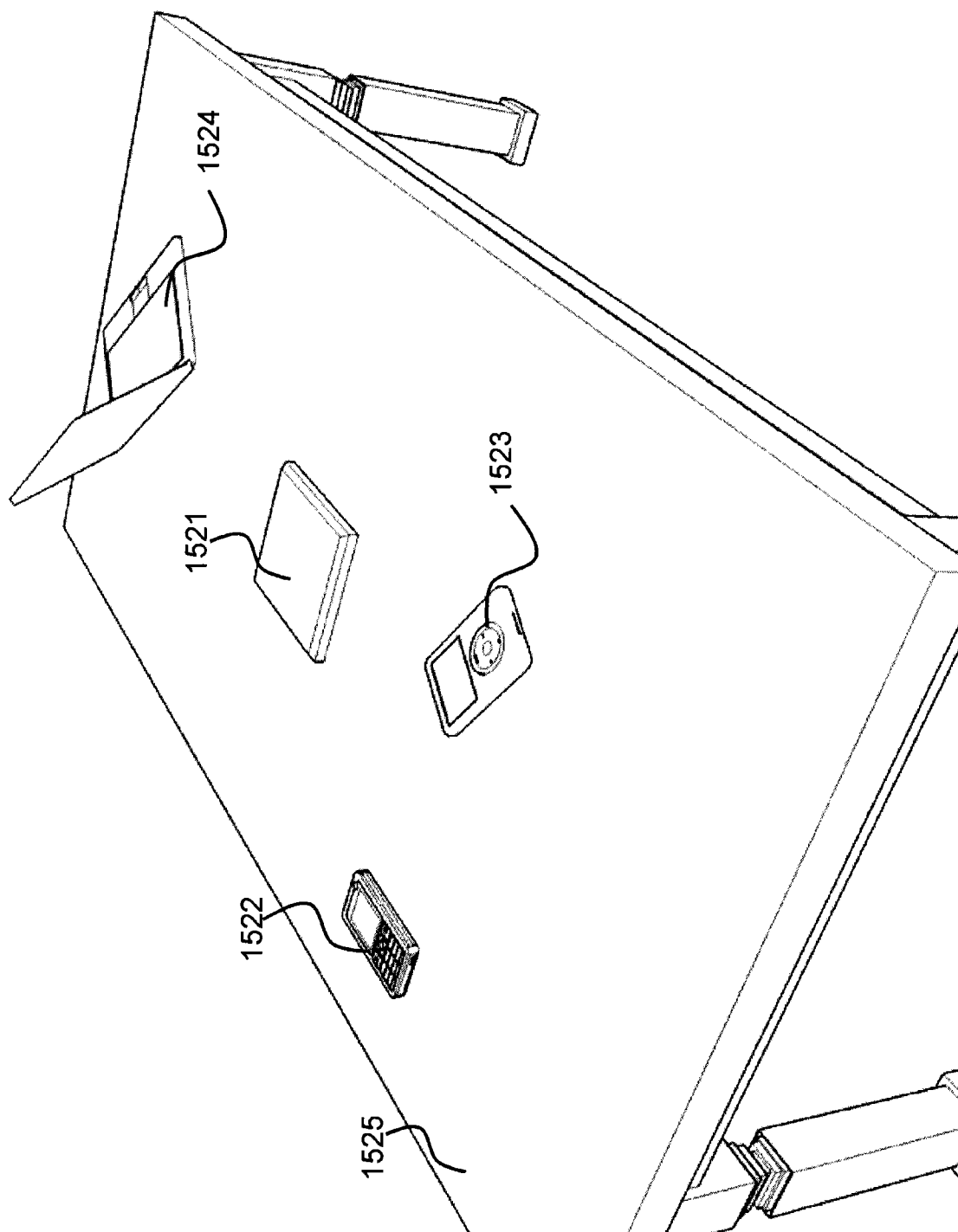


图 15

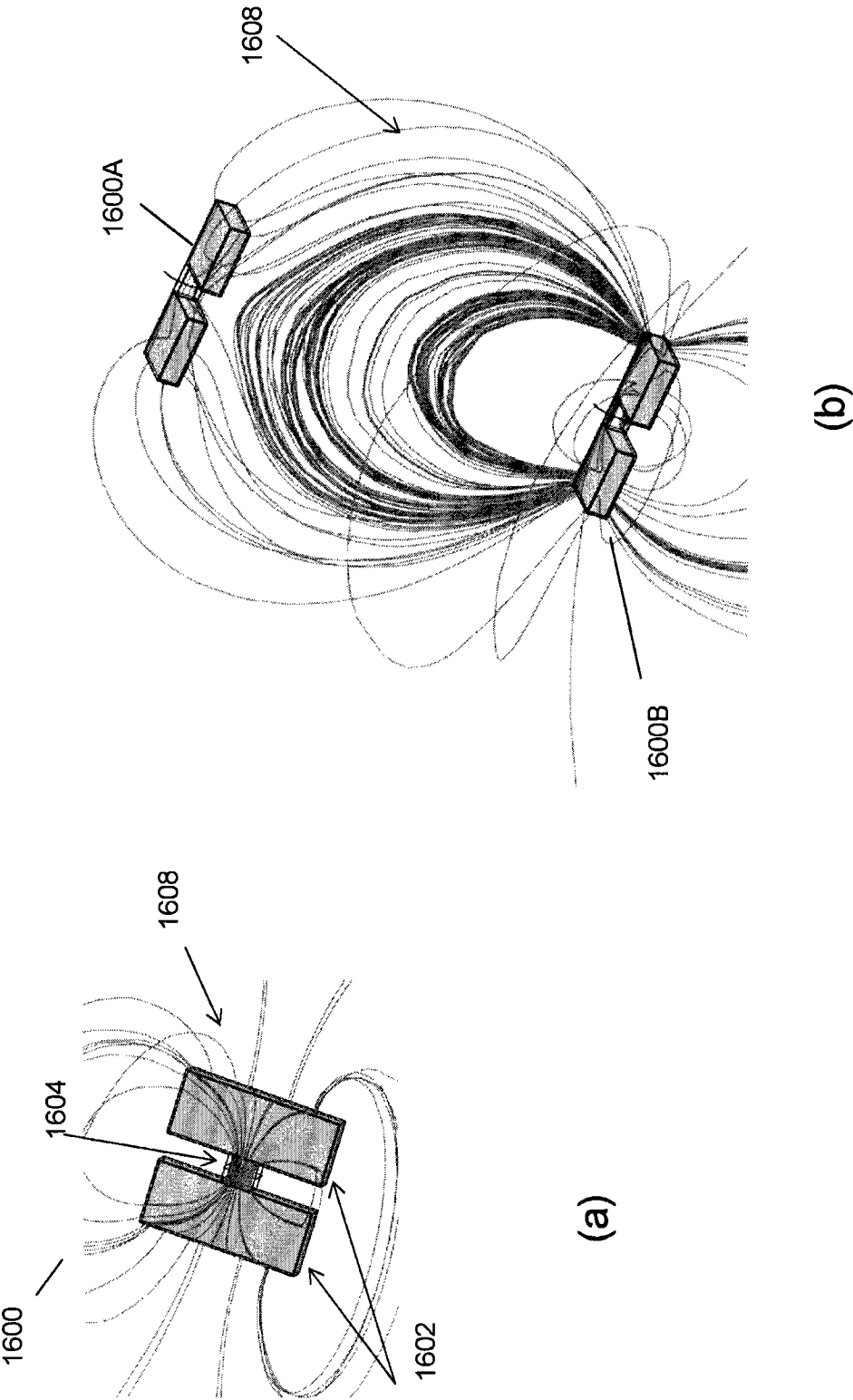


图 16

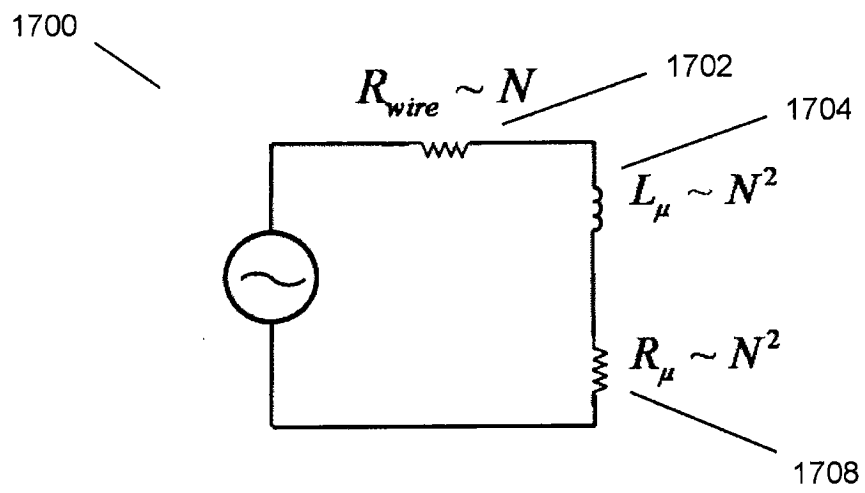


图 17

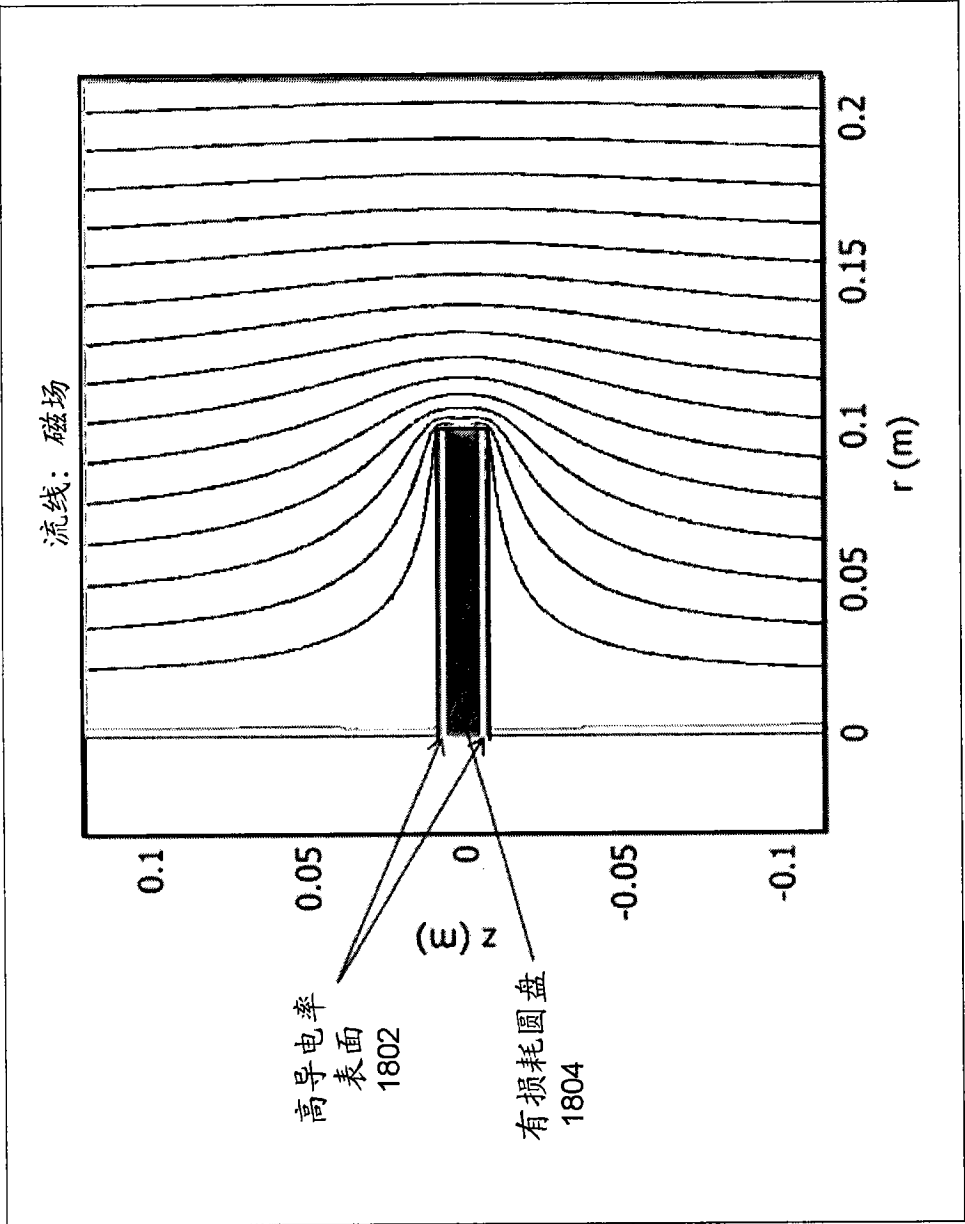


图 18

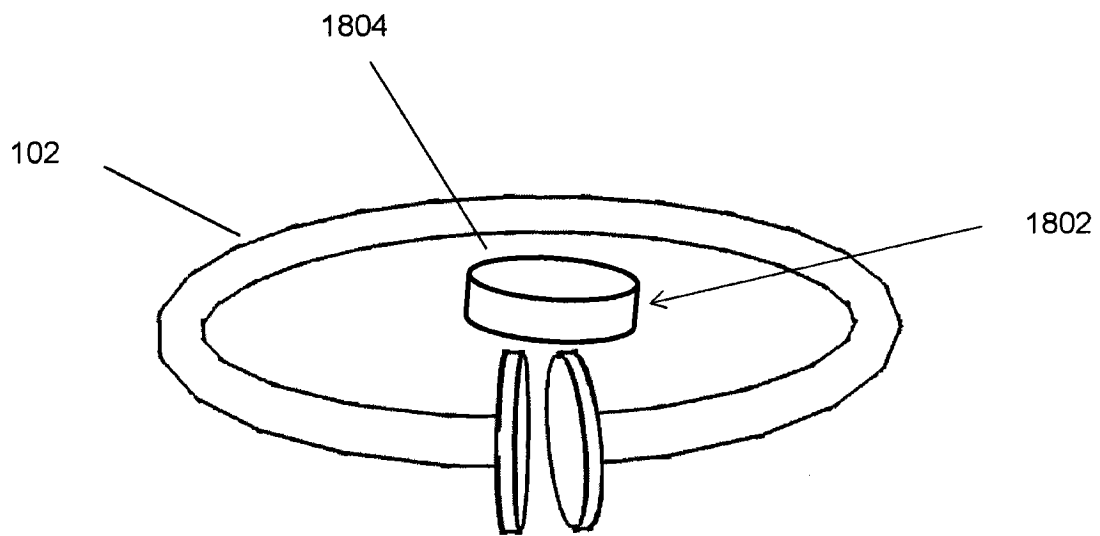


图 19

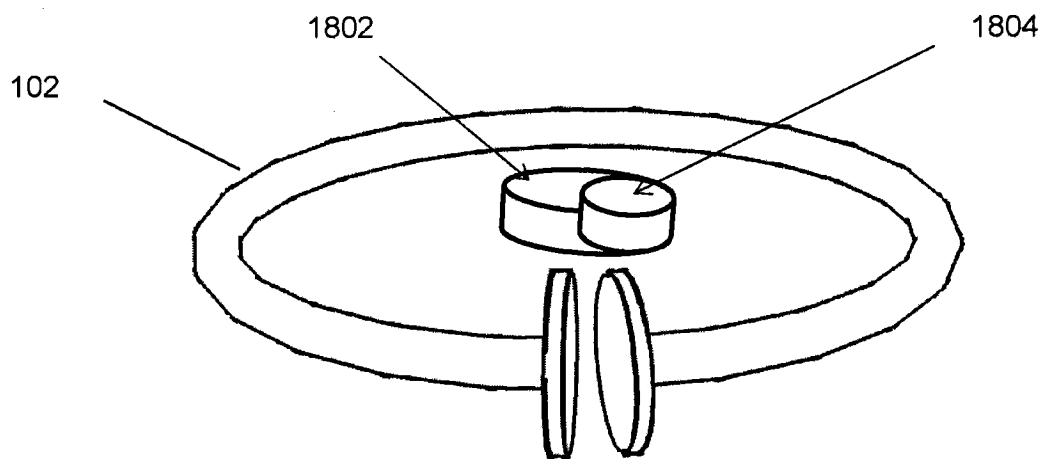


图 20

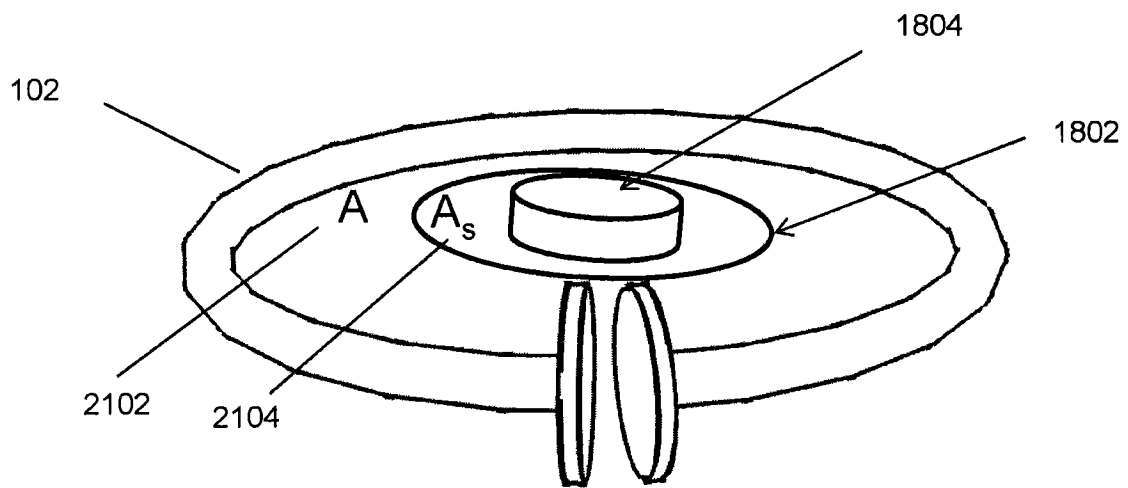


图 21

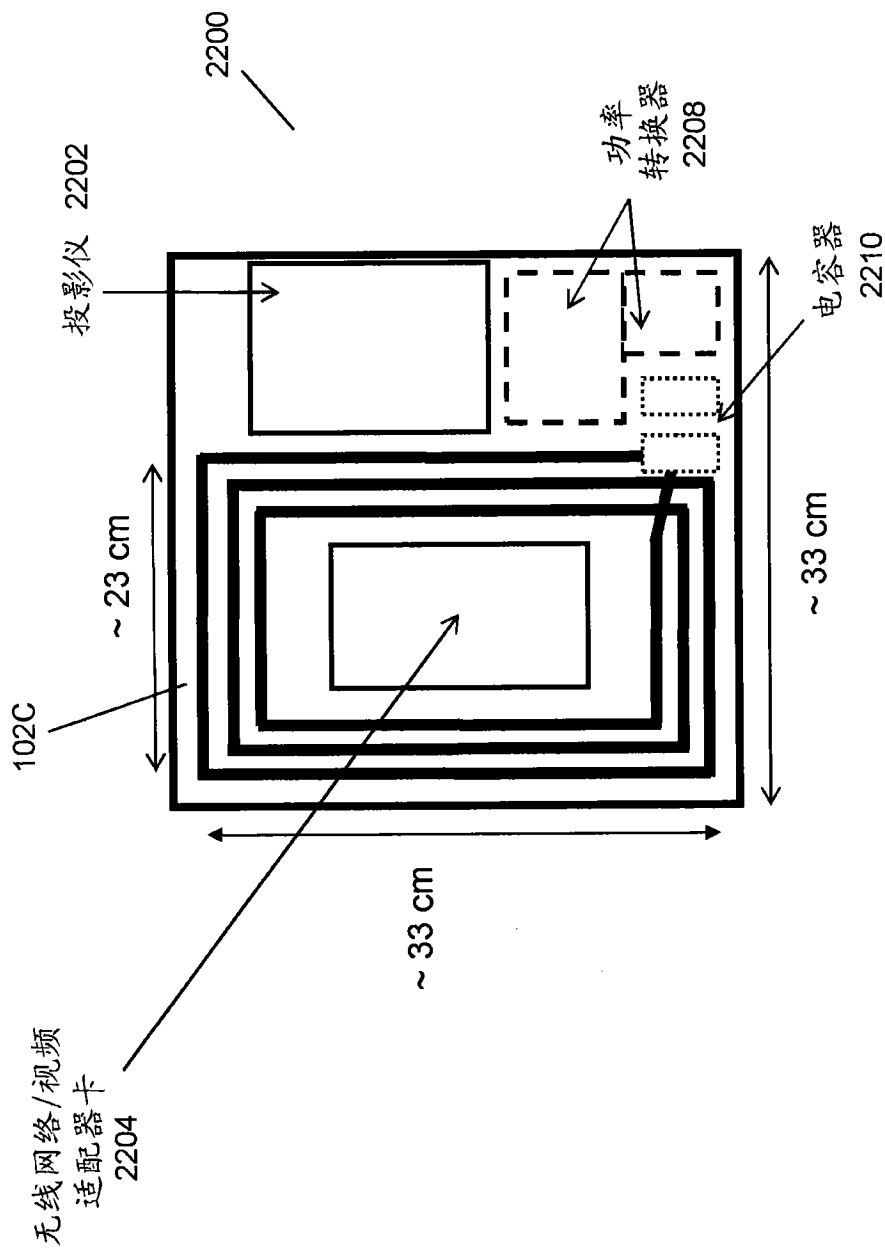


图 22

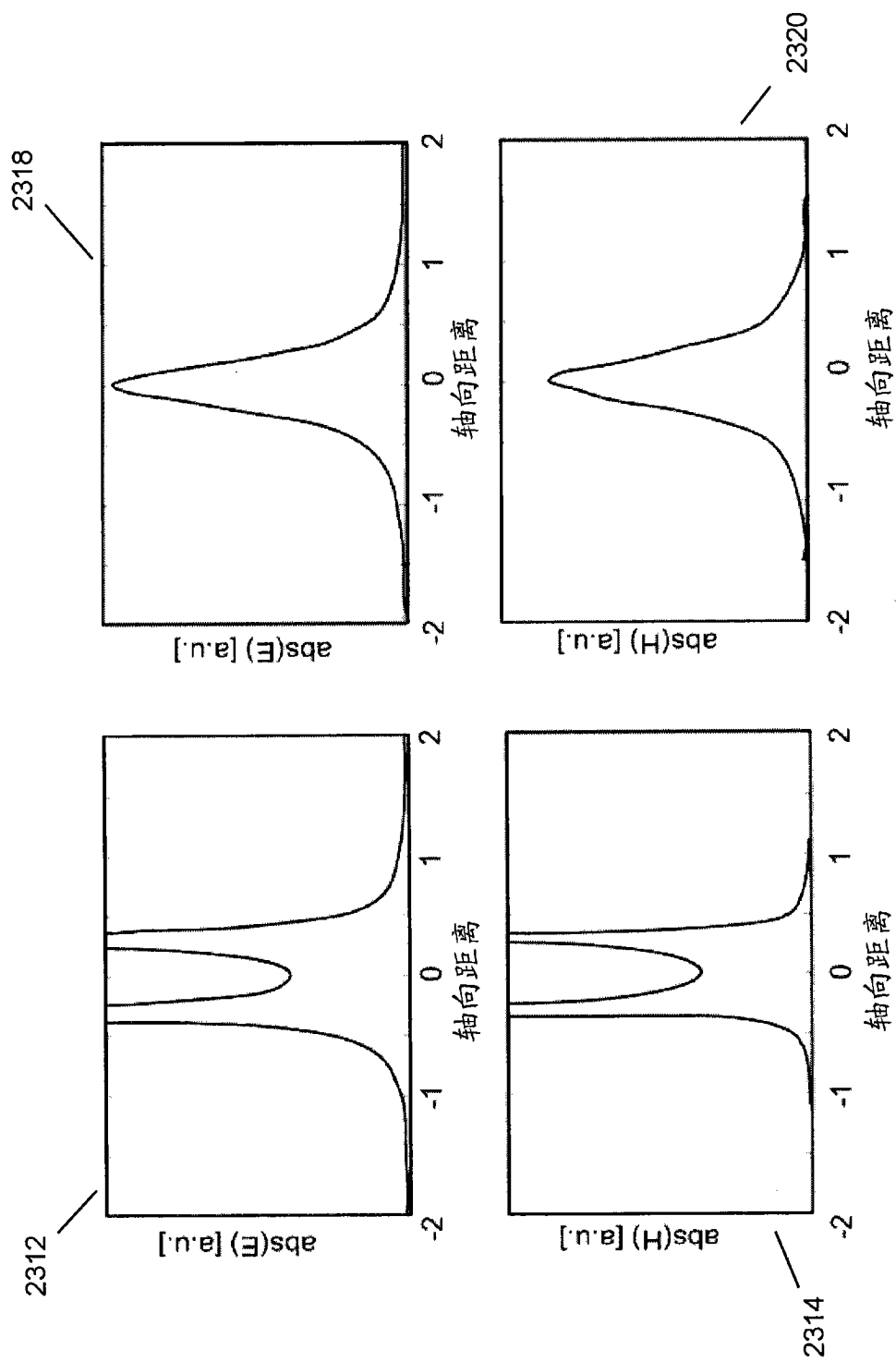


图 23

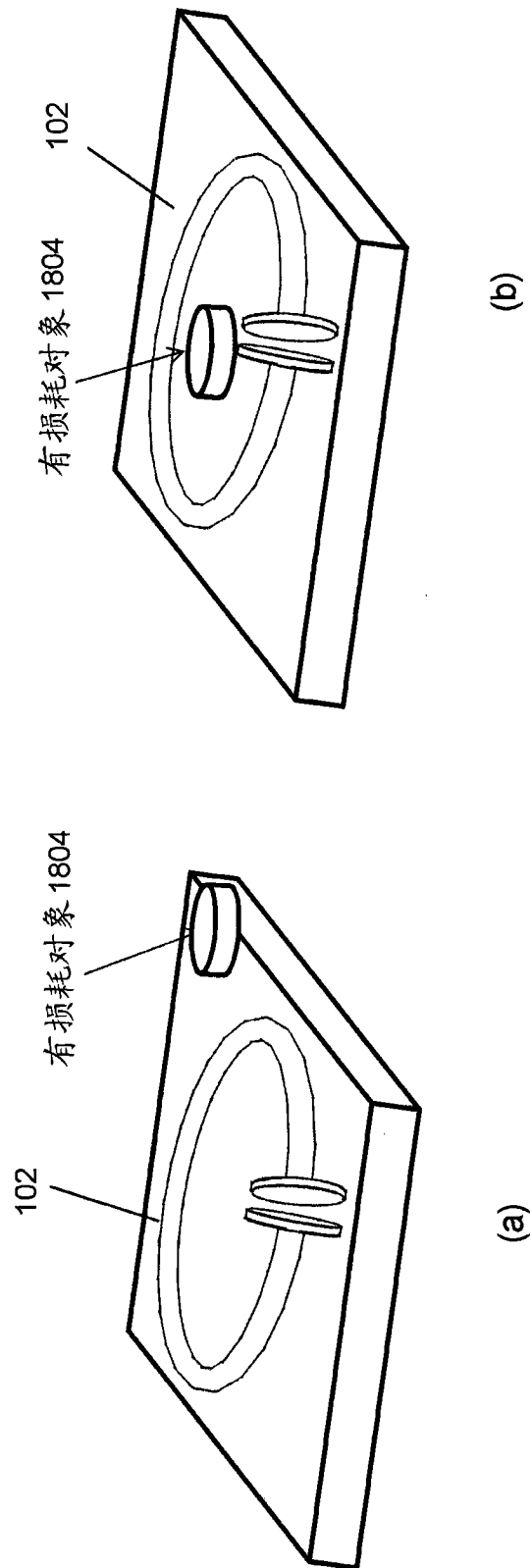


图 24

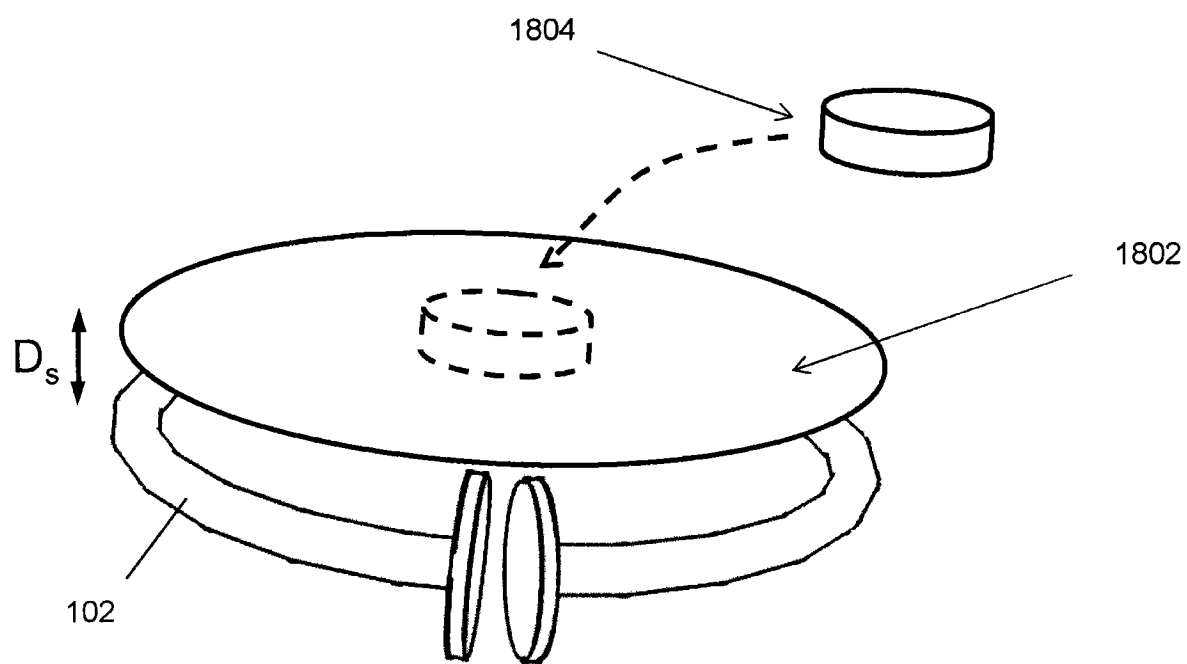


图 25

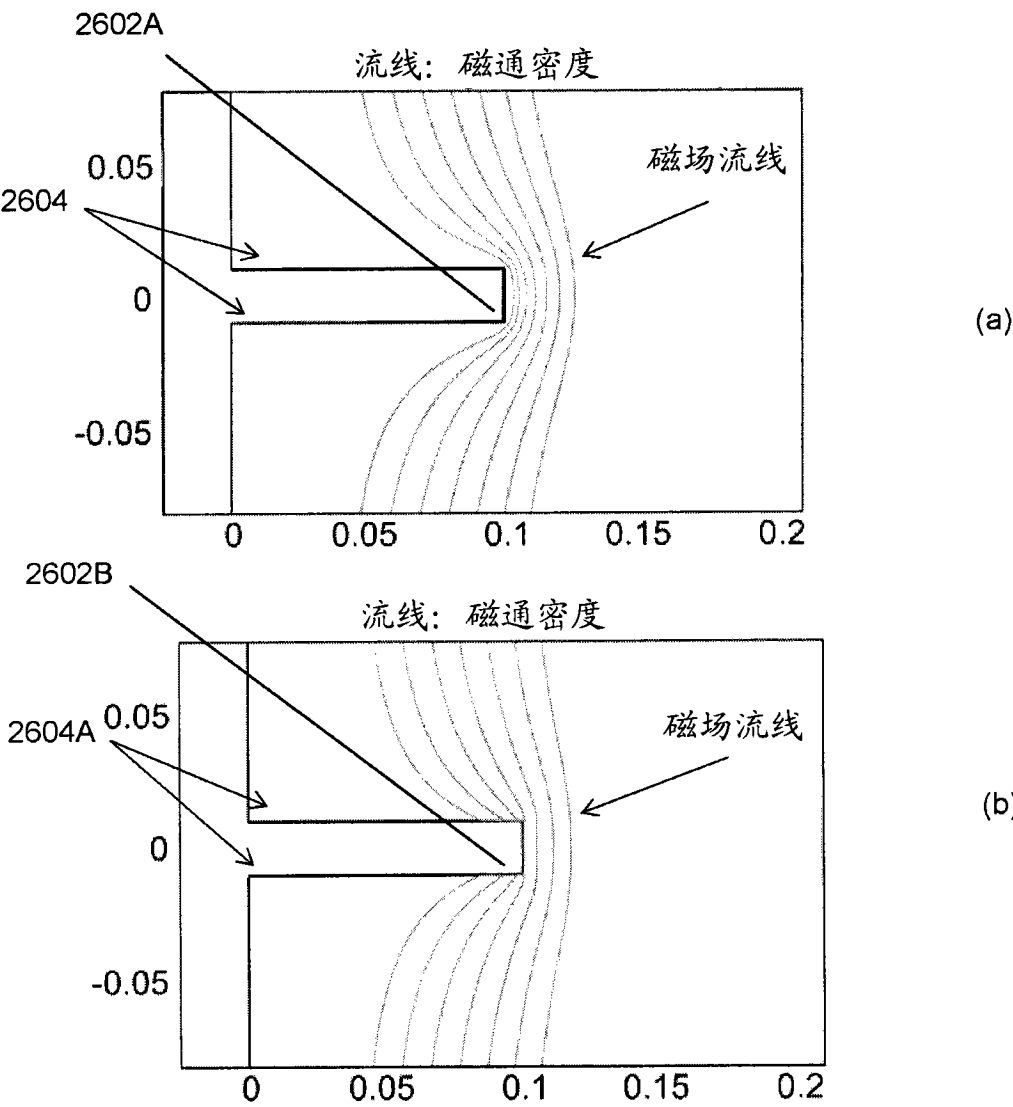


图 26

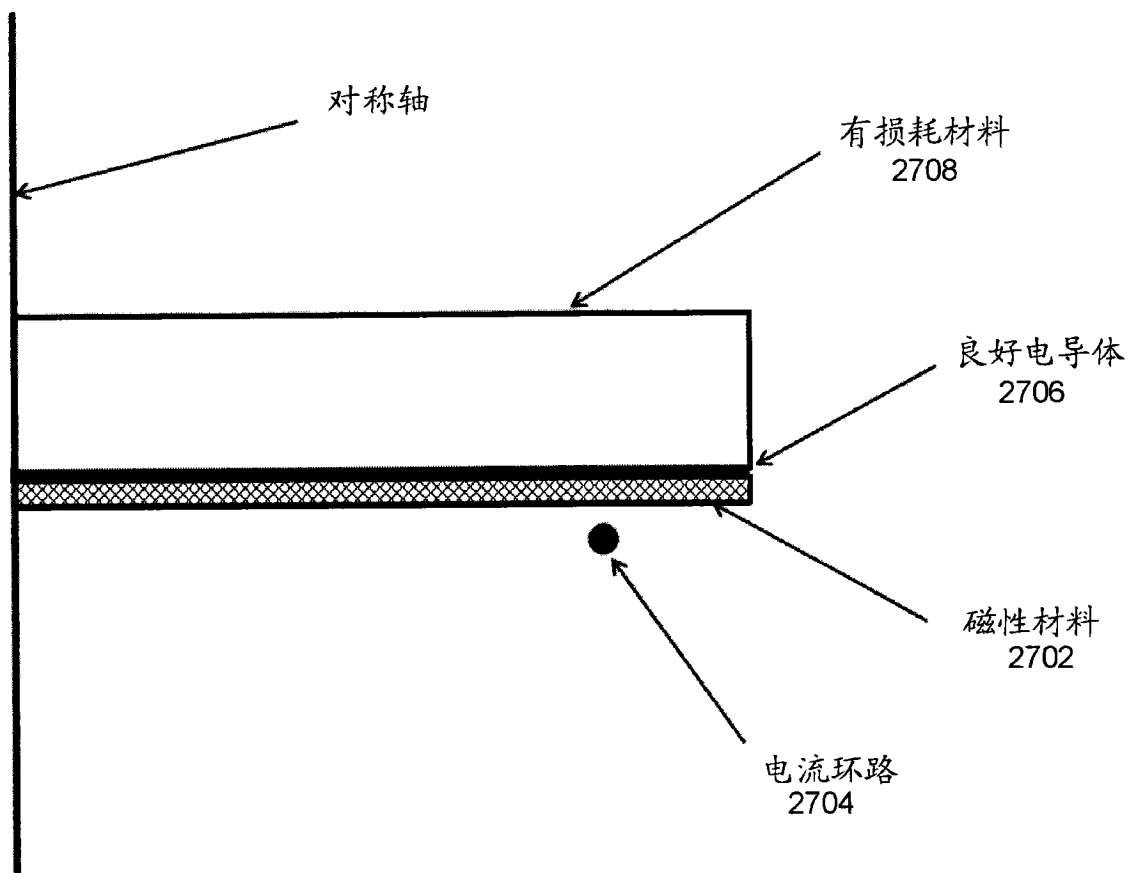


图 27

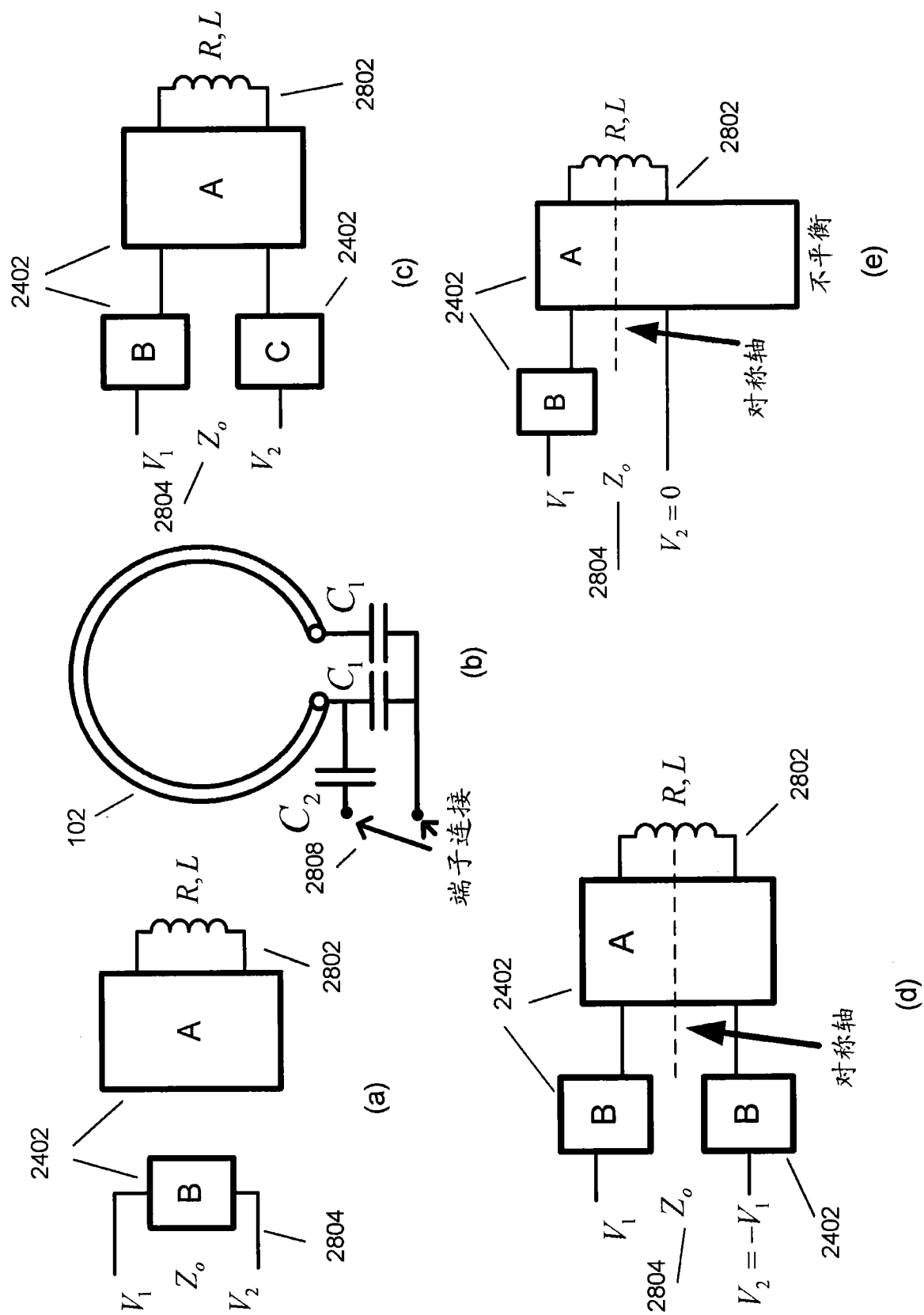


图 28

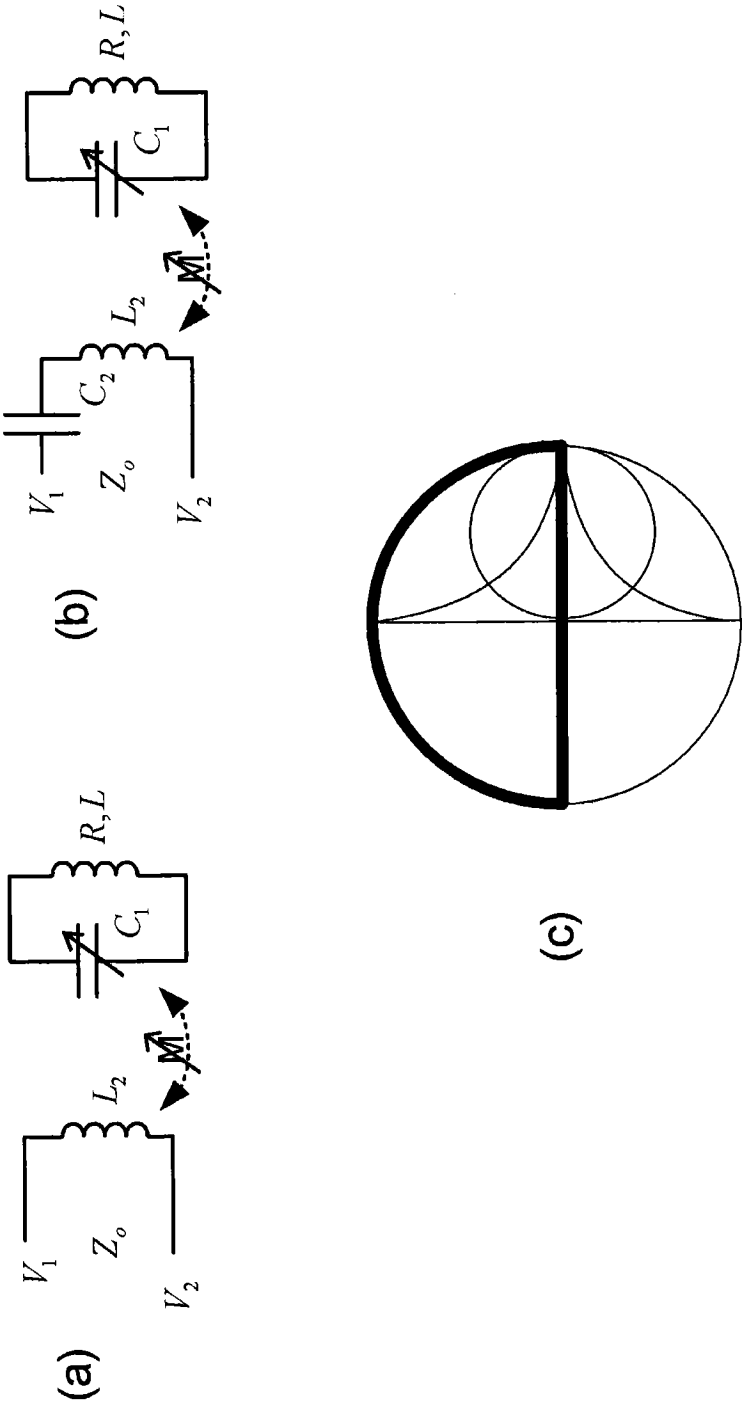
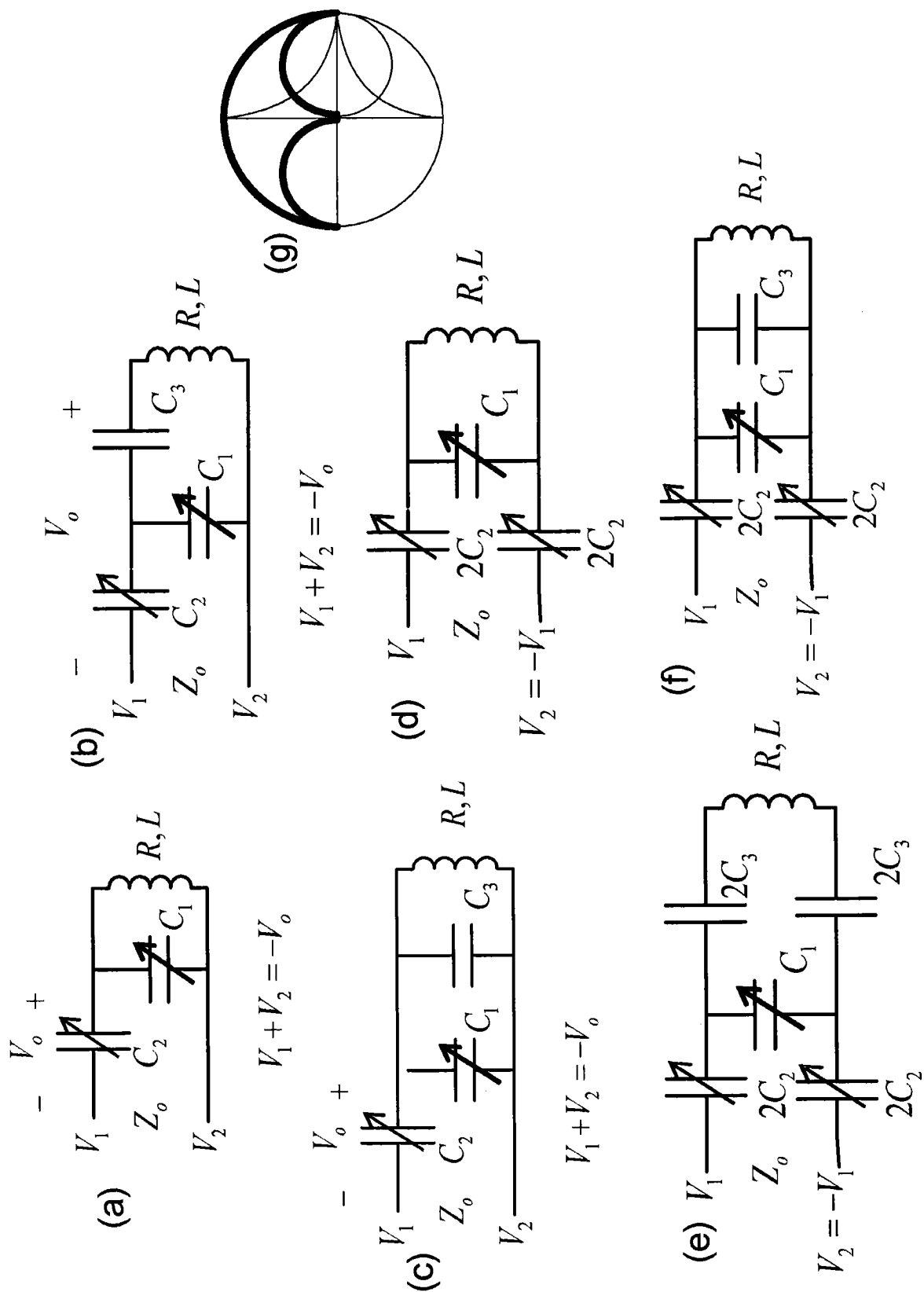


图 29



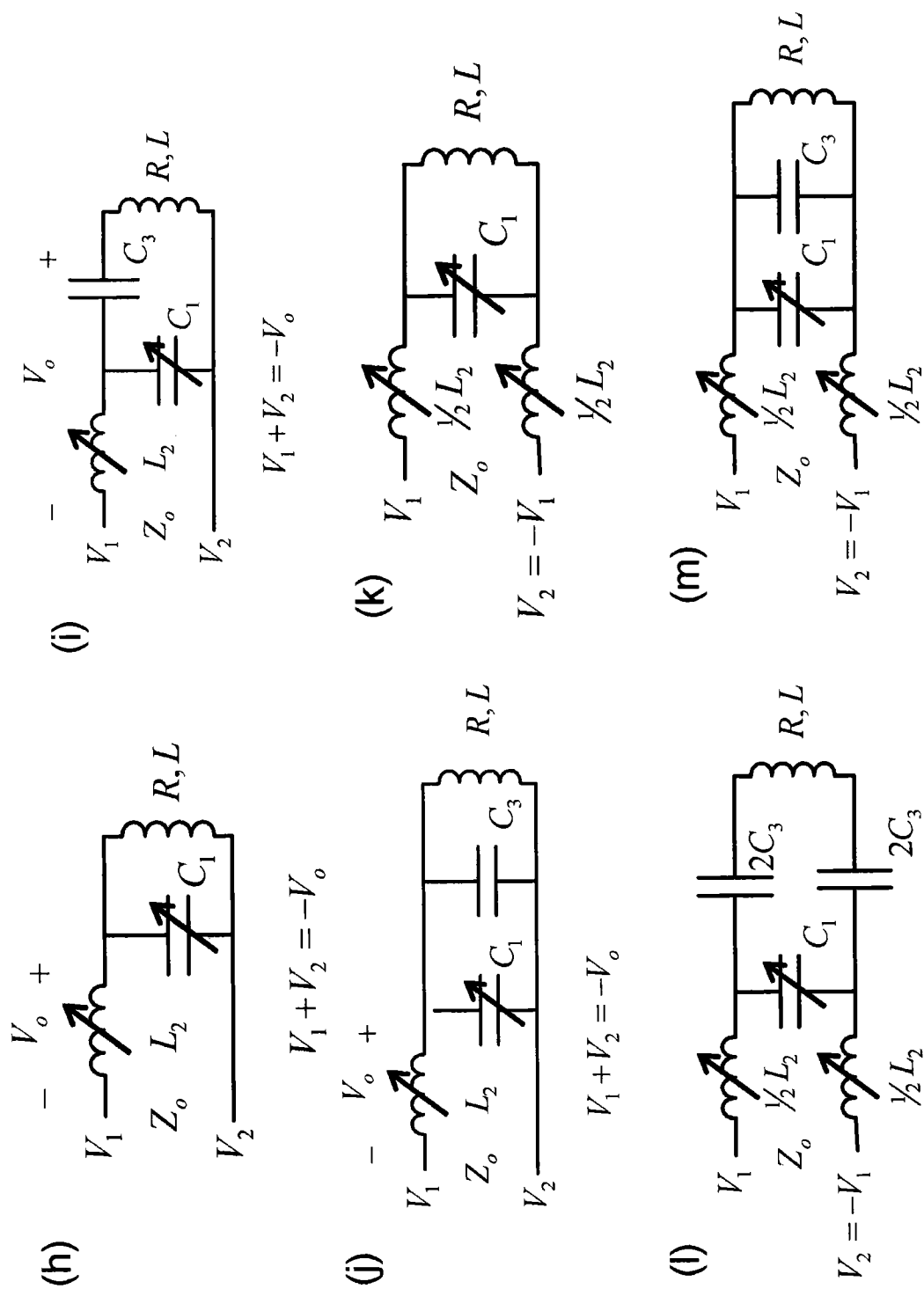


图 30

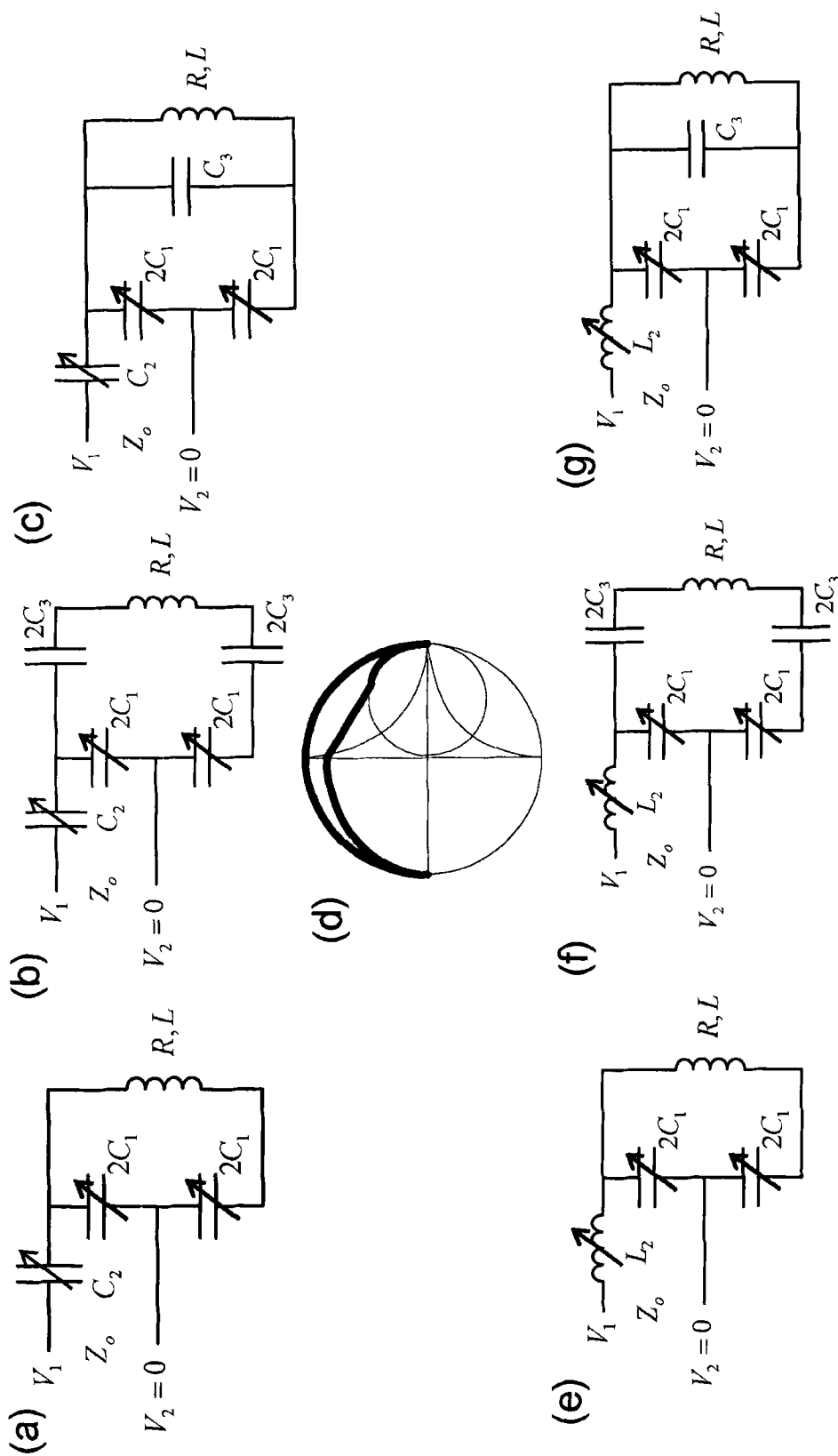


图 31

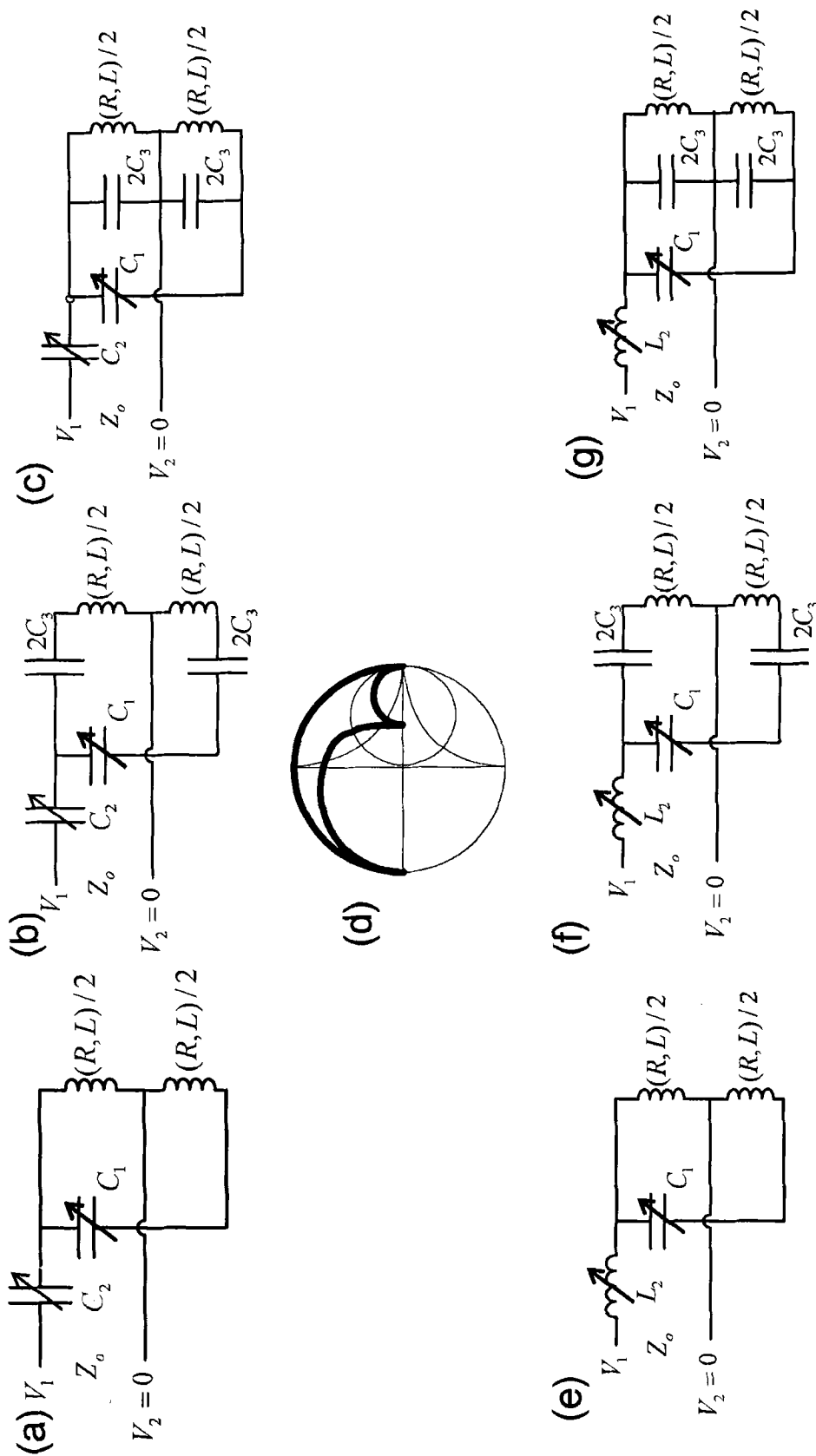
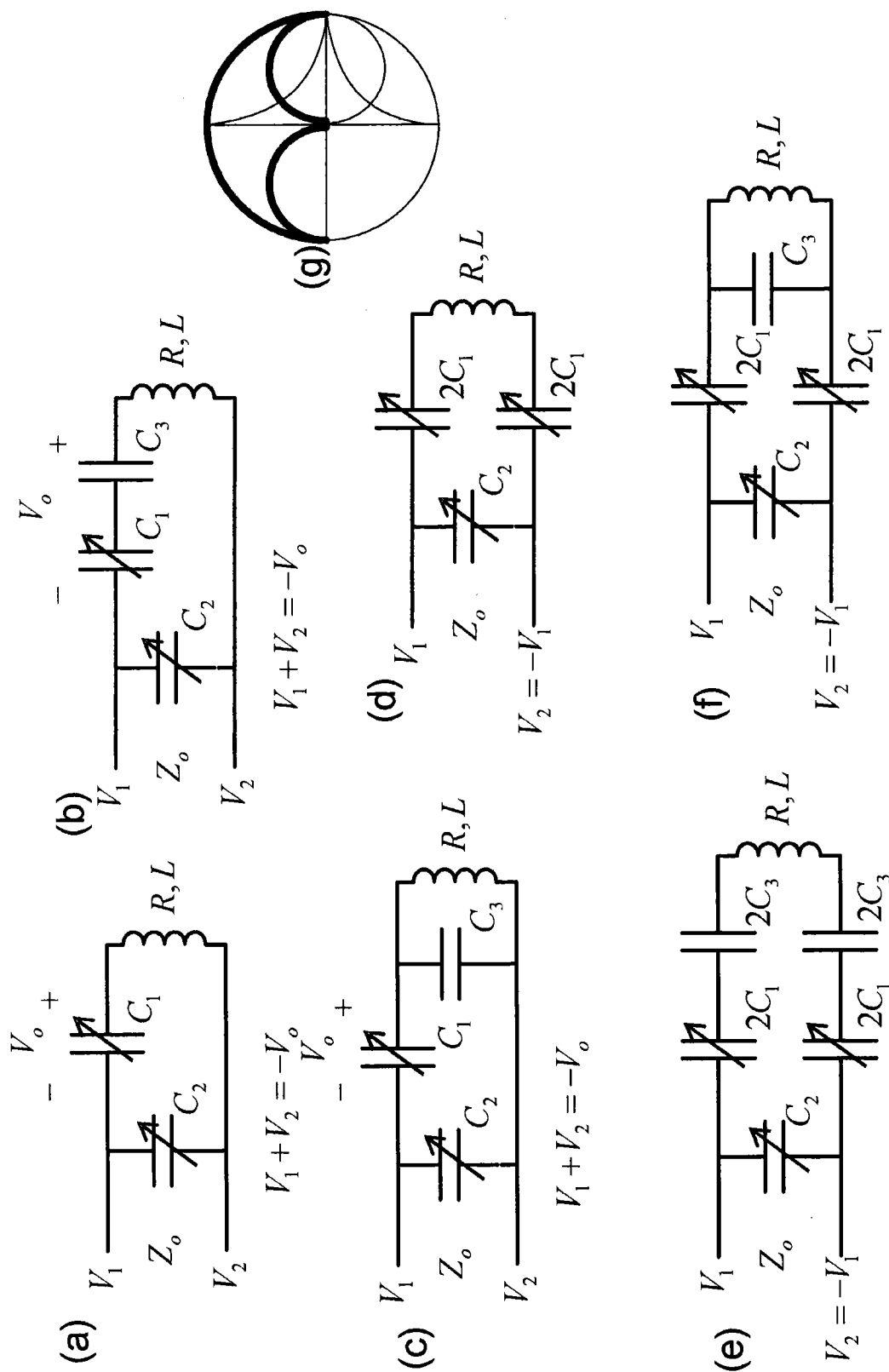


图 32



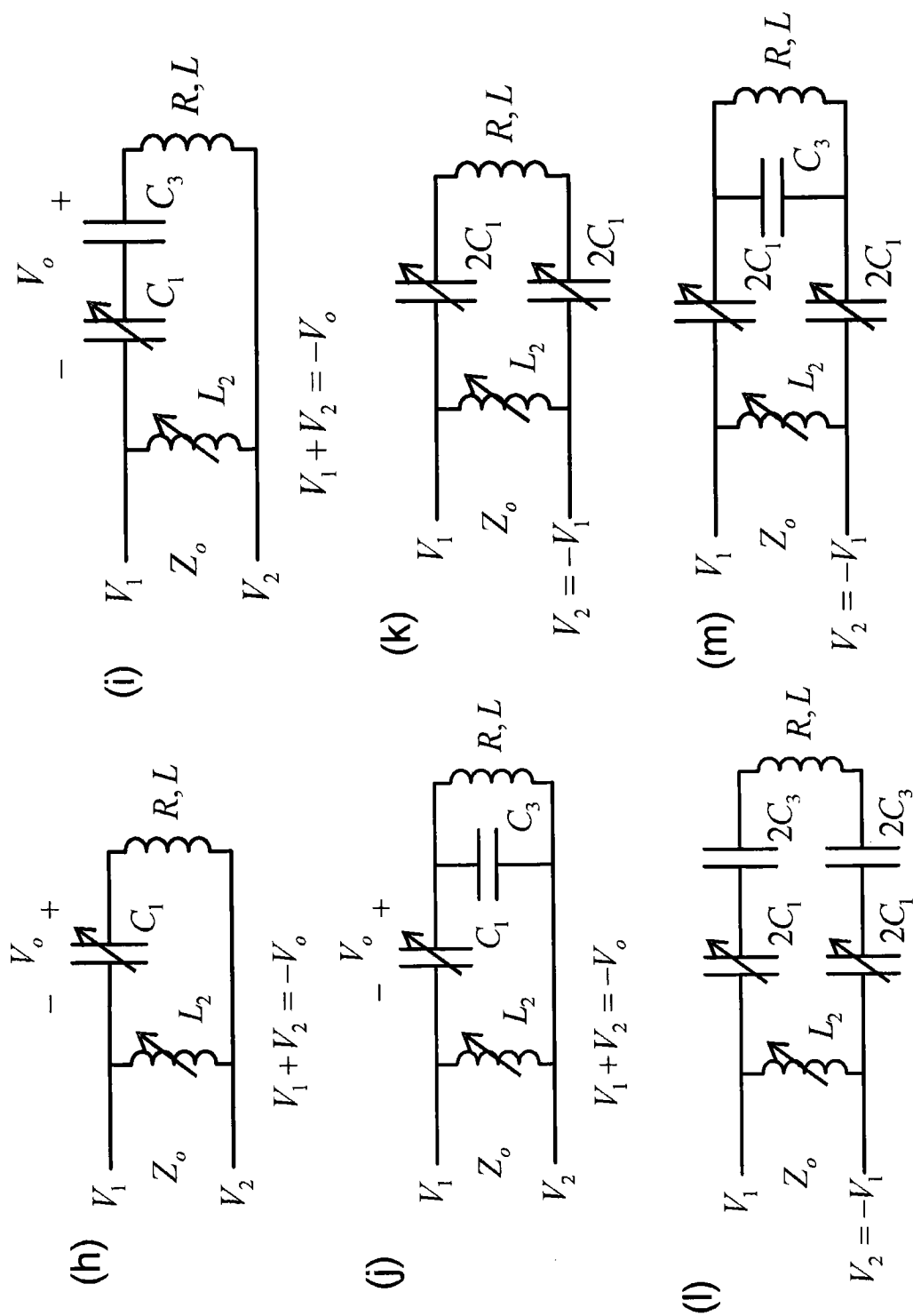


图 33

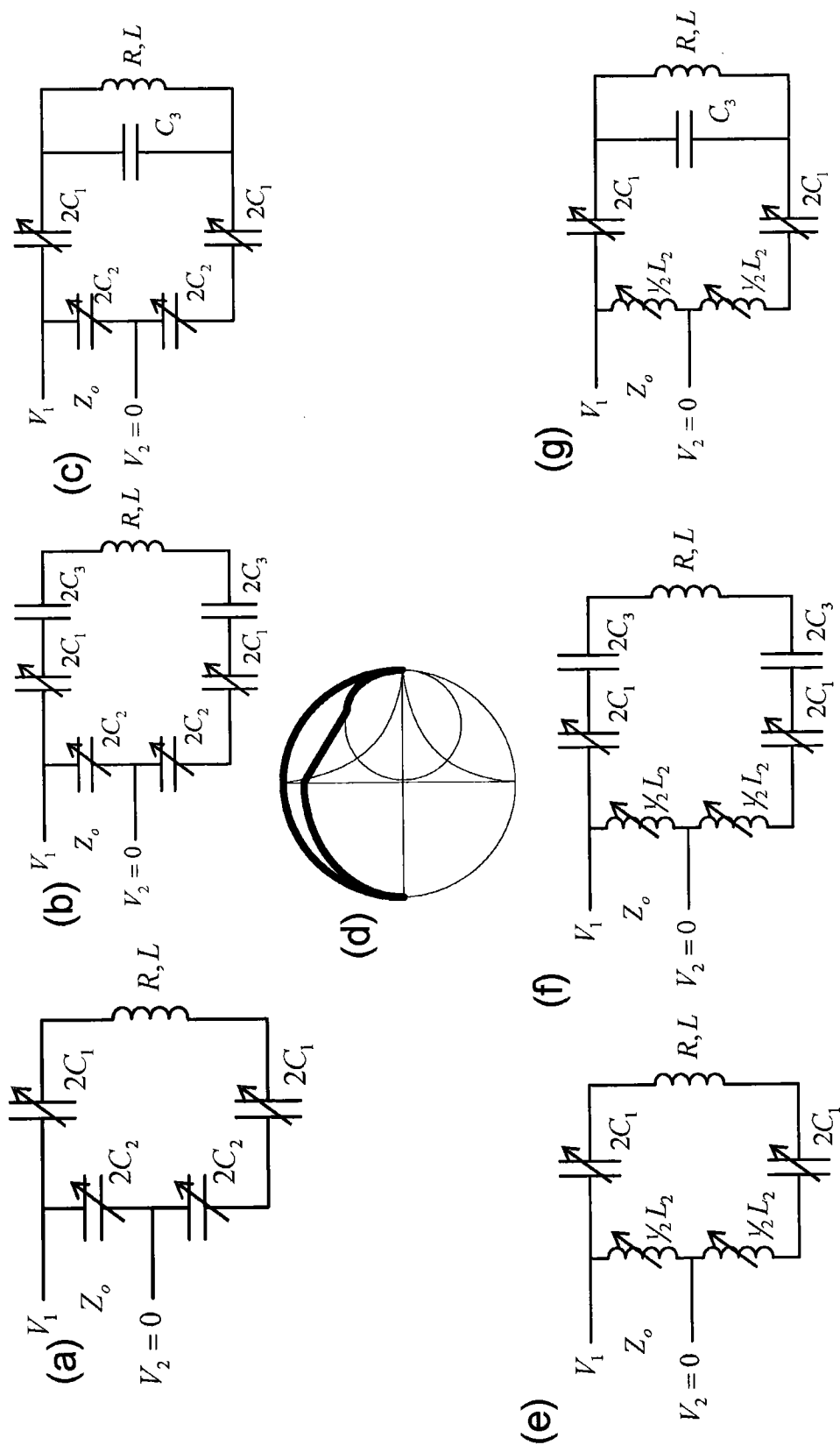


图 34

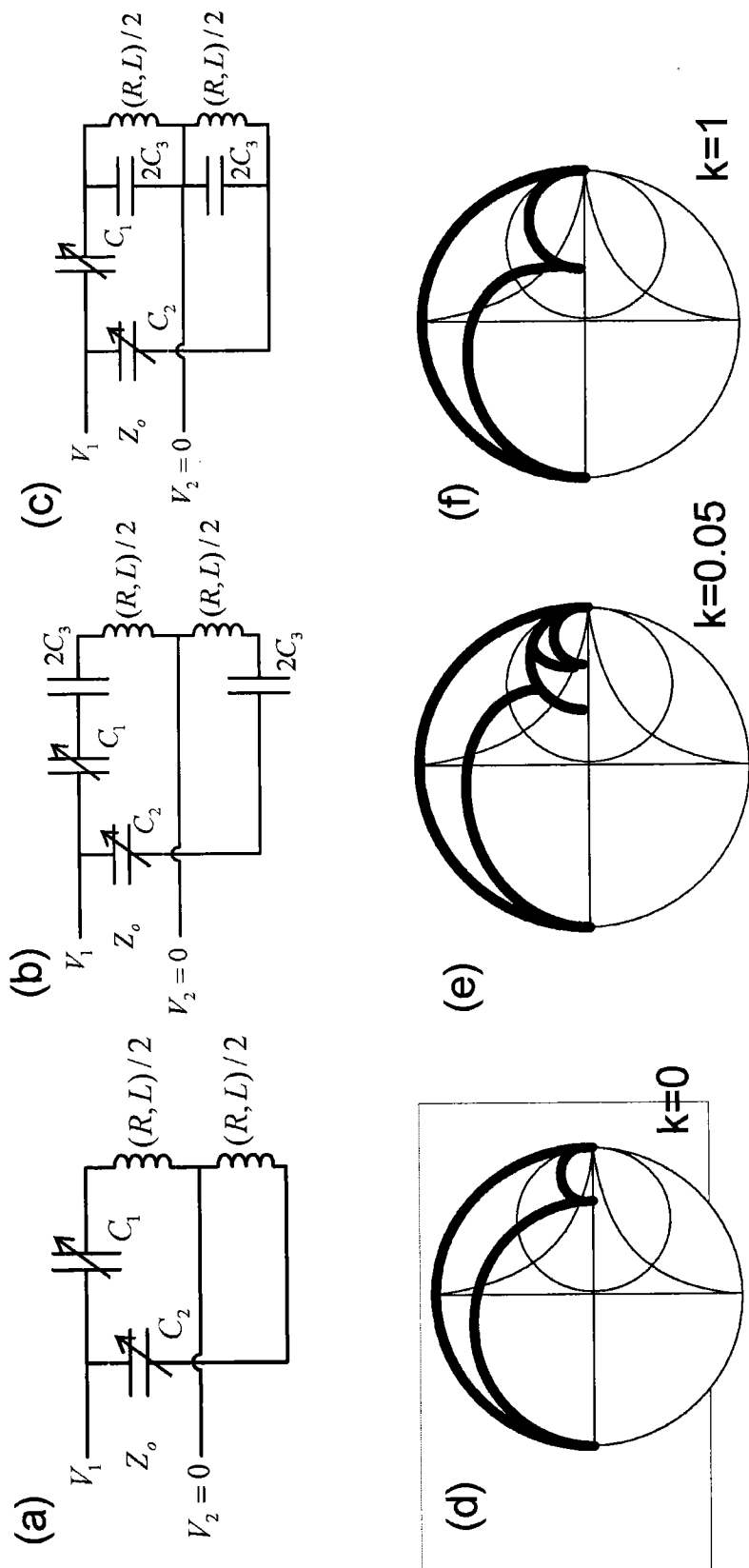


图 35

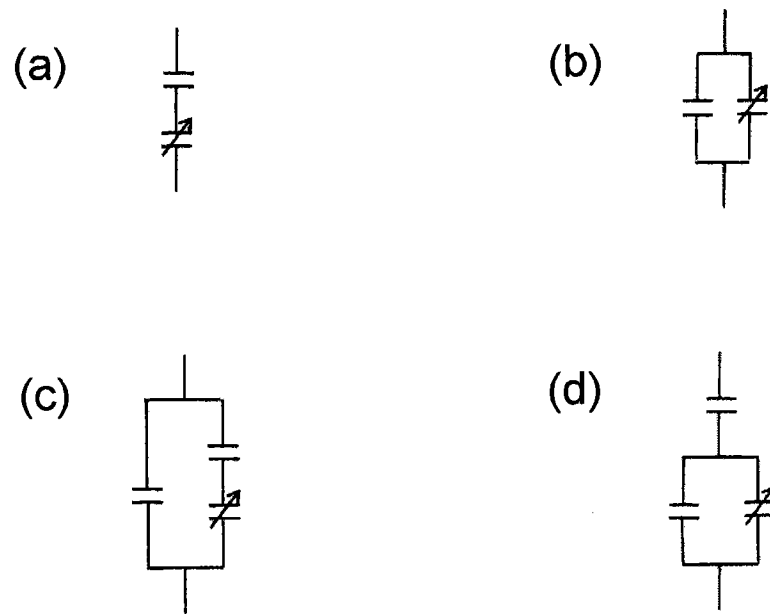


图 36



图 37

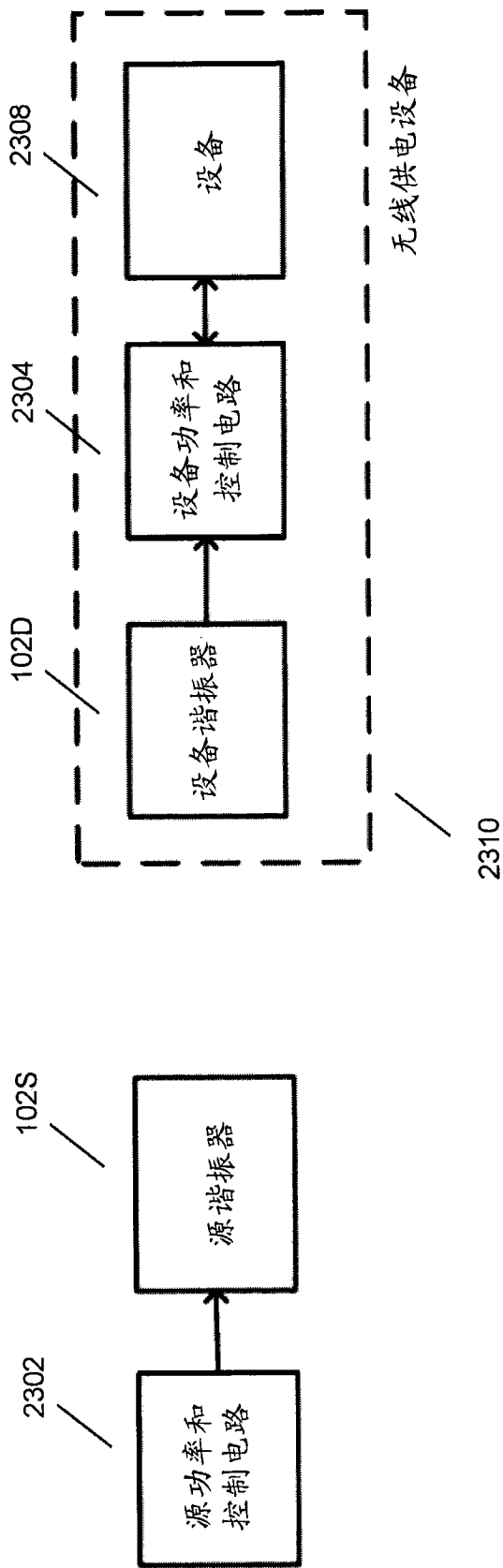


图 38

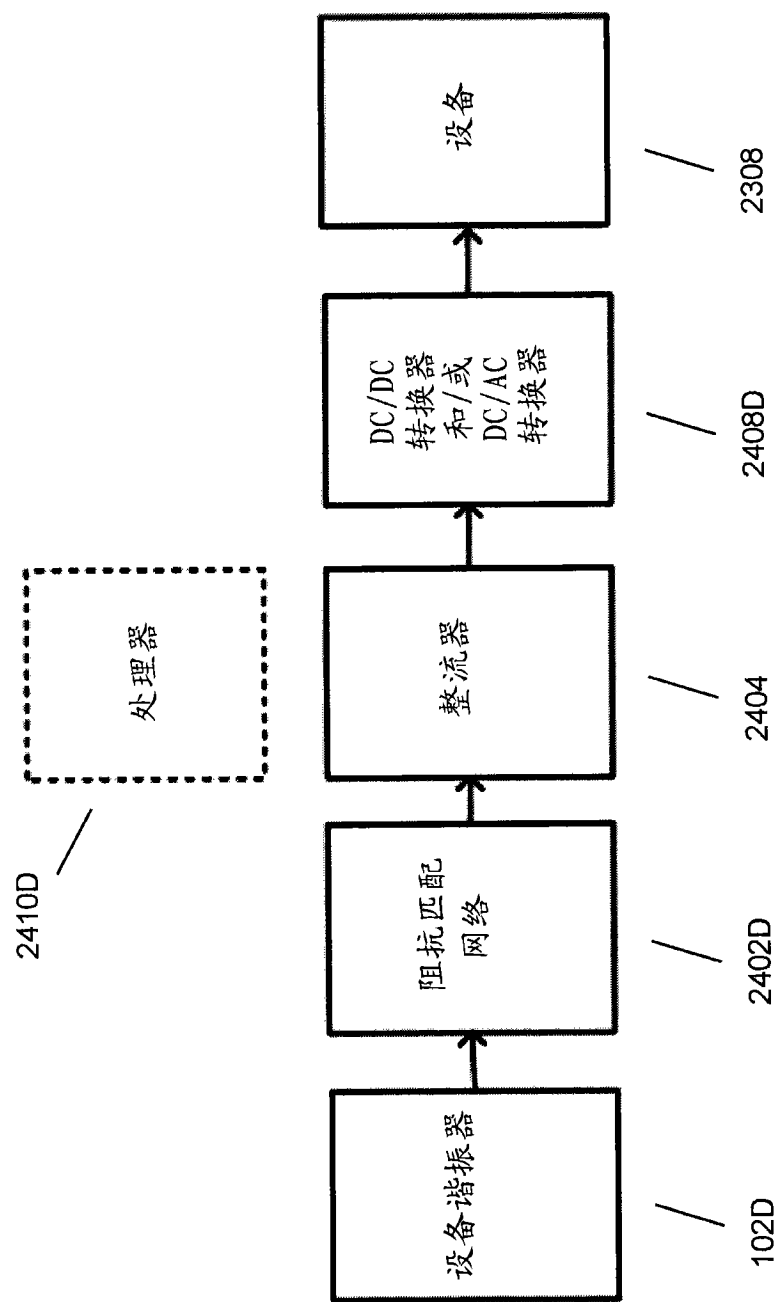


图 39

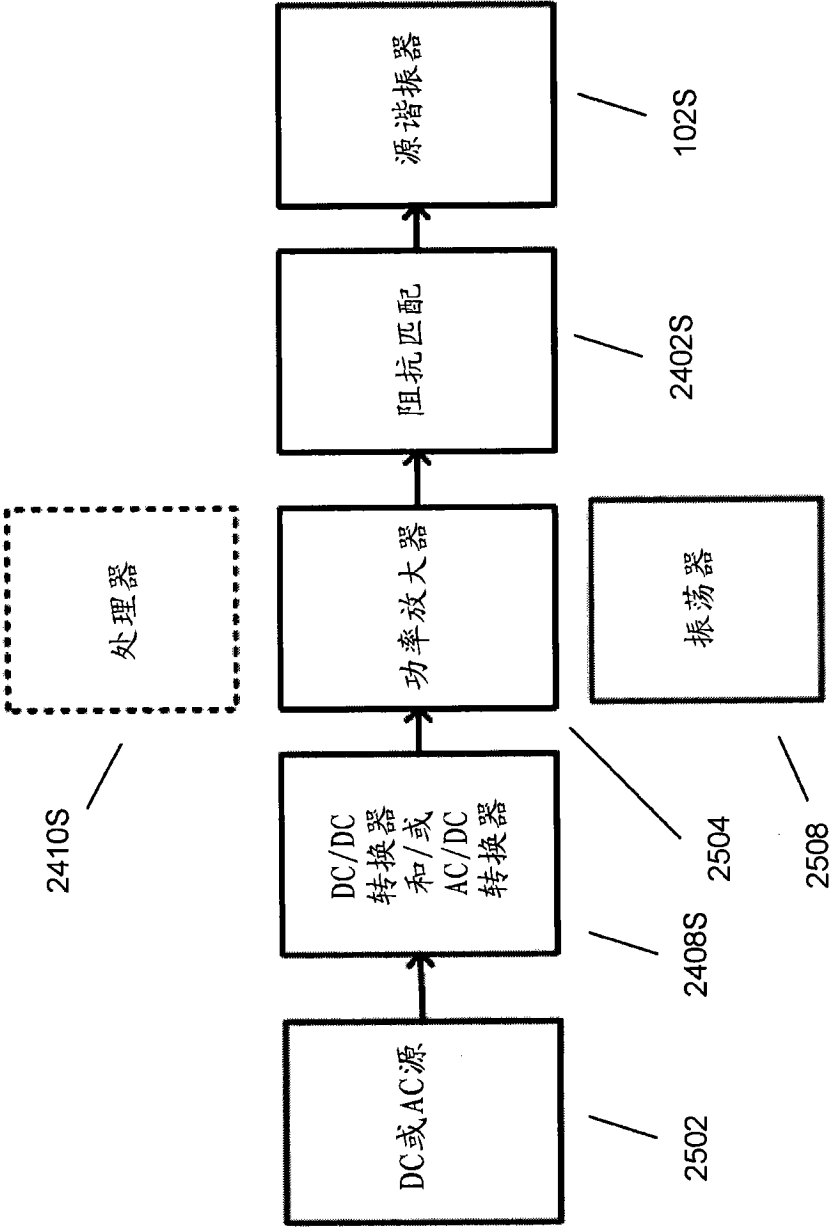


图 40

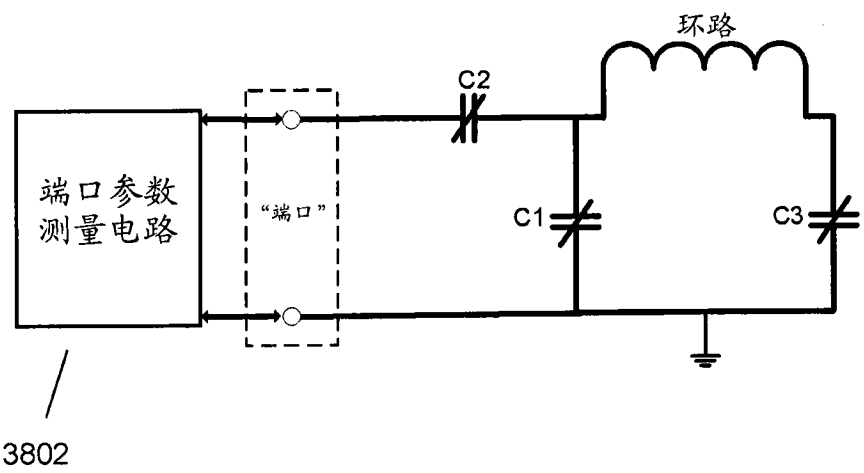


图 41

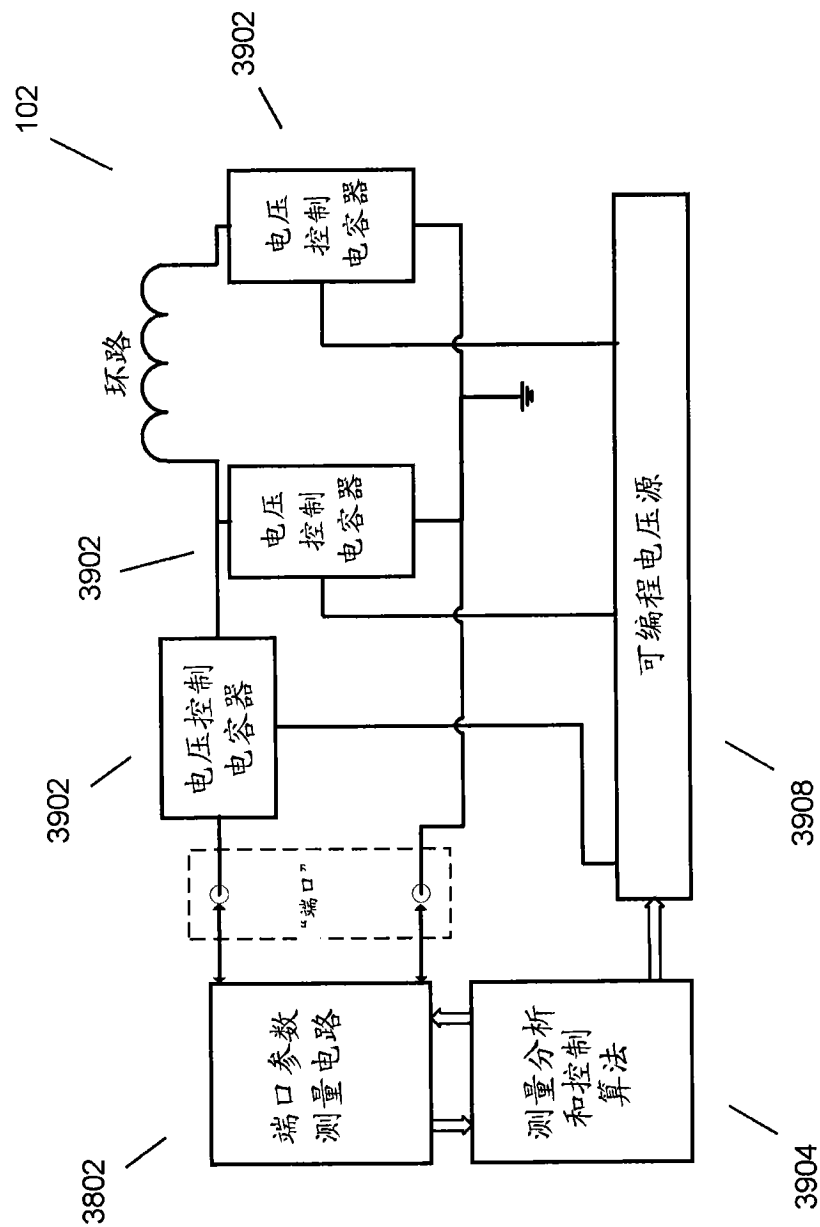


图 42

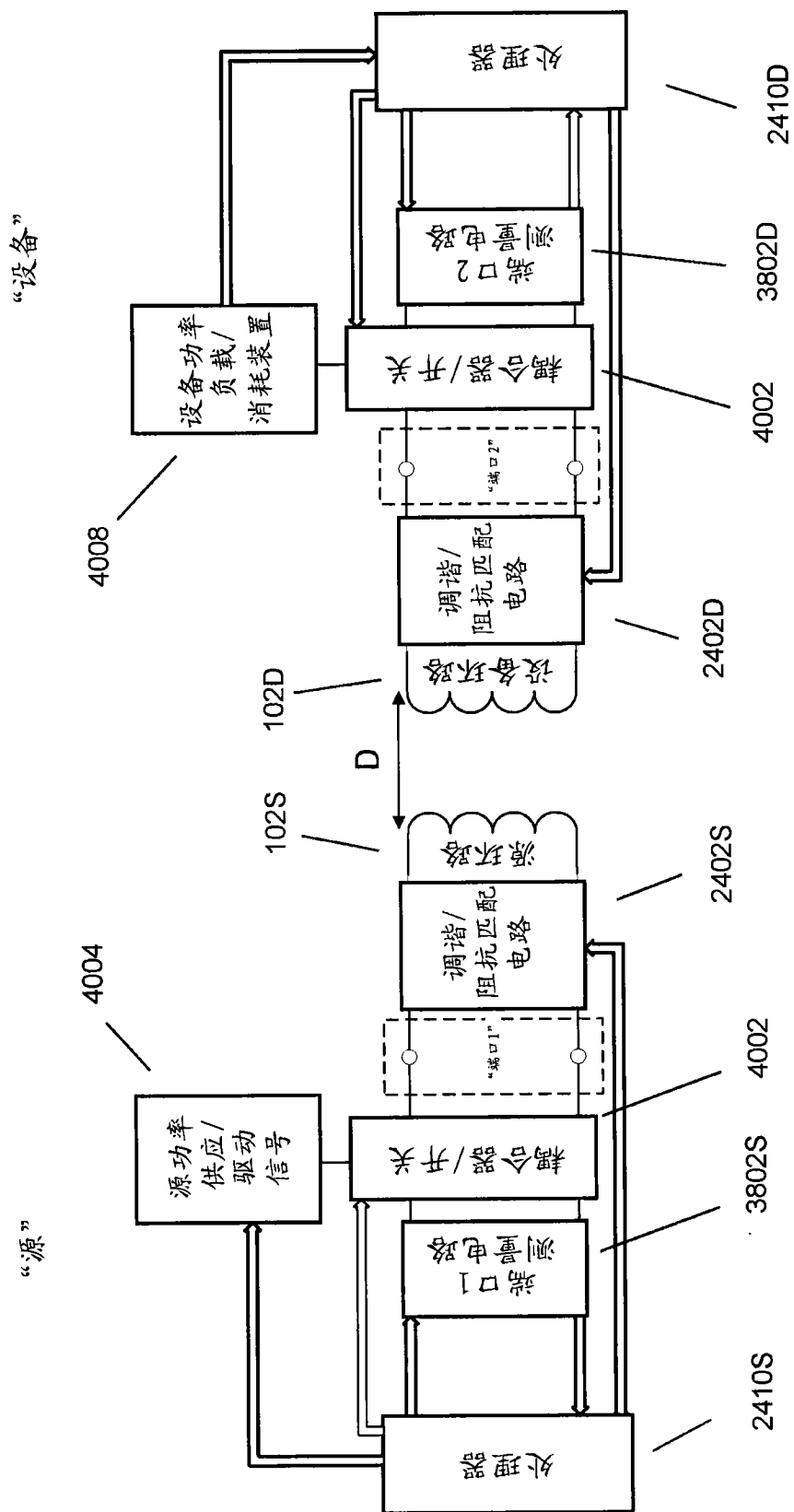


图 43

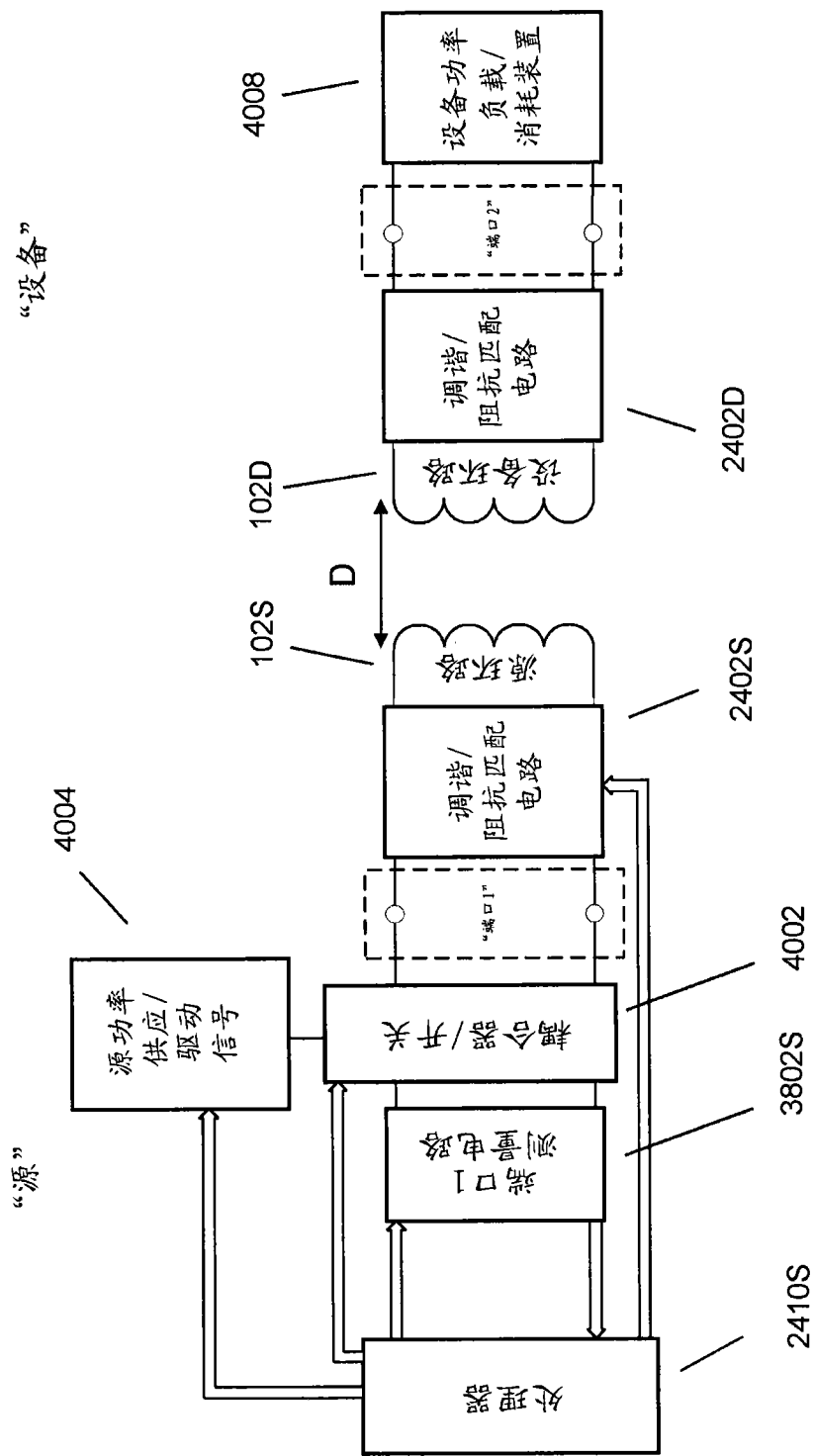


图 44

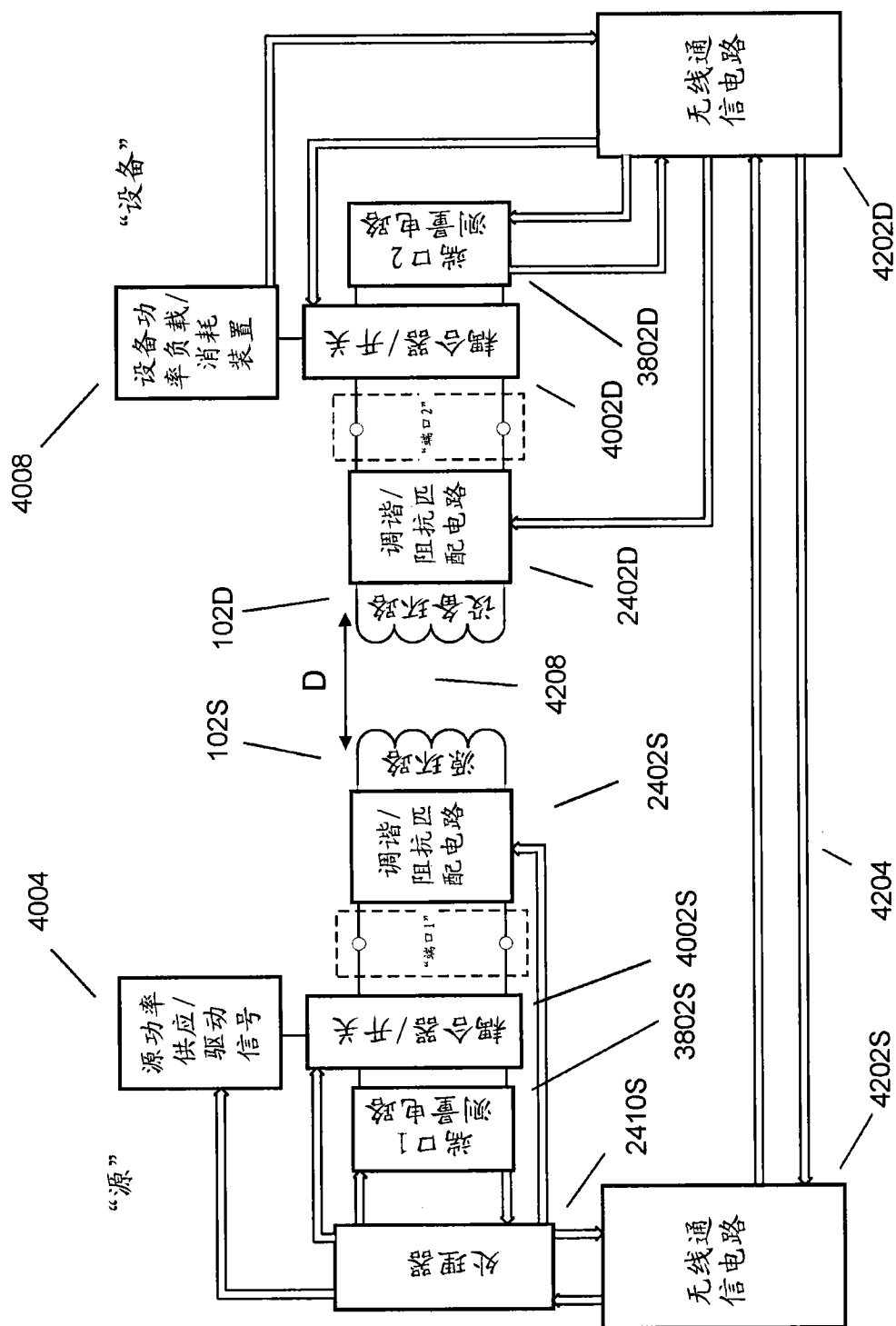


图 45

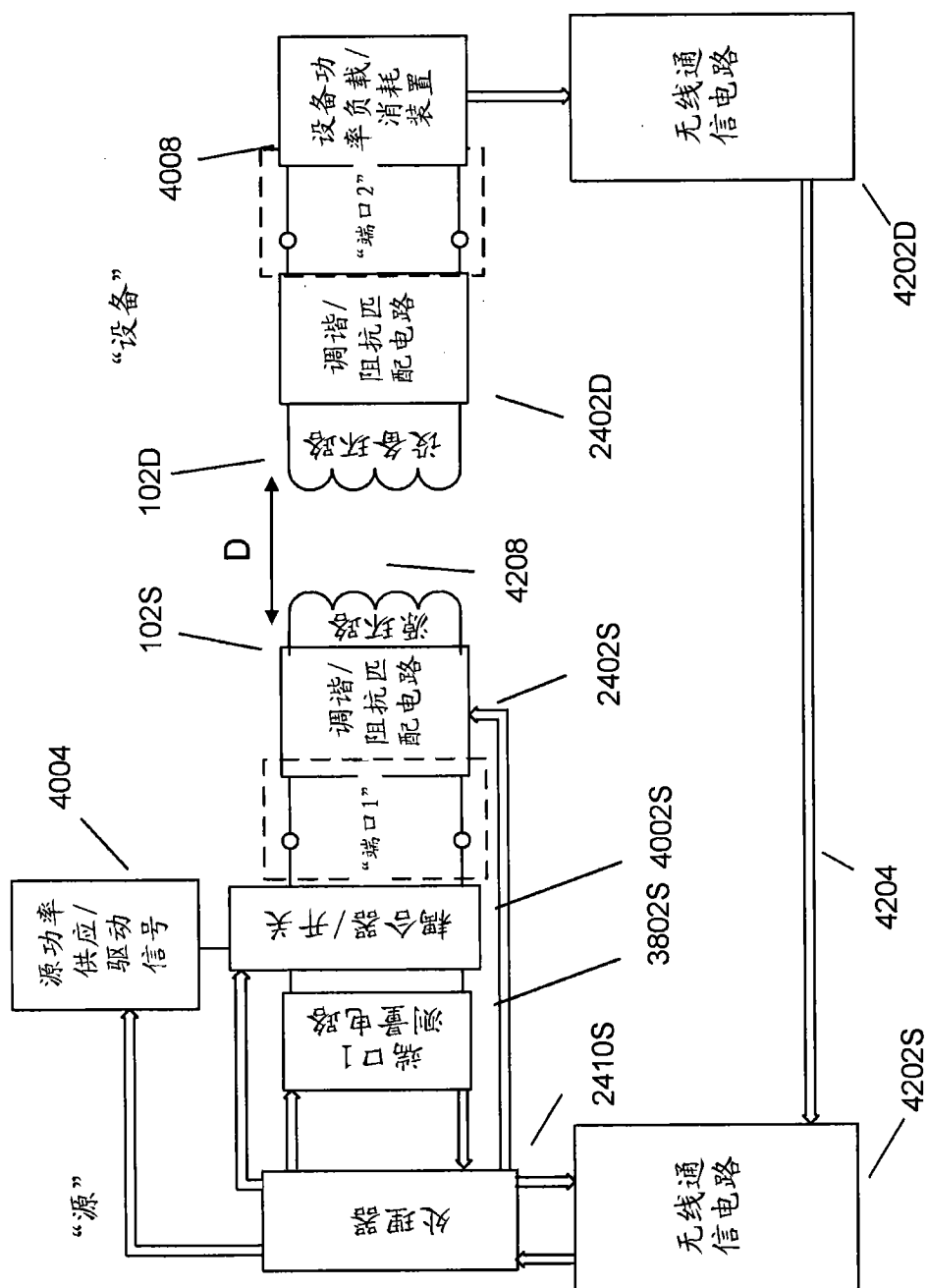


图 46

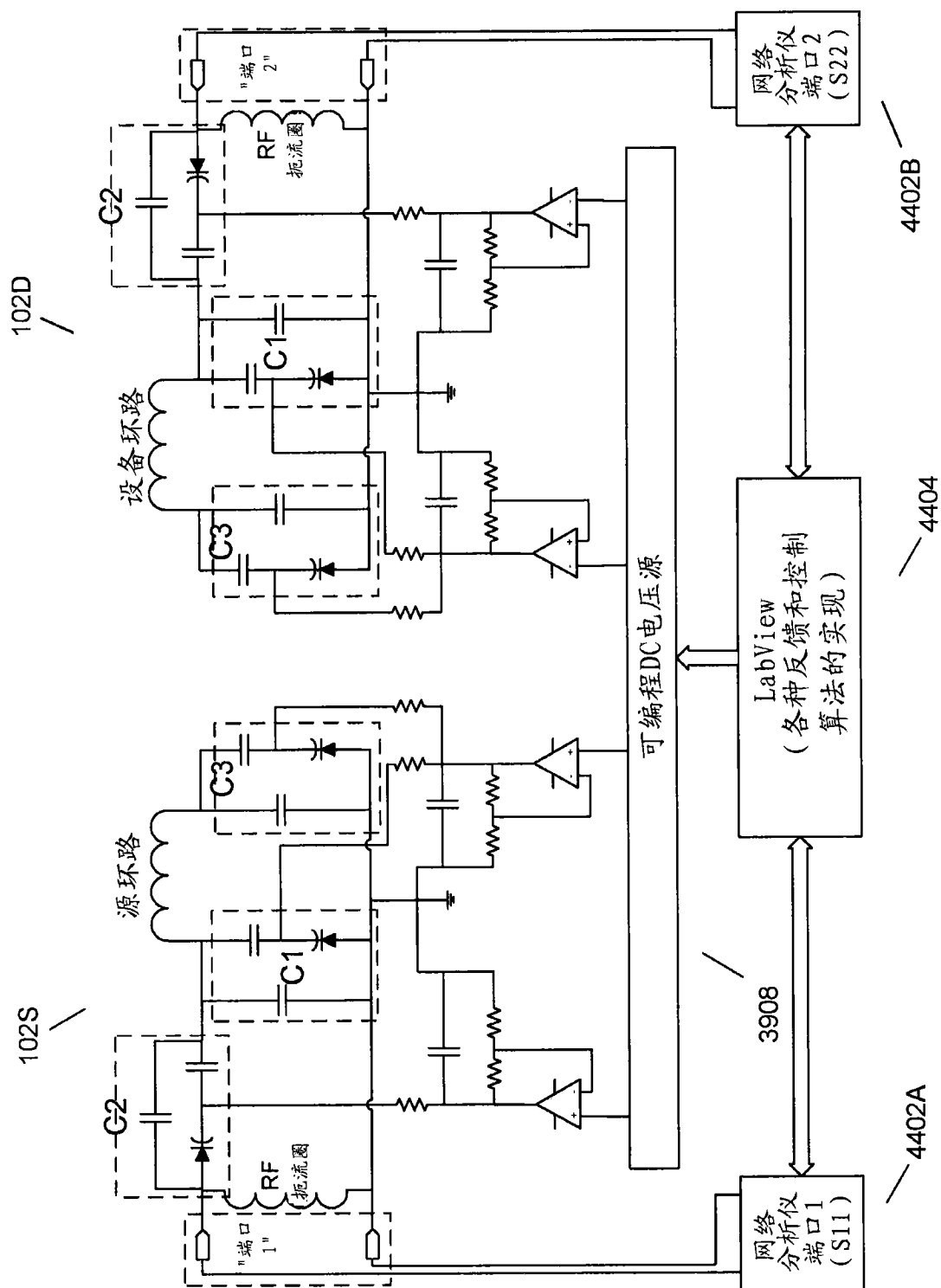


图 47

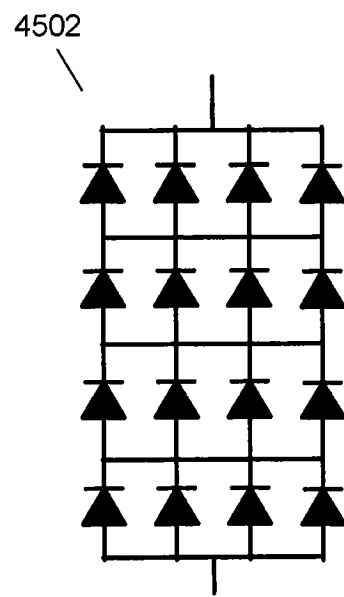


图 48

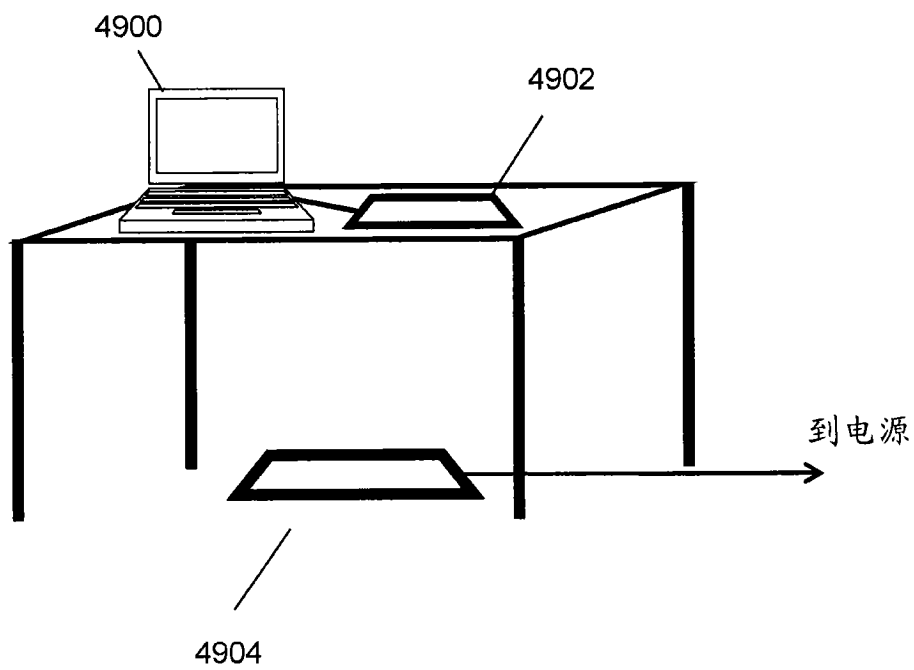


图 49

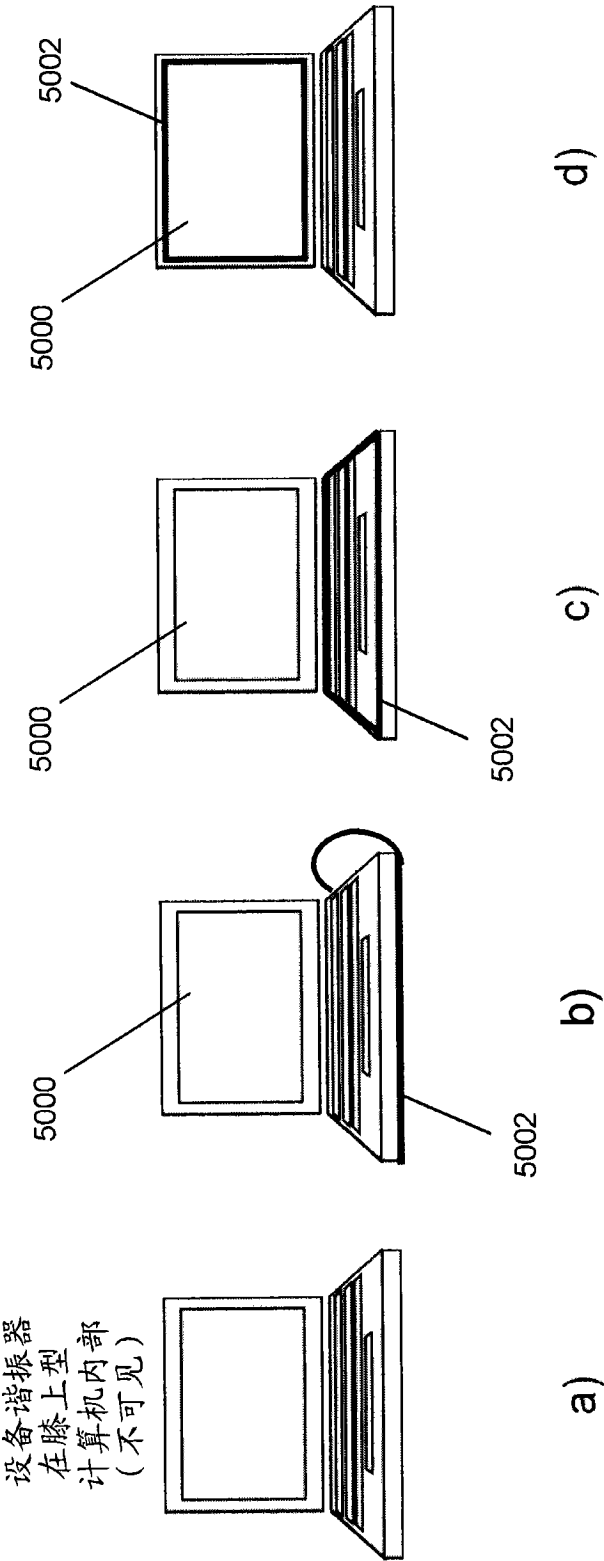


图 50

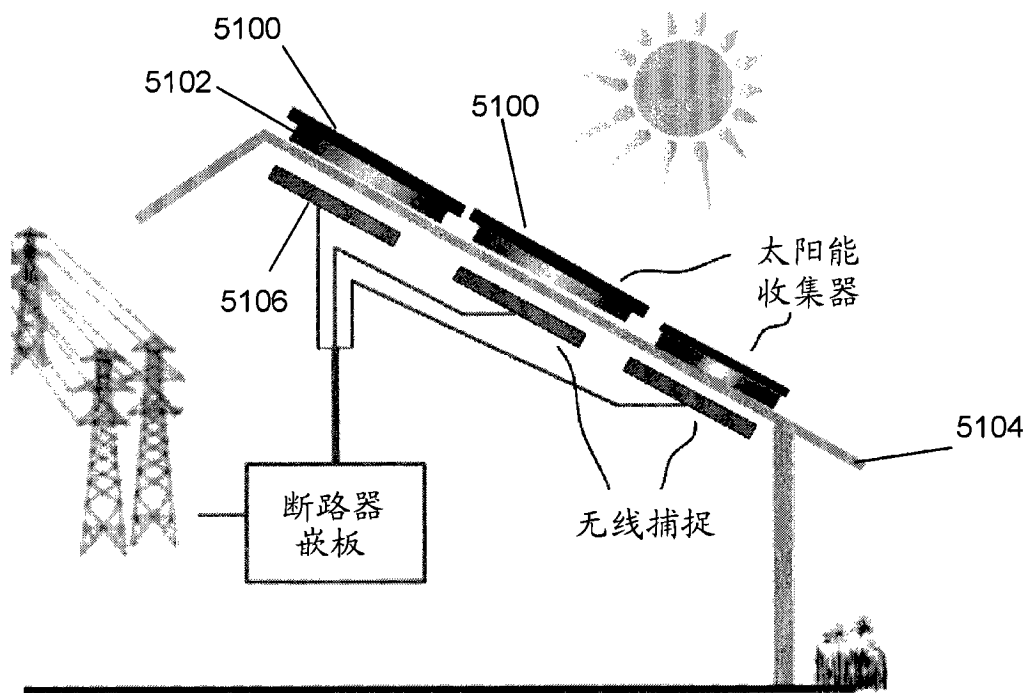


图 51

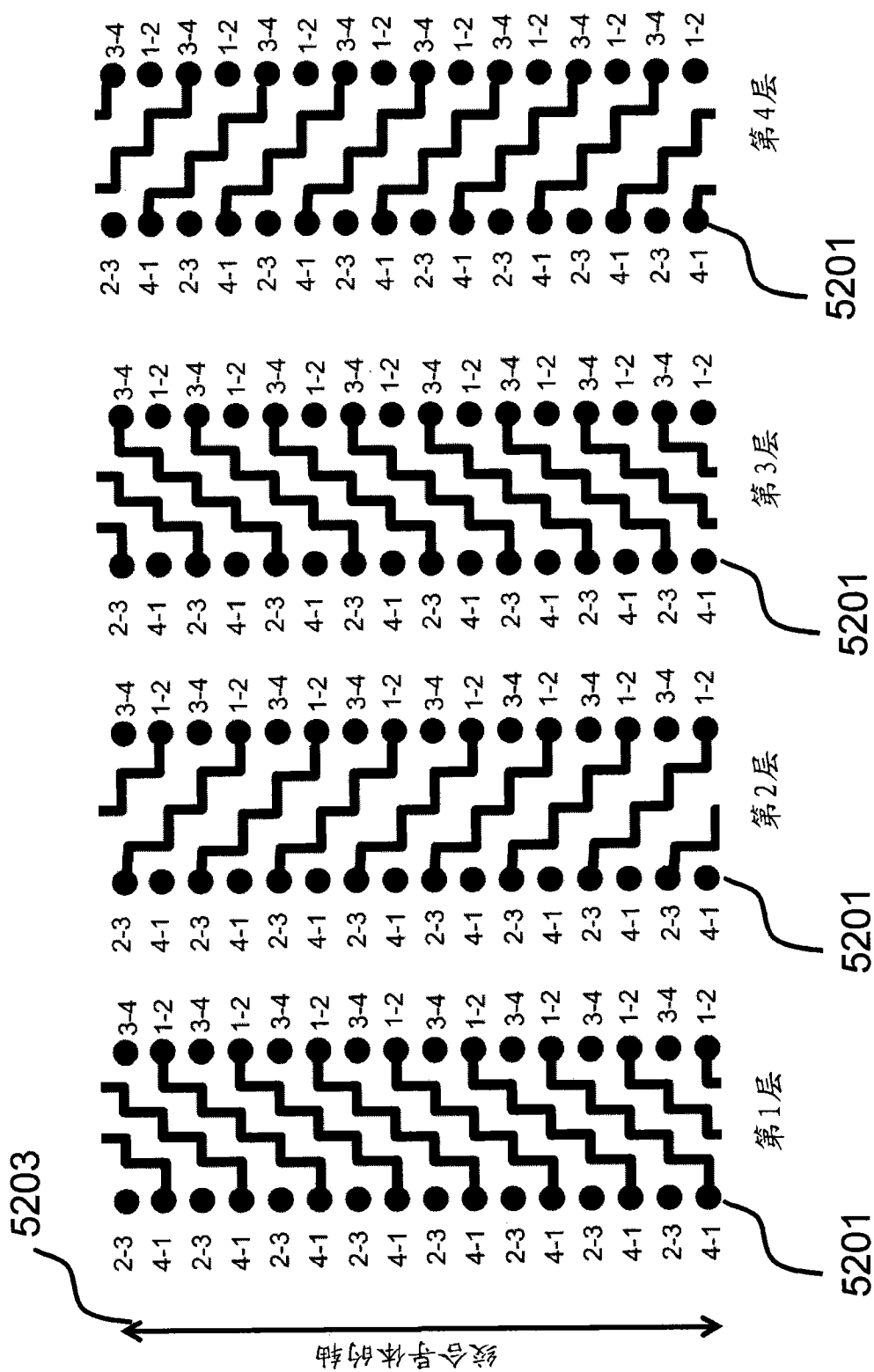


图 52a

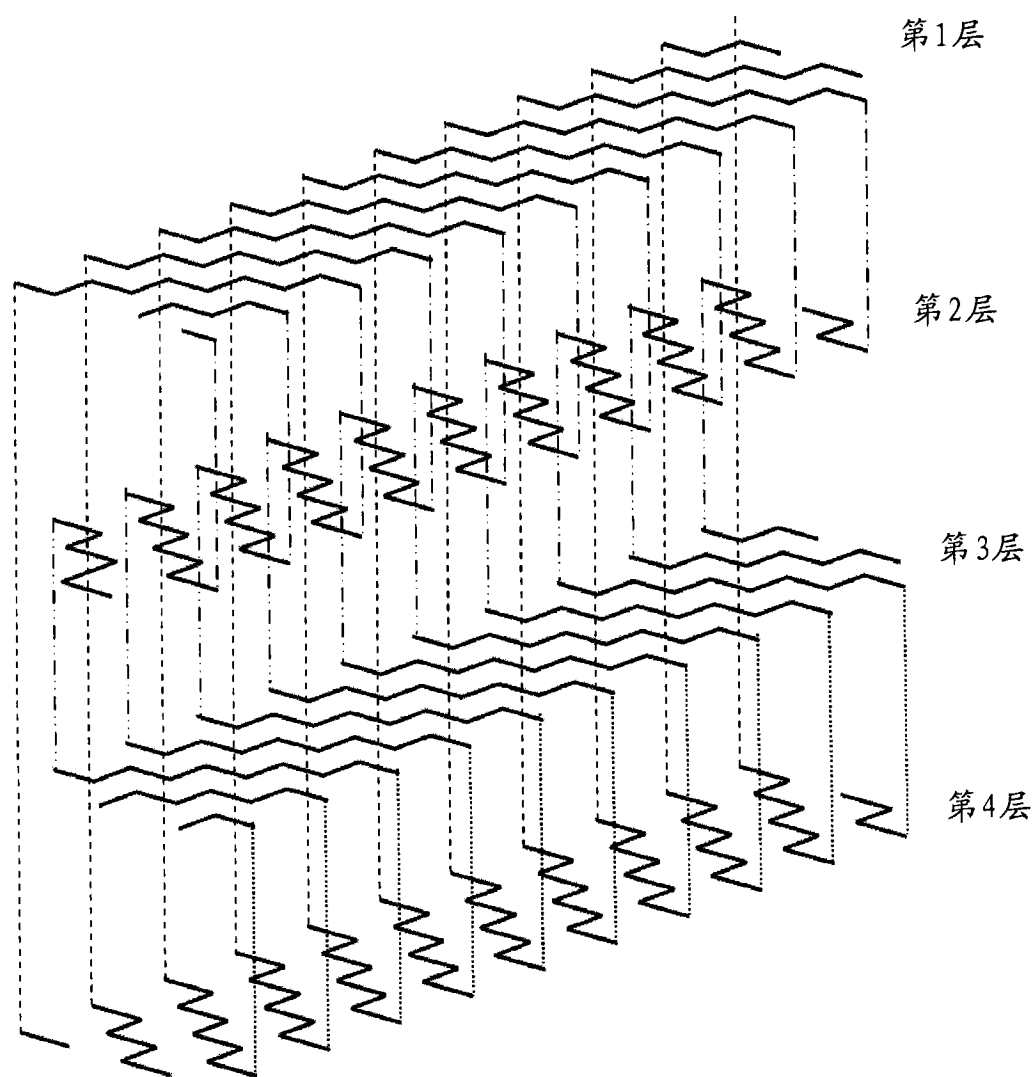


图 52b

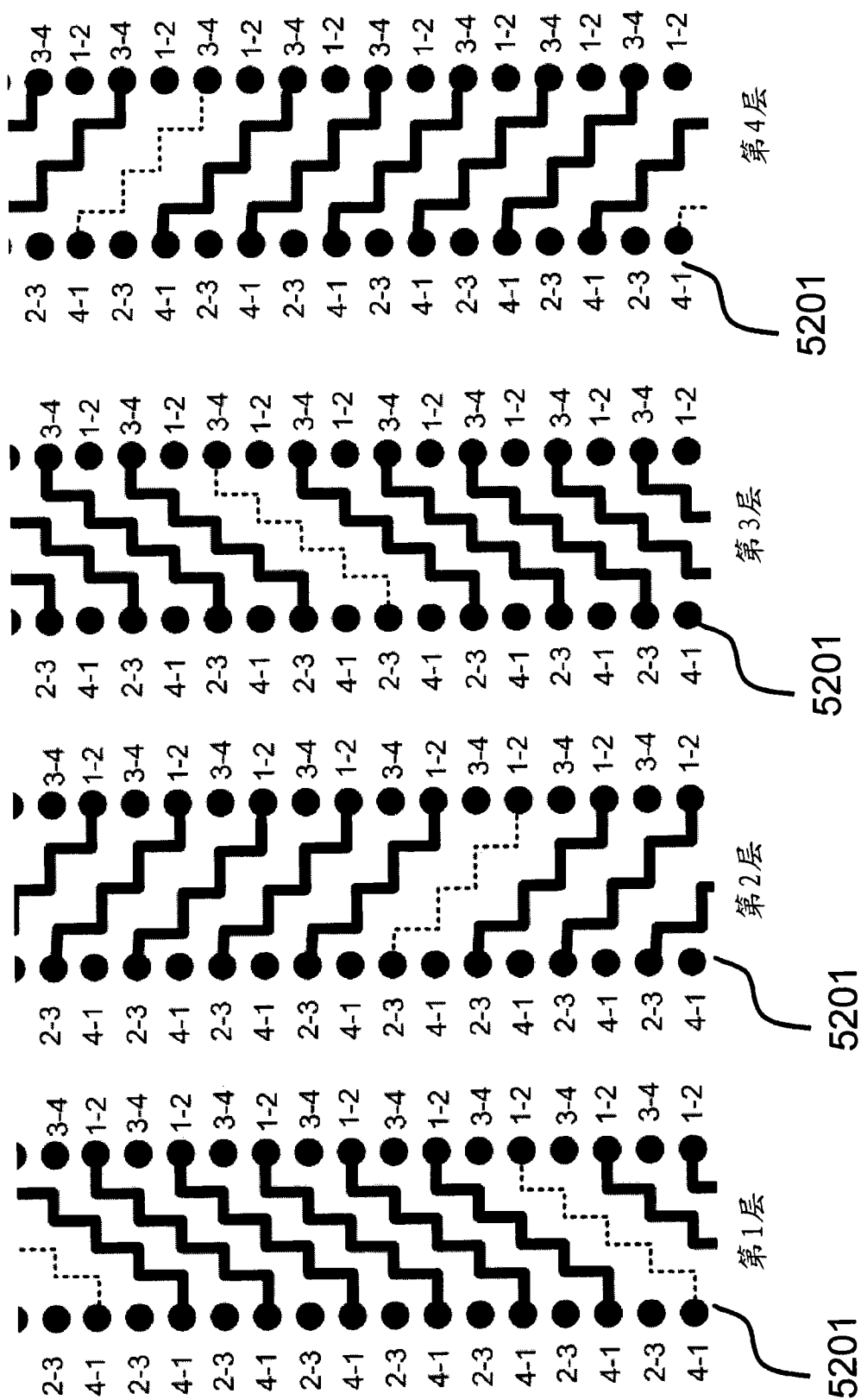


图 53a

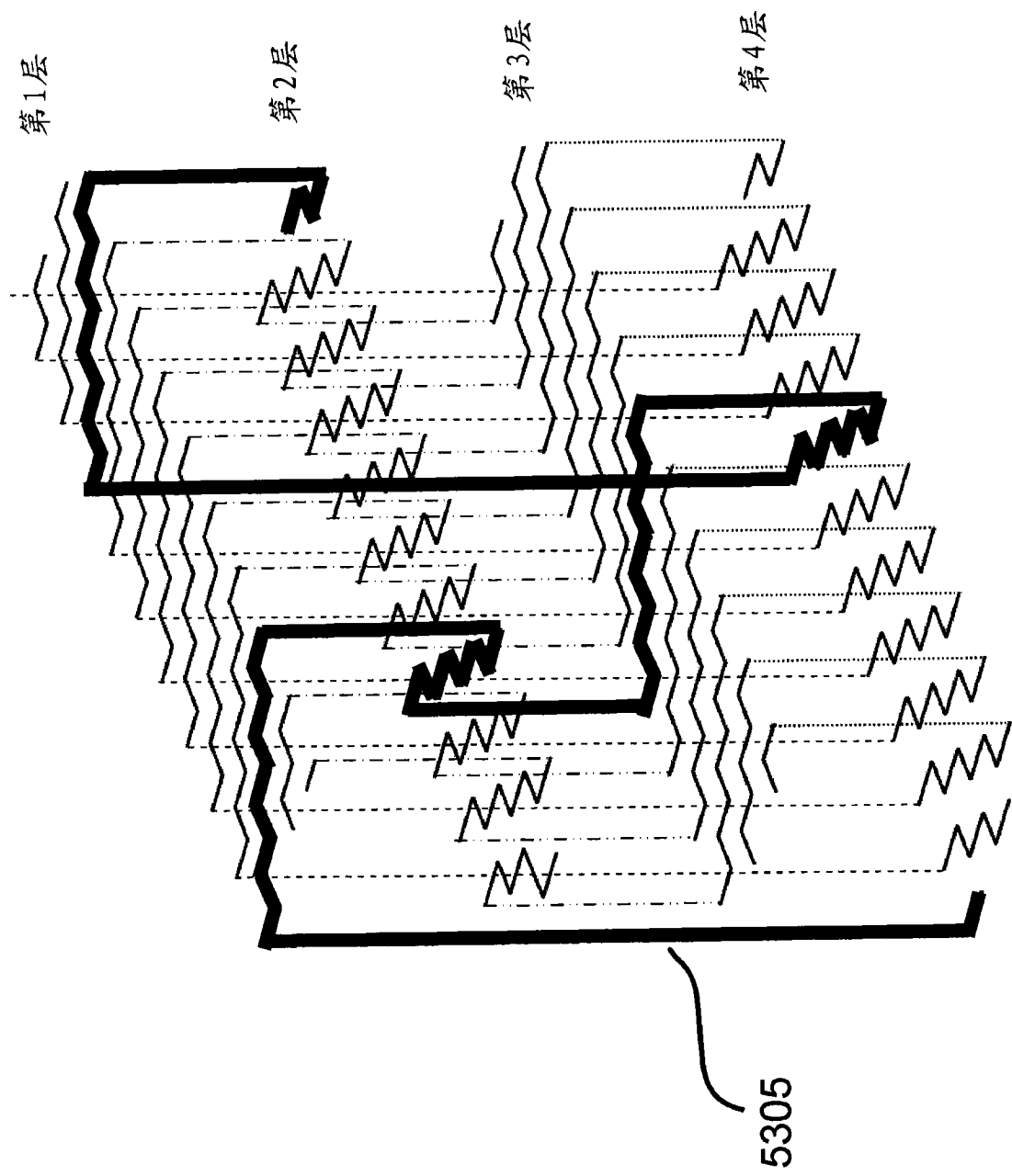
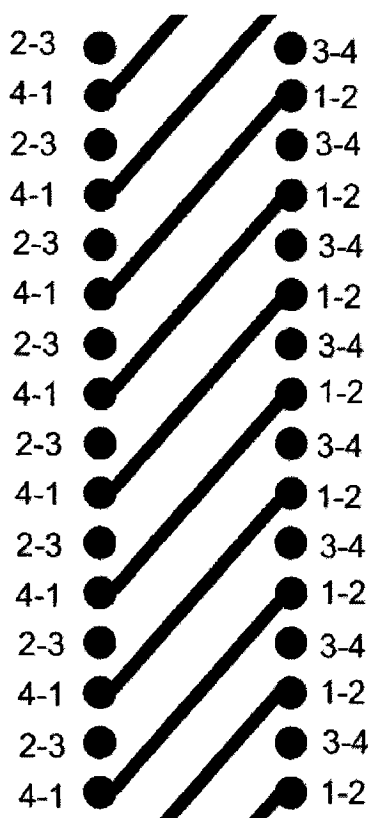
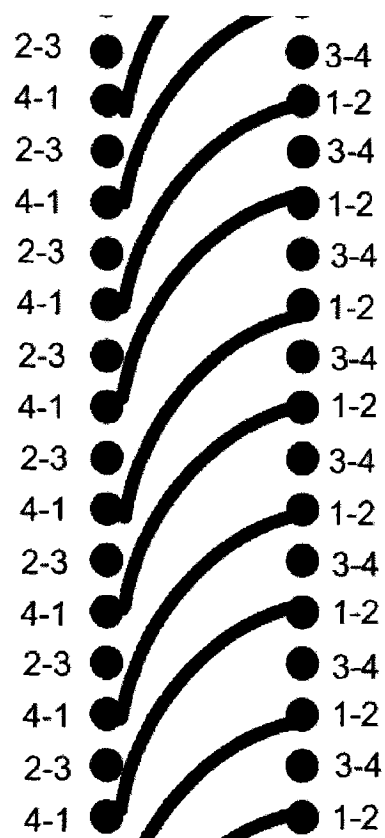


图 53b



(a)



(b)

图 54

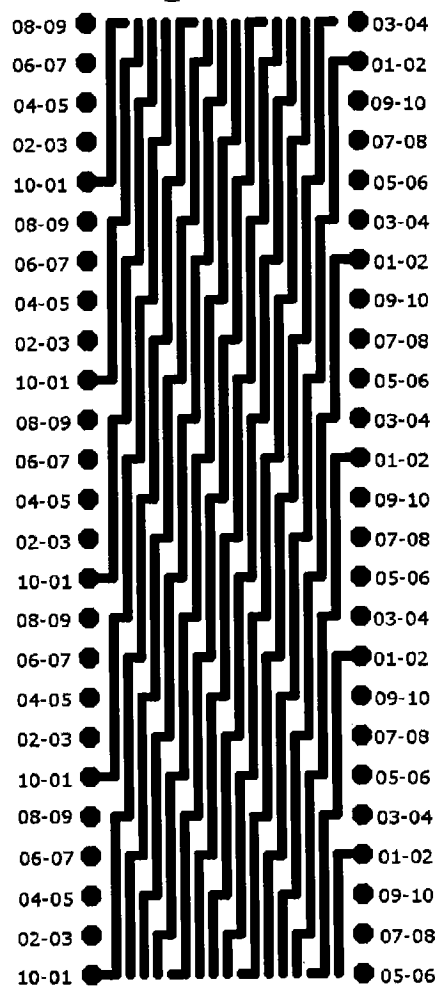


图 55

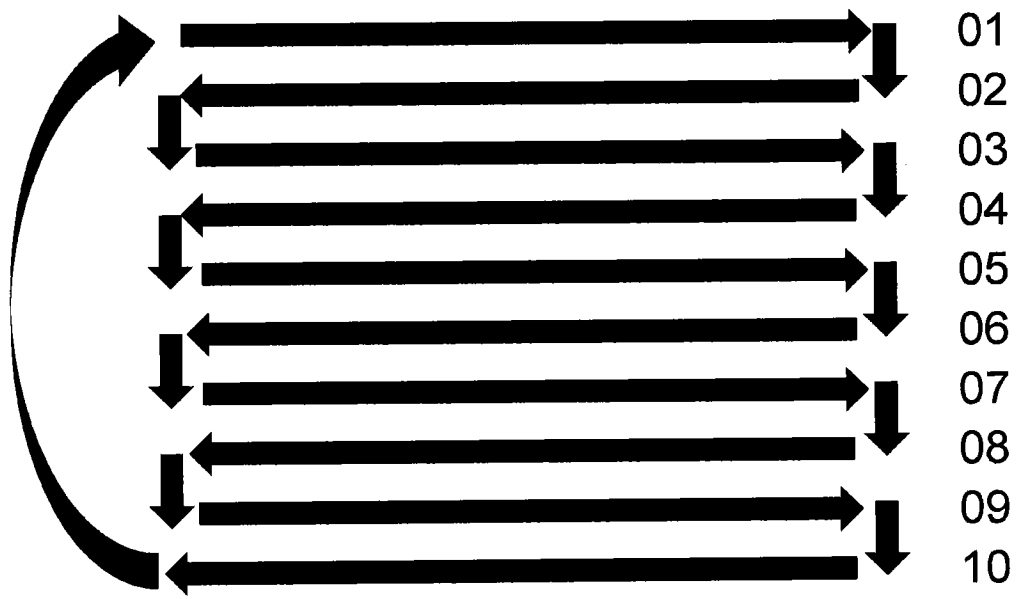


图 56

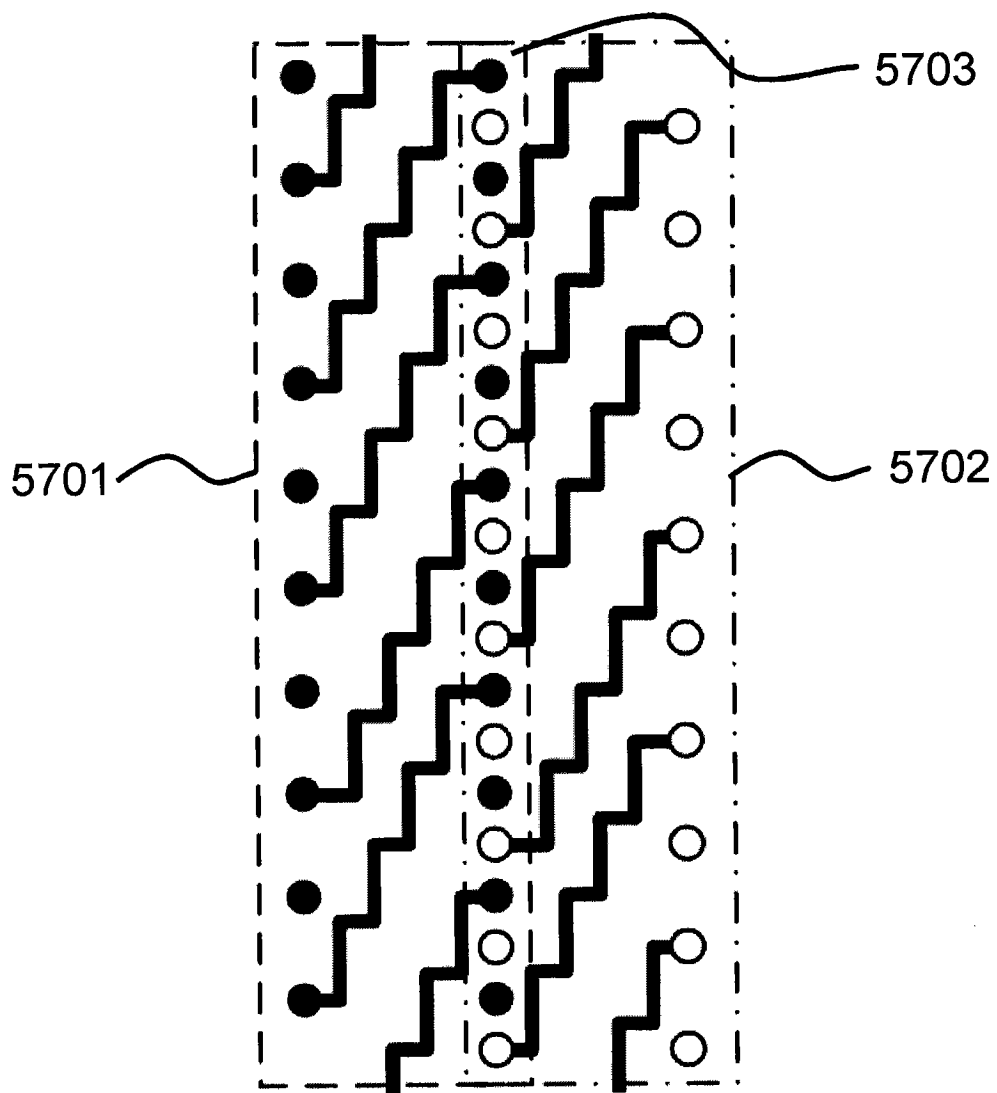


图 57

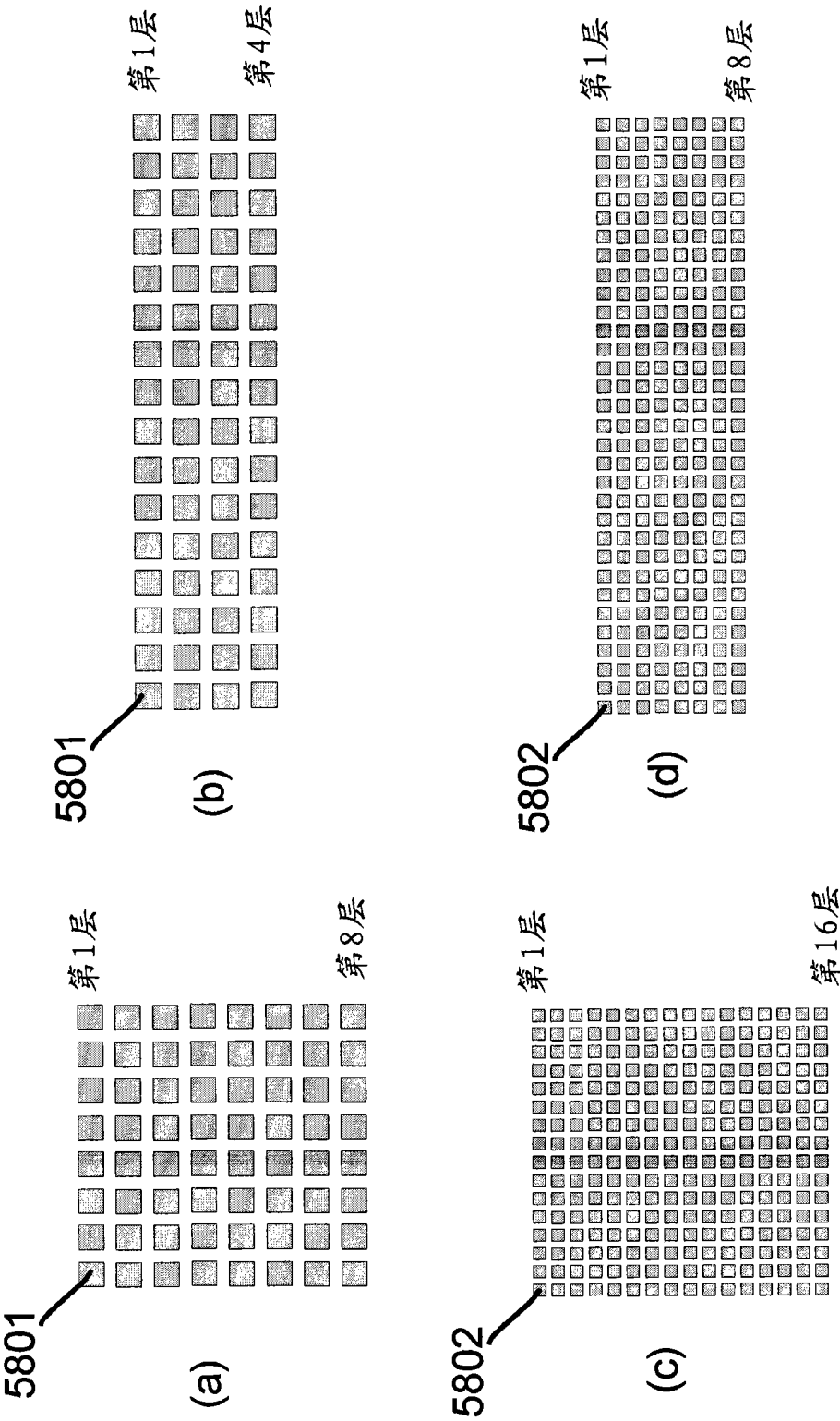


图 58

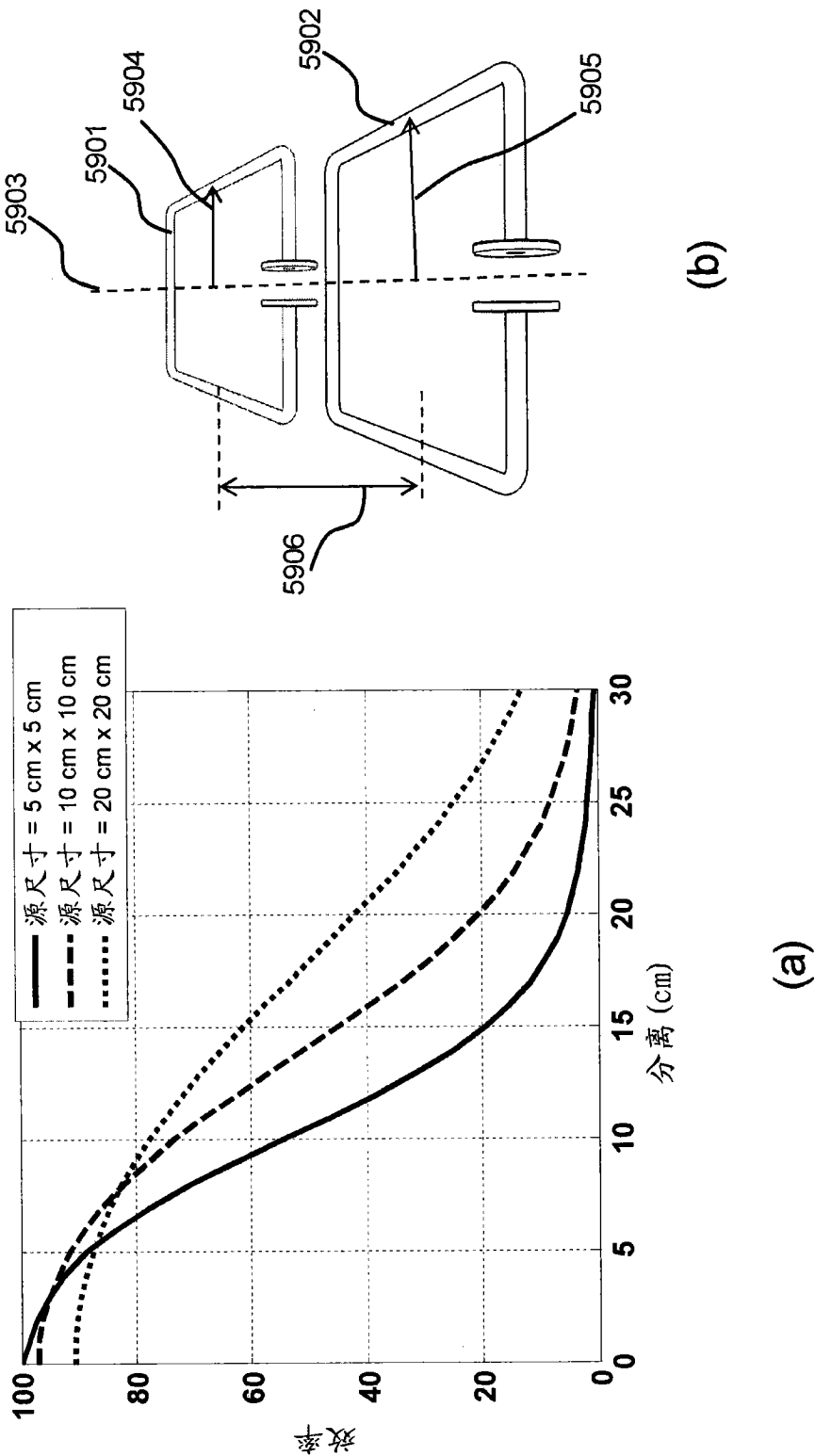


图 59

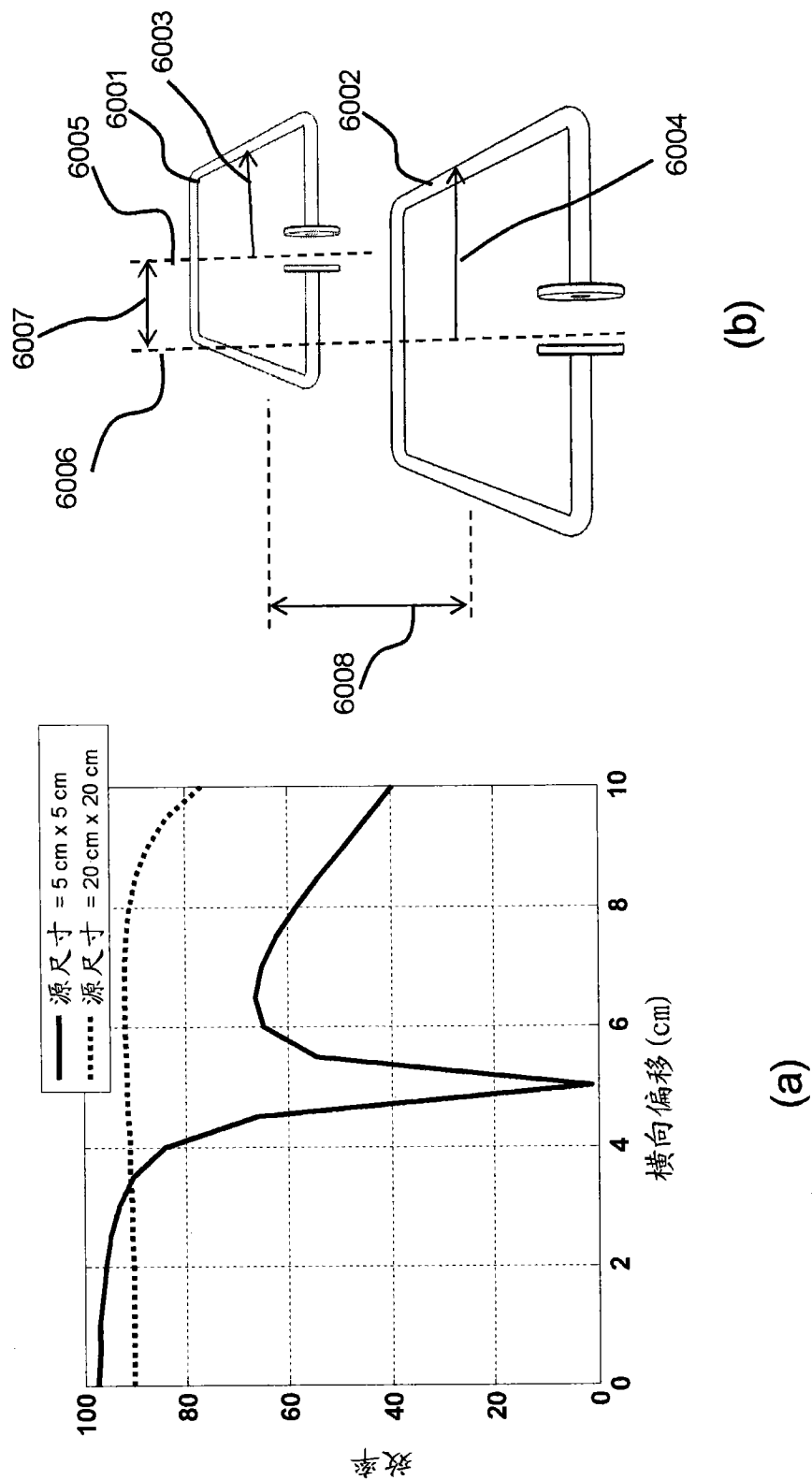


图 60

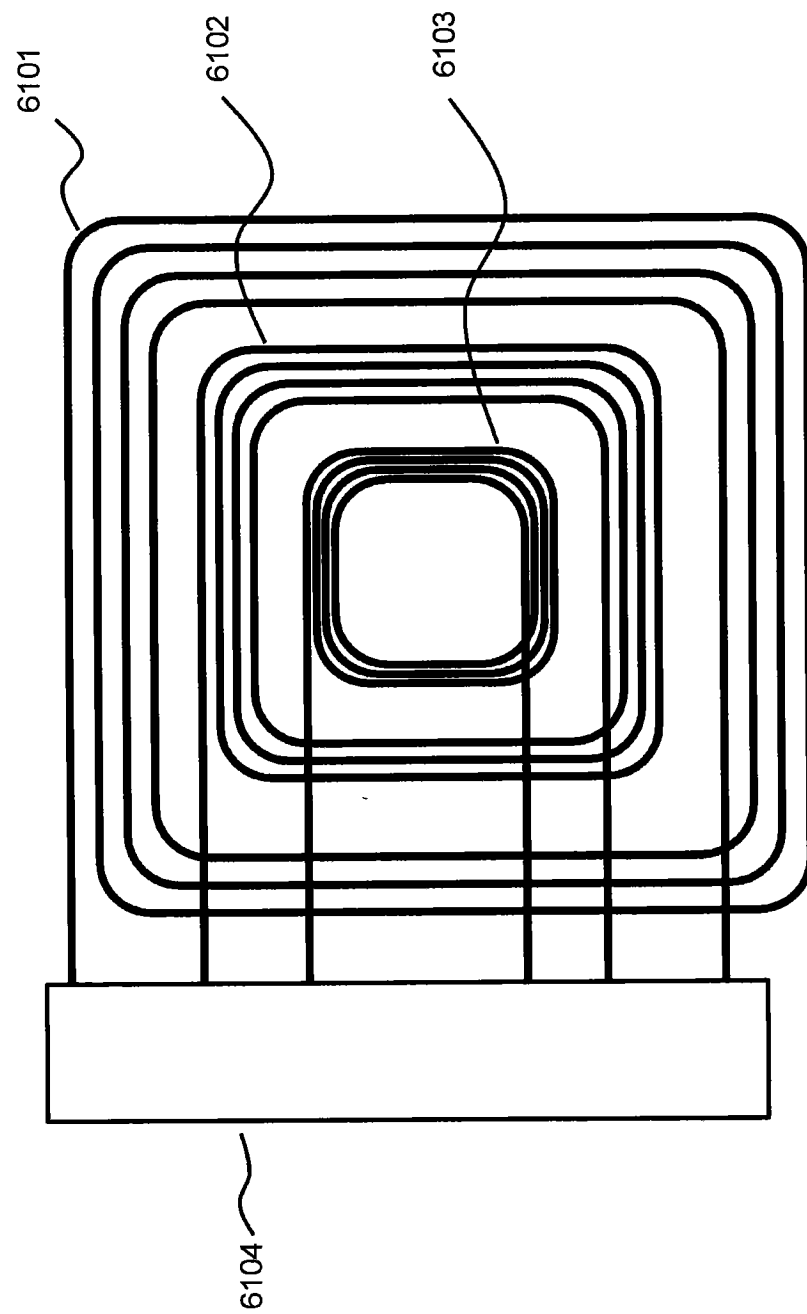


图 61

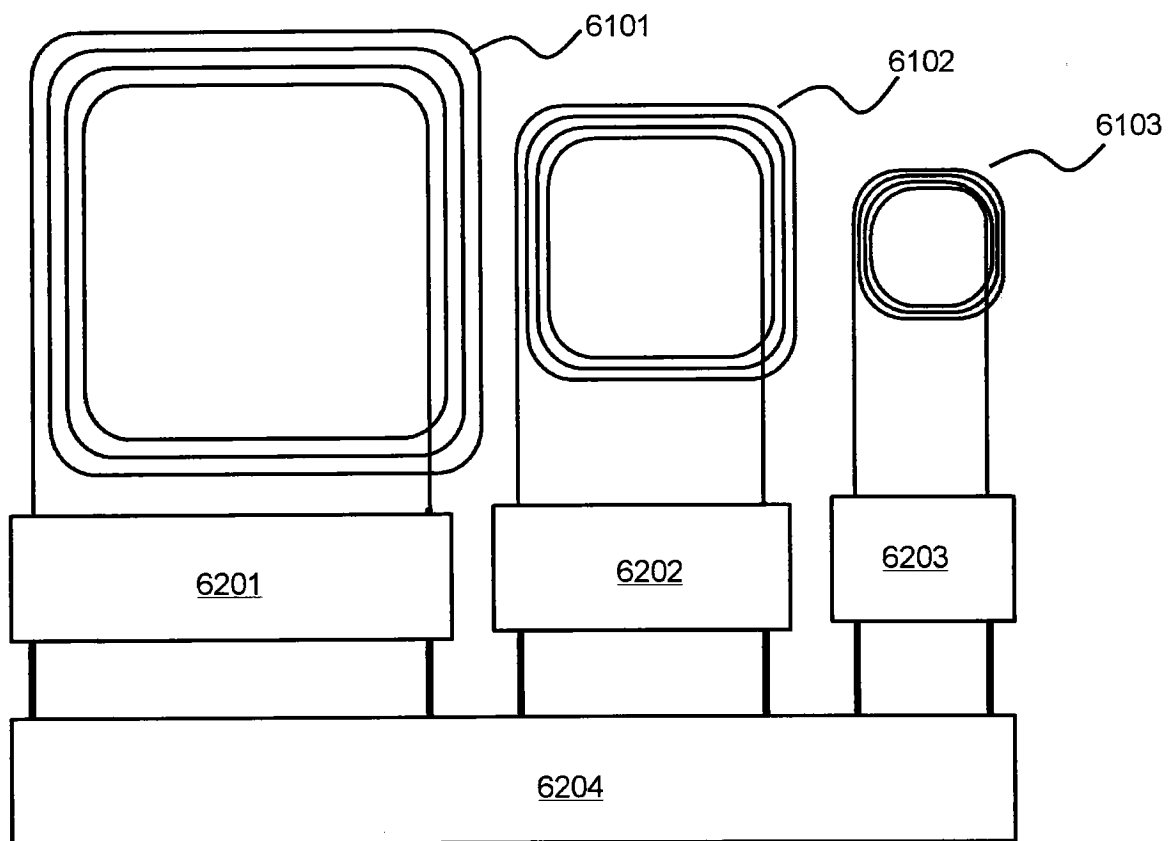


图 62

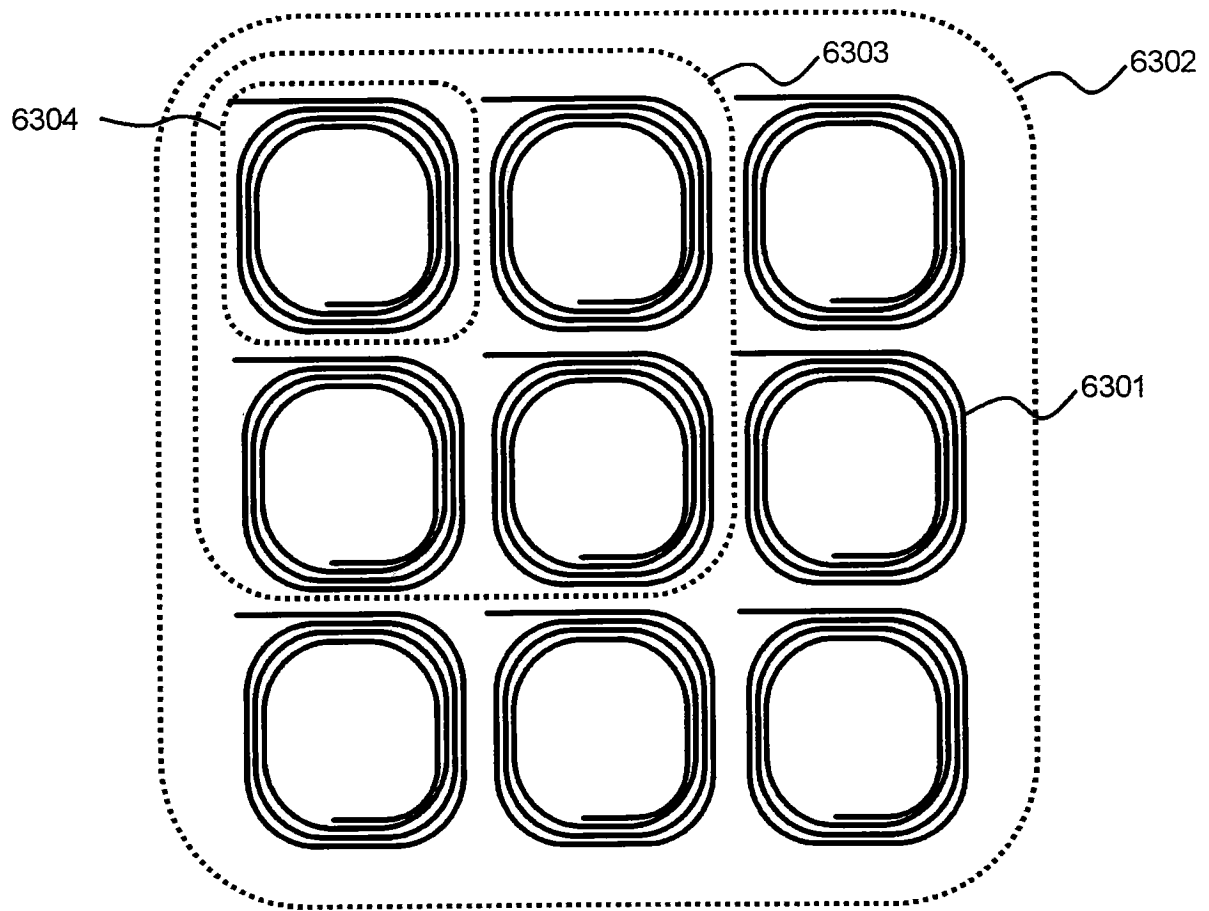


图 63

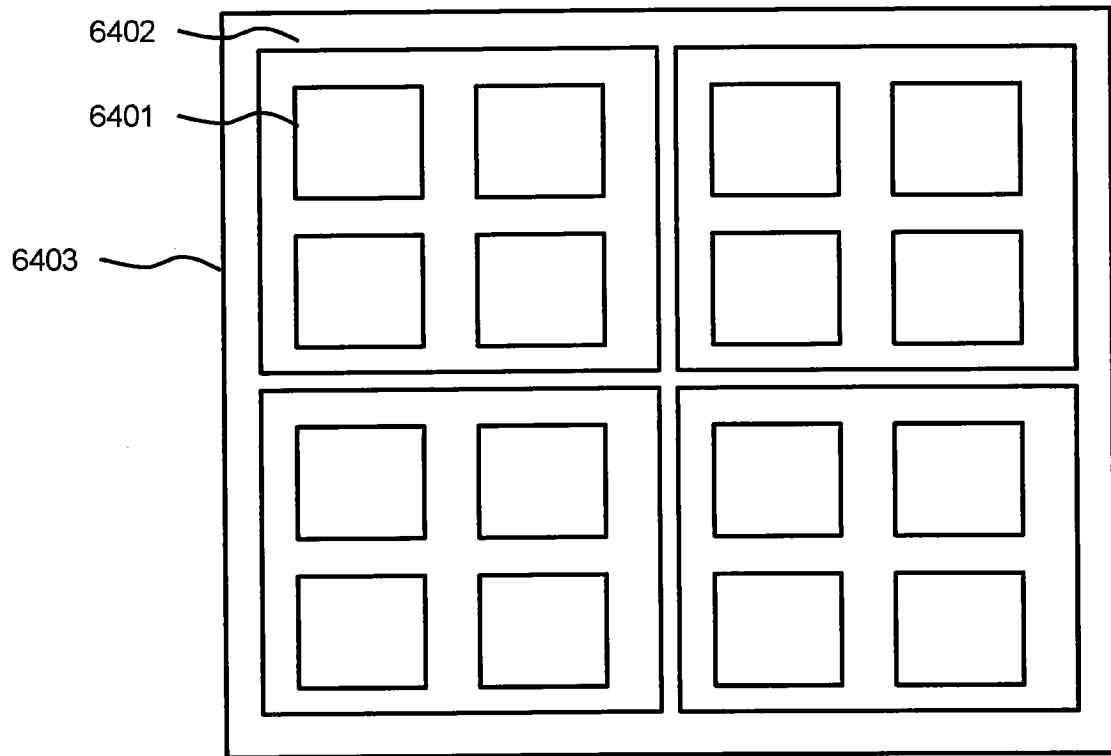


图 64

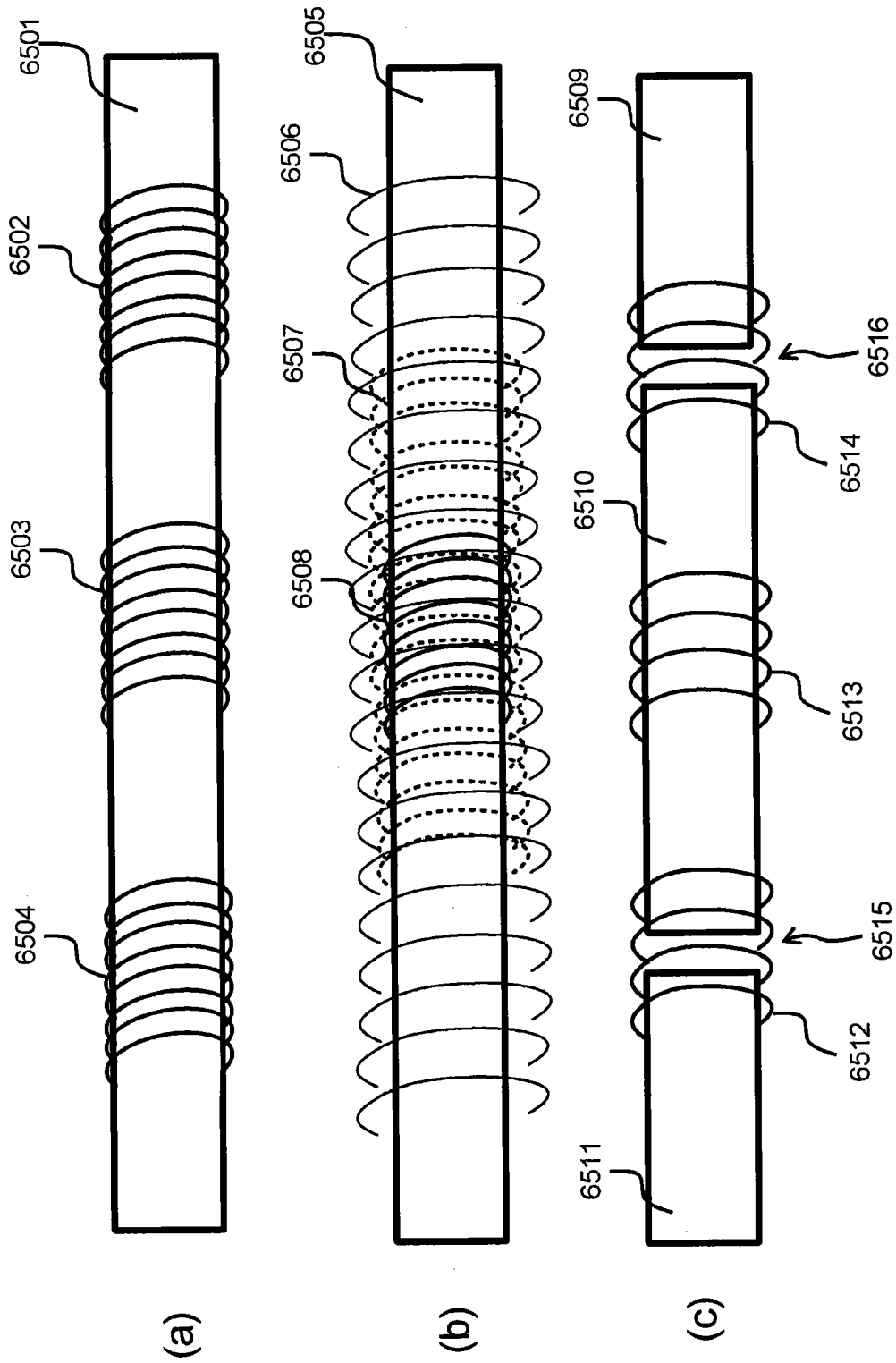


图 65

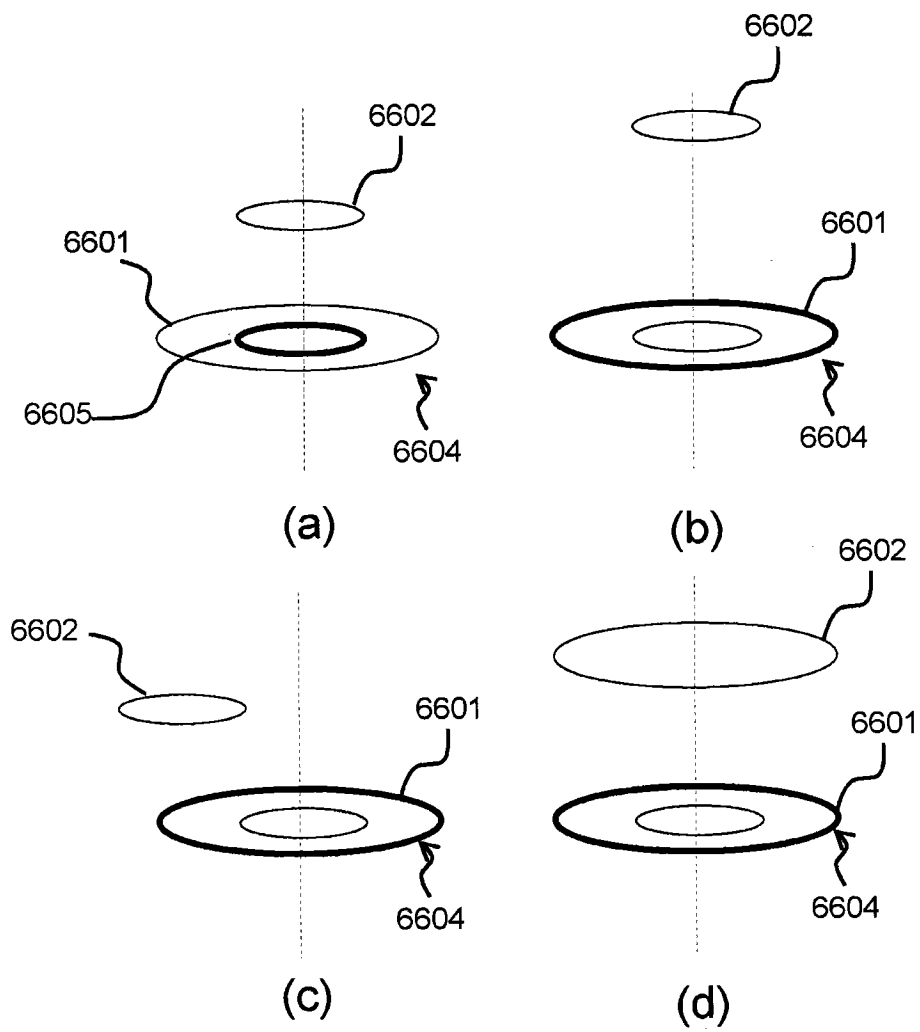


图 66

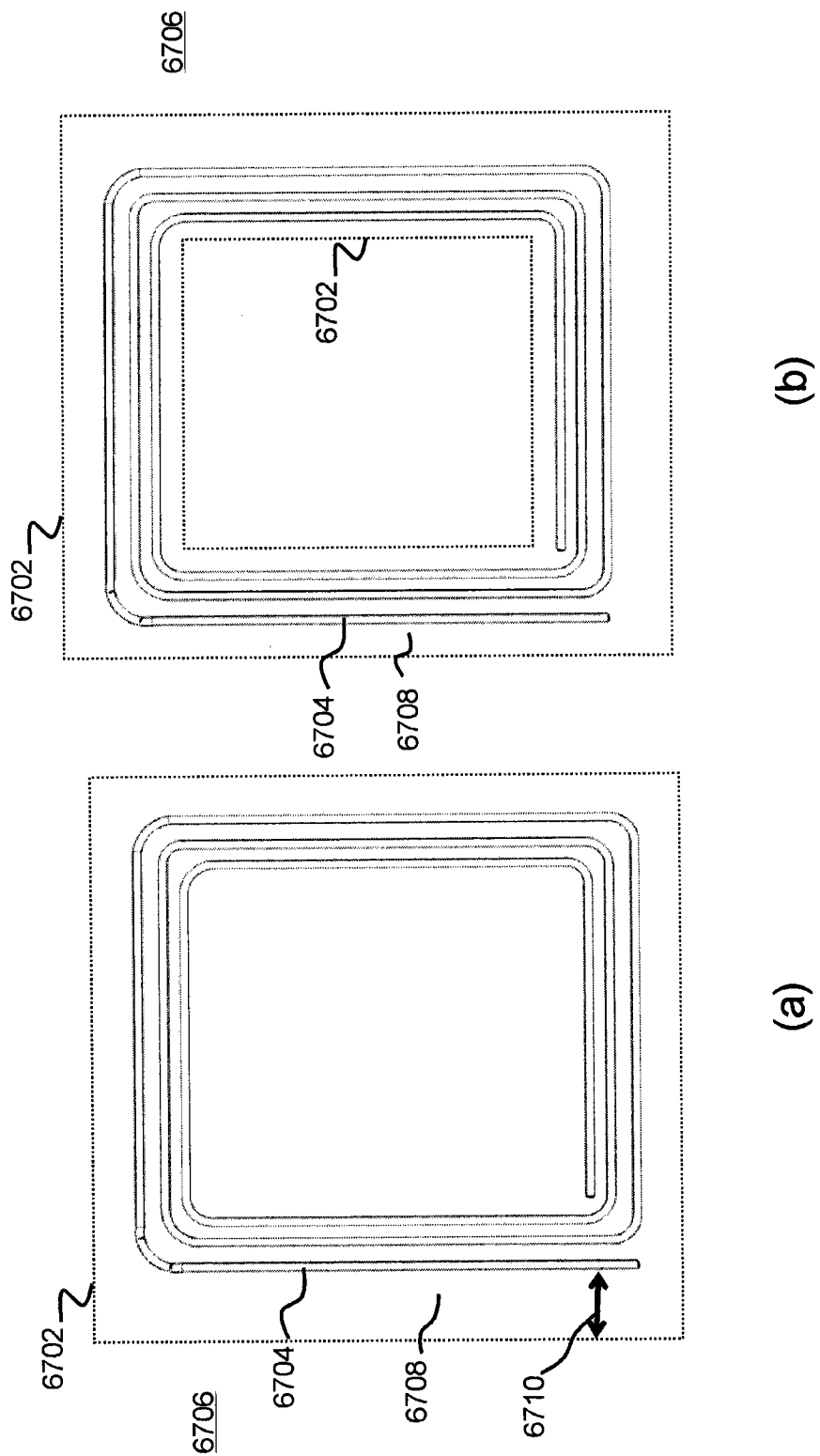


图 67

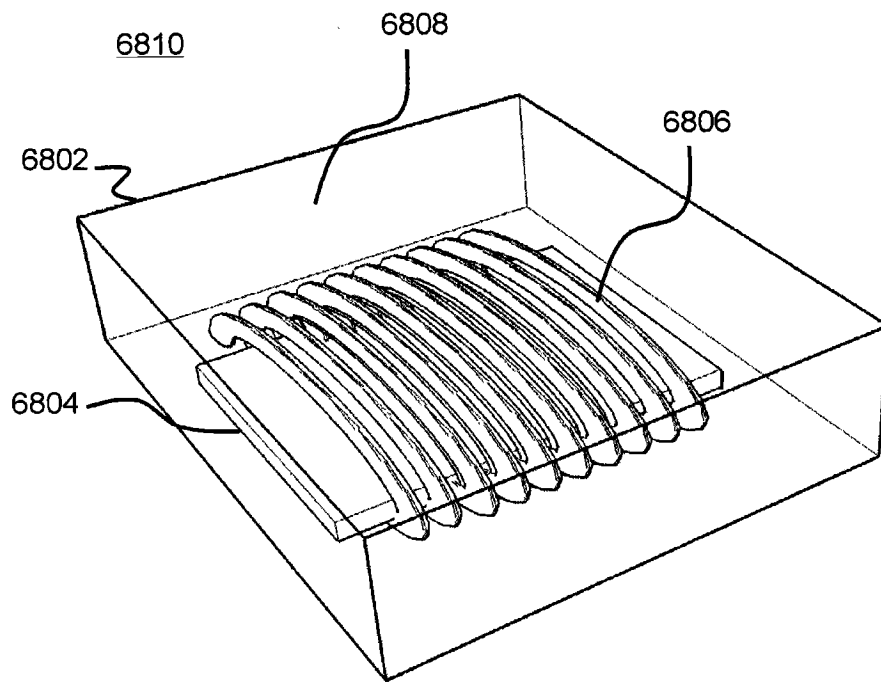


图 68

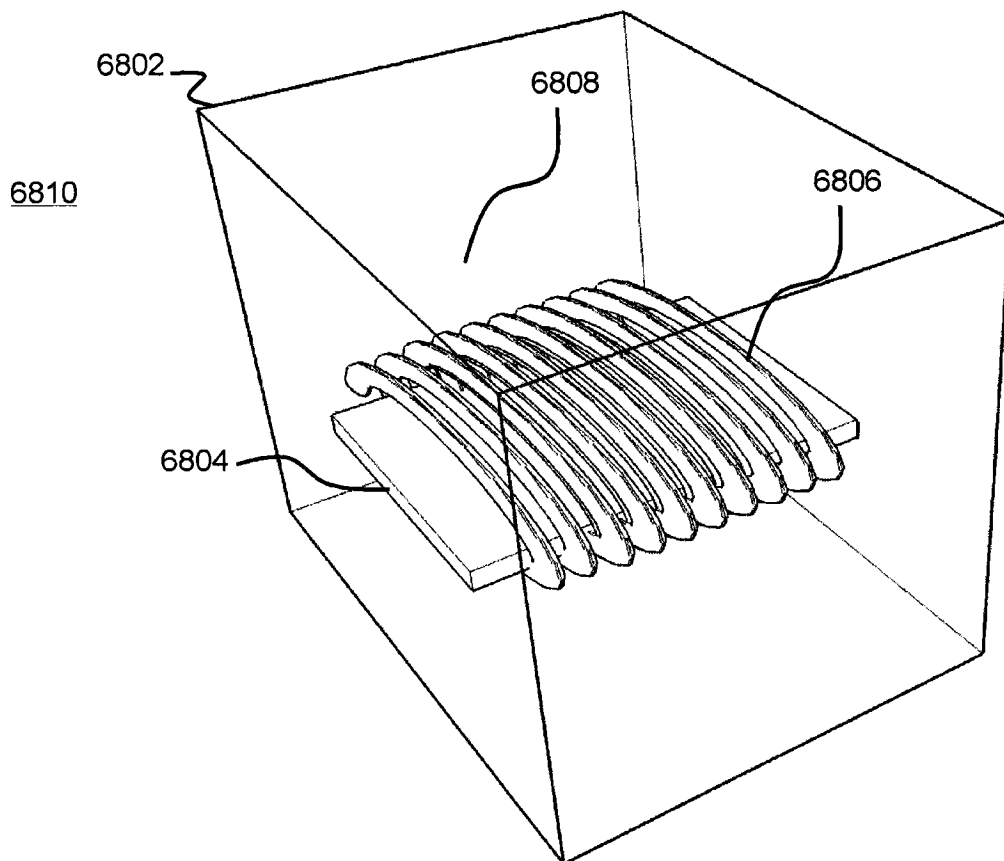


图 69

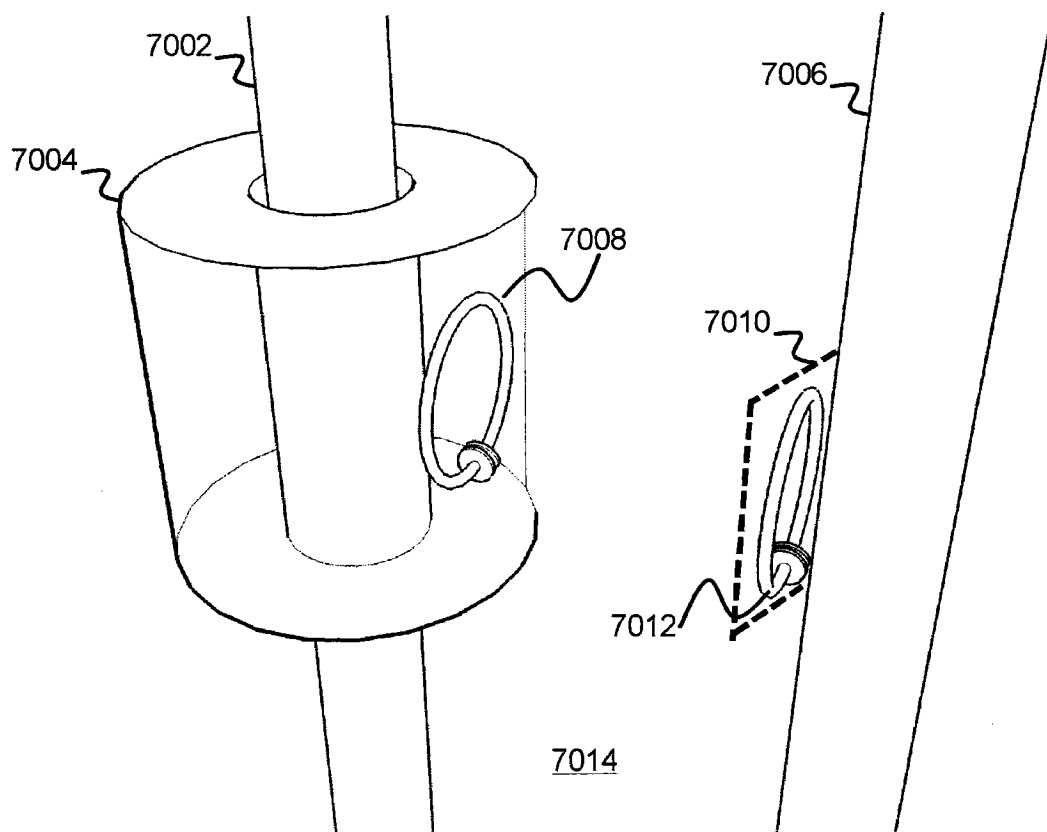


图 70

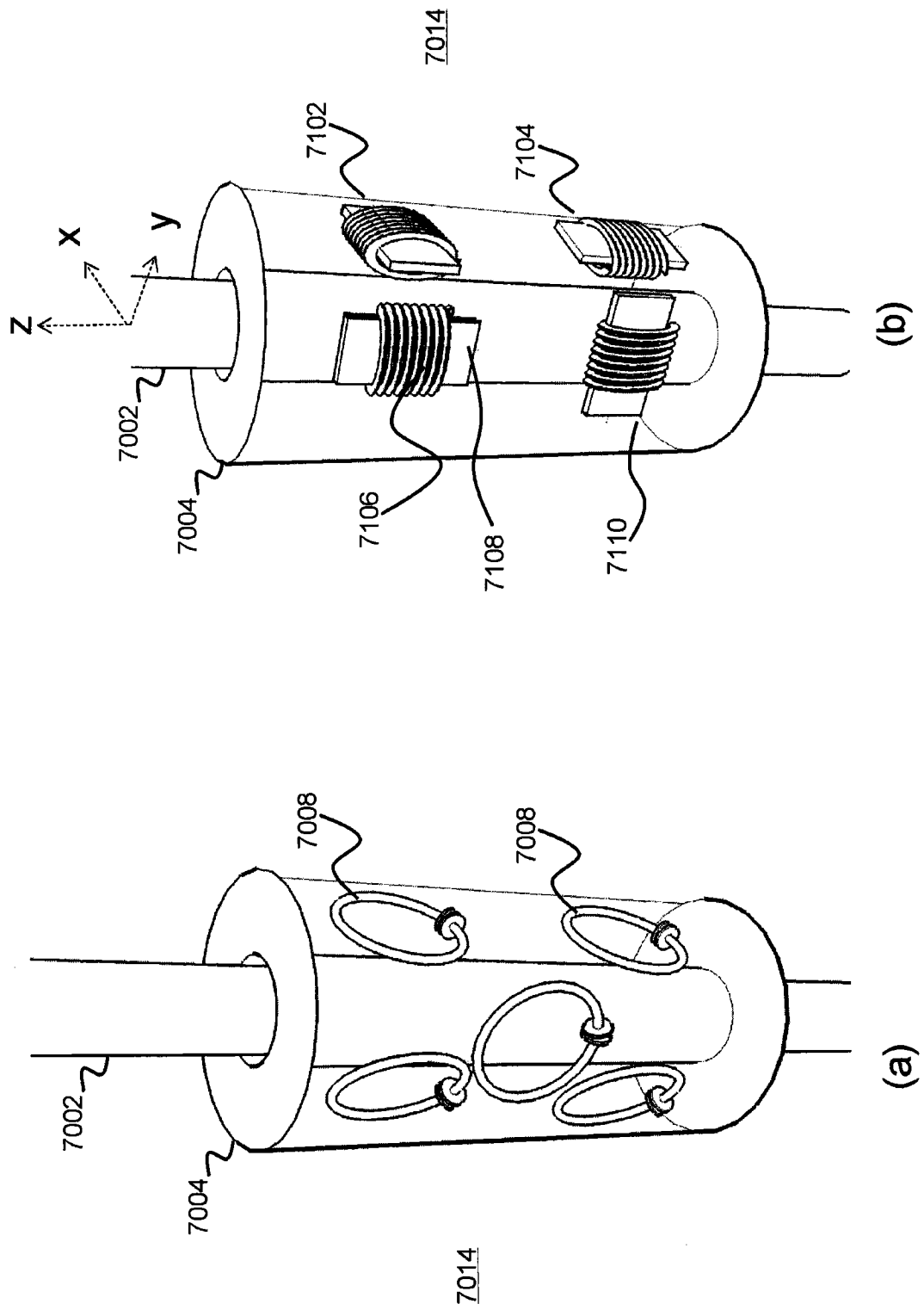


图 71

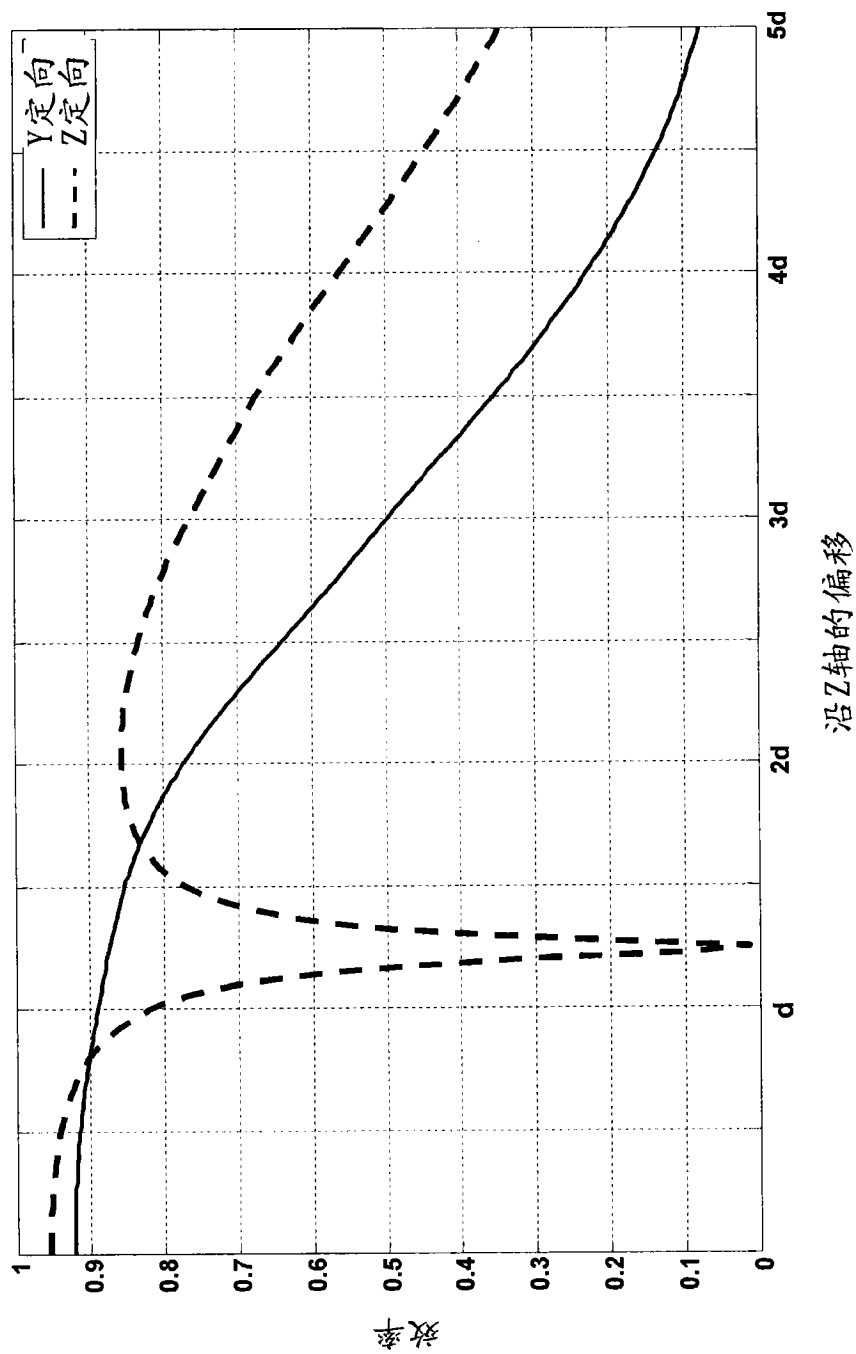


图 72

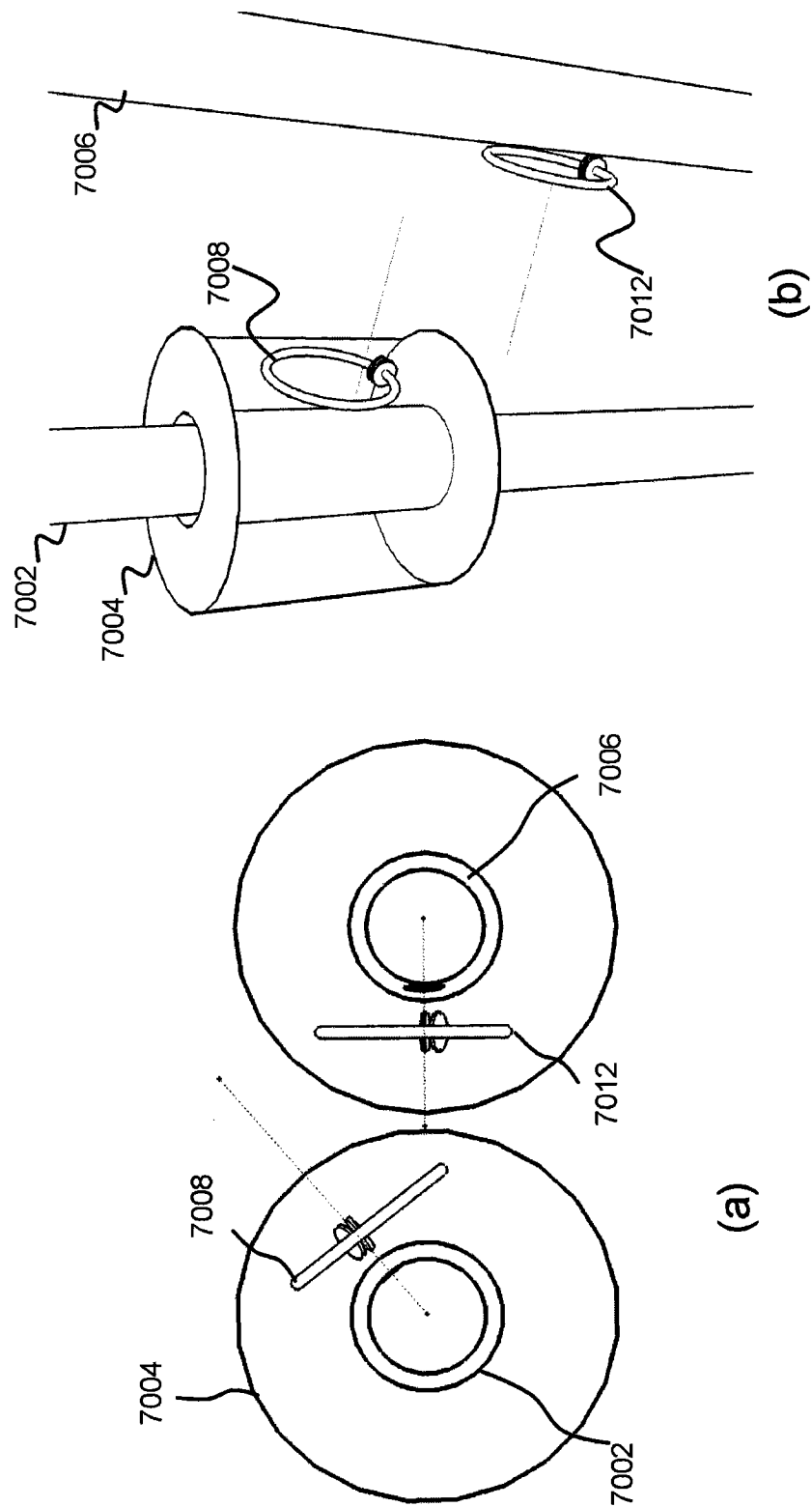


图 73