



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 107258046 B

(45)授权公告日 2020.07.17

(21)申请号 201580048080.0

(22)申请日 2015.07.08

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107258046 A

(43)申请公布日 2017.10.17

(30)优先权数据
62/022,133 2014.07.08 US
62/051,647 2014.09.17 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2017.03.07

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2015/039612 2015.07.08

(87)PCT国际申请的公布数据
W02016/007674 EN 2016.01.14

(73)专利权人 无线电力公司
地址 美国马萨诸塞州

(72)发明人 A·B·科斯 G·莱斯图科伊
M·P·凯斯勒

(74)专利代理机构 北京林达刘知识产权代理事
务所(普通合伙) 11277
代理人 刘新宇

(51)Int.Cl.
H02J 50/12(2016.01)
H02J 7/02(2016.01)
B60L 53/12(2019.01)

(56)对比文件
US 2014111151 A1,2014.04.24,
CN 103208866 A,2013.07.17,
CN 102883525 A,2013.01.16,
CN 102640379 A,2012.08.15,
审查员 赵焯

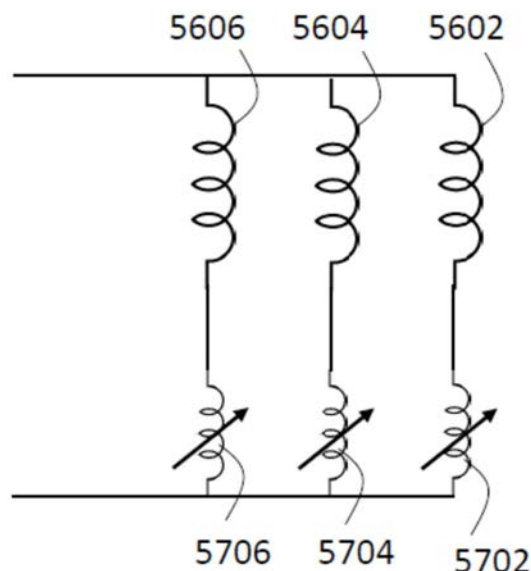
权利要求书3页 说明书29页 附图96页

(54)发明名称

无线电力传送系统中的谐振器均衡

(57)摘要

本公开的特征在于用于无线电力传送的系统,该系统包括特征在于具有至少两个绕组的线圈的谐振器以及具有电感值的至少一个电感器,其中,该至少一个电感器串联连接到至少一个绕组,并且所述电感值被选择为使得在线圈在系统的工作期间承载电流时,该至少一个电感器维持该至少两个绕组之间的电流分布,使得对于该至少两个绕组中的各绕组而言,绕组中的实际电流与绕组的目标电流相差10%或更小。



1. 一种用于无线电力传送的系统,包括:

谐振器,其包括具有至少两个绕组的线圈,所述至少两个绕组中的各绕组包括由导电材料形成并在平面中延伸的多个环,其中所述至少两个绕组中的各绕组的相应部分平行取向,所述至少两个绕组中的至少一个绕组的长度与所述至少两个绕组中的另一绕组的长度不同,并且所述至少两个绕组并联电气连接;

具有电感值的至少一个可调电感器,其中所述至少一个可调电感器串联连接到所述至少两个绕组中的至少一个绕组;以及

电子处理器,其连接到所述谐振器并连接到所述至少一个可调电感器,并且所述电子处理器被配置为在系统的工作期间,基于所述至少两个绕组之间的耦合来确定所述至少两个绕组中的一个或多个绕组的电感调整,并调整所述至少一个可调电感器使得在所述线圈在所述系统的工作期间承载电流时,所述至少一个可调电感器维持所述至少两个绕组之间的电流分布,使得对于所述至少两个绕组中的各绕组而言,该绕组中的实际电流与该绕组的目标电流相差10%或更小。

2. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述至少两个绕组中的各绕组的相应部分沿着所述至少两个绕组中的至少一个绕组的长度的至少80%平行取向。

3. 根据权利要求1所述的系统,其中,各绕组的环是交错的。

4. 根据权利要求1所述的系统,其中,各绕组的环是同心的并且形成螺旋。

5. 根据权利要求1所述的系统,其中,所述电子处理器被配置为基于所述至少两个绕组的目标电流来控制各绕组中的电流。

6. 根据权利要求5所述的系统,其中,所述电子处理器被配置为基于与所述目标电流相关的优值来确定所述电感调整。

7. 根据权利要求6所述的系统,其中,所述电子处理器被配置成:

i. 对于各绕组:

基于该绕组与所有其它绕组电气断开时该绕组的电感的测量值来确定该绕组的自感值,以及

确定该绕组的多个互感值,其中各互感值基于该绕组与另一绕组电气断开时该绕组的电感的测量值;

ii. 基于所述自感值和所述互感值来确定各绕组的目标电流;以及

iii. 基于各绕组的目标电流来确定所述电感调整。

8. 根据权利要求7所述的系统,其中,所述电子处理器被配置为通过以下操作来确定所述目标电流:

基于各绕组的所述自感值和所述互感值来构建电感矩阵;

通过将包括与由于所述至少一个可调电感器而引起的各绕组的电感的变化相对应的元素的电感修改矩阵与所述电感矩阵相加来计算调整后的电感矩阵;

计算调整后的电感矩阵的逆矩阵;以及

基于所述逆矩阵来确定所述目标电流。

9. 根据权利要求8所述的系统,其中,所述电感修改矩阵是对角矩阵,并且所述电感修改矩阵的对角元素是连接到绕组的所述至少一个可调电感器的各构件的电感值。

10. 一种用于无线电力传送的方法,包括以下步骤:

基于至少两个绕组之间的耦合确定用于无线电力传送的谐振器线圈的所述至少两个绕组中的一个或多个绕组的电感调整,其中,所述至少两个绕组中的各绕组包括由导电材料形成并在平面中延伸的多个环,所述至少两个绕组中的各绕组的相应部分平行取向,所述至少两个绕组中的至少一个绕组的长度与所述至少两个绕组中的另一绕组的长度不同,并且所述至少两个绕组并联电气连接,串联连接到所述至少两个绕组中的至少一个绕组的至少一个电感器具有可调电感值;

调整具有可调电感值的所述至少一个电感器;

控制所述至少两个绕组中的各绕组中的电流以维持所述至少两个绕组之间的电流分布,使得对于所述至少两个绕组中的各绕组而言,该绕组中的实际电流与该绕组的目标电流相差10%或更小。

11. 根据权利要求10所述的方法,其中,所述至少两个绕组中的各绕组的相应部分沿着所述至少两个绕组中的至少一个绕组的长度的至少80%平行取向。

12. 根据权利要求10所述的方法,其中,各绕组的环是交错的。

13. 根据权利要求10所述的方法,其中,各绕组的环是同心的并且形成螺旋。

14. 根据权利要求10所述的方法,其中,还包括:

基于与所述目标电流相关的优值来确定所述电感调整。

15. 根据权利要求14所述的方法,其中,还包括通过以下操作来确定所述电感调整:

i. 对于各绕组:

基于该绕组与所有其它绕组电气断开时该绕组的电感的测量值来确定该绕组的自感值,以及

确定该绕组的多个互感值,其中各互感值基于该绕组与另一绕组电气断开时该绕组的电感的测量值;

ii. 基于所述自感值和所述互感值来确定各绕组的目标电流;以及

iii. 基于各绕组的目标电流来确定所述电感调整。

16. 根据权利要求15所述的方法,还包括通过以下操作来确定所述目标电流:

基于各绕组的所述自感值和所述互感值来构建电感矩阵;

通过将包括与由于所述至少一个电感器而引起的各绕组的电感的变化的变化相对应的元素电感修改矩阵与所述电感矩阵相加来计算调整后的电感矩阵;

计算调整后的电感矩阵的逆矩阵;以及

基于所述逆矩阵来确定所述目标电流。

17. 根据权利要求16所述的方法,其中,所述电感修改矩阵是对角矩阵,并且所述电感修改矩阵的对角元素是连接到绕组的所述至少一个电感器的各构件的电感值。

18. 一种用于无线电力传送的谐振器线圈,所述线圈包括:

由磁性材料形成的构件;以及

并联电气连接的三个绕组,所述三个绕组中的各绕组包括由导电材料形成的多个环和串联连接的电感元件,所述电感元件被配置为接收来自电子处理器的信号以在零和正的电感值之间调整所述电感元件的电感,从而调整所述绕组和所述电感元件的组合电感,

其中,所述三个绕组中的各绕组的环是交错的,使得所述三个绕组中的各绕组的相应部分沿着所述三个绕组中的至少一个绕组的长度的至少80%平行取向,以及

所述三个绕组中的各绕组在沿着该绕组的长度的一个或多个点处与至少一个其它绕组在空间上重叠。

19. 根据权利要求18所述的线圈, 其中, 各绕组的环在平面中取向。

20. 根据权利要求19所述的线圈, 其中, 所有绕组的环在共同的平面中取向。

21. 根据权利要求18所述的线圈, 其中, 各绕组的环是同心的并且形成螺旋。

22. 根据权利要求21所述的线圈, 其中, 所有绕组的环形成同心螺旋的环。

23. 根据权利要求18所述的线圈, 其中, 所述三个绕组中的各绕组在沿着该绕组的长度的一个或多个点处与其它绕组中的各绕组在空间上重叠。

24. 根据权利要求18所述的线圈, 其中, 对于各绕组而言, 该绕组与其它绕组中的至少一些绕组重叠的点沿着该绕组的圆周均等地间隔开。

25. 根据权利要求23所述的线圈, 其中, 还包括附加的绕组使得所述线圈中的绕组的总数为 n 个, 其中所述 n 个绕组中的各绕组沿着该绕组的长度与 $n-1$ 个其它绕组中的各绕组在空间上重叠, 以及所述 n 个绕组中的各绕组包括与其它绕组的 $n-1$ 个重叠点, 各点对应于该绕组与所述其它绕组中的不同绕组的重叠。

26. 根据权利要求18所述的线圈, 其中, 还包括附加的绕组使得所述线圈中的绕组的总数为 n 个, 其中所述 n 个绕组中的至少一个绕组包括与其它绕组的多于 $n-1$ 个重叠点, 使得所述至少一个绕组与 $n-1$ 个其它绕组中的至少一些绕组在空间上重叠多于一次。

27. 根据权利要求18所述的线圈, 其中, 还包括附加的绕组使得所述线圈中的绕组的总数为 n 个, 其中所述 n 个绕组中的至少一个绕组包括与其它绕组的少于 $n-1$ 个重叠点, 使得所述至少一个绕组并非与所有 $n-1$ 个其它绕组在空间上重叠。

无线电力传送系统中的谐振器均衡

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求2014年7月8日提交的美国临时专利申请第62/022,133号和2014年9月17日提交的美国临时专利申请第62/051,647号的优先权,其全部内容通过引用包含于此。

技术领域

[0003] 本公开涉及无线电力传送系统和方法。

背景技术

[0004] 可以使用诸如辐射(远场)技术等的各种已知技术将能量从电源传送到接收装置。例如,使用低方向性天线的辐射技术可以传送所供给的辐射电力的一小部分,即,在用于接收的接收装置的方向上并与该接收装置重叠的那部分。在该示例中,大部分能量在除了接收装置的方向之外的方向上被辐射,并且通常所传送的能量不足以对接收装置供电或充电。在辐射技术的另一示例中,使用定向天线来限制并优先地将辐射能量引向接收装置。在这种情况下,使用不间断的视线和潜在的复杂的跟踪和转向机构。

[0005] 另一方式是使用非辐射(近场)技术。例如,已知为传统感应方案的技术并不(有意地)辐射电力,而是使用经过初级线圈的振荡电流来产生在近旁的接收或次级线圈中感应电流的振荡磁近场。传统的感应方案可以针对非常短的距离传递中等到大量的电力。在这些方案中,电源和接收装置之间的偏移容限非常小。电变压器和接近型充电器使用这些传统的感应方案。

发明内容

[0006] 通常,在第一方面,本公开特征在于一种用于无线电力传送的系统,该系统包括:谐振器,其包括具有至少两个绕组的线圈,所述至少两个绕组中的各绕组特征在于包括由导电材料形成并在平面中延伸的多个环,其中所述至少两个绕组中的各绕组的相应部分平行取向,所述至少两个绕组中的至少一个绕组的长度与所述至少两个绕组中的另一绕组的长度不同,并且所述至少两个绕组并联电气连接;以及具有电感值的至少一个电感器,其中所述至少一个电感器串联连接到所述至少两个绕组中的至少一个绕组,其中,所述电感值被选择为使得在所述线圈在所述系统的工作期间承载电流时,所述至少一个电感器维持所述至少两个绕组之间的电流分布,使得对于所述至少两个绕组中的各绕组而言,该绕组中的实际电流与该绕组的目标电流相差10%或更小。

[0007] 该系统的实施例包括以下特征中的任意一个或多个。

[0008] 所述至少一个电感器可以包括可调电感值。所述至少两个绕组中的各绕组的相应部分可以沿着所述至少两个绕组中的至少一个绕组的长度的至少80%平行取向。各绕组的环可以是交错的。各绕组的环可以是同心的并且形成螺旋。

[0009] 该系统还可以包括电子处理器,所述电子处理器耦合到所述至少两个绕组,并且被配置为基于所述至少两个绕组的目标电流来控制各绕组中的电流。所述电子处理器可以

被配置为通过以下操作来控制各绕组中的电流：基于与所述目标电流相关的优值来确定所述至少一个电感器的目标电感值；以及调整所述至少一个电感器的电感值以匹配所述目标电感值。所述电子处理器可以被配置成通过以下操作来确定所述目标电感值：(i) 对于各绕组：基于该绕组与所有其它绕组电气断开时该绕组的电感的测量值来确定该绕组的自感值，以及确定该绕组的多个互感值，其中各互感值基于该绕组与另一绕组电气断开时该绕组的电感的测量值；(ii) 基于所述自感值和所述互感值来确定各绕组的目标电流；以及(iii) 基于各绕组的目标电流来确定目标电感值。所述电子处理器可以被配置为通过以下操作来确定所述目标电流：基于各绕组的自感值和互感值来构建电感矩阵；通过将包括与由于所述至少一个电感器而引起的各绕组的电感的变化相对应的元素电感修改矩阵与所述电感矩阵相加来计算调整后的电感矩阵；计算调整后的电感矩阵的逆矩阵；以及基于所述逆矩阵来确定所述目标电流。所述电感修改矩阵可以是对角矩阵，并且所述电感修改矩阵的对角元素可以是连接到绕组的所述至少一个电感器的各构件的电感值。

[0010] 在另一方面，本公开特征在于一种方法，所述方法包括以下步骤：控制用于无线电力传送的谐振器线圈的至少两个绕组各自中的电流，其中，所述至少两个绕组中的各绕组包括由导电材料形成并在平面中延伸的多个环，所述至少两个绕组中的各绕组平行取向，所述至少两个绕组中的至少一个绕组的长度与所述至少两个绕组中的另一绕组的长度不同，并且所述至少两个绕组并联电气连接，具有电感值的至少一个电感器串联连接到所述至少两个绕组中的至少一个绕组；以及在所述线圈承载电流时，维持所述至少两个绕组之间的电流分布，使得对于所述至少两个绕组中的各绕组而言，该绕组中的实际电流与该绕组的目标电流相差10%或更小。

[0011] 所述方法的实施例可以包括以下特征中的任意一个或多个。

[0012] 所述至少两个绕组中的各绕组的相应部分可以沿着所述至少两个绕组中的至少一个绕组的长度的至少80%平行取向。各绕组的环可以是交错的。各绕组的环可以是同心的并且形成螺旋。

[0013] 所述方法还可以包括通过以下操作来控制各绕组中的电流以维持所述电流分布：基于与所述目标电流相关的优值来确定所述至少一个电感器的目标电感值；以及调整所述至少一个电感器的电感值以匹配所述目标电感值。所述方法还可以包括通过以下操作来确定所述目标电感值：(i) 对于各绕组：基于该绕组与所有其它绕组电气断开时该绕组的电感的测量值来确定该绕组的自感值，以及确定该绕组的多个互感值，其中各互感值基于该绕组与另一绕组电气断开时该绕组的电感的测量值；(ii) 基于所述自感值和所述互感值来确定各绕组的目标电流；以及(iii) 基于各绕组的目标电流来确定目标电感值。

[0014] 所述方法还可以包括通过以下操作来确定所述目标电流：基于各绕组的自感值和互感值来构建电感矩阵；通过将包括与由于所述至少一个电感器而引起的各绕组的电感的变化相对应的元素电感修改矩阵与所述电感矩阵相加来计算调整后的电感矩阵；计算调整后的电感矩阵的逆矩阵；以及基于所述逆矩阵来确定所述目标电流。所述电感修改矩阵可以是对角矩阵，并且所述电感修改矩阵的对角元素可以是连接到绕组的所述至少一个电感器的各构件的电感值。

[0015] 在又一方面，本公开特征在于一种用于无线电力传送的谐振器线圈，所述线圈包括：由磁性材料形成的构件；以及并联电气连接的至少两个绕组，所述至少两个绕组中的各

绕组包括由导电材料形成的多个环,其中,所述至少两个绕组中的各绕组的环是交错的,使得所述至少两个绕组中的各绕组的相应部分沿着所述至少两个绕组中的至少一个绕组的长度的至少80%平行取向,以及所述至少两个绕组中的各绕组在沿着该绕组的长度的一个或多个点处与至少一个其它绕组在空间上重叠。

[0016] 所述线圈的实施例可以包括以下特征中的任意一个或多个。

[0017] 各绕组的环可以在平面中取向。所有绕组的环可以在共同的平面中取向。各绕组的环可以是同心的并且形成螺旋。所有绕组的环可以形成同心螺旋的环。

[0018] 所述线圈还可以包括具有可调电感的至少一个电感器,所述至少一个电感器串联连接到所述至少两个绕组中的至少一个绕组。所述线圈还可以包括具有可调电感的至少一个电感器,所述至少一个电感器串联连接到所述至少两个绕组中的各绕组。所述至少两个绕组中的各绕组可以在沿着该绕组的长度的一个或多个点处与其它绕组中的各绕组在空间上重叠。对于各绕组而言,该绕组与其它绕组中的至少一些绕组重叠的点可以沿着该绕组的圆周均等地间隔开。

[0019] 所述至少两个绕组可以包括 n 个绕组,所述 n 个绕组中的各绕组可以沿着该绕组的长度与 $n-1$ 个其它绕组中的各绕组在空间上重叠,所述 n 个绕组中的各绕组可以包括与其它绕组的 $n-1$ 个重叠点,各点对应于该绕组与所述其它绕组中的不同绕组的重叠。数量 n 可以大于2(例如,大于3)。

[0020] 所述至少两个绕组可以包括 n 个绕组,所述 n 个绕组中的至少一个绕组可以包括与其它绕组的多于 $n-1$ 个重叠点,使得所述至少一个绕组与 $n-1$ 个其它绕组中的至少一些绕组在空间上重叠多于一次。所述至少两个绕组可以包括 n 个绕组,以及所述 n 个绕组中的至少一个绕组可以包括与其它绕组的少于 $n-1$ 个重叠点,使得所述至少一个绕组并非与所有 $n-1$ 个其它绕组在空间上重叠。

[0021] 所述系统、方法和线圈的实施例还可以包括在此公开的任何其它特征,包括适当地以任何组合而结合不同实施例公开的特征。

[0022] 除非另有定义,否则这里所使用的所有技术和科学术语具有与本公开所属领域的普通技术人员通常理解的含义相同的含义。在与所提及的或者通过引用包含于此的出版物、专利申请、专利和其它参考文献冲突的情况下,将以本公开(包括定义)为准。在不背离本公开的范围的情况下,可以单独或组合地使用上述特征中的任何特征。根据以下详细描述和附图,这里所公开的系统和方法的其它特征、目的和优点将是明显的。

附图说明

[0023] 图1A是无线电力传送系统的实施例的示意图。

[0024] 图1B是无线电力传送所用的谐振器的示意图。

[0025] 图2A-2C是一体化到车辆中的无线电力传送系统的示意图。

[0026] 图3A和3B是示出磁性材料附近的源谐振器线圈的示意图。

[0027] 图4是源谐振器的示意图。

[0028] 图5A和5B是被配置为无线地接收电力的装置的示意图。

[0029] 图6A和6B是示出针对作为谐振器的相对位移的函数的源谐振器和接收器谐振器之间的耦合 k 的测量的图。

- [0030] 图7A和7B是示出针对作为源谐振器和接收器谐振器之间的相对位移的函数的优值 (figure-of-merit) 的图。
- [0031] 图8A和8B是示出针对作为源谐振器和接收器谐振器之间的相对位移的函数的耦合 k 的测量的图。
- [0032] 图9A和9B是示出作为源谐振器和接收器谐振器之间的相对位移的函数的优值的图。
- [0033] 图10A和10B是示出针对作为谐振器的相对位移的函数的源谐振器和接收器谐振器之间的耦合 k 的测量的图。
- [0034] 图11A和11B是示出作为源谐振器和接收器谐振器之间的相对位移的函数的优值的图。
- [0035] 图12A和12B是示出针对作为谐振器的相对位移的函数的源谐振器和接收器谐振器之间的耦合 k 的测量的图。
- [0036] 图13A和13B是示出作为源谐振器和接收器谐振器之间的相对位移的函数的优值的图。
- [0037] 图14A和14B是示出针对作为谐振器的相对位移的函数的源谐振器和接收器谐振器之间的耦合 k 的测量的图。
- [0038] 图15A和15B是示出作为源谐振器和接收器谐振器之间的相对位移的函数的品质因数 (quality factor) 的图。
- [0039] 图16A和16B是示出作为源谐振器和接收器谐振器之间的相对位移的函数的优值的图。
- [0040] 图17A和17B是阻抗匹配网络的示意图。
- [0041] 图18A和18B是作为输出电压的函数的装置侧负载阻抗的图。
- [0042] 图19A和19B是作为输出电压的函数的放大器-电池效率的图。
- [0043] 图20A和20B是作为输出电压的函数的在源和装置中耗散的电力的图。
- [0044] 图21A和21B是跨阻抗匹配网络中的一个或多个电容器测量的电压的图。
- [0045] 图22A和22B是源谐振器的磁性构件中的磁场振幅的图。
- [0046] 图23是装置电子器件的实施例的示意性电路图。
- [0047] 图24A和24B是作为输出电压的函数的DC-DC升压转换比的图。
- [0048] 图25A和25B是作为输出电压的函数的放大器-转换器效率的图。
- [0049] 图26A和26B是作为输出电压的函数的在源中耗散的电力的图。
- [0050] 图27A和27B是跨源中的一个或多个匹配网络电容器测量的电压的图。
- [0051] 图28A和28B是附接到源的磁性构件中的磁场的图。
- [0052] 图29A-29D是示出无线电力传送所用的谐振器的实施例的示意图。
- [0053] 图30A是作为源谐振器线圈绕组长度的函数的耦合率的图。
- [0054] 图30B是作为源谐振器线圈绕组长度的函数的优值的图。
- [0055] 图31A~31D是谐振器线圈的示意图。
- [0056] 图32A是作为谐振器线圈绕组间隙-边缘距离和跨度的函数的耦合率的图。
- [0057] 图32B是作为谐振器线圈绕组间隙-边缘距离和跨度的函数的优值的图。
- [0058] 图33A和33B是作为谐振器之间的偏移的函数的源谐振器和装置谐振器之间的耦

合的曲线图。

[0059] 图34A和34B是作为源谐振器和装置谐振器之间的偏移的函数的无线电力传送系统的优值的图。

[0060] 图35A和35B是阻抗匹配网络的示意图。

[0061] 图36是示出不同阻抗匹配网络所用的电容器的最小数量的图。

[0062] 图37是阻抗匹配网络的示意图。

[0063] 图38是作为阻抗匹配的装置中的输出电压的函数的优值的图。

[0064] 图39是阻抗匹配的源谐振器和接收器谐振器中耗散的电力的图。

[0065] 图40是作为输出电压的函数的源谐振器和装置谐振器中的最大磁场的图。

[0066] 图41是源谐振器和接收器谐振器中的阻抗匹配网络的跨一个或多个电容器的电压的图。

[0067] 图42是示出磁性构件的实施例的示意图。

[0068] 图43是谐振器的实施例的图像。

[0069] 图44是固定到磁性构件的源谐振器线圈的实施例的图像。

[0070] 图45A是磁性构件的实施例的示意图。

[0071] 图45B是磁性构件的实施例的图像。

[0072] 图46是装置接收器谐振器线圈的实施例的图像。

[0073] 图47A是源谐振器线圈的实施例的示意图。

[0074] 图47B是装置谐振器线圈的实施例的示意图。

[0075] 图48A和48B是固定到磁性构件的源谐振器线圈的实施例的示意图。

[0076] 图49是具有并联绕组的谐振器线圈的实施例的图像。

[0077] 图50是源谐振器的磁性构件中的磁场的图。

[0078] 图51是源谐振器的磁性构件中的磁场的图。

[0079] 图52是源谐振器的磁性构件中的磁场的图。

[0080] 图53是装置谐振器的磁性构件中的磁场的图。

[0081] 图54A和54B是源谐振器上方的磁场的图。

[0082] 图55是对数标度的图54A和54B的磁场的图。

[0083] 图56是具有并联绕组的线圈的图像。

[0084] 图57A和57B是示出与线圈的并联绕组串联连接的电感器的示意图。

[0085] 图57C是与线圈的多个并联绕组之一串联连接的单个电感器的示意图。

[0086] 图58A和58B是示出针对线圈中的并联绕组的温度测量的图像。

[0087] 图59是示出作为时间的函数的在线圈的各并联绕组中承载的电流的图。

[0088] 图60A和60B是示出作为谐振器的相对位移的函数的源谐振器和接收器谐振器之间的耦合 k 的测量的图。

[0089] 图61A和61B是示出针对作为谐振器的相对位移的函数的源谐振器和接收器谐振器之间的耦合 k 的测量的图。

[0090] 图62是接收器谐振器的示意图。

[0091] 图63是作为屏蔽件的边长的函数的源谐振器和接收器谐振器的 Q 因子的图。

[0092] 图64A和64B是通过阻抗匹配网络中的整流器的二极管的峰值电流的图。

- [0093] 图65A和65B是通过阻抗匹配网络中的整流器的二极管的峰值电流的图。
- [0094] 图66A和66B是示出作为装置电感的函数的装置的阻抗匹配网络中的电容器的数量的图。
- [0095] 图67是阻抗匹配网络的示意图。
- [0096] 图68是作为阻抗匹配网络的输出电压的函数的优值的图。
- [0097] 图69是源的各种组件中的电力耗散的图。
- [0098] 图70是装置的各种组件中的电力耗散的图。
- [0099] 图71是作为输出电压的函数的磁性构件中的磁场的图。
- [0100] 图72是作为输出电压的函数的阻抗匹配网络中的电容器两端的电压的曲线图。
- [0101] 图73是作为输出电压的函数的通过源谐振器线圈和装置谐振器线圈的电流的图。
- [0102] 图74是包括线圈的并联绕组之间的电流分割和均衡所用的一系列步骤的流程图。
- [0103] 图75是电子控制器的示意图。

具体实施方式

[0104] 这里所公开的无线电力传送系统使用一个或多个源谐振器来产生振荡磁场。振荡磁场由一个或多个接收谐振器捕获,并且在该一个或多个接收谐振器中感应电流和电压。接收谐振器可以耦合到负载,并且可以使用电流和电压来驱动负载做有用功。接收谐振器还可以用作中继谐振器,以通过产生附加的振荡磁场来进一步无线地传输电力。

[0105] 无线电力传送系统可以一体化到各种装置中,并用于广泛的电力需求应用。例如,这种系统可以一体化到机动车辆中并且用于对车辆供电和/或充电。这种系统还可以用于对包括固定便携式装置的电子装置供电,并且可以一体化到包括家具(例如,书桌、桌子)和结构特征(例如,地板、墙壁、柱、街道)多种多样的结构中。这种系统可以针对高功率应用提供非常少量到大量的电力。例如,这里所公开的系统可以从一个或多个源谐振器向连接到电气装置的一个或多个接收谐振器提供大于1kW、3kW、5kW、10kW、20kW、50kW或更大的电力。

[0106] 介绍

[0107] 图1A示出包括无线电力源101和装置107的无线电力传送系统100的实施例的示意图。无线电力源101包括耦合到源电子器件104的源谐振器102,其中源电子器件104连接到电源106。源电子器件104可以包括各种组件,其中这些组件包括AC/DC转换器、放大器和阻抗匹配网络。电源106可以包括AC电源、太阳能电池板和一个或多个电池中的一个或多个。并非需要电源101的所有组件均存在以用于操作,并且在一些实施例中,图1A所示的某些组件可以一体化(例如,源电子器件104和电源106可以一体化到单个组件中)。

[0108] 装置107包括耦合到装置电子器件110以向负载112提供电力的装置谐振器108。装置电子器件110可包括各种组件,诸如整流器和/或阻抗匹配网络等。负载112通常与诸如电池和/或机电装置等的各种电力耗散电气组件其中任何一个相对应。并非需要装置107的所有组件均存在以用于操作,并且在一些实施例中,图1A所示的某些组件可以一体化(例如,装置电子器件110和负载112可以一体化到单个组件中)。

[0109] 源电子器件104和装置电子器件110可以各自包括一个或多个电子处理器(分别为处理器105和111)。电子处理器105和111可以进行各种监视、计算和控制功能。例如,如随后将更详细地描述的,处理器105和/或111可以(通过将适当的控制信号引导到各种传感器)

测量各种系统组件的电参数,基于从传感器接收到的测量信号计算各种性能相关的度量和属性,并且基于所计算出的度量和属性将控制信号传送到各种系统组件。通常,处理器105和111可以被配置为进行这里所公开的监测、计算和控制功能其中任何一个。另外,或作为替代,源电子器件104和/或装置电子器件110可以包括专用电路(例如,专用一体化电路)和逻辑单元(例如,可编程逻辑阵列),其中,这些专用电路和逻辑单元可以被配置为进行这些功能其中任何一个或多个。

[0110] 处理器105和/或111可以以各种配置耦合到系统100的一个或多个组件。在一些实施例中,处理器105和/或111经由直接电气连接耦合到系统组件。在某些实施例中,处理器105和/或111经由无线通信(例如,射频、蓝牙通信)耦合到系统组件。处理器和系统组件之间的耦合对于不同的系统组件而言可以是不同的。例如,处理器105可以直接连接到电源106和源谐振器102,而无线地耦合到装置谐振器108和/或装置电子器件110。

[0111] 无线电力传送系统的另外的方面和特征例如在全部内容通过引用包含于此的以下专利文献中公开:美国专利申请公开第2012/0119569号;美国专利申请公开第2015/0051750号;美国专利第8,772,973号;美国专利申请公开第2010/0277121号;以及美国专利第8,598,743号。

[0112] 在一些实施例中,处理器105可以引导电源106向源谐振器102提供电力。例如,处理器105可以增加电源106的电力输出,从而增加传递到源谐振器102的电力。与源谐振器102所产生的振荡磁场的频率相对应的工作频率来传递该电力输出。

[0113] 在某些实施例中,处理器105(和/或处理器111)可以调谐源谐振器102的谐振频率和/或装置谐振器108的谐振频率。通过相对于电源106的工作频率来调谐源谐振器和装置谐振器的谐振频率,可以控制从电源106到负载112的电力传送的效率。例如,处理器105(和/或处理器111)可以将源谐振器102和/或装置谐振器108的谐振频率调谐为大致相同(例如,在0.5%内、在1%内、在2%内),以增加电力传送的效率。

[0114] 在一些实施例中,处理器105和/或111可以通过调整源谐振器102和/或源电子器件104中的组件的电容值来调谐谐振频率。谐振频率还可以通过调整装置谐振器108和/或装置电子器件110中的组件的电容值来调谐谐振频率。例如,为了调谐源谐振器102的谐振频率,处理器105可以调整连接到源谐振器102中的线圈的电容器的电容。调整可以基于处理器105对谐振频率的测量和/或基于从源谐振器102和/或装置谐振器108发送(例如,无线发送)到处理器105的通信信号。在某些实施例中,处理器105可将源谐振器102的谐振频率调谐为与电源106的工作频率大致相同(例如,在0.5%内、在1%内、在2%内)。在一些实施例中,处理器105可以将源谐振器102的谐振频率调谐为与该工作频率相差7%至13%(例如,10%至15%、13%至19%)。类似的考虑适用于(例如,通过处理器111和/或处理器105对)装置谐振器108的谐振频率的调谐。

[0115] 在一些实施例中,处理器105和/或111可以控制系统100中的阻抗匹配网络,以调节系统中的阻抗匹配条件,从而控制电力传送的效率。例如,处理器105可以调谐连接在电源106和源谐振器102之间(例如,作为源电子器件104的一部分)的阻抗匹配网络中的电容器或电容器网络的电容。可选地或此外,处理器105可以调谐阻抗匹配网络中的电感器或电感器网络的电感。最佳阻抗条件可以由处理器105来计算和/或可以从外部装置接收。

[0116] 类似地,在某些实施例中,处理器111可以通过分别调谐连接在装置谐振器108和

负载112之间(例如,作为装置电子器件110的一部分)的阻抗匹配网络中的电容器和/或电感器的电容和/或电感来控制阻抗匹配条件。例如,在全部内容通过引用包含于此的美国专利申请公开第2005/0051750号中公开了频率调谐和阻抗匹配网络的附加方面。

[0117] 在本公开中,从一个线圈(例如,谐振器线圈)到另一线圈(例如,另一谐振器线圈)的“无线能量传送”是指传送能量以做有用功(例如,电力功、机械功等),诸如对电子装置和车辆供电、点亮灯泡或对电池充电等。类似地,从一个线圈(例如,谐振器线圈)到另一谐振器(例如,另一谐振器线圈)的“无线电力传送”是指传送电力以做有用功(例如,电力功、机械功等),诸如对电子装置和车辆供电、点亮灯泡或对电池充电等。无线能量传送和无线电力传送均是指能量的传送(或等效地,传输),以提供本应以其它方式通过到电力源的有线连接(诸如到主电压源的连接等)提供的工作电力。利用上述理解,在本公开中可互换地使用“无线能量传送”和“无线电力传送”这两个表达。还应当理解,“无线电力传送”和“无线能量传送”可以伴随信息的传送;也就是说,信息可以经由电磁信号与用以做有用功的能量或电力一起传送。

[0118] 图1B是示出无线电力传送所使用的谐振器150的一部分的示意图。谐振器150包括线圈152、磁性构件154和屏蔽件156。线圈152包括一个或多个环,并且可以连接到一个或多个电容器和/或电感器以及其它电气组件(未示出)。线圈152由诸如铜、银、金和利兹线(Litz wire)等的一个或多个导电材料形成。作为示例,利兹线可以用于以低于1MHz(例如,85kHz)的频率进行的操作。在某些实施例中,线圈210可以由实心芯线或形成在印刷电路板(PCB)上的一个或多个导电层(例如,铜层)形成。例如,可以以1MHz或更高的工作频率使用实心芯线或导电层。

[0119] 磁性构件154位于线圈152和屏蔽件156之间。在图1A中,线圈152位于磁性构件154的一侧,并且屏蔽件156位于磁性构件154的另一侧。通常,磁性构件154引导由线圈152的环中流过的电流所感应的磁通。磁性构件154的存在可以引起在振荡电流在线圈152中循环时,在与线圈152邻接的区域中(即,在线圈152的平面上方或下方的平面中)由线圈152产生的磁通量密度相对于在磁性构件154不存在的情况下的磁通密度有所增加。

[0120] 在一些实施例中,磁性构件154可以包括由诸如锰-锌(MnZn)和/或镍-锌(NiZn)铁氧体等的磁性材料形成的一个或多个磁性元件。在构件154由多个磁性元件形成的情况下,可以利用诸如粘合剂等的电介质材料来填充元件之间的间隙(图1B中未示出)。

[0121] 尽管磁性材料的大小通常较小,但针对无线电力传送的一些应用利用具有大面积大小的磁性构件。例如,汽车电池充电应用可以使用面积大小大(例如,30cm×30cm)的磁性构件来传送1kW或更大(例如,2kW或更大、3kW或更大、5kW或更大、6kW或更大)的高电力。在这种材料可用的情况下,可以利用特征为单个整体材料的磁性构件。然而,要制造具有大面积大小(例如,30cm×30cm)以供高电力传送所用的整体磁性材料(诸如MnZn或NiZn铁氧体等)可能是困难和/或昂贵的。此外,MnZn和NiZn铁氧体可能是脆性的,因此,面积大的这些材料可能非常容易断裂。

[0122] 为了克服这些困难,铁氧体材料可以制成小尺寸(例如5cm×5cm)的材料,并且多个这样的材料可以接合在一起以形成更大的组合磁性构件。较小的磁性元件在接合的情况下可以以统一的方式在功能上表现得非常类似于较大的磁性构件。在某些实施例中,多个磁性元件可以包含在由导热和电绝缘材料(例如,塑料、Teflon®、氧化铝、氮化铝等)制成

的保持器中，

[0123] 通常与导电材料的薄片相对应的屏蔽件156通常位于接近线圈152的位置。屏蔽件156可以由一个或多个导电材料形成，这些导电材料可以与用以形成线圈152的导电材料相同或不同。例如，屏蔽件156可以由诸如铜、银、金、铁、钢、镍和/或铝等的材料的薄片形成。屏蔽件156用于为线圈152屏蔽损耗引发物（例如，金属物）。此外，在一些实施例中，屏蔽件156可以通过在谐振器附近引导磁场线来增加谐振器150到另一谐振器的耦合。例如，通过使用屏蔽件156来引导磁场线离开损耗引发物，可以减少由异常耦合引起的向损耗引发物的能量损耗。

[0124] 图2A~2C是示出一体化到车辆202中的无线电力传送系统204的示意图。图2A示出X-Z坐标平面中的车辆202的侧视图，图2B示出X-Y坐标平面中的车辆202的俯视图，并且图2C示出Y-Z坐标平面中的车辆202的正视图。为了以下论述，X轴对应于车辆的“前后”方向，Y轴对应于车辆的“左右”方向，并且Z轴对应于车辆的“上下”方向。

[0125] 对于车辆应用中的无线电力传送，源谐振器和装置谐振器可以相对大以适应谐振器之间的大幅电力传送。在一些实施例中，例如，源谐振器在X-Y平面中的最大尺寸可以为30cm或更大（例如，40cm或更大、50cm或更大、60cm或更大、70cm或更大、80cm或更大、90cm或更大、100cm或更大）。在某些实施例中，装置谐振器在X-Y平面中的最大尺寸可以为20cm或更大（例如，30cm或更大、40cm或更大、50cm或更大、60cm或更大、70cm或更大、80cm或更大、90cm或更大、100cm或更大）。在一些实施例中，源谐振器的最大尺寸可以比装置谐振器的最大尺寸小10cm或更多（例如，15cm或更多、20cm或更多、30cm或更多）。

[0126] 源谐振器和装置谐振器可以各自具有各种不同的截面形状，包括正方形、矩形、圆形、椭圆形、更一般地，规则多边形。在某些实施例中，谐振器可以具有不同的形状。例如，源谐振器可以具有正方形的截面形状，而装置谐振器可以具有矩形的截面形状。

[0127] 在这里所公开的无线电力传送系统中所使用的谐振器（例如，源谐振器、接收谐振器、中继器谐振器）可以具有谐振频率 $f = \omega / 2\pi$ 、固有损耗率 Γ 和Q因子 $Q = \omega / (2\Gamma)$ （在本公开中也称为“本征”Q因子），其中 ω 是角谐振频率。源谐振器或接收器谐振器的谐振频率 f 通常由谐振器的电容和电感值来确定。

[0128] 在一些实施例中，源、接收器和/或中继器谐振器其中任何一个可以具有作为高Q因子的Q因子，其中 $Q > 100$ （例如， $Q > 100$ 、 $Q > 200$ 、 $Q > 300$ 、 $Q > 500$ 、 $Q > 1000$ ）。例如，无线电力传送系统可以包括具有一个或多个源谐振器的电力源，并且这些源谐振器其中至少一个可以具有 $Q_1 > 100$ 的Q因子（例如， $Q_1 > 100$ 、 $Q_1 > 200$ 、 $Q_1 > 300$ 、 $Q_1 > 500$ 、 $Q_1 > 1000$ ）。无线电力传送系统可以包括具有一个或多个接收器谐振器的电力接收器，并且这些接收器谐振器其中至少一个可以具有 $Q_2 > 100$ 的Q因子（例如， $Q_2 > 100$ 、 $Q_2 > 200$ 、 $Q_2 > 300$ 、 $Q_2 > 500$ 、 $Q_2 > 1000$ ）。该系统可以包括具有 $Q_3 > 100$ （例如， $Q_3 > 100$ 、 $Q_3 > 200$ 、 $Q_3 > 300$ 、 $Q_3 > 500$ 、 $Q_3 > 1000$ ）的Q因子的至少一个中继器谐振器。

[0129] 利用高Q因子谐振器可以使得无线电力传送系统中的一些或所有谐振器之间能量耦合大。高Q因子可以使得谐振器之间的耦合强，由此谐振器之间的“耦合时间”短于谐振器的“损耗时间”。结果，与由于谐振器的损耗（例如，发热损耗、辐射损耗）而导致的能量损耗速率相比，能量可以以更快的速率在谐振器之间高效地传送。在某些实施例中，几何平均值

$\sqrt{Q_i Q_j}$ 可以大于100(例如 $\sqrt{Q_i Q_j} > 200$ 、 $\sqrt{Q_i Q_j} > 300$ 、 $\sqrt{Q_i Q_j} > 500$ 、 $\sqrt{Q_i Q_j} > 1000$)，其中i和j指的是源-接收器谐振器、源-中继器谐振器或中继器-接收器谐振器的对(例如， $i=1, j=2$ 或 $i=1, j=3$ 或 $i=2, j=3$)。在例如全部内容通过引用包含于此的美国专利第8,461,719号中，描述了高Q谐振器的附加方面。

[0130] 谐振器配置

[0131] 无线电力传送系统中的两个谐振器之间的耦合程度和无线电力传送的效率依赖于谐振器的各种各样的不同结构特征。因此，不同的谐振器配置实现不同的电力传送效率和速率；因此，不同的配置适合于不同类型的电力传送应用。在以下部分中，示出多个不同的谐振器配置，并且将论述不同结构特征对无线电力传送性能的影响。

[0132] 在一些实施例中，谐振器线圈可以相对于导电屏蔽件(例如，铝屏蔽件)偏移，以减少损耗并增加与另一谐振器的耦合。图3A~3B是示出磁性材料304附近的源谐振器线圈302的示意图，其中磁性材料304和导电屏蔽件306之间具有间隙。在图3A中，在磁性材料304和屏蔽件306之间没有间隙。在图3B中，在磁性材料304和屏蔽件306(铝屏蔽件)之间存在40mm的间隙308。针对X-Y平面中尺寸为60cm×60cm的源谐振器以及相对于大小为25cm×50cm的装置谐振器(图3A~3B中未示出)在Z方向上的偏移(其中，相对于该装置谐振器的偏移由一组坐标 $(X, Y, Z) = (0, 0, 15)$ cm来限定)，对于图3A所示的源谐振器302而言，耦合率k被测量为约0.077，对于图3B所示的源谐振器302而言，耦合率k被测量为约0.083。

[0133] 通常，可以改变谐振器附近(或甚至附接到谐振器)的磁性材料304的厚度，以调整向另一谐振器的耦合k。表1总结了针对如下无线传送系统的耦合率k的测量，其中，如图4所示，该无线传送系统包括X-Y平面中的大小为60cm×60cm的源谐振器线圈402，该源谐振器线圈402相对于X-Y平面中的大小为25cm×50cm的装置谐振器线圈404的偏移由一组坐标 $(X, Y, Z) = (10, 10, 150)$ cm来限定。如先前在图3B中所论述的，源谐振器线圈和磁性材料与铝屏蔽件隔开40mm的间隙。k的测量是针对具有不同厚度的磁性材料(例如，“铁氧体”)的源谐振器线圈402来进行的，并且是在存在车辆底盘和不存在车辆底盘的情况下进行的。

[0134] 表格1

[0135] 有无车辆底盘	铁氧体厚度	耦合k
存在底盘	5mm	0.060
不存在底盘	5mm	0.075
不存在底盘	12mm	0.083

[0136] 在一些实施例中，被配置为无线地接收电力的装置可以以一体化的方式容纳装置谐振器和装置电子器件这两者。图5A是示出被配置为无线地接收电力的装置的实施例的示意图，其中在该装置中，装置谐振器线圈502、磁性材料504和导电(例如，铝)屏蔽件506彼此堆叠。图5B示出被配置为无线地接收电力的装置的另一实施例的示意图。图5B的装置具有如下的“顶帽”配置，其中在该配置中，磁性材料508的中心部分在Z方向上呈阶梯形，以在磁性材料508和屏蔽件506之间形成空区域。装置电子器件510位于该空区域内并且线圈502围绕磁性材料508的阶梯形边缘。通过如图5B所示将装置电子器件510封装在装置谐振器内，可以大幅增加装置的紧凑性。

[0137] 车辆无线电力传送系统中的源谐振器和接收器谐振器之间的耦合k部分地依赖于

接收器谐振器附近的车辆底盘的有无和性质。图6A和6B是示出作为谐振器中心之间的在X和Z方向上的相对位移的函数的源谐振器和接收器谐振器604之间的耦合k的测量的图。接收器谐振器类似于图5A中所示的谐振器,并且源谐振器类似于图3B中所示的谐振器。图6A中的图示出不存在车辆底盘的情况下的耦合k的测量,而图6B中的图示出存在铝车辆底盘的情况下的测量。从图6A和6B可以看出,车辆底盘使耦合k的值减小大约20%。

[0138] 图7A和7B是示出作为源谐振器602和接收器谐振器604的中心之间的在X和Z方向上的相对位移的函数的优值(U_0)测量的图。接收器谐振器类似于图5A中所示的谐振器,并且源谐振器类似于图3B中所示的谐振器。图7A中的图示出不存在车辆底盘的情况下的 U_0 的测量,而图7B中的图示出存在铝车辆底盘的情况下的测量。在图7A中,源谐振器的品质因数约为1000,而接收器谐振器的品质因数约为380。在图7B中,源谐振器的品质因数约为1000,而接收器谐振器的品质因数约为460。

[0139] 图8A和8B是示出作为源谐振器602和接收器谐振器604的中心之间的在Y和Z方向上的相对位移的函数的耦合k的测量的图。接收器谐振器类似于图5A中所示的谐振器,并且源谐振器类似于图3B中所示的谐振器。图8A中的图示出不存在车辆底盘的情况下的k的测量,而图8B中的图示出存在铝车辆底盘的情况下的测量。显然,车辆底盘使耦合k减小大约20%。

[0140] 图9A和9B是示出作为源谐振器602和接收器谐振器604的中心之间的在Y和Z方向上的相对位移的函数的优值(U_0)测量的图。接收器谐振器类似于图5A中所示的谐振器,并且源谐振器类似于图3B中所示的谐振器。图9A中的图示出不存在车辆底盘的情况下的 U_0 的测量,而图9B中的图示出存在铝车辆底盘的情况下的测量。

[0141] 图10A和10B是示出作为源谐振器602和接收器谐振器604的中心之间的在X和Z方向上的相对位移的函数的耦合k的测量的图。接收器谐振器类似于图5B中所示的谐振器(即,“顶帽”配置),并且源谐振器类似于图3B中所示的谐振器。图10A中的图示出不存在车辆底盘的情况下的k的测量,而图10B中的图示出存在铝车辆底盘的情况下的测量。图10A和10B中的k的测量值与分别在图6A和6B的图中所示的测量值没有实质性的不同。

[0142] 图11A和11B是示出作为源谐振器602和接收器谐振器604的中心之间的在X和Z方向上的相对位移的函数的优值(U_0)测量的图。接收器谐振器类似于图5B中所示的谐振器(即,“顶帽”配置),并且源谐振器类似于图3B中所示的谐振器。图11A中的图示出不存在车辆底盘的情况下的 U_0 的测量,而图11B中的图示出存在铝车辆底盘的情况下的测量。源谐振器的品质因数Q为1000,而接收器谐振器的品质因数Q为450。

[0143] 图12A和12B是示出作为源谐振器602和接收器谐振器604的中心之间的在Y和Z方向上的相对位移的函数的耦合k的测量的图。接收器谐振器类似于图5B中所示的谐振器(即,“顶帽”配置),并且源谐振器类似于图3B中所示的谐振器。图12A中的图示出不存在车辆底盘的情况下的k的测量,而图12B中的图示出存在铝车辆底盘的情况下的测量。

[0144] 图13A和13B是示出作为源谐振器602和接收器谐振器604的中心之间的在Y和Z方向上的相对位移的函数的优值(U_0)测量的图。接收器谐振器类似于图5B中所示的谐振器(即,“顶帽”配置),并且源谐振器类似于图3B中所示的谐振器。图13A中的图示出不存在车辆底盘的情况下的 U_0 的测量,而图13B中的图示出存在铝车辆底盘的情况下的测量。源谐振器的品质因数Q为1000,而接收器谐振器的品质因数Q为450。

[0145] 图14A和14B是示出作为源谐振器602和接收器谐振器604的中心之间的在X和Z方向上的相对位移的函数的耦合k的测量的图。接收器谐振器类似于图5B中所示的谐振器(即,“顶帽”配置),并且源谐振器类似于图3B中所示的谐振器。图14A中的图示出存在铝车辆底盘的情况下的k的测量值,而图14B中的图示出存在钢(例如,ST1008钢)车辆底盘的情况下的k的测量。从图14A和14B中可以看出,用钢底盘代替铝底盘对耦合k没有显著影响。

[0146] 图15A和15B是示出作为源谐振器602和接收器谐振器604的中心之间的在X和Z方向上的相对位移的函数的品质因数 Q_0 的测量结果的图。接收器谐振器类似于图5B中所示的谐振器(即,“顶帽”配置),并且源谐振器类似于图3B中所示的谐振器。图15A中的图示出存在钢车辆底盘的情况下的源谐振器 $Q_{0,src}$ 测量。图15B中的图示出存在钢车辆底盘的情况下的接收器(“装置”)谐振器 $Q_{0,dev}$ 测量。与存在铝车辆底盘或不存在车辆底盘的情况下的测量值相比,源谐振器 $Q_{0,src}$ 和接收器谐振器 $Q_{0,dev}$ 都显著减小。

[0147] 图16A和16B是示出作为源谐振器602和接收器谐振器604的中心之间的在X和Z方向上的相对位移的函数的优值(U_0)测量的图。接收器谐振器类似于图5B中所示的谐振器(即,“顶帽”配置),并且源谐振器类似于图3B中所示的谐振器。图16A中的图示出存在铝车辆底盘的情况下的 U_0 测量,而图16B中的图示出存在钢(“ST1008”)车辆底盘的情况下的 U_0 测量。

[0148] 从前述论述中可以明显看出,源谐振器和装置谐振器之间的耦合k可以显著地受到汽车底盘的有无的影响。图60A和60B是示出作为谐振器的中心之间的在X和Y方向上的相对位移的函数的、分别与图44和46中所示的源谐振器和装置谐振器类似的源谐振器和装置谐振器之间的耦合k的测量值的图。源谐振器和装置谐振器在Z方向上彼此间隔15cm。图60A中的图示出存在车辆底盘的情况下的k的测量,而图60B中的值示出不存在车辆底盘的情况下的k的测量。车辆底盘的存在使耦合k减小10%~15%。允许X和Y方向上的最大偏移为10cm(使得谐振器之间的最大偏移与坐标组 $(X, Y, Z) = (10, 10, 15)$ cm相对应),这样系统应当良好地匹配最小耦合 $k = 0.07$ 。

[0149] 图61A和61B是示出作为谐振器中心之间的在X和Y方向上的相对位移的函数的、如图60A和60B中的源谐振器和装置谐振器那样的源谐振器和装置谐振器之间的耦合k的测量的图。源谐振器和装置谐振器在Z方向上彼此间隔10cm。图61A中的图示出存在车辆底盘的情况下的k的测量,而图61B中的图示出不存在车辆底盘的情况下的k的测量。车辆底盘的存在使耦合k减小1%~8%。

[0150] 图62示出包括谐振器线圈6202、磁性构件6204、第一导电屏蔽件6206和第二导电屏蔽件6208的接收器谐振器的示意图。接收器谐振器位于由钢(例如,ST1008)形成的车辆底盘6210附近。第二导电屏蔽件6208由铝形成,并且第二导电屏蔽件6208的形状是具有边长6212的正方形。

[0151] 为了研究第二屏蔽件6208的大小对减轻由于底盘6210引起的耦合损耗,第二屏蔽件6208的边长6212从50cm改变为150cm,并且测量无线电力传送系统中的源谐振器和接收器谐振器这两者的Q因子的值。该源谐振器和接收器谐振器与图44和46中所示的源谐振器和接收器谐振器类似。图63是示出作为第二屏蔽件6208的边长6212的函数的、源谐振器的测量Q因子值(曲线6302)和接收器谐振器的测量Q因子值(曲线6304)的图。源谐振器和接收器谐振器相对于彼此的位移在X和Y方向上为10cm,并且在Z方向上为10cm,其中,10cm是车辆底盘对源谐振器的影响最大的情况下的相对偏移。从图63可以看出,第二屏蔽件6208的

边长6212优选为80cm或更大,以减轻钢车辆底盘6210的损耗影响。

[0152] 阻抗匹配网络和电子组件

[0153] 在这里所公开的无线电力传送系统中可以使用各种阻抗匹配网络和配置,以确保在源谐振器和接收器谐振器之间高效地传送电力。在例如全部内容通过引用包含于此的美国专利申请公开第2012/0242225号中论述了阻抗匹配网络的各种特征和方面。

[0154] 图17A是示出实现“均衡LCL”匹配方案的源谐振器所用的阻抗匹配网络的示例的示意图。图17B是示出实现“均衡串联”匹配方案的接收器谐振器所用的阻抗匹配网络的示例的示意图。可以例如以大于3kW甚至大于7kW的电力水平来使用这些阻抗匹配网络。

[0155] 在一些实施例中,无线电力传送系统可以包括品质因数 $Q_{0,src}$ 约为1000的源谐振器和品质因数 $Q_{0,dev}$ 约为450的接收器谐振器。该系统的最大耦合k值可以约为0.12。在X-Z平面中,无线电力传送系统的源谐振器和接收器谐振器的最小耦合k值(参考图6A~6B、7A~7B、10A~10B、11A~11B和14A~14B)可以约为0.08。在Y-Z平面中的无线电力传送系统的源谐振器和接收器谐振器的最小耦合k值(参考图8A~8B、9A~9B、12A~12B和13A~13B)可以约为0.06。

[0156] 在某些实施例中,可以选择接收器谐振器的阻抗匹配点,使得包括阻抗匹配网络和二极管的装置中所耗散的最大电力小于300W(例如,小于275W、小于250W、小于225W、小于200W)。

[0157] 阻抗匹配网络通常可以包括各种不同的电子组件。例如,某些阻抗匹配网络可以包括额定约2000V(峰值电压)并且品质因数 Q_{cap} 约等于2500的陶瓷电容器(例如,来自American Technical Ceramics Corp.,Huntington Station,NY旗下的800E系列的电容器)。在某些实施例中,电容器电压额定值可以确定谐振器线圈的目标电感。例如,上述电容器额定值可以与电感为 $L=40\mu H$ 并且电容值为 $C_{1a}=C_{1b}=C_2=263nF$ 的源谐振器线圈相对应,并且与电感为 $L=100\mu H$ 并且电容值为 $C_{1a}=C_{1b}=70.1nF$ 的接收器谐振器线圈相对应。在某些实施例中,也可以使用例如包括薄膜电容器的其它类型的更便宜的电容器。

[0158] 图18A和18B是存在铝车辆底盘的情况下如图5B中所示的具有接收器谐振器的装置的、作为输出电压的函数的所测量到的装置侧负载阻抗的图。图18A示出针对3.7kW的电力水平所测量到的装置侧负载阻抗,而图18B示出针对7.4kW的电力水平所测量到的装置侧负载阻抗。

[0159] 图19A和19B是存在铝车辆底盘的情况下如图5B所示的具有接收器谐振器的装置的、作为输出电压的函数的放大器-电池效率的图。图19A示出对于3.7kW的电力水平而言耦合k值为0.12(曲线1902)、0.08(曲线1904)和0.06(曲线1906)的情况下的放大器-电池的效率。图19B示出对于7.4kW的电力水平而言耦合k值为0.12(曲线1908)、0.08(曲线1910)和0.06(曲线1912)的情况下的放大器-电池的效率。在一些实施例中,可以通过与较低的优值 U_d 匹配来提高较低耦合k值处的效率值。

[0160] 图20A和20B是存在铝车辆底盘的情况下作为输出电压的函数的、在(具有与图3B中所示的源谐振器相对应的谐振器的)源和(具有与图5B中所示的接收器谐振器相对应的接收器谐振器的)装置中耗散的电力的图。图20A示出在3.7kW的电力水平处在装置中(曲线2008)耗散的电力以及对于耦合k值为0.12(曲线2002)、0.08(曲线2004)、0.06(曲线2006)而言在源中耗散的电力的图。图20B示出在7.4kW的电力水平处在装置(曲线2016)中耗散的

电力以及对于耦合k值为0.12(曲线2010)、0.08(曲线2012)、0.06(曲线2014)而言在源中耗散的电力的图。

[0161] 图21A和21B是存在铝车辆底盘的情况下作为输出电压的函数的、在包括(具有与图3B中所示的源谐振器相对应的谐振器的)源和(具有与图5B中所示的接收器谐振器相对应的接收器谐振器的)装置的系统所用的阻抗匹配网络中跨一个或多个电容器所测量到的电压(V_{rms})的图。图21A和21B中的电压是跨图17A和17B所示的电容器 C_{1a} 和 C_{1b} 来测量的。图21A示出在3.7kW电力水平处对于装置(曲线2102)而言以及耦合k值为0.12(曲线2104)、0.08(曲线2106)和0.06(曲线2108)的情况下对于源而言电容器C1两端的RMS电压。图21B示出在7.4kW的电力水平处对于装置(曲线2110)而言以及耦合k值为0.12(曲线2112)、0.08(曲线2114)和0.06(曲线2116)的情况下对于源而言电容器C1两端的RMS电压。

[0162] 图22A和22B是存在铝车辆底盘的情况下在附接到无线电力传送系统中的谐振器(即,附接到诸如图3B中所示的谐振器等的源谐振器,以及附接到如图5B中所示的接收器谐振器)的磁性构件中所测量到的、作为输出电压的函数的磁场(mT)。对于图22A和22B中所示的测量,磁性构件由5mm的铁氧体形成。图22A示出在3.7kW的电力水平处在接收器谐振器(曲线2202)的磁性构件中的磁场以及对于耦合k值为0.12(曲线2204)、0.08(曲线2206)和0.06(曲线2208)而言在源谐振器的磁性构件中的磁场。图22B示出在7.4kW的电力水平处在接收器谐振器(曲线2210)的磁性构件中的磁场以及对于耦合k值为0.12(曲线2212)、0.08(曲线2214)和0.06(曲线2216)而言在源谐振器的磁性构件中的磁场。

[0163] 图23示出装置电子器件110的实施例的示意性电路图。装置电子器件包括具有由串联电容器2304和2306表示的串联调谐的器件谐振器线圈2302。装置电子器件可以包括半波或全波整流级2310、一个或多个滤波器2312和/或DC-DC转换器2314。可以使用DC-DC转换器来调谐装置看到的负载阻抗,以实现改进的和/或最佳的阻抗匹配值。负载112可以对应于诸如电池2316等的各种电子装置。在一些实施例中,DC-DC转换器2314可以是用以使跨电容器 C_{1a} 和 C_{1b} 的电压最小化的升压转换器。在某些实施例中,DC-DC转换器2314可以是用以减少整流二极管中的损耗的降压转换器。

[0164] 图24A和24B是示出存在铝车辆底盘的情况下、具有接收器谐振器的装置(诸如图5B中所示的接收器谐振器等)的作为输出电压的函数的DC-DC升压转换比的图。图24A示出在3.7kW的电力水平下耦合k值为0.12(曲线2402)、0.08(曲线2404)和0.06(曲线2406)的情况下的具有接收器谐振器的装置的DC-DC转换比。图24B示出在7.4kW的电力水平下耦合k值为0.12(曲线2402)、0.08(曲线2404)和0.06(曲线2406)的情况下的具有接收器谐振器的装置的DC-DC转换比。在一些实施例中,针对在源谐振器和装置谐振器之间的各种位置偏移以及输出电压,约4:1的DC-DC升压转换比对于3.7kW和7.4kW的操作而言可以是最佳的。

[0165] 图25A和25B是示出存在铝车辆底盘的情况下、具有接收器谐振器的装置(诸如图5B中所示的接收器谐振器)的作为输出电压的函数的放大器-转换器效率的图。图25A示出在3.7kW的电力水平下耦合k值为0.12(曲线2502)、0.08(曲线2504)和0.06(曲线2506)的情况下的具有接收器谐振器的装置的效率。图25B示出在7.4kW的电力水平下耦合k值为0.12(曲线2502)、0.08(曲线2504)和0.06(曲线2506)的情况下的具有接收器谐振器的装置的效率。

[0166] 图26A和26B是示出存在铝车辆底盘的情况下作为输出电压的函数的、在包括源谐

振器(诸如图3B中所示的源谐振器等)的源中以及在包括接收器谐振器(诸如图5B中所示的接收器谐振器等)的装置中耗散的电力的图。图26A示出在3.7kW的电力水平处对于耦合k值为0.12(曲线2602)、0.08(曲线2604)和0.06(曲线2606)而言在源中耗散的电力、以及对于耦合k值为0.12(曲线2608)、0.08(曲线2610)和0.06(曲线2612)而言在装置中耗散的电力。图26B示出在7.4kW的电力水平处对于耦合k值为0.12(曲线2614)、0.08(曲线2616)和0.06(曲线2618)而言在源中耗散的电力、以及对于耦合k值为0.12(曲线2620)、0.08(曲线2622)和0.06(曲线2624)而言在装置中耗散的电力。

[0167] 图27A和27B是示出存在铝车辆底盘的情况下作为输出电压的函数的、在包括源谐振器(诸如图3B中所示的源谐振器等)的源中以及在包括接收器谐振器(诸如图5B中所示的接收器谐振器等)的装置中跨一个或多个匹配网络电容器而测量到的电压的图。图27A示出在3.7kW的电力水平处对于耦合k值为0.12(曲线2702)、0.08(曲线2704)和0.06(曲线2706)而言跨源中的一个或多个匹配网络电容器的电压、以及对于耦合k值为0.12(曲线2708)、0.08(曲线2710)和0.06(曲线2712)而言跨越装置中的一个或多个匹配网络电容器的电压。图27B示出在7.4kW的电力水平处对于耦合k值为0.12(曲线2714)、0.08(曲线2716)和0.06(曲线2718)而言跨源中的一个或多个匹配网络电容器的电压、以及对于耦合k值为0.12(曲线2720)、0.08(曲线2722)和0.06(曲线2724)而言跨装置中的一个或多个匹配网络电容器的电压。

[0168] 图28A和28B是存在铝车辆底盘的情况下作为输出电压的函数的、在无线电力传送系统中附接到源谐振器和接收器谐振器的磁性构件中所测量到的磁场(mT)的图,其中源谐振器与图3B中所示的谐振器类似,并且接收器谐振器与图5B中所示的谐振器类似。图28A示出在3.7kW的电力水平处对于耦合k值为0.12(曲线2802)、0.08(曲线2804)和0.06(曲线2806)而言在源的磁性构件中所测量的磁场、以及对于耦合k值为0.12(曲线2808)、0.08(曲线2810)和0.06(曲线2812)而言在装置的磁性构件中所测量到的磁场。图28B示出在7.4kW的电力水平处对于耦合k值为0.12(曲线2814)、0.08(曲线2816)和0.06(曲线2818)而言在源的磁性构件中所测量到的磁场、以及对于耦合k值为0.12(曲线2820)、0.08(曲线2822)和0.06(曲线2824)而言在装置的磁性构件中所测量到的磁场。

[0169] 在一些实施例中,无线电力传送系统可以包括用以可变地调谐源谐振器和/或接收器谐振器的阻抗的可切换多抽头变压器。在一些实施例中,无线电力传送系统可以包括用以调制输出阻抗的DC-DC转换器。

[0170] 谐振器配置

[0171] 可以在无线电力传送系统中使用各种各样不同的谐振器配置。在本部分中,将论述这些配置的示例和这些配置的某些性能特性。

[0172] 图29A~29D是示出无线电力传送系统所用的谐振器线圈的典型实施例的示意图。在图29A~29D中的各图中,谐振器绕组长度2914和跨度2916不同。在图29A~29D中的各图中,磁性构件2904的大小为50cm×50cm×5mm,屏蔽件2902的大小为60cm×60cm。磁性构件2904由铁氧体形成,并且屏蔽件2902由铝形成。图29A示出最小长度为400mm且最小跨度为50mm的谐振器线圈2906。图29B示出最大长度为500mm且最小跨度为50mm的谐振器线圈2908。图29C示出最小长度为400mm且最大跨度为175mm的谐振器线圈2910。图29D示出最大长度为500mm且最大跨度为175mm的谐振器线圈2912。图29A~29D中所示的谐振器可以用作

源谐振器(诸如图3B中所示的源谐振器)。

[0173] 图30A是作为源谐振器线圈绕组长度和跨度的函数的耦合率 k 的图,其中该耦合率 k 是相对于接收器谐振器线圈以约为 $(X, Y, Z) = (10, 10, 15)$ cm的偏移处所测量的,并且 Z 偏移是在线圈表面之间测量的。接收器谐振器尺寸为 $25\text{mm} \times 50\text{mm}$ 。在图30A中,耦合 k 更大的暗区3002表示 500mm 的绕组长度和 130mm 的绕组跨度使得对于某些源谐振器线圈尺寸而言耦合更高。图30B是针对与图30A中的源谐振器和接收器谐振器相同的源谐振器和接收器谐振器的作为源谐振器线圈绕组长度和跨度的函数的优值 U_0 的图,其中该优值 U_0 是相对于接收器谐振器线圈以约为 $(X, Y, Z) = (10, 10, 15)$ cm的偏移所测量的,并且 Z 偏移是在线圈表面之间测量的。

[0174] 图31A~31D是示出无线电力传送系统所用的谐振器线圈的典型实施例的示意图。在图31A~31D中的各图中,绕组间隙-边缘距离3114和跨度3116不同。在图31A~31D中,磁性构件3104的大小为 $20\text{cm} \times 45\text{cm} \times 5\text{mm}$,屏蔽件3102的大小为 $25\text{cm} \times 50\text{cm}$ 。磁性构件3104由铁氧体形成,并且屏蔽件3102由铝形成。图31A示出最小间隙-边缘距离为 0mm 且最小跨度为 25mm 的谐振器线圈3106。图31B示出最大间隙-边缘距离为 20mm 且最小跨度为 25mm 的谐振器线圈3108。图31C示出最小间隙-边缘距离为 0mm 且最大跨距为 50mm 的谐振器线圈3110。图31D示出最大间隙-边缘距离为 20mm 且最大跨度为 50mm 的谐振器线圈3112。图31A~31D中所示的谐振器例如可以用作装置中的接收器谐振器。

[0175] 图32A作为图31A~31D的谐振器的谐振器线圈绕组间隙-边缘距离和跨度的函数的耦合 k 的图。对于绕组间隙-边缘距离为 0mm 且跨度为 50mm 的谐振器线圈实现最高耦合。图32B是作为图31A~31D的谐振器的谐振器线圈绕组间隙-边缘距离和跨度的函数的优值 U_0 的图。

[0176] 图33A和33B是作为谐振器之间在 X 和 Y 方向上的相对偏移的函数的、图29A~29D中所示类型的源谐振器与图31A~31D中所示类型的装置谐振器之间的耦合 k 的图。图33A示出针对谐振器之间在 Z 方向上的 10cm 的相对偏移的耦合 k ,并且图33B示出针对谐振器之间在 Z 方向上的 15cm 的相对偏移的耦合 k 。

[0177] 图34A和34B是作为谐振器之间在 X 和 Y 方向上的相对偏移的函数的无线电力传送系统的优值 U_0 的图,其中该无线电力传送系统包括图29A~29D中所示类型的源谐振器以及图31A~31D中所示类型的装置谐振器。图34A示出针对谐振器之间在 Z 方向上的 10cm 的相对偏移的优值 U_0 ,并且图34B示出谐振器之间在 Z 方向上的 15cm 的相对偏移的优值 U_0 。

[0178] 附加的阻抗匹配网络拓扑

[0179] 除了以上论述的阻抗匹配网络之外,在这里所公开的无线电力系统中还可以使用附加的阻抗匹配网络拓扑。图35A和35B是装置电子器件110中所使用的匹配网络的示意图。图35A示出三角形(δ)电容器匹配网络3502,并且图35B示出星形电容器匹配网络3504。两个电容器网络通过“三角形-星形”变换而彼此等效。期望如下的三角形和星形网络,其中该三角形和星形网络使装置与随着电池电压和输出电力的变化而保持相对平坦的有效阻抗匹配。因此,无线电力传送系统可以包括任一拓扑的匹配网络。在一些实施例中,由使用最少的具有给定电压额定值的电容器的网络来引导实现三角形或星形匹配网络,使得该网络是三角形或星形匹配网络中以较低成本来实现的那一个。

[0180] 图36是装置中的三角形(3602)和星形(3604)阻抗匹配网络所用的电容器的总最

小数量的图。装置匹配点 U_d 可以影响整体效率并且确定所耗散的电力在源和装置之间是如何分配的。较高的 U_d 值意味着在器件中耗散更少的电力并且在源中耗散更多的电力。可以使用三角形和/或星形匹配网络来为匹配 $U_d=50$,使得在谐振器之间的最大相对偏移处在源和装置中消耗大致均等的电力。在一些实施例中,可以在三角形网络3602上选择点3606($L_d=37.5\mu\text{H}$),以使得电容器和电感的数量最小化。较低的电感可以减小绕组两端的电压。

[0181] 图37是示出装置电子器件110中所使用的阻抗匹配网络拓扑的实施例的示意图。在图37中,作为一个示例,各种电路组件位置可以具有以下值: $L_{3a}=L_{3b}=25\mu\text{H}$; $C_a=24.8\text{nF}$; $C_{b1}=C_{b2}=39\text{nF}$; 以及 $C_c=71.8\text{nF}$ 。与具有更少组件位置的拓扑相比,该拓扑在装置的阻抗匹配方面提供了附加的自由度。注意,位置 C_{b1} 和 C_{b2} 处的组件提供了图35A中所示的阻抗匹配网络的均衡。在例如全部内容通过引用包含于此的美国专利第8,461,719号中公开了图37中所示的阻抗匹配网络拓扑的附加方面。

[0182] 图38是作为装置中的输出电压的函数的优值 U 的图,其中该装置包括具有三角形阻抗匹配网络(如图35A所示)的接收谐振器。曲线3802示出作为对于7.0kW电力输出而言的装置匹配阻抗的电阻分量的优值 U_{dR} 。曲线3804示出作为对于3.5kW的电力输出而言的装置匹配阻抗的电阻分量的优值 U_{dR} 。曲线3806示出作为对于7.0kW的电力输出而言的装置匹配阻抗的无功分量的优值 U_{dX} 。曲线3808示出作为对于3.5kW的电力输出而言的装置匹配阻抗的无功分量的优值 U_{dX} 。装置匹配阻抗的无功分量一般小于电阻分量,因此装置谐振器并没有相对于谐振显著地失谐。此外,在这些条件下,源中的电流并没有过度增大以驱动非谐振装置谐振器。

[0183] 图39是示出作为输出电压的函数的、在使用三角形阻抗匹配网络而匹配的源谐振器和接收器谐振器中耗散的电力的图。源谐振器和接收器谐振器的系统具有0.08的耦合 k 。曲线3902示出在7.0kW的电力输出处在源谐振器线圈以及匹配网络的一个或多个电容器中耗散的电力。曲线3904示出在3.5kW的电力输出处在源谐振器线圈以及匹配网络的一个或多个电容器中耗散的电力。曲线3906示出在7.0kW的电力输出处在接收器谐振器线圈以及匹配网络的一个或多个源侧电容器中耗散的电力。曲线3908示出在3.5kW的电力输出处在接收器谐振器线圈以及匹配网络的一个或多个装置侧电容器中耗散的电力。

[0184] 图40是示出对于包括耦合 k 为0.08的源谐振器和装置谐振器的无线电力传送系统而言,作为输出电压的函数的源谐振器和装置谐振器中的最大磁场的图。曲线4002示出在7.0kW的电力输出处在源谐振器中的最大磁场。曲线4004示出在3.5kW的电力输出处在源谐振器中的最大磁场。曲线4006示出在7.0kW的电力输出处在装置谐振器中的最大磁场。曲线4008示出在3.5kW的电力输出处在装置谐振器中的最大磁场。

[0185] 图41是示出作为输出电压的函数的、在装置的接收器谐振器(曲线4102~4112)和源谐振器(曲线4114~4116)中跨三角形匹配网络的一个或多个电容器两端的电压的图。曲线4102示出在7.0kW的电力输出处在图37中的电容器 C_a 两端的电压。曲线4104示出在3.5kW的电力输出处在图37中的电容器 C_a 两端的电压。曲线4106示出在7.0kW的电力输出处在图37中的电容器 C_b 两端的电压。曲线4108示出在3.5kW的电力输出处在图37中的电容器 C_b 两端的电压。曲线4110示出在7.0kW的电力输出处在图37中的电容器 C_c 两端的电压。曲线4112示出在3.5kW的电力输出处在图37中的电容器 C_c 两端的电压。曲线4114示出在7.0kW的电力输出处在源电容器两端的电压。曲线4116示出在3.5kW的电力输出处在源电容器两端的电压。

[0186] 针对特定谐振器配置和电力传递规范来优化阻抗匹配网络涉及针对网络选择电子组件。例如,参考图35A中所示的三角形匹配网络,所选择的一个分量是电感值 L_3 。如果 L_3 过小,则整流器中的二极管可能仅在振荡周期的一小部分导通,因此为了传送固定量的电力,通过二极管的峰值电流将必须更高,导致二极管中更多的电力耗散。另外,通过 L_3 的电流也将峰值更高并具有更多的谐波含量,导致电感器中的损耗。与此相对,更大的 L_3 值可能向阻抗匹配网络添加过多的ESR。因此,选择 L_3 的值以均衡这些竞争效应。

[0187] 图64A和64B是示出通过二极管和电感器 L_3 以将6.6kW传递到 $V_{dc}=420V$ 的负载的峰值电流的图。对于 $L_3=20\mu H$ 的电容器(图64A),峰值电流为34.5A。对于 $L_3=50\mu H$ 的电容器(图64B),峰值电流为26.7A。

[0188] 图65A和65B是示出通过二极管和电感器 L_3 以将3.3kW传递到 $V_{dc}=420V$ 的负载的峰值电流的图。对于 $L_3=20\mu H$ 的电容器(图65A),峰值电流为19.9A。对于 $L_3=50\mu H$ 的电容器(图65B),峰值电流为15.3A。

[0189] 如上所述,一旦确定了阻抗匹配网络的配置,则以优化网络配置。通常,装置匹配点 U_d 影响无线电力传送的总体效率以及电力在源与装置之间如何耗散。更高 U_d 值意味着在源中耗散更多的电力并且在装置中耗散更少的电力。可以优化阻抗匹配网络以在源谐振器和装置谐振器之间的最大偏移处(即, $k=0.07$ 处)满足条件 $U_d=50$ (即,源和装置中的电力耗散均等)。阻抗匹配网络的最佳配置通常是使用最小数量的电容器同时满足可接受容限内的优化条件的配置。

[0190] 图66A和66B是示出对于(American Technical Ceramics Corp.旗下的)800E系列电容器(图66A)和(德国慕尼黑的EPCOS旗下的)薄膜电容器而言、作为装置的接收谐振器线圈电感的电感的函数的装置的阻抗匹配网络中的电容器的数量的图。各图均示出针对三角形匹配网络和星形匹配网络这两者的结果。图66A对应于目标 U_d 为50的2000V峰值电压和6.6kW的电容器。图66B对应于目标 U_d 为50的600V RMS电压和6.6kW的电容器。

[0191] 在选择了要使用的电容器的类型(即,800E系列电容器)和接收器谐振器线圈的电感($43.5\mu H$,其可以用8个导电材料环实现)之后,选择阻抗匹配网络中的不同电容器的数量和电容值,这受到抗匹配条件($U_d=50$)的约束,并进一步受到用于实现该阻抗匹配条件的电容器数量应该尽可能小的约束。

[0192] 图67是优化的设备阻抗匹配网络的示意图。在优化的网络中, $L_{3a}=L_{3b}=25\mu H$ 、 $C_a=28.6nF$ (用 $5\times 5.1nF+1\times 3.0nF$ 的800E电容器来实现)、 $C_{b1}=C_{b2}=36.8nF$ (用 $7\times 5.1nF+1\times 1.0nF$ 的800E系列电容器来实现)、 $C_3=51.0nF$ (用 $10\times 5.1nF$ 的800E系列电容器来实现)。优化的网络中所使用的电容器的总数是32。优化的网络在几何形状上足够小,使得该网络适应图5B中所示的“顶帽”谐振器的空体积。

[0193] 图68是示出在0.07的耦合 k 值处对于优化的阻抗匹配网络而言作为输出电压的函数的优值 U_d 的图。在3.3kW输出(曲线6802)和6.6kW输出(曲线6804)处针对 U_d 的电阻分量在300V和400V之间(并且具体地,在约350V处)实现了目标 $U_d=50$,但并没有在6.6kW输出(曲线6806)或3.3kW输出(曲线6808)处针对 U_d 的无功分量在300V和400V之间(并且具体地,在约350V处)实现了目标 $U_d=50$ 。

[0194] 图69是示出对于源谐振器和接收器谐振器之间耦合值为 $k=0.07$ 的具有优化的装置阻抗匹配网络的无线电力传送系统而言、源的各种组件中耗散的电力量的图。曲线6902、

6904、6906和6908示出在7.0kW的输出电力处在源的谐振器线圈绕组、屏蔽件、铁氧体磁性构件和电容器中耗散的电力。曲线6910、6912、6914和6916示出在3.5kW输出电力处在源的谐振器线圈绕组、屏蔽件、铁氧体磁性构件和电容器中耗散的电力。

[0195] 图70是示出对于源谐振器和接收器谐振器之间耦合值为 $k=0.07$ 的具有优化的装置阻抗匹配网络的无线电力传送系统而言、装置的各种组件中耗散的电力量的图。曲线7002、7004、7006和7008示出在7.0kW的输出电力处在装置的接收器线圈绕组、屏蔽件、铁氧体磁性构件和电容器中耗散的电力。曲线7010、7012、7014和7016示出在3.5kW输出电力处在装置的接收器线圈绕组、屏蔽件、铁氧体磁性构件和电容器中耗散的电力。

[0196] 图71是示出对于源谐振器和接收器谐振器之间耦合值为 $k=0.07$ 的具有优化的装置阻抗匹配网络的无线电力传送系统而言、作为输出电压的函数的铁氧体磁性构件中的磁场的图。曲线7102和7104分别示出在6.6kW和3.3kW的电力输出处源谐振器的磁性构件中的磁场。曲线7106和7108分别示出在6.6kW和3.3kW的电力输出处装置的接收器谐振器的磁性构件中的磁场。

[0197] 图72是示出对于源谐振器和接收器谐振器之间耦合值为 $k=0.07$ 的具有优化的装置阻抗匹配网络的无线电力传送系统而言、作为输出电压的函数电容器两端的电压的图。曲线7202和7204分别示出在6.6kW和3.3kW的输出电力处 C_a 两端的电压。曲线7206和7208分别示出在6.6kW和3.3kW的输出电力处 C_b 两端的电压。曲线7210和7212分别示出在6.6kW和3.3kW的输出电力处 C_c 两端的电压。

[0198] 图73是示出对于源谐振器和接收器谐振器之间耦合值为 $k=0.07$ 的具有优化的装置阻抗匹配网络的无线电力传送系统而言、作为输出电压的函数的通过源谐振器线圈和装置的接收器谐振器线圈的电流的图。曲线7302和7304分别示出在6.6kW和3.3kW的输出电力处通过源谐振器线圈的电流。曲线7306和7308分别示出在6.6kW和3.3kW的输出电力处通过装置的接收器谐振器线圈的电流。

[0199] 附加谐振器配置

[0200] 图42是示出由磁性材料(例如,铁氧体)的区块4202的阵列形成的磁性构件的实施例的示意图。在一些实施例中,铁氧体区块4202可具有约 $150\text{mm}\times 100\text{mm}$ 的尺寸,并且厚度为约5mm或8mm或更大。在某些实施例中,铁氧体区块4202可以布置成使得在邻接区块之间存在约0.4mm的均等间隙。在一些实施例中,磁性构件的最大尺寸可以是约 $500\text{mm}\times 500\text{mm}$ 。

[0201] 通常,磁性构件的中心区域可以留空(如图42所示)或用附加的磁性材料填充。在一些实施例中,如图43所示,在谐振器中,磁性构件可以与铝屏蔽件4302相隔大约40mm。图42和43中所示的磁性构建通常用在源谐振器中。

[0202] 图44示出源谐振器线圈4402的实施例的图像,其中该源谐振器线圈4402固定到位于铝屏蔽件4302上方并与铝屏蔽件4302隔开的磁性构件4202。在图44中,源谐振器线圈具有与磁性构件类似的外部尺寸(即,约 $500\text{mm}\times 500\text{mm}$),谐振器线圈绕组跨距4404约为130mm,并且这些线圈绕组具有约 240mm^2 的内部尺寸4406。

[0203] 通常,通过将多个谐振器线圈并联缠绕在谐振器内可以实现更高的谐振器Q值。在图44中,三个线圈并联缠绕,其中各线圈中最少有5个环,以实现目标电感值。

[0204] 图45A和45B分别是示出由铁氧体区块4502的阵列形成的磁性构件的实施例的示意图和图像。在一些实施例中,铁氧体区块4502可以具有约 $150\text{mm}\times 100\text{mm}$ 的尺寸,并且厚度

为约5mm或8mm或更大。在某些实施例中,铁氧体区块4502可以布置成使得在区块之间存在约0.4mm的均等间隙。在一些实施例中,磁性构件的最大尺寸可以是约200mm×450mm。图45A和45B中所示的磁性构件通常用在装置的接收器谐振器中。

[0205] 图46是固定到磁性构件4502的装置接收器谐振器线圈4602的实施例的图像。在图46中,装置接收器谐振器线圈具有与图42中所示的磁性构件类似的外部尺寸(即,约200mm×450mm)。图42中的接收器谐振器线圈包括在图45的磁性构件的表面上形成七个环的单个配线。接收器谐振器线圈4602的电感约为33.1μH,并且接收器谐振器线圈4602的品质因数约为591。

[0206] 图47A是固定到磁性构件4704的源谐振器线圈4706的实施例的示意图。在一些实施例中,例如,磁性构件4704可具有约50cm×50cm的尺寸,并且厚度为约5mm、约8mm或更大。线圈4706和磁性构件4704位于屏蔽件4702上方并且与屏蔽件4702隔开。在某些实施例中,例如,屏蔽件4702由诸如铝等的导电材料形成,并且具有约60cm×60cm的尺寸。在一些实施例中,磁性构件4704和屏蔽件4702之间的间隙4708可以为约50mm。在某些实施例中,线圈4706的电感可以为约19.9μH,并且线圈4706的品质因数可以为约1150。在某些实施例中,线圈4706可以包括并联缠绕的至少三组线圈绕组,其中各组由不同的配线或导电材料形成。绕组可以并联连接以产生高Q谐振器线圈。作为示例,各线圈绕组可以包括至少五个环以实现目标电感。

[0207] 图47B是示出固定到磁性构件4712的装置接收器谐振器线圈4716的实施例的示意图。在一些实施例中,磁性构件4712可具有约45cm×20cm的尺寸,并且厚度为约5mm、约8mm或更大。在某些实施例中,如图5B所示,磁性构件4712的中心区域可以是阶梯形的,使得中心区域突出到线圈4716内部的区域中。在一些实施例中,谐振器线圈的中心的磁性材料的厚度可以小于其它部位的磁性材料的厚度。

[0208] 线圈4716和磁性构件4712固定到由导电材料(例如,铝)形成并且具有例如约50cm×25cm的尺寸的屏蔽件4710。在一些实施例中,线圈4716的电感可以为33.3μH,并且线圈4716的品质因数可以为约443。

[0209] 对于图47A和47B所示的源谐振器和装置谐振器,针对线圈之间的最大相对偏移 $(X, Y, Z) = (10, 10, 15)$ 的耦合k值可以是:对于固定到厚度为5mm的磁性构件的源谐振器, $k = 0.0707$;以及对于固定到厚度为8mm的磁性构件的源谐振器, $k = 0.0710$ 。

[0210] 图48A是示出固定到磁性构件4802的源谐振器的实施例的示意图,其中该磁性构件4802由在各拐角处尺寸为约10cm×10cm的铁氧体区块并且在拐角外部尺寸为约15cm×10cm的区块形成。该谐振器的品质因数约为1220。

[0211] 图48B是示出固定到磁性构件4804的源谐振器的实施例的示意图,其中该磁性构件4804由尺寸为约15cm×10cm的铁氧体区块形成。该谐振器的品质因数约为1050。

[0212] 具有并联绕组的谐振器线圈

[0213] 图49是示出源谐振器4902的实施例的图像,其中该源谐振器4902包括在磁性构件上方缠绕成线圈形状并且并联电气连接的三个并联绕组4904、4906和4908。在实施例中,绕组可以并联电气连接而不是串联,以减小线圈两端可能出现的总电压。尽管在图49中示出了三个绕组,但更一般地,任意数量的绕组可以并联缠绕以形成线圈并且并联电气连接。绕组可以具有相同或不同的配线直径,并且由并联绕组形成的线圈的整体形状可以是这里所

公开的任何不同形状。为了本公开,如果各自与线圈绕组相对应的两组环具有互补且相应的形状,并且形成一组环的导电材料与形成另一组环的导电材料之间的距离在两组环的沿着导电材料的长度的80%以上的相应部分之间是相同的,则两组环在物理上是“平行的”。如果两个绕组的环之间的磁耦合大于90%,则两个绕组可以被认为是在物理上平行的。在一些实施例中,多组并联环经常交错,使得形成回路的导体的相应部分彼此平行。

[0214] 在一些实施例中,在线圈包括多组并联的环(例如,绕组)的情况下,过量电流可以在最内侧线圈绕组中流动。这种情况可以发生的原因例如是最内侧绕组在线圈内通常具有比中间和外侧绕组更短的总长度。这是由于线圈内的绕组(最内侧绕组)的几何形状而引起的,因为最内侧绕组与其它绕组相比通常具有更小的平均环直径并且具有更短的总长度,因此具有与其它绕组相比更小的总电阻和电感。结果,相对于其它绕组,过量电流可以在最内侧线圈绕组中流动。更一般地,由于各绕组通常具有不同的长度,因此在各绕组中流动的电流是不同的,并且这些电流中的一些(或甚至全部)可以超过设计规范和/或安全准则。

[0215] 通常,由于具有过量电流的绕组中热耗散更大,因此任何一个线圈绕组中的过量电流可能导致无线电力传送期间的效率降低。通常,热耗散与各并联线圈绕组中的电流的平方成比例地增加。在本部分中,公开了用于均衡多个并联绕组中的电流的各种方法。这些方法的基本总体目的是控制多个线圈绕组中的电流,以使得在可接受的容限范围内绕组中流动的实际电流等于预定的或选择的电流分布。通常,预定电流分布被表示为通过组成线圈的绕组的总电流的百分比。例如,对于包括三个并联绕组的线圈,预定电流分布可以对应于线圈所承载的流经各绕组的总电流的33.3%(即,三分之一)。

[0216] 在一些实施例中,预定电流分布对应于绕组之间的总电流的等分。因此,对于例如具有四个并联绕组的线圈,预定电流分布对应于由四个绕组各自所承载的总线圈电流的25%的划分。

[0217] 在某些实施例中,预定分布不对应于绕组之间的电流的等分。为了实现某些功能,例如,在线圈的并联绕组之间不均等地划分总线圈电流,这可能是有利的。可以灵活地使用这里所公开的方法和系统以在线圈的并联绕组之间实现均等和不均等的预定电流分布。

[0218] 在一些实施例中,为了使各线圈绕组中的电流均衡(即,标称均等),线圈绕组可以彼此“交叉”地绞合。图49示出位置4910、4912和4914处的三个这样的绞合。线圈绕组以下列方式交叉:在位置4910处,绕组4908与绕组4906交叉;在位置4912处,绕组4908与绕组4904交叉;并且在位置4914处,绕组4906与绕组4904交叉。在一些实施例中,三个这种绞合可足以大致均衡贯穿线圈的电流。然而,更一般地,三个线圈的绕组可以贯穿线圈交叉或绞合(例如,包括任意数量的交叉或绞合),以进一步均衡绕组中的电流,并且确保各配线具有相近的长度。在一些实施例中,对于具有三个线圈绕组的线圈,例如图49中的4904、4906和4908,绕组中的绞合可以以围绕线圈的距离的1/3各自分开。更一般地,对于具有n个线圈绕组的线圈,绕组可以以沿着环所测量的单个绕组环的总长度的1/n间隔开。

[0219] 通常,绕组之间的交叉用于大致均衡绕组的长度。通过使绕组长度均等,各绕组具有相近的电阻和电感值,因此,总线圈电流中大致均等的部分流经各绕组。

[0220] 图50是示出源谐振器(诸如图47A中所示的源谐振器等)的磁性部件中的磁场的图。在图50中,磁性部件由厚度为5mm的铁氧体形成。在电流为198A的情况下,最大磁场为170mT。

[0221] 图51是示出源谐振器(诸如图47A中所示的源谐振器等)的磁性部件中的磁场的图。在图51中,磁性部件由厚度为8mm的铁氧体形成。在电流为198A的情况下,最大磁场为107mT。

[0222] 图52是示出源谐振器(诸如图47A中所示的源谐振器等)的磁性部件中的磁场的图。在图52中,磁性部件由尺寸为15cm×10cm×8mm的铁氧体区块形成。在电流为198A的情况下,最大磁场为101mT。

[0223] 图53是示出装置谐振器(诸如图47B中所示的装置谐振器等)的磁性部件中的磁场的图。在图53中,磁性部件由厚度为8mm的铁氧体形成。

[0224] 图54A和54B是示出具有图47A中所示的配置的源谐振器上方1cm的距离处的磁场的图。图55是示出以对数标度绘制的具有图47A中所示的配置的源谐振器上方1cm的距离处的磁场的图。

[0225] 如上所述,在一些实施例中,可以通过在沿着绕组长度的点处(例如,使用绞合)将绕组交叉来使形成谐振器线圈的并联绕组中的电流均衡。也可以使用其它方法来均衡多个并联线圈绕组中的电流。具体地,例如参考图56,可以使用一个或多个电感器来均衡并联绕组5602、5604、5606各自中的电流。图57A和57B示出串联连接并用于均衡具有并联绕组5602、5604和5606的谐振器线圈中的电流的一组电感器5702、5704、5706的示意性电路图。在一些实施例中,如图57B所示,一个或多个(或甚至全部)电感器5702、5704、5706可以是可调谐的。通常,串联连接的电感器向其所连接至的相应绕组添加电感。通过向一些或所有绕组添加适当量的电感,可以调整各绕组的有效电感,以在线圈的各绕组之间实现预定或目标电流分布。

[0226] 为了使并联绕组5602、5604和5606(以下分别称为绕组1、2和3,或分别称为最内侧、中间和最外侧绕组)中的电流均衡,可以测量各并联绕组的电感,并且可以基于所测量到的电感来调整电感器5702、5704和5706,以使得并联绕组中的电流均衡。在下面的论述中,电感器5702、5704和5706可以分别被称为 L_1^A 、 L_2^A 和 L_3^A 。通常,各种可调电感器可用作电感器5702、5704和5706。例如,在全部内容通过引用包含于此的美国专利申请公开第2015/0051750号中公开了合适的可调电感器。

[0227] 下面论述的方法可以在谐振器的制造阶段期间进行,使得具有适当电感值的电感器可以在加工时被包括在谐振器中。也就是说,可以以选择和/或调整与并联线圈绕组串联连接的电感器为目标来进行所述方法,使得在谐振器制造完成时,线圈绕组的电感已经进行了调整以实现总线圈电流在绕组之间的特定的预定划分。如上所述,该划分可以对应于电流在绕组之间的标称均等的分布,但是也可以对应于电流的不均等分布。

[0228] 这些方法还可以通过作为谐振器的一部分或连接到谐振器的电子处理器在制造后进行。该电子处理器可以被配置为以单个优化序列一次确定可调电感器的合适的电感值。可选地,处理器可以被配置为响应于工作环境和/或谐振器的参数的变化而为了诸如校准和重新校准的目的多次(例如,以预定的时间间隔和/或响应于用户信号)重复以下论述的步骤。下面的论述描述了电子处理器可以进行的各种步骤。应当理解,这些步骤可以在谐振器线圈的加工之前和/或之后进行,并且某些步骤可以在设计阶段期间人工执行。

[0229] 在无线电力传送系统中,电流均衡步骤和方法可以在系统的工作期间由一个或多个电子处理器(例如,处理器105和/或111)进行。图74是包括用于使谐振器线圈的并联绕组

中的电流均衡的一系列步骤的流程图7400。在以下图74的论述中,参考以上三个并联绕组1、2和3。然而,更一般地,应当理解,这里所公开的方法可以用于使形成谐振器线圈的任意数量的并联绕组中的电流均衡。

[0230] 在第一步骤7402中,电子处理器确定三个相连接的绕组的电感矩阵L,由电感值 L_1 、 L_2 和 L_3 表示。在一些实施例中, $L_1 < L_2 < L_3$,以容纳并联绕组,其中 L_1 是最内侧绕组, L_2 是中间绕组,并且 L_3 是最外侧绕组。可以通过(例如,使用连接到电子处理器的电感传感器,图56中未示出)测量绕组之间的耦合来直接获得电感矩阵L的分量。电子处理器被配置为从传感器接收耦合(即电感)测量,并且基于这些测量来确定矩阵L中的对角元素的值。具体地,L中的对角线元素与其它绕组被电子处理器开路时所测量到的各绕组的电感相对应。通过在使相连接的绕组j短路的同时测量相连接的绕组i的电感 $L_{i,j}$ 而获得其它元素 $L_{i,j} = L_{j,i}$,这是由于:

$$[0231] \quad l_{i,j} = L_i - \frac{L_{i,j}^2}{L_j} \rightarrow L_{i,j} = \sqrt{L_j(L_i - l_{i,j})}。$$

[0232] 在将以角频率 ω 振荡的振幅为V的正弦电压施加于并联连接的绕组时的情况下,三个绕组中流动的电流的振幅由下式确定:

$$[0233] \quad [I_1 \quad I_2 \quad I_3] = \frac{L^{-1}}{\omega} \begin{bmatrix} V \\ V \\ V \end{bmatrix}。$$

[0234] 例如,对于 $L_1 = 21.9\mu\text{H}$ 、 $L_2 = 23.0\mu\text{H}$ 、 $L_3 = 23.7\mu\text{H}$ 、 $l_{1,2} = 5.24\mu\text{H}$ 、 $l_{1,3} = 6.35\mu\text{H}$ 和 $l_{2,3} = 5.61\mu\text{H}$ 。在该示例中,电子处理器使用该处理器所接收到的电感测量来确定以下电感矩阵:

$$[0235] \quad L = \begin{pmatrix} 21.9 & 19.6 & 19.2 \\ 19.6 & 23.0 & 20.3 \\ 19.2 & 20.3 & 23.7 \end{pmatrix} \mu\text{H}。$$

[0236] 在存在跨并联连接的绕组1、2和3的共用电压V的情况下的相应的电流重新划分是:

$$[0237] \quad [I_1 \quad I_2 \quad I_3] = (2.35, 1.23, 1.27) \frac{10^4 V}{\omega}。$$

[0238] 该电流重新划分对应于总电流在三个绕组之间的以下相对重新划分:(48.45%, 25.36%, 26.19%)。因此,在这种线圈中没有均衡电流的情况下,电流 I_1 几乎是 I_2 或 I_3 的两倍。

[0239] 在步骤7404中,电子处理器确定绕组之间的期望或目标电流重新划分。目标电流重新划分可以从存储器或数据存储单元取得的一组存储值,由用户提供的一组值或者电路中的硬编码或固定实现。目标电流重新划分表示电子处理器试图通过调整耦合到线圈绕组的个体电感来实现的性能条件。如上所述,在一些实施例中,目标重新划分对应于总电流在绕组之间的等分。该示例将在下面更详细地论述。然而,更一般地,这里所公开的方法和系统可以实现总电流在绕组之间的任何目标重新划分。

[0240] 然后,在步骤7406中,电子处理器确定分别与 L_1 和 L_2 串联相加的校正电感 L_1^Δ 和 L_2^Δ ,

以在处理在步骤7408结束之前利用最小量的附加电感实现例如均匀分割的电流重新划分(即, $I_1 = I_2 = I_3$)。 L_1^Δ 和 L_2^Δ 由下式给出:

$$[0241] \quad L_1^\Delta = L_3 - L_1 + L_{2,3} - L_{1,2},$$

$$[0242] \quad L_2^\Delta = L_3 - L_2 + L_{1,3} - L_{1,2}.$$

[0243] 在先前的示例中,这得到 $L_1^\Delta = 2.5\mu H$ 和 $L_2^\Delta = 0.3\mu H$, 并且校正后的电流重新划分变为:

$$[0244] \quad [I_1^\Delta \quad I_2^\Delta \quad I_3^\Delta] = \frac{1}{\omega} \left[L + \begin{bmatrix} L_1^\Delta & 0 & 0 \\ 0 & L_2^\Delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} V \\ V \\ V \end{bmatrix} = (1.58, 1.58, 1.58) \frac{10^4 V}{\omega}.$$

[0245] 如前所述,流程图7400的前述讨论以示例的方式涉及三个绕组1、2和3以及均匀的电流重新划分。然而,更一般地,流程图7400中所示的电流均衡所用的方法可以应用于具有任意数量(n)的并联绕组的线圈,并且目标在于这些绕组之间的期望的电流重新划分。因此,对于具有并联电气连接的n个并联绕组的线圈,电子处理器可以进行以下步骤以使得各绕组中的电流均衡。

[0246] 首先,在步骤7402中,电子处理器确定n个绕组的电感矩阵L。可以通过测量绕组之间的耦合(即电感)来直接获得L的分量。矩阵L中的对角元素是在其它绕组开路时所测量到的各相连接的绕组的电感。非对角矩阵元素 $L_{i,j} = L_{j,i}$ 是由电子处理器通过在使绕组j短路的同时测量各绕组i的电感来确定的,这是由于:

$$[0247] \quad l_{i,j} = L_i - \frac{L_{i,j}^2}{L_j} \rightarrow L_{i,j} = \sqrt{L_j(L_i - l_{i,j})}.$$

[0248] 然后,在步骤7404中,电子处理器确定总电流在线圈绕组中的期望或目标重新划分。接着,在步骤7406中,电子处理器从相对于绕组1至n串联添加的任何组合 $L_1^\Delta, \dots, L_n^\Delta$ (i = 1至n) 中确定电感器的适当电感值,以实现n个绕组中的目标电流重新划分。所添加的电感 L_i^Δ 可以被实现为使得这些电感不与n个绕组中的任何一个磁性地耦合也不彼此耦合。由于不存在交叉耦合,因此沿着L矩阵的对角添加电感 L_i^Δ , 余下L的其它元素不变。重新划分由电子处理器通过计算逆矩阵来确定:

$$[0249] \quad M^\Delta = \left[L + \begin{bmatrix} L_1^\Delta & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & L_n^\Delta \end{bmatrix} \right]^{-1}$$

[0250] 这得到相应的电流振幅 I_i^Δ 重新划分:

$$[0251] \quad [I_1^\Delta \quad \dots \quad I_n^\Delta] = \frac{M^\Delta}{\omega} \begin{bmatrix} V \\ \vdots \\ V \end{bmatrix}$$

[0252] 其中V是跨并联连接的绕组的共用电压。

[0253] 电子处理器确定使得优值最小化的电感的组合 $L_1^\Delta, \dots, L_n^\Delta$:

$$[0254] \quad \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_i^\Delta}{\sum I} - \frac{1}{n} \right)^2$$

[0255] 其中 $\sum I = I_i^\Delta$, $i=1$ 至 n , 并且其中 n 等于相连接的线圈的数量。

[0256] 在一些实施例中,更容易发现使得电流在 n 个绕组中大致均等划分的电感的组合 $L_1^\Delta, \dots, L_n^\Delta$ 添加了加大的电感器值。在没有其它约束的情况下, $L_1^\Delta, \dots, L_n^\Delta$ 的一些大的值可以自然地使优值最小化:

$$[0257] \quad \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_i^\Delta}{\sum I} - \frac{1}{n} \right)^2。$$

[0258] 例如,在某些实施例中,所添加的电感 $L_1^\Delta, \dots, L_n^\Delta$ 可以远大于绕组的电感。作为示例, $L_1^\Delta = \dots = L_n^\Delta = \infty$ 将得到绕组之间的理想电流重新划分。类似地,如果所添加的电感 $L_1^\Delta, \dots, L_n^\Delta$ 远大于感应最强的绕组,则可产生接近理想的电流分割。然而,从实际的角度来看,这可能并没有帮助。出于实际原因,在优化期间,电子处理器可以考虑到诸如空间约束、限制附加损耗、限制磁性材料的添加量、限制不期望的总添加电感以及限制无线电力传送系统中的附加复杂性。例如,由于对源谐振器线圈的整体大小施加的空间限制,因此绕组数量 n 可能受到限制。在一些实施例中,可以将 $L_1^\Delta, \dots, L_n^\Delta$ 值的范围限制为小于或等于绕组的缩放电感:

$$[0259] \quad L_i^\Delta \leq aL_i$$

[0260] 其中 a 是零和绕组的最大电感与绕组的最小电感之间的差的缩放量。

[0261] 在某些实施例中,将附加电感添加至的绕组的数量 m 可以由电子处理器来确定。将附加电感添加至的绕组的数量可以限制为小于或等于绕组总数 n 。在一些实施例中,可以在优化针对 n 个绕组的电流分布之前确定将附加电感添加至的绕组的数量 m 。在某些实施例中,在电流分布优化期间可以迭代地选择将附加电感添加至的绕组的数量 m 的不同组合。

[0262] 在一些实施例中,如果 $m=n-1$,则没有添加电感器的一个绕组是具有最大电感的绕组。相反,如果 $m < n-1$,则可以将电感器添加到具有最低电感的绕组,并且余下具有最大电感的 $n-m$ 个绕组不添加电流均衡用的附加电感器。在某些实施例中,电子处理器可以基于依赖于外部因素(装置的有无、有损耗材料的有无等)的绕组的电感的顺序的改变来控制电感器的增加。

[0263] 例如,对于 $n=3$ 的绕组和 $m=1$,电子处理器可以进行三个不同的优化,如下所述,在各优化中将附加电感器的三个电感值中的两个设置为零:

$$[0264] \quad L_2^\Delta = L_3^\Delta = 0 \text{ (优化1) ,}$$

$$[0265] \quad L_1^\Delta = L_3^\Delta = 0 \text{ (优化2) ,}$$

[0266] $L_1^\Delta = L_2^\Delta = 0$ (优化3)。

[0267] 电子处理器可以优化附加电感的组合 $(L_1^\Delta, L_2^\Delta, L_3^\Delta)$,以使得下式最小化:

$$[0268] \left(\frac{I_1^\Delta}{\sum I} - \frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{I_2^\Delta}{\sum I} - \frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{I_3^\Delta}{\sum I} - \frac{1}{3}\right)^2$$

[0269] 其中 $\sum I = I_1^\Delta + I_2^\Delta + I_3^\Delta$ 。这得到三个优化的配置以及三个绕组中的相应的电流分布。然后,电子处理器可以比较三种配置以确定哪个附加电感器 L_1^Δ, L_2^Δ ,或 L_3^Δ 在电流分布(或另一度量)方面得到最佳结果。

[0270] 在一些实施例中,如图57C所示,可以使用单个电感器5702在多个并联线圈绕组之间得到大致均等的电流重新划分。例如,连接到绕组5602(最内侧绕组)的单个电感器 $L_1^\Delta = 2.18 \mu H$ (即 $L_2^\Delta = L_3^\Delta = 0$)可以显著地改善电流重新划分,其中预测分布为约33.5%-34.6%-31.9%。这些结果在各绕组中的大致均等的电流分布(例如,33.3%)的目标的5%内。在一些实施例中,电子处理器可以迭代地进行优化,直到各绕组中的电流分布在目标电流分布的20%内(例如,在15%内、在10%内、在5%内),其中目标电流分布可以(但不必是)绕组之间的均等电流分布。然后,流程图7400中所示的过程在步骤7408结束。

[0271] 在某些实施例中,最外侧绕组5606(绕组3)中略微减小的电流可能是有利的,这是由于绕组5606的较长长度得到可能比其它绕组的电阻高大约8%的电阻。在一些实施例中,可能期望特定的电流分布,并且电子处理器可以使更一般的优值最小化:

$$[0272] \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_i^\Delta}{\sum I} - s_i\right)^2$$

[0273] 其中 s_i 是在绕组 i 中流动的总电流的目标分数(因此 $\sum_{i=1}^n s_i = 1$)。例如,与其它绕组相比,其中一个绕组可以被更有效地冷却,因此,可以相应地改变电流重新划分。在另一示例中,一些绕组可以在制造时具有不同于预期的电阻或电感,并且电子处理器可以能够补偿这些差异。

[0274] 在一些实施例中,电感器 L_1^Δ 可以包括由磁性材料形成的芯的对。例如,可以使用具有由铁氧体形成的平面E芯的电感器。对于具有2mm的间隙和4匝4200/44利兹线的电感器,在源电流值 $I_s = 140 A_{RMS}$ 的情况下,电感器耗散可以为约3.2W。可以使用与最内侧绕组(绕组5602)相同的利兹线来缠绕电感器 L_1^Δ ,因此可以简化连接。在某些实施例中,在添加了电感器 L_1^Δ 的情况下,整体电感测量得到:

$$[0275] L = \begin{pmatrix} 24.2 & 19.6 & 19.2 \\ 19.6 & 23.0 & 20.3 \\ 19.2 & 20.3 & 23.7 \end{pmatrix} \mu H。$$

[0276] 在跨并联连接的三个绕组施加电压 V 的情况下,得到以下关系:

$$[0277] \quad (I_1, I_2, I_3) = (1.56, 1.68, 1.52) \frac{10^4 V}{\omega}.$$

[0278] 可以通过将上述向量中的元素求和 ($1.56+1.68+1.52=4.76$) 并将各元素除以总和来计算绕组之间的电流重新划分。这表明最内侧绕组可以承载32.8%的电流,中间绕组承载35.2%的电流,并且最外侧绕组承载32.0%的电流。

[0279] 例如,对于以 $27.8A_{RMS}$ 的(具有三个并联绕组的)源线圈中的总电流在2.5kW的输出处测试的无线电力传送系统,实现以下电流重新划分:

[0280] 最内侧绕组: $8.4A_{RMS}$ (30.2%),

[0281] 中间绕组: $9.9A_{RMS}$ (35.7%),

[0282] 最外侧绕组: $9.5A_{RMS}$ (34.1%)。

[0283] 该电流重新划分接近于基于低电力测量的预期电流重新划分。

[0284] 在当前实施例中,承载更大电流的绕组可以达到更高的工作温度和/或耗散最大的电力。图58A和58B是示出在工作期间针对承载总共10A的电流的线圈中的绕组的温度测量的图像。中间绕组5604发热到比最内侧绕组5602和最外侧绕组5606的温度(参见图58B,位置5804处的测量)稍大的温度(参见图58A,位置5802处的测量),这与以上预测一致。图59是示出作为时间的函数的、在各绕组5602(曲线5902)、5604(曲线5904)和5606(曲线5906)中承载的电流的图。如图所示,中间绕组(绕组5604)中所承载的电流大于最内侧和最外侧绕组中所承载的电流,这说明了中间绕组发热更大的原因。

[0285] 硬件和软件实现

[0286] 图75示出可与这里所述的系统和方法一起使用的电子控制器7503的示例。如前所述,可以使用电子控制器(更具体地,电子控制器的电子处理器,诸如处理器105和/或111等)来进行这里所公开的控制和/或计算功能中的任何一个,其中这些功能包括例如通过改变电力源的电力输出、调整工作和/或谐振频率以及调整阻抗匹配网络来控制无线电力传送系统的电力传送。可以使用电子控制器7503来控制不同线圈相对于其它线圈的电流方向、大小和相位。在一些实施例中,电子控制器7503可以直接连接到系统的各种元件或者与系统的各种元件无线通信。

[0287] 电子控制器7503可以包括处理器7502(例如,对应于处理器105和/或111)、存储器7504、存储装置7506和用于互连的接口7508。处理器7502可以处理电子控制器7503内的执行用的指令,其中这些指令包括存储在存储器7504中或存储装置7506上的指令。例如,这些指令可以指示处理器7502确定系统的参数,诸如电力传送的效率、工作频率、谐振器的谐振频率和阻抗匹配条件等。电子控制器7503可以基于来自一个或多个传感器的检测信号来确定电力接收设备的类型、大小和对准。在某些实施例中,处理器7502被配置为向各种元件(例如,电力源、电力发送设备、电力接收设备、电力中继设备、阻抗匹配网络)发出控制信号以调整所确定的参数。例如,可以使用控制信号来调谐阻抗匹配网络中的电容器的电容值。在某些实施例中,可以使用控制信号来调整电力源的工作频率。控制信号可改变谐振器中的电容器的电容值以调谐该谐振器的谐振频率,以及/或者改变可调谐电感器的电感值以在谐振器线圈中的并联绕组之间重新划分电流。

[0288] 存储器7504可以存储与系统的优化参数有关的信息。例如,该信息可以包括针对从电力源输出的各种水平的电力的优化阻抗匹配条件。在某些实施例中,存储器7504可以

存储诸如谐振器的谐振频率和系统中的磁性组件的磁性质(例如,依赖于电力水平的磁导率)的信息,其中处理器7502可以使用这些信息以确定要发出的用以控制系统中的各种元件的信号。存储器还可以存储与目标电流重新划分相对应的一组值。

[0289] 存储装置7506可以是计算机可读介质(诸如软盘装置、硬盘装置、光盘装置或磁带装置等)、闪速存储器或其它类似的固态存储器装置或包括存储区域网络或其它配置中的装置的装置阵列。存储装置7506可以存储能够由上述处理器7502执行的指令。在某些实施例中,存储装置7506可以存储针对存储器7504所描述的信息。

[0290] 在一些实施例中,电子控制器7503可以包括用以在诸如显示器7516等的外部输入/输出装置上显示图形信息(例如,使用GUI或文本界面)的图形处理单元。图形信息可以通过用于显示信息的显示装置(例如,CRT(阴极射线管)或LCD(液晶显示器)监视器)来显示。用户可以使用输入装置(例如,键盘、指示装置、触摸屏、语音识别装置)向电子控制器7503提供输入。在一些实施例中,用户可以监视显示器7516以分析系统的电力传送状况。例如,在电力传送没有处于最佳状态的情况下,用户可以通过经由输入装置输入信息来调整参数(例如,电力传送水平、阻抗匹配网络中的电容器值、电力源的工作频率、谐振器的谐振频率)。基于所接收到的输入,电子控制器7503可以如上所述地控制系统。

[0291] 在一些实施例中,电子控制器7503可以监测系统的危险状况。例如,电子控制器7503可以检测系统中的过热,并通过系统的图形显示器或音频装置向用户提供警报(例如,视觉和/或听觉警报)。

[0292] 在某些实施例中,可以使用电子控制器7503来控制无线电力传送系统的一个或多个线圈中流动的电流的大小和相位。例如,处理器7502可以计算和确定要供应到电力发送设备中的线圈的电流的幅度和相位。该确定可以基于监视的电力传送效率和存储在存储器7504或存储单元7506中的信息。

[0293] 反馈信号可以由电子控制器7503接收和处理。例如,电子控制器7503可以包括用以从(可以具有自己的无线通信装置的)电力发送设备和/或电力接收设备其中之一或两者接收信息的无线通信装置(例如,射频、蓝牙接收器)。在一些实施例中,所接收到的信息可由处理器7502处理,处理器7502可进一步发出控制信号以调整如上所述的系统的参数。例如,可以使用控制信号来调整系统中的一个或多个谐振器线圈中流动的电流的大小和相位,以增加电力传送效率。

[0294] 这里所描述的系统和技术各种实施例可以通过可在电子控制器7503上执行和/或解译的一个或多个计算机程序来实现。这些计算机程序(也称为程序、软件、软件应用或代码)包括可编程处理器用的机器指令,并且可以以高级过程和/或面向对象的编程语言和/或以汇编/机器语言来实现。例如,计算机程序可以包含能够存储在如上所述的存储器7504和存储单元7506中并由处理器7502执行的指令。如这里所使用的,术语“计算机可读介质”是指用于向可编程处理器提供机器指令和/或数据的任何计算机程序产品、设备和/或装置(例如,磁盘、光盘、存储器、可编程逻辑器件(PLD)),包括接收机器指令的机器可读介质。

[0295] 通常,电子控制器7503可以在计算系统中实现以实现上述操作。例如,该计算系统可以包括后端组件(例如,作为数据服务器)或中间件组件(例如,应用服务器)或前端组件(例如,具有图形用户接口的客户端计算机)或它们的任何组合,以使得用户能够利用电子

控制器7503的操作。

[0296] 电子控制器7503或其一个或多个元件可以一体化在车辆中。电子控制器7503可以用于控制和/或监控安装在车辆中的电池的无线电力充电。在一些实施例中,如关于图75所描述的,显示器7516可以安装在邻近车辆的驱动轮的位置,使得用户可以监测电力充电的条件和/或电力充电的控制参数。显示器7516还可以使基于全球定位系统(GPS)信息的信息交通信息和道路地图可视化。诸如处理器7502、存储器7504和存储装置7506等的任何元件可以安装在能够使这些元件所进行的数据处理可视化的显示器7516后方的空间中。

[0297] 其它实施例

[0298] 尽管本公开包含许多具体实现详情,但是这些不应被解释为对本公开的范围的限制,而是作为与实施例相关的特征的描述。在分开的实施例的上下文中描述的特征通常也可以在单个实施例中组合地实现。与此相对,在单个实施例的上下文中描述的各种特征也可以在多个实施例中分开地或以任何合适的子组合来实现。此外,尽管特征可以在以上被描述为在某些组合中起作用并且甚至最初要求这样保护,但是来自所要求保护的组合的一个或多个特征通常可以从组合中去除,并且所要求保护的组合可以针对子组合或子组合的变形。

[0299] 除了这里明确公开的实施例之外,其它实施例也在本公开的范围內。

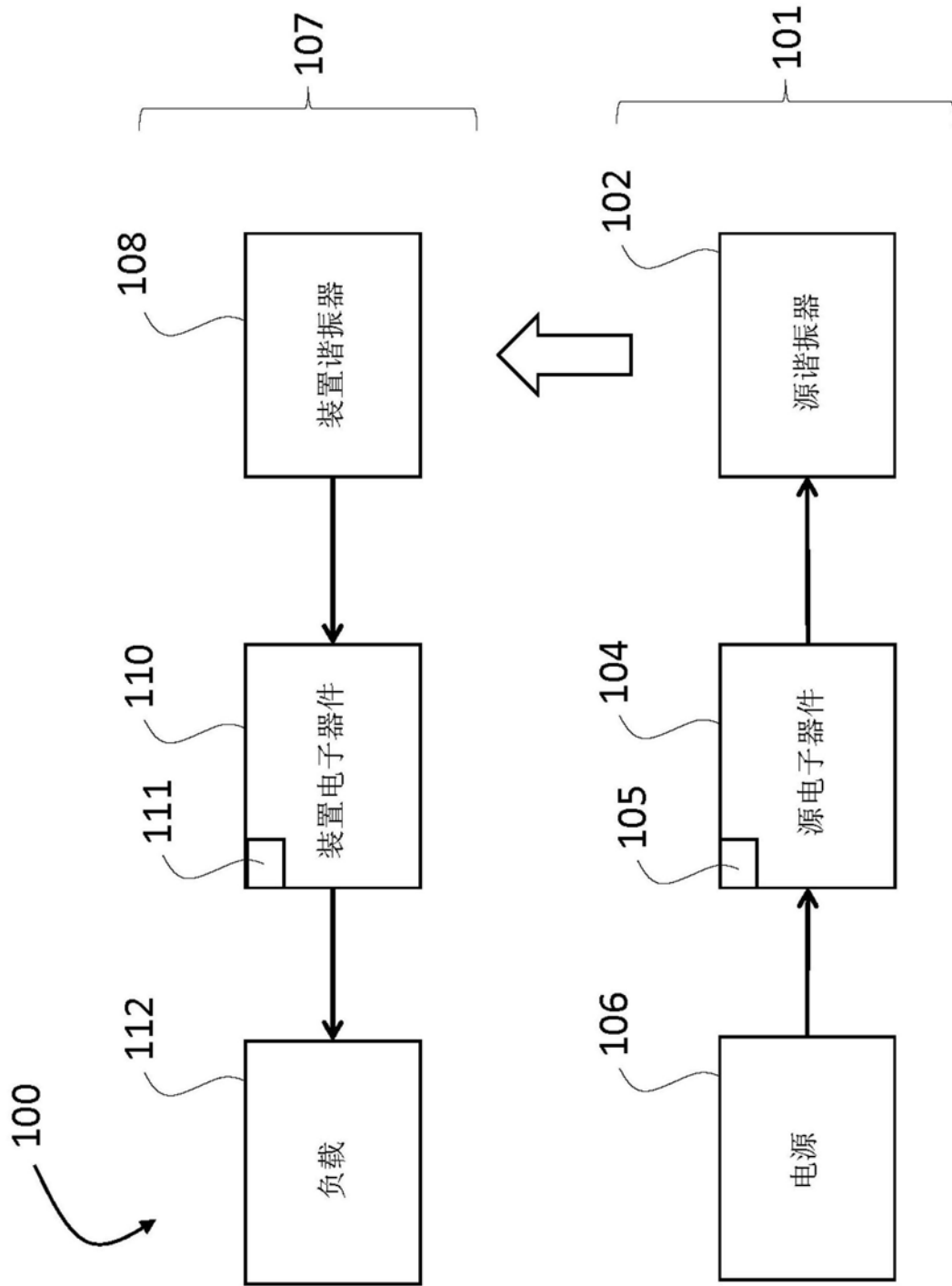


图1A

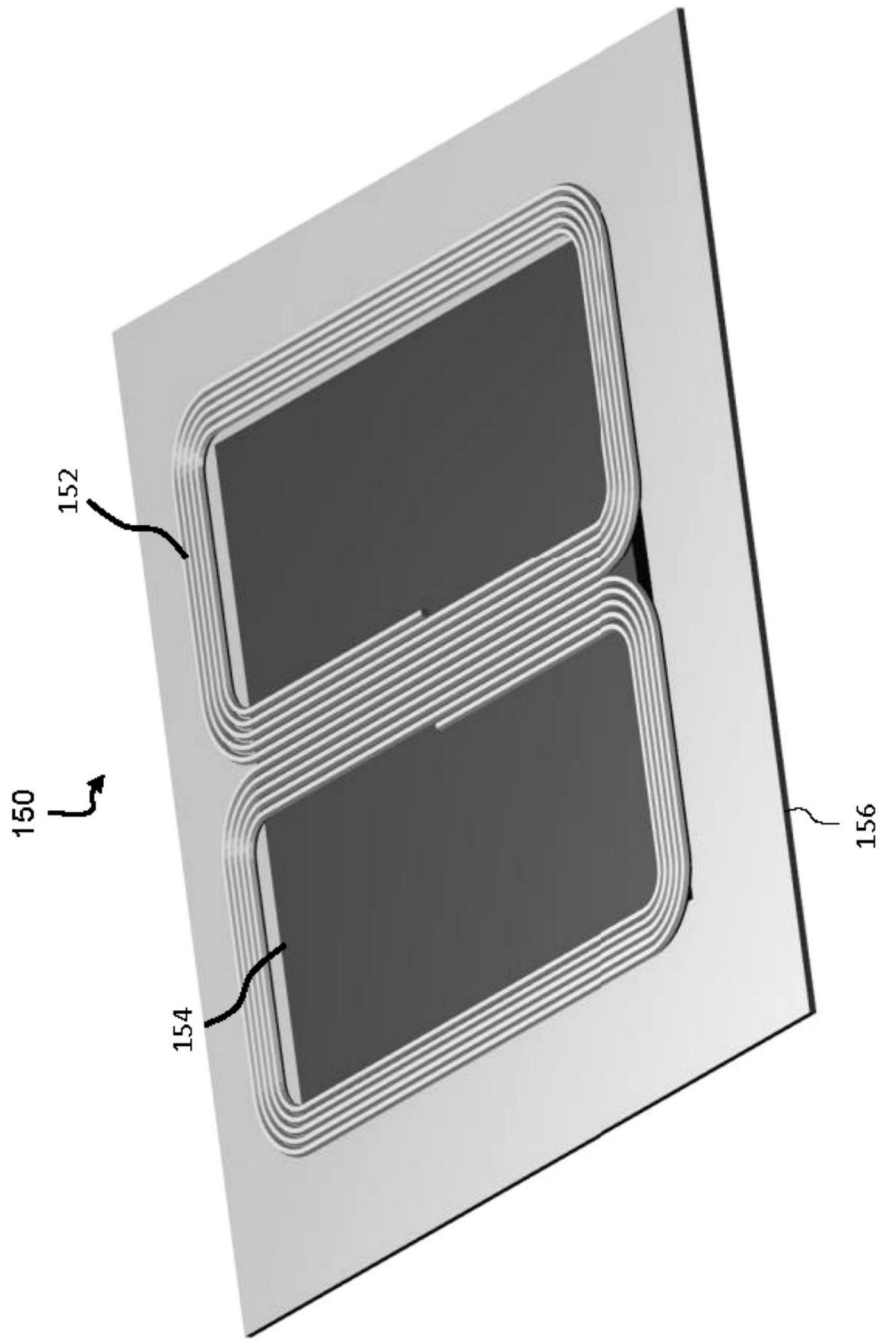


图1B

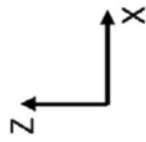
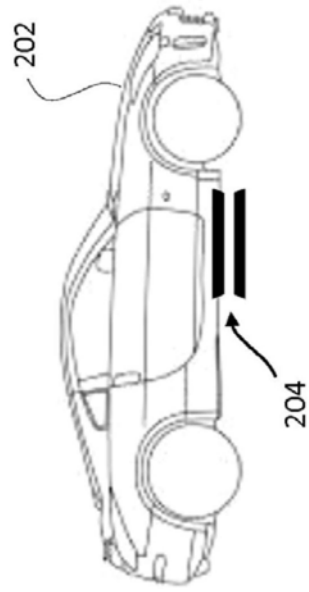


图2A

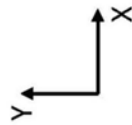
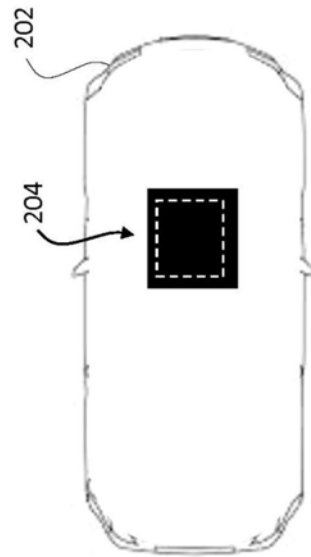


图2B

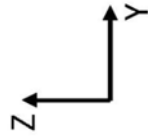
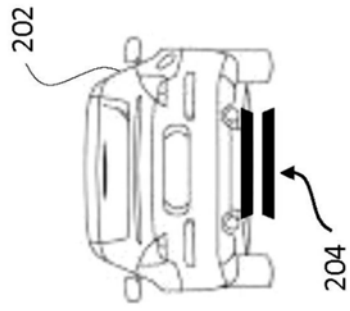


图2C

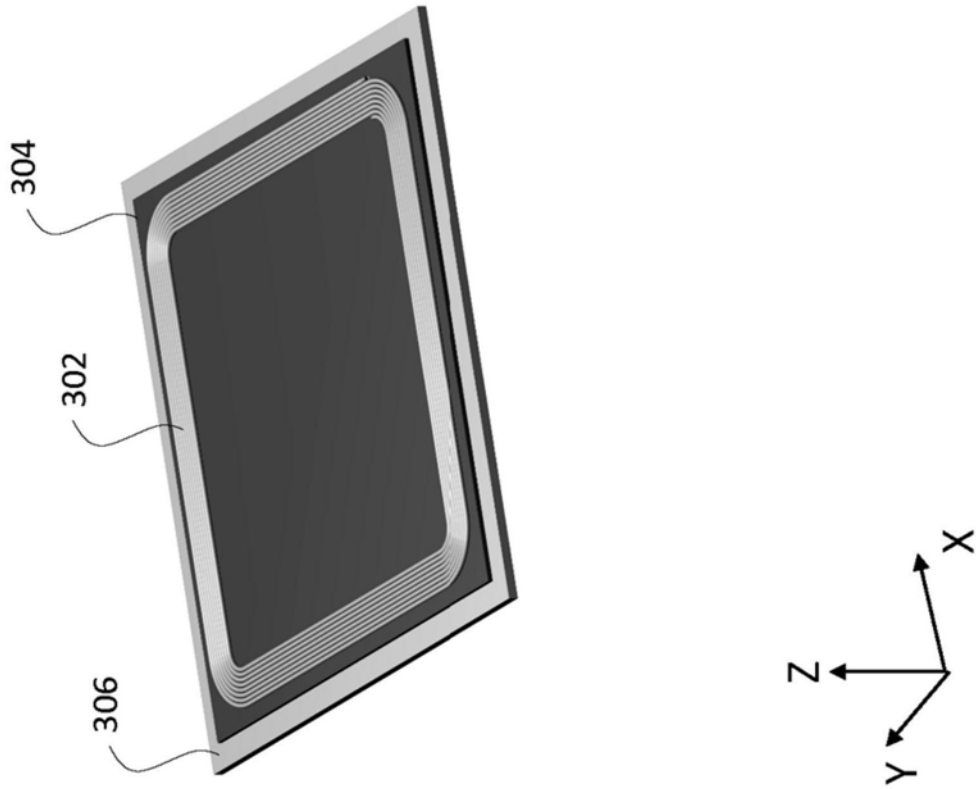


图3A

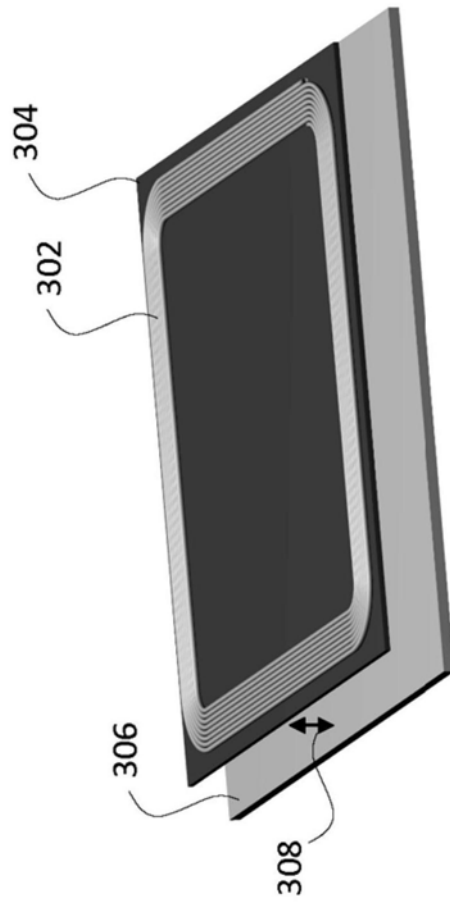


图3B

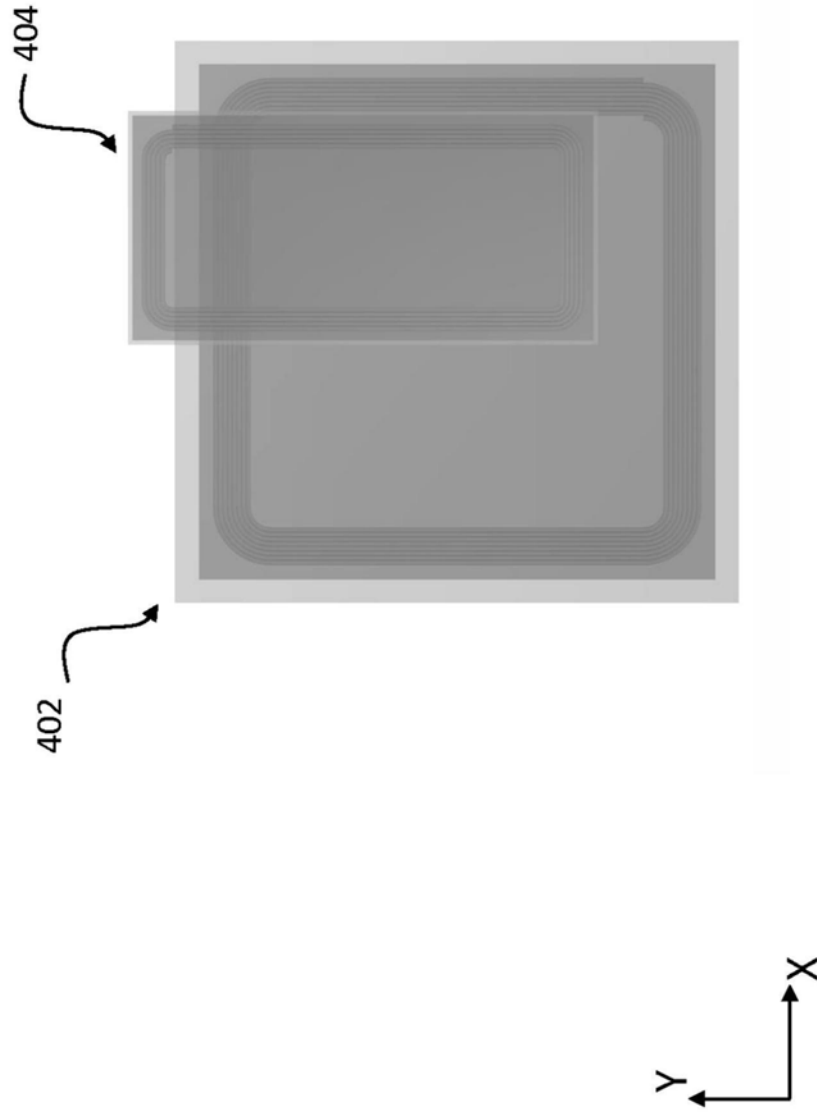


图4

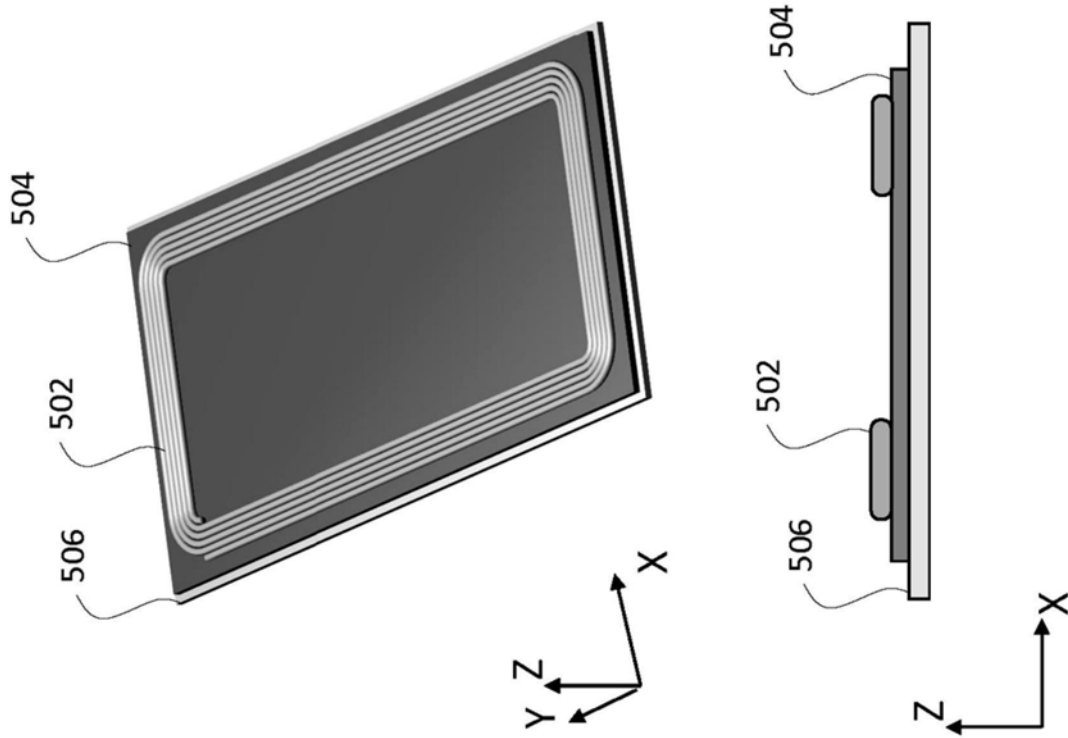


图5A

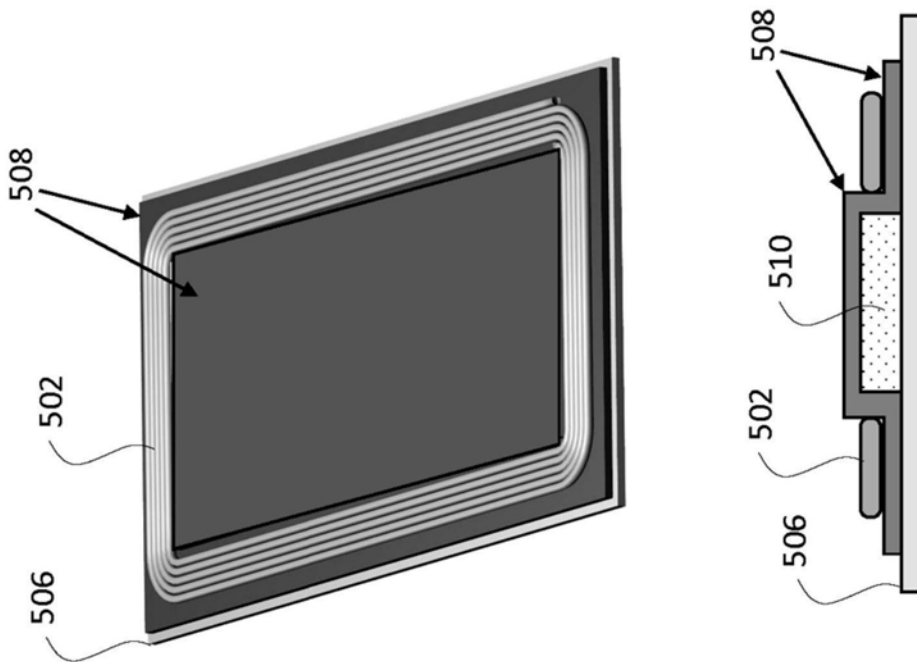


图5B

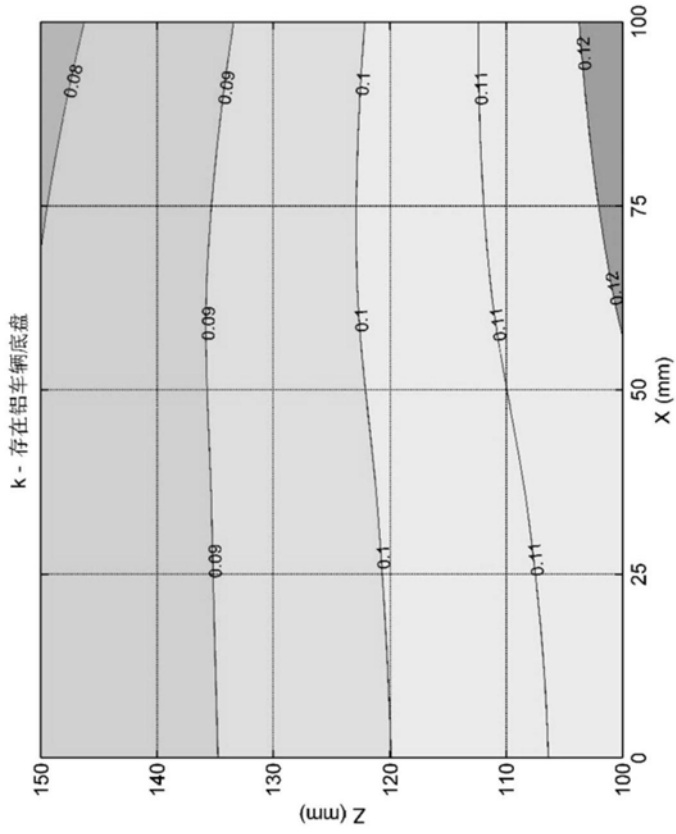


图 6B

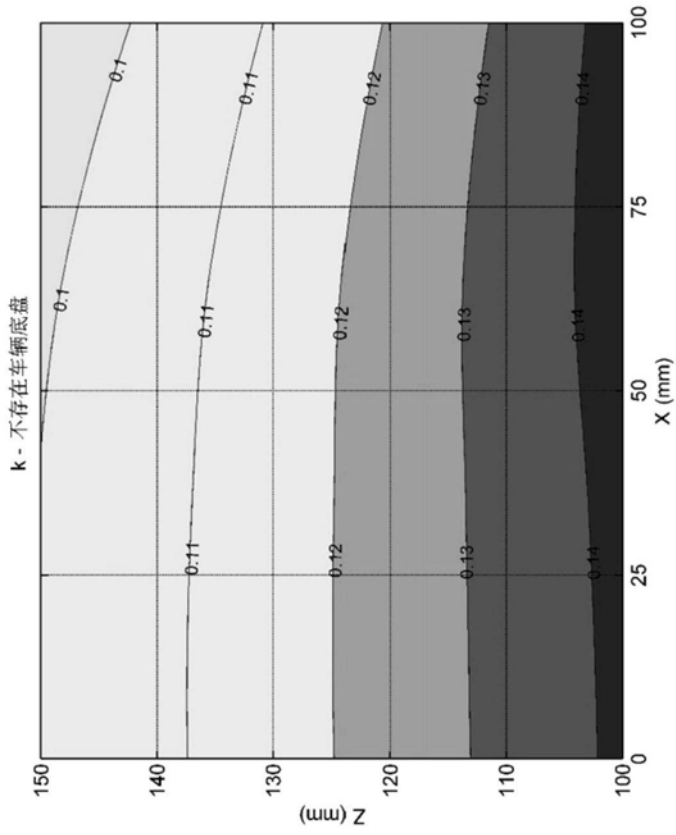
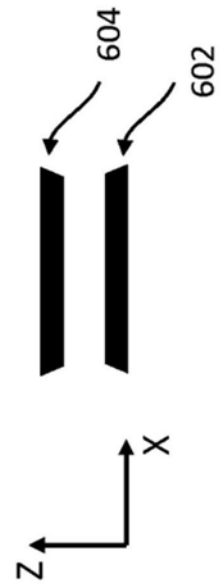


图 6A



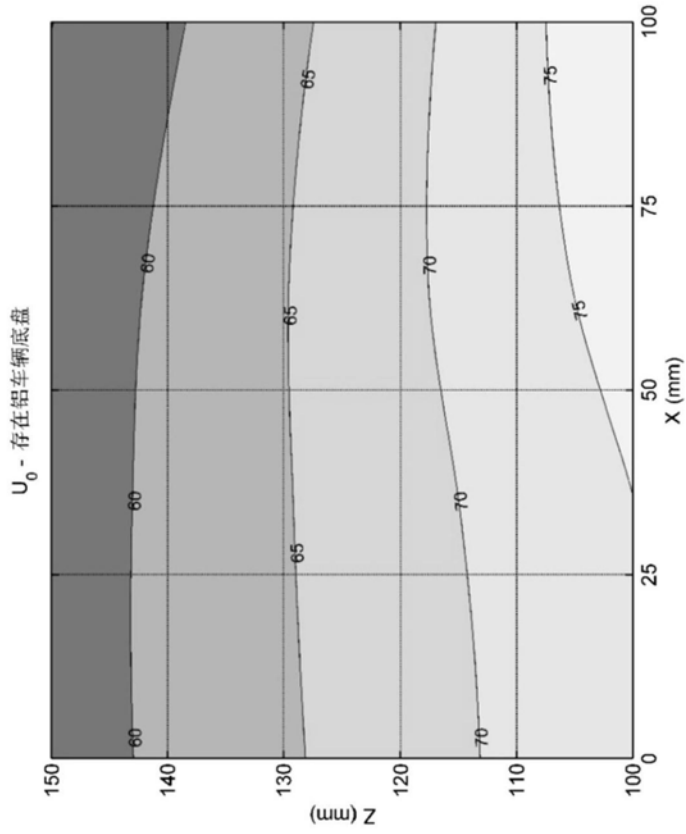


图 7B

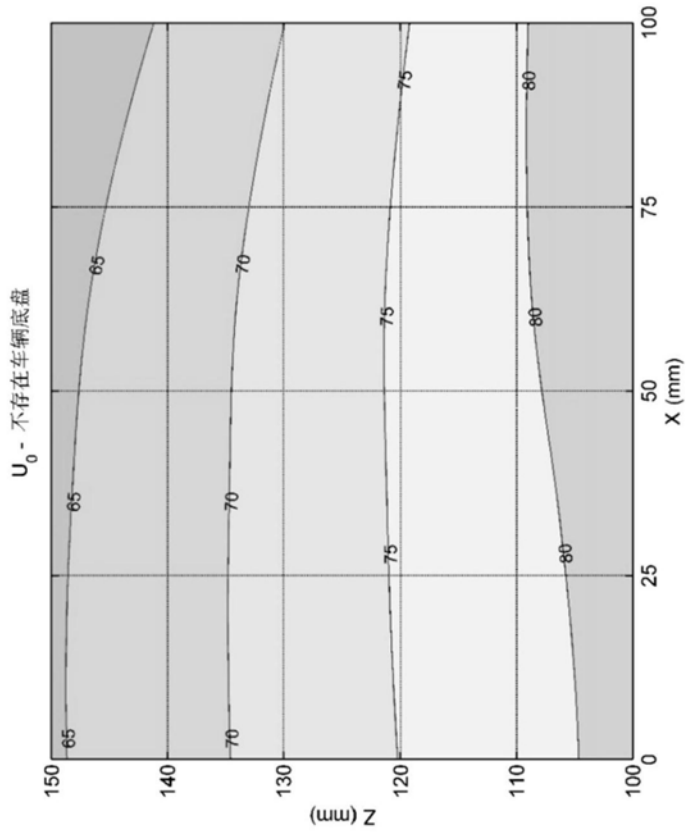


图 7A



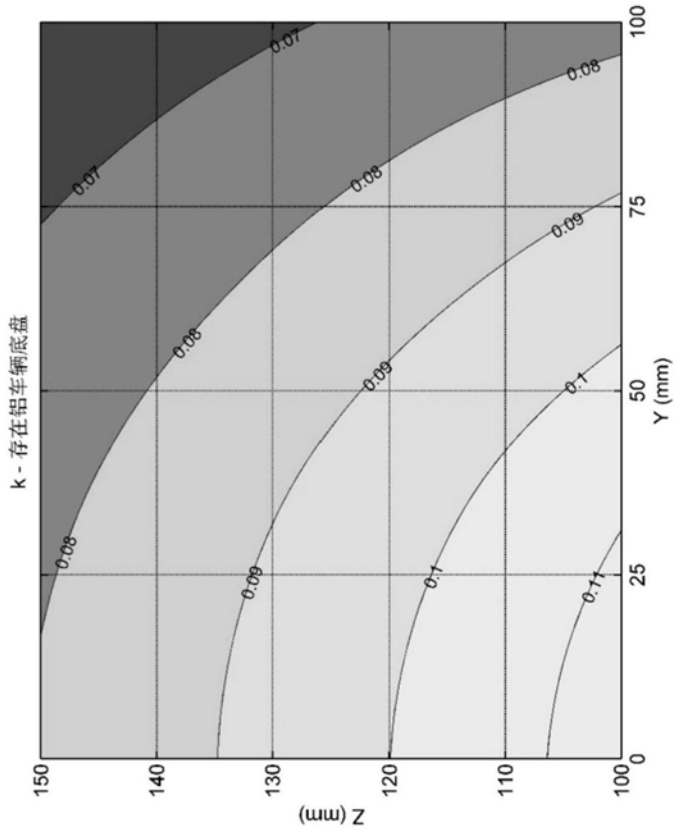


图 8B

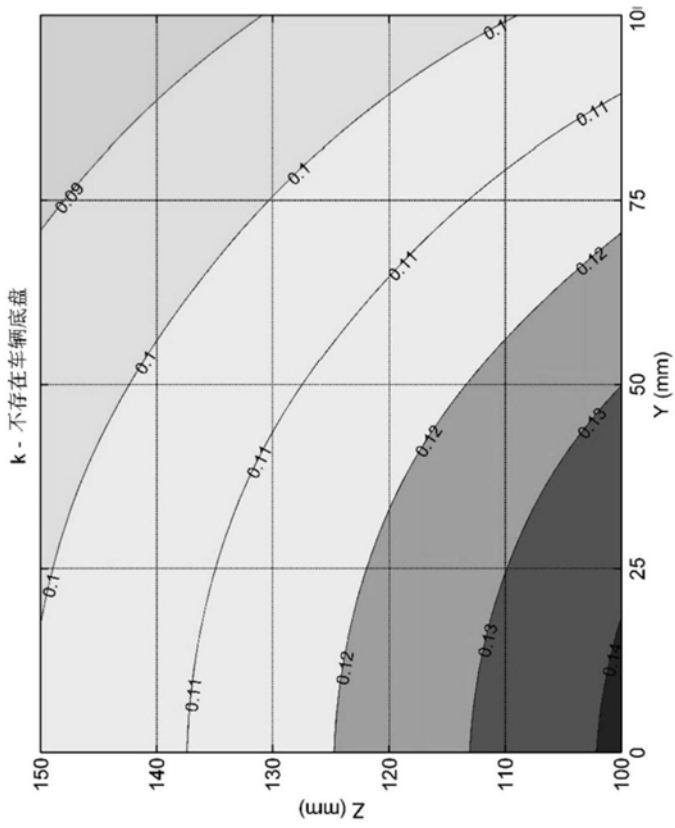


图 8A



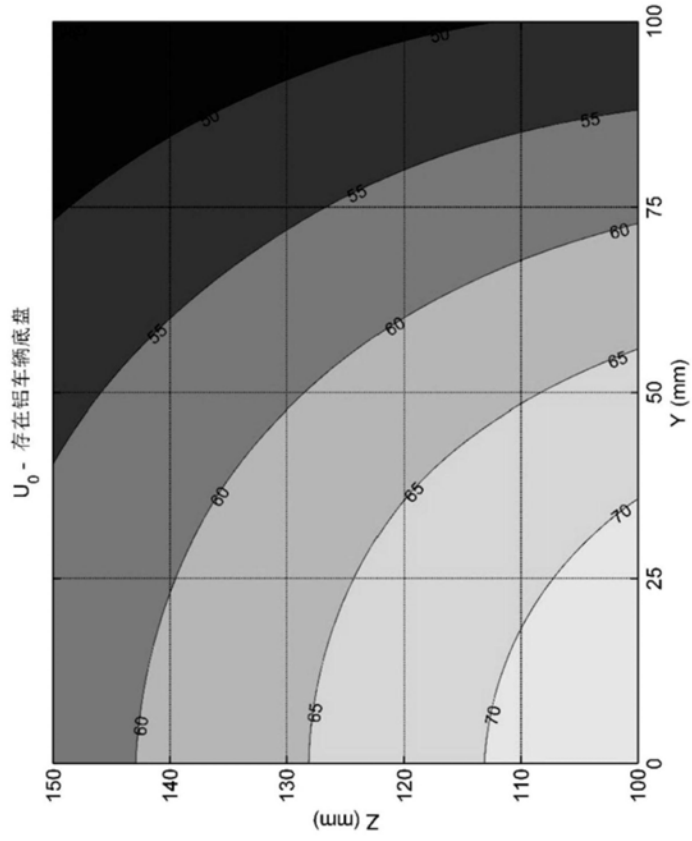


图 9B

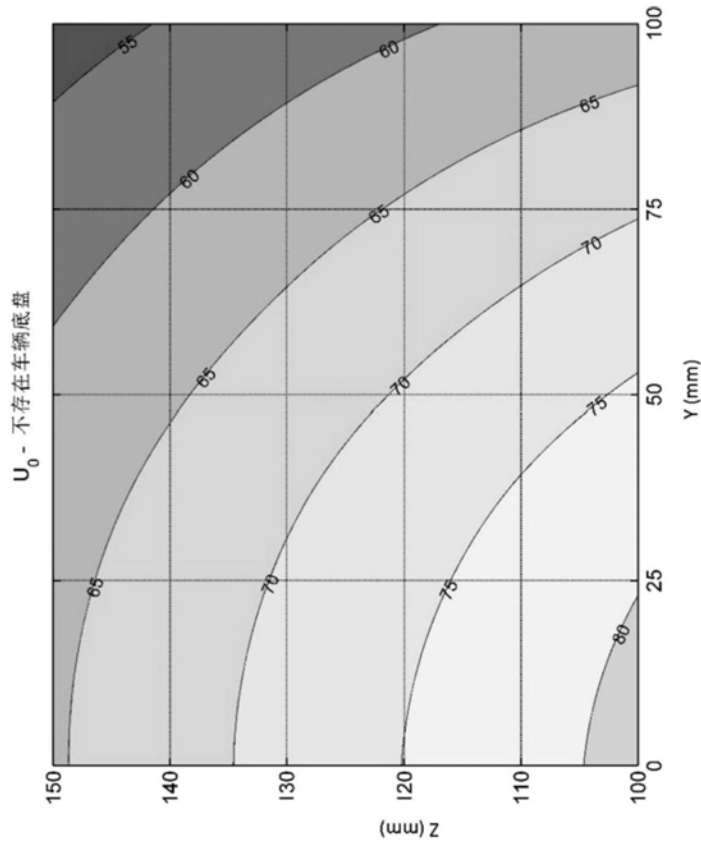


图 9A



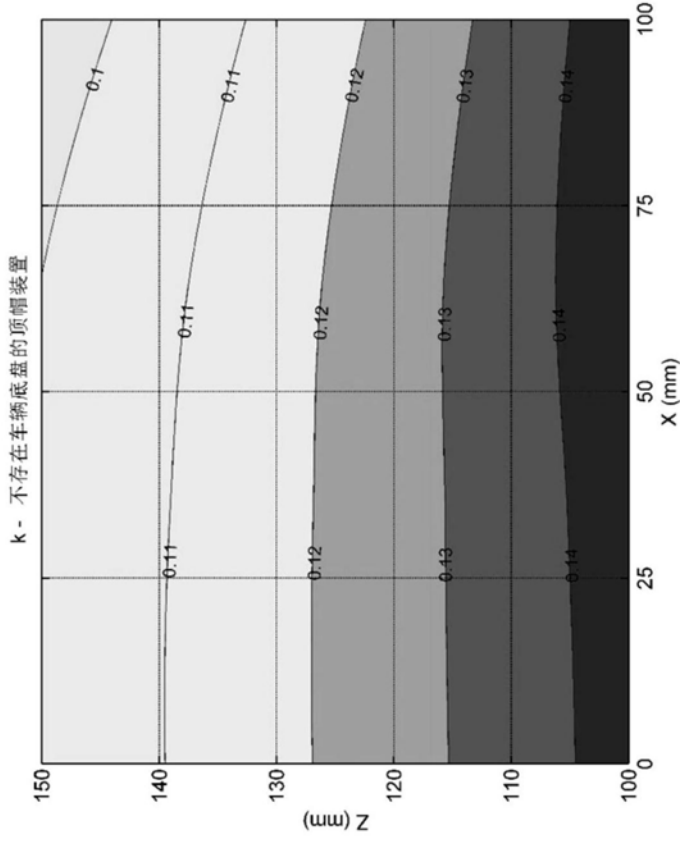
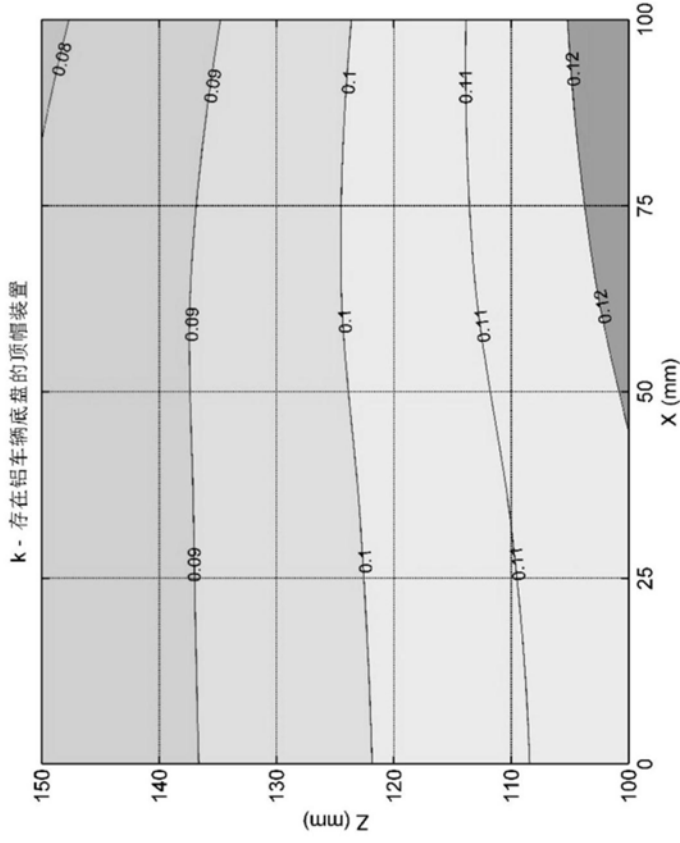


图 10B



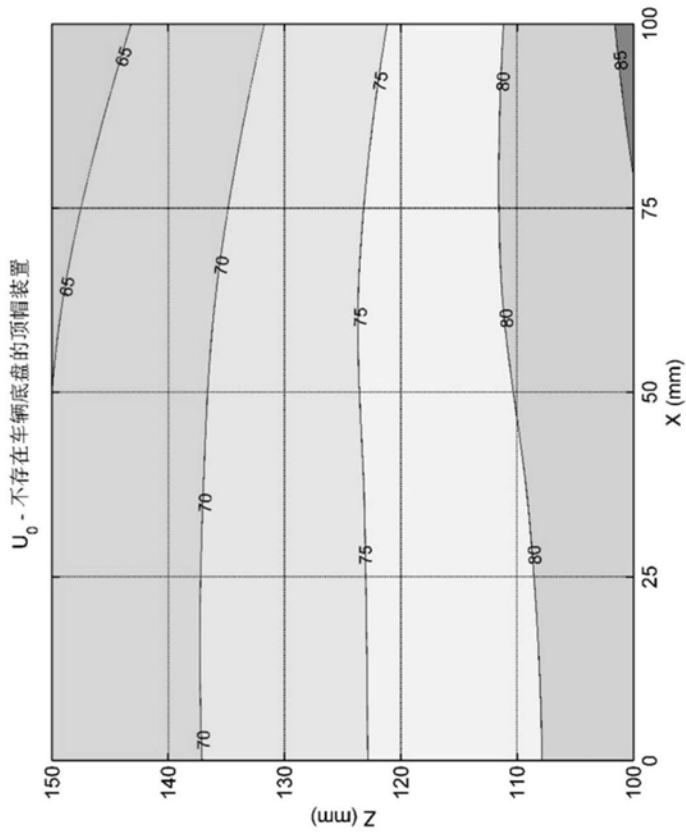
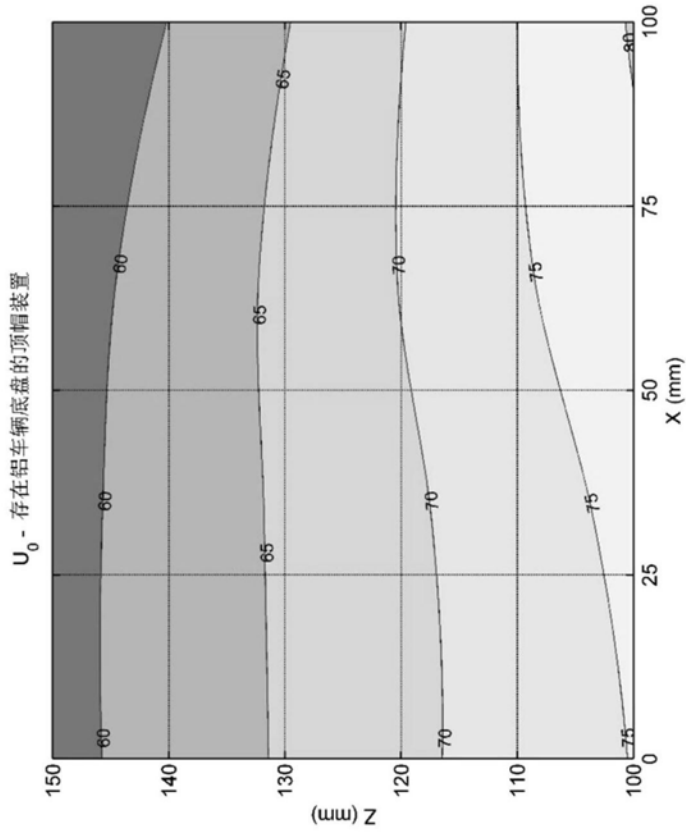
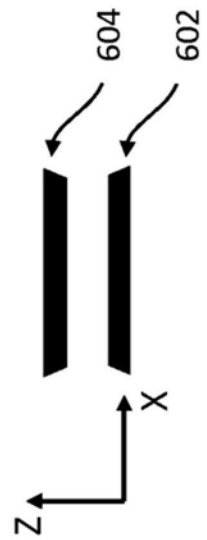


图 11A

图 11B



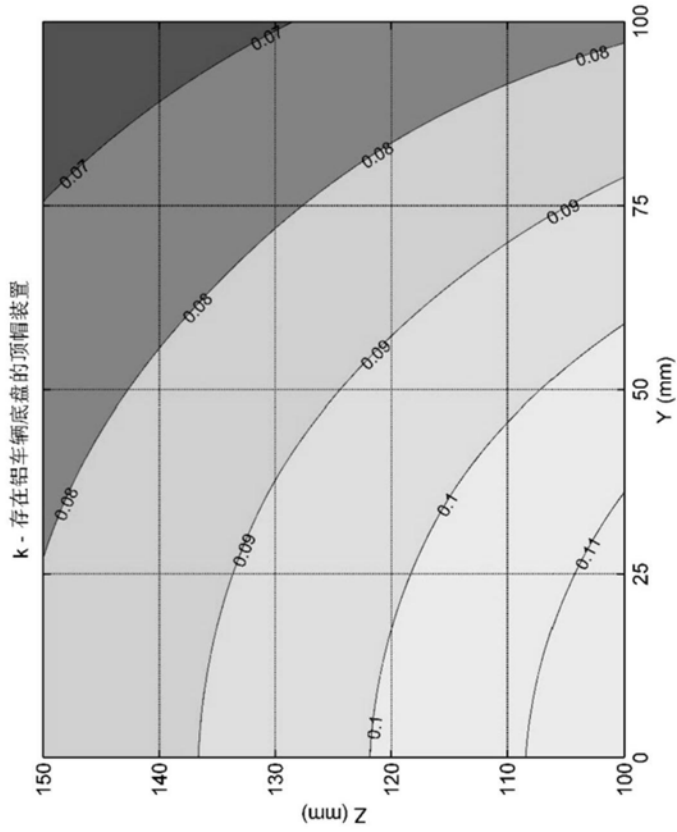


图 12B

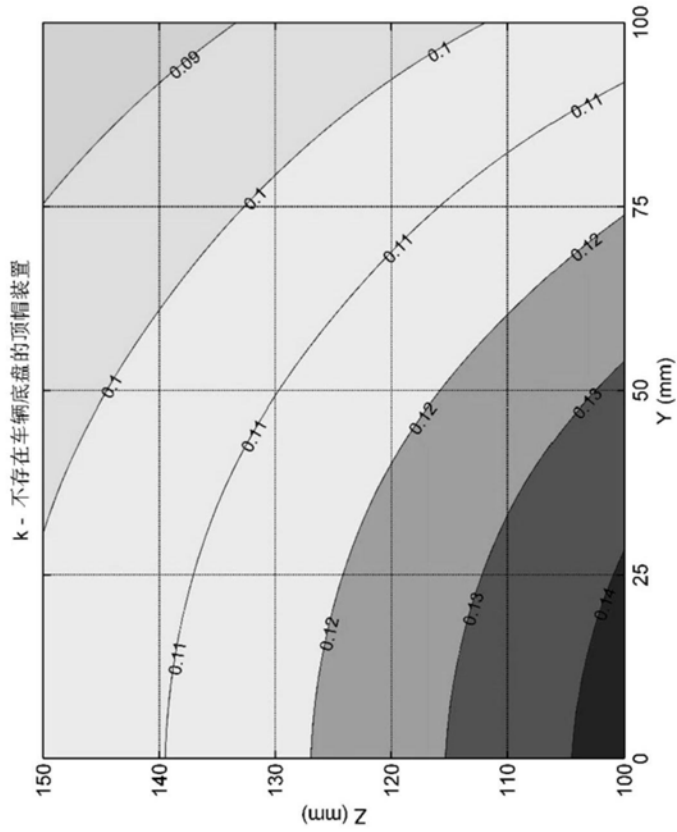


图 12A



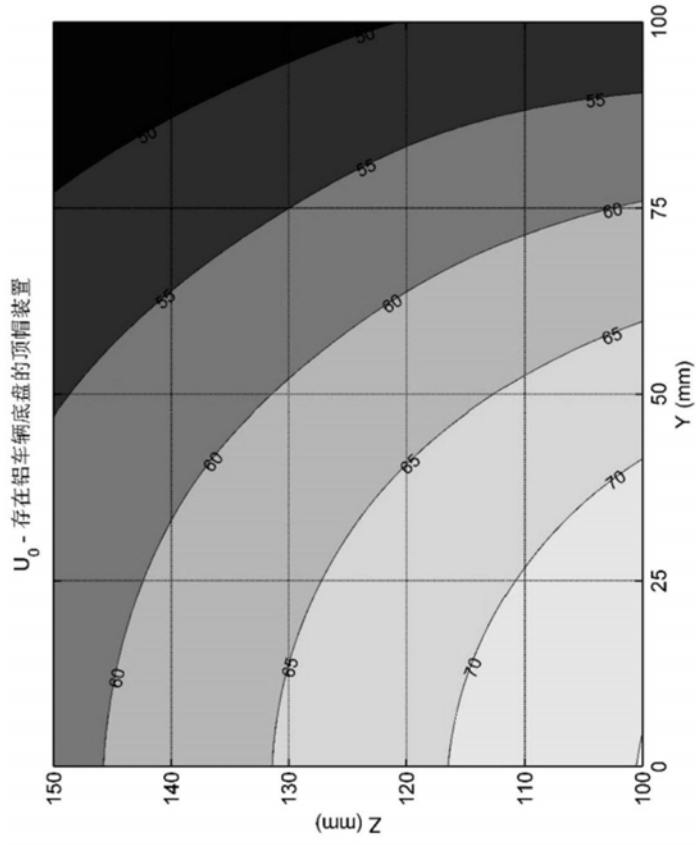


图 13B

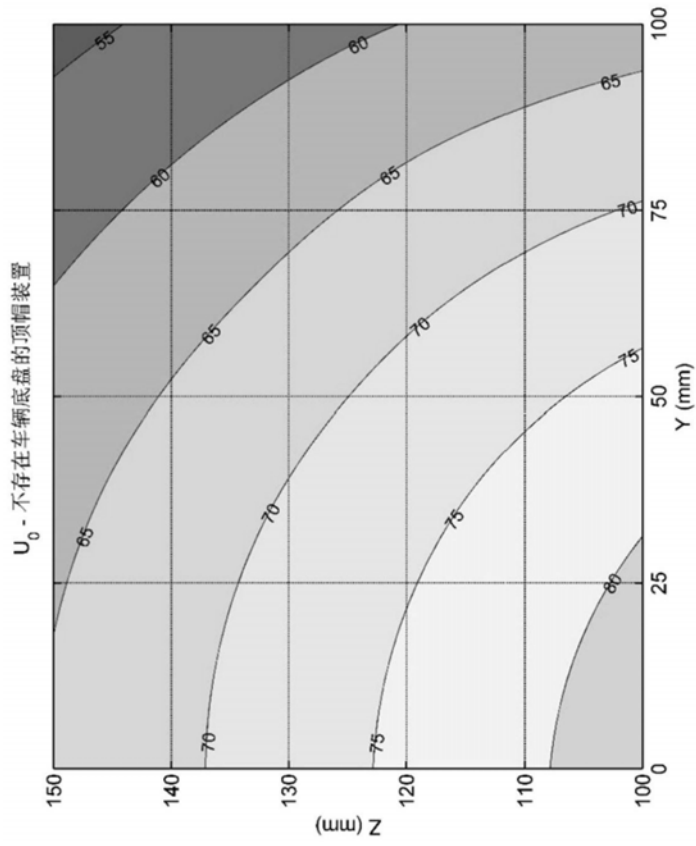


图 13A



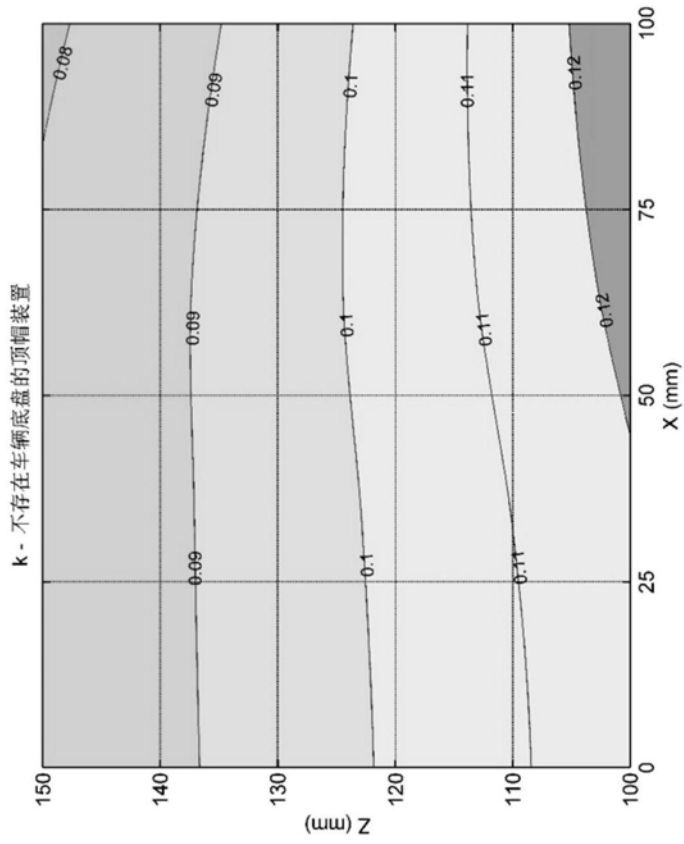
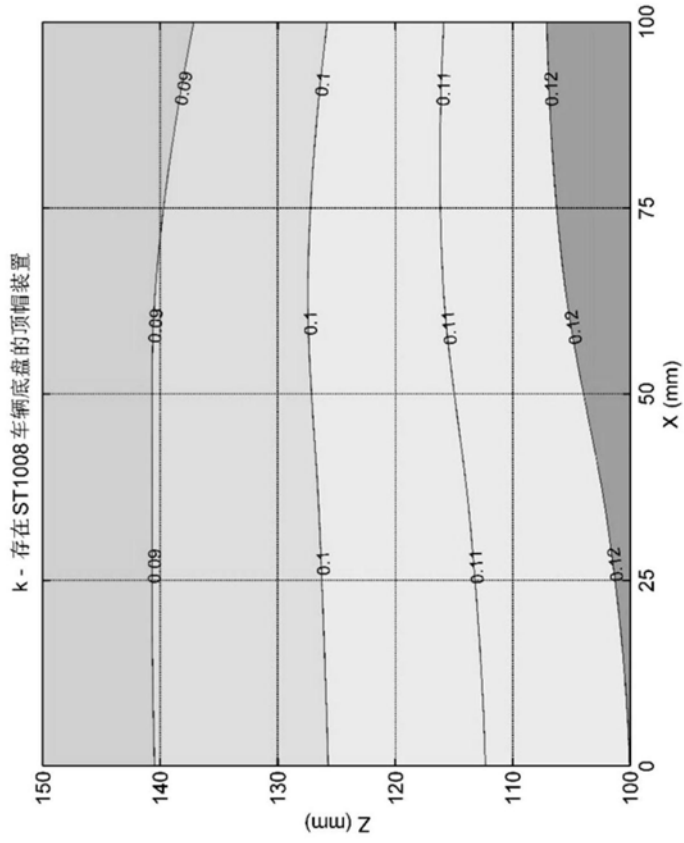


图 14B

图 14A



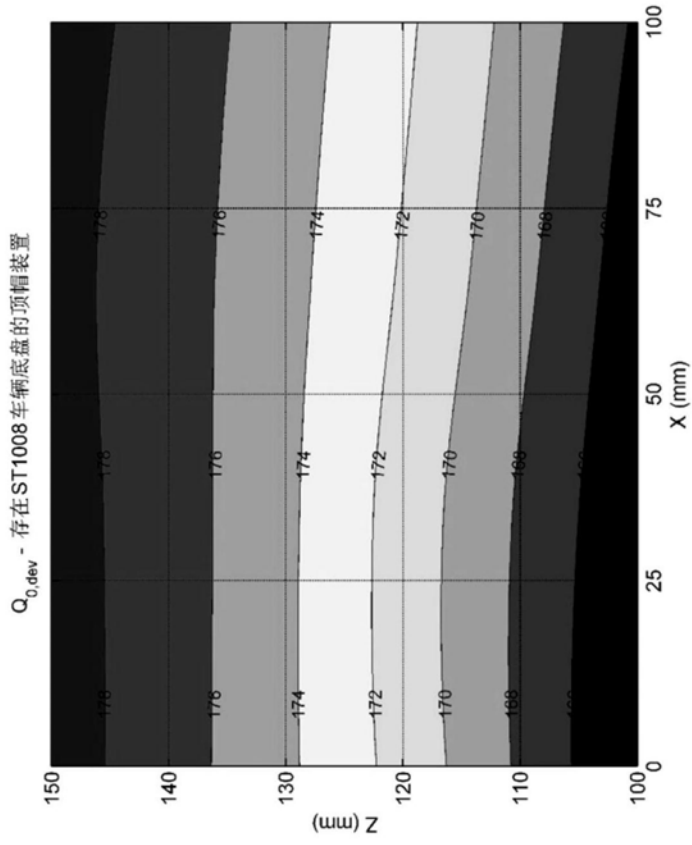


图 15B

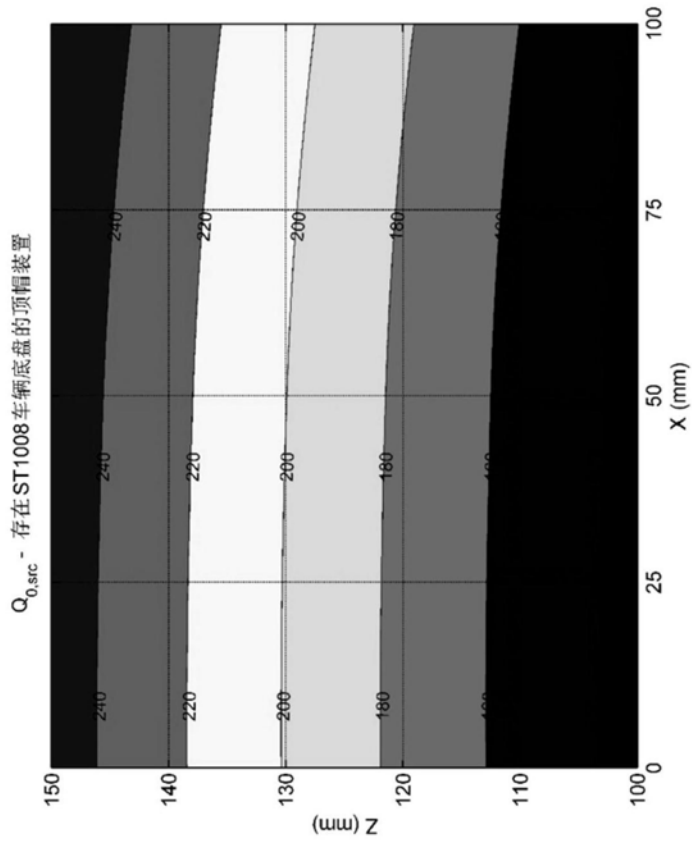


图 15A



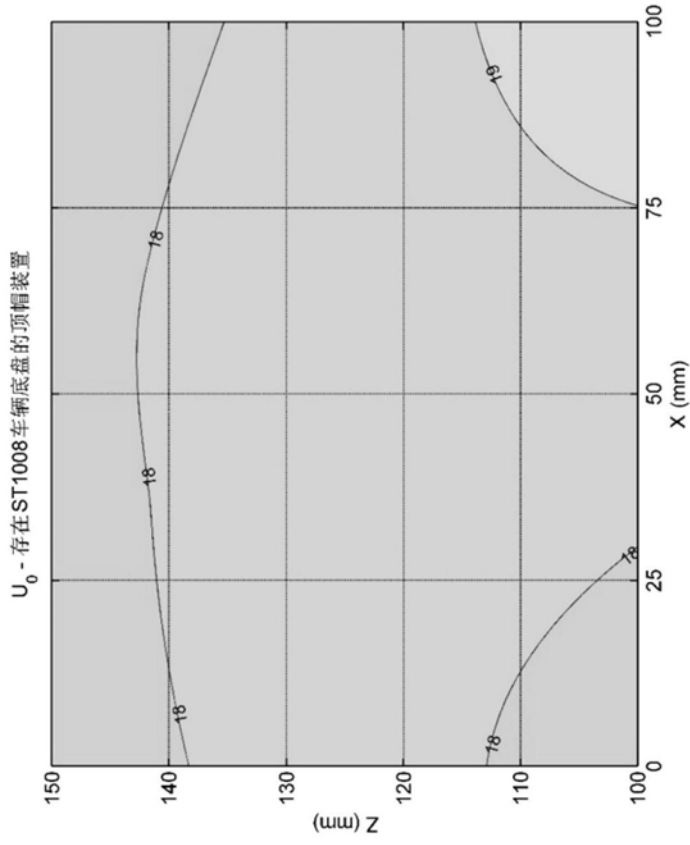


图 16B

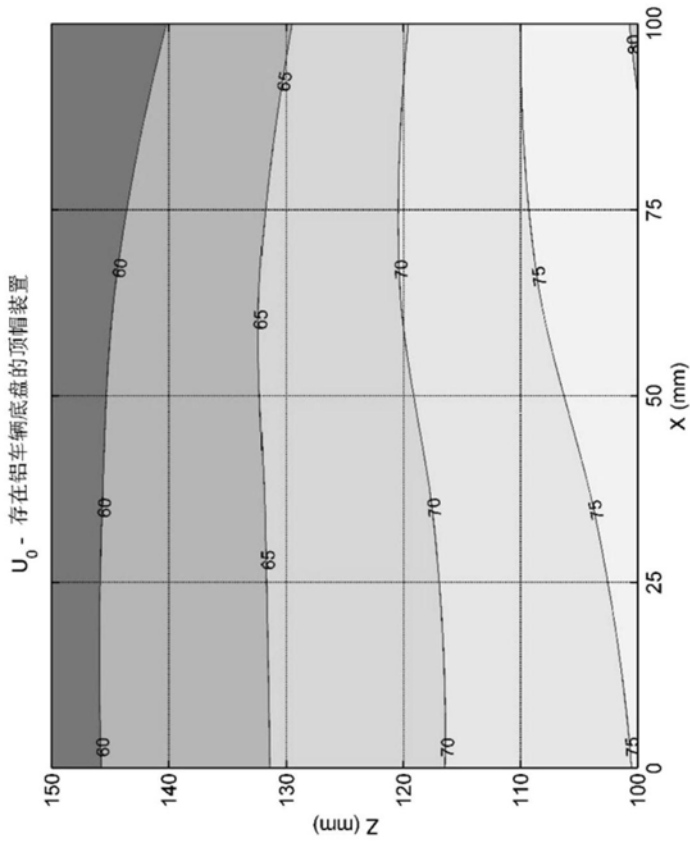


图 16A



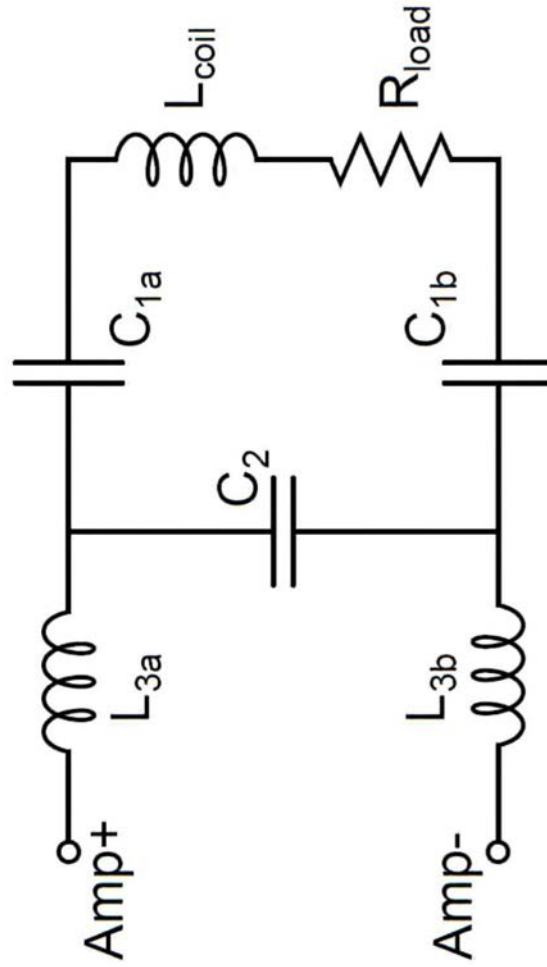


图17A

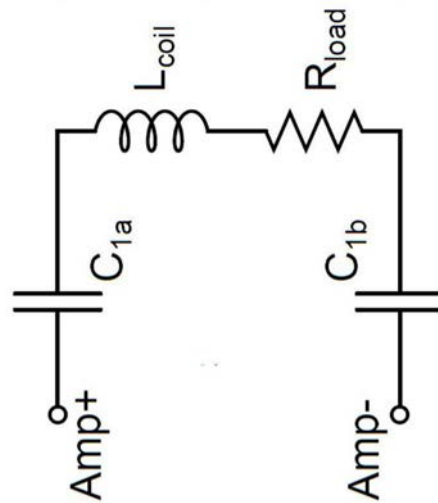


图17B

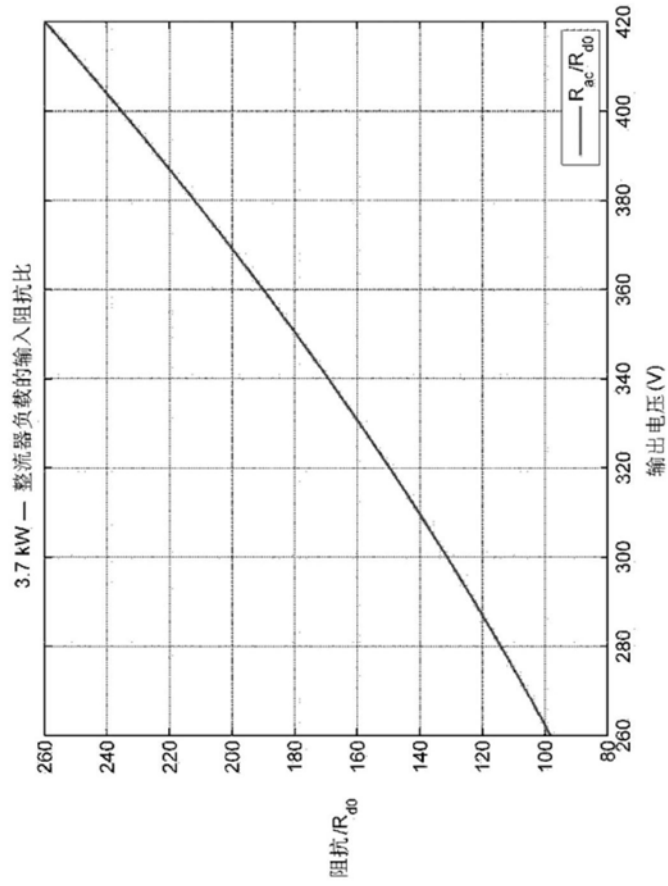


图18A

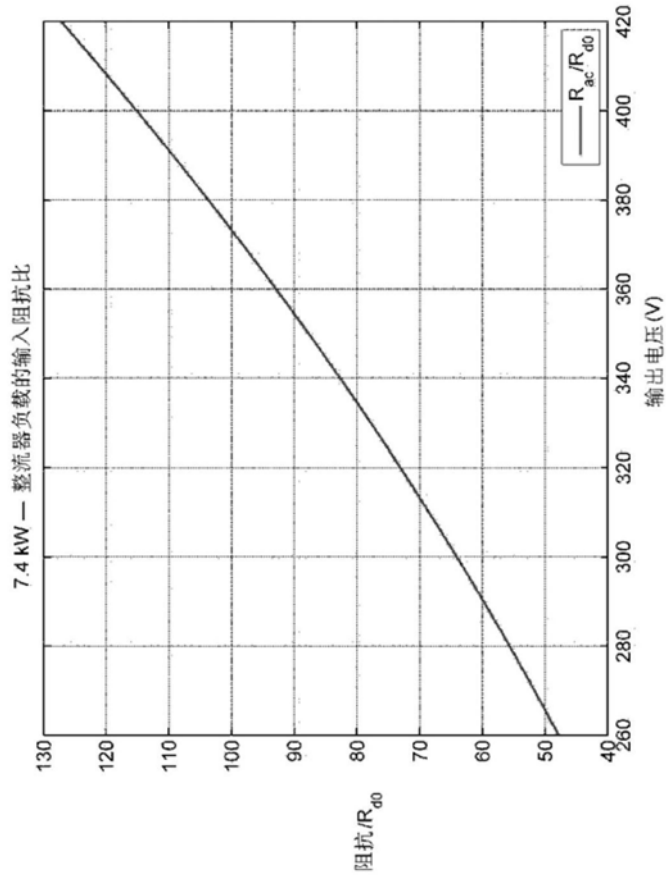


图18B

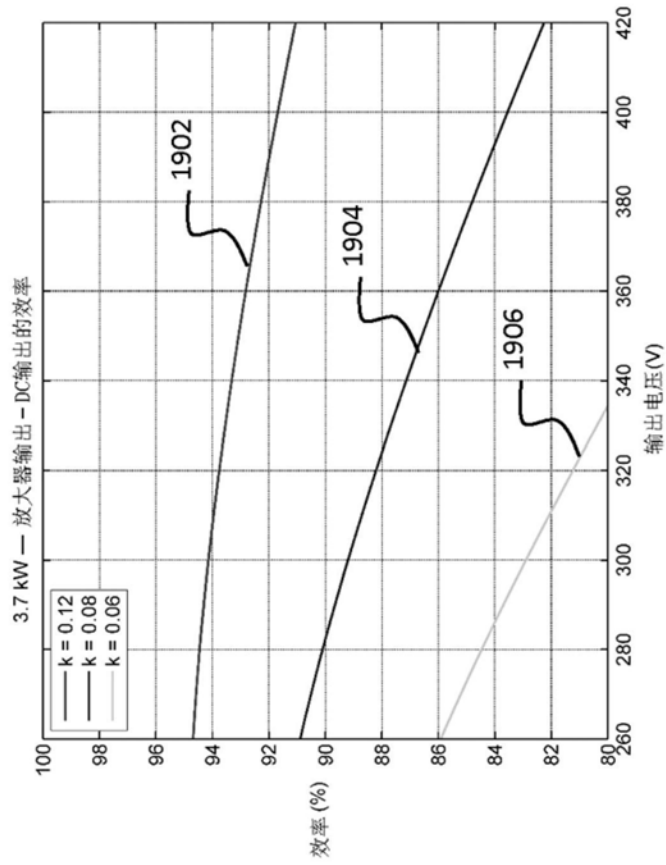


图19A

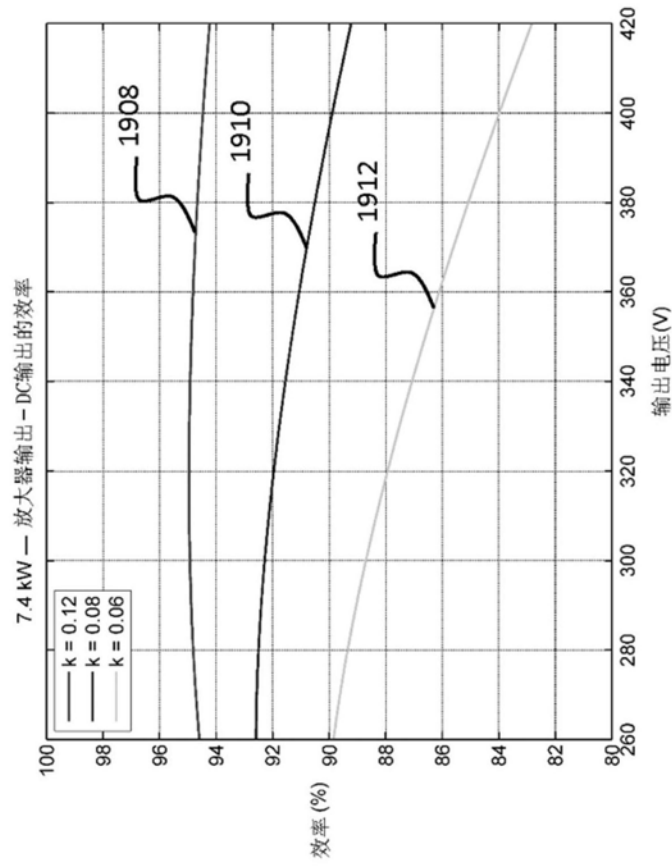


图19B

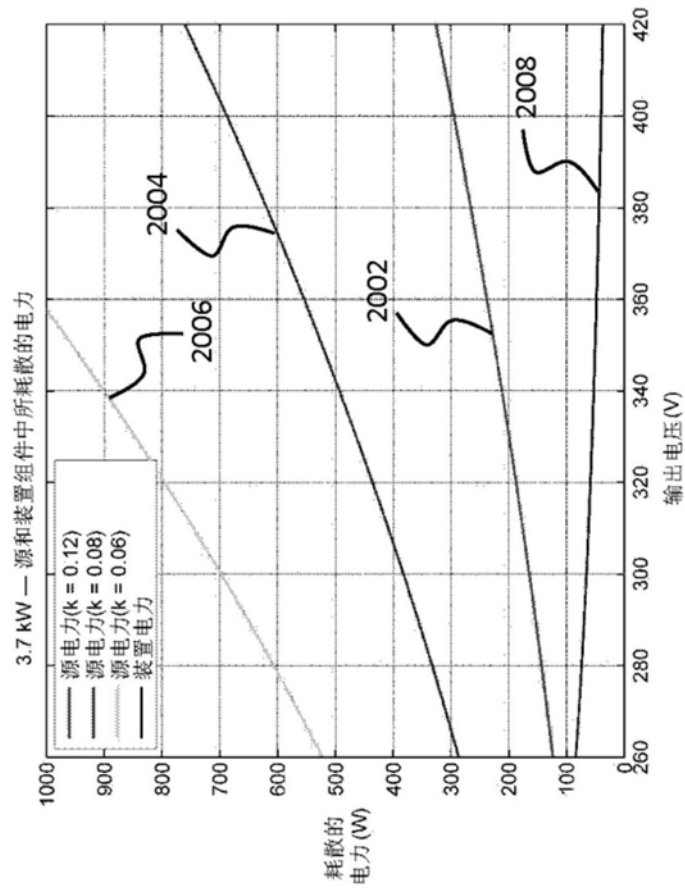


图20A

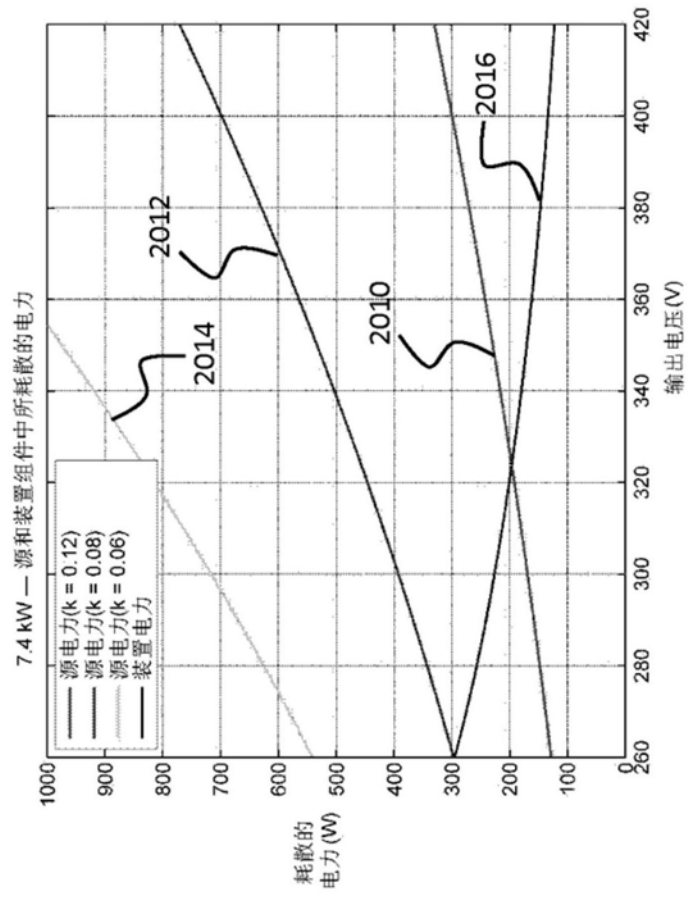


图20B

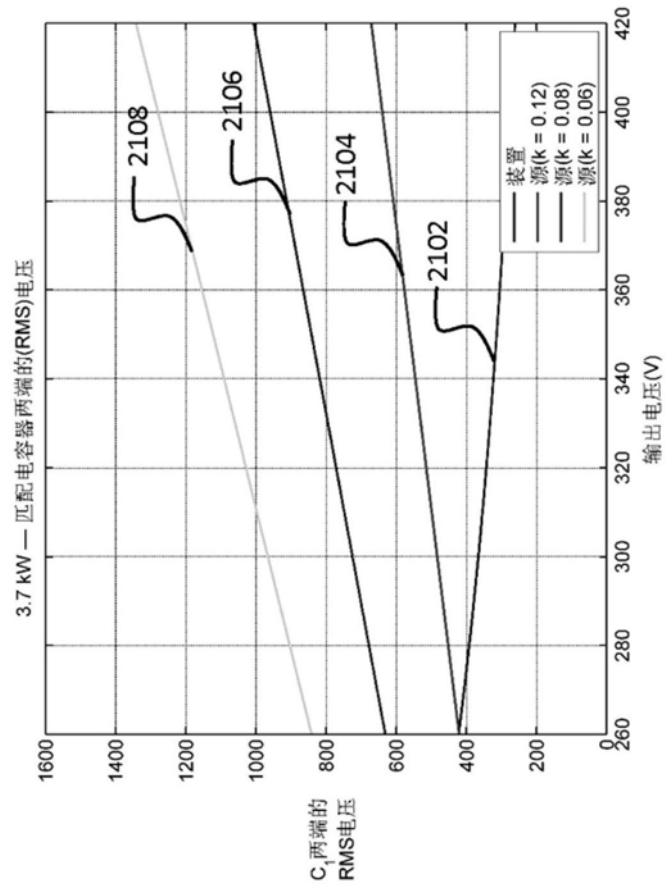


图21A

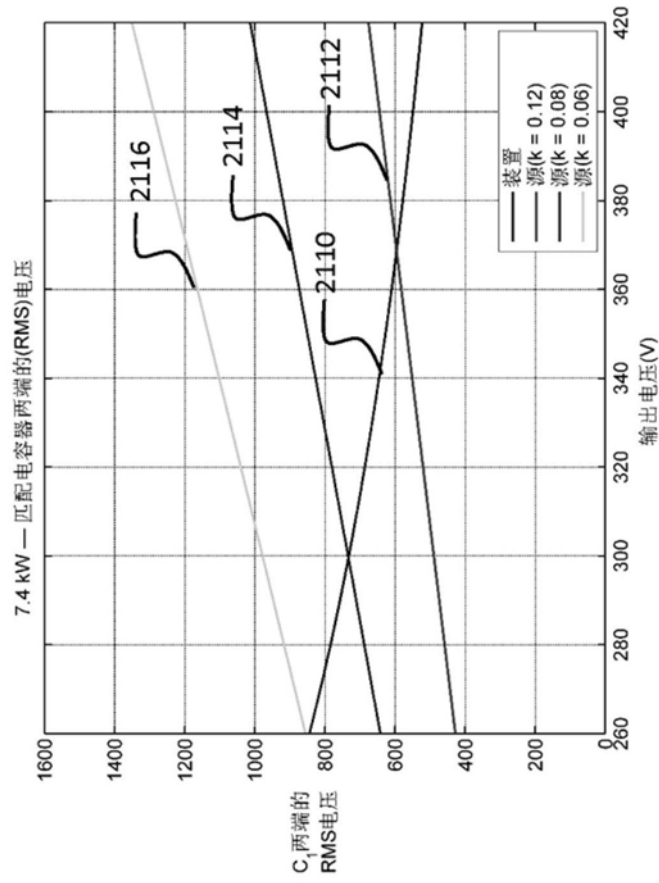


图21B

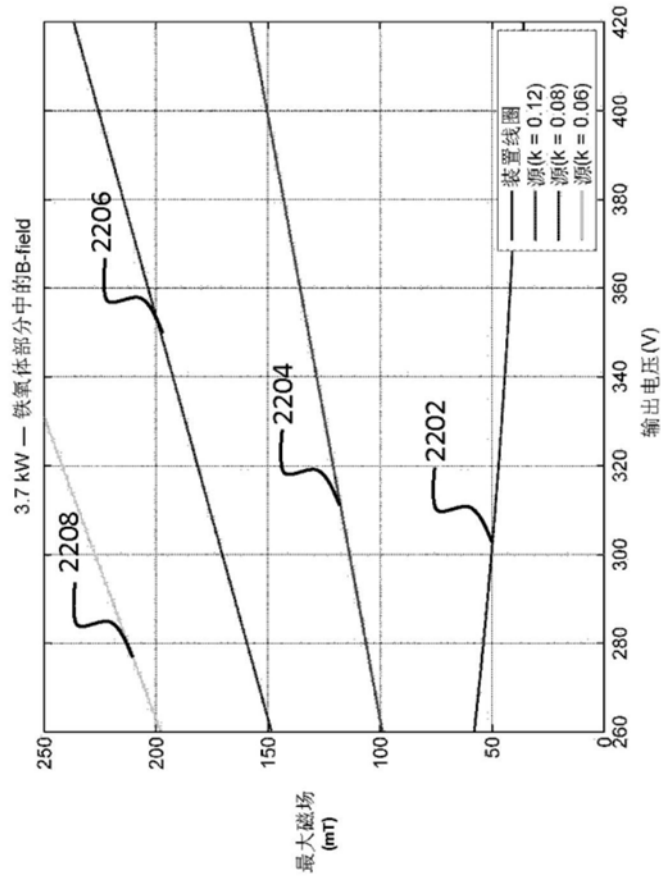


图22A

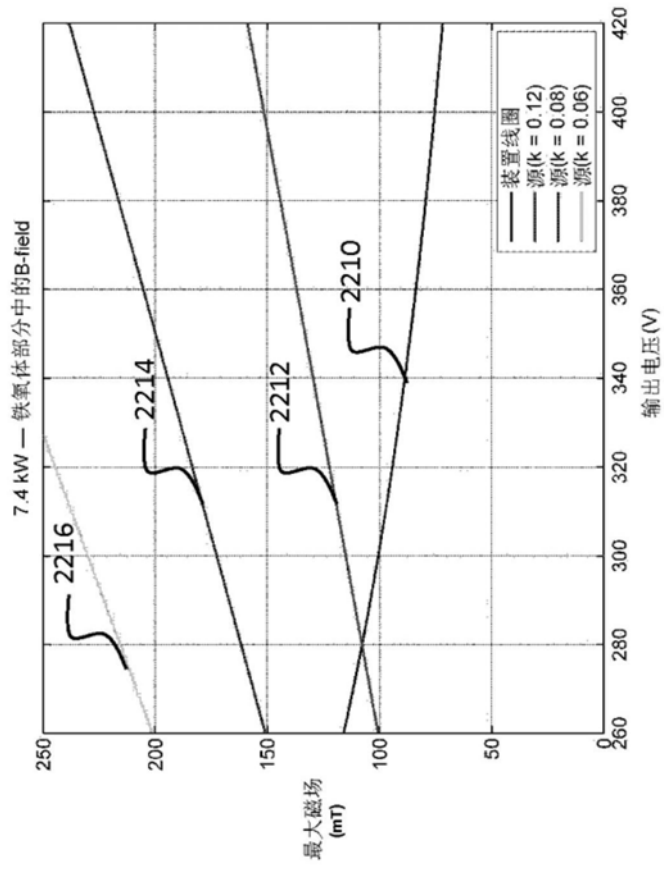


图22B

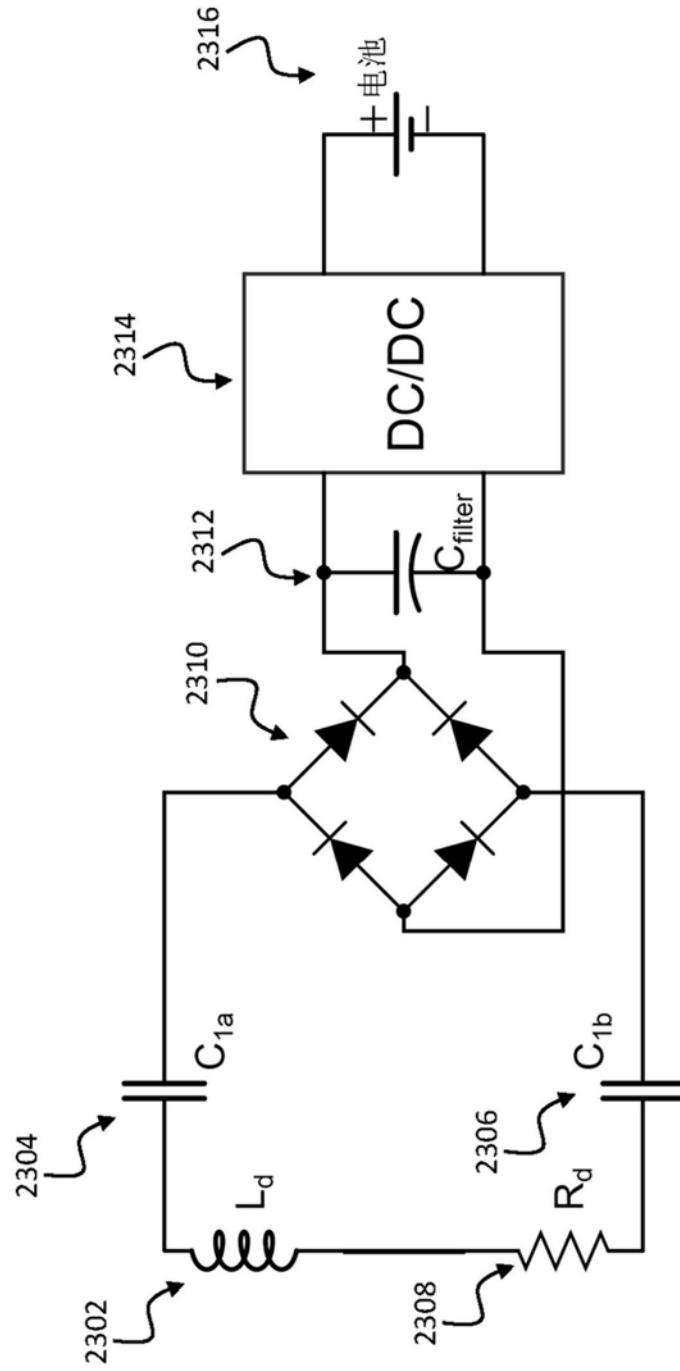


图23

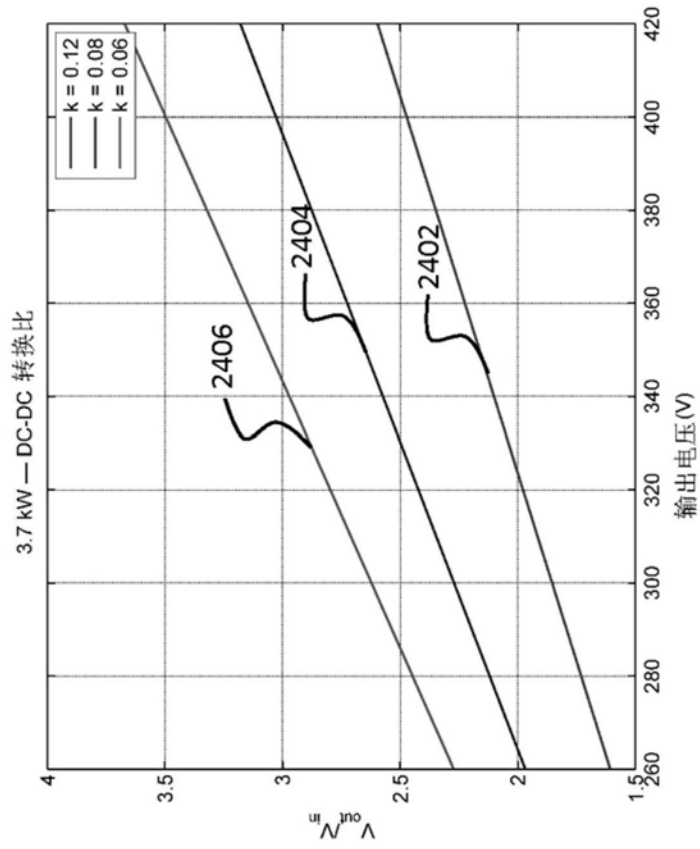


图24A

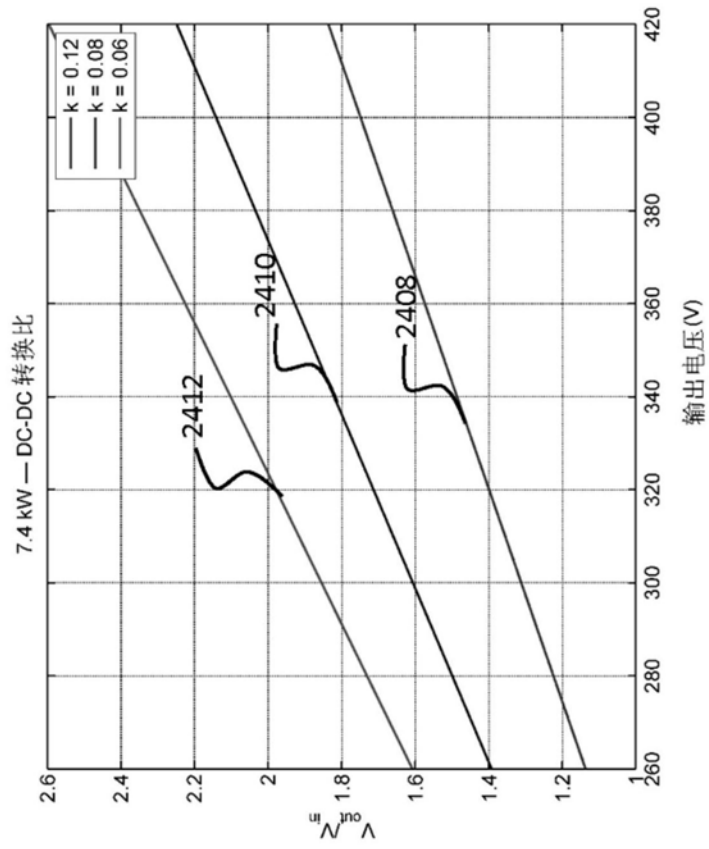


图24B

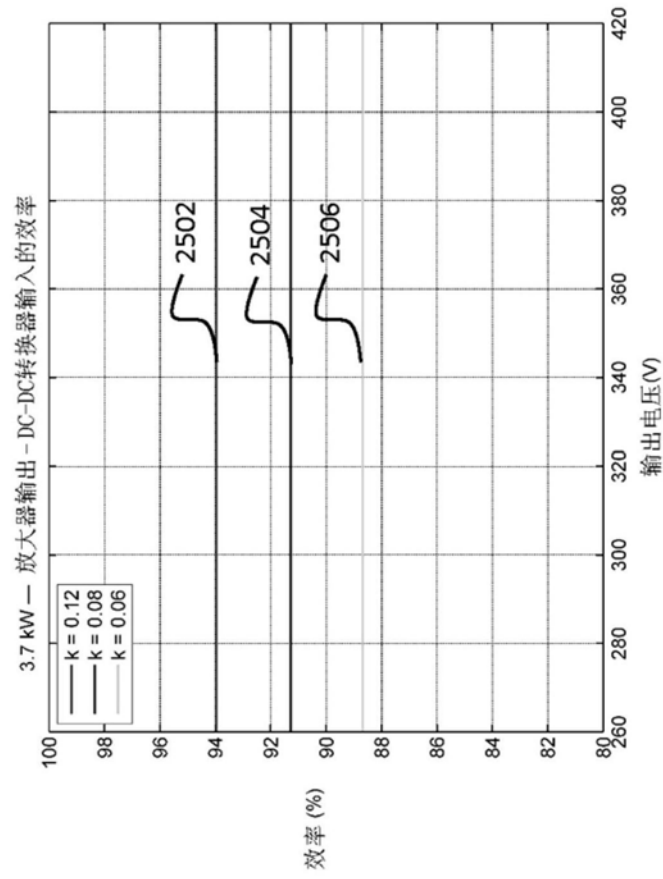


图25A

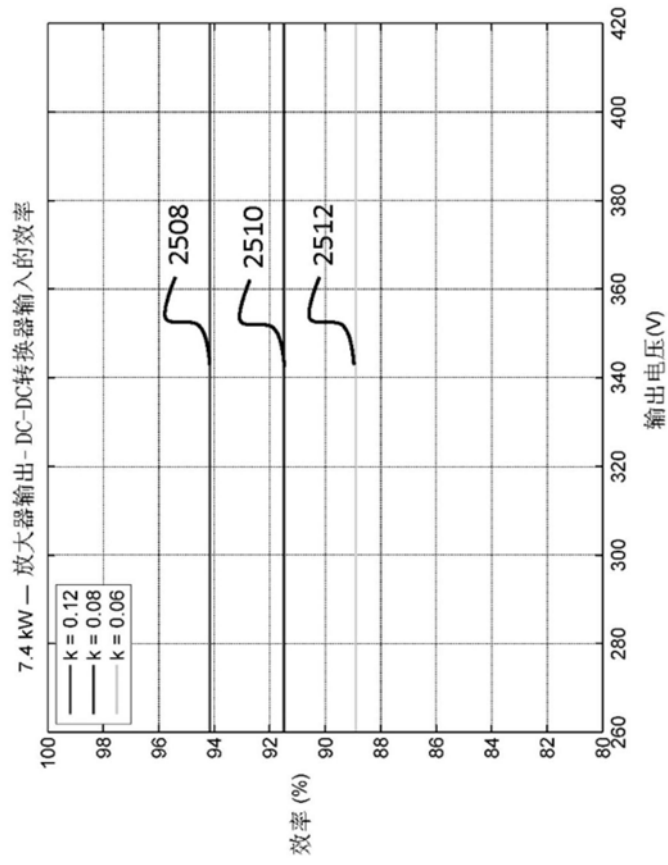


图25B

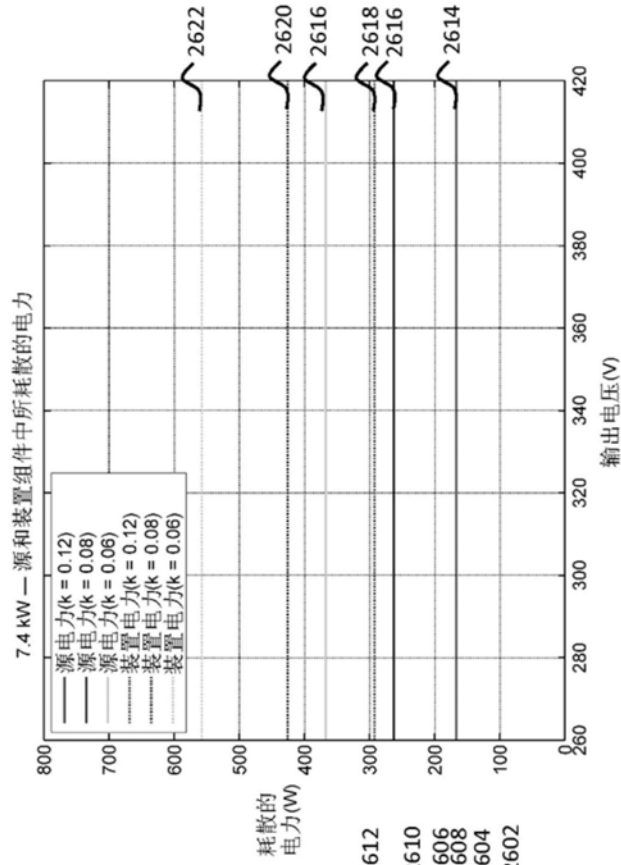


图 26A

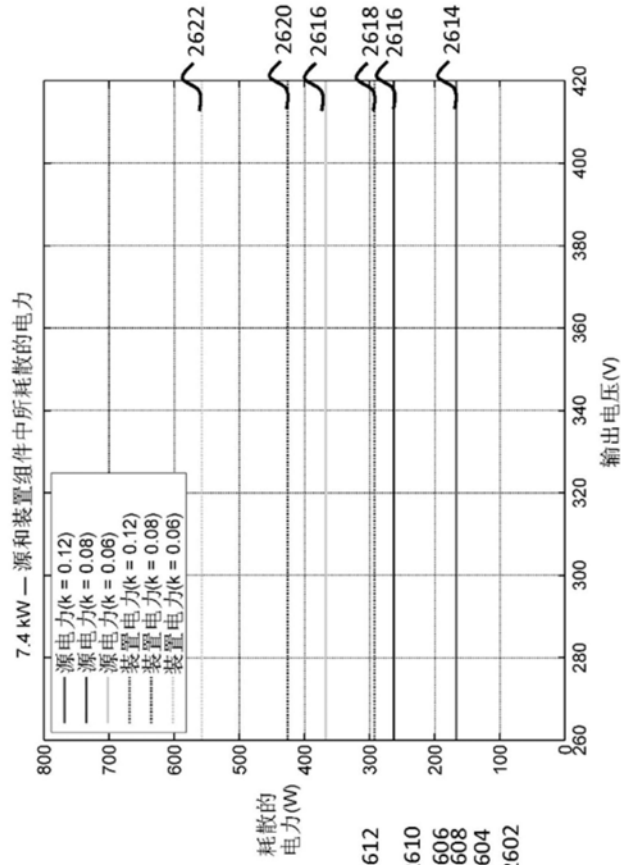


图 26B

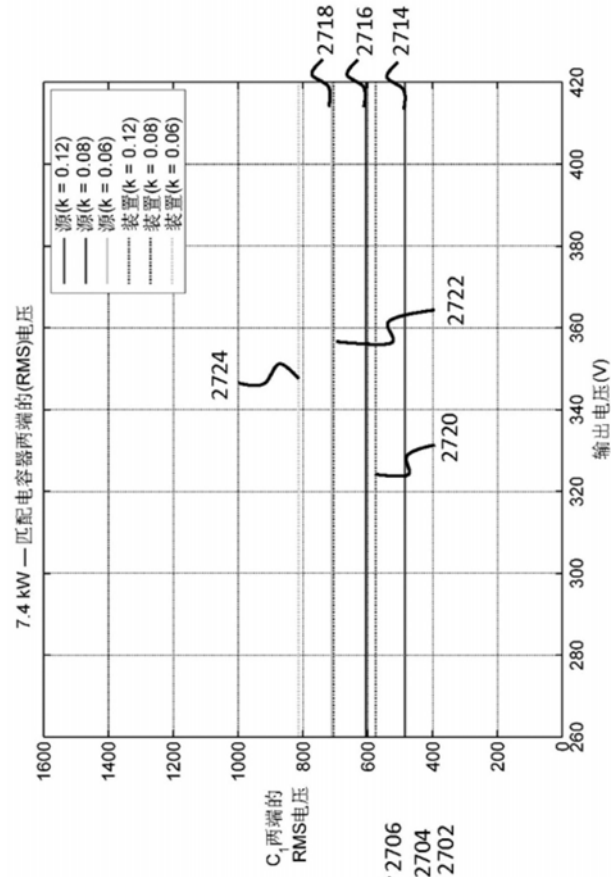


图 27B

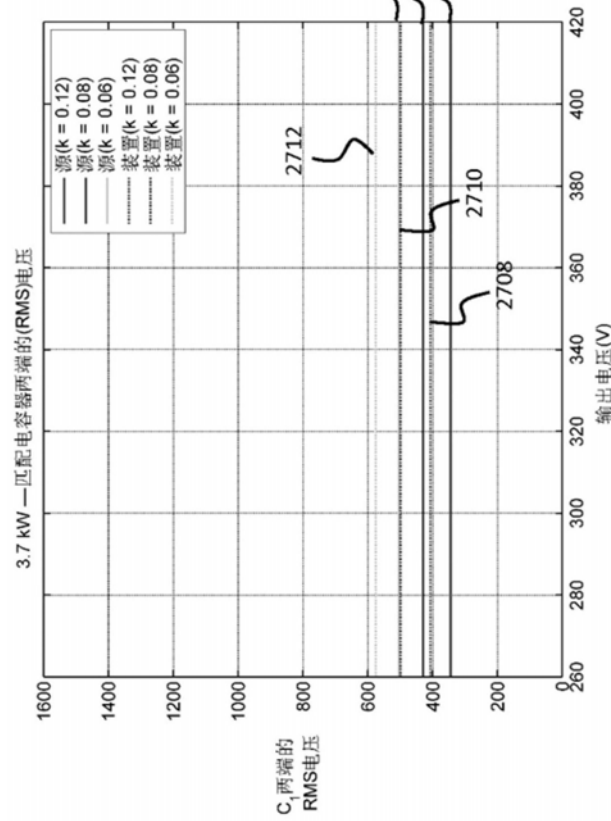


图 27A

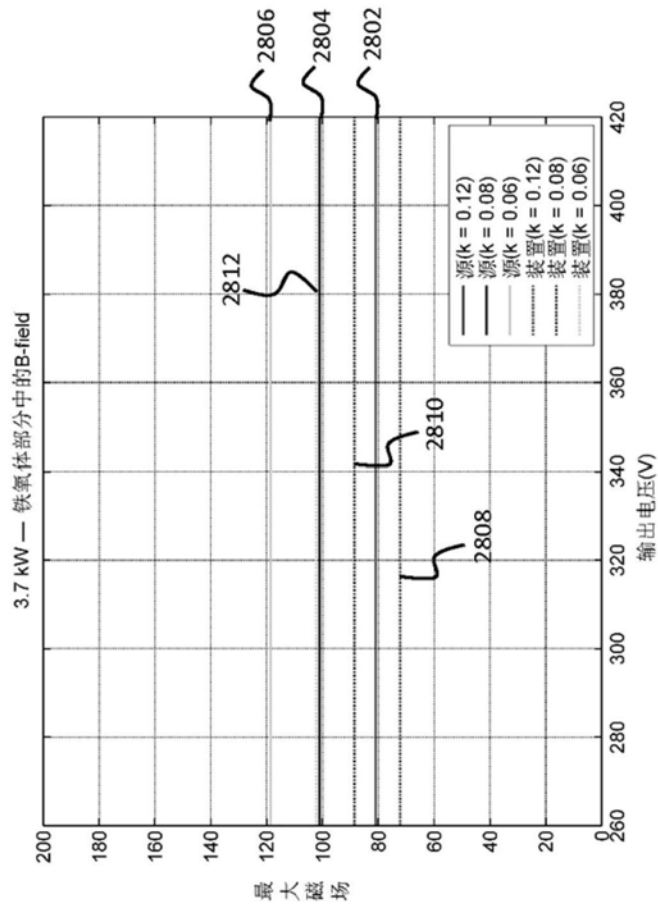


图28A

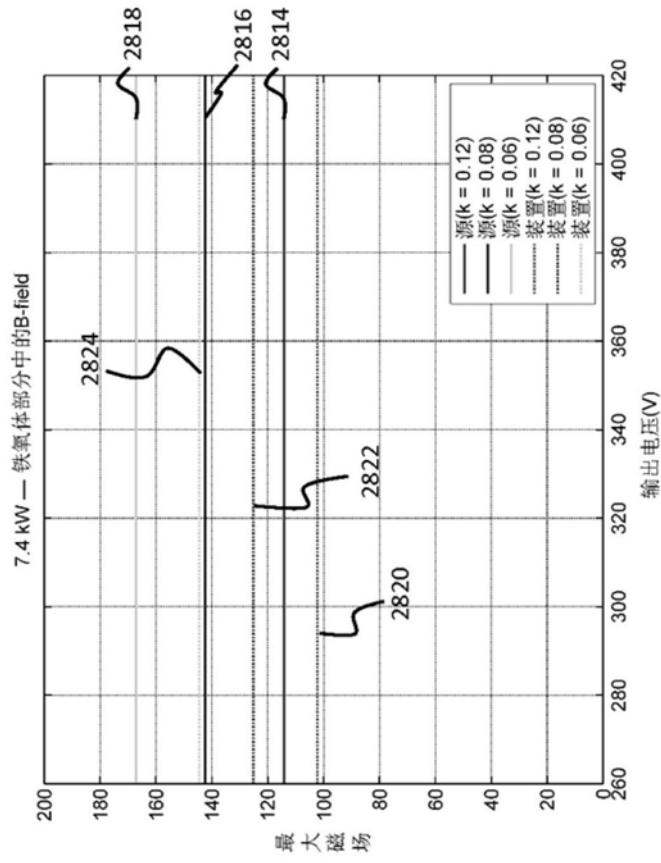


图28B

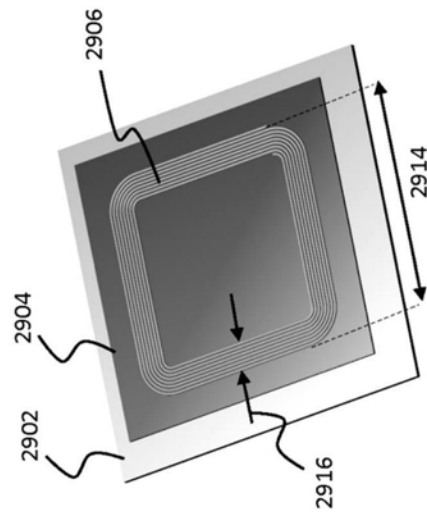


图29A

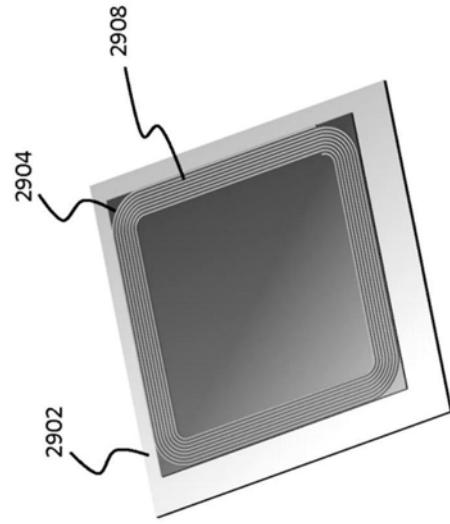


图29B

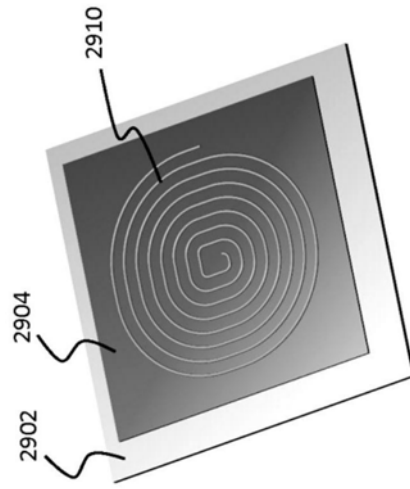


图29C

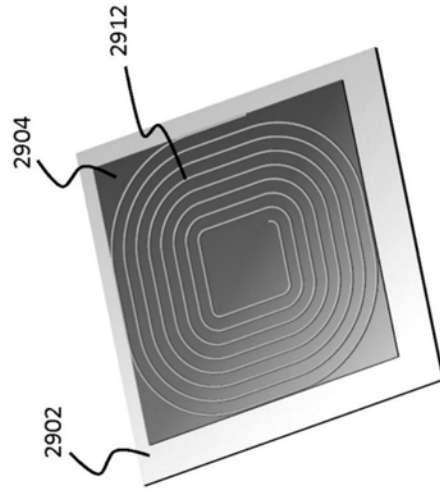


图29D

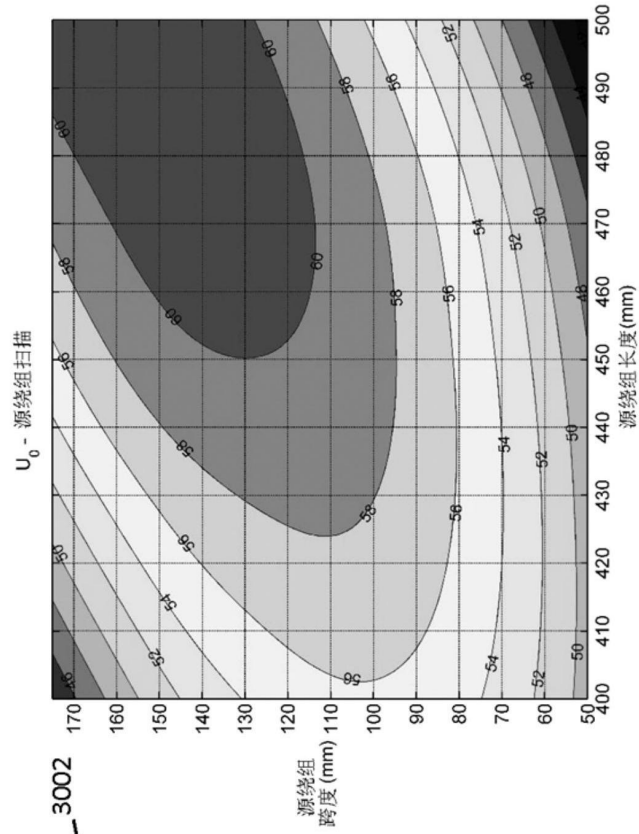


图 30B

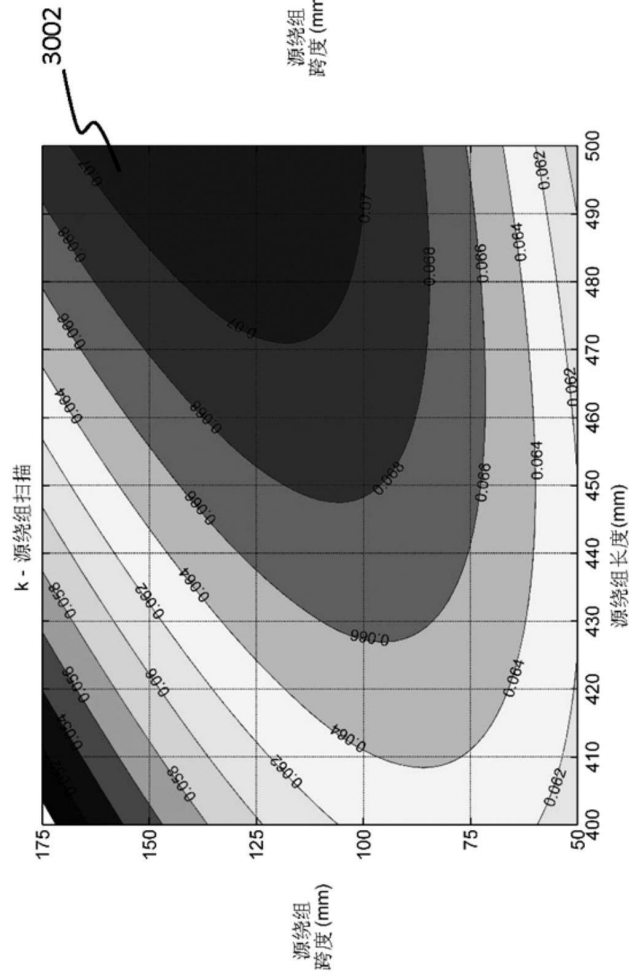


图 30A

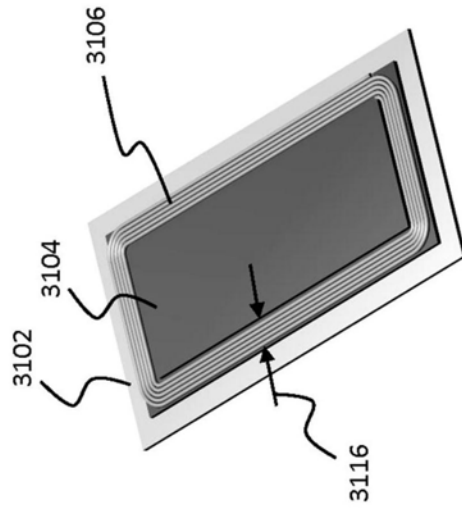


图31A

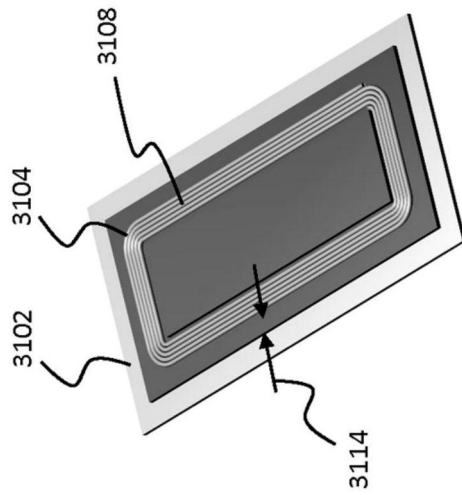


图31B

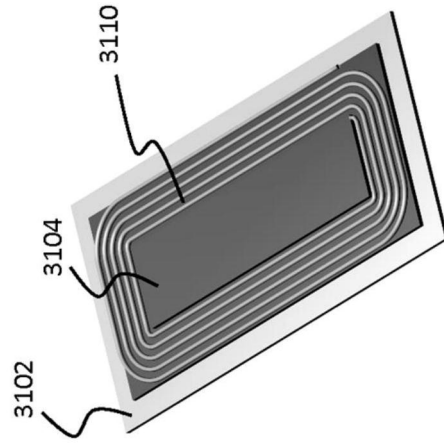


图31C

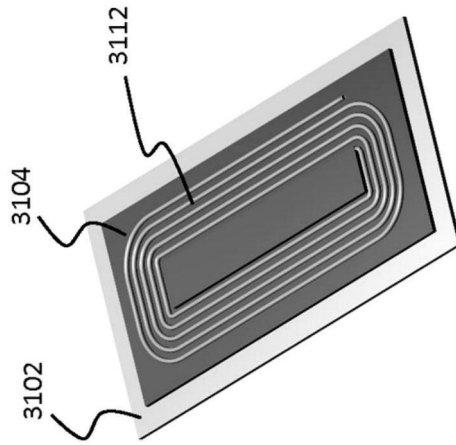


图31D

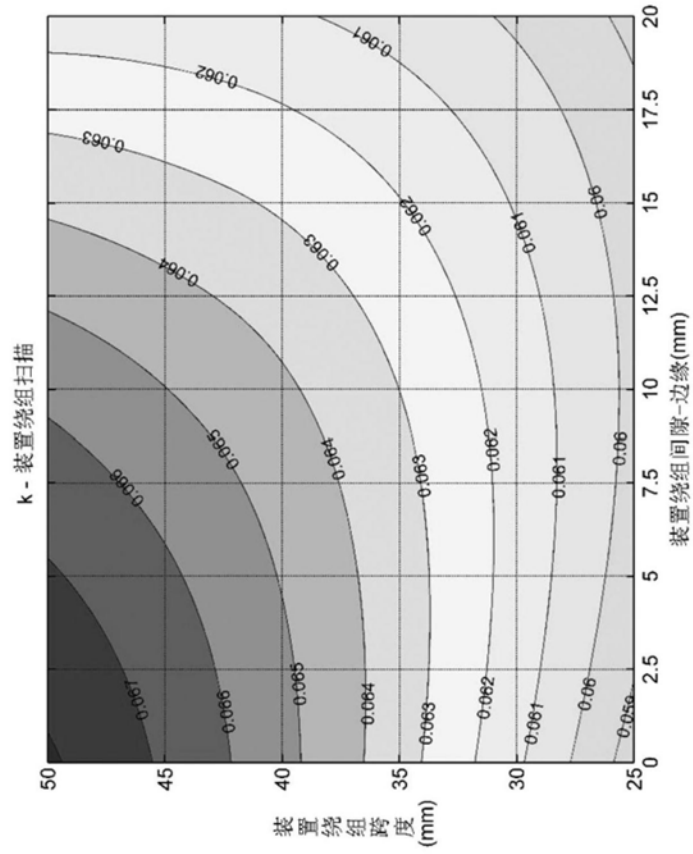


图32A

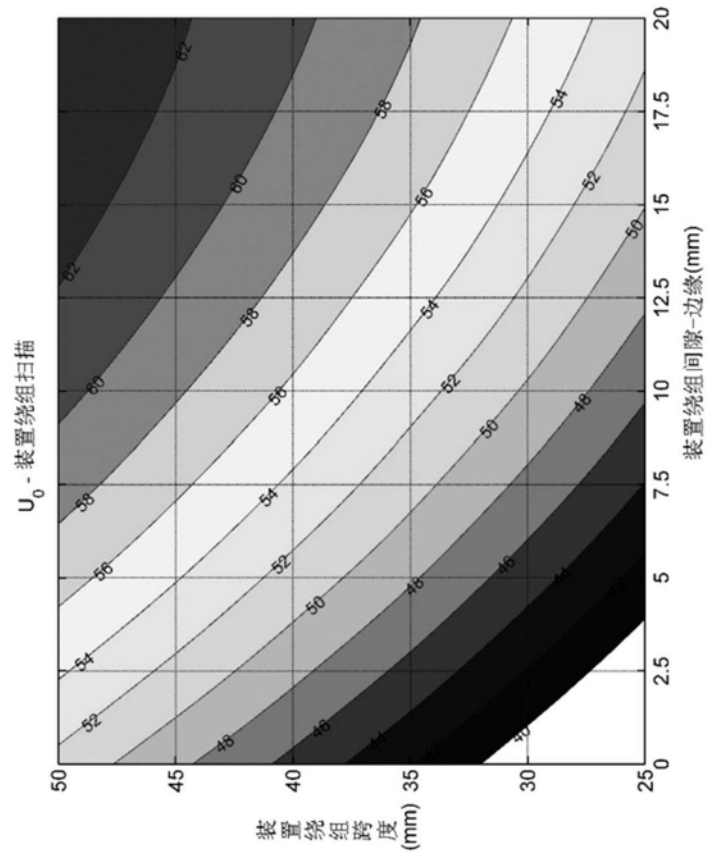


图32B

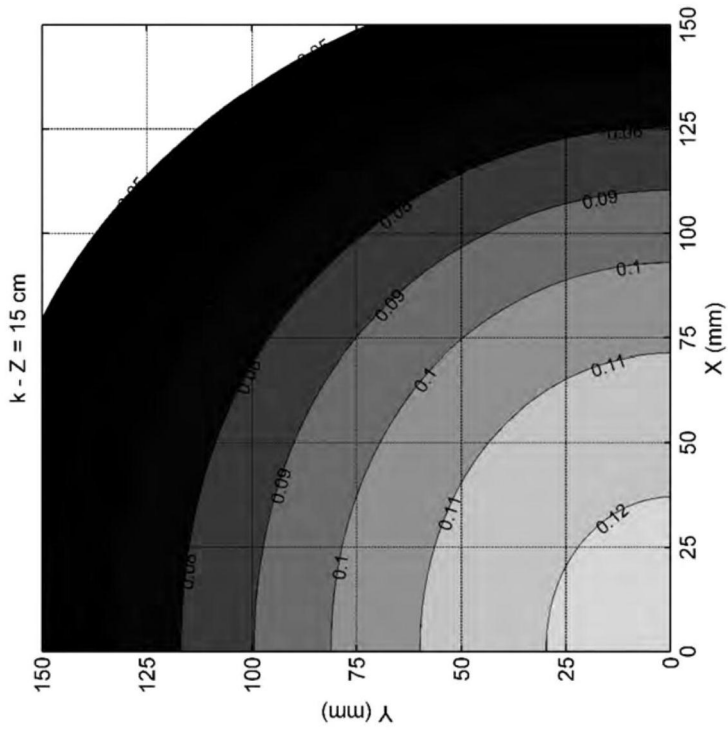


图 33B

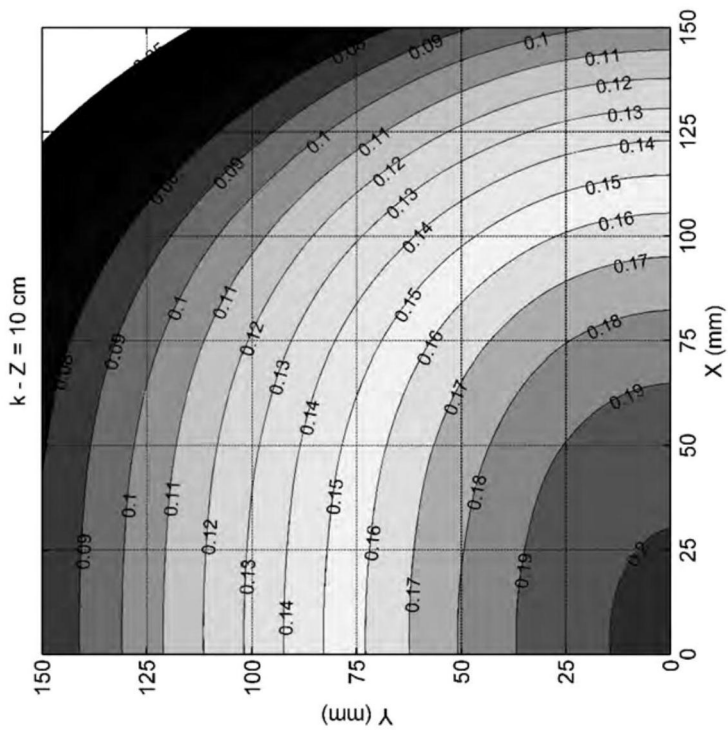
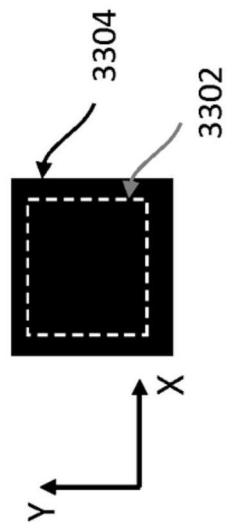


图 33A



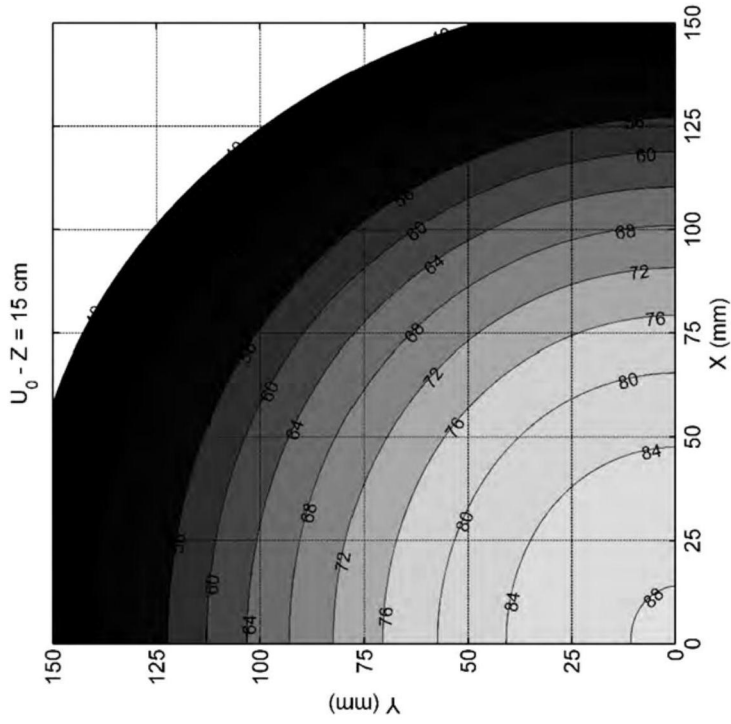


图 34B

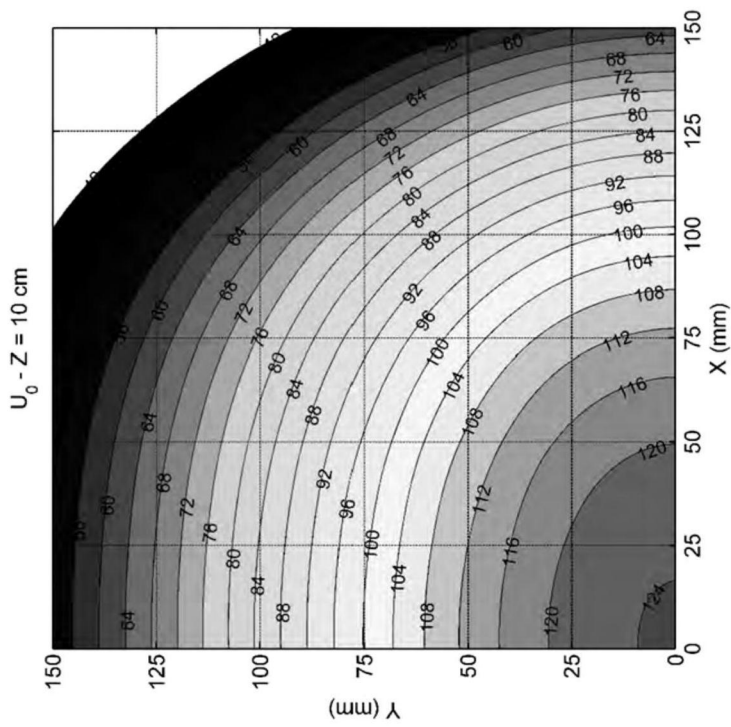
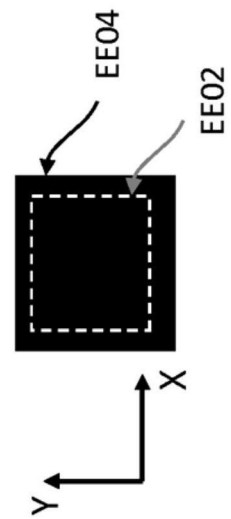


图 34A



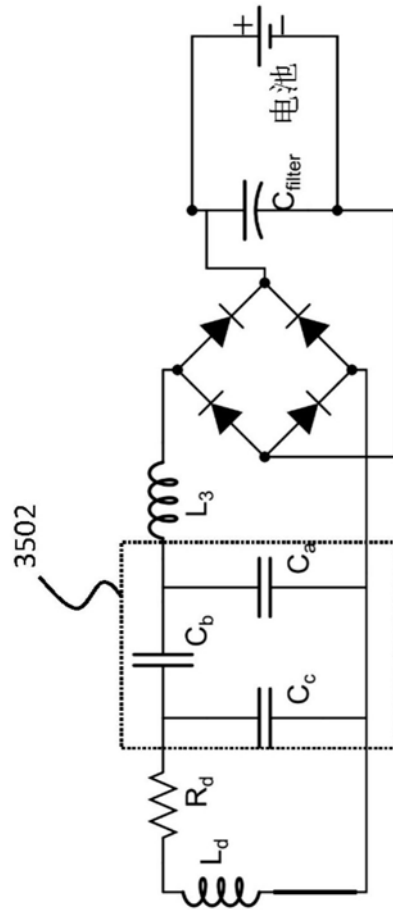


图35A

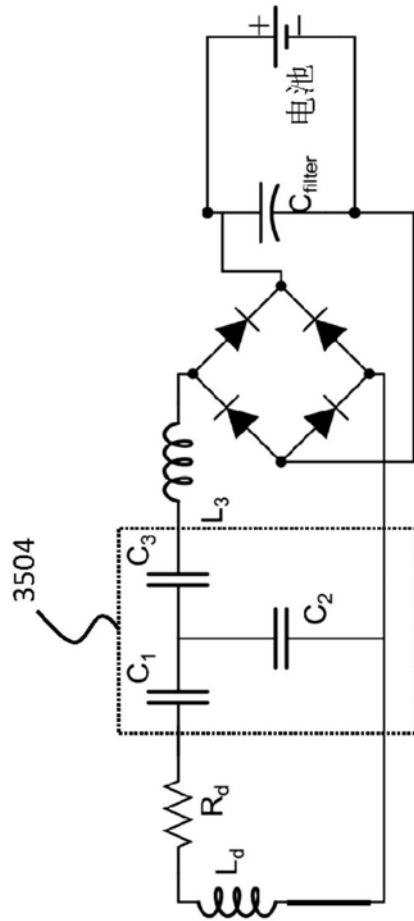


图35B

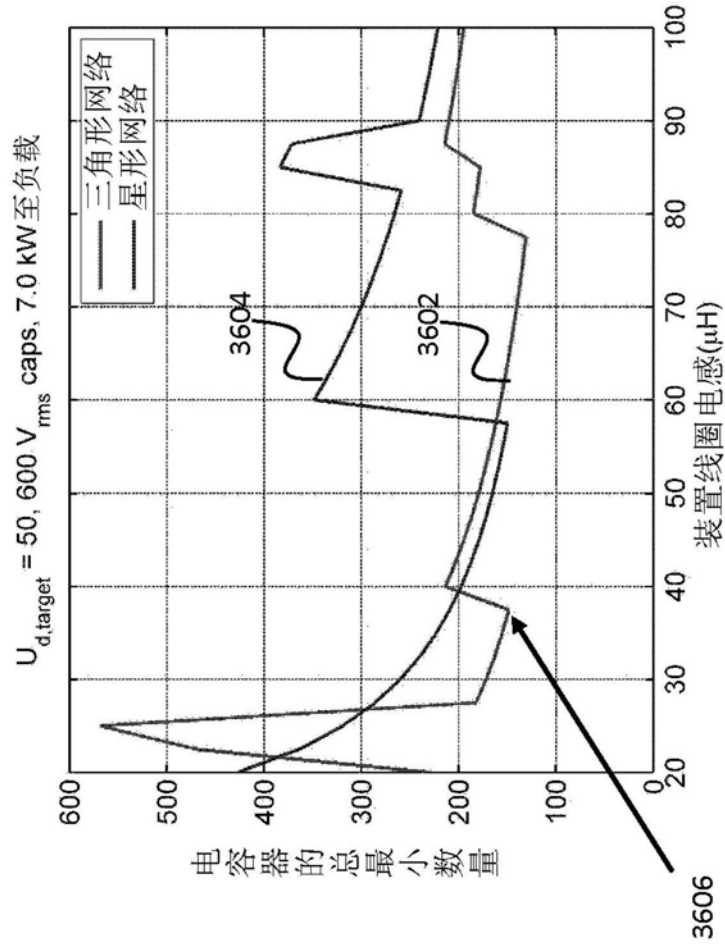


图36

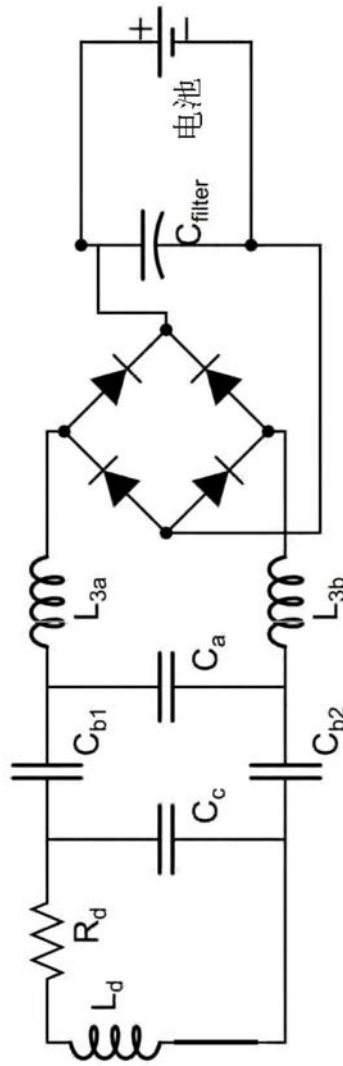


图37

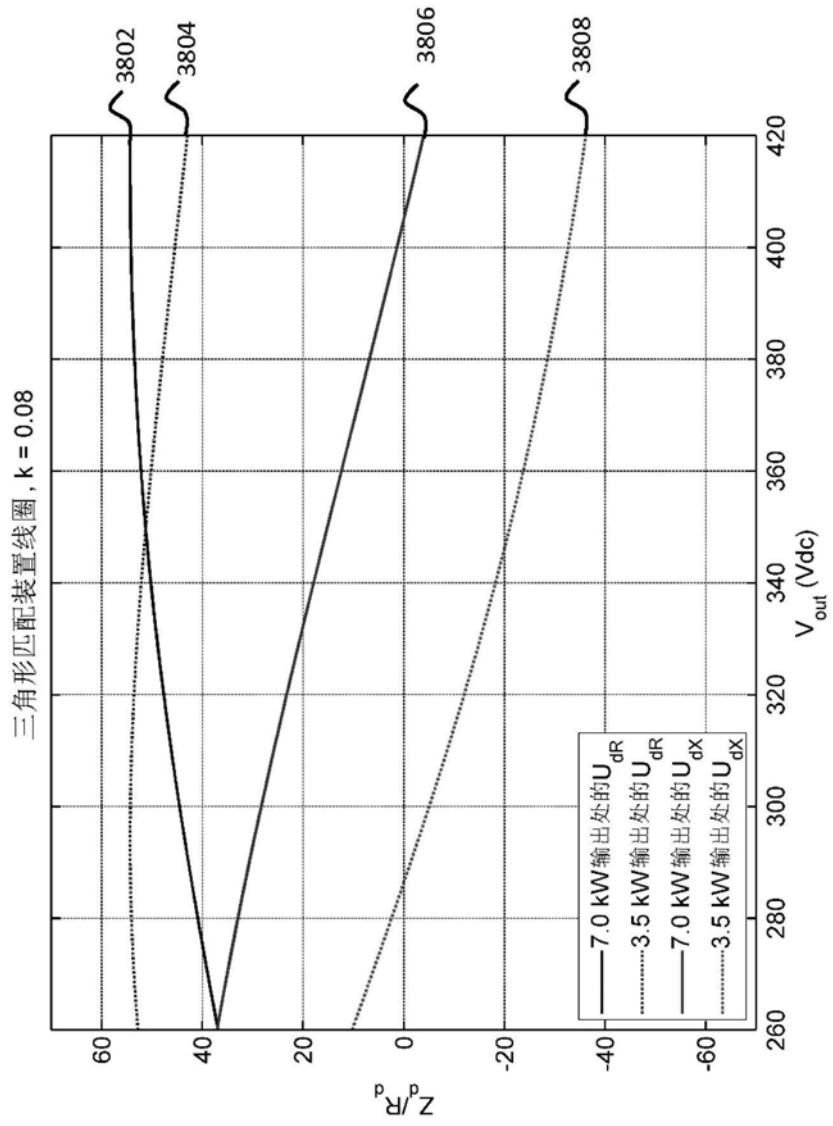


图38

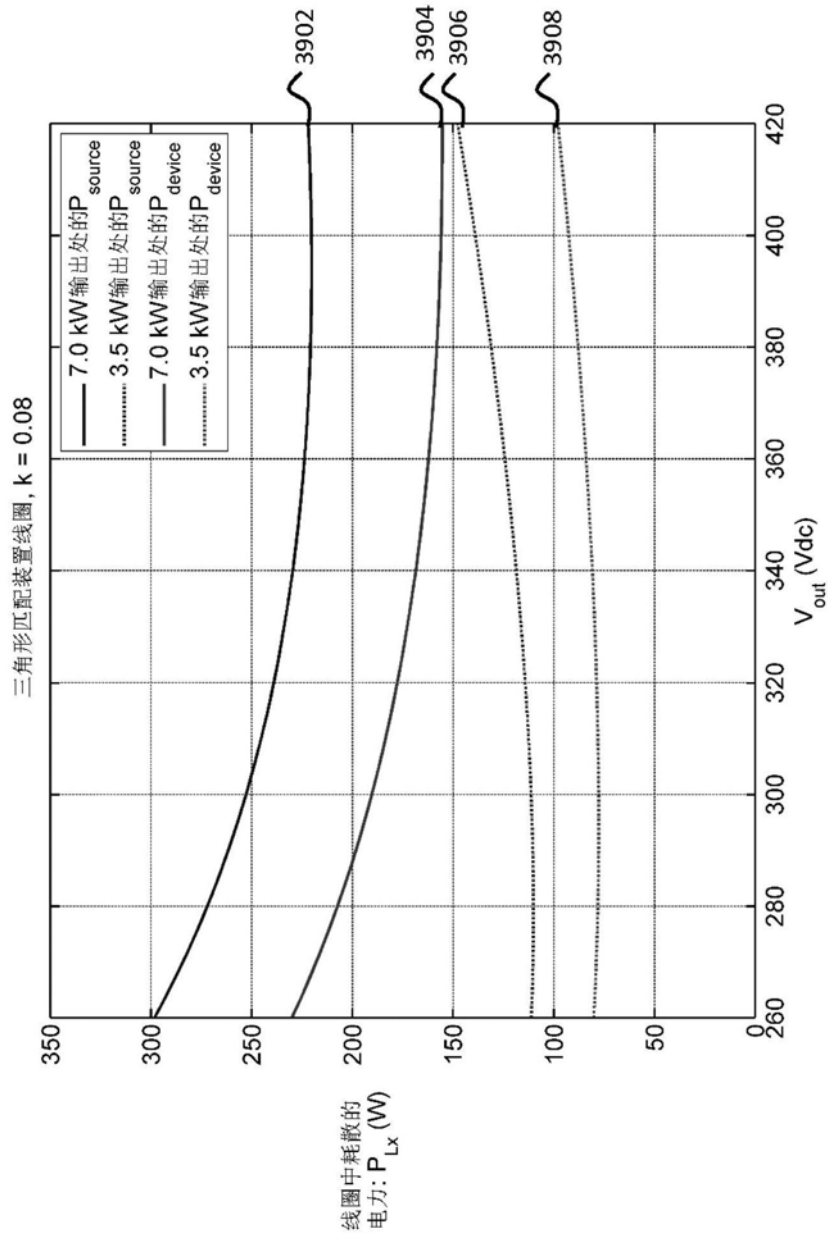


图39

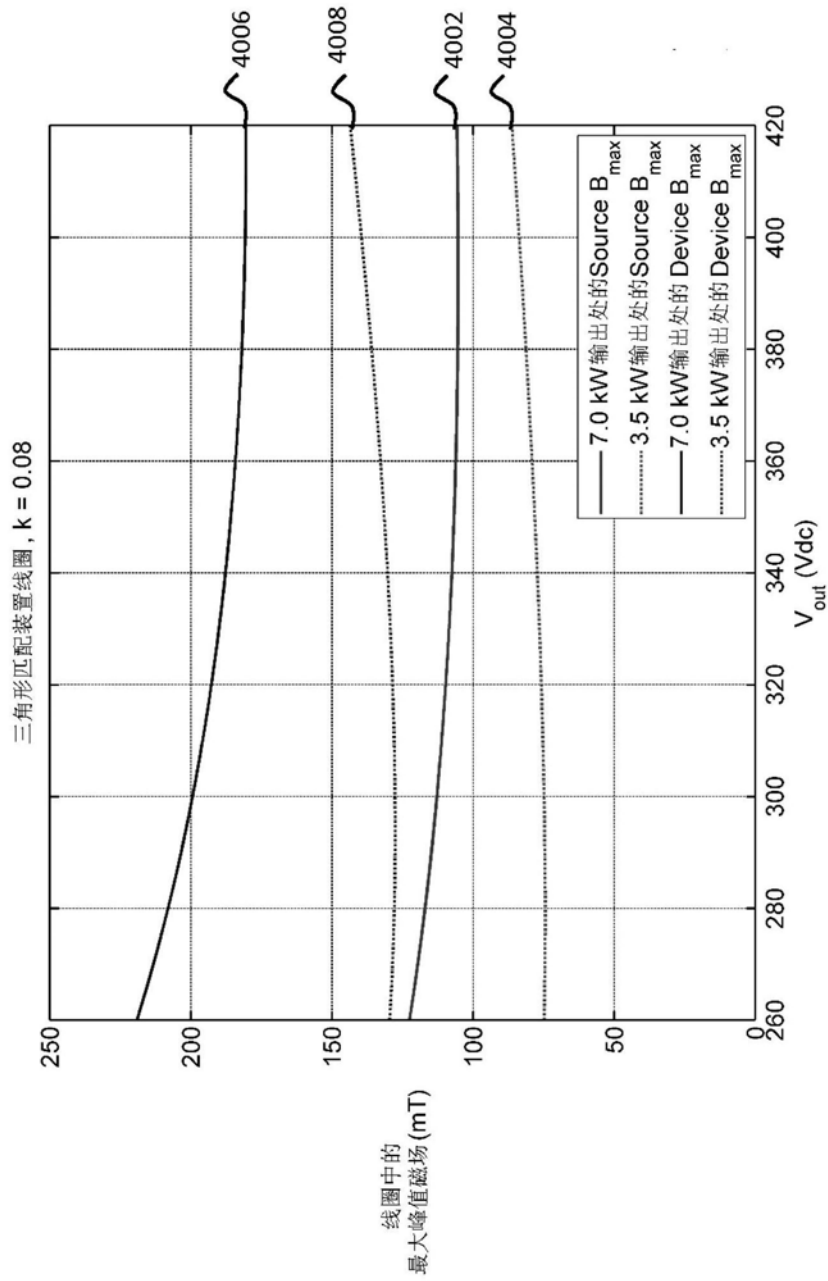


图40

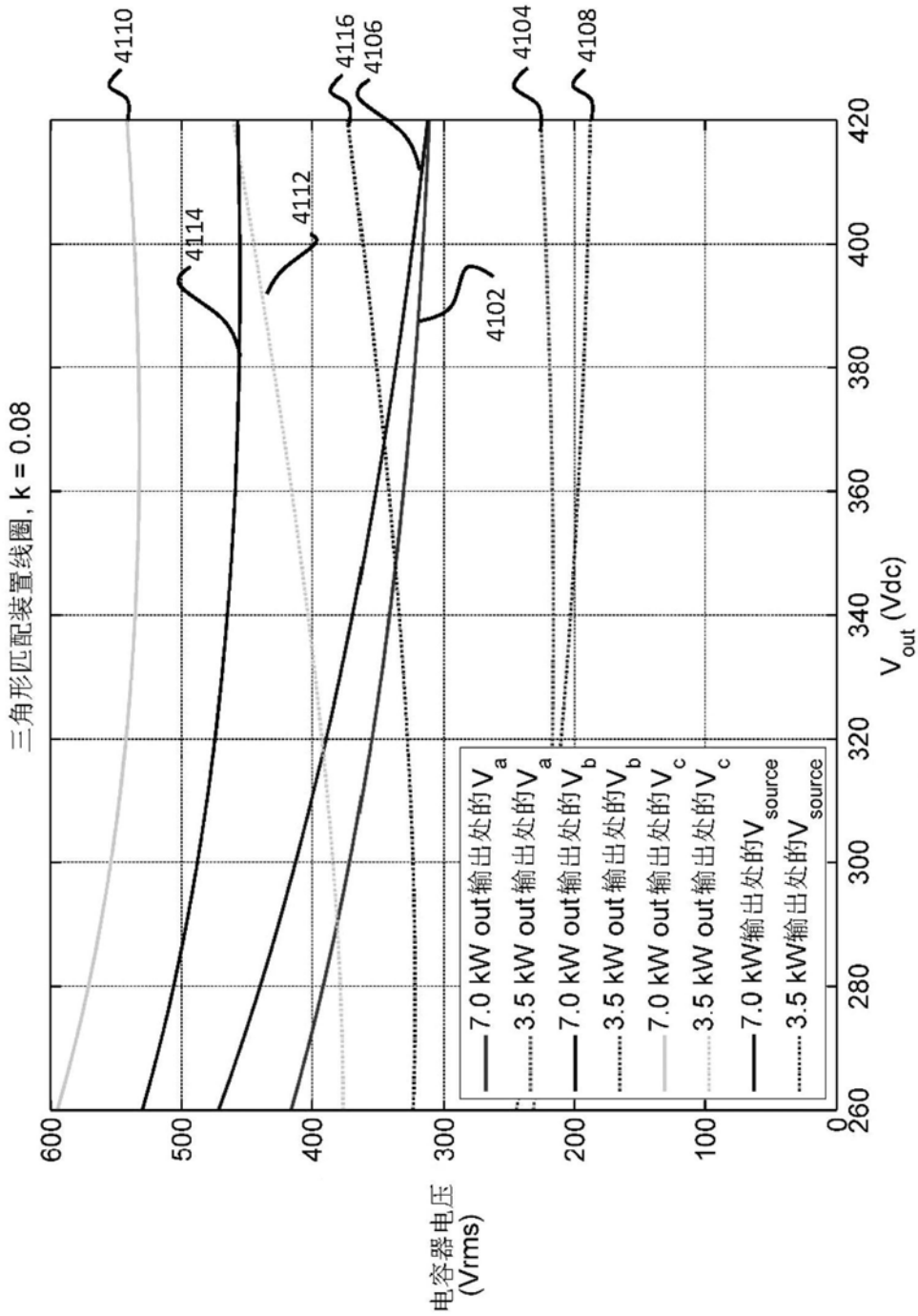


图41

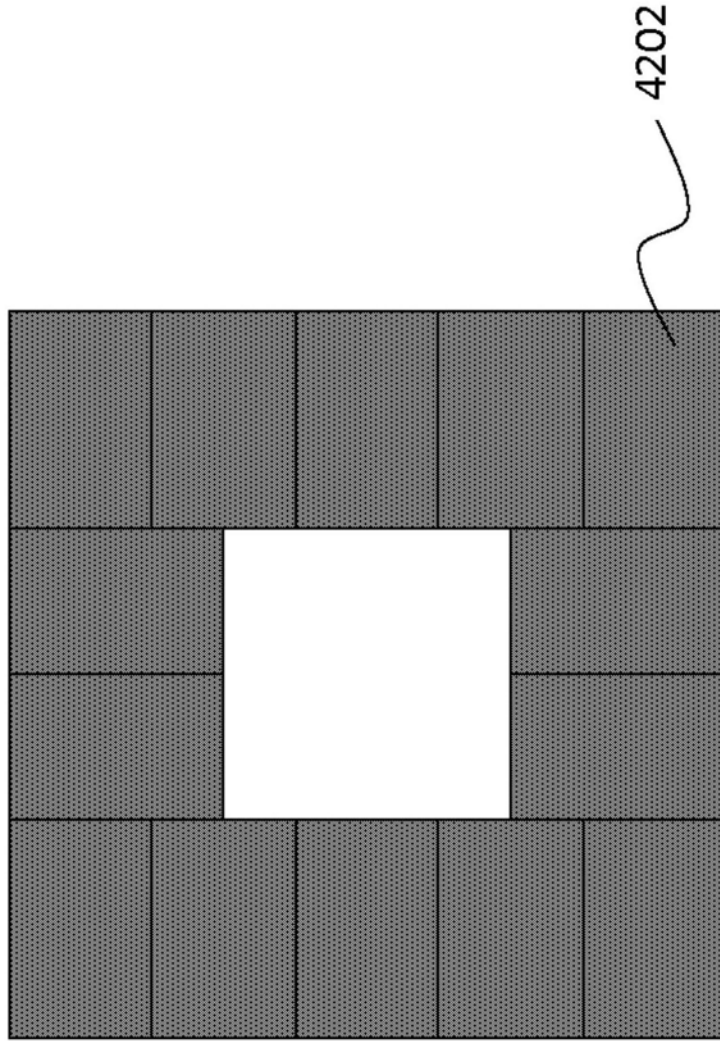


图42



图43

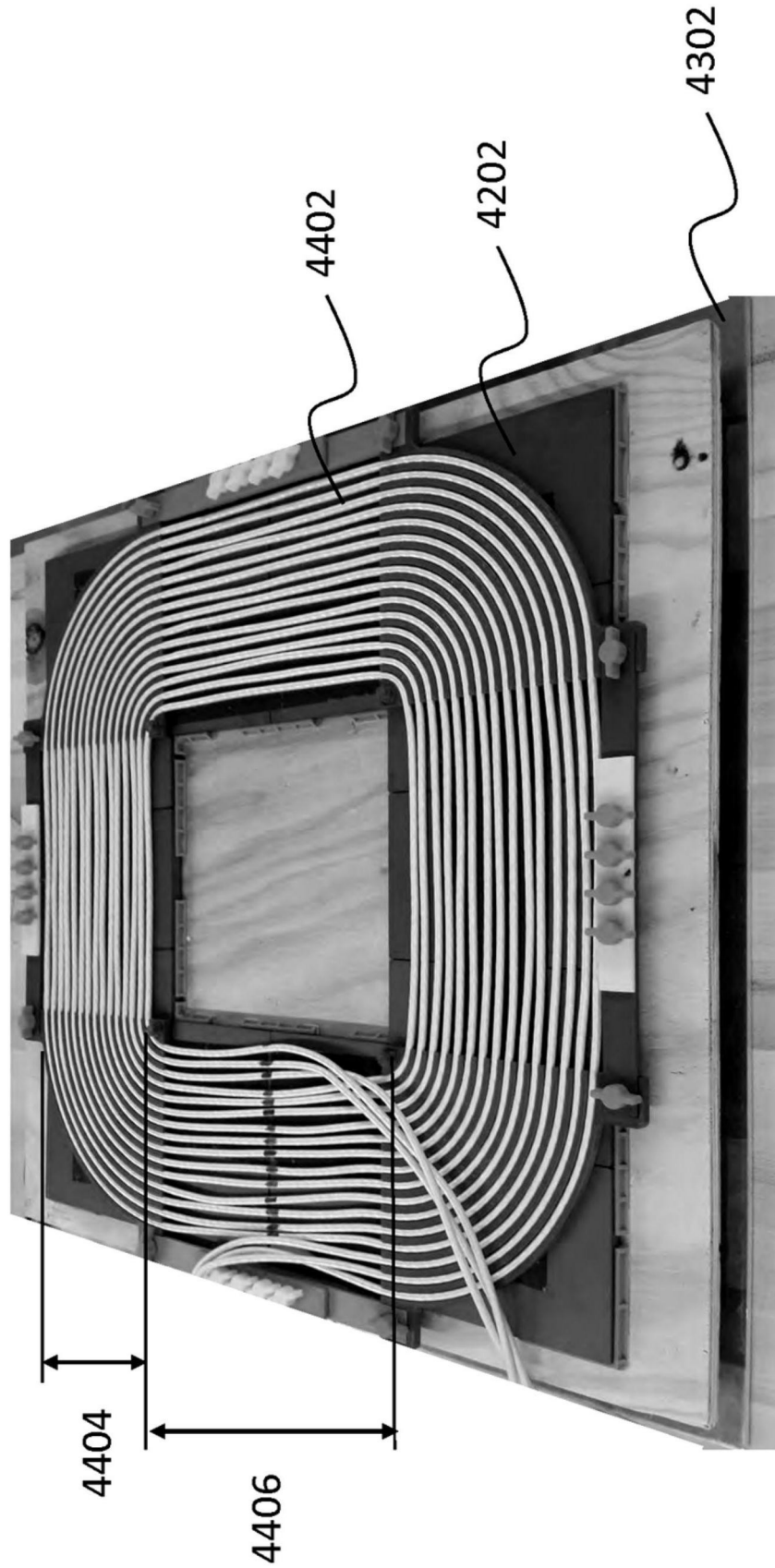


图44

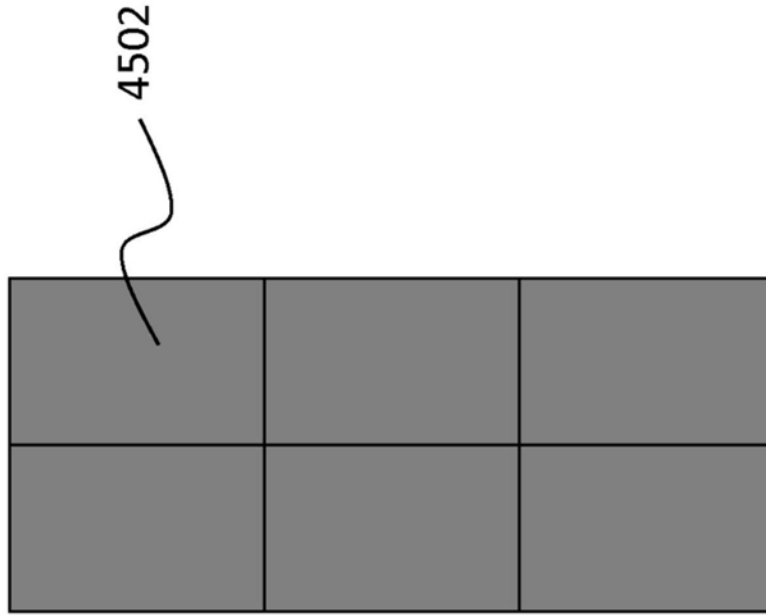


图45A

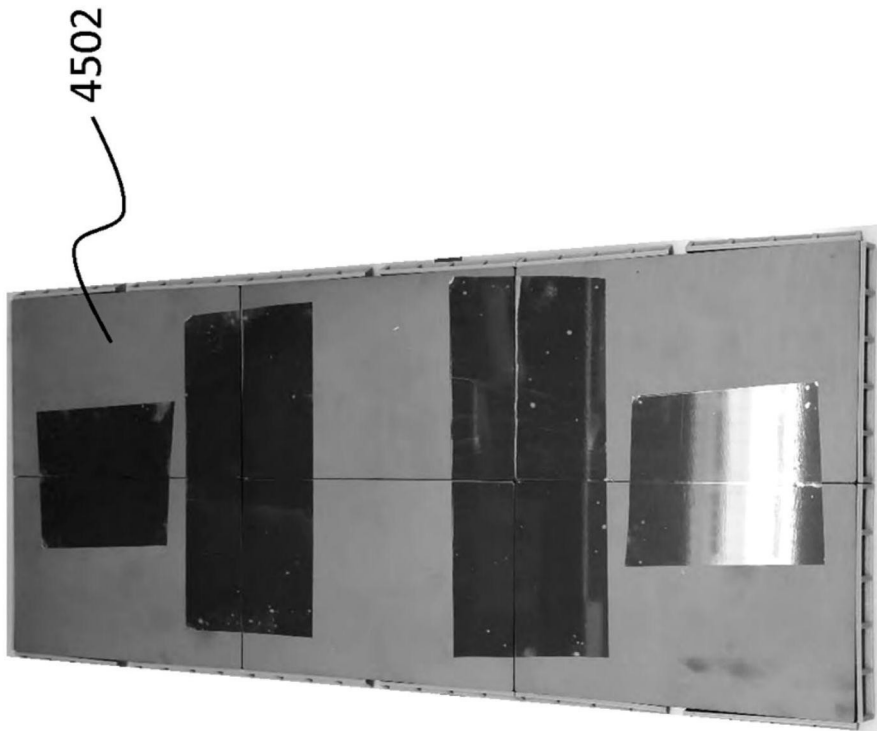


图45B

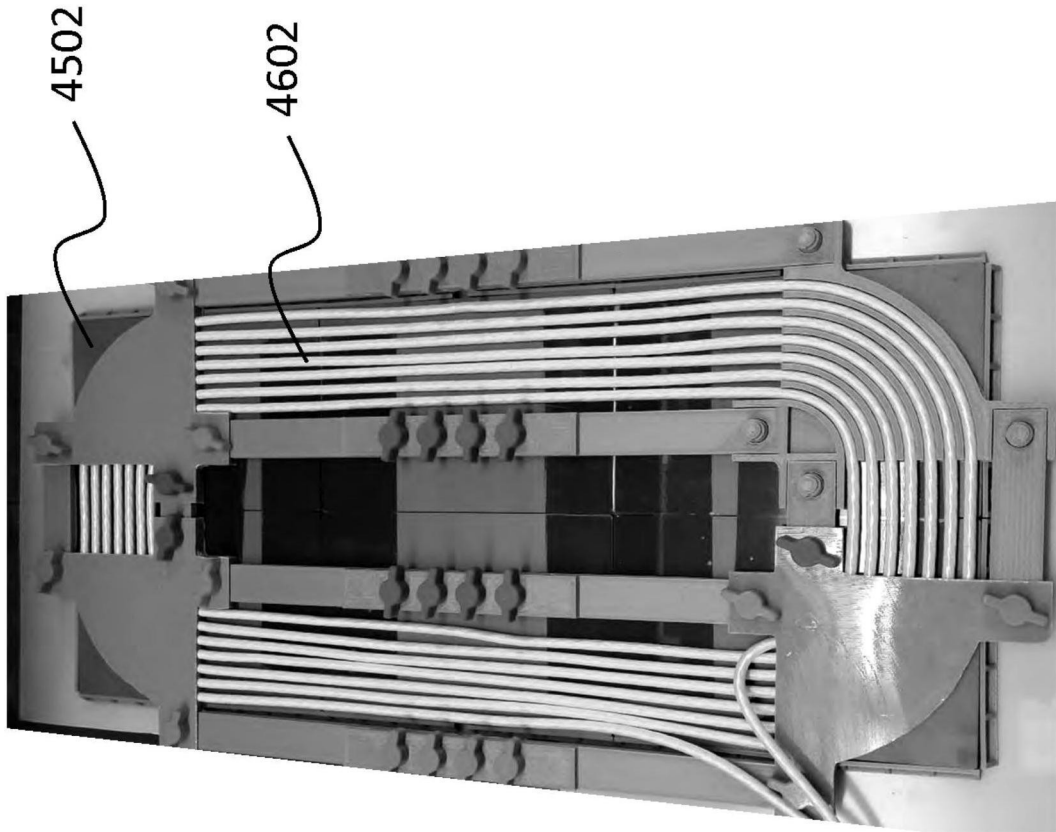


图46

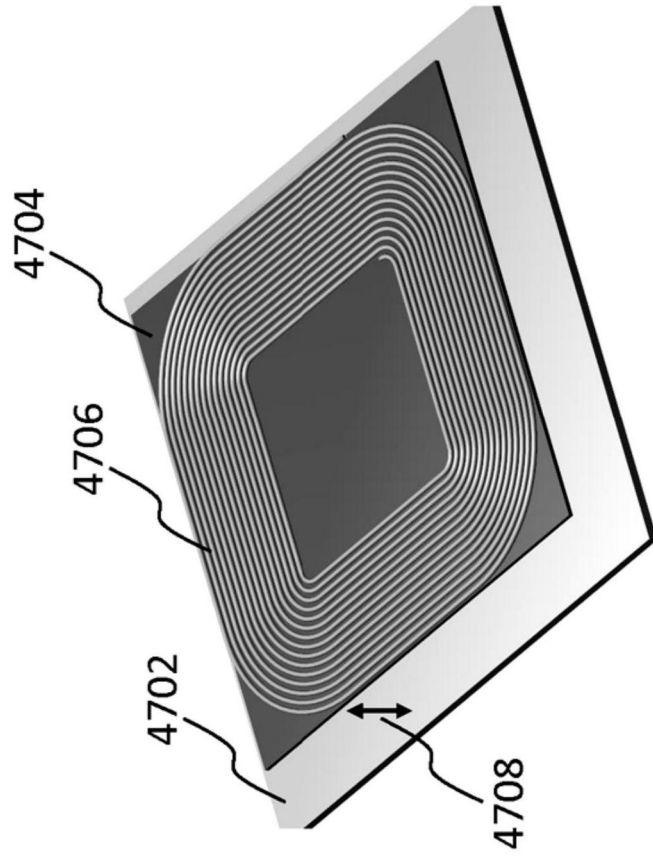


图47A

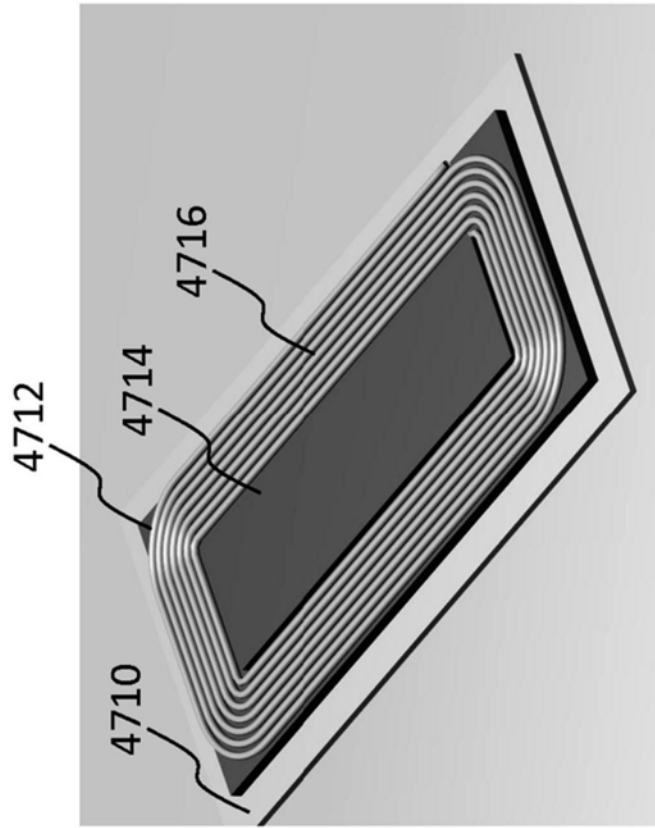


图47B

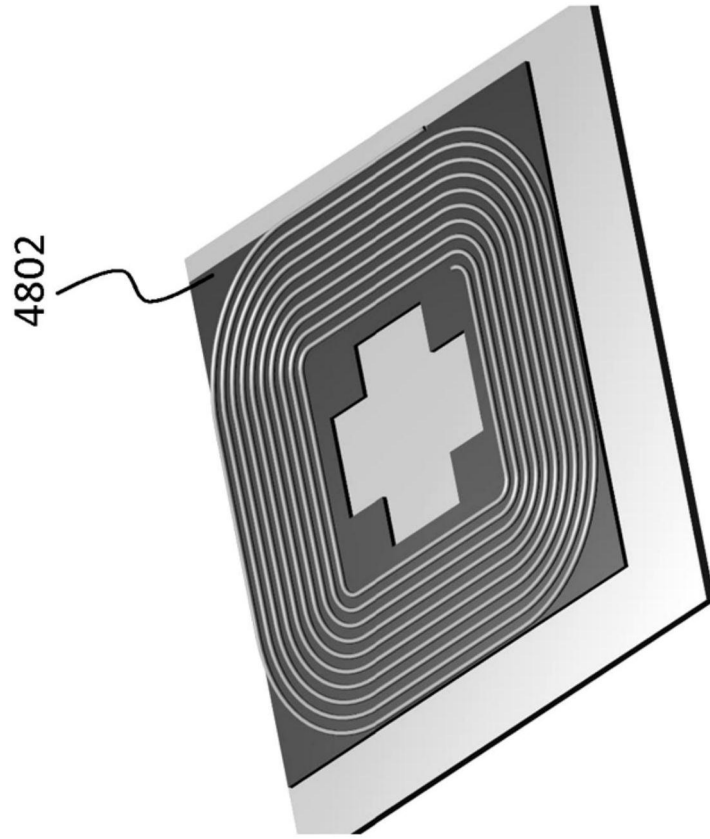


图48A

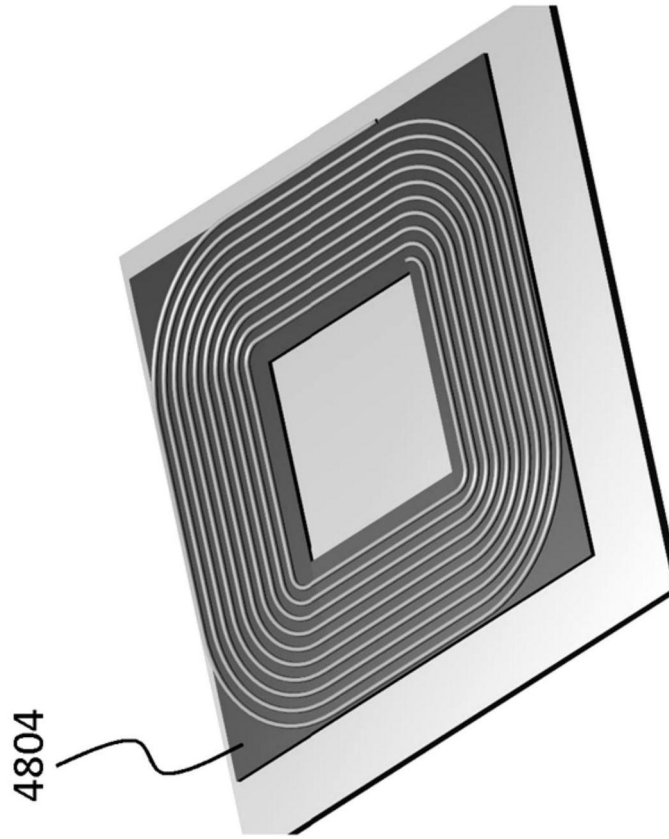


图48B

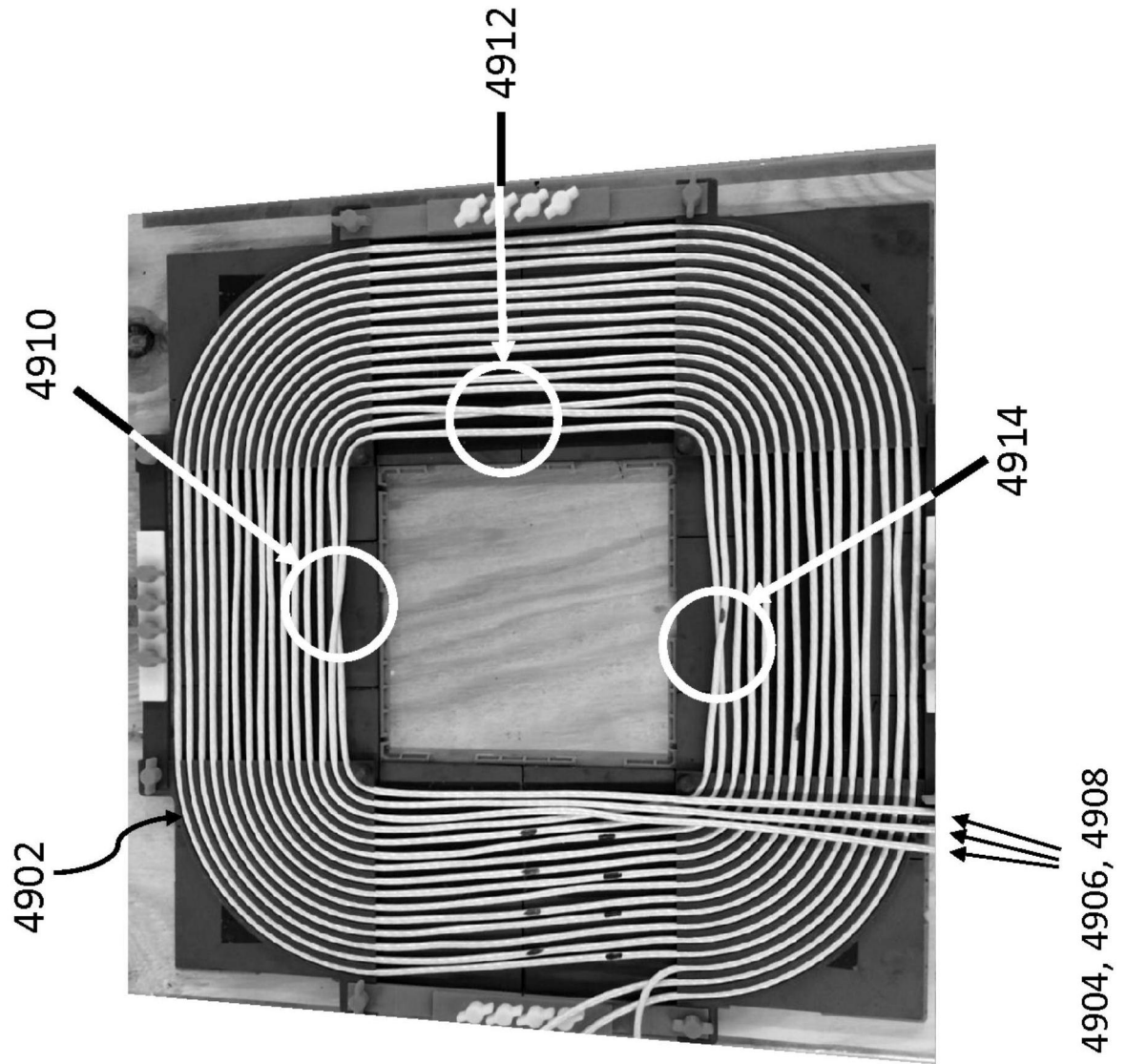


图49

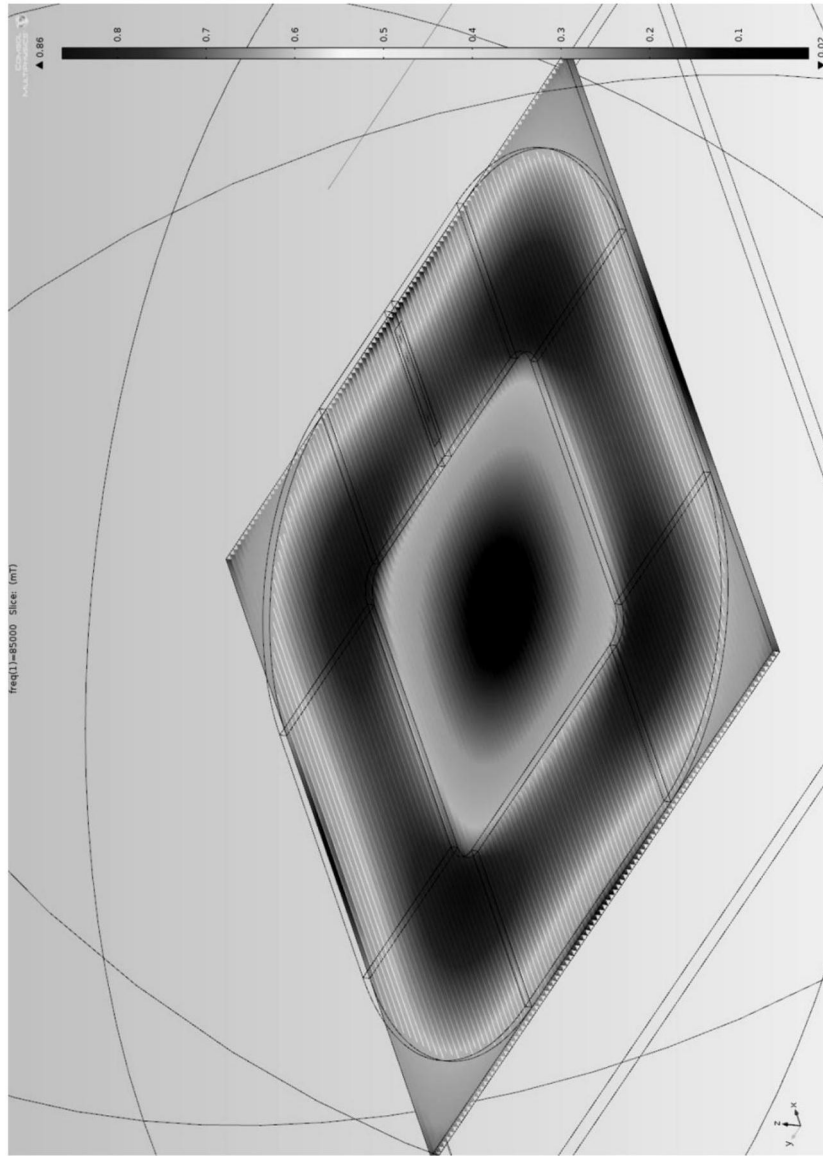


图50

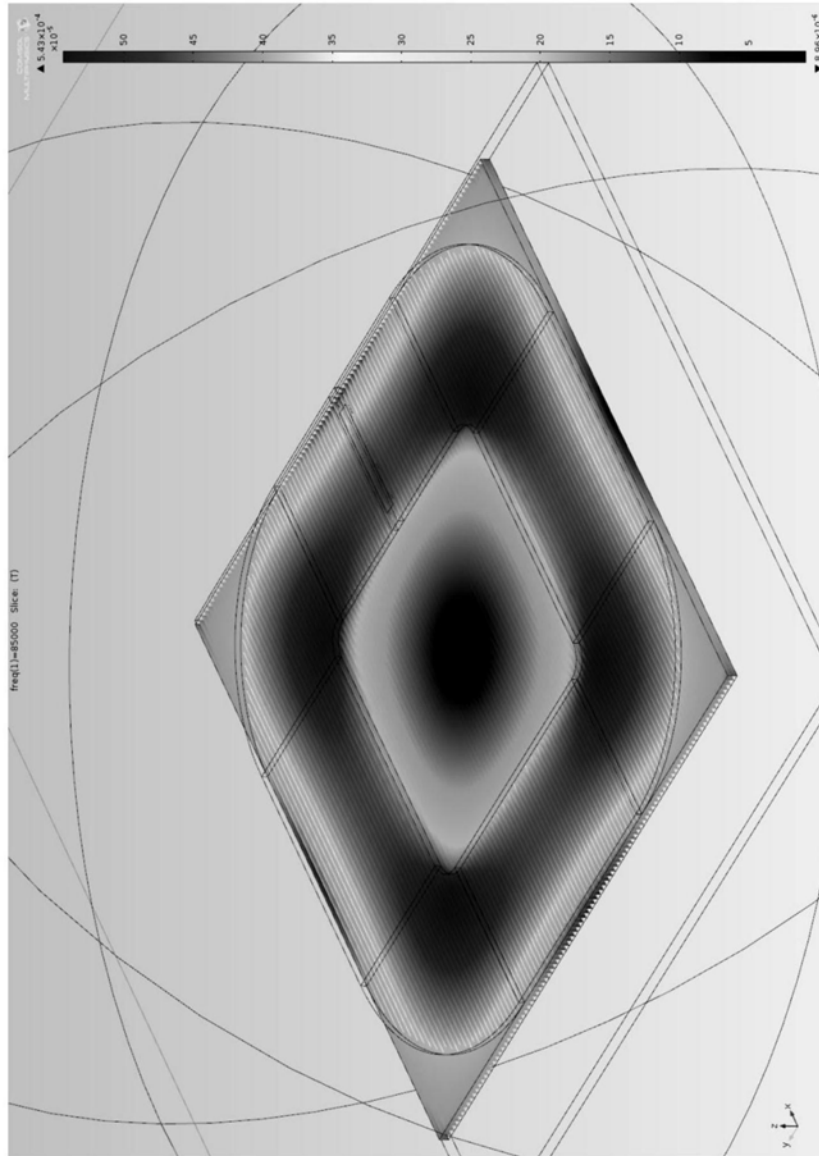


图51

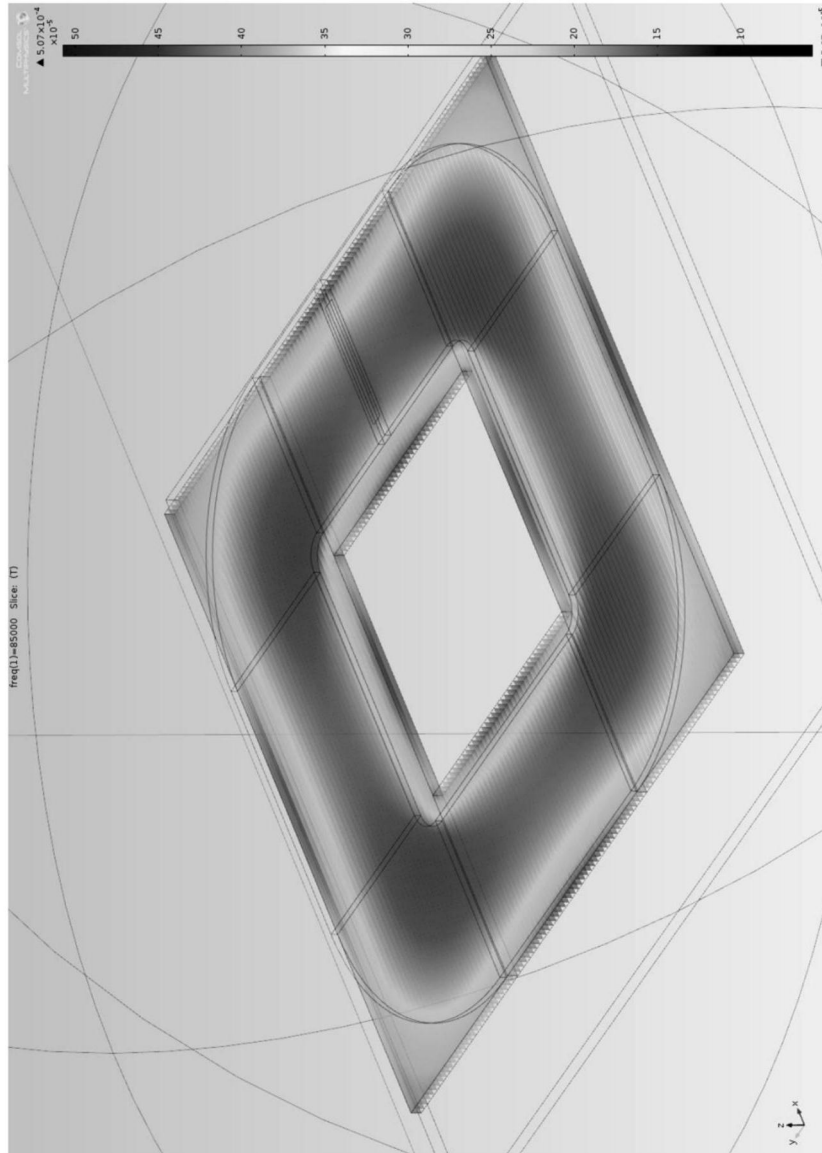


图52

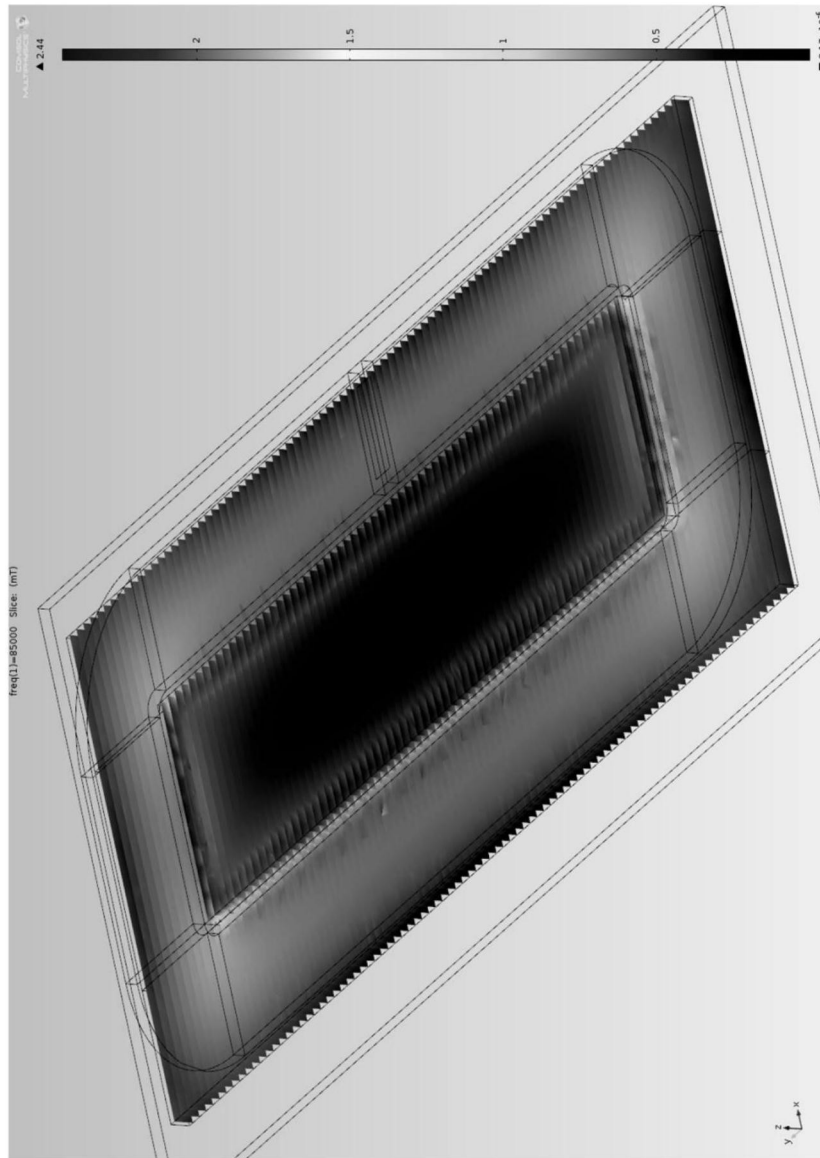


图53

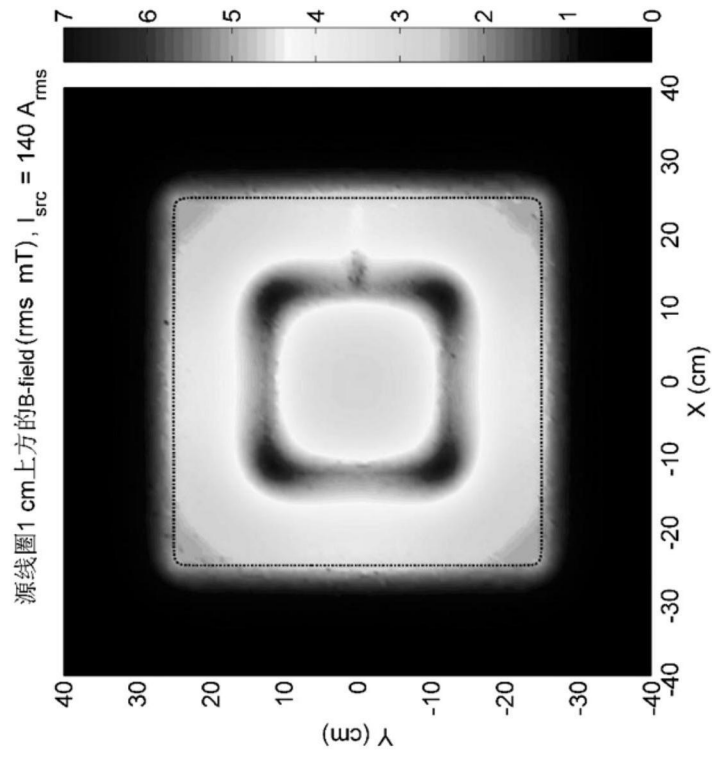


图54A

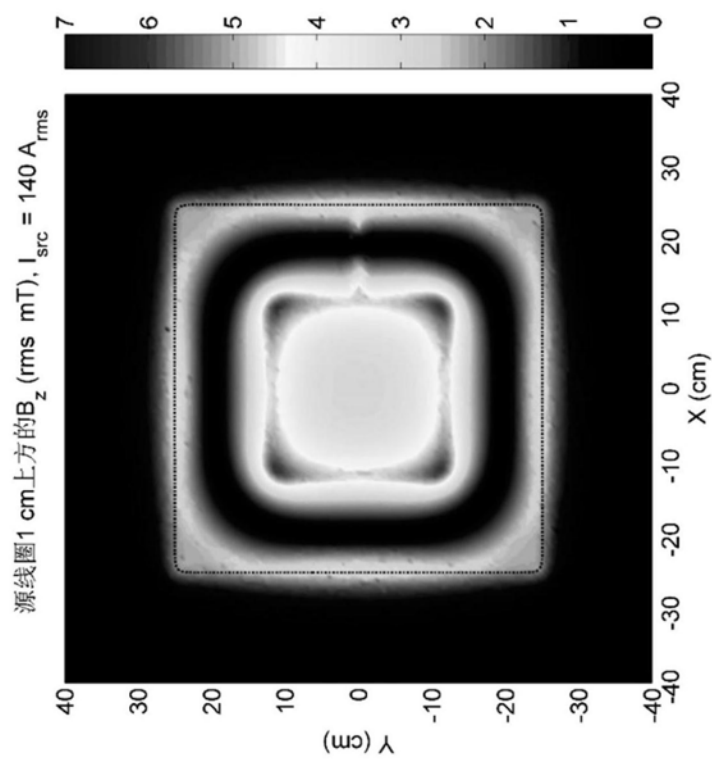


图54B

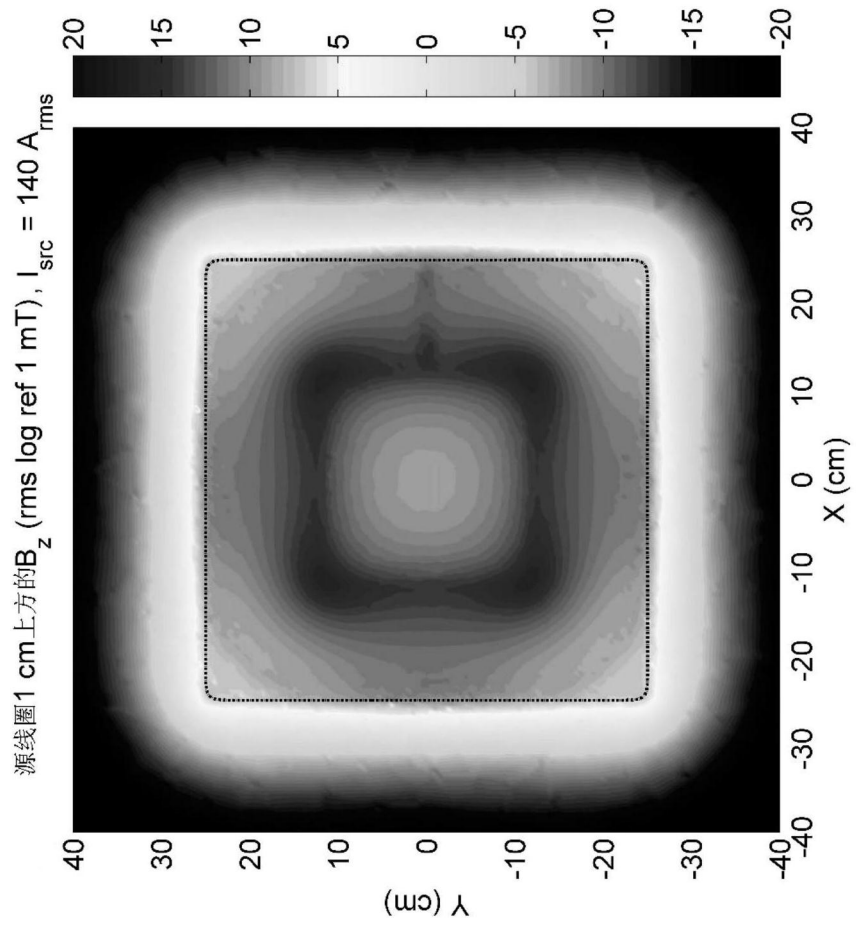


图55

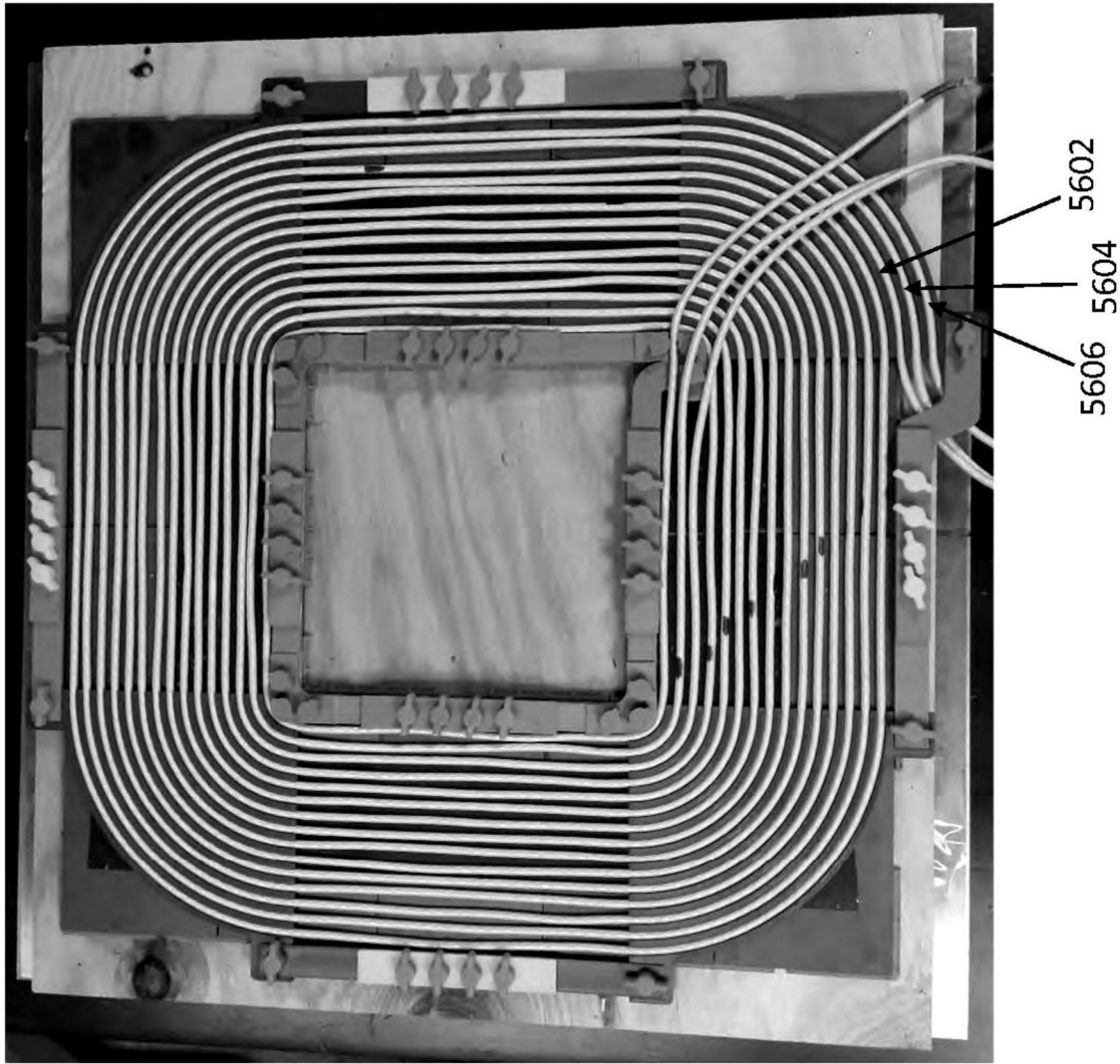


图56

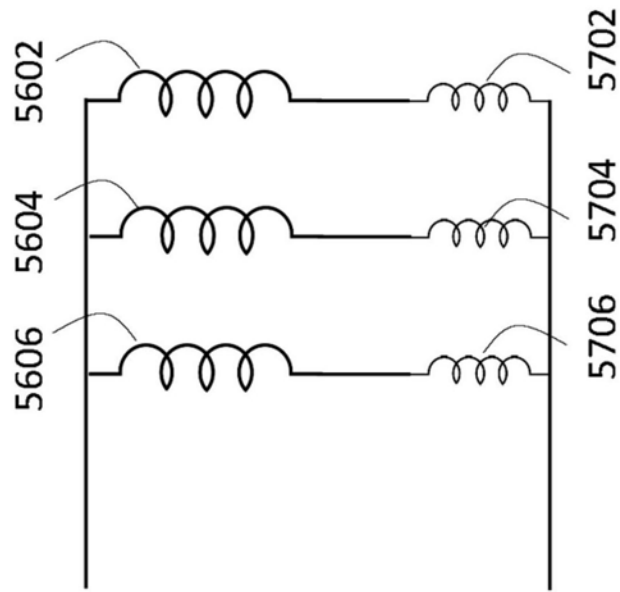


图57A

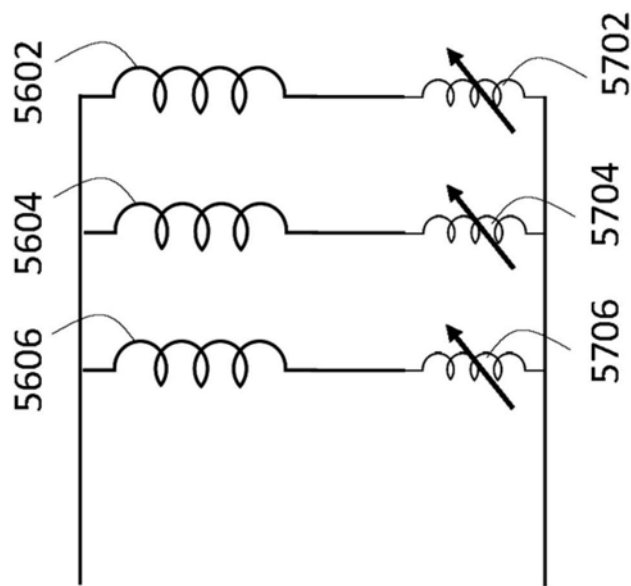


图57B

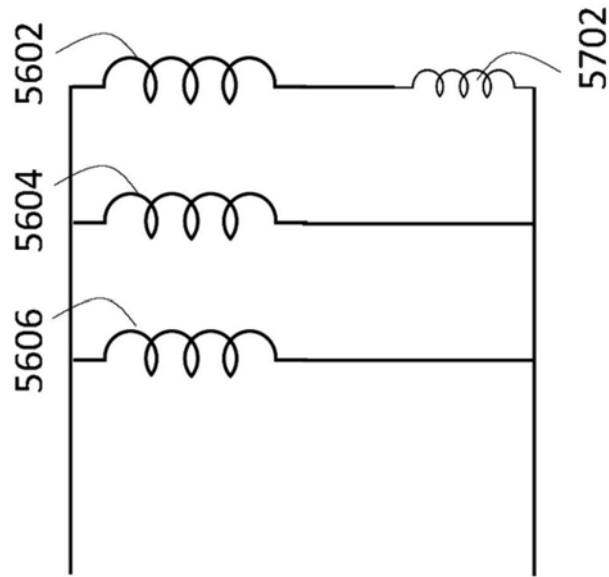


图57C

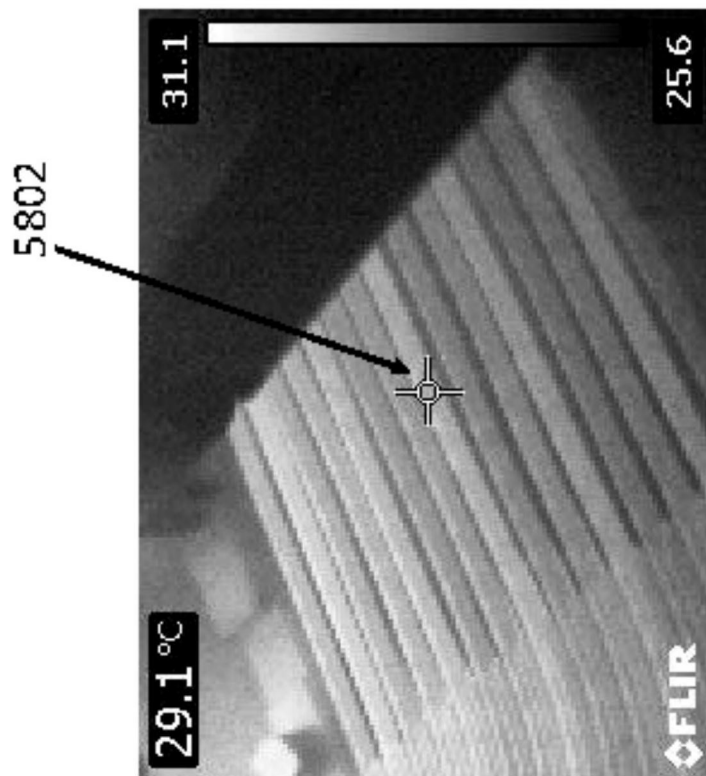


图58A

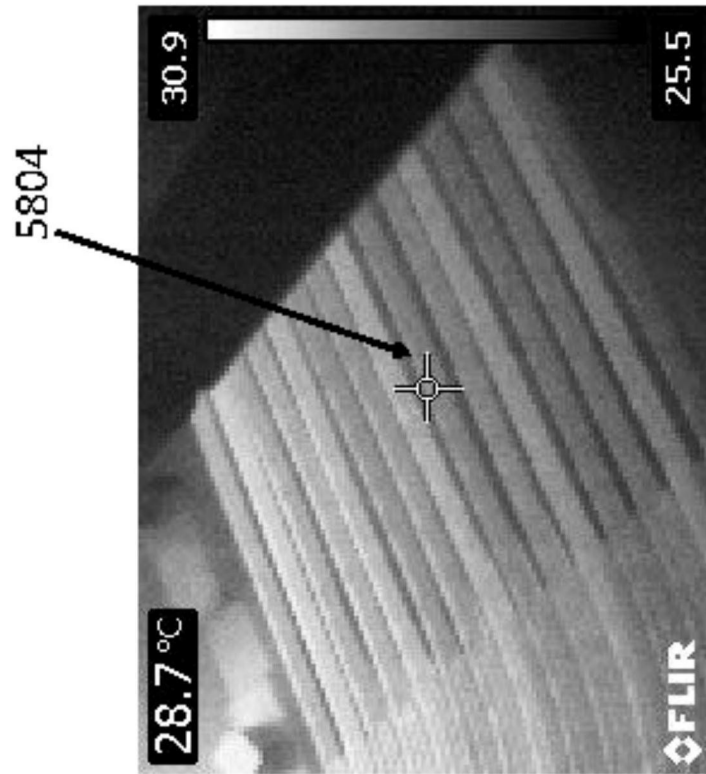


图58B

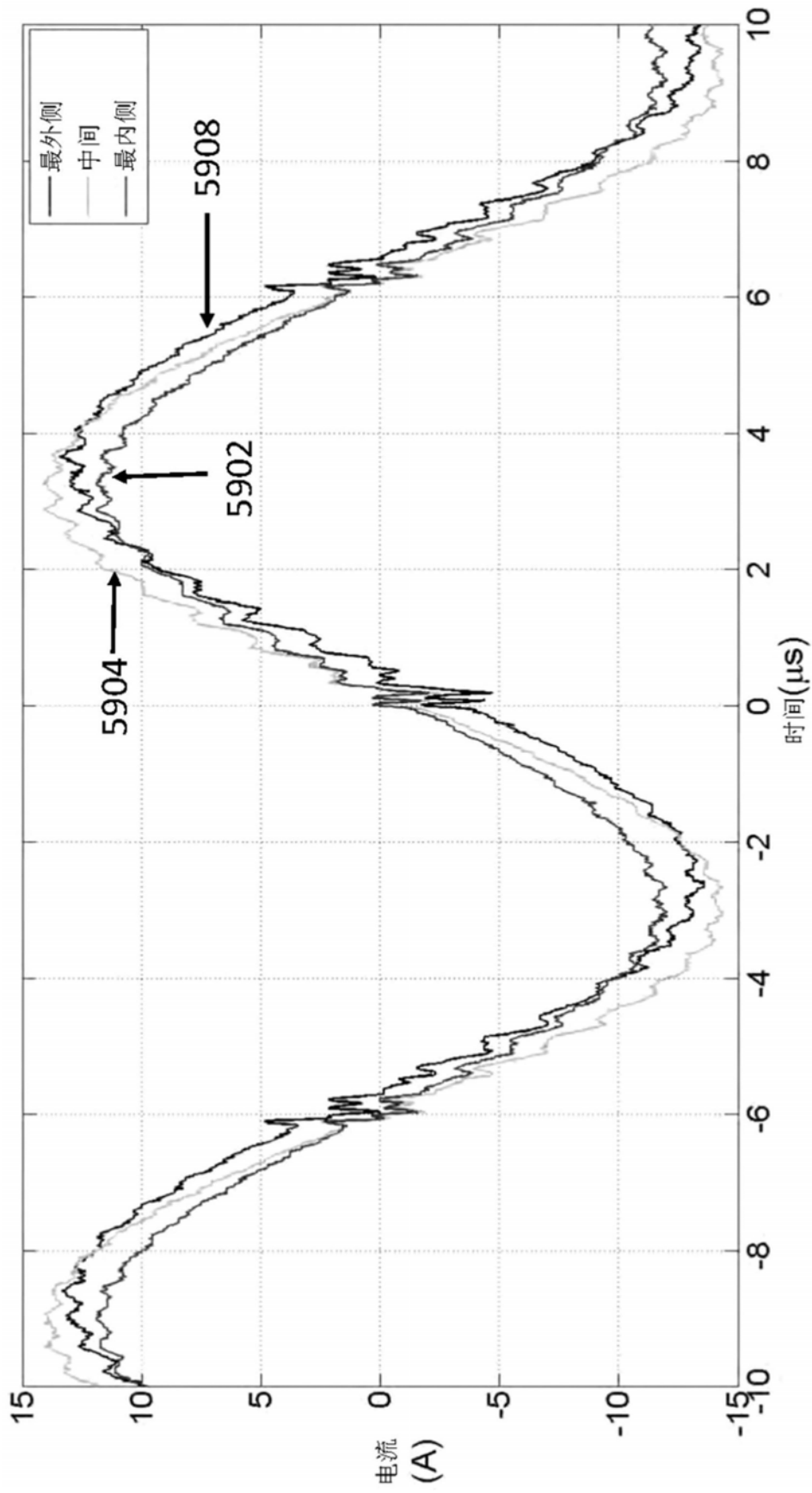


图59

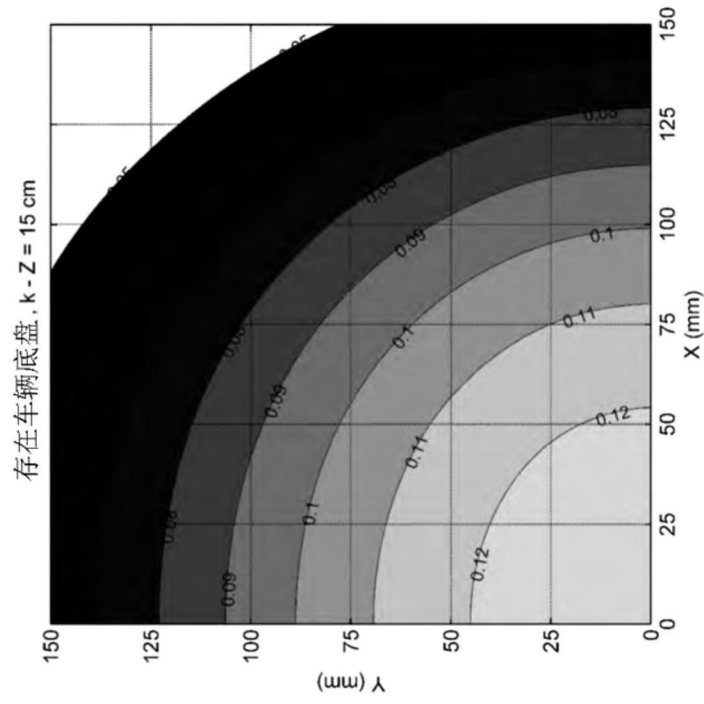


图60A

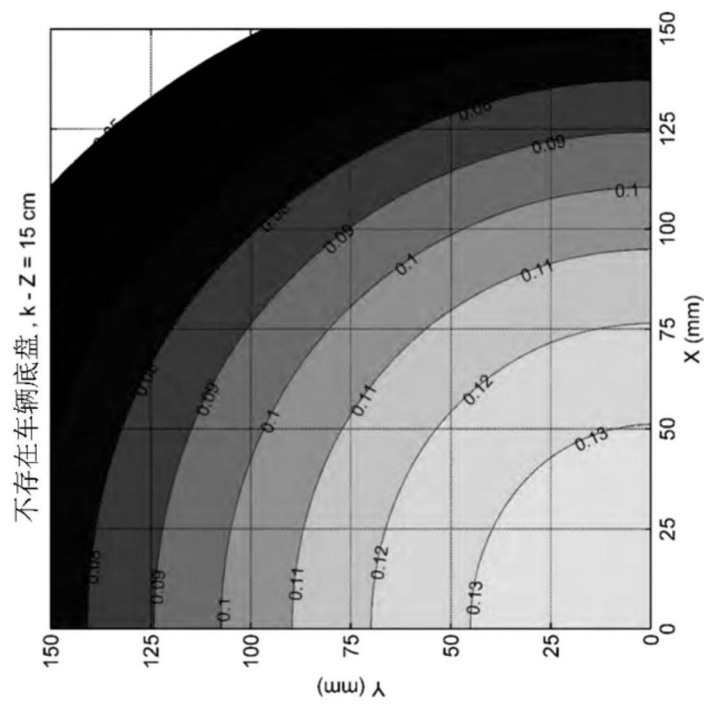


图60B

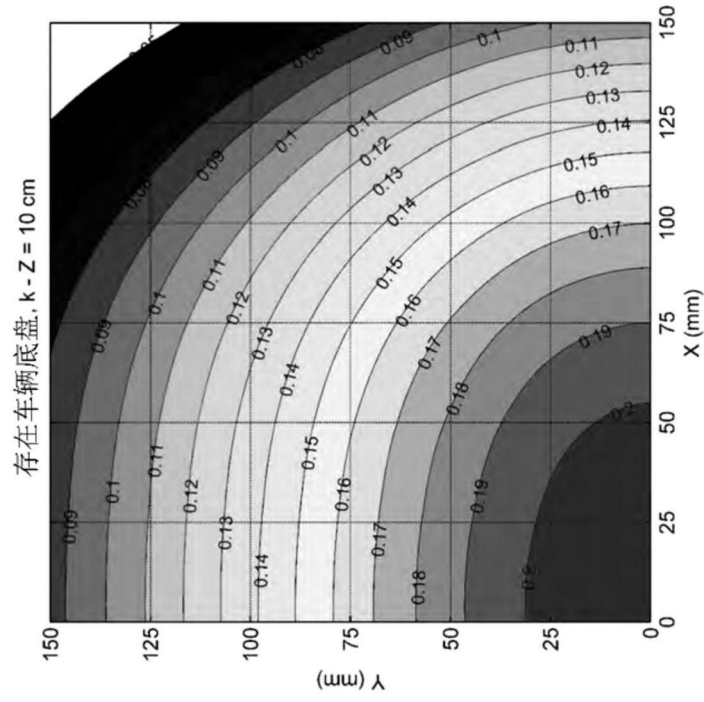


图61A

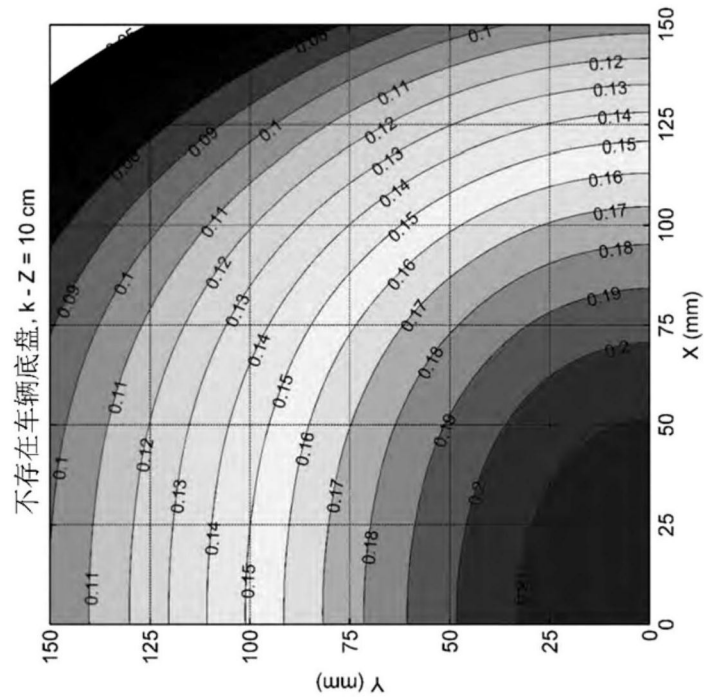


图61B

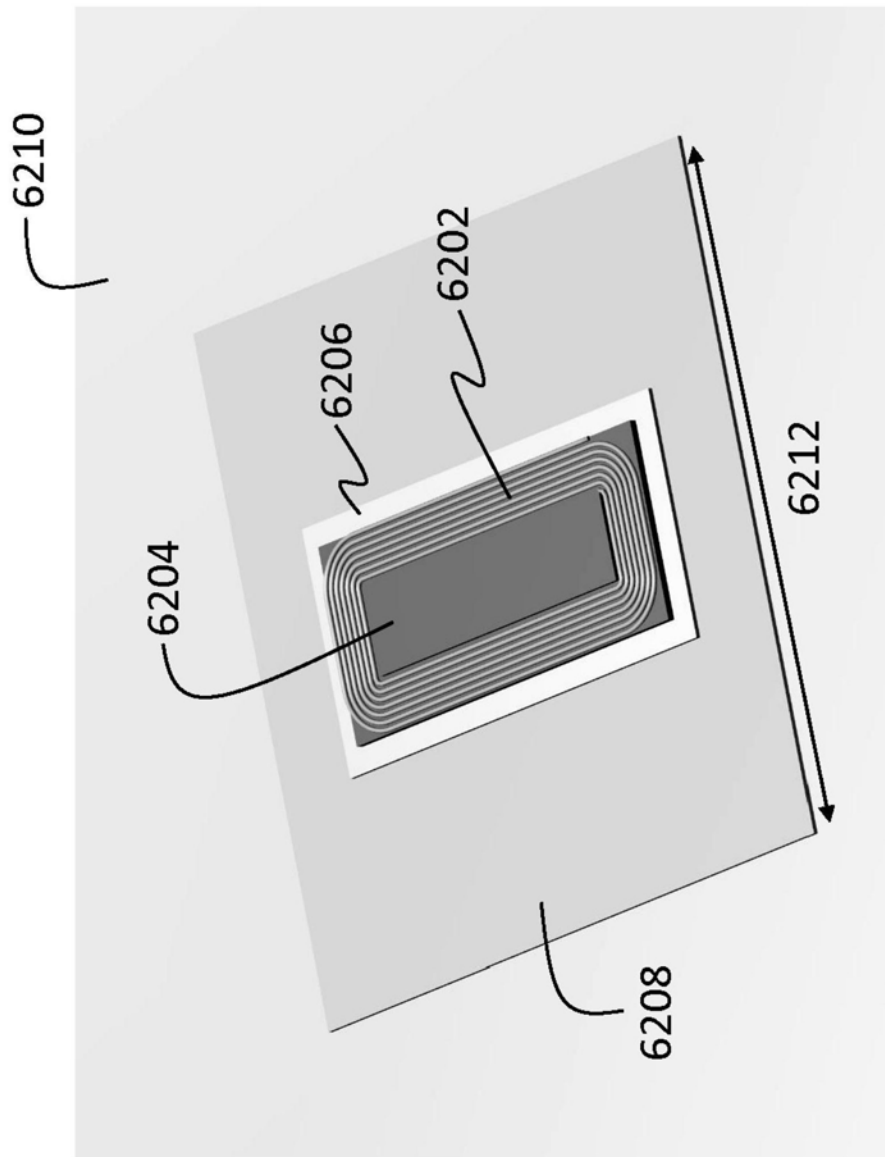


图62

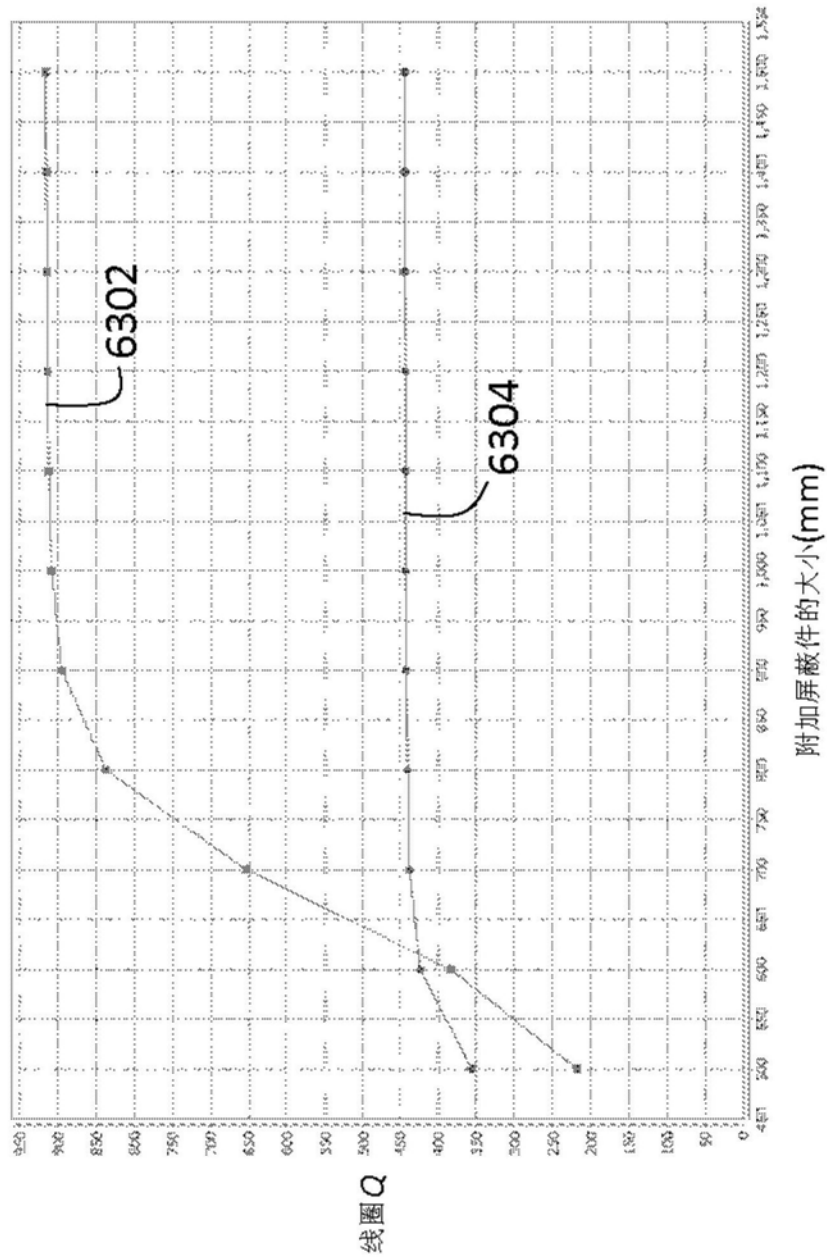


图63

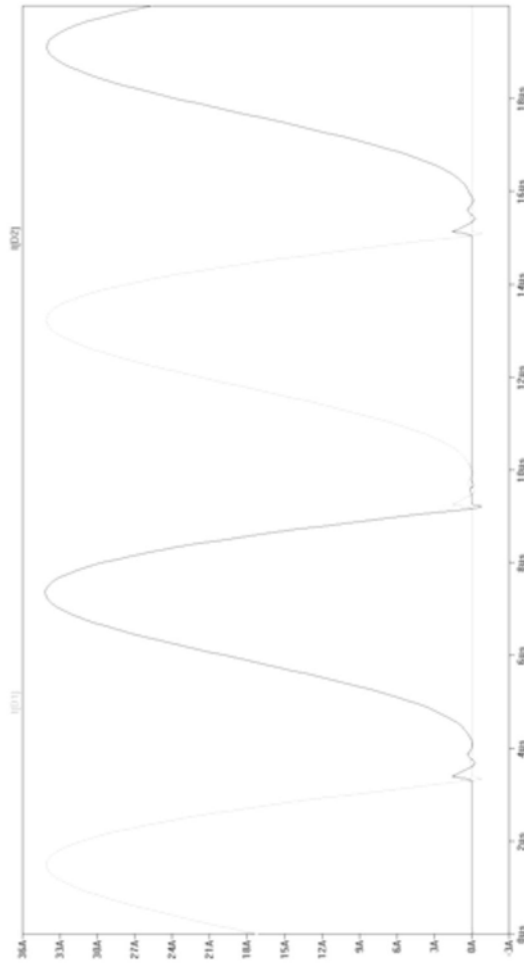


图64A

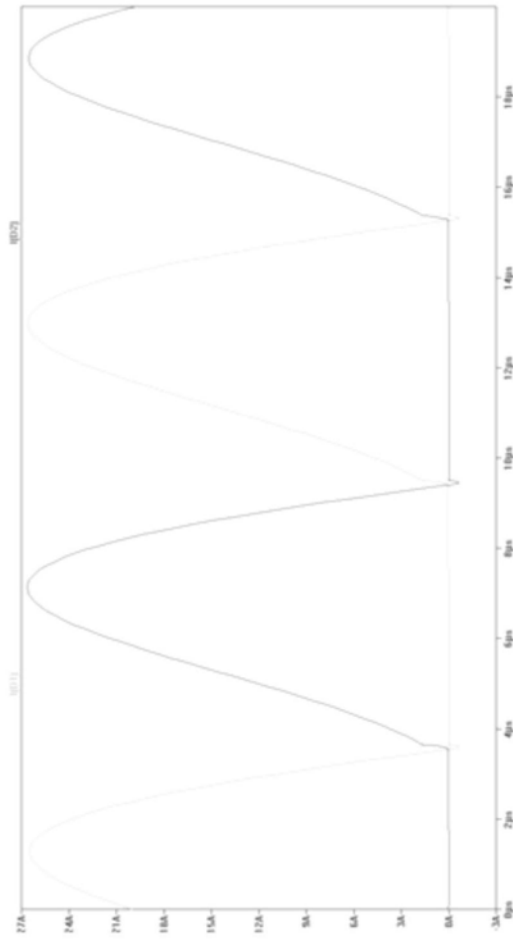


图64B

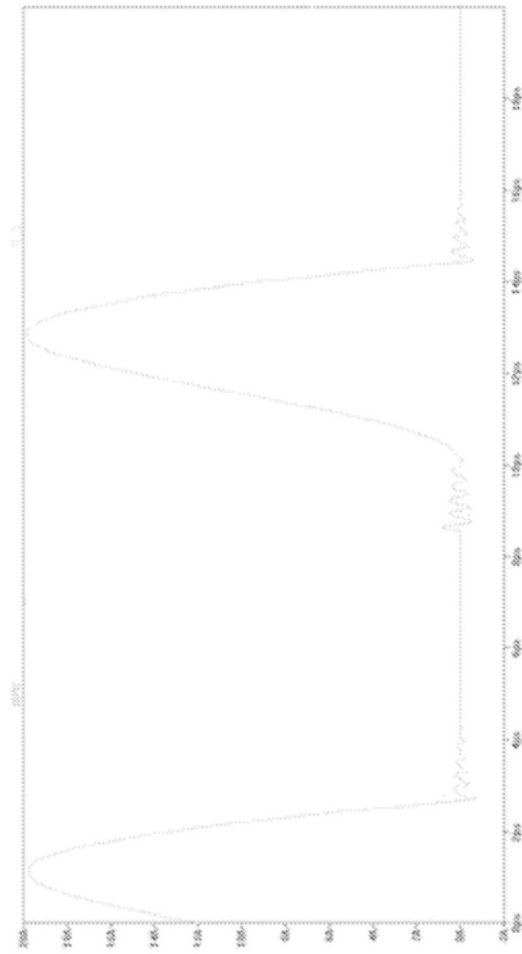


图65A

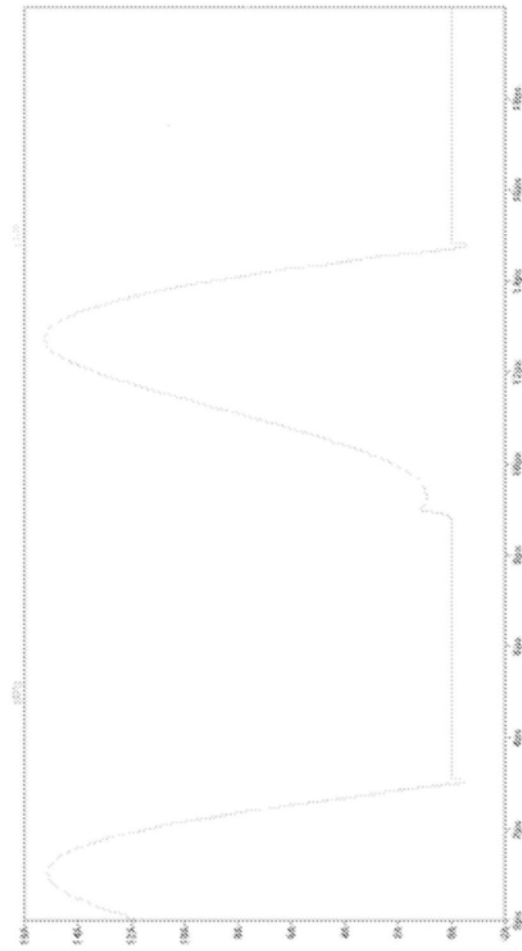


图65B

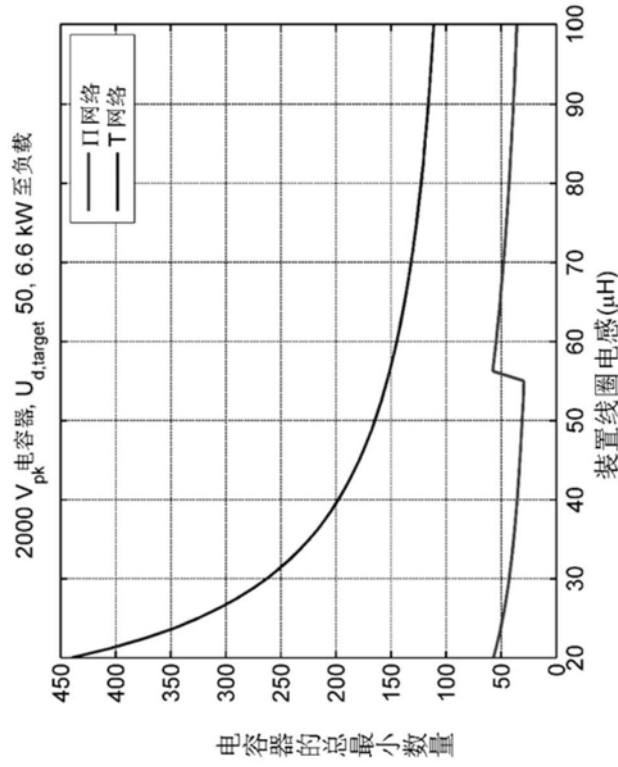


图66A

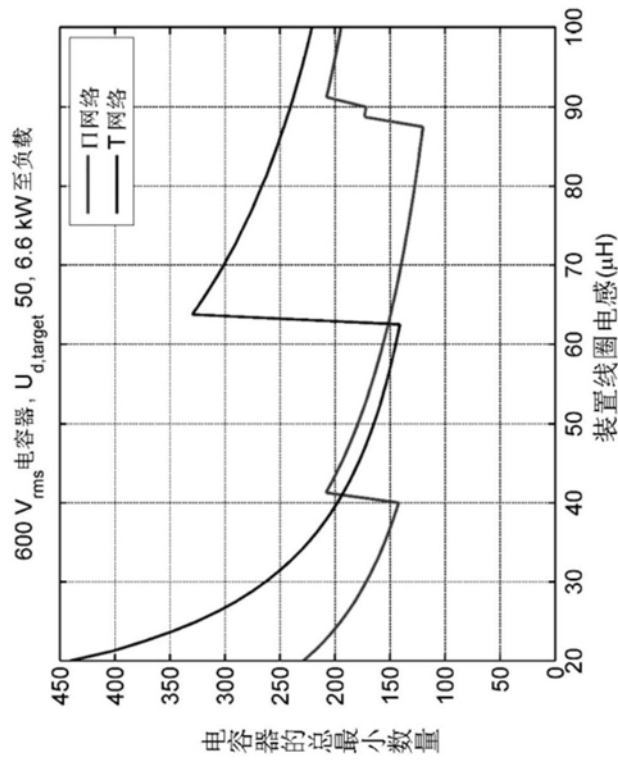


图66B

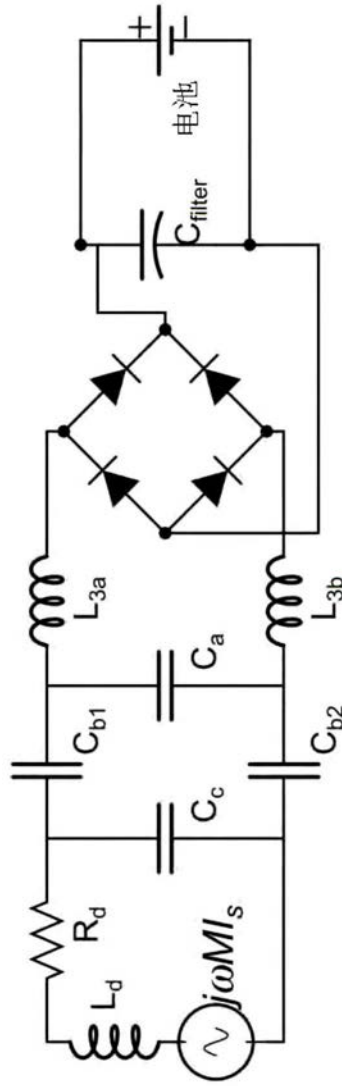


图67

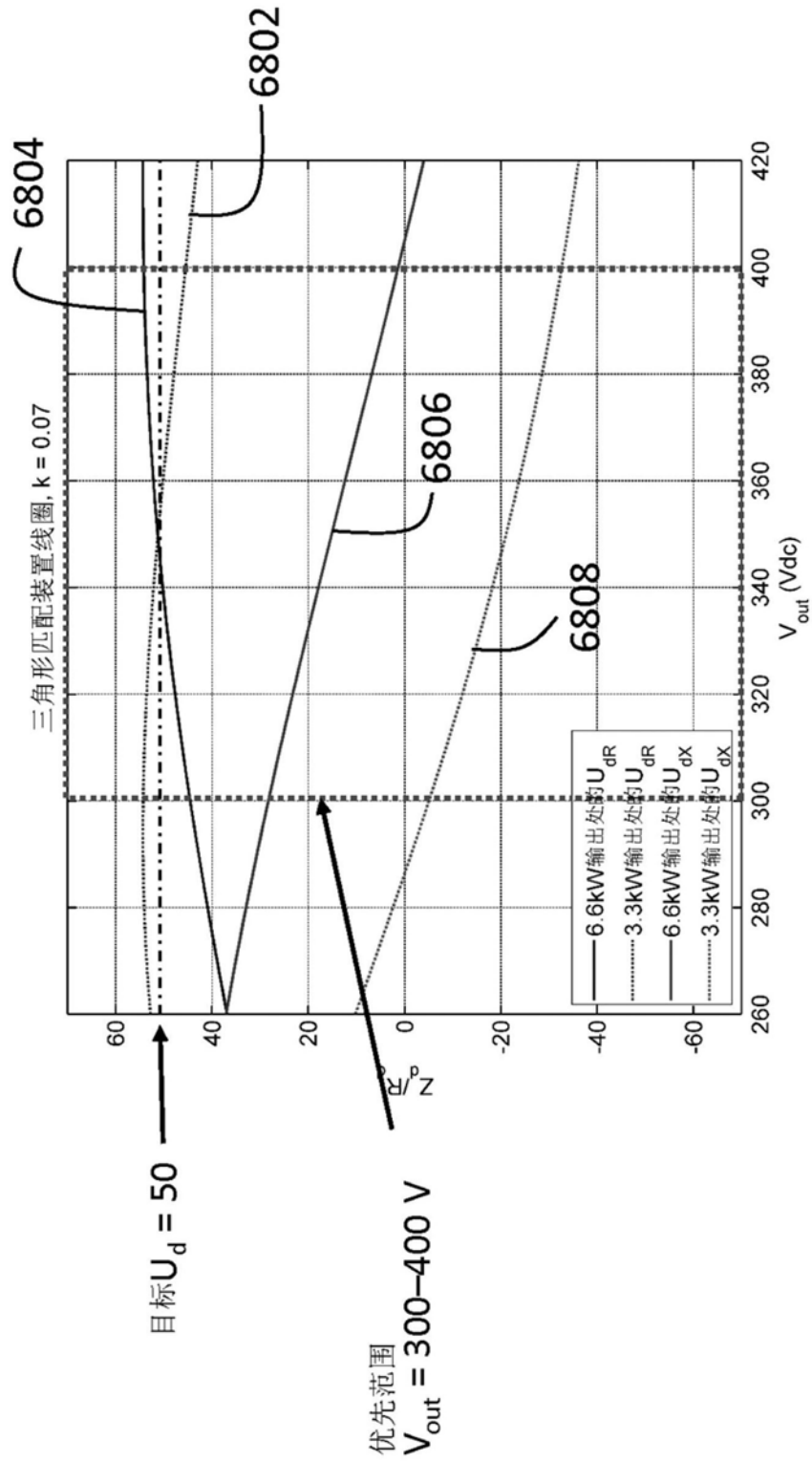


图68

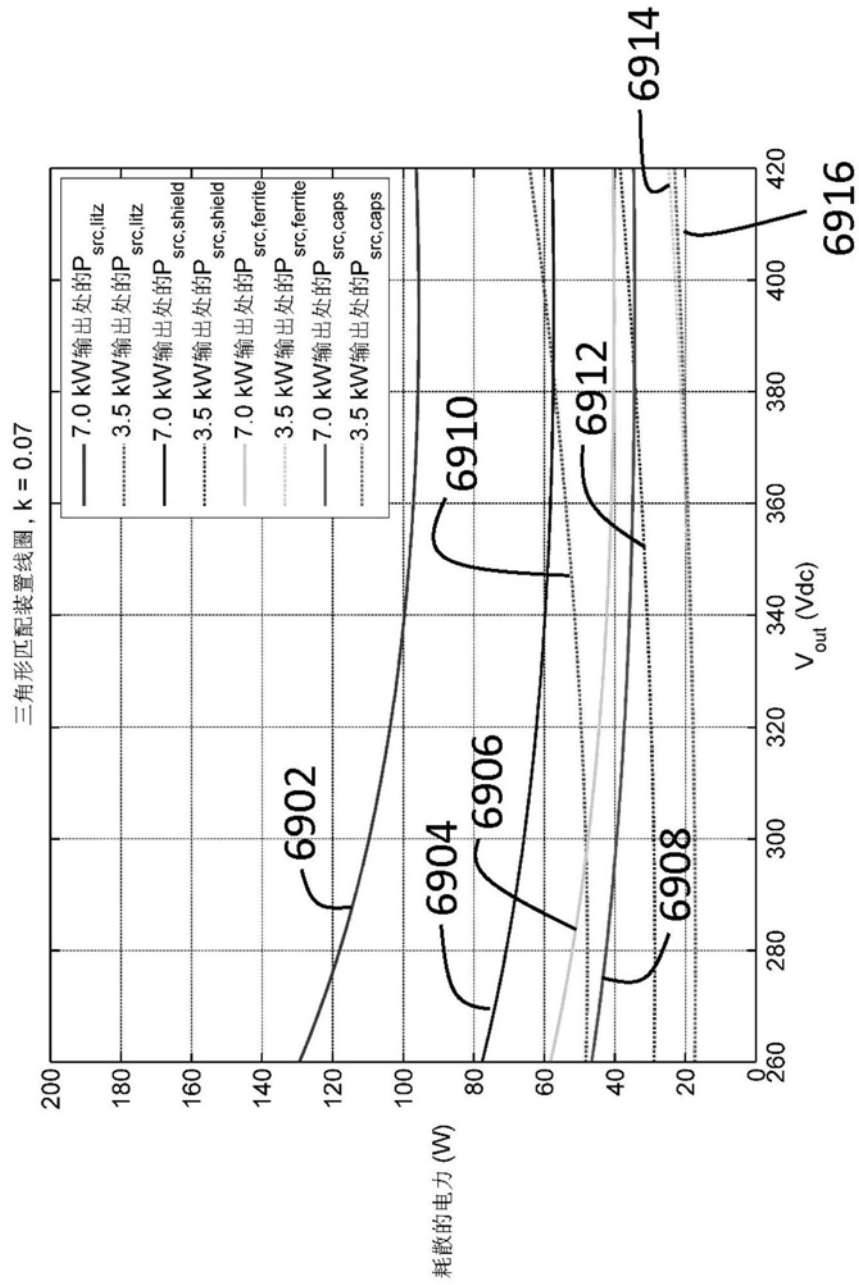


图69

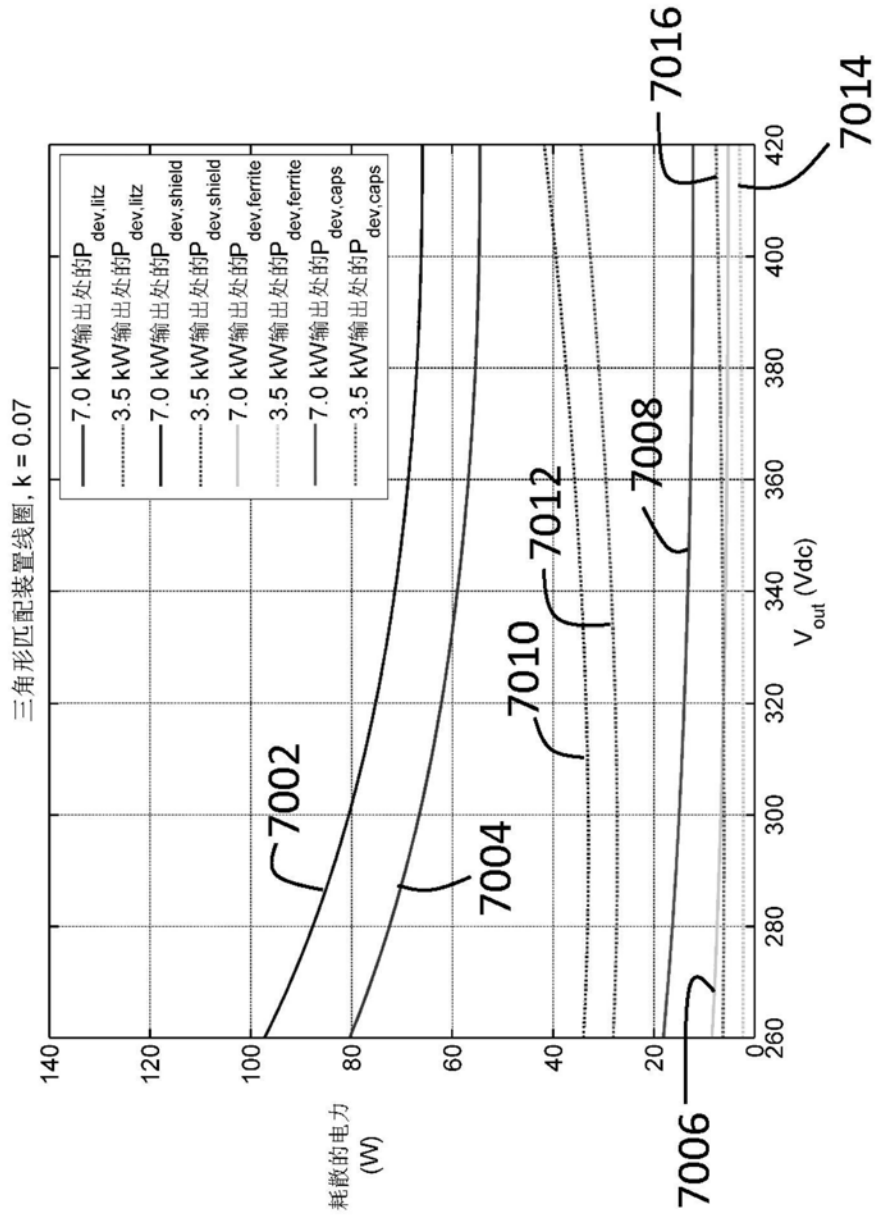


图70

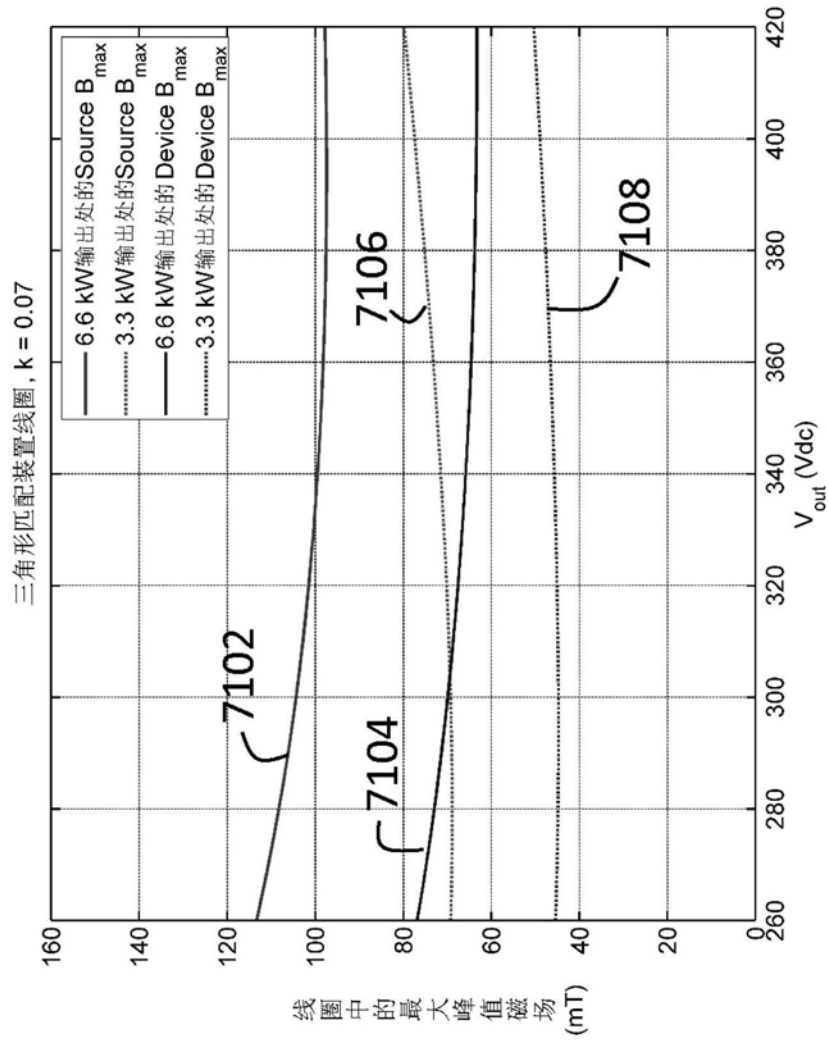


图71

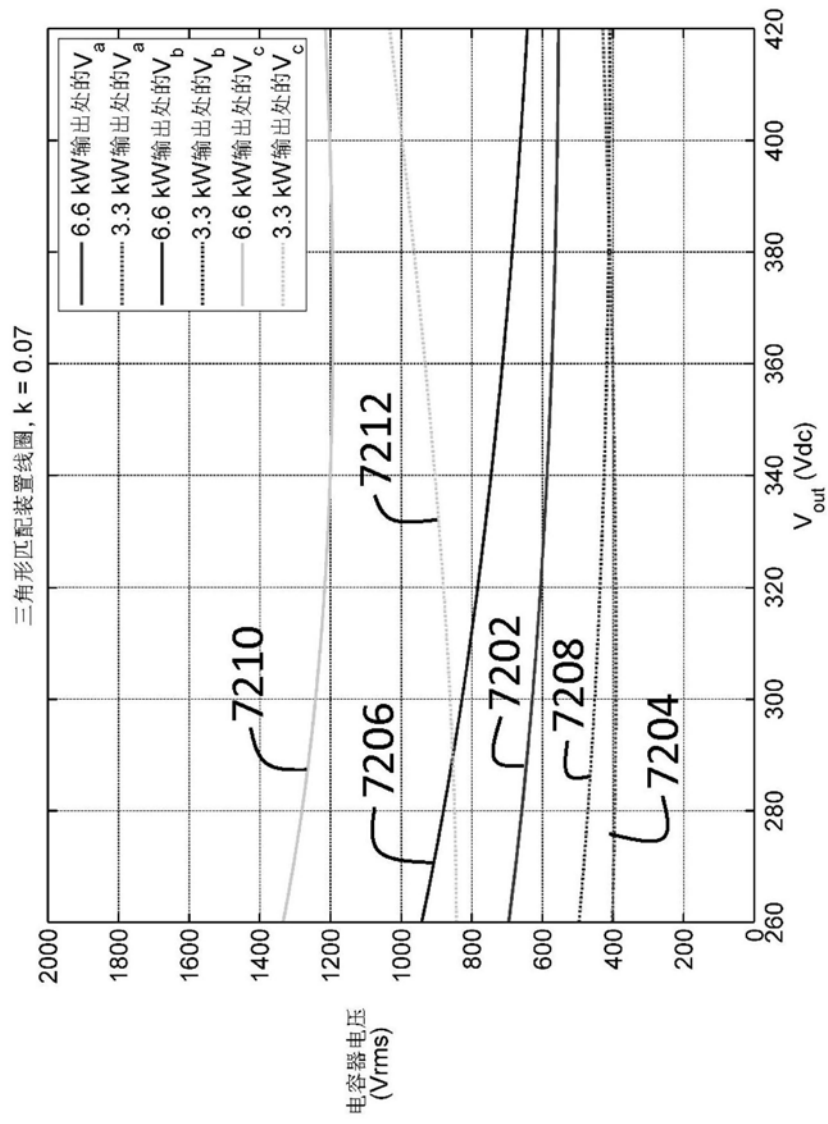


图72

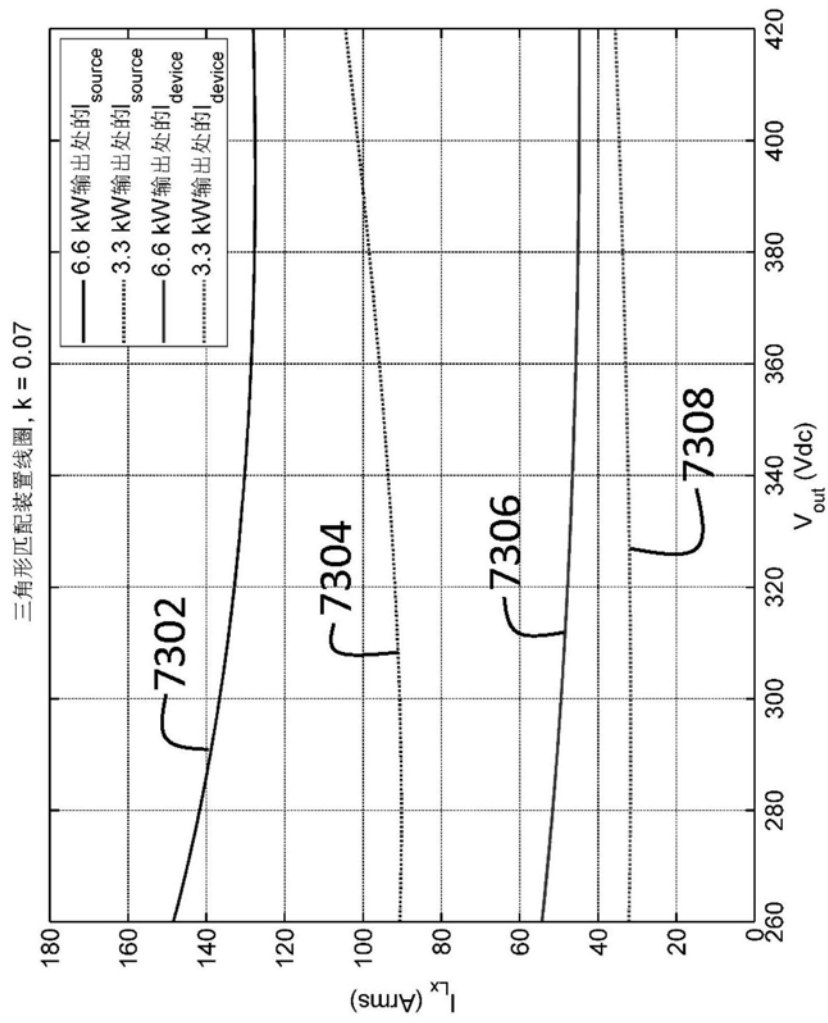


图73

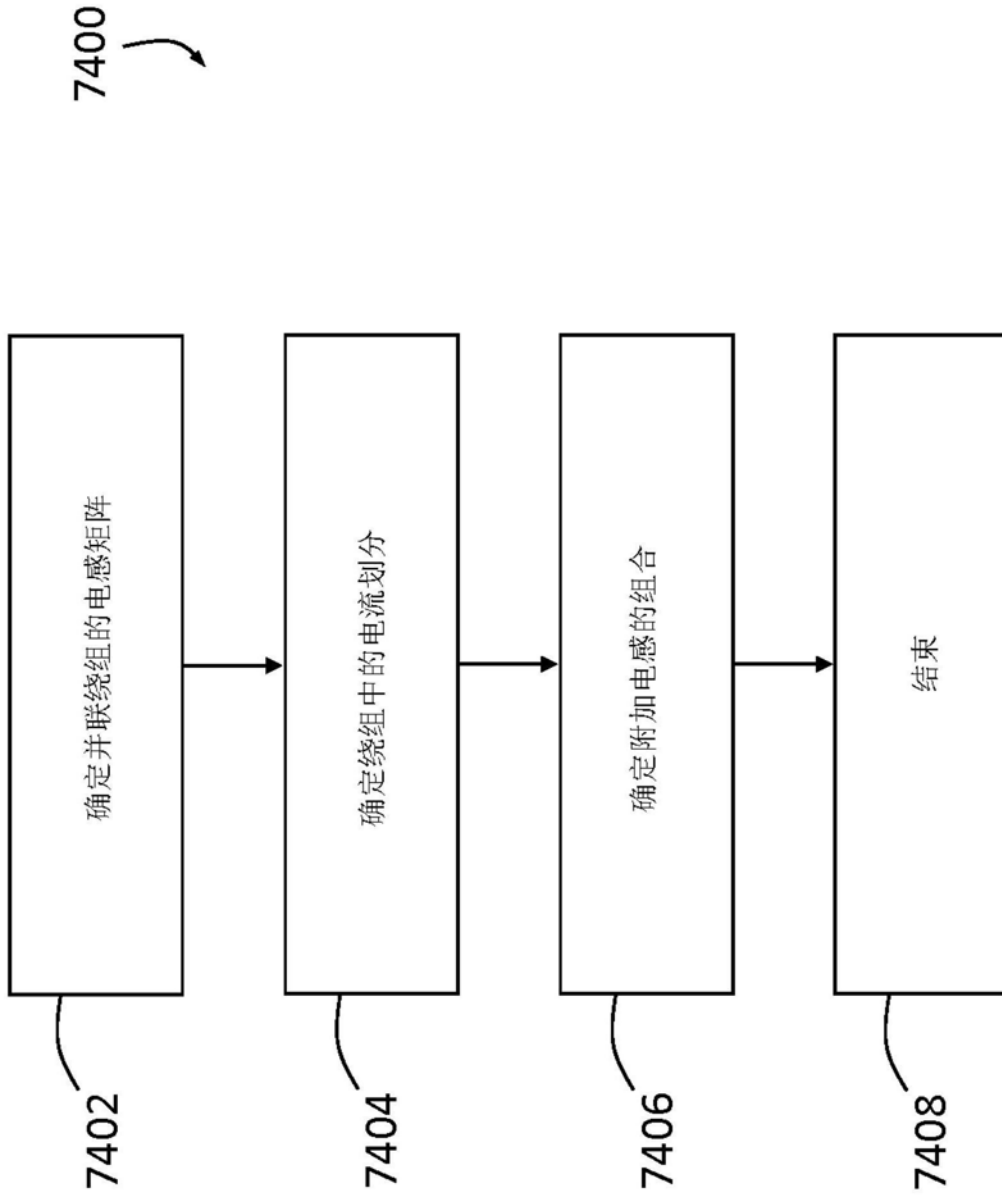


图74

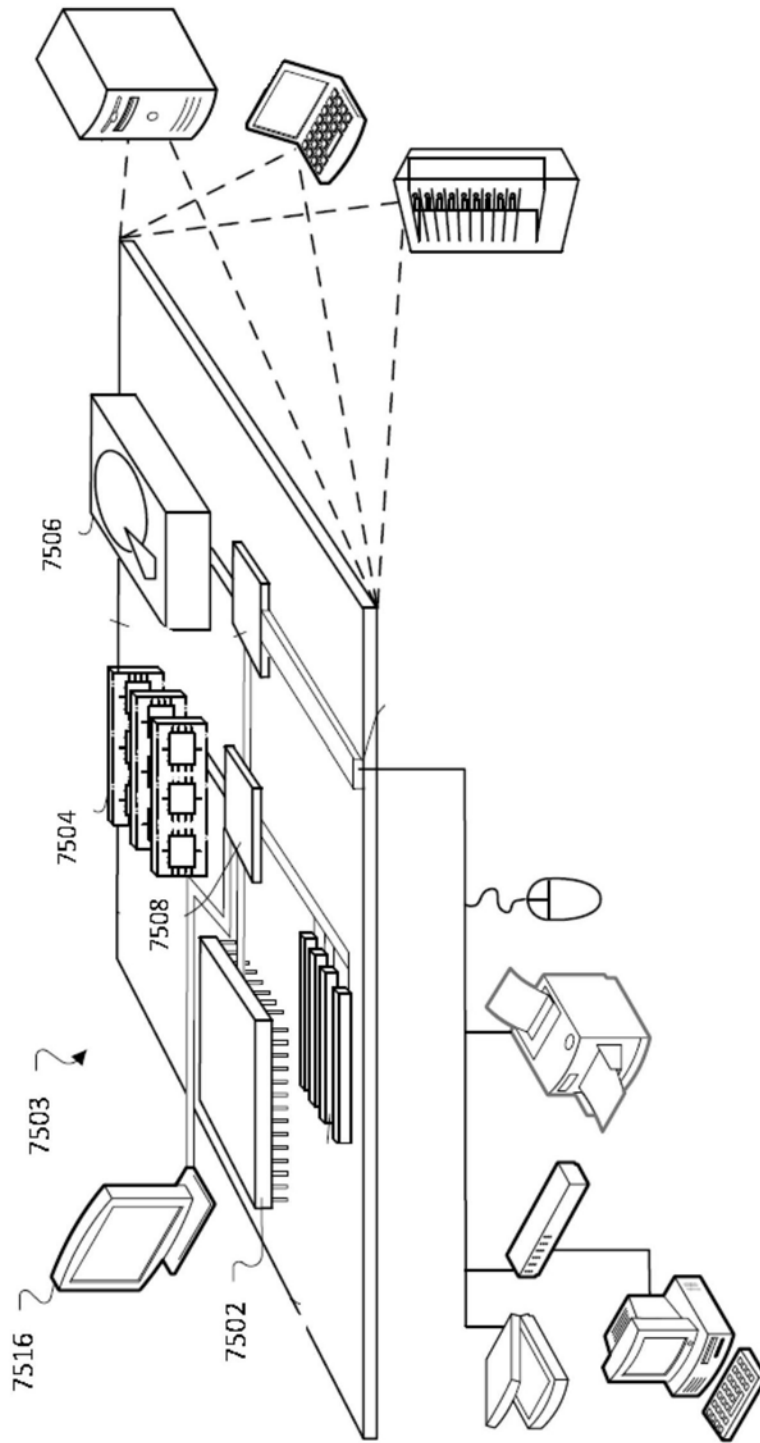


图75