(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109478798 B
(45)授权公告日 2022.09.16

(21)申请号 201780044029.1
(22)申请日 2017.05.23
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109478798 A
(43)申请公布日 2019.03.15
(30)优先权数据
62/342,525 2016.05.27 US
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2019.01.16
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2017/033997 2017.05.23
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2017/205371 EN 2017.11.30
(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 O·阿塔索伊 K·特韦尔克尔
K·D·西利
(74)专利代理机构 永新专利商标代理有限公司 72002
专利代理师 张伟 王英
(51)Int.Cl.
H02J 50/12(2006.01)
(56)对比文件
US 2011198937 A1,2011.08.18
WO 2015119511 A1,2015.08.13
WO 2015119511 A1,2015.08.13
US 2015244179 A1,2015.08.27
JP 5635215 B1,2014.12.03
CN 103414255 A,2013.11.27
CN 104205263 A,2014.12.10
CN 104300698 A,2015.01.21
审查员 黄子毅

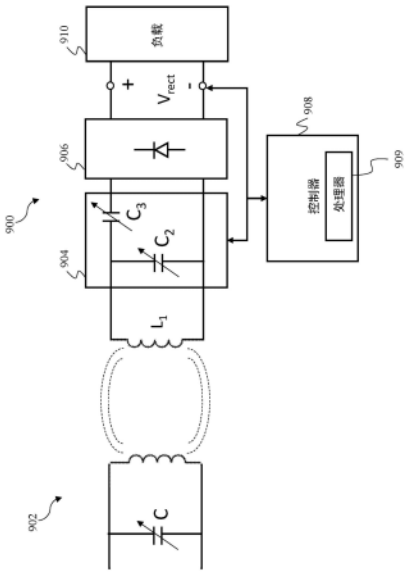
权利要求书2页 说明书14页 附图22页

(54)发明名称

无线电力接收器的电压调节

(57)摘要

一种无线电力接收器包括与电感器并联的一个或多个可调谐电容器。无线电力接收器适于接收由于无线电力发送器产生的磁场而在电感器处感应的电压输入。整流器具有带有整流电压和整流电流的输出端。控制器具有用于接收表示整流电压的信号的第一输入端和用于向可调谐电容器提供调整信号的第一输出端。控制器包括耦合到第一输入端的处理器，并且控制器被配置为对表示整流电压的信号进行操作以产生电容器的期望电容值，和提供确定的调整信号以便将电容器的电容值调整到期望电容值。



CN 109478798 B

1.一种无线电力接收器，包括：

电路，所述电路包括与电感器L_1并联的可调谐电容器C_2，所述无线电力接收器适于接收由于无线电力发送器产生的磁场而在所述电感器L_1处感应的电压输入$V_{induced}$，所述无线电力接收器具有有效串联电阻$R_{receiver}$；

与所述电路串联耦合的可调谐电容器C_3；

整流器，耦合到所述电路，所述整流器具有带有整流电压V_{rect}和整流电流I_{rect}的输出端；以及

控制器，具有用于接收表示所述整流电压V_{rect}的信号的第一输入端、用于向所述可调谐电容器C_2提供调整信号的第一输出端、以及用于向所述可调谐电容器C_3提供调整信号的第二输出端，所述控制器包括耦合到所述第一输入端的处理器，并且所述处理器被配置为：

(i)对表示整流电压V_{rect}的信号进行操作以产生电容器C_2的期望电容值$C_{2_desired}$；以及

(ii)提供确定的所述调整信号，以便将电容器C_2的电容值C_{2_value}调整到所述期望电容值$C_{2_desired}$，

其中，为了产生所述期望电容值$C_{2_desired}$，所述控制器被配置为：

(iv)在所述控制器的第二输入端接收表示整流器输出端的整流电流I_{rect}的信号；

(v)在所述处理器中对表示所述整流电压V_{rect}和所述整流电流I_{rect}中的每一个的信号进行操作，以确定到达与所述整流器输出端耦合的负载的功率P_L和所述负载处的电阻R_L；

(vi)在所述处理器中对接收器电阻$R_{receiver}$和功率P_L进行操作，以确定到达所述接收器的功率$P_{receiver}$；以及

(vii)在所述处理器中对功率$P_{receiver}$、电容器C2的值、以及电容器C_3的值进行操作，以确定开路电压值V_{open}，其中，所述期望电容值$C_{2_desired}$是所述开路电压值V_{open}的函数。

2.根据权利要求1所述的接收器，其中，所述控制器的存储器包括查找表，所述查找表包括针对给定电容值C_{2_value}的电容值C_{3_value}和针对至少一个负载电阻值R_{L_value}的负载电压值V_{L_value}。

3.根据权利要求1所述的接收器，其中，所述控制器选择所述可调谐电容器C_3的电容值C_{3_value}，使得电容值C_{2_value}和C_{3_value}与电感器L_1的电感L_{1_value}谐振，谐振频率为$f_{resonant}$。

4.根据权利要求3所述的接收器，其中，所述谐振频率$f_{resonant}$为6.78MHz。

5.根据权利要求1所述的接收器，其中，电容器C_3包括并联或串联耦合的两个或更多个电容器。

6.根据权利要求1所述的接收器，其中，电容器C_3包括开关电容器、脉冲宽度调制(PWM)控制电容器、变容二极管或钛酸锶钡(BST)电容器。

7.根据权利要求1所述的接收器，还包括用于调整电容器C_3的电容值C_{3_value}的装置。

8.根据权利要求1所述的接收器，还包括用于调整电容器C_2的电容值C_{2_value}的装置。

9.根据权利要求1所述的接收器，其中，电容器C_2包括并联或串联耦合的两个或更多个电容器。

10.根据权利要求1所述的接收器，还包括与所述电感器L_1串联耦合的可调谐电容器C_1，其中，所述控制器包括用于向所述可调谐电容器C_1提供调整信号的第三输出端。

11.一种用于在包括耦合到无线电力接收器的控制器的系统中调节整流电压V_{rect}的方法，所述无线电力接收器包括耦合到电路的整流器，所述电路包括与电感器L_1并联的可调

谐电容器C_2,所述无线电力接收器具有有效串联电阻$R_{receiver}$,所述整流器具有带有整流电压V_{rect}和整流电流I_{rect}的输出端,所述方法包括:

(i)在所述控制器的第一输入端接收表示整流电压V_{rect}的信号;

(ii)在耦合到所述第一输入端的处理器中对表示所述整流电压V_{rect}的信号进行操作以产生电容器C_2的期望电容值$C_{2_desired}$;以及

(iii)经由所述控制器的第一输出端提供调整信号,以便将电容器C_2的电容值C_{2_value}调整到所述期望电容值$C_{2_desired}$,

其中,产生所述期望电容值$C_{2_desired}$还包括:

(iv)在所述控制器的第二输入端接收表示整流电流I_{rect}的信号;

(v)在所述处理器中对表示所述整流电压V_{rect}和所述整流电流I_{rect}中的每一个的信号进行操作,以确定到达与整流器输出端耦合的负载的功率P_L和所述负载处的电阻R_L;

(vi)在所述处理器中对接收器电阻$R_{receiver}$和功率P_L进行操作,以确定到达所述接收器的功率$P_{receiver}$;以及

(vii)在所述处理器中对功率$P_{receiver}$进行操作,以确定开路电压值V_{open},其中,所述期望电容值$C_{2_desired}$是所述开路电压值V_{open}的函数。

12.根据权利要求11所述的方法,还包括(viii)经由耦合到所述处理器的第二输出端向与所述电路串联耦合的可调谐电容器C_3发送调整信号。

13.根据权利要求12所述的方法,还包括(ix)从存储在所述控制器的存储器中的查找表中选择针对给定电容值C_{2_value}的电容值C_{3_value}和针对至少一个负载电阻R_L的负载电压值V_L。

14.根据权利要求12所述的方法,还包括(x)由所述处理器调整可调谐电容器C_3的电容值C_{3_value},使得电容值C_{2_value}和C_{3_value}与电感器L_1的电感L_{1_value}谐振,谐振频率为$f_{resonant}$。

无线电力接收器的电压调节

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本专利申请要求2016年5月27日提交的标题为“VOLTAGE REGULATION IN WIRELESS POWER RECEIVERS”的美国临时专利申请No.62/342,525的优先权，其公开内容通过引用的方式整体并入本文。

技术领域

[0003] 本公开内容总体上涉及无线电力系统，并且更具体而言，本公开内容涉及无线电力系统中的无线电力接收器中的电压调节。

背景技术

[0004] 无线电力接收器可以通过由发送器产生的振荡磁场从无线电力发送器接收电力。无线电力接收器可以耦合到具有不同电力需求的电子设备。电子设备(例如智能电话和笔记本电脑)的电力需求可以随着相关一个或多个电池的充电或放电而变化。

发明内容

[0005] 根据一个实施例，一种无线电力接收器包括电路，该电路包括与电感器L_1并联的可调谐电容器C_2，该无线电力接收器适于接收由于无线电力发送器产生的磁场而在电感器L_1处感应的电压输入$V_{induced}$，无线电力接收器具有有效串联电阻$R_{receiver}$。接收器还包括：耦合到电路的整流器，整流器具有带有整流电压V_{rect}和整流电流I_{rect}的输出端；以及控制器，其具有用于接收表示整流电压V_{rect}的信号的第一输入端和用于向可调谐电容器C_2提供调整信号的第一输出端。控制器可以包括耦合到第一输入端的处理器，并且处理器被配置为(i)对表示整流电压V_{rect}的信号进行操作以产生电容器C_2的期望电容值$C_{2_desired}$和(ii)提供确定的调整信号以便将电容器C_2的电容值C_{2_value}调整到期望电容值$C_{2_desired}$。

[0006] 在相关实施例中，处理器被配置为将表示整流电压V_{rect}的信号与由上限V_{upper}和下限V_{lower}定义的电压范围进行比较，该电压范围存储在控制器的存储器中；并且控制器可以被配置为响应于整流电压V_{rect}的值与电压范围的比较将调整信号发送到可调谐电容器C_2。

[0007] 在另一相关实施例中，为了产生期望电容值$_{C2_desired}$，控制器被配置为(iv)在控制器的第二输入端接收表示整流器输出端的整流电流I_{rect}的信号，(v)在处理器中对表示整流电压V_{rect}和整流电流I_{rect}中的每一个的信号进行操作，以确定到达与整流器输出端耦合的负载的功率P_L和负载处的电阻R_L，(vi)在处理器中对接收器电阻$R_{receiver}$和功率P_L进行操作，以确定到达接收器的功率$P_{receiver}$，以及(vii)在处理器中对功率$P_{receiver}$、电容器C2的值、以及电容器C_3的值进行操作，以确定开路电压值V_{open}，其中，期望电容值$C_{2_desired}$是V_{open}的函数。

[0008] 可选地，无线电力接收器还包括与电路串联耦合的可调谐电容器C_3，其中，控制器包括用于向可调谐电容器C_3提供调整信号的第二输出端。在一些实施例中，控制器的存储器包括查找表，该查找表包括针对给定电容值C_{2_value}的电容值C_{3_value}和针对至少一个负载

电阻值R_{L_value}的负载电压值V_{L_value}。

[0009] 在相关实施例中，控制器选择可调谐电容器C_3的电容值C_{3_value}，使得电容值C_{2_value}和C_{3_value}与电感器L_1的电感L_{1_value}谐振，谐振频率为$f_{resonant}$。可选地，谐振频率$f_{resonant}$约为6.78MHz。

[0010] 在另一相关实施例中，电容器C_3包括并联或串联耦合的两个或更多个电容器。可选地，电容器C_3包括开关电容器、脉冲宽度调制(PWM)控制电容器、变容二极管或钛酸锶钡(BST)电容器。可选地，无线电力接收器包括用于调整电容器C_3的电容值C_{3_value}的装置。在一些实施例中，无线电力接收器包括用于调整电容器C_2的电容值C_{2_value}的装置。

[0011] 在相关实施例中，无线电力接收器还包括与电路串联耦合的可调谐电容器C_3，其中，在操作期间，控制器(v)响应于整流电压V_{rect}的值与电压范围的比较，经由耦合到处理器的第二输出端向可调谐电容器C_3发送调整信号，以调整电容器C_3的电容值C_{3_value}。

[0012] 在另一相关实施例中，电容器C_2包括并联或串联耦合的两个或更多个电容器。可选地，无线电力接收器还包括与电感器L_1串联耦合的可调谐电容器C_1，其中，控制器包括用于向可调谐电容器C_1提供调整信号的第三输出端。

[0013] 根据另一实施例，本文公开了一种用于在包括耦合到无线电力接收器的控制器的系统中调节整流电压V_{rect}的方法，该无线电力接收器包括耦合到电路的整流器，该电路包括与电感器L_1并联的可调谐电容器C_2，该无线电力接收器具有有效串联电阻$R_{receiver}$，整流器具有带有整流电压V_{rect}和整流电流I_{rect}的输出端。该方法包括(i)在控制器的第一输入端接收表示整流电压V_{rect}的信号，(ii)在耦合到第一输入端的处理器中对表示整流电压V_{rect}的信号进行操作以产生电容器C_2的期望电容值$C_{2_desired}$，以及(iii)经由控制器的第一输出端提供调整信号，以便将电容器C_2的电容值C_{2_value}调整到期望电容值$C_{2_desired}$。

[0014] 在相关实施例中，该方法还包括(iv)由处理器将表示整流电压V_{rect}的信号与由上限V_{upper}和下限V_{lower}定义的电压范围进行比较，该电压范围存储在控制器的存储器中；以及(v)响应于表示整流电压V_{rect}的值的信号与电压范围的比较经由控制器的第一输出端将调整信号发送到可调谐电容器C_2。

[0015] 在替代实施例中，产生期望电容值$C_{2_desired}$还包括(iv)在控制器的第二输入端接收表示整流电流I_{rect}的信号，(v)在处理器中对表示整流电压V_{rect}和整流电流I_{rect}中的每一个的信号进行操作，以确定到达与整流器输出端耦合的负载的功率P_L和负载处的电阻R_L，(vi)在处理器中对接收器电阻$R_{receiver}$和功率P_L进行操作，以确定到达接收器的功率$P_{receiver}$，以及(vii)在处理器中对功率$P_{receiver}$进行操作，以确定开路电压值V_{open}，其中，期望电容值$C_{2_desired}$是V_{open}的函数。

[0016] 在又一个相关实施例中，该方法还包括(viii)经由耦合到处理器的第二输出端向与电路串联耦合的可调谐电容器C_3发送调整信号。可选地，该方法还包括(ix)从存储在控制器的存储器中的查找表中选择针对给定电容值C_{2_value}的电容值C_{3_value}和针对至少一个负载电阻R_L的负载电压值V_L。在一些实施例中，该方法还包括(x)由处理器调整可调谐电容器C_3的电容值C_{3_value}，使得电容值C_{2_value}和C_{3_value}与电感器L_1的电感L_{1_value}谐振，谐振频率为$f_{resonant}$。

附图说明

[0017] 本领域技术人员应该通过参考紧接在下面概述的附图所讨论的“具体实施方式”而更全面地理解各种实施例的优点。

[0018] 图1-2示出了无线电力系统的示例性实施例的图。

[0019] 图3-4示出了无线电力接收器的示例性实施例的图。

[0020] 图5-6示出了用于无线电力接收器的电容器网络的示例性实施例的图。

[0021] 图7示出了耦合到控制和逻辑电路的无线电力接收器的示例性实施例的图。

[0022] 图8A、8C、8E和8G示出了用于无线电力接收器的阻抗匹配网络的示例性实施例的图。图8B示出了作为图8A中所示的接收器的电容C_1值的函数的整流电压的曲线图。图8D示出了作为图8C中所示的接收器的电容C_2值的函数的整流电压的曲线图。图8F示出了图8E中所示的接收器的等效电路的图。图8H示出了图8G中所示的接收器的等效电路的图。

[0023] 图9示出了无线电力系统的示例性实施例的图。

[0024] 图10-11示出了用于调谐无线电力接收器的控制方案的示例性实施例的流程图。

[0025] 图12A-12B是用于在具有控制器的无线电力接收器中调整电容器C_2的电容值的示例性方法的流程图。图12C是用于产生图12A-12B的期望电容值$C_{2_desired}$的示例性方法的流程图。

[0026] 图13是作为C_2和C_3的电容值的函数的30Ω负载电阻R_{load}处的电压的曲线图。

[0027] 图14A是用于基于函数进行调谐的示例性方法的流程图。图14B是作为20Ω负载电阻R_{load}的电容C_2和C_3的函数的电压V_{AC}的示例性函数。

具体实施方式

[0028] 接收器谐振器线圈两端感应的电压可以由接收器电路加载。通常，接收器谐振器耦合到阻抗匹配网络(IMN)、整流器(无源或有源)、滤波器和产生期望参数的调节转换器(例如向负载提供固定电压供应的DC-DC电压调节器)。电池充电器是功率典型受调节的特殊示例。可以使用本地控制回路(前馈或反馈)。然而，诸如DC-DC转换器等附加调节级可能增加功率损耗和复杂性。在一些实施例中，优选的替代方案可以是通过IMN(采用可调谐元件)和/或有源整流器进行的调节。

[0029] 执行各种参数调节的多个调谐元件可以消除对额外的昂贵或庞大的调节电路的需要，该调节电路可能最终降低了向电子设备的负载或电池的电力传输效率。电子设备的示例包括蜂窝电话、笔记本电脑、平板电脑、健身设备、手表等。调谐元件还可以降低对制造公差、环境影响(例如温度)和其他变化参数的敏感度。必须注意：控制调谐元件不会导致抵消调谐的益处的更多损失、更大的EMI问题等。使用多个高Q(品质因数)调谐元件，例如钛酸锶钡(BST)电容器，可以在执行调节的同时也保持高效率。使用如PWM电容器等高速调谐元件可以实现非常快速的瞬态响应。

[0030] 接收器电路中的电压或功率调节的关键度量标准包括瞬态响应、稳态误差、发送器驱动效率、接收器中的功耗(热量、产品要求、安全性)、非线性失真(电磁干扰(EMI)-辐射的和传导的)。可能由负载变化、耦合变化、温度漂移等引起的瞬态响应需要一定程度的补偿速度，这可能取决于实施方式。例如，控制回路的速度和接收器和/或发送器的部件之间的通信可能限制响应速度。以下讨论了示例性实施例的细节。

[0031] 系统说明

[0032] 图1示出了包括无线电力发送器102和无线电力接收器104的无线电力传输系统的示例性实施例的图。无线电力发送器102包括耦合到发送器阻抗匹配网络(IMN)108的全桥差分RF逆变器106、以及发送器谐振器线圈110。无线电力接收器104包括耦合到接收器IMN 114的接收器谐振器线圈112、以及RF整流器116。接收器104可以直接耦合到诸如电子设备的电池或电池管理器等负载。注意,发送器IMN 108和/或接收器IMN 114的部件可以是可调谐的。此外,逆变器106和/或整流器116可以是可调谐的。例如,逆变器106的开关(S_{T1}、S_{T2}、S_{T3}、S_{T4})和/或整流器116的开关(S_{R1}、S_{R2}、S_{R3}、S_{R4})可以分别由控制器118和120控制,以实现可变死区时间、相移等。

[0033] 图2示出了包括无线电力发送器202和无线电力接收器204的无线电力传输系统的示例性实施例的图。无线电力发送器202包括耦合到发送器阻抗匹配网络(IMN)208的全桥差分RF逆变器206、以及发送器谐振器线圈210。无线电力接收器204包括耦合到接收器IMN 214的接收器谐振器线圈212、以及RF整流器216。接收器204可以直接耦合到诸如电子设备的电池或电池管理器等负载。注意,发送器IMN 208和接收器IMN 214的部件可以是可调谐的。在一些实施例中,IMN 208可以包括用于差分E类或F类逆变器的可调谐或固定分流电容器218。此外,逆变器206和/或整流器216可以是可调谐的。例如,逆变器206的开关(S_{T1}、S_{T2})和/或整流器216的开关(S_{R1}、S_{R2}、S_{R3}、S_{R4})可以分别由控制器218和220控制,以实现可变死区时间、相移等。

[0034] 图3A示出了无线电力接收器的示例性实施例,无线电力接收器包括耦合到一个或多个电容器和阻抗匹配部件304的接收器谐振器线圈302、一个或多个二极管306、有源钳位器308、电感器309A和309B、平滑电容器310、负载312、一个或多个传感器314、控制器316和无线通信模块318。在一些实施例中,无线通信模块318可以是接收器322耦合到的电子设备320上可用的无线通信设备(例如,低能耗蓝牙(BLE))。有源钳位器308可以用作电路保护措施,以确保电压不会增大超过预定限度。电感器309A和309B用于滤除共模信号。平滑电容器310可以对输出整流器电压中的纹波或变化进行平滑。在一些实施例中,控制器和BLE之间的连接可以通过接收器322和电子设备上的串行外围接口端口324、326来进行中介。在一些实施例中,阻抗匹配部件304可以是可变电容器,例如BST电容器、PWM控制电容器、电容器组等。在一些实施例中,用于整流在接收器谐振器线圈处捕获的振荡能量的一个或多个二极管可以是肖特基二极管。由于肖特基二极管的低正向压降和快速切换,使用肖特基二极管可以是有利的。请注意,肖特基二极管可用于电路的一条支路(顶部)上,而另一条支路短路。这种不平衡加载方法可以降低电路的复杂性和成本。在一些实施例中,传感器可以用于感测沿接收器内的电流路径的电流、电压和/或功率。该系统的一个优点是在接收器的IMN处实现电压调节,从而避免使用DC-DC转换器。在一些实施例中,耦合到接收器谐振器线圈的一个或多个部件可以共同封装到专用集成电路(ASIC)328中。例如,ASIC可以包括一个或多个阻抗匹配部件304、一个或多个二极管306、有源钳位器308、传感器308、控制器316和/或无线通信模块。

[0035] 图3B示出了包括上面针对图3A列出的许多部件的无线电力接收器的示例性实施例。下面描述了一些差异。例如,接收器330包括“拆分线圈”(split coil)接收器谐振器线圈332。拆分线圈耦合到连接到地的电容器结构334。此结构可以缓解共模(CM)信号问题。注

意，顶部电容器的调谐可以独立于底部电容器。

[0036] 图4示出了无线电力接收器的示例性实施例，无线电力接收器包括耦合到一个或多个电容器和阻抗匹配部件404的接收器谐振器线圈402、整流二极管桥406、控制器/无线通信模块408、电感器409A和409B以及平滑电容器410。接收器412耦合到电子设备的负载414。在一些实施例中，二极管桥406可以是具有肖特基二极管的全桥整流器。在一些实施例中，耦合到接收器谐振器线圈402的一个或多个部件可以共同封装到ASIC416中。

[0037] 接收器说明

[0038] 图5示出了无线电力接收器的示例性实施例，该无线电力接收器包括耦合到一个或多个电容器506、508的一个或多个接收器谐振器线圈502、504、以及具有到负载的输出的整流器510。接收器谐振器线圈502、504可以被接通和断开以进行并联或串联，并且实现不同的总电感。例如，当开关A闭合(并且开关B、C断开)时，线圈502、504串联耦合。当开关B和C闭合(并且A断开)时，线圈502、504并联耦合。此外，线圈502、504中的每一个可以通过闭合开关B或C而被独立地启用。电容器506、508可以是可调谐电容器。在一些实施例中，开关、电容器和整流器可以封装到集成电路(例如ASIC)中。在一些实施例中，整流器可以是使用开关的有源整流器。

[0039] 在示例性实施例中，无线电力接收器可以包括耦合到电容器网络的接收器谐振器线圈。在一些实施例中，电容器网络可以包括一个或多个开关控制电容器或PWM控制电容器。当无线电力传输系统以较低频率(例如100-300kHz)操作时，可以启用这些开关控制电容器。在一些实施例中，电容器可以包括一个或多个BST电容器。可以设计或选择BST电容器以使品质因数Q_{cap}等于或大于谐振器线圈的品质因数Q_{coil}。当无线电力传输系统以较高频率(例如1MHz至2.4GHz(例如，6.78MHz或13.56MHz))操作时，可以启用这些可调谐电容器。在一些实施例中，开关电容器或可调谐电容器可以被配置为在任何ISM(工业、科学或医疗)频带上操作。这可以允许系统从一种模式(例如，120kHz)切换到另一种模式(6.78MHz)并且在这些模式中的每一种模式下具有调谐能力。

[0040] 图6A示出了无线电力接收器600的示例性实施例，该无线电力接收器包括耦合到电容器网络604的接收器谐振器线圈602、以及具有到负载的输出的整流器606。电容器网络604可以包括任何上述离散或连续可调谐电容器。在该示例中，第一子电路包括与电容器C_{1A}、C_{1B}、C_{1C}、C_{1D}串联耦合的线圈602。第二子电路包括与电容器C_{2A}、C_{2B}并联耦合的第一子电路。第三子电路包括与电容器C_{3A}、C_{3B}、C_{3C}、C_{3D}串联耦合的第二子电路。该第三子电路耦合到整流器606中。

[0041] 注意，电容器C_{1A}和C_{1B}在相对于线圈602的相同位置彼此并联连接。在一些实施例中，电容器C_{1A}可以是离散可调谐电容器，而电容器C_{1B}可以是连续可调谐电容器。这可以为位置C_1处的电容提供“粗略”和“精细”调谐。在一些实施例中，电容器C_{1A}可以是适合于在频率或频率组f_1下调谐的一类电容器，并且电容器C_{1B}可以是适合于在频率或频率组f_2下调谐的一类电容器。例如，如果无线电力接收器600经由无线通信或阻抗测量检测到能够以频率f_1发送电力的发送器，则接收器600可以接通电容器C_{1A}(并且可以保持电容器C_{1B}断开)。如果接收器600检测到能够以频率f_2发送电力的发送器，则接收器600可以接通电容器C_{1B}(并且可以保持电容器C_{1A}断开)。类似的实施例与并联连接的电容器(C_{1C}和C_{1D}、C_{2A}和C_{2B}、C_{3A}和C_{3B}、C_{3C}和C_{3D})中的每个相关。注意，电容器C_{1A}和C_{1B}与C_{1C}和C_{1D}平衡。这可以减轻共模信号问题。在

一些实施例中，这些部件中的一个或多个与整流器608一起可以封装到集成电路610中。

[0042] 在一些实施例中，网络604中的电容器可以分别包括一个或多个开关控制电容器或PWM控制电容器。当无线电力传输系统以较低频率(例如100-300kHz)操作时，可以启用这些开关控制电容器。在一些实施例中，网络604中的电容器可以分别包括一个或多个BST电容器。可以设计或选择BST电容器以使品质因数Q_{cap}等于或大于谐振器线圈的品质因数Q_{coil}。当无线电力传输系统以较高频率(例如1MHz至2.4GHz(例如，6.78MHz或13.56MHz))操作时，可以启用这些可调谐电容器。在一些实施例中，开关电容器或可调谐电容器可以被配置为在任何ISM(工业、科学或医疗)频带上操作。这可以允许系统从一种模式(例如，120kHz)切换到另一种模式(6.78MHz)并且在这些模式中的每一种模式下具有调谐能力。例如，电容器C_{1A}可以是PWM控制电容器，其中，f_1＝100-300kHz，并且电容器C_{1B}可以是BST电容器，其中，f_2＝1MHz-2.4GHz。

[0043] 图6B示出了无线电力接收器608的示例性实施例，该无线电力接收器包括耦合到电容器网络612的“拆分”接收器谐振器线圈602A、602B、以及具有到负载的输出电压V_{rect}的整流器614。在该示例中，第一子电路包括与电容器C_{1E}、C_{1F}串联耦合的线圈602A、602B。第二子电路包括与电容器C_{2A}、C_{2B}并联耦合的第一子电路。第三子电路包括与电容器C_{3A}、C_{3B}、C_{3C}、C_{3D}串联耦合的第二子电路。该第三子电路耦合到整流器606中。注意，电容器C_{1E}和C_{1F}彼此并联连接。如上文针对电容器C_{1A}和C_{1B}所述，C_{1E}和C_{1F}可以是不同类型的电容器，或者可以被配置为在不同的频率下启用或接通。在一些实施例中，可以基于对发送器采用的无线电力传输的协议或标准的检测来接通或断开特定的电容器集合。

[0044] 调谐配置

[0045] 图7示出了具有可调谐阻抗匹配网络的接收器700的示例性实施例。接收器700包括与电容器C_1串联耦合的谐振器线圈702。接下来，与谐振器线圈和C_1并联连接的是电压传感器704，其测量电压V_1。差分电压测量结果V_{c1}、V_{c2}被馈入积分器INT。在一些实施例中，峰值检测器PD用于检测测量的电压信号V_1的幅度P(作为时间的函数)。电压信号也被馈入混频器(SIN和COS)和一个或多个滤波器(LPF)以检测电压信号V_1的相位。有关相位检测功能和输出的说明，请参阅下面的“混频器操作”部分。幅度和相位测量结果可以由控制器使用来调谐系统部件，例如可调谐电容器C_1、C_2和C_3，或控制接收器的其他部分，例如整流或安全机构。

[0046] 接下来，与电压传感器704并联耦合的是电容器C_2。电流传感器706可以位于电压传感器704和电容器C_2之间，以测量线圈电流I_{coil}。与C_2串联耦合的是电容器C_3。电流传感器708可以位于C_2和C_3之间以测量电流I_3。这些电流传感器706和708中的每一个可以连接到幅度和相位测量电路，如上面针对电压传感器704所述的那样。串联耦合到电容器C_3的是电感器L'_3(平衡的)和整流器710。在一些实施例中，整流器710可以是有源整流器，例如同步整流器。经整流的电压输出V_{rect}可以直接馈送到负载或通过其他电路，例如电压钳位器或滤波器(参见图3A、图3B和图4)馈送到负载。

[0047] 在一些示例性实施例中，可调谐电容器C_1、C_2和C_3可以由控制器712控制。注意，各种传感器704、706和708的输出可以被馈入部件712中。部件INT、PD、SIN和COS及LPF中的一些或者全部以及控制器712可以集成到集成电路714(例如ASIC)中。

[0048] 混频器操作

[0049] 输入信号可以是表示在电力传输系统内的位置处测量的电流或电压的信号。输入信号可以是例如表示在电力传输系统内的位置处测量的电流或电压的电压信号，并且可以由$A_{IN} * \sin(\omega t + \varphi)$表示，其中，φ是输入信号相对于参考信号的相位。例如，输入信号可以是位于电力传输系统的电路内的测量电流信号的Rogowski线圈的输出。

[0050] 信号混频器与信号供应(例如电压信号V_1)耦合，以便接收参考信号之一作为一个输入以及接收输入信号作为另一个输入。混频器(SIN和COS)将相应的参考信号与输入信号混频(例如，执行时域乘法)并输出混频信号1和2。因此，混频信号1可以表示为：

[0051] $$Q = A_{IN} * \sin(\omega t + \varphi) * A * \sin(\omega t) = \frac{AA_{IN}}{2} * \cos(\varphi) - \frac{AA_{IN}}{2} * \cos(2\omega t + \varphi),$$

[0052] 并且混频信号2可以表示为：

[0053] $$I = A_{IN} * \sin(\omega t + \varphi) * A * \cos(\omega t + \theta) = \frac{AA_{IN}}{2} * \sin(\varphi - \theta) + \frac{AA_{IN}}{2} * \sin(2\omega t + \varphi + \theta)。$$

[0054] 滤波器(LPF)可以是低通滤波器，其被设计为例如从混频器产生的第一和第二混频信号中滤除二次谐波。因此，滤波器可以去除从信号混频过程产生的二次谐波以及存在于参考信号或输入信号中的任何更高次谐波。在滤波后，混频信号1可以表示为：

[0055] $$Q = \frac{AA_{IN}}{2} * \cos(\varphi),$$

[0056] 并且混频信号2可以表示为：

[0057] $$I = \frac{AA_{IN}}{2} * \sin(\varphi - \theta)。$$

[0058] 控制器接收混频信号Q和I，确定输入信号的相位，并将输入信号的相位输出到例如IMN控制电路。可以使用Q与I的比值来确定工作频率下的阻抗。在一些实施例中，可以将阻抗输入到检测算法，例如流氓对象检测、异物检测、RFID检测、接近检测、线圈对准等。

[0059] 示例性关系

[0060] 图8A示出了与可调谐电容器C_1串联耦合的接收器谐振器线圈L_1。前述电路耦合到整流器802，整流器802具有输出的整流电压$V_{rect,1}$。图8B示出了对于耦合到整流器的输出端804处的负载的图8A的电路，作为调谐C_1的函数的整流电压。注意，整流电压$V_{rect,1}$的峰值最大可以是由发送器在接收器谐振器线圈L_1上感应的电压$V_{peak,1}$。当电感器L_1与电容器C_1谐振时，这时阻抗最低，可以满足该条件。例如，如果$V_{rect,1}$太高，则可以对C_1调谐以不与L_1谐振或使C_1与L_1的谐振失谐，以减小$V_{rect,1}$。

[0061] 图8C示出了与电容器C_2并联耦合的接收器谐振器线圈L_1。前述电路耦合到整流器802，整流器802具有输出的整流电压$V_{rect,2}$。图8D示出了对于耦合到整流器的输出端804处的负载的图8C的电路，当电容器C_1与电感器L_1谐振时，整流电压$V_{rect,2}$处于其最大值$V_{peak,2}$。注意：

[0062] $V_{peak,2} >> V_{peak,1}$

[0063] 因此，该电路可以被认为是对发送器提供的电压的“提升”。

[0064] 在一些实施例中，整流电压$V_{rect,2}$可能太大，并且可以采用附加的串联元件，例如如图8E所示的电容器C_1，或如图8G所示的电容器C_3。图8E示出了与电容器C_1串联并与电容器C_2并联耦合的接收器谐振器线圈L_1。前述电路耦合到整流器802，整流器802具有输出的整流

电压$V_{rect,3}$。注意，电容器C_1和C_2可以用于以不同的比值与L_1谐振。类似地，这些电容器可用于以不同的比值使谐振器失谐。

[0065] 图8F示出了图8E的等效电路，其中L'_1是电感L_1和电容C_1的串联等效电路：

[0066] $$Z_{series\_equiv} = Z_{L1} + Z_{C1} = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = j\omega L'_1。$$

[0067] 电感L'_1小于电感L_1，导致较低的整流电压。总的来说，可以通过下式大致说明整流电压$V_{rect,3}$的峰值$V_{peak,3}$：

[0068] $V_{peak,2} \geqslant V_{peak,3} \geqslant V_{peak,1}$

[0069] 当电感器L_1、电容器C_1和电容器C_2处于谐振时，$V_{rect,3}$随着C_1的增大而增大。注意，电容C_2具有随着C_1的增大的相关减小。例如，可以通过分压来确定这种关系：

[0070] $$V_{rect,3} = V_{L1} \cdot \frac{Z_{C2}}{Z_{C2} + Z_{C1}}$$

[0071] 其中，V_{L1}是电感器L_1和电容器C_1之间节点处的电压。使用等式$Z_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1}$和$Z_{C2} = \frac{1}{j\omega C_2}$简化上述等式，结果表明$V_{rect,3}$与$C_1$成比例：

[0072] $$V_{rect,3} = V_{L1} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2}。$$

[0073] 图8G示出了与C_2并联耦合的接收器谐振器线圈L_1。线圈L_1和C_2串联耦合到C_3。前述电路耦合到整流器802，整流器802具有输出的整流电压$V_{rect,4}$。如针对上述电路所述，并联电容器C_2可以提升整流电压。在一些实施例中，串联电容器C_3可以补偿变化的负载。

[0074] 图8H示出了图8G的等效电路，其中L''_1是电感L_1和电容C_2的并联等效电路：

[0075] $$Z_{parallel\_equiv} = \frac{Z_{L1} Z_{C2}}{Z_{L1} + Z_{C2}} = \frac{j\omega L_1 * \frac{1}{j\omega C_2}}{j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{j\omega L_1}{-\omega^2 L_1 C_2 + 1} = j\omega L''_1。$$

[0076] 电感L''_1大于电感L_1，导致更高的整流电压。注意，接收器匹配网络中的电容器C_3可以最大化到负载的电流。在一些实施例中，接收器匹配网络中的电容器C_3的调谐可以增大或减小接收器的总体戴维南输出阻抗。可调谐电容器C_3也可用于补偿电感器L_1的失谐。总的来说，可以通过下式大致说明整流电压$V_{rect,4}$的峰值$V_{peak,4}$：

[0077] $V_{peak,2} \geqslant V_{peak,4} \geqslant V_{peak,1}$。

[0078] 当电感器L_1、电容器C_2和电容器C_3处于谐振时，无负载的$V_{rect,4}$随着C_2的增大而增大，直到C_2的值等于谐振电容$C_{2_resonant}$。在C_2达到谐振值$C_{2_resonant}$之前，有负载的$V_{rect,4}$增大和减小(参见图13)。注意，电容C_3具有随着C_2的增大的相关的减小。例如，在调整C_2和C_3的同时，和电容C_2+C_3可以保持近似恒定。对于小于$C_{2,critical}$的C_2值，可以利用较高的C_2和较低的C_3值实现较高的整流电压。可以将$C_{2,critical}$定义为与功率效率无关地使电压最大化的电容。

[0079] 在一些实施例中，接收器侧电容器被保持调谐以进行谐振，从而最大化效率。在一些实施例中，如果接收器失谐，则作为第一步骤，可以对接收器侧电容器重新调谐。如果在接收器处不能实现谐振，则接收器可以与发送器通信以调谐发送器侧电容器。

[0080] <u>控制方案</u>

[0081] 图9示出了从电力发送器902接收无线电力的无线电力接收器900的示例性实施例。接收器包括接收器谐振器线圈L_1、阻抗匹配网络(IMN)904、整流器906和控制器908。在一些实施例中,控制器908包括处理器909。在一些实施例中,控制器908可以耦合到处理器909。接收器可以耦合到电子设备中的负载910,例如蜂窝电话、笔记本电脑、平板电脑的电池等。在一些实施例中,控制器908可以耦合到向控制回路提供测量结果的传感器(例如电流传感器和电压传感器)。在一些实施例中,控制器908可以调谐IMN 904的元件以对到负载910的功率进行调节和/或实现向负载910的高效电力传输。控制器908可以集成在无线通信模块(例如蓝牙模块)内或耦合到无线通信模块(例如蓝牙模块)。在一些实施例中,可以包括电压钳位器以应对启动状况(例如,具有大的初始电压尖峰)和潜在的错误状况。

[0082] 示例性系统采用反馈回路来控制无线电力接收器900的IMN 904的部件,以优化接收器的电力效率。IMN 904的部件可以是电感器和/或电容器,并且这些部件的值可以以离散或连续的方式改变。这种方法的一种实施方式是IMN由可变电容器(例如BST电容器、PWM控制电容器)形成,或者另一实施方式是IMN由具有分立电容器的阵列或组形成,其中使用开关来改变电容值。

[0083] 调谐回路#1:最大化系统效率

[0084] 图10A示出了用于调谐接收器IMN 904的控制回路的示例性实施例。在一些示例性实施例中,可调谐IMN可以由控制回路来控制,以优化系统效率,该控制回路包括来自无线电力发送器902的反馈信息和接收器负载910处的信息。系统效率可以被定义为接收器处负载功率与发送器处输入功率的比值P_{load}/P_{in}。控制回路可以改变接收器IMN 904的部件,使得效率P_{load}/P_{in}最大。例如,发送器的输入端处的电压传感器、电流传感器或功率传感器可以测量或计算输入功率。负载910的输入端处的电压传感器、电流传感器或功率传感器可以测量或计算输出功率。控制器内的处理器或耦合到控制器的处理器可以使用上述比值来计算系统效率。作为响应,控制器可以调整接收器IMN 904的部件C_2和/或C_3。

[0085] 在另一示例中,在第一步骤1002中,如果已知其他测量结果(例如发送器线圈的电阻),则可以测量发送器谐振器线圈中的电流I_1并且可以计算输入功率P_{in,Tx_coil}。可以在接收器负载910处测量输出电压V_{out},并且可以使用额外的电流或电阻测量结果来计算输出功率P_{load}。在第二步骤1004中,处理器可以通过取得比值$P_{load}/P_{in,Tx_coil}$来计算系统效率。在第三步骤1006中,作为响应,控制器可以调整接收器IMN 904的部件C_2和/或C_3。在一些实施例中,控制器可以调整C2并测量对输出电压的影响。如果结果不是所期望的,则控制器可以将C_2返回到其先前值和/或调整C_3并测量对输出电压的影响,直到实现期望的结果。

[0086] 调谐回路#2:最大化传递给负载的功率

[0087] 图10B示出了用于调谐接收器IMN 904的控制回路的示例性实施例。在一些示例性实施例中,接收器控制回路可以最大化传递到负载910的功率。这可以作为最大化系统效率的控制回路的一部分或者接收器处的本地控制回路的一部分。如果从无线电力发送器发送的功率近似恒定,则接收器可以具有用以最大化P_{load}的本地控制回路。这可以降低复杂性和计算量。注意,可以在具有或不具有控制器的模拟、数字或混合信号(模拟和数字)电路中实现反馈回路。在第一步骤1008中,可以在负载910的输入端处测量或计算电压、电流或功率。在第二步骤1010中,可以假设发送器处的恒定电流来计算接收器的效率。在另一个实施例中,可以通过在接收器谐振器线圈处取得电压、电流和/或功率测量结果及计算输入功率

P_{in,Rx_coil}并与P_{load}进行比较来计算接收器的效率。在第三步骤1012中，作为响应，控制器可以调整接收器IMN 904的部件C_2和/或C_3。

[0088] 调谐回路#3：实现负载的目标电压

[0089] 图10C示出了用于调谐接收器IMN 904的控制回路的示例性实施例。在一些示例性实施例中，接收器控制回路可以调谐IMN 904以达到负载910的目标电压V_{target}。例如，目标电压V_{target}可以是处于或接近负载910的最大输入电压V_{max}的电压。通过将无线电力接收器输出驱动到负载的最大输入电压V_{max}(例如电池充电器输入)，可以优化无线电力接收器效率。而且，利用这种控制技术，可以避免使用DC-DC转换器，并因此可以进一步优化无线电力接收器的效率。即，可以避免可归因于DC-DC转换器的损耗。基于负载电压调谐接收器IMN 904的优点是可以确保整流器输出处于安全操作区域中。可以确保安全操作区域，这是因为反馈回路调整IMN 904部件，使得整流器输出达到目标负载电压V_{target}。

[0090] 例如，假设无线电力接收器的负载是电池充电集成电路，其最大输入电压为20V。目标负载电压V_{target}理想地可以是20V，但由于来自整流器的纹波和其他非理想的影响，目标负载电压V_{target}可能会被设置为较低的电压，例如19V。无线电力接收器上的控制器908可以是负反馈回路，其将整流器输出电压调节到目标负载电压。该环路将比较整流器输出电压并将其与目标电压(在该示例中为19V)进行比较，以产生误差信号。然后，该误差信号将改变IMN 904的部件(例如，电容器C_2和C_3)，使得整流器输出电压等于目标电压，从而不产生误差信号。可以在模拟域中使用运算放大器和借助可变电容器的PWM信号和/或在混合信号模拟和数字域中使用模数转换器、比较器、微控制器、数字逻辑单元、固件、开关和电容器组来实现反馈环路的实现方式。在一些实施例中，连续可变电容器的组合用于精细调谐，而开关和电容器组可用于粗略调谐。例如，如果无线电力接收器可以嵌入到预定义的系统(例如笔记本电脑、蜂窝电话等)中，则目标电压可以被先验地获知并且可以容易地输入或编程到控制器或存储器单元中。在一些实施例中，目标电压不需要是静态的并且可以例如由系统的用户或不同的安全状况来改变。

[0091] 图11示出了用于调节无线电力接收器的整流电压的控制方案的示例性实施例。该控制方案的输入可以来自整流电压V_{rect}、电流I_1、I_2、I_3(参见图7)和/或匹配网络中的电压的测量结果(即来自传感器)。在步骤1102，测量整流电压，并且在步骤1104，将整流电压与处于一些误差、滞后或近似区间±ε内的目标电压V_{target}进行比较。在一些实施例中，在诸如移动电子设备和笔记本电脑等消费电子设备中，整流电压的目标值可以是1V、5V、10V和20V。在一些实施例中，该区间ε可以是目标电压V_{target}的1％、5％、10％或更多。例如，对于模拟电压测量结果，在10V系统中，该区间可以是10-100mV。如果电压测量结果是数字信号，则V_{rect}与V_{target}的比较可以取决于噪声基底处或以上的位数或量化。

[0092] 如果V_{rect}小于V_{target}-ε，则在步骤1106，将电容器C_2的电抗X_2与最小电抗值$X_{2,min}$进行比较。如果X_2小于或等于$X_{2,min}$，则在步骤1108，可以增大发送器电流I_{TX}。在一些实施例中，接收器可以向发送器发信号以增大I_{TX}。在一些实施例中，发送器可以检测接收器处的测量结果并相应地调整电流I_{TX}。这可以通过从接收器向发送器发送控制信号来实现。在一些实施例中，发送器可以监测接收器并且可以感测该状况。一旦电流I_{TX}增大，就可以在步骤1102测量V_{rect}。如果X_2大于$X_{2,min}$，则在步骤1110，可以减小X_2，例如，通过调谐电容器C_2来减小X_2。在步骤1112，监测V_{rect}，并且在步骤1114，增大电容器C_3的电抗X_3。例如，如果C_3的调谐是离

散的(即,通过电容器组)并且增大X_3使得V_{rect}超出滞后带ε,则可以循环步骤1110到1114以稳定V_{rect}。控制返回到步骤1102。

[0093] 在步骤1104,如果V_{rect}等于处于±ε内的V_{target}并且电抗X_2不等于最大电抗$X_{2,max}$,则控制返回到步骤1102。

[0094] 在步骤1104,如果V_{rect}大于$V_{target}+\varepsilon$,则在步骤1116将X_2与最大电抗$X_{2,max}$进行比较。如果X_2小于$X_{2,max}$,则在步骤1118,增大X_2。控制返回到步骤1116。如果X_2大于或等于$X_{2,max}$,则在步骤1120,将电抗X_3与$X_{3,min}$进行比较。如果X_3大于$X_{3,min}$,则在步骤1122,减小X_3并且控制返回到V_{rect}。如果X_3小于或等于$X_{3,min}$,则在步骤1124,可以减小发送器电流I_{TX}。在一些实施例中,接收器可以向发送器发信号以增大I_{TX}。在一些实施例中,发送器可以检测接收器处的测量结果并相应地调整电流I_{TX}。

[0095] 调谐回路#4:调节整流电压V_{rect}

[0096] 在无线电力接收器的一些实施例中,可以通过调整位置C_2处的一个或多个电容器的电容值来调节整流电压(至少参见图8C、8E或8G)。调整值可以取决于接收器谐振器(电容器C_2是该接收器谐振器的一部分)中允许的最大耗散功率。

[0097] 图12A是用于具有控制器的无线电力接收器的示例性方法的流程图。注意,以下每个步骤可以由耦合到接收器的部件的控制器执行。至少在图1-4、图7和图9中示出了这种控制器的示例。步骤1202在控制器的第一输入端接收表示整流电压V_{rect}的信号的值。步骤1204在耦合到第一输入端的处理器中对表示整流电压V_{rect}的信号进行操作,以产生电容器C_2的期望电容值$C_{2_desired}$。步骤1206经由控制器的第一输出端提供调整信号,以便将电容器C_2的电容值C_{2_value}调整到期望电容值$C_{2_desired}$。

[0098] 图12B是用于具有控制器的无线电力接收器的示例性方法(包括步骤1202-1206)的流程图。该示例性方法还包括步骤1208,其通过处理器将表示整流电压V_{rect}的信号与由上限V_{upper}和下限V_{lower}定义的电压范围进行比较,该电压范围存储在控制器的存储器中。步骤1210响应于表示整流电压V_{rect}的值的信号与电压范围的比较经由控制器的第一输出端将调整信号发送到可调谐电容器C_2。

[0099] 图12C是用于产生图12A-12B中的步骤1204的期望电容值$C_{2_desired}$的示例性方法的流程图。步骤1212在控制器的第二输入端接收表示整流电流I_{rect}的信号。可以在接收器的整流器的输出端处感测、测量或计算I_{rect}。步骤1214在处理器中对表示整流电压V_{rect}和整流电流I_{rect}中的每一个的信号进行操作,以确定到达与整流器输出端耦合的负载的功率P_L和负载处的电阻R_L。例如,可以根据这些测量结果计算功率P_L和电阻R_L:

[0100] $R_L = V_{rect}/I_{rect}$

[0101] $P_L = I_{rect} \cdot V_{rect}$.

[0102] 步骤1216在处理器中对接收器电阻$R_{receiver}$和功率P_L进行操作,以确定到达接收器的功率$P_{receiver}$。可以通过下式确定接收器电阻$R_{receiver}$和到达接收器的功率$P_{receiver}$:

[0103] $R_{receiver} = \omega \cdot L_1/Q$

[0104] $$U_d = \frac{R_l C_3^2}{((C_2 + C_3)^2 + \omega^2 R_l^2 C_2^2 C_3^2) R_d}$$

[0105] $P_{receiver} = P_L(U_d+1)$,

[0106] 其中,U_d是接收器的品质因数。

[0107] 步骤1218在处理器中对功率$P_{receiver}$、电容器C2的值、以及电容器C_3的值进行操作，以确定开路电压值V_{open}，其中，期望电容值$C_{2_desired}$是V_{open}的函数。电容器C_2和C_3的值可以是最近的测量结果或估计结果。

[0108] 为了计算V_{open}，确定接收器电路的戴维南阻抗Z_{th}：

[0109] $$Z_{th} = Z_3 + \frac{(Z_1)(Z_2)}{Z_1 + Z_2}$$

[0110] 其中

[0111] $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$

[0112] $$Z_2 = R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}$$

[0113] $$Z_3 = R_3 + \frac{1}{j\omega C_3}。$$

[0114] 根据戴维南阻抗，确定交流侧电压：

[0115] $$V_{AC} = \frac{V_L Z_{th}}{R_L}。$$

[0116] 因此，可以通过下式确定开路电压值V_{open}：

[0117] $$V_{open} = V_{th} = \frac{V_{ac}}{j\omega C_2 R_d - \omega^2 L_d C_2 + 1}$$

[0118] 因此，为了产生图12A-12B中的步骤1204的期望电容值$C_{2_desired}$：

[0119] $$C_{2\_desired} = \frac{2\omega^2 L_d \mp \sqrt{4\omega^4 L_d^2 - 4(\omega^4 L_d^2 + \omega^2 R_d^2)\left(1 - \left(\frac{Vac}{Vopen}\right)^2\right)}}{2(\omega^4 L_d^2 + \omega^2 R_d^2)}。$$

[0120] 注意，在一些实施例中，可以通过下式确定C_2的最大电容值：

[0121] $$C_{2\_max} = \frac{2\omega^2 L_d \mp \sqrt{4\omega^4 L_d^2 - 4(\omega^4 L_d^2 + \omega^2 R_d^2)\left(1 - \left(\frac{Vac}{Vocmax}\right)^2\right)}}{2(\omega^4 L_d^2 + \omega^2 R_d^2)}。$$

[0122] 其中，V_{ocmax}是取决于电路的最大开路电压值。确定最大电容值C_{2_max}使得电容器C_2的值具有上限可能是有帮助的。这可以减轻接收器中高压引起的任何潜在伤害或损坏。在一些实施例中，$C_{2_desired}$的值可以等于值C_{2_max}。

[0123] 在一些实施例中，一旦已经确定了电容器C_2的期望值，就可以以获得在V_{upper}和V_{lower}的范围内的整流电压V_{rect}为目标确定电容器C_3的期望值。在示例性实施例中，可以由存储C_2、C_3对的值的查找表确定C_3的电容值。图13是作为C_2和C_3的电容值的函数的、在负载电阻R_{load}为30Ω时的AC负载电压V_{AC_load}的曲线图。注意，AC负载电压V_{AC_loaded}之间的关系如下：

[0124] $$V_{AC\_loaded} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{rect}。$$

[0125] 可以由处理器访问从该函数导出并存储在控制器的存储器中的查找表，以为可调谐电容器C_3提供调整值。注意，在该实施例中，C_2和C_3之间的近似关系是，对于较高的期望电压，来自处理器的对电容器C_2的调整信号将被配置为增大C_2的电容值(在限度1304内)。电容器C_3的调整信号将被配置为减小C_3的电容值(在限度1304内)。

[0126] 在一些实施例中，可以通过使用感应电压、开路状况、到达接收器的已知功率、以及接收器负载处的负载状况来进一步改进或观测电容器C_2和C_3的已知值。知道整流器输出端的开路电压可以通过以下关系得到电容器C_2的值：

[0127] $|V_{Open\_Circuit}|=|A_{Open\_Circuit}|*|V_{Induced}|$

[0128] 其中：

[0129] $|V_{Induced}|=I_{Tx\_Coil}\omega M$

[0130] $$|A_{Open\_Circuit}|=\frac{|X_2|}{\sqrt{{R_{L1}}^2+{X_{L1}}^2+{X_2}^2+2X_{L1}X_2}}$$

[0131] 其中，电感器L_1的电阻为$R_{L1}=X_{L1}/Q_{L1}$，电容器C_2的电抗为$|X_2|=1/(\omega C_2)$，并且电感器L_1的电抗为$X_{L1}=\omega L_1$。注意，开路电压仅取决于C_2(而不取决于C_3)，可以重新排列上面的等式以准确地确定C_2。在替代实施例中，当假设Q_{L1}相对较高(即，低R_{L1})时，可以进行以下近似：

[0132] $$X_2\cong\frac{X_{L1}}{|A_{Open\_Circuit}|-1}$$

[0133] 或者

[0134] $$C_2\cong\frac{|A_{Open\_Circuit}|-1}{\omega|A_{Open\_Circuit}|X_{L1}}。$$

[0135] 一旦开路特性(以及因此X_2的电抗特性)，负载条件和功率传输可用于计算戴维南阻抗的大小并因此计算X_3的剩余电抗变量。与Z_{TH}相关的等式如上所示。另外，在相对于功率求解戴维南等效电路时，可以使用以下关系：

[0136] $$|V_{ac}|^2=\frac{|V_{TH}|^2}{2}-P_{LOAD}R_{TH}\pm\sqrt{\left(\frac{|V_{TH}|^2}{2}-P_{LOAD}R_{TH}\right)^2-{P_{LOAD}}^2|Z_{TH}|^2}$$

[0137] 其中，当$R_{LOAD}>|Z_{TH}|$(典型的)时，使用加法，当$R_{LOAD}<|Z_{TH}|$时，使用减法，并且戴维南电压由下式给出：

[0138] $$V_{TH}=V_{Induced}\frac{-j|X_2|}{R_{L1}+j(|X_{L1}|-|X_2|)}。$$

[0139] 在一些实施例中，调整信号可以输入到可调谐电容器本身或者用于调整可调谐电容器的值的装置。例如，调整信号可以输入到PWM发生器，PWM发生器将调整本文所述的任何可调谐电容器的值，例如可调谐电容器C_1、C_2或C_3(参见图8A、图8C、图8E和图8G)。在另一个示例中，调整信号可以输入到开关控制器以切换到电容器组的适当值。在又一个示例中，可以通过用于机械或压电装置的调整信号来调谐电容器。在进一步的示例中，BST电容器的调整信号可以作为DC电压被提供，这是因为BST电容器的电容值是DC电压偏置的单调函数。

[0140] 调谐回路#5：根据函数调谐匹配

[0141] 在示例性实施例中，可以基于由控制器的处理器、接收器或两者确定的函数来调整接收器匹配的调谐。图14A是用于基于函数进行调谐的示例性方法的流程图。在步骤1402中，针对电容器位置C_2和C_3的第一组电容值C_{2_value1}、C_{3_value1}，可以分别测量整流电压V_{rect}和整流电流I_{rect}并将其输入到处理器。在步骤1404中，可以针对第二组电容值C_{2_value2}、C_{3_value2}

重复这些测量并将这些测量结果输入到处理器。在步骤1406中，已经针对至少两组或更多组电容值进行了测量，处理器然后可以拟合在电感器L_1上感应的电压V_{AC}、负载电阻R_{load}和/或电感的变化ΔL的函数。在一些实施例中，代替使用“拟合”来确定函数，函数参数（ΔL、V_{AC}和R_{load}）的估计结果能够足以确定期望值$C_{2_desired}$、$C_{3\_desired}$。在一些实施例中，可以使用高斯过程来快速收敛于ΔL、V_{AC}和R_{load}的值。在步骤1410中，处理器可以确定用于期望电压V_{AC}的下一组电容值$C_{2_desired}$、$C_{3\_desired}$。在一些实施例中，下一组电容值$C_{2_desired}$、$C_{3_desired}$可以用于目标或期望电压V_{AC}。在可选步骤中，根据该函数，处理器可以计算C_2和C_3的理想匹配值。在其他实施例中，下一组电容值$C_{2_desired}$、$C_{3_desired}$可以在采样点（$C_{2\_value\_1}$、$C_{3\_value\_1}$、$C_{2\_value\_2}$、$C_{3\_value\_2}$）与C_2和C_3的理想匹配值之间的某个点处。在步骤1412中，可以根据$C_{2_desired}$、$C_{3\_desired}$、经由来自控制器的调整信号来调整位置C_2和C_3处的可调谐电容器。注意，针对每组新的测量结果，可以重复该函数的拟合。图14B是作为电容C_2和C_3的函数的、在负载电阻R_{load}为20Ω时的电压V_{AC}的示例性函数。箭头1414示出了电压V_{AC}的刻度的增大方向，箭头1416示出了函数可以如何针对负载电阻R_{load}的变化而改变，并且箭头1418示出了函数可以针对电感的变化ΔL而改变。

[0142] 虽然已经结合特定优选实施例描述了所公开的技术，但是本领域普通技术人员将理解其他实施例，并且这些其他实施例旨在落入本公开内容的范围内。例如，上面已经描述了与发送无线电力相关的设计、方法、部件配置等以及其各种具体应用和示例。本领域的技术人员将理解，本文描述的设计、部件、部件配置可以组合使用或互换使用，并且上述描述并不将部件的这种可互换性或组合仅限于本文所述的内容。

[0143] 本文引用的所有文献均通过引用的方式并入本文。

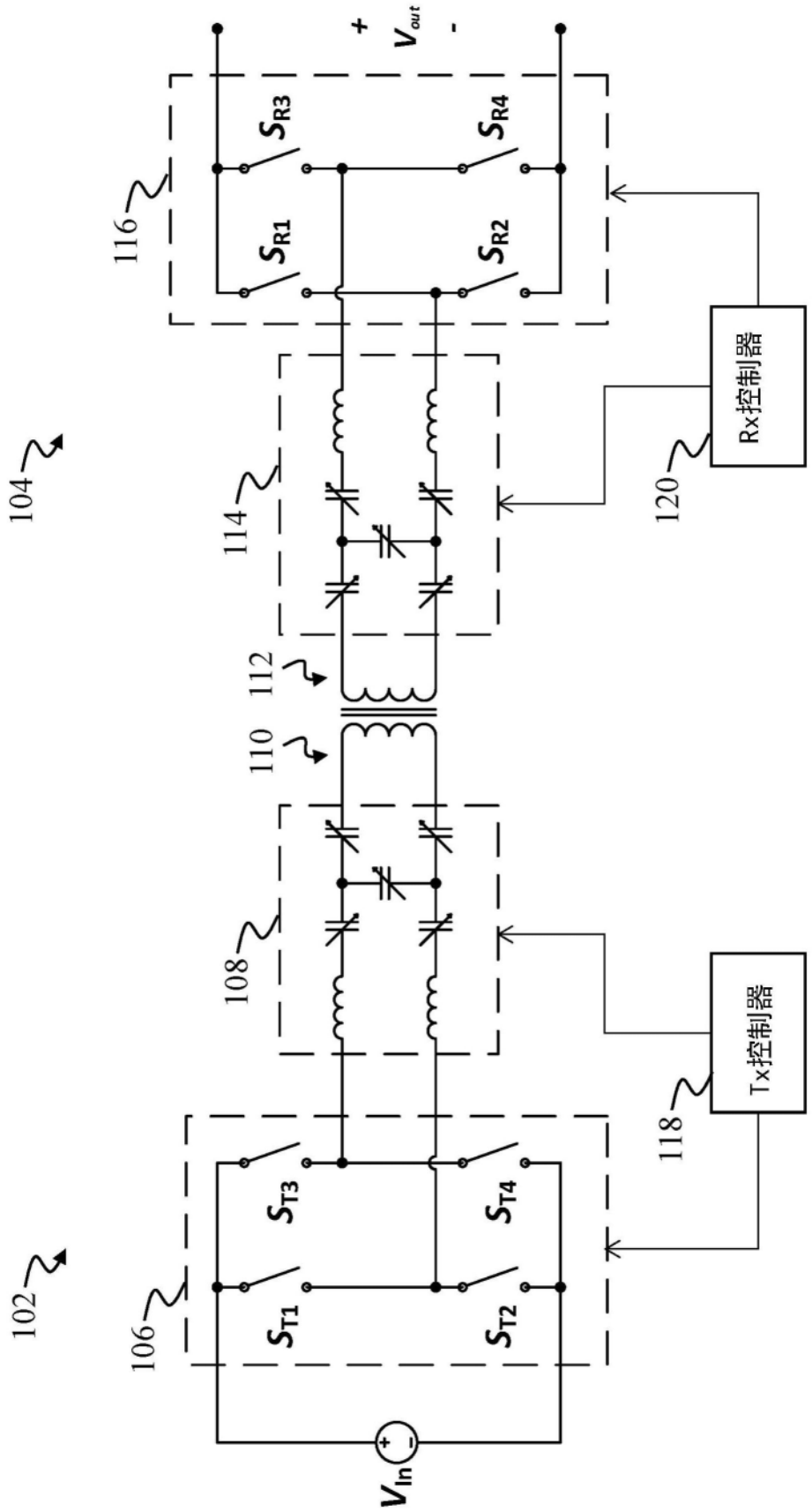

102
104
106
108
110
112
114
116
118
120
S_{T1}
S_{T2}
S_{T3}
S_{T4}
V_{In}
S_{R1}
S_{R2}
S_{R3}
S_{R4}
V_{out}
+
-
Tx控制器
Rx控制器

图1

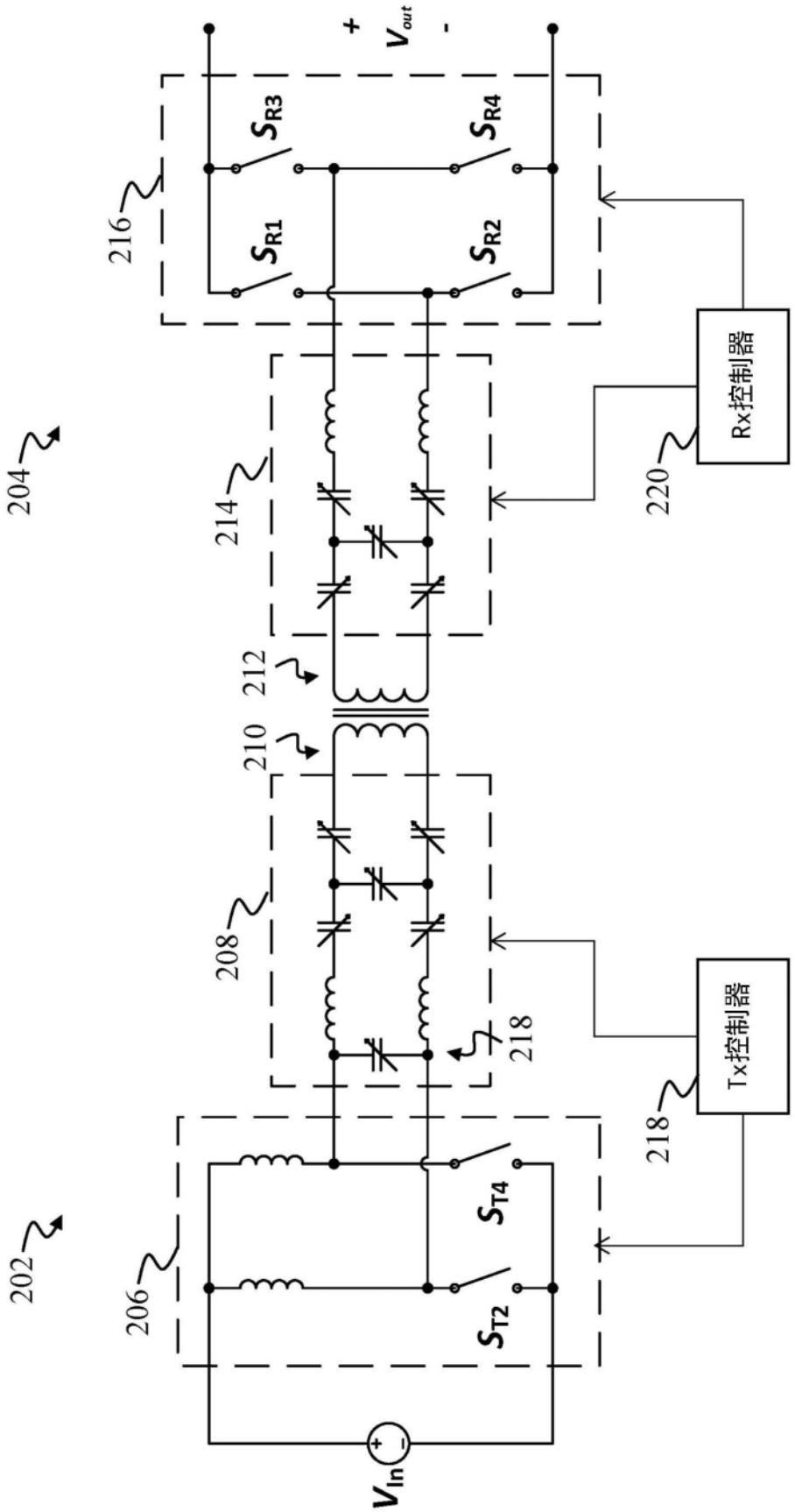

202
204
206
208
210
212
214
216
218
220
V_{In}
S_{T2}
S_{T4}
S_{R1}
S_{R2}
S_{R3}
S_{R4}
+
V_{out}
-
Tx控制器
Rx控制器

图2

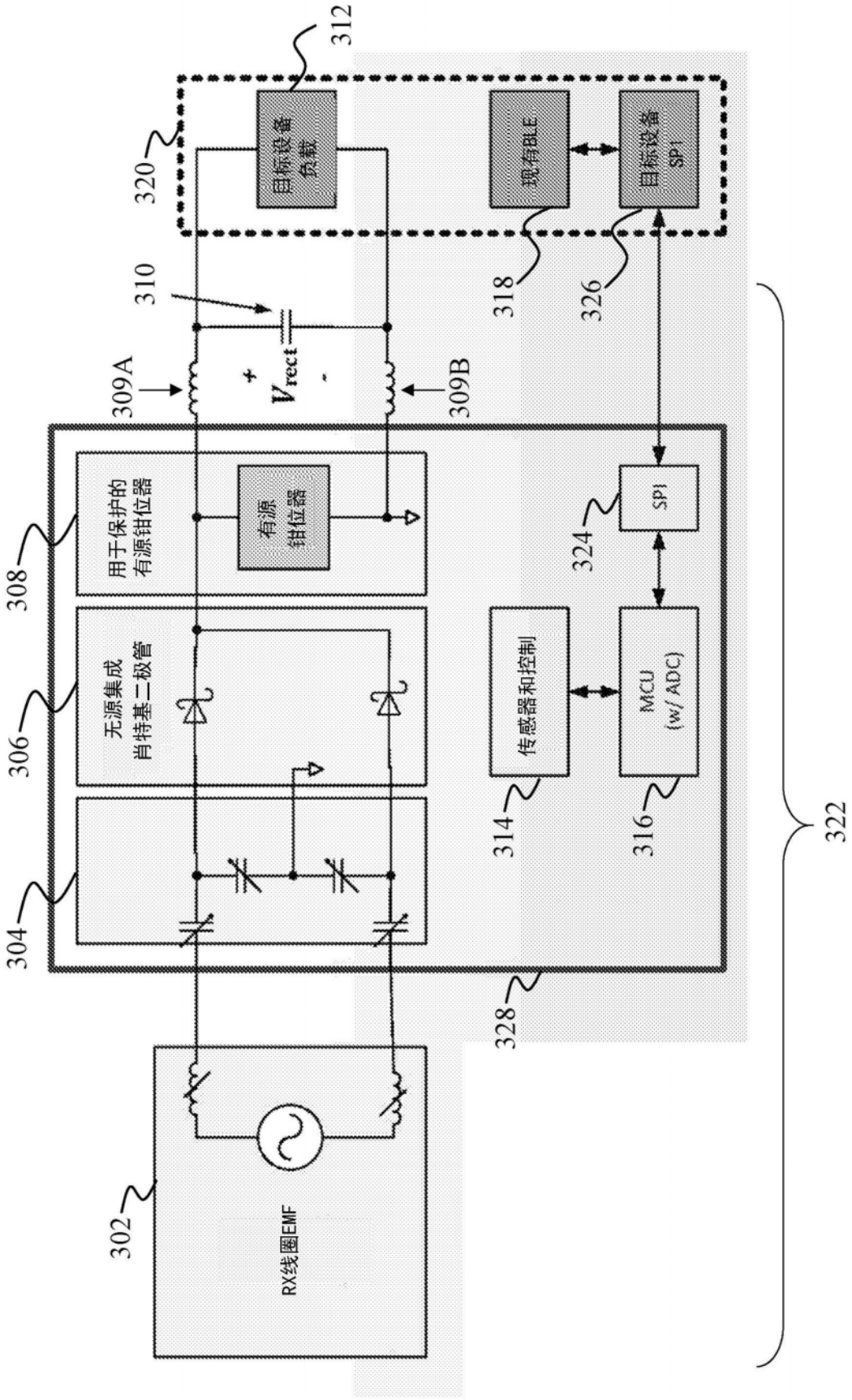

312
320
目标设备
负载
现有BLE
目标设备
SPI
310
318
326
309A
+
V_{rect}
-
309B
308
用于保护的
有源钳位器
有源
钳位器
324
SPI
306
无源集成
肖特基二极管
传感器和控制
MCU
(w/ ADC)
314
316
322
304
328
302
RX线圈EMF

图3A

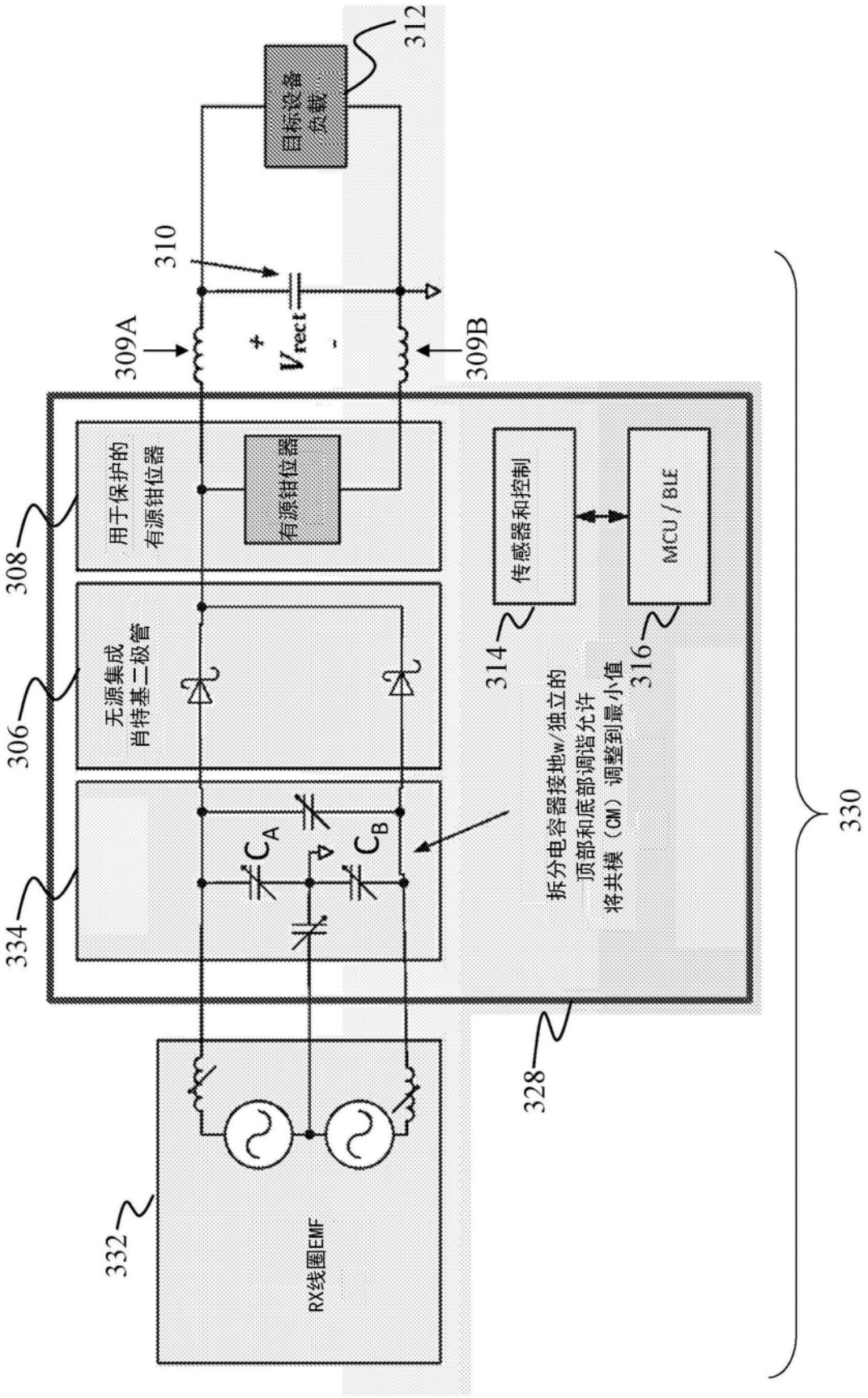

312
目标设备
负载
310
309A
309B
V_{rect}
+
-
308
用于保护的
有源钳位器
有源钳位器
306
无源集成
肖特基二极管
334
C_A
C_B
314
传感器和控制
316
MCU / BLE
拆分电容器接地w/独立的
顶部和底部调谐允许
将共模（CM）调整到最小值
328
330
332
RX线圈EMF

图3B

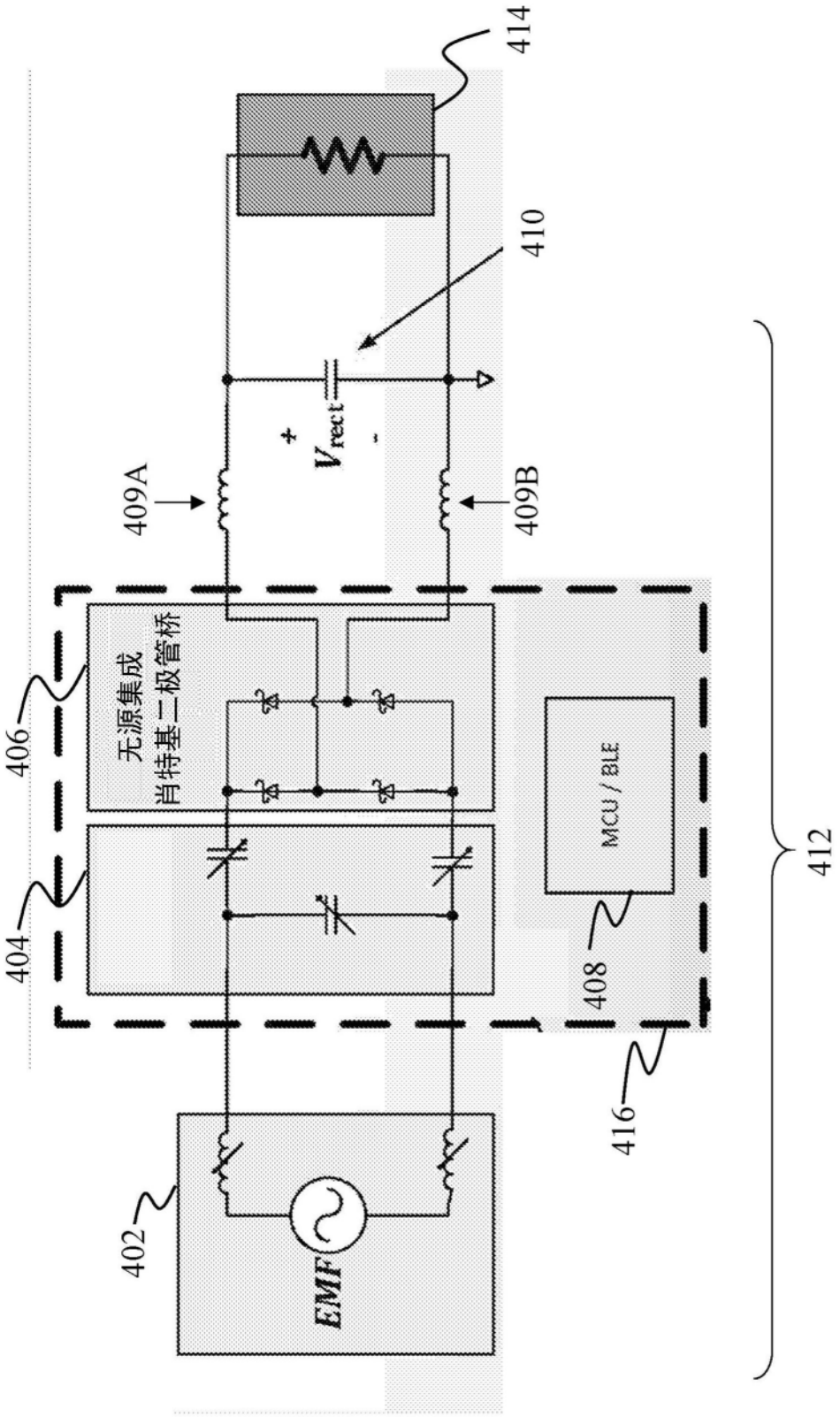

414
410
V_{rect}
+
-
409A
409B
406
无源集成
肖特基二极管桥
404
MCU / BLE
408
416
412
402
EMF

图4

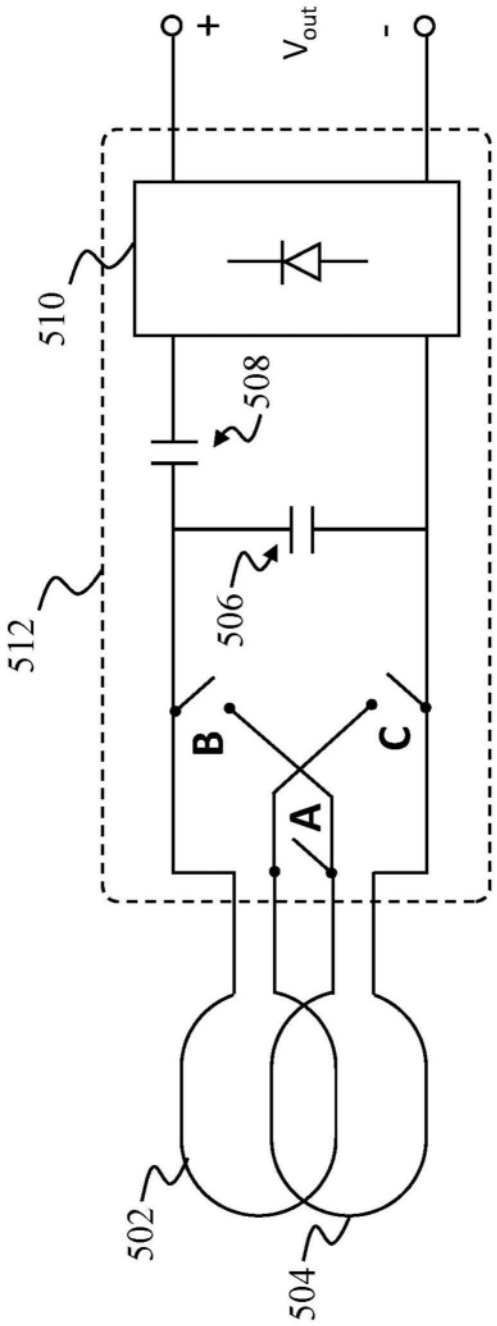


图5

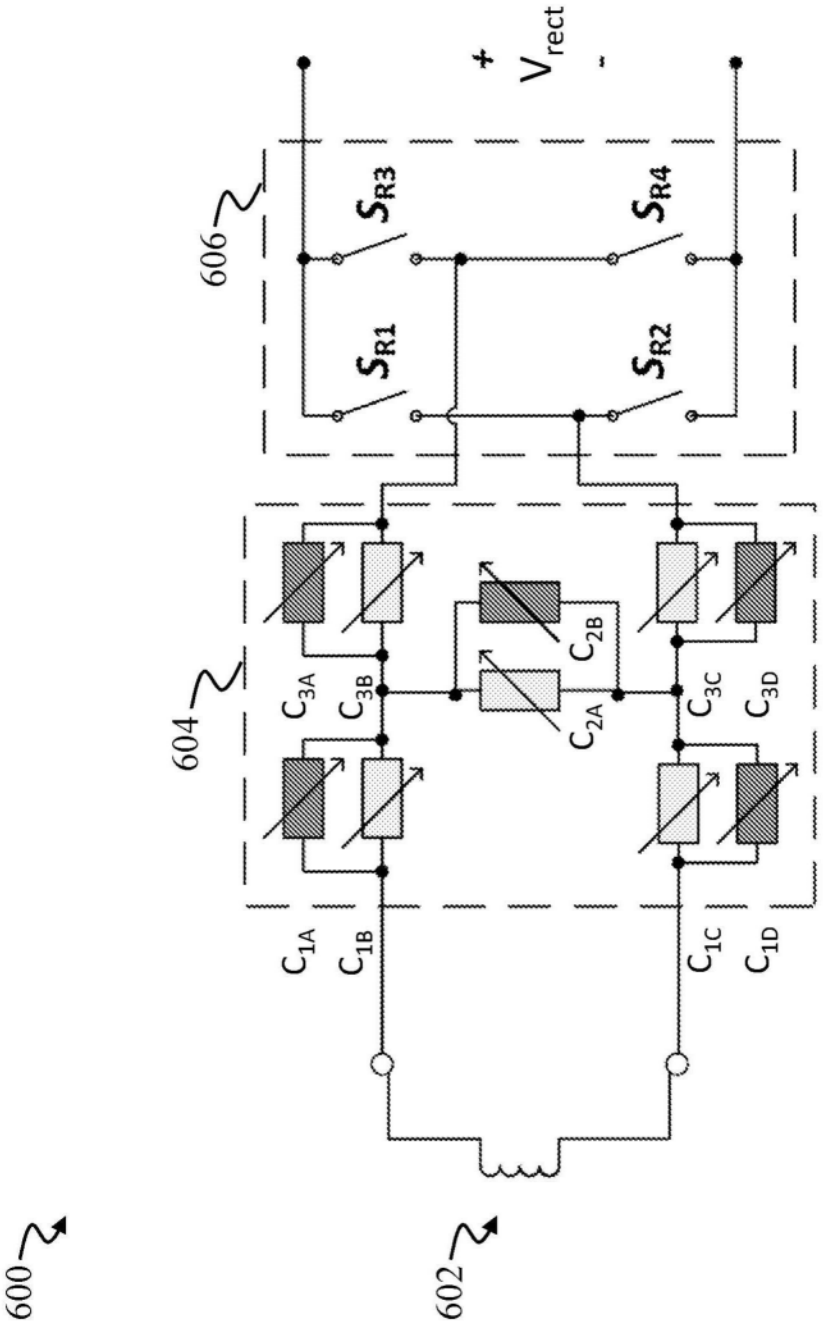

600
602
604
606
S_{R1}
S_{R2}
S_{R3}
S_{R4}
+
V_{rect}
-
C_{1A}
C_{1B}
C_{1C}
C_{1D}
C_{2A}
C_{2B}
C_{3A}
C_{3B}
C_{3C}
C_{3D}

图6A

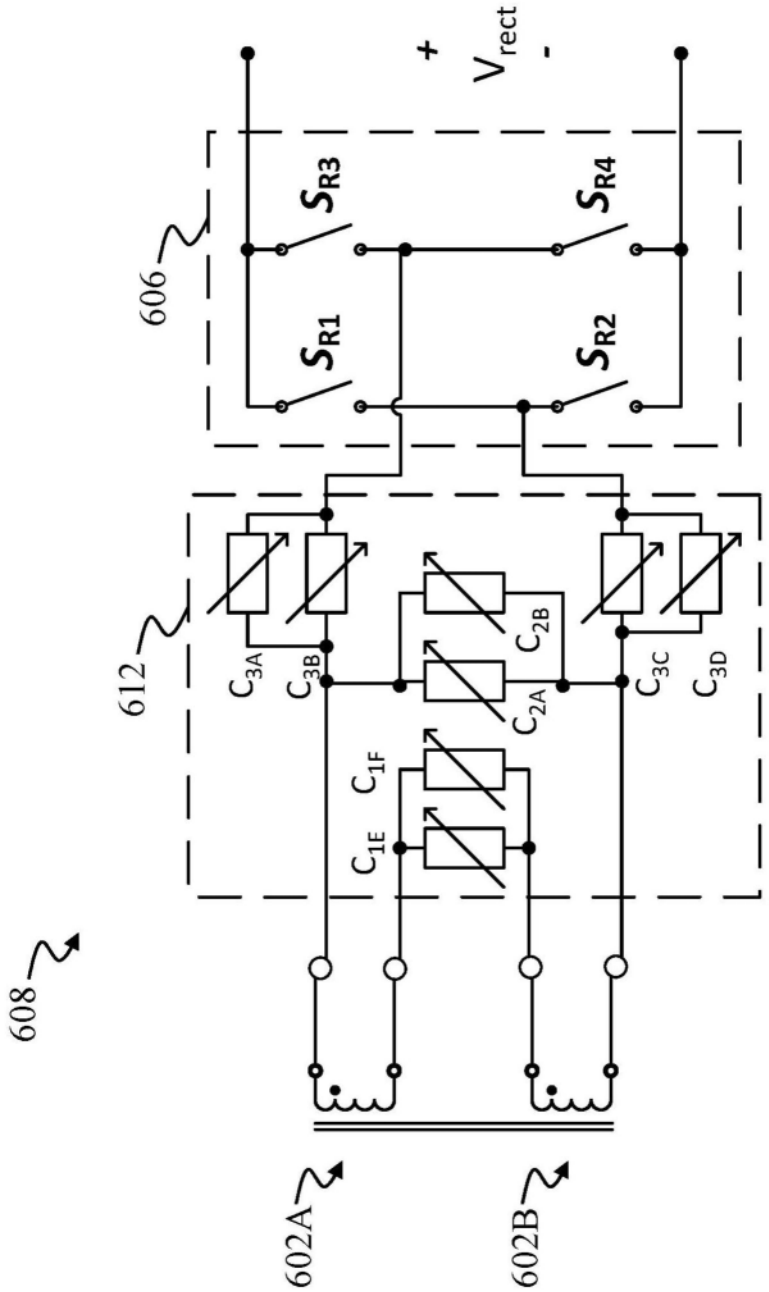

606
S_{R1}
S_{R2}
S_{R3}
S_{R4}
+
V_{rect}
-
612
C_{3A}
C_{3B}
C_{2B}
C_{2A}
C_{3C}
C_{3D}
C_{1F}
C_{1E}
608
602A
602B

图6B

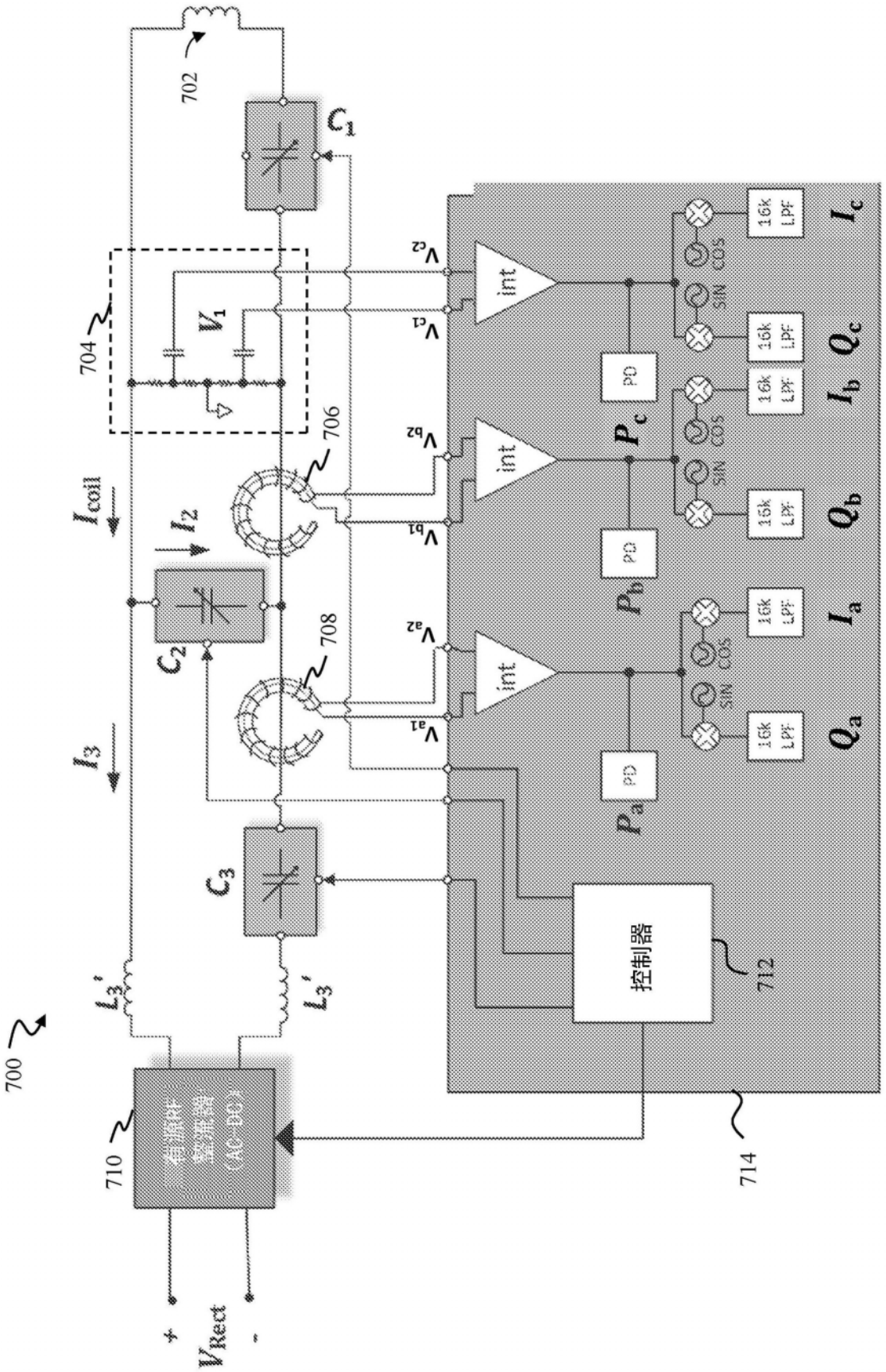

700
702
704
706
708
710
712
714
C_1
C_2
C_3
V_1
I_{coil}
I_2
I_3
L_3'
L_3'
V_{Rect}
+
-
V_{a1}
V_{a2}
V_{b1}
V_{b2}
V_{c1}
V_{c2}
int
int
int
PD
PD
PD
P_a
P_b
P_c
SIN
COS
16k LPF
Q_a
I_a
Q_b
I_b
Q_c
I_c
控制器

图7

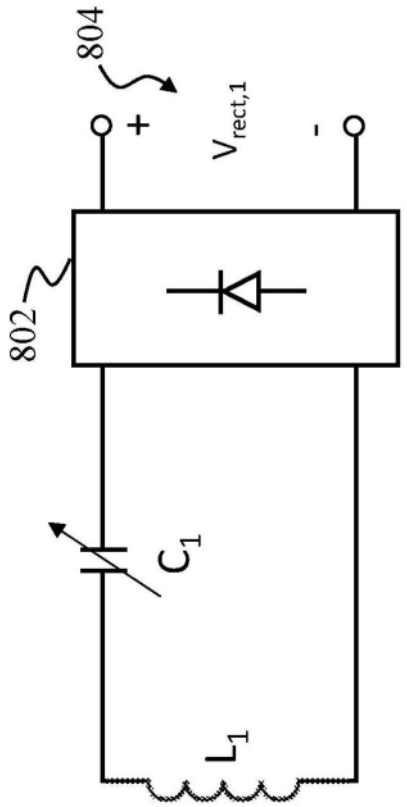


图8A

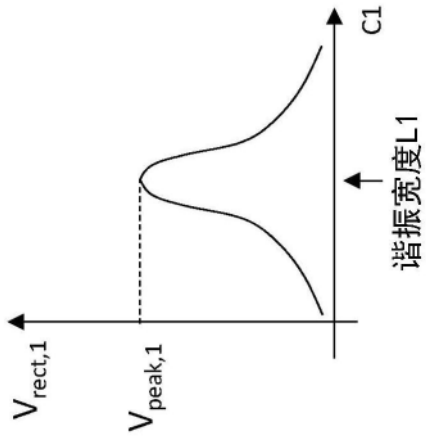


图8B

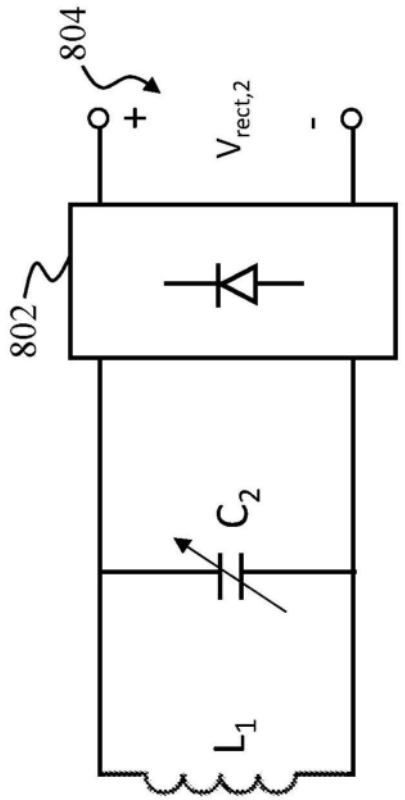


图8C

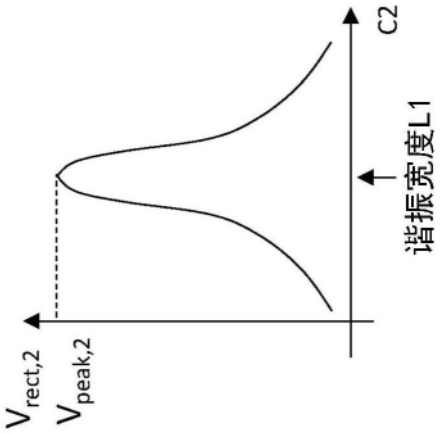


图8D

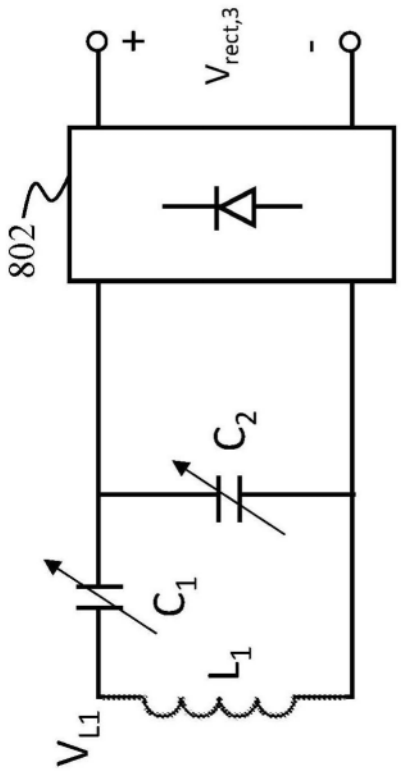


图8E

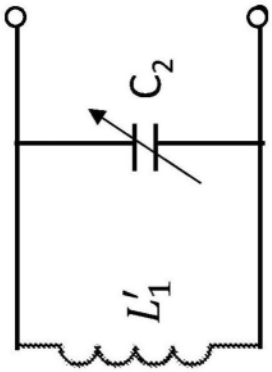


图8F

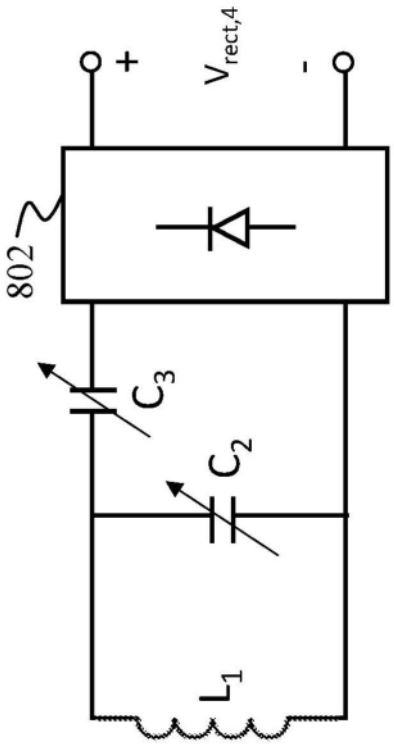


图8G

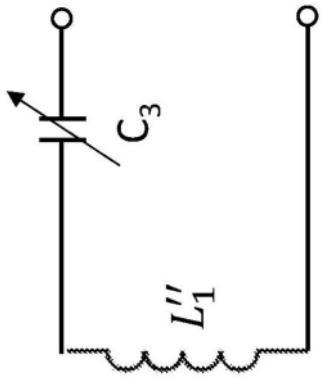


图8H

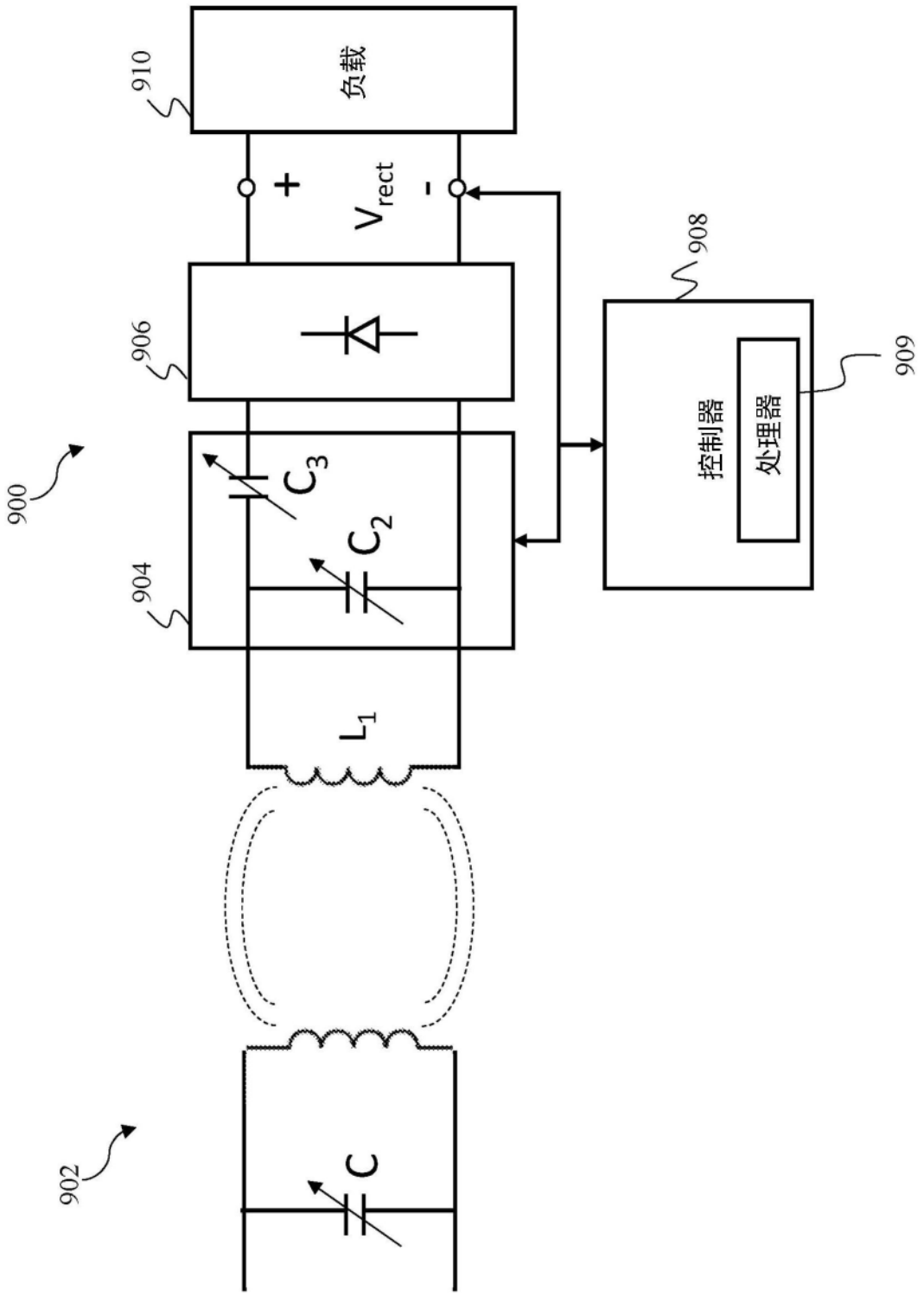


图9

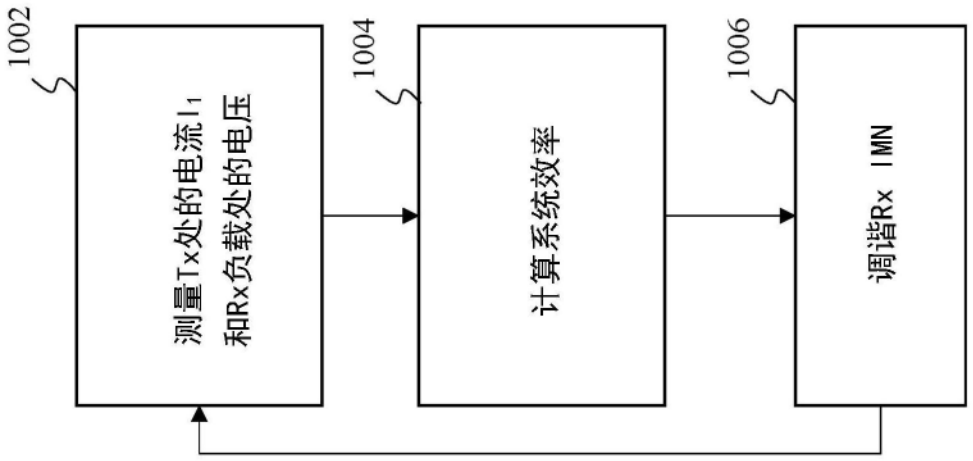


图10A

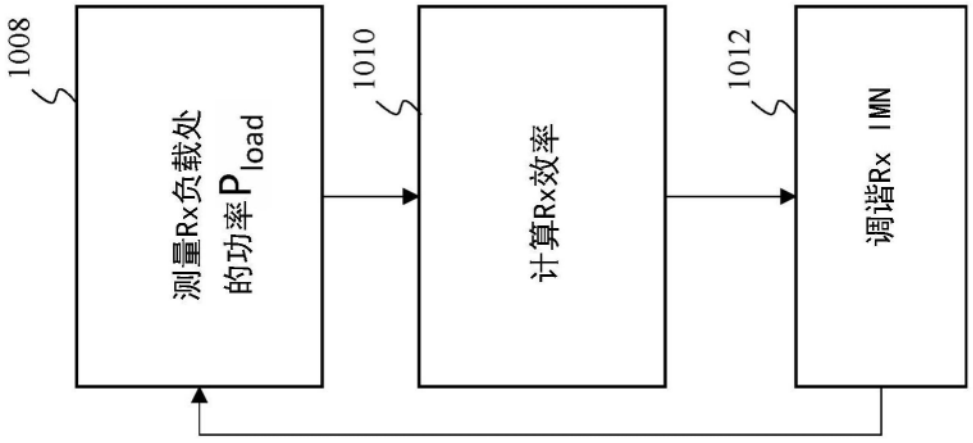


图10B

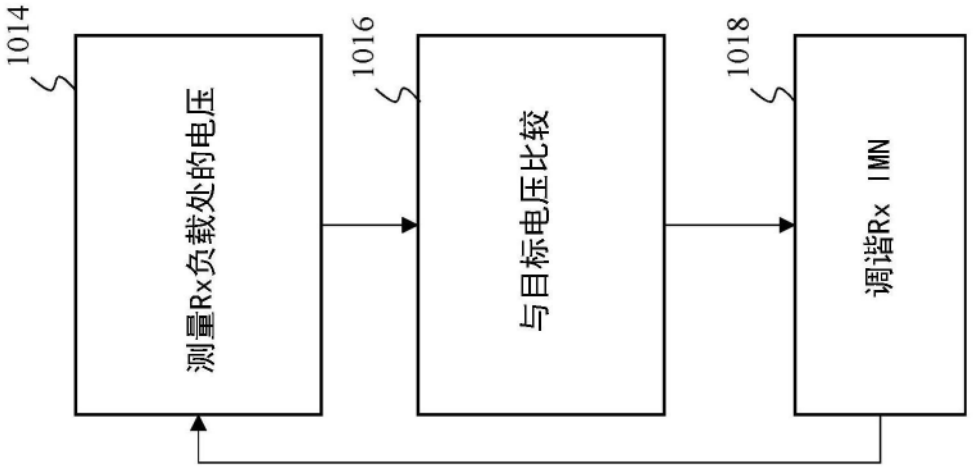


图10C

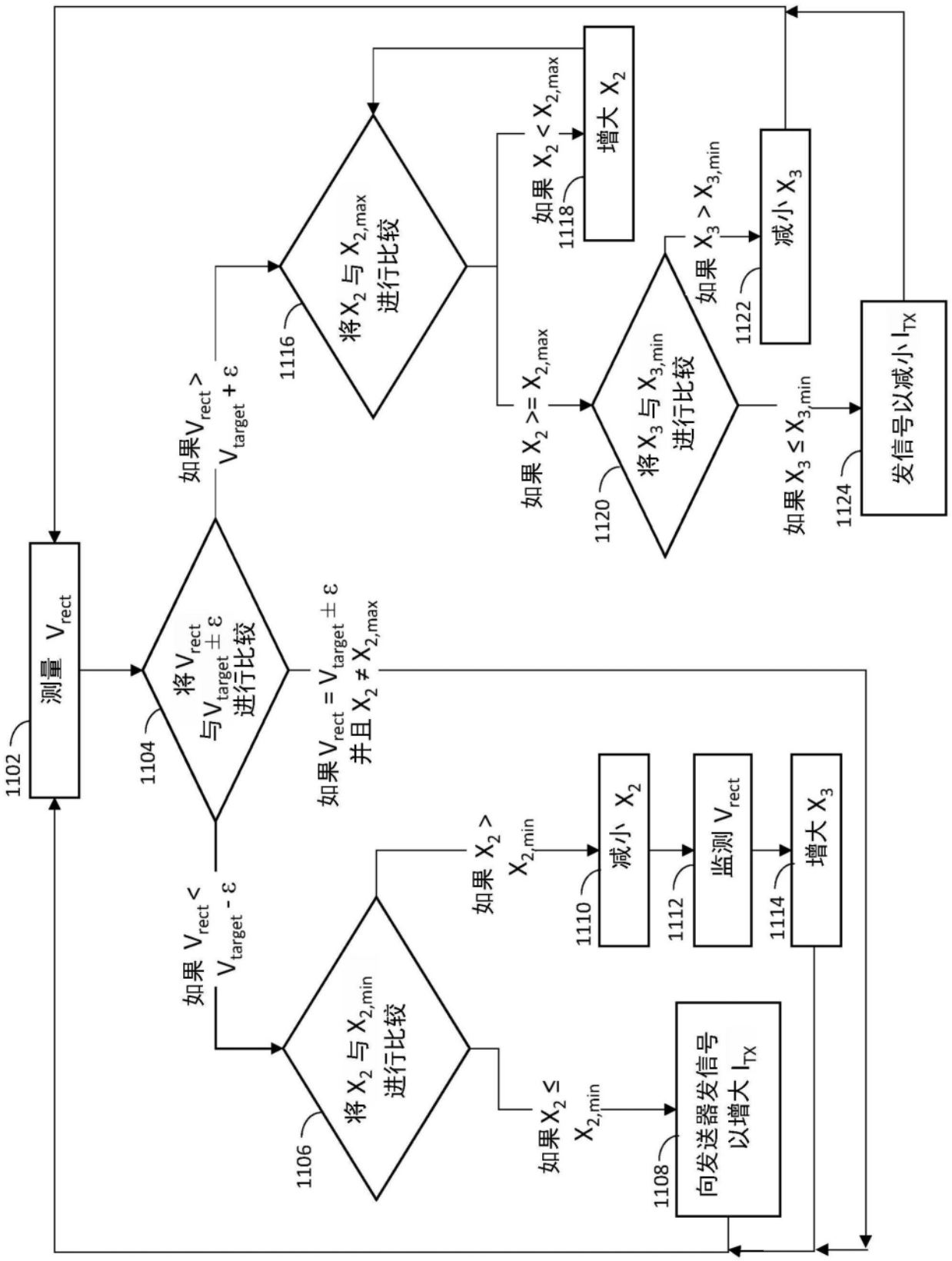

测量 V_{rect}
1102
将 V_{rect} 与 $V_{target} \pm \varepsilon$ 进行比较
1104
如果 $V_{rect} > V_{target} + \varepsilon$
如果 $V_{rect} < V_{target} - \varepsilon$
如果 $V_{rect} = V_{target} \pm \varepsilon$ 并且 $X_2 \neq X_{2,max}$
将 X_2 与 $X_{2,max}$ 进行比较
1116
如果 $X_2 < X_{2,max}$
增大 X_2
1118
如果 $X_2 >= X_{2,max}$
将 X_3 与 $X_{3,min}$ 进行比较
1120
如果 $X_3 > X_{3,min}$
减小 X_3
1122
如果 $X_3 \leq X_{3,min}$
发信号以减小 I_{TX}
1124
将 X_2 与 $X_{2,min}$ 进行比较
1106
如果 $X_2 > X_{2,min}$
减小 X_2
1110
监测 V_{rect}
1112
增大 X_3
1114
如果 $X_2 \leq X_{2,min}$
向发送器发信号以增大 I_{TX}
1108

图11

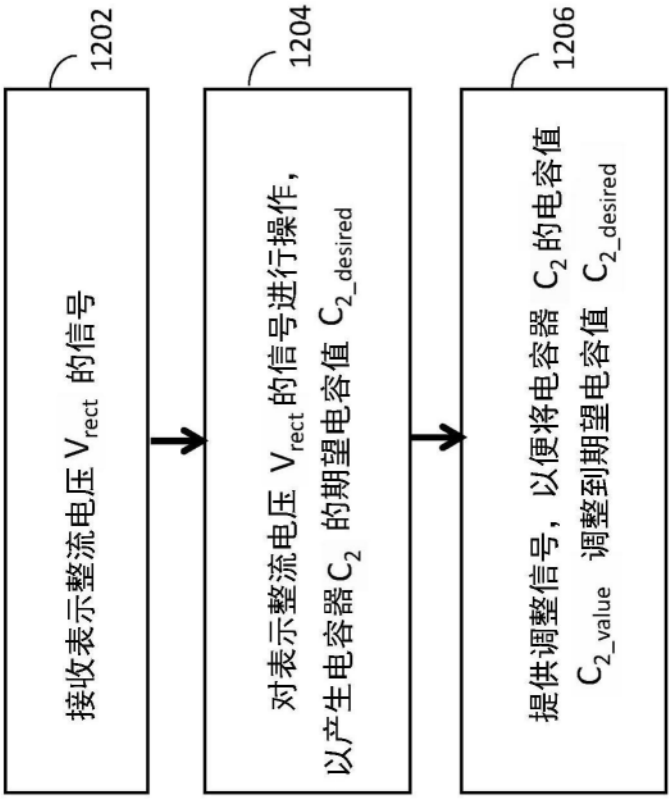

1202
接收表示整流电压 V_{rect} 的信号
1204
对表示整流电压 V_{rect} 的信号进行操作，以产生电容器 C_2 的期望电容值 $C_{2\_desired}$
1206
提供调整信号，以便将电容器 C_2 的电容值 C_{2_value} 调整到期望电容值 $C_{2\_desired}$

图12A

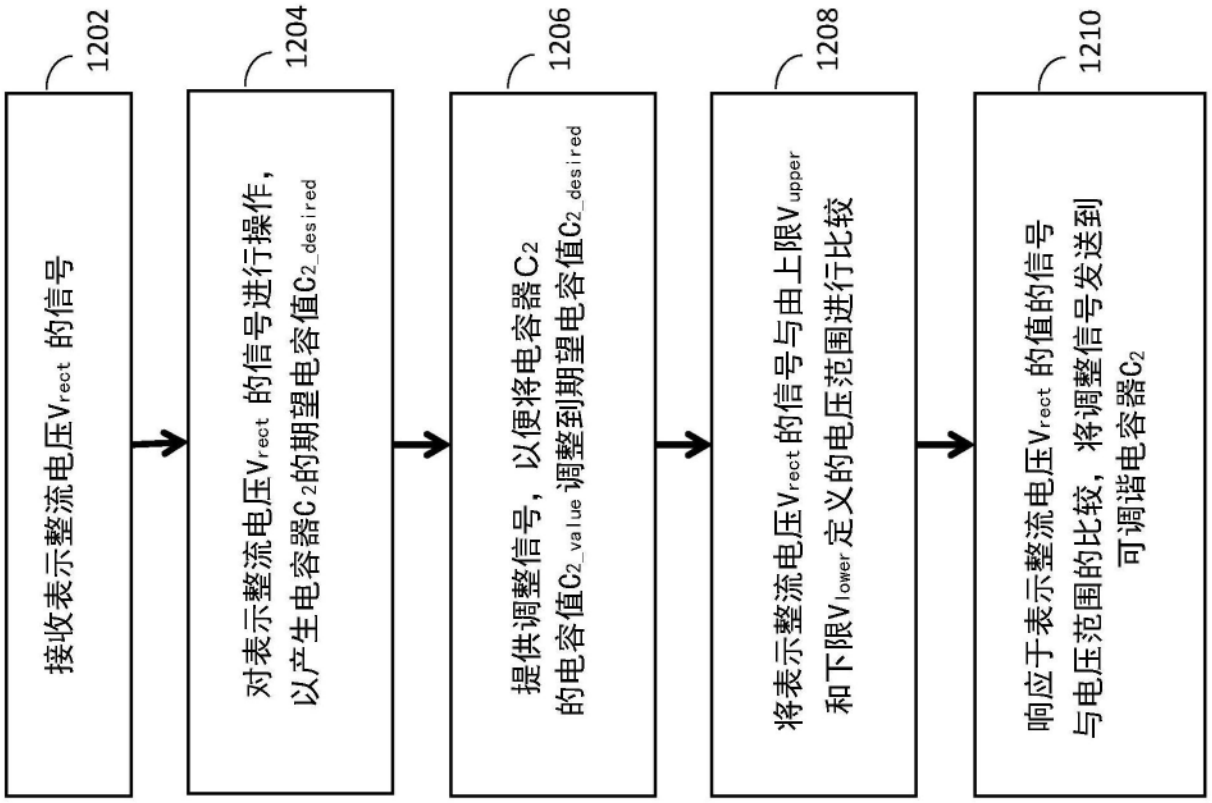

1202
接收表示整流电压V_{rect}的信号
1204
对表示整流电压V_{rect}的信号进行操作，以产生电容器C_2的期望电容值$C_{2_desired}$
1206
提供调整信号，以便将电容器C_2的电容值C_{2_value}调整到期望电容值$C_{2_desired}$
1208
将表示整流电压V_{rect}的信号与由上限V_{upper}和下限V_{lower}定义的电压范围进行比较
1210
响应于表示整流电压V_{rect}的值的信号与电压范围的比较，将调整信号发送到可调谐电容器C_2

图12B

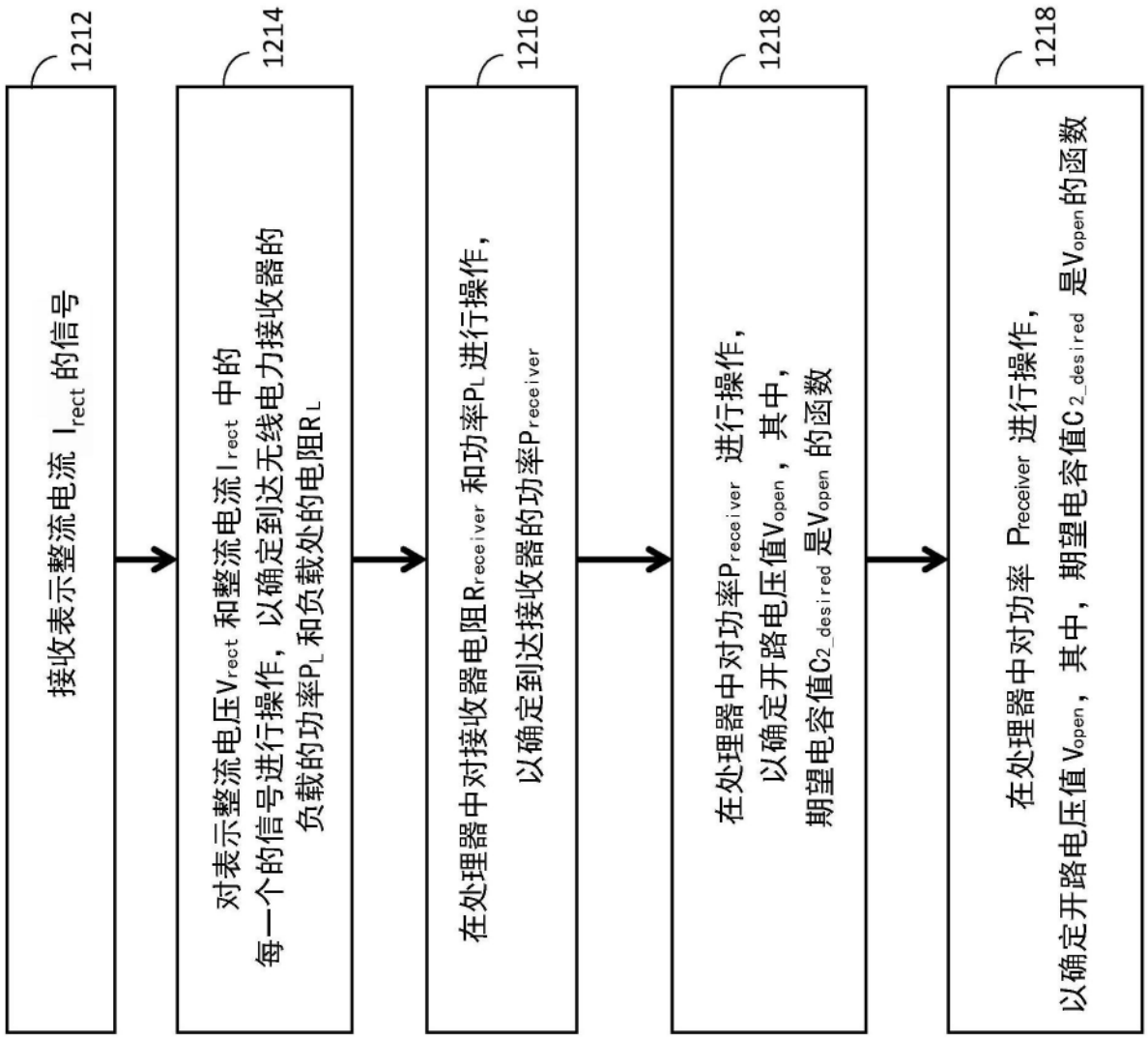

1212
接收表示整流电流 I_{rect} 的信号
1214
对表示整流电压V_{rect} 和整流电流I_{rect} 中的每一个的信号进行操作，以确定到达无线电力接收器的负载的功率P_L 和负载处的电阻R_L
1216
在处理器中对接收器电阻$R_{receiver}$ 和功率P_L 进行操作，以确定到达接收器的功率$P_{receiver}$
1218
在处理器中对功率$P_{receiver}$ 进行操作，以确定开路电压值V_{open}，其中，期望电容值$C_{2_desired}$ 是V_{open} 的函数
1218
在处理器中对功率 $P_{receiver}$ 进行操作，以确定开路电压值 V_{open}，其中，期望电容值$C_{2_desired}$ 是V_{open}的函数

图12C

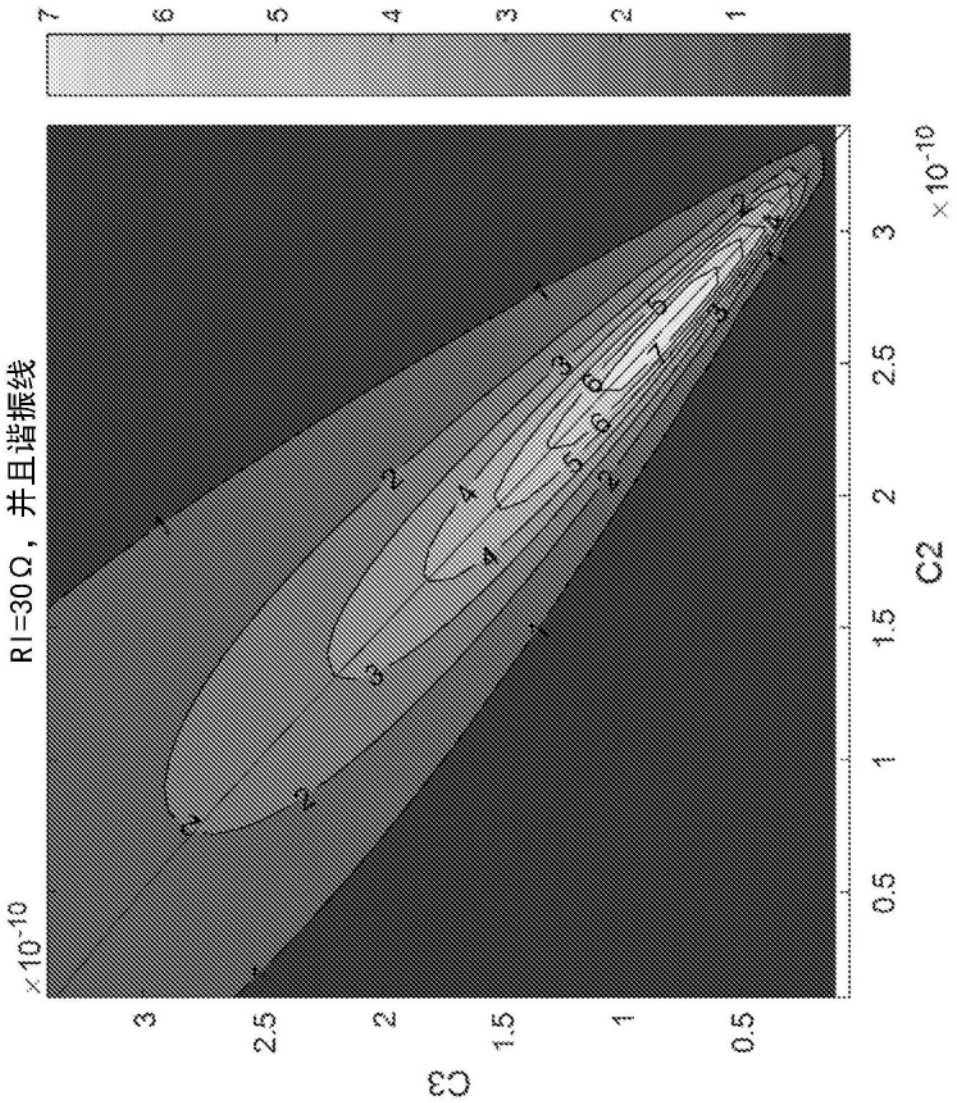


图13

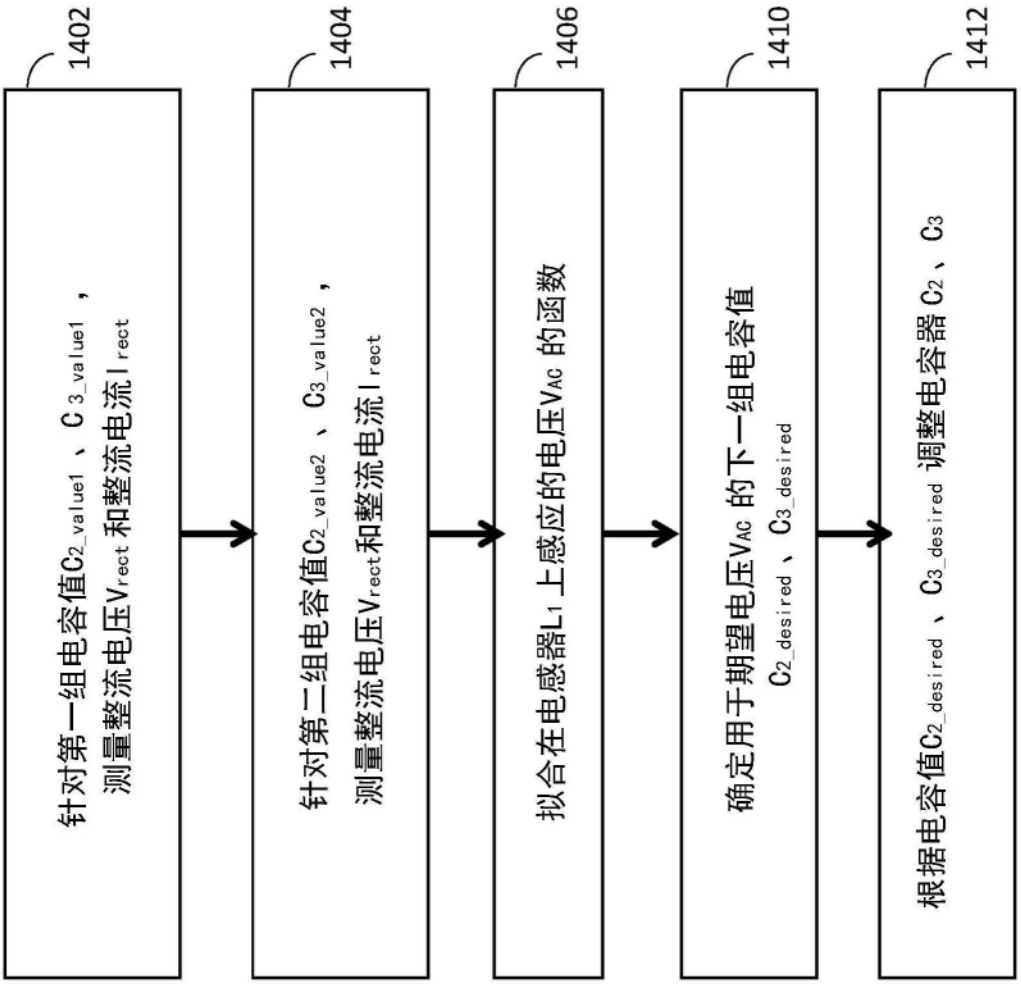

1402
针对第一组电容值C_{2_value1}、C_{3_value1}，测量整流电压V_{rect}和整流电流I_{rect}
1404
针对第二组电容值C_{2_value2}、C_{3_value2}，测量整流电压V_{rect}和整流电流I_{rect}
1406
拟合在电感器L_1上感应的电压V_{AC}的函数
1410
确定用于期望电压V_{AC}的下一组电容值$C_{2_desired}$、$C_{3\_desired}$
1412
根据电容值$C_{2_desired}$、$C_{3_desired}$调整电容器C_2、C_3

图14A

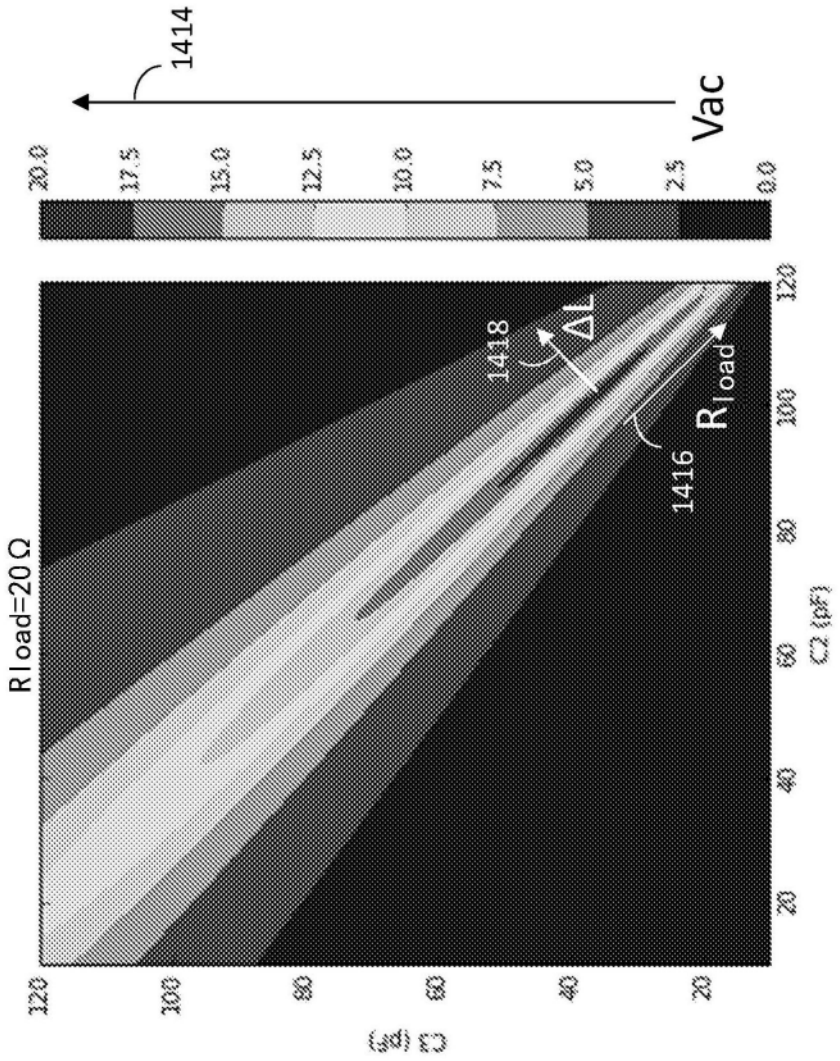

RLoad=20Ω
C3 (pF)
C2 (pF)
1414
Vac
20.0
17.5
15.0
12.5
10.0
7.5
5.0
2.5
0.0
1418
ΔL
1416
RLoad

图14B