



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102883525 A

(43) 申请公布日 2013. 01. 16

(21) 申请号 201210362153. 1

(22) 申请日 2012. 09. 25

(71) 申请人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区北京市
100084-82 信箱

(72) 发明人 陈凯楠 赵争鸣 贺凡波 张艺明

(74) 专利代理机构 北京众合诚成知识产权代理
有限公司 11246

代理人 陈波

(51) Int. Cl.

H05K 1/16 (2006. 01)

H01F 5/00 (2006. 01)

H02J 17/00 (2006. 01)

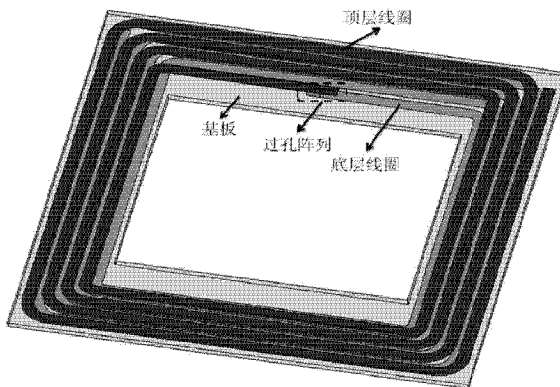
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 2 页

(54) 发明名称

用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈及其设计方法

(57) 摘要

本发明公开了无线能量传输的技术领域的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈及其设计方法。其技术方案是,所述线圈包括基板、顶层线圈、底层线圈和过孔阵列;其中,所述顶层线圈安装在基板的上面;所述底层线圈安装在基板的下面;所述过孔阵列位于基板上,用于连接顶层线圈和底层线圈。同时,本发明还提供了一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈的设计方法。本发明采用 PCB 工艺进行无线能量传输中谐振线圈的制造,保证了线圈自谐振频率的精确性和稳定性;同时使用 PCB 板的上下两层来安放线圈,从而在有限的基板尺寸中获取了更大的电感量,增大了线圈的杂散电容,降低其自谐振频率。



1. 一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈,其特征在于,所述线圈包括基板、顶层线圈、底层线圈和过孔阵列;

其中,所述顶层线圈安装在基板的上面;

所述底层线圈安装在基板的下面;

所述过孔阵列位于基板上,用于连接顶层线圈和底层线圈。

2. 根据权利要求 1 所述的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈,其特征在于,所述顶层线圈和底层线圈采用方形、圆形或多边形结构。

3. 根据权利要求 1 所述的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈,其特征在于,所述顶层线圈以蜗状自外向内盘旋,在最内圈尽头处通过过孔阵列与底层线圈相连,之后底层线圈以蜗状自内向外盘旋。

4. 根据权利要求 1 所述的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈,其特征在于,所述顶层线圈 / 底层线圈的线圈间距满足爬电安全距离;用于防止顶层线圈 / 底层线圈谐振时匝与匝之间所产生的高压造成爬电。

5. 根据权利要求 1 所述的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈,其特征在于,所述线圈采用方形或多边形结构,则顶层线圈和底层线圈采用圆角形式,用于防止顶层线圈和底层线圈拐角处的电荷聚集和尖端放电。

6. 根据权利要求 1 所述的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈,其特征在于,所述基板的材料采用介电损耗角正切值较小的高频板材,用于减小高频下基板所造成的介电损耗。

7. 一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈的设计方法,其特征在于,具体包括以下步骤:

步骤 1:根据实际应用场合,确定出线圈的大小、形状以及结构和电气参数要求;

步骤 2:利用 Ansoft Q3D Extractor 和 Matlab/Simulink 软件对线圈的结构参数进行设计和优化,从而使自谐振频率和品质因数达到设定要求;

步骤 3:根据最终确定的线圈结构参数进行印刷电路板 PCB 的布线和制造。

8. 根据权利要求 7 所述的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈的设计方法,其特征在于,步骤 1 中,确定参数的依据包括:

(1) 根据装置的空间大小确定线圈尺寸;

(2) 根据配套高频电源、电磁兼容环境和传输效率,确定线圈的自谐振频率,即将来传输系统的基准工作频率;

(3) 根据所采用的传输构架以及设定的传输距离和传输效率,经由磁耦合谐振式无线能量传输理论确定线圈的电感量,再结合所确定的线圈尺寸决定其匝数,同时得出线圈的品质因数要求;

(4) 根据装置性能、制造成本等因素,确定 PCB 基板材料,并考虑基板厚度和覆铜厚度。

9. 根据权利要求 7 所述的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈的设计方法,其特征在于,步骤 2 中,利用 Ansoft Q3D Extractor 和 Matlab/Simulink 软件对线圈的结构参数进行设计和优化的具体过程包括以下步骤:

步骤 201:将顶层线圈和底层线圈划分为 n 个单元;

步骤 202:根据杂散参数得出线圈的部分元等效电路模型;所述杂散参数包括各单元

的自感和互感矩阵、各单元间的杂散电容矩阵和各单元的高频等效电阻矩阵；

步骤 203 :用提取电路杂散参数的有限元分析软件 Ansoft Q3D Extractor 软件计算各单元的自感和互感矩阵 L、各单元间的杂散电容矩阵 C 和各单元的高频等效电阻矩阵 R_{wire} ；

步骤 204 :通过计算得到各杂散电容的介电损耗等效电阻 R_{xy} ；

步骤 205 :将步骤 203 和 204 中所得到的参数代入等效电路模型；

步骤 206 :利用仿真软件 Pspice 或 Matlab/Simulink, 仿真得出步骤 205 中等效电路的阻抗频率特性曲线, 据此即得出线圈的自谐振频率点, 将该谐振频率代入步骤 204 中对介电损耗等效电阻进行校正后, 得出准确的阻抗频率特性曲线, 进而确定线圈的品质因数；

步骤 207 :通过调整线圈大小、线圈匝数、导线间距、导线宽度与厚度、基板厚度和基板材料等参数, 并重复步骤 201 到步骤 206, 调整线圈的自谐振频率至所设定数值, 然后通过优化设计提高其品质因数, 最终完成线圈的结构设计。

用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈及其设计方法

技术领域

[0001] 本发明属于无线能量传输的技术领域,尤其涉及一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈及其设计方法。

背景技术

[0002] 磁耦合谐振式无线能量传输技术在近年来发展迅速。与传统的感应式无线能量传输相比,该技术可以在保持 50% 以上传输效率的前提下,将传输距离扩展至 2 ~ 3 倍于线圈直径,且具有更好的电磁兼容性。在该传输系统中,发射线圈和接收线圈为具有相同谐振频率的自谐振线圈,其设计上有以下要求:

[0003] 1. 具有较高的机械稳定性和设计、制造精度,以保证其自谐振频率的精确性;

[0004] 2. 具有一定的杂散电容,以使其自谐振频率不至过高;

[0005] 3. 尽可能的提高其品质因数(Q 值),该参数将极大的影响传输距离和传输效率;

[0006] 4. 在设计阶段能够较为准确的对其特性(包括自谐振频率、品质因数等)进行仿真计算。

[0007] 在近年的研究中,出现了多种谐振线圈的结构,例如:使用铜线或铜带绕制的空心螺旋状或蜗状线圈;忽略其自身杂散电容,而通过串联集中式电容来实现谐振的密绕式线圈;通过串联同轴电缆以增大其杂散电容的线圈;利用印刷电路板(PCB)来制造的平板型蜗状线圈等等。其中基于 PCB 的平板型线圈由于其具有高精度、高稳定性、易于制造、易于与辅助电路集成等优点,尤其适用于诸如个人移动终端、机器人充电、植入式医学设备等各种中小功率场合。

[0008] 当前,虽然国内外均有出现过采用 PCB 谐振线圈的无线能量传输系统,但大都为简单的单层线圈,其电感量和杂散电容均较小,使得自谐振频率过高;且很少对其自谐振频率、品质因数等参数进行系统的设计和优化。对于考虑杂散参数的 PCB 线圈特性分析和设计,当前已有的方法大都针对的是诸如电流互感器、RFID 等其他领域,这些设计方法与思路并不能很好的用于磁耦合谐振式无线能量传输当中。

发明内容

[0009] 针对背景技术中所述的目前在磁耦合谐振式无线能量传输中采用的 PCB 谐振线圈及其参数设计与优化方面存在的问题,本发明提出了一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈及其设计方法。

[0010] 一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈,其特征在于,所述线圈包括基板、顶层线圈、底层线圈和过孔阵列;

[0011] 其中,所述顶层线圈安装在基板的上面;

[0012] 所述底层线圈安装在基板的下面;

[0013] 所述过孔阵列位于基板上,用于连接顶层线圈和底层线圈。

[0014] 所述顶层线圈和底层线圈采用方形、圆形或多边形结构。

[0015] 所述顶层线圈以蜗状自外向内盘旋,在最内圈尽头处通过过孔阵列与底层线圈相连,之后底层线圈以蜗状自内向外盘旋。

[0016] 所述顶层线圈 / 底层线圈的线圈间距满足爬电安全距离 ;用于防止顶层线圈 / 底层线圈谐振时匝与匝之间所产生的高压造成爬电。

[0017] 所述线圈采用方形或多边形结构,则顶层线圈和底层线圈采用圆角形式,用于防止顶层线圈和底层线圈拐角处的电荷聚集和尖端放电。

[0018] 所述基板材料采用介电损耗角正切值较小的高频板材,用于减小高频下基板所造成的介电损耗。

[0019] 一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈的设计方法,其特征在于,具体包括以下步骤:

[0020] 步骤 1 :根据实际应用场合,确定出线圈的大小、形状以及结构和电气参数要求 ;

[0021] 步骤 2 :利用 Ansoft Q3D Extractor 和 Matlab/Simulink 软件对线圈的结构参数进行设计和优化,从而使自谐振频率和品质因数达到设定要求 ;

[0022] 步骤 3 :根据最终确定的线圈结构参数进行印刷电路板 PCB 的布线和制造。

[0023] 步骤 1 中,根据装置的空间大小确定线圈尺寸 ;根据配套高频电源、电磁兼容环境和传输效率,确定线圈的自谐振频率,即将来传输系统的基准工作频率 ;根据所采用的传输构架以及设定的传输距离和传输效率,经由磁耦合谐振式无线能量传输理论确定线圈的电感量,再结合所确定的线圈尺寸决定其匝数,同时得出线圈的品质因数要求 ;根据装置性能、制造成本等因素,确定 PCB 基板材料、基板厚度和覆铜厚度。

[0024] 步骤 2 中,利用 Ansoft Q3D Extractor、Matlab/Simulink 等软件对线圈的结构参数进行设计和优化的具体过程包括以下步骤 :

[0025] 步骤 201 :将顶层线圈和底层线圈划分为 n 个单元 ;

[0026] 步骤 202 :根据杂散参数得出线圈的部分元等效电路模型 ;所述杂散参数包括各单元的自感和互感矩阵、各单元间的杂散电容矩阵和各单元的高频等效电阻矩阵 ;

[0027] 步骤 203 :用提取电路杂散参数的有限元分析软件 Ansoft Q3D Extractor 软件计算各单元的自感和互感矩阵 L、各单元间的杂散电容矩阵 C 和各单元的高频等效电阻矩阵 R_{wire} :

[0028]

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & \cdots & M_{1n} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & \cdots & M_{2n} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & \cdots & M_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & M_{n3} & \cdots & L_n \end{bmatrix}$$

[0029]

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} - & C_{12} & C_{13} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & - & C_{23} & \cdots & C_{2n} \\ C_{31} & C_{32} & - & \cdots & C_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & C_{n3} & \cdots & - \end{bmatrix}$$

[0030]

$$\mathbf{R}_{wire} = \begin{bmatrix} R_1 & & & & \\ & R_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & & R_n \end{bmatrix}$$

[0031] 其中, 设定 x 为行数, y 为列数, 则 L_x 表示各单元的自感、 M_{xy} 表示各单元之间的互感、 C_{xy} 表示各单元之间的杂散电容、 R_x 表示各单元的高频等效电阻, 其中 $x=1, 2, \dots, n$, n 为划分的单元数;

[0032] 步骤 204: 通过计算得到各杂散电容的介电损耗等效电阻:

$$R_{xy} \Big|_{x,y=1,2,\dots,n} = \frac{\tan \delta}{\omega C_{xy}}$$

[0034] 其中 ω 为线圈的自谐振角频率, $\tan \delta$ 为印刷电路板 PCB 基板材料的损耗角正切值, C_{xy} 表示各单元之间的杂散电容;

[0035] 步骤 205: 将步骤 203 和 204 中所得到的参数代入等效电路模型;

[0036] 步骤 206: 利用仿真软件 Pspice 或 Matlab/Simulink, 仿真得出步骤 205 中等效电路的阻抗频率特性曲线, 据此即得出线圈的自谐振频率点, 将该谐振频率代入步骤 204 中对介电损耗等效电阻进行校正后, 得出准确的阻抗频率特性曲线, 进而确定线圈的品质因数;

[0037] 步骤 207: 通过调整线圈大小、线圈匝数、导线间距、导线宽度与厚度、基板厚度和基板材料等参数, 并重复步骤 201 到步骤 206, 调整线圈的自谐振频率至所设定数值, 然后通过优化设计提高其品质因数, 最终完成线圈的结构设计。

[0038] 本发明的有益效果是:

[0039] 1、采用 PCB 工艺进行无线能量传输中谐振线圈的制造, 保证了线圈自谐振频率的精确性和稳定性, 从而有效避免了传输系统因线圈结构不稳定而脱离谐振状态;

[0040] 2、同时使用 PCB 板的上下两层来安放线圈, 从而在有限的基板尺寸中获取了更大的电感量, 并且充分利用上下两层正对线圈的平板电容效应, 增大了线圈的杂散电容, 降低其自谐振频率, 从而减小了前端电源的设计难度;

[0041] 3、利用简化的部分单元等效电路方法以及有限元分析方法对线圈进行建模计算, 从而在设计阶段即可仿真得出较为准确的线圈阻抗频率特性, 为其自谐振频率的确定和品质因数的优化提供了依据。

附图说明

[0042] 图 1 是本发明提供的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈的结构示意图；

[0043] 图 2 是本发明提供的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈的单元划分示意图；

[0044] 图 3 是本发明提供的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈的部分元等效电路模型(互感未标出)。

具体实施方式

[0045] 下面结合附图,对优选实施例作详细说明。应该强调的是下述说明仅仅是示例性的,而不是为了限制本发明的范围及其应用。

[0046] 图 1 是本发明提供的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈的结构示意图。图 1 中,所述线圈包括基板、顶层线圈、底层线圈和过孔阵列；

[0047] 其中,所述顶层线圈安装在基板的上面;所述底层线圈安装在基板的下面;所述过孔阵列位于基板上,用于连接顶层线圈和底层线圈;所述顶层线圈和底层线圈采用方形、圆形或多边形结构(图 1 以方形线圈为例)。所述顶层线圈以蜗状自外向内盘旋,在最内圈尽头处通过过孔阵列与底层线圈相连,之后底层线圈以蜗状自内向外盘旋。所述顶层线圈/底层线圈的线圈间距满足爬电安全距离;用于防止顶层线圈/底层线圈谐振时匝与匝之间所产生的高压造成爬电。所述顶层线圈和底层线圈采用圆角形式,用于防止方形线圈四角的电荷聚集和尖端放电。所述基板的材料采用介电损耗角正切值较小的高频板材,用于减小高频下基板所造成的介电损耗。

[0048] 图 2 是本发明提供的一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈的单元划分示意图。结合一种用于无线能量传输的双层蜗状 PCB 线圈的设计方法进行进一步说明：

[0049] 步骤 1:根据实际应用场合,确定出线圈的大小、形状以及结构和电气参数要求；

[0050] 步骤 2:利用 Ansoft Q3D Extractor 和 Matlab/Simulink 软件对线圈的结构参数进行设计和优化,从而使自谐振频率和品质因数达到设定要求；

[0051] 步骤 3:根据最终确定的线圈结构参数进行 PCB 的布线和制造。

[0052] 步骤 1 中,根据装置的空间大小确定线圈尺寸;根据配套高频电源、电磁兼容环境和传输效率,确定线圈的自谐振频率,即将来传输系统的基准工作频率;根据所采用的传输构架以及设定的传输距离和传输效率,经由磁耦合谐振式无线能量传输理论确定线圈的电感量,再结合所确定的线圈尺寸决定其匝数,同时得出线圈的品质因数要求;根据装置性能、制造成本等因素,确定 PCB 基板材料,并考虑基板厚度和覆铜厚度。

[0053] 步骤 2 中,利用 Ansoft Q3D Extractor 和 Matlab/Simulink 软件对线圈的结构参数进行设计和优化的具体过程包括以下步骤：

[0054] 步骤 201:将线圈划分为若干个单元,每匝将被划分为 1 个单元,以 8 单元为例,如图 2 所示,其中过孔阵列处亦作为分割点之一；

[0055] 步骤 202:考虑杂散参数:各单元的自感、各单元之间的互感、各单元之间的杂散电容、各单元的高频等效电阻和各杂散电容的介电损耗等效电阻,依此得出线圈的部分元等效电路模型如图 3 所示(未标出各单元之间的互感)；

[0056] 步骤 203:利用 Ansoft Q3D Extractor 软件可计算出：

[0057] 各单元的自感和互感矩阵： $\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & \cdots & M_{18} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & \cdots & M_{28} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & \cdots & M_{38} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{81} & M_{82} & M_{83} & \cdots & L_8 \end{bmatrix}$

[0058] 各单元间的杂散电容矩阵： $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} - & C_{12} & C_{13} & \cdots & C_{18} \\ C_{21} & - & C_{23} & \cdots & C_{28} \\ C_{31} & C_{32} & - & \cdots & C_{38} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{81} & C_{82} & C_{83} & \cdots & - \end{bmatrix}$

[0059] 各单元的高频等效电阻矩阵： $\mathbf{R}_{wire} = \begin{bmatrix} R_1 & & & & \\ & R_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & & R_8 \end{bmatrix}$

[0060] 步骤 204：通过计算得到各杂散电容的介电损耗等效电阻：

[0061] $R_{xy} \Big|_{x,y=1,2,\dots,8} = \frac{\tan \delta}{\omega C_{xy}}$

[0062] 其中，设定 x 为矩阵行数， y 为列数， ω 为线圈的自谐振角频率， $\tan \delta$ 为 PCB 基板材料的损耗角正切值； C_{xy} 表示各单元之间的杂散电容；

[0063] 步骤 205：将步骤 3 和 4 中所得到的参数代入图 3 所示的等效电路模型；其等效电路如图 3 所示；

[0064] 步骤 206：利用 Pspice、Matlab/Simulink 等仿真软件，得出步骤 205 中等效电路的阻抗频率特性曲线，据此即得出线圈的自谐振频率点，将该谐振频率代入步骤 204 中对介电损耗等效电阻进行校正后，得出更为准确的阻抗频率特性曲线，进而确定线圈的品质因数；

[0065] 步骤 207：通过调整线圈大小、线圈匝数、导线间距、导线宽度与厚度、基板厚度和基板材料等参数，并重复步骤 201 到步骤 206，调整线圈的自谐振频率至所设定数值，然后通过优化设计提高其品质因数，最终完成线圈的结构设计。

[0066] 步骤 3 中，根据最终确定的线圈结构参数进行 PCB 的布线和制造。

[0067] 对于步骤 2 中所提供的线圈阻抗特性计算方法，其准确性可通过仿真值与实际测量值的对比来验证。在此处所用实施例，线圈结构如图 1 所示，其具体结构参数见表 1。表 2 所示为该线圈自谐振频率与品质因数仿真值和实测值的对比，其精度明显高于现有相关文献中的水平。

[0068] 表 1 示例线圈的结构参数

[0069]

参数名称	数值
基板边长	300mm

线圈最外圈边长	288mm
导线宽度	8mm
导线厚度	3oz(0.105mm)
导线中心线间距	11mm
每层匝数	3.875
基板厚度	4mm
基板材料介电常数	2.1
基板材料介电损耗正切值	<0.0007

[0070] 表 2 示例线圈自谐振频率与品质因数的仿真值和实测值对比

	仿真值	实测值	相对误差
[0071] 自谐振频率	3.93MHz	4.03MHz	-2.48%
品质因数	420.4	418.8	0.38%

[0072] 以上所述,仅为本发明较佳的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

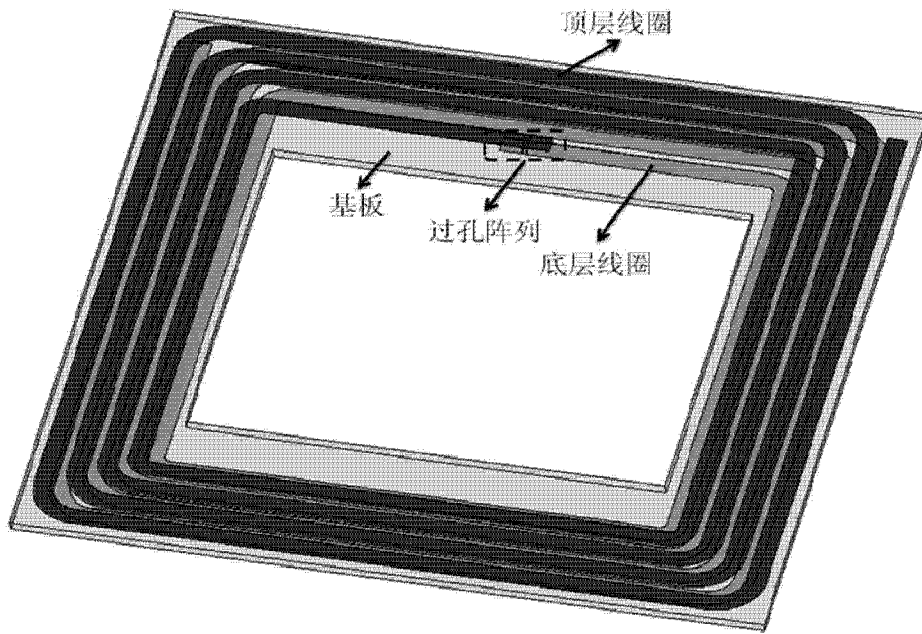


图 1

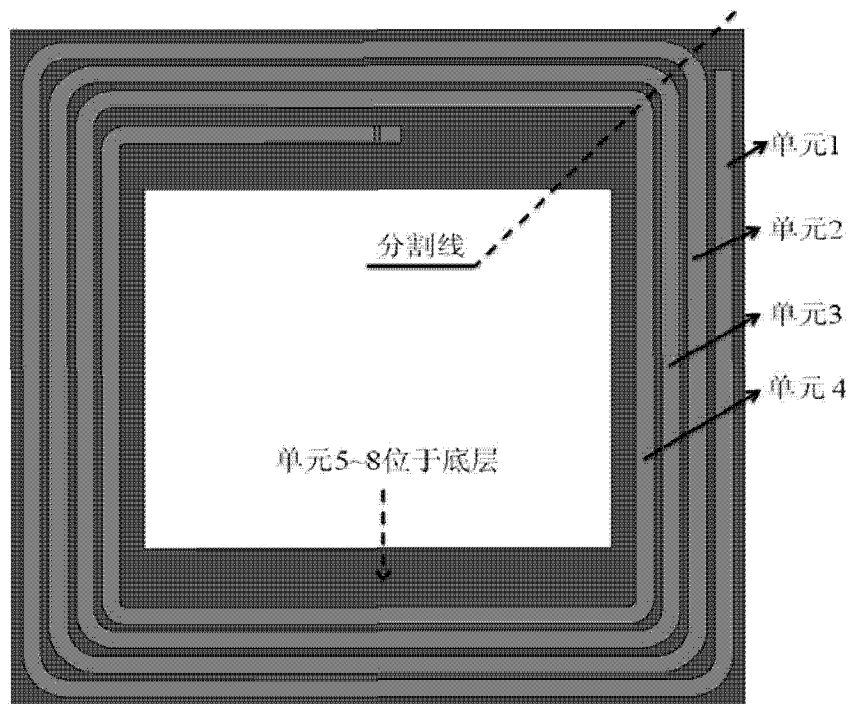


图 2

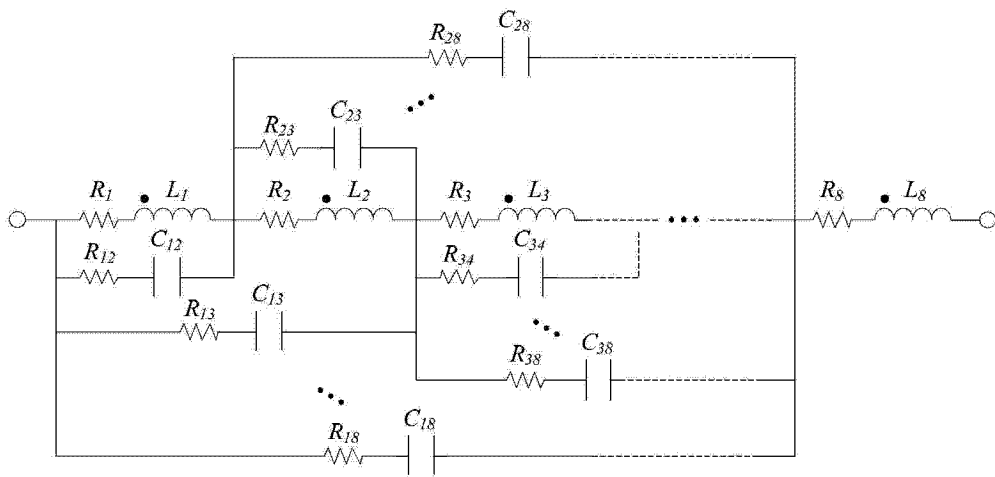


图 3