



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103414261 B

(45) 授权公告日 2015.06.24

(21) 申请号 201310401679.0

(22) 申请日 2013.09.06

(73) 专利权人 中国矿业大学(北京)

地址 100083 北京市学院路丁 11 号中国矿业大学(北京)

(72) 发明人 田子建 林越

(51) Int. Cl.

H02J 17/00(2006.01)

审查员 李永亮

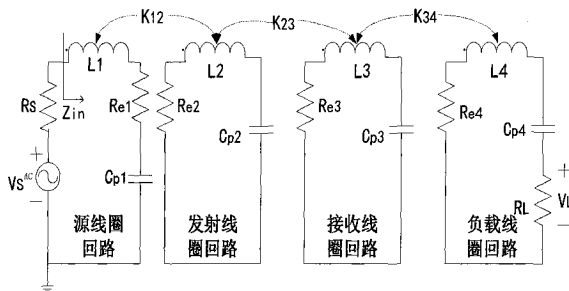
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

变耦合系数磁共振无线电能传输系统及方法

(57) 摘要

本发明公开了磁耦合共振无线电能传输技术领域一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统及方法,主要解决了磁共振无线电能传输系统随着传输距离的增加而传输效率急剧下降的问题,该方法通过同时调整源线圈和发射线圈、接收线圈和负载线圈的距离,使得磁共振无线电能传输系统满足临界耦合条件等式,工作在临界耦合状态。本发明准确地得出了系统处于临界耦合状态所需满足的条件,从而使得磁共振无线电能传输系统始终工作在效率高的模式。



1. 一种变耦合系数磁共振无线电能传输方法,所述变耦合系数磁共振无线电能传输方法采用的变耦合系数磁共振无线电能传输系统包括外加激励源高频信号发生器、阻抗匹配网络、源线圈、发射线圈以及接收线圈、负载线圈和负载设备,其特征在于:

所述方法包括以下步骤:

A:确定所述变耦合系数磁共振无线电能传输系统的无线能量传输距离 d_{23} ,即发射线圈和接收线圈的间距;

B:根据步骤 A 所述无线能量传输距离 d_{23} ,利用公式 $k_{23} = \frac{M_{23}}{\sqrt{L_2 L_3}}$ 和

$$M_{23} = \frac{u_0 N_2 N_3}{4\pi} \oint_{O_2} \oint_{O_3} \frac{dl_2 dl_3}{|d_{23}|} \text{ 计算所述系统发射线圈和接收线圈的耦合系数 } k_{23};$$

其中, M_{23} 是发射线圈和接收线圈的互感系数; L_2 、 L_3 为发射线圈和接收线圈的电感,是可通过仪器直接测量的已知量; u_0 为真空磁导率, $u_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利/米; N_2 、 N_3 为发射线圈和接收线圈的匝数; O_2 、 O_3 是发射线圈和接收线圈的导线回路, O_2 、 O_3 与 N_2 、 N_3 均为已知量; dl_2 、 dl_3 分别是发射线圈和接收线圈上的一个微元; d_{23} 是发射线圈和接收线圈的间距;

C:利用公式 $k_{23}^2 Q_2^2 = 1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2$ 计算在临界耦合状态时,所述系统源线圈和发射线圈的耦合系数 k_{12} ;

其中, k_{12} 是源线圈和发射线圈之间的耦合系数; k_{23} 是发射线圈和接收线圈之间的耦合系数; Q_1 、 Q_2 分别是源线圈和发射线圈的品质因数,是可通过仪器间接测量的已知量;

D:将所述系统源线圈和发射线圈的耦合系数调节至 k_{12} ,具体调节过程如下:

步骤 1,根据计算所得耦合系数 k_{12} ,利用公式 $k_{12} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$ 和

$$M_{12} = \frac{u_0 N_1 N_2}{4\pi} \oint_{O_1} \oint_{O_2} \frac{dl_1 dl_2}{|d_{12}|} \text{ 计算源线圈和发射线圈的间距 } d_{12}; \text{ 其中, } M_{12} \text{ 是源线圈和发射线圈的互感系数, } L_1、L_2 \text{ 为源线圈和发射线圈的电感,是可通过仪器直接测量的已知量, } u_0 \text{ 为真空磁导率, } u_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ 亨利/米, } N_1、N_2 \text{ 为源线圈和发射线圈的匝数, } O_1、O_2 \text{ 是源线圈和发射线圈的导线回路, } O_1、O_2 \text{ 与 } N_1、N_2 \text{ 均为已知量, } dl_1、dl_2 \text{ 分别是源线圈和发射线圈上的一个微元, } d_{12} \text{ 是源线圈和发射线圈的间距;}$$

步骤 2,调节源线圈和发射线圈的间距至 d_{12} ,至此源线圈和发射线圈的耦合系数已调节至 k_{12} ;

步骤 3,调节接收线圈和负载线圈的间距 d_{34} 至与 d_{12} 相等,所述系统工作在临界耦合状态。

2. 一种采用如权利要求 1 所述方法的变耦合系数磁共振无线电能传输系统,其特征在于,包括一个发射机和一个接收机;所述发射机包括高频信号发生器、阻抗匹配网络、源线圈和发射线圈,所述高频信号发生器输出额定功率的高频信号;

所述源线圈一侧通过阻抗匹配网络连接到高频信号发生器,另一侧与所述发射线圈利用电磁感应组成一个升压变压器网络;

所述接收机包括接收线圈和负载线圈,所述接收线圈与负载线圈利用电磁感应组成一个降压变压器网络。

3. 根据权利要求 2 所述一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统,其特征在于,所述阻抗匹配网络是无源匹配网络,由电容和电感组成。

4. 根据权利要求 2 所述一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统,其特征在于,所述阻抗匹配网络是有源匹配网络,由有源、无源器件组成的源极跟随器、射极跟随器和缓冲器构成。

5. 根据权利要求 2 所述一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统,其特征在于,所述负载线圈串联一个与阻抗匹配网络中大小相等的匹配电容,并直接连接交流负载设备。

6. 根据权利要求 2 所述一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统,所述负载线圈通过一个整流电路供给直流负载设备或电路;所述整流电路包括半波整流、全波整流和桥式整流。

7. 根据权利要求 2 所述一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统,其特征在于,所述发射线圈和接收线圈利用其自身在高频下的等效电阻、寄生电容和自身电感组成谐振电路,发射线圈和接收线圈具有相同的谐振频率;

所述源线圈和发射线圈的间距与接收线圈和负载线圈的间距始终是保持相等的,源线圈和负载线圈的电参数相同,发射线圈和接收线圈也具有相同的电参数。

8. 根据权利要求 7 所述一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统,其特征在于,所述电参数包括线圈的电感、高频寄生电容、等效电阻和空载品质因数。

9. 根据权利要求 7 所述一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统,其特征在于,所有线圈均由铜线绕制,对齐在同轴方向,源线圈和发射线圈的间距、发射线圈和接收线圈间距、接收线圈和负载线圈的间距是可调的;

所述发射线圈通过电磁感应从源线圈处得到高频信号发生器所发出的高频振荡信号,再以非辐射近场电磁波的形式发送出去,所述接收线圈通过线圈间的磁耦合共振收到发射线圈传送的高频振荡信号,再经过电磁感应将能量供给负载线圈。

10. 根据权利要求 9 所述一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统,其特征在于,随着发射线圈和接收线圈间距,即传输距离的变化,当所述系统偏离临界耦合状态时,同时调节发射机和接收机的耦合系数,从而改变它们的耦合系数,系统满足临界耦合条件,工作在临界耦合状态。

11. 根据权利要求 10 所述一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统,其特征在于,所述耦合系数的调节是通过同时调节源线圈和发射线圈的间距 d_{12} 、接收线圈和负载线圈的间距 d_{34} 来实现的,并保持两个间距相等,即 $d_{12} = d_{34}$ 。

12. 根据权利要求 10 所述一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统,其特征在于,所述系统中不相邻线圈之间没有磁耦合,所述系统中源线圈和负载线圈都是单匝线圈,发射线圈和接收线圈是有相同匝数的多匝线圈。

变耦合系数磁共振无线电能传输系统及方法

技术领域

[0001] 本发明属于磁耦合共振无线电能传输技术领域,涉及一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统,尤其涉及一种通过改变磁耦合共振无线电能传输系统发射机和接收机的耦合系数来提高传输效率和距离的方法。

背景技术

[0002] 自尼古拉·特斯拉在一个世纪以前提出无线电能传输理论之后,无线电能传输就一直是人们研究的热点。多年来国内外专家一直在进行无线电能传输的研究,但一直以来科研进展缓慢,直到2007年6月,麻省理工学院(MIT)物理教授Marin Soljacic及其小组成员提出一种基于强磁耦合磁共振的全新方案,实验中使用两个直径为60cm、由铜线绕制的线圈,并使线圈的固有谐振频率处于9.9MHz,利用磁耦合共振原理成功点亮了一个离电源约2m的60W电灯泡,后来这项技术被称为WiTricity,至此,开辟了无线电能传输技术的研究盛况。为了使无线电能传输技术尽快得到应用,2010年9月1日,全球首个推动无线充电技术的标准化组织——无线充电联盟(Wireless Power Consortium, WPC)在北京宣布将Qi无线充电国际标准率先引入中国,信息产业部通信电磁兼容质量监督中心也加入该组织,其中深圳桑菲消费通信有限公司是Qi标准的支持者,也是该联盟常务理事成员中唯一一家中国企业。

[0003] 目前国内外无线电能传输的实现有三种方式:

[0004] 1. 电磁感应式——类似于松耦合变压器,通过初级和次级线圈的电磁感应产生电流,从而将能量从发射端输送到接收端,适合效率较高的近距离传输。

[0005] 2. 电磁辐射式——其基本原理类似于早期使用的矿石收音机,目前已有相对成熟的理论,作用范围广、传送功率大,但对生物环境影响较大且效率低下。

[0006] 3. 磁耦合共振式——麻省理工学院Marin Soljacic及其小组成员提出的全新方案,其原理是利用磁场的非辐射近场耦合来传递能量,在很大程度上减小了对人体的伤害,延长了无线电能传输的距离,此方式传输效率高、距离远、功率大,是未来无线电能传输发展的主流方向。

[0007] 磁耦合共振无线电能传输系统,是通过两个结构对称的线圈间磁耦合共振来传递能量的,耦合系数对系统的传输效率有着重要影响。依据耦合系数的大小,磁耦合共振无线电能传输系统可分为三种工作区域:强耦合、临界耦合、弱耦合。

[0008] 研究发现当无线电能传输系统处于强耦合区域时,系统的传输效率在谐振频率两侧取得最大值,即出现频率分裂,随着传输距离的增加,耦合系数减小,频率分裂现象逐渐消失,当耦合系数满足临界耦合条件时,系统的传输效率在谐振频率处取得最大值,随着耦合系数进一步减小达到弱耦合区域时,系统的传输效率随耦合系数的减小而急剧下降,但系统最佳的传输状态始终是在谐振频率处。

[0009] 因此无线电能传输系统的传输效率并非在谐振频率下一直处于最大值,而是在临界耦合状态处具有最大的传输效率和最优的传输距离。

[0010] 综上所述,磁耦合共振无线电能传输系统的最佳工作状态是系统始终处于临界耦合状态,这样系统就可以在谐振频率处获得最大的传输效率和最优的传输距离。但是临界耦合状态所对应的传输距离是确定的,这就使得系统不可能始终处于临界耦合状态,而传输距离对耦合系数有着很明显的调节作用,随着传输距离的增加,引起耦合系数的减小,最终导致的系统传输效率急剧下降,严重阻碍了无线电能传输系统的普及和应用,为此,我们必须找到一种技术方法来实现上述方案——让系统始终处于临界耦合状态,以获取最大的传输效率和最优的传输距离。

发明内容

[0011] 技术问题:本发明的目的在于针对磁耦合共振无线电能传输系统随着传输距离的增加,耦合系数的减小而导致系统传输效率急剧下降的问题,并考虑到系统在临界耦合处取得最大的传输效率和最优的传输距离,提出的一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统及方法。该系统及方法是通过同时调节系统发射机和接收机的耦合系数,使得系统始终处于临界耦合状态,具有最大的传输效率和最优的传输距离,同时本发明可以显著提高无线电能传输的距离和效率,可以很好地满足设备对无线电能传输系统效率和距离的要求。

[0012] 为实现上述目标,本发明采用以下技术方案:

[0013] 本发明所述一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统,包括一个发射机和一个接收机。

[0014] 所述发射机包括高频信号发生器、阻抗匹配网络、源线圈和发射线圈,所述高频信号发生器输出额定功率的高频信号。

[0015] 所述源线圈一侧通过阻抗匹配网络连接到高频信号发生器,另一侧与所述发射线圈利用电磁感应组成一个升压变压器网络。

[0016] 所述阻抗匹配网络是无源匹配网络,由电容和电感组成;或是有源匹配网络,由有源、无源器件组成的源极跟随器、射极跟随器和缓冲器构成。

[0017] 所述接收机包括接收线圈和负载线圈,所述接收线圈与负载线圈利用电磁感应组成一个降压变压器网络。

[0018] 所述负载线圈串联一个与阻抗匹配网络中大小相等的匹配电容,并直接连接交流负载设备,或是通过一个整流电路供给直流负载设备或电路;所述整流电路包括半波整流、全波整流和桥式整流。

[0019] 所述发射线圈和接收线圈利用其自身在高频下的等效电阻、寄生电容和自身电感组成谐振电路,发射线圈和接收线圈具有相同的谐振频率。

[0020] 所述源线圈和发射线圈的间距与接收线圈和负载线圈的间距始终是保持相等的,源线圈和负载线圈的电参数相同,发射线圈和接收线圈也具有相同的电参数,即线圈的电感、高频寄生电容、等效电阻和空载品质因数都是相同的,同时发射线圈和接收线圈具有相同的谐振频率。

[0021] 所述发射线圈通过电磁感应从源线圈处得到高频信号发生器所发出的高频振荡信号,再以非辐射近场电磁波的形式发送出去,所述接收线圈通过线圈间的磁耦合共振收到发射线圈传送的高频振荡信号,再经过电磁感应将能量供给负载线圈。

[0022] 所有线圈均由铜线绕制,对齐在同轴方向,源线圈和发射线圈的间距、发射线圈和

接收线圈间距、接收线圈和负载线圈的间距是可调的,随着发射线圈和接收线圈间距,即传输距离的变化,当所述系统偏离临界耦合状态时,同时调节发射机和接收机的耦合系数,即是同时调节源线圈和发射线圈的间距、接收线圈和负载线圈的间距,并保持两个间距相等,从而改变它们的耦合系数,系统满足临界耦合条件,工作在临界耦合状态。

[0023] 本发明所述变耦合系数磁共振无线电能传输系统中,不相邻线圈之间没有磁耦合,所述系统中源线圈和负载线圈都是单匝线圈,发射线圈和接收线圈是有相同匝数的多匝线圈。

[0024] 所述变耦合系数磁共振无线电能传输系统包括外加激励源高频信号发生器、阻抗匹配网络、源线圈、发射线圈以及接收线圈、负载线圈和负载设备组成,所述变耦合系数磁共振无线电能传输系统的方法,包括以下步骤:

[0025] 步骤 A:确定所述变耦合系数磁共振无线电能传输系统的无线能量传输距离 d_{23} ,即发射线圈和接收线圈的间距;

[0026] 步骤 B:根据步骤 A 所述无线能量传输距离 d_{23} ,利用公式 $k_{23} = \frac{M_{23}}{\sqrt{L_2 L_3}}$ 和

$$M_{23} = \frac{\mu_0 N_2 N_3}{4\pi} \oint_{O_2} \oint_{O_3} \frac{dl_2 dl_3}{|d_{23}|}$$

计算所述系统发射线圈和接收线圈的耦合系数 k_{23} ;其中, M_{23} 是发射线圈和接收线圈的互感系数, L_2 、 L_3 为发射线圈和接收线圈的电感,是可通过仪器直接测量的已知量, μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利 / 米, N_2 、 N_3 为发射线圈和接收线圈的匝数, O_2 、 O_3 是发射线圈和接收线圈的导线回路, O_2 、 O_3 与 N_2 、 N_3 均为已知量, dl_2 、 dl_3 分别是发射线圈和接收线圈上的一个微元, d_{23} 是发射线圈和接收线圈的间距;

[0027] 步骤 C:利用公式 $k_{23}^2 Q_1^2 = 1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2$ 计算在临界耦合状态时,所述系统源线圈和发射线圈的耦合系数 k_{12} ;其中, k_{12} 是源线圈和发射线圈之间的耦合系数, k_{23} 是发射线圈和接收线圈之间的耦合系数, Q_1 、 Q_2 分别是源线圈和发射线圈的品质因数,是可通过仪器间接测量的已知量;

$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{R_{e1} + R_s}$,其中, ω_0 是外加激励源高频信号发生器所产生信号的角频率, L_1 是源线圈的电感值, R_{e1} 是源线圈在高频下的等效电阻, R_s 是外加激励源高频信号发生器的内阻; $Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{R_{e2}}$,其中, ω_0 是高频信号发生器所产生信号的角频率, L_2 是发射线圈的电感值, R_{e2} 是发射线圈在高频下的等效电阻;

[0028] 步骤 D:将所述系统源线圈和发射线圈的耦合系数调节至 k_{12} 。

[0029] 根据上述所述步骤,步骤 D 具体包括下列步骤:

[0030] 步骤 1:根据计算所得耦合系数 k_{12} ,利用公式 $k_{12} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$ 和

$$M_{12} = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{4\pi} \oint_{O_1} \oint_{O_2} \frac{dl_1 dl_2}{|d_{12}|}$$

计算源线圈和发射线圈的间距 d_{12} ;其中, M_{12} 是源线圈和发射线圈的互感系数, L_1 、 L_2 为源线圈和发射线圈的电感,是可通过仪器直接测量的已知量, μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利 / 米, N_1 、 N_2 为源线圈和发射线圈的匝数, O_1 、 O_2 是源线圈和发射线圈的导线回路, O_1 、 O_2 与 N_1 、 N_2 均为已知量, dl_1 、 dl_2 分别是源线圈和发射线圈上的一个微元, d_{12} 是源线圈和发射线圈的间距;

[0031] 步骤 2:调节源线圈和发射线圈的间距至 d_{12} ,至此源线圈和发射线圈的耦合系数

已调节至 k_{12} ;

[0032] 步骤 3:调节接收线圈和负载线圈的间距 d_{34} 至与 d_{12} 相等,所述系统工作在临界耦合状态。

[0033] 本发明的有益效果是:

[0034] 1. 本发明提供的方法,可以使磁耦合共振无线电能传输系统始终工作在临界耦合状态,确保所述系统的传输效率始终取得最大值、传输距离达到最优。

[0035] 2. 与现有技术相比,所述系统始终工作在临界耦合状态,使得传输效率和传输距离都有明显的提高,进一步解决了系统传输效率受传输距离制约的问题,提高了电能的利用效率。

附图说明

[0036] 图 1 是本发明的变耦合系数磁共振无线电能传输的系统示意图;

[0037] 图 2 是本发明的变耦合系数磁共振无线电能传输系统的等效电路模型图;

[0038] 图 3 是本发明的变耦合系数磁共振无线电能传输系统示例实物图;

[0039] 图 4 是本发明的变耦合系数磁共振无线电能传输系统与现有技术的传输效率对比图;

具体实施方式

[0040] 为了使本发明技术方案的内容和优势更加清楚明了,以下结合附图,对本发明的变耦合系数磁共振无线电能传输系统及方法进行进一步的详细说明。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。

[0041] 下面结合附图,详细说明本发明的变耦合系数磁共振无线电能传输系统及方法的实现过程。

[0042] 图 1 是本发明的变耦合系数磁共振无线电能传输的系统示意图。

[0043] 如图 1 所示,本发明的变耦合系数磁共振无线电能传输系统包括高频信号发生器、阻抗匹配网络、源线圈、发射线圈、接收线圈、负载线圈以及负载设备。

[0044] 高频信号发生器发出高频信号脉冲,经过阻抗匹配网络将能量信号传给源线圈,所述系统的能量发射线圈利用电磁感应从源线圈处得到高频信号发生器所发出的高频振荡信号,再以非辐射近场电磁波的形式传送出去。所述系统的能量接收线圈通过线圈间的磁耦合共振收到发射线圈传送的高频振荡信号,再通过电磁感应将能量供给负载线圈以及负载设备,源线圈和负载线圈都是单匝线圈,发射线圈和接收线圈是有相同匝数的多匝线圈,发射线圈和接收线圈的距离为所述系统的传输距离。

[0045] 所有线圈均由铜线绕制,对齐在同轴方向,随着传输距离由小到大逐渐增加,系统传输功率的最大值点由 2 个逐渐合并为 1 个,即是系统工作状态由强耦合到临界耦合,再到弱耦合的变化过程。

[0046] 图 2 是本发明的变耦合系数磁共振无线电能传输系统的等效电路模型图。

[0047] 如图 2 所示,本发明的磁耦合共振无线电能传输系统的等效电路模型共有四个线圈回路:源线圈回路、发射线圈回路、接收线圈回路、负载线圈回路, L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 分别为源线圈、发射线圈、接收线圈和负载线圈的电感, R_{e1} 、 R_{e2} 、 R_{e3} 、 R_{e4} 分别为源线圈、发射线圈、接收线

圈和负载线圈在高频下的等效电阻, C_{p1} 是源线圈在高频下的寄生电容和阻抗匹配网络中的匹配电容之和, C_{p2} 、 C_{p3} 分别是发射线圈和接收线圈在高频下的寄生电容, C_{p4} 是负载线圈在高频下的寄生电容和与其串联的匹配电容之和, V_S 是高频信号发生器的输出电压, V_L 是负载电压, R_S 、 R_L 分别是高频信号发生器的内阻和负载电阻; k_{12} 是源线圈和发射线圈之间的耦合系数, k_{23} 是发射线圈和接收线圈之间的耦合系数, k_{34} 是接收线圈和负载线圈之间的耦合系数。

[0048] 对本发明的磁耦合共振无线电能传输的等效电路模型分析步骤如下:

[0049] 1. 对所述系统的等效电路进行分析, 得到如下所述等式:

$$[0050] \quad \begin{bmatrix} V_S \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}$$

[0051] V_S 是高频信号发生器的输出电压, Z_{ii} 为回路阻抗, Z_{ij} 是相邻回路间耦合阻抗, I_i 是回路电流, $i, j=1, 2, 3, 4$, 分别对应源线圈回路、发射线圈回路、接收线圈回路、负载线圈回路。

[0052] 2. 对所述步骤 1 中行列式求解 I_1 、 I_4 , 可得系统的输入输出电压比 $\frac{V_L}{V_S}$ [如下所述]:

$|\frac{V_L}{V_S}| = |\frac{I_4 R_L}{I_1 R_S}| = \frac{k_{12} k_{34} k_{23} Q_1 Q_2 Q_3}{1 + k_{12} k_{34} Q_1 Q_2 + k_{23}^2 Q_2 Q_3} \sqrt{\frac{R_L}{R_S}}$, 其中 k_{12} 是源线圈和发射线圈之间的耦合系数, k_{34} 是接收线圈和负载线圈之间的耦合系数, k_{23} 是发射线圈和接收线圈之间的耦合系数, Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别是源线圈、发射线圈和接收线圈的品质因数, 且由系统的结构对称可知 $k_{12}=k_{34}$ 、 $Q_2=Q_3$ 。

[0053] 3. 阻抗匹配, 即输入阻抗 $Z_{in} = R_S$ 时, 信号源有最大输出功率, 系统的传输效率 η

表达式如下: $\eta = \frac{V_L^2}{R_L} / \frac{V_S^2}{4R_S} = [\frac{2k_{12}^2 k_{23} Q_1 Q_2^2}{1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2 + k_{23}^2 Q_2^2}]^2$ 。

[0054] 4. 所述系统中各线圈的品质因数均是可间接测量的已知量:

$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{R_{e1} + R_S}$ 、 $Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{R_{e2}}$ 、 $Q_3 = \frac{\omega_0 L_3}{R_{e3}}$ 、 $Q_4 = \frac{\omega_0 L_4}{R_{e4} + R_L}$, 其中 ω_0 是外加激励源高频信号发生器所产生信号的角频率, Q_4 是负载线圈的品质因数。故所述步骤 3 中 η 对 k_{23} 求导可得系统取得最大传输效率时, k_{23} 和 k_{12} 所满足的临界耦合条件等式: $k_{23}^2 Q_2^2 = 1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2$ 。因系统取得最大传输效率的点是在临界耦合处, 故上式即为系统工作在临界耦合状态时, 耦合系数 k_{23} 和 k_{12} 所需满足的临界耦合条件等式。

[0055] 图 3 是本发明的变耦合系数磁共振无线电能传输系统示例实物图。

[0056] 如图 3 所示, 本实施例为工作频率在 $f_0=7.65\text{MHz}$ 的磁耦合共振无线电能传输系统临界耦合实现方案, 高频信号发生器内阻和负载电阻均为 50 欧姆, 所有线圈都是由截面半径为 1mm 的铜导线绕制而成, 对齐在同轴方向。源线圈直径为 28cm, 连有阻抗匹配网络和输出功率为 5W 的高频信号发生器, 发射线圈和接收线圈的直径均为 60cm, 为获取高品质因数 Q , 线圈的自身电容与电感用于共振, 负载线圈直径为 28cm, 连有大小为 50 欧姆的负载电阻, 其后连有示波器 (用于测量信号的能量), 具体的线圈参数如表 1 所示。

[0057] 表 1

[0058]

	电 感 (/ μH)	等效电 阻 ($/\Omega$)	谐振频率 (/ MHz)	Q (空 载)
源线圈	0.97	50.62	7.64	0.92
发射线圈	39.1	6.19	7.66	304.0
接收线圈	36.1	5.49	7.62	314.8
负载线圈	0.98	50.16	7.64	0.93

[0059] 图 4 是本发明的变耦合系数磁共振无线电能传输系统与现有技术的传输效率对比图。

[0060] 现有无线电能传输系统（固定耦合）中源线圈和发射线圈的间距 d_{12} 、接收线圈和负载线圈的间距 d_{34} 都是固定的，本实施例中都设为 1cm，传输距离 d_{23} 从 10cm 变化到 100cm，步长为 5cm。

[0061] 保持上述系统结构不变，随着传输距离的增加，耦合系数急剧下降，整个系统处于弱耦合状态，系统的传输效率随传输距离的变化情况如图 4 中虚线曲线所示。

[0062] 采用本发明提出的一种变耦合系数磁共振无线电能传输系统及方法：

[0063] 步骤 A：确定所述变耦合系数磁共振无线电能传输系统的无线能量传输距离 d_{23} ，即发射线圈和接收线圈的间距；

[0064] 步骤 B：根据步骤 A 所述无线能量传输距离 d_{23} ，利用公式 $k_{23} = \frac{M_{23}}{\sqrt{L_2 L_3}}$ 和

$$M_{23} = \frac{\mu_0 N_2 N_3}{4\pi} \oint_{O_2} \oint_{O_3} \frac{dl_2 dl_3}{|d_{23}|}$$

计算所述系统发射线圈和接收线圈的耦合系数 k_{23} ；其中， M_{23} 是发射线圈和接收线圈的互感系数， L_2 、 L_3 为发射线圈和接收线圈的电感，是可通过仪器直接测量的已知量， μ_0 为真空磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利 / 米， N_2 、 N_3 为发射线圈和接收线圈的匝数， O_2 、 O_3 是发射线圈和接收线圈的导线回路， O_2 、 O_3 与 N_2 、 N_3 均为已知量， dl_2 、 dl_3 分别是发射线圈和接收线圈上的一个微元， d_{23} 是发射线圈和接收线圈的间距；

[0065] 步骤 C：利用公式 $k_{23}^2 Q_2^2 = 1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2$ 计算在临界耦合状态时，所述系统源线圈和发射线圈的耦合系数 k_{12} ；其中， k_{12} 是源线圈和发射线圈之间的耦合系数， k_{23} 是发射线圈和接收线圈之间的耦合系数， Q_1 、 Q_2 分别是源线圈和发射线圈的品质因数，是可通过仪器间接测量的已知量； $Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{R_{e1} + R_s}$ ，其中， ω_0 是外加激励源高频信号发生器所产生信号的角频率， L_1 是源线圈的电感值， R_{e1} 是源线圈在高频下的等效电阻， R_s 是外加激励源高频信号发生器的内阻； $Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{R_{e2}}$ ，其中， ω_0 是高频信号发生器所产生信号的角频率， L_2 是发射线圈的电感值， R_{e2} 是发射线圈在高频下的等效电阻；

[0066] 步骤 D：将所述系统源线圈和发射线圈的耦合系数调节至 k_{12} 。

[0067] 根据上述所述步骤，步骤 D 具体包括下列步骤：

[0068] 步骤 1：根据计算所得耦合系数 k_{12} ，利用公式 $k_{12} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$ 和

[0066] 步骤 D：将所述系统源线圈和发射线圈的耦合系数调节至 k_{12} 。

[0067] 根据上述所述步骤，步骤 D 具体包括下列步骤：

[0068] 步骤 1：根据计算所得耦合系数 k_{12} ，利用公式 $k_{12} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$ 和

$M_{12} = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{4\pi} \oint_{O_1} \oint_{O_2} \frac{dl_1 dl_2}{|d_{12}|}$, 计算源线圈和发射线圈的间距 d_{12} ; 其中, M_{12} 是源线圈和发射线圈的互感系数, L_1 、 L_2 为源线圈和发射线圈的电感, 是可通过仪器直接测量的已知量, μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利 / 米, N_1 、 N_2 为源线圈和发射线圈的匝数, O_1 、 O_2 是源线圈和发射线圈的导线回路, O_1 、 O_2 与 N_1 、 N_2 均为已知量, dl_1 、 dl_2 分别是源线圈和发射线圈上的一个微元, d_{12} 是源线圈和发射线圈的间距;

[0069] 步骤 2: 调节源线圈和发射线圈的间距至 d_{12} , 至此源线圈和发射线圈的耦合系数已调节至 k_{12} ;

[0070] 步骤 3: 调节接收线圈和负载线圈的间距 d_{34} 至与 d_{12} 相等, 所述系统工作在临界耦合状态, 具有最大的传输效率和最优的传输距离, 实验结果如图 4 实线曲线所示。

[0071] 如图 4 所示, 在相同条件下, 本发明提出的变耦合系数磁共振无线电能传输系统及方法显著提高了系统的传输效率, 当传输距离分别为 80cm 和 100cm 时, 传输效率分别有效提高约 30% 和 20%。

[0072] 以上所述仅为本发明较佳的实施方式, 但本发明的保护范围并不局限于此, 但凡熟悉本领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内, 所作的等效修饰或变换, 都应涵盖在本发明的保护范围之内。

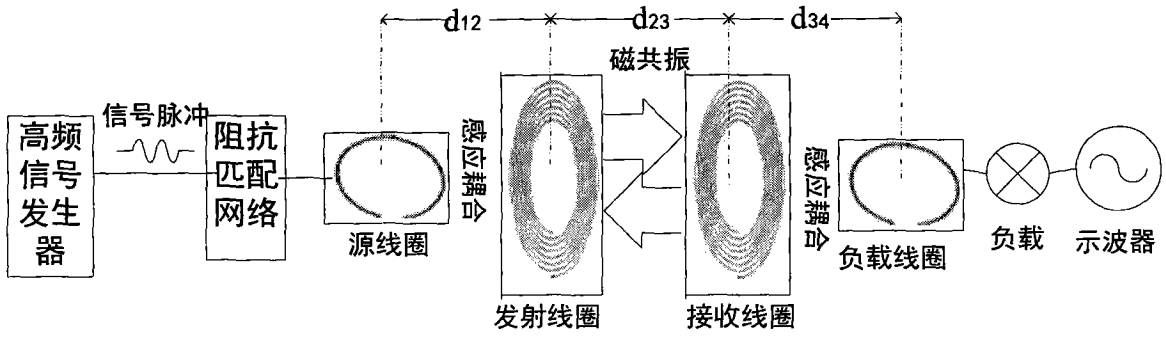


图 1

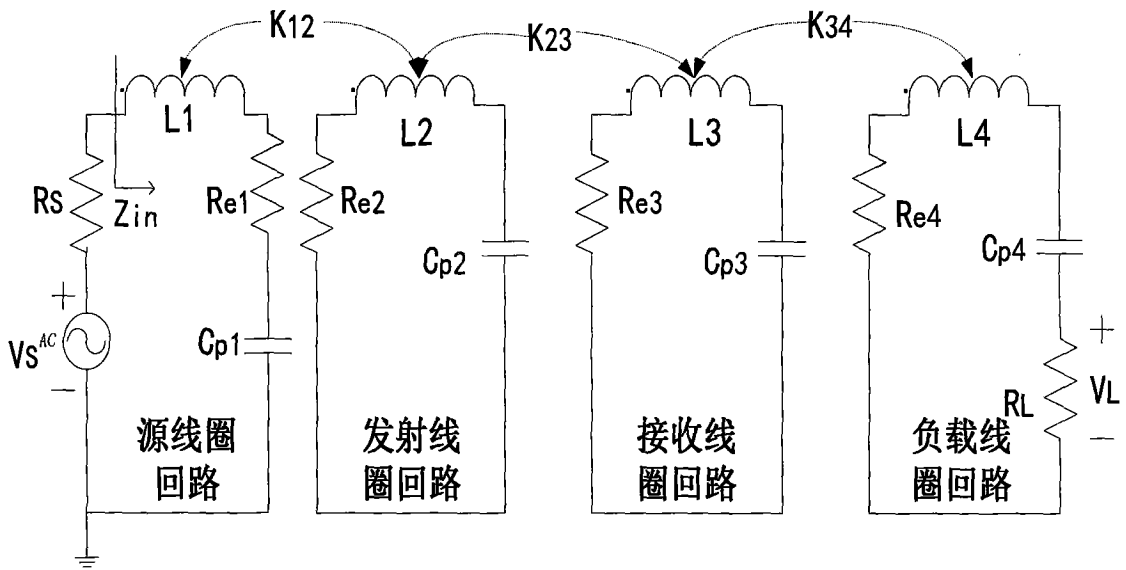


图 2

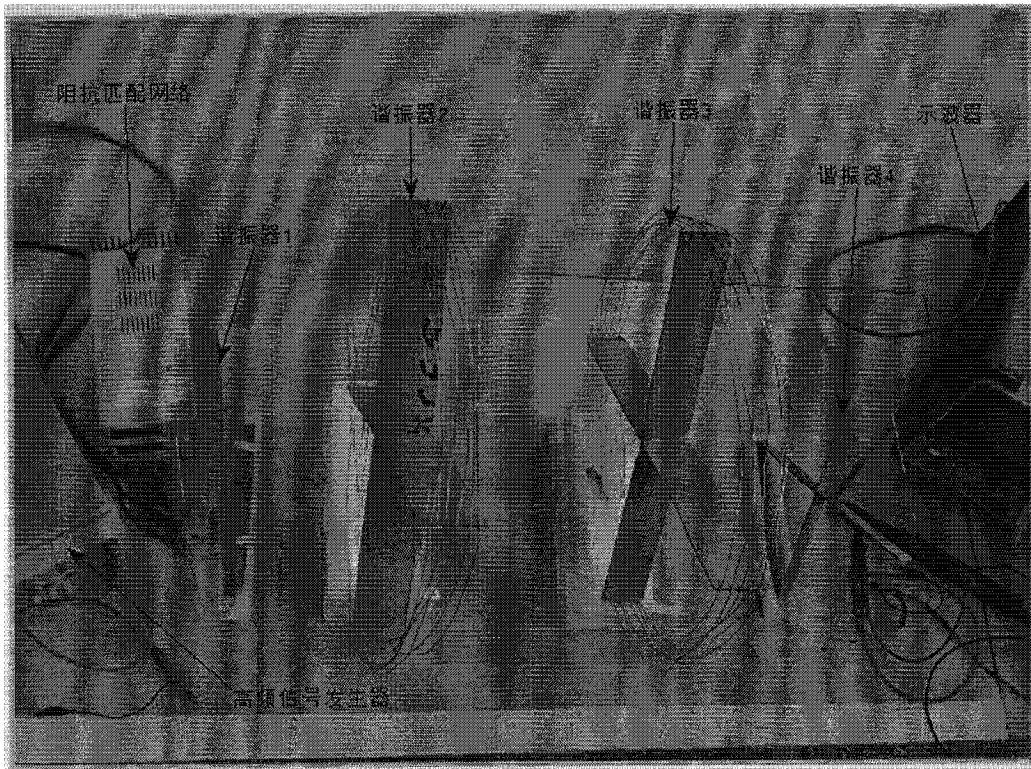


图 3

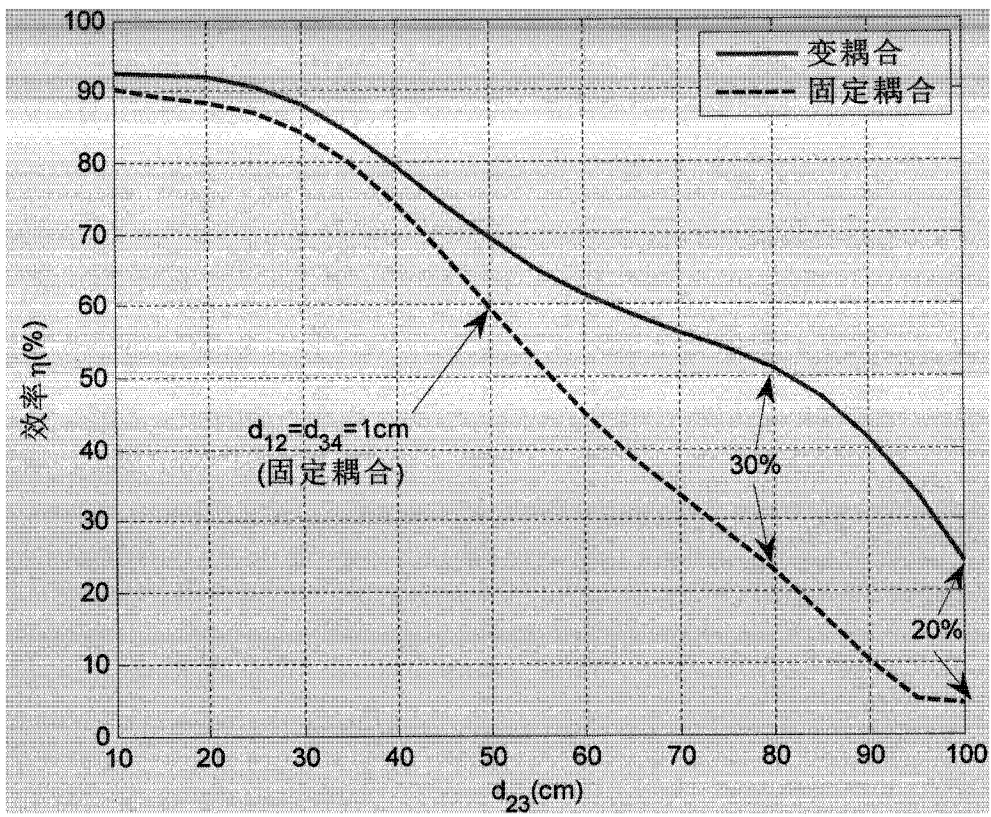


图 4