

磁耦合谐振串并式无线电能传输功率稳定性研究

赵靖英¹, 周思诺¹, 崔玉龙², 李志刚¹

(1. 河北工业大学电气工程学院, 天津 300130;
2. 北京化工大学电气工程学院, 北京 100029)

摘要:无线电能传输功率稳定性分析对其能否安全稳定工作具有重要意义。本文采用等效电路理论对串并式结构进行了研究,获取了输出功率与线圈互感之间的关系,推导出一般形状接收线圈与矩形导轨之间的互感计算公式。考虑固定负载移动供电的情况,研究了影响互感的因素,采用仿真软件得出了不同形状接收线圈与轨道之间的互感与影响互感的因素之间的关系曲线,以及功率与影响互感的因素之间的关系曲线,分析了接收线圈形状对输出功率稳定性的影响。设计了无线电能传输功率稳定性验证实验方案,搭建了实验平台,进行了实验验证。分析与实验表明,当固定负载移动供电系统工作在谐振频率,发射轨道为矩形、接收线圈面积一定时,采用正方形接收线圈传输功率的稳定性更好。

关键词:磁耦合谐振;串并式结构;无线电能传输;耦合特性;稳定性分析

DOI: 10.12067/ATEEE1709027 **文章编号:** 1003-3076(2018)08-0017-10 **中图分类号:** TM724

1 引言

近年来国内外对磁耦合谐振式无线电能传输的研究取得了一些成果^[1-8]。新西兰奥克兰大学研究了发射线圈为 Double-D 型的在线式无线电能传输技术^[9];韩国高等科学技术学院先后研究出 5 代电力供应轨道,设计出 I 型和 S 型轨道,致力于降低建设成本的同时,不断增大传输功率和空气间隙,提高效率^[10,11];美国橡树岭国家实验室采用全桥逆变和两初级线圈的发射装置进行实验,证明传输功率和效率受电动车位置影响较大^[12]。但这些文献重点研究的是发射线圈对传输系统性能的影响。哈尔滨工业大学、香港理工大学、东南大学、华南理工大学等科研院所重点研究了磁耦合谐振式无线电能传输特性、传输系统损耗、电路拓扑结构以及控制等方面^[13-15];重庆大学研究了无线供电的电磁耦合机构特性,通过仿真得出并分析了不同发送、接收线圈与两线圈间互感及耦合系数的关系曲线^[16,17]。文献[18-20]分别对平行轴圆柱线圈、两圆线圈、空心线

圈进行互感计算;文献[19,20]还分析了影响互感的因素,研究无线传能的耦合特性。但这些文献都没有具体分析互感与传输系统之间的关系。

目前,国内外对磁耦合谐振式无线电能传输的研究均集中于通过改进拓扑结构、发射线圈形状等提高传输功率和效率,对于无线电能传输功率的稳定性研究相对较少。而输出功率稳定性越好,对移动用电设备接收端的功率变换与控制设备要求就越低,系统工作就更安全可靠。

研究无线电能传输特性时,一般推导出的传输功率是系统工作角频率、互感和负载的函数。而本文通过分析磁耦合谐振式无线电能传输工作原理,采用等效电路理论研究串并(Series-Parallel, SP)结构电路,得出输出功率与轨道和接收线圈间互感之间的关系;推导出一般形状接收线圈与矩形导轨之间互感的计算公式,从移动供电过程中输出功率稳定性的角度去分析影响互感的因素,再通过仿真和实验研究不同形状接收线圈对互感的影响,反映出接收线圈形状对输出功率稳定性的影响。

收稿日期: 2017-09-11
基金项目: 国家自然科学基金项目(E070302)、国家科技支撑计划项目(2015BAA09B00)、河北省高等学校科学技术研究项目(QN20131165)
作者简介: 赵靖英(1974-),女,河北籍,教授,博士,主要研究方向为电器可靠性及检测技术;
周思诺(1992-),女,河北籍,硕士研究生,主要研究方向为电器可靠性及检测技术。

2 磁耦合谐振串并式无线电能传输功率稳定性分析

2.1 磁耦合谐振式无线电能传输工作原理

基于近场谐振强耦合概念的磁耦合谐振式无线电能传输系统包括高频电源的产生装置、能量发射装置、能量接收装置、负载,其传输原理如图1所示。图1中能量发射侧与能量接收侧采用具有相同谐振频率的感应线圈。系统工作时,高频电源使能量发射端的感应线圈产生交变磁场,交变磁场经过与能量发射端感应线圈谐振频率相同的能量接收端的感应线圈,产生磁谐振,能量接收侧不断聚集能量,从而实现高效的能量交换。

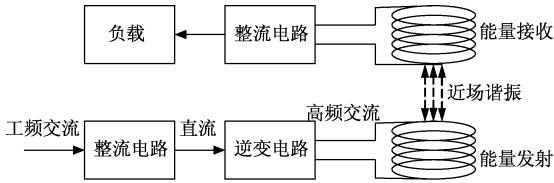


图1 磁耦合谐振式无线电能传输原理图

Fig.1 Principle of magnetic resonance wireless power transmission

2.2 磁耦合谐振串并式无线电能传输拓扑结构

目前,分析磁耦合谐振式无线电能传输的理论模型有耦合模理论和等效电路理论,因分析时等效电路更直观、易理解,本文采用等效电路理论模型进行分析。文献[21]对磁耦合谐振无线电能传输系统不同拓扑结构进行分析,推导出不同拓扑结构下输出功率和效率与频率和距离之间的关系式,并通过仿真和实验证明了SP结构传输性能较好^[21],并且具有较强的容错能力,适用于移动供电。因此,本文重点研究串并式无线电能传输拓扑结构,其等效电路图如图2所示。

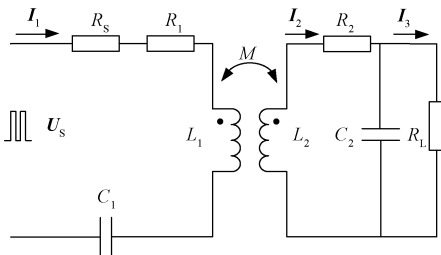


图2 SP型等效电路拓扑图

Fig.2 Topology of SP equivalent circuit

图2中, U_s 为高频电源电压, R_s 为电源内阻, L_1 和 L_2 分别为能量发射侧感应线圈、能量接收侧感应

线圈的电感, M 为两侧感应线圈的互感, C_1 和 C_2 分别为能量发射侧、能量接收侧用于谐振的谐振电容, R_1 和 R_2 分别为能量发射侧感应线圈、能量接收侧感应线圈的电阻, R_L 为等效负载, I_1 、 I_2 、 I_3 分别为流过 R_1 、 R_2 、 R_L 的电流。

根据电路图列出电路的KVL方程如下:

$$\begin{cases} I_1 Z_1 - j\omega M I_2 = U_s \\ I_2 Z_2 - j\omega M I_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$Z_1 = R_s + R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2 + R_L // \frac{1}{j\omega C_2}$$

求解得:

$$I_1 = \frac{U_s}{Z_1 + \omega M^2 / Z_2} \quad (2)$$

式(1)中 Z_2 化简为实部和虚部后,有:

$$Z_2 = R_2 + \frac{R_L}{1 + \omega^2 R_L^2 C_2^2} + j\omega(L_2 - \frac{R_L^2 C_2}{1 + \omega^2 R_L^2 C_2^2}) \quad (3)$$

当 Z_2 虚部为0时,系统接收侧发生谐振,谐振角频率 ω 为:

$$\omega = \frac{1}{R_L C_2} \sqrt{\frac{R_L^2 C_2}{L_2} - 1} \quad (4)$$

若满足 $R_L > \sqrt{L_2 / C_2}$,则 $\omega \approx 1 / \sqrt{L_2 C_2}$ 。为使系统在一定频率工作时,能量发射端与能量接收端均发生谐振,令:

$$L_1 C_1 = L_2 C_2 \quad (5)$$

当系统工作频率为 ω 时,式(2)可等价为:

$$I_1 = \frac{U_s}{\text{Re}[Z_1 + (\omega M)^2 / Z_2]} \quad (6)$$

进一步求得流过负载的电流为:

$$I_3 = \left| \frac{j\omega M I_1}{Z_2} \frac{1 / (j\omega C_2)}{R_L + 1 / (j\omega C_2)} \right| \quad (7)$$

在忽略 R_s 后,系统输出功率为:

$$\begin{aligned} P_L &= I_3^2 R_L \\ &= \frac{\omega^2 M^2 U_s^2 (1 + \omega^2 R_L^2 C_2^2) R_L}{[(1 + \omega^2 R_L^2 C_2^2)(R_1 R_2 + \omega^2 M^2) + R_1 R_L]^2} \end{aligned} \quad (8)$$

由式(8)可知,输出功率是关于能量发射端和能量接收端的系统参数以及互感、负载的多元函数。

2.3 传输功率稳定性分析

在已搭建完成的磁耦合谐振串并式无线电能传

输系统中,能量发射端和能量接收端的系统参数是固定的。当系统工作在谐振频率时,由式(8)可知,对于同一用电设备(即等效负载固定不变),系统输出功率只与能量交换的两感应线圈的互感有关。实验中各参数值如表1所示。

表1 系统参数值

Tab.1 System parameter values

参数	R_1/Ω	$L_1/\mu\text{H}$	C_1/nF	R_2/Ω
数值	0.25	27.1	60	0.02
参数	$L_2/\mu\text{H}$	C_2/nF	R_L/Ω	U_s 幅值/V
数值	15.87	101.8	55	140

由式(4)得出接收侧谐振频率与负载 R_L 的关系曲线,如图3所示。从图3中可以看出,当 $R_L > 40\Omega$ 时,接收侧谐振频率几乎不变,维持在 125 ~ 125.2 kHz。根据表1中所给参数,有:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}} = 125.2(\text{kHz}) \tag{9}$$

并且 R_L 为 55 Ω ,因此接收侧可视为发生谐振。由于两线圈间耦合系数 k 范围为 0 ~ 1,根据

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}} \tag{10}$$

结合表1参数可知,互感取值为 0 ~ 20.7 μH ,由式(8)得出输出功率与互感的关系曲线图,如图4所示。

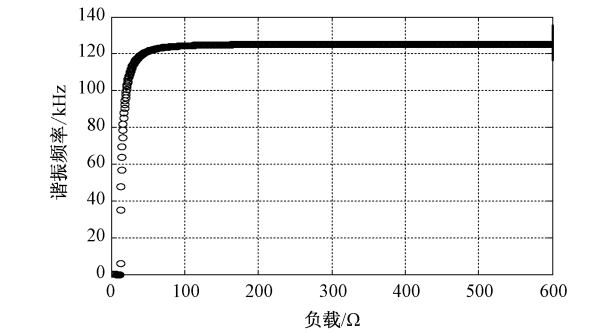


图3 接收侧谐振频率与负载 R_L 的关系曲线
Fig.3 Relationship between resonant frequency of secondary side and load

若在能量传输过程中互感发生变化,输出功率会产生相应的变化,严重影响系统工作的稳定性。但在移动供电过程中,互感的变化有时是不可避免的。例如,接收线圈中心轴相对发射线圈中心轴的偏移不可避免地影响了两感应线圈的互感;另外路面的不平整也会影响两感应线圈的距离,从而影响互感值。这些影响互感值的因素影响了输出功率,造成系统工作的不稳定。因此,研究哪种接收线圈

形状在发生位置变化时对两感应线圈的互感值影响最小,以保持系统工作的稳定性,具有很重要的意义。

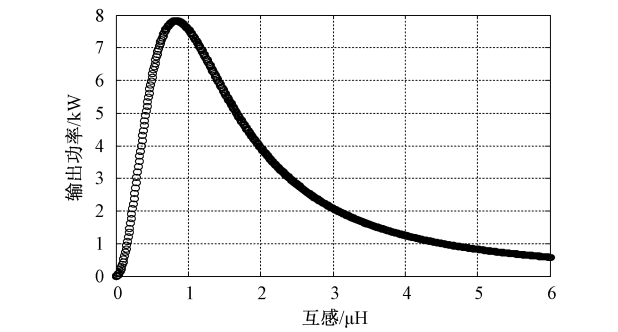


图4 输出功率与互感曲线图
Fig.4 Relationship between output power and mutual inductance

3 一般形状接收线圈位置偏移对两线圈互感及输出功率稳定性的影响

美国橡树岭实验室、韩国高等科技研究院、日本索尼公司、新西兰奥克兰大学等研究机构对移动式供电有很深的研究。其中,韩国研究出的单相单线圈矩形供电轨道因为具有以下优点,从而得到实际应用:①发送线圈结构最为简单、部署成本低,同时由于其极为简单的结构,对电路的分析、预测和建模变得更加简单;②由于发送线圈为长线圈,所以相同距离的道路上,所需要的发送线圈数量会大幅度减小,控制装置也会相应减少,从而控制算法变得更简单^[22]。新西兰奥克兰大学研究的轨道也类似于韩国第一代供电轨道方案,只是接收线圈有所不同,可见矩形轨道的应用潜力很大。因此,本文在矩形轨道的基础上求解一般形状接收线圈与轨道间互感,并进行研究。

3.1 一般形状接收线圈与矩形轨道间互感的计算

由电感计算手册^[23]可知,电感的计算一般采用整体线匝法,通过计算单匝线圈电感来近似获得具有相同形状和尺寸的 N 匝线圈的电感。假设流过线圈的电流密度是均匀的, N_1 和 N_2 为两个线圈的匝数, M 为对应两线圈的互感, M' 为与两线圈有同样形状和尺寸的单匝线圈的互感^[24,25],则

$$M \approx N_1N_2M' \tag{11}$$

利用聂以曼公式计算构成线性回路的单匝线圈互感为:

$$M' = \frac{\mu}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{dl_1dl_2\cos\theta}{D} \tag{12}$$

式中, μ 为磁导率; l_1 、 l_2 分别为两线圈积分路径; θ 、 D 分别为两线圈元素线间夹角和距离。

本文都以单匝线圈为例进行互感关系式的推导,再由式(11)得出 N_1 匝和 N_2 匝的两个线圈之间的互感。

3.1.1 圆形接收线圈与矩形轨道互感的计算

图 5 为圆形接收线圈与矩形轨道结构图。其中 a 、 b 、 c 、 d 为矩形轨道的四个边, l 为矩形轨道的长度, w 为矩形轨道的宽度, r 为圆型线圈的半径, θ 为 dl_2 与 x 轴的夹角, h 为两线圈中心轴沿 z 轴偏移的距离(称为纵向偏移量), t 为两线圈中心轴沿 y 轴偏离的距离(称为横向偏移量)。由式(12)及分段计算原理可知两线圈互感为:

$$M_{cr} = M_{al_2} + M_{bl_2} + M_{cl_2} + M_{dl_2} \tag{13}$$

式中

$$M_{al_2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \int_{-w/2}^{w/2} \int_0^{2\pi} \frac{rcos\theta d\theta dy}{\sqrt{(rcos\theta - d)^2 + (rsin\theta + t - y)^2 + h^2}}$$

其中, μ_0 为真空磁导率。其他部分算法类似。

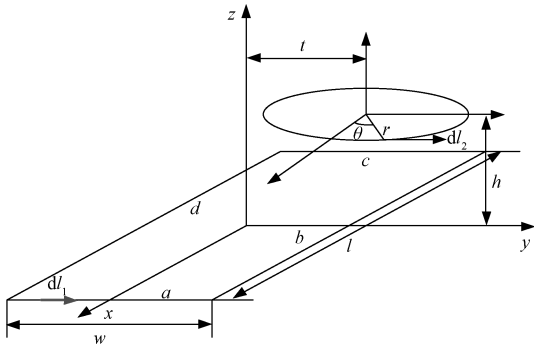


图 5 圆形接收线圈与矩形轨道结构图
Fig. 5 Structure diagram of circular receiving coil and rectangular track

3.1.2 方形接收线圈与矩形轨道互感的计算

图 6 为方形接收线圈与矩形轨道结构图。其中下标 1 代表矩形轨道,下标 2 代表方形接收线圈, a 、 b 、 c 、 d 为方形的四个边, l_1 和 l_2 为两线圈的长度, w_1 和 w_2 为两线圈的宽度, h 为两线圈中心轴沿 z 轴偏移的距离(称为纵向偏移量), t 为两线圈中心轴沿 y 轴偏离的距离(称为横向偏移量)。由式(12)及分段计算原理可知两线圈互感为:

$$M_{sr} = M_{a_1a_2} + M_{b_1b_2} + M_{c_1c_2} + M_{d_1d_2} + M_{a_1c_2} + M_{c_1a_2} + M_{b_1d_2} + M_{d_1b_2} \tag{14}$$

式中

$$M_{a_1a_2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-w_1}^{w_1} \int_{-w_2+t}^{w_2+t} \frac{dy_2 dy_1}{\sqrt{(l_2 - l_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + h^2}}$$

其他部分算法类似。

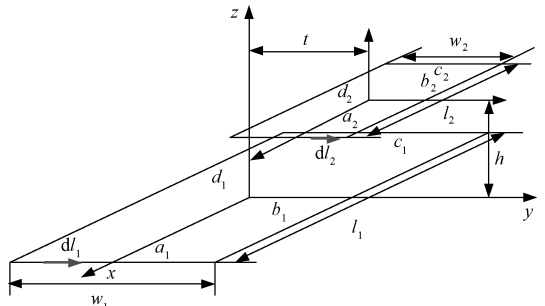


图 6 方形接收线圈与矩形轨道结构图
Fig. 6 Structure diagram of square receiving coil and rectangular track

两线圈间互感的产生是由于轨道线圈中通过的电流随时间变化时,导致穿过接收线圈的磁通量发生了变化。电感与磁通量间的关系如下:

$$M = \frac{\Phi}{I} = \frac{N\phi}{I} \tag{15}$$

式中, Φ 为轨道线圈中电流产生的磁场对接收线圈提供的磁通匝链数; ϕ 为轨道线圈中电流产生的磁场对接收线圈提供的磁通。

由于轨道线圈通入的电流不变,考虑用电设备的底盘,从磁场分布情况分析,方形结构能够更好地利用耦合面积,覆盖整个底盘区域,可减轻接收线圈相对轨道偏移时,两线圈间磁场削弱的程度,增强了发生偏移时输出功率的稳定性。对于长方形接收线圈与正方形接收线圈,由于长方形线圈结构具有极性,使得其在宽方向上的错位性能比正方形线圈差^[26]。因此采用正方形接收线圈系统的输出功率稳定性更好。3.2 节将从理论公式推导的仿真数值验证结论。

3.2 影响互感和输出功率稳定性因素及分析

3.1 节中得出圆形和方形接收线圈与矩形轨道的互感关系式,在系统设计完成后,两线圈各形状、尺寸参数是确定的,因此线圈间的互感值是关于两线圈之间的纵向偏移量 h 和两线圈中心轴的横向偏移量 t 的函数。对于移动供电设备,移动过程中产生的互感变化使输出功率发生变化,影响了系统的输出功率稳定性。本文分别对圆形、正方形、长方形接收线圈三种情况,采用 Matlab 进行接收线圈发生偏移时对互感和输出功率影响的仿真。为便于直观理解两线圈的耦合程度,根据式(10)仿真得出接收

线圈发生偏移与耦合系数 k 的关系曲线。仿真参数值设置如表 2 所示,表 2 中参数保证了各形状接收线圈的面积相同。

表 2 仿真参数值

Tab.2 Simulation parameters value	
参数	数值
轨道长/m	1.6
轨道宽/m	0.3
圆形线圈半径/m	0.15
正方形线圈边长/m	$\sqrt{\pi \times 0.15^2}$
长方形线圈长/m	$\pi \times 0.15^2/0.2$
长方形线圈宽/m	0.2

由式(11)可知,系统中实际线圈间互感约为 3.1 节分析的单匝线圈间互感乘以两线圈匝数。当满足表 1 中电感量,同时满足表 2 中线圈尺寸时,轨道匝数为 3 匝,对应的圆形接收线圈的匝数为 5 匝,正方形接收线圈的匝数为 5 匝,长方形接收线圈的匝数为 5 匝。由尺寸与匝数可根据式(11)、式(13)、式(14)计算出系统中不同形状接收线圈对应的互感值,再由式(10)转化为耦合系数。

3.2.1 横向偏移量 t 对互感及功率稳定性的影响

固定两线圈之间纵向偏移量 h 为 0.1m,按表 2 数据进行仿真。当接收线圈发生横向偏移时,两线圈耦合系数与偏移量的关系曲线如图 7 所示。

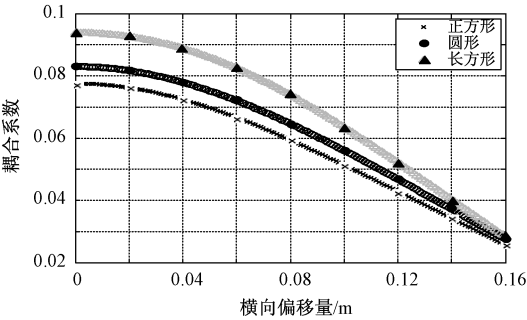


图 7 耦合系数 k 与横向偏移量的关系曲线
Fig.7 Relationship between coupling coefficient and horizontal offset

由图 7 可知,长方形接收线圈对应的曲线最陡。在发生同样偏移量时,接收线圈中心轴与轨道中心轴横向偏移量 $t = 0 \sim 0.16\text{m}$,正方形与圆形接收线圈对应的耦合系数变化趋势相对稳定。长方形接收线圈所对应的耦合系数变化量最大,下降了 72.6%;正方形接收线圈所对应的耦合系数下降了 66.9%;圆形接收线圈所对应的耦合系数下降了 68.4%。由此可知,正方形接收线圈在发生偏移时,互感变化趋势比长方形与圆形接收线圈对应的互感

变化稳定。
由表 1 与式(8)仿真得出正方形、圆形、长方形接收线圈发生不同程度横向偏移时对应的输出功率变化曲线,如图 8 所示,系统工作频率为 125kHz。

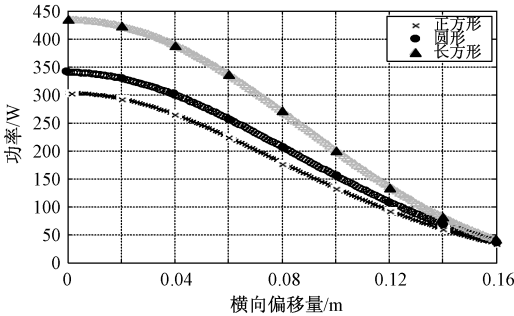


图 8 输出功率与横向偏移量的关系曲线
Fig.8 Relationship between output power and horizontal offset

由图 8 可知,长方形接收线圈对应的输出功率变化曲线最陡,圆形接收线圈对应的输出功率变化趋势略小于长方形接收线圈,而正方形接收线圈对应的输出功率变化相较于前两者比较平缓。特别是在发生微小偏移时,在 $t = 0 \sim 0.02\text{m}$,正方形接收线圈的功率值几乎保持稳定,只变化了 5.1W,下降 1.7%;圆形接收线圈对应的功率值变化了 8.5W,下降 2.5%;长方形接收线圈对应的功率变化了 11.3W,下降 2.6%。从图 8 中也可看出, $t = 0 \sim 0.16\text{m}$,长方形接收线圈对应的曲线斜率较大,正方形接收线圈对应的曲线斜率最小。

由图 7、图 8 的分析可知,在接收线圈发生横向偏移时,采用正方形接收线圈有利于系统的稳定性,长方形与圆形接收线圈对应的系统稳定性较差。

3.2.2 两线圈纵向距离 h 对互感及功率稳定性的影响

固定横向偏移量 t 为 0,即接收线圈的中心轴与轨道的中心轴重合,按表 2 数据进行仿真。当接收线圈与轨道间纵向偏移量发生变化时,两线圈互感值的变化曲线如图 9 所示。

由图 9 可知,接收线圈与轨道的纵向偏移量 h 为 0.1~0.2m,长方形接收线圈对应的耦合系数下降了 48.9%;正方形接收线圈对应的耦合系数下降了 48.8%;圆形接收线圈对应的耦合系数下降了 48.8%。观察曲线并对比数据发现,长方形、正方形与圆形接收线圈在纵向偏移量变化下对应的耦合系数变化趋势几乎平行,因此纵向偏移对不同基本形状接收线圈的互感变化量没有太大影响。

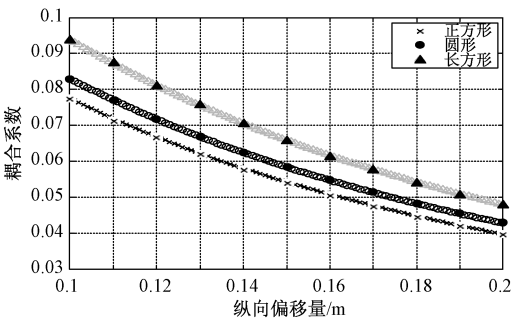


图9 耦合系数 k 与纵向偏移量的关系曲线

Fig.9 Relationship between coupling coefficient and longitudinal offset

同样按表1与表2取值,工作频率为125kHz,仿真得出正方形、圆形、长方形接收线圈与轨道纵向偏移量发生变化时对应的输出功率变化曲线,如图10所示。由图10可知,当线圈间中心轴纵向偏移量 h 在0.1~0.2m变化时,正方形接收线圈的功率值变化了233.1W,圆形接收线圈对应的功率值变化了248.9W,长方形接收线圈对应的功率变化了319.1W,均下降了77%。但是从曲线变化平缓程度来看,正方形接收线圈对应的输出功率变化曲线最平稳,变化量较小,长方形接收线圈与圆形接收线圈对应的输出功率变化较大,因此采用正方形接收线圈的系统稳定性更好。

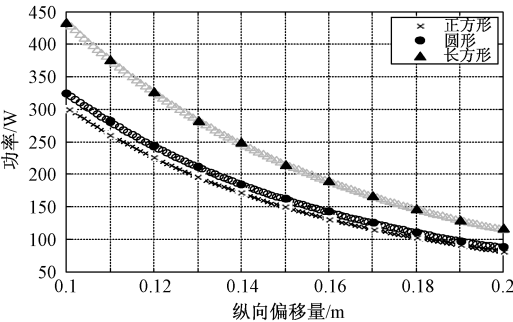


图10 输出功率与纵向偏移量的关系曲线

Fig.10 Relationship between output power and longitudinal offset

由图9、图10的分析可知,当接收线圈与导轨间纵向偏移量发生变化时,采用正方形与圆形接收线圈的系统稳定性较好。

4 实验验证

4.1 实验装置的设计

为证明理论与仿真结果的正确性,本文设计了磁耦合谐振串并式无线电能传输实验装置进行验

证。实验装置如图11所示,矩形轨道为160cm×30cm,电感值为27.1μH,用于发射能量侧产生谐振的电容为60nF;能量接收线圈分别为圆形、正方形、长方形,电感值均为15.87μH,用于接收能量侧产生谐振的电容为101.8nF;系统所接负载为总阻值55Ω的电阻;系统工作频率为125kHz。经计算,系统能量发射侧与能量接收侧近似发生谐振。

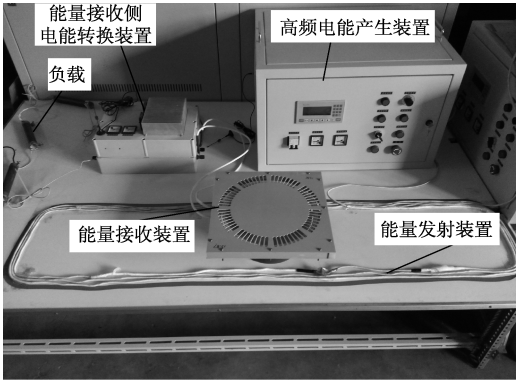


图11 无线电能传输实验装置

Fig.11 Experimental device of wireless power transmission

4.2 实验数据分析

用图11中搭建的无线电能传输装置进行本次的实验验证,依次记下圆形、正方形、长方形接收线圈发生不同程度偏移时,系统的耦合系数、输出功率与传输效率的数值。固定两线圈的纵向距离为10cm,测得输出功率 P 、传输效率 η 与横向偏移量 t 的实验数据分别如表3、表4所示。两线圈耦合系数变化曲线如图12所示。为使三种接收线圈在发生偏移时,输出功率变化趋势更明显,将表3数据表示为折线图,如图13所示。

表3 输出功率与横向偏移量的实验数据

Tab.3 Experimental data of output power and					
		horizontal offset			
横向偏移量 t /m		0	0.05	0.1	0.15
输出 功率 P /W	圆形	304.8	287.8	199.9	67.26
	正方形	286.88	275.32	201.96	81.25
	长方形	434.43	400	287.64	117.34

表4 传输效率与横向偏移量的实验数据

Tab.4 Experimental data of transmission efficiency and horizontal offset					
横向偏移量 t/m		0	0.05	0.1	0.15
传输 效率 $\eta(\%)$	圆形	85.3	81.6	70.2	47.7
	正方形	84.8	82.9	71.1	49
	长方形	86.6	84.3	75.4	52.4

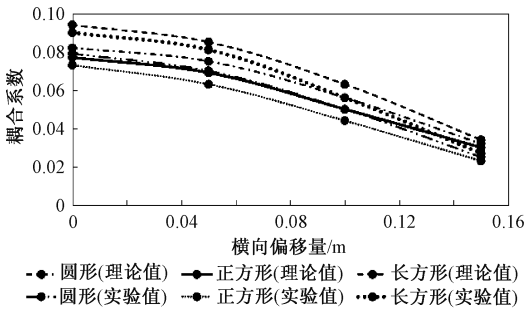


图 12 耦合系数变化曲线
Fig. 12 Curves of coupling coefficient

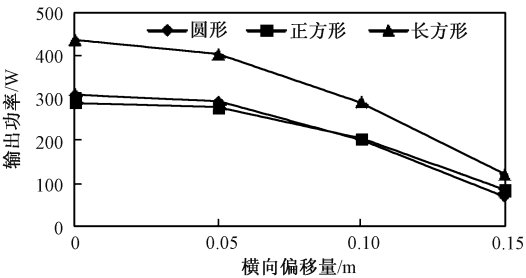


图 13 输出功率与横向偏移量的数据折线图
Fig. 13 Line graph about output power and horizontal offset

由图 12 中理论值与实验值的对比可知,系统耦合系数的理论值与实验值相差 4.5% ~ 17%,且横向偏移量较大时,误差较大。这是因为横向偏移量越大,两线圈的耦合程度越小,实际实验设备由于长线圈的缠绕等因素,会使耦合程度更小;加之理论计算公式做了相近的处理,将单匝的两线圈互感直接乘上两线圈的匝数作为多匝线圈的互感值。在允许误差范围内,耦合系数的理论值与实际值相一致。

由不同接收线圈对应的输出功率与横向偏移量数据关系与数据折线图可知,在接收线圈发生横向偏移时,正方形接收线圈对应的输出功率变化较另外两种形状接收线圈更加平稳。横向偏移量 t 为 0 ~ 0.15m (接收线圈一半在轨道线圈内,一半在轨道线圈外),正方形接收线圈对应的输出功率下降了 205.6W,变化了 71.7%;圆形接收线圈对应的输出功率下降了 237.54W,变化了 77.9%;长方形接收线圈对应的输出功率下降了 317.1W,变化了 73%。从图 13 中还可看出,发生微小偏移时,采用正方形接收线圈的系统,输出功率更稳定。

由系统传输效率数据分析可知,不同形状接收线圈在发生偏移时,对应的传输效率均为下降趋势,且下降趋势相差不多,不同形状接收线圈对应的传输效率下降了 40% ~ 44%。

同样的实验装置,将横向偏移量固定为 0cm,测得输出功率 P 、传输效率 η 与纵向偏移量 h 的实验数据分别如表 5、表 6 所示,对应的输出功率变化曲线如图 14 所示。

表 5 输出功率与纵向偏移量的实验数据
Tab. 5 Experimental data of output power and longitudinal offset

纵向偏移量 h /cm		10	12	14	16	18
输出 功率 P /W	圆形	304.8	255.3	229.1	189.3	164.8
	正方形	286.9	257.7	209.9	170	155.9
	长方形	434.4	370.4	319.3	286	253.2

表 6 传输效率与纵向偏移量的实验数据
Tab. 6 Experimental data of transmission efficiency and longitudinal offset

纵向偏移量 h /cm		10	12	14	16	18
传输 效率 η (%)	圆形	85.3	78.2	73.7	69.5	61.4
	正方形	84.8	80	70.8	68.6	61.2
	长方形	86.6	81.1	77.3	75.4	69.5

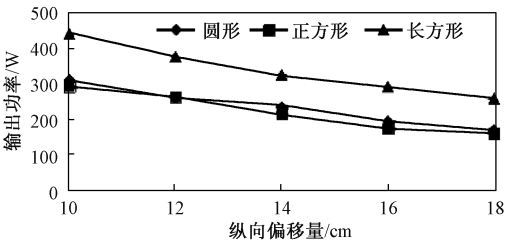


图 14 输出功率与纵向偏移量的数据折线图
Fig. 14 Line graph about output power and longitudinal offset

由表 5 与图 14 可知,在接收线圈发生纵向偏移时,纵向偏移量 h 为 10 ~ 18cm,正方形接收线圈对应的输出功率下降了 131W,而圆形接收线圈对应的输出功率下降了 140W,长方形接收线圈对应的输出功率下降了 181.2W。正方形接收线圈对应的输出功率变化较另外两种形状接收线圈更加平稳。

由系统传输效率数据分析可知,不同形状接收线圈在发生偏移时,对应的传输效率均为下降趋势,且下降趋势相差不多,不同形状接收线圈对应的传输效率下降了 22% ~ 27%。

实验证明在接收线圈发生偏移时,正方形接收线圈对应的系统稳定性更好。由于理论分析中忽略了一些实际系统中存在的损耗,因此实验数据与仿真结果相比,存在一定误差,但是数据相差不多,并且变化趋势一致。通过仿真与实验最终证明,当固

定负载供电系统工作在谐振频率,发射轨道为矩形、接收线圈面积一定时,采用正方形接收线圈更有利于传输功率的稳定性。

为证明输出功率稳定性越好,对延长移动用电设备功率器件寿命越明显,可提高系统工作的可靠性,使用同样的无线电能传输装置,测量开关器件的工作温度。在仅变换接收线圈形状的情况下,测量横向偏移对输出功率的影响试验中,使接收线圈在每个位置处正常运行 10min,停止运行设备后,测量逆变器中开关器件的温度。测量得出正方形接收线圈对应的系统中开关器件温度为 41℃,圆形接收线圈对应的系统开关器件温度为 43℃,长方形接收线圈对应的系统中开关器件温度为 49℃。因使用不同接收线圈进行实验前,各开关器件均为室温 25℃,由所测开关器件温度数据可知,采用正方形接收线圈对应系统的开关器件温升为 16℃,采用圆形接收线圈对应系统的开关器件温升为 18℃,采用长方形接收线圈对应系统的开关器件温升为 24℃,因此采用输出功率稳定性较好的正方形接收线圈可减少开关器件的温升,延长器件寿命,提高系统工作可靠性。

5 结 论

通过对磁耦合谐振式无线电能传输的工作原理以及串并式谐振无线电能传输拓扑结构的研究和分析,推导出在系统发生谐振情况下,输出功率与两能量交换线圈间互感的关系式;考虑无线电能传输系统在移动供电应用中,两能量交换线圈会发生偏移,从而影响两能量交换线圈的互感值,并由输出功率与两能量交换线圈间互感的关系式可知,两线圈的位置偏移影响了系统的输出功率;通过推导圆形、正方形、长方形单匝接收线圈与单匝矩形轨道的互感公式,仿真得出同样面积下三种形状的接收线圈在发生横向偏移与纵向偏移时,正方形接收线圈对矩形轨道与接收线圈间互感的影响最小;当系统工作在谐振频率时,正方形接收线圈对应的输出功率变化最平缓,对应的能量传输系统的稳定性最好。最后搭建实验平台进行实验验证,得出最终结论:当固定负载供电系统工作在谐振频率,发射轨道为矩形、接收线圈面积一定时,采用正方形接收线圈更有利于传输功率的稳定性。

参考文献 (References):

[1] 范兴明,莫小勇,张鑫 (Fan Xingming, Mo Xiaoyong,

Zhang Xin). 磁耦合谐振无线电能传输的研究现状及应用 (Research status and application of wireless power transfer via coupled magnetic resonances) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (12): 75-82, 99.

[2] Choi Su Y, Rim Chun T. Recent progress in developments of on-line electric vehicles [A]. 2015 6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA) [C]. Hong Kong, China, 2015. 1-8.

[3] 李艳红,张超,刘国强,等 (Li Yanhong, Zhang Chao, Liu Guoqiang, et al.). 基于 E 类功放的谐振式无线电能传输控制设计 (Control design of resonant wireless power transmission based on class E power amplifier) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (7): 63-68, 74.

[4] 陈文仙,陈乾宏 (Chen Wenxian, Chen Qianhong). 共振式无线电能传输技术的研究进展与应用综述 (Review and research progress of magnetic resonance wireless power transmission technology) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (9): 35-47.

[5] 吴晓康,杨庆新,张献,等 (Wu Xiaokang, Yang Qingxin, Zhang Xian, et al.). 电动汽车动态充电中耦合结构研究及其效率分析 (Coil structure study and efficiency analysis for the driving wireless charging system of electric car) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (9): 8-13.

[6] 卢闻州,沈锦飞,方楚良 (Lu Wenzhou, Shen Jinfei, Fang Chuliang). 磁耦合谐振式无线电能传输电动汽车充电系统研究 (Study of magnetically-coupled resonant wireless power transfer electric car charging system) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2016, 20 (9): 46-53.

[7] 赵争鸣,张艺明,陈凯楠 (Zhao Zhengming, Zhang Yiming, Chen Kainan). 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展 (New progress of magnetically-coupled resonant wireless power transfer technology) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (3): 1-13.

[8] 王司令,宋保维,段桂林,等 (Wang Siling, Song Baowei, Duan Guilin, et al.). 水下航行器非接触式电能传输技术研究 (Study on non-contact power transmission of underwater unmanned vehicle) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2014, 18 (6): 36-41.

[9] Budhia M, Boys J T, Covic G A, et al. Development of a

- single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (1): 318-328.
- [10] Huh J, Lee S W, Lee W Y, et al. Narrow-width inductive power transfer system for online electrical vehicles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26 (12): 3666-3679.
- [11] Shin J, Shin S, Kim Y, et al. Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61 (3): 1179-1192.
- [12] Miller J, Onar O, White C, et al. Demonstrating dynamic wireless charging of an electric vehicle: The benefit of electrochemical capacitor smoothing [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2014, 1 (1): 12-24.
- [13] 朱春波, 于春来, 毛银花, 等 (Zhu Chunbo, Yu Chunlai, Mao Yinhua, et al.). 磁共振无线能量传输系统损耗分析 (Analysis of the loss of magnetic resonance wireless power transmission system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (4): 13-17.
- [14] 黄学良, 吉青晶, 谭林林, 等 (Huang Xueliang, Ji Qingjing, Tan Linlin, et al.). 磁耦合谐振式无线电能传输系统串并式模型研究 (Study on series-parallel model of wireless power transfer via magnetic resonance coupling) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (3): 171-176, 187.
- [15] 周宏威, 孙丽萍, 王帅, 等 (Zhou Hongwei, Sun Liping, Wang Shuai, et al.). 磁耦合谐振式无线电能传输系统谐振方式分析 (Resonant model analysis of wireless power transfer via magnetic resonant coupling) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2016, 20 (7): 65-73.
- [16] 胡超 (Hu Chao). 电动汽车无线供电电磁耦合机构能效特性及优化方法研究 (Energy efficiency characteristics and optimization method of electromagnetic coupling mechanism for wireless power supply of electric vehicle) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2015.
- [17] 田勇 (Tian Yong). 基于分段导轨模式的电动车无线供电技术关键问题研究 (Research on key technologies of wireless power supply for electric vehicle based on segmented rail mode) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2012.
- [18] 罗焱 (Luo Yao). 平行轴圆柱线圈互感计算的新方法 (New approach for the mutual inductance calculations of the circular coils with parallel axes) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (2): 31-37.
- [19] 谢岳, 潘伟玲 (Xie Yue, Pan Weiling). 任意空间位置线圈的互感计算方法 (Mutual inductance calculation method of arbitrary space positioned coils) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2016, 20 (6): 63-67, 76.
- [20] 刘修泉, 曾昭瑞, 黄平 (Liu Xiuquan, Zeng Zhaorui, Huang Ping). 空心线圈电感的计算与实验分析 (Numerical and experimental analysis on performances of coreless coil inductance) [J]. 工程设计学报 (Chinese Journal of Engineering Design), 2008, 15 (2): 149-153.
- [21] 田子建, 杜欣欣, 樊京, 等 (Tian Zijian, Du Xinxin, Fan Jing, et al.). 磁耦合谐振无线输电系统不同拓扑结构的分析 (Analysis on different topology structures in magnetic coupling resonant wireless power transmission system) [J]. 电气工程学报 (Journal of Electrical Engineering), 2015, 10 (6): 47-57.
- [22] Van X Thai, Su Y Choi, Bo H Choi, et al. Coreless power supply rails compatible with both stationary and dynamic charging of electric vehicles [A]. 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC) [C]. 2015. 1-5.
- [23] 卡兰塔罗夫, 采伊特林 (Karan Tarloff, Caiyitelin). 电感计算手册 (Inductance calculation manual) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1992.
- [24] 武瑛, 严陆光, 徐善纲 (Wu Ying, Yan Luguang, Xu Shangang). 运动设备无接触供电系统耦合特性的研究 (Study on coupling characteristics of contactless power supply system for moving apparatus) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2005, 24 (3): 5-8, 80.
- [25] 苏玉刚, 张帅, 徐勇, 等 (Su Yugang, Zhang Shuai, Xu Yong, et al.). 电动汽车无线供电系统电能发射线圈设计与切换控制 (Design and switching control of power supply coils applied to ICPT-based electric vehicles) [J]. 西南交通大学学报 (Journal of Southwest Jiaotong University), 2016, 51 (1): 168-176.
- [26] Budhia M, Covic G A, Boys J T. Design and optimization of magnetic structures for lumped inductive power transfer systems [A]. 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. San Jose, CA, USA, 2009. 2081-2088.

Research on power stability of magnetic resonance wireless power transmission with series-parallel structure

ZHAO Jing-ying¹, ZHOU Si-nuo¹, CUI Yu-long², LI Zhi-gang¹

- (1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;
2. School of Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: For the operation security to analyze the stability of the power transmission of wireless power transmission is of great significance. In this paper, series-parallel structure is studied by use of the equivalent circuit theory. The relationship between the output power and the mutual inductance of the rail and the receiving coil is obtained. The calculation formula of mutual inductance between the rail and the receiving coil with the general shape is derived. Considering the mobile power supply with fixed load, the effect factors for mutual inductance are analyzed. With simulation software, the relation curves between the mutual inductance, the output power and the effect factors are obtained. The influence of the shape of receiving coil on the stability of output power is acquired. The test scheme is designed and the test platform is built. The test is carried out to verify the analysis result. The analysis and the test show that when the power supply system with fixed load operates at the resonant frequency, the transmitter rail is rectangular, and the area of the receiving coil is constant, receiving coil with square shape is better to the stability of transmission power.

Key words: magnetic coupling resonance; series-parallel structure; wireless power transmission; coupling characteristics; stability analysis