

一种新型空间无线电能传输系统耦合机构设计

蔡智斌, 张国荣, 徐晨林, 高 凯, 彭 勃, 解润生

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:传统正对平面线圈在进行无线电能传输时其电能拾取效率会随耦合机构间相对偏移的角度增大而迅速降低,空间无线电能传输系统则可以很好地解决这个问题。虽然目前国内外空间无线电能传输系统的耦合机构解决了相对偏移的问题,但接收机构只能以特定的轨迹和绕行方式进行相对均匀的功率接收,并非真正意义上的高自由度。本文提出了一种新型的空间无线电能传输系统的耦合机构,该耦合机构由单电源供电,可以实现接收机构高自由度且均匀的功率拾取。提出低耦合路径理论用于分析发射机构,利用 Ansys Maxwell 进行磁场仿真验证了磁场的均匀度。通过提出低耦合区域理论选取最适合发射机构的接收机构。最后搭建实验平台对耦合机构能量传输的均匀度和自由度进行了验证,实验结果说明接收线圈在保证高自由度接收的前提下接收电压数据集标准差小于1,即系统可以进行高自由度且较为稳定的功率传输。

关键词:无线电能传输; 耦合机构; 高自由度; 全方向磁场

DOI: 10.12067/ATEEE2008028

文章编号: 1003-3076(2021)04-0052-07

中图分类号: TM724

1 引言

无线电能传输技术是一种通过电磁感应原理利用原、副边分离的变压器实现由电源到负载无直接接触的输电方式^[1,2]。目前,无线电能传输主要分为电磁波辐射式、电磁感应式、磁耦合谐振式三种传输方式^[3],其中磁耦合谐振式无线电能传输是利用高频交流电源在初级侧产生磁场,同时次级侧谐振网络在磁场作用下耦合产生电压并作用到负载,具有远距离、大功率、高效率、低辐射等特点^[4]。

目前磁耦合谐振式无线电能传输系统耦合机构多采用传统正对平面线圈结构,但该系统存在因耦合机构出现相对偏移而导致无线电能传输效率过低甚至不能正常工作的问题,多数研究通过提出空间无线电能传输方案来解决这个问题。文献[5]提出了一种由两个正交的线圈组成的发射机构,并利用了灯泡作为负载进行了实验,实验表明无论接收角度如何,灯泡的亮度都保持稳定,间接证明了随着接收角度的增加,传输效率几乎保持不变。但是却忽略了仅凭灯泡亮度稳定作为结论缺乏严谨性。文献

[6]提出了一种三正交发射线圈结构的发射机构,当接收线圈与发射线圈之一严重不对准时,可解决在多个接收机应用中出现的谐振频率分裂问题,并保持较高的效率。文献[7]提出了一种碗状发射线圈结构来提供多方向磁场,可在有效的空间自由充电。文献[8]指出在两个正交线圈中相同的电流不能产生真正全向的旋转磁场矢量,并提到了一种用不同形式的非相同电流可以产生旋转磁场矢量的全向波导,这两种电流源具有相同的频率和相位,但其调幅功能不同。但该设计需要两套各自独立的电源和调谐模块,构造复杂。文献[9]在不采用相位和电流控制的情况下,采用单一电源驱动立方Tx线圈来产生全向磁场。但是因为线圈由闭合磁力线绕成,无法做到在立方体的六个面均绕制耦合线圈,故该设计只能在立方体四周环形面上实现相对均匀的能量传输。

文章旨在为空间无线电能传输所存在的耦合机构的设计以及功率传播方式受限的问题提出一种解决方案,设计了一种单电源供电,突出由发射机构发射均匀的全方向磁场,而接收机构可自由地、均匀地

收稿日期: 2020-08-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0903100)、国家电网公司科技项目资助项目(521104170043)

作者简介: 蔡智斌(1996-),男,陕西籍,硕士研究生,研究方向为无线电能传输技术;

张国荣(1963-),男,江苏籍,教授,博士,研究方向为电能质量控制技术、电力电子变换技术等。

拾取耦合功率的无线电能传输耦合机构。在对耦合机构相关理论的学习及分析后,利用 Ansys Maxwell 进行了发射机构的电磁场仿真,并经过实验验证了耦合机构整体对于均匀、自由接收功率的性能要求。

2 磁耦合谐振式系统分析

磁耦合谐振式无线电能传输的耦合机构中有较大的漏感,会影响整个系统的电能传输效率,为了解决这个问题,可在耦合机构两侧加入谐振补偿电路。根据补偿电容的连接方式可将谐振补偿电路拓扑分为:SS(串联)结构、SP(串并)结构、PS(并串)结构、PP(并并)结构。在串联补偿电容以后,回路中的等效阻抗减小,导致励磁电流增大,利于发射机构发射磁场。而在并联补偿电容以后,回路中的等效阻抗增大,导致励磁电流减小,不利于耦合机构发射磁场。因而该系统选择 SS(串联)谐振补偿拓扑,系统简化电路如图 1 所示。其中 L_1 和 L_2 分别为耦合机构的发射机构和接收机构的自感, M 为其互感, C_1 和 C_2 分别为发射机构和接收机构的谐振电容, I_1 和 I_2 分别为流过发射侧和接收侧的电流, R_1 和 R_2 分别为发射机构和接收机构的内阻, R_L 为等效负载电阻, U_s 为交流电压源。

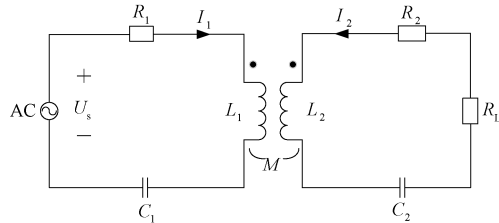


图 1 串联谐振系统简化电路图

Fig.1 Simplified circuit diagram for series resonance system

发射端等效阻抗 Z_1 为:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \quad (1)$$

接收端等效阻抗 Z_2 为:

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

式中, ω 为谐振角频率。

该系统模型的发射回路和接收回路的 KVL 方程分别为:

$$Z_1 I_1 + j\omega M I_2 = U_s \quad (3)$$

$$Z_2 I_2 + j\omega M I_1 = 0 \quad (4)$$

整理后得:

$$I_1 = \frac{U_s Z_2}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2} \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{-j\omega M U_s}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2} \quad (6)$$

则本系统的输入功率 P_{in} 和负载上的输出功率 P_{out} 分别为:

$$P_{in} = U_1 I_1 = \frac{U_s^2 Z_2}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2} \quad (7)$$

$$P_{out} = R_L I_2^2 = \frac{-\omega^2 M^2 U_s^2 R_L}{(Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2)^2} \quad (8)$$

本系统效率 η 为:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{-\omega^2 M^2 R_L}{Z_2 (Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2)} \quad (9)$$

3 无线电能传输耦合机构设计

无线电能传输系统耦合机构是实现能量从初级侧电场转化为磁场,再在次级侧将耦合到的磁场转化为电场的部分,是无线电能传输系统的核心。文中的耦合机构设计包括了发射机构设计和接收机构设计两部分,发射机构要达到发射出在接收区域内尽可能均匀的全方向磁场,接收机构则需要针对发射机构的特性进行分析设计达到耦合更多功率的目的。

3.1 发射机构设计

文中提出了一种由单电源驱动的半球体全方向磁场发射机构,其三维绕制模型的主视图如图 2 所示。为了创造更集中于半球体外区域且方向更多的磁场,将铜线沿半球体框架的底面圆形边缘绕制后,再由半球体顶部向下延伸绕制集中线圈,构造了一个有多个近似正交线圈的发射机构。在底面圆形边缘绕制线圈是为了增加发射机构磁场的全方向性,同时又减小了磁场矢量在区域内某一点的矢量和很小的可能性。整个发射机构线圈除了起点和终点,没有其他重复线径,并且中间没有任何断点,构成了闭合回路,这样做可有效减小线圈内阻。给发射机构通入电流后可以在机构框架外表面附近区域内形成方向基本垂直于半球体外表面的磁场。

发射机构表面磁场方向如图 3 所示,其中箭头为电流流经线圈的方向,对其进行分析发现,发射机构顶部集中绕制部分所形成的四个闭合曲面的磁场在任意时刻是由发射机构内部射出发射机构的,而其他曲面部分的磁场则与之相反,在磁场分界线两边的磁场方向相异,则接收机构在横跨磁场分界线

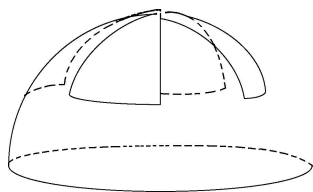


图 2 发射机构主视图

Fig.2 Main view of launch mechanism

时拾取的电压存在由正到负变化的情况,因此在变化过程中会有一个耦合电压为零的点,即在接收机构的几何中心与磁场分界线重合时耦合功率为零。根据卡瓦列里的“不可分量原理”分析可知,若将无数个耦合功率为零的分散点整合,可得到一条路径,在这条路径上的任意位置,耦合机构的耦合功率都为零。文中将这条路径命名为“低耦合路径”,利用低耦合路径的长度可以在一些模型相似的空间无线充电发射机构中比较其耦合性能高低,当接收机构大小相同时低耦合路径越长则发射机构的耦合性能越差,低耦合路径越短则发射机构的耦合性能越好。

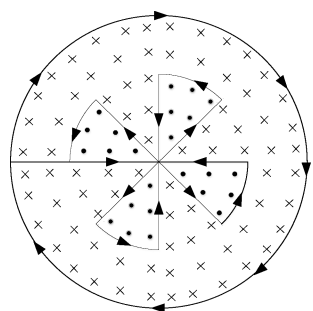


图 3 发射机构表面磁场方向图

Fig.3 Magnetic field direction diagram of launch mechanism surface

通过分析可知文中所设计的半球体框架发射机构的低耦合路径为其顶部集中绕制部分线圈所经过的路径,计算其低耦合路径 l_a 为:

$$l_a = \left(\frac{1}{2} 2\pi R_a \sin 60 + \frac{1}{4} 2\pi R_a \frac{60}{90} \right) k_a$$

$$= \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{8}{3} \right) k_a \pi R_a \quad (10)$$

式中, R_a 为发射机构框架半径; k_a 为该机构的路径重叠系数,用来调整由于机构绕制而造成的线圈重叠带来的细微误差。

图 4 所示为目前国内外讨论较多,应用也较多的球体结构的三个线圈正交的空间无线电能传输发射机构,若其同样是单电源驱动的发射机构,则其磁场方向展开图如图 5 所示,可以看到三个正交线圈

相互围成了八个封闭曲面,而每个封闭曲面的磁场方向都和其相邻的面的磁场方向相反,根据上述理论分析可得其低耦合路径就是其线圈所经过的路径。

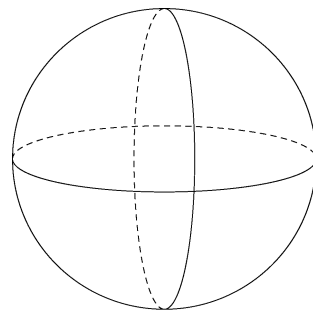


图 4 三正交线圈发射机构主视图

Fig.4 Main view of three-coil orthogonal launch mechanism

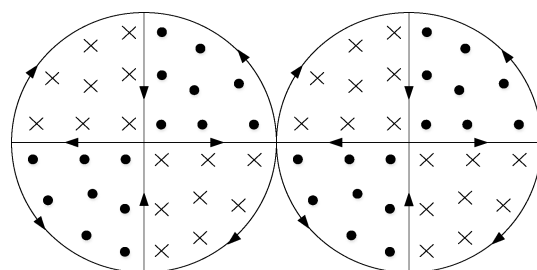


图 5 三正交线圈发射机构表面磁场方向图

Fig.5 Magnetic field direction diagram of launch mechanism surface of three orthogonal coils

计算得到三正交线圈圆形发射机构的低耦合路径 l_b 为:

$$l_b = 3k_b 2\pi R_b = 6k_b \pi R_b \quad (11)$$

式中, R_b 为发射机构球体框架半径; k_b 为该机构的路径重叠系数。

对比两种耦合机构的耦合性能优劣,首先需统一其有效长度尺寸,因此此处设 $R_a = R_b$,且根据微分基本原理,每一处重叠部分均为其线径整体上的一个极限值,个别点的极限值对整体线径长度的影响可忽略,所以此处设 $k_a = k_b = 1$,则对比两种耦合机构的低耦合路径:

$$\frac{l_a}{l_b} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{8}{3}}{6} \approx 0.59 \quad (12)$$

当发射机构的有效长度相同时,文中设计的发射机构的低耦合路径约为目前学术界普遍讨论的发射机构的低耦合路径的 0.6,即本文设计的空间无线电能发射机构的耦合性能较好。

图 6 为利用 Ansys Maxwell 软件对该发射机构

进行磁场仿真的磁场强度矢量图,可见其磁场磁力线较为集中且均匀度较好。

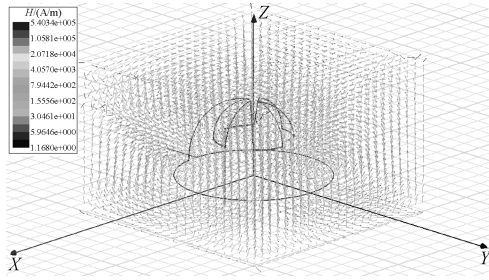


图6 发射机构 Maxwell 磁场仿真

Fig.6 Magnetic field simulation of launch mechanism by Maxwell

3.2 接收机构设计

接收机构的作用是将发射机构发出的磁场通过耦合转化为电能供给到次级侧负载。目前国内外对于接收机构线圈的研究较少,主流使用较多的主要有圆形和正方形两种形状的接收线圈,此节将从设计的发射机构出发选择适合的接收线圈模型。

若将接收机构的几何中心点与发射机构的低耦合路径重合,并让接收机构几何中心点沿低耦合路径的轨迹全程移动,则可以划出一块区域,而在这块区域上耦合机构的耦合效率较低,将该区域命名为“低耦合区域”。利用积分原理将低耦合路径扩展为一个面,并借此面来判断不同模型接收线圈对于发射机构的耦合性能的优劣。当接收机构面积一定时,低耦合区域面积越大则耦合机构性能越差,而低耦合区域面积越小则耦合机构性能越好。

若选取圆形线圈作为接收机构模型,则低耦合区域面积 S_1 计算为:

$$S_1 = \int_0^l 2\pi r dl = 2\pi r l \quad (13)$$

式中, l 为发射机构低耦合路径长度; r 为圆形线圈半径。

若选取正方形线圈作为接收机构模型,由式(13)可知接收机构面积应为 πr^2 ,则正方形线圈的边长可求得为,因为正方形线圈的有效耦合长度是其对角线,长度为 $(2\pi)^{1/2}r$,则低耦合区域面积 S_2 计算为:

$$S_2 = \int_0^l \sqrt{2\pi} r dl = \sqrt{2\pi} r l \quad (14)$$

经过对比不难发现圆形线圈的低耦合区域面积比正方形线圈的小,而且线圈的折角会导致磁场耦合一定程度上失真,圆形线圈的边缘相较正方形线

圈更为圆滑,在单位面积上耦合系数更高^[10],因此本文选取圆形线圈作为耦合机构的模型。

因为空间无线电能传输系统首先需要满足其对于耦合机构间的相对位置的改变而表现出的不敏感性,所以耦合机构的设计不应该只考虑接收机构相对于发射机构的静态性能,更应该着重考虑其动态性能。耦合机构间的动态方式主要有接收机构绕发射机构旋转(公转)和接收机构绕自身几何中心旋转(自转)。若接收机构的公转路径刚好与某一段磁场分界线重合或在空间范围内出现磁场矢量叠加导致出现磁场强度较低的个别点,都会造成接收机构耦合功率较低。文中利用 Ansys Maxwell 仿真软件,在发射机构仿真成功的基础上创建一个接收线圈平面,通过仿真软件后处理得到接收机构平面上收集到的发射机构发出磁场的磁场强度,以此来判断发射机构与接收机构的耦合特性。

考虑公转时,从文中设计的耦合机构特性出发,设定轨迹角度 θ 分别为 0° 、 22.5° 、 45° 、 67.5° 、 90° 、 112.5° 、 135° 、 157.5° 和绕行角度 ψ 分别为 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 、 180° ,其含义分别如图 7、图 8 所示。

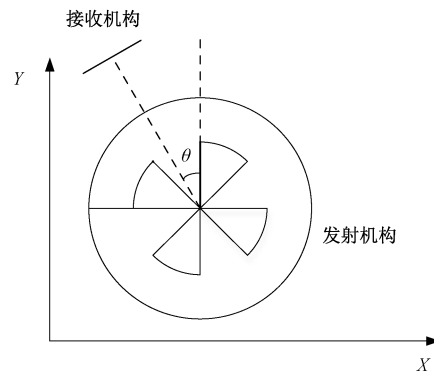


图7 轨迹角度 θ 几何意义

Fig.7 Geometric meaning of trajectory angle θ

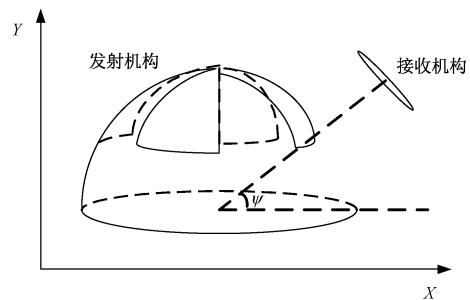


图8 绕行角度 ψ 几何意义

Fig.8 Geometric meaning of detour angle ψ

通过 Ansys Maxwell 仿真软件得到相应结果的折线统计图如图 9 所示,分析图 9 可知公转时在绕行角度 ψ 一定时大部分接收平面上的磁场强度 H 随着轨迹角度的变化波动很小,而当绕行角度 $\psi=60^\circ$ 和 120° 时磁场强度随着轨迹角度的变化出现了一定的波动,这是因为在这两个绕行角度时接收机构随着轨迹角度的变化会来回横跨低耦合路径,导致磁场强度有由高到低再到高的变化趋势,也从仿真角度验证了上文提出的低耦合路径理论的可行性。

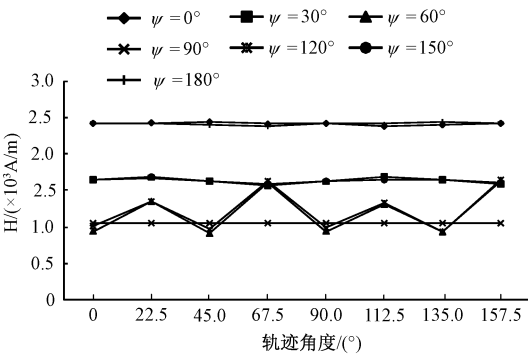


图 9 磁场强度随角度变化情况折线图
Fig.9 Line diagram of magnetic field intensity
varying with angle

考虑自转时要着重讨论接收机构在定点处随着自转角度和方向的变化其耦合性能的波动,因此轨迹角度选取 0° , 绕行角度分别取 0° 、 45° 、 90° 、 135° , 主要在这四个点研究接收机构分别进行正转和侧转时随着其自转角度变化接收机构平面上的磁场强度 H 的波动,如表 1 和表 2 所示,可见在四个采样点上接收机构不论正转还是侧转且不论原接收机构与自转后的接收机构的位置关系有什么变化,其接收平面上的磁场强度波动幅度很小。

表 1 接收机构正转时磁场强度变化
Tab.1 Intensity change of positive rotating
magnetic field of receiving mechanism

绕行 角度 $\psi/(^\circ)$	磁场强度 $H/(\times 10^3 \text{ A/m})$			
	旋转 0°	旋转 45°	旋转 90°	旋转 135°
0	2.42	2.43	2.44	2.45
45	1.36	1.35	1.38	1.36
90	1.05	1.09	1.04	1.07
135	1.33	1.31	1.35	1.30

综上所述上文设计的耦合机构可以满足空间无线电能传输对于接受机构高自由度的要求,且能实现耦合性能稳定、耦合功率波动较小的目标。

表 2 接收机构侧转时磁场强度变化

Tab.2 Intensity change of lateral rotating
magnetic field of receiving mechanism

绕行角度 $\psi/(^\circ)$	磁场强度 $H(\times 10^3 \text{ A/m})$			
	旋转 0°	旋转 45°	旋转 90°	旋转 135°
0	2.42	2.42	2.43	2.44
45	1.36	1.36	1.35	1.37
90	1.05	1.03	1.08	1.04
135	1.33	1.34	1.36	1.32

4 无线电能传输耦合机构实验验证

搭建了实验平台对耦合机构传输能量的均匀性和自由度进行验证,如图 10 所示。100 kHz 功率信号由信号发生器发出后经 LM3886TF 为核心的功率放大电路得到,谐振模块采用多电容并联的调谐电容串联耦合机构组成,接收侧负载为 0.51Ω 精密电阻,发射机构与接收机构耦合距离约 10 cm。电压参数通过示波器读取接收线圈两侧得到^[11]。实验参数如表 3 所示。

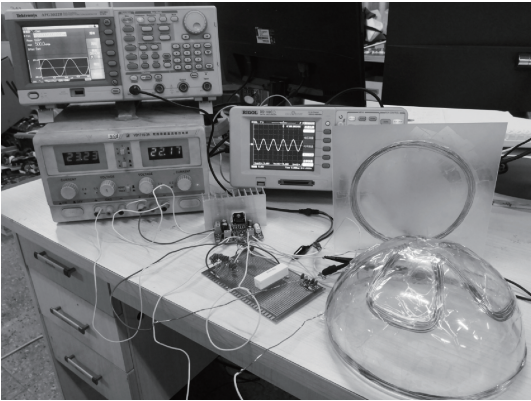


图 10 实验装置平台
Fig.10 Experimental setup platform

表 3 实验主要参数

Tab.3 Main parameters of experiment

参数	数值
$L_1/\mu\text{H}$	40.1
C_1/nF	63.2
$L_2/\mu\text{H}$	16.8
C_2/nF	150.8
R/Ω	0.51

实验数据折线图如图 11 所示,可以看出与上文仿真得到的结果一样,公转时当绕行角度 ψ 一定时大部分接收线圈两侧的电压随着轨迹角度的变化波动很小,而当绕行角度 $\psi=60^\circ$ 与 120° 时接收线圈两

侧电压随着轨迹角度的变化出现了一定的波动,将实验数据代入式(15),计算出数据集的标准差 S 。

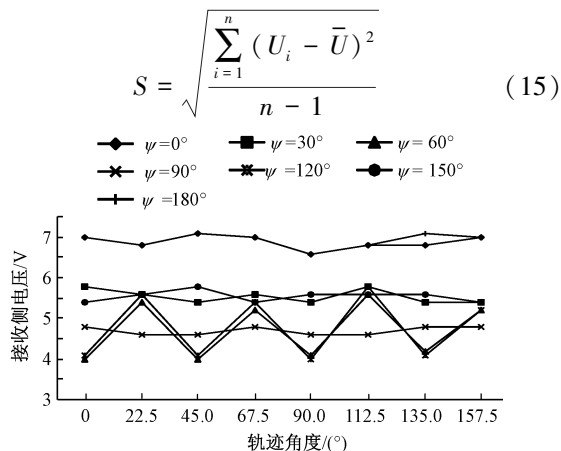


图 11 接收侧电压随角度变化情况折线图

Fig.11 Line diagram of receiving side voltage varying with angle

计算可得标准差 $S=0.981$,数据的离散程度较小,电压变化较为平滑。而在实际应用中考虑到控制系统大多具有调压、变频等改变输入功率以维持输出功率大小的能力,则可以满足此系统的正常运行。

5 结论

文中设计了一种新型单一电源供电的空间无线电能传输系统的耦合机构,用于实现耦合机构高自由度能量传输及均匀的功率拾取。提出低耦合路径原理对发射机构进行理论分析及设计指导,并将其扩展至低耦合区域原理用于筛选适合发射机构的接收机构。而后利用 Ansys Maxwell 软件验证了发射机构生成空间磁场的均匀度和接收机构接收功率高自由度且均匀的要求,最后通过实验验证了耦合系统的整体性能,实验结果表明文中设计的新型耦合机构可以实现在空间区域内高自由度的拾取较为均匀的功率。

参考文献 (References):

[1] 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.

[2] 宋显锦, 刘国强, 张超, 等 (Song Xianjin, Liu Guo-

qiang, Zhang Chao, et al.). 脉冲方波激励下的无线电能传输仿真与实验 (Field-circuit coupled simulation and experiment for wireless power transmission excited by square wave) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (5): 35-40.

[3] 刘振威, 张晓丽, 陈天锦, 等 (Liu Zhenwei, Zhang Xiaoli, Chen Tianjin, et al.). 电动汽车无线充电新型 DD 耦合机构设计与优化 (Design and optimization of novel DD coupling mechanism for wireless charging of ev) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2020, 57 (12): 98-104.

[4] 薛明, 杨庆新, 李阳, 等 (Xue Ming, Yang Qingxin, Li Yang, et al.). 磁耦合谐振式无线电能传输系统存在干扰因素下的频率特性研究 (Research of frequency characteristics in wireless power transfer system via magnetic resonance coupling under interference factors) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (4): 24-30.

[5] Che B, Meng F, Lyu Y, et al. Omnidirectional wireless power transfer system supporting mobile devices [A]. 2015 IEEE International Magnetics Conference [C]. Beijing, 2015. 1.

[6] Wang Dongyang, Zhu Yongxin, Guo Hongliang, et al. Enabling multi-angle wireless power transmission via magnetic resonant coupling [A]. 2012 7th International Conference on Computing and Convergence Technology [C]. Seoul, 2012. 1395-1400.

[7] Kim J, Kim D, Choi J, et al. Free-positioning wireless charging system for small electronic Devices Using a bowl-shaped transmitting coil [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63 (3): 791-800.

[8] Lin D, Zhang C, Hui S Y R. Mathematical analysis of omnidirectional wireless power transfer-part-1: two-dimensional systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32 (1): 625-633.

[9] Ha-Van N, Seo C. Analytical and experimental investigations of omnidirectional wireless power transfer using a cubic transmitter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 (2): 1358-1366.

[10] 张林 (Zhang Lin). 磁耦合式无线电能高效率传输方法的研究 (Research on high efficiency transmission method of magnetically coupled wireless power) [D]. 重庆: 重庆理工大学 (Chongqing: Chongqing University of Technology), 2019.

[11] 赵鑫 (Zhao Xin). 基于磁耦合谐振的空间无线电能传输系统耦合机构设计 (Design of coupling mechanism

of omnidirectional wireless power transfer system based on magnetically coupled resonance) [D]. 安徽: 合肥工业

大学 (Anhui: Hefei University of Technology), 2019.

Design of new space wireless power transmission system coupling mechanism

CAI Zhi-bin, ZHANG Guo-rong, XU Chen-lin, GAO Kai, PENG Bo, XIE Run-sheng

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The power pickup efficiency of the conventional forward pair planar coils decreases rapidly with the increase of the relative offset angle between the coupling mechanisms. The space radio energy transmission system can solve this problem well. Although the coupling mechanism of space radio energy transmission systems at home and abroad solves the problem of relative deviation, the receiving mechanism can only receive relatively uniform power with specific trajectory and detour mode, and it is not a high degree of freedom in the real sense. Therefore, a new coupling mechanism of wireless power transmission system is proposed in this paper. The coupling mechanism is powered by a single power source, which can realize high degree of freedom and uniform power pickup of the receiving mechanism. The low coupling path theory is proposed to analyze the transmitting mechanism, and the magnetic field uniformity is verified by Ansys Maxwell magnetic field simulation. The receiver mechanism which is most suitable for transmitting mechanism is selected by the low coupling region theory. Finally, an experimental platform was built to verify the uniformity and freedom of power transmission of the coupling mechanism. The experimental results show that the standard deviation of the receiving voltage data set is less than 1 on the premise of ensuring the receiving coil to receive with high degree of freedom, that is, the system could carry out a relatively stable power transmission with high degree of freedom.

Key words: wireless power transfer; coupling mechanism; high degree of freedom; omnidirectional field