

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.02.012

新型无线电能传输三维耦合机构的设计与优化

李 阳^{1,2}, 娄志刚¹, 胡涛成¹, 张博扬¹, 安张磊¹

(1. 天津工业大学电气工程学院, 天津 300387; 2. 天津理工大学电气工程与自动化学院, 天津 300384)

摘要: 为了进一步提高无线电能传输系统(WPT)的空间自由度,提出了一种新型类半球体状发射机构,从理论角度出发,利用互感叠加原理与等效电路模型分析了三维无线电能传输系统的特性;建立阵列式三维电能传输系统仿真模型,分析不同控制方式下的磁场分布规律,分别从距离特性与磁场分布研究系统传输性能,并搭建了无线电能三维传输实验系统,对该发射机构的传输性能进行验证。结果表明:新型结构最远可在400 mm处实现效率为19.2%的能量传输;在相同距离下,处于同一水平面的负载线圈在各方向接收功率最大效率偏差仅为8%,具有高均匀度磁场;该新型三维耦合机构具有空间高自由度、无方向性等良好的传输性能。

关键词: 无线电能传输(WPT); 三维发射线圈; 空间高自由度; 传输特性

中图分类号: TM724

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)02-0075-08

Design and optimization of novel three-dimensional coupling mechanism for wireless power transfer

LI Yang^{1,2}, LOU Zhigang¹, HU Taocheng¹, ZHANG Boyang¹, AN Zhanglei¹

(1. School of Electrical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to further improve the space freedom of the wireless power transfer (WPT) system, a new semi-spheroid transmitting mechanism is proposed. From the theoretical point of view, the characteristics of three-dimensional (3D) WPT system are analyzed using mutual inductance superposition principle and equivalent circuit model. The simulation model of array 3D power transmission system is established, and the distribution of magnetic field under different control modes is analyzed. The transmission performance of the system was studied from the perspective of distance characteristics and magnetic field distribution, respectively. A three-dimensional wireless energy transmission experimental system is established to verify the transmission performance of the transmission mechanism. The results show that the new structure can achieve energy transfer with an efficiency of 19.2% up to 400 mm. At the same distance, the maximum efficiency deviation of the load coil receiving power in all directions on the same horizontal plane is only 8%, and it has a high uniformity magnetic field. The experimental results show that the new type of 3D coupling mechanism has good transmission performance such as high spatial freedom and directionless.

Key words: wireless power transfer (WPT); three-dimensional transmitting coil; spatial high degree of freedom; transmission characteristics

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术使用电设备摆脱了电线的束缚,其灵活、高效、便捷的特性令该技术逐渐成为传统输电方式的有力补充,在众多应用领域获得了广泛关注^[1-5]。2007年,麻省理工学院(MIT)的学者通过磁耦合谐振的方式,使用耦合

线圈点亮了2 m外的灯泡,并且可以实现在2 m的距离范围内以40%的效率传输60 W的电能^[6],这使得对无线电能传输技术的研究再次进入高潮^[7-9]。

无线电能传输技术在消费电子^[10-12]、工业^[13-14]和植入式医疗设备^[15]等领域具有明显的优势,但是大多数

收稿日期: 2022-09-30

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51877151)

通信作者: 李 阳(1979—),男,博士,教授,主要研究方向为无线电能传输、电力电子技术。E-mail: liyang@email.tjut.edu.cn

产品传能的距离较短,灵活性差,传统的平面式无线传能方式极大的限制了技术本身的便捷性。因此,对于具有三维空间高自由度的无线传能技术的研究意义重大^[16-17]。

目前,国内外许多研究为打破传统平面线圈传输系统的空间限制做出了很多努力。在国外的研究中,一种新型的全向碗状磁场发射线圈结构可以较好地耦合机构内部空间实现全向无线传能,该系统利用 3 个 6.78 MHz 的 LCL 谐振变换器来驱动发射线圈产生定向磁场,但传输范围依然具有局限性^[18]。3D 打印而成的三维发射机构可以实现较高的磁场自由度,依据空间位置中需要磁场的强度使用格林函数对磁场进行解析计算,从而改变三维线圈形状,该方法利用 3 个三维线圈的单源阵列实现空间中的任意方向磁场覆盖,同时实验验证了磁场合成能力^[19],但该发射机构在负载位置发生变化时需要重新打印三维线圈,故不具有较好的便捷性。研究人员设计了一种使用单导线方式缠绕的正方体形状的全向三维耦合机构,该结构不采用电流相位控制,仅使用简单的单电源控制方式在正方体的周围环绕方向产生均匀磁场,在最佳条件下传输效率可以达到 60%^[20],但该方法仅将均匀磁场集中在发射机构侧面,未对空间中其他方向的磁场分布进行分析,在接收线圈空间位置上仍有局限性。国内有学者提出了一种依照仿生关节设计的缠绕线圈方法,该方法允许接收线圈在传能过程中存在大范围角度错位情况^[21],说明通过合理设计耦合机构可以增加传能系统的无方向性范围,但其球状接收线圈在使用场景上具有很大的局限性,并且仅能在发射线圈包裹的内部区域进行传能,无法进一步提高传输距离或者改变接收线圈的传输位置。

以上针对提高无线传能自由度所得出的结构并未对三维空间中整体的磁场分布进行分析,并且大多数结构的接收系统在发射结构内部,在使用场景上具有局限性。本文提出一种新型三维耦合机构,该结构在空间中具有广泛且均匀的磁场分布,发射机构向外对接收端进行能量传输,接收线圈所处位置具有更高的自由性,利用仿真与实验探究三维耦合机构的传输特性。首先,针对本文所提出的新型三维耦合机构,利用等效电路模型分析计算互感与系统传能功效的关系表达式;其次,建立三维传能系统阵列仿真模型,探究激励的相位变化对磁场分布的影响,通过改变接收线圈位置产生的传输功效变化,分析本文所提出结构在三维空间中的传输特性。最后,根据仿真分析设计并搭建了三维无线传能系统,对发射机构的距离特性和空间磁场均匀性进行实验验证。

1 理论分析

新型三维耦合机构如图 1 所示,三维耦合机构中每个面的基础形状为正五边形,6 个正五边形相互拼接组成向外发射磁场的类半球体。

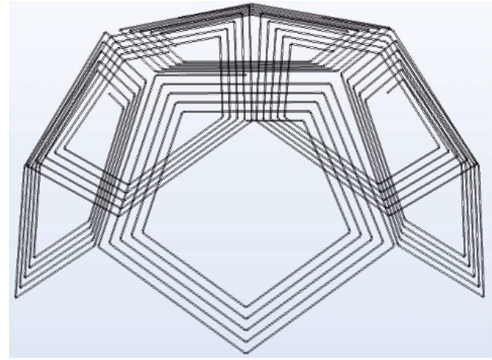


图 1 三维发射机构示意图

Fig.1 Schematic diagram of 3D transmitter mechanism

从电路角度对阵列式三维传输理论进行分析。WPT 系统发射线圈与接收线圈之间进行能量传递时,互感是主要影响因素,由于大多情况下接收线圈不与发射线圈相互垂直,所以接收线圈的互感耦合主要来自于组成发射机构的每个线圈,表示互感的叠加;同时,组成发射机构的各个线圈之间也存在互感的相互影响。所以,在分析多发射阵列式耦合机构时,需对整体互感之间的影响进行研究,其电路模型如图 2 所示。

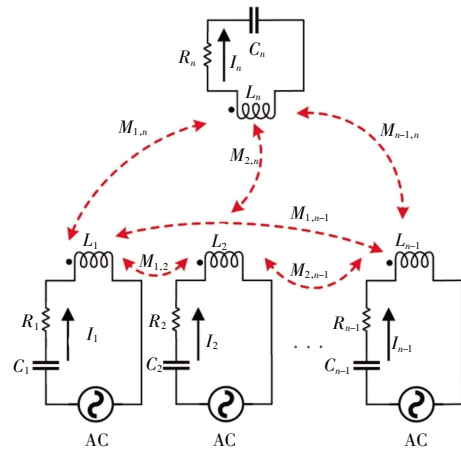


图 2 等效电路模型

Fig.2 Equivalent circuit model

由图 2 可知,多发射线圈耦合机构由 $n-1$ 个线圈组合而成,第 n 个线圈为负载接收线圈。对于这种线圈阵列形式的传能系统,可以使用完整的函数体系分析系统的特性规律。根据基尔霍夫定律^[22],可以得到以下公式:

$$\begin{bmatrix}
 j\omega M_{12} & R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}) & j\omega M_{23} & \cdots & \cdots & j\omega M_{2n} \\
 j\omega M_{13} & j\omega M_{23} & R_3 + j(\omega L_3 - \frac{1}{\omega C_3}) & \cdots & \cdots & j\omega M_{3n} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 j\omega M_{1(n-1)} & \cdots & \cdots & \cdots & R_{n-1} + j(\omega L_{n-1} - \frac{1}{\omega C_{n-1}}) & jM_{(n-1)n} \\
 j\omega M_{1n} & \cdots & \cdots & \cdots & jM_{(n-1)n} & R_n + R_L + j(\omega L_n - \frac{1}{\omega C_{nc}})
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 I_1 \\
 I_2 \\
 \vdots \\
 I_{n-1} \\
 I_n
 \end{bmatrix} =
 \begin{bmatrix}
 V_1 < \theta_1 \\
 V_2 < \theta_2 \\
 \vdots \\
 V_{n-1} < \theta_{n-1} \\
 0
 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_{ij} = k_{ij} \sqrt{L_i L_j} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j) \quad (2)$$

式中: M_{ij} 为线圈 i 与线圈 j 之间的耦合互感; k_{ij} 为线圈 i 与线圈 j 之间的磁耦合系数; R_L 为系统负载, 与负载线圈 n 串联; C_{nc} 为负载的等效电容和线圈的补偿电容, 可以与负载串联或者并联; C_i 为第 i 个线圈的调谐电容; L_i 为第 i 个线圈的自感; ω 为系统的角频率, 与工作频率有关; R_i 为第 i 个线圈的阻抗; I_i 为流过第 i 个线圈的电流; V_i 为第 i 个发射线圈在接收线圈所产生的感应电动势; θ_i 为第 i 个发射线圈中心线与接收线圈中心线间的夹角。式(1)代表了线圈阵列式磁耦合谐振式无线电能传输系统的通用电路模型数学表达式, 系统的效率表达式为:

$$\eta = \frac{I_n^2 R_L}{I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + \cdots + I_n^2 (R_n + R_L)} = \frac{R_L}{(I_1/I_n)^2 R_1 + (I_2/I_n)^2 R_2 + \cdots + (I_{n-1}/I_n)^2 R_{n-1} + R_n + R_L} \quad (3)$$

式中: $I_1 = I_s \sin(\omega t)$, I_s 为交流电流源, 结合式(1)一式(3), 给定相应的电容自感等系统参数, 可以得到关于不同系数的效率关系函数:

$$\eta = f(\omega, M_{12}, M_{13}, \dots, M_{(n-1)n}, R_L) \quad (4)$$

在系统中, 当系统线圈参数(大小、匝数、线径、匝间距、半径等)确定之后, 便可计算得出各绕组间的互感系数。由此得出系统传输效率与耦合线圈之间的距离关系表达式:

$$\eta = f(\omega, d_{12}, d_{13}, \dots, d_{(n-1)n}, R_L) \quad (5)$$

由于各线圈之间的距离 d 与两线圈之间的空间参数相关^[23], 因此, 系统传输效率受不同耦合线圈之间的横向偏移、纵向偏移、角度偏移等因素影响。

2 仿真研究

2.1 仿真模型搭建

根据理论分析设计得出三维无线电能传输发射机构, 为了验证该结构在三维空间中具有良好的传输特性, 建立仿真模型, 以柏拉图立体之一的正十二面体为基础设计形状, 其具有完美的对称性, 由 12 个正五边形组成。根据结构的对称性, 使用半正十二面体进行传能系统的特性分析, 即 6 个正五边形子线圈阵列, 则可以得到所设计三维传能系统的特性, 具体发射线圈参数如表 1 所示。

表 1 WPT 发射线圈仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of WPT transmitter coil

子线圈				线圈	谐振
匝数/匝	边长/mm	匝间距/mm	数量/个	线径/mm	频率/MHz
5	200	10	6	1.06	6.78

各平面线圈的连接方式有串联连接与并联连接。对于阵列形式的发射线圈耦合机构, 串联连接方式指单个子线圈出线端与相邻子线圈进线端相连, 可以通过线圈的缠绕方式改变供电时不同线圈的磁场方向, 但由于电源同时提供电能, 不同方向磁场发射线圈相位只能相差 180° ; 并联连接方式指每个子线圈独立完成缠绕, 自身首尾相连, 不同子线圈单独供电, 这样可以通过改变发射源电流相位的方式控制传能系统磁场的变化。所以, 阵列型三维发射机构的并联连接方式更具有研究价值与意义。

2.2 空间磁场强度与相位关系

为了控制耦合机构不同平面的磁场方向, 从而根据接收线圈的位置实现区域磁场的增强, 仿真中使用

并联控制方式,通过单独调节构成发射机构各个线圈的电流源相位来调节不同发射面的磁场方向。使用电压激励对发射机构进行整体调谐,设置电压源内阻为 50Ω ,对各个平面上发射线圈串联的调谐电容进行整体参数化扫描,当集总端口两端阻抗虚部为 0 时,调谐电容值为 12.64 pF ,此时系统阻抗实部为 82.13Ω ,集总端口功率为 23.5 W 。将此调谐电容参数带入到原系统中,设置电流源激励,通过相位控制改变各个平面产生的磁场方向。

本文采用控制变量的方式对不同相位组合进行磁场分析,同时电流相位只相差 180° ,在传能过程中仅存在正向与反向两种情况的磁场叠加。根据组成线圈的位置不同,有不同的控制组合。发射机构的俯视图如图 3 所示。

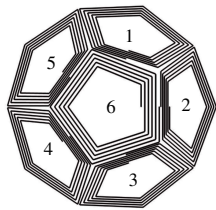


图 3 发射机构俯视图

Fig.3 Top view of transmitter mechanism

对组成发射机构的 6 个正五边形平面进行编号,改变不同面的电流相位,从而改变发射机构周围磁场的分布。仿真中设置一个距离发射机构中心 300 mm 的球面,在此球面上通过观察磁通密度模的方式判断不同线圈相位情况区域的磁场强度,列举 4 种电流相位控制情况,磁场强度大小与分布如图 4 所示。

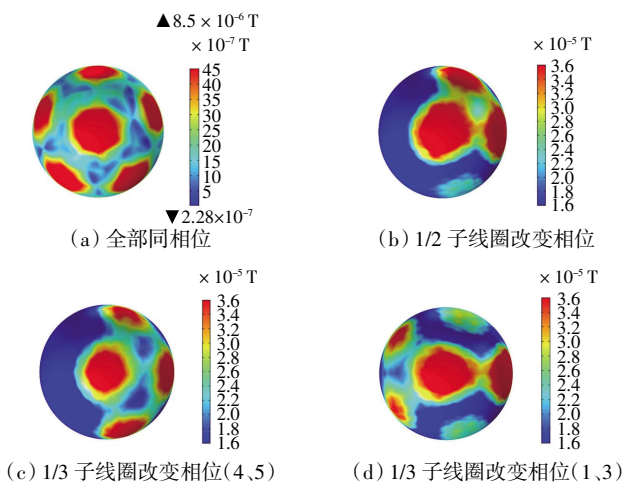


图 4 不同相位控制磁场方向磁通密度模

Fig.4 Magnetic flux density mode as magnetic field direction is controlled by different phases

发射线圈周围的磁场强度取决于通过线圈的闭

合磁感线密度,仿真中设计的发射机构对应不同平面线圈通过的闭合磁感线越密,周围磁场强度越强。图 4 (a)中对应的各个正五边形平面线圈不改变电流源相位,磁场方向在同一时刻保持一致,各个平面发射线圈产生的外部磁场较为均匀;图 4(b)中对应图中编号 1、2 与 6 的线圈与对应编号 3、4、5 的线圈电流相位相差 180° ,同一时刻产生的磁场方向相反,根据发射机构整体产生磁场方向区域一致性,闭合磁感线回路集中穿过编号为 1、2、6 的线圈,因此,在对应区域磁场较强,接收线圈在此区域相比较其他位置可以获得更大的负载接收功率;图 4(c)中对应编号 1、2、3、6 线圈电流相位相同,与对应编号 4、5 线圈电流相位相差 180° ,类似的,此时发射机构闭合磁感线被集中穿过 1、2、3、6 线圈,因此,对应位置区域磁场较强;图 4(d)中对应编号 1、3 线圈电流相位与对应编号 2、4、5、6 线圈电流相位相差 180° ,磁场同样集中在对应区域。

根据上述电源相位与产生磁场区域强度的关系仿真表明,可以通过并联方式来控制电源相位,进而改变线圈在空间中的磁场分布。理论上可以对接收端的位置实时跟踪,通过对源端的相位调节,使对应位置提供最大的磁场强度与发射功率,但在相位控制的作用下,空间中其他位置的磁场会有明显的衰减现象,当接收线圈移动时不能保证能量的稳定传输。考虑到三维电能传输的均匀性,本文采用源端相位不发生变化的控制方式,可以在耦合机构周围产生相对均匀的磁场。

2.3 空间传输特性仿真分析

2.3.1 距离特性分析

根据图 3 所示发射耦合机构的几何性质,过顶面正五边形的内切圆圆心与顶面正五边形的顶点做发射机构的纵向横截面,在此二维平面上进行发射机构的距离特性分析,可以覆盖发射机构各个方向范围。接收线圈采用螺线管形状,螺线管半径与组成发射机构的正五边形平面内切圆半径一致,线圈参数如表 2 所示。空间传输特性的系统模型如图 5 所示。

表 2 WPT 接收线圈仿真参数

Tab.2 Simulation parameters of WPT receiver coil

线圈匝数/ 匝	线圈半径/ mm	轴向节距/ mm	线圈线径/ mm	谐振频率/ MHz	负载电阻/ Ω
5	153.2	10	1.06	6.78	50

由图 5 可知,初始模型将接收线圈平行于发射机构法向方向放置,螺线管中心与发射机构中心的连线与水平面夹角为 0° ,此时发射机构中心与螺线管中心的距离用 d 表示。对三维传输系统的距离特性进行分

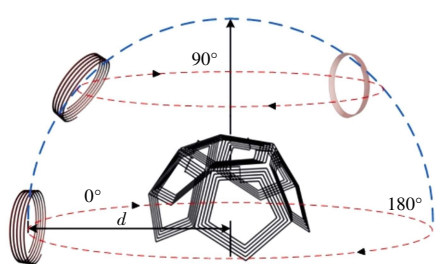


图 5 传输特性的系统模型

Fig.5 System model of transmission characteristic

析,仿真过程中分别在与水平面不同夹角的情况下扫描距离 d ,接收线圈运动轨迹如图 5 蓝色虚线所示。与水平面夹角起始值为 0° ,每隔 30° 进行一次距离扫描,到 180° 截止,得到发射系统周围不同方向延伸距离与系统传输功率效率的关系等值线,如图 6 所示。值得注意的是,根据发射机构的物理结构特性,接收线圈初始位置与两个面的相邻边正对,接收功率大多转换于相邻两平面产生磁场叠加;随着在同一截面内扫描距离方向角度的增大,在 $90^\circ\sim 180^\circ$ 之间接收线圈基本与发射机构单一平面正对,接收功率大多转换于正对平面产生磁场。在此截面进行讨论的益处在于从二维平面对三维系统不同方向情况进行了全覆盖。

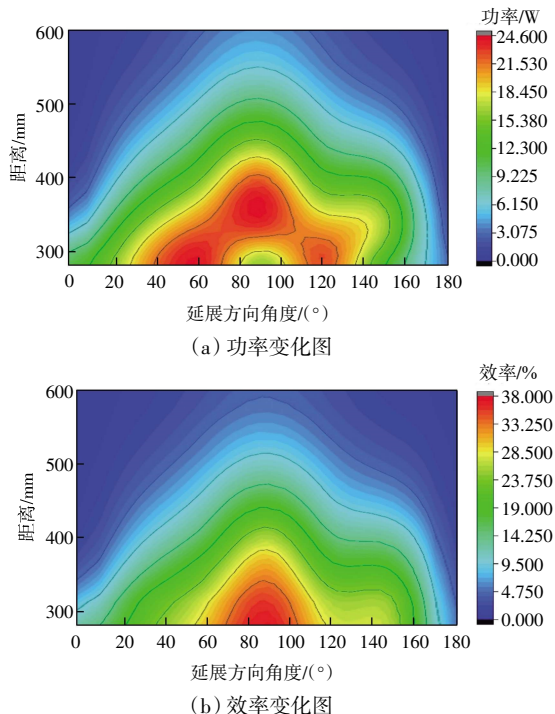


图 6 三维传能系统距离特性仿真结果

Fig.6 Simulation results of distance characteristics of 3D WPT system

由图 6 可知,当接收线圈与发射机构中心位于水平面时,由于耦合机构下半段未设置屏蔽结构,接收线圈受到底部磁场影响,在 0° 以及 180° 方向延展的负

载接收功率与系统传能效率较低;在发射机构顶部,由于顶部线圈对整体磁场有聚集作用,在与发射机构中心位置距离相同的条件下,接收线圈位于顶部所获得的负载接收功率与系统传输效率相对较高;从图 6 (a)中可以看出,当接收线圈位于发射机构顶部时,负载接收功率达到峰值的传输距离最远,在 400 mm 时效率峰值可达 25% 。

2.3.2 磁场分布均匀性分析

通过观察系统传能过程中不同耦合机构位置的磁通密度模(T)可以直观的表达相对应位置的磁场强度,从而可以对比不同接收线圈位置的负载接收功率。设置传能系统耦合机构中心距离为 350 mm ,接收线圈处于不同位置情况下的磁场强度如图 7 所示。

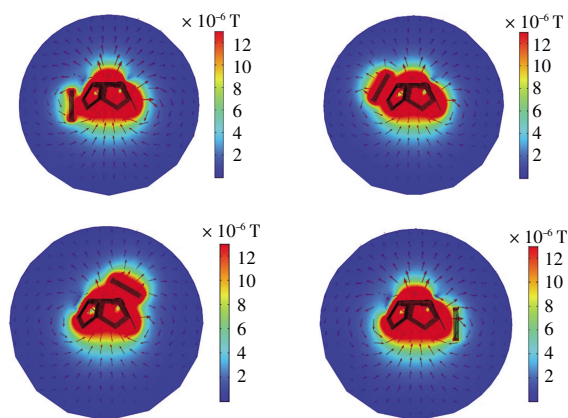


图 7 接收线圈不同位置下磁场强度

Fig.7 Magnetic field strength at different receiver coil positions

由图 7 可知,接收线圈处于耦合机构下半段时受到了底部磁场的影响,大部分磁力线与耦合机构底部形成通路,故穿过接收线圈的磁力线减少,磁通密度降低;当接收线圈处于其他位置时,发射机构周围磁场会向其聚集,局部区域磁通密度增大,且越靠近机构顶部,底部磁场对接收的干扰就越小,磁通密度模值越大。

根据三维系统的距离特性,固定接收线圈中心与发射机构中心距离 $d = 350\text{ mm}$ 的接收半球面,通过系统功效的变化程度分析发射机构空间磁场的均匀性。系统各参数保持不变,在接收线圈中心与发射机构中心连线与水平面夹角分别为 20° 、 40° 、 60° 、 80° 时,令接收线圈绕发射机构中垂线旋转,运动轨迹同图 5 红色虚线所示,每旋转 10° 计算 1 次系统传输效率,观察分析系统不同方向的均匀性如图 8 所示。

由图 8 可以看出,随着发射线圈中心位置的上移,系统传输效率逐渐提高,发射机构在空间中产生的磁场在上方位置较强,这是由于顶面线圈对侧面线

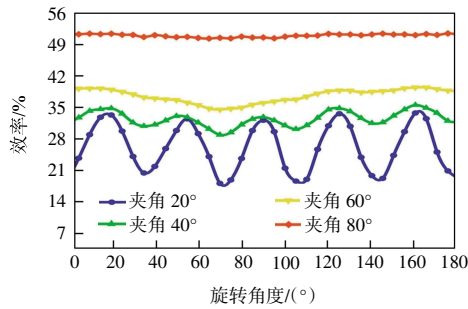


图 8 三维传能系统均匀性仿真结果

Fig.8 Simulation results of uniformity of 3D WPT system

圈产生的磁场有聚集作用。同时,效率会随着接收线圈围绕发射机构横向旋转的角度增加出现波动。仿真结果中,耦合机构中心连线与水平面夹角为 20°时,系统传输功率波动最大;夹角为 80°时,系统传输功率波动最小,基本保持恒定。以 20°方向旋转效率为例,当效率发生波动时,第 1 个波峰效率在旋转角度为 36°左右,此时接收线圈处于正对发射机构侧边的平面位置,接收功率大部分来自正对边所产生的磁场;当系统效率位于波谷时,根据旋转角度观察到接收线圈位置正对发射机构侧边的交界棱角,接收功率转换自相邻两线圈产生的磁场叠加。通过观察磁通密度模可以直观的显示接收线圈处于 2 种位置情况下的磁场强度,如图 9 所示,此时耦合机构中心连线与水平面夹角为 40°。由图 9 可以看出,当接收线圈位置正对于发射机构侧边的交界棱角时,接收线圈磁通密度模较弱,磁场强度较低,因此,负载接收功率值处于波谷位置。

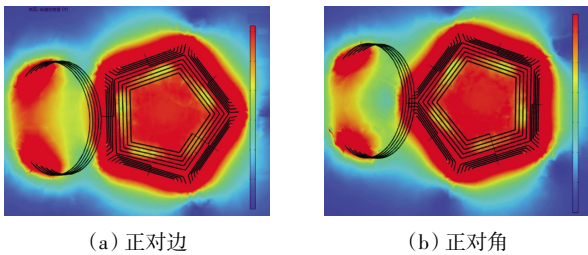


图 9 接收线圈位于正对边与正对角位置的磁场强度对比
 Fig.9 Comparison of magnetic field intensity between receiving coil located on opposite side and opposite corner

对不同距离下的磁场均匀性进行仿真分析,以耦合机构中心连线与水平面夹角为 20°时为例,分别在中心距离为 350 与 400 mm 时使得接收线圈绕球面横向旋转,得到 2 种距离下的系统传输效率,不同距离情况下的磁场均匀程度变化如图 10 所示。

由图 10 可以看出,随着中心线之间距离增加,接收线圈旋转过程中系统传输效率的最大值与最小值之间的差值变小,发射机构所产生的磁场范围逐渐扩大,磁场均匀性得到了提高,证明了该结构的可行性。

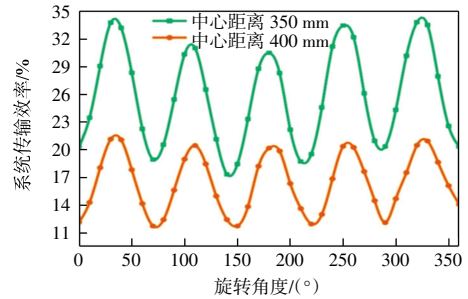


图 10 不同距离下三维传能系统的均匀性仿真结果

Fig.10 Simulation results of uniformity of 3D WPT system at different distances

3 实验验证

为了分析验证本文提出的三维无线电能传输系统的传输特性,搭建了三维无线电能传输实验系统,如图 11 所示。首先确定机构参数。发射机构由 6 个正五边形线圈并联组合而成,每个线圈的匝数、匝间距、线径、直径等参数保持一致并且与仿真中相同,接收线圈除半径大小外其他参数与发射子线圈一致。实验采用四线圈结构,励磁线圈缠绕在各发射线圈背部,具体物理参数如表 3 所示。

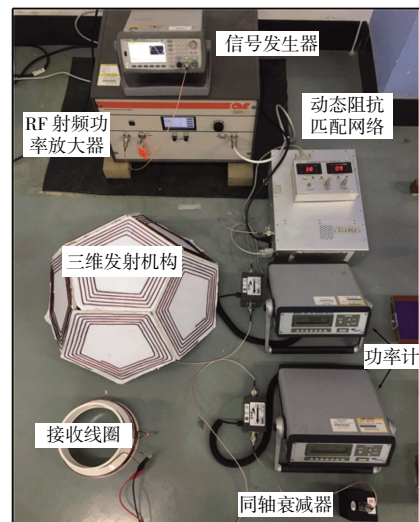


图 11 三维无线电能传输实验系统

Fig.11 Experimental system of 3D WPT

表 3 WPT 接收线圈参数

Tab.3 Parameters of WPT receiver coil

发射子线圈		励磁线圈		接收线圈
匝数/匝	外边长/mm	线径/mm	匝间距/mm	半径/mm
5	200	1.8	10	150

将组成发射机构的正五边形线圈拼接组合成半球体,发射线圈背部各个单匝励磁线圈并联,目的是使得各个发射平面电源相位一致,保证发射机构产生

磁场的均匀性。测量得到三维发射机构中心距离每个发射平面中心的距离为 207 mm。

对三维系统进行无线电能传输特性实验,信号发生器发出 6.78 MHz 正弦波形传输到高频功率放大器。为了减少放大器的反射功率,通过连接阻抗匹配系统将电能传输到发射机构,功率计连接到阻抗匹配系统与发射机构之间测量系统发射功率值。电能接收系统负载线圈连接功率计测量不同情况下的负载接收功率,使用 50 Ω 同轴衰减器作为负载。系统各部分之间使用同轴电缆射频线和射频端子相连接。

按照图 5 蓝色虚线所示改变接收线圈位置,进行距离特性实验,固定接收线圈中心与发射机构中心的距离为 350 和 400 mm,从中心线夹角为 20°时开始测量,绕发射机构切面圆弧移动,每隔 20°测量系统传输效率,实验结果如图 12 所示。

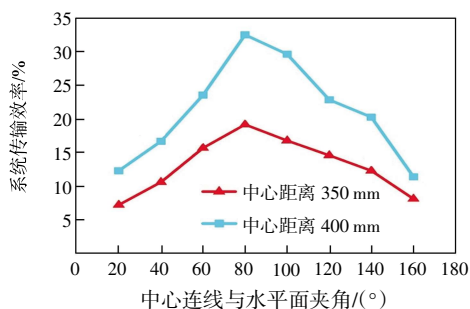


图 12 距离特性实验结果

Fig.12 Experimental results of distance characteristics

由图 12 可以看出,随着中心线与水平面夹角逐渐增大,系统传输效率在 90°附近时到达峰值,距离为 350 mm 时最高可达 32.6%,距离为 400 mm 时最高为 19.2%,随后逐渐降低,说明顶部线圈对系统磁场有聚集作用。当中心线与水平面夹角在 140°附近时,系统传输效率缓慢下降,此时接收线圈正对发射机构侧边线圈平面位置移动,对应发射机构侧边平面位置的磁场强度大于对应发射机构侧边棱角位置的磁场强度。实验结果与仿真中的规律具有良好的一致性,距离为 400 mm 时实验结果与仿真结果相比接收效率下降了约 6%,这是由于线圈在缠绕过程中由于工艺问题难免造成干扰,影响系统传输效率。

按照图 5 所示的红色虚线来改变接收线圈位置,进行均匀性实验,固定发射机构中心与接收线圈中心的距离为 350 mm,分别在中心连线与水平面夹角为 40°、60°、80°时绕发射机构中垂线旋转测量系统传输效率,每隔 30°记录一次数据,实验结果如图 13 所示。

由图 13 可以看出,中心线夹角越大,系统传输效率越高,同时系统传输效率随旋转角度的变化幅度也

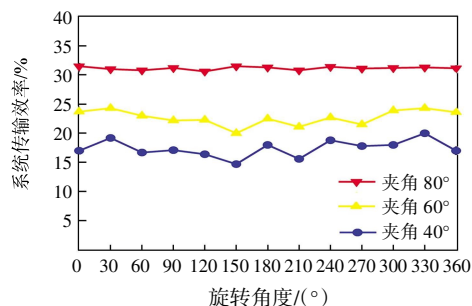


图 13 均匀性实验结果

Fig.13 Experimental results of uniformity

逐渐降低,最大变化幅度仅有 8%,发射机构顶部磁场的均匀程度较高,与仿真结果一致。

4 结 论

本文结合等效电路模型与互感叠加理论对三维无线电能传输特性进行了分析,并设计了一种新型三维耦合机构模型,搭建基于磁耦合谐振式的三维无线电能传输实验系统,分析系统的传输性能,并对仿真过程中得到的相关规律进行验证。结果表明:

(1) 组成发射机构的子线圈采用并联控制方式可以有效地控制所产生磁场集中在接收线圈区域,在接收线圈位置已知时可以提高系统传输性能。

(2) 本文所搭建的三维无线电能传输系统中,三维空间的顶面对磁场具有聚集作用,发射机构上部空间的磁场较强,传输距离最远,仿真结果显示在距离 400 mm 处接收效率接近 25%,而实验结果显示接收效率为 19.2%。在距离相同的情况下,当接收线圈在水平面与发射机构产生位置偏移时,其效率偏差最大仅为 8%,并且越靠近发射机构顶部,效率偏差越低,磁场分布越均匀,

(3) 本文所设计的新型耦合机构在接收线圈处于不同空间位置时传输效率稳定,在三维空间中可进行高自由度能量传输,拓宽了无线电能传输技术的应用场景,为多接收端无线传能系统的研究创造了一定的条件。

参考文献:

- [1] MAI R K, CHEN Y, ZHANG Y Y, et al. Optimization of the passive components for an S-LCC topology-based WPT system for charging massive electric bicycles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5497-5508.
- [2] INOUE K, NAGASHIMA T, WEI X Q, et al. Design of high-efficiency inductive-coupled wireless power transfer system with class-DE transmitter and class-E rectifier[C]//IECON

- 2013–39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, Austria: IEEE, 2013: 613–618.
- [3] MARINCIC A, BUDIMIR D. Tesla's contribution to radiowave propagation[C]//5th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service. Nis, Yugoslavia: IEEE, 2002: 327–331.
- [4] TESLA N. Apparatus for transmitting electrical energy: US 1119732[P]. 1914–12–01.
- [5] DICKINSON R M. Performance of a high-power, 2.388 GHz receiving array in wireless power transmission over 1.54 km[C]//1976 IEEE-MTT-S International Microwave Symposium. NJ, USA: IEEE, 2010: 139–141.
- [6] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. *Science*, 2007, 317(5834): 83–86.
- [7] 杨庆新, 章鹏程, 祝丽花, 等. 无线电能传输技术的关键基础与技术瓶颈问题[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(5): 1–8.
- YANG Q X, ZHANG P C, ZHU L H, et al. Key fundamental problems and technical bottlenecks of the wireless power transmission technology [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(5): 1–8(in Chinese).
- [8] WEI X Z, WANG Z S, DAI H F. A critical review of wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. *Energies*, 2014, 7(7): 4316–4341.
- [9] SHINOHARA N. Trends in wireless power transfer: WPT technology for energy harvesting, millimeter-wave/THz rectennas, MIMO-WPT, and advances in near-field WPT applications[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2021, 22(1): 46–59.
- [10] CASANOVA J J, LOW Z N, LIN J, et al. Transmitting coil achieving uniform magnetic field distribution for planar wireless power transfer system[C]//2009 IEEE Radio and Wireless Symposium. CA, USA: IEEE, 2009: 530–533.
- [11] LEE E S, CHOI B G, CHOI J S, et al. Wide-range adaptive IPT using dipole-coils with a reflector by variable switched capacitance[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(10): 8054–8070.
- [12] MAI R K, CHEN Y, ZHANG Y Y, et al. Optimization of the passive components for an S-LCC topology-based WPT system for charging massive electric bicycles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(7): 5497–5508.
- [13] WANG H S, CHENG K W E. Analysis, design, and validation of a decoupled double-receiver wireless power transfer system with constant voltage outputs for industrial power supplies[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(1): 362–370.
- [14] ROZMAN M, RABIE K M, ADEBISI B. Wireless power and communication transmission for industrial robots[C]//2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP). Budapest, Hungary: IEEE, 2018: 1–5.
- [15] KHAN S R, PAVULURI S K, CUMMINS G, et al. Wireless power transfer techniques for implantable medical devices: A review[J]. *Sensors*, 2020, 20(12): 3487.
- [16] 赵俊锋. 三维无线电能传输系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- ZHAO J F. Research on three-dimensional wireless power transfer system[D]. Nanjing: Southeast University, 2015(in Chinese).
- [17] 李振杰. 远距离小功率无线电能传输技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LI Z J. Long range and low power wireless power transmission technology research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014(in Chinese).
- [18] FENG J J, LI Q, LEE F C. Omnidirectional wireless power transfer for portable devices[C]//2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). FL, USA: IEEE, 2017: 1675–1681.
- [19] ABDOLALI A, JAFARI A M. Flexible control of magnetic fields by shaped-optimized three-dimensional coil arrays[J]. *IEEE Magnetics Letters*, 2019, 10: 1–5.
- [20] 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.
- [21] ABOU HOURAN M, YANG X, CHEN W J. Free angular-positioning wireless power transfer using a spherical joint[J]. *Energies*, 2018, 11(12): 3488.
- [22] 李阳, 杨庆新, 陈海燕, 等. 无线电能传输系统中影响传输功率和效率的因素分析[J]. *电工电能新技术*, 2012, 31(3): 31–34, 39.
- LI Y, YANG Q X, CHEN H Y, et al. Analysis of factors influencing power and efficiency in wireless power transfer system [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2012, 31(3): 31–34, 39(in Chinese).
- [23] 何祥瑞, 荣灿灿, 刘明海. 基于无线电能传输系统多线圈结构参数优化设计[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(S2): 404–411.
- HE X R, RONG C C, LIU M H. Optimization design of multi-coil structure parameters based on wireless power transfer system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(S2): 404–411(in Chinese).

本文引文格式:

李阳, 姜志刚, 胡涛成, 等. 新型无线电能传输三维耦合机构的设计与优化[J]. *天津工业大学学报*, 2024, 43(2): 75–82.

LI Y, LOU Z G, HU T C, et al. Design and optimization of novel three-dimensional coupling mechanism for wireless power transfer[J]. *Journal of Tiangong University*, 2024, 43(2): 75–82(in Chinese).