

基于二维磁耦合线圈的WPT多自由度磁场发射机构设计

寇志伟^{1,2,3}, 王楠¹, 刘焱晨¹, 崔啸鸣^{1,3}, 齐咏生^{1,2,3}

(1. 内蒙古工业大学 电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 大规模储能技术教育部工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古自治区机电控制重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要:针对磁耦合式无线电能传输(WPT)系统发射机构的多自由度(DOF)传输能力弱、占用体积大、接收线圈姿态要求高等问题,提出一种基于二维磁耦合线圈的无线电能传输多自由度磁场发射机构。首先,设计一种二维磁耦合发射线圈结构,建立多物理场耦合模型,仿真发射线圈的磁场分布,验证线圈结构的三维多自由度旋转磁场生成能力。其次,研究三维多自由度旋转磁场的生成机理,提出发射线圈结构参数优化方法;基于三维解耦旋转磁场设计LCC-S型补偿网络发射机构电路,使原边激励电流为不受负载及耦合系数影响的恒流状态,副边电压为不受负载影响的恒压状态。最后,基于多物理场耦合模型,仿真验证发射机构的电能传输效果。实验结果表明,接收线圈姿态多自由度变化时发射机构的能量传输稳定,传输效率保持在61.91%以上,最高达82.32%,验证了新式发射机构设计的正确性与方法的可行性。

关键词:无线电能传输;二维磁耦合;旋转磁场;多自由度;发射线圈

DOI:10.15938/j.emc.2025.09.015

中图分类号:TM724

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2025)09-0159-10

Design of WPT multi-degree-of-freedom magnetic field transmitting mechanism based on two-dimensional magnetic coupling coil

KOU Zhiwei^{1,2,3}, WANG Nan¹, LIU Yanchen¹, CUI Xiaoming^{1,3}, QI Yongsheng^{1,2,3}

(1. College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Inner Mongolia Key Laboratory of Electromechanical Control, Hohhot 010051, China;

3. Engineering Research Center of Large Energy Storage Technology, Ministry of Education, Hohhot 010051, China)

Abstract:To address the issues of weak multi-degree-of-freedom (DOF) transmission capability, large volume occupation, and high requirement for receiver coil attitude in the transmitting mechanism of magnetically coupled wireless power transfer (WPT) systems, a WPT multi-DOF magnetic field transmitting mechanism based on a 2D magnetically coupled coil was proposed. Firstly, a 2D magnetically coupled transmitting coil structure was designed, a multi-physics field coupling model was established, the magnetic field distribution of the transmitting coil was simulated, and the 3D multi-DOF rotating magnetic field generation capability of the coil structure was verified. Secondly, the generation mechanism of the

收稿日期:2024-09-06

基金项目:国家自然科学基金(62363029);内蒙古科技计划项目(2021GG0256);内蒙古自治区自然科学基金(2024LHMS06023)

作者简介:寇志伟(1984—),男,博士,副教授,研究方向为电工理论与新技术、导航与测控技术、模式识别与智能系统;

王楠(1999—),男,硕士研究生,研究方向为无线电能传输技术;

刘焱晨(2000—),男,硕士研究生,研究方向为无线电能传输技术;

崔啸鸣(1981—),女,硕士,副教授,研究方向为检测技术与自动化装置、电工理论与新技术;

齐咏生(1975—),男,博士,教授,研究方向为新能源控制优化技术、风力发电系统故障监测与诊断、移动机器人的协同控制技术。

通信作者:寇志伟

3D multi-DOF rotating magnetic field was studied, and an optimization method for the structural parameters of the transmitting coil was proposed. An LCC-S type compensation network transmitting mechanism circuit was designed based on the 3D decoupled rotating magnetic field, which ensures the primary side excitation current is in a constant current state independent of load and coupling coefficient, and the secondary side voltage is in a constant voltage state independent of load. Finally, based on the multi-physics field coupling model, the power transmission effect of the transmitting mechanism was verified through simulation. Experimental results show that the energy transmission of the transmitting mechanism remains stable when the receiver coil attitude changes with multi-degree-of-freedom, and the transmission efficiency is maintained above 61.91% with a maximum of 82.32%, which verifies correctness of the new transmitting mechanism design and the feasibility of the method.

Keywords: wireless power transfer; two-dimensional magnetic coupling; rotating magnetic field; multiple-degree-of-freedom; transmitting coil

0 引言

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)系统通过系统内耦合机构实现电能从电源到用电侧的无接触传输,依靠磁场、电场、激光或微波等形式作为传输介质,消除了导线的限制,与传统的电能传输形式相比,具有更加安全、便捷和可靠的优势^[1-2]。近年来,随着电力电子半导体技术、高频逆变技术、控制技术的发展和,WPT 技术得到快速发展与广泛关注。

磁耦合无线电能传输技术以磁场作为能量传输介质,通过高频交变电能和高频交变磁场的相互转换实现无线电能传输,其以传输效率高、输出功率稳定等优点成为 WPT 技术的研究热点^[3-4]。目前磁耦合无线电能传输技术尚存在影响传输效果较大的技术难点,如传输距离短、距离对传输效率可能存在指数级别的影响等^[5]。而且其对接收线圈姿态限制较大,偏移期望位置后,传能效果急剧下降,甚至达到无法正常工作状态,使得无接触的优点受到了较大的限制^[6-7]。因此,具有多自由度无线传输的发射结构得到了重点关注。

多自由度无线传输的电磁耦合结构大多数设计为三维形式,以正交圆形、正交矩形等形式较多,但是对于电动汽车、家用电器、水下特种设备、体内植入医疗设备和无人巡检机器人等应用场景,具有成本高、占地广、安装难度大等问题^[6,8]。目前生成三维空间磁场的发射结构主要采用的是3个相互正交的环形或矩形线圈,可以在结构内部或外部生成满足预期传能要求的目标磁场。比较经典的有碗形发射线圈^[9]、三角形发射线圈^[10]、单导线立方体线圈^[11]、立体偶极线圈^[12]等结构。然而,三维发射结

构导致耦合机构占用的空间体积较大,安装难度以及应用场景均受到限制,而二维平面型发射机构可以节约发射侧的安装空间^[13]。韩国高等科学技术研究院提出多种二维平面型发射结构,例如:交叉偶极线圈结构具有二维全方位磁能发射能力,交错式线圈发射机构适用于大范围全方位无线传能,矩形偶极线圈阵列便于根据不同的应用场合扩大或缩小无线传能区域,无磁芯矩形偶极线圈发射机构与十字形线圈接收机构具备了三维全方位磁能接收^[14-16]。KIM J H 等^[17]提出一种两接收线圈组成的平面型结构,可以适配多种发射线圈在多角度生成的磁场,达到预期的三维全方位传能。

在耦合机构的磁场特性调控方面,现有研究的调制主要有靶向性磁场和旋转磁场两种。靶向性磁场需要在发射线圈结构满足条件的基础上,对激励电流进行实时调节,使合成磁场矢量方向始终指向方位变化的接收线圈^[18-19]。该种磁场控制方式针对性较强,具有漏磁较小、传能效率较高的优势,但对于接收线圈位置要求比较苛刻,增加了激励电流的控制难度和系统的复杂性。旋转磁场方式需要在确定线圈结构后,预先计算和设置生成旋转磁场所需激励电流,通过磁场在空间中扫掠,达到接收线圈在预期旋转磁场覆盖范围内捕获到能量的效果^[20-21]。上述研究基于耦合机构的特点选择了二维旋转磁场,当平面型接收线圈位于其二维旋转磁场中时,只能捕获两个维度的磁场,无法实现真正的多自由度无线电能传输。因此,研究基于平面发射结构的多自由度磁耦合式 WPT 系统是很有必要的。

基于上述研究,本文针对磁耦合式无线电能传输系统三维发射结构占用空间体积大、多自由度无

线电能传输与三维发射结构的强相关等问题,设计优化一种具有多自由度磁场生成能力的二维磁耦合结构,实现平面发射结构的三维磁场生成。

1 线圈结构设计及仿真

1.1 发射线圈结构设计

磁耦合式 WPT 系统通过电与磁的相互转化,将能量通过空气介质进行传递,激励电流接入发射线圈生成交变电磁场,接收线圈由于结构内部磁通量变化而产生感应电压,从而将电能传递至负载端。应用广泛的二维多自由度 WPT 系统的发射结构是两正交环形或矩形线圈,此时接收线圈被期望置于发射机构外部,由于两正交发射线圈只有在内部中心区域生成空间均匀磁场,而在外部不同方位的磁场生成随位置不同发生变化,从而使得置于发射机构外部的接收线圈发生位置变化时,捕获的磁能有较大落差,系统整体输出功率产生较大波动。

本文设计了一种环形二维磁耦合发射线圈,如图 1 所示。该线圈整体直径为 40 mm,内部线圈内径为 27 mm,线圈排布为线圈 3 为 20 匝,线圈组 1、2 为 58 匝,由无线电能传输常用利兹线绕制而成。线圈组 1、2 作为生成平行于发射结构方向的磁场,线圈 3 生成垂直于发射结构方向的磁场,磁场之间相互垂直,可以设定为空间直角坐标系的 x 、 y 、 z 轴向。基于磁场矢量合成原理,该二维磁耦合发射线圈可以通过输入调制激励电流实现合成磁场方向指向位置变化的接收线圈。

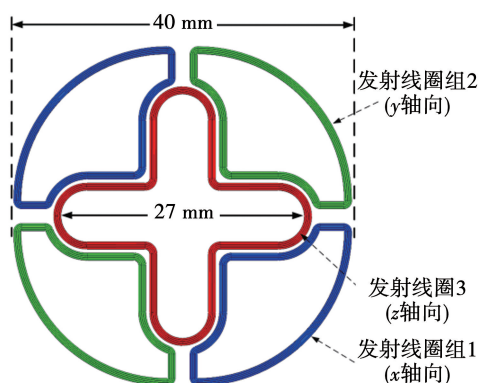


图1 环形磁耦合发射线圈结构

Fig.1 Structure of transmitting coil

该环形磁耦合发射线圈结构在二维平面结构的基础上,高占有率的线圈排列可以使单位使用面积的生成磁场强度较大,并通过线圈激励的控制策略对合成磁场进行矢量控制,实现多自由度磁场生成。

1.2 多自由度发射结构磁场仿真

为了便于分析本文提出的环形磁耦合发射线圈结构的多自由度传能效果,基于 COMSOL 多物理场仿真软件建立发射线圈的电磁仿真模型,仿真分析得到的磁场分布情形如图 2 所示。

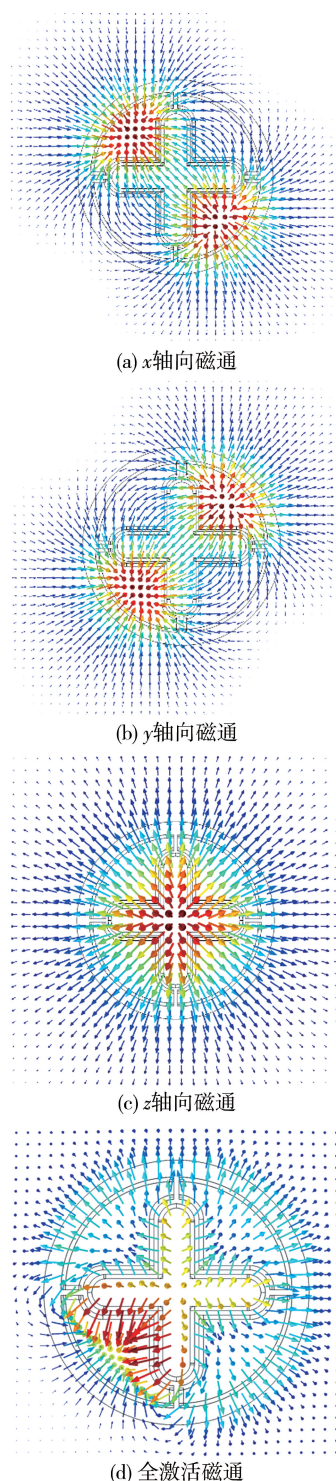


图2 分组激励线圈磁通密度图

Fig.2 Group excitation coil magnetic flux density

由图 2 可知,将直角坐标系逆时针旋转 45° 作

为该环形磁耦合发射线圈结构的基准坐标系,线圈组1生成磁场方向沿 x 轴向分布,线圈组2、3生成磁场方向分别沿 y 、 z 轴向分布。基于向量合成原理,可以得到该结构具备三维多自由度磁场的生成能力。

1.3 三维发射磁场的解耦

基于磁场耦合理论,该环形磁耦合发射线圈结构的3个发射线圈的耦合状态是自然解耦的。首先,由于发射线圈组1、2在空间上相互垂直,二者生成的磁场方向是正交的,因此线圈组1、2是互相解耦的。其次,该环形磁耦合发射线圈结构沿 x 方向轴向对称,因此线圈组1产生的磁通在线圈组3中的流入量等于流出量,即线圈组1、3是互相解耦的;同理线圈组2、3也是互相解耦的。因此该环形磁耦合发射线圈结构能够生成自然的解耦磁场。自然解耦的3个发射线圈具有便于独立控制各线圈组的输入电流、系统的复杂度比较低、发射线圈的互相影响比较小等优点。

自然解耦的发射线圈组结构在无线电能传输系统中只需考虑接收线圈与不同发射线圈组的耦合情况即可,发射线圈的角度偏移后可以形成以下7种耦合:1)接收线圈只与线圈组1耦合;2)接收线圈只与线圈组2耦合;3)接收线圈只与线圈组3耦合;4)接收线圈与线圈组1和线圈组2同时耦合;5)接收线圈与线圈组1和线圈组3同时耦合;6)接收线圈与线圈组2和线圈组3同时耦合;7)接收线圈与线圈组1、线圈组2和线圈组3同时耦合。

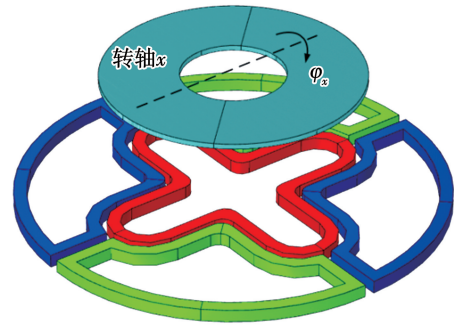
设置接收线圈旋转方式I、II、III三类包含上述7种耦合情况,如图3所示。旋转方式I的初始姿态为发射线圈、接收线圈相互平行,中心点位于 O 的状态;旋转方式II的初始姿态为接收线圈按照旋转方式I的转轴旋转 45° 后的状态;旋转方式III的初始姿态为最初的相互平行状态沿转轴 y 旋转 90° 的状态。上述旋转操作始终保持接收线圈中心点处于初始点 O 处,围绕中心点的旋转方式可将线圈耦合情况全部包含并分组验证传输特性。

旋转方式与耦合情况的对应关系如表1所示。

表1 旋转方式与耦合情况的对应关系

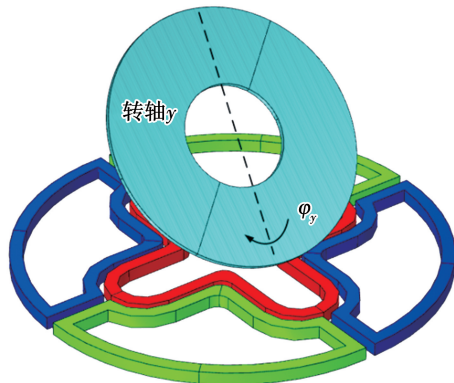
Table 1 Corresponding relationship between rotation mode and coupling condition

旋转方式	耦合关系	对称后耦合关系
I	2)、3)、6)	1)、3)、5)
II	2)、3)、6)、7)	1)、3)、5)、7)
III	1)、2)、4)	1)、2)、4)



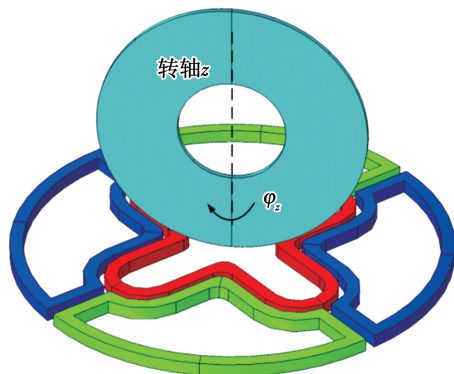
旋转角度: $0^\circ \leq \varphi_x \leq 180^\circ$; 初始角度: $\varphi_x=0^\circ, \varphi_y=0^\circ, \varphi_z=0^\circ$ 。

(a) 旋转方式 I



旋转角度: $0^\circ \leq \varphi_y \leq 180^\circ$; 初始角度: $\varphi_x=45^\circ, \varphi_y=0^\circ, \varphi_z=0^\circ$ 。

(b) 旋转方式 II



旋转角度: $0^\circ \leq \varphi_z \leq 180^\circ$; 初始角度: $\varphi_x=45^\circ, \varphi_y=90^\circ, \varphi_z=0^\circ$ 。

(c) 旋转方式 III

图3 接收线圈旋转方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of receiving coil rotation mode

根据表1中列出的耦合关系情况,可见旋转方式的设置包含所有耦合情况,可以满足接收线圈接收磁场情况的分析条件。

2 耦合机构参数设计

2.1 旋转磁场激励电流调制

设 B_{x0} 、 B_{y0} 和 B_{z0} 分别为3个发射线圈组在接收线圈中心点 O 产生的磁感应强度,将 B_{x0} 、 B_{y0} 、 B_{z0} 视为基准矢量,在 O 点处生成所要求的指向合成磁场可由 B_{x0} 、 B_{y0} 、 B_{z0} 线性表示,即

$$\mathbf{B} = k_1 \mathbf{B}_{x0} + k_2 \mathbf{B}_{y0} + k_3 \mathbf{B}_{z0} \quad (1)$$

式中 k_1, k_2, k_3 为实数。

在球坐标系中,可设 k_1, k_2, k_3 满足如下关系:

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \cos\varphi \sin\theta; \\ k_2 &= \sin\varphi \sin\theta, \varphi \in [0, 2\pi]; \\ k_3 &= \cos\theta. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得磁场矢量及三维磁场旋转轨迹如图4所示。

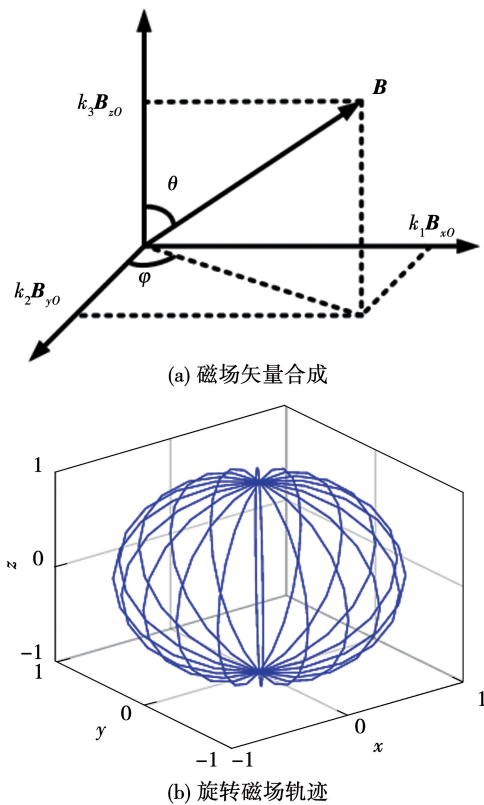


图4 磁场矢量及三维旋转磁场轨迹图

Fig. 4 Magnetic field vector and three-dimensional rotating magnetic field trajectory

由安培定律可知,磁场的大小和方向由输入电流的大小及方向决定,因此要得到期望的多自由度合成磁场,只需在发射线圈侧对输入电流进行调制。本文对发射线圈组的参数设计是通过设计匝数比的计算方法达到3组线圈在预设接收线圈处生成的单位磁场标量相等为目标优化选择的。将激励电流幅值与球坐标系数结合,得到能够控制合成磁场呈现球型旋转磁场的激励电流为:

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= I_m \cos(2\pi f_1 t) \sin(2\pi f_0 t); \\ i_2(t) &= I_m \sin(2\pi f_1 t) \sin(2\pi f_0 t); \\ i_3(t) &= I_m \cos(2\pi f_0 t). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: I_m 为激励电流幅值; $f_0 = 100$ kHz 为交流电流频率; $f_1 = 1$ kHz 为电流调制频率。

根据各组球型旋转磁场激励电流的表达式,使用控制器通过正弦脉宽调制(sine pulse width modulation, SPWM)方法控制全桥逆变电路实现各组发射线圈的激励。通过三维旋转磁场可以验证环形二维磁耦合发射线圈结构具有在接收线圈偏移任意角度时都能够捕获足够磁能的优点,实现了多自由度磁场生成的目标。

2.2 线圈参数的优化设计

为实现二维磁耦合结构及其在应用场景中的参数快速选取,设计了环形二维发射线圈参数优化方法(RTCOM),通过已定义参数及期望传输效果计算3组发射线圈的匝数。参数设计流程如图5所示。

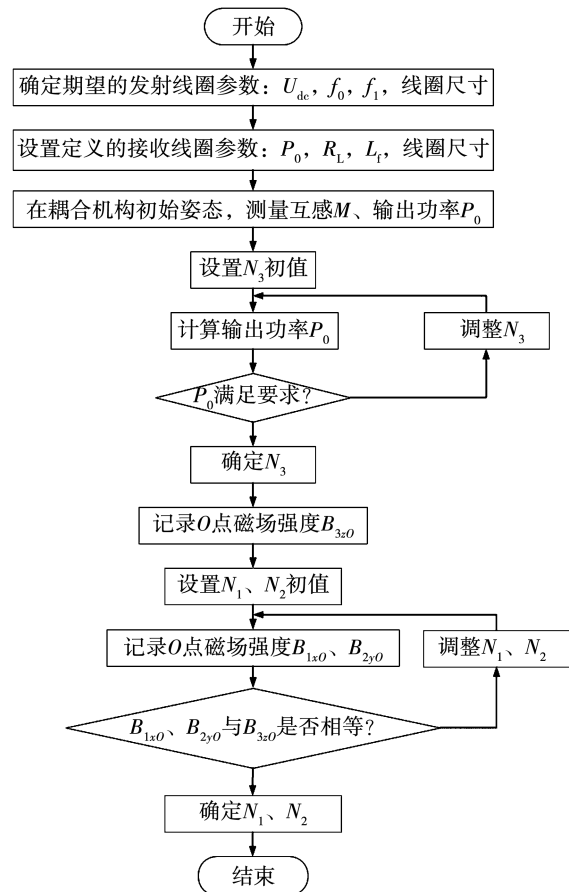


图5 RTCOM 优化方法流程图

Fig. 5 Flow chart of RTCOM optimization method

根据设计的线圈旋转方式,在初始姿态下接收线圈仅与发射线圈组3产生耦合,并处于最大耦合情况,此时基于 RTCOM 方法,可在已知电学参数和预期传输能力的前提下求得线圈组3的匝数并作为基准值,进一步得到该发射结构不同线圈组的匝数

信息。

首先,设置期望的发射线圈参数,包含输入电压 U_{dc} 、系统工作频率 f_0 、激励电流频率 f_1 和线圈尺寸参数;设置定义的接收线圈参数,包含输出功率 P_0 、负载电阻 R_L 、滤波电感 L_f 和线圈尺寸参数。

然后,根据定义的输出功率,在初始姿态下,测量耦合线圈的互感、输出功率,选择符合预期的发射线圈组3的匝数,并记录中心点产生的磁场强度;将线圈组3生成的磁场强度作为基准值,同步调节线圈组1、2的匝数,直到在接收线圈中心点产生标量数值相等的磁场强度,定义此时3个线圈组匝数作为基准值。

观察接收线圈期望输出的磁场强度数值变化,同步等比例调节3组线圈匝数,即可获得优化的设计匝数。

按照 RTCOM 方法对本文设计的环形二维磁耦合发射线圈结构的参数优化选取,设置工作环境和期望输出如表2所示。

表2 线圈初始参数

Table 2 Definition of initial parameters

参数	数值	参数	数值
U_{dc}/V	200	原边线圈直径/cm	40
P_0/W	30	副边线圈直径/cm	30
R_L/Ω	10	初始传输距离/cm	15

根据表2定义初始条件可得到单独激活发射机构线圈组3时,其匝数 N_3 与接收线圈输出功率 P_0 以及线圈组3与接收线圈互感 M_{34} 之间的关系,如图6所示。

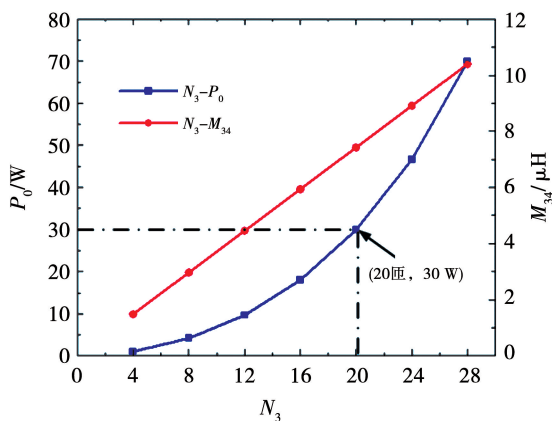


图6 线圈组3匝数、互感和功率的关系

Fig. 6 Relationship between the number of turns, mutual inductance and power of the coil group 3

由图6可得,输出功率为30W时对应的线圈组3的匝数选择为20匝。基于 RTCOM 方法,当接收线圈仅与线圈组1、2分别耦合时,可得到在接收线圈中心点处产生相同传输能力所对应的线圈匝数 N_1 、 N_2 ,如图7所示。

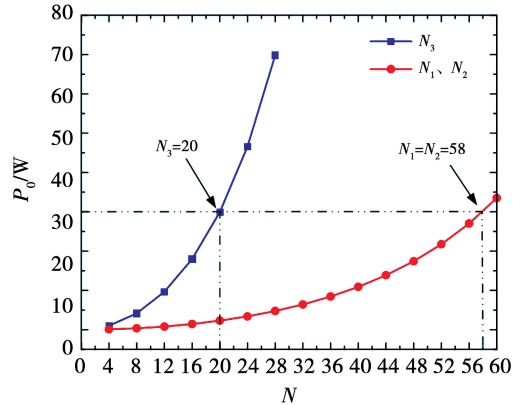


图7 N_1 、 N_2 、 N_3 与相对应的功率关系

Fig. 7 Relationship between N_1 , N_2 , N_3 and P

由图7可得,在发射线圈组3为20匝、输出功率为30W时,发射线圈组1、2达到同样传输能力所对应的线圈匝数 N_1 、 N_2 为58匝。

3 耦合电路建模

根据环形二维磁耦合发射线圈合成磁场的球型旋转控制要求,发射机构电路的原边补偿网络采用 LCC-S 型,其可以使发射线圈激励电流不受接收线圈负载及互感干扰,仅受到逆变器输出电压控制,设计的发射机构电路如图8所示。

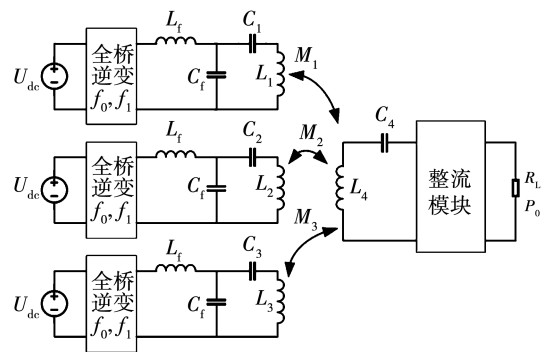


图8 LCC-S 型 WPT 系统电路结构图

Fig. 8 Circuit structure of LCC-S WPT system

该电路由逆变桥、补偿电路、耦合电路、整流电

路组成。其中:逆变桥通过控制外部驱动电路的信号控制相同桥臂的开关管交替导通,使输入的直流电压逆变为方波交流电压;补偿环节采用原边 LCC、副边串联电容补偿的方案,并联补偿电容 C_f 、串联补偿电容 C_i 和补偿电感 L_f 组成原边 LCC 补偿网络; C_4 为副边的补偿电容;耦合电路由发射线圈 L_i 和接收线圈 L_4 组成,通过两线圈间的电磁感应定律实现无线电能传输, M_i 为两线圈互感;传输线圈的匝数、材质以及缠绕方式等是系统能量传输效率的重要影响因素,线圈的结构设计是 WPT 系统的重要环节;整流电路采用了桥式整流电路和滤波补偿,以便更好地驱动直流负载。

LCC-S 型 WPT 系统电路在考虑寄生电阻时的等效电路如图 9 所示。其中 \dot{U}_{in} 为逆变器输出电压。

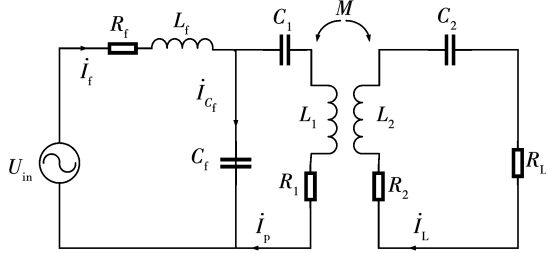


图9 LCC-S 等效电路图

Fig. 9 Equivalent circuit of LCC-S system

电流 \dot{I}_{p1} 流过 LCC 补偿网络进行阻抗匹配,而后通过发射线圈 L_1 ,以交变电磁场的方式将能量传输至接收线圈,接收侧拾取能量后流经串联网路到达负载端。

LCC-S 等效电路参数设计关系为:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \omega_0 \omega_n; \\ L_f &= pL_1; \\ \frac{1}{\omega_0^2} &= L_f C_f = L_2 C_2; \\ \omega_0 L_1 - \frac{1}{\omega_0 C_f} &= \frac{1}{\omega_0 C_1}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: ω 为逆变器输出电压 U_{in} 的角频率; ω_0 为补偿网络与线圈的固有谐振频率, $\omega_0 = 2\pi f_0$; ω_n 为系统工作频率与固有谐振频率的比值; p 为一次侧补偿电感与发射线圈电感的比值, $p = L_f/L_1$;设计时使发射线圈电感值等于接收线圈电感值。

基于互感理论描述系统传输特性时,系统的阻抗模型为:

$$\left. \begin{aligned} Z_s &= \frac{\omega_n(R_2 + R_L) - j\omega_0 L_1(1 - \omega_n^2)}{\omega_n}; \\ Z_r &= \frac{(\omega_n \omega_0 k L_1)^2}{Z_s}; \\ Z_{in} &= j\omega_n \omega_0 p L_1 + R_f + \\ &\quad \frac{1}{\frac{j\omega_n}{\omega_0 p L_1} + \frac{1}{j\omega_n \omega_0 L_1 - j\omega_0 L_1(1 - p)/\omega_n + R_1 + Z_r}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 Z_s 、 Z_r 、 Z_{in} 分别为副边阻抗、反应阻抗和系统输入阻抗。

则等效电路的各支路电流为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_f &= \frac{\dot{U}_{in}}{Z_{in}}; \\ \dot{I}_p &= \frac{\omega_0 p L_1 \dot{I}_f / j\omega_n}{-j\omega_0 L_1 / \omega_n + j\omega_n \omega_0 L_1 + R_1 + Z_r}; \\ \dot{I}_L &= \frac{j\omega_n \omega_0 k L_1 \dot{I}_p}{Z_s}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

当 $\omega_n = 1$ 时,耦合电路原、副边都处于谐振状态,且与逆变器工作频率相同。

电路在谐振状态时,式(5)、式(6)可以简化为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_p &\approx \frac{\dot{U}_{in}}{j\omega_0 p L_1}; \\ U_{out} &\approx \frac{M \dot{U}_{in}}{p L_1}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中 $M = k/\sqrt{L_1 L_2}$, k 为线圈耦合系数。

由上述分析可得该 WPT 系统处于谐振状态时,原边发射线圈激励电流不受负载及耦合系数影响,为恒流状态;副边输出电压不受负载影响,为恒压状态。

4 实验验证

为了验证本文设计的环形二维磁耦合发射线圈的传输性能及其在旋转磁场控制下的多自由度磁场生成能力,在 COMSOL 多物理场仿真软件进行仿真实验。参数按照前文的优化参数选择,即原边发射线圈每组的输出功率为 30 W、线圈组匝数分别为 58 匝、58 匝、20 匝。

4.1 传输效果实验

按照图 8 所示 LCC-S 型电路测试,电气元件及线圈结构参数如表 3 所示。

表3 实验设计系统参数

Table 3 Experimental design system parameters

参数	数值	参数	数值
U_{dc}/V	200	C_s/nF	25
$L_{\bar{u}}/\mu H$	15	R_L/Ω	10
$C_{\bar{u}}/nF$	170	f_0/kHz	100
C_i/nF	15	f_1/kHz	1
N_1, N_2	58	N_3	20

设原边输入电压 U_{dc} 为 200 V, 原边逆变器工作频率为 100 kHz, 旋转磁场调制频率为 1 kHz, 负载电阻为 10 Ω 。系统传输效率的主要影响因素是位置姿态变化的接收线圈和发射线圈组之间的互感值大小, 仿真中考虑了各器件内部损耗, 综合分析得到了旋转磁场激励电流下接收线圈的 3 种旋转方式的能量传输功率和效率, 如图 10 所示。

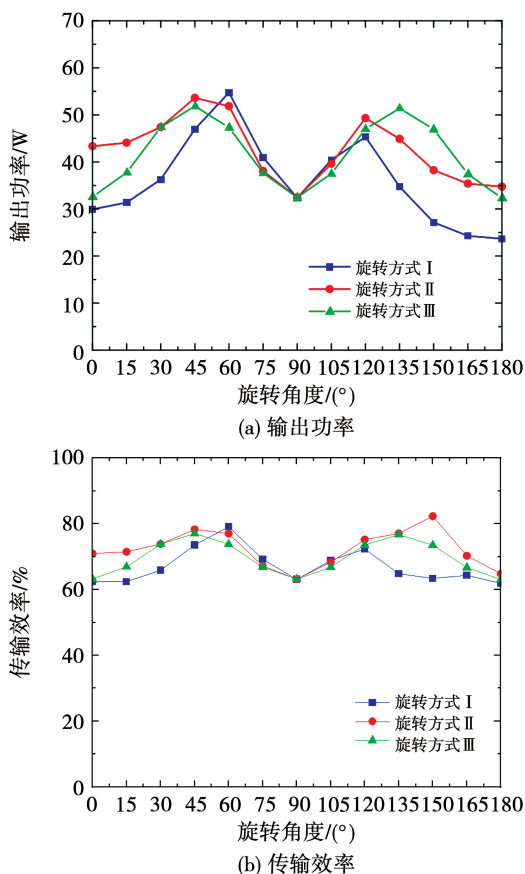


图 10 输出功率及传输效率

Fig. 10 Output power and transmission efficiency

由图 10 可知, 3 种旋转方式下, 接收线圈旋转角度都为 90° 时, 其只与发射线圈组 1 或 2 耦合, 输

出功率为 30 W; 接收线圈姿态为旋转方式 I 时, 其只与发射线圈 3 耦合, 接收线圈姿态为旋转方式 III 时, 接收线圈只与发射线圈组 2 耦合, 耦合程度与旋转 90° 时相等, 输出功率也为 30 W。3 种旋转方式下传输效率可以长期保持在 61.91% 以上, 最高可达到 82.32%。而且, 由上述分析可知, 三维旋转磁场激励时, 接收线圈可以捕获更多的磁场能量, 能量传输效果更好, 传输效率更高。

4.2 对比分析实验

传统的磁场激励主要有单发射激励方式、同电流激励方式等。其中, 单发射激励方式为仅激活活动中心位置的发射线圈 3, 即 z 方向的轴向磁场生成线圈; 同电流激励方式是对 3 组发射线圈组施加相同的电流激励。将本文 2.1 节的三维旋转磁场激励方式与上述传统激励方式进行对比, 在发射线圈侧输入 3 组电流进行调制, 可以多自由度合成磁场。分别采用上述 3 种激励方式测试接收线圈在 3 种旋转方式下的传能效果, 如图 11 所示。由图可知, 单发射激励方式在接收线圈旋转方式 I、II 会有耦合减弱的情况, 无法满足 90° 附近的旋转角度传输需求, 且在旋转方式 III 时由于解耦状态, 没有能量传输。同电流激励方式则在 3 种旋转方式下的传输情况波动较大, 电能传输效果与接收线圈的姿态位置密切相关。三维旋转磁场激励方式在接收线圈旋转方式 I、II、III 3 种姿态时, 能量传输稳定性较高。一般用传输功率方差表示传输能量的稳定程度, 不同磁场激励方法在接收线圈 3 种旋转方式下传输功率方差如表 4 所示。

表 4 传输稳定性(方差)的对比

Table 4 Comparison of transmission stability (variance)

激励方式	旋转方式 I	旋转方式 II	旋转方式 III
单发射激励	94.82	108.84	0
同电流激励	7 213.14	2 482.81	17 385.94
旋转磁场激励	80.24	42.18	49.23

由表 4 可知, 在旋转磁场激励方式下传输功率方差最小, 无线传能的稳定程度最高。因此, 本文设计的环形二维磁耦合发射线圈既有对接收线圈姿态要求低的特点, 也具有输出功率稳定性高的优点, 提高了 WPT 系统的传能稳定性和应用灵活性。

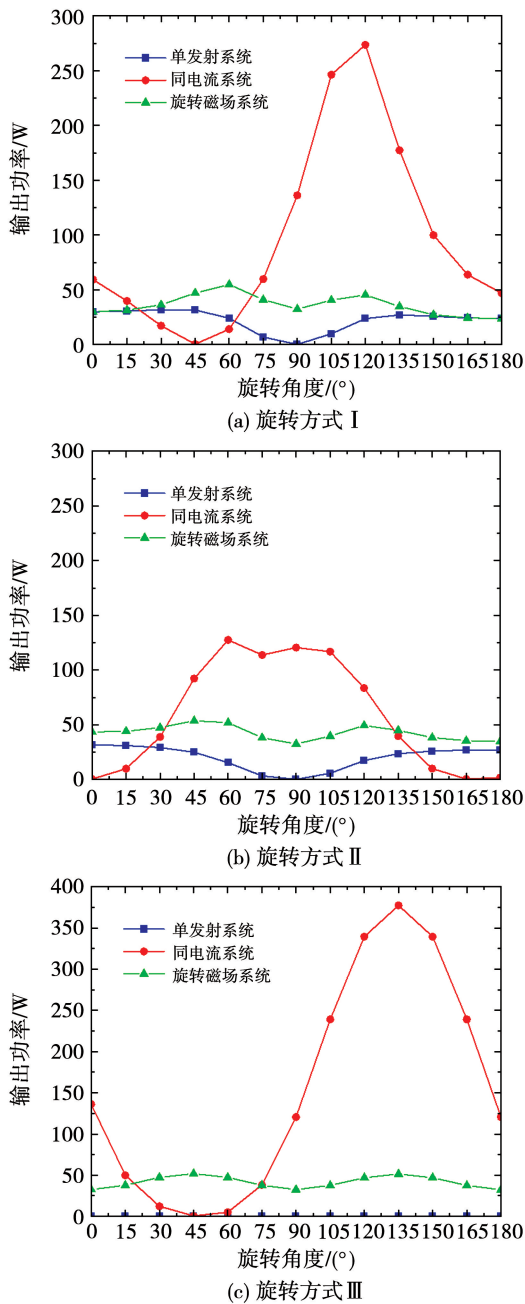


图 11 与传统激励方式传输效果的对比

Fig. 11 Compared with the transmission effect of traditional excitation mode

5 结 论

本文提出一种基于环形二维磁耦合发射线圈的多自由度 WPT 发射机构。在理论研究方面,设计了发射线圈结构,优化了设计参数,研究了发射线圈三维多自由度旋转磁场的生成机理。在仿真验证方面,建立了环形二维磁耦合发射线圈电磁耦合仿真模型,验证了三维多自由度旋转磁场生成能力、3 种

旋转方式下的传输效果,并对比分析了 3 种激励方法时的传能效果。实验结果表明,该环形二维磁耦合发射线圈在接收线圈姿态多自由度变化时能量传输稳定,解决了传统 WPT 系统发射机构的多自由度传输能力弱、占用空间体积大、接收线圈姿态要求高等问题,扩展了无线电能传输发展的应用场景,具有一定的研究价值。

参 考 文 献:

[1] 孙跃, 廖志娟, 叶兆虹, 等. 基于振动理论的 MCR-WPT 系统频率分裂特性研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 3140.
SUN Yue, LIAO Zhijuan, YE Zhaohong, et al. Research on frequency splitting characteristic of MCR-WPT systems based on vibration theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3140.

[2] 薛明, 杨庆新, 章鹏程, 等. 无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(8): 1547.
XUE Ming, YANG Qingxin, ZHANG Pengcheng, et al. Application status and key issues of wireless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1547.

[3] 梁留欢, 刘志珍, 范书静, 等. 应用于双负载同步供电的双频无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3297.
LIANG Lihuan, LIU Zhizhen, FAN Shujing, et al. Dual-band wireless power transmission system for dual-load synchronous power supply[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3297.

[4] LAN J Q, DAO Y L, AKIMASA H, et al. Planar omnidirectional wireless power transfer system based on novel metasurface[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 64(2): 551.

[5] 王懿杰, 陆凯兴, 姚友素, 等. 具有强抗偏移性能的电动汽车用无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3907.
WANG Yijie, LU Kaixing, YAO Yousu, et al. An electric vehicle (EV)-oriented wireless power transfer system featuring high misalignment tolerance [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3907.

[6] 向利娟, 孙跃, 胡超, 等. 基于 AHP 和 FCE 的 IPTS 电磁机构性能评价[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 848.
XIANG Lijuan, SUN Yue, HU Chao, et al. Performance evaluation for magnetic couplers in IPTS using AHP and FCE[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 848.

[7] 刘耀, 肖晋宇, 赵小令, 等. 无线电能传输技术发展与应用综述[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(2): 48.
LIU Yao, XIAO Jinyu, ZHAO Xiaoling, et al. Development and

- application review on wireless power transmission technology[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2023, 42(2): 48.
- [8] 吕双庆, 陈文洁, 胡秀芳. 离散时间迭代的 LCC-S 型无线电能传输系统建模及稳定性分析[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(8): 1.
LÜ Shuangqing, CHEN Wenjie, HU Xiufang. Modeling and stability analysis of LCC-S compensated WPT system based on discrete-time iteration[J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(8): 1.
- [9] FENG J, LI Q, LEE F C, et al. Transmitter coils design for free-positioning omnidirectional wireless power transfer system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(8): 4656.
- [10] 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.
- [11] CHA H R, PARK K R, KIM T J, et al. Design of magnetic structure for omnidirectional wireless power transfer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(8): 8849.
- [12] RONG C, HE X, LIU M, et al. Omnidirectional free-degree wireless power transfer system based on magnetic dipole coils for multiple receivers[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 81588.
- [13] 谢文燕, 陈为. 全方向无线电能传输电磁耦合系统仿真分析[J]. *电源学报*, 2021, 19(1): 142.
XIE Wenyan, CHEN Wei. Simulation analysis of electromagnetic coupling system for omnidirectional wireless power transfer [J]. *Journal of Power Supply*, 2021, 19(1): 142.
- [14] CHOI B H, LEE E S, SOHN Y H, et al. Six degrees of freedom mobile inductive power transfer by crossed dipole Tx and Rx coils [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(4): 3252.
- [15] LEE E S, CHOI J S, SON H S, et al. Six degrees of freedom wide-range ubiquitous IPT for IoT by DQ magnetic field [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(11): 8258.
- [16] LEE E S, SOHN Y H, CHOI B G, et al. A modularized IPT with magnetic shielding for a wide-range ubiquitous Wi-power zone [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(11): 9669.
- [17] KIM J H, CHOI B G, JEONG S Y, et al. Plane-type receiving coil with minimum number of coils for omnidirectional wireless power transfer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(6): 6165.
- [18] ZHU Qi, SU Mei, SUN Yao, et al. Field orientation based on current amplitude and phase angle control for wireless power transfer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(6): 4758.
- [19] ZHANG Chen, LIN Deyan, HUI S Y. Basic control principles of omnidirectional wireless power transfer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(7): 5215.
- [20] YE Zhaohong, SUN Yue, LIU Xiufang, et al. Power transfer efficiency analysis for omnidirectional wireless power transfer system using three-phase-shifted drive [J]. *Energies*, 2018, 11(8): 2159.
- [21] HAN Hua, MAO Zhu, ZHU Qi, et al. A 3D wireless charging cylinder with stable rotating magnetic field for multi-load application [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 35981.

(编辑:邱赫男)