

基于 Halbach 型磁耦合机构的多负载 WPT 系统研究

何继泊¹, 曹桂梅^{1*}, 王 豫^{1,2}, 韩天浩¹, 严仲明^{1,2}

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756;

2. 磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室, 四川 成都 611756)

Research on Multi-Load WPT System Based on Halbach-Type Magnetic Coupler

HE Jibo¹, CAO Guimei^{1*}, WANG Yu^{1,2}, HAN Tianhao¹, YAN Zhongming^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education, Chengdu 611756, China)

Abstract: [Objective] To address the issue of reduced transfer efficiency caused by cross-coupling among receiver coils in multi-load wireless power transfer (WPT) systems, this study proposes a multi-load WPT system based on Halbach-type magnetic couplers. [Methods] By controlling the excitation current direction of constituent coils in the transmitter unit and utilizing the combined magnetic effects of these coils, the Halbach-type magnetic coupler achieved dual regulation effects of magnetic field focusing and attenuation in target areas. Through finite element simulation modeling and optimized design of the magnetic coupler, the mutual inductance and magnetic field characteristics between the transmitter unit and receiver unit were analyzed. The principles of magnetic field focusing and attenuation were explained from the perspective of magnetic flux. Additionally, an SS-type equivalent circuit topology was constructed to derive the output characteristics of the system. Finally, an experimental platform was built to analyze and validate the variation patterns in mutual inductance, output characteristics, and magnetic attenuation performance of the system. [Results] Experimental results showed that the Halbach-type magnetic coupler exhibited the capabilities of bidirectional magnetic field focusing and attenuation. The distribution of magnetic field focusing and attenuation regions

were spatially staggered, which effectively suppressed cross-coupling among receiver coils and reduced magnetic leakage in the system. When two receiver units were positioned 20 mm from the transmitter unit and both loads were 20 Ω , the system achieved a maximum overall transfer efficiency of 80.84%. [Conclusion] The Halbach-type magnetic coupler proposed in this study successfully addresses the issue of cross-coupling between receiver coils in multi-load WPT systems through asymmetric magnetic field regulation technology. Due to its modular unit structure, the system demonstrates excellent scalability. This modular design, characterized by its simplicity and flexibility, shows promising potential for broader applications in multi-load WPT systems.

Key words: wireless power transfer; Halbach-type magnetic coupler; magnetic field focusing; magnetic field attenuation

摘要: [目的] 针对多负载无线电能传输(WPT)系统中,接收线圈交叉耦合导致的系统传输效率降低的问题,本文提出了一种基于 Halbach 磁耦合机构的多负载 WPT 系统。【方法】Halbach 磁耦合机构通过调控发射单元构成线圈的激励电流方向,利用构成线圈的组合磁效应,实现了在目标区域定向聚集磁场和削弱磁场的双重调控效果。通过建立有限元仿真模型,在优化磁耦合机构设计的基础上,对接收单元和发射单元的互感特性与磁场特性进行了分析,从磁通量的角度阐述了磁场聚集和磁场削弱的原理。同时,构建 SS 型等效电路拓扑以推导系统输出特性。最后,搭建试验平台对系统的互感变化规律、输出特性以及磁削弱性能进行分析和验证。【结果】试验结果表明, Halbach 型磁耦合机构具有双侧磁场聚集和磁

基金项目: 磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室开放课题基金

Foundation of Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education

场削弱功能,磁场聚集区域和磁场削弱区域错位分布,有效抑制了接收线圈间的交叉耦合,同时降低了系统的漏磁。两接收单元距离发射单元 20 mm,双负载均为 20 Ω 时,系统整体传输效率最高,达 80.84%。【结论】本文所提 Halbach 型磁耦合机构,通过非对称磁场调控技术,成功解决了多负载 WPT 系统中接收线圈间的交叉耦合问题。由于采用模块化单元,该系统具有较好的可扩展性。这种模块化设计,简单且灵活,有望在多负载 WPT 系统中得到更广泛的应用。

关键词: 无线电能传输; Halbach 型磁耦合机构; 磁场聚集; 磁场削弱

0 引言

无线电能传输 (Wireless Power Transfer, WPT) 是一种利用电磁感应实现电能传输的高新技术。因其具有便捷性、清洁性的优点,在医疗植入装置、移动设备和自动机器人等领域得到了广泛应用^[1-4]。近年来,自动导引车 (Automated Guided Vehicle, AGV) 被广泛应用于物流行业和工厂,加速了智能制造的发展,WPT 技术在 AGV 领域具有广阔的应用场景^[5-6]。

随着应用场景的扩展,WPT 技术已逐渐从“一对一”的单负载模式转为“一对多”的多负载模式^[7-9]。相比于单负载技术,多负载技术具有功率密度更大、激励源利用率更高和接收负载空间位置更自由等优势。多负载 WPT 技术在 AGV 及相关领域具有较高的应用价值。近年来,在多负载 WPT 技术领域,国内外学者针对线圈结构、功率分配及系统效率等方面进行了大量研究,并取得了一定进展^[10-12]。

文献[13]采用了空间正交双发射线圈作为发射端,在多负载条件下,分析了正交发射线圈相位差、接收线圈数量及线圈相对位置对系统能量传输效率的影响,在四负载情形下传输效率明显偏低。文献[14]针对多负载 WPT 系统磁场交叉耦合问题,提出了一种多层结构隔离方案,以实现去耦及无源恒压输出。但该隔离方案采用多种磁屏蔽材料,增加了系统复杂度。文献[15]对比了两种频率选择性磁耦合单发射-多负载机构,并分析了功率分布和系统传输效率随工作频率变化的规律,发现接收-发射-接收配置比发射-接收-接收配置接收线圈的功率利用率更高。但该设计的

接收和发射线圈尺寸一样,未考虑非对称情况。文献[16]提出了一种平面式双分支 WPT 系统,分别为恒流输出、恒压输出,两个支路可独立控制且互不影响,该系统包含了恒流、恒压以及恒流与恒压同时供电三种工作模式。然而该机构传输范围既定且不可移动,无法变更接收线圈位置及方向。文献[17]提出了平面式双层正交 DD 线圈,该线圈内部的两对 DD 线圈易于解耦,合成的磁场呈周期性旋转分布,使其兼具抗偏移和抗偏转性能。然而该系统需要 2 组逆变电路及谐振网络,系统结构冗杂。文献[18]设计了一种旋转型线圈,其发射线圈固定在电机转子上,电机带动发射线圈旋转,形成空间交变旋转磁场,可对多个设备同时充电。然而该系统的传输特性与电机的旋转角度有关,难以保持最佳充电效果。

本文借鉴直线型永磁体 Halbach 阵列,提出了一种具有非对称磁场特征的 Halbach 型磁耦合机构。该机构发射单元的上下两侧均有磁场聚集和磁场削弱两个区域,且两侧的磁场分布区域是非对称的,这种错位非对称分布使其能对多个 AGV 充电。所设计的磁耦合机构采用同一规格的螺线管线圈,并通过调控发射单元构成线圈的激励电流方向,在发射单元两侧产生了类似于正弦分布的不对称磁场。即在发射单元同一侧的磁场呈现出先增大后减小继而保持在较小值的规律。由此,在磁场分布波峰处实现了磁场聚集效果,在磁场分布平缓处实现了磁场削弱效果。所提磁耦合机构的磁场削弱功能,通过减少磁通泄露来提升系统整体传输效率,不涉及无源屏蔽材料的使用,大大减小了系统体积。

1 Halbach 型磁耦合机构设计优化

1.1 磁耦合机构设计

Halbach 阵列自提出后,就被广泛应用于医用设备、磁悬浮和电动汽车等领域^[19-21]。常见的永磁体排列追求单侧对称和均匀的磁场分布,以满足实际需求^[22-23]。基于常规直线型 Halbach 阵列,改进直线型永磁体 Halbach 阵列通过优化永磁体的排列方式,使永磁体两侧产生非对称的磁场分布,如图 1 所示。

因螺线管线圈具有与永磁体相似的磁场特征,按照图 1 所示的改进直线型永磁体 Halbach

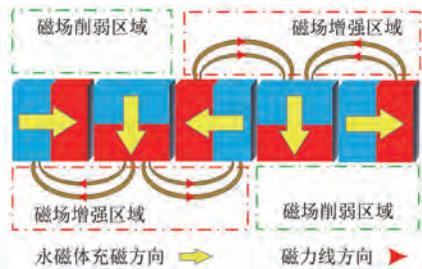


图 1 改进直线型永磁体 Halbach 阵列

Fig. 1 Improved linear permanent magnet Halbach array

阵列排布方式,设计了 Halbach 型磁耦合机构,如图 2 所示。该磁耦合机构包含一个发射单元和两个接收单元。发射单元由五个线圈(TA、TB、TC、TD 和 TE)串联组成,两个接收单元均由三个线圈(R1a、R1b 和 R1c;R2a、R2b 和 R2c)串联组成。

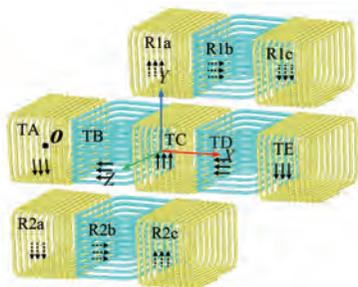


图 2 Halbach 型磁耦合机构

Fig. 2 Halbach-type magnetic coupler

1.2 磁耦合机构优化

接收、发射单元的构成线圈均采用同规格的矩形螺线管线圈,线径为 1.5 mm,匝数一致。为满足 AGV 安装空间需求,将接收单元尺寸限定为 180 mm×100 mm×60 mm。在此基础上,为了提高系统传输性能,对构成线圈的匝数进行优化设计。图 3 为不同匝数下的磁耦合机构 XY 平面的磁场示意图。将发射单元与接收单元 1、2 的距离分别设为 d_1 、 d_2 ,且 $d_1=d_2=30$ mm。

从图 3 中可以看出,随着构成线圈匝数的增加,磁耦合机构的磁场分布范围与磁场强度均呈增长趋势。当匝数为 10 匝时,发射单元激发的磁场主要集中于发射单元构成线圈的内部区域,整体磁场较弱,且分布范围较小。随着匝数的增加,磁耦合机构的磁场范围逐渐扩大,且磁场分布更加均匀。当匝数为 40 匝时,磁耦合机构的整体磁场分布范围达到最大,同时磁场聚集效果最明显。

在不同匝数下,发射单元与接收单元的互感 M 以及耦合系数 k 的变化情况如表 1 所示。其

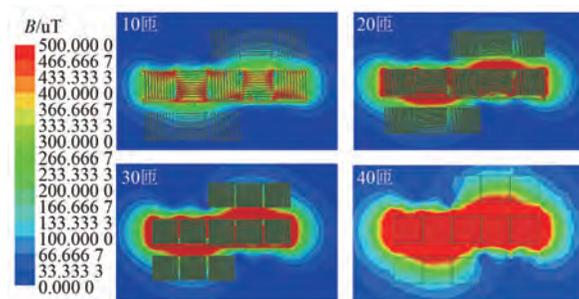


图 3 XY 平面磁场示意图

Fig. 3 Schematic diagram of magnetic field in XY plane

中, M_{TX-RX1} 、 k_{TX-RX1} 分别为发射单元与接收单元 1 之间的互感、耦合系数; M_{TX-RX2} 、 k_{TX-RX2} 分别为发射单元与接收单元 2 之间的互感、耦合系数。从表 1 可以看出,随匝数增加,互感显著提升,耦合系数也呈上升趋势。因此,线圈匝数选为 40 匝。

表 1 发射单元与接收单元的互感和耦合系数

Tab. 1 Mutual inductance and coupling coefficients of transmitter and receiver units

参数名称	10 匝	20 匝	30 匝	40 匝
$M_{TX-RX1}/\mu H$	2.76	10.69	22	39.73
$M_{TX-RX2}/\mu H$	2.76	10.69	22	39.73
k_{TX-RX1}	0.081	0.085	0.087	0.089
k_{TX-RX2}	0.081	0.085	0.087	0.089

1.3 磁耦合机构磁场特性

所设计的 Halbach 型耦合机构的磁场仿真结果如图 4 所示。在发射单元的左上侧和右下侧,由于构成线圈产生的磁场相互抵消,该区域的磁感应强度显著降低,形成磁场削弱区域;相反,在右上侧和左下侧,构成线圈产生的磁场相互叠加,该区域的磁感应强度显著增强,形成磁场聚集区域。这种磁场特性使整体磁场呈现类似正弦分布的规律。

由于该磁耦合机构的非对称磁场分布特性,接收单元 1、2 应错位放置于磁场聚集区域,如图 4 所示。当接收单元被置于磁场聚集区域时,通过仿真计算,两接收单元间的耦合系数为 0.001 6,而接收单元和发射单元之间的耦合系数 k_{TX-RX1} 、 k_{TX-RX2} 分别为 0.089、0.089。结果表明,所设计的 Halbach 型磁耦合机构在有效增强接收单元和发射单元之间耦合的同时,显著降低了接收单元间的相互干扰,确保了能量传输的稳定性。

图 5 为接收单元 1 置于磁场聚集区域时 XZ

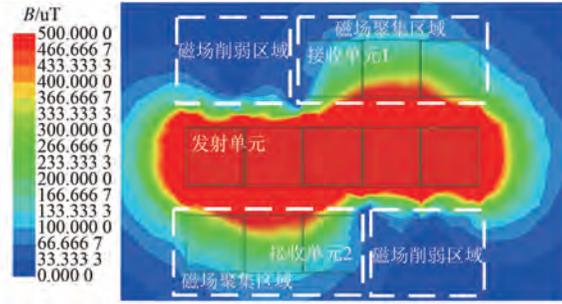


图4 Halbach型磁耦合机构的磁场

Fig. 4 Magnetic field of Halbach-type magnetic coupler 平面的磁场分布图。从图中可以看出,大部分磁通量集中在接收单元内部,且磁感应强度较强,而接收单元外部的磁通量远低于内部区域,保证了所设计磁耦合机构的传输效率。此外,磁场削弱区域的磁通量极少,磁场聚集区域的磁通量显著高于磁场削弱区域。可见该磁耦合机构在空间分布上能够有效实现磁场聚集和磁场削弱。

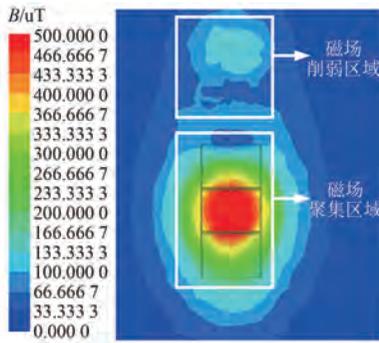


图5 接收单元1在XZ平面的磁场

Fig. 5 Magnetic field of receiver unit 1 in XZ plane

1.4 磁耦合机构偏转特性

因接收单元1、2具有相似性,以接收单元1为例进行仿真分析。当 $d_1 = d_2 = 30$ mm时,接收单元1在XZ平面绕Z轴偏转 $\pm 45^\circ$ 内,互感和耦合系数随偏转角度的变化规律如图6所示。

由图6可知,随着偏转角度增加,互感和耦合系数均呈现下降趋势,且下降幅度逐渐增大。当偏转角度位于 $\pm 15^\circ$ 之间时,互感和耦合系数的变化较为平缓,表明在该范围内系统的传输特性稳定,具有一定的抗偏转能力,能够有效维持能量传输效率。当偏转角度超过 $\pm 15^\circ$ 时,接收单元逐渐偏离磁场聚集区域,互感与耦合系数开始下降,影响能量传输。

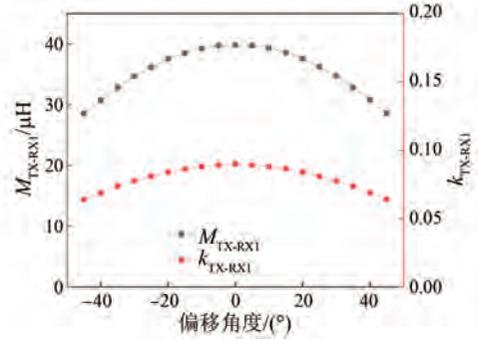


图6 互感、耦合系数变化规律

Fig. 6 Variation pattern of mutual inductance and coupling coefficient

2 磁耦合机构性能分析

2.1 磁场特性分析

发射单元磁通量分布示意图如图7所示。为便于分析,将从左至右的线圈命名为TA、TB、TC、TD和TE。其中, Φ_{TA1} 、 Φ_{TA2} 、 Φ_{TB1} 、 Φ_{TB2} 、 Φ_{TC1} 、 Φ_{TC2} 、 Φ_{TD1} 、 Φ_{TD2} 、 Φ_{TE1} 和 Φ_{TE2} 为相应线圈产生的磁通量;A1~A8为相邻线圈磁场相互作用区域。

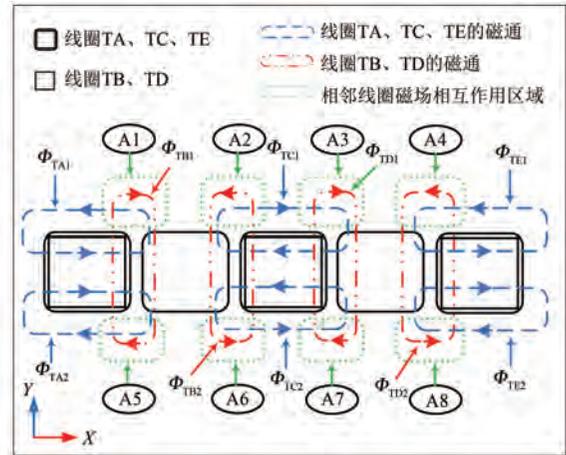


图7 发射单元磁通量分布示意图

Fig. 7 Schematic diagram of magnetic flux distribution in transmitter unit

在忽略漏磁通的前提下,发射单元各线圈满足如式(1)所示的关系^[24]:

$$\begin{cases} \Phi_{TA} = \Phi_{TA1} + \Phi_{TA2} \\ \Phi_{TB} = \Phi_{TB1} + \Phi_{TB2} \\ \Phi_{TC} = \Phi_{TC1} + \Phi_{TC2} \\ \Phi_{TD} = \Phi_{TD1} + \Phi_{TD2} \\ \Phi_{TE} = \Phi_{TE1} + \Phi_{TE2} \end{cases} \quad (1)$$

因线圈按照特定的方式排布, A1~A8 区域的磁通量发生改变会影响磁通密度。A1~A8 区域的磁通量满足如式(2)所示的关系:

$$\begin{cases} \Phi_{A1} = \Phi_{TA1} - \Phi_{TB1} \\ \Phi_{A2} = \Phi_{TB2} - \Phi_{TC1} \\ \Phi_{A3} = \Phi_{TC1} + \Phi_{TD1} \\ \Phi_{A4} = \Phi_{TD2} + \Phi_{TE1} \\ \Phi_{A5} = \Phi_{TA2} + \Phi_{TB1} \\ \Phi_{A6} = \Phi_{TB2} + \Phi_{TC2} \\ \Phi_{A7} = \Phi_{TC2} - \Phi_{TD1} \\ \Phi_{A8} = \Phi_{TD2} - \Phi_{TE2} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,在 A1、A2、A7 和 A8 区域,部分磁场抵消使得空间磁场减弱,进而达到了磁场削弱效果。而在 A3、A4、A5 和 A6 区域,磁场相互叠加使得空间磁场增强,达到了磁场聚集效果,即接收单元和发射单元之间的耦合程度大幅提升,从而提高了系统传输效率。

2.2 电路拓扑分析

由于 SS 型补偿拓扑具有结构简单、稳定性好以及效率高等特点^[25],因此本文采用 SS 型补偿网络搭建多负载 WPT 系统,等效电路如图 8 所示。

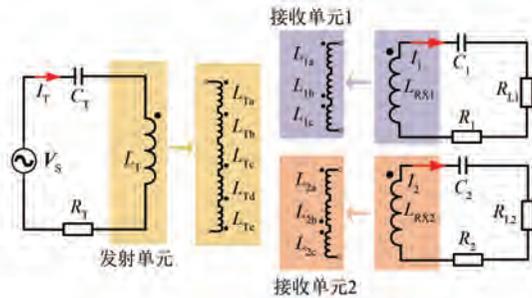


图 8 SS 型等效电路

Fig. 8 SS-type equivalent circuit

图 8 中, V_s 为高频交流电源; I_T 为发射单元的回路电流; $L_{Ta} \sim L_{Te}$ 为发射单元构成线圈的自感; L_T 为发射单元的自感; R_T 、 C_T 分别为发射单元的等效内阻、补偿电容; $L_{1a} \sim L_{1e}$ 和 $L_{2a} \sim L_{2e}$ 为两个接收单元构成线圈的自感; L_{RX1} 、 L_{RX2} 为两个接收单元的自感; I_1 、 I_2 为两个接收单元的回路电流; R_1 、 R_2 和 C_1 、 C_2 分别为两个接收单元的等效内阻和补偿电容; R_{L1} 、 R_{L2} 为两个接收回路的负载电阻。

虽然接收单元和发射单元的构成线圈间存在

互感,但各线圈都是串联而成,则可根据式(3)计算接收单元和发射单元的自感:

$$\begin{cases} L_T = L_{Ta} + L_{Tb} + L_{Tc} + L_{Td} + L_{Te} + 2 \sum_{i=1}^5 \sum_{j=2}^5 M_{ij}, i < j \\ L_{RX1} = L_{1a} + L_{1b} + L_{1c} + 2 \sum_{k=1}^3 \sum_{l=2}^3 M_{kl}, k < l \\ L_{RX2} = L_{2a} + L_{2b} + L_{2c} + 2 \sum_{m=1}^3 \sum_{n=2}^3 M_{mn}, m < n \end{cases} \quad (3)$$

式中: M_{ij} 、 M_{kl} 和 M_{mn} 分别为发射单元、接收单元 1 和接收单元 2 中各构成线圈间的互感。

基于线圈串联,整体谐振等效电路可简化为如图 9 所示的电路^[26]。

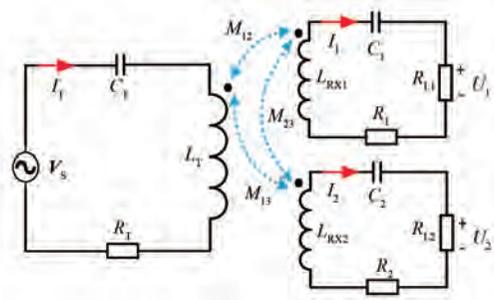


图 9 简化等效电路图

Fig. 9 Simplified equivalent circuit

图 9 中, U_1 、 U_2 为两个接收回路输出电压; M_{12} 、 M_{13} 为发射单元与两个接收单元间的互感值; M_{23} 为两接收单元间的互感值。

定义 Z_T 为发射端的回路总阻抗, Z_1 、 Z_2 为两个接收回路的总阻抗,传输系统中谐振状态对应的角频率为 ω ,即:

$$\begin{cases} Z_T = R_T + j\omega L_T + \frac{1}{j\omega C_T} \\ Z_1 = R_1 + j\omega L_{RX1} + \frac{1}{j\omega C_1} \\ Z_2 = R_2 + j\omega L_{RX2} + \frac{1}{j\omega C_2} \end{cases} \quad (4)$$

基于串联谐振补偿条件:

$$\begin{cases} \omega L_T = \frac{1}{\omega C_T} \\ \omega L_{RX1} = \frac{1}{\omega C_1} \\ \omega L_{RX2} = \frac{1}{\omega C_2} \end{cases} \quad (5)$$

考虑发射单元与两个接收单元间的互感,由基尔霍夫电压定律可推导出电路方程,如式(6)所示^[22]:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_T & -j\omega M_{12} & -j\omega M_{13} \\ -j\omega M_{12} & Z_1 & j\omega M_{23} \\ -j\omega M_{13} & j\omega M_{23} & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_T \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

进而可得发射单元、各接收单元的回路电流为

$$\begin{cases} I_T = \frac{V_S}{Z_T + \frac{\omega^2 M_{12}^2 Z_2 + \omega^2 M_{13}^2 Z_1 - j2\omega^3 M_{12} M_{13} M_{23}}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M_{23}^2}} \\ I_1 = \frac{\omega^2 M_{13} M_{23} + j\omega M_{12} Z_2}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M_{23}^2} I_T \\ I_2 = \frac{\omega^2 M_{12} M_{23} + j\omega M_{13} Z_1}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M_{23}^2} I_T \end{cases} \quad (7)$$

当两个接收单元工作时,任意时刻系统的输出功率 P_{out} 和传输效率 η 分别如式(8)和式(9)所示:

$$P_{out} = P_1 + P_2 = I_1^2 R_{L1} + I_2^2 R_{L2} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_1^2 R_{L1} + I_2^2 R_{L2}}{I_T^2 Z_T + I_1^2 Z_1 + I_2^2 Z_2} \quad (9)$$

式中: P_{in} 为系统的输入功率; P_1 、 P_2 分别为接收单元 1、2 中负载电阻的功率。

3 试验验证

3.1 试验装置

根据表 2 给出的关键参数,搭建了基于 Halbach 型磁耦合机构的 WPT 系统试验平台,来

表 2 试验装置关键参数

Tab. 2 Key parameters of experimental setup

参数名称	参数值
系统工作频率 f/kHz	100
发射单元自感 $L_T/\mu\text{H}$	532
接收单元 1 自感 $L_{RX1}/\mu\text{H}$	365.36
接收单元 2 自感 $L_{RX2}/\mu\text{H}$	362.32
发射单元补偿电容 C_T/nF	5.06
接收单元 1 补偿电容 C_1/nF	7.9
接收单元 2 补偿电容 C_2/nF	8.16

验证该磁耦合机构的传输性能。系统由直流电源提供输入,STM32F103C8T6 提供开关控制信号,驱动全桥逆变电路将直流电转化为高频交流电。高频交流电注入发射单元后,发射单元与接收单元产生磁耦合谐振,接收单元侧可感应出同频交流电,再经整流滤波后供给负载。试验平台如图 10 所示,磁耦合机构实物图如图 11 所示。

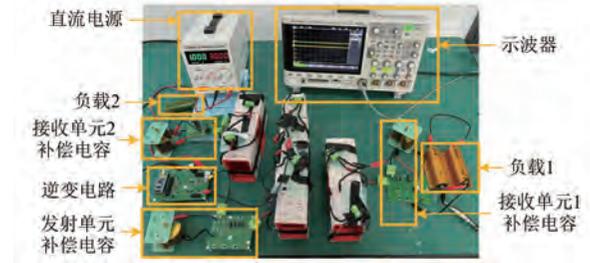


图 10 试验平台

Fig. 10 Experimental platform

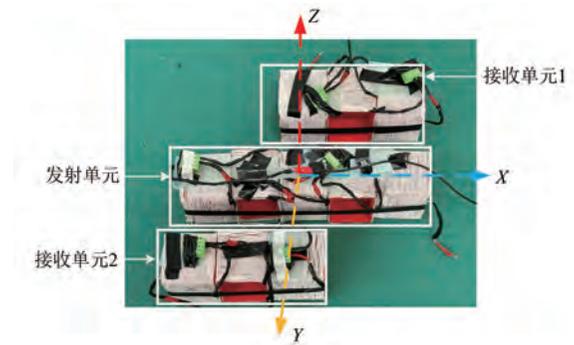


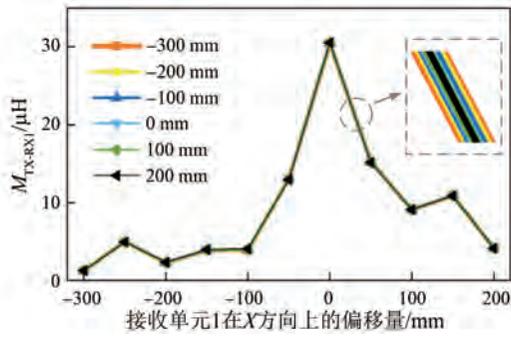
图 11 磁耦合机构实物图

Fig. 11 Photo of magnetic coupler

3.2 互感变化规律验证

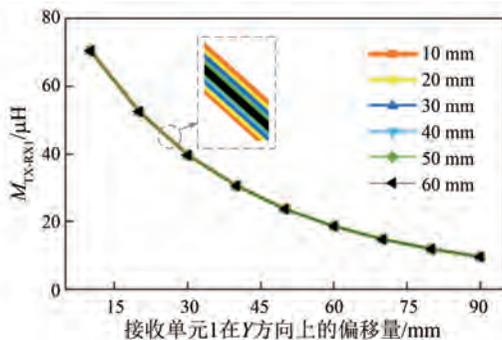
在 XYZ 坐标系中,将接收单元 1 置于(0 mm, -60 mm, 0 mm)的位置,接收单元 2 置于(0 mm, 60 mm, 0 mm)的位置, $d_1 = d_2 = 30$ mm。当接收单元 2 位置不变,接收单元 1 发生 X 方向的偏移时,测得 M_{TX-RX1} 随偏移距离的变化规律,如图 12 所示。图中不同颜色的曲线代表接收单元 2 在 X 方向上的不同位置,从而分析其对 M_{TX-RX1} 的影响。

由图 12 可知,随着接收单元 1 沿 X 方向偏移, M_{TX-RX1} 呈现先增大后减小的趋势,并在原点处达到最大值。这是因为当接收单元 1 位于 X 轴原点时,其正好处于发射单元 Y 轴负方向的磁场聚集区域,磁通量最大,从而互感达到峰值。随着接收单元 1 沿 X 方向偏移,其逐渐偏离最优磁耦合区域,导致互感下降,影响系统的能量传输效率。

图 12 X 方向偏移时 M_{TX-RX1} 的变化规律Fig. 12 Variation pattern of M_{TX-RX1} during displacement in X-direction

从图 12 的各条曲线可以看出, 尽管接收单元 2 在 X 方向上位置不同, 但其对发射单元与接收单元 1 间的互感影响甚微。这表明在当前系统设计下, 接收单元 2 的相对位置对发射单元与接收单元 1 的磁耦合关系的影响可忽略, 能够有效避免接收单元间的干扰, 提升系统的稳定性。

将接收单元 1 置于 (0 mm, -40 mm, 0 mm) 的位置, 接收单元 2 置于 (0 mm, 40 mm, 0 mm) 的位置, $d_1 = d_2 = 10$ mm。当接收单元 2 位置不变, 接收单元 1 发生 Y 方向的偏移时, 测得 M_{TX-RX1} 随偏移距离的变化规律, 如图 13 所示。图中不同颜色的曲线代表接收单元 2 在 Y 方向上的不同位置, 从而分析其对 M_{TX-RX1} 的影响。

图 13 Y 方向偏移时 M_{TX-RX1} 的变化规律Fig. 13 Variation pattern of M_{TX-RX1} during displacement in Y-direction

由图 13 可知, 当接收单元 2 位置固定时, M_{TX-RX1} 呈现单调递减的趋势, 这表明当接收单元 1 逐渐远离发射单元的磁场聚集区域时, 磁通耦合减弱, 互感逐步降低。同时可以看出接收单元 2 的相对位置对接收单元 1 的磁耦合特性影响甚微。

3.3 输出特性验证

为了研究负载电阻对系统性能的影响, 本文对不同负载条件下的传输效率进行了测试与分析。图 14 为 $d_1 = d_2 = 30$ mm 条件下, 系统整体传输效率随负载变化的曲线。

从试验结果可以看出, 系统的能量传输效率随负载电阻的增大呈先上升后下降的趋势。当负载电阻为 20 Ω 时, 系统的传输效率达到最大值, 表明此时负载与系统的阻抗匹配度较高, 即 20 Ω 为系统的最优负载。

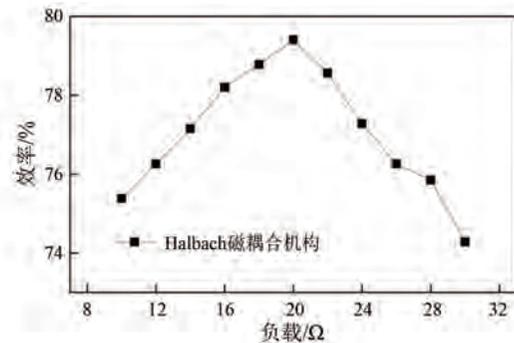


图 14 系统传输效率与负载的关系

Fig. 14 Relationship between system transfer efficiency and load

图 15 为所提磁耦合机构在两个接收单元同时沿 Y 方向发生相同偏移量时传输效率的变化曲线。经过多次试验测量, 最终数据均以平均值展示。由图 15 可知, 两接收单元的传输效率变化规律相似, 随 Y 轴偏移量的增大呈现先增大后减小的趋势。在 10~30 mm 范围内, 系统整体传输效率不低于 70%, 说明该耦合机构具有一定的抗 Y 轴偏移性能。当接收单元 1、2 均距发射单元 20 mm 时, 系统传输效率最高, 达 80.84%。从图

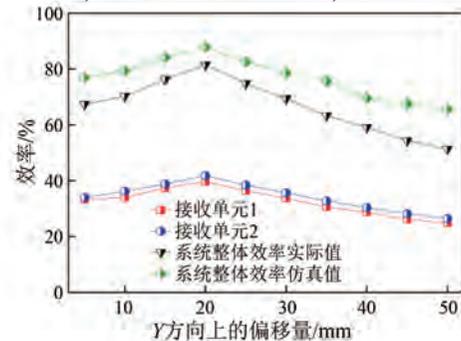


图 15 各接收单元在 Y 方向偏移时传输效率的变化规律

Fig. 15 Variation pattern of transfer efficiency of each receiver unit during displacement in Y direction

中试验与仿真数据对比可以看出,仿真数据与试验差距约为 10%。造成这种差异的原因在于:磁耦合机构为手工绕制,存在制作误差;在仿真中为了减少仿真时间和对硬件的要求,使用了六角形截面的线圈来代替圆形线圈;在测量过程中,发射单元和接收单元可能没有完全对齐,发射单元和接收单元间的距离与模拟不完全一致。

3.4 磁削弱性能验证

将两个接收单元分别置于磁场削弱区域, $d_1 = d_2 = 20 \text{ mm}$ 。输入电压为 30 V,系统输入功率为 34.71 W,负载 1、2 的功率分别为 0.82 W、0.81 W,此条件下测得系统整体传输效率为 4.7%。与接收单元位于磁场聚集区域时的传输效率相比,磁场削弱区域的传输效率显著降低,这表明所设计的磁耦合机构在特定区域具备有效的磁削弱效果。

不同线圈结构的 WPT 系统对比结果如表 3 所示。

表 3 不同线圈结构 WPT 系统对比

Tab.3 Comparison of WPT systems with different coil structures

线圈类型	$\eta_{\max}/\%$	磁削弱效果
平面非对称结构 ^[6]	84	无
空间正交结构 ^[13]	69	无
平面结构 ^[16]	80.5	无
平面正交结构 ^[17]	88.4	无
单负载 Halbach 结构 ^[24]	81	有
本文结构	80.84	有

由表 3 可知,本文所设计的 Halbach 型磁耦合机构在为多个负载供电时,不仅能够保持一定的传输效率,同时还具备良好的磁削弱效果。这一特性使得该磁耦合机构在多负载供电应用中具有明显优势:一方面,该磁耦合机构能够有效抑制寄生耦合,提高系统的稳定性和能量传输效率;另一方面,磁削弱效果有助于减少该磁耦合机构对周围电子设备的干扰,提高系统的电磁兼容性。

4 结语

针对多负载 WPT 系统中,接收线圈交叉耦合导致传输效率降低的问题,提出了一种基于 Halbach 型磁耦合机构的 WPT 系统用于多 AGV

供电。首先,通过优化设计 Halbach 型磁耦合机构,分析接收单元和发射单元之间的磁耦合特性,并结合发射单元构成线圈的激励电流方向,阐述了该机构产生非对称磁场的原理。其次,建立 SS 型等效电路拓扑并推导输出特性。最后,搭建试验平台对系统的互感变化规律、输出特性以及磁削弱性能进行分析和验证。试验结果表明, Halbach 型磁耦合机构具有双侧磁场聚集和磁场削弱功能,磁场聚集区域和磁场削弱区域错位分布,有效抑制了接收线圈间的交叉耦合,同时降低了系统的漏磁。接收单元 1、2 距离发射单元 20 mm,双负载均为 20 Ω 时,系统整体传输效率最高,达 80.84%。对比不同线圈结构 WPT 系统,验证了所提 Halbach 型磁耦合机构的可行性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

何继泊、曹桂梅进行了方案设计、内容总结与论文撰写,何继泊、韩天浩进行了试验测试,王豫、严仲明参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary, and paper writing were carried out by He Jibo and Cao Guimei. The experiment was conducted by He Jibo and Han Tianhao. The manuscript was reviewed and revised by Wang Yu and Yan Zhongming. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] WANG J C, LIM E G, LEACH M P, et al. A 403 MHz wireless power transfer system with tuned splitting loops for implantable medical devices [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 70 (2): 1355-1366.
- [2] 马艺林,李锐华,胡波.电动汽车无线充电系统磁耦合线圈结构的多目标优化设计[J].电机与控制应用,2022,49(6):53-59.

- MA Y L, LI R H, HU B. Multi-objective optimization design of magnetic coupling coil structure for wireless charging system of electric vehicle [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(6): 53-59.
- [3] 蒋金橙, 王佩月, 冯天旭, 等. 基于准双向三态协同调度的无人车和无人机逐级式无线充电应用[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(22): 6965-6979.
- JIANG J C, WANG P Y, FENG T X, et al. AGV and UAV stepwise wireless charging application based on quasi bidirectional three-state collaborative progressive method [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(22): 6965-6979.
- [4] 薛明, 杨庆新, 章鹏程, 等. 机器人随机位置下动态无线供电阵列式发射模组优化设计[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(24): 6319-6331.
- XUE M, YANG Q X, ZHANG P C, et al. Optimal design of dynamic wireless power transmitting array module in random position of robot [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(24): 6319-6331.
- [5] WANG D Y, FU C W, BEI X H, et al. A reconfigurable half-bridge compensation topology-based WPT system with constant current and constant voltage outputs [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2022, 70(1): 256-260.
- [6] KANAZAWA H, UWAI H, KIUCHI S, et al. Receiver-position-based unbalanced-current control for a three-to single-phase wireless power transfer system for AGVs [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 70(4): 3245-3256.
- [7] TANG H M, LIU C, PAN W X, et al. A Self-adaptive dual-channel LCC-S detuned topology for misalignment tolerance in AUV wireless power transfer systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2024, 40(3): 4630-4639.
- [8] DAI X, HUA X X, SUN S X, et al. Stability analysis and incipient fault tolerant control for multiple-output wireless power transfer systems [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2023, 21(12): 3957-3969.
- [9] CHEN L, ZHANG C W, BEN T, et al. Design and optimization of a magnetic coupling structure with high anti-offset for wireless power transfer [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2023, 18(2): 1083-1098.
- [10] 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*, 2022, 19(1): 362-370.
- [11] KIM J, KIM D H, PARK Y J. Analysis of capacitive impedance matching networks for simultaneous wireless power transfer to multiple devices [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 62(5): 2807-2813.
- [12] IMURA T, HORI Y. Maximizing air gap and efficiency of magnetic resonant coupling for wireless power transfer using equivalent circuit and Neumann formula [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(10): 4746-4752.
- [13] 陈旭玲, 田婷, 董硕, 等. 多负载转动的正交双发射 MCR-WPT 系统研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2024, 56(5): 876-883.
- CHEN X L, TIAN T, DONG S, et al. Study on orthogonal dual-transmitter MCR-WPT system with multi-load rotation [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2024, 56(5): 876-883.
- [14] 卢伟国, 陈伟铭, 李慧荣. 多负载多线圈无线电能传输系统各路输出的恒压特性设计[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(6): 1137-1147.
- LU W G, CHEN W M, LI H R. Multi-load constant voltage design for multi-load and multi-coil wireless power transfer system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(6): 1137-1147.
- [15] LEE K, CHAE S H. Comparative analysis of frequency-selective wireless power transfer for multiple-Rx systems [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 35(5): 5122-5131.
- [16] 冯群群, 殷佳斌, 熊飏, 等. 具有恒定输出的双分支共面式无线电能传输系统[J/OL]. *电源学报*, 2024-07-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20240710.0806.002.html>.
- FENG Q Q, YIN J B, XIONG B, et al. A coplanar dual-branch wireless power transfer system with constant current or constant voltage output [J/OL]. *Journal of Power Supply*, 2024-07-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20240710.0806.002.html>.

- [17] 肖蕙蕙,周青山,熊山香,等. 基于双层正交 DD 线圈抗偏移偏转的无线电能传输系统[J]. 电工技术学报, 2022, 37(16): 4004-4018.
- XIAO H H, ZHOU Q S, XIONG S X, et al. Wireless power transfer system based on double-layer quadrature double-D coupling structure with anti-misalignment and anti-deflection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37 (16): 4004-4018.
- [18] LIU G J, ZHANG B, XIAO W X, et al. Omnidirectional wireless power transfer system based on rotary transmitting coil for household appliances [J]. Energies, 2018, 11(4): 1-16.
- [19] 葛红岩,卓亮,刘勇,等. 基于 Halbach 阵列的机器人关节电机关键技术研究[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(12): 65-69.
- GE H Y, ZHUO L, LIU Y, et al. Research on key technologies of robot joint motor based on Halbach array [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(12): 65-69.
- [20] 李宗耀,初秋,车爽,等. 少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机性能和材料成本研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 74-82.
- LI Z Y, CHU Q, CHE S, et al. Research on performance and material cost of Halbach permanent magnet synchronous motor with less rare earth combined magnet poles [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(12): 74-82.
- [21] BABINEC P, KRAFCÍK A, BABINCOVÁ M, et al. Dynamics of magnetic particles in cylindrical Halbach array: Implications for magnetic cell separation and drug targeting [J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 2010, 48: 745-753.
- [22] 温建民,罗成. 两种双边 Halbach 阵列永磁涡流制动特性对比研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(2): 36-40+55.
- WEN J M, LUO C. Comparison research on characteristics of two double-sided Halbach arrays permanent magnet eddy current braking [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(2): 36-40+55.
- [23] 孙嘉悦. 基于三维电磁仿真软件的无线充电耦合机构建模与仿真研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(11): 65-71+113.
- SUN J Y. Research on modeling and simulation of wireless charging coupling mechanism based on 3D electromagnetic simulation software [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(11): 65-71+113.
- [24] WANG L Y, LI J G, CHEN C, et al. Halbach-type coupler WPT system with flux-shielding function for linear motor [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2576-2588.
- [25] 吴理豪,张波. 电动汽车静态无线充电技术研究综述(下篇)[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1662-1678.
- WU L H, ZHANG B. Overview of static wireless charging technology for electric vehicles: Part II [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1662-1678.
- [26] 李建坡,王一钧,杨涛,等. 多负载磁耦合谐振式无线电能传输系统特性分析[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 722-729.
- LI J P, WANG Y J, YANG T, et al. Transmission characteristic research on multi-loads wireless power transfer via magnetic coupling resonance [J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 722-729.
- [27] 孙淑彬,张波,李建国,等. 多负载磁耦合无线电能传输系统的拓扑发展和分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(8): 1885-1903.
- SUN S B, ZHANG B, LI J G, et al. Analysis and development on topologies of multi-load magnetic-coupling wireless power transfer system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(8): 1885-1903.

收稿日期:2025-01-07

收到修改稿日期:2025-02-25

作者简介:

何继泊(2000-),男,硕士研究生,研究方向为无线电能传输技术,hjb1905365861@163.com;

*通信作者:曹桂梅(1998-),女,博士研究生,研究方向为无线电能传输技术,cgm0121@163.com。