DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.247 中图分类号：TM724 文献标志码：A

电动船舶无线充电新型螺线管磁耦合机构设计与优化

王 维[1]，王 硕[1]，吕晓飞[2]，窦真兰[3]
(1.南京师范大学电气与自动化工程学院，南京 210023；2.南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司，南京 211106；3.国网上海市电力公司，上海 200122)

摘要：针对电动船舶充电应用的无线充电技术逐渐受到关注，由于电动船舶无线充电传输距离较大，磁耦合机构的耦合系数和抗偏移能力会随着传输距离的增大而急剧减少，从而降低传输效率和输出功率。提出1种日字螺线管磁耦合机构，并搭建不同结构的磁耦合机构的有限元仿真模型对其性能进行对比；同时对提出的日字螺线管磁耦合机构进行优化，设置相应的磁屏蔽装置，与传统螺线管相比磁心使用减少了32%，利兹线使用减少了38%，有效地提高了磁耦合机构的耦合系数和抗偏移能力。最后搭建了1套无线充电样机，其传输效率可以达到88%，实验与仿真结果一致。

关键词：无线充电；螺线管；有限元仿真；优化设计

Design and Optimization of Novel Solenoid Magnetic Coupler for Electric Boats Wireless Charging

WANG Wei[1], WANG Shuo[1], LÜ Xiaofei[2], DOU Zhenlan[3]
(1. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, NARI Group Corporation, Nanjing 211106, China; 3. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: The wireless charging technology for electric boats charging applications has gradually attracted attention. Due to the long wireless charging transmission distance of electric boats, the coupling coefficient and anti-misalignment capability of a magnetic coupler will decrease sharply with an increase in the transmission distance, thus reducing the transmission efficiency and output power. A novel solenoid magnetic coupler is proposed, and the finite element simulation models of magnetic couplers with different structures are built to compare their performance. In addition, the proposed solenoid magnetic coupler is optimized, and the corresponding magnetic shielding device is configured. Compared with those of the traditional solenoid magnetic coupler, the use of magnetic core and Litz wires of the novel solenoid magnetic coupler are reduced by 32% and 38%, respectively, thus effectively improving its coupling coefficient and anti-misalignment capability. Finally, a set of wireless charging prototype was built, and the transmission efficiency can reach 88%. The experimental results were consistent with the simulation results.

Keywords: Wireless charging; solenoid; finite element simulation; optimization design

石油是人类生存和发展不可或缺的资源，但石油属于不可再生能源。面对石油消耗终端的不断增多(日益增加的船舶数量等)和石油储量的不断减少，电动船舶有替代传统燃油船舶的趋势。推广电动船舶的障碍在于其充电和续航问题。目前，电动船舶的充电方式主要有3种：有线充电、无线充电和更换电池方案。电动船舶有线充电技术成熟、成本较低，但是面临着雨雪天气触电的危险；更换电

收稿日期：2022-12-13；**修回日期：**2023-03-01，2023-03-10；
录用日期：2023-03-21；**网络首发日期：**2023-05-05
基金项目：国家电网公司总部科技资助项目(52094021N00R)
This work is supported by the Science and Technology Project of SGCC under the grant 52094021N00R

池方案看似完美，但是不同船舶厂商之间的电池差异明显，不具有普遍性；无线充电是近年来兴起的充电方式，虽然技术不够成熟、成本较高，但其具有便捷、安全的优势，因此引起社会的广泛关注[1-4]。基于岸电系统的电动船舶无线充电中，接收线圈位于船舶侧面，与岸边的发射线圈通过装有随动装置的机械臂耦合，可以减少接收线圈和发射线圈出现较大偏移的情况[5]。

磁耦合机构的性能是影响无线电能传输的重要因素，其工作情况直接影响系统的传输功率和效率[6-8]。目前磁耦合机构的种类较多，大部分磁耦合机构的设计围绕提高耦合系数和抗偏移能力展开[9-12]。停靠的船舶在充电过程中，由于风、浪、船舶吃水的共同作用，经常相对于固定的岸上充电机构移动，磁耦合机构不可避免地存在偏移情况，线圈正对和偏移时，互感和耦合系数变化较大，导致传输功率不稳定、系统效率降低。

目前，国内外无线电能传输领域关于磁耦合机构方面的研究主要着眼于电动汽车无线充电线圈结构及整体无线充电系统的构建、设计和优化[13-15]。电动汽车无线电能传输距离主要在 100~200 mm，输出功率一般低于 10 kW，难以满足电动船舶大气隙高功率无线充电的需求[16-19]。文献[16]设计了 1 种 DD 型线圈结构，并在此基础上增加 1 个 Q 线圈形成 DDQ 线圈结构，在 200 mm 传输距离下实现 2 kW 功率传输；文献[17]采用新型 H 型螺线管线圈，该线圈可在 200 mm 传输距离下实现 3 kW 功率输出；文献[18]则采用扁平螺线管磁耦合结构，结合 LCC/S 补偿拓扑和数字闭环 Buck 变换器，搭建了传输距离 176 mm、输出功率恒定为 500 W 的系统样机；文献[19]在螺线管磁耦合机构基础上，设计了 1 种双向绕组 H 型螺线管磁耦合机构，显著提高了系统抗偏移能力，在 70 mm 传输距离下实现 10 kW 功率传输。

电动船舶无线充电传输距离和输出功率较大，磁耦合机构的设计目标主要如下：①无线电能传输系统输出功率 P_{out}≥30 kW；②适应 500 mm 船岸距离(发射线圈与接收线圈之间气隙)；③船舶行进方向偏移±10 cm 内，传输效率不小于 80%；④体积和质量尽可能小。目前关于电动船舶无线充电磁耦合机构的研究相对较少，为此，本文提出了 1 种新型日字螺线管磁耦合机构，用于磁耦合谐振式无线充电系统，仿真分析了利兹线覆盖磁心长度和匝间距对该磁耦合机构性能的影响，设计了适配的磁屏蔽结构，实现了高耦合系数和良好的抗偏移性能。

1 磁路模型分析

根据磁耦合机构的磁通量分布，可将其大致分为 2 类，即单侧磁通磁耦合机构和双侧磁通磁耦合机构。其中平面方形、圆形、DD 磁耦合机构均为典型的单侧磁通磁耦合机构，螺线管属于双侧磁通磁耦合机构。由于磁通流动路径不同，螺线管结构的基本磁通路径高度高于相同尺寸的圆形结构，这种特性导致螺线管结构设计具有更高的耦合度。

图 1 所示为典型的螺线管磁耦合机构，包括发射端螺线管和接收端螺线管，其磁力线分布如图中虚线所示。图中：i_s 为流过接收端螺线管的电流；i_p 为流过发射端螺线管的电流；Φ_{12} 为互耦合区磁通；Φ_{S11} 和 Φ_{S12} 分别为发射端螺线管下侧和上侧漏磁通；Φ_{S21} 和 Φ_{S22} 分别为接收端螺线管上侧和下侧漏磁通。由图 1 可见，螺线管磁耦合机构的磁通主要分为自耦合磁通和互耦合磁通，互耦合磁通决定了磁耦合机构的耦合程度，也是影响互感和耦合系数的关键因素。

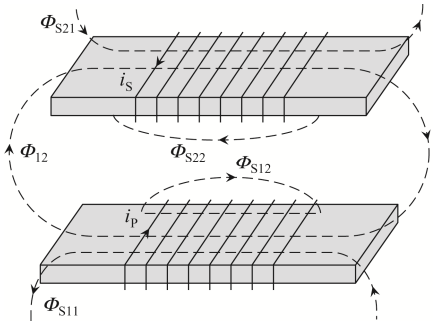


图 1 典型螺线管磁耦合机构及其磁通分布

Fig. 1 Typical solenoid magnetic coupler and its flux distribution

根据螺线管磁耦合机构的磁通分布，建立等效

磁路电路模型如图 2 所示，用磁阻表征磁通在不同介质中的分布情况。电路的等效电压源是发射端的激励电流乘以匝数和接收端激励电流乘以匝数。

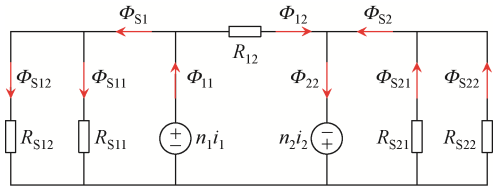


图 2　典型螺线管磁耦合机构等效磁路模型

Fig. 2 Equivalent magnetic circuit model of typical solenoid magnetic coupler

图 2 中：R_{S11}、R_{S12}、R_{S21} 和 R_{S22} 为自耦合磁阻；R_{12} 为互耦合磁阻；Φ_{S1} 和 Φ_{S2} 为自耦合区磁通；Φ_{11} 和 Φ_{22} 分别为发射端和接收端螺线管电流产生的磁动势；n_1i_1 和 n_2i_2 分别为发射端和接收端产生的磁动势。

根据图 2 的等效磁路模型可分别对发射端两侧的自耦合磁阻 R_{S11} 和 R_{S12}，以及接收端两侧的自耦合磁阻 R_{S21} 和 R_{S22} 进行处理，即

$$R_{S1} = R_{S11} // R_{S12} \tag{1}$$

$$R_{S2} = R_{S21} // R_{S22} \tag{2}$$

根据螺线管磁耦合机构等效磁路模型，可列写泄漏电感和耦合电感的计算公式为

$$L_{12} = \frac{n_1 n_2}{R_{12}} \tag{3}$$

$$L_{11} = \frac{n_1^2}{R_1} + \frac{n_1^2}{R_{12}} \tag{4}$$

$$L_{22} = \frac{n_2^2}{R_2} + \frac{n_2^2}{R_{12}} \tag{5}$$

式中：n_1 和 n_2 分别为发射端和接收端螺线管的线圈匝数；R_1 和 R_2 分别为发射端和接收端螺线管磁通所经过路径的磁阻。

根据式(1)~式(5)，可以计算螺线管磁耦合机构耦合系数 k 的大小为

$$k = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} = \sqrt{\frac{R_{S1}R_{S2}}{(R_{S1}+R_{12})(R_{S2}+R_{12})}} \tag{6}$$

由式(6)可知，k 仅与电路中的自耦合磁阻及互耦合磁阻相关，即与磁耦合机构中磁通路径分布上的磁阻相关。由图 1 可以看出，磁阻受磁通路径分布及绕组和磁心尺寸与形状的影响。

螺线管磁耦合机构是最典型的磁耦合机构之一，目前对螺线管进行的改进主要有 2 种方式：第 1 种是增强螺线管垂直于绕组方向的抗偏移能力，以获得与绕组方向相近的抗偏移能力，通常在螺线管的基础上增加正交线圈[20-21]；第 2 种方式注重于减少利兹线和铁氧体磁心的使用，通过改进磁心的形状和尺寸、优化绕组布局和磁屏蔽结构，获得更高的耦合系数，如 H 型磁心和分体式螺线管[22-25]。下文采用第 2 种方式对螺线管磁耦合机构的结构进行改进设计，特别是优化绕组和磁心的位置和尺寸以改变磁通路径分布和磁阻，从而提高磁耦合机构的耦合系数和抗偏移能力。

2　新型日字螺线管磁耦合机构设计

图 3 所示为典型螺线管磁耦合机构模型，不同于其他磁耦合机构，典型螺线管磁耦合机构属于铜包铁结构，利兹线紧密缠绕在铁氧体磁心上，产生的磁力线更加集中，耦合系数较高。但典型螺线管磁耦合机构需要大量磁心和利兹线，这不仅导致耦合机构质量较大，还会大大增加耦合机构成本。

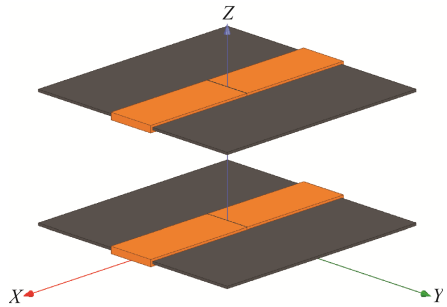


图 3　典型螺线管磁耦合机构模型

Fig. 3 Model of typical solenoid magnetic coupler

新型日字螺线管磁耦合机构由利兹线绕制在日字形磁心的 3 条横边上，整体线圈回路由同一根绝缘导线绕制而成。新型日字螺线管磁耦合机构模型如图 4 所示。

为方便对不同磁耦合机构参数和抗偏移性能进行对比，此处定义参数——耦合系数保持率 k%。耦合系数保持率是指在一定距离偏移发生时，偏移后的耦合系数与正对时耦合系数的百分比。其参数表示为

$$k\%=\frac{k_{\mathrm{mis}}}{k_0} \tag{7}$$

式中：k_0 为磁耦合机构正对时的耦合系数；k_{mis} 为磁耦合机构偏移后的耦合系数。

通过有限元仿真平台分别针对几种常用的线圈搭建仿真模型，进行对比分析。对比的耦合机构为平面圆形线圈、平面方形线圈、DD 线圈、螺线管线圈和日字螺线管线圈。其中，磁心尺寸均为 1 000 mm×1 000 mm×10 mm，利兹线线径为 10 mm，仿真频率为 85 kHz，磁耦合机构传输气隙为 500 mm。不同磁耦合机构仿真结果见表 1。表中：k 为磁耦合机构耦合系数；X 为接收端沿 X 轴正方向偏移的距离；Y 为接收端沿 Y 轴正方向偏移的距离。

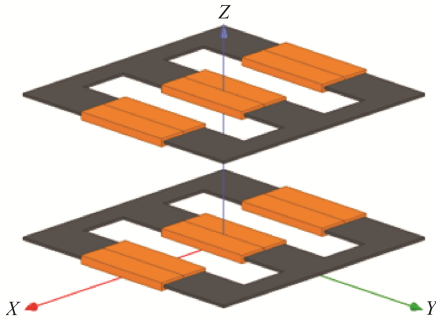
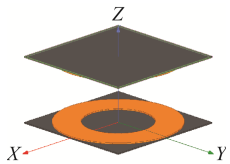
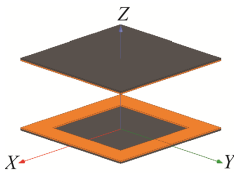
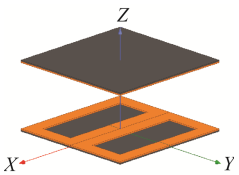
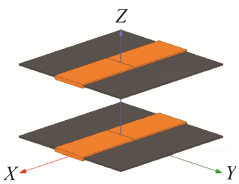
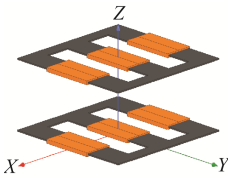


图 4 新型日字螺线管磁耦合机构模型

Fig. 4 Model of novel solenoid magnetic coupler

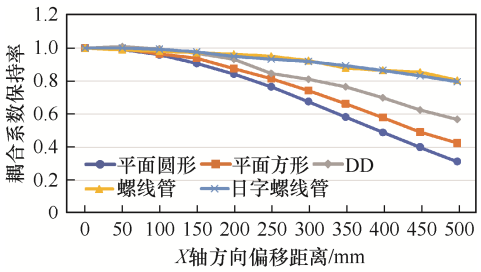
表 1 不同磁耦合机构仿真结果

Tab. 1 Simulation results of different magnetic couplers

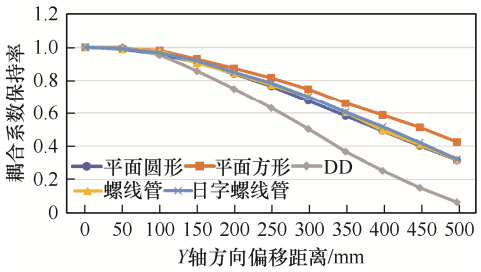
线圈模型	利兹线/m	传输效率/%	k 正对	$k(X$=500 mm)	$k(Y$=500 mm)
 平面圆形	107.82	91.76	0.155 4	0.048 9	0.049 0
 平面方形	107.52	90.94	0.144 3	0.061 5	0.061 2
 DD	112.64	74.63	0.087 7	0.049 8	0.005 5
 螺线管	111.24	93.67	0.142 1	0.114 5	0.045 2
 日字螺线管	110.40	93.82	0.146 3	0.116 5	0.046 8

分析表 1 可知，平面圆形线圈正对时耦合系数最高，但抗偏移性能较差。日字螺线管和传统螺线管抗偏移性能较好，日字螺线管偏移后的耦合系数高于传统螺线管，且日字螺线管所用磁心和利兹线较少，正对时耦合系数与平面圆形线圈相近并且大于传统螺线管。DD 线圈传输效率最低，与其耦合系数相呼应，除 DD 线圈外，其余耦合机构传输效率相近，日字螺线管传输效率略高于其他耦合机构。

图 5 为不同磁耦合机构的耦合系数保持率随偏移距离变化曲线。由图 5 可见，在 X 轴方向偏移小于 100 mm 时，不同磁耦合机构的耦合系数保持率相近，日字螺线管耦合系数保持率较高；在 X 轴方向偏移大于 100 mm 时，日字螺线管和传统螺线管耦合系数保持率明显高于其他磁耦合机构，随着偏移距离的增大，其他磁耦合机构耦合系数保持率快速下降；在 Y 轴方向偏移过程中，DD 线圈耦合系数保持率下降较快，日字螺线管耦合系数保持率仅略低于平面方形线圈。由此可见，日字螺线管磁耦合机构在 X 轴方向具有较高的抗偏移能力，在 Y 轴方向抗偏移能力也优于部分传统磁耦合机构。



(a)沿X轴方向偏移



(b)沿Y轴方向偏移

图 5　耦合系数保持率随偏移距离变化曲线

Fig. 5 Curves of coupling coefficient retention varying with misalignment

3　新型日字螺线管磁耦合机构的优化

新型日字螺线管磁耦合机构由铁氧体磁心和绕制在铁氧体磁心上的利兹线组成，较大的传输距离限制了磁耦合机构磁心的尺寸，因此主要对绕制在铁氧体磁心上的利兹线进行优化，包括利兹线覆盖磁心长度和利兹线匝间距。由式(6)可知，k 仅与电路中的磁阻相关，因此应尽量减少线圈匝数以降低磁耦合机构设计成本和总体质量。图 6 所示为日字螺线管磁耦合机构耦合系数 k 随利兹线覆盖磁心的长度 d 变化的曲线。

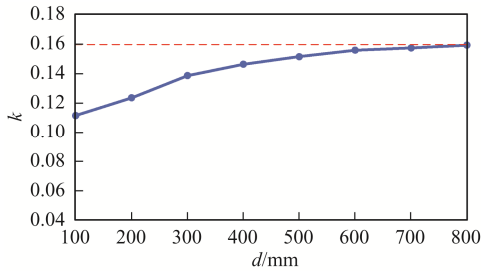


图 6　耦合系数随利兹线覆盖磁心长度变化曲线

Fig. 6 Curves of coupling coefficient varying with length of magnetic core covered by Litz wires

由图 6 可见，耦合系数随利兹线覆盖磁心长度的增加而逐渐增大，综合考虑设计成本和总体质量，选择覆盖磁心的长度 d=250 mm，匝数为 25 匝。在确定匝数的情况下，日字螺线管线圈的绕制主要由 2 种方式，即利兹线紧密绕制和利兹线以固定间距绕制。对利兹线匝间距 c 进行参数化仿真，可得如图 7 所示的耦合系数随利兹线间距变化曲线。

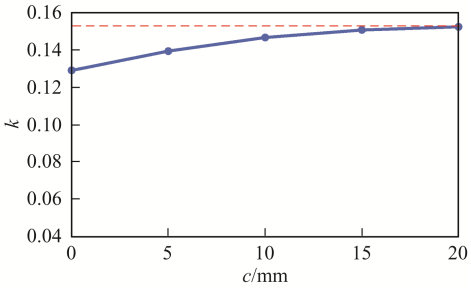
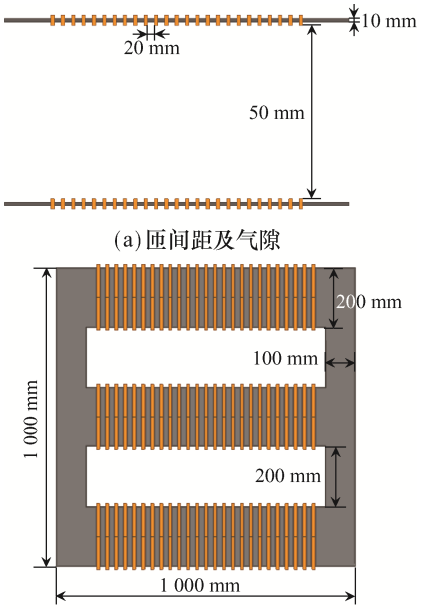


图 7　耦合系数随利兹线间距变化曲线

Fig. 7 Curves of coupling coefficient varying with gap between Litz wires

由图 7 可见，耦合系数随匝间距的增大而逐渐增大，由于磁心尺寸限制，匝间距 c=20 mm 时，耦合系数 k=0.153 最大。匝间距优化后的日字螺线管模型及其参数如图 8 所示。



(a) 匝间距及气隙

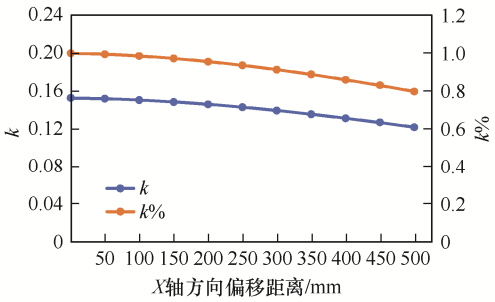
(b) 磁心尺寸

图 8 匝间距优化后日字螺线管模型及其参数

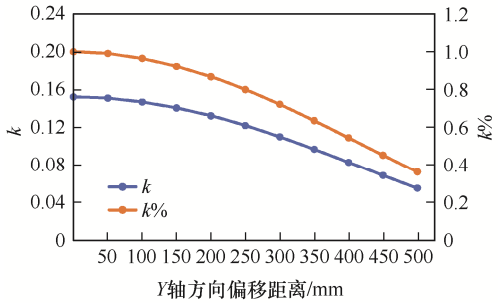
Fig. 8 Model and parameters of novel solenoid magnetic coupler with optimized gap between Litz wires

图 9 为匝间距优化后的日字螺线管磁耦合机构耦合系数 k 和耦合系数保持率 k%在 X 轴和 Y 轴方向的偏移变化曲线。

由图 9 可见，耦合系数 k 和耦合系数保持率 k%在 X 轴方向偏移过程中变化较为平缓，偏移最大处 X=500 mm时，耦合系数保持率 k%仍能达到 0.798。在 Y 轴方向偏移最大处 Y=500 mm 时，耦合系数保持率 k%仍能达到 0.366，相比于优化前明显增高。因此，在对利兹线覆盖磁心长度和利兹线



(a) 沿X轴方向偏移



(b) 沿Y轴方向偏移

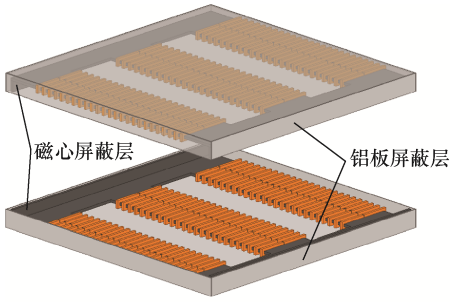
图 9 匝间距优化后日字螺线管偏移曲线

Fig. 9 Curves of novel solenoid magnetic coupler with optimized gap between Litz wires

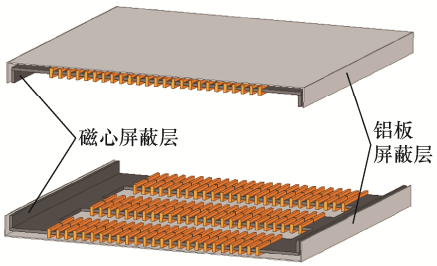
匝间距进行优化设计后，磁耦合机构耦合系数显著增加，且抗偏移能力也得到了提高。

4 磁屏蔽装置的设计

根据图 1 中的磁通分布可知，螺线管泄漏磁通主要分布在磁心两端的垂直方向，而水平方向泄漏磁通占比较低。高磁导率的铁氧体可以提供较低磁阻的磁通路径引导磁通，高电导率的铝可以吸收和反射磁通，因此铁氧体和铝常被用于磁屏蔽装置。图 10 为由 2 种金属材料制成的屏蔽装置的屏蔽层结构。



(a) 屏蔽层结构1



(b) 屏蔽层结构2

图 10 屏蔽层结构

Fig. 10 Structures of shielding layers

图 10(a)和(b)分别为在两侧设置和不设置铝板的对比模型，在磁心的两端放置铁氧体磁心作为磁心屏蔽层，通过磁心高磁导率的特性引导磁通路径。同时，与磁心相邻放置铝板进一步减少磁通泄漏，因此，自耦合磁通 Φ_{S1} 和 Φ_{S2} 减小，互耦合磁通 Φ_{12} 增大。为了更加精确地对比屏蔽层对磁场分布的影响及 2 种磁屏蔽结构的屏蔽效果，在发射线圈中心上方 270 mm 处的 XZ 平面上绘制 1 条关于 Y 轴对称的线段，方向从 X 正半轴到负半轴，长度为 1 200 mm，仿真磁耦合机构磁感应强度沿线段变化情况如图 11 所示。

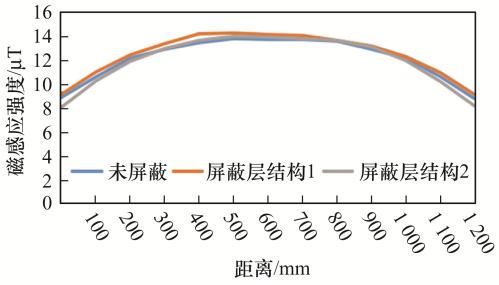
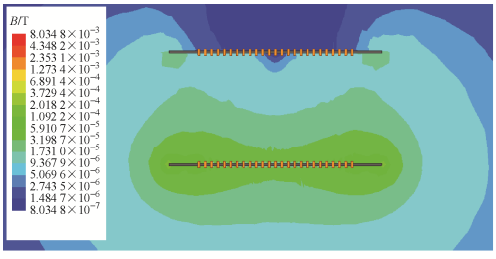


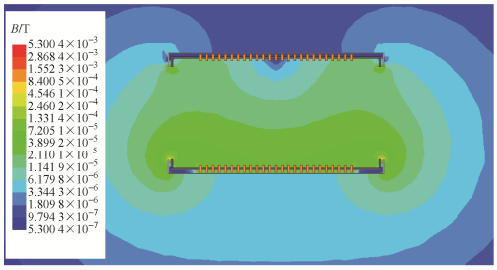
图 11　线段上各点的磁感应强度变化曲线

Fig. 11 Varying curves of magnetic induction intensity at each point on line segment

由图 11 可见，无论是在磁耦合机构外侧还是内侧，采用屏蔽层结构 1 时的磁感应强度均高于未屏蔽和屏蔽层结构 2。采用屏蔽层结构 2 时，在磁耦合机构外侧其磁感应强度最低，屏蔽效果最好，在磁耦合机构内侧时磁感应强度高于未屏蔽且和屏蔽层结构 1 相近，因此，屏蔽层结构 2 具有良好的屏蔽效果，同时可以获得较高的耦合系数。图 12 和图 13 分别为磁屏蔽装置设置前后耦合机构的磁通分布及耦合系数在 X 轴方向的偏移变化曲线。



(a)屏蔽前



(b)屏蔽后

图 12　屏蔽前后耦合机构磁通分布

Fig. 12 Flux distribution of coupler before and after shielding

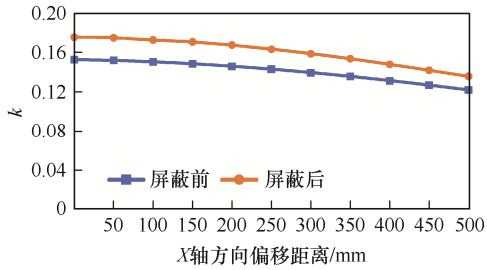


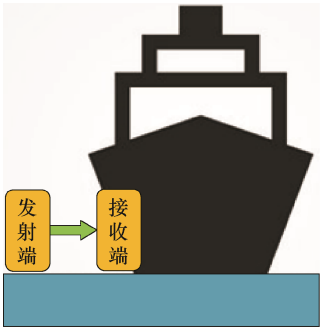
图 13　屏蔽前后日字螺线管 X 轴偏移曲线

Fig. 13 Curves of X-axis misalignment of novel solenoid magnetic coupler before and after shielding

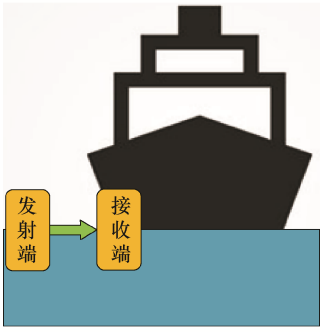
由图 12 和图 13 可见，磁屏蔽装置设置后，发射端磁心下方泄漏磁通大大减少。由于两端添加的磁心具有导向作用，部分泄漏磁通和接收端产生耦合，磁耦合机构正对时的耦合系数由 0.153 增加至 0.176，耦合系数在设置磁屏蔽装置后明显升高，在 X 轴偏移过程中，屏蔽后耦合系数均高于屏蔽前。

由于水位的变化和船舶自身质量的变化，船舶侧面的磁耦合机构与水面位置可能存在 3 种情况：情况 1 为磁耦合机构全部在空气中，情况 2 为磁耦合机构部分没入淡水中，情况 3 为磁耦合机构完全没入淡水中。3 种情况下的磁耦合机构示意如图 14 所示。

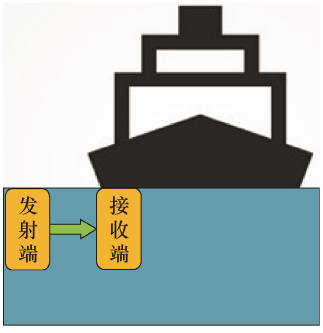
考虑到上述 3 种情况可能对磁耦合机构性能参数存在影响，对上述 3 种情况及磁耦合机构完全没入海水中的磁耦合机构耦合系数及偏移特性进行仿真分析，不同情况下日字螺线管偏移特性曲线如图 15 所示。



(a)情况1



(b)情况2



(c)情况3

图 14 3 种情况下的磁耦合机构示意

Fig. 14 Schematic of magnetic coupler in three cases

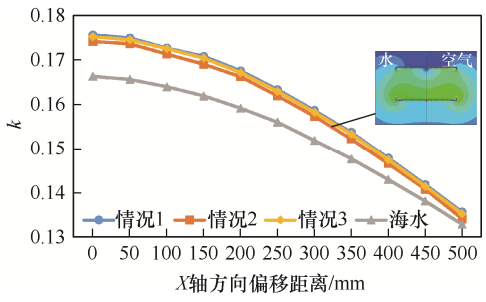


图 15 不同情况下日字螺线管 *X* 轴偏移曲线

Fig. 15 Curves of *X*-axis misalignment of novel solenoid magnetic coupler in different cases

由图 15 对比分析可见，由于空气和淡水的磁导率和电导率相近而海水电导率较高，磁耦合机构在情况 1、情况 2 和情况 3 中的耦合系数特性基本一致，在完全没入海水时耦合系数较低，因此本文提出的磁耦合机构可适用于空气和淡水环境无线充电。

5 实验验证

本文设计的日字螺线管磁耦合机构应用于内河电动船舶无线充电，且磁耦合机构在第 4 节所述 3 种情况下性能相近，因此实验仅需验证磁耦合机构在情况 1 时的传输特性即可。为验证本文提出的日字螺线管磁耦合机构用于无线电能传输系统具有较高的耦合系数和较好的抗偏移性能，根据仿真模型绕制线圈，搭建无线充电样机，如图 16 所示，主要包括直流源、逆变器、磁耦合机构、电阻负载等。根据电动船舶无线充电大功率、大气隙和较高涡流损耗的特征，选择 S/S 型补偿拓扑进行补偿。磁耦合机构实验关键参数见表 2。

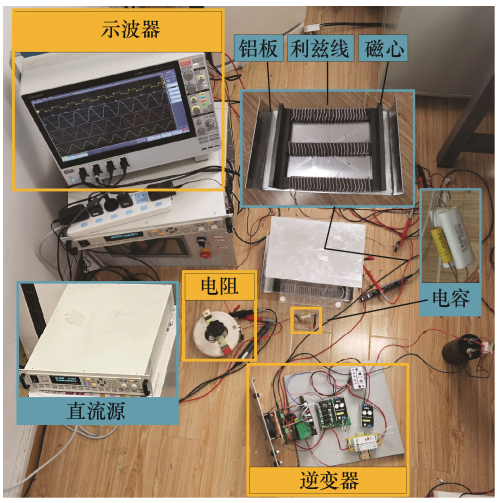


图 16 实验样机

Fig. 16 Experimental prototype

表 2 实验关键参数

Tab. 2 Key experimental parameters

参数	数值
磁心尺寸/mm	250×200×10
频率/kHz	84
气隙/mm	120
负载电阻/Ω	30

利用 LCR 电桥对日字螺线管磁耦合机构静态参数进行测量，可以得到图 17 所示的耦合系数保持率实测值与仿真值的对比曲线。

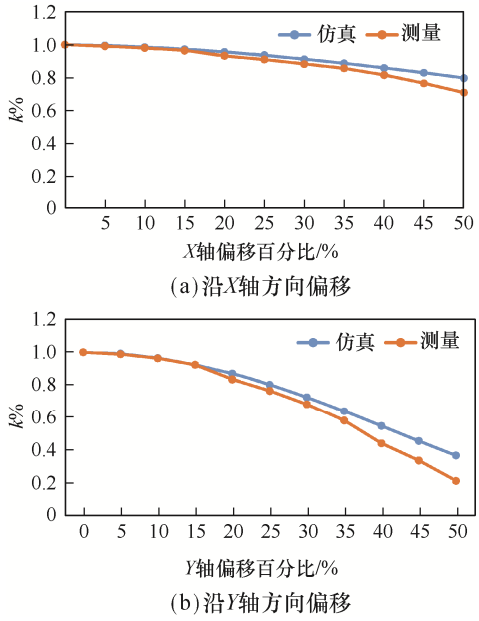


图 17　实测与仿真对比

Fig. 17 Comparison between measurement and simulation results

图 17 中，X 轴偏移百分比表示接收端沿 X 轴正方向偏移距离与磁心宽度的比值，Y 轴偏移百分比表示接收端沿 Y 轴正方向偏移距离与磁心宽度的比值。归一化后的偏移量可以使实测结果和仿真结果在同一条件下进行对比，由图 17 可见，在偏移过程中，耦合系数保持率测量值与仿真值相差无几，在 Y 轴方向偏移较大距离时测量值与仿真值变化趋势一致。

在谐振条件下，测量磁耦合机构发射端交流输入电压、电流和接收端交流输出电压、电流，通过计算可以对磁耦合机构未发生偏移和发生偏移后的传输效率进行对比，以此判断磁耦合机构抗偏移能力的强弱。偏移前后发射端交流输入和接收端交流输出电压电流波形如图 18 所示。图中：U_1 为发射端交流输入电压；I_1 为发射端交流输入电流；U_2 为接收端交流输出电压；I_2 为接收端交流输出电流；RMS 为有效值；P_{out} 为输出功率；η 为磁耦合机构传输效率。

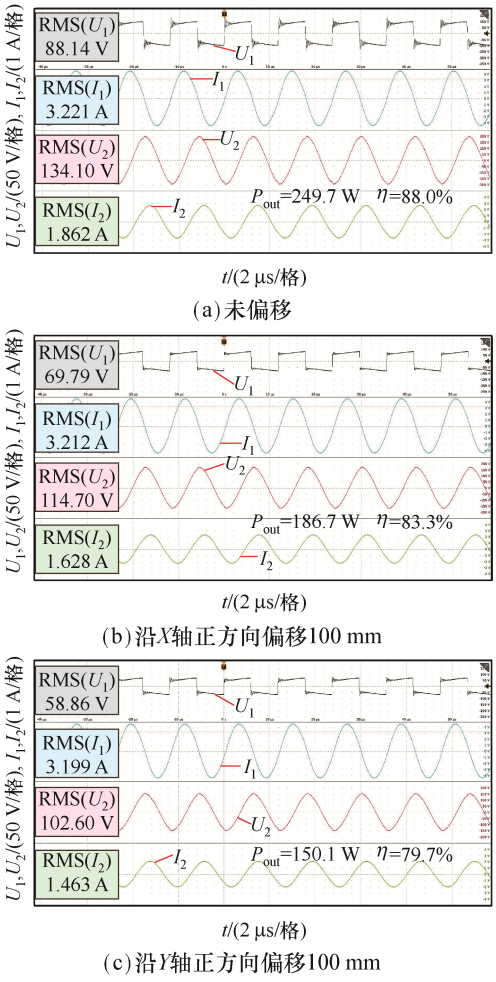


图 18　实验波形

Fig. 18 Experimental waveforms

由图 18 可见，当接收端未发生偏移时，输出功率为 249.7 W，此时耦合机构传输效率为 88.0%；当接收端沿 X 轴正方向偏移 100 mm 时，输出功率为 186.7 W，此时耦合机构传输效率为 83.3%；当接收端沿 Y 轴偏正方向移 100 mm 时，输出功率为 150.1 W，此时耦合机构传输效率为 79.7%。实验结果与仿真结果基本一致，验证了新型磁耦合机构具有较高的耦合系数和良好的抗偏移性能，且在 X 轴方向抗偏移能力优于 Y 轴方向。

6　结语

本文提出了 1 种新型电动船舶无线充电磁耦合机构，并对其进行了优化设计，通过有限元仿真软件分析了利兹线覆盖磁心长度和匝间距对耦合

系数的影响。同时，仿真分析了新型磁耦合机构的抗偏移性能，提出了 1 种相应的磁屏蔽装置，减少了泄漏磁通且提高了耦合系数。新型磁耦合机构与传统螺线管相比，磁心的使用减少了 32%，利兹线的使用减少了 38%，使磁耦合机构更加轻量化的同时降低了成本，对电动船舶无线充电系统量产化意义重大。最后根据仿真模型搭建无线充电样机，实验与仿真结果基本一致，证明了新型磁耦合机构在无线电能传输系统中具有较高的传输效率和抗偏移能力。

参考文献：

[1] 刘宇鑫, 高飞, 刘鑫, 等. 深海无人航行器双向无线充电系统的涡流损耗分析与效率优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(18): 5599-5609.
Liu Yuxin, Gao Fei, Liu Xin, et al. Analysis of eddy current loss and efficiency optimization for bidirectional underwater wireless power transfer of AUVs [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18): 5599-5609. (in Chinese)

[2] 谢诗云, 杨奕, 李恋, 等. 基于双极性耦合磁场调控的高抗偏移偏转无线电能传输系统[J]. 电工技术学报, 2023, 38(18): 4838-4852.
Xie Shiyun, Yang Yi, Li Lian, et al. Wireless power transfer system with high misalignment tolerance based on bipolar coupling magnetic-field control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(18): 4838- 4852. (in Chinese)

[3] 张克涵, 李鑫阳, 代凡, 等. 海洋环境无线电能系统的参数设计及优化方法[J]. 电源学报, 2025, 23(2): 188-195.
Zhang Kehan, Li Xinyang, Dai Fan, et al. Design and optimization method for parameters of wireless power transfer system in marine environment [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(2): 188-195. (in Chinese)

[4] 常雨芳, 尹帅帅, 阎晟, 等. 多方位无线电能传输耦合机构设计与分析[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 230-241.
Chang Yufang, Yin Shuaishuai, Yan Sheng, et al. Design and analysis of multi-directional WPT coupling mechanism [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 230-241. (in Chinese)

[5] Guidi G, Suul J A, Jenset F, et al. Wireless charging for ships: High-power inductive charging for battery electric and plug-in hybrid vessels [J]. IEEE Electrification Magazine, 2017, 5(3): 22-32.

[6] Budhia M, Covic G, Boys J. A new IPT magnetic coupler for electric vehicle charging systems [C]// IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Glendale, AZ, USA, 2010: 2487-2492.

[7] Budhia M, Covic G A, Boys J T, et al. Development and evaluation of single sided flux couplers for contactless electric vehicle charging [C]// 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, AZ, USA, 2011: 614-621.

[8] Gordhan U, Jayalath S. A rectangular double-helix receiver coil for wireless charging of drones [C]// 2022 Wireless Power Week (WPW). Bordeaux, France, 2022: 361-365.

[9] 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 Huihui, Zhou Qingshan, Xiong Shanxiang, 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. (in Chinese)

[10] 麦建伟, 曾宪瑞, 刘治钢, 等. 基于 S/SP 补偿拓扑的强抗偏移感应式无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1525-1536.
Mai Jianwei, Zeng Xianrui, Liu Zhigang, et al. An IPT system based on S/SP compensation topology with high misalignment tolerance [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1525-1536. (in Chinese)

[11] 庄廷伟, 姚友素, 袁悦, 等. 基于 DDQ/DD 耦合机构的强抗偏移电动汽车用无线充电系统[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5675-5685.
Zhuang Tingwei, Yao Yousu, Yuan Yue, et al. A DDQ/DD-coupler-based wireless power transfer system for electric vehicles charging featuring high misalignment tolerance [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5675-5685. (in Chinese)

[12] Chi Fuhai, Wang Pan, Sun Chenglong, et al. Research on

optimization of horizontal omnidirectional misalignment tolerance of WPT based on double D coupler [J]. Electronics, 2022, 11(14): 2163.

[13] 卢哲, 王春芳, 杨凌云, 等. 由复合屏蔽层构成的电动汽车无线充电磁耦合器[J]. 电源学报, 2022, 20(6): 75-83.
Lu Zhe, Wang Chunfang, Yang Lingyun, et al. Magnetic coupler with composite shielding layer for wireless charging of electric vehicle [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(6): 75-83. (in Chinese)

[14] 张艺明, 王辉, 沈志伟, 等. 利用混合拓扑实现强抗偏移性能的紧凑型电动汽车无线充电系统[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2979-2987.
Zhang Yiming, Wang Hui, Shen Zhiwei, et al. Misalignment-tolerant compact electric vehicle wireless charging system by using hybrid topology [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2979-2987. (in Chinese)

[15] Buja G, Bertoluzzo M, Mude K N. Design and experimentation of WPT charger for electric city car [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7436-7447.

[16] 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.

[17] Takanashi H, Sato Y, Kaneko Y, et al. A large air gap 3 kW wireless power transfer system for electric vehicles [C]// 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Raleigh, NC, USA, 2012: 269-274.

[18] 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): 3907-3917.
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): 3907-3917. (in Chinese)

[19] Yamanaka T, Kaneko Y, Abe S, et al. 10 kW contactless power transfer system for rapid charger of electric vehicle [J]. World Electric Vehicle Journal, 2012, 5(3): 643-651.

[20] Covic G A, Boys J T, Budhia M, et al. Electric vehicles-personal transportation for the future [J]. World Electric Vehicle Journal, 2010, 4(4): 693-704.

[21] Yang Guang, Zhu Chunbo, Song Kai, et al. Power stability optimization method of wireless power transfer system against wide misalignment [C]// 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Harbin, China, 2017: 1-6.

[22] Chigira M, Nagatsuka Y, Kaneko Y, et al. Small-size light-weight transformer with new core structure for contactless electric vehicle power transfer system [C]// 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Phoenix, AZ, USA, 2011: 260-266.

[23] Fujita T, Yasuda T, Akagi H. A wireless power transfer system with a double-current rectifier for EVs [C]// 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Milwaukee, WI, USA, 2016:1-7.

[24] Ongayo D, Hanif M. An overview of single-sided and double-sided winding inductive coupling transformers for wireless electric vehicle charging [C]// 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC). Taipei, Taiwan, China, 2015:1-6.

[25] Yao Yousu, Gao Shenghan, Mai Jianwei, et al. A novel misalignment tolerant magnetic coupler for electric vehicle wireless charging [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2022, 3(2): 219-229.



王维

作者简介：

王维(1988—)，男，通信作者，博士，副教授。研究方向：无线电能传输技术，输变电环境取能技术。E-mail：61207@njnu.edu.cn。

王硕(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：无线电能传输技术。E-mail：201846062@njnu.edu.cn。

吕晓飞(1986—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：全控型电力电子器件。E-mail：419475750@qq.com。

窦真兰(1980—)，女，博士，高级工程师。研究方向：兆瓦级风力发电与控制，新能源发电。E-mail：douzhl@sh.sgcc.com.cn。

(责任编辑：耿越)