

# 金属转轴无线感应供电系统传输功率分析与结构优化

戴 明 王佩君 齐红丽 吉小军

推荐单位：《船舶工程》编辑部

推荐意见：该文针对金属转轴传统供电方式的不足，将非接触感应供电技术运用到金属转轴上，通过外置磁芯的方法设计了一种用于金属转轴的感应供电系统，克服了安装条件的限制，这是一种新的尝试。论文通过 ANSYS Multiphysics 建立了该系统的有限元模型，详细分析了 4 种谐振拓扑结构下，系统传输功率和效率随发射线圈与接收线圈电感值以及金属转轴与磁芯间距离发生改变的变化规律。这些规律为新的经验，论文成果对行业设计人员具有重要的参考价值和借鉴意义。文章分析研究思路清晰，文句也较为简明流畅通顺。

摘 要：设计一种用于金属转轴的侧置式感应供电系统，建立磁场耦合单元的有限元分析模型，分析互感耦合参数对系统传输功率和效率的影响，得到不同谐振拓扑结构下以最大传输功率为目标的最佳互感耦合参数，包括最佳的原副边线圈电感值及其比例等关系，以及金属转轴与磁芯间的距离。进一步，分析通过磁屏蔽技术和改进原边线圈绕制方式来提高金属转轴感应供电系统能量传输效率的可行性。最后，通过试验验证该设计和分析方法的准确性和有效性。

关键词：金属转轴；感应供电；传输功率；有限元仿真；磁屏蔽

## 0 引言

金属转轴扭矩、功率和形变等参数的在线检测在船舶等领域具有广泛的工程应用背景<sup>[1-3]</sup>。对旋转机构的供电和信号传输是影响检测可靠性和实用性的关键。目前，对旋转部件测试装置提供能量的方法主要有滑环和电池供电两种方式。滑环供电采用电刷与集电环滑动接触的方式，在使用上存在如滑动磨损、接触火花、碳积和导体不安全裸露等局限性，而电池供电存在电能有限以及对供电环境要求高等一系列缺点和不足，使得这两种供电方式均不能很好满足实际工程需求<sup>[4]</sup>。

近年来，发展起来的非接触感应供电技术为金属转轴等旋转测试设备的供电指出了新的技术方向<sup>[5-7]</sup>。感应供电结合了电力电子技术与电磁感应耦合技术，可以不通过物理连接或接触进行电能传输，克服了传统供电方式存在的缺点与不足，从而保证了电能传输的安全与可靠，目前已在电动汽车和手机充电等领域得到一定的应用<sup>[8]</sup>。

目前，大多数旋转机构的非接触感应供电应用，如旋转导向钻井系统、汽车驱动电机励磁系统、航空发动机转子遥测系统等<sup>[4,9-10]</sup>。一般情况下，发射线圈和接收线圈平行放置以获取强耦合效果，系统的电磁场特性分析也较为简单。但是，转轴测试应用中，存在受安装条件限制难以在转轴外环绕转轴绕制发射线圈的实际情况，同时，金属环境下的涡流损耗也会显著降低耦合效率。如何在金属环境下提高原、副边线圈不共轴条件下的感应供电功率和耦合效率是亟待解决的问题。

本文根据磁路的闭合方向设计了侧置原边线圈的感应供电系统结构，并以磁场耦合单元为核心，通过 ANSYS Multiphysics 建立了金属转轴感应供电系统的三维磁场耦合模型，包括有限元模型和原副边等效电路。通过改变发射线圈电感与接收线圈电感值及其比例关系，以及改变金属转轴与磁芯间距离，研究互感耦合参数对系统传输功率和效率的影响规律。针对金属环境下铁芯损耗对传输效率的影响，通过磁屏蔽结构和改进原边磁芯线圈的绕线方式显著提高感应供电系统的能量传输效率。

1 金属转轴感应供电系统的结构设计

感应供电系统以原边电气回路和副边电气回路通过磁场耦合的方式组成，其基本结构和原理如图 1 所示<sup>[5]</sup>。发射线圈和接收线圈存在空气间隙，相当于松耦合变压器。系统按照电能→磁能→电能的转换过程将能量由原边传送至副边。

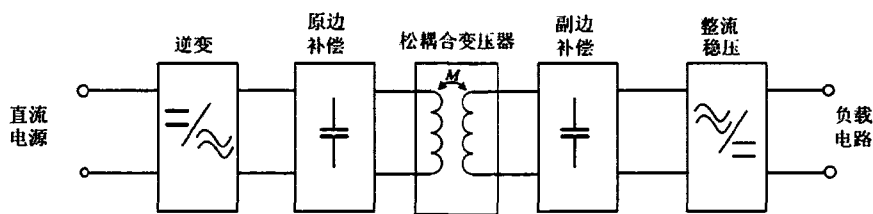


图 1 感应供电系统的原理框图

在金属转轴的测试应用中，传感器和测试电路板通常需要固定在金属转轴上随转轴一起转动，接收线圈绕制在金属转轴上与测试电路一起相连构成副边电气回路。同时，在金属转轴外侧设置对应结构的磁芯，并绕制发射线圈，与高频交流电路相连构成原边电气回路。

1.1 原边线圈磁芯的选择

在金属转轴感应供电系统中，接收线圈绕制在金属转轴外层。依据电磁感应原理，发射（原边）线圈应提供穿过接收线圈的变化磁通，但受安装结构限制，发射线圈和接收线圈不能采用理想的平行同轴结构，只能侧置发射线圈并通过合适的磁芯引导使其磁通沿金属转轴的轴线方向穿过接收线圈。金属转轴的外形为圆柱体，可以看作 I 型结构，因此与之相匹配的磁芯可以选择 U 型结构和 E 型结构。但对于 E 型磁芯而言，E 型中间处感应最强，不利于原、副边线圈的耦合。而对于 U 型磁芯，磁芯窗口处感应的能量基本一致，有利于引导其磁力线穿过绕制在转轴上的副边线圈，因此本文采用 U 型磁芯。

选择的磁芯材料要求如下：1）高磁导率；2）低矫顽力；3）高电阻率；4）足够大的饱和磁感应强度。通过对常见的软磁材料参数进行分析发现，铁氧体是最常运用于感应供电的磁芯软磁材料之一<sup>[10-11]</sup>。本文采用锰锌铁氧体作为磁芯材料。

1.2 金属转轴感应供电系统的工作模式

感应供电系统根据主电路电源输入类型可分为电流型和电压型，不论何种类型，为实现系统的最大能量传输，并同时减少系统的输入伏安容量，通常需要对原副边线圈电感进行补偿<sup>[14]</sup>。根据原边功率补偿环节和副边功率补偿环节结构的不同，可分为 SS、PS、SP、PP 4 种拓扑结构，这 4 种谐振拓扑结构如图 2 所示，其中： $L_p$  和  $L_s$  分别为发射线圈（原边）和接收线圈（副边）的电感； $C_p$  和  $C_s$  分

别为原边和副边调谐电容； $R_p$  和  $R_s$  分别为发射线圈和接收线圈的等效串联电阻； $R$  为系统负载电阻； $M$  为发射线圈与接收线圈间的互感； $I_i$ 、 $I_p$ 、 $I_s$ 、 $I_L$  分别为谐振网络输入电流、发射线圈电流、接收线圈电流和负载电流； $U_{p-v}$ 、 $U_{p-c}$  分别为电压型和电流型感应供电系统经逆变网络输出的电压有效值。

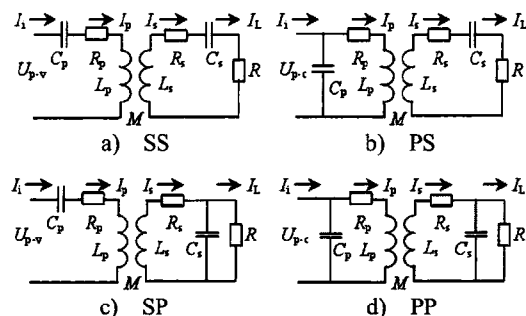


图2 感应供电系统的4种谐振拓扑结构

为了实现功率的最大传输，感应供电系统原、副边需要处于完全谐振模式下，即无论原、副边采用串联谐振还是并联谐振，原边调谐电容  $C_p$  和副边调谐电容  $C_s$  的选取需满足：

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (2)$$

式中： $f$ 为系统的谐振频率。

## 2 最大传输功率目标下的有限元分析

### 2.1 金属转轴感应供电系统的有限元分析方法

通常希望利用感应供电技术设计的系统具有较大的功率传输能力和稳定的输出电压，因此，研究感应供电系统的最大传输功率问题是非常必要的。文献[13-14]利用互感模型，推导出磁场共振式供电系统的最大传输功率表达式，指出互感耦合参数和强耦合系数是决定系统最大传输功率的关键参数；文献[15]通过 Spice 仿真技术，分析传输效率与耦合系数、谐振频率的关系；文献[16]研究了4种功率补偿网络的最大功率传输特性，并通过相控电感实现动态调谐控制，保证系统传输最大功率；文献[10]采用自主研发的电磁耦合谐振式无线电能传输系统说明了负载阻值越小，得到的无线电能传输的功率和效率越大；文献[17]研究了可变结构的感应供电系统，以便在距离和对准关系发生改变时获得高的传输效率。以上文献对感应供电系统最大传输功率和效率的研究侧重于电路模型和电路参数，但未考虑环境和材料因素对系统传输功率和效率的影响，因此分析结果较为理想化。

本文研究的感应供电系统处于特定结构的金属环境下，需要对磁场耦合单元进行精确模拟，以实现系统的最大功率传输目标。基于此，以磁场耦合单元为核心，通过 ANSYS Multiphysics 建立金属转轴感应供电系统的三维场路耦合模型，以系统的最大传输功率为目标，研究4种工作模式下互感耦合参数对系统传输功率和效率的影响。

由于有关电路工作频率影响问题的研究已较为成熟，本文假设电路工作频率固定，以研究系统稳

态下的传输功率。在具体的仿真过程中，通过以下 3 种方式进行研究：

- 1) 改变发射线圈的匝数  $N_1$  可以改变发射线圈的电感值  $L_p$ ;
- 2) 改变接收线圈的匝数  $N_2$  可以改变接收线圈的电感值  $L_s$ ;
- 3) 改变金属转轴与铁氧体磁芯的相对距离  $d$  可以改变系统的耦合系数  $k$ ，再结合式 (3)，从而改变发射线圈与接收线圈间的互感  $M$ 。

$$M = k\sqrt{L_pL_s}$$

(3)

式中： $k$  表示发射线圈与接收线圈的耦合系数；

仿真中，有限元模型使用 SOLID97 单元，原、副边电路模型使用 CIRCU124 单元，使用绞线圈的方式将发射线圈和接收线圈分别与原边电气回路和副边电气回路相连接。以 SP 谐振拓扑结构为例，建立的有限元仿真模型如图 3 所示。

有限元模型按照实际工程应用中的金属转轴感应供电系统等比例建立，其中：铸钢转轴的轴径为 390 mm；磁芯规格为 UU80/65/31；线圈规格为 QZ-2/130L；铜心直径 0.49 mm。仿真的初始条件如表 1 所示。

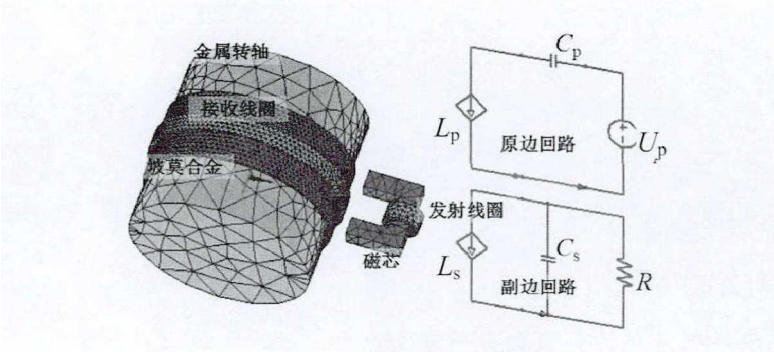


图 3 三维场路耦合模型

表 1 仿真的初始条件

参数	参数值
原边电压源电压 $U_p/V$	50
系统谐振频率 $f/kHz$	125
发射线圈匝数 $N_1$	20
接收线圈匝数 $N_2$	20
发射线圈电感 $L_p/\mu H$	75
接收线圈电感 $L_s/\mu H$	226
原边调谐电容 $C_p/nF$	21.6
副边调谐电容 $C_s/nF$	7.2
磁芯与转轴空气间隙 $d/mm$	5
副边回路负载 $R/\Omega$	50

为研究不同工作模式下互感耦合参数对系统传输功率和效率的影响，需要将互感  $M$  拆分成线圈耦合系数  $k$  和发射线圈电感  $L_p$ 、接收线圈电感  $L_s$  来分析，从而反向推导出最佳的磁芯与转轴空气间隙  $d$ 、发射线圈匝数  $N_1$  和接收线圈匝数  $N_2$ 。

2.2 协同变化  $L_p$  和  $L_s$  的传输功率仿真

仿真条件：连续改变  $N_1$ 、 $N_2$ ，使线圈电感  $L_p$ 、 $L_s$  连续变化，原、副边补偿电容按式（1）和式（2）约束调整，其余参数同表 1 中不变。4 种工作模式下载传输功率  $P_{out}$  随  $L_p$  和  $L_s$  变化的情况如图 4 所示。4 种工作模式下，当传输功率  $P_{out}$  达到最大时，发射线圈和接收线圈的电感值如表 2 所示。

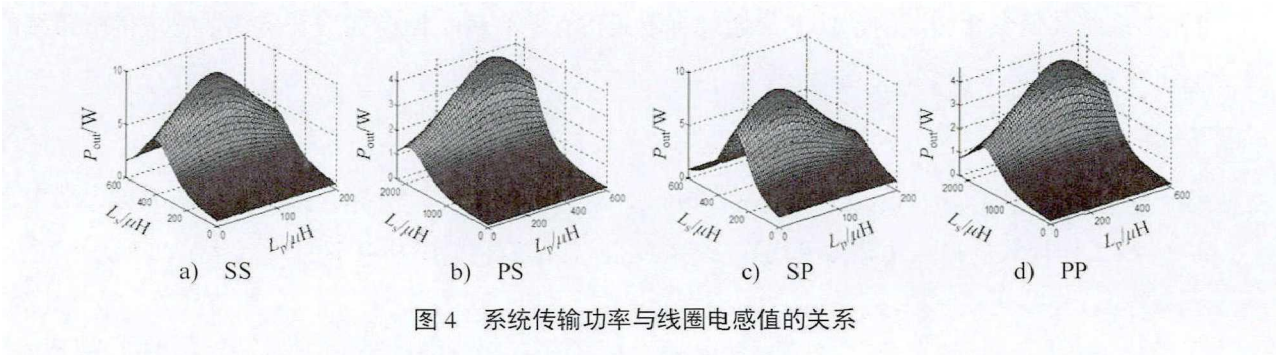


图 4 系统传输功率与线圈电感值的关系

表 2 4 种工作模式下最大传输功率时发射线圈和接收线圈的电感值

工作模式	最大传输功率/W	$L_p/\mu\text{H}$	$L_s/\mu\text{H}$
SS	9.7	93	402
PS	4.2	407	1 882
SP	9.8	66	287
PP	4.4	376	1 621

分析表 2 可知：1) 存在最佳的发射线圈和接收线圈电感值使得系统传输功率最大；2) 4 种工作模式下，SS、SP 工作模式下的最大传输功率值大于 PS 和 PP 工作模式，且 SP 工作模式下可以以更少的线圈匝数获取与 SS 同样的最大输出功率。

2.3 改变耦合系数  $k$  的传输功率仿真

仿真条件：连续改变磁芯与转轴空气间隙  $d$ ，使得线圈耦合系数  $k$  连续变化，从而使发射线圈与接收线圈间互感  $M$  也连续变化，但其余参数同表 1 保持不变。4 种工作模式下系统的传输功率  $P_{out}$  和效率  $\eta$  随互感  $M$  变化的特性曲线如图 5 所示。

系统的能量传输效率  $\eta$  的表达式为

$$\eta = \frac{U_R \cdot I_R}{U_p \cdot I_p} \times 100\%$$

(4)

式中： $U_R$  为负载  $R$  两端的电压； $I_R$  为经过负载  $R$  的电流； $U_p$  为原边电压源电压； $I_p$  为原边电流。

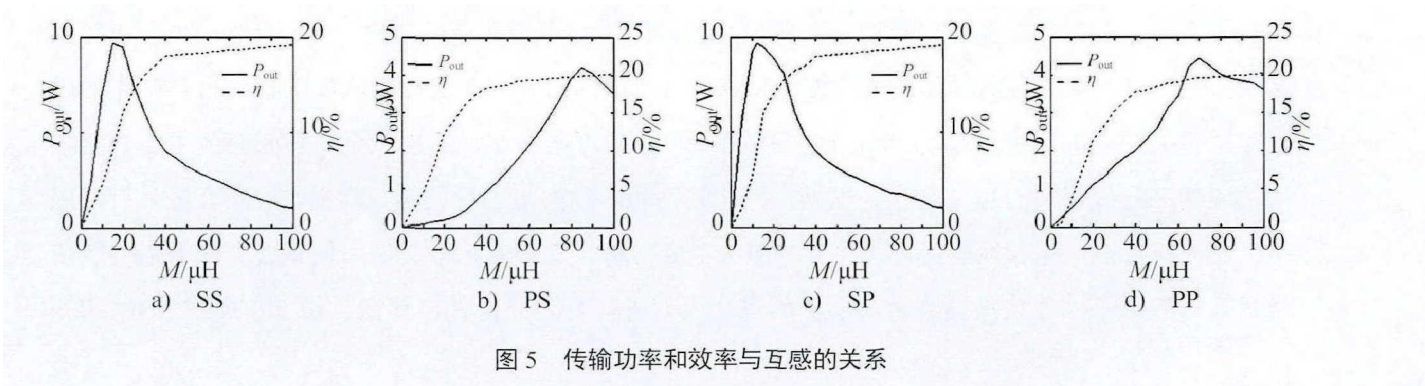


图 5 传输功率和效率与互感的关系

比较分析图 5，可以得出以下结论：

1) 减小金属转轴与磁芯间距离可以增强耦合，提高耦合系数可以提高系统传输效率，但不一定能够提高传输功率。不同工作模式下，存在不同的最佳耦合距离和优化互感参数，使得系统输出最大功率。

2) 在系统其他参数相同的条件下，通过有限元仿真，4 种工作模式下金属转轴感应供电系统的最大输出功率存在以下关系：

$$P_{\max-SS} = P_{\max-SP} > P_{\max-PS} = P_{\max-PP} \quad (5)$$

式中： $P_{\max-SS}$ 、 $P_{\max-SP}$ 、 $P_{\max-PS}$ 、 $P_{\max-PP}$  分别表示在 SS、SP、PS、PP 拓扑结构下的最大输出功率。

3) 4 种工作模式的最大传输效率均在 20% 左右，且在最大输出功率下的效率存在以下关系：

$$\eta_{\max-SS} = \eta_{\max-SP} < \eta_{\max-PS} = \eta_{\max-PP} \quad (6)$$

式中： $\eta_{\max-SS}$ 、 $\eta_{\max-SP}$ 、 $\eta_{\max-PS}$ 、 $\eta_{\max-PP}$  分别表示在 SS、SP、PS、PP 拓扑结构下系统以最大输出功率工作时的传输效率。

4) 为实现最大的功率输出，原边采用串联谐振时的优化互感值较小，最大功率传输条件容易实现；而原边采用并联谐振时优化互感值较大，最大传输功率条件不容易实现，即：

$$M_{\text{opt-SP}} \leq M_{\text{opt-SS}} < M_{\text{opt-PP}} \leq M_{\text{opt-PS}} \quad (7)$$

式中： $M_{\text{opt-SP}}$ 、 $M_{\text{opt-SS}}$ 、 $M_{\text{opt-PP}}$ 、 $M_{\text{opt-PS}}$  分别表示在 SP、SS、PP、PS 拓扑结构下系统以最大输出功率工作时的优化互感值。

### 3 提高金属转轴感应供电系统传输效率的措施

从有限元仿真得到的系统传输功率和效率特性曲线中可以发现，金属转轴感应供电系统不论工作在何种拓扑结构下，普遍存在传输效率不高的现象。观察系统在稳态下的磁力线分布以及获取金属转轴的涡流损耗值可知，金属环境下轴体本身消耗了大量磁能。因此，可以从减少铁芯损耗角度以及采用其他措施来提高系统的传输效率。

#### 3.1 铁芯损耗减少措施

铁芯损耗主要分成涡流损耗和磁滞损耗。金属转轴的材料通常是铸钢。交变的磁场会在金属转轴上感生出自行闭合的涡电流，进而将部分外围电磁场能量损耗掉，同时，金属转轴在反复磁化过程中因磁滞现象也会消耗磁场能量。

文献[18-19]研究了涡流损耗抑制技术，如改变封装材料和尺寸、开槽技术及磁屏蔽技术等。其中，磁屏蔽方案通过在接收线圈内包裹磁屏蔽薄层可将外围磁路束缚在该薄层内，从而有效减少金属转轴的涡流损耗。该方案不会对轴体造成改变或损伤，且使用高磁导率和窄磁滞回线的软磁材料制作的磁屏蔽薄层可大幅提高导磁效果，并降低磁滞损耗。因此，磁屏蔽方案最适用于金属转轴感应供电系统。

常用的高导磁材料有坡莫合金、镍钢、冷轧硅钢和一般的电工软铁等，其中，坡莫合金具有高磁导率、低损耗特性，综合性能优良，并可方便加工成带材<sup>[20]</sup>。因此，本文使用坡莫合金作为磁屏蔽薄层材料，对缠绕不同厚度坡莫合金薄层后的系统模型进行有限元仿真，其在最佳工作模式（SP 拓扑



结构) 下的传输功率和效率特性曲线如图 6 所示。

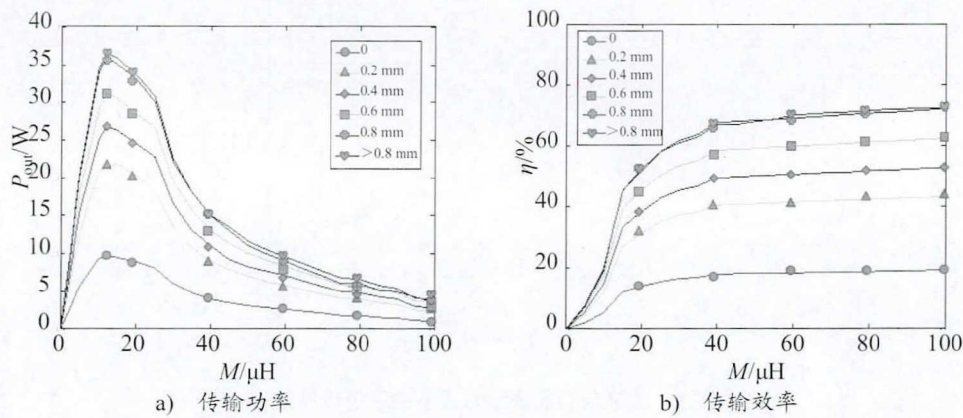


图 6 传输功率和效率与坡莫合金厚度的关系

分析图 6 可知：1) 缠绕坡莫合金薄层能有效提高系统传输效率（饱和时可以提高至原来的 3~4 倍），从而提高系统输出功率；2) 当坡莫合金薄层的厚度增加到一定程度后，由于磁通饱和，系统传输效率不再增加。

### 3.2 绕线方式的改进

在对金属转轴进行磁屏蔽的基础上，对原边磁芯的绕线方式进行改进。发射线圈在磁芯上的不同绕制方式会影响到系统的耦合系数。图 7 为改进前后原边磁芯的绕线方式，由图 7 可知：图 7a) 绕制方式的线圈耦合紧密程度低，导致空气中的漏磁比较多，系统耦合系数会严重下降；图 7b) 绕制方式的线圈耦合紧密程度相对较高，空气中的漏磁比较少，因而系统的耦合系数会有所提高。

保持改进前后绕线方式下的线圈电感相同，系统传输效率随金属转轴与磁芯间距离变化的曲线如图 8 所示，可以明显看出，改进后的绕线方式有效提高了系统的传输效率。

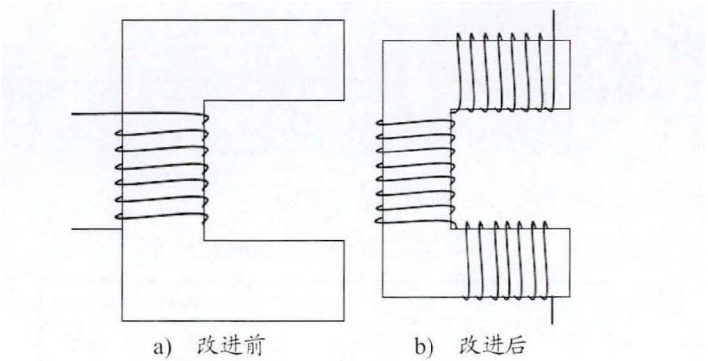


图 7 改进前后的绕线方式

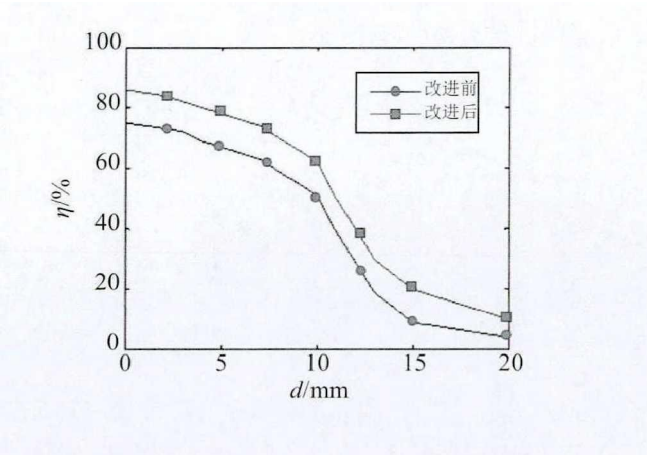


图 8 改进前后的绕线方式下的系统传输效率

4 功率传输试验

为进一步验证仿真结果的准确性，针对实际工程应用中的金属转轴感应供电系统进行相关试验（图 9）。其中：金属转轴、磁芯以及线圈的规格尺寸与有限元仿真时的参数一致，坡莫合金薄层厚度为 1 mm；系统电路采用 SP 谐振拓扑结构；系统为电压型感应供电系统， $U_{p-v}$  经过 IGBT 全桥逆变网络输出，其电压有效值和频率也与有限元仿真时的参数一致。

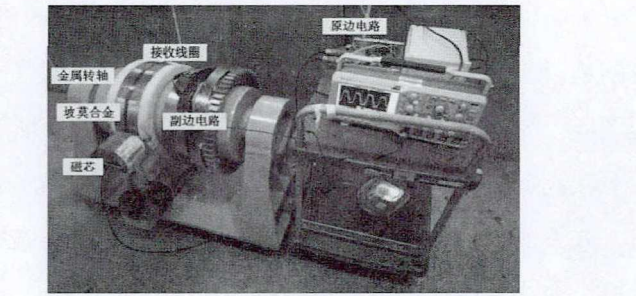


图 9 实际工程应用的金属转轴感应供电系统

4.1 协同变化  $L_p$  和  $L_s$  的传输功率试验

试验初始条件与仿真的初始条件相同。通过改变缠绕在磁芯上的发射线圈匝数  $N_1$  和缠绕在金属转轴上的接收线圈匝数  $N_2$  来改变发射线圈电感  $L_p$  和接收线圈的电感值  $L_s$ 。调节到合适值和比例关系，使得系统输出功率最大，记录下的对应数据如表 3 所示。

表 3 最大输出功率和对应电感值

指标	最大传输功率/W	$L_p/\mu\text{H}$	$L_s/\mu\text{H}$
仿真数据	41.8	66	287
试验数据	39.5	70	294

从表 3 可以看出，试验数据与仿真数据基本一致。考虑到实际发射线圈、接收线圈以及坡莫合金薄层在缠绕的过程中会有一些松动，以及存在连接线电阻问题，这会导致耦合紧密程度比仿真时略低，因此实际输出功率略低于仿真值。

4.2 改变耦合系数  $k$  的传输功率试验

试验初始条件与仿真的初始条件相同。通过移动磁芯改变金属转轴与磁芯间距离  $d$ ，从而改变系统耦合系数  $k$  和线圈间互感  $M$ 。调节到合适的距离值，使得系统输出功率最大，并测试系统能达到的



最大传输效率，记录下的对应数据如表 4 所示。

从表 4 可以看出：试验数据与仿真数据基本一致；通过调节耦合系数  $k$  与通过调节线圈电感  $L_p$ 、 $L_s$  的方式获取到的系统最大输出功率基本相等，即优化互感值  $M$  是影响系统传输功率和效率的最关键因素。实际工程应用中，通过综合调节发射线圈和接收线圈的电感值以及金属转轴与磁芯间距离，可以让系统工作在最佳的功率输出状态。

表 4 最大输出功率和对应互感值

指标	最大传 输功率/W	互感值 $M/\mu\text{H}$	最大传输 效率 $\eta/\%$
仿真数据	40.9	15.0	86
试验数据	38.6	16.5	82

5 结语

针对金属转轴传统供电方式的不足，本文将非接触感应供电技术运用到金属转轴上。克服安装条件的限制，本文通过外置磁芯的方法设计了一种用于金属转轴的感应供电系统，通过 ANSYS Multiphysics 建立了该系统的有限元模型，并详细分析了在 SS、PS、SP、PP 这 4 种谐振拓扑结构下，系统传输功率和效率随发射线圈、接收线圈电感值以及金属转轴与磁芯间距离发生改变的变化规律。主要结论如下：

- 1) 对于 4 种基本拓扑结构的金属转轴感应供电系统，提高互感耦合参数可以提高系统传输效率，但不一定提高系统传输功率。为了实现系统的最大传输功率，其互感耦合参数都存在一个优化的取值。
- 2) 对于 4 种基本拓扑结构，为实现最大的功率输出，原边采用串联谐振时的优化互感值较小，最大功率传输条件更容易实现。其中，SP 谐振拓扑结构是系统最佳的工作方式。
- 3) 通过磁屏蔽措施和改进绕线方式可以大大提高金属转轴感应供电系统的传输效率和传输功率。

参考文献：

[1] 王奉涛, 马孝江. 汽车变速箱性能检测与故障诊断系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2006(S1): 382-384, 400.

[2] 徐礼超. 装载机传动轴扭矩测试系统的开发与应用[J]. 机械设计与制造, 2012(8): 87-89.

[3] 代振华. 钻机性能测试系统测量不确定度的计算与应用[J]. 煤矿机械, 2017, 38(10): 16-17.

[4] 王旭东, 闫美存, 刘金凤, 等. 相对旋转时非接触式励磁系统磁罐变压器研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5915-5923.

[5] ABDOLKHANI A. Fundamentals of Inductively Coupled Wireless Power Transfer Systems[M]. Wireless Power Transfer- Fundamentals and Technologies, 2016.

[6] KACPRZAK D, SYKULSKI J K. Magnetic Design Considerations to Improve Nonlinear Characteristics of Inductively Coupled Power Transfer Systems[R]. Emerald Group Publishing Limited, 2007.

[7] QIANG H, HUANG X L, TAN L L T, et al. Achieving Maximum Power Transfer of Inductively

Coupled Wireless Power Transfer System based on Dynamic Tuning Control [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(7): 1886-1893.

[8] KALWAR K A, AAMIR M, MEKHILEF S. Inductively Coupled Power Transfer (ICPT) for Electric Vehicle Charging-A Review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 47: 462-475.

[9] 陈红新, 蒋世全, 姜伟, 等. 适用于旋转导向钻井工具的非接触式电能传输方法[J]. 中国海上油气, 2009, 21(2): 113-115, 119.

[10] 张宗明, 孙跃, 苏玉刚, 等. 非接触电能传输系统互感耦合的仿真研究[J]. 磁性材料及器件, 2007(5): 42-45.

[11] 张忠仕, 汪伟, 陈文, 等. 开关电源变压器磁芯气隙量的计算[J]. 磁性材料及器件, 2008(1): 53-56, 68.

[11] 孙跃, 夏晨阳, 戴欣, 等. 感应耦合电能传输系统互感耦合参数的分析与优化[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(33): 44-50.

[13] 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.

[14] 卢文成, 丘小辉, 毛行奎. 磁谐振无线电能传输系统的最大效率分析[J]. 电气技术, 2015(4): 14-17, 21.

[15] YANG F, JIN L J. Analysis of Wireless Power Transmission Efficiency based on Electromagnetic Resonance Coupling Mode [C]//2014 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. 2014.

[16] 强浩, 黄学良, 谭林林, 等. 基于动态调谐实现感应耦合无线电能传输系统的最大功率传输[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(7): 830-837.

[17] Li L W. Wireless Power Transmission: State-of-the-arts in Technologies and Potential Applications[C]//Microwave Conference Proceedings, IEEE. 2012.

[18] 李长生, 张合, 查冰婷. 引信无线供能系统电磁耦合结构外围金属介质涡流损耗分析[J]. 南京理工大学学报, 2011, 35(3): 347-351.

[19] 楼宇涛, 栗保明. 电磁轨道炮封装中涡流损耗的抑制方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1935-1941.

[20] 赵东东, 刘斯, 曹大平. 环形坡莫合金磁心的磁化曲线函数构造与应用[J]. 磁性材料及器件, 2012, 43(6): 24-28.

---

#### 作者简介:

戴 明, 男, 1975 年生, 上海船舶设备研究所, 高级工程师。

王佩君, 男, 1987 年生, 上海船舶设备研究所, 工程师。

齐红丽, 女, 1977 年生, 上海船舶设备研究所, 高级工程师。

吉小军, 男, 1969 年生, 上海交通大学电气信息与电气工程学院, 博士, 教授。