文章编号：1674-2974（2026）02-0056-10 DOI：10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026156

旋转机械状态监测无线磁耦合供电能效优化

陈涛[1,2]，孙靖超[1,2]，贾然[1,2†]，王立勇[1,2]，王子祺[1,2]
（1. 北京信息科技大学 机电工程学院，北京 100192；
2. 北京信息科技大学 机电系统测控北京市重点实验室，北京 100192）

摘 要：针对狭小空间及元件动态运转约束条件下，传统外置电源的传感系统无法适用于旋转设备内部元件状态监测的问题，提出了一种采用拱形耦合线圈的无线传感系统磁耦合供电结构.通过建立耦合线圈的电磁和电路模型，推导出无线供电系统的效率表达式，系统地揭示了耦合线圈结构及位置参数对系统供电能效的影响规律.研究结果表明：增大定子线圈弧心角度及线圈高度、减小耦合线圈空气间隙可有效提升耦合线圈的效率.基于系统的仿真计算对线圈结构参数进行实验优选，当线圈弧心角度为120°、线圈高度为80 mm、耦合线圈空气间隙为2 mm时，系统效率可达到0.571.该研究为面向旋转机械设备状态监测的无线传感系统设计及优化提供了理论支撑.

关键词：旋转机械；无线供电；耦合线圈优化
中图分类号：TH89 **文献标志码**：A

Energy efficiency optimization of wireless magnetic coupling power supply for rotating machinery condition monitoring

CHEN Tao[1,2]，SUN Jingchao[1,2]，JIA Ran[1,2†]，WANG Liyong[1,2]，WANG Ziqi[1,2]
（1. College of Mechanical and Electrical Engineering，Beijing Information Science and Technology University，Beijing 100192，China；
2. Beijing Key Laboratory of Electromechanical System Measurement and Control，
Beijing Information Science and Technology University，Beijing 100192，China）

Abstract：Aiming at the problem that the traditional external power supply sensing system cannot be applied to the state monitoring of the internal components of rotating equipment under the constraints of narrow space and dynamic operation of the components，a magnetically coupled power supply structure of a wireless sensing system using an arch-shaped coupling coil is proposed. By establishing the electromagnetic and circuit model of the coupling coil，the expression of the limit efficiency of the wireless power supply system is deduced，and the influence of the structure and position parameters of the coupling coil on the energy efficiency of the power supply system is systematically revealed. The results show that increasing the stator coil arc center angle and coil height and

* **收稿日期**：2024-10-03
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52175074），National Natural Science Foundation of China（52175074）；北京市教委科研计划科技一般项目（KM202311232006），Beijing Municipal Commission of Education Science Research Program General Science and Technology Project（KM202311232006）.
作者简介：陈涛（1981—），女，山东青岛人，北京信息科技大学副研究员，博士
† 通信联系人，E-mail：jiaran89@126.com

reducing the coupling coil air gap can effectively improve the ultimate efficiency of the coupling coil. Based on the simulation calculation of the system and the optimization of the coil structure parameters, the ultimate efficiency of the system can reach 0.571 when the coil arc angle is 120°, the coil height is 80 mm, and the air gap of the coupling coil is 2 mm, which provides theoretical support for the design and optimization of the wireless sensing system for the condition monitoring of rotating machinery and equipment.

Key words: rotating machinery; wireless power supply; coupling coil optimization

随着现代科学的快速发展和对规模化生产的追求,机械设备日益朝着大型化、复杂化、智能化方向发展.以航空发动机、燃气轮机、传动系统为典型代表的旋转设备,在现代能源动力、工业运输、特种装备领域中扮演着重要角色[1].监测旋转设备实时运行状态对评估系统运行安全及保障系统可用性具有重要意义,也是提升装备健康管理水平的重要技术手段[2].旋转设备一般具有结构紧凑、元件转速快、功率密度高等特征.对其进行状态监测时,常规的传感系统难以直接布置于设备内部,导致无法对设备内部元件运行状态进行实时监测[3].研究基于无线传感技术的旋转元件状态监测系统,是实现旋转设备元件级健康管理及整体运行状态评估的重要方法[4].

敏感元件及信号传输系统布置于旋转元件表面,并使其随之转动,通过能量与信号的无线传输,即可实现元件状态信息的采集与传输.无线传感技术中电能无线传输及信号无线传输是两个关键技术问题,其中高效能的无线供电技术是保证传感器正常工作的关键基础[5].考虑机械设备内部元件主要由铁磁性材料制成,其会直接影响电能传输效率,因此开展复杂铁磁环境下无线供电效能优化方法研究,对研制适用于旋转设备状态监测的无线传感系统具有重要的现实意义[6-7].国内外学者面向不同结构类型的无线供电系统开展了深入研究.奥克兰大学 Lin 等人[8]发明 DD 型无线供电耦合线圈结构,该结构采用两个位于同一平面且绕制方向相反的电磁线圈共同组成能量发射端,能明显增大接收线圈的能量接收面积,提高无线供电系统内部的抗偏移能力.程志远等人[9]提出了内外嵌套式无线供电系统结构,研究了能量发射与接收线圈间的轴向偏移距离对线圈间耦合系数、输出功率及供电效率的影响,得出了增加接收端线圈长度可有效提升系统轴向抗偏移能力的结论.朱万能[10]总结了无线供电中线圈的设计方法、线圈参数的计算方法及应用范围,研究了线圈内阻、匝间距等参数对供电系统输出功率以及效率的影响.针对金属环境对无线供电系统集总参数变化的影响规律,疏许健[11]对无线供电系统周围存在金属板的情况进行研究,结果表明金属板对无线供电系统周围磁场有较大影响且会导致系统失谐,进而提出了调整补偿网络的方法使系统输出功率恢复到无障碍的水平.李冬雪[12]建立了金属环境下无线供电系统的电路模型,采用 P-P 补偿电路,推导出能量收发线圈的特征参数公式,并利用有限元软件探究了不同金属材料对系统能效的影响.苏文博等人[13]深入研究了线圈外部环境中金属材质、位置、等效面积对供电系统能效的影响,提出了以等效线圈来代替系统中的金属异物的等效建模方法.该方法大幅简化了金属环境对无线供电系统的影响计算,优化了线圈设计流程.通过分析传输线圈匝数、内径、线径等参数提出了一种对置式双线圈无线供电系统的多参数优化方案,使系统整体效率提高了 7%.朱瑜[14]实现了 250 mm 的空气间隙下电能传输效率超过 90%.但在旋转设备内部元件运行状态信息实时采集的场景中,狭小空间限制、复杂铁磁环境导致的系统结构设计困难、能量传输效率不足仍是限制无线供电系统的关键技术难题.

本文结合旋转机械设备无线传感系统的应用需求,提出了面向轴类旋转元件运行状态实时监测的系统方案,重点构建了铁磁环境下磁耦合供电系统模型.通过建立系统磁学模型及电学模型,分别研究了金属元件自身对供电系统中能量发射与接收集线圈参数的影响,并推导得到了能量最大传输效率和最大接收功率的表达式,仿真分析了线圈结构参数及电气参数对能量传输效率的影响规律.研究为无线传感技术的发展及应用奠定了必要的理论基础.

1 面向旋转元件无线传感的磁耦合供电系统建模

1.1 磁耦合无线供电系统原理

旋转机械设备无线传感系统一般由敏感元件、耦合线圈组成,其中耦合线圈由一对定子线圈和转子线圈构成[15].敏感元件及转子线圈布置于旋转元件表面并随之转动,定子线圈固定安装于设备静止元件上,系统结构如图1所示.系统工作过程中,向定子线圈输入高频交流电源,两线圈间的磁耦合效应使得转子线圈产生一定的电压,并为敏感元件提供所需的电能.敏感元件输出的物理信息经过高频信号调制后,由转子线圈传输至定子线圈,并由检测单元实现信息的有效提取.

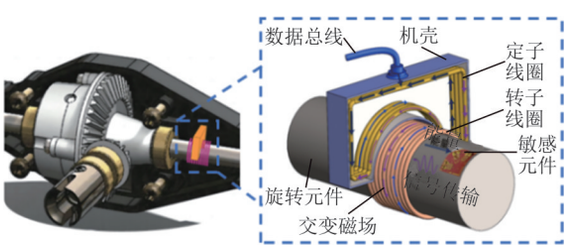


图1 无线传感系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of a wireless sensor system

在采用上述无线传感系统对轴类零件开展状态监测时,一般采用同轴式耦合线圈结构,该结构能够较好地利用旋转设备中轴类部件的外部空间,但系统安装时需拆解轴端的支撑结构,导致安装流程复杂.为方便定子线圈的安装,提出采用拱形定子线圈结构,其半包围的外形使得安装传感器时无须拆卸原有旋转元件,简化了传感系统的安装流程.

在无线传感系统中,完整的无线供电系统架构如图2所示,该系统由三部分构成,分别是耦合线圈、无功补偿网络以及电能调节电路.无线供电系统工作原理为:从信号源发出的高频交流信号通过功率放大器传输到无功补偿电路中,无功补偿电路将含有定子线圈的发射侧呈感性的电路补偿为纯阻性电路,电能再由定子线圈传输到接收侧.基于电磁感应定律,转子线圈会产生交变的感应电压,再经过稳压模块将交流电转换为5 V直流输送给敏感元件实现电能传输.设计无线传感器供电系统时需要综合考虑以上部件的参数从而实现稳定供电.

1.2 磁耦合无线供电系统电磁学模型构建

将系统安装在金属元件上为传感器进行供电

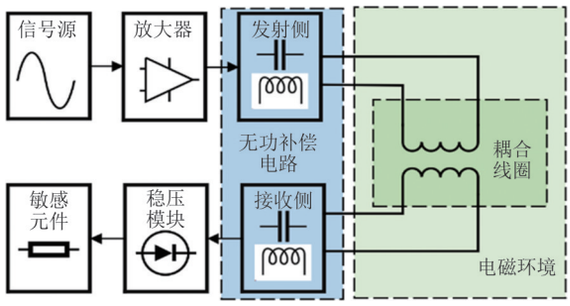


图2 无线电能传输系统架构

Fig.2 Architecture of a wireless power transfer system

时,交变磁场导致金属内部会产生感应电流.该电流又将产生一个与激励磁场变化方向相反的磁场,致使原磁场被削弱,导致系统供电能效下降.因此传感系统所处的金属环境对无线供电系统能效的影响是必须考虑的.为揭示耦合线圈几何参数对耦合线圈性能的具体影响,并优化线圈参数,建立了耦合线圈的电磁学模型,仿真的收发线圈均为铜质密绕线圈,且处于同一平面放置,耦合线圈如图3所示.模型结构及电气参数如表1所示.

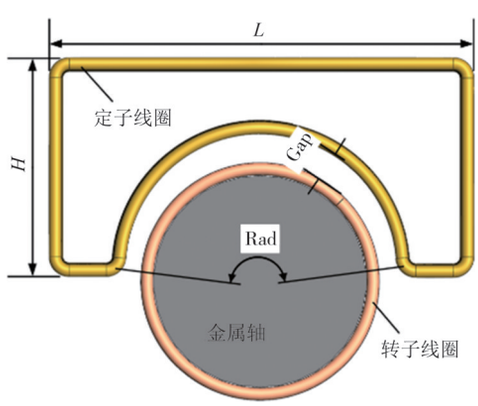


图3 耦合线圈的电磁仿真模型

Fig.3 Electromagnetic simulation model of coupled coils

表1 耦合线圈初始模型参数

Tab.1 Initial model parameters of coupled coils

参数	数值
金属轴半径/mm	35
金属轴相对磁导率	100
金属轴介电常数	3
金属轴电导率/(S·m^{-1})	1.12×10^7
线径r/mm	0.2
线圈匝数	10
定子线圈宽度L/mm	80
定子线圈高度H/mm	40
转子线圈半径/mm	35
空气间隙Gap/mm	5
定子线圈弧心角度/(°)	180

如图 3 所示,该仿真模型由定子线圈、转子线圈、金属轴及外界空气域构成.金属轴位于转子线圈中心,其高电导率(1.12×10^7 S/m)和高相对磁导率(100)特性意味着,在工作频率 85 kHz 下轴内部将产生一定的涡流效应.这些涡流不仅会消耗系统内的电磁能量,还会产生反向磁场,削弱定子线圈产生的原磁场.该效应会降低耦合到转子线圈的有效磁通量及两线圈间的互感系数 M.所建模型通过设置金属域、定义其材料属性以及应用阻抗边界条件,完整地包含了金属轴对电磁场的上述影响.该无线供电系统的磁场分布遵循时变场麦克斯韦方程组,其表示为:

$$\begin{cases} \nabla\times\boldsymbol{H}=\boldsymbol{J}+\dfrac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t} \\ \nabla\times\boldsymbol{E}=-\dfrac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t} \\ \nabla\cdot\boldsymbol{B}=0 \\ \nabla\cdot\boldsymbol{D}=\rho \end{cases} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度;$\boldsymbol{J}$ 为电流密度;$\boldsymbol{J}_s$ 为外加源电流密度;$\boldsymbol{D}$ 为电位移矢量且 $\boldsymbol{D}=\varepsilon\boldsymbol{E}$,$\varepsilon$ 为介电常数;$\boldsymbol{E}$ 为电场强度;$\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度且 $\boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H}$,$\mu$ 为磁导率;ρ 为自由电荷体密度.可将复杂的求解域分解成 Ω_c,Ω_a,Ω_m,分别代表了线圈域、空气域以及金属元件域.

$$\begin{cases} \Omega_c\begin{cases}\nabla\times\boldsymbol{H}_c=\boldsymbol{J}_s+\gamma_c\boldsymbol{E}_c\\ \nabla\times\boldsymbol{E}_c=-\mathrm{j}\omega\boldsymbol{B}_c\\ \nabla\cdot\boldsymbol{B}_c=0\end{cases} \\ \Omega_a\begin{cases}\nabla\times\boldsymbol{H}_a=\gamma_a\boldsymbol{E}_a\\ \nabla\times\boldsymbol{E}_a=-\mathrm{j}\omega\boldsymbol{B}_a\\ \nabla\cdot\boldsymbol{B}_a=0\end{cases} \\ \Omega_m\begin{cases}\nabla\times\boldsymbol{H}_m=\gamma_m\boldsymbol{E}_m\\ \nabla\times\boldsymbol{E}_m=-\mathrm{j}\omega\boldsymbol{B}_m\\ \nabla\cdot\boldsymbol{B}_m=0\end{cases} \end{cases} \tag{2}$$

为了高频条件下简化求解,金属轴的外表面设定为阻抗边界条件,其表达式为:

$$\sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\varepsilon_0\varepsilon_r-\mathrm{j}\sigma/\omega}}\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{H}+\boldsymbol{E}-(\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{E})n=(\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{E}_s)\boldsymbol{n}-\boldsymbol{E}_s \tag{3}$$

式中:σ 为表面电荷密度.上式代表了电磁波不会穿过金属轴,感应电流仅存在于金属轴表面铜质线圈,铜质线圈的线径与趋肤深度相近,因此忽略线圈内部涡流效应对电流分布均匀性的影响.通过求解上述方程,即可获得耦合线圈附近区域的电场强度、磁场强度以及它们的各个分量数值.穿过转子线圈的磁链可表示为 $\Psi_{rt}=N_t\psi$,其中 N_t 为定子线圈的匝数.定子线圈所产生并与转子线圈回路相交的磁链与定子线圈中的电流 I_t 成正比,其比值为:

$$M=\frac{\Psi_{rt}}{I_t} \tag{4}$$

式中:M 为两线圈之间的互感,互感的大小直接反映了耦合线圈之间能量传输能力.

1.3　耦合线圈电路模型

经过上述耦合线圈磁学模型的推导,可以用自感、互感等电学参数完整描述耦合线圈模型.因此,若使用互感模型把耦合线圈以受控电压源的形式表现,其电路拓扑如图 4 所示.C_{tx}、C_{rx} 为定子线圈与转子线圈的补偿电容,两端线圈电感值用 L_{tx}、L_{rx} 表示,其内阻分别为 r_{tx}、r_{rx},线圈两端电压为 v_{tx}、v_{rx},R 表示接收端外接负载.

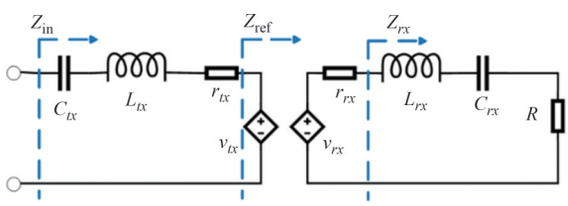


图 4　耦合线圈电路模型

Fig.4　Circuit model of coupled coils

通过电路分析可得到定子线圈与转子线圈在供电系统中工作时的效率表达式为:

$$\begin{aligned}\eta_{tx}&=\frac{\mathrm{real}(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{ref}})}{\mathrm{real}(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{ref}})+r_{tx}}\\ \eta_{rx}&=\frac{\mathrm{real}(\boldsymbol{Z}_{rx})}{\mathrm{real}(\boldsymbol{Z}_{rx})+r_{rx}}\end{aligned} \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{ref}}$,$\boldsymbol{Z}_{rx}$ 分别为定子线圈与转子线圈的阻抗.根据上文中供电系统的工作原理,耦合线圈与无功补偿电路组成纯阻性电路,此时,系统供电效率为:

$$\eta=\eta_{rx}\cdot\eta_{tx}=\frac{\omega_0^2M^2/R}{\omega_0^2M^2/R+r_{tx}}\cdot\frac{R}{R+r_{rx}} \tag{6}$$

式中:ω_0 为谐振频率;M 为线圈间的互感.用品质因数和耦合系数来替换上式中的电阻和互感可得到:

$$\eta=\frac{k^2Q_{tx}Q_{rx}}{k^2\left(Q_{tx}Q_{rx}+Q_{rx}Q_L\right)+\dfrac{Q_{rx}}{Q_L}+\dfrac{Q_L}{Q_{rx}}+2} \tag{7}$$

式中:k 为耦合系数,$k=\dfrac{M}{\sqrt{L_{tx}L_{rx}}}$,表示线圈之间的耦合程度;$Q_{tx}$,$Q_{rx}$,$Q_L$ 分别为定子线圈、转子线圈、负载的品质因数.使用品质因数可简化计算,减少公式中关于耦合线圈的变量,其计算式为

$$\begin{cases} Q_{rx} = \omega_0 L_{rx}/r_{rx} \\ Q_{tx} = \omega_0 L_{tx}/r_{tx} \\ Q_L = \omega_0 L_{rx}/R \end{cases} \tag{8}$$

令 $\frac{\partial \eta}{\partial Q_L} = 0$ 可得到当前系统状态下最优的负载品质因数为:

$$Q_{L\max} = \frac{Q_{tx}}{\sqrt{1 + k^2 Q_{rx} Q_{tx}}} \tag{9}$$

再将 $Q_{L\max}$ 代入可得当前系统状态下最大效率 $\eta_{\max}$ 为:

$$\eta_{\max} = \frac{k^2 Q_{rx} Q_{tx}}{\left(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_{rx} Q_{tx}}\right)^2} \tag{10}$$

耦合线圈最大效率是其理想状态下的效率,观察上式,不难看出 $\eta_{\max}$ 这个参数仅与耦合线圈本身参数有关,与负载参数的变化无关.而耦合线圈的电气参数受到几何参数的直接影响,因此优化耦合线圈的结构,可提高耦合线圈的耦合系数、品质因数,从而提高耦合线圈的最大效率,即提高无线传感器供电系统的能效.

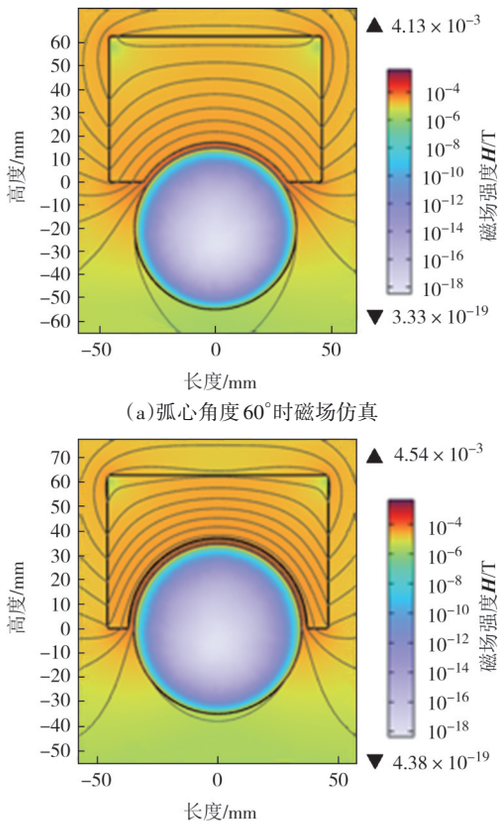
2 拱形线圈几何参数对电能传输性能的影响

研究几何参数对耦合线圈性能的影响是为了在安装尺寸的外部约束下,确定耦合线圈高度、宽度、匝数等参数变化对耦合线圈性能的影响趋势,最终提升传感器供电系统的传输效率.根据上文对耦合线圈模型的分析,提出耦合系数 k 和品质因数 Q 这两个评价耦合线圈性能的关键指标.因此对耦合线圈几何参数改变所致的供电能效变化开展研究.

2.1 定子线圈弧心角度对耦合线圈性能参数的影响

耦合线圈的几何结构直接影响了耦合线圈的性能和空间磁场分布,变化的空间磁场特征也会进一步影响金属轴内的磁场分布.本节在存在中心金属轴的约束条件下,研究定子线圈弧心角度对耦合性能的影响.不同弧心角度情况下定子线圈区域以及金属轴内部的磁场分布如图 5 所示.观察磁场云图可知,定子线圈弧心角度越大,耦合线圈附近的磁通密度越大,磁场强度的最大值从 4.13 mT 增加至 4.54 mT,且磁场分布更集中在转子线圈表面区域.

图 6 为中心金属轴的约束条件下,定子线圈弧心角度对转子线圈磁通量和耦合系数的影响曲线.随着弧心角度的增加,转子线圈的磁通量逐渐增大;当弧心角度小于 150°时磁通量的变化规律近似于线性,随后增长趋势变缓.具体而言,当定子线圈弧心角度为 30°时,耦合线圈的耦合系数为 0.17;当弧心角度增加到 180°时,耦合线圈的耦合系数增加到 0.33.图 7 为中心金属轴的约束条件下,弧心角度对定子线圈品质因数的影响曲线.由图可见定子线圈品质因数的变化趋势呈现出先上升后下降的特征.当弧心角度为 30°时,品质因数为 0.826,当弧心角度增加到 120°时,品质因数增长至 1.024;随着弧心角度进一步增加至 180°,品质因数下降到 0.935.



(a)弧心角度 60°时磁场仿真

(b)弧心角度 150°时磁场仿真

图 5 耦合线圈不同弧心角度磁场分布对比

Fig.5 Comparison of magnetic field distribution for coupled coils at different arc angles

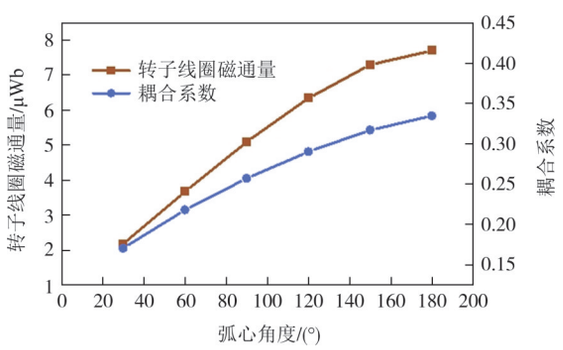


图 6 弧心角度对耦合线圈参数的影响

Fig.6 Impact of arc angle on the parameters of coupled coils

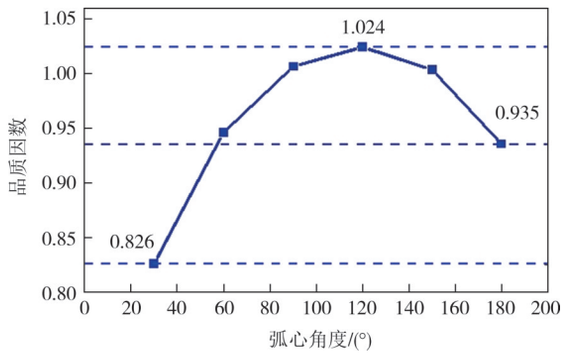


图 7　弧心角度对定子线圈品质因数的影响

Fig.7　Impact of arc angle on the quality factor of stator coils

中心金属轴的约束条件下,弧心角度对无线供电系统能量传输效率的影响如图 8 所示.随着弧心角度的增加,耦合线圈效率呈现出先快速增加后趋于稳定的特征.在弧心角度为 30°时耦合线圈效率为 0.288,弧心角度增长至 180°时效率提高到 0.535.由图可知,设计定子线圈时其弧心角度应当大于 150°,此时耦合线圈效率基本稳定在 0.5 以上.

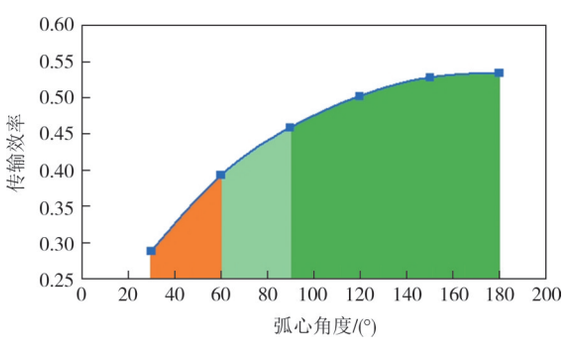


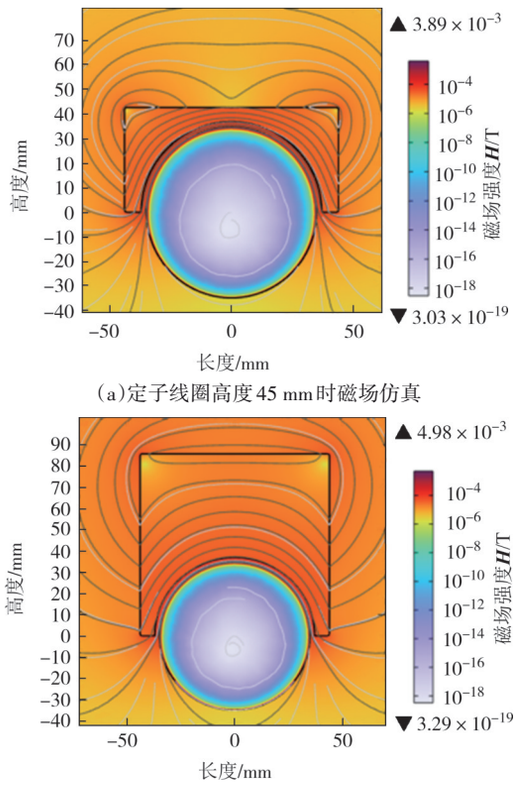
图 8　弧心角度对耦合线圈效率的影响

Fig.8　Impact of arc angle on the tramsmission efficiency of coupled coils

2.2　定子线圈高度对耦合线圈供电能效的影响

由于定子线圈圆弧部分中的电流方向与线圈顶部导线内电流方向相反,二者产生的部分磁场会相互抵消,因此开展定子线圈高度对耦合线圈供电能效的影响研究.图 9 为中心金属轴的约束条件下,定子线圈高度对耦合线圈周围磁场的影响.由图可知,更高的定子线圈高度使得定子线圈顶部直导线部分对附近磁场影响更小,且可为周围空间提供更大的磁通密度,最大值从 3.89 mT 增加至 4.98 mT.

图 10 为中心金属轴的约束条件下,定子线圈高度对转子线圈磁通量和耦合系数的影响曲线.由图可知,随着定子线圈高度的增加,耦合系数呈现先快速上升后缓慢下降的趋势.线圈高度从 45 mm 提高到 72 mm 时耦合系数从 0.31 提高到 0.34,随后线圈



(a)定子线圈高度 45 mm 时磁场仿真

(b)定子线圈高度 85 mm 时磁场仿真

图 9　定子线圈不同高度磁场分布对比

Fig.9　Comparison of magnetic field distribution at different heights of stator coils

高度继续增加至 108 mm 时,耦合系数下降到 0.33.当高度增加时,直线与圆弧之间距离增大,接收线圈中磁通量抵消效果减弱,从而导致耦合系数的上升.但定子线圈高度大于 72 mm 后定子线圈的自感增加占主导,导致互感系数下降.图 11 为中心金属轴的约束条件下,定子线圈高度对定子线圈品质因数影响曲线.随着线圈高度的增加,线圈品质因数增加,并呈现出增长速度随高度增加而减缓的趋势.线圈高度从 45 mm 上升到 108 mm 时,品质因数从 0.799 逐渐上升到 1.102,上升 37.9%.

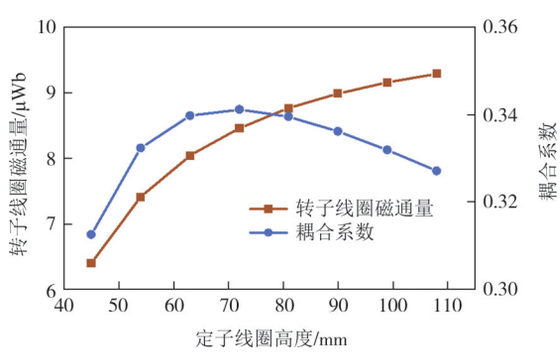


图 10　定子线圈高度对耦合线圈参数的影响

Fig.10　Impact of stator coil height on coupled coil parameters

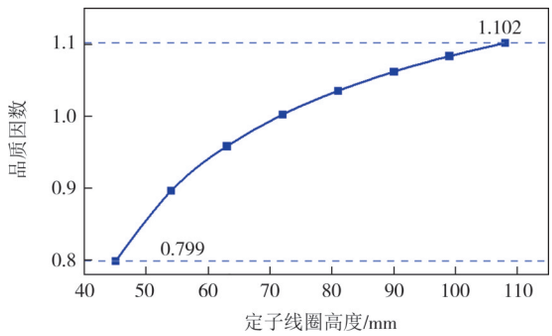


图 11 定子线圈高度对线圈品质因数的影响

Fig.11 Impact of stator coil height on coil quality factor

定子线圈高度对无线供电系统能量传输效率的影响如图 12 所示.仿真结果表明,效率的变化呈现先快速上升随后趋于稳定的趋势.定子线圈高度从 45 mm 上升到 80 mm 时,耦合线圈传输效率从 0.486 上升到 0.553,上升 13.8%.随着线圈高度继续增加至 108 mm,传输效率缓慢下降到 0.543.因此,增加定子线圈高度可有效提升耦合线圈能量传输效率.

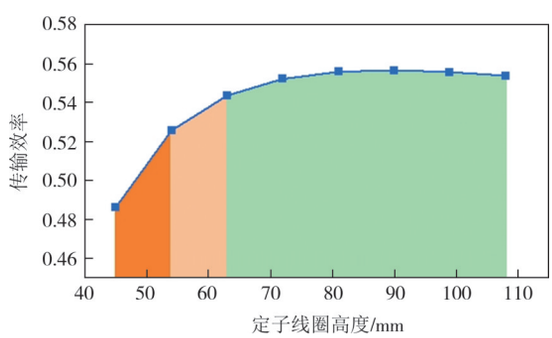


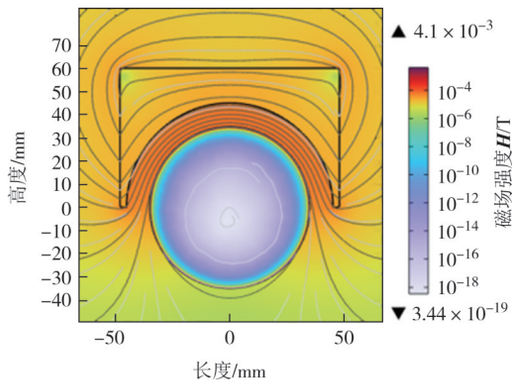
图 12 定子线圈高度对耦合线圈传输效率的影响

Fig.12 Impact of height on the tramsmission efficiency of coupled coils

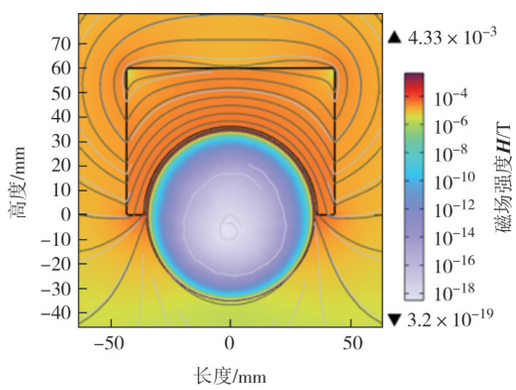
2.3 空气间隙对耦合线圈性能参数的影响

图 13 为空气间隙对耦合线圈周围磁场的影响云图.由图可知,更小的耦合线圈空气间隙可为周围空间提供更大的磁通密度,且最大值从 4.1 mT 增加至 4.33 mT.

图 14 为中心金属轴的约束条件下,耦合线圈空气间隙对转子线圈磁通量和耦合系数的影响曲线.由图可知,随着空气间隙的增加,耦合系数呈现单调下降的趋势.空气间隙从 1 mm 增加到 10 mm 的过程中,耦合系数从 0.428 下降到 0.165.图 15 为中心金属轴的约束条件下,耦合线圈空气间隙对定子线圈品质因数的影响曲线.在空气间隙增大的过程中,品质因数也呈现出单调下降的趋势.空气间隙从 1 mm 增加到 10 mm 的过程中,品质因数从 0.925 下降到 0.795,降低了 14.0%.



(a)空气间隙 10 mm 时磁场仿真



(b)空气间隙 1 mm 时磁场仿真

图 13 不同空气间隙磁场分布对比

Fig.13 Comparison of magnetic field distribution with different air gap

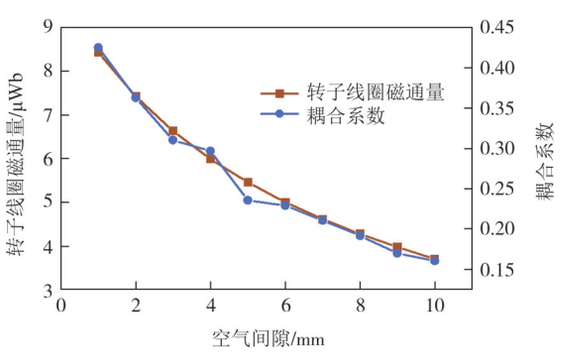


图 14 空气间隙对耦合线圈参数的影响

Fig.14 Impact of air gap on coupled coil parameters

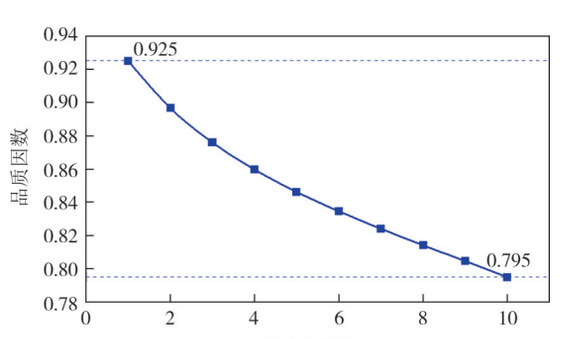


图 15 空气间隙对定子线圈品质因数的影响

Fig.15 Impact of air gap on the quality factor of stator coils

空气间隙对无线供电系统能量传输效率的影响如图16所示.空气间隙从1 mm增加到10 mm的过程中,耦合线圈能量传输效率从0.569下降到0.272.因此,设计耦合线圈时,需尽量减小空气间隙以获得更高的传输效率.

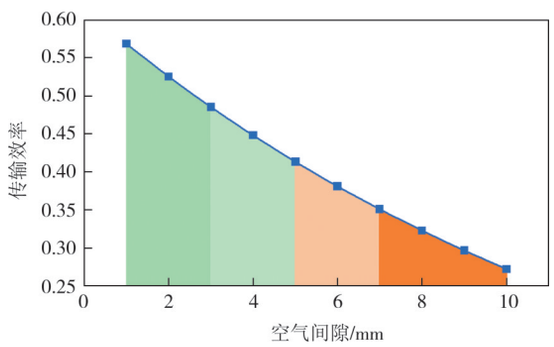


图16　空气间隙对耦合线圈传输效率的影响

Fig.16　Impact of air gap on the tramsmission efficiency of coupled coils

2.4　耦合线圈几何参数优选

基于上述研究,绘制耦合线圈不同结构参数对能量传输效率的影响曲面图,如图17所示.整体而言,增大弧心角度和定子线圈高度均可提高耦合线圈的效率,其中增大定子线圈弧心角度对耦合线圈的效率提升更为明显,且系统效率最高可达到0.61.但在旋转机械无线传感系统耦合线圈结构设计过程中,需要同步考虑线圈能量传输效率以及被测系统内部的空间结构约束条件.

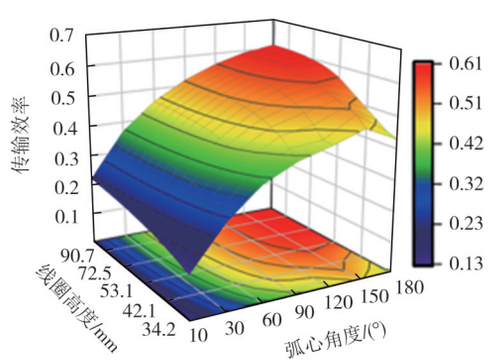


图17　几何参数对耦合线圈传输效率的影响

Fig.17　Impact of geometric parameters on the tramsmission efficiency of coupled coils

3　实验验证

为了验证理论分析与实验结果的正确性,设计开发了一套基于SS补偿结构的传感器无线供电系统样机,如图18所示.实验系统以定轴齿轮箱为依托,其中无线供电系统转子线圈(接收电能)紧密缠绕于齿轮轴上,拱形定子线圈(发射电能)通过支架固定于接收线圈一侧.系统工作时信号发生器产生85 kHz、500 mV正弦信号源,并经过功率放大板后加载至发射线圈.系统中两线圈均由直径0.5 mm漆包线绕制而成,且匝数均为10匝,转子线圈连接10 Ω负载.

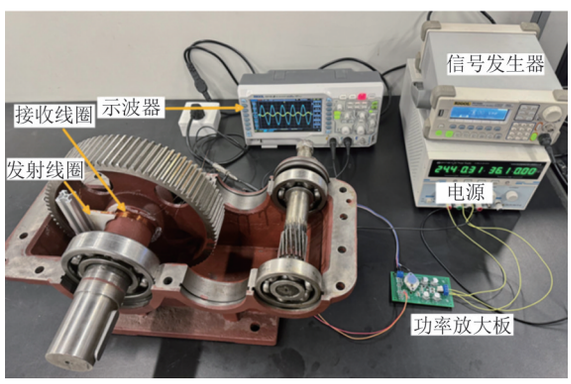


图18　实验装置

Fig.18　Experimental setup

为了验证不同机构参数磁耦合供电系统的效能,分别绕制了不同参数的拱形发射线圈,线圈绕制参数及外形分别如表2及图19所示.采用LCR阻抗分析仪(E4980AL)对线圈电气参数进行测量.首先分别测量两耦合线圈自感L_{tx}、L_{rx}以及两线圈串联后的电感L_s,进而通过公式$M = |L - L_{tx} - L_{rx}|/2$求得耦合线圈间互感$M$,通过公式$k = M/\sqrt{L_{tx}L_{rx}}$求得线圈耦合系数,所得结果如图20所示.

表2　拱形发射线圈参数

Tab.2　Parameters of arched emission coils

序号	弧心角度Rad/(°)	线圈高度H/mm
1	90	30
2	90	50
3	90	70
4	120	50
5	120	80
6	120	100
7	150	60
8	150	90
9	150	120

由图可知,线圈互感及互感系数的变化趋势与仿真结果符合.随着定子线圈弧心角度的增大,耦合线圈互感与耦合系数显著增加,但增长趋势逐渐放缓;随着定子线圈高度增加,耦合线圈间的互感系数

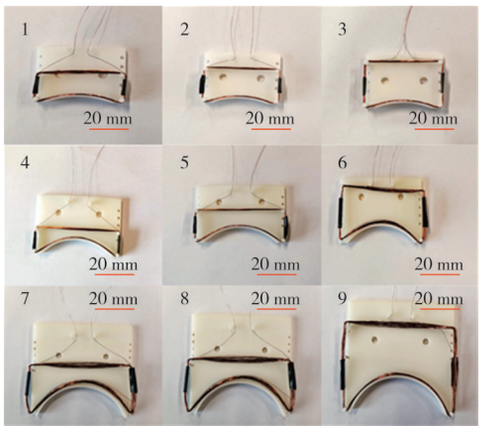
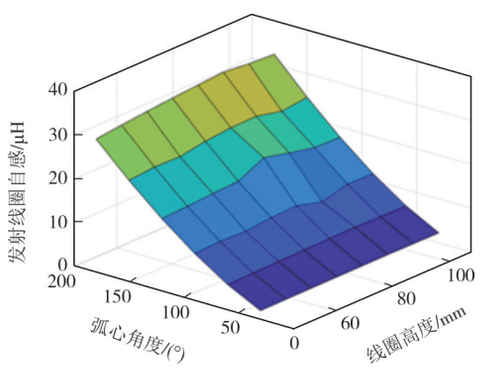
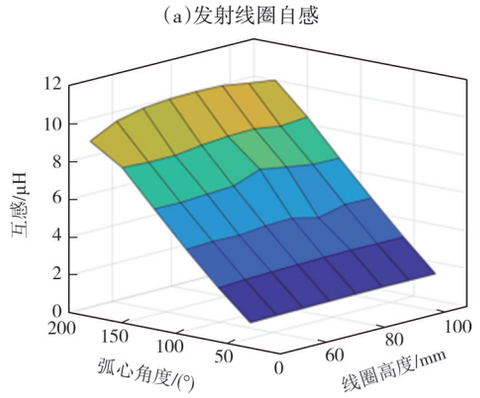


图 19 不同参数拱形发射线圈实物图

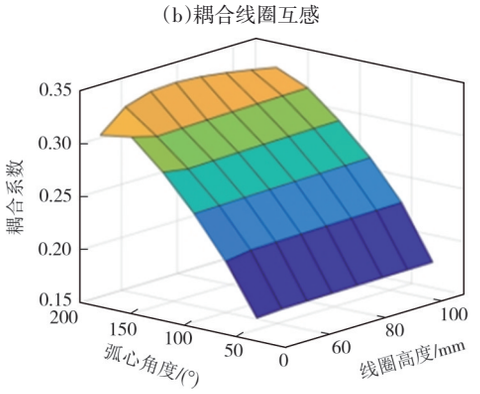
Fig.19 Photograph of arc-shaped launch coils with different parameters



(a)发射线圈自感



(b)耦合线圈互感



(c)线圈耦合系数

图 20 耦合线圈参数测量

Fig.20 Measurement of coupling coil parameters

先逐渐增加后小幅度下降.综合考虑耦合线圈参数测试结果以及实验系统结构,选择线圈高度 80 mm,弧心角度 120°,空气间隙 2 mm 的耦合线圈进行电能传输性能试验测试,所得结果如图 21 所示.图中红色曲线为定子线圈电压,该电压峰峰值为 6.24 V,频率为 85 kHz,此时,转子线圈可感应并输出频率相同、相位相反的正弦电压,负载电压峰峰值为 4 V(如图中蓝色曲线所示),负载功率约为 0.2 W.

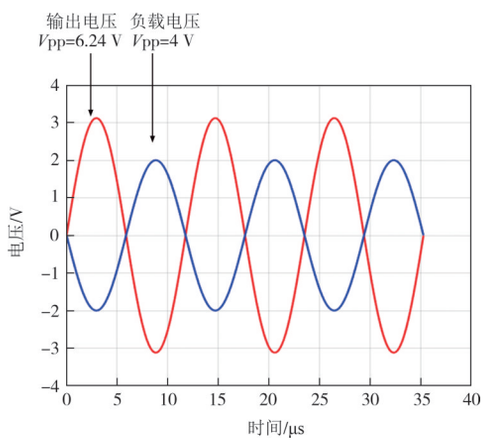


图 21 定子线圈输出、负载电压波形

Fig.21 Stator coil output voltage and load voltage waveforms

通过调节固定在减速器底部基座的导轨,可对磁耦合供电系统不同大小空气间隙下的供电能效进行测量.图 22 为空气间隙对系统效率影响的仿真与实验对比.由图可见,仿真结果与实验结果呈现出较好的趋势一致性,均表现为随着耦合线圈空气间隙的增加,系统的供电能效逐渐下降,当空气间隙由 2 mm 增加至 10 mm 时,系统供电能效下降约 0.4.实验值相较于仿真值存在一定的误差,可能的原因在于实验过程中仍存在额外的非理想因素,如环境干扰、测量误差、线圈绕制不精确等.

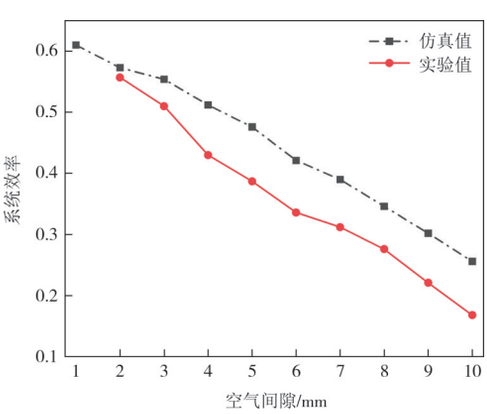


图 22 空气间隙对系统效率影响仿真实验对比

Fig.22 Comparative simulation study on the impact of air gap on efficiency

4 结 论

针对狭小空间及元件动态运转约束条件下,传统外置电源的传感系统无法适用于旋转设备内部元件状态监测的问题,提出了一种采用拱形耦合线圈的无线传感系统磁耦合供电结构,并对其无线供电能效开展系统研究,所得结论如下:

1)在无线供电系统中,耦合线圈的最大传输效率和耦合系数与定子线圈和转子线圈的品质因数有关.

2)增大定子线圈的弧心角度可有效提升耦合线圈最大效率,在弧心角度为30°时耦合线圈效率为0.288,弧心角度增长至180°时效率提高到0.535.设计时,应满足弧心角度大于150°,此时能量传输效率可稳定在0.5以上.

3)定子线圈高度从45 mm升至80 mm,耦合线圈传输效率从0.486上升至0.553;进一步升至108 mm时,效率下降至0.543.设计中需将定子线圈高度控制在63 mm以上.此时效率可稳定在0.550以上.

4)随着空气间隙的增加,耦合线圈效率呈现下降趋势.在空气间隙从1 mm增加到10 mm的过程中,效率从0.569降低至0.272.设计时,应尽量减小空气间隙,以最大化耦合线圈的能量传输效率.

参考文献

[1] 乐珂, 李霁蒲, 陈祝云, 等.基于无源自监督域适应的旋转机械跨域新故障诊断方法[J].机械工程学报,2025,61(3):67-76.
LE K, LI J P, CHEN Z Y, et al. Cross-domain emerging fault diagnosis of rotating machinery using source-free self-supervised domain adaptation network [J]. Journal of Mechanical Engineering,2025,61(3): 67-76.(in Chinese)

[2] REDA K, YAN Y. Vibration measurement of an unbalanced metallic shaft using electrostatic sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019,68(5):1467-1476.

[3] 潘海洋.基于辛几何模态分解和支持矩阵机的机械故障诊断方法[D].长沙:湖南大学,2019.
PAN H Y. Mechanical fault diagnosis method based on symplectic geometry mode decomposition and support matrix machine [D]. Changsha: Hunan University, 2019.(in Chinese)

[4] WANG C, YANG M, ZHENG W L, et al. Vibration suppression with shaft torque limitation using explicit MPC-PI switching control in elastic drive systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 6855-6867.

[5] 马纪梅, 杨行.分拣机器人无线传能系统耦合机构的仿真[J].电测与仪表, 2021, 58(3):87-91.
MA J M, YANG H. Simulation of coupling mechanism for the wireless power transmission system of sorting robot[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2021,58(3):87-91.(in Chinese)

[6] 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): 1547-1568.
XUE M, YANG Q X, ZHANG P C, et al. Application status and key issues of wireless power transmission technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1547-1568.(in Chinese)

[7] 梁仓, 王党辉, 梁晨旭, 等.基于LCC-LCC/S可重构拓扑的无线充电系统在传感器网络中的应用[J].高电压技术, 2025, 51(3): 1191-1205.
LIANG C, WANG D H, LIANG C X, et al. Application of a wireless charging system based on LCC-LCC/S reconfigurable topology in sensor networks[J]. High Voltage Engineering,2025, 51(3):1191-1205.(in Chinese)

[8] LIN F Y, COVIC G A, BOYS J T. Evaluation of magnetic pad sizes and topologies for electric vehicle charging [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6391-6407.

[9] 程志远, 陈坤, 李东东, 等. 旋转式无线充电系统偏移特性研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4648-4657.
CHENG Z Y, CHEN K, LI D D, et al. Research on offset characteristics of rotary wireless charging system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(22): 4648-4657.(in Chinese)

[10] 朱万能.无线电能传输系统谐振线圈偏移特性与电磁屏蔽特性研究[D].长沙:湖南大学,2020.
ZHU W N. Research on offset characteristics and electromagnetic shielding characteristics of resonant coils in wireless power transfer systems [D]. Changsha: Hunan University, 2020.(in Chinese)

[11] 疏许健.分数阶磁耦合无线电能传输系统频率特性及控制[D].广州:华南理工大学,2021.
SHU X J. Frequency characteristics and control of fractional-order magnetic coupling wireless power transfer systems [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.(in Chinese)

[12] 李冬雪.无线充电系统磁耦合器的电磁场模拟与优化设计[D].青岛:青岛大学,2022.
LI D X. Electromagnetic field simulation and optimization design of magnetic coupler in wireless charging system [D]. Qingdao: Qingdao University, 2022.(in Chinese)

[13] 苏文博, 王维, 吕晓飞, 等. 含金属异物的无线充电系统场域等效建模分析[J]. 电力工程技术,2023,42(3):226-232.
SU W B, WANG W, LÜ X F, et al. Field equivalent modeling analysis of wireless charging system with metal foreign objects[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 226-232.(in Chinese)

[14] 朱瑜. 磁耦合式无线电能传输线圈结构优化设计[D]. 大连:大连海事大学,2023.
ZHU Y. Optimal design of coil structure for magnetically coupled wireless power transfer[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.(in Chinese)

[15] 李阳,石少博,刘雪莉,等. 磁场耦合式无线电能传输耦合机构综述[J]. 电工技术学报,2021,36(增刊2):389-403.
LI Y, SHI S B, LIU X L, et al. Overview of magnetic coupling mechanism for wireless power transfer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2021,36(Sup.2):389-403.(in Chinese)