

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205869

水膜压力监测节点旋转非接触供电耦合机理研究*

王楠^{1,2,3} 赵一帆^{1,2,3} 张楠^{1,2,3} 陈毅华^{1,2,3} 张昌明^{1,2,3} 王鹏^{1,2,3}

(1. 陕西理工大学机械工程学院 汉中 723001; 2. 陕西省工业自动化重点实验室 汉中 723001;

3. 起落架及飞机结构件加工检测陕西省高校工程研究中心 汉中 723001)

摘要:水润滑轴承水膜压力无线监测方法中,由于节点随主轴旋转,其供电成为一大难题。而常见的电池、滑环和自供电等供电方法均无法保证无线监测节点的持续和稳定性,因此,提出一种非接触供电方法并深入研究耦合机构电磁耦合机理。首先,通过耦合机构磁通路径建立等效磁路模型,获得了物理模型与电感参数的映射关系。然后,结合有限元仿真分析了耦合机构中磁芯数量、气隙、径向偏移和旋转等因素对耦合性能的影响,并对两侧电路进行无功补偿,通过联合仿真对比了补偿前后的输出功率。最后,将耦合机构安装在水润滑轴承试验台上进行了动态测试试验。研究结果表明,仿真与试验一致性较好,该耦合机构在5 mm气隙下能够兼顾耦合和抗偏移性能,且不受旋转工况影响,经过补偿后的耦合机构平均输出功率为12.496 W,传输效率为71.96%,满足无线监测节点需要。

关键词:水润滑轴承;水膜压力;无线监测节点;旋转非接触供电;耦合机理

中图分类号: TH39; TN92 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on coupling mechanism of rotating contactless power supply coupler for water film pressure wireless monitoring node

Wang Nan^{1,2,3} Zhao Yifan^{1,2,3} Zhang Nan^{1,2,3} Chen Yihua^{1,2,3} Zhang Changming^{1,2,3} Wang Peng^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723001, China; 3. Engineering Research Center of Manufacturing and Testing for Landing Gear and Aircraft Structural Parts, Universities of Shaanxi Province, Hanzhong 723001, China)

Abstract: Due to wireless monitoring node rotates with shaft to monitor the film pressure of water-lubricated bearing, the power supply for wireless node is difficult. The continuity with stability of wireless monitoring node cannot be realized by common power supply methods, such as battery-powered, slipping-powered, self-powered, etc. For this reason, a contactless power supply method is proposed, and the coupling mechanism of coupler is studied. First, in order to obtain the relationship between coupler and electrical parameters, the equivalent magnetic circuit model of coupler was established by magnetic flux path. Second, the influence of core numbers, gap length, radial offset, and rotation to coupling performance were analyzed by FEA, the capacitor is used to compensate the coupler circuit, and the output power before and after compensation was compared by co-simulation. Finally, the coupler was installed on water-lubricated bearing test-rig, and the dynamic test was conducted. The research results show that the simulation and test have favorable consistency, the coupler has well coupled and offset resistance performances when the gap length is 5 mm, meanwhile, it is not affected by rotation condition. After compensation, the average output power of coupler is 12.496 W with a transmission efficiency of 71.96%, which can meet the needs of wireless monitoring node.

Keywords: water-lubricated bearing; water film pressure; wireless monitoring node; contactless power supply; coupling mechanism

收稿日期: 2022-09-30 Received Date: 2022-09-30

* 基金项目: 国家自然科学基金(51605269)、陕西省重点研发计划(2023-YBGY-127)、陕西高校青年创新团队-航空材料加工及航空部件性能检测试验创新团队项目资助

0 引言

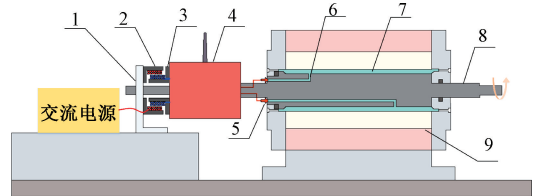
水润滑轴承以水作为润滑介质,具有清洁无污染、工作平稳和低成本等优点,广泛应用于船舶、舰艇和水轮机水力机械设备中。水膜压力作为水润滑轴承的重要参数之一,对其深入研究可以获得轴承润滑特性及机理。传统的水膜压力监测主要采用有线测试方法,存在连续水膜压力信号难以获取、布线复杂等不足,具有较大局限性,因此,随着无线传感测试技术的发展及逐步成熟,水膜压力无线监测成为研究热点^[1-3]。然而,无线监测方法中由于节点随轴旋转,如何有效对其供电成为一大难题。针对上述问题,通常解决方法包括电池供电、滑环导电、自供电等。电池供电会因电池电量耗尽而中断监测过程,且更换过程费时费力^[4];利用滑环实现电能传输的方法会因长时间工作造成摩擦磨损,影响电能传输性能和工作稳定性,严重时可能会产生火花放电引发安全事故^[5-6];而自供电的方法受转速影响较大^[7]。上述方法均无法满足水膜压力无线监测节点旋转工况下的供电需求。

非接触供电是通过电磁耦合实现能量的非接触传输,电磁耦合机构作为其核心可分为原边和副边两部分,且二者之间无导线连接,相对旋转时可实现电能的静-动传输,具有安全、便捷和不间断供电的优点,因此广泛应用于导向钻井^[8-9]、航空航天^[10-11]、旋转超声加工^[12-13]及电机励磁系统^[14-16]等特殊应用场合,但在轴承监测特别是水润滑轴承无线监测领域研究较少,其电磁耦合机理尚待深入研究。王方哲等^[17]在滚珠轴承内圈温度无线监测中应用了非接触供电技术,通过两线圈结构解决了系统的供电问题,并分析了磁场和涡流影响,但未进一步研究旋转工况下的电磁耦合机理;Hoang等^[18]针对船舶推进轴上的无线传感设备搭建了非接触供电系统,提出了一种多个发射和接收线圈的布置方案,并根据接收端传输电压优化了线圈的数量,但该方案易受转速影响;为解决旋转非接触供电耦合机构缺乏通用性的问题,高浚凯等^[19]提出了一种适用于不同轴径的平面阵列线圈结构,分析了系统的抗偏移性和稳定性,但磁通仅从靠近发送线圈一侧通过,使得漏磁较大,导致电能传输功率和效率较低。

综上所述,对于水润滑轴承水膜压力无线监测而言,为了解决节点供电问题,采用非接触供电方案是有益尝试。本文提出了一种水润滑轴承水膜压力无线监测节点的非接触供电方法,并对耦合机构在旋转工况下的电磁耦合机理进行了深入研究。

1 方法描述

如图1所示,水润滑轴承水膜压力无线监测方法描述如下:通过在转轴中设置轴向和周向导流孔传递水膜压力,压力由安装在左侧轴肩处的压力传感器获取,然后该信号传递至无线监测节点进行采样与初步处理后发送至试验装置外部无线接收节点。无线监测过程中,节点随轴旋转,其供电是实现无线监测的前提,考虑到电能供应过程的持续性和安全性,采用如图1所示的非接触供电方法,电磁耦合机构副边与无线监测设备端盖同轴安装,原边则通过支架固定在试验台上,工作时原、副边相对旋转,原边注入的电能转换为磁能,通过电磁耦合向副边耦合能量,实现电能由静止侧向旋转侧传输,整个过程无接触,安全、供电便捷并可持续。



1. 支架 2. 耦合机构原边 3. 耦合机构副边 4. 无线监测节点
5. 压力传感器 6. 导流孔 7. 水膜 8. 转轴 9. 水润滑轴承

图1 水膜压力无线监测与节点非接触供电方法

Fig. 1 Wireless monitoring on water film and contactless power supply methods

非接触供电原理如图2所示,主要包含直流输入、高频逆变、电磁耦合、整流滤波和负载4部分。系统输入的直流电经全桥逆变转换为高频交流电后注入原边线圈,进而产生高频交变磁场;副边线圈经交变磁场电磁耦合产生同频交流电,而后通过整流滤波处理后向负载供电。在此过程中还需在耦合机构两侧串联(或并联)补偿电容 C_p 和 C_s ,以提高系统输出功率。

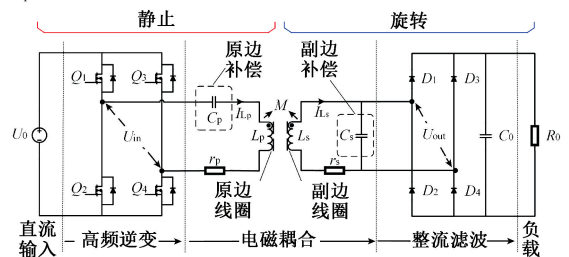


图2 非接触供电原理

Fig. 2 Diagram of contactless power supply schematic

2 耦合机构建模

电磁耦合机构作为核心,其耦合性能的好坏直接影

响系统电能传输功率及效率^[20],耦合性能一般由耦合系数 k 表征,表达式如式(1)所示,

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (1)$$

其中, L_p 、 L_s 和 M 分别为耦合机构原边自感、副边自感及互感。

由于工作时原、副边非接触,因此气隙的存在使得电磁耦合过程中存在漏磁较大的问题,严重影响耦合性能,为此,耦合机构通常需要设置相对磁导率较高的铁氧体磁芯来引导磁场,减少漏磁。但是,铁氧体磁芯的制作采用烧结工艺,特殊形状和尺寸的制作往往需要开模定制,极大增加了成本及不必要的重量,因此,耦合机构采用条形磁芯,如图 3 所示。磁芯材质选用 PC44 型 Mn-Zn 铁氧体;线圈为同轴嵌套式结构,选用 0.1×80 股利兹线,匝数比为 12 : 12;最终的磁芯骨架由 3D 打印制作,气隙可通过轴向移动进行调节。

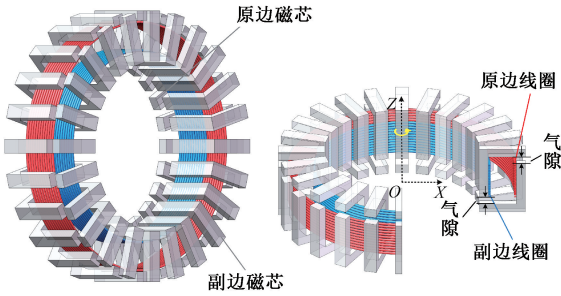


图 3 耦合机构磁芯结构

Fig. 3 Magnetic core structure of coupler

2.1 磁通路径

由于该耦合机构物理结构具有对称性,因而仅在 RZ 坐标系上对其半剖面构建磁通路径,如图 4 所示,并以此为依据建立等效磁路模型。其中, $N_p I_p$ 为原边磁动势,由原边通入电流和匝数决定,因其产生的磁通表示为 φ_p 。由于磁芯的相对磁导率较高,绝大部分磁通(主磁通) φ_m 能够通过气隙到达副边,副边因此产生反磁动势 $N_s I_s$,其磁通由 φ_s 表示。因为 φ_s 与 φ_p 方向相反,故 φ_m 可表示为:

$$\varphi_m = \varphi_p - \varphi_s \quad (2)$$

但是,气隙的存在使得电磁耦合过程存在漏磁通 φ_{lkp} 和 φ_{lks} ,同时,磁通还会对外扩张,造成边缘效应,产生边缘磁通 φ_{st} 。考虑到边缘磁通的路径具有不确定性,此处对其建模并不准确,故对其进行忽略,仅在计算磁通等效面积时进行修正^[21]。 φ_p 和 φ_s 可由式(3)和(4)表示。

$$\varphi_p = \varphi_{lkp} + \varphi_m \quad (3)$$

$$\varphi_s = \varphi_{lks} + \varphi_m \quad (4)$$

LL 型磁芯结构气隙区域可近似看作为空心圆柱体,

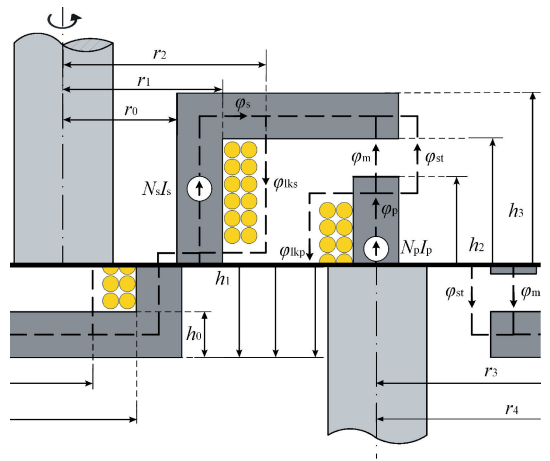


图 4 磁通路径

Fig. 4 Magnetic flux path

因此,近轴端气隙磁通面积 A_{g1} 和远离轴端的气隙磁通面积 A_{g2} 可由式(5)表示。

$$\begin{cases} A_{g1} = \frac{V_{g1}}{l_g} = \frac{\int_{h1}^{h2} dz \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{r1} r dr}{h_2 - h_1} \\ A_{g2} = \frac{V_{g2}}{l_g} = \frac{\int_{h1}^{h2} dz \int_0^{2\pi} d\theta \int_{r4}^{r4+r1-r0} r dr}{h_2 - h_1} \end{cases} \quad (5)$$

其中, l_g 为气隙长度, V_{g1} 和 V_{g2} 分别为气隙体积。

考虑边缘效应,对其进行修正,气隙磁通面积可近似表示为:

$$\begin{cases} A_{g1} \approx \pi [(r_1 + l_g)^2 - (r_0 - l_g)^2] \\ A_{g2} \approx \pi [(r_4 + r_1 - r_0 + l_g)^2 - (r_4 - l_g)^2] \end{cases} \quad (6)$$

2.2 等效磁路

为建立耦合机构物理模型和电感参数的映射关系,进而分析电磁耦合机理,根据上节构建的耦合机构磁通路径建立了图 5 所示的等效磁路模型。

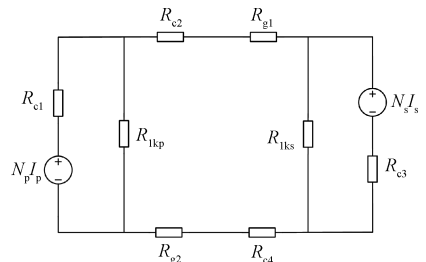


图 5 等效磁路模型

Fig. 5 Equivalent magnetic circuit model

其中, R_{c1} 、 R_{c2} 、 R_{c3} 和 R_{c4} 为各段磁芯磁阻,由于磁芯的相对磁导率远远大于空气磁导率 μ_0 ,因此计算时可忽略不计;气隙磁阻 R_{g1} 和 R_{g2} 、漏磁通引起的漏磁阻 R_{lkp} 和

R_{lks} 则由式(7)~(9)计算。

$$\begin{cases} R_{g1} = \frac{l_g}{\mu_0 \pi [(r_1 + l_g)^2 - (r_0 - l_g)^2]} \\ R_{g2} = \frac{l_g}{\pi [(r_4 + r_1 - r_0 + l_g)^2 - (r_4 - l_g)^2]} \end{cases} \quad (7)$$

$$R_{lkp} = \frac{h_1 - h_0}{\mu_0 \pi (r_2^2 - r_1^2)} \quad (8)$$

$$R_{lks} = \frac{h_1 - h_0}{\mu_0 \pi (r_4^2 - r_3^2)} \quad (9)$$

初级线圈产生的磁通交链到次级线圈的百分数 k_p 和次级线圈产生的磁通交链到初级线圈的百分数 k_s 可表示为:

$$k_p = \frac{\varphi_p - \varphi_{lkp}}{\varphi_p} = \frac{R_{lkp}}{R_{g1} + R_{g2} + R_{lkp}} \quad (10)$$

$$k_s = \frac{\varphi_s - \varphi_{lks}}{\varphi_s} = \frac{R_{lks}}{R_{g1} + R_{g2} + R_{lks}} \quad (11)$$

至此,得到耦合机构物理模型与电感参数的映射关系如式(12)~(15)所示。

$$L_p = \frac{N_p^2}{R_p} = \frac{N_p^2 (R_{lkp} + R_{g1} + R_{g2})}{R_{lkp} (R_{g1} + R_{g2})} \quad (12)$$

$$L_s = \frac{N_s^2}{R_s} = \frac{N_s^2 (R_{lks} + R_{g1} + R_{g2})}{R_{lks} (R_{g1} + R_{g2})} \quad (13)$$

$$k = \sqrt{k_p k_s} \quad (14)$$

$$M = k \sqrt{L_p L_s} \quad (15)$$

3 耦合机理分析

在上节的耦合机构等效磁路模型建立过程中可以发现,气隙磁通面积直接影响气隙磁阻,而气隙磁阻的变化将导致耦合机构 L_p 、 L_s 和 M 等参数的变化,进而影响机构耦合性能。而实际应用中,耦合机构的磁芯数量、气隙、径向偏移以及原、副边相对旋转均是气隙磁通面积的影响因素,为此,需分析上述参数变化对耦合机构性能的影响,即耦合机理。

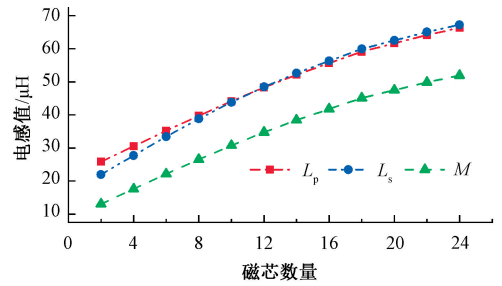
3.1 磁芯数量

与一体化磁芯结构不同,采用条形磁芯进行拼凑会使耦合机构磁芯间存在间隙,磁芯数量越多磁芯结构越紧凑,磁通面积就越大。但考虑到骨架结构及强度,仿真分析时仅将磁芯数量上限设置为24个,得到图6所示耦合机构参数随磁芯数量变化曲线。

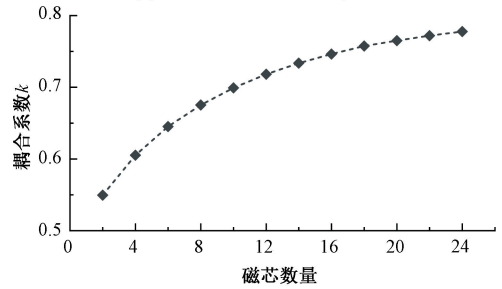
由图6可知耦合机构参数随磁芯数量的增加而增大,与理论分析结果一致。因此,在保证骨架强度的情况下,耦合机构的磁芯数量应尽可能多。

3.2 气隙及径向偏移

在实际应用中,耦合机构副边同轴安装,由于转轴的



(a) Variation of inductance parameters



(b) Variation of inductance parameters

图6 耦合机构参数随磁芯数量变化

Fig. 6 Variation of coupler parameters with number of cores

装配误差、负载偏心及不对中等情况,副边会发生轴向(气隙)和径向偏移,因此需要综合分析气隙和径向偏移带来的影响。

通过在 Maxwell 有限元仿真软件 3D 静态场中建立图3所示的耦合机构模型并仿真,得到了 RZ 坐标下磁芯正对时的截面场图,如图7所示。对比图7(a)和(b)可以发现 5 mm 气隙下的磁通密度明显大于 10 mm 气隙下的磁通密度,说明在 5 mm 气隙下耦合机构原边的绝大部分磁通能够交链到副边;而在相同气隙下,对比图7(a)和(c)可以看出,径向偏移会造成一侧磁芯的磁密增大,另一侧的磁密减少。为准确分析径向偏移对耦合性能的影响,同时考虑到不同气隙下径向偏移对耦合性能的影响程度也可能不同,因此通过参数化扫描得到如图8所示耦合系数随气隙及偏移变化的 3D 曲面图。

由图8可以看出耦合系数随气隙的增大明显减小,但不同气隙下耦合系数随径向偏移波动情况有所不同,尤其在 1~2 mm 气隙下,耦合系数随径向偏移变化发生明显波动,且在径向偏移为 0 mm 时达到最大,即径向偏移对不同气隙下的耦合机构影响程度不同。

为进一步比较不同气隙下径向偏移对耦合性能的影响程度,通过计算得到不同气隙下耦合系数随径向偏移变化的方差,如图9所示,可以看出气隙在 5~8 mm 范围内时方差较小,且数值在 1×10^{-6} 以内,表明在此气隙范围内耦合性能受径向偏移影响较小,同时,该耦合机构在 5 mm 气隙下具有较好的耦合性能和抗偏移性。综上所述,气隙对该耦合机构的耦合性能影响较大,径向偏移则

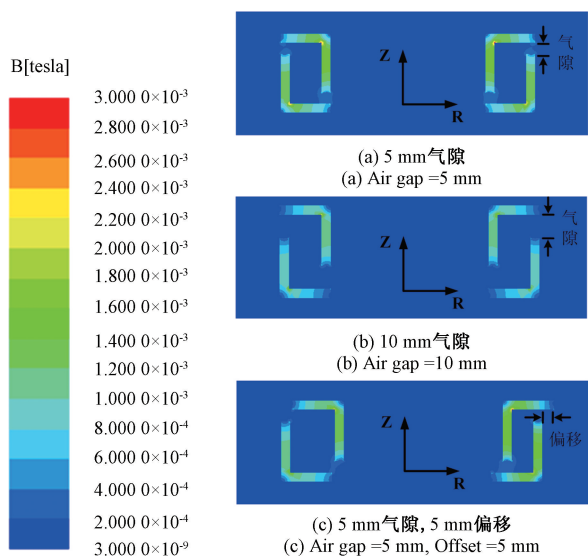


图 7 磁芯截面磁密分布

Fig. 7 Magnetic density distribution of the core cross section

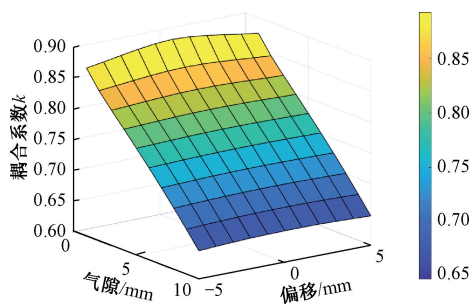


图 8 耦合系数随气隙及径向偏移变化

Fig. 8 Variation of coupling coefficient with gap and offset

影响较小,但不同气隙下径向偏移产生的影响程度也不同,该耦合机构在 5 mm 气隙下能够兼顾耦合性能和稳定性。其原因是气隙的增大使得等效磁通面积 A_{g1} 和 A_{g2} 减小,从而增大了气隙磁阻 R_{g1} 和 R_{g2} ,导致耦合系数 k 减小;但该耦合机构采用同轴嵌套式结构,径向偏移发生时,一侧磁芯的磁密增加,另一侧磁密减少,而整体磁通总量变化不大;随着气隙的减小,电磁耦合逐渐减弱,径向偏移对于耦合系数影响程度也急剧减小。

3.3 旋转扰动

除磁芯数量、气隙和径向偏移影响外,耦合机构在实际水润滑轴承试验台应用中还面临着旋转带来的影响。考虑到磁密场图最能直观反映旋转对耦合性能的影响程度,因而在 Maxwell 3D 瞬态场中对耦合机构进行了瞬态仿真分析,得到 5 mm 气隙下不同时刻的耦合机构磁密分布云图,并选择了其中 3 个时刻进行对比分析。其中,转速设置为 600 rpm 以缩短仿真时长,仿真步长为 0.1 ms,结果如图 10 所示。

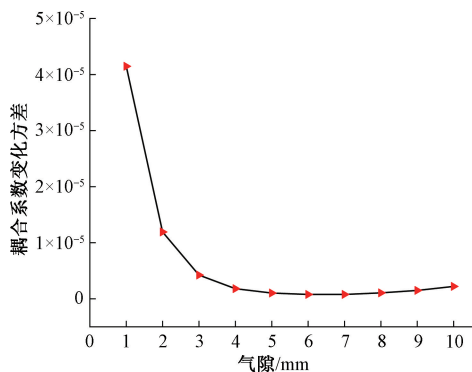


图 9 不同气隙下耦合系数随径向偏移变化方差

Fig. 9 Variance of coupling coefficient with offset for different gaps

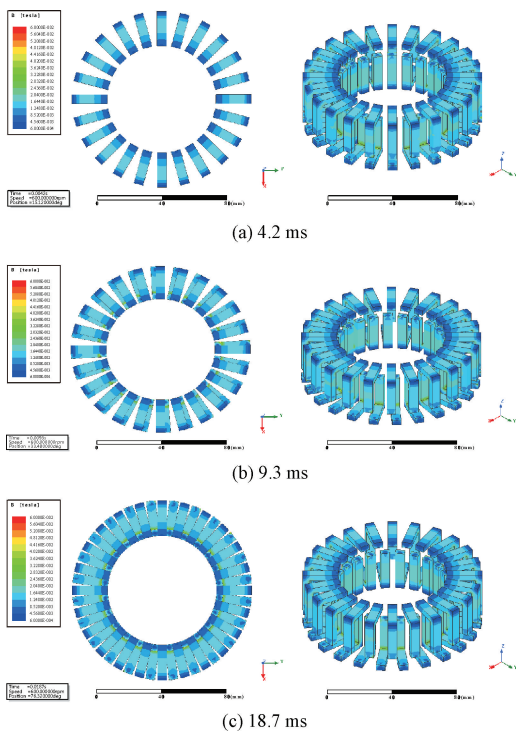


图 10 不同时刻下耦合机构磁密分布

Fig. 10 Magnetic density distribution of the coupler at different moments

观察图 10(a)、(b)和(c)可以发现,耦合机构在所选取的 3 个时刻下分别处于磁芯正对、磁芯半错位及磁芯错位 3 种工作状态,但磁密分布并无明显变化。为准确分析相对旋转运动对耦合机构参数的扰动情况,同时验证参数仿真结果的准确性,使用 LCR 数字电桥 (TH1827B+) 对不同旋转角度下的耦合机构样机进行参数测定并与仿真对比,结果如图 11 所示。

图 11 中可以看出耦合机构参数随旋转角度呈周期性变化,但变化幅度不大,耦合系数可以稳定在小数点后

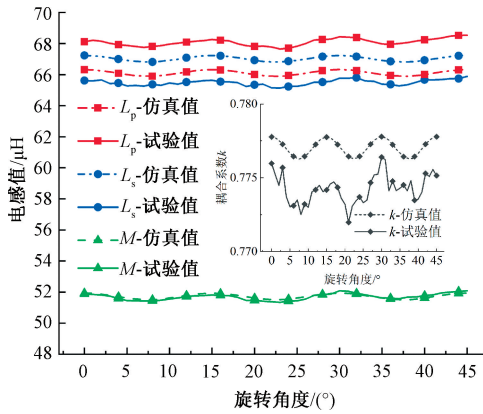


图 11 耦合机构参数随旋转角度变化

Fig. 11 Variation of coupler parameters with rotation angle

两位,即 $k \approx 0.77$ 。并且,通过计算得到试验值与仿真值之间的误差范围为: $-2.64\% \sim +3.37\%$,说明仿真和试验一致性较好。

进一步分析旋转扰动周期性变化的原因,得出结论是由于该耦合机构磁芯间呈 15° 夹角,相对旋转的过程中磁芯不断处于正对、半错位和错位 3 种工作状态下,造成耦合机构磁通变化,进而导致旋转过程中电感参数周期性扰动,但该扰动是否影响实际应用,还需进一步测试试验。

4 电路补偿及联合仿真

为提升耦合机构输出功率,在耦合机构原边串联电容 C_p ,副边并联电容 C_s ,电容值由式(16)计算:

$$C_p = \frac{1}{\omega^2(L_p - \frac{M^2}{L_s})}, C_s = \frac{1}{\omega^2 L_s} \quad (16)$$

其中,电容 C_s 在副边的并联使得电容中流过的电流与副边导纳中电流的无功分量抵消,提高了耦合机构输出功率,而原边串联补偿电容 C_p 上的电压降与初级端的感抗压降相抵消,能够降低对初级供电系统的电压要求。

为了直观对比补偿前后输出功率变化,将 Maxwell 有限元模型导入 Simplerer 软件中进行联合仿真分析,如图 12 所示。同时,将磁芯正对时定义为完全补偿位置以简化分析,在此位置计算得到联合仿真参数如表 1 所示。

表 1 联合仿真参数表

Table 1 Parameters of co-simulation

参数	数值	参数	数值
U_{in}	15 V	f	20 kHz
L_p	69.91 μ H	L_s	71.03 μ H
M	55.49 μ H	R_L	25 Ω
r_p	0.1 Ω	r_s	0.1 Ω
C_p	2.384 μ F	C_s	0.892 μ F

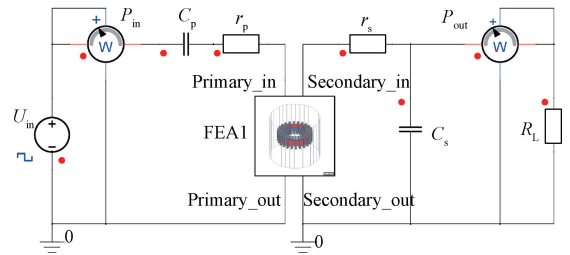


图 12 联合仿真电路

Fig. 12 Co-simulation circuit diagram

补偿前后输出功率联合仿真结果如图 13 所示,可以发现补偿后输出功率较补偿前有明显提高,计算得到补偿前平均输出功率为 4.957 W,补偿后平均输出功率可达 10.917 W,相比之下,补偿后平均输出功率是补偿前的 2.2 倍,此时电能传输效率为 63.11%。

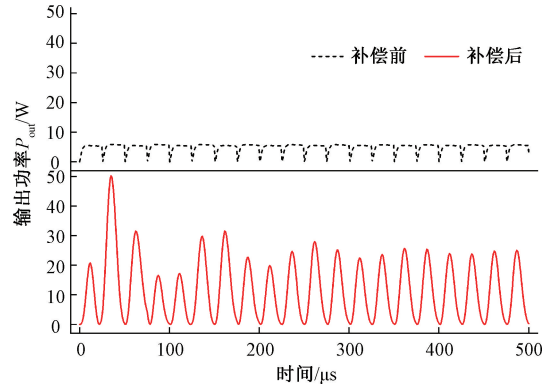


图 13 补偿前后输出功率对比

Fig. 13 Comparison of output power

5 试验测试

为验证理论及仿真分析结果,搭建了如图 14 所示的试验系统,试验现场如图 15 所示。由于非接触供电系统高频逆变电路的设计需建立在耦合机构试验测试完成后,且测试过程需要稳定电压源,因此试验中由信号发生器和功率放大模块代替高频逆变电路向耦合机构原边注入高频交流电。

图 14 中,信号发生器产生高频方波信号并由功率放大模块放大后恒压输出,经原边补偿后注入耦合机构原边,副边电磁耦合到同频交流电后经副边补偿接入负载。在此过程中,副边随轴旋转,因此需要通过电刷进行试验测试,电流传感器(OPCT10AL)用于获取输入输出电流数据,四通道示波器(ZDS2014)最终显示输入输出电压电流测试结果。

为将本文 3.2 节所述气隙带来的影响映射至电气输

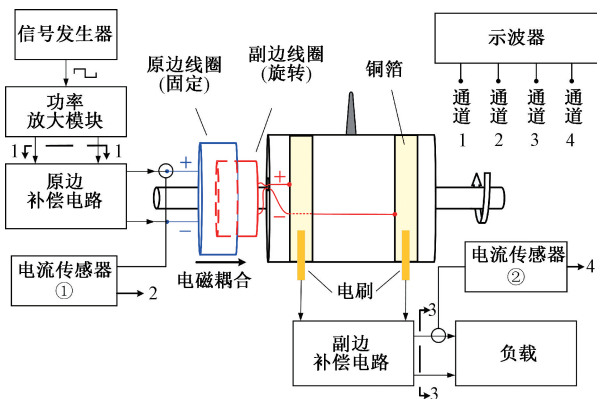


图 14 试验系统框图

Fig. 14 Block diagram of the test system

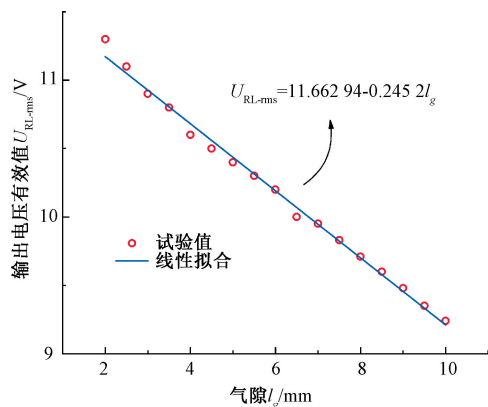


图 16 输出电压有效值随气隙变化

Fig. 16 Variation of output voltage RMS with gap

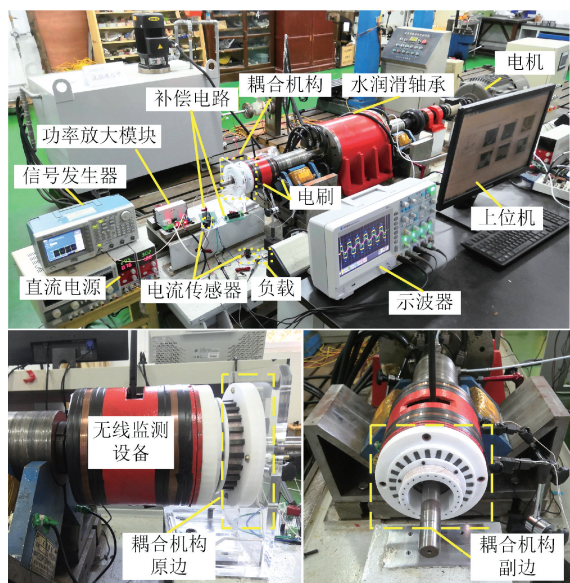


图 15 试验现场

Fig. 15 Testing site

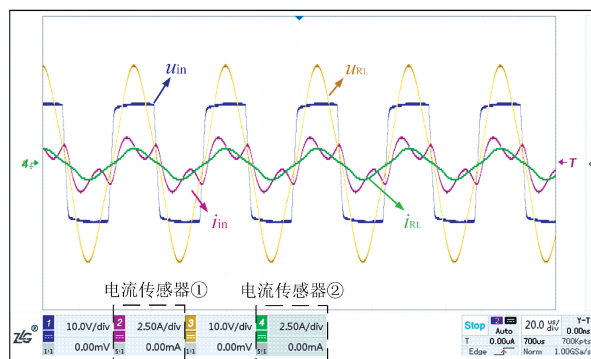


图 17 输入输出电压电流波形

Fig. 17 The waveform of voltage and current

行了试验测试,得到 50~500 rpm 转速下耦合机构补偿后的输出电压电流波动,并以图 18 所示 200 rpm 转速下的测试结果为例进行分析。

表 2 试验参数表

Table 2 Parameters of test

参数	数值	参数	数值
U_{in}	15 V	f	20 kHz
L_p	68.11 μ H	L_s	65.61 μ H
M	51.87 μ H	R_L	25 Ω
r_p	0.1 Ω	r_s	0.1 Ω
C_p	2.337 μ F	C_s	0.965 μ F

出表现,测试了无补偿下耦合机构输出电压有效值随气隙变化情况,此时输入方波电压有效值为 15 V,且磁芯处于正对位置。试验结果如图 16 所示,并通过线性拟合得到输出电压有效值随气隙变化的表达式。可以发现,耦合机构在 10 mm 气隙范围内输出电压有效值随气隙线性变化,且与气隙呈反比。

表 2 为试验系统参数,示波器测试结果如图 17 所示,四通道分别为系统输入输出电压、电流波形。经计算,补偿后的平均输出功率为 12.496 W,传输效率为 71.96%,与仿真结果相比,误差分别为 14.47% 和 14.02%,表明试验与仿真具有较好的一致性。

由于无线监测节点与轴同步旋转,耦合机构在工作过程中受旋转、偏心及轴系不对中等因素综合影响。因此,在实际水润滑轴承试验台不同转速下对耦合机构进

如图 18 所示,示波器通道 3 和通道 4 分别为负载电压、电流波形,可以看出,耦合机构输出电压和电流并无大幅波动,但呈现出部分“缺口”(图中圈出部分),同时,进一步观察发现耦合机构初、次级间相对旋转一周时的“缺口”数量为 24 个,其产生原因在于耦合机构的磁芯结构使得原、副边相对旋转时磁芯会发生错位,导致耦合机构参数变化,进而影响其输出电压电流大小,最终在示波器上呈现“缺口”,与 3.3 节分析结果一致。

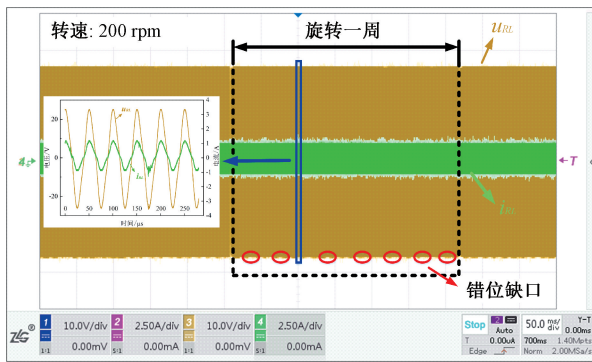


图 18 200 rpm 下输出电压电流波形

Fig. 18 The waveform of output voltage and current at 200 rpm

不同转速下,观察图 19 所示耦合机构输出电压有效值随转速变化结果,发现输出电压有效值在 17.2 V 左右,说明转速并不是电磁耦合过程的影响因素,旋转工况下对电磁耦合过程的影响主要来自耦合机构的磁芯结构。

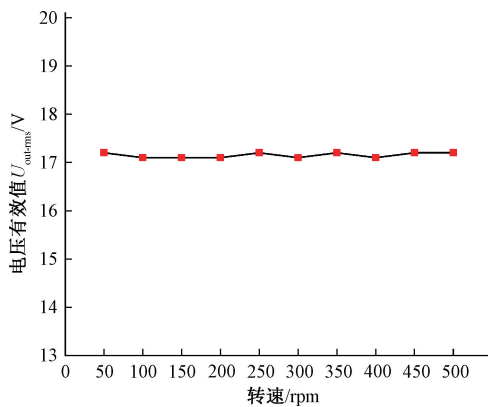


图 19 不同转速下输出电压有效值

Fig. 19 The output voltage RMS at different rotation speeds

6 结论

针对水润滑轴承水膜压力无线监测节点在旋转工况下的供电难题,提出了一种非接触供电方法与条形磁芯电磁耦合机构,并通过建立等效磁路数学模型、有限元仿真以及试验测试相结合的方法研究了其耦合机理。研究表明,该耦合机构耦合性能与磁芯数量呈正比,与气隙呈反比,且在 5 mm 气隙下能够兼顾耦合性能及抗径向偏移能力;轴旋转带来的扰动主要源于耦合机构磁芯结构设计方式,相对旋转时耦合机构参数会发生波动,进而在输出电压电流波形上呈现“缺口”,转速并不是影响因素电磁耦合过程的影响因素;另外,该耦合机构在进行谐振补偿后效率可达 71.96%,并实现 12.496 W 的功率传输,能够满足节点供电需求。后续研究重点在于进一步提高电

磁耦合机构在旋转工况下的电能传输效率、稳定性和可靠性,以便应用于更多的旋转工况下类似无线节点供电场景中,可通过优化耦合机构与电路补偿方法实现。

参考文献

- [1] WANG N, YUAN Z, WANG P. Dynamic electromagnetic force variation mechanism and energy loss of a non-contact loading device for a water-lubricated bearing [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(6): 2645-2656.
- [2] LIU Q, OUYANG W, CHENG Q, et al. Influences of bidirectional shaft inclination on lubrication and dynamic characteristics of the water-lubricated stern bearing [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 169: 108623.
- [3] ZHAO Z, ZHANG R. Theoretical and experimental analysis of a water-lubricated rubber journal bearing with a large aspect ratio [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2020, 72(6): 797-803.
- [4] 韩雨龙, 薛志超, 文丰. 低功耗热电偶无线传感器节点设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(15): 131-136.
HAN Y L, XUE ZH CH, WEN F. Design and implementation of low power thermocouple wireless sensor node [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(15): 131-136.
- [5] 张强, 张可墨, 刘继奎, 等. 空间导电滑环技术研究与发展综述 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 334-348.
ZHANG Q, ZHANG K M, LIU J K, et al. Overview of research and development on space slip rings [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 334-348.
- [6] 刘灏. 发电机励磁系统滑环短路故障引发停机事故分析 [J]. 水电与新能源, 2022, 36(8): 71-75.
LIU H. Analysis of a unit shutdown accident caused by short circuit of the slip ring in generator excitation system [J]. Hydropower and New Energy, 2022, 36(8): 71-75.
- [7] 芮小博, 张宇, 曾周末. 旋转运动能量收集及其实现 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 1-11.
RUI X B, ZHANG Y, ZENG ZH M, et al. Rotational motion energy harvesting technology and its realization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 1-11.
- [8] JIA J, JIA Y, LI X. Analysis, design, and experimental verification of a parallel wireless power and data transmission method for rotary steering systems [J]. Energies, 2022, 15(17): 6349.
- [9] JI L, ZHANG M, MA J, et al. A rotary wireless power

- transfer topology with constant voltage output for oil and gas well [C]. 2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA). IEEE, 2022; 184-190.
- [10] 袁明显, 周江华, 郝勇, 等. 平流层艇载风速计非接触供电系统的设计[J/OL]. 北京航空航天大学学报:1-12 [2022-08-21]. DOI: 10.13700/j. bh. 1001-5965. 2021. 0344.
YUAN M Y, ZHOU J H, HAO Y, et al. Design of contactless power supply system for stratospheric airship anemometer [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1-12[2022-08-21]. DOI: 10.13700/j. bh. 1001-5965. 2021. 0344.
- [11] CUI S, BIE Z, ZHANG J, et al. A redundancy design of wireless power transfer system for satellite slip ring with high reliability [C]. 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). IEEE, 2021; 1-6.
- [12] DONG Y, MENG L, WANG Y, et al. Research of contactless power transmission in rotating EDM system[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(3): 1407-1416.
- [13] LI H, CHEN T, DUAN Z, et al. Performances of resonant frequency tracking methods and compensation strategies for rotary ultrasonic machining device with contactless energy transfer [J]. Applied Acoustics, 2022, 197: 108959.
- [14] AYAZ E, ALTUN O, POLAT H, et al. Concurrent wireless power transfer and motor drive system with a single converter [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2022, 4(1): 409-418.
- [15] MANKO R, VUKOTI? M, MAKUC D, et al. Modelling of the electrically excited synchronous machine with the rotary transformer design influence[J]. Energies, 2022, 15(8): 2832.
- [16] 王旭东, 于勇, 闫美存, 等. CES 中不同绕制拓扑耦合旋转励磁变压器性能及分析[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2): 113-122, 131.
WANG X D, YU Y, YAN M C, et al. Characteristic and analysis for the different topologies of loose coupled excitation transformer in CES [J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(2): 113-122, 131.
- [17] 王方哲, 朱永生, 闫柯, 等. 滚动轴承内圈温度无线监测技术[J]. 机械工程学报, 2018, 54(22): 8-14.
WANG F ZH, ZHU Y SH, YAN K, et al. Wireless monitoring technology of rolling bearing inner ring temperature [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(22): 8-14.
- [18] HOANG V A, LEE Y C. Wireless power transmission system for a rotating propulsive shaft with multiple transmit and receive coils [C]. 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS-Spring). IEEE, 2019; 1574-1578.
- [19] 高浚凯, 齐红丽, 王天泽, 等. 一种应用于不同轴径转轴的感应供电平面阵列线圈结构[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(4): 65-71.
GAO J K, QI H L, WANG T Z, et al. Inductive power transfer planar array coil structure applied to shafts of different shaft diameters [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(4): 65-71.
- [20] 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): 1525-1537.
MAI J W, ZENG X R, LIU ZH G, et al. An IPT system based on S/SP compensation topology with high misalignment tolerance [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1525-1537.
- [21] FENG X, FU Z, HAO G, et al. Modeling and implementation of a new non-contact slip ring for wireless power transfer [C]. 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia). IEEE, 2020; 106-111.

作者简介



王楠(通信作者), 2005 年于陕西科技大学获得学士学位, 2009 年于西安建筑科技大学获得硕士学位, 2015 年于西安交通大学获得博士学位, 现为陕西理工大学副教授, 主要研究方向为机电设备智能监测与控制。

E-mail: heroyoyu@126.com

Wang Nan (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shaanxi University of Science & Technology in 2005, M. Sc. degree from Xi'an University of Architecture & Technology in 2009 and Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2015, respectively. Now he is an associate professor in Shaanxi University of Technology. His main research interests include intelligent monitoring and control of mechanical and electrical equipment.