

# 电涡流传感器在水泵橡胶轴承间隙 在线测量中的应用

花再军<sup>1,2,3</sup>, 莫兆祥<sup>1,3</sup>, 夏臣智<sup>1,3</sup>, 刘军<sup>1,3</sup>, 朱跃龙<sup>2</sup>

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 南京 210029;

2. 河海大学 计算机与信息学院, 南京 211100;

3. 江苏省泵站工程技术研究中心, 南京 210019)

**摘要:** 电涡流传感器被用来对水泵转轴与橡胶轴承的间隙进行在线测量, 以监测轴承磨损状况; 首先通过电磁计算工具设计一个直径为 14 mm 的双层平面电涡流电感, 接着对制作在印刷线路板上的电感分别在空气和水中两种条件下的电阻抗特性进行测量, 然后制作相应的电感检测电路, 得到一个探头和检测电路一体的电涡流传感器; 传感器采用 RS485 接口输出, 不受通讯电缆长度影响; 传感器经密封防水处理后尺寸为 76 mm×25 mm×12 mm; 传感器经过实验室测试和水泵工况测试; 实验室测试进行静态测试和动态测试, 获得了传感器在水中间隙测量的特性, 测量精度达到 0.02 mm; 水泵工况测试在一台轴流泵上进行, 试验结果表明电涡流传感器可以对水泵橡胶轴承间隙进行在线测量。

**关键词:** 水泵; 橡胶轴承; 间隙测量; 电涡流; 阻抗

## Application of Eddy Current Sensors for On-line Measurement of Rubber Bearing Gap of Water Pump

HUA Zaijun<sup>1,2,3</sup>, MO Zhaoxiang<sup>1,3</sup>, XIA Chenzhi<sup>1,3</sup>, LIU Jun<sup>1,3</sup>, ZHU Yuelong<sup>2</sup>

(1. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Nanjing 210029, China;

2. School of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China;

3. Jiangsu Engineering and Technology Center for Pumping Station, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** An eddy current sensor is used to measure the gap between water pump shaft and rubber bearing on line and to monitor the wear condition of bearing. Firstly, a double-layer planar eddy current inductor with diameter of 14 mm is designed by using electromagnetic calculation tools. Then, the impedance characteristics of the inductors made on the printed circuit board are measured under the conditions of air and water respectively. Finally, the corresponding inductance detection circuit is made to obtain an eddy current sensor integrating the probe and the detection circuit. The output signal of sensor is adopted as RS485 interface, which is not affected by the length of communication cable. The sensor size is reached by 76×25×12 mm<sup>3</sup> after sealing and waterproofing the laboratory test and water pump working condition test of sensor are completed. Both static and dynamic tests are carried out in the laboratory to obtain the characteristics of the sensor for gap measurement in water. The measurement accuracy of the sensor reaches 0.02 mm. The pump condition test is conducted on an axial flow pump. The test results show that the designed eddy current sensor can measure the rubber bearing gap of the pump online.

**Keywords:** pump; rubber bearing; gap measurement; eddy current; impedance

## 0 引言

橡胶轴承利用转轴与轴承内衬之间形成的水膜进行润滑, 无需使用传统轴承使用的润滑油, 省去了润滑剂供给系统, 简化了机械结构, 而且对环境无污染<sup>[1-2]</sup>。南水北调东线工程多个泵站机组采用了橡胶轴承作为水泵的下导轴承。橡胶轴承由于材料和结构特性导致会被磨损<sup>[3-4]</sup>。水泵

机组中橡胶轴承在主轴长期运转后也会被磨损, 从而导致主轴的摆度加大。为了保证机组安全, 实际中对轴承间隙进行了限定。由于轴承在水泵内部, 且位于数米深的水下, 运行中无法及时掌握轴承间隙情况。尽管实际机组在水泵与电机轴的连轴处安装有摆度传感器<sup>[5-7]</sup>, 但因为水泵转轴很长, 加之转轴本质上还是弹性体, 所以连轴处的摆度不能够完全反映下导轴承的被磨损后的间隙和橡胶轴承处转

收稿日期: 2023-01-29; 修回日期: 2023-03-15。

作者简介: 花再军(1983-), 男, 博士后, 工程师。

引用格式: 花再军, 莫兆祥, 夏臣智, 等. 电涡流传感器在水泵橡胶轴承间隙在线测量中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 21-27, 75.

轴的摆动情况。目前对橡胶轴承间隙的测量方式是人工定期检测, 花费人力、财力和物力。实现对水润滑橡胶轴承间隙在线测量具有重要意义。

电涡流传感器已经用于材料厚度<sup>[8]</sup>, 桥梁挠度<sup>[9]</sup>, 机械设备健康状况监测<sup>[10-11]</sup>, 具有很高的测量精度。但是电涡流传感器基本是按照空气中测量环境设计, 还没有用于水中环境的应用报道。电涡流传感器在水中执行测量任务一方面要满足防水这个基本要求, 另一方面要保证水下测量的精度。自然水体的电学特性不同于空气, 它具有一定的电导率和介电常数, 需要通过实验评估水对电涡流传感器的影响。传统的电涡流传感器采用感应探头和采集前置器分离的结构。感应探头采用绕线线圈<sup>[12]</sup>, 密封固定后, 由同轴电缆拉远接入采集前置器。同轴电缆作为探头阻抗的一部分。因此, 传感器出厂后同轴电缆长度不可更改, 限制了工程应用的灵活性。传统的电涡流传感器前置器一般不具备防水性, 因此需要用户进行额外的防水处理, 或者通过长同轴电缆将前置器拉远至无水的环境。水泵是大型机械, 作为探头阻抗一部分的同轴电缆会受到金属环境的影响。平面电感线圈具有厚度薄, 尺寸一致度高, 可和电路共同制造的优势, 平面电涡流线圈测距已有报道<sup>[13-15]</sup>。本文实现一种平面电感线圈探头与采集电路一体的电涡流传感器, 通过数字信号远传测量结果, 增加传感器应用的灵活性, 将其用于水泵橡胶轴承间隙在线测量。

本文首先采用电磁分析工具设计一个 14 mm 直径的电感线圈作为电涡流传感器的感应探头, 然后对探头的电阻抗特性分别在空气和水中进行阻抗实验测量, 分析空气和水中阻抗的差异, 进而得到探头探测的最优工作区间。接着设计传感器电路, 密封后得到可在水下工作的传感器。试验阶段, 先在实验室对传感器进行静态和动态测试, 传感器测量精度达到 0.02 mm, 测量范围 1.5 mm。最后在一台轴流泵上进行实验, 将电涡流传感器应用于水泵橡胶轴承在线测量。

## 1 平面电涡流传感器的设计

### 1.1 电涡流距离测量原理

电涡流效应的原理如图 1 所示。由交变电流  $I_1$  驱动的线圈产生交变磁场  $B_1$ , 当线圈接近导体金属块时在金属中感应出交变电流  $I_2$ 。交变电流  $I_2$  产生交变磁场  $B_2$ , 它会阻碍线圈磁场  $B_1$ , 从而引起线圈阻抗的变化。线圈阻抗变

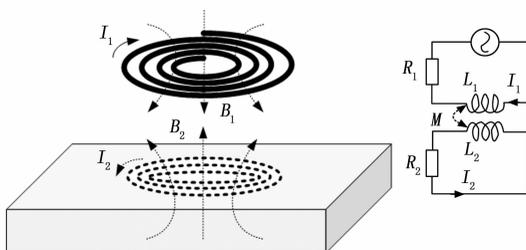


图 1 电涡流原理

化的大小与导体金属块的电阻率、磁导率、交变电流的频率以及二者之间的距离 (也称为提高距离) 有关。当距离以外的因素固定不变, 可以由阻抗的变化值得到提高距离的数值, 从而实现距离测量。电涡流效应也可以用右侧的电路来描述。线圈可以等效为一个电阻  $R_1$  和电感  $L_1$  构成的主回路, 在交流信号驱动下工作。金属中产生的涡流等效为一个电阻  $R_2$  和电感  $L_2$  构成的次级回路。主回路电感  $L_1$  和次级回路电感  $L_2$  之间的互感为  $M$ 。交变电流的工作角频率是  $\omega$ 。根据电磁理论, 互感  $M$  是提高距离的函数<sup>[13]</sup>。提高距离的变化导致互感  $M$  的变化, 从而引起线圈阻抗的变化。线圈阻抗与主回路电阻  $R_1$ 、电感  $L_1$ 、次级回路电阻  $R_2$ 、电感  $L_2$  以及互感  $M$  的关系可以用式 (1) 来描述:

$$Z = \frac{R_2^2 R_1 + \omega^2 L_2^2 R_1 + \omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} + j\omega \frac{R_2^2 L_1 + \omega^2 L_2^2 L_1 - \omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (1)$$

式 (1) 中, 阻抗  $Z$  的实部式等效为一个电阻  $R$ , 虚部是阻抗的电抗部分, 等效为一个电感  $L$ 。

$$R = \frac{R_2^2 R_1 + \omega^2 L_2^2 R_1 + \omega^2 M^2 R_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (2)$$

$$L = \frac{R_2^2 L_1 + \omega^2 L_2^2 L_1 - \omega^2 M^2 L_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (3)$$

通过仪表或者测量电路可以测量得到  $R$  和  $L$ 。当提高距离变大, 电涡流效应减弱, 电感  $L_1$  和电感  $L_2$  之间的耦合变小, 互感  $M$  减小, 电阻  $R$  减小, 电感  $L$  增大。通过预先标定的提高距离与电阻  $R$  或者电感  $L$  的关系曲线即可由阻抗测量得到实际的提高距离, 实现距离测量。

### 1.2 平面电涡流线圈设计

平面电涡流线圈采用平面螺旋结构, 几何参数如下内径  $R_{in}=2.0$  mm, 外径  $R_{out}=7$  mm, 线宽度  $W=0.15$  mm, 线间距  $S=0.2$  mm, 匝数  $N=14$ , 如图 2 所示。为了在较小的面积下获得更大的电感, 采用双层结构, 在印刷线路板的两面各放置一个这样的电感, 同心放置。采用 FR-4 工艺制作印刷线路板, 板厚 1.0 mm。

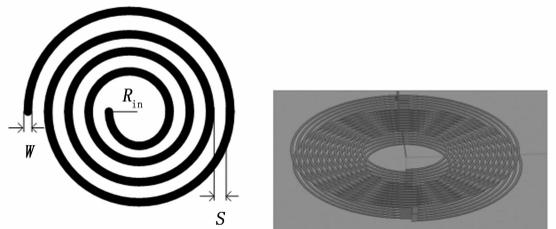


图 2 双层平面电涡流线圈结构

尽管电涡流线圈阻抗分析有具体的数学模型<sup>[16-18]</sup>, 但是针对紧密绕制线圈的模型, 不符合绕匝之间具有间隔特征的平面螺旋线圈。因而工程设计阶段常常用电磁计算工具或者基于有限元对线圈阻抗进行仿真计算<sup>[19-21]</sup>, 获得电感量以及电感量随着目标金属体距离的变化。在电磁计

算工具中按照尺寸对线圈建模后, 用铝、铜和不锈钢作为目标检测体, 得到电感随着目标检测体距离的变化, 如图 3 所示。随着检测体与线圈距离增加, 线圈电感量增加, 并且增加幅度逐渐变小。由于铝、铜材料的相对磁导率接近 1, 涡流效应更强, 变化更明显。以不锈钢检测材料为例, 电感量  $L$  在  $6 \mu\text{H}$  左右, 从提离距离  $dis=2.5 \text{ mm}$  处的  $5.546 \mu\text{H}$  增加到  $4.5 \text{ mm}$  处的  $6.492 \mu\text{H}$ , 增加量约为 17%。

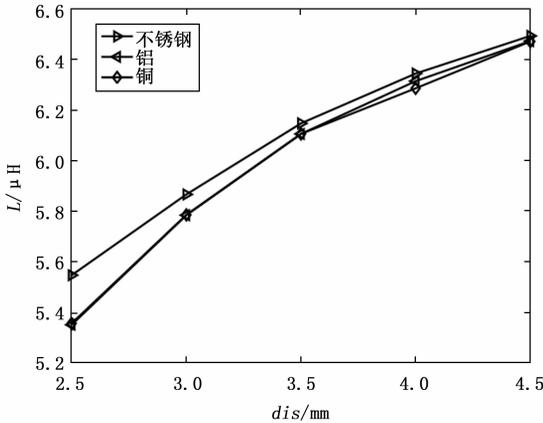


图 3 平面电涡流线圈电感电磁分析结果

### 1.3 平面电涡流线圈在水中的距离探测特性

在传感器制作前对实际电涡流线圈的电涡流阻抗特性进行测量, 以指导传感器电路参数设计。为了能够在水中线圈进行试验, 首先将平面电涡流线圈进行防水处理。实验中先用 3D 打印技术成型一个树脂外壳, 然后采用环氧树脂对线圈电路板进行填充密封, 固化后可进行实验。密封装置和金属导体测试装置如图 4 所示。

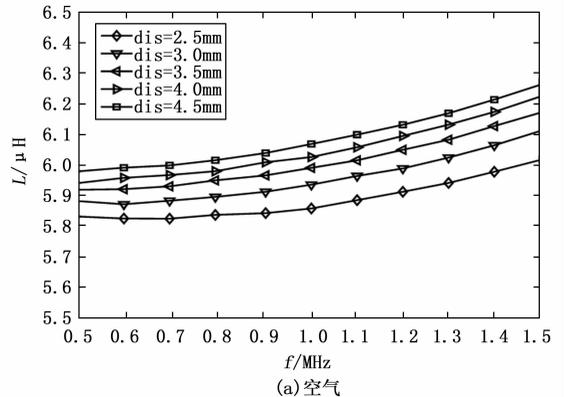


图 4 平面电涡流线圈阻抗测量试验

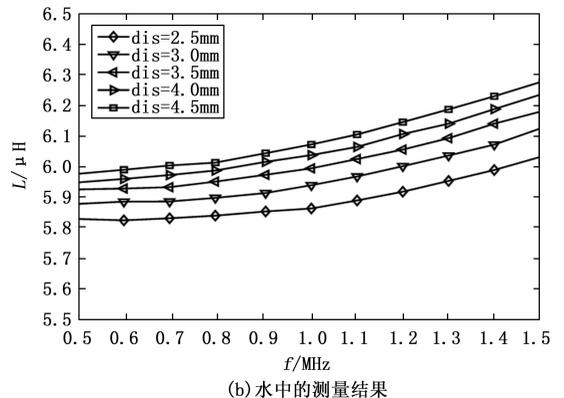
防水处理后用检测金属导体对线圈的阻抗变化进行测试。实验使用的检测金属导体材料是常见的 45 钢块。电感表面到线圈密封体表面的距离  $dis$  为  $2.5 \text{ mm}$ , 因此测试位置从  $2.5 \text{ mm}$  开始, 间隙大小  $d=dis-2.5$ 。使用矢量网络分析仪 (RS-ZNB8) 测量线圈的阻抗, 计算获得电感量。

先在空气中测量目标导体不同距离下的阻抗, 然后将传感器和金属目标导体置于水中测量。在  $0\sim 2 \text{ mm}$  范围调节间隙, 相当于线圈到金属目标距离  $dis$  在  $2.5\sim 4.5 \text{ mm}$  范

围。实验中使用自来水, 电导率为  $400 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。矢量网络分析仪的激励信号频率  $f$  设定在  $0.5\sim 1.5 \text{ MHz}$  之间, 这是常用的电涡流传感器的工作频率范围, 测量结果如图 5 所示。随着线圈中信号频率增加, 线圈的电感量也增加。随着目标导体距离增加, 电涡流线圈电感量增加。在  $1 \text{ MHz}$  信号频率下, 空气中电涡流电感量  $L$  从  $dis=2.5 \text{ mm}$  位置的  $5.859 \mu\text{H}$ , 增加到  $dis=4.5 \text{ mm}$  位置的  $6.069 \mu\text{H}$ ; 水中, 电涡流电感量  $L$  从  $dis=2.5 \text{ mm}$  位置的  $5.866 \mu\text{H}$ , 增加到  $dis=4.5 \text{ mm}$  位置的  $6.074 \mu\text{H}$ 。因为水的介电常数高于空气 80 倍左右, 电容效应明显高于空气, 导致整体的等效电感有所增加。随着传感器与目标金属距离的增加, 电容量减小。这意味着选取合适的工作区域可以使得水对电涡流测量的误差减小。



(a) 空气



(b) 水中的测量结果

图 5 平面电涡流线圈

## 2 平面传感器设计

为了获得阻抗的变化, 需要设计阻抗测量电路构成完整的传感器。将电感测量转化为振荡信号频率测量是一类有效的电感检测方法。将平面线圈安置于振荡电路中产生高频振荡信号, 电感的变化引起振荡频率的变化, 由测量信号频率获得间隙值。电感数字变换芯片 LDC1612 芯片内置振荡器、放大器、频率计数器以及测量控制电路, 对外用 I<sup>2</sup>C 接口进行信息交换。采用低功耗微控制器对 LDC1612 进行控制, 得到振荡频率, 由 RS485 通信接口输出测量结果。与传统的电涡流传感器所采用的探头与采集器分离结构相比, 本文设计的电涡流传感器由数字信号输

出,测量结果与电缆长度无关,在工程应用上更灵活。如图 6 所示,是传感器电路原理。它包括线圈、谐振电容、电感数字变换芯片 LDC1612,晶体时钟,微控制器 STM32L010,RS485 线路驱动器。

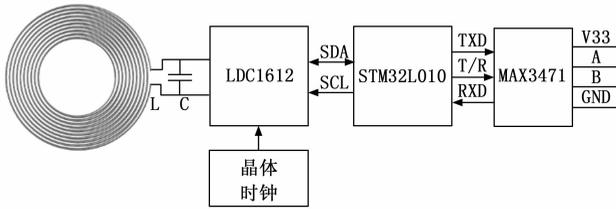


图 6 传感器电路原理

电感数字变换芯片 LDC1612 内部有振荡电路,在电感线圈和谐振电容下构成完整的振荡器,振荡器产生信号的频率由 LDC1612 内部测量模块测得,由 I<sup>2</sup>C 接口与外部进行通信。LDC1612 有两个测量通道,设计中采用其中的通道 0。振荡器的信号频率  $f_0$  由电感线圈的电感值  $L$  与并联的电容  $C$  的容量决定,可根据式 (4) 计算:

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

将工作频率设计在 1 MHz 附近,由前一节线圈设计可知电涡流线圈电感值约为  $6 \mu\text{H}$ ,计算得到并联谐振电容量  $C$  大约 4.2 nF。设计中选用 NPO 电容,以减小电容值的温度漂移。将 LDC1612 的振荡器配置为连续测量模式,频率测量窗口设计为 10 ms。每秒测量 100 次间隙值,对于每分钟 150 转的水泵来说,相当于每圈进行 40 个点位的间隙测量。为了获得较高精度的频率测量结果,本文不采用 LDC1612 内部集成的 RC 时钟源,而是用频率稳定度为 2.5 ppm 的温度补偿晶体时钟,频率 40 MHz。LDC1612 每次测量结束后由微控制器经 I<sup>2</sup>C 接口将振荡频率结果读出,再由 RS485 通信接口将结果按照一定的帧格式输出进行远传。微控制器用 STM32L010,RS485 通信接口采用 MAX3471,所有芯片均具有低功耗的特点,以减小传感器功耗。整个传感器由电缆提供 3.3 V 直流电源。

传感器工作流程如图 7 所示。传感器上电后,微控制器首先对自身 I<sup>2</sup>C、UART、GPIO 等模块进行配置。I<sup>2</sup>C 模块通信速率设置为 400 kHz, UART 波特率设置为 19 200 波特。接着微控制器由 I<sup>2</sup>C 接口对 LDC1612 的内部控制寄存器进行配置,主要寄存器配置如表 1 所示。

表 1 LDC1612 主要寄存器配置

寄存器地址	寄存器名称	配置值
0x08	RCOUNT0	0x04D6
0x10	SETTLECOUNT0	0x000A
0x14	CLK_DIV0	0x1 002
0x19	ERR_CONFIG	0x0 000
0x1B	MUX_CONFIG	0x020C
0x1E	DRIVE_CURR	0x9 000
0x1A	CONFIG	0x1 601

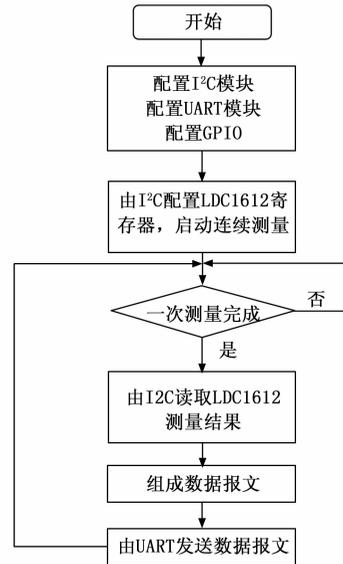


图 7 传感器工作流程图

LDC1612 配制成功后启动连续测量。每次测量完成后,微控制器由 I<sup>2</sup>C 接口读取频率结果,将结果组成数据报文,由 UART 模块输出给 MAX3471 将结果远传,接着等待下一次测量完成,持续工作。

传感器工作时振荡器产生的振荡信号如图 8 所示,示波器通道 1 显示了振荡器的波形,信号幅度 0.8 V,波形稳定,噪声干扰小,信号质量高。

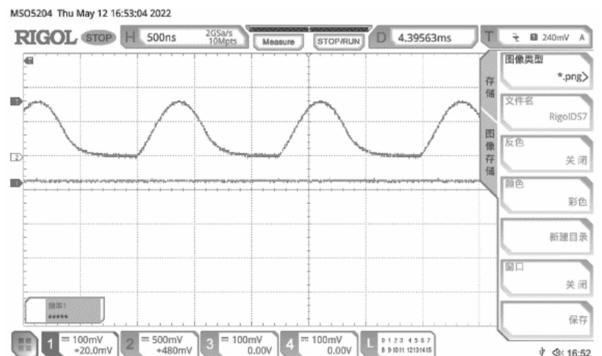


图 8 振荡器输出振荡波形

RS485 通信采用由传感器主动上报方式,采用定长格式报文,如表 2 所示。

表 2 传感器通信帧格式

字节序号	格式	格式
1	帧起始字节	0xA5
2	频率第 1 字节	BCD 码
3	频率第 2 字节	BCD 码
4	频率第 3 字节	BCD 码
5	频率第 4 字节	BCD 码
6	预留字节	0xFF
7	帧校验字节	8 bit CRC
8	帧结束字节	0x5A

### 3 平面传感器实验

根据电路板大小, 再次 3D 打印一个由树脂材料的壳体, 用环氧树脂将传感器电路密封于内部。完成后的传感器, 尺寸  $76\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ 。将光滑的树脂面作为测量面, 正对检测目标体。线圈与检测目标体的最小距离  $2.5\text{ mm}$ , 也就是传感器测量面与检测目标体间隙为  $0$  时, 线圈与检测目标体的距离为  $2.5\text{ mm}$ 。

#### 3.1 传感器静态测量

采用与 1.3 相同的测试工具, 分别在空气和水中对不同间隙下传感器的输出结果进行记录, 结果如图 9 所示。水泵轴承间隙的应用中为了保护传感器免受转轴转动摆动的冲击, 预留超过间隙距离。因此目标导体从  $3\text{ mm}$  处开始测试传感器。水泵轴承间隙不超过  $1\text{ mm}$ , 因此实验限定目标导体最远距离为  $4.5\text{ mm}$ 。空气中测量, 目标导体在  $dis=3\text{ mm}$  位置, 对应的传感器输出频率值为  $1.032\ 930\text{ MHz}$ , 在  $dis=4.5\text{ mm}$  位置对应的传感器输出频率值为  $1.020\ 276\text{ MHz}$ 。在水中测量, 目标导体在  $dis=3\text{ mm}$  位置, 对应的传感器输出频率值为  $1.032\ 660\text{ MHz}$ ,  $dis=4.5\text{ mm}$  位置对应的传感器输出频率值为  $1.020\ 280\text{ MHz}$ 。当距离较远时, 水中测量结果和空气中基本相同, 当间隙减小, 测量结果变大。水中测量结果与空气中结果偏差也加大。且空气中的测量结果大于水中的测量结果。由 1.3 节对电涡流线圈的阻抗测量结果可知, 电涡流线圈的电感量受水的影响会有所增加, 因此振荡频率有所下降。在  $dis=4.5\text{ mm}$  位置, 水中测量的误差为  $0.002\text{ mm}$ ; 在  $dis=3\text{ mm}$  位置水中测量的距离误差达到  $0.024\text{ mm}$ 。轴承间隙测量误差需要满足  $0.02\text{ mm}$  以内精度。在  $dis=3.5\text{ mm}$  位置空气和水中的测量频率值分别为  $1.027\ 597\text{ MHz}$  和  $1.027\ 460\text{ MHz}$ , 距离测量误差  $0.014\text{ mm}$ 。因此将目标导体工作区间设定在  $3.5\sim 4.5\text{ mm}$ 。将这一区间的静态测量结果作为传感器输出与实际距离的对应关系依据。

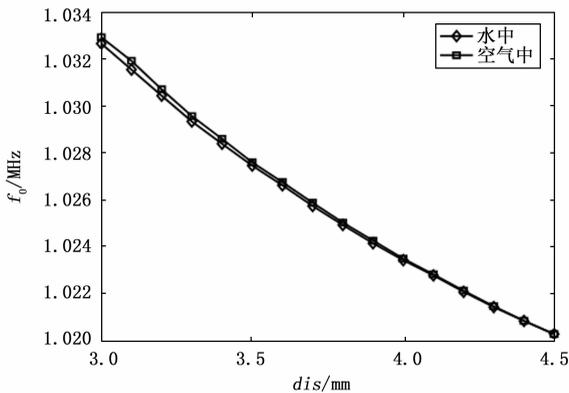


图 9 传感器在空气和水中的静态测量结果

#### 3.2 传感器动态测试

实验室中为了评估传感器在转轴转动情况下的动态测量性能, 搭建由电机、减速机和转轴组成的实验环境。实验装置中转轴表面经过研磨处理, 粗糙度达到  $Ra0.3$ 。转轴

两端采用金属轴承将转轴限定于  $0.3\text{ mm}$  的范围内转动。转轴转速由调速器设定为  $120\sim 150\text{ r/min}$ 。将两个传感器测量部位正对转轴安装, 由支架固定, 传感器测量面距离转轴表面  $1.2\text{ mm}$ 。

数据采集系统如图 10 所示。各个传感器汇集于一个 RS485 集中器。RS485 集中器可汇聚 4 路传感器, 它对各个传感器的数据同步处理, 统一将 4 个传感器的测量结果发送给采集计算机。实验室测试时安装了两个传感器, 得到两路采集的原始测量信号, 如图 11 (a) 所示。两个传感器中振荡信号频率不同, 第 1 路传感器的频率范围在  $1.015\ 6\sim 1.017\ 1\text{ MHz}$  之间, 第 2 路传感器的频率范围在  $1.021\ 5\sim 1.023\ 3\text{ MHz}$  之间。一方面原因是传感器谐振电路中采用的电容  $C$  本身有误差; 另一方面原因是传感器电路板在进行封装时与传感器外壳表面有误差导致与转轴的初始安装距离有误差。实验采集了转轴旋转—停止—旋转的过程波形。波形中数值不变部分是转轴停止转动的情况, 起伏变化部分是转轴旋转时的情况。波形起伏呈现正弦波, 且波形随着转轴转动呈现周期性的变化, 变化周期大约  $0.36\text{ ms}$ , 相当于转速  $168\text{ r/min}$ 。因为两个传感器是正对安装的, 所以它们的信号输出波形呈现峰谷相对的特点。根据两个传感器静态测量结果, 计算得到传感器测量的实际间隙, 如图 11 (b) 所示。由图可知转轴旋转过程中 2 个传感器得到的间隙分别在  $1.08\sim 1.38\text{ mm}$  和  $1.09\sim 1.38\text{ mm}$  之间变化, 间隙变化范围分别为  $0.29\text{ mm}$  和  $0.3\text{ mm}$ , 结果与机械特性一致。

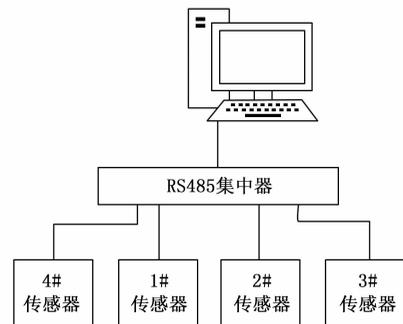


图 10 间隙在线测量装置连接原理

### 4 水泵橡胶轴承间隙在线测量试验

用于传感器试验的是一台立式轴流泵, 叶轮直径  $700\text{ mm}$ , 转轴直径  $90\text{ mm}$ , 材料是  $45\#$  钢。轴承橡胶内壁与转轴的初始安装要求双边间隙  $0.5\text{ mm}$ , 考虑到橡胶浸水后会产生膨胀, 实际安装时留有余量, 间隙会达到  $0.6\text{ mm}$ 。传感器安装于转轴表面的光滑部位外侧。根据传感器尺寸加工一个带传感器安装槽的水泵下导轴承, 4 个传感器安装槽位于轴承内壁四周,  $90^\circ$  等间隔排列。加工一批传感器, 选择 4 个传感器分别经过实验室静态测量获得标定数据后嵌入安装槽内, 如图 12 所示。为了保护传感器, 同时为了减小水对测量结果的影响, 传感器测量面相比轴承橡胶内

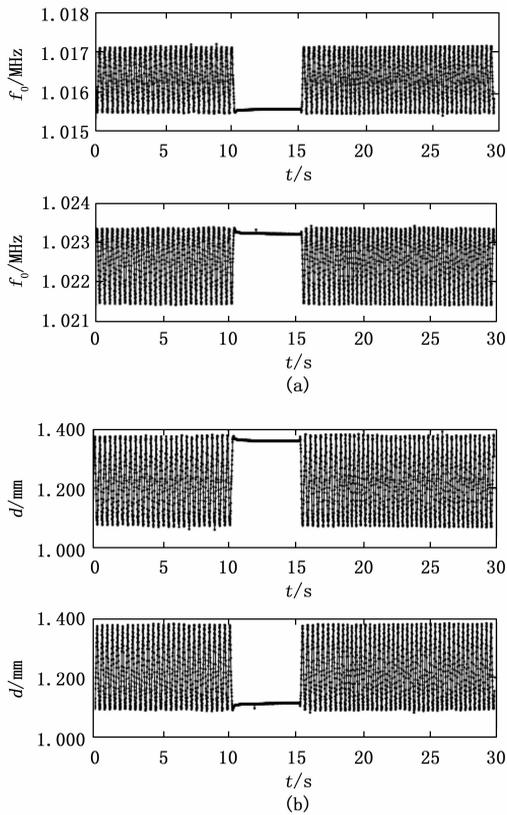


图 11 动态测试传感器输出和间隙计算结果

壁远离转轴 1 mm 左右。传感器信号线经水泵外壳孔引出到地面，然后 RS485 集中器将数据汇集后发送给测试计算机。水泵驱动电机是定速异步电机，额定功率 160 kW，额定工作电流 315 A，额定转速 740 r/min。传感器在每秒 100 采样的情况下，相当于在转轴上每周采集 8 点位。试验水泵出口有调节阀，可模拟不同工况。

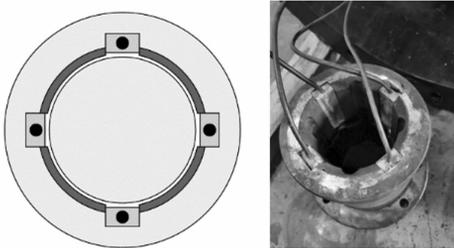


图 12 传感器布置和已安装传感器的橡胶轴承

传感器安装过程中一个传感器发生故障，其他 3 个安装后正常工作，所以试验中仅采集到 3 个传感器数据。水泵安装结束后，轴承和传感器浸没于水泵试验台的水中，48 小时后开始试验。水泵由控制器指令控制执行启动、运行与停机。

图 13 展示了传感器采集的水泵启动过程。图 13 (a) 是传感器的输出频率值，频率值越大，传感器距离转轴越近，反之传感器距离转轴越远，频率变化范围反映了轴承

间隙的变化。水泵启动之初，转速较低，波形变化较慢，之后加快。启动指令发出后大约 2.4 s 电机达到额定转速，此时工作电流 315 A。启动过程中，传感器输出频率变化幅度值逐步加大，达到额定转速后变化幅度基本恒定。根据实验室标定结果，得到传感器与转轴间隙大小，如图 13 (b) 所示，间隙变化范围最大达到 0.7 mm。橡胶轴承具有一定弹性，转轴转动过程中会对橡胶产生压缩，因此间隙变化范围会超过设计的 0.6 mm。

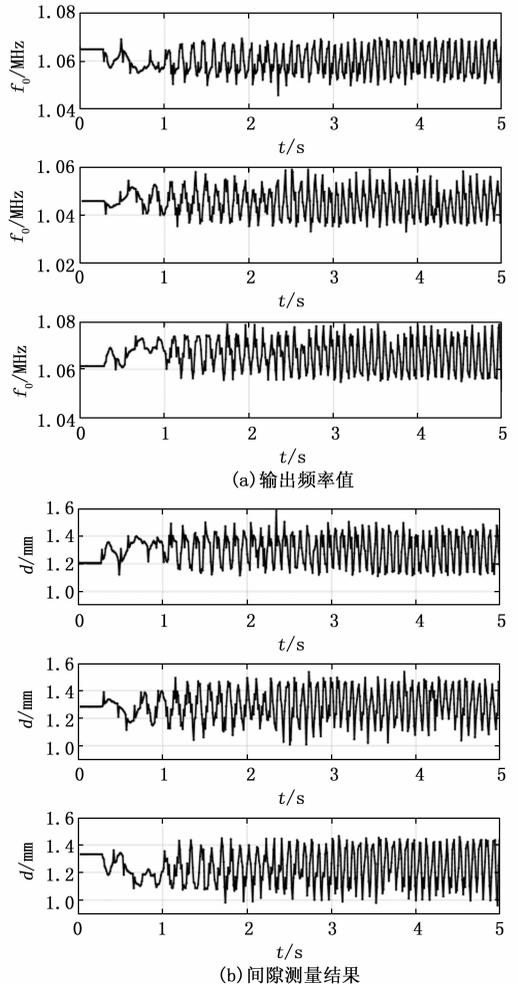


图 13 水泵启动过程传感器波形与间隙测量结果

水泵电机在额定工作状态下获得的传感器输出如图 14 所示。波形变化周期与水泵转速一致。由于传感器是针对 150 r/min 的水泵机组设计，试验水泵转速 740 r/min，每周采集仅有 8 点，所以采集到的信号表现为不等幅。传感器通道 1、2、3 的信号存在时序关系，位置上通道 2 居于通道 1 和通道 3 之间，所以通道 1、2、3 分别先后达到峰值和谷值。根据实验室标定结果，得到传感器与转轴间隙变化，运行过程中轴承间隙变化范围保持在 0.7 mm 以内。

水泵运行 40 分钟后，控制器发出停机指令。由于转轴具有较大惯性，水泵停机过程较长。图 15 显示了停机指令下达后 3 分钟水泵转速较低时的传感器波形和间隙测量结

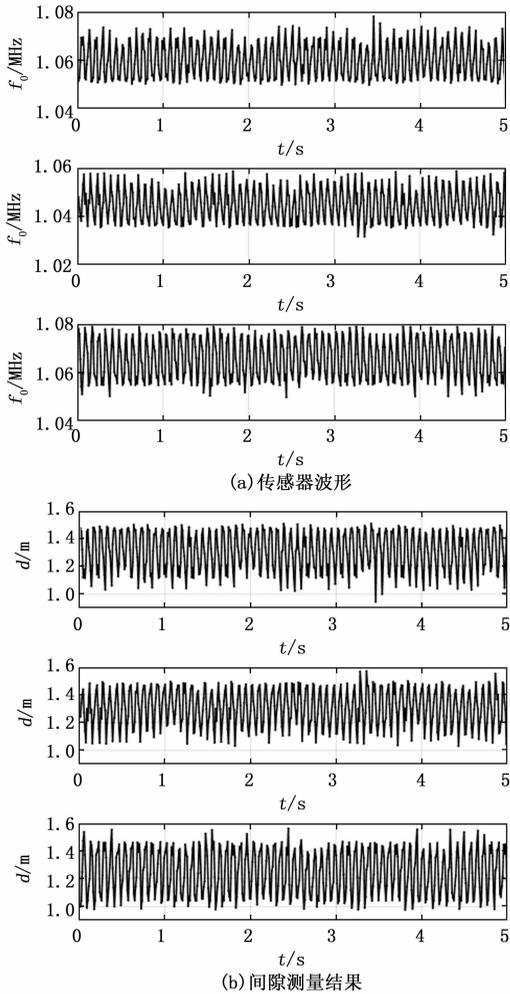


图 14 水泵运行过程传感器波形与间隙测量结果

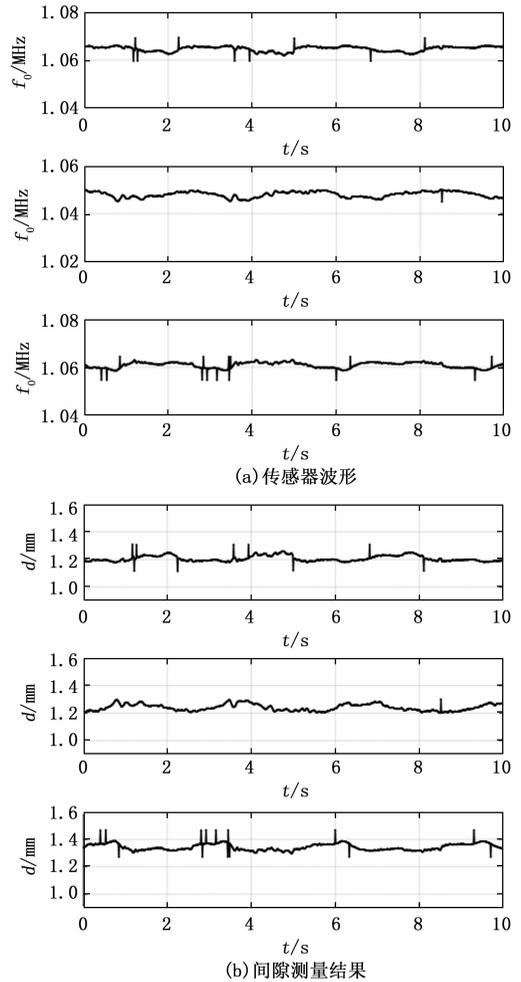


图 15 水泵停机过程传感器波形与间隙测量结果

果, 此时转速大约 3 r/s。传感器输出变化范围大幅度减小, 轴承间隙变化减小到 0.1 mm 左右。

## 5 结束语

本文基于电磁分析工具设计了平面电感线圈, 由电磁分析获得了电感线圈的电感量以及在 2 mm 范围内的电感变化量, 接着对线圈密封处理, 分别在空气和水中对线圈的电涡流阻抗进行测量, 比较在空气和水两种介质的阻抗不同。然后设计一种探头与测量电路一体的电涡流传感器, 频率工作设定在 1 MHz 附近。它体积较小, 数字信号输出, 抗干扰能力强。传感器密封处理后可在水下工作。分别在空气和水两种介质中用 45 # 钢对传感器的距离检测特性进行试验, 结果显示所设计传感器在距离检测目标 1.5 mm 位置处 1 mm 范围内传感器测量几乎不受水的影响, 测量精度达到 0.02 mm。实验室将一对传感器安装于 150 r/min 的转轴附近对传感器进行动态测试, 传感器可正常工作, 间隙测量结果与机械测量结果相符。最后将 4 只传感器等角度间隔布置在实验水泵上, 在水泵开机、运行和停机 3 个工作过程进行试验, 试验结果显示传感器工作正常, 可以检测到不同过程轴承间隙变化情况, 间隙测量精度满足水泵

橡胶轴承间隙在线测量要求。

## 参考文献:

- [1] 覃文源, 杨国峰, 郑洪波, 等. 水润滑橡胶轴承摩擦特性的实验研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36 (17): 42-47.
- [2] 郑建波, 叶晓琰, 胡敬宁, 等. 不同进水压力下水润滑轴承润滑特性试验研究 [J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36 (7): 599-606.
- [3] 廖大鑫, 文薄程, 周广武. 硬度对螺旋槽水润滑橡胶推力轴承摩擦磨损性能影响的实验研究 [J]. 润滑与密封, 2021, 46 (10): 25-30.
- [4] 谢劲松, 杨飞, 訾艳阳. 磨损水润滑橡胶轴承承载特性研究 [J]. 振动与冲击, 2020, 39 (24): 225-231, 270.
- [5] 李耀辉, 朱双良. 立式水泵机组轴系摆度形态的试验分析方法 [J]. 水力发电, 2017, 43 (9): 77-80.
- [6] 罗孝兵, 王建勇, 蓝彦, 等. 一种电涡流式摆度监测传感器温度综合补偿方法 [J]. 水电与抽水蓄能, 2016, 2 (2): 89-92, 110.
- [7] 谭丕成. 大型灯泡贯流式水轮发电机组摆度在线监测系统改造分析 [J]. 水电站机电技术, 2013, 36 (S1): 18-23.

(下转第 75 页)