

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210335

基于梳状式电容传感器的滑油磨粒检测方法*

贾宝惠, 丁梓航, 肖海建, 耿亚南

(中国民航大学航空工程学院 天津 300300)

摘要:航空发动机旋转部件的磨损是影响其寿命的重要因素,而滑油内磨粒的参数能直接反映部件的磨损状态,磨粒监测已是发动机智能诊断的关键技术。提出一种梳状式电容传感器,采用内置多平行板电极结构,分析磨粒检测机理,通过数值模拟分析结构优化方向,确定最佳参数。搭建实验平台进行试验,结果表明,当铁磨粒直径从0.3 mm增至0.9 mm时,电容差值从3 Ff增至17 Ff;当磨粒个数从1增至4时,差值与数量近似成正线性关系,最大增幅在200%~350%左右;电源频率从10 kHz增至100 kHz时,差值降幅在36%~67%。研究表明梳状电容传感器内部电场均匀度较好,利于提高结果一致性与磨粒检出率,可在10 mm管路中检测200 μm以上的磨粒,具有较好的区分度,可为航空发动机滑油磨粒监测研究提供技术支持。

关键词: 润滑油;磨粒检测;在线监测;电容传感器

中图分类号: TP212 TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 590.30

Detection method of lube wear particle based on comb type capacitance sensor

Jia Baohui, Ding Zihang, Xiao Haijian, Geng Yanan

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The wear particle monitoring technology has become a key part of the intelligent diagnosis of aero-engine, because the wear of rotating parts of aero-engine is an important factor that affects the lifespan of aero-engine. The parameters of the wear particle in the lubricating oil can directly reflect the wear state of rotating parts. In this article, a comb type capacitance sensor is proposed, which uses the structure of built-in multi-parallel plate electrodes. On the basis of analyzing the wear particle detection principle of the sensor, we determine the structural optimization direction and the optimal parameter through numerical simulation. Experimental results show that when the diameter of iron wear particles increases from 0.3 mm to 0.9 mm, the variation in capacitance increases from 3 Ff to 17 Ff. When the number of wear particles increases from 1 to 4, the variation in capacitance is approximately in a positive linear relationship with the particle number, and the maximum increase ratio is about 200% to 350%. When the power frequency increases from 10 kHz to 100 kHz, the drop ratio of variation in capacitance is 36% to 67%. The results show that the comb type capacitive sensor can improve the uniformity of the internal electric field, which could improve the consistency of the results and the detection rate of wear particles, and detect 200 μm diameter particles in 10 mm diameter pipe which shows a good discrimination in outcome. This technology can provide technical support for the monitoring research of aero-engine oil wear particles.

Keywords: lubricating oil; abrasive particle detection; in-situ monitoring; capacitive sensor

0 引言

近年来随着国产航空发动机的研制水平逐步向国际先进水平靠拢,航空发动机的持续安全工作问题也成为

了重要研究课题。机械故障是航发故障问题中发生率较高的类型,而异常磨损则是其中一类高发故障,发动机空中停车故障的37.5%和提前换发故障的60%都是由发动机齿轮、轴承等异常磨损造成的。发动机旋转部件的磨损产生的磨粒的各类特征参数,可以反馈零部件的磨损类型、程度与位置等信息。

当发动机旋转部件状态良好时,产生的磨粒大小在 $1\sim 10\ \mu\text{m}$;当部件有异常情况产生时,磨粒尺寸大小将在 $20\sim 100\ \mu\text{m}$;一旦磨粒大小超过 $100\ \mu\text{m}$,此时部件将面临失效的危险^[1]。因此针对 $20\sim 100\ \mu\text{m}$ 的磨粒进行在线监测是当前重点研究方向。在线监测主要依靠磨粒的声、光、电、磁等类型的响应数据来判断磨粒的数量和种类,其中基于电磁学原理的传感器分为电容传感器^[2-3]、电感传感器^[4]、静电传感器^[5]等类型。

基于电容传感器的滑油磨粒在线监测主要分为电容库尔特计数法^[6-9]、集成于滑油管道的电容传感法^[10-12]和电容阵列成像法^[13-16]。基于库尔特计数原理的电容传感器是在微流道基础上检测磨粒。微流道的直径通常在数十微米至数百微米内,能监测到的磨粒大小的范围为 $0.01\sim 0.04\ \text{mm}$,敏感度较高^[17],但存在流量与检测限上的限制,应用范围受限。基于层析成像技术的传感器通过阵列式电容传感器完成磨粒图像重建的任务。当磨粒进入传感器,通过使用LBP^[18]、Tikonov^[19]等算法,依据每个极板对之间的电容变化值来进行图像重建,从而获得磨粒二维轮廓等参数。但是该类传感器目前的检测限仅限于较大尺寸的磨粒,无法检测尺寸小于 $0.1\ \text{mm}$ 的磨粒。集成于滑油管道的电容传感器的相关研究目前比较成熟。何永勃等^[20]设计了一种弧状极板式电容传感器,通过差分放大器和相敏解调器来检测磨粒引起的微小电压变化。Wang等^[21]和朝志斌等^[22]提出了一种同轴电容传感器,其中内芯和外芯构成传感器的两极,通过识别两极间的电容的变化来监测磨粒的存在。两种传感器设计的主要不足在于电场分布不均匀,磨粒的径向位置会导致影响电容变化值,可能会导致传感器的磨粒漏检。

本文提出一种集成于航空发动机滑油主管道上的梳状电容传感器设计方法,首先建立磨粒检测机制的模型,分析传感器设计中各参数对敏感度的影响。然后利用COMSOL多物理仿真方法进行数值模拟,获得传感器设计的最终参数。最后制作了梳状电容传感器,并搭建试验平台,分别进行无磨粒的水介质、滑油介质的电源频率变化实验与含磨粒的滑油介质的电源频率变化实验,结果表明梳式电容传感器设计具有应用前景。

1 传感器理论模型

梳状式电容传感器是基于平行板电容传感器与微流道传感器的理念改进而来的,基本结构如图1(a)所示。平行板电容传感器的检测磨粒的简化模型如图1(b)所示。

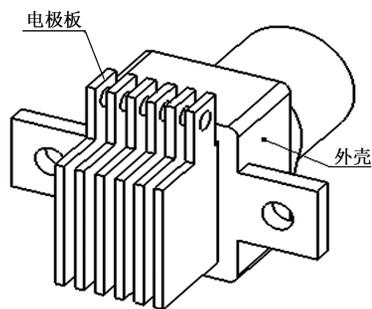
在理想平行电容器中,假设磨粒形状如图1(b)所示,当磨粒进入电场内部时,可将此时电容器的电容计算简化为磨粒表面与极板的对应面积组成的电容以及磨粒

上下表面之间形成的电容等3个电容的串联,然后串联部分与其余部分的再形成并联。

视磨粒为金属材质,介电常数为 ε_1 ,由于静电屏蔽效应,不用考虑磨粒内部的电场,此时串联部分的电容 C 为:

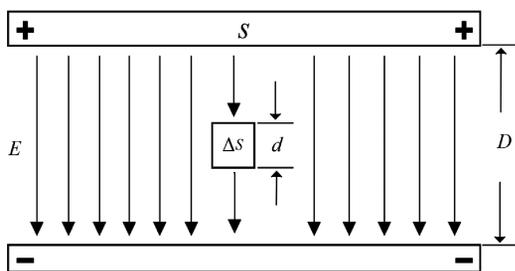
$$C = \frac{\varepsilon_1 \Delta s}{D - d} \quad (1)$$

式中: ε_1 是滑油的介电常数, Δs 是磨粒的上、下表面的面积, D 是极板间距, d 是磨粒上下表面间距。



(a) 梳式电容传感器示意图

(a) Diagram of comb type capacitance sensor



(b) 平行板电容磨粒检测模型

(b) Wear particle detection model based on parallel plate capacitance

图1 梳式电容检测原理示意图

Fig. 1 Diagram of comb capacitor detection principle

结合理想平行板电容器的电容计算公式,由金属磨粒进入引起的电容变化值 ΔC 为:

$$\Delta C = \frac{\varepsilon_1 d \Delta s}{D(D - d)} \quad (2)$$

梳假设一共有 $(N + 1)$ 块极板将一定的滑油流动区域分为 N 块,板间距均为 D ,电容总值为 C_1 。当选择极板间电路连接方式为并联形式时,传感器灵敏度为:

$$k_1 = \frac{\Delta C}{C_1} = \frac{d \Delta s}{N(D - d)S} \quad (3)$$

式中: S 为极板面积。选择串联形式时,灵敏度为:

$$k_2 = \frac{\Delta C}{C_1} = \frac{d \Delta s}{N(D - d)S + (N - 1)d \Delta s} \quad (4)$$

对比式(3)、(4)得出当极板数相同时, $k_1 > k_2$,故极板间的电路连接方式应选择并联。

由于本文使用的 LCR 数字电桥(JK2817B)进行电容测量,其测量原理是通过测量阻抗值来计算等效电容,阻抗值 Z 与电容总值 C_1 的关系如下:

$$Z = \frac{R + j \times R^2 \omega C_1}{\omega^2 C_1^2 R^2 + 1} = Z_R + j \times Z_I \quad (5)$$

式中: Z_R 、 Z_I 分别为阻抗的实部与虚部, ω 为激励电流的角频率。 ω 的表达式为:

$$\omega = 2\pi f \quad (6)$$

其中, f 为电流频率。结合式(5)、(6)可得出下式^[23]:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f} \times \left(\frac{Z_I}{Z_R^2 + Z_I^2} \right) \quad (7)$$

另一方面,在交变电流激励下,磨粒与滑油应使用复介电常数 ε_{lc} 与 ε_{rc} , 分别为:

$$\varepsilon_{lc} = \varepsilon_l - j \times \frac{\sigma_l}{\omega} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon_r - j \times \frac{\sigma_r}{\omega} \quad (9)$$

式中: σ_l 、 σ_r 分别为磨粒与滑油的电导率。

由 Maxwell-Garnett 理论可得磨粒与滑油的混合复介电常数为:

$$\varepsilon_{mc} = \varepsilon_{rc} + 3\varphi \varepsilon_{rc} \left(\frac{\varepsilon_{lc} - \varepsilon_{rc}}{\varepsilon_{lc} + 2\varepsilon_{rc}} \right) \quad (10)$$

其中, φ 为磨粒体积与电容区域体积之比。故理想平行板电容器的容抗可由式(11)计算:

$$Z_c = \frac{1}{j \times \omega C} = \frac{D}{j \times \omega \varepsilon_c S} \quad (11)$$

其中, ε_c 为介质的复介电常数。由阻抗的并联计算规则可得,无磨粒时,梳式电容的总阻抗 Z_{0c} 为:

$$Z_{0c} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{D}{j \times f \varepsilon_{rc} S N} \quad (12)$$

同理当 n 个检测通道存在磨粒时,总阻抗 Z_{lc} 为:

$$Z_{lc} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{D}{j \times S [n \varepsilon_{mc} + (N - n) \varepsilon_{rc}] f} \quad (13)$$

结合上述公式可以得出,除去板间距、磨粒尺寸等参数外,电源频率、极板个数等参数同样对电容变化值具有影响。

2 数值仿真实验

除去上节所述的一些基本影响因素之外,极板厚度对滑油的流动粘滞作用、极板厚度对电场边缘效应的影响以及磨粒形状对局部电场、电势场分布的影响也可能对传感器检测值产生影响。因此从多极板的布局设计考虑,本文主要探讨极板个数、间距以及厚度等参数的影响。

传感器仿真基础几何模型如图 2 所示,由 3 部分组成:内部的电极板、外部的接地壳壁、以及两者之间的绝缘层。在仿真过程中使用控制变量法分别改变极板个数、极板间距、极板厚度等参数,来确定最佳设计范围。

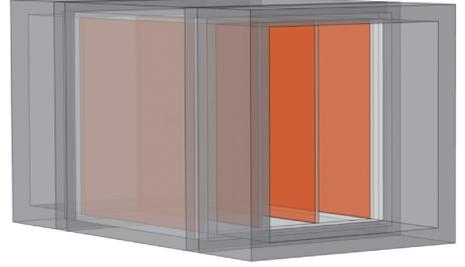


图 2 传感器几何模型

Fig. 2 Sensor geometry model

2.1 滑油内无磨粒时的电场分析

考虑到实际发动机滑油管路实际尺寸往往在 10 mm 左右,传感器仿真几何模型的整体计算域尺寸为长 20 mm,横截面长度尺寸控制在 10~15 mm 之内,其中高 12 mm,宽由极板的结构设计参数决定,即平行板的厚度、数量以及间距等参数。内部的电极板的尺寸设计成长与高均为 10 mm。

首先以极板厚度为 0.2 mm,极板间距为 3 mm,极板个数为 4 的传感器模型来分析梳式电容电场分布规律。仿真结果如图 3 所示。图 3(a)、(b)为传感器通道横截面电场仿真结果,结果表明,由于外壳壁接地的原因,在正极板边缘靠近外壳的区域内,局部电场强度明显强于内部的均匀电场,且在贴近上下内壳面的区域内,从正极板到负极板,电势衰减速度增大,电场强度沿电势降方向减小;板间其他地方电势近似呈线性下降,电场强度均匀分布。整体来看,传感器内部电场强度分布均匀。由边缘效应的相关理论可知,可通过改变极板与外壳的距离与板厚的方式来进一步优化电场分布。仿真时,施加 100 kHz 的 2 V 电源,网格共 454 931 个单元。

2.2 磨粒位置对电容电场的影响

在上述模型基础上进行金属磨粒位置对传感器电场影响的仿真。结果表明,在高频电源激励下,磨粒在板间的位置的变化对电场的变化影响极小。当磨粒靠近电极板边缘效应明显的区域时,电容的波动幅度与频率有所增加。但是在 100 Hz 的低频电源激励下,当磨粒为方块状时,其在板间引起的电场变化幅度和其与正极板的距离成反比,和其与极板边缘的距离成正比,且电场的变化幅度也显著提高。仿真结果如图 4、5 所示,图 4 为磨粒在不同位置引起的电容变化,图 5 为电源频率不同时方块磨粒引起的电场变化对比。考虑到实际实验验证中设备的功能限制,低频电源下仿真实验仅作参考,下一步仿真实验仍以高频激励电源为主。

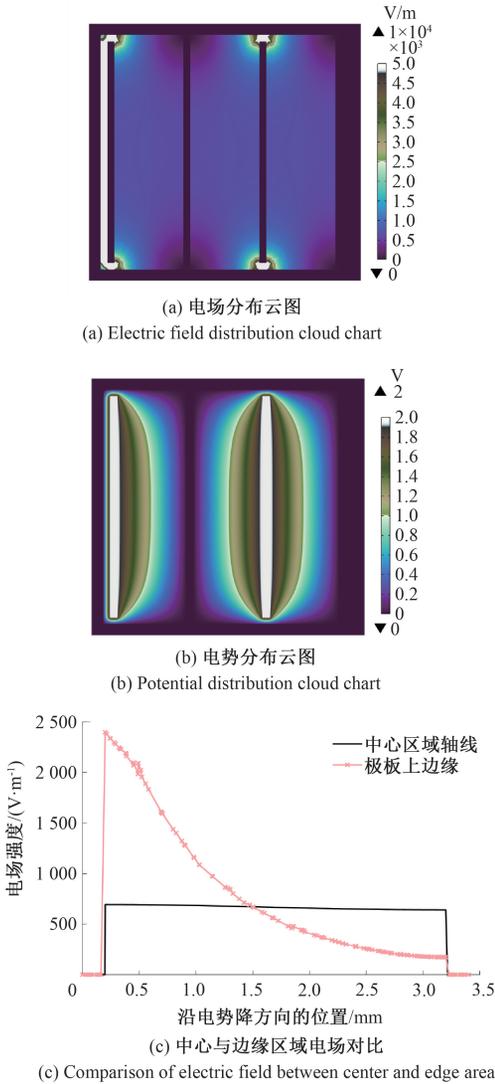


图3 电场、电势仿真结果

Fig. 3 Electric field and potential simulation results

2.3 不同模型参数下磨粒对电场的影响

依据上一小结的结论,选取极板间通道的中心点来观察不同的极板间距、极板个数、极板厚度等3个参数下磨粒对传感器内部电场的影响,从而确定传感器参数。考虑管道直径的限制,仿真时极板间距的范围在1~3 mm,极板个数的范围为4~8个,极板厚度在0.2~0.6 mm,保持磨粒直径为300 μm,依控制变量法来改变各个参数。图6是极板厚度为0.2 mm,极板数为4时不同板间距模型下磨粒附近的电场强度仿真数据与传感器电容值,图7是极板厚度为0.2 mm,板间距为1.5 mm时不同极板数模型下磨粒附近的电场强度仿真数据传感器电容值,图8是板间距为3 mm,板数为4时不同板厚模型下磨粒附近的电场强度仿真数据传感器电容值。结果表明,当极板间距减小时,磨粒引起的电

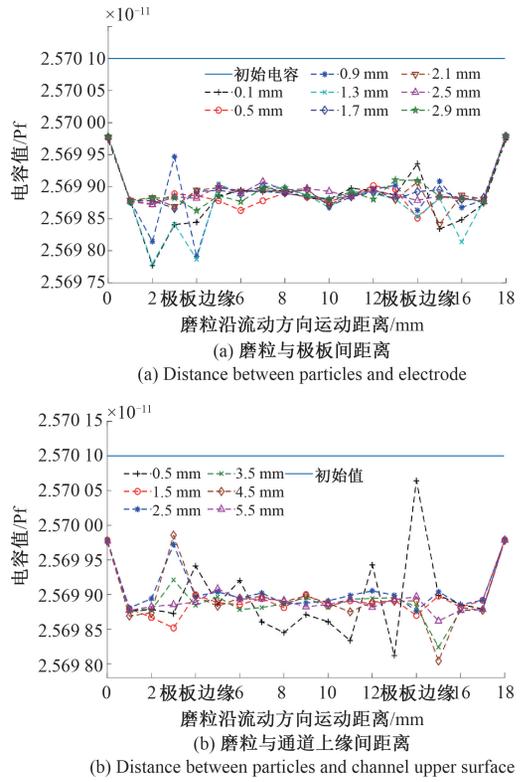


图4 磨粒位置对电容的影响

Fig. 4 Effect of abrasive particle position on capacitance

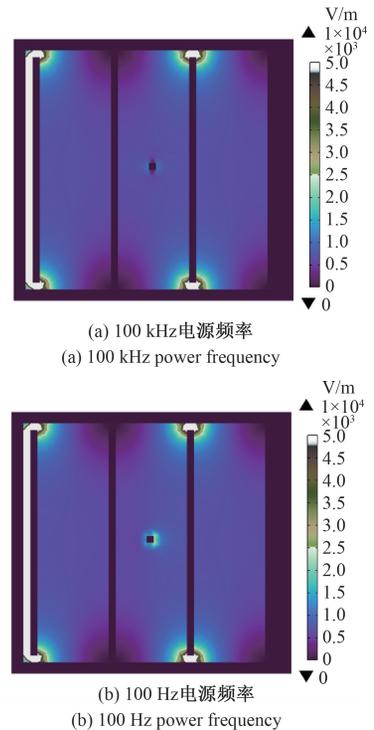


图5 电源频率对传感器电场强度的影响

Fig. 5 Influence of power frequency on electric field intensity of sensor

容变化值逐渐增大,电场强度的最大增大幅度维持在 180% 至 190% 之间;当极板个数增大时,电容变化值先增大后近似保持不变,而电场强度的最大增大幅度基本维持 180% 左右;当极板厚度增加时,电容变化值与电场变化幅度近似维持不变。

考虑管径限制、滑油流动粘滞的影响和加工设备精度问题,选取板厚为 0.5 mm,板间距为 1.5 mm,极板数为 6 个的传感器模型进行实例验证,电源电压为 1 V。

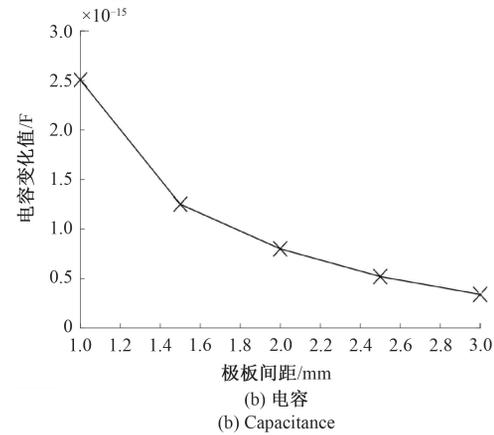
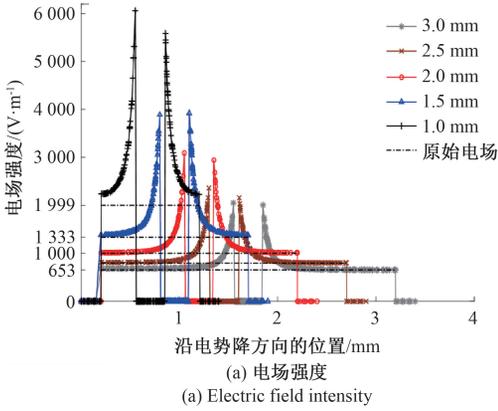


图 6 不同板间距的影响
Fig. 6 Effect of different plate distance

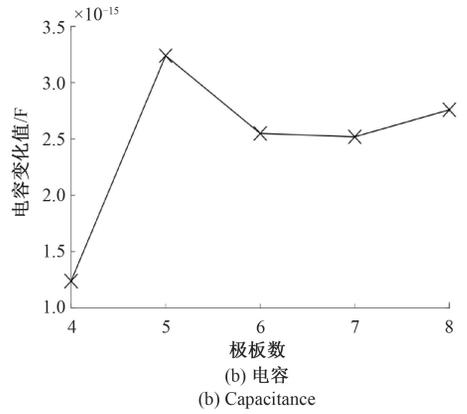
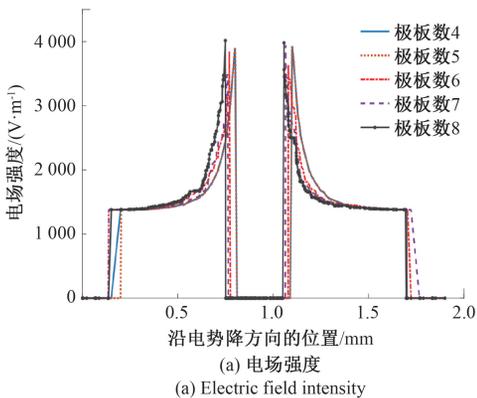


图 7 不同极板数的影响
Fig. 7 Effect of different plate numbers

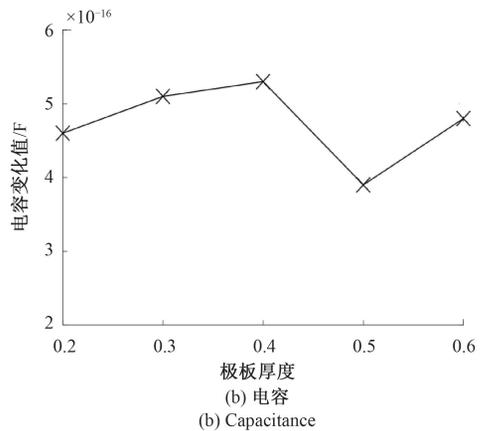
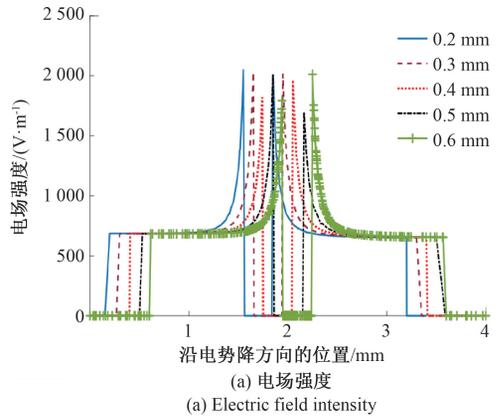


图 8 不同板厚的影响
Fig. 8 Effect of different plate thickness

3 实验验证

3.1 测试平台搭建

根据上一节分析,电极板使用紫铜作为材料,极板长 20 mm、高 14 mm、厚 0.5 mm,并留有接线端口,端口宽

4 mm,高6 mm,内有直径2 mm的圆孔,电极板实物如图9(a)所示。确定电极板个数为6,板间距1.5 mm,使用高精度3D打印机制备传感器的外壳,实物如图9(b)所示。最后将正、负电极板与传感器外壳按照图9(c)形式进行交叉装配。

实验时,采用LCR数字电桥(JK2817B)作为电容测量仪器。该仪器可施加50~100 kHz的交流电,电平范围在0.1~1 V之间,可以直接测量电容,在高频激励电源下测量精度为1 Ff,在低频激励电源下测量精度为0.1 Pf与1 Pf。装置如图9(d)所示。实验使用磨粒为球状铁磨粒,直径在0.3~0.9 mm之间。

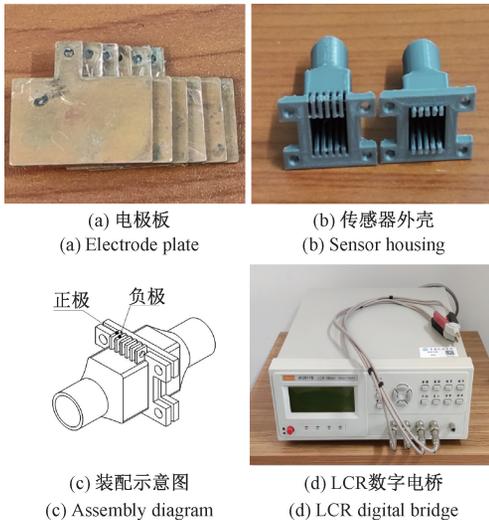


图9 实验设备

Fig. 9 Experimental equipment

3.2 磨粒检测实验

由于实验条件的限制,本文选择自由落体的形式放入磨粒,以初步模拟流体流动。同时由于空气的摩擦系数太小,磨粒通过传感器的时间太短(约0.009 s),LCR数字电桥响应速度不足,因此仅进行液体介质的相应实验,备选介质为水与润滑油,二者基本参数如表1和2所示。

表1 实验用蒸馏水参数

Table 1 Parameters of distilled water for experiment

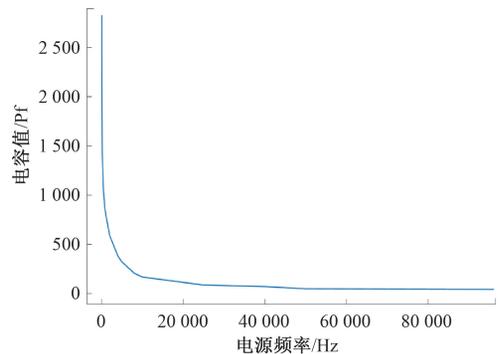
基本参数	参数值
pH值	6.76
电导率(25±1℃)/(μs·cm ⁻¹)	0.5
Fe/(μg·L ⁻¹)	16.7
Cu/(μg·L ⁻¹)	2.6
相对介电常数	80

表2 润滑油基本参数

Table 2 Basic parameters of lubricating oil

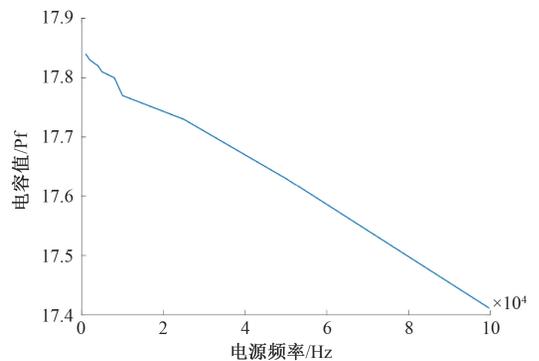
基本参数	参数值
密度(15℃)/(kg·L ⁻¹)	0.872
粘度(40℃)/(mm ² /s)	32
粘度(100℃)/(mm ² /s)	5.4
粘度指数	106

通过无磨粒实验发现,无论介质为水还是滑油,随着频率的增大,传感器检测电容减小,总体趋势如图10所示。但是当介质为水时,在低频电源下,检测电容值存在小幅波动,而且导电性更高的水介质的检测电容值更高,变化幅度也越大。原因可能是电源在低频时频率有小幅波动,导致蒸馏水的复介电常数变化。除此之外水介质的试验值更易受振动的影响。考虑到磨粒引起的电容变化幅度较小,为保证数据的准确性,在后续实验中,仅以滑油为基底进行实验。



(a) 蒸馏水介质下的电容值

(a) Capacitance value in distilled water medium



(b) 滑油介质下的电容值

(b) Capacitance value under lubricating oil medium

图10 不同频率与介质下的电容值

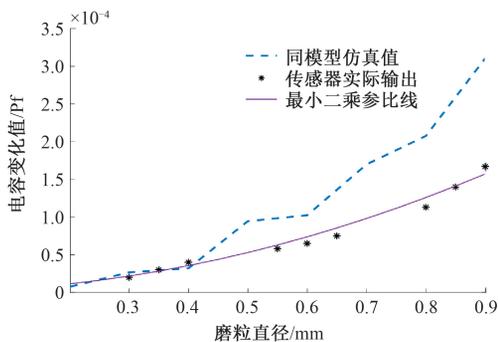
Fig. 10 Capacitance values at different frequencies and mediums

分别改变磨粒尺寸、数量以及电源频率,研究其对输出值的影响,结果如图11所示。由图11(a)中散点图与二次最小二乘参比线可以看出随着磨粒直径的增大,电

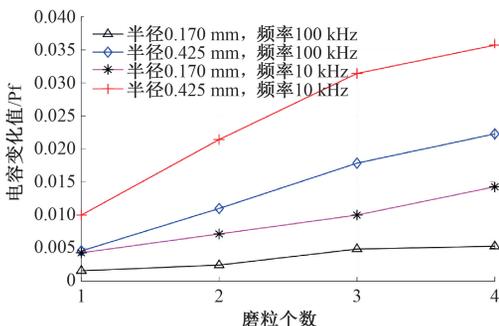
容变化值逐步增大,且当磨粒尺寸越大,电容变化速率越高,该变化趋势同样符合第 1 节中理论公式(2)的特征。同时对比实验数据与仿真数据,磨粒直径在 0.2~0.4 mm 范围内时仿真数据与实验数据比较贴近,当直径超过 0.4 mm 后,仿真数据与实验数据存在明显差别,仿真数据的增大速率偏大,对比其他论文^[24]仿真数据与实际数据的差别,本文重点差别在可接受范围内。

结合国家标准 GB/T 18459—2001 中的传感器符合度性能指标的计算规定,得出传感器二次最小二乘符合度 C_s 为 11.71%,比国标 GB/T 35086—2018 中的 10%符合度标准高约 17%,考虑到传感器外壳的制备精度及实验室环境的影响,该符合度可以接受并具备提升空间。

由图 11(b)可以看出,随着磨粒的数量的增加,电容变化值增大,两者之间近似呈现为线性关系。而且当电源频率从 100 kHz 降至 100 Hz 时,磨粒引起的电容变化值有一定的提高,结合第 2 节中图 5 中高、低频电源下磨粒周围的电场强度的区别,推断可以通过降低电源频率使梳式电容传感器的灵敏度获得一定程度的提升。



(a) 100 kHz 下磨粒直径对电容的影响
(a) Effect of particle diameter on capacitance under 100 kHz power frequency



(b) 不同频率下磨粒个数对电容的影响
(b) Influence of abrasive particles number on capacitance under different frequencies

图 11 磨粒直径与个数对电容的影响

Fig. 11 Influence of diameter and number of particles on capacitance

4 结 论

本文提出一种新型滑油磨粒在线监测电容传感器,建立电容传感器的磨粒检测工作机制,使用仿真软件进行数值模拟,并分析参数优化方向,结果表明梳式结构使内部电场强度分布较为均匀,能够保证磨粒检测结果的一致性,减小磨粒相对位置带来的影响,降低磨粒漏检率。而磨粒引起的电容变化值主要受板间距和极板数量影响。板间距越小,电容变化值的增加速率越高;随着极板数量的增加,电容变化值先增大后趋于稳定。

搭建实验平台进行验证梳式电容传感器的可行性。结果表明,电源频率为 100 kHz 时,当金属磨粒直径从 0.3 mm 增至 0.9 mm 时,电容变化值从 3 Ff 增至 17 Ff;当磨粒个数从 1 逐个增至 4 时,电容变化值与数量近似成正线性关系,增幅在 66.7%~112.5%之间;电源频率从 10 kHz 增至 100 kHz 时,电容变化值降幅在 36%~67%之间。传感器的二次最小二乘符合度为 11.71%,比 GB/T 35086—2018 的对应要求高 17%,在可接受范围内。结果表明本文的梳式电容传感器设计可以在 10 mm 管道检测出 200 μm 以上的金属磨粒,且具有较好的区分度。

由于实验方案受实验设备的影响有所受限,下一步需要针对低频电源与非铁磁性金属磨粒、非金属磨粒以及介质流动速度等因素进行深入研究,进一步优化传感器检测限。

参考文献

- [1] DU L, ZHU X L, HAN Y, et al. High throughput wear debris detection in lubricants using a resonance frequency division multiplexed sensor[J]. Tribology Letters, 2013, 51(3): 453-460.
- [2] 高鹤明,周弘林,宋晓文,等. 金属颗粒的电容式速度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 60-67.
GAO H M, ZHOU H L, SONG X W, et al. Research on the capacitive velocity measurement method of metal particles[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 60-67.
- [3] LI Y M, WU J, GUO Q. Electromagnetic sensor for detecting wear debris in lubricating oil [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(5): 2533-2541.
- [4] WANG X Y, CHEN P, LUO J F, et al. Characteristics and superposition regularity of aliasing signal of an

- inductive debris sensor based on a high-gradient magnetic field[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(17): 10071-10078.
- [5] 薛倩, 王一虎. 基于FPGA的静电层析成像监测系统研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(8): 53-61.
- XUE Q, WANG Y H. Research on electrostatic tomography monitoring system based on FPGA[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(8): 53-61.
- [6] JONG S Y, JIWON P, HYE R A, et al. Microfluidic airborne metal particle sensor using oil microcirculation for real-time and continuous monitoring of metal particle emission[J]. *Micromachines*, 2021, 12, 825.
- [7] ZENG L, YU Z L, ZHANG H P, et al. A high sensitive multi-parameter micro sensor for the detection of multi-contamination in hydraulic oil[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 282: 197-205.
- [8] SHI H T, ZHANG H P, WANG W Q, et al. An integrated inductive-capacitive microfluidic sensor for detection of wear debris in hydraulic oil[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23): 11583-11590.
- [9] SHI H T, BAI C Z, XIE Y C, et al. Capacitive-inductive magnetic plug sensor with high adaptability for online debris monitoring[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 3507508.
- [10] 何永勃, 姜坤. 基于环状电极的电容式润滑油磨粒检测系统设计[J]. *传感器与微系统*, 2014, 33(1): 82-84, 88.
- HE Y B, JIANG K. Design of capacitance lubricating oil grains detecting system based on ring electrode[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, 33(1): 82-84, 88.
- [11] HAN Z B, WANG Y S, QING X L. Characteristics study of in-situ capacitive sensor for monitoring lubrication oil debris[J]. *Sensors*, 2017, 17(12): 2851.
- [12] ISLAM T, YOUSUF M, NAUMAN M. A highly precise cross-capacitive sensor for metal debris detection in insulating oil[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(2): 025005.
- [13] SUN Y S, JIA L C, ZENG Z M. Hyper-heuristic capacitance array method for multi-metal wear debris detection[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 515.
- [14] 马敏, 王涛. 基于CNN-MSLSTM的航空发动机滑油监测方法研究[J]. *计量学报*, 2021, 42(2): 232-238.
- MA M, WANG T. Research on monitoring method of aeroengine lubricating oil based on CNN-MSLSTM[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2021, 42(2): 232-238.
- [15] 马敏, 郭鑫, 于洁. 改进正则化半阈值算法的ECT图像重建[J]. *仪器仪表学报*. 2022, 43(5): 110-119.
- MA M, GUO X, YU J. ECT image reconstruction based on improved regularized half threshold algorithm[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(5): 110-119.
- [16] 马敏, 于洁. 基于改进联合稀疏电容层析算法滑油监测研究[J]. *推进技术*, 2022, 43(4): 201027.
- MA M, YU J. Lubricating oil monitoring based on improved joint sparse electrical capacitance tomography algorithm[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(4): 201027.
- [17] 王奕首, 吴迪恒, 朱凌, 等. 滑油磨粒在线传感技术研究进展[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(3): 73-83.
- WANG Y SH, WU D H, ZHU L, et al. Progress on on-line sensing technology for wear debris in lubricant[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(3): 73-83.
- [18] 刘再兴, 王海刚. 同心圆环区域电容层析成像传感器数目优化[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(10): 94-104.
- LIU Z X, WANG H G. Optimization of the number of electrical capacitance tomography sensors with concentric annulus structure[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(10): 94-104.
- [19] 郭志恒, 律德财, 邵富群, 等. 基于特征值谱区域优化的Tikonov正则化实现ECT图像重建[J]. *中国电机工程学报*. 2021, 41(19): 6641-6649.
- GUO ZH H, LYU D C, SHAO F Q, et al. Realization of ECT image reconstruction by tikonov regularization technology based on eigenspectrum region optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(19): 6641-6649.
- [20] 何永勃, 徐斌. 基于电容传感器的飞机滑油磨粒检测系统设计[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(10): 112-115.

HE Y B, XU B. Design of aircraft lubricating oil abrasive particles detection system based on capacitive sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(10): 112-115.

[21] WANG Y S, HAN Z B, GAO T, et al. In-situ capacitive sensor for monitoring debris of lubricant oil [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2018, 70 (7): 1310-1319.

[22] 韩志斌, 王奕首, 孙虎, 等. 用于滑油中碎屑在线监测的电容传感器设计与实现[J]. 润滑与密封, 2018, 43(6): 102-107, 113.

HAN ZH B, WANG Y SH, SUN H, et al. Design and implement of in-situ capacitive sensor for monitoring debris in the lubricant oil[J]. Lubrication Engineering, 2018, 43(6): 102-107, 113.

[23] 曾霖, 张洪朋, 赵旭鹏, 等. 液压油污染物双线圈多参数阻抗检测传感器[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1690-1697.

ZENG L, ZHANG H P, ZHAO X P, et al. Double coil multi-parameter impedance sensor for hydraulic oil pollutants detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1690-1697.

[24] WANG Y S, LIN T W, WU D H, et al. A new in situ coaxial capacitive sensor network for debris monitoring of lubricating oil[J]. Sensors, 2022, 22(5): 1777.

作者简介



贾宝惠, 1992 于中国民航大学获得学士学位, 2000 年于南京航空航天大学获得硕士学位, 现为中国民航大学交通科学与工程学院教授, 主要研究方向为维修与适航技术、健康管理。

E-mail: jiabaohui@sina.com

Jia Baohui received her B. Sc. degree from Civil Aviation University of China in 1992, and received her M. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2000. She is currently a professor in the College of Transportation Science and Engineering at Civil Aviation University of China. Her main research interests include maintenance and airworthiness technology, health management.



肖海建(通信作者), 2019 年于中国民航大学获得学士学位, 现为中国民航大学安全科学与工程学院博士研究生, 主要研究方向为维修与适航技术、健康管理。

E-mail: 2019011039@cauc.edu.cn

Xiao Haijian (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Civil Aviation University of China in 2019. He is currently a Ph. D. candidate in the College of Safety Science and Engineering at Civil Aviation University of China. His main research interests include maintenance and airworthiness technology, health management.