

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.12.015

滑油磨粒大小的电容层析成像分析*

马闻博¹ 孙衍山^{1,2} 曾周末¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072;
2. 北京航峰科伟装备技术股份有限公司 北京 100141)

摘要:航空发动机轴承部件磨损是导致发动机失效,引起飞机重大事故的主要因素之一。通过监测航空发动机油液中磨粒的情况,可以判断轴承部件的磨损程度。以往的检测方法存在操作难度高、随机性大、定量误差较大等问题。提出了基于电容层析成像(electrical capacitance tomography, ECT)实现飞机发动机磨粒检测的方法,搭建了实验系统,建立了磨粒大小、位置等与电容值变化关系的数学模型。通过有限元仿真和实测试验表明,ECT方法能实现颗粒状金属材料大小的检测。试验检测系统配套36 mm内径传感器,可以检测3~8 mm的颗粒状金属材料。

关键词:金属;电容层析成像;飞机发动机;油液监测

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Analysis of different size wear debris in oil by electrical capacitance tomography

Ma Wenbo¹ Sun Yanshan^{1,2} Zeng Zhoumo¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin 300072, China;
2. Beijing Hang Feng Ke Wei Equipment Technology Co., Ltd., Beijing 100141, China)

Abstract: The wear of aviation engine bearing parts is one of main factors that cause engine failure and serious accidents. The wear degree of bearing parts can be judged by monitoring the wear debris of the aero engine oil. In the past, the detection method has the problem of difficulty operation, high randomness and large quantitative error. This paper presents a method for the detection of aircraft engine wear debris based on electrical capacitance tomography (ECT) and establishes an experimental system and establishes a mathematical model of the relationship between the size or the situation of the abrasive particle and the change of capacitance value. Through the ANSYS and test experiment, the ECT method can detect the size of metal particles. The experiment system is equipped with 36 mm internal diameter sensors, which can detect the particles' size of 3~8 mm.

Keywords: metal; electrical capacitance tomography; aircraft engines; oil monitoring

0 引言

航空发动机工作过程中,运转部件磨损如前轴间轴承磨损、后轴间轴承磨损、滑油回油泵磨损等,会将磨损颗粒带入润滑油,导致发动机故障。例如,F119飞机发动机正常的磨粒数量为每小时几十个,而故障时为每小时几百个。某型号发动机空中停车故障的37.5%以及

提前换发故障的60%以上由发动机齿轮、轴承等部件的异常磨损故障造成,其中最突出的是轴间轴承异常磨损^[1-2]。磨粒产生速度与运行工况密切相关,但发生故障时与正常情况相比有数量级的差别。磨损监测是航空发动机状态监控的重要内容,磨粒分析是目前航空发动机磨损状态监控的重要手段之一^[3],即通过分析航空发动机滑油中的磨损金属颗粒及磁塞和油滤上金属磨粒的成分、含量、尺寸和类型等评估航空发动机的磨损状况、磨

损部位以及磨损原因^[4-5],以便提前采取措施避免事故发生。

常用磨粒的检测方法如原子发射光谱分析法、X 射线荧光光谱分析法、油液铁谱分析法等。X 射线荧光光谱分析(EDXRF)是目前使用最多的大颗粒金属磨粒监控方法^[6-7],通过对航空发动机滑油系统磁塞、油滤上金属颗粒的 X 射线荧光能量谱分析,确定金属磨粒的成分和质量分布,并根据界限值来监控大颗粒金属磨粒,这种方法不能进行系统全流路的检测,也无法对磨粒的个数、形貌等进行定量检测。油液铁谱分析法在高梯度强磁场作用下,将机械润滑剂或工作介质中的微粒按粒度大小进行分离,通过对微粒形态、大小、成分以及粒度分布等定性和定量检测获得有关摩擦副和润滑系统工作状态的重要信息,从而判断装备的磨损机理和磨损状态^[8]。这种方法对油液取样及其处理要求较高并依赖监测人员的经验,随机性大,定量误差较大。现行方法都基于对滑油的取样分析,不能实现在线检测,无法检测大磨粒也无法检测由疲劳磨损和切削磨损产生的磨粒^[9]。

本文利用电容检测的基本思想,提出了滑油颗粒在线检测方案,建立了滑油磨粒层析成像模型,明确了电容层析成像与磨粒分布的关系。

1 磨粒电容层析成像

阵列电容传感器结构如图 1 所示。

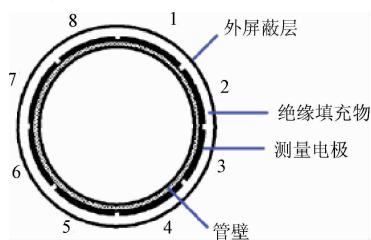


图 1 传感器结构

Fig. 1 Structure of sensor

相邻极板构成平面电容,非平行极板电容保角变换过程如图 2 所示^[10]。

设非平行板电容器的两块极板长、宽分别为 L 和 b ,其截面如图 2(a) 所示。极板 AB、CD 延伸后相交于 O 点,交角为 θ ,极板两端到 O 点的距离分别为 R_1 (线段 OA 的长度)和 R_2 (线段 OB 的长度),则 $L = R_2 - R_1$ (线段 BA 的长度)。

根据式(1)进行对数变换。

$$\zeta = \frac{\pi}{\theta} \ln z = \frac{\pi}{\theta} \ln |z| + i \frac{\pi}{\theta} \arg z \quad (1)$$

把 z 平面上的极板所在二条射线之间的区域变成 ζ 平面上平行于实轴的宽为 π 的带形区域,如图 2(b) 所

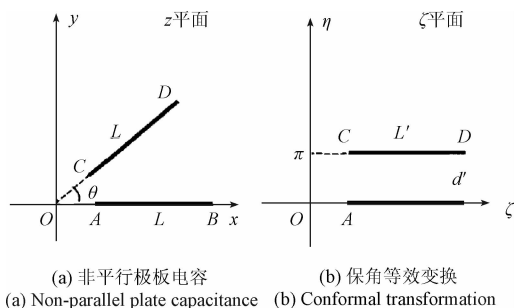


图 2 非平行极板电容保角变换过程

Fig. 2 Conformal transformation of non-parallel plate capacitance

示。其中：

$$\begin{cases} \zeta_A = \frac{\pi}{\theta} \ln R_1 \\ \zeta_B = \frac{\pi}{\theta} \ln R_2 \end{cases} \quad (2)$$

这样, z 平面上的非平行板电容器就变为 ζ 平面上的平行板电容器,两平行极板的宽度如式(3)所示。

$$L' = \xi_B - \xi_A = \frac{\pi}{\theta} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

极板间距离为 $d' = \pi$,由平行板电容器的电容公式可得 ECT 传感器极板对电容如式(4)所示。

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S'}{d'} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{b}{\theta} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

式中: b 是电容极板宽度, θ 是平面电容极板角度(无磨粒时接近 180°), ε_0 是常数真空介电常数 $= 8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$, ε 是常数油液相对介电常数, $\varepsilon = 2.2$ 。

对于尺寸为 d 的磨粒,平面电容可以视为由磨粒存在引起的小电容和原有电容的并联。电容变化如下：

$$\Delta C = \varepsilon_0 \varepsilon d \left(\frac{1}{\theta} - \frac{1}{180} \right) \ln \frac{R+d}{R} \quad (5)$$

式中: $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ 为真空介电常数, $\varepsilon = 2.2$ 为油液相对介电常数, d 为磨粒尺寸, R 是极板到磨粒端到极板延伸后相交点 O 点的距离, θ 是极板的相对夹角,是传感器设计参数。

式(5)明确了磨粒大小 d 、位置 R 与电容值变化 ΔC 的关系,电容变化受磨粒尺寸、磨粒位置的影响是非线性的。影响电容值的磨粒位置变化,是指磨粒端极板延伸后相交点 O 点的距离(也就是磨粒与极板缝的磨粒距离)变化。磨粒大小对电容变化的影响是近似单调递增的,递增程度与磨粒大小和磨粒位置的相对大小有关。

2 磨粒检测系统

为满足滑油测量的需要,传感器阵列设计为如图 1 所示圆柱形,主要参数如表 1 所示。成像系统通过外围

接口获取磨粒信息,实现图像重建并提取测量结果^[11],如图 3 所示。

表 1 传感器主要参数

Table 1 Main parameters of sensor

参数	值
外径 R_2	20 mm
内径 R_1	18 mm
屏蔽层 R_3	25 mm
材质	有机玻璃
传感器全长	100 mm
管道全长	500 mm
测量电极长度	50 mm
电极个数	12
电极材料	铜膜

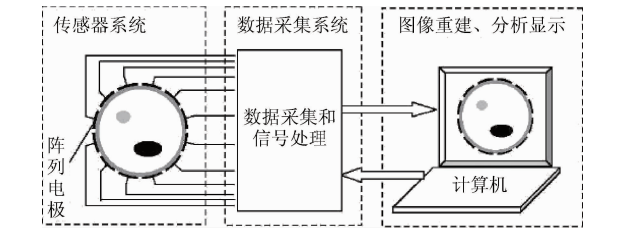


图 3 成像检测系统结构

Fig. 3 Structure of imaging detection system

数据采集系统由多通道的数据采集、C/V 转换、A/D 转换和通信接口等组成,先将磨粒投影数据放大,再对其进行滤波和变换,C/V 转换完成两个检测极板间电容值到电压值的转换。一般极板对之间的电容值很小,但最大值和最小值之间有时会相差达几十倍。图像重建、分析系统负责控制数据采集过程,重构磨粒图像并显示测量参数^[12-13]。

3 磨粒检测仿真分析

对不同磨粒尺寸和位置在 MATLAB 软件平台进行数值仿真^[14],采用表 1 的传感器参数,设置选取不同尺寸的颗粒状金属磨粒,在距离极板缝最近和极板缝最远进行遍历仿真计算。其中,油液相对介电常数设为 2.2,传感器管壁材料和屏蔽层支撑材料选有机玻璃材料相对介电常数 4,金属磨粒介电常数取 10^7 。

有限元仿真模型如图 4 所示。模型剖面图中,不同颜色代表不同介电常数材料,黄色为管壁材料和屏蔽层支撑;浅蓝色为油液,深蓝色为金属磨粒。金属磨粒由于网格约束,表现为长方体。

图 4 中模型显示金属磨粒与传感器检测区间的相对位置关系。

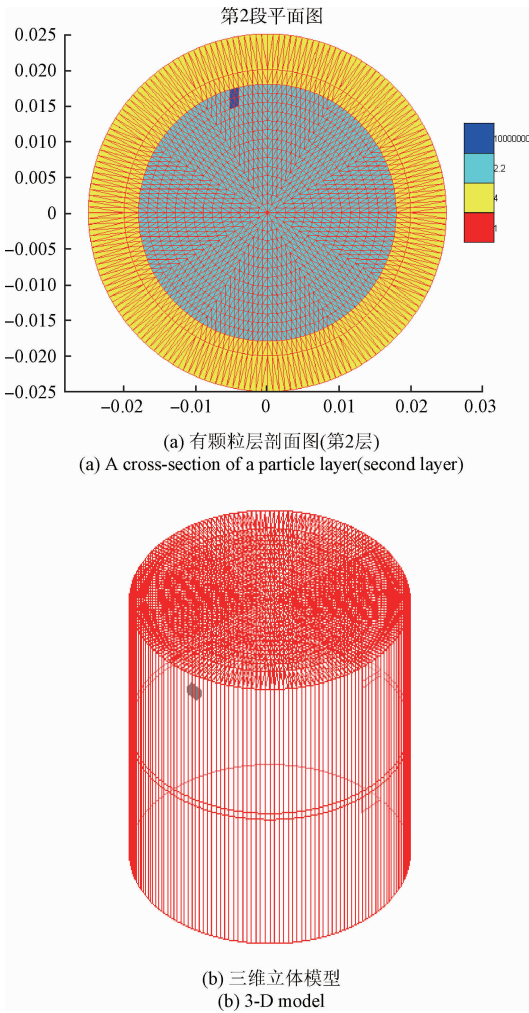


图 4 有限元仿真模型

Fig. 4 Finite element simulation model

在准静态场条件下,计算出各个极板对间的电荷分布、标量电势分布和矢量电场分布信息,并对电荷分布和等位线分布进行可视化和定量分析。得出不同情况下航空发动机滑油磨粒在线检测电容响应。此三维有限元模型下,最上面极板(定义为 1 号极板,逆时针依次编号)激励条件下,电场线分布如图 5 和 6 所示,从图中计算电

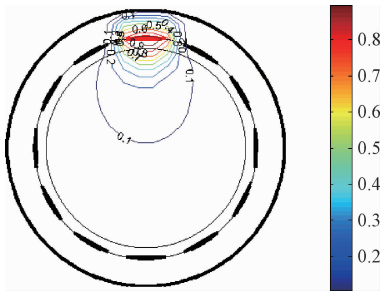


图 5 无磨粒层电场线

Fig. 5 Electric field lines of no particle layer

场线分布和理论模型一致,电场强度随着距离板缝距离逐渐变小,无磨粒有限元电场分布和有磨粒的有限元电场分布有明显区别,在磨粒所在位置区域,由于金属材料存在使电场增强,且金属磨粒存在明显的等势体效应(仿真中图 6 的电势 0.5 电场线)。

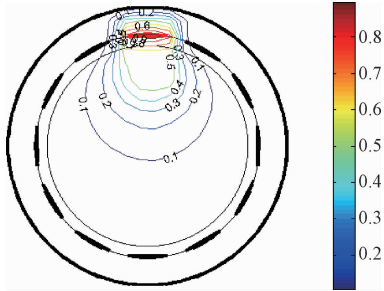


图 6 有磨粒层电场线

Fig.6 Electric field lines of particle layer

有限元模型^[15-16]按整数个网格进行了 3.26 ~ 8.21 mm磨粒尺寸范围的仿真,磨粒位置距离极板缝固定 1 mm 位置处磨粒尺寸仿真结果如图 7 所示,从仿真结果可以看出随着磨粒尺寸变化,电容变化量随之单调非线性增大。

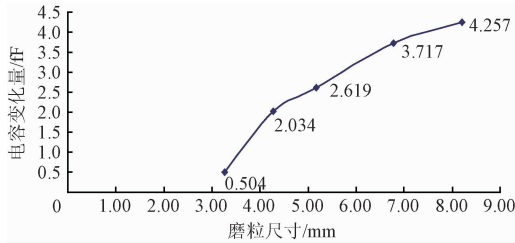


图 7 磨粒尺寸变化仿真结果

Fig.7 Simulation results of particle sizes' change

当金属磨粒尺寸不变,磨粒距离极板缝的距离变化时,电容变化如图 8 所示,图中为 3 mm 尺寸金属磨粒,从距离极板最近到最远(考虑极板阵列对称,为传感器中心)。仿真结果看出随着磨粒与极板缝距离变化,电容变化量即响应敏感度随之快速非线性减小。

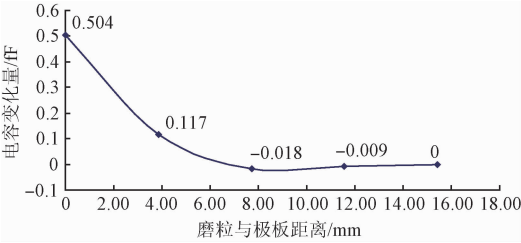


图 8 磨粒与板缝距离变化仿真结果

Fig.8 Simulation results of distance change between particle and detection plate

当距离为 8 ~ 12 mm 时,磨粒引起的变化仅为 0.009 fF,距离更大时响应接近 0.001 fF。按 8 mm 距离最近的约 9 fF 的电容变化,到 3 mm 距离最远的变化 0.001 fF,整个检测系统动态范围要满足 10^4 才能实现全范围检测。

因此通过极板阵列获得多个电容信息,借用成熟的 ECT 算法可以进行成像算法计算,补偿单个极板检测磨粒距离变化引起的检测误差非必要。

4 磨粒检测试验

实验过程中电容传感器竖直放置,将内部装满飞机用润滑油(美孚飞马 2 号),把颗粒投入传感器内部,记录传感器的成像情况,颗粒可移动,尺寸可变化。基本实验参数如表 2 所示。

表 2 试验参数
Table 2 experimental parameters

参数	参数值
环境温度	20 ℃
磨粒材料	不锈钢
磨粒尺寸	3 ~ 8 mm
磨粒形状	球型
油液密度	1 004 kg/m ³
不锈钢密度	7 640 ~ 7 980 kg/m ³
传感器频率	500 kHz

测试过程中,颗粒在管道内运动,颗粒和环境介质(滑油或空气)的介电常数不同,在每个时刻测量管道截面的磨粒和介质的分布也不一样,因此相对应的等价介电常数时刻发生变化,所以会测得一组变化的电容值。如 M6 的不锈钢螺母的测量值,选取 66 组测量值中的一组,因为进行的是 3 000 帧的测量,在每一帧都会得到一个电容值,这样每一组都会由一个 3 000 个数构成的电容值集合构成,如图 9 所示。

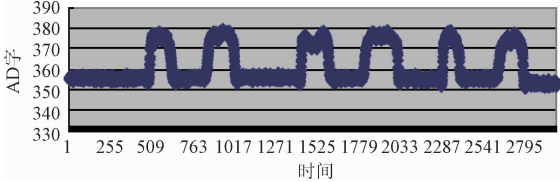


图 9 颗粒运动和背景变化影响

Fig.9 Influence of particle movement and background change

随着颗粒的运动,测量电容的值也在不断变化,当颗粒完全在管径的测量极板内运动时,测得的电容值保持不变,即图下部的平坡处,这就是实验希望得到的测得的颗粒的真实电容,通过勘察测得的电容值,其数值也确实

是保持不变。再通过与初始时,板内无颗粒的初始测量值求差(绝对值),即可得到该颗粒造成的电容变化量。对各颗粒重复测试电容变化量,颗粒运动对数据波动有影响。不同大小颗粒成像情况如图 10 所示。

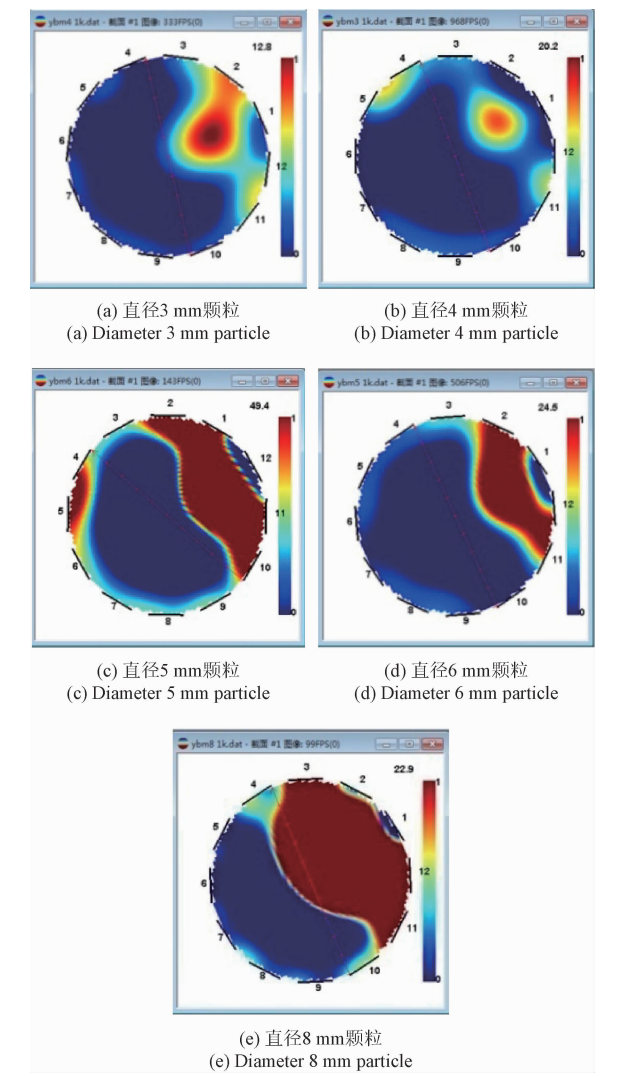


图 10 不同大小颗粒成像
Fig. 10 Image of different size particle

对于仅大小不同的颗粒,大颗粒造成的传感器电容的变化量更大,小颗粒造成的电容变化量较小,并且满足比较好的单调线性关系,通过进行多次测量,使用电容层析成像方法进行检测,可以区分不同大小的颗粒。

将实际参数代入(2)中,其中 d 是电容极板距离为 40 mm; b 是电容极板长度为 50 mm; N 是电容极板个数为 12; δ 是电容极板上保护材料厚度为 4 mm; ε 是油液相对介电常数为 2.2; 对于试验系统 36 mm 内径,最小分辨的金属颗粒为 3 mm,与理论公式符合情况很好,从理论公式分析推导,计算当传感器的极板距离设计为 5 mm 时,可检测到直径为 250 μm 的磨粒引起的电容变化。

理论计算的电容量,与多次测量得到的实际电容量的归一化平均值对比如表 3 所示。

表 3 电容变化量
Table 3 Capacitance variation

磨粒尺寸/mm	理论值/ fF	仿真值/ fF	实验值/ fF
3	0.400 5	0.491 4	0.400 1
4	0.977 4	3.038 6	1.488 7
5	1.967 4	5.099 8	1.744 1
6	3.506 7	6.677 5	3.305 5
8	8.870 9	8.367 4	8.870 3

电容量变化与磨粒尺寸大小的关系如图 11 所示。从图中可以看到,理论值、仿真值和实测值变化趋势一致,在磨粒尺寸小于 5 mm 时实测值和仿真值更接近,在磨粒尺寸大于 5 mm 时,实测值更接近理论值。

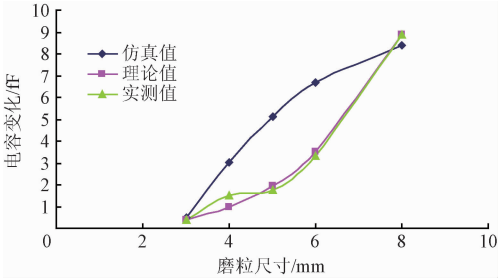


图 11 电容变化曲线
Fig. 11 Curve of change in capacitance

磨粒尺寸小时,理论公式对多层材料和屏蔽等的简单近似忽略使其计算值与实测值误差存在,当磨粒尺寸比较大时,这些固定的小信号影响效果就越来越小了。

有限元仿真对多层材料和屏蔽等细节进行了建模^[17],因此小尺寸磨粒时计算结果更接近真实,但是由于网格限制,仿真过程中磨粒不是球形,磨粒位置也无法和实际位置完全一致,随着磨粒尺寸增大,磨粒形状和位置的计算误差影响有增大,而当磨粒尺寸增大到一定程度时,足够多的网格使仿真磨粒可设置的更接近球形;磨粒位置误差相对于磨粒尺寸也越来越小,因此后面的计算误差也逐渐变小了。

只检测的颗粒成像位置不同时,成像图也有所区别,当颗粒靠近成像极板时成像图案颜色较深,当检测的颗粒靠近检测管道的中心位置时成像的颜色较浅,也就是 ECT 成像算法补偿后,磨粒位置变化仍然会有误差。典型的 ECT 成像算法采用 LBP 或 LANDWEB 补偿效果相似^[13]。当金属磨粒尺寸不变(磨粒尺寸 3 mm 最小,误差最大的情况下),仅磨粒距离变化曲线如图 12 所示,ECT 成像采用快速实时的典型成熟的 LBP 算法,磨粒距离全

部变化范围下,误差在 $-9.7\% \sim 10.25\%$ 变化,也就是补偿后整个系统检测精度可以达到 89% 。

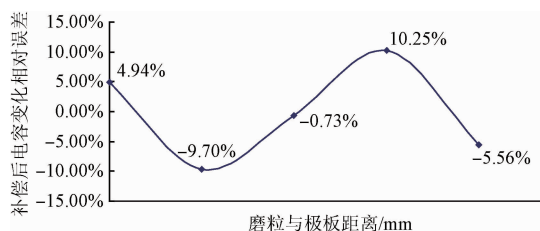


图 12 算法补偿后磨粒与板缝间距离对电容影响

Fig. 12 Influence of capacitance for distance between particle and detection plate after algorithmic compensation

5 结 论

利用电容层析成像技术能够实现滑油磨粒尺寸的检测,论文建立了磨粒大小、位置与电容值变化的关系的数学模型,磨粒大小的变化将引起电容介质的变化,从而引起电容量的变化。

电容变化受磨粒尺寸、磨粒位置等的影响都是非线性的,磨粒与极板距离变化,电容变化量也随之快速非线性减小,利用极板阵列获得多电容信息,补偿单个极板检测磨粒距离变化引起的检测误差是必要的。

改变传感器的结构尺寸可以改善传感器的分辨力,当传感器的极板距离设计为 5 mm 时,可检测到直径为 $250\text{ }\mu\text{m}$ 的磨粒引起的电容变化。

电学层析成像的方法可以实现金属颗粒状滑油磨粒的全流路监测,为实现滑油磨粒的在线监测提供了有效手段。

参考文献

- [1] 李爱. 航空发动机磨损故障智能诊断若干关键技术研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.
LI AI. Research on key techniques of aeroengine wear fault intelligent diagnosis [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [2] ZHAN H, SONG Y, ZHAO H, et al. Study of the sensor for on-line lubricating oil debris monitoring [J]. Sensors & Transducers, 2014, 175(7): 214-219.
- [3] IWAI Y, HONDA T, MIYAJIMA T, et al. Quantitative estimation of wear amounts by real time measurement of wear debris in lubricating oil [J]. Tribology International, 2010, 43: 388-394.
- [4] 蒋章雷, 徐小力. 旋转机械传动系统运行稳定性劣化表征参数提取方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(1): 155-160.
JIANG ZH L, XU X L. Feature parameter extraction

method faced to running stability deterioration of rotating machinery transmission system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(1): 155-160.

- [5] MIHALCOVÁ J, RIMÁR M. Control of activity of aircraft engines by analysis of wear debris particles in terms of shape and size [J]. International Journal of Engineering Research in Africa, 2015, 18 (32): 136-143.
- [6] 毛国强, 李艳军. 基于数字图像与 XRF 技术的发动机油液综合分析系统 [J]. 机械工程与自动化, 2009(4): 128-130.
MAO G Q, LI Y J. A comprehensive analysis system based on digital image and XRF technology [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2009 (4): 128-130.
- [7] 刘东风, 石新发, 周志才. 润滑油中磨粒的 X-荧光能谱测试方法研究与应用 [J]. 润滑与密封, 2015, 40(5): 94-97.
LIU D F, SHI X F, ZHOU ZH C. Research and application of wear particles test method in lubricant based on EDXRF spectroscopy [J]. Lubrication Engineering, 2015, 40(5): 94-97.
- [8] 刘鹏鹏, 左洪福, 付宇, 等. 航空发动机碰摩故障在线监测与诊断研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 164-169.
LIU P P, ZUO H F, FU Y, et al. Study of on-line monitoring and diagnosis of aero-engine rubbing fault [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(7): 164-169.
- [9] WU T, PENG Y, WU H, et al. Full-life dynamic identification of wear state based on on-line wear debris image features [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2014, 42 (S1-2): 404-414.
- [10] CAO Z, XU L. 14-Direct methods for image reconstruction in electrical capacitance tomography [C]. Industrial Tomography: Systems and Applications, 2015: 377-399.
- [11] XIN T, CHEN Z S, YUE L, et al. Analysis of the dynamic sensitivity of hemisphere-shaped electrostatic sensors' circular array for charged particle monitoring [J]. Sensors, 2016, 16(9): 1403-1403.
- [12] LIU Z, BABOUT L, BANASIAK R, et al. Effectiveness of rotatable sensor to improve image accuracy of ECT system [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2010, 21(3): 219-227.
- [13] 陈至坤, 李玮, 邓乃灏. 基于敏感场变换的电容层析成像图像重建算法研究 [J]. 电子测量技术, 2008,

- 31(4):89-92.
- CHEN ZH K, LI W, DENG N H. Study on algorithm of electrical capacitance tomography based on electric capacity examination method improvement[J]. Electronic Measurement Technology, 2008, 31(4):89-92.
- [14] SAOUD A, MOSOROV V, GRUDZIEN K. Measurement of velocity of gas/solid swirl flow using electrical capacitance tomography and cross correlation technique[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2017, 53(A): 133-140.
- [15] LEI J, WANG X Y, LIU Q B, et al. Dynamic reconstruction algorithm based on the split Bregman iteration for electrical capacitance tomography [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2013, 35(4): 476-490.
- [16] 郑颖, 郑显锋, 弋驰. 基于 ANSYS 软件的 FSAE 赛车发动机进气系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2017, 36(7):82-85.
- ZHENG Y, ZHENG X F, YI CH. Design of FSAE car engine intake system based on ANSYS software [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2017, 36(7):82-85.
- [17] 刘靖, 王雪瑶, 刘石. 多相流测量用动态电容层析成像图像重建算法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2355-2362.

LIU J, WANG X Y, LIU SH. Dynamic image reconstruction method for electrical capacitance tomography in multiphase flow measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2355-2362.

作者简介



马闻博, 2013 年于河北工业大学获得学士学位, 现为天津大学硕士研究生, 主要研究方向检测技术及仪器。

E-mail: mawenbo1991@tju.edu.cn

Ma Wenbo received B. Sc. from Hebei University of Technology in 2013. And now he is a M. Sc. candidate in Tianjin University. His main research interest include detection technology and instruments.



曾周末, 分别在 1982 和 1985 年于华中工学院分别获得学士学位和硕士学位, 1993 年于天津大学获得博士学位, 现任天津大学教授, 主要研究方向检测技术及仪器。

E-mail: zhzmeng@tju.edu.cn

Zeng Zhoumo received B. Sc. and M. Sc. both from Huazhong University of Science and Technology in 1982 and 1985, respectively, received Ph. D. from Tianjin University in 1993. And now he is a professor in Tianjin University. His main research interests include Detection technology and instrument.