

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2018.06.019

用于滑油中碎屑在线监测的电容传感器设计与实现*

韩志斌 王奕首 孙 虎 卿新林
(厦门大学航空航天学院 福建厦门 361005)

摘要: 设计了可集成于滑油管道的同轴电容传感器,可用于原位检测滑油中碎屑从而诊断航空发动机健康状态。建立同轴电容传感器的数学模型,采用数值仿真方法对电容传感器相关参数进行分析。结果表明:圆筒式电容传感器的电容值随碎屑数量的增加而增大,且大致呈现线性关系,随碎屑尺寸的增加而增大,且有较好的线性关系。确定合适的传感器设计参数,搭建试验台对同轴电容传感器进行初步实验验证,试验结果表明同轴电容传感器具有可行性。

关键词: 润滑油; 碎屑; 在线监测; 圆筒式电容传感器

中图分类号: TH165.3 文献标志码: A 文章编号: 0254-0150(2018)06-102-06

Design and Implement of In-situ Capacitive Sensor for Monitoring Debris in the Lubricant Oil

HAN Zhibin WANG Yishou SUN Hu QING Xinlin
(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

Abstract: A cylindrical capacitive sensor was developed, which has the advantages of high resolution, small size and designability and can be easily installed on lubricant pipeline to monitor the debris in lubricant of aircraft engine. A theoretical model of the cylindrical capacitive sensor was set up to analyze several parameters' effectiveness on the performance of sensor including the cross sectional area of the sensor, the distance between two poles and the permittivity. It is shown that the capacitance value of the sensor is increased with the increase of the debris number, as well with the increase of debris size; there are approximately linear relations for above two cases. Numerical simulations were conducted to determine the optimal parameters for preliminary experiments. Experiments were carried out to demonstrate the feasibility of the developed capacitive sensors.

Keywords: lubricating oil; debris; in-situ monitoring; cylindrical capacitive sensor

航空发动机结构复杂且运行工况恶劣,其旋转部件的异常磨损是造成发动机各种故障和突然失效的主要原因^[1]。滑油作用一是起到降温,二是运输机械磨损碎屑。滑油中不仅包含正常磨损产生的磨粒,而且还可能包含异常摩擦和磨损产生的碎屑。因此,通过对滑油中磨粒和碎屑进行检测分析,能为发动机的故障诊断提供有益的支持^[2]。

航空发动机滑油检测方法主要可分为离线和在线2种。离线检测常用铁谱法^[3]和光谱法^[4],是一种比较可靠的工程方法,但检测分析时间长。在线监测法

通过实时采集数据分析滑油中碎屑状况,以快速有效地评价发动机的状态^[5],常用方法包括光电磁场耦合法^[6]、电磁感应法^[7-8]、电容传感法^[9-11]、超声粒子监测^[12]、电阻抗法^[13]、在线X-射线光谱法及静电荷检测法等^[14]。WU等^[15]综述了滑油在线传感技术的发展现状和面临的挑战。电容传感法的特点是结构简单、适应性强、动态响应好、可实现非接触测量等^[16]。何永勃和徐斌^[17]设计了基于弧状极板式电容的滑油磨粒检测系统,采用交流电桥式电容检测方法,通过电压变化表征了磨粒。

基于变介电常数的电容传感器已有不少研究^[18-20],但面向航空发动机管道型的电容传感器尚不多。本文作者提出一种适用于航空发动机管道的同轴电容传感器设计方法,首先建立了传感机制的模型,分析了各参数灵敏度,然后利用ANSYS仿真方法进行参数化模拟,最后制造了同轴电容传感器,搭

* 基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(20720180120)。

收稿日期: 2017-07-19; 修回日期: 2018-03-22

作者简介: 韩志斌(1993—),男,硕士研究生,研究方向为滑油监测、机器学习。E-mail: hanzb@stu.xmu.edu.cn。

通信作者: 王奕首(1978—),男,博士,副教授,研究方向为发动机健康监测。E-mail: wangys@xmu.edu.cn。

建了实验平台进行验证。

1 电容传感器理论模型

考虑到航空发动机滑油管道为小口径管路, 理想的电容传感器应该是与滑油管路有机集成。因此, 设计了如图 1 所示的同轴电容传感器, 其中外芯为已有的滑油管路, 不带电, 而内芯为新增细棒, 带电, 外

芯与内芯构成电容传感器两极, 内芯可设计为两管路的连接法兰或螺母。滑油在外芯和内芯之间环形空间流过, 若滑油没有碎屑, 则两极间介电常数无变化, 即电容没有发生改变; 当滑油含有碎屑时, 两极间介电常数发生变化, 导致电容发生变化。

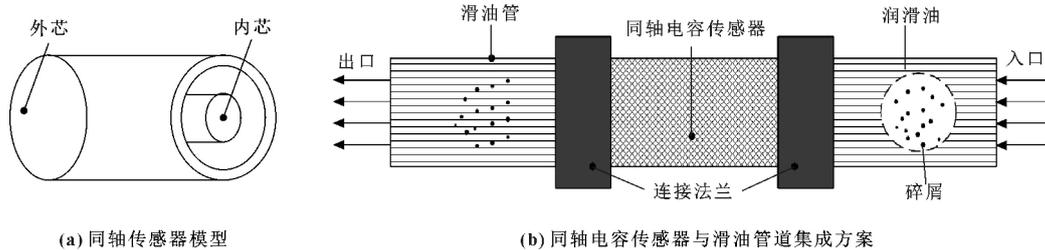


图 1 电容传感器模型示意图

Fig 1 Schematic diagram of the presented capacitive sensor model (a) coaxial capacitive sensor model; (b) integration scheme of coaxial capacitive sensor and lubricant oil pipeline

对于如图 1 所示电容传感模型, 做如下假设: 传感器内芯简化为一长为 l 的均匀带电细棒, 取细棒上任意一点为坐标原点 O , 棒外任意一点 Q , Q 到细棒的

距离为 d , 且 Q 与细棒两端的连线和细棒分别成角 α_1 和 α_2 , 取 Q 点到细棒的垂足 O 点为原点建立直角坐标系 Oxy , 设电荷线密度为 η_e , 简化模型如图 2 所示。

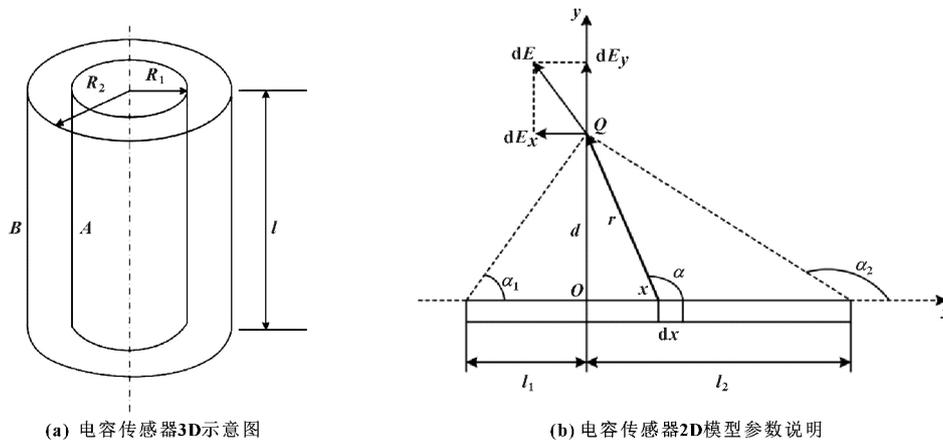


图 2 电容传感器简化数学模型

Fig 2 Simplified model of capacitive sensor (a) 3D diagram; (b) 2D illustration diagram

内芯细棒可看成无限多线元 dx 组成, 在细棒上距离原点 x 处取一长为 dx 的线元, 线元电荷为 $dq = \eta_e dx$, dq 在点 Q 所产生的电场强度大小为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} = \frac{\eta_e}{4\pi\epsilon_0} \frac{dx}{r^2} \quad (1)$$

不同位置的线元所带电荷 dq 在点 Q 所产生的元场强 dE 方向各异, 对矢量 dE 沿 x, y 轴方向分解后再积分, 可计算 E_x 和 E_y , 内芯的 d 和 l 长度会影响

场强分布, 由于滑油管路为小口径细管, 故采用 $d \ll l$ 的物理模型, 即 $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi$, 代入 E_x 和 E_y 可得:

$$\begin{cases} E_x = 0 \\ E_y = \frac{\eta_e}{2\pi\epsilon_0 d} \end{cases} \quad (2)$$

上式中 ϵ_0 为真空介电常量, 对于非真空极间介质, 再引入相对介电常量 ϵ_r , 有 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, ϵ 称为电介质的介电常量。此时有:

$$E = \frac{\eta_e}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r r} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l} \frac{1}{r} \quad (3)$$

式中: q 为内外圆柱面分别带有 $+q$ 和 $-q$ 的电荷, 则有 $\eta_e = \frac{q}{l}$, 电容器由半径分别为 R_1 和 R_2 的两同轴金属内外芯 A, B 组成, 如图 2 所示。

电场强度方向垂直于圆柱轴线, 两圆柱面之间的电势差可积分得到, 即:

$$V_{AB} = \int_l E \cdot dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l} \frac{dr}{r} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

再根据电容器的定义, 有

$$C = \frac{q}{V_{AB}} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (5)$$

式 (3) — (6) 表明同轴电容传感器的相对介电常量发生变化时, 传感器内的电场、电压和电容则会相应变化。当有碎屑进入传感器时, 将碎屑看作电偶极子, 问题可简化为电介质在外加电场 E_0 下的极化问题分析。

由分子极化理论, 电介质表面产生了极化电荷, 极化电荷的存在将会产生一个附加电场 E' , 因此空间上任意一点的场强 E 为外电场 E_0 和极化电荷的附

加电场 E' 的矢量:

$$E = E_0 + E' \quad (6)$$

当碎屑进入圆筒式电容传感器的电场时, 由于极化作用的存在, 使得传感器内原有的电场发生改变, 从而可进一步影响电容大小, 以此表征进入管道内的碎屑的特性。

2 数值模拟实验

如前所述, 同轴电容传感器具有多个可变参量, 下面采用有限元分析法对电容传感器进行参数化分析, 以确定最佳的设计参数。

2.1 滑油中不含碎屑的电容传感器参数化分析

首先研究传感器的长度、两极间距离、两极间所施加的电压等参数对传感器内电场变化的影响。仿真结果表明, 传感器的长度对传感器内的电场没有影响, 而以两极间距离、两极间所施加电压为控制变量进行仿真时, 传感器内的电场发生了明显的变化。在以两极间距离为控制变量仿真时, 始终保持传感器的内芯为 1 mm, 长度为常数 40 mm, 两电极间所施加电压大小为 2 V, 仿真时采用智能网格控制, 用 smart size 调节网格精度, 划分网格后, 共有节点 237 222, 单元 166 057, 极间距仿真结果如图 3 所示。

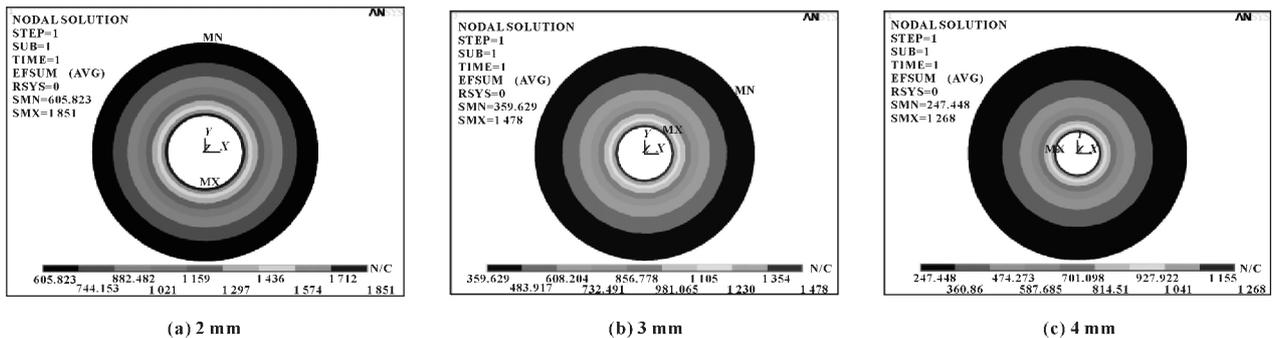


图 3 两极间距离为 2、3、4 mm 时传感器内电场分布图

Fig 3 The electric field distribution of the sensors with different distances of two poles

图 3 仿真结果表明, 随着两电极间距离的增大, 两电极间的电场强度减小, 考虑到信噪比与流动减滞的影响, 取传感器模型两电极距离为 3 mm。由式 (5) 可知, 两电极间所施加的电压越大, 传感器的电场强度也会随之增大, 当电场强度较大时, 测量时的信噪比较好, 考虑到实验室现有仪器, 取两电极间可施加的最大电压为 2 V。将由式 (5) 得到的理论函数曲线与仿真数据的拟合曲线进行对比, 如图 4 所示, 可以看出, 理论分析与仿真分析所得的结果是十分接近的。

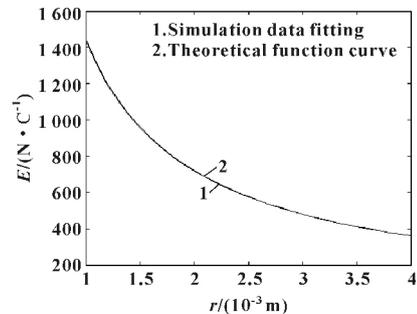


图 4 理论函数与仿真拟合曲线比较

Fig 4 Comparison of theoretical function and simulation fitting curve

2.2 滑油中含碎屑的电场分析

以 2.1 节分析结果为基础, 确定传感器参数为: 内芯 1 mm, 两电极间距离为 3 mm, 长度为 40 mm, 两极所施加电压大小为 2 V。对碎屑进入传感器导致的电场变化情况进行仿真, 结果如图 5 所示。图 5 (a) 给出单个碎屑进入传感器中的结果, 图 5 (b) 给出多个碎屑进入传感器的仿真结果, 结果表明, 碎屑存在处电场分布有较大变化。

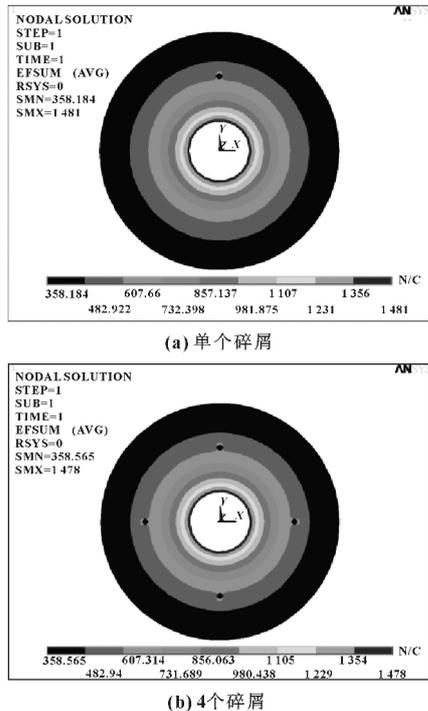


图 5 单个与多个碎屑进入传感器中的电场分布云图
Fig 5 The electric field distribution of the sensor with different number of debris (a) one debris; (b) four debris

图 5 表明, 碎屑多电场突变相应增多, 因此电场突变可用来表征碎屑存在的量。将仿真数据导入 MatLab, 得到有无碎屑时的电场变化曲线, 如图 6 所示。图 6 表明, 在碎屑存在处有一较大波谷产生, 即图中曲线突变的所在处, 经计算可得出, 波谷处产生的电场值与无碎屑情况的电场降低了 22% 左右, 即局部灵敏度。

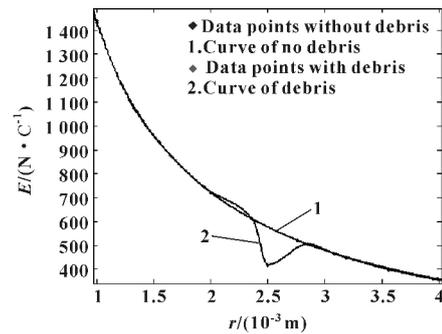


图 6 有碎屑和无碎屑情况下电场变化曲线
Fig 6 The electric field strength curves with or without debris

3 实验验证

3.1 实验平台搭建

根据前文的分析, 确定电容传感器内外芯材料为铜, 长度为 40 mm, 内芯半径为 1 mm, 两电极间距离为 3 mm, 制造加工的同轴电容传感器实物如图 7 (a)、(b) 所示。为了便于同管路集成, 设计了连接内芯和外芯的塑料同轴法兰 (如图 7 (c) 所示), 并从法兰外壁通过法兰轮辐直到安装内芯的内壁开有一个小孔, 该小孔可安装一个金属导电棒作为传感器正极, 将外部电压施加到内芯上, 整个传感器的装配示意图如图 7 (d) 所示。

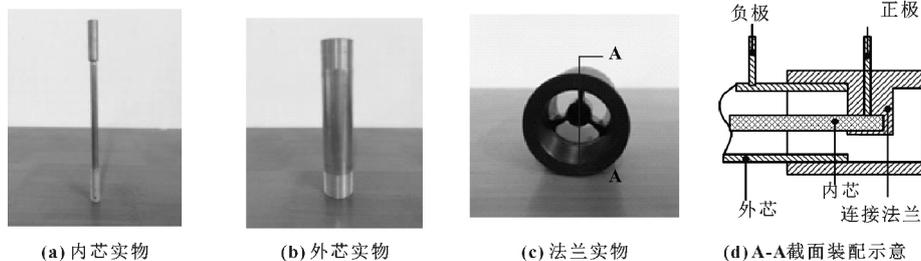
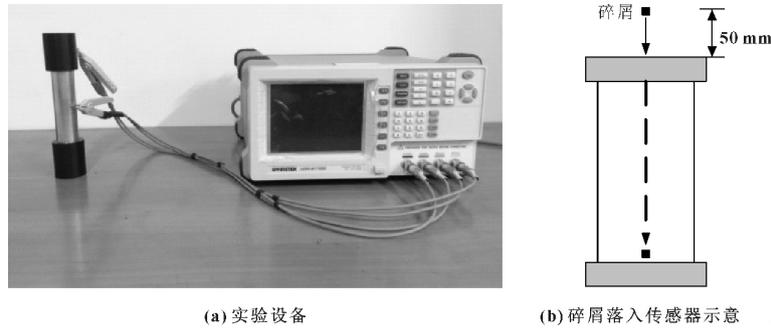


图 7 电容传感器主要部件

Fig 7 Main components of capacitive sensor (a) inner core; (b) outer core; (c) flange; (d) A-A section drawing

实验时, 采用的测量仪器为 LCR 测量仪 (LCR-8110G), LCR 可直接对传感器施加电压, 同时测

量电容大小。实验采用串联接法, 装置如图 8 所示。



(a) 实验设备

(b) 碎屑落入传感器示意

图 8 实验装置图

Fig 8 Experimental setup (a) experimental device; (b) falling process diagram of debris

3.2 电压频率确定

实验时所用电压为 2 V (由仿真确定), 电压频率通过实验确定, 分别取频率为 100、120、150、

200、400、600、800、1 000 Hz, 测量介质分别为空气、水、滑油时的传感器电容变化情况。实验结果如图 9 所示。

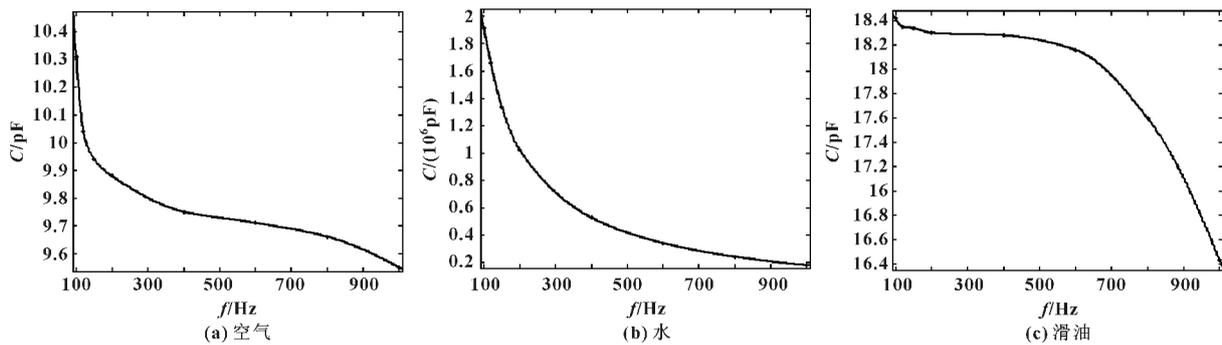


图 9 不同介质时传感器电容随频率变化曲线

Fig 9 Variation of capacitance with frequency in different medium (a) air; (b) water; (c) oil

由图 9 可知, 电容与频率近似呈反比的关系, 当介质为水时, 电容读数较大, 这是因为采用含有杂质的水时, 导电性较强。实验结果也证明, 介质为滑油时曲线斜率变化与介质为水或空气时不同, 这可能是黏度对电荷的阻滞作用所致。为使在测量时电容值大小有一个较为稳定的值, 取电压频率为 100 Hz。

3.3 碎屑监测实验

在确定外加电压为 2 V, 电压频率为 100 Hz 的基础上, 研究碎屑数量与尺寸对电容的影响。由于实验条件所限, 文中碎屑采用自由落体的方式进入介质, 模拟介质流动情况。由于空气的黏性过小, 以自由落体的方式进入的碎屑在传感器中停留的时间太短 (约 0.16 s), LCR 测量仪反应速度不够。因此, 仅针对介质为水与滑油时进行实验, 实验结果如图 10 所示。

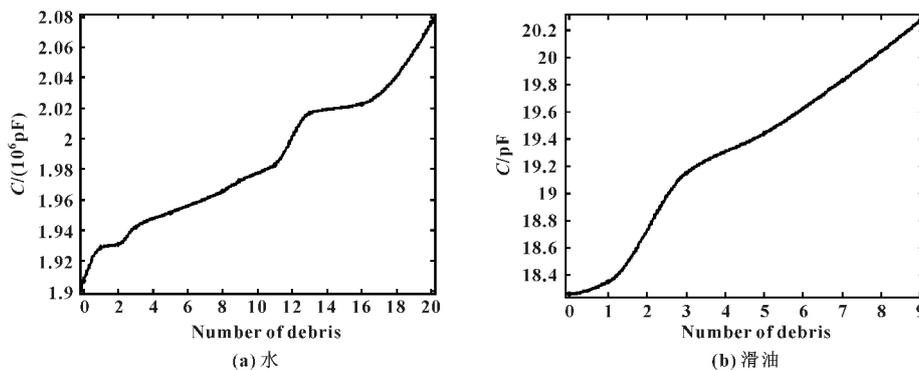
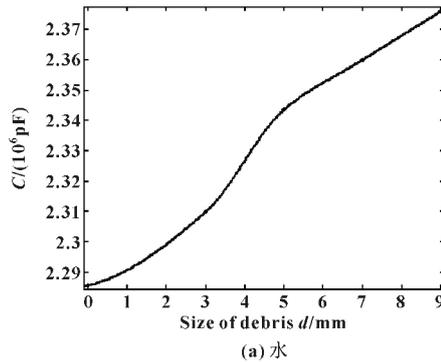


图 10 不同介质时电容值大小随碎屑数量的变化曲线

Fig 10 Variation of capacitance with the number of debris in different medium (a) water; (b) oil

由图 10 可看出, 电容值随着碎屑数量的增多而增加, 两者大致呈线性关系。可见, 电容值对碎屑的数量有较好的敏感度, 能较好地反映介质中碎屑的数量变化。



碎屑尺寸对电容值的影响如图 11 所示。实验结果表明, 电容值随碎屑尺寸变化的趋势也接近于线性关系。

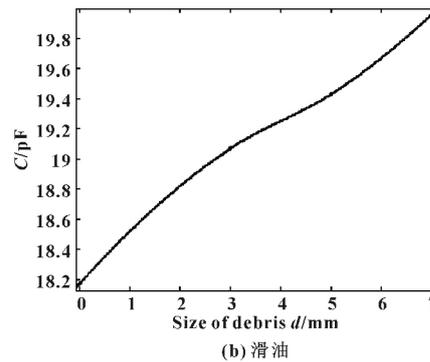


图 11 不同介质时电容值大小随碎屑尺寸的变化趋势

Fig 11 Variation of capacitance with the debris size in different medium (a) water; (b) oil

4 结论

(1) 提出一种适用于发动机滑油碎屑在线监测的圆筒式电容传感器, 基本原理是基于变介电常数型的同轴圆筒传感器, 建立电容传感器监测碎屑的工作机制模型, 使用 ANSYS 仿真软件对圆筒式传感器内部的电场进行了参数化分析, 最后搭建试验平台进行验证, 实验结果表明: 圆筒式电容传感器的电容值随碎屑数量的增加而增大, 且大致呈现线性关系; 圆筒式电容传感器的电容值随碎屑尺寸的增加而增大, 有较好的线性关系。

(2) 由于模型和实验方案较为简单, 下一步需进一步探索介质流动速度对监测结果的影响以及监测反应速度等。

参考文献

- 【1】李允. 航空发动机滑油滤磨屑图像检测与识别技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- 【2】GEGNER J. Tribology: fundamentals and advancements [M]// MAUNTZ M R, GEGNER J, KUIPERS U, et al. A sensor system for online oil condition monitoring of operating components. Rijeka: InTech, 2013: 305-321.
- 【3】HOLZHAEUER W, MURRAY S F. Continuous wear measurement by on-line ferrography [J]. Wear, 1983, 90(1): 11-19.
- 【4】JANUSZKIEWICZ K R, BERKMESIAN G, SULEK H H. UV-fluorescence spectroscopic method for monitoring tramp oil contamination in hot rolling emulsions. II: application of fluorescent tracers [J]. Lubrication Engineering, 1992, 48(1): 56-61.
- 【5】JAW L C. Recent advancements in aircraft engine health management (EHM) technologies and recommendations for the next step [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2005: Power for

Land Sea, and Air. LOS ANGELES: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 683-695.

- 【6】KUO W F, CHIOU Y C, LEE R T. Fundamental characteristics of wear particle deposition measurement by an improved on-line ferrographic analyzer [J]. Wear, 1997, 208(1): 42-49.
- 【7】WU Y, ZHANG H, ZENG L, et al. Determination of metal particles in oil using a microfluidic chip-based inductive sensor [J]. Instrumentation Science & Technology, 2016, 44(3): 259-269.
- 【8】HONG W, WANG S, TOMOVIC M M, et al. A new debris sensor based on dual excitation sources for online debris monitoring [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(9): 095101.1-12.
- 【9】MINASAMUDRAM R, AGARWAL P, VENKATESWARAN P. Simulation of a capacitive sensor for wear metal analysis of industrial oils [C]// Proceedings of the 2013 COMSOL Conference. Bangalore: SPIE, 2013.
- 【10】APPLEBY M, CHOY F, LI D, et al. Oil debris and viscosity monitoring using ultrasonic and capacitance/inductance measurements [J]. Lubrication Science, 2013, 25(8): 507-524.
- 【11】DING X Y, ZHENG H, JIAN W X. Research on capacitive sensor for online oil monitoring [C]// Proceedings of Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Shenzhen). Shenzhen: IEEE, 2012: 1-4.
- 【12】MAITREYEE A S. Oil debris detection using capacitance and ultrasonic measurements [D]. OHIO: University of Akron, 2007.
- 【13】ITOMI S. Oil condition sensor: 7112973 [P]. 2006-09-26.
- 【14】POWRIE H. Use of electrostatic technology for aero engine oil system monitoring [C]// Proceedings of THE 2000 IEEE Aerospace Conference. MONTANA: IEEE, 2000: 57-72.

(下转第 113 页)

从综合测试结果看, 利用 ELECTRE-I 法优选出的 4[#] 润滑脂在梯姆肯 OK 值、磨痕直径、水淋流失量及氧化安定性等方面均有着不错的表现, 而且指标总体优于碳酸钙企业目前采用的同类产品。该润滑脂在现场 3 个月的试用结果表明, 其能够很好地适应球磨机大齿轮圈使用环境, 满足设备润滑要求。

5 结论

(1) 针对润滑脂研制过程中不同配方指标上存在的离散程度大, 无法直观地根据配方某几项指标评价的优劣进行配方选择的问题, 根据组合赋权法及 ELECTRE-I 法中的多属性决策原理, 建立了适用于润滑脂的配方优选模型。

(2) 以环境友好宽温型球磨机大齿轮圈复合润滑脂的研制为例, 组合赋权法及 ELECTRE-I 法优选出一种润滑脂配方。通过理化指标实验测试, 验证了优选方案的合理性。

(3) 优选的润滑脂多项理化指标优于企业当前使用同类产品, 且在实际使用中表现出良好的润滑性能及环境适应能力。因此, 将结合组合赋权的 ELECTRE-I 方法运用于润滑脂研制是有效可行的。

参考文献

- 【1】李雪静, 潘元青, 周惠娟. 润滑脂工业发展概况 [J]. 汽车工艺与材料, 2003(12): 1-3.
LI X J, PAN Y Q, ZHOU H J. Development situation of lubricating grease [J]. Automobile Technology & Material, 2003(12): 1-3.
- 【2】唐兴中, 蓝明新, 经建芳, 等. 夹角余弦赋权法在润滑油配方优选中的应用 [J]. 工具技术, 2014, 48(9): 37-40.
TANG X Z, LAN M X, JING J F, et al. Application of cosine weighting method in optimization of lubricant formulation [J]. Tool Engineering, 2014, 48(9): 37-40.
- 【3】FIGUEIRA J R, GRECO S, ROY B. ELECTRE methods with interaction between criteria: an extension of the concordance index [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 199(2): 478-495.
- 【4】王昆, 宋海洲. 三种客观权重赋权法的比较分析 [J]. 技术经济与管理研究, 2003(6): 48-49.
- 【5】唐兴中, 蓝明新, 经建芳, 等. 基于组合赋权-灰色关联投影法的润滑油配方优选 [J]. 润滑与密封, 2014, 39(6): 108-111.
TANG X Z, LAN M X, JING J F, et al. Optimization of lubricant formulation based on combination weight-grey relation projection method [J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(6): 108-111.
- 【6】高阳, 陈常青. 一种基于 ELECTRE 排序的简化方法 [J]. 统计与决策, 2006(10): 39-41.
- 【7】HATAMI-MARBINI A, TAVANA M. An extension of the Electre I method for group decision-making under a fuzzy environment [J]. Omega, 2011, 39(4): 373-386.
- 【8】唐彩珍, 刘琨, 梁慧, 等. 起重机吊臂专用润滑脂的研制 [J]. 当代化工, 2014(11): 2259-2261.
TANG C Z, LIU K, LIANG H, et al. Study on the special grease used in crane arms [J]. Contemporary Chemical Industry, 2014(11): 2259-2261.
- 【9】王海燕. 复合磺酸钙基润滑脂的制备与性能 [D]. 济南: 山东大学, 2007.
- 【10】刘大军, 王红, 孙洪伟, 等. 润滑脂低温相似粘度关联式的建立及验证 [J]. 石油炼制与化工, 2005, 36(9): 51-54.
LIU D J, WANG H, SUN H W, et al. Correlation for the grease apparent viscosity estimation at low-temperature [J]. Petroleum Processing & Petrochemicals, 2005, 36(9): 51-54.
- 【11】胡性祿. 第 2 讲 润滑脂的性能 (二) [J]. 石油商技, 2004, 22(2): 48-51.
- system for the measurement of water content in crude oil [J]. Sensors, 2014, 14(7): 11351-11361.
- 【19】DONG T, BARBOSA C. Capacitance variation induced by microfluidic two-phase flow across insulated interdigital electrodes in Lab-On-Chip devices [J]. Sensors, 2015, 15(2): 2694-2708.
- 【20】汪蓓蓓, 黄云志, 刘永洪. 平面电容传感器设计及在材料探伤中的应用研究 [J]. 传感技术学报, 2014, 27(7): 997-1001.
WANG P P, HUANG Y Z, LIU Y H. Research on planar capacitive sensor design and application in material injuries detection [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(7): 997-1001.

(上接第 107 页)

- 【15】WU T, WU H, DU Y, et al. Progress and trend of sensor technology for on-line oil monitoring [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(12): 2914-2926.
- 【16】STEVAN S L, PAITER L, GALVÃO J R, et al. Sensor and methodology for dielectric analysis of vegetal oils submitted to thermal stress [J]. Sensors, 2015, 15(10): 26457-26477.
- 【17】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.
- 【18】ASLAM M Z, TANG T B. A high resolution capacitive sensing