

反射式光纤油液污染度检测传感器设计*

张平, 梁洁, 孙天宇, 佟昆宏

(西安建筑科技大学机电工程学院 西安, 710055)

摘要 针对 70% 的液压设备故障由油液污染引起且固体颗粒为主要污染物, 以及常用油液污染度检测技术设备大多存在结构复杂、价格昂贵和不便在线检测的现状, 设计了一种反射式光纤油液污染度检测传感器。根据污染颗粒对光的阻挡致使光强的衰减现象, 结合光在液体中传播特性, 提出了油液污染度反射式光纤检测的工作原理。根据光纤纤端光场近似高斯分布的特性建立传感器数学模型, 在颗粒均匀分布的假设下, 分析了不同参数对传感器输出特性的影响, 确定了传感器探头结构, 设计了用于油液污染度检测的反射式光纤传感器, 并搭建了传感器实验平台。根据不同污染度等级配置标准油液, 对传感器特性进行验证。实验结果表明, 该传感器可以实现对不同污染度等级标准的液压油液检测。

关键词 反射式光纤; 油液污染; 传感器; 数学模型; 输出特性

中图分类号 TN25; TH137

引言

随着液压传动应用的拓展, 维修工作量及费用^[1]也越来越大。由于液压设备故障中有 70% 的故障是由油液污染引起的^[2], 而总污染故障的 60%~70% 又是由固体颗粒污染物引起的^[3], 因此检测油液的固体颗粒污染度, 对提高液压设备的工作可靠性、减少设备维修费用等具有重要意义^[4-5]。目前, 油液颗粒污染物检测技术主要分为 2 种: 离线检测技术和在线检测技术^[6]。离线检测方面, 实验室取样检测精度高, 但检测周期长、设备复杂且费用高^[7]。温焕晓等^[8]提出常用于离线检测的光阻型传感器, 但价格昂贵。在线检测方面, 文献[9-10]研制的电量型传感器仅适用于具有导电性的颗粒。张永祥等^[11]通过回声特性研制了超声波型油液检测传感器, 但其易受安装位置、超声波频率和机械振动的影响。孔令仁等^[3]设计了滤膜堵塞型传感器, 但需要一定时间的淤积才能检测, 且需更换滤膜。

光纤传感器具有可挠曲、抗电磁干扰、结构简单和体积小等特点, 可将传感器探头放入油液中实现快速检测^[12]。文献[13-14]基于光散射特性及 Lambert-Beer 定律设计了光透型光纤传感器, 该设备可在线检测, 但价格昂贵、装置复杂。邓乐等^[15]设计了反射式强度调制型光纤油液污染度传感器, 但平行光的入射使接收光受到很大影响。笔者基于光场的准高斯分布,

提出一种结构简单、低成本、检测速度快且具有在线检测潜力的反射式光纤油液污染度检测传感器。

1 反射式光纤油液污染度检测原理

笔者提出的反射式光纤油液污染度检测原理如图 1 所示。光通过入射光纤传输到油液中, 一部分光经过反射面后由接收光纤接收送至光电转换器进行光电转换, 另一部分则被污染颗粒阻挡, 或发生散射、反射, 这时接收光纤接收到的光功率将减弱。光功率的衰减量与污染颗粒在接收光纤处的投影面积有关, 该部分光不会被接收光纤接收, 因此接收光纤接收的光功率的强弱可以反映油液的污染程度, 可通过检测接收光纤光功率实现油液污染度的检测。

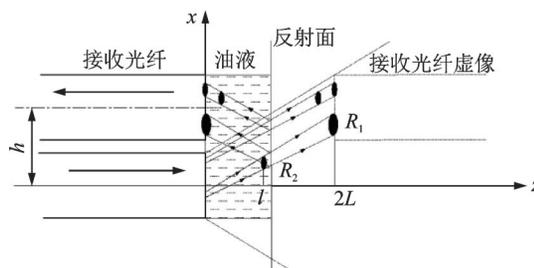


图 1 反射式光纤油液污染度检测原理图

Fig.1 principle diagram of reflective optical fiber oil contamination detection sensor

* 国家自然科学基金资助项目(51405366);陕西省液压技术重点实验室基金资助项目(YYS2022KF08)

收稿日期:2021-02-02;修回日期:2021-04-20

2 反射式光纤油液污染度检测传感器模型与结构

2.1 纤端光场分布

纤端光场不是纯粹的高斯光束和均匀分布的几何光束,而是更接近于两者的混合^[16]。纤端光场的场强分布表达式为

$$I = \frac{K_0 I_0}{\pi R^2(L)} \exp[-h^2/R^2(L)] \quad (1)$$

其中: K_0 为光波在发射光纤中的损耗; I_0 为光源耦合到光纤中的光强; h 为发射光纤和接收光纤的轴间距; L 为光纤端面与反射面的垂直距离; $R(L)$ 为光场分布等效半径。

$R(L)$ 表达式为

$$R(L) = a_0 + k \tan \theta_{NA} L^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

其中: a_0 为纤芯半径; k 为光场耦合系数; θ_{NA} 为光纤最大入射角。

2.2 传感器模型建立

根据光纤纤端光场近似高斯分布的特性,光强的衰减量与污染颗粒在接收光纤处的投影面积有关。油液污染等级指单位体积的油液中含一定尺寸的颗粒状污染物的数量,是衡量油液污染程度的量化指标。通过建立光功率与污染粒子的尺寸和浓度的函数关系,来反映接收光强与油液污染度的对应关系。

如图 1 所示,以发射光纤中心轴线为 z 轴,以过两光纤端面中心的连线为 x 轴。通过计算接收光纤处污染颗粒的投影面积和最大接收面积的占比来反映光功率的大小,对污染颗粒进行积分来表示接收光纤处污染颗粒的投影面积。假设:①油液中的污染颗粒均为规则的球状并均匀分布;②污染颗粒与颗粒阴影相互之间不会互相遮挡光线。

污染颗粒半径与颗粒阴影半径之间的关系为

$$R_1 = 2LR_2/l \quad (3)$$

其中: R_1 为污染颗粒阴影半径; R_2 为污染颗粒半径; l 为污染颗粒与光纤端面的垂直距离。

通过对污染颗粒在区间 $(0, 2L)$ 进行积分来计算污染颗粒总投影面积。积分区域示意图如图 2 所示

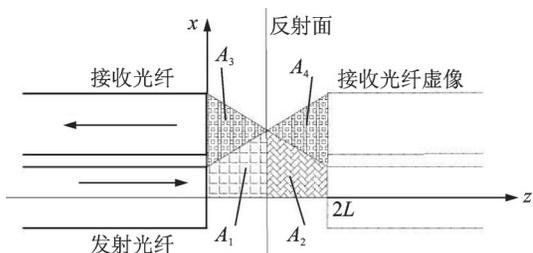


图 2 积分区域示意图

Fig.2 Schematic diagram of integration area

示,其中: A_1 和 A_3 分别为发射光反射光混合区域和纯反射光区域; A_2 和 A_4 分别为 A_1 和 A_3 的镜向区域。光经反射面后到达接收光纤的过程中,若只对 A_1 和 A_4 积分,则未考虑 A_1 区域反射光作用下污染颗粒物阻挡产生的投影。为解决此问题,对 A_1, A_2 和 A_4 区域进行积分来表示污染颗粒总投影面积。

图 3 为“切薄片”法示意图。利用“切薄片”的方式对 A_1, A_2 和 A_4 区域积分。在 dl 厚度内的颗粒个数为

$$N = \pi R_1^2(l) dl c \quad (4)$$

其中: c 为油液污染颗粒的浓度(即每毫升污染油液中的污染颗粒个数); $R_1(l)$ 为 l 处的光场分布等效半径。

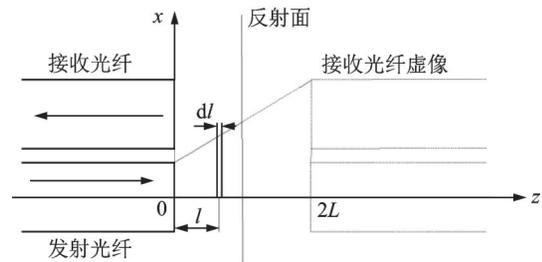


图 3 “切薄片”法示意图

Fig.3 Schematic diagram of "slicing" method

l 处的单一颗粒在接收光纤处的投影面积为

$$S_1 = \pi(2LR_2/l)^2 \quad (5)$$

由式(4),(5)可知 l 处的颗粒在接收光纤处的投影面积为

$$S_2 = \pi R_1^2(l) dl c \pi(2LR_2/l)^2 \quad (6)$$

在区间 $(0, 2L]$ 范围内积分,得到污染颗粒在接收光纤处的总投影面积为

$$S_3 = \int_0^{2L} \pi R_1^2(l) c \pi(2LR_2/l)^2 dl \quad (7)$$

在 $2L$ 处,接收光纤可接收光的面积与光照射面积的占比为

$$K_1 = 1 - \frac{\int_0^{2L} \pi R_1^2(l) c \pi(2LR_2/l)^2 dl}{\pi R_2^2(2L)} \quad (8)$$

其中: $R_2(2L)$ 为在 $2L$ 处的等效半径。

结合式(1),(8),得到污染颗粒浓度和颗粒尺寸与光强的强度调制函数为

$$I = \left\{ 1 - \frac{\int_0^{2L} \pi R_1^2(l) c \pi(2LR_2/l)^2 dl}{\pi R_2^2(2L)} \right\} \frac{K_0 I_0}{\pi R^2(l)} \times \exp(-h^2/R^2(l)) \quad (9)$$

假设反射面为光滑镜面,忽略散射的影响,接收光纤接收到的光强等于接收光纤虚像接收到的光强乘以镜面反射系数。根据光纤纤端光强分布假设,式(1)在接收光纤端面积分得到的光功率为

$$\varphi(c) = \rho \iint_S KI \exp\left(-\sum_i \eta_i r_i\right) dS \quad (10)$$

其中: ρ 为镜面反射率; K 为接收光纤的光功率损耗系数(本征损耗); $\exp\left(-\sum_i \eta_i r_i\right)$ 为接收光纤弯曲所附加的损耗; S 为光纤有效接收面积。

将式(9)代入式(10),得到污染颗粒浓度和颗粒尺寸与接收光功率的调制函数为

$$\varphi(c) = \rho \iint_S K_1 \frac{K_0 K I_0}{\pi R^2(l)} \exp\left(\frac{-h^2}{R^2(l)}\right) \times \exp\left(-\sum_i \eta_i r_i\right) dS \quad (11)$$

2.3 传感器结构

图4为反射式光纤油液污染度检测传感器结构示意图,由传感器主体、发射光纤、接收光纤、反射体和进液套组成。其中,传感器主体、进液套和反射体通过螺纹连接,使反射面与传感器主体之间形成可确定的距离。

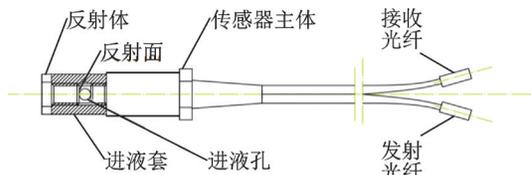


图4 反射式光纤油液污染度检测传感器结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of reflective optical fiber sensor for oil contamination degree

进液套结构如图5所示。污染油液通过进液孔进入进液套内,从出液孔流出,反射体的反射面和传感器主体的光纤端面间形成液膜,液膜厚度为反射面与传感器主体端面的垂直距离,即反射面距离。

为了增大接收光功率,将接收光纤设置为6根。笔者设计的单接收光纤探头排列如图6所示。传感器结构中心为单根发射光纤,外围为6根接收光纤。



图5 进液套结构

Fig.5 Structure of liquid inlet sleeve

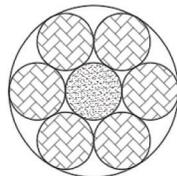


图6 单接收光纤探头排列

Fig.6 Single receiving fiber probe arrangement

式(11)较为复杂,此处做近似简化处理。由于单根多模光纤纤芯半径较小,可将接收光纤端面中心点处的光强作为各个光纤面上的平均光强,即

$$\varphi(c) = 6\rho \left\{ 1 - \frac{\int_0^{2L} \pi R_1(l)^2 c \pi (2LR_2/l)^2 dl}{\pi R_2(2L)^2} \right\} \times \frac{K_0 K I_0 S_1}{\pi R(l)^2} \exp\left(\frac{-h^2}{R(l)^2}\right) \exp\left(-\sum_i \eta_i r_i\right) \quad (12)$$

由式(2),(12)可知,当反射面距离 l 、发射光纤与接收光纤的轴间距 h 、纤芯半径 a_0 、光纤的数值孔径(numerical aperture, 简称NA)一定时,光纤的输出特性仅与油液中的污染颗粒尺寸和浓度有关,光功率的多少决定于污染颗粒的尺寸和浓度。因此,可通过检测接收光纤的接收光功率得到油液受污染程度。

3 传感器输出特性仿真

3.1 污染等级标准

ISO 4406 污染度等级标准采用三位码分别代表每毫升污染油液中尺寸 $\geq 4 \mu\text{m}$ 的颗粒数、尺寸 $\geq 6 \mu\text{m}$ 的颗粒数和尺寸 $\geq 14 \mu\text{m}$ 的颗粒数。因此,笔者选用5,8和25 μm 3种尺寸的铜粉磨粒,分别表示ISO等级标准所评定的油液污染物颗粒尺寸。

贾瑞清等^[17]对液压系统清洁度等级研究表明,普通机械的污染度等级多在ISO 4406 污染度等级17/14浮动。因此,选定ISO 18/16/13,ISO 17/15/12,ISO 16/14/11,ISO 15/13/10和ISO 14/12/9这5种污染度等级标准进行特性仿真及实验验证。

式(12)为单一尺寸的颗粒浓度与光功率的数学模型,无法同时对不同尺寸颗粒情况下的传感器输出特性进行仿真。针对5,8和25 μm 3种尺寸的颗粒,采用代替法,1个10 μm 的磨粒投影面积相当于4个5 μm 的磨粒投影面积,1个10 μm 的磨粒投影面积相当于2个8 μm 的磨粒投影面积,1个25 μm 的磨粒投影面积相当于6个10 μm 的磨粒投影面积。在仿真过程中,污染油液的磨粒浓度可用10 μm 的颗粒等价代替5,8和25 μm 的颗粒浓度,将最高污染度等级ISO18/16/13定为磨粒浓度标准。等级18对应的每毫升颗粒数为2500个,等价代替等级16和13所对应的磨粒浓度之后,等级ISO18/16/13的每毫升颗粒数为15340个,等级ISO14/12/9的每毫升颗粒数为982个。因此,输出特性仿真时,取每毫升颗粒数范围为0~20000个。

3.2 输出特性仿真

根据式(12),以 $h=300 \mu\text{m}$, $a_0=200 \mu\text{m}$, $\text{NA}=0.22$, $l=0.7 \text{ mm}$ 为基准值,固定其他参数不变,对其

中一个参数进行比较分析。改变不同参数时传感器

输出特性曲线如图7所示。

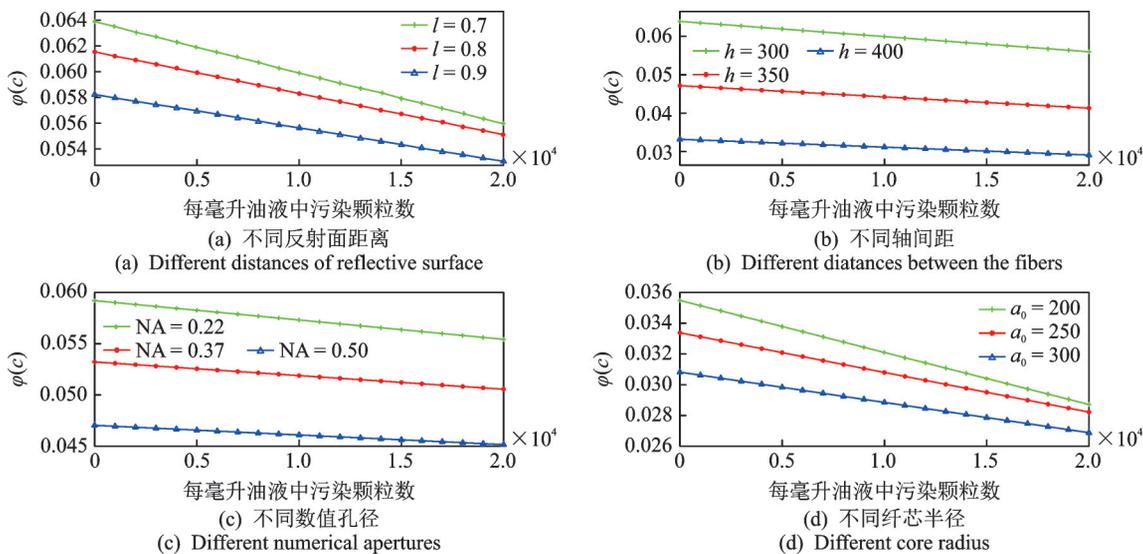


图7 改变不同参数时传感器输出特性曲线

Fig.7 Output characteristic curve of sensor with different parameters

由图7可知:当其他条件不变、每毫升颗粒数范围为0~20 000个时,反射面距离 $l=0.7$ mm比 $l=0.8$ mm的灵敏度增加了33.3%;接收光纤纤芯半径 $a_0=200$ μm 比 $a_0=300$ μm 的灵敏度增加了45.8%;轴间距 $h=300$ μm 时的灵敏度是 $h=400$ μm 时的1.67倍;数值孔径 $\text{NA}=0.22$ 时的特性曲线灵敏度是 $\text{NA}=0.50$ 时的1.5倍。因此,在污染油液中,每毫升颗粒数范围为0~20 000个时,利用控制变量法研究光纤结构参数(l, d, NA, a_0)对传感器输出特性的影响。结果表明,反射面距离相对越小、光纤轴间距、光纤数值孔径以及光纤纤芯半径越小,传感器接收光功率越大,检测灵敏度越高。

笔者设计的光纤探头反射面距离为0.7 mm, $a_0=200$ μm , $h=300$ μm , $\text{NA}=0.22$ 。根据式(12)得到传感器输出特性调制曲线如图8所示。

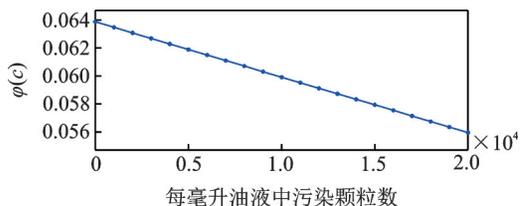


图8 输出特性调制曲线

Fig.8 Output characteristic modulation curve

4 实验与结果

4.1 检测系统

接收光纤接收到的光信号经过处理,转化成为

可检测的信号。图9为信号检测系统模块框图。

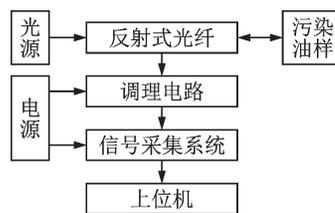


图9 信号检测系统模块框图

Fig.9 Block diagram of signal detection system module

各模块主要功能如下:反射式光纤传感器接收光纤发射出携带油液污染度信息的光信号;当光信号抵达调理电路模块时,通过光电转换模块成为可被检测的电信号,光电信号转换模块的光电转换芯片为OPT101,其外接直流补偿电路实现对稳定背景光干扰的滤除,陷波电路模块滤除周围环境的工频干扰,滤波放大模块实现低频滤波,滤除混叠干扰信号;信号采集模块实现对电信号的输出采集,最终输入上位机利用LabVIEW进行数据显示处理。

4.2 油样配制

参考ISO 4406污染度等级标准,通过称重法配制不同污染度等级的油样进行检测。根据选定的ISO 18/16/13, ISO 17/15/12, ISO 16/14/11, ISO 15/13/10和ISO 14/12/9这5种污染度等级标准,采用32号抗磨液压油,通过称重法配制不同等级油样。因实验磨粒质量均为毫克级,且相邻污染度等级间的污染物浓度均为倍数增长,所以实验过程中采用逐级稀释的方法配制了5种污染度等级油样。

图 10 为配制油样示意图。

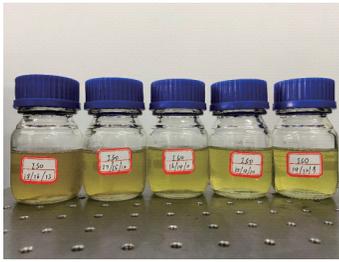


图 10 配制油样示意图

Fig.10 Schematic diagram of preparing oil sample

4.3 实验台搭建及测试

图 11 为油液污染度反射式光纤检测实验台, 主要包括: 650 nm 激光光源、光纤传感器、信号调理盒、数据采集模块、上位机和不同污染等级的油样。

依次对 5 种不同污染等级标准的油样进行检测, 实验数据如表 1 所示。将实验数据进行处理, 拟合得到的 ISO 标准污染油液输出电压值曲线如图 12 所示。每毫升颗粒数范围为 0~20 000 个时, 随着污染度等级的增大, 即污染油液中污染颗粒浓

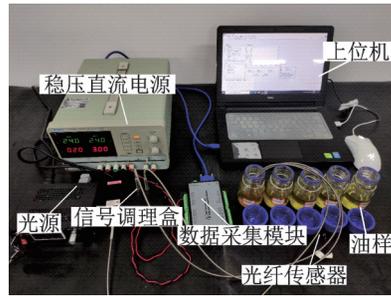


图 11 油液污染度反射式光纤检测实验台

Fig.11 Reflective optical fiber test bench for oil pollution degree

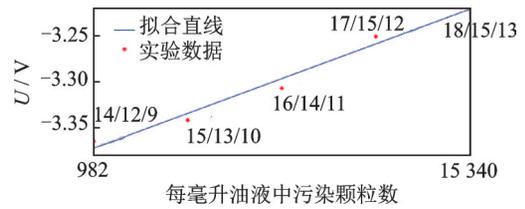


图 12 ISO 标准污染油液输出电压值曲线

Fig.12 Output voltage curve of ISO standard contaminated oil

度的增大, 输出的电压值不断减小。分析实验结果可知, 实验结果与仿真结果基本一致, 接收光功率和输出电压随着污染油液固体颗粒浓度的增大而减小。可见, 该传感器可有效区分油液污染等级。

表 1 实验数据

Tab.1 Experimental data

污染标准等级	实验组数										平均值
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ISO 14/12/9	-3.393 3	-3.350 2	-3.361 7	-3.332 9	-3.392 0	-3.328 6	-3.381 0	-3.376 9	-3.349 4	-3.381 2	-3.364 7
ISO 15/13/10	-3.364 4	-3.326 9	-3.337 6	-3.314 9	-3.361 3	-3.303 9	-3.357 3	-3.354 8	-3.329 7	-3.357 8	-3.340 8
ISO 16/14/11	-3.325 7	-3.291 2	-3.307 8	-3.277 8	-3.333 9	-3.275 9	-3.327 6	-3.318 1	-3.298 8	-3.314 4	-3.307 1
ISO 17/15/12	-3.262 2	-3.272 5	-3.236 1	-3.217 7	-3.270 2	-3.223 2	-3.273 9	-3.254 4	-3.233 5	-3.264 9	-3.250 9
ISO 18/16/13	-3.236 5	-3.216 7	-3.187 4	-3.204 4	-3.250 1	-3.197 9	-3.241 8	-3.233 7	-3.201 6	-3.238 2	-3.220 8

5 结 论

1) 在假设油液中的污染颗粒为规则的球状且均匀分布、污染颗粒与颗粒阴影之间不会互相遮挡光线的前提下, 油液污染度反射式光纤检测传感器根据油液污染固体颗粒对光的阻挡致使光强衰减的作用, 得出了光功率与颗粒污染浓度的关系, 通过检测光功率的变化实现对颗粒污染浓度的检测。

2) 由于油液污染固体颗粒对光的阻挡致使光强衰减, 结合高斯光束分布和均匀几何光束分布理论对传感器的纤端光场分布进行分析, 得到其强度调制函数表达式, 并建立数学模型。

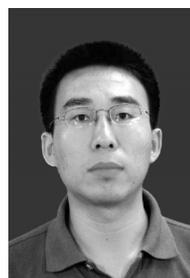
3) 仿真分析表明: 当其他条件不变时, 仅增大光纤的反射面距离、轴间距、光纤的数值孔径和接收光纤的纤芯半径时, 光纤传感器的灵敏度减小。

4) 以不同污染度等级标准的液压污染油液为对象, 进行传感器输出特性实验。结果表明, 笔者设计的反射式光纤油液污染度检测传感器可实现对不同污染度等级标准的液压油液检测。

参 考 文 献

[1] NG F, HARDING J A, GLASS J. Improving hydraulic excavator performance through in line hydraulic oil contamination monitoring [J]. Mechanical

- Systems and Signal Processing, 2017, 83: 176-193.
- [2] 吴赛龙, 林森, 任志超, 等. 基于光纤传感的液压油污染度检测[J]. 流体传动与控制, 2016(5): 27-30.
WU Sailong, LIN Sen, REN Zhichao, et al. Detection of hydraulic oil pollution degree based on optical fiber sensing[J]. Fluid Transmission and Control, 2016(5): 27-30. (in Chinese)
- [3] 孔令仁, 卢继霞, 苏子龙, 等. 基于滤膜堵塞型的油液污染检测系统的设计[J]. 润滑与密封, 2017, 42(3): 107-110.
KONG Lingren, LU Jixia, SU Zilong, et al. Design of oil contamination detection system based on filter clogging[J]. Lubrication and Sealing, 2017, 42(3): 107-110. (in Chinese)
- [4] ZENG L, ZHANG H P, WANG Q, et al. Monitoring of non-ferrous wear debris in hydraulic oil by detecting the equivalent resistance of inductive sensors [J]. Micromachines, 2018, 9(3):1-8.
- [5] 任松, 徐雪茹, 欧阳汛, 等. 旋挖钻机设备油液智能分析与健康监测[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(3): 597-603.
REN Song, XU Xueru, OUYANG Xun, et al. Oil intelligent analysis and health monitoring of rotary drilling rig equipment [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3):597-603. (in Chinese)
- [6] 彭峰, 王立勇, 吴健鹏, 等. 油液磨粒在线监测技术发展现状与趋势[J]. 设备管理与维修, 2016(Sup2): 26-28.
PENG Feng, WANG Liyong, WU Jianpeng, et al. Development status and trend of on-line monitoring technology for oil-liquid abrasive particles [J]. Equipment Management and Maintenance, 2016(Sup2): 26-28. (in Chinese)
- [7] RAUSCHER M, TREMMEL A, SCHARDT M, et al. Non-dispersive infrared sensor for online condition monitoring of gearbox oil[J]. Sensors, 2017, 17(2): 399-408.
- [8] 温焕晓, 付敬业. 光阻法测量油液中颗粒污染度的研究[J]. 宇航计测技术, 2002, 22(6):38-41.
WEN Huanxiao, FU Jingye. Study on the measurement of particle pollution in oil by photoresistance method [J]. Aerospace Measurement Technology, 2002, 22(6): 38-41. (in Chinese)
- [9] 熊子伦, 卢继德, 李琪, 等. 利用电容器验证油液的污染程度[J]. 物理实验, 2018, 38(12):48-50.
XIONG Zilun, LU Jide, LI Qi, et al. Using capacitors to verify the pollution degree of oil[J]. Physics Experimentation, 2018, 38(12): 48-50. (in Chinese)
- [10] FAROOQ K, FOWLER R. Comparison of water measurement results in polyol ester-based lubricating fluids determined by the coulometric Karl Fischer method and a thin-film polymer capacitive water sensor [J]. Tribotest, 2001, 8(2):151-161.
- [11] 张永祥, 明廷锋. 超声波颗粒监测尺寸标定方法研究[J]. 振动、测试与诊断, 2003(4):298-301.
ZHANG Yongxiang, MING Tingfeng. Research on size calibration method of ultrasonic particle monitoring [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2003(4): 298-301. (in Chinese)
- [12] 张策, 周剑超, 汤科, 等. 反射式双光纤传感探头的实验研究[J]. 轻工科技, 2020, 36(6):89-91.
ZHANG Ce, ZHOU Jianchao, TANG Ke, et al. Experimental study on reflective dual optical fiber sensing probe [J]. Light Industry Science and Technology, 2020, 36(6): 89-91. (in Chinese)
- [13] YONG H Y, WEI H W, XIN P Y, et al. An integrated on-line oil analysis method for condition monitoring [J]. Measurement Science & Technology, 2003, 14(11): 1973-1977.
- [14] 任国军. 基于光纤传感技术的液压油污染度在线检测[J]. 液压与气动, 2008(7): 38-40.
REN Guojun. On-line detection of hydraulic oil contamination based on optical fiber sensing technology [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2008(7): 38-40. (in Chinese)
- [15] 邓乐, 熊开选. 反射式光强调制型光纤油液污染度传感器[J]. 煤矿自动化, 1997(1):55-57.
DENG Le, XIONG Kaixuan. Reflective light-emphasized optical fiber oil pollution degree sensor [J]. Coal Mine Automation, 1997(1): 55-57. (in Chinese)
- [16] YUAN L, JIAN P, TAO Y, et al. Analysis of the compensation mechanism of a fiber-optic displacement sensor [J]. Sensors & Actuators a Physical, 1993, 36(3): 177-182.
- [17] 贾瑞清, 王炉平, 弓乐, 等. 液压系统主动维护中目标清洁度的设置和优化[J]. 润滑与密封, 2006(12): 26-29.
JIA Ruiqing, WANG Luping, GONG Le, et al. Setting and optimization of target cleanliness in active maintenance of hydraulic system [J]. Lubrication Engineering, 2006(12): 26-29. (in Chinese)



第一作者简介:张平,男,1980年5月生,博士、副教授。主要研究方向为流体传动与控制,光纤检测技术。曾发表《自调整复合级联形态滤波算法及应用》(《振动、测试与诊断》2015年第35卷第3期)等论文。

E-mail: zp_80@163.com