

# 使用二态测试的铁磁磨粒质量浓度检测方法\*

梁寒钰, 魏海军, 何磊, 谢飞, 付柄春

(上海海事大学商船学院 上海, 201306)

**摘要** 现有油液铁磁磨粒检测技术中,使用旋转式 PQ 仪只能单一检测铁磁性磨损颗粒无量纲指数,使用插入式铁量仪只能单一检测铁磁磨粒浓度,并且检测精度较低。针对此问题,基于旋转式 PQ 仪设备对样品 2 种不同状态进行了测试,通过指数计算与系数拟合,建立起将 PQ 指数换算成铁磁性磨粒浓度的数学模型。研究表明:该拟合方法对大于 10  $\mu\text{m}$  的铁磁性磨粒有较高的精度,在这一范围内检测值与油液中铁磁磨粒含量实际值相对误差在  $\pm 8\%$  以内;使用该方法可以同时分析油液中铁磁磨粒 PQ 指数与质量浓度,能够更有效地判断机械设备中的摩擦磨损状况并优化大尺寸磨粒分析。

**关键词** 铁磁磨粒测量仪;润滑油;PQ 指数;质量浓度;二态测试

**中图分类号** TH117.1

## 引言

润滑油具有减少设备磨损、冷却、清洗和密封等功用。在机械设备长期工作过程中,由于高温、污染和剪切力的作用,滑油会发生劣化并出现金属磨屑、碳渣和有机沉淀物等现象,从而造成润滑故障<sup>[1-8]</sup>。通过对润滑油中金属磨粒尺寸、数量和材质等进行检测,有助于判断设备的磨损部位及磨损程度,对设备进行针对性维护、提高设备工作可靠性具有重要意义<sup>[9-15]</sup>。

PQ 指数和铁磁磨粒含量是目前用于大型设备,特别是承受冲击载荷的大型机械异常磨损检测最常用的现场或试验室指标。其中,PQ 指数是油液检测中铁磁磨粒分析的重要依据。梁培沛等<sup>[4]</sup>通过探索典型风电机组轴承磨损油液监测技术,证实了 PQ 指数、铁谱分析技术对预警滚动轴承磨损和预防设备事故的可行性和有效性。王圆等<sup>[5]</sup>使用 Kitwiki PQM 型测定仪对风电机组齿轮油进行分析,判断了摩擦副的磨损失效原因,并论证了该方法在风电机组状态监测中的重要性。胡学超等<sup>[8]</sup>对某风电场运行 3 年的齿轮油进行监测,发现其中颗粒度、PQ 指数异常增高,判断设备发生异常磨损,并结合进一步结合齿轮箱内窥镜检查结果对齿轮箱运行中的主要失效原因进行了探讨。闫宗庆等<sup>[16]</sup>使用英国 MTML 公司研发的 MIDAS 系列自动 PQ 铁量仪对疲劳寿命

下齿轮润滑油进行检测,提出了对油液中的铁含量和颗粒度进行拟合及预测的方法。

日常维护中,通过 PQ 指数等指标对设备磨损故障判断有着很高的可行性与有效性,但目前基于电磁感应方法的铁质磨损检测结果多受到线圈感应体积内铁磁材料浓度、大小和空间分布的影响,且没有建立起 PQ 指数与铁磁性磨粒含量 2 种相近指标的关联性,在设备磨损状态判断上会产生一些分歧,因此传统的油液铁质磨损检测方法的分析效果还没有达到最优化。磨粒检测技术的发展需要进一步优化磨粒检测传感器的参数,将多种检测技术进行融合,以提高磨粒检测的精度和细化磨粒分析<sup>[17]</sup>。

笔者建立了 PQ 指数与铁磁磨粒浓度的关联模型,可解决传统检测技术只能得到单一判断数据的缺点,并优化检测效果以及磨粒分析,能够更好地判断设备的磨损部位及磨损程度,有助于对设备进行针对性维护,提高设备工作的可靠性。

## 1 试验设计

### 1.1 仪器及材料

试验仪器包括旋转式 PQ 仪(英国 Kittiwake 公司 ANALEX PQL 型)、插入式铁量仪(挪威 Wilhelmson 公司 UNITOR FWM 型)以及精密天平等。

\* 上海市科技计划资助项目(20DZ2252300)

收稿日期:2022-03-23;修回日期:2022-09-25

材料包括 Shell 壳牌 API SN 通用合成机油、高纯超细铁粉。

笔者设计“均匀分布”和“均匀沉积”2种状态对样品进行测试。由于 PQ 指数是一个无量纲数值,为方便后续关联性模型的建立,样品的数据结果以  $PQ'$  表示,即样品单位取样质量的 PQ 指数<sup>[5]</sup>。

## 1.2 样品制备

配置样品选择新油作为溶剂油,通过精密筛网将高纯铁粉(铁磁磨粒)筛分并对其编号,磨粒尺寸与单尺寸样品配制浓度如表1所示。

表1 磨粒尺寸与单尺寸样品配制浓度

Tab.1 Particle size and Concentration prepared by a single size sample

编组	磨粒尺寸/ $\mu\text{m}$	样品浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$		
A	<5	102.0	213.9	317.7
B	5~10	117.7	207.9	309.8
C	10~20	96.1	198.0	299.9
D	20~30	106.0	209.8	297.9
E	30~40	112.0	213.4	305.7
F	40~50	100.0	211.9	301.6
G	50~75	105.8	199.8	295.5
H	75~100	101.9	208.0	292.9

实际情况中,样品的磨屑大小是复杂的混合态,因此还需要多尺寸油铁混合样品的试验数据。多尺寸样品配制浓度如表2所示。

表2 多尺寸样品配制浓度

Tab.2 Concentration prepared by multi-size samples

编组	磨粒质量			油质量	样品浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$
	$M_{\text{Fe1}}$	$M_{\text{Fe2}}$	$M_{\text{Fe3}}$	$M_{\text{Oil}}$	
A:B	0.019 5	0.020 1	—	50.045	791.0
A:D	0.021 3	0.020 5	—	50.329	829.9
D:G	0.019 7	0.020 6	—	50.119	803.5
G:H	0.019 4	0.020 3	—	50.116	791.5
A:D:G	0.014 8	0.014 7	0.015 7	50.555	893.3

表2中的混合编组对应表1中各单尺寸磨粒,磨粒质量指每种单尺寸磨粒的取样质量,与编组顺序对应。如编组A:B中, $M_{\text{Fe1}}$ 为单尺寸磨粒A的取样质量, $M_{\text{Fe2}}$ 为单尺寸磨粒B的取样质量。

## 1.3 试验步骤

具体试验步骤如下:

1) 将表1,2中的试验样品放在恒温烘箱中加

热到  $50^{\circ}\text{C}$ ,室温控制在  $20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ,取样前充分摇晃样品,保证磨粒均匀分布在润滑油中;

2) 快速取样并测试,记录取样质量,每个样品重复测定10次,取平均值作为结果,平行取样若无较大偏差则认为样品数据满足“均匀分布”状态;

3) 静置上一步测试的样品,待其内铁磁磨粒由于自重完全沉积于样品盒底部后,重复上一步骤,获得“均匀沉积”状态下的 PQ 指数,额外静置1h后数据若无较大偏差则认为满足沉积状态;

4) 分析表1和表2中样品的数据变化趋势、PQ 指数与铁磁磨粒尺寸的关联性;

5) 分析无量纲 PQ 指数与样品中铁磁性物质含量的关系,建立适当的数学模型;

6) 验证建立的 PQ 指数与铁磁磨粒浓度相关性模型的可行性与精度,并与传统方法进行比较。

## 2 方法建立与试验结果

### 2.1 PQ 指数相关性分析

#### 2.1.1 单尺寸样品关联性

本研究通过对表1所配单尺寸磨粒样品进行试验,发现样品的 PQ 指数与样品浓度有一定的关联性。假定两者的关联系数为  $K$ ,则

$$K = PQ'_i / N \quad (1)$$

其中: $PQ'_i$ 为测量的单位质量 PQ 指数(后文中  $PQ'_i$  均为“均匀分布”状态下测试结果); $N$ 为样品浓度。

单一尺寸样品试验数据与关联系数如表3所示。

系数  $K$  表征了每种单一尺寸磨粒下,样品的  $PQ'$  与浓度  $N$  的对应关系。取每一尺寸样品平均系数  $K$ ,建立计算公式为

$$K = 0.113 3e^{0.015 2Z} \quad (2)$$

其中: $Z$ 为铁磁磨粒尺寸。

研究发现,当样品中铁磁磨粒含量在相同梯度时,样品中磨粒尺寸  $Z$  与仪器测得的 PQ 指数呈指数关系。

#### 2.1.2 多尺寸样品关联性

通过对表2制备的多尺寸磨粒样品进行试验,得到多尺寸样品试验数据与计算数据,如表4所示。样品的仪器测量值  $PQ'_i$  与理论计算值  $PQ'_c$  为

$$PQ'_c = \sum_{i=1}^n PQ'_i = \left( \frac{M_{\text{Fe}i}}{M_{\text{Fe}i} + M_{\text{Oil}}} \times 10^6 \right) K_{\text{Fe}i} \quad (3)$$

其中: $PQ'_c$ 为多尺寸理论计算 PQ 数据; $PQ'_i$ 为单尺

表 3 单一尺寸样品试验数据与关联系数

Tab.3 Single size sample data and correlation coefficient

编组	样品浓度/(mg·kg <sup>-1</sup> )	测量值 PQ <sub>T</sub> '	关联系数 K
A	102.0	9.05	0.089
	213.9	21.49	0.101
	317.7	37.57	0.118
B	117.7	16.54	0.141
	207.9	35.09	0.169
	309.8	52.67	0.170
C	96.1	14.14	0.147
	198.0	35.61	0.180
	299.9	56.55	0.189
D	106.0	13.13	0.124
	209.8	32.39	0.154
	297.9	58.40	0.196
E	112.0	18.41	0.164
	213.4	49.64	0.233
	305.7	78.20	0.256
F	100.0	17.59	0.176
	211.9	44.05	0.208
	301.6	70.69	0.234
G	105.8	46.87	0.443
	199.8	86.61	0.434
	295.5	125.98	0.426
H	101.9	50.46	0.495
	208.0	87.74	0.422
	292.9	153.39	0.524

表 4 多尺寸样品试验数据与计算数据

Tab.4 Multi-size sample test data and calculation data

编组	样品浓度/(mg·kg <sup>-1</sup> )	测量值 PQ <sub>T</sub> '	理论值 PQ <sub>C</sub> '
A:B	791.0	123.39	104.08
A:D	829.9	148.43	107.73
D:G	803.5	247.36	240.54
G:H	791.5	334.47	362.47
A:D:G	893.3	254.90	210.77

寸理论计算 PQ 数据(*i* 对应表 1 中单尺寸磨粒编组,共 8 组,当 *i*=1 对应编组 A,即最小尺寸铁质磨粒);*M<sub>Fei</sub>* 为单尺寸磨粒取样质量;*M<sub>Oil</sub>* 为溶剂油取样质量;*K<sub>Fei</sub>* 为单尺寸磨粒关联系数。

式(3)中多尺寸磨粒理论数据由各单尺寸磨粒按浓度比例的理论计算值累加得出。

由表 4 可以看出,仪器测量值 PQ<sub>T</sub>' 与理论计算值 PQ<sub>C</sub>' 结果接近,证明通过式(3)反推导关联系数 *K* 和铁磁磨粒浓度 *N* 得到接近测量值的 PQ' 是可行

的。但是,实际样品中铁磁磨粒尺寸是未知因素,无法直接得到关联系数 *K*,因此需要建立拟合公式。

## 2.2 PQ 指数与铁磁磨粒浓度相关性

### 2.2.1 基于旋转式 PQ 仪的二态测试

二态是指“均匀分布”状态和“均匀沉积”状态。通过关联系数可以将“均匀分布”状态测量的 PQ 指数转换成铁磁磨粒含量,但是这一阶段并没能得到固定常数或范围的关联系数 *K*。为了解决此问题,本研究参考了相关文献<sup>[2,9,13-15]</sup>并通过试验,设计出一种基于旋转式 PQ 仪进行二态测试来计算“沉均比”的方法。单尺寸样品二态测试数据如图 1 所示,为表 1 中单尺寸样品在两种状态下测试的 PQ 指数。可以看出,沉积后的样品测得的 PQ 指数大于分布均匀状态立即测试的 PQ 指数,而这种差异会随着磨粒尺寸的变大而逐步变小,并且最后会趋近相同。

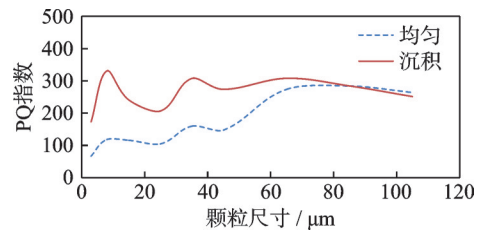


图 1 单尺寸样品二态测试数据

Fig.1 Single size sample test data in two-states

基于空间分布与磨粒的自重,通过试验可以得到磨粒在样盒空间内均匀分布的数据 PQ<sub>D</sub> 和磨粒均匀沉积样盒底部的数据 PQ<sub>S</sub>。“沉均比”*G<sub>T</sub>* 则是两种测试状态的比值,即

$$G_T = PQ_S / PQ_D \quad (4)$$

由于测试对象相同,所以不需要代入取样质量计算。表 5 为单尺寸样品沉均比。可以看出,沉积后样品数据整体呈现增长变化,且增长差异与磨粒尺寸的大小有关。因此,可建立单一尺寸磨粒沉均比 *G<sub>Fei</sub>* 与磨粒尺寸 *Z* 的相关性公式为

$$G_{Fei} = 2.663 1e^{-0.01Z} \quad (5)$$

表 5 单尺寸样品沉均比

Tab.5 Single size two state data ratio

编组	<i>G<sub>T</sub></i>	编组	<i>G<sub>T</sub></i>
A	2.600	E	1.927
B	2.803	F	1.860
C	2.092	G	1.126
D	1.980	H	1.000

为了验证多尺寸混合样品同样适用这一规律,通过式(6)进行累加计算,即

$$G_C = \sum_{i=1}^n G_i = \left( \frac{M_{Fei}}{M_{Fe}} \right) G_{Fei} \quad (6)$$

其中: $G_C$ 为多尺寸理论计算沉均比; $G_i$ 为单尺寸理论计算沉均比; $M_{Fei}$ 为单尺寸磨粒取样质量; $M_{Fe}$ 为多尺寸磨粒取样总质量; $G_{Fei}$ 为单尺寸磨粒沉均比。

多尺寸颗粒样品的测试与理论沉均比如表6所示。可以看出, $G_T$ 与 $G_C$ 的数值相近,验证了式(5)、式(6)的可行性。

表6 多尺寸颗粒样品的测试与理论沉均比

Tab.6 Multi-size test and theoretical two state data ratio

编组	样品浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	测试沉均比 $G_T$	理论沉均比 $G_C$
A:B	791.0	2.660	2.703
A:D	829.9	2.191	2.296
D:G	803.5	1.430	1.544
G:H	791.5	1.094	1.061
A:D:G	893.3	1.617	1.886

另外,基于沉均比与关联系数都跟铁磁磨粒尺寸具有相关性,因此笔者设计并使用沉均比来计算关联系数 $K$ ,可以建立PQ指数与铁磁磨粒含量拟

合关联模型。

### 2.2.2 相关性模型的建立

本研究通过试验得到了拟合PQ指数与铁磁磨粒含量的方法,并通过对样品进行二态测试获得了测试沉均比 $G_T$ 。在此基础上,可推导出计算理论关联系数 $K_C$ 为

$$K_C = 0.4517 G_T^{-1.1} \quad (7)$$

将 $K_C$ 及在“均匀分布”状态测试的 $PQ_T'$ 代入式(1),得到PQ指数与铁磁磨粒含量的拟合公式为

$$N_C = \frac{PQ_T'}{K_C} = \frac{PQ_T'}{0.4517 G_T^{-1.1}} \quad (8)$$

通过式(8)计算出拟合铁磁磨粒浓度 $N_C$ 、实际配制浓度 $N$ 以及相对误差 $E_r$ 。基于二态测试方法的PQ指数-铁磁磨粒含量拟合结果如表7所示。由于旋转式PQ仪本身就是用于大尺寸磨粒检测的设备,由表7可以看出,从C组(即大于 $10 \mu\text{m}$ 单尺寸磨粒样品)开始至A:D:G组,复杂态样品的拟合结果与实际结果的偏差值较低,基本在 $\pm 8\%$ 以内,证明了使用二态测试方法得到的拟合模型能够转换无量纲PQ指数与铁磁性磨粒含量两种数据。另外,A:B组混合的复杂态样品中虽然颗粒尺寸较小,但因为本身磨粒含量较多,在二态测试中给线圈的感应信号相较于单尺寸磨粒更强烈,所以也取得了良好的数据反馈。

表7 基于二态测试方法的PQ指数-铁磁磨粒含量拟合结果

Tab.7 Fitting results of PQ index-ferromagnetic particle content tested in two-states

序号	编组	$PQ_{Tes}'$	$G_T$	$K_C$	$N/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$N_{Cal}$	$E_r/\%$
1	A	37.6	2.865	0.142	317.7	$264.7 \times 10^{-6}$	-17
2	B	35.1	2.803	0.145	207.9	$241.4 \times 10^{-6}$	16
3	C	56.6	2.100	0.200	299.9	$283.1 \times 10^{-6}$	-6
4	D	58.4	2.117	0.198	297.9	$295.1 \times 10^{-6}$	-1
5	E	49.6	1.927	0.220	213.4	$226.2 \times 10^{-6}$	6
6	F	70.7	1.797	0.237	301.6	$298.2 \times 10^{-6}$	-1
7	G	46.9	1.086	0.413	105.8	$113.6 \times 10^{-6}$	7
8	H	50.5	0.962	0.472	101.9	$107.0 \times 10^{-6}$	5
9	A:B	123.4	2.660	0.154	791.0	$801.3 \times 10^{-6}$	1
10	A:D	148.4	2.191	0.191	829.9	$778.9 \times 10^{-6}$	-6
11	D:G	247.4	1.430	0.305	803.4	$811.4 \times 10^{-6}$	1
12	G:H	334.5	1.094	0.409	791.5	$817.7 \times 10^{-6}$	3
13	A:D:G	254.9	1.617	0.266	893.3	$957.2 \times 10^{-6}$	7

### 2.2.3 与传统方法的对比

传统的测试方法多是基于电磁感应原理,使用3组线圈的旋转式PQ仪只能检测PQ指数,使用2

组线圈的插入式铁量仪只能检测铁磁磨粒浓度且检测精度较低。传统方法下二者都无法避免磨粒形状对检测结果的影响。使用传统插入式铁量仪的测试

数据如图2所示。使用 ANALEX PQL 型旋转式 PQ 仪的测试数据如图3所示。

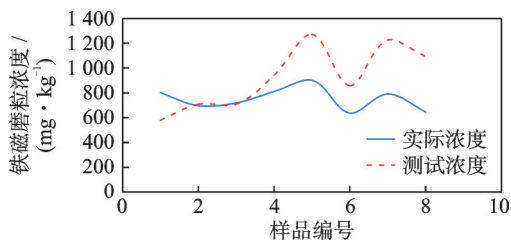


图2 使用传统插入式铁量仪的测试数据

Fig.2 Test data using a traditional plug-in iron meter

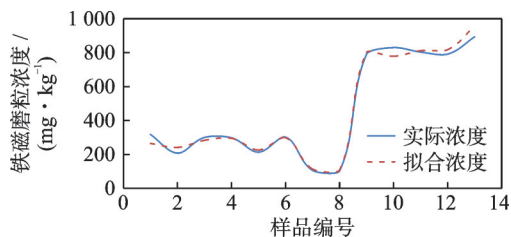


图3 使用 ANALEX PQL 型旋转式 PQ 仪的测试数据

Fig.3 Test data using ANALEX PQL instrument

由图2,3可知:使用传统测试方法虽然可以得到数据,但是测试结果受样品中铁磁性磨粒大小的影响,与实际样品有较大的差别;使用二态测试方法得到的拟合结果与实际样品中铁磁性磨粒含量更加接近,测试结果受磨粒干扰较小。

此外,传统方法只能使用插入式铁量仪获得唯一的铁磁磨粒含量数据,使用旋转式 PQ 仪只能获得单一的 PQ 指数,而使用二态测试方法仅需要一步操作,就可以同时获得 PQ 指数与铁磁磨粒含量,因此更方便技术人员进行操作,有助于更好地对机械设备运行状态进行监测与故障判断,提高设备的安全性及经济性。

### 3 结论

1) 本研究基于电磁感应方法检测油液中铁磁磨粒含量的无量纲 PQ 指数与样品中铁屑浓度两种相近指标的关联性,使用旋转式 PQ 仪对样品进行二态测试,提出两种参数拟合计算的方法。由于这两种指标的计算逻辑不同,因此通过该指标对设备磨损情况的判断方法也有所区别。

2) 使用本研究方法可以搭建两种指标的关联性,获得多种数据,且对大于  $10\ \mu\text{m}$  的磨损颗粒检测有更高的精度,得到的结果与实际值偏差在  $\pm 8\%$  以内。

3) 通过使用二态测试方法配合对小尺寸元素检测更敏感的原子发射光谱等检测技术,可以提高磨粒检测的精度和细化磨粒分析,能够更好地掌握机械设备的磨损状况,降低误判风险,优化设备的维护维修和换油周期,减少维修费用,提高设备的安全性、可靠性,有利于机械设备的科学维护和管理。

### 参 考 文 献

- [1] 田勇, 廉书林, 陈闽杰. 油液污染分析在机械磨损检测中的研究进展[J]. 液压气动与密封, 2013, 33(7): 1-4.  
TIAN Yong, LIAN Shulin, CHEN Minjie. Oil pollution analysis research progress in the detection of mechanical wear [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2013, 33(7): 1-4. (in Chinese)
- [2] 胡江涌, 杨明桂, 闻环, 等. 在用润滑油的 PQ 指数与铁谱分析的相关性研究[C]//第四届全国金属加工润滑技术学术研讨会. 北京: 中国金属学会青年委员会, 2013: 39-48.
- [3] 魏海军, 王宏志, 孙培廷, 等. 船舶机械油液检测光谱分析的特征参数研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(7): 1125-1127.  
WEI Haijun, WANG Hongzhi, SUN Peiting, et al. Study on the characteristic parameter of oil spectrometric analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(7): 1125-1127. (in Chinese)
- [4] 梁培沛, 肖剑. 风电机组轴承磨损的油液监测技术研究与应用[J]. 能源与节能, 2020(5): 37-40.  
LIANG Peipei, XIAO Jian. Research and application of oil monitoring technology for bearing wear of wind turbine [J]. Energy and Conservation, 2020(5): 37-40. (in Chinese)
- [5] 王圆. 磨损颗粒检测在风电机组齿轮油监测中的应用[C]//中国农业机械工业协会风力机械分会. 北京: 龙源(北京)风电工程技术有限公司, 2018: 112-114.
- [6] XU B, WEN G, ZHANG Z, et al. Wear particle classification using genetic programming evolved features [J]. Lubrication Science, 2018, 30 (5) : 229-246.
- [7] ZHU X L, ZHONG C, ZHE J. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring—a review [J]. Tribology International, 2017, 109: 473-484.
- [8] 胡学超, 杨文广, 樊振海, 等. 基于油液监测的风机齿轮箱异常磨损案例分析[J]. 电工技术, 2021(12): 64-66.

- HU Xuechao, YANG Wenguang, FAN Zhenhai, et al. Case analysis of abnormal wear of fan gearbox based on oil monitoring[J]. *Electric Engineering*, 2021(12): 64-66.(in Chinese)
- [9] 张春辉, 田洪祥, 韩秋平, 等. 基于电磁感应原理的铁量仪检测性能研究[J]. *润滑与密封*, 2012, 37(10): 78-81.
- ZHANG Chunhui, TIAN Hongxiang, HAN Qiuping, et al. Research on detection performance of iron gauge based on electromagnetic induction principle[J]. *Lubrication Engineering*, 2012, 37(10): 78-81.(in Chinese)
- [10] 张奇, 田洪祥, 何伟, 等. 在用润滑油金属磨粒快速检测研究[J]. *设备管理与维修*, 2017(7): 125-128.
- ZHANG Qi, TIAN Hongxiang, HE Wei, et al. Study on rapid detection of metal abrasive particles in lubricating oil[J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2017(7): 125-128. (in Chinese)
- [11] AKI S Y, ABD EL-GHAFAR S, MOSLE H. An experimental investigation of industrial gearbox condition using wear particle analysis technique [C]// The ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Phoenix, Arizona, USA: ASME, 2016: V009T17A001.
- [12] CAO W, ZHANG H, WANG N, et al. The gearbox wears state monitoring and evaluation based on on-line wear debris features[J]. *Wear*, 2019, 427: 1719-1728.
- [13] 范红波, 张英堂, 李志宁, 等. 电感式磨粒传感器中铁磁质磨粒的磁特性研究[J]. *摩擦学学报*, 2009, 29(5): 452-457.
- FAN Hongbo, ZHANG Yingtang, LI Zhining, et al. Study on magnetic characteristic of ferromagnetic wear debris in inductive wear debris sensor[J]. *Tribology*, 2009, 29(5): 452-457.(in Chinese)
- [14] FAN B, LI B, FENG S, et al. Modeling and experimental investigations on the relationship between wear debris concentration and wear rate in lubrication systems[J]. *Tribology International*, 2017, 109: 114-123.
- [15] 张宏辉, 赵天禅, 郑翔, 等. 一种快速检测润滑油中铁磁磨粒的装置和方法[J]. *制造业自动化*, 2015(13): 129-133.
- ZHANG Honghui, ZHAO Tianchan, ZHENG Xiang, et al. An apparatus and method for rapid detection of ferromagnetic wear particle in lubricating oil[J]. *Manufacturing Automation*, 2015(13): 129-133.(in Chinese)
- [16] 闫宗庆, 庞新宇, 陈明鑫. 基于油液分析的齿轮磨损量趋势预测[J]. *现代制造工程*, 2020(11): 131-135, 149.
- YAN Zongqing, PANG Xinyu, CHEN Mingxin. Prediction of gear wear trend based on oil analysis[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2020(11): 131-135, 149.(in Chinese)
- [17] 龚卿青, 白文斌, 李凯, 等. 油液磨粒检测技术研究现状与发展趋势[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(6): 564-576.
- GONG Qingqing, BAI Wenbin, LI Kai, et al. Research status and development trend of oil abrasive detection technology[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2021, 42(6): 564-576.(in Chinese)



**第一作者简介:**梁寒钰,男,1997年12月生,硕士生。主要研究方向为油液分析及故障诊断、轮机工程和船舶修造技术。

E-mail:13916394930@163.com

**通信作者简介:**魏海军,男,1971年7月生,博士、教授。主要研究方向为油液分析及故障诊断。

E-mail:hjwei@shmtu.edu.cn