

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108475

全视场在线图像可视铁谱磨粒显微成像特性分析^{*}

李 博¹, 吕浩文¹, 吴 伟¹, 郑 杰¹, 席寅虎²

(1. 西安石油大学机械工程学院 西安 710065; 2. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049)

摘 要:为了评估全视场在线图像可视铁谱磨粒显微成像特性,提出了一种反射光显微成像模型。首先,基于朗伯余弦与小角度散射理论建立了全视场(OLVF)的反射光辐照度模型,实现了磨粒显微成像清晰度定量评价。然后,仿真计算磨粒显微成像的反差透视比,确定了最优光学倍率和适用于全视场 OLVF 探测的油液衰减系数范围,明确了光学参数对磨粒显微成像质量的影响规律。结果显示:光学倍率为 2.0 $\times$ 且油液衰减系数 ≤ 2.0 条件下,磨粒沉积于物方视场的主光轴附近,全视场 OLVF 可获得最佳磨粒显微成像清晰度。最后,开展了磨粒显微成像实验测试,结果表明:全视场 OLVF 能够从油液衰减系数小于 2.0 的在用液压油和齿轮油中获取反射光谱片图像,并提取磨粒视觉信息进行磨损在线监测。

关键词:全视场在线图像可视铁谱;显微成像;油液;光散射;磨粒;反射光谱片

中图分类号: TH742 TN312.8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

Evaluation and analysis of microscopic imaging characteristics of wear debris for full field-of-view online visual ferrograph

Li Bo¹, Lyu Haowen¹, Wu Wei¹, Zheng Jie¹, Xi Yinhu²

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyu University, Xi'an 710065, China;

2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To analyze the microscopic imaging characteristics of wear debris for full field-of-view online visual ferrograph (OLVF), a new reflected light microscopic imaging model is proposed. First, by taking the Lambert-cosine law and the small-angle scattering theory as references, a reflected light irradiance model based on the wear debris microscopic imaging is formulated. The microscopic imaging sharpness of wear debris is evaluated quantitatively. Then, according to Matlab simulation calculation of contrast transmittance, the optimized value of optical magnification and the numerical ranges of oil attenuation coefficient detected by full field-of-view OLVF are determined. The changing rules of microscopic imaging sharpness of wear debris are investigated and determined successfully by analyzing the effectiveness of the numerical increasing of oil attenuation coefficient on contrast transmittance. Simulation results show that, under 2.0 $\times$ optical magnification and less than 2.0 oil attenuation coefficient, wear debris deposits near the optical axis of object field of view. And the high-quality microscopic imaging of full field-of-view OLVF for detecting wear debris can be achieved. Finally, the experimental measurement of wear debris microscopic imaging is implemented by using the current full field-of-view OLVF. Results show that the full field-of-view reflected ferrograms of wear debris can be reliably obtained from different in-use lube oils with less than 2.0 oil attenuation coefficient. It has potential for online wear monitoring by extracting the visual feature information of wear debris.

Keywords: full field-of-view on-line visual ferrograph; microscopic imaging; lube oil; light scattering; wear debris; reflected ferrogram

0 引 言

机械设备润滑油中金属磨粒携带的视觉信息可反映摩擦副磨损状态,通过磨粒浓度、颜色及形态特征辨识磨

损演变过程和磨损机理。在线图像可视铁谱(on-line visual ferrograph, OLVF)能够捕获磨粒视觉信息,进而提取磨粒浓度指标,用于监测磨损演变过程^[1-2]。显微成像是 OLVF 可靠获得磨粒视觉信息的关键技术,然而现有 OLVF 磨粒显微成像模糊,且主要以透射光投影成像的

收稿日期:2021-08-25 Received Date: 2021-08-25

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(52004215)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JM-405)项目资助

磨粒浓度特征提取为磨粒信息获取方式^[3],由于透射光源安装在沉积磁极的工作间隙正下方,磁极遮挡限制了透射光下磨粒成像视场范围,导致 OLVF 显微成像仅能捕获两磁极间隙内中心局部视场的磨粒信息,被磁极遮挡区域的磨粒视觉信息则无法提取^[4],造成 OLVF 透射光下磨粒探测精度较低,加之透射光谱片中磨粒颜色、形态特征不能呈现,从而影响机械设备磨损状态监测之准确性。

为解决所述技术问题,文献[5]提出了可实现高亮度均匀照明的环形发光二极管(light emitting diode, LED)反射光源阵列,设计了能够增大 OLVF 视场范围且增强磨粒成像清晰度的反射光显微成像系统原型^[6],结合高梯度磁场装置^[7-8]开发了全视场 OLVF 探头^[9],用于提高磨粒探测精度,提升磨粒表面形貌及颜色特征获取能力。以此为基础,本文作者基于朗伯余弦理论构建了反射光显微成像系统像面照度分布数学模型^[10],分析了光学倍率与油液衰减系数对 CMOS 像面照度不均匀度的影响,仿真与实验结果表明所提出的 OLVF 显微成像系统能够满足反射光铁谱成像要求。然而,像面照度分布模型仅能用于评价无磨粒沉积状态下全视场 OLVF 像面照度均匀性,不适用于定量分析磨粒沉积状态下光学参数及油液介质透光度对其显微成像清晰度的影响规律,难以确定全视场 OLVF 磨粒视觉信息获取的油液透光度范围,无法评价磨粒探测的 OLVF 显微成像质量。文献[11]提出根据小孔成像原理建立了显微视觉成像模型,以此推导出图像坐标系与微动平台坐标系之间的数学关系,并结合图像处理算法,实现了微动平台输出位移的精准测量。尽管该模型方法在显微成像条件下实现了微动位移的测量分析,但无法进行微小物体显微特征探测。文献[12]提出建立基于分光瞳差动共聚焦原理的显微成像系统光强度模型,优化了其关键参数,以此研制了一种具有最优参数的分光瞳差动共聚焦显微传感器,文献[13]提出利用共聚焦显微成像实现了物体的三维形貌重构,其显微测量精度可达到微米级。然而,所述共聚焦原理的显微成像模型和方法仅局限于空气介质条件下微小物体显微成像特性分析及三维重构,难以满足液体介质下显微成像与测量要求。因此,文献[14]提出通过显微成像探测微尺度流场中示踪粒子,构建了基于波动光学理论的光场显微成像模型,运用反卷积运算实现了液体介质下微小粒子的重构,但该模型不能对液体流场中粒子的显微成像效果进行定量分析与评价。综上所述,用于分析评价不同透光度油液介质下微观颗粒反射光显微成像质量的模型和方法尚无文献记载。

为此,本文提出了基于光散射理论的磨粒显微成像反射光辐照度模型,仿真计算确定了全视场 OLVF 显微成像系统的光学倍率,以及实现磨粒监测的油液衰减系

数取值范围,并分析评估全视场 OLVF 磨粒显微成像特性。实验测试结果与仿真分析结果一致,油液磨粒反射光显微成像清晰度满足液压系统和齿轮传动系统的磨损在线监测要求。

1 反射光显微成像建模

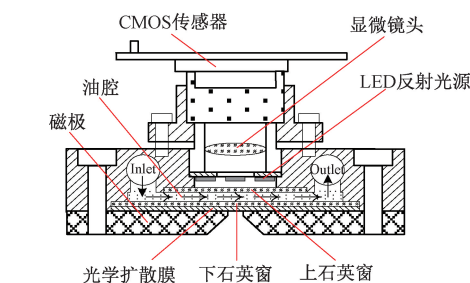
全视场 OLVF 显微成像系统如图 1(a)所示:CMOS 传感器置于显微镜头正上方,环形 LED 阵列作为反射光源,与显微镜头粘结固定后嵌入油液流道内部;上石英窗和下石英窗固定于油液流道底部,形成的密封间隙作为油腔,下石英窗用作磨粒沉积面,光学扩散膜被夹持于下石英窗与高梯度磁场装置的磁极之间,作为显微成像背景;改变物距和像距可调节成像系统光学倍率。反射光源的出射光线经光学扩散膜和磨粒表面反射,其二次反射光在油液中散射,部分光线依次透过上石英窗与显微镜头成像于 CMOS 像面,形成磨粒反射光谱片,显微成像系统的反射光辐照度模型如图 1(b)所示。环形 LED 阵列的出射光线经光学扩散膜或磨粒表面反射,其二次反射光未被润滑油液散射在 CMOS 像面产生的辐照度称之为直接分量;二次反射光在润滑油液中发生小角度散射^[15],形成的辐照度称之为油层前向散射分量;环形 LED 阵列出射光线透过上石英窗进入油腔,被油液后向散射而进入显微镜头,在 CMOS 像面产生的辐照度称之为油层后向散射分量。全视场 OLVF 显微成像系统中的机械部件经发黑处理,因此忽略光路中杂散光影响,考虑润滑油液对光线的散射、吸收作用,那么全视场 OLVF 显微图像可被看作直接分量、油层前向散射分量及油层后向散射分量辐照度的线性叠加。反差透视比(contrast transmittance, CT)作为描述图像对比度和反映光学成像系统性能的有效指标,可表示为实际对比度与固有对比度的比值^[16]。通常情况下,CT 值越大反射光下图像对比度越高,表明成像质量越好,则反射光下全视场 OLVF 磨粒显微成像的反差透视比可表示为直接分量与全视场 OLVF 显微图像辐照度总量之比值^[17],即为:

$$C_R(x', y') = \frac{E_d(x', y')}{E_d(x', y') + E_{fs}(x', y') + E_{bs}(x', y')} \quad (1)$$

式中: $E_d(x', y')$ 为直接分量; $E_{fs}(x', y')$ 为油层前向散射分量; $E_{bs}(x', y')$ 为油层后向散射分量。

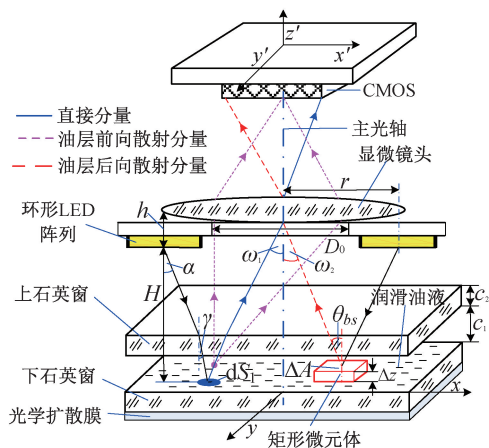
1.1 直接分量与油层前向散射分量

将内衬有光学扩散膜的磨粒沉积面划分为若干个等份微元,每一个微元可被看作表面照度均匀的朗伯余弦辐射体,令环形 LED 阵列的有效半径为 r ,LED 阵列距离磨粒沉积面的高度为 H ,油腔高度为 c_1 和上石英窗厚度为 c_2 ,LED 入射光线与主光轴之间的夹角为 α ,光线进入



(a) 显微成像系统结构示意图

(a) Schematic diagram of the microscopic imaging system



(b) 反射光辐照度模型

(b) A reflected light irradiance model

图1 全视场 OLVF 显微成像系统

Fig. 1 Full field-of-view OLVF microscopic imaging system

润滑油液的折射角为 γ 。当油腔通油时,任意微元 dS_1 的出射光线将首先穿过油层与上石英窗,经显微镜镜头成像于 CMOS 像面形成微元图像 dS_2' 。如图 1(a) 所示,采用出射窗边框与像方主平面重合的平板机镜头,将其倒置作为显微镜使用,此时镜头的出射光瞳即为显微成像系统的入射光瞳^[18],平板机镜头的出射窗边框则作为孔径光阑被置于显微镜镜头最前端,与成像系统物方主平面重合,那么在 (x', y') 坐标点上 CMOS 像面所接受的直接分量 $E_d(x', y')$ 为:

$$\left\{ \begin{aligned} E_d(x', y') = & \frac{\tau_0 \beta^2 D_0^2 W_1^2 n_{oil}^2 (1-R_T) e^{\frac{2C_0 \gamma_1}{\cos \gamma}} \rho(x', y') E_0(x', y') \cos^4 \omega_1}{4n_{air}^2 [W_1 - 2(c_1 + c_2)(\tan - \tan \gamma)]^2 f^2 (1+\beta)^2} \\ & \frac{dS_1}{dS_2'} \\ W_1 = & 2(H \tan \alpha + \sqrt{1/\pi} - r) \\ \frac{dS_1}{dS_2'} = & \frac{1}{\beta^2} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: γ 恒等于 $\arcsin(n_{air} \sin \alpha / n_{oil})$, 其中 $n_{oil} \approx 1.5$ 与

$n_{air} \approx 1.0$ 分别为油液和空气的折射率,上石英窗与油液折射率相近,忽略两者差异; τ_0 为显微镜镜头的透光率, β 为显微成像系统光学倍率, D_0 为孔径光阑直径, C_0 为油液衰减系数; R_T 为上石英窗的反射比, ω_1 为折射光线至入瞳中心与主光轴的夹角。此外, $\rho(x', y')$ 表示磨粒沉积面的物方平面反射图,即为 $\rho(x', y') = \eta J(x', y')$, 其中 η 为光学扩散膜反射率与对应图像灰度的比值系数, $J(x', y')$ 为全视场 OLVF 所获得的显微图像。另外, $E_0(x', y')$ 和 $\cos \omega_1$ 已在文献[10]中进行定量描述,可表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} E_0(x', y') = & \frac{\sqrt{6} r I_0 \beta^3}{2} \times \\ & \sum_{n=1}^8 \left\{ \frac{3r^2 \beta^2}{2} + \left[x' - r\beta \cos\left(\frac{\pi n}{4}\right) \right]^2 + \right. \\ & \left. \left[y' - r\beta \sin\left(\frac{\pi n}{4}\right) \right]^2 \right\}^{-\frac{3}{2}}, \quad r \leq \frac{H \tan \alpha}{2} \\ \cos \omega_1 = & \frac{f(\beta + 1)}{\sqrt{f^2(\beta + 1)^2 + (x'^2 + y'^2)}} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中: I_0 为主光轴方向的发光强度。相应地,磨粒沉积面微元的出射光线在油液中发生小角度散射而形成油层前向散射分量辐照度 $E_{fs}(x', y', 0)$, 可等效于直接分量辐照度与油液点扩展函数的卷积运算^[19], 则有:

$$E_{fs}(x', y', 0) = E_d(x', y', 0) \otimes PSF_{sb}(x', y' | G, C_0, \beta, c_1) \quad (4)$$

其中, $PSF_{sb}(x', y' | G, C_0, \beta, c_1)$ 为磨粒沉积面 $(x'/\beta, y'/\beta)$ 坐标点出射光透过油液在 CMOS 像面产生的点扩展函数,可近似表示为^[20]

$$PSF_{sb} \approx \left[e^{-\frac{b_{oil}(500) + C_0}{2} \sqrt{\frac{x'^2 + y'^2}{\beta^2 + c_1^2}}} - e^{-C_0 \sqrt{\frac{x'^2 + y'^2}{\beta^2 + c_1^2}}} \right] \times \mathcal{F}^{-1} \{ e^{-C_0 \gamma_1 w} \} \quad (5)$$

式中: $\mathcal{F}^{-1}$ 表示傅里叶反变换, w 为空间频率; 其中 $b_{oil}(500)$ 表示 500 nm 主波长条件下测试获得油液中的光散射系数,采用紫外可见分光光度计(型号:日本津岛 UV3600)测得 $b_{oil}(500) \approx 0.095$ 。

1.2 油层后向散射分量

参考 McGlamery 等^[21]提出的水下成像后向散射模型,将位于磨粒沉积面上方的油液划分成等厚度的矩形微元体,如图 1(b) 所示。已知油层厚度为 c_1 ,令微元体的厚度为 Δz ,则油层可被划分为 $c_1/\Delta z$ 个等厚度的微元体,所有微元体与 CMOS 传感器的像面平行,为提高油层后向散射分量辐照度的计算精度, Δz 取值应尽可能的小,且保证 $c_1/\Delta z$ 为整数。将主光轴与磨粒沉积面的交点作为坐标原点,那么当前微元体在 z 轴方向的坐标位置可表示为 $z' = \Delta z \left(i - \frac{1}{2} \right)$, 其中 $i = 1, 2, \dots, c_1/\Delta z$ 。当微元

体至入瞳中心与主光轴的夹角为 ω_2 时, 单个微元体在 CMOS 像面产生的油层后向散射分量辐照度

$E_{bs,d}(x', y')$ 可表示为:

$$\begin{cases} E_{bs,d}(x', y') = \frac{\pi D_0^2 (1 - R_T) \tau_0 \delta_{bs}(\theta_{bs}) \cos^3 \omega_2 E_1 \left\{ x', y', \left[\Delta z \left(i - \frac{1}{2} \right) \right] \right\} \Delta z}{4f^2 (\beta + 1)^2 \cdot e^{c_0(c_1 - |\Delta z(i - \frac{1}{2})|)}} \\ \cos \omega_2 = \frac{f(1 + \beta) - \Delta z \left(i - \frac{1}{2} \right) \beta}{\sqrt{\left[f(1 + \beta) - \Delta z \left(i - \frac{1}{2} \right) \beta \right]^2 + \left(\frac{\beta x'}{B_m} \right)^2 + \left(\frac{\beta y'}{B_m} \right)^2}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\delta_{bs}(\theta_{bs})$ 为体散射函数, 其中 θ_{bs} 为后向散射角; f 为显微镜头焦距. 只考虑油液分子所引起的后向散射光, 由蒙特卡洛仿真可得油液的体散射函数 δ_{bs} 为^[22]

$$\delta_{bs}(\theta_{bs}) = \frac{3b_{oil}(500)(1 + p \cos^2 \theta_{bs})}{4\pi(3 + p)} \quad (7)$$

式中: p 为极化因数, 依据 Boss 等^[23] 的研究结果 p 取值为 0.84. 另外, $E_1(x', y')$ 表示为单个微元体所接受的环形 LED 阵列出射光线的辐照度, 参考上述式(3)推导可得 $E_1(x', y')$ 为:

$$\begin{cases} E_1(x', y') = B_m^3 (1 - R_T) \left[H - \Delta z \left(i - \frac{1}{2} \right) \right] \times \\ I_0 e^{-c_0 \frac{[c_1 - \Delta z(i - \frac{1}{2})]}{\cos y}} \cdot \sum_{n=1}^8 \left\{ \left[x' - r B_m \cos \left(\frac{\pi n}{4} \right) \right]^2 + \right. \\ \left. \left[y' - r B_m \sin \left(\frac{\pi n}{4} \right) \right]^2 + B_m^2 \left[H - \Delta z \left(i - \frac{1}{2} \right) \right]^2 \right\}^{-\frac{3}{2}} \\ B_m = \frac{f\beta(\beta + 1)}{f(\beta + 1) - \Delta z(i - 0.5)\beta} \end{cases} \quad (8)$$

式中: B_m 为微元体在 CMOS 像面的光学倍率; H 等效于 $f(1 + 1/\beta) - h$, 其中 h 为显微镜头物方主平面与 LED 阵列的间距, 取值为 $h = 4$ mm. 微元体表面的后向散射光在入瞳方向发生前向散射, 由小角度散射理论, 则 CMOS 像面的油层后向散射分量辐照度 $E_{bs}(x', y')$ 为^[16]:

$$\begin{aligned} E_{bs}(x', y') &= \sum_{i=1}^{\frac{c_1}{\Delta z}} E_{bs,d}(x', y') + \left\{ \sum_{i=1}^{\frac{c_1}{\Delta z}} E_{bs,d}(x', y') \right\} \otimes \\ PSF_{sb} \left[x', y' \mid G, C_0, \beta, c_1 - \Delta z \left(i - \frac{1}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $PSF_{sb} \left[x', y' \mid G, C_0, \beta, c_1 - \Delta z \left(i - \frac{1}{2} \right) \right]$ 用式(5)来表征。

2 仿真结果与分析

采用 MATLAB 仿真计算反射光下全视场 OLVF 磨粒显微成像的反差透视比, 分析光学倍率 β 、油液衰减系数

C_0 与后向散射角 θ_{bs} 对反差透视比的影响, 进而评价全视场 OLVF 反射光显微成像特性. 将显微成像系统主光轴与 CMOS 像面的交点作为坐标原点, 并与 CMOS 像面轴上像点重合. 采用 OV7725 CMOS 传感器作为全视场 OLVF 显微图像的接受器件, 根据其感光面尺寸可确定显微成像的有效视场范围在 $x' \in [-2, 2]$ 和 $y' \in [-1.5, 1.5]$ 区间内. 运用式(1)~(9)计算全视场 OLVF 磨粒显微成像的反差透视比, 设置仿真计算参数值如表 1 所示。

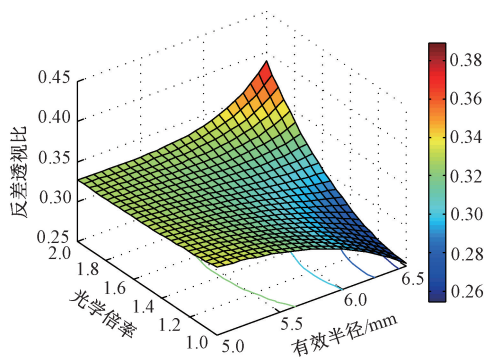
表 1 仿真计算参数值

Table 1 Simulation calculating parameters

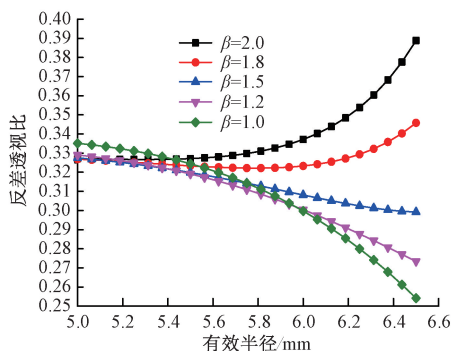
参数类型	数值	参数类型	数值
有效半径 r/mm	6.5	光线夹角 $\alpha/^\circ$	45
油腔高度 c_1/mm	1.0	微元体厚度 $\Delta z/\text{mm}$	0.01
上石英窗厚度 c_2/mm	0.8	石英反射比 R_T	0.04
光阑直径 D_0/mm	5.0	镜头透光率 τ_0	0.95
显微镜头焦距 f/mm	8.0	比值系数 η	0.005
发光强度 I_0/cd	1.98	物面反射率 $\rho(0,0)$	0.9

当 $C_0 = 1.0$ 和 $\theta_{bs} = 0$ 的理想条件下, 油液散射光可全部进入显微镜头, 被 CMOS 像面接受. 全视场 OLVF 磨粒显微成像的反差透视比可通过调整 LED 光源与主光轴之间的间距 (等效于 LED 阵列的有效半径) 来改变^[15], 为保证全视场 OLVF 显微成像效果, 参考文献[5]和[10]的设计参数, 环形 LED 阵列反射光源由 8 颗 0.1W 小功率 LED 均布构成, 距离磨粒沉积面的安装高度为 $H = 8.0$ mm. 当 LED 阵列有效半径设置为 $r = 6.5$ mm 时, 全视场 OLVF 的磨粒沉积面可获得 $130 \sim 150 \text{ W/m}^2$ 的辐照度分布, 并确保其显微成像的像面辐照度均匀性比率大于 90%. 以此为基础, 在 $r \in [5.0, 6.5]$ 和 $\beta \in [1.0, 2.0]$ 条件下计算 CMOS 像面轴上像点的反差透视比 $C_R(0,0)$ 的变化情况, 其仿真计算结果如图 2 所示. 显然, 当 β 从 $1.0 \times$ 增至 $2.0 \times$ 时 $C_R(0,0)$ 值随之增大, 其原因在于随着 β 增大显微成像的物距减小, CMOS 像面可接受到的直接分量辐照度增多, 同时 r 变大导致油层后向散射分量辐照度随之减小, 由式(1)可知增大

了全视场 OLVF 磨粒显微成像的反差透视比,进而提高了全视场 OLVF 显微成像的图像对比度。所以,本设计以 $\beta=2.0$ 作为全视场 OLVF 反射光显微成像系统的最佳光学倍率,在满足小型化的同时有效地提升显微成像质量。



(a) $C_R(0,0)$ 与 r 、 β 的对应关系
(a) The 3D graph of relationship between $C_R(0,0)$ and r 、 β



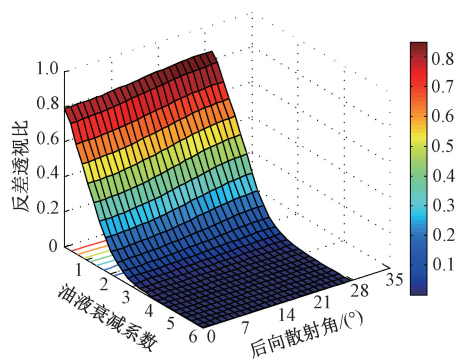
(b) $C_R(0,0)$ 与 r 的关系曲线图
(b) The 2D curve of relationship between $C_R(0,0)$ and r

图2 r 和 β 变化对 CMOS 像面轴上像点反差透视比的影响

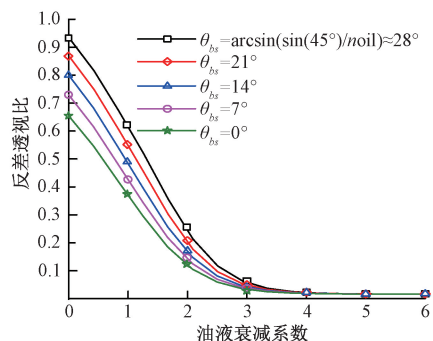
Fig. 2 Influence of two arguments of r and β on contrast transmittance at on-axis image point of CMOS image plane

图2可见,当 $\beta=2.0$ 和 $r=6.5$ mm时全视场 OLVF 反射光成像系统可达到最佳显微成像效果,然而不同颜色润滑油的透明度存在差异,随着油液透明度减小,势必造成全视场 OLVF 磨粒显微成像质量降低。油液衰减系数 C_0 与后向散射角 θ_{bs} 能够反映油液透明度,为此设定 $\theta_{bs} \in [0, \arcsin(\sin\alpha(45^\circ)/n_{oil})] \approx [0, 28^\circ]$ 以避免出射光全反射现象,在 $C_0 \in [1, 6]$ 区间内仿真计算 CMOS 像面轴上像点 $C_R(0,0)$ 的变化,如图3所示。

显然,随着 C_0 增大 $C_R(0,0)$ 以近似指数形式衰减,当 $C_0 \leq 2$ 时 θ_{bs} 越大 $C_R(0,0)$ 随之增大,尤其当 $C_0 \geq 2$ 时 θ_{bs} 变化对 $C_R(0,0)$ 几乎无影响。分析其原因在于: C_0 越大油液对光的吸收、散射损耗越多,将导致 CMOS 像面接受直接分量与油层前向散射分量辐照度急剧减小, θ_{bs} 增大油层后向散射分量辐照度 $E_{bs}(0,0)$ 亦随之减小,当 $\theta_{bs} \approx 28^\circ$ 时后向散射光在石英-空气界面发生全反射,



(a) $C_R(0,0)$ 与 C_0 、 θ_{bs} 的对应关系
(a) The 3D graph of relationship between $C_R(0,0)$ and C_0 、 θ_{bs}



(b) $C_R(0,0)$ 与 C_0 的关系曲线
(b) The 2D curves of relationship between $C_R(0,0)$ and C_0

图3 C_0 和 θ_{bs} 变化对 CMOS 像面轴上像点反差透视比的影响

Fig. 3 Influence of two arguments of C_0 and θ_{bs} on contrast transmittance at on-axis image point of CMOS image plane

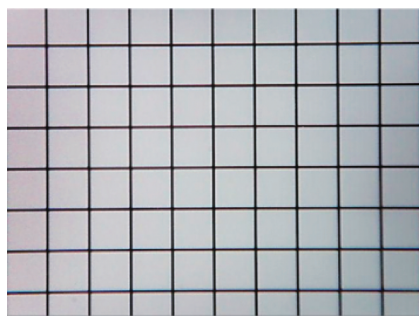


图4 全视场 OLVF 显微成像的测微尺网格图像($\beta=2.0$)

Fig. 4 A typical grid wee-ruler image obtained by full field-of-view OLVF microscopic imaging system ($\beta=2.0$)

$E_{bs}(0,0)$ 等于 0。然而,相对于油层后向散射分量辐照度,直接分量辐照度减小更快,将导致 CMOS 像面中心可获得的反差透视比减小,从而造成全视场 OLVF 显微成像的图像对比度急剧降低。综上所述,油液衰减系数是影响全视场 OLVF 磨粒显微成像质量的决定性因素,当 $C_0 \geq 2$ 时 $C_R(0,0)$ 衰减严重,导致全视场 OLVF 显微成像模糊或无法成像问题。所以,为获得较高质量显微图像,

全视场 OLVF 显微成像系统探测对象的油液衰减系数应设定为 $C_0 \leq 2$ 。

然而, $C_R(0,0)$ 无法反映 CMOS 像面边缘区域的图像对比度变化。将光学扩散膜置于网格微标尺下方,作为全视场 OLVF 显微成像的背景,在 $\beta=2.0$ 条件下获取网格精度 0.2 mm 的测微尺网格图像如图 4 所示,由此计算平面反射图 $\rho(x',y')$ 。当 $\theta_{bs}=0^\circ$ 且 C_0 取值分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 时,利用式 (1) ~ (9) 计算 $x' \in [-2,2]$ 和 $y' \in [-1.5,1.5]$ 坐标平面内 $C_R(x',y')$ 的等值线图,以分析 CMOS 像面反差透视比的变化规律,仿真结果如图 5。显而易见,随着 C_0 增大 $C_R(x',y')$ 值急剧减小,当 C_0 由 0.5 增大至 2.0 时,测微尺网格图像背景区域的 $C_R(x',y')$ 最大值由 0.60 衰减至 0.18,然而网格区域的 $C_R(x',y')$ 仅由 0.12 减小至 0.04,网格图像背景区域与网格区域之间的反差透视比差异急剧减小,表明增大油液衰减系数将导致全视场 OLVF 显微成像的图像对比度显著降低。另外,由图 5 可知,CMOS 像面内的像素点距离主光轴越远,在 (x',y') 坐标上测微尺网格图像的 $C_R(x',y')$ 值越小。其主要原因:如图 1(b) 所示,由于油液中出射光传播距离增大以及显微镜镜头场曲像差的存在,从 CMOS 像面中心向边缘区域过渡,像素点接受的直接分量辐照度 $E_d(x',y')$ 逐渐降低,造成测微尺网格图像远离主光轴位置的反差透视比值随之减小,如图 5(b) ~ (d) 所示。因此,在 CMOS 像面中心与主光轴重合条件下,磨粒尽可能沉积于全视场 OLVF 显微成像系统的主光轴附近,以保证磨粒图像的最佳显微成像质量。

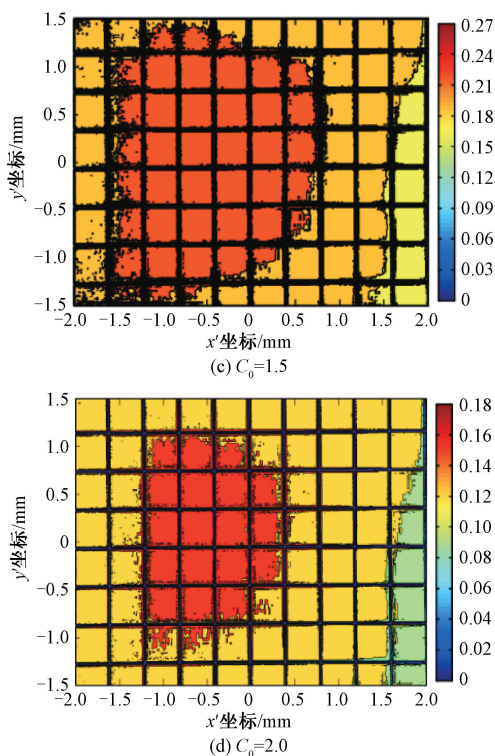
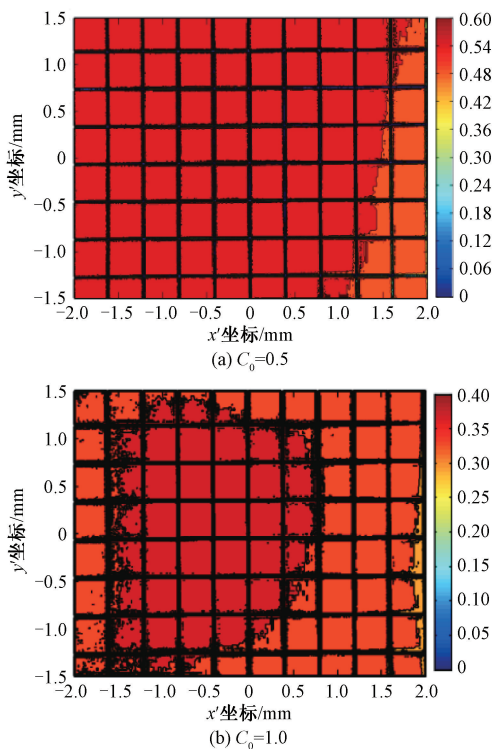


图5 不同油液衰减系数下的 $C_R(x', y')$ 等值线图

Fig. 5 The contour maps of $C_R(x', y')$ with four different oil attenuation coefficients

综上所述,在 LED 阵列的有效半径 $r=6.5$ mm 被确定条件下,光学倍率 β 与油液衰减系数 C_0 是影响全视场 OLVF 反射光显微成像性能的主要因素。在 $\beta=2.0$ 且 $C_0 \leq 2.0$ 条件下,通过控制高梯度磁场强度和油液流量,使得磨粒尽可能被吸附且有序地沉积于磨粒沉积面物方视场的主光轴附近,以提高全视场 OLVF 的反射光显微成像质量,实现在线磨损监测过程中较高探测精度的磨粒视觉信息获取。

3 测试实验与结果分析

将装有反射光显微成像系统的全视场 OLVF 探头进行磨粒图像采集与显微成像性能实验测试,磨粒探测实验系统如图 6 所示。计算机通过 RS232 串口将控制信号发送至 MCU 沉积控制器,按照磨粒循环采样命令,采样参数如磨粒沉积磁动势、磨粒沉积时间,采样周期以及磨粒冲刷与沉积流量可被 MCU 控制,蠕动泵以特定转速将含有磨粒的油液注入全视场 OLVF 探头油腔,在高梯度磁场力作用下油液中的磨粒被吸附沉积于磨粒沉积面,形成有序分布的磨粒沉积谱,恒流驱动器控制 LED 阵列反射光源为全视场 OLVF 磨粒显微成像提供均匀照明,CMOS 传感器捕获磨粒沉积谱的反射光谱片,并上传于

计算机进行处理分析。以图 6 所示的磨粒探测系统为基础,开展磨粒反射光谱片采集实验,分析油液衰减系数变化对全视场 OLVF 显微成像性能的影响规律。采用不同颜色的液压油、齿轮油、汽轮机油以及车用柴油机油作为测试油样,在 2×光学倍率条件下分别获得 4 种油样磨粒沉积谱的反射光谱片,如图 7 所示。为减小沉积谱中磨粒磁化堆积,实验测试过程中的采样参数设置如表 2 所示。

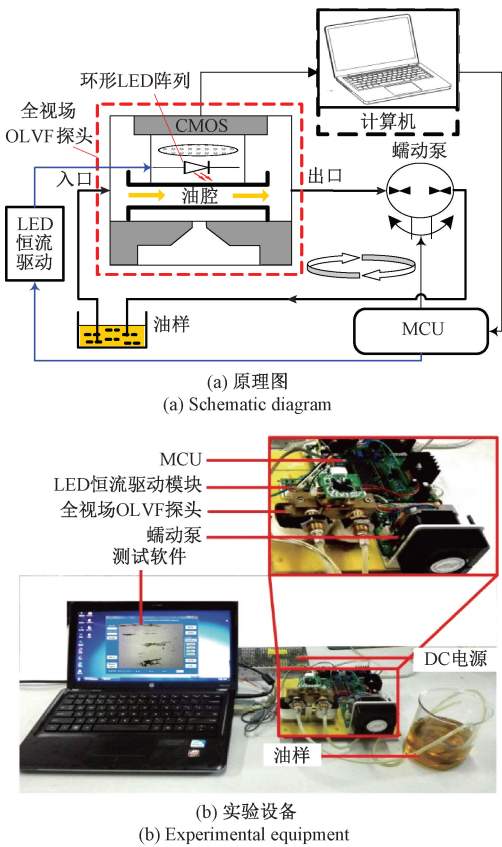


图 6 磨粒探测实验系统

Fig. 6 Experimental system of wear debris detection

表 2 全视场 OLVF 采样参数

Table 2 The sampling parameters of full field-of-view OLVF

参数 类型	采样周期/ min	沉积时间/ min	磁动势/ AN	冲刷流量/ (mL·min ⁻¹)	沉积流量/ (mL·min ⁻¹)
参数值	2.0	0.5	800	8.0	4.0

图 7(a) 与 (b) 可见,全视场 OLVF 显微成像系统可从液压油和齿轮油中可靠获取较高成像清晰度的反射光谱片,磨粒图像的轮廓与形态特征可准确辨识,尤其在齿轮油谱片中,大磨粒颜色清晰可见。图 7(c) 可见,由于光线透过汽轮机油的光散射、吸收损耗增大,使得

汽轮机油谱片中磨粒与背景的图像对比度降低,导致图像模糊,磨粒轮廓与形态特征辨识度不高。相比之下,图 7(d) 柴油机油谱片中的磨粒视觉特征不可见,仅能观测到上石英窗与机械部件反射产生的杂散光图像,分析原因在于:车用柴油机油中含有大量积碳,光线无法透过油层,造成反射光谱片的图像对比度急剧减小,以致于全视场 OLVF 无法实现磨粒显微成像。显然,随着油液颜色的加深,反射光谱片的磨粒图像可识别度逐渐减小,说明全视场 OLVF 高质量显微成像性能下降。

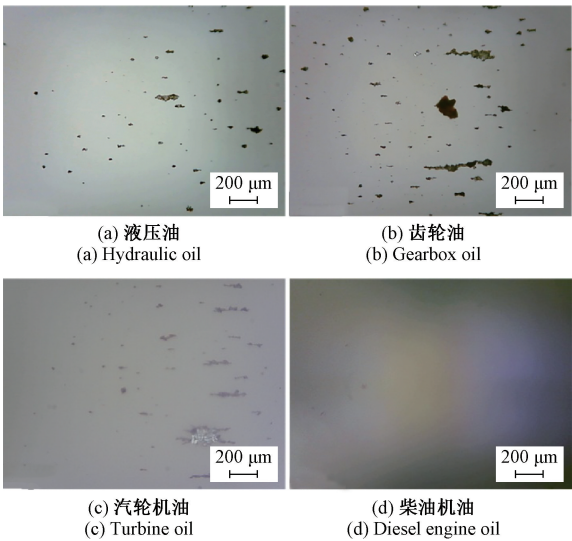


图 7 不同颜色润滑油样的全视场 OLVF 反射光谱片
Fig. 7 Full field-of-view OLVF reflected ferrograms for different coloured lube oils

为揭示上述变化的机理,采用紫外可见分光光度计(仪器型号: SHIMADZU-UV3600,其光度测试误差为 $\pm 0.3\%$) 在 400~650 nm 波长范围内测量 4 种油样的油液衰减系数,分析其对全视场 OLVF 磨粒显微成像的影响。测量结果如图 8 所示,随着测试光波长的增大液压油与齿轮油的油液衰减系数以指数形式减小,并趋近于零。全视场 OLVF 显微成像系统中环形 LED 阵列的主波长为 500 nm,图 8 液压油与齿轮油曲线可见,主波长附近液压油的油液衰减系数为 $0.415 \pm 0.3\%$,齿轮油等于 $1.276 \pm 0.3\%$,并且液压油和齿轮油谱片中心区域的磨粒图像较边缘区域清晰度更高(图 7(a) 与 (b)),表明当 $C_0 \leq 2.0$ 时全视场 OLVF 反射光显微成像系统性能满足高质量显微成像要求,其实验测试结果与仿真结果相符。图 8 汽轮机油曲线可见,在 400~600 nm 波长范围内汽轮机油的油液衰减系数在 $C_0 \in [2.25, 4.0]$ 区间内呈无规则变化,当测试光波长为 500 nm 时,油液衰减系数突变为 $2.491 \pm 0.3\%$,无法满足 $C_0 \leq 2.0$ 的全视场 OLVF 显微

成像要求,从而造成汽轮机油的反射光谱片图像模糊,磨粒视觉特征信息难以提取(图7(c))。另外,由图8柴油机油曲线可见,车用柴油机油的油液衰减系数已超出紫外可见分光光度计的测量范围,表明油液不透光情况下全视场 OLVF 磨粒显微成像失效如图7(d)所示。综上所述,全视场 OLVF 显微成像系统仅适用于液压系统与齿轮箱传动系统油液的磨粒显微图像获取,能够捕获较高成像清晰度的反射光谱片,以保证在线磨损监测结果准确可靠。

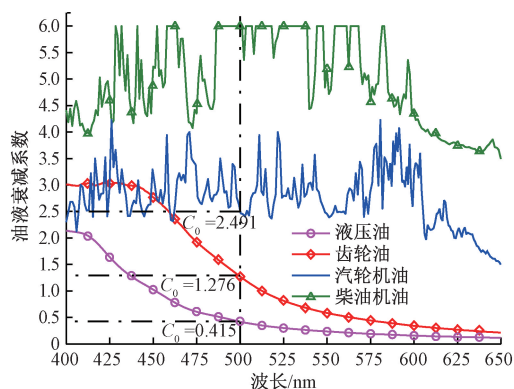


图8 不同颜色润滑油样的油液衰减系数曲线

Fig.8 Oil attenuation coefficient curves for different coloured lube oils

4 结 论

本文提出了全视场 OLVF 反射光显微成像模型,在环形 LED 阵列的有效半径被设置为 6.5 mm 状况下,确定了磨粒反射光显微成像的最佳光学倍率为 2.0 $\times$,以此为基础,分析计算确定了检测油样的油液衰减系数 ≤ 2 时全视场 OLVF 可获得清晰度较高的反射光谱片图像进行磨粒探测,并且仿真分析了 2.0 $\times$ 光学倍率条件下油液衰减系数变化对 CMOS 像面反差透视比的影响规律。仿真结果表明,油液中的磨粒被吸附且有序沉积在磨粒沉积面的主光轴附近,可确保 CMOS 像面中心区域获得较高成像质量的磨粒显微图像。最后,磨粒图像采集实验来验证不同润滑油液下全视场 OLVF 磨粒探测的有效性。实验结果表明,全视场 OLVF 显微成像系统能够从油液衰减系数小于 2 的在用润滑油液中可靠获取磨粒反射光谱片,且沉积在谱片图像中心区域磨粒具有较高的显微成像清晰度,仿真计算与实验测试结果基本一致。因此,全视场 OLVF 通过提取在用油液中反射光磨粒视觉特征信息实现液压系统和齿轮传动系统的磨损在线监测是有效且可行的。

参考文献

- [1] LI B, XI Y H, FENG S, et al. A direct reflection OLVF debris detector based on dark-field imaging [J]. Measurement Science and Technology, UK, 2018, 29: 1-10.
- [2] 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.
- [3] FAN B, LIU Y, ZHANG CH, et al. A deposition rate-based index of debris concentration and its extraction method for online image visual ferrography[J]. Tribology Transactions, 2021, 9(22): 1-10.
- [4] WU T, WU H, DU Y, et al. Imaged wear debris separation for on-line monitoring using gray level and integrated morphological features [J]. Wear, 2014, 316(1-2): 19-29.
- [5] 李 博, 冯 松, 毛军红. 在线图像可视铁谱 LED 阵列反射光源设计与实现[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(10): 29-34.
- LI B, FENG S, MAO J H. A design method and its implementation of an LED array reflecting light for on-line visual ferrograph [J]. Journal of Xi' an Jiaotong University, 2014, 48(10): 29-34.
- [6] 毛军红, 李 博, 谢友柏. 一种在线图像可视铁谱成像系统: CN201410206588.6 [P]. 2014-05-15.
- MAO J H, LI B, XIE Y B. A new imaging system for on-line visual ferrograph: CN201410206588.6 [P]. 2014-05-15.
- [7] WU T H, MAO J H, WANG J T, et al. A new on-line visual ferrograph [J]. Tribology Transactions, 2009, 52 (5): 623-631.
- [8] FENG S, YANG L, QIU G, et al. An inductive debris sensor based on a high-gradient magnetic field[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19 (8): 2879-2886.

- [9] LI B, WU W, ZHOU M, et al. A full field-of-view online visual ferrograph debris detector based on reflected light microscopic imaging [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(15): 16584-16597.
- [10] 李 博, 冯 松, 毛军红. 在线图像可视铁谱成像系统的像面照度均匀性 [J]. 光学 精密工程, 2016, 24(10): 2347-2356.
- LI B, FENG S, MAO J H. Illumination uniformity of an imaging system for on-line visual ferrograph [J]. Optics & Precision Engineering, 2016, 24(10): 2347-2356.
- [11] 朱永波, 卢国梁. 基于计算机显微视觉的微动平台位移测量方法 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38 (5): 17-22.
- ZHU Y B, LU G L. Displacement measurement method for micropositioning platform based on computer micro vision [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38 (5): 17-22.
- [12] 刘超, 王允, 赵维谦, 等. 高分辨力分光瞳差动共聚焦传感技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2225-2231.
- LIU CH, WANG Y, ZHAO W Q, et al. High-resolution divided-aperture differential confocal sensing technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2225-2231.
- [13] 张雅丽, 余卿, 程方, 等. 光纤束并行彩色共聚焦测量系统及实验研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(12): 23-31.
- ZHANG Y L, XU Q, CHENG F, et al. Parallel chromatic confocal measurement system based on optical fiber bundle and its experimental study [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(12): 23-31.
- [14] 宋祥磊, 李 舒, 顾梦涛, 等. 光场显微成像微尺度流场三维重建方法研究 [J]. 光学学报, 2019, 39(10): 1-10.
- SONG X L, LI SH, GU M T, et al. Three-dimensional reconstruction of micro-scale flow field based on light field microscopic imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(10): 1-10.
- [15] 吉勇, 屠大维, 张旭, 等. 水下主动激光扫描系统中光场记录及散射背景分离研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 58-64.
- JI Y, TU D W, ZHANG X, et al. Research on light field recording and scattering background separation in underwater active laser scanning system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 58-64.
- [16] JAFFE J S. Underwater optical imaging: The past, the present, and the prospects [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 40(3): 683-700.
- [17] JAFFE J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1990, 15(2): 101-111.
- [18] 李博, 王方, 吴伟, 等. 基于针孔成像面参数提取的单板机镜头显微成像质量评价方法 [J]. 应用光学, 2021, 42(5): 839-847.
- LI B, WANG F, WU W, et al. Method of microscopic imaging quality evaluation for board lens based on image parameter extraction of pinhole imaging [J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 839-847.
- [19] 李 博. 在线铁谱嵌入式显微成像技术与实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- LI B. Technological and experimental study of embedded microscopic imaging on on-line ferrograph [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2018.
- [20] SCHETTINI R, CORCHS S. Underwater image processing: State of the art of restoration and image enhancement methods [J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 2010, 2010: 1-14.
- [21] MCGLAMERY B L. A computer model for underwater camera systems [J]. Proc Spie, 1980, 208: 221-231.
- [22] MOREL A, GENTILI B. Diffuse reflectance of oceanic waters: Its dependence on sun angle as influenced by the molecular scattering contribution [J]. Applied Optics, 1991, 30(30): 4427-4438.
- [23] BOSS E, PEGAU W S. Relationship of light scattering at an angle in the backward direction to the backscattering coefficient [J]. Applied Optics, 2001, 40 (30): 5503-5507.

作者简介



李博(通信作者),2005 年于西安石油大学获得学士学位,2010 年于西安石油大学获得硕士学位,2018 年于西安交通大学获得博士学位,现为西安石油大学机械工程学院讲师,主要从事光学磨粒传感器及油液磨粒

在线监测技术研究。

E-mail: libo@xsyu.edu.cn

Li Bo (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Xi'an Shiyu University in 2005 and 2010, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2018. He is currently a lecturer in the Department of Mechanical Engineering at Xi'an Shiyu University. His research interests include optical debris sensors and real-time monitoring techniques of lube oil.



吴伟,1984 年于西安石油大学获得学士学位,1990 年于西安交通大学获得硕士学位,2003 年于西安交通大学获得博士学位,现为西安石油大学机械工程学院教授,主要从事智能控制与故障诊断方面

的研究。

E-mail: wuwei@xsyu.edu.cn

Wu Wei received his B. Sc. degree from Xi'an Shiyu University in 1984, and received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Xi'an Jiaotong University in 1990 and 2003, respectively. He is currently a professor in the Department of Mechanical Engineering at Xi'an Shiyu University. His research interests include intelligent control and fault diagnosis techniques.



席寅虎,2008 年于合肥工业大学获得学士学位,2011 年于合肥工业大学获得硕士学位,2017 年于西安交通大学获得博士学位,现为西安交通大学机械工程学院副教授,主

要从事摩擦学、摩擦电纳米发电机与在线图

像可视铁谱技术研究。

E-mail: easonxiyinhu@gmail.com

Xi Yinhu received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hefei University of Technology in 2008 and 2011, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2017. He is currently an associate professor in the School of Mechanical Engineering at Xi'an Jiaotong University. His research interests include tribology, triboelectric nanogenerator and on-line visual ferrograph.