

文章编号 1004-924X(2016)10-2347-10

在线图像可视铁谱成像系统的像面照度均匀性

李 博,冯 松,毛军红*

(西安交通大学 现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 润滑理论与轴承研究所,陕西 西安 710049)

摘要:为了定量评价在线图像可视铁谱(OLVF)成像系统的像面照度均匀性,建立了一种像面照度模型。以像方参数及放大倍率表征物方视场,将物方视场区域离散化,采用朗伯余弦理论建立入瞳模式的像面照度模型,实现了像面照度的计算与均匀性评价。利用 Matlab 进行了物面照度仿真分析,确定了 OLVF 成像系统环形阵列光源的发光二极管(LED)数量,基于像面照度分析确定了最佳成像焦距和放大倍率。计算了油腔通油情况下成像系统中的光能量损耗以及磨粒沉积面的照度分布,建立了油液吸光系数与 CCD 像面轴上像点照度的关系。结果显示:LED 发光强度已知时,仿真计算的像面不均匀度约为 5.60%,实际测试的像面不均匀度为 8%~9%,满足不均匀度 $\leq 10\%$ 的要求。开展了磨粒铁谱图像采集实验,结果表明:图像中磨粒清晰可辨,便于图像分割与视觉特征提取。提出的模型可定量描述 OLVF 成像系统的像面照度,可作为优化系统结构,提高系统成像性能的依据。

关键词:在线图像可视铁谱;成像系统;发光二极管;像面照度均匀性;像面照度模型;像面均匀性评价
中图分类号:TN312.8;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162410.2347

Illumination uniformity of an imaging system for on-line visual ferrograph

LI Bo, FENG Song, MAO Jun-hong*

(Theory of Lubrication & Bearing Institute, Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing Systems, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail: suryb@163.com

Abstract: To evaluate quantitatively the uniformity of image illumination for an On-line Visual Ferrograph (OLVF) imaging system, a new mathematical model of image illumination was presented. The view field of an object space was represented by image space parameters and optical magnification, then it was discretized into a micro area. By taking Lambert-cosine law as reference, the image illumination model based on the aperture of entrance pupil was established, the image illumination distribution was calculated reliably and the uniformity of image illumination was evaluated successfully. On the basis of Matlab simulation analysis, the number of single Light Emission Diodes(LEDs) in the circular ring array source of the OLVF imaging system was obtained and the optimized values of focal length and optical magnification were determined. The light loss of imaging system and the illumination distribution of wear debris deposition region were analyzed and calculated under the condition of the oil cavity filled with lubricant oil. The relationship between the absorptivity of lubricant oil and the peak value of CCD image illumination was investigated. The experimental results show when the

收稿日期:2016-04-14;修订日期:2016-06-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51225501)

luminous intensity of LED arrays is known, the imaging plane illumination non-uniformity is more than 5.60% by simulating calculation and that is from 8% to 9% by a practical test, which satisfies the demand by indicator less than 10%. Finally, this imaging system was practically used to capture the reflected ferrograph. The results show that the characteristics of wear debris has been clearly distinguished from the reflected ferrograph, and it is favorable to the ferrograph segmentation and image extraction. It concludes that the proposed model evaluates quantitatively the uniformity of image illumination, optimizes systematical structure and improves the imaging performance of the system.

Key words: On-line Visual Ferrograph(OLVF); imaging system; Light Emitting Diode(LED); illumination uniformity ; image illumination model; image uniformity evaluation

1 引言

在线图像可视铁谱(On-Line Visual Ferrograph, OLVF)能够在线获取铁磁性磨粒谱片的图像,进而监测磨损过程^[1]。成像系统是 OLVF 获取磨损信息的核心环节,其性能优劣直接影响谱片的图像质量,从而对磨粒视觉特征量提取的准确性产生影响。现有研究主要集中在使用 OLVF 实时获取磨粒谱片,并从中提取磨粒的特征指标,反应装备的磨损过程^[2-4]。OLVF 通过显微成像方式获得谱片图像,受在线应用的限制,OLVF 成像系统的光源为点光源^[1],图像中心位置的亮度大于边缘位置。OLVF 成像系统体积小、结构紧凑,现有的照明方式难以满足 OLVF 狭小空间的要求,文献[5]设计了适用于 OLVF 的环形 LED 阵列反射光源,通过照度叠加实现了磨粒沉积区域的均匀照明,但受到成像系统的光源结构及光学参数等影响,无法确定像面均匀性是否满足要求。

像面照度均匀性是决定光电系统成像质量的重要因素,常用不均匀度作为像面照度均匀性的评价指标^[6]。当不均匀度小于 10% 时,像面感光均匀性较好^[7],信噪比较高,能更好地满足动态范围要求,有利于提高磨粒的图像质量;否则,将导致图像清晰度急剧降低^[8],影响磨粒图像的分割与特征提取^[9]。Zhong 等以出瞳模式分析光学系统的像面照度^[10],提出使用中心遮拦方法引入渐晕,以轴外斜光束截面与轴上光束截面积之比优化像面照度的方法。不过,该方法主要针对大视场光学成像系统,不适用于小视场放大成像系统。Zhang 等提出天基红外探测系统的像面照度模型,分析各种因素对像面照度的影响,利用像面

照度模型选择探测系统的中心波长和波段度,提高探测准确性^[11]。M. CHANTLER 等建立了基于朗伯余弦定律的线性化像面照度模型,分析了未知质地纹理图像的局部照度特征,识别和分类质地材料类型^[12]。上述研究中出瞳模式光学系统的出瞳位置视场光束具有明显的方向性,像面照度的计算结果缺乏准确性^[13],不但所采用的像面照度模型及分析方法没有考虑介质(如石英玻璃、油液)对光的反射、折射及吸收损失,而且像面照度分析并未考虑狭小空间内光源照明均匀性的影响,因此不适用于定量描述 OLVF 成像系统的照度分布和分析像面均匀性。

为了分析环形 LED 阵列反射光源作用下 OLVF 成像系统的像面照度均匀性,本文以像方参数和图像放大倍率表征物方视场,使物方视场区域离散化,利用朗伯余弦理论分析和计算入瞳模式的像面照度,确定了 OLVF 显微成像系统的焦距和放大倍率。然后,分析了油腔中有油时 OLVF 成像系统的光能量损耗及磨粒沉积面的照度分布,并仿真分析了油液吸光系数对 CCD 像面轴上像点照度的影响。实验测试结果与仿真计算结果一致,像面均匀性满足成像要求。

2 成像系统像面照度分析

OLVF 成像系统如图 1(a)所示:抛光陶瓷基板作为磨粒沉积面,石英玻片与陶瓷基板之间的密封间隙构成油腔;环形 LED 阵列作为反射光源,被固定于油腔正上方,可在磨粒沉积面产生近似均匀照明^[5];调节成像系统的物距和像距可改变放大倍率。光线透过石英玻片进入油腔,经磨粒沉积面反射,反射光依次透过油液、石英玻片与光学镜头组在 CCD 像面成像,系统的光路模型如

图 1(b)所示。令环形 LED 阵列反射光源的有效半径为 R ,光源与磨粒沉积面之间的高度为 H ,油腔高度为 d_1 ,石英玻片厚度为 d_2 ,油腔无油时磨粒沉积面的照度均匀区域等效圆直径为 W_1 ,光线入射角为 α ,进入油液的折射角为 γ 。考虑石英玻片、油液以及磨粒沉积面造成的光能量损失,假设油液吸光系数为 k ,石英玻片透光率为 P_2 ,反射比为 ρ ,磨粒沉积面反射率为 ρ_{wd} ,空气折射率为 n_{air} ,石英玻片(JSG1)与基础油液折射率相近,忽略差异,两者折射率统一表示为 n_{oil} 。假设油腔无油时磨粒沉积面的叠加照度为 $E(x, y)$,那么有油时的照度分布 $E_c(x, y)$ 可表示为:

$$E_c(x, y) = \frac{\pi W_1^2 (1-\rho) e^{-kd_1} P_2^{d_2} n_{\text{oil}}^2 \rho_{\text{wd}}}{4 n_{\text{air}}^2 S} \cdot E(x, y), \quad (1)$$

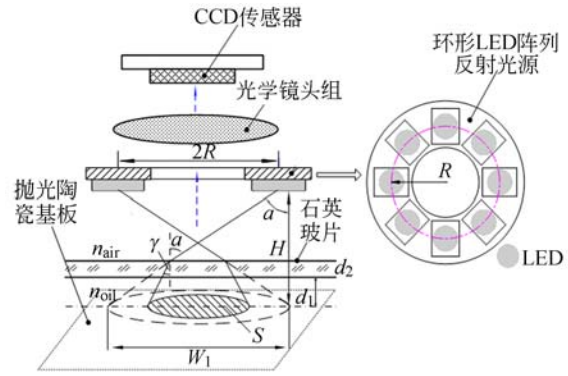
其中 S 为有油时照度近似均匀区域面积,如图 1(b)阴影部分所示。光线由空气进入油液发生折射,磨粒沉积面均匀照明区域的面积较无油时减小,推导可得 S 为:

$$S \approx \frac{\pi [W_1 - 2(d_1 + d_2)(\tan \alpha - \tan \gamma)]^2}{4}, \quad \alpha \geq 45^\circ. \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得:

$$E_c(x, y) = \frac{W_1^2 (1-\rho) e^{-kd_1} P_2^{d_2} n_{\text{oil}}^2 \rho_{\text{wd}}}{n_{\text{air}}^2 [W_1 - 2(d_1 + d_2)(\tan \alpha - \tan \gamma)]^2} \cdot E(x, y). \quad (3)$$

用像方参数及放大倍率表征物方视场,以入瞳模式分析像面照度。像面照度的计算模型如图 2 所示,假设 CCD 像素大小为 $M \times N$,像面宽度与高度分别为 X 和 Y ,成像系统镜头组的焦距为 f ,放大倍率为 β ,那么在 $x \in [-X/2\beta, X/2\beta]$ 和 $y \in [-Y/2\beta, Y/2\beta]$ 区间内,将磨粒沉积面物方视



(b) 光路模型

(b) Optical model

图 1 OLVF 成像系统

Fig. 1 OLVF image-forming system

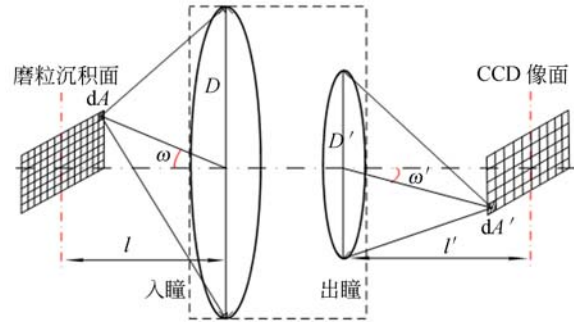


图 2 像面照度的计算模型

Fig. 2 Calculation model of image plane illuminance

场区域离散化,沿 x, y 轴划分为 $M \times N$ 等份的微元,每个微元被看作一个朗伯余弦辐射体,表面照度均匀。假设任意微元 dA 在物方视场区域内的坐标为 (x_i, y_j) ,该微元至入瞳中心与主光轴的夹角为 ω ,则 dA 在 ω 方向的发光强度为:

$$I(x_i, y_j) = \frac{E_c(x_i, y_j) \cos \omega dA}{\pi}. \quad (4)$$

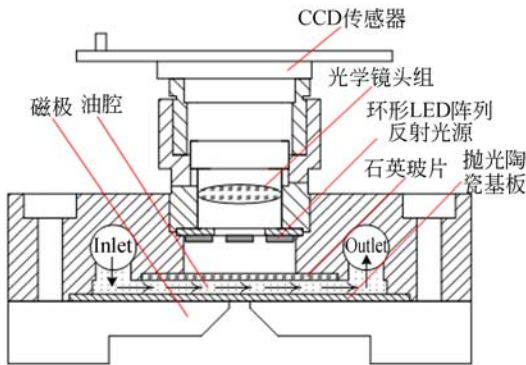
OLVF 成像系统的镜头组前端有孔径光阑,即为系统入射光瞳,令成像系统的入瞳直径为 D ,磨粒沉积面到入瞳面的垂直距离为 l ,根据光照度定义,则入瞳接收 dA 的光通量为:

$$\phi(x_i, y_j) = \frac{D^2 E_c(x_i, y_j) \cos^4 \omega dA}{4l^2}. \quad (5)$$

物方视场微元 dA 经过成像系统在 CCD 像面的成像微元为 dA' ,令镜头组的透射率为 τ ,结合式(5)可得像面照度为:

$$E'_{\text{cs}}(x_i, y_j) = \frac{\tau(1-\rho) P_2^{d_2} n_{\text{oil}}^2 D^2 E_c(x_i, y_j) \cos^4 \omega dA}{4e^{kd_1} n_{\text{air}}^2 l^2 dA'}. \quad (6)$$

式中: $dA/dA' = 1/\beta^2$, $l = n_{\text{air}} f(1 + 1/\beta)/n_{\text{oil}}$ 。若像



(a) 系统结构示意图

(a) Schematic diagram of imaging system

面微元 dA' 的像方视场坐标为 (x'_i, y'_j) , 以像面坐标及放大倍率表征物方视场内的 dA 坐标位

置, 将式(3)代入式(6)中可得像面微元 dA' 坐标处的像面照度为:

$$E'_{cs}(x'_i, y'_j) = \frac{PL(1+\beta)^{-2} D^2 W_1^2 E(x'_i, y'_j) \cos^4 \omega}{4 f^2 [W_1 - 2(d_1 + d_2)(\tan \alpha - \tan \gamma)]^2}. \quad (7)$$

利用式(7)分别计算 $M \times N$ 个微元对应的像面照度, 沿 x' 与 y' 方向将计算结果均匀排布在 $x' \in [-X/2, X/2]$ 和 $y' \in [-Y/2, Y/2]$, 即可

获得 CCD 像面照度分布, 用于分析像面均匀性。那么整个物方视场区域的像面照度为:

$$E'_{cs}(x', y') = \frac{D^2 W_1^2 PL \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N E(x'_i, y'_j) \delta(x' - x'_i, y' - y'_j) \cos^4 \omega}{4(1+\beta)^2 f^2 [W_1 - 2(d_1 + d_2)(\tan \alpha - \tan \gamma)]^2}, \quad (8)$$

式中: $i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N$, x' 与 y' 方向取样间隔分别为 $|x'_{i+1} - x'_i| = X/N$ 和 $|y'_{j+1} - y'_j| = Y/M$; $PL = \tau \rho_{wd} (1 - \rho)^2 e^{-2kd_1} P_2^{d_2} n_{oil}^6 / n_{air}^6$, 为光损系数; $E(x'_i, y'_j)$ 为物方微元 dA 的表面照度^[5]; $\delta(x' - x'_i, y' - y'_j)$ 为单位取样函数; $\gamma = \arcsin(n_{air} \sin \alpha / n_{oil})$ 。假设环形阵列光源所用 LED 的发光面为圆形, 为简化运算, 有效发光面积设为 1 mm^2 , 法线方向的光亮度为 L_{LED} , 则式(8)中 W_1 及 $E(x'_i, y'_j)$ 可表示为:

$$\begin{cases} W_1 = 2(H \tan \alpha + \sqrt{1/\pi} - R) \\ E(x'_i, y'_j) = \frac{\sqrt{6} R L_{LED} \beta^3}{2} \times \\ \sum_{n=1}^m \left\{ \frac{3R^2 \beta^3}{2} + [x'_i - R \cos(\frac{\pi n}{4})]^2 + [y'_j - R \sin(\frac{\pi n}{4})]^2 \right\}^{-\frac{3}{2}} \end{cases}, \quad (9)$$

其中: $R \leq (H \tan \alpha + \sqrt{1/\pi})/2$, m 为环形阵列光源中集成的 LED 个数。成像系统的物方视场由镜头组焦距、放大倍率与 CCD 像面尺寸共同决定。假设成像系统的入射光瞳与物方主平面重合, 即成像物距与 l 相等, 则有:

$$\cos^4 \omega = \frac{16 n_{air}^4 f^4 (\beta + 1)^4}{[4 n_{air}^2 f^2 (\beta + 1)^2 + n_{oil}^2 (x'^2_i + y'^2_j)]^2}. \quad (10)$$

像面不均匀度可表示为 $E'_{cs}(x', y')$ 的最大照度 E'_{max} 和最小照度 E'_{min} 之差与两者之和的比值^[7], 则成像系统的像面不均匀度为:

$$\Delta E'_{cs} = \frac{E'_{max} - E'_{min}}{E'_{max} + E'_{min}} \times 100\%. \quad (11)$$

像面不均匀度越小像面越均匀, 当 $\Delta E'_{cs}$ 小于 10% 时, 可认为 OLVF 成像系统的像面均匀性

较好, 铁谱成像质量满足要求。

3 仿真分析

这里采用 Matlab 仿真计算磨粒沉积面与 CCD 像面的照度分布, 分析 OLVF 成像系统的光源结构与光学参数对像面照度均匀性的影响。式(7)~式(10)中的仿真实验参数值如表 1 所示, 其中 $n_{air} \approx 1$ 和 $n_{oil} \approx 1.46$ 。采用像面尺寸为 $3.984 \times 2.952 \text{ mm}$ 的 CCD 器件, 以像面几何中心为直角坐标原点, 则像方视场近似在 $x' \in [-2 \text{ mm}, 2 \text{ mm}]$ 和 $y' \in [-1.5 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm}]$, 此外像面像素大小 $M \times N$ 设置为 480×640 。

表 1 仿真实验参数值

Tab. 1 Parameter values for Matlab simulation analysis

参数	值
R/mm	6.5
H/mm	8.0
$d_{1,2}$ /mm	1.0
D/mm	5.0
ρ	0.04
P_2	0.96
ρ_{wd}	0.9
k	1.5
$\alpha/(\circ)$	45

当 $\beta=1$ 时, 物像尺寸相等, 磨粒沉积面物方视场区域在 $x \in [-2 \text{ mm}, 2 \text{ mm}]$ 和 $y \in [-1.5 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm}]$, 该区域的照度分布越均匀, CCD 像面不均匀度越小。由式(3)、式(9)及式(11)计

算可得:当 $m \gg 6$ 时,所述区间内的照度均匀性逐渐趋于稳定,随着 m 的增大,物面照度的不均匀度 ($< 3\%$) 变化减小;当 $m=8$ 时,磨粒沉积面物方视场区域照度 $E_c(x, y)$ 的归一化等值线如图 3 所示。可见,在环形 LED 阵列光源的 α, R 与 H 参数已知的条件下,磨粒沉积面照度 $E_c(x, y)$ 的均匀性主要由环形阵列中的 LED 数量 m 来决定。设计中受到 OLVF 成像系统内狭小空间的限制,以及环形阵列光源低功耗的要求,确定 $m=8$ 。

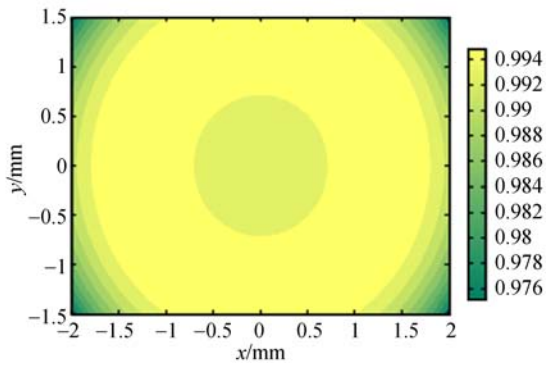
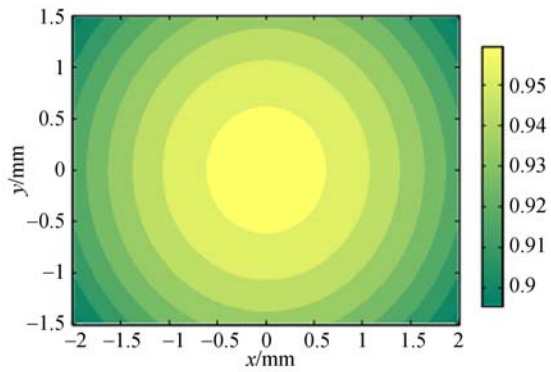


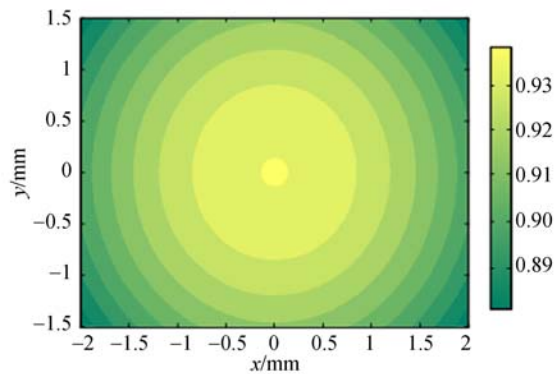
图 3 归一化物方视场区域照度的等值线 ($\beta=1$)

Fig. 3 Normalized contour distribution of imaging region illuminance ($\beta=1$)

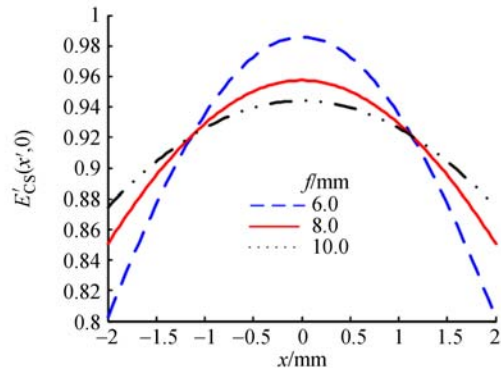
OLVF 成像系统中镜头组前端的孔径光阑作为系统入瞳,也是限制入射光束的有效孔径。如表 1 所示,成像系统的入瞳直径 $D=5$ mm,即有效孔径为固定值,当 $\beta=1$ 且 $m=8$ 时,像面照度均匀性主要由 f 决定。当 f 分别为 6, 8 与 10 mm 时,在 $x' \in [-2$ mm, 2 mm] 和 $y' \in [-1.5$ mm, 1.5 mm] 区间内仿真可得归一化的像面照度 $E'_{cs}(x', y')$ 等值线,以及 x' 方向的像面照度 $E'_{cs}(x', 0)$ 变化曲线如图 4 所示。



(b) $f=8$ mm



(c) $f=10$ mm



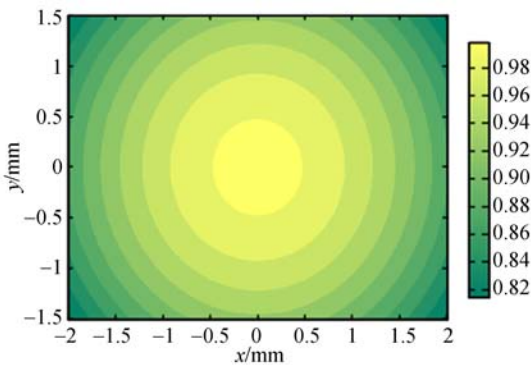
(d) x 方向的像面照度变化

(d) Image plane illuminance in lateral axis

图 4 归一化像面照度

Fig. 4 Normalized distribution of image plane illuminance

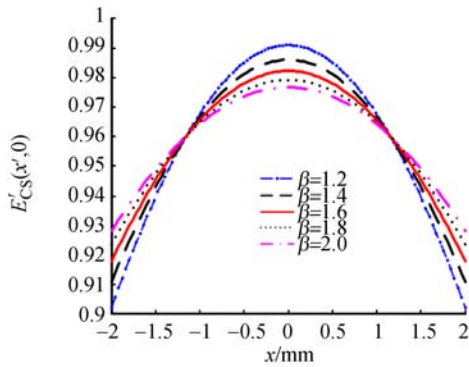
图 4(d) 可见,在有效孔径 D 固定的前提下,相对孔径 D/f 越小,CCD 像面中心与边缘区域的照度相差越小,像面均匀性越好。为了满足 OLVF 成像系统体积小、结构紧凑,以及工业现场在线使用的要求,必须确保磨粒沉积面到 CCD 像



(a) $f=6$ mm

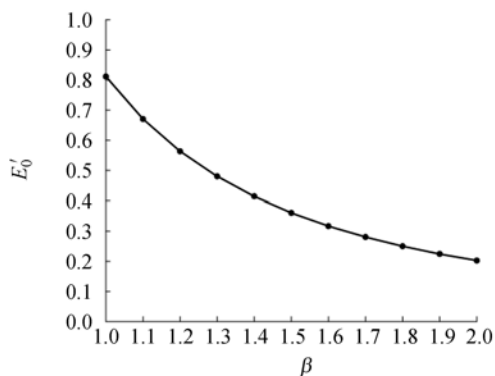
面的光路长度 ≤ 40 mm, 那么 $f \leq 8$ mm, 当 f 分别为 6 mm 与 8 mm 时, 所对应的像面照度分布如图 4(a) 和图 4(b) 所示, 利用式(11) 计算可得像面不均匀度分别为 9.41% 和 7.86%。相比之下, $f=8$ mm 时能够更好地满足 OLVF 成像系统像面照度均匀性的要求。

实际光学系统中, 放大倍率影响物方视场范围, 视场范围与离轴距离又是影响像面照度均匀性的主要因素^[8]。当 β 分别为 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 时, 沿 x' 轴方向的像面照度 $E'_{CS}(x', 0)$ 分布曲线如图 5(a) 所示。当 β 在 1~2 之间连续变化时, 计算可得 β 与 E'_0 关系的归一化曲线如图 5(b) 所示, 其中 E'_0 表示 CCD 像面轴上的像点照度 $E'_{CS}(0, 0)$ 。



(a) 不同倍率下的 $E'(x', 0)$ 分布曲线

(a) Distribution curve of $E'(x', 0)$ under different magnifications



(b) β 与 E'_0 关系

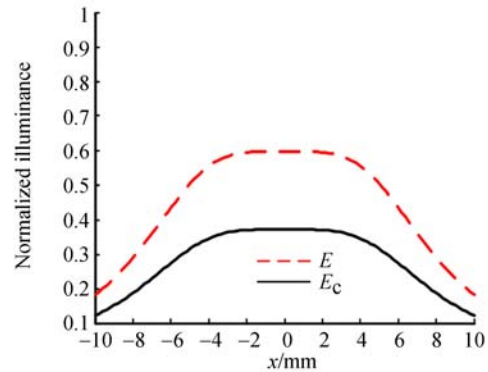
(b) Relationship between β and E'_0

图 5 放大倍率与像面照度的关系曲线

Fig. 5 Relationship between magnification and image plane illuminance

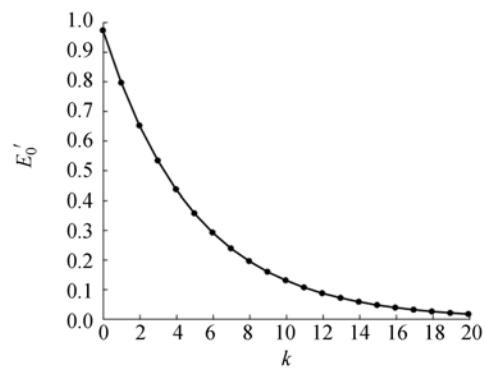
由图 5(b) 可见, E'_0 随着 β 的增大而减小, 由于 β 越大磨粒沉积面的物方视场越小, 导致进入入瞳的总光通量减小, 使得成像系统的像面照度随之降低, 但增大 β 有利于提高像面均匀性。为了兼顾照度与像面均匀性, 这里以 $\beta=1.5$ 作为 OLVF 成像系统的标准放大倍率。

仿真分析油腔中有油和无油状态下磨粒沉积面的照度分布。当 f 与 β 分别为 8 mm 和 1.5 时, 在 $x \in [-10$ mm, 10 mm] 和 $y \in [-10$ mm, 10 mm], 有油与无油状态下磨粒沉积面沿 x 轴方向的照度分布 $E(x, y)$ 和 $E_c(x, y)$ 的归一化曲线如图 6(a) 所示。仿真结果可见, 在 $x \in [-2$ mm, 2 mm] 磨粒沉积面的照度近似均匀, 可确保 β 为 1.5 倍时物方视场照明均匀。有油时磨粒沉积面的照度均匀区域较无油减小, 该区域的照度不足



(a) 磨粒沉积面的照度曲线

(a) Illuminance distribution of wear debris sedimentation region



(b) k 与 E'_0 关系

(b) Relationship between k and E'_0

图 6 物面和像面照度的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of object plane and image plane illuminance

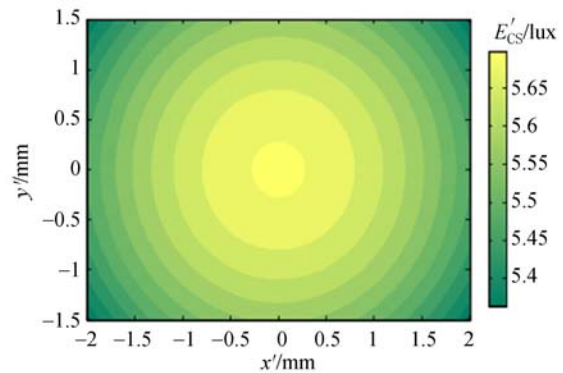
无油时的 50%, 光能量损耗较大。光能量损失是影响像面照度的重要因素, 由式(7)可见入射光能量损耗是由油液吸光系数 k 和油层厚度 d_1 决定的, 其中 d_1 为常量。当 k 在 $[0, 20]$ 连续变化时, 分析可得 k 与 E'_0 的关系曲线如图 6(b) 所示。

由图 6(b) 可见, 当 k 增大时, 光能量损耗随之增大, 像面照度降低, 影响铁谱的成像质量。随着 k 的增大, 像面照度以 $E'_{CS}(x', y')$ 的指数形式衰减, 当 k 增至 20 时像面照度接近于零, 表明 k 值是影响像面照度的决定性因素。为保证像面质量, 油液吸光系数 $k \leq 3$ 。

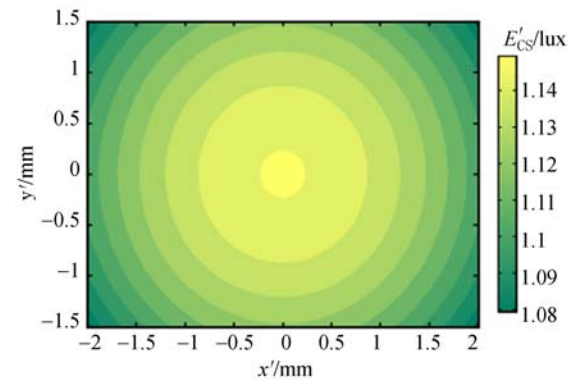
采用两种环形 LED 阵列光源进行像面照度仿真与不均匀度计算。假设两种光源的入射角、主波长、显色指数和色温相同, 环形阵列分别以 0805 和 2835 白光贴片 LED 作为基本单元, 测得单颗 LED 的最大发光强度分别为 0.42 cd 和 1.98 cd。假设镜头组的透射率 $\tau=0.8$, 在 $x' \in [-2 \text{ mm}, 2 \text{ mm}]$ 和 $y' \in [-1.5 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm}]$, 0805 与 2835 环形阵列光源作用下 OLVF 成像系统的 $E'_{CS}(x', y')$ 等值线如图 7 所示。

光路中金属部件的遮挡与表面反光, 加之石英玻片和油液的反射吸收损失, 造成光能量的严重损失, 使得能够到达 CCD 像面的光能量不足磨粒沉积面的 10%。仿真结果可见, 采用 2835 环形阵列得到的 CCD 像面照度 $E'_{CS}(x', y')$ 集中在 5.35~5.75 lux; 采用 0805 环形阵列所获得的 $E'_{CS}(x', y')$ 则主要集中在 1.08~1.16 lux。可见, 两种光源产生的像面照度均大于所用 CCD 的最小感光照度 0.1 lux, 可满足 CCD 器件像面的感光灵敏度要求。为了避免照度过低对像面质量的影响, 在满足低功耗的前提下应增大 LED 光源的发光强度, 提高光源对不同透光率油液的适应性, 确保铁谱图像的可靠获取。相比之下, 2835 阵列环形光源更利于提高 CCD 像面照度。式(11)计算得到的两种光源作用下的像面不均匀度近似相等, 约为 5.60%, 表明理想状态下 LED 的发光强度及有效发光面积的变化并不影响 OLVF 成像系统的像面均匀性。

综上所述, 吸光系数 k 与光源发光强度仅影响像面照度的大小, 与均匀性无关; 而焦距 f 与放大倍率 β 才是影响像面均匀性的主要因素。当 $f=8 \text{ mm}$ 且 $\beta=1.5$ 时, OLVF 成像系统可满足不均匀度小于 10% 的像面均匀性要求, 可实现较



(a) 2835 LED ($L_{LED} A_{LED}=1.98 \text{ cd}$)



(b) 0805 LED ($L_{LED} A_{LED}=0.42 \text{ cd}$)

图 7 两种光源下像面照度的等值线($\beta=1.5$ 和 $f=8 \text{ mm}$)

Fig. 7 Contour distribution of image plane illuminance with different LED arrays

高质量的铁谱成像。

4 实验结果与分析

将 0805 与 2835 环形阵列光源分别安装于 OLVF 成像系统内进行像面照度均匀性实验测试, 实验原理如图 8 所示。OLVF 成像系统被固定在精密定位装置上, 光源控制模块恒流驱动环形 LED 阵列光源, 以抛光陶瓷基板作为流道油腔的磨粒沉积面, 采用蠕动泵循环向油腔内通入长城 L-AN68 润滑油, 在 1.5 倍率下成像系统进行像面对焦, 使 CCD 传感器位于像方焦平面位置; 然后控制蠕动泵停止油液流动, CCD 扫描获取像面照度图像, 并通过图像采集卡实时上传至计算机; 最后, 利用像面均匀性测试软件分析计算像面不均匀度。30 mA 恒流驱动下, 上述两种光源照明所获得的像面照度灰度及所对应的等值线如图 9 所示。

在环境温度为 25 °C 与相对湿度为 55% 的条

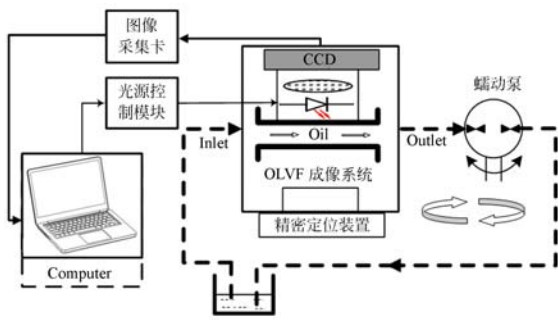


图 8 测试系统原理图

Fig. 8 Principal diagram of experimental system

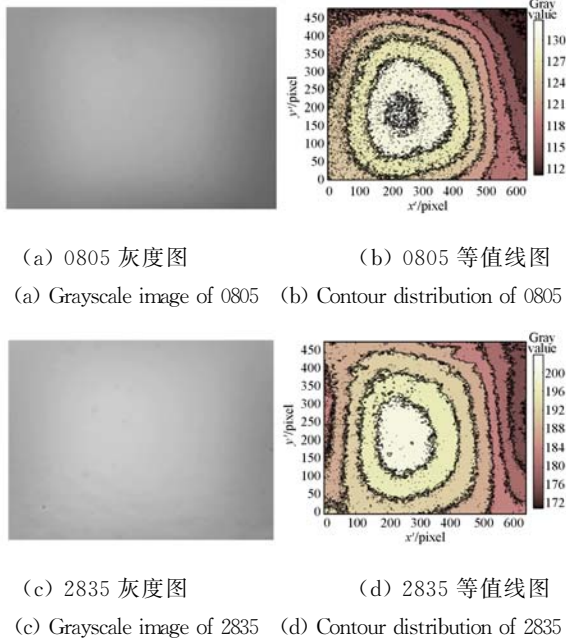


图 9 实验结果对比

Fig. 9 Comparison of experimental results

件下,测试两种环形阵列光源作用下成像系统的像面照度均匀性,调节光源控制模块产生不同的驱动电流,改变环形 LED 阵列的发光强度,检测像面不均匀度,结果如表 2 所示。

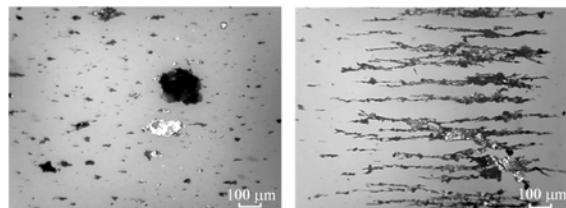
表 2 两种光源照明的像面不均匀度

Tab. 2 Illumination non-uniformity of image plane with two kinds of LED arrays

驱动电流/mA	0805 阵列/%	驱动电流/mA	2835 阵列/%
9.99	8.94	10.03	8.56
15.02	8.86	15.07	8.38
19.98	8.69	20.03	8.42
25.05	8.73	25.09	8.29
30.04	8.58	30.06	8.25

表 2 可见,不同电流驱动下两种环形 LED 阵列光源的像面不均匀度在 8%~9%,0805 环形阵列与 2835 环形阵列产生的不均匀度平均值分别为 8.76% 和 8.38%。由于 LED 贴片光源 0805 与 2835 实际的人射角度不相等,导致磨粒沉积面物方视场区域的照明均匀性不同,加之装调误差的影响,不均匀度测试值存在较小差异。另外,由于环形 LED 光源安装及光学部件加工装配误差、油液中悬浮气泡的反射与散射、放大倍率偏差以及系统内杂光干扰等因素的影响,像面不均匀度的实测值与仿真计算结果存在差异,但从测试结果来看,OLVF 成像系统的像面不均匀度仍小于 10%,可满足像面均匀性的要求。

图像采集实验可以验证 OLVF 成像系统对磨粒的成像效果,采用 2835 环形 LED 阵列作为唯一照明光源。通过校正成像系统来减小装调误差,提取背景图像的最大与最小灰度值,式(11)计算可得像面不均匀度为 8.36%,满足成像要求。1.5 倍率条件下,在线获取齿轮箱油液的特征磨粒谱片,如图 10 所示。图 10(a) 谱片图像清晰、分辨率高,可见大磨粒形态与颜色特征可辨,氧化磨粒与反光磨粒相对于谱片背景反差较大,图像对比度提高。图 10(b) 中大小磨粒成链重叠,重叠位置层次分明,有利于磨粒图像分割与视觉特征提取。综上所述,OLVF 成像系统的像面均匀性较好,满足磨粒高质量铁谱成像的要求。



(a) 大磨粒

(b) 磨粒链

(a) Big wear debris (b) Wear debris chain

图 10 OLVF 反射光铁谱图像

Fig. 10 Reflected ferro-images captured by OLVF

5 结 论

本文建立了人瞳模式 OLVF 成像系统的像面照度模型,确定了均匀照明用环形阵列光源的 LED 数量为 8 以及满足像面均匀性的物方焦距与放大倍率分别为 8 mm 和 1.5,分析了油腔通

油时 OLVF 成像系统的光能量损耗及油液中磨粒沉积面的照度分布,并仿真分析了油液吸光系数对像面照度的影响。实验结果显示:已知 LED 光源的发光强度,仿真计算像面不均匀度约为 5.60%;实际测试成像系统的像面不均匀度在 8%~9%,满足均匀性要求。最后,通过铁谱图像采集实验来验证磨粒的成像效果。结果表明:光源发光强度变化对成像系统的像面均匀性基本没影响,仿真计算与实验测试结果基本一致,OLVF 成像系统的像面均匀性能够满足铁谱成像要求,

图像中磨粒清晰可辨,有利于图像分割与视觉特征提取。本文模型可定量描述 OLVF 成像系统的像面照度,并评价像面均匀性,对于优化系统结构,提高成像性能具有一定的指导意义和工程价值。

6 致 谢

感谢西安应用光学研究所提供实验条件,特别感谢杨鸿儒老师的博士生康登魁对论文内容进行有益的讨论。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] FENG S, FAN B, MAO J H, *et al.*. Prediction on wear of a spur gearbox by on-line wear debris concentration monitoring [J]. *Wear*, 2015, 336-337: 1-8.
- [3] WU J Y, MI X Y, MAO J, *et al.*. A wavelet-analysis-based differential method for engine wear monitoring via on-line visual ferrograph [J]. *Proc. IMechE Part J. : J. of Engineering Tribology*, 2013, 227(12): 1356-1366.
- [4] CAO W, CHEN W, DONG G N, *et al.*. Wear condition monitoring and working pattern recognition of piston rings and cylinder liners using on-line visual ferrograph [J]. *Tribology Transactions*, 2014, 57(4): 690-699.
- [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研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(10): 29-34.
LI B, FENG S, MAO J H. Design and implementation of a LED array reflecting light for on-line visual ferrograph [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(10): 29-34. (in Chinese)
- [6] KANG D K, YANG H, SHA D, *et al.*. Measurement of image plane illumination uniformity of photoelectric imaging system [C]. *7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment, Harbin, SPIE*, 2014, 9282: 92822O-92822O-8.
- [7] 沈湘衡,杨亮,贺庚贤,等.光电测量设备光学系统的像面照度均匀性检测[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12): 2531-2536.
SHEN X H, YANG L, HE G X, *et al.*. Measurement of image plane illumination non-uniformity of optical system in photoelectric equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2531-2536. (in Chinese)
- [8] BROWN M S, SONG P, CHAM T J, *et al.*. Image pre-conditioning for out-of-focus projector blur [C]. *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York: IEEE*, 2006: 1956-1963.
- [9] LU Z Y, PENG Q, YAN X P, *et al.*. Method of eliminating and segmenting ferrographic images non-uniform background [C]. *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Changsha: IEEE*, 2010: 640-643.
- [10] ZHONG X, ZHANG L, JIN G. Illumination uniformity optimization of position-sensitive detector sensing optical system by circular and annular obscurations [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(35): 8401-8406.
- [11] 张光明,孙胜利,张伟,等.导弹助推段天基红外探测的像面照度模型及其应用 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(6): 425-428.
ZHANG G M, SUN SH L, ZHANG W, *et al.*. Model and application of image plane illumination for the space-based infrared detecting of boost-

- phase missile [J]. *Infrared Millim. Waves*, 2007, 26(6): 425-428. (in Chinese)
- [12] CHANTLER M, PETROU M, PENIRSCHE A, *et al.*. Classifying surface texture while simultaneously estimating illumination direction [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2005, 62(1-2):83-96.
- [13] 屈恩世, 张恒全, 曹剑中, 等. 对光学设计中照度计算公式的讨论 [J]. *光学学报*, 2008, 28(7): 1364-1368.
- QU E SH, ZHANG H J, CAO J ZH, *et al.*. Discussion of illuminance formula in optical design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(7): 1364-1368. (in Chinese)

作者简介:

李 博(1984—),男,陕西西安人,博士研究生,2010年于西安石油大学获得硕士学位,主要从事在线图像可视铁谱显微成像技术的研究与OLVF探头的开发。E-mail: suryb@163.com

导师简介:

毛军红(1965—),女,陕西西安人,教授,博士生导师,1998年于西安交通大学获得博士学位,主要从事精密运动控制和在线图像可视铁谱技术及其在装备全生命期设计中的应用研究。E-mail: jhmao@mail.xjtu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)