

DOI: 10.7652/xjtuxb201410005

# 在线图像可视铁谱 LED 阵列反射光源设计与实现

李博<sup>1,2</sup>, 冯松<sup>1,2</sup>, 毛军红<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学润滑理论及轴承研究所, 710049, 西安;  
2. 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, 710049, 西安)

**摘要:** 针对在线图像可视铁谱(on-line visual ferrograph, OLVF)反射光源亮度低、照明不均匀影响铁谱成像质量的问题,提出了一种用于 OLVF 探头的 LED 阵列反射光源。该反射光源为圆环形 LED 阵列结构,由 8 颗 0.1 W 小功率 LED 组成。基于照明均匀性理论与仿真分析,确定了反射光源结构参数、安装高度及均匀照明区域大小;利用 TracePro 仿真计算了光源在磨粒沉积区域的照度均匀性。实验结果表明:圆环形 LED 阵列反射光源的照明均匀性较好,磨粒沉积区域的辐照度分布为 130~150 W/m<sup>2</sup>,其光通量为 56.64 lm,显色指数为 82.6,色温为 6 376 K,功率为 0.336 1 W,符合 OLVF 的低功耗、高亮度、均匀性照明等要求,铁谱成像质量得到了提高,有利于磨粒形貌观测与视觉特征信息提取。

**关键词:** LED 阵列;反射光源;均匀照明;在线图像可视铁谱

**中图分类号:** TN312.8   **文献标志码:** A   **文章编号:** 0253-987X(2014)10-0029-06

## A Design Method and Its Implementation of an LED Array Reflecting Light for On-Line Visual Ferrograph

LI Bo<sup>1,2</sup>, FENG Song<sup>1,2</sup>, MAO Junhong<sup>1,2</sup>

(1. Theory of Lubrication and Bearing Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing Systems, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** A new reflecting light based on LED arrays is presented to solve the problem of ferro-imaging quality that is affected by the lower-brightness and non-uniform illumination of the original reflecting light. The new reflecting light is designed for on-line visual ferrograph (OLVF), and has a configuration of circular ring LED array composed with eight 0.1 W low-power LEDs. The theoretical and simulation analyses of uniformity illumination are used to determine geometrical parameters, the installing positions and the range of uniform illumination area. The irradiance distribution of the circular ring LED array is analyzed and calculated by TracePro to validate the characteristics of uniformity illumination on the middle of wear debris deposition zone. Experimental results show that the new reflecting light achieves a better uniformity illumination, its irradiance distribution ranges from 130 to 150 W/m<sup>2</sup>, luminous flux is 56.64 lm, color rendering index is 82.6, color temperature is 6 376 K and power is 0.336 1 W. The performance requirements such as lower power consumption, high-brightness and uniform illumination have been achieved, and ferro-imaging quality is remarkably improved. The proposed reflecting light is applicable for OLVF to observe the morphology of wear debris and to extract

the visual feature information.

**Keywords:** LED arrays; reflecting light; uniform illumination; on-line visual ferrograph

在线图像可视铁谱(on-line visual ferrograph, OLVF)能够在线捕捉装备在用润滑油中磨粒信息,监测与分析装备磨损,与基于超声感应集成脉冲传感器、超声换能器及静电传感器的油液磨粒在线监测技术相比<sup>[1-3]</sup>,OLVF具有直接读取、在线分析及抗干扰能力强等优点,它借助高梯度磁场从装备在用润滑油中分离铁磁性磨粒,利用CMOS图像传感器获取磨粒谱片,并由磨粒谱片提取磨粒的尺寸、形貌与浓度等信息<sup>[4]</sup>,其硬件核心是小体积、低功耗、单位置电磁场磨粒有序沉积及数字沉积谱图像获取探头<sup>[5]</sup>,该探头具备电磁分离沉积、透反射光照明和图像采集功能。反射光源是OLVF探头的关键部件,其性能直接影响铁谱成像质量,进而影响装备磨损状态监测的准确性和可靠性。OLVF探头体积小、结构紧凑,造成LED反射光源的安装空间狭小,不能实现反射光均匀照明。反射光源照明不均匀,将影响铁谱成像质量,增大图像处理难度,不利于磨粒表面形貌观测与视觉特征量提取。

随着LED制造技术的快速发展,发光二极管以小体积、低功耗、高亮度、长寿命和安全可靠等优点被广泛应用于仪器与照明领域。LED阵列是单颗LED点光源的有序排布和集成,可分为平面阵列和曲面阵列,其中平面阵列能更好地满足均匀照明的条件<sup>[6]</sup>,容易实现狭小区域内的均匀照明,但采用LED阵列在狭小空间内实现均匀照明的研究却相对较少。Zhu等利用三环形LED阵列与高漫反射率表面实现了间接均匀照明<sup>[7]</sup>。李林等针对医用无影灯的应用要求,提出采用非球面透镜与LED球面阵列实现目标平面的均匀照明<sup>[8]</sup>,但其照明系统均为体积大、结构复杂,无法达到小型化应用要求。Murat等提出将1-D LED阵列安装于扫描仪中用于立体扫描,实现3D显示<sup>[9]</sup>,但1-D LED阵列照明仅是线形离散光斑点,照明范围小、均匀性差。

本文以2-LED阵列结构与照度分布规律为研究基础,提出一种在线图像可视铁谱圆环形LED阵列反射光源;设计了8颗LED的圆环形阵列结构,基于照明均匀性理论与仿真分析,确定反射光源结构与安装位置参数;利用TracePro仿真计算了光源在磨粒沉积区域的照度均匀性;通过光电性能测试验证了圆环形LED阵列反射光源的低功耗、高亮度特性。磨粒铁谱图片采集实验表明,反射光磨粒谱

片清晰,适用于OLVF磨粒形貌观测与视觉特征信息的提取。

## 1 LED阵列反射光源设计与分析

LED阵列照明均匀性主要受到两个因素的影响,即LED光源间距与LED发光角度<sup>[10-11]</sup>。目前,LED平面阵列常采用线形阵列、矩形阵列和圆环阵列排布<sup>[12]</sup>。采用2-LED(即两颗LED)分析阵列结构与照度分布的关系,如图1所示。假设两颗LED的中心间距为 $L$ ,LED与光接受面的距离为 $H$ ,LED的发光角度为 $\alpha$ ,光接受面上单颗LED照度分布的圆形区域直径为 $D$ ,相隔距离 $L$ 的两颗LED照度重叠区域(即阴影部分)的横向宽度为 $W$ ,面积为 $S$ ,可得

$$\left. \begin{aligned} D &= 2H \tan(\alpha/2) \\ W &= 2H \tan(\alpha/2) - L \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} S &= D^2 \arccos(1 - W/D) - \\ &(D - W)^2 \tan[\arccos(1 - W/D)] \end{aligned} \quad (2)$$

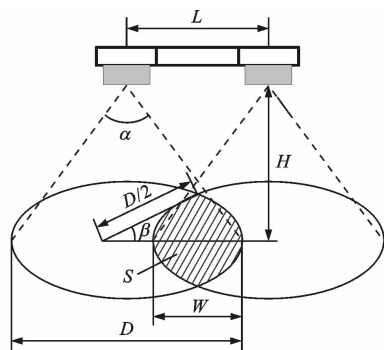


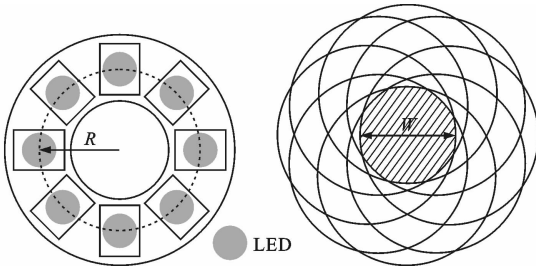
图1 2-LED阵列照度分布示意图

结合2-LED阵列结构分析,本文采用圆环阵列排布设计铁谱反射光源,该光源由8颗0.1 W小功率LED组成,以 $\pi/4$ 夹角均匀排布在半径为 $R$ 的圆周上,光源结构与光接受面上照度分布如图2所示。如图2b阴影部分所示,圆环形LED阵列照度叠加区域为直径 $W$ 的近似圆形,假设阴影部分面积为 $S'$ ,则可得

$$\left. \begin{aligned} S' &\approx \pi W^2/4, & L > D/2 \\ W &= 2H \tan(\alpha/2) - L, & \alpha < 90^\circ \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} S' &\approx \pi D^2/16, & L \leq D/2 \\ D &= 2H \tan(\alpha/2), & \alpha \geq 90^\circ \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

圆环形LED阵列中两颗对称LED的中心间距



(a) 反射光源结构 (b) 照度分布

图 2 圆环形 LED 阵列反射光源示意图

$L$  取值为 12~14 mm (即  $R=2/L$ ), 单颗 LED 的发光角度  $\alpha \geq 90^\circ$ , 以增大均匀照明范围。

由于 LED 是一种非相干光源, 光接受面上  $N$  颗 LED 的照度分布  $E(x, y, z)$  是由单颗 LED 的照度分布相加而得<sup>[13]</sup>, 即有

$$E(x, y, z) = z^m I_0 \sum_{n=1}^N \left\{ [x - R \cos(2\pi n/N)]^2 + [y - R \sin(2\pi n/N)]^2 + z^2 \right\}^{-(m+2)/2} \quad (5)$$

$$m = -\ln 2 / \ln(\cos \theta_{1/2})$$

式中:  $I_0$  为主光轴方向发光强度;  $R$  表示 LED 阵列组成的圆形半径;  $N$  为 LED 的个数;  $m$  值取决于 LED 发光区域与球面密封材料的曲率中心的相对位置;  $\theta_{1/2}$  为发光半角度, 表示发光强度减小到主光轴方向发光强度  $I_0$  一半时的角度。

通过改变  $R$  值与 LED 阵列间距, 提高反射光源照明均匀性。当环形阵列上均匀布局  $N$  颗 LED ( $N \gg 3$ ) 时, 利用斯派罗法则<sup>[14]</sup>, 即令  $x=y=0$  且  $\partial^2 E / \partial x^2 = 0$ , 求取  $R$  的最大值为

$$R_{\max} = z(6/(2m+7))^{1/2} \quad (6)$$

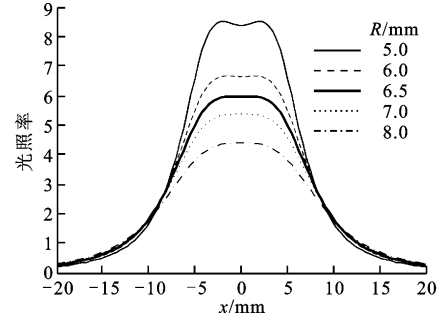
当  $N$  颗 LED 在半径为  $R_{\max}$  的环形阵列上均匀布局时可获得最大平坦度, 表明  $E(x, y, z)$  的斜率沿  $x$  轴方向变化趋近于 0, 光接受面上可以获得近似均匀照明。

结合光源结构, 磨粒沉积面上的照度是 8 颗小功率 LED 的照度叠加, 即有  $N=8$ 。认为小功率 LED 密封材料的曲率中心和 LED 芯片位置近似重合, 可看做一个符合朗伯定律的余弦辐射体, 即有  $m \approx 1$ 。所以, 圆环形 LED 阵列反射光源在磨粒沉积面上的照度分布为

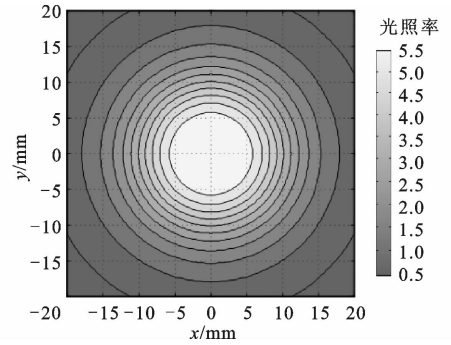
$$E(x, y) = 6^{1/2} R I_0 / 2 \sum_{n=1}^8 \left\{ [x - R \cos(\pi n/4)]^2 + [y - R \sin(\pi n/4)]^2 + 3R^2/2 \right\}^{-3/2} \quad (7)$$

在  $x \in [-20 \text{ mm}, 20 \text{ mm}]$  和  $y \in [-20 \text{ mm}, 20 \text{ mm}]$  区间内, 仿真分析圆环形 LED 阵列反射光

源在磨粒沉积面上的照度分布, 当  $R$  取值分别为 5.0、6.0、6.5、7.0、8.0 mm 时,  $x$  轴方向上的光照率分布曲线如图 3a 所示。可见, 当  $R$  在 6~7 mm 之间时, 光照分布曲线有最大平坦度。结合式(6), 当  $R$  取最大值时, 光接收面上可得到最大近似均匀照明面积。图 3b 为  $R_{\max}=6.5$  mm 时 LED 阵列在  $x$ 、 $y$  方向上的光照分布等值线图。



(a) 光照率曲线图



(b) 光照分布等值线图 ( $R_{\max}=6.5$  mm)

图 3 圆环形 LED 阵列反射光源照度分布

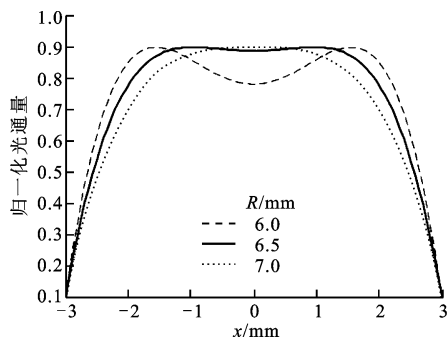
由图 3b 可见, 半径 5 mm 的圆内照度分布近似均匀, 结合式(4), 可得到圆环形 LED 阵列反射光源照度重叠区域的总光通量为

$$\phi \approx 6^{1/2} \pi D^2 R I_0 / 32 \sum_{n=1}^8 \left\{ [x - R \cos(\pi n/4)]^2 + [y - R \sin(\pi n/4)]^2 + 3R^2/2 \right\}^{-3/2}, \quad R \leq D/4$$

$$D = 2H \tan(\alpha/2), \quad \alpha \geq 90^\circ \quad (8)$$

结合磨粒沉积区域的实际面积, 在  $x \in [-3 \text{ mm}, 3 \text{ mm}]$  和  $y \in [-3 \text{ mm}, 3 \text{ mm}]$  区间内仿真分析近似圆形区域的光通量分布 ( $H$  取 8 mm), 图 4a 为  $x$  轴方向上的光通量归一化曲线图; 图 4b 为  $R_{\max}=6.5$  mm 时对应的  $x$ 、 $y$  方向上光通量分布等值线图。

可见, 当半径  $R_{\max}=6.5$  mm 时, 光源与光接受面相距 8 mm, 圆环形 LED 阵列反射光源在直径为 5 mm 的近似圆形区域可获得均匀照明。



(a) 归一化光通量图

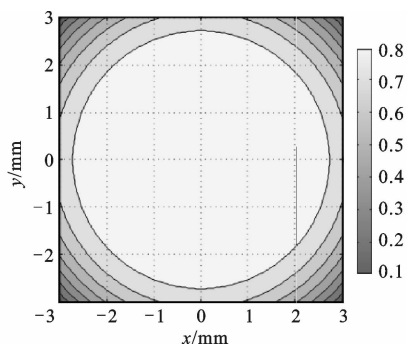
(b) 光通量分布等值线图 ( $R_{\max} = 6.5$  mm)

图4 圆环形LED阵列反射光源光通量分布

采用最小光通量  $\phi_{\min}$  与最大光通量  $\phi_{\max}$  的比值,即最小照度均匀性比率  $U_{\text{uniformity}}$  来衡量某一照明区域照度均匀性<sup>[15]</sup>,直径 5 mm 近似圆形区域内的最小照度均匀性比率可表示为

$$U_{\text{uniformity}} = \phi_{\min} / \phi_{\max} \times 100\% = E'_{\min} / E'_{\max} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $E'_{\min}$  和  $E'_{\max}$  为直径 5 mm 近似圆形区域内的最小照度值与最大照度值。将  $R_{\max} = 6.5$  mm 代入式(7),得到  $x \in [0, 2.5$  mm] 和  $y \in [0, (6.25 - x^2)^{1/2}]$  区域内的照度分布  $E'(x, y)$  为

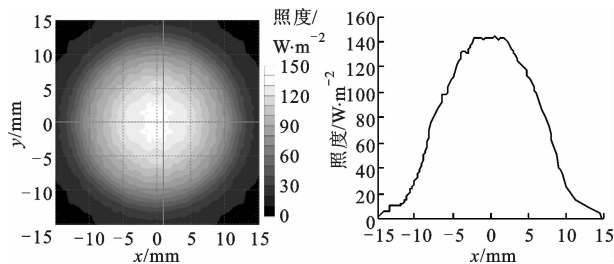
$$E'(x, y) = 13 \times 6^{1/2} I_0 / 4 \sum_{n=1}^8 \{ [x - 13 \cos(\pi n / 4) / 2]^2 + [y - 13 \sin(\pi n / 4) / 2]^2 + 507 / 8 \}^{-3/2} \quad (10)$$

当  $U_{\text{uniformity}}$  大于 90% 时,可认为该照明区域内照度均匀<sup>[16]</sup>。利用 Matlab 求取近似圆形区域内的  $E'_{\min}$  和  $E'_{\max}$ ,并代入式(9)可知,该区域内的最小照度均匀性比率达到 96.7%,照度分布近似均匀,可满足磨粒沉积面均匀照明需要。

## 2 照度均匀性仿真分析

构建圆环形 LED 阵列反射光源 3D 模型,利用 TracePro 软件进行照度均匀性仿真,设置单颗 LED 的光通量均为 11.659 lm,在模型正下方 8 mm (即

$H = 8$  mm) 处设置圆形区域作为光接受面,当圆形接受面半径为 15 mm 时,30 mm × 30 mm 矩形区域内的照度分布如图 5 所示。

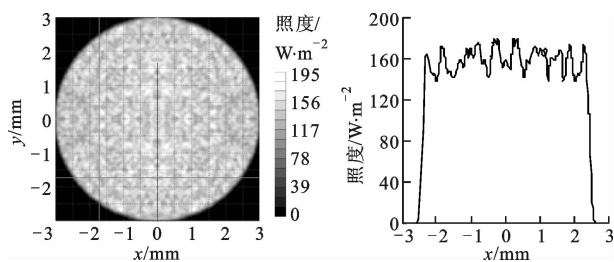


(a) 照度分布

(b) 二维照度分布曲线

图5 半径 15 mm 圆形接受面照度分布

由图 5 可见,该光源的最大照度集中在半径 3 mm 的近似圆形区域内,该区域照度曲线较为平坦,表明照度分布较为均匀。在相同高度下(即  $H$  值设定为 8 mm 时),进一步缩小光接受面积,设置圆形半径为 3 mm,以模拟磨粒沉积面的照度分布,6 mm × 6 mm 矩形区域内的照度分布如图 6 所示。



(a) 照度分布

(b) 二维照度分布曲线

图6 半径 3 mm 圆形接受面照度分布

由仿真结果可见,当反射光源模型与光接受面之间的距离保持不变时,圆形接受面上的照度分布集中在 130~150 W/m² 之间,照度分布较为均匀,表明磨粒沉积面上可以实现近似均匀照明。

## 3 LED 阵列反射光源性能测试与实验

为了提高磨粒铁谱图像质量和视觉特征信息提取的准确性,圆环形 LED 阵列反射光源性能指标需要满足 CCD 与 CMOS 传感器的最低感光灵敏度要求。确定 LED 阵列反射光源的光通量应大于或等于 36 lm,色温区间在 5 500~6 500 K 之间,显色指数大于 80(避免图像产生色飘),最大功率不大于 0.5 W,30 mA 恒流驱动。

本文采用 SXOT2835 白光系列的 0.1 W 小功率 LED 集成制作圆环形 LED 阵列反射光源,30 mA 电流驱动下,0.1 W LED 的平均光通量为 11.659 lm,

平均色温为 6 119.2 K,显色指数均达到 80 以上,主波长为 500 nm 左右,反射光源实物图如图 7 所示。



图 7 圆环形 LED 阵列反射光源实物图

由道维利尔判据可知,当光源波长较短时,图像分辨率将会提高,更有利于获取高质量磨粒铁谱图像,并且光源波长越短,光的透射能力也越强。可见,0.1 W 小功率 LED 光源性能可以满足圆环形 LED 阵列反射光源各项设计指标。

采用远方 START-1000 光色电分析仪测试圆环形 LED 阵列反射光源性能参数,在环境温度 25℃与相对湿度 55%条件下进行扫描测试,积分时间为 128 ms,当正向电流为 30 mA 时(测试系统电源供电)光源测试参数如表 1 所示。

表 1 圆环形 LED 阵列反射光源测试参数

| 功率/W    | 色温/K  | 显色指数 | 光通量/lm |
|---------|-------|------|--------|
| 0.336 1 | 637 6 | 82.6 | 56.64  |

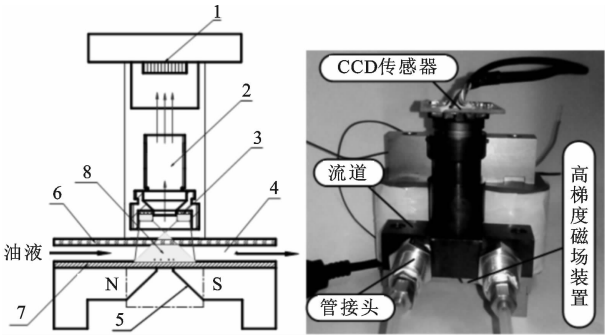
数据显示,圆环形 LED 阵列反射光源满足低功耗、高亮度的使用要求,光源性能稳定,各项参数均达到设计要求。将该光源安装在 OLVF 光路中进行实际测试,积分时间为 198 ms,30 mA 恒流驱动,则相同环境条件下光源测试参数见表 2。

表 2 光学系统内 LED 阵列反射光源测试参数

| 功率/W    | 色温/K  | 显色指数 | 光通量/lm |
|---------|-------|------|--------|
| 0.332 2 | 6 425 | 82.9 | 38.45  |

可见,光源安装在光路中测试时,由于光学镜筒的遮挡,造成光能量的大量损失,光源有效光通量  $\phi$  显著降低,但对显色指数与色温基本没影响。

通过实际应用实验(铁谱图像采集实验),验证反射光源的光学性能和使用效果,光源实验测试装置如图 8 所示,主要包括 CCD 图像传感器、数码镜头、圆环形 LED 阵列反射光源、流道以及高梯度磁场装置。圆环形 LED 阵列反射光源安装在流道正上方的光学成像装置内,透过光学薄玻璃均匀照明磨粒沉积区域。

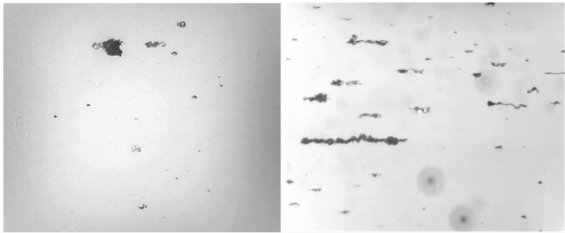


(a)光源安装示意图 (b)OLVF 探头实物图

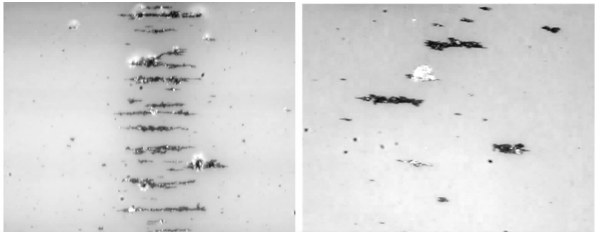
- 1:CCD 图像传感器;2:数码镜头;3:LED 阵列反射光源;  
4:流道;5:高梯度磁场装置;6:光学薄玻璃;  
7:0.6 mm 陶瓷基板;8:磨粒沉积区域

图 8 圆环形 LED 阵列反射光源实验测试装置

实验过程中,待磨粒产生有序沉积且流道中的油液无气泡产生时,随机获取一帧磨粒铁谱图像并保存为 jpg 格式图片,采集的磨粒谱片如图 9 所示。图 9a 中大磨粒图像清晰可见,可以观测到大磨粒尺寸与形貌特征;图 9b 可清晰显示小磨粒链,部分小磨粒表面产生金属反光;图 9c 可以观测到磨粒成链现象,且可见磨粒轻微堆积;图 9d 为某型号发动机磨粒谱片,图中可以看到特征磨粒,其表面有金属反光。同时,各图中的大部分磨粒表面已被氧化而呈现黑色,表明圆环形 LED 阵列反射光磨粒谱片可以通过金属反光与颜色特征判断磨粒的材料属性。因此,该光源可以较好地作为 OLVF 探头反射光源使用。



(a)大磨粒谱片 (b)小磨粒谱片



(c)磨粒链谱片 (d)发动机磨粒谱片

图 9 圆环形 LED 阵列反射光磨粒谱片

## 4 结 语

本文研究开发了一种圆环形 LED 阵列反射光源,用于解决在线图像可视铁谱反射光下均匀照明,改善磨粒铁谱成像质量。以 2-LED 阵列的照度分布理论与仿真分析为基础,设计圆环形 LED 阵列光源结构,仿真分析照度分布均匀性,同时开发圆环形 LED 阵列反射光源实体,并对其进行性能测试与实验验证。实验结果表明,本文研究开发的圆环形 LED 阵列反射光源性能良好,可以为 OLVF 探头的磨粒铁谱成像提供高亮度、均匀性照明,有利于磨粒形貌观测与视觉特征信息提取,具有一定的工程应用价值。

### 参考文献:

- [1] LI Du, JIANG Zhe. An integrated ultrasonic-inductive pulse sensor for wear debris detection [J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(2): 1-9.
- [2] KOBAYASHI M, WU K T, JEN C K, et al. Engine oil condition monitoring using high temperature integrated ultrasonic transducers [C]// *Proceedings of the 30th Computers and Information in Engineering Conference*. New York, USA: ASME, 2010: 1033-1038.
- [3] 李绍成. 基于静电感应和显微图像的油液磨粒监测技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [4] WU Tonghai, MAO Junhong, WANG Jintao, et al. A new on-line visual ferrograph [J]. *Tribology Transactions*, 2009, 52(5): 623-631.
- [5] 谢友柏, 毛军红, 王金涛, 等. 短沉积距离图像型在线铁谱装置与方法: 中国, 200610041773. X[P]. 2006-02-09.
- [6] 黄启禄, 吴逢铁. 基于近场均匀照明的 LED 二次曲线阵列的研究 [J]. *光学学报*, 2010, 32(10): 3039-3043.  
HUANG Qilu, WU Fengtie. Investigation of uniform illumination of near-field targets using a conic light-emitting diode array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 3039-3043.
- [7] ZHU Zhenmin, QU Xinghua, JIA Guoxin, et al. Uniform illumination design by configuration of LED array and diffuse reflection surface for color vision application [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(2): 84-89.

- [8] 李林, 王光珍, 王丽莉, 等. 实现均匀照明的 LED 系统设计方法 [J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0222002. 1-0222002. 7.  
LI Lin, WANG Guangzhen, WANG Lili, et al. Lens design for uniform illumination with LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0222002. 1-0222002. 7.
- [9] MURAT S, SERHAN O I, HAKAN U. Scanning led array based volumetric display [C]// *Proceedings of the 3DTV Conference on the True Vision-Capture, Transmission and Display of 3D Video*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 21-24.
- [10] ZHANG Hu, LI Yi, ZHANG Wei, et al. Optimization for LED arrays to achieve uniform near-field illumination [C]// *Proceedings of the 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2010: 1-6.
- [11] MORENO I, MUÑOZ J. Uniform illumination of distant targets using a spherical light-emitting diode array [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(3): 033001. 1-033001. 7.
- [12] LI Cheng, LI Nong, CHEN Jianxin. The research of LED arrays for uniform illumination [J]. *Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 2012, 4(10): 174-182.
- [13] WHANG A J W, CHEN Y Y, TENG Y T. Designing uniform illumination systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(3): 94-103.
- [14] MORENO I, SUN C C. Modeling the radiation pattern of LEDs [J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 1808-1819.
- [15] LIU Hai, TANG Zirong, SHI Tielin, et al. Optical and thermal modeling of ultraviolet-LED arrays packaging for curing application [C]// *Proceedings of the 2008 Photonics and Optoelectronics Meetings on Optoelectronic Devices and Integration*. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2009: 1-7.
- [16] SUN Jie, ZHANG Jingwen. Design of LED light source for uniform illumination in large area [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 401/402/403: 465-468.

(编辑 武红江)