

文章编号: 0253-2239(2006)02-0294-6

## 小孔阵列衍射特性与应用<sup>\*</sup>

郑志敏 丁天怀 张建福

(清华大学精密仪器与机械学系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 以单色标量波衍射理论为基础,研究了均匀平面波从不同角度入射小孔阵列的衍射特性。运用单孔衍射理论,同时考虑相邻小孔间衍射光强的相互影响,建立了小孔阵列衍射的理论模型和光强分布的数值积分式,小孔为硬边小孔。利用 Matlab 对 500 nm 波长的平面波入射微小方孔阵列衍射图样进行了计算机仿真,得到了不同几何参量下平面波从不同角度入射时的衍射图样的一维和二维光强分布图,并将仿真结果用于微型数字式太阳敏感器的光学系统中的结构参量设计和图像处理中的参量确定。太阳敏感器的成像实验结果表明,小孔阵列衍射光强分布图的仿真结果正确、太阳敏感器光学系统参量设计合理。小孔阵列衍射理论为太阳敏感器的光学系统设计和图像处理提供了可靠的理论基础。

**关键词:** 物理光学; 小孔阵列; 衍射; 太阳敏感器  
中图分类号: O436.1; V448.2 文献标识码: A

## Characteristics of Aperture-Array Diffraction and Its Application

Zheng Zhimin Ding Tianhuai Zhang Jianfu

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instrument and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** Based on the diffraction theory of monochromatic scalar wave, the characteristics of plane wave with uniform intensity diffracted by aperture-array from different angles were investigated. Considering the effect of the near apertures, the theoretical model and intensity distribution numerical integral expression were established on the base of aperture diffraction theory, where the apertures are hard-edged. The intensity distribution patterns of diffraction when plane light with 500 nm wavelength went through the aperture-array were simulated with Matlab, and figures of one- and two-dimensional diffraction intensity distribution of aperture and apertures-array. The simulation results were applied to design optical system's structure parameters of a micro digital sun sensor and to determine the parameters in image processing of it. The experiments showed that simulation results of intensity distribution diffraction patterns were correct and the design results of sun sensor's optical system were reasonable. The aperture-array diffraction theory provided a reliable theory for the optical system design of the sun sensor and image processing.

**Key words:** physical optics; aperture array; diffraction; sun sensor

### 1 引 言

标量衍射理论广泛用于光束垂直入射小孔衍射现象的分析与定量计算<sup>[1~6]</sup>,同样也可作为小孔阵列衍射的理论基础。

不同条件下的衍射特征有所不同。本文研究的小孔阵列衍射具有以下条件:单色平行光从不同角

度入射;硬边小孔尺寸为几十微米,间距为几百微米;平行光波长约为 500 nm;硬边小孔到屏的距离为 1000  $\mu\text{m}$  到 3000  $\mu\text{m}$ 。在给定的这些条件下,不能确定衍射现象属于菲涅耳衍射还是夫琅禾费衍射,而且入射角度是变化的,不只是垂直入射情况,现有的关于衍射现象的解析式无法直接应用。

<sup>\*</sup> 国家 973 计划资助课题。

作者简介: 郑志敏(1971~),女,河北曲阳人,博士研究生,主要从事传感器与智能仪器以及光学技术方面的研究。

E-mail: zzm01@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005-01-07; 收到修改稿日期: 2005-05-10

本文基于惠更斯-菲涅耳单色平面波衍射积分公式,运用单孔衍射理论,考虑相邻小孔之间衍射光强分布的相互影响,建立了小孔阵列衍射光强分布的理论模型和数值积分式。将实际条件和具体的量化值代入衍射积分公式,利用 Matlab 进行计算机仿真并获得衍射图样。仿真结果用于微型数字式太阳敏感器光学系统参量设计和图像处理中的参量确定。

## 2 小孔和小孔阵列衍射现象研究

### 2.1 小孔衍射数学模型的建立

如图 1 所示,根据惠更斯-菲涅耳原理,平行光经入射面 I 沿  $\alpha$  方向入射到光接收面 II 上的任一点的光强是小孔  $\Sigma$  所在面所有点发出的次波在该点的相干叠加<sup>[7]</sup>。

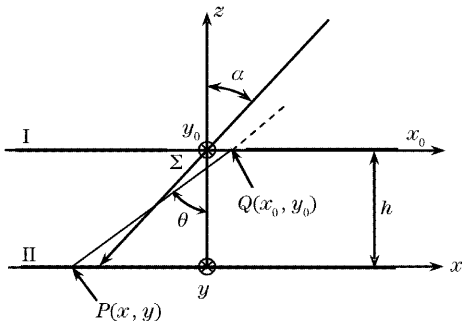


图 1 小孔衍射原理图

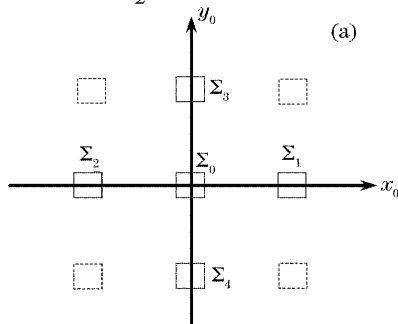
Fig. 1 Principle of aperture diffraction

小孔  $\Sigma$  上任一点  $Q$  处的光波复振幅记作  $U(Q)$ ,在  $Q$  点附近取面积元  $d\Sigma$ ,设法线方向为  $n$ ,从  $Q$  点指向  $P$  点的矢量为  $r$ , $\theta$  表示  $n$  与  $r$  的夹角,称为衍射角。则次级子波源在观察点  $P$  贡献的复振幅为

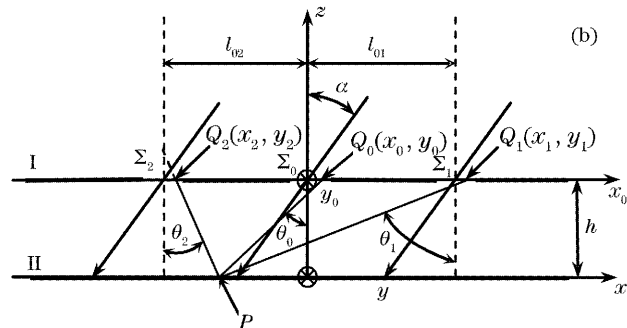
$$dU(P) = CK(\theta)U(Q) \frac{\exp(jkr)}{r} d\Sigma,$$

$P$  点的光波复振幅为

$$U(P) = C \iint_{\Sigma} K(\theta)U(Q) \frac{\exp(jkr)}{r} d\Sigma,$$



(a)



(b)

图 2 小孔阵列与小孔阵列衍射原理图

Fig. 2 Aperture array and principle of aperture-array diffraction

式中  $C = -\frac{j}{\lambda} = \frac{\exp(j\pi/2)}{\lambda}$ ,即假设次级波源相位比该点振动  $U(Q)$  的相位领先  $\pi/2$ ,且  $C \propto 1/\lambda$ 。由于  $\lambda$  为固定值,并且整体相位的相同变化对光强的叠加无影响,故此项可视作常数; $K(\theta)$  为倾斜因子,取  $K(\theta) = \cos \theta$ , $\theta$  为衍射角; $U(Q) = u_0 \exp(jkx_0 \sin \alpha)$  为平行光在  $\Sigma$  面上  $Q$  点的光波复振幅。式中  $u_0$  为振幅常数, $k = 2\pi/\lambda$ , $\alpha$  为入射角。已知

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + h^2},$$

那么, $P$  点的光波复振幅为

$$U(P) = Cu_0 \iint_{\Sigma} \cos \theta \exp(jkx_0 \sin \alpha) \times \frac{\exp(j2\pi r/\lambda)}{r} d\Sigma.$$

为便于进行数值积分和计算机仿真,将  $U(P)$  写成实部和虚部之和的形式:

$$U(P) = R_e + jI_m,$$

则  $P$  点光强表示成

$$I(P) = U(P) \times U^*(P) = R_e^2 + I_m^2, \quad (1)$$

由(1)式可见,当忽略入射面遮光层厚度,对于固定波长的平行光小孔衍射,光强分布与平行光入射角、小孔形状与尺寸和光入射面到光接收面的间距有关。

### 2.2 小孔阵列衍射数学模型的建立

在单个小孔衍射分析的基础上,考虑相邻小孔衍射的影响就可得到小孔阵列衍射的数学模型。图 2(a)给出小孔阵列中相邻的 8 个小孔位置,图中虚线部分所示的 4 个小孔相对  $\Sigma_0$  的距离较远,因此只考虑了  $\Sigma_1$ 、 $\Sigma_2$ 、 $\Sigma_3$  和  $\Sigma_4$  对  $\Sigma_0$  衍射图样光强分布的影响;图 2(b)给出了平行光在  $xoy$  平面内入射时的情况。

相邻小孔  $\Sigma_0$ 、 $\Sigma_1$ 、 $\Sigma_2$ 、 $\Sigma_3$  和  $\Sigma_4$  上任一点  $Q_0$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$  和  $Q_4$  处的光波复振幅记作  $U(Q_0)$ 、 $U(Q_1)$ 、

$U(Q_2)$ 、 $U(Q_3)$ 和 $U(Q_4)$ ，在 $Q_0$ 、 $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 和 $Q_4$ 点附近取面积元 $d\Sigma_0$ 、 $d\Sigma_1$ 、 $d\Sigma_2$ 、 $d\Sigma_3$ 和 $d\Sigma_4$ ，衍射角为 $\theta_0$ 、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 和 $\theta_4$ 。则次级子波源 $\Sigma_i$ 在观察点 $P$ 产生的复振幅为

$$U_i(P) = Cu_0 \iint_{\Sigma_i} \cos \theta_i \exp[jk(x_i - l_{0i}) \sin \alpha] \times \frac{\exp(j2\pi/\lambda)}{r_i} d\Sigma_i.$$

式中 $i = 0 \sim 4$ ， $l_{0i}$ 表示相邻小孔到中心孔的距离，进而得到 $P$ 点的光波复振幅为

$$U(P) = \sum_{i=0}^4 U_i(P),$$

$U(P)$ 写成实部和虚部之和的形式：

$$U(P) = \sum_{i=0}^4 R_{ei} + i \sum_{i=0}^4 I_{mi},$$

$P$ 点光强表示成

$$I(P) = U(P) \times U^*(P) = \left( \sum_{i=0}^4 R_{ei} \right)^2 + \left( \sum_{i=0}^4 I_{mi} \right)^2, \quad (2)$$

由上式可知，对于固定波长的平行光小孔阵列，与衍射光强分布有关的参量除影响单个小孔衍射光强分

布的有关参量外，还与相邻孔间距有关。

### 2.3 衍射图样计算机仿真

按(1)式和(2)式进行小孔衍射光强分布的计算机仿真。设定的光学参量分别是：平行光波长为 $500 \text{ nm}$ ；入射角为 $0^\circ$ 和 $64^\circ$ ；小孔为方形，尺寸分别为 $40 \text{ }\mu\text{m} \times 40 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $60 \text{ }\mu\text{m} \times 60 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $80 \text{ }\mu\text{m} \times 80 \text{ }\mu\text{m}$ ；小孔到屏的距离分别为 $1000 \text{ }\mu\text{m}$ 、 $2000 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $3000 \text{ }\mu\text{m}$ 。

以下给出单孔二维光强分布、单孔一维光强分布和小孔阵列光强分布的仿真结果，各图中的 $x$ 或 $y$ 坐标代表相对小孔几何投影中心的距离，单位是微米，光强数值用归一化表示。

#### 2.3.1 单孔衍射二维光强分布

图3给出了小孔尺寸为 $60 \text{ }\mu\text{m} \times 60 \text{ }\mu\text{m}$ 的二维光强分布图样。比较图3(a)和图3(b)可知，小孔到屏的间距 $h$ 不同，衍射图样不同， $h$ 较小时为四个会聚的亮斑； $h$ 较大时为一个会聚的亮斑。比较图3(b)和图3(c)可知，平行光垂直入射时，衍射图样中间亮斑为近似圆形；斜入射时，衍射图样中间亮斑为近似椭圆形。

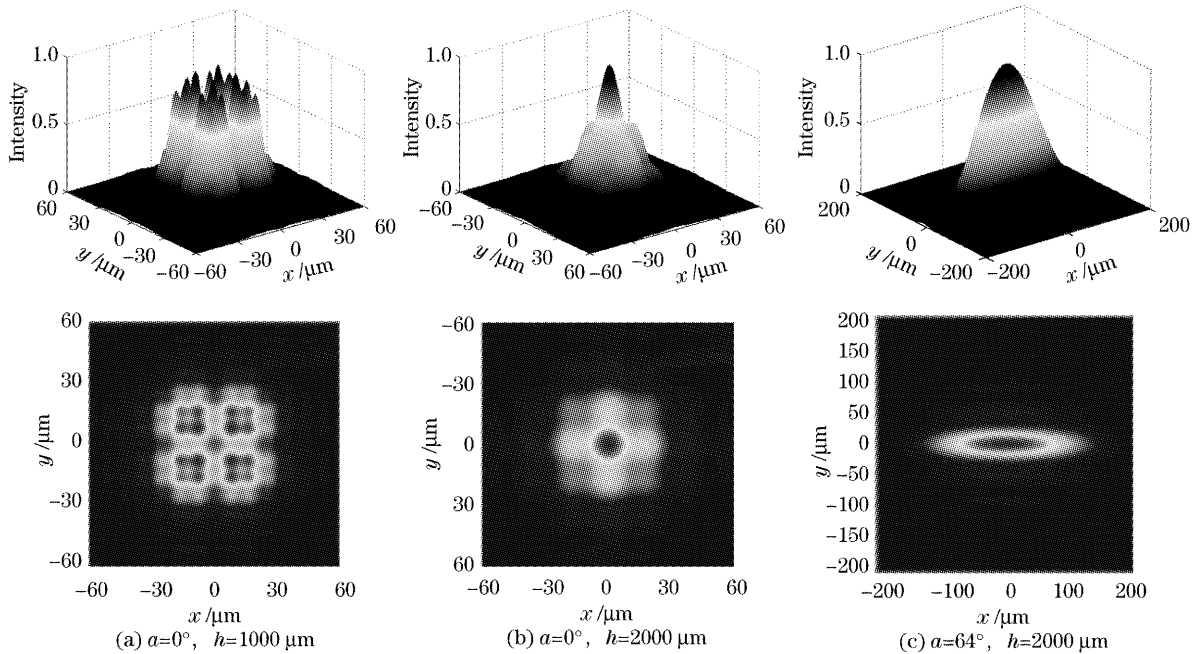


图3 单孔衍射二维光强分布

Fig. 3 Two-dimensional aperture diffraction intensity distribution

#### 2.3.2 单孔衍射一维光强分布

为了更好地比较不同参量对衍射光强分布的影响，图4~图7给出了一维光强分布图。

由图4可知，入射角越大，衍射图样光强越分

散；但当小孔到屏的距离 $h$ 较小时，小入射角时衍射图样出现光强分散(出现多个会聚的亮斑)。由图5可知，小孔到屏的距离 $h$ 在 $1000 \text{ }\mu\text{m}$ 到 $3000 \text{ }\mu\text{m}$ 范围内，对小入射角情况， $h$ 越小，衍射图样光强越分

散(出现多个会聚的亮斑);对大入射角情况,  $h$  越大, 衍射图样光强越分散(亮斑的椭圆度越大)。由图 6 可知, 小孔尺寸在  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$  到  $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$  范围内, 对小入射角情况, 小孔尺寸越大, 衍射图样光强越分散; 对大入射角情况, 小孔尺寸越大, 衍射图样光强越集中。由图 7 可知, 在相对角度为  $0^\circ$  到  $64^\circ$  变化时的  $y$  方向光强分布范围变化不大。

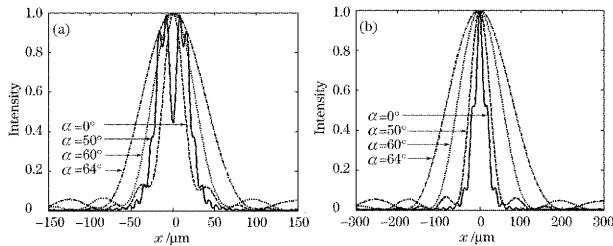


图 4 单孔衍射一维光强分布, 小孔尺寸为  $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$  ( $x$  方向)。 (a)  $h=1000 \mu\text{m}$ , (b)  $h=2000 \mu\text{m}$

Fig. 4 One-dimensional aperture diffraction intensity distribution, aperture size is  $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$  ( $x$  direction). (a)  $h=1000 \mu\text{m}$ , (b)  $h=2000 \mu\text{m}$

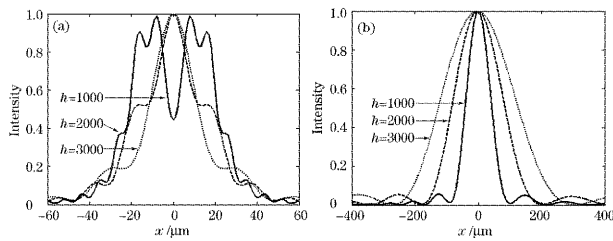


图 5 单孔衍射一维光强分布, 小孔尺寸为  $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$  ( $x$  方向)。 (a)  $\alpha=0^\circ$ , (b)  $\alpha=64^\circ$

Fig. 5 One-dimensional aperture diffraction intensity distribution, a perture size is  $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$  ( $x$  direction). (a)  $\alpha=0^\circ$ , (b)  $\alpha=64^\circ$

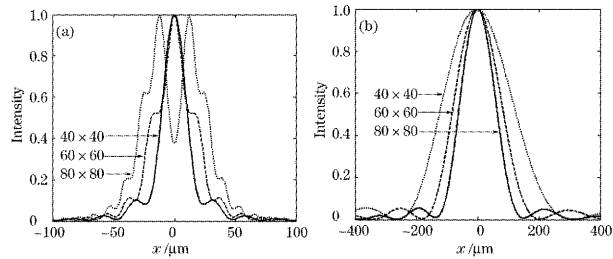


图 6 单孔衍射一维光强分布,  $h=2000 \mu\text{m}$ 。 (a)  $\alpha=0^\circ$ , (b)  $\alpha=64^\circ$

Fig. 6 One-dimensional aperture diffraction intensity distribution,  $h=2000 \mu\text{m}$ 。 (a)  $\alpha=0^\circ$ , (b)  $\alpha=64^\circ$

2. 3. 3 小孔阵列衍射一维光强分布

小孔阵列衍射图样如图 8~图 10 所示。由图 8 可知, 入射角越小, 衍射图样光强越集中, 相邻小孔

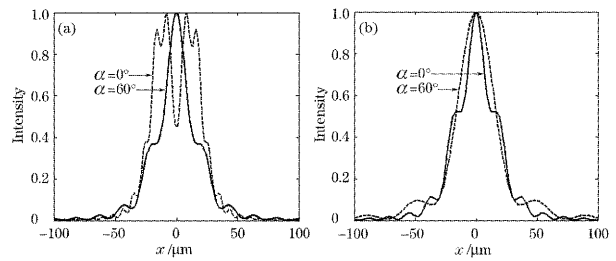


图 7 单孔衍射一维光强分布, 小孔尺寸为  $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$  ( $y$  方向)。 (a)  $h=1000 \mu\text{m}$ , (b)  $h=2000 \mu\text{m}$

Fig. 7 One-dimensional aperture diffraction intensity distribution, aperture size is  $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$  ( $y$  direction). (a)  $h=1000 \mu\text{m}$ , (b)  $h=2000 \mu\text{m}$

衍射的相互影响越小; 反之入射角越大, 相互影响越大。由图 9 和图 10 可知, 当  $h$  一定时, 小孔尺寸越小, 光强越分散, 相邻小孔衍射的相互影响越大; 当小孔尺寸一定时,  $h$  越大, 光强越分散, 相邻小孔衍射的相互影响越大。影响严重时, 相邻两孔衍射图样界限会消失, 使衍射图样成为一个明亮的条纹。

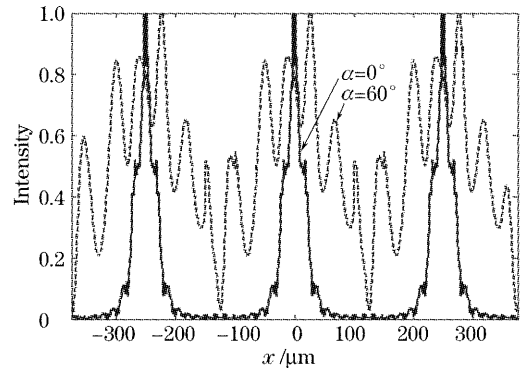


图 8 小孔阵列衍射一维光强分布,  $h=2000 \mu\text{m}$ , 小孔尺寸为  $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$

Fig. 8 One-dimensional aperture-array intensity distribution,  $h=2000 \mu\text{m}$ , aperture size  $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$

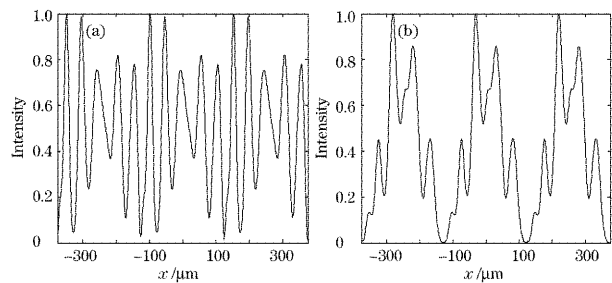


图 9 小孔阵列衍射一维光强分布。  $\alpha=64^\circ$ ,  $h=2000 \mu\text{m}$ , 小孔尺寸为  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$  (a),  $80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$  (b)

Fig. 9 One-dimensional aperture-array intensity distribution.  $\alpha=64^\circ$ ,  $h=2000 \mu\text{m}$ , aperture sizes  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$  (a),  $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$  (b)

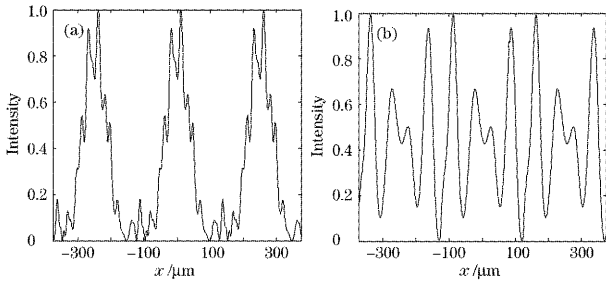


图 10 小孔阵列衍射一维光强分布。α=64°，小孔尺寸为 60 μm×60 μm。(a) h=1000 μm，(b) h=2000 μm

Fig. 10 One-dimensional aperture-array intensity distribution. α=64°, aperture sizes are 60 μm×60 μm. (a) h=1000 μm, (b) h=2000 μm

通过以上分析和仿真得到小孔和小孔阵列的衍射规律：如果条件满足，平行光经过小孔在接收面上会聚成一个亮斑，垂直入射时，亮斑为圆形，斜入射时（即入射角度大于 0°），亮斑为近似椭圆形，椭圆度随入射角度的增大而增大；平行光经过小孔阵列在接收面上成像为亮斑阵列，即每个小孔在接收面上会聚成一个亮斑，平行光入射角度越大、入射面到接收面距离越大、小孔尺寸越小，相邻小孔相互间对光强分布的影响就越大，严重时甚至会形成一条明亮的条纹。

### 3 在太阳传感器光学设计和图像处理中的应用

#### 3.1 太阳传感器光学系统工作原理

微型数字式太阳传感器光学系统由 APS CMOS 图像传感器和微机电系统 (MEMS) 工艺制作的光线引入器组成 (图 11)<sup>[8~10]</sup>。光线引入器由窄带滤光片、玻璃基片、掩膜层和防反射层等组成，其中，掩膜层具有透光小孔阵列结构，是光线引入器关键的功能部件。太阳光束从不同角度入射，通过光线引入器，由于掩膜层的透光小孔对光线的衍射作用，太阳光在光探测器上形成亮斑，亮斑中心位置与太阳方位角有关。

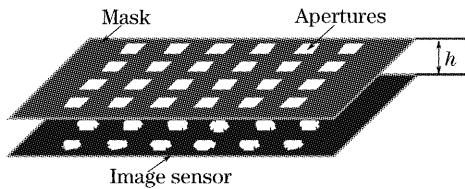


图 11 太阳传感器工作原理图

Fig. 11 Working principle of the sun sensor

光线引入器上的掩膜层的遮光层厚度约为 130 nm，这个厚度相对入射光波长和小孔尺寸相比

可忽略，并且小孔边界清晰，因此小孔可视为理想化的硬边小孔；同时由于太阳光经过了窄带滤光片，小孔入射光线可视作单色平行光，太阳传感器的成像基本满足单色平行光小孔阵列衍射条件，小孔阵列衍射理论可以作为太阳传感器光学系统设计的理论基础。

#### 3.2 太阳传感器光学系统参量设计

太阳传感器的光学系统参量设计包括小孔单元尺寸设计、阵列参量设计和光线引入器与图像传感器的间距设计，是传感器设计中的关键，直接关系到传感器的视场角大小和测量精度。以下设计是针对所选定的图像传感器进行的，其分辨率为 1024×1024，像素尺寸为 10 μm×10 μm。

光学系统参量设计的原则是：

单个孔的衍射图样仅有一个会聚亮斑，保证图像识别时每个小孔对应一个光斑质心；

光能量分布范围适宜。为保证亚像元算法的质心估计精度，光能量至少分布在 4×4 的像素上<sup>[11]</sup>，同时为避免大量的计算，光能量也不宜分布在过多的像素上；

孔阵列的衍射图样中的单个衍射图样可分辨。单个衍射图样无法分辨时整个图像会形成明暗条纹，每个孔对应的投影中心就无法识别，太阳传感器也就不能实现太阳角的测量；

满足以上条件的同时还要有足够多的阵列数量。依据统计学原理，阵列数量越多，随机误差就越小。

由图 4~图 10 的仿真结果，最终太阳传感器光学系统参量为：阵列数量为 30×30，小孔尺寸为 60 μm×60 μm，小孔到图像传感器的接收面距离为 2000 μm，小孔间距为 250 μm。

#### 3.3 太阳传感器图像处理方法

太阳传感器的图像处理包括背景预处理和小孔几何投影中心估算两部分<sup>[12]</sup>。背景预处理包括除背景噪声和除衍射旁瓣，除背景系数要根据衍射图样确定；小孔几何投影中心只能以光强分布的强度质心来代替，计算公式为

$$x_{cen} = \frac{\iint (R_e^2 + I_m^2) x dx dy}{\iint (R_e^2 + I_m^2) dx dy}$$

积分区域是在几何投影中心附近的小视窗内，小视窗的大小视小孔衍射范围确定，因此在不同角度时积分区域大小不同，角度越大，小视窗越大。

#### 3.4 太阳传感器成像实验

按以上设计结果制备完成了基于微机电系统

(MEMS)工艺制备的光线引入器和太阳传感器样机<sup>[13]</sup>,以 F550 型平行光管为模拟光源,实验得到了不同角度的图片,图 12 为整幅图片,图 13 为整幅图片中的  $4 \times 4$  阵列的部分图片。

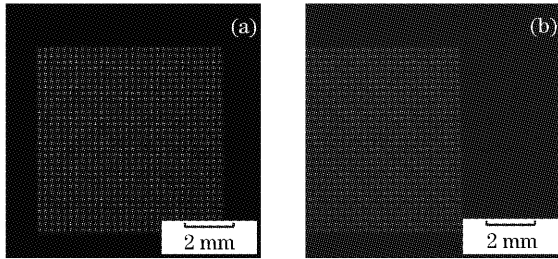


图 12 太阳传感器实验图片(整图)。(a)  $\alpha=0^\circ$ , (b)  $\alpha=64^\circ$

Fig. 12 Experimental images of the sun sensor (whole).

(a)  $\alpha=0^\circ$ , (b)  $\alpha=64^\circ$

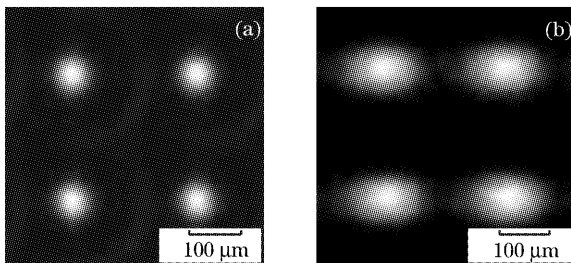


图 13 太阳传感器实验图片(部分)。(a)  $\alpha=0^\circ$ , (b)  $\alpha=64^\circ$

Fig. 13 Experimental images of the sun sensor (part).

(a)  $\alpha=0^\circ$ , (b)  $\alpha=64^\circ$

太阳传感器实际输出图像的特征是:小角度时,每个孔所成图像为一会聚的圆形光斑,光强分布范围小;大角度时,每个孔所成图像为一会聚的椭圆形光斑,光强分布范围大,每个光斑之间有明显界限。

可见太阳传感器实际输出图像特征与仿真结果基本吻合,太阳传感器光学系统参量设计合理,视场角可达到  $\pm 64^\circ$ 。

## 4 结 论

通过解析分析和数值计算得到的小孔和小孔阵列的衍射规律,为太阳传感器的光学系统设计和图像处理提供了理论基础,实验结果验证了仿真结果的正确性和太阳传感器光学设计的合理性。

## 参 考 文 献

- 1 Zhou Guoquan, Zhao Daomu, Wang Shaomin. Characteristics of axial light intensity of planar wave diffracted by small circular aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 22~25 (in Chinese)
- 2 Teng Shuyun, Liu Liren, Wan Lingyu *et al.*. Propagation of Gaussian beam limited by an aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 157~160 (in Chinese)
- 3 滕树云,刘立人,万玲玉等. 孔径光阑限制下高斯光束的传输[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 157~160
- 3 Shuyun Teng, Liren Liu, Zhu Luan *et al.*. Axial distribution of Gaussian beam limited by a hard-edged aperture[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(7): 376~378
- 4 Feng Di, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Rigorous vector analysis of diffractive micro-cylindrical lenses characteristics of focal depth and focal shift[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1045~1049 (in Chinese)
- 5 冯迪,严瑛白,金国藩等. 衍射微柱透镜轴向光强分布特性的严格电磁分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1045~1049
- 5 Zhang Yan, Zhang Jingjuan, Situ Guohai. Investigation on diffractive optical elements for converting Gaussian beam into square uniform focused spot[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1183~1187 (in Chinese)
- 6 张艳,张静娟,司徒国海. 高斯光束变换成方形均匀焦斑的衍射光学元件的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(10): 1183~1187
- 6 Wang Mingzhuo, Lv Baida. Fraunhofer and Fresnel diffraction at two asymmetrical rectangular apertures[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(3): 330~333 (in Chinese)
- 7 王明灼,吕百达. 非对称方孔的夫琅和费和非涅耳衍射[J]. *激光技术*, 2004, **28**(3): 330~333
- 7 Born M, Wolf E. *Principles of Optics* [M]. Yang Jiasun transl. Beijing: Science Press, 1978 (in Chinese)
- 8 Duggan Philip, Garlt Willam A, Hersom Chavlesh H. Sun sensors using multi-pinhole overlays detection of satellite attitude[P]. Canada, WO0138896, 2001-5-31
- 9 M. 波恩, E. 沃尔夫. 光学原理[M]. 杨荫荪译. 北京: 科学出版社, 1978
- 9 Liebe C, Mobasser S, Youngsam B *et al.*. Micro sun sensor[C]. *IEEE Proceedings Aerospace Conference*, 2002, 5-2263~5-2273
- 10 Zhu Hongtai, Sun Shengli, Chen Guilin. Sun sensor based on CMOS APS[J]. *Infrared Technology*, 2004, **26**(4): 76~80 (in Chinese)
- 10 朱鸿泰,孙胜利,陈桂林. CMOS APS 在太阳传感器中的应用研究[J]. *红外技术*, 2004, **26**(4): 76~80
- 11 Hancock B R, Stirbl R C, Thomas J. Cunningham *et al.*. CMOS active pixel sensor specific performance effects on star tracker/Imager position accuracy[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **4284**: 43~53
- 12 Mobasser S, Liebe C C, Howard A. Fuzzy image processing in sun sensor[C]. *IEEE International Fuzzy Systems Conference*, 2001. 1337~1342
- 13 Zheng Zhimin, Ding Tianhuai, Zhang Jianfu. MEMS based sun sensor with wide FOV and high accuracy[C]. *4th International Workshop on Microfactories*, 2004. 592~595