

红外浸没探测器有效通光口径计算

徐枝锦¹, 朱蓓蓓², 潘婷婷², 曹新平²

(1.上海师范大学商学院, 上海 200234; 2.上海航天控制技术研究所, 上海 201108)

摘要: 给出了浸没探测器的有效通光口径计算式, 包括透镜折射率 n_1 小于等于浸没介质折射率 n_2 ($n_1 \leq n_2$) 和透镜折射率 n_1 大于浸没介质折射率 n_2 ($n_1 > n_2$) 两种情形。

关键词: 浸没透镜; 有效通光口径; 红外探测器

中图分类号: TN215, O434.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2016)08-0666-08

Calculation of Effective Optical Aperture for Optical Immersed Detectors

XU Zhijin¹, ZHU Beibei², PAN Tingting², CAO Xinping²

(1.School of Finance and business, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China;

2.Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology Shanghai 201108, China)

Abstract: When the detectivity of an optical immersed detector is measured, the effective optical aperture of the detector is involved. In this paper, the calculation expression of the effective optical aperture for an optical immersed detector is derived.

Key words: immersed lens, effective optical aperture, infrared detector

0 引言

红外浸没探测器探测度测试时, 必定要涉及到该探测器的有效通光口径。浸没探测器有效通光口径与透镜球面曲率半径、透镜厚度、透镜折射率、浸没介质折射率以及探测元件光敏面宽度等有关。浸没透镜与探测元件之间应是光学接触, 即 $n_1 \leq n_2$ 。但是, 考虑到探测器探测率等因素, 常选用折射率 n_1 较大的材料(如锗)^[1]做浸没透镜。这样, 可能会出现 $n_1 > n_2$ 这种情形。本文分别给出 $n_1 \leq n_2$ 和 $n_1 > n_2$ 两种情形下, 超半球浸没探测器、亚半球浸没探测器和半球浸没探测器的有效通光口径计算式。

1 一般方程及其解

球面曲率半径为 r_c , 厚度为 d , 材料折射率为 n_1 的透镜通过材料折射率为 n_2 的介质与光敏面宽度为 w 的探测元件构成一同心探测整体, 即浸没探测器。一平行于浸没探测器光轴的平行光由空气经该浸没透镜球面上点 M 后折射到与该探测元件光敏面尺寸相同的浸没介质边缘点 N 处, 如图 1 所示。图中 c 为透镜球面圆心, O 为透镜球面顶点。

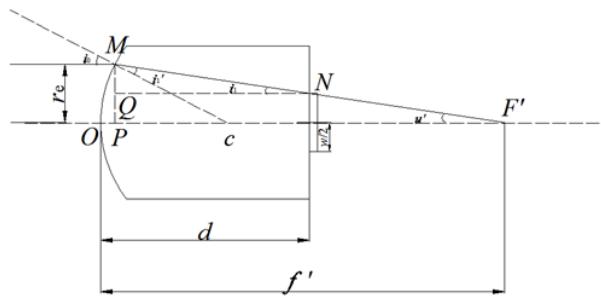


图 1 浸没探测器有效通光口径的光路图

Fig.1 Optical principle of an optical immersed detector for effective optical aperture

球面点 M 处, 有折射定律:

$$n_0 \sin i_0 = n_1 \sin i_1 \quad (1)$$

$$\sin i_0 = r_e / r_c \quad (2)$$

式中: r_e 即浸没探测器有效通光口径半径。

$$\sin i_1' = \sin(i_0 - u') = \sin i_0 \cos u' - \cos i_0 \sin u' \quad (3)$$

$$\cos i_0 = \frac{r_c - h}{r_c} \quad (4)$$

式中: h 为 OP 长度, 即弓形高, $h = r_c - \sqrt{r_c^2 - r_e^2}$ [2]。

$$\cos u' = \frac{f' - d}{\sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 + (f' - d)^2}} = \frac{\frac{n_1}{n_1 - 1}r_c - d}{\sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 + \left(\frac{n_1}{n_1 - 1}r_c - d\right)^2}} \quad (5)$$

$$\sin u' = \frac{\frac{w}{2}}{\sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 + \left(\frac{n_1}{n_1 - 1}r_c - d\right)^2}} \quad (6)$$

式中: f' 为线段 $\overline{OF'}$, 即焦距 $f' = \frac{n_1}{n_1 - 1}r_c$ 。

将 $n_0 = 1$ (空气折射率) 和式(2)~(6)代入式(1)得:

$$1 = n_1 \left[\frac{\frac{n_1}{n_1 - 1}r_c - d}{\sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 + \left(\frac{n_1}{n_1 - 1}r_c - d\right)^2}} - \frac{\frac{w}{2}\sqrt{r_c^2 - r_e^2}}{r_e \sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 + \left(\frac{n_1}{n_1 - 1}r_c - d\right)^2}} \right] \quad (7)$$

式(7)就是浸没探测器有效通光口径, 在 $n_1 \leq n_2$ 情形下的一般方程 $f_1(r_e, r_c, d, n_1, w) = 0$, 也是 $n_1 > n_2$ 情形下一般方程之一。

从式(7)中解出的 r_e 记为 r_{e_1} , 得 $n_1 \leq n_2$ 情形下浸没探测器有效通光口径的计算式:

$$r_{e_1} = \frac{n_1 r_c \frac{w}{2}}{\sqrt{\left[n_1 \left(\frac{n_1}{n_1 - 1}r_c - d\right) - \sqrt{\left(\frac{w}{2}\right)^2 + \left(\frac{n_1}{n_1 - 1}r_c - d\right)^2}\right]^2 + n_1^2 \left(\frac{w}{2}\right)^2}} \quad (8)$$

对于 $n_1 > n_2$ 情形: 平行光经点 M 折射后达点 N 。若 $n_1 - n_2$ 介面上入射角 i_1 等于临界角 i_{1m} , 则平面上点 N 处:

$$\frac{n_2}{n_1} = \sin i_{1m} \quad (9)$$

$$\sin i_{1m} = \frac{\overline{MQ}}{\overline{MN}} = \frac{r_e - \frac{w}{2}}{\sqrt{\left(r_e - \frac{w}{2}\right)^2 + (d - h)^2}} \quad (10)$$

式中: h 为线段 \overline{OP} , $h = r_c - \sqrt{r_c^2 - r_e^2}$ 。

将式(10)代入式(9), 得:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{r_e - \frac{w}{2}}{\sqrt{\left(r_e - \frac{w}{2}\right)^2 + \left(d - r_c + \sqrt{r_c^2 - r_e^2}\right)^2}} \quad (11)$$

式(11)即浸没探测器有效通光口径在 $n_1 > n_2$ 情形下的另一个一般方程 $f_2(r_e, r_c, d, n_1, n_2, w) = 0$ 。

从式(11)中解出的 r_e 记为 r_{e_2} :

$$r_{e_2} = \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \left(\frac{w}{2} \right) + \frac{n_2}{n_1^2} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} (d - r_c) + \frac{n_2}{n_1} \sqrt{r_c^2 - \left[\frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} \left(\frac{w}{2} \right) + \frac{n_2}{n_1} (d - r_c) \right]^2} \quad (12)$$

解式(11)过程中须满足以下条件:

$$\textcircled{1} \quad d \geq r_c - \sqrt{r_c^2 - r_e^2}$$

\textcircled{2} 式(12)中根号内不能小于 0, 即:

$$d \leq r_c + \frac{n_1}{n_2} r_c - \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_2} \left(\frac{w}{2} \right)$$

综合, 式(12)须满足以下条件:

$$r_c - \sqrt{r_c^2 - r_e^2} < d < r_c + \frac{n_1}{n_2} r_c - \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_2} \left(\frac{w}{2} \right) \quad (13)$$

可以看出, $r_c - \sqrt{r_c^2 - r_e^2} = \overline{OP} = h$, 因为 $n_1 > n_2$, $r_c > w/2$, 有 $\frac{n_1}{n_2} r_c - \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_2} \left(\frac{w}{2} \right) > 0$, 也就是式(13)右边大于浸没透镜球面曲率半径。

2 超半球与亚半球

透镜厚度大于透镜球面曲率半径 ($d > r_c$) 的浸没探测器为超半球浸没探测器, 如图 2。

透镜厚度小于透镜球面曲率半径 ($d < r_c$) 的浸没探测器为亚半球浸没探测器, 如图 3。

对于 $n_1 \leq n_2$ 情形, 超半球浸没探测器有效通光口径计算式和亚半球浸没探测器有效通光口径计算式均为式(8)。

$n_1 > n_2$ 情形，比较式(8) r_{e_1} 值与式(12) r_{e_2} 值。 $2r_{e_1}$ 与 $2r_{e_2}$ 中，值小的为超半球浸没探测器有效通光口径值或亚半球浸没探测器有效通光口径值。

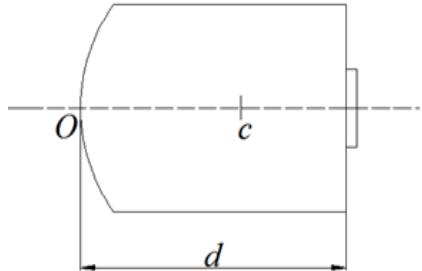


图2 超半球浸没探测器

Fig.2 Optical immersed detector with a hyper-hemispherical lens

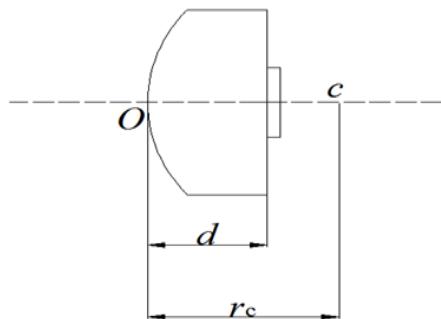


图3 亚半球浸没探测器

Fig.3 Optical immersed detector with a quasi-hemispherical lens

3 半球

透镜厚度等于透镜球面曲率半径 ($d=r_c$) 的浸没探测器为半球浸没探测器，如图4。

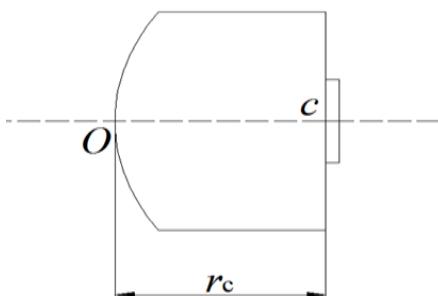


图4 半球浸没探测器

Fig.4 Optical immersed detector with a hemispherical lens

半球是一般中 $d=r_c$ 的特例。将 $d=r_c$ 代入式(8)和式(12)，分别得到：

球面：

$$r_{e_{1(\text{半球})}} = \frac{n_1 r_c w}{2 \sqrt{\left[\frac{n_1}{n_1 - 1} r_c - \sqrt{\left(\frac{w}{2} \right)^2 + \left(\frac{1}{n_1 - 1} r_c \right)^2} \right]^2 + n_1^2 \left(\frac{w}{2} \right)^2}} \quad (14)$$

平面：

$$r_{e_{2(\text{半球})}} = \frac{(n_1^2 - n_2^2)w/2 + n_2 \sqrt{n_1^2 r_c^2 - (n_1^2 - n_2^2)(w/2)^2}}{n_1^2} \quad (15)$$

$n_1 \leq n_2$ 时，式(14)为半球浸没探测器有效通光口径计算式。

$n_1 > n_2$ 时，式(14)所计算的 $r_{e_{1(\text{半球})}}$ 值与式(15)所计算的 $r_{e_{2(\text{半球})}}$ 值比较， $2r_{e_{1(\text{半球})}}$ 与 $2r_{e_{2(\text{半球})}}$ 中，值小的为半球浸没探测器有效通光口径值。

4 齐明透镜

上述有效通光口径计算对于常用的半球齐明透镜（像距 $l'=d=r_c$ ）和超半球齐明透镜（像距 $l'=d=r_c + r_c/n_1$ ）所构成的浸没探测器^[3]均适用，只在 $n_1 > n_2$ 情形下，应用式(12)时，超半球齐明透镜厚度须符合式(13)，即：

$$r_c + \frac{n_1}{n_2} r_c - \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_2} \left(\frac{w}{2} \right) \geq \left(1 + \frac{1}{n_1} \right) r_c \quad (16)$$

式(16)改写为：

$$(n_1 - \frac{n_2}{n_1}) r_c \geq \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \left(\frac{w}{2} \right) \quad (17)$$

因为 $r_c > w/2$ ，若

$$(n_1 - \frac{n_2}{n_1}) \geq \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (18)$$

则式(16)成立。解式(18)得：

$$n_2 \geq \frac{2}{1 + \left(\frac{1}{n_1} \right)^2}$$

也就是 $n_2 \geq 2$ ，式(16)成立。

对于 $1 \leq n_2 < 2$ ，式(17)改写为：

$$\frac{n_1 - \frac{n_2}{n_1}}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \geq \frac{w}{2r_c} \quad (19)$$

给定一对 n_1 ， n_2 值，可得一个 k 值，即式(19)左边值：

$$k = \frac{n_1 - n_2/n_1}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad (20)$$

只要探测元件光敏面宽度与透镜球面曲率直径之比值小于等于 k 值 ($w/2r_c \leq k$)，则式(16)成立。

表1列出了式(20)部分 $k=k(n_1, n_2)$ 数据。

从表1数据可知, 对于高折射率材料的超半球

齐明透镜完全满足式(16)条件。

表1 计算适用于判别式(20)部分数据

Table 1 Partial data for the calculation of formula (20)

n_1	n_2										
	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
5	0.9798	0.9800	0.9807	0.9818	0.9833	0.9854	0.9879	0.9910	0.9947	0.9989	1.004
4	0.9682	0.9686	0.9697	0.9715	0.9741	0.9776	0.982	0.9873	0.9938	1.001	1.010
3	0.9428	0.9435	0.9456	0.9493	0.9548	0.9623	0.972	0.9844	1	1.019	1.043
2	0.8660	0.8681	0.875	0.8882	0.9102	0.9449	1	1.0915	1.2618	1.6813	
1.9	0.8503	0.8528	0.8610	0.8775	0.9056	0.9522	1.0324	1.1847	1.5660		
1.8	0.8314	0.8344	0.8446	0.8657	0.9035	0.9716	1.1049	1.4462			
1.7	0.8087	0.8124	0.8255	0.8538	0.9089	1.022	1.3208				
1.6	0.7806	0.7854	0.8032	0.8443	0.9360	1.1898					
1.5	0.7453	0.7518	0.7778	0.8463	1.0524						
1.4	0.6998	0.7094	0.7529	0.9072							
1.3	0.6390	0.6550	0.7538								
1.2	0.5528	0.5907									
1.1	0.4165										

5 结论

浸没探测器其浸没透镜无论是超半球, 亚半球还是半球, 当透镜折射率小于等于浸没介质折射率时, 式(8)为浸没探测器有效通光口径计算式。只有当透镜折射率大于浸没介质折射率时, 才有式(8)所得计算值 $2r_{e_1}$ 与式(12)所得计算值 $2r_{e_2}$ 作比较, 小者为浸没探测器有效通光口径值。若式(12)为浸没探测器有效通光口径计算式, 则浸没透镜厚度须满足式(13)条件。对于超半球齐明透镜, 可参照 k 值数据表, 用式(19)来判断其透镜厚度是否满足式(13)条件。

若不使用浸没介质, 探测元件直接制备在浸没透镜上, 则 n_2 为探测元件材料折射率。

参考文献:

- [1] 王子孟, 王培纲. $20\text{ }\mu\text{m}$ 高灵敏浸没型碲镉汞探测器[J]. 红外与毫米波学报, 1996, 15(5): 363-366.
WANG Zimeng, WANG Peigang. High sensitivity immersed-type HgCdTe infrared detector for $20\text{ }\mu\text{m}$ [J]. J. Infrared Millim. Wave, 1996, 15(5): 363-366.
- [2] 四川矿业学院数学教研组. 数学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 29.
Sichuan College of Mining. Handbook of Mathematic[M]. Beijing: Science Press, 1978: 29.
- [3] 赵秀丽. 红外光学系统设计[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 211.
ZHAO Xiuli. Design of Infrared Optical System[M]. Beijing: Science Press, 1978: 211.