

反射型扩束式场镜的设计

李春霞 杨茂华 王 鹏 董惠莲

(哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

摘 要 本文介绍一种新型的反射式场镜的设计。该场镜除了具有透射式场镜的作用外, 同时还起扩束作用。

关键词 场镜, 扩束, 弥散斑, 微坑.

在一些有中间实像的光学系统中, 如刻卜勒望远镜、军用取景器及一些特殊用途的光学仪器, 为了减小尺寸和像差, 往往在中间像的位置上加入正或负场镜。这些场镜一般是透射式的。光学系统在宽谱段中使用时, 如红外仿真光学系统用于 $0.4 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$, 甚至用到 $14 \mu\text{m}$ 。为了消色差, 采用反射式光学系统。本文介绍一种除了具有一般场镜的作用外, 重点在于它的扩束作用的场镜。

1 反射式场镜的扩束原理

对于一个望远系统, 欲使它起扩束作用, 把它例置使用即可, 此时扩束倍率 $\Gamma = -f'_1/f'_2$ (f'_1 为物镜焦距, f'_2 为目镜焦距)。在制导仿真系统中, 主红外光学系统的物和像均在无限远, 是普遍意义上的望远光学系统。基于使用条件、原理设计及结构上的考虑, “物、目”镜由同一球心、同一曲率半径 ($R_1 = R_3 = -5000 \text{ mm}$) 的两块球面反射镜组成。在重合于一点的“物、目”镜的焦点上放一与 R_1, R_3 同心、曲率半径 $R_2 = -2500 \text{ mm}$ 的球面反射镜作场镜, 其光学系统如图 1 所示。此时系统的扩束倍率 $\Gamma = -1$ 。它的入射光束口径为 $D_m = 35 \text{ mm}$, 其上光线 a、光束中心线即“主光线”z、下光线 b 的投射高分别为 $h_{a1} = 327.5 \text{ mm}$, $h_{z1} = 310 \text{ mm}$ 、 $h_{b1} = 292.5 \text{ mm}$ 。并要求对入射光束进行偏移性扩束, 即该束光线经物镜、场镜反射后, 在目镜上的投射高, 最高为 290 mm , 最低为 410 mm , z 光线的投射高仍为 $h_{z3} = 310 \text{ mm}$ 。整个出射光束口径为 $D_{\text{out}} = 120 \text{ mm}$ 。已知该系统的“物、目”镜组合并无扩束作用。至于场镜, 由于物和像重合在它本身上, 亦即 $l = l' = 0$, $\Gamma = 1$, 因此场镜在通常情况下也没有扩束作用, 它选什么样的光焦度只对场曲和畸变有影响。从理论上来说, 如果光学系统无像差, 即为理想光学系统, 那么该反射式望镜系统的物镜把轴上点射来的平行于光轴的光线都会聚于场镜的中心点 O_2 上, 如图 1 所示即像也是一几何点, 故对于场镜才有 $l = l' = 0$ 。然而实际上, 由于像差的存在, 轴上点发出的光线由于球差的缘故, 并不都会聚于 O_2 上。若对 a、z、b 光

线经“物镜”反射进行计算可得到如下结果(其中 PA_2 为光线在场镜上的投射高,如图 2 所示):

Table 1 Calculation results of optical path a 、 z 、 b via objective

	h	LA'	u'	$\Delta u_z'$	PA_2
a	327.5	- 5.3799	7.5111°	0.4019°	0.7093
z	310	- 4.8193	7.1092°	0°	0.6011
b	292.5	- 4.2893	6.7074°	$- 0.4018^\circ$	0.5044

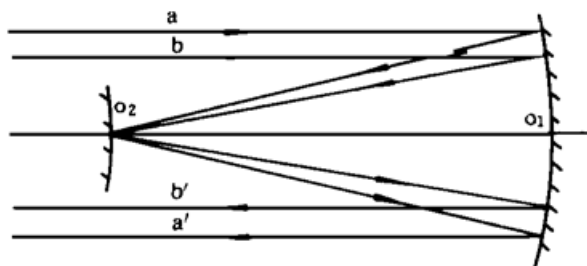


Fig. 1 Optical path of the optical system without aberration

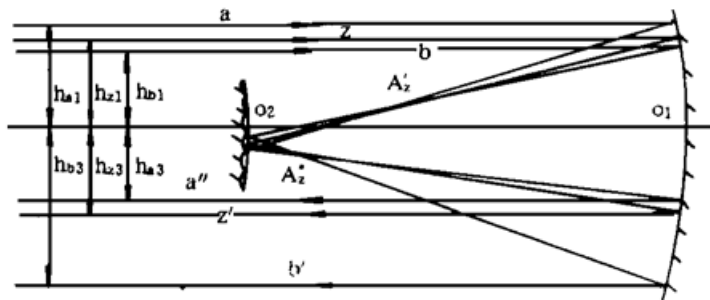


Fig. 2 Optical path of the optical system with aberration

本文利用这个球差来实现扩束的目的。把轴上无限远物点发出的光线经物镜反射后形成的在场镜之右的弥散斑作为物点 A'_z , 把 a 、 z 或 b 、 z 光线经“物镜”反射的光线间的夹角 $\Delta u_z'$ 作为物方孔径角。为保证 a 、 z 或 b 、 z 的共轭光线整个系统反射后间距为 100 mm 且相互平行及达到在“目镜”上的投射高的要求,对“目镜”逆光路计算三条轴上光线($h = 320$ mm 的光线为附加计算),计算数据如表 2 所列。并把此经“目镜”逆光路形成的轴上无限远点的弥散斑作为像点为 A''_z , 夹角 $\Delta u_z'' = 2.2978^\circ$ 作为像方孔径角。这样可以用在场镜上附加反射子球面的办法实现 A'_z 与 A''_z 的物像关系。

$$1/l' + 1/l = 2/r \quad (1)$$

由于 l 、 l' 均在场镜右侧,则子球面半径 r 也必然与 l 或 l' 同号,即其球心必然在场镜之右。这样就可以 r 为半径的圆冲头在场镜上打出一排排的坑,形成所谓的“微坑镜”。然而, a 、 b 光线经过整个系统反射后, a' 、 b' 的位置排列由图 1 所示的(场镜上不打坑) b' 在上、 a' 在下变成图 2 所示的(场镜上打坑) a' 在上、 b' 在下。即“微坑镜”不仅起了扩束作用,还起了倒像的作用。

Table 2 Calculated results of axial rays via eyepiece

h	LA'	u'	$\Delta u_z''$	PA_2
410	- 8.4478	9.4071°	2.2978°	1.3996
320	- 5.1358	7.3389°		0.6615
310	- 4.8193	7.1092°	0°	0.6011
290	- 4.2156	6.6500°	0.4592°	0.4915

2 微坑反射子球面半径的计算

根据像差理论可以推断,全口径内的光线经球面镜反射后在“主光线”上的截距肯定是不一样的,如 a 、 b 光线经“物镜”反射后在反射“主光线”上的截距分别为 15.303 mm 和 13.684 mm。为保证全口径内光线都要按要求扩束,还要考虑除设计以外的误差带来的附加像差,本

文先确定“微坑”直径, 然后根据其直径和孔径角来求 l, l' 。

由上分析及图 2 可看出, 微坑直径大致应等于球差在场镜上的弥散斑直径 $\delta T' \approx 0.25$ mm。考虑到其它误差和物体有一定的高度(即轴外点情况), 现取“微坑”直径 $d = 1/3$ mm, $h = d/2 = 1/6$ mm。这样可得物像距:

$$l = \frac{h}{u} = \frac{1/6}{\sin 0.4018056^\circ} = 23.766 \text{ mm} \quad l' = \frac{h}{u'} = \frac{1/6}{\sin 0.2.29783^\circ} = 4.1569 \text{ mm}$$

代入(1)式可得 $r = 7.07$ mm。“微坑”的深度(子球面矢高)约为 0.002 mm。

3 结果分析与讨论

由上述分析计算可知, 实际上 A_1' 和 A_2' 对于子球面来说是轴外点, 而按(1)式计算, l, l' 应是子球面的轴上点物像距, 因此, 这样求出的子球面半径 $r = 7.07$ mm 能否按要求扩束, 令人难以置信。为此, 需要计算 a, b 光线经“物镜”、场镜上的子球面反射后, 在“目镜”上的投射高度值。把“主光线” z 在场镜上的投射点作为子球面的中心, 过此中心与场镜球心连线, 该连线即是子球面的“光轴”。该“光轴”与主光轴夹角为 $\varphi = 0.0138 \approx 49.59''$ 。这样求得 a 和 b 光线在“目镜”上的投射高分别是 $h_{a3} = 254$ mm 和 $h_{b3} = 364$ mm。显然 h_{b3} 未达到 410 mm, 且 $D_{\text{out}} = 110$ mm, 也不到 120 mm。因此, 不能满足扩束要求。

为满足预定的扩束要求, 可考虑二个改进措施: 1) 通过缩小“微坑”直径来尝试是否可能进一步扩束。通过计算和分析, 当“微坑”直径由原设计的 1/3 mm 减小到 0.24 mm, 使“微坑”数目由原来的约 10 万个增加到 20 万个时, 增加了加工难度, 却对扩束并无明显改进效果。2) 减小“微坑”子球面半径到 $r = 4.28$ mm, 此时算得 $h_{a3} = 204$ mm, $h_{b3} = 408$ mm。另外, 光束以“主光线”为轴向两侧基本对称扩束, 并不像要求的那样只向单侧扩束, 而且 $D_{\text{out}} = 205$ mm $>$ 120 mm, 会导致一部分能量的损失。为了避免这种损失, 在设计子球面时, 可以考虑重新选一条“主光线”, 例如选 $h_z = 320$ mm, 此时求得 $h_{a3} = 296.3$ mm, $h_{b3} = 407$ mm, $D_{\text{out}} = 110.7$ mm。若把子球面半径修正到 $r = 6.7$ mm, 得 $h_{a3} = 291.9$ mm, $h_{b3} = 411.5$ mm, $D_{\text{out}} = 119.6$ mm, 基本满足预定要求。

结 论 由上述分析过程可知, 在设计反射扩束式场镜时, 首先应该恰当地选择子球面半径, 如本设计最终选择 $r = 6.7$ mm, 基本上达到了扩束目的。其次是选择合适的“主光线”位置, 这里的主光线已失去光束对称轴的涵义, 而只不过是微坑中心的光线。当选 $h_z = 320$ mm 时, 只要把在图 2 所示的场镜下移 0.05 mm ~ 0.07 mm, 而 b 光线在微坑中新投射高增加到 0.157 mm, 则 a, b 的共轭光线仍在同一微坑内, 又达到了在目镜上预定的投射高。

Design of Reflective Broadening Band Field Lens

Li Chunxia Yang Maohua Wang Peng Dong Huilian

(The Space College of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 6 June 1996)

Abstract The design of a new kind reflective field lens is introduced in this paper. This field lens has a particular effect—broadening band in addition to the normal action of transmissive field lens in the optical system.

Key words field lens, broadening band, dispersed spot, micro-concavity.