

红外热成像鱼镜头设计中若干特殊问题的处理*

王永仲

(军械工程学院光学与电子工程系, 石家庄 050003)

摘要 提出鱼镜头光阑球差的级数表达式及其基于有限差分的近似计算方法, 解决了通常的光阑倒追方法面临的难题; 讨论孔径光阑与入瞳的特殊“共轭”关系, 分析了光阑彗差和像差渐晕; 运用 Aitkin 插值技术填补“溢出”光线在像面上的落点, 以保证像质函数定义的一致性, 维持自动优化持续进展, 从而克服频繁的光线“溢出”造成的严重困难; 提出充分利用像差渐晕改善像面照度均匀性的方法; 论述标定轴外光束边界的逐次渐近过程和运用入瞳距离变量实现孔径光阑位置全域优化的技术。

关键词 热成像鱼镜头; 光阑球差; 像差渐晕; Aitkin 插值; 全域优化

中图分类号 O435 **文献标识码** A

0 引言

鱼镜头在摄影方面的特殊应用已是众所周知。然而, 鱼镜头的用途远不止此。在天文、气象、电影、测量、管道检测、防火监视、医疗内窥检查乃至公安、边防等方面, 它们也大有用武之地。在当今信息化时代, 鱼镜头又在导航、定位、遥感、光通信、机器视觉、微小智能系统等领域得到成功应用; 而在国防和军事上, 它们更是占有重要而不可替代的地位^[1], 尤其是用于中波和长波红外谱区的红外热成像鱼镜头。但热成像鱼镜头的设计比常规系统困难得多, 本文讨论的几个重要技术问题是常规镜头设计中不曾碰到而目前公开文献又涉笔甚少者^[2,3]。

1 光阑球差与主光线标定

轴外物点主光线的准确标定是像质评价的前提, 但鱼镜头中显著的光阑球差造成主光线标定的严重困难。我们由实践得知, 对一般可见光用鱼镜头, 当视场半角 $\omega \geq 56^\circ$ 时, 传统的迭代逼近方法就不能奏效; 而对长波和中波红外鱼镜头, 这个角度进一步减小为 43° 左右。其中最大障碍是因为迭代起点离真实的入瞳中心太远, 穿过此点的尝试“主光线”在折射面上发生全反射或与折射面无交点(统称为“光线溢出”), 使光路计算夭折。

我们提出光阑球差 $\Delta L_p(\omega)$ 的级数表达式

$$\Delta L_p(\omega) = a\omega^2 + b\omega^4 + c\omega^6 + d\omega^8 + \dots \quad (1)$$

取 4 个较小的视场半角抽样点以避免光线溢出, 实际计算相应的 $\Delta L_p(\omega)$, 并将式(1)截取前 4 项, 建立方程组求解 a, b, c, d , 得近似式

$$\Delta L_p(\omega) \approx a\omega^2 + b\omega^4 + c\omega^6 + d\omega^8 \quad (2)$$

由此可得常规取样视场入瞳的近似位置。实践证明

它们已非常接近实际, 以此为起点的迭代过程不会有光线溢出, 很快即可准确标定实际主光线。

上述方法可行, 但较麻烦, 采用微分方法可简化计算, 即取

$$\Delta L_p(\omega) \approx a\omega^2 + b\omega^4 \quad (3)$$

$$\delta[\Delta L_p(\omega)] \approx 2a\omega \cdot \delta\omega + 4b\omega^3 \cdot \delta\omega \quad (4)$$

令 $\omega_1 = 0.3\omega_{\max}$, $\delta\omega = 0.01\omega_1$ 实际算出相应的 $\Delta L_p(\omega_1)$, $\delta[\Delta L_p(\omega_1)]$, 利用式(3)、(4)解出 a, b 后即可简捷、准确地标定主光线。

例如, 我们研制的长波和中波红外鱼镜头, 其边缘视场对应的光阑球差分别是焦距的 1.35 倍和 1.31 倍, 运用常规方法都因“光线溢出”而使光路计算夭折, 但用上述方法都能迅速奏效; 对几十种可见光鱼镜头做光路计算试验, 也未出现反例。

2 孔径光阑与入瞳的特殊关系

在鱼镜头中, 必须假定: 对轴外物点而言, 与光轴垂直的孔径光阑对应着相对于光轴倾斜的入瞳, 倾斜的方向系趋于能纳入物方成像光束。否则, 对 $\omega \geq 0.5\pi$ 的实际成像就无法解释。于是, 绝对值相同但符号相反的视场半角 ($\pm\omega_1$) 便对应着关于光轴对称的两个倾斜入瞳平面, 其夹角为 $2\omega_1$ 。这也与普通光学系统不同。这种情况使我们在光路计算中要采用不同的坐标平面度量光线的起始坐标(图 1, OX 为光轴): 对轴上物点用 YOZ 平面, 对轴外物

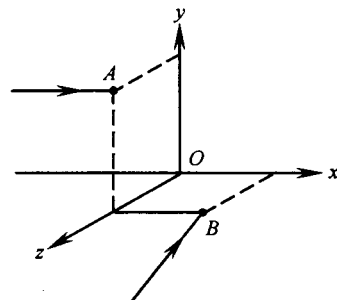


图 1 坐标系
Fig. 1 System of coordinates

* 国家 863 计划项目(02AA776031)

Tel: 0311-87994635 Email: zhb_optics@sina.com.cn

收稿日期: 2004-06-14

点, 则用 XOZ 平面。

3 像差渐晕与像面照度均匀性

图 2 为一示意图, 其中 L_1 、 L_2 分别为负透镜和正透镜。由于存在光阑彗差, 擦过近轴入瞳 P 边缘的轴外光束在孔径光阑 S 上的投射宽度 $A''B''$ 小于 S 的直径 $A'B'$, $B'B''$ 即光阑彗差 K'_{TP} 。鱼眼镜头的设计通常保证轴外光束充满 S , 从而使轴外光束在近轴入瞳面上的实际宽度比轴上点光束大, 此即像差渐晕效应。它与普通镜头中的几何渐晕明显不同。

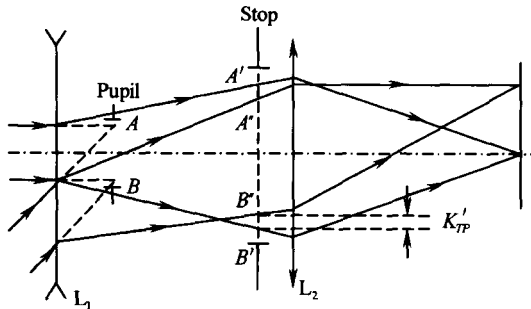


图 2 光阑彗差
Fig. 2 The stop coma

鱼眼镜头中第一透镜具有很强的负光焦度, 其作用之一是产生显著的光阑彗差; 作用之二是充分减小轴外主光线在像方与光轴的夹角 ω' 。二者都利于提高轴外像点的照度。

例如, 我们研制的长波和中波红外鱼眼镜头, 其与 $\omega = 90^\circ$ 对应的 ω' 各为 10.97° 和 15.02° 。若按轴外像点照度的 $(\cos \omega')$ 下降律, 其相应的 $(\cos \omega')$ 分别是 0.93 和 0.87, 显然不会使视场边缘照度明显降低; 加之像差渐晕使轴外物点成像光束截面增大; 故两种镜头都表现了均匀的像面照度分布。

4 轴外边缘光线的标定

为充分利用像差渐晕效应, 以提高轴外像点的照度, 应使最大视场的边缘子午光线正好擦过孔径光阑的边缘, 且系统中各光学面的通光口径要保证其顺利通过。为此, 首先要以最大视场子午边界光线的标定为基础, 确定系统各面的外形尺寸。

先用逐次逼近方法确定上边界光线 (a 光线) 的起始坐标 (见图 1) X_a (其另两个坐标 $y=0, z=0$), 先试取

$$\begin{aligned} X_0 &= X_{a0} = 0.125H/\sin \omega_m \\ X_1 &= X_{a1} = 1.01X_{a0} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 H 为近轴入瞳半径, ω_m 为最大视场半角。

经光路计算得其在光阑面上的投射高度分别为 V_0, V_1 , 再令

$$X_2 = X_1 - (X_1 - X_0)(V_1 - R_s)/(V_1 - V_0) \quad (6)$$

式中 R_s 为孔径光阑半径。

做光线追迹得其与光阑面的交点高度 V_2 , 该点

必然更靠近光阑边缘。写成一般性公式则为

$$X_i = X_{i-1} - (X_{i-1} - X_{i-2})(V_{i-1} - R_s)/(V_{i-1} - V_{i-2}) \quad (7)$$

每迭代一次均判断式 (8) 是否成立

$$\|V_{i-1} - R_s| \leq 0.002 \quad (8)$$

若否, 则仿照式 (7) 继续计算; 若是, 则 $X_a = X_{i-1}$ 为上边界光线的 X 坐标起始值。

同理可得下边界光线 (b 光线) 的起始坐标 X_b 。

找到上述 X_a, X_b 即确定了最大视场子午光束的边界。

对最大视场点, 还要标定弧矢光束边界。

对其它轴外抽样物点, 也要标定相应的子午光束和弧矢光束边界, 方法与上相仿。这些边界光线的特征是至少擦过系统中一个面的通光口径边缘。

由于鱼眼镜头中显著的光阑像差, 只有标定了轴外边缘光线才能计算轴外宽光束像差, 这是边缘光线标定的作用之一, 也是它与普通镜头设计的又一区别。

5 像空间的光线虚拟技术

鱼眼镜头优化中经常出现的光线“溢出”是十分棘手的事。以 Ge 透镜为例, 波长 $3 \mu\text{m}$ 的光线在其内所对应的全反射临界角 i_c 为 14.3° , 这就要求其内所有光线在后表面的人射角 $i < 14.3^\circ$ 。显然, 对鱼眼镜头而言, 这个要求非常苛刻; 加之其视角 $\geq 180^\circ$, 相对孔径也大, 自动优化中常出现强烈弯曲的表面, 使矛盾更加突出。若按常规处理方法, 发生光线“溢出”即中止优化, 则鱼眼镜头的计算机设计便寸步难行。我们采用虚拟技术, 通过插值计算, 虚拟“溢出”光线与像面的交点, 即假定它们也到达像面, 而用 Aitkin 插值方法填补其在像平面的落点, 照常计算像差并继续自动优化。

因为初始结构不存在光线“溢出”, 而自动优化是逐次迭代过程, 故开始出现“溢出”的必是少数光线。随着优化的进展, 像质逐渐趋于预期目标, 系统组成、成像光束结构及其相对关系都不断改善, 光线“溢出”现象可渐渐被清除。

利用插值技术虚拟“溢出”光线在像空间的行径, 从而保证了像质函数定义的一致性, 维持优化过程持续进展。这是鱼眼镜头计算机设计的关键技术, 对我们研制长波和中波红外鱼眼镜头序列 (获国家发明专利) 起了重要作用。它促使其自动优化设计顺利完成。所制出的镜头已经取得满意的实用效果。将此方法用于几十种可见光鱼眼镜头的自动优化也取得预期成效, 从而证明了它的普适性。

6 光阑位置的全域优化

孔径光阑的位置对轴外像差有重要影响, 而许多鱼眼镜头专利文献没有指明光阑位置。通常的计

计算机光学设计是把光阑两侧间距作为自变量参与优化。但由于边界条件的约束,这种优化不能使光阑跨越原来所处的区间,因而可能只能实现局部寻优。

我们推行以入瞳距离为自变量的优化方法,并以优选出的入瞳映射光阑位置,如此便摆脱了通常的区间约束,实现光阑位置的全域优化^[4,5]。

例如设计形如图 3 的鱼眼镜头,在其它条件相同时,若光阑在虚线位置,则当 $d_6 : d_7 = 0.62$ 时,常规轴外样点垂轴像差曲线面积之和取极小值 S_1 ;但若用入瞳距离优化,光阑却在实线位置,且当 $d_8 : d_9 = 0.46$ 时,与上述 S_1 相应的极小值 $S_2 = 0.51S_1$ 。

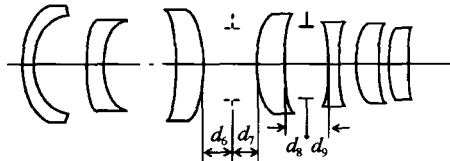


图 3 一种鱼眼镜头
Fig. 3 A fish-eye lens

将光阑设在另两个可能的区间做优化实验,并做综合比较,证明上述 S_2 是最小值,故相应的光阑位置为全域最优者。

它表明,传统方法可能只是局部寻优,而以入瞳距离为自变量可以实现光阑位置的全域优化。

7 结论

本文论述了红外热成像鱼镜头设计与计算中几个特殊而重要技术问题的处理。实践证明,它们对近红外和可见光谱区的鱼镜头也适用。

参考文献

- 王永仲. 现代军用光学技术. 北京: 科学出版社, 2003. 387
Wang Y Z. Modern military optics technology. Beijing: Science Press, 2003. 387
- 沈为民, 薛鸣球, 余建军, 等. 大视场大相对孔径长波红外物镜. 光子学报, 2004, 33(4): 460~463
Shen W M, Xue M Q, Yu J J, et al. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(4): 460~463
- 樊学武, 马臻, 陈荣利, 等. 红外双波段卡塞格林系统设计. 光子学报, 2003, 32(4): 463~465
Fan X W, Ma Z, Chen R L, et al. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(4): 463~465
- 王永仲. 光学设计与微型计算机. 长沙: 国防科大出版社, 1986. 208
Wang Y Z. Optical Design and Micro-computer. Changshan: press of NUDT, 1986. 208
- 王永仲. 新光学系统的计算机设计. 北京: 科学出版社, 1993. 92
Wang Y Z. CAD of Special Optical Systems. Beijing: Science Press, 1993. 92

Some Key Problems about the Design of IR Thermal Imaging Fish-eye Lens

Wang Yongzhong

Dept. of Optoelectronics, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003

Received date: 2004-06-14

Abstract The series formula and its corresponding differential equation of fish-eye lens' stop spherical aberration have been brought forward. Calculating the approximation of the stop spherical aberration according to these formulas, and then adopting iteration, we can confirm the entrance pupil's position and primary ray accurately. Furthermore, it analyzes the stop's coma, discusses the special "conjugate" relation between aperture stop and entrance pupil, and how to improve the uniformity of image plane illuminance by using aberration vignetting. Ray's total reflection or no-intersection at refracting surface is called "ray overflow". Frequent ray overflows in the optical automatic design of fish-eye lens makes its CAD very hard. Using Aitkin Interpolation to fill up the intersection points of overflow-rays at image plane can ensure the optimization process persistently to go along, and then clearing up the overflow gradually. In the end, it expounds the successive approach method to confirm the boundary of abaxial beams, and how to realize global optimization of the aperture stop's position using the entrance pupil's distance variable.

Keywords IR thermal imaging fish-eye lens; Stop spherical aberration; Aberration vignetting; Aitkin interpolation; Global optimization

Wang Yongzhong is a professor, graduated from Beijing Institute of Technology (BIT) in 1967, and received his M. S. degree from BIT in 1981. He was visiting scholar at RIT, USA, in 1995. His research areas are imaging science and optoelectronic countermeasure.

