

· 光学设计 ·

离轴三反射式光学系统设计

赵 亮

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300000)

摘要:在三反射镜光学系统的几何光学理论上,详细讨论了三反射式光学系统的设计方法,从初级像差理论出发推导出了三反射式系统初始结构的计算公式,并且得出了系统结构形式与其基本结构参数和焦距之间的关系。通过设计实例讨论了不同的三反射式光学系统的特点及其应用。设计了大视场、小 F 数且实现衍射极限成像的光学系统,且能有效抑制杂散光。

关键词:三反射光学系统;离轴;视场;光阑;像差

中图分类号:O435

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2014)-04-0001-04

Design of Off-axis Three-reflection Optical System

ZHAO Liang

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China)

Abstract: Based on the geometrical optics theory of three-reflection optical system, the design method of the system is discussed in detail. According to primary aberration theory, a calculation formula of the three-reflection system initial structure is deduced. And the relationships among system structure, basic structure parameters and focal length are obtained. The characteristics and the applications of three-reflection optical systems are discussed through design examples. The optical system with wide field of view, small F number and diffraction limit imaging is designed to suppress stray light effectively.

Key words: three-reflection optical system; off-axis; field of view; aperture; aberration

光学系统经历了从折射式到反射式,从同轴光学系统到离轴光学系统的发展阶段。从光学系统质量上考虑,折射系统采用的是实心镜,其质量最大,折反式系统次之,反射光学系统质量最轻,且发展了多种大型反射镜轻量化技术,可以进一步减轻全反射光学系统的质量。反射光学系统采用的镜坯材料普遍具有密度小、弹性模量大、热膨胀系数低、热传导系数高、微观结构均匀等特点,受温度梯度变化的影响小,光学系统的质量控制相对折射系统容易。

1 离轴三反射式系统设计

离轴三反射镜光学系统设计基于高斯光学理

论,求取共轴三反射镜光学系统结构作初始结构。通过光阑离轴或视场离轴,或者二者相结合的方法实现系统中心无遮拦。在系统优化过程中,利用高次非球面来满足系统多种性能的要求。

1.1 离轴三反射式系统分类

1.1.1 光阑离轴

光阑置于主镜上或之前,光阑离轴。如图1所示。

采用光阑离轴的方法,虽然可以使系统结构变得紧凑,但是在较大视场的情况下,成像质量下降得

很快。

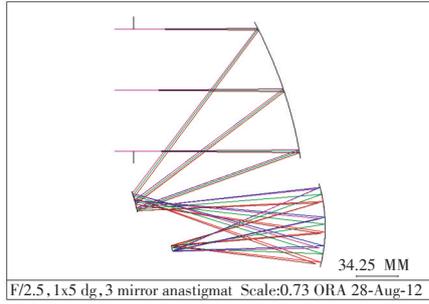


图1 光阑离轴

1.1.2 视场离轴

将光阑置于次镜上,通过视场的倾斜来避免中心遮拦,光阑不离轴。

视场离轴的三反射系统具有更强的像差校正能力,视场大,成像质量好,比较适合大视场和大相对口径的要求。视场离轴效果图如图2所示。

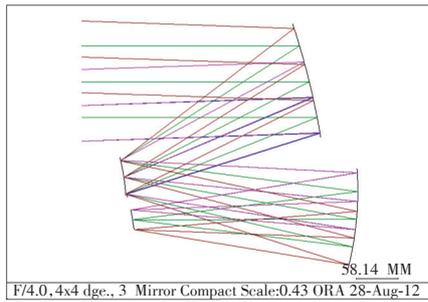


图2 视场离轴

1.2 三反射式光学系统结构参数

三反射式光学系统结构图如图3所示。

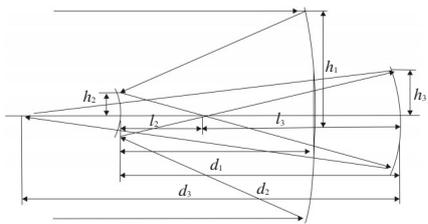


图3 同轴三反射式系统结构图

三反射系统的成像性质由下式中的 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 决定。

$$\alpha_1 = \frac{l_2}{f_1'} \approx \frac{h_2}{h_3} \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \frac{l_3}{l_2} \approx \frac{h_3}{h_2} \quad (2)$$

$$\beta_1 = \frac{l_2'}{l_2} = \frac{u_2'}{u_2} \quad (3)$$

$$\beta_2 = \frac{l_3'}{l_3} = \frac{u_3'}{u_3} \quad (4)$$

式中, α_1 为次镜对主镜的遮拦比; α_2 为三镜对次镜的遮拦比; β_1 为次镜放大率; β_2 为三镜放大率。

1.3 三反射式光学系统像差分析

1.3.1 光阑位于主镜

对于一个焦距为 f' 的三反射系统,物体位于无穷远时,以 y 表示主光线与各镜面交点的高度,则当光阑位于主镜时,表达式如下

$$y_1 = 0; y_2 = \frac{\alpha_1 - 1}{\beta_1 \beta_2}; y_3 = \frac{\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)}{\beta_1 \beta_2} \quad (5)$$

1.3.2 光阑位于次镜

当光阑位于次镜时,表达式如下

$$y_1 = \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1 \beta_1 \beta_2}; y_2 = 0; y_3 = \frac{1 - \alpha_2}{\beta_2} \quad (6)$$

代入三反射系统初级像差公式,得到三反射光学系统像差。

光阑位于主镜时,表达式如下

$$\begin{aligned} s_1 = & \frac{1}{4} \left[(e_1^2 - 1) \beta_1^3 \beta_2^3 - e_2^2 \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)^3 \right] + \\ & e_3^2 \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)^3 + \\ & \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1) (1 - \beta_1)^2 - \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2) (1 - \beta_2)^2 \\ s_2 = & - \frac{e_2^2 (\alpha_1 - 1) \beta_2^3 (1 + \beta_1)^3}{4 \beta_1 \beta_2} + \\ & \frac{e_3^2 [\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)^3}{4 \beta_1 \beta_2} - \frac{1}{2} + \\ & \frac{(\alpha_1 - 1) \beta_2^3 (1 + \beta_1) (1 - \beta_1)^2}{4 \beta_1 \beta_2} - \\ & \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2) (1 - \beta_2)^2}{4 \beta_1 \beta_2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} s_3 = & - e_2^2 \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)^2 (1 - \beta_1)^3}{4 \alpha_1 \beta_1^2} + \\ & e_3^2 \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)]^2 (1 + \beta_2)^3}{4 \alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} + \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{\beta_2(\alpha_1-1)^2(1+\beta_1)(1-\beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1-1)+\beta_1(1-\alpha_2)]^2(1+\beta_2)(1-\beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} - \frac{\beta_2(\alpha_1-1)(1+\beta_1)(1-\beta_1)}{\alpha_1\beta_1} \quad (9)$$

$$\frac{[\alpha_2(\alpha_1-1)+\beta_1(1-\alpha_2)](1+\beta_2)(1-\beta_2)}{\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2} - \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1+\beta_2}{\alpha_1\alpha_2}$$

$$s_4 = \beta_1\beta_2 - \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1+\beta_2}{\alpha_1\alpha_2} \quad (10)$$

光阑位于次镜时,球差 s_1 和场曲 s_4 与光阑位于主镜时结果相同,表达式如下

$$s'_2 = \frac{(1-\alpha_1)\beta_1^2\beta_2^2e_1^2}{4\alpha_1} + \frac{(1-\alpha_1)(1+\beta_2)^3e_3^2}{4\beta_1} - \frac{(1-\alpha_1)\beta_1^2\beta_2^2}{4\alpha_1} - \frac{(1-\alpha_2)(1+\beta_1)(1-\beta_2)^2}{4\beta_2} - \frac{1}{2} \quad (11)$$

$$s'_3 = e_1^2 \frac{(\alpha_1-1)^2\beta_1\beta_2}{4\alpha_1^2} + e_3^2 \frac{(1-\alpha_2)^2(1+\beta_2)^3}{4\alpha_1\alpha_2\beta_2^2} - \frac{(\alpha_1-1)^2\beta_1\beta_2}{4\alpha_1^2} - \frac{(1-\alpha_2)^2(1+\beta_2)(1-\beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_2^2} - \frac{(1-\alpha_1)\beta_1\beta_2}{\alpha_1} - \frac{(1-\alpha_2)(1-\beta_2)^2}{\alpha_1\alpha_2\beta_2} - \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1+\beta_2}{\alpha_1\alpha_2} \quad (12)$$

由系统结构参数 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 和系统焦距 f' 可得三反射系统镜面顶点的曲率半径式(13)和面间距式(14)分别如下

$$R_1 = \frac{2}{\beta_1\beta_2}f', R_2 = \frac{2\alpha_1}{(1+\beta_1)\beta_2}f', R_3 = \frac{2\alpha_1\alpha_2}{1+\beta_2}f' \quad (13)$$

$$d_1 = \frac{1-\alpha_1}{\beta_1\beta_2}f', d_2 = \alpha_1\left(\frac{1}{\beta_2}-1\right)f', d_3 = \alpha_1\alpha_2f' \quad (14)$$

2 三反射式光学系统设计步骤

2.1 系统参数确定

首先确定同轴三反射系统的结构参数 d_1 、 d_2 、 d_3 (如图3所示)。在实际的设计工作中,对光学系统的长度等有一定要求,以给定的三镜间隔 d_1 、 d_2 和后截距 d_3 为条件,进行系统参量确定,以满足设计需要。假设三镜的曲率半径分别为 c_1 、 c_2 和 c_3 ,由系统

光焦度 Φ 和场曲 $S_W=0$ 得到。

$$S_W = c_1 - c_2 + c_3 = 0 \quad (15)$$

$$\varphi = 2c_3d_3\varphi - 2c_2 + 2c_1 + 4d_1c_1c_2 \quad (16)$$

$$d_3\varphi = 1 - 2d_1c_1 - 2d_2c_2 + 2d_2c_1 + 4c_1c_2d_1d_2 \quad (17)$$

当系统 Φ 取负值时,对应的系统中间不成实像。

根据系统要求的匹兹万和数 S_W ,总焦距 Φ 和给定的3个间隔 d_1 、 d_2 、 d_3 作为已知量代入方程中,可以求出3个镜面在顶点处的曲率半径 r_1 、 r_2 、 r_3 。由 r_1 、 r_2 、 r_3 、 d_1 、 d_2 和 Φ 可以求出次镜对主镜的遮拦比 α_1 ,第三镜对次镜的遮拦比 α_2 ,次镜的放大率 β_1 ,第三镜的放大率 β_2 。

2.2 计算二次非球面系数

再由求出的 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 ,根据系统要求的球差 s_1 、彗差 s_2 、像散 s_3 的值即可求得三个反射镜面的二次非球面系数 $-e_{21}$ 、 $-e_{22}$ 、 $-e_{23}$ 。系统的8个结构参数 r_1 、 r_2 、 r_3 、 d_1 、 d_2 、 $-e_{21}$ 、 $-e_{22}$ 、 $-e_{23}$ 就全部确定了。

2.3 参数优化

求出初始结构参数后,在保证焦距为定值的条件下,对系统的结构参数进行微小的优化,即可得到很好的像质。然后让中心视场离轴或光阑离轴,选取合适的倾斜角,避免中心遮拦,同时适当调整各个镜面的离轴量和倾斜角,使结构更加合理,再次进行反复的优化,直到整个系统无遮拦并且成像质量达到衍射极限为止。

2.4 注意事项

应注意的事项如下:(1)在优化过程中,应尽量保持间隔 d_1 、 d_2 、 d_3 不变,否则,像差平衡的结果会大幅度增加 d_1 、 d_2 、 d_3 ,使系统总长度变大;(2)不能无限制的优化视场和各个镜面的倾斜角,否则系统会减小离轴量趋向于同轴系统来达到提高像质的目的。

3 系统设计难点

3.1 反射镜离轴

离轴系统的离轴方式有多种,离轴量的大小、镜面旋转角度的大小对于加工难度、加工成本、装校难度影响巨大。

以下面参数的系统为例说明:焦距 3 000 mm;

口径 300 mm; 视场 $8^\circ \times 0.8^\circ$ 。
视场离轴, 如图4所示。

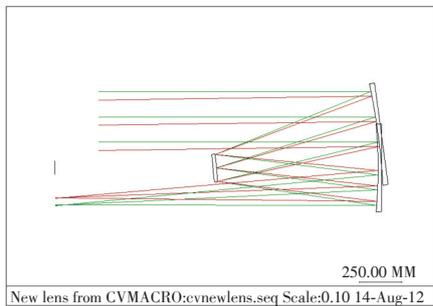


图4 离轴系统图

视场离轴, 反射镜面旋转适当角度, 如图5所示。通过反射镜离轴和旋转适当角度避免中心遮拦, 离轴量较小, 需要加工的反射镜口径较小, 装校困难。

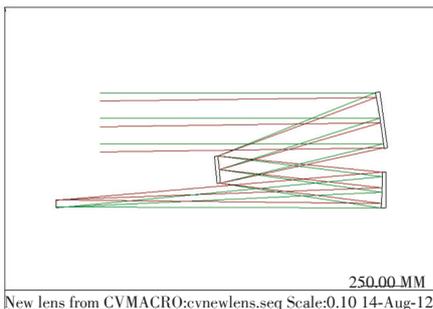


图5 视场离轴, 反射镜面旋转图

反射镜离轴, 反射镜不旋转, 如图6所示。通过反射镜离轴避免中心遮拦, 离轴量较大, 故需要加工的反射镜口径较大, 装校相对容易。

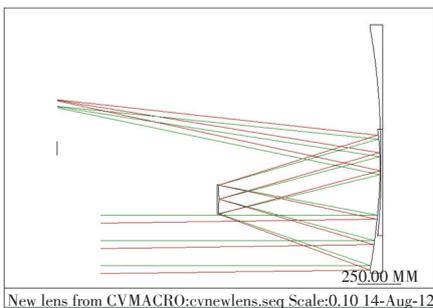


图6 反射镜离轴, 反射镜面不旋转

3.2 消除杂散光

反射式系统的杂散光比较严重, 需要在合适的地方加入消杂光光阑。

在有中间像的系统中, 在中间像面处加入光阑可有效控制杂散光。系统初始设计与改进后设计分别如图7、图8所示。

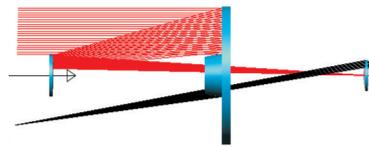


图7 初始设计

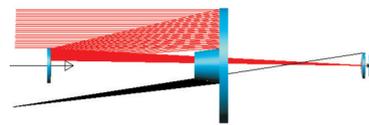


图8 改进后设计

4 结论

利用几何光学和初级像差理论详细推导出三反射式光学系统结构参数的计算公式。在同轴三反射式光学系统基础上通过一个设计实例, 对光阑离轴, 获得了成像质量较好的离轴三反射式光学系统。采用离轴三反系统, 能够消除中心遮拦, 在提高了像质的同时, 又保持了轻量化的特点, 在空间光学等领域得到普遍的关注。随着非球面加工技术的不断进步, 这类系统会得到越来越广泛的应用。

参考文献

- [1] 刘辉, 李兴隆, 裴云天, 等. 离轴三反射式光学系统的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 59-60.
- [2] 黄一帆, 李林. 光学设计教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 144-147.
- [3] 宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 707-709.
- [4] 江伦, 黄玮. 长焦距大变倍比中波红外变焦距系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012(7).
- [5] 李旭阳, 杨洪涛, 贺天兵, 等. 新型三反射光学系统设计[J]. 光子学报, 2012(1).
- [6] 李志来. 长焦距空间相机主次镜间桁架支撑结构设计[J]. 激光与红外, 2012(1).
- [7] 伍和云, 王培纲. 离轴反射式光学系统设计[J]. 光电工程, 2006(33).
- [8] John W Figoski. Design, fabrication and testing of aspher-

(下转第29页)

- er phosphor package of white-light-emitting diodes with high efficiency [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, 121(24):2224-2226.
- [3] Hitzel F, Hangleiter A. The reason for the high emission efficiency of GaInN/GaN based LEDs[J]. *Phys Lett B*, 2008, 22:3261-3266.
- [4] Lee T H, Dickson R M. Single-Molecule LEDs from Nanoscale Electroluminescent Junctions[J]. *J Phy Chem B*, 2003, 107:7387-7390.
- [5] Jin X, Zhang B, Dai T, et al. Optimization of top polymer gratings to improve GaN LEDs light transmission[J]. *Chin Opt Lett*, 2008, 10:788-790.
- [6] Nogueira E, Vazquez M, Mateos J. Accelerated life test of high luminosity AlGaInP LEDs[J]. *Technical Physics Letters*. 2012, 52(9):1853-1858.
- [7] 牛萍娟,李艳玲,刘宏伟,等. 热超声倒装焊在制作大功率 GaN 基 LED 中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 9:43-46.
- [8] Sim J K, Ashok K, Ra Y H. Characteristics enhancement of white LED lamp using low temperature co-fired ceramic chip on board package current [J]. *App. Phys*, 2012, 12 (2):494-498.
- [9] 邝海,刘军林,程海英,等. 转移基板材质对 Si 衬底 GaN 基 LED 芯片性能的影响[J]. *光学学报*, 2008, 28 (1): 143-145
- [10] Liang T, Guo X, Guan B L, et al. A flip-chip AlGaInP LED with GaN/Sapphire transparent substrate fabricated by direct wafer bonding [J]. *Chin Phy. Lett*, 2007, 24 (4): 1110-1113.
- [11] Fan Y Y, He B, Zhou J, et al. Efficient heat transfer in high-power fiber lasers [J]. *Opt. Lett*, 2012, 10 (11): 111401-11401.
- [12] Shen C, Feng H, Xu Z, et al. GaInN light-emitting diodes with omni-directional reflector using nanoporous SnO₂ film [J]. *Chin Opt. Lett*, 2008, 6(2):152-153.
- [13] Wierer J J, Steigerwald D A, Krames M R. High-power Al-GaN flip-chip light-emitting diodes [J]. *Phys. Lett*, 2001, 78(22):3379-3381.
- [14] 张建平,邹建华,文尚胜. 聚合物电致发光二极管面光源的热分析[J]. *光学学报*, 2011, 2:294-300.

~~~~~

(上接第4页)

- ical optical surface [M]. Beijing: Science Press, 1994: 157-160.
- [9] John W Figoski. Development of a three-mirror, wide-field sensor, from paper design to hardware [J]. *SPIE*, 1989, 1113:126-133.
- [10] Joseph M Hqward, Bryan D Stone. Imaging with three spherical mirrors [J]. *Applied Optics*, 2000, 39 (19) : 3216-3231.

~~~~~

(上接第9页)

- 光镜设计与分析[J]. *灯与照明*, 2010, 3: 18-21.
- [9] 李郑阳,冯仕猛.基于 Tracepro 软件的 LCD TV 直下式背光源均匀性仿真[J]. *液晶与显示*, 2009, 04: 86-90.
- [10] 安宇鹏,王一丁,李黎,等.采用 Tracepro 进行中红外气体检测系统的光路结构设计[J].*激光与红外*, 2009, 11: 72-76.

~~~~~

(上接第12页)

- [2] 王志坚.光学工程基础[J].*长春理工大学*, 98-101, 136-139
- [3] 王之江.实用光学技术手册[M].北京:机械工业出版社, 150-151.
- [4] 郁道银.工程光学[M].北京:机械工业出版社, 142-147.
- [5] 王志坚.光学工程原理[M].北京:国防工业出版社, 197-198.
- [6] 白瑜.一种改进型的红外三反射镜探测成像系统[J]. *光电技术应用*, 2013, 28(6): 31-34.
- [7] 袁莉.大口径平像场激光扩束器光学系统的研制[J].*激光与红外*, 2007(3): 672-675.
- [8] 辛维娟.多波长激光扩束器的光学设计[J]. *光学仪器*, 2007(3): 31-34.
- [9] 胡明勇.1.064 μm 测风激光雷达扩束系统的设计[J]. *量子电子学报*, 2006(3): 467-470.
- [10] 樊丽娜.激光扩束望远镜的光学设计[J]. *红外*, 2007 (4): 20-22.