

红外反射/衍射离轴混合光学系统设计

郭永洪 沈忙作

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

陆祖康

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 在分析了红外光学系统的设计要求的基础上, 研究采用衍射光学元件, 实现红外反射/衍射离轴混合光学系统的设计方法。具体设计结果表明, 这样的光学系统结构简单, 具有优良的综合光学性能。

关键词 光学设计, 衍射光学, 混合光学系统, 离轴系统。

1 引 言

由两个反射镜组成的光学系统具有很重要的实用价值, 卡塞格伦(Cassegrain)系统、格雷里(Gregory)系统以及改进的卡塞格林型的等晕系统(Ritchey-Chretien系统)应用都非常普遍^[1]。但常规的两镜同轴系统, 有两个严重的缺点, 1) 视场较小, 2) 具有中心遮拦, 对口径内能量的利用和像点光能的集中程度都有较大影响。而现代红外面阵探测器件的发展, 对红外光学系统提出了新的要求: 1) 为了提高探测能力, 要求有高的集光能力, 能量集中。这就要求光学系统无中心遮拦; 2) 现代的面阵列器件要求有平像场, 大视场, 以及接近衍射极限的成像质量; 3) 对弱信号的探测, 要求系统有抑制杂光的能力, 和 100% 的冷光栏效率。即在像面前, 制冷探测器杜瓦内的冷光栏为光学系统的孔径光栏。这就要求光学系统具有中间像面^[2]; 4) 特定的应用背景, 要求光学系统结构简单、质量轻、透过率高。因此传统的两个反射镜系统就不再适合现代的红外光学系统要求, 有必要改进和提高。

为了克服这些问题, 人们提出了采用偏轴和加无光焦校正元件的方法^[3]。其缺点是, 偏轴系统本射的像差校正就困难, 而无光焦校正元件, 对系统场曲的改善也是无能为力的, 因此对系统质量的提高也是有限的, 并且该系统没有考虑冷光栏效率。

本文提出一种设计红外两反射镜无中心遮拦光学系统的新方法, 即两二次非球面反射镜取自同轴反射系统的一部分, 以避开中心遮拦, 构成离轴系统, 加上一个折射/衍射光学混合元件, 提高系统校正像差的能力。折射/衍射混合光学元件具有一定的光焦度, 可以对系统的场曲进行校正, 并使冷光栏成像在主镜上。折射/衍射混合光学元件的折射球面所带来的色差由衍射光学面来校正。

2 光学系统结构的确定

对于两个反射镜和折射/衍射混合光学元件, 其光焦度的分配应满足光焦度、场曲和冷光栏位置三个方程:

$$\Phi = \theta_1 + h_2\mathcal{Q}_2 + h_3\mathcal{Q}_3 \quad (1)$$

$$S_{IV} = -\mathcal{Q}_1 - \mathcal{Q}_2 + \frac{\mathcal{Q}_3}{n_3} = 0 \quad (2)$$

$$d_2 = d_1/(d_1\mathcal{Q}_2 + 1) - d_3/(1 - d_3\mathcal{Q}_3) \quad (3)$$

式中 \mathcal{Q}_1 、 \mathcal{Q}_2 、 \mathcal{Q}_3 分别为两个反射镜和折射/衍射混合光学元件的光焦度, d_1 、 d_2 、 d_3 为第二个反射镜到第一个反射镜、折射/衍射混合元件到第二个反射镜、冷光栏到折射/衍射混合元件的距离。 h_2 、 h_3 为第一近轴光线在各元件上的高度。

对于反射镜, 其光焦度与半径的关系为:

$$\mathcal{Q} = -2/R \quad (4)$$

对于折射/衍射混合光学元件, 为了衍射面的加工方便, 取其中的一面为平面, 并且在以下的讨论中可以看到, 衍射面承担的光焦度很小, 因此其折射面的半径可以很方便地得到:

$$\mathcal{Q} = (n' - n)/R \quad (5)$$

通过求解方程(1)~(5), 就可以得到光学系统的初步结果, 再由三级像差理论得到相应的非球面系数。

3 非球面系数的确定

非球面的面型可以用下式表示:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2r^2}} + a_4r^4 + \dots \quad (6)$$

其相应的像差系数可以看成在球面系数上加上非球面像差系数的增量:

$$\begin{aligned} \Delta S_I &= (n - n')(Kc^3h^4 + 8a_4h^4), & \Delta S_{II} &= \Delta S_I h_p/h, \\ \Delta S_{III} &= \Delta S_I h_p^2/h^2, & \Delta S_{IV} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

式中 h_p 为主光线在各元件上的高度。通过求解: $\sum \Delta S_i = -\sum S_i$, 使非球面引起的像差系数的增量与球面的像差系数补偿, 便得到了相应的非球面系数 K 或 a_4 。这里, 系统共有两个二次曲面: 主镜和次镜, 一个非球面: 即折射/衍射混合光学元件的衍射光学面, 这三个非球面系数可以用来校正球差、彗差和像散。

4 采用衍射光学面消色差

衍射面的色散与材料无关, 它可以由下式给出^[4]:

$$V_d = \lambda/(\lambda - \lambda) \quad (8)$$

折射/衍射混合光学元件的光焦度分配以及色差要求满足:

$$\mathcal{Q}_3 = \mathcal{Q} + \mathcal{Q}_d, \quad C = \mathcal{Q}/V_r + \mathcal{Q}_d/V_d = 0 \quad (9)$$

式中 \mathcal{Q}_d 、 V_d 为衍射面的光焦度和阿贝数, \mathcal{Q} 、 V_r 为折射面的光焦度和阿贝数。由于衍射面的色散与折射面的色散不同, 所以(8)式和(9)式有 \mathcal{Q}_d 、 \mathcal{Q} 不为零的解, 对于材料 Ge, 折射/衍射混合光学元件的光焦度分配在 $8 \mu\text{m} \sim 12 \mu\text{m}$ 相应的解为 $\mathcal{Q}_d = 0.0025\mathcal{Q}$, $\mathcal{Q} = 0.9975\mathcal{Q}_d$, 由此

可以看到衍射面所占的光焦度是很小的。

5 设计结果

本文设计一个工作波长为 $8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$ 、孔径为 $60\ \text{mm}$ 、视场为 4.2° 、焦距 $120\ \text{mm}$ 、冷光栏效率为 100% 的红外反射/衍射光学系统。根据上面方程的解作为初始结构，再经过光学设计软件 Zemax 优化，得到光学系统的结构和像质如图 1 和图 2 所示。为了将像面引出，副镜和折射/衍射混合元件都有小的偏转。在图 1 中可以看到这个情况。从图 2 的调制传递函数 (MTF) 曲线中可以看到，在整个视场范围内，系统的成像质量接近衍射极限。该系统体积小，结构紧凑，具有中间像面和 100% 冷光栏效率，视场较大，符合现代红外光学的应用要求，尤其在空间红外光学有很好的应用前景。

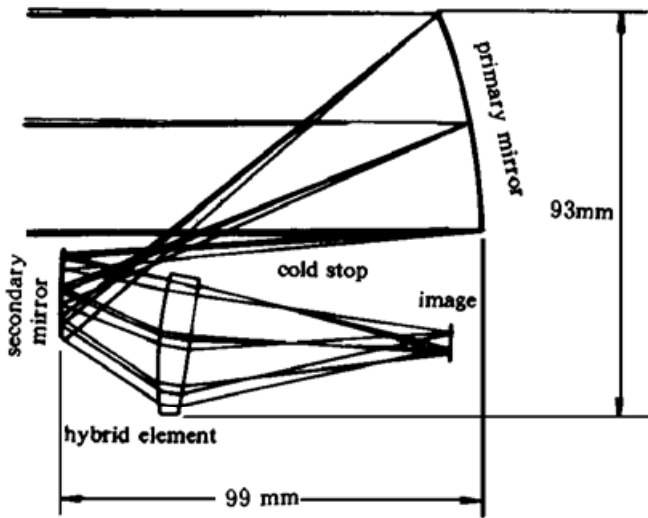


Fig. 1 Optical layout of hybrid diffractive-reflective off-axis system

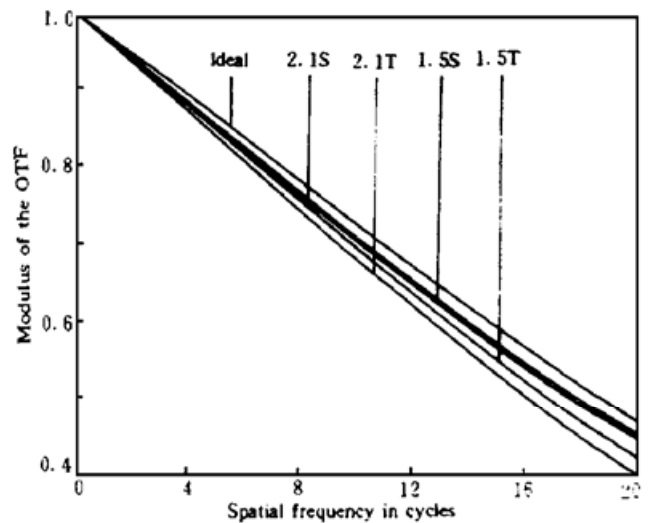


Fig. 2 Diffraction MTF of hybrid diffractive-reflective off-axis system

结 论 对于无中心遮拦的两反射镜混合光学系统系统，采用离轴形式，可以由三级像差理论求出初始结构。由于采用了折射/衍射混合元件，可以带有光焦度，增加了系统的像差校正能力。具体的设计结果表明，对于工作在 $8\ \mu\text{m}\sim 12\ \mu\text{m}$ 的两反射镜离轴混合光学系统，可以在 4.2° 的视场内得到接近衍射极限的成像质量。并且该系统体积小，结构简单，具有中间像面和满足 100% 冷光栏效率，符合现代红外光学的应用要求。

参 考 文 献

[1] 潘君骅, 光学非球面的设计、加工与检验. 北京: 科学出版社, 1994. 10~ 87

[2] Max J. Riedl, *Optical Design Fundamentals for Infrared System*. Bellingham, Washington USA, SPIE Optical Engineering Press, 1995. 133~ 134

[3] Danial M. Brown, Alan D. Kathman, Off-axis spherical element telescope with binary optic corrector. *Proc. SPIE*, 1991, **1555** : 114~ 127

[4] T. Stone, N. George, Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14) : 2960~ 2971

Design of a Hybrid Diffractive-Reflective Off-Axis System for Infrared Application

Guo Yonghong Shen Mangzuo

(*Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Shuangliu Chengdu 610209*)

Lu Zukang

(*State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

(Received 8 September 1997; revised 24 November 1997)

Abstract With the requirement for modern infrared optics system, a method for designing hybrid diffractive-reflective off-axis optical system in infrared region is introduced. An optical system thus designed is simple in structure and possesses high optical and mechanical quality.

Key words optical design, diffractive optics, hybrid optical system, off-axis system.