

大相对口径长焦距折射式光学系统设计

李宏壮, 赵勇志, 王国强, 刘欣悦

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 分析了大相对口径、长焦距折射式光学系统的像差特点, 针对一款口径 300 mm, 焦距 540 mm, 波段范围 500~850 nm, 视场角 2° 的折射式成像物镜进行了设计。首先根据系统的像差特点, 针对二级光谱, 选择了 Petzval 型作为初始结构, 并进行了复杂化, 形成大空气间隔的三组元形式, 利于像差的校正和后组元件尺寸的减小; 而后针对使用波段对玻璃材料的部分色散 P 和阿贝数 V 值进行了修正, 并绘制了 $P-V$ 图, 从中选择了具有一定二级光谱校正能力并性能优良的玻璃材料。最终系统的二级光谱达到了 0.06 mm, 表明具有较好的复消色差性能。设计结果系统在相机 Nyquist 频率 (39 lp/mm) 处各视场 MTF 大于 0.8, 80% 能量集中在直径为 8 μm 的圆内, 小于一个象元尺寸, 最大畸变小于 0.1%, 各项指标均满足设计要求。

关键词: 光学设计; 折射系统; 二级光谱

中图分类号: TH751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2954-05

Design of refractive optical system with large relative aperture and long focal length

Li Hongzhuang, Zhao Yongzhi, Wang Guoqiang, Liu Xinyue

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The aberration characteristics of refractive optical system with large relative aperture and long focal length were analyzed. And a lens with 300 mm diameter, 540 mm focal length, 500–850 nm operating wavelength range, and 2° field of view was designed. First, as the secondary spectrum was the most prominent aberration, the Petzval form was chose as the initial configuration, and after complication, the configuration with three components with large air space was used, which was good for aberration correction and element size reduction. Then the partial dispersion and abbe number of typical glasses were recalculated and modified for the used wavelength, and $P-V$ map is draw, then the glasses with some secondary spectrum correction ability and fine optical performance were chose. Finally the secondary spectrum of the system is reduced to 0.06 mm, which show that the system is apochromat. The design results demonstrate that the MTF of all field of view at Nyquist frequency 39 lp/mm is higher than 0.8, and 80% energy of the system encircled in 8 μm , which is less than a pixel size, and the distortion is less than 0.1%. All indexes satisfy the commands of system.

Key words: optical design; refractive system; secondary spectrum

收稿日期: 2014-01-10; 修订日期: 2014-02-25

基金项目: 中国科学院第三期创新工程资助项目

作者简介: 李宏壮(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事光学设计、检测、主动光学、大口径望远镜波前探测方面的研究。

Email: jilinbayan@163.com

0 引言

在许多应用领域中,为了获得高的分辨率和靶面照度,光学成像系统要求具有大的相对孔径和长的焦距,另外由于 CCD 探测器件的光谱响应范围宽,因此,还要求光学系统同时具有宽的光谱范围,这些要求提高了光学设计的难度。

在光学系统结构形式选择上,由于反射系统元件口径可达米级、结构简单、不产生色差、通过加入折射校正元件可以实现大的相对孔径和一定的视场要求,因此在大口径光学系统中被广泛采用。但反射和折反射式系统也有明显的缺点,包括:轴外像差校正困难,视场难以做大;非球面的反射镜加工难度大、成本高;装调精度要求高;次镜形成中心遮拦,并随着视场和相对孔径的增大,遮拦比迅速增加,使成像对比度、分辨率及探测能力下降;杂光抑制困难等等。

而折射式系统最大的优点是按照常规的加工、装调手段即可达到精度要求、像质稳定、杂光小、元件透过率高。其缺点是透镜元件尺寸受限制、色差和二级光谱的校正困难等,其中最主要的是元件尺寸的限制。但按照目前的工艺水平,口径 300 mm 以下的折射系统是较容易实现的,在光学像差校正达到要求基础上,能够充分利用折射系统的优点,获得较理想的光学性能。

文中以一款口径为 300 mm、焦距为 540 mm 的物镜为例,介绍了折射式大相对口径、长焦距光学系统的设计,并重点围绕二级光谱的校正进行了分析。

1 设计指标要求

系统设计指标要求如表 1 所示。

由指标要求可以看出,系统为大相对口径、长焦距、宽谱段、小视场。由于视场角较小,像差校正中对应于像高二次方以上的像差,包括象散、场曲、畸变及其高级项都不会太大,不需要专门考虑,而轴上像差需要重点校正,尤其是二级光谱,因为二级光谱与相对口径的平方和焦距的一次方成正比,是影响这类镜头成像质量的最主要因素^[1-2]。

表1 光学系统指标

Tab.1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Diameter/mm	300
Focal length /mm	540
<i>F</i> /#	1.8
Field of view/(°)	2
Wavelength/nm	500-850
Back focal distance	>30
Image size/mm	13.3×13.3
Pixel size /μm	13
80% Energy encircled /pixel	<1×1
Distortion	<1%

2 设计过程和结果

2.1 结构形式选取

长焦距折射系统可采用的形式主要有三片型、远摄型和 Petzval 型。其中三片型在长焦距下难以实现大相对口径;远摄型可以使光学总长减小,减轻体积和重量,但其结构为正、负光焦度分离,后组垂轴放大率大于 1,使其二级光谱大于相同焦距的基本双胶合形式。Petzval 型采用正、正分离形式,光学总长较长,但由于其后组垂轴放大率小于 1,二级光谱小于相同焦距的双胶合形式,对二级光谱校正有利^[3-4]。

由于该系统重点要对影响像质的二级光谱进行校正,对结构尺寸要求不高,因此选择 Petzval 型作为初始结构,并对其进行复杂化,在前后组之间增加一组,形成大空气间隔的三组元结构,实现对二级光谱、轴外像差较好的校正。并通过大的空气间隔减小中、后组元件的口径。

2.2 玻璃材料的选择

二级光谱的校正除与结构形式有关外,在很大程度上取决于玻璃材料的选择,对于相互贴合的双薄透镜,其二级光谱表达式为^[5-7]:

$$\Delta L = f \cdot \frac{P_2 - P_1}{V_1 - V_3} \quad (1)$$

公式(1)表示对 λ_1 和 λ_2 两种波长消色差时, λ_2 波长的二级光谱。其中 P_1 、 P_2 为两种材料的部分色散, V_1 、 V_3 为阿贝数,其表达式为:

$$P_{\lambda_2} = \frac{n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}}{n_{\lambda_3} - n_{\lambda_1}} \quad (2)$$

$$V = \frac{n_{\lambda_2} - 1}{n_{\lambda_3} - n_{\lambda_1}} \quad (3)$$

由公式(1)可以看出, n_{λ} 为校正二级光谱, 应选择 P 值接近、 V 值差别大的玻璃。而由于系统波段为 500~850 nm, 需要对传统可见光范围(g, F, C)的玻璃 $P-V$ 图进行修正, 计算使用波段内玻璃的 P 、 V 值。由于系统波段为 500~850 nm, 因此选择 $F(486.13 \text{ nm})$ 和 $s(852.11 \text{ nm})$ 作为消色差谱线, 计算 $C(656.27 \text{ nm})$ 谱线的部分色散 P 和阿贝数 V , 对 39 种材料经过计算后绘制了 $P-V$ 图, 如图 1 所示。

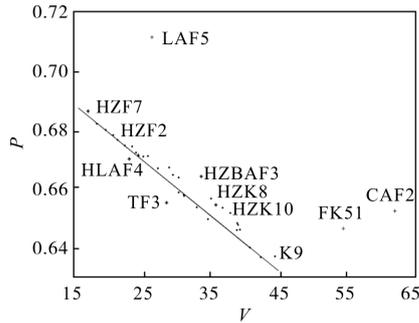


图 1 $F\sim s$ 波段材料的 $P-V$ 图
Fig.1 Diagram of $P-V$ for $F\sim s$ band material

从修正后的材料 $P-V$ 图可以看出, 大部分玻璃处于一条直线附件, 该直线称为正常玻璃线, 这些材料为正常色散玻璃; $LAF5$ 、 $FK51$ 、 $CAF2$ 材料偏离正常玻璃线较远, 表明具有很强的复消色差能力, 属于特殊色散材料。但 $LAF5$ 制备困难, 折射率无法保证, 不能实际使用; $FK51$ 和 $CAF2$ 的化学稳定性和光学工艺性差, 价格昂贵, 难以制成大块镜坯, 在光学设计中应尽量避免使用。

而 $HZF7$ 、 $HLAFA4$ 、 $HZBAF3$ 、 $HZK8$ 、 $HZK10$ 等玻璃与正常玻璃线之间有稍小的偏离, 称为微反常色散玻璃, 利用这类材料可以大大提高二级光谱的校正能力, 且其具有较好光学性能, 易制成大口径镜坯。因此本系统中采用 $HZF7$ 、 $HLAFA4$ 、 $HZBAF3$ 、 $HZK8$ 材料, 并在后组一块小口径透镜中使用了较常用的特殊色散材料 $TF3$ 进一步校正二级光谱。

2.3 设计结果及像差分析

通过前面的分析, 由初始结构反复优化, 最终得到系统的光路结构如图 2 所示。

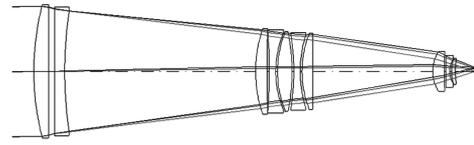


图 2 系统结构
Fig.2 Structure of system

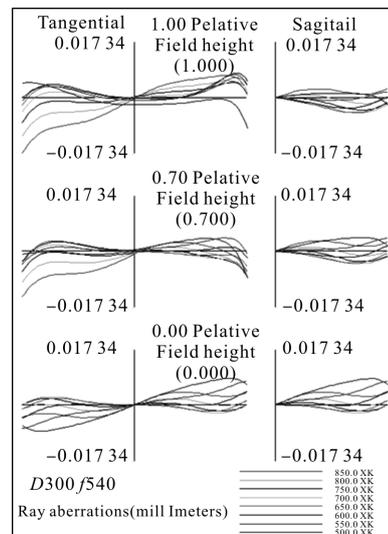
系统共三组 10 片, 光学总长 1 170 mm, 后工作距离为 51 mm。

前组由两块透镜组成, 为减小前组口径, 将光阑设置在第一片透镜上, 两块透镜口径分别为 300 mm 和 290 mm。由于前组轴上光线高度高, 相对孔径大, 球差及其高级量较大, 因此采用高折射率的 $HZF7$ 和 $HLAFA4$ 材料, 通过正、负元件高的折射率和小折射率差, 使正负元件的密接半径加大, 降低高级球差。设计结果中该密接面为平面。

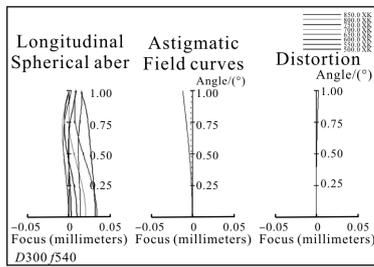
中组 5 片的通光口径为 191~170 mm 之间, 材料分别为 $HZK8$ 、 $HZF7$ 、 $HZBAF3$ 、 $HZF7$ 、 $HZBAF3$ 。通过将胶合面分离形成密接透镜组, 降低高级球差。并在优化中控制密接面的像差, 降低其像差敏感度, 从而降低对加工装调的精度要求。

后组 3 片通光口径为 88~52 mm 之间, 材料分别为 $HZF7$ 、 $TF3$ 、 $HZF7$ 。通过第二片采用特殊色散材料 $TF3$ 实现对二级光谱的进一步校正。并形成反常胶合面, 利于校正高级象散和轴外球差。由于前组残余的像差需要后组补偿, 这样往往导致后组透镜极度弯曲, 因此将后组胶合面也分开, 增加一个校正像差的变数。

设计结果的像差曲线和成像质量如图 3 所示。

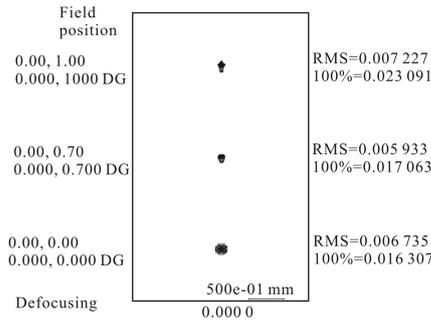


(a) 像差曲线
(a) Transverse ray aberration



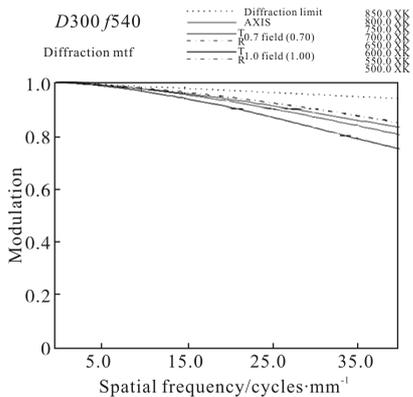
(b) 球差、场曲、畸变曲线

(b) Spherical, field curvature and distortion curve



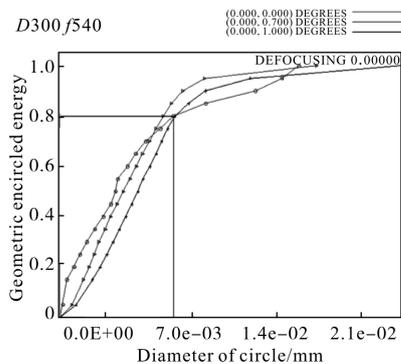
(c) 点列图

(c) Spot diagram



(d) 传递函数曲线

(d) MTF curve



(e) 传递函数曲线

(e) Energy encircled plot

图 3 像差曲线和成像质量

Fig.3 Aberration curve and imaging quality

由像差曲线可见,系统残余像差为二级光谱、色球差和高级球差,此外轴外视场还有少量的高级慧差和高级象散。

系统的残余二级光谱仅约为 0.06 mm,而如果采用常规的玻璃 K9 和 HZF2 组成胶合透镜,则系统的二级光谱为:

$$\Delta L = f \cdot \frac{P_{K9} - P_{HZF2}}{V_{K9} - V_{HZF2}} = 540 \times \frac{0.64 - 0.676}{40.916 - 21.559} = 1 \text{ mm} \quad (4)$$

可以看出设计结果的二级光谱已得到较好的校正。

由成像质量曲线可见,在相机 Nyquist 频率(39 lp/mm)处各视场 MTF 大于 0.8,80%能量集中在直径为 8 μm 的圆内,小于一个象元尺寸,系统最大畸变小于 0.1%,各项指标均满足设计要求。

3 结论

大相对孔径、长焦距成像系统设计的关键是对轴上像差、尤其是对二级光谱的校正。设计中应首先分析系统要求和像差特点,选择合适的结构形式并进行复杂化,而后针对使用波段,修正玻璃的部分色散值 P 和阿贝数 V,从而选择具有一定二级光谱校正能力且光学性能优良玻璃材料,再针对系统的像差特点,进行优化设计,最终达到性能要求。

文中针对一款口径 300 mm,焦距 540 mm 的 F/1.8 的折射系统进行了设计,通过分析选择了对二级光谱校正有利的 Petzval 型作为初始结构,并进行了复杂化,形成大空气间隔的三组元形式;而后根据修正的玻璃 P-V 图,选择了 4 种加工使用性能优良、并具有一定二级光谱校正能力的微反常色散玻璃,并在后组中使用了一块小口径特殊色差材料,使系统的二级光谱校正到仅为 0.06 mm,获得较好的成像质量,各项指标满足要求。

按照目前的工艺水平,基于普通玻璃材料的 300 mm 口径透镜,从镜丕制造,到加工装调等过程难度都不大,易于实现。通过系统结构的合理布局,采用大的空气间隔,可以仅使用一到两块大口径的元件,其余采用小口径透镜,降低了研制难度和成本。相比于反射和折反射系统,在中心遮拦、杂光抑制、加工装调难度及成本方面的优点使折射系统更具优势。

参考文献:

[1] Wang Meiqin, Wang Zhonghou, Bai Jiaguang. Removing

- secondary spectrum in wide spectrum optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(3): 360–364. (in Chinese)
王美钦, 王忠厚, 白加光. 宽谱段光学系统消二级光谱的设计[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 360–364.
- [2] Yang Qinghua, Zhao Baochang, Zhou Renkui. Correction of secondary spectrum based on normal dispersion glass [J]. *Acta Phoutonica Sinica*, 2008, 37(4): 772–775. (in Chinese)
杨庆化, 赵葆常, 周任魁. 基于正常色散玻璃二级光谱的校正[J]. 光子学报, 2008, 37(4): 772–775.
- [3] Huang Lei, Hu Wenwen, Yang Zhiwen. Optical design of wide bands and long focal length collimating lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 125–127. (in Chinese)
黄雷, 胡雯雯, 杨志文. 宽光谱、长焦距准直物镜光学设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 125–127.
- [4] Wu Di, Li Lijuan, Shen Jiwei. Optical system design of aerial camera simulator with wide spectrum and wide-view field [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2012, 32(12): 991–999. (in Chinese)
吴迪, 李丽娟, 沈继伟. 宽光谱大视场航空相机模拟器光学系统设计[J]. 西安工业大学学报, 2012, 32(12): 991–999.
- [5] Sun Xin, Bai Jiaguang, Wang Zhonghou, et al. Optical system design of an airborne multi-spectral camera [J]. *Acta Phoutonica Sinica*, 2009, 38(12):3160–3164. (in Chinese)
孙鑫, 白加光, 王忠厚, 等. 一种机载多光谱相机的光学系统设计[J]. 光子学报, 2009, 38(12): 3160–3164.
- [6] Martha Rosete –Aguilar. Correction of secondary spectrum using standard glasses[C]//SPIE, 1996, 2774: 378–386.
- [7] Jiang Huilin. On the secondary spectrum [J]. *Acta Optical Sinica*, 1982, 2(3): 225–228. (in Chinese)
姜会林. 关于二级光谱问题的探讨 [J]. 光学学报, 1982, 2(3): 225–228.