

超宽波段透射式中继镜头设计

范翔, 赵森

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要: 瞄准镜、高温炉内窥镜、复印镜头、大倍率变焦系统等光学系统中, 通常采用中继系统实现系统的延长、转向和系统出入瞳的匹配等等。本文探索了一种实现超宽带宽中继光学系统的像差矫正要求、玻璃选择方法以及设计结果, 完成了超宽波段中继光学系统的设计, Zemax 的设计结果表明, 在工作波段 $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 物方 $\text{NA} = 0.2$, 视场为 10 mm 的要求内, 系统的 MTF 接近于衍射极限, 轴向色差小于 $40 \mu\text{m}$, 成像质量较好。

关键词: 超宽光谱范围; 中继系统; 玻璃选择

中图分类号: TP391.41 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2022.06.018

Design of super-wide band transmission relay lens

FAN Xiang, ZHAO Sen

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In optical sights, high temperature endoscope, copy lens and large range zoom lens and other optics systems, often employ relay systems to achieve system extension, image erection and pupil coupling. In this paper, a design of super-wide band relay system is proposed to realize the aberration correction requirements, glass selection method and obtain the design results. The results of Zemax showed that with working spectral range $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$, $\text{NA} = 0.2$ and 10 mm field of view, the MTF of the system is almost diffraction limited, with an axial color difference of less than $40 \mu\text{m}$ and the imaging quality is good.

Keywords: super wide spectral range; relay system; glass selection

1 引言

中继系统广泛应用于各种光学系统中, 其能够用来延长光学系统的长度, 同时可以对系统进行转像^[1-2]。传统的光学仪器比如瞄准镜、高温内窥镜、复印光学系统等系统中均包含有中继系统。随着工业技术的发展, 对光学仪器的工作波段要求越来越宽, 系统的成像质量也要求越来越高, 比如在超宽光谱成像的物镜系统中, 通过增加中继系统, 可以实现更高的倍率和更多目标监测的需求^[3-4]。开发一种宽波段的中继系统, 使其可适用于各种场景具有重要的意义。

本文设计了一种超宽带宽的中继光学系统, 系统结构采用了全对称的结构, 每侧均采用了 8 片 6 组的结构, 所有镜片均为球面透镜, 工作波段为

$0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 物方 NA 为 0.2 , 全视场物高为 10 mm , 系统成像质量接近于衍射极限, 实现超宽波段的中继光学系统设计。

2 中继系统的像差特性

中继系统是指垂轴放大倍率为 -1 的光学系统, 系统孔径光阑位于系统的中心位置, 孔径光阑两侧的光学系统的结构参数完全对称, 光阑处各视场为平行光束。无限远成像光学系统的像差表达式为:

球差:

$$\delta L'_0 = -\frac{1}{2n'u'^2} \sum S_1 S_1 = \text{luni}(i-i')(i'-u) \quad (1)$$

弧矢慧差:

$$K_{s0} = -\frac{1}{2n'u'} \sum S_{\parallel} S_{\parallel} = S_{\parallel} \frac{i_p}{i} \quad (2)$$

像散:

$$x'_{sp} = -\frac{1}{2n'u'^2} \sum S_{\text{III}} S_{\text{III}} = S_{\parallel} \frac{i_p}{i} \quad (3)$$

像面弯曲:

$$x'_p = -\frac{1}{2n'u'^2} \sum S_{\text{IV}} S_{\text{IV}} = f^2 \frac{n' - n}{n'nr} \quad (4)$$

畸变:

$$\delta y'_p = -\frac{1}{2n'u'} \sum S_{\text{V}} S_{\text{V}} = (S_{\text{III}} + S_{\text{IV}}) \frac{i_p}{i} \quad (5)$$

位置色差:

$$\delta l'_{ch} = -\frac{1}{n'u'^2} \sum C_{\text{I}} C_{\text{I}} = \text{luni} \left(\frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n} \right) \quad (6)$$

倍率色差:

$$\delta y'_{ch} = -\frac{1}{n'u'} \sum C_{\text{II}} C_{\text{II}} = C_{\text{I}} \frac{i_p}{i} \quad (7)$$

从公式(1)~(7)可知,对于结构参数完全对称于光阑的光学系统,在任一对折射面上,轴向像差分布系数的 S_{I} 和 C_{I} 以及 S_{IV} 均为相同值且符号相同,因此,整个系统的轴向像差为任一侧值的二倍,而垂轴像差分布系数 $S_{\text{II}}, S_{\text{V}}$ 和 C_{II} 均为大小相等,符号相反,因此,系统的垂轴色差互相抵消。由像差理论可知垂轴像差中的彗差、畸变、垂轴色差可以完全抵消,系统不需进行垂直方向的像差校正,系统的轴向像差包括系统的球差、轴向色差两种,必须选择合理的光学系统结构和合理的玻璃组合实现校正球差和轴向色差的目的。

3 宽波段消色差玻璃选择的方法与理论

根据工程需求,设计中继光学结构的光谱范围为400~1700 nm。超宽谱段复消色差是必要的。折射式光学系统的色差来源于玻璃材料对不同波长光线的折射率差异。由初级色差理论可知,消色差条件为:

$$C = \sum_{i=1}^N \frac{\phi_i}{v_i} = 0 \quad (8)$$

其中, ϕ 为透镜光焦度; v 为阿贝系数; N 为透镜个数。光焦度表示为:

$$\phi_i = (n_i - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = (n_i - 1)K \quad (9)$$

其中, n 为折射率; r 为透镜曲率。

中继系统为对称结构,且孔径处各视场为平行光束,可视为无限远成像光学系统。系统光焦度还

可用焦距 f' 表示为:

$$\sum_{i=1}^N \phi_i = \frac{1}{f'} \quad (10)$$

以两种透镜为例,光焦度分别为 ϕ_1, ϕ_2 ,代入公式(8)和(9)得:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{1}{f'} \cdot \frac{v_1}{v_1 - v_2} \\ \phi_2 &= -\frac{1}{f'} \cdot \frac{v_2}{v_1 - v_2} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $v = \frac{n_d - 1}{n_F - n_c}, d, F, C$ 为最常用的三色光。

根据像差理论,一组透镜的轴向色差 ΔL 可得:

$$\Delta L = L(\lambda + \Delta\lambda) - L(\lambda) \quad (12)$$

由于处于像方无限远结构中,可由焦距表示轴向色差,并带入公式(10)得:

$$\frac{\phi(\lambda + \Delta\lambda) - \phi(\lambda)}{\phi} = \frac{f'(\lambda + \Delta\lambda) - f'(\lambda)}{f'} \quad (13)$$

将公式(9)和(11)代入公式(13)经数学变换得:

$$\Delta f = f'(\lambda + \Delta\lambda) - f'(\lambda) = f' \frac{P_1 - P_2}{v_1 - v_2} \quad (14)$$

其中, $P = \frac{n_F - n_\lambda}{n_F - n_c}$ 为相对部分色散。

推广到多种玻璃材料,两两之间消色差需要选择相对部分色散 P 相差较小,玻璃材料的阿贝数相差较大,对400~1700 nm范围内的玻璃材料进行拟合分析,拟合方式采用Hoogland's图可以更好地看出多种材料组合的消色差能力。在该图中,纵坐标是 $y = 1/v$,横坐标是 $x = -(P - b)/v$,其中 b 是阿贝图拟合直线的常数项。因此,在此图中表示玻璃材料时,任何通过原点落在同一直线上的玻璃材料组合意味着消色差为零或具有较小的次级光谱,即相对部分色散 $P = \text{常数}$ 。令 r_a, r_b 分别表示为从坐标原点到代表光学材料 a, b 光学材料的径向距离。参考公式(11)可以证明,不同材料光焦度的比率与径向距离的比率成反比,即 $\phi_a/\phi_b = r_a/r_b$ 。也可以表示,在Hoogland's图中找到与径向距离相差较大的一对玻璃等效于找到一对 V 值相差较大的玻璃。也可以一个图中诠释消色差条件下 ϕ, P, v 之间的关系,满足消色差条件即公式(8)和复消色差即消二级光谱公式(14)。

考虑到肖特玻璃库中玻璃材料的光谱范围和使用性能,选用性能良好材料进行拟合分析。得到的玻璃材料分布图如图 1。

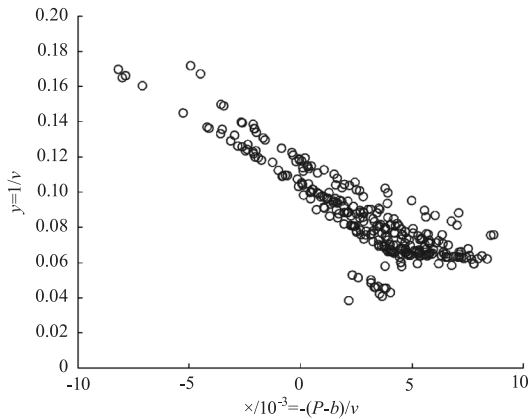


图 1 Hoogland's 图
Fig. 1 Hoogland's figure

整个中继光学系统采用 4 中材料复消色差,取相对色散值较小,阿贝数较大的 4 种材料,光焦度比值过大也不利于设计装载,从 Hoogland's 图中分析取过原点的直线斜率在 0 左右和 0.012 分布的材料进行部分筛选(如表 1 所示)。

表 1 玻璃材料的 Hoogland's 图坐标值

Tab. 1 Coordinate of glass materials in Hoogland's figure

Glass	x	y	Glass	x	y
K3	5.306	0.0655	PSK52	5.223	0.0594
K4	5.626	0.0675	SF12	0.351	0.1041
KZFN1	5.038	0.0767	SF16	0.096	0.1032
SK5	5.671	0.0637	SF19	0.144	0.1071
ZK1	5.213	0.0664	BASF54	0.068	0.1092
N-KZFS11	5.553	0.0896	BASF56	0.443	0.0961

经过材料对比筛选,选出相对 P 相差较小, V 相差较大组合,结合材料性能。选用 BASF54、N-KZFS11、PSK52 和 SF16 组合方式。

4 光学系统设计

4.1 系统参数

针对宽波段消色差中继镜头的像差特性,通过选择合理的玻璃组合,实现宽波段消色差的目标。中继系统垂轴放大率 $\beta = -1$,孔径光阑位于系统的中心位置,光阑前后位置的镜片完全对称。拟设计的光学系统技术指标如表 2 所示。

4.2 设计结果

利用光学设计软件 ZEMAX 分析上述得到的镜

头参数,并选择双分离、双胶合或者三分离结构开展光学系统的优化设计,控制系统的总长、后焦和玻璃的中心、边缘厚度,控制镜片中心、边缘间隔,确保系统具有可加工性。控制光线在镜片上的入射角以降低系统的高级像差,控制中心主波长、两端波长的轴向色差、控制不同孔径不同波长光线的球差以实现消轴向色差的目的。经过反复优化和玻璃选择控制,得到最终的光学系统结构图如图 2 所示。

表 2 中继系统的技术指标

Tab. 2 Specification of relay system

Performance parameter	Value
Magnification	-1 ×
Field of View/mm	10
Object NA	>0.2
Spectral Range/ μm	0.4 ~ 1.7
Working distance/mm	≥ 6
RMS/ μm	<3
MTF	>0.5@100lp/mm
Total Track/mm	<130

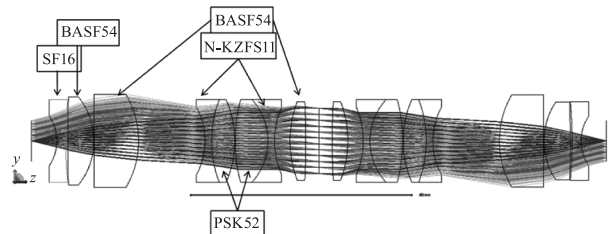
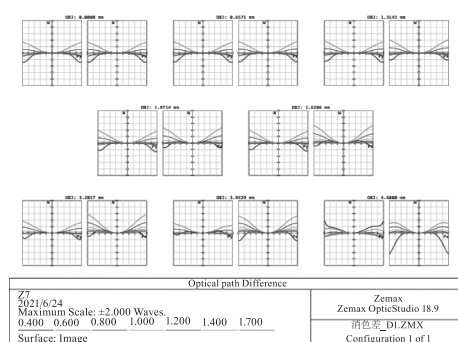


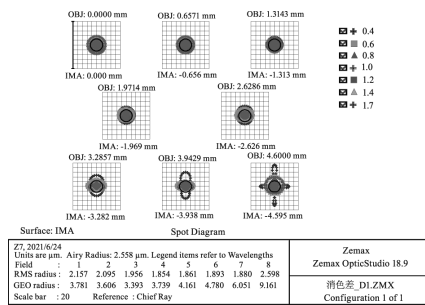
图 2 光学系统结构图

Fig. 2 Layout of optical system

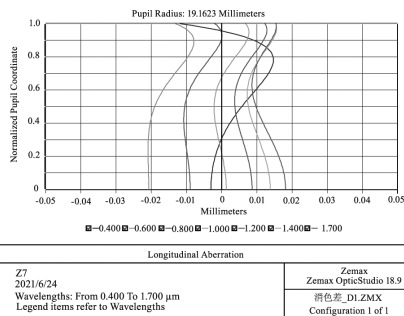
光学系统中,采用了 5 种不同的光学材料,其中第一组双分离镜片的玻璃牌号为 SF16、BASF54;后两组中的胶合加单片结构玻璃牌号分别为 BASF54、N-KZFS11 和 PSK52;5 种玻璃组合消除了系统的轴向色差,且可以矫正球差。图 3 为所设计系统的仿真结果。



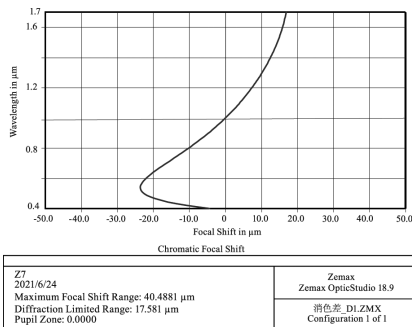
(a) 光程差图



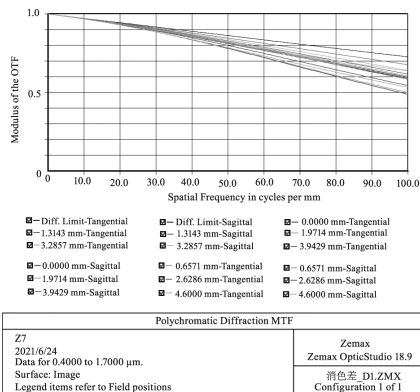
(b) 点列图



(c) 纵向色差



(d) 轴向色差



(e) 传递函数曲线

图 3 系统仿真结果

Fig. 3 System simulation results

从上述光学系统的设计结果来看,系统的波前差达到了 1 个波长,整个系统的弥散斑均 $< 3 \mu\text{m}$,系统的轴向色差最大约为 $40 \mu\text{m}$,系统的色球差约为 $40 \mu\text{m}$,光路设计结果满足技术指标要求。

5 结论

设计了一种宽波段消色差中继系统,针对系统宽波段和 $-1 \times$ 中继系统像差的特点,提出了一种通过选择合理的玻璃组合和结构形式的方法,实现了复消轴向色差的目的。从复消色差的理论出发,分析玻璃透过率特性、几何像差理论和 Hoogland's 图,建立玻璃组合筛选算法,找出可以复消色差的玻璃组合。通过计算玻璃组合的最小轴向色差值得到最优的玻璃组合,在所获得的玻璃组合的基础上,建立光学系统的模型,并根据像差特新,逐步调整光学系统的结构形式,从而实现宽波段消色差的中继系统。设计结果表明,系统全视场的弥散斑优于 $3 \mu\text{m}$, $\text{MTF} \geq 0.5 @ 100 \text{ lp/mm}$ 且接近于衍射极限;光学系统结构形式简单,能够满足加工和装调的要求。从设计过程来看,经过筛选后的玻璃组合能够实现宽波段消色差的目标,验证了算法的正确性,为复消色差光学系统的设计提供了一种新的方法。

参考文献:

- [1] 李晓彤. 几何光学和光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,140-152.
- [2] 袁旭沧. 光学设计[M]. 北京:北京理工大学出版社,47-86.
- [3] Yu Lu, Cheng Dewen, Zhou Wei, et al. Optimization design of rigid endoscope with high definition and large depth of field. [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1122003. (in Chinese)
- [4] 禹璐,程德文,周伟,等. 大景深高清硬性内窥镜光学系统的优化设计[J]. 光学学报,2013,33(11):1122003.
- [5] Bráulio, Fonseca, Carneiro, et al. Method of glass selection for color correction in optical system design [J]. Optics Express, 2012, 20(13):13592-13610.