

引用格式: LIU Zhi-ying, LI Shu-qi, HUANG Yun-hang, *et al.* Design and Analysis of the Transmitted Inner Focusing Wide Spectrum Optical System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3):0322004

刘智颖,李曙琦,黄蕴涵,等.透射式内调焦宽光谱光学系统的设计与分析[J].光子学报,2020,49(3):0322004

透射式内调焦宽光谱光学系统的设计与分析

刘智颖,李曙琦,黄蕴涵,付跃刚

(长春理工大学 光电工程学院 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室,长春 130022)

摘 要:为了在实现系统内调焦的同时保证宽光谱系统的优良像质,通过合理选材对宽光谱光学系统中存在的位置色差以及二级光谱进行校正,并提出了一种内调焦宽光谱光学系统的设计方法.建立内调焦消色差的数学模型,推导系统设计所需满足的公式.结合提出的数学模型与推导出的公式,以焦距为 90 mm、 F 数为 2.8、具备内调焦功能的宽光谱光学系统为例进行验证.结果表明,系统可在 420~900 nm 的宽光谱范围内对 0.2~200 km 位置内的目标进行色差校正,验证了内调焦宽光谱光学系统设计方法与消色差数学模型的正确性.

关键词:光学设计;内调焦;宽光谱;消色差;数学模型

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204903.0322004

Design and Analysis of the Transmitted Inner Focusing Wide Spectrum Optical System

LIU Zhi-ying, LI Shu-qi, HUANG Yun-hang, FU Yue-gang

(Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission
Technology of Ministry of Education, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun
University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to realize the inner focusing and meanwhile ensure the excellent image quality of the wide spectrum system, the position chromatic aberration and secondary spectrum in the wide spectrum optical system are corrected through the reasonable selection of materials, and a kind of design method of the wide spectrum optical system with inner focusing is proposed. The mathematical model of the achromatic with inner focusing is established, and the formulas that the system design needed are deduced. Combined with the proposed mathematical model and the derived formulas, a wide spectrum optical system with a focal length of 90 mm, the F number of 2.8 and the function of inner focusing is taken as an example. The result shows that in the range of 420~900 nm, the system can correct the chromatic aberration of the target at the distance of 0.2~200 km. The correctness of the design method and mathematical model of the inner focusing wide spectrum optical system is verified.

Key words: Optical design; Inner focusing; Wide spectrum; Achromatic; Mathematical model

OCIS Codes: 220.3620; 080.3620; 080.2720; 080.1753

0 引言

宽光谱光学系统在宽波段范围内具有良好的空间分辨率以及光谱分辨率,并且能够获取更多目标信息.对于中小口径、大相对孔径的光学系统,透射式结构形式仍然存在着很大的性能优势^[1-2].对于宽光谱光学系

基金项目:国家自然科学基金(No.61805025),国家重点研发计划(No.2016YFF0101902)

第一作者:刘智颖(1981-),女,教授,博士,主要研究方向为先进光学设计与成像. Email:lzcceccc@126.com

收稿日期:2019-11-25;录用日期:2020-01-13

<http://www.photon.ac.cn>

统来说,如何对系统进行消色差是要解决的关键问题之一.西南技术物理研究所曲锐等^[3]设计出一款宽波段大相对孔径光学系统.波段范围为 $0.4\sim 1.7\ \mu\text{m}$,论述了各光学玻璃材料的使用与替换方法,利用四种普通光学玻璃材料,实现了宽波段复消色差;中科院上海物理研究所桂立^[4]等设计了一款可见近红外高光谱物镜.该系统波段范围为 $365\sim 1\ 000\ \text{nm}$,通过对玻璃材料的使用,物镜在宽波段内的色差得到了良好校正.中科院长光所刘娟娟^[5]等设计出一款 $300\sim 1\ 000\ \text{nm}$ 宽波段光学系统,该系统采取反远距结构型式,利用棱镜进行三路分光,通过合理选材达到消色差要求,利用移动透镜来完成消色差.以上研究都是从初级色差理论出发,对消色差方程进行求解,最终通过对系统合理选材以及光焦度的合理分配,实现宽波段的消色差.

为了实现在宽波段范围对不同物距的物体成像,在设计光学系统时,需要对宽光谱光学系统进行内调焦设计.杭州照相机械研究所李晓艳等^[6]设计了一款内调焦望远镜头,焦距为 $500\ \text{mm}$,物距从无穷远到 $5\ \text{m}$,利用远距型结构形式来获取较小的远摄比.最近,浙江大学设计出一款高精度的自动调焦系统,此系统的物距调焦范围从无穷远至 $50\ \text{mm}$ 处,系统采用图像处理法,成像清晰度良好,调焦速度极快,能够达到 $10\ \text{s}$ 之内.内调焦光学系统独特的调焦特性大大改善了光学系统的性能,而对于长焦距的内调焦光学系统,其二级光谱很难矫正^[7].因此,实现对内调焦宽光谱光学系统的复消色差是需要解决的关键问题.

在实现光学系统的宽波段清晰成像的同时,具有内调焦功能,可使系统的应用更为广泛,也大大提升系统的应用环境.光学系统中,各片透镜产生的色差量不仅与透镜光焦度、所用材料色散性质有关,还与它在系统中所处的位置有关.同时,内调焦的光学系统需要透镜(组)在光轴上移动,这也导致系统中的色差发生变化.因此,色差的校正,在宽波段以及内调焦光学系统中尤为重要并且难度也较大.本文在设计宽光谱光学系统的基础上实现系统的内调焦,选取相应玻璃材料,并对内调焦消色差理论进行了数学模型的建立和公式推导.最后对成像质量进行具体分析,为内调焦宽光谱光学系统的设计提供了合理方法与依据.

1 宽波段复消色差理论

透射式系统的色差主要来源于材料的色散^[8].光学系统在校正位置色差之后还存在二级光谱,直接影响系统的成像质量^[9].系统的二级光谱由两种玻璃材料的相对色散系数之差与阿贝系数之差共同决定.一般来说,系统既满足光焦度要求又要校正二级光谱至少需要用三种玻璃材料^[10].系统的总光焦度、位置色差、二级光谱表达式分别为

$$\varphi_1 + \frac{H_2}{H_1} + \frac{H_3}{H_1} \varphi_3 = \Phi \quad (1)$$

$$\frac{\varphi_1}{\nu_1} + \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 \frac{\varphi_2}{\nu_2} + \left(\frac{H_3}{H_1}\right)^2 \frac{\varphi_3}{\nu_3} = C_1 \quad (2)$$

$$\frac{\varphi_1}{\nu_1} P_1 + \left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2 \frac{\varphi_2}{\nu_2} P_2 + \left(\frac{H_3}{H_1}\right)^2 \frac{\varphi_3}{\nu_3} P_2 = C_{II} \quad (3)$$

式中, φ_1 、 φ_2 、 φ_3 分别为三块透镜的光焦度; H_1 、 H_2 、 H_3 分别表示三种玻璃材料上的光线入射高度; P_1 、 P_2 、 P_3 分别为三块透镜的相对色散系数; ν_1 、 ν_2 、 ν_3 分别为三块透镜的阿贝数; Φ 为系统的总光焦度; C_1 为位置色差; C_{II} 为二级光谱.

根据式(1)~(3)光学系统对位置色差以及二级光谱的校正,有 $C_1=0$ 、 $C_{II}=0$.发现选取相对色散系数接近,而阿贝系数相差较大的玻璃材料是校正色差和二级光谱的重要前提^[11].但是一般玻璃材料的相对部分色散近似与阿贝系数呈线性关系,这与系统校正位置色差所要求的阿贝系数值相差越大越好相矛盾,因此系统要实现复消色差需要加入特殊色散玻璃^[12-13].

选取国内部分玻璃材料,计算它们的相对色散系数 P 以及阿贝系数 ν .绘制玻璃材料图,如图 1 所示.

从图 1 可以看出 H-ZPK5 和 CaF_2 的分布远离正常玻璃直线,具有特殊的色散特性.但由于 CaF_2 的可加工性和化学稳定性差,因此在设计时使用 H-ZPK5 玻璃材料.利用 H-ZPK5 和其他玻璃材料的合理组合能够很好地校正位置色差以及二级光谱.

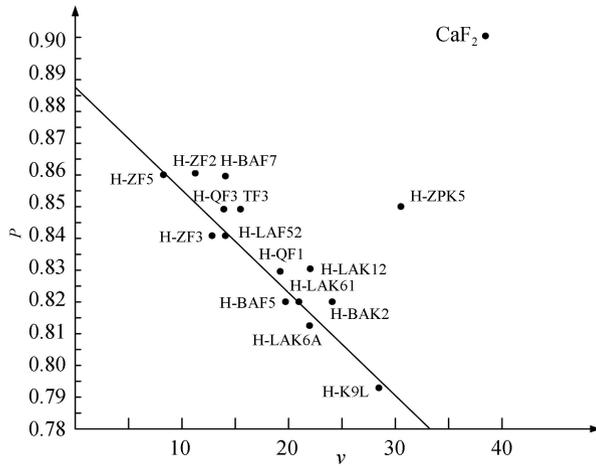


图 1 玻璃材料的 $P-\nu$ 分布

Fig.1 $P-\nu$ distribution of glass materials

2 内调焦宽光谱复消色差原理

在内调焦光学系统中,一组元透镜沿光轴做轴向运动,以此保证处于远近不同位置的物体能够成清晰像.色差问题与光线入射到透镜的高度有着直接关系,而对于内调焦系统,调焦组一定要沿光轴做轴向运动才能保证对不同位置的物体进行观测.但是,透镜(组)在移动过程中必然影响到光线入射到透镜(组)的高度.因此,要保证在物距变化过程中系统的色差不会受到影响,要求在物距变化过程中,光学系统成像质量几乎不发生变化满足像质要求^[14].

轴向色差公式为

$$\frac{\Phi_1}{\nu_{1\text{combine}}} \cdot h_1^2 + \frac{\Phi_2}{\nu_{2\text{combine}}} \cdot h_2^2 + \frac{\Phi_3}{\nu_{3\text{combine}}} \cdot h_3^2 = 0 \quad (4)$$

式中, Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 分别代表每个组元的光焦度; $\nu_{1\text{combine}}$ 、 $\nu_{2\text{combine}}$ 、 $\nu_{3\text{combine}}$ 分别表示各个组元中组合阿贝常数.组合阿贝常数的关系式为

$$\nu_{\text{combine}} = \frac{\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c}{\frac{\Phi_a}{\nu_a} + \frac{\Phi_b}{\nu_b} + \frac{\Phi_c}{\nu_c}} \quad (5)$$

式中, Φ_a 、 Φ_b 、 Φ_c 是透镜组中单个透镜的光焦度; ν_a 、 ν_b 、 ν_c 表示单个透镜的阿贝常数.

在系统内调焦过程中各个组件的光焦度与色散系数不会改变,只要保证主光线高度平方的比值不发生改变,那么色差就不会改变.因此,需满足条件

$$\frac{h_{o1}^2}{h_1^2} = \frac{h_{o2}^2}{h_2^2} = \frac{h_{o3}^2}{h_3^2} \quad (6)$$

式中, h_1 、 h_2 、 h_3 分别代表有限远物距 L 时主光线在各组元上的边缘高度; h_{o1} 、 h_{o2} 、 h_{o3} 分别代表无限远物距时主光线在各组元透镜上的边缘高度.

在得知内调焦消色差条件之后,需对系统在物距不同情况下的参数进行求解.分析在不同物距下各参数需满足怎样关系才能保证对系统进行色差校正.

2.1 三组元有限远物距参数求解

首先,将物距设为有限远 L ,光学系统由三组元结构组成,对这种情况进行各参数求解及公式推导.其结构示意图如图 2.

图 2 中,存在关系式

$$u_2 = u_1 - \Phi_1 h_1 \quad (7)$$

式中,

$$u_1 = \frac{h_1}{L} \quad (8)$$

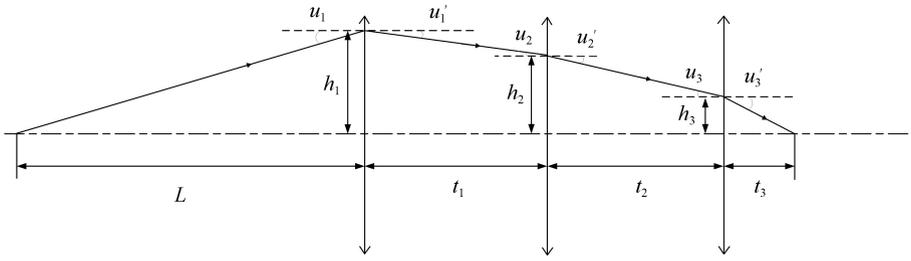


图2 三组元有限远物距结构示意图
Fig.2 Three groups of finite distance structure

对 h_2 进行求解

$$h_2 = h_1 + u_1' t_1 \quad (9)$$

整理可得

$$h_2 = h_1 + \left(\frac{h_1}{L} - \Phi_1 h_1 \right) \cdot t_1 \quad (10)$$

$$\frac{h_2^2}{h_1^2} = \frac{(L + t_1 - \Phi_1 L t_1)^2}{L^2} \quad (11)$$

同样推导可得

$$u_2' = u_1 - \Phi_1 h_1 - \Phi_2 h_1 + \Phi_2 \Phi_1 h_1 \cdot t_1 - \Phi_2 u_1 \cdot t_1 \quad (12)$$

$$h_3 = h_2 + u_2' t_2 \quad (13)$$

$$h_3 = h_1 + \left(\frac{h_1}{L} - \Phi_1 h_1 \right) \cdot t_1 + \left\{ \frac{h_1}{L} - \Phi_1 h_1 - \Phi_2 \left[h_1 + \left(\frac{h_1}{L} - \Phi_1 h_1 \right) \cdot t_1 \right] \right\} \cdot t_2 \quad (14)$$

最终得到

$$\frac{h_3}{h_1} = \frac{-L + t_1 - \Phi_1 L t_1}{L} + \frac{(1 - \Phi_1 L - \Phi_2 L - \Phi_2 t_1 + \Phi_1 \Phi_2 L t_1) \cdot t_2}{L} \quad (15)$$

其中,各角度数值大小逆时针为正,顺时针为负。 u_1 、 u_2 分别表示有限远物距 L 时第一组元的物、像方孔径角; u_2 、 u_2' 分别表示第二组元的物、像方孔径角; t_1 、 t_2 分别表示第一组元与第二组元距离以及第二组元与第三组元距离; Φ_1 、 Φ_2 分别表示有限远物距 L 下第一、二组元的光焦度。

2.2 三组元无限远物距参数求解

对物距为无限远的情况进行具体分析,其结构示意图如图3。

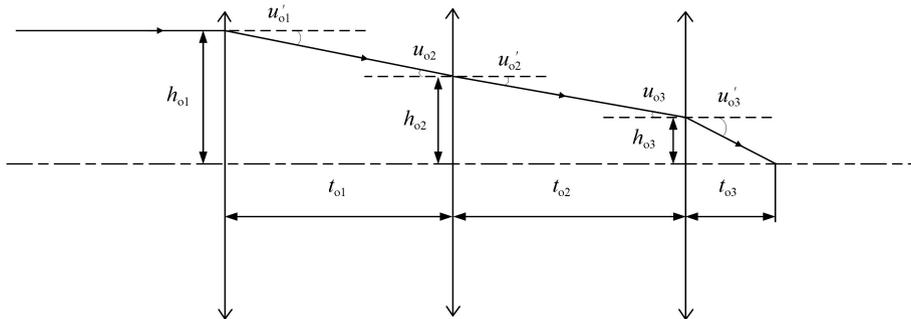


图3 三组元无限物距远结构示意图
Fig.3 Three groups of infinite distance structure

根据式(7)~(12)推理过程可得

$$u_{02}' = -\Phi_1 h_{01} - \Phi_2 h_{01} + \Phi_2 \Phi_1 h_{01} t_{01} \quad (16)$$

$$h_{02} = \frac{-u_{02}' - \Phi_1 h_{01}}{\Phi_2} \quad (17)$$

那么

$$\frac{h_{o2}^2}{h_{o1}^2} = \frac{u'_{o2}}{\Phi_2^2} \frac{1}{h_{o1}^2} + \frac{2u'_{o2}\Phi_1}{\Phi_2\Phi_2 h_{o1}} \frac{1}{h_{o1}^2} + \frac{\Phi_1^2}{\Phi_2^2} \quad (18)$$

化简最终得到

$$\frac{h_{o2}^2}{h_{o1}^2} = (-1 + \Phi_1 t_{o1})^2 \quad (19)$$

同理可以得到

$$\frac{h_{o3}}{h_{o1}} = 1 - \Phi_1 t_{o1} + (-\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_1 \Phi_2 t_{o1}) t_{o2} \quad (20)$$

其中, u'_{o2} 表示物距无限远时第二组元的像方孔径角; t_{o1} 、 t_{o2} 分别代表无限远物距情况下第一组元与第二组元距离以及第二组元与第三组元距离; Φ_1 、 Φ_2 分别是无限远物距下第一、二组元的光焦度。

2.3 内调焦消色差公式推导

将求解出的各参数代入满足内调焦消色差的关系中,可以精确得出内调焦光学系统对色差校正的各组元移动距离。

将式(11)和(19)代入式(6)化简可得

$$\left(1 - \frac{1}{\Phi_1 L}\right) t_1 = t_{o1} \quad (21)$$

式(21)即为无限远物距时透镜组1与透镜组2之间距离 t_{o1} 与有限远物距时透镜组1与透镜组2之间距离 t_1 所需满足的关系式。

将式(15)和(20)代入式(6)化简可得

$$t_{o2} = \left[\frac{1 - \Phi_2(L + t_1) + \Phi_1 L(-1 + \Phi_2 t_1)}{-\Phi_2(L + t_1) + \Phi_1 L(-1 + \Phi_2 t_1)} \right] \cdot t_2 \quad (22)$$

式(22)即为无限远物距时透镜组2与透镜组3之间距离 t_{o2} 与有限远物距 L 时透镜组2与透镜组3之间距离 t_2 所需满足的关系式。

在分别得到 t_1 与 t_{o1} 和 t_2 与 t_{o2} 的关系后,再对 t_3 以及 t_{o3} 进行求解,得到

$$t_{o3} = \frac{1}{\Phi_3} + \frac{1}{\Phi_3} \cdot \frac{1 - \Phi_1 L - \Phi_2 L - \Phi_2 t_{o1} + \Phi_1 \Phi_2 L t_{o1}}{A + B} \quad (23)$$

式中,

$$A = -1 + \Phi_1 L + \Phi_2 L + \Phi_3 L + \Phi_2 t_{o1} + \Phi_3 t_{o1} - \Phi_1 \Phi_2 L t_{o1} - \Phi_1 \Phi_3 L t_{o1} \quad (24)$$

$$B = \Phi_3 t_{o2} - \Phi_1 \Phi_3 L t_{o2} - \Phi_2 \Phi_3 L t_{o2} - \Phi_2 \Phi_3 t_{o1} t_{o2} + \Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 L t_{o1} t_{o2} \quad (25)$$

同理得出

$$t_3 = \frac{1}{\Phi_3} + \frac{1}{\Phi_3} \cdot \frac{-\Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_1 \Phi_2 t_1}{D} \quad (26)$$

式中,

$$D = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_1 \Phi_2 t_1 - \Phi_1 \Phi_3 t_1 - \Phi_2 \Phi_3 t_2 - \Phi_2 \Phi_3 t_1 + \Phi_1 \Phi_2 \Phi_3 t_1 t_2 \quad (27)$$

式中, t_{o3} 表示物距为无限远时透镜组3到像面的距离; t_3 表示物距为 L 时透镜组3到像面的距离;

经过公式推导,掌握了内调焦光学系统消色差需满足条件,并在此基础上得出对系统进行消色差各组元之间距离的关系。通过关系表达式,可以对内调焦光学系统中组元进行定量移动,同时给出具体参数后,也能清楚掌握每组元对内调焦系统的影响程度。这对接下来光学系统实现内调焦设计有了更好的理论基础与保障。

3 实例验证

内调焦宽光谱光学系统的具体参数如表1所示,其工作波段为420~900 nm,覆盖了完整可见光与近红外波段。

表 1 光学系统具体参数
Table 1 Specific parameters of optical system

Parameter	Numerical value
Focal length f'	90mm
F number	2.8
Pixel	$3.45 \mu\text{m}$
Band range	420~900 nm
Object distance	0.2~200 km

首先,设计的光学系统结构形式是由具有正光焦度的三组元组成,物距为 200 m 和 200 km 时其简易结构示意图如图 4 所示.

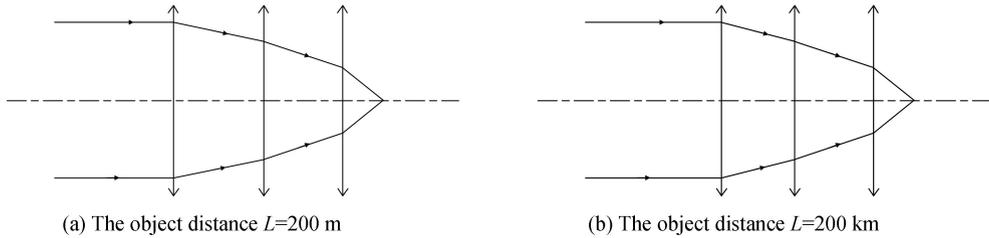


图 4 初始结构简易图
Fig.4 Simple diagram of initial structure

图 5~9 为各个组元焦距变化对系统内调焦过程中组元之间距离变化量的影响. f'_1 、 f'_2 、 f'_3 分别代表第一、二、三组元的焦距; dt_1 、 dt_2 、 dt_3 分别表示第一、二、三组元在内调焦过程中的移动量.从图 5~7 发现随着 f'_1 增大 dt_1 的绝对值随之增大,同时 f'_1 与 dt_2 和 dt_3 分别呈反比与正比关系.

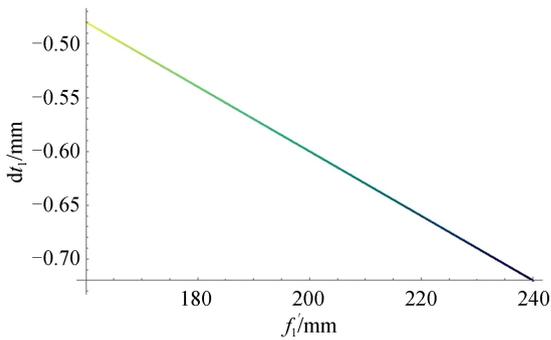


图 5 f'_1 与 dt_1 之间的关系
Fig.5 The relationship between f'_1 and dt_1

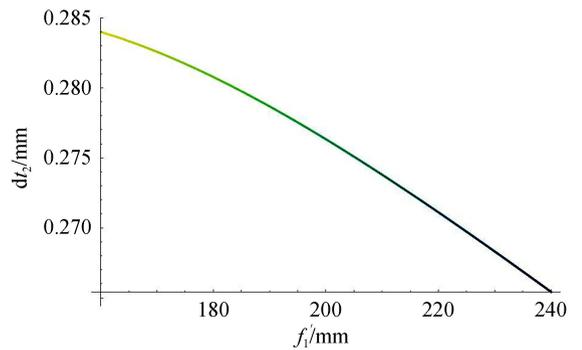


图 6 f'_1 与 dt_2 之间的关系
Fig.6 The relationship between f'_1 and dt_2

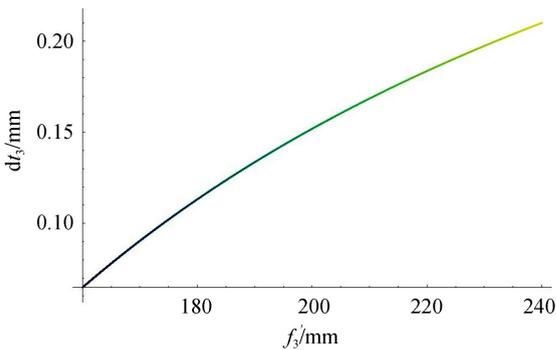


图 7 f'_1 与 dt_3 之间的关系
Fig.7 The relationship between f'_1 and dt_3

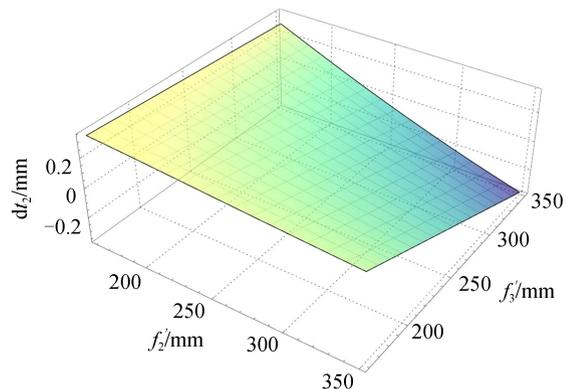


图 8 f'_2 、 f'_3 与 dt_2 之间的关系
Fig.8 The relationship between f'_2 、 f'_3 and dt_2

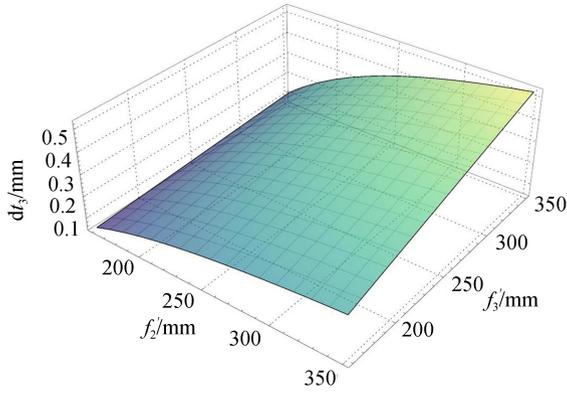


图9 f'_2 、 f'_3 与 dt_3 之间的关系
Fig.9 The relationship between f'_2 、 f'_3 and dt_3

在实际设计内调焦光学系统时,尽量移动少量组元,这样有利于后续的装调,并且也能减少误差.本文主要考虑移动第一组元,即满足少量移动组元的要求,又对距离参数变化有更好的控制.在系统具体设计过程中合理地每组元光焦度进行分配,尽可能保证内调焦过程 dt_1 的变化数值比较大, dt_2 、 dt_3 的变化数值比较小.在内调焦过程中只移动 t_1 的距离,而忽略 t_2 、 t_3 的移动,并且实现系统色差的变化不大.这样既满足具体参数要求,同时也能很好地控制像质.

对 dt_2 与 dt_3 进行分析. dt_2 随着 f'_2 、 f'_3 的增加逐渐变小; dt_3 则随着 f'_2 、 f'_3 的增加逐渐变大.但是可以看到 f'_3 对 dt_3 的影响并不大,所以控制一个比较小的 f'_2 数值来实现一个比较小的 dt_3 . f'_2 数值的减少对 dt_2 的数值变化不利,所以这里采用增大 f'_3 数值方式对 dt_2 的数值进行控制.进而得到一个比较小的 dt_2 与 dt_3 数值,同时合理控制 f'_1 的数值.

结合以上分析,给出第一、二、三组元的焦距见表 2.

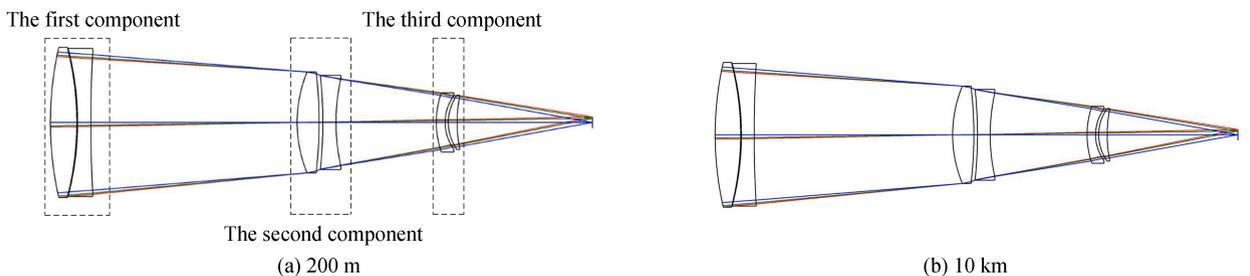
表 2 各组元焦距分配

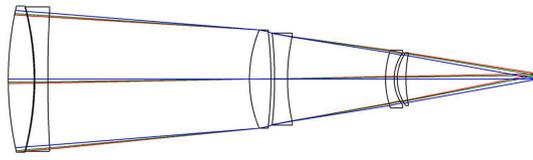
Table 2 Focallength distribution of each component

Component	Focal length
The first component	200 mm
The second component	175 mm
The third component	340 mm

在初始结构确定之后,对该光学系统进行具体设计分析.设计采取三组元结构形式,每组元都由两块单透镜组成.在整体结构形式确定后,基于消色差基本理论,选取合理玻璃材料,本文设计选取 H-ZPK5、TF3、H-LAK12 和 H-LAK61 四种玻璃材料,利用 H-ZPK5 材料的特殊色散特性与其余三种玻璃材料合理搭配,各个玻璃的相对色散相差不大而阿贝常数之差却较大,能很好地对系统中存在的色差进行校正.并且对每组元透镜进行合理光焦度分配,在不同物距的情况下,对系统进行内调焦设计,给定不同情况下每组元透镜之间的距离.根据式(21)~(27),以物距为 200 m 为例,根据公式算出系统初始结构的第一组元、第二组元以及第三组元的移动量分别为 0.071 2 mm、0.017 8 mm、0.017 8 mm.

当物距由 20 m 到 200 km 范围变化时,其结构示意图如图 10 所示.





(c) 200 km

图 10 不同物距的系统结构示意图

Fig.10 Schematic diagram of system structure with different object distances

对该系统进行整体分析,其像质如图 11~13 所示.

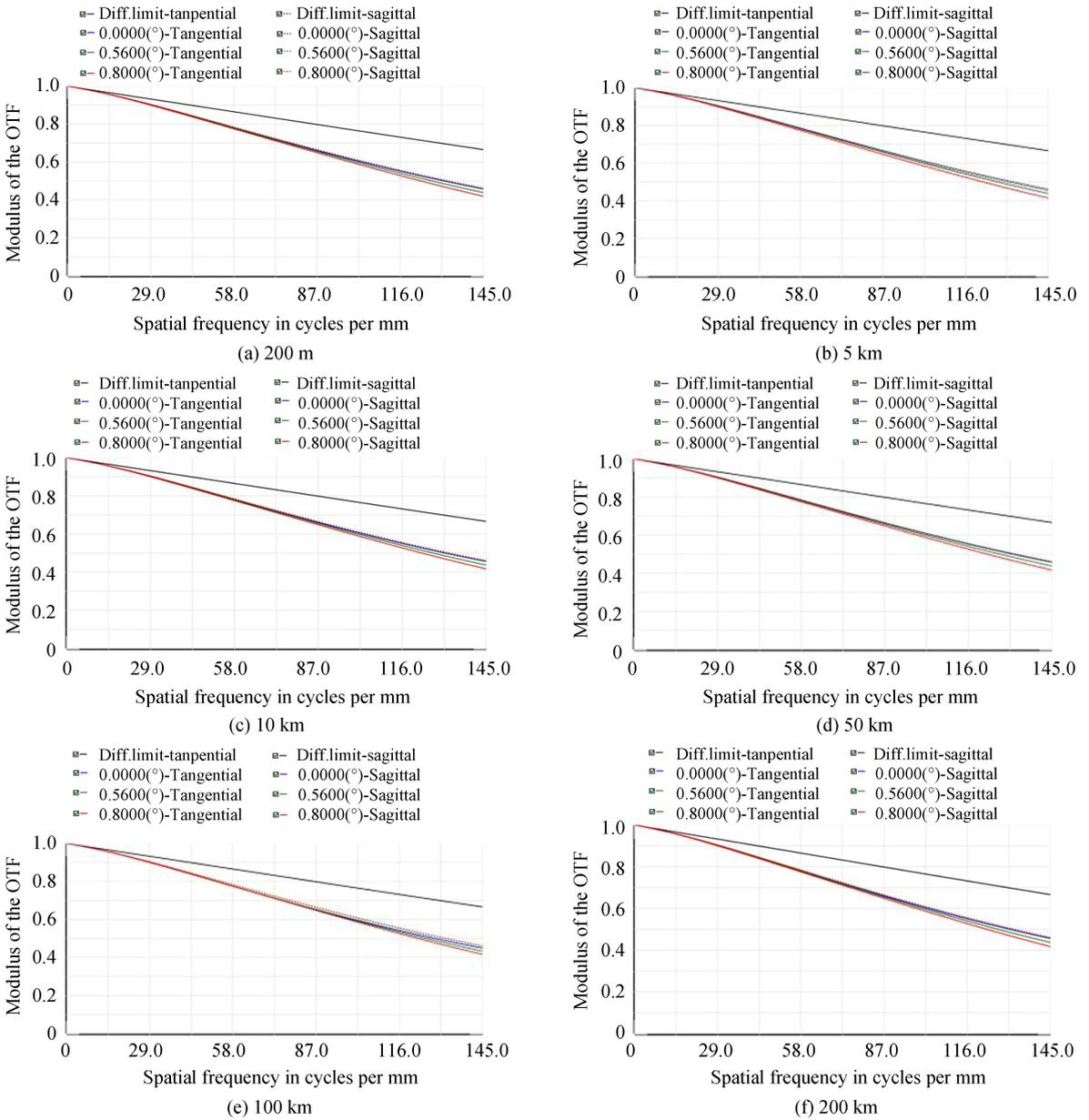


图 11 不同物距的系统 MTF

Fig.11 The system MTF with different object distances

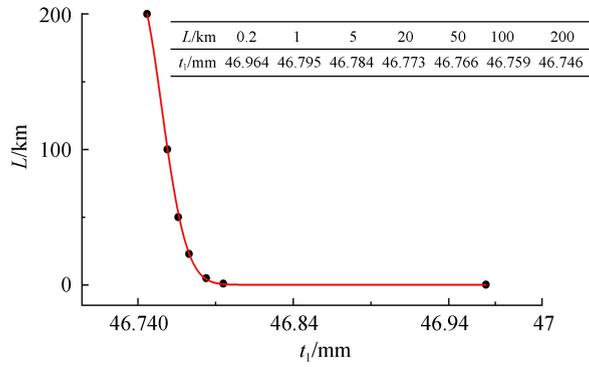


图 12 物距与第一组元位置关系

Fig.12 Diagram of object distance and position of the first component

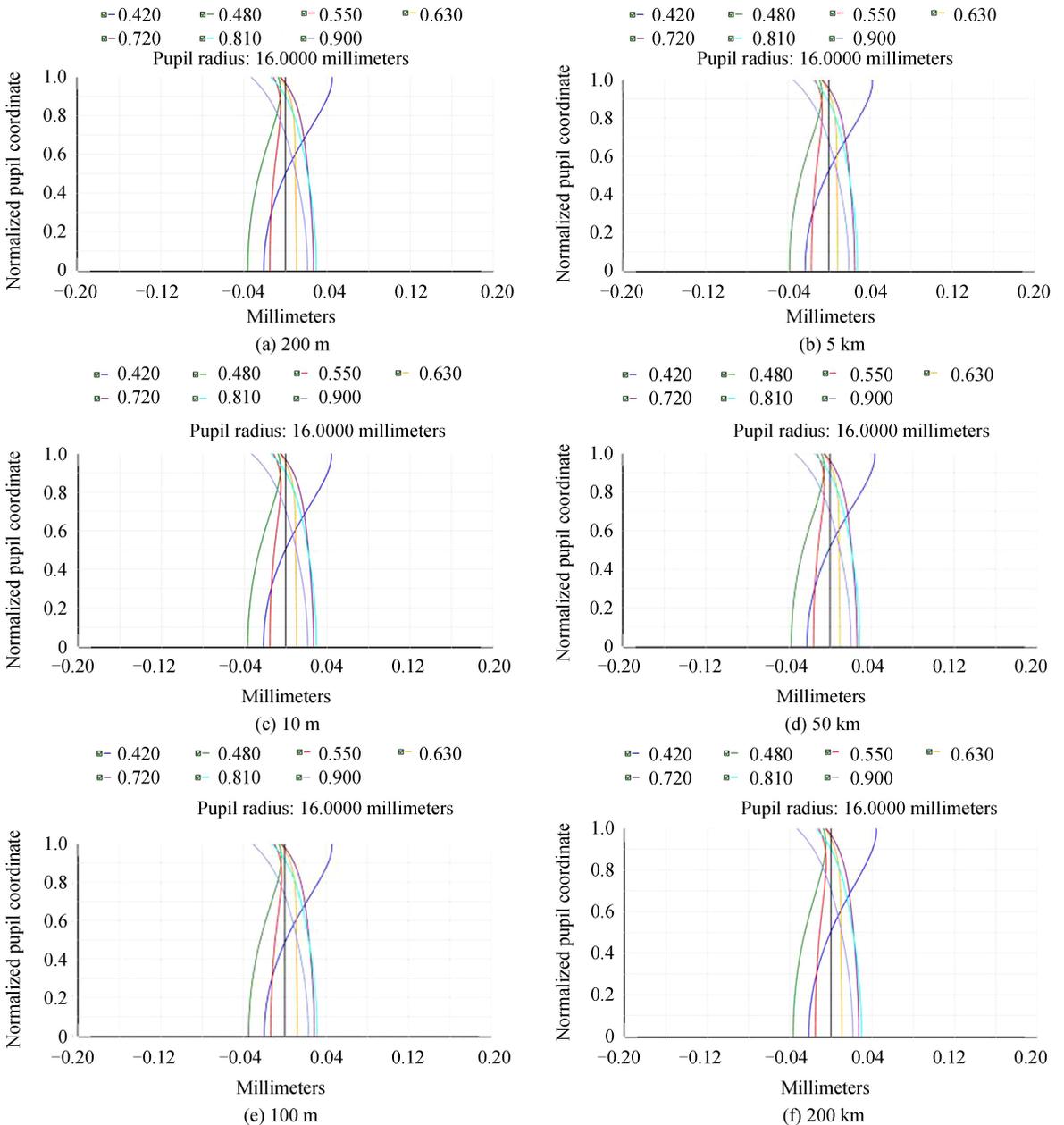


图 13 不同物距的色球差

Fig.13 Chromated spherical aberration with different object distances

图 11 为调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线, 可以看出光学系统在奈奎塞特频率, 即 $N_r = \frac{1}{2 \text{ pixel}} = 145 \text{ lp/mm}$ 处, 全视场内的 $\text{MTF} > 0.4$, 满足成像质量要求. 图 12 中 L 表示物距, t_1 表示第一组元到第二组元的距离. 从图中可以看出, 物距从 200 m 到 1 km 相对于 1 km 到 200 km 过程中第一组元的移动比较明显, 但总体来说, 在物距变化中, 第一组元的移动量数值都很小. 图 13 色球差曲线中, 光学系统的位置色差和二级光谱得到了良好的校正, 从图 13(a)、(b)、(c)、(e) 和 (f) 得到在 0.707 孔径处的位置色差分别为 0.020 3 mm、0.020 8 mm、0.019 9 mm、0.020 6 mm、0.020 4 mm、0.021 2 mm, 其二级光谱分别为 0.013 7 mm、0.013 5 mm、0.013 5 mm、0.013 6 mm、0.013 7 mm、0.013 8 mm. 对于校正二级光谱的物镜其大小应小于一倍焦深^[15], 其中系统焦深大小为 0.361 mm, 可得系统的二级光谱在一倍焦深内, 球差小于 2 倍焦深. 同时可见, 在物距变化后色差几乎保持不变, 整体设计像质良好, 满足设计要求.

从像质评价图发现在物距变化后, 根据推导公式给出的距离关系, 对第一组元透镜沿光轴进行对应数值移动后, 系统像质的各项指标都没有出现明显变化. 同时, 像质也都满足成像要求, 对上文的公式推导也有了更好的验证.

4 结论

本文基于初级色差理论, 提出了内调焦宽光谱光学系统的设计方法, 并对内调焦光学系统消色差公式进行推导与验证. 以焦距 90 mm, 波段范围为 420 ~ 900 nm, 物距为 0.2 ~ 200 km 的光学系统为例, 对其进行合理选材以及光焦度的合理分配, 光学系统色差在物距变化后几乎不发生改变, 其设计结果满足成像要求. 验证了内调焦宽光谱光学系统数学模型与推导公式的正确性.

参考文献

- [1] HUANG Lei, HU Wen-wen, YANG Zhi-wen. Optical design of wide bands and long focal length collimating lens[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(S2): 125-127.
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**(S2): 125-127.
- [2] FAN Zhe-yuan, YANG Hong-tao, QU En-shi, et al. Design of long-wave infrared scan system with large field and large aperture[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(10): 2740-2744.
范哲源, 杨洪涛, 屈恩世, 等. 大视场大相对孔径长波红外扫描光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(10): 2740-2744.
- [3] QU Rui, DENG Jian, PENG Xiao-le, et al. 0.4 ~ 1.7 μm wideband fast f-number optical system design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(8): 0822007.
曲锐, 邓健, 彭晓乐, 等. 0.4 ~ 1.7 μm 宽波段大相对孔径光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, **35**(8): 0822007.
- [4] GUI Li, DING Xue-zhuan, ZHAO Hang-bin, et al. Design of apochromatic objective for visible and near infrared hyperspectral imager[J]. *Laser and Infrared*, 2018, **48**(3): 384-388.
桂立, 丁学专, 赵航斌, 等. 可见近红外宽波段复消色差高光谱物镜设计[J]. *激光与红外*, 2018, **48**(3): 384-388.
- [5] LIU Juan-juan, GUO Bang-hui, WU Hong-sheng, et al. Design of 300 ~ 1100 nm board-waveband optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1766-1769.
刘娟娟, 郭帮辉, 吴宏圣, 等. 300 ~ 1100 nm 宽波段光学系统设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1766-1769.
- [6] LI Xiao-yan, ZHONG Bo-liang. Optical design of telephoto lens with inner focusing[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(4): 299-301.
李晓艳, 钟伯亮. 内调焦望远镜头的光学设计[J]. *光子技术*, 2002, **28**(4): 299-301.
- [7] YE Hai-shui, GAO Zhi-shan, LUO Ting. Optical configuration of fundus camera based on inner focusing manner[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(7): 689-692.
- [8] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [9] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1976.
- [10] RAMSEY J, UNGER B L. Design of multiband optics using updated athermal/achromatic glass map[C]. SPIE, 2017, 2017, 10181: 1018103.
- [11] BAI Qing-lan. Apochromatized design of teleobjective in short wave infrared band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 115-119.
白清兰. 复消色差的短波红外望远物镜设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 115-119.
- [12] REN D Q, JEREMY SMITH J R. Apochromatic lenses for near-infrared astronomical instruments [J]. *Optical Engineering*, 1999, **38**(3): 537-541.
- [13] LIU Jun, ZUO Xiao-zhou, WU Xiao-ming, et al. Design of inner focusing object lens in HUD parallax surveymeter

based on multi configuration[J]. *Applied Optics*, 2010, **31**(1):25-28.

刘钧,左晓舟,吴晓鸣,等.基于多重结构的平显视差仪中内调焦物镜设计[J].应用光学,2010, **31**(1):25-28.

- [14] VLI Xi-jie, LIU Jun, CHEN Yang. Design of dual-band, high zoom ratio and continuous co-focal optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(10):1022003.

李西杰,刘钧,陈阳.双波段大变倍比连续共变焦光学系统设计[J].光子学报,2016, **45**(10):1022003.

- [15] GREISUKH G I, EZHOV E G, LEVIN I A, *et al.* Design of achromatic and apochromatic plastic micro-objectives[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(23):4379-4384.