

引用格式: CHEN Taixi, WU Yanxiong. Design and Alignment of Airborne Compact Long Focal Length Optical System [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11):1111002

陈太喜, 伍雁雄. 航空机载紧凑型长焦距光学系统设计与装调[J]. 光子学报, 2021, 50(11):1111002

航空机载紧凑型长焦距光学系统设计与装调

陈太喜¹, 伍雁雄²

(1 季华实验室, 广东 佛山 528000)

(2 佛山科学技术学院 物理与光电工程学院, 广东 佛山 528000)

摘 要: 针对航空机载平台对长焦距、紧凑型光学系统的需求, 研究采用改进型的 R-C 主次反射镜接球面校正透镜组的结构形式, 校正了全视场下的球差、彗差及色差等像差, 设计了长焦距、高分辨率的紧凑型折反射式光学系统。系统焦距为 1 500 mm, 全视场角为 2°, 光学系统结构包络直径不大于 $\varphi 400$ mm, 全视场传递函数优于 0.56 @62.5 lp/mm, 成像质量接近衍射极限。为提高装调效率, 降低装调难度, 设计实现了 R-C 主次反射镜中心及附近视场的成像质量达到衍射极限。基于光学干涉检测技术与计算机辅助装调理论, 建立系统失调量与像差之间映射关系的灵敏度矩阵, 分析失调光学系统的像差特性, 并在此基础上设计了精确测量波前、反演失调量的精密光学装调方案。整机装调后光学系统全视场波像差 RMS 优于 $1/13\lambda$, 达到成像质量要求。

关键词: 光学设计; 折反射; 长焦距; 航空机载; 计算机辅助装调

中图分类号: TH74

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215011.1111002

Design and Alignment of Airborne Compact Long Focal Length Optical System

CHEN Taixi¹, WU Yanxiong²

(1 Ji Hua Laboratory, Foshan, Guangdong 528000, China)

(2 School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract: According to the requirement of long focal length and compact optical system for airborne platform, a catadioptric system with long focal length and high resolution is designed by using an improved R-C mirrors and a spherical correction lens to correct spherical aberration, coma and chromatic aberration in full field. This system has a focal length of 1 500 mm and field of 2°. The envelopment diameter of the optical system is no more than $\varphi 400$ mm, the Modulation Transfer Function is better than 0.56 @62.5 lp/mm, and the imaging quality is approaching to diffraction limit. In order to improve efficiency and reduce the difficulty of alignment, the imaging quality of the central and adjacent field of the R-C primary and secondary mirror is controlled to diffraction limit. The sensitivity matrix of the mapping relationship between the misalignment and primary aberration is established by means of interferometer detection and computer-aided alignment. The aberration characteristics of the misalignment optical system are analyzed. The optical precise alignment scheme of wavefront accurate measurement and inversion of the misalignment is proposed. After alignment, the RMS value of the whole system is better than $1/13\lambda$, achieving the imaging quality requirements.

Key words: Optical design; Catadioptric; Long focal length; Airborne; Computer-aided alignment

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61771139), 广东省科技计划(No. X190311UZ190).

第一作者: 陈太喜(1983—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光学设计和光学系统装调、检测技术。Email: chentx@jihualab.com

通讯作者: 伍雁雄(1982—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学系统设计和光学仪器研制。Email: 364477424@qq.com

收稿日期: 2021-05-13; 录用日期: 2021-06-29

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

OCIS Codes: 110.4850; 220.4830; 220.1140; 220.4840

0 引言

机载光电成像是获取地面目标信息的重要手段之一,广泛应用于航空侦查、安防监控、航空测绘等领域。近年来,航空机载相机多为高空斜视,航拍高度达到万米以上,其光学系统需具有高分辨率成像的特点^[1-2]。然而,高分辨率、远距离成像的光学系统则要求大口径和长焦距,随着光学系统口径和焦距的增大,几何像差和相机的体积、质量也在急剧增加。目前,光学系统的结构形式主要有折射式、反射式以及折反射式三种。大口径、长焦距光学系统很少采用全折射式,其主要原因是口径增大,则透镜的重量增大,易变形,难以保证质量,且系统难以完全消除色差^[3]。全反射式系统无需考虑色差,可以通过一次成像或二次成像的离轴结构实现长焦距,但在体积和质量方面不易控制,加工、装调、检测难度都较大,不利于高性价比商业相机的批量生产^[4]。从减少体积和质量,以及设计、装调难度出发,选择大口径反射镜与小口径的透镜组相结合的折反射式光学系统可以很好解决这些问题^[5-6]。

国外对于航空机载相机的研究起步较早,如Goodrich公司的DB-110相机^[7]和ROI公司的CA-295相机^[8]都是当前先进的长焦距、远距离成像相机的代表,其光学系统均采用折反射式结构。国内许多学者也对长焦距、高分辨率成像系统展开了研究。吕博等^[9]设计了一款折反射式空间相机光学系统设计与杂散光抑制,系统焦距为750 mm,系统包络尺寸为 $\phi 95\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 。沈志娟等^[10]设计了一款大相对孔径长焦距同轴折反射式望远物镜,系统焦距为900 mm,系统总长为495 mm。奚小东等^[11]设计了一款基于自由曲面的大口径长焦距机载紫外成像光学系统,系统焦距为1 000 mm,系统总长为499 mm。

尽管折反射式光学系统的设计、加工和检测装调的技术已趋于成熟,但在工程应用中,这些技术尤其是装调检测部分过于依赖操作人员的个人经验,在面对批量生产中产品的稳定性和一致性要求时,极为不利。

针对上述问题,本文采用Ritchey-Cretien(R-C)主次镜系统与校正透镜组相结合的折反射式光学系统结构形式,设计了航空机载紧凑型长焦距成像光学系统。在分析该光学系统像差理论上,基于光学干涉检测技术以及计算机辅助装调方法,对系统的装调方法进行研究,形成了此类系统的光学精密装调方案,有利于应对批量生产时产品一致性与高效率的要求。

1 光学系统设计

1.1 设计参数及初始结构分析

航空侦察机飞行高度取18 000 m,光学相机的地面分辨率需求为0.1 m,计算得到该航空机载平台的光学系统主要参数如表1。

表1 光学系统设计指标
Table 1 Targets of optical system design

Parameters	Targets
Focal length /mm	1 500
Field of view / (°)	≥ 2
Entrance pupil diameter /mm	$\geq \phi 290$
Waveband/nm	400~700
Modulation transfer function	$> 0.4 @ 62.5\text{ lp/mm}$
Detector pixel size/ μm	8

为了实现高分辨率成像,航空机载光学系统的焦距需达到米级以上,由于机载平台空间尺寸有限,长焦距下实现光学系统轻小型化是航空机载光学系统结构选型设计时需要考虑的重要指标。R-C折反射光学系统以其结构尺寸小、质量轻、大口径等优势成为主要选择。此外,为了降低装调难度,提高装调效率,R-C主次镜系统的轴上及附近视场实现零球差、零彗差设计。即 $S_I = S_{II} = 0$ 时,则主次反射镜二次曲面系数为^[12-13]

$$e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2} \quad (1)$$

$$e_2^2 = \frac{\frac{2\beta}{(1-\alpha)} + (1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3} \quad (2)$$

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{(1+\beta)} R_1 \quad (3)$$

$$d = f_1 \cdot (1-\alpha) / \beta \quad (4)$$

式中, e_1^2 、 e_2^2 分别为主镜、次镜的偏心率平方, f_1 为 R-C 系统焦距, 初步确定中心线遮拦比 α 为 0.34, 次镜放大倍率 β 为 -5.2, 由式(1)、(2) 计算得出主镜与次镜的二次曲面系数 e_1^2 、 e_2^2 分别为 1.038 1、2.391 8。为了获得更小体积尺寸的光学系统, 并考虑工程上的可实现性, 确定主镜焦比为 1.01, 主镜的顶点半径 R_1 为 -585。根据高斯光学和两镜消像差理论公式(3)、(4) 计算次镜的顶点半径 R_2 为 -246 mm, 主镜与次镜之间的间隔 d 为 190 mm。以此作为初始双反射镜结构, 如图 1。

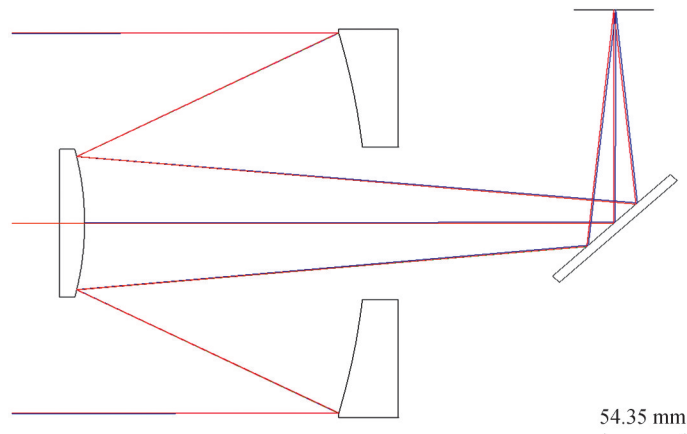


图 1 改进的 R-C 系统初始结构

Fig.1 Initial structure of improved R-C system

由于 R-C 系统的轴外视场存在较大的像散和彗差, 场曲较大, 需要在次镜之后设置一组透镜作为校正组, 以扩大光学系统的视场。R-C 主次镜承担光学系统的主要光焦度, 透镜组通过不同玻璃材料的组合及弯曲, 校正轴外倍率色差以及反射镜组残余较大的像散、彗差, 并通过正负光焦度的分离及靠近像面的场镜透镜, 校正较大视场下的场曲像差, 获得平场像面。此外, 由于反射镜组校正了轴上球差, 透镜组还需要校正自身引起的轴向色差, 避免引入零视场下不同波长在像面上的位置差异。校正组透镜元件数量较少时, 系统的倍率色差和畸变将很难校正。如果透镜元件数量增多, 光学系统透过率将会降低, 相应的加工装调误差也会使光学成像质量下降。经设计实践, 最终校正组采用 3 块透镜的结构形式, 在与 R-C 主次镜一同优化的过程中控制主光线的位置、垂轴像差等值, 在畸变满足设计要求的前提下, 使得可见弥散斑大部分能量集中在艾里斑范围内。设计优化得到的主要结构参数如表 2, 折反射式系统光路如图 2。最终设计的光学系统焦距为 1 500 mm, 系统总长为 400 mm。

光学系统为了实现紧凑型布局, 需要压缩主次镜间隔, 造成主镜焦比小以及次镜倍率大, 进而导致装调公差较为敏感, 难度变大。为降低装调难度, 在引入校正透镜组进行补偿 R-C 主次镜轴外视场像差的同时, 设计控制主次镜中心及附近视场的像质在衍射极限之内。在装调阶段可以先将主次镜预先装配好, 降低整个系统在引入折转反射镜以及透镜组后再进行装调的复杂性及难度。

表2 光学系统结构参数
Table 2 Structure parameters of optical system

No.	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	Conic coefficient k
OBJ	∞	∞		
STO	-585.072	-191.748	MIRROR	-1.062 0
3	-249.189	359.521	MIRROR	-2.508 5
4	∞	-89.042	MIRROR	
5	-181.179	-18.588	HLAK7A	
6	-430.661	-29.129		
7	354.851	-7.00	HLAF4	
8	-855.707	-5.290 1		
9	91.688	-5.937	HFK61	
10	-793.753	-3.676		
IMA	∞	-11.323		

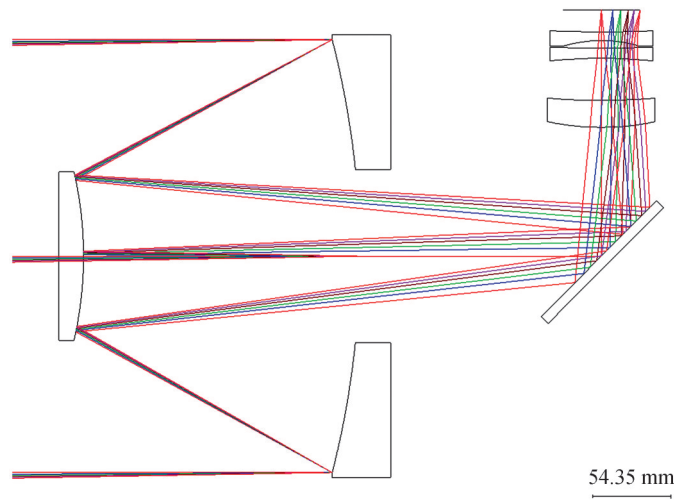
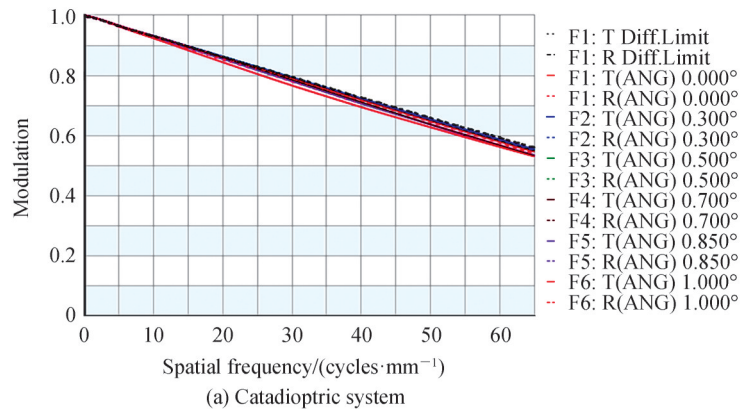


图2 折反射式系统光路
Fig.2 Optical path of catadioptric system

1.2 像质评价

光学系统的光学传递函数设计结果如图3(a),全视场范围内的MTF设计值在奈奎斯特频率62.5 lp/mm处平均值优于0.56,成像质量接近衍射极限,满足设计指标要求。系统的出射波前误差RMS如图4(a),以干涉仪工作波长计算,波前误差RMS最大值为0.028 7 λ ,标准差小于0.003 λ ,表明全视场下像差得到了较好的校正。



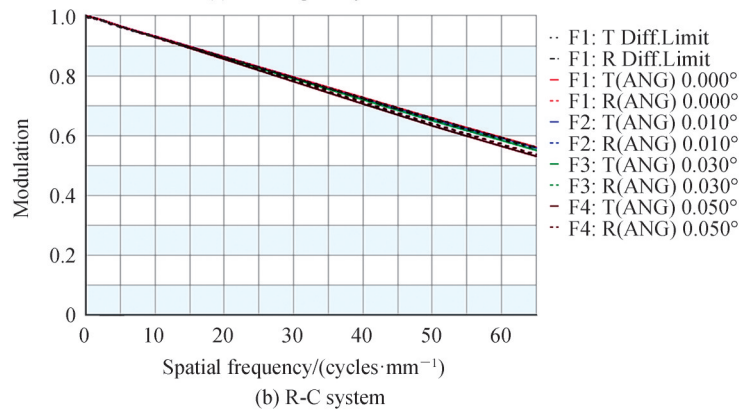


图3 光学传递函数设计结果
Fig.3 MTF design results

R-C 主次镜系统的光学传递函数如图 3(b), 中心及近视场的 MTF 设计值在奈奎斯特频率 62.5 lp/mm 处平均值优于 0.58。波前误差 RMS 如图 4(b), 以干涉仪工作波长计算, 出射波前 RMS 最大值为 0.036 4λ。这样的设计结果为之后的装调过程中带来明显的优势, 可以通过多个视场的波像差判断系统装调的准确性, 避免以单一视场的波像差作为判断依据而导致系统轴外视场波像差的失调。

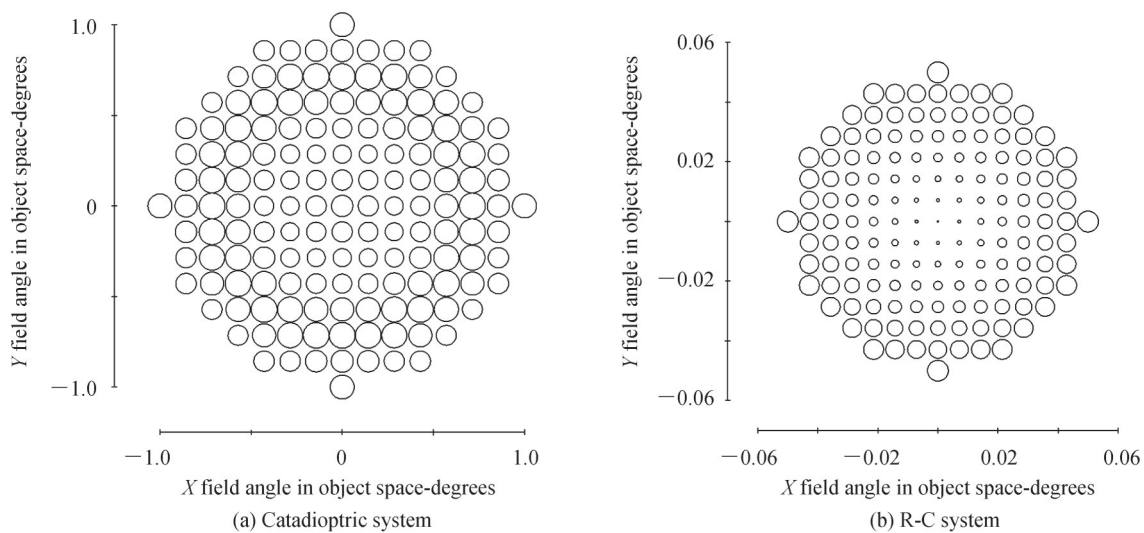


图4 RMS 波前误差设计结果
Fig.4 RMS wavefront error design results

2 光学系统装调分析

为了实现光学系统的紧凑轻小型化设计, 主镜焦比达到了 1.01, 不仅增大了主镜的相对孔径, 还使得主镜装调公差比较敏感。此外, 为进一步缩短光学系统长度, 次镜的倍率达到 $\beta = -5.2$, 使得次镜的倾斜、偏心等参数变化对像质的影响更加敏感, 增大了光学装调的难度。为了降低装调的难度, 实现装调过程中的可操作性, 整个光学系统的装调拆分为 R-C 主次镜系统的装调、校正镜组装调和整机联调三个模块。校正透镜组采用定心装配方案, 透镜组定心装配工艺比较成熟, 难度相对较低, 因此文中对校正透镜组模块的装调不作细节讨论。

计算机辅助装调从数学模型上讲是把系统像差作为光学元件位置失调量的函数, 找出失调量和它们引入的像差之间的关系, 并根据像差的变化确定失调量。把波前像差分解成 Zernike 多项式, Zernike 多项式系数构成了波像差失调量, 可以近似地用下列方程组来表示

$$A_{zi} X_i + H = Z_i \tag{5}$$

$$\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} x_{i1} - x_{i01} \\ \vdots \\ x_{in} - x_{i0n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_{i1} \\ \vdots \\ \Delta x_{in} \end{bmatrix}, \mathbf{Z}_i = \begin{bmatrix} z_{i1} - z_{i01} \\ \vdots \\ z_{im} - z_{i0m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta z_{i1} \\ \vdots \\ \Delta z_{im} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{z_i} = \begin{bmatrix} \frac{\delta z_{i1}}{\delta x_{i1}} & \cdots & \frac{\delta z_{i1}}{\delta x_{in}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\delta z_{im}}{\delta x_{i1}} & \cdots & \frac{\delta z_{im}}{\delta x_{in}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, \mathbf{X}_i 为光学元件位置失调量, \mathbf{A}_{z_i} 为灵敏度矩阵, \mathbf{Z}_i 为实际波前分解的 zernike 多项式和设计值的差值, \mathbf{H} 为噪声, 包含光学元件加工面形残余误差、环境扰动误差以及检测误差等。

光学系统失调量所带来的主要影响表现为初级像差。高级像差的变化与初级像差相比较小, 因此装调时把初级像差作为校正对象, 装调过程中只控制初级球差、彗差和像散^[14-15]。从公差分析看, 主镜的倾斜与偏心等参数变化对像差的影响最为敏感, 作为系统装调基准, 固定不动。折叠镜无光焦度, 当镜面形误差符合设计要求时, 它的位置姿态对像差没有贡献, 但会直接影响后接校正透镜组的位置, 需要通过高精度光电经纬仪按设计值标定装调。综上, 失调 R-C 主次镜系统有 5 个有效的自由度需要校正, 即次镜沿 x 、 y 、 z 轴的偏心和绕 x 、 y 的转动, 用向量表示为 $\mathbf{m} = [\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1, \Delta \alpha_1, \Delta \beta_1]$; 整机联调有 5 个有效的自由度需要校正, 即校正镜组沿 x 、 y 、 z 轴的偏心和绕 x 、 y 的转动, 用向量表示为 $\mathbf{n} = [\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2, \Delta \alpha_2, \Delta \beta_2]$ 。利用光学设计软件可以方便地分析失调次镜、校正透镜组的像差特性, 分析过程中人为对次镜、校正镜组施加失调量(如表 3), 建立各失调量与光学初级像差的灵敏度矩阵 \mathbf{A} , 如表 4 所示。

表 3 各自由度的失调量
Table 3 Maladjustment of each degree

$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	$\Delta z/\text{mm}$	$\Delta \alpha/(\circ)$	$\Delta \beta/(\circ)$
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

表 4 灵敏度矩阵
Table 4 Sensitivity matrix

Aberration	Secondary mirror					Aberration	Third mirror				
	Δx_1	Δy_1	Δz_1	$\Delta \alpha_1$	$\Delta \beta_1$		Δx_2	Δy_2	Δz_2	$\Delta \alpha_2$	$\Delta \beta_2$
(0,0) Z_5	-0.007	0.007	0	0.047	-0.047	(0,0) Z_5	0	0	0	0	0
Z_6	0	0	0	0	0	Z_6	0	0	0	0	0
Z_7	-1.529	0	0	0	-2.444	Z_7	0.009	0	0	0	0.018
Z_8	0	-1.529	0	2.444	0	Z_8	0	0.009	0	-0.018	0
Z_9	0	0	0.196	0	0	Z_9	0	0	-0.000 8	0	0
(0,-0.05) Z_5	-0.007	0.015 1	0	-0.01	-0.048	(0,-1) Z_5	0	0.045	0	0.015	0
Z_6	-0.008	0	0	0	-0.057	Z_6	-0.044	0	0	0	0.015
Z_7	-1.529	0	0	0	-2.447	Z_7	0.009	0	0	0	0.018
Z_8	0	-1.529	0	2.444	0	Z_8	0	0.01	0	-0.018	0
Z_9	0	0	0.196	0	0	Z_9	0	0	-0.008	0	0
(0,+0.05) Z_5	-0.007	-0.001	0	0.109	-0.048	(0,+1) Z_5	0	-0.045	0	-0.013	0
Z_6	0.008	0	0	0	0.057	Z_6	0.044	0	0	0	-0.015
Z_7	-1.529	0	0	0	-2.44	Z_7	0.009	0	0	0	0.018
Z_8	0	-1.529	0	2.444	0	Z_8	0	0.01	0	-0.018	0
Z_9	0	0	0.196	0	0	Z_9	0	0	-0.008	0	0

对以上灵敏度矩阵分析可以得到 R-C 主次镜系统的失调像差特性如下:

1) R-C 主次镜系统是否正确装调, 决定了后续整机联调时轴外视场的波像差是否能精调到设计要求。

2) R-C 主次镜系统的装调, 轴上视场像质可通过偏心量 Δx_1 、 Δy_1 的调整达到较好像质, 这时, 不代表主镜、次镜处于共轴状态。事实上, 由次镜的偏心产生的彗差和次镜倾斜产生的彗差在满足某种条件下能够相互补偿。因此, 装调时必须检测轴外对称视场, 进行整体分析判断系统是否处于共轴状态。为了提高装

调效率,R-C系统设计中心视场、 $\pm 0.05^\circ$ 视场的像质在衍射极限之内,装调过程中可利用这三个视场判断装调结果的正确性。

3)系统球差主要由主次镜间隔的失调引起,装调过程中可利用 Zernike 系数球差项 Z_0 解算主次镜间隔的失调量。

4)校正透镜组和次镜的间隔在一定范围内不会影响系统的波像差,因此,在系统初装调时可按机械基准定位透镜组和次镜的间隔。

3 实际装调测试

根据以上折反射式光学系统的失调像差特性,确定该光学系统的装调步骤。

3.1 装调基准的建立

R-C 主次镜系统的装调以主镜为基准,即固定主镜不动,调整次镜的位置姿态,故先标定主镜的光轴作为系统中心视场波像差的检测基准。在光学加工过程中,主镜光轴以主镜检测所用的补偿器光轴为基准,即补偿器光轴和主镜光轴重合,因此系统光轴可以通过补偿器引入。

对于单个反射镜来讲,只有轴上视场具有完善像质,通过调整补偿器和主镜的位置姿态,使检测主镜面形精度的波像差最小,彗差为 0,这时,认为主镜光轴和主镜补偿器光轴重合,检测光路如图 5(a)。主镜补偿器前端面的平板玻璃代表补偿器光轴。撤开 Zygo 激光干涉仪,利用 TM6100A 经纬仪(测量精度 $0.5''$)标定补偿器平板玻璃,修研工装平面镜,使二者相互平行。在之后的光学系统装调中,始终以工装平面镜为基准标定各个视场的位置,如图 5(b)所示。

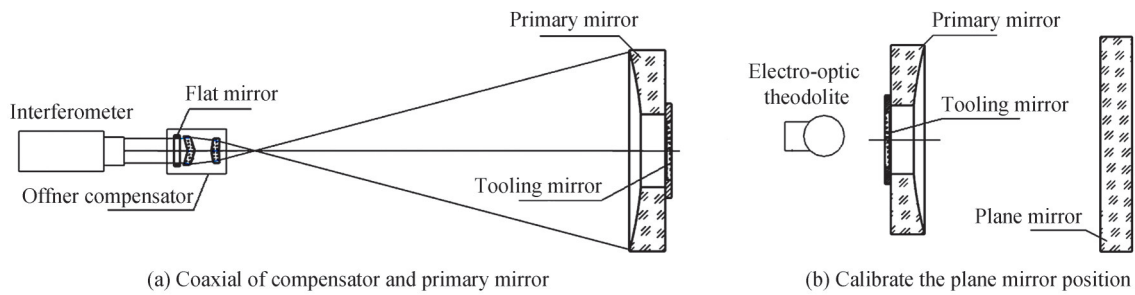


图 5 建立装调基准

Fig.5 Introduce optical system axis

3.2 失调量调整

系统光轴引入之后,对 R-C 主次镜光学系统进行联调,联调光路的搭建如图 6。

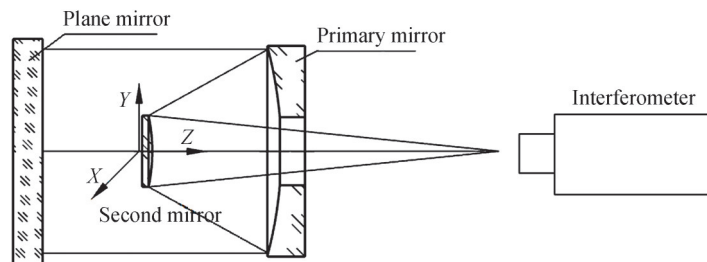


图 6 R-C 系统装调光路

Fig.6 Alignment optical path of R-C system

利用工装平面镜通过光电经纬仪确定主镜和标准平面反射镜的位置关系,确定中心视场,调整次镜,使用 Zygo 激光干涉仪检测中心视场波像差,根据 Zernike 系数球差项 Z_0 的检测结果调整主次镜间隔,以球差项 Z_0 在设计公差范围之内确定主次镜间隔。调整次镜的平移偏心量,使得中心视场彗差为 0,检测中心视场和对称 $\pm 0.05^\circ$ 视场波像差,检测结果如图 7。利用 Zernike 多项式进行波面拟合,得到 Zernike 系数如表 5。结果显示 R-C 系统中心视场波像差为完善像质,但轴外视场波像差仍存在倾斜,表明这时的主次镜并不处于

共轴状态。

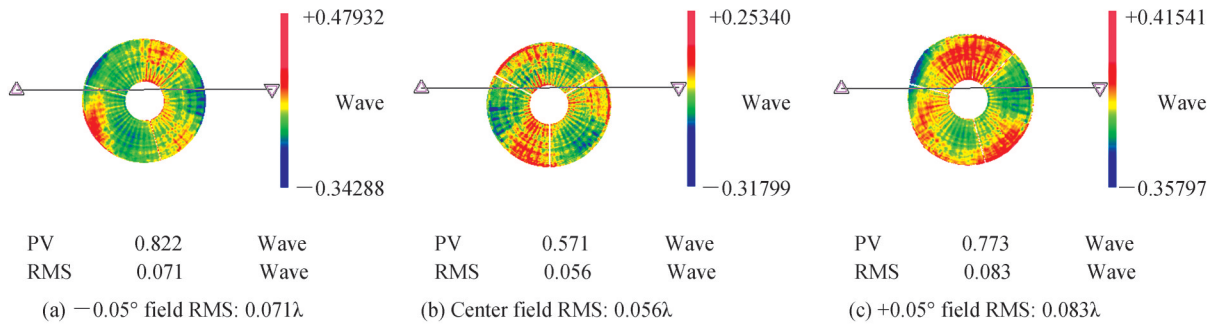


图7 粗调后各视场的波像差
Fig.7 Wave aberration of each field after coarse alignment

表5 粗调后各视场的 Zernike 系数

Table 5 Zernike coefficients in full field after coarse alignment

	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9
F(0,0)	-0.030	0.031	-0.004	-0.001 1	0.03
F(0,-1)	-0.062	0.023	0.002	-0.012	-0.016
F(0,1)	0.125	0.039	-0.012	0.027	-0.018

将各个视场的波像差检测数据以及各个光学镜面的加工面形残余误差代入设计软件,计算次镜的倾斜量和倾斜方向,模拟计算失调量结果如表6。由于实际装调环境影响,激光干涉仪在采集数据时会带入一些扰乱因素(如气流、振动等)产生的误差,从而导致数据采集得到的 Zernike 系数存在一定的误差,增加失调量的解算误差。调整机构的精度也会影响装调精度,故在装调过程中须经过几次迭代精调,使得各个视场的检测数据在公差允许范围之内,R-C 主次镜系统精调后的波像差检测结果如图8,利用 Zernike 多项式进行波面拟合,得到 Zernike 系数如表7。R-C 主次镜系统辅助装调分析过程如图9。

表6 次镜失调量计算结果

Table 6 Misalignment calculation results of second mirror

Misalignment value	$\Delta x/\text{mm}$	$\Delta y/\text{mm}$	$\Delta z/\text{mm}$	$\Delta\alpha/(\text{°})$	$\Delta\beta/(\text{°})$
Calculated value	-0.002	-0.023	-0.011	0.014	0.003

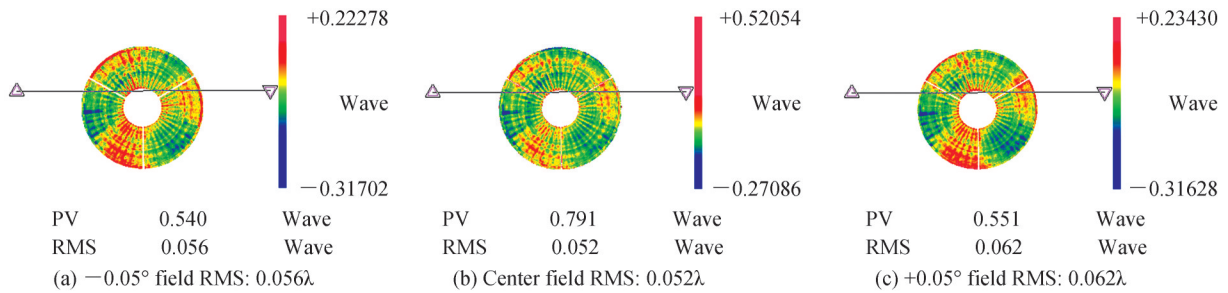


图8 精调后各视场的波像差
Fig.8 Wave aberration of each field after fine alignment

表7 精调后各视场的 Zernike 系数

Table 7 Zernike coefficients in full field after fine alignment

	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9
F(0,0)	-0.016	0.010	0.001	0.012	0.006
F(0,-1)	0.021	0.019	0.004	0.008	-0.001
F(0,1)	0.033	0.020	0.006	-0.010	-0.008

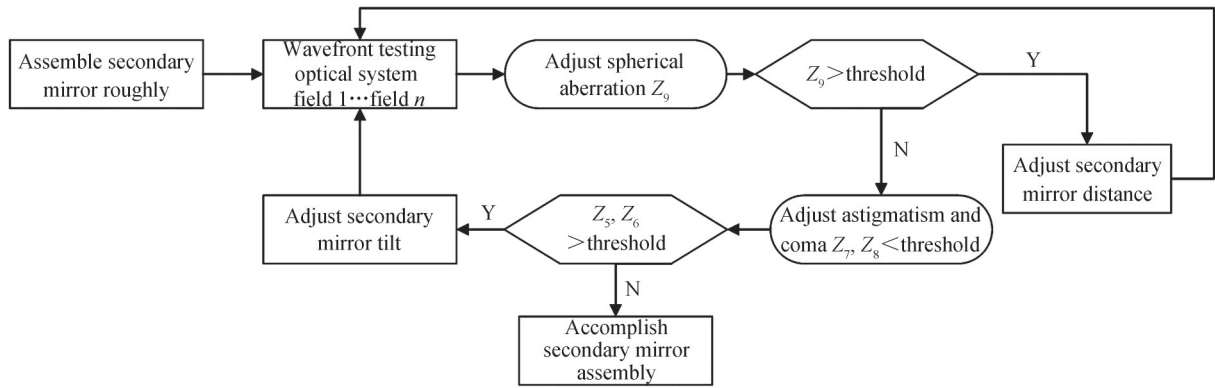


图9 R-C系统辅助装调流程

Fig.9 Computer aided alignment flow chart of R-C system

以准直平面反射镜为基准,利用TM6100A经纬仪标定调整折转反射镜调度,按设计值粗装透镜组,综合检测系统各个视场的波像差,检测结果如图10。根据灵敏度矩阵分析检测数据,调整透镜组镜的偏心量 Δx_2 、 Δy_2 消除轴外视场像散,使得轴外视场波像差达到比较好的状态;其次调整校正透镜组的倾斜量 $\Delta\alpha_2$ 、 $\Delta\beta_2$ 消除边缘视场的残差。实际装调布局如图11。整机联调后系统波像差的检测结果如图12,中心视场RMS值为 0.074λ , -1° 视场RMS值为 0.075λ , $+1^\circ$ 视场RMS值为 0.074λ ,系统全视场成像质量均满足光学设计要求。

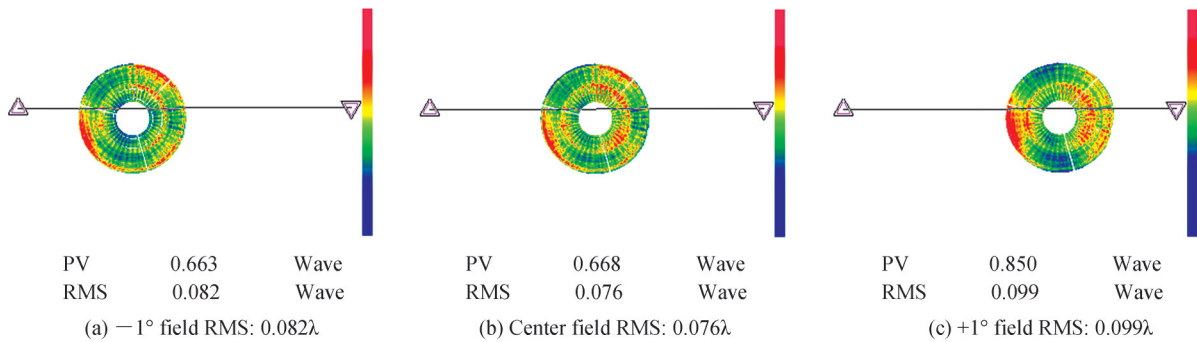


图10 粗调后全视场的系统波像差

Fig.10 System wave aberration of full field after coarse alignment

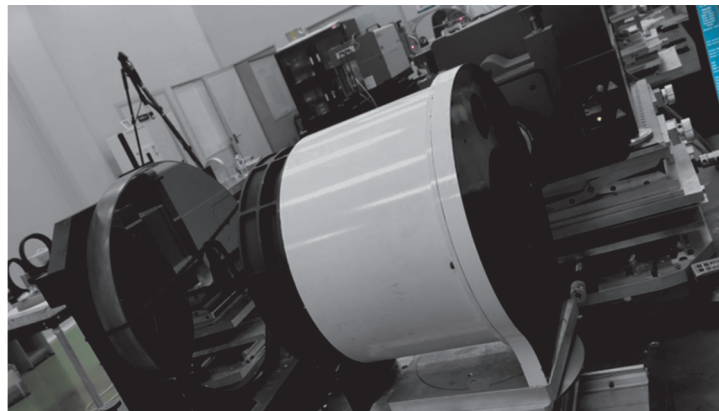


图11 实际装调现场

Fig.11 Actual alignment site

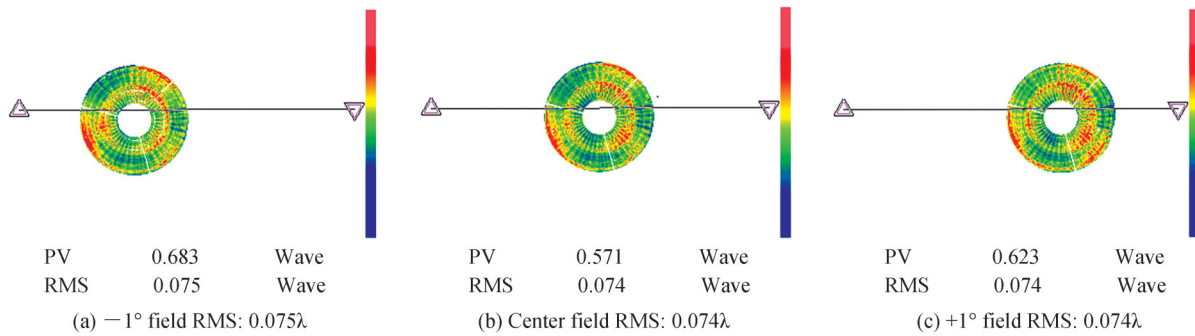


图12 精调后全视场的系统波像差
Fig.12 System wave aberration of full field after fine alignment

4 结论

为满足航空机载遥感对高性能轻小型长焦距光学系统的需求,采用改进型的R-C主次反射镜接球面校正透镜组的结构形式,设计了一种长焦距紧凑型折反射式光学系统。光学系统焦距达到1500 mm,系统结构空间包络尺寸直径不大于 $\phi 400$ mm,全视场范围内的MTF设计值在奈奎斯特频率 $62.5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处平均值优于0.56,成像质量接近衍射极限。基于光学干涉检测技术和计算机辅助装调理论,根据系统失调量与像差间的映射关系建立灵敏度矩阵,分析了失调光学系统的像差特性,在此基础上提出了波前精确测量、反演失调量的光学精密装调方案。整机装调后光学系统全视场波像差RMS优于 $1/13\lambda$,达到成像质量要求。研究结果可为航空机载长焦距紧凑型光学载荷技术的发展提供参考。

参考文献

- [1] FU Yanyu, YANG Guang, GUAN Shibao. Research status and development trend of hyperspectral imagers onboard airborne and spaceborne platforms[J]. Infrared, 2020, 41(8): 1-14.
付严宇, 杨桃, 关世豪. 航空航天高光谱成像仪研究现状及发展趋势[J]. 红外, 2020, 41(8): 1-14.
- [2] LI Jiahui, TAN Fenli, ZENG Chenxin, et al. Optical system design of wide-coverage and high-resolution airborne camera [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0222001.
李加慧, 谭奋利, 曾晨欣, 等. 宽覆盖高分辨率机载相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0222001.
- [3] LI Jiangyong, FENG Weixin, LIU Fei, et al. Design of airborne multi-Scale wide field of view and high-resolution imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0208002.
李江勇, 冯位欣, 刘飞, 等. 机载多尺度广域高分辨率成像系统设计[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0208002.
- [4] ZHOU Xinru, SONG Huatang, ZHU Runhui, et al. Compact off-axis two-mirror freeform telescopic optical system design with large relative aperture[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(10): 1022002.
周欣茹, 宋华堂, 朱润徽, 等. 结构紧凑型大相对孔径离轴两反自由曲面望远光学系统设计[J]. 光子学报, 2020, 49(10): 1022002.
- [5] WU Wenda, ZHANG Bao, HONG Yongfeng, et al. Design of co-aperture antenna for airborne infrared and synthetic aperture radar[J]. Chinese Optics, 2020, 13(3): 596-604.
吴文达, 张葆, 洪永丰, 等. 机载红外与合成孔径雷达共孔径天线设计[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 596-604.
- [6] LI Jianlin, LEI Guangzhi, BAI Yang, et al. Optical path design for catadioptric star sensor with large aperture [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(6): 0611002.
李建林, 雷广智, 白杨, 等. 大口径折反式星敏感器光学系统的光路设计[J]. 光子学报, 2020, 49(6): 0611002.
- [7] LI Yongkun, LIN Zhaorong, ZHANG Xuguo. Development survey of foreign aerial cameras for distant oblique reconnaissance[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2017, 38(6): 11-18.
李永昆, 林招荣, 张绪国. 国外远距斜视航空相机发展概况[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(6): 11-18.
- [8] CHEN Zhichao. Research on real-time phase detection auto focus technique of long focus airborne camera based on R-C optical system[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2016: 1-6
陈志超. 基于R-C系统的长焦距航空相机实时相位检焦技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016: 1-6.
- [9] LÜ Bo, FENG Rui, KOU Wei, et al. Optical system design and stray light suppression of catadioptric space camera [J]. Chinese Optics, 2020, 13(4): 822-831.
吕博, 冯睿, 寇伟, 等. 折反射式空间相机光学系统设计与杂散光抑制[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 822-831.
- [10] SHEN Zhijuan, CAO Yiqing. Design of a coaxial catadioptric telescope objective with a large relative aperture and long focal length[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 0108002.

- 沈志娟,曹一青.大相对孔径长焦距同轴折反射式望远物镜设计[J].激光与光电子学进展,2020,57(9):0108002.
- [11] XI Xiaodong. Design of large-caliber long focus airborne ultraviolet imaging optical system based on free-form surface[D]. Wuhan: Wuhan institute of technology, 2019: 47-64.
- 奚小东.基于自由曲面的大口径长焦距机载紫外成像光学系统设计[D].武汉:武汉工程大学,2019:47-64.
- [12] 沃伦 J. 史密斯. 现代光学工程[M]. 周海宪,程云芳,译. 4版. 北京:化学工业出版社,2011:414-420.
- [13] 李林,黄一帆,王涌天. 现代光学设计方法[M]. 2版. 北京:北京理工大学出版社,2015:130-137.
- [14] WANG Bin, WU Fan, YE Yutang. Computer aided alignment for off-axis TMA system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 1118006.
- 王彬,伍凡,叶玉堂.离轴三反系统计算机辅助装调[J].红外与激光工程,2016,45(11):1118006.
- [15] ZHANG Kun, ZHONG Xing, MENG Yao, et, al. Tolerance sensitivity research of nano-star sensor optical system with large field[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(5): 0522001.
- 张坤,钟兴,孟遥,等.大视场纳型星敏光学系统公差灵敏度研究[J].光子学报,2019,48(5):0522001.