

文章编号 1004-924X(2004)03-0270-05

Zemax 软件在离轴三反射镜系统 计算机辅助装调中的应用

杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 国家光学机械质检中心, 吉林 长春 130033)

摘要:利用 Zemax 光学设计软件与自编计算机辅助装调软件, 实现了对大口径、长焦距、无中心遮拦离轴三反射镜光学系统的装调。通过 Zemax 软件模拟光学系统的失调模式, 得到整个光学系统的波前像差, 把波前像差代入到自编的复杂光学系统计算机辅助装调软件中, 计算出光学系统的失调量, 与引入的失调量对比, 证明了其正确性。在实际的装调过程中, 用小型球面干涉仪分别收集 3 个视场的干涉图, 得到失调光学系统的失调量, 用 Zemax 软件验证失调量数据的正确性, 从而指导装调。按此方法, 在波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 时, 得到离轴三反射镜光学系统的全视场波像差 RMS 值为 0.108λ 。该方法也可以运用到其他光学系统中。

关键词:离轴三反射镜光学系统; 计算机辅助装调; Zemax 软件

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A

Application of Zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system

YANG Xiao-fei, ZHANG Xiao-hui, HAN Chang-yuan

(National Test Center of Optomechanical Products, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: With the aid of Zemax software, a three-mirror, unobscured, high-resolution optical system with large aperture, long focal length was successfully aligned by first collecting interferograms from several fields of all image plane, and obtaining the wavefront error, namely, obtained wavefront Zernike polynomials; then using the self-made program package to calculate the optical system misalignment. Finally, comparing Zernike polynomial coefficients of ideal optical system with Zernike polynomial coefficients of aligned optical system, and drawing a conclusion about the alignment correction values. It is simple and valid. After alignment, the optical system produced a measured wavefront error across the all image plane of 0.108λ RMS at $\lambda = 632.8 \text{ nm}$.

Key words: computer-aided alignment; Zemax software; off-axis three-mirror optical system

1 引言

近年来,无论是航天相机还是光学刻蚀系统,都变得越来越复杂,精度要求也非常高,因此成功的装调已成为一个关键性问题。从1970年到1985年,Ittek公司研制出了许多成像质量优于Cassegrain和Gregorian设计的全反射、无中心遮拦、视场大、全波段应用的光学系统,但却无法将系统装调到接近设计的成像质量。于是,该公司采用了计算机辅助装调的方法,达到了手工装调无法达到的结果,从而为计算机辅助装调创立了一个良好的开端^[1]。1987年,Hughes飞机公司的Williams,Wu和Elerbrook继续进行此项技术的研究和论证工作,提出并发展了两种主要的光学系统失调估计方法。(1)OYSTER(Optimal Yardstick System Toward Error Reduction)方法。利用Hartmann掩模测量,处理光学系统波面倾斜数据,得到灵敏度矩阵来估计系统的失调。(2)EBOD(Error Estimation from Operation Detectors)方法。通过测得星点像的点扩散函数(PSF)与理想的PSF偏差来判定系统失调量。此后,很多研究单位和个人都灵活地应用了他们提出的方法^[2]。1989年,美国Santa Barbra研究中心针对其设计的有效焦距为1 m,相对孔径为1/4.5,视场为(0.6 × 15)的全反射、三镜、多频谱地面探测光学系统进行了计算机辅助装调技术的研究^[3],此项技术已经成功地应用于国防和商业上。如美国Ball Aerospace Technologies公司研制的QuickBird Telescope成功地运用计算机辅助装调技术,在检测波长为632.8 nm时,系统波像差从RMS值0.45调到RMS值0.04^[4]。以色列的EL-OP,Electro-Optics Industries有限公司,用CODE VTM成功地对200 mm口径的Cassegrain系统进行了装调,使轴上和轴外视场的RMS值达到预期的效果^[5]。

2 用光学设计软件Zemax和装调优化软件进行数值比较^[6-7]

本文利用Zemax光学设计软件对大口径、长焦距、无中心遮拦的离轴三反射镜的失调进行模

拟,证明了此方法的可行性与正确性。在此基础上对实际三反射镜光学系统进行了装调,装调的结果达到了系统的要求。光学系统如图1所示。

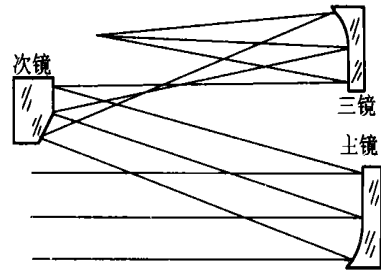


图1 非球面离轴三反射镜光学系统设计示意图

Fig. 1 Layout of off-axis three-mirror aspherical optical design

首先,用光学设计软件Zemax进行数值模拟,以证实可以用其进行光学系统的装调。用光学设计软件,给定某些失调量,算出波像差,用此结果来代替实际装调过程中干涉测量的波前误差数据。然后,再把这些波前误差量代入到自编的软件中,进行验证。将失调量引入到离轴三反射镜系统的设计值中,为了使实际装调的量不要过多,尽量地减少要调整的量。在此实验中,主镜可固定不动,作基准,只调整次镜与三镜的偏心、扭摆和俯仰。偏心的单位是mm,倾斜的单位是(°)。由于一个光学系统是经过粗装调以后才进行精密装调,所以在失调量的取值上都是很小的。所用装调工具的装调精度满足装调的要求,角度定位精度为2',位移定位精度为0.01 mm。

通过Zemax光学设计软件和自编的一套计算机辅助装调软件相结合,将引入的失调量和自编程序的计算结果进行了比对。其中, D_{y_s} 、 D_{y_t} 表示次镜与三镜沿y方向的偏心量; T_{x_s} 、 T_{y_s} 表示次镜以x轴和y轴为轴心的旋转量; T_{x_t} 、 T_{y_t} 表示三镜以x轴和y轴为轴心的旋转量。可以通过改变单个量或多个量的失调,进而比较系统失调量与模拟结果是否吻合。引入的失调量是随意的。首先见表1, $T_{xt} = -0.03^\circ$ 。

表 1 失调量与计算结果的比较

Tab.1 Comparison of misalignment data and calculation result data

	引入的失调量	自编装调程序的计算结果
D_{y_s}	0	0.003
T_{x_s}	0	0.002
T_{y_s}	0	0.000
D_{y_t}	0	0.005
T_{x_t}	- 0.03	- 0.034
T_{y_t}	0	0.000

对于引入光学系统的单个失调量,模拟的结果是比较好的。如果引入两个失调量, $D_{y_s} = 0.05 \text{ mm}$; $T_{y_t} = - 0.04^\circ$, 比较的结果见表 2。

表 2 失调量与计算结果的比较

Tab.2 Comparison of misalignment data and calculation result data

	引入的失调量	自编装调程序的计算结果
D_{y_s}	0.05	0.047
T_{x_s}	0	0.007
T_{y_s}	0	0.000
D_{y_t}	0	0.003
T_{x_t}	0	0.001
T_{y_t}	- 0.04	- 0.039

引入 4 个失调量, $T_{x_s} = - 0.03^\circ$; $T_{y_s} = 0.05^\circ$; $T_{x_t} = 0.06^\circ$; $T_{y_t} = - 0.04^\circ$, 见表 3。

表 3 失调量与计算结果的比较

Tab.3 Comparison of misalignment data and calculation result data

	引入的失调量	自编装调程序的计算结果
D_{y_s}	0	- 0.006
T_{x_s}	- 0.03	- 0.027
T_{y_s}	0.05	0.049
D_{y_t}	0.06	0.055
T_{x_t}	- 0.04	- 0.043
T_{y_t}	0	- 0.004

将所有的失调量都引入, $D_{y_s} = 0.02 \text{ mm}$, $T_{x_s} = 0.07^\circ$, $T_{y_s} = - 0.04^\circ$; $D_{y_t} = - 0.03 \text{ mm}$, $T_{x_t} = - 0.05^\circ$, $T_{y_t} = 0.06^\circ$; 见表 4。

表 4 失调量与计算结果的比较

Tab.4 Comparison of misalignment data and calculation result data

	引入的失调量	自编装调程序的计算结果
D_{y_s}	0.02	0.019
T_{x_s}	0.07	0.076
T_{y_s}	- 0.04	- 0.041
D_{y_t}	- 0.03	- 0.034
T_{x_t}	- 0.05	- 0.040
T_{y_t}	0.06	0.058

从上面的 4 个表可知,通过对理想设计的光学系统引入失调量,从而使像差变大,然后对系统的像差进行分析计算,代入到优化程序中,得到系统的失调量。

3 实际装调过程

实验示意图见图 2。

实验中,采用一个自制的小型球面干涉仪,从该离轴三反射镜系统的第 2 像面发出一束球面波,经光学系统后,变成平面波,到达标准平面反射镜,从而形成自准干涉光路。在此光学系统的狭长的像面采集 3 个视场的干涉图。由干涉图处理软件获得波前误差,从波前误差中找到系统的失调量。

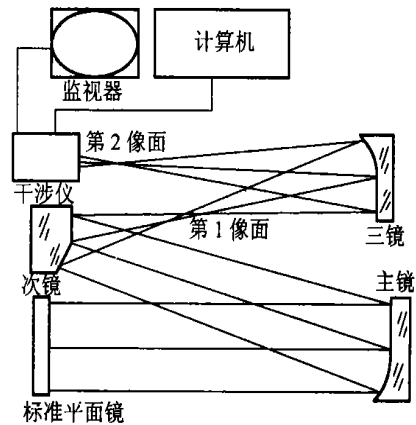


图 2 自准干涉检验示意图
Fig.2 Autocollimating interferometric test

经过粗调,得到如下的干涉图,见图 3。

通过对图 3 中干涉图的部分口径分析计算,可以得到表 5 中的 Zernike 系数。

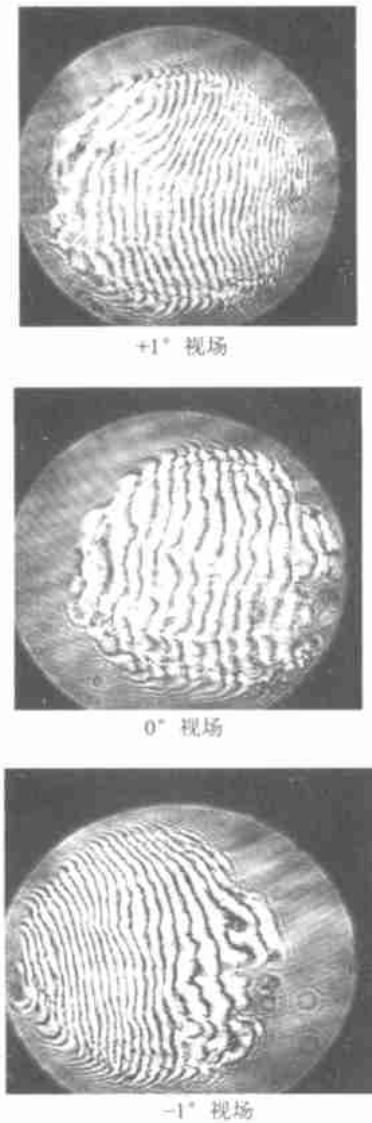


图 3 粗装调后的干涉图
Fig. 3 Interferograms of extensive alignment

表 5 干涉图的 Zernike 多项式系数

Tab. 5 Zernike polynomial coefficients of interferograms

	+1 视场	0 视场	-1 视场
Z_1	+ 6.566	+ 5.898	+ 9.070
Z_2	+ 6.913	+ 5.076	+ 6.636
Z_3	+ 0.905	+ 0.132	- 0.920
Z_4	- 0.225	- 0.387	- 0.586
Z_5	+ 1.362	- 0.329	- 1.320
Z_6	+ 0.064	+ 0.151	+ 0.364
Z_7	+ 0.091	+ 0.049	+ 0.091
Z_8	- 0.138	- 0.326	- 0.142
Z_9	+ 0.036	+ 0.271	+ 0.024

将其代入自编的装调优化程序中进行迭代,得到要调整的量,见表 6。

表 6 失调量的结果

Tab. 6 Result of misalignments

$D_{y_s} = - 0.706 \text{ mm}$	$D_{y_t} = 5.050 \text{ mm}$
$T_{x_s} = 0.012^\circ$	$T_{x_t} = - 0.050^\circ$
$T_{y_s} = 0.044^\circ$	$T_{y_t} = - 0.140^\circ$

将上面的失调量先代入到 Zemax 光学设计软件中,经过计算,得出像差的变化量。表 7 中的 Z_5 、 Z_6 、 Z_7 、 Z_8 、 Z_9 表示系统的像散,彗差以及球差的变化量。由于这时光学系统的主要任务就是要消去像散,从表 5 与表 7 比较来看,像散应减少。Zemax 光学设计软件充分地证明这次迭代是正确的,实验证明也如此。

表 7 期望装调校正值

Tab. 7 Predicted alignment correction values

	+1 视场	0 视场	-1 视场
Z_5	- 1.354	- 0.005	+ 1.304
Z_6	+ 0.074	+ 0.058	+ 0.066
Z_7	+ 0.260	+ 0.256	+ 0.257
Z_8	- 0.061	- 0.060	- 0.082
Z_9	+ 0.020	+ 0.023	+ 0.025

经过多次迭代,最终的装调结果如图 4 所示。

Zemax 光学设计软件在装调中起到了指导作用。由于实验环境的影响,在分析处理波前误差时,有可能将环境的因素掺杂进去,从而影响迭代时一些项的收敛性,导致某些结果的不正确。基于以上原因,用 Zemax 进行验证可以定量地调整某些变化量,使其变好,同时也可以定性地知道哪些量有变坏的趋势,在下次迭代中,可以有针对性地对变坏的量进行消除。检测波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 时,最终的装调结果是光学系统全视场波像差达到 0.108λ 。

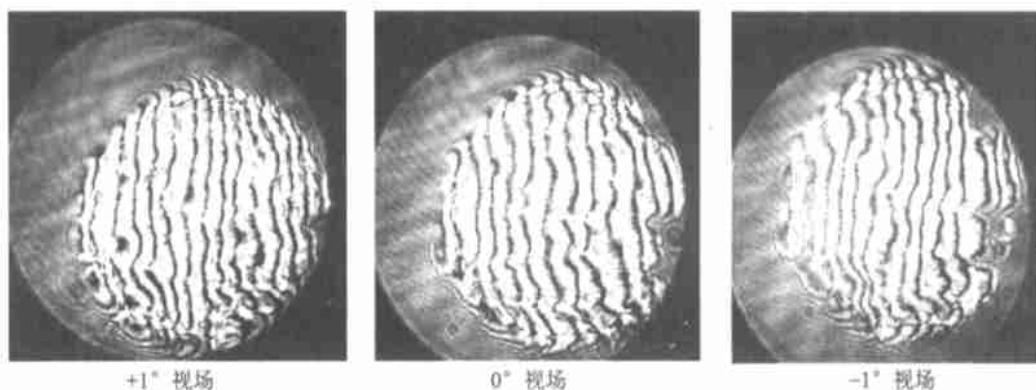


图 4 最终装调的干涉图
Fig. 4 Interferograms of final alignment

4 结 论

计算机辅助装调也是一项系统工程,其中涉及到光学设计参数,框架支撑结构的变形,光学镜

面受应力变形,还有实验环境等诸多方面。在计算机辅助装调中,这些方面基本都给予考虑。光学设计软件 Zemax 在该系统的装调中起到了重要作用,也同样适用于同轴光学系统。

参考文献:

- [1] IRA M. ECDAL L. Manufacture of a three-mirror wide-field optical system[J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(2): 285-292.
- [2] WU N, ELLERBROEK B L, WILLIAMS S G. Experimental verifications of an image-based alignment technique for optical systems in space[J]. *SPIE*, 1987, 351:121-130.
- [3] FIGOSKI J W, SHRODE T E, MOORE G F. Computer-aided alignment of a wide-field three-mirror, unobscured, high-resolution sensor[J]. *SPIE*, 1989, 1049:166-177.
- [4] JOHN W, FIGOSKI J W. Alignment and test results of the QuickBird telescope using the ball optical system test facility[J]. *SPIE*, 1999, 3748:99-108.
- [5] LEIGH D, FREIMAN D. Computer aided optical system with CODE VTM [J]. *SPIE*, 1988, 1038:288-294.
- [6] 张斌, 张晓晖, 韩昌元. 光学系统计算机辅助装调中的一种优化算法[J]. *光学 精密工程*, 2000, 8(3):273-277.
ZHANG B, ZHANG X H, HAN CH Y. Algorithm for misalignment determination in computer-aided alignment of optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(3):273-277.

作者简介:杨晓飞(1977-)男,山西黎城人,中科院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要研究方向为信息光学,光学检测和计算机辅助装调。E-mail:yang-600@yahoo.com.cn