文章编号:1001-5078(2013)04-0428-05 ·光学技术·

基于DWC波前检测的计算机辅助装调技术

刘 琳,王 洋,张兴德
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘 要:计算机辅助装调(CAA)技术是提升高精度、复杂离轴光学系统成像质量的有效手段。介绍了计算机辅助装调技术发展背景及现状,总结了用于计算机辅助装调技术的光学检测手段及优化方法。介绍了一种基于高分辨率波前传感器(DWC)的计算机辅助装调技术,建立了数学模型。这个模型包含光学系统出瞳波面像差获取、失调光学系统的失调量计算及系统像差表示三个方面的内容。最后,对模型进行了数值仿真试验,通过对比系统装调前后的结果,验证了该方法的理论可行性。

关键词:计算机辅助装调技术;离轴反镜光学系统;泽尼克多项式;波前检测
中图分类号:TH74 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2013.04.017

Computer-aided alignment based on DWC wave-front testing

LIU Lin, WANG Yang, ZHANG Xing-de
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Computer-aided alignment (CAA) is an effective method to improve the imaging quality of high precision, complex and off-axis optical systems. The paper introduces the development and application of CAA, and summarizes the method of optical testing and optimizing. A computer-aided alignment method based on a high-resolution wave-front detector is proposed. The model includes the detection of the wave-front, calculation of disalignment and the aberration between the actual system and the designed system. By numerical experiments and comparison of the image qualities between the pre-aligned and post-aligned systems, the feasibility of the CAA method is demonstrated.

Key words: computer-aided alignment technology; off-axis three-mirror optical system; Zernike polynomials; wave-front testing

1 引 言

随着空间技术水平的提高和现代战争的发展,对远距离空间目标的观测和监视性能提出了更高的需求。这就促使星载光电系统和远程光电预警设备的光学系统朝着大口径、长焦距、宽波段、小体积的方向发展。此时,传统透射式光学系统的设计面临体积、质量、材料选择等难题,而全反射式光学系统因为波段宽、无色差、体积小等特点,成为复杂系统设计首选的结构形式[1]。为了提高系统光学效率,克服中心遮拦带来的光能损失,进一步提升分辨率,在同轴反射系统的基础上发展出了离轴反射式结构。与共轴系统不同,离轴系统每个元件都具有非对称的传播光束和成像光斑,旋转对称的光学理论和像差特性不再适用。若采用传统装调方法依靠简单的同轴调试设备来进行装调,由于无法建立与共轴系统一样的评判标准,对于可调参数的补偿方向和结果都无从而知,导致系统不可能达到设计的成像质量[2]。因此,虽然离轴光学系统可以具有接近衍射极限的理论成像质量,但是,光学元件的加工和

作者简介:刘 琳(1982-)女,工程师,从事红外成像系统研究工作。E-mail:bonnieliu1982@gmail.com
收稿日期:2012-09-12

装调环节对系统的最终成像质量起决定性作用。针对超高精度要求、接近衍射极限成像质量的复杂光学系统,在光学设计和元件加工满足要求的条件下,提出了将干涉测量成分和优化技术相结合的计算机辅助装调(CAA)技术。

CAA 技术的研究始于 20 世纪 80 年代,美国 Itek 公司率先提出了计算机辅助装调的概念并开展研究,这一研究成果应用于实际光学系统的装调,成为 CAA 技术的良好开端。此后,Arizona 光学中心、俄罗斯、法国等也相继在这方面进行了研究,已应用到国防和商业等领域,并取得了较理想的效果。如美国 NASA 发射的土星观测飞行器上装备的复合红外光谱仪的装调;美国的太空激光武器系统,将大量的光学元件集成在一个平台上,也采用了计算机辅助装调来调整光学元件[3]。与国外相比,CAA 技术在国内的应用还处于初级阶段。随着国防和民用等各项领域的发展,复杂光学系统及离轴非球面光学系统的需求越来越迫切,适于常规同轴光学系统的装调方法已经无法满足需要,这将推动 CAA 技术更快地发展。

2　CAA 基础理论

2.1　CAA 模型

CAA 技术是针对传统装调方法不可规、不定量、随机成分多、装调周期长等缺陷提出来的新的装调手段,是将光学测量和计算机优化技术相结合的一项先进光学装调技术。具体装调过程如图 1 所示。

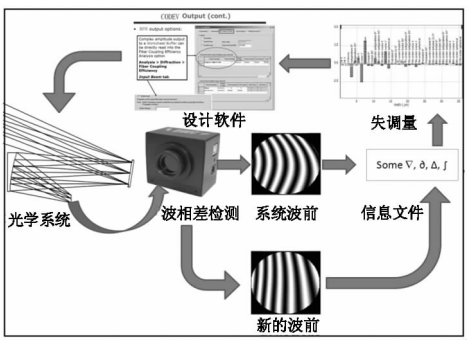


图 1　计算机辅助装调流程

待测光学系统安装完成并经过粗装调后,经过波前检测,从出瞳面上获取光学系统的波相差,从中提取出系统成像质量的信息文件,通过计算机软件对得到的波像差进行处理和优化,与光学设计的理论值进行比对,给出系统的失调量,明确各个镜子的调整方向和具体的量值。再将失调量反馈给相应的模块,对光学元件的位置做出适当的调整,提高系统的波前像差。检测装调过程形成闭环回路,在调试过程中不断同理论值比较,直到系统成像质量接近于理论设计指标。因此,可见 CAA 技术可将光学系统的像质调整至最佳状态,是提升高精度、复杂离轴光学系统成像质量的有效手段。

2.2　CAA 关键技术

计算机辅助装调中的关键技术是系统失调量的确定,即光学零件的实际位置和理论位置之间的差别,包括沿 X,Y,Z 三个轴的偏移和相对于这三个轴的偏转。计算机辅助装调的目的是找到失调量和它们对应的像差的关系,所以 CAA 的数学模型可以通过下面的矩阵表达:

$$\boldsymbol{A}\Delta\boldsymbol{X} = \Delta F \tag{1}$$

其中,$\boldsymbol{A}$ 是光学系统的灵敏度矩阵,由光学系统设计确定;$\Delta\boldsymbol{X} = X - X_0$ 是系统的失调量矩阵;$\Delta F = F - F_0$ 是系统成像质量随失调量的变化值。

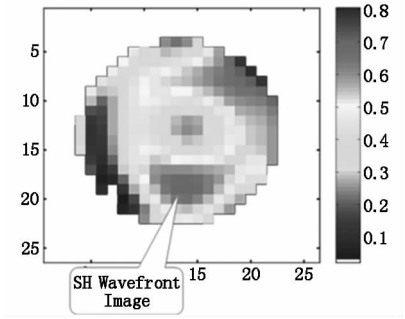
式(1)建立了失调量与系统像差的数学模型,在已经进行的研究中,CAA 技术的焦点集中在如何精确获取系统的失调量矩阵上。系统失调量的确定是一个数据处理过程,也是一个数值优化过程。失调量的获取要靠恰当的检测方法,这些方法的不同,决定了辅助装调方法的不同。已经报道的较为成熟的方法包括:星点法、干涉法和 Hartmann 法[3]。无论是星点法还是干涉法,都需要辅助的光学系统检测出像质,再通过拟合计算得到系统的波前像差;Hartmann 法在检测过程上是一大进步,原理简单、测量结果直接反应波前像差,可直接和光线追迹结果比较,使得装调系统得到了简化,且提高了效率。

3　基于 DWC 的 CAA 模型

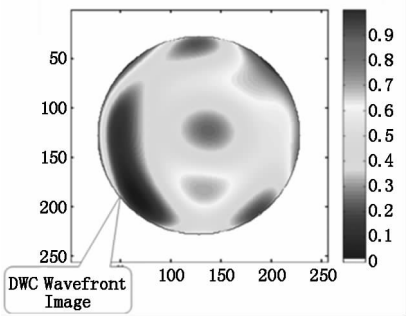
3.1　DWC 的优点

DWC 即为数字波前传感器,由法国 phasewiew 公司的研究人员于 2007 年公开发布。与传统的波前测量 Hartmann 法不同,它创新了一种数字算法,采用了智能化的波前数据采集方法,具有更高的分辨率和更宽的动态范围。同时,免去了用 Hartmann 法测量波前的微透镜阵列校准过程,提高了装调效率。本论文首次将 DWC 用于 CAA 技术中,提出了新的求解失调量矩阵的方法。理论上该方法具有更高的准确度和装调效率。图 2 为 Hartmann 法和 DWC 采集的同一波前的图像,更高的分辨率对于实

验室装调工作非常有利,关系到装调结果的精度。图 3 为 DWC 波前检测获得的丰富的图像信息,包括光强、三维波前相位、Zernike 系数等。



(a) Hartmann



(b) DWC

图 2 Hartmann 和 DWC 采集的同一波前的图像

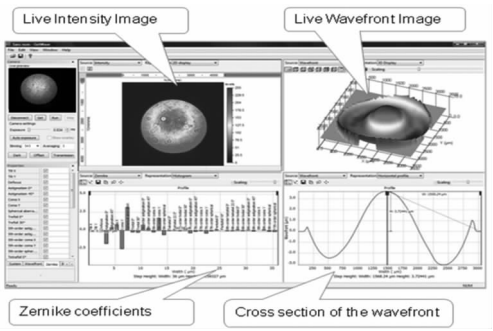


图 3 DWC 获得的图像信息

3.2 DWC 和设计软件的结合

在本论文的模型中,利用了 DWC 获取的波前信息,在测量软件的后期处理中方便地加入了与设计软件一致的输出参数。辅助装调的过程如下:

首先,由 DWC 测量失调光学系统的波前,结果数据通过转换,输出标准 Zernike 多项式。系统检测始终遵循如下光线定义:主光线和像平面的交点作为理想球面波的球心,使实际波面和理想波面在出瞳坐标原点重合。与光学设计软件 CODEV 的设计和评价保持一致[4]。

其次,在 CODEV 中比较测量结果和设计结果,计算系统成像质量随失调量的变化值 ΔF。

再次,利用设计时搭建的光学系统模型,建立基准,选择合适的补偿参数,求解光学系统的灵敏度矩阵 $\boldsymbol{A}$。

最后,运用 CODEV 中的 BPR 功能,将像质差 ΔF 附加在光路中,优化得到在灵敏度矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的补偿条件下各参数的失调量 ΔX。指导系统调节相应的方向和大小,完成装调。

4 数值仿真实验

数值仿真实验提供了一种便捷的,用于检验上述计算机辅助装调理论方法有效性的手段。进行数值实验时,在已知光学系统中人为地引入失调量,通过光学设计软件 CODEV 来计算系统的波像差,再进行 Zernike 多项式拟合,附加在系统上,通过装调优化得到系统灵敏度矩阵和失调量,与实际输入的失调量进行比较。

4.1 焦距 1000 mm 的离轴反射光学系统

被装调的光学系统是一个经典的离轴三反系统,焦距 $f'=1000$ mm,口径 $D=100$ mm。系统光路如图 4 所示。

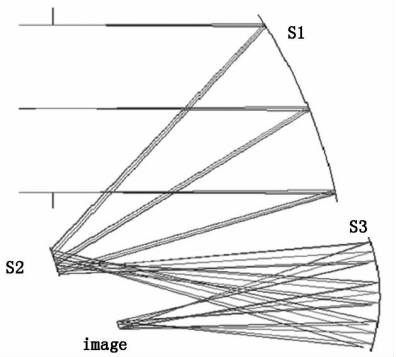


图 4 离轴反射系统光路

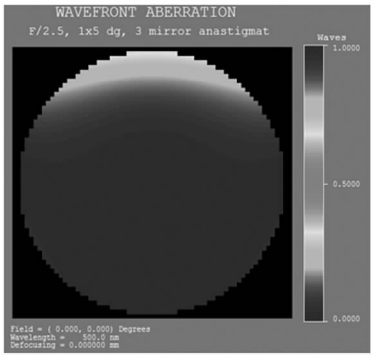
4.2 失调量的仿真计算

向系统中加入在表 1 中列出的失调量。其中,D_x,D_y,D_z 分别表示沿 X,Y,Z 轴的平移,分别为绕 X,Y,Z 轴的旋转。可见,次镜 S2 沿光轴发生偏移,三镜 S3 沿 X,Y 轴发生平移和旋转。

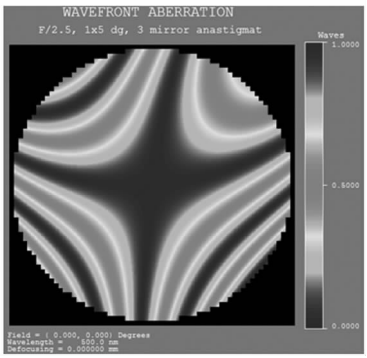
表 1 人为引入的失调量

	misalignment					
	D_x	D_y	D_z	α	β	γ
Lens2	0	0	0.01	0	0	0
Lens3	-0.15	0.1	0	0.1146	-0.0573	0

在加入了失调量后,系统的波前像差发生了很大变化,如图 5 所示。



(a)引入失调量前



(b)引入失调量后

图5　引入失调量前后系统的波像差

由CODEV软件计算出的失调系统的波前误差,根据计算机辅助装调的数学模型,计算得到系统的标准Zernike系数,保存为CODEV数据接口的文件。设置灵敏度矩阵,如图6所示。

	Compensators					
	Type	Start Surface	End Surface	Label	Value	Compensator Use Control
1	TRX -	3	3		0.5000	May be u
2	TRY -	3	3		0.5000	May be u
3	DLX -	3	3		0.5000	May be u
4	DLY -	3	3		0.5000	May be u
5	DLT - Th	2	2		-0.500	May be u
5	DLT - Th	Stop	Stop		0.5000	May be u

End Of Data

图6　灵敏度矩阵设置

灵敏度矩阵确定了系统的装调方案,为了验证失调量计算的准确度,我们选取与引入失调量一致的补偿参数。继续求解系统与该灵敏度矩阵相关的失调量矩阵。经装调优化解得的失调量如图7所示。

TOTAL　0.1696　0.0081　Compare

Compensator type	Compensator value	RMS (a) difference	RMS (b) contribution	Input errors
DLA S3	-.19975E-02	0.1463	0.1220	(+0.002)
DLB S3	0.99530E-03	0.1393	0.0608	(-0.001)
DLX S3	0.15110	0.1408	0.0571	(-0.15)
DLY S3	-.99345E-01	0.1867	0.0375	(+0.10)
DLT S2	-.10806E-01	0.1466	0.0854	(+0.01)

图7　CODEV计算的失调量

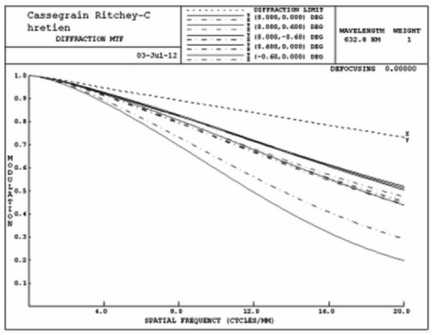
4.3　结果比较

对比基于DWC的CAA仿真失调量和人为引入的失调量,如表2所示。误差结果分析表明仿在高像质要求的光学系统装调中,采用本文的计算机辅助装调方法来确定反射镜的调整位置,最终调整结果与实际引入量相符,可见该计算机辅助装调算法收敛,调整准确度高。

表2　用DWC和CODEV计算的失调量结果

失调参数	给定值	计算结果	误　差
Dz_1	0.01	0.010806	0.000806
Dx_2	-0.15	-0.15110	0.00110
Dy_2	0.1	0.099345	0.000655
α_2	0.1146	0.10897	0.00563
β_2	-0.0573	-0.06009	0.00279

将得到的结果代入到系统中,得到装调前后的系统的MTF值如图8所示。对比两幅图,可以看出装调后系统的MTF值提高了20%,初级像差基本得到了校正,光学系统较好地满足成像质量的要求。



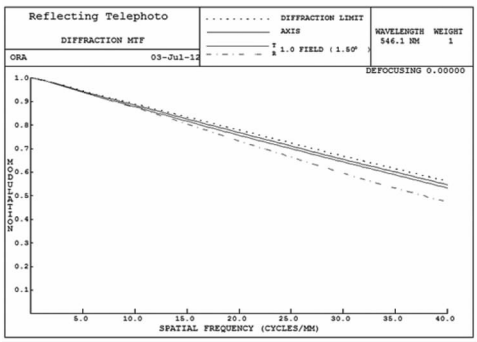


图8　模拟装调前后系统的MTF

5　结　论

通过数值试验,验证了基于DWC的CAA技术的理论可行性,它具有以下优点:

(1)测试速度快,测量精度高;

(2)具有很好的通用性,适用于各类光学系统;

(3)得到的反映系统像质的波前像差图,经Zernike多项式拟合后很容易进行数据处理和优化。

为了完善该方法,后期的研究工作包括:

(1)在硬件平台上验证基于 DWC 的 CAA 理论模型的正确性;

(2)对失调量矩阵的获取方法进行优化改进,使得装调方案更加准确、高效;

(3)编译可视化程序界面,在检测系统的计算机上建立直观、方便的操作终端。

参考文献:

[1] R B Johnson, J B Hadaway, T A Burleson, et al. All-reflective four-element zoom telescope: design and analysis [C]. SPIE, 1990, 1354: 669 – 675.

[2] Yang Xiaofei. Study on the computer-aided alignment of three-mirror optical system [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Academia Sinica, 2004. (in Chinese)
杨晓飞. 三反射镜光学系统的计算机辅助装调技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2004.

[3] Zhao Ruiping, et al. Computer-aided alignment of optical system [J]. Technology of Computer Application, 2010, 331(20): 123 – 132. (in Chinese)
赵瑞萍,等. 光学计算机辅助装调分析与应用[J]. 计算机应用技术,2010,331(20):123 – 132.

[4] Optical Research Associates. CODEV Reference [M]. California: Optical Research Associates, 2012.