

doi: 10.3788/gzxb20124101.0036

基于波像差检测的大口径 RC 光学系统装调分析

段学霆^{1,2}, 周仁魁¹, 陈建军^{1,2}, 付兴¹, 李华¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:通过对 520 mm 口径 RC 系统进行面形波像差检测, 并将其主、次镜各光学零件实际面形的干涉检测结果输入 Code V 软件进行了系统成像质量的波像差分析. 分析结果与实际系统装调完成后的系统成像质量波像差检测结果对比, 具有高度的一致性, 说明在计算机辅助装调工艺中应用该仿真工具仿真度高, 可以用于实际光学装调的仿真分析、指导光学装调.

关键词:光学装调; 计算机辅助装调; CODE V 软件; 波像差检测

中图分类号: V556.5; TH741

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)01-0036-3

($\lambda = 632.8 \text{ nm}$). 系统结构如图 1 所示, 该主次镜系

0 引言

用于航天光学遥感器的大口径长焦距光学系统, 成像质量要求高、装调难度大、装调周期长^[1]. 如果在装调前对系统预先进行软件仿真, 模拟光学元件面形变化及系统失调对系统的影响, 及时评估装调工艺过程中能够达到的实际结果, 可以减少工程实践中的盲目性, 提高装调质量和效率. 利用光学计算软件对实际光学系统进行装调分析和计算机辅助装调, 是目前国内外光学工程领域研究热点之一^[2-7], 尤其在空间光学领域, 更加贴近工程实际的仿真和分析, 成为装调工作的重要组成部分.

CODE V 软件的强大公差分析 (TOR) 功能的突出特点之一就是利用一种快速的基于波像差的算法, 使用光学传递函数、波像差的均方根值 (Root Mean Square, RMS) 等作为光学系统性能评价的尺度, 并且支持直接读入每一个工作面面形的波像差检测结果^[8].

本文提出了使用 CODE V 软件对系统进行基于插入光学元件实际面形波像差检测数据的装调分析方法, 并给出了 520 mm 口径 RC 系统的主次镜实际装调分析与实验验证结果.

1 装调对象的光学模型

试验中使用的主镜口径 520 mm, 中心开孔直径 118 mm, 为二次非球面, 要求部件装配完成后面形优于 $1/30\lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$); 次镜口径 114 mm, 二次非球面, 要求部件装配完成后面形优于 $1/30\lambda$

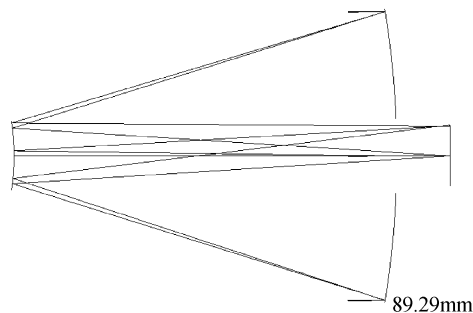


图 1 主次镜系统结构

Fig. 1 Structure of main-second system

统作为一个共轴三反射系统的前置部分, 形成一次像面, 系统的光学模型由 CODE V 软件构建.

2 对系统的波像差分析

系统出瞳面上的波像差可理解为一个关于垂直于光轴平面二维笛卡尔坐标系的二元函数 $W(x, y)$, 该函数包含主镜面形残余误差 $W_{\text{main}}(x, y)$ 和次镜面型残余误差 $W_{\text{sec}}(x, y)$ 以及系统失调引起的出射光瞳波面误差 $W_{\text{align}}(x, y)$ 和系统结构本身存在的设计残余波前误差 $W_s(x, y)$, 其表达式为

$$W(x, y) = W_{\text{main}}(x, y) + W_{\text{sec}}(x, y) + W_{\text{align}}(x, y) + W_s(x, y) \quad (1)$$

式中主镜面形残余误差 $W_{\text{main}}(x, y)$ 和次镜面形残余误差 $W_{\text{sec}}(x, y)$ 在实际装调过程中可由激光干涉仪、哈特曼波前测试仪等波像差精密检测仪器实测得到. 对于设计的理论光学模型, $W_{\text{align}}(x, y)$ 可以由

第一作者: 段学霆 (1977-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为先进光学装调工艺及装备. Email: duanxueting@opt. ac. cn

导师 (通讯作者): 周仁魁 (1945-), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为光电工程. Email: rkzhou@opt. ac. cn

收稿日期: 2011-05-19; 修回日期: 2011-10-25

ZEMAX 或 CODE V 等光学计算软件模拟失调计算得出。对于实际系统,可由波像差检测仪器实测并进行数据分析得到,而对于主次镜系统,其出瞳面上的波像差 $W(x,y)$ 分别可由理论模型计算得出和实测得出^[9]。

值得注意的是,当光学计算软件对 RC 系统进行波像差计算时,如果不人为引入系统内光学元件的面形残差 $W_{main}(x,y)$ 和 $W_{sec}(x,y)$,以及模拟失调引起的波像差 $W_{align}(x,y)$,计算结果将忽略以上三种误差,仅得出系统结构本身带来的残余波像差,即系统的理想误差 $W_s(x,y)$,这样的结果对于实际系统装调的工程分析,其价值非常有限。

CODE V 软件以系统波像差的 RMS 作为光学系统性能评价的尺度,支持直接读入每一个工作面的波像差检测结果,使得式(1)中 $W_{main}(x,y)$ 和 $W_{sec}(x,y)$ 的实测结果可直接代入计算,当 $W_{align}(x,y)$ 逐渐减小时,系统出瞳面波像差 $W(x,y)$ 的计算结果将与实测结果高度吻合。反之,如果偏离较大,则可以反向预估 $W_{align}(x,y)$ 代表的失调量,指导实际装调即计算机辅助装调,计算机辅助装调的基本目标就是减少实际系统波前与理想波前之间的差,使用调整变量使这个差为最小^[10]。

3 用 CODE V 软件对系统分析预估

由 CODE V 软件建立的主次镜系统光学模型计算出在理想误差情况下,系统轴上点最佳像面像质的波像差结果为 $RMS0.0880\lambda(\lambda=632.8\text{ nm})$ 。软件分析结果界面如图 2。

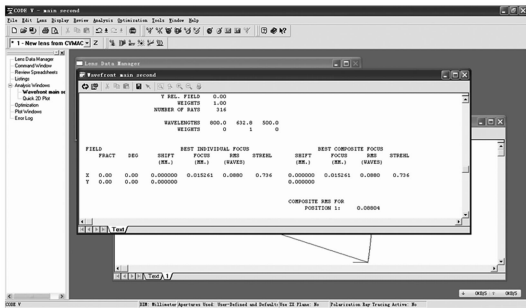


图 2 CODE V 软件分析界面
Fig. 2 CODE V software analysis table

使用激光干涉仪对主镜面形实际波像差检测结果为: $RMS\ 0.021\lambda(\lambda=632.8\text{ nm})$,如图 3。使用激光干涉仪对次镜面形实际波像差检测结果为: $RMS\ 0.030\lambda(\lambda=632.8\text{ nm})$,如图 4。

将主次镜面形检测结果分别代入 CODE V 软件所建立的光学模型中,粘贴在光学模型相应的工作面上,并通过旋转、镜像等操作将面形检测结果的空间坐标与模型的空间位置相对应,再对系统轴上

最佳像面位置的波像差进行计算得到结果为 $RMS0.0847\lambda(\lambda=632.8\text{ nm})$ 。软件分析结果界面如图 5。

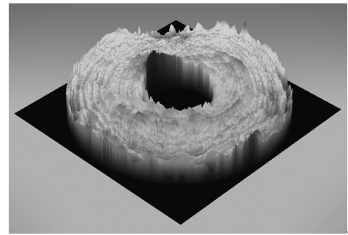


图 3 主镜部件面形波像差检测三维云图
Fig. 3 Main mirror surface error test 3D result

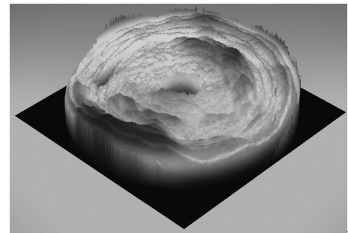


图 4 次镜部件面形波像差检测三维云图
Fig. 4 Second mirror surface error test 3D result

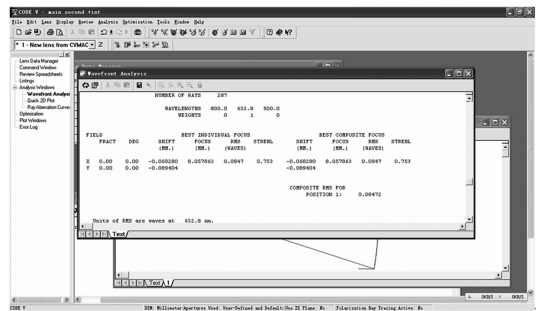


图 5 CODE V 软件分析界面
Fig. 5 CODE V software analysis table

4 实际 RC 系统的装调结果

实验中的主次镜光学系统在实际装调工艺过程中分别对主镜部件和次镜部件进行了精密的光学共基准车削,通过精密的结构配合消除了主面间的倾斜,则由其引起的像散和彗差对系统波像差的贡献可以忽略,仅残留同心度失调引起的彗差,当彗差未经调整消除时的波像差实测结果为 $RMS\ 0.124\lambda(\lambda=632.8\text{ nm})$,如图 6。

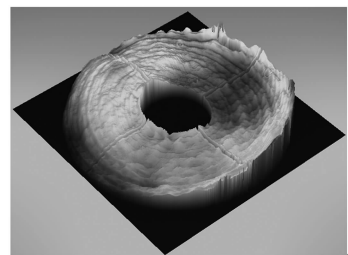


图 6 有彗差系统波像差实测三维云图
Fig. 6 System wavefront aberration test 3D result with coma

接下来对该主次镜系统出瞳面上波像差进行检测,并以主镜光轴为基准,调整次镜,使二者同心度逐步提高以消除系统彗差,直至波像差检测结果中的彗差分量减小到小于系统残余像差时可以认为该系统装调完成。

而实际系统装调完成后,对轴上最佳焦面处的准单色光($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)干涉检测结果表明:系统实际波像差可达到 $\text{RMS}0.079\lambda$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),波像差检测结果如图 7。

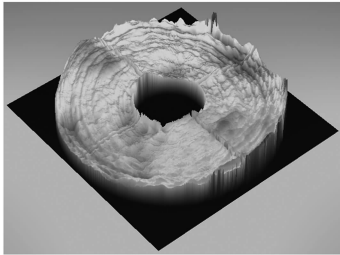


图 7 消除彗差系统波像差实测三维云图
Fig. 7 System wavefront aberration test 3D result without coma

5 结论

实际 RC 系统干涉检测结果与 CODE V 软件计算结果对比表明,当对设计模型插入每一面的实测面形数据进行装调结果分析时,其预估结果与系统完成装调后的实测结果相比,预估误差由 0.009λ 降低到 0.0057λ ,说明该分析方法更加接近实际系统,分析结果更为可靠,对于实际装调结果的预估具有重要意义。

该分析方法应用时,应该注意通过激光干涉仪或者哈特曼波前传感器等波前测试仪器获得的光学元件面形数据;其二维坐标系必须与系统光路中各元件的反射面间相对坐标关系相对应,然后代入 CODE V 软件进行分析才能得到正确的结果。CODE V 软件提供将各个面形测量结果进行二维镜像变换的功能,以保证任何检测光路获取的面形

检测数据均可与实际光学系统中光学元件相对空间关系相符。由于光学系统波像差的代数叠加效应,如果上述关系颠倒,由于实际镜面残余面形误差的存在,代入软件的分析结果将会由于波面相互补偿而偏离实际系统的波像差。

根据主次镜系统中各光学零件面形的干涉检测结果,预先通过光学计算软件 CODE V 对系统成像质量进行更接近实际的分析,用以指导光学装调,较理想系统公差分析方法达到更精确的分析效果,并且作为实用的计算机辅助装调工艺的分析计算基础,具有工程实用价值。

参考文献

- [1] de ALBUQUERQUEA B F C, LOPES R V F, KUGA H K. Misalignment parameters estimation in refractive optical systems[C]. *SPIE*, 2008, **7068**: 70680p-1.
- [2] LIU Jian-feng. Study on computer aided alignment method [C]. *SPIE*, 2005, **5638**: 674-681.
- [3] OH E S. Integration of differential wavefront sampling with merit function regression for efficient alignment of three-mirror anastigmatic optical system[C]. *SPIE*, 2010, **7793**: 77930F-1.
- [4] ZHENG Li-gong. Computer aided alignment for off-axis asphere null test[C]. *SPIE*, 2005, **5638**: 319-323.
- [5] CHEN Qin-fang, LI Ying-cai. Computer aided alignment of off-axis aspheric mirrors in null testing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2220-2223.
陈钦芳,李英才.离轴非球面反射镜补偿检验的计算机辅助装调技术研究[J].光子学报,2010, **39**(12):2220-2223.
- [6] JIANG Zhen-yu, LI Lin. Computer aided alignment method of segmented primary mirror system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1858-1861.
姜震宇,李林.拼接子镜系统计算机辅助装调研究[J].光子学报,2009, **38**(7):1858-1861.
- [7] LIU Ke. Computer aided alignment of a 20X schwarzchild projection optics[C]. *SPIE*, 2008, **7130**: 421-426.
- [8] HOWARD J M. Wavefront aberration due to alignment and figure compensation[C]. *SPIE*, 2007, **6675**: 667503-2.
- [9] SEONG K, GREIVENKAMP J E. Surface figure measurement based on the transmitted wavefront with reverse ray tracing[J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**(4): 043602-1.
- [10] RIMMER M P. A computer aided optical alignment method [C]. *SPIE*, 1990, **1271**: 363-368.

Alignment Analysis of Large Aperture RC System Based on Wavefront Aberration Test

DUAN Xue-ting^{1,2}, ZHOU Ren-kui¹, CHEN Jian-jun^{1,2}, FU Xing¹, LI Hua¹

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Image quality analysis by CODE V software can obtain more accurate result of a main-secod mirror optical system based on each surface's real wavefront aberration of surface error, and this result can be used to direct the alignment of the system. A 520 mm diameter RC system is analyzed, and the result is compared with real interferogram of surface error and non. It is shown that the former result is more close to the real wavefront aberration tested by a interferometer, which proves the feasibility and reliability of the proposed method used in optical alignment engineering.

Key words: Optical alignment; Computer aided alignment; CODE V software; Wavefront aberration testing