

文章编号: 1005-5630(2014)05-0413-03

利用 Zemax 评估 RC 光学系统研究

吕占伟¹, 聂真威²

(1. 中国人民解放军 91550 部队, 辽宁 大连 116023;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 针对 RC(里奇-克莱琴)光学系统主次镜都为双曲面且轴外视场像散较大的特点, 需要对这类光学系统的加工和装调过程进行分析, 以明确加工误差和测试失调量对光学系统的影响。利用干涉仪和光学设计软件 Zemax, 对这类光学系统的光学特性进行分析。通过测试波像差与 Zemax 模拟结果的比对, 完成了对加工误差和失调量的准确判断。经过对加工误差和失调量的正确修改, 使光学系统的性能达到设计要求。

关键词: 波前像差; Zemax; RC 光学系统

中图分类号: TH 70; TH 74 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2014.05.009

Study on estimating RC optical system by using Zemax

LÜ Zhanwei¹, NIE Zhenwei²

(1. Unit 91550 of PLA, Dalian 116023, China; 2. Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: RC (Ritchey-Chretien) optical system has hyperboloidal primary and secondary mirrors, and the off-axis field has large astigmatism. The processing and alignment of RC optical system has some particular characteristics. The influence of errors in the processing and alignment of RC optical system need analyzing. The traits in the processing and alignment are evaluated by using interferometer and software Zemax. Comparing the tested wavefront with those simulated results of Zemax, the errors in the processing and alignment of an RC optical system are judged. After proper modifications of the processing errors and misalignments, the optical system meets the requirement of the design finally.

Key words: wave front aberration; Zemax; RC optical system

引言

目前对于光学系统的波像差检测可以通过商用干涉仪来进行, 但是如何利用波像差正确地分析光学系统的误差一直困扰着人们。元件的加工和装调误差往往引起光学系统波前像差的增加, 如果能够对已经装好的光学系统准确地分析出误差来源, 就可大大地加快装调进度, 提高系统的成像质量。随着计算机技术的发展, 出现了很多光学设计软件如 Zemax, Code V, Light Tool 等等。利用光学设计软件可以准确分析光学系统的光学特性, 并可以模拟失调引入的波前误差。根据光学系统的光学特性和波前信息, 可以正确判断加工误差和失调量。本文对主次镜均为双曲面的 RC 系统进行了分析, 通过干涉仪检测可

收稿日期: 2014-02-27

作者简介: 吕占伟(1974-), 男, 高级工程师, 主要从事装备计量检测方面的研究。E-mail: vanhelman@gmail.com

知光学系统波像差主要为像散。由于此 RC 系统的轴外视场具有较大的像散,不能准确得到误差来源,因此需要进一步的分析才能得到准确的结果。

1 光学系统测试原理

RC 光学系统的波像差采用自准法进行测量,测试原理如图 1 所示。调整光学系统与干涉仪之间位置,使干涉仪发出的球面波光束的球心与光学系统焦点重合。球面光束经过光学系统次镜和主镜反射后出射变成平面波,出射光束由一块标准平面镜反射后再次进入光学系统,携带有光学系统被测信息的反射光束进入干涉仪,与干涉仪的参考光束发生干涉,干涉图被干涉仪中的 CCD 记录,经过数据计算处理后可以获得光学系统的波像差。

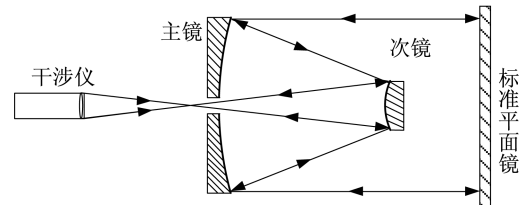


图 1 光学系统测试原理图

Fig 1 Schematic diagram of the optical system

测试过程中所使用的干涉仪为数字式移相干涉仪。这种干涉仪通过改变被测波前与参考波前之间的位相关系,获得多幅干涉图进行数据处理,具有精度高的优点。光学系统主镜的测量采用补偿镜干涉测量方式,次镜采用 Zygo 干涉仪环形拼接检测方式。

2 光学特性分析

设计的 RC 光学系统由双曲面特性的主次镜组成,视场为 $0^\circ, 0.5^\circ, 0.8^\circ$,图 2 展示了这种光学系统的像差特性,可见随着视场的增加波前像差中的像散会增加。此 RC 光学系统中心遮拦比为 0.347,对于此类具有中心遮拦的环孔径波面的传统像差分析需要 Zernike 环多项式进行拟合,但是干涉仪软件使用 Zernike 圆多项式进行拟合分析,而且 Zernike 环多项式拟合系数与 Seidel 像差并没有被广泛的应用。根据文献[1-6]的

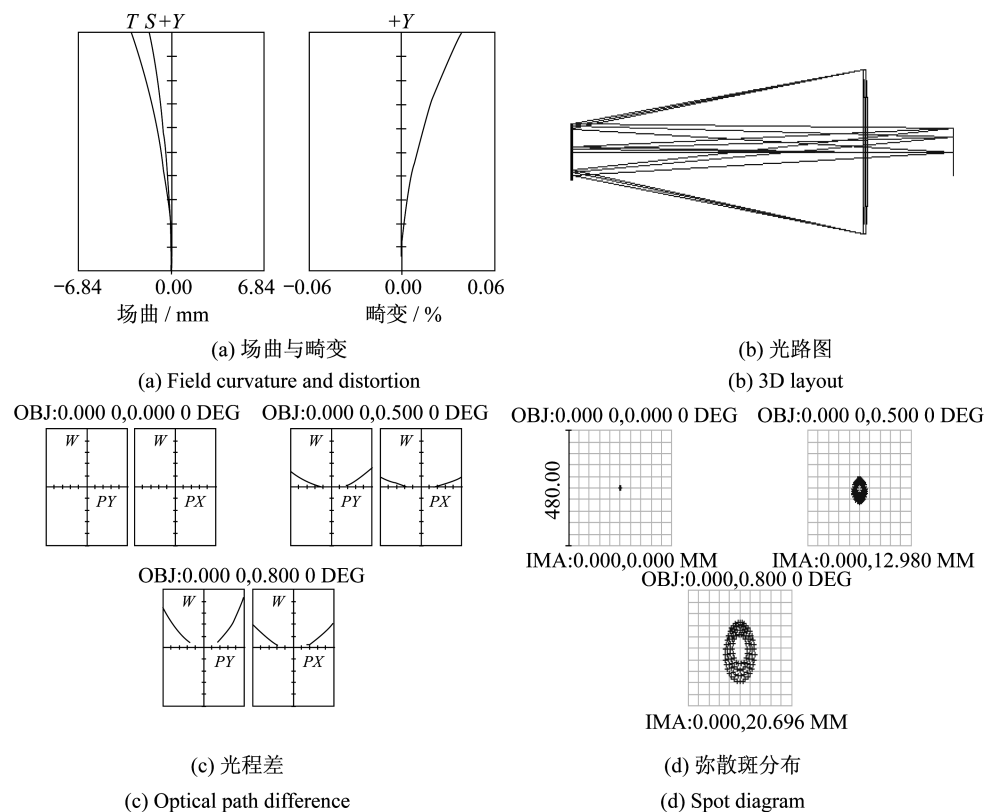


图 2 RC 光学系统设计报告

Fig. 2 The report of the RC optical system

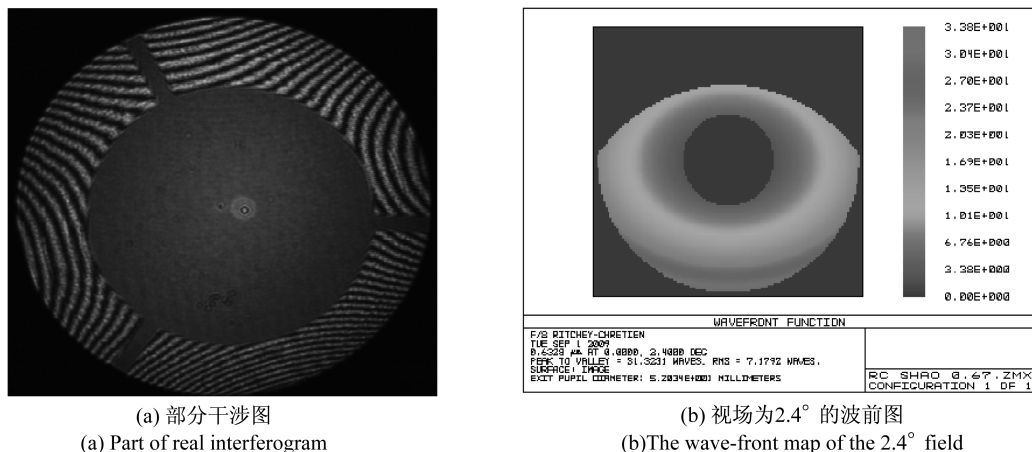
论述,对于较小孔径遮拦比的环孔径波面,利用 9 项 Zernike 圆多项式进行 Seidel 像差分析能够接近 Zernike 环多项式的计算结果。并且 Zernike 圆多项式计算的彗差和像散像差最接近 Zernike 环多项式的计算结果,能够被利用进行工程应用。本文波前的 Seidel 像差是利用 9 项 Zernike 圆多项式拟合求取的。

利用 Zemax 对 RC 系统不同视场的波前进行分析,使用 9 项 Zernike 圆多项式拟合,参考波长为 $\lambda=632.8\text{ nm}$ 。0°视场下没有像散和彗差,0.5°视场下具有 0.69 λ 的像散和 0.22 λ 的彗差,0.8°视场下具有 1.78 λ 的像散和 0.36 λ 的彗差。随着视场的增加,波前像散明显增加。

3 系统的误差分析

利用干涉仪对此 RC 光学系统进行波前检测,得到系统波像差如图 3(a)所示:系统像散为 16.418 1 λ ;彗差为 1.848 4 λ ;球差为 -2.053 9 λ 。

可见像散是最大的像差,由于光学系统的轴外视场也有像散,因此必须正确地分析此像差的来源。利用 Zemax 软件进行轴外视场模拟^[7-9],当像散量达到 16 λ 时,轴外视场达 2.4°,波前图如图 3(b)所示,波前已经被明显遮挡。同时干涉检测过程中像散一直居高不下,没有迅速衰减的现象,上述像散数据已是最小值,这可以证明检测中如此大的像散是由系统的加工或装调误差带来的,并不是轴外视场造成的。



(a) 部分干涉图
(a) Part of real interferogram

(b) 视场为 2.4° 的波前图
(b) The wave-front map of the 2.4° field

图 3 实际和模拟波前

Fig. 3 The real and simulated wave front map

对主镜和次镜分别进行面型检测,发现加工的两镜分别带有 1.129 λ 和 0.237 λ 的像散。利用 Zemax 将这些误差引入理想模型中,得到轴上波前有 2.27 λ 的像散,但是并没有彗差的引入。只对理想模型的主镜加入 1 λ 的像散,轴上波前的像散为 1.99 λ 。只在次镜中加入 1 λ 的像散,轴上波前的像散为 1.33 λ 。可见,主镜面形的像散会对波前像散更为敏感。可以认为主镜中在装调有更大的像散,经分析装调的主镜中有 8 λ 左右的像散。同时认为主次镜之间有 3 mm 左右的偏心引入了 2 λ 彗差。

将主镜装入镜筒进行波像差检测,发现了 7 λ 左右的像散。经调整消除了像散,并将主次镜之间偏心进行适当的调节,光学系统的像差明显减小,达到了设计要求。

4 结论

RC 光学系统具有轴外视场像散大的特点,难以准确判断测试过程中像散的准确来源。本文利用 Zemax 对 RC 光学系统的误差做出了准确的分析,对误差进行了修正。最终装调好的 RC 光学系统的波像差达到了设计要求。同时,在工程中对于具有较小中心遮拦比环孔径波面,Seidel 像差可以利用 9 项 Zernike 圆多项式拟合求取。这一结论在本文的实际应用中也得到了很好的验证。

(下转第 419 页)

目前,已完成该光学系统的结构设计和镜头的试制,用该显微镜观测到的细胞如图6所示,观测结果较清晰。

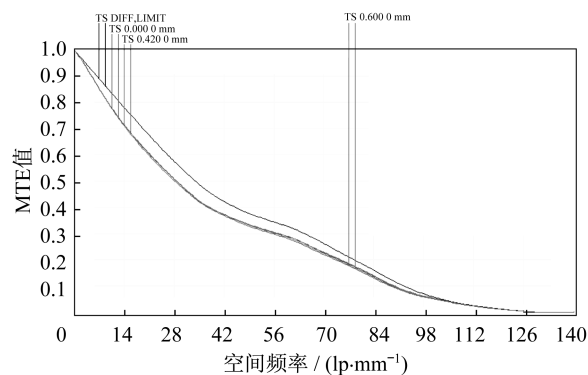


图5 调制传递函数

Fig. 5 Transfer function of the modulation

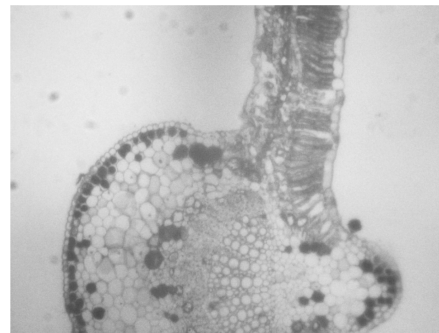


图6 细胞观测图

Fig. 6 Observation of cells

4 结论

分析了长工作距视频显微镜的像差特点,并提供了设计指标、CCD参数及设计实例。通过合理的结构选型和优化设计,并考虑加工工艺和结构成本要求,获得了一种长工作距视频显微镜镜头,其结构简单、加工成本低、成像质量好以及具有较高的分辨率。目前,已完成该光学系统的结构设计工作和镜头的试制,若样机性能指标达到预期的要求,有望在长工作距离的观察中得到广泛应用。

参考文献:

- [1] 张 斌. 大视场显微镜的设计[J]. 光学仪器, 2003, 25(4): 81-83.
- [2] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 284-289.
- [3] 王文生. 应用光学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010: 183-188.
- [4] 王之江, 顾培森. 现代光学应用技术手册(上册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 290-295.
- [5] 刘 钧, 高 明. 光学设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006: 120-121.

=====

(上接第 415 页)

参考文献:

- [1] MELOZZI M, PEZZATI L. Interferometric testing of annular aperture specification and measurement of optical systems[J]. *SPIE*, 1992, 1781: 241-248.
- [2] 侯 溪, 伍 凡, 杨 力, 等. 中心遮拦干涉图的圆泽尼克拟合对计算赛德尔像差的影响分析[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 54-60.
- [3] TATIAN B. Aberration balancing in rotationally symmetric lenses[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, 64(8): 1083-1091.
- [4] MAHAJAN N V. Zernike annular polynomials and optical aberrations of systems with annular pupils[J]. *Supplement to Applied Optics*, 1994, 33(34): 8125-8132.
- [5] DAI G M, MAHAJAN N V. Zernike annular polynomials and atmospheric turbulence[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2007, 24(1): 139-155.
- [6] MALACARA D. Optical shop testing[M]. 3rd ed. 2007: 525-539.
- [7] 何湘艳, 陈莹花, 廖文哲, 等. 基于 Zemax 的简单连续变倍显微物镜设计[J]. 光学仪器, 2013, 35(5): 41-45.
- [8] 胡肖彦, 吕丽军. 基于平面对称光学系统像差理论的折反射全景成像系统优化设计[J]. 光学仪器, 2012, 34(1): 45-49.
- [9] 李 利, 吴 平, 马 鹤. 大相对孔径折射式复消色差天文望远镜物镜设计[J]. 光学仪器, 2012, 34(3): 29-32.