

文章编号 1004-924X(2015)02-0342-07

## 大型光学设备检测中大口径 平行光管波像差的消除

李 响<sup>1,2\*</sup>, 张晓辉<sup>1</sup>

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

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 使用大口径平行光管检测大型光学设备或元件时, 平行光管的自身误差会影响检测结果, 故本文提出了一种消除光学检测结果中平行光管引入误差的新方法。该方法使用干涉仪获取平行光管和光学检测系统的出射波前信息并以 37 项 Standard Zernike Phase 多项式进行拟合; 通过两组系数相减分离平行光管引入误差, 再配合 ZEMAX 中建立的等效被检光学系统的仿真模型模拟真实系统的出射光锥, 最终获得被检光学系统真实的出射波前信息。利用 ZEMAX 中的光学系统模型验证了该方法在大口径光学检测工作中的可行性; 使用焦距为 1 597 mm, 口径为 150 mm 的小型平行光管、焦距为 50 mm 的光学镜头进行了实验。实验结果表明: 使用该方法获得的被检光学系统出射波前与真实波前的 P-V 值误差小于  $0.005\lambda$ , RMS 值误差小于  $0.001\lambda$ , 可以满足实验室中对被检光学系统成像质量参数检测的精度要求。

**关键词:** 光学检测; 大型光学设备; 平行光管; 像差; 误差分离; Zernike 多项式; ZEMAX

**中图分类号:** TH741.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152302.0342

## Elimination of wavefront aberration introduced from large aperture collimator in detection of large optical device

LI Xiang<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Xiao-hui<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: abelfeel@163.com*

**Abstract:** When a large aperture collimator is used to test large aperture optical devices or components, the error introduced by the collimator will effect the measuring accuracy. This paper proposes a new method to eliminate the error from optical test results. The method uses an interferometer to obtain wavefront information of the collimator and the optical testing system, and adopts 37 Standard Zernike Phase polynomials to fit the wavefront. The error introduced by the collimator is then separated by subtraction of two sets of coefficients and the true wavefront information of tested optical system is obtained by simulating the light cone of a real optical system using the simulation model of tested optical system established in ZEMAX. The feasibility of this method in large aperture optical tes-

收稿日期: 2013-10-22; 修订日期: 2013-12-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61307114)

ting is verified by using the optical system model in ZEMAX, and an experiment is performed by using a small collimator with a focal length of 1 597 mm and an aperture of 150 mm, as well as a camera lens with a focal length of 50 mm. The experiment results show that the calculated wavefront P-V error is less than  $0.005\lambda$  and the RMS error is less than  $0.001\lambda$  after eliminating collimator error as compared to the real tested optical system wavefront. It meets the accuracy requirement of testing optical systems for image quality parameters in a laboratory.

**Key words:** optical test; larger optical device; collimator; aberration; error separation; Zernike polynomial; ZEMAX

## 1 引言

在空间遥感器等大型光学设备或大口径光学元件的光学检测工作中,大口径平行光管是最基本的检测设备,其像质的好坏直接影响着检测结果的准确程度。随着空间光学技术的不断发展,空间相机、空间望远镜等光学载荷的口径、焦距、分辨率以及成像质量等都在不断提高,而这种趋势推动着光学检测技术的进步。为了保证检测精度并满足被检设备的发展要求,对平行光管口径和像质的要求越来越高,平行光管的制造成本也在不断增加,而且随着平行光管与被检光学设备的像质差距不断缩小,平行光管对检测精度的影响逐渐增大,这些都给其光学设计带来了一定的难度。

目前,国内外主要采用两种方法解决以上问题。第一种方法是建立超大型平行光管以及配套的检测设备体系,例如:美国贝尔航空技术公司的口径为 1.5 m 的 VCA 系统<sup>[1]</sup>、洛克希德-马丁空间系统公司的口径为 6 m 的 LOTIS 系统<sup>[2]</sup>和俄罗斯的口径为 3.4 m 的 VERTICAL 系统<sup>[3]</sup>等。这些系统不但包括大口径长焦距的平行光管,而且多数配备了波前传感器、干涉仪等波前监测设备。它们通过主动光学技术实时调整平行光管的出射波前,使得平行光管对被检光学设备的影响降到最低,从而大大提高了检测精度。但是这种方法的技术难度较大、制造成本高、周期长,中小项目难以负担,只适合于大型科研项目。第二种方法是在设计空间相机、望远镜等大型光学设备时考虑平行光管所引入的误差,留有足够的误差余量,使得被检光学设备进行整机测试时可以达

到项目的指标要求。这种方法目前已经被广泛应用,但随着空间遥感器的像质与平行光管的差距不断缩小,平行光管的光学设计部分的压力越来越大。

为了降低平行光管对光学检测结果的影响,本文利用干涉仪获取检测系统与平行光管的出射波前信息,并通过 37 项 Standard Zernike Phase 多项式系数进行输出与计算,即在检测系统的出瞳处消除平行光管引入的畸变波前,最终利用 ZEMAX 中建立的等效模型模拟被检光学系统的出射波前。文中在 ZEMAX 环境下通过仿真验证确定了提出方法的可行性和检测精度范围,并使用焦距为 1 597 mm,口径为 150 mm 的小型平行光管与光学镜头进行了实验。该方法有效地消除了光学检测时由平行光管引入的系统误差,如实地反映了被检光学系统本身的成像质量并且使光学检测精度不再受平行光管制造精度的限制。

## 2 光学系统检测原理

### 2.1 平行光管的误差分析

在光学检测中,平行光管一般用于模拟无穷远的目标,为被检光学系统提供一个较为理想的入射平面波,并在被检光学系统的出瞳面上形成系统的出射波前(见图 1)。系统的波像差正是以系统出瞳处参考波前与出射波前的光程差来评价被检光学系统成像质量的。实际上,系统的出射波前不仅包含被检光学系统的成像信息,还包括平行光管出射的波前信息,只是由于平行光管的波前畸变比被检光学系统小很多,所以一直被忽略。但随着被检光学系统成像质量的逐步提升,平行光管开始影响检测结果并导致检测精度降低。

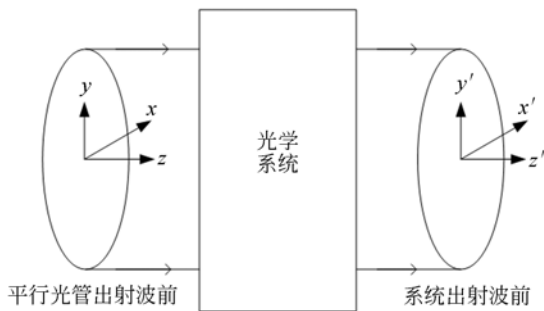


图 1 使用平行光管进行光学检测原理图

Fig. 1 Principle of optical detection using collimator

## 2.2 其他误差的分析

在自准直检测过程中,除了使用平行光管以外一般还需采用标准平面镜,所以严格地说自准直检测得到的结果中除了平行光管引入的误差外还包括标准平面反射镜引入的误差。但随着制造技术的不断提高,平面反射镜的制造技术已经相当成熟,尤其是作为检测用的标准镜,加工精度不断提高,面型误差一般优于  $\lambda/50$ 。所以在日常的检测工作中由标准平面镜引入的误差不会影响系统的检测精度,基本上可以忽略。

除此之外,理论上干涉仪也会引入一定的系统误差,但是在正常情况下 4D 干涉仪与 ZYGO 干涉仪每年都会进行专业的校准与调试,以保证其检测精度,所以在检测工作中由干涉仪引入的误差不足以影响检测系统的精度。因此本文主要考虑由平行光管自身波像差对被检光学系统出射波前的影响。

## 2.3 平行光管误差的消除

当平行光管发出的平面波经过光学系统形成出射波前时,由于光学系统中存在像差,导致实际出射波前与理想波前在系统出瞳处产生了一定的光程差,即被检系统的波像差。由于平行光管本身也存在像差,所以其发射的畸变平面波与理想平面波同样存在光程差,导致被检系统的出射波前与理想波前的光程差发生了变化。根据马吕斯定律,光学系统的入射波前与出射波前对应点之间的光程均为定值,因此平行光管出射的畸变波前产生的光程差被叠加到了系统的出射波前上,此时对光学系统的像质评价指标并不能真实地反应其成像质量。

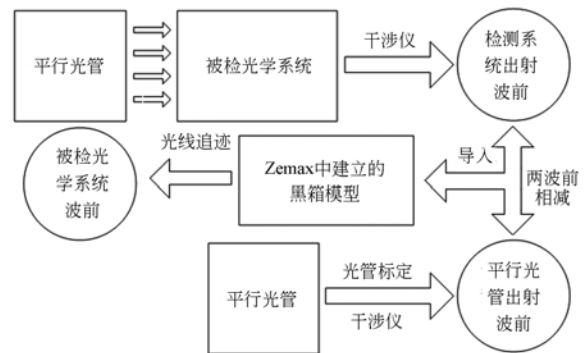


图 2 平行光管误差消除流程图

Fig. 2 Flow chart for error elimination of collimator

如图 2 所示,本文使用 4D 干涉仪分别检测组合系统和平行光管,并获取各自的出射波前信息以及相应的 Zernike 系数。然后通过两种出射波前 Zernike 系数相减分离出在光学系统出瞳处由平行光管畸变波前引入的额外光程差,并将得到的计算结果以波前文件的格式导入到已建好的 ZEMAX 等效光学模型中,最后通过光线追迹得到被检光学系统真实的出射波前。利用以上方法可以从常规的光学检测结果中消除由平行光管引入的额外像差,从而得出最接近光学系统真实波前的结果。

从平行光管发射出的平面波前  $W_c$  沿  $z$  轴方向从左向右传播(如图 1 所示),经过光学系统在其出瞳位置形成被检出射波前  $W_{sum}$ 。如前文所述,此时的出射波前不仅包括光学系统的波像差  $W_s'$ ,还包括平行光管引入的波像差  $W_c'$ 。

$$W_{sum} = W_0 + W_{sum}' = W_0 + W_c' + W_s', \quad (1)$$

其中: $W_0$  为参考波前, $W_{sum}'$  为组合系统的总波像差。

由于光学系统的口径和成像质量的不断提高,平行光管波像差  $W_c'$  对于总的出射波前  $W_{sum}$  的影响逐渐增强,致使光学系统的波前  $W_s$  与  $W_{sum}$  逐渐偏离。

$$W_s = W_0 + W_s', \quad (2)$$

本文用平行光管标定时检测的波面信息  $W_c$  与  $W_{sum}$  相减来消除由平行光管引入的像差,得到光学系统真实的出射波前。

$$W_c = W_0 + W_c', \quad (3)$$

$$W_s = W_{sum} - W_c + W_0, \quad (4)$$

## 2.4 Zernike 多项式

利用 Zernike 多项式可以方便拟合光学系统

的出射波前<sup>[4-7]</sup>,并且建立光学系统各种像差间的联系,其基本表达式为:

$$W(x, y) = a_1 Z_1(x, y) + a_2 Z_2(x, y) + \cdots + a_n Z_n(x, y) = \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n A_{nm} Z_{nm}(\rho, \theta) = \begin{cases} \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n A_{nm} R_n^{n-2m}(\rho) \cos(n-2m)\theta & (n-2m \geq 0) \\ \sum_{n=0}^k \sum_{m=0}^n A_{nm} R_n^{n-2m}(\rho) \sin(n-2m)\theta & (n-2m < 0) \end{cases}, \quad (5)$$

其中:  $R_n^{n-2m}(\rho)$  为径向函数,定义为:

$$R_n^{n-2m} = \begin{cases} \sum_{s=0}^m (-1)^s \frac{(n-s)!}{s!(m-s)!(n-m-s)!} \rho^{n-2s} & (n-2m \geq 0) \\ R_n^{|n-2m|} & (n-2m < 0) \end{cases}, \quad (6)$$

式中:  $k$  为大于零的整数;  $n=0, 1, 2, \dots, k$ ;  $m=0, 1, 2, \dots, n$ ;  $\rho$  为标准化半径;  $\theta$  为极角;  $A_{nm}$  是 Zernike 系数。

由上式可知, Zernike 多项式在连续的单位圆上正交且标准化,具有旋转对称性,与几何像差有着一定的对应关系,并可以根据需要对 Zernike 系数进行运算得到其所拟合波前的相应运算关系。不同用途的 Zernike 多项式具有不同的形式,其中 Standard Zernike Sag 多项式描述的是光学表面的物理形变量,适用于拟合光学表面的形变与缺陷,并且通过调整相应的多项式系数可

以直接改变光学元件表面,使光学系统产生特定的几何像差或波像差,本文中可以用于在 ZEMAX 仿真验证阶段中向平行光管与被检光学系统中加入合适的像差。而 Standard Zernike Phase 多项式以实际波前与参考波前之间的光程差衡量系统出射波前的畸变,与干涉仪的检测原理相同,以波长为单位,在本文中用于编写波前信息文件,使干涉仪检测到的波前信息可以有效地导入 ZEMAX 中进行光线追迹<sup>[8]</sup>。

由上文对 Zernike 多项式的表述可知,式(1)中的波像差  $W_{\text{sum}}', W_c', W_s'$  可表示成如下形式:

$$W'(x, y) = a_1 Z_1(x, y) + a_2 Z_2(x, y) + \cdots + a_n Z_n(x, y) = \begin{bmatrix} Z_1(x_1, y_1) a_1 + Z_2(x_1, y_1) a_2 + \cdots + Z_n(x_1, y_1) a_n \\ Z_1(x_2, y_2) a_1 + Z_2(x_2, y_2) a_2 + \cdots + Z_n(x_2, y_2) a_n \\ \cdots \\ Z_1(x_m, y_m) a_1 + Z_2(x_m, y_m) a_2 + \cdots + Z_n(x_m, y_m) a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1(x_1, y_1) & Z_2(x_1, y_1) & \cdots & Z_n(x_1, y_1) \\ Z_1(x_2, y_2) & Z_2(x_2, y_2) & \cdots & Z_n(x_2, y_2) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_1(x_m, y_m) & Z_2(x_m, y_m) & \cdots & Z_n(x_m, y_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \cdots \\ a_n \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \mathbf{a}^T, \quad (7)$$

把式(7)带入式(4)中,得:

$$W_s = W_{\text{sum}} - W_c + W_0 = W_{\text{sum}}' - W_c' + W_0 = \mathbf{Z}(\mathbf{a}_{\text{sum}}^T - \mathbf{a}_c^T) + W_0, \quad (8)$$

其中:  $\mathbf{a}_{\text{sum}}^T$  表示组合系统总波像差的 Zernike 系数,  $\mathbf{a}_c^T$  表示平行光管波像差的 Zernike 系数。由此得到被检光学系统真实的出射波前  $W_s$ 。

### 3 仿真验证

为了验证上述方法能否成功地消除平行光管

引入的波像差,本文在 ZEMAX (ZEMAX-EE, Version June 9, 2009) 环境下进行了仿真验证实验。

首先建立一个口径为 600 mm, 焦距为 7 m 的卡塞式望远镜光学系统模型(见图 3(a))作为被检光学系统,并在主镜上使用自定义的 Standard Zernike Sag 多项式表面(使用其他多项式也可以,只要能够模拟系统的出射波前畸变即可)。令光学系统出射波前发生畸变(见图 4(a)),使其波前峰谷误差(PV 值)为  $0.3738\lambda$ , 波前均方根误差(RMS 值)为  $0.0717\lambda$ 。然后建立一个与被

检光学系统等口径且焦距为 18 m 的牛顿式平行光管模型(见图 3(b)),用于发射平面波,在光管主镜上同样使用 Standard Zernike Sag 多项式表面使其出射波前发生畸变。模拟干涉仪标定平行光管的原理,建立平面镜自准直法检测平行光管的模型,得到平行光管的出射波前(见图 4(b)) PV 值为  $0.3354\lambda$ ,RMS 值为  $0.0547\lambda$ ,并通过自编的 ZEMAX 宏命令输出平行光管出射波前的 Standard Zernike Phase 系数(模拟干涉仪的数据导出过程)。

使用平行光管发射平面波检测光学系统(见图 3(c)),得到组合系统总的出射波前(见图 4(c))的 P-V 值为  $0.5294\lambda$ ,RMS 值为  $0.0843\lambda$ ,输出相应的 Standard Zernike Phase 系数。这一步得到的检测结果就是一般情况下利用平行光管检测其他光学设备或元件的最终检测结果,其中包含了平行光管引入的波像差。

由于之前导出的两组 Zernike 系数都经过归一化,所以可以根据式(8)计算 Zernike 系数,从而消除平行光管引入的波像差对检测结果的影响,得到以 Zernike 系数表示的被检光学系统的出射波前。最后把得到的这组 Zernike 系数导入 ZEMAX 中建好的等效光学模型中,模拟被检光学系统的出射光锥(见图 3(d)),最终通过光线追迹得到被检光学系统的出射波前信息(见图 4(d))。由于光学系统的出射波前一般指的是光学系统出瞳处的波前状态,即拟合出射波前的 Zernike 多项式也是基于光学系统的出瞳大小进行标准化的,所以使用出瞳大小和出瞳位置模拟光学系统的出射光锥最接近真实情况。

如图 4 所示,本方法最终得到的模拟波前相比被检光学系统的真实出射波前的 P-V 值误差为  $0.0032\lambda$ ,RMS 误差为  $0.0003\lambda$ ,可以满足实验室对于波像差检测的精度要求。

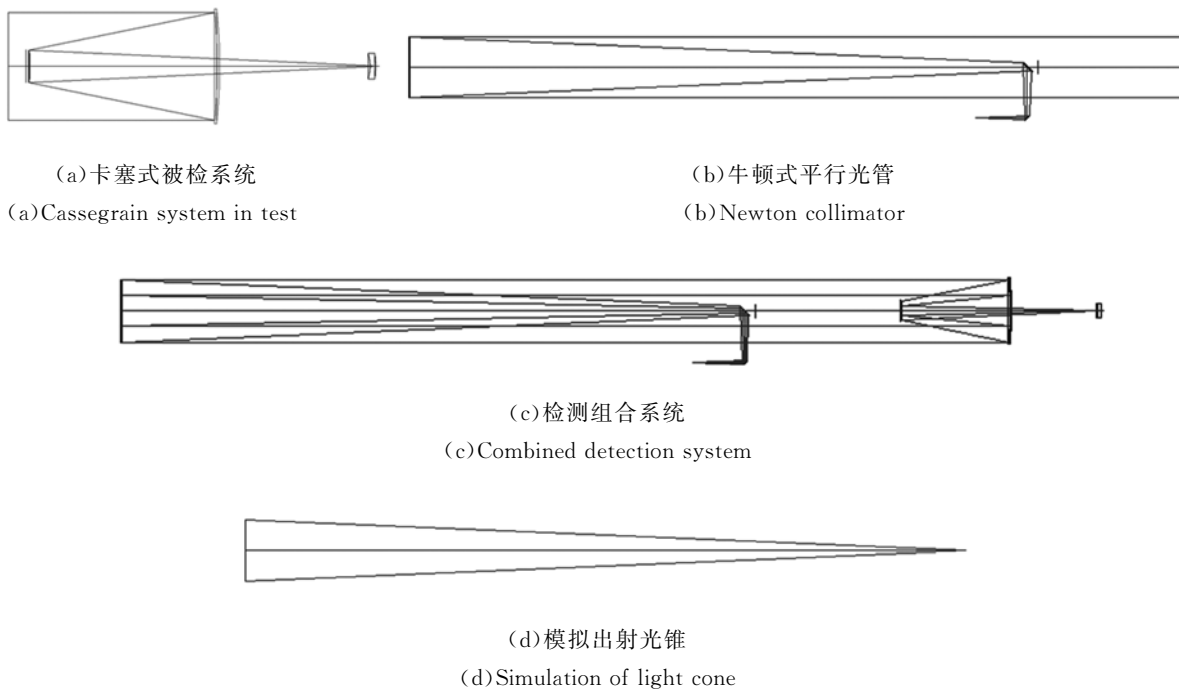


图 3 仿真光学系统模型

Fig 3 Simulation models of optical system

## 4 实验验证

为了进一步验证本方法的可行性,本文使用

口径为 150 mm、焦距为 1 597 mm 的小型平行光管和焦距为 50 mm 的光学镜头进行了实验。

首先使用 4D 干涉仪和平面镜标定平行光管的焦平面位置<sup>[9-11]</sup>,同时监测平行光管出射波前的状态,多次测量后保存相应的波前信息并计算

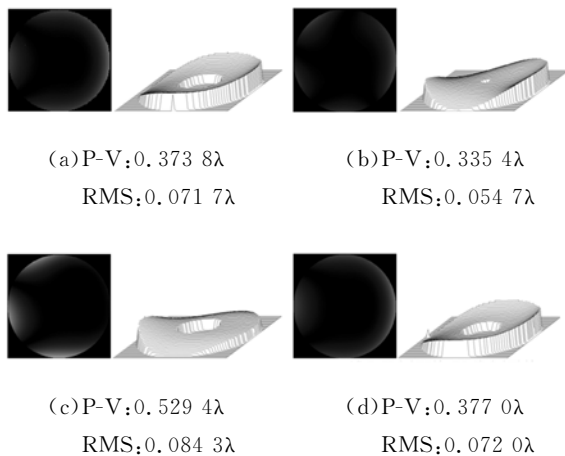


图4 仿真波前面型图

Fig. 4 Simulation wavefront surfaces

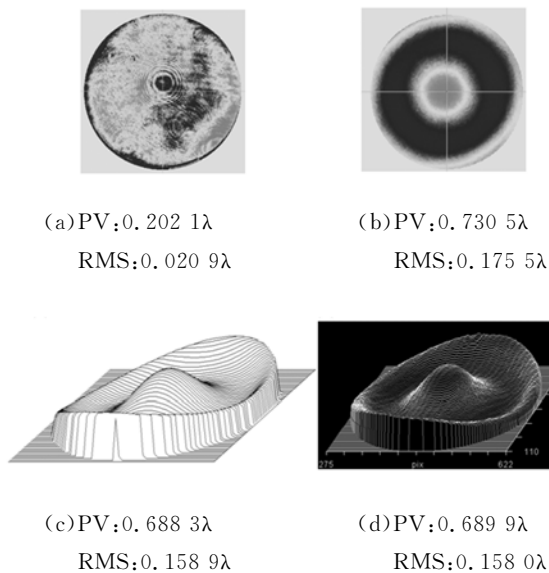


图5 实验结果图

Fig. 5 Experiment results

出平均 Zernike 系数  $\mathbf{a}_c^T$ , 如图 5(a)所示。图中数据为 5 次测量的平均值。

然后把被检镜头放入调好的光路中并调整它与平行光管的相对位置,使两者光轴平行并确保由平行光管发出的平行光能完整覆盖被检镜头的全口径。使用 4D 干涉仪监测被检镜头的成像质量,多次测量后保存相应的出射波前信息并计算出平均 Zernike 系数  $\mathbf{a}_{\text{sum}}^T$ ,如图 5(b)所示。图中数据为 5 次测量的平均值。

把之前得到的两组 Zernike 系数  $\mathbf{a}_{\text{sum}}^T, \mathbf{a}_c^T$  相减并将结果编写成波前文件导入 ZEMAX 中,

利用建立好的等效光学模型进行光线追迹,计算实现了式(8)的波前还原过程,分离了由平行光管引入的系统误差,最终得到了被检光学系统的等效出射波前,如图 5(c)所示。

使用 ZYGO 干涉仪检测被检镜头得到了其出射波前,如图 5(d)所示。图中数据为 5 次测量的平均值。实验结果表明,本方法获得的被检光学系统的出射波前 PV 值为  $0.688\ 3\lambda$ ,RMS 值为  $0.158\ 9\lambda$ ,相比镜头本身的出射波前 PV 值  $0.689\ 9\lambda$ ,RMS 值  $0.158\ 0\lambda$ ,可知本方法获得的出射波前模拟精度的 P-V 值误差为  $0.001\ 6\lambda$ ,RMS 值误差为  $0.000\ 9\lambda$ ,能够满足实验室中对光学系统成像质量参数的检测精度要求。

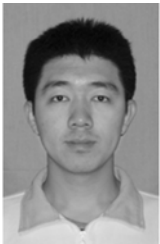
## 5 结 论

本文使用干涉仪检测光学系统与平行光管并以 Standard Zernike Phase 系数的形式导出其波前信息,以消除平行光管在检测系统中引入的误差。在 ZEMAX 建立的被检光学系统等效模型中导入 Standard Zernike Phase 系数的计算结果并进行光线追迹,获得了被检光学系统自身的出射波前信息。该方法可以有效地消除平行光管加工、装调或是环境因素引起的误差对光学检测结果的影响,从而获得光学系统真实的波前信息。在 ZEMAX 环境下的仿真实验表明,模拟波前相比被检光学系统的真实出射波前的 PV 值误差为  $0.003\ 2\lambda$ ,RMS 误差为  $0.000\ 3\lambda$ 。使用口径为 150 mm、焦距为 1 597 mm 的小型平行光管和焦距为 50 mm 的光学镜头进行了实验,结果显示本方法获得的光学系统的出射波前相比镜头本身的出射波前的 P-V 值误差为  $0.001\ 6\lambda$ ,RMS 值误差为  $0.000\ 9\lambda$ 。由此表明,本方法测得的光学系统出射波前相比其真实波前的 PV 值误差小于  $0.005\lambda$ ,RMS 值误差小于  $0.001\lambda$ ,能够满足实验室中对光学系统出射波前的检测精度要求,有效地消除了平行光管引入的系统误差,如实地反映了被检光学系统的成像质量,并且使检测精度不再受平行光管制造精度的限制。

## 参考文献:

- [1] SABATKE D, MEYER S, SIEGEL N, *et al.*. Vertically configured collimator for cryogenic, vacuum testing of meter scale optical systems [J]. *SPIE*, 2007, 6671, 667108:1-10.
- [2] BELL R M, ROBINS G C, EUGENI C E, *et al.*. LOTIS at completion of collimator integration [J]. *SPIE*, 2008, 7017, 70170D:1-13.
- [3] SERGEEV P A, MIROSHNIKOV M M, ZAKHARENKOV V F, *et al.*. Large optical test facility 'vertical' for space telescopes testing [J]. *SPIE*, 1994, 2199:1046-1051.
- [4] WYANT J C. *Optical Testing and Testing Instrumentation* [M]. University of Rochester, 1985:25-78.
- [5] 元波, 陈洪斌, 刘顺发. Zernike 多项式波面拟合的回归分析方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3): 396-400.  
QI B, CHEN H B, LIU SH F. Regression analysis of wavefront fitting using Zernike polynomial [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 396-400. (in Chinese)
- [6] 单宝忠, 王淑岩, 牛慈笨, 等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(3): 319-323.  
SHAN B ZH, WANG SH Y, NIU H B, *et al.*. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(3): 319-323. (in Chinese)
- [7] 杨飞, 安其昌, 张景旭. 基于功率谱的反射镜面形评价[J]. *中国光学*, 2014, 7(1): 156-162.  
YANG F, AN Q CH, ZHANG J X. Mirror surface figure evaluation based on power spectral density [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 156-162. (in Chinese)
- [8] User's Guide [M]. ZEMAX Optical Design Program, 2009.
- [9] 史广维. 基于矢量波像差理论的反射望远镜系统装调研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.  
SHI G W. *Study of Reflective Telescopes Alignment Based on Vector Wavefront Aberration* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [10] 张金平. 夏克-哈特曼波前传感器检测大口径非球面应用研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.  
ZHANG J P. *Research on Testing Aspherical Surface Using Shack-Hartmann Wavefront Sensor* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [11] 陈宝刚, 明名, 吕天宇. 大口径球面反射镜曲率半径的精确测量[J]. *中国光学*, 2014, 7(1): 163-168.  
CHEN B G, MING M, LÜ T Y. Precise measurement of curvature radius for spherical mirror with large aperture [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 163-168. (in Chinese)

## 作者简介:



李响(1986—),男,吉林长春人,博士研究生,2009年于长春理工大学获得学士学位,主要从事光学检测技术的研究以及光学检测设备的研发工作。E-mail: abelfeel@163.com

## 导师简介:



张晓辉(1967—),女,吉林长春人,硕士生,研究员,博士生导师,1991年于中国科学院长春光机所获得硕士学位,主要从事空间光学遥感器的光学系统、整机成像系统的成像质量、评价指标的检测方法与检测设备的研制工作。E-mail: zhangxiaohui0123@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)