

# 无限远前后零位补偿结合的非球面检验

王欣\*, 刘强, 周浩, 贾建军, 舒嵘

中国科学院上海技术物理研究所空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083

**摘要** 利用有限远零位补偿方法检验非球面时, 装调环节多, 检验精度低。提出了无限远前后零位补偿结合的非球面检验系统, 通过在待检镜球心前后位置处各放置一个补偿透镜, 使像差在前后区间具有相关性。基于像差理论, 对两片补偿透镜的光学参数进行了推导求解, 分析了初始参量与归一化数据的关系, 再利用光学软件对计算结果进行缩放与优化。在不同的前零位补偿透镜放大率下, 设计了四个具有不同曲率半径的凹抛物面镜, 并给出了非球面镜的最大口径和最大相对孔径。采用具有 1/10 口径比的补偿透镜, 实现了口径为 3.7 m、相对孔径为 1/1.2 的非球面镜面形检验, 面形波前误差峰谷 (PV) 值优于  $0.1\lambda$  ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ )。容差分析结果证明了检验系统的可行性。针对口径为 500 mm、相对孔径为 1/1 的抛物面镜开展了原理实验, 从可检验的最大非球面镜口径和实施难度方面对所提方法与常用方案进行了比较, 前后零位补偿结合系统的设计面形波前误差 PV 值为  $0.061\lambda$ , 面形波前误差均方根 (RMS) 值为  $0.009\lambda$ , 实现了面形波前误差 RMS 值优于  $\lambda/40$  的检测精度。前后零位补偿结合的检验系统适用于具有 4 m 量级大口径、大相对孔径的非球面镜的高精度面形检测。

**关键词** 光学设计; 几何光学; 非球面辅助光学系统; 零位补偿检验; 无限远光路; 三级像差理论

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1722003

## Aspheric Test Combining Front and Back Null Compensation for Infinite Optical Path

Wang Xin\*, Liu Qiang, Zhou Hao, Jia Jianjun, Shu Rong

Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

**Abstract** The aspheric test via finite distance null compensation is limited by too many adjustment factors and low test precision. Here we establish an aspheric test system by integrating front null compensation with back null compensation, in which a compensation lens is used before and after the spherical center of the mirror to be tested and thus the front and back areas show aberration correlation. First, based on the aberration theory, the optical parameters of two compensation lenses are theoretically derived and solved, and the relationship between the initial parameters and the normalized data is analyzed. Then the normalized results are scaled and optimized by the optical design software. Four concave parabolic mirrors with different curvature radii are designed under different magnifications of front null compensation lenses. The maximum aperture and the maximum relative aperture of the aspheric mirror are obtained. The compensation lens with a 1/10 aperture ratio is used to realize the aspheric test of an aspheric mirror with a large aperture of 3.7 m and a large relative aperture of 1/1.2, and the peak-valley (PV) value of the residual wavefront error is superior to  $0.1\lambda$  ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ). The tolerance analysis confirms that the test system is feasible. The principle experiment is conducted for the parabolic mirror with an aperture of 500 mm and a relative aperture of 1/1. The maximum diameter of the aspheric mirror and the difficulty of implementation are compared between the proposed method and the classical configuration. The PV value and the RMS value of the designed wavefront error of the test system combining front and back null compensation is  $0.061\lambda$  and  $0.009\lambda$ , respectively. The RMS value is superior to  $\lambda/40$ . The test system combining front and back null compensation is suitable for the high-precision test of aspheric surfaces with 4 m large diameter and large relative aperture.

**Key words** optical design; geometric optics; aspheric auxiliary optical system; null compensation test; infinite optical configuration; third-order aberration theory

**OCIS codes** 220.4840; 220.1000; 220.1250

收稿日期: 2020-04-21; 修回日期: 2020-05-22; 录用日期: 2020-05-29

基金项目: 国家重大科技专项工程

\* E-mail: wangxin@mail.sitp.ac.cn

## 1 引 言

大口径光学系统在天文观测、空间遥感和地基空间目标探测预警等领域得到了广泛的应用。在光学系统中使用大口径非球面镜能提高系统性能,改善像质,减小光学元件数量以及降低系统复杂性<sup>[1-2]</sup>。在焦距一定的条件下,非球面镜口径越大即相对孔径越大,则光学系统接收的能量越多,弱小目标的探测概率就越高。具有大相对孔径的光学系统是高分辨率成像探测领域的热点需求之一,但是大相对孔径凹非球面主镜的加工和检测一直是光学领域的难题,随着非球面光学的应用发展,大相对孔径非球面元件的高精度检测具有重要的意义<sup>[3-4]</sup>。

目前,常用的凹非球面镜的检验方法主要有经典非球面检验和零位补偿非球面检验<sup>[5]</sup>。经典非球面检验是利用非球面镜自身的消像差点进行自准检验<sup>[6]</sup>,光线两次经过待检非球面镜。零位补偿非球面检验是利用补偿透镜生成的球差补偿待检凹非球面镜的法距差,进而进行自准检验,光线仅一次经过待检非球面镜<sup>[7]</sup>。经典非球面检验方法适用于一般口径和小相对孔径的非球面镜,而零位补偿非球面检验利用较小的补偿透镜或反射镜,可实现大口径凹非球面镜的检验<sup>[8-9]</sup>,所以应用更加广泛。

零位补偿检验中的补偿镜装调影响镜面的加工精度,因此必须严格控制补偿镜与被测镜的距离及补偿镜的偏心<sup>[10]</sup>,否则会引起无法预测的问题。如用于观测天体和研究银河系以及河外星系的哈勃望远镜,便遭遇到了严重的补偿器装调错误。在哈勃望远镜主镜加工过程中,采用干涉测量方法检测其面形,然而在光路系统装调过程中,补偿器与被测镜的距离出现了 1.3 mm 的误差,导致主镜加工出现了极大的偏差,最终造成实际的观测距离由设计的 140 光年缩短为 40 光年,望远镜发射升空后不得不对其进行在轨修复。

零位补偿非球面检验方法有道尔前零位补偿和奥夫纳尔后零位补偿<sup>[11]</sup>,两种方法又可分成有限远光路和无限远光路。无限远光路的入射方式可以忽略检测设备与补偿镜之间的距离和补偿镜的偏心,设计变量少,装调敏感度低,不存在非球面参数偏离等影响因素。无限远光路相比于有限远光路,具有结构简单、容易实现的优点,有利于实现非球面面形的高精度检测。然而,无限远奥夫纳尔后零位补偿法和道尔前零位补偿法校正补偿镜像差的能力有限,不能满足大口径大相对孔径的需求。

在面形波前误差峰谷(PV)值为  $\lambda/10$  ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ,全文同)的指标要求下,本文针对口径为 3.7 m,相对孔径为 1/1.2 的反射式抛物面检验系统进行了研究。由于这样的指标已超过了传统非球面检验的极限,本文提出了一种前后零位补偿相结合的无限远检测方法,基于三级像差理论,针对检验系统建立了数学模型,推导出了补偿镜的初始结构参数,探索了最佳初始参数与检验效果的关系,并将设计方法应用到实际加工检测中,得到了良好的测试结果。

## 2 无限远前后零位补偿检验的光学设计理论

依据三级像差理论求解光学系统的归一化结构参数<sup>[12]</sup>。即基于三级像差理论,通过设定光学初始值来建立数学模型,推导各个参数之间的关系,得到补偿镜参量。整个求解过程快速便捷。采用归一化处理的方法,可忽略透镜厚度,将获取的归一化参数代入到光学设计软件中以设置边界条件,通过加厚并缩放透镜进行透镜优化,从而求解最终合适的结构参量。

图 1 为无限远前后零位补偿结合检验凹非球面镜的光学系统光路,其中 1 为待检凹非球面镜,2 为前零位补偿透镜,3 为后零位补偿透镜,0 为待检凹非球面镜的球心。光学系统的光阑位于待检凹非球面镜上;检测设备发出的平行光线经后零位补偿透镜会聚到待检凹非球面镜的球心,再经前零位补偿透镜透射至待检凹非球面镜进行自准反射,随后再次经过前零位补偿透镜、待检凹非球面镜的球心和后零位补偿透镜沿透射原路回到检测设备。待检凹非球面镜的球心位于后零位补偿透镜和前零位补偿透镜之间。

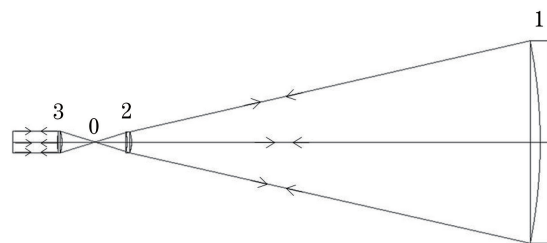


图 1 无限远前后零位补偿结合的非球面检验的光路图  
Fig. 1 Optical layout of aspheric test combining front and back null compensation for infinite optical path

根据三级像差理论,光学系统的初级球差系数  $S_1 = 0$ ,  $S_1$  与补偿透镜的初级球差参量之间的关系为

$$S_1 = h_1 P_1 + h_2 P_2 + h_{03} P_3 + h_{03}^4 K_3 + h_4 P_4 + h_5 P_5 = 0, \quad (1)$$

式中： $h_4$ 、 $h_5$  分别为待检非球面镜自准后光线在前零位补偿透镜和后零位补偿透镜上的高度，即光线与前零位补偿透镜和后零位补偿透镜的交点到光轴的垂直距离，交点在光轴上方时值为正，交点在光轴下方时值为负； $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_{03}$  分别为光线在后零位补偿透镜、前零位补偿透镜和待检非球面镜上的入射高度； $P_1 = P_5$ 、 $P_2 = P_4$  分别为后零位补偿透镜、前零位补偿透镜的初级球差参量； $P_3$ 、 $K_3$  为非球面镜的初级球差参量。由光路结构可知， $h_1 = h_5$ 、 $h_2 = h_4$ ，对系统进行归一化处理，(1)式可以整理为

$$\alpha_1 P_1 + \alpha_2 P_2 = -e^2, \quad (2)$$

式中： $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为后零位补偿透镜和前零位补偿透镜与待检凹非球面镜的口径比，且  $\alpha_1 = h_1/h_{03}$ ， $\alpha_2 = h_2/h_{03}$ ； $e^2$  为非球面镜偏心率平方。引入  $m_{11}$ 、 $m_{12}$  作为非球面镜法线像差分担因子，可得

$$P_1 = -\frac{m_{11}}{\alpha_1}, P_2 = -\frac{m_{12}}{\alpha_2}. \quad (3)$$

根据后零位补偿透镜放大率  $\beta_1$  和前零位补偿透镜放大率  $\beta_2$  可知，计算放大率公式为

$$u_1 = 0, u'_2 = 1, u_2 = \beta_2 \times u'_2, u'_1 = u_2, \quad (4)$$

式中： $u_1$ 、 $u'_1$  分别为光线在后零位补偿透镜上的入射角、出射角； $u_2$ 、 $u'_2$  分别为光线在前零位补偿透镜上

的入射角、出射角。

计算光线偏角  $h_1 \varphi_1$ 、 $h_2 \varphi_2$  为

$$\begin{cases} h_1 \varphi_1 = u'_1 - u_1 \\ h_2 \varphi_2 = u'_2 - u_2 \end{cases}, \quad (5)$$

式中： $\varphi_1$  为后零位补偿透镜的光焦度； $\varphi_2$  为前零位补偿透镜的光焦度。

利用(5)式计算光线孔径角的归一化值，有

$$\begin{cases} \nu_1 = \frac{u_1}{h_1 \varphi_1} \\ \nu_2 = \frac{u_2}{h_2 \varphi_2} \end{cases}, \quad (6)$$

式中： $\nu_1$  和  $\nu_2$  分别为后零位补偿透镜和前零位补偿透镜的入射孔径角归一化值。

当前零位补偿透镜和后零位补偿透镜材料的折射率为  $n$  时，定义  $P_0$  为

$$P_0 = \frac{n}{(n-1)^2} \left[ 1 - \frac{9}{4(n+2)} \right]. \quad (7)$$

后零位补偿透镜和前零位补偿透镜的初级球差参量  $P_1$ 、 $P_2$  与归一化值  $A_1$ 、 $A_2$  的关系为

$$\begin{cases} A_1 = \frac{P_1}{(h_1 \varphi_1)^3} \\ A_2 = \frac{P_2}{(h_2 \varphi_2)^3} \end{cases}, \quad (8)$$

后零位补偿透镜和前零位补偿透镜的弯曲  $Q_1$  和  $Q_2$  为

$$\begin{cases} Q_1 = \frac{2n+2}{n+2} \nu_1 - \frac{3n}{2(n-1)(n+2)} \pm \sqrt{\left[ A_1 - P_0 + \frac{n}{n+2} (\nu_1 + \nu_1^2) \right] \frac{n}{n+2}} \\ Q_2 = \frac{2n+2}{n+2} \nu_2 - \frac{3n}{2(n-1)(n+2)} \pm \sqrt{\left[ A_2 - P_0 + \frac{n}{n+2} (\nu_2 + \nu_2^2) \right] \frac{n}{n+2}} \end{cases}, \quad (9)$$

后零位补偿透镜和前零位补偿透镜的曲率半径  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$  为

$$\begin{cases} r_1 = \frac{1}{\left( Q_1 + \frac{n}{n-1} \right) \times \varphi_1} \\ r_2 = \frac{1}{(Q_1 + 1) \times \varphi_1} \\ r_3 = \frac{1}{\left( Q_2 + \frac{n}{n-1} \right) \times \varphi_2} \\ r_4 = \frac{1}{(Q_2 + 1) \times \varphi_2} \end{cases}. \quad (10)$$

当补偿透镜的球面为凹面时，曲率半径为负；当补偿透镜的球面为凸面时，曲率半径为正。

给定初始  $m_{11}$ 、 $m_{12}$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  参数值，通过

解算(1)~(10)式，可以求出后零位补偿透镜和前零位补偿透镜的曲率半径归一化参数  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 。

### 3 光学设计求解

#### 3.1 初始参数的选择

在初始结构参数  $m_{11}$ 、 $m_{12}$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  中， $m_{11}$ 、 $m_{12}$  表示后零位补偿透镜和前零位补偿透镜非球面的法线像差分担比例，一般情况下， $m_{11}$  为 0.55~0.95， $m_{12}$  为 0.45~0.05。采用取值较小的  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  参数，有利于实现利用小口径补偿镜检验大口径非球面镜的目标，而前零位补偿透镜放大率  $\beta_2$  则是影响归一化参数求解的关键因素。

由第 2 节无限远前后零位补偿检验的理论模型可知，前零位补偿透镜放大率  $\beta_2$  决定了补偿透镜光

线的入射孔径角、光线偏角、入射孔径角归一化值、初级球差参量与初级球差参量归一化值的取值。

(9)式有解的条件为  $A_1 - P_0 + \frac{n}{n+2}(\nu_1 + \nu_1^2) \geq 0$ ,

这为  $\beta_2$  的选择提供了运算依据。将  $\beta_2$  作为变量,后零位补偿透镜  $Q_1$ 、前零位补偿透镜弯曲  $Q_2$  与  $\beta_2$  的关系分别如图 2、3 所示。

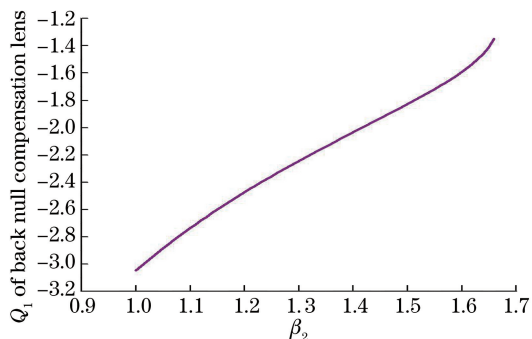


图 2 后零位补偿透镜  $Q_1$  与  $\beta_2$  的关系  
Fig. 2 Relationship between  $\beta_2$  and  $Q_1$  of back null compensation lens

由图 2 和图 3 可知,当  $\beta_2 \leq 1.7$  时,后零位补偿透镜的弯曲  $Q_1$  有解;当  $\beta_2 \leq 1.8$  时,前零位补偿透镜的弯曲  $Q_2$  有解。弯曲值太大会导致透镜光焦度偏大,进而引起较大的高级球差,这不利于非球面的法线像差补偿。因此,本文选择在  $\beta_2 = 1.10, 1.35, 1.60, 1.70$  条件下计算归一化参数,

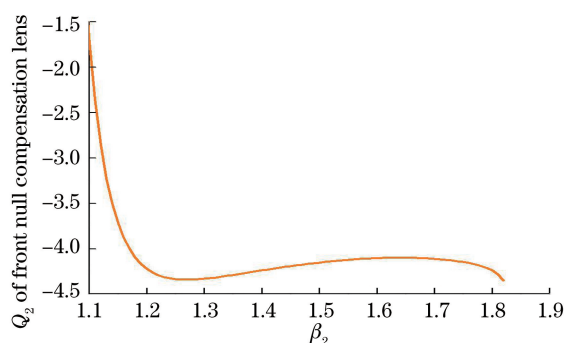


图 3 前零位补偿透镜  $Q_2$  与  $\beta_2$  的关系  
Fig. 3 Relationship between  $\beta_2$  and  $Q_2$  of front null compensation lens

以获得不同曲率半径下光学系统的优化参数,并比较可实现的待检非球面镜的最大检验口径和最大相对孔径。

### 3.2 归一化参数的求解

采用非球面参数  $e^2 = 1$  的凹抛物面,确定参数  $\beta_1 = 0, \beta_2 = 1.10, 1.35, 1.60, 1.70, m_{11}$  为  $0.55 \sim 0.95, m_{12}$  为  $0.45 \sim 0.05, \alpha_1 = -0.1, \alpha_2 = 0.1$ 。由(4)式计算可得,  $u_1 = 0, u'_2 = 1.00, u_2 = 1.10, 1.35, 1.60, 1.70, u'_1 = 1.10, 1.35, 1.60, 1.70$ 。当前零位补偿透镜 2 和后零位补偿透镜 3 的材料为光学玻璃 K9 时,通过(7)式计算得  $P_0 = 2.0576$ 。在  $\beta_2 = 1.10, 1.35, 1.60, 1.70$  情况下计算透镜的归一化光学参数,结果如表 1 所示。

表 1 不同  $\beta_2$  下计算所得的光学参数

Table 1 Optical parameters calculated for different  $\beta_2$

Lens	Optical parameter	$\beta_2 = 1.10$	$\beta_2 = 1.35$	$\beta_2 = 1.60$	$\beta_2 = 1.70$
Back null compensation lens	$r_1 / \text{mm}$	0.34776	0.09976	0.03195	0.03412
	$r_2 / \text{mm}$	-0.05455	-0.06242	0.27777	-0.34637
	Thickness /mm	0.01	0.01	0.01	0.01
Front null compensation lens	$r_3 / \text{mm}$	0.13997	-0.24919	-2.49594	-0.10603
	$r_4 / \text{mm}$	0.21677	-0.09689	-0.09925	-0.04629
	Thickness /mm	0.01	0.01	0.01	0.01
Distance between two lens /mm		0.173	0.138	0.120	0.104
Distance between front compensation lens and aspheric mirror /mm		0.905	0.904	0.904	0.904

### 3.3 光学参数的优化

将光学系统初始参数代入光学设计软件,通过加厚并缩放透镜进行透镜优化,四种  $\beta_2$  下对应的非球面镜的曲率半径为  $R = 2, 4, 6, 9 \text{ m}$ 。以系统波前误差 PV 值优于  $\lambda/10$  为标准,对该检验系统进行仿真与优化,通过比较获得的待检非球面镜的最大口径和最大相对孔径,确定不同  $\beta_2$  下系统的检测能力。 $\beta_2 = 1.10, 1.35, 1.60, 1.70$  时待检凹抛物面

镜的最大相对孔径与曲率半径分别如图 4、5 所示。

从图 4、5 可看出,在相同前零位补偿透镜放大率  $\beta_2$  条件下,随着非球面曲率半径的增大,非球面镜的最大口径增加,而最大相对孔径呈减小趋势,可见非球面镜的焦距越大,则光学系统的检验能力越差。在  $\beta_2 = 1.35$  条件下,非球面曲率半径为  $2 \text{ m}$  时,非球面镜的最大相对孔径达到  $1/1.03$ ,此时获得的待检非球面镜的口径和相对孔径最大,光学系统检验



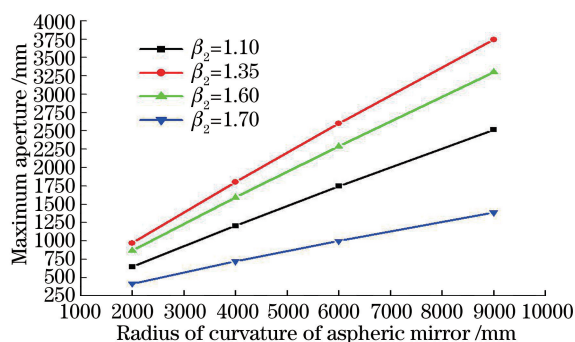


图 4 待检非球面镜的最大口径

Fig. 4 Maximum aperture of aspheric mirror to be tested

非球面的能力最强,且后零位补偿透镜  $\varphi_1 = 13.5$ ,前零位补偿透镜  $\varphi_2 = 3.5$ ,两者约为4倍关系。其次是  $\beta_2 = 1.60, 1.10$ ,非球面曲率半径为 2 m 时,非球面镜的最大相对孔径分别为 1/1.15 和 1/1.53。最后是  $\beta_2 = 1.70$ ,此时光学系统的检验能力最差,非球面曲率半径为 2 m 时,非球面镜的最大相对孔径为 1/2.38。所得结果为最佳初始参数  $\beta_2$  的选择提供了

表 2 采用前后零位补偿方法设计的  $R = 9$  m 的凹非球面镜的光学参数

Table 2 Optical parameters of concave aspheric mirror with  $R = 9$  m designed by using front and back null compensation

Optical element	Surface shape	Radius of curvature /mm	Aspheric coefficient	Diameter	Material
Aspheric mirror	Conic	9000	$e^2 = 1$	3.7 m	Metal or glass
Back null compensation lens	Spherical	1098.5 and 575.6	0	370 mm	K9
Front null compensation lens	Spherical	707.1 and 504.1	0	370 mm	K9

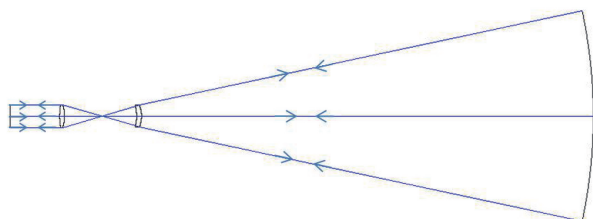


图 6  $R = 9$  m 时采用前后零位补偿方法设计的光路图

Fig. 6 Optical layout designed by using front and back null compensation when  $R = 9$  m

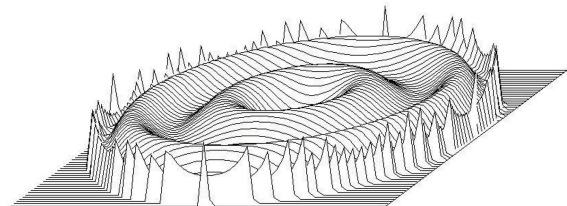


图 7  $R = 9$  m 时采用前后零位补偿方法设计的面形波前误差

Fig. 7 Surface wavefront error designed by using front and back null compensation when  $R = 9$  m

在  $\beta_2 = 1.35$  的条件下,通过无限远前后零位补偿方法检测  $R = 9$  m 的非球面镜,非球面镜的口径

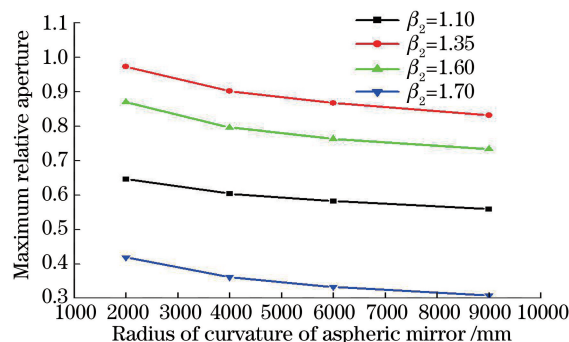


图 5 待检非球面镜的最大相对孔径

Fig. 5 Maximum relative aperture of aspheric mirror to be tested

数据参考,并为深入研究前后零位补偿系统的放大率与光学系统检验能力之间的关系提供了计算依据。

当  $\beta_2 = 1.35$  时,采用无限远前后零位补偿方法,设计了  $R = 9$  m 的凹抛物面的光学参数,如表 2 所示,对应的光路如图 6 所示,波前误差和球差曲线分别如图 7、8 所示。

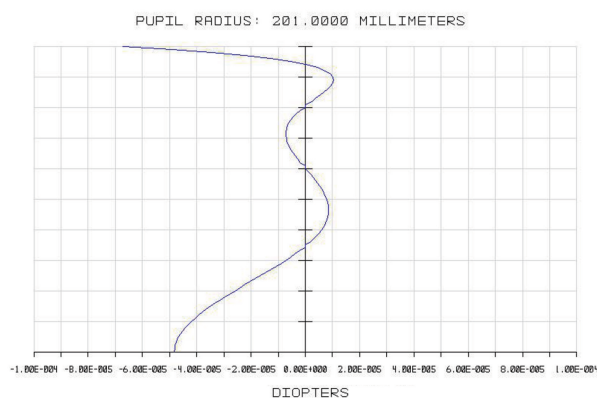


图 8  $R = 9$  m 时采用前后零位补偿方法设计的球差曲线

Fig. 8 Spherical aberration designed by using front and back null compensation when  $R = 9$  m

达到 3.7 m,相对孔径达到 1/1.2;补偿镜口径仅为 370 mm,容易进行补偿镜的加工与检测;系统面形波前误差 PV 值为  $0.1\lambda$ ,均方根(RMS)值为  $0.015\lambda$ 。结果显示,无限远前后零位补偿方法能够满足大口径、大相对孔径、高精度非球面的需求。

### 3.4 容差分析

当  $\beta_2 = 1.35, \alpha_1 = -1/10$  时,采用无限远前后

零位补偿结合的检验系统,对  $R=9\text{ m}$  的凹抛物面进行公差分析。对于补偿透镜组的装调,每个透镜在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向均有偏心与倾斜现象;对于补偿系统,加工误差来自于曲率半径公差和面形误差。以

补偿镜与待检镜的间距、待检镜的曲率半径和非球面系数作为补偿参数,以面形波前误差 RMS 值小于  $0.02\lambda$  为评价指标,进行蒙特卡罗公差分析,表 3 为公差分配参数。

表 3 容差参数

Table 3 Tolerance parameters

Tolerance parameter	Back null compensation lens	Front null compensation lens
Refractive index	0.0005	0.0005
Decentering distance /mm	0.004	0.004
Tilt angle /( $^{\circ}$ )	0.0008	0.0008
Thickness /mm	0.02	0.02
Radius of curvature /mm	0.1	0.1
RMS of surface wavefront error	$\lambda/40$	$\lambda/40$

根据表 3 公差分配结果,对补偿光学系统进行 300 次加工装调模拟,结果显示,光学系统的面形波前误差 RMS 值优于  $0.02\lambda$ ,满足光学指标要求。为了检测补偿镜的加工装调误差,可采取以下措施:第一,采用 schott 公司 BK7 玻璃,材料折射率均匀性为  $5\times 10^{-6}$ ,SpectroMaster 折射率测量仪的检测精度可达到  $1\times 10^{-6}$ ,符合折射率测试和折射率均匀性要求;第二,补偿镜镜面间隔和偏心倾斜可使用 OptiCentric 中心偏差测量仪进行检测,间隔检测精度可达到  $\pm 0.15\ \mu\text{m}$ ,中心偏差精度为  $\pm 0.00055^{\circ}$ ;第三,曲率半径通过全自动接触式球径仪进行检测,检测精度能达到  $0.005\%$ ;第四,利用高精度干涉仪检测面形,面形波前误差 RMS 值可达  $0.35\ \text{nm}$ 。综上所述,针对容差结果,在实际使用场合均可找到检测仪器进行测量,计算指标均合理。

## 4 原理实验

由于大口径实验经费的限制,针对一个口径为

表 4 利用无限远前后零位补偿方法设计的原理实验参数

Table 4 Optical parameters of principle experiment designed by using front and back null compensation for infinite optical path

Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Diameter /mm	$e^2$
Standard	Infinity	100	Air	50	0
Standard	128.93	15	K9	50	0
Standard	-74.01	146.26	Air	50	0
Standard	-87.34	10	K9	50	0
Standard	-61.36	917.25	Air	50	0
Standard	-1000	-917.25	Reflector	500	1.000
Standard	-61.36	-10.00	K9	50	0
Standard	-87.34	-146.26	Air	50	0
Standard	-74.01	-15	K9	50	0
Standard	128.93	-100	Air	50	0

无限远前后零位补偿结合实验的光路和面形波前误差分别如图 9、10 所示,可以看出,实现了面形

500 mm、顶点曲率半径为 1000 mm、偏心率平方为 1、面形波前误差 RMS 值优于  $0.025\lambda$  的凹抛物面主镜,进行原理实验。首先分别采用无限远前后零位补偿结合的光学结构和常用的无限远 OFFNER 后零位补偿的检验结构开展光学设计;设计输入补偿镜与被检非球面镜的口径比为 1/10;考虑加工可检测性,透镜各面的相对孔径小于 1/1.33。其次在加工装调灵敏度方面对两种光学设计方案进行比较。最后针对前后零位补偿结合的检验方法开展实验验证。

### 4.1 无限远前后零位补偿结合的检验光学设计

利用前后零位补偿结合的理论方法计算出无限远辅助光学系统的归一化初始光学参数,对初始参量进行优化处理,优化后的实际数据如表 4 所示。其中,在入射光线经过补偿透镜的光路中,补偿透镜的中心间距取值为正;在待检非球面自准后反射光线经过的光路中,补偿透镜的中心间距取值为负;Radius 是补偿透镜非球面的曲率半径;Thickness 是补偿透镜的中心间距;Diameter 是补偿透镜的外径。

波前误差 PV 值为  $0.061\lambda$ 、面形波前误差 RMS 值为  $0.009\lambda$  的优良像质。

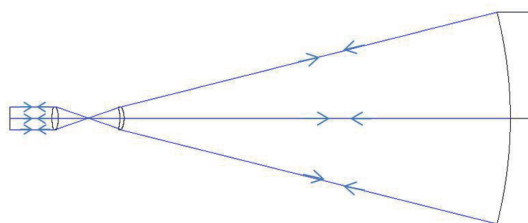


图 9 利用无限远前后零位补偿方法设计的原理实验光路图

Fig. 9 Optical layout of principle experiment designed by using front and back null compensation for infinite optical path

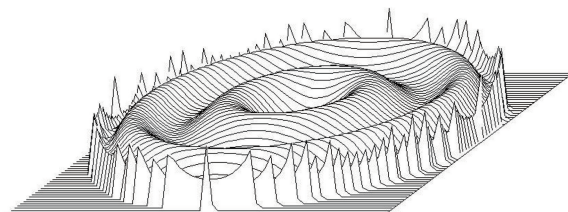


图 10 利用无限远前后零位补偿方法设计的原理实验中的面形波前误差

Fig. 10 Surface wavefront error in principle experiment designed by using front and back null compensation for infinite optical path

#### 4.2 无限远 OFFNER 后零位补偿的检验光学设计

利用位于待检凹非球面镜球心后的补偿正透镜检验凹非球面,待检凹非球面是自准面,这种结构为常用的后零位补偿非球面检验。入射平行光经补偿正透镜和场镜折射到待检凹非球面上,再经待检凹非球面的自准反射按原路返回。口径为 500 mm 的凹抛物面镜的无限远 OFFNER 检验光路如图 11 所示,设计参数如表 5 所示。

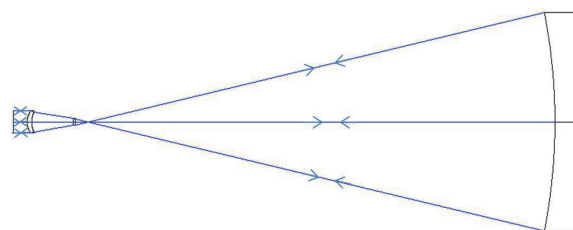


图 11 利用无限远后零位补偿方法设计的光路图

Fig. 11 Optical layout designed by using back null compensation for infinite optical path

表 5 利用无限远后零位补偿方法设计的实验参数

Table 5 Optical parameters designed by using back null compensation for infinite optical path

Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Diameter /mm	$e^2$
Standard	Infinity	100	Air	43	0
Standard	32.25	10	K9	43	0
Standard	39.90	91.17	Air	43	0
Standard	204.62	5	K9	15	0
Standard	-71.76	1052.28	Air	15	0
Standard	-1000	-1052.28	Reflector	430	1.000
Standard	-71.76	-5	K9	15	0
Standard	204.62	-91.17	Air	15	0
Standard	39.90	-10	K9	43	0
Standard	32.25	-100	Air	43	0

利用无限远后零位补偿方法设计的面形波前误差如图 12 所示,实际的面形波前误差 PV 值等于  $0.0067\lambda$ ,RMS 值等于  $0.001\lambda$ 。

#### 4.3 两种检验方案的比较

当无限远前后零位补偿方案中采用的补偿透镜与被检非球面镜的口径比为 1/10 时,使用口径为

50 mm 的补偿透镜可以实现口径为 500 mm 的非球面镜的面形检验。在无限远 OFFNER 后零位补偿光路中,当场镜的  $\beta_2 \leq 0.7$  时,场镜的弯曲值不会太大,故后零位补偿检验实验选择  $\beta_2 = 0.7$ ;在同样条件下,约束透镜的相对孔径小于 1/1.33。在现有测试设备的检测范围内,采用口径为 43 mm 的补偿

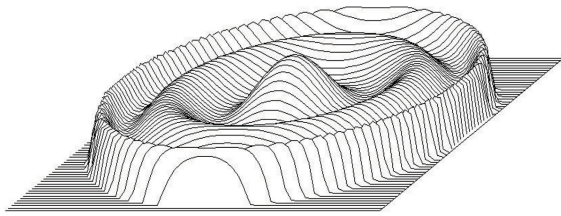


图 12 利用无限远后零位补偿方法设计的面形波前误差  
Fig. 12 Surface wavefront error designed by using back null compensation for infinite optical path

镜仅能实现口径为 430 mm 的非球面镜的面形检验,与 500 mm 口径的检验需求存在差距。当选用大口径比 1/7 时,无限远 OFFNER 后零位补偿系统可检验的非球面镜的口径较大,但是大口径比透镜较难应用于大口径非球面镜的面形检验。

在容差方面对两种方案进行分析,考虑到检测精度,设置装调偏心距离为 0.002 mm,装调倾斜角为 0.0008°,比较各个光学元件对面形波前误差 RMS 值的影响,结果如表 6 所示。

由表 6 可知,单个补偿透镜的偏心误差和倾斜误差对两个系统的面形波前误差 RMS 值的影响不同,透镜的偏心 and 倾斜对无限远前后零位补偿系统的影响较小,而对无限远 OFFNER 后零位补偿系统的影响较大。综合各个环节的装调误差,300 次蒙特卡罗公差分析后,无限远前后零位补偿系统的面形波前误差 RMS 值为 0.0083λ, OFFNER 后零位补偿系统的结果为 0.011λ,后者比前者下降了 35%,可见后者对装调误差更加敏感。

表 6 两种方案的容差比较

Table 6 Tolerance comparison of two test configurations

Optical system	Alignment error	Change of RMS of surface wavefront error /λ
Test system by using front null compensation and back null compensation for infinite optical path	Decenter distance is 0.002 mm for back null compensation lens	0.0072
	Tilt angle is 0.0008° for back null compensation lens	0.0032
	Decenter distance is 0.002 mm for front null compensation lens	0.0043
	Tilt angle is 0.0008° for front null compensation lens	0.00098
	Estimated RMS of surface wavefront error after 300 Monte Carlo analyses	0.0083
OFFNER system by using back null compensation for infinite optical path	Decenter distance is 0.002 mm for back null compensation lens	0.0101
	Tilt angle is 0.0008° for back null compensation lens	0.0023
	Decenter distance is 0.002 mm for front null compensation lens	0.0071
	Tilt angle is 0.0008° for front null compensation lens	0.00023
	Estimated RMS of surface wavefront error after 300 Monte Carlo analyses	0.0110

总之,与无限远前后零位补偿结合的检验系统相比,无限远 OFFNER 后零位补偿系统对补偿镜的装配要求更高,因此补偿镜的装配难度更大;在相同的待检非球面镜口径条件下,无限远 OFFNER 后零位补偿系统要求补偿镜与非球面镜的口径比更大,补偿镜的口径随着待检镜口径的增加而增加,当非球面镜的口径为 3.7 m 时补偿镜口径为 528 mm,因此难以实现大口径非球面镜的面形检验。前后零位补偿结合系统在基于小透镜进行大口

径非球面镜的高精度面形检验方面具有明显优势。

#### 4.4 实验结果

无限远前后零位补偿检验光路的设计验证了数学模型的有效性,与有限远入射光路形式相比,无限远入射光路形式无需考虑干涉仪与补偿镜的距离及补偿镜的偏心,装调简单,通过调控补偿镜到待检非球面镜的距离,即可准确地调控非球面镜的光学参数。针对检验方案搭建的实验装置如图 13 所示。

在实施过程中,根据补偿镜的实测曲率半径和



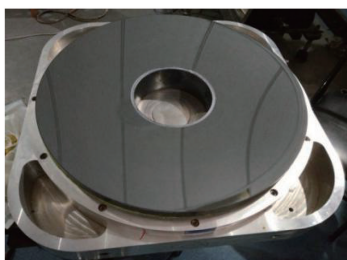


图 13 实验装置

Fig. 13 Experiment prototype

实测中心厚度,优化设计间隔,对相应结构进行修磨,将加工误差尽量控制到最小。在面形波前误差 PV 值优于  $\lambda/10$  的指标要求下,精确调控补偿镜的面形,严格控制装配过程中的误差源,保证高精度检测。采用检测装置测试口径为 500 mm 的凹抛物面反射镜,面形波前误差 PV 值为  $0.48\lambda$ , RMS 值为  $0.022\lambda$ ,完全满足指标要求,测试得到的面形波前误差如图 14 所示。

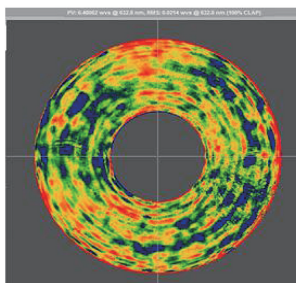


图 14 实测的面形波前误差

Fig. 14 Test result of wavefront error

## 5 结 论

基于平行光路,提出了前零位补偿方法和后零位补偿方法相结合的补偿检验方法。通过理论分析、光学设计和原理实验验证了补偿方法的可行性。建立了初始结构的数学模型,求解了前零位补偿透镜的放大率与非球面检验效果之间的关系。结果显示,当  $\beta_2 = 1.35$  时,系统检验非球面的能力最强,此时后零位补偿透镜的光焦度是前零位补偿透镜的 4 倍。在补偿镜与待检镜的口径比仅为 1/10 的条件下,可实现口径为 3.7 m、相对孔径为 1/1.2、面形波前误差 PV 值优于  $0.1\lambda$  的非球面镜的面形检验。容差分析结果证明了补偿系统的可行性。前后零位补偿相结合的方法使得非球面的曲率半径在球心前后区间具有相关性,后零位补偿透镜承担了系统较大部分的光焦度,前零位补偿透镜承担了系统较小部分的光焦度,系统像差的校正能力得到大大提升。这一检验方法采用无限远光路结构,相比有限远光

路,更有利于非球面检验,且无需考虑检测设备与补偿元件之间的距离等装调误差,装配简单,稳定性高,通过平面干涉图像能直接定量获得待检非球面镜的面形误差;同时最大补偿器口径与被检非球面镜口径的比非常小,仅为 1/10,小口径补偿器材料较易获取,有利于零件加工;两片式补偿光学元件的设计方案简单,检验精度高,加工周期短。在实际应用前期,与无限远 OFFNER 后零位补偿方法相比,前后零位补偿结合的检验方法可基于小透镜进行大口径非球面镜的面形检验,装调敏感度低。采用前后零位补偿方法检验了口径为 500 mm、相对孔径为 1/1 的凹抛物面镜的面形,面形波前误差 RMS 值为  $0.022\lambda$ ,满足指标要求,证明了前后零位补偿方法的实用性与可靠性。通过合理的光线孔径角和光焦度参数分配,利用小口径补偿透镜实现了平行光路条件下的光学系统的球差平衡,该方法适用于大口径、大相对孔径光学仪器非球面的高精度检测。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Q, Zhang P Y, Hao P M, et al. Manufacturing and testing on large aspherical surface [J]. Optical Technique, 2001, 7(3): 204-205, 208. 张权, 张璞扬, 郝沛明, 等. 大型非球面镜的加工和检测 [J]. 光学技术, 2001, 27(3): 204-205, 208.
- [2] Malacara D. Optical shop testing [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [3] Hao P M, Wang P, Wang Z S, et al. Lens design for high power and wide-aperture beam expander [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(6): 494-496. 郝沛明, 王鹏, 王占山, 等. 高倍率及大孔径扩束器的光学系统设计 [J]. 中国激光, 2003, 30(6): 494-496.
- [4] Ye L, Zhang J P, Zheng L H, et al. Design of back null compensator test method of convex aspherical surface [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(4): 0422002. 叶璐, 张金平, 郑列华, 等. 凸非球面背向零位补偿检验的设计方法 [J]. 光子学报, 2015, 44(4): 0422002.
- [5] Yao J G, Zhang J P, Zheng L H, et al. Study on interference null compensator testing [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0622003. 姚劲刚, 张金平, 郑列华, 等. 干涉零位补偿检验研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0622003.
- [6] Li X N, Yuan L J, Liu X T, et al. Manufacturing of the  $\Phi 520$  mm  $F/1.6$  ellipsoid mirror [J]. Optical Technique, 2004, 30(5): 619-622. 李新南, 袁吕军, 刘星涛, 等.  $\Phi 520$  mm  $F/1.6$  椭圆面反射镜加工 [J]. 光学技术, 2004, 30(5): 619-

622.

- [7] Zhang L, Hu W Q, Zheng L H, et al. Catadioptric null compensating test [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7): 0722002.  
张珑, 胡文琦, 郑列华, 等. 折反射式零位补偿检验 [J]. 光子学报, 2016, 45(7): 0722002.
- [8] Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 15-28.  
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验 [M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 15-28.
- [9] Hao P M. Fabrication of a convex aspherical surface [J]. Acta Optica Sinica, 1991, 11(10): 931-937.  
郝沛明. 凸非球面加工 [J]. 光学学报, 1991, 11(10): 931-937.
- [10] Chen X, Liu W Q, Kang Y S, et al. Design and tolerance analysis of Offner compensator [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 88-93.  
陈旭, 刘伟奇, 康玉思, 等. Offner 补偿器的结构设计 与 装调 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(1): 88-93.
- [11] Wu F. Design of reflective Offner compensator for null testing of aspherical surface [J]. Journal of Applied Optics, 1993, 14(3): 8-12.  
伍凡. 非球面零检验的 Offner 补偿器设计 [J]. 应用光学, 1993, 14(3): 8-12.
- [12] Hao P M. Design of auxiliary optical system for aspheric surface test [M]. Beijing: Science Press, 2017: 71-99.  
郝沛明. 非球面检验的辅助光学系统设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2017: 71-99.