

折反射检验大口径凸双曲面的研究

赵鹏玮^{1,2}, 张金平¹, 叶璐¹, 郑列华^{1*}

¹中国科学院上海技术物理研究所公共技术室, 上海 200080;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为解决凸双曲面检验中因辅助反射镜的口径过大而导致其加工困难的问题, 提出一种可用于检验凸双曲面反射镜的方法。在 Hindle 法的基础上, 利用校正透镜和球面反射镜组成消像差系统, 通过设计检验光路缩短了辅助反射镜与待检双曲面镜的距离。该方法不但可以减小辅助反射镜的口径, 而且能够维持待检双曲面镜的有效口径不变。根据三级像差理论推导公式, 设计口径为 800 mm, 顶点曲率半径为 1800 mm, 二次曲线常数为 -2.25 的大口径凸双曲面的检验光路。对所设计的检验光路进行分析, 结果显示: 其残余像差峰谷值为 0.0003λ ($\lambda = 632.8$ nm), 均方根误差为 0.0001λ 。这表明该方法可以用于检验大口径、大相对口径凸双曲面, 并且具有辅助面口径小、检验系统的长度较短的优点。

关键词 光学设计; 凸非球面检验; 三级像差理论; 非球面; 大口径; 大相对口径

中图分类号 O435.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1122003

Catadioptric Testing of Large Aperture Convex Hyperboloid Surfaces

Zhao Pengwei^{1,2}, Zhang Jinping¹, Ye Lu¹, Zheng Liehua^{1*}

¹Department of Public Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In the testing of convex hyperboloid surfaces, the required auxiliary mirror is too large to manufacture. A new method of testing is proposed herein to solve this problem. Based on the Hindle test, the correcting lens and the spherical mirror produce a ray that has no aberration and is incident to the test surface. The distance between auxiliary mirror and hyperboloid mirror is short. This reduces the aperture of the auxiliary mirror, while the effective aperture does not reduce. The formula is derived based on the third-order aberration theory. A test optical system is designed, wherein the aperture of the mirror being tested is 800 mm, the vertex radius is 1800 mm, and the conic constant is -2.25 . The peak-valley value of the residual aberration is 0.0003λ ($\lambda = 632.8$ nm), and the root mean square is 0.0001λ . The analysis shows that this method can be used to test large aperture and large relative aperture convex hyperboloid surfaces with a small auxiliary mirror and short length.

Key words optical design; convex aspheric surface testing; third-order aberration theory; aspheric surface; large aperture; large relative aperture

OCIS codes 220.1000; 220.1250; 220.4830; 220.4840

1 引 言

随着天文观测以及遥感等领域的发展, 光学系统中反射镜的口径越来越大, 如哈勃望远镜主镜的口径为 2.4 m^[1], 詹姆斯·韦伯太空望远镜 (JWST) 的主镜口径达到了 6.5 m, 其中 JWST 由 18 块口径为 1.3 m 的子镜拼接而成^[2]。这对超大口径非球面镜的加工和检验提出了更高的要求^[3-6], 其中大口径

凸非球面检验是一个难题。常用的检验方法主要为 Hindle 检验。Hindle 检验法利用大口径的辅助球面镜与待检非球面镜组成自动消像差光路。但是在检验大口径凸非球面时, 辅助球面镜的口径将变得极大以至于无法加工。改进型 Hindle 检验法^[7-9]利用弯月形透镜代替辅助球面镜, 减小了辅助镜的口径。由于材料和结构的限制, 弯月形透镜的口径亦无法做到很大, 因此改进型 Hindle 检验法仍然无法

收稿日期: 2019-04-09; 修回日期: 2019-07-21; 录用日期: 2019-07-25

* E-mail: dimo818@126.com

检验超大口径凸非球面。在背向检验^[10-11]中,光线从待检镜的背面入射,将凸非球面检验变成凹非球面检验,再通过 offner 补偿器等补偿非球面的法距差,从而实现凸非球面的检验。然而,背向检验需要待检非球面镜的材料是透光的,碳化硅等不透光材料制作的凸非球面无法通过这种方法进行检验。

为此,本文提出一种可用于检验大口径凸双曲面的方法。该方法利用小口径透镜与球面反射镜组合检验大口径凸双曲面,解决了辅助镜口径过大的问题。根据三级像差理论,设计了口径 $\Phi = 800\text{ mm}$,相对口径 $A = 0.8889$,二次曲线常数 $k = -2.25$ 凸双曲面镜的检验光路,并分析了其可以检验的最大口径。与 Hindle 法比较,虽然该方法使用的辅助反射镜口径较小,但是可以检验更大口径的凸双曲面。

2 基本原理

图 1 为 Hindle 检验法的示意图^[12]。光线从待检双曲面镜 1 的前焦点 O 处发出,经过待检双曲面镜反射后在后焦点 O' 处成虚像。辅助球面镜 2 的球心与待检双曲面镜 1 的后焦点 O' 重合,光线在辅助球面镜 2 上自准反射。为了减小辅助球面镜 2 的口径,缩短其与待检双曲面镜 1 的间距,将图 1 所示的光路改为如图 2(a)所示。在辅助球面镜 2 上自准反射的光线经过待检双曲面 3 反射,成像于待检双曲面镜 3 的前焦点。反射镜 4 的曲率半径和球心位置与辅助反射镜 2 相同。成像在待检双曲面镜 3 前焦点的光线在反射镜 4 上反射,并产生球差,需要通过透镜面 5 和 6 来校正。光线经过校正透镜后,在待检双曲面镜后面 O'' 处成像。实际检验光路如图 2(b),角 u_1 为面 1 的入射角,角 u'_4 为面 4 的反射角。 l_1 和 l_5 为面 1 和面 5 的前截距, d_{23} 为面 2 和 3 的间距。校正透镜面 1、2 和反射镜 3,产生无像差的光

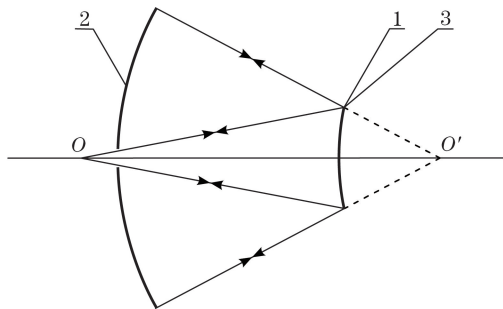


图 1 Hindle 法检验凸双曲面
Fig. 1 Hindle testing for the convex hyperboloid surface

线,并将该光线入射到待检双曲面 4 上。待检双曲面 4 反射的光线经辅助球面镜 5 自准后沿原路返回。

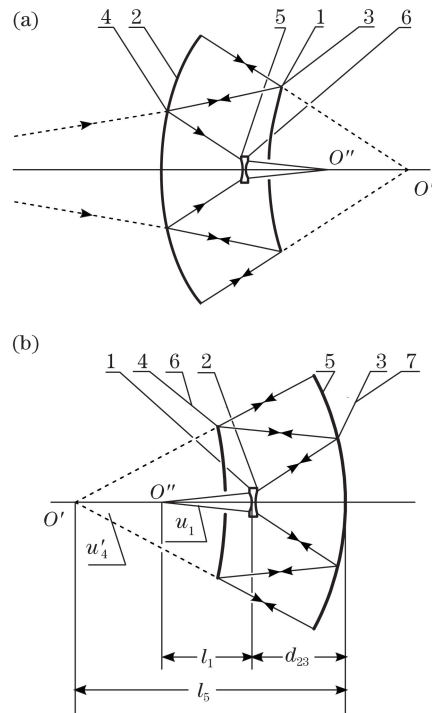


图 2 折反射检验凸双曲面。(a)原理图;(b)实际光路图
Fig. 2 Catadioptric testing for the convex hyperboloid surface. (a) Schematic diagram; (b) layout of actual optical path

3 规化光学系统设计

3.1 规化参数

根据图 2(b)推导规化光学系统的各参数值。推导过程中所有参数的符号符合几何光学的符号定义^[13]。光路中各个元件的折射率依次为

$$\begin{aligned} n_1 = 1, n'_1 = n_2 = n, n'_2 = n_3 = 1, \bar{n}'_3 = \bar{n}_4 = -1, \\ n'_4 = n_5 = 1, \bar{n}'_5 = \bar{n}_6 = -1, n'_6 = n_7 = 1, \\ \bar{n}'_7 = \bar{n}_8 = -1, \bar{n}'_8 = \bar{n}_9 = -n, \bar{n}'_9 = -1, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: n_i 和 n'_i 分别为第 i 面前和后介质的折射率, i 为 1~9 中任意正整数; n 为 K9 玻璃的折射率, $n = 1.514664$;向左的箭头表示光线沿反向传播。

设定待检双曲面的规化值为

$$\begin{aligned} u_{04} = 1, r_{04} = -1, h_{04} = -1, \\ u_{04} = h_{04}/r_{04}, e_4^2 = 2.25, l_1 = -0.4, \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $2u_{04}$ 为待检双曲面 4 的口径对球心的张角; r_{04} 为待检双曲面的顶点曲率半径; h_{04} 为光线在待检双曲面 4 上的入射高度; e_4^2 为待检双曲面 4 偏心率平方($e_4^2 = -k_4, k_4$ 为双曲面 4 的二次曲线常数); l_1 为校正透镜面 1 的前截距。根据实际情况设定辅助

球面镜 5 的口径 h_5 与待检双曲面镜 4 的比值, 即口径比 $\alpha_1 = h_5/h_{04}$, 校正透镜口径 h_1 与待检双曲面镜 4 的比值, 即遮拦比 $\alpha_2 = h_1/h_{04}$, 其中 h_i 为第 i 面光线的入射高度。所用透镜为薄透镜。

3.2 反射镜参数求解

光线经过待检双曲面 4 的前后焦点即为两个消球差点。待检双曲面 4 的前后截距 \tilde{l}_4, l'_4 和入射角、反射角 \tilde{u}_4, u'_4 分别为^[14]

$$\begin{aligned} \tilde{l}_4 &= \frac{r_{04}}{1-e_4}, \quad \tilde{u}_4 = \frac{h_{04}}{\tilde{l}_4} \\ l'_4 &= \frac{r_{04}}{1+e_4}, \quad u'_4 = \frac{h_{04}}{l'_4} \end{aligned} \quad (3)$$

辅助球面镜 5 的球心与待检双曲面镜 4 的后焦点重合。根据几何关系, 辅助球面镜 5 的入射角 u_5 , 反射角 \tilde{u}'_5 , 入射高度 h_5 , 前后截距 \tilde{l}_5 和 l'_5 , 曲率半径 r_5 以及辅助球面镜 5 与待检双曲面 4 的间距 d_{45} 分别为

$$\begin{aligned} u'_4 &= u_5 = \tilde{u}'_5, \quad h_5 = \alpha_1 h_{04}, \\ l_5 &= h_5/u_5 = \tilde{l}'_5 = r_5, \quad d_{45} = l'_4 - l_5. \end{aligned} \quad (4)$$

反射镜 3 与辅助球面镜 5 的顶点曲率半径和球心位置相同, 于是反射镜 3 的曲率半径 r_3 , 镜面 3 和镜面 4 的间距 \tilde{d}_{34} , 反射面 3 的后截距 \tilde{l}'_3 及反射角 \tilde{u}'_3 分别为

$$r_3 = r_5, \quad \tilde{d}_{34} = -d_{45}, \quad \tilde{l}'_3 = \tilde{l}_4 + \tilde{d}_{34}, \quad \tilde{u}'_3 = \tilde{u}_4. \quad (5)$$

根据近轴公式, 反射面 3 的前截距 l_3 , 入射角 u_3 和入射高度 h_3 分别为

$$\frac{\tilde{n}'_3 - n_3}{r_3} = \frac{\tilde{n}'_3}{\tilde{l}'_3} - \frac{n_3}{l_3}, \quad h_3 = \tilde{l}'_3 \tilde{u}'_3, \quad u_3 = \frac{h_3}{l_3}. \quad (6)$$

3.3 校正单透镜参数求解

校正透镜为薄透镜, 设系统的球差系数为 S_1 , 则消球差条件为

$$\begin{aligned} S_1 &= h_1 P_1 + h_1 P_2 + h_3 \tilde{P}_3 + h_{04} P_4 + \\ &h_{04}^4 K_4 + h_5 \tilde{P}_5 + h_{06} P_6 + h_{06}^4 K_6 + \\ &h_7 \tilde{P}_7 + h_9 \tilde{P}_8 + h_9 \tilde{P}_9 = 0, \end{aligned} \quad (7)$$

式中: P_i 为第 i 面的 P 值, K_i 为第 i 面双曲面的 K 值, P 和 K 均是计算过程中的中间值; h_{06} 为光线在待检双曲面 6 上的入射高度。根据前面的分析可知,

$$\begin{aligned} h_5 \tilde{P}_5 &= 0, \quad h_{04} P_4 + h_{04}^4 K_4 = h_{06} P_6 + h_{06}^4 K_6 = 0, \\ h_1 P_1 + h_1 P_2 &= h_9 \tilde{P}_8 + h_9 \tilde{P}_9 = h_1 P_{1-2}, \\ h_3 \tilde{P}_3 &= h_7 \tilde{P}_7, \end{aligned} \quad (8)$$

式中: P_{1-2} 为校正透镜的 1, 2 两个面的 P 值。将其

代入(7)式, 化简整理可得

$$P_{1-2} = -h_3 \tilde{P}_3 / h_1. \quad (9)$$

根据三级像差理论^[15], 可以求解 \tilde{P}_3 :

$$\tilde{P}_3 = \left[\frac{n_3 \tilde{n}'_3 (\tilde{u}'_3 - u_3)}{\tilde{n}'_3 - n_3} \right]^2 \left(\frac{\tilde{u}'_3}{\tilde{n}'_3} - \frac{u_3}{n_3} \right). \quad (10)$$

另外, 可推导出校正透镜的光焦度 φ_{1-2} :

$$\begin{aligned} h_1 &= h_{04} \alpha_2, \quad u'_2 = u_3, \quad u_1 = \frac{h_1}{l_1}, \\ h_1 \varphi_{1-2} &= u'_2 - u_1, \quad \varphi_{1-2} = \frac{u'_2 - u_1}{h_1}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中: u'_2 为校正透镜面 2 的出射角; u_1 为校正透镜面 1 的入射角。利用 $h_1 \varphi_{1-2}$ 对 P_{1-2} 和 u_1 进行规范化, 得到规范化后的 p_{1-2} 和入射角 v_1 分别为

$$p_{1-2} = \frac{P_{1-2}}{(h_1 \varphi_{1-2})^3}, \quad v_1 = \frac{u_1}{h_1 \varphi_{1-2}}. \quad (12)$$

在此基础上可求解校正透镜的弯曲 Q_1 , 即

$$Q_1 = av_1 - b \pm \sqrt{c[p_{1-2} - P_0^\infty + c(v_1 + v_1^2)]}, \quad (13)$$

式中: P_0^∞ 为对无穷远物体成像时 p 的极小值, 可表示为

$$\begin{aligned} P_0^\infty &= \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)} \right], \quad a = \frac{2n+2}{n+2}, \\ b &= \frac{3n}{2(n-1)(n+2)}, \quad c = \frac{n}{n+2}. \end{aligned} \quad (14)$$

根据弯曲 Q_1 可以求出校正透镜 1 面和 2 面的曲率半径 r_1, r_2, c_1 和 c_2 为中间值, 可表示为

$$\begin{aligned} c_1 &= Q_1 + \frac{n}{n-1}, \quad r_1 = \frac{1}{c_1 \varphi_{1-2}}, \\ c_2 &= Q_1 + 1, \quad r_2 = \frac{1}{c_2 \varphi_{1-2}}. \end{aligned} \quad (15)$$

4 实际光路设计

根据上述推导过程, 设计了口径 $\Phi = 800$ mm, 顶点曲率半径 $R = 1800$ mm, 偏心率平方 $e^2 = 2.25$ 的凸双曲面镜的检验光路, 其口径比 $\alpha_1 = 2$, 遮拦比 $\alpha_2 = 0.16$ 。将计算得到的初始结构用 Zemax 进行优化。在优化过程中, 为了提高校正像差的能力, 将单透镜从中间分开, 变成两片透镜。优化后检验光路的结构参数如表 1 所示, 其中 OBJ, STP 和 IMA 分别表示物面、光阑面和像面。实际光路如图 3 所示, 实际光路的球差曲线和波像差分别如图 4 和 5 所示。球差曲线的横坐标 W_{LA} 为球差值, 纵坐标为光线在光阑面上的相对高度。波像差图中系统残余像差峰谷值 $W_{PV} = 0.0005\lambda$, 均方根值 $W_{RMS} = 0.0001\lambda$,

表 1 实际检验光路的结构参数

Table 1 Structural parameters of actual testing optical path

No.	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Diameter /mm	Conic
OBJ	Standard	Infinity	506.48	-	-	0.00
1	Standard	-79.76	12.59	K9	110.00	0.00
2	Standard	430.00	1.72	-	110.00	0.00
3	Standard	165.38	17.32	K9	127.00	0.00
4	Standard	158.73	461.06	-	127.00	0.00
5	Standard	-1440.00	-720.00	Mirror	641.00	0.00
6	Standard	-1800.00	720.00	Mirror	800.00	-2.25
STP	Standard	-1440.00	-720.00	Mirror	1467.00	0.00
8	Standard	-1800.00	720.00	Mirror	800.00	-2.25
9	Standard	-1440.00	-461.06	Mirror	641.00	0.00
10	Standard	158.73	-17.32	K9	127.00	0.00
11	Standard	165.38	-1.72	-	127.00	0.00
12	Standard	430.00	-12.59	K9	110.00	0.00
13	Standard	-79.76	-506.48	-	110.00	0.00
IMA	Standard	Infinity	-	-	-	0.00

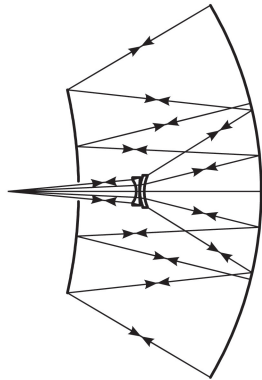


图 3 光路图

Fig. 3 Layout of optical path

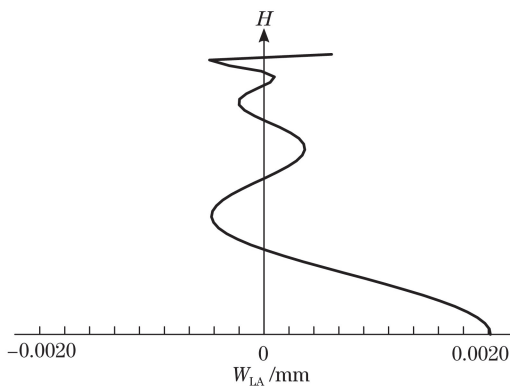


图 4 球差曲线

Fig. 4 Spherical aberration

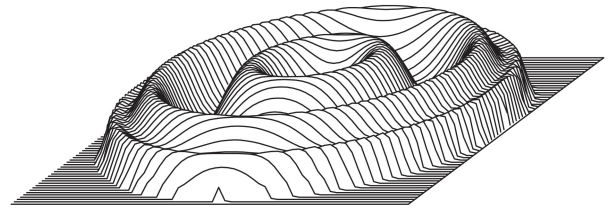


图 5 波前图

Fig. 5 Wavefront map

$\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。由于光线在待检镜上发生两次反射，实际残余像差为系统残余像差(即高级像差)的1/2。实际残余像差峰谷值 $W_{PV} = 0.0003\lambda$ ，均方根值 $W_{RMS} = 0.0001\lambda$ 。

为确保光学系统在一定的加工、装调精度下可以正常使用,对检验光路进行公差分析。分析过程中,为减小系统对误差的灵敏度,将透镜最后一面与像点的距离设为补偿量。分析结果如表 2 所示,其中, Δr 为半径的加工误差, Δd 为透镜厚度和间隔的误差, Δn 为透镜折射率的误差。校正透镜的倾斜需要控制在 $3''$ 以内,辅助球面镜的倾斜角需要控制在 $5''$ 以内。各镜面的面型误差控制在 0.125λ 以内,主要参数的公差要求在可加工范围内。

由于光线在球面反射镜上发生三次反射,因此对球面反射镜的加工和装调误差要求较为严格。在实际情况下,需要调整反射镜与待检镜的间距并精

表 2 主要参数的误差
Table 2 Errors of main parameters

Parameter	Value
$r_1 + \Delta r$ /mm	-79.75 ± 0.05
$r_2 + \Delta r$ /mm	430.00 ± 0.25
$r_3 + \Delta r$ /mm	165.38 ± 0.1
$r_4 + \Delta r$ /mm	158.73 ± 0.1
$r_5 + \Delta r$ /mm	-1440.00 ± 0.7
$d_{12} + \Delta d$ /mm	12.59 ± 0.005
$d_{23} + \Delta d$ /mm	1.72 ± 0.005
$d_{34} + \Delta d$ /mm	17.32 ± 0.005
$d_{45} + \Delta d$ /mm	461.06 ± 0.02
Δn	$\pm 10^{-6}$

确调整反射镜的倾斜度,以减小误差对检验精度的影响。

5 分析与讨论

5.1 可检验的最大口径

将实际检验光路中待检双曲面镜的口径增大,其他参数不变,计算不同口径凸双曲面镜检验光路的初始结构并对其进行优化。优化后可以得到待检镜口径大小与系统残余像差的关系,如图 6 所示,其中 Φ 为待检双曲面镜的口径, A 为相对口径, W_{PV} 为残余像差。当残余像差 W_{PV} 值小于 0.1λ 时,一般认为该光学系统可用于非球面检验。从图 6 可以看出,对于曲率半径 $R = 1800$ mm, 偏心率平方 $e^2 = 2.25$ 的凸双曲面镜,当口径比 $\alpha_1 = 2$, 遮拦比 $\alpha_2 = 0.16$ 时,可以检验的最大口径 $\Phi = 1050$ mm, 最大相对口径 $A = 1.1667$ 。

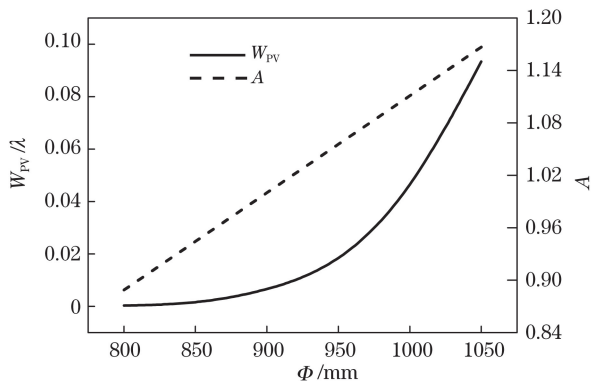


图 6 残余像差与口径的关系曲线

Fig. 6 Relationship between residual aberration and aperture

5.2 遮拦比的影响

对于口径 $\Phi = 600$ mm 的凸双曲面检验光路,

设定辅助反射镜与待检双曲面镜的口径比 α_1 分别为 2.0 和 1.8, 校正透镜的遮拦比 α_2 在区间 (0.08, 0.16) 内。计算各条件下实际检验光路的像差, 分析辅助反射镜与校正透镜的口径大小对系统残余像差的影响, 结果如图 7 所示。当辅助反射镜的口径一定时, 残余像差会随着校正透镜口径的增大而减小。在校正透镜口径相同的情况下, 辅助反射镜口径较小的检验光路, 其残余像差较大。

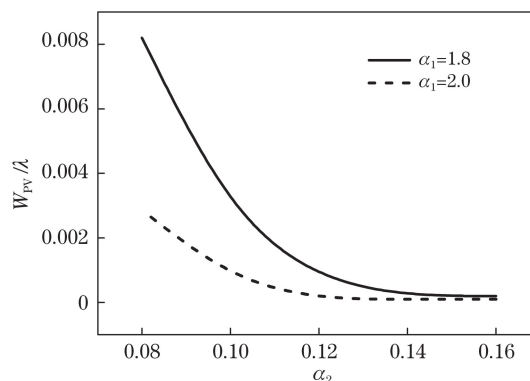


图 7 残余像差与遮拦比的关系

Fig. 7 Relationship between residual aberration and obstruction ratio

5.3 与 Hindle 法的比较

分别用 Hindle 法和本文所提出的方法检验口径 $\Phi = 600$ mm, 顶点曲率半径 $R = 1800$ mm, 偏心率平方 $e^2 = 2.25$ 的凸双曲面, 对比二者的辅助球面镜口径 D_H 、与待检双曲面的间距 d 以及待检双曲面镜的有效口径 D_V , 结果如表 3 所示。

表 3 两种检验方法的参数比较

Table 3 Comparison of parameters in two

Method	testing methods			mm
	D_H	d	D_V	
Hindle ^[12]	1800	1440	480	
Catadioptric testing	1150	720	496.64	

可以看出, 校正透镜与反射镜组合检验凸双曲面的方法所使用的辅助球面镜口径较小, 辅助球面镜与待检双曲面镜的间隔也较短。表 2 中折反射检验的有效口径是通过几何关系求得的, 与直接通过遮拦比 α_2 计算得到的 504 mm 有所差别。这是因为在光路中被透镜遮挡的光线与光轴有一定的角度, 所以遮挡的部分比透镜的口径稍大。

6 结 论

提出了一种利用小透镜和反射镜组合检验凸双曲面的方法, 并给出实际检验光路的例子, 证明该方

法可以用于凸双曲面检验。该方法通过减小辅助反射镜与待检双曲面镜的间距,减小了辅助球面镜的口径。利用辅助球面镜的部分口径作为反射镜,改变光线传播的方向,解决了辅助镜靠近待检镜后可检验的有效口径减小的问题。利用小口径透镜和球面反射镜组合产生具有消球差的入射光线。光线在待检镜后焦点成虚像,整个系统实现了消球差。分析结果显示,曲率半径为 1800 mm,偏心率平方 $e^2=2.25$ 的凸双曲面镜,在口径比 $\alpha_1=2$,遮拦比 $\alpha_2=0.16$ 的情况下,可以检验凸双曲面的最大口径 $\Phi=1050$ mm。光学系统的残余像差会受到辅助球面镜及校正透镜口径的影响。与 Hindle 法相比,该方法所使用的辅助球面镜口径明显减小,光学系统的长度也较短。结果表明,该方法可以用于检验大口径、大相对口径的凸双曲面。对于待检面为凸抛物面或凸椭球面的情况,还需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Furey L, Dubos T, Hansen D, *et al.* Hubble Space Telescope primary-mirror characterization by measurement of the reflective null corrector[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(10): 1703-1714.
- [2] Feinberg L D, Clampin M, Keski-Kuha R, *et al.* James Webb Space Telescope optical telescope element mirror development history and results[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8442: 84422B.
- [3] Fu L X, Wu Y G, Li X L, *et al.* Manufacture and test of Cassegrain system's primary mirror with large relative diameter and lightweight[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(4): 764-767.
付联效, 吴永刚, 李兴隆, 等. 大相对口径轻量化卡塞格林系统主镜的加工检验[J]. *光学学报*, 2008, 28(4): 764-767.
- [4] Pang Z H, Fan X W, Chen Q F, *et al.* Influence of surface-profile error of larger mirror on aberrations characteristics of optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422002.
庞志海, 樊学武, 陈钦芳, 等. 大口径反射镜面形误差对光学系统像差特性的影响[J]. *光学学报*, 2013, 33(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] Martin H M, Angel J R P, Burge J H, *et al.* Design and manufacture of 8.4 m primary mirror segments and supports for the GMT[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6273: 62730E.
- [7] Yao J G, Zheng L H, Hao P M. Hindle testing of convex aspheric double-lens with zero-focal power[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2017, 34(3): 272-277.
姚劲刚, 郑列华, 郝沛明. 凸非球面无光焦度双透镜 Hindle 检验研究[J]. *量子电子学报*, 2017, 34(3): 272-277.
- [8] Ma J, Zhu Z. Testing convex aspherical surfaces with optimized modified Hindle arrangement[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 277-281.
马杰, 朱政. 改进的 Hindle 方法检测凸非球面的研究[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(2): 277-281.
- [9] Parks R E, Shao L Z. Testing large hyperbolic secondary mirrors[J]. *Optical Engineering*, 1988, 27(12): 1057-1062.
- [10] 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.
- [11] Yao J G, Hu W Q, Ye L, *et al.* Convex asphere back null compensation testing with auxiliary surface[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2014, 31(5): 520-524.
姚劲刚, 胡文琦, 叶璐, 等. 凸非球面辅助面的背向零位检验分析[J]. *量子电子学报*, 2014, 31(5): 520-524.
- [12] Malacara D. *Optical shop testing*[M]. Yang L, Wu F, Transl. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2012: 329-333.
D. 马拉卡拉. *光学车间检测*[M]. 杨力, 伍凡, 译. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2012: 329-333.
- [13] Zhang Y M. *Applied optics*[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2008: 18-21.
张以谟. *应用光学*[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 18-21.
- [14] Hao P M. Design of auxiliary optical system of aspherical testing[M]. Beijing: Science Press, 2017: 18-23.
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: 18-23.
- [15] Lin D J. Design of optical engineering system[M]. Beijing: China Machine Press, 1987: 41-67.
林大键. *工程光学系统设计*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 41-67.