

文章编号: 1002-1582(2011)03-0259-05

瑞奇-康芒两角度检测法的一种波像差解读方法^{*}

宣斌, 谢京江

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 长春 130033)

摘 要: 瑞奇-康芒法是大口径平面元件面形检测的有效方法。通过分析检测光瞳到被检平面的位置转换关系以及波像差到面形误差的幅值转换关系, 分别对检测得到的波像差以及干涉仪离焦产生的 Power 进行转换处理, 利用最小二乘法计算出瑞奇-康芒两角度检测时的干涉仪离焦量, 从而获得被检平面的面形误差分布。实验部分给出了第4项到第37项泽尼克多项式分布形式的被检平面面形误差的仿真检测结果的误差分布, 其峰谷值和均方根值的相对数值误差的平均值分别为6.22%和3.48%, 相对分布误差的平均值分别为28.1%和14.4%; 并给出了一个随机面形误差的仿真检测结果。此波像差解读方法不存在多项式拟合的误差, 适用于任意形状的被检平面通光口径, 具有较高的精度, 达到了实际工程要求。

关 键 词: 应用光学; 光学检测; 光学平面; 瑞奇-康芒; 波像差解读

中图分类号: O439 文献标识码: A

Wavefront interpretation of Ritchey-Common test in two angular positions

XUAN Bin, XIE Jingjiang

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: Ritchey-Common test is one of the most effective methods of testing large flat components. The acquired wavefront and the power caused by defocus of interferometer are processed based on the position transformation from pupil coordinate to surface coordinate and the amplitude transformation from wavefront to surface error. The defocus amounts of Ritchey-Common test in two angular positions are obtained by the least square method and therefore the surface error of the flat under test is obtained. The simulative testing results of the surface errors of the 4th to 37th Zernike term distribution show that the mean relative numerical errors of peak-to-valley and root-mean-square are 6.22% and 3.48% respectively and the mean relative distribution errors are 28.1% and 14.4% respectively. A simulative testing result of a random surface error is also given. The wavefront interpretation method does not rely on the polynomial fitting and can be applied to any kinds of flat shapes. It provides high precision and meets the requirement of engineering application.

Key words: applied optics; optical testing; optical flat; Ritchey-Common; wavefront interpretation

* 收稿日期: 2010-11-07; 收到修改稿日期: 2011-01-05

基金项目: 财政部重大装备专项

作者简介: 宣斌(1983-), 男, 长春光学精密机械与物理研究所助理研究员, 博士, 从事光学检测研究。E-mail: xbjstn@sina.com

导师简介: 谢京江(1954-), 男, 长春光学精密机械与物理研究所研究员, 从事光学检测、光学加工研究。E-mail: jjxie@ciomp.ac.cn

通信联系人: E-mail: jjxie@ciomp.ac.cn

0 引 言

平面光学元件在光学系统中一直占有重要地位。随着光学系统口径的不断增大,对高精度大口径平面光学元件的需求也在不断地增加。平面面形检测最常用的斐索型激光数字干涉仪^[1]由于受到标准平面镜头口径的限制,全口径检测能力一般不超过 Φ800mm,并且价格十分昂贵。利用子孔径拼接^[2,3]等方法可以利用较小口径的标准平面镜头检测大口径平面元件,但是其检测效率相对较低,不利于指导光学加工。瑞奇-康芒法^[4]是一种利用小口径球面镜头和大口径球面反射镜检测平面元件的方法,其球面镜头和球面反射镜的加工难度和成本都相对较低,并且可以实现大口径平面元件的高精度全口径检测。

1 瑞奇-康芒法的波像差构成

瑞奇-康芒检测法的光路布置如图 1 所示。球面镜头的焦点与球面标准镜的球心重合,形成自准直检测。被检平面面形的常数项不是光学检测关注的重点,通常都不予考虑;被检平面的倾斜会导致主光线入射角的偏离,因此不作为波像差的引入因素。因此,干涉仪检测到的波像差可以分解为四部分:球面镜头面形误差、球面标准镜面形误差、被检平面面形误差 $Z(x,y)$ 以及干涉仪离焦引入的误差。^[5] 其中,球面镜头和球面标准镜的面形误差可以预先标定,从而作为系统误差予以补偿。

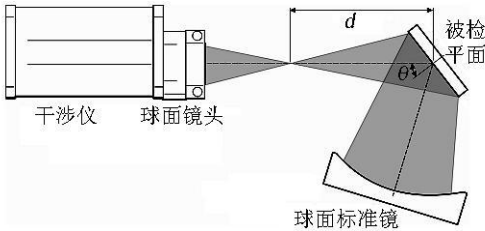


图 1 瑞奇-康芒检测法的光路布置图

补偿后的波像差记为 $W(x',y')$, 由被检平面面形误差 $Z(x,y)$ 和干涉仪离焦两部分组成,

$$W(x',y') = Z(x,y) \cdot \text{TF}_{\text{amp}} \cdot \text{TF}_{\text{pos}} + f \cdot \text{Power} \tag{1}$$

式中 TF_{amp} 和 TF_{pos} 分别为被检平面面形误差到波像差的幅值和位置转换函数; f 为干涉仪离焦量; Power 为离焦产生的波像差,可以表示为 $\text{Power} = x'^2 + y'^2$, 如图 2 所示。

由式(1)可知,干涉仪离焦产生的波像差与被检平面面形误差之间存在一定的耦合联系 $\text{TF}_{\text{amp}} \cdot \text{TF}_{\text{pos}}$, 因此单次瑞奇-康芒检测无法对干涉仪离焦进行分离,至少需要两种不同形式的检测,例如被检

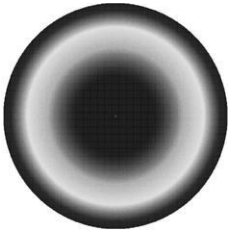


图 2 干涉仪离焦产生的 Power 形式的波像差

平面对应不同的主光线入射角或者采用绕其中心轴旋转的不同角度姿态,才能得到被检平面面形误差。对于大口径高精度平面元件,通常需要在特定的支撑状态下进行检测,以克服自身重力变形等因素的影响。这时更多的是采用不同的主光线入射角进行两次或多次瑞奇-康芒检测。下文对这种形式的检测结果进行分析。

1.1 面形误差到波像差的幅值转换

按照惯例,主光线与被检平面的交点设为干涉仪检测光瞳坐标系的原点 o' , 干涉仪焦点与原点的连线方向设为 $o'z'$ 轴, 弧矢和子午方向分别设为 $o'x'$ 轴和 $o'y'$ 轴, 并满足右手法则。被检平面坐标系中, 原点 o 和 oy 轴分别与 o' 和 $o'y'$ 轴重合, ox 轴与被检平面的表面平行。如图 3 所示。

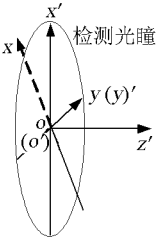


图 3 瑞奇-康芒检测法的坐标系设置

假设检测光线在被检平面任意点 (x,y) 的入射角为 $\theta(x,y)$, 则面形误差 $Z(x,y)$ 与波像差 $W(x,y)$ 之间的幅值转换函数为

$$\text{TF}_{\text{amp}} = 4 \cdot \cos\theta(x,y) \tag{2}$$

其中

$$\theta(x,y) = \arctan \frac{\sqrt{(d \cdot \sin\theta - x)^2 + y^2}}{d \cdot \cos\theta} \tag{3}$$

当 (x,y) 为原点时, $\theta(x,y)$ 为主光线入射角 θ_0 。

1.2 面形误差到波像差的位置转换

假设被检平面任意点 (x,y) 对应于干涉仪检测光瞳中的 (x',y') , 两者的几何关系如图 4 所示。

利用正弦和余弦定理不难得到 TF_{pos} 包括两部分

$$\begin{cases} x' = d \cdot \tan\Psi \\ y' = \frac{x'}{x \cdot \cos\theta} \cdot y \end{cases} \tag{4}$$

式中 d 为干涉仪焦点到主光线与被检平面交点的距离

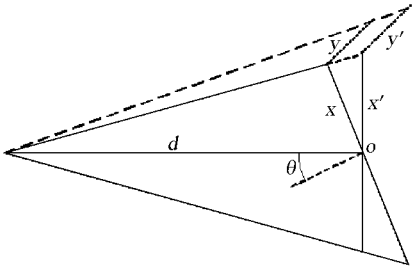


图 4 被检平面与检测光瞳的对应位置关系

$$\Psi = \arcsin \left[\frac{\cos \theta}{\sqrt{d^2 + x^2 - 2d \cdot x \cdot \sin \theta}} \cdot x \right] \quad (5)$$

2 瑞奇-康芒两角度检测法的面形误差解读

对式(1)进行逆变换, 将波像差转换为面形误差, 得到

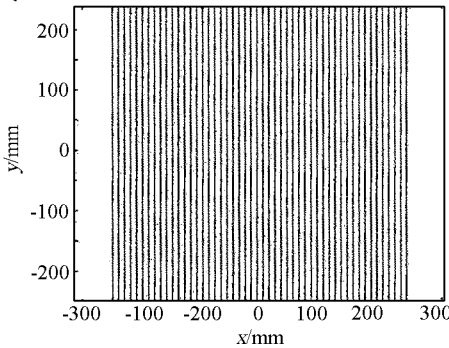
$$Z(x, y) = W(x', y') \cdot TF_{pos}^{-1} \cdot TF_{amp}^{-1} - f \cdot Power \cdot TF_{pos}^{-1} \cdot TF_{amp}^{-1} \quad (6)$$

式中 TF_{pos}^{-1} 、 TF_{amp}^{-1} 分别为 TF_{pos} 、 TF_{amp} 的反函数, 表示波像差到面形误差的位置和幅值转换。

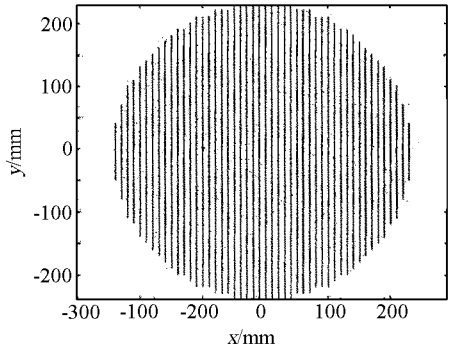
2.1 波像差到面形误差的位置转换

根据图 4, 利用相似三角形以及正弦定理不难得到 TF_{pos}^{-1} 包含两个部分

$$\begin{cases} x = \frac{\sin \theta}{\sin(\theta + \varphi)} \cdot x' \\ y = \frac{x \cdot \cos \theta}{x'} \cdot y' \end{cases} \quad (7)$$



(a) 矩形转换为近似梯形



(b) 圆形转换为椭圆

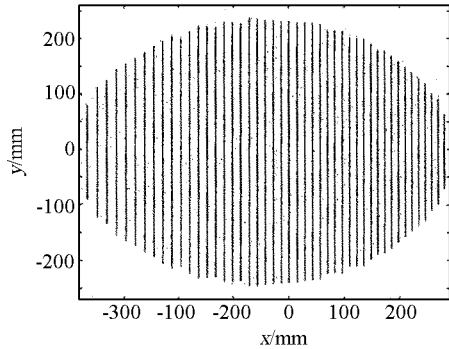
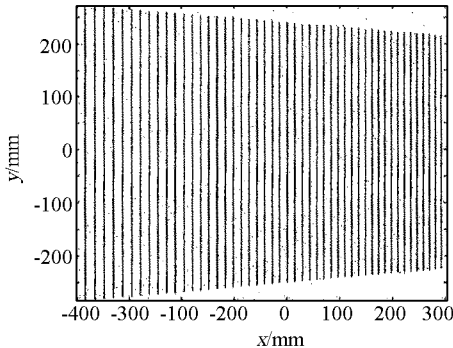


图 5 $\theta = 4^\circ$ 时, 检测光瞳到被检平面的 TF_{pos}^{-1} 的分布形式(注意坐标比例的变化)

其中

$$\varphi = \arctan \frac{d}{x} \quad (8)$$

根据式(7)可以从位置关系上将干涉仪检测的波像差对应到被检平面的面形误差。可以看到, 被检平面与检测光瞳之间的位置为非线性关系, 由于干涉仪测得的波像差转化到被检平面的面形误差会产生较为严重的畸变, 如图 5 所示。为了将转换后得到的被检平面面形误差按照习惯的均布型网格状位置分布显示, 需要进行插值等数学运算进行数据处理。

2.2 波像差到面形误差的幅值转换

根据式(2), 容易得到

$$TF_{amp}^{-1} = \frac{1}{4 \cdot \cos \theta(x, y)} \quad (9)$$

根据此式可以从幅值关系上将波像差转换到面形误差, 其分布如图 6 所示。可以看到, 幅值转换函数 TF_{amp}^{-1} 的分布类似于离轴的环带形式, 不具有回转对称性。

2.3 面形误差合成

为了获知被检平面的曲率半径, 至少需要进行两次不同主光线入射角度的瑞奇-康芒检测并进行综合。下文以两个入射角 θ_1 和 θ_2 为例进行分析, 更多检测次数的处理方法与之类似。

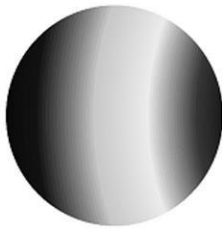


图 6 $TF_{1\text{pos}}^{-1}$ 的分布形式

假设两次瑞奇-康芒检测引入的离焦量分别为 f_1 和 f_2 , 根据式 (6), 被检平面的面形误差可分别表示为

$$\begin{cases} Z(x, y) = W_1(x', y') \cdot TF_{1\text{pos}}^{-1} \cdot TF_{1\text{amp}}^{-1} - f_1 \cdot \text{Power} \cdot TF_{1\text{pos}}^{-1} \cdot TF_{1\text{amp}}^{-1} \\ Z(x, y) = W_2(x', y') \cdot TF_{2\text{pos}}^{-1} \cdot TF_{2\text{amp}}^{-1} - f_2 \cdot \text{Power} \cdot TF_{2\text{pos}}^{-1} \cdot TF_{2\text{amp}}^{-1} \end{cases} \quad (10)$$

其中, f_1 和 f_2 需要满足: 使得 $Z(x, y)$ 在此方程组中的差别最小, 即 f_1 和 f_2 为此方程组的最小二乘解。

在特定 θ 和 d 的条件下, $TF_{1\text{amp}}^{-1}$ 和 $TF_{1\text{pos}}^{-1}$ 与被检平面通光口径的形状无关。对应于 θ_1 和 θ_2 , 令

$$\begin{cases} \text{Focus}_1 = \text{Power} \cdot TF_{1\text{pos}}^{-1} \cdot TF_{1\text{amp}}^{-1} \\ \text{Focus}_2 = \text{Power} \cdot TF_{2\text{pos}}^{-1} \cdot TF_{2\text{amp}}^{-1} \end{cases} \quad (11)$$

则式 (10) 简化为

$$\begin{cases} Z(x, y) = W_1(x', y') \cdot TF_{1\text{pos}}^{-1} \cdot TF_{1\text{amp}}^{-1} - f_1 \cdot \text{Focus}_1 \\ Z(x, y) = W_2(x', y') \cdot TF_{2\text{pos}}^{-1} \cdot TF_{2\text{amp}}^{-1} - f_2 \cdot \text{Focus}_2 \end{cases} \quad (12)$$

例如, 当 $\theta_1 = 30^\circ$, $\theta_2 = 60^\circ$, $d = 10\text{m}$ 时, 利用式 (7)、(9) 和 (11) 得到的 Focus_1 和 Focus_2 分布如图 7 所示。

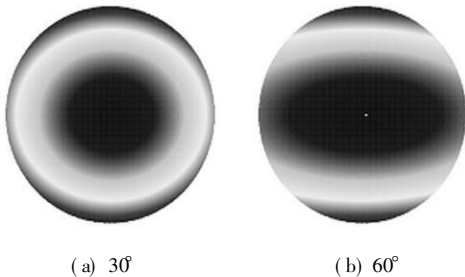


图 7 不同 θ 角度时离焦引入的 Focus

实际操作时, θ_1 、 θ_2 和 d 往往是固定的。对于不同的被检平面, Focus_1 和 Focus_2 都是相同、可以通用的, 因此可以预先计算并设置好。

利用 Focus_1 和 Focus_2 对式 (12) 在整个检测口径内的所有数据点进行最小二乘法求解, 得到的被检平面面形误差 $Z(x, y)$ 为瑞奇-康芒两角度检测法的最优解。

3 实验及数据分析

为了对瑞奇-康芒的波像差解读算法进行量化分析, 定义峰谷值和均方根值的相对数值误差分别为检测结果的 PV 、 rms 值与实际面形误差的相对偏差, 即

$$\begin{cases} E_{PV\text{-Num}} = \frac{PV_{\text{result}} - PV_{\text{surface}}}{PV_{\text{surface}}} \\ E_{rms\text{-Num}} = \frac{rms_{\text{result}} - rms_{\text{surface}}}{rms_{\text{surface}}} \end{cases} \quad (13)$$

定义峰谷值和均方根值的相对分布误差分别为检测结果与实际面形误差的偏离的 PV 、 rms 值与实际面形误差的相对偏差,

$$\begin{cases} E_{PV\text{-Dis}} = \frac{PV_{\text{residual}}}{PV_{\text{surface}}} \\ E_{rms\text{-Dis}} = \frac{rms_{\text{residual}}}{rms_{\text{surface}}} \end{cases} \quad (14)$$

式中 PV_{surface} 和 rms_{surface} 分别表示被检平面面形误差的峰谷值和均方根值; PV_{result} 和 rms_{result} 分别表示检测结果的峰谷值和均方根值; PV_{residual} 和 rms_{residual} 分别表示检测结果与实际面形误差的偏离情况的峰谷值和均方根值。

不考虑第 1 项常数、第 2、3 项倾斜, 利用本文所述算法对第 4 到第 37 项泽尼克多项式形式分布的圆形通光口径被检平面面形误差进行了仿真解读。其中, 球面标准镜口径 1.3m , 相对口径 $F/10$, 两次检测的主光线入射角分别为 30° 和 60° 。结果显示, 此算法对于边缘数据点的解读有时会产生类似于衍射效应的现象^[6], 显示为“塌边”或者“翘边”; 将有效口径略微缩小后解读的稳定性和精度都明显提高。图 8 给出了 98% 有效口径下的峰谷值和均方根值的相对数值误差和相对分布误差。其中, 峰谷值和均方根值的相对数值误差的平均值分别为 6.22% 和 3.48%, 相对分布误差的平均值分别为 28.1% 和 14.4%。

图 9 给出了一个随机面形误差的解读情况。其中, 图 9(a) 为被检平面面形误差分布, $PV = 180.49\text{nm}$, $rms = 28.80\text{nm}$; 图 9(b) 为仿真的检测结果, $PV = 177.85\text{nm}$, $rms = 27.81\text{nm}$, 峰谷值和均方根值的相对数值误差分别为 -1.47% 和 -3.43% ; 图 9(c) 为面形误差与检测结果偏差的分布, $PV = 51.13\text{nm}$, $rms = 3.99\text{nm}$, 峰谷值和均方根值的相对分布误差分别为 28.3% 和 13.8%。

相对数值误差表示实际面形误差和检测结果在峰谷值和均方根值这两个统计量上的差别, 无法表达分布特征。对于最终面形指标的检测评价, 要

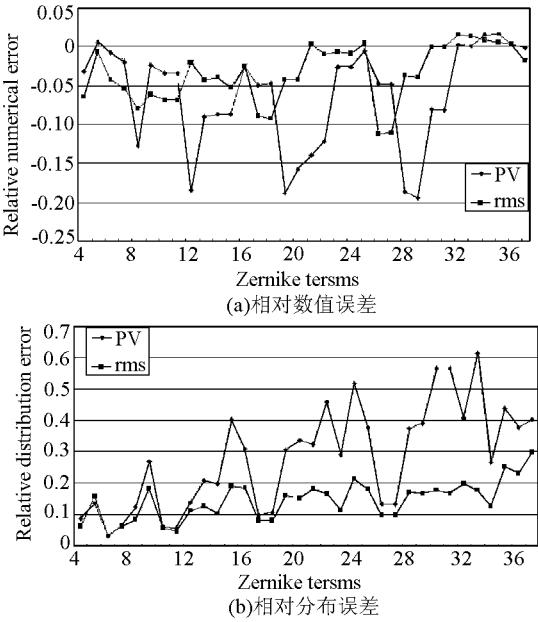


图 8 98% 口径时, 第 4 到第 37 项泽尼克多项式形式的平面面形误差的解读误差

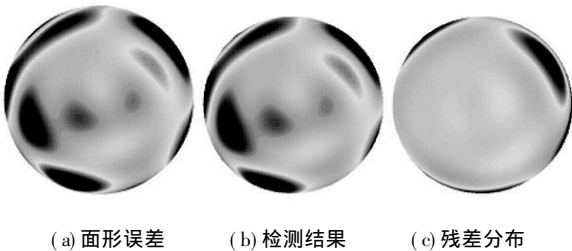


图 9 随机的被检平面面形误差的仿真检测结果

求相对数值误差尽量小。而对于光学加工, 不仅需要关注过程检测给出的面形误差的大小, 更为重要的是需要关注面形误差的分布形式以制定相应的工艺方法, 指导加工。因此过程检测需要以更为严格的相对分布误差作为检测精度的评价标准。虽然相对分布误差仍然较大, 但分布残差基本上没有改变零值基准, 即实际面形误差的“高点”和“低点”在检测结果中大致上都保持一致。检测结果提供的方向性的指导仍然正确, 这对于光学加工是至关重要的。

4 结 论

本文叙述的瑞奇-康芒两角度检测法的波像差解读方法, 基于波像差到面形误差的位置和幅值转换得到不同角度检测时的干涉仪离焦对波像差的影响分布, 利用最小二乘法计算干涉仪的离焦量, 从而给出被检平面的面形误差。此方法由于不采用多项式拟合从而不受拟合精度的影响; 并且不受拟合多

项式的正交性限制, 从而适用于各种形状的被检平面^[7-9]。此算法具有很高的通用性。但是由于运算量庞大, 为了降低运算时间, 算法在插值等方面做出了一些权衡性的让步, 对检测精度造成了一定的影响。总体上, 此算法满足了实验室正在建设的 $\Phi 1.15\text{m}$ 全口径检测能力的瑞奇-康芒检测平台的工程要求。

参考文献:

[1] Malacara D. Optical shop testing [M]. New York: Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley and Sons, 1991: 18—36.

[2] 李新南, 张明意. 大口径光学平面的子孔径拼接检测研究[J]. 光学技术, 2006, 32(4): 514—517.

Li X N, Zhang M Y. Study on the sub-aperture stitching interferometry for large plane optics [J]. Optical Technique, 2006, 32(4): 514—517.

[3] 王孝坤, 王丽辉, 张学军. 子孔径拼接干涉法检测非球面[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 192—198.

Wang X K, Wang L H, Zhang X J. Testing asphere by sub-aperture stitching interferometric method [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2): 192—198.

[4] Malacara D. Optical shop testing [M]. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley and Sons, 1991: 309—312.

[5] Dorband B, Schulte S, Schillke F, et al. Testing large plane mirrors with the Ritchey-Common test in two angular positions [J]. Proc. SPIE, 1999, 3739: 330—334.

[6] 徐德衍, 王青, 高志山, 等. 现行光学元件检测与国际标准[M]. 北京: 科学出版社, 2009. 108—109.

Xu D Y, Wang Q, Gao Z S, et al. Modern optical testing and international standards [M]. Beijing: Science Publication, 2009: 108—109.

[7] 袁吕军, 邢娜. 大口径光学平面瑞奇-康芒检测技术的研究[J]. 光学技术, 2007, 33(5): 737—744.

Yuan L J, Xing N. Study on the Ritchey-Common interferometry for large plane optics [J]. Optical Technique, 2007, 33(5): 737—744.

[8] 田秀云, 吴时彬, 伍凡, 等. 高精度大口径平面镜瑞奇-康芒定量检测方法研究[J]. 光学技术, 2004, 30(4): 486—488.

Tian X Y, Wu S B, Wu F, et al. Quantitative Test Method of Ritchey-Common Test in Large High Precision Flat Measurements [J]. Optical Technique, 2004, 30(4): 486—488.

[9] 田秀云, 吴时彬, 伍凡, 等. 瑞奇-康芒法中的一种数据处理方法[J]. 光电工程, 2004, 31(1): 23—31.

Tian X Y, Wu S B, Wu F, et al. A data processing method in Ritchey-Common test [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(1): 23—31.