文章编号:1002-2082(2010)06-0984-05

大口径平面镜的计算机辅助瑞奇-康芒检验

孔小辉[1,2]，樊学武[1]，马 臻[1]，庞志海[1,2]，余舜京[3]
(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所，陕西 西安 710119；
2. 中国科学院 研究生院，北京 100039；3. 上海微小卫星工程中心，上海 200050)

摘 要:在瑞奇-康芒检测中,被检平面本身所固有的像散和大曲率在被检系统波像差数据中都表现为像散。由于被检平面处于发散光路中，这就使得平面面形与系统波像差之间的关系（即影响函数）变得十分复杂，推导起来十分困难，只能进行定性或半定量检测。文中介绍了如何通过计算机光线追迹模拟瑞奇—康芒检验,在两个瑞奇角下得到两组影响函数,以此建立过定方程组,由干涉仪检测得到的两个不同瑞奇角下的系统波像差，通过最小二乘法解过定方程组，拟合得到被检平面镜的面形误差；实现了大口径平面镜的定量检测，并以平面镜直接检验的面形误差作为对比，检验结果的一致验证了该方法的准确性与可行性。

关键词：光学检测；瑞奇-康芒检验；波像差；影响函数
中图分类号：TN206 **文献标志码**：A

Computer added Ritchey-Common test for large flat mirror measurement

KONG Xiao-hui[1,2], FAN Xue-wu[1], MA Zhen[1], PANG Zhi-hai[1,2], YU Shun-jing[3]
(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;
3. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 200050, China)

Abstract: In Ritchey-Common test, the intrinsic astigmatism of the mirror plane under test and the astigmatism of the large curvature can not be distinguished in the measured system wavefront aberration. The flat is set in a divergent beam, which makes the relation between figure errors of flat and wavefront aberrations (influence function) complicate and difficult to derive. The procedure to simulate the Ritchey-Common test to derive the relationships between the figure errors of an optical flat and the wavefront aberrations, as well as the procedure to construct two set of influence functions by ray-tracing program are presented. Figure errors of the flat can be extracted from a set of over defined linear equations with the aid of least squares, using the influence functions and the measured wavefront aberrations for two different Ritchey angles. Both Ritchey-Common test and direct measurement results are presented. The comparison result proved the feasibility and reliability of this method.

Key words: optics test; Ritchey-Common test; wavefront aberration; influence function

引言

大口径平面镜作为大口径光学元件和仪器自准检验的必备设备,其面形精度要求非常高,往往需要知道其定量面形精度,所以长期以来,大口径

收稿日期:2010-03-15； **修回日期**:2010-04-13
作者简介:孔小辉(1985—),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要从事光学检测、计算机辅助装调研究。
E-mail:xhkong@opt.ac.cn

平面镜的定量检测一直是光学制造领域需致力解决的问题。干涉法的速度和精度都非常好,因而成为光学面形检测领域常用方法之一。目前,小口径的平面镜直接用干涉仪进行检验,但随着平面镜口径的增大,大口径干涉仪的制作难度和成本都非常高,直接检测法已不实用。大口径平面镜的检验主要有两种方法:一种是子口径拼接;另一种就是瑞奇-康芒法。子孔径拼接首先是利用已有的干涉仪,将被检平面镜分为多个相互之间有一定重叠区域的子口径(等于干涉仪的有效口径),用干涉仪分别测量,然后采用一定的算法获得整个平面的面形。由于这种方法一方面拼接误差较大,精度不高,另一方面需要精度高与行程大的二维工件台,故在大口径平面镜的实际检测过程中应用不多。瑞奇-康芒法在大口径平面镜的实际检验中是一种经常使用而且又是一种行之有效的方法,但由于其数学推导和数据处理繁琐,以前只是作为一种定性或半定量的方法。在国内外定量检测理论推导的基础上[1-8],本文对瑞奇-康芒法定量检测进行了计算机模拟和实验验证,验证了两角法瑞奇-康芒检测的正确性和实用性。

1　瑞奇-康芒测试原理

瑞奇-康芒法光路使用一块大口径的标准球面镜,球面镜的加工制作难度相对大口径的平面干涉仪来讲要容易得多。采用瑞奇-康芒法检测时,干涉图中所反映的像散包括两部分,除了平面镜本身固有的像散外,还有一部分像散是由于大曲率镜面所造成的,所以瑞奇-康芒检测不能真实地反映被检平面的真实面形情况,我们在数据处理时必须将由于大曲率所造成的像散从误差数据中分离出来。

图1是瑞奇-康芒检测光路原理图。干涉仪焦点好比一个点光源,正好位于反射球面镜的曲率中心处。被检平面以一定的角度θ(亦称为瑞奇角,是系统光轴在平面镜上的入射角)插入发散光束中。光束经被检平面反射到标准球面,然后经标准球面返回再次经过平面镜,最后返回到干涉仪焦点处,与干涉仪中参考面光束形成干涉。

由于被检平面与光瞳面成一定的角度,所以必须建立各自的坐标系,如图2所示。这两个坐标系的法线有一定的夹角,并不重合。在瑞奇-康芒检测中,由于光束是倾斜入射到平面上的,所以在系统的光瞳面上形成的光斑是近似的椭圆形,利用几何方法可以推导出光瞳坐标系和平面表面坐标系之间的关系如下

$$x_s=\frac{x_p/\cos\theta}{1\pm\frac{\tan\theta}{2F/\#}},\quad y_s=y_p \tag{1}$$

其正负符号分别表示负和正的x方向。

用泽尼克圆多项式表示平面镜面形误差已被证明是一种行之有效的方法。本文中使用泽尼克多项式来拟合波面误差和系统波像差。因为泽尼克多项式各项间互为正交,与线性无关,可以惟一、归一化地描述系统圆形孔径的面形,并且泽尼克多项式容易与光学系统像差建立起联系。

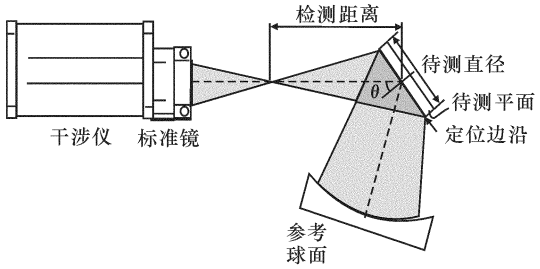


图1　瑞奇-康芒检测光路原理图

Fig. 1　Ritchey-Common test configuration

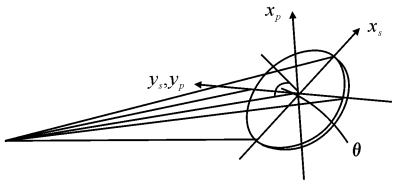


图2　被检平面与光瞳面的坐标系

Fig. 2　Surface and pupil coordinates in Ritchey-Common test

当被检平面镜被抛光后,平面镜的面形误差ΔS不是很大时,就可以用泽尼克多项式表示为

$$\Delta S(x_s,y_s)=\sum_n S_n Z_n(x_s,y_s) \tag{2}$$

式中:S_n是用泽尼克多项式Z_n表示的面形误差的各项系数;x_s和y_s是被检平面的表面坐标。在两次反射之后,波阵面的光程差OPD可以表示为关于x_p和y_p的函数为

$$\mathrm{OPD}(x_p,y_p)=\sum_n W_n Z_n(x_p,y_p) \tag{3}$$

式中:W_n表示系统波像差的各项泽尼克系数;$Z_n(x_p,y_p)$表示在光瞳面内坐标为点(x_p,y_p)的各个泽尼克多项式的基项。

在光轴倾斜入射的发散光路中,任意的入射I可以表示为

$$\cos I=\pm\sin(\theta-a\tan\frac{2F/\#}{x_p}) \tag{4}$$

式中:$F/\#$是发散光束的F数,其正负符号分别

表示负和正的 x 方向。

由以上关系式近似处理后可以得到平面面形误差和系统波像差之间的影响函数,建立影响矩阵,详见参考文献,但其推导的表达式十分复杂,且使用的都为标准泽尼克(Standard Zernike)多项式。实际干涉测量中,干涉仪得到的系统误差和面形误差都以条纹泽尼克(FRINGE Zernike)多项式来表示,所以为了实际应用方便,本文采用条纹泽尼克多项式来表示平面面形误差和系统波像差。为了找出面形误差和对应波像差之间的相互关系,按实际的瑞奇-康芒检验光路逐一算出平面镜上以泽尼克多项式形式表示的各单项面形误差的一个单位对检验系统波像差中各项泽尼克系数的贡献,建立一个表示面形误差与波像差之间的相互关系的影响函数,由于泽尼克多项式之间具有正交性,同时被检平面镜面形误差通常不会太大,所以此影响函数满足线性条件。于是可以得到平面镜面形误差与对应的系统波像差之间的关系式为

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,j} \\ a_{2,1} & a_{2,1} & \cdots & a_{2,j} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{i,1} & a_{i,2} & \cdots & a_{i,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_i \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中:a_{ij}为上面的影响函数;S_j 是平面镜面形误差系数矩阵;W_i 为系统波像差系数矩阵。由于泽尼克系数前 3 项为固定项和沿 x 和 y 轴的倾斜量,对面形误差无影响,所以在S_j 和W_i 中去掉前 3 项。

由于在实际测量中平面镜的面形误差对离焦项的贡献与由检测系统的调整引入的离焦项无法区分,所以在实际的数据处理中,必须舍弃离焦项 W_4 和 Z,这样未知数 S_j 的个数便大于实际测得的波像差W_i 的个数,成为不定方程组。因此改变瑞奇角的大小,按上述过程建立一组类似的方程组,然后再将相互独立的两组方程组合在一起,得到一个过定方程组。利用最小二乘法,即可求得被检平面的面形误差的各项泽尼克系数S_j,进而拟合出被检平面面形。需要指出的是,上式的W_i 是由干涉仪测得的系统波像差泽尼克系数与球面镜的残余面形误差泽尼克系数之差。在两者相减的过程中,要确保系统检验与球面检验的位置坐标关系。

瑞奇角为θ_i 时测得系统波像差可建立如下方程组

$$\begin{bmatrix} a_{4,5} & a_{4,6} & \cdots & a_{4,j} \\ a_{5,5} & a_{5,6} & \cdots & a_{5,j} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{i,5} & a_{i,6} & \cdots & a_{i,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_4 \\ S_5 \\ \vdots \\ S_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_5 \\ W_6 \\ \vdots \\ W_i \end{bmatrix} \tag{6}$$

简写为

$$A_{\theta 1} S = W_{\theta 1} \tag{7}$$

瑞奇角为θ_2 时可建立如下方程组

$$\begin{bmatrix} a_{4,5} & a_{4,6} & \cdots & a_{4,j} \\ a_{5,5} & a_{5,6} & \cdots & a_{5,j} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{i,5} & a_{i,6} & \cdots & a_{i,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_4 \\ S_5 \\ \vdots \\ S_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_5 \\ W_6 \\ \vdots \\ W_i \end{bmatrix} \tag{8}$$

简写为

$$A_{\theta 2} S = W_{\theta 2} \tag{9}$$

组合后建立过定方程组

$$\begin{bmatrix} A_{\theta 1} \\ A_{\theta 2} \end{bmatrix} S = \begin{bmatrix} W_{\theta 1} \\ W_{\theta 2} \end{bmatrix} \tag{10}$$

简写为

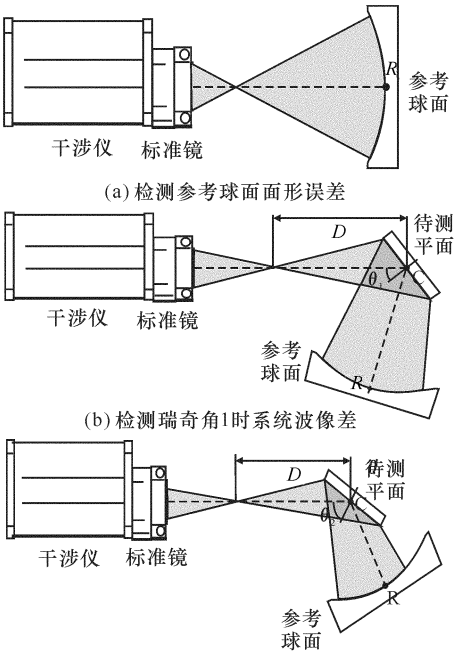
$$AS = W \tag{11}$$

用最小二乘法求解此过定方程组得

$$S = (A^{\mathrm{T}} \cdot A)^{-1} \cdot A^{\mathrm{T}} W \tag{12}$$

2　实验

本实验使用一块口径为 172 mm,曲率半径为 776 mm 的标准球面镜。在瑞奇角分别为 29.4°和 42.6°的情况下,用 zygo 干涉仪检测了口径为 90 mm 的平面反射镜,实验流程如下。



(a) 检测参考球面面形误差

(b) 检测瑞奇角1时系统波像差

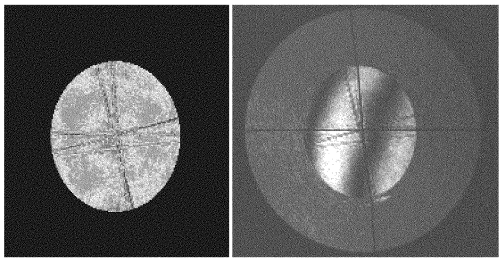
(c) 检测瑞奇角2时系统波像差

图 3　瑞奇-康芒检测的原理图

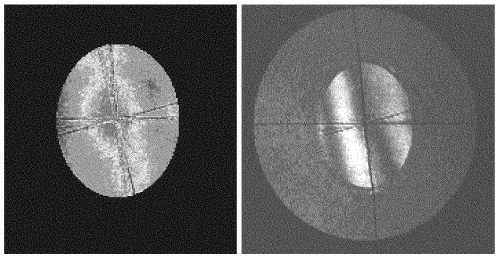
Fig. 3　Sequence of three measurements in Ritchey-Common test

首先对参考球面进行检测,得到球面镜面形误差,第二步搭建 29.4°瑞奇角检测光路,检测得到系

统波像差。第三步转动平面镜改变瑞奇角为42.6°,检测得到新的系统波像差。结果如图4所示。由得到的系统波像差减去球面参考镜面形误差即为由平面镜引入的波像差。代入光线追迹得到的影响矩阵方程中,由最小二乘法可以得出平面镜的面形误差系数S,并给出了最后拟合的结果及相应的PV值和RMS值,同时,用干涉仪直接对平面镜进行了检测,相应的检测结果如图5所示。对比表明计算机辅助的瑞奇-康芒检验法基本可以得到被检平面的真实面形误差,证明该方法确实可行,但还存在一定的误差需要分析解决。



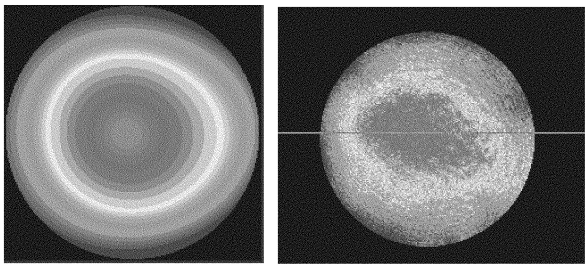
(a) 瑞奇角为29.4°时系统波像差图



(b) 瑞奇角为42.6°时系统波像差图

图4　两瑞奇角下测得的系统误差

Fig. 4　System wavefronts in two Ritchey angle positions



拟合面形误差:P－V＝0.140 λ,RMS＝0.034 λ; 干涉仪直接检测得到的面形误差:PV＝0.166 λ,RMS＝0.031 λ

图5　瑞奇-康芒法拟合面形与直接检测面形对比

Fig. 5　Result of Ritchey-Common test vs. result of direct measurement

实验误差分析

1）在平面镜改变瑞奇角测量过程中,需要保证平面镜中心点位置始终在干涉仪光轴上且距焦点距离不变,球面参考镜在第二、三步测量时需要保证光轴与第一次测量时在同一位置。可通过高精度的转台和测量工具来减小位置误差。

2）瑞奇角计算

如图6所示,可通过三角测量得到瑞奇角θ实际值。计算公式为

$$\cos\theta=\sqrt{\frac{S(S-C)}{ab}} \tag{13}$$

其中:$s=1/2(a+b+c)$。

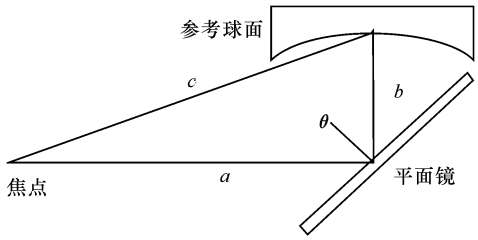


图6　实际瑞奇角三角法测量原理图

Fig. 6　Triangle method for the Ritchey angle measurement

3）拟合误差

本文只采用了16项泽尼克系数进行拟合,因此采用有限项泽尼克多项式拟合时也会带来一定的拟合误差(微小量值)。

4）由于被测平面镜含有一定高频误差,由光束倾斜入射形成的近似椭圆面展开为圆面时,镜面的高频误差无法体现,造成数据丢失,所以瑞奇角不能太大,拟合项数应适当增加。

由于是高精度测量,且操作过程复杂,因此在实验过程中环境因素和人员操作过程中都会影响实验的检测结果。因此,为了减小人为和环境的影响必须多次测量,取检测结果稳定时的数据进行计算。

3　结论

利用计算机光线追迹方法模拟较复杂的检测系统,从而找出某些量之间的影响关系,是一种行之有效的计算机辅助检测方法,可以避免过于复杂或过于近似的公式推导。

经过抛光后的平面镜和球面镜的面形误差主要含有低频误差,高频误差很少。因此,本文所用的16项泽尼克多项式就可以比较准确地表示和分析这类误差。本文通过实验对比证明了该方法的可行性,但检测中各种误差的定量影响还需要在以后的工作中继续研究。

参考文献:

[1]　SHU K L. Ray-trace analysis and data reduction

methods for the Ritchey-Common test[J]. Appl Opt, 1983,22(12):1879-1886.

[2] HAN SEN, ERIK NOVAK. Application of Ritchey-Common test in large flat measurements[J]. SPIE, 2001,4399:131-136.

[3] 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 Xiu-yun, WU Shi-bin, WU Fan, et al. Quantitative test method of Ritchey-Common test in large high precision flat measurements[J]. Optical Technique,2004,30(4):486-488. (in Chinese with an English abstract)

[4] MALACARA D. Optical shop testing (Third Edition)[M]. New Jersey:Wiley, 2007:310-313.

[5] 曹根瑞,安德逊,邵联贞,等. 计算机辅助的瑞奇-康芒检验[J].北京工业学院学报,1988,8(4):46-53.
CAO Gen-rui, ANDERSON D S,SHAO Lian-zhen, et al. Computer added Ritchey-Common test[J]. Beijing Inst. Technol, 1988,8(4):46-53. (in Chinese with an English abstract)

[6] 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):24-25.
TIAN Xiu-yun, WU Shi-bin, WU Fan,et al. A data processing method in Ritchey-Common test[J]. Opto-Electronic Engineering,2004,31(1):24-25. (in Chinese with an English abstract)

[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 Lu-jun, XING Na. Study on the Ritchey-Common interferometry for large plane optics[J]. Optical Technique, 2007, 33(5): 737-744. (in Chinese with an English abstract)

[8] ZYGO, CORPORATIAN. Ritchey-common metroPro application[M]. Connecticut: Zygo Corporation, 2004.