文章编号: 1002-1582(2007)05-0737-04

大口径光学平面瑞奇-康芒检测技术的研究*

袁吕军[1], 邢娜[1,2]
(1. 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042)
(2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 在瑞奇-康芒定量检测中, 被检数据中除了被检平面本身所固有的像散以外,还存在由于大曲率所造成的像散,这样就很难得到准确的被测平面面形误差,给指导镜面加工带来困难。对瑞奇-康芒检测法中由于瑞奇角产生的压缩图像进行展开,同时旋转被测平面进行推导,该方法将被检平面高低误差和被检平面本身的像散进行分离,使得检测结果更加准确地反映被检平面面形。通过与其它检测方法的比对,可以证明此方法的可行性、可靠性。给出了大天区面积多目标光纤光谱望远镜(LAMOST)项目中的 MA 大口径平面子镜的检测实例。

关 键 词: 瑞奇-康芒检测; 面形误差; 光学检测
中图分类号: TH706 **文献标识码**: A

Study on the Ritchey-Common interferometry for large plano optics

YUAN Lu-jun[1], XING Na[1,2]
(1. National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)
(2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Besides the intrinsic astigmatism of the mirror plane under test, astigmatism due to large curvature is encountered in quantitative. Ritchey-Common test, bringing in difficulties to the accurate determination of surface shape error, and in turn to the accurate machining of mirror plane. A method which expands the compressed images due to Ritchey Angle and rotates the plane under test is presented. By derivation based on the obtained relationships between the original plane and the rotated plane, the effect of intrinsic astigmatism and the undulate error of the plane under test can be separated, leading to a better agreement between the test result and the actual surface shape under test. Comparison with results by other test methods proved the feasibility and reliability of this method. The method's application in test of large aperture MA plane submirrors in LAMOST project is presented.

Key words: Ritchey-Common test; form error; optics test

0 引 言

光学面形的检测技术是准确反映面形质量的关键,随着天文望远镜的迅速发展,对天文光学镜面检测技术的要求也越来越高。干涉计量法的速度和准确性都非常好,因而成为光学面形检测领域常用方法之一。目前如果光学平面镜的直径大于 150mm 或更大直径,商业标准的 100mm 或 150mm 口径的干涉计量仪是很难对其进行全口径测量的。目前,高精度大口径平面镜的干涉计量法检测通常采取两种方式:一种是直接检测法,但是大口径的镜面检测却受到实际制作难度的限制;另一种就是瑞奇-康芒检测法,检测平面镜口径可以很大,实际检测成本有所降低。直接检测法其干涉仪口径要做得与被测镜同等口径,目前国内的最大平面干涉仪的检测口径为 800mm,若平面镜口径大于 800mm,则干涉仪的制作难度和成本都很高,从而可考虑第二种瑞奇-康芒检测法。瑞奇-康芒法在大口径平面镜的实际检测中是一种经常使用且又行之有效的方法。采用瑞奇-康芒检测方法,可以以较低的成本实现用小口径的干涉仪进行大口径光学平面的检测,瑞奇-康芒检测方法的研究在天文光学领域中的应用具有十分重要的意义。

本文给出了瑞奇-康芒定量检测方法的理论推导,并通过计算机编程,验证了使用瑞奇-康芒法用小口径的干涉仪进行大口径光学平面元件定量检测的可行性,通过对比实验验证此方法的可行性。此检测方法在大天区面积多目标光纤光谱望远镜(LAMOST)天文望远镜项目 MA 大口径六角形平面子镜的检测中得到了很好的验证。

* 收稿日期: 2006-09-01; 收到修改稿日期: 2006-11-02 E-mail: xingna@niaot.ac.cn
作者简介: 袁吕军(1961-),男,江苏人,中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所研究员,从事大口径非球面光学工艺与检测研究。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 瑞奇-康芒测试原理

瑞奇-康芒检测法的优越之处是不需要制作大口径的平面干涉仪。瑞奇-康芒法光路使用一块大口径的标准球面镜,其制作难度相对大口径的平面干涉仪来讲要容易的多。该方法的难点在于由于瑞奇角产生了检测图像压缩,从而使被测平面的高低误差与镜面本身的像散混合在了一起,影响了检测结果的准确性。本文就是通过解算压缩图像,还原被测镜本身的形状,使得被测平面的高低误差与镜面本身的像散从检测数据中分离开来。

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。其中反射球面镜的直径应大于待测平面的直径 1.2 到 1.3 倍。

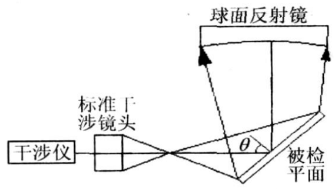

图 1 瑞奇-康芒检测原理图

2 瑞奇-康芒定量检测原理

利用多项式进行波面拟合是非常方便的,但多项式形式的选取与需要拟合的曲面性质有很大关系。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、线性无关,可以唯一、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。

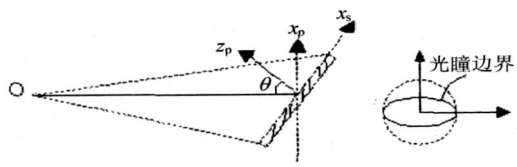

图 2 被检平面与光瞳面的坐标关系

首先,我们利用瑞奇-康芒检测原理图建立坐标系。如图 2 所示,x_s-y_s 是被检平面的表面坐标系,x_p-y_p 是光瞳面坐标。光瞳面坐标系的法线为通过 0 点的主光轴,被检平面表面坐标系的法线则垂直于被检平面。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椭圆形,而非圆形,如图 2 右所示。

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

$$x_s = \frac{x_p/\cos\theta}{1 \mp \frac{x_p \tan\theta}{2F/\#}} \qquad y_s = y_p \tag{1}$$

其正负符号分别表示负和正的 x 方向。

当被检平面镜被抛光后,面形误差 Δ_s 足够小,就可以用泽尼克多项式表示成

$$\Delta_s(x_s, y_s) = \sum_{n,m} S_{n,m} Z_{n,m}(x_s, y_s) \tag{2}$$

式中 $S_{n,m}$ 是面形误差泽尼克多项式的系数;$Z_{n,m}(x_s, y_s)$ 表示在被检平面内坐标为 (x_s, y_s) 点的各个泽尼克多项式的基项。在两次反射之后,波阵面的光程差 Δ_s 可以表示为关于 x_p, y_p 的函数为

$$\mathrm{OPD}(x_p, y_p) \approx 4\Delta_s \cos I = \sum_{n,m} W_{n,m} Z_{n,m}(x_p, y_p) \tag{3}$$

式中 $W_{n,m}$ 表示系统波像差的各项泽尼克系数;$Z_{n,m}(x_p, y_p)$ 表示在光瞳面内坐标为 (x_p, y_p) 点的各个泽尼克多项式的基项。

在方程(3)中,入射的径向方向角是被忽略的,在光轴倾斜入射的发散光路中任意的入射角 I 可以表示成

$$\cos I = \mp \sin\left(\theta - \mathrm{atan}\frac{2F/\#}{x_p}\right) \tag{4}$$

其中 $F/\#$ 是发散光束的 F 数,其正负符号分别表示负和正的 x 方向。

当 $\tan\theta/(2F/\#) = 1$ 时,代入(3)式有

$$\mathrm{OPD}(x_p, y_p) \approx 4\cos\theta\Delta_s\left(\frac{x_p}{\cos\theta}, y_p\right) \tag{5}$$

由以上关系式可以得到平面面形误差和系统波像差之间的影响函数,如(6)—(17)式。其中 $W_{0,0}$,$W_{1,1}$ 和 $W_{1,-1}$ 仅表示平面沿 x 和 y 方向的倾斜,与像散无关,因此并不包括在下列方程中。这里给出了前四阶面形误差和波阵面误差之间的关系式。

$$\begin{aligned} W_{2,0} = {} & 2\cos\theta\left(\frac{1}{\cos^2\theta} + 1\right) S_{2,0} + \frac{\sin^2\theta}{\cos\theta} S_{2,2} + \\ & \frac{3\sin\theta}{2}\left(\frac{1}{\cos^4\theta} - \frac{1}{\cos^2\theta} - 1\right) S_{4,0} + \\ & \frac{3\sin^2\theta}{\cos^3\theta} S_{4,2} + \frac{3\sin^4\theta}{4\cos^3\theta} S_{4,4} \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} W_{2,2} = {} & \frac{4\sin^2\theta}{\cos\theta} S_{2,0} + 2\cos\theta\left(\frac{1}{\cos^2\theta} + 1\right) S_{2,2} + \\ & 3\cos\theta\left(\frac{3}{\cos^4\theta} - \frac{4}{\cos^2\theta} + 1\right) S_{4,0} + \\ & \frac{6\sin^2\theta}{\cos^3\theta} S_{4,2} + \frac{3\cos\theta}{2}\left(\frac{1}{\cos^4\theta} - 1\right) S_{4,4} \end{aligned} \tag{7}$$

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$W_{2,-2} = 4S_{2,-2} + 6\tan^2\theta S_{4,-2} + 3\tan^2\theta S_{4,-4} \quad (8)$$

$$W_{3,1} = \left(\frac{3}{\cos^2\theta} + 1\right) S_{3,1} + \tan^2\theta S_{3,3} \quad (9)$$

$$W_{3,-1} = \cos\theta\left(\frac{1}{\cos^2\theta} + 3\right) S_{3,-1} + \frac{\sin^2\theta}{\cos\theta} S_{3,-3} \quad (10)$$

$$W_{3,3} = 3\tan^2\theta S_{3,1} + \left(\frac{1}{\cos^2\theta} + 3\right) S_{3,3} \quad (11)$$

$$W_{3,-3} = \frac{3\sin^2\theta}{\cos\theta} S_{3,-1} + \cos\theta\left(\frac{3}{\cos^2\theta} + 1\right) S_{3,-3} \quad (12)$$

$$W_{4,0} = \frac{\cos\theta}{2}\left(\frac{3}{\cos^4\theta} + \frac{2}{\cos^2\theta} + 3\right) S_{4,0} + \cos\theta\left(\frac{1}{\cos^4\theta} - 1\right) S_{4,2} + \frac{\cos\theta}{4}\left(\frac{1}{\cos^4\theta} - \frac{1}{\cos^2\theta} + 1\right) S_{4,4} \quad (13)$$

$$W_{4,2} = 3\cos\theta\left(\frac{1}{\cos^4\theta} - 1\right) S_{4,0} + 2\cos\theta\left(\frac{1}{\cos^4\theta} + 1\right) S_{4,2} + \frac{\cos\theta}{2}\left(\frac{1}{\cos^4\theta} - 1\right) S_{4,4} \quad (14)$$

$$W_{4,2} = 2\left(\frac{1}{\cos^2\theta} + 1\right) S_{4,-2} + \tan^2\theta S_{4,-4} \quad (15)$$

$$W_{4,4} = \frac{3\sin^4\theta}{\cos^3\theta} S_{4,0} + 2\cos\theta\left(\frac{1}{\cos^4\theta} - 1\right) S_{4,2} + \frac{\cos\theta}{2}\left(\frac{1}{\cos^4\theta} + \frac{6}{\cos^2\theta} + 1\right) S_{4,4} \quad (16)$$

$$W_{4,-4} = 4\tan^2\theta S_{4,-2} + 2\left(\frac{1}{\cos^2\theta} + 1\right) S_{4,-4} \quad (17)$$

为了求出面形,我们将上面的方程整理成如下的形式

$$\begin{bmatrix} * & * & * & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & * & * & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & * & 0 & 0 & * & \cdots & 0 \\ & & \cdots & & & & \cdots & \cdots \\ & & \cdots & & & & \cdots & \cdots \\ & & \cdots & & & & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & * & \cdots & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{2,0} \\ s_{2,2} \\ s_{2,-2} \\ \cdots \\ s_{4,-4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{2,0} \\ w_{2,2} \\ w_{2,-2} \\ \cdots \\ w_{4,-4} \end{bmatrix} \quad (18)$$

简写为

$$PS = W \quad (19)$$

式中 P 为上面的稀疏矩阵,即影响函数矩阵。

3　被检大平面高低误差和本身像散的分离

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-康芒检测不能真实的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。为了分离被检平面高低误差和本身的像散,我们通过展开压缩图像和旋转被测平面不同的角度进行多次测量来提取大曲率所造成的像散。对于转换不同角度的瑞奇-康芒数据来说,它们所表现的像散都是被检平面高低和本身像散的综合量值,镜面本身的像散在不同角度下反映的像散方向和量值时各不相同的,而被检平面高低引起的像散在不同角度的瑞奇-康芒误差数据中其方向和量值是固定的像散,这样通过角度展开和旋转,就能将被检平面大曲率造成的像散和被检平面本身固有的像散完好的从瑞奇-康芒数据中分离出来,以正确地反映被检平面的面形状况。

通过上面的理论推导,为了更准确的检测被检平面的面形,在用瑞奇-康芒法检测时,我们旋转被测的平面多次测量来减少误差。旋转不同角度后的面形误差泽尼克多项式的系数 $S^{\phi}_{n,m}$,用原始面形误差泽尼克多项式的系数 $S_{n,m}$ 表示为

$$S^{\phi}_{2,0} = S_{2,0} \quad (20)$$

$$S^{\phi}_{2,2} = \cos(2\phi) S_{2,2} - \sin(2\phi) S_{2,-2} \quad (21)$$

$$S^{\phi}_{2,-2} = \sin(2\phi) S_{2,2} + \cos(2\phi) S_{2,-2} \quad (22)$$

$$S^{\phi}_{3,1} = \cos\phi S_{3,1} - \sin\phi S_{3,-1} \quad (23)$$

$$S^{\phi}_{3,-1} = \sin\phi S_{3,1} + \cos\phi S_{3,-1} \quad (24)$$

$$S^{\phi}_{3,3} = \cos(3\phi) S_{3,3} - \sin\phi(4\cos^2\phi - 1) S_{3,-3} \quad (25)$$

$$S^{\phi}_{3,-3} = \sin\phi(4\cos^2\phi - 1) S_{3,3} + \cos(3\phi) S_{3,-3} \quad (26)$$

$$S^{\phi}_{4,0} = S_{4,0} \quad (27)$$

$$S^{\phi}_{4,2} = \cos(2\phi) S_{4,2} - \sin(2\phi) S_{4,-2} \quad (28)$$

$$S^{\phi}_{4,-2} = \sin(2\phi) S_{4,2} + \cos(2\phi) S_{4,-2} \quad (29)$$

$$S^{\phi}_{4,4} = (8\cos^4\phi - 8\cos^2\phi + 1) S_{4,4} - \sin(4\phi) S_{4,-4} \quad (30)$$

$$S^{\phi}_{4,-4} = \sin(4\phi) S_{4,4} + (8\cos^4\phi - 8\cos^2\phi + 1) S_{4,-4} \quad (31)$$

第三部分我们完成了平面面形的瑞奇-康芒定量检测数据的计算,只要通过计算公式 $PS = W$ 求得 S,就可以根据公式(2)计算并绘制待测平面的面形。当将平面旋转了一个角度 ϕ 时,计算公式变为

$$PS^{\phi} = W^{\phi} \quad (32)$$

其中 W^{ϕ} 的求解方法跟 W 相同,也是利用不同旋转角度 ϕ 下的波像差数据拟合得到。同时将(20)—(32)式整理为 $S^{\phi} = Q \cdot S$,代入(33)式可得 $Q \cdot P \cdot S = W^{\phi}$,从而求出不同旋转角度下的原始面形误差泽尼克多项式的系数 $S_{n,m}$。将各个旋转角度下得到的系数 $S_{n,m}$ 减去其相同的像散,在求其平均值,最后求出镜面的面形。根据以上的分析,该结果能更加真实地反映被检平面的面形。

4　实验及误差分析

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4.1 实验

根据以上对瑞奇-康芒检测方法的研究与分析,编制了用于瑞奇-康芒检测实验的应用程序,并设计了相关实验来验证瑞奇-康芒检测方法的正确性和可行性。

我们用一个口径为 1280mm,曲率半径为 11000mm 的标准反射球面镜,在瑞奇角为 45°时,对口径为 400mm 的平面镜进行检测,并给出了最后检测的结果及相应的 PV 值和 RMS 值,如图 3 所示。同时,用大口径平面干涉仪直接对口径为 400mm 平面镜进行了直接检测,结果如图 4 所示。

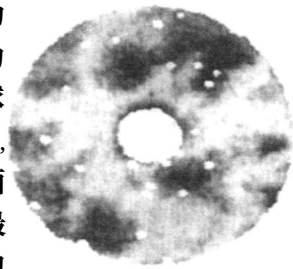

图 3 瑞奇-康芒法拟合的平面镜面形

PV = 0.052λ; RMS = 0.009λ

通过比较我们可以看到,瑞奇-康芒法与直接法检测的检测结果很接近,RMS 的检测精度优于 0.0036 λ,能够满足实际使用要求,并且能够更好的反映镜面的信息,由此表明,本文的研究方法是可行的、检测精度也是可信的。

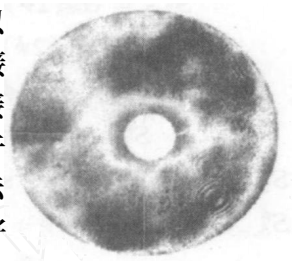

图 4 干涉仪直接检测的平面镜面形

PV = 0.069λ; RMS = 0.0126λ

4.2 误差分析

(1) 旋转工作台误差的影响:旋转工作台作为待测平面镜的载体,旋转工作台每旋转一个角度时,角度误差会影响图像的恢复重建,在系统设置时,可以在旋转台上选取三点作为基准定位点,来减小误差。

(2) 瑞奇-康芒展开的误差影响:由于瑞奇角的存在,平面镜进行投影时,由椭圆到圆的展开,像元数的增多会引进微小的插值或拟合误差。我们在实验中可以从 0°到 180°每隔 30°旋转 6 个角度测量,这样可以减小图像展开误差。

(3) 在用泽尼克多项式系数拟合时也会带来一定的拟合误差(微小量值)。

(4) 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。

5 在 LAMOST 的 MA 子镜检测的应用

瑞奇-康芒实验光路由一个口径为 1280mm,曲率半径为 11000mm 的标准反射球面镜,旋转工作台和一台小口径地移相干涉仪组成,被检平面的瑞奇角为 45°,被检平面为对角线长为 1100mm、厚为 25mm 的六边形超薄平面(LAMOST 的 MA 子镜)。

在实验中旋转被检平面时,我们可以每隔 30°角度旋转,经过多次试验证明每隔 30°旋转得到的求解面形误差偏差最小。

图 5 给出了旋转 30°7 个位置被检平面的等高图。

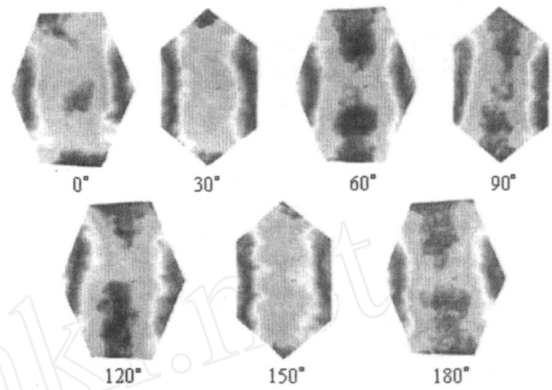

图 5 从 0 到 180°每隔 30°旋转得到的等高图

图 6 给出了通过本文叙述的解算原理和方法计算还原得到的被检平面真实的表面误差等高图。

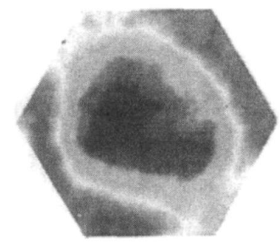

图 6 被检平面镜灰度等高图

PV = 0.724λ; RMS = 0.177λ

通过等高图,我们可以看出被检平面的高低误差被很好地反映出来。

实验中的瑞奇角是通过三角形测量法求得的,如图 7 所示的三个边长 a, b, c,这时瑞奇角为 45°,计算公式为

$$\cos\theta = \sqrt{\frac{s(s-c)}{ab}} \tag{33}$$

其中 $s = (1/2)(a + b + c)$

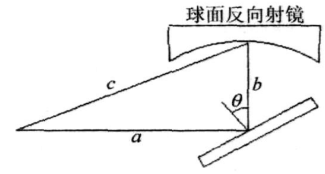

图 7 瑞奇角求解图

6 结 论

对采用瑞奇-康芒法检测大口径平面的方法进行了详细的数学推导和分析,编制了瑞奇-康芒检测的计算程序,通过实验,证明了此方法的可行性,本方法简单,易行,又能更好的反映出被检平面的面形误差,并给出了对大天区面积多目标光纤光谱天文

(下转第 744 页)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 超薄镜加工实验的经验

(1) 由于担心在铣磨加工中产生的热量会导致沥青熔化,影响加工的精度,我们使用了较硬的沥青进行粘接。使用硬度高的沥青产生的问题是其粘接力相对较软的沥青要大,更易导致超薄镜下盘后的形变。而比较硬的沥青在粘接过程中也不易涂抹均匀,难以排除粘接层中的空气,对后续加工会产生影响。但我们发现只要能够较好的控制铣磨机冷却液的温度,铣磨产生的热量将远不足以将沥青熔化。可以使用标号较低较软的沥青进行粘接,这样可以比较好的解决上述由于使用较硬沥青所产生的问题。因此我们将要对改进相应设备以求能够更好的控制铣磨机冷却液的温度。

(2) 超薄镜坯和基底在加工前都必须进行倒角的工序。虽然在此块超薄镜的加工过程中已经对其进行倒角,但是由于倒角较小还是产生问题。在对研加工中镜坯和基底发生轻微磕碰几乎是无法避免的,由于此块实验镜倒角不够在一次小磕碰中导致了基底边缘小块碎裂。为了实验能够继续进行,我们不得已将周围一圈用磨边的方法铣去,导致此块实验镜的实际口径只有 195mm,而原先我们希望加工出口径为 200mm 的超薄镜样品。在以后的实验中必须重视倒角的工序,防止类似问题出现。

(3) 对于超薄镜厚度均匀性的控制问题的需要关注。我们实验所用的镜坯材料和基底材料上下两个面均不是非常平整,在实验前我们对于这个问题没有给予足够的重视。后来我们发现两个面均不平整在基底和镜坯的粘接中会出现找不到参考平面的问题,无法保证粘接中不发生倾斜。如果粘接发生倾斜将导致铣磨后的超薄镜不是均匀等厚的。由于此超薄镜非常薄仅为 1.6mm,如果有 0.2mm 的不等厚,其不等厚程度就达到 12.5 %。对于更大口径的超薄镜,同样的倾斜角度将导致不等厚的情况更加严重。经测量,此块实验件的厚度相差为 0.1mm。在以后的实验中首先要对镜坯材料和基底材料进行磨平面的工序,用磨平的平面作为基准面。在粘接中用基准面来校正倾斜。

(4) 在本实验中,将超薄镜镜坯铣磨成超薄镜的工序材料去除量大,耗时耗力。因此在以后的实验中需要根据超薄镜矢高计算所需要的镜坯材料厚度,尽可能减少材料去除量,节约成本,缩短制造周期。

(5) 用汽油溶解沥青下盘的过程比较缓慢,主要原因在于超薄镜和基底间的间隙比较小,汽油渗入比较缓慢。在增高汽油油面高度后溶解速度变快,说明加大油压可以大大提高汽油的溶解速度。因此在以后的实验中应该采用比较深的容器浸泡超薄镜和基底,以增加油压,加快溶解。另外由于汽油的渗入越往中心越慢,所以我们考虑在以后的实验中可以在基底上打一些小口径的通孔,在溶解过程中汽油可以通过这些小孔向里渗入,加快下盘的速度。

4 对实验结果的分析和总结

由于我们目前所进行的实验主要的目的是验证实验工艺流程的可行性和获得一些初步的经验结果,故未选择光学性能表现优异的微晶材料,也没有针对此实验镜加工出支撑调整机构。如果采用微晶玻璃作为实验材料,并加以调整机构对下盘后的超薄镜进行调整,相信应该能够获得较好的镜面面形。

我们在下一步的工作中将对现有的加工工艺进行优化并着手进行更大口径的超薄镜加工。同时我们也将展开超薄镜支撑调整机构的研究制造,将其用于超薄镜的面形调节,在超薄镜的应用领域进行更加深入的研究。

参考文献:

[1] Burge J H, Angel J R P, Cuerden B, et al H. Lightweight mirror technology using a thin facesheet with active rigid support [J]. SPIE: Space Telescopes and Instruments V, 1998, 3356: 690—701.

[2] Miller S, Angel R, Martin B, et al. Fabrication of ultra thin mirrors for adaptive and space optics [J]. SPIE, 1998, 3126: 391—396.

[3] Martin H M, Anderson D S. Techniques for fabrication of 2-mm-thick adaptive secondary mirror [J]. SPIE, 1997, 2534: 134—139.

[4] 叶露,辛宏伟,等. 主动调节刚性支撑薄膜反射镜制造[J]. 航天工艺, 2001, (5): 1—19.

(上接第 740 页)

望远镜(LAMOST)的 MA 子镜的检测实例,对今后大口径光学平面镜元件的检测尤其是对下一代大口径光学望远镜的发展具有重要意义。下一步我们将继续完善瑞奇-康芒检测方法的程序,并对检测的数据进行误差分析,从而使瑞奇-康芒法在检测大口径平面镜中将会得到更好的应用。

参考文献:

[1] Han S, Novak E, Schuring M. Application of Ritchey-Common test in large flat mearsurements [J]. SPIE, 2001, 4399: 131—136.

[2] SHU K L. Ray-trace analysis and data reduction methods for the Ritchey-Common Test [J]. Applied Optics, 1983, 22 (12): 1879—1886.

[3] Born M. Wolf E. Principles of optics [M]. Pergamon Press, 1980.

[4] 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.

[5] Malacara D. Optical shop testing (Second Edition) [M]. 1992. 309—312.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net