

刀口定量检验技术的研究

袁吕军

(南京天文仪器研制中心, 南京 210042)

摘 要 主要介绍天文镜面加工中的刀口定量检验技术, 包括阴影图像 CCD 实时采集、图像处理、定量计算。

关键词 刀口检验, 定量计算, 天文镜面。

1 引 言

随着科学技术的发展, 对天文镜面的加工、检测要求越来越高, 刀口仪定性检验已远远不能满足实际需要。给刀口仪配上 CCD 作实时图像采集、图像处理, 并从几何光学的概念出发, 使得对天文镜面或光学系统作刀口检测图像的定量分析、定量计算成为可能。目前, 刀口定量检验的初步研究结果已得到很好的应用。通过刀口定量计算, 可以比较准确地测量出波面形状, 同时也反映出了刀口检测灵敏度高、直观性强、操作方便、灵活的诸多优点。刀口仪定量检验最主要的特色之一就是不需要借助于额外的光学参考面或光学系统, 所以不存在额外的光学调整和额外的系统误差, 具有较好的抗震、抗气流特性, 从而为大大提高镜面检测的质量和缩短加工周期提供了强有力的保证。刀口定量检验的研究及其应用已显示出它广阔的应用前景。

2 刀口仪定量检测系统的组成

刀口定量检测系统如图 1 所示。1 为被测镜(球面或非球面), 2 为非球面补偿系统, 3 为刀口检测头, 4 为 CCD 摄像机。A 为被检系统, B 为刀口及摄像系统, C 为微机处理系统。被检系统 A 可以是单块球面反射镜, 也可以是组合系统。在组合系统里, 被测镜可以是单块非球面反射镜也可以是透镜或透镜组。补偿系统的作用在于与被测镜一起构成自准光路被检系统。通常情况下, 补偿系统可以是标准平面、标准球面或者是透镜系统, 主要根据被测镜参数和检测的实际情况结合起来而定。

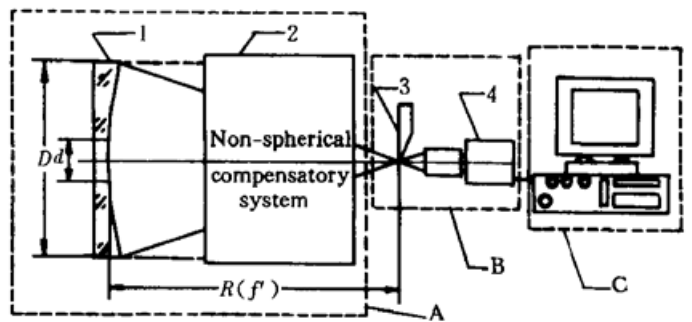


Fig. 1 Diagram of the Knife-edge testing system

3 刀口仪定量检验的原理及其数学表达式

刀口仪检验适合于长焦距、大镜面光学加工过程中的实时检测。由于环境的影响，单幅阴影图像不适用于定量分析和定量处理，刀口仪定量检验必须经过多幅图像处理 and 特征提取处理以达到定量检测的准确性、可靠性。刀口仪定量检验主要从几何光学的概念着手进行数学公式的推导和波面计算。

由原理分析图 2 可知，若点光源放在 F' 处， N 为理想波面在 M 点处的法线， N' 为带差在 M 点处的法线，由反射定律， $\angle M'MF' = 2\alpha_0$ ， α_0 为 N 与 N' 之间的差角值。设 $|M'F'| = -y'$ ，则有 $\alpha_0 = 0$ 时， $y' = 0$ 。 $|M'F'|$ 为法线差角 α_0 形成的光线偏差值。下面依据图 2 来推导 α_0 与 y' 之间的关系表达式。

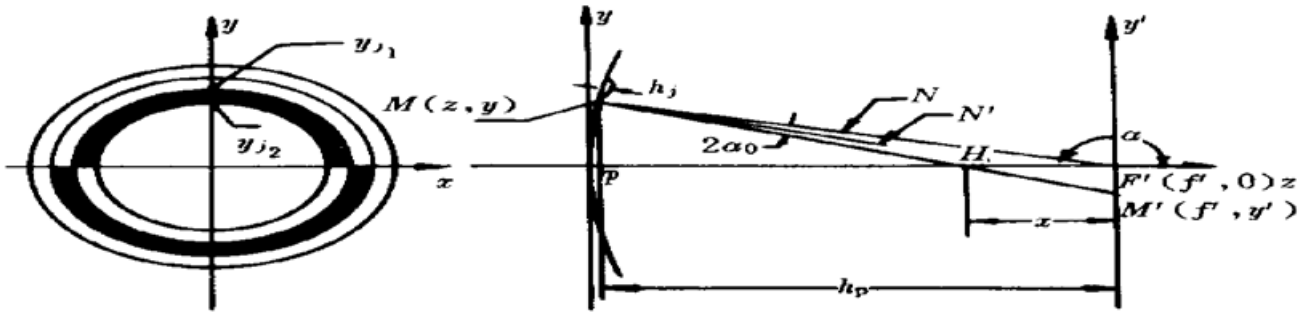


Fig. 2 The mathematics analytical diagram of quantitative knife-edge test

图 2 中 $h_p = \sqrt{f'^2 - y^2}$ 。由于 M 点近似地在半径为 f' 的圆周上，所以 M 点应满足下列方程：

$$(z - f')^2 + y^2 = f'^2 \tag{1}$$

由(1)式微分得到 M 点处的切线斜率 $K_Q = \partial y / \partial z = \sqrt{f'^2 - y^2} / y$ ，设 K_T 为 M 点处法线 N 的斜率，由 $K_Q K_T = -1$ 得

$$\tan \alpha = K_T = -\frac{1}{K_Q} = \frac{-y}{\sqrt{f'^2 - y^2}} \tag{2}$$

通过相似三角形及数学上的简单变换得到：

$$\tan \alpha_0 = \frac{-y'}{2f'^2} \sqrt{f'^2 - y^2} \tag{3}$$

(3) 式为刀口仪定量计算使用的最基本的数学表达式。式中， y 为光线偏值 y' 时的镜面上对应的位置值，由图像处理得到； y' 为刀口位置值，由位移传感器读出，同一个 y' 值可能在镜面同时有一个以上的位置值 y 与之对应。

下面依据(3)式分两种情况，讨论刀口仪定量计算的实现。

1) 取刀口仪检验中的两个刀口检测位置 $y'_j = y'_{j\max}$ 和 $y'_j = 0$ 进行的定量计算， $y'_{j\max}$ 为由镜面误差产生的最大弥散圆半径。此方法是在刀口仪位移值不能细分的情况下所采用的， j 为第 j 个带差。在刀口取两个位置 $y'_j = y'_{j\max}$ 、 $y'_j = 0$ 时所对应的两个带差位置值 y_{j2} 、 y_{j1} 由图像处理得到。 $y_{j2} - y_{j1}$ 为带宽 l_j 在阴影图 y 方向上的投影。

由(3)式和 $y'_{j\max}$ 、 0 、 y_{j2} 、 y_{j1} 四个值，可导出峰谷值 h_j 的数学表达式。很显然 h_j 对应于带宽 l_j ， $l_j = 0$ 时 $\tan \alpha_{0j} = 0$ 。 $l_j = l_{j\max} = \sqrt{(y_{j2} - y_{j1})^2 + (z_{j2} - z_{j1})^2}$ 时 $\tan \alpha_{0j} = \tan \alpha_{0j\max}$ 。由(1)式用 y_{j2} 、 y_{j1} 表示 z_{j2} 、 z_{j1} 得：

$$l_{j\max} = \sqrt{2[f'^2 - y_{j1}y_{j2} - \sqrt{(f'^2 - y_{j1}^2)(f'^2 - y_{j2}^2)}]} \quad (4)$$

$$\tan \alpha_{0j\max} = \frac{-y'_{j\max} \sqrt{f'^2 - y_{j2}^2}}{2f'^2} \quad (5)$$

由图 2 可知 $dh/dl = \tan \alpha_0$, 在 $y_{j2} - y_{j1}$ 与 f' 的比值及带宽 l 很小的情况下, 假设 $\tan \alpha_0$ 与阴影带宽 l 呈线性关系, 则通过数学变换、化简后得到:

$$h_j = \frac{-\sqrt{2} y'_{j\max} \sqrt{f'^2 - y_{j2}^2}}{4f'^2} \sqrt{f'^2 - y_{j1}y_{j2} - \sqrt{(f'^2 - y_{j1}^2)(f'^2 - y_{j2}^2)}} \quad (6)$$

上式中 y_{j2} 是刀口仪位移量为 $y'_j = y'_{j\max}$ 时的第 j 个带差的最大法线差位置值; y_{j1} 是刀口仪位移量为 $y'_j = 0$ 时的第 j 个带差的零法线差位置值。 y_{j2} 、 y_{j1} 都是通过图像处理得到; $y'_{j\max}$ 由位移传感器或千分表读出; f' 为刀口到被测镜面顶点间的距离。

通过(6)式就可以粗略地计算出第 j 个带差所产生的面形峰谷差值。

当带宽 l 较大时, 刀口仪位移值必须要求细分, 这样才能避免推导表达式过程中的矢高增量与带宽增量均匀变化这一假设带来的较大误差, 使计算结果更准确、更实用。

在实际测量中, 设光源大小为 S_0 , 则整个弥散斑直径值为 $2y'_{j\max} + s_0$, 设 s_{\max} 为刀口仪切割整个弥散斑直径所走过的位移量, 由于光源与刀口一起行走, 由反射定律得到 $2s_{\max} = 2y'_{j\max} + s_0$, 所以, $y'_{j\max} = s_{\max} - s_0/2$ 。

目前, 弥散斑参数的测量值 $y'_{j\max}$ 是用千分表作量具, 通过肉眼来进行镜面被计算区域光亮度的识别得到镜面上最大、最小法线差位置值 s_{\max} 肉眼灵敏度和环境的影响就使得弥散斑参数的测量精度 ($\geq 0.005 \text{ mm}$) 会影响到刀口定量检测测量值的大小。

2) 当刀口仪位移值能够细分时, 得到两个增量 Δy (刀口位置增量) 和 $\Delta y'$ (阴影带宽增量), 根据目前市场的实际情况, 位移传感器的灵敏度能读到 0.001 mm , 在目前的工作环境和条件下, 可以达到 0.002 mm 。经过细分后, 则在第 j 个带差第 n 个分点处的斜率差表达式为:

$$\tan \alpha_{0jn} = \frac{-y'_{jn} \sqrt{f'^2 - y_{jn}^2}}{2f'^2} \quad (7)$$

在 n 与 $n+1$ 分点段, 由 $\Delta y'$ 、 Δy 引起的斜率差增量表示式为:

$$\Delta \tan \alpha_{0jn} = \frac{y_{jn} y'_{jn} \Delta y_{jn} - \Delta y'_{jn} (f'^2 - y_{jn}^2)}{2f'^2 \sqrt{f'^2 - y_{jn}^2}} \quad (8)$$

带宽增量为:

$$\Delta l_{jn} = \frac{f' \Delta y_{jn}}{\sqrt{f'^2 - y_{jn}^2}} \quad (9)$$

在带宽增量 Δl_{jn} 范围内, 对应矢高增量 Δh_{jn} 为:

$$\Delta h_{jn} = \left(\frac{\Delta \tan \alpha_{0jn}}{2} + \tan \alpha_{0jn} \right) \Delta l_{jn} \quad (10)$$

将(7)、(8)、(9)三式代入上式化简得:

$$\Delta h_{jn} = \frac{-y'_{jn} \Delta y_{jn}}{2f'} + \frac{y_{jn} y'_{jn} \Delta y_{jn} - \Delta y'_{jn} \Delta y_{jn} (f'^2 - y_{jn}^2)}{4f' (f'^2 - y_{jn}^2)} \quad (11)$$

第 j 个带差的峰谷值应为:

$$\Delta h_j = \sum_{n=1}^m \Delta h_{jn} = \sum_{n=1}^m \frac{y'_{jn} \Delta y_{jn}}{2f'} + \sum_{n=1}^m \frac{y_{jn} y'_{jn} \Delta y_{jn}^2 - \Delta y_{jn} \Delta y'_{jn} (f'^2 - y_{jn}^2)}{4f' (f'^2 - y_{jn}^2)} \quad (12)$$

(12) 式是刀口仪能够以 $\Delta y'_{jn}$ 格值细分的情况下所进行的带差定量计算数学表达式, y'_{jn} 、 $\Delta y'_{jn}$ 由位移传感器得到, y_{jn} 、 Δy_{jn} 在刀口仪检测中图像采集和图像处理得到, f' 是刀口仪到被测镜顶点间的距离, 由实测得到, m 为分点数目。

4 镜面误差表示法

4.1 用角度误差统计法表示的能量会聚度

此表示法只有在细分的情况下才准确, 由(7)式对所有采样点进行统计, 就可以得出 50%、70%、75%、80%、90%、95%、100% 的法线浓度值。

4.2 峰谷值表示法

1) 在不能细分的情况下, 由(6)式可以计算出镜面上最大的峰值 h_p 和最小的谷值 h_v , 由此得被测镜面的峰谷差值为:

$$h_p - h_v \quad (14)$$

2) 在能细分的情况下, 由(12)式可以计算出镜面上最大的峰值 h_p 和最小的谷值 h_v , 由此得被测镜面的峰谷差值为

$$h_p - h_v \quad (15)$$

4.3 均方差值表示法

只有细分的情况下, 才可用均方差值表示, 设取样点数为 I , 由(12)式可以计算出各采样点处的误差分布数据值 h_j , 则均方差值表示为:

$$\text{RMS} = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^I h_j^2\right) / I} \quad (16)$$

取样点数 I 越多则计算结果就越准确。

5 图像采集、图像处理、定量计算软件设计流程

1) 测量图像灰度, 调整光源亮度使 CCD 处于非饱和状态, 以确保图像采集、图像处理的精度。

2) 根据使用过程中的实际情况, 特别是光学系统处于有气流或者有严重干扰的环境中, 则图像采集幅数要适当多些(20~100幅), 图像采集速度则根据干扰的实际频率由软件提示而加以调整。

3) 对多幅图像进行气流等的干扰排除处理和特征提取处理。

4) 输入参数包括被测镜口径 D 、等效焦距 $F(R)$ 、光源尺寸 S_0 、光源像的弥散斑直径测量值 S_y 等等。

5) 对图像进行定格定量计算区域处理, 有效地剔除不需计算的区域, 如: 中孔(d)、绷带等等, 与弥散斑实测值相应以外的图像区域也须进行定格定量计算区域处理, 如: 硬翘边、硬塌边等等。

6) 为提高刀口定量检测的质量, 需要对同一被测镜(或系统)作多次测量, 并根据每次输

出的用灰度表示的二维等高图对检测图像作微量的失焦系数 DB_p 和刀口头系数 D_p 的调整, 使多次的检测结果得到吻合, 从而排除额外因素给检测结果带来的不利影响。

7) 误差数据处理、波面计算及测量结果输出[包括被测镜或系统的三维波面图, 阴影图, 参数及测试数据结果, 误差数据分配表, 用灰度表示的二维等高图, $A(100\%)$ 、 $A(80\%)$ 、 $A(50\%)$ 光浓度图]。限于文章篇幅, 文中的检测实例只给出被测镜或系统的阴影图、三维波面图、二维灰度等高图、参数及检验数据结果。

8) 输出结果中, N 为采样点的数量, Ratio 为镜面上采样点的大小, NN 为画三维波面图抽样点的数量, Ratio(graftools) 为三维波面图抽样点间隔对应镜面上的间隔大小。

6 检测实例(刀口均从右向左切)

1) 被测镜为凹双曲面 ($\Phi 500$ mm、组合焦距 f 为 1000 mm) 的刀口定量检测结果。

图 3、图 4、图 5 为该镜的阴影图、三维波面图、二维灰度等高图。采样点数为 $N = 138560$, 被测镜有效口径 $D = 493.865$ mm, 中孔 $d = 213.701$ mm, 采样点的大小为 1.022 mm, 等效焦距 $F(R) = 1000.000$ mm, 失焦系数 $DB_p = 0.120$, 刀口头系数 $D_p = 0.120$, 光源大小 $S_0 = 0.050$ mm, 光源像的弥散斑直径 $S_y = 0.050$ mm, $S_y - S_0 = 0.025$ mm, 镜面峰值 $h_p = 0.040$ μm , 谷值 $h_v = -0.109$ μm , $h_{p-v} = 0.109$ μm 。均方值差为 0.018 μm , 三维波面图抽样点数 $NN(1313) = 1005$ 。三维波面图抽样点间隔对应镜面上的间隔为 12.045 mm。

法线浓度:

$$A(50\%) = 0.383", A(70\%) = 0.546", A(75\%) = 0.599", A(80\%) = 0.661", \\ A(85\%) = 0.758", A(90\%) = 0.875", A(95\%) = 1.035", A(100\%) = 2.597"。$$

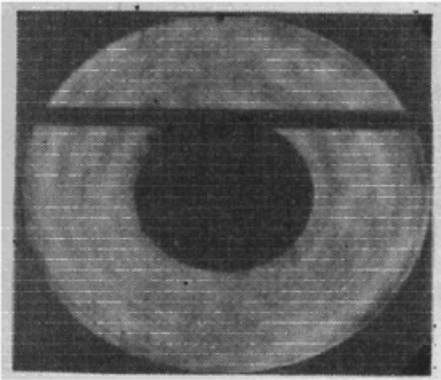


Fig. 3 Image of the quantitative calculating

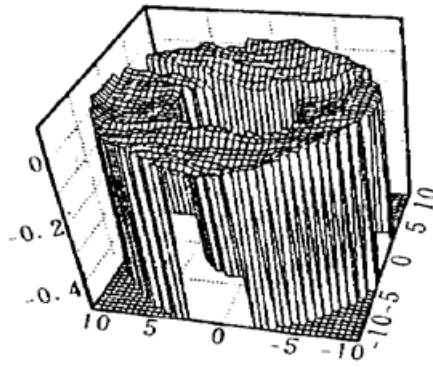


Fig. 4 Wave-surface drawing

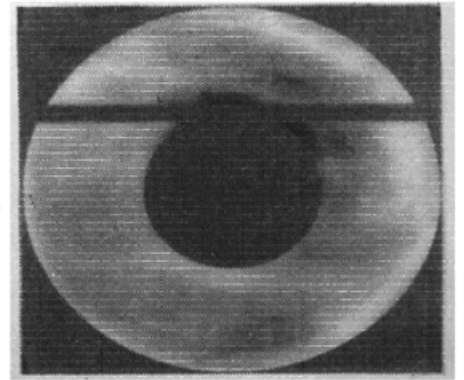


Fig. 5 Height-low gray image

2) 被测镜为球面 ($\Phi 200$ mm、半径 R 为 1800 mm) 的刀口定量检测结果。

图 6、图 7、图 8 为该镜的阴影图、三维波面图、二维灰度等高图。 $N = 132013$, 有效口径 $D = 198.072$ mm, $d = 0.000$ mm, 镜面上采样点大小为 0.482 mm, $F(R) = 1800.000$ mm, $DB_p = -0.020$, $D_p = 0.270$, $S_0 = 0.025$ mm, $S_y = 0.110$ mm, $S_y - S_0 = 0.085$ mm, $h_p = 0.016$ μm , $h_v = 0.043$ μm , $h_{p-v} = 0.059$ μm , $RMS = 0.010$ μm , $NN(1313) = 1313$, 三维波面图抽样点间隔对应镜面上的间隔为 4831 mm。

法线浓度:

$$A(50\%) = 0.505", A(70\%) = 0.747", A(75\%) = 0.803", A(80\%) = 0.895", \\ A(85\%) = 1.005", A(90\%) = 1.131", A(95\%) = 1.376", A(100\%) = 3.802"。$$

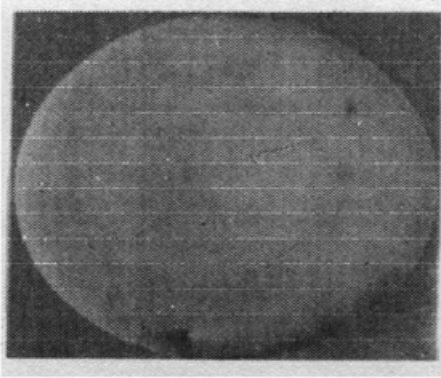


Fig. 6 Image of the quantitative calculating

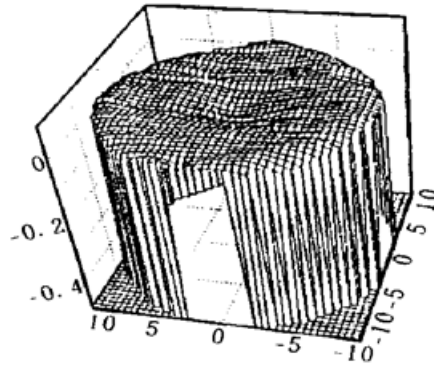


Fig. 7 Wave-surface drawing

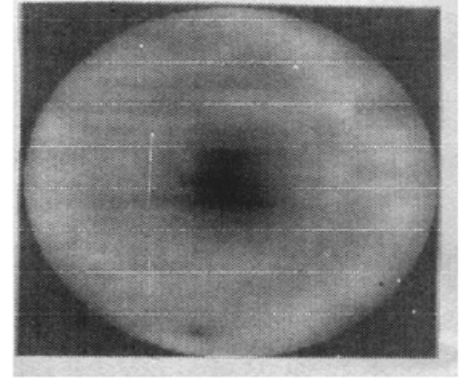


Fig. 8 Height-low gray image

7 检测结果分析与讨论

根据上述原理进行了大量被测镜的刀口定量检测,同时也作了干涉条纹检测。文中列举了两个典型的应用检测实例:前例的干涉检验结果为 $h_{p-v} = 0.122 \mu\text{m}$, $\text{RMS} = 0.025 \mu\text{m}$;后例的干涉检验结果为 $h_{p-v} = 0.063 \mu\text{m}$, $\text{RMS} = 0.009 \mu\text{m}$ 。

从(6)式[(12)式具有相同的分析结论]分析可知:刀口检测经过图像处理、特征提取处理到定量分析、定量计算,其检测灵敏度有了很大程度的提高。刀口检测图像的特征量(如: y_{j2} 、 y_{j1})都是通过图像处理得到的,不同的被测镜面具有不同的刀口检测图像,也就是说有不同的特征信息(波面形状),刀口检测图像所反映的只是被测镜面的波面形状,目前的研究结果已做得比较准确。至于波面起伏量的大小,从(6)式可以看出, $R(f')$ 测量精度的影响可以忽略不计。而弥散斑参数 $y'_{j\max}$ 的大小至关重要,弥散斑参数的测量精度实际应用中应小于 0.002 mm 才能保证刀口定量检测结果具有一定的准确度。但目前定量的准确度(精度)还受到弥散斑参数测量精度的制约。与干涉仪测量值相比,焦比小 ($D/F \leq 1.10$) 的被测镜或系统其两种方法检测结果量值基本吻合,这是由于被测镜本身的弥散斑值大 ($\geq 0.1 \text{ mm}$),弥散斑的测量精度值 ($\geq 0.005 \text{ mm}$) 对检测结果的影响较小。而对焦比大 ($D/F \geq 1.3$) 的被测镜或系统,刀口定量检测结果量值会稍稍偏小,这是由于在同样波面误差情况下被测镜本身的弥散斑值小 ($\leq 0.03 \text{ mm}$) (与其它焦比被测镜相比),此时弥散斑的测量精度值 ($\geq 0.005 \text{ mm}$) 对检测结果的影响较大。目前的研究成果及其应用只是验证刀口定量检验原理的正确性、合理性,刀口定量检测得到的被测镜面的波面图与定性分析的结果是完全吻合的,但其检测到的信息比定性分析的结果要丰富、全面、准确。此研究仅仅是刀口定量检验研究过程中的一个开端。

结束语 刀口仪定量计算在大量检测实例综合分析的基础上,根据其操作方便、波面测量准确、灵敏度高的优点已应用于指导目前的大口径、高精度镜面的加工。在用千分表作量具的情况下,其检测的准确度(精度) $P-V$ 值可优于 $\lambda/10$ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$),检测重复性精度和不确定度都能优于 $\lambda/20$ 。随着研究的深入,改用位移传感器(由计算机控制)作量具,则检测准确度(精度)可以达到刀口检测灵敏度的值 ($P-V \leq \lambda/25$),检测重复性精度和不确定度都能优于 $\lambda/30$ 。作为一种高准确度的刀口定量、定标检测结果,其弥散斑参数的测量技术、被测镜两次或两次以上反射后弥散斑量值的换算(以往是简单的用测量值除以反射次数得到被测镜的弥散斑实际值)以及误差数据的处理等等都将有待于进一步的研究。由计算机实现弥散斑

参数的自动测量,其测量精度优于 0.002mm,同时,检测人员与刀口检测仪器场地完全分开,有效地克服了肉眼灵敏度和人本身温度、重心变动对刀口检测系统测量结果造成的环境影响。这样,刀口仪定量检测的准确度可达到更好的水平,接近其灵敏度的值。所谓刀口检测的灵敏度就是根据刀口检测图像得到的波面图能发现被测镜最小的镜面误差值(傅科^[1]刀口检测理论分析得到刀口检测的灵敏度 P-V 值能达到 $\lambda/40$ 。实际使用中,通过图像处理、特征提取处理技术,其检测灵敏度 P-V 值可优于 $\lambda/25$)。能准确地计算刀口检测灵敏度的值是今后努力的目标。

感谢潘君骅研究员、崔向群研究员给予此项工作的关心、指导、帮助和支持。同时,衷心感谢所有关心、帮助、支持过此项工作的老师和同行们。刀口定量检测技术的初步研究课题得到了南京天文仪器研制中心科研经费的大力资助。

参 考 文 献

- [1] 欧捷达-卡斯坦达 J. 光学车间检验. 北京: 机械工业出版社, 1983. 205~ 223

Study of Technology for Knife-Edge Quantitative Test

Yuan Lujun

(*Nanjing Astronomical Instruments Research Center, Nanjing 210042*)

(Received 30 March 1998)

Abstract The method of quantitative calculating of knife-edge testing for astronomical mirror polishing is discussed including shadow image CCD real-time collecting, image processing and the method of quantitative calculating of clitelum error.

Key words knife-edge testing, the method of primary quantative, astronomical mirror.