

文章编号: 1002-2082(2010)06-1046-04

关于光学元件面形评价参数峰谷值(PV)的分析

高波¹, 李瑞洁¹, 魏小红¹, 陈磊², 李强¹

(1. 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610091; 2. 南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要: 光学元件的表面面形或波前质量一般采用数字指标峰谷值PV(表面最高点和最低点之差)来评价。而两点PV在高分辨率干涉仪的测量结果中具有很大不确定性。为了更准确地评价光学元件的表面面形或波前质量, 讨论了针对两点PV进行改进后的评价方式 PV_{20} , PV_r , PV_q 。通过模拟实验证明其可以描述真实波面, 并在实验中证明其可以消除灰尘等杂点对测量结果带来的干扰, 以及这几种评价方式对CCD分辨率的变化不敏感, 并发现上述3种方式在测量重复性方面也有较好的表现。

关键词: 面形评价; PV_{20} ; PV_r ; PV_q

中图分类号: TN247

文献标志码: A

Peak-to-valley parameter of optical component

GAO Bo¹, LI Rui-jie¹, WEI Xiao-hong¹, CHEN Lei², LI Qiang¹

(1. Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610091, China;

2. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Peak-to-Valley departure (PV) is a widely used parameter in evaluating the quality of optical surface and wavefront. However, there is great uncertainty in optical surface testing using high resolution interferometer. In order to evaluate the quality of optical surface and wavefront more precisely, PV_{20} , PV_r and PV_q are discussed. Through numerical simulation and experiment, it is proved that these three parameters can not only represent the real optical surface, but also be insensitive to interferometer spatial resolution. In addition, they have great advantage in metrology repeatability, hence, PV_{20} , PV_r and PV_q are better than PV for characterizing optical surface.

Key words: surface evaluating; PV_{20} ; PV_r ; PV_q

引言

惯性约束聚变高功率固体激光驱动器中需要用到大量大口径光学元件, 光学元件面形或波前的好坏直接影响着激光光束的波前质量和聚焦能力^[1,3]。因此, 正确评价及检测光学元件的面形及波前质量是光学元件检测的重要工作。在目前光学元件的检测中, 峰谷值(PV采用波面中单点最高点与单点最低点的差值来表示)一直作为光学元件面形或波前的评价指标。但随着干涉仪CCD分辨率

的提高, 以及高分辨率干涉仪的出现, PV值的评价方式暴露出它原理上的弊病, 两点PV容易受到灰尘、脏点等影响造成对极值点的干扰, 特别是在大口径光学元件中这样的情况更容易出现^[2]。而采用滤波等方式来降低噪声或自然信号时, 不同滤波器的滤波结果差异很大, 很难保证测量的重复性。目前国际上一些知名干涉仪生产厂商提出了对PV进行改进后的评价方式 PV_{20} , PV_r , PV_q 。本文针对这几种评价方式的讨论, 对于今后合理地提出

收稿日期: 2010-04-29; 修回日期: 2010-06-24

作者简介: 高波(1983-), 男, 四川遂宁人, 硕士研究生, 成都精密光学工程研究中心研究实习员, 主要从事光学检测与测试方面的研究工作。E-mail: cowbovtar@hotmail.com

光学元件面形或波前的设计指标,以及检测评价方式具有重要的意义。

1 $PV_{20}, PV_r, PV_q, PV_m$ 的物理意义

在传统加工和检测中,为了保证PV值的重复性,wyko软件中给出了 PV_{20} ,即以波面上最高的10个点平均值减去最低的10个点平均值。 PV_{20} 可以从一定程度上消除测试数据中的一些脏点或缺陷点带来的误差。4D干涉仪在其软件中采用 PV_q ,即去掉原始波面数据的0.5%的最大值和0.5%的最小值得到的面形值。其提出依据为光学元件的波面分布采用直方图形式表征后,各分量成正态分布,故其去掉最大的0.5%和最小的0.5%,以期去除随机误差等因素对面形及波面检测的影响。zygo干涉仪在其软件中采用 PV_r 来描述改进后的PV,其定义^[4-5]为

$$PV_r = PV_{36Zernikes} + 3\sigma_{6Zernike Resid}$$

其中:第1项是泽尼克36项多项式拟合成波面的PV值;第2项是移去36项后的剩余均方根值的3倍。光学元件的波面可以采用zernike多项式拟合,故采用泽尼克36项多项式拟合成波面来描述波面的低频部分,而高频部分采用3倍的残差均方根来描述。在光学元件检测过程中,常常会通过去除一些毛刺高点,从而得到的PV值,在本文中称为 PV_m 。

2 理想波面与添加毛刺的波面采用不同评价方式的评价结果

通过泽尼克多项式模拟1个接近理想平面^[6-7], $PV = 6.32 \text{ nm}$,在波面中心处添加一毛刺点,添加毛刺点后 $PV = 65.55 \text{ nm}$ 。通过4种不同方式分析处理后的波面,如图1所示,其中图1(a)为模拟的理想波面;图1(b)为添加毛刺后的波面。

表1给出了理想波面和毛刺波面分别经 $PV_{20}, PV_r, PV_q, PV_m$ 表示的面形结果以及相对于原始波面的变化量。模拟实验表明,对于理想波面而言,通过 $PV_{20}, PV_r, PV_q, PV_m$ 表示的面形结果与PV值比较,变化量小于5%;而毛刺波面经过 $PV_{20}, PV_r, PV_q, PV_m$ 处理后除 PV_{20} 外其余3种方式得到的结果与PV值比较,变化量大于80%。因此可以看出理想平面经过 $PV_{20}, PV_r, PV_q, PV_m$ 处理后几乎不影响PV值,但对存在毛刺与脏点等奇异点的波面却有非常大的影响。说明 $PV_{20}, PV_r, PV_q, PV_m$ 反映

的是真实波面的情况,不会影响波面真实值的大小。

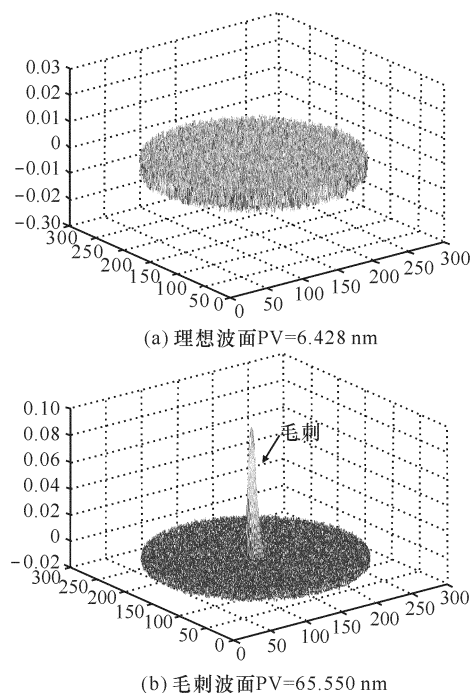


图1 理想波面和毛刺波面PV比较

Fig. 1 Peak-to-valley comparison of perfect surface and glitch surface

表1 理想波面与加毛刺波面处理结果对比

Table 1 Processed result comparison of perfect surface and glitch surface

评价方式	理想波面		毛刺波面	
	处理后波面值/nm	变化量所占比例/%	处理后波面值/nm	变化量所占比例/%
PV	6.370	0.90	39.328	40
PV	6.172	3.98	6.172	90.60
PV	6.428	0	10.510	83.96
PV	6.328	1.56	6.960	89.38

3 不同评价方式对毛刺点的敏感度

选取一块待测元件,通过ZYGO干涉仪测量其反射面形,其三维波面图如图2所示,分别采用 $PV_{20}, PV_r, PV_q, PV_m$ 计算。未经过任何处理的面形 $PV = 54.187 \text{ nm}$,而 $PV_{20} = 35.313 \text{ nm}$, $PV_r = 32.342 \text{ nm}$, $PV_q = 27.45 \text{ nm}$, $PV_m = 32.38 \text{ nm}$,去除的点数占总有效点数的比例分别为0.002 8%,0.013 6%,1%,0.008 1%,见表2所示。从图2中可以看到该元件面形PV值受杂点等毛刺的影响较为明显,通过上面的处理,面形PV值减小到30 nm左右,可以判断该面形的真实PV值应在30 nm左右,而不是此前的测量值54.187 nm。

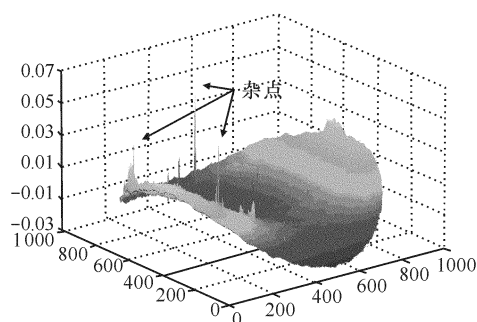


图2 实验件三维波面图

Fig. 2 Three-dimension surface of the sample component

表2反映了不同评价方式下对同一块元件的毛刺进行去除后的测量结果。从表中可以看出这几种评价方式对毛刺不敏感。通过实验可以看到,经过 PV_r , PV_q , PV_m 处理后的数据均将影响毛刺的高点去除,其中去除量的大小依次为 PV_q , PV_r , PV_m , 从而恢复了波面的真实状况。

表2 5种方式处理后面形结果比较

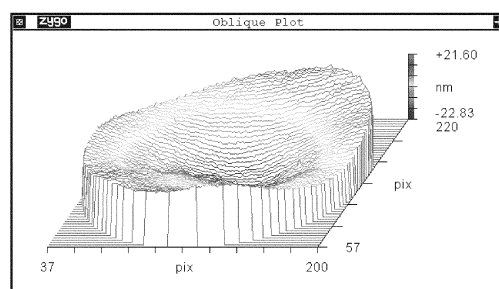
Table 2 Processed result comparison of the five surface evaluating ways

面形评价方式	处理后的面形/nm	去除量所占比例/%
PV	54.187	0
PV	35.313	0.002 8
PV	32.342	0.013 6
PV	27.45	1
PV	32.38	0.008 1

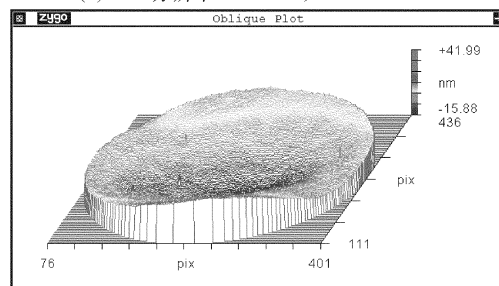
4 不同CCD分辨率测量结果比较

采用ZYGO 150口径干涉仪测量1块100 mm口径标准镜进行反射面形测量,测量中分别选取256×256, 512×512, 1 024×1 024三种CCD分辨率进行测量,256×256分辨率下 $PV=44.43$ nm,如图3(a)所示;512×512分辨率下 $PV=57.88$ nm,如图3(b)所示;1 024×1 024分辨率下 $PV=68.07$ nm,如图3(c)所示。

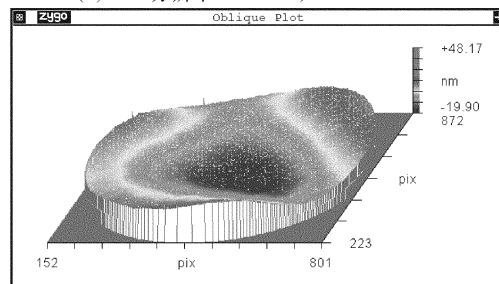
通过上面的比较可以发现,随着CCD分辨率的降低,对于同一面形的光学元件其PV值也在变小,原因是在高分辨率干涉仪中,其细节分辨能力高,容易受到毛刺与脏点等因素影响,而低分辨率干涉仪,对毛刺和脏点不敏感,故其测量得到的PV值小于高分辨率干涉仪测量得到的PV值。表3中我们对这几种不同评价方式进行了比较,从结果中可以看出,PV值的敏感度较强,而其他几种评价方式 PV_{20} , PV_r , PV_q , PV_m 对CCD的分辨率不敏感。



(a) CCD分辨率256×256, $PV=44.43$ nm



(b) CCD分辨率512×512, $PV=57.88$ nm



(c) CCD分辨率1 024×1 024, $PV=68.07$ nm

图3 不同CCD分辨率下100 mm口径标准镜面形测量结果

Fig. 3 Measurement result of 100 mm standard lens surface in different CCD resolutions

表3 不同CCD分辨率下各种面形评价方式比较

Table 3 Surface evaluating methods comparison of different surface evaluating ways in different CCD resolution

CCD分辨率 /像素	面形评价方式/nm				
	PV	PV_{20}	PV_r	PV_q	PV_m
1 024×1 024	68.07	45.63	42.93	37.95	43.33
512×512	57.88	41.58	40.74	35.70	41.21
256×256	44.43	41.86	43.81	40.76	43.89

5 不同评价方式的重复性比较

重复性比较,实验中对一组元件进行单次相位平均测量,每件测量50次,比较 PV , PV_{20} , PV_r , PV_q , PV_m 的重复性。图4(a)是干涉仪测量口径为600 mm元件得到的结果;图4(b)是另一台干涉仪测量口径为150 mm元件得到的结果。

从图3可以看出PV值的随机波动幅度最大;其次是 PV_m ,说明采用手动扣除脏点这种方法,测

量重复性很难得到保证,而 PV_{20} , PV_r , PV_q 的波动范围较小。通过计算,几种评价方式在50次测量中的标准偏差,如表4所示, PV 和 PV_m 的标准偏差值相对较大,而 PV_{20} , PV_r , PV_q 标准偏差较小,从而也说明这3种方式可以较好地保证测量的重复性,从而也有利于指导光学元件的加工。

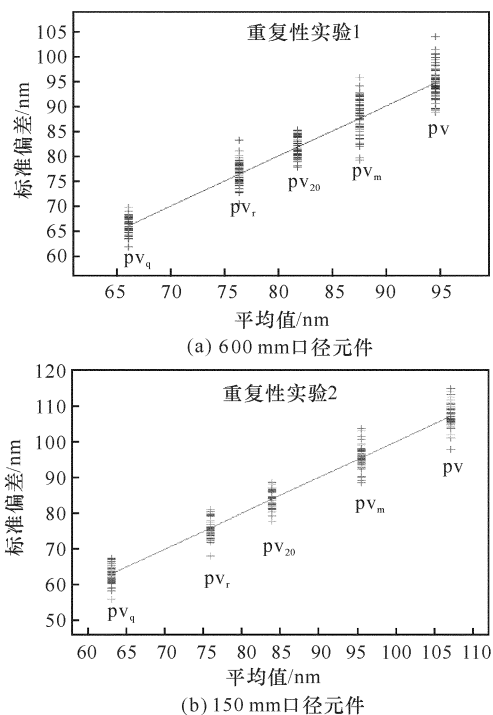


图4 5种评价方式重复性比较

Fig. 4 Metrology repeatability comparison of the five surface evaluating ways

表4 不同方式评价下的测量标准偏差

Table 4 Standard deviation in different optical surface specifications

元件口径 d/mm	标准偏差 σ/nm				
	PV	PV_{20}	PV_r	PV_q	PV_m
150	3.22	3.07	2.30	2.53	2.63
600	3.51	3.64	1.93	1.69	2.31

6 结论

通过以上实验分析, PV_{20} , PV_q , PV_r 对于测量结果的合理性和重复性都要优于 PV 。而手动去除杂点这一方式,使得测量结果容易受人为因素的干扰。因此可以将 PV_{20} , PV_q , PV_r 应用于高分辨率干涉仪以及对大口径光学元件的面型评价方式中。

同时, PV_{20} , PV_q , PV_r 对于合理提出惯性约束聚变高功率固体激光驱动器中光学元件的面形设计指标具有一定的参考作用,也可用于指导光学元件的加工。但 PV_{20} , PV_q , PV_r 由于其主要考虑元件低频段的变化,对高频信息存在一定的去除,因此当设计者在更多考虑面形高频信息时,有可能存在一定的偏差。对于 PV_{20} , PV_q , PV_r 在面形高频部分的影响还有待进一步分析和研究。

参考文献:

- [1] 万敏,苏毅,张卫,等. 光学器件面形误差对光束质量的影响[J]. 光学学报,2002,22(4):495-500.
WAN Min, SU Yi, ZHANG Wei, et al. Influence of the surface error of optical elements on beam quality [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(4): 495-500. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 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,2009:94-100.
XU De-yan, WANG Qing, GAO Zhi-shan, et al. The current test of optical componet and ISO standard [M]. Beijing: Science Press, 2009: 94-100. (in Chinese)
- [3] SPAETH M L, MANES K R, WIDMAYER C C, et al. The national ignition facility wavefront requirements and optical architecture [J]. SPIE, 2004, 5341:25-41.
- [4] CHRIS J, EVANS. PV—a robust amplitude parameter for optical surface specification [J]. Optical Engineering, 2009, 48(4):1-8.
- [5] CHRIS J, EVANS. Uncertainty evaluation for measurements of peak-to-valley surface form errors[J]. CIRP Annals, 2008, 57(1):509-512.
- [6] MAHAJAN V N. Zernike circle polynomials and optical aberrations of systems with circular pupils [J]. OPN, Engineering and Lab. Notes, 1994, 8:21-23.
- [7] 单宝忠,王淑岩,牛憨笨,等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J]. 光学精密工程,2002,10(3):318-323.
SHAN Bao-zhong, WANG Shu-yan, NIU Han-ben, et al. Zernike polynomial fitting method and its application [J]. Optics and Precision Engineerin, 2002, 10(3): 318-323. (in Chinese with an English abstract)