

文章编号: 0253-2239(2005)02-195-4

# 高精度检测球面面形的方法研究

阚珊珊 黄煜 王淑荣

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

**摘要:** 短波光学的迅猛发展和高精密光学仪器的需求日益增多,对高精度表面的加工与检测也随之重要起来。而在一般的干涉检测中,球面镜检测精度主要依赖参考镜的精度。利用 Jensen 提出的干涉仪绝对校准理论可以去除参考镜的误差和干涉仪的附加波像差,从而提高被测件测量精度。在研究 Jensen 绝对校准理论的基础上,提出一种利用泽尼克(Zernike)多项式进行波面相位转换的方法进行波面处理,并提出具体实施方案。对面形精度优于  $\lambda/37$  小凸球面进行测量得出了较好的结果,打破了标准镜头最优  $\lambda/20$  的局限,使这一理论简单易行地赋予应用。从而实现了高精度检测球面面形。

**关键词:** 光学测量; 绝对测量; 干涉图处理; 泽尼克多项式

中图分类号: TH703 文献标识码: A

## Methodological Disquisition of Spherical Fine Metrical Precision

Kan Shanshan Huang Yu Wang Shurong

(The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

**Abstract:** With developing of shortwave optics and more requirement of lofty precision optical machine, the processing and measurement of fine precision surface are becoming important. But in common interferometry, the metrical precision of spherical surface mainly depends on the precision of reference surface. So an absolute calibration method has been described (Jensen in 1973) that is ideally suited to a real-time interferometer to wipe off all additive aberration. Based on the absolute calibration theory a method which rotates the wavefront by using Zernike polynomials is put forward, and detailed projects are given. We get fine precision by measuring surface of small protruding spherical surface with precision above  $\lambda/37$ , and break the localization of standard lens which  $\lambda/20$  is the best. The method can be used to get fine metrical precision of spherical surface.

**Key words:** optical measurement; absolute calibration; disposal of interference pattern; Zernike polynomials

## 1 引 言

随着短波光学的的发展以及高精密光学仪器的需求,高精度表面的加工与检测日趋重要。众所周知,用干涉仪测量光学表面面形是相对测量,即干涉仪检测的是被测面和参考面面形的差。所以,面形的检测精度主要依赖于参考表面的面形精度。而且,干涉仪本身也会带来一定的附加波像差。在 Fizeau 型 Zygo 干涉仪中,工作波长  $\lambda$  为  $0.6328 \mu\text{m}$ ,能够达到的检测精度 PV 为  $0.1\lambda$ ,均方根值(RMS)为  $0.01\lambda$ (Zygo 干涉仪依 Fizeau 型干涉仪原理,仪器内部往返光路路径一致,系统误差可以忽略不计,所以

其精度取决于标准镜头的面形精度,我们采用的是 PV  $0.1\lambda$  精度的标准镜头)。要达到更高检测精度,需用绝对表面测量技术<sup>[1~5]</sup>。

由 Jensen 提出的干涉仪的绝对校准理论在实现上需配以具体的实验方法和技巧,才能使其在应用中行之有效。本文用泽尼克(Zernike)多项式进行波面相位转换的方法对面形优于  $\lambda/37$  的小凸球面进行测量得出较好结果,从而用具体的实施方案实现了高精度球面面形检测。

## 2 绝对校准方法

绝对校准方法就是独立地测量出相对于理想数

作者简介: 阚珊珊(1980~),女,吉林省人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在职硕士。主要研究非常规光学检测技术。Email: angelkss@163.com。

收稿日期: 2004-03-02; 收到修改稿日期: 2004-06-25

学平面的参考面面形,并给出足够精度的结果。

如图 1 所示,  $W_1$  是在被测面在某一方向角位置所测得的波像差;  $W_2$  是在被测面由前一位置绕光轴旋转  $180^\circ$  所测得的波像差;  $W_3$  是把被测面放于“猫眼(cat's eye)”位置测得的波像差。则

$$W_1 = W_R + W_T + W_S, \quad (1)$$

$$W_2 = W_R + W_T + W_S^\pi, \quad (2)$$

$$W_3 = W_R + (W_T + W_T^\pi)/2, \quad (3)$$

其中  $W_R$  是参考臂的波前贡献;  $W_T$  是不算被测面时测试臂的波前贡献;  $W_S$  是被测面的波前贡献; 上标  $\pi$  表示波前或被测面方向角旋转  $180^\circ$ 。则

$$W_4 = \frac{W_1 + W_2^\pi}{2} = \frac{W_R + W_R^\pi + W_T + W_T^\pi}{2} + W_S, \quad (4)$$

$$W_5 = \frac{W_3 + W_3^\pi}{2} = \frac{W_R + W_R^\pi + W_T + W_T^\pi}{2}, \quad (5)$$

由(4)式、(5)式得

$$W_S = W_4 - W_5 = \frac{W_1 + W_2^\pi - W_3 - W_3^\pi}{2}, \quad (6)$$

这样,只要检测出  $W_1, W_2, W_3$ , 经过一定的波前相位变换运算,按(6)式即可得到被测面的面形。当然,在检测球面面形时,需要去除  $W_1, W_2, W_3$  波面的 Piston 定位项、倾斜项和离焦项。

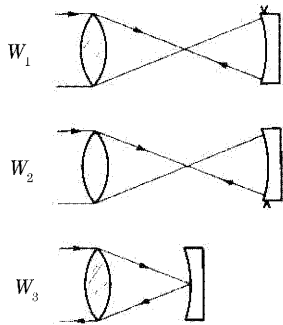


图 1 干涉仪绝对测量波像差

Fig. 1 Interferometer calibration wavefronts

### 3 波面相位变化处理

由于在波面处理过程需要进行波前相位变换,而在用 Zygo 干涉仪检测波面时,得不到相位的原始数据。对此,我们提出了利用泽尼克系数的形式变换方法来进行波前相位变换。把测得的各个波像差转化为 36 项泽尼克多项式表示形式。可以看出,当相位  $\phi$  变化  $\pi$  时,对应的泽尼克多项式项的某些系数需要改变符号,它们为第 1、2、6、7、9、10、13、14、18、19、22、23、25、26、29、30、33、34 项。也就是

说,只要把波像差  $W$  这些系数的符号取反,就实现了相位  $\phi$  变化  $\pi$  的目的,即转化成了  $W^\pi$ 。

按照上面描述的方法对凸球面镜用 Zygo 干涉仪进行了多次检测,对  $W_2, W_3$  波面的泽尼克系数作相应处理,得到相位转换后的波面  $W_2^\pi, W_3^\pi$ 。最后,按(6)式计算被测面的面形。各次测量得的 PV 和均方根值如表 1 所示。

表 1 检测凸球面得到结果

Table 1 Testing result of gibbous spherical surface

Measurement number	PV / $\lambda$	RMS / $\lambda$
1	0.0262	0.00312
2	0.0221	0.00259
3	0.0265	0.00313
4	0.0263	0.00331
5	0.0228	0.00282
6	0.0211	0.00269
7	0.0234	0.00267
8	0.0258	0.00304
9	0.0248	0.00316
10	0.0228	0.00282
11	0.0246	0.00308
12	0.0229	0.00300

由于检测和计算量较大,测量次数不可能很大。而且在这么高的精度要求下进行检测,环境和人为的因素很容易带来粗大误差。因而利用罗曼诺夫斯基准则来分析误差。

对表 1 根据粗大误差判别法,即  $3\sigma$  准则(拉依达准则),设有一个有限测量列,其测量值为:  $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$ , 算出测量列的算术平均值和残差:在这组测量数据中,最大值  $PV_{\max} = 0.0265\lambda$ , 最小值  $PV_{\min} = 0.0211\lambda$ , 则最大测量误差范围:

$$\Delta_{\max} = PV_{\max} - PV_{\min} = 0.0054\lambda = 0.0034 \mu\text{m}, \quad (7)$$

其测量的算术平均值:

$$\overline{PV} = \sum_{i=1}^N PV_i / N = 0.0241\lambda = 0.0152 \mu\text{m}, \quad (8)$$

$$v_i = PV_i - \overline{PV}. \quad (9)$$

从表 1 中我们可以看出,计算单次测量的标准偏差:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N v_i^2 / (N-1)} = 0.00183\lambda = 0.001158024 \mu\text{m}, \quad (10)$$

根据随机误差正态分布,绝对值大于  $3\sigma$  的残余误差,在历史上 370 次测量中只可能出现一次,如果在测量列中,发现大于  $3\sigma$  的残余误差的测量值,即

$$|v_i| > 3\sigma = 0.00549\lambda = 0.003474072 \mu\text{m}, \quad (11)$$

则可认为它含有粗大误差, 应予以剔除。在上面测量数据中不存在粗大误差, 可以继续使用。对上表数据我们采用残余误差校核法及格罗布斯判别准则, 判断出该测量数据无系统误差。算术平均值的标准偏差为

$$\sigma_L = \sigma/\sqrt{n} = 0.000529\lambda = 0.0003347512 \mu\text{m}, \quad (12)$$

因为测量次数较少, 所以按  $t$  分布计算算术平均值的极限误差:

$$t_0 = 3.54, \quad (13)$$

则算术平均值的极限误差  $\delta_{\text{limL}}$  为

$$\delta_{\text{limL}} = t_0\sigma_L = 0.0019\lambda = 0.0012 \mu\text{m}, \quad (14)$$

最后的测量结果为

$$PV = \overline{PV} \pm \delta_{\text{limL}} = 0.0152 \pm 0.0012 \mu\text{m}, \quad (15)$$

#### 4 面形精度优于 $\lambda/37$ 的小凸球面镜的检测

按照上面描述的方法对凸球面镜用 Zygo 干

涉仪进行了检测。其中有几个关键调整技术:

- 1) 需要有一个自准中心的五维调整架;
- 2) 在共焦位置和猫眼位置反复调整干涉图, 直到在两个位置的干涉图都不存在渐晕为止(如图 2);
- 3) 使干涉图在共焦和猫眼位置都是零条纹;
- 4) 在标准镜头后面的腔和相位调制腔(PMR)之间放入一个带校准装置器(Alignment fixture)的十字叉丝, 调整十字叉丝, 使十字叉丝的两个像重合(如图 3)。选择十字叉丝的交叉点作为干涉图的中心, 也就是作泽尼克系数处理时的单位圆的中心。

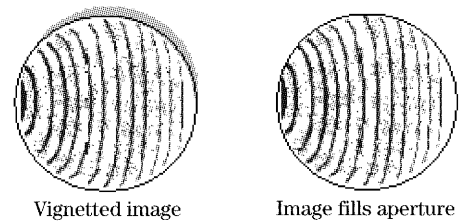


图 2 条纹的无渐晕调整

Fig. 2 The adjustment of fringes without vignetting

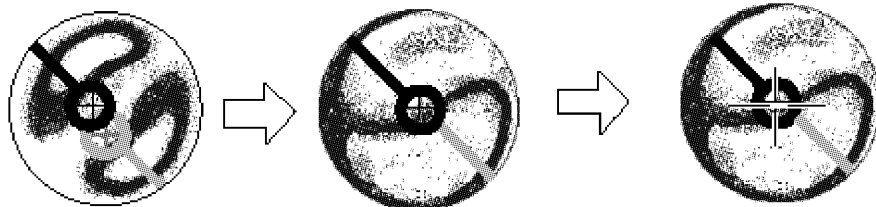


图 3 条纹中心的选择

Fig. 3 The selection of the center of the fringes

检测球面的波像差, 得到泽尼克系数, 并以所定的干涉图中心为泽尼克单位圆的中心, 进行泽尼克系数归一化处理。对  $W_2, W_3$  波面的泽尼克系数作相应处理, 得到相位转换后的波面  $W_2^*, W_3^*$ 。最后, 按(6)式计算被测面的面形, 将算好的泽尼克系数输入计算机生成二维/三维图形。

#### 5 误差源分析

由于是高精度测量, 且操作过程复杂, 因此存在一些因素会影响到面形精度。比如: 泽尼克项数的选择、环境因素、操作过程。对于泽尼克项数而言, 项数过少, 高阶像差表现不出来, 则不足以表述高精度面形; 项数过多, 则会附加太多的累积处理误差。而本文所用的干涉仪其项数的选择只能有 9、16、25、36 项。因为高精度测量, 高阶像差不能忽视, 所以采用 36 项是最为合适的。本文所用的干涉仪

通常情况下也以 36 作为默认项数。对环境而言, 在进行表面绝对测量时通常将室温保持在  $18 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$  附近, 为了保持面形稳定, 温度偏差不能超过  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。操作时不超过两个人(减少气流扰动、温度变化), 必要时加屏蔽罩。平台充气要好尽量避免振源干扰。对操作过程来讲, 则需要注意旋转自准中心调解架时注意看清刻度; 每步测量时保持同一校准标准后方可采得数据。因此, 为了减小人为和环境的影响必须多次测量, 用上述第 3 节对数据进行误差分析。

#### 6 结 论

介绍了在依据 Jensen 提出的绝对校准理论的基础上, 利用 Zygo 干涉仪和波面相位转换的方法处理干涉图。效果显而易见, 使其理论真正用于实际应用, 从而实现了球面镜的高精度检测。

## 参 考 文 献

- 1 GPI-XP Interferometer System Operation Manual. Zygo Corporation (2003)
- 2 Daniel Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. New York: Wiley-Interscien Publication, 1992. 577~580
- 3 Cheng Yunpeng. *Theory of Matrix* [M]. (2nd Edition). Xi'an: Publishing Company of Northwest University of Industry, 2000. 225~233 (in Chinese)  
程云鹏. 矩阵论[M]. (第二版). 西安: 西北工业大学出版社, 2000. 225~233
- 4 Fei Yetai. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: Publishing Company of Mechanical Industry, 2004. 43~49 (in Chinese)  
费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. 43~49
- 5 Chang Jun, Li Fengyou, Weng Zhicheng *et al.*. Testing large convex aspherical surface with computer-generated holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1266~1268 (in Chinese)  
常 军, 李凤友, 翁志成等. 用计算全息法检测大口径凸球面的研究[J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1266~1268



## 征 订 启 事

## 《光学手册》

顾问: 龚祖同 主编: 李景镇 陕西科学技术出版社 16 开, 1541 页, 定价: 100.00 元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式, 1400 余幅插图和 400 多个数据表格, 230 万字。手册包括 25 个光学分科, 5 个附录, 2 个索引。由 20 多位光学专家编撰完成, 在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助, 保证了该手册的编写质量和权威性。资料丰富, 表达方式详细得当, 是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。

## 《第十六届全国激光会议论文集》

第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行, 会议论文集由《中国激光》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每册 100 元, 光盘版为每张 50 元。

本期增刊共收录了 170 多篇论文, 约 600 多页。出版时间为 2004 年 3 月。论文集较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化最新成果, 显示了激光科学技术对国家 863 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

## 《第八届国际光电子和光通信学术会议(OECC'2003)论文集》

第八届国际光电子和光通信学术会议于 2003 年 10 月 13~16 日在上海举行, 会议论文集由《光学学报》编辑部以增刊形式出版。增刊定价为每套 100 元, 光盘版为每张 50 元。

论文集共收录论文 436 篇, 800 多页, 分上下两册。对该论文集 OECC 会议节目委员会的评价是: 质量之高, 可与国际上知名的优秀论文集媲美。

如需购买, 请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话: 021-69918427

请从邮局汇款 地址: 上海 800-211 信箱, 光学期刊联合编辑部 邮编: 201800

光学期刊联合编辑部  
2004 年 4 月