

高精度平面绝对标定

苗二龙 苏东奇 彭石军

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 在高精度面形检测中,绝对标定是提高检测精度的重要方法。但在平面绝对标定中,无论是经典的三平板绝对检测还是旋转平移绝对检测都无法对平面的 power 项进行绝对标定。而利用液面进行绝对标定虽然可以给出完整的平面标定,但是液面易受环境影响,重复性难以提高,因此标定精度往往不高。针对这一难题,利用 Fizeau 干涉仪,采用液面方法对平面的 power 项单独进行绝对标定,结合旋转平移绝对标定方法对平面其他 Zernike 项进行标定,从而得到了完整的高精度的平面绝对标定。不仅提高了检测精度,也对平面进行了完整的高精度标定,大大提高了干涉仪的检测精度。

关键词 测量;面形检测;绝对标定;液面;旋转平移绝对标定

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.051203

High Precise Absolute Flat Calibration

Miao Erlong Su Dongqi Peng Shijun

*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China*

Abstract Absolute calibration is an important method to improve accuracy in high precise surface figure testing. But for flat absolute calibration, the power of the flat cannot be calibrated in both the classic three-flat and the rotation-shifting absolute calibration. Using liquid surface absolute calibration can give flat surface figure including the power term, but the liquid surface is easily affected by environments and the repeatability is not good enough to get high accurate results. In order to solve the problem, liquid surface is used only to calibrate the power term and the other Zernike terms are calibrated by the rotation-shifting method. By this way, all the Zernike terms of the flat are absolutely calibrated and the test accuracy of the interferometer is greatly improved.

Key words measurement; surface figure testing; absolute calibration; liquid surface; rotation and shifting absolute calibration

OCIS codes 120.3940; 120.3180; 120.4800

1 引言

在光学元件面形检测中,基于干涉仪的干涉测量方法以其精度高、无损伤、测量迅速等优点,在高精度检测领域获得了广泛的应用。光学检测的能力从侧面也反映了一个实验室或者光学车间的光学制造能力。Fizeau 型干涉仪是目前应用最为广泛的面形检测设备,其检测结果反映了被测面相对于参考面的面形差别,因此参考面是干涉仪中最为关键的部件之一,其面形精度直接决定了干涉仪检测结果的精度。高精度的参考面价格昂贵,对环境和支撑状态要求苛刻,使用成本过高,因此一般采用绝对标定^[1-3]的方式,将参考面面形精确地标定出来作为系统误差在检测结果中减去,从而大大提高了干涉仪的检测精度。但是传统的平面绝对标定如三平板^[4-5]、旋转平移^[6-8]等方法中,平面的 power 项是无法进行绝对标定的。特别是常用的三平板绝对标定方法,标定过程中平板需要进行翻面操作,当光轴在竖直方向时,重力会导致 power 在翻

收稿日期: 2013-12-19; 收到修改稿日期: 2014-01-06; 网络出版日期: 2014-04-30

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205-004)

作者简介: 苗二龙(1976—),男,博士,副研究员,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: ustcmiao@qq.com
(通信联系人)

面时发生变化。当元件口径较大时, power 变化更加明显。在光刻投影物镜等高精度的光学系统中, 平面 power 项作为平面面形中的一项重要指标无法忽略。采用轮廓仪、三坐标等接触测量的方法, 或者采用计算模拟的方式, 可以将平面 power 变化计算出来。但是轮廓仪等接触式的测量方法只能扫描几条轮廓线, 不能给出完整真实的面形, 而且接触式的测量方式还容易划伤元件表面, 在元件表面留下划痕。计算模拟的方式由于受到支撑方式和边界条件的限制, 计算结果与实际结果往往有差别, 需要利用实际的测量结果对计算模型进行修正。为了克服这一困难, 本文采用了液面的方式, 仅对参考面的 power 项进行标定, 然后结合旋转平移绝对检测方法, 标定出其他 Zernike 项, 从而得到参考平面的绝对面形。这种方法实验过程简单, 不仅克服了液面直接标定完整面形时对环境要求过高, 标定精度不高的缺点, 也充分利用了旋转平移绝对标定复现性好、精度高的特点, 从而完成了对平面完整面形的高精度标定, 满足了高精度光学系统对平面面形的检测需求。

2 液面法标定平面 power 项

将液面作为标准平面的思想最早是由 Rayleigh^[9] 提出的, 理论上由于受到重力的影响, 液面曲率半径跟地球的曲率半径一致。如果 y 为液面半径, R 为地球半径, 则液面与标准平面的偏差为 $y^2/(2R)$ 。地球半径平均值为 6400 km, 曲率半径为 300 mm 的液面与标准平面偏差的峰谷(PV)值小于 2 nm, 因此可以将液面作为平面的绝对基准。国内外利用液面作为基准平面的报道很多^[10], 其优点是成本较低, 实现相对容易, 不需要复杂的操作即可直接完成对平面的绝对标定; 缺点是基准液面在实际使用过程中极易受外界环境影响, 例如温度、振动、气流等外界扰动, 很容易扰乱液面, 破坏液面的面形, 难以获得高精度的标定结果。为了获得重复性好而准确的测量结果, 需要控制环境干扰, 保障检测环境的绝对稳定。实验采用的是口径为 300 mm 的立式 Fizeau 型干涉仪, 实验原理如图 1 所示。

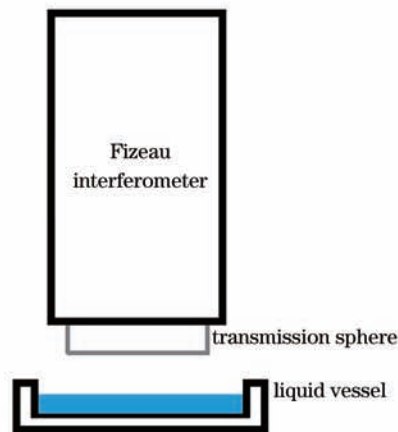


图1 液面标定原理

Fig.1 Liquid surface absolute calibration

2.1 实验环境的控制

环境是影响液面重复性的重要因素, 为了得到高精度的重复性, 需要将液面放置在一个非常稳定的环境中。影响液面的主要环境因素是温度、振动和气流扰动, 因此从以上三个方面进行控制。温度是影响液面面形的主要因素之一, 其对测量的影响体现在两个方面: 1) 温度变化会改变干涉腔内空气折射率, 使得通过干涉腔的光程发生变化, 这直接影响 CCD 所获得的干涉图从而引入面形测量误差; 2) 温度的不同还会导致液面和参考面各部分膨胀不一致, 使得参考面和被测面随着温度的变化高低起伏。因此为了得到高重复性而准确的测量结果, 必须对温度的稳定性和空间的均匀性进行严格控制。测试的液面环境单点温度稳定性控制在 $\pm 0.025\text{ }^\circ\text{C}/72\text{ h}$, 在干涉腔四周分别放置温度传感器, 测得均匀性优于 $0.2\text{ }^\circ\text{C}/\text{m}$ 。为了使得温度分布更加均匀, 测试前使用风扇进行匀化, 图 2 是实验室实时测量的温度变化数据。

振动是影响液面重复性的另外一个主要因素。由玻璃平板构成干涉腔, 干涉腔整体的振动不会引起干涉腔光程的改变, 因此对检测结果没有影响。液面标定干涉腔由液面和玻璃平板参考面构成, 外界微小的

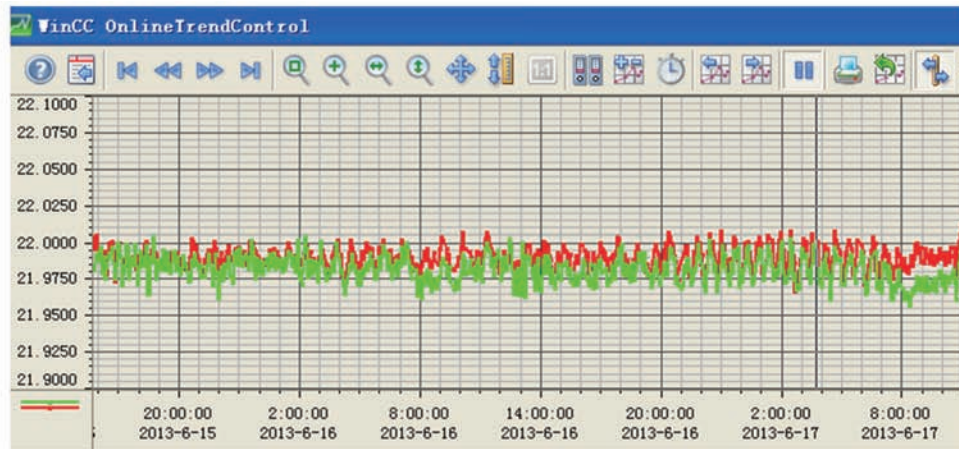


图2 实验室实测温度变化

Fig.2 Laboratory's temperature variation

振动引起的液面的不规则起伏直接导致干涉腔光程的改变,因此液面绝对标定对振动要求非常苛刻,这也是液面绝对标定精度难以提高的主要因素之一。实验中主要利用液面进行 power 项的标定,而面形的其他项则由其他绝对标定方法进行标定,因此大大降低了检测结果对振动的敏感程度。图3是针对实验室检测平台在 xyz 三个方向上的振动测试数据。

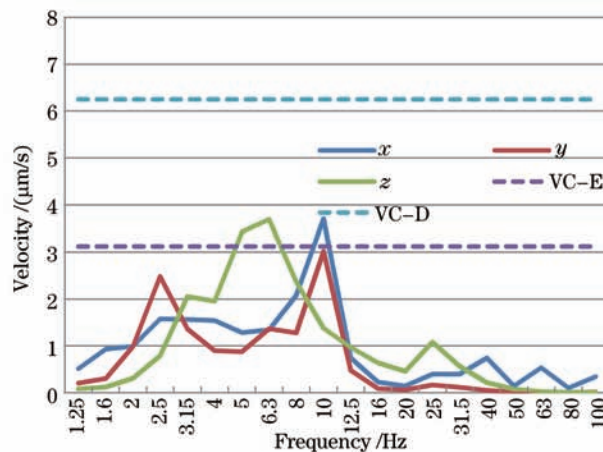


图3 减振地基振动测试

Fig.3 Vibration of the base

可以看到实验室地基振动条件非常好,大部分频段都在振动标准(VC-D,VC-E)以下,完全满足液面测试条件。通常为了提高重复性,固体元件可以采用风扇匀化来提高重复性。但是,对于液面这种方法不可行。液面对气流的扰动非常敏感,风扇虽然可以使干涉腔气体得到匀化,但是气流引起的液面起伏会引入很大误差,因此实验前为了使液面温度均匀,首先利用风扇进行匀化,然后加装外部防护罩,隔离气流扰动和热量交换。其次多次求平均可以消除绝大部分温度、气流扰动和震动带来的影响,因此在测试时待系统稳定后利用多次算术平均可以提高重复性。

2.2 液体的选择和液槽的制作

液面实验的液体选择非常关键。考虑到振动的影响和通光的需求,要选择粘滞性适中、可以防止轻微振动的液体。另外要达到干涉仪条纹对比度好的要求,需要根据干涉仪光强选择反射率匹配的液体。并且需要具有无色、无味、无腐蚀性、洁净度高(去除液面的灰尘)、稳定性好、不能有蒸发或者吸水现象的液体。常用的液体有甘油、矿物油、漂白的蓖麻油,液体石蜡,硅油(DC705)^[11]等。另外在液槽边缘,液体与液槽壁接触时由于毛细管现象会产生浸润效应,使得液槽周围液面发生弯曲。根据浸润效应的杨-拉普拉斯方程式,可以推导出浸润效应的范围为^[12]

$$r \sqrt{\frac{\delta}{\rho g}}, \quad (1)$$

式中 δ 为液体表面张力, ρ 为液体密度, g 为重力加速度。采用的液体甲基硅油密度 $\rho=0.970 \text{ g/cm}^3$, 表面张力 $\delta=21.15 \text{ mN/m}$ 。因此边缘 r 一般留出 5 mm 即可避免浸润效应对面形的影响。由于圆形液槽容易在液面形成驻波^[13], 因此实验中采用 $450 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的长方形液槽。如图 4 所示, 并且不同的边采用了不同的厚度。标定的表面口径为 $\phi 300 \text{ mm}$, 因此边缘效应可以忽略不计。为了消除振动影响, 实验的液槽放置在一个口径为 300 mm 的立式干涉仪样品台上, 整个干涉仪放置在气浮平台上, 如图 5 所示。

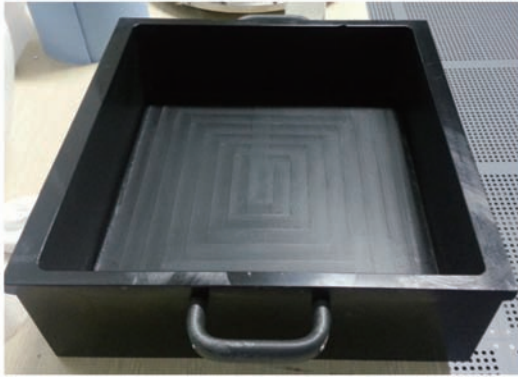


图4 液槽

Fig.4 Vessel for the liquid



图5 口径 300 mm 干涉仪

Fig.5 $\phi 300 \text{ mm}$ interferometer

2.3 液面 power 标定实验

将甲基硅油铺满液槽, 液层厚度为 $2\sim 3 \text{ mm}$, 调节干涉仪相对于液面的倾斜, 使得条纹尽量少。为了防止气流扰动, 避免静电力带来面形误差^[11,13], 干涉腔腔长调节为 40 mm , 静止 12 h 后进行测量, 测量 10 次, 每次 128 次相位平均, 测量结果如图 6 所示。

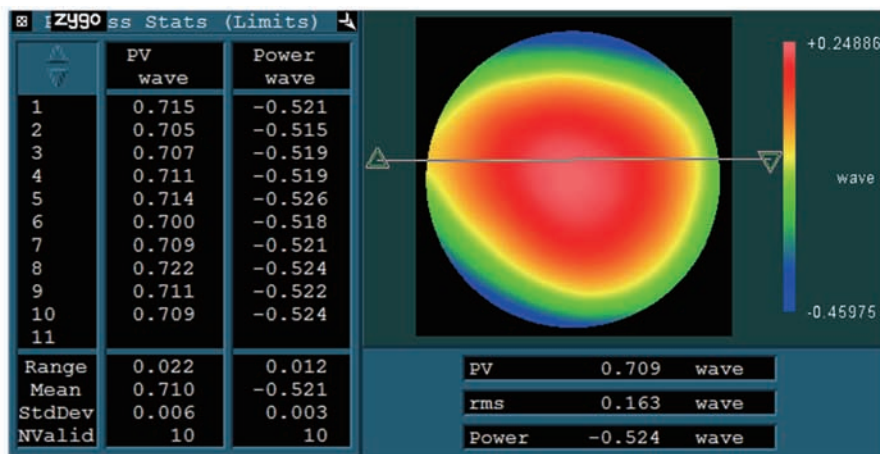


图6 液面标定数据

Fig.6 Data of the liquid surface absolute calibration

测量结果显示平面 power 平均值为 -0.521λ , 标准偏差为 0.003λ 。为了验证液体本身引入的面形可以忽略不计, 将液槽旋转 90° , 静止 12 h 后重新测量 10 次, 得到结果如图 7 所示。

测量结果显示平面 power 平均值为 -0.516λ , 标准偏差为 0.003λ 。液面本身由于重力引入的 power 与标准偏差统一量级, 在这里可以忽略不计。旋转后的测量结果面形图与旋转前的面形相似, 表明液面标定结果可信。

3 旋转平移绝对标定

在立式干涉仪上进行标定, 传统的三平板绝对标定由于需要翻面, 因此会因为重力引入 power 的变化, 并且由于需要重复进行装卡, 装卡精度及其复现性严重影响标定的精度。为了提高标定精度, 采用了旋转

平移绝对标定的方法^[14-16]。这种方法主要利用两个平板之间的相对移动,分别测量原位置、 x 方向移动、 y 方向移动、绕 z 轴旋转4个位置的数据,如图8所示。

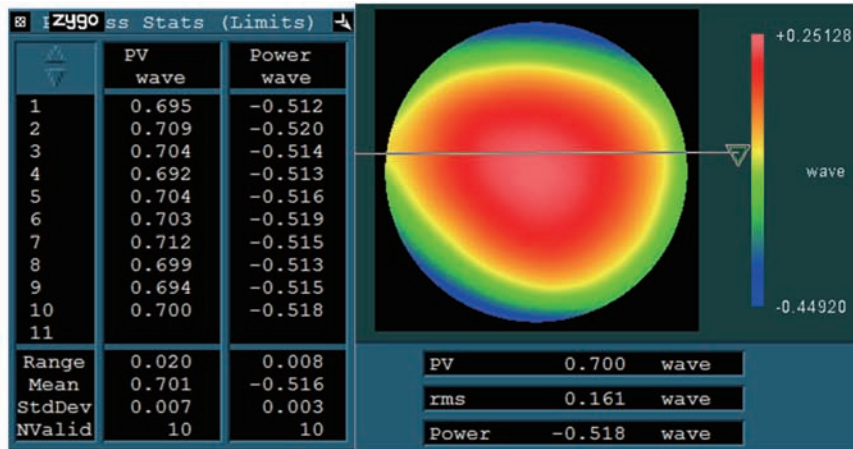


图7 旋转90°液面标定数据

Fig.7 Data of liquid absolute calibration after 90° rotation

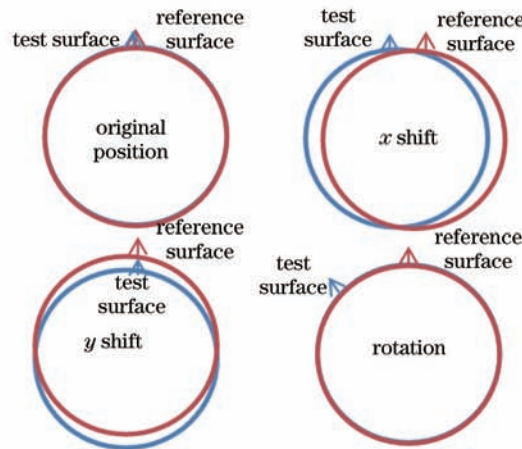


图8 旋转平移绝对标定

Fig.8 Rotate and shift absolute calibration

利用Zernike多项式可以将被测面面形表示如下:

$$W_i \approx \sum_{i=1}^K a_i Z_i, \tag{2}$$

式中 Z_i 表示 Zernike 项, a_i 表示对应的系数;图8中四个位置的测量结果可以表示为

$$W_1 = W_r + \sum_{i=1}^K a_i Z_i + t_x Z_2 + t_{y1} Z_3 + p_1 Z_4, \tag{3}$$

$$W_2 = W_r + \sum_{i=1}^K a_i Z_i(x + \Delta x, y) + t_{x2} Z_2 + t_{y2} Z_3 + p_2 Z_4, \tag{4}$$

$$W_4 = W_r + \sum_{i=1}^K a_i Z_i(x, y + \Delta y) + t_{x3} Z_2 + t_{y3} Z_3 + p_3 Z_4, \tag{5}$$

$$W_4 = W_r + \sum_{i=1}^K a_i Z_i(r, \theta + \Delta \theta) + t_{x4} Z_2 + t_{y4} Z_3 + p_4 Z_4, \tag{6}$$

式中 W_r 表示参考面面形,利用 Zernike 项 Z_2 、 Z_3 表示参考面和被测面之间的倾斜, t_x, t_y 为其相应系数, Z_4 表示 power 项, p 为其系数。利用 W_2, W_3, W_4 分别减去 W_1 , 得到

$$\Delta_x W = \sum_{i=1}^K a_i \Delta Z_{ix} + t_{x1} Z_2 + t_{y1} Z_3 + p p_1 Z_4, \tag{7}$$

$$\Delta_y W = \sum_{i=1}^K a_i \Delta Z_{iy} + tt_{x2} Z_2 + tt_{y2} Z_3 + pp_2 Z_4, \quad (8)$$

$$\Delta_r W = \sum_{i=1}^K a_i \Delta Z_{ir} + tt_{x3} Z_2 + tt_{y3} Z_3 + pp_3 Z_4. \quad (9)$$

解此方程即可得到被测面和参考面 Zernike 相关系数。这种方法的好处是只需要两个平板即可,不需要翻面,因此避免了翻面带来的平板面形变化。另外由于只需要引入微量的平移和旋转,因此支撑结构基本不变,避免了重复装卡带来的面形变化影响,大大提高了标定的精度。三次绝对标定的重复性和平均值如图 9 所示。

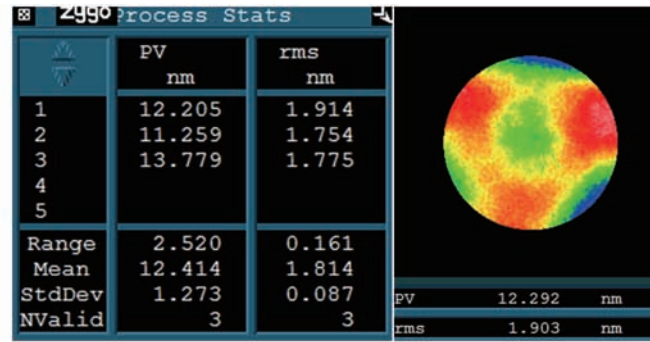


图9 旋转平移绝对标定结果

Fig.9 Result of the rotate and shift absolute calibration

但是在测量过程中,由于需要移动位置,因此不可避免的会引入倾斜。从方程中可以看出,元件自身的二阶项由于差分与测量过程中引入的倾斜不可区分,从而导致通过积分后引入像散和 power 误差。其中像散一般可以通过旋转进行消除,而 power 项对于球面来说一般利用曲率半径进行控制,在面形测量时可以去除。对于平面 power 不能去除,也无法通过这种方面方法进行标定。以上标定结果为去除 power 项后的标定结果。实验结果如表 1 所示。

表 1 标定实验结果

Table 1 Absolute calibration results

Name	Standard deviation ($x_{rms}, 1\sigma$)
Power term	<3.8 nm
Other Zernike terms	0.1 nm

4 结 论

在平板绝对标定中,由于传统的绝对标定技术不能将平面的 power 项标定出来,采用了液面绝对标定方式,先将平面的 power 标定出来,然后结合旋转平移绝对方法,实现了完整的平板绝对面形标定。这种方法,既能利用旋转平移绝对标定精度高的特点,又能给出平面 power 的绝对值,大大提高了参考面的标定精度,提高了干涉仪的绝对检测精度,满足了光刻投影物镜等大部分高精度光学系统平面检测的需求。

参 考 文 献

- 1 Jan Burke, David S Wu. Calibration of spherical reference surfaces for Fizeau interferometry: a comparative study of methods [J]. Appl Opt, 2010, 49(31): 6014-6023.
- 2 Weibo Wang, Jiubin Tan, Tong Wang, *et al.*. Reference surface calibration of a Fizeau interferometer through even/odd synthesis [J]. Appl Opt, 2011, 50(20): 3482-3487.
- 3 Ikumatsu Fujimoto, Toshiyuki Takatsuji, Kunitoshi Nishimura, *et al.*. Autonomous calibration method of the reference flat surface of an interferometer without using a standard flat surface [J]. Appl Opt, 2012, 51(20): 4754-4767.
- 4 G Schulz, J Schwider, C Hiller. Establishing an optical flatness standard [J]. Appl Opt, 1971, 10(4): 929-934.
- 5 G Schulz, J Schwider. Precise measurement of planeness [J]. Appl Opt, 1967, 6(6): 1077-1084.
- 6 P B Keenan. Pseudo-shear interferometry [C]. SPIE, 1984, 123(4): 2-9.
- 7 Klaus R Freischlad. Absolute interferometric testing based on reconstruction of rotational shear [J]. Appl Opt, 2001, 40

- (10): 1637-1648.
- 8 E E Bloemhof. Absolute surface metrology by differencing spatially shifted maps from a phase-shifting interferometer [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(14): 2346-2348.
- 9 L Rayleigh. Interference bands and their applications [J]. *Nature*, 1893, 48(1235): 212-214.
- 10 G Schulz, J Schwider. Precise measurement of planeness [J]. *Appl Opt*, 1967, 6(6): 1077-1084.
- 11 Ian Powell, Emmanuelle Goulet. Absolute figure measurements with a liquid-flat reference [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(13): 2579-2588.
- 12 Wu Xuhua, Xia Jiangtao, Xiao Shaorong, et al.. Calibration of system error for interferometer through absolute liquid reference method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(3): 485-489.
武旭华, 夏江涛, 肖韶荣, 等. 液面基准法标定干涉仪系统误差[J]. *光子学报*, 2010, 39(3): 485-489.
- 13 Maurizio Vannoni, Giuseppe Molesini. Validation of absolute planarity reference plates with a liquid mirror [J]. *Metrologia*, 2005, 42(5): 389-393.
- 14 Dongqi Su, Erlong Miao, Yongxin Sui, et al.. Absolute surface figure testing by shift-rotation method using Zernike polynomials [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(15): 3198-3200.
- 15 Song Weihong, Wu Fan, Hou Xi. Study on the absolute testing of rotationally asymmetric surface deviation with the method of single rotation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0812006.
宋伟红, 伍凡, 侯溪. 基于单次旋转的旋转非对称面形误差绝对检测技术研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0812006.
- 16 Chen Jinbang, Song Dezhen, Zhu Rihong, et al.. High accuracy and large aperture optical standard - phase shifting digital flat interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(4): 480-485.
陈进榜, 宋德真, 朱日宏, 等. 高精度、大口径平面波像差标准——移相式数字平面干涉仪[J]. *光学学报*, 1995, 15(4): 480-485.