

文章编号: 0253-2239(2006)01-0073-7

# 透过检测中的准直镜精度容限

曹晓君<sup>1</sup> 朱健强<sup>1</sup> 李艳红<sup>2</sup> 杨 毓<sup>1</sup> 林 强<sup>1</sup> 李永国<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)  
(<sup>2</sup> 长春理工大学光电工程学院, 长春 130022)

**摘要:** 在干涉检验过程中, 被检元件的面形误差检测精度受到干涉仪系统结构的影响, 从而降低测量结果的可靠性。为了得到较高的检测精度, 必须对检测系统进行分析, 建立测量误差和系统结构的关联度。根据菲涅耳衍射近似理论, 就菲佐干涉仪中的准直镜和标准镜面形误差对透过检测的影响进行了研究。通过对波前相位传递情况的分析, 得出波前误差和系统结构参量的相关性, 去除空腔系统误差, 优化结构参量, 并建立准直镜误差容限表达式。经计算得出, 当被检面形变误差为  $0.2\lambda$  时, 测试误差可以达到  $0.02\lambda$ , 而对准直镜的面形误差要求只需  $0.8\lambda$ 。

**关键词:** 光学测量; 菲佐干涉仪; 相位分布; 波前误差; 系统误差; 菲涅耳衍射近似

中图分类号: O43 文献标识码: A

## Tolerance Limit of Collimated Lens During Transparency Testing

Cao Xiaojun<sup>1</sup> Zhu Jianqiang<sup>1</sup> Li Yanhong<sup>2</sup> Yang Yu<sup>1</sup> Lin Qiang<sup>1</sup> Li Yongguo<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)  
(<sup>2</sup> College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022)

**Abstract:** During the optical interference testing, the measurement accuracy of the tested surface is influenced by the system structure of interferometer, which will decrease the reliability of the measurement. To obtain high measurement precision, it is necessary to analyze the testing system and build the relationship between the measurement error and system structures. With the Fresnel diffraction approximation method, the influences of the collimated lens and standard lens surface errors on the transparency testing are analyzed in Fizeau interferometer. Through analyzing the propagation of the wavefront phase, we obtain the correlation between the wavefront error and system structure parameters, remove the empty system error, optimize the structure parameter, and build up the expression about the tolerance limit of the collimated lens. We draw the conclusion that when the aberration of the tested surface is  $0.2\lambda$ , the measurement error can reach  $0.02\lambda$ , and the aberration of the collimated lens  $0.8\lambda$  will be enough.

**Key words:** optical measurement; Fizeau interferometer; phase distribution; wavefront error; system error; Fresnel diffraction approximation

## 1 引 言

高功率激光系统, 尤其是大型固体激光驱动装置如美国的 OMEGA、日本的 Gekko-XII, 中国的神光 II, 都需要优质的光学元件。在大量使用大尺寸光学件的情况下<sup>[1]</sup>, 面形误差会严重影响最终的功率输出。为了保证装置正常运作, 光学件必须具备

高精度的表面特性。而为了保证光学件的精度, 测试系统必须具有优良的重现精度, 不能引入显著的测量误差。

由于涉及到光束沿整个系统的传输, 分析起来相当复杂, 许多研究都是基于部分传输过程展开的<sup>[2~7]</sup>。R. Jóźwicki<sup>[8]</sup> 使用等效光路波前分析方

作者简介: 曹晓君(1975—), 女, 吉林人, 博士研究生, 主要从事菲佐干涉精度分析方面的研究。

E-mail: junjuncaocn@yahoo.com.cn

导师简介: 朱健强(1964—), 男, 江苏苏州人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光驱动器的研制工作。

E-mail: jqzhu@mail.shnc.ac.cn

收稿日期: 2006-03-02; 收到修改稿日期: 2006-06-01

法,把波前在复杂干涉系统的传输简化成通过有误差光学结构的传输,但并没有就干涉结构和误差容限展开分析。本文基于光学系统的菲涅耳衍射近似成像理论,对波前传播及干涉相位分布进行分析,建立了空腔误差去除和结构优化关系,进一步得出准直镜误差容限表达式。

## 2 成像面上的干涉相位分布

我们运用 R. Jozwicki 的波前误差分析方法,建立菲佐干涉结构等效光路,并分别对参考光和被检光的波前传播情况进行分析,得出干涉仪成像面上的波前误差传播公式。

### 2.1 菲佐干涉结构等效光路的建立

图 1 为菲佐干涉结构示意图,从激光光源出射的发散光束,透过分束器 B 和准直镜 U 平行射出,一部分光被标准镜 S 反射回来,另一部分光透过 S 和被检面 T,再由标准镜 S' 反射。这两束光返回后,通过准直镜 U、分束器 B、孔径光阑 A 和成像物镜 U<sub>i</sub>,在探测器 D 上呈现干涉图像。其中,干涉腔长为  $d$ ,准直镜 U 到标准镜 S 距离为  $Z_s$ ,D 到 U<sub>i</sub> 的距离为  $Z_t$ 。

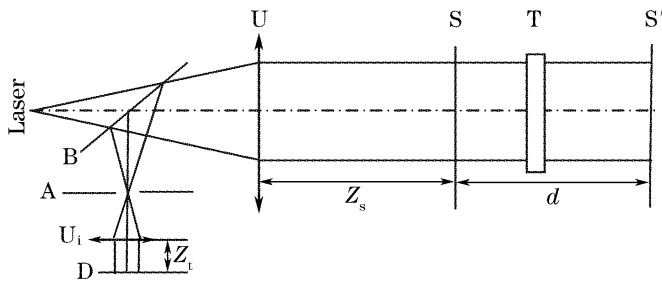


图 1 菲佐干涉透过检验装置

Fig. 1 Optical system of Fizeau interferometer

一般情况下,由于成像物镜 U<sub>i</sub> 比 U 要小得多,而分束器 B 是较小的平面,因而它们的像差影响可以得到很好的校正。孔径光阑只影响衬比度,并不影响像差。因此,假设成像物镜 U<sub>i</sub> 是无像差透镜,分束器和孔径光阑的影响略去不计。整个系统分析就可以简化为准直镜和标准镜面形误差对测量结果的影响。

先把图 1 的光路图展开等效为图 2,即把光束在 S 和 S' 面上的反射展开为沿同一方向传播,然后把准直镜 U 分成准直部分 U<sub>1</sub> 和成像部分 U<sub>2</sub>;根据光学系统的合成原则,有像差的 U<sub>1</sub> 可以拆分成由理想透镜 U<sub>0</sub> 和误差面 D<sub>1</sub> 组成,U<sub>2</sub> 也可以拆分成由理想透镜 U<sub>0</sub> 和误差面 D<sub>2</sub> 组成;因为 U<sub>i</sub> 为理想透镜,成像透镜 U<sub>0</sub> 和 U<sub>i</sub> 构成理想无焦系统 U';根

据菲涅耳近似成像合成理论<sup>[9]</sup>,如果把 D 通过 U' 投影至 D',则在传播误差分析时,U'+D 和 D'+U'对系统产生的影响是等同的;无限大的无像差透镜,只会改变传播的振幅,不会改变相位信息,对成像误差不产生影响,当直接对 D 的虚拟共轭面 D' 进行分析时,可以不去考虑 U' 的影响,而光束通过 U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub> 传播产生的相位误差也同直接通过 D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub> 相同,这样就可以把一个复杂的光学传播过程简化成通过误差面的传播。其中,Z<sub>p</sub> 为 D 经理想无焦系统 U' 所成的像 D' 到 U<sub>2</sub> 的距离,若准直镜 U 焦距为 f<sub>1</sub>,成像物镜 U<sub>i</sub> 焦距为 f<sub>2</sub>,则由透镜成像共轭公式可知  $1/Z_p = 1/f_2 - 1/Z_t - 1/f_1$ 。

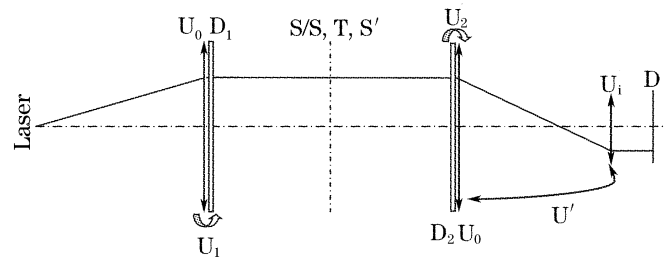


图 2 图 1 的展开等效光路

Fig. 2 Expanded equivalent light path of the interferometer of Fig. 1

根据上述分析,系统参考光简化为图 3 所示的等效光路,传播过程分成五个组成部分,分别为:光波穿过 D<sub>1</sub> 透射,从 D<sub>1</sub> 到 S 面的传播,光波在 S 面上反射,从 S 面到 D<sub>2</sub> 的透射,从 D<sub>2</sub> 到达 D' 的传播。

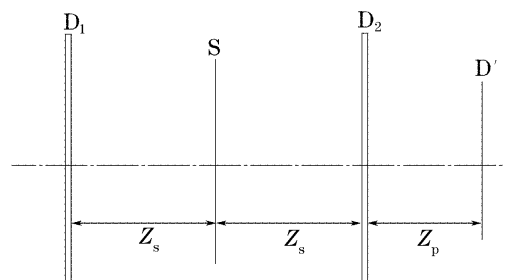


图 3 参考波前传播展开等效光路

Fig. 3 Expanded equivalent light path of reference wavefront propagation

系统另一光路的传播与参考光路的传播类似,将在后面的分析中作详细描述。

### 2.2 波前传播公式分析

应用菲涅耳衍射近似关系,设垂直入射的准平面波通过某平面的场分布为

$$V_1(\mathbf{a}_n) = V_0 \exp[2\pi i A_1(\mathbf{a}_n)], \quad (1)$$

其中  $V_0$  为振幅常量, $A_1$  为平面面形误差函数, $\mathbf{a}_n$  为径向位置矢量。则在距离该平面为  $z$  处的位置,波前

相位分布为

$$A_2(\mathbf{a}_n) = A_1(\mathbf{a}_n) + \delta A_1(\mathbf{a}_n, z), \quad (2)$$

$$\text{且 } \delta A_1(\mathbf{a}_n, z) = -\frac{\lambda z}{2a_0^2} \left[ \left( \frac{\partial A_1}{\partial a_{nx}} \right)^2 + \left( \frac{\partial A_1}{\partial a_{ny}} \right)^2 \right], \quad (3)$$

其中  $2a_0$  为光束传输的最大孔径,  $0 \leq \mathbf{a}_n \leq 1$ ,  $a_{nx}$  和  $a_{ny}$  是  $\mathbf{a}_n$  的笛卡耳坐标分量。因为  $A_1$  为二维函数, (3) 式可以表达成

$$\delta A_1(\mathbf{a}_n, z) = -\frac{\lambda z}{2a_0^2} \text{grad}^2 A_1,$$

归一化径向距离为  $\mathbf{a}_n = \mathbf{a}/a_0$ 。

### 2.2.1 参考光束传播公式

为了避免用向量形式表示, 这里用  $W$  表示面形误差,  $r$  和  $t$  表示波前相位分布, 对菲佐干涉系统波前误差展开分析。首先分析图 3 中的参考波前误差传播情况。

由菲涅耳衍射近似关系得到的波前传播关系, 光波穿过  $D_1$  透射后的场分布可表达为

$$V_1(\mathbf{a}_n) = V_0 \exp[2\pi i W_1(\mathbf{a}_n)], \quad (4)$$

其中  $V_0$  为通过形变面  $D_1$  后的场振幅,  $W_1(\mathbf{a}_n)$  为物镜  $U_1$  的面形误差透射函数。

光波从  $D_1$  到  $S$  面之前, 即在距离  $D_1$  为  $Z_s$  的参考面, 相位分布为

$$r_s(\mathbf{a}_n) = W_1(\mathbf{a}_n) + \delta W_1(\mathbf{a}_n, Z_s), \quad (5)$$

令  $S$  面面形误差函数为  $W_r(\mathbf{a}_n)$ , 因为光束在  $S$  面反射(设该面为凹面), 则产生的相位变化是  $2W_r(\mathbf{a}_n)$ , 经过  $S$  面后, 相位分布为

$$r'_{s,d}(\mathbf{a}_n) = W_1(\mathbf{a}_n) + \delta W_1(\mathbf{a}_n, Z_s) - 2W_r(\mathbf{a}_n), \quad (6)$$

设  $W_2(\mathbf{a}_n)$  为  $U_2$  的面形误差透射函数, 光束传输  $Z_s$  距离, 经过  $D_2$  后,

$$r'_{2s}(\mathbf{a}_n) = r'_{s,d}(\mathbf{a}_n) + \delta r'_{s,d}(\mathbf{a}_n, Z_s) + W_2(\mathbf{a}_n). \quad (7)$$

到达  $D'$  时, 相位分布为

$$r_t(\mathbf{a}_n) = r'_{2s}(\mathbf{a}_n) + \delta r'_{2s}(\mathbf{a}_n, Z_p). \quad (8)$$

对于  $\delta A_1(\bar{\mathbf{a}}_n, z) = -\frac{\lambda z}{2a_0^2} \text{grad}^2 A_1$  而言, 因为梯度前面的系数很小, 带有它们的乘积项可以忽略不计, (8) 式经该近似计算, 可以得出

$$\begin{aligned} r_t(\mathbf{a}_n) = & W_1 + W_2 + 2W_r - \frac{\lambda Z_s}{2a_0^2} \text{grad}^2 W_1 - \\ & \frac{\lambda Z_s}{2a_0^2} \text{grad}^2 (W_1 + 2W_r) - \\ & \frac{\lambda Z_p}{2a_0^2} \text{grad}^2 (W_1 + W_2 - 2nW_r), \quad (9) \end{aligned}$$

为了表达简便, 略去坐标变量  $\mathbf{a}_n$ 。

### 2.2.2 空腔被测光束传播公式

与参考光路分析同理, 在不放置被测物  $T$  即空

腔情况下, 展开后的被检光路传播情况如图 4 所示。传播过程分成五个组成部分, 分别是: 光波穿过  $D_1$ , 从  $D_1$  到  $S$  面, 且透过  $S$  的传播; 从  $S$  到  $S'$  面, 且在  $S'$  面上反射的传播; 从  $S'$  到  $S$  面, 且经  $S$  透射的传播; 从  $S$  面到  $D_2$ , 穿过  $D_2$  透射的传播; 从  $D_2$  到达  $D'$  的传播。

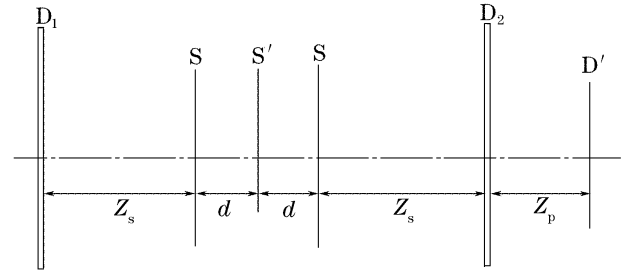


图 4 空腔被检波前传播展开等效光路

Fig. 4 Expanded equivalent light path of empty testing wavefront propagation

当光束传播至  $S$  面时, 被检光和参考光的传播情况发生了变化, 被检光通过  $S$  发生透射, 通过对透过程的光程分析, 可以得到其产生的相位变化为  $[-(n-1)W_r(\mathbf{a}_n)]$ ,  $S$  面后面相位分布表达式为

$$t'_s(\mathbf{a}_n) = r_s(\mathbf{a}_n) - (n-1)W_r(\mathbf{a}_n). \quad (10)$$

经过距离  $d$ , 光束到达  $S'$  面, 在该处反射, 令  $S'$  面面形误差函数为  $W_s(\mathbf{a}_n)$ , 这时相位分布为

$$t'_{s,d}(\mathbf{a}_n) = t'_s(\mathbf{a}_n) + \delta t'_s(\mathbf{a}_n, d) + 2W_s(\mathbf{a}_n). \quad (11)$$

反射光再次通过  $S$  面后, 相位分布为

$$t'_{d,d}(\mathbf{a}_n) = t'_{s,d}(\mathbf{a}_n) + \delta t'_{s,d}(\mathbf{a}_n, d) + (n-1)W_r(\mathbf{a}_n). \quad (12)$$

经过  $D_2$ , 相位分布为

$$t'_{d,Z_s}(\mathbf{a}_n) = t'_{d,d}(\mathbf{a}_n) + \delta t'_{d,d}(\mathbf{a}_n, Z_s) + W_2(\mathbf{a}_n). \quad (13)$$

最后在探测器  $D'$  上的相位为

$$t_t(\mathbf{a}_n) = t'_{d,Z_s}(\mathbf{a}_n) + \delta t'_{d,Z_s}(\mathbf{a}_n, Z_p), \quad (14)$$

同理, 经近似整理后得到

$$\begin{aligned} t_t = & W_1 - 2(n-1)W_r + 2W_s + W_2 - \\ & \frac{\lambda Z_s}{2a_0^2} \text{grad}^2 W_1 - \\ & \frac{\lambda Z_s}{2a_0^2} \text{grad}^2 [W_1 - 2(n-1)W_r + 2W_s] - \\ & \frac{\lambda d}{2a_0^2} \text{grad}^2 [W_1 - (n-1)W_r] - \\ & \frac{\lambda d}{2a_0^2} \text{grad}^2 [W_1 - (n-1)W_r + 2W_s] - \\ & \frac{\lambda Z_p}{2a_0^2} \text{grad}^2 [W_1 + W_2 - 2(n-1)W_r + 2W_s], \quad (15) \end{aligned}$$

### 2.2.3 非空腔被测光束传播公式

当放置了被测物 T 时,展开后的被检光路传播如图 5 所示。传播过程为:平面波经  $D_1$  和 S 透射后,经被检面 T 传播至  $S'$ ,在  $S'$  处反射后,再通过 T、S、 $D_2$  返回,成像至  $D'$ 。其中, $d_1$  为标准镜 S 到被检面 T 的距离, $d_2$  为被检面 T 到准直镜  $S'$  的距离。

该过程与系统的空腔被检波前传播过程相比多了两个部分,就是光波两次穿过被检面,同理,按照系统的空腔被检波前传播过程分析,可以得到光波通过被检透射面,系统最终在探测器  $D'$  上的相位

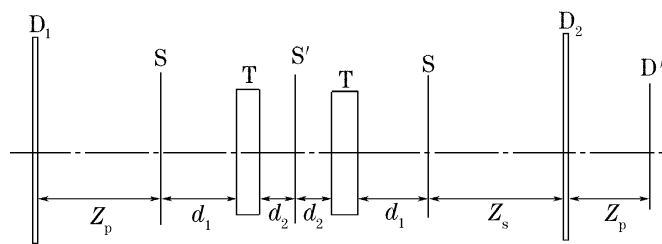


图 5 光波通过被检透射面波前传播展开等效光路  
Fig. 5 Expanded equivalent light path of wavefront propagation when the light passes the testing surface 分布为

$$\begin{aligned}
 t'_t = & W_1 - 2(n-1)(W_r + W_t) + 2W_s + W_2 - \\
 & \frac{\lambda Z_s}{2a_0^2} \text{grad}^2 W_1 - \frac{\lambda Z_s}{2a_0^2} \text{grad}^2 [W_1 - 2(n-1)(W_r + W_t) + 2W_s] - \\
 & \frac{\lambda d_1}{2a_0^2} \text{grad}^2 [W_1 - (n-1)W_r] - \frac{\lambda d_1}{2a_0^2} \text{grad}^2 [W_1 - (n-1)W_r - 2(n-1)W_t + 2W_s] - \\
 & \frac{\lambda d_2}{2a_0^2} \text{grad}^2 [W_1 - (n-1)W_r - (n-1)W_t] - \frac{\lambda d_2}{2a_0^2} \text{grad}^2 [W_1 - (n-1)W_r - (n-1)W_t + 2W_s] - \\
 & \frac{\lambda Z_p}{2a_0^2} \text{grad}^2 [W_1 + W_2 - 2(n-1)(W_r + W_t) + 2W_s], \quad (16)
 \end{aligned}$$

其中  $W_t$  为被检透过面的形变误差。

## 3 干涉波前误差表达式

我们对系统的干涉波前误差进行计算,分别得到空腔和非空腔检测状态下,干涉波前误差表达式,并对表达式各项对测试结果的影响加以分析。

### 3.1 空腔干涉波前误差公式

首先分析不放置被检物时的空腔干涉波前误差表达式。在  $D'$  上的干涉波前相位分布为参考光和被检光相位分布之差,即

$$\Delta(a_n) = t_1(a_n) - r_1(a_n). \quad (17)$$

将 (9) 式和 (15) 式代入,经过梯度展开计算并合并相同的误差函数,可以得到

$$\Delta(a_n) = 2W_s + 2nW_r + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 + \Delta_5 + \Delta_6, \quad (18)$$

其中

$$\Delta_1 = -\frac{\lambda}{2a_0^2} [(Z_s + Z_p)(4n^2 - 8n) + (2d(n-1))^2] \text{grad}^2 W_r,$$

$$\Delta_2 = -\frac{\lambda}{2a_0^2} (2d) \text{grad}^2 W_1,$$

$$\Delta_3 = -\frac{\lambda}{2a_0^2} [4(Z_s + Z_p + d)] \text{grad}^2 W_s,$$

$$\Delta_4 = -\frac{\lambda}{2a_0^2} \{ [-4n(Z_s + Z_p) - 4d(n-1)] \text{grad} W_r \text{grad} W_1 - 4nZ_p \text{grad} W_r \text{grad} W_2 \},$$

$$\Delta_5 = -\frac{\lambda}{2a_0^2} [(Z_s + Z_p)(8 - 8n) - 4d(n-1)] \text{grad} W_r \text{grad} W_s,$$

$$\Delta_6 = -\frac{\lambda}{2a_0^2} [(4Z_s + 4d + 4Z_p) \text{grad} W_1 \text{grad} W_s + 4Z_p \text{grad} W_2 \text{grad} W_s],$$

(18)式中,第一项为标准面  $S'$  对结果引入它本身两倍的面形误差;第二项表示标准面  $S$  对结果引入它本身 2 倍的面形误差;准直镜是共光路元件,对参考光和被检光的影响相同,在计算干涉相位时相互抵消。其余项为元件误差的梯度对测量结果的影响,因为梯度前面的系数非常小,测量误差将主要受前两项的影响。光线经  $S$  面发生透过, $S$  面和  $S'$  面

对结果的影响相同,而且是产生测量误差的主因,因此在光学设计中对  $S$  和  $S'$  的精度要求较高,如果这两个面的面形误差方向相同,将会消减系统误差。

### 3.2 被测干涉波前误差公式

放置被检面后,由(9)式和(16)式,经梯度展开计算,并合并相同的误差函数项,可以得到探测器上的被测干涉波前误差为

$$\begin{aligned} \Delta' = t'_i - r_i = & 2W_s - 2(n-1)W_t + 2nW_r - \frac{\lambda}{2a_0^2}2d\text{grad}^2W_1 - \frac{\lambda}{2a_0^2}4Z_p\text{grad}W_2\text{grad}W_s + \\ & \frac{\lambda}{2a_0^2}4(n-1)Z_p\text{grad}W_2\text{grad}W_t + \frac{\lambda}{2a_0^2}4nZ_p\text{grad}W_2\text{grad}W_r + \\ & \Delta'_1 + \Delta'_2 + \Delta'_3 + \Delta'_4 + \Delta'_5 + \Delta'_6 + \Delta'_7 + \Delta'_8 + \Delta'_9, \end{aligned} \quad (19)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta'_1 = & -\frac{\lambda}{2a_0^2}4(Z_s + Z_p + d)\text{grad}^2W_s, \\ \Delta'_2 = & -\frac{\lambda}{2a_0^2}2(n-1)^2(2Z_s + 2Z_p + 2d_1 + d_2)\text{grad}^2W_t, \\ \Delta'_3 = & -\frac{\lambda}{2a_0^2}[(4n^2 - 8n)(Z_s + Z_p) + 2(n-1)^2d]\text{grad}^2W_r, \\ \Delta'_4 = & \frac{\lambda}{2a_0^2}4(n-1)(2Z_s + 2Z_p + 2d_1 + d_2)\text{grad}W_s\text{grad}W_t, \\ \Delta'_5 = & \frac{\lambda}{2a_0^2}4(n-1)(2Z_s + 2Z_p + d)\text{grad}W_s\text{grad}W_r, \\ \Delta'_6 = & -\frac{\lambda}{2a_0^2}4(n-1)^2(2Z_s + 2Z_p + d)\text{grad}W_r\text{grad}W_t, \\ \Delta'_7 = & -\frac{\lambda}{2a_0^2}4(Z_s + Z_p + d)\text{grad}W_s\text{grad}W_1, \\ \Delta'_8 = & \frac{\lambda}{2a_0^2}4(n-1)(Z_s + Z_p + d)\text{grad}W_1\text{grad}W_t, \\ \Delta'_9 = & \frac{\lambda}{2a_0^2}[4n(Z_s + Z_p) + 4(n-1)d]\text{grad}W_s\text{grad}W_t, \end{aligned}$$

由(19)式可见,即使各梯度项对测量的影响很小,该式中仍然包括标准面  $S$  和  $S'$  的像差函数,且  $S$  和  $S'$  对测量的影响要比被检面  $T$  大。也就是说,在干涉检测过程中,直接使用参考光和被检光波前进行相位比较,进而得出被测面形误差的方法,会引入较大的测量误差,该误差必须通过一定的算法予以去除。

## 4 空腔波前误差去除

空腔波前误差和被测波前误差的差异是由于在干涉腔中插入被测件引起的,在计算被测件的形变误差时,可以考虑从被测波前误差(19)式中去掉空腔波前误差(18)式,得到

$$\begin{aligned} \Delta - \Delta' = & -2(n-1)W_t - \frac{\lambda}{2a_0^2}2(n-1)^2(2Z_s + 2Z_p + 2d_1 + d_2)\text{grad}^2W_t + \\ & \frac{\lambda}{2a_0^2}4(n-1)(2Z_s + 2Z_p + 2d_1 + d_2)\text{grad}W_s\text{grad}W_t - \\ & \frac{\lambda}{2a_0^2}4(n-1)^2(2Z_s + 2Z_p + d)\text{grad}W_r\text{grad}W_t + \\ & \frac{\lambda}{2a_0^2}4(n-1)(Z_s + 2Z_p + d)\text{grad}W_1\text{grad}W_t, \end{aligned} \quad (20)$$

用  $W_1(\mathbf{a}_n)$  来代替了  $W_2(\mathbf{a}_n)$  [在非干涉仪中  $W_1(\mathbf{a}_n) = W_2(\mathbf{a}_n)$ ]。由(20)式可见,通过被测波前误差和空腔波前误差相减,就可以把干涉结构中与被检面无关的项去除,简化测量误差。在进行实际的干涉检测过程中,分别得到不放置和放置被检透过面 T 时,探测器上的干涉相位分布,将二者相减,所

得即为(20)式的最终结果,这一算法是很容易实现的。在该表达式中,系统结构元件的独立像差项对测量结果所产生的较大误差已经去除,只剩下被检面、被检面梯度、被检面和系统元件像差面的梯度相关项,而梯度项对测量结果的影响是比较小的。

(20)式两边同时除以  $2(n-1)$ ,得到

$$\begin{aligned} \frac{\Delta - \Delta'}{2(n-1)} = & -W_t - \frac{\lambda}{2a_0^2}(n-1)(2Z_s + 2Z_p + 2d_1 + d_2)\text{grad}^2 W_t + \\ & \frac{2\lambda}{2a_0^2}(2Z_s + 2Z_p + 2d_1 + d_2)\text{grad} W_s \text{grad} W_t - \\ & \frac{2\lambda}{2a_0^2}(n-1)(2Z_s + 2Z_p + d)\text{grad} W_r \text{grad} W_t + \\ & \frac{2\lambda}{2a_0^2}(Z_s + 2Z_p + d)\text{grad} W_1 \text{grad} W_t. \end{aligned} \quad (21)$$

(21)式即理论上的面形检测结果, $W_t$  前面的负号表示透过检测中得到的形变误差和实际的相反,后面一项即为测试误差。去掉被检面形变误差,得到测试误差为

$$\begin{aligned} \delta = & \frac{\lambda}{2a_0^2}(n-1)(2Z_s + 2Z_p + 2d_1 + d_2)\text{grad}^2 W_t - \frac{2\lambda}{2a_0^2}(2Z_s + 2Z_p + 2d_1 + d_2)\text{grad} W_s \text{grad} W_t + \\ & \frac{2\lambda}{2a_0^2}(n-1)(2Z_s + 2Z_p + d)\text{grad} W_r \text{grad} W_t - \frac{2\lambda}{2a_0^2}(Z_s + Z_p + d)\text{grad} W_1 \text{grad} W_t. \end{aligned} \quad (22)$$

下面根据(22)式,用具体数据计算测试误差值。当准直镜到参考面距离  $Z_s$  为 40 mm,探测器所成像到准直镜距离  $Z_p$  为 -30 mm,干涉腔腔长  $d$  为 50 mm 的时候,如果 S、S' 的面形误差为  $0.05\lambda$ ,准直镜的面形误差为  $0.1\lambda$ ,选用玻璃材料为 BK7,折射率为 1.5168。考虑到元件面形误差的方向性,将各表达式绝对值相加,将得到图 6 所示测试误差随被检面形变误差变化曲线。从图中可以看出,当被检面形变误差为  $0.2\lambda$  时,测试误差为  $0.02\lambda$ ,测试精度是比较高的,可以真实反映被检面形变;随着被检面形变误差的增大,测试误差也逐渐增大,当被检面形变误差为  $0.4\lambda$  时,测试误差已经达到  $0.05\lambda$ ,此

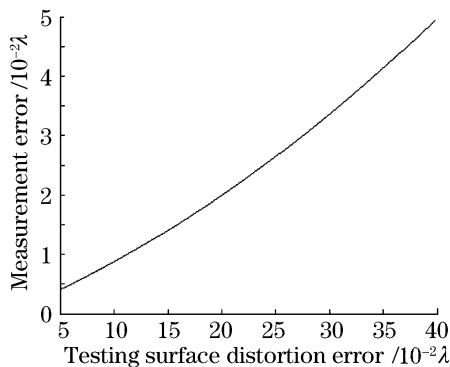


图 6 测试误差随被检面形变误差变化曲线

Fig. 6 Relationship between tested surface distortion error and measurement errors

时,非空腔误差去除方法已经不能满足测试要求,导致测量结果与实际相差较大,需要对分析方法做进一步研究。

## 5 准直镜误差容限

由于(22)式中的梯度相关项直接通过元件面形无法分离,我们将借助梯度表达式前面的系数关系来去除部分元件误差的影响。

从(22)式的系数关系可以看出,当干涉腔腔长很小,即  $d \rightarrow 0$ ,表达式中各项干涉结构参量关系相同;如果能进一步满足  $Z_s = -Z_p$ ,可以去除 S 面和 S' 面对测量结果的影响。上述对系数的优化只是建立在数学表达式的基础上,结合干涉结构的物理意义可知, $Z_p$  是 D 经  $U'$  所成的像到准直镜的距离,由透镜成像公式,根据  $U_i$  和 U 的焦距,就可以计算从 D 到  $U_i$  的实际距离,该等式的物理意义相当于标准镜 S 和探测器 D 位置共轭;表达式(2)成立的条件是腔长  $d$  为极小值,所以该优化可以成立,从而得到

$$\delta = \frac{\lambda}{a_0^2} Z_p \text{grad} W_t \text{grad} W_1, \quad (23)$$

这样就可以把对测量影响的分析减小到准直镜一个元件,极大地降低了测试误差分析的复杂程度;在实际检测过程中,干涉腔腔长是不可能为零的,由腔长

引起的误差也无法去除,只能在允许的条件下,尽量减小其长度,这也是在所有的干涉检测过程中,一个难以解决的问题,本文仅在理想状态下做一近似。

通过(23)式可知,最终优化的结果和标准镜面形误差  $W_1(a_n)$ 、 $Z_p$  有关,常量  $Z_p$  等于准直镜 U 到标准镜 S 的距离  $Z_s$ ,和测试误差成正比,变量为被检面和准直镜面形误差梯度的乘积,根据具体干涉精度要求,就可以由该式计算准直镜误差容限。当  $Z_p$  为  $-30\text{ mm}$  的时候,如果要求测试误差  $\delta$  小于  $0.02\lambda$ ,可以得到准直镜随被检面变化的面形误差曲线图 7,可以看出,当被检面形变误差为  $0.2\lambda$  时,准直镜的面形误差为  $0.8\lambda$  就可以满足测量要求,和结构优化之前的  $0.1\lambda$  相比,对准直镜的要求降低了许多。因此,进行干涉结构优化,在简化设计中需要考虑问题的同时,也降低了设计和加工的难度。

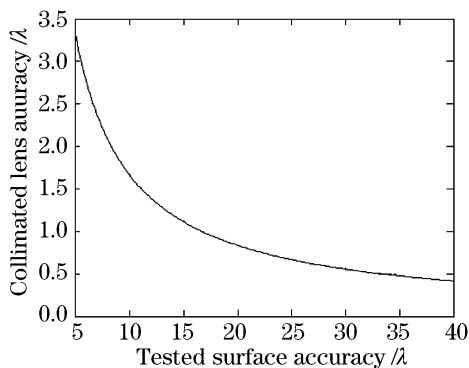


图 7 准直镜面形误差随被检面形变误差变化曲线  
Fig. 7 Relationship between surface error and tested surface distortion error for collimated lens

综上所述,在进行空腔误差去除的基础上,如果干涉仪结构参量选择合理,并根据测试精度要求合理选择准直镜精度容限,将会在很大程度上降低结果误差,简化误差分析过程,且对准直镜的面形精度要求也大为降低。因此,光学设计人员在做干涉仪结构优化时,只要根据以上分析适当的选取干涉系统参量,就可以做到合理的控制测量结果精度,提高测量结果可靠性。

## 6 结 论

根据光学系统的菲涅耳合成原则,运用 R. Jozwicki 的波前误差分析方法,就菲佐干涉系统结构进行展开,将一个复杂的系统转换为一个较简单的光路,对光束在误差面的传播进行分析。在干涉系统进行透过检验的状态下,分析标准镜 S、S'、准直物镜 U 和结构参量对测量结果误差的影响,得到空腔波前误差和被测波前误差表达式,通过计算进一步去除系统误差,得出干涉检测结果和系统参量的关系,并建立准直镜误差容限表达式及关系曲线,为光学设计人员进行系统误差优化提供了理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 Erik Lowell Novak. Measurement and analysis optimization of large aperture laser Fizeau interferometer [D]. America: the University of Arizona, 1998. 11~18
- 2 Chunsheng Huang. Propagation errors in precision Fizeau interferometry[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(34): 7016~7021
- 3 Luzhong Cai, Mingzhao He, Qing Liu. Correction of wave-front errors caused by the slight tilt of a reference beam in phase-shifting interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43** (17): 3466~3471
- 4 Bruce E. Truax. Interferometers eliminate test plates during fabrication[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(11): 2090~2091
- 5 Karl-Edmund Elssner, Andreas Vogel, Jürgen Grzanna *et al.*. Establishing a flatness standard[J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(13): 2437~2446
- 6 Philip S. Fairman, Barry K. Ward, Bozenko F. Oreb *et al.*. 300-mm-aperture phase-shifting Fizeau interferometer[J]. *Opt. Engng.*, 1999, **38**(8): 1371~1380
- 7 Ю. В. Коряомнйцов. *The Theory and Application of Interferometry* [M]. Li Chengye, Wu Jingwen, Qin Nanrong *et al.* transl. Beijing: Technical Standard Press, 1982. 144~152 (in chinese)  
考洛米佐夫. 干涉仪的理论基础及应用[M]. 李承业, 吴景文, 秦南荣 等译. 北京: 技术标准出版社, 1982. 44~152
- 8 R. Jozwicki. Propagation of an aberrated wave with nonuniform amplitude distribution influence upon the interferometric measurement accuracy[J]. *Opt. Appl.*, 1990, **20**: 229~253
- 9 R. Józwicki. Imaging synthesis in the Fresnel approximations [J]. *Opt. Acta*, 1984, **31**(2): 169~180