

细丝法激光纹影仪的最佳仪器参数

陆家昌 李正直

(杭州大学)

提要: 本文详细分析与计算了细丝空间滤波器的宽度和位相物的结构参量对显示位相分布的影响,并找到了该种纹影仪的最佳参数。

Optimum parameters of a laser schlieren apparatus with wire spatial filter

Lu Jiachang, Li Zhengzhi

(Hangzhou University)

Abstract: In this paper, the influence of parameters of both the wire spatial filter and phase object on the intensity distribution in the image plane is discussed, and the optimum parameters of this laser schlieren apparatus are also calculated.

目前经常采用振幅空间滤波器的激光纹影仪来检验光学元件的象差,以及其他位相物中位相的不均匀分布。对于一维的位相物,可用细丝作为空间滤波器,然而,在已有的专著^[1,2]及该种仪器使用中,均未讨论过细丝的直径和位相物的有限宽度对显示位相分布的影响。文献[3]曾对上述有关条件进行了若干计算。本文在实验探讨的基础上,用电子计算机对激光纹影仪的仪器参数、位相物不同结构参量对显示位相分布的影响,进行了详细的计算和讨论,并修正与扩展了文献[3]的结果。此外,还给出典型位相物的计算机模拟显示实例。

于纯位相物,其复振幅透射率即物函数可表为如下形式:

$$f(x) = \exp[i\phi(x)] \quad (1)$$

如 $\phi(x)$ 是周期性函数,则可将 $f(x)$ 展开成如下傅里叶级数:

$$f(x) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} C_l e^{il\omega_0 x} \quad (2)$$

其中 $\omega_0 = 2\pi/2T = \pi/T$ 是空间圆频率; $2T$ 是 $\phi(x)$ 的周期; C_l 是傅里叶级数的系数:

$$C_l = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(x) e^{-il\omega_0 x} dx \quad (3)$$

以平行光照射位相物,在第一透镜后焦面得到物函数的频谱。如果限制位相物的光阑宽为 $2D$,可得周期性位相物 $f(x)$ 的频谱为:

$$G(\omega) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} 2C_l \frac{\sin(l\omega_0 - \omega)D}{l\omega_0 - \omega} \quad (4)$$

一、基本原理

为简明起见,这里研究一维的情况。对

收稿日期: 1984年8月16日。

对于非周期位相物, 可以物函数的有限宽度 $2D$ 为周期, 将 $f(x)$ 作延拓, 然后展开为 $\omega_0 = \pi/D$ 的傅里叶级数。或直接由频域抽样定理, 可得非周期位相物在上述条件下的频谱为:

$$G(\omega) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} G\left(\frac{l\pi}{D}\right) \frac{\sin(l\pi - \omega D)}{l\pi - \omega D} \quad (5)$$

其中 π/D 是采样频宽, $l\pi/D$ 表示各等距采样点, 而 $G\left(\frac{l\pi}{D}\right)$ 是各采样点傅里叶变换值:

$$G\left(\frac{l\pi}{D}\right) = \int_{-D}^D f(t) e^{-il\pi t/D} dt \\ = \int_{-D}^D f(t) e^{-il\omega_0 t} dt \quad (6)$$

如在频谱面插入滤波器 $\xi(\omega)$, 经滤波后象面上的振幅函数即为:

$$F(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \xi(\omega) e^{i\omega x} d\omega \quad (7)$$

在细丝检验方法中, 如设细丝宽为 $2d$, 照明相干光波数为 $k = 2\pi/\lambda$, 透镜焦距为 F , 即有:

$$\xi(\omega) = \begin{cases} 0 & |\omega| \leq kd/F \\ 1 & |\omega| > kd/F \end{cases} \quad (8)$$

将式(4)和(8)代入(7)并作积分变换可得:

$$F(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) e^{i\omega x} d\omega \\ - \frac{1}{2\pi} \int_{-kd/F}^{kd/F} G(\omega) e^{i\omega x} d\omega \\ = f(x) - C_0 f_0 - R(x) \quad (9)$$

其中:

$$R(x) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} C_l f_l \exp(il\omega_0 x) \quad (10)$$

$$f_l(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{A_l}^{B_l} \frac{\sin t}{t} e^{-i\left(\frac{\pi}{D}\right)t} dt \quad (11)$$

(11)式中积分限 $A_l = [l/(T/D) - d/d_0]\pi$, $B_l = [l/(T/D) + d/d_0]\pi$, 而 $d_0 = \lambda F/2D$ 。 d/d_0 的值涉及到细丝宽度等参量的选取, 它是本文要详细分析的仪器参量。(9)式中将 $l=0$ 的项提出 $R(x)$ 无穷求和之外, 因为该项对于细丝检验法显示位相物有重要意义, 而 $f_0(x)$ 也可由被积函数的奇偶性和三角变换表示成更为简单的积分形式:

$$f_0(x) = \frac{1}{\pi} \left\{ S_1 \left[\left(1 + \frac{x}{D}\right) \frac{d}{d_0} \pi \right] \right. \\ \left. + S_1 \left[\left(1 - \frac{x}{D}\right) \frac{d}{d_0} \pi \right] \right\} \quad (12)$$

式中 $S_1(x)$ 是正弦积分。

上述结果也易于推广到非周期结构的情况。由前文述及的周期延拓原理, 非周期结构即相应于 $T=D$ 的情况, 也就是只需将(11)的积分限改为 $A_l = [(l-d/d_0)\pi]$, $B_l = [(l+d/d_0)\pi]$, 其它则完全一致。

(9)式表示象面复振幅函数和原物函数之间的关系。其中的 $f_0(x)$ 和 $R(x)$ 都是 x 的显函数, 其性状与位相物的结构性质、光阑孔径大小、仪器参量 d/d_0 密切相关。如能选择适当的参量使 $R(x) \rightarrow 0$, 且 $f_0(x)$ 为常数, 或至少在较大的范围内接近常量, 则象面振幅函数就近似成为:

$$F(x) \approx f(x) - C \quad (13)$$

其中 $C = C_0 f_0$ 为常量。对于如(1)式的位相物函数, C_0 一般是复数, 故 C 也是复常量。象面可观测的是波场的强度:

$$I(x) = |F(x)|^2 = |\exp[i\phi(x)] - C|^2 \\ = 1 + C^* C - 2|C| \cos[\phi(x) - \phi_0] \quad (14)$$

ϕ_0 是由于 C 引起的相移。即在象面的强度分布中, 除增加一个恒定的背景光外, 将可直接观察到物函数的位相起伏。(14)式就是细丝检验法显示位相的基础。这里关键的是在什么情况下 $f_0(x)$ 会接近于一个常数, $R(x)$ 趋近零, 从而(9)式可以过渡到(13)式。为此必须按不同的物理条件, 考查(9)式的渐近性状。

二、不同条件下的象面复波函数

关于 $f_0(x)$ 。由(12)式知, $f_0(x)$ 实际是两个正弦积分之和。 $f_0(x)$ 的值分布, 主要由光阑孔径和细丝宽度决定, 与物函数结构无关。这涉及到参量 d/d_0 的选取。下面将详细阐明, d/d_0 过大将使 $R(x)$ 中有较多不等

于零的项, 这些项的模值与 $f_0(x)$ 比较将不是很小, 有些将接近甚至超过 $f_0(x)$, 从而明显地影响位相显示。因此要确定最佳参量 d/d_0 , 就必须在 d/d_0 不是很大的情况下, 使 $f_0(x)$ 有恒定值, 或在 x 足够大的变化区间里, $f_0(x)$ 接近于一个常数。我们由微处理机计算了不同参量 d/d_0 值时的 $f_0(x)$ 分布曲线, 为方便将 x/D 作为函数变量, 其变化范围取 $0 \sim 1$ 。结果得到, 当 $d/d_0 = 1/3, 1/2, 2/3, 1.5, 2.5$ 时, $f_0(x/D)$ 的值在较大的范围里接近于恒量。其中当 $d/d_0 = 2/3$, x/D 在区间 $(0, 0.3)$; $d/d_0 = 1.5$, x/D 在区间 $(0, 0.7)$, 都有 $f_0(x/D) \sim 1$ 。图 1 给出上述五种参量时 $f(x/D)$ 与 x/D 的关系曲线。由于 $f_0(x)$ 是偶函数, 将所得结果对纵轴作对称变换, 就可得到 x 在整个 $(-D, D)$ 区间里的函数值。由图 1 可知, 选取这几种参量值, 如果条件 $|R(x)| \ll |C_0 f_0(x)|$ 同时成立, 则象面振幅函数就由 (9) 式演化为 (13) 式, 象面强度中就能较好地观测到位相分布, 尤其是在接近坐标原点的中心区域能按 (14) 式较为正确地显示位相。而当 $d/d_0 = 1/3, 1/2$ 和 1.5 时, 其精确度高的区域几乎占到整个图象宽度的五分之三。文献 [3] 中仅将 $d/d_0 = 2/3$ 作为最佳参量曲线, 导致这一片面结果的原因有二: 其一是该文作者将 $f_0(x) \sim 1$ 作为确定最佳参量的判据, 这显然是不必要的。因为细丝检验法显示位相的基础是 (14) 式, 它仅要求 $f_0(x)$ 在尽可能大的区间里近似于一个常数, 当然为了图象有足够的反差,

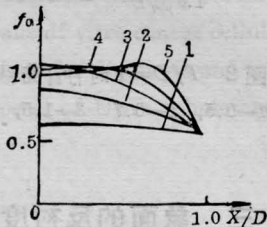


图1 不同参量 d/d_0 时的 f_0 曲线
 d/d_0 : 1—1/3, 2—1/2, 3—2/3
 4—3/2, 5—5/2

这个常数值不能太小; 其二是 [3] 文中计算跨度太大, 仅比较了 $d/d_0 = 1, 2, 3$ 各值时的情况, 恰好疏漏了这中间 $d/d_0 = 1.5, 2.5$ 左右的情况, 而这时不仅也有 $f_0(x) \sim 1$, 且 $f_0(x) \sim 1$ 的恒定区间也比 $d/d_0 = 2/3$ 时大。

关于 $R(x)$ 。 $R(x)$ 是一个较为复杂的无穷级数, 其通项是位相物函数的傅里叶系数 (对非周期物是采样点值 $G(\frac{l\pi}{D})$) 和因子 $\frac{\sin(l\omega_0 - \omega)D}{l\omega_0 - \omega}$ 的傅里叶变换 $f_l(x)$ 的积。它与物函数的结构形式、光阑孔径、细丝宽度都有关。为估计 $R(x)$ 的值分布情况, 首先要指出由 (3) 定义的傅里叶系数 C_l 的递减率不低于 $\frac{1}{l}$ [4]。由于 $f(x)$ 满足狄里希利条件, 对 (3) 式分部积分可得:

$$C_l = \frac{1}{2Tli} [f(-T_+) - f(T_-) + \int_{-T}^T f'(x) e^{-ilx} dx] \quad (15)$$

对 (15) 式取模数并考虑到方括号中的值与 l 无关, 得:

$$|C_l| \leq \frac{1}{2Tl} [|f(-T_+) - f(T_-)| + \int_{-T}^T |f'(x) e^{-ilx}| dx] < \frac{M}{l} \quad (16)$$

M 为常数。采用类似方法可证, 当 $f(x)$ 具有 K 阶导数并在满足某些连续性条件下, 其傅里叶系数递减率不低于 $\frac{1}{l^{k+1}}$, 即存在常数 M , 使得:

$$|C_l| < \frac{M}{l^{k+1}} \quad (17)$$

显然, 上述推导和结论都适用于非周期结构的情况。

考查各级 $f_l(x)$ 的模值分布情况。如果 $f_l(x)$ 的模值随 l 迅速衰减, 且各级 $f_l(x)$ 模值远小于 $f_0(x)$, 则根据傅里叶级数系数的递减特性, 易于推出 $R(x)$ 模值可作为高阶小量。根据上节确定的能使 $f_0(x)$ 恒定分布较好的参量 d/d_0 和不同的物结构条件, 按 (11)

式逐级计算了一百三十多条 $f_i(x)$ 的模值分布曲线,定量地考查了 $f_i(x)$ 的衰减特性。典型结果概述于下。

1. 周期性位相物。当 T/D 很小,即位相物的周期与物有限宽 $2D$ 相比很小时,选取适当的仪器参量能很好地显示位相。当 $T/D=0.05、0.1、0.15$,直至 0.2 ,而 d/d_0 取 $0.5、0.7$ 和 1.5 时,各级 $f_i(x)$ 的模值衰减极快,几乎在 $|\frac{x}{D}| < 1$ 的整个区间里, $f_1(x)$ 的模值都在 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 数量级,与同样条件下的 $f_0(x)$ 相比完全可以忽略不计。如取 $d/d_0=2.5$,则 $f_1(x)$ 数值略微偏大些,但衰减仍然极快,数量级仍然相近。当 $T/D \geq 0.1$ 时,在 $0.6 < |x/D| \leq 1$ 的区间里, $f_1(x)$ 模值最大达到 2.5×10^{-1} 。因此如不计边缘畸变,当 $T/D \leq 0.2$, $d/d_0=0.5、0.7、1.5$ 和 2.5 时,象面振幅函数可近似用 (13) 式代替,位相变成强度显示。考虑到图象反衬度,这里没有给出 $d/d_0=1/3$ 的情况,这点将在下段叙述。

当 $T/D=1/4$,上述 4 个仪器参量条件下各级 $f_i(x)$ 模值仍然衰减较快,但 $f_1(x)$ 的情况却与前不同,具体计算结果如表 1。

表 1

d/d_0	$ f_1(x/D) $ 较小起伏量	较小量起伏区间 (x/D)	$ f_1(x/D) $ 最大起伏量	较大量起伏区间 (x/D)
0.5	5×10^{-2} $\sim 10^{-3}$	(0, 0.7)	1×10^{-1}	(0.7, 1.0)
0.7	5×10^{-2} $\sim 10^{-3}$	(0, 0.2)	1.4×10^{-1}	(0.2, 1.0)
1.5	5×10^{-2} $\sim 10^{-3}$	(0, 0.5)	2.1×10^{-1}	(0.5, 1.0)
2.5	5×10^{-2} $\sim 1 \times 10^{-2}$	(0, 0.3)	4.8×10^{-1}	(0.3, 1.0)

由表可知, $f_1(x)$ 模值在较大的区间里有 10^{-1} 量级,与 $f_0(x)$ 相比已不是很小的量,难以忽略。但值得注意的是,当 $|x/D| < 0.5$ 时, $f_1(x)$ 模值仍然很小, (13) 仍近似正确。显然在这种条件下,取 $d/d_0=0.5$ 和 1.5

的结果较好。

当 T/D 进一步增大时, $f_i(x)$ 模值的衰减变得缓慢,各曲线的波动幅值也更大,这实际上已接近于下面叙述的非周期结构情况。

2. 对于 $\varphi(x)$ 为非周期的位相物,由频域采样定理,这相应于 $T/D=1$ 的情况。这时 $f_i(x)$ 的模值衰减最为缓慢,这些项与 $f_0(x)$ 相比已不是小量,它们都接近甚至大于 $f_0(x)$ 的值。图 2 给出 $l=3、4$ 时不同参量的 $|f_i(x/D)|$ 曲线。尽管在选取不同 d/d_0 值时, $f_i(x)$ 模值的衰减速度有差别,其幅值大小及变化范围也不同,但相同的是 $R(x)$ 已不能作为微量忽略不计,除非物函数的傅里叶系数除零级外,其余各级都有 $O_i \sim 0$ 。因此当 T/D 较大,直至 $T/D=1$ 的非周期位相物,象面复振幅函数不能由 (9) 式演化到 (13) 式,而是一个复杂的和式。由于各级分量的互相叠加,形成复杂的干涉,最后得到的是模糊和畸变了位相分布。由于 d/d_0 值较小时, $|f_i(x)|$ 波动幅值较小,衰减速度也较快,这将能使显示图象得到改善。计算表明,当 T/D 较大时,较好的仪器参量是 $d/d_0=0.5、1.5$ 和 0.7 。

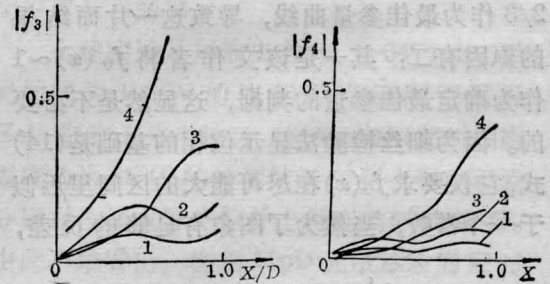


图 2 $T/D=1$ 时 $|f_i|$ 曲线

d/d_0 : 1—0.5, 2—0.7, 3—1.5, 4—2.5

三、象面的反衬度

要使光学系统显示的位相能被观测,象面的强度分布必须有足够大的反衬度。这里

进一步研究细丝检验法中不同结构位相物图象反衬度和仪器参数的关系。我们选取一个非周期结构的位相物为例。如设：

$$f(x) = \begin{cases} e^{i\alpha(1-\frac{|x|}{L})} & |x| \leq L \\ 1 & L < |x| \leq D \end{cases} \quad (18)$$

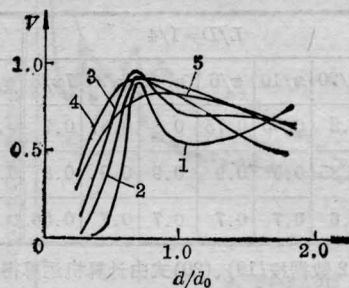
其中位相函数 $\varphi(x)$ ，当 $|x| \leq L$ 时是一个三角函数；当 $L < |x| \leq D$ 时等于 0。位相起伏的大小、变化的范围可由不同的 α 和 L 值表征。选取(18)式所示的非周期位相函数具有一般意义，其最终结果也易于推广到周期位相物的情况。为简化，我们按(9)式取象面振幅函数的一级近似，即取：

$$R(x) = \sum_{l=\pm 1} C_l f_l \exp(il\omega_0 x) \quad (19)$$

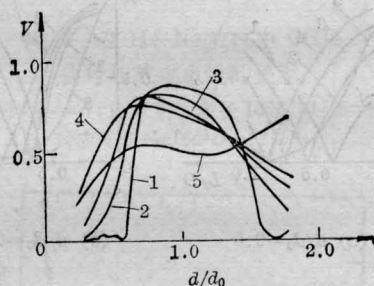
C_l 、 f_l 分别由(6)和(11)式给出。反衬度将取位相起伏最大的 $x=0$ 和转向最小的 $x=L$ 点的强度值按下式进行计算：

$$V = \frac{I(0) - I(L)}{I(0) + I(L)} \quad (20)$$

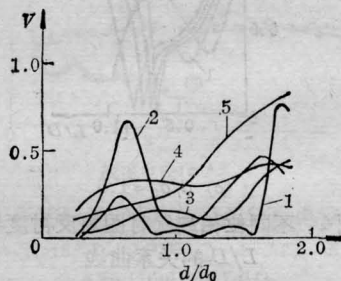
不难想象，象面的反衬度和位相起伏的大小、位相起伏范围与物有限宽度的比值 L/D 有关。图 3 给出不同 α 值时反衬度和仪器参数 d/d_0 的关系曲线。由图 3 可知，象面图象的反衬度与仪器参数、位相物结构形式都密切相关。根据曲线形状和计算机运算结果分析，大致可得如下几个结论：(1) 当位相起伏很小即 α 值很小时，象面反衬度与 d/d_0 的关系很大。这时如 d/d_0 太小，就会因反衬度太低无法从象面显示位相。例如当 $L/D=1/4$ 时，如 α 值为 $\pi/20$ 和 $\pi/10$ ，则要取 $d/d_0 \geq 0.5$ 才能有足够的反衬度。(2) 当位相起伏增大时，反衬度曲线变得平坦，随 d/d_0 变化较小。在 d/d_0 值较大的区间范围里，象面反衬度都足以被观测到。这将给 d/d_0 的选取带来方便。(3) 计算表明，在所给物函数条件下，当 $L/D \geq 2/5$ 时，将出现负的反衬度。这是由于随着 L/D 的增加，象面振幅函数零级分量 $C_0 f_0$ 的模值在 ω 的某些区域超过了原物函数 $f(x)$ 的模值，以至出现负的反衬度。



(a) $L/D=1/4$



(b) $L/D=2/5$



(c) $L/D=2/3$

图 3 不同位相起伏时象面强度反衬度 V 与参量 d/d_0 的关系曲线

α : 1— $\pi/20$, 2— $\pi/10$, 3— $\pi/6$, 4— $\pi/3$, 5— $7\pi/3$

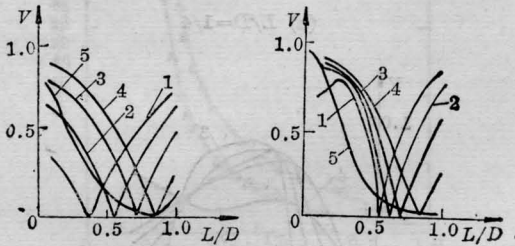
表 2 给出不同物结构条件下几个较好参量的反衬度计算值。

需要进一步指出的是，物位相起伏的范围“ $2L$ ”，更严格地说是 L/D 的大小，对于图象的反衬度、位相显示的优劣有着较大的影响。下面我们直接给出不同 α 值时位相显示反衬度与 L/D 之间的关系曲线(图 4)。图 4 中各反衬度曲线梯度在横轴上间断点相应于反衬度从正变为负。当 L/D 超过曲线的

表 2 不同物结构条件下几个较好参量的反衬度计算值(V)

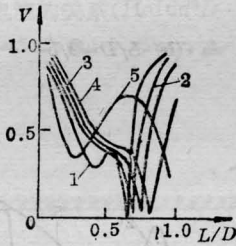
d/d_0	$L/D=1/4$						$L/D=2/5$						$L/D=2/3$					
	$\pi/20$	$\pi/10$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$7\pi/3$	$\pi/20$	$\pi/10$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$7\pi/3$	$\pi/20$	$\pi/10$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$7\pi/3$
0.5	0.2	0.55	0.75	0.8	0.87	0.7	0.06*	0.3	0.55	0.7	0.7	0.5	0.5*	0.2*	0.05	0.23	0.3	0.2
0.7	0.85	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.55	0.5*	0.1*	0.15	0.3	0.35	0.2
1.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.56	0.35	0.4	0.45	0.45	0.46	0.57	0.4*	0.02*	0.21	0.35	0.4	0.7

注: 表 2 数据按(19)、(20)式由计算机运算得到, 物函数按(18)式定义。数据右角打*者表示该点反衬度为负。



(a) $d/d_0=0.5$

(b) $d/d_0=0.7$



(c) $d/d_0=1.5$

图 4 不同位相起伏时图象反衬度与 L/D 的关系曲线

α : 1— $\pi/20$, 2— $\pi/10$, 3— $\pi/6$, 4— $\pi/3$ 5— $7\pi/4$

这一转变点时, 象面将仍然显示位相, 只是象片黑白变得相反。

在细丝检验方法中, 了解反衬度曲线的转变点的分布应是有意义的。因为在转变点邻近的区域反衬度都较小, 位相分布就难以被观测得到。由上述条件的计算结果表明, 转变点的分布主要与位相物位相起伏的大小有关, 与 d/d_0 值的关系较小。现将某些条件下反衬度曲线的转变点(L/D 值)列于表 3。

反衬度曲线的形式, 转变点的分布以及转变点附近曲线的梯度, 都直接反映图象质量。从上面结果可以看到, $d/d_0=0.5$ 、 0.7

表 3

α	$\pi/20$	$\pi/10$	$\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/3$	$7\pi/4$
d/d_0						
0.3	0.37	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95
0.5	0.37	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95
0.7	0.55	0.60	0.67	0.75	0.80	—
1.0	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	—
1.5	0.58	0.62	0.70	0.75	0.80	—

和 1.5 都是较好的参量。它们对于不同位相结构的物函数, 反衬度值平均都较高, 反衬度曲线在转变点附近都很陡直, 从而在 L/D 较宽的变化范围内, 即对于位相起伏范围较大的位相物, 其位相也能得到较好的显示。其中 $d/d_0=1.5$ 情况更好些, 特别是对位相起伏大的位相物。例如 $\alpha=7\pi/4$ 的物函数, 取 $d/d_0=0.5$ 和 0.7 时, 只有当 $L/D < 0.4$, 反衬度 $V > 0.2$, 当 $L/D > 0.4$, V 很快变小并趋于 0; 而取 $d/d_0=1.5$, 则几乎在 L/D 的全部区间 $(0, 1)$, 反衬度 V 都在 $0.2 \sim 0.9$ 之间, 效果显然要好些。

四、计算机模拟显示实例

为进一步阐明上述有关结论, 我们给出计算机模拟细丝检验法位相显示的实例。取正弦型位相物为:

$$f(x) = \exp[ia \sin m \pi x] \quad |x| \leq 1 \quad (21)$$

假设物的有限半宽度 D 也等于 1。为与象面强度分布相比较, 取(21)的实部:

$$\text{Re } f(x) = \cos(a \sin m \pi x) \quad (22)$$

图5给出位相物实部曲线, 其中 $\alpha=1.5$, $m=5$ 。这是周期性结构, $T/D=1/5$ 。由前面的研究, 已知此时如取 $d/d_0=0.5$ 、 0.7 和 1.5 , 象面振幅函数就可近似由(13)式给出, 而强度分布则就是:

$$I(x) = 1 + C_0^2 f_0^2(x) - 2C_0 f_0 \cos(\alpha \sin m \pi x) \quad (23)$$

其中 $f_0(x)$ 由(6)式给出。图6是不同仪器参量时象面强度分布曲线, 这个分布就是细丝检验法显示的物函数位相分布(实部)。其中曲线沿纵轴方向的上移是强度分布中恒定背景所致, 为便于用图表示和比较, 我们舍去了(23)中的恒量1, 且不考虑由于零级傅里叶项 C_0 正负不同可能引起的相移。比较图5和6可以看出, 在所定的物函数和仪器参量条件下, 象面都能较好地显示原物函数的位相, 各曲线除边缘有明显畸变外, 在靠近坐标中心的区域内畸变很小。其中图6(a) $d/d_0=0.5$, 曲线在较宽范围内符合原物位

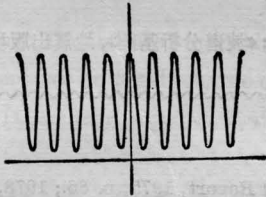
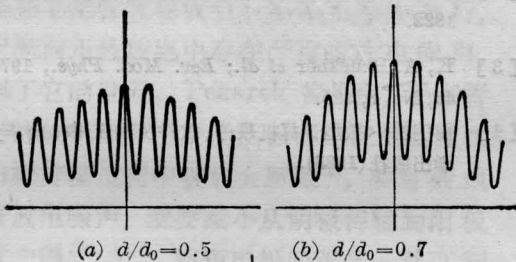
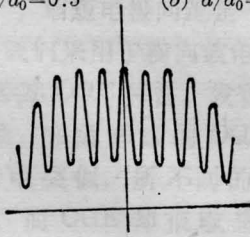


图5 物函数 $f(x)$ 位相曲线(实部)



(a) $d/d_0=0.5$

(b) $d/d_0=0.7$



(c) $d/d_0=1.5$

图6 不同参量条件下计算机模拟细丝检验法在象面显示的原物函数位相曲线

相, 但波动幅值变小。这是由因子 $C_0 f_0(x)$ 引起, 因为当 $d/d_0=0.5$ 时, $f_0(x)$ 的恒定值是 0.8 左右。这通常不影响再现物位相, 但图象的反衬度将略为降低。按(16)式计算不同条件下的反衬度 V , 结果是 $d/d_0=0.5$ 时, $V \sim 0.25$, 其他两个参量时 V 约为 0.3 , 都在可观测的范围。由图6也可看出, (c) 所示 $d/d_0=1.5$ 时象面曲线比其他几种情况更好些, 畸变较小。为定量比较各曲线对于原曲线的偏差程度, 我们按下式计算各不同参量时的均方误差:

$$D = \sum_{i=1}^N |C_0^2 [f_0^2(x_i) - \bar{f}_0^2] + 2C_0 \cos(\alpha \sin m \pi x_i) [f_0(x_i) - \bar{f}_0]| \quad (24)$$

式中扣除了恒定背景光, 并对原曲线也乘上线性因子 $2C_0 \bar{f}_0$ 。计算对整个变量区间 $|x| \leq 1$ 进行, 取样点 $N=128$, 步度 $T=0.0156$ 。对 $d/d_0=0.5$ 取 $\bar{f}_0=0.8$, 其余参量时均取 $\bar{f}_0=1.0$, 最后将 D 按取样总值平均得平均偏差 δ 。计算结果为: 当 $d/d_0=0.5$ 和 1.5 , 平均偏差都在 0.1 以下; $d/d_0=0.7$, 平均偏差稍大, 为 0.16 。如计算 $|x| \leq 0.6$ 区间内误差, 即考虑在图象中心区域(宽度的五分之三范围)位相显示精度, 所得结果: $d/d_0=0.5$, 平均偏差 $\delta=0.06$; $d/d_0=0.7$, $\delta=0.07$; $d/d_0=1.5$, $\delta=0.03$; 重现物函数位相的精度较高。由上可知在所得的几个仪器参量中, $d/d_0=1.5$ 结果最佳。作为比较, 图7给出 $d/d_0=2.0$ 时计算机模拟结果。图中虽也显示位相起伏, 但整个象面曲线都有严重畸变, 与原物位相离甚远。误差估计表明, 此

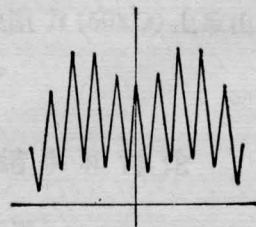


图7 $d/d_0=2.0$ 时计算机模拟位相显示的结果

时图象的平均偏差已在 0.2 以上。

综上所述,我们所得到的主要结果为:

(1) 细丝检验法显示物函数位相的图象象质,与物函数结构参量、纹影仪的各种参量密切有关。一般说,只有对某些种类的周期性位相物($T/D \leq 1/4$),适当地选择仪器参量(如取 $d/d_0 = 0.5$ 、0.7 和 1.5),能在象面较好地重现原物函数位相,且在象面中心区域重现精度很高。对于 $T/D > 1/4$ 的周期性位相物直至 $T/D = 1$ 的非周期物,象面振幅函数将有较复杂的形式,用细丝方法得到的将是畸变和模糊的位相图象。

(2) 用细丝检验法得到的位相图象的反衬度主要与物函数位相起伏的大小、 L/D 及 d/d_0 有关。由于零级傅里叶分量的起伏,将使图象出现负反衬。图象正负反衬度转变点的分布主要与物函数位相起伏的大小有关。反衬度转变点近旁就是反衬度小的区域,相应于观测不到位相显示的情况。

(3) 在通常情况下, d/d_0 太小(如在 0.3

以下),图象的反衬度较小。 d/d_0 增大,反衬度也增大,曲线较平稳,而且各曲线在反衬度转变点的陡度也增大,这个区域一直延展到 $d/d_0 \sim 2.0$ 左右。但 d/d_0 过大(如 > 2.5),象面振幅函数不接近于零的项数明显增加,将使位相图象的畸变更严重。此外在位相物重现中,必须适当选取 d/d_0 值使象面函数零级分量接近于一个常数。在兼顾到足够反衬度和畸变、误差最小的条件下,求得 $d/d_0 = 0.5$ 、0.7 和 1.5 都是较好的仪器参量,且在较宽的范围条件下, $d/d_0 = 1.5$ 情况最好。

参 考 文 献

- [1] D. 马拉卡拉主编;《光学车间检验》,机械工业出版社,1983.
- [2] L. A. Vasilev; Schlieren Methods. Israel Program for Scientific Translations, New York, 1971.
- [3] B. И. Геродецкая и др.; *Опт. уснектр.*, 1983, 54, 167.
- [4] 郑治真;《波谱分析基础》,地震出版社,1979.

(上接第 546 页)

主光路光束的角漂移为 $0.5''$, 轴漂移为 $102 \mu\text{m}$ 。

实验中,激光功率的时间起伏由计算机编程得以消除。

参 考 文 献

- [1] Lawrence Livermore Laboratory; *Laser Program*

Annual Report, 1975, p. 86.; 1978, Vol. 2, p. 5.

- [2] J. C. Fouere *et al.*; *Appl. Opt.*, 1974, 13, No. 6, 1322.
- [3] K. A. Bruekner *et al.*; *Rev. Mod. Phys.*, 1974, 46, No. 2, 325.
- [4] 周明德;《微型计算机硬件、软件及其应用》,清华大学出版社(1983).