

# 一种便于使用的平面重程干涉测量法

向才新 杨林

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

## 提 要

在 Fizeau 平面干涉仪上, 配备一 Twyman 型分束器, 以构成一种便于使用的平面重程干涉测量法。误差分析指出: 这种结构可以实现, 有一定实用价值。实验表明: 检测低反射光学元件, 其灵敏度比之通常的 Fizeau 平面干涉法高 1~2 倍, 检测高反射光学元件, 则可提高 7~9 倍。

## 一、前 言

光学平面元件加工很需要一种高灵敏度的目测干涉仪。为此, Langebeck 曾提出 Twyman 型和 Fizeau 型两种平面重程干涉法<sup>[1]</sup>。但前者不易作成检测大尺寸平面部件的仪器, 而后者在使用时, 必须调整零级和第  $N$  级反射像点通过预定的光阑孔, 并用一光栅与干涉场重叠, 形成 Moire 条纹, 以改变 Moire 干涉条纹的宽度, 因而这种方法不便使用。为了克服 Langebeck 的两种方法之不足, 我们提出了一个新方法。

## 二、原理和结构

我们的方法是: 在 Fizeau 平面干涉仪上, 配备一 Twyman 型分束器, 如图 1 所示, 虚线框内为 Twyman 型分束器,  $O_2$ 、 $O_3$  为准直物镜,  $M_4$ 、 $M_3$ 、 $M_2$  分别为分束器、反射平面镜和变透过率平面镜。

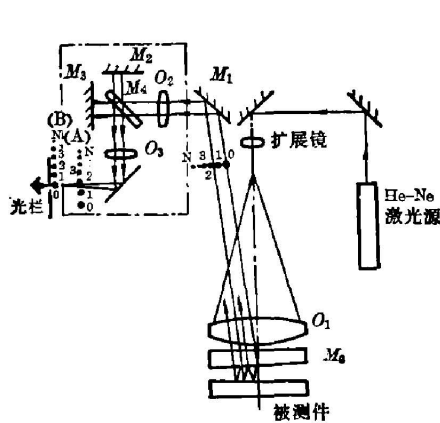


图 1

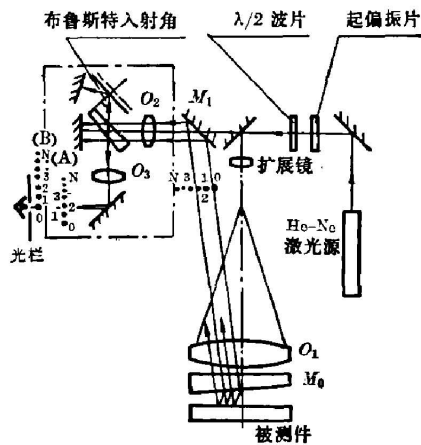


图 2

收稿日期: 1982年4月21日, 收到修改稿日期: 1982年10月17日

He-Ne 激光通过扩展镜聚焦于准直物镜  $O_1$  的焦点处, 通过  $O_1$  后形成准直光, 在半反射标准平面镜  $M_0$  处部分反射(命名为零级光)和折射, 该折射光在  $M_0$  与被测平面之间, 形成多次反射(命名为 1、2、3、...、 $N$  级反射), 所有这些反射光在  $O_1$  的焦点处形成所谓 0 级、1 级、2 级、...、 $N$  级等  $(N+1)$  个像点,  $O_2$ 、 $O_1$  两者的焦点相重合。这些反射像点的光束通过 Twyman 型分束器后, 在  $O_3$  的焦点处, 形成两组像点。其中, 比如 A 组由  $M_3$  反射, 而 B 组由  $M_2$  反

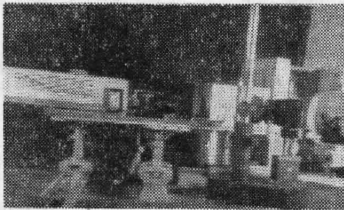


图 3

射后, 通过  $O_3$  所形成的像点。转动  $M_2$ , 使 B 组“0”级像点与 A 组“1”、“2”、...、“ $N$ ”级中的某一像点相重合。即把 B 组“0”级视作参考光束, 而把 A 组各级视作检测光束。在  $O_3$  的焦面处, 放置一狭缝, 只使两重合像点的光束通过狭缝。通过狭缝来观测 B 组“0”级光束与 A 组中任一级光束的相干条纹, 从而实现重程干涉法。这个调校、使用过程, 如同通常的 Twyman 或 Fizeau 干涉仪

一样, 是很方便的。依照上述原则, 我们作了一台实验装置, 如图 3 所示。

### 三、干涉方程和误差

设  $O_1$ 、 $O_2$  和  $O_3$  的像差分别为  $W_{01}$ 、 $W_{02}$  和  $W_{03}$ ;  $M_0$ 、 $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$  以及被测平面的面形差分别为  $W_0$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$  ( $W_4'$ )\* 和  $W_{测}$ 。参考光束, 即零级光束由  $M_0$  的析光膜处至观测处的总波面像差为:

$$W_{参} = W_{01} + W_{02} + W_{03} + 2(-nW_0 + W_2) + W_4 \quad (1)**$$

(1) 式中,  $n$  为  $M_0$  的折射率。

被测光束“1”级、“2”级、...、“ $N$ ”级等反射光束, 在被测面反射后, 相互横移。当光束的“往”、“返”光路的相对横向移动量不特别大, “返”光路的波面像差表示式可以视作“往”光路波面像差表示式的坐标平移。故第“ $N$ ”级被测光束的波面像差表示式为:

$$\begin{aligned} W_{N级} = & W_{01} + N \cdot \epsilon_{01} (\partial W_{01} / \partial \rho_1) + W_{02} + N \cdot \epsilon_{02} (\partial W_{02} / \partial \rho_2) \\ & + W_{03} + 2(N-n) \cdot W_0 + N(N+n-2) \cdot \epsilon_{01} (\partial W_0 / \partial \rho_1) \\ & + W_4' + 2W_3 + 2N \cdot W_{测} + N \cdot (N-1) \cdot \epsilon_{01} (\partial W_{测} / \partial \rho_1) \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式中,  $\epsilon_{01}$ 、 $\epsilon_{02}$  分别为被测光束在  $M_0$  处和  $M_2$ 、 $M_3$  处相对于参考光束的横移量;  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  分别为光线在  $M_0$  和  $M_2$ 、 $M_3$  处的位置坐标。  $\epsilon_{01}$ 、 $\rho_1$  和  $\epsilon_{02}$ 、 $\rho_2$  分别以  $M_0$  和  $M_2$ 、 $M_3$  处的通光半径为参量, 取归一化值。由 (1)、(2) 式之差, 得到重程干涉方程为\*\*\*:

$$\begin{aligned} W = & N \cdot \epsilon_{01} \cdot \frac{\partial W_{01}}{\partial \rho_1} + N \cdot \epsilon_{02} \cdot \frac{\partial W_{02}}{\partial \rho_2} + \left( 2N \cdot W_0 + (N+n-2) \cdot \epsilon_{01} \cdot \frac{\partial W_0}{\partial \rho_1} \right) \\ & + [(W_4' - W_4) + 2(W_3 - W_2)] + 2N \cdot W_{测} + N(N-1) \cdot \epsilon_{01} \cdot \frac{\partial W_{测}}{\partial \rho_1} \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 式也适用于其它形式的重程干涉法。下面分别讨论  $O_1$ 、 $O_2$  的像差和  $M_0$  等光学件

\*  $W_4$ 、 $W_4'$  分别表示两种不同光路的光程差。

\*\* (1) 式中的  $2nW_0$  的符号应与 (2) 式中的相同, 为方便计, 现均取负号。

\*\*\* 还应考虑到波面变形传播的影响, 为简单起见, 这里没有写出, 可参考文献 [2], [3]。

面形差的影响, 以及使用条件。

### 1. 准直物镜 $O_1$ 的像差

$O_1$  的像差所衍生的误差表示式为(3)式右侧第一项。仅考虑初级波面球差时 ( $N \cdot \epsilon_{01} < 0.1$ ), 该式为:

$$W^{01} = N \cdot \epsilon_{01} \cdot \frac{\partial W_{01}}{\partial \rho_1} \doteq 4 N \cdot \epsilon_{01} \cdot W_{01} \quad (4)$$

(4)式表明: 当  $W_{01} \leq \lambda/4 \sim \lambda/8$ ,  $N \cdot \epsilon_{01} \leq 0.05 \sim 0.03$  时,  $W^{01} \leq 0.03\lambda \sim 0.01\lambda$ 。此条件不难实现。因此有可能使  $O_1$  的像差因检测波横移而衍生的误差可以忽略不计。

### 2. 准直物镜 $O_2$ 的像差

由  $O_2$  的像差所衍生的系统误差为(3)式右侧第二项所表示, 当  $N \cdot \epsilon_{02} < 0.1$ , 且仅考虑初级波面球差时, 该式可写为:

$$W^{02} = N \cdot \epsilon_{02} \cdot \frac{\partial W_{02}}{\partial \rho_2} \doteq 4 N \cdot \epsilon_{02} \cdot W_{02} \doteq 4 \left( \frac{S \cdot \Delta l}{f_2^2 (D_1/f_1)} \right) \cdot W_{02} \quad (5)$$

(5)式中:  $f_1$ ,  $f_2$  和  $D_1$ ,  $D_2$  分别为  $O_1$ ,  $O_2$  的焦距和通光口径;  $\Delta l$  为(B)“0”级与(A)“N”级两像点在  $O_1$ ,  $O_2$  焦面处的间距;  $S$  为  $O_2$  至  $M_2$  或  $M_3$  之间距。由(5)式知: 选取小的  $S$  和  $\Delta l$  值、大的  $f_2$  和  $D_1/f_1$  值, 有利于减小  $W^{02}$  值。比如当  $W_{02} = \lambda/8$ ,  $\Delta l = 3$  时, 选取  $f_2 = 150$ ;  $D_1/f_1 = 1/4$ ;  $S = 50$ , 则有  $W^{02} \doteq 0.01\lambda$ 。因此, 也有可能, 使由  $O_2$  的像差所衍生的误差可以忽略不计。

在给定的使用条件下, 也可以设计  $O_1$ ,  $O_2$ , 使二者的衍生误差值相抵消或部分抵消。比如, 使其误差和  $\leq 0.01\lambda \sim 0.005\lambda$ 。

### 3. 标准平面镜 $M_0$ 的面形误差

$M_0$  的面形误差由(3)式右侧第三项所表示:

$$W^{N,0} = 2 N \cdot W_0 + N(N+n-2) \cdot \epsilon_{01} \cdot (\partial W_0 / \partial \rho_1) \quad (6)$$

当  $M_0$  的质量较好, 检测光束的相对横移量不大时, 比如当  $n = 1.5$ ,  $N \epsilon_{01} \doteq 0.02$ ,  $(\partial W_0 / \partial \rho_1) \doteq 0.01$  时, 对  $N = 5$  级检测波, 有  $N(N+n-2) \cdot \epsilon_{01} \cdot (\partial W_0 / \partial \rho_1) \sim 0.001\lambda$ , 而  $2 N \cdot W_0$  远大于此项值, 因此(6)式可表示为:

$$W^{N,0} \doteq 2 N \cdot W_0 \quad (7)$$

(6), (7)式和后面的被测件面形差表示式(9), (11)式, 都与  $N$  有相同的比例关系。这就表明:  $M_0$  的精度要求与通常的 Fizeau 干涉仪的基本相同。

$M_0$  的面形差不同于  $O_1$ ,  $O_2$  的像差, 只有研磨才能减小其误差量。因此与通常的 Fizeau 干涉仪一样,  $M_0$  的面形差仍将是决定重程干涉仪质量的重要精度指标。

### 4. 平面镜 $M_2$ , $M_3$ 和分束器的面形差

Twyman 型分束器中的  $M_2$ ,  $M_3$  和分束器的面形差表示式为(3)式右侧第四项:

$$W^{n,n} = (W_4 - W_4) + 2(W_3 - W_2) \quad (8)$$

$W^{n,n}$  不同于  $W^{n,0}$ , 后者随  $N$  递增而增加, 而前者与  $N$  无关。因此提高检测波的级数  $N$ , 有利于降低 Twyman 型分束器的精度要求。

一般精度的目测,  $M_0$  的面形差为  $\lambda/20 \sim \lambda/30$ 。若  $W^{n,n} \doteq \lambda/30 \sim \lambda/40$ , 则当  $N \geq 2$  时, 由(7)、(8)式, 有  $W^{n,n} / W^{n,0} \leq 0.25$ , 故  $W^{n,n} \leq \lambda/30 \sim \lambda/40$  可以略去不计。另一方面, 小于

或等于瞄准误差的系统误差可以略去不计,故  $W^{s, \theta} \leq \lambda/30 \sim \lambda/40$  也可忽略。对于高精度目测,  $M_0$  和 Twyman 型分束器的精度, 或检测波的级数必须相应提高, Twyman 型分束器的误差量才能被忽略, 比如  $M_0$  的面形差小于  $\lambda/50 \sim \lambda/100$ , 除非  $W^{s, \theta} < \lambda/50$ , 否则, 检测波的级数至少增加到  $N=3, 4$ 。

Twyman 型分束器中诸平面镜的面积较小, 通过“手修”, 可使其总系统误差小于  $\lambda/30 \sim \lambda/40$ , 或更小一点。

综前所述, 作一般精度目测, 在一定使用条件下, 当  $N \geq 2$  时,  $O_1 O_2$  像差的衍生误差和  $\leq 0.01\lambda \sim 0.02\lambda$ ; Twyman 型分束器总面形差  $\leq 0.02\lambda \sim 0.03\lambda$ ;  $M_0$  的面形差最大, 为  $0.1\lambda$  或  $0.07\lambda$ 。这时, 总系统误差为  $0.13\lambda \sim 0.15\lambda$  或  $0.1\lambda \sim 0.12\lambda$ 。显见, 总系统误差值主要取决于  $M_0$  面形差的大小, 其它三项误差可以忽略不计, 尽管该三项误差的存在, 使总误差略有增加。正如前述,  $M_0$  的面形差是决定重程干涉仪的重要精度指标。对高精度目测, 也可以得到相同结论, 不再赘述。

### 5. 外移效应和被测面形误差

被测面形差为(3)式右侧最末两项所表示:

$$W^{\text{测}} = 2N \cdot W_{\text{测}} + (N-1) \cdot N \epsilon_{01} \cdot \frac{\partial W_{\text{测}}}{\partial \rho_1} \quad (9)$$

(9) 式中  $(N-1) \cdot N \cdot \frac{\partial W_{\text{测}}}{\partial \rho_1}$  是由外移动效应产生的被测面形差的误差值。为消除该误差对  $W_{\text{测}}$  测值精确度的影响, 应有

$$N(N-1) \cdot \epsilon_{01} \cdot \frac{\partial W_{\text{测}}}{\partial \rho_1} \ll 2N \cdot W_{\text{测}} \quad (10)$$

这时, (9)式可简化为

$$W^{\text{测}} = 2N \cdot W_{\text{测}} \quad (11)$$

有两种情况满足(10)、(11)式: (1)  $W_{\text{测}}$  为常数, 如平行于检测波横移方向的等深度划痕; (2) 对于某测定点处, 在光线横移区间内,  $W_{\text{测}}$  的变化量远小于该点的  $W_{\text{测}}$  值, 如不特别坏的面形差缓慢变化的抛光平面镜。对于骤变的面形差, 则不一定满足(10)、(11)式。对于这种情况, 使用重程干涉仪时应特别注意。

## 四、灵 敏 度

重程干涉法的灵敏度取决于可以目视到的检测光波的最高级数。因而, 其灵敏度与光路方式、光源强度、被测件的反射率和仪器的杂光值有直接关系。检测波强度因被测件反射率的降低而急骤下降, 因而可目视检测波的级数和重程干涉法的灵敏度也急骤下降。我们按图 1、图 6、图 7 实验, 得到如表 1 所示结果\*:

图 4 和图 5 是检测低反射光学件时, “0”级参考光与“1”、“2”级检测光波的干涉图。由于杂光较大, 光源功率较低, 虽然观察到“3”级检测波的像点, 但没有观察到该波与“0”级参考光的干涉条纹。

看来, 检测低反射光学件, 把灵敏度提高一倍, 并不困难。但若提高 2 倍, 则必须大大提

\* 按照 Langebeck 的方案<sup>[1]</sup>, 其结果也绝不会比我们的好。

表 1

H <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> 激光源 (W)	被 测 件 的 反 射 率			
	0.04		0.9	
	最高可目视到的检测波级数	能观测到干涉条纹的检测波级数	最高可目视到的检测波级数	能观测到干涉条纹的检测波级数
1 mW	2	1	3	2
4 mW	3	2	7	6
14 mW	3	2	9	8

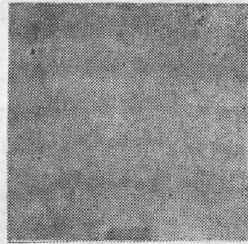


图 4

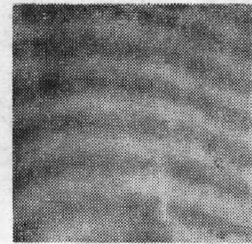


图 5

高光源强度,减小杂光;对于高反射光学件,灵敏度提高到7~9倍是易于实现的。

## 五、光强匹配

使用时,只采用某一特定级检测波,这时为获得两相干光束强度的较好匹配,只须将  $M_2$  镀以合适的析光膜或增透膜。当须连续改变参考光束强度,以与各级检测光束强度相匹配,则采用如图2所示的偏光干涉。参考光束以布儒斯特角入射在未镀膜平面镜上,此平面镜可视为一透过率为0.15的偏振器,旋转半波片来改变参考光束强度。

当起偏器和检偏器的晶轴与垂直通过半波片的某一偏振光的振动方向平行时,通过检偏器后可能得到的最低光强为<sup>[4]</sup>:

$$I = 0.15I_0 \cdot \cos^2\left(\frac{\pi + \delta}{2}\right) = 0.15I_0 \cdot \sin^2\left[\frac{\pi}{\lambda}(n_o - n_e) \cdot \Delta h\right] \quad (12)$$

(12)式中,  $\delta$  为半波片偏离理论厚度的加工误差  $\Delta h$  所引起的附加程差;  $n_o$ 、 $n_e$  分别为半波片的寻常与非寻常折射率;  $I_0$  为入射光强。由(12)式,若  $\Delta h = 0.01$ , 则有  $I/I_0 \approx 0.03$ , 即参考光束强度较大,而不能很好地与最低强度的检测光束强度\*相匹配。因此半波片的加工误差是很严格的。为此使半波片的加工厚度比其理论的略薄,使用时,略倾斜波片,使光束斜入射通过半波片的厚度与其垂直入射通过时的理论厚度相等。

## 六、其它形式的 Twyman 型分束器

Twyman 型分束器也可以采用图6~图8的各种形式:

\* 最低强度的检测光束强度与入射光强之比  $\leq 0.0004$ 。

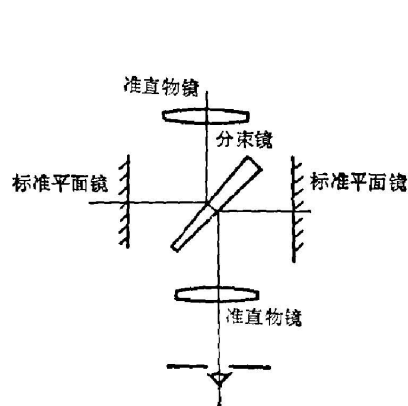


图 6

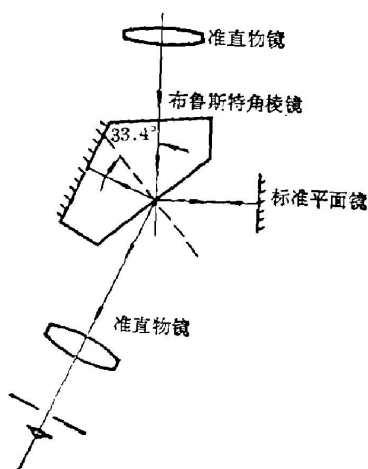


图 7

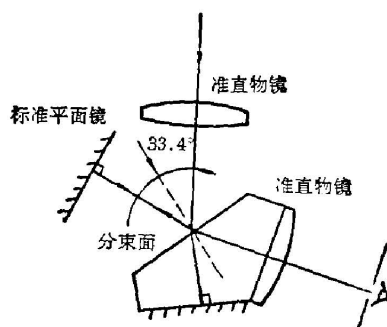


图 8

图 6 型的优点是：增加分束镜的透过率，可以提高检测光束的强度，因而有利于提高方法的灵敏度。图 7 和图 8 型的优点是结构简单紧凑，且前者采用偏光，如同图 2 型，可以连续改变光束强度。图 7 型的缺点是：折射时，在与棱镜主截面平行和垂直的两方向，光束缩小比不相同，因而折射光束横截面形改变。对于图 8 型，当入射角较小时，这种改变可以很小。

## 七、结 论

理论和实验证明：我们的方法，也可以说，所有重程干涉法、检测低反射件，其灵敏度和测量精度较之通常的双光束干涉法，可以提高 1~2 倍；检测高反射件，则可提高 7~9 倍。

仪器实际精度取决于  $M_0$  的面形差，其次是 Twyman 型分束器面形差和检测波级数，其它衍生误差有可能使其忽略不计。

采用 Twyman 型分束器，调整使用是方便的，但为了消除其系统误差的影响，其制造加工也是要求比较严格的，此是其缺点。

## 参 考 文 献

- [1] P. Langenbeck; *Appl. Opt.*, 1967, **6**, No. 8 (Aug), 1425.  
P. Langenbeck; *Appl. Opt.*, 1969, **8**, No. 3 (Mar), 543.
- [2] R. Kingslake; *Trans. Opt. Soc.*, 1926~1927, **28**, No. 1. 1.
- [3] D. Malacara; *«Optical Shop Testing»*, (John Wiley & Sons), 68.
- [4] M. Born, E. Wolf; *«Principles of Optics»*, (Pergamon Press, 1959), 692.

**A plane multipass interferometry convenient for using**

XIANG CAIXIN AND YANG LIN

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)*

(Received 21 April 1982, revised 17 October 1982)

**Abstract**

Providing the plane Fizeau interferometer with a Twyman-model beam splitter, authors have accomplished a plane multipass interferometry which is easy to operate. The errors analyses point out that: such arrangement is realizable and valuable for practical applications. Experiments show that its sensitivity is 1~2 times higher than the conventional Fizeau interferometer for testing the polished uncoated optical elements, 7~9 times for high reflective coated surfaces.