

# 大口径等厚条纹型 F-P 干涉仪

贺安之 阎大鹏  
(华东工学院物理系)

## 提 要

本文论述了大口径等厚条纹型 F-P 干涉仪的工作原理, 指出了它具有对光学元件的材料要求较低, 抗震动干扰力强, 条纹定位精度高等优点。并研制成大口径、能在强震动环境条件下工作的瞬态干涉测试仪, 得到了火焰燃烧的干涉图, 火箭发动机真实燃气射流的流谱图。

## 一、引 言

1967年, A. Frohn<sup>[1]</sup>利用 He-Ne 激光为等厚条纹型 F-P 干涉仪<sup>[1]</sup>的光源, 测量模拟气体的浓度, 并预言可用于瞬态现象的研究。他们所研制的 F-P 干涉仪口径约为  $\phi 38$ , 干涉腔长为 76 mm。此后, 未见对 F-P 干涉仪更进一步的研究成果报道和有实用价值的口径较大的 F-P 干涉仪的出现。我们为了对燃烧、爆炸、火箭发动机喷流等高温强震动的瞬态流场进行测试, 就要求有一种长腔长, 大口径, 能在强震动环境下工作的干涉仪。经过研究分析比较了各种经典与近代干涉仪, 发现, 以单光路结构, 长干涉腔, 很短的曝光时间工作的等厚型 F-P 干涉仪能满足这一要求。由于干涉是在两平行平面镜内表面间发生, 故对光学材料要求较泰曼、马赫干涉仪低, 而干涉条纹的定位精度更高。同时, 以单光路形式工作, 便于对震动强、温度高的火焰、喷流流场进行干涉测量。我们已做成口径为  $\phi 150$ ,  $\phi 200$  的长程 F-P 干涉仪, 并利用它获得高温火焰的干涉图, 火箭发动机燃气射流的流谱图。

## 二、等厚条纹型 F-P 干涉仪的工作原理及特点

等厚条纹型 F-P 干涉仪的原理光路如图 1 所示, 干涉仪的主体是由两平行平面镜片  $M_1$ 、 $M_2$  组成的干涉腔; 用  $L_1$ 、 $L_2$  两透镜组成准直系统, 将相干性优良的激光光源扩展成优良的平行光, 使 F-P 干涉仪呈等厚干涉; 由透镜  $L_3$  和照相系统组成记录装置。下面就它的工作原理和特点进行讨论。

### 1. 干涉方程(有限宽条纹与无限宽条纹)

设该干涉仪的双镜内表面膜层反射率为  $R$ , 当它们成小倾角  $\alpha$  时, 用平行光入射形成多光束干涉。如图 2 所示, 在平行光垂直入射  $M_1$  情况下, 则第 1 个直接透射波和第  $N$  个透射波在间隔  $d$  处的位相差是<sup>[1]</sup>

$$\delta_N = N\delta - N^3\delta_1, \quad (1)$$

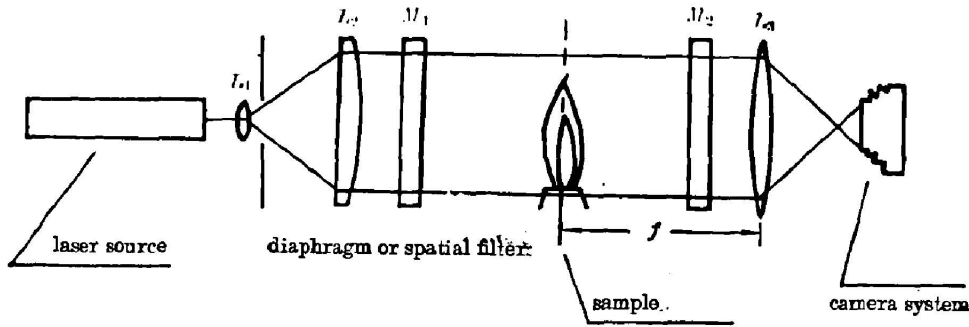


Fig. 1 Optical layout of the equal-thickness-fringe F-P interferometer

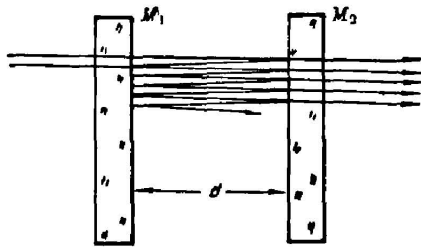


Fig. 2 Multiple reflections between the two mirrors

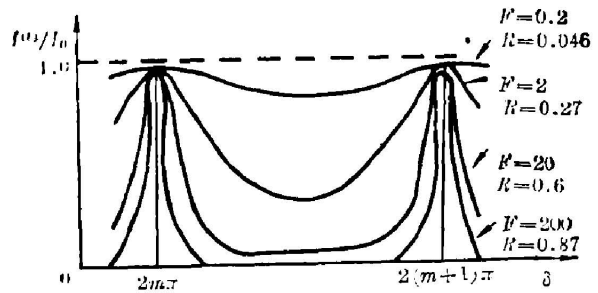


Fig. 3 Transmitted intensity distribution of multiple-reflection interference

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_0 d, \tag{2}$$

$$\delta_1 = \frac{8\pi}{\lambda} n_0 d \alpha^2, \tag{3}$$

$n_0$  为干涉腔内空气的折射率, 透射波的强度为

$$I = I_0 T^2 \left| \sum_{N=1}^{\infty} R^{N-1} e^{iN\delta} e^{-iN\delta_1} \right|^2, \tag{4}$$

其中  $T$  为透过率, 当倾角很小时, 透射光强取决于 (2) 式, 形成平行的、等间距的干涉条纹, 条纹的间隔为

$$S = \frac{\lambda}{2n_0 \alpha}, \tag{5}$$

称这种干涉条纹为有限宽条纹。当调节  $M_1$  平行于  $M_2$  时,  $\alpha \rightarrow 0$ , 间隔  $S \rightarrow \infty$ , 则称此全场均匀的所谓零场状态为无限宽条纹。

### 2. 大行程干涉腔

F-P 干涉仪的最小程差  $\Delta = 2n_0 d$ , 当两相干光波程差为所用激光器腔长  $L_0$  的偶数倍时, 即  $\Delta = 2n_0 L_0$ , 仍可得到最佳调制度, 反之光程差为  $L_0$  的奇数倍时, 调制度最差<sup>[3]</sup>。因此可将该干涉仪两镜的间距调成  $L_0$  的整数倍, 则干涉腔长达数米时皆可得到清晰的干涉条纹。

### 3. 条纹的锐度

F-P 干涉仪的条纹锐度比泰曼、马赫干涉仪的锐度好得多, 由 F-P 干涉仪的光强分布与位相差和反射率的关系曲线(见图 3)看出当  $R=0.64$  时, 干涉条纹的锐度就远比正弦曲线大得多, 条纹线宽和间隔之比为  $5:30=1/6$ , 而一般干涉仪的条纹线宽与间隔之比几乎为  $1:1$ , 显然 F-P 干涉仪的定位精度至少可达  $1/5\sim 1/6$  条纹间距, 而普通干涉仪则仅为  $1/2$  条纹间距。

### 4. 透过率、条纹锐度与对比度的选择

瞬态干涉仪曝光时间很短, 设计要求透过率愈高愈好, 透过率高, 则两平面镜的反射率  $R$  必然较低, 条纹锐度与对比度就较差, 因此, 三者是矛盾的。但处理这一关系的原则是在保证足够的条纹锐度的前提下来综合设计的。由上述关于条纹锐度的分析看出, 只要  $R>0.5$ , 即可得到优于普通干涉仪的锐度。对比度虽然较低, (在普通条纹上叠加均匀背影), 但可做到不影响测量精度。如用光电探测器探测信号, 可滤去直流信号成分, 得到良好的条纹分辨率。

选择  $R\sim 0.5$  左右, 透过率基本上和马赫干涉仪相近, 但条纹锐度比马赫干涉仪更高, 并有较高的条纹定位精度。

## 三、等厚条纹型 F-P 干涉仪用于流场温度测量及显示流谱

当 F-P 干涉仪的测试区域(干涉腔内)有折射率场变化(由于气流的温度或密度引起折射率变化), 对光束有扰动, 因此各处的位相差  $\delta$  不再为固定的常数, 这样在有限宽条纹的情况下, 将引起干涉条纹的位移。可根据位移值定量地推算出扰动场的温度或密度分布。对于二维折射率场, 计算温度的公式为

$$T = \frac{2(n_0 - 1) \cdot L \cdot T_0}{\lambda \epsilon T_0 + 2(n_0 - 1) \cdot L} \quad (6)$$

式中  $n_0$ 、 $T_0$  为未扰动场的折射率和温度,  $T$  是被扰动场的温度,  $L$  为扰动区域位置的函数,  $\lambda$  为所用激光的波长,  $\epsilon$  为条纹位移值。而实际上, 火焰、喷流、等离子弧等的流场呈对称分布, 故对它们可作三维计算, 如图 4 所示, 设  $z$  为光线传播方向, 对称轴为  $x$  轴, 折射率仅是  $r$  的函数, 并假定大于  $r_0$  的径向位置折射率分布均匀且为  $n_0$ , 在特定位置  $y$  偏离光线射线的条纹位移

$$\epsilon(y) = \frac{2}{\lambda} \int_{-r_0}^{r_0} [n(r) - n_0] dz, \quad (7)$$

Abell 反演<sup>[4]</sup>给出了这个积分方程的解为

$$\Delta n(r) = -\frac{\lambda}{2\pi} \int_r^{r_0} \frac{d\epsilon(y)/dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy, \quad (8)$$

根据 Gladstone-Dale 公式和理想气体状态方程, 可得到对称场的温度分布公式

$$T(r) = \frac{[n_0(r) - 1] - T_0(r)}{\Delta n(r) + [n_0(r) - 1]}, \quad (9)$$

我们用 F-P 干涉仪得到的酒精喷灯火焰的干涉图如图 5 所示。将(8)、(9)式编译成计算机

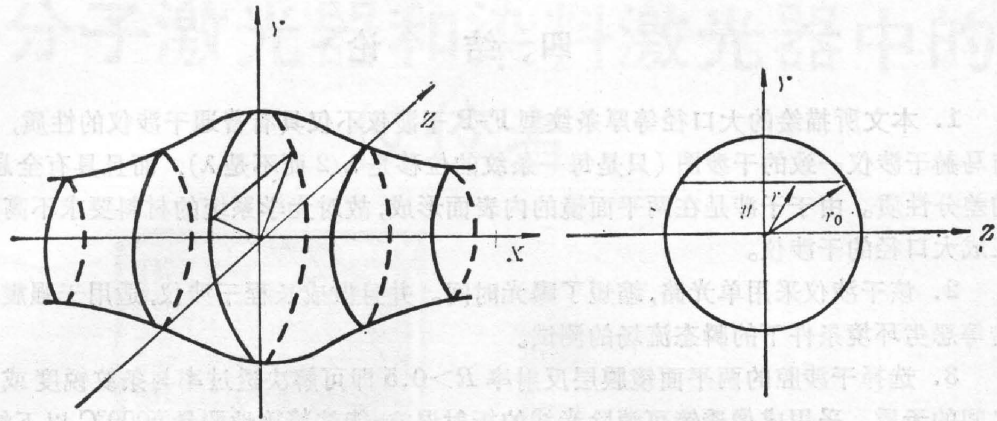


Fig. 4 Axial-symmetric stereogram and cross section

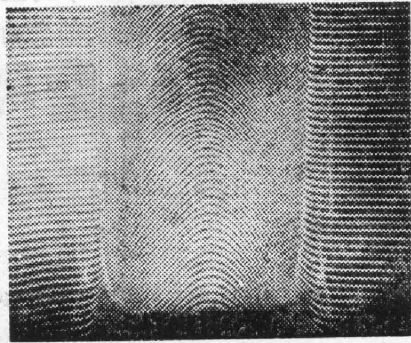


Fig. 5 Interferogram of the flame of an alcohol blowlamp

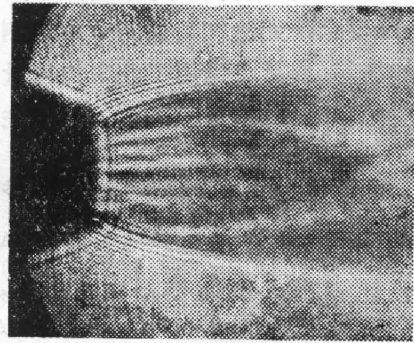


Fig. 6 Interferogram of the exhaust plume from a rocket engine

程序计算温度分布,得到的结果与用热电偶测量的结果是一致的。为了消除探测光线的折射误差,我们加置了成像透镜,使测温精度可达5%左右。在无限宽条纹的情况下,当扰动场存在时,屏幕上即会出现干涉条纹,每一条亮的或暗的条纹代表等光程差曲线,也即表示气流中的等密度线或等温线,它给予折射率场变化定性的观察。

对于瞬态流场,由于热电偶是接触测量难于迅速达到热平衡,故不能用于高温,迅变流场的测量。光测方法是流场测试的有力工具,但对火箭发动机燃气射流,由于其中烟尘颗粒散射严重,用阴影和纹影技术皆不能透过流场,国内外许多学者做过这种流场的阴影或纹影显示工作,只获得火焰及烟雾的阴影,而看不到流谱结构<sup>[5]</sup>,如果采用双光路干涉仪如马赫干涉仪,通光口径不大,而且抗震能力弱,故难于用在火箭发动机燃气射流的测量。为了使F-P干涉仪能够适用于强震动环境条件下的瞬态过程测量,除了利用其本身具有长干涉腔和单光路结构的独特优点外,底座采用了高阻尼隔震器隔震,光学元件采用了一些稳定措施,并利用短脉冲激光为光源,缩短曝光时间,使公认的精密干涉仪,能够在象火箭发动机这样强震动恶劣环境条件下,成功地获得无限宽条纹情况下真实的燃气射流近场结构干涉图(见图6所示),为有关火箭发动机的科研鉴定会提供了重要的实验依据。

## 四、结 论

1. 本文所描绘的大口径等厚条纹型 F-P 干涉仪不仅具有普通干涉仪的性质, 可得到与马赫干涉仪一致的干涉图 (只是每一条纹的位移是  $\lambda/2$  而不是  $\lambda$ ), 而且具有全息干涉仪的差分性质。由于干涉是在两平面镜的内表面形成, 故对光学系统的材料要求不高, 较易加工成大口径的干涉仪。

2. 该干涉仪采用单光路, 缩短了曝光时间。并且做成长程干涉仪, 适用于强震动, 强冲击等恶劣环境条件下的瞬态流场的测试。

3. 选择干涉腔的两平面镜膜层反射率  $R > 0.5$  即可解决透过率与条纹锐度或对比度之间的矛盾。采用成像透镜可消除光线的折射误差, 能够精确地测量  $5000^{\circ}\text{C}$  以下的高温流场温度。

4. 该干涉仪结构简单, 紧凑, 调节方便, 造价便宜, 口径可做成  $> \phi 200$ , 对工作环境条件无特殊要求, 无论在兵器工业中如测量枪口、炮口火药气体温度分布、火箭发动机燃气射流、爆炸场等; 或是在民用工业中如测量各种热射流、物理化学反应过程、等离子体温度等, 都将发挥其非接触法定量测试的优越性。

## 参 考 文 献

- [1] H. W. Moos; *Appl. Opt.*, 1963, 2, No. 3 (Aug), 817.
- [2] A. Frohn; *AIAA. J.*, 1967, 5, No. 1 (Jan), 185.
- [3] H. M. 史密斯; 《全息学原理》, (中国科学院物理所《全息学原理》翻译组译校, 科学出版社 1973), 140.
- [4] R. Goulard; 《Combustion Measurements》, (Academic press New York 1976), 226~244.
- [5] F. Harshbarger; *AD-444088*, 1964.

## A large-aperture equal-thickness-fringe Fabry-Perot interferometer

HE ANZHI AND YAN DAPENG

(Department of Physics, East China Institute of Technology, Nanjing)

(Received 17 June 1985; revised 29 July 1985)

### Abstract

This paper discusses the principle of a large-aperture equal-thickness-fringe Fabry-Perot interferometer. Its merits include a relatively low requirement on optical material, high resistance to disturbance and vibration, and high accuracy of fringe location. A transient interferometer has been developed which has a large aperture and can operate in an environment with strong vibration. Interferograms of combustion flames and rocket exhaust plumes were obtained by using this interferometer.