

用数字化M-Z干涉仪对低密度混合流场 测量的实验研究

刘文杰 俞刚

(中国科学院力学研究所)

摘要 本文提出了最近研制成功的数字化M-Z干涉系统,并用它对二维低密度混合流场的密度场进行了测量。由于该系统采用了激光光源以及干涉图的计算机处理技术,使得实验和数据处理的工作自动化,而且具有精度高的特点,适用于低密度混合流场中较弱信号的高精度测量。文中系统地分析了用激光作光源的条件下,M-Z干涉系统对平行光扩束系统的要求,以及如何消除因激光干涉性太强而引起的寄生干涉条纹,通过对平行式半透半反镜的分析,给出了适用于M-Z干涉仪的平行式半透半反镜的具体设计参数,并简述了由于使用激光光源而简化仪器调节的原理,给出了一种使经典M-Z干涉仪与现代计算机技术相结合来提高测量精度的新方法。

关键词 数字化干涉仪;高精度;低密度流场

0 引言

在气体动力学测量中,M-Z干涉仪作为气体密度场定量测量的主要手段,已经使用了几十年^[1,2]。但在激光器未问世之前,由于利用白光作光源,给系统本身及使用带来了很大的不便和限制^[3,4]。最近我们发展了用于流场测量的数字化M-Z干涉系统。该系统采用激光光源以及干涉图的计算机处理技术,解决了长期以来存在的人工操作问题,使实验和数据处理实现了自动化,而且具有数据处理精度高的特点,解决了测量中信号弱难以鉴别的困难,适用于低密度场测量。本文着重描述M-Z干涉部分。

激光束作为M-Z干涉仪的光源,有着明显的优点,它可在光束汇合产生高可见度非定域条纹,从而可在平行性很好的平行光束汇合区任意垂直截面上,得到测量所需要的条纹与测试面相对应的定量关系,而且二路光程不等时,也可调出各类条纹。特别是对光束间是否存在切变不敏感。当入射平行光无象差时,不会因切变产生寄生条纹;若存在象差,虽使条纹有微小的畸变,但对测量结果不产生影响^[5]。这些性质,大大方便了光路调整,减轻了对调节机构的要求,从而降低了整套仪器的费用,也简化了调节过

本文于1990年4月9日收到,6月4日收到修改稿。

程。

但是用激光作光源,也带来了由于干涉性能太强引起的寄生干涉问题。实际上,探测光束难以做到严格的平面波,任何偏离平面波的波阵面通过半透半反镜时,都会因前后镜面反射的波阵面曲率半径不同产生等厚条纹,即使是严格平行的平板也不例外。可分析如下:严格平行的平板,在正入射时,若入射光束是带有曲率半径 R 的球面波,则可由式(1)给出,曲率半径 R 与视场内出现条纹个数 N 之间的关系:

$$R = \frac{D}{4} \sqrt{\frac{d}{nN\lambda}} - \frac{d}{n} \quad (1)$$

其中 n 为折射率, d 为平板距观察屏的距离, D 为视场直径。由(1)式可算出,当 $D=150\text{mm}$, $d=20\text{mm}$, $N=0.1$ 个条纹时, $R=38.2\text{m}$ 。可见对准直系统的要求是非常苛刻的。在研制过程中,对各类准直系统进行了比较,发现一般的反射式球面镜准直系统,很难得到M-Z干涉仪所需要的平行光束,往往产生难以消除的寄生条纹。而且,即使是透镜式准直系统,如果光学系统未作消像差处理,也会因像差破坏条纹的平直性,为消除寄生条纹带来困难。利用505型纹影仪的准直系统,因该准直系统具有较好的消像差功能,因而获得了满意的结果。

干涉条纹的平直性直接与镜片的平面度有关,寄生条纹与分光镜的楔角也有很大关系。研究发现,在 45° 角入射条件下,楔角 α 小于 $0.4'$ 时,在 $\phi=150\text{mm}$ 的视场内不会出现因楔角引起的寄生条纹。根据实验对条纹平直性的要求,选用了平面度为 $\lambda/20$ 的镜片作为M-Z干涉仪的镜片。

低密度流场折射率变化微小,对于这种小信号流场的测量,需要仪器有很高的灵敏度和可靠的测量精度。干涉仪的灵敏度可分为两类。绝对灵敏度由波面沿传播方向的畸变与横向条纹位移量之比决定,可由(2)式表示:

$$S_{abs} = \frac{\Delta P}{T} = \frac{P}{\lambda} \quad (2)$$

其中, λ 为波长, P 为条纹间距, T 为相对平滑表面的畸变长度, ΔP 为条纹的位移量。

干涉仪的相对灵敏度可由下式表示:

$$S_{rel} = \frac{(\Delta P/P)}{T} = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

由(3)式可以看出,对于许多干涉仪而言,相对灵敏度是一个固定的值,它可通过波长较短的探测光束或让光束多次通过试验段的方法来提高。实验中主要采用提高绝对灵敏度的方法来测量低密度流量。由式(2)可看出,干涉仪的绝对灵敏度可通过两条途径得到提高,一是提高条纹读数精度,即提高 $\Delta P/P$ 的测量精度;二是增大条纹间距。对于小信号流场测量,通过增大条纹间距来增加绝对灵敏度的方法不大适用,因为会由于减少了视场内条纹个数而减少可探测的信息,从而使得灵敏度的增加变得没有意义。测量中通过与计算机相结合来提高条纹读数精度的方法使仪器的灵敏度得到提高,从而解决了小信号测量问题。所研制的干涉图计算机自动处理系统通过对条纹进行细化,判读条纹各点的位置坐标得到条纹位移量的方法,可使条纹读数精度在 $\lambda/50$ 以上^[5],大大

地提高了仪器的灵敏度，实现了小信号流场的定量测量。

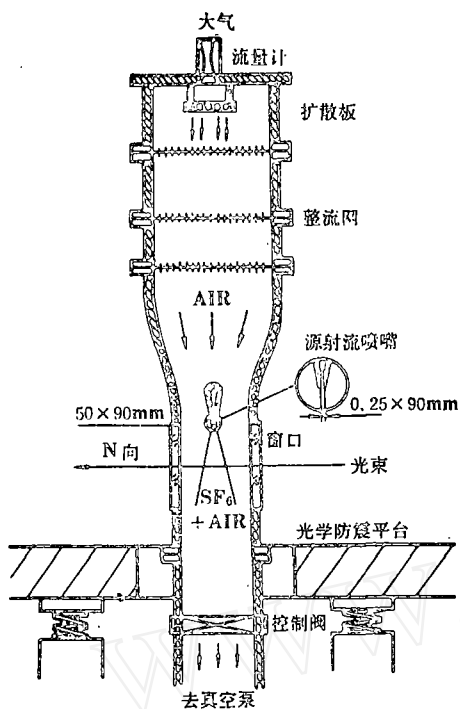


图 1 源射流混合实验装置图 (P向)

光学部分由红宝石四脉冲激光器，30mW 单模 He-Ne 激光器，505 型纹影仪的准直系统，平行平面分光板，平面反射镜，防震光学平台，透镜及调节机构组成。与传统的 M-Z 干涉仪比较，具有以下优点：

- 1) 实现了连续和脉冲两种光源的兼容测量，解决了两种光源共轴（或同轴）性的问题；
- 2) 镜片 M_1 、 M_2 、 B_1 、 B_2 可搭成不严格等程的 M-Z 干涉仪，光束间允许存在微小切变；
- 3) 不象传统的 M-Z 干涉仪那样专设 U 型固定框架，调节机构不需特别精密的调节架，直接固定在防震光学平台上，系统的排放与调节比以往有更大的自由度，降低了仪器的费用；
- 4) 实现了大口径，视场口径为 150mm，分光镜采用平行平板型，楔角小于 0.4° ，所有镜子平面度均为 $\lambda/20$ ；
- 5) 准直系统使用了 505 型纹影仪准直系统，满足了仪器对准直系统提出的苛刻件，保证了探测光束的平行度，提高了仪器的利用率。

脉冲和连续兼容测量的实现，解决了高速流场的瞬时定量测量和实时监测问题。当相位变化不快，可在 30ms 内成清晰图像的流场，也可用连续光源结合 CCD 摄像机进行测量，拓宽了应用领域。

数据处理部分由 CCD 摄像机、录像机，PIP1024B 图像板，监视器，打印机，

1 实验装置

实验段如图 1 所示，类似于吸入式风洞。由出口真空泵驱动，通过整流网获得匀直气流，利用临界喷嘴和真空泵节流阀控制试验段内压力和流速。典型的实验参数为 $V_{air} = 40\text{m/s}$, $P = 1.9993 \times 10^3\text{Pa}$ ，试验段尺寸为 $9\text{cm} \times 5\text{cm} \times 12\text{cm}$ 。第二种混合气流 SF_6 气体，通过位于实验段入口中心位置的流线型叶片喷嘴以声速注入，并与空气混合，保持 $x_{air} : x_{\text{SF}_6} = 4 : 1$ 的摩尔比。喷嘴尺寸为 $0.25\text{mm} \times 90\text{mm}$ ，相当于二维源射流喷管。

2 干涉系统

干涉系统由光学部分和数据处理部分组成，如图 2 所示：

AST386 微机及其处理软件组成^[5], 具有条纹细化、自动判读、实时显示、条纹位置坐标显示、图像灰度显示、随时存取、计算结果、绘图打印等功能。

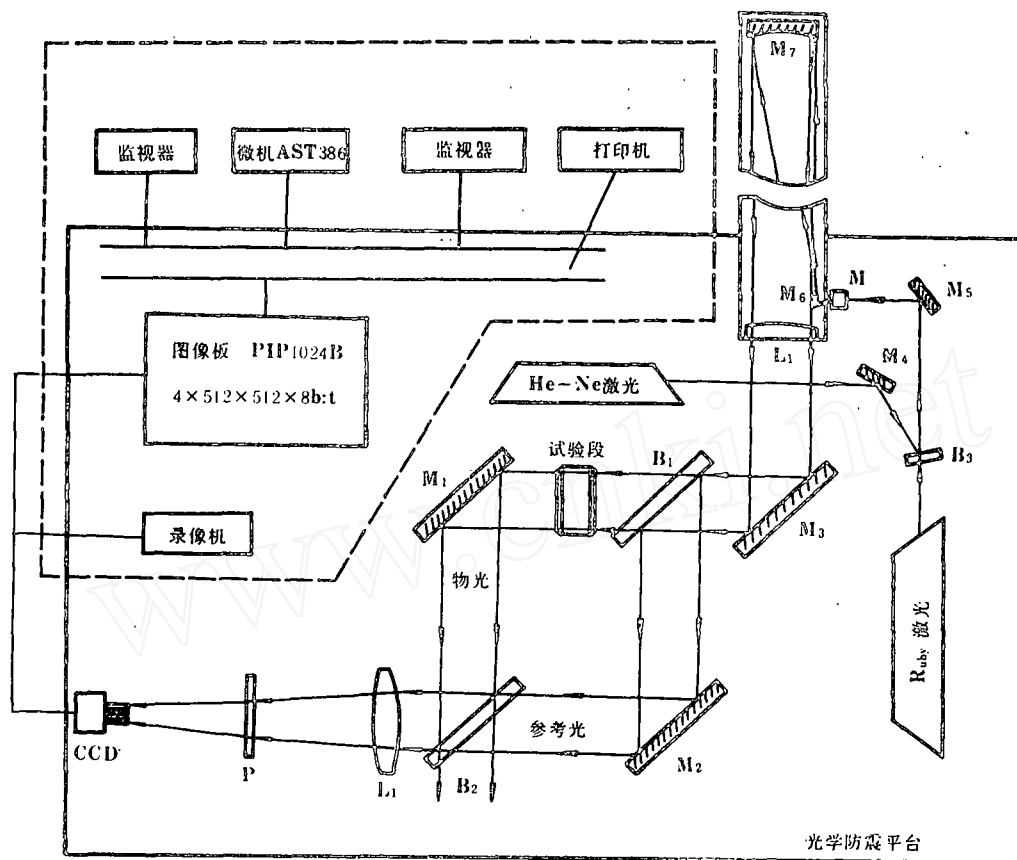


图 2 数字化 M-Z 干涉系统示意图

$L_1 \sim L_2$ 透镜 $B_1 \sim B_3$ 半透、半反镜 $M_1 \sim M_7$ 反射镜 P 观察屏 M 扩束镜和空间滤波器
(图中虚线部分为干涉图计算机自动处理系统(ICAPS))

3 结果及讨论

本实验所测量流场为二维源射流低密度混合流场, 从平行和垂直于混合面的二个方向进行测量。测量中, 分别使用了连续和脉冲两种激光光源, 得到了两种光源的流场干涉图。连续光源可用作流场的实时监测, 当流动过程不太快时, 可以得到条纹清晰的流场干涉图, 并可对此进行定量分析。用连续光源进行测量较用脉冲光源测量的一个好处是可用 CCD 摄像机接收变成活动的干涉图, 然后用录像机记录, 这样流场的全部变化过程都可记录储存下来, 以备随时提取有关部分进行处理。此外, 还容易实现干涉图的高精度重叠, 从叠加图中可清楚地看出条纹的位移, 直观地反映了流场的变化。

图 3 为连续光源拍摄的平行于混合面方向的流场干涉图。实验参数是 $V_{air} = 40\text{m/s}$,

$P=1.9993 \times 10^3 \text{Pa}$, SF_6 气体以声速从照片左边注入与空气混合, 摩尔比为 $x_{\text{SF}_6} : x_{\text{air}} = 1 : 4$, 图中自由区的条纹不平直是由于当时选用的镜片面型没达到标准而造成的, 但在计算结果时是利用原条纹与参考条纹相减反推计算的, 故面型造成的误差可消除, 不影响最后结果。图 4 是图 3 经细化处理后与参考条纹的叠加图。

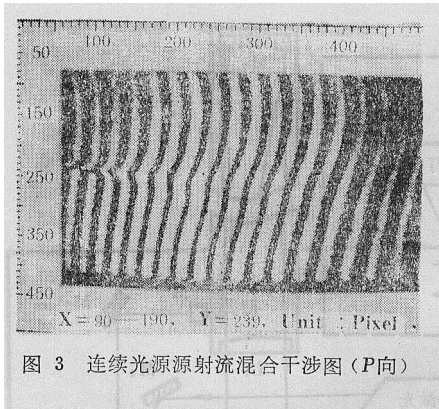


图 3 连续光源源射流混合干涉图 (P 向)

图 5 为实验参数相同, 用连续光源拍摄的垂直于混合面方向条纹细化后与参考条纹的叠加图, 参考条纹是在同样条件下不注入 SF_6 气体时拍摄的条纹。从图中可清晰地看出条纹的位移, 自由区条纹重合很好, 气流尾部的微小条纹位移仍可从图中清晰分辨, 说明了系统达到了数字化精确程度。

实验所测流场为二维流场, 所以由流场折射率场的变化引起的光程差可由 (4) 式表示:

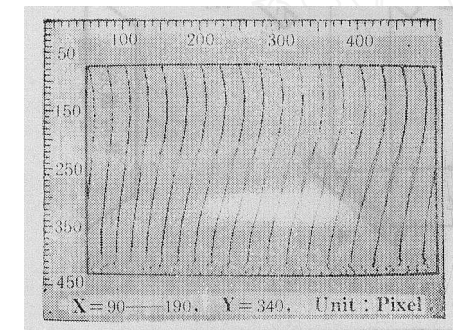


图 4 经处理后与参考条纹叠加图 (P 向)

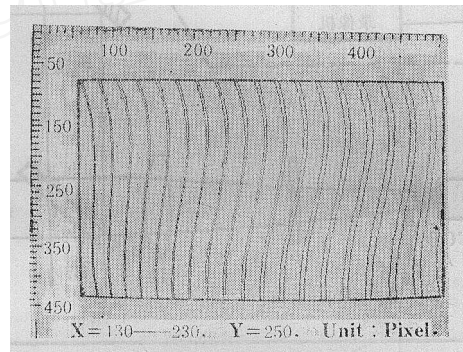


图 5 经处理后与参考条纹叠加图 (P 向)

SF_6 气体以声速从左边注入混合

$$\Delta\Phi(x, y) = \int_0^L [n(x, y) - n_0] dz = [n(x, y) - n_0] L = \Delta N \lambda \quad (4)$$

其中 L 为试验段沿光传播方向长度, ΔN 为因折射率场变化而引起的同级条纹的条纹级数变量。在该实验条件下, 流场可近似地看成是等压、等温混合, SF_6 气体密度与折射率变化的关系可由 (5) 式描述^[6]。

$$\Delta n = n(x, y) - n_0 = \left(K_{\text{SF}_6} - \frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{SF}_6}} K_{\text{air}} \right) \rho_{\text{SF}_6} \quad (5)$$

其中 $M_{\text{air}}, M_{\text{SF}_6}, K_{\text{SF}_6}$ 分别为空气和 SF_6 气体的分子量和 Gladstone-Dale 常数。从图 4 中可得到条纹位移量 Γ , 干涉条纹位移量 Γ 与流场中密度变化 $\Delta\rho$ 的关系可由 (6) 式表示:

$$\frac{\Gamma}{P} = \left(K_{\text{SF}_6} - \frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{SF}_6}} K_{\text{air}} \right) \rho_{\text{SF}_6} / \lambda \quad (6)$$

(6)式中 Γ 为干涉条纹位移量, P 为干涉条纹间距, λ 为激光光源波长。根据(6)式可算出流场的密度分布。

由计算可知流场尾部等密度线很少, 可认为此区域混合比较均匀。

脉冲光源可得到流场某时刻的瞬时干涉图。现在还只能用Polaroid相机记录。图7为脉冲光源拍摄的流场瞬时干涉图。实验参数为 $V_{air}=40\text{m/s}$, $P=2.2661\times 10^3\text{Pa}$, SF_6 气体以声速从照片左边注入与空气混合, 此条件与图3基本相同, 但可以看到靠近喷嘴处有精细的环形干涉条纹, 这表明在喷嘴的出口处, 确实存在一个“源”, 值得进一步研究。

这样的干涉图用时间平均的光源是得不到的。图中看到的流场分布不对称, 是由于喷嘴位置安装不合适造成的。

M-Z干涉仪作为一种经典的干涉仪, 其定量测量的精度、可靠性和灵敏度早已被人们所证实, 由于低密度流场被测信号小, 其它接触测量方法显然不能适用, 利用M-Z干涉仪在定量测量中的可靠性, 结合计算机图像处理、激光等新技术, 力求提高仪器的灵敏度来解决低密度混合流场的测量问题。从以上实验分析结果可看出, 最近研制的这套数字化M-Z干涉系统, 足以胜任低密度混合流场的测量研究工作, 为小信号流场测量提供了一种有效手段, 与其它接触测试方法相比, 具有测量精度高, 不扰动流场, 数据处理简单直观等优点。

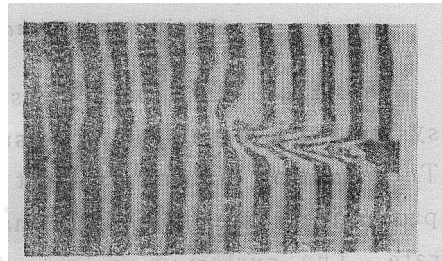


图7 脉冲光源源射流混合干涉图(P向)
 $V_{air}=40\text{m/s}$, $P=2.266\times 10^3\text{Pa}$
 SF_6 气体以声速从左边注入混合

感谢吴宝根、李建国、杨仕润、范清玲同志在实验中的帮助。

参 考 文 献

- 1 Kennard R B. J. Res. Nat. Bur. std, 1932, 8, 787
- 2 Winker J. Rev, Sci. Inst. 1948 19, 307
- 3 Paul Bet. U. S. Government Printiting offices. 1950
- 4 wilkies D et al. proc Instn mach Engrs 1963—1964, 78 (17)
- 5 杨仕润, 俞 刚. 干涉图的计算机处理 (待发表) 力学与实践.
- 6 维斯特 C M. 全息干涉度量学. 机械工业出版社, 1984, 408

THE STUDY OF THE MEASUREMENT OF THE LOW DENSITY MIXING FLOW BY DIGITAL MACH- ZEHNDER INTERFEROMETER

Liu Wenjie Yu Gong

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science)

Abstract This paper posed a digital Mach-Zehnder interferometer system newly developed to measure the low density field of 2-D mixing flow. The adoption of laser as light source and the image computer automation processing system (ICAPS) made the experiment and data highly accurate. The system is suitable to high accuracy measurement for weak signal in low density flow. The requirement of M-Z interferometer system to the parallel expansion beam system and how to dispel the additional interferograms caused by strong laser interference have been analyzed systematically. The specific design parameter of the parallel splitter suitable for M-Z interferometer has also been given here. The paper introduced the simplified adjustment principle using the laser source and described the new accurate method of the combination of classical M-Z interferometer and modern computer technique.

Key words digital interferometer, high accuracy, low density flow