

用于流场显示的激光双镜干涉仪

夏生杰 吴宝根 谢邦力

(中国科学院力学研究所)

摘要 研制的激光双镜干涉仪比马赫-陈得尔干涉仪除具有较高的干涉光束强度、更大的视场口径、更好的抗振性、结构更简单及成本很低等优点外,还具有与马赫干涉仪完全相同的干涉信息处理方法,并且灵敏度还高一倍。干涉条纹的方向与宽度可任意调节。不需苛刻的实验环境和复杂的调节过程,适于大多数流场干涉显示的定量研究。

文中将讨论仪器的原理及特点,并给出部份实际应用中的结果。

一、概 述

在流场的光学显示技术中,阴影、纹影及干涉技术用得较多。全息术在近年来也开始采用。在许多关于流场显示的文章中,报导了用阴影及纹影术得到的结果。国内也有这类仪器批量生产,使用经验也很丰富,取得了大量成果。

能对流场作定量显示的干涉技术,相对于阴影及纹影术来说应用较少。这大概是因为对于光的波长量级的干涉技术要求更复杂和严格的技术条件的缘故,使得干涉显示在实际工程应用上遇到不少困难,推广这一技术受到一定限制。特别在我国,许多超音速风洞用光学干涉显示技术对流场作定量研究的还不多,尽管超音速风洞已在我国建立多年。因而,推广对流场作定量干涉的显示技术还是十分必要的。

二、光学干涉显示技术

用干涉条纹的位移量还原成密度变化的光学干涉显示法,能对流场作定量分析,这是众所周知的。

在光学显示技术中,特别是在气体动力学研究中,国际上得到公认的仪器是马赫-陈得尔干涉仪(MZI)。它的优点是:1.能将干涉仪光源分成两束相互距离较大的实验光和参考光束,这就有可能用于更多的试验场合,例如大型风洞实验;2.参考光束是未经扰动的平面波,经与受到扰动的畸变波迭加后的干涉图,其数据还原较为简单。但它

本文于1984年5月21日收到,7月19日收到修改稿。

也有下述缺点：1. 干涉元件数量多，加工成本高，易失调，对实验环境要求苛刻；2. 干涉元件与光束有 45 度倾角，有效视场小并呈椭圆形；3. 调节困难。要把四块元件调到相互成弧秒量级的平行度是较难的。激光出现后，调准难度有所降低，但其它缺点仍未能克服。例如一台口径 100 毫米的日本 MZI，有效视场 100×80 毫米，需数万美元，因而，在使用及购置上均受到限制。

1975 年我们研制了一台激光平晶错位干涉仪并投入使用。它是一种较为简单的干涉仪。用一块平行平晶作干涉元件。由于元件少，故成本很低。此外，它易调节，抗振性好，有效视场较大等，从而克服了使用 MZI 时的部份缺点。但是，和所有的错位（或剪切）干涉仪一样，由于错位干涉是波前自身错位相干，两个相干波均为未知。当然这给定量计算带来了麻烦；而且，干涉信息量少，只是在错位方向上才有信息。在有模型流场中，由于错位使模形的象出现“重影”。尽管如此，对于某些试验场合，它是不可缺少的。例如，在振动强烈的燃烧型超音速风洞上的应用。这种风洞的工作特点是，在点火时产生极强烈的爆炸，振动波远在超音速流建立之前到达测量设备上，使设备产生各种变形而失调，因而无法对流场作干涉显示。平晶干涉仪能抵抗上述振动，清晰地显示出流场中的激波来。图 1 所示的是，1975 年拍摄的点燃 CO ， N_2 ， O_2 及 H_2 的混合气体、以每秒 10 公斤流量、 $M=4.5$ 的超音风洞流场的干涉显示照片。在这种实验条件下，用别的干涉仪是很难显示出流场的。平晶错位干涉仪的其它应用，如图 2 所示。它也可用作高速干涉摄影等^[1-3]。

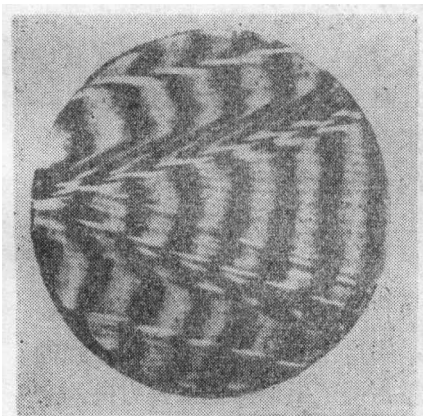


图 1 燃烧型超音速风洞流场， $M=4.5$ 。

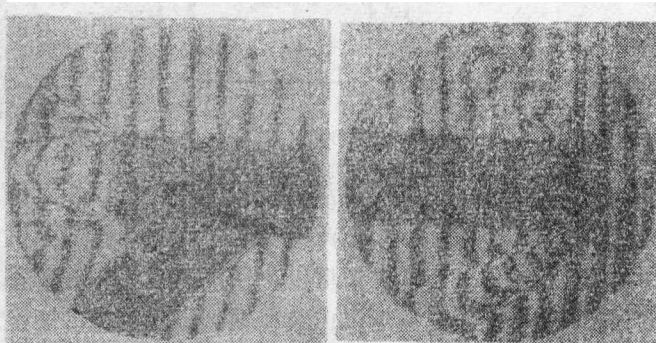


图 2 $M=2.5$ 超音速风洞中管模型激波

三、激光双镜干涉仪

平晶错位干涉仪克服了 MZI 的部份缺点，但是又带来了干涉信息处理复杂化。而激光双镜干涉仪就是为了克服信息处理复杂化，并保留平晶错位干涉仪其余优点而设计的^[6]。由于它有许多优点，使得激光双镜干涉仪能够成功地用在工程实践中，而不是仅限于在有优越条件的实验室内使用。仪器通过了技术鉴定并已批量生产。这里将介绍双

镜干涉仪的原理及其在超音速流、跨音速流、传热、传质及焊接等方面的具体应用。

1. 双镜干涉仪原理及特点

使用一块光学材料不均匀的平行平晶作干涉元件时, 尽管平晶的两个光学表面的加工是高质量的, 仍能明显地看出干涉图中条纹是弯曲的。这是由于两平面间材料的不均匀性引起的。据此可以设计一种用两个平面组成的干涉仪, 被研究的现象(可以是透明的气体, 液体或固体)处在两光学平面之间。用这种方法可显示并测量介质中的密度变化。例如, 在测量光学材料的均匀性时用到下式^[2],

$$\Delta N = \frac{k \lambda}{2dt}$$

式中 d 为干涉图上的条纹间距, k 为对直线干涉条纹的最大偏离量, $(k/d)\lambda$ 为光程差, 由材料的非均匀性 ΔN 及被测材料的厚度 t 决定, 值为 $2\Delta Nt$ 。如果 $k/d=1/4$ 、 $\lambda=6328$ 埃、 $t=25$ 毫米, 则可以算出 $\Delta N=3.2 \times 10^{-6}$, 其测量精度是较高的。

要对流体介质中的现象进行测量, 应将研究现象置于两光学面之间。激光双镜干涉仪的原理如图 3 所示。两块加工很好的平面镜, 前面一块镜的干涉面 B 不镀或镀部份反射膜。后一块镜的 C 面不镀或镀全反射膜。用一束平行性较好的激光束照明。当两个干涉面不镀膜时, 得到最佳对比度的干涉条纹, 当分别镀以不同膜层时, 得到高亮度的干涉条纹。

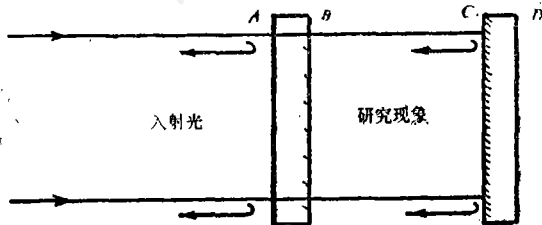


图 3 双镜干涉原理

从图 3 左方垂直镜面入射一扩束平行光, 经 A 面入射到 B 面, B 面将光束部份反射和部份透射。透射光经过试验区至 C 面, 又被 C 面反射回来再次通过试验区。这样, 一束平行光射至 B 面被反射出一束未经扰动的平面波和受到两次扰动的畸变波相干于 B 面, 干涉信息反回到干涉仪光源装置中, 经过一小反射镜从侧面输出到屏幕或相机底片上。

为防止 A 面在干涉图上产生噪音, A B 两面加工成具有较大的楔角。两块干涉镜装在用四根等长杆牢固的框架板上, 保证两镜无相对位移, 使仪器有较大的刚度, 较强的抗振性和稳定性。两镜可以由装在框架板上的微动螺丝精密调节出任意宽度及方向的干涉条纹。

在光路设计上可采用两种型式, (1) 同轴型(图 4a)。干涉信息由装在光束未经扩束部位的 45 度倾斜半反射镜取出, 反射镜尺寸可以较小, 但使用半反射镜后, 光损失较大、对于短时曝光的快速现象的记录不利。(2) 离轴型(图 4b)。装置与同轴型类似, 只是光束的去程和回程间约有 5 毫弧度的夹角, 用一块小全反射镜在干涉仪光源主球面镜焦点附近取出干涉信息。由于夹角很小, 对干涉图影响不大。但干涉光束强度比前者约大四倍, 对快速过程的干涉显示记录十分有利。

激光双镜干涉仪的优点如下: (1) 双镜干涉仪没有与光束成 45 度倾角的大尺寸干

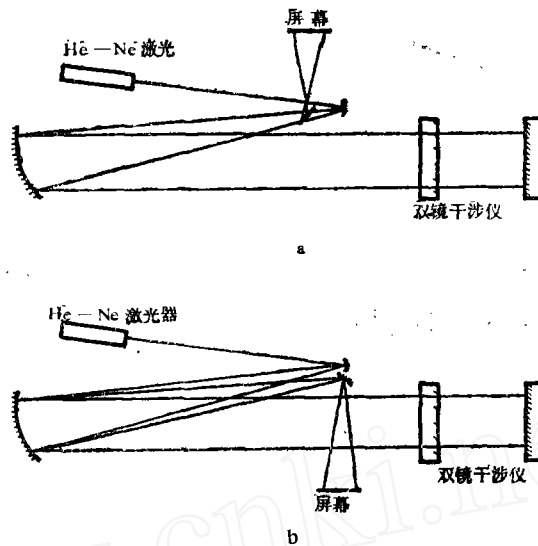


图 4 干涉仪的两种型式

涉元件，能充分利用全光束口径，相应干涉镜尺寸可以缩小；(2) 只有两个干涉面加工精度要求较高，因而成本大大降低；(3) 采用了四杆固支框架结构，不用笨重的铸铁底座，刚性加大，整体结构重量轻，搬动方便，便于多种试验场合下使用；(4) 光束两次通过试验区，灵敏度比 MZI 提高一倍；(5) 参考光与测量光束同轴并在试验区同一侧，结构紧凑，操作方便；(6) 容易调出任意宽度及方向的条纹并稳定不变；(7) 仪器后镜输出的阴影象可以作为实验时的监视光源或同时作阴影摄影。

2. 双镜干涉仪的应用

本仪器已能用于多种流体力学试验、激光与物质相互作用、传热、燃烧、一般光学元件检验、等离子体及焊接等发光或不发光现象的定性显示，特别是用作定量显示，可以得到流场的密度、温度及压力的二维分布。也可以作高速干涉摄影，例如：

(1) 温度场的定量干涉显示^[8]。用双镜干涉仪研究传热是极为方便的非接触测量方法。例如，研究有自然对流时二维等温热板的温度场，将试件垂直或水平放置在干涉仪两镜之间，立即显示出了温度分布的干涉图。

根据双镜干涉仪的干涉方程

$$m\lambda = 2 \left[\int_0^L n(x, y, z) dz + x\theta \sin \alpha + y\theta \cos \alpha \right]$$

θ 为二干涉面法线的夹角； n 为介质折射率； α 为两干涉面的交线与 x 轴的夹角， $\alpha = 90^\circ$ 时干涉条纹垂直， $\alpha = 0^\circ$ 时条纹水平； λ 为光源波长。上述 $\theta = 0^\circ$ 时，得到无限宽条纹。

无扰动时，

$$m_0\lambda = 2 \left[\int_0^L n_0(x_0, y_0, z_0) dz + x\theta \sin \alpha + y\theta \cos \alpha \right]$$

有扰动时，

$$m\lambda = 2 \left[\int_0^L n(x, y, z) dz + x\theta \sin \alpha + y\theta \cos \alpha \right]$$

扰动前后干涉序差为

$$\Delta m = m - m_0 = -\frac{2}{\lambda} \int_0^L [n(x, y, z) - n_0] dz$$

根据格拉斯顿-德尔方程和气体状态方程有

$$n - 1 = \frac{k p}{R T}$$

k 为 $G-D$ 常数; R 为气体常数; p 为压力; T 为温度。

上式中, 只要将所摄得的干涉图中干涉条纹的位移量测出后即可算出相应的 n 值, 再由 n 值计算出温度分布, 详见[8]。

在调成无限宽条纹时, 能直接显示出等温线。图5所示为二维等温热板的温度场干

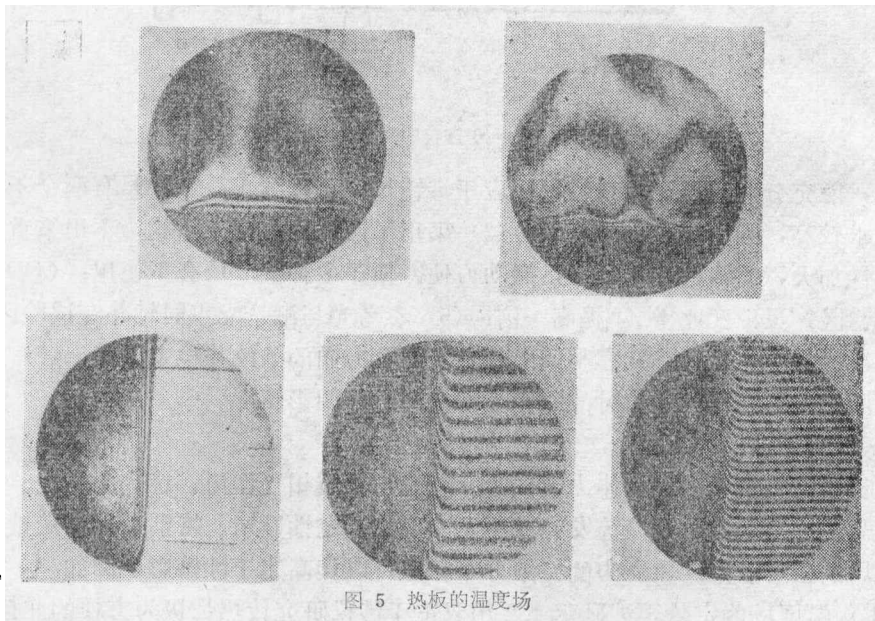


图5 热板的温度场

涉显示照片。图中有垂直及水平状态, 也有无限宽条纹等五种状态。实验条件为, 用1.5毫瓦 He-Ne 激光器, 视场口径 $\phi 140$, 21 定全色底片, 曝光时间 $1/1000$ 秒。图6则为酒精灯火焰及热体的干涉显示照片, 分别用两种条纹密度。

(2) 低密度流场显示。对吸气式电弧加热多喷咀超音速流场的显示研究, 由于试验段密度低, 燃烧时也有振动, 用一般干涉显示法难于凑效。双镜干涉仪因具有较高的灵敏度及抗振性, 在流场 $M=6.5$ 、压力 15 千的试验条件下显示出了流场的密度变化, 这对低密度流场的干涉显示是有价值的。这一工作还在继续深入进行。

(3) 传质研究。不同的介质有不同的折射率, 用双镜干涉仪研究传质是十分方便的。例如, 图7所示为一束直径 3 毫米的 CO_2 气流, 以低速喷入空气中时的干涉显示照片, 可测出条纹中心部份位移量约 1.5 波长。

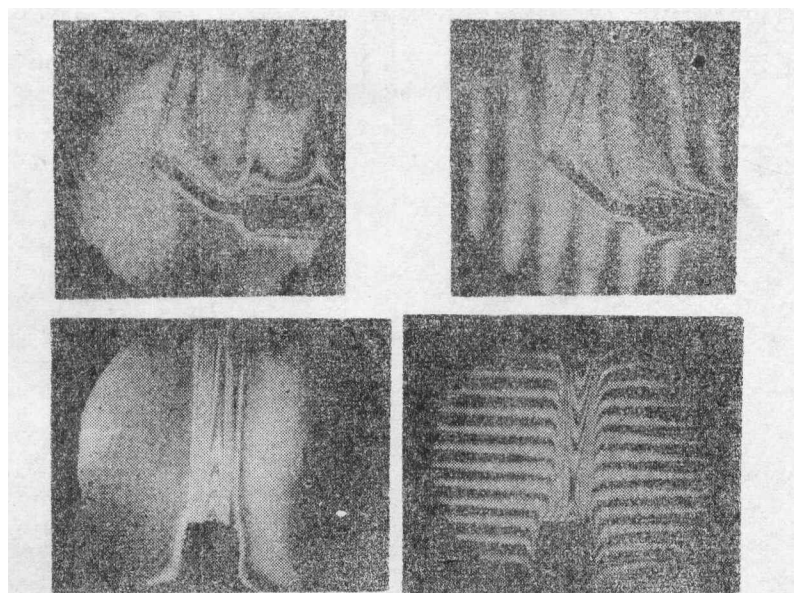
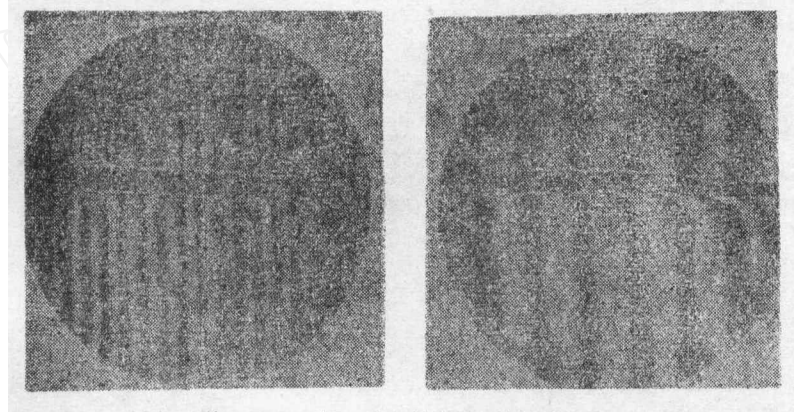


图 6 酒精灯及热体的干涉显示

图 7 CO₂-空气的传质干涉显示

根据方程 $n-1=k\rho$, 对 CO₂, $n-1=0.000449913$, 又知 $\Delta m = \frac{2}{\lambda} [k_a \rho_a - k_{CO_2} \rho_{CO_2}] L$ 。

其中 ρ_a , ρ_{CO_2} 分别为空气和 CO₂ 的密度, L 为光束方向上扰动区长度。此例中只考虑中心部份,

$$\Delta m = \frac{2(-0.000160716) \times 0.3 \times 10^3}{6.328} \approx 1.5$$

实验值和理论值基本相符。气流边缘部份是传质过程区域, 在此不详述。

(4) 焊接研究。在焊接研究中, 电极周围的温度场及加保护气体的情况, 很少用光学干涉法来显示, 特别是在用 Ar 气体作保护气时, 由于 Ar 气的密度与环境气份相差很小, 一般方法不易显示, 双镜干涉仪可以显示 Ar 气流。这对焊接研究十分有利。

天津大学已用双镜干涉仪在焊接研究中得到了很好的结果。图8为焊接时电极附近温度场的干涉显示照片。其条件为用5毫瓦 He-Ne 激光加干涉滤光片消除电弧光,用21定全色底片,采用同轴型光路。

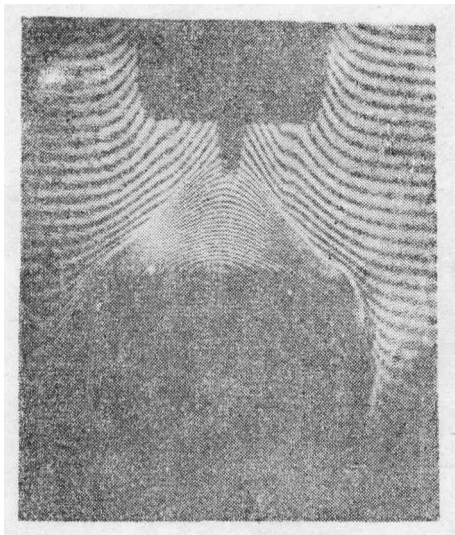


图8 焊接时电极温度场干涉显示

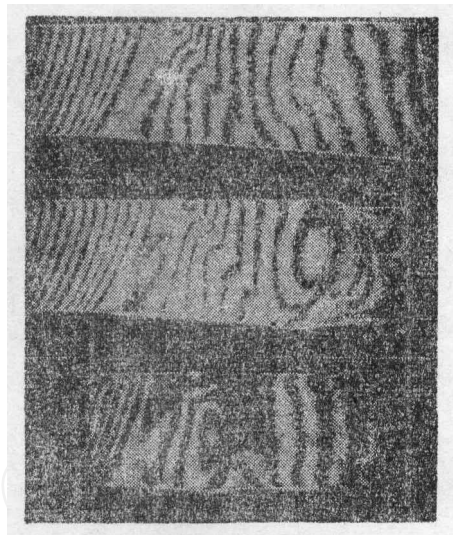


图9 跨音速风洞流场

(5) 吸气式跨音速扩压器的流场显示。在抽气系统造成试验区地面明显振动的条件下,用双镜干涉仪能清晰地显示流场。也用了16HD高速摄影机以每秒1000幅、每幅曝光1/5000秒的速度拍摄了对象的动态过程。图9为一组跨音速风洞中的干涉显示照片,可看出流场全超音或部份超音速时的情况。

(6) 超音速流场显示。图10为力学所F₁风洞上用双镜干涉仪对30度锥模型所作的干涉显示结果,光束口径140毫米,用1.5毫瓦 He-Ne 激光,21定全色底片,曝光1/1000秒,流场马赫数2.5。所得到的一张马赫图可以在显微密度计上读出条纹位移量,从而计算出激波前后的气流密度值。图11为试验装置全貌,可以看出整个试验装置没有特殊防振措施,干涉部份和光源部份分别用两个支承。风洞的启动和吹风过程的振动未引起干涉仪的失调。现有风洞结构截面积为400×300毫米²。对于其它较大一些尺寸的风洞,只要改变四根支杆长度,大都能适用。也可以对水槽中加热引起的折射率变化及分层流等进行测量。

图12为双镜干涉仪外形。左面为双镜干涉部份,右面为光源装置及记录部份。图13则为干涉仪在风洞装置上的安装图。

四、后 语

上述数种典型应用中均采用力学所研制的激光双镜干涉仪,在科研和教学中得到应用并做出了结果。无疑,双镜干涉仪能对多种流场进行干涉定量显示,这为定量研究流



图 10 超音速风洞流场

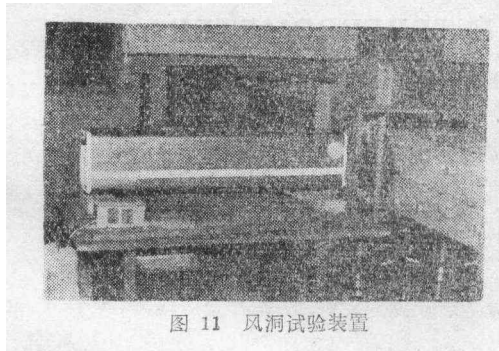


图 11 风洞试验装置



图 12 激光双镜干涉仪

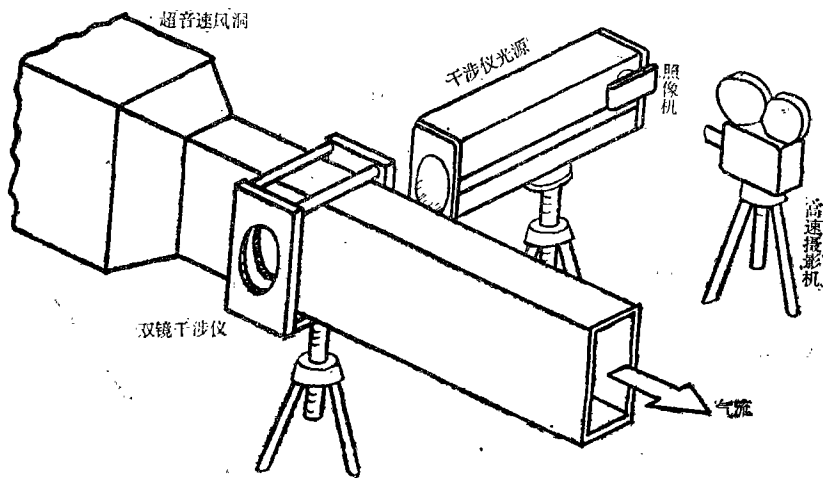


图 13 干涉仪在风洞上的安装图

场, 也为教学课堂上的干涉显示演示提供一个有效的手段。

感谢南航彭存一教授、天大李俊岳副教授、工程热所姚永庆工程师提供了宝贵的资料。

参 考 文 献

- [1] 刘建邦, 夏生杰, 力学学报, 2 (1978), P147.
- [2] Kelly, J. G. and Hangreaves, R. A. Appl Opt, 4 (1974).
- [3] Bryngdahl, O. Progress in Optics, 4 (1956).
- [4] Xia Shengjie, Wang Chunkui, Fu Yusou and Wu Baogen, Proceedings of International Conference on laser, 1980.
- [5] 夏生杰, 王春奎, 付裕寿, 吴宝根, 力学学报, 2 (1981), P181.
- [6] Xia Shengjie, Double mirror interferometer, Proceedings of International Symposium on Flow Visualization, 1983.
- [7] Daniel Malacara, Optical Shop Testing (1978).
- [8] 姚永庆, 吴宝根, 葛绍岩, 工程热物理学报, 4 (1984).

DOUBLE MIRROR LASER INTERFEROMETER FOR VISUALIZATION OF FLOW-FIELD

Xia Shengjie, Wu Baogen, Xie bangli

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

A double mirror laser interferometer has been designed and constructed. Compared with Mach-Zehnder interferometer (MZI), it has the merits such as higher intensity of interference information, better shock proof, simpler structure and lower cost, and its interferograms can be evaluated quantitatively in the same way as that of MZI.

In addition, its sensitivity in a large field of view is about twice that of MZI. The width and direction of the interference fringes may be adjusted easily and no harsh terms and complex adjustment are needed.

This interferometer is suitable for interference visualization and quantitative analysis of most flow-field.

In this paper, the principle and characteristics will of this instrument be discussed and some applied results in practice will be given.