

用激光双镜干涉仪测量自然对流的温度场

姚永庆 葛绍岩 吴宝根

(中国科学院工程热物理研究所) (中国科学院力学研究所)

在某些科研领域中,测量密度(温度)空间的分布是十分重要的. 阴影仪、纹影仪等便于定性观察,要定量是十分困难的. M-Z 干涉是一种较好的定量测量手段,但是由于它的光学元件要求苛刻,造价昂贵,使用调整比较复杂,所以在使用上就有一定的局限性^[1]. 有了激光以后,对 M-Z 干涉仪的某些要求就大大地缓和了.

激光双镜干涉仪具有 M-Z 干涉仪定量方便的特点,又具有结构简单,操作调整方便等优点. 它是以扩束准直的 He-Ne 激光为光源,由两块平面平晶做干涉元件的不等程干涉仪,被测对象置于两块平晶之间. 其原理示意图见图 1.

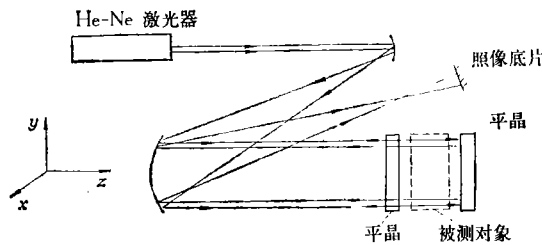


图1 激光双镜干涉仪原理示意图

激光双镜干涉仪和 M-Z 干涉仪定量方法是一样的. 但是由于它的探测光是往返两次通过被测区,所以它的灵敏度又比 M-Z 干涉仪高一倍. 在建立如图 1 所示的坐标系之后,不难列出激光双镜干涉仪的干涉方程^[2].

$$m\lambda = 2 \left[\int_0^L n(x, y, z) dz + x\theta \sin \alpha + y\theta \cos \alpha \right] \quad (1)$$

式中: m 是干涉序; λ 是探测光的波长, He-Ne 激光的 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$; L 是被测区沿 z 向的长度; n 是折射率; θ 是两块平晶干涉镜表面法线的夹角,当 $\theta = 0$ 时,两块平晶干涉镜表面平行,此时为无限宽条纹,灵敏度最高,随着 θ 角增加,条纹数增加,条纹之间间距减小,灵敏度下降. α 是两块平晶干涉镜表面的交线与 x 轴的夹角, $\alpha = 0$ 时是水平条纹, $\alpha = 90^\circ$ 时是垂直条纹. 在被测区的物理量是均匀的时候,也就是说折射率是均匀分布的,有 $n(x, y, z) = n_0$, 即有

$$m\lambda = 2 \left[\int_0^L n_0 dz + x\theta \sin \alpha + y\theta \cos \alpha \right] \quad (2)$$

当被测区物理发生变化,从而引起折射率发生变化时,条纹便要产生扭曲,这样在被测区有扰动和没有扰动时相比较,就产生一个干涉序差 Δm , 即

$$\Delta m = m - m_0 = \frac{2}{\lambda} \int_0^L [n(x, y, z) - n_0] dz \quad (3)$$

本文曾于1983年10月在西安中国工程热物理学会第四届年会上宣读.

测量出干涉序差的分布,再由方程(3)反演,从而可以求出每点折射率的变化,干涉仪的定量测量,就是从干涉图象上,测出每点条纹序的变化,然后求出折射率的分布.根据 Gladstone-Dale 方程有:

$$n - 1 = K\rho \quad (4)$$

K 是 Gladstone-Dale 常数,它是表示气体性质的一个量,随着探测光的波长不同而变化,通常与被测气体的温度、压力等依赖关系不大.对于空气,在 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ 时, $K = 2.268 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{kg}$. 对于理想气体,根据状态方程不难得到

$$n - 1 = Kp/RT \quad (5)$$

式(5)是折射率与温度的关系式.在考虑到被测区的压力是常数时,便有

$$n(x, y, z) - n_0 = \frac{Kp_c}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} \right) \quad (6)$$

如果折射率沿光轴方向(即 z 向),不发生变化时有

$$\Delta m(x, y) = \frac{2LKp_c}{\lambda R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} \right) \quad (7)$$

这样在干涉图象上测量出干涉序的改变量,并已知参考温度 T_c , 及压力 p_c 之后,便可由式(7)直接计算出温度分布.

为了方便起见,本文采用方形热管的冷端平面作为工作面,表面积为 $8 \times 8 \text{ cm}^2$. 工作表面的温度分布在试验前仔细地测量过,在 $30^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C}$ 之间,其表面温差不超过 1°C . 并在工作表面的垂直上方放置铜-康铜热电偶来测定参考温度. 热管的非工作面均采取了很好的绝热措施. 试验中利用激光双镜干涉仪的干涉条纹可以任意调整的特点,本文采用了无限宽条纹和有限宽条纹两种方法进行测量. 为了读数方便,本文均采用条纹与工作表面垂直的方法拍摄干涉图象. 在一维扫描显微密度计上读数,狭缝宽度为 20μ . 高度为 0.05 mm . 记录仪上放大 50 倍.

图 2 是水平等温平板自然对流的干涉图象及其定量结果. 采用无限宽条纹法拍摄,从干涉图象上不仅可以看出沿板的垂直方向上的温度分布,同时也可以看出在达到一定距离之后,气流便产生扰动.

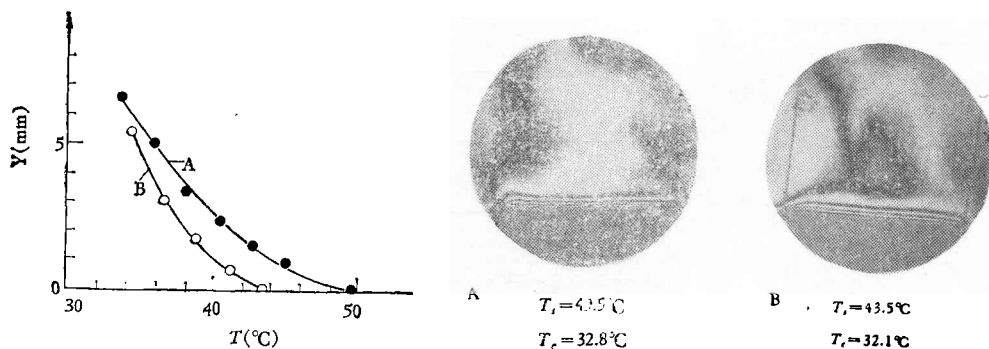
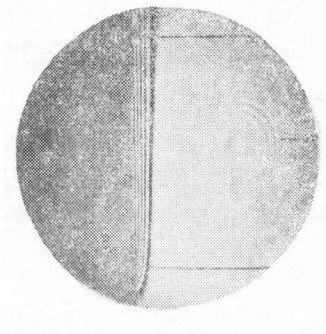
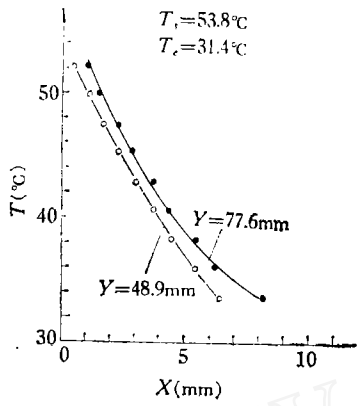


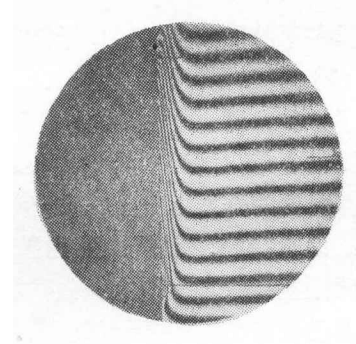
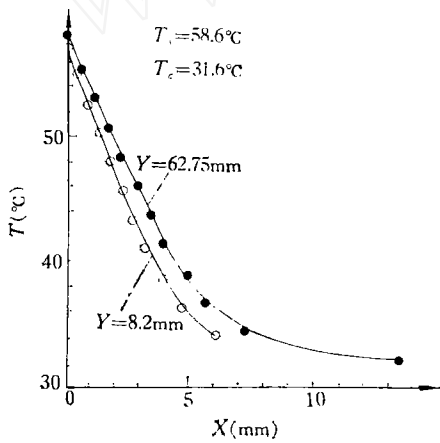
图 2 水平等温平板自然对流的干涉图象及其定量结果

图 3, 图 4, 是垂直等温平板自然对流的干涉图象及定量结果, 分别采用了无限宽条纹和有限宽条纹两种方法来进行定量测量, 其定量结果与理论分析一致, 将测量结果与



$T_i = 53.8^\circ\text{C}$
 $T_e = 31.4^\circ\text{C}$

图3 垂直板自然对流的干涉图象(无限宽条纹)及其定量结果



$T_i = 58.6^\circ\text{C}$
 $T_e = 31.6^\circ\text{C}$

图4 垂直板自然对流的干涉图象(有限宽条纹)及其定量结果

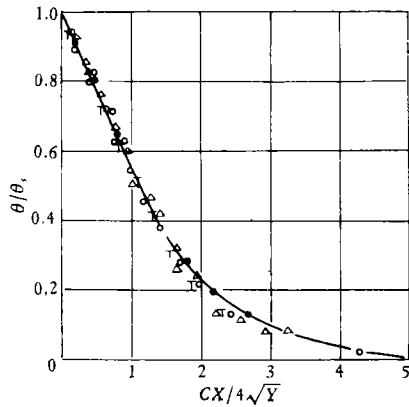


图5 垂直板自然对流测量结果与 Schmidt-Beckmann 理论值的比较

Schmidt-Beckmann 的严格理论解^[3]进行比较,有较好的吻合,见图5。其中采用无限宽条

纹法误差较大,其个别点最大误差在 13% 之内,而用有限宽条纹法其个别点最大误差不超过 6%。

激光双镜干涉仪的干涉方程是严格的,但是由于本身结构,光学元件的质量,试验中的操作,读数等等,都将引起一些误差而这些误差的最终结果都影响到定量的精度。这些误差中最主要的是平晶的质量,如本文中所采用的平晶,它本身就产生条纹有 1/10 波长的扭曲。如果条纹扭转一个波长相应温度变化是 4.6°C 的话,那么它本身就引起误差 0.46°C。这在采用一张干涉图象读数时,或是采用无限宽条纹法时,或是工作温度比较低时,影响就比较明显。激光是单色光源,必然会产生衍射,这就造成边缘轮廓不清楚,而近壁面处条纹又比较密集,这样在读数时就比较困难。边界效应也必然引起误差。Schmidt-Beckmann 在 M-Z 干涉仪上做过试验,由于边界效应的存在,所引起的误差可达 6%^[3]。在采用无限宽条纹法时,由于把条纹宽度调到大于平晶直径后,便无法确定条纹的实际宽度,这样就在条纹宽度还不是足够大时,便按无限宽来处理了。从而引起误差,本文在垂直板中的定量测量的结果,也说明了这个问题。因此所谓用无限宽条纹法可以得到等温线显示,严格地讲,它常常可能只是一个近似的等温线。就上述各项误差来讲,目前还不能确定每项在误差中占比例是多少。从试验结果来看,选择一对优质的平晶是十分重要的。

参 考 文 献

- [1] 王恩惠,王丰,汪铸,魏福清:“附面层内温度场的激光全息测量”,中国工程热物理学会传热传质学学术会议宣读论文,黄山,1981年10月。
- [2] Eckert/Goldstein: «Measurement Techniques in Heat Transfer» Technivision Services Slough, England A Division of Engethard Hanovis International Ltd., 1978.
- [3] Max Jakob: «Heat Transfer», John Wiley and Sons, Inc., New York, 1949.

THE MEASUREMENT OF TEMPERATURE FIELD OF NATURAL CONVECTION THE FLAT PLATE WITH THE LASER DOUBLE-MIRROR INTERFEROMETER (LDMI)

Yao Yongqing Shao-Yen Ko

(Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences)

Wu Baogen

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The LDMI was used to measure the temperature field of natural convection near flat plate of uniform temperature.

The quantitative results were obtained from the interference patterns. The measured temperature field for the vertically placed plate agreed quite well with theoretical solutions. The errors of measurements were discussed briefly.