

# 双频光栅纹影剪切干涉法对温度场的诊断\*

明海 周晨冈 刘宇 谢建平

霍然 李昌烽

(中国科技大学物理系, 合肥 230026) (中国科技大学工程热物理系, 合肥 230026)

**摘 要** 用双频光栅纹影剪切干涉法对无限热平板的自然对流温度场进行诊断. 纹影系统光线从轴外入射造成的系统象散、彗差对剪切干涉图的系统误差可以通过减小入射角、增大纹影仪球面镜的曲率半径以及调节双频光栅的位置控制在给定精度范围内.

**关键词** 双频光栅, 纹影剪切干涉法, 温度场.

## 1 引 言

近年来发展起来的全息双频光栅剪切干涉法具有实时性好, 装置简单等特点, 通过更换不同拍频周期的光栅可以改变测试的灵敏度, 且适用范围较广, 已用于火焰温度场<sup>[1]</sup>、风洞流场<sup>[2]</sup>、透镜象差<sup>[3]</sup>等测量. 采用 CCD 作为图象接收元件, 已可将图象转换为数字信息后输入计算机进行实时计算. 但以往一般的双频光栅剪切干涉装置以消象差球面透镜为主要成像元件, 由于加工条件等因素限制, 其透镜口径很难做得很大, 不能满足工程热物理中研究的实际温度场较大实验区测试的需要. 因此, 利用常规的纹影仪的光路作为全息双频光栅的剪切干涉光路将使剪切干涉仪同时具有视场范围大和实时等优点, 比现有干涉仪在应用上更有发展前途. 但由于光线从轴外入射, 造成彗差、象散对干涉图的影响, 本文对此作些分析.

## 2 原理与实验

以往的双频光栅剪切干涉光路如图 1 所示. He-Ne 激光经扩束和透镜  $L_2$  准直, 以平行光经过实验区入射到透镜  $L_3$  上, 在透镜  $L_3$  的焦点附近放置双频光栅 DH, 在其一级衍射角方向上观察干涉图样. 由于成像透镜采用傅里叶变换透镜, 保证了成像质量, 避免了透镜象差对剪切干涉图的影响. 本文采用大口径球面镜的双频光栅纹影剪切干涉光路, 如图 2 所示. He-Ne 激光扩束后从轴外投射到球面反射镜  $M_1$  形成平行光束通过实验区, 由反射镜  $M_2$  会聚平行光束于轴外焦平面上. 在该处附近放置双频光栅代换纹影仪的刀口, 在光栅一级衍射角方向放置观察屏观察干涉图样: 球面反射镜的口径可做得很大, 但因光束偏离光轴入射, 由此产生的象差将影响干涉图样的测量精度.

当实验区未加温度场时, 观察屏上的剪切条纹是由双频光栅衍射的两个球面波干涉产生

收稿日期: 1992年11月6日; 收到修改稿日期: 1993年1月18日

\* 国家自然科学基金资助项目.

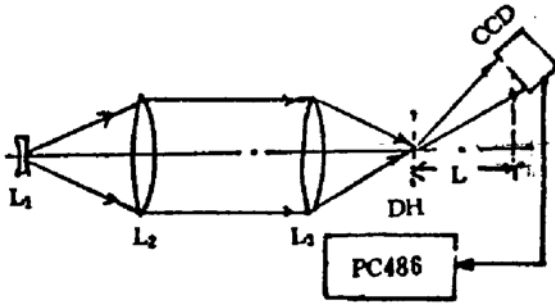


Fig. 1 Experimental setup of shearing interferometry with double frequency grating (DFG)

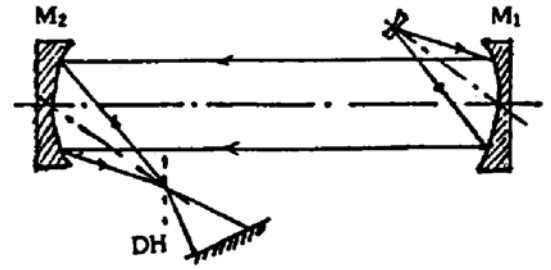


Fig. 2 Experimental setup of schlieren shearing interferometry with DFG

的平行直条纹, 条纹间距为:

$$S = d' (\cos \theta + L/D) \quad (1)$$

其中  $d'$  为双频光栅的拍频周期,  $\theta$  为双频光栅的一级平均衍射角,  $L$  是双频光栅到观察屏的沿光轴距离,  $D$  是球面反射镜  $M_2$  的焦平面到双频光栅的距离.

温度场的引入导致了气体密度  $\rho$  的变化, 从而使折射率  $n$  发生变化, 干涉条纹产生偏移. 气体的折射率与密度关系由 Glaston-Dale 公式描述:

$$n - 1 = k\rho \quad (2)$$

以沿光轴方向为  $z$  轴, 双频光栅剪切方向为  $x$  轴, 被测温度场引起的位相差为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{z_1}^{z_2} \left[ n\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y, z\right) - n\left(x - \frac{\Delta x}{2}, y, z\right) \right] dz \quad (3)$$

当剪切干涉量  $\Delta x$  远小于试验区沿轴长时, 上式可用泰勒公式展开\*,

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial x} dz \cdot \Delta x \quad (4)$$

则所引起的剪切条纹相对偏移为

$$\Delta S/S = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{\Delta x}{\lambda} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial x} dz \quad (5)$$

因此, 条纹的相对偏移量正比于剪切方向上折射率  $n$  的梯度, 对气体来说也就正比于该方向上的气体密度  $\rho$  的梯度.

温度场的分布可进而通过理想气体状态方程求得

$$T = \mu P/R\rho \quad (6)$$

其中  $T$  为温度,  $\mu$  为气体平均分子量,  $P$  为大气压,  $R$  为摩尔气体常数.

图 1 装置中双频光栅拍频周期  $d' = 0.15 \text{ mm}$ , 一级平均衍射角  $\theta = 18^\circ 50'$ , 双周期值  $d_1 = 1.948 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $d_2 = 1.973 \text{ }\mu\text{m}$ ; 图 2 中  $d' = 0.342 \text{ mm}$ ,  $\theta = 19^\circ 20'$ ,  $d_1 = 1.906 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $d_2 = 1.917 \text{ }\mu\text{m}$ . 纹影仪的球反镜  $M_1$ 、 $M_2$  的曲率半径  $R = 5.816 \text{ m}$ , 口径  $2h = 0.30 \text{ m}$ ,  $M_1$ 、 $M_2$  中心间距  $7 \text{ m}$ ; 热平板试件轴向长度  $l = 0.20 \text{ m}$ , 试验时室温  $T_\infty = 300.0 \text{ K}$ , 加热壁面经热电偶测量得  $T_{w1} =$

\* 这里只取线性项

385.9 K,  $T_{w2} = 359.6$  K. 纹影仪光源入射角  $\alpha$  为 0.026 rad.



Fig. 3 Interferogram of heating plate by experimental setup in Fig. 1



Fig. 4 Interferogram of heating plate by experimental setup in Fig. 2

分别采用图 1、图 2 装置所摄得竖直平板自然对流剪切干涉图照片如图 3、图 4 所示. 照片中左侧为热平板, 右侧为温度场的干涉条纹. 为使干涉条纹易于测量, 放置双频光栅使其剪切方向与平板面成锐角. 远离平板面为室温, 条纹为平行直线, 靠近热板则随温度变化而产生条纹的弯曲偏移, 在靠近热板面零点几毫米处可观察到干涉条纹的消失, 这是由于金属热板表面对光的散射而破坏了平面波型所致.

选择热边界层中某一横截面测量条纹偏移量对横向位移的离散关系, 用计算机拟合曲线  $\Delta S/S$ , 并据公式(2)、(5)计算密度梯度, 由积分得温度场分布, 结果如图 5、图 6 所示. 由上述两图中密度梯度曲线比较, 两者大体一致, 说明在球面镜曲率半径大、入射偏角小的情况下, 象差的影响可以控制在一定的误差范围内.

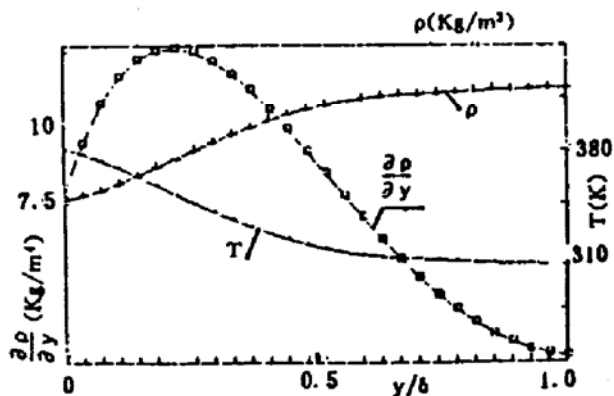


Fig. 5 Analysis result of Fig. 3

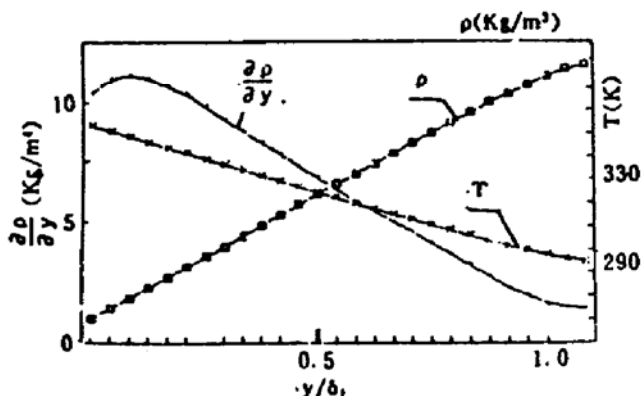


Fig. 6 Analysis result of Fig. 4

### 3 轴外象差对测量精度影响分析

纹影仪的点光源与球面镜  $M_1$  相距  $a$ , 为轴外点光源的球面系统成像, 等效光路图如图 7 所示. 实际成像波面偏离理想波面产生象散和彗差, 经双频光栅后使干涉条纹偏移, 产生了系统误差. 彗差和象散的波象差函数是:

$$\omega_1(x, y) = Bx(x^2 + y^2), \quad \omega_2(x, y) = C(x^2 - y^2)$$

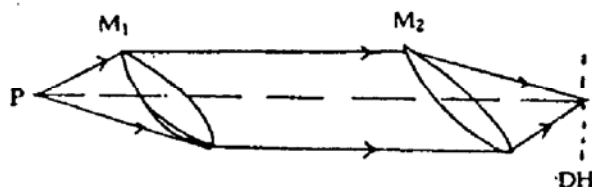


Fig. 7 Equivalent optical path of Fig. 2

式中  $B$  和  $C$  分别为彗差和象散系数, 与给定物点(光源)的视场角、反射镜曲率半径、介质折射率、物面和光阑的位置有关. 给定系统下, 这两个系数是物点视场角  $\alpha$  的函数.

理想球面波产生的剪切干涉条纹为

$$x_0 = k \frac{\lambda(L + D/\cos \theta)}{\Delta x} \approx k \frac{\lambda L}{\Delta x}, \quad \Delta x = \frac{D\lambda}{d'} \cos \theta \quad (7)$$

理想球面波上叠加波象差函数  $\omega_1(x, y)$  形成的干涉条纹为离焦椭圆:

$$3Bx^2 + By^2 + x = k(\lambda/\Delta x) \quad (8)$$

因观察屏上最大的条纹级数  $R_{\max}$  受系统光阑口径大小以及条纹间距的限制, 在彗差引起的系统光程差不超过  $\frac{\lambda}{\delta}$  的判定精度下, 经推导可得彗差系数  $B$  的上限:

$$B_{\max} = \frac{2}{1 + 3R^2(2Lh/r)^2} \quad (9)$$

式中  $R = (D/\cos \theta) + L \approx L$ ,  $2h$  为球面镜的口径. 经光路追迹计算, 此时的光源偏轴入射角  $\alpha$  为  $64^\circ$ , 一般纹影系统都满足入射角小于此值的条件, 因此彗差对干涉的影响可以忽略.

同样的判定精度下可得象散系数的上限

$$C_{\max} = \left[ 2L \left( \frac{2hL}{mrs} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (10)$$

式中  $m = \Delta S/S$  为象散造成的相对偏移, 可由上式反求得到  $m$  以估计误差

$$m = \Delta S/S = \frac{(1 + 2Lc)2hL}{rs} \quad (11)$$

当  $S = 5 \text{ mm}$ ,  $L = 0.2 \text{ m}$ , 光源偏轴入射角  $\alpha = 1.66^\circ$  时有象散系数  $C = 0.127 \text{ m}^{-1}$ , 产生的条纹平均偏移  $m = 0.05$ . 由(11)式可得, 象散产生的条纹平均偏移  $m$ , 可以通过增大球面反射镜的曲率半径  $r$ , 减小光源偏轴入射角从而减小彗差系数  $C$ , 减小双频光栅到观察屏的沿光轴距离, 以及调节光栅到球面反射镜  $M_2$  的焦平面距离  $D$  以使条纹间距  $S$  增大的办法, 控制在给定的精度内. 精确计算可由(11)式求得相对偏差并由计算机校正得到.

## 4 结 论

轴外光入射对纹影仪系统造成的象差对剪切干涉的影响总可控制在给定的精度范围内, 而且通过计算可以消去象差的影响而进一步提高实验精度. 双频光栅纹影剪切法可以有效地运用于较大实验区的温度场的实时诊断, 加上 CCD 转换器件及计算机处理能实时地完成纠象差等处理功能, 因此是一种很有前途的光学干涉装置. 正交双频光栅剪切干涉法和不同方向上放置的双频光栅剪切干涉法可分别用于非对称位相场和三维位相场的诊断.

## 参 考 文 献

- [1] Ming Hai, Xie Jianping, Luo Shouyu *et al.*, Shearing interferometry of double frequency grating to measure temperature field. *Proc. SPIE*, 1990, 1230: 215~216
- [2] 明海, 伍永安, 王奎等, 流场显示中的 NYAB 激光动态剪切干涉术. *中国激光*, 1991, 18(8): 633~635
- [3] 谢建平, 陈农, 吴云霞等, 全息双频光栅剪切干涉法测量透镜象差. *计量学报*, 1991, 12(1): 41~45

[4] 谢建平, 明海, 盛定远, 全息杨氏干涉仪. 仪器仪表学报, 1988, 9(3): 234~239

## Measurement of Temperature Field with Schlieren Shearing Interferometry of Double Frequency Gratings

Ming Hai    Zhou Chengang    Liu Yu    Xie Jianping

(*Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

Huo Ran    Li Changfen

(*Department of Engineering Thermophysics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*)

(Received 6 November 1992; revised 18 January 1993)

**Abstract.** This paper deals with the natural convection temperature field of unlimited heated plate with schlieren shearing interferometry of double frequency gratings. The effect of system astigmatism and coma to the interferometry diagram caused by the out-axis irradiation of light source can be reduced to a certain degree by reduction of incident angle, increase of radius of reflective mirror, and the adjustment of the position of double frequency grating.

**Key words** double frequency grating, schlieren shearing interferometry, temperature field.