

## 应用云纹法确定三维非对称的温度场

丁健生 宋福海 李靖生 高福昌 徐丽桂  
(扬州师范学院物理系)

凌德洪  
(苏州大学激光研究室)

**提要:** 本文应用 Moire 法确定三维非对称的温度场。平行光通过折射率存在梯度的场, 光线产生偏转, 即产生云纹效应。在十三个方向上, 测量了 182 个数据点, 用 Radon 数值逆变换, 得到了  $Z$  为常数的某个平面的折射率分布(即温度场)。

**关键词:** 相物体, 云纹偏转法, 温度场

### Analysis of 3-D asymmetric temperature field by moire deflectometry

*Ding Jiansheng, Song Fuhai, Li Jingsheng, Gao Fuchang, Xu Ligui*  
(Department of Physics, Yangzhou Teachers' College, Yangzhou)

*Lin Dehong*  
(Laser Research Lab., Suzhou University, Suzhou)

**Abstract:** The paper describes the analyses of 3-D asymmetric temperature field by moire deflectometry. The method is based on measuring the deflection of rays from a collimated light beam due to gradients in refractive index. The deflection data were reduced from the deflectograms at 182 positions of 13 viewing angles, and the temperature field in a particular plane ( $Z = \text{constant}$ ) was obtained by solving the inverse Radon transform.

**Key words:** Phase object, moire deflectometry, temperature field.

### 一、引言

应用云纹技术, 测量二维不对称的相物体, 方法简单、容易, 已有大量的报道<sup>[1]</sup>, 但用于三维相物体的测量, 则报道较少。本文应用云纹图的弯曲, 定量地确定了三维温度场。方法的要点是: 沿着光传播的路径, 折射率的变化将引起光线传播方向的偏转, 从而产生云纹效应。实验测出, 三维相物体不同方位的各组数据点的偏转值, 依据 Radon 逆变换<sup>[2]</sup>, 计算出三维相物体的折射率分布, 即确定了三维温度场。该方法确定的温度场, 与用温度计直接测定比较, 符合较好。

## 二、实 验

实验装置如图 1 所示,  $G_1$  和  $G_2$  为 Ronchi 刻线光栅, 两光栅间距相等 ( $p=0.2\text{mm}$ ),  $G_1$  与  $G_2$  相距为  $\Delta$  ( $\Delta=400\text{mm}$ ), 参考栅  $G_2$  的刻线方向为  $z'$  方向,  $G_1$  刻线方向与  $z'$  的夹角为  $\alpha$ 。

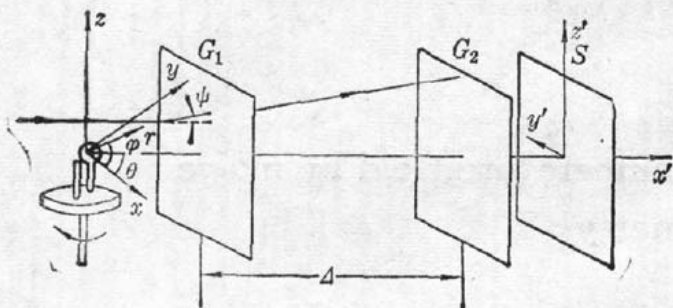


图 1

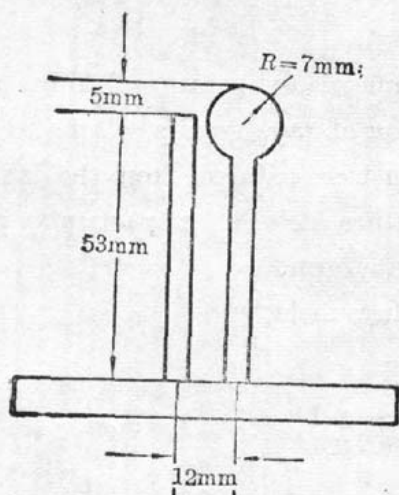


图 2

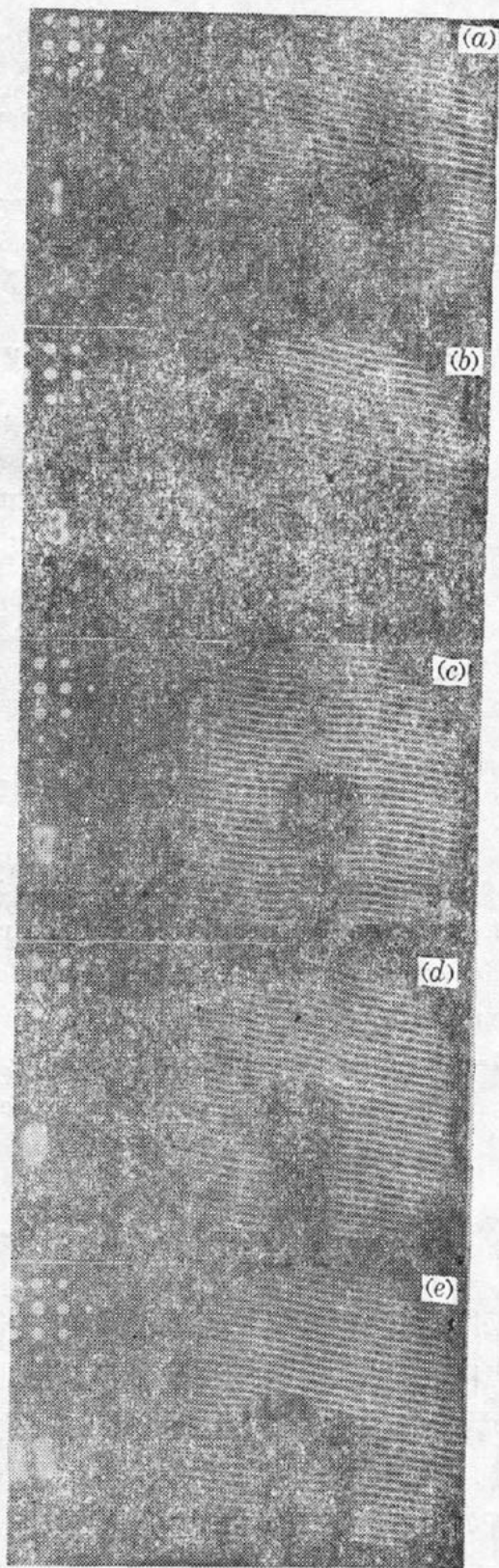


图 3

(a)  $\theta=0^\circ$ ; (b)  $\theta=30^\circ$ ; (c)  $\theta=90^\circ$ ; (d)  $\theta=30^\circ$ ;  
(e)  $\theta=60^\circ$

用 7 mW 的 He-Ne 激光器作平行光光源, 准直镜  $D=55\text{ mm}$ ,  $f=550\text{ mm}$ ,  $S$  为感光底片。三维相物体是由铜球和瓷棒组成, 由于内装电热丝, 通电加热之后便形成了三维温度场。铜球和瓷棒的尺寸、位置详见图 2, 球和棒的温度分别为 367 K、362 K, 室温 290 K, 压强  $P=758\text{ mmHg}$ 。

为测量三维的温度场, 旋转发热体的平台, 以代替旋转整个光路, 见图 1。令  $x$  轴与  $x'$  轴的夹角为  $\theta$ , 对于非对称的场,  $\theta$  从  $\pi/2$  转到  $-\pi/2$ , 每旋转  $15^\circ$ , 待系统达到热平稳后拍一张云纹图。曝光时间为 18 s, 图 3 给出了  $\theta$  分别为  $0^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $-90^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$  的云纹图。为了便于定位测量, 在拍摄每张云纹图的同时, 在底片的左上角摄下正交光栅的衍射花样。

### 三、理 论

平行光通过 Ronchi 光栅  $G_1$  和  $G_2$ , 在屏上形成云纹, 云纹直条纹间距为

$$p' = \frac{p}{2\sin(\alpha/2)} \quad (1)$$

测量出  $p'=1.5\text{ mm}$ , 由 (1) 式求出  $G_1$  刻线方向与  $z'$  的夹角  $\alpha=-7.6^\circ$ 。

设待测温度场的折射率分布为  $n(x, y, z)$ , 当平行光束通过该温度场时, 由于空气密度存在梯度, 故折射率存在梯度, 使平行光发生偏转, 从而导致云纹发生弯曲。一般偏转角很小,  $y'$  方向的偏转角  $\varphi$  与该方向上折射率的梯度有关。

$$\varphi = \frac{1}{n_\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial y'} \right| dx' \quad (2)$$

式中,  $n_\infty$  为远离加热体的空气折射率。

另外, 偏转角  $\varphi$  亦可根据云纹图得到<sup>[3]</sup>,

$$\varphi = \alpha h / \Delta \quad (3)$$

式中,  $h$  是加热前后云纹条纹位置的偏差, 可以通过云纹弯曲情况得到。

这样, 为求  $n(x, y, z)$ , 就必须求出偏转积分方程 (2) 的数学逆变换。

实验发现, 球的上方附近,  $z$  方向折射率梯度近似不变, 为讨论方便, 考虑  $z$  等于某个常数的确定平面, 折射率分布为  $n(x, y)$ 。换用柱坐标, 并考虑折射率的差值, 令

$$N(r, \psi) = n(r, \psi) - n_\infty$$

在给定观察方向  $\theta$  上, 光程的长度差可表示为<sup>[2]</sup>

$$F(y'\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} N(r, \psi) \delta[y' - r\sin(\psi - \theta)] dx dy \quad (5)$$

在此情况下, 方程 (5) 的逆变换即为 Radon 逆变换<sup>[2]</sup>

$$N(r, \psi) = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\theta \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial F}{\partial y'} \frac{dy'}{r\sin(\psi - \theta) - y'} \quad (6)$$

式中,  $\frac{\partial F}{\partial y'}$  与  $\varphi$  成正比, 因为根据 (2) 式有

$$\frac{\partial F}{\partial y'} = \frac{\partial}{\partial y'} \int [n(x, y, z) - n_\infty] dx' = n_\infty \varphi \quad (7)$$

所以, 当温度场为有限大时, 测出不同观察方向上的各组数据点的  $\varphi$  值, 即可求解方程 (6), 得

到  $N(r, \psi)$

再根据空气折射率与密度的关系<sup>[4]</sup>,  $n-1=0.226\rho$ , 以及熟知的空气密度与温度的关系, 即可得到温度场。

### 四、结果与讨论

1. 根据云纹图, 计算了铜球顶部上方  $z=4\text{mm}$  的平面的折射率分布 (即温度场)。取  $-2.6\text{cm}\leq y'\leq 2.8\text{cm}$ ,  $\theta=0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \dots, \pm 90^\circ$ , 在十三个方向上, 共取 182 个数据点, 表 1 中列出  $\theta=0^\circ$  时各个  $h$  值, 方程(6)的解列于图 4, 并根据图 4 描出温度场 (见图 5(a))。同理,  $z$  为其它值的温度场亦可求。此外还得到了  $T_{*}=386\text{K}$ ,  $T_{*}=377\text{K}$ ,  $T_{\infty}=280\text{K}$ ,  $P=774\text{mmHg}$ ,  $z=4\text{mm}$  的平面的温度场, 如图 5(b) 所示。

2. 得到的温度场与用 DM 801 热电偶温度计测量的外围的几个点的温度符合较好。由于没有点接触温度计, 不扰动地测量整个温度场是不可能的。在本实验装置中, 转动平台的轴

表 1 (单位 mm)

$y'$	-21	-18	-15	-12	-9	-6	-3	0	3	6	9	12	15	18	21	24
$h$	0	0	0.1	0.1	0.3	0.2	0.3	0.1	0.1	-0.1	-0.3	-0.4	-0.2	-0.1	0	0

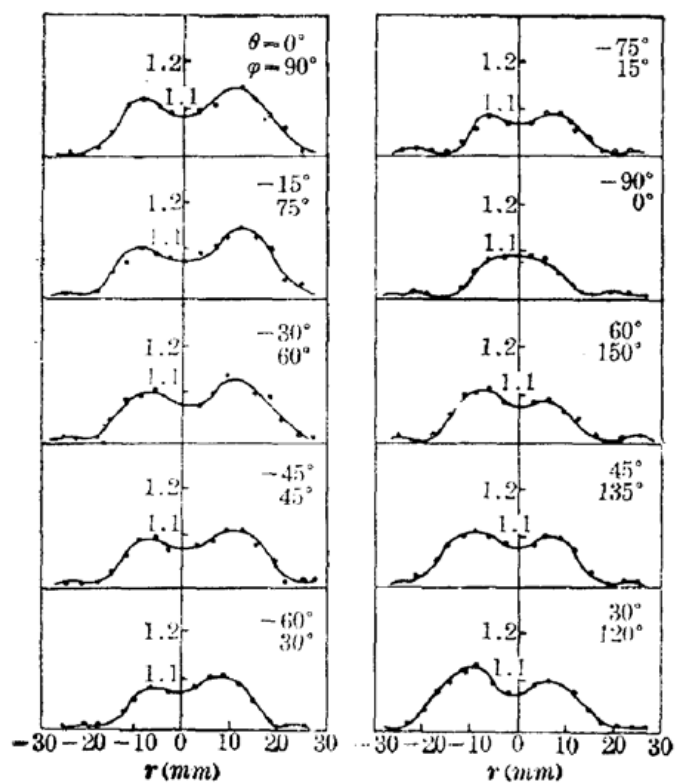


图 4

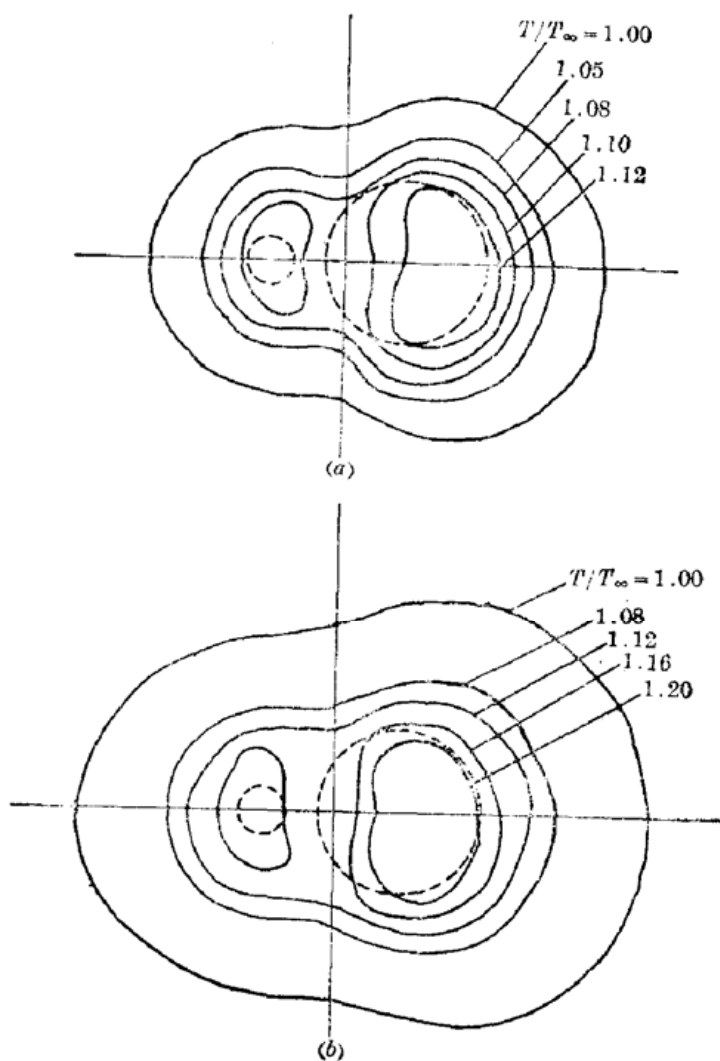


图 5

(下转第 17 页)

论和实验表明,利用材料的特征频率 $f_0$ ,描述涡流耗是可行的。由[6]可知

$$f_0 = 10^6 \rho_e / 2\pi^2 \mu t^2 \quad (4-1)$$

这里 $\rho_e$ 为材料的电阻系数( $\Omega\text{-cm}$ )。 $\mu$ 为恒定张力下的可逆性磁导率。 $t$ 为层厚( $\text{cm}$ )。由[6]中的实验结果表明:当调制频率 $f \leq 2f_0$ 。涡流耗是可容忍的。由[7]可知Ni的工作频率不大于100 kHz。现采用最坏情况估计,取 $f = 100 \text{ kHz}$ ,则 $f_0 = 50 \text{ kHz}$ ,由(4-1)可得

$$t = \sqrt{\frac{10^6 \times \rho_e}{f_0^2 \pi^2 \mu}} \quad (4-2)$$

代入Ni的有关参数<sup>[6]</sup>,即 $\rho_e = 9.8$ , $\mu = 19$ ,由(4-2)可得:

$$t = \sqrt{\frac{10^6 \times 9.8}{50 \times 10^3 \times 2 \times 3.14^2 \times 19}} \approx 0.72(\text{cm})。$$

也即采用纯镍为磁敏材料,厚度至多是毫米级。当然 $f$ 的降低,可使 $t$ 增厚。所以常采用小于或等于毫米级的厚度<sup>[4]</sup>。

### 参 考 文 献

- 1 A. Yariv *et al.*, *Opt. Lett.*, **5**(3), 87 (1980)
- 2 J. Jarzynski *et al.*, *Appl. Opt.*, **19** (22), 3476 (1980)
- 3 Thoms G. Giallorenzi *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-18**(4), 626 (1982)
- 4 United States Patent **4**, 587, 487; May 6, 1986
- 5 United States Patent **4**, 591, 786; May 27, 1986
- 6 H. Sussman *et al.*, *J. Acoustical Soc. of Am.*, **22** (4), 499 (1950)
- 7 C. M. Davis *et al.*, *J. Acoustical Soc. of Am.*, **28** (2), 286 (1956)
- 8 H. I. Heaton, *Appl. Opt.*, **19** (22), 3719 (1980)



(上接第12页)

线,与加热体的对称轴两轴线不完全重合,所以在计算中,应选择转动平台的轴线为柱坐标轴,来描述温度场。

3. 等温线( $T/T_\infty = 1.12$ ),对铜球和瓷棒不对称,这是由于球和棒内安装的电热丝都不在各自的中心轴线上,球和棒的温度也不同。

### 五、小 结

本文测量加热前后云纹条纹的偏差,应用 Radon 数值逆变换,定量地确定三维不对称的密度场(即温度场)。该方法的主要优点,一是对稳定性的要求不苛刻,不需要防震台,二是选用大尺寸的 Ronchi 刻线光栅,就可以确定大尺寸的三维温度场。不足之处和云纹图的其它用法一样,测量精度不如一般全息干涉计量。

### 参 考 文 献

- 1 E. Keren *et al.*, *Appl. Opt.*, **20**, 4263(1981)
- 2 C. M. Vest, *J. Opt. Soc. Am.*, **64**, 1215(1974)
- 3 O. Kafri, *Opt. Lett.*, **5**, 555 (1980)
- 4 R. C. Weast, Ed CRC Handbook of Chemistry and Physics (CRC Press, Ohio, 1973)