

莫尔偏转法测量相位物体的研究*

蔡伟建 游龙翔 陈远绳 曹向群

(浙江大学光仪系, 杭州 310027)

摘要 本文从几何光学和傅里叶光学中最基本的公式出发,推导出用莫尔偏转法测量相位物体的基本公式,为用莫尔偏转法测量相位物体提供了处理实验结果的理论依据,并对轴对称火焰温度分布进行了实测。

关键词 莫尔,测试,光栅,火焰温度

Testing optical phase object by Moire deflectometry

CAI Weijian, YOU Longxiang, CHEN Yuanshen, CAO Xiangqun

(Dept. of Opt. Instrum. Eng., Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract In this paper the principal formulae of phase object testing by Moire deflectometry are inferred from geometric and Fourier optics, and practical testing of an axially symmetrical flame temperature distribution is performed with its experimental results processed by the proposed formulae.

Key words Moire, testing, grating, flame temperature

1 引言

利用莫尔偏转法测量相位物体是近年来发展起来的一种新的光学测量技术,它是利用莫尔效应和泰伯(Talbot)效应对相位物体和镜反射表面进行光学检测,从而得到被测相位物体的某些特性参数,例如液体的折射率、透镜的焦距、火焰的温度分布等^[1~3]。

近年来国内对莫尔偏转法进行了广泛的研究,但较多的研究局限于特定的方法或现象,得到的是特定条件下的公式或结论,而没有从理论上对莫尔偏转法测量相位物体进行深入的分析 and 全面的概括,以便得到对这种测量方法更为全面的解释。

本文从《光学原理》^[4]中最基本的公式出发,结合傅里叶光学原理对莫尔偏转法测量相位物体从理论上进行了深入的研究,推导出在任意条件下都适用的测量莫尔偏转条纹的基本公式,从而为莫尔偏转法的应用提供了理论依据,并以此为基础,对轴对称火焰测试分布

收稿日期:1993年5月11日。

* 本课题为国家自然科学基金资助项目。

进行了测试,得到了较好的测试结果。

2 基本原理

2.1 被测相位物体空间折射率分布的求解

图 1 中,当用一束平行光束照射到光栅副 G_1 和 G_2 上,如果在光栅 G_1 前放一相位物体,此相位物体对光线是透射的(镜反射物体也可),其折射率空间分布为 $n(x,y,z)$,周围介质的折射率为 n_s ,平行光束经过相位物体后,以角 $\phi(x,y,z)$ 入射到光栅 G_1 上,为分析方便,只画了一条光线,并设其是发散的。

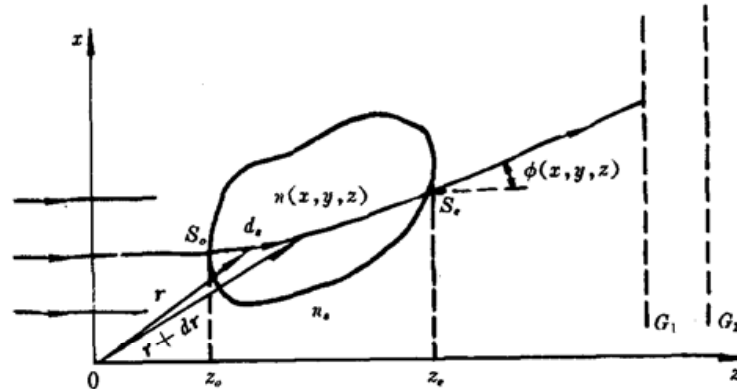


Fig. 1 Schematic of light beam deflection in an optical phase object

根据光线方程^[4]

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n \quad (1)$$

可见出射光线和入射光线之间的夹角 $\phi(x,y,z)$ 等于 dr/ds 在 x 方向上的分量,即

$$\phi(x,y,z) = \left[\frac{dr}{ds} \right]_x \quad (2)$$

将公式(2)代入(1),则有

$$\phi(x,y,z) = \frac{1}{n_s} \int_{s_0}^{s_e} \frac{\partial n(x,y,z)}{\partial x} ds \quad (3)$$

在一般情况下,偏转角 ϕ 很小,故可利用近轴近似

$$\phi(x,y,z) = \frac{1}{n_s} \int_{z_0(x,y)}^{z_e(x,y)} \frac{\partial n(x,y,z)}{\partial x} dz \quad (4)$$

如果要知道被测相位物体的某些特性参数,就需要知道其折射率的空间分布 $n(x,y,z)$,从公式(4)看到,如果求得偏转角的空间分布,也就求出了折射率的空间分布。

然而一般相位物体的折射率空间分布是任意的,偏转角的分布也是任意的,因而公式(4)很难解出。但如果相位物体的折射率空间分布具有某些特定规律,就可以求得偏转角的空间分布,从而得到折射率的空间分布。下面对光学检测中常出现的轴对称分布情况做一具体分析。

在图 2 中,由于折射率是轴对称分布,有

$$x^2 + z^2 = r^2 \quad (5)$$

$$\frac{\partial n(x,y,z)}{\partial x} = \frac{x}{r} \cdot \frac{\partial n(y,r)}{\partial r} \quad (6)$$

代入公式(4)得

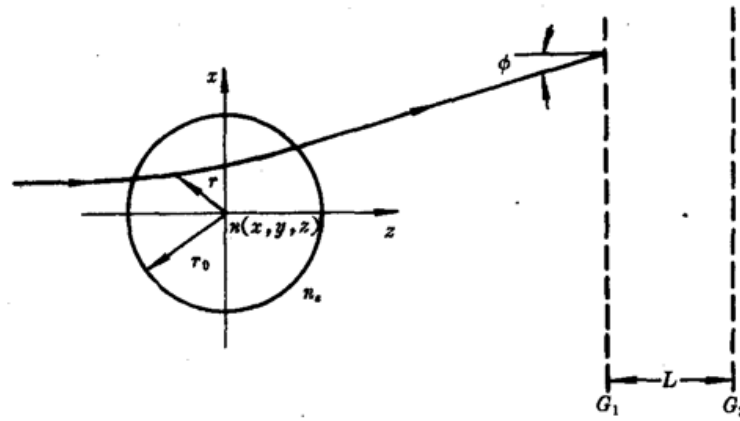


Fig. 2 Formulating refractive index profile of an axially-symmetrical phase object by Moire deflectometry

$$\phi(x, y, z) = \frac{x}{n_s} \int_x^{r_0} \frac{\partial n(y, r)}{\partial r} \cdot \frac{dr}{(r^2 - x^2)^{1/2}} \tag{7}$$

式中 r_0 是被测相位物体的边界。

根据 Abel 变换, 公式(7)变为

$$n(y, r) = n_s - \frac{2n_s}{\pi} \int_r^{r_0} \frac{\phi(x, y, z)}{(x^2 - r^2)^{1/2}} dx \tag{8}$$

只要知道轴对称相位物体的偏转角空间分布, 就可得到其折射率的空间分布。

2.2 平行光束通过相位物体后其偏转角空间分布的求解

根据图 1, 光栅 G_1 前表面处光场的复振幅分布为

$$u_1^-(x_1, y_1) = A \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 \sin \phi_x + y_1 \sin \phi_y)\right] \tag{9}$$

光栅 G_1 后表面处的复振幅分布为

$$u_1^+(x_1, y_1) = t_1(x_1, y_1) u_1^-(x_1, y_1) \tag{10}$$

光场传播到光栅 G_2 前表面处的复振幅分布为

$$u_2^-(x_2, y_2) = \frac{\exp(ikL)}{i\lambda L} \cdot q\left(x_2, y_2; \frac{1}{\lambda L}\right) \iint_{-\infty}^{\infty} u_1^+(x_1, y_1) q\left(x_1, y_1; \frac{1}{\lambda L}\right) \cdot \exp\left[-i2\pi\left(\frac{x_2}{\lambda L}x_1 + \frac{y_2}{\lambda L}y_1\right)\right] dx_1 dy_1 \tag{11}$$

式中,

$$q(x, y; 1/\lambda L) = \exp[i\pi/\lambda L(x^2 + y^2)]^{[5]} \tag{12}$$

设光栅 G_2 位于光栅 G_1 的泰伯像面处, 即

$$L = l \frac{2P_1^2}{\lambda} \quad l = 0, 1, 2, \dots \tag{13}$$

最后解出

$$u_2^-(x_1, y_2) = K \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \exp\left\{i2\pi \frac{n}{P_1} [(x_2 \cos \theta - L \cos \theta \cdot \sin \phi_x) + (y_2 \sin \theta - L \sin \theta \cdot \sin \phi_y)]\right\} \tag{14}$$

它与光栅 G_1 的复振幅透过率分布完全相似, 只是此光栅像的位置与原光栅 G_1 的位置相比较, 沿 x_2 和 y_2 方向有一移动, 移动量为

$$\Delta x_2 = L \cdot \cos \theta \cdot \sin \phi_x \quad \Delta y_2 = L \cdot \sin \theta \cdot \sin \phi_y \tag{15}$$

通常莫尔条纹的空间周期由下式决定

$$W = P/2\sin\theta \quad (16)$$

当光栅 G_1 沿 x 方向相对于 G_2 有一微量移动 Δx 时,莫尔条纹的移动量为

$$\Delta W = \Delta x/2\sin\theta \quad (17)$$

由于光栅 G_1 前相位物体的存在,使得入射的平行光束发生偏转, G_1 的泰伯像沿 x 和 y 方向均产生一偏移量,在一般情况下, θ 角很小,偏转角 ϕ 也很小,因而有

$$\Delta y_2 = L \cdot \sin\theta \cdot \sin\phi_y \ll W \quad (18)$$

$$\Delta x_2 = L \cdot \cos\theta \cdot \sin\phi_x \approx L \cdot \phi_x = L \cdot \phi \quad (19)$$

代入公式(17)得

$$\phi(x, y, z) = \frac{\lambda}{2lP_1} \cdot \frac{\Delta W(x_2, y_2)}{W} \quad l = 0, 1, 2, \dots \quad (20)$$

这样只要在光栅 G_2 后表面测得莫尔偏转条纹的空间周期 W 和不同 x_2, y_2 位置处莫尔条纹的偏移量 $\Delta W(x_2, y_2)$, 就可以得到平行光束通过相位物体后偏转角的空间分布 $\phi(x, y, z)$, 再代入公式(8) 得到折射率的空间分布 $n(x, y, z)$, 进而得到相位物体的一些其它特性参数。

3 轴对称火焰温度分布的测试

温度的准确计量一直是一个很重要的研究课题,常规的测温方法只能对火焰温度进行逐点测量或逐条环带测量,利用莫尔偏转法对轴对称火焰温度的空间分布同时进行整体温度场的测试描绘是一个新的尝试。

3.1 混物质燃烧时其火焰温度分布的计算

根据克分子折射度的定义^[6]

$$A = \frac{M}{\rho} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{RT}{P} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \quad (21)$$

式中, A 为克分子折射度; M 为分子量; ρ 为密度; P 为压力; T 为绝对温度; R 为普适气体常数。

混合物质的克分子折射度可写为

$$A = \frac{N_1 A_1 + N_2 A_2 + \dots}{N_1 + N_2 + \dots} \quad (22)$$

其中 N 为分子数。

这样就可以得到火焰温度分布的计算公式

$$T = \frac{P}{R} \cdot \frac{n^2 + 2}{n^2 - 1} \cdot \frac{\sum A_i \rho_i'}{\sum \rho_i'} \quad (23)$$

式中, P 为燃烧气体的压强; n 为燃烧火焰气体的折射率; A_i 为火焰中第 i 种成份气体的克分子折射度; ρ_i' 为火焰中第 i 种成份气体的克分子密度。

在轴对称燃烧火焰中某一高度某一半径处的温度可用下式计算

$$T(y, r) = \frac{n_f^2 - 1}{n^2(y, r) - 1} \cdot \frac{n^2(y, r) + 2}{n_f^2 + 2} \cdot \frac{k(y, r)}{k_f} \cdot T_f \quad (24)$$

式中, n_f 为燃烧火焰周围环境的折射率; T_f 为燃烧火焰周围环境的绝对温度; $n(y, r)$ 为燃烧火焰某一高度某一半径处的折射率; $k(y, r)$ 为燃烧火焰在某一高度某一半径处的平均克分子折射度, 且

$$k(y, r) = \frac{\sum A_i \rho_i'}{\sum \rho_i'} \quad (25)$$

k_f 为燃烧火焰周围环境的平均克分子折射度,且

$$k_f = \frac{\sum A_i \rho_i^f}{\sum \rho_i^f} \quad (26)$$

为了得到准确的温度分布,必须知道燃烧火焰中各种物质成份的准确空间分布,这是比较困难的,但是如果燃烧火焰中某种物质成份的折射率差占主要优势或几种主要物质成份的折射率差相近时, $k(y,r)$ 可用一个与高度和半径无关的平均值 k_{av} 来代替,于是公式(24) 变为

$$T(y,r) = \frac{n_f^2 - 1}{n^2(y,r) - 1} \cdot \frac{n^2(y,r) + 2}{n_f^2 + 2} \cdot \frac{k_{av}}{k_f} \cdot T_f \quad (27)$$

3.2 实验测试装置

实验装置如图 3 所示。

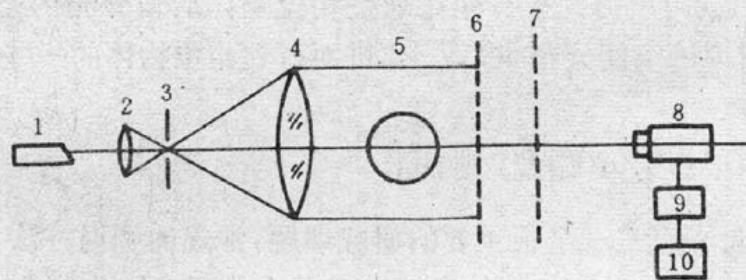


Fig. 3 Experimental setup for measuring alcohol burner flame by Moire deflectometry

1—He-Ne laser; 2—Beam-expander; 3—Pin-hole; 4—Collimating lens; 5—Alcohol burner; 6—Grating G_1 ; 7—Grating G_2 ; 8—Video camera; 9—A/D converter; 10—Microcomputer

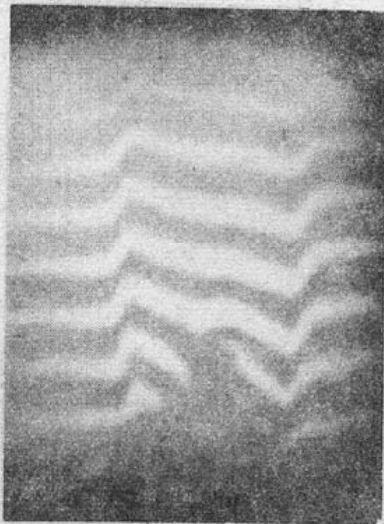


Fig. 4 Moire deflectometric pattern of an alcohol burner flame

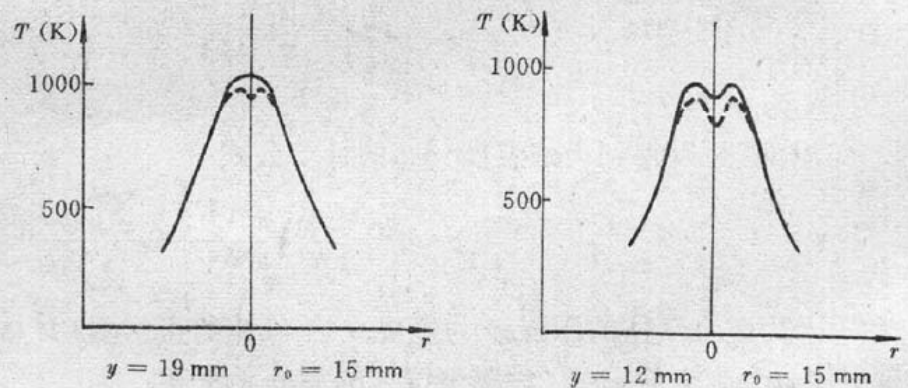


Fig. 5 Temperature profiles of an alcohol burner flame measured by thermocouple (thick dark line) and Moire deflectometry (dashed line)

氩氖激光器经过扩束准直后平行照射到被测火焰及光栅副上,在光栅 G_2 后表面处形成莫尔偏转条纹,摄像机将条纹拍摄下来,然后通过接口装置与微机相连,经过微机数字图像处理得到燃烧火焰在不同高度不同半径处温度场的分布情况。我们对酒精灯火焰温度分布进行了实测,给出了酒精灯火焰的莫尔偏转条纹照片(图 4) 和其中两个高度的温度分布情况(图 5),

并同用热电偶测量的结果进行了对比测定。

从实验测试结果看,莫尔偏转法测量的温度比用热电偶测得的温度低,本身精度也不太高,这是因为酒精灯燃烧时不十分稳定,易受空气气流的影响,数字图像处理及有关公式计算也存在误差。若要进一步提高精度,应采用脉冲激光器,并提高 A/D 转换的速度等。

参 考 文 献

- 1 O. Kafri, *Opt. Lett.*, **5**(12), 555(1980)
- 2 O. Kafri, A. Livnat *et al.*, *Appl. Opt.*, **21**(21), 3884(1982)
- 3 E. Keren, E. Bar-Ziv *et al.*, *Appl. Opt.*, **20**(24), 4263(1981)
- 4 M. 玻恩, E. 沃尔夫, 光学原理, 科学出版社, 1979, 165
- 5 J. D. 加斯基尔, 线性系统·傅里叶变换·光学, 人民教育出版社, 1981, 360
- 6 M. 玻恩, E. 沃尔夫, 光学原理, 科学出版社, 1979, 123

第五届全国光学测试学术交流会 在曲阜召开

由中国光学学会光学测试专业委员会主办,山东激光学会和曲阜师范大学激光研究所承办的第五届全国光学测试学术交流会于 1993 年 10 月 6 日至 9 日在山东曲阜市曲阜师范大学召开。来自全国 15 个省市共 112 名代表出席了会议。大会共收到近 200 篇论文,已选编成册。

大会安排了 4 篇大会报告,受到代表们的欢迎。具体是:李国华教授的“偏光技术与偏光器件的发展和未来”;李锡善研究员的“光盘的有关问题”;郑克哲高工的“国防光学计量一级站技术发展现状”;陈进榜教授的“日本光电工业结构浅析”。尔后设三个分会场,就近两年来光学测试领域里的新进展进行了报告和讨论。代表们充分认识到科学要发展,计量要先行,发言踊跃,气氛热烈。

与会代表参观了曲阜师范大学激光研究所,并就有关激光偏光器件等问题和李国华等教授展开了讨论。

另外,光学测试专业委员会举行了会议,讨论决定第六届全国光学测试学术交流会将在昆明市举行。

(赵梅村)