

基于莫尔条纹原理的两种非接触光测量

陈晓莹 王丽 黄靖元 李辉林 李宏彬

(华南师范大学物理与电信工程学院 广东 广州 510006)

(收稿日期:2017-05-31)

摘要:激光莫尔条纹测量是一项非接触性测量的技术手段,也是一项运用非常广泛的测量方法.本文意在通过研究激光莫尔条纹测量,能够提供更加行之有效而精确度高的测量方法.首先说明了莫尔条纹的形成原理,其次系统地介绍了一起实验的设计,以及设计仪器的思路和构想,最后整理实验的数据并分析后得出结论.

关键词:莫尔条纹 固体线膨胀系数 透镜焦距 光栅

1 引言

目前,随着光测量装置的不断革新,莫尔条纹技术测量的发展也非常迅速.它俨然已经成为非接触性测量领域各国家较量的重要技术.从应用上来看,它的用途十分多样,几乎渗透到我们生产生活中的方方面面,如工厂制造业、航空航天航海、各大高校教育以及国家安全基础设施建设等各个方面.对于激光莫尔条纹测量技术的研究,存在很大的实践空间.

2 实验原理

2.1 莫尔偏折法测量透镜焦距

莫尔偏折法测量原理光路图如图1所示.

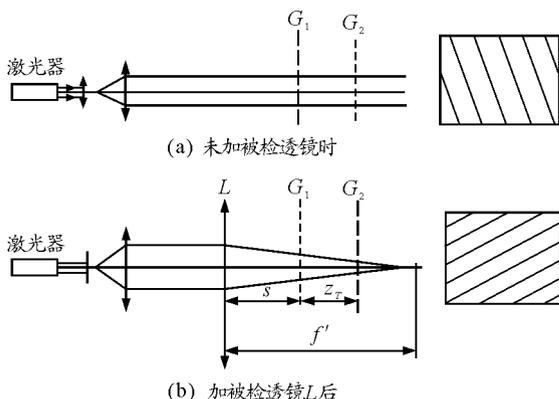


图1 莫尔偏折法测量原理光路图

从激光发射的光照至光栅 G_1 上, G_1 和 G_2 所在

面垂直于光轴,两者相距 z_T , G_1 和 G_2 的栅线夹角为 θ ,于是紧靠在 G_2 后的接受屏上产生清晰的条纹.加入被检透镜 L 后,在双光栅系统中的光波偏折为球面波, G_2 后的接受屏上产生的条纹在方向和宽度上都产生变化,条纹偏折的方向和大小与透镜焦距正负与长短有关,测其偏转角 α 即可求透镜焦距.

若未放置被检透镜 L ,双光栅处于平行光路中, G_1' 与 G_2 栅距相等,栅线夹角为 θ ,产生的莫尔条纹偏离 x 轴 $\frac{\theta}{2}$ 角,条纹间距 ω_0 为

$$\omega_0 = \frac{d}{2 \sin \frac{\theta}{2}}$$

若加上被检透镜 L , G_1 的节距变为

$$d_1 = d \left(1 - \frac{z_T}{f' - s} \right)$$

式中 f' 为 L 的焦距; s 为 L 的像方主面到光栅面 G_1 的间距,这时 G_1' 的栅线仍与 G_1 的栅线平行, G_1' 与 G_2 迭合产生一组方向和宽度都已变化的新莫尔条纹.经过几何关系推导,可得透镜焦距的计算公式为

$$f' = s + \frac{z_T}{2} \left(1 + \frac{1}{\tan \alpha \tan \frac{\theta}{2}} \right)$$

其中 f' 为待测透镜的焦距, θ 为 G_1 与 G_2 的栅线交叉角, α 为新旧莫尔条纹方向偏转角, s 为待测透镜的像方主面到光栅面 G_1 的间距, z_T 为两光栅平面之间的距离.

2.2 莫尔条纹测量固体线膨胀系数

测量固体线膨胀系数对于微小位移量变化的测量要求很高,而莫尔条纹技术具有位移高倍率放大的光学特性,可对位移量进行准确的测量和控制.

将两相同的一维光栅成一小角度 θ ,在光栅表面便能观察到莫尔条纹,其中莫尔条纹间距由光栅常数和两光栅栅线夹角 θ 决定,其中光栅常数 d 和光栅夹角 θ 的关系满足

$$W = \frac{d}{2\sin\frac{\theta}{2}}$$

其中 W 为莫尔条纹间距, d 为光栅常数, θ 为两光栅的夹角.

当两光栅夹角 θ 一定时,若两光栅相对移动一个栅距,莫尔条纹也将移动一个间距.因此,反之若莫尔条纹移动一个间距,两光栅也同时移动一个栅距.

同时在一定温度范围内,当金属棒受热时,它的线度会随着温度的变化而变化,其中关系满足

$$\Delta L = \alpha l (t_2 - t_1)$$

式中 ΔL 为金属棒线度变化量, α 为金属棒的线膨胀系数, l 为金属棒原长, t_2 为末温度, t_1 为初始温度.

本实验中,固定其中一个光栅,将另一光栅与金属棒相连,对金属棒的加热,当金属棒受热膨胀,在一维方向上伸长,由于金属棒的受热膨胀变化,则相连光栅相对于固定光栅产生微小位移 ΔL .同时,莫尔条纹也相对于某点移动一段距离 Δw .我们测量莫尔条纹移动距离 Δw ,则由 $\Delta w = \frac{\Delta L}{2\sin\frac{\theta}{2}}$ 关系

$$\Delta L = 2\Delta w \sin\frac{\theta}{2}$$

其中金属棒膨胀长度满足

$$\Delta L = \alpha l (t_2 - t_1)$$

则

$$\alpha = \frac{2\Delta w \sin\frac{\theta}{2}}{l(t_2 - t_1)}$$

其中 Δw 为莫尔条纹移动距离, θ 为两光栅的夹角, α 为金属棒的线膨胀系数, l 为金属棒原长, t_2 为末温度, t_1 为初始温度.

2.3 实验内容与步骤

2.3.1 莫尔偏折法测量透镜焦距

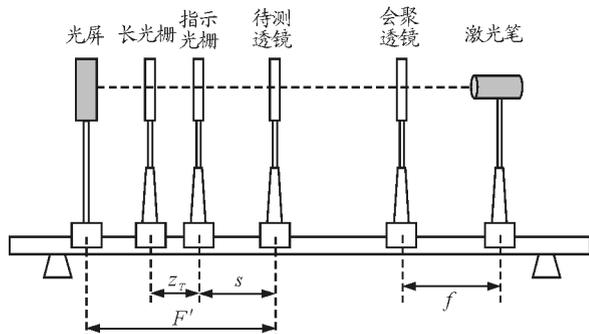


图2 测量透镜焦距装置图

(1) 整理实验仪器使其处于同一水平.

(2) 将两片光栅以一个小角度($\theta = 8^\circ$)放置,然后移动会聚透镜、双光栅系统的位置,使光屏上出现清晰的莫尔条纹.

(3) 测量出莫尔条纹在待测透镜插入前与水平方向的夹角 α_1 ,插入后的莫尔条纹与水平方向的夹角 α_2 ,最后并求出两个方向的夹角 $\alpha = |\alpha_1 - \alpha_2|$.

(4) 测量出两片光栅的距离 z_T 以及待测透镜到第一片光栅的距离 s .代入公式可求出待测透镜的焦距 f' .

(5) 重复以上步骤4次以确保实验结果的准确性.

2.3.2 莫尔条纹测固体线膨胀系数

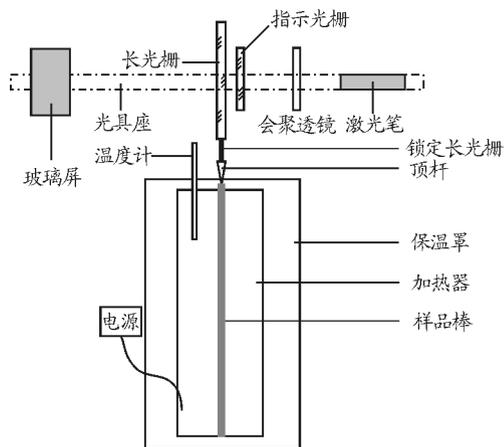


图3 测量固体线膨胀系数装置图

(1) 本实验测得为金属棒铜胀系数,先通过测量得到金属棒长度 l ,之后将金属棒放入加热器中.两片光栅以一个小角度 θ 叠放并放置在光具座上,其中一片与顶杆相连.

(2) 连接实验仪器,调整仪器的位置,使玻璃屏上能观察到清晰可读的莫尔条纹.

(3) 启动加热器,将目标温度定为 70°C ,待升温至 35°C 时开始读数,用照相机记录下此时亮纹的位置 w ,此后每隔 5°C 读取一次该条纹的位置,直至升温至 70°C ,共记录 8 组数据.

(5) 由莫尔条纹每 5°C 升温前后的两个位置可求得莫尔条纹移动距离 Δw ,运用公式可求出金属棒的热膨胀系数 α .

(6) 用铝和铜棒两种材质进行实验,每组进行 5 次重复实验,以确保实验结果的准确性.

3 结果及分析

3.1 莫尔偏折法测量透镜焦距

3.1.1 数据处理

两光栅间隔 $s_T = 0.60\text{ cm}$;

两光栅栅线夹角 $\theta = 5^{\circ}$;

表 1 莫尔偏折法测量透镜焦距数据表

s/cm	10.00	10.10	10.15	10.25	10.35
$\alpha_1/(\text{C}^{\circ})$	15.524	14.331	12.995	13.496	25.741
$\alpha_2/(\text{C}^{\circ})$	6.242	2.785	1.469	3.145	17.162
f'/cm	36.550	31.401	31.488	34.039	39.089

3.1.2 误差分析

由于测量过程的测量次数不能达到无限,需要对实验结果进行随机误差的估算.结合表中数据以及贝塞尔公式

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

可得

$$\bar{x} = 34.513\text{ cm}$$

$$S_x = 3.32\text{ cm}$$

由于在测量过程中,测量次数是有限的,故随机误差分布不是正态分布,而是 t 分布.对 t 分布进行修正,由公式

$$\Delta_A = \frac{t}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 4.128\text{ cm}$$

故测量数值: $f' = 35 \pm 5\text{ cm}$.

与透镜焦距参数 ($f = 30\text{ cm}$) 比较,百分偏差由公式

$$E = \frac{|\bar{x} - x_{\text{理}}|}{x_{\text{理}}} \times 100\% = 11\%$$

通过相对不确定度的计算,数据的相对不确定度控制在 11% ,实验结果从结果上看是较为精确的.

3.2 莫尔条纹测量固体线膨胀系数

3.2.1 数据处理

光栅常数 $d = 6\text{ 条/mm}$;两光栅栅线夹角 $\theta = 5^{\circ}$;金属棒的原长为 $L = 40\text{ cm}$;

(1) 铝棒

铝棒的莫尔条纹法测量热膨胀系数值如表 2 所示.

表 2 莫尔条纹法测量铝棒热膨胀系数表

温度 / $^{\circ}\text{C}$		35	40	45	50	55	60	65	70
1	$\Delta w/\text{cm}$	0	0.137 600	0.045 870	0.027 500	0.036 700	0.009 200	0.156 000	0.064 220
	$\Delta l/\text{cm}$	0	0.012 004	0.004 002	0.002 399	0.003 202	0.000 803	0.013 609	0.005 602
2	$\Delta w/\text{cm}$	0	0.085 470	0.123 400	0.056 980	0.037 990	0.113 900	0.037 990	0.170 900
	$\Delta l/\text{cm}$	0	0.007 656	0.010 765	0.049 710	0.003 314	0.009 936	0.003 314	0.014 909
3	$\Delta w/\text{cm}$	0	0.077 810	0.060 519	0.103 746	0.086 455	0.112 392	0.008 646	0.138 329
	$\Delta l/\text{cm}$	0	0.006 787	0.005 280	0.009 051	0.007 542	0.009 806	0.000 754	0.012 039
4	$\Delta w/\text{cm}$	0	0.067 797	0.059 322	0.059 322	0.059 322	0.067 797	0.059 322	0.042 373
	$\Delta l/\text{cm}$	0	0.005 914	0.005 175	0.005 175	0.005 175	0.005 914	0.005 175	0.003 696
5	$\Delta w/\text{cm}$	0	0.166 667	0.055 556	0.119 048	0.015 873	0.047 619	0.055 556	0.039 683
	$\Delta l/\text{cm}$	0	0.014 539	0.004 847	0.010 381	0.001 384	0.004 154	0.004 846	0.003 462

(2) 铜棒

铜棒的莫尔条纹法测量热膨胀系数值如表3所示。

表3 莫尔条纹法测量铜棒热膨胀系数表

温度 / °C		35	40	45	50	55	60	65	70
1	$\Delta w/\text{cm}$	0	0.008 156	0.089 670	0.057 000	0.024 460	0.065 220	0.097 800	0.008 152
	$\Delta l/\text{cm}$	0	0.000 712	0.007 823	0.004 973	0.002 134	0.005 690	0.008 532	0.000 711
2	$\Delta w/\text{cm}$	0	0.103 450	0.051 700	0.134 500	0.082 760	0.041 380	0.082 760	0.041 380
	$\Delta l/\text{cm}$	0	0.009 025	0.004 510	0.011 734	0.007 220	0.003 610	0.007 220	0.003 610
3	$\Delta w/\text{cm}$	0	0.124 000	0.107 500	0.057 880	0.066 150	0.066 150	0.066 150	0.033 080
	$\Delta l/\text{cm}$	0	0.010 818	0.009 378	0.005 049	0.005 771	0.005 771	0.005 771	0.002 886
4	$\Delta w/\text{cm}$	0	0.087 719	0.061 404	0.070 175	0.061 404	0.078 947	0.026 316	0.017 544
	$\Delta l/\text{cm}$	0	0.007 653	0.005 356	0.006 124	0.005 356	0.006 883	0.002 294	0.001 527
5	$\Delta w/\text{cm}$	0	0.042 135	0.016 853	0.067 416	0.067 416	0.058 989	0.042 135	0.033 708
	$\Delta l/\text{cm}$	0	0.003 675	0.001 470	0.005 881	0.005 881	0.005 146	0.003 675	0.002 941

(3) 平均值

值如表4所示。

铜棒和铝棒的莫尔条纹法测量热膨胀系数平均

表4 莫尔条纹法测量铝、铜棒热膨胀系数平均值表

$\alpha/^\circ\text{C}$	1	2	3	4	5	平均值
材料						
铜 / $\times 10^{-5}$	2.184	3.352	3.246	2.514	2.048	2.668
铝 / $\times 10^{-5}$	2.973	3.905	3.661	2.588	3.115	3.248

3.2.2 误差分析

$$\Delta_A = 0.7 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

(1) 铜棒

与铜的公认线膨胀系数参数($\alpha = 1.80 \times 10^{-5}$

由于测量过程的测量次数不能达到无限,需要对实验结果进行随机误差的估算.结合表中数据以及贝塞尔公式

$^\circ\text{C}^{-1}$)比较,百分偏差由公式

$$E = \frac{|\bar{\alpha} - \alpha_{\text{理}}|}{\alpha_{\text{理}}} \times 100\% = 50\%$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

(2) 铝棒

由于测量过程的测量次数不能达到无限,需要对实验结果进行随机误差的估算.结合表中数据以及贝塞尔公式

可得

$$\bar{\alpha} = 2.7 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$S_x = 0.6 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

由于在测量过程中,测量次数是有限的,故随机误差分布不是正态分布,而是 t 分布.

对 t 分布进行修正,由公式

$$\Delta_A = \frac{t}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

可得

$$\bar{\alpha} = 3.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$S_x = 0.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

由于在测量过程中,测量次数是有限的,故随机误差分布不是正态分布,而是 t 分布.

对 t 分布进行修正,由公式

$$\Delta_A = \frac{t}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

$$\Delta_A = 0.6 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

与铝的公认线膨胀系数参数($\alpha = 2.30 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)比较,百分偏差由公式

$$E = \frac{|\bar{\alpha} - \alpha_{\text{理}}|}{\alpha_{\text{理}}} \times 100\% = 39.1\%$$

4 结论

对于线膨胀系数和透镜焦距,它们都是非常难以直接测量的物理量.我们通常会采用经典的接触性测量的方法,例如使用千分尺等度量工具.本文提供了一种更加精确的非接触性测量方法,通过莫尔条纹实现了对微小量的测量,并提供了一套完备的微小位移的测量方法,避免了由于接触测量而导致的结果不精确等问题,是一种更加有效而精确的方法.

实验中我们使用了照相机实时摄影与电脑画板坐标结合的方法来测量激光莫尔条纹角度,对于条纹的移动能够准确的记录,也从数据记录上减少了读数误差,做到更精确.解决了激光条纹角度难以测量的问题.同时这种方法简单易行,使用的器材也

非常简易.实验中采用了程序算法,可实时输出实验结果,检验测量的准确度,并且避免了一些较为复杂的计算,减小了实验数据处理的难度,使实验简单可行且高效.

通过相对不确定度和百分误差的计算,在一定误差范围内,测量结果与公认值相差不远.实验误差主要来源于读数误差和系统误差,采取多次测量求平均值的方式,以减小实验的偶然性,并采用逐差法进行数据处理.另一方面,在实验测量中读数时,若两光栅的相对移动太快,很容易引起测量数据的误差增大,其主要原因是错数莫尔条纹引起,因而要求实验测量时,要控制好温度的上升速度.

参考文献

- 1 何春娟,刘绒霞,曹磊.莫尔条纹技术在微小位移测量中的应用.西安工业学院学报,2005(06)
- 2 李田泽,秦萌青.使用莫尔条纹对冲击场气流密度的测试.红外与激光工程,1998(02)
- 3 汪逸新.微弱振动的干涉测量方法.信阳师范学院学报(自然科学版),1992(04)
- 4 李柱峰,徐秀平.双光栅弹性模量测量实验方法.物理实验,2013(01)
- 5 白宏,荣健,王秀.光束漂移的莫尔条纹检测原理.应用光学,2007(05)

(上接第90页)

Simulation of Newton Ring Based on Matlab

Shen Huijuan Deng Liqiang Xu Xiangfu Fang Yunliang Qi Lingmin Lai Guoxia

(Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming, Guangdong 525000)

Abstract: The Newton ring interference experiment is simulated based on Matlab. In the simulation process, by changing the wavelength, the radius of curvature of a lens, the refractive index and thickness of films, the interference phenomenon of Newton's ring and its variation can be clearly observed. And the rationality of the simulation results are verified through theory, which confirmed that Matlab simulation can be used as an effective supplement to the experimental results.

Key words: simulation on matlab; newton ring interference