

# 绝对编码光栅的相位细分及其在位移测量中的应用

赵 勇<sup>1,2</sup> 苏显渝<sup>1</sup> 张启灿<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)  
(<sup>2</sup> 成都千嘉科技公司, 四川 成都 610200)

**摘要** 提出通过光栅条纹相位的精密测量, 获取光栅高精度位移信息的方法。具体方法是对光栅图像采用多码道设计, 用 CCD 二维图像传感器获取测量段光栅图像多码道信息。对最低码道图形的周期函数序列进行傅里叶变换、基频滤波和逆傅里叶变换获得光栅截断相位分布, 其余码道信息提供相位展开的级次, 以此获得测量段光栅的绝对相位分布。用光刻的手段制作了实用的绝对编码光栅, 基元码道的尺寸是: 27.36  $\mu\text{m}$  用于明条纹, 27.36  $\mu\text{m}$  用于暗条纹, 最小基元码道空间周期为 54.72  $\mu\text{m}$ , 光栅长度为 14008.32  $\mu\text{m}$ 。在步长近似 3  $\mu\text{m}$  的位移测试中, 与对比的标准仪器记录值比较, 标准偏差为 0.2057  $\mu\text{m}$ , 精度在亚微米量级。重复性实验表明, 位置测试的稳定性为 0.09  $\mu\text{m}$  (标准差), 得到 600 倍以上细分的分辨力。

**关键词** 光学测量; 绝对编码; 光栅; 位移测量; 相位细分

**中图分类号** O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0812005

## Phase Subdivision of Absolute Coding Grating and Application in Displacement Measurement

Zhao Yong<sup>1,2</sup> Su Xianyu<sup>1</sup> Zhang Qican<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Opto-Electronics Department, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)  
(<sup>2</sup> Chengdu Qianjia Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610200, China)

**Abstract** A phase subdivision of absolute coding is proposed to enhance the resolution of absolute coding grating in displacement measurement. The used grating consists of multiple code channel grating. CCD image sensor acquires information of multiple code channel in measurement section. The absolute phase distribution in measurement section is obtained by Fourier transform, filtering, inverse Fourier transform, and phase unwrapping. Practical absolute coding grating is fabricated by lithography. The size of minimum code pattern is 27.36  $\mu\text{m}$  for light and dark fringe. Space period of benchmark code sequence pattern is 54.72  $\mu\text{m}$ , and the length of grating is 14008.32  $\mu\text{m}$ . A large number of displacement tests are carried out. In the displacement test of step length approximate 3  $\mu\text{m}$ , compared with the record value of standard equipment, the standard deviation is 0.2057  $\mu\text{m}$ . The precision reaches sub-micron level. The stability tests demonstrate that the resolution of 600 times of subdivisions on minimum code pattern is gotten.

**Key words** optical measurement; absolute coding; grating; displacement measurement; phase subdivision

**OCIS codes** 120.2820; 120.5050; 070.0070

## 1 引 言

位移测量技术是现代测量技术中最基础、最普遍的一种测量技术, 利用光电转换技术进行位移的

精密测量已在世界上取得普遍应用, 其主要方法为光栅叠栅条纹技术, 激光干涉仪技术等<sup>[1]</sup>。与增量式光栅编码器比较, 绝对编码光栅有很多优势, 由于

收稿日期: 2011-03-25; 收到修改稿日期: 2011-05-02

基金项目: 国家自然科学基金(60838002)资助课题。

作者简介: 赵 勇(1966—), 男, 博士研究生, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: zy999@vip.sina.com

导师简介: 苏显渝(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信息光学和光学三维传感技术等方面的研究。

E-mail: xysu@scu.edu.cn(中国光学学会会员号: 6100105)

在任何点都有相应的码值,所以没有累计误差,具有测量精度高、抗干扰能力强、稳定性高等特点,并且还可以进行非线性修正。另外绝对编码范围大,所以可测量较大量程的线性位移,对于大量程的位移测量,仍然以光栅位移传感器为主。机械现象总是与空间联系在一起的,光栅的移动体现为条纹在空间的位移。从信息光学的观点来看,空间和空间频率是描述成像过程的两个不同的对偶关系,它们通过傅里叶变换紧密联系,光栅的移动既体现为条纹在空间的位移,又体现为其频谱在空间频域的线性相移。因此,研究光栅条纹的相位以及相位的精密测量方法,对于获取高精度位移信息具有重要意义。

本文提出通过光栅条纹相位的精密测量,获取光栅高精度位移信息的方法。用光刻的手段制作了实用的绝对编码光栅,对其进行了位移实验测试。

## 2 绝对编码光栅的基准元相位细分

绝对编码光栅就是在光栅尺基片上刻上二进制的编码图形,可以是自然二进制码,也可以是格雷编码等。以自然二进制码绝对编码光栅为例,其结构如图 1 所示。

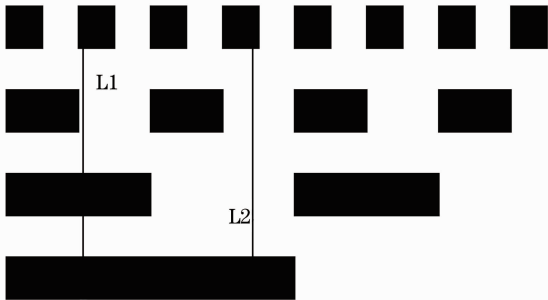


图 1 自然二进制码绝对编码光栅的结构示意图

Fig. 1 Absolute coding grating with natural binary code

为简洁起见,仅显示了四个码道。由图 1 可见,假如黑(不透光处)看作二进制“0”,白(透光处)看作二进制“1”,则每一根压住所有码道的竖线都有一个对应的二进制编码。图 1 中 L1 对应二进制码“0010”,L2 对应“0110”。正因为任何位置都有一个二进制码与其对应,所以即使测量长度较长也没有叠栅法由于干扰产生的累积误差。

CCD 像素细分方法将 CCD 上的一个像素作为最小刻度。理论上在最小基准元位间距覆盖像素数  $n$ (通过成像系统实现),就可以得到  $n$  倍的细分<sup>[2~4]</sup>。实际的  $n$  值是不能太大的,如  $n$  值过大,则

- 1) CCD 的像素数要求会很高,
- 2) 读数头光学系统

将非常复杂;3)对绝对编码光栅结构,读取的码道数会减少,从而测量范围将受到限制。

利用相位信息进行细分是很好的技术路径。国内外很多学者开展了对干涉条纹图像和光栅计量的研究<sup>[5~8]</sup>,条纹的相位包含了丰富的定位和位移等信息<sup>[9]</sup>,由于它不受光强、背景等因素的影响,所以具有很强的抗干扰能力。

从基元码道图形上和实际读出的信号来看,比光栅叠栅条纹要规则,有固定的空间周期和频率。这样,它的相位信息就与其位置和位移一一对应。而其幅值与光栅质量、背景、光源和对比度等因素相关,直接用于位置或位移的测量是不准确的。对求取的相位进行展开可充分地利用多周期的相位信息以利用其平差效应,避免栅线的局部误差。

## 3 绝对编码光栅的制作

采用绝对编码光栅的相位细分的长度计量方法,其精度在很大程度上依赖于基元码道的高精度空间刻划技术。在原理性实验基础上<sup>[10]</sup>,采用 DMD 无掩模步进投影光刻机<sup>[11]</sup>,用投影光刻的手段制作了用于位移测量的多码道绝对编码光栅。

实际制作的光栅采用自然二进制编码,共有 9 个码道,其码道图形如图 2 所示。光栅的制作采用无掩模投影光刻的方式,由于采用的光刻图形最小分辨力为  $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$ ,因此,本次光栅的制作在水平方向选择  $4 \times 13.68 \mu\text{m}$  为一个基元码道周期,其中  $2 \times 13.68 \mu\text{m}$  用于明条纹,  $2 \times 13.68 \mu\text{m}$  用于暗条纹,最小基元码道周期为  $54.72 \mu\text{m}$  ( $13.68 \times 4$ ),光栅长度为  $14008.32 \mu\text{m}$  ( $54.72 \times 256$ )。增加条纹级次的编码码道,可以增加光栅长度,增大位移测量的量程。

在测量段 CCD 观察到的光栅图像如图 2 所示。

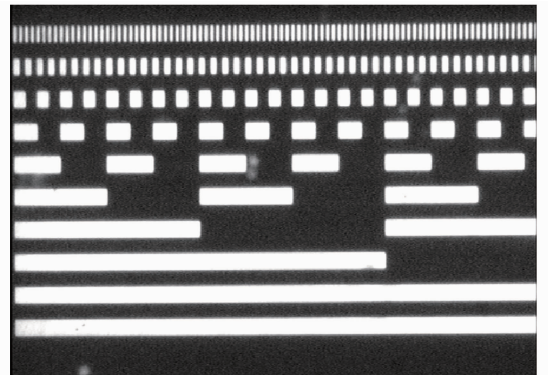


图 2 CCD 观察到的测量段光栅图像

Fig. 2 Grating image in measurement section observed by CCD

## 4 位移测量实验

### 4.1 测试平台

实验测试平台如图 3 所示。

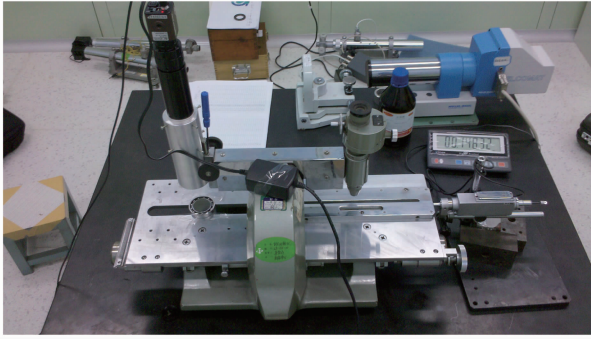


图 3 实验测试平台

Fig. 3 Testing setup

实验测试平台主要包括：

1) 标准测量仪器：采用标普纳米测控技术股份有限公司的 LG-001 型大量程光电测长仪，其显示分辨力为  $0.01 \mu\text{m}$ ，最大示值误差为  $(0.1 + 0.004L) \mu\text{m}$ ， $L$  为实际测量距离；

2) 位移工件台：采用二维测微台架，本次实验只用一维；

3) 绝对编码光栅：本次测试的对象，CCD 从绝对编码光栅上获取光栅码道图像；

4) 绝对编码光栅运动方向角度调节装置：调节绝对编码光栅的角度位置，保证光栅码道的方向与位移工件台的移动方向一致，用以消除测量中的阿贝误差；

5) CCD 光电传感器：获取绝对编码光栅的码道图像；

6)  $1\times$  光学成像物镜：辅助 CCD 获取绝对编码光栅的清晰图像。

### 4.2 绝对相位计算方法

移动绝对编码光栅到测量量程内任一位置，CCD 二维图像传感器获取测量段光栅图像多码道信息。根据 CCD 接收的最低码道图形，对其中的一行周期空间序列（一行 CCD 像素值）进行离散傅里叶变换，得到其频谱分布。设计带通数字滤波器取出频谱分布的基频分量，对基频分量作逆傅里叶变换得到基波信号，得到测量段的截断相位分布。其余码道信息提供相位展开的级次，以此获得测量段光栅的绝对相位分布<sup>[12]</sup>。实验中用测量段采样点上相位的平均值表示测量段的相位值，极大地提高了测量分辨率，降低了随机误差，可以得到很高的细分结果。由于有限长度周期信号的频谱泄漏效应，

舍去了信号段边缘几个像素的测值，有助于提高测量精度。由于基元码道的周期是制作绝对编码光栅的基本参数，是一个已知的参数，计算出测量段的绝对相位后，根据光栅周期可得到测量段的绝对位置。

### 4.3 实验结果

以步长近似  $3 \mu\text{m}$  移动，共测了 45 个点，共计移动距离约为  $133 \mu\text{m}$ ，测试记录的数据如表 1 所示，其中测量值为根据相位测量值计算出的位置，标准值为标准测量仪器的读数，误差值 = 测量值 - 标准值。

表 1 位移对比测试数据

Table 1 Measured data for displacement comparison  $\mu\text{m}$

Sequence number	Measured displacement	Normal displacement	Errors
1	0.000	0.000	0.000
2	2.910	2.950	-0.040
3	5.767	5.940	-0.173
4	9.241	9.030	0.211
5	11.641	11.930	-0.289
6	15.365	15.280	0.085
7	17.813	17.930	-0.117
8	20.994	21.180	-0.186
9	24.276	23.960	0.316
10	26.850	27.070	-0.220
11	30.162	30.010	0.152
12	33.203	33.050	0.153
13	36.091	36.250	-0.159
14	39.342	39.100	0.242
15	41.704	41.930	-0.226
16	45.199	44.930	0.269
17	47.873	47.950	-0.077
18	51.189	51.460	-0.271
19	54.606	54.270	0.336
20	56.714	56.970	-0.256
21	60.088	60.020	0.068
22	63.022	62.980	0.042
23	65.887	66.060	-0.173
24	69.093	68.950	0.143
25	71.758	72.050	-0.292
26	75.086	75.030	0.056
27	78.032	78.020	0.012
28	81.184	81.200	-0.016
29	84.389	83.920	0.469
30	87.219	87.380	-0.161
31	90.508	90.310	0.198
32	93.104	92.970	0.134
33	96.010	96.010	0.000
34	99.211	98.970	0.241
35	101.825	102.090	-0.265
36	105.194	105.010	0.184

(续表 1)

Sequence number	Measured displacement	Normal displacement	Errors
37	107.819	107.920	-0.101
38	110.864	110.970	-0.106
39	114.334	114.070	0.264
40	116.718	117.030	-0.312
41	120.234	120.160	0.074
42	123.038	123.060	-0.022
43	125.974	126.170	-0.196
44	129.290	129.120	0.170
45	131.680	132.020	-0.340

与比对的标准仪器记录值比较,最大误差为:  $-0.340 \mu\text{m}$  和  $+0.469 \mu\text{m}$ ,测量了 45 个有效位置,标准偏差为:  $0.2057 \mu\text{m}$ ,精度在亚微米量级。测量数据和标准测量仪器读数之间的关系如图 4 所示,横坐标是标准测量仪器读数,纵坐标是根据相位测量值计算出的位移。与标准测量仪器读数比对的测量误差,如图 5 所示。

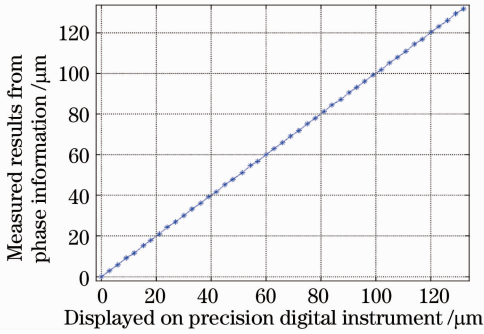


图 4 位移测试实验结果

Fig. 4 Measured results for displacement testing

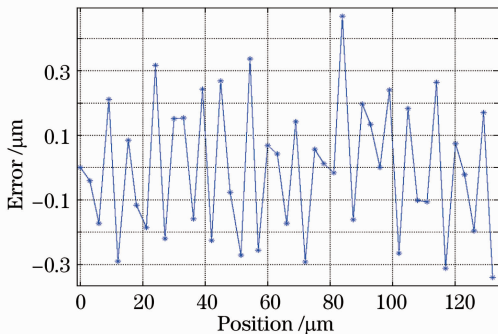


图 5 位移测量误差(与标准测量仪器示值比较)

Fig. 5 Measurement errors for displacement (compared with measured result by standard instrument)

以步长近似  $300 \mu\text{m}$  ( $0.3 \text{ mm}$ ) 移动,共测了 26 个点,共计移动距离约为  $7845 \mu\text{m}$  (约  $7.8 \text{ mm}$ ),与比对的标准仪器记录值比较,标准偏差为:  $0.4349 \mu\text{m}$ ,精度在亚微米量级。

#### 4.4 定点测试稳定性分析

为了分析测试方法的稳定性,在光栅测量范围内随机的 9 个不同位置上共进行了 9 组稳定性测试。每组定点重复测试 50 次,总测量次数 450 次。9 组不同位置的相位值如图 6 所示。与各段均值比较,最大误差为:  $-0.033 \text{ rad}$  和  $+0.028 \text{ rad}$ 。标准偏差为:  $0.01112 \text{ rad}$ ,如图 7 所示。

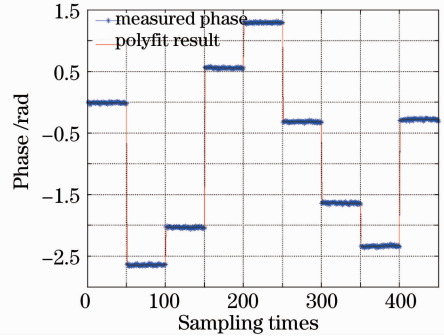


图 6 9 组不同位置定点测试结果

Fig. 6 Measured results of stationary point in 9 different positions

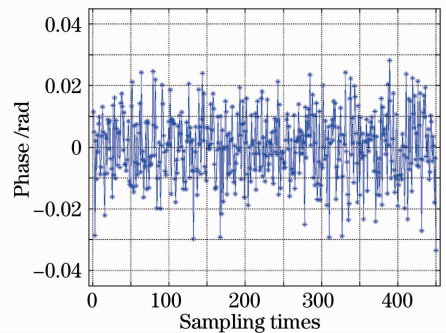


图 7 9 组不同位置定点重复测试偏差

Fig. 7 Repeated measurement deviation for stationary point in 9 different positions

定点测试表明,相位测量的稳定性为  $0.01112 \text{ rad}$  (标准差),相当于  $1/600$  个周期,相位细分精度可达  $1/600$ 。由于最小基元码道周期为  $54.72 \mu\text{m}$ ,测试表明,位置测试的稳定性为  $0.09 \mu\text{m}$  (标准差)。

## 5 结 论

对绝对编码光栅用于位移测量的方法进行了研究,重点研究了基元码道相位细分的方法,采用 DMD 无掩模步进投影光刻机制作了绝对编码的长度计量光栅,开展了位移测量的实验研究。实验结果表明,位置测试的稳定性为  $0.09 \mu\text{m}$  (标准差),相位细分精度可达基元码道宽度的  $1/600$ 。由于相位测量的稳定性,一些系统误差(例如刻线误差引起的)可以在校准过程中予以修正,以进一步提高位移

测量精度。本实验只完成了针对较小量程的测试, 增加条纹级次的编码码道, 可以增加光栅长度, 增大位移测量的量程。

### 参 考 文 献

- Jin Guofan, Li Jingzhen. Laser metrology [M]. Beijing: Science Press, 1998  
金国藩, 李景镇主编. 激光测量学 [M]. 北京: 科学出版社, 1998
- He Shurong, Xiao Zongyang. Study of displacement sensor using CCD to subdivide grating directly [J]. *Optical Technique*, 1999, (3): 1~3,7  
何树荣, 肖宗扬. CCD直接细分光栅位移传感器的研究[J]. 光学技术, 1999, (3): 1~3,7
- Yang Junping, Wu Xinhui, Qin Changhai. The design of displacement measurement system based on CMOS image sensors in grating sensors [J]. *Science & Technology Information*, 2010, (5): 490~491  
杨军平, 吴欣慧, 秦长海. 基于CMOS图像光栅传感器的位移测量系统的实现[J]. 科技信息, 2010, (5): 490~491
- Zheng Hong. Research on single track beeline encoder with CCD fractionize [J]. *China Mechanical Engineering*, 2003, **14**(3): 195~197  
郑 洪. 单道编码 CCD 细分直线编码器的研究 [J]. 中国机械工程, 2003, **14**(3): 195~197
- Mitsuo Takeda, Hideki Ina, Seiji Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry [J]. *J. Opt. Soc. Am*, 1982, **72**(1): 156~160
- Luo Gang, Fang Hui, Fang Zhiliang *et al.*. Measurement of fringe shift using phase information [J]. *Opt. Technol.*, 2000, **26**(2): 130~133  
罗 罡, 方 晖, 方志良等. 利用位相信息的条纹微位移测量 [J]. 光学技术, 2000, **26**(2): 130~133
- Zhang Xiangchun, Song Yaozu. Analysis of measurement accuracy for mini-displacement of moiré fringe by Fourier transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1445~1450  
张香春, 宋耀祖. 傅里叶变换求取叠栅条纹微小位移的精度分析 [J]. 光学学报, 2003, **23**(12): 1445~1450
- Zeng Aijun, Wang Xiangzhao. Micro-displacement measurement based on grating projection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 394~398  
曾爱军, 王向朝. 基于光栅成像投影的微位移检测方法 [J]. 中国激光, 2005, **32**(3): 394~398
- Mao Xianfu, Su Xianyu, Liu Yuankun *et al.*. Analysis on 3-D object measurement based on phase target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2452~2457  
毛先富, 苏显渝, 刘元坤等. 基于相位标靶的光学坐标测量方法 [J]. 光学学报, 2009, **29**(9): 2452~2457
- Zhao Yong, Su Xianyu, Li Wen. Phase subdivision of absolute coding grating [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2010, **21**(1): 91~95  
赵 勇, 苏显渝, 李 雯. 绝对编码光栅的相位细分 [J]. 光电子·激光, 2010, **21**(1): 91~95
- Yan Wei, Hu Song, Tang Xiaoping *et al.*. The method and equipment of maskless step digital lithography based on DMD [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2008, (10): 14~19  
严 伟, 胡 松, 唐小萍等. 基于DMD的步进式无掩模数字曝光方法及装置 [J]. 电子工业专用设备, 2008, (10): 14~19
- Sun Xuezheng, Su Xianyu, Zou Xiaoping. Phase-unwrapping based on complementary structured light binary code [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(10): 1947~1951  
孙学真, 苏显渝, 邹小平. 基于互补型光栅编码的相位展开 [J]. 光学学报, 2008, **28**(10): 1947~1951