

文章编号: 0258-7025(2007)12-1682-06

同步移相干涉的测量性能

左 芬^{1,2}, 陈 磊¹, 徐 晨¹

(¹ 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094; ² 淮阴师范学院, 江苏 淮安 223001)

摘要 详细分析了一种基于二维正交光栅衍射的同步移相干涉测量系统的组成结构, 包括干涉系统、空间分光部件、偏振移相部件以及图像采集与处理系统。选择了二维正交透射光栅的四个衍射级次的光束作为测试光, 理论和实验都证明这种方案具有良好的分光效果; 用偏振方向依次改变 45° 的四片偏振片构成偏振阵列作为移相器件, 并根据空间一致性要求, 分割得到依次具有 90° 移相的四幅独立干涉图, 获得了较高的移相精度; 在幅频积低于 100 Hz λ 的振动环境中, 系统测量重复性的峰谷值优于 0.02λ, 可以用于一般的在线检测和动态测量。

关键词 测量; 干涉; 抗振技术; 同步移相; 测量重复性

中图分类号 TH 744.3 文献标识码 A

Measurement Performance of Simultaneous Phase-Shifting Interferometer

ZUO Fen^{1,2}, CHEN Lei¹, XU Chen¹

¹ School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China
² Huaiyin Teacher's College, Huai'an, Jiangsu 223001, China

Abstract The structure of a simultaneous phase-shifting interferometry system based on two-dimensional (2D) orthogonal grating diffraction is analyzed in detail, including components of interference, spatial beam splitting, polarizing phase-shifting element, and image sampling and processing. The four diffraction-order beams of the 2D orthogonal transmission grating are taken as the testing beams. Both the theory and the experiment show that the beam splitting of the system function well. A polarizing array, consists of four linear polarizing elements of which transmitting directions change 45° in turn, acts as the phase-shifter. According to the requirement of spatial consistency, the four independent interferograms with 90° phase shift are divided. High phase-shifting precision is obtained. The repetitive experimental results show that, when the amplitude-frequency product of environmental vibration does not exceed 100 Hz λ, the peak to valley of testing repeatability is less than 0.02λ, so the advanced system can be used in on-line testing and dynamic measurement.

Key words measurement; interference; anti-vibration technology; simultaneous phase-shifting; testing repeatability

1 引 言

同步移相干涉测量系统的基本原理是在同一时刻于不同空间位置采集相互之间具有一定移相步长的干涉图^[1~7]。由于振动在相同时刻对干涉图的影响是相同的, 如果采用高速、高分辨率的图像采集设备, 则基于一般的移相算法中相减相除的规则, 可以

从根本上避免环境振动和空气扰动对测量结果的影响, 而这些影响在其他分时采集干涉图的移相干涉测量中难以消除。近年来同步移相干涉光抗振技术的研究发展很快^[8], 其中典型代表有 4D 公司的同步移相动态干涉仪^[9~11] 系列以及 ESDI 公司的 Intellium™ H2000 系列^[12] 菲索 (Fizeau) 型同步移相干涉仪等。

收稿日期: 2007-03-01; 收到修改稿日期: 2007-05-30

基金项目: 江苏省“六大人才高峰”项目 (06-E-030) 资助课题。

作者简介: 左 芬 (1974—), 女, 江苏人, 讲师, 博士研究生, 研究方向为光学计量测试与光电智能化仪器。

E-mail: weile_ni@163.com

导师简介: 陈 磊 (1964—), 男, 江苏人, 教授, 博士生导师, 研究方向为光学计量测试与光电智能化仪器。

E-mail: chenleiy@126.com

通常,同步移相干涉测量系统的光路结构必须具有三个或者三个以上的移相单元,在每一个单元中需引入不同的相移值,所以结构一般比较复杂。因此,同步移相干涉测量系统的设计相对于时域移相干涉测量系统的设计差别很大,主要表现在多个移相单元之间的分光问题,即同步移相干涉图之间的光强匹配问题;其次,移相单元的移相精度问题,而移相误差包括两个方面,即移相器的误差和各干涉图之间的空间一致性校准误差所等效成的移相误差,前者可以通过提高移相器件的光学质量及其调整机构的质量来保证,后者是一个 CCD 同时采集多幅干涉图,因此在运用波面复原算法之前一般需要将干涉图进行空间一致性校准,而校准误差对于整个干涉测量结果的影响可以等效于产生了附加的移相量^[5]。本文介绍了一种低成本的、基于二维正交光栅分光的同步移相干涉测量系统,并通过实验研究了系统的分光性能、移相性能及抗振性能。

2 同步移相干涉测量系统的组成

采用的同步移相干涉测量系统如图 1 所示,可以分为四个部分:干涉系统、空间分光部件、移相部件以及数据采集和处理部件。

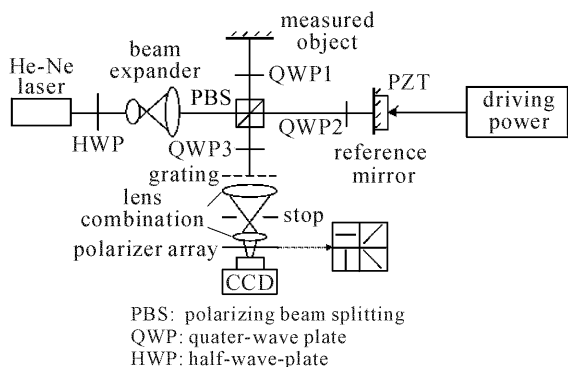


图 1 基于二维正交光栅的同步移相干涉测量系统
Fig. 1 Simultaneous phase-shifting interferometer based on a 2D orthogonal grating

2.1 干涉系统

该系统中的干涉部分采用偏振移相泰曼-格林干涉仪的型式^[13]。图 1 中从光源发出的线偏振光经过扩束后被偏振分光棱镜(PBS)分为两个部分,其中 s 光被偏振分光棱镜反射后先后两次通过一个快轴方向与水平成 45°的四分之一波片 1(QWP1)后,使偏振方向改变了 90°,因此由偏振分光棱镜透射;同理 p 光经偏振分光棱镜透射后也先后两次通过一个快轴方向与水平成 45°的四分之一波片 2

(QWP2),改变了线偏振光的偏振方向,进而被偏振分光棱镜反射。偏振方向相互垂直的参考光与测试光会合后,共同经过一个与其偏振方向均成 45°的四分之一波片 3(QWP3),合成光为含有被测波差信息的线偏振光。若将该线偏振光通过一个检偏器后,将产生待测干涉图。当转动检偏器改变其方位角时,待测干涉图的光强发生改变,可以等效为干涉条纹的移相,而且相位的变化量为方位角改变量的两倍^[14]。因此依次改变检偏器方位角 45°三次,就可以得到四幅移相步长为 90°的干涉图,这就是偏振移相的干涉测量原理。

图 1 在偏振移相干涉测量原理的基础上,选用一个二维正交全息光栅作为分光器件,并且让选定的四个级次衍射光同时分别通过一个偏振方向依次相差 45°的检偏器,则产生的干涉图之间会依次形成 90°的移相量,且分布于空间不同位置上。采用一个 CCD 同时采集这四幅干涉图,根据相应的移相算法及解包算法可计算出待测波面。

2.2 空间分光部件

同步移相干涉测量系统所需要的四幅移相干涉图由一个二维正交全息光栅分光产生,根据移相算法,要求选择相同光强和衬比度的四组衍射光,这由光栅的衍射效率决定。为了简单起见,以一维矩形光栅的标量衍射理论加以解释^[15],其结构示意图如图 2 所示,其中 T 为光栅周期, ρ 为光栅的占空比, h 为槽深, H 为基底厚度。

由图 2 可知光线 1,2 通过光栅时产生了相位差 $\Delta\phi = (2\pi/\lambda)(n_0 - 1)h$ (n_0 为基底材料折射率),而光栅的透射率函数为

$$t(x) = \begin{cases} e^{i\phi_1} & mT < x < mT + \rho T \\ e^{i\phi_2} & mT + \rho T < x < (m + 1)T \end{cases}, \quad (1)$$

式中 m 为衍射级次。可以将(1)式写成傅里叶级数为

$$t(x) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} C_m e^{\frac{2\pi i}{T}(mx)}, \quad (2)$$

式中 C_m 为傅里叶展开系数,而光栅的对应级次的衍射效率为该级次的傅里叶展开系数模的平方,因此有

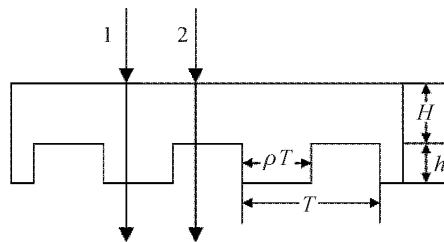


图 2 矩形光栅的结构示意图
Fig. 2 Structure schematics of a rectangular grating

当 $m = 0$ 时

$$C_0 = \rho e^{i\phi_1} + (1 - \rho) e^{i\phi_2}, \quad (3)$$

$$\eta_0 = |C_0|^2 = C_0 \cdot C_0^* = 1 - \rho(1 - \rho) \cdot 2\cos\Delta\phi, \quad (4)$$

而当 $m \neq 0$ 时

$$C_m = \frac{1}{T} \int_0^T e^{i\phi_1} e^{-\frac{2\pi i}{T}(mx)} dx + \frac{1}{T} \int_0^T e^{i\phi_2} e^{-\frac{2\pi i}{T}(mx)} dx = \frac{1}{2\pi m i} (e^{i\phi_1} - e^{i\phi_2}) (e^{-2\pi m i} - 1), \quad (5)$$

$$\eta_m = |C_m|^2 = C_m \cdot C_m^* = \frac{1}{\pi^2 m^2} (1 - \cos\Delta\phi) (1 - \cos 2m\rho\pi), \quad (6)$$

式中 * 为复共轭符号。这样,可以近似推得二维正交光栅的衍射效率

$$\eta_{mn} = \begin{cases} [1 - \rho_1(1 - \rho_1)2\cos\Delta\phi_1][1 - \rho_2(1 - \rho_2)2\cos\Delta\phi_2] & m = n = 0 \\ [1 - \rho_1(1 - \rho_1)2\cos\Delta\phi_1] \left[\frac{1}{\pi^2 m^2} (1 - \cos\Delta\phi_1) (1 - \cos 2m\rho_1\pi) \right] & n = 0, m \neq 0 \\ [1 - \rho_2(1 - \rho_2)2\cos\Delta\phi_2] \left[\frac{1}{\pi^2 n^2} (1 - \cos\Delta\phi_2) (1 - \cos 2n\rho_2\pi) \right] & m = 0, n \neq 0 \\ \frac{1}{\pi^4 m^2 n^2} [(1 - \cos\Delta\phi_1) (1 - \cos 2m\rho_1\pi)] [(1 - \cos\Delta\phi_2) (1 - \cos 2n\rho_2\pi)] & m \neq 0, n \neq 0 \end{cases}, \quad (7)$$

式中 m, n 分别为两个正交方向上的衍射级次, T_1, T_2 分别为两个正交方向上的光栅周期, ρ_1, ρ_2 分别为两个正交方向上的光栅的占空比, $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$ 分别为两个正交方向上的相位差。因此对于普通的二维正交光栅,当光线垂直入射时,理论上 $\eta_{m,n}, \eta_{-m,n}, \eta_{m,-n}, \eta_{-m,-n}$ 四组衍射效率是绝对相等的,这对于本系统中干涉光路的选取非常重要。为了尽量提高干涉场的光强,选取 $(1, 1), (1, -1), (-1, 1), (-1, -1)$ 四组衍射光作为干涉测试光路,既保证了四组光的衍射效率相等,又保证了干涉测试所需要的光强。

2.3 移相部件

系统的移相结构为一个偏振片阵列^[13,16],由四片材料相同且偏振方向依次成 45° 的偏振片组成。四束光栅的衍射光分别通过四片偏振片,可以得到四幅依次移相 90° 的干涉图,从而实现移相。应用该结构作为移相器件具有很明显的优点,首先,由于该系统的移相方式通过变换检偏器的方位角来实现,因此移相精度的控制要比一般的时域移相干涉测量中驱动压电陶瓷(PZT)移相简单可靠;其次,该移相器件一次成型后经过校准,当再次使用时不需要重新校准且精度保持不变,但在时域移相干涉测量过程中驱动压电陶瓷移相时,环境振动等对其影响是随机的、不可预测且不可消除的,这对系统的测量精度将产生不利的影

2.4 图像采集部分

由于系统只需要一次曝光就可以得到恢复被测量波面所需要的全部信息,因此具有较强的抗振能力,且抗振能力的大小取决于所采用的 CCD 摄像机

的曝光时间。系统选用了电子快门时间可调的低照度高解析黑白摄像机 MTV-1881EX,电子快门时间最短可调节为 $1/10000$ s,选择不同的曝光时间,可以在不同的场合下于瞬间“冻结”四幅移相干涉图,从而实现抗振的目的。

3 系统性能的实验研究

3.1 分光性能

为了检验系统中二维正交光栅的分光效果,设计了两组实验。第一组实验按照系统的设置要求调整好光路,采用自制的偏振片组测试一个被测件,该偏振片组设计中四个偏振片的方位角误差通过标定后平均不超过 1° ,采集的空间移相干涉图如图 3 所示;第二组实验以一个大口径的检偏器取代图 1 系统中的偏振片组,让四束衍射光束全部同时通过该检偏器,检偏器的初始方位与水平方向成 0° ,通过依次转动(角度为 45°)三次可实现四步移相,分别计算出每一个分光单元的复原波面,然后将该四个复原波面与第一组实验通过空间移相法得到的复原波面进行比较,如果选择的光分单元分光一致的话,这五个复原波面的结果应该一致。图 4 为第二组实验得到的四组四通道的移相干涉图,设每幅图中左上角的为单元 1 采得的干涉图,同时按照顺时针方向依次命名为单元 2,3,4。

利用四步移相算法以及自编的解包程序,对于图 3 中的空间移相干涉图和图 4 中的四个单元的时间移相干涉图进行处理后可以分别得到被测波面的

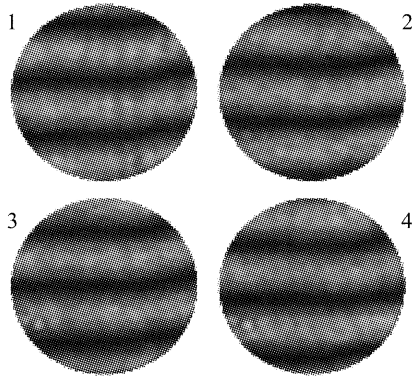


图 3 空间移相干涉图

Fig. 3 Spatial phase-shifting interferograms

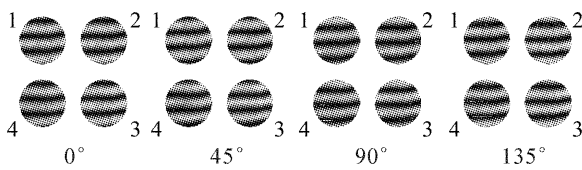


图 4 四个分光单元的时间移相干涉图

Fig. 4 Temporal phase-shifting interferograms of four cells

均方根(RMS)值和峰谷值(PV)值,如表 1 所示。由表 1 可见四个分光单元的测量结果相差很小,与空间移相法得到的波面参数一致,从而说明对该光栅所选择的衍射级具有良好的分光效果。

表 1 四个通道时间移相以及空间移相的复原波面参数, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$

Table 1 Retrieved wavefront parameters of temporal phase-shifting of four channels and spatial phase-shifting, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$

	Cell 1	Cell 2	Cell 3	Cell 4	Spatial phase-shifting
RMS/ λ	0.0275	0.0286	0.0307	0.0304	0.0304
PV/ λ	0.1671	0.1596	0.1884	0.1845	0.1803

3.2 移相精度

偏振片组的方位角偏差和干涉图的空间一致性校准误差最终都会影响干涉图之间的移相精度,因此首先对拍得的一组空间移相干涉图运用自编算法进行空间一致性校准,然后对四幅干涉图之间的移相效果进行实验分析。如图 5 所示,将一组干涉图进行空间一致性校准后分别得到了四幅独立的移相干涉图,大小为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。读出各干涉图同一水平直径上的光强值,图 6 中表示的是第 128 行中 $60 \sim 210$ 列之间的数据,可见四条曲线的所有最大值和所有最小值基本相符,说明四幅干涉图具

有近似相等的光强和衬比度;另外,将四组光强 (I_1, I_2, I_3, I_4) 曲线分别做正弦拟合,并依次得到它们相互之间的利萨如(Lissajous)图形,如图 7 所示,四个图都接近于一个正圆,从而说明四幅干涉图之间近似依次移相了 90° ,移相效果良好。

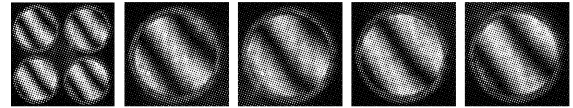


图 5 同步移相干涉图及其经过空间一致性校准后的独立干涉图

Fig. 5 Simultaneous phase-shifting interferograms and their separate phase-shifting interferograms after spatial calibration

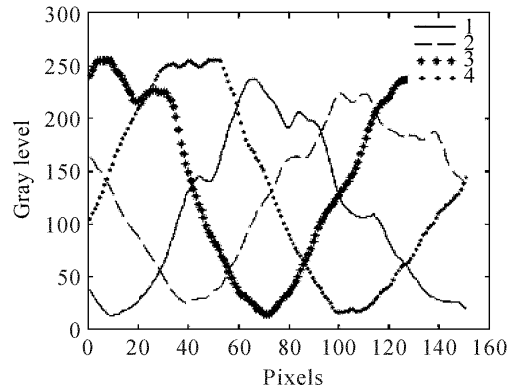


图 6 四幅干涉图的同一行、相同列区间的光强曲线
Fig. 6 Intensity curves of the same row and the same range of line of four interferograms

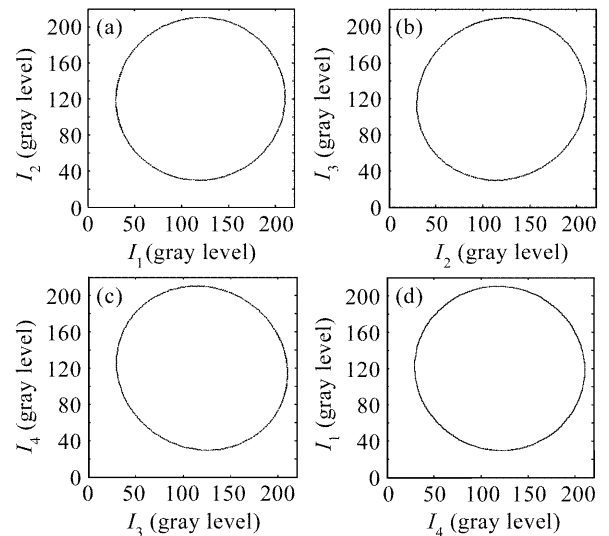


图 7 四组光强曲线经正弦拟合后的相互之间的利萨如图形

Fig. 7 Lissajous figures between every two intensity curves after they were sine approached-fitted
(a) I_1, I_2 ; (b) I_2, I_3 ; (c) I_3, I_4 ; (d) I_4, I_1

3.3 抗振性能

为了定量分析干涉系统对振源的抗振能力,将图 1 中参考镜固定在一个压电陶瓷上,以压电陶瓷的振动来模拟一个人工振源,通过改变压电陶瓷驱动电压的频率和幅值来改变压电陶瓷振动的频率和振幅,用以定量研究该系统在单一方向振动且幅频积变化的环境中测量的重复性。整套装置放置于减振平台上,图 8 为在干涉条纹振幅依次为 1λ 和 0.5λ 条件下振动的频率与被测波面均方根值之间的关系,可知在压电陶瓷振动幅频积低于 $100 \text{ Hz} \lambda$ 时系统测量的重复性优于 0.02λ 。

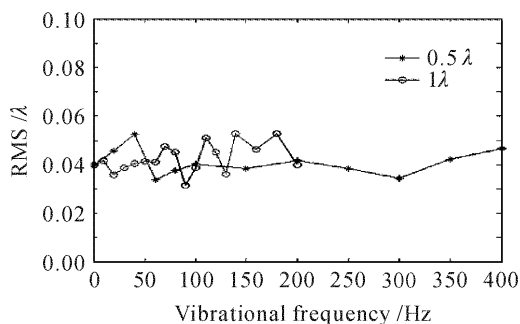


图 8 不同条纹振幅下振动频率与均方根的变化关系

Fig. 8 Relation between root-mean-square (RMS) and vibrational frequency at different fringe amplitude

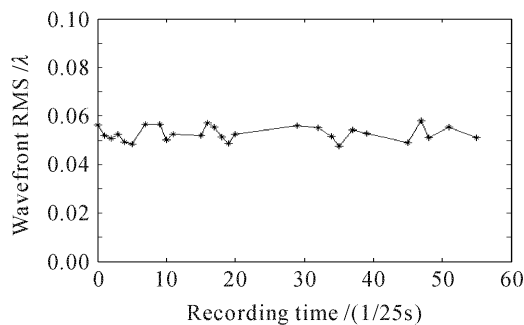


图 9 实验室实际振动环境下均方根与采集时间的关系

Fig. 9 Relation between wavefront RMS and recording time in a common laboratorial environment

另外,将图 1 中的被测件放置于普通的三脚架上,而其他的结构仍然放置于减振平台上,即被测件处于一般实验室的动态振动环境中,设置图像采集程序,让 CCD 连续多次采集干涉图,采集间隔为 $1/25 \text{ s}$,将电子快门时间设置为 $1/10000 \text{ s}$,研究在实际振动环境中干涉测量的重复性。图 9 为干涉图的采集时间与复原波面参数之间的关系,可见在实际的实验室环境振动中该系统的干涉测量重复性峰谷值优于 0.01λ 。

综合两组实验结果可知,系统在振动幅频积小

于 $100 \text{ Hz} \lambda$ 的环境中测量重复性的峰谷值优于 0.02λ , 显示出较好的抗振效果。

4 结 论

详细分析了一种基于二维正交光栅的同步偏振移相干涉测量系统的结构,实验研究了该系统的分光性能、移相精度以及抗振性能。对同步移相干涉测量系统的分光部件做了详细的理论和实验分析,证明了系统选用的二维正交光栅衍射级次的衍射光具有良好的分光一致性。实验定量研究了系统的抗振性能,包括在加载人工振源情况下改变振动的幅频积来研究系统测量的重复性,以及在实际的实验室环境振动下多次测量的重复性。结果表明,在环境振动幅频积低于 $100 \text{ Hz} \lambda$ 时,系统测量重复性的峰谷值优于 0.02λ , 而且实验过程中器件集成度不高,如将系统进行集成安装后其抗振性能会得到进一步的提高,更好地满足一般在线检测或者动态检测的抗振要求。

参 考 文 献

- 1 C. L. Koliopoulos. Simultaneous phase shift interferometer [C]. *SPIE*, 1991, **1531**:119~127
- 2 R. Smythe, R. Moore. Instantaneous phase measuring interferometry [J]. *Opt. Eng.*, 1984, **23**(4):361~364
- 3 Jungjae Park, Hagyoung Kihm, Seung-Woo Kim. Point-diffraction fiber interferometer for vibration desensitization [C]. *SPIE*, 2005, **5856**:922~929
- 4 Seung-Woo Kim, Hagyoung Kihm, Jungjae Park. Vibration-insensitive Interferometer [P]. U. S Patent, US 0039007 A1, 2006-02-23
- 5 A. Hettwer, J. Kranz, J. Schwider. Three channel phase-shifting interferometer using polarization-optics and a diffraction grating [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(4):960~966
- 6 J. Kranz, J. Lamprecht, A. Hettwer *et al.*. Fiber optical single frame speckle interferometer for measuring industrial surfaces [C]. *SPIE*, 1998, **3408**:328~331
- 7 N. Brock, J. Hayes, B. Kimbrough *et al.*. Dynamic interferometry [C]. *SPIE*, 2005, **5875**:5875F-1~5875F-10
- 8 Zuo Fen, Chen Lei. Development of anti-vibration technology in simultaneous phase-shifting interferometry [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(11):43~48
左 芬,陈 磊. 同步移相抗振光干涉测量技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(11):43~48
- 9 J. E. Millerd, N. J. Brock, J. Hayes *et al.*. Pixelated phase-mask dynamic interferometer [C]. *SPIE*, 2004, **5531**:304~314
- 10 J. E. Millerd, N. J. Brock. Methods and apparatus for splitting, imaging, and measuring wavefronts in interferometry [P]. U. S. Patent, US 6304330, 2001-10-16
- 11 James C. Wyant. Advances in interferometric metrology [C]. *SPIE*, 2002, **4927**:154~162
- 12 http://www.engsynthesis.com/products_fizeau_h2000.php
- 13 Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chunsheng. Simultaneous phase-shifting interferometry based on two-dimension grating [J].

- Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):663~667
左 芬, 陈 磊, 徐春生. 基于二维光栅分光的同步移相干涉测量技术[J]. 光学学报, 2007, **27**(4):663~667
- 14 Su Datu. *Optical Measuring Technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 188~190
苏大图. 光学测试技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 188~190
- 15 Bayinheshig, Qi Xiangdong, Tang Yuguo. The general formula to the diffraction efficiency of rectangular grating and its phenomenon of missing orders [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2003, **14**(10):1021~1024
巴音贺希格, 齐向东, 唐玉国. 矩形光栅衍射效率的一般表达式及其缺级现象[J]. 光电子·激光, 2003, **14**(10):1021~1024
- 16 Qian Kemao, Miao Hong, Wu Xiaoping. A real-time polarization phase shifting technique for dynamic measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1):64~67
钱克矛, 缪 泓, 伍小平. 一种用于动态过程测量的实时偏振相移方法[J]. 光学学报, 2001, **21**(1):64~67



· 新书推荐

《科学研究的途径》——一个指导老师的札记

本书是作者作为一个指导教师在近 30 年的研究生指导实践中写下的有关研究生学习和科学方法的札记。诸凡青年学人,特别是研究生在学习与科学研究过程中的科学探索,为人与治学,以及论文写作方法等,著者都以亲身的经历阐述自己的认识和体会。其中很多内容都是应青年研究生的要求撰写的,非常符合青年学人的实际需要,能帮助初涉科研的青年学人较快地熟悉科研过程及方法,及早多出成果,出好成果。本书作为有志于从事科学研究的理工科大学生、研究生、青年教师和青年科技人员的一本参考书,将对青年学人成长为学者起到辅助作用,使他们在从事科学研究时少走些弯路。同时,它也是研究生指导教师交流指导心得的一个平台。另外,本书实际上也是一本论述科学方法的科普读物。

作者简介 周立伟,电子光学和光电子成像专家。北京理工大学首席专家、教授、博士生导师;中国工程院院士,俄罗斯联邦工程科学院外籍院士。长期在宽束电子光学、光电子成像领域从事教学与科研工作,研究成果曾多次获部和国家科技进步奖励。

本书由北京理工大学出版社出版,16 开,定价:25 元。

联系人:郑京华

地 址:北京理工大学出版社人文社科事业部

邮 编:100081

手 机:13810624594

办公电话:010-68945381

电子邮件:caizhengjinghua@126.com

