

SPIE.

Eric P. Goodwin James C. Wyant

FIELD GUIDE TO

INTERFEROMETRIC OPTICAL TESTING

光学干涉检测

里克·P.古德温 著
[美]詹姆斯·C.怀亚特

苏俊宏 田爱玲 译



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

光学干涉检测

[美]埃里克·P. 古德温 著
[美]詹姆士·C. 怀亚特
苏俊宏 田爱玲 译



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光学干涉检测 / (美)古德温, (美)怀亚特著; 苏俊宏, 田爱玲译. —杭州: 浙江大学出版社, 2014. 8

书名原文: Field guide to interferometric optical testing

ISBN 978-7-308-13476-7

I. ①光… II. ①古… ②怀… ③苏… ④田… III. ①光学干涉仪—检测 IV. ①TH744.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 146509 号

© 2006 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from SPIE.

Translated and published in China by special arrangement with SPIE Press, 1000 20th St. Bellingham, WA 98225.

Authorized Chinese-language edition.

浙江省版权局著作权合同登记 图字:11-2014-137

光学干涉检测

[美]埃里克·P. 古德温 [美]詹姆斯·C. 怀亚特 著
苏俊宏 田爱玲 译

责任编辑 杜希武

封面设计 俞亚彤

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 浙江时代出版服务有限公司

印 刷 浙江印刷集团有限公司

开 本 850mm×1168mm 1/32

印 张 3.75

字 数 101 千

版 印 次 2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-13476-7

定 价 28.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: (0571) 88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

译者序

光干涉计量测试技术是以波长为计量单位,是一种公认的高精度计量测试技术。干涉仪输出的是一幅干涉图,借助于数学物理模型,可以将干涉图与多种被测参数相联系,从而实现测量相关的物理参数。

随着激光技术、光电探测技术、光纤技术、数字图像处理技术、计算机技术与传统光干涉仪技术相结合,在引入新原理(光电相位探测)、新器件(压电晶体、声光晶体、电光晶体等)、新技术(计算机辅助干涉术等)后形成现代光干涉测试技术。这种技术以现代光学为基础来实现精密计量与测试,其特征是从目视半定量发展到光电定量测试,从单幅静态干涉图测量发展到多幅动态干涉图的测量,从一幅干涉图判读与测量发展到多幅干涉图的组合测试,由单参数测量发展到多参数、多功能测量,使用的光波段已由可见光扩展到远红外波段,干涉仪也已由光机型发展到光、机、电、算相结合,融硬、软件于一体的智能化、高精度实时处理的现代干涉仪,仪器操作更加简便,测试更客观,显示更直观,结果更准确。

译者有幸两次在中国举办的 AOMATT 国际会议上聆听过詹姆士·C. 怀亚特先生所做的大会主报告,见证了怀亚特先生在光干涉领域所取得的杰出成就,目睹了他对现代光学测试技术所做出的突出贡献。非常荣幸取得了这本书的中文翻译权,能够让更多的读者尽早阅读到这样一本好书是译者最大的心愿与期望。

原著主要以光干涉测试技术为主介绍各种光学量的测试原理与测试方法。全书共九章。第一章介绍了光干涉测试的理论基础与技术基础;第二章介绍了几种典型的干涉仪及其工作原理;第三章介绍了干涉图像处理的数学描述;第

四章介绍了相位偏移干涉术的原理及其应用;第五章介绍了表面微观结构的光干涉测试方法;第六与第七章分别介绍了平面测试技术与曲面检测技术;第八章介绍了绝对测量原理方法及其应用;第九章介绍了非球面测试技术。最后为附录。本书不仅理论上深入浅出,而且具有指导实际应用的方法与过程,适用于光学与仪器学科相关专业的本科生和研究生教材,也适合从事测试研究的专业技术人员参考。

本书第一、二、三、四、六、七、八章由苏俊宏翻译,第九章和附录由田爱玲翻译,第五章由杨利红翻译。译著全书由苏俊宏统稿。

本书受到西安工业大学专著出版基金资助。在翻译过程中,得到了光电工程学院、科技处等部门领导的大力支持,西安工业大学光电工程学院研究生葛锦蔓、刘胜利、王坤坤等在文档整理上付出了辛劳,在此一并表示感谢。

在翻译过程中,忠实遵循了原文的学术思想。鉴于译者学识疏浅,文辞的运用、语言的表达等不妥之处在所难免,书中也可能有不少错误,恳请读者不吝赐教,批评指正。

译 者

2014年5月于未央湖校区

- x_w Spatial width 像素宽度
 y Spatial coordinate y 方向空间坐标
 y_p Pupil coordinate y 方向光瞳坐标
 z Object distance, axial position 物距, 轴向位置
 z' Image distance (lens) 像距(透镜)
 Z Zernike polynomial coefficients 泽尼克多项式系数
 α Angle between two polarization states 两偏振态夹角
 α Moiré angle, wedge angle 莫尔角, 楔角
 β Tilt 倾角
 $\delta\beta$ Tilt difference 倾角差
 Γ Fringe contrast 条纹对比度
 $\delta(x, y)$ Grating errors, function of position 光栅误差, 位置函数
 Δ Fringe displacement 条纹位移
 Δ Integrated phase change 累积相位变化
 ϵ Linear phase shift error 线性相移误差
 ϵ Angle error for 90-degree prism 90 度棱镜角度误差
 ϵ_z Axial distance from paraxial focus 近轴焦点的轴向距离
 η Diffraction efficiency 衍射效率
 θ Angle, shear angle, tilt orientation 角度值, 剪切角, 倾斜方向
 θ' Angle, Zernike polynomial set 角度值, 泽尼克多项式组
 θ_d Diffraction angle 衍射角
 θ_i Incident angle 入射角
 κ Conic constant 二次曲线常数
 λ Wavelength 波长
 λ_c Center wavelength 中心波长
 λ_{eq} Equivalent wavelength 等效波长
 Λ Diffraction grating or Moiré grating period 衍射光栅或莫尔光栅周期
 ν Frequency 频率
 $\Delta\nu$ Frequency difference 频率差

- ξ_c Cutoff frequency 截止频率
- $\xi_{c,sa}$ Cutoff frequency for a sparse array detector 稀疏阵列探测器的截止频率
- ξ_{Ny} Nyquist frequency 尼奎斯特频率
- ρ Reflectance (ratio of reflected irradiance) 反射(反射辐照度)比
- ρ Normalized pupil radius ($0 < \rho < 1$) 归一化的瞳孔半径
- σ RMS wavefront error 波前均方根误差
- σ^2 Wavefront variance 波面方差
- $\sigma_{\phi,i}$ Standard deviation, irradiance fluctuations 标准偏差, 辐照度起伏
- $\sigma_{\phi,p}$ Standard deviation, quantization phase error 标准偏差, 量化相移误差
- ϕ Phase 相位
- $\phi(t)$ Phase shift as a function of time 时间相移函数
- Ω Rotation rate 旋转速度
- Ω Solid angle 立体角

常用符号变量

- a Average phase shift between frames 每帧间平均相移
- A Amplitude 振幅
- A_n Aspheric surface coefficients 非球面系数
- b Number of bits for quantization error 量化误差的比特数
- B Obscuration ratio 遮拦比
- c Speed of light 光速
- C Moiré fringe spacing 莫尔条纹间距
- C Curvature 曲率
- d Distance, displacement 距离, 位移
- D Diameter 直径
- D_{HS} Diameter of Hindle Sphere 海德球直径
- f Focal length 焦距
- f Spatial frequency 空间频率
- $f/\#$ F -number F 数
- F Focal point 焦点
- F Coefficient of finesse 细化系数
- $g[\theta']$ Zernike angular component 泽尼克角分量
- G G -factor G 因子
- h Height 高度
- H Normalized field height 归一化视场高度
- i Step number, frame number 步数, 帧数
- I Irradiance 辐照度
- L_c Coherence length 相干长度
- m Diffraction order or fringe order 衍射级次或条纹级次
- m Fresnel zone plate zone number 菲涅尔波带片的波带数
- m Transverse or lateral magnification 横向放大率

- n Index of refraction 折射率
- n_e Extraordinary index, uniaxial crystal 非常折射率, 单轴晶体
- n_o Ordinary index, uniaxial crystal 寻常折射率, 单轴晶体
- N Number of algorithm steps 算法步数
- N Integer number of 2π 2π 的整数
- NA Numerical aperture 数值孔径
- OPD Optical path difference 光程差
- OPL Optical path length 光程
- p p-polarization state p 光偏振态
- r Non-normalized radial coordinate 非归一化径向坐标
- r_m Radius of m th bright fringe m 级亮条纹半径
- r_p Pupil radius 瞳孔半径
- R Radius of curvature 曲率半径
- R/T Reflection/transmission ratio 反射/透射比
- R_s Radial shear coefficient 径向剪切系数
- s s-polarization state s 光偏振态
- $s(r)$ Sag as function of part radius 矢高作为半径函数
- S Fringe spacing 条纹间隔
- SNR Signal to noise ratio 信噪比
- t Thickness 厚度
- t_c Coherence time 相干时间
- T Lateral translation 横向平移
- v Speed of light in medium or velocity 光在介质中的速度
- V Visibility 可见度
- V_{sc} Visibility factor due to spatial coherence 空间相干可见度因数
- W_{ijk} Wavefront aberration coefficient 波面像差系数
- $W(x, y)$ Wavefront as function of spatial position 波面空间函数
- x Spatial coordinate x 方向空间坐标
- x_p Pupil coordinate x 方向光瞳坐标
- x_s Pixel spacing 像素间距

目 录

第一章 干涉基础	1
一、双光束干涉方程	1
二、基本概念和定义	2
三、获得干涉条纹的条件	3
四、条纹可见度	3
五、空间相干性	4
六、偏振特性	5
七、相对光强度	6
八、分束器	7
九、分光板和薄膜分光镜	8
十、分光镜式衍射光栅	8
第二章 干涉仪	9
一、经典斐索干涉仪	9
二、牛顿环	11
三、泰曼-格林干涉仪	12
四、补偿板	12
五、反射/透射比	13
六、基于 PBS 的泰曼-格林干涉仪	13
七、斐索激光干涉仪	14
八、马赫-曾德尔干涉仪	16
九、光束检测	16
十、横向剪切干涉仪(LSI)	17
十一、旋转光栅 LSI	18
十二、径向剪切干涉仪	19

第三章 干涉图像	20
一、波面像差系数	20
二、泽尼克多项式	22
三、波面误差 RMS 值	24
四、球差干涉图	24
五、彗差干涉图	25
六、干涉图——其他像差	26
七、莫尔条纹	27
八、莫尔和干涉图	28
第四章 相移干涉	30
一、直接相位测量	30
二、相移方法	31
三、连续相移	32
四、液晶延迟器	33
五、频移光源	33
六、相移算法	34
七、基本的相位解包裹	35
八、步进相移和连续相移的比较	35
九、PSI 的误差	36
十、量化误差	37
十一、不正确的相移	38
十二、避免振动	39
十三、空间同步和傅里叶方法	40
十四、空间载波干涉仪	41
十五、毛玻璃散射器	42
第五章 表面微观结构	44
一、诺马斯基干涉显微镜	44
二、等色序干涉条纹(FECO)	45
三、相移干涉显微镜	46

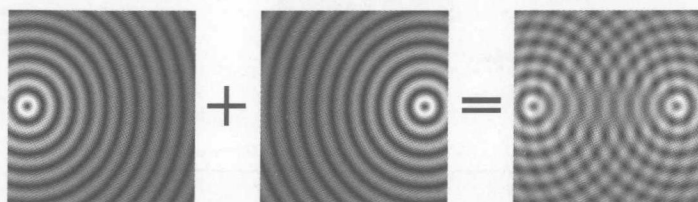
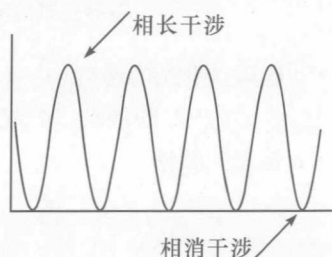
四、多波长干涉仪	47
五、立式扫描技术	48
第六章 平面检测	50
一、反光镜	50
二、窗口	51
三、楔镜	53
四、角锥立方棱镜	54
第七章 曲面检测	56
一、样板法	56
二、泰曼-格林干涉仪检测曲面	57
三、斐索激光干涉仪检测曲面	58
四、检测透镜或者透镜系统	59
五、沙克立方干涉仪	60
六、散光板干涉仪	61
七、相移散射板干涉仪	62
八、长波干涉仪	63
九、斯马特点衍射干涉仪	64
十、相移点衍射干涉仪	65
十一、索马格伦衍射干涉仪	66
十二、曲面,立式白光扫描干涉仪(VSWLI)	67
十三、柱形光学零件	67
第八章 绝对测量	68
一、平板	68
二、球面	69
第九章 非球面检测	71
一、非球面	71
二、非球面检测	72
三、双曲面零检测	73

四、奥夫纳零检测	74
五、全息零光学检测	75
六、计算全息基本原理	76
七、计算全息设计指南	77
八、非零检测	78
九、反射光线跟踪	79
十、尼奎斯特干涉仪	80
十一、长波干涉仪	81
附 录	83
一、非干涉检测	83
二、傅科(刀口)检测	84
三、线检测	85
四、朗奇检验	85
公式汇总	87
参考文献	93
索引	97

第一章 干涉基础

一、双光束干涉方程

光干涉测试技术是以光的干涉效应为基础的。双光束干涉技术是两个波面的叠加,类似池塘中的一块石头击起的涟漪与另一块石头击起的涟漪相遇时出现的现象。当两个波峰相遇的时候,合成波的高度便是这两个独立波峰高度之和。相反,当一个波谷和一个波峰相遇时,其合成波便会相互抵消。水波、声波和光波都会产生干涉现象,但是鉴于光学测试的目的,这里重点介绍光的干涉及其应用。



一束光波可以由它的频率、振幅和相位来描述。两束光波叠加后的干涉图案取决于它们各自的属性。单色波的双光束干涉方程是:

$$I(x,y)=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}\cos(\phi_1-\phi_2)$$

$$I(x,y)=A_1^2+A_2^2+2A_1A_2\cos(\phi_1-\phi_2)$$

• I 是辐照度,探测器对应辐照度,此辐照度是电场强度 A 的平方:

$$I=A^2$$

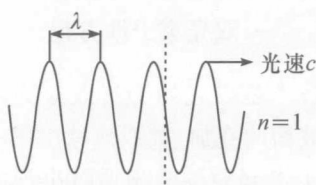
• ϕ 是光波的相位(以弧度为单位):

$$0 \leq \phi \leq 2\pi$$

- $\phi_1 - \phi_2 = \Delta\phi$ 是测量光束和参考光束之间的相位差。

二、基本概念和定义

- λ 是光的波长。可见光的范围是 400~700 nm。



每秒经过的波峰数等于频率 ν

- c 是真空中光的速度 ($n=1$):

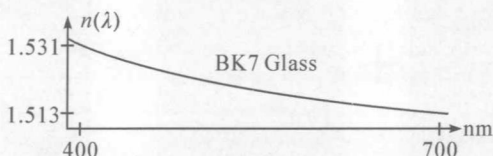
$$c = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$$

- ν 是光学频率:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}; \nu = 5.45 \times 10^{14} \text{ Hz } (\lambda = 550 \text{ nm})$$

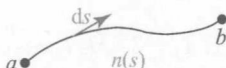
- n 是介质的折射率, 是关于 λ 的函数:

$$n(\lambda) = \frac{c}{\nu} = \frac{\text{真空中光的速度}}{\text{介质中光的速度}}$$



- OPL 是光程, 与光从 a 点到 b 点所经历的时间成正比:

$$OPL = \int_a^b n(s) ds; OPL = nt$$



- t 是介质的物理厚度。
- OPD 是双光束之间的光程差:

$$OPL = OPL_1 - OPL_2; \phi_1 - \phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} OPD$$

三、获得干涉条纹的条件

为了观察双光束的干涉条纹,必须满足几个条件。一束光必须与另一束光具有时间和空间相干性,这样在相交区域才能看到干涉条纹。另外,两束光的偏振特性一致。最后,两束光的光强度振幅一致。

时间相干性与双光束光源的光谱带宽成反比,与光源光谱分布的傅里叶变换相关。例如:激光通常被调制成纯单色光源,即它的光谱带宽是 0。零带宽光源的傅里叶变换为常数,所以理想单色光源的时间相干性是无穷大的。无穷大的时间相干性意味着一束光可以相对于另一束光通过不同数量的光程来进行延时,并且这两束光仍然发生干涉效应。光源的时间相干性可由相干长度(L_c)或者相干时间(t_c)得到:

$$L_c = \frac{\lambda_c^2}{\Delta\lambda}; \quad t_c = \frac{L_c}{c}$$

λ_c 是光源中心波长,而 $\Delta\lambda$ 是光谱带宽,它们可通过半峰宽度(FWHM)测量出来。只有双光束的光程差小于相干长度,光源才会产生干涉条纹。如果双光束的光程差比相干长度大,那么将不会产生干涉条纹。当光程差为零时,条纹可见度将达到最大值。

光源	λ_c (nm)	$\Delta\lambda$	L_c
氦氖激光	632.8	$<0.04 \text{ pm}$	$>10 \text{ m}$
汞灯	546	$\sim 0.1 \text{ nm}$	$\sim 3 \text{ mm}$
SLD	680	12 nm	$38 \text{ }\mu\text{m}$
LED	660	25 nm	$17 \text{ }\mu\text{m}$
电灯泡	550	$\sim 300 \text{ nm}$	$\sim 1 \text{ }\mu\text{m}$

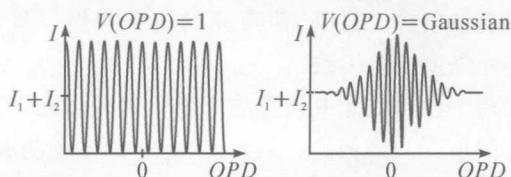
四、条纹可见度

条纹可见度的范围从 0 到 1,当可见度 V 大于 0.2 时才可以辨别出条纹。双光束干涉方程需要用瞬时可见度函数进行修正,此函数由光源决定且是一个光程差函数。对于激光来说,光程差可以达到 1,原双光束干涉方程仍然是:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}};$$

$$I = I_1 + I_2 + 2V(OPD) \sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi)$$

时间相干性引起条纹可见度的变化

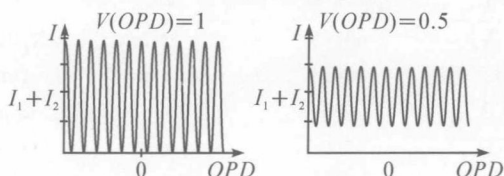


由于时间相干性,条纹可见度会降低。减少双光束光程差或者对光源光谱进行滤波可提高条纹可见度。

五、空间相干性

要观察到干涉条纹的第二个要求是:双光束具有空间相干性。如果光源是理想点光源,除了有光程差外两束光是完全一致的。理想单色光源产生的双光束在任意区域相遇都会发生干涉。但实际上,点光源是不存在的,实际光束比理想光束的空间相干性差。双光束的干涉条纹可见度与光源的空间尺寸成反比。

空间相干性引起条纹可见度的变化



与时间相干性对干涉条纹可见度的影响不同,由空间相干性引入的条纹可见度的退化并不是一个光程差的函数。这种条纹可见度在双光束干涉方程中,由一个常数 \$V_{\infty}\$ 乘以一个余弦项来表示:

$$I = I_1 + I_2 + 2V_{\infty} \sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi)$$

光源的空间相干性可以通过光源的空间滤波来进行改善。一种光源的空间滤波方法是使用一个透镜将光束耦合