

现代物理基础丛书

23

全息干涉计量 ——原理和方法

熊秉衡 李俊昌 编著



科学出版社

www.sciencep.com

现代物理基础丛书 23

全息干涉计量——原理和方法

熊秉衡 李俊昌 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在讲述干涉、衍射、相干性以及激光基本原理的基础上,系统介绍全息干涉计量的原理、方法、技术关键及发展近况。除传统全息干涉计量外,还介绍了近年迅猛发展的数字全息干涉计量。全书博采众多文献之长,融入作者多年的研究成果,因此别具特色。在较严谨的数理分析基础上,既认真阐明物理意义,又配有丰富实例。

本书可供从事光学、信息光学、光电子学、光学干涉计量研究的科技人员、教师、研究生参考,也是相关专业大学生的一部很好的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

全息干涉计量——原理和方法/熊秉衡,李俊昌编著. —北京:科学出版社, 2009

(现代物理基础丛书; 23)

ISBN 978-7-03-023740-8

I. 全… II. ①熊… ②李… III. 全息干涉测量法 IV. O4-34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008) 第 201327 号

责任编辑:刘凤娟 胡 凯/责任校对:桂伟利

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 1 月 第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009 年 1 月第一次印刷 印张: 51 1/4

印数: 1—2 500 字数: 1 007 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

《现代物理基础丛书》编委会

主 编 杨国桢

副主编 阎守胜 聂玉昕

编 委 (按姓氏笔画排序)

王 牧 王鼎盛 朱邦芬 刘寄星

邹振隆 宋菲君 张元仲 张守著

张海澜 张焕乔 张维岩 侯建国

侯晓远 夏建白 黄 涛 解思深

序 言

《全息干涉计量——原理和方法》这本专著,系统介绍了全息干涉计量的基本原理、实验技术以及它的最新进展和发展趋势。

全息干涉计量是激光问世后全息技术随之迅速发展起来的一种新的检测方法。它有全场、非接触、非破坏、精确度高等特点。可用于非破坏检测与评估、流场分析、燃烧分析、等离子体诊断、固体的应力应变分析、振动分析等。实时全息干涉计量更具有实时的特点,进一步配合使用高速摄影装置,能记录研究对象的高速变化。采用闭路电视系统,还可以将全息干涉条纹实时地输入到图像显示器,可方便地观察、记录条纹及其变化。

20 世纪 80~90 年代,特别是近几年来,全息干涉计量有许多重要进展,仅就实时全息干涉计量方面的进展而言,在提高干涉条纹衬比度,提高检测光场亮度,对位相调制度加以控制,利用物光再现参考光和直透参考光的干涉图纹进行检测等方面,发展了许多新方法。在使用的记录材料方面,光导热塑的商品化、光折变晶体、噬菌调理素、多量子阱记录材料等新材料在全息干涉计量中获得成功的应用。在系统的小型化、简易化等方面也有许多进展。此外,由于数字全息的发展,随着计算机速度和 CCD 分辨率的提高、数字全息检测有着极好的潜在应用前景。

本书作者长期从事激光全息的研究工作,他和合作者们,在实时全息、全息肖像、大景深全息、模压全息、散斑、全息元件等方面,有多项较高水平的研究成果。突出的实例如大景深技术,采用 25cm 相干长度的激光器拍摄成功 8.2m 景深、4.5m 尺寸的场景,创下菲涅耳全息的国内外最好结果。在 1986 年 7 月举行的国际全息应用会议上介绍中国光学进展的报告,提到了这项研究成果。近十年来,他从事于全息检测方面的一系列应用研究,主要应用于地震研究,大尺寸晶体元件检测,物体受力破坏过程的断裂力学等方面,获得多项创新研究成果。

作者毕业于云南大学物理系理论物理专业,不仅有扎实深厚的数理功底,而且有试验室长期工作的实践经验。《全息干涉计量——原理和方法》是这一研究领域中的一本系统专著。书中不少内容反映了他的学术研究,实验经验及实验技巧。理

论与实验并重, 并附有相当数量的实例. 此书可供从事光学全息干涉计量的科学技术工作者以及高校师生参阅. 从他在这些创新性工作中得到有益的启迪.

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王大钟' (Wang Dazhong).

2006 年 12 月 28 日

目 录

第 1 章 光学和数学基础	1
1.1 光的波动性描述	1
1.1.1 光波	1
1.1.2 辐照度、光强	2
1.1.3 波动方程	3
1.1.4 波函数	4
1.1.5 波函数的复数表示	8
1.1.6 空间频率	9
1.2 数学基础	12
1.2.1 傅里叶变换	12
1.2.2 卷积和相关	18
1.2.3 Delta 函数	21
1.2.4 一些常用函数	23
1.2.5 常用函数的傅里叶变换	29
参考文献	36
第 2 章 光波的衍射	38
2.1 惠更斯-菲涅耳原理	38
2.2 衍射的标量波理论	39
2.2.1 亥姆霍兹方程	40
2.2.2 亥姆霍兹-基尔霍夫积分定理	40
2.2.3 菲涅耳-基尔霍夫衍射公式	43
2.3 菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射	46
2.3.1 菲涅耳衍射	48
2.3.2 夫琅禾费衍射	49
2.4 薄透镜的光学性质	50
2.4.1 光波通过薄透镜的相位变化	50
2.4.2 透镜的傅里叶变换性质	54
2.5 二元屏的夫琅禾费衍射	60
2.5.1 矩孔的夫琅禾费衍射	60
2.5.2 单缝的夫琅禾费衍射	62

2.5.3 圆孔的夫琅禾费衍射	64
2.5.4 直边的夫琅禾费衍射	72
2.6 二元屏夫琅禾费衍射的进一步讨论	73
2.6.1 二元屏中心偏离光轴	73
2.6.2 双孔夫琅禾费衍射	74
2.6.3 双缝夫琅禾费衍射	75
2.7 二元屏的非涅耳衍射	78
2.7.1 矩孔的非涅耳衍射	78
2.7.2 直边的非涅耳衍射	83
2.7.3 单缝的非涅耳衍射	85
2.7.4 圆孔的非涅耳衍射	87
2.8 巴比涅原理	88
2.9 不等幅波前光波的衍射	91
2.10 光栅的衍射	94
2.10.1 正弦光栅	94
2.10.2 正弦光栅的组合	100
2.10.3 二元光栅 (黑白光栅)	104
参考文献	106
第 3 章 相干性理论基础	107
3.1 光的干涉	107
3.1.1 叠加原理	107
3.1.2 两列平面波的干涉	107
3.1.3 条纹能见度	109
3.1.4 灵敏度矢量和空间频率	110
3.2 时间相干性	112
3.2.1 非单色光源的时间相干性	112
3.2.2 等长波列窄带光源的时间相干性	117
3.2.3 相干时间和相干长度	123
3.2.4 复自相干度与功率谱密度	124
3.2.5 激光光源的时间相干性	134
3.3 空间相干性	137
3.3.1 窄带扩展光源的空间相干性	137
3.3.2 激光光源的空间相干性	143
3.4 时间-空间相干性	143
3.4.1 互相干函数和复相干度	143

3.4.2 准单色条件、互强度	147
3.4.3 准单色光空间相干性的传播性质	150
3.4.4 范西泰特-策尼克定理	154
3.4.5 星体干涉术	163
参考文献	167
第 4 章 激光光源	168
4.1 激光的原理	169
4.1.1 原子发光机制	169
4.1.2 受激发射与热辐射	171
4.1.3 光在介质中的放大	174
4.1.4 激光振荡	176
4.2 光学共振腔	179
4.2.1 共振腔模式	179
4.2.2 非共焦腔内基模的振荡	190
4.3 全息干涉计量术常用的激光器	193
4.3.1 固体激光器	193
4.3.2 气体激光器	199
参考文献	205
第 5 章 全息照相的基本原理	206
5.1 平面波形成的全息图 —— 全息光栅	208
5.1.1 干涉条纹的质量	208
5.1.2 干涉条纹的记录和感光材料的性能	209
5.1.3 调制传递函数 MTF	215
5.1.4 干涉条纹的两种主要类型 —— 振幅型和相位型干涉条纹	217
5.2 点光源形成的全息图	227
5.2.1 点光源全息图的记录	227
5.2.2 点光源全息图的再现	229
5.2.3 像的放大率	232
5.2.4 像的分辨率	234
5.3 同轴全息图和离轴全息图	236
5.3.1 同轴全息图	236
5.3.2 离轴全息图	237
5.4 菲涅耳全息图和夫琅禾费全息图以及傅里叶变换全息图	252
5.4.1 菲涅耳全息图和夫琅禾费全息图	252
5.4.2 傅里叶变换全息图	253

5.4.3 无透镜傅里叶变换全息图	257
参考文献	258
第 6 章 全息图的几种主要类型	259
6.1 按参考光和物光的主光线方向分类	259
6.2 按全息图干涉条纹信息的构成型式分类	259
6.3 按记录时全息图所在物体衍射光场的位置分类	261
6.4 按全息图再现的不同方式分类	261
6.4.1 透射全息图	262
6.4.2 反射全息图	263
6.5 按全息图干涉条纹间距与记录介质厚度比例分类	264
6.5.1 克莱因参量	264
6.5.2 布拉格定律	265
6.5.3 透射型厚全息图	268
6.5.4 反射型厚全息图	269
6.5.5 体积全息图的衍射效率	271
6.6 按全息图的再现光源分类	273
6.6.1 激光再现全息图	273
6.6.2 白光再现全息图	273
6.7 按全息图的制作方法分类	279
6.7.1 光全息图	279
6.7.2 计算机全息图	279
6.7.3 刻蚀法全息图	283
6.7.4 模压法、模压全息图	284
6.7.5 烫印法、烫印全息图	285
6.8 按制作全息图的记录材料分类	285
6.8.1 卤化银乳胶全息图	285
6.8.2 光导热塑全息图	286
6.8.3 光折变晶体全息图	287
6.8.4 重铬酸明胶全息图	289
6.8.5 光致抗蚀剂全息图	291
6.8.6 光致聚合物全息图	292
6.9 按制作全息图所使用的波源分类	293
6.9.1 电磁波全息图	293
6.9.2 超声全息	303
参考文献	307

第 7 章 全息干涉计量的基本原理和方法	309
7.1 单曝光法或实时全息法	309
7.1.1 基本原理	309
7.1.2 实验方法和装置	320
7.2 双曝光法或二次曝光法	323
7.2.1 基本原理	323
7.2.2 物体的位移测量	327
7.2.3 三维位移场的测量	331
7.3 连续曝光法或时间平均法	337
参考文献	341
第 8 章 不透明物体的全息干涉计量	343
8.1 刚体平移和转动的测量	343
8.1.1 刚体运动的方程式组	343
8.1.2 瞬时转动中心和阻力中心的测定	346
8.2 物体变形的测量	348
8.2.1 表面形变的数学表述	348
8.2.2 测量物体变形的条纹矢量理论	354
8.3 干涉条纹的定域	362
8.3.1 全息条纹的观察和条纹定域的概念	362
8.3.2 全息干涉条纹的定域条件	366
8.3.3 用准直光照明得到的条纹定域	368
8.3.4 用球面光照明得到的条纹定域	373
8.3.5 示例	375
8.4 分析全息干涉图一种简易方法	380
8.4.1 条纹间距方程式	381
8.4.2 条纹间距方程式的应用	383
参考文献	396
第 9 章 透明物体的全息干涉计量	397
9.1 透明物体的全息干涉条纹的形成和定域	397
9.1.1 单色光在非均匀介质中的传播性质	398
9.1.2 相位物体的全息干涉计量术	405
9.1.3 漫射照明相位物体全息术中的条纹定域	417
9.2 干涉条纹的分析	422
9.2.1 反转技术	422
9.2.2 由折射产生的误差	429

9.3 应用示例	431
9.3.1 空气动力学和流体目视观测	432
9.3.2 等离子体诊断	434
9.3.3 热传导和物质传递	437
9.3.4 应力分析	439
参考文献	442
第 10 章 全息干涉计量中的一些特殊技术	446
10.1 提高相位测量灵敏度的一些方法	446
10.1.1 非线性全息干涉计量术	446
10.1.2 双参考光全息干涉计量技术	456
10.1.3 多波长全息干涉计量方法	460
10.1.4 多通道全息干涉计量方法	462
10.2 外差全息干涉计量术	463
10.2.1 外差全息干涉计量术的基本原理	463
10.2.2 外差全息干涉计量术实验	463
10.3 全息等值线	465
10.3.1 用波长差产生等值线	465
10.3.2 用折射率的变化产生等值线	467
10.3.3 变化照明方向产生等值线	468
10.4 比较全息干涉计量术	470
10.4.1 比较全息干涉计量术原理	470
10.4.2 实时比较全息干涉计量术	473
10.5 全息剪切干涉计量方法	475
10.6 实时全息的一些特殊方法	478
10.6.1 在实时全息中获得高反衬度干涉条纹的方法	479
10.6.2 同时获得高亮度检测光场和高衬比条纹的实时全息记录方法	493
10.6.3 在“参考光场”检测透明物的方法	497
10.6.4 采用移相器判断条纹序数	503
10.7 大型结构的全息检测——大景深全息技术	505
10.7.1 远距离拍摄方法——等光程椭圆	505
10.7.2 大景深全息技术	507
参考文献	519
第 11 章 数字全息预备知识	523
11.1 菲涅耳衍射的数值计算	523
11.1.1 菲涅耳衍射积分的两种表述形式	523

11.1.2	离散傅里叶变换与傅里叶变换的关系	525
11.1.3	奈奎斯特取样定律	529
11.1.4	菲涅耳衍射积分的运算及逆运算	529
11.2	计算机图像的基础知识	537
11.2.1	三基色原理及图像的数字表示	537
11.2.2	图像文件的格式及 BMP 图像	538
11.2.3	真彩色图像转换为灰度图像的程序	541
11.3	二维光波场强度分布的数字图像表示及程序实例	550
11.3.1	二维光波场强度分布的数字图像表示	550
11.3.2	二维光波场强度分布的数字图像程序实例	551
	参考文献	555
第 12 章	平滑波面数字全息的基本理论	557
12.1	基于菲涅耳衍射积分及其逆运算的数字全息	558
12.1.1	计算物体实像的菲涅耳衍射波面重建	559
12.1.2	计算物体虚像的菲涅耳衍射逆运算波面重建	562
12.1.3	菲涅耳数字全息波面重建系统的脉冲响应	562
12.2	消除波面重建噪声的讨论	570
12.2.1	数字全息图的衍射效率	570
12.2.2	频域滤波法	571
12.2.3	消零级衍射光频域滤波法	575
12.2.4	空间载波相移法	577
12.2.5	时间相移法	580
12.3	傍轴光学系统的数字全息	583
12.3.1	柯林斯公式及用柯林斯公式的逆运算实现波面重建	584
12.3.2	ABCD 系统数字全息的波面重建实验研究	586
12.3.3	ABCD 系统数字全息系统的脉冲响应	588
12.4	消傍轴近似的数字全息	591
12.4.1	衍射场追迹重建波面的理论模拟	591
12.4.2	衍射场追迹重建波面的实验证明	595
12.5	数字全息变焦系统	596
12.5.1	数字全息变焦系统简介	597
12.5.2	变焦系统研究	597
12.5.3	变焦系统的参数设计	598
12.5.4	变焦系统在数字实时全息中的应用	599
12.6	三维场的数字全息重建实例	604

12.6.1	白炽灯点燃过程的实时全息干涉图像简介	604
12.6.2	白炽灯点燃过程的模拟研究	605
12.6.3	实际图像的处理	608
12.6.4	三维折射率场的重建	609
12.6.5	计算机模拟研究信息的讨论	611
	参考文献	612
第 13 章	数字全息的统计光学表述及实际应用	614
13.1	数字全息的统计光学表述	614
13.1.1	散射光的统计光学理论	615
13.1.2	散射光的波面重建	616
13.2	两次曝光数字全息检测研究	618
13.2.1	物体表面形变与相干基元波相差的关系	618
13.2.2	双曝光全息图的统计光学表述	619
13.2.3	双光路两次曝光数字全息测量系统	621
13.2.4	形变物体及双曝光干涉场的数学描述	623
13.2.5	傅里叶变换重建模拟及实验证明	625
13.2.6	物平面光波场的卷积重建	630
13.2.7	消零级衍射干扰的物平面光波场高保真卷积重建	637
13.3	三维面形的数字全息检测及相位测量技术	644
13.3.1	数字全息三维面形检测原理	645
13.3.2	等效光波的数字全息及绝对相位的计算	650
13.3.3	多波长等高线数字全息三维面形测量技术	651
13.3.4	改变照明光倾角的测量技术	654
13.4	相位型数字全息图及波面重建	655
13.4.1	相位型数字全息图的形成及波面重建	656
13.4.2	理论模拟及实验证明	658
13.5	散射光的真彩色数字全息	661
13.5.1	三基色光波重建计算涉及的主要问题	661
13.5.2	真彩色重建图像的显示及存储	662
13.5.3	真彩色图像重建的模拟	666
13.5.4	真彩色数字全息的实验研究	669
13.6	数字全息的应用	670
13.6.1	三维粒子场检测	671
13.6.2	微机电系统的数字全息检测	675
13.6.3	材料物性参数的检测	675

13.6.4 时间平均法数字全息振动分析	679
13.6.5 生物体微形变检测	681
参考文献	683
第 14 章 应用	686
14.1 全息干涉计量技术的应用	686
14.1.1 在力学研究、力学参数检测等方面的应用	686
14.1.2 微电子学中的应用	697
14.1.3 在分子物理学, 流体力学, 空气动力学中的应用	699
14.1.4 在空间技术、核技术、高能物理等方面的应用	707
14.1.5 应用于振动分析	709
14.2 记录材料的进展	712
14.2.1 热塑记录材料的商品化	712
14.2.2 光折变晶体记录材料	713
14.2.3 多量子阱记录材料	714
14.2.4 液晶	715
14.2.5 噬菌体调理性 BR 记录材料	716
14.3 全息系统的智能化、小型化、多功能化	718
14.4 脉冲全息与高功率激光的实时全息研究高速瞬变物理现象	724
参考文献	742
附录 A 辐照度检测	752
A.1 光照度的测量与计算	752
A.2 光照度比的测量	755
A.3 光密度的测量	756
A.4 用测光表测量激光辐照度的读数修正	758
参考文献	761
附录 B 卤化银记录材料的处理技术	762
B.1 原理简介	762
B.2 使用连续激光器记录的透射全息图的处理	763
B.2.1 获得高质量振幅型离轴、透射全息图的注意事项	763
B.2.2 获得高质量相位型、离轴、透射全息图的注意事项	764
B.3 使用连续激光器记录的位相型反射全息图的处理	765
B.3.1 红光记录	765
B.3.2 绿光记录	768
B.4 使用脉冲激光器记录的透射全息图的处理	769
B.4.1 获得高质量振幅型离轴、透射全息图的注意事项	769

B.4.2 获得高质量相位型离轴、透射全息图的注意事项	769
B.5 使用脉冲激光器记录的反射全息图的处理	770
B.5.1 红光下获得高质量反射全息图的注意事项	770
B.5.2 绿光下获得高质量反射全息图的注意事项	770
参考文献	770
附录 C 空间滤波器 物镜与针孔的选择	772
参考文献	778
附录 D 防止准直透镜反射光的干扰	779
D.1 准直透镜的内反射光的会聚点位置	779
D.2 准直透镜的内反射光影响强弱的区域划分	782
D.2.1 条纹衬比 $V \approx 1$ 的区域	783
D.2.2 条纹衬比 $V \approx 0.1$ 的区域	784
D.2.3 条纹衬比 $V \approx 0.01$ 的区域	784
D.2.4 实践中应注意的若干问题	784
参考文献	787
附录 E 激光和人眼安全	788
E.1 人眼结构	788
E.2 激光的生物学效应	789
E.3 激光器安全分类	793
E.4 激光防护措施	795
参考文献	797
后记	799

第1章 光学和数学基础

1.1 光的波动性描述

1.1.1 光波

根据光的波动性理论, 光是一定频率范围内的电磁波, 其频率范围如图 1-1-1 所示.

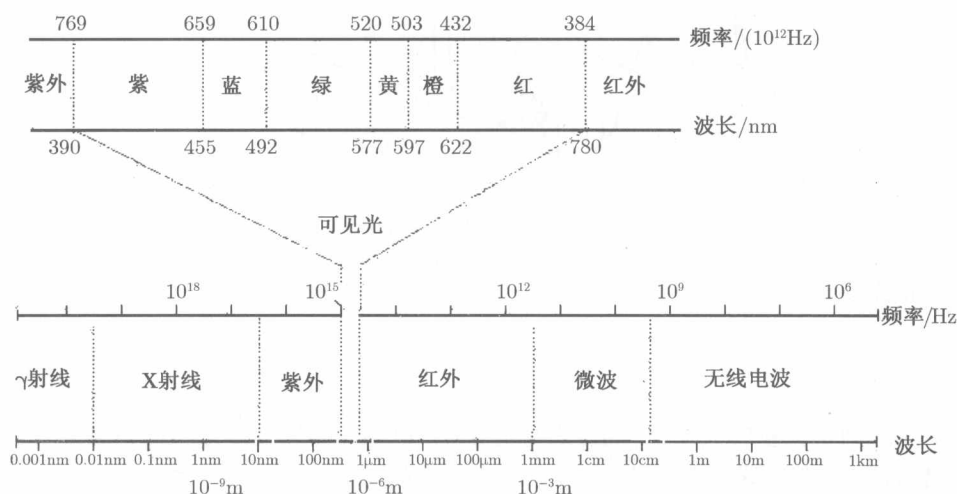


图 1-1-1 电磁波谱

就发光的时间特性来看, 光源可区分为两类: 脉冲光源和连续光源. 脉冲光源发光时间短暂, 辐射出一个或多个波包在空间传播; 而连续光源则稳定、持续地发光. 它辐射出很长的波列在空间传播, 波场中的各点以相同于光源的时间特性, 稳定、持续地发生电磁扰动, 扰动的基本形式是简谐振荡. 通常把它的这种振荡称作光扰动(optical disturbance). 作为这类波场的一种抽像是定态波场, 它具有以下两个特性: ① 波场各点的光扰动是相同频率的简谐振荡, 频率高低决定于光源性质; ② 波场各点光扰动的振幅不随时间改变, 在空间形成稳定的振幅分布. 严格定义的定态波场要求光源发出的光波波列是无限长的, 然而实际光源的发光过程都是有限的. 从微观角度看, 发光过程总是断断续续的, 波场是由一个个波列的传播形成的, 而且波列的频率也不是单一的. 不过, 当波列持续时间比光扰动的周期长得很