

装备科技出版基金

Digital Optical Measurement
Techniques and Applications

数字光学测量 技术和应用

[瑞士] Pramod Rastogi 主编

李胜勇 吴俊 艾小川

吴荣华 李晖宙

译

 **ARTECH HOUSE**
BOSTON | LONDON



国防工业出版社
National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

数字光学测量技术 和应用

Digital Optical Measurement Techniques and
Applications

[瑞士] Pramod Rastogi 主编

李胜勇 吴俊 艾小川 吴建华 李照宙 译



国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字：军—2018—022 号

图书在版编目（CIP）数据

数字光学测量技术和应用/（瑞士）普拉莫德·拉斯托吉（Pramod Rastogi）主编；李胜勇等译. —北京：国防工业出版社，2018.10

书名原文：Digital Optical Measurement Techniques and Applications
ISBN 978-7-118-11634-2

I. ①数… II. ①普… ②李… III. ①数学技术—应用—光学测量—研究 IV. ①TB96-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 216860 号

2015 Artech House, Inc.

Translation from the English edition: Digital Optical Measurement Techniques and Applications by Pramod Rastogi.

All Rights Reserved. This translation published by Artech House, Inc.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书简体中文版由 Artech House, Inc. 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有，侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

（北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048）

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 27¼ 字数 522 千字

2018 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 168.00 元

（本书如有印装错误，我社负责调换）

国防书店：（010）88540777

发行邮购：（010）88540776

发行传真：（010）88540755

发行业务：（010）88540717

光学通过光学检测、光学测量和图像处理等分支有效地解决了科学和工程众多领域的难题，在实验力学、断裂力学、材料学、生物学和医学等广泛领域得到大量应用。激光器和数字信息处理技术是传统光学重新焕发异彩的两个重要使能器。数字信息处理技术与光电检测技术的发展共同促成了光学测量技术的成功及其在科学和工程中的应用。近年来，伴随着传感器技术日新月异的飞速发展，数字计算机的信息存储和处理能力呈现指数增长，这些都为光学测量的进一步发展铺平了道路。光学测量是一门应用领域广泛且自身发展快速的复杂学科，要想了解其全貌无疑面临着巨大的挑战。本书正是为了增强科学和工程学的学生对数字数据处理和光学计量学的基本理解和必要技能而写的。

光学测量近年来的发展越发具有显著的多学科特征，为了透彻理解相关学科的基本理论并全面了解相关领域的最新进展，本书将不同领域的专家小组聚集在一起，精心挑选相关主题，向读者呈现底层原理和最新进展。本书作者阵容庞大，他们来自多个国家，都是国际上光学测量领域的知名专家和学者，具备深厚的学术背景，有些作者还具有工业领域的丰富实践经验。强大且多样的作者阵容保证了本书的权威性。

本书内容翔实。作为一本研究性著作，本书全面介绍了光学测量学科的基本原理、前沿进展和工程应用。而作为一本教科书，本书具有丰富的教学功能，如已解习题、案例研究和文本框，使读者能够理解底层物理学原理和功能。同时，本书具有严谨的参考文献，可供读者进一步扩展研究。总体来说，本书为科学和工程领域的人员了解光学测量的最先进概念提供了一份极有价值的资料。

翻译一本涉及领域如此广泛的光学测量书籍是一项非常具有挑战性的任务。除了要理解光学原理，还需要了解相关应用领域的进展。因此，在翻译过程中，译者查阅了大量的国内外文献，以保证对理论的理解以及研究进展把握的正确性。特别是在某些细分领域的个别术语的翻译方面，译者参考并借鉴了国内相关学术出版物相关文献的主流用语。鉴于本书内容涉及面之庞杂、译者水平有限，翻译错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

译者

2017年11月24日

序

光学通过其多个分支（如光学检测、光学测量和图像处理）已经被有效地用于解决科学和工程众多领域的多种应用问题。其中的许多应用属于诸如实验力学、断裂力学、材料学、生物学和医学等广泛的领域。自从1960年激光器问世以来，出现了各种具有扩展波长和高功率的激光器。作为激光器提供的增强相干性的副产品，在相干光学成像中散斑一直被认为是噪声。散斑现象是由来自粗糙表面的相干光的散射或光学粗糙介质（其厚度变化足以使透射波随机化）的透射而产生的，并且在非破坏性检测领域发挥重要作用。数字信息处理技术与光电检测技术的发展共同促成了光学测量技术的成功及其在科学和工程中的应用。自从这些技术的早期版本问世以来，相关技术已经发生了巨大变化。具有大量的像素、扩展的色彩灵敏度和计算机直接寻址像素的CCD和CMOS检测器构成了数字信息处理系统的基本元件。在单位成本的计算能力方面，数字计算机的存储容量和计算能力也继续呈指数增长，从而允许高速数据操作。

非接触式光学测量不会损坏物体表面。物体的相关信息由透射波或散射波携带，物体本身的状态并不会受到显著影响。对精度、测量速度，以及向涉及微技术和纳米技术应用逐渐转变的需求也在快速增长。具有不断改进的空间分辨力和更短响应时间的新型光电接收器的最新发展应当有助于处理大量数据或将波长范围扩展到红外和紫外区域。而这又需要适当的图像处理工具。数字信息处理技术自21世纪初以来所取得的巨大进步为处理这种大量的数据流铺平了道路。

考虑光电记录的带限特性，摄影术中的数字图像处理技术有助于以最高的保真度渲染场景。近年来，成像技术与图像处理硬件同步发展。数字处理技术使用几乎实时的对比度增强和模糊减少方案，已经实现主观图像质量的增强。同样，边缘增强、图像锐化和直方图均衡有助于改善主观图像感知。然而，对于客观图像增强，则需要利用具有频域分析的傅里叶变换技术来扩展图像处理技术，正如第1章中所讨论的那样。为了改善图像质量，使用调制传递函数来定量地复原图像质量。

第1章讨论利用具有频域分析的傅里叶变换技术来扩展图像处理技术，进行客观图像增强。

第2章讨论的光学检测技术在高精度制造中至关重要，特别是在生产高精度

光学部件和系统时。光学表面和系统的干涉测试技术已经问世多年，在表面和光学系统的商店测试中，牛顿环仍被提及。在非球面干涉检测中，计算机生成的全息图用于产生非球面参考波。高精度和复杂的制造机器只有在非常短的时间或准实时地实现非接触式检测时才有效。工业领域非球面的非接触光学检测问题虽然已经出现多年，但目前当计算机生成的全息图太贵或者其生成耗时太长时，个别元件和低 F 数仍然是研究的主题。而自由曲面的计量要求更高。

第3章讨论的数字条纹分析及其条纹解释是当今的迫切需求。相移技术和傅里叶变换方法经常用于干涉测量、全息干涉测量和散斑图案干涉测量中的自动条纹分析，用于应力分析的光弹，用于形状比较、测量条纹投影。光学技术不再借助逐点式应变仪，可以进行非接触全场位移和应变分析。

第4章和第5章介绍的数字全息和散斑图案干涉测量是一类源远流长的用来测量面内和面外位移、变形、应变、斜率、曲率、形状和振动等的全场干涉测量技术。除了数字全息成像和数字斑点图案干涉测量，我们还将同时讨论具有自动条纹分析功能的数字信息处理技术。

第6章讨论的数字图像相关与全息和散斑图案干涉测量一样，也需要在物体变形之前和之后记录和处理物体信息。该技术在平面物体和面内变形测量领域已经得到普遍应用。将计算机生成的散斑图案投影与数字投影仪组合起来，开发出双目立体视觉系统，可用于曲面和三维变形测量。随着立体视觉校准的改进，三维数字图像相关在宏观物体和结构的变形测量领域颇受欢迎。

第7章中讨论的数字条纹投影轮廓测量法已经非常成熟，并且已广泛应用于对鲁棒性、测量速度和自动分析有特殊要求的形状测量领域。

第8章讨论的数字光弹技术涉及对相干要求较低的公共路径干涉测量。它是一款用于可视化和量化应力场的极佳的工具，它基于物体在受到应力作用下暂时诱导的双折射现象。随着基于相移技术的发展，全场自动光弹变得可行。从早期使用数字硬件到使用相移或彩色图像处理技术向传统光弹引入自动化，必然需要使用数字信息处理。实验分析一直被认为是克服与数字建模相关的问题和不确定性所必需的，图像采集中涉及的低成本，使数字建模有利于工业应用。

基于激光的流体速度测量技术可以分为点测量（如激光多普勒测风法）和场测量技术（如激光散斑测速或粒子图像测速，在第9章中讨论）。多次记录标记粒子在流体中的三维位置可重建三维场。然而，并非借助跟踪单个标记粒子，而是使用有限三维查询体的数字处理来确定流中的速度分量。

第10章讨论的光纤传感器正在世界各地得到应用，从飞机机翼的应力监测到医疗应用。虽然这些传感器的基本原理非常明确，但是光纤传感器系统和网络的实现则需要大量运用数字技术。

第11章讨论的光学相干层析技术是低相干干涉测量的变种，并且在眼科得到了重要的应用。该方法提供体内人体组织的非侵入性断层扫描。断层扫描的目的是获得物体的横截面切片。光学相干层析技术快速发展成为标准方法（特别是在最初发明的眼科）出人意料。

本书内容翔实，内置许多教学功能，如已解习题、案例研究和文本框，并适当引用参考文献。总体来说，本书提供了一份有价值的资料，介绍了关于这个主题的最先进的概念性观点，而且应该是数字光学测量及其在未来几年应用的标准文本。

汉斯·蒂齐亚尼 (Hans J. Tiziani)

瑞士伯内克

2015年4月

35 年前，数字处理技术在发展的早期阶段只是少数光学成像和测量系统的一小部分。然而，电荷耦合器件（CCD）等电子成像器件的出现引领了未来的希望，因为它们在为现有的光学测量技术提供人性化和经济驱动的解决方案方面表现出很大的潜力，因此能够克服障碍并满足 21 世纪技术的需求。

通过将图像处理技术（诸如数字图像和信号处理方面的相关工具）与光学测量系统集成，人们已经设计出光学测量系统的数字对应物。这个集成过程不仅把模拟方法的优势转化为数字方法，而且带来了一系列全新的光功能，而这些功能是不可能以各自的模拟形式存在的。此外，集成化还提高了测量效率和精度。

模拟方法与数字数据处理的结合是过去几十年中最引人注目的成功案例之一。它们的综合协同作用不仅使我们能够处理更复杂的问题，而且还为创新解决方案的提出创造了机制，而这些全新的工作方式是以前无法想象的。这种协同作用还为控制相关过程以及管理信息及其流动提供了一种稳健的手段。

数字信息处理和分析与光学计量的协调发展使得其功能范围具备显著增加的潜力，为探索当前和未来世界开辟了令人鼓舞的研究途径。复杂性的提高反映了一项重要需求，即要求科学和工程学的学生增强对数字数据处理和光学计量学的基本理解和必要技能。本书就是基于这个观点并作为《光学测量技术和应用》（Artech House, 1997）的续篇而写的。

大多数科技领域的进展都具有不断深化的多学科特征，这一直在缓慢但稳步地促进着图书出版业的转变。将不同领域的专家小组聚集在一起，目的是通过适应或更接近教科书，而不是参考书的风格来处理广泛的学科。作为这种转变的一个例子，本书旨在达成以下期望：本书涵盖的所有主题都经过刻意的选择和呈现，以使读者能够理解它们的底层物理学原理和功能，进而掌握本学科的统一方法。本书以教学式风格阐述了这些元素，并提供了对该领域最新进展的深入理解。本书自始至终都采用已解习题、应用、案例研究和包含背景材料的文本框，帮助读者扩大对这一主题的理解。

我想借此机会向所有为本书做出贡献的作者们表示感谢，感谢他们深厚的团结精神，同时感谢他们及时响应我的各项请求。

普拉莫德·拉斯托吉（Pramod Rastogi）

2015 年 4 月

作者介绍

吉姆·比尔格 (Jim Burge) 是图森市亚利桑那州大学光科学、天文、机械工程学教授, 他带领一批研究人员、工程师和学生推动制造和检测技术的前沿研究, 并将其用来制造有挑战性的反光镜和光学系统。他领导着大型光学元件制造和检测实验室 (Large Optics Fabrication and Testing Laboratory), 该实验室支持各种望远镜项目, 既有各种小型望远镜, 也有用于太空的 25m 巨型麦哲伦望远镜。他已撰写了 320 多篇技术出版物, 共同创办了两家公司, 分别是亚利桑那光学计量 (Arizona Optical Metrology) 公司和亚利桑那光学系统 (Arizona Optical Systems) 公司。

陈路杰 (Lujie Chen) 2001 年本科毕业于中国南京工业大学工程学专业。2006 年, 他在新加坡国立大学取得博士学位。2007—2010 年, 他在英国剑桥大学任研究助理。他于 2010 年加入新加坡科技与设计大学 (SUTD) 当教员。2011 年, 他在美国麻省理工学院进行为期一年的学术访问, 研究量子点生物医学成像。他的研究领域包括光学测量、医学成像和快速原型。他开发了 “UU and Fig”, 这是一个关注光学测量和快速原型的通用图像处理系统。

布莱恩·卡肖 (Brian Culshaw) 1966 年毕业于伦敦大学学院, 获得物理学一等荣誉学位, 1970 年获得电气工程博士学位。他曾在康奈尔大学 (1970 年)、加拿大渥太华贝尔北方研究中心 (1971—1973 年)、伦敦大学学院 (1974—1983 年)、斯坦福大学 (1982 年) 任职, 并于 1983 年加入了斯特拉思克莱德大学, 成为名誉教授。他曾担任国际光学工程协会 (SPIE, 总部设在美国华盛顿州贝林翰市) 的董事, 并担任 2007 年的主席。他发表了超过 300 余篇技术论文、一些会议记录、7 本教科书和 10 多种专利。

瑞诗凯诗·库卡尼 (Rishikesh Kulkarni) 从位于印度班加罗尔的印度科学理工学院获得了机械工程学硕士 (MTech) 学位。他拥有生物医学和汽车电子领域的行业经验。他目前正在洛桑联邦理工学院 (EPFL) 攻读光子学博士学位。他的研究领域是数字信号处理和光学测量应用。

潘兵 (Bing Pan) 来自于中国北京航空航天大学 (BUAA) 航天科学与工程学院。他 2008 年获得了清华大学机械工程博士学位。在新加坡南洋理工大学作为研究员工作一年后, 他在 2009 年加入北京航空航天大学固体力学研究所。他

目前的研究兴趣主要集中在先进光学技术及其实验力学应用。他在国际期刊发表了 60 篇同行评议文章。他在 2013 年赢得了国家自然科学基金优秀青年奖，并在 2012 年入选中国教育部新世纪优秀人才支持项目。

权成根 (Chenggen Quan) 1982 年毕业于中国哈尔滨工业大学 (HIT)，获得工程学士学位。他在 1988 年从哈尔滨工业大学获得了机械工程学工学硕士学位。1992 年从英国华威大学获得光学工程博士学位。在加入新加坡国立大学 (NUS) 之前，他曾在国家计量中心、新加坡生产力与标准局担任高级工程师。他目前是新加坡国立大学机械工程系副教授。他的研究兴趣包括光学无损检测、实验力学、数字全息、光学图像加密和自动条纹图案分析。他曾撰写或合著超过 150 篇国际期刊论文。

K·拉梅什 (K. Ramesh) 目前是印度理工学院马德拉斯分校应用力学系教授，在 2005—2009 年担任董事长，之前在印度理工学院坎普尔分校机械工程系担任教授。他为数字光弹学的发展做出了显著的贡献。他有专著 *Digital Photoelasticity—Advanced Techniques and Applications* (《数字光弹——先进技术和应用》)，并在 *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics* (《实验固体力学施普林格手册》) 中撰写了 “Photoelasticity (光弹)” 一章。他已经写了几本创新的电子书，如 *Engineering Fracture Mechanics and Experimental Stress Analysis* (《工程断裂力学和实验应力分析》)，开创了工程教育的新典范。他自 2006 年以来担任印度国家科学院工程院院士，由于为光弹涂料的发展所做的杰出贡献，他获得了美国实验力学学会颁发的桑德曼奖 (Zandman, 2012 年)。

胡里奥·索里亚 (Julio Soria) 于 1983 年被西澳大利亚大学授予工学学士 (荣誉) 学位，1989 年获得西澳大利亚大学机械工程学博士学位。1990 年在斯坦福大学和美国宇航局艾姆斯研究中心从事博士后研究，1991 年加入了澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (CSIRO)。1993 年加入了莫纳什大学，目前是机械工程讲座教授。他担任航天和燃烧湍流研究实验室 (LTRAC) 主任，他在 1994 年创立了该实验室。他是澳大利亚流体力学学会研究员。他目前的研究兴趣包括湍流边界层流动、亚声速和超声速过渡、湍流喷射流以及非侵入式光学实验测量方法 (PIV、Stereo-PIV、Tomo-PIV、HPIV、Tomo-HPIV) 的开发。他共撰写了 420 余篇论文。

赵泰瑞 (Cho Jui Tay) 从英国思克莱德大学获得学士学位和博士学位。他目前是新加坡国立大学的副教授。他的研究兴趣包括实验应力分析和光学干涉测量技术及其在 MEMS 和 NEMS 设备中的应用。他曾在国际期刊上发表大量论文，并与人合著了几本书和书籍章节。他同时还担任多个国际期刊的编委和多家补助奖励机构委员会的委员。他拥有多项专利，并赢得了一些研究和最佳论文奖，包括

英国的大卫嘉吉奖。

马蒂亚斯 R·维奥蒂 (Matias R. Viotti) 在阿根廷罗萨里奥国立大学研究机械工程学, 1999 年也在那里获得文凭。他于 2005 年在阿根廷罗萨里奥物理研究所获得博士学位。他自 2005 年以来一直作为副研究员在巴西圣卡塔琳娜州国立大学计量和自动化实验室工作。他是国际光学工程协会高级会员。他的研究兴趣包括数字散斑干涉、残余应力测量、相干技术应变分析和无损检测的发展。他与人合著发表在国际期刊和会议程序论文共计 50 余篇。

理查德·沃尔默豪森 (Richard Vollmerhausen) 是圣约翰光学系统的创始成员和首席工程师。他在美国特拉华大学获得了电气工程博士学位。他曾经在道格拉斯飞行器公司担任仪表工程师, 并曾在美国海军 China Lake 武器中心担任物理学家。在美国陆军夜视实验室, 他开发出了目前应用于所有美国 and 大部分北约光电武器瞄准器设计的目标任务绩效指标。他还进行了广泛的飞行实验, 以建立直升机引航的心理需求。他已经发表近 100 篇研究论文和两本关于成像系统性能的著作。

莱昂内尔·沃特金斯 (Lionel Watkins) 曾经是英国班戈威尔士大学电子工程科学学院的一名研究员, 然后担任讲师, 1991 年在同一机构获得博士学位。1996 年, 他加入了新西兰奥克兰大学物理系。他的研究方向是光学测量 (主要是椭圆偏振仪) 和干涉仪。在前一领域中, 他设计了许多借鉴干涉概念的新颖椭圆偏振仪, 而在后一领域中, 他的兴趣已经集中在相位恢复小波方法, 最近研究寻找外差干涉产生的利萨如图形 (Lissajous Figure) 的最佳拟合椭圆的新技术。

义明安野 (Yoshiaki Yasuno) 领导着筑波大学计算光学组 (Computational Optics Group)。他在 2000 年获得了时空光计算博士学位, 并将光学计算理论扩展到光学测量领域。自 2003 年以来, 他一直在研究光计算在高速医学成像领域的应用, 这就是当前有名的傅里叶域光学相干层析成像 (FD-OCT) 技术。他目前的研究兴趣是傅里叶域光学相干层析成像技术在眼科的应用, 同时他也积极参与基于光学计算角度扩展傅里叶域光学相干层析成像技术。

赵春雨 (Chunyu Zhao) 是亚利桑那光学计量 (Arizona Optical Metrology) 公司创始人和总裁, 该公司提供计算机生成的全息图, 用于非球面检测。他 1993 年在清华大学获得了物理学学士学位和机械工程工学学位。1999 年取得硕士学位, 2002 年取得博士学位, 这两个学位均在亚利桑那大学光学工程专业获得。他拥有超过 15 年的开发和构建各种用于大型非球面光学表面检测的干涉系统的经验。他曾撰写或合著约 70 篇技术论文, 并在国际会议上发表许多演讲。

周萍 (Ping Zhou) 是亚利桑那大学光学科学学院的助理研究教授。她的研究领域是精密光学制造和测试, 特别是大型光学系统。她的研究活动包括光学系统设计、高精密计量和各种测量的误差分析及数据处理。她于 2009 年在亚利桑那大学获得博士学位。从那时起, 她一直在亚利桑那大学大型光学元件制造和检测小组工作。

主编介绍

普拉莫德·拉斯托吉教授 (Pramod Rastogi) 在德里的印度理工学院获得机械工程硕士学位，并在法国弗朗什-孔泰大学获得博士学位。他 1978 年加入瑞士洛桑联邦理工学院 (EPFL)。他在同行评审收录期刊撰写或发表超过 150 篇科学论文。拉斯托吉教授也是百科全书文章的作者，并出版了好几本光学计量领域的著作。

拉斯托吉教授是 2014 年国际光学工程协会丹尼斯·加博尔奖 (Dennis Gabor Award) 获得者，他是瑞士工程科学学院的成员、光学仪器工程师协会会员 (1995 年) 和美国光学学会院士 (1993 年)。他也是 Hetényi 奖获得者，以表彰他 1982 年发表在 *Experimental Mechanics* (《实验力学》) 上最具影响力的论文。拉斯托吉教授是爱思唯尔 (Elsevier) 出版公司、工程国际期刊 *Optics and Lasers* (《光学和激光》) 的首席共同主编。

第 1 章 数字图像处理

1.1	简介	1
1.2	傅里叶光学分析	2
1.2.1	频域传递响应	4
1.2.2	相机传递函数的理想特性	9
1.2.3	采样和图像重建	15
1.3	数字复原滤波器	20
1.3.1	反卷积核的生成	21
1.3.2	有用的窗函数	29
1.3.3	使用快速傅里叶变换进行复原	30
1.4	局部区域对比度增强	34
1.4.1	热成像仪的 LACE 算法	37
1.4.2	反射成像仪的 LACE 算法	43
1.5	小结	45
	参考文献	46

第 2 章 干涉法光学表面检测

2.1	干涉仪基本原理	47
2.1.1	光的波性质使得干涉成为可能	47
2.1.2	表面测量干涉仪类型	53
2.2	商业干涉仪	56
2.2.1	商业干涉仪概述	56
2.2.2	附加功能和附件	60
2.2.3	曲率半径测量	62
2.3	采用商业干涉仪测量平面和球面的实际问题	62
2.3.1	搭建硬件并对准	62
2.3.2	软件设置	64
2.3.3	校准	65

2.3.4	处理数据	68
2.3.5	测量不确定度的估计	69
2.4	非球面的测量	71
2.4.1	非球面的定义及类型	71
2.4.2	非球面零位测试的配置	73
2.5	使用计算机生成的全息图进行非球面测量	75
2.5.1	CGH 干涉仪的工作原理	76
2.5.2	CGH 的设计	79
2.5.3	CGH 的制造	80
2.5.4	CGH 测试的对准	82
2.5.5	数据削减	83
2.5.6	误差分析	85
	参考文献	87

第3章 相移干涉测量法

3.1	干涉仪方程	88
3.2	三帧法	92
3.3	四帧法	95
3.4	最小二乘算法	98
3.5	Carré 算法	101
3.6	Hariharan 法	102
3.7	相移步进算法设计	104
3.8	相移步进技术及应用	108
3.8.1	机械步进	108
3.8.2	光栅方法	111
3.8.3	基于 Pancharatnam 相位的方法	114
3.8.4	空间方法	118
	参考文献	121

第4章 数字全息成像的系统方法及其在干涉测量中的应用

4.1	介绍	124
4.2	记录数字全息图	125
4.3	数字全息方法中的数值重建	128
4.3.1	基于卷积法的重建	128
4.3.2	基于菲涅耳近似的重建	129

4.3.3 可变放大倍率的数值重建	136
4.4 抑制 DC 项	139
4.5 降低 CCD 上的空间频率内容	141
4.5.1 通过使用发散透镜减小 CCD 阵列上的物体角度	141
4.5.2 通过使用小孔减小 CCD 上的物体角度	142
4.6 数字全息干涉测量	143
4.6.1 变形测量	144
4.6.2 折射率分布的研究	151
4.6.3 振动测量	153
4.6.4 物体形貌测量	154
4.7 小结	156
参考文献	157

第 5 章 数字散斑图案干涉测量

5.1 介绍	160
5.2 散斑基本原理	161
5.2.1 客观散斑分布	162
5.2.2 主观散斑分布	163
5.3 散斑干涉测量	166
5.4 散斑干涉测量的相位恢复	172
5.4.1 运用傅里叶变换进行相位估计	173
5.4.2 利用相移作为相位估计量化工具	177
5.5 相位展开处理	179
5.6 实验测量的光学结构	183
5.6.1 对面外位移敏感的干涉仪	183
5.6.2 对面内位移敏感的干涉仪	187
5.6.3 对径向面内位移敏感的干涉仪	191
5.6.4 对位移导数敏感的干涉仪	198
5.7 小结	201
5.8 致谢	202
参考文献	202

第 6 章 数字图像相关法

6.1 简介	209
6.2 二维数字图像相关法	211

- 6.2.1 试件制备和图像采集 211
- 6.2.2 基本原理和概念 213
- 6.2.3 运用数字图像相关法测量位移场 222
- 6.2.4 使用逐点最小二乘法估算应变场 230
- 6.2.5 二维数字图像相关法在应变测量中的应用 232
- 6.3 三维数字图像相关法 236
 - 6.3.1 基本原理和概念 236
 - 6.3.2 双目立体视觉系统标定法 237
 - 6.3.3 立体视觉匹配 239
 - 6.3.4 三维轮廓重建和变形计算 241
 - 6.3.5 三维数字图像相关法在形貌和变形测量中的应用 242
- 6.4 结论和后续工作 249
- 参考文献 249

第 7 章 数字条纹投影轮廓测量

- 7.1 简介 255
- 7.2 方法的原理 255
 - 7.2.1 三角测量法 255
 - 7.2.2 条纹投影 257
 - 7.2.3 相位估算 259
 - 7.2.4 相位标定 266
- 7.3 方法的应用 268
 - 7.3.1 线扫描和条纹投影 268
 - 7.3.2 质量导向的相位展开 270
 - 7.3.3 多频条纹投影 271
 - 7.3.4 载波相位消除 273
 - 7.3.5 360°条纹投影 273
- 7.4 结论 276
- 参考文献 276

第 8 章 数字光弹

- 8.1 简介 278
- 8.2 光弹基础 278
 - 8.2.1 双折射 278
 - 8.2.2 延迟片 279