

“十二五”国家重点图书出版规划项目



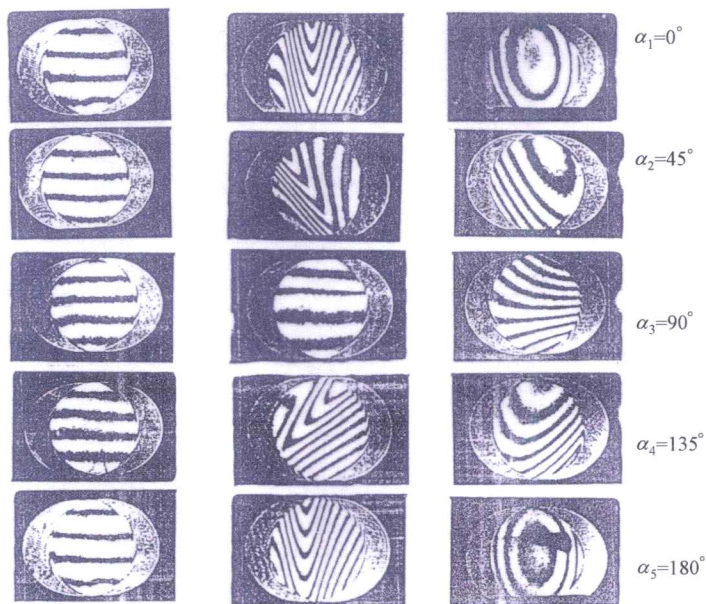
光学与光子学丛书

剪切干涉术及其进展

徐德衍 王向朝

编著

戴凤钊 曾爱军 孙建锋



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

“十二五”国家重点图书出版规划项目

光学与光子学丛书

剪切干涉术及其进展

徐德衍 王向朝

编著

戴凤钊 曾爱军 孙建锋



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一本光干涉领域论述剪切干涉术的专著。在全面介绍剪切干涉术的基本概况、理论与技术的基础上,系统描述了几种常用剪切干涉仪的工作原理、使用方法、解析运算及其各种基本应用,详细介绍了近30年来发展的不同相移剪切干涉术的实施技术与途径,几种剪切干涉波前重建理论、方法与实例,以及在现代高端光学领域中的应用实例及进展。书末附有制作和应用剪切干涉仪的若干参考资料。

本书适用于光学检测、光学计量、像质评价、激光检测以及精密测试等领域的科研与技术人员阅读,可作为高等院校与光学有关的师生的干涉术的教科书或参考书。对从事激光工程、红外技术、光学信息处理、全息术以及实验力学等学科的科技人员均有裨益。

图书在版编目(CIP)数据

剪切干涉术及其进展 / 徐德衍等编著. —北京: 科学出版社, 2017.4
(光学与光子学丛书)

ISBN 978-7-03-052529-1

I. ①剪… II. ①徐… III. ①物理光学-研究 IV. ①0436

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第074779号

责任编辑: 钱 俊/责任校对: 邹慧卿
责任印制: 张 伟/封面设计: 铭轩堂设计

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年4月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017年4月第一次印刷 印张: 28 3/4

字数: 573 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本丛书名由中国科学院院士母国光先生题写

光学与光子学丛书

《光学与光子学丛书》编委会

主 编 周炳琨

副主编 郭光灿 龚旗煌 朱健强

编 委 (按姓氏拼音排序):

陈家壁	高志山	贺安之	姜会林	李淳飞
廖宁放	刘 旭	刘智深	陆 卫	吕乃光
吕志伟	梅 霆	倪国强	饶瑞中	宋菲君
苏显渝	孙雨南	魏志义	相里斌	徐 雷
宣 丽	杨怀江	杨坤涛	郁道银	袁小聪
张存林	张书练	张卫平	张雨东	赵 卫
赵建林	朱晓农			

序

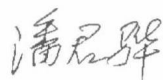
自 1987 年徐德衍研究员的专著《剪切干涉仪及其应用》问世以来，整整三十年过去了。

在这一时期，光学干涉术、光学剪切干涉术以及其他领域的光学检测取得了很多重要进展。一方面，现代光学、激光工程与技术及空间光学通信等领域的光学检测都比三十年前要求速度更快、精度更高。另一方面，上述领域现代光学技术的新进展，牵引和驱动了光学检测科学与技术向纵深发展，其中包括了剪切干涉术的研究和应用，尤以各种形式的相移剪切干涉术研究与应用、剪切波前重构理论与技术应用等方面更为突出。再则，在高速激光通信、光刻机投影物镜像质检测技术、合成孔径激光成像雷达波前检验等必须应用有别于传统的剪切干涉仪而开发出新型的“剪切干涉”手段去实现。所有这些，使得剪切干涉术的内容提升到一个新的高度。

《剪切干涉术及其进展》一书，基本上保留了三十年前的原著章节和绝大部分“经典”内容，仅作了稍微的调整、更改和充实。在原书基础上增添了若干章节，旨在体现剪切干涉术这三十年来的最重要进展！

该书主编徐德衍研究员，在光学检测领域工作已有五十载，从未中断。早在 1965 年大学毕业时的论文就涉及“光学剪切干涉”内容。1984 年我与杨世杰等来中国科学院上海光学精密机械研究所鉴定和验收直径 1.56m 非球面天文镜面时，剪切干涉法就是该镜面几种检验与验收方法之一。在此前后四五十年光学检测工作职业生涯中，他的一些工作、论文及专利大都涉及剪切干涉术的理论研究和技术应用。该书其他几位作者也都是当前活跃在光学检测技术领域第一线的专家。

该书是剪切干涉术的基本理论与技术的专著，涵盖了这一领域的新进展与最新成果，因此特向读者们推荐。



2016 年 11 月 24 日于苏州

前 言

干涉术及剪切干涉术在现代测试技术中的地位举足轻重、令人瞩目。剪切干涉仪是干涉仪中极为重要的一类。近五十年来,随着激光、光电探测器件与计算机技术的飞速发展,剪切干涉理论、技术及应用亦在不断扩展,尤其近二三十年来,几种相移剪切干涉技术的成熟应用及波前重建理论的完善与实用化,使得剪切干涉术不仅在常规光学与激光检测中发挥着特有的效能,而且,重要的是,在现代高端光学检测领域中也扮演着独特的、无可替代的角色。它的重要性和优越性越来越被更多的光学科技工作者理解、接受和重视。

为了使广大光学工作者了解、熟悉、掌握并运用剪切干涉术,尤其是几种相移剪切干涉术的基本理论、独特性能、制作技术、评价方法及现代波前重建理论与技术及其令人瞩目的现代应用,我们根据多年从事剪切干涉技术研究与应用的体会,并结合有关资料写成本书。

在编写中,没有涉及与剪切干涉术有关的全部内容,而是着重描述研究较深、应用最广的横向剪切干涉术。本书的编写思想是,力求面向光学基层有一定文化水平的广大工人和技术人员,使之在检验、装调、验收等各种实际工作中发挥应有的效能;对此法虽有所了解,尚缺乏实践的光学和激光研究单位从事检测、计量、像质评价的工作人员,提供更多的技术细节、实施途径及应用实例,使之成为得心应手的参考书。同时对培养即将参加工作的大专院校光学专业学生独立承担光学检测及物理实验工作和解决相关问题的能力定有裨益。书中某些章节对高等院校光学专业教师以及激光与红外技术、信息处理与全息术、实验力学等领域的工程技术人员会有一定的参考价值。总之,本书旨在对需要了解、使用剪切干涉术的同行提供一本入门的读物;对已有所了解、尚缺乏实践的同行提供一本实用的参考书。这一思想能否实现或实现了多少,留待读者品评。

本书共 12 章。第 1 章是剪切干涉术的概括介绍,包括诞生背景、发展进程、技术特色及应用概况等,旨在让读者对这一领域有一个全方位的粗轮廓的了解。为了易于读懂书中涉及光干涉的基础概念与知识,我们在第 2 章提炼出与剪切干涉术有关联的必须掌握的光干涉的基本理论与技术,这对从事剪切干涉术的入门者是非常有意义的。第 3~6 章是本书的主体之一。从波前剪切干涉

术的基本类型、原理、特点，到经典的 Saunders 波前求解及某些概念定义都在第 3 章作了全面的阐述。第 4~6 章分别对常用的棱镜式剪切干涉仪、平板式剪切干涉仪以及光栅式剪切干涉仪原理、制作甚至调试等方方面面作了全面、深入、细致的描述，这对未曾接触过或使用过尚不熟练者，能否成功地掌握剪切干涉仪从制作到应用全过程是极其重要的。选自不同类型的这些经典的剪切干涉仪在各个学科的基本应用，我们在第 7 章中做了详尽的分类介绍：从光学材料到光学元件检验；从光学系统装调到光束或系统准直检测；从光学传递函数测量到激光不同参量的监测等均予以全面的介绍。第 8 章我们比较概括地描述了剪切干涉术延伸在其他光学学科的几个研究与应用实例，旨在引导读者拓宽剪切干涉术应用的视野和思路。

三十多年来，在干涉术中引进相移技术的基础上，依赖光电接收和数据处理新技术使得干涉仪的定量解析愈加可靠、准确、快速，这一系列技术环节获得迅猛发展；同样地，上述关键技术应用于采用不同手段的相移剪切干涉术中也随之应运而生，再加以剪切波面重建理论的创立与实用，也使得剪切干涉仪的定量解析较之经典方法愈加可靠、准确、快速，从而大大提升了剪切干涉术在现代高端光学领域的应用空间，所有这些内容，将在第 9~11 章分别进行详尽的描述，并构成本书的主体之二。书末几个附录作为第 12 章，对领会、加深、扩展该领域的知识、视野或许是有益的。

本书的编写安排是：除第 9 章及 11.3 节由曾爱军执笔；第 10 章及书后索引由戴凤钊执笔；第 11 章由孙建锋执笔外，其余章节及内容均由徐德衍执笔。全书由徐德衍和王向朝统稿和审定。

本书承蒙中国科学院上海光学精密机械研究所林尊琪院士的指导与帮助，并幸运地得到我的大学毕业指导老师、学长杨力研究员的关爱与指点。杨力研究员和他已经仙逝的老师宋从武老先生在五十年前把我引入了“剪切干涉”的王国。近年来，我们前一本书（《现行光学元件检测与国际标准》）的合作者们——南京理工大学的高志山、陈磊等教授多次催促我重新编写剪切干涉的专著。在组成写作小组过程中，得到本所刘立人研究员、王向朝研究员、黄惠杰研究员大力支持，也得到相应室、组的同事和硕士和博士研究生们（李杰、诸波尔、孟泽江、张恒、顾帅妍、朱鹏辉、方伟、贺琪欲、彭常哲、宋思雨、成维、董冠极、陈国栋、廖陆峰等）的无私帮助和有益建议。所有这些，在此一并表示深深的谢意。

本书的编写虽有本人在三十年前的拙作为基础，但那时的背景、那时的光学检测、那时的我们，与现在相比，回忆起来颇有“河东、河西”之感。如今条件充裕，人才辈出，但我们那一代的人们，已坐七望八，或淡出本

行、或魂牵梦萦在那个曾经的光学岁月里。我与合作者们要特别感谢科学出版社的鼎力支持，以及国家科学技术学术著作出版基金的资助。同时，要感谢我曾经工作过的中国科学院上海光学精密机械研究所相关室组及同仁与师生们的无私协助。

专论干涉仪的著作，国内前辈和同行从未出版过，即使在国际书林中，亦属凤毛麟角；专论剪切干涉术的著作国内外均未所见。常因内容布局取舍、背景主题兼备、新老资讯取舍等所困惑。再则，限于年高与体弱，学识浅薄与老化，经验有限与陈旧，书中疏漏之处在所难免，敬请同行不吝赐教，以求改正，在此先致以由衷的谢意。

徐德衍

2015年9月12日初稿于美国得州达拉斯

2016年11月18日完稿于中国科学院上海光学精密机械研究所

目 录

序 前言

第 1 章 剪切干涉术概述	1
1.1 剪切干涉术的产生	1
1.2 剪切干涉术的发展简史	2
1.3 剪切干涉仪的特点	4
1.4 剪切干涉仪的应用概况	6
参考文献	7
第 2 章 光干涉的基本理论与技术	9
2.1 光的波动性及其数学描述	9
2.2 波动方程中特征量的基本概念与意义	11
2.2.1 波长、周期与频率	11
2.2.2 波速与光程	11
2.2.3 相位差与光程差	11
2.2.4 振幅与光强度	13
2.2.5 光强度与光程差	13
2.2.6 球面波与平面波	14
2.3 光的干涉现象与相干条件	15
2.3.1 光的干涉现象	15
2.3.2 相干条件	16
2.4 光干涉的普遍规律	17
2.4.1 光强分布公式的讨论	17
2.4.2 干涉图样的对比度	20
2.5 干涉条纹宽度与形状	20
2.5.1 条纹的线宽度与角宽度	20

2.5.2	干涉条纹的形状	22
2.5.3	干涉条纹的观测	24
2.6	分光方法与分光元件	25
2.6.1	三种分光方法	25
2.6.2	振幅分光法的膜层分配及其对对比度的影响	26
2.6.3	光栅分光元件	26
2.6.4	平行平板分光元件	27
2.6.5	立方棱镜分光镜	28
2.6.6	偏光分光镜	29
2.7	平板干涉及其重要性	30
2.7.1	平板干涉及其特点	30
2.7.2	平板干涉中光程差计算与讨论	32
2.7.3	平板的等厚干涉与等倾干涉	35
2.8	白光干涉	38
2.8.1	白光干涉现象及彩色干涉条纹图谱	38
2.8.2	白光干涉中的两个重要问题	39
2.9	剪切干涉的初步知识	41
2.9.1	引言	41
2.9.2	横向剪切干涉仪的基本原理与基本概念	41
2.9.3	波面剪切、倾角及条纹取向	44
2.10	剪切干涉仪中的白光光源与激光光源	45
	参考文献	46
第3章	波前横向剪切干涉仪	47
3.1	引言	47
3.2	波前剪切干涉仪的主要类型与特点	47
3.2.1	波前横向剪切干涉仪	48
3.2.2	波前径向剪切干涉仪	48
3.2.3	波前旋转剪切干涉仪	51
3.2.4	波前翻转剪切干涉仪	53
3.2.5	不同类型干涉仪的图示说明	53
3.3	横向剪切干涉仪的基本原理	55
3.3.1	结构形式与干涉原理	56
3.3.2	波像差与干涉条纹的关系	57

3.3.3	几种像差的干涉图形表达式	58
3.3.4	关于色差的若干考虑	64
3.3.5	条纹形状与镜面缺陷	65
3.4	由横向剪切干涉条纹求解未知波面形状	67
3.4.1	引言	67
3.4.2	一维联立解析法	68
3.4.3	二维联立解析法	73
3.4.4	作图解析法	77
3.5	剪切量、参考点与灵敏度	80
3.5.1	用经验公式选取剪切量	80
3.5.2	参考点的选取方法	82
3.5.3	灵敏度与剪切量的关系	84
3.6	影响剪切干涉图形对比度的因素	86
3.6.1	对比度的两种不同含义及其影响对比度降低的因素	86
3.6.2	光源的非单色性	87
3.6.3	光强不等及其杂散光的存在	89
3.6.4	光源容许尺寸与对比度及剪切量的关系	92
3.6.5	偏振等其他因素的影响以及各种因素影响的综合	96
	参考文献	97

第4章 棱镜式横向剪切干涉仪 99

4.1	剪切干涉仪的产生	99
4.1.1	基于马赫-曾德尔干涉仪的剪切干涉仪原理	99
4.1.2	基于迈克耳孙干涉仪的剪切干涉仪原理	101
4.2	棱镜剪切干涉仪的几种形式	102
4.2.1	梯形棱镜型	102
4.2.2	锥角棱镜扭转型	104
4.2.3	锥角棱镜固定型	105
4.2.4	立方棱镜固定型	105
4.2.5	两种立方棱镜扭转型	106
4.2.6	立方棱镜组合型	108
4.2.7	两用可变剪切型	109
4.2.8	棱镜剪切干涉仪简要小结	110
4.3	棱镜固有像差的消除	111

4.3.1	问题的提出	111
4.3.2	辅助透镜的选用	111
4.4	棱镜剪切干涉仪的结构与使用	112
4.4.1	引言	112
4.4.2	仪器系统的描述	112
4.4.3	仪器结构	113
4.4.4	仪器使用	115
4.4.5	剪切棱镜的调整原理与方式	116
4.5	剪切干涉条纹判读与解析	119
4.5.1	像差的干涉图样	119
4.5.2	联立解析法求未知波面举例	121
4.5.3	联立解析法误差分析	125
4.6	一些具体问题及措施	127
4.6.1	缝宽计算与制作狭缝的简易方法	128
4.6.2	棱镜剪切干涉仪制作中的两个问题	129
4.6.3	未能出现干涉条纹的原因分析	130
4.6.4	剪切干涉图样的拍摄方法	130
	参考文献	131
第5章	平板式横向剪切干涉仪	133
5.1	引言	133
5.2	单平板剪切干涉仪	134
5.2.1	单平板剪切干涉仪原理	134
5.2.2	单平板剪切干涉中的几个基本关系式	136
5.2.3	对平板两面平行度的要求	139
5.2.4	对平板面形局部误差的要求	140
5.2.5	平板两反射面反射率的匹配	143
5.2.6	用降低平板平行度要求的转向法测波面曲率半径	144
5.2.7	用楔形平板直接检测激光波面	146
5.2.8	检测大口径激光束准直性的大口径单平板剪切干涉仪	148
5.3	双平板剪切干涉仪	150
5.3.1	双平板剪切干涉仪的产生	150
5.3.2	双平板剪切干涉仪的原理	151
5.3.3	双平板剪切干涉仪的实例	152

5.4	三平板环路剪切干涉仪	153
5.4.1	三平板环路剪切干涉仪原理	153
5.4.2	实现可变横向剪切的几种方式举例	155
5.4.3	三平板环路剪切干涉仪的几何尺寸设计	157
5.4.4	干涉仪调整与馈光控制	159
5.4.5	环路中有光学系统的径向剪切	161
5.4.6	干涉仪误差及其测量精度	162
5.5	四平板横向剪切干涉仪	164
5.6	横向旋转剪切与横向平行剪切的数理关系	165
5.6.1	横向旋转剪切的参量关系	165
5.6.2	球面波横向旋转剪切的几个关系式	166
5.6.3	横向旋转剪切与横向平行剪切的的关系	167
	参考文献	167
第 6 章	光栅式横向剪切干涉仪	169
6.1	引言	169
6.2	光栅检验法概况	170
6.3	朗奇检验原理	171
6.3.1	朗奇检验的初期认识	171
6.3.2	朗奇检验几何光学原理	172
6.3.3	朗奇检验物理光学原理	174
6.3.4	朗奇检验几何光学原理与物理光学原理的关系	174
6.4	朗奇光栅横向剪切干涉仪	176
6.4.1	光栅剪切干涉仪原理及其条纹基本方程	176
6.4.2	朗奇图形定量检验公式	178
6.4.3	朗奇图形定量检验公式使用说明	188
6.5	非球面的朗奇检验	193
6.5.1	朗奇检验用于非球面	193
6.5.2	零位朗奇检验	195
6.6	朗奇检验中的两个问题	197
6.6.1	朗奇光栅频率的考虑	197
6.6.2	表面面形与朗奇图形的关系	199
	参考文献	200

第7章 剪切干涉仪的基础应用	202
7.1 概述	202
7.1.1 干涉术在光学测试中的重要性	202
7.1.2 选取光学检验方式的原则	203
7.1.3 剪切干涉仪的应用范围	204
7.2 光学材料均匀性检验	205
7.2.1 引言	205
7.2.2 成品与半成品材料检验	206
7.2.3 激光材料的检验	208
7.3 光学元件检验与测量	209
7.3.1 引言	209
7.3.2 大口径凹球面反射镜的检验	210
7.3.3 大口径平面镜的检验	213
7.3.4 平板平行度及棱镜角的测量	216
7.4 光学系统装校、准直与检验	218
7.4.1 在光学装校中的应用	218
7.4.2 准直光学系统的检验	220
7.4.3 光学系统的波差检验	222
7.5 在非球面检验中的应用	224
7.5.1 引言	224
7.5.2 非球面基本方程及必要的参数	225
7.5.3 非球面的辅助检验与补偿检验	228
7.5.4 非球面镜的直接检验	234
7.5.5 应用两种检验方法的实例	241
7.6 光学传递函数的自相关测量	245
7.6.1 引言	245
7.6.2 自相关法测量光学传递函数的基本原理	246
7.6.3 几台早期测量光学传递函数的剪切干涉仪简介	247
7.6.4 单平板剪切干涉仪测量调制传递函数	250
7.6.5 用三平板环路剪切干涉仪快速测试传递函数	250
7.6.6 用光栅剪切干涉仪测量光学传递函数	252
7.6.7 用固定剪切量的剪切干涉仪测量光学传递函数	255
7.7 在激光参量测试中的特殊用途	258
7.7.1 检测激光束的特殊性	258

7.7.2	激光束波面曲率半径测量	259
7.7.3	激光束波面像差的测量	260
7.7.4	相干长度的确定	262
7.8	在信息处理及全息术中的应用	263
7.8.1	摄影图像实时光学相减	263
7.8.2	计算机产生全息图再现波面的评价	268
7.8.3	傅里叶变换物镜波像差的检验	271
7.9	在气体动力学研究中的应用	274
7.9.1	引言	274
7.9.2	从马赫-曾德尔干涉仪到剪切干涉仪	274
7.9.3	剪切干涉图形的一种分析方法	276
7.10	在其他方面的应用	279
7.10.1	引言	279
7.10.2	激光核聚变玻璃靶球的评价	279
7.10.3	全息凹面光栅的检验	281
7.10.4	用剪切干涉条纹检查人眼视功能	282
7.10.5	眼镜屈光度与质量检查	284
	参考文献	286
第 8 章	剪切干涉术在其他学科的扩展	288
8.1	引言	288
8.2	显微剪切干涉术	289
8.3	全息剪切干涉术	290
8.3.1	全息图作为干涉元件的全息剪切干涉仪	291
8.3.2	全息光栅剪切干涉仪	292
8.4	散斑剪切干涉术	294
8.5	红外剪切干涉仪	296
8.6	声光剪切干涉术	297
	参考文献	300
第 9 章	移相剪切干涉术	301
9.1	引言	301
9.2	移相剪切干涉数理分析	301
9.3	几种移相剪切干涉技术	303

9.3.1	PZT 移相剪切干涉术	303
9.3.2	楔板移相剪切干涉术	304
9.3.3	液晶移相剪切干涉术	309
9.3.4	光栅移相剪切干涉术	311
9.3.5	检偏器移相剪切干涉术	315
9.3.6	波片移相剪切干涉术	318
9.4	结语	320
	参考文献	320
第 10 章	剪切干涉波前重建理论与技术	323
10.1	概述	323
10.2	区域法	324
10.2.1	区域法重建概述	324
10.2.2	低空间分辨率区域法	325
10.2.3	高空间分辨率区域法	328
10.3	模式法	354
10.3.1	模式法重建基础	354
10.3.2	基于 Zernike 多项式的模式法	356
10.3.3	基于 xy 二维多项式的模式法	375
10.4	离散傅里叶变换法	377
10.5	波前重建实例	379
	参考文献	381
第 11 章	剪切干涉术的现代应用	385
11.1	长焦距透镜焦距测量	385
11.1.1	引言	385
11.1.2	测量原理	386
11.1.3	结论	387
11.2	激光波前测量	388
11.2.1	双剪切概念的提出	388
11.2.2	结构和原理	388
11.2.3	应用实例	390
11.2.4	结论	391
11.3	光刻机投影物镜像质检测	391



11.3.1	光刻机投影物镜像质检测及朗奇剪切干涉	391
11.3.2	测量原理	392
11.3.3	结论	397
11.4	准直光束的检测	397
11.4.1	引言	397
11.4.2	基本原理	397
11.4.3	测量实例	398
11.4.4	结论	400
11.5	在高速激光通信领域的应用	400
11.5.1	双剪切干涉仪结构	400
11.5.2	干涉仪结构	401
11.5.3	系统试验和分析	402
11.5.4	结论	403
11.6	在合成孔径激光成像雷达领域的应用	404
11.6.1	引言	404
11.6.2	合成孔径激光成像雷达相位历史测量	404
11.6.3	结论	405
11.7	大气湍流的实时测量	405
11.7.1	引言	405
11.7.2	理论模型	406
11.7.3	测量方法	409
11.7.4	结论	412
	参考文献	412
第 12 章	附录	414
12.1	Rimmer-Wyant 方法剪切矩阵	414
12.2	椭圆正交变换法剪切矩阵	420
12.3	制作两种规格的梯形棱镜剪切干涉仪的技术要求	424
12.3.1	大型棱镜剪切干涉仪	424
12.3.2	微型棱镜剪切干涉仪	427
12.4	制作全方位旋转楔形平板剪切干涉仪工艺技术要求	428
12.4.1	楔形平板加工工艺技术要求	428
12.4.2	部分装配图	429
12.4.3	应用中的口径 85mm 全方位旋转剪切干涉仪实物照片	430