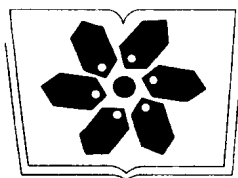


全國標準叢書

激
光
測
量
學

科學出版社



中国科学院科学出版基金资助出版



国家自然科学基金委员会资助出版

激光测量学

金国藩 李景镇 主编

科学出版社

1998

内 容 简 介

本书系统地论述了激光测量的基础理论、测量原理和 14 个领域的激光测量技术,总结了我国激光测量技术所取得的成就,反映了最新的科研成果,其中包含了撰写者自己的学术研究成果和独特见解,介绍了有应用前景的前沿课题。

本书同时兼有学术研究论著、技术应用参考书的特点,为从事激光测量、激光仪器设计和激光应用的科研人员、工程技术人员提供了很多宝贵的实用资料,亦可作为电子专业、光学及激光专业、仪器专业、测量专业师生的教科书。

图书在版编目(CIP)数据

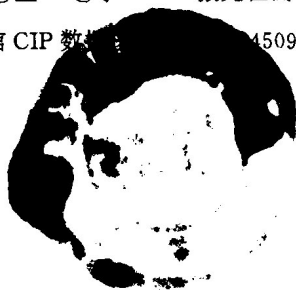
激光测量学/金国藩、李景镇主编. —北京:科学出版社,

1998.7

ISBN 7-03-006131-4

I. 激… II. ①金… ②李… III. 激光检测 N. TN247

中国版本图书馆 CIP 数据核字 98014509 号



科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998年8月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1998年8月第一次印刷 印张: 70 1/2

印数: 1—1 300 字数: 1 623 000

定价: 148.00 元

《激光测量学》编委会

主编 金国藩 李景镇

编委 陈家璧 过巴吉 李景镇 金国藩

苏显渝 袁 格 殷纯永

序 言

60 年代,激光的问世堪称本世纪物理学的重大进展之一,是光学领域具有革命意义的重大突破。基于激光的独特性质,人们对于光的本质以及光与物质相互作用的认识都具有了划时代的提高。正如上世纪末 X 射线的发现,人们普遍理解了 X 射线的透射性质,使其在医疗及工程上得到应用。然而,X 射线的影响还远不止于此,更重要的是,X 射线为了解物质的原子、分子结构提供了探测手段,促进了材料及工程科学的进步。今天,由于激光的特有性质,人们已普遍将其应用于激光加工、激光医疗,等等;然而,激光正是因为其在波长、方向性、时间范围所能达到的极限程度,成为研究物质在原子范围内结构和运动规律的“探针”,特别是其能用于研究原子级的动态程度,而促进了探测手段质的飞跃。我们知道,将近一个世纪以来,X 光在物质研究中具有极其重要的作用,直至现在还有生命力,还在用于研究较复杂的分子(如生物分子)结构;但激光为人类提供了研究物质动态及反应的手段,它的生命力将更长,必将成为即将到来的下个世纪的重要科学研究对象。

激光测量所取得的成就已蔚为壮观,其应用价值及科学意义不可估量。例如,由于稳频激光技术的发展和应用,物理学上最基本的量值——米,改为用真空光速来定义,有效数字准确到九位数(真空光速为 299796458m/s),稳频激光的稳定度已达到 10^{-13} ,再现度达到 10^{-12} ,超短脉冲激光的脉宽达到 $4.6 \times 10^{-15}\text{s}$ (相当于在一个光脉冲中只有屈指可数的几个波数),几何尺寸的微细测量可以达到 $\frac{1}{10}$ 原子级的尺度或者更小……这就使我们有条件来研究植物叶绿素(与人类生活联系最密切的物质之一,人类的粮食来源)的光合作用,了解其分子链的反应过程;研究在地质年代才能显示出来的地壳板块运动;用激光全息研究燃料燃烧过程……正是由于这些,人类进一步认识了世界。激光对现代科学技术所起的作用,促使激光作为精密测量(探测)手段而得到发展及应用,从而使激光测量学成为有广阔前景的新兴学科领域。

本书主编是金国藩院士和李景镇教授。李景镇教授从事应用光学的科研工作 30 多年,具有广博的理论基础及丰富的实践经验,加之他有博览文献的爱好,80 年代已有由他主编的《光学手册》问世,为光学界主要参考专著。近四年来,他又与金国藩院士一道组织国内知名专家,共同撰写本书。本书内容丰富,既有理论基础,又有激光在探测测量诸方面的应用,详尽而新颖,实属高水平专著。为此,我高兴地推荐本书并作此序言。



1997 年 8 月 20 日

前 言

从某种意义上来说,没有测量就没有科研,就没有现代工业的发展。激光的高亮度、高相干性和高准直性,使很多过去难以测量和不能测量的领域成为可能,开拓了测量的内涵并得到了广泛的应用,提高了测量的精度,已达纳米量级,提高了测量的层次,促进了测量智能化的进程。激光测量技术推动了现代科研和高新技术的发展。

我国一直重视激光测量技术的理论研究、应用研究和工程应用。在国家级和部委级研究项目中,有大量激光测量的课题。我国在激光测量的总体水平上已接近世界水平,有的已达到世界先进水平。我国研制的输出波长为 640nm 的稳频激光器,稳定度达 10^{-13} ,复现性达 10^{-12} ,为米的定义提供了先进的波长基准;精密测量进入纳米领域,促进了纳米技术的发展;人造卫星测距取得了重大进展,当作用距离为 $(6\sim 8)\times 10^6\text{m}$ 时,测量精度高达 $\pm 4\text{cm}$;激光多波长无导轨测量一直处于世界先进行列;激光 CT 技术使定量测量三维温度场成为可能;激光时间探针测量技术为微观世界的皮秒级和飞秒级信息的获取提供了近乎唯一的工具,在诸如光合作用之类的生命科学的研究中起到重要作用。

激光测量技术正处在高速发展时期。随着新型激光器的问世,激光新效应的发现和新型光电探测器的研制成功并走向市场,激光将在深度和广度两个方面继续发展。可以预见,激光将进一步向其他学科和领域渗透,激光测量的精度会进一步提高,激光测量的智能化会得到进一步发展,激光测量的多维化和群集化将把激光测量技术推到一个新的应用高度。激光测量将随着光子产业的发展走向成熟。

国际上倾向性的看法是,激光测量是一门综合性实用技术,能记录、分析激光与被研究对象相互作用而发生变化的光波场参数,以便测出被研究对象的动力学参数、声学参数、重力场参数、热力学参数、电磁学参数、光学参数和微观信息等。激光测量学在突出应用的同时,还注重激光测量的系统性、学术性。

本书分三篇共 31 章。第一篇(共 8 章)是激光测量的基础,涉及到测量用激光器和光电探测器的理论、技术和器件,在进行全面分析的基础上,突出与应用有关的性能和技术,使读者用有所选,选有所依。第二篇(共 9 章)是激光测量原理,主要论述了激光场变化的类型,是解决光场如何变化、变化成什么和探测变化的原理与技术,同时也涉及到影响激光测量精度的附加光场变化(即光场变化的噪声)。第三篇是激光测量,阐述了激光测量在 14 个方面的具体应用,重点论述激光测量在各个具体应用中的特殊性,如测量系统选择、元器件选取和测量链诸环节对测量精度的贡献等等。

激光测量的资料浩如烟海。我们力图在占有较为丰富资料的基础上,经过分析、归纳,找出激光测量的共性,阐述其内在规律,初步建立激光测量的学科系统,以提高激光测量的层次,增强激光测量的实用性。本书在选材、撰写上着重于以下三个方面:

(1)注重激光测量学理论体系的建立和结构体系的完整。测量用激光理论、激光光场变化理论、光电探测器的匹配理论和激光测量的精度理论,构成激光测量的理论主干,初步形成激光测量的理论体系;从激光测量的基础、原理到激光测量的具体应用,逐次展开,

有原理,有技术,有器件,有系统,有应用,形成较为完整的体系。

(2)取材先进,反映了最新的科研成果和前沿领域,体现我国学者,特别是撰写者及其课题组的突出贡献。

(3)侧重实用。在阐明原理和技术的基础上,突出系统、器件和精度分析,利于读者选择方案和系统,易于查找国内外器件;每章附有参考文献,便于读者进一步查阅。

为使本书尽可能达到较高的学术水平和实用要求,撰写者多为该领域的专家,本书反映了他们近 20 年来的学术结晶。参加本书撰写的专家有李景镇(深圳大学)、过已吉(西安电子科技大学)、殷纯永(清华大学)、陈家璧(上海理工大学)、方强(西安邮电学院)、苏显渝(四川大学)、李国华(曲阜师范大学)、王水才(中国科学院西安光机所)、沙定国(北京理工大学)、袁格(航天工业总公司第七〇一研究所)、陈尧生(中国科学院西安光机所)、贺安之(南京理工大学)、赖天树(中山大学)、徐毓贤(清华大学)。本书在四年的撰写过程中,虽然几易其稿,不断提炼和提高,并且日趋完善,但由于涉及的领域较多,很难做到概括罄尽,阐明臻赅,考虑不周之处敬请读者指正。

对于中国科学院科学出版基金委员会、国家自然科学基金委员会和深圳大学给予本书出版的鼎力资助,深表敬意。中国科学院院士王大珩先生、周炳琨先生和我国著名光学专家刘颂豪教授在本书撰写过程中所给予的指导和帮助,深圳大学、清华大学领导对本书出版工作的支持和关心,提高了本书的学术水平和实用价值,促进了出版工作的顺利进行,在此一并向他们表示衷心感谢!对田洁、卜桂学为本书的撰写成功所付出的辛勤劳动表示谢意。

金国藩(清华大学)

李景镇(深圳大学)

1998 年 2 月

目 录

第一篇 激光测量基础

第一章 激光和相干理论	3
一、激光的特性	3
(一) 单色性	3
(二) 方向性	4
(三) 相干性	4
(四) 高亮度	5
二、相干性的光子描述	5
(一) 光子的基本性质	6
(二) 光波模式、光子状态和相格	6
(三) 光子相干性	7
(四) 相干性的同一理论	9
三、相干函数和相干度	9
(一) 光波的数学描述	9
(二) 相干函数和相干度	11
(三) 相干度与条纹的可见度	12
四、时间相干性	13
(一) 时间相干性的内涵	13
(二) 时间相干性的量度	14
五、空间相干性	15
(一) 空间相干性的内涵	15
(二) 空间相干性的量度	16
(三) 时间相干性和空间相干性同时考虑的情况	17
六、激光的相干性	18
(一) 激光光源的时间相干性	18
(二) 激光光源的空间相干性	19
(三) 激光干涉条纹的可见度	19
七、高阶相干性	20
参考文献	21
第二章 激光器的物理基础	22
一、辐射过程与 Einstein 系数	22
(一) 量子态的辐射过程	22
(二) 自发发射	23

(三) 受激发射	24
(四) 受激吸收	24
(五) Einstein 关系式	24
(六) 光子简并度	25
二、谱线自然加宽与线型函数	26
(一) 谱线自然加宽	26
(二) 线型函数	28
三、均匀加宽与非均匀加宽	29
(一) 非辐射跃迁	29
(二) 碰撞加宽(压力加宽)	29
(三) 均匀加宽	32
(四) Doppler 加宽	33
(五) 非均匀加宽	34
(六) 综合加宽	35
(七) 多能级系统的情况	37
(八) 纵向弛豫时间和横向弛豫时间	38
四、激光器速率方程组	39
(一) 三能级系统的速率方程组	39
(二) 四能级系统的速率方程组	42
五、增益与损耗	43
(一) 增益	43
(二) 损耗	45
六、增益饱和	47
(一) 均匀加宽增益饱和	47
(二) 非均匀加宽增益饱和	48
七、激光振荡条件	50
八、均匀加宽激光器与非均匀加宽激光器	53
(一) 均匀加宽激光器	53
(二) 非均匀加宽激光器	54
(三) Lamb 凹陷	55
九、激光器输出线宽极限	56
十、激光器频率牵引	58
十一、光学谐振腔的本征模	60
(一) 本征模	60
(二) 圆形镜共焦腔的模式	61
参考文献	64
第三章 激光器	65
一、气体激光器	65
(一) 原子激光器	65

(二) 离子激光器	68
(三) 分子激光器	71
二、固体激光器	76
(一) 红宝石激光器	77
(二) 掺钕钇铝石榴石($\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$)激光器	78
(三) 钕玻璃激光器	79
(四) 板条激光器	79
(五) 半导体激光泵浦固体激光器(DPL)	80
(六) 可调谐固体激光器	81
(七) 光纤激光器	85
三、半导体激光器	86
(一) 半导体 p-n 结及其能带结构	86
(二) 载流子注入	87
(三) 半导体集居数分布反转的条件	88
(四) 同质结和异质结半导体激光器	89
(五) 激光振荡模式	90
(六) 分布反馈式半导体激光器	92
(七) 量子阱、量子阱线和量子阱箱激光器	93
(八) 微腔激光器	96
四、液体有机染料激光器	98
(一) 染料分子的能级、吸收及荧光	98
(二) 染料分子的三重态“陷阱”效应	100
(三) 染料激光器的泵浦	100
(四) 染料激光器的调谐	101
参考文献	102
第四章 激光器单元技术	103
一、激光调制技术	103
(一) 光调制的基本概念	103
(二) 电光调制	104
(三) 声光调制	111
(四) 磁光调制	116
(五) 电源调制	117
(六) 其他调制	117
二、激光偏转技术	118
(一) 机械偏转	119
(二) 电光偏转	120
(三) 声光偏转	122
三、激光调 Q 技术	124
(一) 调 Q 原理	124

(二) 电光调 Q	124
(三) 声光调 Q	126
(四) 可饱和吸收调 Q	127
(五) 几种调 Q 激光器比较	128
四、激光锁模技术	128
(一) 模式锁定的基本特性	129
(二) 典型锁模技术	130
(三) 单脉冲选取	134
五、激光选模技术	135
(一) 横模选择技术	135
(二) 纵模选择技术	137
六、激光稳频技术	140
(一) 激光器频率稳定性和再现度	140
(二) 激光频率主动稳频的方法	141
七、激光放大技术	144
(一) 行波放大器	145
(二) 注入放大器	146
(三) 光纤放大器	147
八、激光稳强技术	148
九、倍频与参量振荡	149
(一) 非线性光学概念	149
(二) 非线性光学的数学描述及三波耦合	150
(三) 光学倍频(二次谐波产生)技术	151
(四) 光参量振荡技术	155
参考文献	156
第五章 激光束和激光束传输系统	157
一、Gaussian 光束	157
(一) 圆形镜共焦腔的行波场	157
(二) Gaussian 光束的基本特性	158
(三) 一般稳定球面腔与共焦腔的等价性	160
二、Gaussian 光束的传输	162
三、Gaussian 光束变换的 ABCD 定则	164
(一) Gaussian 光束通过薄透镜的变换	164
(二) Gaussian 光束通过复杂透镜的变换	164
四、Gaussian 光束的聚焦和准直	166
(一) Gaussian 光束的聚焦	166
(二) Gaussian 光束的准直	168
五、Gaussian 光束的图解法——Collins 图	170
六、Gaussian 光束通过圆孔的衍射	171

(一) Kirchhoff-Huygens 衍射积分	171
(二) Gaussian 光束的 Fraunhofer 圆孔衍射	173
(三) Gaussian 光束的 Fresnel 圆孔衍射	175
(四) 基模 Gaussian 光束的有效通光孔径	176
七、Gaussian 光束通过透镜序列的传输	177
八、Gaussian 光束在具有平方折射率分布的媒质中的传输	178
九、椭圆 Gaussian 光束	182
十、Gaussian 模的匹配	184
(一) 圆形 Gaussian 光束的匹配	184
(二) 椭圆光束与圆光束的匹配	186
十一、光束耦合	187
(一) 直接耦合	187
(二) 棱镜耦合	189
(三) 光栅耦合	191
十二、无衍射光束	192
(一) Bessel 光束和 Bessel-Gauss 光束	192
(二) Fresnel 衍射的轴向强度	192
(三) Fresnel 衍射的横向强度分布	197
参考文献	200
第六章 偏振光技术与偏光器件	201
一、偏振光概念	201
(一) 光的偏振概念	201
(二) Fresnel 公式及有关概念	202
二、偏振光的数学表示与计算	203
(一) 电矢分量方法	204
(二) Poincare 球作图法	204
(三) Stokes 矢量表示法	205
(四) Jones 矢量方法	205
三、偏光变换器件的矩阵表示	206
(一) Mueller 矩阵和 Jones 矩阵计算方法	206
(二) 矩阵运算	206
(三) Jones 矩阵举例	207
(四) Mueller 矩阵	209
(五) Jones 矩阵和 Mueller 矩阵的比较	210
(六) 相干矩阵	210
四、偏振光的获得及偏光器件	211
(一) 由反射和折射产生偏振光	211
(二) 薄膜干涉起偏镜	212
(三) 二向色偏光镜和线栅偏光镜	213

(四) 晶体与双折射	216
(五) 棱镜型偏光器件	219
(六) 退偏器件	226
五、光学延迟和补偿器件	228
(一) 相位延迟片	228
(二) 光学补偿器	234
六、偏光参数测量	236
(一) 偏光器件主透射比和消光比的测量	237
(二) Stokes 参量的测量	239
(三) 波片相位延迟的精确测量	244
七、偏光器件与偏光技术应用举例	247
(一) 偏光干涉法测量激光发散角	247
(二) 偏光隔离技术	248
(三) 偏振成像	250
(四) 偏振和光学逻辑	250
参考文献	251
第七章 光电探测器和光电探测技术	252
一、光子效应和光热效应	252
(一) 光子效应	252
(二) 光热效应	254
(三) 光电转换定律	255
二、光电探测器的特性参数和噪声	256
(一) 光电探测器特性参数	256
(二) 光电探测器噪声	258
三、光电倍增管	260
四、光电导探测器	263
(一) 光电转换规律	263
(二) 工作特性	264
五、光伏探测器	267
(一) 两种工作模式	267
(二) 器件特性	268
(三) PIN 硅光电二极管	270
(四) 异质结光电二极管	270
(五) 雪崩光电极管(APD)	271
(六) Schottky 势垒光电二极管	272
(七) 位置敏感探测器(PSD)	272
(八) 光电三极管	274
(九) 长波长红外焦平面阵列	274
六、电荷耦合器件	275

七、热释电探测器	277
八、其他光探测器	278
(一) 光子牵引探测器	278
(二) 光磁电探测器	279
(三) Josephson 结探测器	279
(四) 超导测辐射热计	280
九、直接探测	280
十、光频外差探测	283
(一) 光外差原理	283
(二) 光外差探测的基本特性	284
十一、光子计数	289
参考文献	291
第八章 测量误差与测量不确定度	292
一、测量误差的概述	292
(一) 测量误差与精度	292
(二) 测量误差分布的统计特性	296
二、测量不确定度的概述	300
(一) 绪论	300
(二) 定义和概念	302
三、测量不确定度的评定方法	306
(一) 标准不确定度的 A 类评定	306
(二) 标准不确定度的 B 类评定	307
(三) 标准不确定度的合成	309
(四) 扩展不确定度的估计	310
四、测量不确定度的表示方法	314
(一) 评定和表示不确定度的步骤	314
(二) 以规定方式报告测量结果的不确定度	314
五、粗大误差的剔除	315
(一) 3σ 准则	316
(二) Grubbs 准则	316
(三) Dixon 准则	317
六、系统误差的发现	318
(一) 系统误差的分类和特点	319
(二) 系统误差的发现	320
七、总结和应用举例	328
(一) 总结	328
(二) 应用举例	332
参考文献	334

第二篇 激光测量原理

第一章 波面干涉测量原理	337
一、双光束干涉计量	337
(一) 基本原理	337
(二) 信息提取原理	338
(三) 计量条纹的自动识别方法	338
(四) 测量精度分析	341
(五) 用于干涉条纹自动识别的图像处理系统配置	341
二、外差干涉计量	343
(一) 基本原理	343
(二) 信息的提取原理及方法	343
(三) 相位展开方法	344
(四) 频率调制实现方法	345
(五) 计量精度分析	348
三、准外差干涉计量	350
(一) 基本原理	351
(二) 步进相移式信息提取方法	351
(三) 连续相移式信息提取方法	352
(四) 最佳采样方式的确定	353
(五) 计量误差分析	355
(六) 相移实现方法	357
四、基于空间相位调制的干涉计量	357
(一) 基本原理	358
(二) 信息提取的空间域正弦拟合法	358
(三) 信息提取的谱域滤波法	359
(四) 误差分析	362
五、多波长波面综合技术	364
(一) 双波长波面综合原理	364
(二) 测量精度分析	365
(三) 提高测量精度的方法	365
(四) 多波长相位综合原理	366
(五) 多波长绝对相位综合技术	366
参考文献	366
第二章 光学平滑波面的干涉检测技术	368
一、Fizeau 干涉仪	368
(一) Fizeau 干涉仪基本形式	368
(二) Fizeau 干涉仪用于光学元件和光学系统的测量	370
(三) 外差 Fizeau 干涉仪	373

(四) 准外差 Fizeau 干涉仪	374
(五) 多通道准外差 Fizeau 干涉仪	375
(六) 基于空间调制的 Fizeau 干涉仪	376
(七) 多波长 Fizeau 干涉仪	376
(八) Fizeau 干涉仪系统设计上及测量中的一些考虑	376
(九) 传统计量条纹级数的判读	378
(十) 干涉计量系统的调整与定标	378
二、Twyman-Green 干涉仪	379
(一) Twyman-Green 干涉仪基本形式	379
(二) 外差 Twyman-Green 干涉仪	380
(三) 准外差 Twyman-Green 干涉仪	381
(四) 多通道准外差 Twyman-Green 干涉仪	381
(五) 基于空间相位调制的 Twyman-Green 干涉仪	382
(六) 多波长 Twyman-Green 干涉仪	382
三、Mach-Zehnder 干涉仪	382
(一) Mach-Zehnder 干涉仪基本形式	382
(二) 外差 Mach-Zehnder 干涉仪	382
(三) 准外差 Mach-Zehnder 干涉仪	384
(四) 多通道准外差 Mach-Zehnder 干涉仪	384
(五) 基于空间相位调制的 Mach-Zehnder 干涉仪	387
(六) 多波长 Mach-Zehnder 干涉仪	387
(七) Mach-Zehnder 干涉仪的有关问题	387
四、剪切干涉计量条纹解释	387
五、剪切干涉仪	389
(一) 平面波的剪切	390
(二) 球面波的剪切	392
(三) 外差剪切干涉仪	393
(四) 准外差剪切干涉仪	393
(五) 多通道准外差剪切干涉仪	393
(六) 基于空间调制的剪切干涉仪	394
(七) 多波长剪切干涉仪	394
参考文献	394
第三章 激光全息干涉测量	396
一、全息术原理及光场的统计特性	396
(一) 全息术原理	396
(二) 光场的统计特性	400
二、全息干涉的统计光学描述	404
(一) 二次曝光型全息干涉术	405
(二) 双脉冲全息干涉技术	410

(三) 双脉冲频闪全息干涉技术	410
(四) 被测表面消偏振效应对二次曝光全息干涉方法的影响	413
三、时间平均全息干涉术	413
(一) 时间平均全息干涉测量技术	413
(二) 时间调制全息干涉计量技术	414
四、实时全息干涉术	417
(一) 实时全息干涉技术	417
(二) 实时频闪全息干涉术	418
(三) 实时时均全息干涉技术	419
五、外差与准外差全息干涉术	419
(一) 二次曝光型外差全息干涉技术	420
(二) 实时外差全息干涉技术	423
(三) 准外差全息干涉技术	424
六、锁相全息技术	427
(一) 光学锁相技术	427
(二) 电子学锁相	428
(三) 锁相全息干涉术	429
七、全息干涉条纹自动识别中的消散斑方法	429
参考文献	431
第四章 激光散斑测量	432
一、散斑干涉测量技术	432
(一) 参考束型散斑干涉测量方法	432
(二) 双照明光束散斑干涉测量方法	437
(三) 剪切散斑干涉测量方法	440
二、电子散斑干涉测量技术	444
(一) 电子散斑干涉仪的典型光路和测量原理	444
(二) 电子散斑干涉相减技术的统计分析	445
(三) 电子散斑干涉的时均测振方法	447
(四) 双波长照明电子散斑干涉术	448
三、相干光散斑照相测量术	449
(一) 像面二次曝光激光散斑图的记录及其透过率自相关函数	450
(二) 二次曝光散斑图的逐点滤波	451
(三) 二次曝光散斑图的全场滤波	454
(四) 像面散斑照相的时均测振方法	457
(五) 焦面散斑照相做倾斜分析	458
四、白光散斑照相测量术	459
五、数字散斑照相测量术	461
(一) 数字散斑信号的相关函数	461
(二) 数字全场滤波技术	462