



“十二五”国家重点图书出版规划项目

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

世界光电经典译丛

丛书主编 叶朝辉

 Springer

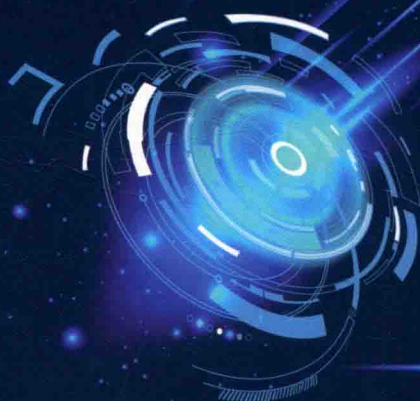
激光测量技术

原理与应用

LASER MEASUREMENT TECHNOLOGY:
FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS

Axel Donges Reinhard Noll 著

张书练 译



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



“十二五”国家重点图书出版规划项目

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

世界光电经典译丛

丛书主编 叶朝辉



Springer

激光测量技术

原理与应用

Axel Donges Reinhard Noll 著

张书练 译



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

Translation from the English language edition:
Laser Measurement Technology. Fundamentals and Applications
by Axel Donges and Reinhard Noll
Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015
This work is published by Springer Nature
The registered company is Springer-Verlag GmbH
All Rights Reserved

版权登记号:湖北省版权局著作权合同登记 图字:17-2017-091 号

图书在版编目(CIP)数据

激光测量技术:原理与应用/(德)阿克塞尔·多涅斯,(德)莱因霍德·诺尔著;张书练译.
—武汉:华中科技大学出版社,2017.6
(世界光电经典译丛)
ISBN 978-7-5680-2838-7

I. ①激… II. ①阿… ②莱… ③张… III. ①激光测距-测量技术 IV. ①P225.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 116144 号

激光测量技术:原理与应用

Axel Donges Reinhard Noll 著

Jiguang Celiang Jishu: Yuanli yu Yingyong

张书练 译

策划编辑:徐晓琦

责任编辑:余涛

封面设计:原色设计

责任校对:李琴

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录排:武汉楚海文化传播有限公司

印刷:湖北新华印务有限公司

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:26.25 插页:4

字数:446千字

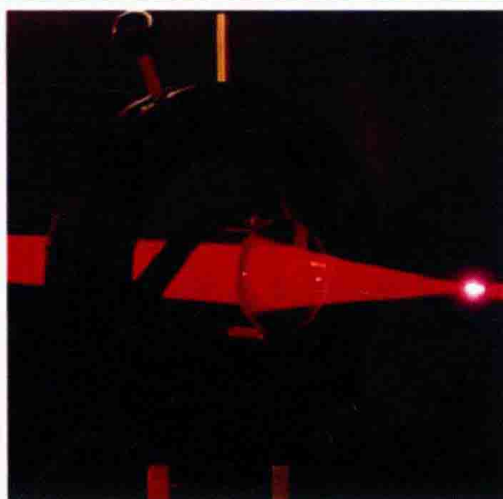
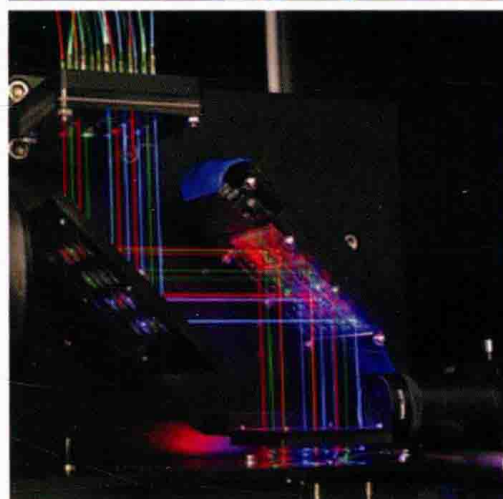
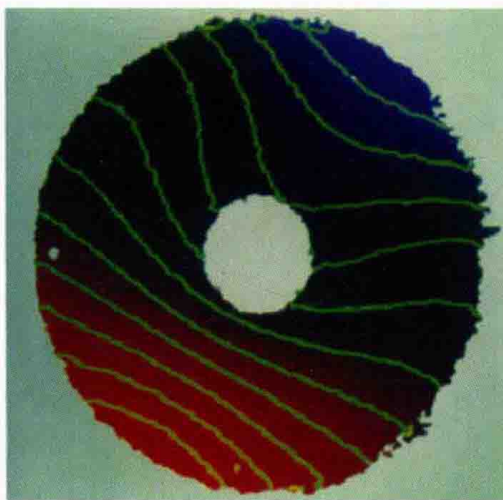
版次:2017年6月第1版第1次印刷

定价:148.00元

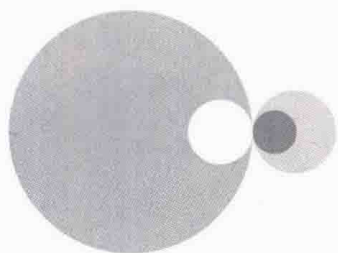


华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



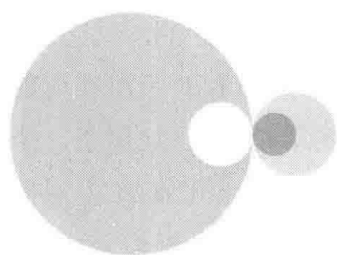
左上:基于光学相干层析成像技术的传感器测头。右上:显示了一个被测目标的离面变形场的散斑干涉图。左下:微流控芯片中荧光颗粒的多波长激发。右下:聚焦纳秒激光脉冲辐照度大于 10^7 W/cm^2 时在空气中诱发出等离子体。



译者简介

张书练,清华大学本科、硕士,现任清华大学教授、博导。学术方向:激光器、精密测量以及两者的交叉。作为第一完成人,获国家发明奖二等奖2项,省部级科技一等奖3项、二等奖3项。拥有70项发明专利。发表中、英文论文各200篇,以第一作者出版中、英文专著各一部。以课题组发现为原理研制成10余种精密测量仪器。





译者序

接受华中科技大学出版社的委托,组织翻译此书。

开始,因太忙,怕误事,不敢接受这一任务。读了出版社寄给我的原版书《Laser Measurement Technology: Fundamentals and Applications》后,我改变了主意,愿意完成这一任务,因为这是一本很值得阅读的书。中国激光(光学)测量行业需要这本书。

国内曾出版了一些激光(和光学)计量的书,推动了激光测量技术的发展。但总的说来,这些书还需要在“全面”上再下些功夫,需要引入近年全新的进展,也需要补充传统方向的新进展,还需要编入对同一测量对象的不同技术之间的优缺点比较。

本书是一本较为全面的书。开头5章介绍激光,包括激光束的特性、光和物质相互作用、光束整形和传导、光的探测等研读激光测量必备的基础知识。之后9章,每章介绍一种激光测量原理和技术,每种技术又都给出了多个应用的例子。这些原理和技术是:激光干涉、激光全息、激光散斑、相干层析、激光三角、激光多普勒、激光共焦、激光光谱、激光诱导荧光。本书较少涉及仪器化、工程化的技术细节和构成仪器的各元件的参数。

书中,读者可以学习整个光学测量领域的知识。一旦需要解决某一测量问题时,您会站在整个领域的高度上找思路。需要工程细节时,可去阅读更专门的书籍或文章。此书适合科学家、工程师阅读,非常适合作为博士、硕士研究生、本科生的教材或参考书。

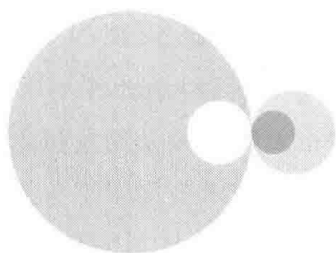
不知为什么,有一种激光测量技术没有收入本书,有些遗憾。我把这个技术称为“激光器谐振测量技术”。这里,激光器不仅作为光源,而是利用激光器内部的振荡特性,实现多种物理量测量。激光器自身就是测量仪器,测量仪器就是激光器自身。大家熟知的激光陀螺就是这样一类技术。激光陀螺随被测飞机、船舰旋转,激光器内顺、逆时针的光产生频率差。频率差代表的就是飞机、船舰的旋转角速度。光纤陀螺是光学技术,但现在还不是激光技术。还有大家不熟悉的一类激光器谐振测量技术:激光回馈。包括译者课题组在内的国内外科学家努力多年,激光回馈原理的仪器也进入实用阶段,已经用于几个领域。例如,位移测量,玻璃、液体等的折射率测量,多层(种)介质的层层间隔的测量,甚至微小部件内部结构测量。相信这一方向会逐步被国内外认识,获得广泛应用。有兴趣的读者可以参阅译者的专著《正交偏振激光原理》(清华大学出版社出版)和《Orthogonal Polarization in Lasers: Physical Phenomena and Engineering Applications》(Wiley 和清华大学出版社合作出版)。

同时,我按照出版社的建议,召集、组织我的正在大学任教的弟子们协助翻译,由我校对修改。感谢华中科技大学出版社对我们的信任。

翻译者各自完成的章节如下(以章节前后为序):刘小艳,第 1、2 章和附录 A.1;李小丽,第 3、4 章;潘玉寨,第 5、14 章;任成,第 6、13 章;张鹏,第 7、11 章;万新军,第 8、10 章;曾召利,第 9、12 章,附录 A.2 到 A.7 及中英文术语对照。张鹏还协助我组织了本书翻译。

张书练

2016 年 10 月 1 日于清华园



前言

过去十年间,激光测量技术获得了飞速发展。激光测量方法功能强大,可应用于多种测量和检测任务,激光对物理量及化学量的离线和在线测量成功展现了激光测量广泛的适用性与优势。例如,激光实现测量的非接触性以及以光的速度完成测量。

从 20 世纪 90 年代初以来,一个越来越明显的趋势是:测量设备、精密仪器不再是只能在实验室或计量室中使用,而是被安装到生产设备中靠近生产线的位置甚至就在生产线上。由此,激光测量可以在线采集待测物理量,从而实现加工或生产过程中的快速检测,而这也正是闭环控制概念的关键。在闭环式生产过程中,由生产线直接获得的测量信息被用于对上游或下游加工阶段的即时反馈。从这种意义上说,激光测量技术开创了一个生产过程透明可视化的新纪元,显示了工业生产过程优化和质量控制的新潜能。到目前为止,这种潜力还不易实现。

因此,在研究、开发和生产过程中,科学家和工程师们应该学习激光测量技术,掌握激光测量设备的物理原理和结构,并且对它的应用潜力有一定了解。

本书的第 1~5 章介绍了激光测量技术的基础知识,第 6~14 章介绍了激光测量方法及其应用。本书的潜在读者是从事相关工作的物理学家和工程师,以及学习应用物理和工程科学的大学生。本书对原理、方法和应用的描述力求使读者能够追踪和评价激光测量技术的未来发展。阅读本书所需具备的

前期知识仅需大学第一个学期所讲授的物理学原理即可。

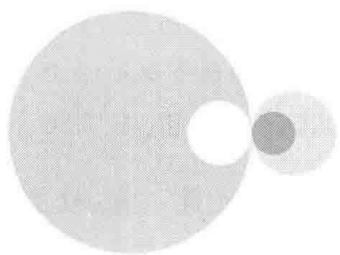
本书作者是在 20 世纪 80 年代初开始接触激光技术的,当时他们还是达姆施塔特工业大学(Technische Hochschule Darmstadt)的应用物理研究所的博士生。着迷于激光辐射的潜力,他们开始了不同的职业生涯。阿克塞尔·多涅斯(A. D.)就职于教育部门并成为一名教授,现为伊斯尼应用技术大学(Isny Hochschule Isny)的物理学与光学学院院长。莱因哈德·诺尔(R. N.)则来到新成立的位于亚琛(Aachen)的夫琅和费激光技术研究所(Fraunhofer Institute for Laser Technology, ILT),开始其工作,现为相关领域激光测量技术和远紫外(EUV)光源研究的负责人。他已将多种激光测量技术应用于工业用途,并促进了一些以开发和销售新的激光测量设备为目标的新公司的创办。自 2012 年开始,他成为亚琛工业大学(RWTH Aachen University)的助理教授。作者们为本书带来了他们在激光测量技术领域中的教学、研究、开发和应用的综合经验。

作者谨此向他们的妻子表达特别谢意,感谢她们为本书得以顺利完成所付出的耐心和鼓励。

伊斯尼,亚琛(Isny, Aachen)

阿克塞尔·多涅斯(Axel Donges)

莱因哈德·诺尔(Reinhard Noll)



目录

第 1 章 导论 /1

- 1.1 光学计量与激光测量技术 /1
- 1.2 示意图 /3

第 2 章 激光辐射的特性 /4

- 2.1 光作为电磁波 /4
- 2.2 光束参数 /6
- 2.3 衍射 /11
- 2.4 相干性 /17
- 2.5 激光辐射与热光源的比较 /21
- 2.6 高斯光束 /23
- 2.7 具体激光系统的光束参数 /29
- 2.8 激光辐射的危害 /30

第 3 章 光辐射与物质相互作用 /36

- 3.1 光的粒子性 /36
- 3.2 反射与折射 /37
- 3.3 吸收 /45

- 3.4 光散射 /49
- 3.5 倍频 /51
- 3.6 光学多普勒效应 /53

- 第4章 光束整形和传导 /55**
 - 4.1 用于光束调制的光学元件 /56
 - 4.2 高斯光束的传播 /71
 - 4.3 光纤 /79

- 第5章 电磁辐射探测 /87**
 - 5.1 热探测器 /87
 - 5.2 光电探测器 /98
 - 5.3 半导体探测器 /105
 - 5.4 空间分辨探测器 /111
 - 5.5 探测器信号的测量 /123
 - 5.6 总结与比较 /126

- 第6章 激光干涉测量 /131**
 - 6.1 干涉测量基本原理 /132
 - 6.2 基于激光干涉仪的距离测量 /135
 - 6.3 泰曼-格林(Twyman-Green)干涉仪 /145

- 第7章 全息干涉 /150**
 - 7.1 全息原理 /150
 - 7.2 全息干涉测量原理 /157
 - 7.3 解释与评价 /160
 - 7.4 数字全息 /165
 - 7.5 全息干涉装置与应用实例 /169

- 第8章 散斑计量学 /178**
 - 8.1 散斑的形成 /178

8.2 散斑摄影术 /180

8.3 散斑干涉术 /186

8.4 应用实例 /199

第9章 光学相干断层成像 /207

9.1 原理 /207

9.2 OCT 传感器 /216

9.3 应用例子 /220

第10章 激光三角法 /225

10.1 原理 /226

10.2 激光三角测量中的影响因素 /230

10.3 用于轮廓测量的三角测量传感器 /246

10.4 应用实例 /249

第11章 激光多普勒法 /256

11.1 多普勒效应 /256

11.2 激光测振仪 /258

11.3 激光多普勒风速仪 /268

第12章 共聚焦测量系统 /281

12.1 共聚焦显微镜 /282

12.2 轮廓仪 /289

12.3 光盘扫描系统 /290

第13章 激光光谱学 /298

13.1 激光材料分析 /299

13.2 激光雷达:LIDAR /316

13.3 相干反斯托克斯拉曼光谱技术:CARS /327

第14章 激光诱导荧光 /346

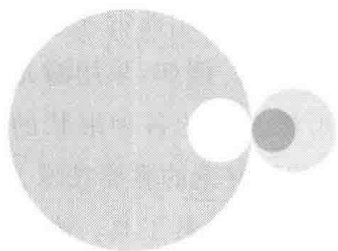
14.1 原理 /347

- 14.2 荧光光谱学 /349
- 14.3 荧光标记 /351
- 14.4 荧光相关光谱 /351
- 14.5 荧光偏振光谱 /353
- 14.6 时间分辨荧光分析 /355
- 14.7 应用实例 /356

附录 A /367

- A.1 干涉可见度 /367
- A.2 黑体辐射与激光辐射的光谱辐射度的比较 /373
- A.3 式(9.23)的推导过程 /375
- A.4 式(9.26)的推导过程 /377
- A.5 式(9.28)的推导过程 /377
- A.6 缩写词 /379
- A.7 符号标记与列表 /381

中英文术语对照 /388



第 1 章 导论

摘要 本章作为全书的引言,首先介绍了光学和激光测量的发展过程,然后概括了激光测量技术涉及的宽广范围,最后指出激光测量是一种灵活度高、测量速度高、精度高的非接触测量技术。

1.1 光学计量与激光测量技术

目前有多种不同的测量技术,没有哪一位科学家或工程师能忽视这种技术。测量技术可分为不同的子学科,除了电气计量外,另一个非常重要的学科就是物理计量。物理和工程领域的发展需要依靠一些特殊的测量仪器,如温度计、时钟、刻度尺和显微镜等。目前物理计量可被划分成不同的领域,如核物理计量、声学测量技术和光学计量等。

光学测量是一种非常重要的计量方法。尽管光学测量技术发展迅速,但它并不是一门新的学科。光学测量技术的出现,对物理科学的发展产生了很大影响。随着 16 世纪末显微镜的发明和 17 世纪早期望远镜的出现,光学测量技术为深入研究微观和宏观世界发挥了重要作用。19 世纪,摄影和光谱学的发展也可认为是光学测量的里程碑,特别是光谱学为研究物质的微观结构提供了重要手段。在 20 世纪,光学测量为自然科学的发展做出了重要贡献,

一系列荣获诺贝尔奖的成果就证明了这一点。这些成果包括:用于光谱和计量研究的精密干涉仪(A. Michelson)、拉曼散射技术(C. Raman)、相差显微镜(F. Zernike)、全息学(D. Gabor)、激光非线性光学(N. Bloembergen、A. Schawlow)、超精密激光光谱技术(J. Hall、T. Hänsch)和 CCD 传感器(检测光辐射的电荷耦合元件,W. Boyle、G. Smith)等。

1960 年西奥多·梅曼发明了第一台激光器,目前激光的应用已非常广泛,如用于通信技术、材料处理和医学等领域。随着光盘的出现,激光被带入千家万户。由于激光的问世,一些传统方法逐渐被新技术所替代。例如,采用激光烧蚀或激光立体成形(LAM)就能够加工出传统工艺不能实现的各种形状的工件。现在,激光技术已经被认为是一项与微电子技术相提并论的重要技术。

由于激光独有的一些特性,使其能够成为一种多功能的测量工具。继激光发明之后,一种新的测量技术就诞生了,这就是激光测量技术。激光测量技术近年来发展迅速,已广泛应用在生产工艺设计、质量保证、回收技术、环境保护、生物技术和医疗技术等领域。激光测量技术的特点是:

- 非接触测量;
- 灵活性强;
- 测量速度快;
- 测量精度高。

以激光为基础的测量方法已被越来越多地用于监测产品质量的生产过程。随着工艺和质量控制在制造过程中的重要性日益增加,更加速了激光测量技术在这些领域的可持续发展。

激光测量系统非接触测量的优势使其可以装配在生产线上。用激光系统进行质量检测的关键是可以不中断生产流程,因此能够提供实时的数据,以便直接进行过程控制。利用该优点,可使许多应用场合的自动化测试流程简洁明了,并能优化生产工艺和提高产品质量。

本书旨在介绍激光测量技术的基础知识。其中,第 1~5 章主要介绍激光技术的物理原理,第 6~14 章专门介绍不同的激光测量技术。在目前众多的测量方法中,我们根据技术的成熟度和商业的实用性标准,选择了一些测量方法进行详细分析,并介绍了它们的典型应用。附录中补充说明了干涉可见度和光谱辐射亮度,推导了文中的一些重要公式,提供了相关物理量的缩写和符号列表。

1.2 示意图

一个典型激光测量系统的基本装置如图 1.1(a)所示,包含三个主要组成部分:

- 激光器;
- 测量对象;
- 探测器。

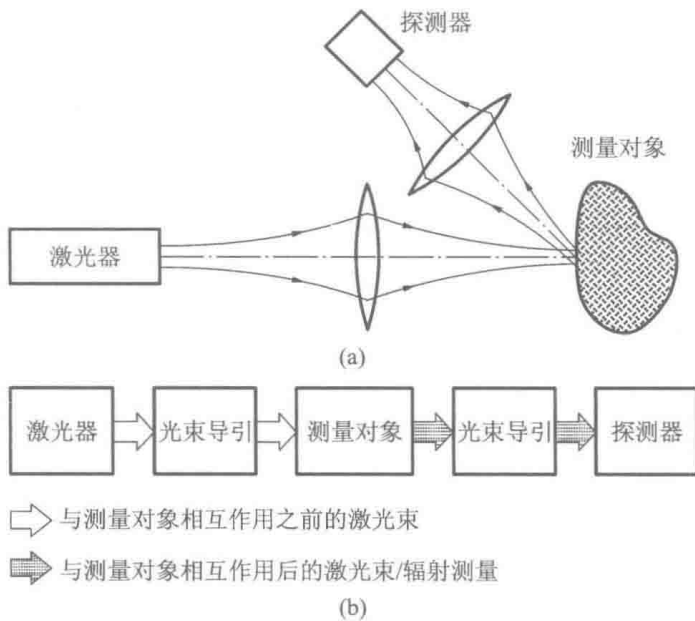
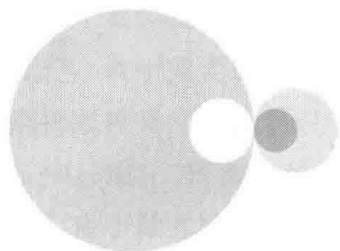


图 1.1 激光测量系统。(a)主要装置图;(b)方框图

在激光辐射与被测对象相互作用过程中,激光辐射会携带被测对象的相关信息。一部分激光入射到检测器,它将激光中携带的信息转换为观察者可识别的形式。在激光与测量对象之间,以及测量对象与探测器之间,还需通过聚焦光学系统、扩束镜或光纤进行光束整形和导引。

图 1.1(b)中组件的具体介绍请见本书的第 2~5 章。其中,第 2 章概述了激光辐射的特性,第 3 章讨论了激光辐射与测量对象之间的不同相互作用,第 4 章主要介绍了光束整形和导引,第 5 章介绍了最常见的辐射探测器。本书前 5 章介绍的内容是理解第 6~14 章中不同激光测量方法的基础,同时也为及时了解激光测量技术的最新发展提供了必要的基础知识。



第 2 章

激光辐射的特性

摘要 首先概述了横向电磁波的性质,并讨论了光的衍射。接着介绍了时间相干和空间相干的概念,比较了激光辐射与热光源之间的差异。之后讲述了高斯光束和高阶横模,以及典型的激光参数。最后阐明了激光辐射的危害。

2.1 光作为电磁波

所有的电磁现象都遵守麦克斯韦(Maxwell)方程组。麦克斯韦方程组把电场强度 E 和磁场强度 H 两者的时间和空间导数联系起来^{[1]~[5]}。从麦克斯韦方程组出发,麦克斯韦预测了电磁波的存在,且预测电磁波的传播速度与光速相同。1887—1888年,赫兹(H. Hertz)成功地制造出并探测到电磁波的存在。同时,光被认为是一种电磁波的特例。

在实验和技术上常使用的电磁波的频率(或波长)如图 2.1 所示。激光波长通常为 $\lambda = 0.1 \sim 10 \mu\text{m}$,仅占总光谱中的一小部分。