

〔美〕 罗伯特 K·厄尔夫 主编

散斑计量学

(原理与应用)

机械工业出版社



642

散斑计量学 8

(原理与应用)

〔美〕 罗伯特 K. 厄尔夫 主编
贺铎民 贺明霞 译
贺铎民 校

机械工业出版社

本书系统地介绍了散斑物理性质，表面粗糙度、位移和应变的测量，振动分析，电子散斑技术 (ESPI)，运动轨迹描绘，拓扑散斑与结构检测，散斑相关，白光散斑等方面的基本原理，并针对晶体长度变化、瞬态现象分析、压力容器与复合材料检测等诸多工程应用问题，详尽地描述了各项专门的散斑技术。

本书可供从事散斑计量和激光检测的研究者、工程师，以及大学教师、研究生与高班本科生阅读。

Speckle Metrology

ROBERT K. ERF

ACADEMIC PRESS, INC. 1978.

* * *

散斑计量学

(原理与应用)

〔美〕 罗伯特 K. 厄尔夫 主编

贺铎民 贺明霞 译

贺铎民 校

*

责任编辑：郑姗姗 版式设计：乔玲

封面设计：肖晴 责任校对：熊天荣

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 · 新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $11^{5/8}$ · 字数 253 千字

1989年7月北京第一版 · 1989年7月北京第一次印刷

印数 0,001—1,000 · 定价：10.30 元

*

ISBN 7-111-01037-X/TH · 178

译 者 的 话

从散斑看作为全息照相的噪声受到关注，到成为一门研究分支，已有十多年之久。罗伯特 K. 厄尔夫博士适时地组织各国专家撰写了散斑研究的主要内容——散斑计量学，对散斑技术的发展起了很大的推动作用。本书是该领域的权威著作，每一位散斑计量工作者都值得备一本。在我国，散斑计量无论在理论上、实验技术上，或者是在工程应用中都已经展开，但是还没有一本系统的中文专著，因此，本译著的出版谅能弥补此项不足。

本书主要介绍散斑计量的基本原理、主要方法，以及现代应用，特别是工程检测方面的应用，读者浏览一下本书的原序与引论，便可一目了然。

本书有多位撰写者，汇集了多种观点，这对于一门正处于发展阶段的研究分支来讲，在启发思路与进一步探索方面是很有意义的，不过，全书在论述过程中，也特别注意到原先对散斑技术不熟悉而又打算跨入此领域的工程师们的需要。一般讲，具有大学普通物理与高等数学知识的读者都能读懂本书，因此，对于研究生和高班大学生也是一本良好的参考书。

由于散斑技术与全息技术有紧密的联系，本书在许多章节中都论及了两种近代光学计量方法的比较。如果某些读者对全息检测技术不十分了解，建议翻阅厄尔夫博士的另一本风格同样的专著《全息摄影无损检测》（机械工业出版社，1982）。

此外，本书各章末都列有详尽的参考文献目录，为读者深入研究提供了方便，

撰写者名单

F. A. A. 阿明 英国 天鹅海(斯旺西) 斯旺西综合学院 土木工程系

浅倉 利水 日本国 北海道 札幌 北海道大学 应用电气研究所

约翰·恩·巴特斯 英国 英格兰 莱斯特郡 拉夫巴勒拉夫巴勒技术大学 机械工程系

杰曼·达·科斯塔 委内瑞拉 加拉加斯 西蒙·博利瓦尔大学

罗伯特 K. 厄尔夫 美国 康涅狄格州 东哈特福德联合技术研究中心

M. E. 福尼 美国 加州 洛杉矶 加州大学洛杉矶分校 工程与应用科学学院

D. A. 格雷戈里 英国 布里斯托尔 英国航空和航天动力中心

Y. Y. 洪 美国 密西根州 罗彻斯特 奥克兰大学工学院

罗伯特·琼斯 英国 莱斯特郡 拉夫巴勒 拉夫巴勒技术大学 机械工程系

A. 勒克斯穆尔 英国 天鹅海(斯旺西) 斯旺西综合学院 土木工程系

K. A. 斯特森 美国 康涅狄格州 东哈特福德 联合技术研究中心

H. J. 蒂齐尼 瑞士 赫尔布勒格 维尔德·赫尔布勒

格有限公司

格尔德 P. 韦格尔特 联邦德国 埃尔 兰 根 埃尔 兰
根-尼恩贝格大学 物理研究所

凯瑟琳·威克斯 英国 英格兰 莱斯特郡 拉夫巴勒
拉夫巴勒技术大学 机械工程系

序

倘若本杰明·富兰克林 (Benjamin Franklin) 也看到了激光散斑现象, 并得知由此而发展出一门研究分支, 以及最后成为一种计量工具, 那么, 他或许就会“请”穷理查 (Poor Richard) 以隽秀的文笔这样写下此段史实:

排除一切干扰,
你的工作定会做得更好;
善于利用使你烦恼的一切,
你就会获得双倍的回报。

的确, 激光散斑往往令人烦恼, 它是由于激光照射漫反射物体而产生的一种颗粒状图样, 首先是作为全息工作者的敌手而崭露头角的。关于这方面, 为了克服散斑对全息照相的不良影响, 虽然已提出几项好办法, 但人们发现直接的散斑照相 (通常采用两次曝光法) 是极其有用的。因此, 与若干众所周知的激光特性, 诸如功率强, 单色性、相干性、准直性好等相比较, 激光散斑或许更易于开发应用。因为, 在最简单的情况下, 散斑照相只需一支激光管与一架照相机。目前, 综合处理散斑图的数据压缩技术, 或者光电直接检测散斑特性的技术, 已得到发展, 并用于测位移与应变、振动和变形以及表面粗糙度等三大类。有趣的是, 最简便的散斑图数据处理方法的根据是 18 世纪早期 (恰在 Franklin “请” 人写出上述格言那个时期的 26 年之后) 的杨氏 (Thomas Young) 实验, 即两个针孔所发出光波之间的干涉现象。于是, 本世纪 60

年代末，基于 150 多年前杨氏用以证实光的波动理论方面的工作，一个崭新的计量领域——散斑计量学脱孕而生，并蕴育成长，发展壮大，足以使人们感到本书的出版是适时的。当然，本书的宗旨是将极其丰富的散斑计量技术及典型的应用实例汇编成册。这些技术及其应用业已获得成功并正式报导，它们广泛地分布在各种杂志和研究机构的报告中。

本书从理论概念和实验方法两个方面对散斑计量学作了完整的论述。因而，既能适用于研究发展部门，又可服务于工业界从事实践的工程师们。对于前者，希望本书在新技术的研讨与应用，以及现有方法的进一步精炼方面，起到某种促进作用；对于后者，本书则提供必要的基本知识与方法，以便把散斑计量系统结合到他们的设备检测和质量控制工作中去。因此，本书在介绍研究方法、系统装置、数据处理方法和专门应用等方面都予以详述。开头的两章较短，介绍了散斑术语，较为充分地概述了全书内容，并扼要地描绘了散斑的物理特性。随后，对上面所列举的三项主要应用领域分章予以介绍。再下一章，专门讨论了散斑测量技术与录像处理技术的结合。第 7、8、9 等三章论述散斑计量的各种专门应用，其中包括在结构检测方面的应用。最后一章则针对研制者和潜在用户，讨论了散斑干涉仪，因为在散斑计量方面这是一种应用广泛的装置。

在此，著者希望就本书的诞生向遍布全世界的所有撰写者表示感谢，并对提供其他图片和资料的贡献者致意。

目 录

序

第一章 引论	1
参考文献	5
第二章 散斑的物理特性	6
参考文献	10
第三章 表面粗糙度测量	11
3.1 前言	11
3.2 像平面和衍射面上散斑图的构成	13
3.3 像平面和衍射面上散斑图的统计性质	17
3.4 像平面散斑图的计算机模拟	25
3.5 像面散斑反差的测量方法	25
3.6 衍射面散斑反差测量方法	40
3.7 多色散斑图的测量方法	45
3.8 散斑图相关测量方法	49
3.9 光散射测量方法	53
3.10 小结	54
参考文献	55
第四章 位移和应变测量	58
4.1 前言	58
4.2 用散斑干涉计量术测量位移	59
4.3 用散斑剪切干涉计量术直接测量位移导数	68
4.4 结构无损评价和表面恒值线（等高线）研究	76
4.5 小结	79
参考文献	80

第五章 振动分析和变形测量	81
5.1 目视振动检测	81
5.2 利用散斑干涉计量术测变形	85
5.3 像平面记录面内振动	88
5.4 利用傅里叶变换面记录进行倾斜(度)分析	104
5.5 散斑照相用于工程测量时的限制	115
5.6 讨论	118
参考文献	124
第六章 电子散斑图干涉计量术	126
6.1 前言	126
6.2 电子散斑图干涉计量术的发展	127
6.3 单波长照明 ESPI 的基本性质	146
6.4 ESPI 测应变场、弹性系数,以及伴随的退相关现象	149
6.5 双波长照明 ESPI	168
参考文献	182
第七章 运动轨迹的测量	183
7.1 前言	183
7.2 横向运动的测量	184
7.3 纵深运动的测量	192
7.4 实时测量	201
参考文献	209
第八章 拓扑散斑与结构检测	210
8.1 前言	210
8.2 实验布置的研究	213
8.3 聚焦和离焦的影响	222
8.4 复杂倾斜和拓扑信息的提取	226
8.5 在实际结构上的应用	240
参考文献	258

第九章 散斑计量的专门应用技术	259
9.1 综合应用	259
9.2 测量晶体长度的变化	280
9.3 测量裂纹尖端周围的位移	290
9.4 瞬变现象分析	301
9.5 散射光散斑干涉计量术	314
参考文献	327
第十章 散斑计量学中的综合课题	331
10.1 前言	331
10.2 散斑干涉计量仪	331
10.3 散斑相关	339
10.4 三维像场中的散斑运动	346
10.5 散斑照相中透镜像差的影响	355
参考文献	360

第一章 引 论

罗伯特 K. 厄尔夫

——美国 康涅狄格州 东哈特福德

联合技术研究中心

曾一度成为全息工作的天敌的散斑，现已从积极的角度被人们所探究，并发展成一种新兴的、独特的光学计量工具。实际上，“应用光学”杂志在1973年就认识到这一领域内的萌发活动，而在当年总目录中把“散斑图样”列为一条标题，虽然在该标题下的三项条目中，有两项是关于在全息实验中如何减少散斑的办法。次年，即1974年，“美国光学学会杂志”在它的年目录中引入了同样的标题。此后的两年内，该标题下的条款数目超过了75项。不过，我们应该指出，散斑计量学的发现与早期实际应用是在英格兰，紧接着是在其他欧洲国家。因此，在该领域内头几篇重要的论文出现于其他国家的出版物中，例如 *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, *Optica Acta*, *Optik*, *Optical Communications*, *Optics and Laser Technology*。读者如研究一下遍布全书的各章参考文献目录便可明瞭这一情况。

由于世界各国的科学家和工程师们在发展散斑计量学方面投入了他们的精力与智慧，这项新兴技术的研究工作便更加日趋广泛。查一下本书撰写者览表以及有关的说明材料就

不难看出这一点。该表列有比利时、德国、英国、日本、挪威、瑞典、瑞士、美国、委内瑞拉等国家的撰写者。由上述每一个国家的科学家来提供本书所包括的绝大部分素材是很有意义的，这样，便于有意识地安排他们就本书的专题发表各种各样的观点。

虽然，散斑现象几乎总是与物体被激光照射时的“闪烁”外貌伴随而生，但是，散斑或散斑类现象的历史大大地早于本世纪 60 年代激光的问世，至少推溯到 100 多年之前。请读者不必惊奇：诸如牛顿和 L. 瑞利等伟大的名字在那个时代就已经与散斑现象联系在一起了^[1.1.]。不过，我们这部多著者参与的作品所预期的目的是，论述散斑技术的现代应用，特别是实际的工程检测问题，并列出大量参考文献，以便读者获得更深入的资料。显然，本书所涉及的只是激光问世以来，有关散斑研究方面业已展开的几个最新领域之一。至于散斑图样的其他研究领域，诸如信息处理、星体干涉仪以及正在进行的有关散斑消除方面的课题，将不作为本书的讨论内容。

毫无疑问，上述的最后一个课题，即消除全息照相中激光散斑的讨厌的不良影响，的确激起人们对散斑进行十分认真的研究，从而使全息照相最后达到人们今天得以享受的实际运用地步。不过，这只是一方面的见解而已。斯特森 (Stetson) 在一篇评论性文章^[1.2.]中曾幽默地提出：“……到底有几位学者乐于承认全息术所完成的最实在的成绩是唤起人们注意激光散斑呢？”。我想是一个都没有，因为对许许多多工程检测任务来讲，所宜采用的光测技术有各种各样，散斑技术与全息术只是其中的两种，而对这些技术的选择也必须根据问题的具体情况。因此，正如 Stetson 后来在他的

文章中所指出的那样，看来散斑技术与全息技术两者将在今后的光学计量中起重要作用，特别是由于它们具有检测工件整个表面的能力。再说，它们两者亦各有其优缺点。所以，凡是适当的地方，本书都将对它们进行比较并指出折衷方案。

散斑计量术包括种类繁多的各种方法，但一般可归纳为两大类，即直接激光（散斑）照相术与散斑干涉术。两者之间的区别甚为细微，因为两者都包括照相记录（或者其他适当的图像检测方法），并都涉及干涉现象，就是说，散斑照相一定是依赖于散斑的光学性质（散斑本身就是干涉的结果）。此外，在运用每一类方法（散斑照相术或散斑干涉术）时，一般都需要首先获取表征物体运动的条纹，然后才得出检测结果。这样，也许可以讲这两类方法没有什么大的差异。但实际上，两者是有区别的，并由 Stetson 在 1975 年作了很适当的分类^[1,2]。他提出，如果在两个图像上存在某些区域，其各自的散斑图样之间相关性良好，就把这种方法称为散斑照相术；如果条纹的形成是由于两个图像之间散斑图样相关性的起伏，而不论两图样的相关区域之间有无移动，这种方法就称之为散斑干涉术。显然，在部件的实验装置方面，以及在定义这两大类散斑方法的辅助手段方面，两者是不同的。实际上，有不少人乐于把散斑干涉术类比于同轴像（平）面全息术，因为它们的装置很相似。不过，我们认为更重要的是，这两类散斑计量方法都已经在实验上解决了本书所论及的各种各样的检测问题。

作为引论（第一章）的深入，本书在第二章里概述了散斑的某些基本特性，在第三章里扼要地介绍了散斑的统计性质，并详细讨论了在表面粗糙度测量方面的应用。在第六章，除

了论述该章主题即电子散斑图干涉术 (ESPI) 以外, 亦涉及到某些有关散斑技术发展的背景资料。

对这项新的计量工具的最大兴趣或许在于它能够探测表面的移动。所以, 第四章和第五章分别确立了检测位移与应变, 以及振动与变形的基本途径。下一章 (即第六章) 描述这些散斑技术与电视系统的适配, 此项发展进一步显出散斑技术对于工业中实际工程应用的吸引力。如上面所提及, 该项研究称之为电子散斑图干涉术。它充分体现了电视显示和录像存贮的优越性, 以及与计算机结合而实现电子学处理的可能性。

然后, 本书介绍各种基本的散斑实验技术对轨迹研究 (第七章), 以及对拓扑与结构检测应用 (第八章) 方面的进一步用途和适应性。特别是在研究某些大型结构的第八章中, 出现了脉冲激光与散斑技术的结合。之所以要在此提一句的目的在于, 想要强调一下散斑技术的广泛性。因为我们在讨论方法时, 一般都采用连续波 (CW) 激光, 这也许会导致人们的错觉, 以为脉冲激光可能不宜于作为散斑应用的光源, 而大型物体可能不可以作为检测对象。在讨论散斑计量问题的几项具体的特定应用时 (第九章), 我们在所涉及的若干例子中, 再一次强调: 脉冲激光是适宜于散斑照相术与散斑干涉术的。第九章所讨论与说明的具体应用实例有: 混凝土裂缝探测, 白光散斑方法, 松弛继电器触点的检测, 压力容器检测, 复合材料检测, ESPI 技术测量振幅与相位的进一步考虑, 裂缝尖端附近位移场的测量, 瞬变现象的分析, 三维物体内的位移测量。最后 (第十章), 本书从操作的角度详细叙述了散斑干涉仪, 并讨论了散斑相关和透镜像差对散斑计量的影响, 以及进一步研究了三维像场中的散斑

运动。

参 考 文 献

- 1.1. J. C. Dainty (ed.), "Laser Speckle and Related Phenomena." Springer-Verlag, Berlin and New York, 1975.
- 1.2. K. A. Stetson, A review of speckle photography and interferometry, *Opt. Eng.* **14**, 482 (1975).

第二章 散斑的物理特性

H. J. 蒂齐尼

——瑞士 赫尔布勒格

维尔德·赫尔布勒格有限公司

对于散斑现象，人们是早已熟悉的，但只是在激光问世之后，才有深入的理解和新颖的应用。当用高度相干的激光照射光学粗糙表面时，就会出现激光散斑。该表面的粗糙程度应等于所用光波波长量级或稍大一些。距离表面适当远处的光波，是由许多相干子波所组成，而每一个子波则来自该表面上的不同单元。子波间的光程差约为数个波长。这些经光学粗糙面散射而产生的子波不仅相位随机，而且实振幅亦随机〔2.1.〕。这样一些相位不同的次级相干球面子波，相互干涉而产生强度分布呈颗粒状的图样，就叫做散斑。劳(Laue)〔2.2.〕推导出了不少直接与散斑有关的基本结果。此外，在无线电波传播中，人们很早就发现存在着完全类似于激光散斑的统计现象〔2.3.〕。

只要用高度相干光照射光学粗糙面，空间中处处都会有散斑。不过，我们最感兴趣的是像平面和衍射面内的散斑。该随机场的分布在时间上是稳定的，所以它仅仅是空间坐标的函数。现考虑定性确定散斑形状的因素，以及在衍射图上强度包络的形式。在图 2.1 中，一束相干波照射着粗糙物体，如果没有散射，该波将会聚在点 E 附近。为简单起见，此图