

Engineering Industry and Technics

全息摄影无损检测

Industrie Mécanique et Technique

〔美〕 R.K. 厄尔夫 主编

きかいこうぎょうぎじゅつとしょ

ingenbauindustrie und Technologie

Промышленности и Технике

机械工业出版社

全息摄影无损检测

〔美〕 R. K. 厄尔夫 主编

王致新 译
王永昭 校



机械工业出版社

本书全面地论述了连续波和脉冲全息摄影、干涉计量全息摄影、全息摄影莫尔等高线、全息摄影相关术等光学全息摄影理论及实验技术。详尽地论述了近年来全息摄影在振动分析、位移、应变以及探伤等多方面无损检测问题中的实际应用。同时,对微波及声全息摄影的进展也作了概括的介绍。

本书可供从事激光和无损检测方面研究及工作的人员参考。

Holographic Nondestructive Testing

Robert K. Erf

Academic Press 1974

*

全息摄影无损检测

〔美〕R. K. 厄尔夫 主编

王敦新 译

王永昭 校

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 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 787×1092 1/32·印张 $14\frac{1}{8}$ ·字数 307 千字

1982 年 9 月北京第一版 1982 年 9 月北京第一次印刷

印数 0,001— 4,200·定价 1.45 元

*

统一书号: 15083·5155

译 者 的 话

随着激光技术日新月异的发展，近年来全息摄影在无损伤检测领域中的应用范围迅速扩大，许多以前无法检测或难以检测的问题得到了解决，全息摄影无损检测在科研和生产中的重大作用正日益被人们所认识。从航天科学到牙科手术都应用了这项新兴的技术。它的发展必将使其在无损伤检测领域中的作用迅速扩大。

我国许多部门中已经应用了全息摄影无损检测技术，其应用范围正在扩大。为了使这项技术能更好地为实现祖国的四个现代化服务，特译出此书供有关同志参考。

本书的特点是循序渐进，对每项技术都作了比较深入的讨论，不仅论述了基本原理的概念和公式，而且对实验设备的布局、一般实验技巧到条纹的定量解释都作了详细的论述。它不仅对专门从事全息摄影无损检测的光学和机械专业的同志有所帮助，而且对那些刚刚着手进行这方面工作的同志也能起到很好的引导作用。本书对于理论阐述、实验技巧和条纹解释方面的论述必将引起读者们的兴趣。

这本书是由美、英等国的许多专家分章合著的，每一论题都写得比较详尽并在各章末列有参考文献索引。

翻译时仅删去了个别章节最后关于“感谢”的一段，其余全文译出。由于本书涉及专业面相当广，限于译者水平，译文中错误及欠妥之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

目 录

出版说明

中译本序

译者的话

序

第1章 导论	1
参考文献	3
第2章 全息摄影	4
2.1 导言	4
2.2 一般理论分析	8
2.3 全息图的类型	13
2.4 制作连续波全息图的实验技术	40
参考文献	62
第3章 脉冲全息摄影	64
3.1 导言	64
3.2 脉冲激光器的工作特性	65
3.3 脉冲激光全息摄影系统的结构	73
3.4 环境的影响	75
3.5 一些实际考虑	79
3.6 无损试验	82
参考文献	88
第4章 全息摄影干涉计量	90
4.1 导言	90
4.2 全息摄影干涉计量的方法	91
4.3 基本技术的一些变化	100
4.4 全息摄影干涉计量用于无损检测	104
参考文献	106
第5章 全息摄影及莫尔表面等高线	107
5.1 导言	107

5.2 线投影等高线技术	110
5.3 莫尔等高线	114
5.4 多频全息摄影等高线	125
5.5 多折射率全息摄影等高线	145
5.6 用于光场等高线的阴极射线管和散斑图技术	150
参考文献	153
第6章 全息摄影相关术	155
6.1 导言	155
6.2 相关和干涉计量	155
6.3 光学匹配滤波器和全息摄影相关术	158
6.4 用光学相关的实时表面检验	168
6.5 非实时相关	182
6.6 结论	187
参考文献	187
第7章 全息摄影振动分析	189
7.1 导言	189
7.2 条纹的观察	190
7.3 可分解的物体运动	193
7.4 不可分解的物体运动	201
7.5 测量与分析	207
7.6 用正弦激振进行振动分析	209
7.7 J_0 条纹的拍摄	219
7.8 全息摄影振动分析的应用	222
参考文献	230
第8章 特种全息摄影技术及应用	232
8.1 导言	232
8.2 连续波全息摄影中物体运动的补偿	239
8.2.1 导言	239
8.2.2 本机参考光束的产生	240

8.2.3	用电子反馈伺服系统补偿参考光束	252
8.2.4	扫描光束全息摄影	255
8.3	时间调制技术	256
8.3.1	引言	256
8.3.2	振动物体的调制技术	263
8.3.3	产生调制的技术	272
8.4	用等高线图测量表面位移	274
8.4.1	引言	274
8.4.2	用全息图干涉计量测量位移大小时对应用范围的一些限制	274
8.4.3	位移测量中的等高线图	276
8.4.4	实验结果	281
8.5	应变的测量	284
8.5.1	引言	284
8.5.2	全息摄影法	286
8.5.3	激光散斑图法	291
8.5.4	表面涂覆技术	295
8.6	裂纹探测	297
8.6.1	基本概念	297
8.6.2	微细裂纹的探测	298
8.6.3	应力腐蚀裂纹的观察	304
8.6.4	讨论	309
8.7	迭层结构的检验	310
8.7.1	引言	310
8.7.2	加载的概念	310
8.7.3	实际试验及一些限制	315
8.7.4	典型例子及设备	323
8.8	复合材料的检验	329
8.8.1	引言	329
8.8.2	声加载的应用	330

8.8.3	复合材料试样的检验	332
8.8.4	复合压气机叶片的检验	333
8.8.5	优缺点及此方法的一些限制	337
8.9	圆柱孔的检验	338
8.9.1	引言	338
8.9.2	用全息摄影干涉计量进行形状比较	339
8.9.3	比较圆柱孔用的全息摄影干涉计量	340
8.9.4	条纹的解释	342
8.9.5	用激光检验孔的简单方法	346
8.10	涡轮叶片的检验	346
8.10.1	引言	346
8.10.2	振动分析	347
8.10.3	壁厚的测量	352
8.10.4	内部结构的完整性	354
8.10.5	实验技术	355
8.11	充气轮胎的检验	358
8.11.1	引言	358
8.11.2	对内部缺陷的评价	358
8.11.3	振动和结构分析	366
8.12	固体燃料火箭的检验	368
8.12.1	引言	368
8.12.2	试验程序及试验结果的说明	369
8.12.3	这种方法的优缺点及其局限性	374
	参考文献	375
第9章	微波全息摄影	379
9.1	引言	379
9.2	微波全息图理论	381
9.3	微波波带片	382
9.4	早期的微波全息图	392
9.5	微波全息图用作探测装置	395

9.6 开诺型及其微波等效	400
9.7 用液晶的微波全息图	404
9.8 微波全息摄影干涉计量	405
9.9 微波全息图天线	409
参考文献	410
第 10 章 扫描全息图系统的声全息摄影	412
10.1 导言	412
10.2 构成全息图的参数	412
10.3 成象参数	414
10.4 解析表达式	416
10.5 象差的校正	418
10.6 扫描系统简述	423
10.7 光学处理器	426
10.8 放大率和分辨率	430
10.9 实际应用举例	431
参考文献	437

第1章 导 论

——美国空军研究实验室

R. K. 厄尔夫 (R. K. Erf)

全息摄影的原理是 D. 盖伯 (D. Gabor) 博士于 1948 年首先创建的 [1.1]。二十三年之后, 由于他的“发明及全息摄影方法的发展”而荣获诺贝尔物理学奖金。看来似乎可以认为全息摄影是诞生于 1948 年这个闰年的二月二十九日; 不过, 实事求是地说, 大量的科学研究只接近于这些实际年龄的四分之一。这件怪事的主要原因之一是: 全息图再现时总有与原始波同时出现的共轭波, 从而无法获得简明的象。此共轭波形成的物体镜象, 呈现一个散焦象, 因此妨碍了对所要求的象的观察。全息摄影在这样漫长的岁月中, 只是最近几年才极为活跃的第二个理由在于缺乏适用的具有足够相干性同时又具有高度单色性的照明光源。而这种光源却是拍摄引人注目的固态物体反射光全息图所必须的。1960 年初激光器的出现才克服了后一个障碍。更为重要的, 而且几乎是同时发生的是激光器的迅速实用化和 E. 利思 (E. Leith) 及 J. 厄帕特尼克斯 (J. Upatnieks) 发展了离轴全息摄影方法, 从而消除了观察全息图再现象时共轭象和实象互相重迭而降低象质的影响。这一引人注目的进展在美国光学协会 1961 年秋季会议上发表, 并作为三篇续载论文中的第一篇于次年发表 [1.2]。第一篇论文论证了简单的高度透明物体 (透明基底上的黑字) 可以用这种全息摄影方法成功地记录和再现。利思及厄帕特尼克斯 1963 年发表的第二篇论文将这种方法扩展到

色调连续变化的各种透明体和不能透过强背景波的物体(黑色基底上的透明字)。1964年发表的第三篇论文记录了他们将全息摄影成功地用来处理一个固态三维反射物体。后来,这三篇文章和盖伯于1948, 1949及1951年发表的几篇文章[1.1]一起被认为是全息摄影领域中的经典论文。

从历史上来说,“激光器”这个词作为题录名称首先出现在光学协会会志1961年的年度索引中。四年之后,1965年,上述杂志及应用光学杂志这两种刊物将“全息摄影”列为索引题录(上述利思及厄帕特尼克斯的三篇经典著作预先列于“成象”及“信息理论”中)。最后,1970年应用光学杂志将“无损检测”列入年度索引,它包括三个题录项目,其中两个包含有全息摄影。大约在同时,美国无损检测协会承认了这门高速发展中的科学的推动作用,并组织了一个全息摄影委员会,作为他们早已建立了的声学法、穿透法、穿透辐射法、密封试验法、红外法和加热法以及电、磁技术等各种方法分支的一部分。

在某种意义上,全息摄影被看作激光科学家的救星,因为正当科学界中的实用派开始提出激光器究竟有何实用价值的问题时全息摄影已成熟了。于是可以说激光器到底总算有了一种实际应用,即拍摄全息图。当然,接之而来的问题是为全息摄影寻找用途。经过几年的研究和发展崭露头角的终于是全息摄影无损检测。虽然上述说法似乎有点滑稽,但并非毫无道理(正如基础理论方面已经做过的那样,现在从事激光及全息摄影的科学家们正在进行大量极其杰出和振奋人心的应用和发展方面的工作),据不完全的统计,大量已出版的文献表明,一个迷人的新领域正在展现出来。尽管全息摄影这个领域从1951年到1961年间没有完全冬眠,但从1962年以来才十分活跃,单单有关这方面出版物的目录就足以构成一本大部头

的书。不过,这里既不想评论全息摄影的发展,也不打算细述其潜在的用途和那些显然尚无实用的建议,这些内容在以前出版的一些涉及更广泛论题的著作中已有适当地记载了。在其中的一篇评论中[1.3],利思及厄帕特尼克斯列出了许多全息摄影最有希望的领域,如“全息摄影干涉计量、全息摄影信息存储以及全息图光学元件”等。而全息摄影无损检测这方面则是挺进到这些领域中的第一个;反过来,全息摄影无损检测又是全息图干涉计量术预示为有光明前景的一个主要理由。

在以下几章中,读者将探讨全息摄影基本概念、一般实验方法和如何将此技术用于解决特定的无损试验及检验问题。以下以七章的篇幅来讨论光学全息摄影,最后两章讨论微波全息摄影和声全息摄影。在光学部分中,开始时以三章篇幅进行一般讨论,包括连续波全息摄影和脉冲全息摄影以及干涉计量全息摄影的数学基础,它对更详细地讨论三种特殊全息摄影技术(表面等高线、相关术及振动分析)奠定了基础,在这几章中还包括这三种技术在无损检测方面的应用。光学部分还有一章以一组短文说明一些特殊实验障碍的工程解并对若干无损检测问题进行了详细分析。微波与声全息摄影部分的叙述格式相类似,不过内容较为简短,没有反映它们的效用,但稍微反映了在这两方面较为少数的工作人员及其成果。

参 考 文 献

- 1.1 D. Gabor, "A New Microscopic Principle," *Nature (London)* 161, 771 (1948); "Microscopy by Reconstructed Wavefronts," *Proc. Roy. Soc. (London)* A197, 454 (1949); "Microscopy by Reconstructed Wavefronts," *Proc. Phys. Soc. (London)* B64, 449 (1951).
- 1.2 E. N. Leith and J. Upatnieks, "Reconstructed Wavefronts and Communications Theory," *J. Opt. Soc. Amer.* 52, 1123 (1962); "Wavefront Reconstruction with Continuous-Tone Objects," *ibid.* 53, 1377 (1963); "Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects," *ibid.* 54, 1295 (1964).
- 1.3 E. N. Leith and J. Upatnieks, "Progress in Holography," *Phys. Today* 25, 28 (1972).

第2章 全息摄影

——美国空军研究实验室

J. P. 沃特斯 (J. P. Waters)

2.1 导 言

全息摄影是将光波波前的相位和振幅信息完整地记录于一种适当记录材料上的科学。这种记录称之为全息图。它来源于希腊文 *Holos*, 是完全的意思。和用二维形式记录三维景象的普通摄影不同, 全息摄影所保存的景象是真实三维的。与摄影光学方面的根本不同是无需镜头或其它成象装置; 代替它的是利用干涉术的程序, 来记录与物体反射光波的振幅和相位两者都有关的光强花样。所记录的花样和原来物体完全不同, 但是它不仅包含有普通照相对一个物体所能得到的全部信息, 而且包含有三维视觉所需要的相位信息。

由全息图产生一目了然的成象过程称为再现过程。在此过程中, 全息图被单色相干光照明, 并将照明光衍射为与由物体反射出来的原始波前无本质差别的波前。此衍射波产生表征原来光波的全部光学现象。可用一透镜将衍射波汇聚并具有焦点。因此, 即使原来的物体已经拿走, 它还可以成原来物体的象。如果再现波被一观察者的眼睛截取, 其效果就和观察原始波一样。观察者所看到的显然是原始物体的真实三维象。当观察者改变他的观察位置时, 象的透视景象也改变了, 视差效应是明显的 (如果一个物体是置于另一物体之前, 观察者移动他的头时, 视线可绕过障碍物, 从而能看到原来藏在它

后面的物体)。此外,当观察者的观察点由景象中的物体自近而远地变化时,观察者就必须重新调焦。假定全息图拍摄和再现时使用同一单色光源,则用目视检验真实物体和物体的再现现象时看不出两者之间的差别。全息图就象是一个窗口,通过它可看到明显的物体。

除了再现现象具有三维性的这些特征之外,全息记录本身还有一些有趣的特性。全息图的每一个局部都可以再现整个象的景象。不过用一张全息图的很小很小的一个局部再现时,象的强度和分辨率会伴随着损失。当将全息图翻转时,例如用接触印刷方法(不透明区变为透明区;透明区则变为不透明区),它仍能再现与原版产生的象无差别的正象。全息图的另一个性质是一张全息图总可以再现两个象。通常是一个实的幻视象和一个虚的正立的象。特殊情况下两个象可以都是实象或虚象,但一般情况下全息图产生的是一个幻视象和一个正立象。

实际上,全息图是用类似于图 2.1 所示的实验装置来拍摄的。从激光光源来的高度相干的单色光用分光镜 BS 分为两束,一束经扩束后用来照明被记录的物体 O;被称为参考光束的另一束光经扩束后用反射镜直接照射高分辨率的全息底版 H。后一束光用为参考光束,当其与来自物体的散射光

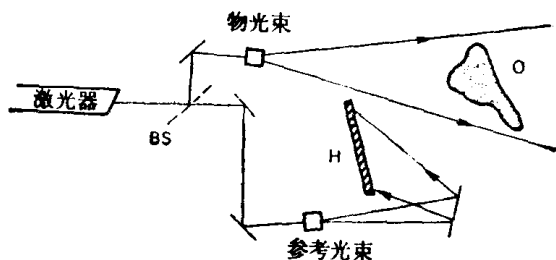


图 2.1 拍摄普通反射光全息图用的一种典型实验装置

在全息底版平面上结合时,参考光与散射光进行相位比较。这两束光迭加的结果为干涉花样而被记录在全息底版上,从而形成一张全息图。一个典型例子示于图 2.2 中。

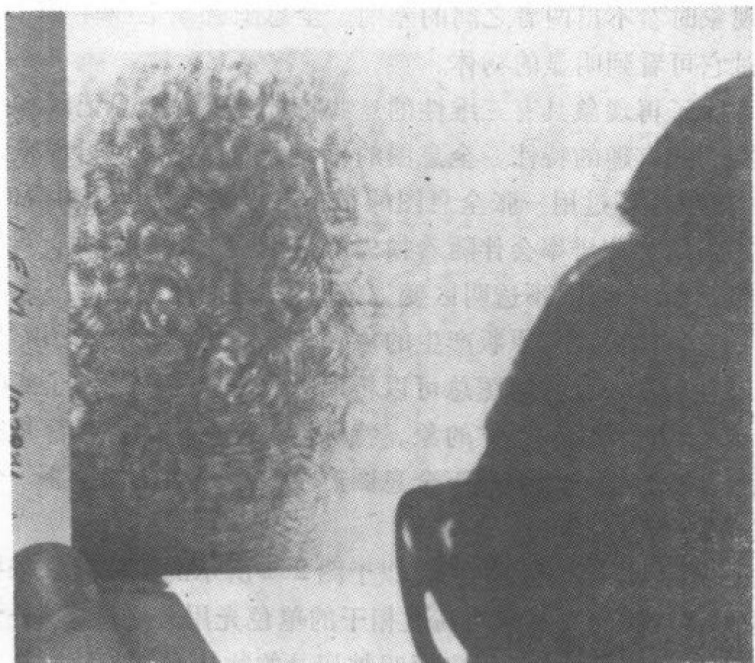


图 2.2 作者正在观察一张实际全息图(它与普通照片完全不同)

可以看出,全息图完全不同于普通照片,全息图中并没有被记录的象。事实上,图 2.2 中底版上所记录的干涉条纹因为条纹间距极小(约为 5×10^{-4} 厘米),没有其它东西的帮助眼睛是看不见的。在照片上所看到的那些条纹是拍摄全息图的光学系统中的灰尘粒子所引起的。经过处理后的照相干版,即全息图才能用来再现原来物体的三维象。两个再现象中的一个(图 2.3a)将如同虚象,位于全息图的后面,在原物体所占据的位置上呈现给观察者。另一个象(图 2.3b)将是以共轭

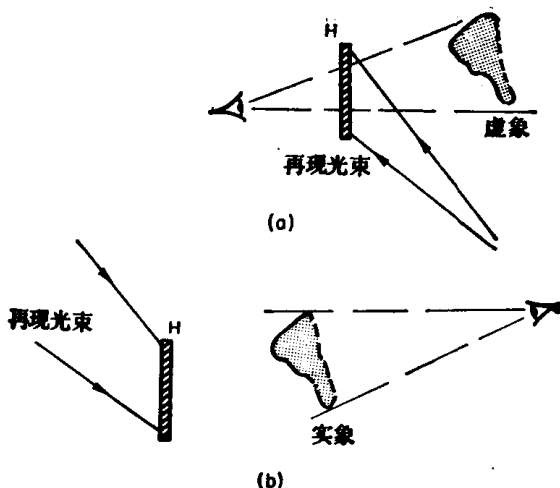


图 2.3 说明全息摄影再现的简图

(a) 虚象 (b) 实象

波前再现,位于干版前面呈现为一个实象(共轭波前是与原始波前反方向进行的,且曲率相反)。因为人眼孔径的限制,实象很难察觉,故最为常用的是以虚象进行观察。除了实象是幻视象之外,实象和虚象是一样的(亦即它与全息干版之间的关系与虚象一样,但是,虚象中离眼睛最近的那些部分在实象中离眼睛最远;反之亦然)。

从以上对全息图拍摄和再现的简短叙述可以看出其过程是简单的。只要实验者具备有关光学现象的基础知识并掌握围绕这些过程的实验技术就行了。这两方面的要求实质上是为了制取高质量全息图和解释全息摄影所观察到的各种现象。本章打算为有关全息摄影基础理论和各种实验技术提供足够的背景材料,使不熟悉光学的读者能懂得并会制作全息图。对于迄今尚未直接接触过全息摄影的人来说,它可进一步作为他们熟悉光学知识的向导。对全息摄影中的各种特殊

范围的详尽说明将放在以后几章中,读者可在那里逐个地深入考虑这些论题。为了达到这个目的,首先介绍基础理论的概貌,然后说明全息图的各种类型和它们的性质,再次,来考虑一些实验技术,包括讨论各种类型的记录材料、对相干性的要求、隔震要求、全息图的漂白处理、全息底版的超敏化以及拍摄再现象的照片的方法等。

2.2 一般理论分析

一个物体的全息图是由两个波前重迭在诸如照相底版之类适当的记录材料上所形成的(见图 2.1)。为了在照相乳剂上形成高反差干涉条纹,用以记录全息图的光必须同时是相干的和单色的。为了这一目的最常用的光源是激光器。

在照相底版的平面上,由物体发散出来的复数波前可用数学式表示为

$$U_0(\mathbf{r}) = A_0(\mathbf{r}) \exp i[\phi_0(\mathbf{r}) + \omega t] \quad (2-1)$$

此波前表示了由空间的振幅 A_0 及相位 ϕ_0 所决定的特性。此外还有一个取决于时间 t 及描述波传播角频率 ω 的这一项。后面这一项代表正在传播的波前之瞬时相位。参考波前 U_r 的形式是

$$U_r(\mathbf{r}) = A_r(\mathbf{r}) \exp i[k(r \sin \alpha + r^2/2Z + \omega t)] \quad (2-2)$$

式中 k 是传播数,等于 2π 被照明光波长 λ 除。 $\sin \alpha$ 是由于参考波与底版平面构成 α 角所引起的相位变化。 r^2 是由波前弯曲产生的相位变化并取决于从底版平面到光源的距离 Z 。上述两个波前在底版上迭加,底版上接受到的复振幅为

$$U(\mathbf{r}) = U_0 + U_r = A_0 \exp i[\phi_0(\mathbf{r}) + \omega t] + A_r \exp i[k(r \sin \alpha + r^2/2Z) + \omega t] \quad (2-3)$$

因为照相底版是一个平方律探测器(记录的只是整个曝