

全息图的摄制与估算

[瑞典] N. 艾布拉姆森 著

杨霁辉 吴 琼 译

科 学 出 版 社

1988

内 容 简 介

本书以光的相干概念为基础，系统地阐述了全息摄影的基本原理和各种实际应用与测试方法，是一本理论和应用相结合、并以应用为主的专著。本书内容包括：干涉的特性与干涉仪，全息摄影方法及全息摄影应用，条纹的判读和处理，以及测试装置等。

本书可供从事全息科学、实验方法及无损检测的科技人员及有关专业的高校师生参考。

Nils Abramson

THE MAKING AND EVALUATION OF HOLOGRAMS

Academic Press, 1981

全息图的摄制与估算

〔瑞典〕N. 艾布拉姆森 著

杨弄辉 吴 琼 译

责任编辑 刘海龄

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

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

*

1988年7月第一版 开本：787×1092 1/32

1988年7月第一次印刷 印张：12 1/4

印数：0001—8704 字数：273,000

ISBN 7-03-000140-0/TB·7

定价：12.30元

译者的话

本书从干涉现象和全息摄影方法的基本原理出发，介绍了用于尺度、形变和振动测量的各种全息摄影方法，即实时全息术、双曝光全息术、时间平均全息术和夹层全息术。讨论了平面运动和非平面运动条纹的估算，以及条纹的判读和处理，最后介绍了用于全息摄影的各种装置和方法。

本书作者N. 艾布拉姆森教授系当今全息学科享有威望的学者之一，对该学科的发展作出了杰出的贡献。书中包括了作者在该学科中多年来卓有成效的研究成果和宝贵经验。内容极其丰富，既富于系统理论，更颇具实用价值。

本书广泛地应用了各种模拟，使复杂现象的解释变得形象、直观，同时避免了许多繁琐的数学推演，因而，能增强学习的兴味，并且也有助于对内容的理解。

对原书中的若干欠妥之处，译文中已分别予以更正。

在本书翻译过程中，得到了南开大学沈寿春教授和母国光教授的热忱指导，存此谨向两位先生致以衷心的感谢。

序

1947年Gabor首先实现了全息摄影术的物理过程⁽¹⁾。但是，他所得的象质劣于普通的摄影象质，因此，他的工作不能引起人们的重视。妨碍其成象质量的主要原因在于，当时尚不具备所需要的强而又相干的光源。

1917年，爱因斯坦曾预言辐射的受激发射存在，这使后来的激光的发明⁽²⁾成为可能。这种新型辐射的提出，仅仅是为了满足爱因斯坦方程的要求。为了建立谱线的吸收和发射之间的平衡，他不得不引入一种能使某些谱线的辐射增强的受激发射。直到爱因斯坦逝世后很久，在1960年，随着第一台激光器——辐射的受激发射光放大器的研制成功，他的发现才成为现实。

当激光器发展到可以实际应用时，Leith和Upatnieks将它应用于全息摄影术⁽³⁾，并对此作了进一步的发展和完善。他们的实验得到了非常优良的三维象，使科学界为之一惊。现已从事其他领域工作的伽柏，于1971年获得了诺贝尔奖金。因此，爱因斯坦有关受激发射的预言和伽柏关于全息摄影术预言相结合的结果，使得成象和测量方法得以改进，本书将对这些方法予以叙述。

另外，在美国的Powell和Stetson⁽⁴⁾及在英国的Burch与他的合作者⁽⁵⁾发现了在全息图曝光过程中运动物体全息象出现的干涉条纹。不久，便发展了利用这种条纹进行测量的几种新方法^(6,7)，此类技术统称为全息干涉测量术。

本书将叙述如何应用全息干涉测量方法来进行尺度、形

变和振动的测量。通过数干涉条纹并研究当观察角度改变时条纹图样的变化，即可求出位移的方向和大小。为了解释条纹形成的过程，将应用一些模拟，如全息析纹图、莫尔(Moiré)图、弦、反射镜和光栅的模拟、由运动余迹反射的模拟以及短相干长度和短脉冲之间的模拟。

虽然数学是最通用的模拟方法，并且可以应用在很宽的频谱范围，但是也正由于其通用性强，有时会变得比所要解释的现象更为复杂。作者的意见是：对于这类情形应当采用其它适当的模拟。因此在本书中，数学将主要用于检验和证明其它模拟方法的正确性。不用数学来解释干涉图样性质的又一层原因是这些图样表示直接可见的信息。因此，最好的解释形式是和类似的较易于直观理解的可见信息相比较，例如，和简单地通过相交线簇建立起来的莫尔图相比较。

姑且假设全息摄影所产生的不是图样，而是一列具有相应信息内容的数字，那么，人们可能会问所有这些数字有什么用处呢？于是，人们的目标必定是来设计一个能将这些数字转变为某种图形的图解表示，例如，这种图形的等值线可表示等位移线或等振幅线，而这正是全息干涉测量术自身都能直接作到的。

第一章向读者介绍了光的相干概念，干涉条纹的形成，以及当两束光相消产生暗条纹时光能量发生的变化。本章已经证明，相干光的强度相加是一个非线性过程，因此，一台干涉仪可在有限范围内作为一个光强放大器，用一幅图表将信号光作为参考光的函数来说明这种放大作用。根据简单的能量守恒概念，本章导出了光学系统的“衍射极限”和“干涉极限”分辨率的已知公式，并且也叙述了干涉条纹和莫尔条纹之间的类比，本书其他部分的讨论在很大程度上都依赖于这一类比的推广应用。这一章还描述了一些应用于干涉原理

的仪器，并解释了它们的功能。干涉镜即为其一，它是新近研制成的一种对条纹处理具有特殊能力的仪器。本章还向读者介绍了全息析纹图和“观察波前”的新概念。

第二章解释了全息摄影过程，研究了真的和假的两种全息摄影象，提出了能预示虚象还是实象的一个新的方程式和一种新的图解方法，并且证明虚象和实象二者均位于通过参考光束点光源的直线上。本章对全息摄影和普通摄影进行比较，阐明了前者为什么能产生包含有较高信息容量的三维象的原因，并讨论了全息摄影存贮，证明了对于某一给定尺寸的元件，其信息容量并不超过照相摄影存贮。这一章还把散斑作为光学信息量进行了论述，散斑的数目确定了信息容量。本章末对不同的全息摄影方法和配置进行了探讨。

第三章中研究了全息摄影对于尺度、形变和振动测量的应用。在全息摄影象中进行测量的最明显方法，是通过全息底板进行观察，宛如它是一个“具有存贮的窗口”，并应用通常的光学仪器来测定物点的位置。本章用图例示了一种新型的莫尔图，它以简便的方法，直接观察透镜周围空间的光学分辨情况。然而，全息摄影方法的精度不受观察仪器衍射极限分辨率限制，而只取决于全息底板干涉极限分辨率。这些方法都是对一个物体在不同情况下的干涉测量比较的结果。本章所述的几种方法是实时全息干涉测量术、双曝光全息术、时间平均全息术和夹层全息术。这一章对最后一种方法讨论得比较详细，因为它不象其他方法那样为人们所熟知。本章中还叙述了各种全息摄影配置，探讨了不同元件的稳定性要求，并着重强调全息摄影装置的简易性优点。

第四章叙述了由于非平面运动所产生的条纹的计算方法，讨论了条纹形成的过程，强调确定光程长度的重要性。这章证明了当全息干涉测量术在一般情况下应用时，光线应

当只通过一个散射表面。本章叙述了条纹估算的三角方法，并证明了在物体运动方向上存在一个等灵敏度锥体，还从数学上证明了最大灵敏度由等分照明方向和观察方向的平面所表示，也给出了使平面运动和非平面运动进行分离的具体实例，并提出了观察杨氏 (Young) 条纹的概念。该章用等效光栅代替物体的散射表面，以解释莫尔图对全息干涉测量术的模拟。本章还研究了弦的模拟，其作法很简单，是以拉直的弦代替光线作为基础。最后再次提出全息析纹图，并说明它在测量空间如何能产生有关灵敏度分布的信息。

第五章解释了通常的全息干涉测量方法为何不能很好适应于平面运动测量的原因，叙述了倾斜照明和观察的优缺点，解释了用双光束照明的作用。当研究一张普通全息图时，条纹随着观察角度的变化而移动，由这种移动便可计算出平面内的位移量。这种移动有时会产生视差效应，似乎条纹系存在于物体表面之前，或在其后。这种效应——条纹的“定域”可用于测量，并且通常认为是由对应光线所引起的。本章根据来自“运动余迹”的反射所产生的聚焦效应，提出了一种定域的新的解释，而且给出一些实例，并应用全息析纹图解释了复杂的条纹图样。对于每一种运动，都从数学上证明了莫尔图对全息干涉测量术的模拟。该章研究了物体的许多运动，利用莫尔图模拟使所得的干涉图变得直观可见，并首先提出然后证明了一种大胆的新论点：全息干涉测量方法的作用，无需干涉测量，甚至也无需全息图。在全息图干涉测量情况下，必须用一个透镜产生一个象，上面有条纹图样分布。这种方法即是众所周知的散斑摄影法。本章末研究了夹层全息摄影的平面灵敏度，并导出一个方程。

第六章从“误差的玫瑰图”讨论开始，利用一插图说明了即使对于一给定形变只存在一种条纹图样，但却可能有多

种不同的形变，它们能产生相同的条纹图样。这说明了利用象平面上的干涉或莫尔图效应对条纹进行处理，便可以将唯一的真实形变单独地确定。前一种方法最为普遍，并且能提供更多的信息。它利用夹层全息摄影术即可非常简便地完成。这种简单的方法，可以揭示方向是向前或是向后，并能对于超过1毫米以上的无用运动进行补偿。此外，尚能用它来计算由于弯曲产生的应力和应变，而无需对条纹间隔的变化进行测量。本章给出了在接近2米高、重约2000公斤的铣床上进行测量的一些实例，其精确度可达万分之几毫米；并用静负荷提供剪切力，研究了位移达到十分之几毫米处机床部件的合成形变。该章应用双脉冲全息摄影术研究了一个小手持钻机的工作状态，通过快速自旋夹层全息图，可对手持钻机的过大而且无用的运动进行补偿，并分析了局部振动。本章末还提出了一些条纹读数的规则。

第七章从He-Ne激光器、氩激光器和红宝石激光器开始，叙述了全息摄影术所用的各种装置和方法，对激光的相干性进行了研究，特别着眼于全息摄影术中具有重要作用的细节；还讨论了偏振的影响，并且指出可以利用偏振来消除全息底板上的某些干扰。本章叙述了扩束器，并给出空间滤波器针孔大小的计算方法。虽然由一只简单的He-Ne激光器发出的光的相干长度极限只有约0.3米，但已证明对长达数米的物体亦能进行全息摄影。并且，这章用数学方法和图解方法证明了相干区域本身以激光器长度两倍的程长重复出现。相干长度的这种重复性，可以用来产生和物体相交的等距表面以及在其表面上产生等高条纹，这些条纹称为“等值条纹”。该章还讨论了产生等值条纹的几种方法，并着重指出这种条纹可能偶然出现而被错误地解释为位移或形变的象征。在“用全息摄影进行光飞点记录”方法中应用短相干长度是有利的，可以

证明在全息摄影术中，短相干长度的光所得到的结果和用短光脉冲所得结果相同。在相干长度和脉冲长度之间的这种相似，开辟了一种全新的全息摄影直观化领域，光脉冲以电影画面形式通过光学元件，并且还可以利用短光脉冲对超高速现象进行研究。最后，在本书之末对全息摄影装置及其元件的稳定性要求提出了具体建议，还引用了一个一米长的物体为例，在应用夹层全息图对它进行第一次曝光后，用汽车运到工厂进行加工，数天以后将它运回到全息摄影装置进行第二次曝光，得到了极好的能显示物体变形的干涉条纹。此实验仅是本书中许多例举之一，它们显示了全息摄影现在已很适合在工厂条件下，进行实际测量工作。

N. 艾布拉姆森

1981年2月于斯德哥尔摩

参 考 文 献

1. D. Gabor. Microscopy by reconstructed wavefronts. *Proc. R. Soc. A* 197, 454 (1949).
2. A. Einstein. Zur Quantentheorie der Strahlung. *Phys. Z.* 18, 121 (1917).
3. E. Leith and J. Upatnieks. Reconstructed wavefronts and communication theory. *J. opt. Soc. Am.* 52, 1123 (1962).
4. R. Powell and K. Stetson. Interferometric analysis by wavefront reconstruction. *J. opt. Soc. Am.* 55, 1593 (1965).
5. J. Burch. The application of lasers in production engineering. *Prod. Engng* 44, 431 (1965).
6. R. Collier, E. Doherty and K. Pennington. Application of moiré techniques to holography. *Appl. Phys. Lett.* 7, 223 (1965).
7. P. Brooks, L. Heflinger and R. Weurker. Interferometry with a holographically reconstructed comparison beam. *Appl. Phys. Lett.* 7, 248 (1965).

目 录

译者的话

序

第一章 干涉	1
1.1 干涉条纹的形成	1
1.1.1 激光相干性简介	1
1.1.2 模拟	4
1.1.3 两束相交的激光	6
1.1.4 光程差	6
1.1.5 莫尔图模拟	10
1.2 干涉仪	11
1.2.1 杨氏条纹	11
1.2.2 牛顿环	12
1.2.3 干涉镜	15
1.2.4 迈克耳孙干涉仪	20
1.2.5 差异的干涉测量	24
1.3 干涉现象的能量平衡	26
1.3.1 强度放大	26
1.3.2 干涉量度中的能量守恒	28
1.3.3 衍射极限分辨率	31
1.4 两列球面波的干涉	32
1.4.1 全息析纹图	33
1.4.2 观察波前	36
1.4.3 实象和虚象	37
第二章 全息摄影方法	40

2.1	用两束相交激光束进行记录	40
2.1.1	真光束和共轭光束的偏折	40
2.1.2	其他假光束	43
2.2	二维物体的全息图	46
2.2.1	真象和假象	48
2.2.2	薄傅里叶全息图的信息容量	49
2.3	三维物体的记录	53
2.3.1	与照相摄影的比较	55
2.3.2	散斑——光学信息量	56
2.3.3	共轭虚象	60
2.3.4	共轭实象	63
2.3.5	用全息析纹图解释真象和假象	64
2.3.6	逆平行再现光束形成的象	66
2.3.7	放大	68
2.4	白光全息图	71
2.4.1	Lippmann-Denisjuk全息图	71
2.4.2	聚焦象全息图	74
2.4.3	彩虹全息图	75
2.4.4	几种不同的全息摄影配置	77
第三章	用于尺度、形变和振动测量的全息摄影术	80
3.1	全息摄影象的一些常规测量	80
3.1.1	聚焦	80
3.1.2	立体摄影术和照相测量	81
3.1.3	显微术	84
3.2	实时全息干涉测量	85
3.2.1	位移的测量	86
3.2.2	用频闪仪和时间平均测量振动	89
3.2.3	莫尔图模拟	94
3.2.4	不同物体的比较	97
3.3	双曝光	100

3.3.1	全息摄影装置	102
3.3.2	双参考光束的应用	106
3.4	时间平均全息干涉测量术	109
3.5	夹层全息摄影术	112
3.5.1	曝光	114
3.5.2	复位误差的检查	116
3.5.3	估算	119
3.5.4	莫尔图模拟	123
第四章	非平面运动条纹的估算	126
4.1	条纹形成过程	128
4.1.1	散射表面	129
4.1.2	确定光程的重要性	130
4.2	三角计算	132
4.2.1	位移方向上的条纹锥体	133
4.2.2	移动观察点	135
4.2.3	最大灵敏度方向	136
4.2.4	计算真实方向和振幅	138
4.2.5	非平面运动与平面运动的分离	140
4.2.6	运动垂直分量的估算	143
4.2.7	观察的杨氏条纹	144
4.2.8	光栅模拟	146
4.2.9	归结为光栅模拟结果的莫尔图模拟	151
4.2.10	矢量方法	152
4.2.11	限定光程干涉测量	153
4.3	弦模拟	154
4.3.1	位移线已知	155
4.3.2	位移平面已知	156
4.3.3	位移情况未知	158
4.3.4	物体上无固定点	159
4.3.5	实际应用	160

4.3.6	一些经验	163
4.4	全息析纹图	165
4.4.1	逐点估算	166
4.4.2	容许的近似	167
4.4.3	中等距离的平移	168
4.4.4	x 方向平移的近场效应	171
4.4.5	y 方向平移的近场效应	175
第五章	平面运动条纹的估算	178
5.1	普通全息摄影	179
5.1.1	倾斜照明和观察	180
5.1.2	象的复原	181
5.2	双象的区别	182
5.2.1	移动观察点: 动态方法	183
5.2.2	双象的结合	184
5.2.3	双照明光束	185
5.2.4	光学滤波	187
5.3	条纹的定域	189
5.3.1	一般特征	190
5.3.2	对应光线	191
5.3.3	由“运动余迹”引起的聚焦效应	194
5.3.4	一些特例	196
5.4	物体上的条纹图样	200
5.4.1	观察的杨氏条纹	202
5.4.2	近似方法	204
5.4.3	平移情形的全息析纹图	205
5.4.4	全息析纹图平面内的旋转	206
5.4.5	空间中的旋转	209
5.4.6	条纹的空间定域	211
5.5	全息干涉测量的莫尔图模拟	213
5.5.1	数学证明	214

5.5.2	物体上莫尔条纹的形成过程	216
5.5.3	无物体空间中莫尔条纹的形成过程	219
5.5.4	平移	219
5.5.5	转动	223
5.5.6	实例	224
5.5.7	模拟或等同	227
5.6	散斑方法	229
5.6.1	散斑摄影	230
5.6.2	散斑摄影和全息干涉测量在数学上的统一性	232
5.6.3	夹层全息摄影	233
第六章	条纹的判读和处理	235
6.1	无用刚体运动的补偿	237
6.1.1	干涉测量补偿	238
6.1.2	利用莫尔效应补偿	239
6.1.3	实验	240
6.2	估算	242
6.2.1	位移的方向	242
6.2.2	弯曲	243
6.2.3	莫尔图方法	251
6.2.4	实例	254
6.3	立式铣床的研究	255
6.3.1	无条纹处理	257
6.3.2	刚体运动的补偿和运动方向的估算	258
6.3.3	莫尔图方法	264
6.4	卧式铣床的研究	265
6.4.1	无条纹处理	266
6.4.2	相对位移的估算	269
6.4.3	不足一条条纹的判读	271
6.4.4	振动	273
6.5	运转状态下手持钻机的研究	276

6.5.1	用旋转圆柱体进行的引导实验	277
6.5.2	基本实验中的一些条件	281
6.5.3	刚体运动的补偿	282
6.5.4	振动位相关系的估算	286
6.6	条纹读数规则	290
6.6.1	利用一个大的刚体运动	291
6.6.2	条纹的符号	293
6.6.3	可变的灵敏度	294
6.6.4	夹层全息摄影对于大平面运动的补偿	297
第七章	装置与方法	301
7.1	激光器	301
7.1.1	He-Ne激光器	303
7.1.2	相干长度	306
7.1.3	氩激光器与红宝石激光器	309
7.1.4	偏振的影响	313
7.1.5	实际考虑	315
7.2	光束扩展器	317
7.2.1	空间滤波器	319
7.3	相干长度的应用	321
7.3.1	全息析纹图的应用	322
7.3.2	实例	325
7.3.3	相干长度的重复性	327
7.4	等值线法	332
7.4.1	双频率	332
7.4.2	物体平移	334
7.4.3	条纹散斑的梳除	340
7.4.4	照明和观察错开	341
7.4.5	夹层全息图	343
7.4.6	实际考虑	352
7.5	短相干长度和短脉冲宽度之间的类比	353

7.5.1 光学元件的相干性要求.....	354
7.5.2 用全息摄影进行光的飞点记录.....	356
7.6 稳定性要求	362
7.6.1 光学元件.....	362
7.6.2 物体定位装置.....	364
参考文献	368
名词索引	372

第一章 干 涉

1.1 干涉条纹的形成

倘若将一只普通白炽灯接通，室内便被照亮，如果再接通另一只灯，室内变得更亮。只要两灯强度相等，并与一屏距离相等，则此屏将从每只灯接受大致相等的能量。每一点将接受到约为只有一只灯时两倍的光能（图1.1(a)）。假使情况并非如此，则将令人惊奇。

相反，如果用一个半透明镜，将来自一激光器的光分为两束，然后再重合于一个屏上，则屏上的某些点在两束光同时照明屏时，变得比用一束光照明时可能更暗。两光束甚至可以形成黑暗，如图1.1(b)所示。或者，如果使用一台干涉仪，整束光可能完全消失，如图1.1(c)所示。在图1.1(c)中，从左边的激光器发出一束光，此光束的一部分(I)直接通过两个半透明镜 a 和 d ，而另一部分光束(II)则被反射镜 a 、 b 、 c 反射，在经过 d 进行第四次反射后它和第一部分光束重新会合。如果将光束I挡住，例如将手置于 a 和 d 之间，此时屏上具有一定强度；但是，如果让光束I在 a 和 d 之间自由通过，则屏上强度变为零。光能量发生了什么变化呢？在本书之后将对此予以研究。

可以不用任何仪器就能研究激光的另一个怪现象。如果用激光照明一漫射表面，则此面的照明并不均匀，而是由杂乱分布着的亮点和暗点，或所谓散斑组成。

1.1.1 激光相干性简介

这些奇怪的结果都是由于下列事实引起的：即所有位于