

液面法超声全息

姜锦虎 陈炳泉

(苏州大学物理系)

提要: 本文介绍了液面法超声全息术的基本原理和实验装置, 并报导了用该装置对其在生物、医疗显示和工业无损检测应用的初步研究结果。

Liquid-surface ultrasonic holography

Jiang Jinhua, Chen Bingquan

(Department of Physics, Suzhou University)

Abstract: This article describes the fundamental principle and experimental setup for liquid-surface ultrasonic holography and reports the preliminary results in the application of this device to biological medical detection and NDT of industrial materials.

液面法超声全息显象技术是用超声波形成全息图, 用激光进行图象再现。它以能实时地、动态地显示物体内部结构及形象逼真、图象分辨率高等优点而获得人们的重视。在医疗显示、工业无损检测和生物研究等方面有应用潜力。本文介绍我们在这方面的实验结果。

一、基本原理

图1是液面法超声全息基本原理图, $A'B'$ 为液-气界面, 下方是液体, 上方是空气, 被检测的物体浸没在液体中。两束相干平面超声波的一束透过物体, 称它为物波 U_0 , 另一束称为参考波 U_r 。这两束超声波在液面上相干涉, 并在液-气界面上被反射, 产生辐射压力使液面升高, 液面升高的高度

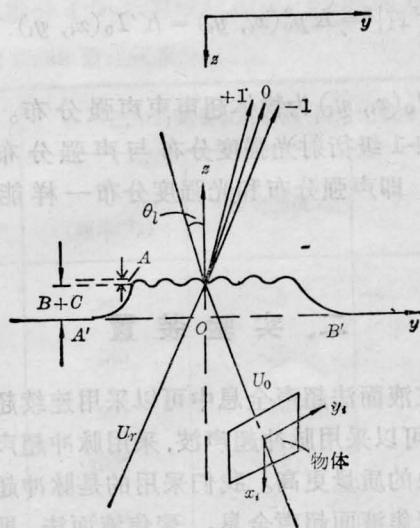


图1 基本原理图

收稿日期: 1982年2月16日。

为^[1,2]:

$$Z(x_i, y_i; y) = A(x_i, y_i) \cos[(\eta_r + \eta_0)y + \phi(x_i, y_i)] + B(x_i, y_i) + C \quad (1)$$

其中

$$A(x_i, y_i) = \frac{2p_r p_0(x_i, y_i)}{\rho c_0^2 (\rho g + r(\eta_r + \eta_0)^2)}$$

$$B(x_i, y_i) = \frac{p_0^2(x_i, y_i)}{\rho^3 c_0^3 g}$$

$$c = \frac{p_r^2}{\rho^3 c_0^3 g}$$

$Z(x_i, y_i; y)$ 是由三部分组成的。其中 B 和 C 分别是物体声束和参考声束引起的液面升高, $A(x_i, y_i)$ 为参考声束和物体声束相干涉引起的纹波振幅。由此可见两束超声波在液-气界面上形成的干涉图样(即全息图)是以液面高度变化的形式浮雕在液面上的。

当一束激光 $U_i = D_{\exp}[i(\eta_r y + \xi t^2)]$ 以入射角 θ_i 照射液面(如图1所示)时, U_i 的相位被 $Z(x_i, y_i; y)$ 所调制, 从而其反射光被衍射, 包含0级、+1级、-1级、+2级、-2级等等。通过计算可获得 +1级衍射光的强度分布为:

$$|V_{+1}|^2 = K p_0^2(x_i, y_i) = K' I_0(x_i, y_i) \quad (2)$$

式中 $I_0(x_i, y_i)$ 为物体超声束声强分布。这说明 +1级衍射光强度分布与声强分布成正比, 即声强分布和光强度分布一样能成象^[1]。

二、实验装置

在液面法超声全息中可以采用连续超声波, 也可以采用脉冲超声波, 采用脉冲超声波可使象的质量更高。我们采用的是脉冲超声波的聚焦液面超声全息。聚焦液面法, 即将物体的声象聚焦于液面并与参考束相干涉, 然后用激光进行再现, 从而获得清晰的重现象, 图2为装置示意图。

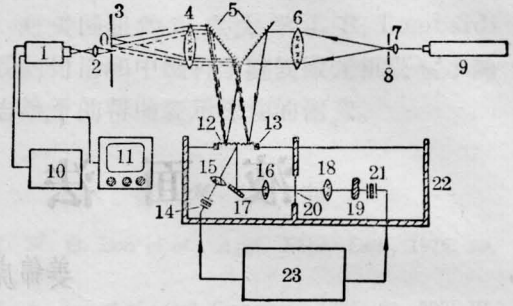


图2 聚焦液面声全息装置示意图

- 1—TV 摄像机; 2—成像透镜; 3—空间滤波器; 4—变换透镜; 5—光反射镜; 6—准直透镜; 7—显微镜物镜; 8—针孔滤波器; 9—激光器; 10—磁带录象机; 11—监视器; 12—液面; 13—小油槽; 14—参考束超声换能器; 15、16、18—液体声透镜; 17—声反射镜; 19—物体; 20—阻尼薄膜; 21—物束超声换能器; 22—全息水槽; 23—脉冲超声发射机

三、实验结果和应用

液面法超声全息在医疗显示和生物学研究方面可以对人体的四肢、肌肉、血管、骨骼、乳房和某些内脏器官, 如肾、胆囊进行显示^[3,4], 特别值得指出的是能检查肿瘤^[5](如乳房癌^[6]), 还能观察胎儿在母体内的生长情况。图3是由三张拼成的活鲫鱼象, 从照片上不仅能看到逼真的鲫鱼象, 且可以看到鱼体内的梳骨、鳔和肛门处的肠子等。图4是成人的手掌、手臂象, 从照片上不仅能清楚地看到指骨、掌骨、尺骨和挠骨, 且能看到 x -射线无法显示的一些软组织——肌肉等, 例如拇指内收肌、骨间肌等。如果我们在电视屏幕前进行动态实时观察, 则图象更为逼真, 且组织的各个层次清晰可辨。

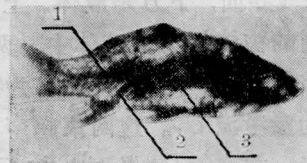


图3

- 1—梳骨; 2—肛门处的肠子; 3—鳔

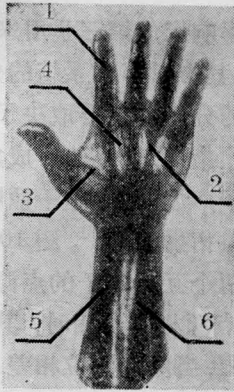
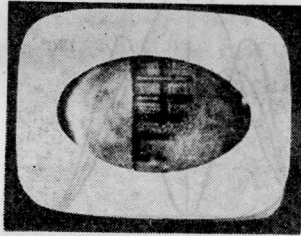
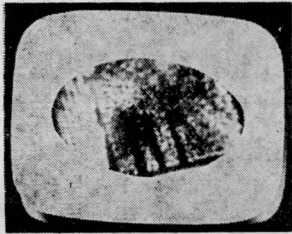


图 4

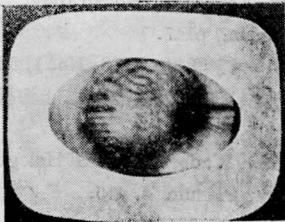
1—指骨；2—掌骨；3—拇指内收肌；
4—骨间肌；5—尺骨；6—桡骨



(a)



(b)



(c)

图 5 板状物体内部缺陷模拟试验

(a) 在不透明有机玻璃板侧面钻孔径为 1~3 毫米深孔的声学象 (b) 在 8 毫米厚胶木板侧面钻孔径为 1~3 毫米深孔的声学象 (c) 在厚 47 毫米的钢元侧面钻一个孔的声学象

这种成象技术用于工业无损检测，不受材料种类的限制，它不仅能检测材料表面伤痕，也能检测物体内部的各种缺陷（如空穴、砂眼和夹杂等）和分层结构的质量^[7]等等。为显示其探伤能力，我们做了以下几组模拟试验和实物试验。

1. 检测板状物体内部缺陷的模拟试验

我们对厚度从 2 毫米到 56 毫米不等的各种材料，如不透明的有机玻璃、塑料、粉末压制成型的胶木板、铝、铜和钢铁等材料进行了模拟试验，其内部缺陷清晰可辨（比 56 毫米更厚的材料没有试验）。图 5(a)、(b)、(c) 分别为对不透明有机玻璃板、胶木板和钢铁的内部模拟缺陷成的声学象。

2. 疲劳裂纹的检测

在燃气轮机叶片上有一条用肉眼仔细观察才能看到的疲劳裂纹，图 6 是其声学象。箭头所指的一条黑纹就是疲劳裂纹。此外，在叶片上还复盖了许多条纹，这些条纹是由于叶片弯曲和各处厚度不同而引起的超声波干涉条纹。如果在现场进行动态、实时观察，当微微转动叶片时，这些干涉条纹的形状和位置就发生变化，而裂纹象却仍在原处不动，从而裂纹象清晰可辨。

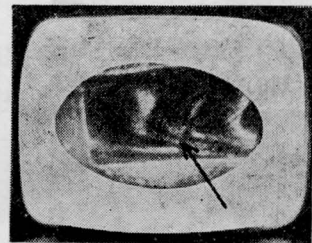


图 6 发动机叶片上裂纹的声学象

3. 材料粘结质量检测的模拟试验

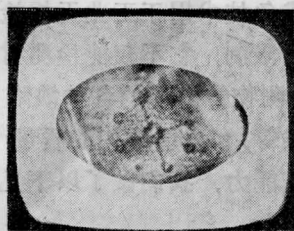
见图 7 照片。

4. 物体表面划痕试验

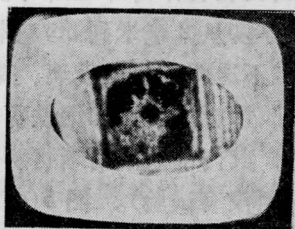
见图 8 照片。

5. 分辨率试验

在一块厚为 8 毫米透明有机玻璃板侧面钻了三组孔，最右面一组两孔内侧间距仅 0.47 毫米，图 9 为其声学象。可见，在我们的



(a)



(b)

图7 检测材料粘结质量的模拟试验

(a) 在不透明有机玻璃板上钻一系列凹坑, 用超声全息成的象, 作对比用。(b) 在同样材料上打一些类似的凹坑, 再用粘剂粘上一块方形不透明有机玻璃板, 有意识使一些地方未粘接到(照片上呈暗区处)



图8 在材料表面用钉子划的“AC”字样的声学象

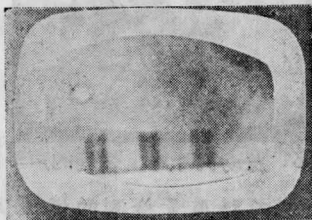


图9 分辨率试验

试验条件下, 装置能分辨的最小距离比 0.47 毫米还要小。

液面法超声全息成象装置的分辩率主要受三个因素限制。一是形成液面上物声象采用的声学系统的分辩率; 其次是物体声束和参考声束投射到液面上引起液面起伏时, 液

面的空间频率响应, 第三是用来再现的光学系统分辩率。其中以声学系统的分辩率最低, 也即该装置的分辩率主要取决于声学系统的分辩率。必须指出, 这儿的声成象系统, 使用的声波是相干声波, 对于相干照明, 分辩率有可能超越经典衍射极限^[8]。图 10 给出相距为瑞利间隔的两个互相相干的点源的象之强度分布。当两点源相位同相时, 其分辩率劣于经典衍射极限, 当两点源位相差 90° 时, 与经典衍射极限相同, 当两点反相(180°)时, 则超越经典衍射极限。

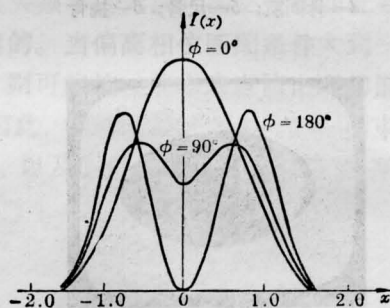


图 10 相距为瑞利间隔的两个互相相干的点源的象的强度分布

我们的工作曾得到上海细胞生物学研究所全息组谢世栋、吴直江、丁秀兰等同志的帮助, 在此谨表谢意。

参 考 文 献

- [1] B. P. Hildebrand, B. B. Brenden; An Introduction to Acoustical Holography, 1972, New York, Plenum, p147.
- [2] 周静华等; 《声学学报》, 1978, No. 1, 52.
- [3] 《国外超声全息技术及其应用》, 上海科学情报研究所.
- [4] Ed. by Glen Wade; Acoustical Holography, 1972, New York, Plenum, 4, 415.
- [5] Ed. by Glen Wade; Acoustical Holography, 1972, New York, Plenum, 4, 510.
- [6] 中科院上海细胞生物学研究所; 《超声全息在医学诊断上的应用》, (内部资料), 1978年5月.
- [7] Ed. by A. F. Metherell; Acoustical Holography, 1971, New York, Plenum, 3, 159.
- [8] J. W. Goodman; 《傅里叶光学导论》, 中译本, p. 152.