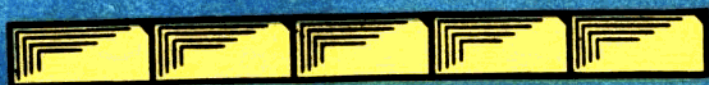


气动实验
非接触测量会议
文选

第三分册



目 录

高速全息照相装置探讨	浙江大学光仪系激光全息组 (1)
GGS-1 高速鼓轮摄影机	哈工大 李润顺 韩心志 (14)
补偿式高速摄影机设计及其应用	中国科学院西安光机所 姚文学 (22)
重复曝光式高速照相技术	七机部七〇一所 李桂春 (32)
激波管风洞中模型自由飞测力技术	中国科学院力学所 唐宗衡 马家驷 郭燕平 张小平 (38)
风洞自由飞试验的高速摄影	七机部七〇一所 李桂春 孙汉阳 (53)
我院闪光 X 射线机测试技术的发展	二机部九〇一所 刘锡三 (60)
氩闪光灯及改进设想	89955 部队 王叶青 (73)
组脉冲频闪光灯	七机部七〇一所
	张昭文 何政绵 倪刚 张贵银 刘文元 (79)
离焦模糊图象处理	中国科学院物理所模糊图象处理组 (83)
ZZF-5310 电涡流型非接触振幅位移测量仪	三机部 608 所 王寿华 (91)
风洞窗玻璃对摄影象质量及位移测量精度的影响	哈工大 韩心志 (101)
1* 自由飞弹道靶气动力测量系统	89955 部队 503 室 气动力测量课题组 (113)
气动流场的光学测量	上海光机所 王润文 谭慈爱 何国珍 (119)
流场显示技术在流体力学中的应用和展望	中国科学院力学研究所 束继祖 李华煜 (125)
流场显示中的夹层全息术	中国科技大学近代力学系高速空气动力学专业 (137)
夹层全息技术的分析及原理性试验	中国科学院力学研究所 李华煜 狄建华 (144)
激波风洞流场显示	89955 部队二室光学组 (152)
用于风洞试验研究的全息照相试验装置	89956 部队 吴兴源 (158)
利用红宝石激光器进行高速叶片多幅全息摄影	中国科学院西安光机所全息组 王国志 (164)
一般纹影仪改为彩色纹影仪	89952 部队 张惠庆 (172)
图像讯息的数字处理与自动识别	王绍霖 (176)
多脉冲 Q 开关红宝石全息光源及其摄影	天津大学精仪系激光教研室 任国权 邢岐荣 武瑞成 叶志声 宁喜发 (185)
全息术在风洞试验中的应用概况——国外情况综述	三机部 628 所 高桂林 (192)
一种新型的彩色全息术	中国科学院物理研究所 陈岩松 王玉堂 董碧珍 (200)

高速全息照相装置探讨

浙江大学光仪系激光全息组

摘 要

本文简述高速全息照相系统发展概况。对其光源, 光束偏转器和记录系统等主要部分的某些问题作了探讨, 并提供了初步模拟实验报告。

一、发展概要

随着全息术的发展, 出现全息电影摄影、高速全息摄影和超高速全息摄影技术, 以实行对瞬态快速事件和破坏性试验的记录。和一般高速摄影技术相比, 它具有不受亮背景(如伴随爆炸击穿, 电离等出现的亮背景)的限制, 场景深、立体感强, 存储量大, 而且可以作干涉比较测量等优点。

较早出现的高速全息摄影装置是转镜式系统^[1](图1), 其分幅速率为每秒5万至20万幅。每幅曝光时间(即单脉冲宽度)为50毫微秒或更少。物光束透过景物由 M_0 反

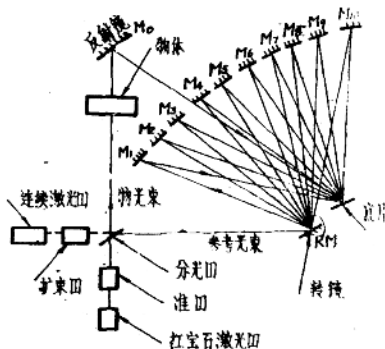


图1 用于单次曝光全息术的典型转镜式全息摄影机

射到全息干板上, 而参考光束被转镜 RM (转速达每分钟30万转)反射到 M_1 至 M_{10} , 将十幅全息图记录在一张干板上。这种装置由于偏转定位不准而没有双次曝光的能力。为此, 采用空间多重扫描的方法, 其装置示于图2^[2, 3], 分幅速率为每秒2万幅, 可得8张双次曝光全息图。红宝石激光器发出一序列脉冲, 放在全息干板前面开有对称小孔的圆盘高速旋转, 使得每个脉冲在干板的不同区域上曝光。但是分幅速率严重地受到圆盘

机械转速的限制^[4]。为克服这种缺点,目前出现两种非机械偏转的高速全息摄影系统。其一是用多重腔激光器的全息系统,如图3所示^[5,6]。分幅速率为每秒50万至20万

图2 采用空间多重扫描的全息装置

图3 生产时序列脉冲的多重腔激光器的高速全息系统

至于超高速全息摄影系统, 往往用腔外光电子开关削波技术产生毫微秒级相干巨脉冲, 或用锁模技术产生微微秒级相干光脉冲。据报道前者以光学延迟器分离出若干序列脉冲进行全息照相, 装置如图 6 所示^[12], 已用于等离子体显示实验,

本文仅就高速全息系统的三个主要组成部分——光源，光束偏转器，记录系统中的一些问题作粗浅的分析和探讨。

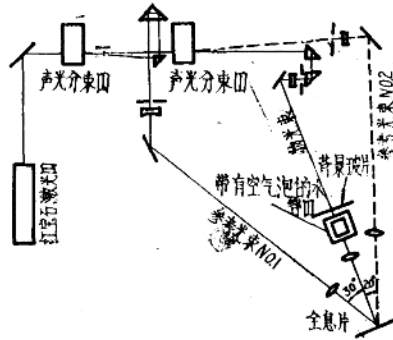


图4 为记录双脉冲全息图使用声光分束器的全息摄影装置

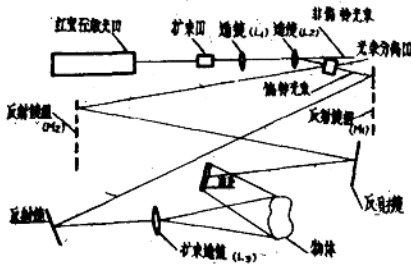


图5 用于全息干涉测量的高速全息摄影系统简图

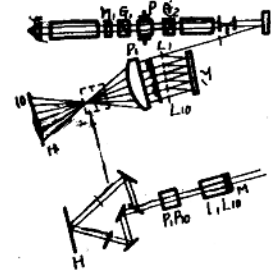


图6 利用光学延迟器分离若干序列脉冲的全息摄影机简图

二、相干序列脉冲激光器

能产生相干序列巨脉冲的分离脉冲型激光器结构简单，常用于脉冲全息照相。其动力学问题资料[13]已有介绍。资料[9]中对克服氘闸流管的电离——消电离的迟滞现象，为缩小序列脉冲频率间隔作了某些改善，此处主要讨论光束质量问题。

众所周知，用于全息照相的红宝石激光器，要求其光束质量如下：

- (1) 有足够好的时间相干性和空间相干性；
- (2) 在双脉冲曝光之间防止模式跳变从而保持高的频率稳定性；
- (3) 相当强的脉冲能量；
- (4) 对环境温度有必要的补偿措施。

对一般的调Q脉冲而言，影响相干长度的最大因素是纵模限制问题。常常采用F—P平板选模器和可饱和染料Q开关选择纵模。可饱和染料Q开关的漂白过程是取决于光子流密度的被动型Q开关，从而它不适用于同步精度要求高的场合。为此，可采用电光Q开关和染料Q开关相结合的方法^[15]，同步精度由电光Q开关决定，而染料池却保

证有良好的选模效果。

腔内单独 $F-P$ 平板选模器的最大透过率光谱间隔为:

$$\Delta v_m = \frac{C}{2nL_{F-P} \cos \theta}$$

其中 L_{F-P} 是平板厚度, n 是平板折射率, θ 为入射角。

F—P 平板的选模能力由锐度决定:

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - \sqrt{R}}$$

其中 R 为单面反射率。

一般总是使 L_{F-P} 决定的 $\Delta\nu_m$ 接近自由振荡线宽, 而 R 高至足以分辨出相邻纵模的损耗程度。单块 $F-P$ 平板是简单的, 但往往难以实现精确的温度补偿, 同时高的反射系数, 镀层的吸收, 散布等损耗, 将使腔耗增加。

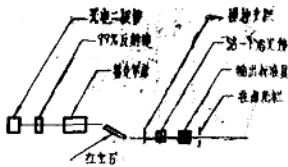


图 7 (a) 红宝石激光器调整装置

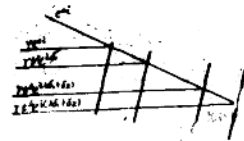


图 7.(b) 四界面谐振
反射器⁷⁴

图 7 (a) 展示着利用三界或四界面谐振反射器和组合 $F-P$ 腔内选模器相结合的系统, 它能够完善地达到预定的要求。图 7 (b) 展示了三界、四界面的几个重要的反射波。

四界面谐振反射器由两块厚度差小于 $\lambda/8$ 的 $F-P$ 平板组成, 其平行度差也需小于 $\lambda/8$, 中间是空气间隔。而三界面只是上述一块板向外的一个表面上, 涂上减反膜即成。在弱耦合 (即每个面反射率很低) 的情况下, 可以不考虑其他派生反射波的耦合, 此时, 根据图 7 (b) 对于四界面谐振反射器有:

$$r_1 = r[1 + t^2 e^{i\delta_1} + t^4 e^{i(\delta_1 + \delta_2)} + t^8 e^{i(2\delta_1 + \delta_2)}] \quad (1)$$

式中: r —每个面的振幅反射率; t —每个面的振幅透射率; r_1 —组合振幅反射率; δ_1 —二块光学厚度严格相等的 $F-P$ 平板各自的相位因子; $\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} 2nL_{F-P}$; $\delta_2 =$

空气间隔的相位因子, $\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda}2d$; 根据可得四界面谐振反射器的组合反射率 R_1 :

$$R_i = r_i \cdot r_i = R \{ 1 + 2\cos\delta_1 + t^2 [1 + 2\cos(\delta_1 + \delta_2)] + \\ + 2T^3 [\cos\delta_2 + \cos(2\delta_1 + \delta_2)] + T^4 [1 + 2\cos(\delta_1 + \delta_2) + \\ + 2T^5 \cos\delta_1 + T^6 \} \quad (2)$$

其中 $R = r^2$ —每个面的(光强)反射率, $T = t^2$ —每个面的透过率, R_1 —组合反射率;

值得强调的是该式只适合于弱耦合的场合；对单面反射率稍大的系统，其峰值和极小值将有某些修正，但是峰值位置，频率特性曲线的轮廓仍保持基本不变，这个轮廓分成细结构和粗结构，当间隔 d 远大于平板厚度 L_{F-P} 时，精细结构的反射率峰值间隔由下式决定：

$$\Delta\nu_f = \frac{c}{2(d + nL_{F-P})}$$

而粗周期的频率间隔近似有：

$$\Delta\nu_g = \frac{c}{2nL_{F-P}}$$

这样，薄的 $F-P$ 平板将粗结构拉开，而长的间隔距离使细结构有较大的锐度，从而达到选择纵模的要求。

对于四界面谐振反射器，只要间隔 d 有微小的变化，就能使反射率进行频率扫描，这种频率扫描对温度补偿是必需的。图 8 (a) 示出当 d 改变 $\pm \lambda/4$ 时，主反射峰的极大值进行了一个周期的扫描。

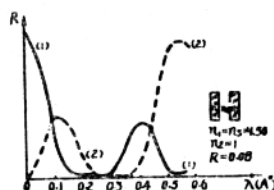


图 8 (a) 当间隔 d 改变 $1/4 \lambda$ 时，频率曲线从(1)线扫描到(2)线

这种灵敏的频率扫描，反过来要求在两次曝光之间 $F-P$ 平板组的结构参数保持严格等同。例如间隔长为 25 毫米，用线胀系数 $\alpha = 3 \times 10^{-6}$ / 度的陶瓷环做隔圈，若环境温度改变 0.1°C ，则间隔 d 将改变 $\Delta d = \alpha \cdot d \cdot \Delta T = 75 \text{ \AA}$ ，这样就会使得主反射峰发生显著的漂移而造成模式跳变。为此，往往将谐振反射器放入温度可调的恒温槽中，其恒温性达 0.01°C 以上。此外，减少陶瓷压圈长度 d ，也将有利于降低对恒温条件的严格要求。

我们设计了一组共振谐振反射器，结构如图 9 所示， $F-P$ 平板用表面镀膜

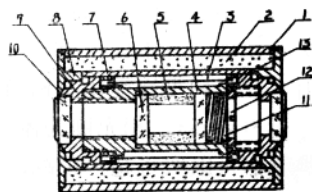


图 9 一组共振腔反射器结构

1. 外套 2. 硅橡胶 3. 电热丝 4. 内套筒(I)
5. 压电陶瓷 6. 平晶 7. 陶瓷片 8. 端盖 9. 镜框
10. 密封窗 11. 压簧 12. 压圈 13. 内套筒(II)

($R = 8\%$) 的熔融石英平板构成 (理想的应以零度定向的引上法生长的兰宝石材料), 石英板厚 3 毫米, 中间陶瓷隔圈为 2.5 毫米, 其反射特性曲线如图 8 (b) 所示, 当标准具温度改变 23°C 时, 能作全光谱扫描。标准具恒温要求达 0.01°C 。

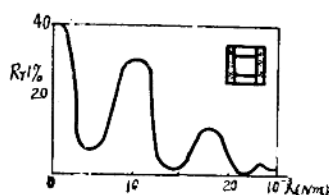


图 8 (b) 谐振反射器的总反射率 R_T 依赖于波长峰值的变化

要求两块 $F-P$ 平板严格等同, 是实现四界面选模器的困难所在, 为此可选用三界面对称谐振反射器, 由类似的计算, 可得其组合反射率 R_i 为:

$$R_i = R \{ 1 + 2T \cos \delta_1 + T^2 [1 + 2 \cos (\delta_1 + \delta_2) + 2T^2 \cos \delta_2 + T^4] \} \quad (3)$$

理论分析表明, 用兰宝石 ($n = 1.78$) 作三界面对称谐振反射器, 主反射峰在 50% 左右, 最有利于作红宝石激光器的输出反射器。此时, 在主反射峰峰值附近的邻近纵模, 反射率仅比处于峰值上的纵模低 2% 左右, 这表明欲获得单纵模输出, 泵浦必需在略高阈值的水平上抽运, 这对获得稳定的单模输出是不可靠的, 如果配以四界面的腔内选模器将会有显著的改善。但振荡级单脉冲能量仅达 10—20 毫焦耳左右, 必须通过放大级才能实现脉冲能量的指标。为了使两次曝光之间, 两个光频保持相对的稳定, 聚光腔需全腔水冷, 为防止工作物质表面由于冷却而结雾, 水冷温度应在露点以上。

三、光束偏转器

光束偏转器的作用是将光束高速偏转定位, 以实行高速全息摄影。众所周知, 机械偏转 (转镜等) 的缺点是偏转速度低、光点位置难于精确定位、不能用于双次曝光。电光偏转器则因其结构复杂, 或偏转角小等原因尚未获得广泛的应用。目前在高速全息摄影领域中采用声光偏转器作为实际使用已有不少报导 [9, 10, 11]。

声阵面传过声光介质使折射率产生周期性变化而相当于一个相光栅, 在光所穿过的声阵面足够多的情况下 (介质宽而声频高), 相光栅为体光栅, 激光束通过该体光栅将发生布拉格衍射, 采用相位阵列换能器可以实行超声跟踪, 即在不同的声频下光束与声阵面的夹角始终保持在布拉格角附近。这就是声光偏转的简单原理 [11, 16]。

声光偏转用于高速分幅全息摄影的主要优点是:

(1) 声光偏转完全由电讯号控制, 激光束空间定位及其和 Q 开关的同步方法没有转镜那样复杂, 由于输入到声光偏转器的电信号能准确而迅速地重复, 因而可实现双次

曝光记录。

(2) 结构简单, 驱动电源也不复杂, 分幅速率高。

关于声光偏转器的设计, 可见资料[16], 这里仅对应用水声偏转实现高速分幅记录中碰到多普勒频移的影响和实现双次曝光记录对超声频率的重复精度要求等问题作一简略讨论。

(1) 多普勒频率漂移的影响。由于声光偏转的衍射效率 η (1 级衍射光强度和零级衍射光强度之比) 决定于声光介质的性能和电源功率, 达到 70% 已是较佳的工作状态, 这就表明至少还有 30% 的光能尚集中于零级光, 如果能利用零级光为物光束, 以 1 级光为参考光束, 这样就充分利用了声光偏转器出来的全部光能。但是 1 级光由于声频调制会发生多普勒频率漂移, 于是物光束和参考光束之间将出现差频, 会使记录在全息图上的干涉图样明暗随时间周期性的变化, 导致条纹对比下降, 衍射效率降低, 资料[10]曾推得对比 K 和声周期 T_s 的关系为:

$$K = \frac{2a(r)}{1 + a(r)} \exp\left[\left(-\frac{\pi T}{T_s}\right)^2\right]$$

此处 $a(r)$ 是物光束在底片上的振幅因子, $2T$ 为激光脉冲宽度即曝光时间。由式见, 反差随激光脉冲宽度 $2T$ 与声周期 T_s 之比的上升而下降。设 $a(r) = 1$, 反差和 $2T/T_s$ 的关系如图 10 所示。

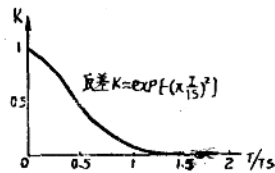


图10 应用分束器时全息图上反差作为激光脉冲宽度 $2T$ 对声周期 T_s 之比的函数

若认为对比下降 1/2 是允许的话, 由图 10 可见, 这时 $2T \approx T_s/2$, 所以应选择激光脉冲和声周期之关系满足 $2T \leq T_s/2$ 。我们设计的红宝石激光器序列脉冲宽度约为 20 毫微秒, 为此要求 $T_s \geq 40$ 毫微秒, 从而超声频率应满足 ≤ 25 兆赫。选取声传播速度为 1500 米/秒的水作声光介质是合宜的。若用钽酸铅及熔融石英等声光介质, 可以推知由于所需之声频很高, 不能用零级光作为物光束了。当然以 1 级光同时为物光束和参考光束, 两者都是极为适宜的声光介质。

(2) 超声频率的重复精度要求。实现高速全息摄影中的双次曝光记录必须使两次曝光的参考光束严格精确定位, 否则因参考光束错位会在再现的物象上引进假条纹, 严重时甚至为双象。为此, 必须首先对双次曝光时声频的允许变化量 Δf 作出估计, 可推知^[附录]物体上由此引进的条纹间隔 Δz 为:

$$\Delta z = \frac{\lambda}{\Delta \alpha_R \cos \alpha_R}$$

此处 λ 为光的波长, α_R 为参考光束的入射角, 也是再现时照明光束的入射角, $\Delta\alpha_R$ 为参考光束入射角的变化量。它是在双曝光中由声频变化量 Δf 所引起的。

由偏转原理知: 偏转角 $\alpha_R = \frac{\lambda}{V_s} f_0$ 。

V_s —声光介质中声传播速度, f —输入声频, λ 为记录时和再现时的光波波长。于是有 $\Delta\alpha_R = \frac{\lambda}{V_s} \Delta f$ 。代入 Δz 式得 $\Delta f = \frac{V_s}{\Delta z \cos \alpha_R}$ 。欲使在再现的物体像上没有假条纹, 则要求条纹间距 $\Delta z \geq$ 物体的大小, 这时频率重复的相对误差应满足下式:

$$\frac{\Delta f}{f} \leq \frac{V_s}{\Delta z \cdot f \cdot \cos \alpha_R}$$

对于 $\Delta z = 300$ 毫米, $V_s = 1500$ 米/秒, $f = f_{max} = 25 \times 10^6$ Hz, $\alpha_R = \alpha_{Rmin} = 10^\circ$ 的场合中, 则 $\Delta f/f = 2 \times 10^{-4}$, 就是说, 超声对中心声频为 20 兆赫的水声器件其频率的重复精度要求在 2×10^{-4} 以上, 而对中心频率在 80 兆赫的钼酸铅器件且要求 $\Delta f < 1 \times 10^{-4}$ 。

四、记录系统

资料[9]介绍在布满物光束的平板上, 用参考光束孔径扫描的方式实行分幅记录, 资料[3]则介绍用与脉冲时间同步、开有一定孔径的旋转圆盘实行分幅记录, 这两种方式都因为把全息干板分成画幅数 N 等分而减小衍射孔径, 分辨率降低。前者由于物光束在 N 次曝光中始终布满整个干板增加背景噪音, 从而降低衍射效率; 后者分幅速率严重地受旋转圆盘速度的限制。我们对于分幅的设想是基于干板乳胶的厚层特性, 改变参考光束的入射角, 在一张干板上进行多次重复曝光实行分幅记录。这样显然因增加了全息图孔径而提高分辨率, 并且有相当高的分幅速率。下面我们讨论重复曝光画幅数如何确定。

(1) 从体积全息图对方向的灵敏度来看。大家知道, 体积全息图的衍射满足布拉格条件, 并存在一个有限大小的方向范围 $\Delta\theta_c$, 史密西曾以两平面波作记录导出 [18]:

$$\Delta\theta_c = \frac{\lambda}{t} \cdot \frac{\cos \alpha_0}{\sin \alpha_R \cos \alpha_0 - \sin \alpha_0 \cos \alpha_R}$$

式中, $\Delta\theta_c$ 为再现光束的方向范围, α_0 , α_R 分别为物光束和参考光束与干板法线的夹角, λ 为再现光波波长 (与记录波长同), t 为干板乳胶的厚度。 λ 和角度参量均为在记录介质内的数值。图 11 表示 $\Delta\theta_c$ 和 α_R 在不同的 λ/t 值下的关系曲线, 曲线表示在某一 λ/t 值下, 参考光束和物光束的夹角 α_R 一定时 ($\alpha_0 = 0$) 可以求得使象消隐的再现光束角度变量 $\Delta\theta_c$ 值。由式见, $\Delta\theta_c$ 随 α_R 的增大而减小, 如: 记录介质 $\gamma = 1.5$, $\lambda = \lambda_{\text{空气}}/\gamma$, $t = 0.02$ 毫米时, 若 $\alpha_R = 30^\circ$, 则 $\Delta\theta_{c\text{空气}} = 6^\circ$, 若 $\alpha_R = 60^\circ$, 则 $\Delta\theta_{c\text{空气}} = 3.5^\circ$, 我们可按 $\Delta\theta_c$ 值和参考光束总的偏转范围求出可能的画幅数。

实际上,物光束包含丰富的空间频率,全息图往往还表现为平面型的性质,实验发现一次再现往往同时出现几幅图象。所以为得到独立再现的目的,需对体积型、平面型全息图综合考虑确定分幅数。

(2) 从全息干板记录的条纹调制度下降的角度看。设物光束为 $oe^{i\varphi_i}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) 表示各次曝光物光束仅有位相变化,参考光束为 $Re^{i\varphi_R}$ 表示各次曝光参考光束恒定,因而单位时间的曝光量为(记录重复 N 次):

$$\begin{aligned} E &= |oe^{i\varphi_1} + Re^{i\varphi_R}|^2 + |oe^{i\varphi_2} \\ &\quad + Re^{i\varphi_R}|^2 + \dots + \\ &\quad |oe^{i\varphi_N} + Re^{i\varphi_R}|^2 \\ &= N(o^2 + R^2) + \\ &\quad + \sum_{i=1}^N 2oR \cos(\varphi_i + \varphi_R) \end{aligned}$$

由式可得再现某一分量的调制度为:

$$M = \frac{2oR}{N(o^2 + R^2)}$$

同理可推知单次曝光的调制度为:

$$M_s = \frac{oR}{o^2 + R^2}$$

比较上两式可知,作 N 次重复记录,调制度下降到单项记录的 $1/N$,假定平板各次曝光在 $D - \lg E$ 曲线的线性段上,一般全息图的衍射光通量应与调制度的平方成比例,这就使衍射效率降低到 $1/N^2$,由此会严重地限制重复曝光记录方式的画幅数。但这种估计和实际偏离很大,因为这样的讨论没有仔细推敲照相乳胶的非线性效应、斑纹噪声的严重影响等等因素。

另外,记录光路的设计,必须考虑全息图各衍射分量分离的物光束和参考光束所允许的最小夹角 θ_{min} , J.W. 顾德门指出^[17]为分离全息图各衍射分量,参考偏离束角 θ 应有一个最小值 θ_{min} ^[17]

$$\theta_{min} = \sin^{-1} 3B\lambda$$

B 为物光束所具有之最高空间频率,当参考波比物波强得多时,则可认为:

$$\theta_{min} = \sin^{-1} B\lambda$$

例如,我们欲记录空间频率 $B = 100$ 的物体,取记录光为红宝石激光,则 $\theta_{min} \approx 12^\circ$, 当参考束比物光束强得多时,则 $\theta_{min} \approx 4^\circ$

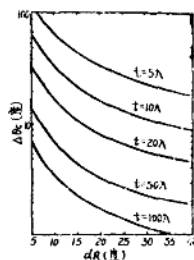


图11 使衍射光波消失所需之照明光波方向改变与参考波入射角 α_R 的关系

五、原理性实验说明

原理性实验的目的:

- (1) 验证一干板上重复曝光记录多张全息图的可能性;
- (2) 全息图各衍射分量分离时, 物光束和参考光束最小夹角的确定;
- (3) 独立再现原始象的参考光束夹角的确定。

实验用 $He-Ne$ 激光器为光源, 实验光路如图 12 所示, 激光束经分束器 M_1 成物光束 O 和参考光束 R , 物光束 O 经 24 倍望远镜 L_1, L_2 放大为 $\phi 36$ 准直光束、经 M_2, M_3 ,

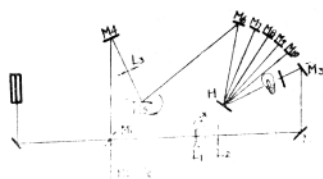


图12 模拟实验光路图

照明灯泡, 灯泡放在 $\phi 32$ 的圆筒之中, 光束穿经圆筒到达干板, 灯泡前放置散射板。参考光束 R 经反射镜 M_4 、负透镜 L_3 成为发散光束在 M_5 反射, 由 M_5 转动分别到 M_6 至 M_7 , 再反射到干板作重复曝光记录。对每一幅全息图, 灯泡亮或不亮时各曝光一次, 作双次曝光记录, 用天津胶卷厂 1978 年产品全息 I 型。



图13 再现全息照片之一
(由一束照明光再现的三个分立原始象)

图 13 是用 $D-F$ 照相机一次拍摄的全息图再现象片, 一束照明光同时再现出三个分立的原始象。图 14 是转动 $D-F$ 照相机角度分次拍摄一张全息图各再现一原始象的



图14 再现全息照片之二
(分次拍摄一张全息图再现五幅原始象照片)

照片。

图 14 由一束照明光再现的五个分立原始象。

由这两组照片得出结论:

(1) 重复记录三幅和五幅的双次曝光全息图再现象条纹清晰, 对比度尚佳, 说明在一张干板上记录五张双次曝光全息图可行;

(2) 一般由式 $\theta_{min} = \sin^{-1} 3BA$ 确定之最小参考光束偏离角可以达到重现象各衍射分开分离的目的;

(8) 一束照明光同时再现出多幅原始象, 欲使象消隐的转角很大, 说明干板乳胶不厚, 应以平面全息图一起来考虑分幅摄影中参考光束 $\Delta\alpha_R$ 的取值。

实验发现, 每次曝光时间递增, 可以改善再现物体上的条纹对比度, 实际上这也就是曝光量递增, 所以和前面讨论的多幅记录全息图调制度随曝光次数增多而减小似乎矛盾, 我们感到尚需进一步研究干板特性, 并推求全息图各衍射分量与调制度的关系。

〔附录〕史密西曾建立全息学基本方程, 推得再现物波的原始项为:

$$C_0 O_0 R_0 e^{i(\varphi_c + \varphi_0 - \varphi_R)} \quad [18]$$

设 $C_0 e^{i\varphi_c}$, $O_0 e^{i\varphi_0}$, $R_0 e^{i\varphi_R}$ 分别表示照明光波, 物光波和参考光波。建立坐标系如图

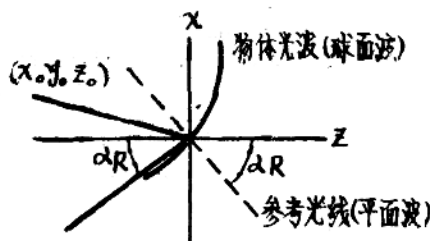


图15. 建立坐标系

15, 简单假设全息图位于 xoy 平面, 物波坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 参考波为平面波、它的波矢在 xoz 平面内传播, 并与三轴夹角为 α_R , 再现光波也为平面波, 它的波矢也在 xoz 平面内, 并与 z 轴夹角为 α_c , 于是有:

$$\begin{cases} \varphi_0(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{1}{2z_0} (x^2 + y^2 - 2xx_0 - 2yy_0) \right] \\ \varphi_R = \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \alpha_R \\ \varphi_c = \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \alpha_c \quad (\text{此处略去高次项}) \end{cases}$$

得:

$$\begin{aligned} \Phi_p^{(1)} &= \varphi_0 - \varphi_R + \varphi_c \\ &= \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{x^2 + y^2}{z_0} - 2x \left(\frac{x_0}{z_0} \sin \alpha_R + \sin \alpha_c \right) - 2y \frac{y_0}{z_0} \right] \end{aligned}$$

式 $\Phi_p^{(1)}$ 表示再现光波原始项在全息图上 (x, y) 点的相位, 可以看作是再现的球面波的一级项, 记为:

$$\Phi_p^{(1)} = \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2 + y^2}{Z_p} - 2x \frac{X_p}{Z_p} - 2y \frac{Y_p}{Z_p} \right)$$

这里 Z_P 是球面波的半径、 X_P 、 Y_P 是球面波中心坐标, 则有:

$$Z_P = z_0$$

$$X_P = x_0 - z_0 \sin \alpha_R + z_0 \sin \alpha_C$$

$$Y_P = y_0$$

若双次曝光记录时第一次曝光时的参考波相位 $\varphi_{R(1)} = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \alpha_R$, 由频率差 Δf 产生偏转角误差, 而使第二次曝光的参考波相位项为:

$$\varphi_{R(2)} = \frac{2\pi}{\lambda} x \sin(\alpha_R + \Delta \alpha_R)$$

总可以选择再现波使得和第一次曝光的参考光波全同, 则双次曝光记录的全息图将再现出两组物体光波:

第一组为:

$$\begin{cases} Z_P = z_0 \\ X_P = x_0 \\ Y_P = y_0 \end{cases} \quad \text{与原始物波全同}$$

第二组为:

$$\begin{cases} Z_P = z_0 \\ X_P = x_0 + z_0 \cos \alpha_R \cdot \Delta \alpha_R \quad (\Delta \alpha \ll \Delta \alpha_R) \\ Y_P = y_0 \end{cases}$$

可见物点有一错位, 将使物波之间产生干涉形成条纹, 其程差满足 $m\lambda$ 者为亮条纹, 即

$$\Delta = z_0 \Delta \alpha_R \cos \alpha_R = m\lambda \quad \text{为亮条纹}$$

所以

$$z_0 = \frac{m\lambda}{\Delta \alpha_R \cos \alpha_R}$$

可见物体坐标只要满足此或者为亮条纹, 条纹间隔则为:

$$\Delta z_0 = \frac{\lambda}{\Delta \alpha_R \cos \alpha_R}$$

参 参 文 献

- [1] Lowe, M. A., 9th International Congress on High Speed Photography.
- [2] W. Loutrbom and K. J Ebeling, Appl. Phys. Lett., 663, Vol. 31, No. 10, 1977.
- [3] K. J. Ebeling and W. Lanterbom, Opt. Commun., 21, 67, 1977.
- [4] R. V. Van Ligten and H. Osterberg, Nature. 211, 1966, 282.
- [5] M. J. Landrg and A. E. Mccarthy, Optical Engineering, Vol. 14, No. 1, 1975, P. 71.

- [6] M. J. Landrg, Appl. Phys. Lett. , Vol. 18, 1971, P. 494-496.
- [7] Laser Focus, 1974.
- [8] 激光与红外, 1974, 第1期, 第10~14页.
- [9] R. L. Battiste, W. F. Ranson, W. F. . Sminson, AD-A011394, 1975.
- [10] K. Hinsoh and F. Badek, Optics Commun; Cations, Vol. 2, No. 1, 1974
- [11] 利用声光偏转的高速摄影和全息摄影术-第九届高速摄影会议录.
- [12] M. Novaro, Laser, Nr4, 35-38. 1971.
- [13] 天津大学激光专业: 78年激光在电子工业上应用会议报告。
- [14] L. O. Siebert, Appl. Opt. , 10632, 1971.
- [15] M. Yorng 等, Appl. Opt. , Vol. 13, No. 11, 2486, 1974.
- [16] 北京工业大学学报第1期, 第1—10页, 1976.
- [17] Godman, 富里叶光学导论, 第241—243页.
- [18] M. Smith, 全息学原理, 第245—254、42. 44—46、77—82页.

GGG-1 高速鼓轮摄影机

哈工大 李润顺 韩心志

摘 要

GGG-1 高速鼓轮摄影机是在国外一般鼓轮相机基础上研制的一种新型高速摄影机。它增添了许多附件和电器控制显示系统,使它具有性能高、用途广,使用方便可靠等优点。本文着重介绍了该摄影机的特点、光学系统原理、电器控制系统功能、最后分析了在风洞试验方面影响测量精度的因素,供使用单位判读时参考。

一、GGG-1 高速鼓轮摄影机性能和特点

鼓轮摄影机具有拍摄频率较高,记录胶片不长,结构简单等优点,因而它特别适用于高速现象、持续时间短、要求判读底片不长的场合,例如风洞自由飞试验中,它是必不可少的测试设备。但是我国至今还未有这种摄影机。我们从 1978 年初开始研制这种高速鼓轮摄影机。

鼓轮摄影机的原理和结构是比较简单的。考虑到使用单位要求一机多用,操作方便准确可靠,我们在光学系统、机械结构,电器控制系统等方面作了很多改进,使其性能和用途超过了一般的鼓轮式高速摄影机。其主要特点如下:

1. 它具有为风洞试验所需要的多种用途,因而使该摄影机在风洞试验中具有特别的使用价值。

我们在主机的基础上增加了相应的附件扩大其用途:

- 1) 主机可进行平面分幅 35 毫米底片摄影;
- 2) 加立体附件后可立体摄影;
- 3) 加扫描附件后可对垂直方向变化的高速现象作扫描摄影;
- 4) 加纹影镜头后可进行纹影摄影;
- 5) 更换鼓轮后可进行 70 毫米底片摄影。

2. 它具有便于不同实验室使用的光学机械装置,因而扩大了它的应用范围。

1) 它有适于宽、窄片的,焦距分别为 50、150、300 毫米的可更换的物镜组,供使用者选用;

2) 它有置于胶片前的取景调焦装置,可以在底片装好后进行取景调焦;

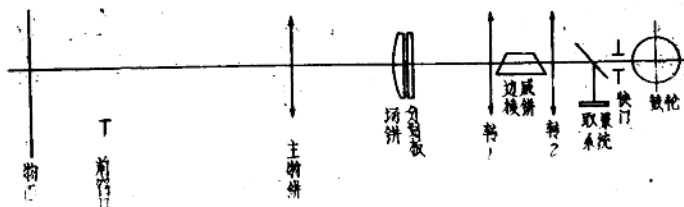
3) 它有可更换的带各有种标记的分划板供使用者选用,以利于判读;

3. 它具有保证摄影过程与风洞试验同步的自动控制显示系统, 使摄影机可靠性和功能大为提高。

- 3) 它有与风洞试验同步工作的时标系统从而在底片上可以得到空间-时间信息, 为定量计算速度、加速度等提供了原始数据;

- 从上述可见, GGS-1 高速鼓轮摄影机是一种新型的、性能高, 用途广, 通用性强、操作可靠的鼓轮式摄影机。它的鼓轮直径是 500 毫米, 最高线速度是 75 米/秒, 这在国内还是第一次尝试。它在使用时必须与高强度脉冲光源配合, 闪光灯曝光时间应在 1 微秒之内, 因而可不用光学象移补偿器, 使其结构很简单。

GG5-1 光学系统设计时主要考虑保证底片判读精度和使该相机有多种用途(如分幅、扫描、主体摄影)采用了如下的光学系统:



主物镜的作用是将模型成象在位于其象面处的分划板上。分划板上刻有标记。经转象系统使模型象和分划板上的标记同时成象在底片上, 见图 2。

转象系统是由结构完全对称的两个镜组组成,这是为了加扫描附件道威棱镜所需要的。为了满足分幅摄影底片判读精度,鼓轮轴取水平轴,胶片是在铅垂面内旋转。当对铅垂方向变化的现象扫描摄影时,其象运动方向和胶片运动方向一致,不符合扫描摄影时物象运动方向应和胶片运动方向垂直的要求,这就要求把象的运动方向改变 90° 。道