

具有高清晰度三维图像的模压全息图 母版制作技术

张向苏 刘 守

(厦门大学物理系 厦门 361005)

提要 从理论上分析了在模压三维全息图母版的记录光路中,为消除或减小像散和像场弯曲以及扩展照明光源产生的像模糊所应采取的参数设置。试验结果表明用此方法制作的模压三维全息图即使在漫射照明光下亦能呈现出清晰、明亮的图像。

关键词 模压全息图,三维全息图像,图像清晰度

1 引言

自1962年离轴全息术^[1]发明以来,已发展了多种全息图摄制技术。在各种不同类型的全息图中,唯有模压全息图被成功地在商业上应用并获得经济效益。模压全息图的主要作用是产品的标识或包装,以取得防伪效果。因此它们不象艺术全息图那样可以挂在展厅里,由事先安排好的理想光源照明以获得最佳观察效果,而是贴在各种商品上,在任意环境照明条件下观察。由于全息图的观察效果与照明条件关系极大,所以模压全息图在不好的照明条件下极易产生像模糊,尤其是三维图像更是显得模糊不清,观察效果极差,影响了模压全息图的应用和产品开发。

模压全息图像的清晰度虽与制作过程中的多道工艺有关,但关键在于母版的技术质量,否则其他工艺再好也无济于事。本文描述一种能制作清晰三维图像的模压全息图母版技术。该技术的关键在于全息图记录光路中几何参数的选择,以使重现图像的像差和像模糊减至最小。全息图的制作通常采用两步法。第一步,光路设置的重点是消除像散和像场弯曲;第二步,重点是使全息图在重现照明条件很差的情况下,依然能使图像清晰明亮。

2 理论

2.1 H_1 记录和重现光路的参数设置

H_1 重现像的质量直接影响到最终重现图像的质量。如果 H_1 的像差很大, H_2 记录的就是一个模糊的实像。消除像差可由选择合理的记录和重现光路中的几何参数来达到。如果物的尺寸小于物到全息版的距离,可近似将物的中心点作为物点来利用公式进行计算。若参考光和重现光都处于 xoz 平面上(即 $y = 0$),则全息图的高斯成像的距离和角度公式分别为^[2]

$$\frac{1}{R_l} = \frac{1}{R_c} \pm \left(\frac{\mu}{m^2} \right) \left(\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} \right) \quad (1)$$

$$\frac{x_l}{R_l} = \frac{x_c}{R_c} \pm \left(\frac{\mu}{m} \right) \left(\frac{x_o}{R_o} - \frac{x_r}{R_r} \right) \quad (2)$$

其中 R_l, R_c, R_o 和 R_r 分别代表重现全息图像、重现照明光源、物光及参考光到全息版中心的距离; $\mu = \lambda_c/\lambda_r$, λ_c 为重现光波长, λ_r 为记录光波长; m 为全息图的放大倍数。式中的 \pm 号对应于重现出来的两个像^[2]。 R_l 为正数时是虚像, 为负数时是实像。由于虚像对应于发散的光束, 实像对应于会聚的光束, 所以上述公式中所有的 R 为发散光的取正号, 为会聚光的取负号。在通常 $R_r > R_o$ 的光路安排下, 成实像时上述公式中的 \pm 号应取负号。

破坏三维全息图像清晰度的主要是像散的影响, 所以在此仅对像散进行讨论而省略对其他像差的讨论。当参考光和重现光都处于 xoz 平面上时, 全息图的像散为^[2]

$$A_s = \frac{x_c^2}{R_c^3} \pm \left(\frac{\mu}{m^2} \right) \left(\frac{x_o^2}{R_o^3} - \frac{x_r^2}{R_r^3} \right) - \frac{x_l^2}{R_l^3} \quad (3)$$

众所周知, 当全息图的记录和重现均采用同一波长时, 只要重现光与参考光共轭, 就能完全消除像差。但实际上在模压全息图母版的制作过程中, H_1 的记录和重现常常采用不同的光波长, 这是因为一般情况下 H_1 的材料是对红光敏感的银盐版, 而 H_2 的材料是对蓝光敏感的光刻胶版。在这种情况下, 只要采用合理的光路参数, 亦能消除像散。设 $m = 1$ (通常全息图在记录后和重现前的大小不会改变), 对重现光的距离和角度取 $1/R_c = -\mu/R_r$ 和 $x_c/R_c = -\mu x_r/R_r$, 分别代入(1), (2) 式得 $1/R_l = -\mu/R_o$ 和 $x_l/R_l = -\mu x_o/R_o$ 。将这些关系式代入(3) 式(其中 \pm 号与(1), (2) 式相同也取负号), 经过整理和化简可得 $A_s = (\mu - \mu^3)(x_r^2/R_r^3 - x_o^2/R_o^3)$ 。要使 $A_s = 0$ 就必须使 $x_r^2/R_r^3 - x_o^2/R_o^3 = 0$, 即必须使

$$\frac{R_r}{R_o} = \left(\frac{x_r/R_r}{x_o/R_o} \right)^2 \quad (4)$$

这说明只要参考光距离和物光距离的比值符合此条件, 就能使像散为 0。

即使重现的是无像散的实像, 仍存在着像场弯曲的问题而影响图像的清晰度。由几何光学理论知道, 无像散的像与 Petzval 面重合(见图 1)。若成像是单透镜, Petzval 面上距离光轴为 x 的某一点偏离近轴像面的距离 Δz 可表示为^[3]

$$\Delta z = \frac{x^2}{2nf} \quad (5)$$

其中 n 和 f 分别为透镜的折射率和焦距。在全息图的记录和重现过程中, 全息图本身也相当于一个透镜, 其焦距在全息图记录后就确定了。将 H_1 重现的无像散的实像作为物记录在 H_2 上时, 由于像场弯曲, 像的不同部位到全息版的距离不同。这样 H_2 重现出来的像远离全息版的部分就不清晰。在图 1 中, 若全息版 H_2 放在位置 A, 重现出来的像则上下清楚, 中间不清楚; 若全息版放在位置 B, 则重现出来的像中间清楚, 上下不清楚。从(5) 式可知, 减小 x 或增大 f 均可减小 Δz 。从图 1 可以很直观地看出, 减小 x 可从加大物到透镜的距离获得, 在全息图的情况下, 即加大物到全息版的距离。对于焦

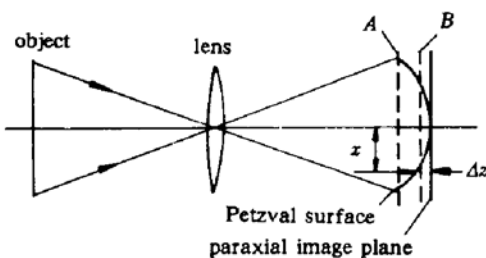


图 1 像场弯曲示意图

在无像散情况下, 像面与弯曲的 Petzval 面重合

Fig. 1 Diagram showing the curvature of field
When there is no astigmatism, the image falls on the curved Petzval surface

H_2 放在位置 A, 重现出来的像则上下清楚, 中间不清楚; 若全息版放在位置 B, 则重现出来的像中间清楚, 上下不清楚。从(5) 式可知, 减小 x 或增大 f 均可减小 Δz 。从图 1 可以很直观地看出, 减小 x 可从加大物到透镜的距离获得, 在全息图的情况下, 即加大物到全息版的距离。对于焦

距 f , 在参考光距离大于物距的情况下, 透射全息图的焦距由记录光路确定, 其数学表达式为^[4]

$$\frac{1}{R_o} - \frac{1}{R_r} = \frac{1}{f} \quad (6)$$

从(6)式可以看出, 在 R_r 的取值必须满足式(4)的情况下, R_o 越大 f 就越大, 这个结果与为减小 x 而必须加大 R_o 的条件一致。所以可得出结论, 为减小 H_1 的无像散重现像的弯曲度, 在记录 H_1 时物放置在离全息版较远的地方为好。当然物也不能放得太远, 否则到达全息版的物光能量太弱, 会影响全息图的衍射效率。

2.2 H_2 的记录光路参数设置

从 H_1 重现出一个无像散且像场弯曲较小的实像后, 还必须慎重选择 H_2 记录光路中的参数, 才能获得最终的清晰图像, 对 H_2 重现图像清晰度的影响主要来自扩展的重现光源, 在它的直径 Δr 和波长范围 $\Delta \lambda$ 影响下的图像最小分辨尺寸 Δs 和像模糊度 $\Delta \sigma$ 分别为^[5]

$$\Delta s = \left(\frac{z_l}{z_o} \right) \Delta r \quad (7)$$

$$\Delta \sigma = \theta_o z_l \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right) \quad (8)$$

其中 z_l 和 z_o 分别为 H_2 重现像和照明光源到全息版的距离, θ_o 为照明光的角度; λ 为照明光的中心波长。从式(7), (8) 可看出, 为获得清晰的最终图像, 在记录 H_2 时, 不仅 H_1 的重现像应靠近 H_2 的表面, 而且必须使参考光的距离尽量长, 角度尽量小。

3 试 验

试验中我们采用不同波长进行两步记录, H_1 采用 Agfa8E75 银盐版, 用 He-Ne 激光器的 633 nm 波长记录, H_2 是光刻胶版, 用 Ar 离子激光器的 458 nm 波长记录。光路中各参数的选择遵照以上理论计算方法。所用物为毛泽东铸铜像, 其竖直方向为 x 轴方向, 中心点位于光轴。 H_1 的参考光用发散光, 光路具体参数为: 物距 32 cm, 参考光距离 120 cm, 参考光角度 28° 。 H_1 的重现光与参考光共轭, 即采用会聚光, 可加强重现像的亮度, 距离为 166 cm。 H_2 的参考光距离为 150 cm (此距离受工作台的大小限制), 角度为 28° 。应注意的是, 记录 H_2 时 H_1 的像应位于光刻胶版的胶面之后, 这是因为重现像突出于胶面之前的部分会引起视觉混乱, 以至破坏观察效果^[6]。

图 2 是用该全息图母版制作的模压全息图的黑白照片。全息图中的三维毛泽东像明亮、逼真, 即使在阴天的漫射阳光下观察都相当清晰。图像在水平和竖直方向上的观察角度都很大。在竖直方向的某一角度上, 呈现出一个很好的消色差像。



图 2 用全息图母片制作的三维模压全息图重现像的黑白照片

Fig. 2 Black and white photograph taken from a 3D image of an embossed hologram made using the technique

参 考 文 献

- 1 E. N. Leith, J. Upatnieks. Reconstructed wavefronts and communication theory. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, **52** (10):1123~1130
- 2 E. B. Champagne. Nonparaxial imaging, magnification, and aberration properties in holography. *J. Opt. Soc. Am.*, 1967, **57**(1):51~55
- 3 E. Hecht, A. Zajac. *Optics*. London; Addison-Wesley Publishing Company, 1974. 183
- 4 S. A. Benton. The mathematical optics of white-light transmission holograms. *Proceedings of the International Symposium of Display Holography*, 1982, 1:5~14
- 5 R. J. Collier, C. B. Burckhardt, L. H. Lin. *Optical Holography*. New York: Academic Press, 1971. 170~173
- 6 J. T. Rule. The geometry of stereoscopic projection. *J. Opt. Soc. Am.*, 1941, **31**(4):325~334

Technique of Making 3D Master Holograms with High Resolution for Embossing

Zhang Xiangsu Liu Shou

(Physics Department, Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract A theoretical analysis is presented for selecting optimal parameters in recording geometries of embossing master holograms to eliminate astigmatism and field curvature of the reconstructed images, and the image blur caused by extended illuminating light source. The experimental result shows that the embossed hologram with 3D image made using the method reconstructs bright image with high resolution even under diffused illumination.

Key words embossing master hologram, 3D holographic image, resolution of holographic image