

散斑计量技术——走向工程实用化的技术¹⁾

姜力军 刘 伟 谭玉山

(西安交通大学机械工程学院激光红外研究所,西安 710049)

摘要 散斑计量技术是在现代高科技成果如激光技术、视频技术、电子技术、信息与图像处理技术、计算机技术、全息技术、精密测试技术等基础上发展起来的有效的工程检测技术,它具有全场、无损、灵敏、实用的优点,因而得到了迅速发展和广泛的应用。散斑计量技术的最终目的是走向工程实用化,实现现场在线测量。随着它的发展,必然会在科学研究和工程实际中发挥重大的作用。

关键词 散斑,散斑计量术,电子散斑干涉术

Abstract Based on modern high technologies such as lasers, video, electronics, information and image processing, computers, holography and metrology, speckle metrology has developed into a vary powerful tool for industry. Due to its many advantages, such as whole field, nondestructiveness, accuracy and convenience, it has developed very fast and is now used in many fields. Its ultimate aim is to be used in on-line measurement, when it will play an even more important role in research and engineering.

Key words speckle, speckle metrology, electronic speckle pattern interferometry

在30多年前,谁也不会想到散斑——这种“光学噪声”对计量检测技术有什么意义,因为在当时它是令许多光学工作者感到头疼的现象,人们总设法消除、克服它。然而今天,散斑技术已经成为一门重要的应用技术,在科学研究、工程应用中发挥着越来越重要的作用。目前,散斑技术的应用早已超越了近代光学的范畴,在医学、力学、天文学、材料、建筑、水利、机械工程、化工等许多学科得到了应用,而散斑计量技术更是散斑技术中最活跃的领域。正如著名光学家弗朗松所说,激光散斑“在光学中揭开了一个崭新的篇章”^[1]。

1 激光散斑——信息的载体

当激光照射在平均起伏大于波长数量级的光学粗糙表面(或透过光学粗糙的透射板)上时,这个表面上无规分布的面元所散射的子波

相互叠加使反射光场(或透射光场)具有随机的空间光强分布,呈现出颗粒状的结构,这就是激光散斑。

激光散斑具有随机性、无空间参照性,它与无线电收音机的电噪声一样,对信息的传递是有害的。然而噪声本身也是物质运动的一种形式,在无线电广播中人们就利用高频电波作载波传递信息。因此,只要运用得当,散斑也可以成为信息的载体。

激光散斑是激光照射在粗糙表面上而形成的,因此散斑图样的分布必定会依赖于被照表面的细微结构,从而利用它来测量表面粗糙度;散斑是由大量细微的高反差亮斑构成,根据“测不准关系”,它本身频谱必然很宽,因此可利用它对图像信息编码,进行图像的加减、信息存储。

1) 1994年6月15日收到第一稿,1994年10月24日收到修改稿。

物体的位移或变形必然引起散斑场的变化,因此通过测量散斑场的变化就可以获取物体的形变信息,这就是散斑计量技术的研究内容。

2 散斑计量技术的起源及发展

散斑现象早在牛顿时代就被人们所认识。但是散斑现象的广为人知并在光学及相关应用领域受到足够重视,还是在1960年世界上第一台激光器问世之后。激光器的诞生,使全息术成为光学中最活跃的领域,然而激光散斑却严重影响了全息图的质量,给全息工作者带来了许多麻烦。也正是由此引起了人们对它的关注。

1966年,Bruch和Ennos在实验中发现散斑具有可测的强度和确定的位相,从而为散斑的应用奠定了基础^[2]。此后,Groh把散斑引入计量领域,他用散斑图样作为测量疲劳断裂的阴影模板,结果表明这是一种非常灵敏的测量表面位移的方法^[3]。1968年,Bruch和Tokski提出了散斑照相术^[4],Arcbold,Duffy,Y. Y. Hung等人发展了此方法。1969年,Leendertz在国际光学会议上,提出了散斑相关干涉计量术(SPCI),这是散斑计量技术的一个重要发展^[5],基于这种思想,他又提出了剪切散斑干涉术(SSI)^[6]。后来,经Y. Y. Hung和Liang的改进^[7],成为一种非常实用的方法。

在人们发展理论和方法的同时,开始考虑如何使散斑计量技术走向工程实际应用。由于像面散斑大小可以通过照相系统的数值孔径加以调节,对记录介质的分辨率要求降低,只要能够记录光强的分布即能满足要求。这样,人们自然想到了摄像机。1971年,英格兰莱斯特州Loughbrough工业大学的J. N. Butters等人用闭路电视系统代替照相机,实现了电子散斑干涉术(ESPI)^[8],与此同时,Macoviski也进行了类似的工作。ESPI省去了照相底板的处理、复位等繁琐的处理,为走向工程实用化迈进了一大步。

进入80年代以后,电子技术、计算机技术、激光技术的发展促进了散斑计量技术的发展。高速存储器加快了数字图像的存取速度,计算机的高速运算能力使图像处理的复杂运算成为可能。激光技术尤其是脉冲激光技术的发展使ESPI可以测量高速运动的物体变形,并提高抗干扰能力。散斑计量技术与上述技术的结合,发展了数字散斑干涉术(DSPI)(图1),使其向智能化迈进了一大步。

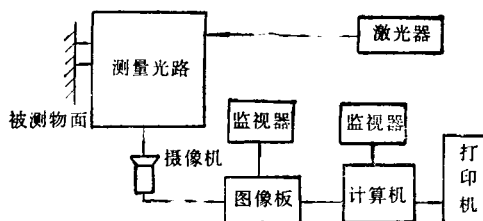


图1 DSPI系统组成

3 灵敏、实用、高效的检测技术

光测力学具有广阔的发展前途和应用前景。在光测力学领域中,散斑计量技术较其他方法有更多优点。例如,光弹方法属于模型实验技术,它需要使用双折射材料,一般说来,这种材料不能用于原样机,因此它不能用来解决起重要作用的材料问题。云纹法是近20年来获得迅速发展的一种方法,它利用两个格栅产生试件的变形图,其中一个格栅被贴在试件表面。在实际应用中,由于必须采用某种方法把格栅贴在试件表面,这就限制了它的广泛应用。全息法在许多使用场合太灵敏,它所记录的信息太多,彼此相互制约,给信息提取带来困难。散斑计量技术不但是非接触的和无损的,而且还能遥感,可以用它测量离面位移及面内位移和应变,同样可以解决振动和瞬变问题。它能进行全场测量,检测效率高并具有波长级的灵敏度。ESPI和DSPI的出现,用视频图像存储设备取代了照相干板,避免了干板的处理、复位及光场再现等过程,并能实时显示干涉条纹;同时,它以视频速率记录散斑图,增强了抗干扰能

力;在一定条件下, ESPI, DSPI 可在明室下操作。因此, 散斑计量技术具有非常大的应用价值。散斑计量技术主要用于以下几方面:

3.1 位移的测量

图 2(a) 是用相关干涉法测量离面位移的光路图。其光路与迈克耳孙干涉仪类似。摄像机接收的是物光与参考光的干涉场。当物体发生离面位移时, 物光与参考光之间光程发生变化, 从而使干涉场强度变化。记录下变形前后散斑干涉图样, 经相减处理就可以得到反映位移变化的相关条纹。测量面内位移也可以采用相关干涉法, 此时要采用对称入射光路, [见图 2(b)]. 测量面内位移的另一有效方法是二次曝光散斑照相法。它是通过在同一张底片上对物体变形前后进行两次曝光, 得到双曝光散斑图。然后通过逐点杨氏条纹分析或全场分析获取位移信息。在工程实际中, 物体的变形大多是三维的, 因此, 如何在不改变光路的情况下测量三维位移, 一度成为人们关注的课题。1982

年, 美国纽约州立大学的 F. P. Chiang 和 A. Asudi 提出了用散斑照相法测量三维位移的方法^[9]。Winther 在 1988 年提出了一种用 ESPI 测量三维位移的方法^[10], 该方法从三个方向照明试件, 测出试件上各点在不同照明方向下的相位变化, 通过计算机综合出三维位移。

3.2 应变分析

应变分析和挠度问题是力学分析和工程应用中非常重要的问题。应变和挠度可以用位移通过微分运算求得。但实验数据的数值微分会导致较大的误差。应用散斑剪切干涉法能直接得到位移的一阶微分, 从而减少了误差, 提高了测量精度。散斑剪切干涉法的形式很多, 但 Y. Y. Hung 和 Liang 提出的光楔法是最为实用和有效的。这种方法是通过在光阑位置上放置一块光楔, 遮住光阑的一半, 从而使经过光阑和不经过光阑的像发生剪切干涉。具有抗干扰能力强、装置简单、对光能利用率高等优点。

3.3 动态测试

动态测试是散斑计量技术的一个重要应用领域。用连续波激光器可以测量稳态振动。用脉冲激光器则不仅可以测量稳态振动, 还可以测量冲击振动。用连续波激光器测量稳态振动的方法有时间平均法、频闪法等。在用 DSPI 或 ESPI 测振时, 一般情况下, 物体的振动频率比摄像机的记录场频要高得多, 因此摄像机所接收的光强实际上为场周期内的平均值。通过去除直流分量即可得到反映振动振幅的相关条纹。这就是时间平均法的原理。频闪法则是通过调制照明光的强度, 使其在每个振动周期的 t_1, t_2 时刻照亮物体。当振动周期远小于摄像机光靶的“记忆时间”时, 就可得到试件在 $\Delta t = (t_2 - t_1)$ 时间内发生的 \cos^2 型相加条纹。双脉冲激光器测振的方法是利用两脉冲间隔小于光靶的“记忆时间”, 从而使摄像机输出的视频信号对应于两次照亮试件时散斑场的和。经过高通滤波后即可得到反映在两脉冲之间产生的形变的条纹。

3.4 无损探伤

用散斑计量技术可以测量复合材料、集成

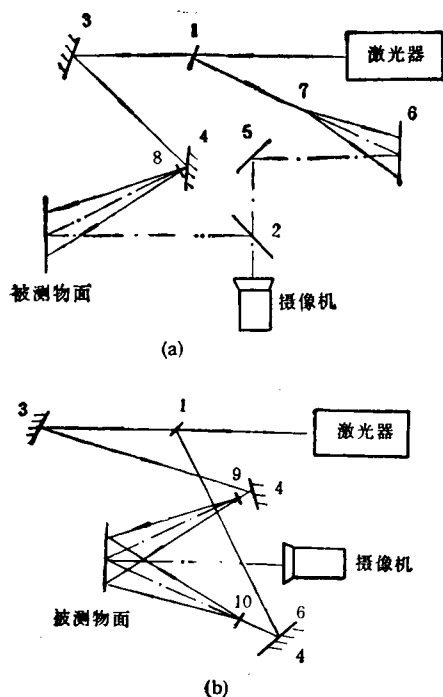


图 2 相关干涉法测量离面位移和面内位移的光路图
(a) 离面位移的测量光路; (b) 面内位移的测量光路
1——分光镜; 2——立方棱镜; 3,4,5,6——反射镜
7,8,9,10——扩束镜

电路、压力容器及焊接构件的表面或内部缺陷，成为射线、超声等传统无损检测方法的有力补充。它通过某种方式使被测物体发生变形，这时在缺陷处会发生畸变，用散斑计量技术进行测量就可以确定缺陷的位置和大小。

3.5 其他方面的应用

自从散斑现象引起人们的重视以后，许多学者研究了散斑图样的统计特性。在这些研究工作的基础上，一种利用散斑图样对比度测量表面粗糙度的非接触测量方法已被发展起来，并已用于不同表面的表面粗糙度测量。此外，散斑计量技术还应用于二维流场速度的分布、晶体长度变化、二维气体温度场、三维物体表面形状等的测量^[11]。

4 发展现状与展望

随着现代工业的迅速发展，对计量检测技术的要求越来越高，特别是能够实现现场在线测量。因此，使散斑计量技术走出实验室，使其能在工业现场使用，已成为目前发展的主要问题。要实现这一目标，必须解决检测系统的小型化、提高抗干扰能力和测试精度的问题。由此引发了以下几方面的研究：

4.1 光纤散斑计量技术

80年代初，美国贝尔实验室的 T. D. Duderar 和 J. A. Gilbert 将光纤成功地用于全息干涉计量中，他们采用多模光纤记录远方物体表面的位移^[12]，但全息图质量较差，后来，他们又将单模光纤用于全息测量。1985年，Takai 和 T. Asakara 对多模光纤照明形成的散斑统计特性进行了研究。此后，光纤散斑计量技术成为人们关注的研究方向。国内天津大学精密仪器系较早对光纤全息干涉计量进行了研究。西安交通大学机械工程学院激光研究所从1990年开始对各种光纤和传像束在 ESPI 系统中的应用进行了理论及实验研究，获得了较好的效果^[13]。

光纤散斑计量技术利用光纤代替原散斑计量系统中的光学元件，如反射镜、分束镜等，简

化了光路，缩小了体积，提高了抗干扰性。光纤具有屏蔽性，可屏蔽外界杂光，光纤也易于实现调制。它可以弯曲，耐腐蚀，可用于恶劣环境下。因此，光纤散斑计量技术是解决散斑计量系统小型化、提高抗干扰能力的有效方法。

光纤与半导体激光器结合的光纤散斑计量系统大大减小了体积，提高了抗干扰能力，具有很大的发展前途。目前，半导体激光器特别是可见光半导体激光器的功率问题、半导体激光器与光纤的耦合效率问题是发展的关键。预计在未来的几年里，这些问题会得到解决。

4.2 相移散斑干涉计量技术

在 ESPI 和 DSPI 中，一般采用物体变形前后散斑场相减的方法得到表征物体变形的相关条纹，设变形前记录的光强 I_b 为

$$I_b(x, y) = I_0\{1 + m \cos[\Delta\varphi_b(x, y)]\}, \quad (1)$$

式中 I_0 为平均光强， m 为调制度， $\varphi_b(x, y)$ 为物光相对参考光的相位。变形后光强 I_a 为

$$I_a(x, y) = I_0\{1 + m \cos[\Delta\varphi_a(x, y)]\}, \quad (2)$$

$$\varphi_a(x, y) = \varphi_b(x, y) + \Delta\varphi(x, y),$$

式中 $\varphi_a(x, y)$ 为变形后的相位， $\Delta\varphi(x, y)$ 为物体变形引起的相位变化。光强相减并取模得

$$\begin{aligned} I(x, y) &= I_a(x, y) - I_b(x, y) \\ &= 2mI_0 |\sin[\varphi_b(x, y) \\ &\quad + \Delta\varphi(x, y)/2| \\ &\quad \times |\sin[+\Delta\varphi(x, y)/2]|. \quad (3) \end{aligned}$$

(3)式即表示减模式数字散斑干涉计量的相关条纹。 $|\sin[\varphi_b(x, y) + \Delta\varphi(x, y)/2|$ 项表示高

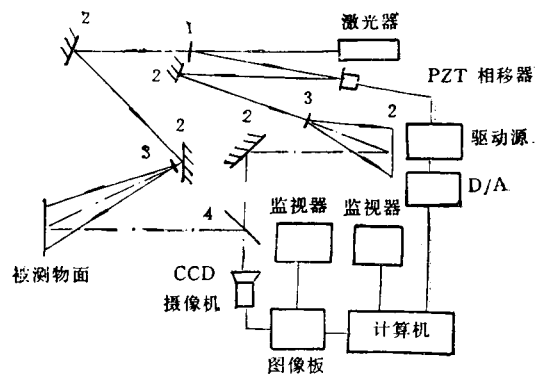


图3 相移电子散斑干涉系统

1—分光镜； 2—反射镜； 3—扩束镜；
4—立方棱镜

频散噪声,由于这一项的存在,使 DSPI 条纹质量远不如全息条纹高,难以进行定量分析,从而限制了应用范围。

1985年,Robinson 等人提出了数字位相步进散斑干涉术(digital phase stepping speckle interferometry)^[44]。它的基本思想是通过在参考光中引入不同的相移量来求得物光的位相变化量,从而求得变形量。图3为测量离面位移的相移电子散斑干涉系统,在参考光路中,利用压电陶瓷(PZT)作为相移器,引入一已知的相移量 β ,则记录的光强为

$$I(x,y) = I_0\{1 + m \cos[\varphi(x,y) + \beta]\}. \quad (4)$$

取 $\beta = 0, 120^\circ, 240^\circ$,从(4)式可求得

$$\varphi(x,y) = \arctg [\sqrt{3}(I_3 - I_2)/(2I_1 - I_2 - I_3)]. \quad (5)$$

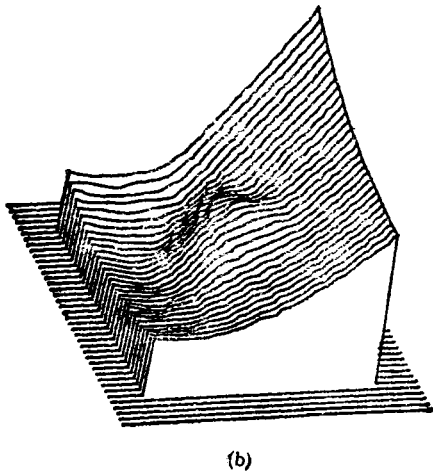
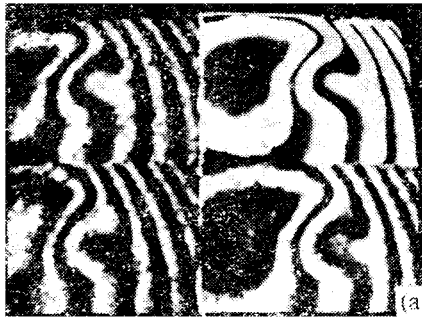


图4 碳纤维复合材料的无损检测结果

- (a) 左上、左下、右下分别为 $\beta = 0, 120^\circ, 240^\circ$ 时减模式相关条纹图,右上为计算所得的相位图;
- (b) 对应的物体表面三维变形图,其突起部分为畸变区,表明缺陷在此

用这种方法分别求出变形前后的相位分布 φ_b, φ_c ,则由(2)式即获得物体各点的相位变化值 $\Delta\varphi(x,y)$ 。由于参与相减的不再是光强,而是变形前后散斑场的相位,因此大大减小了散斑随机性的影响。图4为用相移电子散斑干涉法对碳纤维复合材料进行无损检测所得结果。图4(a)中的左上、左下、右下分别为 $\beta = 0, 120^\circ, 240^\circ$ 时减模式相关条纹图,右上为计算所得的相位图。图4(b)是对应的物体表面三维变形图,其突起部分为畸变区,表明缺陷在此。

相移散斑计量技术在其后几年得到了较快的发展。1989年,D. Kerr 提出了单步相移法,简化了数据采集过程,减少了相移 ESPI 受环境稳定性的影响。1990年,C. Joenathan 利用相移技术,采用双照明光束,实现了物体应变的测量。同一年,S. Toyooka 提出了液晶相移技术,并应用于剪切相移 ESPI^[45]。目前,实现相移的方法主要有 PZT 法、电光调制器法、偏振相移法、液晶相移法、多普勒频移法等。清华大学力学系曾进行过偏振相移法的研究,1990年,西安交通大学机械系激光研究室在国家“七五”攻关的基础上,用 PZT 作相移器件,研制了相移 ESPI 系统,并对相移全息、散斑干涉技术进行了研究^[46]。随着新型相移器件的发展,相移散斑干涉术会有广阔的应用前景。

4.3 数字强度相关计量技术

数字强度相关计量技术是通过光学场中数字化强度相关来求解光场变化的定量分析技术。图5是数字散斑强度相关计量系统的基本组成。它的最大特点是系统简单,对环境要求低,因此具有较强的适应性,它几乎与 DSPI 同

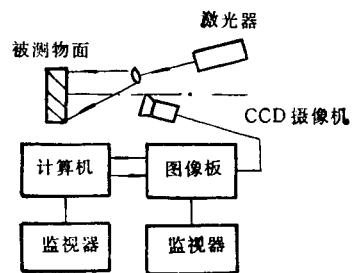


图5 数字散斑强度相关计量系统的基本组成

时产生,但当时只是将其作为研究光场与条纹质量的手段,随着人们对散斑计量技术实用性的认识,它再次受到人们的重视。

数字强度相关计量技术的基本原理是:用电子摄像系统分别记录下物体变形前的散斑场 $f(x,y)$ 和变形后的散斑场 $g(x+u,y+v)$,则求位移 (u,v) 的问题就转化为物体变形前后的散斑图像 $f(x,y)$ 和 $g(x+u,y+v)$ 的相关问题。两幅图像的相关函数 $C(u,v)$ 由下式计算:

$$C(u,v) = \int_M f(x,y)g(x+u,y+v)dx dy \quad (6)$$

其中 M 是图像面积。因为图像场存在各种噪声,常使(4)式不具有稳定的峰值输出。合理的处理方法是对(4)式在一个更小的子域 ΔM 中计算:

$$\Delta C(u,v) = \int_{\Delta M} f(x,y)g(x+u,y+v)dx dy. \quad (7)$$

位移量 u 和 v 对应相关函数 $\Delta C(u,v)$ 二维平面上的极大值坐标,这样就确定了该点的位移向量。1980年, Yamachi 提出了用相关法测量面内位移和转角的实时技术^[17],散斑位移由物体变形前后散斑场强度相关函数峰值确定。当位移在 $\pm 500\mu\text{m}$ 之间,转角在 ± 0.3 度之间时,该法与理论吻合较好,能测量小于散斑大小的位移。与此同时, F. P. Chiang 也作了有益的研究工作。他们初步完成了干涉场的相关特性与计量理论的研究工作。1982年, W. H. Peter 及其合作者应用图象相关技术完成了物体表面位移、变形、振动的测量,取得了较理想的结果。在国内,中国科学技术大学力学系、清华大学力学系在这方面进行了大量探索性的工作,取得了满意的效果。

数字强度相关计量技术存在着计算量大、运算速度慢的问题,但随着各种快速算法的研究和计算机技术的发展,这些问题会逐渐得到解决。

4.4 其他新技术

1986年,美国海军系统中心研制成功光学锁相的 ESPI 系统^[18],具有较高的抗干扰能力。

1990年,美国纽约州立大学的 D. J. Chen 和 F. P. Chiang 提出了计算机辅助散斑干涉计量术^[19]。该方法用计算机图象处理技术代替了散斑照相术的分析、处理过程。与 ESPI 相比,它光路简单,抗干扰性强;与数字相关法相比,它具有较高的运算效率。在提高稳定性方面,1993年,挪威技术学院提出了双脉冲剪切干涉术^[20],将双脉冲技术与剪切干涉术结合起来,大大降低了对稳定性的要求。

5 ESPI 的仪器化研究

散斑计量技术的最终目的是用于工程实际检测。因此,ESPI 的产品化是一个重要的课题,在许多国家得到重视。1985年,英国 Ealing 公司和美国 Newport 公司推出了 ESPI 产品,受当时条件的限制,它不具备计量信息的自动识别功能。1989年,他们又推出了计算机化的 ESPI 产品。80年代末和90年代初,世界上最权威的几个电子散斑技术研究中心和生产企业,如英国的 Loughbrogh 工业大学、Ealing 公司、Heriot Watt 大学物理系,美国的 Newport 公司、Oakland 大学,挪威技术学院物理系,德国 Jurid 公司等,都在努力开拓具有高精度、高速定量分析能力、高度抗干扰能力和小型化的电子散斑检测系统新技术,其研究目标是使这种通用性的检测设备能方便地携带到工业环境中使用。

我国在80年代中后期逐渐开始 ESPI 的仪器化研究。1989年,天津大学研制了剪切电子散斑的实验样机;中国科学院大恒公司研制了以半导体激光器作光源、采用光纤化光路的电子散斑检测样机。西安交通大学从1985年开始进行电子散斑的理论和研究工作,并在90年代初研制成功 TVH-30 型 ESPI 系统,其性能指标接近国外八十年代末的水平。国家也非常重视 ESPI 的产品化研究,1992年国家将 ESPI 产品化研究列入国家“产学研联合工程”重点项目。随着散斑计量技术工程实用化研究的发展,它必然会发挥越来越大的作用。

参 考 文 献

- [1] 宋菲君,从波动光学到信息光学,科学出版社,(1987), 188.
- [2] J. M. Burch, A. E. Ennos and R. J. Wilton, *Nature*, **209** (1966), 1015.
- [3] G. Greh, Proc. of Symp. Engineering Uses of Holography, Cambridge Univ. Press, London, (1970), 8.
- [4] J. M. Burch and J. M. J. Tokarski, *Opt. Acta*, **15**(1968), 101.
- [5] J. A. Leendertz, *J. Phys. E*, **3**(1970), 214.
- [6] J. A. Leendertz, J. N. Butters, *J. Phys. E*, **6** (1973), 1107.
- [7] Y. Y. Hung and C. Y. Liang, *Appl. opt.*, **18** (1979), 1046.
- [8] J. N. Butters and J. A. Leendertz, *Meas & Contr.*, **4**(1971), 344.
- [9] A. Asundi and F. P. Chiang, *Opt. Eng.*, **21** (1982), 570.
- [10] S. Winther, *Opt. lasers. Eng.*, **8**(1988), 45.
- [11] 何世平、汪柳生、伍小平,实验力学, **5**(1990),387.
- [12] T. D. Dudderar, J. A. Gilbert and A.J. Boehlein, *Exp. Mech.*, **23**(1981), 289.
- [13] 谭玉山、刘伟、王祥林,光子学报,**21**(1992),365.
- [14] D. W. Robinson, *Opt. Comm.*, **57**(1986), 26.
- [15] H. Kadono, S. Toyooka and Y. Iwasaki, *J. Opt. Soc. Am. A*, **8**(1991), 2001.
- [16] 郑文、谭玉山,光学学报,**11**(1991),273.
- [17] I. Yamachi, *Jap. J. Appl. Phys.*, **19**(1980), 113.
- [18] Steven E. Moran, Robert L. Law, Peter N. Craig et al, *Appl. Opt.*, **26**(1987), 475.
- [19] D. J. Chen and F. P. Chiang, Proc. of Intern. Conf. on Hologram Interferometry and Speckle Metrology, Publ. by the Society for Exp. Mech, Maryland (USA), (1990), 49.
- [20] R. Spooren, A. A. Dyresth and M. Vaz, *Appl. Opt.*, **32**(1993), 4719.

全息印刷——21 世纪的印刷术¹⁾

裴 文

(北京三友激光图像公司,北京 100101)

摘要 从特种印刷的角度介绍了近几年才发展起来的新领域——模压全息。模压全息作为低成本、大批量重复复制全息图的一种工业化手段,已在安全印刷、产品促销、包装装璜等领域得到了广泛的应用。文章着重介绍了这一领域的发展概况,全息技术及其应用,工作原理与工艺技术及设备,未来发展前景等几个方面。

关键词 模压全息、全息印刷、全息图

一谈到印刷,人们会立即联想到铅字,丝网和胶版印刷。随着计算机的开发及其应用领域的不断扩大,“轻印刷”这个由计算机与其外围设备实现的 20 世纪的印刷术已经越来越为人们熟悉。这些在人们日常生活中司空见惯的印刷技术,有一个共同的特点,即都是通过油墨来实现印刷目的的。进入到 90 年代,一种新型的印刷术正悄然兴起,其特点之一是印刷过程中不使用油墨,并掀起了一个又一个高潮。这种新型印刷品,首先被广泛应用于安全防伪领域,充当了“防伪标志”和“真品标志”的角色,有“假冒伪劣品的克星”的美誉,从而在安全印刷领域 (security print) 掀起了第一个高潮。由于这种新型的印刷品有着随光源(光线)或观

察位置变化而变化色彩的特点,它又在建筑材料行业占据了一席之地。这种新型的建筑材料就是所谓的“镭射玻璃”(laser glass)或“激光光栅玻璃”。它是利用图像转移 (image transformation) 技术,将图像转移到玻璃上而制成的。目前这种玻璃已被广泛应用于歌厅、舞厅和高档饭店的室内装璜中,从而在建材方面又掀起了第二个高潮。之后的第三个高潮,是在产品促销及包装方面,如正在兴起的高档服装吊牌,礼品与商品内外包装等。这种极具魅力并极有前途的印刷技术,就是所谓的“全息印刷术”。

1) 1994 年 6 月 4 日收到第一稿,1994 年 8 月 30 日收到修改稿。