

## 云纹干涉法在我国的研究进展\*

罗至善

天津大学力学系 (邮政编码 300072)

**提要** 本文介绍和评述我国在云纹干涉法的实验原理、方法、技术等方面研究中所取得的进展, 并就这一方法的应用前景和发展方向, 提出了一些看法。

**关键词** 云纹干涉法; 透射式实时云纹干涉法; 等应变线的实时条纹; 解冻云纹干涉法; 单光束错位云纹干涉法

### 1 引言

云纹法尽管有很多优点, 但受灵敏度只有  $10^{-2}$ mm 量级的限制, 测弹性变形和微小位移时得到的条纹太少、太粗, 测量精度不够。而加密栅线遇到制造成本剧增和衍射效应导致条纹清晰度下降的困难, 这极大地限制了其发展和应用。有些学者致力于条纹细化和倍增技术研究, 用图象处理技术提高灵敏度, 并取得了进展<sup>[1-3]</sup>。这就是利用光的衍射效应和滤波技术使条纹倍增, 最高已达 50 倍, 但实际应用的也只是 8—10 倍<sup>[4]</sup>。因为要使高的衍射级仍有足够的光强, 对底板质量和光强的要求越来越高, 这很难在工程应用中实现。结果, 灵敏度只达到  $10^{-3}$ mm 量级。

由于全息干涉和散斑干涉技术的发展, 有人将其某些技术引入云纹法。一方面, 用全息干涉技术调制光栅, 得到全息高频光栅; 另一方面, 以规则的平行线的干涉代替随机分布的散斑干涉以形成条纹, 这就是全息云纹, 并称为全息云纹法 (holographic-moiré method)。

Post<sup>[5]</sup>把云纹法这两个发展趋势结合起来, 利用  $\pm 1$  阶衍射, 得到倍增系数为 2 的云纹图, 并且把真空蒸镀技术应用于试件栅的调制工艺, 得到了极好的条纹对比度和清晰度; 实现了 2400 线/毫米 (使用氦氖激光为光源时) 以至 4000 线/毫米 (使用氩离子激光为光源时) 的高频光栅, 比普通云纹法 (40—50 线/毫米) 的灵敏度提高了 60—100 倍, 因而得到广泛应用并引起各国包括我国实验力学工作者的极大注意。Post 更准确地把这一方法称为云纹干涉测量法 (moiré interferometry), 中文简称为**云纹干涉法**; 这一名称更好地反映了它与全息干涉法、散斑干涉法以及传统云纹法之间的区别和联系。

云纹干涉法与电测法相比, 可给出全场位移; 与光弹法相比, 可得到高得多的灵敏度,

\* 中国科学院科学基金资助课题, 本文摘要曾在第 5 届中国航空学会光测力学学术会议 (1986年11月) 上报告。

而且可直接应用于不透明的工程材料,包括各向异性的复合材料;与全息干涉法相比,其灵敏度可在  $10^{-2}$ — $10^{-5}$ mm 的广阔范围内调节,而且对防振要求没那么苛刻,能有效地测量面内位移;与散斑干涉法相比,条纹更清晰,一般情况下灵敏度更高。所以它是很有发展前途的光测力学新技术,最近10年有很大发展。当然,它也有自己的弱点和局限性,还有不少问题需进一步探索和解决。但目前它已使云纹技术发展至高灵敏度阶段,能用以解决一系列工程问题;而在实际应用的开发方面,则刚刚开始。

我国从1979年开始有人介绍和翻译国外有关资料(例如[6]),并有少数人从事该方法的研究。比较系统的研究工作及发表学术论文,则始于1982年。1981年,美国弗吉尼亚州综合技术研究所和州立大学教授 D. Post<sup>[5]</sup> 将总结他多年工作成果尚待发表的论文“云纹干涉测量法进展”寄给中国力学学会实验力学专业委员会主任贾有权教授,该文的中译文于1982年散发,不久在《力学进展》发表。1982年底中国力学学会第3届全国实验应力分析学术会议上,介绍了国外云纹干涉法研究的动态,并首次宣读了我国在本领域的研究论文<sup>[7-9]</sup>;1983年起,我国全国性学术刊物上也相继发表了有关论文<sup>[10-17]</sup>。

经过4,5年的努力,我国已迅速掌握了这一新的实验应力分析手段;1985年10月在北京国际实验力学会议上,我国发表了有关论文多篇<sup>[18-21]</sup>,标志着我国在这一领域的实验原理和实验技术上,已接近或达到国际先进水平。在某些方面还有所发展和创新,受到国内外实验力学界的关注和好评。

本文介绍近几年来国内在本领域所取得的进展,也涉及国外近况,并对这一方法的发展前景,提出一些看法。

## 2 基本原理和基本光路

Post<sup>[5]</sup>曾指出,传统云纹法(指栅线频率 $\leq 100$ 线/毫米,通常为50线/毫米以下的低频栅云纹法)可用几何干涉,即低频栅线对光亮的机械遮挡来说明,而云纹干涉法则需要用物理光学,主要是光波的干涉原理和衍射效应才能解释。

二准直相干光束汇交时(图1)所形成的明暗相间的平行平面,以及它们与屏幕或试件表面相交时形成的平行线,是在空间或平面内的全息光栅(虚光栅),光栅频率

$$f' = (2 \sin \alpha \cos \beta) / \lambda \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为二光束夹角之半(图2),  $\beta$  为屏幕(或试件表面)外向法线与平分角线之夹角;

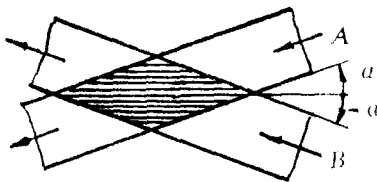


图 1

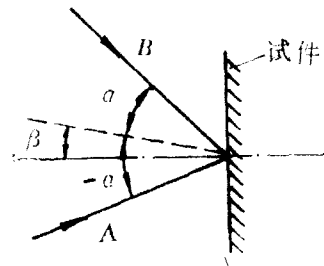


图 2

当二光束对表面外法线对称入射时  $\beta = 0$ , 则

$$f' = (2 \sin \alpha) / \lambda \quad (2)$$

当光束 A 照射高频透射光栅时(图3),会出现衍射现象,其第  $n$  阶衍射的衍射角  $\theta_n$  与

光栅频率  $f$  及入射角  $\alpha$  之间的关系为

$$\sin \theta_n = n\lambda f + \sin \alpha \quad (3)$$

上式对反射光栅同样适用。

利用上述光波干涉原理和衍射效应，由高频光栅的二次干涉形成云纹。我国已采用的基本光路有以下四种。

2.1  $\pm 1$ 阶衍射束相干形成云纹 Post倡导用对称双光束  $A, B$  照射有强反射率的高频试件栅（实光栅，图4），利用其 $\pm 1$ 阶衍射波在波前干涉得到实时云纹，每一条纹代表一组

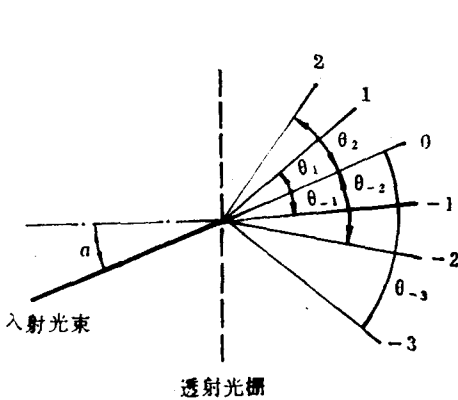


图 3

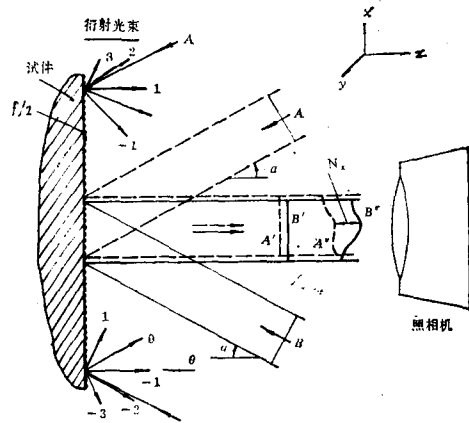


图 4

等位移点的轨迹，第  $n$  阶条纹的位移

$$U = Np \quad (4)$$

式中  $p$  为试件栅的栅距：

$$p = 1/f \quad (5)$$

这一光路是体现云纹干涉法思想的经典光路，也是迄今实现反射式实时云纹观测的最常见光路。文献[9,13]等采用了这一光路。这一光路要求  $A, B$  光束形成的虚光栅频率  $f'$  为试件栅频率  $f$  的 2 倍<sup>[4-5]</sup>（其证明可参看文献[9]），因而制栅和测试需分别调光路，而且保证栅频严格达到倍率的要求（否则会出现初始条纹并影响试验精度）。

Post 以这一光路为例，深入浅出地以衍射光束射出光的波前干涉（interaction of the emergent wavefronts）概念<sup>[5]</sup>解释了云纹干涉法的云纹条纹的形成原理，说明平面波前（plane wavefronts，图 4 中的  $A', B'$ ）干涉结果形成的是均匀亮度场，而翘曲波前（warped wavefronts，图 4 中的  $A''B''$ ）产生干涉图象即云纹条纹。

2.2  $+1$  阶或  $-1$  阶与零阶衍射束干涉形成云纹 文献[7,10]采用图 5 所示对称光路，研究了 AT16 铝合金和混凝土梁的断裂问题。 $A$  光束照射试件栅后，其零阶、 $\pm 1$ 阶衍射束分别为  $A_0, A_{-1}, A_{+1}$ ，而  $B$  光束的相应衍射束为  $B_0, B_{+1}, B_{-1}$ ；当  $A, B$  光束相干所形

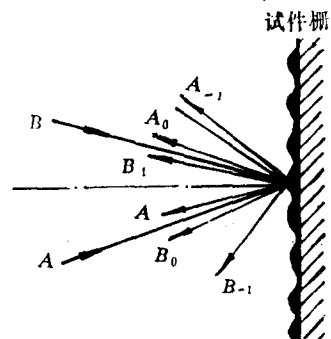


图 5

成的虚光栅栅频  $f'$  恰好与试件栅频率相等时,  $A_0$  与  $B_{+1}$  将沿同一方位即  $B$  入射方位出射, 它们的波前将发生干涉 (文献 [17,22] 给出了上述条件的证明); 试件栅因受载而畸变时, 其衍射波不再是平面波, 波前干涉出现反映试件变形的云纹。这种云纹也可以简单地解释为上述条件下虚光栅和试件栅叠置的结果。

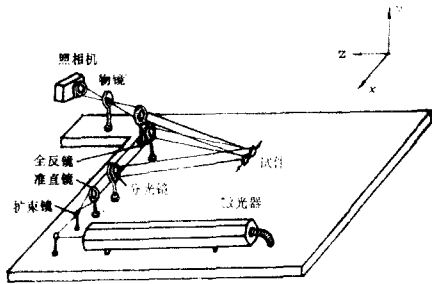


图 6

由于采用这一光路时试件栅和虚光栅频率相等, 因此调制试件栅和加载测试可以采用同一光路, 即可少调一次光路; 但云纹条纹只能从衍射束出射方向观测, 观测时必然要遮挡入射光束而使条纹消失。因此为观察和拍摄条纹, 文献 [7,10] 采取使试件栅绕水平轴向上倾斜一微小角度的办法, 从入射光束的上方观测云纹 (图 6); 该文献并证明, 用对称光路时试件栅绕水平轴的离面转动, 对云纹没有影响。为实现这种转动, 要求试件沿水平方向安装及加载; 因为这种机构应用不普遍, 影响了这一光路的推广。为了克服这一困难, 文献 [22,17] 建议从试件后方观测云纹, 仍然是利用零阶和 +1 或 -1 阶衍射束的相干, 不过这时不再是反射束而是透射束罢了 (图 7)。自然这种方法只能适用于透明试件、透射实光栅, 因而称为透射式实时云纹干涉法。这时试件栅表面不必蒸镀金属薄膜, 能降低成本, 缩短测试周期。由于一般光测力学试验室没有配置真空蒸镀设备, 镀膜费用占调制强反射全息光栅费用的 80% 以上 (当用机刻光栅复制时, 成本则要增加几十倍以上), 故这一改进具有实用价值。

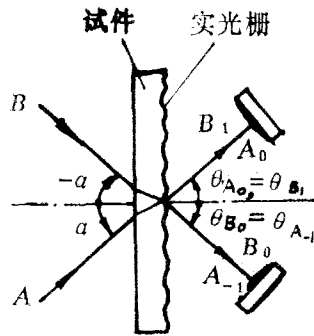


图 7

文献 [21, 22, 17] 还对实现实时观测的条件进行了分析, 并推证了四个条件; 明确这些条件, 使试验可少走弯路, 但应指出, 所给条件是在对称光路前提下得到的。

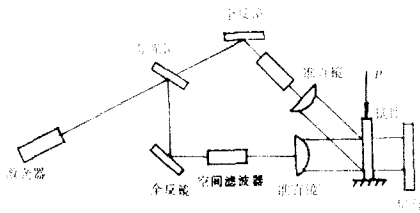


图 8

文献 [12,21,17] 采用使主光束垂直于试件表面的非对称光路 (图 8), 这时试件栅有栅线的表面不要求置于出射一侧, 而且可得到 1:1 的不失真的云纹图。必须指出, 不对称光路存在由离面转动和离面位移引起的误差 [12]。

采用本节光路的最大优点是, 试件栅和虚光栅频率相同, 制栅和观测云纹可使用同一光路。如果对表面涂有感光乳剂的试件实行加载前后两次曝光, 则可得到清晰的、没有任何初始条纹的云纹图。

2.3 利用大尺寸反射镜的单光束系统 Post 曾采用图 9 所示的简化光路 [23], 这时只需一条准直光束, 其一部分光直接照到试件上, 另一部分经反射镜再反射到试件上。这节省了一条光路, 但光场的有效面积减小了。因此采用抛物面形状反射镜, 以减小准直镜尺寸, 这

一光路还可通过调节反射镜的角度对栅频和初始条纹作微调节；Weissman 和 Post 使用这一光路系统和错配技术，并配合底片叠置得到二次云纹——等应变线<sup>[24]</sup>；文献[14,19,44]引用剪切散斑原理，在上述 Post 光路的成像透镜处加入玻璃光楔，可直接得到位移的微分——等应变线；这一改进的主要优点，是可以对等应变线进行实时观测。

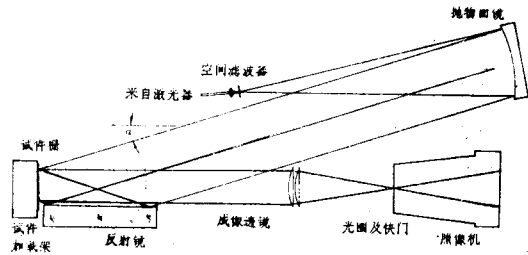


图 9

2.4 利用斜射原理的单光束系统 利用一个透射实光栅，也可以由单光束系统获得虚光栅。Bowles, Post 采用此光路测量热膨胀<sup>[25]</sup>，苏联 Жилкин 等也采用过类似光路获得基准栅和试件栅<sup>[26]</sup>。

文献[21,17]对此作了推证，提出控制衍射效应的斜射守则，证明了文献[25]中提出的条件是该守则的一个特例。根据该守则，实现了高频透射光栅的复制，复制栅的质量接近母栅。文献[16]采用此简化光路测材料的弹性模量。

应用物理光学关于光波的干涉和衍射理论更准确和完善地阐述云纹干涉法原理方面，我国实验力学工作者也进行了工作。文献[7,10,12]对于高频光栅的形成、全息光栅的衍射、零阶和 $\pm 1$ 阶衍射波波前相干形成云纹等问题进行了推证和分析，指出对称和非对称光路这两种情况下，微小离面刚体转动对云纹条纹的影响是不同的；文献[27]用双光束波前干涉原理对 $\pm 1$ 阶衍射形成的云纹及其等应变线进行了推证和分析，还解释了光学载波和滤波技术可消除无载时初始条纹影响的原理。

### 3 试件栅的调制技术

高频试件栅的调制，是云纹干涉法研究的重要条件和内容之一。标准光栅的传统制作方法是机刻，而通常使用的是它的复制品。即使如此，试件栅的费用仍然高得惊人，而且正交栅的质量仍不易保证。Post认为他在云纹干涉法的近期工作，“和先前工作的主要差别在于相对简易的技术在试件表面形成高频光栅的新的可能性，采用的工艺再也不比早先实际应用于低频光栅的更困难了”<sup>[6]</sup>。他避免直接用标准光栅去复制试件栅，而只是用它作调光路的基准，然后用虚光栅调制母栅（即用光刻法调制模版），最后再将母栅复制到试件表面；这样可避免直接复制必然会给昂贵的标准光栅造成的损耗；这里，标准光栅是作为控制栅频精度的工具和手段来使用的，同时也必然会限制栅频的灵活调节。由于引入了真空蒸镀金属（铝、铬或黄金）薄膜技术，试件栅的反射率和条纹对比度都很好。

尽管有关的配方和技术细节外国文献上没有公布，我国已解决了用国产全息干板、粘合剂和脱膜剂，将全息光栅复制到各种材料试件上去的问题，所用设备是一般光测力学实验室都具备，其技术是易于掌握的<sup>[11]</sup>。

国外一些学者曾采用直接在试件表面涂布全息乳剂方法制作全息光栅<sup>[28,26]</sup>，但一般是在透明材料或者具有强反射能力的金属材料上进行，才能获得良好的条纹对比度。我国已经掌握这一方法，不但应用于有机玻璃、铝和 A3 钢，而且还应用于陶瓷等不透明又未经高级表面加工的材料<sup>[11,17,21]</sup>；这是因为采用了表面平整处理和光刻光栅表面蒸镀金属薄层的技术<sup>[11]</sup>。

当采用氩离子激光器为光源时涂布的是光刻胶,也已取得良好效果<sup>[7,12]</sup>;光刻胶有商品供应,它不要求严格的暗室条件,这是其推广应用的有利条件;但目前使用更普遍的是氦氟激光器和金息 I 型感光乳剂。后者没有商品供应,运输和贮藏条件要求比较苛刻,使其推广受到限制。

闪耀光栅具有将衍射光强集中于所需要的衍射阶的特性,文献[13,14,19,20,27]对此进行了分析,并将这一技术引入光测力学,得到衍射效率和反射能力更好的试件栅,并且采用热塑料、硅橡胶等手段复制到试件表面。它可以利用高阶衍射束进行测试。在测试表面粘贴全息胶片以代替涂布全息乳剂,是更方便且利于推广的方法,但片基的存在大大降低了反射光栅的衍射效率,其条纹对比度较差。我国发明的专用粘结剂 TDL 和 TDJ,以及相应的粘贴、分离工艺和在胶片上蒸镀金属薄膜技术<sup>[21,17,15]</sup>,提供了解决上述问题的两条途径:一是在制栅或加载后将全息胶片分离进行再现等后处理,二是制栅后在胶片表面镀上一层金属薄膜,这可以使其光栅衍射效率提高几倍,并获得很好的条纹对比度。前者适用于两次曝光法,后者适用于实时观测反射式云纹条纹。由于其技术简易,费用低廉,调制周期短,而且国产全息胶片和专用粘结剂都已批量投产,这一方法已开始得到推广。

此外,文献[29]采用将易形成薄膜的塑料涂于试件表层再涂布全息乳剂办法,在试件形状比较复杂,增强效应要求更小的情况下适宜应用。

#### 4 光栅频率的控制和测定

光栅频率的精确测定,直接影响到试验精度。用高倍数(放大 500—1500 倍)读数显微镜可以测量高频栅栅频,但价格高昂,使用并不方便。

A. Ohta 等<sup>[30]</sup>制作标定用的标准试件,用理论值反求栅线频率;这一方法比较麻烦,而且包括一部分隐误差。Post 对此作了改进,他利用标准光栅作为调光路的基准,用虚光栅的精度来控制实光栅的精度<sup>[15]</sup>。但需要配备标准光栅,而且栅频受标准光栅品种的局限。

文献[11]采用分光光度计,利用衍射效应,通过测量衍射角测定栅频,精确度高。该设备是物理光学试验室的常用设备。

文献[15]采用几何法测量衍射角,不需任何专用设备,在云纹干涉法实验现场可即时测定所调制光栅的栅频,虽然精度稍差,但 <1% 的测量误差是可以接受的,因而这是便于推广的简便方法。

栅频测试技术的改进,使栅频可真正根据测试对象对量程和灵敏度的要求确定,从而摆脱了标准光栅的束缚,而且使虚光栅栅频的精确调节不再必要;这为简化试验程序、改进实验方法提供了重要条件。

此外,文献[12]将光弹的解冻法引入云纹干涉法,用以解决三维问题,并利用氩离子激光器波长可调的特性,用改变波长实现载波。这一方法由于可不动任何光学元件,可避免畸变引起的误差。

#### 5 应用实例

上述情况说明,我国对云纹干涉法基础技术的研究进展迅速,推广应用的条件已趋于成熟。但应用的开发,仅仅才开始。即使在国外,与应用的前景相比,也只能认为刚起步不久。以下举出部分实例。

5.1 断裂力学研究 由于云纹干涉法的高灵敏度和实时、全场的特点,适合于研究断

裂问题。Post 用以测定裂纹尖端的位移场和应变场,得到清晰的云纹条纹图<sup>[31]</sup>;文献[32]用于测定 COD;文献[30]用以研究疲劳裂纹扩展速率;文献[33]提供了通过三个方向的位移场计算 J 积分的方法。我国在这方面也已取得进展,文献[7, 10, 12, 15, 34, 35]等用以测定应力强度因子及裂纹尖端处位移场和应变场。用以测定裂纹张开位移的工作也已取得进展。

5.2 测定材料的某些力学性能 云纹干涉法可用于测定材料的弹性模量、横向变形系数、热膨胀系数<sup>[26]</sup>等。由于它能给出位移全场,灵敏度较机械式引伸仪高,可有更高的精度,特别是对脆性材料、各向异性材料,有更明显的优点。文献[16]介绍了用以测定有机玻璃、钢材、陶瓷等弹性模量的工作。用云纹干涉法测定单晶硅在不同晶相排列下某一方向变形性质也取得了成果。

5.3 研究某些结构和构件的弹塑性应力应变场 文献[36]研究了接头处的位移场;文献[37,38]研究了带孔板孔边弹塑性应变场及其在循环载荷下的变化;文献[33,39]研究了残余应力问题,文献[29]给出了连杆的云纹图。

## 6 新方法、新技术和展望

云纹干涉法在其基础技术问题获得解决之后,正进一步向简化方法、相互渗透、扩大应用的方向发展。

将调制试件栅的光刻技术,几何法测定栅频,光路及其调节技术的简化以及全息胶片的粘贴和分离工艺,在胶片上蒸镀金属薄膜技术等结合起来的贴片云纹干涉法<sup>[15,17,21,35,20,43]</sup>,使高灵敏度的云纹干涉法的技术、工艺变得简易,大大缩短了试验周期,测试费用也大幅度降低,还可直接用于测试不可拆卸的构件,已为国内不少单位所采用。当然,对细微变形和各种条件下的应用方面,还有不少需要探索的问题。目前应用开发研究的范围逐步扩大,实验技术的研究正在深入。

采用尽可能简单的光路和设备,获得二维以至三维位移及应变场的研究,正在取得进展。文献[33,36]都给出了测试二维位移的比较简单的光路。文献[41]给出了用云纹法同时取得三维位移的方法,有可能在云纹干涉法中得到应用。文献[45]讨论了用云纹干涉法同时提供面内位移和离面位移的技术。文献[18,27]建议单光束错位云纹干涉法,用单光束照射反射光栅,在某零阶和+1或-1阶衍射束加入玻璃平晶以引起错位干涉,产生面内位移和离面位移导数场的组合,或单独的离面位移导数场,条纹清晰,对比度好,且不受刚体位移影响。

光弹法、全息干涉法、散斑干涉法和云纹法中某些方法和技术引入云纹干涉法后,已使后者得到推动和发展,今后仍将给它带来新的活力。但新方法的生命力还在于它的实用性,要经得起实践的筛选。

把云纹干涉法与数值分析的边界元方法结合起来<sup>[40]</sup>,会使某些复杂的应力分析问题以比较经济的费用和较短周期得到解决。

由于云纹干涉法可直接应用于工程材料,包括各向异性和非线性弹性材料,因此对复合材料和组合结构也是有效的。文献[42]得出各向异性的石墨-聚酰亚胺拉伸试件的  $u, v$  位移场;文献[4]给出了石墨-环氧拉伸试件云纹图,用以研究正交叠层结构中角度的影响;我们预期国内在这方面的的工作将很快取得进展。

云纹干涉法可观测实时条纹,也可用两次曝光或两个瞬态底版叠置办法,得到某一载荷间隔或某一时间间隔条纹;因此可望在动态测量,包括振动,应力波传播等领域的研究中得到应用。文献[46]给出了圆环受冲击作用时瞬态云纹图。这只是动态应变测量应用方面的初步工作,今后将会有较快进展。

云纹实时条纹的自动采集和处理,将使云纹干涉法数据处理的精度和效率得以提高,便于新技术的应用,以及工程人员掌握;这方面的研究工作在数年内将达到实用阶段。

我们预期在5—10年时间内,云纹干涉法将在我国获得新的进展和广泛的开发、应用。

张绍义、亢一兰同志参加了本文的部分工作,作者在此表示感谢!

### 参 考 文 献

- 1 Sciammarella C A. *Exp. Mech.*, **9**, 4 (1969) : 179
- 2 Post D. *Appl. Opt.*, **10**, 4 (1971) : 901—907
- 3 Mckelvie J, Walker C A. *Exp. Mech.*, **18**, 8 (1978) : 316
- 4 Post D. *Exp. Mech.*, **23**, 2 (1983) : 203
- 5 Post D. *Opt. Eng.*, **21**, 3 (1982) : 458; 中译文见: *力学进展*, **13**, 3 (1983) (毛贻弘, 罗至善译)
- 6 方莘长. 应变分析的云纹法及其发展概况. 第2届全国实验应力分析学术交流会议论文(1979)
- 7 陆桦. 使用全息光栅的莫尔法及其在断裂力学中的应用. 第3届全国实验应力分析学术会议论文汇编, 成都(1982) : J 46
- 8 罗至善, 袁福湘. 全息光栅两次曝光的Moire法. 同上: J 60
- 9 罗至善, 袁福湘. 利用衍射效应的Moire法. 同上: J 61
- 10 陆桦. *天津大学学报*, 3 (1983) : 27—36
- 11 罗至善, 袁福湘, 刘文秀. *天津大学学报*, 4 (1983) : 39—47
- 12 贾有权, 王银燕. *天津大学研究生学报*, **1** (1985) : 48—57
- 13 傅承诵, 陈怡. *清华大学学报*, 2 (1985) ; 第4届中国航空学会光测力学学术会议论文汇编(1984, 5) : J 62
- 14 傅承诵, 戴福隆, 陈怡, 吴岫原. *清华大学学报*, 2 (1986) ; 第4届全国实验应力分析学术会议论文汇编, 武汉(1984) : J 63
- 15 罗至善, 袁福湘, 张桂琴, 肖为. *实验力学*, **1**, 3 (1986) : 205—211; 第5届中国航空学会光测力学学术会议论文集, 长沙(1986) : 云纹部分 6
- 16 罗至善, 袁福湘, 程雨琴. *机械强度*, **8**, 4 (1986) : 50—54
- 17 罗至善, 袁福湘, 刘文秀, 张桂琴. *天津大学学报*, 1 (1987) : 77—84
- 18 Dai F L (戴福隆). One-beam shearing interferometry for measuring slope and curvature of bent plates. *Proc. Int. Conf. on Exp. Mech.*, Beijing (1985) : 418—424
- 19 Fu C S (傅承诵), Dai F L (戴福隆), Chen Yi (陈怡), Wu X U (吴岫原). Shearing moire interferometry for measuring strain field. *ibid*: 439—445
- 20 Zhong G C (钟国成), Zhou C T (周春田), Gou Q J (勾秋静). The measurement of elastoplastic strain field by high sensitivity moire interferometry. *ibid*: 353—359
- 21 Luo Z S (罗至善), Yuan F X (袁福湘), Liu W X (刘文秀), Zhang G G (张桂琴). Some improvements of moire interferometry. *ibid*: 451—453
- 22 罗至善, 刘文秀, 张桂琴. 透射式实时云纹干涉法及其应用. 第4届全国实验应力分析学术会议论文汇编, 武汉(1984) : J 18
- 23 Post D. Barakat W A. *Exp. Mech.*, **21**, 3 (1981) : 100—104
- 24 Weissman E M, Post D. *Exp. Mech.*, **22**, 9 (1982) : 324—328
- 25 Bowles D E, Post D, Herakovich C T, Tenney D R. *Exp. Mech.*, **21**, 2 (1981) : 441—446
- 26 Жплкин В А, Попов А М, Заводская лаборатория. **11** (1979) : 1039—1042
- 27 戴福隆, 傅承诵, 吴岫原. 云纹干涉法的波前干涉理论及发展. 第4届全国实验应力分析学术会议论文摘要汇编, 武汉(1984) : J 26
- 28 入交裕, 竹内洋一郎, 野田直刚, 米谷彰. *日本机械学会论文集*, **44**, 380 (1978)
- 29 Pirodda L, Tong J W (佟景伟), Dichirico G. Developments in moire interferometry and applications to strain analysis. *Proc. Int. Conf. on Exp. Mech.*, Beijing (1985) : 331—339
- 30 Ohta A, Kosuge M, Sasaki E. *Int. J. Fracture*, **13**, 3 (1977) : 289—300



- 31 Post D. Observations of elastic-plastic displacement fields around cracks by moire interferometry. Proc. V Int. Cong. on Exp. Mech. (1984): 224—229
- 32 Smith C W, Post D, Hiant G, Nicoletto G. *Exp. Mech.*, **23**, 1 (1983): 15—20
- 33 Mcdonach A, Mckelvie J, Mackenzie P, Walker C A. *Exp. Teck.*, (June 1983): 20—24
- 34 陈正新, 傅承诵. 用云纹干涉法测定转动因子和裂纹尖端附近  $K_1$  场. 第5届中国航空学会光测力学学术会议, 长沙 (1986, 11): 云纹部分 5
- 35 张桂琴, 罗至善, 肖为. 贴片云纹干涉法在测定应力强度因子中的应用. 同上: 云纹部分 7
- 36 Post D. *Opt. Engin.*, **24**, 4 (1985): 663—667
- 37 钟国成, 周春田, 勾秋静. 用高灵敏度云纹干涉法测定弹塑性应变场. 第4届全国实验应力分析学术会议论文汇编, 武汉 (1984): J 73
- 38 周春田, 钟国成, 勾秋静. 高灵敏云纹干涉法测定循环载荷下有限宽度带孔板的弹塑性应变场. 同上: J 65
- 39 傅承诵. 云纹干涉法用于盲孔释放法测定残余应力. 同上: J 70
- 40 贾有权, 谢祁安. 云纹干涉法与边界元的混合法研究. 天津大学研究生毕业论文 (1986)
- 41 Chiang F P, Williams R C Jr. *Engin. Frac. Mech.*, **22**, 5 (1985): 731—735
- 42 Nemeth M P, Herakovich C T, Post D. On the off-axis tensile test for unidirectional composite. *Composite Tech. Review* (to be published in summer 1983 issue)
- 43 佟景伟, 李鸿琦. 动态云纹干涉法. 全国动态光弹学术会议, 杭州 (1986)
- 44 吴柚原, 傅承诵, 戴福隆. 差载错位云纹干涉法测量应变场. 第4届中国航空学会光测力学会议论文汇编 (1984, 5)
- 45 Basehore M L, Post D. *Exp. Mech.*, **21**, 9 (1981): 321—328
- 46 杜长泰, 邵立国, 罗至善. 脉冲全息动态云纹干涉法. 全国动态光弹学术会议, 杭州 (1986)

## DEVELOPMENTS OF MOIRE INTERFEROMETRY IN CHINA

Luo Zhi-shan

Department of Mechanics, Tianjin University

**Abstract** This paper discusses some new developments of the principles, methods and techniques of moire interferometry in China, as well as the prospects and development courses of this method.

**Keywords** *moire interferometry; transmissible moire interferometry; real time fringes of the strain isopleth; moire interferometry of sticking film; single-beam shearing moire interferometry*

### 致 读 者

本刊已于1988年10月成立了第2届编辑委员会, 在提高刊物质量方面将作更大的努力。1989年将连载一批好文章, 希读者及早预订, 以免向隅。本刊由北京报刊发行局国内总发行, 全国各地邮局均可订阅, 代号82-331。边远地区读者如未订到本刊, 可直接邮汇款给本刊编辑部订阅。

《力学进展》编辑部