

密栅云纹法原理及应用

曾起骧 叶绍英 编
谢冰 马喜腾

清华大学出版社

密栅云纹法原理及应用

曹起骧 叶绍英 编著
谢 冰 马喜腾

清华大学出版社

内 容 简 介

密栅云纹法是一种新型的实验力学方法，它可以在弹性、塑性、蠕变、静载、动载、常温和高温等条件下进行测量，其应用范围是非常广泛的。

本书详细地阐述了密栅云纹法的基本原理并着重介绍了此法在各种典型工程领域中的应用实例，对云纹法的特点以及测量精度和实验技术等问题都作了深入的讨论。本书较全面地反映了这项力学量测技术近几年来在国内外的研究和应用现状，其中许多内容是作者多年科研工作的成果和经验总结（该项目曾获国家科委科技发明奖并两次获得北京市科技成果奖）。

本书可供机械、冶金、力学、动力、土木、水利、地质、航空、造船等专业的大学生和研究生作为教材或教学参考书，也可供有关科研和工程技术人员参考。

密栅云纹法原理与应用

曹起骥 等编著

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京朝阳关西庄印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售



开本：787×1092 1/32 印张：13.5 字数：292千字

1983年5月第一版 1983年5月第一次印刷

印数：1~15000

统一书号，15235·68 定价：1.90元

目 录

前言	(1)
第一章 密栅云纹法的原理和几何计算法	(3)
§ 1.1 密栅云纹法的基本原理	(3)
§ 1.2 平行云纹与应变的关系	(6)
§ 1.3 转角云纹与应变的关系	(11)
§ 1.4 虚应变的原理、计算和应用	(20)
§ 1.5 应变符号的确定	(25)
§ 1.6 双间距测量法和实例	(27)
§ 1.7 圆环栅和射线栅的介绍	(35)
第二章 用位移场方法测定应变	(46)
§ 2.1 云纹是等位移线的轨迹	(46)
§ 2.2 小变形情况下由云纹图求应变	(50)
§ 2.3 等位移线图形的性质和偏导数符号的确定	(53)
§ 2.4 不同面内云纹方法的比较及应用	(61)
§ 2.5 由位移导数确定应变的方法及实例	(64)
§ 2.6 大应变、大转动情况下应变和位移的关系式及其简化	(91)
第三章 密栅云纹实验技术	(102)
§ 3.1 密栅版的制造	(120)
§ 3.2 拷贝过程中影响栅版质量的因素及拷贝栅	

	版的方法.....	(132)
§ 3.3	制版用感光乳剂的配制.....	(141)
§ 3.4	云纹的拍摄技术和装备.....	(154)
§ 3.5	模型设计和相似理论的应用.....	(160)
§ 3.6	模型材料的性能与加工要求.....	(168)
第四章	密栅云纹实验的精度.....	(182)
§ 4.1	密栅云纹实验的精度分析.....	(182)
§ 4.2	提高云纹法测量精度的方法.....	(187)
§ 4.3	用光电扫描方法提高云纹法的量测精度和实例.....	(210)
第五章	面外云纹方法的原理及其应用.....	(234)
§ 5.1	面外云纹方法的基本原理及试件表面高度的测量.....	(234)
§ 5.2	试件表面挠度的测量.....	(253)
§ 5.3	厚度变化的等值线测定.....	(255)
§ 5.4	试件表面斜率的测量.....	(259)
§ 5.5	试件表面曲率的测量.....	(269)
第六章	密栅云纹实验方法的应用实例.....	(274)
§ 6.1	直升飞机旋翼接头的密栅云纹法应变测定.....	(274)
§ 6.2	1600吨钢丝缠绕压机模型机架强度试验和方案比较.....	(285)
§ 6.3	采用密栅云纹光电扫描方法测定半圆梁周界接触应力的分布规律.....	(296)
第七章	密栅云纹法在塑性变形量测和其它领域中的应用.....	(312)

§ 7.1	密栅云纹法在塑性变形量测中的应用…	(312)
§ 7.2	密栅云纹法在热应变场量测中的应用…	(361)
§ 7.3	密栅云纹法在动载应变场量测中的应用	(378)
§ 7.4	密栅云纹法在三维问题量测中的应用…	(395)
结束语	(412)
主要参考文献	(419)

前 言

密栅云纹法是一种新型的实验力学研究方法，它是利用两组互相重叠的栅线间光的几何干涉现象产生明暗相间的云纹来测量各种机械量和物体变形规律。其特点是：可直接获得整个面积位移场和应变场分布，并能测量局部区域的应力或应力集中现象；对材料无特殊性能要求，所以既可用于模型试验也可进行实物测量；能用于各种不同性质的变形量测，有广阔的应用范围，如弹性、塑性、蠕变、静载、动载、常温、高温等；方法较简便，记录信息迅速，便于使用电子计算机等。

该法能广泛应用于机械、冶金、动力、土建、水工、地质、航空、造船等部门的设备、工程结构和工艺的研究，如大型机器设备的模型实验和方案比较、复杂工程结构的受力分析，在塑性成型工艺（如锻、轧加工），高温下材料性能、加工工艺和应变的研究等方面，它是最有发展前途的技术之一。近年来该法在理论、方法、技术和应用方面都有了很大的发展，应用范围不断扩大，如研究重型机械的强度刚度、土建和水工结构受力；飞机，导弹材料性能和结构强度；材料性能和断裂；冷、热加工中应力和变形（如焊接、热处理等）；地震和地质力学；三维结构强度；动载荷应力量测，爆炸、冲击和振动波的传播，板壳的挠度；各种壳体和曲面形状的量测等等。

本书主要介绍云纹法的基本原理，方法及其在不同领域中的应用，共分七章。第一、二章介绍云纹法的基本原理及由云纹图形成应变的两种方法，即“几何法”和“位移场法”，“几何法”是从栅线和云纹的几何关系计算应变的方法，“位移场法”则将云纹看作等位移线的轨迹，从而可直接应用弹、塑性理论进行分析；第三章详细介绍了栅版制造工艺和云纹法的实验技术；第四章介绍云纹法的精度及提高精度的途径；第五章介绍面外云纹法的原理及其应用；第六、七章介绍了不同云纹方法在各种领域中的应用及实例，本书中相当一部分内容为科研组多年来工作的总结，也介绍了大量国内、外文献中的有关资料，以供读者参考。

本书由清华大学机械工程系曹起骧、叶绍英、谢冰、马喜腾同志共同编写，由曹起骧副教授担任主编，并由清华大学工程力学系徐秉业副教授审阅了全部内容，提出了宝贵意见，对此，我们表示衷心感谢。

由于作者水平所限，书中内容虽经反复修改，缺点和错误仍恐难免，诚恳地欢迎读者批评指正。

作者

1981.11

第一章 密栅云纹法的原理 和几何算法

§ 1.1 密栅云纹法的基本原理

将两块印有密集平行线条的透明版（称密栅版），重叠起来，对着亮的背景看去，就会有明暗相间的条纹出现，称之为“云纹”。

在试件表面上制出一组栅线，称“试件栅”，它与试件一起变形，在其上重叠一块拷贝有栅线的玻璃版，由于光的干涉就会产生云纹。这块玻璃栅版称为“基准栅”或“分析栅”。试件变形时，试件栅栅线的间距（称节距 p ）就发生变化，云纹也随着增加、减少、倾斜或弯曲。因为云纹的分布和试件的变形情况有着定量的几何关系，从而可推算出试件各处的应变值。

国外称此方法为“Moire”法，该字出自法文，有丝绸波纹之意。国内也有按其发音译为“莫尔”法。

密栅云纹法与电测法类似，只是贴片面积大，计算点数多，能求出应变场，云纹的图形又与光弹性实验相似，但计算方法不同，对模型材料没有光学性能要求，它可以在金属材料、有机玻璃、橡皮、塑料、木材、水泥等实物或模型上贴片测量。

线互相平行的两块栅版重叠形成的云纹，每隔 f 距离，试件栅和基准栅栅版就相差一根栅线，出现一条云纹，其特点是云纹与栅线平行，是平行云纹的典型例子。

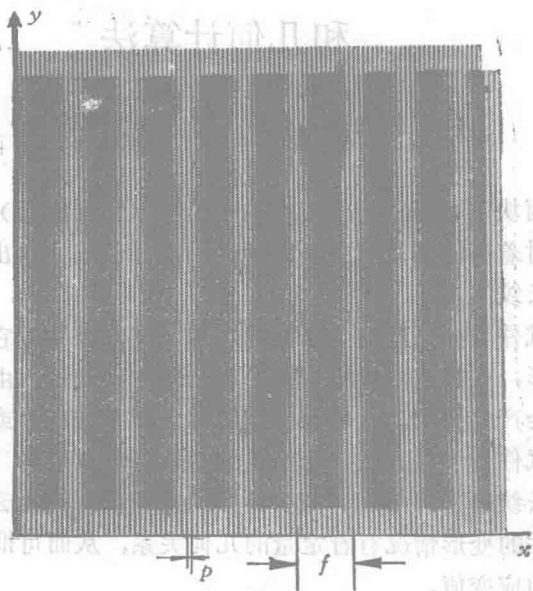


图1.1 两栅版节距不等，平行重叠形成的平行云纹

图1.2是节距相等的两块栅版，相对转一角度 θ 形成的云纹，是转角云纹的典型例子，在转角 θ 很小的情况下，其特点是云纹基本上垂直于栅线。

图1.3是两栅版节距不等，对转一角度 θ 形成的云纹，也是转角云纹的典型例子，其特点是云纹既不平行也不垂直于栅线，而是倾斜一个角度。通常实验中所得云纹图形一般是第三种情况，即试件栅节距发生变化，同时也转了角度，该图

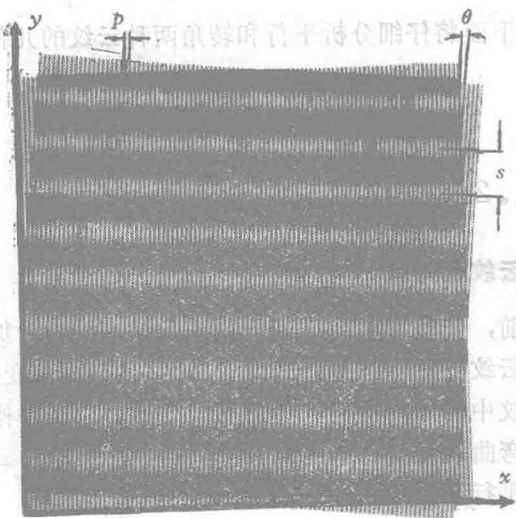


图1.2 两栅版节距相等，转一角度 θ 形成的转角云纹

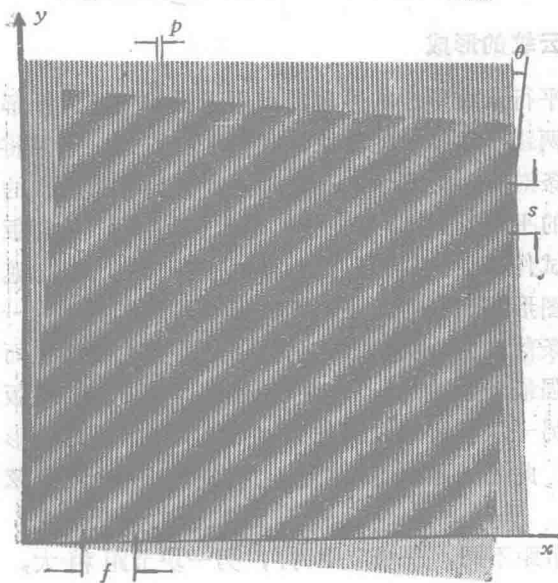


图1.3 两栅版节距不等，转一角度 θ 形成的转角云纹

是均匀变形。下面将仔细分析平行和转角两种云纹的几何关系。

§ 1.2 平行云纹与应变的关系

一、平行云纹的定义

试件变形前，使基准栅与试件栅的线条保持平行，加载变形后，所得云纹图像称“平行云纹”。图1.1是均匀变形，它仅是平行云纹中的一个特例。在非均匀变形时，试件栅栅线发生转动或弯曲，云纹将不是都平行于栅线，但这种云纹图形统称为“平行云纹”。

二、平行云纹的形成

为了说明平行云纹形成的原理，可用光强的变化来解释，图1.4a是两组节距相等的栅版，相互平行重叠，同时将两栅版的黑线条对齐，光线由白线条透过，因为有黑栅线的遮挡，每节距的平均光强由 a 减弱为 b 。图1.4b是两组栅版节距不等（设试件栅受拉伸），由于栅线对光线的机械遮挡，形成云纹图形周期性的光强变化，云纹的黑带是因为一块栅版的黑线条落在另一块栅版的白线条上，把光线挡住而形成，该处光强最弱如图c处。云纹的亮带，则是一块栅版的白线条落在另一块栅版的白线条上，光线从白线透过，形成云纹的亮带，此处光强如图的 b 处。光强曲线近似于正弦曲线。

设两栅版节距不同，一块节距为 p ，另一块节距稍大，

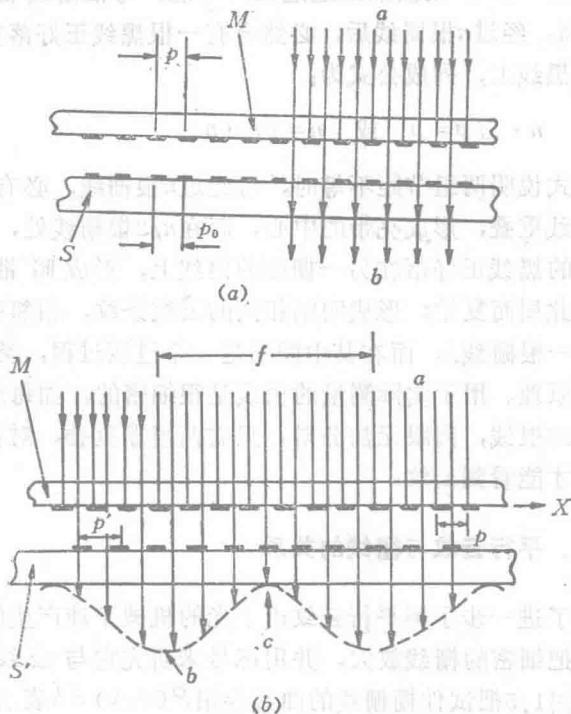


图1.4 (a) 节距相等, 平行云纹的光强曲线

(b) 节距不等, 平行云纹的光强曲线

a ——光源的光强(按一个节距 p 的平均光强计算)

b ——云纹亮带处的光强

c ——云纹暗带处的光强

M ——基准栅(节距为 p)

S ——试件栅(节距 $p_0 = p$)

S' ——试件栅(节距 $p' > p$)

f ——相邻两云纹间距

为 $p + \Delta p = p'$ ，则按照上述遮挡的原理，每根栅线都错位 Δp 距离，经过 n 根栅线后，必然会有一根黑线正好落在另一块栅的黑线上，列成公式为：

$$n \cdot \Delta p = p \quad \text{或} \quad n = p / \Delta p$$

上式说明两组节距不等时，每经过 n 根栅线，必有一处两栅白线重叠，形成亮带的中心，而在 $n/2$ 根栅线处，必有一栅版的黑线正好落在另一栅版的白线上，形成暗带的中心，如此周而复始，形成明暗相间的云纹条纹，相邻两云纹间，差一根栅线 p ，而在其中间则是一个过渡过程，类似游标尺的原理。用于实际测量的栅线是很细密的，如每毫米 12 根线至 50 根线，肉眼无法分辨，只有两组栅重叠，对着亮的背景，才能看到云纹。

三、平行云纹与栅线的关系

为了进一步了解平行云纹由于光的机械干涉产生的云纹效应，把细密的栅线放大，并用标号来研究它与云纹的关系。如图 1.5 把试件栅栅线的曲线族用 $R(x, y) = k$ 表示，基准栅栅线的曲线族用 $S(x, y) = l$ 表示。其中 x, y 为任意点的坐标。 l, k 为栅线的标号， $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ， $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 。栅线的标号与云纹的标号有一定的关系，以标号方程表示为：

$$l \pm k = m \tag{1.1}$$

式中 m 为云纹的标号或称云纹条纹的级数。图 1.5 中试件栅（斜线部分），基准栅（黑粗线），两栅线平行重叠，试件栅均匀拉伸形成的平行云纹，试件栅栅线编号 1 和 12，基

准栅栅线编号为 1 和 13，就是云纹亮带的中心，相邻两云纹间距 f 中，试件栅比基准栅少一根栅线，云纹的标号方程为 $i - k = m$ 。此时称“相减条纹”。

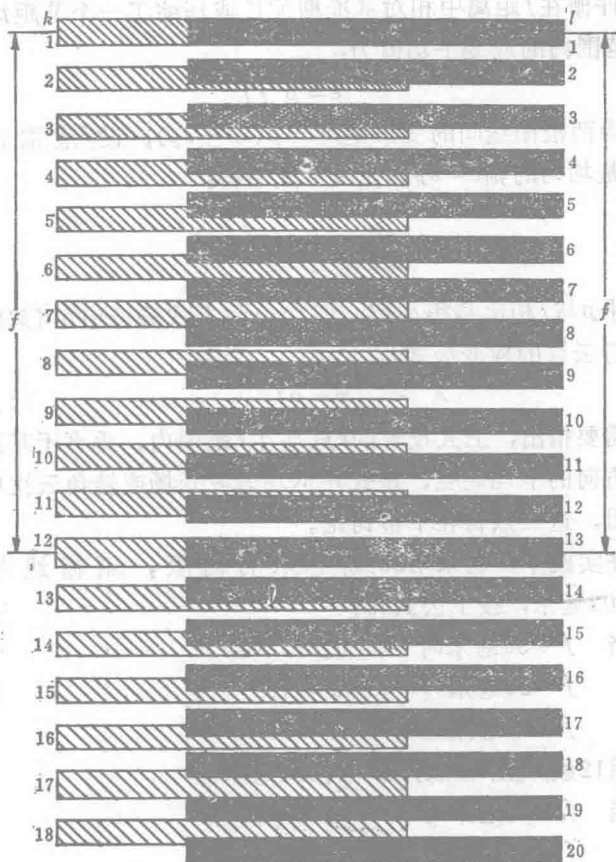


图1.5 平行云纹的形成及与栅线的关系

四、平行云纹与应变的关系式

按图1.5云纹形成的原理，可知试件在变形后，在云纹间距 f 范围内有 $n \pm 1$ 根栅线，而基准栅是 n 根栅线，也就是说试件栅在 f 距离中相对基准栅伸长或压缩了一个节距 p' 。故 f 范围内的应变平均值为：

$$\varepsilon = p' / f$$

又因为两根栅线间的变形是 $p' = p(1 \pm \varepsilon_p)$ ，设 f 范围内的变形是均匀的则 $\varepsilon = \varepsilon_p$ 。代入上式后得：

$$\varepsilon = \frac{p}{f \mp p}$$

实践中 p 与 f 相比是很小值，即 $f \gg p$ 故上式分母中 p 可忽略，得平行云纹的应变公式，

$$\varepsilon = p / f \quad (1.2)$$

需要指出，上式反映的 ε 只是在 f 范围内，垂直于基准栅栅线方向的平均应变，该式在不均匀应变场或转角云纹中也都适用，这一点将在下节讨论。

在实践中，若采用50线/毫米的栅版，则栅线节距 $p = 0.02$ 毫米，按上公式得：

$$\text{当 } f = 30 \text{ 毫米时 } \varepsilon = 0.667 \times 10^{-3}$$

$$f = 20 \text{ 毫米时 } \varepsilon = 1 \times 10^{-3}$$

$$f = 5 \text{ 毫米时 } \varepsilon = 4 \times 10^{-3}$$

若采用12线/毫米栅版， $p = 0.083$ 毫米

$$\text{当 } f = 30 \text{ 毫米时 } \varepsilon = 2.78 \times 10^{-3}$$

$$f = 20 \text{ 毫米时 } \varepsilon = 4.17 \times 10^{-3}$$

$$f = 5 \text{ 毫米时 } \varepsilon = 16.67 \times 10^{-3}$$

§ 1.3 转角云纹与应变的关系

一、转角云纹的定义

在试件变形前，将基准栅转一小角度与试件栅重叠，所得云纹图像称“转角云纹”。当基准栅节距和变形前试件栅节距相等时，云纹基本上垂直于栅线，如图1.2，在变形后若是均匀场，云纹呈倾斜状如图1.3，若是非均匀场，则出现云纹倾斜、弯曲、疏密不等的现象，但与栅线仍有很大的倾角，这些图像统称为“转角云纹”。

二、转角云纹的形成

两组节距相等的栅线互相转一小角度 θ 重叠在一起，就形成转角云纹。如图1.6，由于两组栅线斜交，当一块栅版的黑线穿过另一栅版的白线时，光线受挡，形成云纹的黑带；而在黑线穿过另一栅版黑线的地方，由于白线不受遮挡透过光线，形成云纹的亮带。即在透光多和透光少的地方形

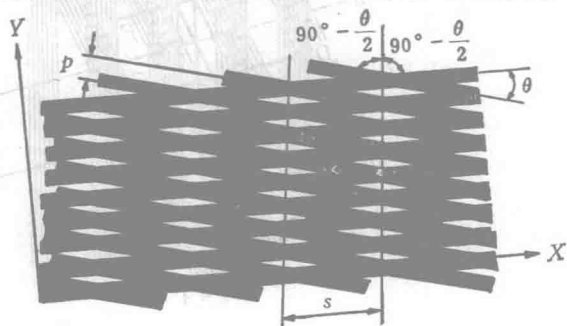


图1.6 转角云纹形成的原理