

网格法的自动检测技术研究*

关 铎 何世平 伍小平 王 鹏

(中国科技大学力学系, 合肥, 230026)

摘 要 详细地讨论网格法的自动检测原理及方法, 探讨自动网格法应用于细观力学的可能性, 并验证性地使用自动网格法测量裂纹尖端的位移场, 给出测量精度.

关键词 网格法, 细观力学, 自动检测, 裂纹尖端, 位移场

1 引言

传统网格法的基本思想就是通过人工识别预先制作在试件上的标志点的移动, 确定其对应区域的位移. 显然, 这种方法具有原理简单、可测大变形等优点, 但工作量大, 测量精度低, 而且测试精度与测试人员的经验有关. 因而, 传统网格法已较少使用.

随着现代图像技术的发展, 传统网格法正在迅速与之融合而发展成为一种新的测试技术——自动网格法. 它继承了传统网格法的优点, 更由于节点的自动识别技术及节点中心提取算法的应用, 具有测量精度高^[1,2]、速度快、自动化程度高等优势. 因而, 国内外学者进行了许多卓有成效的研究^[3,4]. 但是, 目前的工作大多着眼于网格法的自动化, 其测量也集中于宏观尺度, 挖掘数字图像技术的潜力, 并配合显微技术, 可以进一步提高自动网格法的精度、速度和空间分辨率; 而且, 由于网格法测量的是变形前后节点的相对位移, 因而不存在试件的复位问题, 方便了试件的加载. 可见, 自动网格法可望成为一种细观尺度上的变形测量的较好手段.

本文详细讨论了网格法自动检测技术的基本思想, 特别探讨了自动网格法在细观测量上的潜力. 通过刚体位移测量验证了方法的可行性, 同时给出了测量精度. 最后, 测量了双边裂纹板拉伸的裂端位移场, 其精度为 0.1 像素 (优于 0.1 μm).

2 自动网格法

自动网格法分为变形前后网格图的摄入及其预处理、节点分割、重心提取和变形前后节点的匹配、位移及应变的计算六个步骤.

2.1 网格图的预处理

由 CCD 摄入的网格图, 由于电噪声和照明等多因素的影响, 一般会存在点状噪声、斑状噪声及全图各区域灰度分布状态不均衡等问题. 相应的预处理工作包括下面几个部分:

(1) 中值滤波 消除面积较小的斑、点噪声;

* 1995-07-25 收到第 1 稿, 1996-06-07 收到修改稿.

(2) 分区线性拉伸 根据灰度分布,人为地将全图分为若干子区,对每个子区进行线性拉伸,从而使全图及各子区的灰度都均衡地分布于 0~255 之间;

(3) 频域分析 其作用与(2)相同,具体方法是从网格图傅氏变换所得的频谱中取出低频成分,再由反变换重建背景,最后用原图与背景作“除”的运算。

2.2 节点分割

将网格节点从背景中区分开来,并确定各节点区域的过程称为分割。经预处理后,网格图上只有两种景物:节点和背景,其灰度直方图呈明显的双峰结构(峰值为 I_b 和 I_w)。经典的直方图法^[4]可以轻易地将节点区分出来,即令:阈值

$$I_t = (I_b + I_w) / 2 \quad (1)$$

若节点为“黑”,各像素坐标为 (x, y) ,当其灰度 $I(x, y) \leq I_t$ 时,该像素属节点区域;否则属背景。基于这一准则,以一定算法扫描全图,可以明确地区分各像素是否属节点区域、归属哪一节点区域——完成了节点分割。

在扫描全图的过程中,可以同时统计各节点的面积 A_i 及所有节点的平均面积 $\bar{A}$ 。当节点 i 的面积 $A_i < (1/3)\bar{A}$ 时,可将节点 i 从节点序列中剔除。这样做的目的,是消除由于斑状噪声而被误判的节点。

2.3 重心提取

对数字图像而言,网格节点是由若干像素组成的区域而并非一个几何点,因而存在一个节点定位问题。由于变形前后同一节点位置坐标之差即为该点位移,节点的定位精度是决定网格法测量精度的核心问题。

定位的方法有多种,这里介绍广泛应用的灰度重心法。为降低分割阈值对定位精度的影响,首先作变换

$$I'(x_{ij}, y_{ij}) = I_{wi} - I(x_{ij}, y_{ij}) \quad (2)$$

其中, $I(x_{ij}, y_{ij})$ 为节点 i 上各像素的灰度; I_{wi} 为该节点附近背景灰度的均值。

设节点 i 的灰度重心为 $(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$, 则:

$$\begin{cases} \bar{x}_i = \frac{\sum_j x_{ij} I'(x_{ij}, y_{ij})}{\sum_j I'(x_{ij}, y_{ij})} \\ \bar{y}_i = \frac{\sum_j y_{ij} I'(x_{ij}, y_{ij})}{\sum_j I'(x_{ij}, y_{ij})} \end{cases} \quad (3)$$

式中,求和运算遍历该节点的所有像素。

2.4 节点的匹配

分割与重心提取完成了节点的识别与定位,下面的工作是寻找变形前后网格节点的一一对应关系——匹配。

低密度网格法中,一般可以在网格图上预先制作一个具有特殊形状的标记(图 1 所示),称为 icon。由于标记的面积较大、形状特殊,计算机容易将其识别出来,并根据它建立一个坐标系。对变形前后的节点,各自相对其 icon 系编码,同码的节点即是变形前后对应的节点。

首先说明有关坐标系,如图 2 所示,XY 系为图像处理系统规定的坐标系,上文中所有坐

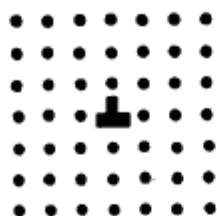


图 1 网格中的标记

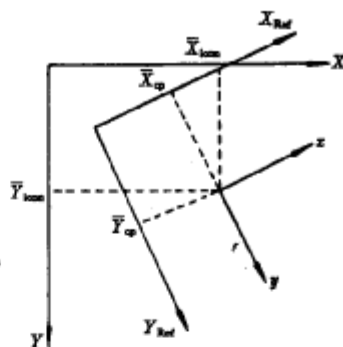


图 2 各坐标系间的关系

标均是在这一系中的,其原点位于图像左上角,方向沿像素的行、列方向. xy 系为标记 icon 确定的坐标系,原点位于 icon 重心,方向由 icon 与 XY 系成 θ 角, θ 的计算请参阅文献[4]. 为方便起见,一般再建一个 xy 系的平移系 $X_{ref}Y_{ref}$, 选择其原点位置,使 icon 在该系中的坐标 $(\bar{X}_c, \bar{Y}_c)$ 等于图像中心坐标(对 512×512 像素图像, $\bar{X}_c = \bar{Y}_c = 255$). 下面一组公式用来计算各节点重心在 Ref 系中的坐标 $(\bar{X}_{ref}, \bar{Y}_{ref})$.

$$\begin{cases} \bar{X}_{ref} = \bar{X} + \rho[\sin(\omega_z - \theta) - \sin\omega_z] + \bar{X}_c - \bar{X}_{icon} \\ \bar{Y}_{ref} = \bar{Y} + \rho[\sin(\omega_z - \theta) - \sin\omega_z] + \bar{Y}_c - \bar{Y}_{icon} \\ \rho = [(\bar{X} - \bar{X}_{icon})^2 + (\bar{Y} - \bar{Y}_{icon})^2]^{1/2} \\ \omega_z = \tan^{-1}[(\bar{X} - \bar{X}_{icon})/(\bar{Y} - \bar{Y}_{icon})] \end{cases} \quad (4)$$

式中, $(\bar{X}, \bar{Y})$ 为节点重心在 XY 系中的坐标(略去下标); $(\bar{X}_{icon}, \bar{Y}_{icon})$ 为 icon 在 XY 系中的坐标.

计算各节点与 icon 的相对位置

$$\begin{cases} \bar{X}_{rel} = \bar{X}_{ref} - \bar{X}_{cp} \\ \bar{Y}_{rel} = \bar{Y}_{ref} - \bar{Y}_{cp} \end{cases} \quad (5)$$

为避免重码、简化运算,本文采用了下面的二维编码方式:

$$\begin{cases} X_{max} = \text{MAX}(\text{ABS}(\bar{X}_{rel})) \\ X_{min} = \text{MIN}(\text{ABS}(\bar{X}_{rel})) \\ N_x = \text{MINT}(X_{max}/X_{min}) \\ X_{space} = X_{min} + \frac{X_{max} - N_x X_{min}}{N_x + 1} \\ X_{offset} = \bar{X}_{rel}/X_{space} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\text{ABS}()$ 为取绝对值; $\text{MINT}()$ 为取整; $\text{MAX}()$ 与 $\text{MIN}()$ 为取最大, 最小值函数. 对 $\bar{Y}_{rel}$ 作同样处理, 可以得到 $\bar{Y}_{offset}$, $(X_{offset}, \bar{Y}_{offset})$ 即为该节点的二维编码.

2.5 细观测量中的匹配问题

应用于细观测量的网格,一般需较高的密度. 这种网格经常使用光学方法制备. icon 的制作是非常困难的,因而,应用于细观测量时,必须对 icon 匹配法进行一定的修改.

事实上,由于制作的问题,网格经显微后,经常有些能够人工识别的特征,据此可以人工

判断某些点的变形前后匹配关系,假设变形前的两点 A 、 B 与变形后的匹配关系能够找到,则可以以 A 为原点,沿 A - B 连线及其垂线方向建立变形前后各自的编码坐标系. icon 的功能完全被两组匹配点替代,只不过上节公式中所有 icon 坐标 $(\bar{X}_{\text{icon}}, \bar{Y}_{\text{icon}})$ 均需以 A 点重心坐标 $(\bar{X}_A, \bar{Y}_A)$ 代替. θ 的计算公式为:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\bar{Y}_B - \bar{Y}_A}{\bar{X}_B - \bar{X}_A} \right) \quad (7)$$

$(\bar{X}_B, \bar{Y}_B)$ 为 B 点重心坐标. 套用上节公式,各节点的匹配关系可以获得.

2.6 变形的计算

匹配关系确立后,各节点位移可由下式得到:

$$\begin{cases} u_i = \bar{X}_i' - \bar{X}_i \\ v_i = \bar{Y}_i' - \bar{Y}_i \end{cases} \quad (8)$$

式中, $(\bar{X}_i, \bar{Y}_i)$ 与 $(\bar{X}_i', \bar{Y}_i')$ 分别为变形前后节点重心坐标.

对节点位移场差分,即可得应变场.

3 自动网格法用于位移测量

本文实验装置如图3所示,具体配置为:微机 LEO 486;图像板 VIGP-2M, $512 \times 512 \times 8$; 监视器, 512×512 像素; CCD 512×512 ; 前配显微系统, 本文使用标准 $5 \times$ 显微物镜.

3.1 方法验证及精度确定

为验证方法的可行性并通过实验确定测量精度,本文首先测量了平板的面内刚体平移. 网格密度 50 线/毫米. 表1给出了部分节点的位移,其中 (X, Y) 为节点坐标, U 为位移(对平移而言,精确值为零),单位为像素,从数据的分散度看,测量精度明显优于 0.1 像素.

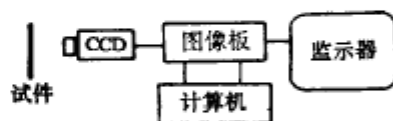


图3 实验装置示意图

表1 部分节点的刚体位移 单位:像素

X	Y	U
-191.358 215	66.867 676	-0.03 6990
-222.379 593	67.641 296	-0.057 832
-253.825 043	68.055 450	-0.041 188
-286.398 010	68.942 688	-0.001 317
-317.156 281	69.575 684	-0.002 476
-349.414 185	67.841 339	-0.017 149
-380.140 137	71.569 550	-0.041 007
-411.974 609	73.238 159	-0.044 134
-62.923 309	96.579 895	-0.020 988
-93.887 543	97.162 109	0.008 249

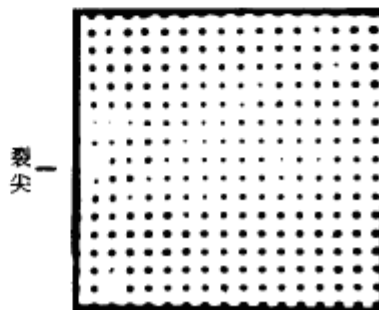


图4 典型的变形网格

3.2 裂纹尖端位移场

裂纹尖端位移场一直是力学关心的问题,本文尝试使用自动网格法测量了带有双边裂纹的铝薄板试件裂端位移场,网格密度与实验装置如前.对试件逐级加载,逐级记录网格图,处理后可得一系列增量位移场.图4是其中一级变形网格,图5是两级连续的位移场.

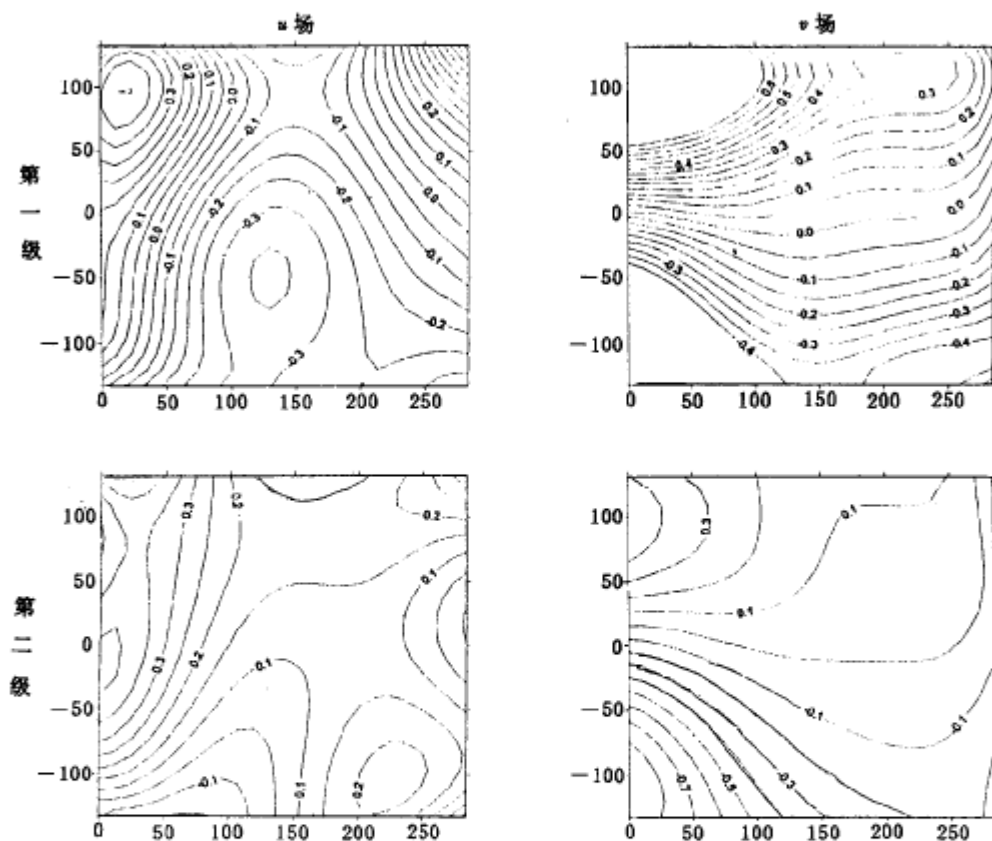


图5 裂端位移场

图中边框坐标单位为微米;裂尖在(0, -12)附近,等值线单位为像素.

第二级加载的位移为第一级基础上的增量

4 讨论与结论

上文中通过实验,以像素为单位给出了本文装置的测量精度.若网格密度为 m 线/毫米,每幅图含 $N \times N$ 个节点距,图像系统分辨率为 $n \times n$ 像素,则每个像素代表的实际长度 ΔP 约为:

$$\Delta P \doteq \frac{N}{m \cdot n} \quad (9)$$

本文情况下, $N=16$, $m=50$, $n=512$, 所以 $\Delta P \doteq 0.6 \mu\text{m}$. 若以 0.1 像素为测量精度,则该精度相当于 $0.06 \mu\text{m}$.

实际上,进一步提高栅线密度 m 及图像分辨率 n 是可能的;通过改进算法和实验条件,提高以像素为单位的测量精度也有很大潜力^[2],因而,通过努力,可望使自动网格法的测量精度达到 $10^{-2} \sim 10^{-3} \mu\text{m}$.

综上所述,自动网格法具有设备简单、精度好、量程大、自动化程度高等优势,作为细观尺度上的变形测量手段,自动网格法不失为一种较好的选择.

参 考 文 献

- 1 Sirks J S. System response to automated grid method. *Opt Eng*, 1990, 29(12):1485~1493
- 2 Sirks J S and Lim T J. Displacement and strain measurement with automated grid method. *Exp Mech*, 1991, 12:382~388
- 3 Shimamoto A, Takahashi S and Yokota A. Fundamental study on rupture by low-cycle fatigue of polymers applying the fine-grid method. *Exp Mech*, 1991, 3:65~69
- 4 Fail R W and Taylor C E. An application of pattern mapping to plane motion. *Exp Mech*, 1990, 12:404~410

THE STUDY OF THE AUTO-INSPECTION OF GRID METHOD

Guan E He Shiping Wu Xiaoping Wang Peng

(*Department of Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026*)

Abstract The automatic inspection principle and procedure of grid method are discussed in detail, and the probability of using the auto-grid method to mesomechanics is raised. By using the auto-grid method, the displacement fields around a crack tip are measured with 50 lines/mm grid. The precision is given and the potentiality of improving the precision is also discussed.

Key words grid method, mesomechanics, auto-inspection, crack tip, displacement field