

激光微粒影象的三维判读技术

西北工业大学 方金焰 严传俊 王宏基

一、引言

微粒尺寸和分布的测量在工业、农业等许多工程和科学领域中都很重要。目前检测微粒场特性主要采用光学方法,特别是激光摄影技术,如激光显微摄影和激光全息摄影等。这不仅因为胶片是一种高容量的永久记录介质,还由于测量结果直观,便于分析,其主要困难在于微粒影象的判读和处理。本文希望在微粒影象判读方面提出一种既能确定粒径、又能确定微粒位置的新方法。

近年来激光微粒影象的处理受到普遍关注。在现有的微粒影象处理技术中,均先判别微粒影象是否在焦,将离焦影象剔除掉,只利用在焦影象确定微粒尺寸。由于每张记录底片上的在焦微粒影象数目很少,经摄影和图象处理后,所能得到的有用微粒数目很有限,因此图象处理效率较低。此外,微粒位置的确定也很重要,但至今仍未得到解决。本文即针对上述两问题而提出研究。

二、微粒影象的特征及光强分布规律

激光摄影光路通常采用 $4F$ 系统,如图1所示。该系统的放大倍率仅由两透镜的焦距比值确定,不仅使用方便,而且克服了通常记录系统的倍率随位置而变的缺点^[1]。

我们曾采用这一系统,以静态微粒进行实验,得出激光微粒影象具有以下特征^[2]: (1) 当记录面位于象面时,微粒影象呈放大的阴影图,边缘锐利可辨,这时可由影象大小直接确定尺寸; (2) 当影象离焦时,影象中心出现亮斑,影象外存在环状干涉条纹,影象边缘可辨度稍差,影象大小受记录底片、冲洗照片的曝光量和显影时间的影响。离焦量越大,上述特征越加明显。由光场计算结果看到,当微粒离焦时,影象边缘由光强接近零逐渐过渡到1.0左右,以光强为0.25值的位置确定粒径比较准确,且适合到远场数接近0.3的情况,部分地利用了离焦影象,使可测厚度得到一定的提高^[2]。采用这种判读方法提高了检测结果的客观性、准确性和效率。但是微粒位置的确定仍未解决、实际检测中可测厚度仍嫌不足,这是直接判读方法普遍存在的缺陷。由实验结果发现,即使当记录

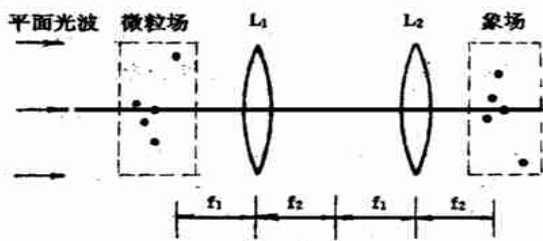


图1 $4F$ 记录光路系统

远场数大到接近 2.0 时, 影象的存在仍十分清楚。如能进一步利用这些离焦影象, 不仅使图象处理效率得到显著提高, 还将加大可测空间厚度, 这正是本文的目的之一。

为了建立影象的三维判读技术, 首先应总结出影象的光场分布规律。由实验结果看到, 不同微粒在远场数相近时, 影象的特征非常相似。从计算中发现, 当远场数相近时, 影象的光强分布曲线极相似。经过深入观察和分析后, 本文作出如下关于影象光场分布的推论: 在同一记录远场数条件下, 微粒影象的归一化光强分布相同。以下简单论证一下这一推论。

为使问题简化, 本文不考虑微粒间光场的相互影响。实际上, 当微粒浓度不很高时, 这种影响很小。这里仅以不透明微粒来论证, 可用图 2 光路来分析, 用 $A(\xi, \eta)$ 表示微粒的投影, 取单位平面照明光波, 波长为 λ 。

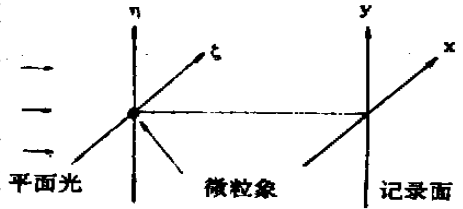


图 2 分析光路简图

根据上述假设, 在象面上的光场复振幅为: $(1 - A(\xi, \eta))$ 。利用惠更斯—菲涅尔原理, 可确定出记录面上的复振幅分布, 最终表达式为:

$$Q(x, y) = e^{jkz} \left[1 + \frac{j}{\lambda z} e^{j\pi(x^2 + y^2)/\lambda z} \iint_{-\infty}^{+\infty} A(\xi, \eta) e^{j\pi(\xi^2 + \eta^2)/\lambda z} e^{-j2\pi(x\xi + y\eta)/\lambda z} d\xi d\eta \right] \quad (1)$$

式中 k 为照明光波数, $k = 2\pi/\lambda$, 其它符号见图 2。

上式积分可看作 $A(\xi, \eta) \exp \{j\pi(\xi^2 + \eta^2)/\lambda z\}$ 的二维付立叶变换, 用频谱坐标表示:

$$Q(f_1, f_2) = e^{jkz} \left[1 + \frac{j}{\lambda z} e^{j\pi z} (f_1^2 + f_2^2) \iint_{-\infty}^{+\infty} A(\xi, \eta) e^{j\pi(\xi^2 + \eta^2)/\lambda z} e^{-j2\pi(f_1\xi + f_2\eta)} d\xi d\eta \right] \quad (2)$$

式中 f_1 和 f_2 是频谱坐标, $f_1 = x/\lambda z$, $f_2 = y/\lambda z$ 。上式中 $\exp(jkz)$ 不影响光强分布, 以下从略。对于半径为 r_1 和 r_2 的两个微粒, 上述推论用数学表述成:

$$Q(f_1/r_1, f_2/r_1) = Q_2(f_1/r_2, f_2/r_2) \quad (3)$$

其中, Q_1 及 Q_2 表示两微粒影象的归一化光场分布, 即:

$$Q_1\left(\frac{f_1}{r_1}, \frac{f_2}{r_1}\right) = 1 + \frac{j}{\lambda z_1} e^{j\pi z_1} (f_1/r_1)^2 + (f_2/r_1)^2 \iint_{D_1} e^{j\pi(\xi_1^2 + \eta_1^2)/\lambda z_1} e^{-j2\pi(\xi_1 f_1/r_1 + \eta_1 f_2/r_1)} d\xi_1 d\eta_1 \quad (4)$$

$$Q_2\left(\frac{f_1}{r_2}, \frac{f_2}{r_2}\right) = 1 + \frac{j}{\lambda z_2} e^{j\pi z_2} (f_1/r_2)^2 + (f_2/r_2)^2 \iint_{D_2} e^{j\pi(\xi_2^2 + \eta_2^2)/\lambda z_2} e^{-j2\pi(\xi_2 f_1/r_2 + \eta_2 f_2/r_2)} d\xi_2 d\eta_2 \quad (5)$$

上两式中, D_1 和 D_2 分别表示以原点为中心, r_1 及 r_2 为半径的圆域, (ξ_1, η_1) 、 (ξ_2, η_2) 、 z_1 及 z_2 分别为对应的象面坐标及记录距离。

满足记录远场数相同时:

$$z_2 = z_1(r_2^2/r_1^2) \quad (6)$$

对公式 (5) 实施如下坐标变换: $\xi_2 = (r_2/r_1) \xi_1$ 及 $\eta_2 = (r_2/r_1) \eta_1$ 。取这一变换后, 式 (5) 的积分域便成为 D_1 , 将以上有关公式代入式 (5), 整理得到:

$$Q_2\left(\frac{f_1}{r_2}, \frac{f_2}{r_2}\right) = 1 + \frac{j}{\lambda z_1} e^{j\pi z_1} (f_1/r_1)^2 + (f_2/r_1)^2 \iint_{D_1} e^{j\pi(\xi_1^2 + \eta_1^2)/\lambda z_1} e^{-j2\pi(\xi_1 f_1/r_1 + \eta_1 f_2/r_1)} d\xi_1 d\eta_1 \quad (7)$$

这与公式 (4) 完全一样, 因此上述推论是正确的。

三、激光微粒影象的判读方法和步骤

根据上述推论和计算结果得到: (1) 微粒影象中心亮斑尺寸 $d_{0.5}$ (以光强为 0.5 值确定) 与影象大小 $d'_{0.5}$ (也以光强为 0.5 值确定) 的比值是记录远场数的单调增加函数, 它是唯一的, 与微粒大小无关。因此用来确定记录远场数是很方便的; (2) 微粒影象大小 $d'_{0.5}$ 与待测粒径 d 的比值是远场数的单值函数, 它是唯一的, 也与粒径大小无关。通过大量的影象光强分布的计算, 将上述两比值与远场数的关系以曲线形式给出, 如图 3 和图 4 所示。

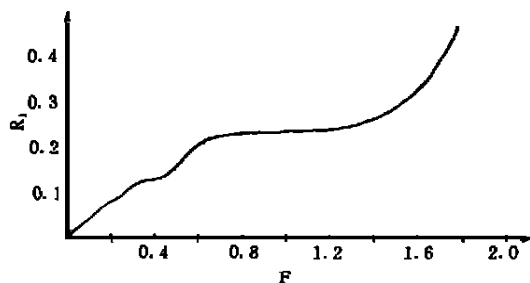


图 3 $R_1 (= d'_{0.5} / d_{0.5})$ 随远场数 F 的变化

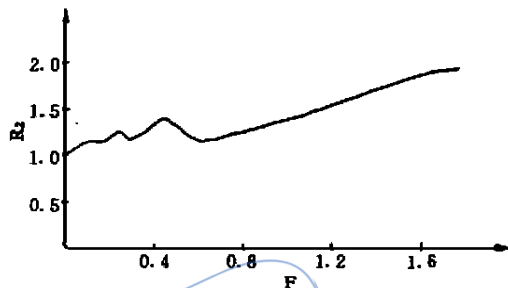


图 4 $R_2 (= d'_{0.5} / d)$ 随远场数 F 的变化

有了以上两条关系曲线, 进行粒径和位置 (记录距离) 的测量是很方便的, 具体步骤如下: (1) 根据记录的激光微粒影象确定出中心亮斑直径 $d_{0.5}$ 与影象大小 $d'_{0.5}$ 的比值 R_1 ; (2) 由 R_1 与 F 的关系 (图 3) 确定出记录远场数 F ; (3) 由图 4 的 F 与 R_2 关系定出 R_2 ; (4) 确定微粒尺寸 $d = d'_{0.5} / R_2$; (5) 求出记录距离 $z = F \cdot (d^2 / \lambda)$ 。

利用计算机图象处理系统完成上述步骤是非常容易的。采用这种三维判读方法既可以确定微粒尺寸, 又能确定微粒的空间位置, 还将判读范围加大到记录远场数为 1.8 以上, 这一般都能满足测量空间厚度的要求, 因此这种方法具有突出的优点, 也将充分发挥计算机图象处理的作用, 使检测效率得到显著提高。值得一提的是, 本文的分析虽基于静态微粒场的实验和计算结果上, 当采用脉冲激光摄影时, 本方法完全适合于运动的微粒场中。

四、结 论

本文提出的激光微粒影象的三维判读技术既可以确定粒径, 又能检测微粒的空间位置, 较传统的二维判读技术具有突出的优点。这种判读方法将有效地利用离焦微粒影象, 使可测厚度得到显著提高。

参 考 文 献

- [1] Thompian, B. J., "Accuracy of Measurement in Coherent Imaging of Particles in a Three-Dimensional Sample", SPIE Vol. 573, Particle Sizing and Spray Analysis 1985.
- [2] 方金焰, "相干影象测粒法及其在动态微粒场研究中的应用", 西北工业大学博士论文, 1988 年 9 月。

TECHNICAL NOTES

EVALUATION OF PARTICLE SIZES AND POSITIONS BY THEIR COHERENT IMAGES

Fang Jinyan, Yan Chuanjun, Wang Hongji (*Northwestern Polytechnical University*)

ABSTRACT

A new approach to evaluate the particle sizes and positions has been developed on the basis of their coherent images. According to the experimental and calculated results about the coherent images of steady particles, the paper described the features of coherent images of particles. It is concluded that the characteristics of the coherent images are different from those in incoherent cases, and the more the image deviates from the focus, the more obvious the differences are. From theoretical analysis, the conclusion has been drawn and proved that the normalized intensity distributions of coherent images of particles are the same when their recording far-field conditions are identical. The new method to determine the particle sizes and positions is just based on this conclusion.

THE CALIBRATION TECHNIQUE OF FIVE-HOLE PROBE

Lin Feng, Zhang Kunyuan, Pen Chengyi (*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT

A Calibration technique is developed to make the five-hole probe applicable to both definite and variable Mach numbers. A rake composed of 9 five-hole probe is calibrated. The diameter of the probe is 2.5mm and the width of the rake is 100mm. The range of yaw angle is from -30° to $+30^\circ$, so is the range of pitch angle. The minimum calibration Mach number is 0.15 and the maximum is 0.45. The standard deviations of yaw angle and pitch angle of each probe are less than 1.0° . The experimental results shows that this technique is suitable for engineering measurement.

EXPERIMENTAL TECHNIQUE FOR INVESTIGATION ON FOREIGN OBJECT DAMAGE OF AEROENGINE

Qiao Wenxiao (*China Flight Test Establishment*)

Xiong Changbing (*Beijing University of Aeronautics and Astronautics*)

ABSTRACT

A method to determine the size of notch on first stage blade of compressor with a stress concentrated factor (K_t) of three is briefly introduced, which is required for foreign object damage (FOD) testing of aeroengines. It is based on 8-node and 20-node finite element approaches respectively. The 8-node super-parameter element approach is used to calculate the stress distribution of a whole blade without and with notch, and the 20-node 3D iso-parameter finite element program is applied to computation of local stress distribution around a notch of blade. The practical testing techniques and test results are also presented.

VIBRATION DIAGNOSIS AND VIBRATION SOURCE ANALYSIS OF AIRCRAFT ENGINE

Li Xifa, Qiu Lun, Yi Juan, Meng Zhaobing (*Air Force Research Institute No. 1*)

ABSTRACT

This paper presents a progress in aircraft engine vibration monitoring and diagnosis in flight. Essentiality of the in-flight vibration monitoring and vibration source analysis and the features of the system used are discussed. An airborne vibration data acquisition unit, the ground analysis equipments and the method for analysing vibration signal are given. Its applications prove that it is feasible for vibration signal recording in flight and frequency spectrum analyzing.