

# 粒子成像测速法中询问域大小的选择与粒子位移量的关系

周 革 张以谟

(天津大学精仪系, 天津 300072)

## 提 要

通过分析询问域大小对底片乳剂颗粒产生的散斑噪声及其散斑噪声对干涉条纹识别的影响, 推导出了询问域大小的选择与被测粒子位移量之间的关系, 并详细讨论和分析了询问域的大小对所能探测的粒子位移量最大值的限止, 以及合理选择询问域大小的依据。

关键词 粒子成像测速法, 询问域, 位移量, 散斑噪声。

## 1 引 言

粒子成像测速法 (particle image velocimetry 简称 PIV)<sup>[1, 2]</sup> 目前已发展成为测量流场速度分布的一种有力工具, 它被广泛地应用于各种不稳定大面积流场的整场测量<sup>[3]</sup>。

粒子成像测速法测量流速分布的过程分为两个步骤: 先是采用照像方法记录跟随流场运动的粒子双曝光像; 然后用光学变换的方法, 逐个小面积的对双曝光底片进行分析, 探测出粒子在两次曝光之间的位移量, 再由位移量除以已知的两次曝光时间间隔算出粒子的位移速度。

粒子成像测速法对流场照像时通常采用图 1 所示的光路安排。光源为脉冲激光器或配有光束斩波装置的高功率连续激光器。激光束被扩展成薄片型光束后照明流场中的一个截面。照相底片放在光束面的垂直方向上, 利用粒子的侧向散射光记录照明面内的粒子双曝光像。采用薄片型光束照明流场, 可以将所记录的粒子限定在一个平面内, 为流场测量提供了一个坐标面, 并防止了复杂流场中前后粒子的像相互干扰的问题<sup>[1]</sup>。

对照像结果的分析, 常用的方法是用一细光束逐个小面积的对底片进行扫描探测, 如图

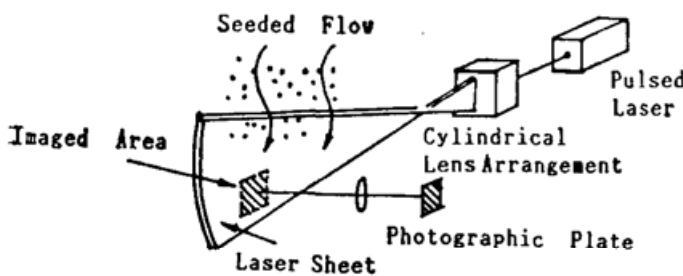


Fig. 1 Optical configuration for particle imaging velocimetry

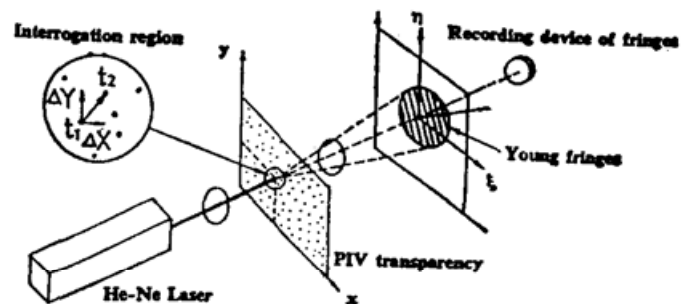


Fig. 2 Schematic drawing of the fringe formation

2 所示. 底片被细光束所照明的面积, 即是在每个扫描点上底片被探测的区域大小, 称为询问域. 当细光束照明底片时, 询问域上的粒子像对(即同一个粒子在两次曝光中形成的像对)在远场产生杨氏干涉条纹. 粒子在两次曝光之间的位移大小和方向通过干涉条纹的间隔和取向便可以求出.

在对底片分析时, 选择多大的询问域是和粒子位移量有着一定关系的. 首先, 询问域不能太大, 太大会使域中的粒子像对之间的位移量相差太多, 而使条纹无法产生. 其次, 询问域又不能过小, 过小又会使底片乳剂颗粒产生的散斑噪声将干涉条纹淹没, 致使条纹无法被识别和判读. 大面积询问域对条纹的影响, 文献[4]中已有介绍, 本文将详细分析询问域的最大值选择依据及其大小对被测粒子最大位移量的限止.

## 2 粒子位移量与条纹间隔的关系

假设在询问域中的粒子像对数为  $N$ , 且所有粒子具有相同的位移量  $\mathbf{d}$ , 则透过底片后的光场分布为

$$U(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^N q(\mathbf{x}) \otimes [\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_n) + \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_n - \mathbf{d})] \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{x}_n$  为第  $n$  个粒子像的矢量坐标,  $\otimes$  为卷积符号,  $\delta(x)$  为狄拉克(Dirac)函数,  $q(\mathbf{x})$  为粒子的像函数. 粒子的位移量  $\mathbf{d}$  与速度  $\mathbf{V}$  的关系为

$$\mathbf{d} = TM\mathbf{V}, \quad (2)$$

式中,  $T$  为两次曝光之间的时间间隔,  $M$  为照像系统的成像倍率. 由(1)式给出的光场分布在远场产生干涉条纹, 条纹的强度分布为

$$I(\boldsymbol{\xi}) = N |Q(\boldsymbol{\xi})|^2 \{2 + 2 \cos[(2\pi/\lambda L)\boldsymbol{\xi} \cdot \mathbf{d}]\}, \quad (3)$$

式中  $Q(\boldsymbol{\xi})$  为粒子像  $q(\mathbf{x})$  本身的衍射分布函数,  $\boldsymbol{\xi}$  为条纹接收面上的矢量坐标,  $L$  为底片到条纹接收面的距离,  $\lambda$  为波长. (3)式中省略了非像对之间产生的平均背景噪声项.

粒子的位移量  $\mathbf{d}$  包含在(3)式中的余弦调制量中. 由于两个条纹之间位相相差  $2\pi$ , 可以得出位移量与条纹间隔  $\Delta\xi$  的关系为

$$|\mathbf{d}| = \lambda L / \Delta\xi, \quad (4)$$

(4)式表明, 粒子位移量  $|\mathbf{d}|$  与条纹间隔  $\Delta\xi$  成反比, 即是说由粒子像对产生的干涉条纹越密, 所反映的粒子位移量就越大. (4)式还表明条纹的疏密程度与距离  $L$  也有关. 但在下面的分析中, 可以看到底片乳剂颗粒产生的散斑噪声对条纹识别的影响是与距离  $L$  无关的.

## 3 询问域大小与粒子位移量的关系

在底片被细光束照明时, 底片的乳剂颗粒将产生散斑噪声. 散斑噪声对干涉条纹的影响的程度, 将取决于照明面积, 即询问域的大小. 如果询问域是直径为  $D$  的圆形区域时(一般光束截面都为圆形的), 则根据散斑分布的统计性质, 询问域上乳剂颗粒产生的散斑平均粒径  $\rho$  为<sup>[5]</sup>

$$\rho = 1.22\lambda L/D, \quad (5)$$

将散斑粒径  $\rho$  和条纹间隔  $\Delta\xi$  相比, 并设比值为  $K$ , 则由(4)式和(5)式可得:

$$K = \rho/\Delta\xi = 1.22|\mathbf{d}|/D, \quad (6)$$

$K$  值是一个反映散斑对条纹识别影响大小的量,  $K$  值的大小只与粒子位移量  $|\mathbf{d}|$  和询问域直径  $D$  的比值有关, 而与距离  $L$  无关. (6)式的物理意义是: 在条纹观测中, 虽然增加条纹接收面与底片之间的距离  $L$ , 条纹的间隔会增加, 但散斑颗粒的大小也随之增加, 而且这两者增加的比率是相同的.

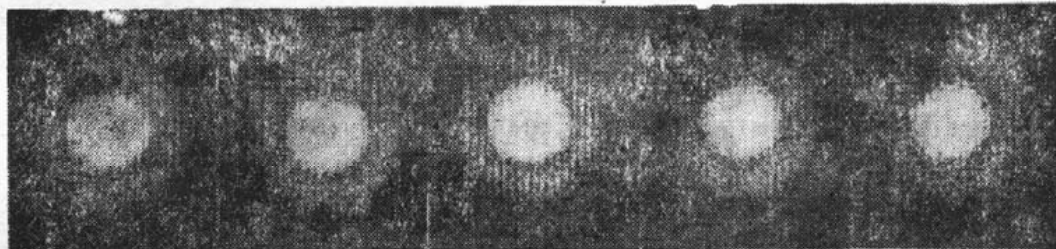
$K$  值的作用从图 3 和图 4 给出的实验结果中可以看出, 图 3 和图 4 分别为采用不同  $K$  值的圆形询问域对两种位移量的粒子成像测速底片进行分析所获得的两组干涉条纹照片, 其中图 4 的位移量  $|\mathbf{d}|$  是图 3 的两倍. 从照片上可以看出随着  $K$  值的增加, 散斑噪声对条纹的影响也就随着增加. 一般认为当散斑粒径超过条纹间隔的  $1/5$ , 即  $K > 1/5$  时, 条纹便不能很好地被测量了<sup>[6]</sup>. 此点从实验照片上可以明显的看出. 当  $K < 1/5$  (图 3(a)、(b) 和图 4(a)、(b)) 时, 条纹清晰可辨; 当  $K = 1/5$  (图 3(c) 和图 4(c)) 时, 条纹仍可测量, 但散斑对条纹的影响已显示出来; 当  $K > 1/5$  (图 3(d)、(e) 和图 4(d)、(e)) 时, 散斑对条纹的影响已经比较严重了, 条纹已不能被很好的测量了. 因此, 在对粒子成像测速底片进行条纹分析时, 其散斑粒径与条纹间隔的比值  $K$  的最大取值应为

$$K_{\max} = (1/5). \quad (7)$$

由(6)式可以得到询问域直径  $D$  与粒子位移量  $|\mathbf{d}|$  的关系应满足

$$D/|\mathbf{d}| \geq 6.1. \quad (8)$$

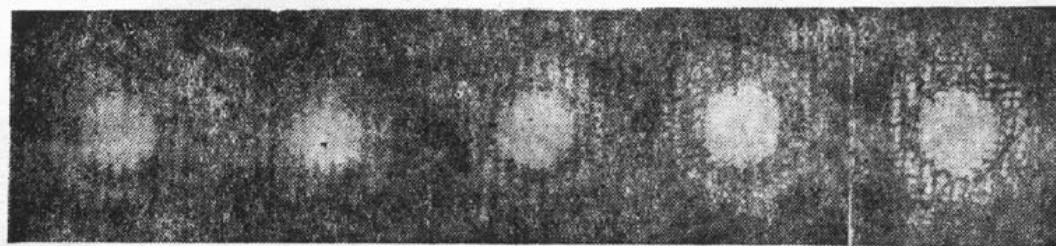
只有(8)式的条件得到满足, 干涉条纹才能被很好地测量.



(a)  $K=1/10$  (b)  $K=1/7$  (c)  $K=1/5$  (d)  $K=1/3.5$  (e)  $K=1/2.8$

Fig. 3 The influence of the speckle noise upon the Young's fringes for the different  $K$  value while  $|\mathbf{d}|=0.35$

(a)  $D=4.2$ , (b)  $D=3$ , (c)  $D=2.1$ , (d)  $D=1.5$ , (e)  $D=1.2$



(a)  $K=1/10$  (b)  $K=1/7$  (c)  $K=1/5$  (d)  $K=1/3.5$  (e)  $K=1/2.5$

Fig. 4 The influence of the speckle noise upon the Young's fringes for the different  $K$  value while  $|\mathbf{d}|=0.7$

(a)  $D=8.4$ , (b)  $D=6$ , (c)  $D=4.2$ , (d)  $D=3$ , (e)  $D=2.1$

如果只考虑底片颗粒散斑对干涉条纹的影响, 询问域设置得越大越好. 但是当询问域过大时, 会使域中所包含的粒子群位移量存在较大差异. 由于条纹是由域中所有粒子共同衍射产生的平均结果, 当粒子之间的位移量不等时, 条纹的可见度将要下降, 甚至不能产生干涉条纹<sup>[4]</sup>. 所以, 询问域大小的选择还要考虑流场的速度空间分布的情况. 在速度差异较大的区域, 必须选择小的询问域, 以保证域中的粒子群有相同的位移量. 在实际测量中, 如果粒子的最大像面位移量为  $d_{\max}$  时, 则合适的询问域直径应选为:

$$D = 6.1 d_{\max}. \quad (9)$$

由(6)式和实验结果还可以看出, 当询问域一定时, 如图3(c)和图4(e)的  $D$  都为 2.1 mm,  $|d|$  值越大,  $K$  值就越大, 散斑噪声对条纹的影响也就变得越严重. 在图3(c)中,  $|d| = 0.35$  mm, 相应的  $K = 1/5$ , 条纹仍可测量. 而在图4(e)中,  $|d| = 0.7$  mm,  $K = 1/2.5$ , 条纹基本上已被散斑淹没了. 因此, 当询问域一定时, 由条纹所能得到的粒子位移量将受到限制, 根据(8)式, 位移量的最大值为

$$d_{\max} = D/6.1. \quad (10)$$

由此可以得出: 当询问域的直径为  $D$  时, 由干涉条纹可以测量的粒子位移范围为:

$$2r \leq d \leq D/6.1, \quad (11)$$

式中,  $2r$  是粒子的直径.  $2r \leq d$  是粒子位移的最小限, 这是为能够在粒子本身的衍射调制范围内产生足够多的条纹数而要求的.

在比较复杂的流场测量中, 也可以对不同的区域采用不同大小的询问域的方法, 来缓和为消除散斑影响希望  $D$  值大与为使位移量相等而希望  $D$  值小之间的矛盾.

### 参 考 文 献

- [1] T. D. Dudderar, R. Meynart, P. G. Simpkins, Full-field Laser metrology for fluid velocity measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, 1988, 9 (3/4): 163~199
- [2] R. J. Adrian, Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow—a review *Inter. J. Heat & Fluid Flow*, 1986, 7 (2): 127~145
- [3] I. Grant, G. H. Smith, Modern developments in particle image velocimetry. *Optics and Lasers in Engineering*, 1988, 9 (3/4): 245~264
- [4] K. Hinsch, W. Arnold, W. Platen, Flow field analysis by large-area interrogation in particle image velocimetry. *Optics and Lasers in Engineering*, 1988, 9 (3/4): 229~243
- [5] 刘培森著. 散斑统计光学基础, 北京: 科学出版社, 1987: 32~34
- [6] 杨国光编. 近代光学测试技术, 北京: 机械工业出版社, 1986: 145~147
- [7] K. Hinsch, Fringe positions in double-exposure speckle photography, *Applied Optics*, 1989, 28 (24): 5298~5304

## The relation between the choice of interrogation region size and the particles displacement in particle image velocimetry

ZHOU GE    ZHANG YIMO

*(Institute of Contemporary Optical Instruments Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)*

(Received 21 November 1991; revised 20 January 1992)

### Abstract

In particle image velocimetry, a thin laser beam is usually used to interrogate the double-exposure photographic image point by point in order to find out displacement of the particles. In this paper, the relation between the choice of interrogation region size and the displacement of the measured particles is deduced by analyzing the effect of size of the region upon the speckle distribution and the influence of the speckle noise upon the discrimination of the Young's fringes. The problem that the size of the interrogation region places a restriction on the maximum displacement to be able to measure and the criteria for reasonably choosing the interrogation region are discussed and analyzed.

**Key words** particle image velocimetry, Interrogation region, displacement, speckle noise.