

# PIV 技术的粒子图像处理方法

段 俐

康 琦

(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

(中国科学院 力学研究所国家微重力实验室)

申功

(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

**摘 要:** 以图像相关理论为基础,研究粒子图像测速技术(PIV)的图像处理方法,编制出高精度的处理软件,重建计算模拟的粒子图像位移场,给出了自相关法与互相关法的积相关与减相关的计算结果,及互相关法的误差分析,分析了自相关与互相关区别,得出了互相关法是提高粒子图像测速技术精度的有效方法的结论,因此跨帧技术是 PIV 技术的发展方向。

**关 键 词:** 流动测量; 数字图像处理; 自相关; 互相关; PIV 技术

**中图分类号:** V 211.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2000)01-0079-04

目前 PIV 技术正朝着数字式粒子图像测速技术(DPIV)方向发展. 该技术采用电视摄像机式 CCD 摄像机,不需经湿处理,直接记录粒子图像,用处理相继两帧数字图像的互相关取得速度向量<sup>[1]~[4]</sup>.

近年来, DPIV 技术成为 PIV 技术的一个发展趋势. 图像相关技术是 DPIV 技术的位移场重建方法,可以说是一门边缘科学,是以信息论和随机过程理论作为它的基础. 近二三十年来,它在力学、光学、声学、电子学、地震学、地质、神经生理学等领域内,都日益得到广泛的应用.

## 1 相关技术的基本理论

### 1.1 二维相关函数的定义<sup>[5],[6]</sup>

PIV 技术中所获得的粒子图像信号是二维的,从粒子图像中获取速度信息研究的是两个图像信号的相似程度,因此所关心的是二维相关函数的形式,也就是要研究图像匹配的问题. 假设有两个离散的二维信号是  $x(m, n)$  和  $y(m, n)$ , 把  $x(m, n)$  在  $y(m, n)$  上对每一个移动点  $(k, l)$  计算,则相关函数为

$$R(k, l) = \sum_{k=-} \sum_{l=-} x(m, n) y(m+k, n+l)$$

式中,  $R(k, l)$  表示了  $x$  与  $y$  之间的相互关系,

$R(k, l)$  为最大时的  $k$  和  $l$  就表示  $x$  与  $y$  的相对位移. 通常情况下 PIV 技术中两次曝光的粒子图像的亮度不均匀,同时在计算机程序设计中考虑计算时间问题,所以做匹配尺度一般应使用如下被规格化了的相互关系

$$(k, l) = \frac{R(k, l)}{\sqrt{\sum_{k=-} \sum_{l=-} y^2(m+k, n+l)}}$$

上述计算方法又叫积相关法,其计算量很大,为从大幅面图像寻找与样板最一致的地方,要花费相当多的时间,为提高计算速度,采用贯序检测法(Sequential Similarity Detection Algorithm),也叫减相关法. 在输入图像中搜寻与模板图像最为相似的子图像的位置. 这种方法是相对于相关识别法而提出的一种快速实用的识别方法,它以被搜寻的子图像与模板图像之间的差异为相似性指标,搜寻最佳相似子图像. 由于该方法大量的计算是减法计算,而非乘法,因此计算速度快,节约许多时间. 把  $x(m, n)$  在  $y(m+k, n+l)$  上对每一个移动点  $(k, l)$  计算,则相关函数为

$$R(k, l) =$$

$$\sum_{k=-} \sum_{l=-} |x(m, n) - y(m+k, n+l)|$$

当  $x$  与  $y$  达到最相似时,  $R(k, l)$  为最小值.

收稿日期: 1998-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(1939100-1-3)

作者简介: 段俐(1966-),女,四川广安人,博士生,100083,北京.

## 1.2 自相关与互相关

相关测量是图像处理中的重要手段,相关又有自相关与互相关之分.自相关是 PIV 技术的两次曝光的粒子图像成像在一张底片上,速度方向不能自动判别,存在速度方向二义性问题,自相关方法的速度测量范围也很小.做相关计算时,图像中的判读小区域在自身图像中寻找其最大相似度的区域,做相关处理的两次曝光的粒子图像中的无效粒子被认为是相关处理中的背景噪声,影响判读识别的准确度.

互相关是做相关处理的两幅图像独立存在(在 PIV 实验中为两次曝光成像在两张底片上),一个最大优点是可以自动判别速度方向,速度测量的范围可以比自相关大很多.做相关计算时,图像中的判读小区域在另一图像中寻找其最大相似度的区域,降低了相关处理中的背景噪声,相关的有效粒子数增加,信噪比提高,判读识别的准确度大大提高.

## 2 相关计算的软件设计

传统的 PIV 相关处理方法是作为判读小区域的原图像与被搜寻的图像取同等大小.为提高判读识别的准确度,在做相关计算时,把粒子图像跟踪测速技术(PIV)的粒子跟踪识别思想应用到相关计算中,作为判读小区域的原图像在其 4 倍大小的另一幅被搜寻的图像中寻找其最相似的区域,判读识别的成功率很高,尤其是在处理图像质量比较差的图像时,这种方法更为必要.

用 MS FORTRAN 语言编制了相关处理软件,分别采用积相关和减相关方法,既可做粒子图像的自相关计算,亦可做粒子图像的互相关计算.

在积相关和减相关的方法中,判读小区域取  $32 \times 32$  像元,数组为  $x(32, 32)$ ,被搜寻的图像取  $64 \times 64$  像元,做相关计算的数组为  $y(32+k, 32+l)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, 32$ ,  $l = 0, 1, 2, \dots, 32$ ,做循环运算,在  $y(32+k, 32+l)$  中找到与  $x(32, 32)$  最相似时的  $k$  和  $l$ .在像空间中,横向位移为  $k$  个像元,纵向位移为  $l$  个像元,再根据物像比例关系得出物空间位移(速度)的大小和方向.

从运算时间上来看,积相关方法耗时是减相关法耗时的 1.5 倍;从积相关与减相关的相关函数数值上来讲,积相关法的最大相关点在极大值处,减相关法的最大相关点在极小值处,两种方法的编程思想是有所不同的.图 1 和图 2 是用自编的程序对粒子图像的某一判读小区域做积相关计算

的相关谱和做减相关计算的相关谱,从两图可见,积相关与减相关的相关峰值均很锐利、突出.

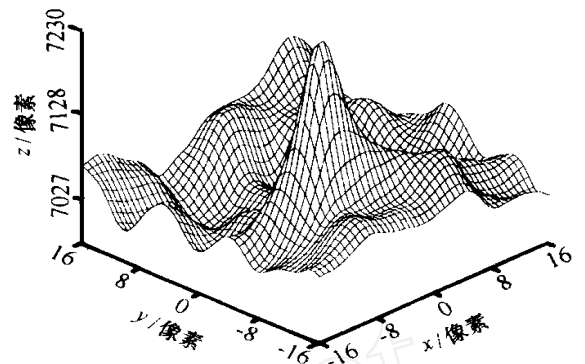


图 1 积相关法的相关谱

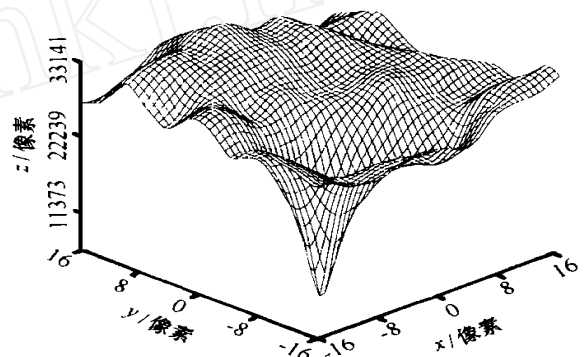


图 2 减相关法的相关谱

## 3 相关计算的模拟及误差分析

几种相关方法的误差通过重建计算模拟的粒子图像位移场而获得.本文模拟了从图像的两对角向中心流动又流向另外两对角的对流场;在模拟流动中,流场中各点位移的大小是已知的,用我们自编的相关计算软件从模拟粒子图像中重建计算出各点的位移,由此可以得到绝对误差和相对误差.

图 3 为模拟的有噪声对流前的粒子图像,图



图 3 对流前的有噪声粒子图像

4 为模拟的有噪声对流后的粒子图像,图 5 为图 3 与图 4 的合成图像.

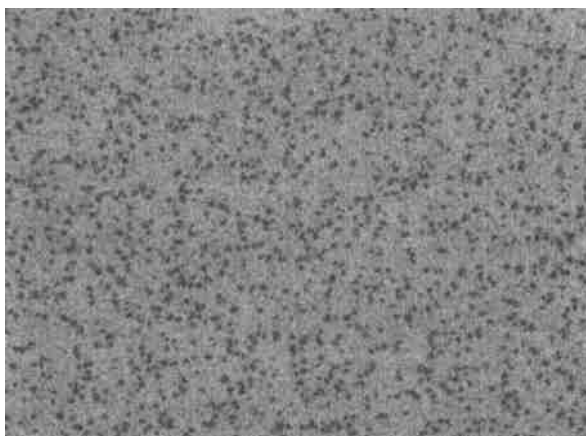


图 4 对流后的有噪声粒子图像

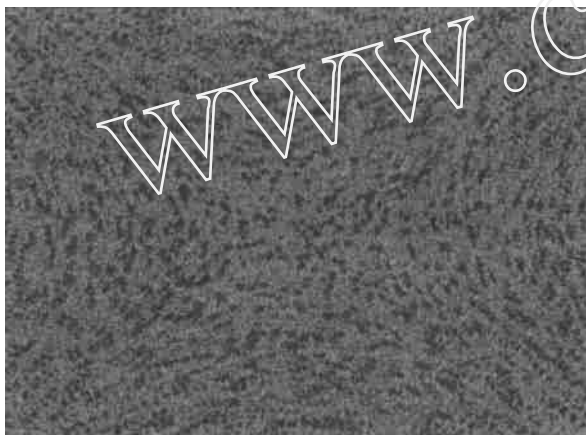


图 5 有噪声对流前后的合成图像

### 3.1 自相关法模拟计算

分别用积相关和减相关的方法对模拟的位移场进行了自相关法的位移重建计算.积相关法计算结果如图 6 所示,自相关法存在的问题首先是速度方向问题,速度的大小计算大部分合理,但方向无法判断,这一问题在互相关法中是不存在的;其次是自相关法的判读识别的准确度比较低,出现了许多错误的速度矢量,重建计算的误差较大.

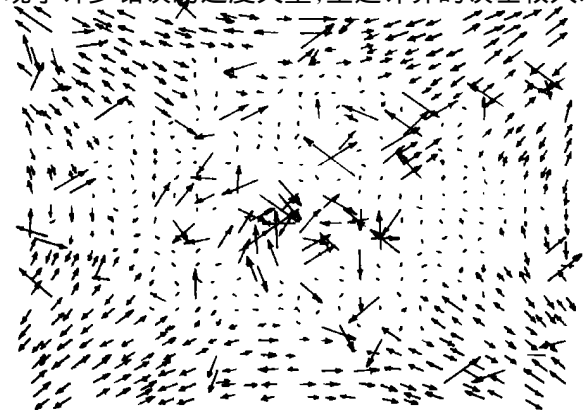


图 6 自相关积相关法计算结果

### 3.2 互相关法模拟计算及误差分析

分别用积相关和减相关的方法对有噪声情况下的模拟的位移场进行了互相关法的位移重建计算.表 1 给出了用积相关和减相关计算的粒子图像的位移(速度)的误差,其中包括  $x$  方向位移的误差、 $y$  方向位移的误差以及位移  $r$  的误差.图 7、8 给出了互相关法重建计算的位移(速度)分布.重建结果显示:积相关法的精度高于减相关法,误差较小.

表 1 互相关法对流场重建误差分析

相关方法	位移 $r$ 的绝对误差/像素	位移 $r$ 的相对误差/ %
积相关法	0.363 7	1.607
减相关法	0.439 4	1.942

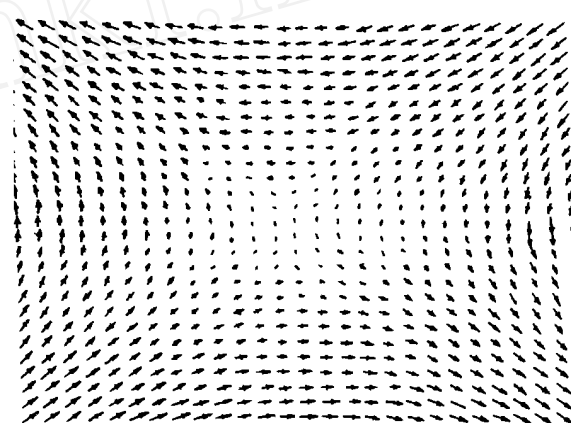


图 7 互相关积相关法计算结果

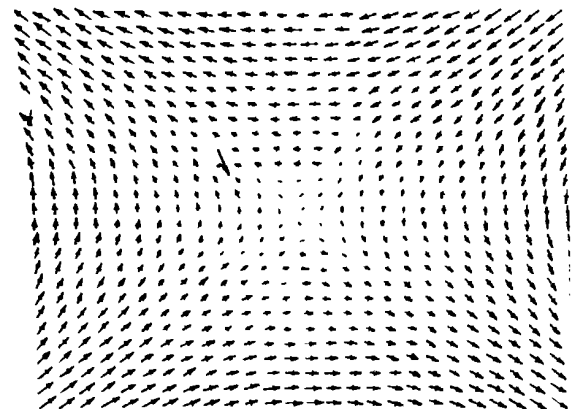


图 8 互相关减相关法计算结果

## 4 结束语

PIV 技术是目前国际上实验流体力学的热门实验技术,而图像处理方法是 PIV 技术的一个关键.从本文的分析可见,在 PIV 技术的图像处理方法中,粒子图像的互相关法明显地优于自相关法,既可以精确地重建位移场,亦可以自动识别位移方向;从精度上讲,积相关法稍优于减相关法,但

其运算时间长;进一步提高 PIV 技术精度的有效方法是用互相关法进行图像分析,也就是记录 PIV 底片时必须从硬件上解决跨帧技术问题.

### 参 考 文 献

- [1] Westerweel J, Dabiri D, Gharib M. The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings[J]. Experiments in Fluids, 1997, 23: 20 ~ 28.
- [2] Keane R D, Adrian R J. Theory of cross-correlation analysis of PIV image[J]. J Appl Sci Res, 1992, 49: 191 ~ 215.
- [3] Michael L Jakobsen, William J Hossack, Clive A Greated. Particle image velocimetry analysis using an optically addressed spatial light modulator: effects of nonlinear transfer function[J]. Applied Optics, 1995, 34(11): 1757 ~ 1768.
- [4] Grant X Wang. Directionally-unambiguous, digital particle image velocimetry studies using a image intensifier camera[J]. Experiments in Fluids, 1995, 18: 358 ~ 362.
- [5] 田村秀行. 计算机图像处理技术[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1988.
- [6] 徐秉铮, 欧阳景正. 信号分析与相关技术[M]. 北京: 科学出版社, 1981.

## Image Processing Method of PIV Technique

DUAN Li

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

KANG Qi

(Chinese Academy of Sciences, Institute of Mechanics)

SHEN Gong-xin

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

Abstract: The image processing method of PIV was studied on the base of the image correlation theory in this paper. The simulated particle image displacement field was reconstructed. The reconstruction result of auto correlation and cross correlation, and the error of cross correlation were given. The difference of this two correlation method was analyzed. The cross correlation is a good method that can increase the PIV's accuracy, so the frame straddling technique is favorite to be developed for PIV measurement.

Key words: flow measurement; digital image processing; autocorrelations; cross-correlation; PIV