

改进的反距离权重法在 PIV 流场测量系统中的应用

罗朝林,陈若舟,吴华良

(水利部珠江水利委员会珠江水利科学研究院,广东 广州 510611)

**摘要:**从流体连续性原理出发,提出了一种基于 Delaunay 三角网通量平衡的反距离权重插值算法,应用于 PIV 流场测量系统流场后处理模块中。通过模拟流体漩涡试验,对该方法进行验证,结果表明,该方法能准确把控制点数据插值到规则目标点网格,且能有效地剔除流场误矢量,具有较广泛的适用性。

**关键词:**粒子图像测速;流场测量;反距离权重法;结构网格;误矢量

**中图分类号:**TV131. 66      **文献标志码:**A      **文章编号:**1006 - 7647(2012)S2 - 0037 - 03

粒子图像测速(PIV/PTV)技术测量表面流场已经在河工物理模型试验中广泛应用,但输出的结果一般皆为非结构性网格数据,为了便于观察流场运动的规律,把非结构性网格数据转换成结构性网格数据有较为重要的意义,插值是解决这一问题的常用方法。目前,较为通用的插值算法有最邻近法、移动平均法、反距离权重法(IDW)、克里金(Kriging)法等<sup>[1]</sup>,最邻近法适用于数据紧密完整,只有少数点没有数据的情况;移动平均法仅仅是一种平滑预测技术,只能消除“畸点”噪声波动;克里金插值法是一种最佳线性无偏估计的方法,但是应用起来较为麻烦。根据整体物理模型的流场运动特征,运用反距离加权法对 PIV 处理结果进行插值具有更广泛的适用性。

1 基本原理

反距离权重插值方法是一种加权平均插值方法,可以把离散数据插值成结构化的网格数据,该方法基于一种假设:彼此距离较近的事物比彼此距离较远的事物更相似,并且假定每个测量点都有一种局部影响,而这种影响会随着距离的增大而减小,与流体运动连续性的定律相吻合,奠定了反距离权重插值法应用在流体运动中的理论基础。

设平面上分布了一系列离散点,这些点的坐标为 $(x_i, y_i)$  ( $i=1, 2, \cdots, n$ ),对应的流速值为 $v_i$ ,根据相关邻域的值,通过反距离权重法可求得指定点的流速值。反距离权重法的通用方程<sup>[2]</sup>为

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{r_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i^p}}$$

(1)

式中: $Z$  点为指定点的估计值; $Z_i$  为控制点  $i$  的流速值; $r_i$  为  $i$  点与指定点之间的距离; $n$  为相关邻域控制点的数量; $p$  为权重系数( $p$  一般取  $1 \sim 3$ ), $p$  越大表明距离相关性越明显。通过对相关邻域中的离散控制点进行插值可获得目标点流速值。

在这个算法中权重系数  $\omega$  的计算方式为

$$\omega = \frac{1}{r^p}$$

(2)

由于这种方法为距离预测位置最近的点分配的权重较大,所以插值点与其距离较近的点相关性越大,符合流体连续性定律。

但是,PIV 流场测量系统分析出的流速数据容易受到“噪声”等其他因素的干扰,导致被插值点不能满足流体连续性方程,而手工法删除只能删除大小与方向存在明显差异的情况,而不能剔除相同数量级的误矢量,因此有必要在插值前进行误矢量校验。本文采用阮晓东等<sup>[3]</sup>提出的一种基于 Delaunay 三角形节点通量平衡的方法对控制点进行校验。该方法假设流体的密度为常数,如果流体在三角形内满足连续性方程,则流入流出三角形的净流量为  $0^{[3]}$ ,即

$$\int_s \nabla \cdot \mathbf{u} dS = \int_c \mathbf{u} n dl = q_{v1} + q_{v2} + q_{v3} = 0$$

(3)

式中: $S$  为三角形的面积; $C$  为周长。理想的流体应该满足流入三角形净流量为 0,但实际应用中只能接近 0,因此需要引入一个评价系数  $E^{[2]}$ :

$$E = \frac{|q_{v1} + q_{v2} + q_{v3}|}{\max(|q_v^+, q_v^-|)} \quad (4)$$

通过  $E$  值来判断误矢量是否存在,从式(4)可以得出  $E$  的取值范围为 0 ~ 1。 $E$  越小,表明数据越准确;反之,则存在误矢量。通常设定的判别阈值为  $E=0.2 \sim 0.3$ ,如果大于设定的阈值,则判断该数据对存在误矢量,在网格插值之前先行进行数据修正(修正算法本文不作论述),修正后的数据才加入插值数据链表。通过在网格插值之前进行误矢量判定和修正,可进一步提高网格插值的准确性和精度。

2 算法分析与实现

网格插值是利用某种插值方法把已知规则或不规则的数据统一到一系列有规律的节点上,实现数据的有序分布,便于观察事物的规律。设定义一个二维平面上的多边形区域,对该区域进行网格处理,节点流速函数可概化为  $z_{(i,j)} = f(x_{(i,j)}, y_{(i,j)})$ ,其中  $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n_0$ 。拟把离散性数据转换成规则的目标点数据,需进行网格插值,图 1 是网格插值的一个示意图<sup>[4]</sup>。

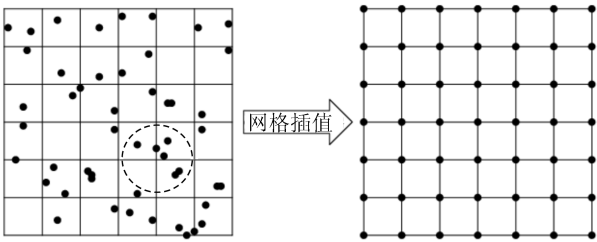


图 1 网格插值示意图

如图 1 所示,拟把离散的控制点数据转换成规则的结构化目标点数据,应先确定网格的大小和搜索区域,然后通过特定的插值算法进行插值,具体插值流程如图 2 所示。

- 算法的实现过程如下:
- a. 初始化:设置网格间距,生成插值网格。
  - b. 确定搜索区域,在插值点搜索范围内寻找输入数据对。
  - c. 利用流体连续性方程判别数据对是否符合规律,符合规律则加入数据链表;否则修正数据,转 b。
  - d. 如果搜索区域数据添加完毕,进行插值计算。
  - e. 输出该点的插值数据。
  - f. 待所有网格点插值完毕,插值结束。
- 流场中的速度矢量的分布满足一定的相关性,

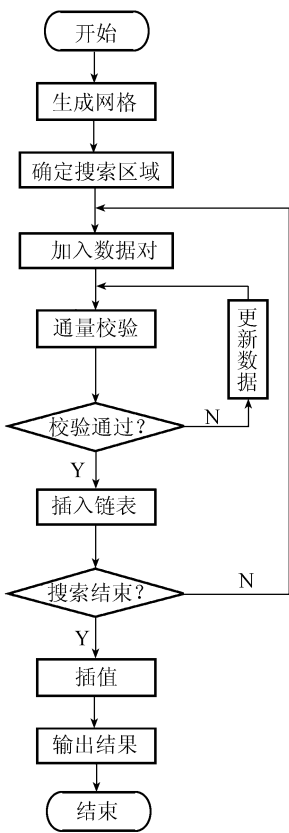


图 2 改进的反距离权重法实现流程

即相邻流场矢量之间不应存在突变,在数值的变化上是连续的,误矢量不能满足这种要求。因此对离散数据进行插值时,首先运用流体连续性方程对离散数据点进行三角网通量平衡校验,校验通过则该数据满足要求,加入插值数据链表;否则直接剔除,避免误矢量干扰,可提高插值精度和速度。

3 试验与验证

上述算法在 Visual C++2005 平台上开发,嵌入到 PIV 流场测量系统中,用于断面插值、区域插值和全局插值。该试验是通过电机带动水桶旋转而实现水体螺旋运动,模拟流体的漩涡(试验图片见图 3),然后通过 PIV 技术分析漩涡的运动方向和大小,计算网格为 32×32;然后通过改进的反距离权重法进行插值,插值网格为 30×30;图 3 为间隔 40 ms 的两幅粒子运动图像,图 4(a) 为未插值的流体运动分析结果,图 4(b) 为运用改进的反距离权重插值法插值后流场分布。

通过试验数据和流场效果比较可以得出,插值前由于噪声的干扰有局部区域没有流速或存在误流速,经过改进的反距离权重插值算法插值后,不仅把不规则的离散数据转换成规则的网格数据,而且剔除了一些干扰噪声,插值后的流速与相对应的插值前区域的流速数据具有一致性,反映了真实的流向

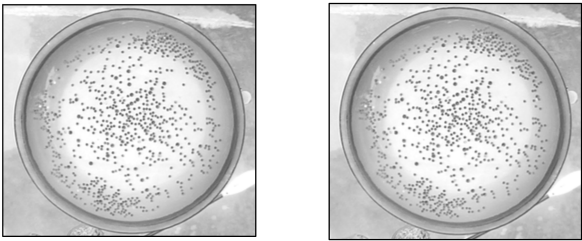


图3 间隔 40 ms 的两幅粒子运动图像

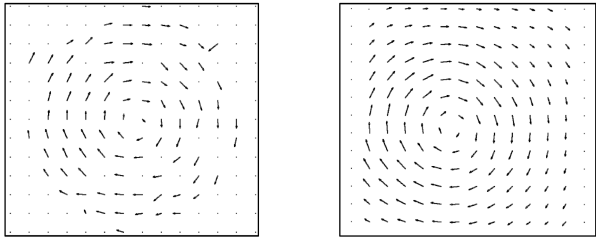


图4 流场分布

和流速,能满足 PIV 表面流场测量系统的精度和速度要求。

(上接第 11 页)

响可以忽略。此时,影响最终测量结果的是传感器被水流冲击造成的位置误差以及钢丝弹性造成的误差。钢丝使用不锈钢合金钢丝,铅鱼质量设计为 30 kg,此时钢丝的弹性变形一般很小,也可以忽略,因此,误差主要由横向位移的测量引起。由于横向位移测量通过流速间接导出,因此误差相对较大,现场试验基本误差在 0.6% 左右。在一般现场条件下,这部分引入的误差量在 1 mm 左右。

最后一部分影响测量精度的因素是接触传感器压缩泥面产生的误差,这部分误差与泥面承载力密切相关,一般来说,泥面越硬误差越小。经过实验室模拟试验,这部分误差在 5 mm 以下。

该系统在黄河某灌区进行实际试验,流速 0.8 m,水平偏移 0.42 m,铅鱼质量 15 kg,测试 6 个点,每个点测试 3 遍。人工使用水尺测杆插入泥底,通过卷尺测量水深获得泥位,数据见表 2。

| 表 2 现场测试数据   |              |              |           |           | cm    |
|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|-------|
| 第 1 次<br>测量值 | 第 2 次<br>测量值 | 第 3 次<br>测量值 | 测量<br>平均值 | 人工<br>测量值 | 误差    |
| 25.2         | 25.1         | 25.2         | 25.17     | 26.5      | -1.33 |
| 23.3         | 23.3         | 23.4         | 23.33     | 24.8      | -1.47 |
| 10.8         | 10.9         | 10.9         | 10.87     | 13.2      | -2.33 |
| 8.6          | 8.6          | 8.6          | 8.60      | 10.8      | -2.40 |
| 16.5         | 16.4         | 16.5         | 16.47     | 16.5      | -0.03 |
| 26.7         | 26.6         | 26.7         | 26.67     | 29.4      | -2.73 |

4 结 语

本文介绍了反距离权重插值法的原理及其实现方法,并且根据流体连续性运动方程的特征,对反距离权重法进行改进,使该方法不仅能实现网格插值的功能,而且能有效剔除噪声干扰点,进一步提高了插值准确度和精度。试验表明,改进的反距离权重插值法不仅能适用规则的 PIV 数据,也可应用于随机分布的 PTV 技术,能较好地反映流场的运动规律,且实现较为简单,易被推广应用。

参考文献:

[1] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.

[2] 李新. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展, 2000, 15 (3):260-265

[3] 阮晓东,吴锋,杨华勇,等,一种自动检测 PIV 数据中误差矢量的算法[J]. 机械工程学报, 2004,40(7):89-92.

[4] 李志林,朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,2000:134-139.

(收稿日期:2012-07-10 编辑:熊水斌)

从表 2 可以看出,自动测量与人工测量误差在 3 cm 以下,且基本朝一个方向偏差,应该是存在一个可以修正的固定偏差值。修正后整体误差可以控制在 2 cm 左右,能够满足实际需要。

4 结 语

泥位测量是渠道断面流量测量中的一个重要参数,本文提出的方法及相关设备,经过现场试用具有较好的稳定性和可靠性,测量精度能够满足要求,成本较为低廉,具有较好的应用前景。这种方法也为渠道断面流量自动测试提供了一种参考方法。

参考文献:

[1] 戴建国,姚刚,唐炜. 一种新型水文缆道综合测量装置的研究[J]. 水利水电自动化,1999(4):44-46.

[2] 张孝兵,沈晓红. PLC 在步进电机控制中的应用[J]. 机电工程技术,2008,37(1):104-106.

[3] 汪仁里. 超声接近报警器[J]. 电子制作,2008(3):67-70.

[4] 杨仁文. 超声波泥位计的研制和应用效果[J]. 山地研究,1998,16(1):77-79.

[5] 苏红鲁,张扩成,张厚芹. 荆家渡灌区自动测水量水系统研制[J]. 山东水利,2011 (10):14-15.

(收稿日期:2012-07-25 编辑:胡新宇)