

文章编号 : 1672-989X(2005)02-0079-05

PIV 系统测量误差的实验评价方法 以及实验参数的优化

董明哲, 汪 洋, 蒋宁涛

(天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 : 提出了一种 PIV (Particle Image Velocimetry) 测量误差的实验评价方法 : 利用匀速转动圆盘上粒子的反射光模拟流场中示踪粒子散射光解决基准速度场。建立了一套二维 PIV 系统的测量误差评价系统, 利用该系统对 PIV 测量误差和测量精度进行了实验评价, 得到了结果误差在空间及时间上的概率分布特性, 并对两个关键 PIV 实验参数进行了优化。实验表明该误差评价方法装置简单, 方法可靠, 可方便灵活地对 PIV 系统测量误差和测量精度进行实验评价和参数优化研究。

关键词 : PIV ; 测量误差 ; 实验评价 ; 参数优化

中图分类号 : TN249 **文献标识码** : A

An experimental method for evaluating the PIV measurement error and its application in optimizing PIV experiment parameters

DONG Ming-zhe, WANG Yang, JIANG Ning-tao

(State Key Laboratory of Engine in Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract : This paper presents an experimental method to evaluate the error of measurement results by means of Particle Image Velocimetry (PIV). The error analysis under evaluation includes the results' system error, measurement precision expressed by standard error, and the random error's statistical characters. Thus, two experimental parameters significant for the PIV performances are optimized. Results show that the experimental method is reliable and the evaluation system is easy to construct.

Key words : particle image velocimetry (PIV); measure error; experimental evaluation method; experimental parameter optimization

0 引 言

粒子图像测速技术 (Particle Image Velocimetry, PIV) 是一种量化的瞬时二维及三维流场速度测量技术, 在测量中具有不干扰被测流场, 以及动态响应快、精度高、空间分辨率高等特点。相比于激光多普勒技术 (LDA) 和相位多普勒技术 (PLDA) 的单点测量, 能进行全场快速无扰动测量, 是测量具有非稳定性、

湍流复杂性及随机性等复杂流场的一种最先进的技术。

近年来 PIV 技术的应用日益广泛, PIV 系统测量结果的精度也一直是应用者十分关心的问题。对 PIV 测量结果误差分析大体分为两类 : 一是利用计算机模拟生成基准流场研究测量结果误差^[1], 该模拟方法的主要特点是可任意调节实验参数并进行相应误差分析, 因此对优化实验参数研究非常方便^[2], 但对 PIV

* 收稿日期 : 2004-06-22, 修订日期 : 2004-09-14

基金项目 : 国家自然科学基金资助项目 (项目号 : 50006008); "973" 项目子课题资助 (课题编号 : 2001CB209203)

作者简介 : 董明哲 (1980-) 男, 湖南衡阳人, 研究生。研究方向 : 内燃机的激光诊断及内燃机电控技术。

系统的实际测量误差进行评价时有局限性;另外一种是采用一些不可压缩定常流作为基准速度场,对实际 PIV 系统测量误差进行估计和分析^[3],但由于实际流体通常都是三维的,加上流体自身的特性,稳定的已知基准速度场很难得到。因此,基准速度场是 PIV 系统误差实验评价的关键问题,笔者提出利用匀速转动圆盘上的粒子的反射光模拟流场中示踪粒子散射光的解决方案,在此基础上提出一套对二维 PIV 系统进行误差估计和速度标定的实验方法,并利用这套方法对 PIV 实验参数中的两个关键参数进行优化。

1 PIV 测量原理和测量误差评价系统

1.1 粒子图像测速(PIV)原理

图 1 为 PIV 的测量原理图,其基本原理为:在流场中散布一定的示踪粒子,用已知时间间隔的双脉冲激光片光源照射所要研究的流场区域,利用 CCD 相机记录下两时刻的图像,通过对图像进行分析运算,求出流场中各微小区域在已知时间间隔内的偏移位移,继而得出速度矢量场。在实际应用中,总是将图像分割成大小适中的微小查问区域 $L \times L$,在间隔时间 Δt 内假定查问区域粒子位移 Δs 为直线位移,这样粒子在 x, y 坐标上速度分量 u, v 可以用下面公式求得:

$$\Delta x = M \Delta X, \Delta y = M \Delta Y,$$

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} \times 10^3, v = \frac{\Delta y}{\Delta t} \times 10^3$$

(u, v 为 x 和 y 方向速度,单位: m/s ; $\Delta x, \Delta y$ 为流场中粒子实际位移,单位: mm ; $\Delta X, \Delta Y$ 为粒子图像在 x 和 y 方向的位移,单位:像素 pixel; M 为比例系数,单位: mm/pixel ; Δt 为脉冲时间间隔,单位: μs)

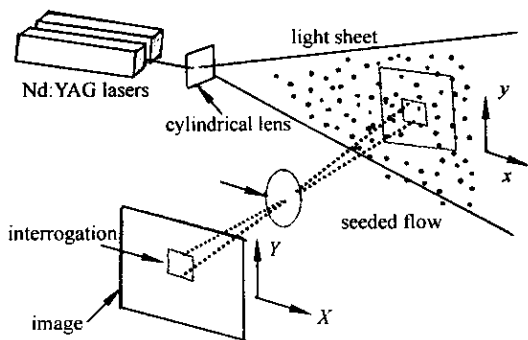


图 1 PIV 测量原理图

Fig.1 Principle of PIV measurement system

在测量中,时间间隔 Δt 以及查问区域大小 L 是人为设定的,这两个实验参数对测量结果精度有重要影响,笔者将这两个参数当作优化目标。实验所用

PIV 系统是德国 LaVision 生产的 Flowmaster3S 系列。

1.2 PIV 误差评价系统

要对 PIV 的实际测量结果进行误差评价,关键是要解决基准速度场问题。提出利用匀速转动圆盘上粒子的反射光模拟流场中示踪粒子散射光的解决方案,具体做法:用半径为 25cm 的 80 # 号水磨砂纸(砂纸平均颗粒粒径为 $180 \sim 250\mu\text{m}$)贴在匀速马达的转动圆盘上,在已知马达转速时圆盘各点的速度可通过计算得出当作基准速度场,同时将 PIV 系统中的片光源通过圆柱透镜扩展为矩形光柱均匀地照射在圆盘上,利用 CCD 相机接收圆盘上粒子的两个时刻的反射光记录下模拟流场的粒子图像。图 2 是评价系统原理图。

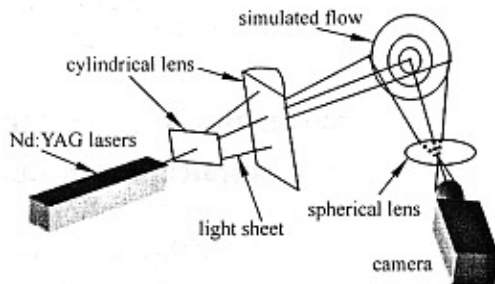


图 2 PIV 误差评价系统原理图

Fig.2 Principle schematic of the measurement error evaluation system

该方法的主要特点为:

- (1) 粒子是固定在旋转圆盘上的,而且均匀分布,圆盘转速波动可以控制在 0.001% 以内,因此可以获得足够精度的模拟流场,只要得到圆盘的转速,就可以获得圆盘上各点的速度矢量,作为速度基准;
- (2) 模拟流场为二维流场,没有第三维速度分量的干扰;
- (3) 装置简单、外形尺寸小。

对 PIV 系统误差进行评价时,为消除测量结果中随机误差带来的影响,根据高斯(C. F. Gauss)1795 年提出的随机误差分布规律函数表达式:

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} \quad (y \text{ 为随机误差为 } \Delta \text{ 时的概率})$$

密度; σ 为标准误差, $\sigma = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}}$)

从上式可知,随机误差有对称性和抵偿性的特点。为此,利用测量结果平均值 \bar{v} 消除随机误差影响来进行系统误差评价,测量均值 \bar{v} 和基准速度的偏差计算公式为:

$\delta = \bar{v} - R \times (n/60) \times 2\pi \times 10^{-3}$ (\bar{v} 为测量结果均值,单位: m/s; R 为圆盘半径,单位: mm; n 为圆盘转速,单位: r/min)。

将测量速度结果划分为等宽度 Δv (m/s) 区间,各区间内测量结果出现频率为 $y(i)/n$,以 $y(i)/n\Delta v$ 当作平均概率密度为纵坐标,测量结果 v 为横坐标,利用测量结果的标准误差 σ 拟合高斯误差分布函数,看二者是否接近,同时利用标准误差 σ 表征测量结果精度。

在参数优化时改变激光脉冲时间间隔 Δt 则得到合适的粒子图像位移 Δs (单位: 像素 pixel),用到的计算公式为:

$$\Delta s = \frac{R \times (n/60) \times 2\pi \times \Delta t \times 10^{-6}}{M}$$

(Δt 为激光脉冲时间间隔,单位: μs ; M 为放大系数,单位: mm/pixel)。

2 实验结果

2.1 PIV 系统测量结果及系统误差评价

图3是用PIV系统对模拟流场的典型测量结果,图4是对该测量结果中同一旋转圆周半径($R = 20\text{mm}$)上均匀抽取90个测量点获得的概率密度分布曲线(折线部分,区间宽度 Δv 为 0.1m/s)。图中的虚线是利用上述测量点标准误差 σ 拟合的高斯误差分布函数,图中的直线为测量点的基准速度 (8.0657m/s)。通过比较可以发现,PIV测量随机误差的概率密度分布在空间上接近高斯误差分布函数,均值和基准速度的偏差为 -0.0157m/s ,均值偏差率为

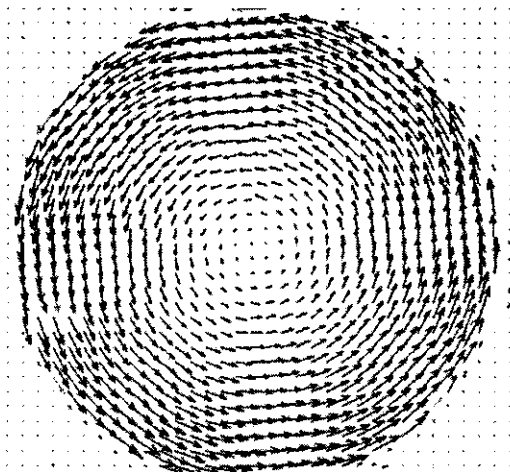


图3 模拟流场实际测量速度场

Fig. 3 Velocity vectors of simulated flow

-0.19% , 2σ 为 0.4414m/s (结果区间真值出现概率为 95.45%)。上述实验中,圆盘转速 $n = 3850\text{r/min}$,测量参数为: $M = 0.0548225\text{mm/pixel}$, $\Delta t = 35\mu s$,计算时分割查问区域大小 $L \times L = 32 \times 32$ (像素 pixel),查问区域内平均粒子数 $N = 9$,统计参数: 旋转半径 $R = 20\text{mm}$ (对应速度为 8.0657m/s)。

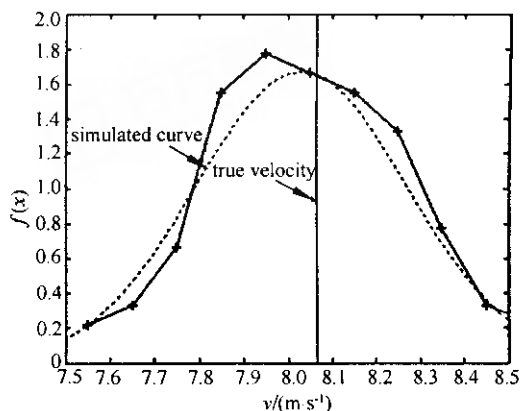


图4 测量结果空间分布概率特性

Fig. 4 Spatial probability distribution of measurement results

图5是连续拍摄40次时测量结果在时间域的概率分布特性,转速 $n = 3850\text{r/min}$,以每次测量结果同一点(对应速度为 8.2465m/s)处的速度值为统计量,其它条件同图4。从图5中可以发现测量结果随机误差在时间上也接近高斯误差分布函数,均值和基准速度的偏差为 -0.0396m/s ,均值偏差率为 -0.48% , 2σ 偏差为 0.3568m/s (真值概率为 95.45%)。

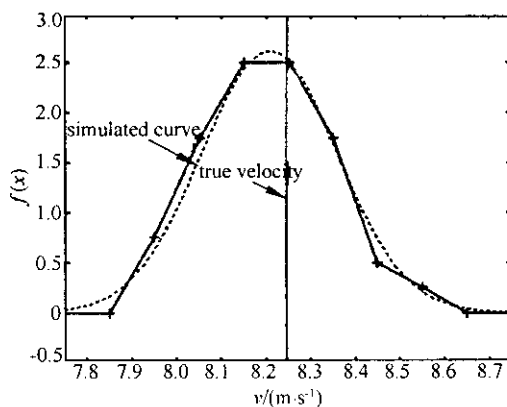


图5 测量结果时间分布概率特性

Fig. 5 Temporal probability distribution of measurement results

2.2 PIV 实验参数的优化

利用笔者提出的PIV误差评价系统,调节测量中激光脉冲时间间隔 Δt 和粒子图像分割查问区域大

小 L (pixel), 依据系统误差和标准误差的变化规律实现实验设定参数 Δt 和 L 的优化调节。图 6 是改变 Δt 使粒子图像位移 Δs (像素 pixel) 变化时, 均值偏差和标准误差 σ 随 Δs 的变化规律, 圆盘转速 $n = 3850 \text{ r/min}$, 测量参数为: $M = 0.0548225 \text{ mm/pixel}$, 粒子图像查询区域 $L \times L = 32 \times 32 \text{ pixels}$, 查询区域内平均粒子数 $N = 9$, 统计方法同图 4 和图 5。从图中可以发现 (a) 不管是空间上的测量误差还是时间上的测量误差, 不管是均值偏差还是标准误差, Δs 对它们的影响规律都是相同的: 当 $\Delta s < 3 \text{ pixel}$ 时, 二者均开始迅速增大。这主要是由于在对粒子图像分析计算粒子图像位移 Δs 时存在量化误差 Δx , 改变脉冲时间间隔 Δt 时 Δx 基本恒定, $\Delta x/\Delta s$ 随着 Δs 减小时该误差成分影响变大, $\Delta s < 3 \text{ pixel}$ 时该误差成分影响显著, 导致系统误差开始迅速增大。(b) 从图 6 中还可以发现, 当 $\Delta s > 3 \text{ pixel}$ 时均值偏差总为负数, 即测量结果总是小于实际值, 这是由于 PIV 测量中假定查询区域内粒子图像位移 Δs 为实际流场中两点的直线位移, 其值必然小于两点的实际位移, 使测量结果小于实际值。因此, 为了提高 PIV 系统的测量精度, 并且减少由于流场粒子曲线运动引起的测量误差, 通常选取 Δs 为 $3 \sim 4 \text{ pixel}$ 。

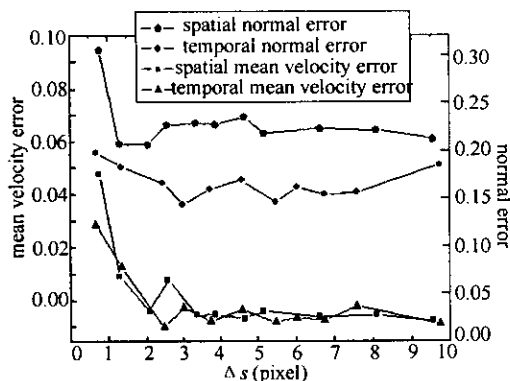


图 6 Δs 结果均值误差和标准误差的影响

Fig. 6 Variation of the mean velocity error and the normal error corresponding to Δs

图 7 是查询区域大小 L 改变时对均值偏差和标准误差 σ 的影响规律, 图中以粒子图像位移 (pixel) 和查询区域大小 L (pixel) 的比值 $\Delta s/L$ 为横坐标, Δs 值固定为 4 pixel , 其他实验条件同图 6。从图中可以发现, 不管是空间上的测量误差还是时间上的测量误差, 不管是均值偏差还是标准误差, L 对它们的影响规律都基本相同: 当 $\Delta s/L > 0.25$ 即 $L < 4\Delta s$ 时, 测量误差开始迅速增大。这主要是由于对两幅粒子图像

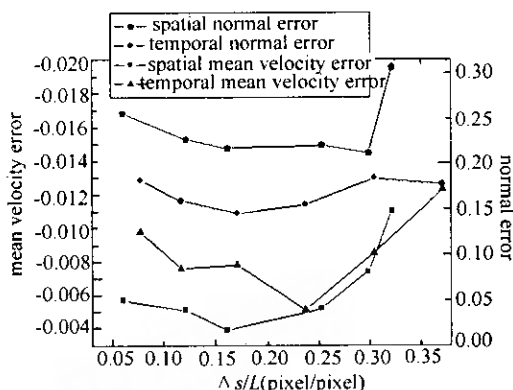


图 7 $\Delta s/L$ 结果均值误差和标准误差的影响

Fig. 7 Variation of the mean velocity error and the normal error corresponding to $\Delta s/L$

的对应查询区域进行互相关运算时, 粒子图像中的示踪粒子经过位移 Δs 后仍位于同一查询区域内时, 查询区域大小 L 至少应满足: $L > 2\Delta s$, 这种示踪粒子为图像处理中的有效粒子对, 当 $L = 4\Delta s$ 时, 查询区域内的有效粒子对为流场中对应区域内平均粒子数的 $1/2$, 进行互相关运算时出现粒子图像信噪比不够, 使结果中背景噪声影响增加, 导致测量误差增大, 通常选取 $L > 4\Delta s$, 但 L 过大时查询区域内粒子的非直线运动引起的误差将增大, 为更好地反映复杂流场真实速度场, L 应尽量小。参考图 7 中测量结果的均值偏差和标准误差 σ 随 L 的变化, 考虑实际测量时流场的复杂性, 通常选取 $0.125 < \Delta s/L < 0.25$, 即 $4\Delta s < L < 8\Delta s$ 。

3 结 论

(1) 提出了一种 PIV 系统的实验误差评价方法, 该方法具有基准流场精确度高, 装置简单, 测量结果误差可直接估计的特点;

(2) PIV 系统实际测量结果在空间和时间上随机误差的概率分布接近高斯随机误差分布规律;

(3) 对 PIV 实验参数优化结果为: 粒子图像位移最佳为 $3 \sim 4 \text{ pixel}$, 查询区域通常选取 $4\Delta s < L < 8\Delta s$ 。

参考文献:

- [1] RICHARD D K, RONALD J A. Optimization of particle image velocimeters. Part I: Double pulsed systems [J]. Meas. Sci. Tech. 1990(1): 1202 ~ 1215.
- [2] WEN W G, LIAO G H, FAN W D. Study of the parameters of the DPIV [J]. Journal of China University of Science and

Technology , 2000 , 30 (3) : 600 ~ 606 .

[3] LIU Y Z , LUO C S , CHEN H P . Error analysis of the whole field velocity measurement results via LDV/PIV [J] . Journal of Shanghai Jiao Tong University , 2002 , 36 (10) : 1044 ~ 1047 .

[4] RAFFEL M , WILLERT C E , KOMPENHANS J . Particle image velocimetry [M] . Springer 1998 .
[5] ZHAO H , NICOS L . Engine combustion instrumentation and diagnostics [M] . ISBN 0-7680-0665-1 298 ~ 333 .

(上接第 73 页)

$$\frac{p_{02}}{p_{01}} = \left[1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (M_1^2 - 1) \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \left[\frac{(\gamma + 1) M_1^2}{(\gamma - 1) M_1^2 + 2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

其中 p_{01} 、 p_{02} 分别为加热器总压和设备喷管出口总压靶的实测值, γ 为根据实测温度和平衡计算的质量分数求出的实验气体比热比。由此可以得到喷管流场核心区域的马赫数分布, 如图 7 所示, 马赫数同样具有良好的均匀性, 经计算 $\frac{|\Delta M|_{\max}}{M} = 0.0329$ 。测得的实际马赫数在 5.7 ~ 5.8 范围内。

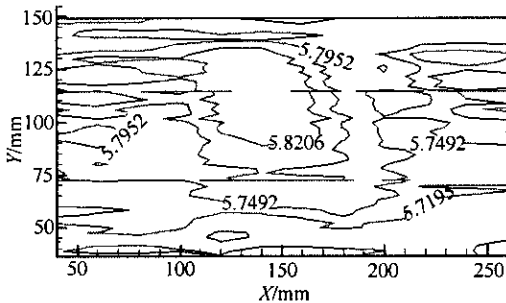


图 7 马赫数等值线图

Fig.7 Mach number isoline distribution

3 结 论

高超声速试验的稳定时间一般不过几秒, 在这

么短的时间内要做到对整个流场的测量并不容易。在利用这套扫描式测量装置试验中, 位移机构的移动性能良好, 移动快速并且定位准确, 能够满足测量整个流场的需要。通过对静止和移动测量条件下的结果比较发现靶子移动对压力测量无明显影响, 通过扫描方法测量这个流场方法可行。以测量装置可行为前提对测得的流场进行分析, 分析结果中得出喷管流场的核心区域内压力的均匀性、重复性以及流场的稳定性都良好。可以用于进行发动机模型的试验研究。

参考文献:

[1] RAUSCH V L , MCCINTON C R , SITZ J R . Hyper-X program overview [R] . ISABE 99-7213 , 1999 .
[2] GUY R W , ROGERS R L , Rock K E , et al . The NASA langley scramjet test complex [R] . AIAA Paper No. 96-3243 , 1996 .
[3] SABELNIKOV V , Walther R . Progress in the joint German-Russian scramjet technology program [R] . ISABE 95-7121 , 1995 .
[4] CHANG X , YU G . Development of a facility for model scramjet testing [R] . AIAA 2001-1857 .
[5] 张新宇 , 俞刚 , 陈立红 . 超燃冲压发动机模型实验装置的研制 [A] . 2001 年弹用吸气式发动机技术交流会论文集 [C] . 北京 2001 , 167 ~ 170 .