

激光法测量湍流流场时散射粒子的选择

邱建荣 马毓义

(华中理工大学煤燃烧国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 激光技术测速时需要合适的粒子。本文研究了用三维粒子动态分析仪(PDA)测量湍流流场时选择合适的散射粒子的问题。试验结果和理论分析表明:(1)散射粒子的特性参数是影响测速精度的重要因素;(2)在湍流度较高的流场中测量时应尽可能选择直径小、密度低、折射率大的粒子作为散射粒子,而且粒子散播的浓度要合适。

关键词: 散射粒子 湍流流场 PDA 速度测量

Choice of scattering particles during measuring turbulent flow field with particle dynamic analyzer

Qiu Jianrong, Ma Yuyi

(National Coal Combustion Laboratory, HUST)

Abstract: The technology of laser Doppler velocity measurement in fluid depends on the presence of suitable particles. How to choose the scattering particles during measuring turbulent flow field with particle dynamic analyzer (PDA) is discussed in this paper. The results show: (1) The choice of scattering particle is the main factor of influencing the velocity measurement; (2) In the study of turbulent flow field by PDA, the requirements of scattering particle choice are mainly small size, low particle density, high particle refractive index and suitable concentration.

Key words: scattering particles turbulent flow field PDA velocity measurement

一、引言

激光测速技术自问世以来,由于其具有不干扰流场、灵敏度高许多优点,已广泛地运用于各种测量领域,运用激光测试的仪器设备也在逐步完善和发展。DANTEC公司近年来开发的三维粒子动态分析仪(PDA)就是LDA的扩展。它能用于单相及两相流场的测量。PDA测速是通过区分流体中的跟踪粒子产生的多普勒信号来测量粒子的速度。因此,利用PDA进行测量的先决条件是需要气流中添加适当浓度和粒径的粒子,即散射粒子。流体运动速度的

测量精确度在很大程度上决定于合适的散射粒子。本文从试验结果出发分析探讨了粒子的选择方法。

二、试验系统及测量原理

1. 试验系统

本试验是在 PDA 上进行的^[4,5]。该系统是由按基模方式(TEM₀₀)工作的 Ar⁺ 激光器(额定功率为 5W)、发射系统、光纤探头、接收系统、信号处理器、计算机、三维坐标架、示波器等部件组成,能同时测量液体或气流中粒子的速度、浓度、尺寸以及湍流度、剪切应力等等,并可进行相关运算。测试过程中由位移控制器控制三维坐标架的走向,以实现光束焦点的三维移动。系统配备有四通道示波器,用来观察信号波形,以判别信号质量。实验数据由专门的计算程序处理,并可将实验结果实时打印出来。

2. 测量原理

PDA 测速是运用 Doppler 方法,即当激光照射到随流体一起运动的微粒上时,激光被运动着的微粒所散射,散射光的频率和入射光的频率不同,两者之间会发生频率偏移 f_D ,它和粒子速度成正比。即有

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}$$

式中, f_D 为多普勒频移; v 为粒子速度; λ 为光的波长; θ 为散射角。

只要测出 f_D 则可确定散射粒子的速度,用此速度表征流体的流速。

从上述激光多普勒测速原理可知,激光法测得的流速并不是真正流体的流速,而是悬浮于流体内的散射粒子的运动速度。但由于散射粒子的质量密度与气流有很大差异,因而不可能完全跟随流体一起运动,粒子的速度 v_p 与气流速度 v_f 多少有些差异,亦即存在一个滑移速度 v_p/v_f 。

v_p/v_f 越接近于 1 表示粒子的跟随性越好。 v_p/v_f 与粒子的质量密度 ρ_p 、粒径 d_p 、气流的密度 ρ_f 、运动粘滞系数 ν 以及湍流脉动角频率 ω 等因素有关,其关系式如下^[1]:

$$\eta(\omega) = \frac{v_p}{v_f} = \frac{\left(a + c \sqrt{\frac{\pi\omega}{2}} \right)^2 + \left(b\omega + c \sqrt{\frac{\pi\omega}{2}} \right)^2}{\left(a + c \sqrt{\frac{\pi\omega}{2}} \right)^2 + \left(\omega + c \sqrt{\frac{\pi\omega}{2}} \right)^2}$$

式中, $a = \frac{36\nu}{(2\frac{\rho_p}{\rho_f} + 1)d_p^2}$; $b = \frac{3}{2\frac{\rho_p}{\rho_f} + 1}$; $c = \frac{18}{(2\frac{\rho_p}{\rho_f} + 1)d_p} \sqrt{\frac{\nu}{\pi}}$ 。

湍流的最高角频率 ω_{\max} 可按 КОЛМОГОРОВ 理论^[2]进行估算,对于圆管湍流有公式:

$$\omega = 2\pi f = 0.38 v_m R_e^{0.58} D^{-1}$$

式中, v_m 为截面平均流速 m/s; R_e 为雷诺数; $R_e = \frac{v_m D}{\nu}$; D 为圆管直径。

因此,对于一定内径 D 的管道,已知 v_m 就可求出 R_e , 而由 ω 公式计算出 ω_{\max} 。同时若知道 ρ_p/ρ_f 、 ν 、 d_p , 则可求出速度比 η 。从公式中可以看出,影响粒子跟随性的主要因素有粒子直径 d_p 、湍流的频率 ω 以及密度比 ρ_p/ρ_f 。

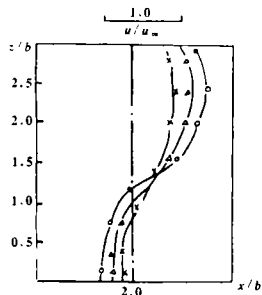


Fig. 1 Normal velocity distribution at a cross section behind bluff-body
 0 - measurement value with hot-sphere anemometer
 Δ - measurement value with PDA (scattering particles are plastics powder)
 \times - measurement value with PDA (scattering particles are talcum powder)

三、试验结果及分析

为了找出合适的散射粒子进行测量,我们曾先后用蚊烟、滑石粉末、塑料粉末等作为散射粒子测量了钝体后的湍流流场。对各种不同粒子的性能进行了比较,以确定最佳的散射粒子。

1. 散射粒子质量密度对测量精度的影响

图 1 给出了以滑石粉末和塑料粉末作为散射粒子所测得的速度值,并与热球风速仪的测值进行了比较。测量时所选择的两种粉末直径相近,滑石粉的质量密度与空气密度比 ρ_p/ρ_f 为 2100,塑料粉的 ρ_p/ρ_f 为 1200。从图中可以看出,在湍流脉动频率相同的区域,塑料粉的跟随性优于滑石粉。这表明,当其它条件相同时,粒子的密度与空气密度比 ρ_p/ρ_f 越小则跟随性越好,也就是测速精度越高。

我们也用蚊烟作为散射粒子进行了试验,结果表明,浓度合适时蚊烟粒子的跟随性很好,这主要是由于蚊烟与空气密度比 ρ_p/ρ_f

ρ_f 很小的缘故。

表 1 列出了流体为空气、保证速度比 η 大于 0.85 时,几种不同散射粒子的允许最大直径。

Table 1 Critical diameter of scattering particles ($\eta \geq 0.85$)

particles		talcum powder	plastics powder	glycerme	TiO ₂	Al ₂ O ₃
ρ_p/ρ_f		2100	1200	900	3500	2900
limiting	1(kHz)	5.1	6.3	8.5	4.0	4.5
diameter (μm)	10(kHz)	1.8	2.1	3.0	1.1	1.4

由表中可看出, ρ_p/ρ_f 越大,其临界直径越小,说明其跟随性越差,测量精度越低。因此,选择散射粒子时应尽可能选取较小的 ρ_p/ρ_f 值的粒子。

2. 粒子直径对测量精度的影响

表 2 是不同直径的塑料粉粒子在湍流脉动频率相同的空气中的滑移速度值。

Table 2 Relation between scattering particles diameter and relative velocity

pulsating frequency ω (kHz)	1	1	1
diameter d_p (μm)	1	3	5
relative velocity η (%)	98.9	93.0	87.5

从表中可以看出,对于同一种散射粒子,流场的湍流脉动频率相同时,直径越小,其跟随性越好。表中直径从 $5\mu\text{m}$ 降到 $1\mu\text{m}$ 时,测速精度从 12.5% 提高到 1.1%。这表明,直径大小对测速精度具有极大的影响。因此,选择散射粒子时直径越小越好。

3. 湍流脉动的影响

用 PDA 测量湍流流场速度时,粒子的跟随性与湍流脉动频率有很大关系。在图 1 中我们可以看到,在湍流脉动较强烈的回流区附近,用 PDA 测量出的速度与用热球风速仪测出的值差值增大。这表明,湍流脉动越强烈,散射粒子的跟随性越差。Mazumder 曾就此问题进行过

试验,得到了如表 3 的试验结果。

Table 3 Measure value in different turbulent fluctuation frequency^[3]

turbulent fluctuation frequency ω (kHz)	4.99	20.84	32.15	51.46
particle diameter d_p (μm)	1.011	1.011	1.011	1.011
η measurement value(%)	100.0	92.0	79.0	60.0

从表中可以看出,选择直径相同的某种粒子作为散射粒子测量湍流速度时,湍流的脉动频率越大,则测量精度越低。因此,用 PDA 测量湍流速度时,应尽可能选择极细小的轻粒子,而对于脉动极强烈的流场,要准确测量是比较困难的。

4. 粒子折射率对测量精度的影响

对于光学法测量,应选择折射率较大的散射粒子,以产生足够强的散射光,使检测器能得到满意的信噪比。

Table 4 Index of refraction of some scattering particles

particles	talcum powder	plastics powder	glycerme	organic glass	Al_2O_3
index of refraction	1.57	1.59	1.47	1.47	1.61

表 4 中的几种粒子虽然都具有很高的折射率,散射效率也应很高,但是,由于这些粒子的形状一般不规则,尺寸分布不均匀,所以实际的散射效果比预期的要差。滑石粉还易于聚集,因而其多普勒信号比塑料粉的要差些。而 Al_2O_3 则价格昂贵。

5. 散射粒子播散浓度对测量精度的影响

散射粒子的浓度对多普勒信号的质量有很大的影响,从而直接影响测量精度。

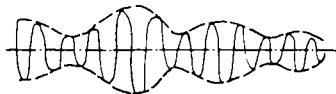


Fig. 2 Normal Doppler signal



Fig. 3 Abnormal Doppler signal

从试验中我们看到,当散播浓度太大时将会出现失真的多普勒信号(如图 3),有时得到的测量值为超出仪器量程的畸值。当浓度太小即粒子过于稀少时,取样时间就会延长,对于湍流流场,其测量误差增大,在用蚊烟测量时我们碰到过这种情况。因此,散射粒子的添加量应当适当,以保证多普勒信号质量较好,同时保证取样时间足够短。一般来说,散播粒子浓度为 $10^2 \sim 10^5$ 个/ cm^3 较合适。

四、结 论

1. PDA 测量湍流流场时采用几种不同特性的散射粒子进行比较,结果表明,粒子的选择是影响 PDA 测量精度的主要因素之一。

2. PDA 测速时,散射粒子的添加原则是:在湍流度较大的流场中应保证粒子的跟随性较好,即选择质量密度比 ρ_p/ρ_f 小、直径 d_p 小、折射率大的粒子;而且粒子无毒、不挥发、不易聚集、价格便宜;添加时要视具体情况选择合适的浓度。

3. 经过多次试验比较,塑料粉具有比较优越的性能: ρ_p/ρ_f 较小、折射率高且不易聚集、

版权所有 © 《激光技术》编辑部