

粒子动态分析仪(PDA)测量湍流场时 散射粒子的选择

郭 嘉 罗 晔

(华中理工大学, 武汉, 430074)

摘要: 应用激光技术测量流场时需要合适的散射粒子。本文研究了激光三维粒子动态分析仪测量湍流流场时, 如何选择合适散射粒子的问题。实验结果表明, 散射粒子的合理选择是保证测量精度的重要措施之一。在测量强脉冲湍流场时, 选用密度小, 直径小且折射率大的粒子作为散射粒子。选择合适的粒子播散浓度。

关键词: 粒子动态分析仪 湍流 散射粒子

Selection of scattering particles for measuring turbulent flow field with particle dynamic analyzer

Guo Jia, Luo Ye

(Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: The technique of laser Doppler velocity measurement of flow field depends on suitable selection of scattering particles. How to select the suitable scattering particles to measure the flow field with a 3-dimensional particle dynamic analyzer (3D-PDA) has been discussed in this paper. The results show that the properties of scattering particles are key factors of effecting on the velocity measurement accurate. The scattering particles should meet the requirements of the small size, low density, high reflective index and suitable concentration.

Key words: particle dynamic analyzer turbulent flow particles scattering

一、引 言

激光测速技术自 1964 年问世以来, 由于它具有非接触性测量、不干扰流场, 空间分辨率高 (测量体积小于 10^{-4}mm^3), 动态响应快, 测量精度高等许多优点, 已广泛应用于各种测量领域。丹麦 Dantec 公司新近研制的激光三维粒子动态分析仪 (3-Dimensional Particle Dynamic Analyzer, 简称 3D-PDA), 就是将激光多普勒风速计 LDA (Laser Doppler Anemometer) 扩展, 用于单相及两相流场的测量, 即通过区分流场中散射粒子所产生的多普勒信号来测量粒子的速度。

因此,粒子动态分析仪测量流场的先决条件是流场中有适当的散射粒子。本文通过实验与分析,提出了合理选择散射粒子的准则。

二、测量系统及原理

1. 测量系统

激光三维粒子动态分析仪由按基模方式工作的氩离子(Ar⁺)激光器、发射系统、光纤探头、光学接收系统、信号处理器及计算机等部分组成,其系统如图 1 所示。该分析仪能同时测量流场中粒子的速度、浓度、平均直径,以及流场的湍流强度、剪切应力等,并可进行相关运算,实时打印出实验数据。此外,还配有一台四通道示波器,用来观察多普勒波形信号以判别信号的质量。

2. 测量原理

粒子动态分析仪测速时运用了多普勒原理,即当激光照射到随流体一起运动着的粒子上时,激光被运动粒子所散射,散射光与入射光之间会发生频率偏移,偏移量与粒子的运动速度成正比。

$$f_D = 2v \sin(\theta/2) / \lambda \quad (1)$$

式中, f_D 为多普勒频移(Hz), v 为粒子速度(m/s), λ 为光的波长(m), θ 为散射角。

只要测出 f_D 便可确定散射粒子的运动速度,并用此速度来表征流体的流速,但由于粒子不可能完全跟随流体运动,粒子速度 v_p 与流体速度 v_f 间有一定差异,可用滞移速度比 η 来表示。

$$\eta = v_p / v_f \quad (2)$$

η 越接近于 1,表示粒子跟随性越好,即测得的粒子速度越接近流体速度。 η 与粒子密度 ρ_p , 流体密度 ρ_f , 粒径 d_p , 运动粘滞系数 ν 以及湍流脉动角频率 ω 等因素有关。

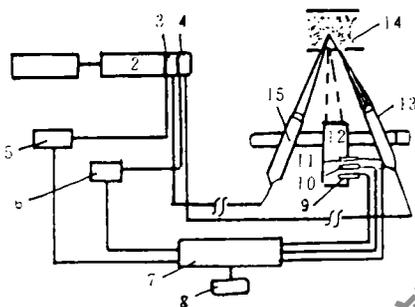


Fig. 1 Arrangement of a 3-dimension particle dynamic analyzer

- 1-laser 2-emitter 3-1D fibre-optic distributor
- 4-2D fibre-optic Distributor 5, 6-blue/purple color filter 7-signal processor 8-computer 9, 10, 11-multiplier phototube 12-optical receiver
- 13, 15-optical probe 14-tested part

三、实验结果及分析

分别选用蚊香烟雾、滑石粉和塑料粉等不同性能的粒子作为散射粒子,在一环形风洞中测量了某钝体尾部的湍流场,实验系统简图如图 2 所示,实验的结果及分析如下。

1. 散射粒子密度对测量精度的影响

图 3 给出了以滑石粉和塑料粉作散射粒子测得的钝体回流区某一截面速度分布与热球风速仪测值的比较。滑石粉密度与空气密度之比为 $\rho_p / \rho_f = 2100$, 塑料粉的比值为 1200, 且两种粉末的直径相近。由图 3 可见,在同一区域塑料粉的跟随性优于滑石粉,这主要是因为塑料粉

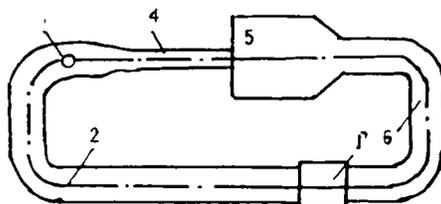


Fig. 2 Sketch map of test system

- 1-eddy flow pump 2-interim part 3-particle adder
- 4-tested part 5-balancer 6-circulating part

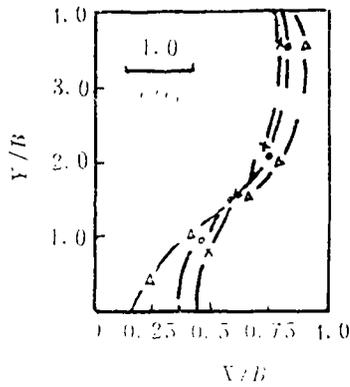


Fig. 3 Comparisons of the measured values of different scattering particles and the measured values with heated ball anemoscope
 X—measured values with heated ball anemoscope
 O—measured value of plastic powder Δ—measured values of talcum powder

2. 粒子对测量精度的影响

表2为不同直径塑料粉粒子的滑移速度表,表中看出,直径大小对测量精度有较大的影响,散射粒子的直径应选择越小越好。

3. 湍流脉动频率对测量精度的影响

实验中发现,在湍流脉动较强的回流区边界附近,粒子动态分析仪的测值与用热球风速仪测得值的差距较大,如图4所示。这表明,粒子的跟随性与湍流脉动频率有较大关系,湍流脉动越强的区域里粒子的跟随性越差。当湍流脉动频率从51.46kHz降到20.84kHz时,滑移速度比由原来的60.0%增大到92.0%,因此,在测量强湍流场时,应尽量选用跟随性能好的粒子。

4. 粒子折射率对测量精度的影响

激光测速时应选择折射率较大的散射粒子以产生足够强的散射光,从而在检测器上得到满意的信噪比。而一般细微粒子的折射率都很高,如塑料粉的折射率为1.59,滑石粉的折射率为1.57,硅油的折射率也有1.47,散射效果应该很好,但由于这些粒子的形状不规则,尺寸分布不均匀,所以实际散射效果比预期的要差些。其中滑石粉还易聚集成团块,影响折射效果,使接收到的多普勒信号质量下降。

5. 粒子播散浓度对测量精度的影响

当粒子播散浓度太小即粒子过于稀少时,取样时间延长,会使测量误差增大。用蚊香作散

的密度较小的缘故。图3中 B 为钝体边高(m), v 为流体速度(m/s), v_0 为出口初速度(m/s)。

表1列出了在保证滑移速度比 η 大于0.85的条件下,几种常用散射粒子的允许最大直径 ρ_p/ρ_f 越大,则粒子的临界直径越小,说明其跟随性越差,测量精度越低。因此,散射粒子应尽量选取 ρ_p/ρ_f 较小的粒子。

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

particle	ρ_p/ρ_f	critical diameter (μm)	
		$\omega=1\text{kHz}$	$\omega=1\text{MHz}$
TiO ₂	3500	4.0	1.0
Al ₂ O ₃	2900	4.5	1.4
talcum powder	2100	5.1	1.8
plastic powder	1200	6.3	2.1
silicon oil	900	8.5	3.0

Table 2 Comparison of sliding velocity of different diameter plastic powder

particle diameter (μm)	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
ratio of sliding velocity η (%)	87.5	90.1	92.0	95.3	98.9

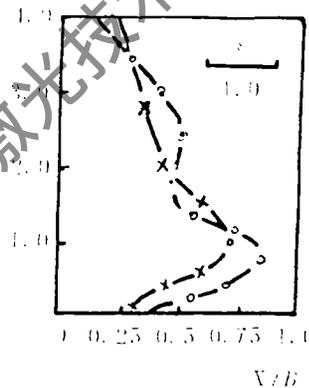


Fig. 4 Effect of pulsating intensity of turbulent flows on measurement accuracy

X—measured value by heated-ball anemoscope O—measured value by 3D-PDA

射粒子时即会出现此情况,因此不宜用蚊香烟雾作散射粒子,而当粒子浓度太大会出现有毛刺的失真多普勒信号,有时测量值甚至会超出仪器的量程,如图5a所示。一般来说,播散粒子的浓度为 $10^2 \sim 10^5$ 个/cm³时,多普勒信号质量较好,如图5b所示,又能保证足够短的取样时间。

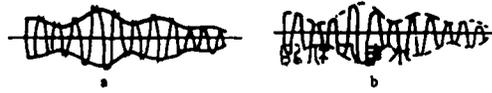


Fig. 5 Doppler signals of different particle densities
a—particle density: $10^6/\text{cm}^3$ b—particle density: $10^1/\text{cm}^3$

四、结 论

1. 激光三维粒子动态分析仪测量湍流场时,散射粒子的性能是影响测量精度的主要因素之一,因此,必须合理选择散射粒子才能保证测量精度。

2. 散射粒子的添加原理是,在湍流脉动较强的流场中,应保证粒子的跟随性较好,即选择密度比 ρ_p/ρ_f 和直径 d_p 较小的粒子;粒子的折射率大且不易聚集;添加时还视具体情况选择合适的播散浓度。

3. 通过实验比较,塑料粉具有较优越的性能, ρ_p/ρ_f 小,折射率高,不易聚集且价格便宜,无毒无腐蚀,因此,选用直径微小的塑料粉作为散射粒子较为合适。

参 考 文 献

- 1 Drain L E 著,王代康译.激光多普勒技术.北京:清华大学出版社,1985:10~13
- 2 田中敬一著,朴大植译.激光与测量:新测量领域的开拓.北京:中国计量出版社,1987:136~138
- 3 王启华.激光实用测量.北京:中国铁道出版社,1989:215~216
- 4 Dantec 公司.三维粒子动态分析仪用户手册.丹麦:Palytec Publishing House, 1988:4~9

作者简介:郭嘉,男,1969年11月出生。博士研究生。现从事锅炉内燃烧空气动力场的研究工作。
罗晔,女,1972年10月出生。硕士研究生。现从事光学测量仪器的研究工作。

收稿日期:1993-09-30 收到修改稿日期:1994-01-25

· 产品简讯 ·

二极管泵浦 Nd:YAG 激光器

Santa Fe 激光公司推出小型二极管泵浦 Nd:YAG 激光器新系列。CV 系列设计用于连续红外功率的应用要求。所有型号都带自动控制冷却系统、小型激光谐振腔和现代化的开关电源。CV 系列连续 Nd:YAG 或 Nd:YLF 的输出功率为 1~5W。

译自 L & O, 1994;13(5):26 中尧译 马理校