

小功率前向式 LDV 改制为 双向式 LDV 的方法

王亚伟 胡惠芳

(江苏理工大学应用物理研究室, 镇江, 212013)

摘要: 前向式 LDV 由于对激光器的功率要求低, 所以较后向式 LDV 造价低使用面广。但量, 实际测试中因环境限制, 往往必须使用后向式 LDV。对此, 本文针对差动前向式 LDV 的分光系统、采光系统及其光路进行了研究, 提出了改进方法使得一仪两用, 既能用作前向式又可用作后向式的 LDV 进行测试。实验验证效果较好, 可用于实际的测速过程。

关键词: 激光 多普勒效应 散射

A method of developing a low power forward LDV into a forward and backward LDV

Wang Yawei, Hu Hui Fang

(Department of Physics, Jiangsu University of Science & Technology)

Abstract: The forward LDV has wider applications than the backward LDV, because of its lower requirements of the laser power. In practical measurements, due to limited circumstance, the backward LDV also must be used. In this paper, the light splitting system and the light receiving system of the different forward LDV have been studied, and an important method is provided to make forward LDV have the function to be used as backward LDV. The experimental results show the method is very well, so the method can be wide used in practical applications.

Key words: laser Doppler effect scattering

一、引言

激光差动式多普勒测速仪(LDV)在流速测定中具有较高的空间和时间分辨率、不接触物体、不扰动被测对象、信号处理速度快等特点, 因而在研究流速分布中得到广泛的应用。此类 LDV 按散射方式不同一般分为前向式 LDV 和后向式 LDV 两种, 前向式因散射光强的分布特征(理论研究表明: 一般情况下前向散射光强约为后向散射光强的近百倍)^[1] 只需较小功率的

激光器,因而造价低使用面广,但是被测对象的前后环境必须均能开窗口。相反,后向式的 LDV 需要大功率的激光器,造价高使用面小,但是被测对象的环境只需在一面开窗口,所以测试中应用面较广。实际测试中往往被测对象的环境要求只能使用后向式 LDV,这对于只拥有前向式 LDV 的用户来说是最不幸的了。若前向式 LDV 稍作改进能用作后向式 LDV 的测试工作,那必将是件极好之事,但是,因为激光器功率的限制至今未见有较成功的突破。作者对此进行了研究,虽然 J. H. Churnside 的散斑法^[2]、Rodrigo Henao 的光栅法^[3]、D. B. Barker 的散斑条纹法^[4]、Junji Ohtubo 散斑相干法^[5]、Y. Aizu 的微区域光子相干法^[6]等等皆可用小功率的激光器,但是对被测对象的要求、时空的分辨率、信号的处理速度等方面因素限制了在 LDV 改进中的应用。例如 Rodrigo Henao 方法对流体不适用,而 D. B. Barker 的方法若不采用 CCD 和电处理系统则不能用于实时测量。对此,作者通过研究^[7]不断完善了改进方案。提出了在保持原 LDV 原理和基本光路的情况下,对分光系统改用双 Dover 棱镜以减少分光时的能量损失以及测试过程中的调节环节的简化,对采光系统改用特殊设制的中条隙 HM 镜采光配以独立的汇聚透镜收集信号,同时在前向增设高反特性的凸面材料发生二次散射给采光系统增强了交流散射信号。经改进后的 LDV 可用作后向与前向两种方式的测速工作,经实验验证,此方法不仅保持了原 LDV 的特色,而且还具有较高的准确性和较强的实用性。

二、主要改进方法

1. 采光系统的改进

传统的前向采光系统(双光束)通常如图 1, 双相干光束在 P 点相遇发生干涉产生条纹形成了控制体, 粒子通过控制体中条纹时发出闪烁的散射光, 经过透镜 L_1 后散射信号由光电倍增管接收转变为电信号供后续处理。虽然散射特性决定了前向式接收的信号远强于后向式, 但是在实际测试中, 通常为增加信噪比必须避开双入射光束的直接进入, 所以 θ 较小, 而 l 为 L_1 所决

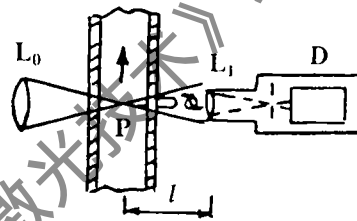


Fig.1 A normal light receiving system

定一般较大, 这样势必有很大一部分前向散射光能分布在空间未能进入接收系统, 由此可知实际利用的前向散射光能是有限的。若直接采用传统的后向式光路, 则由于分光、采光均是采用同一套透镜和棱镜等, 多次的折射, 反射吸收大大衰减了光能, 不能用于小功率激光器的情况, 因此必须采用新的适用于小功率激光器的光路和光学系统。改进后的接收系统如图 2。后向散射的光经 HM 收集后反射给 L, L_1 和 D 组成的接收系统。由米氏理论^[1]可知, 此后向散射的光能远小于前向式的, 对于小功率的激光器情况, 通常后向散射的光能低于光电管的阈值, 不能产生有效的电流信号。为了尽可能的提高所接收的散射光能量, 首先, 采用了大口径的中央空隙特制反射镜 HM 其结构如图 3。中央空隙给入射光提供通路, 两个半面反射面

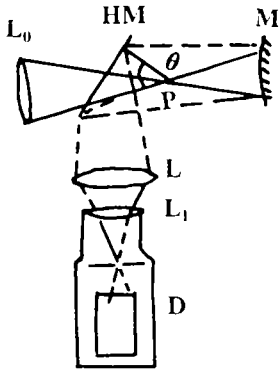


Fig.2 The developed receiving system

用于收集散射光。由于镜面面积大而且测试中紧贴测试腔体, 所以采光角 θ 较大, 由理论^[2]

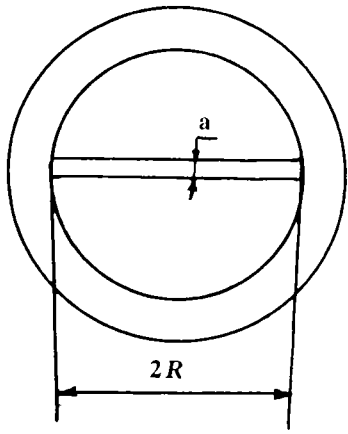


Fig.3 The structure of a HM mirror

可知： $\frac{I_s(\theta)}{I_0(\theta)} = \frac{F(\theta)}{K^2(r^2)}$ ，式中， I_s 为交流信号， I_0 为入射光强， θ 为采光角， r 为散射体至镜面的距离， K 为因子，当 r 减小， θ 增加时 I_s/I_0 显见增大，从此大大增加了交流信号的相对强度，所以大口径、近距置位是提高散射光有效信号的一种方法，而传统的前向式和后向式由于入射系统和采光系统为同一套系统，且要避开入射光的直接入射或镜向反射则不可能取得较大口径和较近的距离。其二，在测试腔的前向置一凸型增反曲面，前向散射光通过此反射面发生二次散射，其散射信号的频闪特征保持不变，再次通过 L, L₁, D 被接收，这样使得总的接收信号增强。凸面的另一个主要作用是使双入射光的镜向反射不进入采光系统，从而提高信号的交流成分。其三，

由于接收系统独立了入射分光系统(传统后向式是同一系统)使散射光直接进入采光系统，较传统后向式来说大大减少了光能在介质中的吸收损耗，从而有效地提高了散射光能量。而且由于此系统的独立性从而方便了测试中的调试。

2. 分光系统

传统的分光光路一般如图 4 所示。激光器发出的光通过棱镜分光再经透镜 L₀ 汇聚于 P

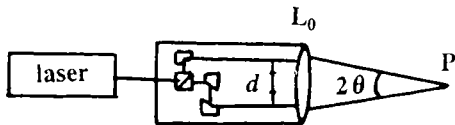


Fig.4 A beam splitting system

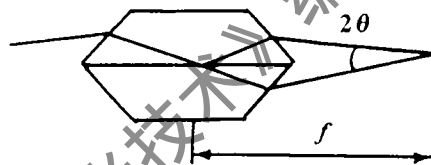


Fig.5 The developed beam splitting system

点形成控制体，针对不同雷诺系数的流场，测量时可调节 d 以得到最佳测试结果。若为后向式，则 L₀ 还起收集光能的作用，要接收散射信号和有效采集到控制体内的信号，在 L₀ 后需置光阑和棱镜等，由此对光能的损失较大，这对于小功率前向改后向来说是不可行的。为此，需对分光系统改进以增加信号强度从而适合小功率的情况。改进后的分光系统见图 5，两个 Dover 棱镜底面胶合，胶合面镀有半透半反膜，来自激光器的光束经双 Dover 棱镜分解为夹角为 2θ 的入射光，此双相干光发生干涉在控制体内形成条纹。其控制体宽度 $d_m = \frac{D}{\cos\theta}$ ，条纹数 $N = \frac{2D}{\lambda} \text{tg}\theta$ 。对不同雷诺数的流场流速的测试，可改变入射角即可改变 θ 和距离 f 从而得到最佳测试效果。由于双 Dover 棱镜仅改变了光路的走向，起了一分为二的作用，所以避免了传统式中的扩束和束腰性所带来的腰身不完全吻合的麻烦，同时减少了光在介质中因多次折射和反射造成的能量衰减，有效地提高了光能利用率。

三、测试原理

前向式 LDV 经改进后可用于后向式的 LDV 测试，其测试原理如图 6。由激光器产生的

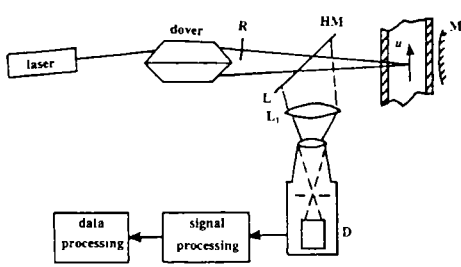


Fig. 6 The experimental arrangement

单色相干光经双Dover棱镜分为两束相干光, 交汇于流场中形成控制体, 当流场中示踪粒子通过控制内的明暗相交条纹时产生交变的光闪散射信号, 此闪烁频率由理论^[2]可推导得 $f_D = \frac{2\sin\theta}{\lambda}u$, 其中, f_D 为频率, λ 为激光波长, u 为所测速度, 由此可知, 只要测出 f_D 即可得到 u 。散射的信号通过 HM, L, L₁ 采集后传递给光电管 D, 光电倍增管将此信号转变为电信号传递给频率跟踪器, 经处理后可得到频率参数, 若加微机处理则可直接得到速度的数值。

四、实验验证

1. 准确性验证

为了验证该方法在实际应用中的准确性和可靠性, 我们作了模拟流场测速实验。实验中以透明光学玻璃 ($R = 50$) 圆盘边缘胶贴铝粉 (示踪粒子), 将其固定在直流电机上放入控制体中, 通电转动在控制内即有示踪粒子运动, 调节电机电压以改变转速的模拟变化的流场, 实验装置示意如图 6。实验结果如下: 中频电平 $80\mu A$, 前置电平 $\times 10$, 中频带宽 8%, 光电管电压 24V, 光电管电流 $50\mu A$, 入射光夹角 15° , 频率跟踪自动。

Table 1 Summary of voltage and velocity parameters in experiment

voltage (V)	0.60	1.00	1.40	1.80	2.20	2.40	2.60	3.00
rotating speed (r/s)	1130	1780	2600	3350	4580	5000	5500	6200
velocity (m/s)	5.96	9.32	13.61	17.54	23.98	26.18	28.80	32.46

注: 表 1 为模拟流场的圆盘所加电压与速度值。

Table 2 Voltage and frequency

f_D (kHz)	488.7	740.3	1213.2	1407.1	1989.1	2214.4	2450.1	2700.7
V(V)	0.60	1.00	1.40	1.80	2.20	2.40	2.60	3.00

注: 表 2 为频率跟踪器进行模拟测试 6 次的平均频率值及相应电机电压的值。

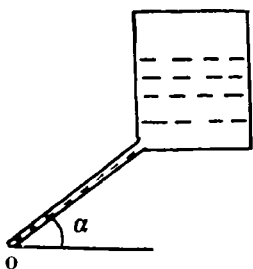


Fig. 7 Pipe water

表 2 结果根据 $f_D = \frac{2\sin(2\theta)}{\lambda}u$ 可求得速度 u , 再根据 $u = 2\pi Rv$ (v 为转速) 可求得 v , 与表 1 结果吻合较好。

2. 实际应用的可行性验证

为了说明此方法在实际测试中仍是可行的, 我们设制了如图 7 的管流装置, 改变 α 角即可改变流速, 对不同 α 角所做的实验情况如下:

管直径 $D = 16\text{mm}$, $l = 300\text{mm}$, $2\theta = 15^\circ$ 测得频率 f_D 与角度 α 的关系如表 3。

版权所有 © 《激光技术》编辑部