

文章编号: 1001-3806(2002)05-0341-03

## 二维 LDA 系统在液体流速测量中的修正及应用\*

王德忠 许 鹏 扈黎光 王小兵

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海, 200030)

**摘要:** 结合三光束激光多普勒测速仪, 从理论上分析了在不同介质中测量参数的修正, 推导出 LDA 在不同介质中的参数修正公式。以空气和水两种不同介质为例, 利用修正公式求出各自的参数, 在二维流道上用 LDA 测量减阻流体的流速, 将 LDA 与流量计的测量结果进行比较, 结果令人满意。

**关键词:** 激光多普勒测速仪(LDA); 激光多普勒测速技术; 速度测量

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A

### Amendment and application of 2-D LDA in fluid

Wang Dezhong, Xu Peng, Hu Liguang, Wang Xiaobing

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030)

**Abstract:** Coupled with the 3-beam laser Doppler anemometry(LDA), the amendment of the measuring parameters in different media was discussed in theory. And the amendatory formulas were achieved. With the formulas, the parameters both in air and in water were obtained and compared. The result proved the amendment of the parameters was correct and necessary. The mean velocities were gained individually in the reduction fluid by LDA and flowmeter. By comparing the two results, it proved the LDA was trustiness.

**Key words:** laser Doppler anemometry(LDA); the amendment of parameters; the measurement of velocity

### 引 言

本世纪 60 年代发展起来的 LDA, 实现了对流场的无接触测量。它通过测量流场中示踪粒子的散射光相对于原入射激光的多普勒频移量, 计算出粒子的运动速度。该技术在流速测量中, 具有时间和空间分辨率高、不扰被测流场、动态响应快等优点, 近年来, 已发展得很完善。作为流速测量的有力工具, 目前已广泛地应用于流体力学、空气动力学、燃烧学、生物学和医学领域<sup>[1~4]</sup>。

在使用 LDA 之前, 要根据实际情况对 LDA 测量系统进行修正, 国内有学者曾对双镜头三维 LDA/PDPA 测量系统坐标架的位移进行了修正<sup>[5]</sup>。在将 LDA 用于液体流速测量时, 由于光线从空气进入被测液体时要发生折射, 从而造成测量体发生变化, 为保证测量数据的准确性, 在使用前, 需对所用的 LDA 系统进行修正。针对三光束 LDA, 从理论

上分析了在不同介质中测量参数, 在二维流道上对液体介质的流速测量进行修正, 结果令人满意。

### 1 三光束激光多普勒测速仪参数的修正

三光束 LDA 系统, 如图 1 所示, 其 3 个光束成等腰直角三角形布置, 混合光束所在的位置为直角顶点; 测速仪的探测体就是这 3 束光相交形成的椭球体, 如图 2 所示。

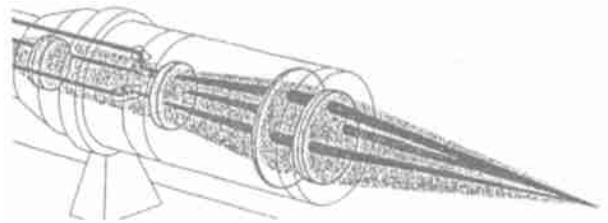


Fig. 1 Three-beam LDA probe and beam alignment

激光多普勒测速技术就是利用多普勒原理, 通过测出多普勒效应引起的频率变化, 利用下式得到测量速度<sup>[6]</sup>:

$$u = Cf_D \quad (1)$$

式中,  $u$  是速度矢量在两束相交光线平面内并垂直于聚焦角角平分线方向上的分量(如图 2 中的  $x$  方向);  $C = \lambda / 2 \sin(\theta/2)$ ,  $\lambda$  是波长,  $\theta$  为两束光的聚焦角;  $f_D$  是多普勒频移。

\* 国家自然科学基金资助项目。

作者简介: 王德忠, 男, 1962 年 10 月出生。副教授。现从事流场可视化及光电测试技术研究。

收稿日期: 2001-09-29; 收到修改稿日期: 2001-12-12

由上式可以看出参数  $\lambda$  和  $\theta$  对速度测量的准确性及其重要,但是在通常的测量工况下,上述参数的选择都是以空气中光束的波长和相交角为准。所以,在测量不同折射率的介质中的流动速度时,由于激光的折射和波长的变化,按原参数得到的速度就会存在较大的误差。目前,尚没有关于这一方面参数修订的论述,针对三光束 LDA 测速系统提出一种解决方案,目的是消除由于光束在不同介质中的折射而引起的系统误差。

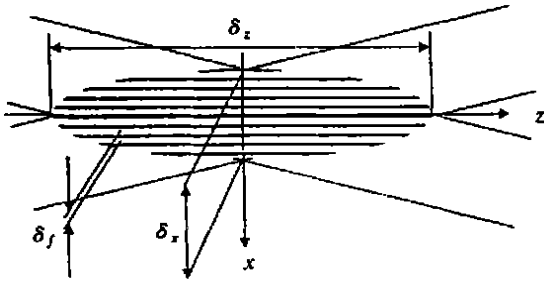


Fig. 2 The fringe model of LDA

光束由空气进入不同折射率的介质(假设进入的介质为水)中时,光束发生折射,如图3所示。

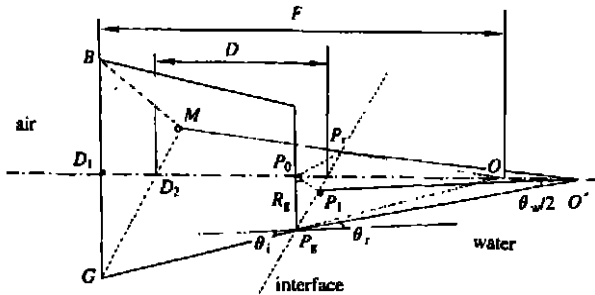


Fig. 3 The sketch map of laser beam refraction

图中所表示的符号分别为:  $G$  是绿光,  $B$  是蓝光,  $M$  是混合光;  $P_g, P_r$  分别是绿光和混合光与分界面的交点;  $\theta_i$  为入射角;  $\theta_r$  为折射角;  $\theta_w$  为在水中,绿光和混合光之间的夹角;  $F$  为镜头焦距;  $D_1$  为蓝光与绿光之间的距离;  $D_2$  为绿光和混合光之间的距离;  $R_g$  为在空气和水的交界面处,绿光和轴线之间的距离。

已知  $\tan \theta_i = (D_1/2)/F$ , 从而可以求出  $\theta_i$ , 根据折射定理可以求出  $\sin \theta_r$ :

$$\sin \theta_r = n_a \sin \theta_i / n_w \quad (2)$$

式中,  $n$  为介质的折射率。

令光束到轴线的距离为  $R_g$ , 由图2可以看出:

$$R_g = D_1(F - D)/2F \quad (3)$$

在分界面上,绿光到混合光的距离为:

$$\overline{P_r P_g} = \sqrt{2} R_g \quad (4)$$

$$\text{故 } \sin \theta_r = R_g / P_g O' \quad (5)$$

由此可以得到:

$$\sin \frac{\theta_w}{2} = \frac{\overline{P_r P_g}}{2 P_g O'} = \frac{\sqrt{2} R_g / 2}{R_g / \sin \theta_r} = \frac{\sqrt{2}}{2 n_w} \sin \theta_i \quad (6)$$

从而求出在水中的实际的夹角  $\theta_w$ , 完成对  $\theta$  的修订。利用修订的参数可以求出探测体的各个系统参数。修正后的探测体参数公式为:

$$\delta_x = 4FNn\pi ED_L \cos(\theta_w/2) \quad (7)$$

$$\delta_y = 4FNn\pi ED_L \quad (8)$$

$$\delta_z = 4FNn\pi ED_L \sin(\theta_w/2) \quad (9)$$

$$\delta_f = N2n \sin(\theta_w/2) \quad (10)$$

$$N_f = 8Ft \tan(\theta_w/2) / \pi ED_L \quad (11)$$

式中,  $\delta_x, \delta_y, \delta_z, \delta_f, N_f$  分别是探测体的长、宽、高、条纹间距和条纹个数;  $F$  为镜头焦距,  $D_L$  为通过发射镜头前的光腰直径,  $E$  为扩束系数,  $\lambda$  为激光在空气中的波长,  $n$  为介质的折射率,  $\theta$  是测量介质中的光束夹角。

表1是通过理论计算得出的在空气和水中的激光束参数。

Table 1 The comparison between measured volume parameters in air and in water

	medium	$\delta_x/\mu\text{m}$	$\delta_y/\mu\text{m}$	$\delta_z/\mu\text{m}$	$\delta_f/\mu\text{m}$	$N_f$
green light $\lambda = 514.5\text{nm}$	air	158	158	3838	6.247	25
	water	118	118	3833	6.246	18
blue light $\lambda = 488.0\text{nm}$	air	150	150	3640	5.926	25
	water	112	112	3629	5.925	18

通过比较可以发现,参数在不同的介质中差异较大,尤其是对速度测量影响极大的参数  $\delta_r$ , 其值相当于(1)式中的  $C$ 。由(1)式可知,分别利用以空气为基准和以水为基准的参数计算,得出的结果有一定的差异,且测量的速度越大,即所测得的多普勒频移越高,误差越大。

但是利用所推导出的修正公式可以消除这一误差,且非常方便简单。由推导过程可以看出,该修正公式可以适用于任何介质,具有通用性。

## 2 在二维流道上对流体速度的测量

本次实验利用测量旋转圆盘上某一点的切线速度,和圆盘旋转速度进行比较,完成实验前的 LDA 校准工作。其原理公式如下:  $v_d = 2\pi nR$  (12) 式中,  $v_d$  是圆盘测量点的切线速度(m/s),  $n$  是转速(r/s),  $R$  是测量点到圆盘中心的距离。

实验中,  $R = 48\text{mm}$ , 测量圆盘的转速测量系统

极其精确, 误差仅 0.01%。当达到采样时间为 20s 或采样点为 8000 个时, 停止采样。经过数据整理和分析, 得出转盘的平均转速。利用该结果与 LDA 测量结果进行比较, 得出测量转速的百分比误差, 其值为 0.3635%, 证明 LDA 系统的设置是准确的。

实验中通过利用 LDA 测量流体管道的横截面的速度分布, 得出流体的平均速度并与流量计得出的速度进行比较。实验结果如图 4。流道横截面是一个 500mm × 40mm 的矩形截面。

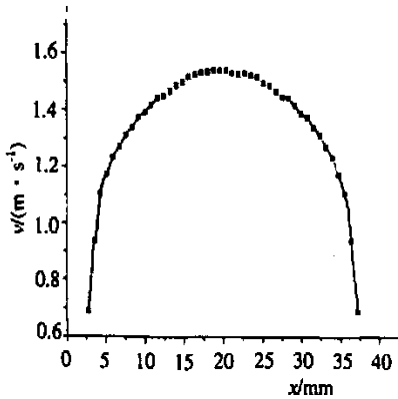


Fig. 4 The velocity contribution of the cross section profile

LDA 测出的平均速度为 1.39m/s, 涡轮流量计测出的速度为 1.40m/s。激光测速技术的误差来源主要有: (1) 由于示踪粒子有一定的跟随性误差, 故造成测量值偏小; (2) 计数率和采样时间长短对结果有一定的影响, 如果测量中有足够的采样数据, 结果会更加精确; (3) 介质的折射率受很多因素的影响, 如溶液浓度分布、波长大小等, 本实验中采用的是平均值, 因此, 会给结果带来一些影响; (4) 根据高斯定

律, 形成探测体的激光束是否相交在光腰处对结果也会产生一定的影响。

另外, 考虑到涡轮流量计的误差(±0.5%), 因此, 二者的数据相互吻合得很好。结果表明, LDA 参数的修正是成功的。

### 3 结 论

对三光束 LDA 测量流体模型中存在的由于介质折射率的不同而引起的入射光聚焦变形提出了一种解决方法: 即公式修正法。该方法从几何光学的角度推导出参数修正公式, 解决了测量结果因为介质折射率的不同而存在的偏差。经过严格的标定之后, 通过实验对比证明了该方法的可行性。对 LDA 在不同介质中测量参数的修正公式可以应用在不同的介质中, 有一定的通用性。

本实验的进行得到动力机械与工程教育部重点实验室的支持, 特在此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 杨国光主编. 近代光学测试技术. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.
- [2] 孙渝生编著. 激光多普勒测量技术及其应用. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1995.
- [3] McAndrew D, Copen S, Rogers C B. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(9): 1517.
- [4] Mathiesen V, Solberg T, Hjertager B H. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26(3): 387.
- [5] 沈熊, 董鹏, 陈巧宁 *et al.* 流体力学实验与测量, 1998, 12(4): 53.
- [6] Drain L E 著, 王仕康, 沈熊, 周作元译. 激光多普勒技术. 北京: 清华大学出版社, 1985.

(上接第 340 页)

涅耳数  $N$ , 都将提高光栅腔的波长选择能力, 但同时也增大了光栅腔的衍射损耗, 从而也会减少激光器的输出功率和选支数目。因此, 光栅谐振腔的各参数的合理选取原则应是: 既要考虑腔的分辨本领, 又要顾及到腔的损耗和功率。可由所给出的表达式 (5) 式为依据, 再根据由 TEM<sub>00</sub> 模所限定的  $a$  与  $\omega_s$  之间的关系, 从中选取出一个合理的值。这里的所谓“合理”, 应随各种不同的应用场合而异, 当要求有较高的波长分辨率时, 势必要减小输出功率; 而要求某些波段上有强线时, 即可放宽分辨率要求。总之, (5) 式指出了这些参数之间的关系, 为这种“合理”的选取, 提供了可靠的依据。

### 参 考 文 献

- [1] Hansch T W. Appl Opt, 1972, 11: 895~ 898.
- [2] Ionin A A. SPIE, 1998, 3228: 9~ 17.
- [3] Osgood R M, Sackett P B, Javan A. J Chem Phys, 1974, 60: 1464~ 1479.
- [4] Chodzko R A, Mirels H, Roehrs F S *et al.* IEEE J Q E, 1973, QE9: 523~ 529.
- [5] 赫光生, 雷仕堤. 激光器设计基础. 1 版, 上海: 上海科学技术出版社, 1979.
- [6] Hardy A, Treves D. Appl Opt, 1975, 14: 589~ 592.
- [7] Consortini A, Pasqualetti F. Appl Opt, 1973, 20: 793~ 803.
- [8] Sanderson R L, Streifer W. Appl Opt, 1969, 8: 2241~ 2248.
- [9] Maitland A, Dunn M H, 朱如曾译. Laser physics. 1 版, 北京: 国际工业出版社, 1975.
- [10] Barn M, 杨霞译. Principles of optics. 2 版, 北京: 科学出版社, 1978.
- [11] 马养武, 陈钰清. 激光器件. 1 版, 杭州: 浙江大学出版社, 1994.