文章编号:1001-5078(2009)07-0721-03　　·激光技术与应用·

激光多普勒测速实验系统

王辉林,陈志敏
(山东理工大学机械工程学院,山东 淄博 255049)

摘　要:利用激光多普勒效应测量流体流速已成为近年来测速系统的发展趋势,激光多普勒测速具有高精度、非接触等优点,但由于激光器的限制此技术尚未广泛普及应用。详细推导了多普勒测速的原理和计算方法,相信能够为解决实际问题带来帮助,例如暖气管道流量计的设计等。

关键词:激光;多普勒效应;测速;非接触测量
中图分类号:TP273　　**文献标识码:**A

System of laser Doppler's flow velocity measurement

WANG Hui-lin, CHEN Zhi-min
(College of Mechanical, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Laser Doppler velocity is the trend of the velocity measurement filed in recent period for its high accuracy and non-contact property, because of the laser's restrict it hasn't extensive used. This paper derivation the principle and computation of the laser Doppler velocity in details, hope this may offer some help to the concrete issue, such as the design of the flue's flow meter.

Key words: laser; Doppler effect; flow velocity measurement; non-contact measurement

1　引　言

多普勒效应是 19 世纪德国物理学家多普勒(Doppler)发现的声学效应。在声源和接收器之间存在相对运动时,接收器收到的声音频率不等于声源发出的声音频率,称这一频率差为多普勒频差或频移[1]。1905 年,爱因斯坦在狭义相对论中指出,光波也具有类似的多普勒效应。只要物体产生散射光,就可利用多普勒效应测量其运动速度。所谓光学多普勒效应就是:当光源与光接收器之间存在相对运动时,发射光波与接收光波之间会产生频率偏移,其大小与光源和光接收器之间的相对速度有关。

本文介绍的激光多普勒技术即利用光学多普勒效应对流体速度进行测量的测速技术,由于是对光信号进行测量,是一种无接触测量,所以对待测系统无干扰而且可用于高温、强腐蚀流体、有毒气体等的流速测量,同时具有动态响应快、空间分辨率高、测量范围大等优点[2]。

2　测量原理

利用多普勒效应测量流速,在流体中加入随流体一起运动的微粒(示踪粒子)。由于微粒对于入射光的散射作用,当它接受到频率为 f 的入射光照射之后,也会以同样的频率向四周散射。这样,随流体一起运动着的微粒既作为入射光的接收器,接受入射光的照射,又作为散射光的光源,向固定的光接收器发射出散射光波。由于固定的接收器所接收到的微粒散射光频率,将不同于光源发射出的光频率,二者之间同样会产生多普勒频移,并且频移不是矢量,大小相同方向相反的速度所得的频移是一样的,因此激光束被分为强度相同的两束光。系统原理框图如图 1 所示。

作者简介:王辉林(1962 -),男,硕士,高级实验师,硕士生导师,山东理工大学机械工程学院测试与精密仪器实验室主任,主要从事传感器设计及测控系统的设计与研究。

收稿日期:2009-01-01;**修订日期:**2009-03-03

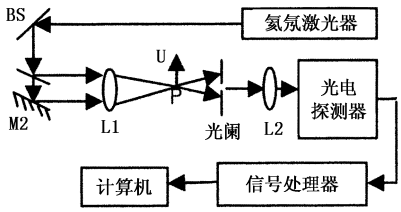

图 1 测量系统框图

从图 1 可以看出,运动粒子 P 以速度 U 通过测量区域时,粒子相对于入射光来说是运动的,即光源静止,接收器运动;而相对于光电探测器来说,运动粒子的散射光相对于探测器是运动的,即光源运动,接收器静止。本文就这两种情况的多普勒效应来讨论激光多普勒流速仪(laser Doppler anemometry, LDA)的原理,并计算出流体流速[3]。

(a)第一种情况:光源静止,接收器运动。这里接收器的速度用向量 $\vec{U}$ 来表示。在接收器处的光频率 f_R 是光源处发射的光频率 f_S 的函数,函数关系由下式给出:

$$f_R = f_S\left(1 - \frac{\vec{U}\cdot\vec{l}}{c}\right) \tag{1}$$

式中,c 为空气里的光速。

(b)第二种情况:光源移动,接收器静止。这样,接受到的光频率由下式给出:

$$f_R = \frac{f_S}{\left(1 - \frac{\vec{U}\cdot\vec{k}}{c}\right)} \tag{2}$$

在 LDA 中,激光器是静止光源,在微小的流动的粒子上散射,然后由光电探测器接收。

应用上面的式(1)和式(2),就可以得出激光束经过运动的粒子散射后由静止的接收器光电池处的光频,如图 2 所示。

$$f_R = f_S\left(1 - \frac{\vec{U}\cdot\vec{l}}{c}\right)\Big/\left(1 - \frac{\vec{U}\cdot\vec{k}}{c}\right) \tag{3}$$

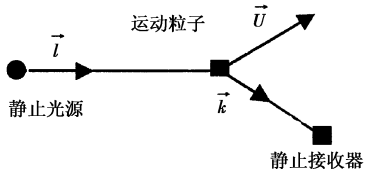

图 2 一个运动粒子的散射光

本测量系统中,采用了双光束的配置(从一个光源来的两个相交光束,如图 1 所示)在这样的布局下,一束激光束被分成具有相同亮度的两束光束,然后被聚焦在测量控制体积 MCV(measuring control volume)内,在 MCV 内相交。流经这个体积内的粒子会对这两束光都发生散射。这两束光的多普勒频移是不同的(不同的 $\vec{l}$ 向量,相同的 $\vec{k}$ 向量)。这个频差,就是通常所说的拍频,在散射光中就测得了。这个拍频在这里称作多普勒频率,已经很低了,并且和激光源具有一样窄的带宽。这样,用电子的方法来精确地探测和测量这个频率就是可能的了。下面证明多普勒频率和粒子的速度成正比[4]。

两束散射光的频率由下式给出:

$$f_{R_1} = f_S\frac{\left(1 - \frac{\vec{U}\cdot\vec{l}_1}{c}\right)}{\left(1 - \frac{\vec{U}\cdot\vec{k}_1}{c}\right)} \tag{4}$$

$$f_{R_2} = f_S\frac{\left(1 - \frac{\vec{U}\cdot\vec{l}_2}{c}\right)}{\left(1 - \frac{\vec{U}\cdot\vec{k}_2}{c}\right)} \tag{5}$$

两者的差:

$$f_D = f_{R_1} - f_{R_2} = f_S\frac{\vec{U}\cdot(\vec{l}_2 - \vec{l}_1)}{c} \tag{6}$$

用图 3 所示的关系,以及关系式 $c = f_S\cdot\lambda$(λ 为激光的波长),多普勒频率可以用下面的式子表示:

$$f_D = \frac{\vec{U}\cdot(\vec{l}_2 - \vec{l}_1)}{\lambda} = \frac{\vec{U}\cdot\vec{n}\cdot 2\cdot\sin\varphi}{\lambda} = \frac{U_\perp\cdot 2\cdot\sin\varphi}{\lambda} \tag{7}$$

这里,$U_\perp$ 是粒子运动速度在垂直于两束光线交叠区域的角平分线方向上的分量。式(7)表明,粒子的速度可以通过测量流过测量体积 MCV 的粒子的多普勒频率来测得。

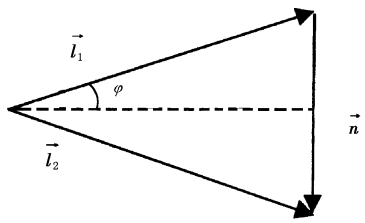

图 3 单位向量的差

通过上面的分析,我们可以知道,若要得到流体流速,必须确定光束交叠半角 φ,如图 4 所示,在距离透镜 L_1 2 m 左右的距离放置一个观察屏,测量屏上两个光点之间的距离 D,这样,交叠半角 φ 由下式得到:

$$\tan\varphi = \frac{D}{2\cdot l} \Rightarrow \varphi = \arctan\left(\frac{D}{2\cdot l}\right) \tag{8}$$

这里,$l = l' - f$(f 为透镜 L_1 的焦距)。

这样在实际测量中,便可以通过式(8)确定出

交叠半角的值,从而根据式(7)及测得的频移得到所需测量流体的流速。

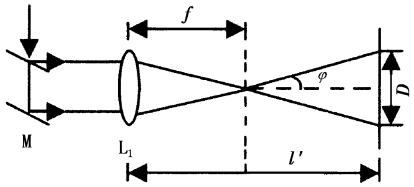

图4　交叠半角的确定

3　测量实例

实验中使用的激光波长 $\lambda = 632$ nm,透镜 L_1 焦距 $f = 10$ cm。测得 $l' = 247.3$ cm, $l = l' - f$, $D = 61.3$ cm,由此可得 $\varphi = 7.36°$,信号处理器处理后的信号显示如图5所示。

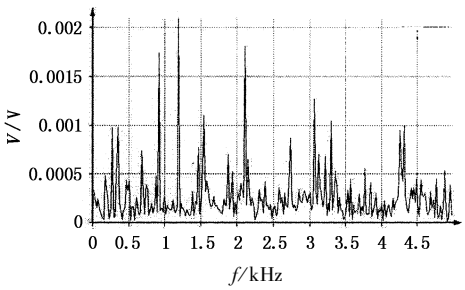

图5　频移与电压示意图

从图5可以看到,通过MCV的粒子频移是不一样的,说明流体流过MCV时流速不是稳定的,有几种流速同时存在,在1.2 kHz处频移最大,即对应的流速为主要流速。根据式(7),将数据代入,可以得到:

$$U = \frac{f_D \cdot \lambda}{2 \cdot \sin\varphi} = \frac{1200 \cdot 632 \times 10^{-9}}{2 \cdot \sin 7.36} = 0.148 \text{ cm/s}$$

同理可以得到流体在每一时刻的流速。

参考文献:

[1]　雷肇棣. 物理光学导论[M]. 西安:电子科技大学出版社,1993.

[2]　沈熊. 激光多普勒测试技术及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[3]　Phywe System GmbH. LDA Laser-Doppler-Anemometry [M]. 2003.

[4]　Becker K A. General approach to TMA observe ability from angle and frequency measurements[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(1): 487 - 494.