

## 声光扫描激光测速研究\*

刘昌文 王仕康 刘 杰 黄河振

(天津大学热能研究所 天津 300072)

**提要** 针对机械式扫描激光多普勒测速技术(LDA)存在的缺陷,利用声光互作用中衍射光束的偏转效应来实现激光束扫描,构成的声光扫描 LDA 系统不存在任何运动的光学元件,克服了机械扫描 LDA 存在惯性影响带来的局限性。应用于人工心瓣返流瞬态流速分布的测定,所获得的实验结果为评定二尖瓣替代物返流特性提供了可信的依据。

**关键词** 激光多普勒测速,声光扫描,心瓣返流瞬态流速分布

激光多普勒测速技术(LDA)是具有不干扰流场、空间分辨率高、动态响应快等特点的新型测速技术。1964 年问世后,虽然发展异常迅速,但是已有的商品化 LDA 只限于流速的单点测量,只能获得流场中某点脉动流速随时间变化的历程。流体力学中湍流的实验研究,涉及各种湍流空间尺度测量。工程中燃烧过程的研究也发现,湍流空间结构及尺度对燃烧反应速度及火焰传播速度的影响极大。就内燃机气缸内的燃烧过程而言,在进气过程中气缸内产生了强烈的非均匀湍流,平均流速及湍流强度皆是空间时间的函数<sup>[1]</sup>。为评定人工心瓣的品质,必须经过体外脉动流试验,进行诸如跨瓣压差、脉动返流量以及流场脉动特性等品质因素鉴定。总之,流体力学湍流尺度、燃烧的非均匀湍流以及人工心瓣体外模拟试验中的脉动返流量等测定都需要多点流速的同时测量。利用空间分布的多线热线测速技术(HWA)能同时获得湍流场中不同点的瞬时流速的时间历程,由此组合成空间二点脉动流速的空间相关函数<sup>[2,3]</sup>,从而得到湍流微尺度和积分尺度等表征湍流微结构的统计量,但 HWA 对流场有干扰。虽然 LDA 与 HWA 相比具有不干扰流场的独特优点,但只能进行单点流速测量的 LDA,其非接触式、空间分辨率高、动态响应快等优点在湍流空间微结构的研究中无法充分发挥作用。上述因素促使不少研究者去探索用移动激光束的方法来达到使测量点在流场中扫描的目的,进而实现流场中多点瞬时流速的同时测量。已有测量点扫描的 LDA,大都是通过光学元件(透镜、反射镜)的周期性运动来实现的,属于机械式扫描。例如 1973 年 Grant 和 Orloff<sup>[4]</sup>采用传输透镜沿光轴前后平移实现了测量点沿光轴方向扫描的 LDA 测量,其最大扫描范围为 200 mm,测量体移动速度可达 1.5 m/s,透镜运动惯性限制了扫描速度的提高。1981 年 Durst 及其合作者<sup>[5]</sup>,1984 年 Chehoudi 和 Simpson<sup>[6]</sup>,在传统的双光束差动式 LDA 光学系统中增加了定轴摆动反射镜,实现了垂直于光轴方向扫描的扫描 LDA。由于光学元件都有一定的重量和体积,不可避免地存在一定惯性,从而限制了扫描频率的提高,一般都小于 20 Hz,而且要对机械式扫描实现计算机

\* 国家自然科学基金资助项目,于 1989 年 10 月通过专家鉴定。

收稿日期: 1996-09-17; 收到修改稿日期: 1996-12-04

控制与操作也极为困难。针对机械式扫描 LDA 存在的缺陷,天津大学激光诊断研究室在国家自然科学基金资助下,发展了具有高速扫描功能的新型扫描 LDA——声光扫描 LDA(简称 AOS-LDA),该系统利用声光偏转器件一级衍射光的偏转效应来实现激光束扫描,不存在任何运动的光学元件,克服了机械扫描存在惯性带来的局限性,其扫描速率比机械式扫描速率高出二个数量级。

## 1 声光扫描 LDA 构成及工作原理

### 1.1 光学系统

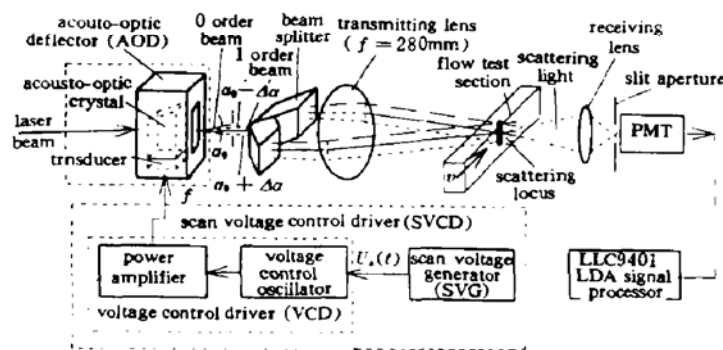


图 1 垂直方式 AOS-LDA 原理图

Fig. 1 Schematic of the vertical scanning model AOS-LDA

于被测流场中形成测量点,此交点的空间位置由入射到传输透镜的两束入射光束的方向决定。测量点中的微粒所产生的散射光由接收系统收集后,被转换成多普勒电信号,它的频率与流速成正比,即  $f_D = 2 \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \frac{V}{\lambda}$ , 式中  $f_D$  为多普勒频率; $\theta$  为两束入射光的夹角; $\lambda$  为激光波长 ( $0.6328 \mu\text{m}$ )。由于一级衍射光的偏转角依赖于产生在 AOD 晶体内的声光互作用的超声波频率,它就是压控驱动源(VCD)注入给换能器的电压信号的频率。如果 VCD 输出频率周期性变化,入射到传输透镜的两束入射光的方向也将在垂直于两入射光所在的平面内作周期性变化,从而使测量点在垂直于光轴的方向上扫描。

图 1 中的声光偏转器(中国科学院上海硅酸盐研究所研制的产品)的声光互作用介质为  $\text{TeO}_2$ ,给换能器注入中心频率为 60 MHz 的驱动信号后,即可在  $\text{TeO}_2$  晶体中激励出超声波,它在晶体中的传播速度约为 620 m/s,并在介质中产生密度呈周期变化的相位光栅,光栅的间距等于超声波波长。声光互作用产生反常 Bragg 衍射,以离轴角为  $6^\circ$  的离轴方式工作<sup>[7]</sup>。

散射光接收系统由接收透镜、光阑和光电转换器组成。AOS-LDA 中散射光的探测需由灵敏度高、响应快、噪声水平低的光电转换器完成。由于 AOS-LDA 的测量点是移动的,经接收系统成像在光电转换器的光敏面上的像点也是移动的,因而要求光电转换器件必须具有较大光敏面,能接收来自扫描范围内测量点的散射光,为此选用光电倍增管(PMT,型号 GDB-423,华东电子管厂产品)作为 AOS-LDA 散射信号的光电转换器,它具有端窗式铯钾钠铯光阴极,光敏面有效直径为 34 mm。选用焦距为 105 mm,  $\phi 30 \text{ mm}$  的复合镜头作为散射光收集透镜。由于测量点在接收平面内的像点也是周期性地垂直方向扫描,为了使散射光能通过光阑射到 PMT 光敏面上,置于光电倍增管前的光阑需做成与像点扫描轨迹一致的狭缝。为了滤除杂散光,狭缝光阑宽度必须小于扫描像点的直径,狭缝光阑的长度与像点扫描轨迹的长度相匹配。

AOS-LDA 有两种构成方式:测量点在垂直于光轴的方向扫描(简称垂直方式);测量点沿光轴方向扫描(简称光轴方式)。图 1 是垂直方式 AOS-LDA 的原理图。这是一个典型的双光束型 LDA 系统,He-Ne 激光器输出的光束经声光偏转器(AOD)产生衍射,选择衍射效率较高的第一级衍射光进入成分束器后,被分成两束相互平行的光束,经传输透镜相交

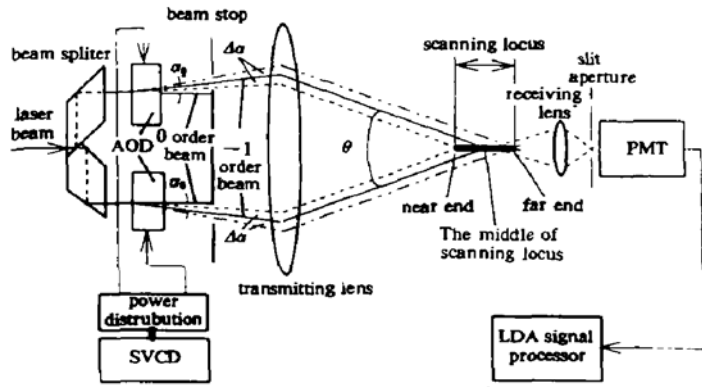


图 2 光轴方式 AOS-LDA 原理图

Fig. 2 Schematic of the axial scanning model AOS-LDA

图 2 是沿光轴方向扫描的 AOS-LDA 的原理图。入射光首先经分束器后分为两束光强相等的平行光，然后使它们分别射入两个声光偏转器，并使其产生 Bragg 衍射，衍射平面应在分束后两平行光所在的平面内。利用光阑只让两束负一级衍射光入射到传输透镜。当 VCD 工作在中心频率为  $f_0$  时，一级衍射光的偏转角为  $\alpha_0$ ，测量点落在扫描范围的中心处，如果 VCD 输出的频率偏离中心频率为  $\pm \Delta f$  时，两束一级衍射光偏转角同步向相反方向产生  $\pm \Delta \alpha_0$  的变化，测量点分别落在扫描范围的远端点和近端点。VCD 输出频率连续地由  $f_0 - \Delta f$  变化到  $f_0 + \Delta f$ ，就可使测量点连续地由近端点移动到远端点，从而实现测量点沿光轴方向的扫描。

当 VCD 输出的频率偏离中心频率为  $\pm \Delta f$  时，两束一级衍射光偏转角同步向相反方向产生  $\pm \Delta \alpha_0$  的变化，测量点分别落在扫描范围的远端点和近端点。VCD 输出频率连续地由  $f_0 - \Delta f$  变化到  $f_0 + \Delta f$ ，就可使测量点连续地由近端点移动到远端点，从而实现测量点沿光轴方向的扫描。

### 1.2 扫描压控驱动源

AOS-LDA 中使用扫描压控驱动源 (SVCD) 为声光偏转器提供频率可控的驱动电压信号 (见图 1, 2)。SVCD 由扫描控制电压发生器 (SVG) 及压控驱动源 (VCD) 组成 (图 1)。其中的扫描控制电压由数字量转换而得，它的原理示于图 3(a) 中。4 MHz 晶体振荡器作为脉冲信号源，经分频数  $k$  可设定的  $\div k$  分频后，作为触发脉冲输入给加计数器。加计数器的输出作为控制测量点位置的数字量  $n$ ，输入给 D/A 转换器， $n$  的变化速率由触发脉冲频率决定。当输入到加计数器的触发脉冲频率固定时，计数器的输出  $n$  将周期性地增加。数字量  $n$  经 D/A 转换后

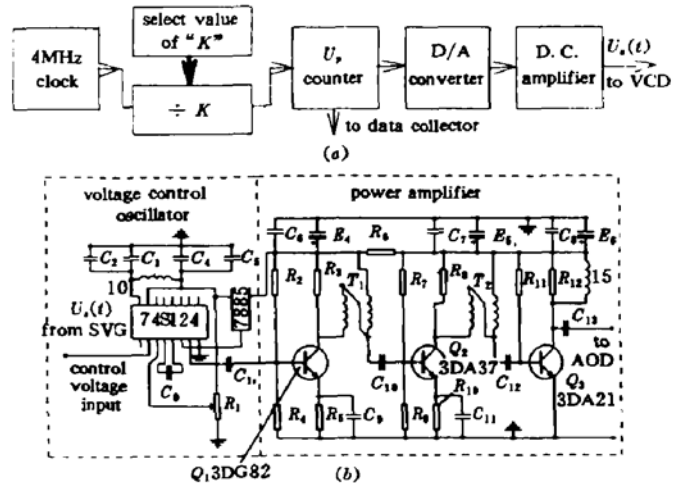


图 3 (a) 扫描控制电压发生器 (SVG) 框图；

(b) 压控驱动源 (VCD) 电路原理图

Fig. 3 (a) The block diagram of the scan-voltage generator (SVG);

(b) The circuit diagram of the voltage control driver (VCD) for AOD

的锯齿波形扫描电压  $U_s(t)$  输入压控驱动源，产生声光偏转器所需的驱动电压信号，驱动源输出信号频率  $f$  的大小与数字量成正比，变化范围为 40~80 MHz。VCD 中的压控振荡器由 74S124 为核心元件构成的集成压控振荡器 (图 3(b))，输出信号的频率与输入的扫描电压  $U_s(t)$  成正比。功率放大器是以 4:1 传输线阻抗变换器作为匹配元件，把三级各自引入局部负反馈的共发射极放大器级连而成的宽带晶体管功率放大器 (图 3(b))，输出功率连续可调，以适应不同驱动功率的声光器件。当 SVCD 的输出频率偏离中心频率  $\pm \Delta f$  时，将引起一级衍射光偏转角  $\alpha_0$  变化  $\pm \Delta \alpha$ 。采用图 1 或图 2 所示的光学系统便可实现垂直方式扫描或光轴方式扫描。

### 1.3 多普勒信号处理

PMT 输出的多普勒信号由计数型信号处理装置 (LLC9401 型, 天津大学热能研究所激光

诊断研究室产品)处理。首先进行带通放大,滤去低频的基底频谱和低频噪声后,通过整形、计数、有效性判别等得出多普勒信号的周期,并输出一个与多普勒频率成正比的模拟电压  $U_b(t)$ 。

利用计算机分析扫描电压  $U_s(t)$  和多普勒模拟电压  $U_b(t)$  的大小以及它们之间的关系,可以得到流速的空间分布及其时间变化特性。通过包括 A/D 转换及其控制器的数据采集单元,计算机可将  $U_b(t)$  值乘以相应的比例常数后得到流速值  $V(t)$ 。以最低扫描电压作为扫描起始点,启动数据采集单元。每一扫描周期被均分为  $I$  个时段(即流场中扫描范围被均分为  $I$  个区域),数据采集单元在每一个时段被触发后,计算机就得到  $U_s(t)$  和  $V(t)$  的一个采样值。 $N$  次扫描得到  $N \times I$  个  $V(t)$  采样值,可用二维数组  $V(i, n)$  表示。 $i = J, V(J, n)$  表示第  $J$  个空间点处流速作为时间的函数; $n = M, V(i, M)$  表示第  $M$  次扫描过程中测到的流速瞬时分布值。

## 2 应用实例

AOS-LDA 已应用于美国迈阿密大学心血管工程实验室的人工二尖瓣返流测定<sup>[9]</sup>。二尖瓣返流是最常见的风湿性心脏瓣膜病变,如果把返流量也计入左心室搏出的血流量,这意味着心脏负荷过重,因此返流特性是人工二尖瓣替代物的一项重要控制指标。

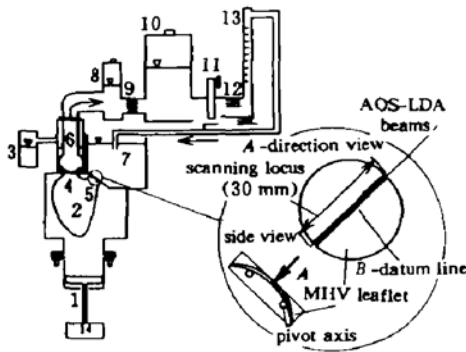


图4 人模拟试验台及 AOS-LDA 测量区域示意图

- 1: 活塞和顶杆; 2: 左心室; 3: 主动脉顺应调节器; 4: 主动脉瓣; 5: 二尖瓣; 6: 主动脉段; 7: 左心房; 8: 特征顺应器; 9: 特征阻尼; 10: 外周顺应器; 11: 可调阻尼; 12: 外周阻尼; 13: 浮子流量计; 14: 驱动电机

Fig. 4 Schematic diagram of the physiological mock loop, and the arrangement of AOS-LDA scanning locus

- 1: piston; 2: ventricular sac; 3: aortic compliance; 4: aortic valve; 5: mitral heart valve (MHV); 6: aortic root; 7: left atrial chamber; 8: characteristic compliance; 9: characteristic resistance; 10: peripheral compliance; 11: variable resistance; 12: peripheral resistance; 13: rotometer; 14: electromagnetic motor

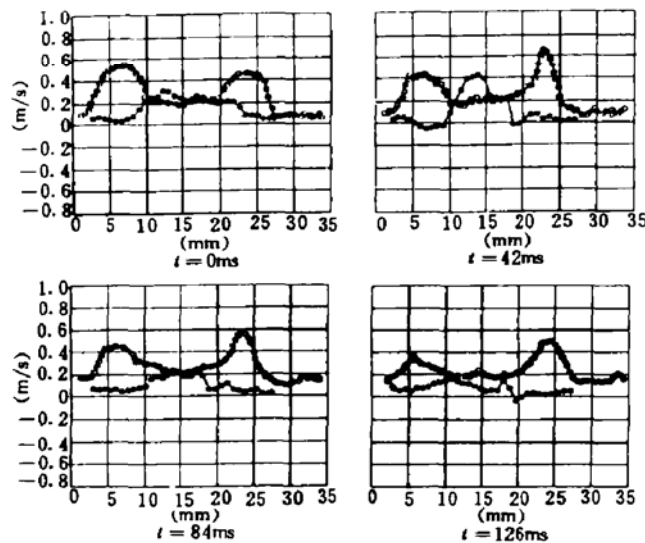


图5 用 AOS-LDA 测定的二尖瓣返流的瞬态分布

Fig. 5 AOS-LDA measurement of regurgitant jet velocity profiles (white circle Duromedics 29m. black circle Cii 1205 27m) velocity (m/s) vs scanning position (mm) along B-datum line ○: duromedics 29m. ●: Cii 1205 27m

试验用二尖瓣替代物分别为 Duromedics 29m 及 Cii1205 27m 双叶机械瓣(MHV), 安装在脉动流模拟台中的二尖瓣位置处(见图 4)。AOS-LDA(光轴方式)的测量点沿两瓣叶闭合缘方向扫描, 距离瓣叶表面 5 mm 左右。

用 AOS-LDA 测定的瓣膜关闭阶段返流流速分布示于图 5 的四幅曲线族中, 它们分别代表四个时刻流速分布。它们之间的时间间隔为 42 ms。作为对比, 每幅实验曲线族中都包含分别用空心圆和实心圆表示的二组数据, 它们分别代表 Duromedics 29m 和 Cii1205 27m 的瞬态返流分布。可由瞬态返流分布曲线来估算返流血流量随时间变化的特性。

### 参 考 文 献

- 1 Daneshyar H., Hill P. G.. The structure of small-scale turbulence and its effect on combustion in spark ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1987, 13(1): 47~73
- 2 Kuo A. Y. S., Corrin S.. Experiments on the geometry of the fine-structure regions in fully turbulent fluid. *J. Fluid Mech.* . 1972, 56: 447
- 3 Narayanan M. A. B., Rajogopalan S., Narasimha R.. Experiments on the fine structure of turbulence. *J. Fluid Mech.* . 1977, 80: 2
- 4 Grant G. R., Orloff K. L.. Two-colour dual-beam backscatter laser Doppler velocimeter. *J. Appl. Opt.* . 1973, 12: 2913~2916
- 5 Durst F., Lehmann B., Tropea C.. Laser Doppler system for rapid scanning of flow fluids. *Rev. Sci. Instrum.* . 1981, 52: 1676~1681
- 6 Chehroudi B., Simpson R. L.. A rapidly scanning laser Doppler anemometer. *Phys. E: Scientific Instrument*, 1984, 17: 131~136
- 7 徐介平 著. 声光器件的工作原理、设计和应用。北京: 科学出版社, 1982, 112~134
- 8 Wu Z. J., Wang Y., Hwang N. H. C.. Occluder closing behavior: a key factor in mechanical heart valve cavitation. *J. Heart Valve Disease*, 1994, 3: S25~S34

## Investigation of Acousto-optic Scanning Laser Anemometry

Liu Changwen Wang Shikang Liu Jie Huang Hezhen

(Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** In order to overcome the inherent weakness in the mechanical scanning laser Doppler anemometry (LDA) system, the laser beam scanning was realized by means of the deflection of the diffracted laser beam occurring in the acousto-optic interaction to construct an acousto-optic scanning LDA (AOS-LDA). Because there are no any movable or rotational optical elements in the AOS-LDA, the limitations induced by mechanical inertia was then eliminated. The instantaneous regurgitant velocity profiles obtained from the mitral heart valve prosthesis (MHVP) test installed in a mock circulatory loop can be used to evaluate the regurgitation characteristic of the MHVP in vitro.

**Key words** LDA, acousto-optic, scanning, instantaneous regurgitant velocity profiles