

# 应用于流场测量的激光高频空气 超声声光偏转效应

宋宙模 张彬乾 李建英 陈长乐

(西北工业大学应用物理系, 西安 710072)

尚志远

(陕西师范大学声学所, 西安 720062)

**提要** 研制了适用于产生空气超声相位光栅的大功率高频超声换能器, 采用位移灵敏接收器, 在换能器发射面前方适当位置加声匹配器以加强声场干涉提高发射方向性, 获得了明显的激光空气超声声光偏转效应。可应用于风洞试验中测量空气旋涡流场参量。

**关键词** 激光空气声光偏转, 高频空气超声换能器, 空气流场测量

## 1 引言

空气流场测量对空气动力学特别是复杂空气流场如旋涡场的研究极为重要。目前对流场参数如旋涡的空气密度、压力、温度、流速及旋涡的环量等的测量采用微型传感器, 微粒的片状激光摄影及 Doppler 测量方法。但这些方法存在阻挡流场及载体惯性效应。激光超声方法<sup>[1]</sup>只用空气本身的激光超声声光效应, 可实现无破坏非接触测量, 并能进行自动连续的流场测量。其原理及在水中的声光偏转效应的试验已作过介绍<sup>[2]</sup>。

当  $y$  方向有相距  $s$  的两束平行的激光束, 超声波以速度  $v$ , 从  $z$  方向垂直通过这两束光线。如果在声波与光束相交处有声光偏转效应, 则两束光被光探测器接收后所得的信号就会有时间差, 因为超声波经过两光束之间的距离  $s$  需要时间  $t_0$ , 当两光束通过的空间中有一旋涡流场, 则由于旋涡的影响, 超声波通过的速度会变化。一部分是由速度最高的旋涡核中心向外速度逐渐衰减, 因而使超声波通过两光束之间的时间变化到  $t'$ , 另一部分则由于旋涡场还存在着螺旋线状切变层, 通过  $s$  的时间又变化了  $t''$ 。于是超声波通过两光束之间的距离的时间变化为

$$\Delta t_w = t_0 - (t' + t'') \quad (1)$$

由空气动力学可以得到  $\Delta t_w$  与超声束距旋涡核中心位置的距离  $y$ , 旋涡最大速度处的环量  $\Gamma_0$  以及切变层环量跃变  $\Delta\Gamma_i$  之间的关系

$$\Delta t_w = f(y, r_0, \Gamma_0, \Delta\Gamma_i) \quad (2)$$

测出  $\Delta t_w$  就可以得到  $\Delta\Gamma_i$  与位置  $y$  关系 (旋涡核半径  $r_0$  和  $\Gamma_0$  可以由其他方法测得或计算出)。于是由此关系就可定出旋涡场及其他参量的场分布。

实现上述激光-超声对流场的测量, 关键在于要知道超声到达两光束的时刻, 然后可测出  $\Delta t_w$ 。这可从超声对激光的影响所发生的时刻来决定。超声对激光的影响又可以通过声光

偏转效应来显示。

目前对声光效应的研究大都用声光晶体来实现。在文献[2]中我们进行过水中的声光偏转试验。由于空气折射率极小,由声波的影响产生局部折射率变化更小,通过空气声波引起的局部折射率变化导致光线路径可控制的偏转,在国内尚未见有报道。要达此目的,首先要制作大功率高频空气超声换能器,其次要解决固体振动面与空气之间悬殊的声阻抗匹配问题(固体声阻抗与空气声阻抗相差五个数量级)。然后要解决在大功率情况下的电机阻抗匹配和频率调谐,换能器发出声波的方向性及声光偏转效应的灵敏探测等问题。本文对这几方面进行了改进提高,实现了激光空气超声声光偏转。

## 2 实验及结果

**2.1 大功率高频空气超声换能器制作** 由在水中形成超声相位光栅使激光产生偏转的实验可以估算出在空气中产生相应的偏转需要换能器的功率约达 300 W 以上。我们在 175 kHz 高频超声换能器研究<sup>[3]</sup>的基础上采用变幅杆夹心式压电换能器结构<sup>[4]</sup>,如图 1 所示。在压电陶瓷 PZT 的两电极之间可加 500 V 左右的峰-峰电压。经测试其谐振频率为 66.3 kHz, 75.0 kHz, 103.1 kHz, 132.0 kHz 以及 181.0 kHz, 其中 66.3 kHz 声信号最强, 103.1 kHz 次之。

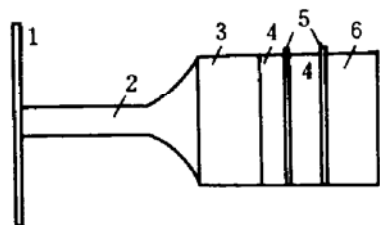


Fig. 1 Ultrasonic transducer

1: vibrating plate; 2: variable amplitude stick; 3: front cover plate; 4: PZT; 5: electrodes; 6: back cover plate

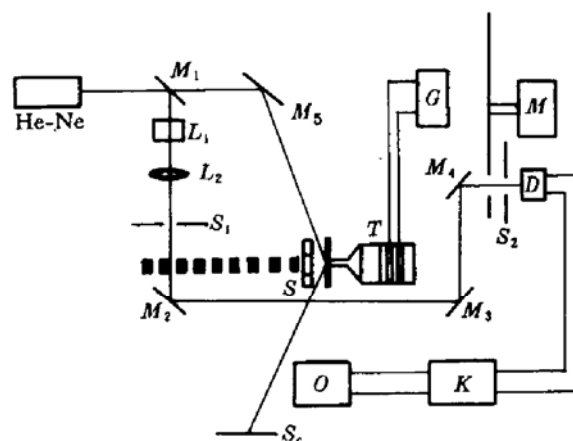


Fig. 2 Optical path diagram for laser ultrasonic acousto-optic deflection

$M_1$ : partial reflection mirror;  $M_2, M_3, M_4$ : mirrors;  $T$ : transducer;  $S_1, S_2$ : slits;  $S$ : acoustic coupler;  $L_1$ : expanding beam lens;  $L_2$ : focus lens;  $G$ : acoustic generator;  $M$ : modulator;  $D$ : optical detector;  $K$ : amplifier;  $O$ : oscilloscope;  $S_c$ : screen

**2.2 激光超声空气声光偏转** 实验光路如图 2 所示。He-Ne 激光器发出的 632.8 nm 激光经半反镜  $M_1$  反射后经  $L_1$  扩束,并由  $L_2$  变换成平行光,使束腰变换到光缝  $S_2$  上。光缝  $S_1$  用以限制光束宽度约 1 mm 左右,可根据超声波波长而定,但必须使  $S_1$  光缝宽度小于  $\lambda_s/4$ 。由  $S_1$  出射的条状光束垂直通过超声换能器形成的折射率光栅后产生声光偏转,经全反射镜  $M_2, M_3, M_4$  射入光缝  $S_2$ ,并由光电接收器接收。通过半反射镜  $M_1$  的另一路光由  $M_5$  反射后射在换能器  $T$  的振动片表面上并反射到屏  $S_c$  上,用以监测换能器的振动。换能器谐振时振动面使反射光在屏上拉开成长条,如图 3 所示。在换能器  $T$  振动面前加一声匹配器  $S$ 。整个光路放在光学平台上,换能器及  $S$  放置在平台上面的导轨上以使其能沿声发射方向前后移动。声光偏转的光束由

调制器  $M$ , 光电接收器及相敏放大器或高通低噪声放大器组成的位移灵敏接收装置接收。在接收时光缝  $S_2$  与光斑相对位置非常重要, 需精心调整。 $S_2$  的缝宽可根据光电转换灵敏度调节, 一般放在  $100 \mu\text{m}$  左右。我们用高通低噪声放大器  $K$  把信号放大约 1000 倍, 可得到接近于  $20 \text{ mV}$  的声光偏转信号。在用  $200 \text{ Hz}$  左右斩波器调置光束时, 在无声光效应时基本不放大, 只出现由于线路电容微分作用产生的在方波上升沿和下降沿处的正负尖脉冲。而一旦有声光效应以后则在调制器开启时出现高频(与超声频率一致)的光信号。当调制器不通光时, 由于无光照而变为无信号状态, 从这种对比可明显地观察到声光偏转信号, 如图 4 所示。一旦发现有声光效应则可停止使用调制器而直接经高通放大器观察声光偏转效应, 所得的信号如图 5 所示。

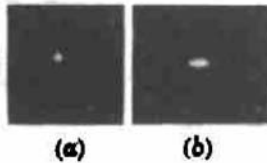


Fig. 3 Laser beam spots for monitoring vibration  
(a) no vibration; (b) with vibration

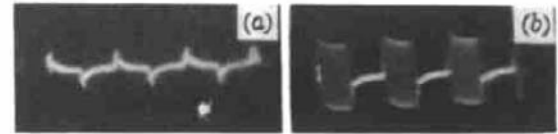


Fig. 4 Observation of acousto-optic deflection signal  
(a) no signal; (b) with signal

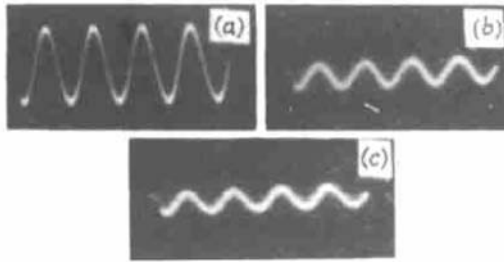


Fig. 5 Acousto-optic deflection signal at different distances  
(a)  $d = 300 \text{ mm}$ ; (b)  $d = 600 \text{ mm}$ ; (c)  $d = 1200 \text{ mm}$

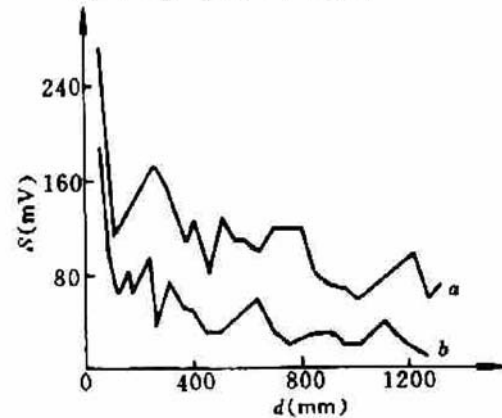


Fig. 6 Acousto-optic deflection as a function of distance  
(a) with acoustic coupler; (b) no acoustic coupler

2.3 用于流场测量的声光效应的主要指标是在风洞模型试验的空间范围内要很明显地探测到声光偏转信号, 因此, 我们测出了声光偏转信号随距离变化的曲线如图 6 所示。图中的二条曲线为加匹配器和不加匹配器两种情况下得到的。

### 3 结果讨论

3.1 声强估计 在等温条件下, 折射率变化幅度  $\Delta n$  与声压  $\Delta P$  的关系为<sup>[2]</sup>

$$\Delta n = K \Delta P \quad (3)$$

$$K = (n^2 - 1)(n^2 + 2)M / 6n\rho RT \quad (4)$$

式中  $n$  为空气折射率,  $M$  为克分子量,  $\rho$  为密度,  $R$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度。根据光束偏转最大距离  $d_{\text{max}}$  与折射率变化幅度的关系可推导出如下关系

$$d_{\text{max}} = 2\pi K a \cdot 1/\lambda_0 \cdot \Delta P \quad (5)$$

其中  $a$  为声光作用位置与接收偏转信号处的距离, 若取  $d_{\text{max}} = 100 \mu\text{m}$ , 就可估算出声压  $\Delta P$ , 然后再根据声压与声强  $I$  的关系  $I = 1/2 \cdot \Delta P^2 / Z$  (式中  $Z$  为声阻抗) 及声强与声功率的关系  $P = I \cdot S$  ( $S$  是直径为  $\phi 6$  的变幅杆细杆的截面积) 可进一步估算出声功率约为  $7.5 \text{ W}$ 。考虑到实验中所用电功率约为  $100 \text{ W}$ , 因而电声的转换效率约为  $7.5\%$  左右。虽然如此, 还是比原来由水

中的声光实验估算的声能约需 300 W 左右要减小一个数量级。

3.2 声光效应的匹配增强 提高超声源功率可以增强声光效应,但在采用变幅杆的结构中,变幅杆可能在输入功率为 150 W 时发生断裂,一般工作在 100 W 左右为宜。因而必须解决固体与空气声阻的匹配问题。M. Babic<sup>[5]</sup>介绍过在振动面上加一层半波长厚度的匹配层的方法。我们用加振动片的方法可部分解决这个问题<sup>[4]</sup>,同时还特制了一个声匹配器,使声束方向性达到 10°左右,增强了声光效应,使偏转信号接收距离达到 1300 mm,满足了流场测量的要求。

3.3 提高超声频率 由于光线路径是向折射率大的方向偏转,当连续的超声波经过声光作用区时,形成的折射率光栅使空气疏密变化,当频率提高时,由于波长缩短,疏密之间的距离亦变小,因而折射率变化的梯度亦增大,声光偏转效应的效果更好。为了充分利用这一梯度,则要求光束被限制在  $\lambda_0/4$  以内,这就是为什么我们在光路中要加上光缝  $S_1$  以限制光束在 1 mm 以内的原因。

3.4 精度分析 当两平行光束距离较小时,所得流场速度即为当地速度。由于光束限制在  $\lambda_0/4$  内,这距离可小到 5 mm。光束对声光偏转无推迟效应,利用目前的电子技术,时间差  $\Delta t$  的测量精度估计小于  $1 \times 10^{-7}$  s,于是可分辨出 5 cm/s 的速度变化。这是常规方法达不到的。

### 参 考 文 献

- 1 R. H. Engler. Vortex Breakdown—Investigation by Using the Ultrasonic-Laser Method and Laser Sheet Techniques. ICAS' 88 Record, 1988. 1731~1737
- 2 宋宙模,陈长乐,张彬乾等. 复杂流场的激光-超声测量方法及原理性实验研究. 激光杂志, 1993, 14(4): 179~184
- 3 宋宙模,陈长乐,尚志远等. 175 kHz 高频空气超声换能器研制及其特性测量. 应用声学, 1994, 13(1): 33~36
- 4 程存弟等. 超声技术——功率超声及其应用. 西安: 陕西师范大学出版社, 1992. 22
- 5 M. Babic. A 200 kHz Ultrasonic Transducer Coupled to the Air with a Radiating Membrane. *IEEE Transactions on UFFC*, 1991, 38(3): 252~255

## Laser High Frequency Air Ultrasonic Acousto-optic Deflection Effect Used for Flow Field Measurement

Song Zhoumo Zhang Binqian Li Jiangying Chen Changle

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Shan Zhiyuan

(Shaanxi Teacher University, Xi'an 710062)

**Abstract** A high power, high frequency air ultrasonic transducer used to generate air ultrasonic phase grating is fabricated. The laser ultrasonic acousto-optic deflection has been observed clearly by using a displacement-sensitive detector and a particularly prepared acoustic coupler setting at a proper place in front of the acoustic radiating surface of the transducer to increase the interference of acoustic field and to decrease the divergence angle of acoustic radiation. It can be applied to measure the parameters of the air vortex flow field in wind tunnel test.

**Key words** laser acousto-optic deflection in air, air ultrasonic transducer with high frequency, flow field measurement