

气流流场的高分辨激光光谱法测量*

刘文华 严海星 杨富荣*

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

(中国气动力研究与发展中心设备设计与测试技术研究所, 四川安县, 622653)

摘要 对高分辨率激光光谱技术用于气流流场的测量方法进行了探讨。利用不同波长光波频率的自动扫描进行了静态和动态、单向和相向光的吸收光谱测量, 得到了初步的实验结果, 并对实验中的关键技术及难点进行了讨论

关键词 流场速度测量 高分辨率激光光谱

1 引言

迄今为止, 用激光测量流场的技术已经历了三个阶段: 第一阶段是将传统的光学测量技术(干涉、条纹、阴影等)改用激光光源, 第二阶段是六十年代后期发展起来的以激光 Doppler 测速(LDV)为代表的激光检测技术, 第三阶段是八十年代初开始发展的激光光谱流场测量技术

将激光光谱用于流场测量可实现非接触的定量测量, 并可实现多点和多个流场参数的同时测量, 有很高的空间分辨率和时间分辨率, 因此它具有显著优于其它流场测量技术的特点^[1-8]。

本文采用氩离子激光泵浦的环形染料激光系统在几个不同波长下对掺碘分子的气流池进行了光波频率自动扫描的静态和动态、单向和相向光的吸收光谱测量, 得到了清晰的激光碘分子谱图, 观察到激光诱导的碘荧光

2 测量原理

在气流流场的激光诱导荧光(LIF)光谱检测中, 气流中的组份, 部分地吸收特定波长的激光辐射被激发到激发态, 被吸收的辐射的一部分再作为荧光向所有方向发射。在与激发激光束垂直的方向上检测到的这种荧光信号包含了有关气流流场的速度、温度、压力、密度、组份浓度等信息。因此, 只要我们恰当地选用实验条件并适当处理实验数据, 就可通过检测到的荧光信号定量地确定被照射部分气流的流场参数

可以用二能级模型来描述组份吸收/荧光的动力学过程。在远离饱和的条件下, 检测器的

* 国家自然科学基金资助项目

1998- 06- 05 收到第 1 次稿, 1999- 03- 23 收到修改稿

一个像元上成像的, 在流体体积 V_c 内产生并被检测到的荧光信号为:

$$S = N_{abs} \frac{\Omega}{4\pi A_{21} + \Omega_{21}} \eta_a R \quad (1)$$

$$N_{abs} = n_{abs} IV_c g(\nu, P, T) B_{12} \Delta T / c \quad (2)$$

$$n_{abs} = f_{pop} X_n \quad (3)$$

其中: N_{abs} 为体积 V_c 内所吸收的光子数; n_{abs} 为处于吸收状态的分子(或原子)的数密度; I 为入射激光强度; B_{12} 为 Einstein 吸收系数; g 为吸收谱线线型函数; ν 为激光频率; P 为气体压力; T 为气体温度; ΔT 为测量时间; f_{pop} 为处于吸收状态的集居分数; X_n 为吸收组份的克分子分数; n 为体积 V_c 内的总粒子数密度; A_{21} 为 Einstein 自发辐射系数; Q_{21} 为激发态的猝灭速率; Ω 为收集荧光的立体角; η_a 为收集荧光的光学系统的效率; R 为成像灵敏度

从式(1)可以看出, 荧光信号除了与组份的固有性质和实验系统自身的参数有关外, 还通过线型函数 g , 猝灭速率 Q_{21} , 集居分数 f_{pop} 及粒子数密度 n 依赖于气流的气动参数。正是利用这些依赖关系可以通过测量激光诱导荧光信号来定量地确定空间各点的气动参数

众所周知, 气体无宏观运动时非饱和谱线型为 Voigt 线型:

$$g(\nu, \nu_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_D(\nu, \nu_0) g_L(\nu, \nu) d\nu \quad (4)$$

$$g_D(\nu, \nu_0) = \frac{2}{\Delta\nu_D} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left\{ - \left[4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D} \right)^2 \right] \right\} \quad (5)$$

$$g_L(\nu, \nu) = \frac{\Delta\nu_L / 2\pi}{(\nu - \nu)^2 + (\Delta\nu_L / 2)^2} \quad (6)$$

$g_D(\nu, \nu_0)$ 是中心频率为 ν_0 的 Gauss 线型, $g_L(\nu, \nu)$ 是中心频率为 ν 的 Lorentz 线型

当气体存在整体的宏观流动时, 由介质的粒子数的速度分布函数和众所周知的 Doppler 原理, 可以推出气流介质的非饱和谱线型。对于沿光束方向宏观运动速度 u 为常数的简单情况, 纯 Doppler 加宽的谱线形式为:

$$g_{D'}(\nu, \nu_0) = \frac{2}{\Delta\nu_{D'}} \left(\frac{\ln 2}{\pi} \right)^{1/2} \exp \left\{ - \left[4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0(1 - u/c)}{\Delta\nu_{D'}} \right)^2 \right] \right\} \quad (7)$$

若同时考虑均匀加宽, 线型函数变为:

$$g_f(\nu, \nu_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} g_{D'}(\nu, \nu_0) g_L(\nu, \nu) d\nu \quad (8)$$

可以证明, 与静止气体介质中的线型函数(4)~(6)相比, 只是峰值移动了 $(u/c)\nu_0$, 对于实际上各处速度不为常数的气流而言, 可以把与被光束探测的流体部分看作由无数个宏观上小、微观上大的流体元组成。在每个流体元内, 可将沿光束方向的流速看成常数。即将线型函数(7)、(8)当作“当地”线型函数使用。将不同流体元的贡献叠加在一起就可得到光束穿过一团流体后的总效应^[5]。

气流参数对线型函数 g_f 的影响, 除了上述气流速度 u 的影响外, 还通过 Doppler 线宽和 Lorentz 线宽体现出来:

$$\Delta\nu_D = \nu_0 \sqrt{8(\ln 2)kT/mc} = C_D \sqrt{T} \quad (9)$$

$$\Delta\nu_C = C_b P / \sqrt{T} \quad (10)$$

C_D, C_b 是仅与粒子固有性质有关、与气动参数无关的常数

下面分别说明气流速度的测量原理

气流速度只通过线型函数 g (即前面的 g_f) 影响检测信号。可以证明, 存在气流宏观运动时, 谱线频移量为

$$\Delta V_{Doppler} = - \frac{1}{2\pi} \mathbf{k} \cdot \mathbf{u} \quad (11)$$

\mathbf{k} 为激光的波矢量 $|\mathbf{k}| = 2\pi/\lambda$, 激光波长 $\lambda = v_0/C$, \mathbf{u} 为气流速度矢量。在光束方向上速度分量为:

$$\mathbf{u} = - \lambda \Delta V_{Doppler} = - \frac{v_0}{C} \Delta V_{Doppler} \quad (12)$$

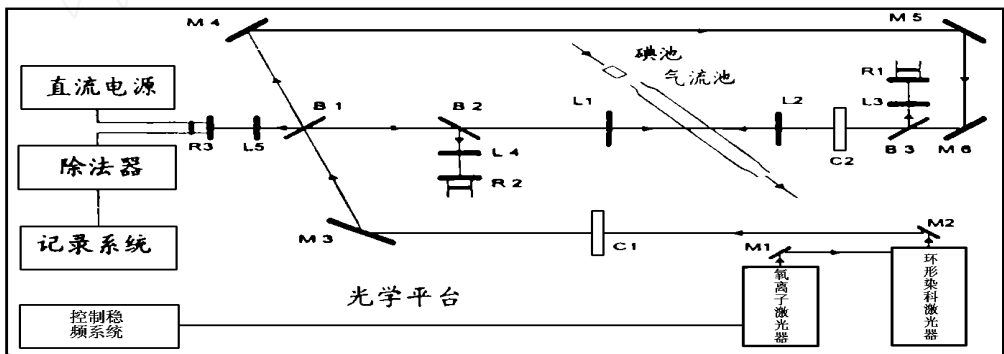
可见, 通过测量谱线的频移量, 就可得到气流的速度

3 实验方案

从上述测量原理看出, 气流速度的测量主要要求对吸收谱线的频移量 ΔV 进行测量。这种测量既可由吸收法实现, 也可通过测量荧光的强度间接获得吸收谱的频移。从技术上看, 进行吸收光谱测量比荧光光谱测量容易得多。当采用吸收光谱法测量气流速度时, 吸收光谱中谱线的频移为光路上的平均值, 故可测得光路上的平均速度。

4 实验装置

该实验装置主要由激光器系统, 光路系统, 气流装置系统, 以及探测、记录系统四部分组成, 如图 1 所示。



M1 - M6: 全反射镜, B1 - B3: 分光镜, C1 - C2: 衰减器, L1 - L5: 组合透镜, R1 - R3: 探测器

图 1 实验装置系统示意图

4.1 激光器系统

实验中我们选用美国光谱物理公司的 380D 型氩离子激光泵浦环形染料激光器作为探测光源, 线宽小于 1MHz, 可在 1~30GHz 范围内连续调谐, 波长在可见范围内。

4.2 光路系统

光学系统主要包括由激发光路和收集光路所需要的光学元件(各种发射镜、透镜、光阑、滤光片等)及其可调节支架, 隔振光学平台等组成。为防止发射镜背面反射的光干扰光路, 需将背面涂黑, 并在使用时尽量保持一小角度。同时为了消除激光中衍射和干涉引起的波面紊乱

的杂光,在光路上需放置空间滤波器,并用衰减器调节参考光和正向光、逆向光的光强比。在气流池两边各加一个透镜系统和光阑使焦平面的位置正好在气流池的中心位置。实验时选用了 $f = 300\text{mm}$ 的组合透镜

4.3 气流装置系统

气流系统主要由碘池,超声速喷管,气流池和真空系统组成

气流池测速段为 $20 \times 6 \times 1(\text{cm})$ 的矩形有机玻璃空腔。为了使流场均匀,在超声速喷管下游加有整流用的铜丝网

若测速段截面积为 A , 喷管喉道面积为 A_1 , 则气流速度 V 与压力 p 为关系为:

$$V = \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma}{2(\gamma - 1)}} \frac{A_1}{A} \sqrt{\gamma R T_0} \frac{p}{p_0} \quad (13)$$

式中: γ 为比热比; R 为气体常数; T_0 为总温; p_0 为总压

我们通过改变气流池压力的方法得到实验所需的不同速度

4.4 探测系统

实验中使用北京光电器件厂生产的 R16 型硅光电池作为探测器,采用会聚接收法进行测量,使探测光直接照射在中心圆以内,从而得到了低噪音、近似直线的记录信号,再通过放大器放大信号,满足了实验要求

为了得到高质量的探测信号,消除光源本身的波动影响,我们在实验装置中安装了除法器,让一路不经吸收池的光作为参考光,与另一路经过吸收池的光相除来消除光源波动的影响,其线路如图 2 所示

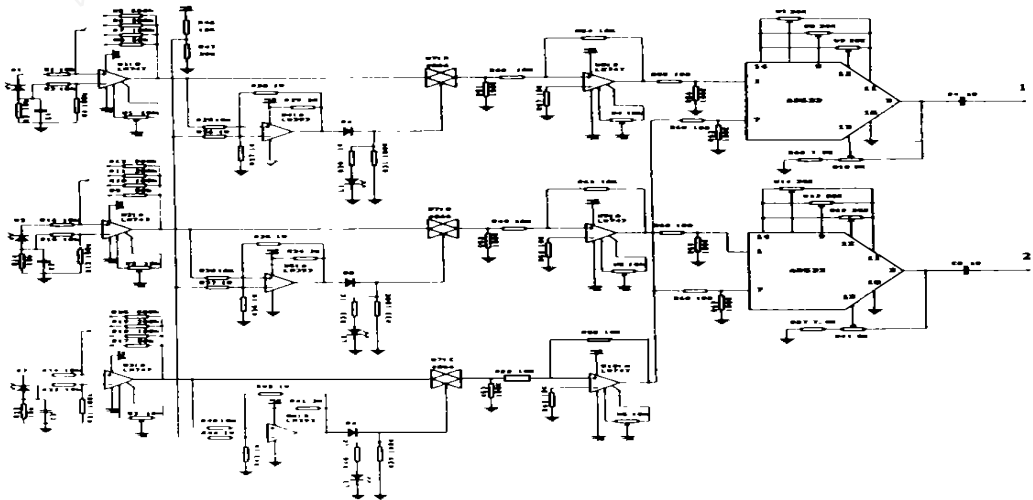


图2 放大器、除法器系统线路图

经除法器处理后的信号输出为:

$$S = \frac{I_s}{I_r} = \frac{1-K}{K} e^{-\alpha L}, \quad I_s = (K-1)I_i e^{-\alpha L}, \quad I_r = KI_i \quad (14)$$

式中, I_r 为参考光强, I_s 为经过吸收池的光, I_i 为输出光强, K 为分光镜的分光系数, L 为吸收光路的长度, α 为吸收系数。经实验摸索,发现探测器与除法器的最佳工作匹配值分别为: 探测

器输出在 40~ 150 mV 范围, 除法器输出在 3~ 8 V 范围

5 高分辨率碘吸收光谱实验

5.1 单向光实验

通过气流池的光为单向光 我们用氩离子环形染料激光系统对掺碘分子的蒸汽进行了高分辨率吸收光谱测量 入射角为 $\theta = 30^\circ, 150^\circ$; 探测器的输出电压分别为: 探测器 R1~ 80 mV; 探测器 R2~ 130 mV, 除法器置 50 倍档 在 6000 Å 附近的 3 个不同波长下得到了扫描谱图, 其中在波长 6072 Å 附近自动扫描 30GHz 的吸收谱图在图 3 中给出 在单向光实验中必须通过测量与气流速度方向的夹角不为 90 的光路上的某个吸收峰相对于与气流方向夹角为 90 或不穿过气流池的同一吸收峰的频移, 得到前一光路上的平均气流速度 而在我们的气流池中, 光路上气流速度的最大分量约为 50 米/秒, 在所采用的波长下对应的频移应约为 0.083GHz 在 14cm 的记录纸对应 30GHz 的扫描频率的条件下, 此频移量只相当于记录纸上 $14 \times 0.083/300 = 0.04\text{cm} = 0.4\text{mm}$ 的移动 这显然是难以准确测量的

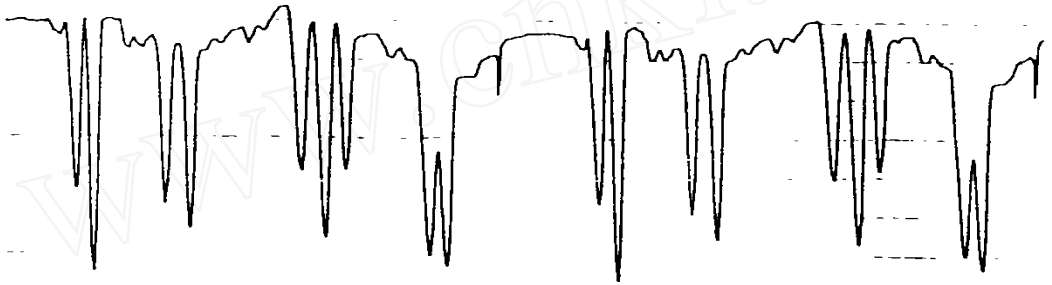


图3 单向光碘吸收谱图

5.2 相向光实验

为了提高测量精度, 我们对实验进行了改进, 对从相反方向穿过气流池的两束激光进行频率扫描测量同一吸收峰的相对频移量, 可使频移量的数值加倍, 有利于提高测量的分辨率(见图 4). 但值得注意的是由于两路光路同时测量, 测量时必须找到各元件的最佳匹配值和最佳工作点, 否则噪音太大, 使信号失真

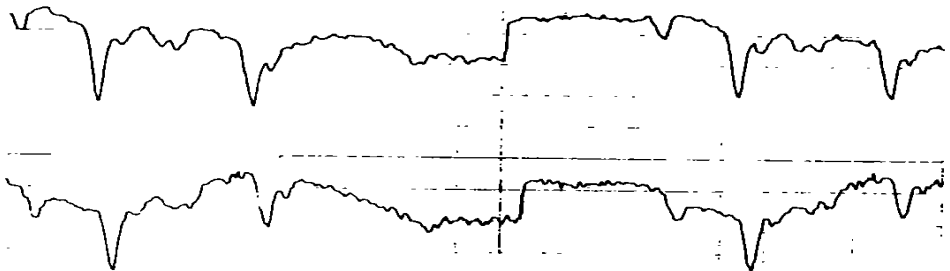


图4 相向光碘吸收谱图

在相向光条件下, 通过光谱频移测速依然可以由直接测量相向的两路光同一个吸收峰的频移得到气流速度值 与单向光实验相经, 相向光实验中等效气流速度加倍 频移量也加倍 但在记录纸上约 0.8mm 的移动量依然难以测准 这说明相向光的频率扫描测频移方案难以

实现 为了克服这一困难, 可以将频率固定于某根谱线的腰部, 这样相向穿过气流池的两束激光的相对频移量就转化为两路光信号的大小之差 通过测量光信号的大小, 就可由已知的该吸收谱线的斜率换算出频移量的大小, 从而确定出气流的速度值 可以利用图3中的一根典型谱线估算在这样条件下的相向光的信号差: 在记录纸上 1.6mm 的宽度对应于 0.58GHz 的频移, 而相应的峰高为 65mm. 这样, 100 米/秒的相对气流速度对应约 0.17GHz 的频移, 在记录上相应的信号差为约 19mm, 显然比较容易测准

通过实验我们发现: 相向光动态实验难度也是很大的, 主要原因是激光器的频率和功率很难在较长时间内稳定, 且干扰难以消除 当探测器 R1, R3 的电压接近时, V_1 和 V_2 输出差别很小, 峰值之差也很小 根据已做的大量实验探索和所获得的成功经验, 我们认为要使激光光谱测量的固定频率法成功地用于测量气流速度, 可从以下几个方面进行改进:

- a) 提高激光器的输出功率, 如采用输出功率高几十倍的 R6G 染料;
- b) 寻找吸收更强的谱线;
- c) 提高碘蒸汽浓度;
- d) 改进电信号处理系统, 改进信噪比, 提高信号放大倍数;
- e) 必须使激光器的输出在较长时间内稳定在所选定的频率上

6 结束语

1) 本文实现了将高分辨率激光光谱技术用于检测气流速度的原理性实验 文中采用吸收光谱的方法对静态掺碘分子的空气池和动态气流池进行单向光和双向光, 频率调谐和固定频率的激光光谱检测, 探索了实验中的技术关键和难点, 摸索了改进的措施和效果, 取得了初步的有意义的结果, 为进一步实现这种新一代的以激光为基础的气流流场检测技术奠定了良好的基础

2) 静态气流池实验时, 发现碘分子的高分辨率激光光谱图清晰, 光谱分辨率高, 重复性好, 碘分子在氩离子激光泵浦的环形染料激光器输出的频段有十分丰富的光谱供选择使用 这对实现这一流场测量技术非常有利

3) 对动态气流池的单向光和相向光光谱测量可以观测到气流所造成的谱线频移 但流速较低时, 光电信号的信噪比分辨率不够理想, 难以实现准确的定量测量

4) 若采用将激光频率固定在选定谱线的腰部的相向光进行动态气流池实验, 可以实现气流速度的定量测定 实验中还观察到了碘分子的激光诱导荧光信号, 利用这种荧光信号, 配合 CCD 探测器和快速的数据采集、处理系统, 采用高分辨率激光光谱技术实现气流流场的多点同时测量是完全可能的

5) 对于低速流动, 光谱线频移较小, 即使采用将频率固定于斜率很大的谱线的腰部的相向光实验方案可以提高检测精度, 但在当前条件下测量精度也难以高于 ± 10 米/秒, 也无法准确地检测出低于 10 米/秒的气流速度 而对于高速气流, 由于谱线的频移与气流速度成正比, 所以气流速度越高, 频移量越大, 越容易准确测量 当然, 对于高速气流不一定要采用固定于谱线腰部的相向光实验方案

6) 实验表明, 我们设计的这套激光光谱法测速系统, 包括气流系统、光学系统、光电探测和接收系统、信号处理系统等, 可满足实验的基本要求 经过进一步改进和完善, 可望成为我国新一代测速设备

致谢 本文写作时与吴应湘研究员和刘文杰副研究员进行了大量有益的讨论,实验装置设计和实验过程中得到朱宗厚、范秉诚、张秀兰、张东香等同志的大力帮助,在此一并表示感谢

参 考 文 献

- 1 严海星,高智. 测量气流速度的新方法——激光谱线测量. 中国激光, 1986, 13(9): 570
- 2 Hiller B, Hanson R K. Properties of the iodine molecule relevant to laser-induced fluorescence experiments in gas flows. Experiments in Fluids, 1990, 10: 1- 11
- 3 Hiller B, Hanson R K. Simultaneous planar measurements of velocity and pressure fields in gas flows using laser-induced fluorescence. Appl Opt, 1988, 27(1): 33- 48
- 4 Lempert W R *et al*. Flow tagging in water by photo-activated nonintrusive tracking of molecular motion. AIAA Paper 93- 0157, 1993
- 5 Lester K, Dahm J A. Scalar imaging velocimetry studies of the dissipative scales of motion in turbulent flows. AIAA Paper 94- 0403, 1994
- 6 Tokumaru P T, Dimotakis P E. Image correlation velocimetry. Exp. Fluids, 1995, 19: 1
- 7 Cattolica R J *et al*. Aerodynamic separation of gases by velocity slip in free jet expansions. AIAA Journal, 1979, 17: 344
- 8 Davidson D F, Chang A Y, DiRosa M D, Hanson R K. Continuous wave laser absorption techniques for gas dynamic measurements in supersonic flows. Applied Optics, 1991, 30(10)

Laser Absorption Spectrum Technique for Gas Flow Velocity Field Measurements

LU Wenhua YAN Haixing YANG Furong *

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100080*)

(* *Institute of Facility Design and Measuring Technology, Aerodynamic Research and development Center of China, Anxian County, Sichuan Province 622653*)

Abstract An optical technique for velocity measurement in gas flow field is presented. The technique is based on the observation of Doppler-shifted absorption spectrum lines from seeded iodine molecules excited at a laser frequency. Large amount of optical spectrum measurements are made for static and dynamic, unidirectional and dual-directional laser excitations at different wave length. Some conclusions are drawn. The key points and difficulties of the technique are also pointed out.

Key words flow field velocity measurement, laser absorption spectrum

作 者 简 介

刘文华,男,1954年11月生,工程师.曾参加从事大功率二氧化碳激光器的设计、加工、制造、安装、调试、应用,大功率激光光束研究,气流流场的激光光谱法测量研究等工作。