

利用 PSD 传感器元件测量湍流密度场*

王建华 陈 俊 陈义良

(中国科技大学热科学及能源工程系,合肥,230026)

摘要: 描述了一种利用激光、PSD(position sensitive detector)元件及计算机数据采集系统测量湍流场气体密度及其脉动统计平均值的方法;并在流场是轴对称统计定常的假设条件下,建立了测量数据处理的数学模型。用这种测量技术可以定量地获得湍流场内部的统计平均特性。

关键词: 激光技术 测量 湍流密度

Measurement of turbulent density field by laser technique

Wang Jianhua, Chen Jun, Chen Yiliang

(Dept. of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026)

Abstract: This paper describes a measurement method of statistical mean of the gas density and its fluctuation intensity in the turbulent field using a system composed of laser and PSD element and computer data collector. A mathematical model for experiment data processing was found based on an assuming that the flow field was axial symmetric and statistically stationary. And the quantity statistical mean characteristic inside the turbulent field can be obtained by using this technique described by this paper.

Key words: laser technique measurement turbulent density

引 言

长期以来,测量湍流标量场如密度、浓度等一直是流体力学、航天航空及工程热物理学界的前沿课题。传统的光学方法如:单一方向取样的干涉技术、纹影图像仅能捕捉沿光线流场密度变化的累积效应;近年来发展的光学方法如:同步双干涉^[1]、综合衍射技术^[2]等已成功地测出流场内部密度分布。但是,人们所测量流场大多是湍动的,而用这些测量手段通常仅能够得到流场某一瞬间的信息。交叉光束相关法^[3]虽可以测定流场密度脉动的统计平均值,却因为不能同时得出密度的统计平均值,而无法给被测场脉动强度一个完整的描述。

作者描述了一种利用 PSD 为传感器元件,结合激光光源和计算机数据采集与处理系统,对湍流密度场进行了定量测量。

1 理论基础

1.1 密度统计平均值的测量计算

如图 1 所示实验装置,热风源经预均化处理后产生低速喷流,氦氛激光器发出稳定的光,当这束窄光穿越湍动的流场时,垂直于光线传播方向的气体密度梯度导致光线发生偏转,PSD

* 国家自然科学基金资助。

元件记录了这一偏转量,并由计算机对此信号进行采集、处理,得出测量结果。

光线通过一段非均匀介质时,其光线沿原传播方向将发生偏转,文献[3]给出的偏转角为:

$$\theta = \int_{\text{path}} (\vec{i} \cdot \frac{1}{n} \nabla n) ds \quad (1)$$

式中, \vec{i} 为光线传播方向 $d\vec{s}$ 的法线方向的单位向量, n 为气体折射率。当在 x - y 平面上的偏转角很小时有:

$$\theta_y = \frac{1}{n_0} \int_{x_0}^{x_e} \frac{\partial n}{\partial y} dx \quad (2)$$

式中, n_0 为环境折射率。假如被测流场参数在统计平均后满足轴对称条件,变换图 2 中的坐标得到相对于图 3

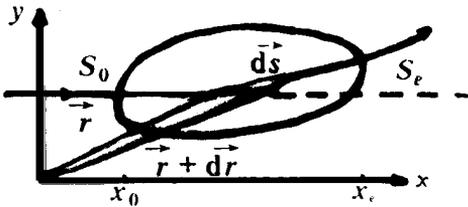


Fig. 2 Optical ray through a turbulent field

上式得:

$$\theta_y = \frac{2}{n_0} \int_0^y \frac{\partial n}{\partial r} dx \quad (5)$$

上式在坐标原点时为奇异点,关于这些点的处理方式在文献[5]中已讨论。用差分技术离散上式中被积函数的微商,然后用数值积分方法改写(5)式得:

$$\theta_y = \frac{2}{n_0} \sum_{i=1}^j a_{ij} (\bar{n}_i - \bar{n}_{i-1}) \quad (6)$$

式中, a_{ij} 为离散系数。由(6)式解得折射率统计平均值沿径向分布: $\bar{n}_1 \dots \bar{n}_N$ 。

1.2 密度统计脉动值的测量计算

设某一瞬时光线的偏转角为:

$$\theta_y = \frac{1}{n_0} \int \frac{\partial n}{\partial r} \frac{y_i}{r_{ij}} dx \quad (7)$$

用同样的方法,将上式离散为代数方程组:

$$\theta_y = (1/n_0) [a_{1j}(n_{1r} + n_{1l} - 2n_0) + a_{2j}(n_{2r} + n_{2l} - n_{1r} - n_{1l}) + \dots + a_{jj}(2n_j - n_{j-1r} - n_{j-1l})] \quad (8)$$

式中, n_{ir}, n_{il} 分别为同一时刻第 i 个圆环上的对称轴左右两边的折射率瞬时值,显然 $n_{ir} \neq n_{il}$,

但是在统计平均轴对称的条件下有: $\bar{n}_{ir} = \bar{n}_{il} = \bar{n}_i, \overline{n_{ir}^2} = \overline{n_{il}^2} = \overline{n_i^2}$ (9)

式中,上标“ $\bar{\quad}$ ”及“ $\overline{\quad}$ ”分别表示统计平均及脉动量,下标“ r ”及“ l ”分别表示对称轴的左边和右边。由(8)~(6)式得偏转角的脉动值:

$$\theta_y = (1/n_0) [(a_{1j} - a_{2j})(n_{1r} + n_{1l}) + \dots + (a_{j-1j} - a_{jj})(n_{j-1r} + n_{j-1l}) + 2a_{jj}n_j] \quad (10)$$

由湍流的随机性得: $\overline{n_{ir} n_{il}} = 0, \overline{(n_{ir} + n_{il})(n_{jr} + n_{jl})} = 0 \quad i \neq j \quad (11)$

利用(11)式,从(10)式可得: $\overline{\theta_y (n_{ir} + n_{il})} = (a_{ij} - a_{i+1j}) 2 \overline{n_i^2} / n_0 \quad (12)$

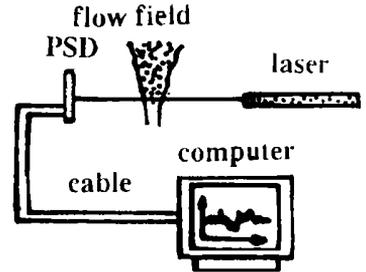


Fig. 1 Arrangement of PSD-laser measuring system

的偏转角统计平均: $\theta_y = \frac{1}{n_0} \int_{x_0}^{x_e} \frac{\partial \bar{n}}{\partial y} dx \quad (3)$

考虑到被测流场在测量前并无确定的边界,我们将积分边界任意延伸得到:

$$\theta_y = \frac{1}{n_0} \int \frac{\partial \bar{n}}{\partial y} dx \quad (4)$$

考虑到被测流场的轴对称条件,并用柱坐标变换

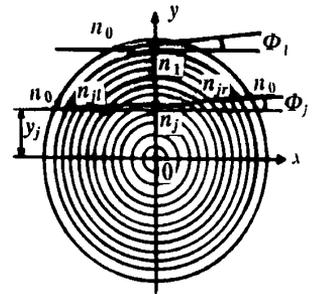


Fig. 3 Optical ray through an axis-symmetrical field

利用(11)及(12)式,从(10)式可得折射率脉动的递推式:

$$n_j^2 = [0.5 \overline{n_0^2} - (a_{1j} - a_{2j})^2 \overline{n_1^2} - (a_{2j} - a_{3j})^2 \overline{n_2^2} - \dots - (a_{j-1j} - a_{jj})^2 \overline{n_{j-1}^2}] / (2 a_{jj}^2) \tag{13}$$

由方程组(13)解得折射率脉动统计平均值沿径向分布。

最后由 Gladstone-Dale 公式: $n = 1 + k$, 求得密度场的平均值及脉动均方值沿径向分布。上式中 k 为 Gladstone-Dale 常数, 它仅与波长有关而与温度及压力无关。

2 实验结果与分析

我们利用图 1 所示实验装置对一射流流场进行了定量测量。实验用一个稳定的热风源, 经预均化处理后, 由圆形喷口 ($d = 40\text{mm}$) 射出热流, 产生一轴对称湍流场, 出口流速为 12m/s , 温度约为 400K 。使用的 AD 板响应频率可达到 100kHz , 而被测信号频率的最大值为 1kHz , 因此, 从这个意义上来讲, 我们可以认为这种测量是一种连续实时的。在实验数据的处理中所用的 Gladstone-Dale 常数为 $0.2255 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{kg})$ 。

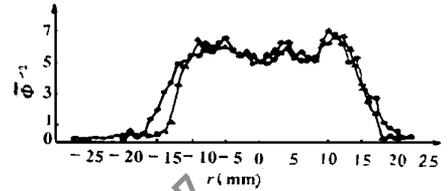


Fig. 4 Radial distribution of deflection angle fluctuations

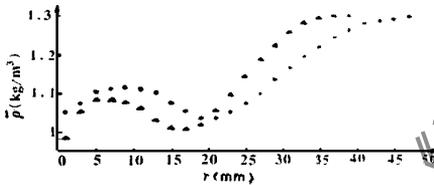


Fig. 5 Radial distribution of mean density

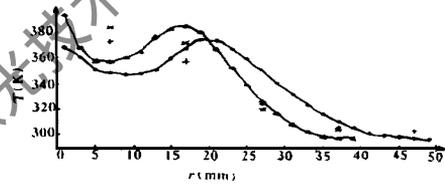


Fig. 6 Measured and calculated profiles of mean temperature

图 4 是偏转角脉动均方值沿径向分布, 以喷口为 z 轴原点, 图中 \circ 表示测量位置在 $z/d = 1.0$ 处; \otimes 表示测量位置在 $z/d = 1.67$ 处。图 5 为密度统计平均值沿径向的分布。图 6 显示了用测量得出的密度统计平均值计算温度与测量温度的比较。图 7 为测得的密度统计脉动值沿径向的分布, 这一结果是符合射流变化规律的。

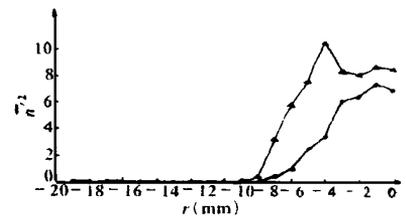


Fig. 7 Radial distribution of refraction index of fluctuations

3 结 论

这是一种测量湍流密度场强度的有效方法。其独到之处在于不仅可以在测量时不改变流场的流量状况, 而且实现了湍流标量场脉动强度的定量测量。

参 考 文 献

- 1 Desse J M, Pegneaux J C. Journal of Experiments in Fluid, 1991; 12(1): 1~9
- 2 Toker G, Levin D, Stricker J. Journal of Experiments in Fluid, 1997; 22(1): 354~357
- 3 Ball G A, Bray K C. AIAA J, 1990; 28(6): 1057~1064
- 4 陈俊, 王建华, 陈义良. 利用激光及 PSD 元件测量射流平均密度场——湍流密度场测量方法研究报告. 1997 全国工程热物理年会文集, 天津: 中国工程热物理学会编, 论文编号 974013, VII 12~16
- 5 Wang J H, Chen J, Wang X *et al.* The measurement of mean density in turbulent jets using optical technique. Proc of

中间段光折变晶体材料参数的测量原理^{*}

吉选芒 王金来

(山西运城高等专科学校物理系,运城,044000)

刘劲松 安毓英

(西安电子科技大学技术物理系,西安,710071)

摘要: 提出了中间段光折变晶体材料参数的测量原理。利用公开报道的关于 Ce:KNSBN 双光束耦合的实验数据计算了该晶体的材料参数。实验与理论结果相吻合。

关键词: 光折变效应 材料参数 双光束耦合

Measuring principle of materials parameters of photorefractive crystal in intermediate regime

Ji Xuanmang, Wang Jinlai

(Department of Physics, Yuncheng Advanced Training College, Yuncheng, 044000)

Liu Jinsong, An Yuying

(Department of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, 710071)

Abstract: The two-wave coupling is a fundamental and important photorefractive effect. Till now, many papers have studied the saturation effect of the gain coefficient of the photorefractive crystal. The studies found that the gain coefficient G varies with the increasing of the light intensity I , and goes through three stages: cut-off, increasing and saturation regime. This paper formulated a set of expressions of materials parameters and presents the measuring principles of materials parameters of photorefractive crystal in intermediate regime, namely increasing regime. The experimental results are in accord with the theoretical analysis.

Key words: photorefractive effect material parameters two-wave coupling

引 言

在光折变效应中,双光束耦合是一种最基本而又十分重要的光折变效应。以前,人们在处理光折变效应时,往往认为有效增益系数与入射总光强无关。但从最近的一些文献^[1,2]和我们对双光束耦合的研究发现,增益系数 G 随总光强变化呈现出截止、增加而到饱和的变化特

*国防科技预研基金资助。