

激光散射法粒子测量中信号串扰影响的研究

葛宝臻 张以谟 李贺桥 陈瑞民 毛义

(天津大学现代光学仪器研究所, 天津 300072)

提要 提出了夫琅和费衍射和激光多普勒效应相结合的三光束激光散射方法,详细研究并解决了该方法用于同时测量大于 $5\mu\text{m}$ 粒子尺寸和速度时信号串扰问题,并用实验结果证实了理论分析。

关键词 三光束散射测量法,尺寸测量,速度测量

1 引言

激光散射以其突出的优点在粒子测量领域得到了广泛的应用。如测量粒子尺寸的激光粒度仪和测量速度的激光多普勒测速仪(LDA)都是以激光散射为基础的。但它们对尺寸和速度是分别测量的,而在燃烧、喷雾等工业过程研究方面,往往要求同时测量粒子尺寸和速度。目前已有的测试方法主要是从 LDA 信号中提取尺寸信息^[1~4],具有代表性的是 PDA(Phase Doppler Anemometry)法,该方法采用两个以上有固定间隔探测器接收散射信号,利用两路 Doppler 信号间的相位差来线性确定粒子直径,但用这种方法测量很复杂。本文提出三光束激光散射方法,用于同时测量 $5\mu\text{m}$ 以上粒子的尺寸和速度。这种方法以夫琅和费衍射和激光多普勒效应为基础,具有测量简单、信号处理快等优点,关键问题必须解决信号串扰影响。

2 三光束散射法测量原理

三光束激光散射法同时测量粒子尺寸和速度的原理如图 1 所示。

其粒子尺寸测量是建立在球形粒子的夫琅和费衍射理论基础之上的,不考虑光束 2 和光束 3 的影响,假设测量场中有直径分别为 $D_i(i=1,2,\dots,m)$ 的 m 种粒子,根据夫琅和费衍射理论和瑞利公式,可以得到光束 3 在傅里叶物镜后焦面上 m 个同心圆环带的能量方程组^[5]

$$\begin{cases} L_1 = \frac{6}{\rho} \sum_{i=1}^m \frac{W_i}{4D_i} [(J_0^2 + J_1^2)_{r_{01}} - (J_0^2 + J_1^2)_{r_{01}}] \\ L_2 = \frac{6}{\rho} \sum_{i=1}^m \frac{W_i}{4D_i} [(J_0^2 + J_1^2)_{r_{02}} - (J_0^2 + J_1^2)_{r_{02}}] \\ \vdots \\ L_m = \frac{6}{\rho} \sum_{i=1}^m \frac{W_i}{4D_i} [(J_0^2 + J_1^2)_{r_{0m}} - (J_0^2 + J_1^2)_{r_{0m}}] \end{cases} \quad (1)$$

式中, L_i 分别是 m 个环带上的能量, W_i 是尺寸的重量分布, ρ 是粒子的比重, r_{ij} 和 r_{oj} 分别代表第 j 个环的内、外半径, 而

$$(J_0^2 + J_1^2)_{r_{ij}} = J_0^2\left(\frac{\pi D_i r_{ij}}{\lambda f}\right) + J_1^2\left(\frac{\pi D_i r_{ij}}{\lambda f}\right) \quad (2)$$

D_i 是通过尺寸分段预先得到的, 各环的内外半径、照射光波长、接收物镜的焦距是已知的, 当测得 L_i 后, 就可由(1)式解出 W_i , 得到粒子尺寸分布。

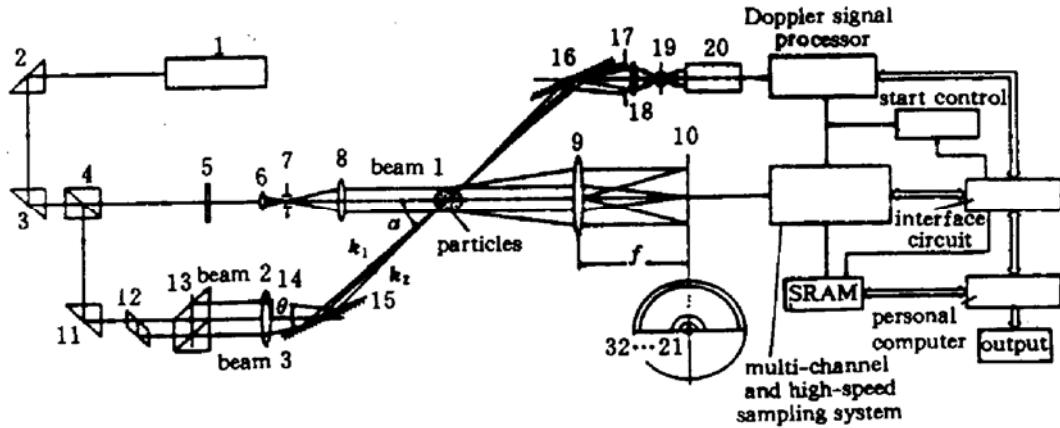


Fig. 1 Schematic diagram showing the three-beam scattering method

1: He-Ne laser; 2, 3, 11, 12: Total reflectors; 4, 13: Beam splitter; 5: Half waveplate; 6, 8, 14, 18: Lenses; 7: Spatial filter; 9: Fourier transform lens; 10: Ring detector; 15, 16: Reflectors; 17: Aperture stop; 19: Pin hole; 20: Photomultiplier

粒子速度测量是以运动粒子的激光多普勒效应为基础的, 参考图 1, 不考虑光束 1 的影响。两束强度和频率相同的激光束从不同的方向 K_1 和 K_2 聚焦于同一粒子 P 上, 由于运动粒子的多普勒效应, 散射光频率发生了变化, 设粒子运动速度为 v , 运动方向垂直于 K_1, K_2 夹角的平分线, K_1, K_2 的夹角为 θ , 则可得到多普勒频移 f_D 和速度 v 的关系如下^[6]

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

当测得 f_D 后, 由于 λ, θ 是已知的, v 就可通过(3)式计算出来, 得到粒子速度值。

根据(1)式和(3)式, 如果在同一时刻对 L_i 和 f_D 进行测量, 就可实现粒子尺寸和速度的同时测量。事实上, 当三束光同时照射粒子时, 光束 2 和光束 3 在傅里叶物镜的后焦面上也有衍射光存在; 同时, 如果光束 1 和光束 2、光束 3 满足相干光条件, 三光束会两两发生干涉, 对 f_D 的测量有很大的影响, 即三光束散射法存在信号串扰问题。下节将讨论这一问题的解决方法。

3 同时测量粒子速度和尺寸时信号串扰问题的解决

3.1 速度测量对粒子尺寸信号影响的解决

根据夫琅和费衍射理论, 粒子的衍射光强分布为

$$I(D, \theta) = \left[2J_1\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta\right) / \left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta\right) \right]^2 I_0 \quad (4)$$

式中, $I(D, \theta)$ 是光强分布, D 为粒子的直径, θ 为散射角, I_0 是衍射中心的光强度, λ 为照射光的波长, J_1 是一阶贝塞尔 (Bessel) 函数。由此可得到夫琅和费衍射的相对光强分布为

$$\frac{I(D, \theta)}{I_0} = \left[2J_1\left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta\right) / \left(\frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta\right) \right]^2 \quad (5)$$

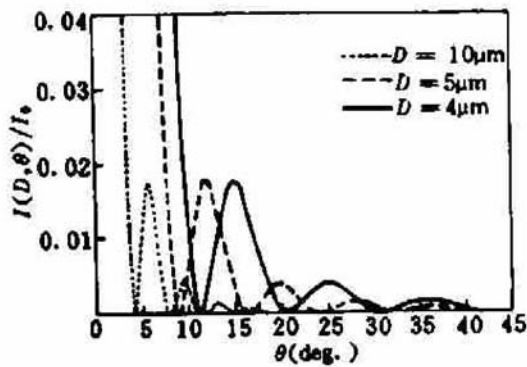


Fig. 2 The relative light intensity distribution curve of the Fraunhofer diffraction of particles

图 2 是在波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 的激光照射下,不同直径粒子的夫琅和费衍射相对光强角分布曲线(为了表达清楚衍射各次亮环,图中主亮环曲线没有画完全,在 $\theta = 0^\circ$ 时,相对光强值应为 1)。可以看出,随着粒子直径的增加,光强分布越来越集中在散射角很小的范围内,对于一定直径的粒子,随着散射角的增大,衍射亮环的强度越来越小。由于第四亮环相对光强降为 0.078%,且前 4 环的能量占总衍射能量的 96% 以上,所以第四亮环以外的衍射光可以忽略。因此可以通过选择图 1 中 α 角的大小,使得光束 2、光束 3 在尺寸信号探

测器上的衍射光忽略。粒子直径为 $5 \mu\text{m}$ 时,第五暗环对应 $\theta = 41.6^\circ$,而当直径为 $10 \mu\text{m}$ 时,第五暗环对应 $\theta = 19.4^\circ$ 。因此当选择 $\alpha = 45^\circ$ 时,对于直径大于 $5 \mu\text{m}$ 的粒子,速度测量对尺寸信号的影响是可以忽略的。

3.2 尺寸测量对速度信号影响的解决

根据条纹模型理论,双光束 LDA 多普勒频率 f_D 的产生是由于运动粒子受到测量体内干涉条纹的强度调制,当粒子垂直于干涉条纹方向通过条纹区时,在亮条纹处,散射光强最大,在暗条纹处,散射光强最小,光电倍增管接收到的是一个波动量,波动频率就是 f_D ,其大小正比于粒子速度而反比于干涉条纹的间距。三光束散射测量中,三光束交于一点,当满足相干条件时,三光束会两两发生干涉,干涉场内是三组条纹的叠加,这样会使多普勒频移 f_D 变得模糊,信噪比降低。因此,必须破坏光束 1 和光束 2、光束 3 的相干条件,比较简单的方法是改变偏振态,由于 He-Ne 激光器发出的是垂直线偏振光,在光束 1 前面加入一个快轴与垂直方向成 45° 角的 $1/2$ 波片,光通过后其偏振态就会变为水平线偏振,这样,测量体内就只有双光束的干涉条纹,其条纹间距不变,因此对 f_D 的大小没有影响。三光束激光散射法中对光束 1 的能量要求较低,并且需对高斯细光束准直为平面波;而为了得到多普勒信号的高信噪比,对光束 2、光束 3 的能量要求较高,高斯光束不需准直。假如光源采用 50 mW He-Ne 激光器,采用 1:4 分束比分别用于尺寸和速度测量,可计算出测量体内的光强比大约为 1:50。这样,在多普勒信号接收方向,干涉条纹的对比度基本不会下降,因而不影响信噪比。综上所述,光束 1 对速度测量影响得到解决。

4 信号串扰问题解决的实验验证

实验系统参考图 1,系统采用 50 mW He-Ne 激光器为光源,分束镜 4 的分束比为 1:4, $1/2$ 波片快轴和垂直方向成 45° 。光束 1 准直成 $\phi 8 \text{ mm}$ 的平行光,平行光束光束 2、光束 3 间距为 16 mm 。为了验证上节的两个结论,进行了下面两个实验。

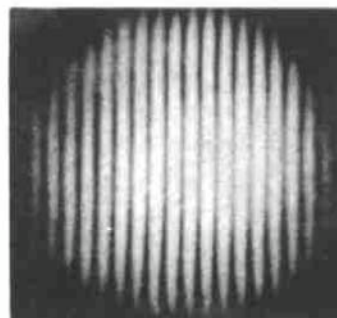


Fig. 3 Interference fringes of two beams

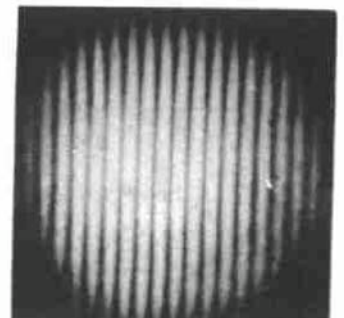


Fig. 4 Interference fringes of three beams

4.1 双光束和三光束照射情况下测量体内的干涉条纹对比

图 3 是只有两束测速光束照射时,在光电倍增管接收方向拍得的干涉场条纹,图 4 是三光束同时照射而其它条件完全不变的情况下得到的干涉条纹,可以看出两幅照片几乎是一样的,证实了上节的结论。

4.2 单光束和三光束照射下环形探测器接收的能量对比

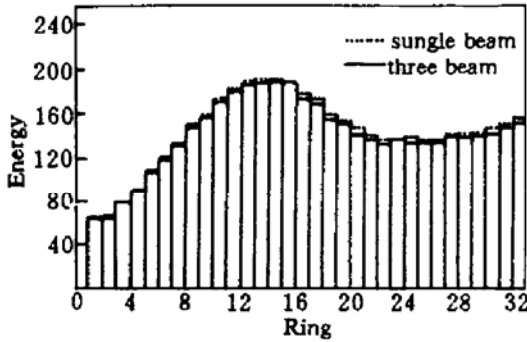


Fig. 5 Histogram of energy received by a ring detector

以上海测试技术研究所的 GBW(E)120009b 玻璃球标准物质为样品进行了实验。该样品的尺寸范围在 $5\sim 60\ \mu\text{m}$,分别在只有尺寸测量光束和三光束同时照射的情况下,对环形探测器各环输出的能量值进行了记录。表 1 是实验结果,图 5 是两种情况下,环形探测器 32 环输出的能量的直方图。可以看出,两种情况的测量结果误差在 3.5% 之内,这一误差还包括系统重复性误差在内。因此可以认为,速度测量光对尺寸测量的影响是很小的,可以忽略。

Table 1 Experimental results of the two cases

RN	SBI	TBI	RE%	RN	SBI	TBI	RE%
1	64	66	3.1	17	169	174	3.0
2	67	66	-1.5	18	154	158	2.5
3	80	79	-1.3	19	151	154	2.0
4	91	91	0	20	142	147	3.5
5	110	108	-1.9	21	138	141	2.2
6	122	121	-0.8	22	133	137	3.0
7	135	133	-1.5	23	137	137	0
8	147	150	2.0	24	135	139	3.0
9	158	157	-0.6	25	133	135	1.5
10	171	173	1.2	26	136	134	-1.5
11	181	180	-0.6	27	139	141	1.4
12	186	189	1.6	28	139	142	2.1
13	187	190	1.6	29	139	143	2.9
14	188	190	1.0	30	142	146	2.8
15	188	188	0	31	146	150	2.7
16	173	179	3.4	32	151	156	3.3

RN is the ring numbers; SBI is the single beam illumination; TBI is the three-beam illumination;

RE is the relative error.

5 结 论

综合上述理论分析和实验结果,采用本文所述的三光束激光散射法,在同时测量直径大于 $5\ \mu\text{m}$ 粒子的尺寸和速度时,其尺寸和速度信号的串扰问题得到了解决,因此,粒子尺寸和速度

测量可以看作是相互独立的,其信号处理可以分别进行,如在同一时刻对尺寸信号和速度信号进行采样,就可实现粒子尺寸和速度的同时测量。

参 考 文 献

- 1 W. M. Farmer. Measurement of particle size, number density, and velocity using a laser interferometer. *Appl. Opt.*, 1972, 11(15): 2603
- 2 A. J. Yule, N. A. Chigier, S. Atakan *et al.*. Particle size and velocity measurement by laser anemometry. AIAA 15th Aerospace Sciences Meeting, Los Angeles, 1977. 77~214
- 3 W. D. Bachalo. Method for measuring the size and velocity of spheres by dual-beam light-scatter interferometry. *Appl. Opt.*, 1980, 19(3): 363
- 4 W. D. Bachalo. The phase Doppler spray analyzer for simultaneous measurements of drop size and velocity distributions. *Opt. Eng.*, 1984, 23(5): 583
- 5 张以谟, 毛 义, 田学飞 等. 粒子尺寸分布的激光衍射测量研究. *光电工程*, 1990, 17(1): 1
- 6 杨国光. 近代光学测试技术. 北京: 机械工业出版社, 1983. 338

Resolution of the Signal Cross-talk Influence on the Particles Measurement by a Laser Scattering Method

Ge Baozhen Zhang Yimo Li Heqiao Chen Ruimin Mao Yi

(*Institute of Opto-electronics and Precision Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072*)

Abstract A three-beam laser scattering method combining Fraunhofer diffraction with laser Doppler effect is proposed. The problem of the signal cross-talk when measuring size and velocity of particles bigger than $5\mu\text{m}$ simultaneously has also been analyzed and solved. Experimental results obtained have confirmed the analysis.

Keywords three-beam laser scattering method, signal cross-talk, particle size measurement, particle velocity measurement