

基于光子相关光谱分析的声压量值复现方法

冯秀娟 何龙标* 牛 锋 杨 平 钟 波 许 欢

中国计量科学研究院力学与声学计量科学研究所, 北京 100029

摘要 寻求不依赖于实验室标准传声器的灵敏度而直接溯源至国际单位制基本单位的声压量值复现技术是声学计量的长期目标,对声压量值摆脱实物基准具有重要意义,激光多普勒测速技术是实现这一目标的有效途径。以行波管内平面波声场为测量对象,建立无固定频移的激光多普勒测速系统,采用光子相关光谱分析法解调多普勒信号,获得声管内示踪粒子的振动速度,根据平面波声压与质点振动速度的线性关系,复现声管测量点处的声压。以工作标准传声器的测量结果为参考,评估测量方案的可行性和测量结果的准确性,分析影响测量准确性的主要因素。测量结果表明,声波频率为 315 Hz,声压级在 100 dB~110 dB 范围内间隔 1 dB 变化时,测量偏差小于 0.5 dB;声压级为 105 dB,声波频率为 315,400,500,800 Hz 时测量偏差小于 0.3 dB。

关键词 测量; 声压复现; 光子相关光谱; 激光多普勒; 粒子振速

中图分类号 TB52; TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0712004

Realization of Airborne Sound Pressure Based on Photon Correlation Spectroscopy

Feng Xiujuan He Longbiao Niu Feng Yang Ping Zhong Bo Xu Huan

Division of Mechanics and Acoustics, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Abstract It is a long-term goal and of great significance to seek a new method towards direct realization of the SI unit of sound pressure and no longer rely on the sensitivity of standard laboratory microphone in the field of airborne acoustic metrology. Laser Doppler velocimetry technique can be used to realize the goal. In this paper, the optical interferometer without Doppler frequency bias is designed to investigate the realization of sound pressure in traveling wave tube with the photon correlation spectroscopy (PCS). According to the linear relationship, the sound pressure of plane acoustic wave can be acquired by the demodulated particle vibration velocity from the Doppler signal. The experiments are also implemented to demonstrate the feasibility and accuracy of this scheme with the working standard microphone as reference. For the acoustic frequency of 315 Hz, the deviation between the two methods is less than 0.5 dB with the measured sound pressure level varied every 1 dB in the range from 100 dB to 110 dB. For the measured sound pressure level of 105 dB, the deviation is less than 0.3 dB with acoustic frequency of 315, 400, 500, and 800 Hz.

Key words measurement; sound pressure realization; photon correlation spectroscopy; laser Doppler; particle vibration velocity

OCIS codes 120.3930; 120.7250; 120.3180

1 引 言

随着科技的发展,量子基准逐渐取代实物基准成为计量科学的发展趋势,激光干涉测量是重要的实现手段。目前,空气声声压量值寄存在实验室标准传声器中,通过互易法校准实验室标准传声器的声压灵敏度而间接复现。互易法校准并未体现声压单位的物理定义,在量值传递过程中,互易法校准仅适用于具有固定规格且满足电声互易性的传声器,随着传声器技术的发展,互易法已然不能满足新型传声器的溯源需求^[1-2]。

收稿日期: 2016-01-15; **收到修改稿日期:** 2016-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(51575502,51505453)

作者简介: 冯秀娟(1984—),女,博士,副研究员,主要从事声学计量方面的研究。E-mail: fxj@nim.ac.cn

* **通信联系人。** E-mail: helb@nim.ac.cn

因此,寻求不依赖于实验室标准传声器和互易原理的声压量值复现方法成为声学计量领域的研究热点^[3-9]。

激光多普勒测速技术已广泛应用于气体、液体和固体速度的测量^[10-14],Talyor^[15-16]采用该技术测量驻波管声场的质点振动速度,以此复现声压量值,为空气声声压基准摆脱实物基准提供了有效途径。声场测量需要尽可能少地介入示踪粒子,以避免干扰声波传输介质的声阻抗,在低粒子浓度的情况下,相较于频谱分析的信号处理方案,Hann等^[17-18]证实光子相关光谱分析法(PCS)更为适用,随后,大量实验验证了以驻波管为测量对象的光子相关光谱分析法^[3-5]。除了驻波管中的平面波声场外,Koukoulas等^[6-7]已将此方法应用于自由场。拓展声压复现的频率范围、减小与互易法校准结果的偏差和测量不确定度是目前亟待解决的问题。

本文以行波管平面波声场为测量对象,建立无固定频移的激光多普勒测速系统,采用光子相关光谱分析法复现声管内测量点处的声压值,测量结果以工作标准传声器为参考,验证测量系统的可行性。

2 基本原理

图1所示为基于激光多普勒测速原理的声压量值复现系统,测量基本原理为:被测声场中添加合适的示踪粒子,保证示踪粒子在被测频率范围内跟随声波振动,通过测量声场中示踪粒子产生散射光的多普勒信号,得到示踪粒子的振动速度,已知声场内传输介质的声阻抗,可直接计算声压量值。

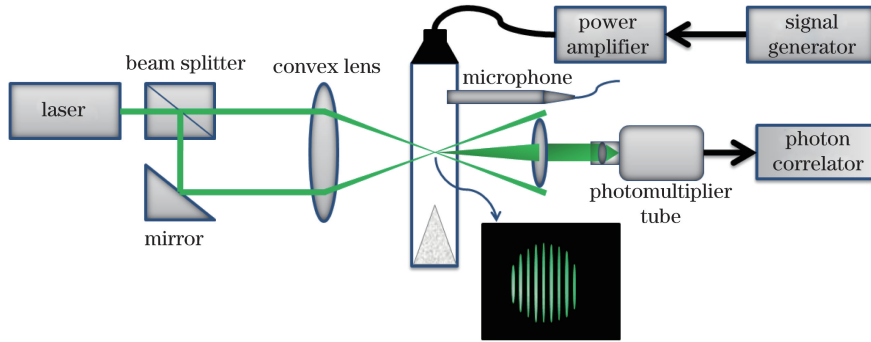


图1 基于激光多普勒测速原理的声压量值复现系统

Fig. 1 Scheme of sound pressure realization system based on laser Doppler velocimetry

对于双光束-双散射的光路模式,两入射光束交叉干涉产生椭球形测量体,椭球体内示踪粒子散射光产生的多普勒频移可表示为

$$f = \frac{v}{d} = v \cdot \frac{2 \sin \theta}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 v 为示踪粒子的振动速度, $d = \lambda / (2 \sin \theta)$ 为椭球体内干涉条纹的间距, λ 为激光器的工作波长, θ 为两交叉干涉光束夹角的一半,且测量光路最敏感的速度方向垂直于交叉干涉的两入射光束所在平面内夹角的平分线。

多普勒信号经光电探测器接收后,进行自相关计算。当被测声场中传输介质不存在平均流速时,多普勒信号的自相关函数可表示为^[17]

$$R(\tau) \propto J_0 \left[\frac{2u_m}{df_m} \sin(\pi f_m \tau) \right], \quad (2)$$

式中 $J_0(\cdot)$ 为零阶贝塞尔函数, f_m 为被测声波的频率, u_m 为示踪粒子振动速度的峰值, τ 为相关运算的延迟时间。

零阶贝塞尔函数出现第一个拐点对应的宗量为 3.832,根据自相关曲线解算第一个拐点对应的延迟时间 τ_{\min} ,则示踪粒子的振动速度可表示为

$$u_m = \frac{3.832df_m}{2 \sin(\pi f_m \tau_{\min})}. \quad (3)$$

根据平面波声场中声压与质点振动速度的线性关系,被测点处的声压量值可直接复现为

$$P = \rho c u_{\text{rms}}, \quad (4)$$

式中 P 为声压值, ρ 为声波传输介质的密度, c 为声速, u_{rms} 为示踪粒子振动速度的有效值。

3 实验装置

实验装置包括多普勒信号测量模块、平面波声管及驱动装置、多普勒信号接收模块和光子相关光谱分析模块,如图 1 所示。

多普勒信号测量光路采用双光束-双散射模式。由(3)式可知,多普勒信号自相关函数特征点处延迟时间的估计精度直接影响声压量值的复现结果,有固定频移的测量光路中,延迟时间的估计精度受限于自相关函数包络第一个零点内调制信号周期数的取整估计偏差,而无固定频移的测量光路中延迟时间的估计更准确且更易实现^[19]。因此,设计的无固定频移测量光路中,光源为 532 nm 的固体激光器,输出功率为 50 mW,聚焦透镜焦距为 500 mm、直径为 100 mm,通过测量两光束聚焦点至透镜的距离及两光束的间距,计算得到干涉条纹间距为 3.82 μm 。

实验中行波管为 3000 mm \times 100 mm \times 100 mm 的方管,方管两端分别安置扬声器和吸声尖劈。扬声器的口径与方管尺寸相当,在管内产生被测声波,吸声尖劈用于吸收入射波、防止反射波产生声压波动,保证管内形成行波场。方管中部均匀分布间隔 5 cm 的 7 个测试孔,以方便安装声压测量用标准传声器及其他传感器用于评估声管内平面波的质量并计算声阻抗,如图 2 所示。信号发生器产生单频正弦信号,该信号经过音频功率放大器放大后驱动行波管内的扬声器产生被测声场。理想的平面行波声场内各处声压相等,选择压力场传声器(B&K 4192 型)测量声管不同测试孔处的声压。250~1000 Hz 频率范围内传声器的测量不确定度为 0.10 dB($k=2$),测量结果表明,300~1000 Hz 范围的最大声压波动为 0.33 dB,550 Hz 时声压波动为 0.05 dB,满足实验对平面波的要求^[20]。

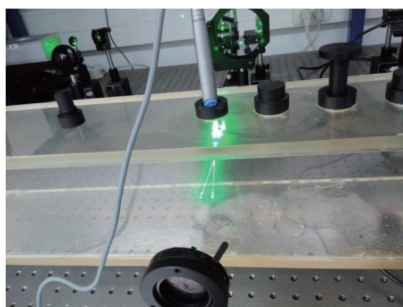


图 2 基于激光多普勒测速原理复现声压量值的实验装置

Fig. 2 Experimental setup of sound pressure realization system based on laser Doppler velocimetry

选择示踪粒子时需综合考虑示踪粒子的跟随性和散射效率,本文选择檀香燃烧产生的烟雾粒子作为示踪粒子,粒径平均值约为 0.5 μm ,结合实验中干涉条纹的间距和文献[21-22]的理论模型,檀香烟雾粒子满足实验对示踪粒子的要求。示踪粒子产生的散射光采用前向接收模式,经过透镜聚焦和空间滤波后,进入光电倍增管,光电转换后的多普勒信号通过光子相关器进行自相关运算,根据自相关曲线,计算得到被测点处的声压值。

4 实验结果与分析讨论

验证实验包括两种情况:被测声波具有相同频率、不同声压级(SPL),被测声波具有不同频率、相同声压级。

首先,将被测声波频率固定为 315 Hz,改变信号发生器输出正弦信号的幅值,使得行波管内的声压级在 100 dB~110 dB 范围内间隔 1 dB 变化,行波管内测量点处的声压值通过工作标准传声器实时监测,实验装置的测量结果及传声器测量结果如表 1 所示。不同声压级条件下,实验装置测得的光子自相关曲线如图 3 所示。结果表明,被测声波频率为 315 Hz、声压级在 100 dB~110 dB 范围内间隔 1 dB 变化时,两种方法的测量结果偏差小于 0.5 dB,且随着声压级增高,测量偏差总体上呈现减小的趋势。

表 1 声波频率为 315 Hz 时不同声压级的测量结果

Table 1 Experimental results with different sound pressure levels at 315 Hz

Microphone	SPL /dB		Particle velocity $u_{rms} /(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	
	PCS	Deviation	Microphone	PCS
110.00	109.90	-0.10	15.03	15.20
108.00	107.84	-0.16	11.86	12.08
105.01	105.50	0.49	9.05	8.54
104.01	104.11	0.10	7.72	7.62
103.03	103.13	0.10	6.90	6.79
102.01	102.21	0.20	6.20	6.05
101.06	101.46	0.40	5.69	5.39
100.07	100.55	0.48	5.12	4.81

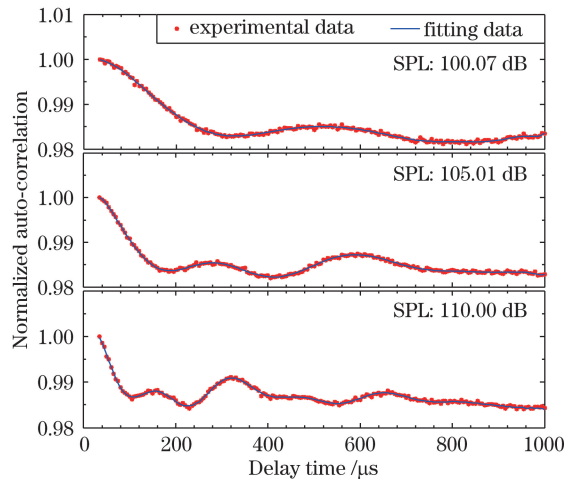


图 3 声波频率为 315 Hz 时不同声压级条件下实验测得的光子自相关曲线

Fig. 3 Auto-correlation function with 315 Hz acoustic frequency and different SPLs

保持行波管内声压级约为 105 dB, 改变被测声波的频率, 光子相关光谱分析法与工作标准传声器的测量结果及比较如表 2 所示。结果表明, 被测声压级为 105 dB, 声波频率为 315, 400, 500, 800 Hz 时, 两种方法的测量结果偏差均小于 0.3 dB。

表 2 被测声压级为 105 dB 时不同频率的测量结果

Table 2 Experimental results at different frequencies with SPL of 105 dB

Frequency /Hz	SPL /dB			Particle velocity $u_{rms} /(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	
	Microphone	PCS	Deviation	Microphone	PCS
315	105.00	105.29	0.29	8.54	8.84
400	104.95	105.14	0.18	8.50	8.69
500	105.00	104.88	-0.12	8.55	8.43
800	104.90	104.98	0.08	8.46	8.53

上述实验结果表明, 光子相关光谱分析法和工作标准传声器的测量结果吻合, 验证了实验装置的可行性, 但两种方法在个别频率点上的测量偏差仍较大。由(3)、(4)式可知, 声压值复现的准确度与椭球体内的干涉条纹间距、声管内传输介质的声阻抗和自相关曲线拐点对应的延迟时间直接相关, 结合实验现象, 分析光子相关光谱分析法产生较大测量偏差的因素如下。

1) 声管内质点振动方向与测量光路速度敏感方向的偏差

图 1 所示测量系统中, 质点振动速度的敏感方向为两相交光束所构成平面内角平分线的垂直方向, 实际测量中要保证质点振动方向为测量光路最敏感的速度方向, 否则, 测量结果为质点速度的分量, 声压复现结果将产生系统误差。如图 4 所示, 实验开始时质点振动方向与测量光路最敏感的速度方向存在偏差, 声压复现结果出现 4.40 dB 的系统误差, 逐渐调整行波管的俯仰和方位角直至行波管内质点振动方向

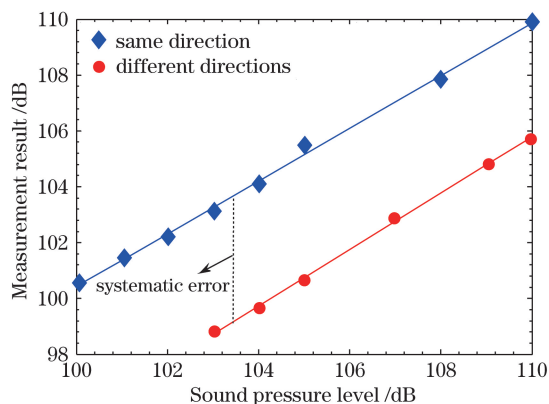


图 4 声管内质点振动方向与测量光路速度敏感方向的偏差对声压复现结果的影响

Fig. 4 Influence of the disalignment between the vibration direction of acoustic particles and the sensitive direction of the optical interferometer on the calculated SPL

与测量光路最敏感的速度方向重合,使得声压复现的系统误差逐渐减小直至消失。通过调整聚焦透镜前两入射平行光束的相对高度及其入射到透镜的位置,也可使行波管内质点振动方向与测量光路最敏感的速度方向重合。

2) 干涉条纹畸变及条纹间距的计算偏差

声场测量中,椭球体内干涉条纹间距的典型值为 $1\sim 5\ \mu\text{m}$,可通过测量入射到聚焦透镜的两平行光束的间距及透镜焦距间接计算,此方法的计算精度有限,而且未考虑声管管壁的折射对聚焦透镜出射的两干涉光束交叉角度即干涉条纹间距的影响。

此外,由(1)式可知,椭球体内干涉条纹间距是否等间隔分布会影响粒子散射光的多普勒频移,进而影响粒子振动速度和声压值的解调结果。当参与干涉的两高斯光束的聚焦点恰好均为各自的束腰时,椭球体内形成的干涉条纹是理想的平行等间隔分布,实际测量系统中,参与干涉的两高斯光束入射聚焦透镜前并非完全平行或各自经历的光程不等,都会导致聚焦点不在束腰位置,此时形成的干涉条纹会发生畸变。

3) 声阻抗的计算偏差

声管内传输介质的声阻抗为声速和介质密度的乘积,声速与温度有关,介质密度与温度、气压、相对湿度等因素有关。因此,必须实时监测声管内的温度、湿度、气压值等参数,以提高声阻抗的计算准确度;此外,还需评估示踪粒子的引入对介质密度及声压复现的影响。

4) 自相关曲线拐点对应延迟时间的计算精度

实验采用商用的数字式光子相关器,得到的自相关曲线是离散的,受到光子相关器硬件设置的限制,自相关曲线的采样间隔为 $5\ \mu\text{s}$,采样点数为 200,采样时间为 1 ms,而声场测量中自相关曲线第一个拐点对应延迟时间的典型值为 $100\sim 300\ \mu\text{s}$ 。因此,自相关曲线有限的采样率会影响拐点对应延迟时间的计算精度,引入软件插值算法有助于减小延迟时间的计算误差。

5) 其他因素

导致上述实验偏差的其他因素还包括参考传声器的测量不确定度、行波管内平面波不理想、声管内传输介质的平均流速、两干涉光束光强不匹配等。

5 结 论

建立了无固定频移的激光多普勒测速系统,基于光子相关光谱分析法实现了行波管内声压量值的直接复现。实验结果表明,声波频率分别为 315, 400, 500, 800 Hz,声压级在 100 dB~110 dB 范围内间隔 1 dB 变化时,光子相关光谱分析法与工作标准传声器的测量结果一致,最大偏差小于 0.5 dB。分析了光子相关光谱分析法中产生测量偏差的主要因素,包括声管内质点振动方向与测量光路速度敏感方向的偏差、干涉条纹畸变及条纹间距的计算偏差、声管内声阻抗的计算偏差、自相关运算的有限采样率等,后续研究的重点是定量

评估上述因素对声压量值复现准确度的影响及系统性能的优化,完成系统测量不确定度的评估,为实现非标准尺寸、微机电系统(MEMS)等新型传声器、质点振动速度传感器的校准奠定基础。

参 考 文 献

- 1 Electroacoustics - measurement microphones - part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique: IEC 61094-2-2009 [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2009.
- 2 Measurement microphones - part 3: Primary method for free-field calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique: IEC 61094-3-1995 [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 1995.
- 3 MacGillivray T, Campbell D, Greated C, *et al.* The development of a microphone calibration technique using photon correlation spectroscopy[J]. *Acta Acustica united with Acoustica*, 2003, 89(2): 369-376.
- 4 Raangs R, Schlicke T, Barham R. Calibration of a micromachined particle velocity microphone in a standing wave tube using a LDA photon-correlation technique[J]. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16(5): 1099-1108.
- 5 Koukoulas T, Theobald P, Schlicke T, *et al.* Towards a future primary method for microphone calibration: Optical measurement of acoustic velocity in low seeding conditions[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(11): 791-796.
- 6 Koukoulas T, Piper B, Theobald P. Gated photon correlation spectroscopy for acoustical particle velocity measurements in free-field conditions[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 133(3): EL156-EL161.
- 7 Koukoulas T, Piper B. Towards direct realization of the SI unit of sound pressure in the audible hearing range based on optical free-field acoustic particle measurements[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(16): 164101.
- 8 He Longbiao, Li Liangjie, Wang Xuejing. Realization of air borne sound pressure using laser Doppler spectral analyzing technique[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1104-1107.
何龙标, 李良杰, 王雪晶. 基于多普勒频谱分析技术的声压复现方法研究[J]. *激光与红外*, 2013, 43(10): 1104-1107.
- 9 He Longbiao, Niu Feng, Xu Huan, *et al.* Realization of air borne sound pressure unit using LDV spectral analyzing and autocorrelation technique[J]. *Noise and Vibration Control*, 2013, 33(S1): 225-228.
何龙标, 牛 锋, 许 欢, 等. 基于 LDV 频谱和自相关技术的空气声压量值的复现[J]. *噪声与振动控制*, 2013, 33(S1): 225-228.
- 10 Li Enbang. Three-dimensional laser Doppler velocimetry using frequency shift separation[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(7): 768-772.
李恩邦. 频移分离型三维激光多普勒测速仪研究[J]. *光学学报*, 1994, 14(7): 768-772.
- 11 Huang Zhen, Liu Bin, Dong Quanlin. Research on the torsional vibration measurement based on laser Doppler technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(3): 389-392.
黄 震, 刘 彬, 董全林. 基于激光多普勒技术扭振测量的研究[J]. *光学学报*, 2006, 26(3): 389-392.
- 12 Guo Jihua, Xu Zhengqi, Yin Chunyong. Ultralow speed measurement by laser Doppler velocimetry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(2): 252-256.
郭继华, 徐正奇, 殷纯永. 激光多普勒超低速测量[J]. *光学学报*, 1996, 16(2): 252-256.
- 13 Zhou Jian, Long Xingwu. Research on multipoint layer-type laser Doppler self-velocimetry[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(7): 1837-1844.
周 健, 龙兴武. 多点分层差动激光多普勒自身测速仪的研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(7): 1837-1844.
- 14 He Yan, Wang Wenkui, Xia Wenbing, *et al.* Laser Doppler vibrometer for acousto-optic communication[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(5): 703-706.
贺 岩, 王文奎, 夏文兵, 等. 激光多普勒振动计用于水下声光通信[J]. *中国激光*, 2007, 34(5): 703-706.
- 15 Taylor K J. Absolute measurement of acoustic particle velocity[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1976, 59(3): 691-694.
- 16 Taylor K J. Absolute calibration of microphones by a laser-Doppler technique[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1981, 70(4): 939-945.
- 17 Hann D, Greated C A. Acoustic measurements in flows using photon correlation spectroscopy[J]. *Measurement Science and Technology*, 1994, 5(2): 157-164.
- 18 Hann D, Greated C A. The measurement of sound fields using laser Doppler anemometry[J]. *Acta Acustica united with Acoustica*, 1999, 85(3): 401-411.
- 19 Sharpe J P, Greated C A. The measurement of periodic acoustic fields using photon correlation spectroscopy[J]. *Journal*

- of Physics D, 1987, 20(4): 418-423.
- 20 Li Liangjie. Research on realization of airborne sound pressure unit on by LDV technology[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013: 18-19.
李良杰. 基于 LDV 技术复现空气声声压量值的方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013: 18-19.
- 21 Melling A. Tracer particles and seeding for particle image velocimetry[J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(12): 1406-1416.
- 22 Huang Dekang, Li Cairong, Zhu Maohua, *et al.* Effect of scattering particle size on signal to noise ratio in Doppler speed measuring with laser device[J]. Optical Technology, 2003, 29(2): 164-165.
黄德康, 李彩荣, 朱茂华, 等. 激光多普勒测速中散射粒子的大小对信噪比的影响[J]. 光学技术, 2003, 29(2): 164-165.