

# 光子多普勒测速仪的单探头多目标测速能力研究

李建中 刘寿先 刘俊 彭其先 雷江波 田建华

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 随着相关研究的发展,在冲击波物理、爆轰物理、强激光、兵器等众多领域中,均提出了通过单个探头对小范围内的多个目标,如多个小飞片或粒子群,同时进行高精度速度测量的要求,为满足该要求,论述了光子多普勒测速的工作原理和光路结构,分析了单探头多目标测速应用时的信号特征和数据处理方法,指出速度分辨率和空间分辨率是决定该性能的关键因素。根据理论分析结果,采用光通信行业中的常规器件,搭建了一台光子多普勒测速仪,并设计了爆轰实验装置,同时利用该装置进行了爆轰加载金属飞片的验证实验。实验结果表明,使用单个光子多普勒测速探头,对单个大尺寸铝飞片、多个小尺寸铝飞片、铅靶喷射粒子群等单个或多个运动目标均达到了较好的速度测量结果,获得了各目标的速度曲线以及多条速度曲线构成的速度带,测量最高速度达到 2.5 km/s,工作距离达到 20 mm。研究结果对于深入探索光子多普勒测速技术在单探头多目标测速中的应用有重要的参考意义。

**关键词** 光纤光学;光子多普勒测速;探头;多目标;速度分辨率

**中图分类号** TN06 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1105004

## Measuring Multiple Targets' Velocities with Just One Probe of Photonic Doppler Velocimetry

Li Jianzhong Liu Shouxian Liu Jun Peng Qixian Lei Jiangbo Tian Jianhua

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** As the investigation deepened, it is necessary to measure the velocities of multiple targets, such as several flyers and a large number of granules, using just one probe, in the field of explosion and shock waves physics, intense laser, weapon, et al. . The operational principle and topology of photonic Doppler velocimetry are introduced. The signal characteristics and signal processing are analyzed, when the velocities of multiple targets are measured with just one probe, and the velocity resolution and spatial resolution are two key factors for measuring multiple velocities. According to the analysis, a photonic Doppler velocimetry is assembled on the basis of the optical Doppler effects, using the components well developed in the telecommunication industry, and the velocity of the explosively driven metal plate are tested by the proposed photonic Doppler velocimetry. The experimental results show that the velocities of one large aluminum flyer, several small aluminum flyers and a large number of lead granules are measured with just one probe, the velocity is up to 2.5 km/s, and the work distance is up to 20 mm. The research results will provide a valuable reference for the practical application of photonic Doppler velocimetry to measure multiple targets' velocities.

**Key words** fiber optics; photonic Doppler velocimetry; probe; multiple targets; velocity resolution

**OCIS codes** 060.2310; 070.2025; 280.3340

### 1 引言

在冲击波和爆轰物理、炸药、强激光、脉冲功率、超高速实验、天体物理、兵器等研究领域,速度一直是最关键的问题和需要诊断的主要参数<sup>[1-3]</sup>,例

如需要连续、非接触地测量各种材料在冲击波作用下的自由面速度历史,从而对材料的特性进行研究;炸药、轻气炮、激光装置、电磁驱动装置等加载技术的研究中,也需要对其驱动飞片的速度进行测量;炮

**收稿日期:** 2014-05-14; **收到修改稿日期:** 2014-06-04

**基金项目:** 国家自然科学基金(11202194, 11272298)、中国工程物理研究院科学技术发展基金(2014B0101001)

**作者简介:** 李建中(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事光纤干涉测速及光纤传感等方面的研究。

E-mail: jianzhong265@163.com

弹在膛内的速度和加速度是火炮及炮弹发射系统设计的关键参数,这些参数的测量对于发展内弹道理论、研究新型火炮和轻武器、对武器进行校验等方面均有重要的意义。

全光纤结构的光子多普勒测速仪<sup>[4-7]</sup>(PDV),作为最新一代的激光干涉测速技术,具有非接触测量、时间分辨率高、测速准确度高等优点,在上述领域中得到广泛应用,已成为主要的测速手段。

随着应用领域相关研究的不断深入,在对待测对象进行速度测量及相关分析的精细度方面提出了更高的要求,因为待测的材料和飞片在探头光束范围内(光束直径不大于 1 mm)的部分,在强加载下通常会分裂成多个小飞片或粒子群,需要分辨各个小飞片或粒子的速度差异,并分别得到各自的速度曲线。由于小飞片或粒子数量较大、尺寸较小且集中在一个小于探头光束直径的区域,无法采用多个探头分别测量各个小飞片或粒子的速度,仅能通过单探头,采用适宜的方法对小范围内的多个运动目标同时进行高精度速度测量。国内外对 PDV 进行了一定的研究,但却缺乏专门针对单探头多目标测速能力的深入研究及实验验证。

本文对 PDV 的工作原理进行了描述,并分析了 PDV 单个探头多目标测速能力的决定因素——速度分辨率和空间分辨率,以及采用常规器材及参数设置时可实现的具体指标,为提高 PDV 的单探头多目标测速能力提供了参考,最后设计了爆轰实验,验证了 PDV 可以实现单探头多目标测速,且具备较高分辨率。

## 2 基本原理

PDV 利用光学多普勒效应进行速度测量<sup>[8-9]</sup>,当被测物体向探头运动时,从被测物体表面反射回的信号光  $f_s$ ,相对于激光器从探头发出的探测光  $f_0$ ,会有微小的频率移动——多普勒频移  $f_d$ ,即

$$f_d = f_s - f_0 = \frac{2V}{\lambda_0} = \frac{2f_0}{c}V, \quad (1)$$

式中  $V$  为被测物体的运动速度, $\lambda_0$  为探测光的中心波长, $c$  为光速。被测物体的运动速度  $V$  和多普勒频移  $f_d$  直接呈线性关系。

信号光和探测光干涉后,干涉信号强度为

$$I(t) = I_0 + I_s + \sqrt{I_0 I_s} \sin[f_d(t) + \phi], \quad (2)$$

式中  $I_0$  为探测光的光强(无多普勒频移), $I_s$  为反射信号光的光强(有多普勒频移), $\phi$  为两束光的相对相位差。

可见,对干涉信号(2)式进行时频分析<sup>[10]</sup>,提取出多普勒频移  $f_d$ ,即可利用(1)式得到被测物体的运动速度  $V$ 。

光纤探头的测量角度对测试结果有较大影响,探测光垂直入射到被测物体上且探头以垂直于被测物体的角度接收其表面的反射光,是实际应用中较多的情况(实际上探测光是通过探头照射到被测物体上的,当探头与被测物体垂直时,即可同时满足上述两个条件),也是设计实验装置时应遵循的原则,此时由于测量方向与物体运动方向一致,被测物体没有横向的运动矢量,仅有面对探头的纵向运动矢量,测量结果可以较好地代表其整体运动速度。当探头并未与被测物体垂直,而是有一定角度  $\theta$  时,探头测量到的速度会比物体的运动速度小,在  $\theta \leq 8^\circ$  的情况下,测量到的速度与物体运动速度的偏差可以控制在 1% 以内<sup>[11]</sup>。

PDV 的基本结构如图 1 所示(在此基础上可有多种不同的改进),激光器输出足够功率的探测光,通过环形器注入光纤测速探头,并从探头照射到待测的运动目标上。探测光在运动目标上发生反射,部分反射光被探头收集,并反向传输至环形器,通过环形器后进入探测器,构成包含多普勒频移信息的信号光。注入光纤测速探头的探测光,受探头内部反射部件的作用,一部分光功率返回至原光路,同样通过环形器进入探测器,构成了不含多普勒频移信息的参考光。信号光和参考光在探测器处发生干涉,干涉光被光电转换为电压信号,接入示波器进行数据采集,对该数据进行一定的处理后,即可得到运动目标的速度历史。

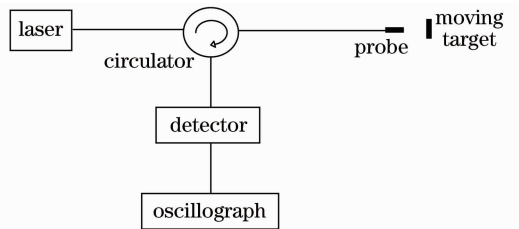


图 1 光子多普勒测速仪的基本结构

Fig. 1 Scheme of photonic Doppler velocimetry

## 3 单探头多目标测速能力分析

PDV 用于测速时,单个探头仅能获取到一路干涉信号,且如(2)式所示,速度等于多普勒频移即干涉信号频率,则如果该探头对应的待测目标是一个完整的运动物体(如整个飞片),则单位时间内的干涉信号仅存在一个频率。如该探头对应的待测目标

是多个运动物体(如多个小飞片或粒子群),则单位时间内的干涉信号包含多个(其数值等于具有速度差异的运动物体数量)频率,需要从中分别解读出各个运动目标对应的多普勒频移曲线及速度曲线。

PDV单探头多目标测速时,数据处理难度较大,尤其是各目标速度差异较小时,各目标的多普勒频率也非常接近,需要较高的频率分辨率才能将各自的多普勒频移曲线分开。决定频率分辨率最主要的因素是数据处理,数据处理方法的频率分辨能力直接决定了PDV的频率分辨率(即速度分辨率)。

PDV一般通过离散傅里叶变换对测试数据进行频谱分析,得到干涉信号的频率(多普勒频移),如(1)式所示,该频率直接对应所测得的运动目标速度。用傅里叶变换方法对有限时间段内的离散时间信号进行频率分析,会限制其频率分辨能力,体现在两个方面,其一是可分辨最小频率,其二是频谱展宽。其中可分辨的最小频率 $\Delta f$ 与傅里叶变换计算点数 $N$ 和采样时间间隔 $\Delta T$ 的关系为

$$\Delta f = \frac{1}{N \cdot \Delta T}, \quad (3)$$

如(1)式所示,所测量的速度与PDV干涉信号频率成正比,对于1550 nm波长,1 km/s的速度对应于1.29 GHz的频率。因此,PDV最小可分辨速度为

$$\Delta v = \frac{1}{N \cdot \Delta T} / 1.29, \quad (4)$$

由(4)式可知,PDV最小可分辨速度 $\Delta v$ 主要由傅里叶变换计算点数和采样率共同决定。令 $T = N \cdot \Delta T$ ,则 $T$ 表征了采样前模拟信号的时间长度,则可知信号长度越长,傅里叶变换的频率分辨率越高,PDV的速度分辨率也就越高。

要取得更高的速度分辨率,有两种途径——增加傅里叶变换计算点数 $N$ 或增大采样时间间隔 $\Delta T$ ,而当其中某一项为固定值时,PDV速度分辨率随另一项的变化趋势如图2和图3所示。

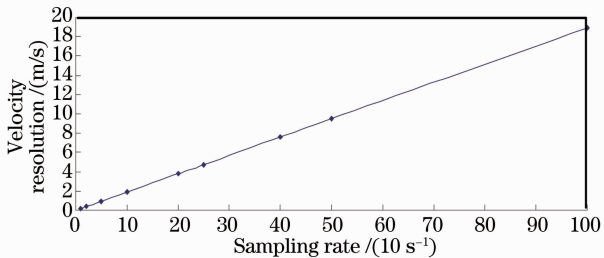


图2 PDV速度分辨率与系统采样率的关系  
(傅里叶变换计算点数设为4096)

Fig. 2 Relationship between velocity resolution and sampling rate (the number of computing points is 4096)

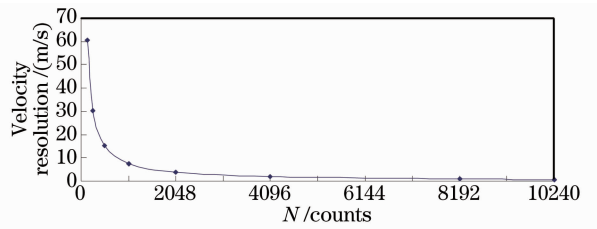


图3 PDV速度分辨率与傅里叶变换计算点数的关系  
(采样率设为 $10^{10} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 3 Relationship between velocity resolution and the number of computing points (the sampling rate is  $10^{10} \text{ s}^{-1}$ )

此外,依据图2和图3,可直接得到典型实验参数下的PDV最小可分辨速度值,例如在采用4096计算点数和 $10^{10} \text{ s}^{-1}$ 采样率下,对动态实验信号的处理结果可以实现优于2 m/s的速度分辨,已可满足大多数应用领域的需求。

上述两种提高频率分辨率的途径均需要付出一定的代价:增大采样时间间隔,即降低了采样频率,根据(1)式,将减小PDV的测速上限值即覆盖速度的动态范围;增加傅里叶变换计算点数 $N$ ,即增加进行快速傅里叶变换(FFT)的数据长度,将增加计算量,导致延时增加,实时性变差。因此,可以考虑从软件上采用特殊的方法对FFT的结果进行修正以提高频率分辨率,例如对信号先进行频谱细化,再进行频谱校正的方法<sup>[12]</sup>。频谱细化技术,其实质就是在增加FFT数据长度的基础上,不计算每一个样点的傅里叶变换值,而是通过各种算法减少傅里叶变换的计算量,也就是说虽然增加FFT数据长度,提高频率分辨率,但其计算量减少,系统的延时减小,经分析,Goertzel、选带相位补偿、复调制谱等细化算法均可以获得很好的细化结果,使频率分辨率得以提高(其高低取决于细化倍数的大小)。频谱校正的方法有很多种,考虑校正精度、速度、算法实现的难易程度以及与多普勒信号特点的结合,能量重心校正、比值校正以及相位差校正较为实用,校正效果均比较明显,其中比值法校正的精度较高,可达 $10^{-5}$ 量级,且能满足信号中含有大量噪声时的应用,更适合对实测多普勒信号进行处理。

PDV的单探头进行多目标测速时,其空间分辨率跟待测目标的材料(尤其是表面反射率)、尺寸、系统噪声等因素相关,当待测目标表面的反射光被探头收集到的光功率足以跟参考光干涉,且干涉信号的信噪比足以通过数据处理得到其信号频率,就可以测量到该目标的速度,即实现等于该目标尺寸的空间分辨率。

#### 4 单探头多目标测速实验研究

使用光纤激光器(窄线宽,高功率)、光纤探头(光纤准直器,光束直径小于 0.5 mm)、探测器以及光纤通信领域的常规光纤器件,搭建了一套 PDV 装置。

在 PDV 装置的基础上,为了验证其单探头多目标测速能力,设计了可产生不同尺寸飞片的爆轰实验装置,其基本结构如图 4 所示(剖面图),传爆药柱、空腔、待测靶等模块均为圆柱(或圆片)状,被封装在一个铝制圆筒里。使用两块传爆药柱驱动不同材料的待测靶,PDV 探头安装在铝制底座正中央,距离靶面中心 20 mm。数据采集时采样率为  $10^{10} \text{ s}^{-1}$ ,数据处理时计算点数采用 4096 点。

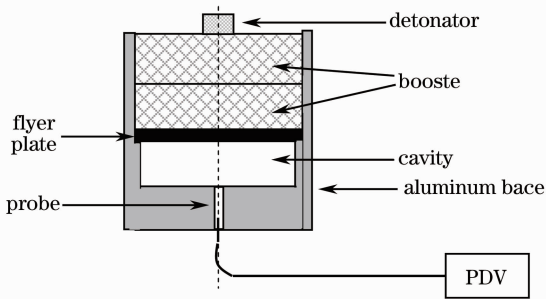


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Experimental setup

使用铝靶作为待测靶,传爆药柱产生的爆轰波将该靶轰击成多个飞片(其尺寸大于探头光束直径),使用单个 PDV 探头对其中某个飞片进行速度测量,该飞片的速度曲线如图 5 所示,可见在大约  $14 \mu\text{s}$  的持续时间内,飞片速度从零跳变至  $0.8 \text{ km/s}$ ,然后缓慢加速到  $1.75 \text{ km/s}$ 。

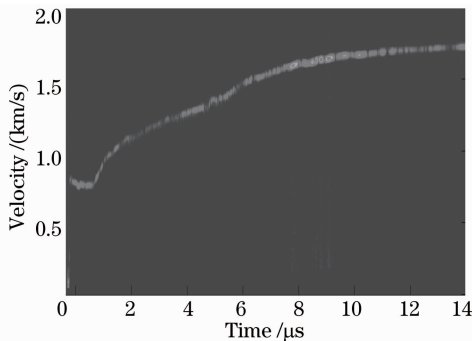


图 5 某个大尺寸铝飞片的实测速度曲线

Fig. 5 Measured velocity of a large aluminum flyer

使用另一块铝靶(经过一定处理)作为待测靶,传爆药柱产生的爆轰波将该铝靶轰击成零散的小飞片(其尺寸小于探头光束直径),且各飞片存在一定的尺寸和速度差异,使用单个 PDV 探头对其探测光束照

射范围内的多个小飞片同时进行速度测量。各个小飞片的速度曲线如图 6 所示,可见在大约  $8 \mu\text{s}$  的持续时间内,多个飞片的速度从零快速加速到  $2.0 \sim 2.5 \text{ km/s}$ ,各飞片的速度差异为数十米每秒。

使用质地更软的铅靶作为待测靶,传爆药柱产生的爆轰波将该靶轰击成喷射状的粒子群(其尺寸远小于探头光束直径,数量级差异),且各粒子存在一定的尺寸和速度差异,使用单个 PDV 探头对其探测光束照射范围内的粒子群同时进行速度测量。粒子群喷射时的速度曲线如图 7 所示,可见在大约  $12 \mu\text{s}$  的持续时间内,粒子群的速度从零快速加速到  $0.8 \sim 1.8 \text{ km/s}$ 。粒子数量较庞大,有差异的速度值数量也较为庞大,且相邻粒子的速度差异已难以区分,即大量运动目标的多条(数量较大)速度曲线整体形成了一条较宽的速度带。与图 5 和图 6 所示的铝飞片相比,图 7 中粒子群的运动过程较为复杂,即使在飞行途中也存在较大的变化,例如某些较大粒子在飞行途中会再次裂变成多个更小的粒子,速度也相应地发生较大变化。此外,由于铅粒子的尺寸远小于铝飞片,反射回探头的信号光功率也相

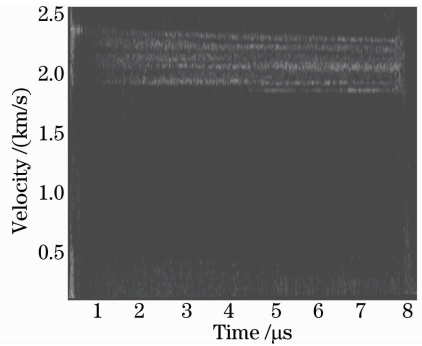


图 6 多个小尺寸铝飞片的实测速度曲线  
Fig. 6 Measured velocities of several small aluminum flyers

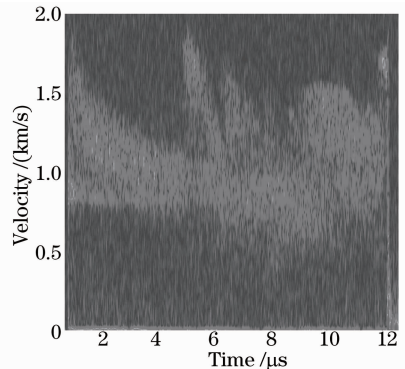


图 7 铅粒子群的实测速度曲线  
Fig. 7 Measured velocities of a large number of lead granules

应的大为减弱,从而速度曲线(速度带)的信噪比有所减低。

## 5 结 论

通过理论分析和数值模拟,对PDV的单探头多目标测速能力进行了分析,对相关的两个关键指标——速度分辨率和空间分辨率进行了阐述,并指出了提高该指标的可行措施,为研制PDV并较好地实现单探头多目标测速功能奠定了基础。

根据所分析的结果,采用常规器材并设置所需的参数,搭建了一台PDV装置,设计了爆轰实验装置,对PDV单探头的多目标测速能力进行了验证。经测试,单个PDV探头对某个大尺寸铝飞片、多个小尺寸铝飞片、铅靶喷射粒子群等单点或多点运动目标均达到了较好的速度测量结果,获得了各个目标的速度曲线以及多条速度曲线构成的速度带。

## 参 考 文 献

- Ren Aiguo, Zhang Yongkang, Jiang Yinfang, *et al.*. Numerical simulation of metal sheet velocity by laser shock forming with semi-die[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1368-1374.  
任爱国,张永康,姜银方,等.激光冲击半模成形板料运动速度的数值模拟[J].中国激光,2010,37(5):1368-1374.
- Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye, *et al.*. Shock wave velocity calculation under X-ray preheat effect[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1327-1331.  
王峰,彭晓世,刘慎业,等.预热效应影响下冲击波速度推算方法[J].光学学报,2010,30(5):1327-1331.
- Liu Shouxian, Wen Weifeng, Yuan Shuyun, *et al.*. Full field velocity measurement of laser-driven flyer using framing-imaging velocity interferometer system for any reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912007.  
刘寿先,温伟峰,袁树云,等.分幅面成像任意反射面速度干涉仪诊断激光驱动飞片全场速度[J].光学学报,2013,33(9):0912007.
- O T Strand, D R Goosman, C Martinesz, *et al.*. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques[J]. Rev Scient Instrum, 2006, 77(8): 083108.
- Hong Guangwei, Jia Bo. All-fiber velocity interferometer for multipoint measurement[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(8): 1097-1100.  
洪广伟,贾波.用于多点测试的全光纤速度干涉仪研究[J].中国激光,2005,32(8):1097-1100.
- Wang Detian, Li Zeren, Wu Jianrong, *et al.*. An optical-fiber displacement interferometer for measuring velocities of explosively-driven metal plates[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(1): 105-108.  
王德田,李泽仁,吴建荣,等.光纤位移干涉仪在爆轰加载飞片速度测量中的应用[J].爆炸与冲击,2009,29(1):105-108.
- Chen Guanghua, Wang Detian, Liu Jun, *et al.*. A novel photonic Doppler velocimetry for transverse velocity measurement[J]. Rev Scient Instrum, 2013, 84(1): 013101.
- Dong Jing, Chen Rui, Li Xiaolong, *et al.*. Lidar coherent detection and feature extraction of moving target based on micro-doppler effect[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1014001.  
董晶,陈蕊,李小龙,等.运动目标微多普勒效应的激光雷达相干探测及特征提取[J].中国激光,2012,39(10):1014001.
- Zhou Jian, Long Xingwu. Laser Doppler velocimeter for vehicle inertial navigation system[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1316-1321.  
周健,龙兴武.用于车载自主惯导系统的激光多普勒测速仪[J].中国激光,2010,37(5):1316-1321.
- Liu Shouxian, Li Zeren, Wu Jianrong, *et al.*. Signal processing of displacement interferometer based on the continuous wavelet transform[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(8): 1235-1239.  
刘寿先,李泽仁,吴建荣,等.基于连续小波变换的瞬态位移干涉仪信号处理[J].中国激光,2008,35(8):1235-1239.
- Peng Qixian, Liu Qiao, Liu Jun, *et al.*. Analysis of incident angle and its influence on laser velocity interferometry[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(4): 809-812.  
彭其先,刘乔,刘俊,等.测量角度对激光干涉测速的影响分析[J].光子学报,2008,37(4):809-812.
- Zhou Jian, Huang Hua. Application of frequency spectrum refinement and correction technology in laser Doppler velocimeter[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(2): 144-151.  
周健,黄华.频谱细化及频谱校正技术在激光多普勒测速仪中的应用[J].激光与红外,2010,40(2):144-151.

栏目编辑:何卓铭