

## 多点光子多普勒测速仪及其在爆轰物理领域的应用

李建中, 王德田, 刘俊, 雷江波, 田建华, 刘寿先

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 爆轰物理、冲击波物理、强激光等众多领域均提出了对多个目标同时进行测速的要求, 从而急需研制多点测速系统。论述了光子多普勒测速的工作原理和光路结构, 计算了整个光纤链路上的功率变化, 分析了多点光子多普勒测速系统最大通道数量的各个影响因素及影响程度。根据分析结果, 研制了一套八通道光子多普勒测速样机, 可对 8 个测点进行同步测速, 并进行了爆轰加载金属飞片和粒子的验证实验。实验结果表明, 在测试条件逐渐恶化, 探头接收效率逐渐降低的情况下, 样机对单个或多个运动目标均达到了较好的速度测量结果, 获得了信噪比较高的待测目标速度曲线。研究结果对于深入探索多点激光测速技术及其应用极具参考意义。

**关键词:** 光子多普勒测速; 速度; 爆轰; 光功率; 接收效率

**中图分类号:** TN06 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0422001

## Multi-channel photonic Doppler velocimetry and its application in the field of explosion physics

Li Jianzhong, Wang Detian, Liu Jun, Lei Jiangbo, Tian Jianhua, Liu Shouxian

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

**Abstract:** As the investigation deepened, it is necessary to measure the velocity of the object in an array with large quantities of points or in a covered area, in the field of explosion and shock waves physics, intense laser, et al. The operational principle and topology of photonic Doppler velocimetry were introduced, the transformation of power in optical fiber link was computed in detail, and the maximum number of channel was analyzed for multi-channel photonic Doppler velocimetry. According to the analysis, a 8-channel photonic Doppler velocimetry which can measuring 8 targets' velocity simultaneously, is assembled on the basis of the optical Doppler effects, and the velocity of the explosively driven metal plate was tested by the proposed velocimetry. The experimental results show that the velocities of the steel flyer plates and the lead granules are measured well, with the poor receiving efficiency. The research results will provide a valuable reference for the practical application of the velocimetry to measure a large number of targets' velocity simultaneously.

**Key words:** photonic Doppler velocimetry; velocity; explosion; optical power; receiving efficiency

收稿日期: 2015-08-07; 修订日期: 2015-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(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, 助理研究员, 硕士, 主要从事光电测试技术研究。Email: jianzhong265@163.com

## 0 引言

在冲击波和爆轰物理、炸药、强激光、兵器等研究领域,速度一直是关键问题和需要诊断的主要参数<sup>[1-5]</sup>,如连续的、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,测量炸药、轻气炮、激光装置、电磁驱动装置等加载技术驱动飞片的速度,测量炮弹在火炮及炮弹发射系统中的速度和加速度。随着相关研究的深入,众多应用领域均提出了在待测对象(一个尺寸较大的目标或多个尺寸较小的目标)上布置不同测点,并对各个测点分别进行测速的要求,如对多个对象同时进行速度测量、飞层整个表面的运动物理过程、强冲击波的时空不均匀性、某个或多个时刻样品整个表面的速度分布及相对差别等诊断需求,目前国内已对此有着明确需求。

由于实验成本较高且操作复杂,难以采取多发重复实验,并在各发实验中依次对各个测点单独测速,最后再汇总拟合的方式,满足对目标进行多点测速的要求,因此,各应用领域均提出了在单发实验中进行多点同时测速的要求。如采用单点测速设备进行多点同时测量,则在一发实验中需要配置多台测速主机,随着测速点数的增多,其整套系统的复杂度、成本和体积均大幅增加,因此,急需研究多点测速设备,即单套测速主机具备多个测量通道,可对多个测点同时测速,且单套主机具备的测量通道数越大,可测点数越多,越能为各应用领域提供更大信息量的速度数据,以促进其进行更加深入的研究,例如针对爆轰加载飞层实验,飞层上可布置的测点数越多,飞层整个表面的运动物理过程就可以分析得更加精细、准确且可靠。此外,单套测速主机具备的测量通道数越多,对其进行叠加,相对于直接叠加单点测速主机,构成更大测点数量测速系统的难度越小,即可拓展性越强。2004年,美国利弗莫尔实验室即研发了一套可携带的四通道 PDV,可同时对 4 个点进行速度测量,随后继续进行更大点数的系统研制。

对光子多普勒测速的工作原理进行了阐述,并对整个光纤链路的功率变化进行了详细计算,同时对对光纤探头接收效率和激光器功率进行深入分析的前提下,确定了单台激光器单套主机最大可具备的测量通道数,在此基础上,基于已有器件,研制了

一台 8 点测速主机,可对 8 个测点进行同步测速,最后在爆轰实验中进行了实际应用。

## 1 基本原理

光子多普勒测速仪<sup>[6-9]</sup>(photonic Doppler velocimetry, PDV, 国内也称 displacement interferometer system for any reflector 即 DISAR)具有非接触测量、时间分辨率高、测速准确度高等优点,得到了广泛应用,已成为主要的测速手段。

PDV 一般基于单光源的零差探测,通常采用的结构如图 1 所示。当被测目标向探头运动时,从目标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  $f_d$ , 且可得:

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

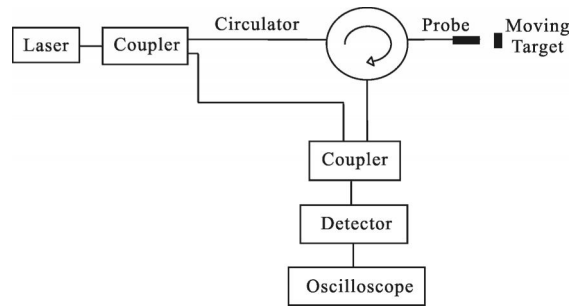


图 1 光子多普勒测速仪的基本结构

Fig.1 Scheme of photonic Doppler velocimetry

PDV 的参考光可以来自于本台激光器经光纤分束器分出的小部分光功率,也可以来自于另一台激光器,与信号光产生干涉后,干涉信号强度为:

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

式中:  $I_0$  为参考光的光强(无多普勒频移);  $I_s$  为信号光的光强(有多普勒频移);  $\phi$  为两束光的相对相位差。可见,对干涉信号进行时频分析<sup>[10]</sup>,提取出多普勒频移,即可利用公式(1)得到被测目标的运动速度。

## 2 光路结构及链路功率分析

多点 PDV 采用图 2 所示结构,激光器输出光被  $1 \times N$  的光纤分束器 Coupler1(大功率器件,其最大承受功率需不小于激光器输出功率)分成  $N$  路,构成  $N$  个测量通道,其中单个通道的光路如图 2 虚线框内

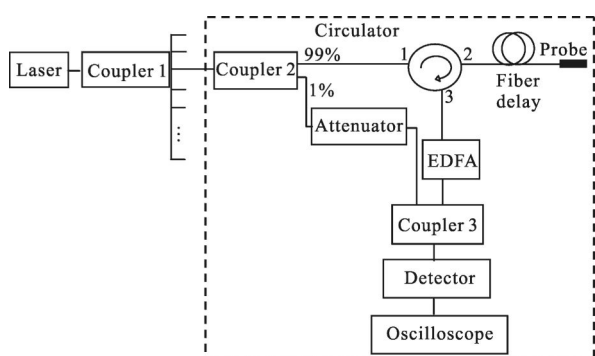


图 2 多点光子多普勒测速仪的光路结构

Fig. 2 Scheme of multi-channel photonic Doppler velocimetry

部分所示,其余通道与之相同。

图 2 中, Coupler1 中一个输出端将激光器提供的探测光输入给本测量通道使用。通道输入光经过一个  $1 \times 2$  光纤分束器 Coupler2 后,大部分功率(通常为 99%)通过环形器和光纤延迟线注入探头,并从探头照射到待测目标上,探测光在目标上发生反射,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,先经过 EDFA 放大,再进入  $1 \times 2$  光纤分束器 Coupler3,构成携带有待测目标速度信息的信号光。单点 PDV 仅有一个测点,且探测光可为激光器全部功率,无需放大,多点 PDV 每个通道仅能使用激光器功率的  $1/N$ ,必须放大,否则信号光功率难以满足要求。通道输入光通过 Coupler2 后的小部分功率(通常为 1%)经过可调衰减器后进入 Coupler3,构成具有适宜功率大小的参考光(参考光也可以直接来自于另一台激光器)。信号光和参考光合束后产生干涉,干涉光被探测器和示波器进行光电转换和数据采集,最后通过数据处理得到待测目标的速度变化过程。

光纤元器件拟使用常规商业品,其典型参数可从相关产品资料中获取,其中  $1 \times 2$  光纤分束器的附加损耗典型值约为 0.05 dB,环形器的插入损耗典型值约为 0.7 dB,100 m 单模光纤延迟线(爆轰实验需要较长延迟线,以分隔开爆点和测试间,确保测试人员及设备的安全,100 m 可满足大多数实验的需求)的衰减量典型值约为 0.02 dB,光纤测速探头(光纤准直器或光纤自聚焦器)的插入损耗典型值约为 0.2 dB,探头接收目标表面回光的接收效率  $\eta$  一般在  $10^{-6} \sim 10^{-1}$  范围内。大功率  $1 \times N$  光纤分束器的附加损耗,根据  $N$  值的不同,具有一定的差异,多点 PDV 一般使

用  $1 \times 4 \sim 1 \times 32$  的产品,其附加损耗典型值在 1.1 dB ~ 1.8 dB 范围内,以上指标均忽略各产品或通道的不均匀性。此外,假设各器件之间的尾纤通过熔接方式进行连接,其插入损耗可忽略。

分析信号光在整个链路上的功率变化,设激光器出光功率为  $P_0$ ,且为便于分析, $1 \times N$  光纤分束器的附加损耗取最小值 1.1 dB,即最理想的情况,从而激光器出光通过 Coupler1 后,单个测量通道的输入光功率约为  $0.776 2P_0/N$ ,经过 Coupler2 后,99% 输出端的光功率为  $0.759 7P_0/N$ ,该探测光由环形器端口 1 传输至端口 2 后,功率减为  $0.646 6P_0/N$ ,再被 100 m 光纤延迟线衰减,最终到达探头的探测光功率余量约为  $0.643 6P_0/N$ 。探测光经过探头后,被其插损衰减,仅有  $0.614 7P_0/N$  功率从探头发出并照向待测目标,同时目标表面的散射光有  $0.614 7\eta P_0/N$  被探头接收到,作为携带有待测目标速度信息的信号光。信号光经过探头和光纤延迟线衰减后, $0.584 3\eta P_0/N$  到达环形器,然后从环形器端口 2 传输至端口 3,剩余光功率  $0.497 3\eta P_0/N$  到达 EDFA 进行放大。

分析参考光整个链路上的功率变化,取  $N$  为较大的数值 32,此时到达衰减器的功率为  $0.759 7P_0/(32 \times 99)$ ,PDV 一般使用大功率激光器, $P_0$  通常大于 1 W,则未衰减前的参考光不低于  $239.8 \mu\text{W}$ ,其功率足以保证系统可以产生良好的干涉。

综上所述,多点 PDV 的最大通道数  $N$ ,可忽略参考光对其影响,而主要考虑信号光的影响。

信号光链路上,EDFA 通常要求输入光的功率大于  $-30 \text{ dBm}$ (即  $1 \mu\text{W}$ ),此时输入光的功率处于 EDFA 的最佳工作区间,可对其进行较理想的放大,充分提高功率和信噪比,从而使信号光经放大后质量较好,可以跟参考光产生良好的干涉,即确保了干涉信号的质量以及测速性能。如果输入光低于  $-30 \text{ dBm}$ ,则难以对其进行较好的放大,信号光的功率和信噪比提高程度不理想,甚至可能被 EDFA 的噪声湮没。

总之,如需确保系统干涉信号的质量以及测速性能,需要满足

$$\frac{0.497 3\eta P_0}{N} \geq 10^{-6} \quad (3)$$

式中: $P_0$  的单位为 W; $\eta$  和  $N$  均为无量纲数字。可见多点 PDV 最大通道数量  $N$  为:

$$N=0.4973 \times 10^6 \eta P_0 \quad (4)$$

即  $N$  的大小主要决定于激光器功率  $P_0$  和探头接收效率  $\eta$ 。

公式 (4) 为根据常规商用产品的典型参数计算得到,满足大多数情况下的链路功率分析,如针对实际的测速系统,可采用所述计算过程,根据所使用元器件的实测参数进行具体计算。

当  $P_0$  为定值 (假设为最常用的 1 W), 则多点 PDV 的最大通道数量  $N$  与探头接收效率  $\eta$  的关系如图 3 所示,可以直观地看出  $N$  跟  $\eta$  的关系。

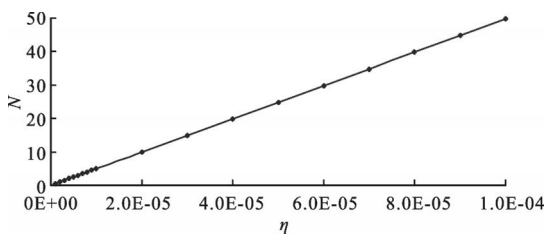


图 3 多点 PDV 最大通道数量  $N$  与探头接收效率  $\eta$  的关系

Fig.3 Relation between  $N$  and  $\eta$

当  $\eta$  为定值 (假设为中间值  $1 \times 10^{-5}$ ), 则多点 PDV 的最大通道数量  $N$  与激光器功率  $P_0$  的关系如图 4 所示,可以直观地看出  $N$  跟  $P_0$  的关系。

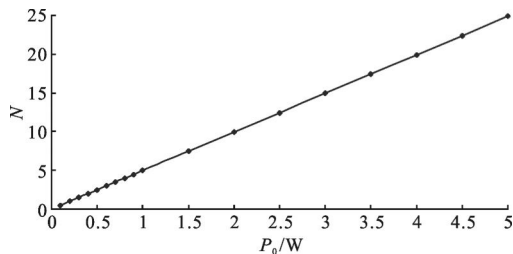


图 4 多点 PDV 最大通道数量  $N$  与激光器功率的关系

Fig.4 Relation between  $N$  and  $P_0$

PDV 需要使用窄线宽 (kHz 数量级)、低相位噪声、高频率稳定性的 1 550 nm 波段激光器,在不进行特殊定制的前提下,其功率一般最大为 5 W,提高功率的技术难度和成本均较高,尤其是价格提高幅度较大。从图 3 和图 4 可以看出,受激光器功率提高程度的限制,要增大多点 PDV 的最大通道数量  $N$ ,相比提高激光器功率  $P_0$  的途径,增大探头接收效率  $\eta$  更有效,也更可行,因为采购接收性能更高的探头产品,对目标表面进行一定的处理(在大多数实验中,对靶面进行处理,提高其反射率,不会对测试数据和物理过程分析造成影响),或者在不影响实验装置的

前提下尽量减小探头和目标的距离,均可以较大幅度提高探头接收效率,从而较大幅度提高  $N$ 。

如前所述, $N$  还受 EDFA 最小输入光功率的影响,如果该指标可以优化到 -40 dBm (即 100 nW),上述计算中的  $N$  值大小可以提高一个数量级,但这大幅度提高了 EDFA 的性能要求,尤其是可放大的最小输入光功率、噪声指数、增益(输入光功率越小,要放大到同等功率所需的增益越大)等指标,同时实现上述指标的技术难度较大,尤其是当输入光功率较小时,容易被 EDFA 本身的噪声恶化输入信号的性噪比,甚至湮没该信号。

$N$  值大小还受光纤分束器 Coupler2 分束比的影响,但影响的程度较小,因为需要保证探测光功率足够大,所以该链路的功率一般至少应为 Coupler2 输入光功率的 95%,与上述计算设定的 99% 差距不大。此外,即使参考光链路功率仅为 Coupler2 输入光功率的 1%,也足以满足干涉要求,因此无需考虑参考光因素。

在技术水平提升的基础上,信号光链路使用插入损耗更低的新产品,可以在一定程度上增大  $N$ 。此外,光纤链路上各器件之间的连接,如果采用光纤接头和法兰的方式,则多处连接点累积的插入损耗较大, $N$  会随之小,因此,应尽可能将各器件通过尾纤熔接的方式进行连接。

### 3 实验

在实验条件较为苛刻的情况下,例如目标表面反射率较低、探头与目标的距离较远、目标为小尺寸粒子等,根据长期实验的测试经验,此时接收效率通常在  $1.0 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-5}$  范围内,即探头仅具备较低的接收效率。拟使用一台功率为 1 W 的 1 550.12 nm 的光纤激光器,与 PDV 主机搭配使用,该参数的激光器为目前普遍使用的产品,稳定可靠。因此,根据上述计算,为尽可能满足实验测试需求,选定通道数量  $N$  为 8 (计算结果显示  $N$  最大为 10),并以此选定所需器材,研制了一台 8 点 PDV 样机,如图 5 所示。

为在爆轰实验中对所研制的 8 点 PDV 进行应用和验证,特别设计了爆轰实验装置,其基本结构(剖面图)如图 6 所示,传爆药柱、空腔、金属靶等模块均为圆柱(或圆片)状,被封装在一个铝制圆筒里。

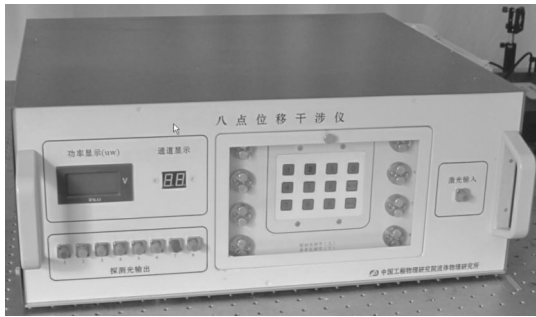


图 5 8 点光子多普勒测速仪样机

Fig.5 8-channel photonic Doppler velocimetry

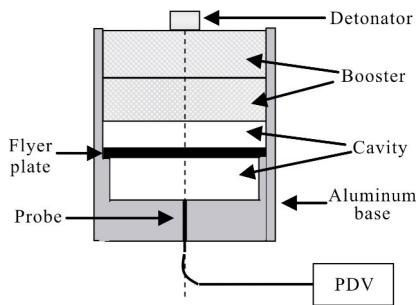


图 6 实验装置示意图

Fig.6 Experimental setup

探头安装在铝制底座里,且 8 个探头以铝制底座中心为圆心对称安装,由于各自对准金属靶的不同位置,从而在靶面上形成了 8 个分隔开的独立测点。为得到平缓的冲击波前沿,在传炸药柱和金属靶之间增加了空气间隙。

为提供足够高的探头接收效率,使用反射率较高的钢靶作为待测目标,探头距离靶面 20 mm,进行第 1 发实验。起爆后,传炸药柱产生的爆轰波加载到钢靶上,钢靶破裂开并产生大量不同尺寸的飞片,PDV 检测到运动飞片的动态干涉信号,对该信号进行时频分析后,获得的速度曲线如图 7 所示。如前所述,由于 8 个探头对准钢靶的不同位置,即在钢靶上形成了 8 个独立的测点,因此,每个探头一般测量的是不同飞片的速度(除非某个飞片尺寸较大,覆盖了相邻多个测点的区域)。从图 7 中可看出,在飞片运动初期,各条速度曲线重合度较高,从物理上解释有两个可能的原因,其一是此时靶面未完全裂开,8 个探头实际上测量的是 1 个整体目标,其二是靶面已完全裂开,但在裂开初期,各飞片的速度差异还较小。从图 7 中还可看出,在飞片运动中后期,各条速度曲线已分隔开,从物理上解释,此时靶面已完全裂

开,且由于各个飞片的尺寸、质量和飞行姿态的差异,随着飞行时间及距离的增加,其速度差异逐渐增大。该发实验说明,所研制的 8 点 PDV 在较为理想的实验条件下,各个通道均可以满足速度诊断需求。此外,在此次实验中,使用 1 套单点 PDV 样机作为对比物,其探头在底座中与上述 8 个探头距离圆心相同距离,所测量到的飞片速度曲线如图 7 所示,可见 8 点 PDV 每个通道与单点 PDV 相比,测速性能并未明显恶化,速度曲线的信噪比、轨迹、时间持续长度、特征点等参数均大致相同。

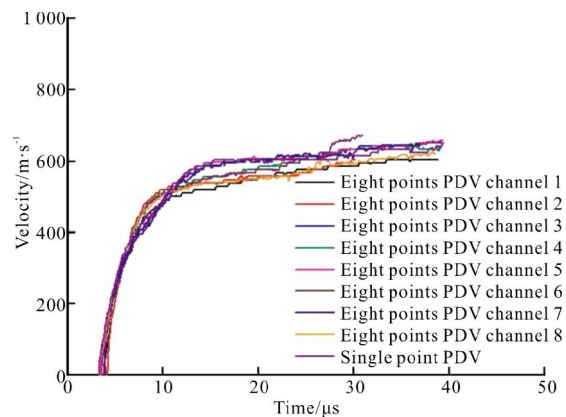


图 7 8 点 PDV 测量到的钢飞片速度曲线(工作距离 20 mm)

Fig.7 Velocities of some steel flyer plates with 8-channel PDV, WD=20 mm

为降低目标反射率及探头接收效率,特增大探头与钢靶的距离至 75 mm,进行第 2 发实验,并在该发实验中加大了药量,以延长飞片运动过程的持续时间和飞行距离。8 点 PDV 某个通道获得的钢飞片速度曲线如图 8 所示(其余通道与之类似)。从图 8 中可看出,尽管加大了探头与飞片的距离,大幅度减小了探头接收到的飞片表面散射光的功率,但最终获得的速度曲线的信噪比仍然较好。

为更进一步降低目标反射率及探头接收效率,特使用质地较软的铅靶作为待测靶,探头距离靶面 20 mm,进行第 3 发实验。起爆后,传炸药柱产生的爆轰波将铅靶轰击成喷射状的粒子群,各粒子存在一定的尺寸和速度差异,但其尺寸均远小于前两发实验的飞片,且为几个数量级的差异,因此,探测光照射到小尺寸粒子上的光功率远低于大尺寸飞片,探头接收到的单个目标(某个小尺寸粒子)回光也会随之远低于前两发实验。如前所述,由于测点位置不

同,8 个探头分别测量的是不同粒子群的速度,其中 1 个探头测到的粒子群喷射时的速度曲线如图 9 所示(其余探头测得的结果与之类似)。从图 9 中可看出,尽管探头接收到的单个粒子的表面散射光功率极为微弱,但获得的速度曲线仍然具备较好的信噪比,此外,因为粒子数量庞大,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 1 条较宽的速度带,且粒子群的速度从零快速加速到 0.8~1.4 km/s,并持续飞行了大约 20  $\mu$ s。该发实验也验证了样机具有较为优异的速度分辨率和空间分辨率。

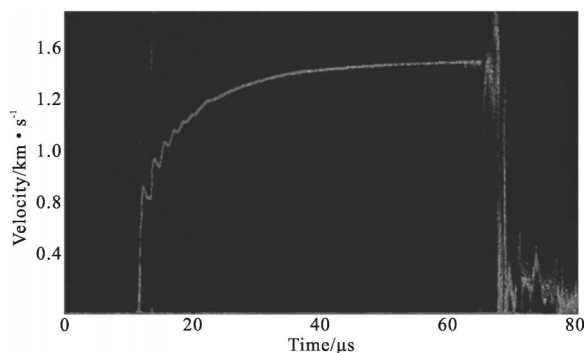


图 8 8 点 PDV 测量到的某个钢飞片速度曲线(工作距离 75 mm)  
Fig.8 Velocity of a steel flyer plate with 8-channel PDV , WD=75 mm

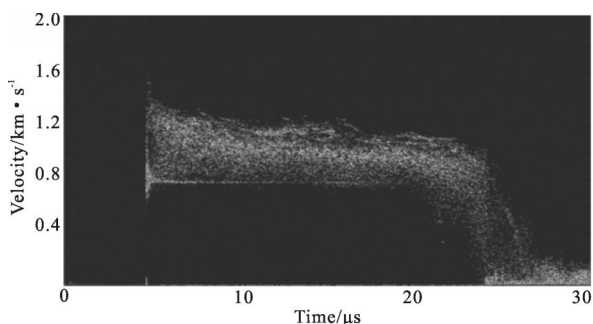


图 9 8 点 PDV 测量到的铅粒子群速度曲线

Fig.9 Velocities of a large numbers of lead granules with 8-channel PDV

## 4 结 论

论文对光纤链路上的功率变化进行了详细的计算,分析了影响多点 PDV 最大通道数量  $N$  的各个因素,以及各因素的影响程度,从理论上确定了单台激光器单套主机最大可具备的测量通道数。

研制了一套 8 通道 PDV 样机,可对 8 个测点进行同步测速。实验结果表明,所研制的 8 点 PDV 即

使在较为苛刻的实验条件下,仍然获得了较好的速度测量结果,可以满足相关领域的速度诊断需求,充分验证了此文的计算过程及结果。

## 参 考 文 献:

- [1] 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. (in Chinese)
- [2] Huang Fajun, Wan Qiuhua, Yang Shouwang, et al. Method of velocity measurement based on Moiré fringe and nonlinear tracking differentiator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1930–1935. (in Chinese)
- [3] Zhang Xiaoyue, Lin Zhili. Online calibration method for IMU based on the usage of single-beam Lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S): 466–471. (in Chinese)
- [4] Li Guangze, Kong Dezhu, Liu Jinguo. Computation of scroll image motion velocity of wide coverage optical remote camera[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 750–758. (in Chinese)
- [5] Li Xiuming, Huang Zhanghua, Li Xiangyu, et al. Two-dimensional point laser Doppler velocimeter for velocity measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(10): 2627–2632. (in Chinese)
- [6] Strand O T, Goosman D R, Martinez C, et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77: 083108.
- [7] Chen Guanghua, Wang Detian, Liu Jun, et al. A novel photonic Doppler velocimetry for transverse velocity measurement[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84: 013101.
- [8] Yang Jun, Wang Keyi, Xu Haibin, et al. Development of an optical-fiber displacement interferometer and its application in Hopkinson pressure bar experiment[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 102–107. (in Chinese)
- [9] Wang Jian, Wu Chongqing, Song Hongwei, et al. Velocity measurement of back-free the surface of target after laser shock peening using all-fiber photonic Doppler velocimetry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (5): 1212–1216. (in Chinese)
- [10] Liu Shouxian, Li Zeren, Wu Jianrong, et al. Signal processing of displacement interferometer based on the continuous wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(8): 1235–1239. (in Chinese)