

基于单探头实现两种技术同步复测的新测速仪

李建中 刘寿先 刘俊 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 在冲击波、爆轰、兵器、激光等众多研究领域中,均提出了使用单个探头对一个测点进行多种技术同步复测的迫切需求。为实现上述目标,分析了常规和外差式光子多普勒测速技术的工作机理、光学结构和复测难题,设计了一种基于单探头实现常规和外差式光子多普勒测速技术同步复测的方案,并根据该方案搭建了一套新型测速装置。设计了爆轰波加载铝飞片和铅粒子群的考核实验,实验结果显示,使用单个测速探头对单个或多个目标均实现了优异的测速效果,获得了2种技术在单次实验中各自独立测量到的待测目标速度曲线。该研究内容及实验结果对充分研究激光测速技术在单探头多技术复测方面的应用极具意义。

关键词 光纤光学;光子多普勒测速;速度;光纤测速探头;光学外差

中图分类号 TN06

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1005007

Novel Velocimetry of Two Techniques Synchronous Measurement Based on Single Probe

Li Jianzhong Liu Shouxian Liu Jun Lei Jiangbo Tian Jianhua

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

Abstract As the investigation is deepened, it is necessary to measure velocity with different techniques based on single probe to a point in the fields of shock waves physics, explosion physics, weapon, intense laser, and so on. The operational principles, optical structures and synchronous measuremental problems of the conventional and heterodyne photonic Doppler velocimetry (PDV) techniques are analyzed. According to the analysis, a novel velocimetry based on single probe, which can measure a target's velocity by different techniques, is designed and assembled. The aluminum flyer plate and a large number of lead granules loaded by detonation wave are tested by the proposed velocimetry. The experimental results show that the velocities of single or multiple targets are measured well by the novel velocimetry, and the speed curves of the targets under test are obtained in independence measurement by two techniques. The research results can provide a valuable reference for the practical application of the velocimetry to measure a target's velocity with different techniques simultaneously.

Key words fiber optics; photonic Doppler velocimetry; velocity; fiber probe of velocity measurement; optical heterodyne

OCIS codes 060.2310; 070.2025; 280.3340

1 引言

在冲击波物理、爆轰物理、兵器、激光等领域中,各类目标的速度通常是需要测量的关键参数^[1-4],如不同材料在冲击波加载下的自由面速度,爆轰、激光、脉冲功率等加载技术驱动粒子或飞片的速度,火炮及炮弹发射系统设计中炮弹在膛内的速度或加速度。此外,各个应用领域对速度数据的要求均较高,需要精确地获取目标速度随时间的变化历史,但由于实验成本较高且操作复杂,难以通过多次实验并重复测速来提高测试数据的准确性、可靠性和稳定性,因此各应用领域均提出了在单次实验中进行重复测速的要求,即在一次实验中对某个目标(测点)通过复测获取到该目标(测点)的多份速度数据,以验证测量结果。

收稿日期: 2015-04-22; 收到修改稿日期: 2015-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(11272298)、中物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方面的研究。

E-mail: jianzhong265@163.com

在实际的实验测试过程中,由于各种测速技术均需要各自独立地使用一个测速探头,且受探头尺寸和实验装置安装要求的限制一个测点只能被一个探头垂直对准并测量,因此对一个测点只能在多种测速技术中选择其中一种进行测量。目前通常采用的复测方式,是利用某一种测速技术获取到携带有待测目标速度信息的干涉光,将其功率分为多份并分别被多个探测器和多个示波器通道(不同幅度量程)采集,分别进行数据处理以获取到待测目标的多条速度曲线。上述方式的主要目的是避免示波器幅度量程设置不合适而无法采集到信号的问题,只能称之为幅度复测,是“伪”复测,即并非一个测点通过多种技术获取到多份速度信息。这种意义上的速度复测,实际上一个测点仅能通过一种技术获取到一份速度信息,最终所得到的多份速度信息均是这一份信息的原样复制。

综上所述,目前难以利用单个测速探头实现对一个测点进行多种测速技术同步复测,因此急需解决这个问题以满足众多领域的应用需求。

本文对常规光子多普勒测速技术(PDV,国内又称DPS或DISAR)和光学外差光子多普勒测速技术进行了分析,设计了一种基于单个测速探头和单套光路结构便可实现2种测速技术对一个测点进行同步复测的方案,以此研制了一套新型测速装置并在爆轰实验中对其进行了考核。

2 基本原理

由光纤器件构成的光子多普勒测速仪^[5-8]具有测量准确、操作简单、稳定可靠等众多优势,在各个领域均进行了广泛的应用并逐渐成为最主要的速度测量技术。

目前主要有2种PDV测速技术:常规PDV和光学外差PDV,其中常规PDV通常采用的光路结构如图1所示。图1使用单个光源,该光源输出足够功率的探测光 f_0 并通过探头照射到目标上,当目标以速度 V 飞向探头时,目标表面散射光被探头接收到的部分(信号光 f_s)相对于探测光会有频率漂移,即多普勒频移:

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

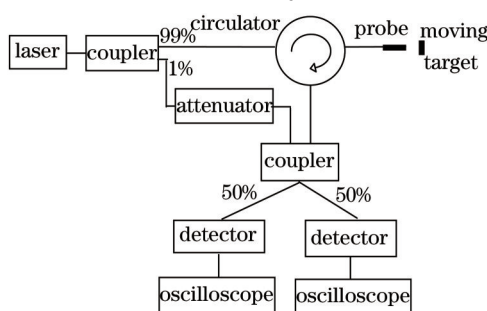


图1 光子多普勒测速仪通常采用的结构

Fig.1 Scheme of photonic Doppler velocimetry

信号光和参考光(来自于探测光光源经光纤分束器分出的小部分光功率,频率与探测光相同)进行干涉后,可得

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

式中 I_s 为信号光光强, I_0 为参考光光强, φ 为两者相位差,从而对干涉信号进行处理可得到 f_d ^[9],进而根据(1)式得到运动目标的速度 V 。

光学外差PDV为性能增强型的一种PDV测速技术,其光路结构与图1类似(基本原理相同),但使用2台激光器:探测光激光器(提供足够功率的探测光)和参考光激光器(提供参考光),且参考光激光器与探测光激光器的工作波长(即频率)有一定的差异,从而可以借助光学外差方法测量目标的速度,以提高短历程、低速过程的测速准确度或大幅度提高速度测量范围。

对于常规PDV通常采用的结构和光学外差PDV所使用的探头,一般具有较低的回波损耗(约-60 dB)和较高的透射率,即注入探头的探测光功率只有不到 $1/10^6$ 被反射回环形器,其余部分全部通过探头照射到目标上,从而可以增大从目标表面反射回的信号光功率,以增强干涉效果。

2 光路结构设计

针对上述问题,提出一种新型的速度测量装置,可以利用单个测速探头和单套光路结构实现对一个测点进行2种测速技术同步复测,其光路结构如图2所示。laser1输出较大功率的探测光,经过环形器和探头(定制探头,内含反射器件)后照射到目标上,并在其表面发生散射,散射光的一部分被探头接收到,并反向传回到环形器和1×2光纤分束器,作为携带有待测目标速度信息的信号光。laser2输出与laser1具有一定波长差异的光信号,并通过光纤分束器进入装置的后端光路形成第1束参考光,由于与探测光具有波长差异,从而可作为光学外差PDV的参考光。laser1输出的探测光进入定制探头时,在其内部反射器件的作用下,小部分反射回环形器和1×2光纤分束器并形成第2束参考光,由于与探测光的波长相同,从而可作为常规PDV的参考光。第1束参考光与信号光在后端光路中发生光学外差PDV所需的干涉效应,第2束参考光与信号光在后端光路中发生常规PDV所需的干涉效应,且2种干涉信息均被包含在光纤分束器输出的一路干涉光里,从而该路干涉光便同时包含了光学外差PDV和常规PDV对待测目标进行探测后获取到的速度信息。干涉光经过探测器和示波器的光电转换和数据记录后,再通过一定的算法对数据进行处理,便可获得待测目标被2种测速技术分别测量到的速度曲线,从而基于单个测速探头和单套光路结构(2种技术共用一套光路)实现了对一个测点进行2种测速技术同步复测。

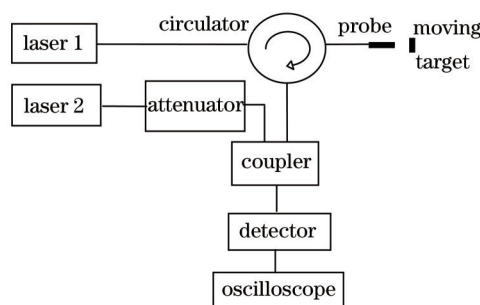


图2 常规PDV和光学外差PDV同步复测的单光路结构

Fig.2 New scheme which combines conventional PDV and heterodyne PDV

如上所述,实现对一个测点进行2种测速技术同步复测的关键器件是特制的光纤测速探头,其工作机制及具体指标具有较为严格且特殊的要求。常规PDV(可以幅度复测的常用结构,如图1所示)和光学外差PDV在单独应用时,通常使用内部没有强反射器件的探头产品,即laser1注入探头的探测光功率仅有不到 $1/10^6$ 被反射回环形器,一般不超过 $1\ \mu\text{W}$ (假如laser1功率为 $1\ \text{W}$)。图2为定制产品光纤测速探头,其内部光纤的端面上镀有具备一定反射率的薄膜,且该反射率可以使反射回环形器的光信号功率限制在 $200\sim 500\ \mu\text{W}$ 范围内(假如laser1功率为 $1\ \text{W}$,则反射率为 10^{-4} 量级)。此外,上述功能也可通过其他方法实现,如探头本身具备一定的回波损耗且其大小等于薄膜反射率($-40\ \text{dB}$ 左右)。由于反射率仍然较小(但远大于之前的常用产品),因此对通过探头照射到待测目标上的探测光功率的影响也较小。

常规PDV和光学外差PDV在各自单独使用时,探测器接收到的参考光仅为某一种技术的参考光,为了达到较好的干涉条件以增强干涉效果,同时使参考光(功率较高)和信号光(功率较弱)合束后的干涉光功率在探测器的最佳工作区间(数百微瓦时探测器的性能可以达到最佳,但不能超出其饱和值,该值一般在 $1\ \text{mW}$ 左右),参考光通常通过衰减器调整为 $400\sim 1\ \mu\text{W}$ 。图2所示方案中,探测器接收到的参考光为2种技术的参考光之和,为避免探测器饱和,2种技术的参考光功率均需小于 $500\ \text{mW}$,同时功率也不能过小,否则探测器难以达到最佳工作性能,因此探头使返回至环形器的光信号功率限制在 $200\sim 500\ \mu\text{W}$ 范围内(常规PDV的参考光),laser2通过衰减器将其输出功率也调整为 $200\sim 500\ \mu\text{W}$ (光学外差PDV的参考光)。

本方案中2种技术均是独立对目标进行测速,并得到各自获取到的速度曲线,真正实现了对一个测点进行2种测速技术同步复测,而非目前通常采用的“伪”复测。此外,本方案在进行复测时仅需要单个探头和单套光路结构,同时只需要单个探测器和单个示波器通道(激光测速技术需要高带宽的探测器和示波器,其单价一般分别为数万元人民币和大约十万元人民币,单位分别为个和通道),与图1相比,大幅度降低了测速系统的结构复杂度、成本和体积。

3 实验研究

通过光学镀膜方法定制了所需光纤测速探头,并基于图2所示的设计搭建了一套测速装置,其中 laser1 为功率 1 W 的窄线宽激光器, laser2 为波长可调谐的 15 mW 窄线宽激光器。此外,使用已有的常规 PDV 样机和光学外差 PDV 样机进行对比实验。

设计并制作了一种可进行考核实验的简易爆轰装置,如图3所示(剖面图),传爆药柱(药量可调整)、空腔(其高度可通过垫片调整)、金属靶(可为不同规格尺寸或不同材料)等部件均为圆柱(或圆片)状,并安装在圆筒状的铝制底座中。底座底部加工有数个圆孔,用于在不同位置安装测速探头(垂直对准靶面)。雷管引爆传爆药柱后产生爆轰波并加载到金属靶上,导致其产生了各类待测目标,而增加空腔的作用是可以使速度曲线的上升沿相对平缓。

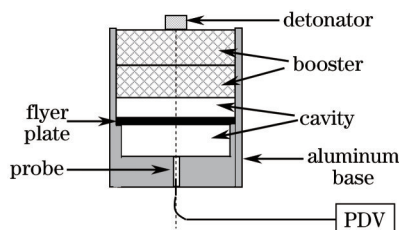


图3 实验装置示意图

Fig.3 Experimental setup

首先测试常规 PDV 样机和外差 PDV 样机(上变频,频差 3.087 GHz)。由于 2 种技术均需要各自独立地使用一个探头,且受探头尺寸(外径一般为几毫米)和实验装置安装要求(探头与待测目标之间的角度会对测量结果产生影响,垂直、正对是应遵守的基本原则,因为此时探头可以最大程度接收到待测目标表面的散射信号光,同时确保测速结果表征其实际速度^[10])的限制,一个测点(一个尺寸较小的待测目标,或者尺寸较大待测目标的某个特定位置)只能被一个探头测量,因此 2 套样机共使用 2 个探头对相邻的 2 个测点各自进行测速。

将铝靶作为待测物体,爆轰后产生铝飞片且飞片开始向探头飞行,常规 PDV 样机和外差式 PDV 样机获取到对应的干涉信号。在各类实验过程中,PDV 干涉信号的幅度可能会出现无法预估的变化,此时对示波器幅度量程的设置提出了较高要求,当幅度量程设置过小时可能会在某些时间段丢失掉幅度较大的信号(信号超出了示波器屏幕),当幅度量程设置过大时可能会影响小信号的幅度分辨率。针对上述问题,一般将 PDV 干涉信号以如图 1 所示的方式用 2×2 光纤分束器分成 2 份,并分别被设置为不同幅度量程的示波器通道采集,其中一个通道设置较大的幅度量程以避免无法采集到大幅度信号,另一个通道设置较小的幅度量程以提高小信号的幅度分辨率,即进行幅度复测。由于仅仅是通过分束器分割干涉信号的功率,则 2 个示波器通道采集到的干涉信号以及利用该信号处理得到的速度数据完全相同,即实际上一个测点仅能通过一种技术获取到一份速度信息,最终所得到的 2 份速度信息均是这一份信息的原样复制。在本次实验中,根据静态调试的结果,将示波器 2 个通道的幅度刻度分别设置为 80 mV/div 和 200 mV/div,其分别采集到的常规 PDV 干涉信号如图 4 所示(外差 PDV 的干涉信号被示波器的另外 2 个通道采集),可见第 1 个通道在 5~20 ms 范围内丢失了数据,第 2 个通道则采集到了完整的信号。

对示波器数据进行处理后可得如图 5 和图 6 所示的飞片速度曲线。从图 5 中可发现,对于常规 PDV,起

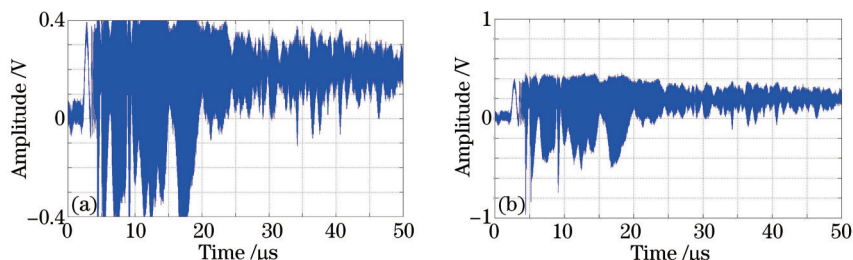


图4 示波器 2 个通道分别记录的干涉信号。(a) 示波器通道 1,幅度刻度 80 mV/div; (b) 示波器通道 2,幅度刻度 200 mV/div

Fig.4 Interference signals recorded by two channels of the oscilloscope. (a) channel-1, 80 mV/div; (b) channel-2, 200 mV/div

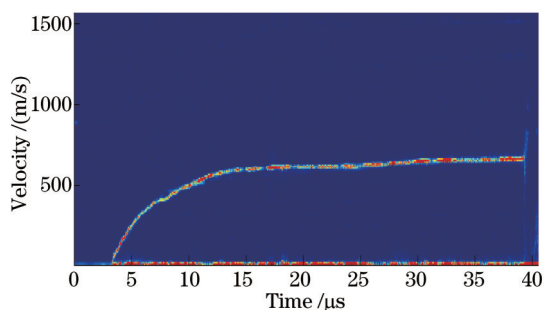


图5 常规PDV测量到的铝飞片速度曲线

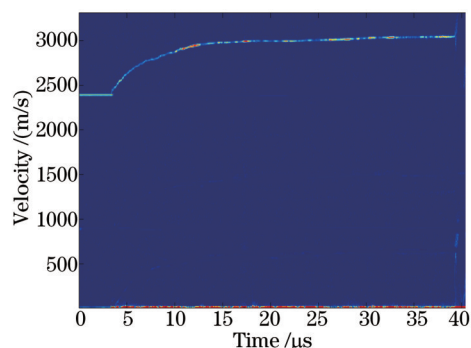


图6 光学外差PDV测量到的铝飞片速度曲线

Fig.5 Velocity curve of a aluminum flyer using conventional PDV

Fig.6 Velocity curve of a aluminum flyer using heterodyne PDV

爆前速度为零,起爆后其速度以零为基准逐渐增大。从图6中可发现,对于光学外差PDV,起爆前待测靶处于静止状态,但此时却存在着一个不为零的基线速度(即坐标轴纵向上的偏置量),该速度由双光源预设的频率差异(即2个激光器输出激光的拍频)产生,即3.087 GHz拍频通过(1)式换算成基线速度2393.5 m/s。从图6中还可发现,对于光学外差PDV,起爆后飞片的速度信号以基线速度为基准逐渐增大,要得到此时实际的速度大小,需要通过数据处理将外差PDV速度信号的幅度值减去基线值,即实际速度等于外差PDV速度减去2393.5 m/s。由于探头安装位置相邻,图5和图6中2个测点(可能为2个小飞片,也可能为一个飞片的2个不同部位)的速度变化历史相近似,运动过程的持续时间均约为35 ms,达到的最高速度均约为650 m/s。

其次再测试所搭建的新型速度测量装置,此时仅需安装一个定制的光纤测速探头,同时通过调节 laser2 的波长实现上变频(2个光源的频差为2.587 GHz,即对应基线速度为2005.6 m/s)。

将另一块铝靶(与第一次实验所用铝靶相比厚度不同)作为待测物体,爆轰后产生铝飞片且飞片开始向探头飞行,新型速度测量装置获取到对应的干涉信号,对其数据处理后可得如图7所示的速度曲线。从图7中可发现,基于本方案搭建的装置,在单发实验中测量到的速度信号有2条,其中一条(坐标区域下部,无基线)为图5所示常规PDV技术所测量到的速度信号,另一条(坐标区域上部,有基线)为图6所示光学外差PDV技术所测量到的速度信号。将图7中外差PDV速度信号的幅度值减去基线值2005.6 m/s,得到图8所示的2种技术分别测量到的待测目标速度曲线(并非彼此的原样复制),可见搭建的新型速度测量装置测量到的2条速度曲线较为吻合,从而可以通过速度复测进行对比分析并相互验证。此外,本装置仍然可以使用图4所示的方式,在不影响速度复测的前提下同时进行幅度复测,以确保获取到测试信号。

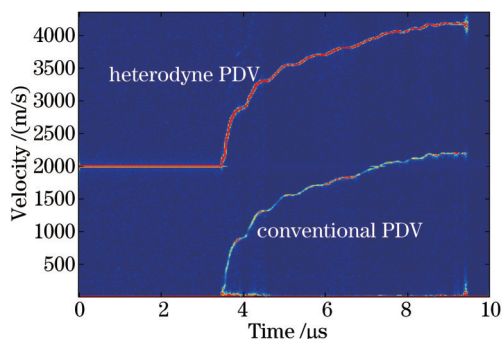


图7 新型速度测量装置测量到的铝飞片速度曲线

Fig.7 Velocity curves of a aluminum flyer using the novel velocimetry

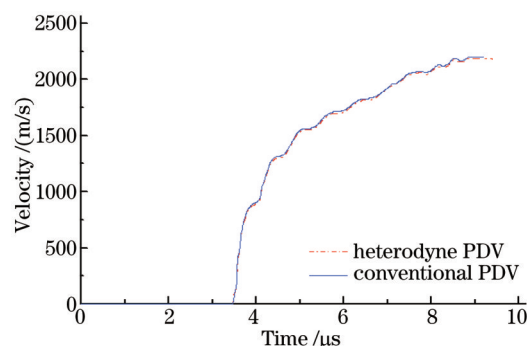


图8 新型速度测量装置测量到的铝飞片速度曲线(数据处理后)

Fig.8 Velocity curves of a aluminum flyer using the novel velocimetry and signal processing

运动目标的速度信号通常存在一些特征点,例如速度曲线起跳时刻、某时刻速度值突发性地大幅度增加或减小(又称速度再次起跳)、2次速度起跳点之间的时间差、某时刻速度曲线分散成多条(物理上表征此时运动目标从一个整体裂开成数个具有速度差异的子目标)等,这些特征点对研究物理现象及其过程极为关键。当速度信号某个特征点的实测数据与物理研究者进行理论分析和数值模拟的结果不一致时,如果对目标仅使用一种技术测速,则无法排除该测试技术本身出现错误的可能性。而当对一个目标使用2种不同的

技术测速且测量结果相互吻合时,则可认为物理现象及其过程确实如此;不吻合时物理研究者需要重新进行分析或者调整模拟参数。综上所述,对一个目标使用2种不同的技术测速,其结果可以对比分析并相互验证,从而确保测量数据的准确性和可靠性,并以此促进物理研究者解读真实的物理现象及其过程,避免误判(尤其是理论结果与实测数据不一致时)。通过对图8的数据进行分析,可知速度信号在3.5 μs左右首次起跳,并在4.0、4.6、5.3、6.0 μs等时间点附近再次起跳,同时飞片运动过程的持续时间约为6 μs,达到的最高速度约为2200 m/s。2种技术测得的上述数据完全吻合,证明该速度信号表征了真实的物理现象及过程。

利用搭建的新型速度测量装置和单个定制测速探头进行第3次实验,参数设置与第2次实验相同,但使用质地更软的铅靶作为待测物体。起爆后,铅靶受爆轰波作用产生了喷射状的粒子群(其中单个粒子的尺寸远远小于探头所发出光束的直径),同时各个粒子在尺寸、飞行姿态和速度方面均存在差异。新型速度测量装置获取到了如图9所示的铅粒子群喷射时的速度曲线,可见在单发实验中测量到的速度信号仍然有2条,其中一条(坐标区域下部,无基线)为常规PDV所测量到的速度信号,另一条(坐标区域上部,有基线)为光学外差PDV所测量到的速度信号。此外,从图9中可看出,由于粒子群中的铅粒子数量非常大,同时受尺寸、飞行姿态等因素的影响,导致速度值有差异的粒子的数量非常大且其中的速度差距已无法区分,即大量铅粒子的多条速度曲线整体构成了一条具有一定宽度的速度带。通过对图9的数据进行分析,可知铅粒子群的速度从零快速增大至0.8 km/s~1.4 km/s,再持续飞行了17 μs。第3次实验也验证了本装置具有较为优异的速度分辨率和空间分辨率。

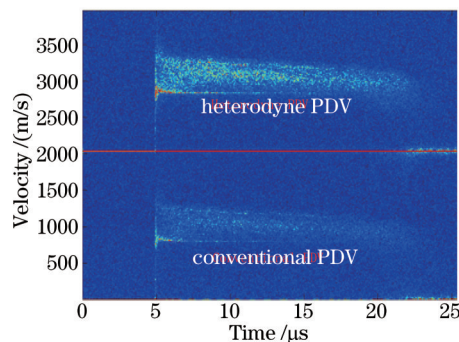


图9 所搭建的新型速度测量装置测量到的铅粒子群速度曲线

Fig.9 Velocity curves of a large numbers of lead granules using the novel velocimetry

4 结 论

对常规激光测速技术和光学外差激光测速技术进行了说明,并对一个测点只能在多种测速技术中选择其中一种进行测量,难以实现速度复测而只能完成幅度“伪”复测的问题进行了详细分析。以分析结果为基础,设计了一种基于单个光纤测速探头和单套光路结构便可实现2种测速技术对一个测点进行同步复测的方案,并从理论上分析了其可行性。

以所设计的方案为基础,采用商用的光纤元器件研制了一套新型的速度测量装置,并利用铝飞片和铅粒子群作为待测目标对该装置的速度复测能力进行了考核。经测试,本装置仅使用单个光纤测速探头和单个光路结构,便实现了对一个测点进行2种测速技术同步复测的要求,且对各类目标均实现了优异的测量效果。

参 考 文 献

- 1 Liu Shouxian, Lei Jiangbo, Chen Guanghua, *et al.*. Simultaneous line imaging and plane framing imaging velocity interferometer for shock physics[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108007.
刘寿先, 雷江波, 陈光华, 等. 同时线成像和分幅面成像任意反射面速度干涉仪测速技术[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108007.
- 2 Xu Tao, Wang Feng, Peng Xiaoshi, *et al.*. Optical system design of imaging velocity interferometer system for any reflector[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0722001.
徐 涛, 王 峰, 彭晓世, 等. 成像型任意反射面速度干涉仪系统的光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0722001.
- 3 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye, *et al.*. Active high-accuracy shock-wave velocity measure technique in laser indirect-drive

- experiment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1114004.
- 王 峰, 彭晓世, 刘慎业, 等. 辐射驱动下主动式高精度冲击波速度精密诊断技术[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1114004.
- 4 A R Valenzuela, G Rodriguez, S A Clarke, *et al.*. Photonic Doppler velocimetry of laser-ablated ultrathin metals[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(1): 013101.
- 5 D H Dolana. Accuracy and precision in photonic Doppler velocimetry[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(5): 053905.
- 6 P Mercier, J Benier, P A Frugier, *et al.*. Heterodyne velocimetry and detonics experiments[C]. 28th International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, 2009, 7126: 712610.
- 7 Li Jianzhong, Liu Shouxian, Liu Jun, *et al.*. Measuring multiple targets' velocities with just one probe of photonic Doppler velocimetry [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105004.
- 李建中, 刘寿先, 刘 俊, 等. 光子多普勒测速仪的单探头多目标测速能力研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105004.
- 8 Li Jianzhong, Liu Shouxian, Liu Jun, *et al.*. Research on multiplex technology and experiment of multiplexed photonic Doppler velocimetry[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105009.
- 李建中, 刘寿先, 刘 俊, 等. 多路复用光子多普勒测速复用方案分析及实验研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105009.
- 9 Shouxian Liu, Detian Wang, Tao Li. Analysis of photonic Doppler velocimetry data based on the continuous wavelet transform[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(2): 023103.
- 10 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.

栏目编辑: 王晓琰