



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102721824 A

(43) 申请公布日 2012. 10. 10

(21) 申请号 201210216938. 8

(22) 申请日 2012. 06. 27

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路 15 号

(72) 发明人 宋宏伟 黄晨光 王健 魏延鹏 吴先前

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理 事务所 (普通合伙) 11390

代理人 王艺

(51) Int. Cl.

G01P 3/36 (2006. 01)

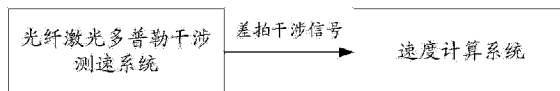
权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 6 页

(54) 发明名称

针对具有低速且高加速度特征的质点速度测量方法及装置

(57) 摘要

本发明公开一种针对具有低速且高加速度特征的质点速度测量方法及装置,对于速度为10^0~10^1m/s量级,并且加速度在10^9m/s^2以上量级的质点表速度,本发明采用光纤激光多普勒干涉测速硬件系统与采用特定流程的短时傅里叶变换或连续小波变换时频变换数据处理相结合的方法,实现具有上述特征运动靶面质点速度的高时间分辨率和速度分辨率测试,其中时间分辨率为0.2ns,速度精度为误差不超过0.1%。而且,本发明可以同时测试多路质点速度,测试效率高,成本较低,易于实现。



1. 一种针对具有低速且高加速度特征的质点速度测量方法,包括:

步骤 1, 光纤激光多普勒干涉测速系统对速度为 $10^0 \sim 10^1 \text{m/s}$ 量级, 并且加速度在 10^9m/s^2 以上量级的运动靶面质点速度进行测量, 输出差拍干涉信号至速度计算系统;

步骤 2, 所述速度计算系统采用短时傅里叶变换或连续小波变换对所述差拍干涉信号进行时频变换数据处理, 以实现具有上述特征的运动靶面质点速度的高时间分辨率和速度分辨率测试。

2. 如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于,

所述光纤激光多普勒干涉测速系统包括: 激光器、光纤环形器、聚焦透镜、探测器和示波器, 所述步骤 1 包括:

激光器发射通讯激光至光纤环形器的第一端口;

所述光纤环形器将接收到的通讯激光从其第二端口发送至聚焦透镜;

所述聚焦透镜将接收到的通讯激光的一部分作为参考光从其端面反射回所述光纤环形器的第二端口, 另一部分输出至运动靶面; 并将从运动靶面反射回的信号光发送至光纤环形器的第二端口;

所述光纤环形器将接收到的参考光和信号光从其第三端口发送至探测器;

所述探测器探测到所述参考光和信号光产生的差拍干涉信号, 并发送至示波器;

所述示波器记录所述差拍干涉信号, 并将所记录的差拍干涉信号发送至速度计算系统。

3. 如权利要求 1 所述的方法, 其特征在于,

在所述步骤 2 中, 所述速度计算系统针对运动靶面的质点速度特征以及差拍干涉信号的特征选择短时傅里叶变换或连续小波变换进行时频变换数据处理; 其中, 对于质点速度波动剧烈, 信噪比大于 5dB 的差拍干涉信号, 选择连续小波变换进行数据处理; 对于质点速度波动较为平稳, 信噪比小于 5dB 的干涉信号, 选择短时傅里叶变换进行数据处理。

4. 如权利要求 3 所述的方法, 其特征在于,

所述质点速度波动剧烈是指: 质点速度波动的每个周期中, $v_{\min} \leq 0.2v_{\max}$;

所述质点速度波动较为平稳是指: 质点速度波动的每个周期中, $v_{\min} \geq 0.8v_{\max}$;

其中, v_{\min} 为波谷对应的质点速度, v_{\max} 为波峰对应的质点速度。

5. 如权利要求 1~4 中任意一项所述的方法, 其特征在于,

采用连续小波变换对所述差拍干涉信号进行时频变换数据处理包括:

对所述差拍干涉信号进行滤波处理;

分别对预处理后的差拍干涉信号和原始的差拍干涉信号进行小波变换, 得到它们各自的小波系数, 再把对应的小波系数相乘;

用局部模极大值法进行小波脊线的提取, 得到质点速度曲线。

6. 如权利要求 5 所述的方法, 其特征在于,

在对所述差拍干涉信号进行滤波处理的步骤之前, 所述方法还包括:

对所述差拍干涉信号进行短时傅里叶变换处理, 并根据得到的结果估算质点速度的上限和下限, 并计算小波基的中心频率及带宽, 然后根据短时傅里叶变换的时频图, 选择最优的小波基;

在对所述差拍干涉信号进行滤波处理的步骤中, 根据估算的质点信号速度的上限和下

限,设定滤波速度的上限和下限;

在分别对预处理后的差拍干涉信号和原始的差拍干涉信号进行小波变换的步骤中,采用所述最优的小波基进行小波变换。

7. 如权利要求 5 所述的方法,其特征在于,

在用局部模极大值法进行小波脊线的提取,得到质点速度曲线的步骤中,找到时频谱的模极大值,作为可靠的小波脊线的时间起点和差频频率起点,再根据加速度的变化范围,设置差频频率的搜寻范围,求出局部极大值,找到时间范围内各时刻的差频频率,从而实现小波脊线的提取。

8. 一种针对具有低速且高加速度特征的质点速度测量装置,其特征在于,包括光纤激光多普勒干涉测速系统和速度计算系统,

所述光纤激光多普勒干涉测速系统用于对速度为 $10^0 \sim 10^1 \text{m/s}$ 量级,并且加速度在 10^9m/s^2 以上量级的运动靶面质点速度进行测量,输出差拍干涉信号至速度计算系统;

所述速度计算系统用于采用短时傅里叶变换或连续小波变换对所述差拍干涉信号进行时频变换数据处理,以实现具有上述特征的运动靶面质点速度的高时间分辨率和速度分辨率测试。

9. 如权利要求 8 所述的装置,其特征在于,

所述光纤激光多普勒干涉测速系统包括:激光器、光纤环形器、聚焦透镜、探测器和示波器,其中,激光器、光纤环形器、探测器和示波器依次相连,聚焦透镜与光纤环形器相连;

所述激光器用于发射通讯激光至光纤环形器的第一端口;

所述光纤环形器用于将接收到的通讯激光从其第二端口发送至聚焦透镜,以及,将接收到的参考光和信号光从其第三端口发送至探测器;

所述聚焦透镜用于将接收到的通讯激光的一部分作为参考光从其端面反射回所述光纤环形器的第二端口,另一部分输出至运动靶面;并将从运动靶面反射回的信号光发送至光纤环形器的第二端口;

所述探测器用于探测所述参考光和信号光产生的差拍干涉信号,并发送至示波器;

所述示波器用于记录所述差拍干涉信号,并将所记录的差拍干涉信号发送至速度计算系统。

10. 如权利要求 9 所述的装置,其特征在于,

所述光纤激光多普勒干涉测速系统还包括光电转换模块、显示模块、第一分光模块和第二分光模块;所述聚焦透镜、光纤环形器、探测器和第二分光模块一一对应,均为 N 个, N 大于等于 1;

所述第一分光模块的入端与所述激光器相连,所述第一分光模块的 N 个出端分别与 N 个光纤环形器的第一端口相连,将所述激光器发射的通讯激光均分给 N 个光纤环形器;

每个第二分光模块的入端分别与对应的光纤环形器的第三端口相连,所述第二分光模块的一个出端与对应的探测器相连,另一个出端与光电转换模块相连;

所述光电转换模块用于将接收到的光信号转换成电信号,并发送给显示模块进行显示。

针对具有低速且高加速度特征的质点速度测量方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及质点速度测量领域,尤其涉及一种针对具有低速且高加速度特征的质点速度测量方法。

背景技术

[0002] 爆炸与冲击产生的强动载荷具有高强度、短历时和小尺度的特点,对测量技术和测试装备提出了更高的要求。最近,高速摄影技术、X 闪光照相技术、高速数字示波器以及相关的传感器、光源和快电子学设备已经开始应用于爆炸与冲击实验。诊断技术发展的主流是以激光和光电子学技术为基础的快响应、高分辨率、高灵敏度的非接触测量技术,例如各种激光干涉测量和光谱技术(速度和位移干涉仪、VISAR、FPI 等)、散斑技术、激光诱导荧光和拉曼光谱技术、光学窗口技术等。

[0003] 自由表面速度测量是爆炸与冲击实验研究的另一重点与难点。VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector,任意反射面测速)系统是目前应用最广泛的一种测量工具。随着科学技术的进步,VISAR 系统也不断改进与更新,现代光纤技术和相关光电子器件已开始引入到该测试技术中,在干涉测速原理上也实现了较大的突破,大大降低了干涉系统对照明光源相干性和光强的要求。

[0004] 但是,在冲击波物理中,往往要面对具有低速且高加速度特征的质点速度测量问题。对于速度为 $10^0 \sim 10^4$ m/s 量级,并且加速度在 10^9 m/s² 以上量级的自由表面速度,VISAR 等测量手段却难以满足精度要求。

发明内容

[0005] 本发明针对现有技术中无法精确测量具有低速且高加速度特征的质点速度的问题,提出一种针对具有低速且高加速度特征的质点速度测量方法及装置,依据信号特征有针对性地采取特定步骤的数据处理方法,能够较准确地测量具有低速且高加速度特征的质点速度。

[0006] 为了解决上述问题,本发明提供一种针对具有低速且高加速度特征的质点速度测量方法,包括:

[0007] 步骤 1,光纤激光多普勒干涉测速系统对速度为 $10^0 \sim 10^4$ m/s 量级,并且加速度在 10^9 m/s² 以上量级的运动靶面质点速度进行测量,输出差拍干涉信号至速度计算系统;

[0008] 步骤 2,所述速度计算系统采用短时傅里叶变换或连续小波变换对所述差拍干涉信号进行时频变换数据处理,以实现具有上述特征的运动靶面质点速度的高时间分辨率和速度分辨率测试。

[0009] 优选地,上述方法具有以下特点:

[0010] 所述光纤激光多普勒干涉测速系统包括:激光器、光纤环形器、聚焦透镜、探测器和示波器,所述步骤 1 包括:

[0011] 激光器发射通讯激光至光纤环形器的第一端口;

- [0012] 所述光纤环形器将接收到的通讯激光从其第二端口发送至聚焦透镜；
- [0013] 所述聚焦透镜将接收到的通讯激光的一部分作为参考光从其端面反射回所述光纤环形器的第二端口，另一部分输出至运动靶面；并将从运动靶面反射回的信号光发送至光纤环形器的第二端口；
- [0014] 所述光纤环形器将接收到的参考光和信号光从其第三端口发送至探测器；
- [0015] 所述探测器探测到所述参考光和信号光产生的差拍干涉信号，并发送至示波器；
- [0016] 所述示波器记录所述差拍干涉信号，并将所记录的差拍干涉信号发送至速度计算系统。
- [0017] 优选地，上述方法具有以下特点：
- [0018] 在所述步骤 2 中，所述速度计算系统针对运动靶面的质点速度特征以及差拍干涉信号的特征选择短时傅里叶变换或连续小波变换进行时频变换数据处理；其中，对于质点速度波动剧烈，信噪比大于 5dB 的差拍干涉信号，选择连续小波变换进行数据处理；对于质点速度波动较为平稳，信噪比小于 5dB 的干涉信号，选择短时傅里叶变换进行数据处理。
- [0019] 优选地，上述方法具有以下特点：
- [0020] 所述质点速度波动剧烈是指：质点速度波动的每个周期中， $v_{\min} \leq 0.2v_{\max}$ ；
- [0021] 所述质点速度波动较为平稳是指：质点速度波动的每个周期中， $v_{\min} \geq 0.8v_{\max}$ ；
- [0022] 其中， v_{\min} 为波谷对应的质点速度， v_{\max} 为波峰对应的质点速度。
- [0023] 优选地，上述方法具有以下特点：
- [0024] 采用连续小波变换对所述差拍干涉信号进行时频变换数据处理包括：
- [0025] 对所述差拍干涉信号进行滤波处理；
- [0026] 分别对预处理后的差拍干涉信号和原始的差拍干涉信号进行小波变换，得到它们各自的小波系数，再把对应的小波系数相乘；
- [0027] 用局部模极大值法进行小波脊线的提取，得到质点速度曲线。
- [0028] 优选地，上述方法具有以下特点：
- [0029] 在对所述差拍干涉信号进行滤波处理的步骤之前，所述方法还包括：
- [0030] 对所述差拍干涉信号进行短时傅里叶变换处理，并根据得到的结果估算质点速度的上限和下限，并计算小波基的中心频率及带宽，然后根据短时傅里叶变换的时频图，选择最优的小波基；
- [0031] 在对所述差拍干涉信号进行滤波处理的步骤中，根据估算的质点信号速度的上限和下限，设定滤波速度的上限和下限；
- [0032] 在分别对预处理后的差拍干涉信号和原始的差拍干涉信号进行小波变换的步骤中，采用所述最优的小波基进行小波变换。
- [0033] 优选地，上述方法具有以下特点：
- [0034] 在用局部模极大值法进行小波脊线的提取，得到质点速度曲线的步骤中，找到时频谱的模极大值，作为可靠的小波脊线的时间起点和差频频率起点，再根据加速度的变化范围，设置差频频率的搜寻范围，求出局部极大值，找到时间范围内各时刻的差频频率，从而实现小波脊线的提取。
- [0035] 为了解决上述问题，本发明提供一种针对具有低速且高加速度特征的质点速度测量装置，包括光纤激光多普勒干涉测速系统和速度计算系统，

[0036] 所述光纤激光多普勒干涉测速系统用于对速度为 $10^0 \sim 10^1 \text{m/s}$ 量级, 并且加速度在 10^9m/s^2 以上量级的运动靶面质点速度进行测量, 输出差拍干涉信号至速度计算系统;

[0037] 所述速度计算系统用于采用短时傅里叶变换或连续小波变换对所述差拍干涉信号进行时频变换数据处理, 以实现具有上述特征的运动靶面质点速度的高时间分辨率和速度分辨率测试。

[0038] 优选地, 上述装置具有以下特点:

[0039] 所述光纤激光多普勒干涉测速系统包括: 激光器、光纤环形器、聚焦透镜、探测器和示波器, 其中, 激光器、光纤环形器、探测器和示波器依次相连, 聚焦透镜与光纤环形器相连;

[0040] 所述激光器用于发射通讯激光至光纤环形器的第一端口;

[0041] 所述光纤环形器用于将接收到的通讯激光从其第二端口发送至聚焦透镜, 以及, 将接收到的参考光和信号光从其第三端口发送至探测器;

[0042] 所述聚焦透镜用于将接收到的通讯激光的一部分作为参考光从其端面反射回所述光纤环形器的第二端口, 另一部分输出至运动靶面; 并将从运动靶面反射回的信号光发送至光纤环形器的第二端口;

[0043] 所述探测器用于探测所述参考光和信号光产生的差拍干涉信号, 并发送至示波器;

[0044] 所述示波器用于记录所述差拍干涉信号, 并将所记录的差拍干涉信号发送至速度计算系统。

[0045] 优选地, 上述装置具有以下特点:

[0046] 所述光纤激光多普勒干涉测速系统还包括光电转换模块、显示模块、第一分光模块和第二分光模块; 所述聚焦透镜、光纤环形器、探测器和第二分光模块一一对应, 均为 N 个, N 大于等于 1;

[0047] 所述第一分光模块的入端与所述激光器相连, 所述第一分光模块的 N 个出端分别与 N 个光纤环形器的第一端口相连, 将所述激光器发射的通讯激光均分给 N 个光纤环形器;

[0048] 每个第二分光模块的入端分别与对应的光纤环形器的第三端口相连, 所述第二分光模块的一个出端与对应的探测器相连, 另一个出端与光电转换模块相连;

[0049] 所述光电转换模块用于将接收到的光信号转换成电信号, 并发送给显示模块进行显示。

[0050] 对于速度为 $10^0 \sim 10^1 \text{m/s}$ 量级, 并且加速度在 10^9m/s^2 以上量级的质点速度, 本发明实现了具有上述特征运动靶面质点速度的高时间分辨率和速度分辨率测试, 其中时间分辨率为 0.2ns , 速度精度为误差不超过 0.1% 。而且, 本发明可以同时测试多路质点速度, 测试效率高, 成本较低, 易于实现。

附图说明

[0051] 图 1 为本发明实施例的针对具有低速且高加速度特征的质点速度测量装置示意图;

[0052] 图 2 为本发明实施例的光纤激光多普勒干涉测速系统示意图;

- [0053] 图 3 为本发明实施例的多路测试的光纤激光多普勒干涉测速系统示意图；
- [0054] 图 4 为本发明应用实例的多路测试的光纤激光多普勒干涉测速系统示意图；
- [0055] 图 5 为本发明应用实例的主机箱的示意图；
- [0056] 图 6 为本发明应用实例的 LSP 自由表面速度测量示意图；
- [0057] 图 7 为本发明应用实例的三组 LSP 自由表面速度测量结果；
- [0058] 图 8 为本发明应用实例的 SHPB 自由表面速度测量示意图,其中 (a) 为测量入射杆端面纵向速度;(b) 为测量试样径向速度；
- [0059] 图 9 为本发明应用实例的 SHPB 测量不同处理方法比较,其中 (a) 为测量入射杆端面纵向速度得到的测量结果;(b) 测量试样径向速度测得的测量结果。

具体实施方式

[0060] 下文中将结合附图对本发明的实施例进行详细说明。需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互任意组合。

[0061] 对于速度为 $10^0 \sim 10^1 \text{m/s}$ 量级,并且加速度在 10^9m/s^2 以上量级的质点表速度,本发明采用光纤激光多普勒干涉测速硬件系统与短时傅里叶变换或连续小波变换等时频变换数据处理软件相结合的方法,实现具有上述特征运动靶面质点速度的高时间分辨率和速度分辨率测试,其中时间分辨率为 0.2ns ,速度精度为误差不超过 0.1% 。

[0062] 如图 1 所示,本发明的针对具有低速且高加速度特征的质点速度测量装置,包括光纤激光多普勒干涉测速系统和速度计算系统,其中,

[0063] 所述光纤激光多普勒干涉测速系统对速度为 $10^0 \sim 10^1 \text{m/s}$ 量级,并且加速度在 10^9m/s^2 以上量级的运动靶面质点速度进行测量,输出差拍干涉信号至速度计算系统；

[0064] 所述速度计算系统采用短时傅里叶变换或连续小波变换对所述差拍干涉信号进行时频变换数据处理,以实现具有上述特征的运动靶面质点速度的高时间分辨率和速度分辨率测试。

[0065] 如图 2 所示,本发明实施例的光纤激光多普勒干涉测速系统包括:激光器、光纤环形器、聚焦透镜、探测器和示波器,其中,激光器、光纤环形器、探测器和示波器依次相连,聚焦透镜与光纤环形器相连;其中,

[0066] 激光器发射通讯激光(其初始频率为 f_0)至光纤环形器的第一端口；

[0067] 所述光纤环形器将接收到的通讯激光从其第二端口发送至聚焦透镜；

[0068] 所述聚焦透镜将接收到的通讯激光的一部分作为参考光(其频率仍为 f_0)从其端面反射回所述光纤环形器的第二端口,另一部分输出至运动靶面;并将从运动靶面反射回的信号光(因多普勒频移效应而具有频率 f_0)发送至光纤环形器的第二端口；

[0069] 所述光纤环形器将接收到的参考光和信号光从其第三端口发送至探测器；

[0070] 所述探测器探测到所述参考光和信号光产生的差拍干涉信号,并发送至示波器；

[0071] 所述示波器记录所述差拍干涉信号,并将所记录的差拍干涉信号发送至速度计算系统。

[0072] 参考光和信号光产生差拍干涉信号,被探测器探测和示波器记录,其瞬时光强为

[0073]

$$I(t) = I_0(t) + I_b(t) + 2\sqrt{I_0(t)I_b(t)} \cos \left[\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^t u(t)dt + \varphi_0 \right] \quad (1)$$

[0074] 其中, $I_0(t)$ 和 $I_b(t)$ 分别为参考光和信号光光强幅值, $u(t)$ 为运动靶面瞬时质点速度, λ 为激光波长, φ_0 为初始相位差。运动靶面的质点速度为

$$u(t) = \frac{\lambda}{2} [f_b(t) - f_0] = \frac{\lambda}{2} \Delta f_b(t) \quad (2)$$

[0076] $\Delta f_b(t)$ 为拍频, 由瞬时干涉条纹的疏密决定, 可取相邻两个波峰或波谷时间间隔的倒数。可见, 速度历程隐藏在干涉信号的频域内, 而与光强变化无关, 因此系统的抗干扰能力较强。主要的系统误差来源于激光器波长的不稳定性 and 基频噪声。

[0077] 在一优选实例中, 该光纤激光多普勒干涉测速系统采用美国 JDSU 公司 CQF938/400 型窄线宽通讯激光器, 输出光的波长为 1550nm, 线宽为 200kHz, 最大输出功率 100mW。探测器采用 New Focus 公司 1544-A 型 InGaAs PIN 产品, 带宽为 12GHz; 示波器采用 Lecoy 公司 WaveMaster 808Zi 型产品, 带宽为 8GHz, 单通道最大写入速度 40Gs/s。

[0078] 如图 3 所示, 可以增加分光器件, 对图 2 实施例进行扩展, 实现多路(N 路)测量。其中, 增加一个第一分光模块, 聚焦透镜、光纤环形器和探测器一一对应, 均为 N 个, N 大于等于 1。

[0079] 所述第一分光模块的入端与所述激光器相连, 所述第一分光模块的 N 个出端分别与 N 个光纤环形器的第一端口相连, 将所述激光器发射的通讯激光均分给 N 个光纤环形器。N 个探测器均接到同一个示波器上进行记录。

[0080] 另外, 可以增加 N 个第二分光模块, 实现对 N 路光路的监测显示, 如图 3 所示, 每个第二分光模块的入端分别与对应的光纤环形器的第三端口相连, 所述第二分光模块的一个出端与对应的探测器相连, 另一个出端与光电转换模块相连; 光电转换模块将接收到的光信号转换成电信号, 并发送给显示模块进行显示。

[0081] 如图 4~图 5 所示, 为本发明的一优选实例, 采用两路光路测量, 分光器件采用耦合器。

[0082] 如图 4 所示, 实验对象可放在第一微调架或第二微调架上, 聚焦透镜采用自聚焦棒(包括第一自聚焦棒和第二自聚焦棒), 第一探测器和第二探测器均连接示波器。测量时, 采用实验测量通过激光脉宽上升沿同步触发。

[0083] 如图 5 所示, 在图 4 中的主机箱内部, 包含有: 激光源驱动电路板(含激光器)、为激光器制冷的制冷电路板、显示电路板、耦合器(第一耦合器、第二耦合器和第三耦合器)、环形器(第一环形器和第二环形器)、光电转换电路板和触发处理电路板。

[0084] 其中, 显示电路板可用于四个显示——驱动电流、制冷电流、两个探测点的光电流。

[0085] 光电转换电路板将输入的光信号转换为电信号, 并将光电流放大。

[0086] 触发处理电路板用于触发信号的处理。

[0087] 第一耦合器的分光比为 50%:50%, 第二耦合器和第三耦合器的分光比为 90%:10%。

[0088] 速度计算系统针对运动靶面的质点速度特征以及差拍干涉信号的特征选择短时傅里叶变换或连续小波变换进行时频变换数据处理; 其中, 对于质点速度波动剧烈, 信噪比大于 5dB 的差拍干涉信号, 选择连续小波变换进行数据处理; 对于质点速度波动较为平稳,

信噪比小于 5dB 的干涉信号,选择短时傅里叶变换进行数据处理。

[0089] 所述质点速度波动剧烈是指:质点速度波动的每个周期中, $v_{\min} \leq 0.2v_{\max}$;

[0090] 所述质点速度波动较为平稳是指:质点速度波动的每个周期中, $v_{\min} \geq 0.8v_{\max}$;

[0091] 其中, v_{\min} 为波谷对应的质点速度, v_{\max} 为波峰对应的质点速度。

[0092] (1) 基于短时傅里叶进行数据处理时:

[0093] 通过选取一个固定宽度的滑动窗口,将非平稳信号逐段截取为近似平稳的信号,然后分别对截得的信号进行傅里叶变换,得到每段中的频谱,进而得到运动靶面的质点速度。

[0094] 其基本定义式为

[0095] $STFT(\tau, f) = \int x(t)g(t-\tau)\exp(-i2\pi ft)dt$ (3)

[0096] $x(t)$ 表示信号, $g(t-\tau)$ 表示中心在 τ 处的窗函数。该 $STFT(\tau, f)$ 即指上文 $\Delta f_b(t)$ 拍频。在处理时,取窗口函数为 Hamming 窗,窗函数受到 Heisenberg 不确定准则的限制,其时间分辨率 Δt 和频率分辨率 Δf 满足

[0097] $\Delta f \cdot \Delta t = 1$ (4)

[0098] 可见,STFT 窗函数的时间与频率分辨率不能同时达到最优。

[0099] (2) 基于连续小波变换进行数据处理时:

[0100] 连续小波变换具有时频窗口可调的性质,在低频时使用较宽的窗口,在高频时使用较窄的窗口,因而在时域和频域上都有较好的分辨率,能更好地分析非平稳信号的时频特性。定义小波变换

[0101] $W_{\psi}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt$ (5)

[0102] 其中, $x(t)$ 表示干涉信号, $a \in \mathbb{R}$ (实数)且 $a \neq 0$, a 为尺度因子,表示与频率相关的伸缩, b 为时间平移因子。在 (a, b) 空间内得到 $\max |W_{\psi}(a, b)|$ 的路径称为脊线,由此可得瞬时频响。时频变换常用的小波基为修正的 Morlet 小波或者修正的高斯小波,其时频窗口满足

[0103] $\Delta f \cdot \Delta t = 1/4\pi$ (6)

[0104] 通过与式 (4) 对比可见, CWT 除了具有可变的窗口外,其时频分辨率也高于 STFT。

[0105] 采用连续小波变换对差拍干涉信号进行时频变换数据处理包括如下步骤:

[0106] (1) 对所述差拍干涉信号进行滤波处理;

[0107] (2) 分别对预处理后的差拍干涉信号和原始的差拍干涉信号进行小波变换,得到它们各自的小波系数,再把对应的小波系数相乘;

[0108] (3) 用局部模极大值法进行小波脊线的提取,得到质点速度曲线。

[0109] 其中,步骤(1)之前,还可对所述差拍干涉信号进行短时傅里叶变换处理,并根据得到的结果估算质点速度的上限和下限,并计算小波基的中心频率及带宽,然后根据短时傅里叶变换的时频图,选择最优的小波基;

[0110] 在步骤(1)中,根据估算的质点信号速度的上限和下限,设定滤波速度的上限和下限;

[0111] 在步骤(2)中,采用所述最优的小波基进行小波变换。

[0112] 在步骤(3)中,找到时频谱的模极大值,作为可靠的小波脊线的时间起点和差频

频率起点,再根据加速度的变化范围,设置差频频率的搜寻范围,求出局部极大值,找到时间范围内各时刻的差频频率,从而实现小波脊线的提取。

[0113] 我们设计了两类试验,即激光冲击强化(LSP)和霍普金森杆(SHPB)试验,分别对LSP自由表面速度和SHPB端面及试样径向速度进行了测量。在LSP研究中,通常激光脉宽为几个纳秒,压力持续作用时间为十几个纳秒,弹性前驱波到达毫米量级厚度的靶材背表面所需的时间约为一两百个纳秒,在十几个纳秒内自由表面速度就由几米每秒上升至数百米每秒。因此,LSP自由表面测速对测试设备的灵敏度、时间分辨率和频率响应范围都提出了非常高的要求。Berther等人曾经尝试采用VISAR进行测量,但未能观察到数值计算能够模拟出的弹性前驱波。Arrigoni等人采用Fabry-Perot干涉仪初步观测到了LSP背表面弹性前驱波,但Fabry-Perot干涉仪价格过于昂贵。在SHPB试验中,端面速度和试样径向速度分别仅有十几米每秒和几米每秒,特别是在对后者的测量中出现较大的背景噪声。根据上述分析,需要通过有效的数据处理方法来提高信号的分辨率,以获取上升前沿速度变化历程的细节。利用我们自行研制的光纤激光多普勒干涉测速系统,以及基于短时傅里叶(STFT)和连续小波变换(CWT)数据处理方法,能够对上述两类试验实现较好的测量。

[0114] 实验一,LSP自由表面速度测量:

[0115] 图6为LSP自由表面测量实验原理图。短脉冲激光经聚焦透镜汇聚到厚度为1.0mm的2024铝合金靶材上,光斑直径约为2mm。在强激光作用面依次紧密覆有0.1mm的铝膜吸收层和4.0mm厚的BK7玻璃约束层,共同装卡在冲击环境箱内。聚焦透镜置于靶体背表面并指向冲击中心位置,进行自由表面速度的测量。高功率密度短脉冲激光辐照在靶材上,产生等离子体并形成冲击波向靶材内部传播,到达靶材背表面时,引起质点运动。冲击波在靶材两个表面来回多次反射,其强度不断衰减,形成自由表面质点速度历程。实验测量通过激光脉宽上升沿同步触发。

[0116] 图7为采用CWT处理的三个典型LSP试验结果,具有较好的一致性和规律性。由于应力波在靶材的两个表面来回多次反射,自由表面速度出现周期性的峰值。根据靶材厚度及弹塑性波达到背表面时间,可估算2024铝合金弹性波速约为 $6.11 \times 10^3 \text{m/s}$,塑性波速约为 $5.14 \times 10^3 \text{m/s}$,与文献中弹性波速 $C_e = 6.20 \times 10^3 \text{m/s}$,塑性波速 $D = 5.52 \times 10^3 \text{m/s}$ 相近。

[0117] 根据Rankin-Hugoniot关系,弹性前驱波引起的自由表面速度 $u_{\text{HEL}}^{\text{surf}}$ 对应着Hugoniot弹性极限

$$[0118] \quad \text{HEL} = \rho_0 C_e u_{\text{HEL}}^{\text{surf}} / 2 \quad (7)$$

[0119] 其中 ρ_0 、 C_e 分别为靶材的初始密度和一维应变弹性波速。三个试验测量中最大值为59.7m/s,可得2024铝合金的HEL约为513MPa,与文献中的522MPa接近。在Hugoniot阶段采用的频率分辨率为 $\Delta f \approx 4.9 \text{MHz}$,对应的速度分辨率为3.9m/s。

[0120] 实验二,SHPB端面及试样径向速度测量:

[0121] 如图8所示,分别对SHPB端面及试样径向速度进行测量。图9为分别采用STFT和CWT处理结果比较。对于入射杆端面速度历程,STFT和CWT均能较好地解析,两种方法得到了较为一致的结果。对于试样径向速度历程,由于测得干涉条纹具有较大的背景噪声,而CWT对噪声较为敏感,因此不能准确地处理初始段的速度信息。STFT则显示了较好的抗噪声干扰能力,能够基本准确地解析出速度历史。通常试样径向速度在2m/s的低速范围内。就本文作者所知,目前尚未有文献报道出对SHPB试样径向速度的测量结果。

[0122] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已,并不用于限制本发明,对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

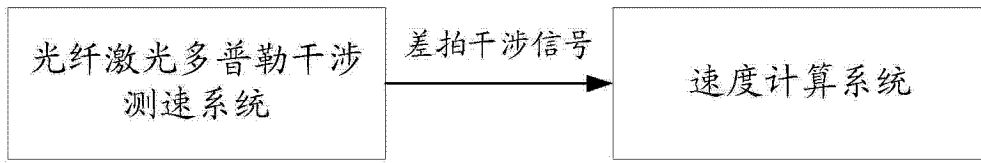


图 1

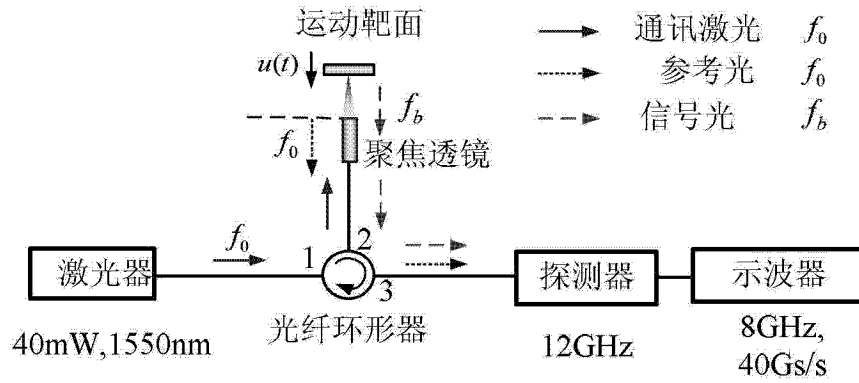


图 2

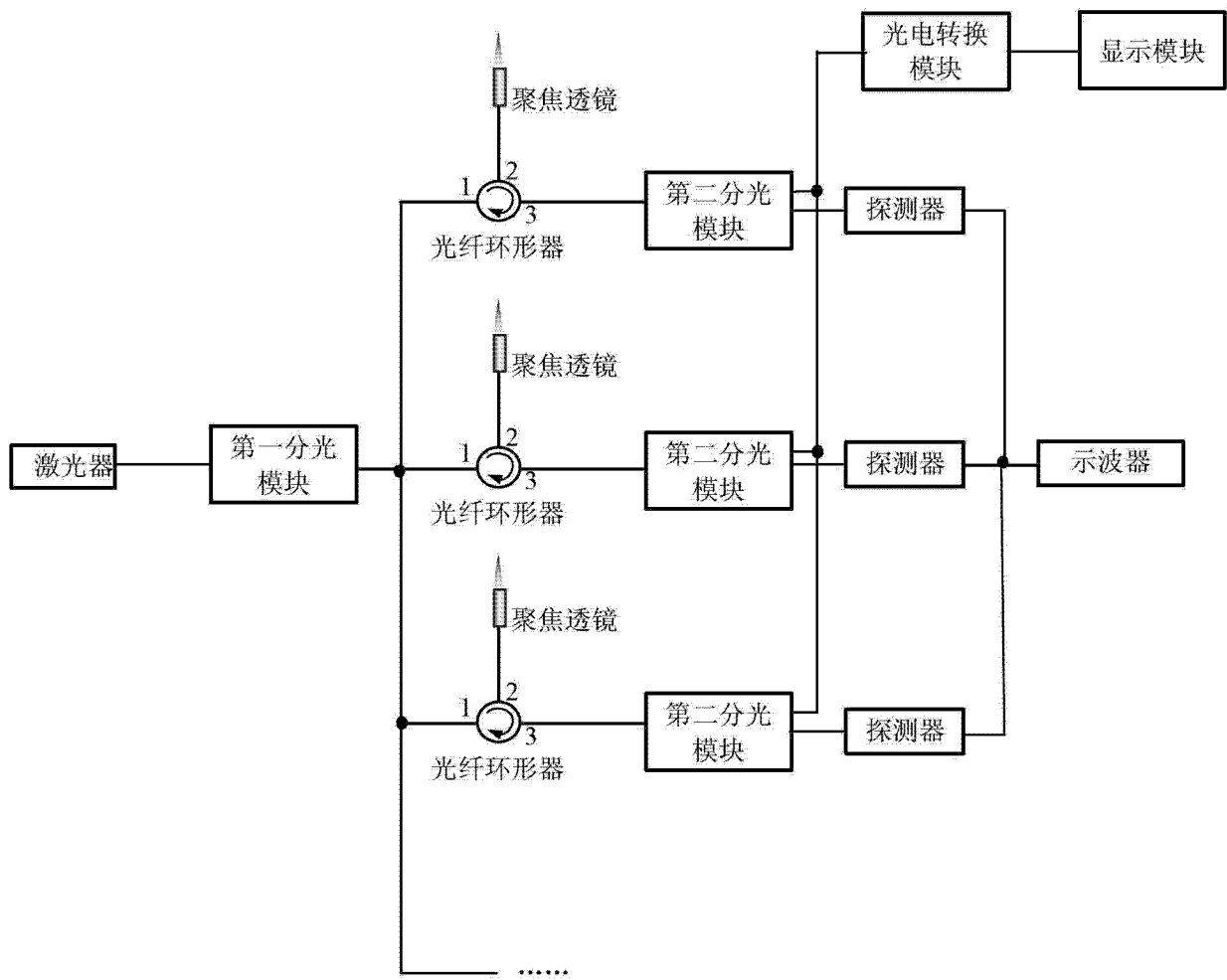


图 3

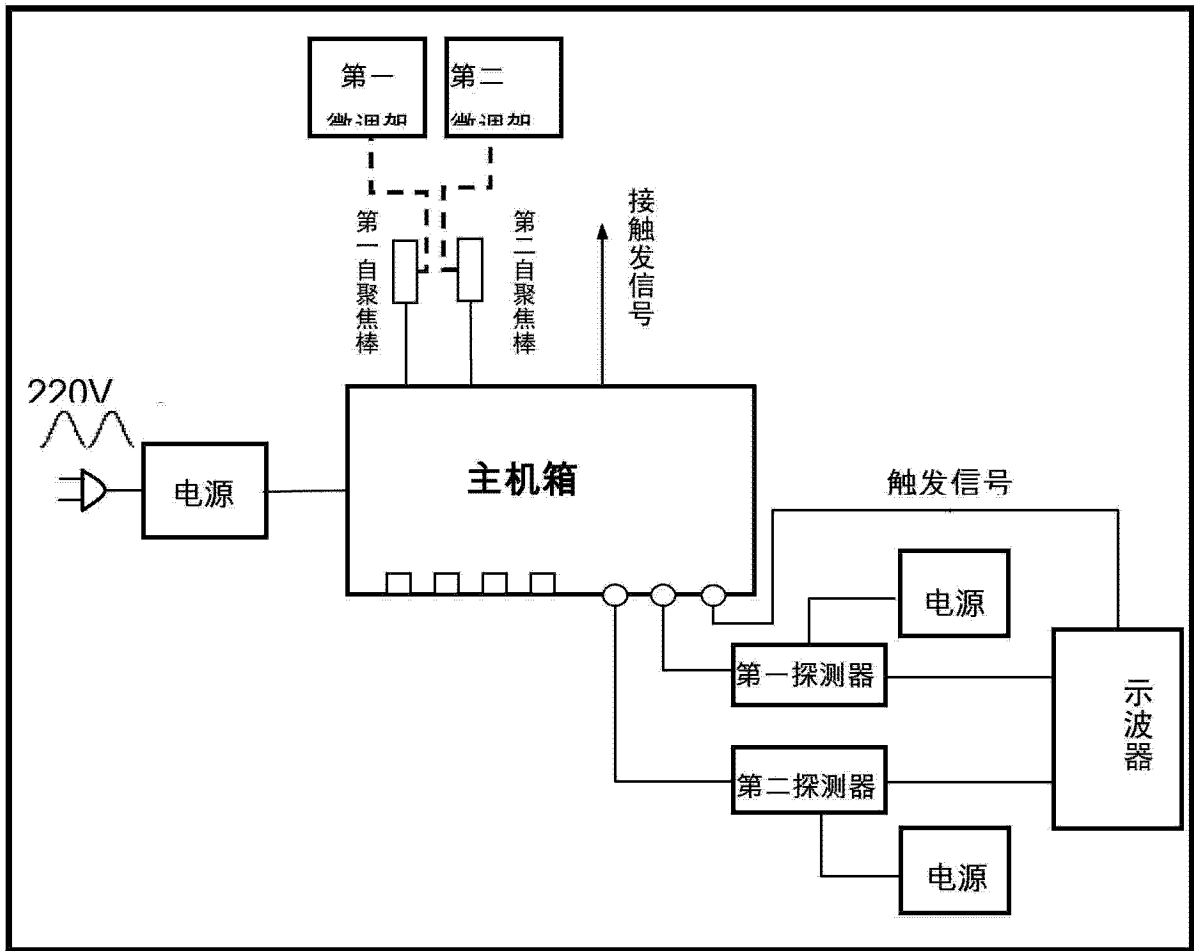


图 4

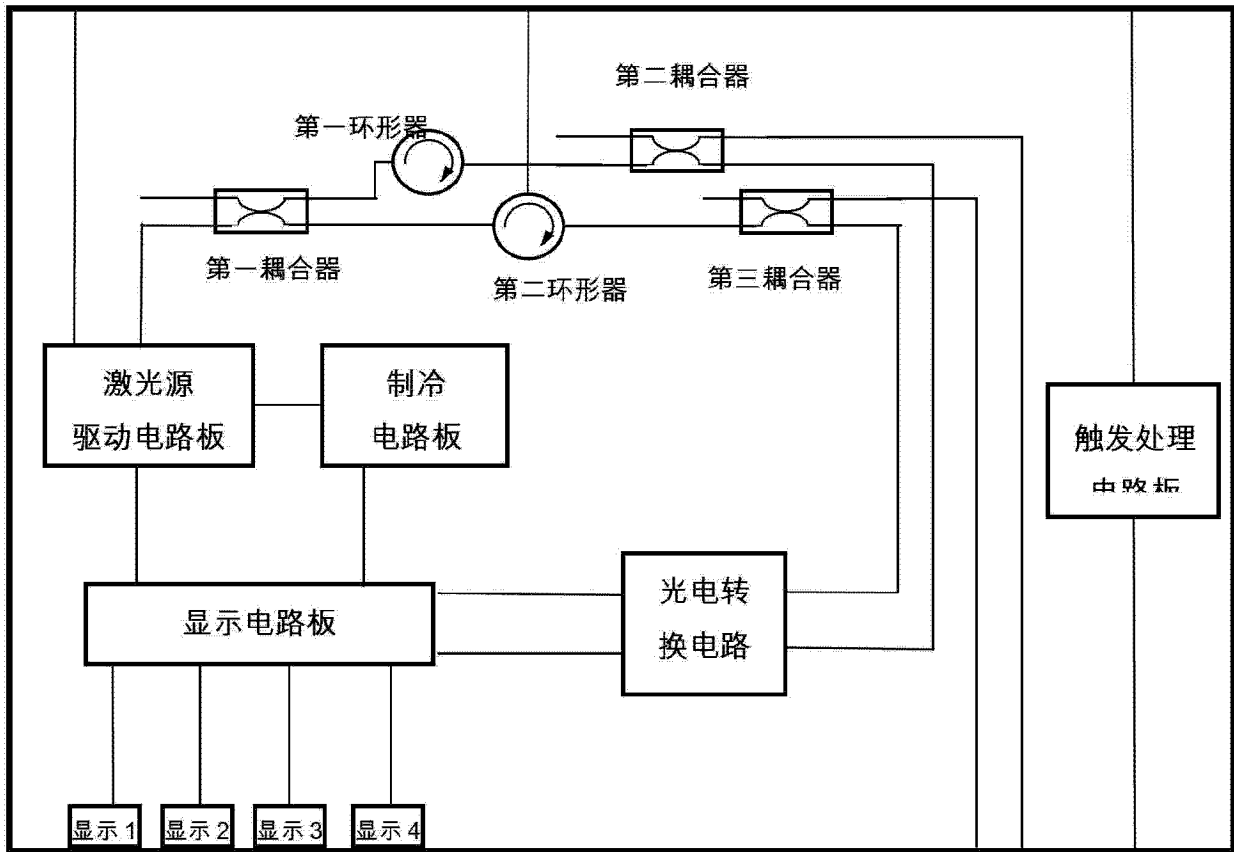


图 5

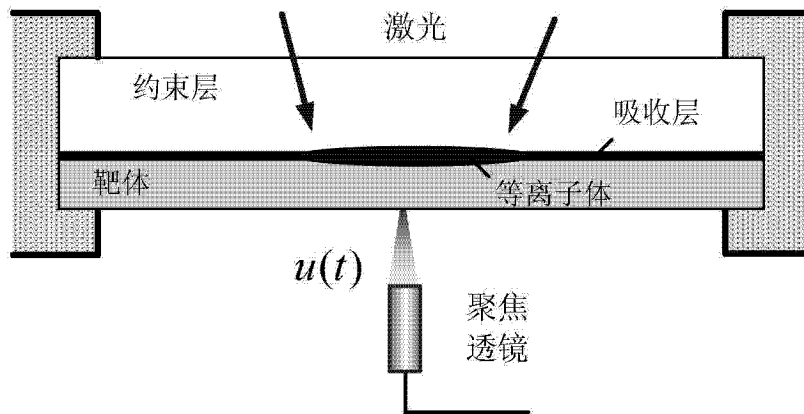


图 6

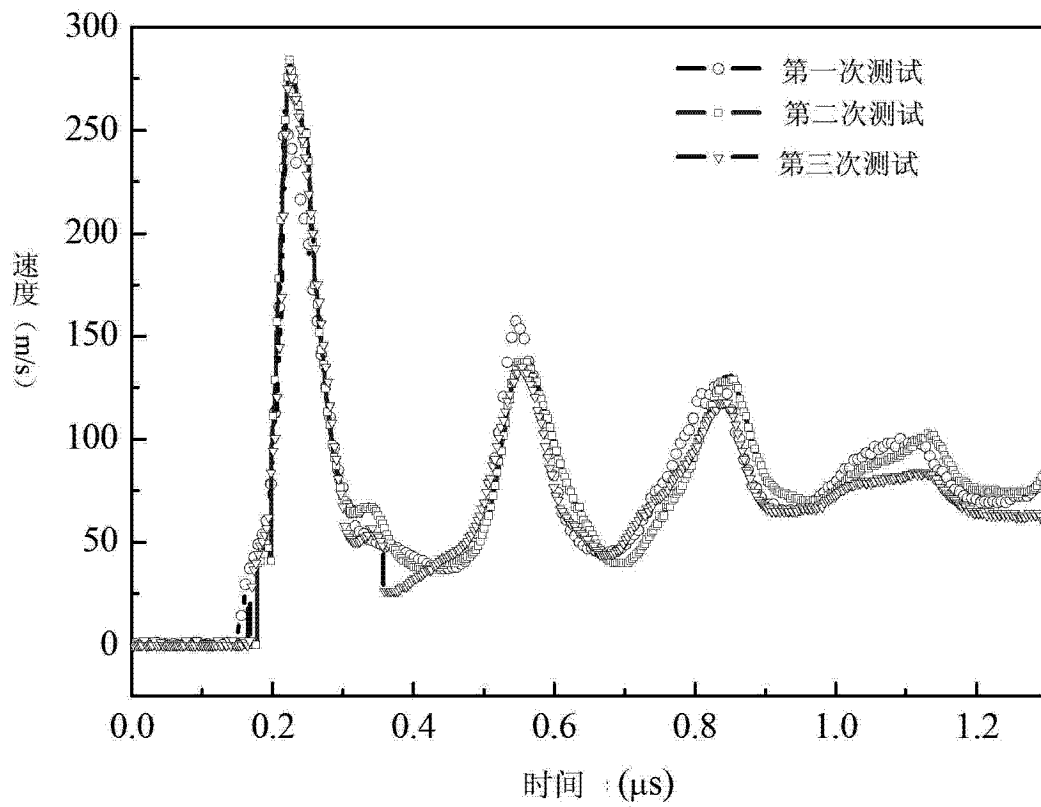


图 7

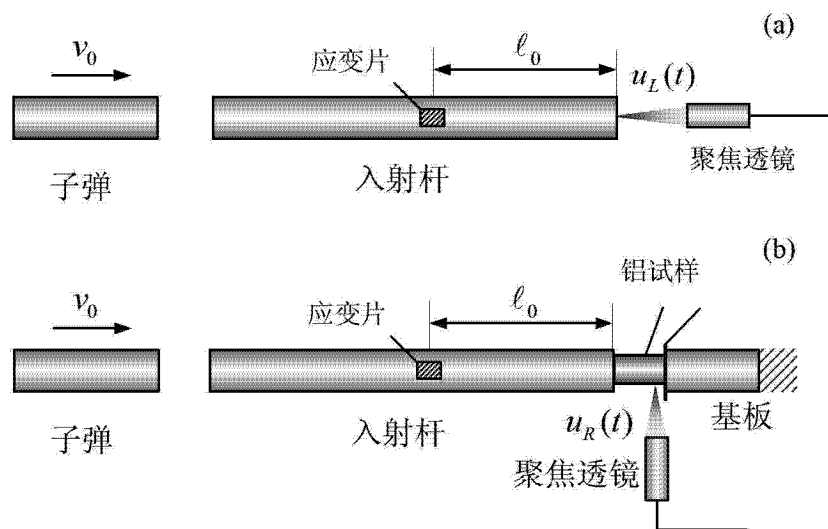


图 8

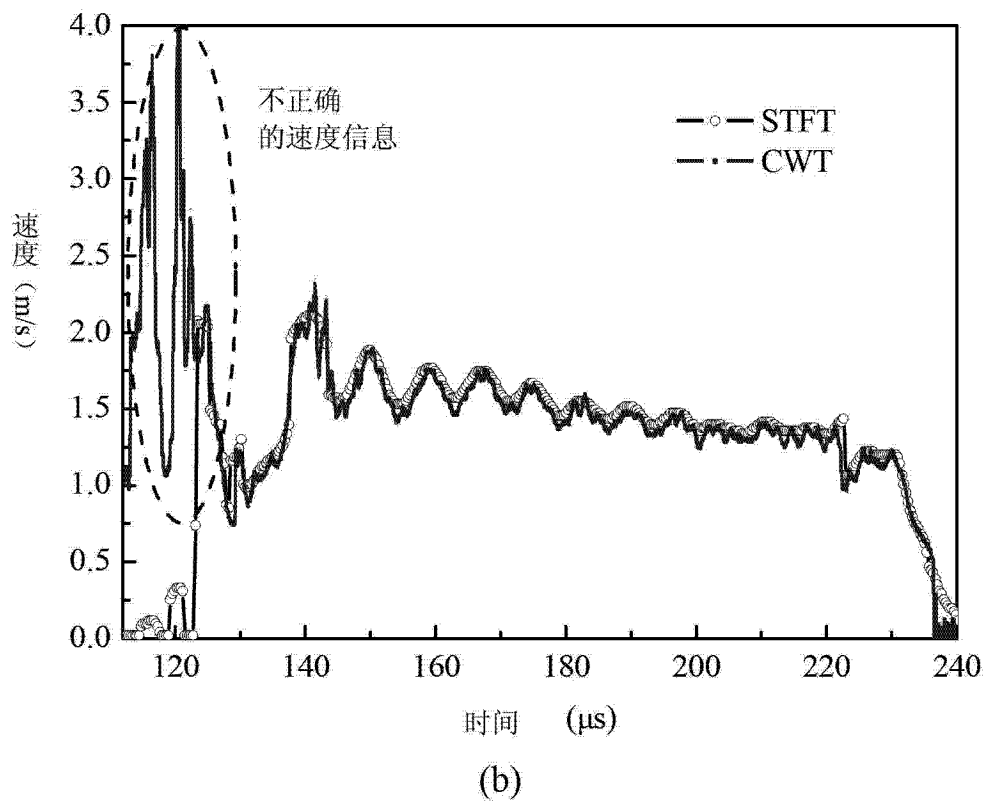
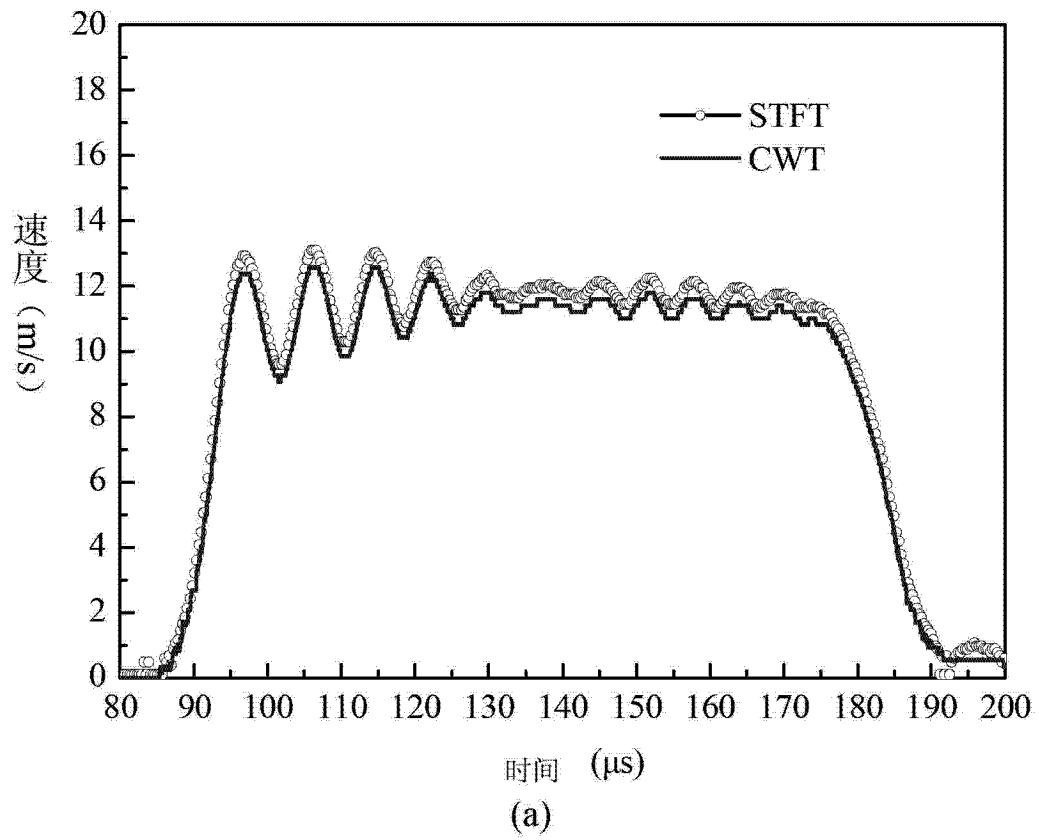


图 9