



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108732240 B

(45)授权公告日 2020.06.19

(21)申请号 201810387740.3

G01N 29/07(2006.01)

(22)申请日 2018.04.26

G01N 29/11(2006.01)

A61B 8/00(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 108732240 A

(56)对比文件

CN 106840362 A, 2017.06.13, 权利要求1-9, 说明书第6-69段, 附图1.

(43)申请公布日 2018.11.02

CN 106175831 A, 2016.12.07, 权利要求1-2, 说明书第8-52段.

(73)专利权人 西安交通大学
地址 710049 陕西省西安市碑林区咸宁西路28号

CN 106840362 A, 2017.06.13, 权利要求1-9, 说明书第6-69段, 附图1.

(72)发明人 陆明珠 王轩 张灵璐 韩丹
耿一喆 刘妍杉 李玉娇 万明习

审查员 牛琳

(74)专利代理机构 西安通大专利代理有限责任公司 61200

代理人 田洲

(51) Int. Cl.

G01N 29/04(2006.01)

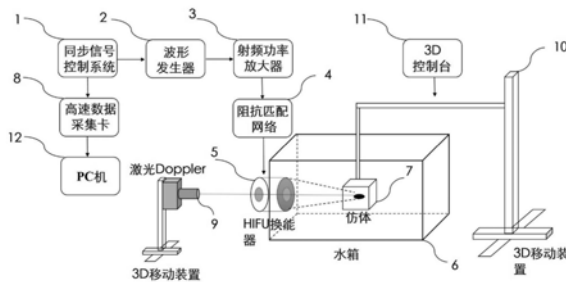
权利要求书2页 说明书8页 附图6页

(54)发明名称

激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的系统和方法

(57)摘要

本发明公开一种激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的系统和方法,系统中:同步信号控制系统连接任意波形发生器和高速数据采集卡,任意波形发生器通过功率放大器、阻抗匹配网络连接高强度聚焦超声换能器;高强度聚焦超声换能器设置于水箱外部,被测仿体组织设置于水箱内部且连接一个三维移动装置;激光Doppler设备设置于水箱外部,且连接另一个三维移动装置;激光Doppler设备的输出端经高速数据采集卡连接PC机。本发明采用单脉冲作用于仿体组织,有效减少超声作用时间和超声辐射剂量;利用激光Doppler跟踪声辐射力剪切波,并使用2D-FT的算法得到了剪切波波速和衰减系数,进一步解析出剪切弹性模量和剪切粘性系数,克服了现有SDUV方法的不足。



1. 激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的方法,其特征在于,该方法基于一种激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的系统;该系统包括同步信号控制系统(1)、任意波形发生器(2)、射频功率放大器(3)、阻抗匹配网络(4)、高强度聚焦超声换能器(5)、水箱(6)、被测仿体组织(7)、高速数据采集卡(8)、激光Doppler设备(9)、两个三维移动装置(10)和三维移动控制台(11)及PC机(12);同步信号控制系统(1)连接任意波形发生器(2)和高速数据采集卡(8),任意波形发生器(2)通过射频功率放大器(3)、阻抗匹配网络(4)连接高强度聚焦超声换能器(5);高强度聚焦超声换能器(5)设置于水箱(6)外部,被测仿体组织(7)设置于水箱(6)内部且连接一个三维移动装置;激光Doppler设备(9)设置于水箱(6)外部,且连接另一个三维移动装置;激光Doppler设备(9)的输出端经高速数据采集卡(8)连接PC机(12);

所述方法包括以下步骤:

1) 高强度聚焦超声换能器(5)产生单脉冲作用于被测仿体目标区域内的激励点时,采用激光Doppler设备(9)对被测仿体组织(7)的剪切波传播位置标记点的振动进行跟踪;记录每个检测点的振动曲线;

2) 根据振动曲线,计算被测仿体组织(7)的剪切波速度及衰减系数,然后获得粘弹系数;

步骤1)具体包括以下步骤:

1.1) 在被测仿体组织(7)的剪切波传播方向上取若干点称为标记点;

1.2) 将高强度聚焦超声换能器(5)聚焦于步骤1.1)所标记的某一标记点处做为激励点,高强度聚焦超声换能器(5)产生单脉冲作用于该激励点诱导产生剪切波信号;

1.3) 采用激光Doppler设备(9)对激励点及剪切波传播方向上的一个标记点的振动进行监测并记录,获得一组振动曲线;

标记点的个数应满足:在剪切波传播的一侧方向上至少有两个标记点;

步骤2)具体包括:

2.1)、采集每个检测点的振动曲线;

2.2)、将振动曲线按照横轴为时间,纵轴为检测点到激励点的距离的方式排列得到时域图;

2.3)、对步骤2.2)获得的时域图编程计算进行2D-FT变换得到频域图;

2.4)、利用频域图计算得到各频率的剪切波速度和衰减系数,并根据Voigt模型及其推导式解析求解得到剪切粘性系数和剪切弹性模量;

计算剪切波速度和衰减系数的方法具体包括:

标记点位置固定且间距已知,将不同标记点所得到的位移曲线按标记点距激励点的距离从小到大的顺序排列,对其进行2D-FT变换,得到频域图像;对于所得到的频域图像,取在频域上某个频率 f_x 相对应的曲线,曲线峰值距离原点记为 k_x ,则 f_x 剪切波的传播速度 c_x 为:

$$c_x = \frac{f_x}{k_x} \quad (1)$$

记曲线的半高宽为FWHM,则 f_x 剪切波的衰减系数 α 为:

$$\alpha = \frac{\text{FWHM} \times \pi}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

用于进行粘弹性解析求解的方法为：

平面剪切波波速 c_x 、衰减系数 α 与仿体组织粘弹性之间的关系为：

$$\frac{2\pi f_x}{c_x} - i\alpha = 2\pi f_x \sqrt{\frac{\rho}{\mu_1 + i2\pi f_x \mu_2}} \quad (3)$$

式中： ρ ——仿体中介质的密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； μ_1 ——剪切粘性系数/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； μ_2 ——剪切弹性模量/ Pa ， i ——虚数单位；

任意波形发生器产生的脉冲序列为长脉冲信号，脉冲宽度为 $500\mu\text{s}$ 。

2. 根据权利要求1所述的激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的方法，其特征在于，步骤1)中，调节激光Doppler设备(9)与高强度聚焦超声换能器(5)共焦，使激光Doppler设备(9)激光信号发射方向与高强度聚焦超声换能器(5)超声发射方向平行；用激光Doppler设备(9)对被测仿体组织(7)目标区域进行定位，并相应地调节高强度聚焦超声换能器(5)的焦点落入目标区域；同步信号控制系统(1)产生同步信号分别驱动任意波形发生器(2)及高速数据采集卡(8)，任意波形发生器(2)产生的脉冲序列经过射频功率放大器(3)和阻抗匹配网络(4)作用于高强度聚焦超声换能器(5)，高速数据采集卡(8)对激光Doppler设备(9)输出的信号进行采集。

3. 根据权利要求1所述的激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的方法，其特征在于，被测仿体组织为BSA仿体，激光Doppler设备采用激光多普勒测振仪。

4. 根据权利要求1所述的激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的方法，其特征在于，同步信号控制系统(1)输出的同步信号一路驱动任意波形发生器(2)产生脉冲序列，经过射频功率放大器(3)与阻抗匹配网络(4)放大后激励高强度聚焦超声换能器(5)，对水箱(6)中的BSA仿体施加作用；激光Doppler设备(9)对剪切波产生的振动进行跟踪，同步信号中另一路触发高速数据采集卡(8)对激光Doppler设备信号进行采集；采集得到的数据由PC机(12)进行保存和处理。

5. 根据权利要求1所述的激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的方法，其特征在于，高强度聚焦超声换能器(5)为球面单阵元换能器，中心频率为 1.06MHz ，焦距为 100mm ，焦区长度为 18mm ；BSA仿体为质量分数为7%的牛血清蛋白聚丙烯酰胺凝胶仿体；激光Doppler设备采用激光多普勒测振仪。

激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的系统和方法

技术领域

[0001] 本发明属于生物医学超声测量技术领域,特别涉及一种使用2D-FT算法的激光Doppler监测声辐射力剪切波估计高强度聚焦超声(HIFU)损伤粘弹性的实验系统和方法。

背景技术

[0002] 高强度聚焦超声(high intensity focused ultrasound,HIFU)是一种无创、安全且高效的治疗方法,为了有效地引导HIFU的治疗焦域、控制超声治疗剂量,需要对HIFU的治疗过程进行实时监控和评价。在HIFU治疗过程中,组织蛋白质变性从而形成不可逆转的凝固性坏死,这一过程会改变组织的力学特性,因此,可以通过对组织靶区在HIFU作用下的力学特性尤其是粘弹特性的变化进行实时监控来评价治疗效果。

[0003] 声辐射力剪切波成像是一种实时定量弹性成像方法,它通过获取相关组织剪切波速来定量弹性信息进行成像。中国发明专利申请公开第CN103431874A号,专利名称“声辐射力脉冲成像估算方法和系统”,采用了超声成像监测剪切波的方法,获得声辐射力脉冲成像的参数,根据所述参数求取剪切波速率;中国发明专利申请公开第CN104622507A号,专利名称“弹性模量测量方法和系统”,通过发射超声射频波束跟踪剪切波以计算弹性模量;中国发明专利申请公开第CN104510499A号,专利名称“医学超声成像中的剪切波检测”,提供了一种利用超声的剪切波检测方法获得剪切波速度图像。

[0004] 随着弹性成像的发展,组织粘性特性也逐渐得到重视。剪切波散射超声振动测量(Shear wave Dispersion Ultrasound Vibrometry,SDUV)方法是一种基于声辐射力剪切波的方法,既可以分离组织的粘性和弹性,又可以得到它们各自的量化值,是一种非常有效的检测方法。James F.Greenleaf等人的美国发明专利US 8659975B2,专利名称“Vibration generation and detection in shear wave dispersion ultrasound vibrometry with large background motions”中,提到了一种利用相干成像进行SDUV的方法,通过超声换能器对组织进行激励和运动检测。该方法使用一定频率的连续波激励组织产生剪切波,再利用相干平面波获取不同位置的剪切波运动信号,通过对不同频率剪切波运动信息如幅度和相位进行分析来进行粘弹性估计。然而,现有SDUV技术采用连续波将组织激励到稳态,耗时长,所用超声剂量大,在临床应用上有较大的局限性。此外,测量剪切波波速进而量化组织的粘弹性需要分别使用多个不同频率的驱动信号来激励组织以获得各频率的剪切波波速,实时性差。

[0005] 现存技术通常采用超声成像对声辐射力剪切波进行监测,超声设备发展比较成熟,操作简单,应用范围广,可以观察和检测剪切波传播过程中引起的组织位移。然而,该方法还存在着如下不足:1.HIFU作用下形成的剪切波位移幅值较小,仅有几到十几微米,而超声的信噪比较低,剪切波位移容易淹没在噪声中,且超声估计位移的算法受窗宽影响而不够精确,导致所测得的振动位移结果精度较低;2.跟踪剪切波的超声会和产生剪切波的HIFU相互干扰,不利于实时监控HIFU治疗过程;3.超声影像设备分辨率较低,弹性图像的分

分辨率和对比度难以保证。

发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的系统和方法,以解决上述技术问题。本发明采用单脉冲作用于仿体组织,并将激光Doppler技术应用于透明仿体内部剪切波的监测中,以克服现有技术中采用连续波作用于仿体组织的不足,并实现将激光Doppler技术应用于透明仿体内部的突破,同时,利用基于2D-FT的算法克服了传统SDUV方法无法测量衰减系数的不足,并大大提高了测量效率。

[0007] 为实现上述目的,本发明采用如下的技术方案:

[0008] 激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的系统,包括同步信号控制系统、任意波形发生器、功率放大器、阻抗匹配网络、高强度聚焦超声换能器、水箱、被测仿体组织、高速数据采集卡、激光Doppler设备、两个三维移动装置和三维移动控制台及PC机;同步信号控制系统连接任意波形发生器和高速数据采集卡,任意波形发生器通过功率放大器、阻抗匹配网络连接高强度聚焦超声换能器;高强度聚焦超声换能器设置于水箱外部,被测仿体组织设置于水箱内部且连接一个三维移动装置;激光Doppler设备设置于水箱外部,且连接另一个三维移动装置;激光Doppler设备的输出端经高速数据采集卡连接PC机。

[0009] 进一的,被测仿体组织为BSA仿体,激光Doppler设备采用激光多普勒测振仪。

[0010] 进一的,同步信号控制系统输出的同步信号一路驱动任意波形发生器产生脉冲序列,经过射频功率放大器与阻抗匹配网络放大后激励高强度聚焦超声换能器,对水箱中的BSA仿体施加作用;激光Doppler设备对剪切波产生的振动进行跟踪,同步信号中另一路触发高速数据采集卡对激光Doppler设备信号进行采集;采集得到的数据由PC机进行保存和处理。

[0011] 进一的,高强度聚焦超声换能器为球面单阵元换能器,中心频率为1.06MHz,焦距为100mm,焦区长度为18mm;BSA仿体为质量分数为7%的牛血清蛋白聚丙烯酰胺凝胶仿体;激光Doppler设备采用激光多普勒测振仪。

[0012] 激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的方法,包括以下步骤:

[0013] 1) 高强度聚焦超声换能器产生激励脉冲作用于被测仿体目标区域内的激励点时,采用激光Doppler设备对被测仿体的剪切波传播位置标记点的振动进行跟踪;记录每个检测点的振动曲线;

[0014] 2) 根据振动曲线,计算被测仿体的剪切波速度及衰减系数,然后获得粘弹系数。

[0015] 进一的,步骤1)中,调节激光Doppler设备与高强度聚焦超声换能器共焦,使激光Doppler设备激光信号发射方向与高强度聚焦超声换能器超声发射方向平行;用激光Doppler设备对被测仿体目标区域进行定位,并相应地调节高强度聚焦超声换能器的焦点落入目标区域;同步信号控制系统产生同步信号分别驱动任意波形发生器及高速数据采集卡,任意波形发生器产生的脉冲序列经过功率放大器和阻抗匹配网络作用于高强度聚焦超声换能器,高速数据采集卡对激光Doppler设备输出的信号进行采集。

[0016] 进一的,步骤1)具体包括以下步骤:

[0017] 1.1) 在仿体的剪切波传播方向上取若干点称为标记点;

[0018] 1.2) 将高强度聚焦超声换能器聚焦于步骤1.1) 所标记的某一标记点处,称该点为激励点,高强度聚焦超声换能器产生单脉冲作用于该点诱导产生剪切波信号;

[0019] 1.3) 采用激光Doppler设备对激励点及剪切波传播方向上的一个标记点的振动进行监测并记录,获得一组振动曲线;

[0020] 标记点的个数应满足:在剪切波传播的一侧方向上至少有两个标记点。

[0021] 进一的,步骤2) 具体包括:

[0022] 2.1)、采集每个检测点的振动曲线;

[0023] 2.2)、将振动曲线按照横轴为时间,纵轴为检测点到激励点的距离的方式排列得到时域图;

[0024] 2.3)、对步骤2.2) 获得的时域图进行2D-FT变换得到频域图;

[0025] 2.4)、利用频域图得到各频率的剪切波速度和衰减系数,并根据Voigt模型及其推导式解析求解得到剪切粘性系数和剪切弹性模量。

[0026] 进一的,计算剪切波速度和衰减系数的方法具体包括:

[0027] 标记点位置固定且间距已知,将不同标记点所得到的位移曲线按标记点距激励点的距离从小到大的顺序排列,对其进行2D-FT变换,得到频域图像;对于所得到的频域图像,取在频域上某个频率 f_x 相对应的曲线,曲线峰值距离原点记为 k_x ,则 f_x 剪切波的传播速度 c_x 为:

$$[0028] \quad c_x = \frac{f_x}{k_x} \quad (1)$$

[0029] 记曲线的半高宽为FWHM,则 f_x 剪切波的衰减系数 α 为:

$$[0030] \quad \alpha = \frac{\text{FWHM} \times \pi}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

[0031] 在得出局部仿体组织剪切波速和频率分布的情况下,根据生物仿体组织的Voigt模型及其推导式进行粘弹性解析求解;

[0032] 用于进行粘弹性解析求解的方法为:

[0033] 平面剪切波速 c_x 、衰减 α 与仿体组织粘弹性之间的关系为:

$$[0034] \quad \frac{2\pi f_x}{c_x} - i\alpha = 2\pi f_x \sqrt{\frac{\rho}{\mu_1 + i2\pi f_x \mu_2}} \quad (3)$$

[0035] 式中: ρ ——仿体中介质的密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; μ_1 ——剪切粘性系数/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_2 ——剪切弹性模量/ Pa , i ——虚数单位。

[0036] 进一步的,任意波形发生器产生的脉冲序列为长脉冲信号,脉冲宽度为 $500\mu\text{s}$ 。

[0037] 相对于现有技术,本发明具有以下有益效果:

[0038] 本发明提供了一种基于2D-FT的激光Doppler评价高强度聚焦超声(HIFU)损伤粘弹性特性的实验系统和方法。该方法利用2D-FT的算法克服了现有SDUV方法的不足,即需要分别使用多个频率的驱动信号来激励组织以获取各频率的剪切波波速。而本发明采用单脉冲波作用于仿体组织,不仅过程简单、耗时短、抗干扰性强,还能有效减少超声辐射剂量;使用激光Doppler技术通过跟踪仿体组织内部点的振动来计算剪切波速和衰减系数,可有效

用于透明仿体组织内部损伤的评价;将激光Doppler技术与声辐射力脉冲响应的方法相结合,使测量响应更快,精度更高;激光Doppler设备装置结构简单,无需额外的固定,且能直接得到测量点的振动信息,后期数据处理简单;激光信号与HIFU无相互作用,完全可以用来实时监控和检测治疗过程中局部仿体组织的振动,可监测损伤在整个形成过程中的力学变化。

[0039] 不同于超声设备,使用激光Doppler的方法可以得到比较精确的剪切波原始数据,更好地进行剪切波速度和衰减系数的估计,同时,激光Doppler作为一种高精度的方法,可用作其他方法的标定。本发明提出了使用单脉冲作用于仿体组织,同时利用激光Doppler跟踪声辐射力剪切波,并使用基于2D-FT的算法实现HIFU损伤粘弹系数解析求解的实验系统和方法,克服了单脉冲法只能定量弹性和传统SDUV方法的不足。

附图说明

[0040] 下面结合附图和具体实施方式对本发明做进一步详细说明。

[0041] 图1是根据振动曲线,计算被测仿体组织的剪切波速度及衰减系数,然后进行粘弹性解析求解的方法流程图。

[0042] 图2是计算剪切波速度时峰值离原点的距离和计算衰减时半高宽的示意图。

[0043] 图3是本发明一种基于声辐射力脉冲响应的激光Doppler监测HIFU损伤粘弹性的方法所采用的监测系统框图。其中:1为同步信号控制系统,2为任意波形发生器,3为射频功率放大器,4为阻抗匹配网络,5为高强度聚焦超声换能器,6为水箱,7为被测仿体组织,8为高速数据采集卡,9为激光Doppler设备,10为三维移动装置,11为三维移动控制台,12为PC机。

[0044] 图4为本发明中作用于仿体组织内部的激励脉冲示意图。

[0045] 图5为本发明中测量剪切波位移曲线的原理图,即测量出剪切波传播路径上距离已知的两点的位移。

[0046] 图6是治疗后的损伤分布图。其中图6(a)是线打所得均匀热损伤的横向损伤形状,图6(b)是线打所得均匀热损伤的纵向损伤形状,图6(c)是散点分布的热损伤点排布设计图,各热损伤点到中心损伤点的距离为1.5mm-11mm,间隔为0.5mm,如图6(c)排布的目的是减小各点之间的干扰,图6(d)是散点分布的热损伤点的实物图。

[0047] 图7是将测量点的位移曲线按测量点距HIFU激励点的距离从小到大的顺序排列所得到的时域图,横坐标为时间,纵坐标为测量点距激励点的距离。图7(a)是线打所得均匀热损伤的时域图,图7(b)是散点分布的热损伤点的时域图。

[0048] 图8是对图5所得到的时域图进行二维傅里叶变换(2D-FT)后所得到的频域图,横坐标为频率 f ,纵坐标为波数 k 。图8(a)是线打所得均匀热损伤的频域图,图8(b)是散点分布的热损伤点的频域图。

[0049] 图9是在 $f=300\text{Hz}$ 情况下所取得的频域上的曲线,图9(a)是线打所得均匀热损伤的曲线,图9(b)是散点分布的热损伤点的曲线。

[0050] 图10是实验所得剪切波波速和衰减系数。其中图10(a)是线打所得均匀热损伤的剪切波波速,图10(b)是散点分布的热损伤点的剪切波波速;图10(c)是线打所得均匀热损伤的弹性系数,图10(d)是散点分布的热损伤点的弹性系数。

[0051] 图11是剪切波波速和衰减系数分布,横轴是剪切波波速,纵轴是衰减系数。其中图11(a)是线打所得均匀热损伤的分布,图11(b)是散点分布的热损伤点的分布。

[0052] 图12是粘性系数和弹性模量分布,横轴是弹性模量,纵轴是粘性系数。其中图12(a)是线打所得均匀热损伤的分布,图12(b)是散点分布的热损伤点的分布。

具体实施方式

[0053] 请参阅图3所示,本发明一种激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的系统,包括同步信号控制系统1、任意波形发生器2、功率放大器3、阻抗匹配网络4、高强度聚焦超声换能器(HIFU)5、水箱6、被测仿体组织7、高速数据采集卡8、激光Doppler设备9、两个三维移动装置10和三维移动控制台11及PC机12。

[0054] 本发明具体实施例中,被测仿体组织为BSA仿体,激光Doppler设备采用激光多普勒测振仪(LDV)。

[0055] 同步信号控制系统1连接任意波形发生器2和高速数据采集卡8,任意波形发生器2通过功率放大器3、阻抗匹配网络4连接高强度聚焦超声换能器5;高强度聚焦超声换能器5设置于水箱6外部,被测仿体组织7设置于水箱6内部且连接一个三维移动装置;激光Doppler设备9设置于水箱6外部,且连接另一个三维移动装置;激光Doppler设备9的输出端经高速数据采集卡8连接PC机12。

[0056] 同步信号控制系统1输出的同步信号一路驱动任意波形发生器2(AWG420, Tektronix Inc.,US)产生脉冲序列,经过射频功率放大器3(AG1017,T&C Power Conversion Inc.,US)与阻抗匹配网络4放大后激励高强度聚焦超声换能器5,对水箱6中的BSA仿体7施加作用,实验中使用的高强度聚焦超声换能器5为球面单阵元换能器,中心频率为1.06MHz,焦距为100mm,焦区长度为18mm(Chongqing Haifu Medical Technology Co., Ltd,CN);激光Doppler设备9对剪切波产生的振动进行跟踪,同步信号中另一路触发高速数据采集卡8对激光Doppler设备信号进行采集。采集得到的数据由PC机12进行保存和处理。实验中采用三维移动装置10实现对LDV和BSA仿体的移动。BSA仿体6为质量分数为7%的牛血清蛋白(BSA)聚丙烯酰胺凝胶仿体。

[0057] 激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的方法,包括以下步骤:

[0058] 1) HIFU换能器产生激励脉冲作用于被测仿体目标区域内的激励点;激光Doppler设备对剪切波传播位置标记点的振动进行跟踪;记录每个检测点的振动曲线;

[0059] 2) 根据振动曲线,计算被测仿体的剪切波速度及衰减系数,然后进行粘弹系数解析求解。

[0060] 步骤1)中,调节激光Doppler设备与HIFU换能器共焦,使激光Doppler设备激光信号发射方向与HIFU换能器超声发射方向平行;用激光Doppler设备对被测仿体目标区域进行定位,并相应地调节HIFU换能器的焦点落入目标区域;同步信号控制系统产生同步信号分别驱动任意波形发生器及高速数据采集卡,任意波形发生器产生的脉冲序列经过功率放大器和阻抗匹配网络作用于HIFU换能器,高速数据采集卡对激光Doppler设备输出的信号进行采集。

[0061] 步骤1)具体包括以下步骤:

- [0062] 1.1) 在剪切波传播方向上取若干点称为标记点；
- [0063] 1.2) 将HIFU换能器聚焦于某一标记点处，称该点为激励点，HIFU换能器产生单脉冲作用于该点诱导产生剪切波信号；
- [0064] 1.3) 采用激光Doppler设备对激励点及剪切波传播方向上的一个标记点的振动进行监测并记录，获得一组振动曲线。
- [0065] 标记点的个数应满足：在剪切波传播的一侧方向上至少有两个标记点。
- [0066] 步骤2) 的算法流程如图1所示，包括：
- [0067] 步骤S1、采集每个检测点的振动曲线；
- [0068] 步骤S2、将振动曲线按照横轴为时间，纵轴为检测点到激励点的距离的方式排列得到时域图；
- [0069] 步骤S3、对时域图进行2D-FT变换得到频域图；
- [0070] 步骤S4、利用频域图得到各频率的剪切波速度和衰减系数，并根据Voigt模型及其推导式解析求解得到 μ_1 、 μ_2 。

[0071] 计算剪切波速度和衰减系数的方法具体为：

[0072] 标记点位置固定且间距已知，将不同标记点所得到的位移曲线按标记点距激励点的距离从小到大的顺序排列，对其进行2D-FT变换，得到频域图像。对于所得到的频域图像，取在频域上某个频率相对应的曲线，如 $f_x = 200\text{Hz}$ 所在的曲线，如图2所示，曲线峰值距离原点记为 k_x ，则200Hz剪切波的传播速度 c_x 为：

$$[0073] \quad c_x = \frac{f_x}{k_x} \quad (1)$$

[0074] 记曲线的半高宽为FWHM，则200Hz剪切波的衰减系数 α 为：

$$[0075] \quad \alpha = \frac{\text{FWHM} \times \pi}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

[0076] 利用频域图得到各频率的剪切波速度和衰减系数后，根据Voigt模型及其推导式求解得到剪切粘性系数和剪切弹性模量；

[0077] 用于进行粘弹性解析求解的方法为：

[0078] 平面剪切波波速 c_x 、衰减 α 与仿体组织粘弹性之间的关系为：

$$[0079] \quad \frac{2\pi f_x}{c_x} - i\alpha = 2\pi f_x \sqrt{\frac{\rho}{\mu_1 + i2\pi f_x \mu_2}} \quad (3)$$

[0080] 式中： ρ ——介质的密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ； μ_1 ——剪切粘性系数/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； μ_2 ——剪切弹性模量/ Pa ， i ——虚数单位。

[0081] 任意波形发生器产生的脉冲序列为长脉冲信号，脉冲宽度为 $500\mu\text{s}$ 。

[0082] 已知含有牛血清蛋白 (BSA) 的聚丙烯酰胺凝胶仿体的剪切粘性系数 μ_1 、剪切弹性模量 μ_2 、该仿体中剪切波波速 c_x 和剪切波振动的衰减系数 α 的关系如式 (3) 所示，则在BSA仿体密度已知的前提下，剪切弹性和粘性模量可以通过由2D-FT方法得到的剪切波波速和衰减系数进行解析求解得到。

[0083] 为获得介质中的剪切波速，本发明利用了不同测量点处所得到的位移曲线，将位移曲线按标记点距激励点的距离从小到大的顺序排列，对其进行2D-FT变换，得到频域数

据。对于所得到的频域数据,取在频域上某频率相对应的曲线,如在 $f=f_x$ 所在的曲线,曲线峰值距离原点记为 k_x ,则剪切波在 $f=f_x$ 的传播速度 c_x 可由式(1)得到。

[0084] 为获得剪切波振动的衰减信息,本发明利用了所得到的频域上所对应的曲线,如在 $f=f_x$ 的曲线,记曲线的半高宽为FWHM,则 $f=f_x$ 剪切波的衰减系数 α 可由式(2)得到。

[0085] 为获得激励点与检测点的振动与时间关系曲线,本发明采取如下步骤:调节激光Doppler设备与HIFU换能器共焦,使光信号发射方向与HIFU超声发射方向平行。设置两个三维移动装置,分别用于移动激光Doppler设备9和仿体7。实验前,采用高强度聚焦超声换能器5在目标仿体组织内部形成一定形状的热损伤。调节HIFU换能器焦点至热损伤的特定点处,记该处为HIFU激励点。同步信号控制系统1产生同步信号送入任意波形发生器2进而驱动HIFU换能器5以完成剪切波激励。信号发生的同时触发高速数据采集卡8,对激光Doppler设备9输出的信号进行采集。跟踪激励点处的振动得到其波形曲线以作为后续检测的参考,接着移动激光Doppler的激光头,测量距离激励点 Δd 处的热损伤在HIFU作用于激励点时产生的振动,记录该点处的振动曲线。继续移动激光Doppler设备,测量距离激励点 $2\Delta d$ 处的热损伤在HIFU作用于激励点时产生的位移,重复以上步骤,直到测试完所有测试点,得到激励点和多组检测点的振动波形。

[0086] 下面结合附图对本发明做详细描述。应当理解,此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0087] 本发明一种基于2D-FT的激光Doppler监测HIFU损伤粘弹性的方法,包括以下步骤:实验共使用了用相同仿体溶液配制的2块BSA仿体,在实验前,使用连续波驱动高强度聚焦超声换能器5先在第一块仿体中进行线打形成均匀热损伤,如图6(a)与6(b)所示,热损伤的高度约为14mm,长度约为10mm,宽度约为4mm;同样使用连续波驱动HIFU换能器在第二块仿体内部形成按照图6(c)所示分布的共21个小热损伤点,结果如图6(d)所示。损伤通过LDV中的摄像机监控,损伤尺寸通过调整治疗时间来控制。然后分别对两块仿体进行实验。同步信号控制系统驱动任意波形发生器产生脉冲序列用于产生剪切波激励。驱动信号为长脉冲信号,脉冲宽度(PD)为500 μ s。剪切波产生的振动由LDV进行跟踪,同步信号控制系统产生脉冲序列的同时触发高速数据采集卡,对LDV信号进行采集。功率放大器的输出功率为15W。三维移动装置用来移动LDV和仿体,完成多个位置的振动采集。

[0088] 首先对第一块仿体中线打所得的均匀热损伤(图6(a)(b))进行实验:先将均匀热损伤最上方点作为HIFU激励点,用LDV测量出激励点处的振动作为后续检测的参考,然后向下移动LDV至距激励点 $\Delta d=0.5$ mm处,检测该处振动,然后再向下移动LDV至距该点 $\Delta d=0.5$ mm处检测振动,以此类推,直至检测完整条热损伤,共得到23个位置处的组振动曲线。其次对第二块仿体的散点分布状热损伤点(图6(c)(d))进行实验:先将HIFU聚焦于位于圆心处(图6(c)红点)的热损伤点上,用LDV测量出激励点处的振动作为后续检测的参考,然后保持HIFU作用位置不变,移动LDV测量出周围分布的热损伤点的振动,共得到21个热损伤点的振动曲线,圆心处热损伤点到周围20个小损伤点的距离为1.5mm-11mm,间隔为0.5mm。

[0089] 分别把两块仿体中不同测量点所得到的位移曲线按测量点距激励点的距离从小到大的顺序排列,如图7所示,其中图7(a)是线打所得均匀热损伤的时域图,图7(b)是散点分布的热损伤点的时域图,横坐标为时间,纵坐标为点数,灰度值表示振动幅值大小,再对时域图进行2D-FT变换,得到频域数据,如图8所示,其中图8(a)是线打所得均匀热损伤的频

域图,图8 (b) 是散点分布的热损伤点的频域图。得到图8所示的频域分布图后,对其横轴确定的情况下,可以得到频域值沿波数 k 变化的曲线,如图9所示,其中图9 (a) 是线打所得均匀热损伤的300Hz处曲线,图9 (b) 是散点分布的热损伤点的300Hz处曲线。根据图中峰值和原点位置的距离以及半高宽可以计算出剪切波的波速和衰减系数,再根据波速和衰减系数解析求解出剪切弹性模量和剪切粘性。

[0090] 在第二块仿体中,由于散布的热损伤点较小,并且剪切波从圆心处的热损伤点传播至各个周围热损伤点的路径是正常仿体组织,因此可认为第二块仿体所得数据为正常仿体组织的数据,和第一块仿体中所得的热损伤数据形成对比。

[0091] 图10是实验所得衰减系数和剪切波波速。其中 (a) 是热损伤的剪切波波速, (b) 是正常仿体组织的剪切波波速; (c) 是热损伤的衰减系数, (d) 是正常仿体组织的衰减系数。可见随着频率的增大,剪切波波速和弹性系数都增大。

[0092] 图11是衰减系数和剪切波波速分布,横轴为剪切波波速,纵轴为衰减系数。其中 (a) 是热损伤的分布, (b) 是正常仿体组织的分布。可见两组数据能被明显区分开,证明本发明确实能有效辨别出仿体组织变性前后的力学特性变化。

[0093] 图12是粘性系数和弹性模量分布,横轴为弹性模量,纵轴为粘性系数。其中 (a) 是热损伤的分布, (b) 是正常仿体组织的分布。可见虽然在弹性系数上两组数据略有重叠,但仍能区分出热损伤和正常仿体组织。

[0094] 以上实例描述了本发明的具体实施方式,其描述较为具体和详细,但并不能因此而理解为对本发明专利范围的限制。应当指出的是,在不脱离本发明构思的前提下做出的若干变形和改进,都属于本发明的保护范围。因此,本发明的保护范围应以所附权利要求为准。

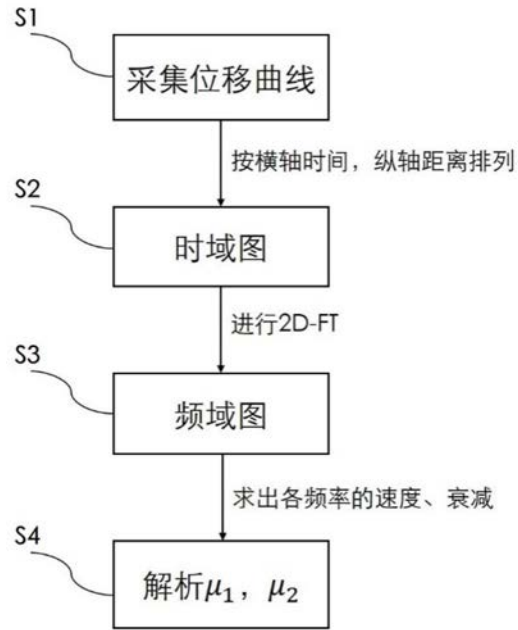


图1

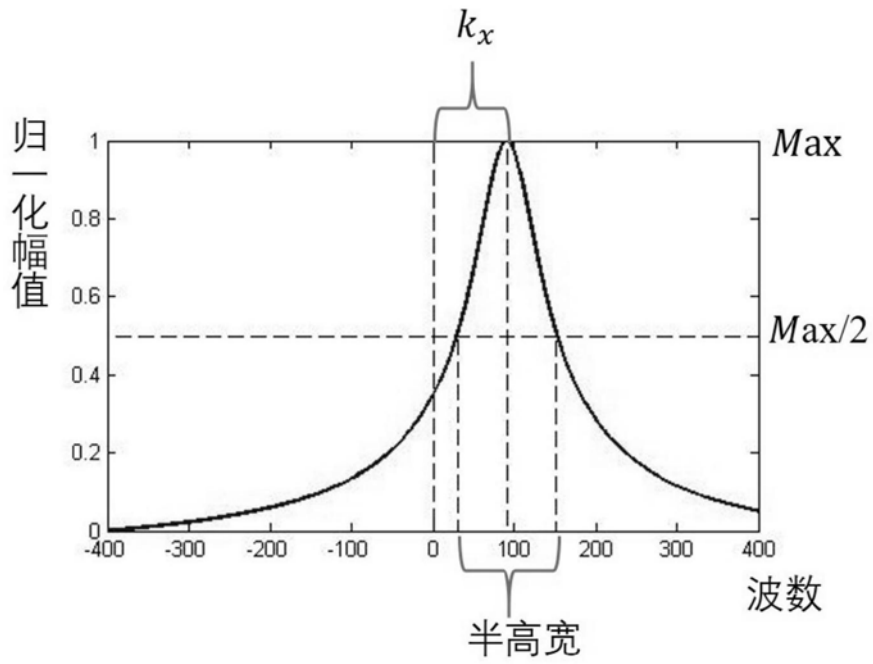


图2

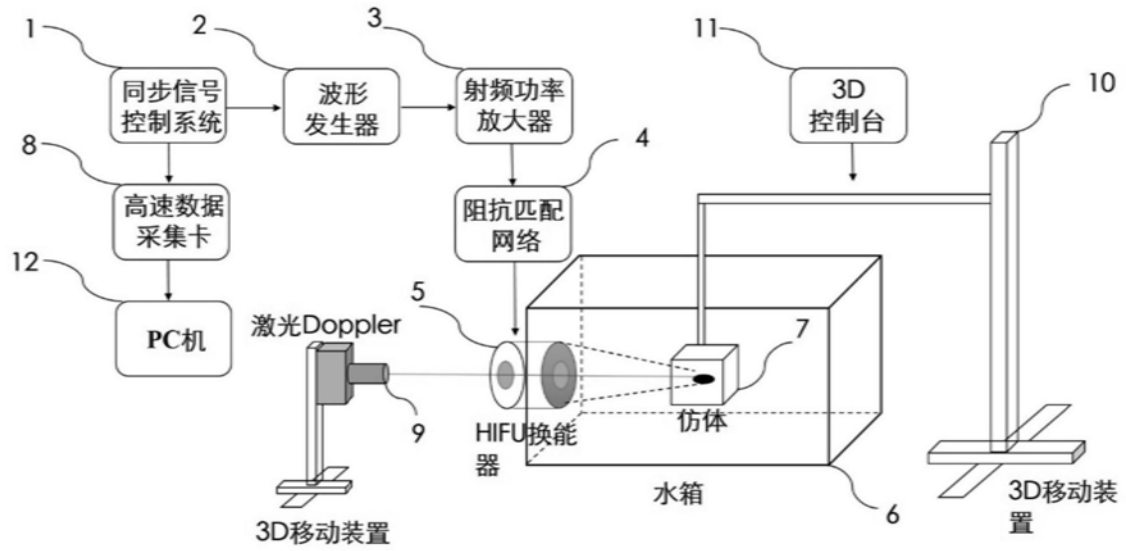


图3

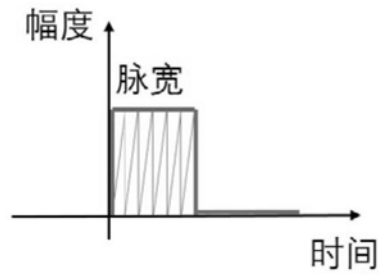


图4

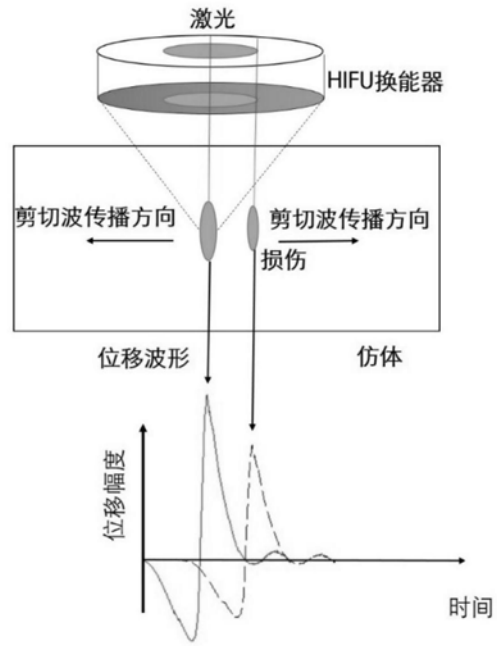
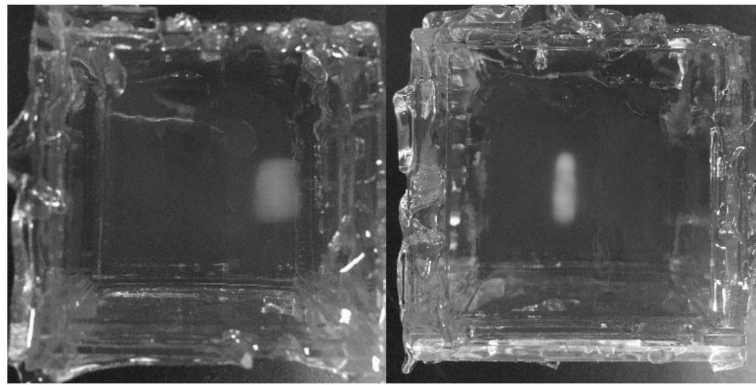
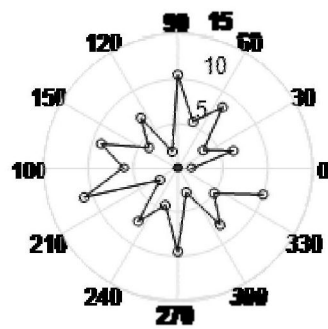


图5

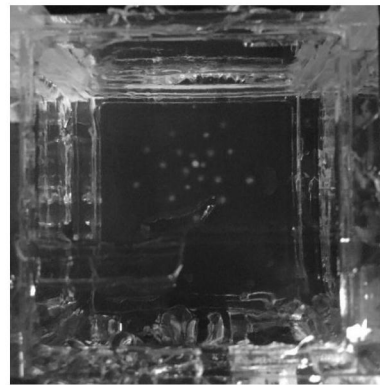


(a)

(b)

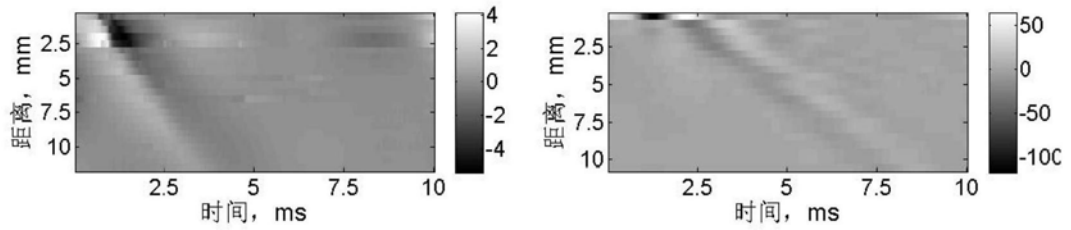


(c)



(d)

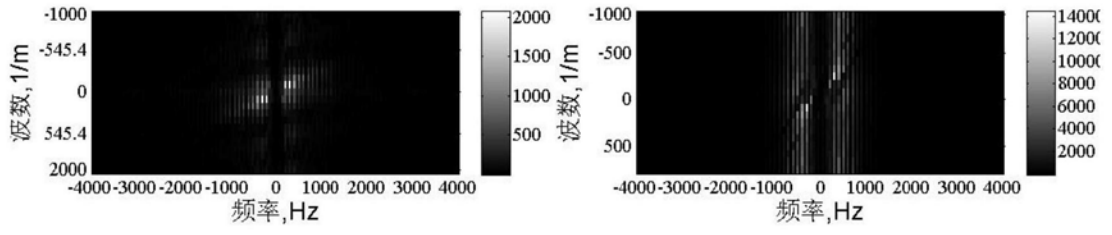
图6



(a)

(b)

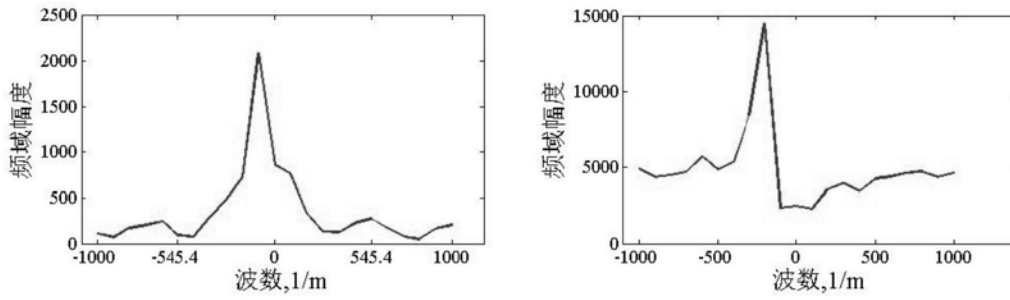
图7



(a)

(b)

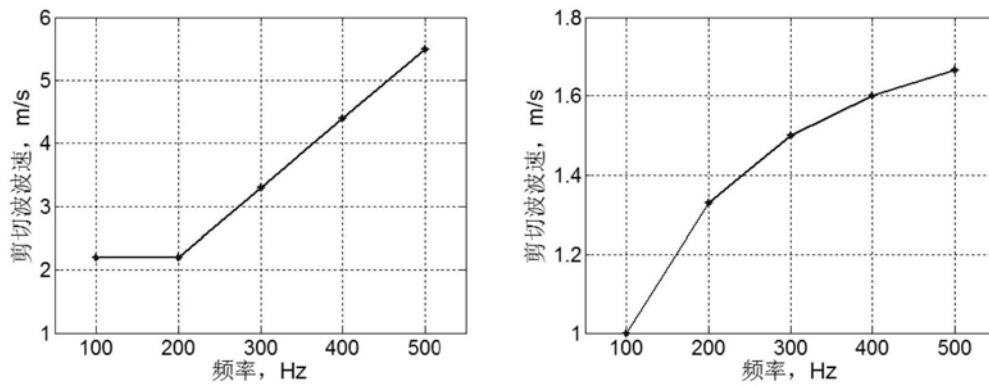
图8



(a)

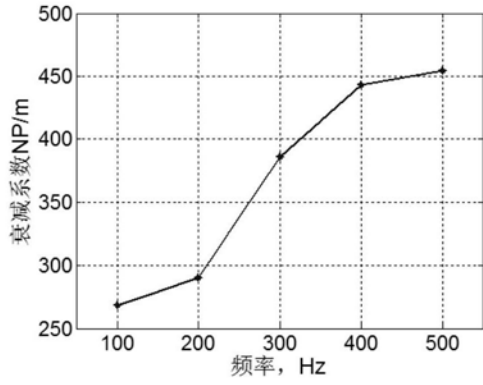
(b)

图9

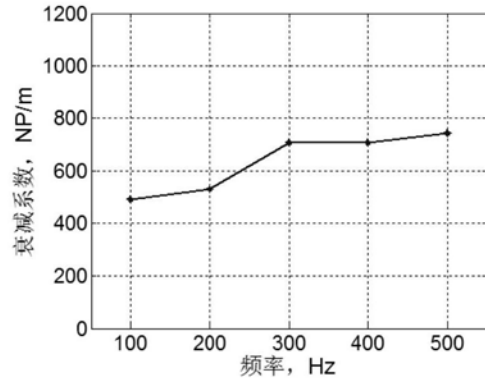


(a)

(b)

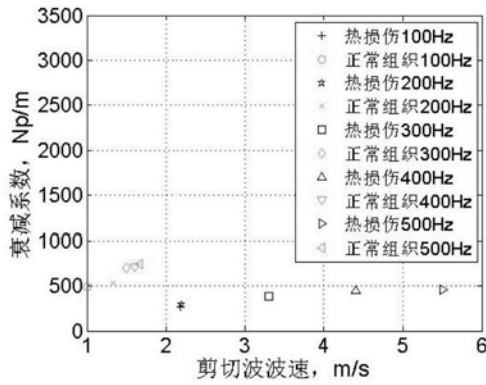


(c)

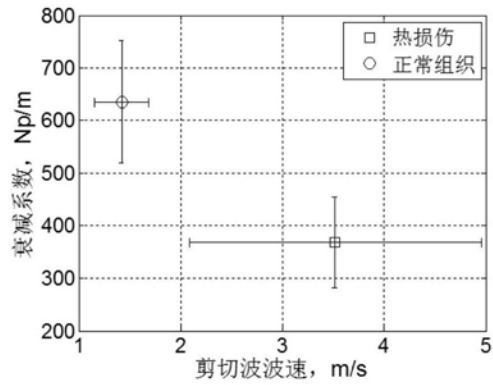


(d)

图10

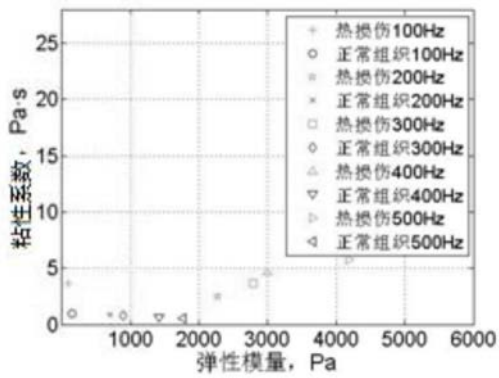


(a)

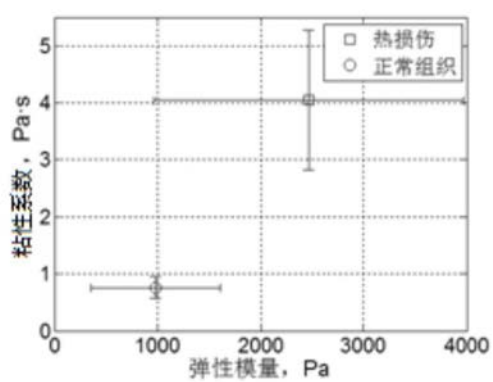


(b)

图11



(a)



(b)

图12

专利名称(译)	激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的系统和方法		
公开(公告)号	CN108732240B	公开(公告)日	2020-06-19
申请号	CN201810387740.3	申请日	2018-04-26
[标]申请(专利权)人(译)	西安交通大学		
申请(专利权)人(译)	西安交通大学		
当前申请(专利权)人(译)	西安交通大学		
[标]发明人	陆明珠 王轩 张灵璐 韩丹 耿一喆 刘妍杉 李玉娇 万明习		
发明人	陆明珠 王轩 张灵璐 韩丹 耿一喆 刘妍杉 李玉娇 万明习		
IPC分类号	G01N29/04 G01N29/07 G01N29/11 A61B8/00		
代理人(译)	田洲		
审查员(译)	牛琳		
其他公开文献	CN108732240A		
外部链接	SIPO		

摘要(译)

本发明公开一种激光Doppler监测脉冲声辐射力剪切波定量估计HIFU损伤粘弹性的系统和方法，系统中：同步信号控制系统连接任意波形发生器和高速数据采集卡，任意波形发生器通过功率放大器、阻抗匹配网络连接高强度聚焦超声换能器；高强度聚焦超声换能器设置于水箱外部，被测仿体组织设置于水箱内部且连接一个三维移动装置；激光Doppler设备设置于水箱外部，且连接另一个三维移动装置；激光Doppler设备的输出端经高速数据采集卡连接PC机。本发明采用单脉冲作用于仿体组织，有效减少超声作用时间和超声辐射剂量；利用激光Doppler跟踪声辐射力剪切波，并使用2D-FT的算法得到了剪切波波速和衰减系数，进一步解析出剪切弹性模量和剪切粘性系数，克服了现有SDUV方法的不足。

