

文章编号 1004-924X(2008)07-1158-05

光学外差干涉法检测微弱超声振动

李醒飞,王 驰,向红标,张国雄

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室,天津 300072)

摘要:为检测微弱超声振动信号,设计了一个具有较高检测灵敏度的光学外差干涉系统。采用相干性高的线偏振光作为光源,提高了有效干涉强度;利用光阑消除光学噪声,并有效控制回授光对光路的影响;最后,以 1 级光作为参照光,使光路调节简单易行。实验结果显示,用主频为 62.42 kHz、幅值为 74 V 的方波信号激励超声探头作为振动信号源时,测得的振动信号频率和幅值分别为 62.38 kHz 和 76.4 mV,表明该系统能满足微弱超声振动检测要求。

关键词:激光超声;线偏振光;外差干涉;相敏检测

中图分类号:TB57;TH744.3 **文献标识码:**A

Detection of weak ultrasonic signal using optical heterodyne interferometry

LI Xing-fei, WANG Chi, XIANG Hong-biao, ZHANG Guo-xiong

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to detect weak ultrasonic signal, a high-sensitivity optical heterodyne interferometer was developed. A linearly polarized laser with good coherence was used as light source to improve interference intensity, and a diaphragm was employed to eliminate the optic noises and the influences of feedback lights on the light path. Then, the system was easily adjusted by using the 1st order light as reference light. Experimental results indicate that the measured vibration signal frequency and amplitude are 62.38 kHz and 76.4 mV respectively, when a square wave is adopted to excite the ultrasonic probe with 62.42 kHz central frequency and 74 V amplitude, which shows proposed system can satisfy the detection requirement of weak ultrasonic signal.

Key words: laser ultrasonics; linearly polarized light; heterodyne interference; phase detection

1 引 言

自 20 世纪 70 年代以来,激光超声技术因其频带较宽、模式多样、具有很高的时间和空间分辨率等特性,在无损伤探伤领域得到了越来越广泛的

关注和应用,已发展成为超声学的一个重要分支^[1-2]。但激光超声振动信号非常微弱,位移幅值一般在数微米量级,且激发超声的激光源所需强度特别大^[3-5],因此,目前多用光学方法检测。光学法检测超声可分为两大类:一类是非干涉法,如狭缝法、刀刃法等;另一类为干涉法,主要包括外

差干涉法、差分干涉法和多光束干涉法等^[6]。此外,还有使用法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot Interferometer)和光折变干涉仪的方法,但前者性能不稳定,后者价格十分昂贵。较常用的当属外差干涉法^[7],该方法最大的特点是将微弱的激光超声信号加载到高频范围内进行处理,从而避开了低频 $1/f$ 噪声的干扰。

通常的外差干涉系统,因使用的光学器件较多,会出现很多杂光(如回授光^[8]),光学噪声大,信噪比低,并不适合微弱激光超声信号的检测。基于此,本文采用线偏振光作为光源来改善传统的干涉光路系统,设计出了检测微弱振动信号的新型线偏振光外差干涉系统。该系统用压电超声代替激光超声作为微弱振动信号源,实验得到了较好的外差干涉信号,并得到了与压电探头振动激励信号一致的探测信号,而且结构简单,成本较低。

2 线偏振光外差干涉系统组成

图1为本文所设计的测量微弱振动信号的线偏振光外差干涉系统示意图。采用功率为12 mW的He-Ne线偏振激光器作为光源,发出的偏

振光波长为632.8 nm,光束通过具有移频作用的布拉格器件(Bragg cell)产生频率不同、偏振方向相互垂直的两束线偏振光:0级光和1级光,其频差 f_B 为40 MHz。通过 $\lambda/2$ 波片来调整其偏振方向(线偏振光通过 $\lambda/2$ 波片,若入射线偏振光的振动方向与波片快轴的夹角为 α ,则出射线偏振光的振动方向向着快轴方向转动 2α 角),使0级光在偏振分光镜上发生全透射(同时1级光全反射),在PBS上透射的光束经过 $\lambda/4$ 波片和透镜汇聚成像到被测样品表面上(要求被测样品与透镜的距离为透镜焦距 f),之后被样品表面反射,重新通过 $\lambda/4$ 波片,返回到偏振分光镜上。调整 $\lambda/4$ 波片的快轴与入射偏振光的振动方向成 45° ,光线两次经过 $\lambda/4$ 波片,0级偏振光的偏振方向变化 90° ,回到偏振分光镜时则变成为全反射的光束。1级光依次通过反射镜 M_1 、 $\lambda/2$ 波片、反射镜 M_2 和 M_3 时,因 $\lambda/2$ 波片的作用(调整 $\lambda/2$ 波片的快轴与入射偏振光的振动方向成 45° ,使1级光偏振相位改变 90°)在偏振分光镜上发生全透射。调整光路系统使透射的1级光(参考光)和反射的0级光(信号光)相互重合,重合的两束光通过检偏器和透镜汇聚到光电探测器上发生干涉。

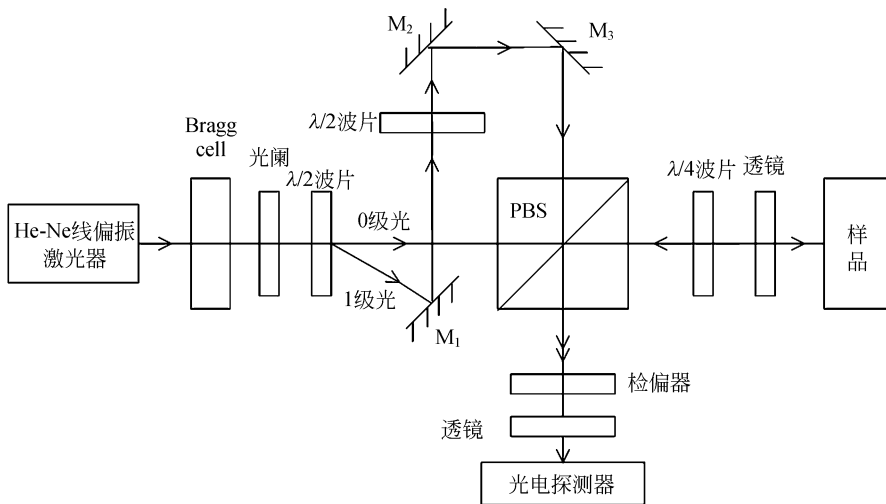


图1 线偏振光外差干涉系统示意图

Fig. 1 Scheme of polarized light heterodyne interferometer

整个实验系统的实物图如图2所示。与传统的线偏振光外差干涉系统相比,该系统具有如下优点:

第一,光源发出的线偏振光经过布拉格器件

(即Bragg Cell)、 $\lambda/2$ 波片和其它光学元件后,不可避免地出现很多杂光光斑,形成光学噪声,为此在布拉格器件和 $\lambda/2$ 波片之间加了一个带有矩形框的小光阑,使其恰好只能通过布拉格器件分出

的两束光(0 级光和 1 级光),从而避免了杂光以及回授光的影响。

第二,对于 1 级光进入偏振分光棱镜之前的光路,传统的方法是用一个 $\lambda/4$ 波片和一个角锥棱镜来实现,以使其变成全透射的偏振光。但实践中发现用传统的方法调节时,难以保证干涉光的空间准直性,严重影响干涉信号强度,为此,本文中用一个 $\lambda/2$ 波片和 3 个反射镜来实现,虽然光学器件数目多,但便于调节,实践证明其灵敏度也较高。

第三,参考光和信号光分别通过透射和反射经过偏振分光镜后,传统方法多用第二个偏振分光镜使其二者的投影发生干涉,本文直接用检偏器代替,并加入了透镜聚焦,从而在保证灵敏度的基础上降低了成本。

第四,选择 DET210 通用型高速光电探测器,其内置有一个高速的 PIN 探测器和偏置电池,封装在一个坚固的铝盒里。它的上升时间短(1 ns),光谱响应范围宽(200~1 100 nm),具有方便的 BNC 接口。把光电探测器和示波器通过 BNC 连接时,要通过一个转换头转接一个 50Ω 的电阻以保证阻抗匹配。

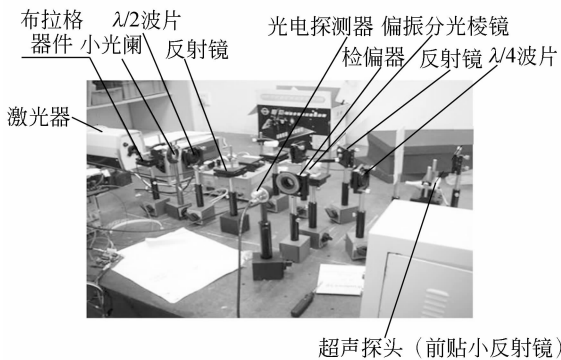


图 2 线偏振光外差干涉系统实物图

Fig. 2 Physical map of polarized light heterodyne interferometer

3 微弱振动信号检测原理

若样品表面有超声振动 $u(t)$,则 0 级光经样品表面反射后由于多普勒效应发生 $(4\pi/\lambda)u(t)$ 的相位移^[9],与 1 级参考光发生干涉作用后经光电探测器输出含有相位调制的电流信号,其表达式可写为:

$$\tilde{U}(t) = A \cos \left\{ 2\pi f_B t + \frac{4\pi}{\lambda} u(t) + \phi_0 \right\}, \quad (1)$$

其中, f_B 为 40 MHz, $u(t)$ 为超声振动位移, A 为信号幅值, ϕ_0 为初始相位。

布拉格器件还有一个输出端口可以输出 40 MHz 的标准参考信号,其表达式为:

$$\tilde{W}(t) = A_1 \cos(2\pi f_S t + \phi_S), \quad (2)$$

其中, $f_S = f_B = 40$ MHz。在实验中,信号处理电路可由放大器、相敏检波器(乘法器)和低通滤波器部分组成,其原理框图如图 3 所示。

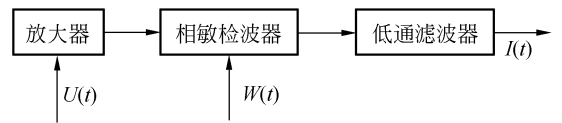


图 3 超声信号检测原理框图

Fig. 3 Scheme of ultrasonic signal processing

待测信号 $u(t)$ 经过放大后与参考信号 $w(t)$ 在相敏检波器处相乘并整理可得:

$$\begin{aligned} I(t) &= \tilde{U}(t) \tilde{W}(t) = AA_1 \cos \left(2\pi f_B t + \frac{4\pi}{\lambda} u(t) + \phi_0 \right) \\ &\cos(2\pi f_S t + \phi_S) = \frac{1}{2} AA_1 \left(\cos 4\pi f_B t + \frac{4\pi}{\lambda} u(t) + \phi_0 + \phi_S \right) \\ &+ \frac{1}{2} AA_1 \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} u(t) + \phi_0 - \phi_S \right). \end{aligned} \quad (3)$$

调整相位使 ϕ_0 与 ϕ_S 相差 90° , 并通过低通滤波器滤除上式的第一项, 又 $(4\pi/\lambda)u(t)$ 很小以致接近于 0, 所以可得:

$$I(t) = \frac{1}{2} AA_1 \sin \left(\frac{4\pi}{\lambda} u(t) \right) \approx \frac{2\pi}{\lambda} AA_1 u(t) = Ku(t). \quad (4)$$

因此输出电流正比于(其中比例系数 $K = (2\pi/\lambda)AA_1$) 超声振动位移, 据此可检测超声信息。

4 光路关键环节调试方法

光路系统调试的过程中,要做好对空间准直性和两束光能量分配的调试,以得到较好的差拍信号。

4.1 空间准直性的调试

在水平实验台上画出参考线,准备一个带有坐标纸的白屏。首先调整激光器,使其发出的光平行于实验台。每增加一个光学器件,就要调整

其二维架上的两个旋钮,使得当白屏在参考线上移动时,光点始终位于坐标纸的同一点。

反复实验证明,先调 1 级光,再用它作为参考,调整 0 级光,能更方便地实现两束光在同一平面内重合。因为 1 级光经过偏振分光棱镜是透射,不会改变传播方向。而 0 级光要通过偏振分光棱镜全反射,它与偏振分光棱镜的放置有关。当调整好 1 级光后,再放置调整偏振分光棱镜,使 0 级光与 1 级光重合。

1 级光要 2 次通过反射镜再通过直角棱镜,经过了 3 次反射,随意移动其中一个部件就会造成光路的很大变化,给光路调节带来困难。尽量使 2 个反射镜与入射光束成 45° ,最后使从 M_3 中出射的光沿着实验台上画好的参考线平行出射。

4.2 两束光能量分配调试

调整光阑后面的 $\lambda/2$ 波片,使得信号光和参考光干涉时的光强尽可能接近。由于波片的角度设置,0 级光和 1 级光始终处于互相垂直的状态,检偏器转动角度要使得在两束光的垂直平分线上的光分量强度尽可能接近,才有较好的干涉效果,具体办法是:分别挡住其中一束光,然后在白屏上观察其光强,调节检偏器使得光强一致。

5 测试结果

经过上述光路的调试,在示波器上可以观察到明显的差拍信号,如图 4 所示,它的频率是 39.56 MHz,与理想的 40 MHz 相比误差只有 0.1%,幅值为 54.4 mV,接近 60 mV。图 5 所示是所用的方波激励信号,其主频为 62.42 kHz,幅值为 74 V。

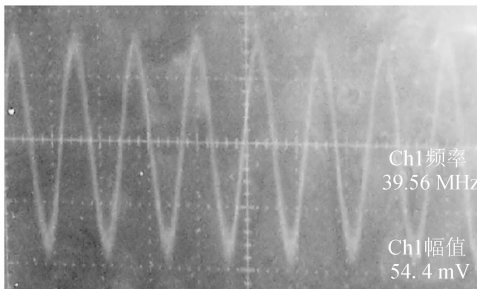


图 4 40 MHz 差拍信号

Fig. 4 40 MHz beat frequency signal

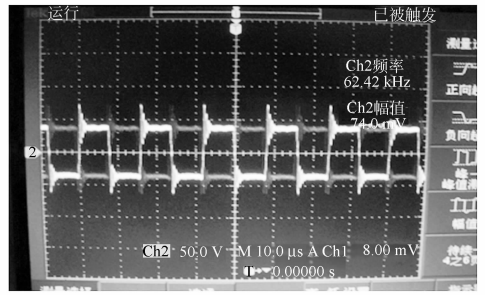
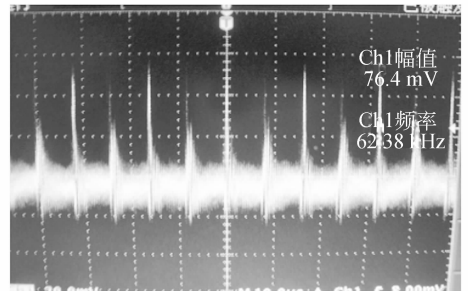


图 5 超声探头激励信号

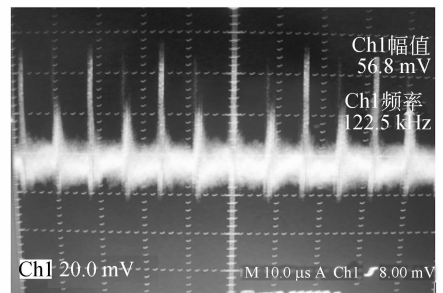
Fig. 5 Excited signal for ultrasonic probe

图 5 是超声探头激励信号,图 6 是所测得的振动信号的波形。从该组振动波形来看,测得的振动主频会出现约 62.38 kHz(近似等于激励信号主频或中心频率)和约 122.5 kHz 的情况,这是因为当中心频率约为 62.4 kHz 的方波信号激励超声探头时,会以该频率作为基频产生共振现象,引起探头在这个频率点有较强的振动效果,同时它的二次谐波也会与其发生共振现象,在某些



(a) 一次谐波

(a) First harmonic frequency wave



(b) 二次谐波

(b) Second harmonic frequency wave

图 6 超声振动信号

Fig. 6 Ultrasonic vibration signals

情况下甚至表现得很强烈以致占能量的主导地位,由于示波器记录数据的瞬时性,所显示的频率值在某些情况下可能会是它的二次谐波值,从统计以及实验观察来看,这个频率值是在基频和二次谐波两个频率点进行跳动。从幅值来看,对应电压几乎能达到 80 mV。

实验还可以看出,系统所测得的超声振动含有大量的噪声,但也能清晰地分辨出振动峰值的跳动对超声探头的激励电压方波具有跟踪的性质。这是因为:当一个方波到来时,对超声探头的冲激作用最大,引起的振动也最为强烈,因此幅值较大,在测得的振动信息中便表现为峰值的跳动。

6 结 论

激光超声是近些年发展起来的一种新的无

损探测技术,具有非接触、宽带等诸多优点。本文设计的外差干涉系统,通过光路系统改进设计,抑制了光学噪声,提高了系统检测灵敏度。推导了超声振动信号的检测原理,根据 0 级光和 1 级光并非完全理想偏振的特点,提出了一种保证空间准直性的光路调试方法。结果表明:实验测得外差信号频率是 39.56 MHz,与理想的 40 MHz 相比误差只有 0.1%,幅值接近 60 mV;当用主频为 62.42 kHz、幅值为 74 V 方波激励信号时,测得振动电压几乎能达到 80 mV,而且,系统调试方便,成本较低,适合对微弱的激光超声信号进行检测研究。

参考文献:

- [1] 钱梦骏. 激光超声检测技术及其应用[J]. 上海计量测试, 2003, 30(1): 4-7.
QIAN M L. Laser ultrasound technique and its application [J]. *Shanghai Measurement and Evaluation*, 2003, 30(1): 4-7. (in Chinese)
- [2] 张淑义. 激光超声与材料无损评价[J]. 应用声学, 1992, 11(4): 1-6.
ZHANG SH Y. Laser ultrasound and materials nondestructive evaluation[J]. *Applied Acoustics*, 1992, 11(4): 1-6. (in Chinese)
- [3] LI X F, WANG CH, XIANG H B, *et al.*. Finite element simulation of ultrasonic guided waves generated by a pulsed laser in human skin [J]. *Instrument of Science & Technology*, 2006, 34 (6): 711-725.
- [4] QI L H, NI Q L, CHEN B. Experimental investigation of laser-produced-plasma EUV source based on liquid target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(5): 604-607.
- [5] MA P, HU J P, CHEN S L, *et al.*. High laser damage threshold coatings and damage testing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(4): 500-504.
- [6] MONCHALIN J P. Heterodyne interferometric laser probe to measure continuous ultrasonic displacement [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1985, 56 (4): 543-546.
- [7] 龚育良, 张永智, 梁海岩. 用外差干涉法探测固体表面激光超声的研究[J]. 中国激光, 1997, 24(9): 819-822.
GONG Y L, ZHANG Y ZH, LIANG H Y. Research of detection of solid surface laser ultrasonic pulses using a laser heterodyne interferometric method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24(9): 819-822. (in Chinese)
- [8] MAO W, ZHANG SH L, TAN Y D. Experimental research on dual polarized laser optical feedback microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(5): 613-619.
- [9] 龚育良, 李红卫, 白世武. 激光外差探测超声位移的原理、方法和实验[J]. 声学学报, 1996, 21(3): 259-264.
GONG Y L, LI H W, BAI SH W. Principle, method and experiment of ultrasonic displacement measurement by laser heterodyne interferometer [J]. *Acta acustica*, 1996, 21(3): 259-264. (in Chinese)

作者简介: 李醒飞(1966—), 男, 教授, 主要从事精密测控与测试技术的研究。E-mail: lixf@tju.edu.cn

王 驰(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事精密测控与测试技术的研究。E-mail: wangchi@tju.edu.cn

张国雄(1936—), 男, 教授, 主要从事精密测控与测试技术的研究。E-mail: gxzhang@tju.edu.cn