

基于共焦球面法布里-珀罗干涉仪的激光超声信号检测

尹向宝,金永君

(黑龙江科技学院 数学力学系,哈尔滨 150027)

摘要:从理论上对共焦球面法布里-珀罗干涉仪的自由谱宽、透射谱线半宽度和精细度等光学参数与共振腔长度及球面镜曲率半径的关系进行了分析。根据激光超声检测的特点和要求,设计制作了一台实验室用的共焦球面法布里-珀罗干涉仪。根据选择的干涉仪参数及其具体结构形式,获得了干涉仪的锯齿波扫描透射曲线的试验结果,成功实现了激光超声的非接触测量。

关键词:激光超声检测;共焦球面法布里-珀罗干涉仪;速度型干涉测量

中图分类号:TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2009)07-0531-03

Signal Detection of Laser Ultrasound Based on Spherical Confocal Fabry-Perot Interferometer

YIN Xiang-Bao, JIN Yong-Jun

(Heilongjiang Institute of Science and Technology, haerbin 150027, China)

Abstract: The relationships were analyzed for the spherical confocal Fabry-Perot interferometer between free spectral width, half-width of transmission lines and fine optical parameters of with the cavity length and radius curvature of spherical mirror theoretically. According to the characteristics and requirements of laser ultrasonic testing, a laboratory spherical confocal Fabry-Perot interferometer was designed. According to the interferometer parameters chosen and the specific structural form, the scanned sawtooth wave of the interferometer was got, which showed the success of non-contact laser ultrasonic measurement.

Keywords: Laser ultrasound detection; Spherical confocal Fabry-Perot interferometer; Speed type interferometry

激光超声检测技术是利用激光脉冲激发和检测超声,从而实现无损检测的一种方法。它有自差法、外差法和共焦法布里-珀罗干涉法等,其中共焦球面法布里-珀罗干涉仪(CFPI)接收超声的方法属于速度干涉法,它基于振动表面反射光和散射光的多普勒频移,使光的频率受到超声波信号的调制,再由共焦球面法布里-珀罗干涉仪解调,将频率调制变为光强调制,从而检测超声振动信号。这种速度干涉仪对振动样品表面速度灵敏,而对周围环境振动(一般只在低频范围)不灵敏。此外,该干涉仪可同时接收

多个散射光斑,有强的集光能力,因此适用于现场对工件表面超声振动的探测^[1]。但这种干涉仪结构复杂,加工精度要求高,调焦困难,尤其是腔长和工作点的控制更为困难。笔者自行设计制作了一台共焦Fabry-Perot干涉仪,合理地选择参数及结构,获得了令人满意的试验结果。

1 共焦 Fabry-Perot 干涉仪的基本原理

CFPI是由两个曲率半径相等,镀有低损耗高反射系数多层介质膜的凹球面镜共焦放置而成。在忽略球差的情况下,当入射光近轴入射时,进入腔内的光将在两球面间来回反射,形成一闭合路径,自动保持原来的光学模式。由于共焦腔的模具有高度简并性,因此,不要求有严格的模匹配。设表征干涉仪相对透射光强为 T_E ,则有:

收稿日期:2008-09-11

基金项目:黑龙江省教育厅 2008 年度科学技术基金资助项目(11531331)

作者简介:尹向宝(1978—),女,讲师,硕士,从事岩石声场的研究及大学物理教学工作。

$$T_E = \frac{I}{I_i} = \frac{(1+R^2)(1-R^2)}{1+R^4 - 2R^2 \cos \frac{8\pi L}{c}} \quad (1)$$

式中 R 为镜面反射系数; L 为腔长; c 为光速; ν 为光频; I_i 为干涉仪的入射光强; I 为透射光强。

当 R 确定时, T_E 只是入射光频 ν 和干涉仪腔长 L 的函数。当 $\nu = \nu_m = c/4L$ (ν_m 为共振频率) 时, 透射系数达到最大值。即当入射光满足该谐振条件时, 进入腔内和射出腔外及腔内来回反射的光波为同相位, 腔内的光波发生相长干涉^[2]。其相对透射光强曲线 $T_E(\nu)$ 如图 1 所示。

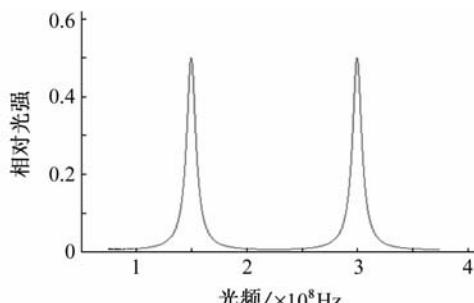


图 1 干涉仪的相对透射光强曲线 $T_E(\nu)$

CFPI 用于探测超声波的试验装置如图 2, 它是集光、声、电等为一体的精密检测系统。

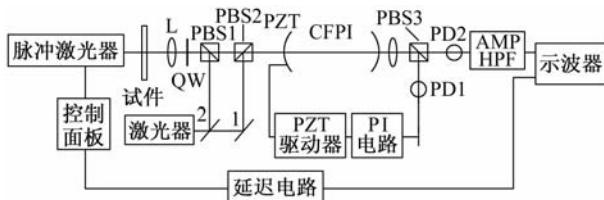


图 2 CFPI 超声信号检测实验装置

He-Ne 激光束经分光镜 BS 分光, 光束 1 经偏振分光镜 PBS2 全反, 透过 CFPI, 再经偏振分光镜 PBS3 全反至光电转换器 PD1, 将光信号转化成电信号, 经 PI 调节器调节校正后送入 PZT 驱动器功率放大, 以驱动 PZT 筒的伸缩来控制 CFPI 的腔长以便稳定工作点。光束 2 经 PBS1 全反到物体表面, 其散射光被在物体内部传播的超声波引起的多普勒频移所调制, 经透镜 L 汇聚后通过 QW 即 $1/4$ 波片。由于两次通过 $1/4$ 波片, 光束的偏振方向旋转 $\pi/2$, 于是信号光全部透过偏振分束片 PBS1 和 PBS2, 经 CFPI 干涉后, 由透镜聚焦, 再全部透过偏振分束片 PBS3 入射到光电转换器 PD2 的光敏面上。此信号为解调了的超声信号, 经放大和滤波后在示波器上显示。

PBS 为偏振分光镜, 当光束的偏振方向垂直纸

面时, 它对光束 100% 反射; 当光束的偏振方向平行于纸面时, 它对光束 100% 透射。

2 干涉仪的主要光学参数

CFPI 各项指标直接影响超声波光学系统的品质^[3]。正确选择 CFPI 的各个参数(即球面镜的曲率半径 r 及反射系数 R) 及其结构形式, 对于超声波接收器的正常运行是非常重要的。CFPI 的性能由以下几个重要参数来描述。

2.1 干涉仪的自由谱宽

如图 1 所示, 干涉仪的自由光谱范围 $\Delta\nu_f$ 用来衡量干涉仪所能区分的最大频率范围, 其定义为:

$$\Delta\nu_f = \frac{c}{4L} \quad (2)$$

式(2)反映了两个相邻透射峰值之间的频率差。当腔长变化 $\Delta d = \lambda/4$ 时, 干涉仪经过一个自由光谱区。

2.2 干涉仪带宽

干涉仪的带宽 $\Delta\nu$ 是指透射光强响应下降到其最大值响应一半时所对应的两频率之差, 简称为半峰值宽度, 其定义为:

$$\Delta\nu = \frac{c(1-R^2)}{4\pi LR} \quad (3)$$

$\Delta\nu$ 越小, 透射光强响应曲线越陡, 干涉条纹越锐。

2.3 精细度

干涉仪的精细度 F 表示在一个自由光谱范围内可以分辨的谱线数目, 其定义为:

$$F = \frac{\Delta\nu_f}{\Delta\nu} = \frac{\pi R}{1-R^2} \quad (4)$$

在不考虑其它损失的情况下, 当 R 选定后, F 即为一常数。实际上, 参数 F 还会受实际镜面和理想镜面的偏差以及光的衍射等影响。

3 干涉仪的设计制作

3.1 参数选择

由上述几个参数的定义可知, 几个参数均与 CFPI 的两个参数有关, 即球面镜的曲率半径 r 和反射面的反射系数 R 。下面将通过分析计算来确定这两个参数的取值。

3.1.1 干涉仪带宽

对于无损检测领域中的超声信号, 其频率大多在 10 MHz 以内。因此选择仪器的带宽 $\Delta\nu = 5$ MHz。这样一方面兼顾了仪器的灵敏度及应用场合的要求, 同时也考虑到该仪器对后续电子线路的频带要求不至于太高。

由式(3)可知,合理选择 L 和 R ,使其既满足带宽要求,又对其加工工艺的要求不至于太苛刻。比如,过高的 R 在工艺上要求甚高,其成本也很昂贵;过大的 L 对于镜面加工相对容易,但对其机械支撑部分的加工要求较高。因此选择 $R=0.97$, $L=302$ mm,这样,实际的仪器带宽为 $\Delta\nu=4.8$ MHz。

3.1.2 自由谱宽

当选定干涉仪两个相邻穿透峰值对应的频率差后,自由谱宽就确定了。为了获得较高的精细度,选择仪器带宽时一定要兼顾自由谱宽。根据以上参数可以算得,实际仪器的自由谱宽为 $\Delta\nu_f=248$ MHz。

3.1.3 精细度

根据式(4),精细度愈高,透射峰愈陡,灵敏度愈高,但要求 R 愈大。综合考虑加工工艺、成本及灵敏度后,实际的精细度 $F=51.5$ 。

3.2 球面反射镜的设计

CPFI 对环境温度的变化很敏感,而且用于激光超声检测时,对共焦工作点(透射峰的半峰值点)要求较高,否则解调灵敏度很低。因此其腔长设计为可调的(包括粗调和微调)。这种设计一方面保证了系统有一定的调节范围,另一方面能够微调,以保证干涉仪能够严格共焦^[4]。

干涉仪在结构上要具有良好的整体性和稳定性(图 3)。两球面镜(内表面选用 632.8 nm 多层介质膜,外表面镀有 632.8 nm 增透膜)分别安装在两个镜座上。其中一个镜座可以通过螺纹沿轴向微调,以改变腔长进行共焦调整;另一镜座与 PZT 微位移器连接,以实现压电式扫描。必须保证机械与光学系统的同轴,腔长的微调分辨率优于 0.7 μm 。

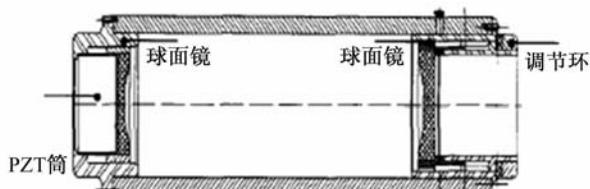


图 3 共焦球面法布里-珀罗干涉仪构造图

4 CFPI 的试验结果及分析

根据在近共焦状态时干涉条纹的变化规律,可以确定共焦状态的调整方法。自行研制的 CFPI 经仔细调整,得到一系列试验结果(图 4)。由图 4 可见,其透射曲线很陡,说明干涉仪有足够的精细度。当加在 PZT 微位移器的锯齿波驱动电压为 200 V 时,可以扫过 6 个自由谱区^[5]。

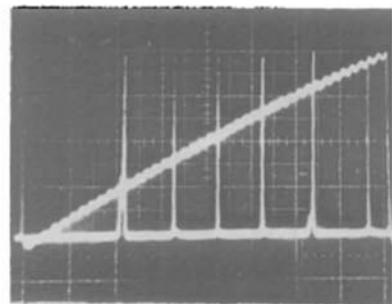


图 4 矩齿波电压(200 V)与透射峰值

试验结果表明,研制的 CFPI 干涉图样清晰,透射曲线陡立,可实现激光超声的非接触测量。

参考文献:

- [1] Zhou Jia, Li Po Zeolite. Modified microcanfilever gas son. got for indoor air quality control[J]. Sensors and Actuators B, 2003, 94(3): 337—342.
- [2] Thomsen C, Grain H T, Mares H J, et al. Phys. R EV[J]. 1986, B34(5): 4129—4140.
- [3] 张晓春. 激光超声技术及其应用[J]. 大学物理, 1998, (2): 31—33.
- [4] 高会栋, 沈中华, 徐晓东. 固体中脉冲激光激发声表面波的理论研究[J]. 应用声学, 2002, 21(5): 19—24.
- [5] 张光玉, 解梅, 马争. 一种新的彩色图像边缘检测算法[J]. 电子科学大学学报, 2005, 34(2): 164—167.

(上接第 530 页)

参考文献:

- [1] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] Sophian A, Tian G Y, Talyor D, et al. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulse eddy current NDT[J]. NDT & E International, 2003, 36(1): 37—41.
- [3] 王春艳, 陈铁群, 张欣宇. 脉冲涡流检测技术的某些进展[J]. 无损探伤, 2005, 29(4): 1—4.
- [4] Dai X W, Ludwig R, Palanisamy R. Numerical simulation of pulse eddy current nondestructive testing phenomena[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990, 26(6): 3089—3096.
- [5] Patel U, Rodger D. Finite element modeling of pulsed eddy current for nondestructive testing [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(3): 1593—1596.
- [6] Pavo J. Numerical calculation method for pulsed eddy current testing[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 1169—1172.