

基于激光干涉法测水介质正弦压力的动态校准技术

李 博^{1,2}, 杨 军¹, 黄 楠³, 石玉松¹

(1. 中国航空工业集团公司 北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;
2. 陆军装甲兵学院 兵器与控制系, 北京 100072; 3. 中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘 要: 针对动态压力传感器校准中, 压力无法直接准确溯源的问题, 一种利用激光干涉法测量水介质折射率的方法用于正弦压力校准。压力腔内充满水介质并产生动态压力, 以周期型的正弦压力为例, 通过激光干涉测量正弦压力下水介质折射率的改变, 得到介质动态压力的大小。为了对正弦压力进行精确测量, 建立数学模型并进行实验验证, 研制专门的解调系统, 通过硬件和软件的配合来实现正弦压力的精确测量。通过静态和动态试验验证了基于激光干涉测量压力的数学模型, 激光干涉方法来测量动态压力切实可行, 实现动态压力的量值溯源到时间、长度等基本量上。

关键词: 测量; 激光干涉法; 正弦压力; 传感器校准; 动态测量

中图分类号: TB935 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0805003

Dynamic calibration technology for measuring sinusoidal pressure of water medium based on laser interferometry

Li Bo^{1,2}, Yang Jun¹, Huang Nan³, Shi Yusong¹

(1. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100095, China;
2. Department of Weaponry and Control, Academy of Army Armored Forces, Beijing 100072, China;
3. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: Aiming at the dynamic pressure sensor calibration, the pressure can not be accurately traced, a method of measuring refractive index of water medium by laser interferometry was used for sinusoidal pressure calibration. The pressure chamber was filled with water medium and generated dynamic pressure. Taking the periodic sinusoidal pressure as an example, the dynamic pressure of the medium was obtained by measuring the change of refractive index of the water under the sinusoidal pressure by laser interference. In order to measure sinusoidal pressure accurately, a mathematical model was established and verified by experiments. A special demodulation system was developed to measure sinusoidal pressure accurately through hardware and software cooperation. Through static and dynamic experiments, the mathematical model of pressure measurement based on laser interferometry was validated. It is feasible to measure dynamic pressure by laser interferometry, and the value of dynamic pressure can be traced back to such basic quantities as time and length.

Key words: measurement; laser interferometry; sinusoidal pressure; sensor calibration; dynamic measurement

收稿日期: 2019-03-11; 修订日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51775526)

作者简介: 李博(1990-), 男, 工程师, 本科, 主要从事力学量的动态测量与校准技术方面的研究。Email: libo@cimm.com.cn

0 引言

压电式压力传感器具有灵敏度高、动态特性好等优点,广泛应用于动态压力测量,如枪炮膛压变化以及炮口冲击波压力、爆炸冲击波压力、发动机内流压力脉动等的测量。但对于相当一部分压电式压力传感器,如不使用高阻抗电荷放大器,就难以采用静态校准方法进行校准,特别是近年来发展非常迅速的内置放大器的压电传感器(如 ICP 压力传感器),电荷泄漏时间较短,更是无法进行静态校准。因此,动态测量与校准技术越来越受到重视和推广。虽然校准的技术手段也越来越多,但动态压力的溯源技术发展相对缓慢。

为了解决动态压力的可溯源问题,近年来在欧洲计量组织 EURAMET 项目“Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities”^[1]的支持下,欧洲多个国家计量技术研究机构对激光干涉仪在动态压力校准应用中进行了研究^[2-6]。而美国国家标准与技术研究院(NIST)近期致力于一个项目来提高气体折射率的测量,其目的:一是提高在空气或其他气体环境下激光干涉测量能力;二是利用折射率与气体密度和温度的关系间接测量气体压力和气体温度。NIST 计划用这种方式建立新的压力标准和温度标准^[7-10]。

目前,国内外动态压力校准装置大体有两种形式:一种是通过理论计算得到动态压力信号,称为绝对校准;另一种是通过其他手段和方法直接测量得到动态压力信号,将测得动态压力信号作为标准源,称为相对校准。各国正在推进利用激光干涉技术测量压力的方法研究,利用激光的动态响应快、灵敏度高等特点,可以使动态压力测试系统测量的幅值及相位移动的准确度、可靠性得到大幅提高。目前,北京长城计量测试技术研究所已实现利用激光干涉测量的方法对脉冲压力进行校准^[11-12],但国内现有的正弦压力校准装置主要还采用相对法进行校准,即通过标准传感器来标定被校传感器。文中介绍了在正弦压力装置上采用基于水介质折射率改变的激光干涉测量方法,实现了对正弦压力的测量和可靠溯源。

1 测量原理

1.1 整体测量模型

在动态压力测量中,采用周期型的正弦压力作

为激励源,整体装置示意图如图 1 所示,整个压力腔内充满液体介质,压力发生器产生正弦压力波动,光学测量腔体安装在上端压力腔内,利用激光干涉仪测量压力腔内液体介质随着压力变化的光程变化,通过液体介质内折射率的改变使正弦压力能溯源到时间、长度与静态压力等量上。

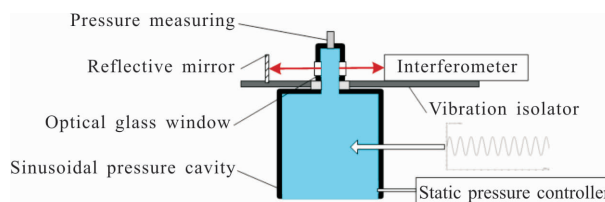


图 1 正弦压力激光干涉法测量示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sinusoidal pressure measurement by laser interferometry

激光干涉测量系统发出的激光依次通过玻璃光学窗口、液体介质、玻璃光学窗口,并通过反射玻璃反射后原路返回;静压控制器用于正弦压力腔体内静态压力预压加载和激光干涉测压系统静态标定时静压加载;压力测量系统对正弦压力腔体内压力进行高精度测量。

激光干涉测量系统测量得到的正弦压力所引起的内部液体介质的光程变化,除以激光干涉测压系统标定所得到的光程-压力转化系数 $\alpha(\mu\text{m}/\text{MPa})$,即可以得到被测的压力 $\Delta p = \frac{\Delta l}{\alpha}$,整体流程如图 2 所示。

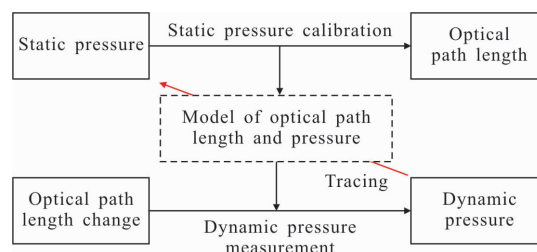


图 2 激光干涉法测量正弦压力溯源示意图

Fig.2 Schematic diagram of sinusoidal pressure tracing based on laser interferometry measurement

采用光程-压力转化关系的定义用于动态压力测量时,理论上可以把动态压力溯源到长度、时间、阿伏伽德罗常数等参数上去。

1.2 基于折射率模型的压力测量

在光频条件下,根据洛伦兹-洛伦茨方程(Lorentz-

Lorenz equation)^[13], 非导电液体介质的折射率 n 与介质密度 ρ 之间存在一定关系:

$$\frac{n^2-1}{n^2+2}=\rho k \quad (1)$$

经过变形, 得到:

$$n=\sqrt{\frac{1+2\rho k}{1-\rho k}}, \text{ 其中 } k=\frac{N_A\alpha}{3\varepsilon_0 M_{\text{mol}}} \quad (2)$$

式中: M_{mol} 为摩尔质量; N_A 为阿伏加德罗常数; α 为分子电极化率; ε_0 为真空介电常数; k 为常数。

选用压力介质为去离子水(纯水), 在试验环境 20 °C 和相对湿度 70% 以下的条件下, 根据由 IAPWS^[14] (国际水和水蒸气性质协会) 提供的去离子水物理性质数据, 如表 1 所示, 常数 k 可计算得到为 $2.060\ 54\times 10^{-4}\ \text{m}^3/\text{kg}$ 。

表 1 去离子水(纯水)物理性质

Tab.1 Physical properties of deionized water

Refractive index	Density/kg · m ⁻³	Bulk modulus of elasticity/GPa
1.332 99	998.232 3	2.18

而液体介质的密度 ρ 是介质压力 p 和温度 T 的函数, 并且折射率 n 随着密度 ρ 的增大而增大, 但成非线性关系。体积弹性模量 K 随压力与温度变化, 但在 50 MPa 以内等温过程中可近似为常数, 纯水常温下取体积弹性模量 $K=2.18\ \text{GPa}$, 根据体积弹性模量的定义: $K=-\frac{\Delta\rho}{\Delta V/V}$, 又有 $\frac{\Delta\rho}{\rho}=-\frac{\Delta V}{V}$, 式中变形得到 $\frac{\Delta\rho}{\rho}=\frac{\Delta\rho}{K}$, 再变形可以得到:

$$\rho=\rho_0 e^{\frac{\Delta\rho}{K}}=\rho_0 e^{\frac{1}{K}(p-p_0)} \quad (3)$$

取 $p_0=101.325\ \text{kPa}$ 和 $\rho_0=998.232\ 3\ \text{kg/m}^3$ 分别为 20 °C 时纯水在标准大气压下的绝对压力与密度, 将公式(3)代入公式(1)则有:

$$\frac{n^2-1}{n^2+2}=k\rho_0 e^{\frac{\Delta p}{K}}=0.205\ 69 e^{\frac{\Delta p}{K}} \quad (4)$$

设 $X=0.205\ 69 e^{\frac{\Delta p}{K}}$ 代入公式(4), 变形得到:

$$n=\sqrt{\frac{1+2X}{1-X}} \quad (5)$$

根据公式(5)经计算得到 100 MPa 以内压力与折射率关系曲线如图 3 所示。

由图 3 可知压力与折射率为非线性关系, 但在

环境温度 20 °C 和压力 20 MPa 以下时, 得到纯水折射率与压力的关系基本呈线性关系, 对其进行线性拟合可以得到水的折射率简化公式:

$$n=K_w p+n_{20} \quad (6)$$

式中: K_w 为折射率与压力系数; n_{20} 为 20 °C 水的折射率, 经过线性拟合计算得到折射率与压力系数 $K_w=1.716\ 1\times 10^{-4}\ \text{MPa}^{-1}$ 。

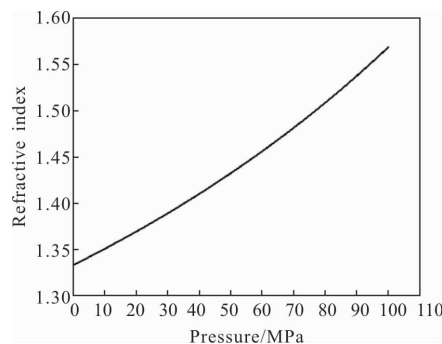


图 3 去离子水折射率与压力的关系曲线

Fig.3 Relationship between refractive index and pressure of deionized water

利用激光干涉法测量液体介质光程差的变化来实现动态压力的测量, 实际测量光路如图 4 所示, 总光程路径 l 为:

$$l=2L_a+2L_g+L_w \quad (7)$$

式中: L_a 为空气中光程; L_g 为光学玻璃中光程; L_w 为液体介质中光程。

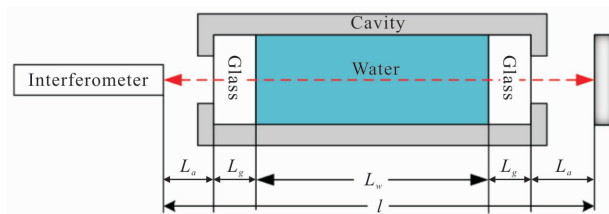


图 4 实际测量光路示意图

Fig.4 Schematic diagram of the actual measurement of the optical path

腔体内纯水体积弹性模量为 2.18 GPa, 光学压力腔体外壳采用 06Cr19Ni10 材料, 弹性模量 $E=194\ \text{GPa}$, 同等压力下形变远小于纯水, 可以忽略腔体形变对光学路径测量的影响; 光学玻璃采用 H-K9L 型玻璃, 弹性模量 $E=79.2\ \text{GPa}$, 同等压力下形变远小于纯水, L_g 的改变可以忽略不计; 而在实验室条件下, 温

度恒定,外界环境影响因素很小, L_a 的改变可以忽略不计,因此可以认定光学路径的改变主要由液体介质受压导致折射率的变化而引起的,激光干涉仪测得的压力腔中光程变化 Δl 可表示为:

$$\Delta l = \Delta L_w = \Delta n L_w = K_w \Delta p L_w \quad (8)$$

这样就得到了光程-压力的数学模型,其中光程-压力转化系数就定义为压力激光测量的光程灵敏度 a 为:

$$a = \Delta l / \Delta p = K_w L \quad (9)$$

可见,光程灵敏度 a 与压力腔内液体介质通光距离有关,但实际却不好测量。

前面的理论分析表明,光程灵敏度随压力没有明显变化,即具有很好的线性,因此,将主要考虑使用现场原位静态标定的方式来确定光程灵敏度 a 。

现场原位静态标定的方式来确定光程灵敏度具有两点优势:(1) 不需要对激光通过的内部实际物理路径进行测量,极大的提高了试验的便利性;(2) 只要水介质的相关物理属性不发生突发性的或本质性的变化,动态试验前的原位静态标定可能消除其相关物理属性长期漂移带来的影响。

1.3 激光干涉测量系统搭建

对光程的变化通过激光干涉进行高精度测量,主要考虑采用外差式激光干涉仪用于测量光程变化,外差式激光干涉仪与测量光路如图 5 所示。

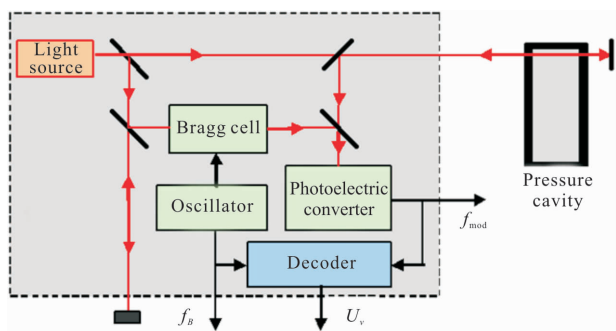


图 5 正弦压力测量中的外差式激光干涉仪工作流程图

Fig.5 Heterodyne laser interferometer for sinusoidal pressure measurement

软件解调技术利用外差式激光干涉仪原始的 Bragg 频移晶振信号和速度调频信号,再经过混频降频、A/D 转换、软件算法解调直接得到了动态位移信号。混频降频的电路如图 6 所示,在通过软件中的解调,最终得到动态位移信号。

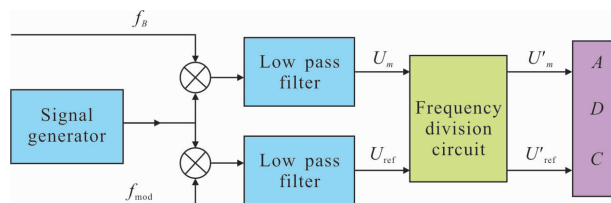


图 6 激光干涉信号降频解调结构示意图

Fig.6 Schematic diagram of frequency reduction demodulation for laser interference signals

光电信号相对于布拉格晶振信号的频移与速度 v 的关系为:

$$f_{mod} - f_b = 2 \frac{v}{\lambda} \quad (10)$$

式中: f_{mod} 为光电信号; $f_b=40$ MHz 为布拉格晶振信号; λ 为激光波长,使用波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ He-Ne 激光器。 f_{mod} 和 f_b 分别与一个正弦信号混频,将高频信号降为低频信号,再进行低通滤波,得出 U_m 、 U_{ref} 。再用采集卡采集两路信号,将两路信号进行延迟、相乘、带通滤波产生正交信号 $U_1[n]$ 、 $U_2[n]$,其位移可以通过下式算出:

$$s[n] = \frac{\lambda}{4\pi} \left(\arctan \frac{U_2[n]}{U_1[n]} + k\pi \right) \quad (11)$$

须使布拉格晶振信号降频后仍大于频移最大值,而光电信号降频后频率范围为 $f'_B - 2 \cdot \frac{|V|}{\lambda} \sim f'_B + 2 \cdot \frac{|V|}{\lambda}$, f'_B 为布拉格晶振信号降频后频率。

对不同频率范围设计不同物理路径长度的光学腔,1~10kHz 为 10 mm,10~20kHz 为 8 mm,20~30 kHz 为 6 mm,正弦压力峰值 0.01~1 MPa,进行不同频率与压力幅值对应的测试,发现最大频移小于 0.5 MHz。

选混频信号 39 MHz, $f'_B=1$ MHz,为了满足采样定律并进行正交信号转换,采样频率不低于 4 MHz。通过软件中的解调过程如图 7 所示,得到动态位移信号。

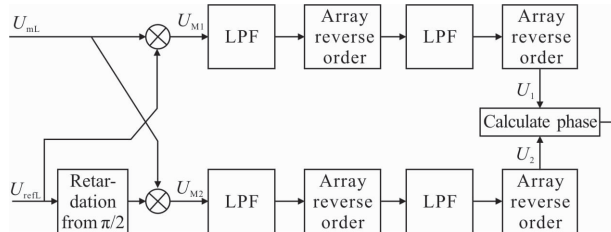


图 7 激光干涉信号解调软件处理流程图

Fig.7 Demodulation software processing of laser interference signal

2 实验

2.1 静态实验

为了确认光程-压力数学模型的准确性,设计了 $L=170\text{ mm}$ 的液体腔长度的静压实验,来确定压力激

光测量的光程灵敏度 a ,实验流程示意如图 8 所示。

实验装置如图 9 所示,实验过程中严格控制内部压力介质温度为 $(20\pm 0.2)^\circ\text{C}$,利用压力控制器每隔 25 s 加压一次,每一次压力上升 1 MPa 直至 10 MPa,通过 SIOS SP120-DI 型激光干涉仪采集压力变化过

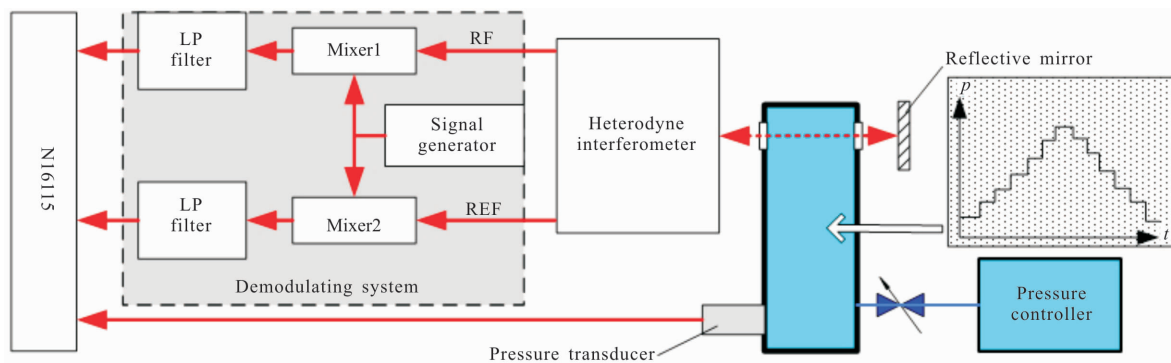


图 8 静态压力装置实验流程示意图

Fig.8 Flow diagram of static pressure experimental device

程中的光程改变,压力传感器测量静态压力值。

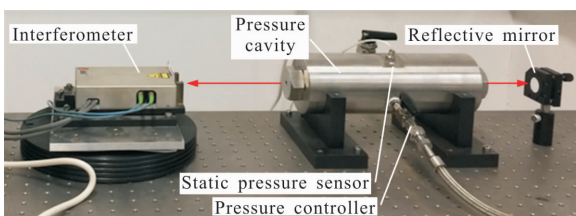


图 9 静态压力激光干涉测量实验装置图

Fig.9 Static pressure laser interferometry experimental device

某次加载阶梯压力光程的压力与光程变化曲线如图 10 所示,在一定压力范围内经过线性拟合结果显示光程变化-压力之间存在很好的线性关系,得到关系系数为 $28.2208\ \mu\text{m}/\text{MPa}$ 。而通过公式(9)计算得

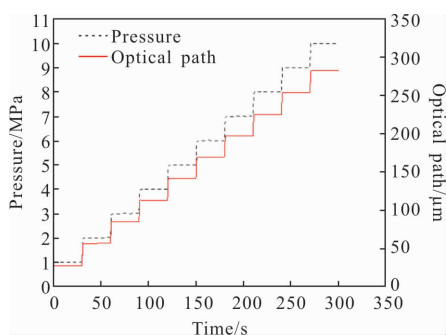


图 10 压力阶梯变化过程中的光程变化曲线

Fig.10 Optical path change curve during pressure gradient change

到的理论光程灵敏度为 $29.1737\ \mu\text{m}/\text{MPa}$,这比实际测量得到的光程灵敏度略大,原因可能由于液压腔体内部加工或装配误差引起的液体腔长度不准确。

在静态压力条件下经过多次试验验证,试验结果与光程-压力的数学模型相符合,而在实际动态测量使用中将根据插值与拟合的方法获取当时静态压力下的光程灵敏度,因此现场原位标定是非常必要的。

2.2 动态实验

为了把静态标定的光程灵敏度结果用于动态测量,通过在动态测量时的平均压力监测,选取相应压力点的光程灵敏度用于动态测量。搭建正弦压力实验装置如图 11 所示,装置的正弦压力频率范围 0.1~

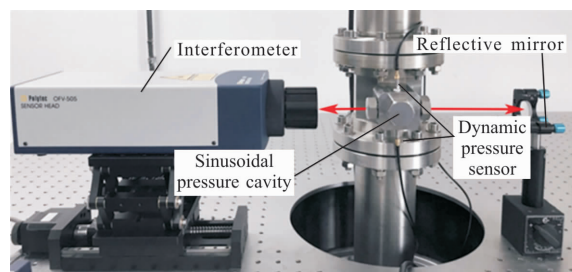


图 11 正弦压力激光干涉测量实验装置图

Fig.11 Sinusoidal pressure laser interferometry experimental device

30 kHz,正弦压力峰值 0.01~1 MPa,静态压力 0.1~10 MPa。设计的正弦压力试验腔体内长度 $L=14\text{ mm}$,

在进行动态测量前首先进行原位静态标定光程灵敏度,步骤如上文描述。通过原位静态标定得到实际测量光程灵敏度为 $2.3302 \mu\text{m}/\text{MPa}$, 理论值为 $2.4025 \mu\text{m}/\text{MPa}$ 。

为了验证光程-压力的数学模型在动态测量中的准确性,进行正弦压力扫频试验,对一支带前置放大的压电式压力传感器 PCB-113B03 在 $1\sim 30 \text{ kHz}$ 范围内每隔 1 kHz 进行正弦激励,某次 5 kHz 正弦压力激励下加载结果如图 12 所示,激光测量得到的正弦压力波形失真度 $<1\%$,以激光干涉法进行正弦压力的测量切实可行。

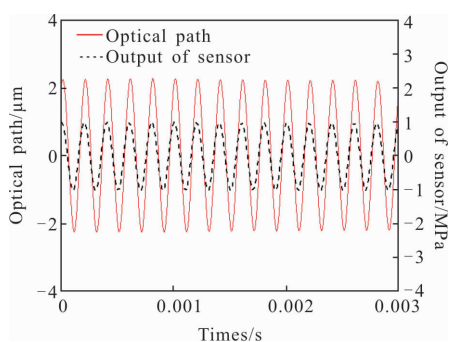


图 12 5 kHz 正弦激励下输出曲线

Fig.12 Output curve under sinusoidal excitation of 5 kHz

在 $1\sim 30 \text{ kHz}$ 范围内扫频下,以传感器压力输出为标准,通过光程-压力模型计算得到压力值与传感器输出压力值进行比对,结果如图 13 所示。

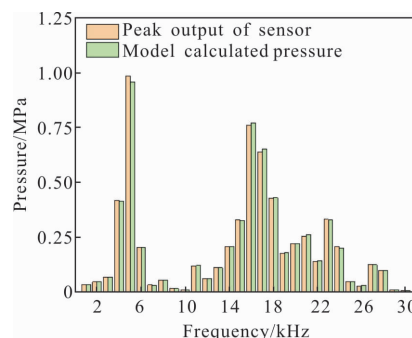


图 13 正弦压力输出结果对比图

Fig.13 Comparison of sinusoidal pressure output results

在 $1\sim 30 \text{ kHz}$ 正弦压力范围内,以传感器压力输出为标准,经过激光干涉仪测量结果导入数学模型得到的压力值与传感器直接测量得到压力值的相对偏差在 $0.21\%\sim 8.21\%$ 之间。为进一步考察激光测量正弦压力的重复性,选取 5 kHz 正弦激励下进行多次测量,结果如表 2 所示。经过 6 次在 5 kHz 正弦激励下,利用激光干涉法测量得到的正弦压力峰值与传感器输出偏差小于 0.6% ,测量重复性为 0.47% ,

表 2 5 kHz 正弦激励下多次测量结果

Tab.2 Multiple measurement results under sinusoidal excitation of 5 kHz

Number	Optical path/ μm	Amplitude/MPa	Peak output of sensor/MPa	Deviation	Interferometer phase/ $^\circ$	Sensor phase/ $^\circ$	Deviation/ $^\circ$
1	2.408 96	1.033 8	1.029 2	0.45%	-75.62	-66.21	9.41
2	2.429 46	1.042 6	1.037 2	0.52%	-143.25	-133.88	9.37
3	2.433 66	1.044 4	1.038 4	0.58%	33.09	42.44	9.35
4	2.438 32	1.046 4	1.040 4	0.58%	-30.72	-21.38	9.34
5	2.434 59	1.044 8	1.039 6	0.50%	76.55	85.89	9.34
6	2.441 12	1.047 6	1.041 6	0.58%	168.35	177.68	9.33

相位偏差小于 10° 。

在正弦压力测量过程中,光程-压力的数学模型结果基本符合真实测量结果,从测量重复性上来看装置本身稳定可靠,而出现压力值相对偏差较大的点主要体现在高频段,可能是由于计算使用的传感器灵敏度是按其出厂时静态方法校准得到的数据,这是国际上普遍存在的静标动用现象,这种方法本

身就会存在偏差,后期还需要进一步分析校准影响因素,修正数学模型。

3 结论

理论分析建立的光程-压力数学模型通过试验验证的方法,将激光干涉测量技术应用于动态压力测量中,基于激光干涉技术的正弦压力装置能够真实复现

液压管道内的压力变化的时间历程,提高动态压力校准准确度。它利用计量学的基本量直接、绝对复现动态压力单位量值,实现对动态压力的绝对校准,测量过程符合计量学关于绝对法测量的定义和要求。现有正弦压力校准装置主要采用相对法测量,标准传感器的动态性能如何评价是一个难以解决的问题。文中采用的激光干涉测量方法,将激光干涉测量技术代替标准传感器,并溯源到基本量,解决了原来难以解决的问题,使压力测试系统的幅值及相移的准确度可靠性有很大提高,能够应用于压力幅值很宽、频率含量很丰富的动态压力测量中,是我国未来动态压力测量和校准技术领域探索和研发的方向。

参考文献:

- [1] Bartoli C, Beug M F, Bruns T, et al. Traceable dynamic measurement of mechanical quantities: Objectives and first results of this european project [J]. *International Journal of Metrology & Quality Engineering*, 2013, 3(3): 127-135.
- [2] Salminen J, Högström, R, Saxholm S, et al. Development of a primary standard for dynamic pressure based on drop weight method covering a range of 10 -400 MPa [J]. *Metrologia*, 2018, 55(2): aaa847.
- [3] Kobusch M, Bruns T, Klaus L, et al. The 250 kN primary shock force calibration device at PTB [J]. *Measurement*, 2013, 46(5): 1757-1761.
- [4] Zafer A, Yadav S, Sanjid A, et al. Volume ratio and pressure drop on hydraulic dynamic pressure calibration system [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(8): 3769-3775.
- [5] Klaus L, Bruns T, Volkens H. Calibration of Bridge -, charge -and voltage amplifiers for dynamic measurement applications[J]. *Metrologia*, 2015, 52(1):72-81.
- [6] Zafer A, Yadav S, Sanjid A, et al. Volume ratio and pressure drop on hydraulic dynamic pressure calibration system [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(8): 3769-3775.
- [7] Bruns Th, Franke E, Kobusch M. Linking dynamic pressure to static pressure by laser interferometry [J]. *Metrologia*, 2013, 50(6): 580-585.
- [8] Julia S , Fedchak J A , Zeeshan A , et al. Review Article: Quantum-based vacuum metrology at the national institute of standards and technology [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2018, 36(4): 040801.
- [9] Sharipov F, Yang Y, Ricker J E, et al. Primary pressure standard based on piston-cylinder assemblies. Calculation of effective cross sectional area based on rarefied gas dynamics [J]. *Metrologia*, 2016, 53(5): 1177-1184.
- [10] Ahmed Z, Klimov N N, Douglass K, et al. Towards photonics enabled quantum metrology of temperature, pressure and vacuum[J]. *Research Gate*, 2016, 3: 07690.
- [11] Yang J, Fan S, Li C, et al. Liquid sinusoidal pressure measurement by laser interferometry based on the refractive index of water[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(34): 9695.
- [12] Yang Jun, Shi Bo, Fan Shangchun, et al. Liquid high pulse pressure calibration by laser interferometry[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 179(3): 103-109.
- [13] Michels A, Lebesque H, Lebesque L, et al. Refractive index and Lorentz-Lorenz function of nitrogen up to 2000 atmospheres at 25 °C[J]. *Physica*, 1947, 13(6-7): 337-342.
- [14] Wagner W. The IAPWS Industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam [J]. *Trans Asme Journal of Engineering for Gas Turbine & Power*, 2000, 122(1): 150-184.