

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.06.09

基于激光干涉法的 CO₂ 气体压力测量

张博涵, 杨军, 谢兴娟, 张大治, 姜延欢

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 气体压力无接触式测量是激光技术应用的重要研究方向。为解决气体压力测量过程中的溯源问题, 设计了一种基于激光干涉技术的压力测量方法, 通过洛伦兹-洛伦茨方程、气体状态方程和光程差方程的理论研究, 建立了基于光程差的压力测量模型, 将压力测量问题追溯到光程变化量上。并以 CO₂ 为研究对象, 搭建压力测量实验系统, 开展了 293, 313, 333 K 温度条件下, 压力范围为 0.1 ~ 0.3 MPa 的压力测量实验。实验结果显示: 压力测量值与实际值有较高的吻合度, 相对误差在 5% 以内, 证明压力测量溯源模型的正确性, 对变温环境下的气体压力测量有着重要意义。

关键词: 激光干涉法; 气体压力; 气体状态方程; 光程

中图分类号: TB93

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)06-0055-04

CO₂ Gas Pressure Measurement Based on Laser Interferometry

ZHANG Bohan, YANG Jun, XIE Xingjuan, ZHANG Dazhi, JIANG Yanhuan

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 10095, China)

Abstract: The non-contact measurement of gas pressure is an important research direction of laser technology application. In order to solve the problem of traceability in the process of gas pressure measurement, a pressure measurement method based on laser interference technology is designed. Through the theoretical research of the Lorentz-Lorenz equation, the gas state equation and the optical path difference equation, a pressure measurement model based on the optical path difference is established, and the pressure measurement problem is traced back to the optical path difference. With CO₂ as the research object, a pressure measurement experiment system was built to carry out pressure measurement experiments with a pressure range of 0.1 ~ 0.3 MPa under the conditions of 293 K, 313 K, and 333 K. The experimental results show that the pressure measurement value is in good agreement with the actual value, and the relative error is within 5%, which proves the correctness of the pressure measurement traceability model and is of great significance to the gas pressure measurement in a variable temperature environment.

Key words: laser interferometry; gas pressure; gas state equation; optical path

0 引言

目前压力测量的主要方法是依靠传统的压力传感器进行检测, 虽然测量精度高, 成本低, 但是也存在因重复性和长时性工作所产生的磨损、测量准确度下降、失常校准、无法溯源等问题。为解决这些问题, 许多国家的计量技术研究机构不断地探索如何将激光技术应用于压力测量和校准领域中^[1-4]。其中, 德国联邦技术物理研究所(PTB)设计了一种基于折射率的水脉冲压力激光干涉测量方法^[5]; 北京长城计量测试

技术研究所进行了基于激光干涉法的液体脉冲压力校准和正弦压力校准研究等^[6-7]; 而针对气体介质, 中国科学技术大学的许玉蓉^[8]等人设计了一种法布里-珀罗腔的氩气折射率精密测量方法, 并建立了气体静态压力和折射率的关系; 四川大学的邓博文^[9]等人利用迈克尔逊干涉仪原理, 通过静压下的干涉条纹得到气体压强和折射率之间的关系; 美国国家标准与技术研究院(NIST)也在计划通过激光干涉法来实现气体压力和温度的测量^[11]。本文针对气体压力测量中的溯源问题, 通过理论分析, 建立了基于光程变化的气体压力

收稿日期: 2021-08-16; 修回日期: 2021-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(51775526)

引用格式: 张博涵, 杨军, 谢兴娟, 等. 基于激光干涉法的 CO₂ 气体压力测量[J]. 计测技术, 2021, 41(6): 55-58.

ZHANG B H, YANG J, XIE X J, et al. CO₂ gas pressure measurement based on laser interferometry[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(6): 55-58.

测量模型，并通过实验进行验证。

1 气体压力测量原理

根据克劳修斯-莫索提 (Clausius-Mossotti) 方程^[12] 和洛伦兹-洛伦茨 (Lorentz-Lorenz) 方程^[13] 可知，对非极性、且均匀的气体介质，有

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{1}{3\epsilon_0} \sum_j N_j \alpha_j \quad (1)$$

式中： n 为气体折射率； ϵ_0 为真空介电常数，F/m； N_j 为单位体积内的 j 分子的分子数； α_j 为分子极化率，(C·m²)/V。

单位体积内的分子数 N_j 又可表达为

$$N_j = \frac{\rho_j N_A}{M_{\text{mol}-j}} \quad (2)$$

式中： ρ_j 为气体 j 的密度，g/cm³； $M_{\text{mol}-j}$ 为摩尔质量，g/mol； N_A 为阿伏伽德罗常数，mol⁻¹。

式(1)可表达为

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{N_A}{3\epsilon_0} \sum_j \frac{\rho_j \alpha_j}{M_{\text{mol}-j}} \quad (3)$$

根据热力学原理，从理想气体状态方程^[14] 角度考虑，消去介质密度 ρ ，可得理想气体平衡状态条件下，气体压力与折射率的关系为

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{N_A}{3\epsilon_0} \sum_j \frac{p_j \alpha_j}{RT} \quad (4)$$

式中： p_j 为气体 j 的压强，Pa； R 为理想气体常数，J/(mol·K)； T 为温度，K。

气体折射率的测量，通常利用激光干涉技术测量气体介质因压力变化导致的光程差值的方式来实现，其折射率-光程差关系为

$$\Delta l = \Delta n \times L \quad (5)$$

式中： Δl 为光程差，cm； Δn 为折射率差； L 为物理光程，cm。

在以真空状态折射率为 1 的情况下，基于激光干涉技术测量气体的折射率 n 为 $1 + \Delta n$ ，以某种气体为研究对象时，式(4)可表达为

$$p = \frac{3\epsilon_0 RT}{N_A \alpha} \frac{(1 + \frac{\Delta l}{L})^2 - 1}{(1 + \frac{\Delta l}{L})^2 + 2} \quad (6)$$

式(6)建立了气体压力与光程的关系，这样就可以将气体压力值追溯到光程变化量上。

2 气体压力测量实验

气体压力测量装置如图 1 所示，主要由高精度压力控制器、激光干涉仪、真空泵、变温压力气室和计算机系统组成。

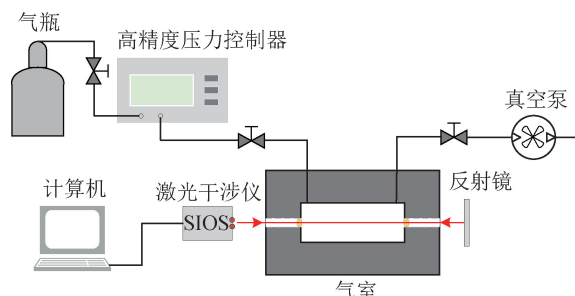


图 1 气体压力测量装置图

Fig. 1 Gas pressure measurement device diagram

在实验过程中，先利用真空泵对气室抽真空，然后通过压力控制器控制气室内的压强，根据压力控制器的量程条件设定其压力变化范围为 0.1 ~ 0.3 MPa，考虑实际光程变化量很小和更好地展现光程差-压力关系等因素，选择步进量为 0.05 MPa。通过气室的温度控制功能改变气室温度，考虑密闭气室温度控制单元的局限性和高温下的不稳定性，选择设定气室内温度为 293，313，333 K 三个温度点。采用德国 SIOS SP2000 - DI 型激光干涉仪搭配用户软件，采集气室内压力、温度变化过程中的光程改变量。

3 实验结果

3.1 光程差测量结果

在 293，313，333 K 温度下，压力分别为 0.1，0.15，0.2，0.25，0.3 MPa 的光程差测量结果如图 2 所示。

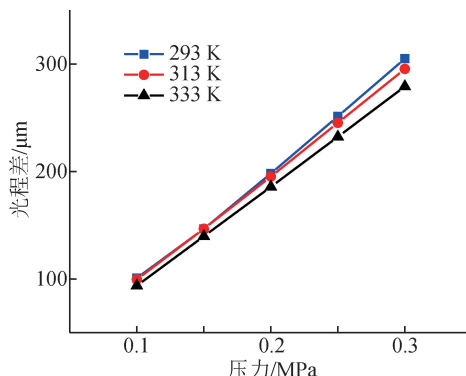


图 2 光程差测量结果图

Fig. 2 Optical path difference measurement result graph

图 2 中光程差的测量是以真空为基准，通过充入高纯 CO₂ 气体改变压力而测得的光程变化量。且在每个采集点分别进行了 20 次采样，取其平均值作为光程差数据。可知：在 0.1 ~ 0.3 MPa 压力范围内，光程差和压力呈良好的线性关系，其线性值可用光程差测量灵敏度进行表示。

在本文中定义光程差变化量与压力变化量的比值作为光程差测量灵敏度 s ，即

$$s = \frac{\Delta(\Delta l)}{\Delta p} \quad (7)$$

根据实验计算得到 293, 313, 333 K 温度条件下光程差测量灵敏度值分别为 102.60, 98.09, 92.66。可见随着温度的升高, 灵敏度值减小, 同等压力变化量引起的光程差变化减小, 气体折射率也呈下降的趋势, 与式(4)中温度和折射率的关系相符。

3.2 压力计算结果

在本次实验中, 采用的是高纯 CO₂ 气体, 假设其分子极化率在实验温度下受温度影响比较微弱, 可视为常量, 将光程差数据代入式(6), 可计算得到压力值, 结果如图 3 所示。

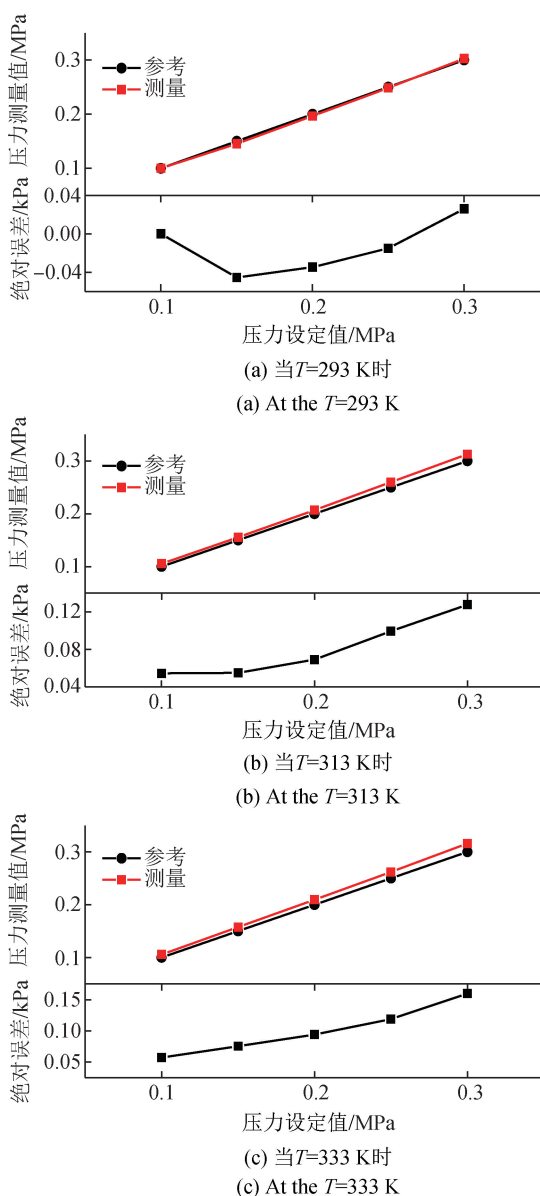


图 3 不同温度条件下, 压力计算结果图

Fig. 3 Diagram of pressure calculation results under different temperature conditions

由图 3 可以看出, 在室温(293 K)条件下, 压力测量结果绝对误差较小, 在 0.15 MPa 压力点的测量相对误差达到最大(为 3.02%), 在 0.1 MPa 压力点的测量相对误差最小(约为 0.04%), 平均相对误差为 1.25%; 而当温度升高后, 压力测量误差变大, 绝对误差随着压力增大呈现上升趋势, 在 313 K 条件下, 压力测量结果相对误差在 3.00%~5.00%, 在 333 K 条件下, 压力测量结果相对误差在 4.00%~5.00%。

根据不同温度下的压力测量结果与参考压力的对比, 分析误差主要来源包括以下几个方面: 第一, 压力理论模型的建立采用的是理想状态下的经验方程, 且对相对磁导率和分子极化率等参数进行了简化, 从而产生理论误差; 第二, 实验装置本身设计存在局限性, 其温度测量点只有一个, 导致实验过程中进行升温操作时气室内的温度测量不够精准; 第三, 在实际光程差数据测量过程中, 吸收池无法达到绝对真空状态, 影响折射率的测量结果。

4 结论

根据有关折射率的洛伦兹-洛伦茨方程和气体状态方程, 推导并建立了一种基于光程变化的气体压力测量模型, 并进行了实验验证。实验结果表明: 在室温条件下, 基于激光干涉法的气体压力测量准确度较高, 平均相对误差为 1.25%, 验证了理论模型的正确性。此次气体压力测量研究工作可为动态压力测量和压力校准技术提供参考。针对实验过程中温度升高使测量误差变大的情况, 将在后续工作中继续进行探索。

参考文献

[1] SALMINEN J, HGSTRM R, SAXHOLM S, et al. Development of a primary standard for dynamic pressure based on drop weight method covering a range of 10 MPa – 400 MPa [J]. Metrologia, 2018, 55(2): 52 – 59.

[2] MICHAEL K, THOMAS B, LEONARD K, et al. The 250 kN primary shock force calibration device at PTB [J]. Measurement, 2013.

[3] ZAFER A, YADAV S, SANJI D 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.

[4] 韩冰. 激光干涉技术在动态测试与校准中的应用 [J]. 计测技术, 2016, 36(S1): 56 – 59.

HAN B. Application of laser interference technology in dynamic testing and calibration [J]. Metrology and measurement technology, 2016, 36(S1): 56 – 59. (in Chinese)

[5] BRUNS T, FRANKE E, KOBUSCH M. Linking dynamic to static pressure by laser interferometry [J]. *Metrologia*, 2013, 50(6): 580 – 585.

[6] 李博, 杨军, 黄楠, 等. 基于激光干涉法测水介质正弦压力的动态校准技术[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(8): 26 – 32. LI B, YANG J, HUANG N, et al. Dynamic calibration technology for measuring sinusoidal pressure of water medium based on laser interferometry [J]. *Infrared and laser engineering*, 2019, 48(8): 26 – 32. (in Chinese)

[7] 杨军, 史博, 樊尚春, 等. 基于激光干涉测量的液体高脉冲击压力校准[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(3): 572 – 578. YANG J, SHI B, FAN S C, et al. Liquid high pulse pressure calibration by laser interferometry [J]. *Explosion and shock waves*, 2018, 38(3): 572 – 578. (in Chinese)

[8] 许玉蓉, 刘洋洋, 王进, 等. 基于气体折射率方法的真空计量[J]. *物理学报*, 2020, 69(15): 250 – 256. XU Y R, LIU Y Y, WANG J, et al. Vacuum metrology based on refractive index of gas [J]. *Acta physica sinica*, 2020, 69(15): 250 – 256. (in Chinese)

[9] 邓博文, 梁小冲, 于白茹, 等. 利用干涉原理探索压强与空气折射率之间的关系 [J]. *实验科学与技术*, 2016, 14(5): 48 – 51. DNEG B W, LIANG X C, YU B R, et al. Relationship between the refractive index of air and the pressure using the principle of interference [J]. *Experiment science and technology*, 2016, 14(5): 48 – 51. (in Chinese)

[10] 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.

[11] AHMED Z, KLIMOV N N, DOUGLASS K, et al. Towards photonics enabled quantum metrology of temperature, pressure and vacuum [J]. *Research gate*, 2016, 3: 7690.

[12] DOMMERMUTH M, SCHOPOHL N. On the theory of light propagation in crystalline dielectrics [J]. *Journal of physics communications*, 2017.

[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: 337 – 342.

[14] 周越, 张国锋. 对等温条件下理想气体伯努利方程的讨论 [J]. *物理与工程*, 2021, 31(1): 22 – 24. ZHOU Y, ZHANG G F. A discussion on the Bernoulli's equation of ideal gas under isothermal condition [J]. *Physics and engineering*, 2021, 31(1): 22 – 24. (in Chinese)



(广告)

《宇航计测技术》2021 年第 4 期目次

调频激光雷达测量技术及在航空航天领域的应用
 电子测量仪器行业发展综述
 关键尺寸扫描电镜校准及符合性评价技术研究
 回归反射球基准尺校准技术研究
 热阻式热流传感器校准用热板设计与仿真
 贴片式压力传感器温度响应特性研究
 生成对抗网络复原图像的质量测评方法研究

基于地物信息的高光谱遥感图像分类方法
 铂电阻温度变送器自动化测试系统研究与应用
 日月影响的地球重力加速度精确计算方法
 贮运箱监测仪表在线综合检测装置设计
 基于 nRF24L01 + 的飞行器状态监测系统研究
 基于 CC2530 无线火灾报警系统的设计
 原子频标中激光器高偏振态检测器件设计研究