

# 基于多步相移法和偏振干涉光学层析光路的 三维温度场测量

陈强华<sup>1\*</sup>, 周胜<sup>1</sup>, 丁锦红<sup>1</sup>, 韩文远<sup>1</sup>, 孔祥悦<sup>2</sup>, 罗会甫<sup>3</sup>

<sup>1</sup>北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100144;

<sup>2</sup>中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100016;

<sup>3</sup>北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081

**摘要** 温度场的精密测量对机械、航空航天、生物医学、食品化工、电力、能源和环境等诸多行业都有重要意义。提出了一种基于多步相移法和偏振干涉光学层析光路的三维温度场测量方法。首先, 结合马赫-曾德尔干涉光路结构与光学层析技术设计偏振干涉光学层析测量系统, 并利用偏振器件的旋转实现多步相移以实现高精度信号检测。然后, 通过指数型滤波反投影算法还原得到被测介质的三维折射率分布, 进而获得三维温度场分布。最后, 推导了测量公式并搭建了实验系统。误差分析表明, 现有实验条件下的系统测量不确定度约为 0.8 °C。测量实验和比对结果表明, 所测得的温度场与实际情况吻合, 与铂电阻温度计的标定温度比对结果小于 2 °C。

**关键词** 测量; 温度场测量; 多步相移法; 偏振干涉; 光学层析; 折射率

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0712004

## Three-Dimensional Temperature Field Measurement Based on Multi-Step Phase Shift Method and Polarization Interference Optical Tomography Optical Path

Chen Qianghua<sup>1</sup>, Zhou Sheng<sup>1</sup>, Ding Jinhong<sup>1</sup>, Han Wenyan<sup>1</sup>,  
Kong Xiangyue<sup>2</sup>, Luo Huifu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical and Materials Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;

<sup>2</sup> The 11th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Beijing 100016, China;

<sup>3</sup> School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** The precision measurement of the temperature field is of great significance in many fields, such as machinery, aerospace, biomedicine, food and chemical engineering, electric power, energy, and environment. A three-dimensional temperature field measurement method based on multi-step phase shift method and polarization interference optical tomography optical path is proposed. First, the polarization interference optical tomography measurement system is designed by combining the Mach-Zehnder interference optical path structure and optical tomography technology, and the multi-step phase shift is realized by using the rotation of the polarization device to achieve high-precision signal detection. Then, the three-dimensional refractive index distribution of the measured medium is restored by the exponential filtering backprojection algorithm, and the three-dimensional temperature field distribution is obtained. Finally, the measurement formulae are derived and the experimental system is built. The error analysis shows that the system measurement uncertainty is about 0.8 °C under the existing experimental

收稿日期: 2021-09-06; 修回日期: 2021-09-30; 录用日期: 2021-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(52075004, 11774030, 51775044)、北京市教委科研计划一般项目(KM202110009010)、北京市自然科学基金(3212003)、北方工业大学科研启动基金(110051360002)

通信作者: \*chenqianghua@tsinghua.org.cn

conditions. The measurement experiment and comparison results show that the measured temperature field is consistent with the actual situation, and the result is less than  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  compared with the calibration temperature of the platinum resistance thermometer.

**Key words** measurement; temperature field measurement; multi-step phase shift method; polarization interference; optical tomography; refractive index

## 1 引言

温度是反映物质状态的基本物理量,在科学、工程和生活等领域都有重要意义。温度场是目标系统内各点温度的空间分布集合,通常是复杂的三维场分布。机械、航空航天、生物医学、食品化工、电力、能源和环境等诸多行业中都涉及对三维温度场的测量。随着科技水平的快速发展,对三维温度场测量的精度要求也日益提高<sup>[1-3]</sup>。

目前常用的温度场测量方式包括接触式和非接触式两大类。接触式测量法主要是将电阻式<sup>[4]</sup>、热电耦式<sup>[5]</sup>或光纤式<sup>[6]</sup>等温度传感器分布在待测温度场的相应位置,进行单点测量,然后合成为温度场三维分布。该类方法应用广泛,但所获得的温度场是根据离散的单点测量结果合成而来的。因此,虽然单点测量精度很高,但是会受到测点的限制,进而无法全面精确反映实际温度场的分布,且传感器的放置也一定程度干扰了原始温度场。非接触测量法主要分为基于光谱分析和基于折射率测量机理的两类方法。前者包括红外光谱法<sup>[7]</sup>、光场相机法<sup>[8]</sup>等,一般通过相机、探测器等检测热源的发射光谱及其强度来获得温度场分布。其测量装置相对简单,测量快速便捷,还可对不透明物体的表面温度分布进行测量,缺点是一般只能测量发热源表面及其附近的温度分布,难以测量远离热源的气/液流体介质的空间温度场分布,且空间分辨率不高。此外,物体发射率对测温精度的影响也较大。后者包括数字全息

法<sup>[9]</sup>、背景纹影法<sup>[10]</sup>和声学<sup>[11-13]</sup>/光学<sup>[14-15]</sup>层析法等,其机理一般是先让光束、声束穿过待测介质,再对束线偏折、干涉图案等的变化进行检测,最后采用还原算法重建待测介质的折射率场分布,进而获得温度场分布。该类方法可以检测气/液流体介质空间折射率和温度场分布,可根据需要搭建干涉、层析和全息等不同形式的光学、声学系统,采用不同的信号检测方法,研究各种优化还原算法重建折射率场和温度场分布。该类方法的测量精度由光源/声源性能、系统结构、信号检测与处理方法、还原算法和环境因素等共同决定,应用场合较为灵活。

本文提出了一种基于多步相移法和偏振干涉光学层析光路的三维温度场测量方法。首先,以马赫-曾德尔干涉光路为基础,结合层析技术实现偏振干涉光学层析光路,利用旋转偏振器件实现多步相移以进行信号检测。然后,通过滤波反投影算法(FBP)还原得到被测介质的三维折射率分布,进而获得三维温度场分布。

## 2 测量原理与方案

测量光路系统如图 1 所示,双频氦氖(He-Ne)激光器的输出光包含一对相互正交的 P、S 线偏振分量,光束进入由偏振分光镜(PBS)、反射镜(Re) Re1、Re2 和分光镜(BS)构成的马赫-曾德尔干涉光路。光束经过 PBS 后被分为两部分,其中透射光为 P 偏振光,反射光为 S 偏振光。S 光被 Re1 反射后直接进入 BS 并透射(忽略反射部分),此为参考光

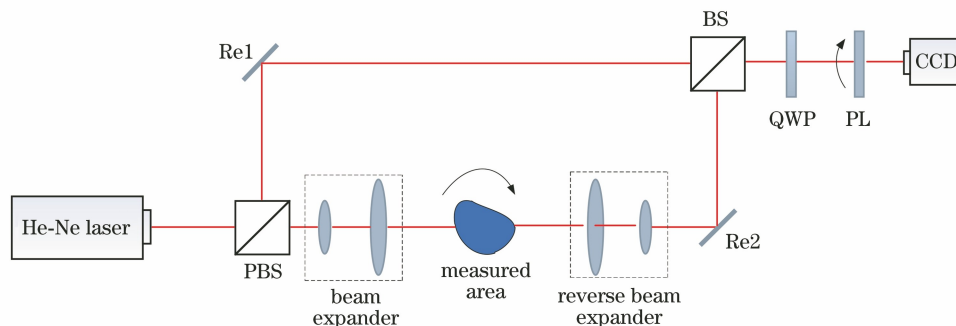


图 1 激光相移偏振干涉层析测量光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring light path for laser phase shift polarization interference tomography

路。P 光经过由双透镜组成的准直扩束系统后通过被测介质,被测介质可转动,进而可以改变光束的照射角度。然后,P 光经过缩束系统(与扩束系统相同但反面对称放置)缩束后被 Re2 反射后进入 BS 并反射(忽略透射部分),此为测量光路。二者在 BS 处合成一束光后依次经过 1/4 波片(QWP)和偏振器(PL)。QWP 的快轴与 P、S 偏振方向的夹角为  $45^\circ$ ,其作用是将 P、S 光分别转换为左、右旋圆偏振光。PL 安装在一个旋转装置上,可精确控制旋转角度。两个圆偏振光在 PL 的透光轴方向上产生干涉,干涉图案被电荷耦合器件(CCD)接收。需要指出的是,光源也可采用单频激光(通常输出线偏振光,如输出的不是线偏振光,可在激光器出射端处放置一个 PL),此时可以用一个 BS 代替 PBS,虽然经过 QWP 后的参考光束和测量光束变成了旋向相同的圆偏振光,但是这并不影响干涉信号的接收和后续的算法运行。

CCD 记录的干涉图案反映了测量光路相对参考光路的相位差。为测得相位差,采用多步相移法<sup>[16]</sup>,利用旋转 PL 获得相移。本文采用五步相移法,即在每一个照射角度下,5 次旋转 PL,使其透光轴方向与 P 或 S 偏振方向的夹角分别为  $-\pi/2$ ,  $-\pi/4$ ,  $0$ ,  $\pi/4$ ,  $\pi/2$  并记录相应的干涉图案。CCD 所记录的干涉光强为

$$I = I_A + I_B \sin(2\beta + \varphi), \quad (1)$$

式中: $I$  为 CCD 检测的光强; $I_A$  为直流光强; $I_B$  为干涉光强变化幅值; $\beta$  为 PL 方位角; $\varphi$  为测量光路相对参考光路的相位差。

PL 依次旋转 5 次角度之后,得到的光强表达式为

$$\begin{cases} I_1 = I_A + I_B \sin(\varphi - 180^\circ) = I_A - I_B \sin \varphi \\ I_2 = I_A + I_B \sin(\varphi - 90^\circ) = I_A - I_B \cos \varphi \\ I_3 = I_A + I_B \sin \varphi \\ I_4 = I_A + I_B \sin(\varphi + 90^\circ) = I_A + I_B \cos \varphi \\ I_5 = I_A + I_B \sin(\varphi + 180^\circ) = I_A + I_B \sin \varphi \end{cases}, \quad (2)$$

求解(2)式可得某一角度测量光束照射被测介质时测量光路相对参考光路的相位差

$$\varphi = \arctan \frac{2I_3 - I_5 - I_1}{2(I_4 - I_2)}. \quad (3)$$

如图 2 所示,以固定角度  $\theta$  旋转被测介质,重复上述过程直至完整扫描  $180^\circ$ ,得到整体被测介质投影数据  $\varphi(\theta)$ ,再通过反投影算法还原得到被测介质三维相位分布  $\varphi(x, y, z)$ 。

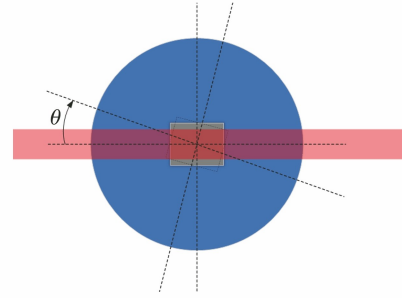


图 2 测量区域旋转示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rotation of measuring area

被测介质的三维折射率场分布的计算公式为

$$n(x, y, z) = \frac{\varphi(x, y, z)\lambda}{\pi m R}, \quad (4)$$

式中: $\lambda$  为激光波长; $m$  为 CCD 像元尺寸; $R$  为扩束比。

在实验中,将加热的空气作为被测介质,通过对其温度场分布的测量来验证所提测量方法的有效性。空气折射率的变化主要来自温度、湿度和大气压强的变化。Edlen 公式给出了干燥空气的折射率与温度和大气压强的函数关系<sup>[17]</sup>,其表达式为

$$q_{t,p} = \frac{pq_s}{96095.43} \times \frac{1 + 10^{-8} \times (0.613 - 0.00998t)p}{1 + 0.003661t}, \quad (5)$$

式中: $q_{t,p}$  为在气压  $p$  与温度  $t$  下的空气折射率; $q_s$  为在  $20^\circ\text{C}$  温度时一个标准大气压下的标准空气折射率; $q = n - 1$ 。由(5)式可得

$$q_{t,p} = \frac{2.8793p}{1 + 0.003671t} \times 10^{-9}. \quad (6)$$

进一步由(6)式可得到温度变化  $\Delta t$  与空气折射率变化  $\Delta n$  的关系

$$\Delta n = \frac{p \Delta t}{(1 + 0.003671t)^2} \times 10^{-11}. \quad (7)$$

实验时可先测得环境温度下被测区域的三维相位分布和空气折射率场,并将其作为基准数据。然后,测得加热稳定后的空气折射率场,利用二者之差,根据(7)式可得到温度变化。最后,可得到被测区域的温度场分布。需要指出的是,上述温度场是根据折射率变化值进行计算的,而根据 Edlen 公式,湿空气和干燥空气折射率之间只相差一个与波长值和湿度值有关的修正。因此,当计算前后折射率变化时,湿度修正值会被抵消,即湿度值不影响测量结果。此外,由于被测空气所在区域是开放于周围环境之中的,故加热之后的气压变化可忽略。

实验所用 CCD 为北京睿智奥恒科技有限公司

生产的 MicroUH600 相机,可以提供彩色和黑白(灰度)模式,实验中采用黑白模式,此时其默认灰度值范围为 0~255。因此,根据(3)式和(7)式,可得测量温度的分辨率约为 0.08 °C。在温度测量范围方面,所提方法是在测量折射率分布的基础上进行温度测量的,就气体温度而言,若任意温度下的温度和折射率的对应关系都已知,则所提方法的温度测量范围不受限制。在本文实验中,由于采用 Edlen 公式来表示空气温度和折射率的关系,同时受实验条件和结果比对用的温度标定仪器测量范围所限,故实际所测温度场为几十摄氏度左右。

### 3 实验与误差分析

根据图 1 的光路系统搭建实验系统,如图 3(a)所示。实验光源为稳频双频 He-Ne 激光器,波长为

0.633  $\mu\text{m}$ ,双频频差约为 3 MHz,光频稳定性优于  $5 \times 10^{-8}$ 。CCD 分辨率为 3072 pixel  $\times$  2048 pixel,像元尺寸 2.4  $\mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$ ,扩束系统由直径为  $\phi = 20 \text{ mm}$ 、焦距为 50.8 mm 的凸透镜和直径为  $\phi = 50.8 \text{ mm}$ 、焦距为 150 mm 的凸透镜组成,扩束比为 2.95,扩束后的光束直径为 17.7 mm。QWP 为胶合零级波片,相位延迟精度为  $\lambda/300$ 。PL 消光比为 500:1。实验的环境大气压为 102.64 kPa,空气湿度为 29%,环境温度为 16.7 °C。实验使用尺寸为 25 mm  $\times$  20 mm  $\times$  5 mm 并可均匀加热至  $(150 \pm 10)$  °C 的陶瓷加热平片作为被测温度场的热源。由于陶瓷加热片工作时不需要消耗氧气,故不改变空气成分系数,保证了 Edlen 公式对本实验的适用性。首先,测量在环境温度下的折射率场分布。然后,让陶瓷加热片工作,待温度场稳定后,依据前述方案进行测量实验。

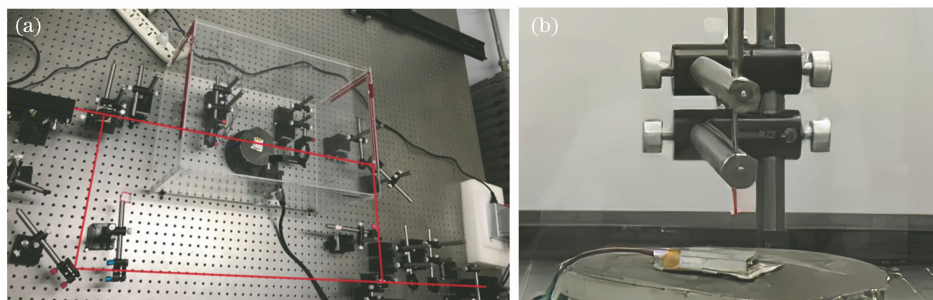


图 3 实验系统实物图。(a)测量光路系统;(b)温度场标定装置

Fig. 3 Physical diagram of experimental system. (a) Measuring optical path system; (b) temperature field calibration device

为比对系统的测量结果,在实验前对被测温度场进行温度标定。标定仪器采用 PT1000 高精度铂电阻温度计,探针长度为 50 mm,直径为 2 mm,末端端面为温度测量点,在  $-100 \sim 200$  °C 范围内的测量精度为  $\pm 0.2$  °C。为保证实验环境的稳定性,减小空气流动对温度场的影响,用亚克力板罩箱将被测温度场封闭,并留有光束进出口。

表 1 被测温度场温度标定数据

Table 1 Temperature calibration data of measured temperature field

Mark point No.	Temperature /°C	Mark point No.	Temperature /°C	Mark point No.	Temperature /°C
1	66.694	7	62.197	13	58.846
2	66.105	8	61.755	14	58.407
3	65.262	9	61.346	15	57.883
4	64.225	10	60.681	16	57.492
5	63.774	11	59.904	17	56.811
6	63.299	12	59.597	18	56.572

其中一组光束投影角度下得到的五步相移干涉图如图 4 所示。根据(3)式计算得到该投影角度下

如图 3(b) 所示,探针垂直放置于陶瓷加热片正中心的上方,以通过的测量光束光斑的最下端为起点,待温度稳定时,取 1 min 内的测量温度的平均值作为该标定点的标定温度。然后,以固定位移 1 mm 向上移动探针,重复测量过程直至探针末端移动到光斑上端位置。共得到 18 个温度标定数据,标定数据如表 1 所示。

的相位信息。温度场底部贴近加热片的位置和顶部位置的温度梯度过大会引起光线偏折,同时也导致

温度场稳定性变差,二者将共同造成该两处区域相位数据产生部分突变,进而无法作为有效数据进行后续数据处理。为保证测量数据的可靠性,在后续数据处理过程中将干涉图案(相位分布图)的上下末端部分统一截去,只使用中间约 65% 的区域(通过多次实验和数据分析确定)。该处理方式并不影响实验对所提方法的验证。

端部分统一截去,只使用中间约 65% 的区域(通过多次实验和数据分析确定)。该处理方式并不影响实验对所提方法的验证。

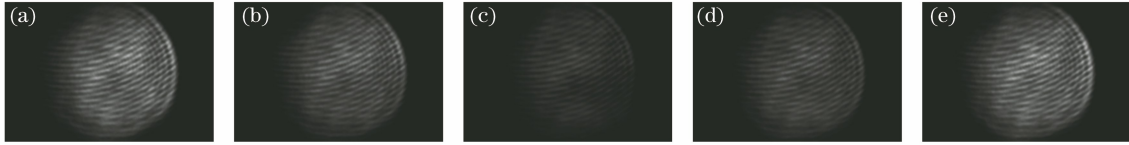


图 4 检偏器不同旋转角度下的干涉图案。(a)  $-\pi/2$ ; (b)  $-\pi/4$ ; (c) 0; (d)  $\pi/4$ ; (e)  $\pi/2$

Fig. 4 Interference patterns at different rotation angles of polarizer. (a)  $-\pi/2$ ; (b)  $-\pi/4$ ; (c) 0; (d)  $\pi/4$ ; (e)  $\pi/2$

用电控精密转台转动陶瓷加热片以实现不同的照射角度,重复测量得到各个投影方向下的投影相位数据。本实验的角度旋转间隔为  $3^\circ$ ,每旋转一次后等待约 30 s 以使流场稳定,再旋转检偏器进行测量,共旋转  $180^\circ$ ,整个实验过程约 50 min。

由于对各照射方向的多步相移干涉图的相位数据进行了预处理,故避免了温度场底部和顶部温度梯度太大导致光线偏折和温度场不稳定所带来影响,保证了计算数据的可靠性。因此,本实验中的温度场还原重建过程可以采用通用的常规算法。本文采用了标准的滤波反投影算法<sup>[18]</sup>进行被测空气场的三维相位分布重建,其中的滤波函数采用指数型滤波函数(EF)<sup>[19]</sup>,滤波函数的表达式为

$$H(\omega) = |\omega| \exp(-C|\omega|^3)(1 + \omega^2) \times \text{rect}[\omega/(2R_1)], \quad (8)$$

式中:  $|\omega|$  为理想滤波函数频率;  $R_1$  为原始图像频率上限;  $\text{rect}(\cdot)$  为矩阵函数;  $C$  为投影因子。在通过指数型滤波反投影算法还原得到被测空气场的三维相位分布后,根据(4)、(7)式计算得到温度场三维分布。水平切片的还原温度场分布如图 5 所示,间距为 160 pixel,其按照前述温度标定路线提取出的温度值如图 6 中的细实曲线所示。

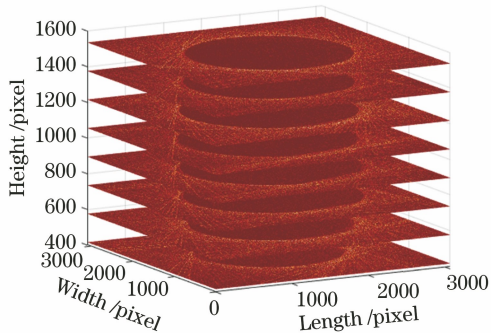


图 5 三维温度场还原切片图

Fig. 5 Reduction slice diagram of three-dimensional temperature field

需要指出的是,一般而言,光束经过的区域可分为完全数据重建区域、非完全数据重建区域和非重建区域三个部分。根据 Randon 逆变换原理,重建的具有完全数据的被测场范围为照射光束和被测折射率场多次相对旋转的共有区域。由于本实验中光束的横截面接近椭圆,因此具有完全数据的被测温度场范围为类似椭球的区域,如图 5 中各切片上的圆形区域所示(因前面所说的突变原因,截去了该近似椭球的上下末端部分)。在该区域内,任意一点都能够被所有旋转角度下的光束照射到,即可以进行完全数据重建,重建结果最精确,故前述铂电阻温度计的温度标定路线应尽量接近该椭球区域的轴线。在该区域外的一定范围内,任意一点都无法被所有旋转角度下的光束照射到,即这些区域为非完全数据重建区域。在本实验中,由于光束大小不能完全覆盖被测加热温度场区域,因此存在非完全数据重建区域(若光束大小完全覆盖加热温度场区域,则无此区域),即上述椭球区域外、加热温度场范围内的区域。一般情况下,该区域会对重建数据精度造成一定影响,但本实验中加热片加热比较均匀,上方温度场以加热片正中心法线为轴线接近对称分布,故其影响不大。当距离远到只能被一个投影角度下的光束照射到时,该区域无法进行数据重建,为非重建区域。本实验中的非重建区域为室温环境温度场区域,该区域在整个实验过程中不变,不影响数据重建。

为验证系统实验结果,将测量还原的温度场与铂电阻温度计标定的结果进行比对。由于探针直径为 2 mm,故为便于比对,取所还原温度场的各水平中心点附近 400 pixel 大小区域的温度平均值作为测量结果。同时,在将表 1 的标记温度点进行保形分段三次插值后与所得到的温度场进行比较,比对结果如图 6 所示,其中虚线为铂电阻温度计所测温度值。由图 6 可知,二者温度的最大差值小于  $2^\circ\text{C}$ 。

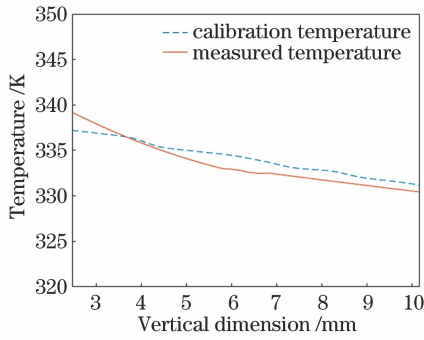


图 6 测量结果比对

Fig. 6 Comparison of measurement results

测量系统的误差源主要包括相位检测误差、还原算法误差、元器件误差和环境扰动。

1) 相位检测误差

与相位检测精度相关的误差源有以下几项。

a. 检偏器转角导致的误差

对五步相移法而言,若每次转动检偏器的转角误差为  $\Delta\epsilon_i, i=1,2,3,4,5$ ,则引起的相位测量误差  $\Delta\varphi_\epsilon$  为

$$\Delta\varphi_\epsilon = \arctan \frac{A - C \cos 2\varphi - S \sin 2\varphi}{1 - C \sin 2\varphi + S \cos 2\varphi}, \quad (9)$$

式中:  $A = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta\epsilon_i$ ;  $C = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta\epsilon_i \cos 2\epsilon_r$ , 其中  $\epsilon_r$  为每次转动检偏器的移相增量的理想值,此处为  $\pi/4$ ;

$$S = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta\epsilon_i \sin 2\epsilon_r.$$

当  $\Delta\epsilon_i$  较小时,(9)式可以写为

$$\Delta\varphi_\epsilon = A(1 + \cos 2\varphi - \sin 2\varphi). \quad (10)$$

由(10)式可知, $\Delta\varphi_\epsilon$  的最大值为  $2A$ 。实验中所用检偏器镜架的对准方式为单线对准,其最大转角误差不超过  $0.1^\circ$ ,5次转角累计最大误差为  $0.5^\circ$ ,因此  $A=0.3^\circ$ ,造成的相位测量误差  $\Delta\varphi_\epsilon$  最大为  $0.6^\circ$ 。对应的折射率误差不大于  $4.9 \times 10^{-8}$ ,由此引起的误差  $\Delta T_1$  小于  $0.2^\circ\text{C}$ 。

b. 1/4 波片快轴方位角导致的误差

由于本系统中 QWP 的快轴方位角  $\kappa$  是通过 CCD 显示光强明暗变化判断的,故存在一定的方位角误差  $\Delta\kappa$ 。CCD 检测的光强为

$$I = \frac{1}{2} \left[ S_1 + \left( \frac{S_2}{2} \cos 2\beta + \frac{S_3}{2} \sin 2\beta \right) (1 + \cos \zeta) \right] + \frac{S_4}{2} \sin \zeta \sin(2\beta - 2\kappa) + \frac{1}{4} [(S_2 \cos 2\beta - S_3 \sin 2\beta) \cos 4\kappa + (S_2 \sin 2\beta + S_3 \cos 2\beta) \sin 4\kappa] (1 - \cos \zeta), \quad (11)$$

式中: $\zeta$  为 QWP 的相位延迟; $S_1, S_2, S_3, S_4$  为斯托克斯矩阵分量。

若令  $\zeta = \pi/2$ ,则参考和测量光路的光强幅值相等,再代入  $\kappa = \frac{\pi}{4} + \Delta\kappa$ ,可得快轴方位角误差  $\Delta\kappa$  引起的相位测量误差  $\Delta\varphi_\kappa$  为

$$\Delta\varphi_\kappa = \sin 2\varphi \frac{(\Delta\kappa)^2 - 2\Delta\kappa \tan \varphi + 4(\Delta\kappa)^2 \tan^2 \varphi}{1 - 4(\Delta\kappa)^2 \tan^2 \varphi}, \quad (12)$$

忽略高阶因子,可简化为

$$\Delta\varphi_\kappa = -2\Delta\kappa - 2\Delta\kappa \cos \varphi. \quad (13)$$

实验中旋转 QWP 的分度头精度约为  $5''$ ,由(13)式可知,相位误差  $\Delta\varphi_\kappa$  最大值为  $-0.006^\circ$ ,相应的折射率为  $4.52 \times 10^{-10}$ ,由此引起的误差  $\Delta T_2$  小于  $0.002^\circ\text{C}$ 。

c. 1/4 波片相位延迟精度导致的误差

实验所用 QWP 为胶合零级波片,延迟精度为  $\lambda/300$ ,即  $1.2^\circ$ ,利用(11)式计算出的相位测量最大误差约为  $2.74 \times 10^{-5}$ ,此时在各个像素点上的相位差分布误差小于  $8.92 \times 10^{-9}$ ,相应的折射率为  $1.27 \times 10^{-10}$ ,由此引起的误差  $\Delta T_3$  为  $5.3 \times 10^{-4}^\circ\text{C}$ ,可忽略。

2) 还原算法误差

本文将指数型滤波反投影算法作为从被测介质投影数据  $\varphi(\theta)$  计算出三维相位分布  $\varphi(x, y, z)$  的还原算法。通过对典型图像模型的仿真分析,结果显示该算法造成的误差最大为  $0.495\%$ ,实验区域加热后的温度约为  $60 \sim 70^\circ\text{C}$ ,按  $100^\circ\text{C}$  估算,算法误差引起的误差  $\Delta T_4$  小于  $0.5^\circ\text{C}$ 。

3) 元器件和环境误差

a. 激光器性能误差

实验所用 He-Ne 激光器为高精度稳频光源,光强和频率稳定性很高。稳频精度优于  $5 \times 10^{-8}$ ,波长引起的误差可以忽略。实验中每幅干涉图案都是通过 2 s 内采集 10 幅图案并进行累加平均得到的,从实验结果来看,光强波动引起的误差可以忽略。因此,由激光光源引起的误差  $\Delta T_5$  可以忽略。

b. CCD 噪声误差

CCD 的噪声包括光电子数量起伏噪声、暗电流噪声、电荷转移噪声、读出放大器复位噪声、模拟-数字转换量化噪声,以及行转移时钟和水平移位寄存器驱动时钟之间的串扰导致的噪声等。所用 CCD 信噪比为 68 dB,图像信号大小与噪声信号大小比为 2667:1,由此带来的误差约为  $0.37\%$ 。为减小其

影响,按下述方式处理干涉图案数据:在 2 s 内连续采集 10 幅同一干涉图像;进行累加平均,将计算处理后的图像数据作为有效数据进行后续计算。此时,实际的 CCD 噪声误差应远小于 0.37%。此外,由(3)式可知,理论上该噪声误差可互相抵消。综合以上考虑,CCD 自身噪声引起的误差  $\Delta T_6$  可以忽略。

#### c. 环境温度测量误差

温度场分布是以环境温度下的空气折射率场的测量结果为基准数据的,在测得加热稳定后的空气折射率场后,可利用二者之差根据(7)式计算得到,故环境温度的准确度会影响测量结果。所用环境温度传感器的测量精度为  $\pm 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ ,引起的误差  $\Delta T_7$  约为  $0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 。

#### d. 温度场不稳定性误差

在实验过程中,需要等待温度场稳定后再进行实验。以相同参数对陶瓷加热片进行多次重复加热,每次将铂电阻温度计探头放置在其上方温度场的不同位置处,在温度稳定后进行监控测量,结果显示 1 h 内(时间可以覆盖测量过程)温度基本稳定在  $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。可以认为,温度场不稳定性带来的误差  $\Delta T_8$  约为  $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。若能通过改善实验方案来减少实验时间,则可进一步降低该项误差。

综上,实验系统的测量不确定度为

$$\Delta T = \sqrt{\sum_{j=1}^8 \Delta T_j^2} \approx 0.8\text{ }^\circ\text{C}, \quad (14)$$

式中: $j$  为误差个数。

目前实验方案最大的不足之处在于测量过程时间过长和由此带来的流场/温度场不稳定。受限于实验条件,现有实验是将待测流场放在转台上每隔一个角度进行一次检测,每次检测时偏振片器旋转 5 次,整个实验过程比较耗时。与此同时,待测流场转动带来了一定的流场变化,虽然每次旋转都进行了静置等待,但是仍然无法消除其对测量的影响,且流场变化是复杂的非线性过程,难以准确定量分析其影响,本实验只能通过与标定结果比对来评估测量实际效果。进一步的实验方案改良可以考虑两个思路:1)将测量光束分为不同角度同时入射的多个光束(参考光束也相应地同时分成多个光束以使二者能合光),并在信号接收端配置多个波片-PL-CCD 组。2)转动测量光束而非转动被测流场。

此外,若流场/温度场梯度过大,故光束入射后会发生偏折并影响测量结果。同时,一般的液体和气体流场在温度梯度比较大的区域往往温度稳定性

也较差,容易带来相位数据突变,从而使数据难以用于后续处理。对于前者,可以通过多次实验分析其规律并在还原重建算法中进行优化修正来解决。对于后者,一般难以从算法上改善,可考虑对该区域进行一定程度的标定,然后在数据重建过程中加以修正以减小其影响。

尽管如此,本文采用偏振层析光路结构,利用探测光和参考光的多步相移干涉图得到相位分布,再推导出折射率分布,进而得到温度分布的方法依旧提供了一种新颖、可行并值得进一步探索研究的思路。

## 4 结 论

提出了一种结合多步相移法和偏振干涉光学层析光路的三维温度场测量方法。以马赫-曾德尔干涉光路为基础,结合光学层析技术设计偏振干涉光学层析测量系统。利用旋转偏振器获得相移干涉图案,并采用多步相移法实现高精度相位信号检测,将所得相位数据进行指数型滤波反投影算法还原,得到被测介质的三维折射率分布,进而获得三维温度场分布。推导了测量公式并搭建了实验光路系统,对热空气进行了温度场测量实验,并与仪器标定结果进行了比对。实验表明,所测得的温度场与实际情况吻合,比对结果小于  $2\text{ }^\circ\text{C}$ 。通过误差分析给出了系统的测量不确定度( $0.8\text{ }^\circ\text{C}$ )。本研究可应用于机械、航空航天、生物医学、食品化工、电力、能源和环境等领域的温度场分布高精度检测中。

## 参 考 文 献

- [1] Cui S L, Sun B J, Sun X G. A method for improving temperature measurement accuracy on an infrared thermometer for the ambient temperature field [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(5): 054903.
- [2] Hu B, Wei D, Shi Y A, et al. Method for simultaneously sensing the internal temperature field and thickness of solid structure under steady heat conduction condition [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(4): 21-26.  
胡斌, 魏东, 石友安, 等. 稳态传热条件下的结构温度场和厚度同时测量方法研究 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(4): 21-26.
- [3] Wang Y H, Liu J G, Xu L, et al. Quantitative analysis of accuracy of concentration inversion under different temperature and pressure [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(7): 20201672.

- 王钰豪, 刘建国, 徐亮, 等. 不同温度压力对浓度反演精度的定量分析[J]. 物理学报, 2021, 70(7): 20201672.
- [4] Zhang H, Yang W, Dou Y, et al. A novel high-accuracy platinum resistance flexible temperature chain for polar temperature field measurement [J]. Journal of Instrumentation, 2020, 15(12): P12026.
- [5] Wu W N, Liu X Y, Hu Z, et al. Measurement of the local material depth in a directly-heated pilot rotary kiln based on temperature fields [J]. Powder Technology, 2018, 330: 12-18.
- [6] Zhang J B, He Q, Zhang Q C. Application of fiber Bragg grating sensor array in space temperature field measurement[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(6): 724-728.  
张佳斌, 贺庆, 张青超. 光纤光栅传感器阵列在空间温度场测量中的应用[J]. 激光与红外, 2020, 50(6): 724-728.
- [7] Laurinavicius D, Seporaitis M, Valincius M, et al. Measurement of water temperature and velocity fields by applying thermography on two-phase flow through horizontal rectangular channel[J]. Thermal Science, 2018, 22(6): 2847-2857.
- [8] Sun J, Xu C L, Zhang B, et al. Measurement of three-dimensional temperature field of flame based on a single light field camera[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(3): 527-532.  
孙俊, 许传龙, 张彪, 等. 基于单光场相机的火焰三维温度场测量[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(3): 527-532.
- [9] Doleček R, Psota P, Lédl V, et al. General temperature field measurement by digital holography [J]. Applied Optics, 2013, 52(1): A319-A325.
- [10] Gao L, Xu D. Refractive index field measurement of random medium based on background oriented schlieren[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 2653-2658.  
高磊, 许东. 基于背景纹影技术的随机介质折射率场测量[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11): 2653-2658.
- [11] Kong Q, Jiang G S, Liu Y C, et al. 3D high-quality temperature-field reconstruction method in furnace based on acoustic tomography[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 179: 115693.
- [12] Ren S Y, Lei J, Jia Z P. Reconstruction method for temperature field measurement using ultrasonic tomography [J]. Chemical Engineering Science, 2018, 183: 177-189.
- [13] Bao Y, Jia J B, Polydorides N. Real-time temperature field measurement based on acoustic tomography [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(7): 074002.
- [14] Niu Z T, Qi H, Shi J W, et al. Temperature field reconstruction of 3D luminous flames based on light field tomography theory [J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(2): 223-236.
- [15] Wang Z Z, Kamimoto T, Deguchi Y, et al. Two dimensional temperature measurement characteristics in pulverized coal combustion field by computed tomography-tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 171: 115066.
- [16] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects [J]. Applied Optics, 1984, 23(18): 3105-3108.
- [17] Miao E L, Gu Y Q. Temperature influence on Fizeau interferometer repeatability[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1212008.  
苗二龙, 谷勇强. 温度对 Fizeau 干涉仪测量重复性的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1212008.
- [18] Qu G R. Convergence of FBP algorithm for tomography [J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, English Series, 2016, 32(4): 963-968.
- [19] Ma S H, Zhang C, Chen Z G, et al. Optimization of exponential-based filter function in CT image reconstruction[J]. Nondestructive Testing, 2017, 39(12): 1-6.  
马思汉, 张催, 陈章谷, 等. CT 图像重建中基于指数形式的滤波函数优化[J]. 无损检测, 2017, 39(12): 1-6.