

一种新的测定流体质扩散系数的 全息干涉图像处理方法

何茂刚, 郭盈, 钟秋, 张颖

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 将基于傅里叶变换的相位检测原理应用于流体质扩散系数测量中的图像数据处理, 提出了一种新的流体质扩散激光全息干涉条纹图像的处理方法. 该方法由小波变换去噪、频域窗口滤波、全息图像再现及最小二乘法相位展开等步骤组成. 采用该方法对实验中采集的标准体系 0.33 mol/L KCl 溶液在 298.15 K 下与水的质扩散干涉条纹图像以及在不同温度下 0.1 mol/L 蔗糖水溶液-水扩散系的扩散干涉条纹图像进行了处理, 并通过与文献值的比较验证了该方法的准确性. 该方法充分利用了全息图的相位信息, 进一步提高了处理实验数据的精度, 通过误差分析可知其理论精度可以达到 0.1%, 从而可为激光全息干涉法测量流体质扩散系数实验提供新的手段.

关键词: 质扩散系数; 图像处理; 激光全息干涉; 相位检测; 小波变换; 频域滤波

中图分类号: TK121; O438.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1350-05

Novel Method for Processing Mass Diffusion Holographic Interference Image via Discrete Fourier Transform Based Phase Measurement

HE Maogang, GUO Ying, ZHONG Qiu, ZHANG Ying

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new processing method of holographic interference image for measuring mass diffusion coefficient was proposed by adopting the theory of discrete Fourier transform (DFT) in phase detection of the mass diffusion interference image. The method consists of four steps, i. e., wavelet denoise, wave filtering in frequency domain, reconstruction of object wave, and least squares phase unwrapping. The holographic interference image of 0.33 mol/L KCl solution with water at the temperature of 298.15 K and the holographic interference image of 0.1 mol/L sucrose solution with water at five different temperatures were processed using the present method. Literature data and the processing results were compared and the accuracy of this method was verified. It is possible that adopting the present method can extract the phase information of the interference image completely and then improve the processing precision greatly.

Keywords: mass diffusion coefficient; image process; laser holographic interferometry; phase measurement; wavelet transform; frequency-domain wave filtering

激光全息干涉法是流体质扩散系数测量中最新、应用最广泛的方法^[1-2], 它通过拍摄不同时刻扩散溶液的全息干涉条纹图像, 然后利用特定的图像

处理方法提取条纹图像中包含的扩散信息, 并最终计算得到扩散系数. 不难看出, 扩散干涉条纹图像的处理是获得高精度测量结果的关键步骤. 目前, 质扩

散干涉条纹图的处理方法主要有:①条纹中心线法——细化条纹后提取条纹中心线,然后手工测量条纹中心线两个峰值之间的距离^[3];②改进的条纹中心线法——细化条纹后采用最小二乘拟合的方法拟合出干涉条纹中心线,然后测量峰值之间的距离^[4];③采用移相式数字波面干涉仪的相位检测方法——通过额外增加相移装置使参考光发生特定量的相位移,拍摄不同相移量下的多幅干涉条纹图像,然后叠加计算得到条纹峰值距离^[5]。前 2 种方法只利用了干涉图像中的一小部分(整数级)条纹,没有充分利用全息图中物光相位这一重要信息,而且在测量峰值之间距离的过程中存在条纹判读误差和数据拟合误差,对最终计算质扩散系数值的影响较大。方法③利用了条纹全息图中所有的灰度信息来分析条纹,较前 2 种方法处理精度高,但要采用移相干涉仪,增加了实验设备和测量的复杂性。

本文利用基于傅里叶变换的相位检测原理,将数字全息图的物像再现技术与相位检测技术相结合,通过检测 2 幅全息干涉条纹图像中相位的变化得到干涉条纹峰值之间的距离,从而计算出扩散系数值,与传统方法相比既提高了测量的精度,又简化了实验流程。文中采集流体质扩散激光全息干涉条纹图像时所利用的实验系统见文献[6-7]。

1 基于傅里叶变换相位检测的图像处理原理

图像处理的目的是建立全息图中物光相位与流体质扩散系数的某种联系,并在此基础上利用物光相位信息最终求得流体质扩散系数。实验过程中随着溶液扩散的进行,其折射率不断变化,透过溶液的光波及其相位也在不断变化,反映在全息图上就是干涉条纹弯曲程度不断变化,因此不同时刻全息图中包含的物光相位信息体现出了扩散进行的程度。

对于一维扩散,由费克第二定律经过推导,可得质扩散系数 D_{AB} 的计算公式

$$D_{AB} = \Delta z_m^2 \frac{t_1/t_2 - 1}{8t_1 \ln(t_1/t_2)} \quad (1)$$

式中: t_1 为采集第 1 幅干涉条纹图的时刻; t_2 为采集第 2 幅干涉条纹图的时刻; Δz_m 为扩散界面上、下 2 种溶液浓度变化极值点间的垂直距离。

从式(1)可以看出,只要得到 t_1 、 t_2 及 Δz_m 的值,即可求得质扩散系数。 t_1 、 t_2 可以通过计算机硬件时钟获得。由于物光相位差 $\Delta\varphi$ 和溶液浓度变化之间具有线性关系,可以认为物光相位变化极值点间的垂直距离即为浓度变化极值点间的垂直距离,故二者都用 Δz_m 来表示,因此求 2 种物质扩散系数的关键也就是确定物光相位差 $\Delta\varphi$ 的分布。本文采用傅里叶变换相位检测的方法来确定物光相位差 $\Delta\varphi$ 。

物光波 $O(x, y)$ 与参考光波 $R(x, y)$ 发生干涉形成干涉条纹全息图,其强度分布为

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |R(x, y) + O(x, y)|^2 = |R(x, y)|^2 + \\ &|O(x, y)|^2 + R^*(x, y)O(x, y) + \\ &O^*(x, y)R(x, y) = r^2 + o^2 + m \exp[j2\pi f_0 x] + \\ &m^* \exp[-j2\pi f_0 x] \end{aligned} \quad (2)$$

对干涉条纹全息图作傅里叶变换,可得全息图的空间频谱

$$G(\xi, \eta) = C_1(\xi, \eta) + C_2(\xi, \eta) + C_3(\xi, \eta) + C_4(\xi, \eta) \quad (3)$$

式中: C_1 是参考光的直透部分; C_2 代表物体各点的自相干以及物体各点之间的互相干项; C_3 是原始物光波前的频谱; C_4 是原始物光波前共轭像的频谱。

经过全息图的频域滤波除掉 C_1 、 C_2 和 C_4 , 只保留原始物光波前的频谱 C_3 , 并将其进行逆傅里叶变换转换到空间域,即可得到包含扩散进行程度信息的物光波。利用不同时刻 2 幅物光波中的相位信息求得包裹相位差(或截断相位差) $\Delta\varphi$, 对包裹相位差进行二维解包裹运算得到连续的相位差 $\Delta\varphi$, 判读出浓度变化极值点间的垂直距离 Δz_m , 带入式(1)即可计算出扩散系数 D_{AB} 。

2 基于傅里叶变换相位检测的图像处理方法

本文中所采用的全息图像数字处理所包括的主

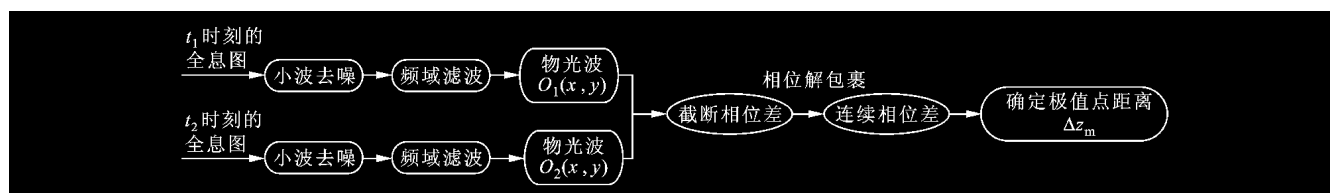


图 1 傅里叶变换相位检测法的图像处理流程

要步骤如图1所示.下面以实验中拍摄得到的蔗糖溶液-纯水扩散系的全息干涉条纹图像为例,简述全息干涉条纹图像处理的整个过程.

2.1 图像的采集及其小波分解去噪

实验干涉条纹图通过 CCD 传感器(本文采用像素点尺寸 $3.2\ \mu\text{m} \times 3.2\ \mu\text{m}$ 、传感器尺寸 $2\ 048 \times 1\ 536$ 像素的面阵型 CCD 传感器)传输至计算机,应用 MATLAB 对干涉图像进行数字化存储,即得到干涉图像上每个像素点的感光信息.由于在图像采集过程中有外界杂光以及光学仪器上和扩散容器玻璃壁面上的划痕、水滴等干扰因素,导致全息图上存在阶跃噪声和区域噪声,所以空间滤波去噪是必不可少的一个环节.传统的去噪方法仅具有空间域或频域的局部分析能力,在抑制图像噪声的同时,损失了图像的边缘等细节信息,特别是当信号与噪声频带重叠大时尤为显著,而物光相位信息又存在于全息图的细节之中,所以不能用传统滤波方法滤波.小波变换通过伸缩和平移等运算功能对信号进行多尺度细化分析,有良好的局部化特性,而且由于对高频采取逐渐精细的时域或空域步长,因此可以聚焦到分析对象的任意细节,能够在降低图像噪声的同时保留图像的细节,更加有效地从信号中提取信息.

小波变换滤波的关键是小波系数收缩的阈值算法.传统的 Donoho 阈值算法是用一个全局的阈值来决定丢弃或保留小波系数,设置的阈值是通过每级小波分解高频子带系数方差得到的全局数值,固定不变的特性限制了其优越性,因此这样的阈值设置方法没有考虑到图像是一种局部变化丰富的信号,而干涉条纹图像中包含局部变化多、变化剧烈的细节信息,所以这样的全局阈值设置并不合适.

本文采用 NeighShrink 阈值计算方法^[8],利用 3×3 窗口 $B_{i,j}$,将窗口内小波系数的平方 $d_{i,j}^2$ 累加,再将累加的值与 Donoho 阈值 λ^2 进行比较.具体算法如下

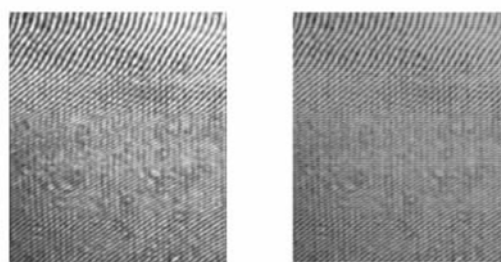
$$S_{i,j}^2 = \sum_{B_{i,j}} d_{i,j}^2 \quad (4)$$

$$d_{i,j} = \begin{cases} 0 & S_{i,j}^2 < \lambda^2 \\ d_{i,j}\beta_{i,j} & S_{i,j}^2 > \lambda^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\beta_{i,j} = (1 - \lambda^2 / S_{i,j}^2)$$

当窗口 $B_{i,j}$ 内的信号没有剧烈变化时,小波系数平方和比 Donoho 阈值 λ^2 小,相应的小波系数被置 0,否则小波系数需要收缩 β 倍.具体的算法步骤为:①做小波变换,将干涉条纹图像转化到小波域;②在每个子带使用一个 3×3 的窗口,计算窗口内小波系

数 $d_{i,j}$ 的平方和 $S_{i,j}^2$,根据式(5)将 $S_{i,j}^2$ 与 λ^2 进行比较;③如果窗口内的小波系数平方和小于阈值,则将窗口中心的小波系数置 0,否则将小波系数收缩 β 倍;④做小波逆变换,重构干涉条纹图像.本文的小波变换选用“db1”小波基,分解级数为 3 级,对实验中采集的全息干涉条纹图像进行滤波去噪,结果如图 2 所示.



(a) 去噪前

(b) 去噪后

图 2 小波去噪前后的干涉条纹图像

2.2 图像的频域滤波及物光波再现

本文采用的频域滤波过程如图 3 所示,图中的 $H(\zeta, \eta)$ 是矩形窗口滤波器传递函数,其作用是只保留需要的特定频率分量,而滤除其他的无关频率分量.

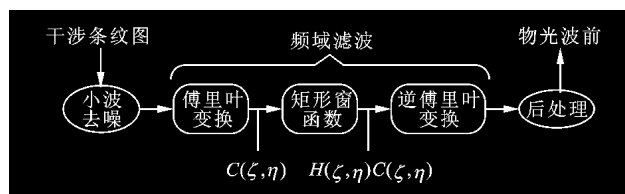
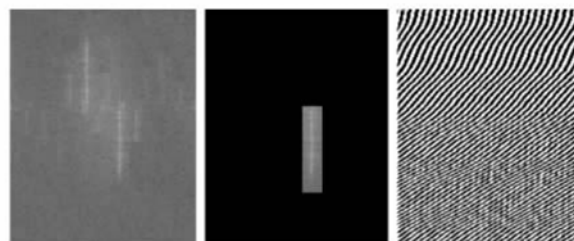


图 3 频域滤波过程

对小波去噪后的干涉条纹全息图像进行二维傅里叶变换,得到全息图像的频谱信息后,将该频谱图与矩形窗口滤波函数进行乘法运算,消除参考光直透部分及高级频谱等干扰项的影响,提取出只包含物光信息的一级频谱信息,对其进行逆傅里叶变换,转换到空间域得到该时刻的物光波,如图 4 所示.



(a) 干涉条纹频谱 (b) 一级频谱提取 (c) 再现的物光波

图 4 图像的频域滤波及物光波再现

2.3 截断相位差的计算

将不同时刻的 2 幅再现的物光波前作点除运算

$$Q(x, y) = \frac{O_2(x, y)}{O_1(x, y)} = \exp\{j[\phi_2(x, y) - \phi_1(x, y)]\} = \exp[j\Delta\phi(x, y)] \quad (6)$$

再用对数算法公式解出其相位差 $\Delta\phi(x, y)$

$$\lg[Q(x, y)] = j\Delta\phi(x, y) \quad (7)$$

即得到包裹的物光相位差分布,如图 5 所示。



图 5 包裹的物光相位差 $\Delta\phi(x, y)$

2.4 截断相位的解包裹及 Δz_m 的确定

经过上一步的处理得到的仅仅是包裹的物光相位差 $\Delta\phi(x, y)$,其值在 $[-\pi, \pi]$ 之间,要获得真实的物光相位差,就需要进行相位去包裹处理。

相位展开算法中基于极点的路径向向法和基于可靠度参数图的路径向向法所采用的最优积分路径选择方式,都是基于点处理的特性来完成位连续相面的形成,没有从根本上解决误差扩散问题。最小二乘相位展开方法是通过计算期望位相面与真实位相面的位相梯度误差的最小范数,来获得真实位相面的逼近,只有在相位图具有较高信噪比的情况下才有较好的展开结果。

由于本文要展开的相位图像信噪比较高,所以在既考虑算法的适用性又兼顾计算效率的基础上,采用基于快速离散余弦变换(DCT变换)的最小二乘相位展开算法。对于一个二维的包裹相位图矩阵,包裹图中的原始包裹相位差为 $\Delta\phi(x, y)$,对应的去包裹相位差为 $\Delta\varphi(x, y)$,则有

$$\Delta\varphi(x, y) = \Delta\phi(x, y) + 2K\pi$$

最小二乘去包裹算法的基本原理是:寻求相邻像素点之间的去包裹相位差与包裹相位差之差的最小二乘解,即

$$\min \left\{ \sum_{x,y} |\nabla_x \varphi(x, y) - W[\nabla_x \phi(x, y)]|^2 + \sum_{x,y} |\nabla_y \varphi(x, y) - W[\nabla_y \phi(x, y)]|^2 \right\}$$

求上式的最小解相当于求离散泊松方程

$$[\varphi(x+1, y) - 2\varphi(x, y) + \varphi(x-1, y)] + [\varphi(x, y+1) - 2\varphi(x, y) + \varphi(x, y-1)] =$$

$$\rho(x, y) \quad (8)$$

式中

$$\rho(x, y) = W[\nabla_x \phi(x, y)] - W[\nabla_x \phi(x-1, y)] + W[\nabla_y \phi(x, y)] - W[\nabla_y \phi(x, y-1)] \quad (9)$$

对上式采用 DCT 变换的算法,计算步骤如下。

第 1 步:由包裹相位差 $\Delta\phi(x, y)$ 求出 $\rho(x, y)$ 。

第 2 步:对 $\rho(x, y)$ 进行 DCT 变换得到 $\rho'(x, y)$, 即 $\rho'(x, y) = \text{DCT}(\rho(x, y))$ 。

第 3 步:由上步结果 $\rho'(x, y)$ 计算

$$\Delta\varphi'(x, y) = \frac{\rho'(x, y)}{2[\cos(\pi x/M) + \cos(\pi y/N) - 2]} \quad (10)$$

第 4 步:对上步结果 $\Delta\varphi'(x, y)$ 进行逆 DCT 变换,即可得到展开相位差 $\Delta\varphi(x, y)$ 。

对展开的连续相位差 $\Delta\varphi(x, y)$ 取统计平均,得到如图 6 所示的结果,通过像素点坐标即可确定物光相位差极值点之间的垂直距离 Δz_m 。

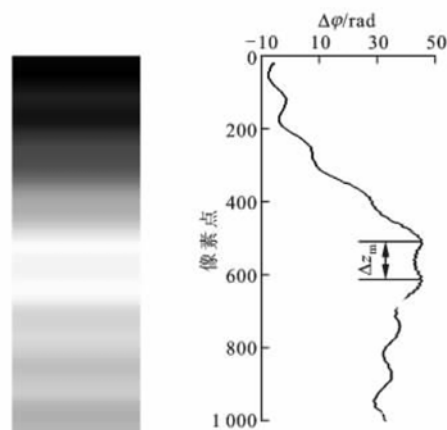


图 6 连续相位差 $\Delta\varphi(x, y)$ 及其极值点间的垂直距离 Δz_m

3 误差分析及实验验证

3.1 图像处理方法的误差分析

本文提出的利用激光全息干涉图像处理来测量流体质扩散系数的方法是一种间接测量方法,它是将直接测量的量 t_1 、 t_2 以及 Δz_m 代入式(1)中进行计算,从而得到质扩散系数,所以误差产生在这 3 个物理量的获取过程中。

t_1 、 t_2 的采集通过利用 VC 开发的软件控制,采集的时间精度达到 10^{-3} s,所以 t_1 、 t_2 的绝对误差 dt_1 、 dt_2 非常小,均在 10^{-3} s 数量级。在整个图像处理过程中,对最终计算 Δz_m 影响较大的误差主要产生在本文 2.4 小节中“最小二乘相位展开”这一步,这一步导致的相位极值点偏移误差最大可达到

10^{-5} m 数量级,所以最终获得的 Δz_m 的绝对误差 $d\Delta z_m$ 为 10^{-5} m.

将 dt_1 、 dt_2 和 $d\Delta z_m$ 带入间接测量量的相对不确定度计算公式

$$\frac{dD_{AB}}{D_{AB}} = \frac{\partial \ln D_{AB}}{\partial t_1} dt_1 + \frac{\partial \ln D_{AB}}{\partial t_2} dt_2 + \frac{\partial \ln D_{AB}}{\partial \Delta z_m^2} d\Delta z_m^2 \quad (11)$$

计算得到质扩散系数 D_{AB} 的相对不确定度在 10^{-2} 数量级,即精度可以达到 0.1%.

将 dt_1 、 dt_2 和 $d\Delta z_m$ 带入间接测量量的绝对误差计算公式

$$dD_{AB} = \frac{\partial D_{AB}}{\partial t_1} dt_1 + \frac{\partial D_{AB}}{\partial t_2} dt_2 + \frac{\partial D_{AB}}{\partial \Delta z_m^2} d\Delta z_m^2 \quad (12)$$

计算得到质扩散系数 D_{AB} 的绝对误差为 $0.001 \text{ cm}^2/\text{s}$.

3.2 图像处理方法的实验验证

为了检验本文提出的图像处理方法的准确性及可靠性,测定了已有文献值的 0.33 mol/L KCl 溶液在 298.15 K 下与水的质扩散系数,该测点被认为是质扩散测量系统检测的标准点.该点的质扩散系数

标准值 D_{ref} 为 $1.841 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$,利用本文方法得到的该点质扩散系数为 $1.865 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$,与标准值比较相对误差 $\sigma=1.30\%$.

为了进一步验证本文方法的准确性及可靠性,对温度分别为 288.15 、 298.15 、 303.15 、 313.15 和 333.15 K 的 0.1 mol/L 蔗糖水溶液-水扩散系的质扩散系数进行了实验测量,测量结果与文献值及改进的条纹中心线法的测量结果的比较见表 1.

由表 1 可以看出,将基于傅里叶变换相位检测原理的图像处理方法应用于流体质扩散系数测量的结果显示,数据处理精度可以控制在 5% 以内,而改进的条纹中心线法的误差则在 10% 左右.本文采用的方法由于利用了条纹全息图中所有的灰度信息来分析条纹,同条纹中心线法相比,处理精度大幅提高,特别是在温度较高时,因为扩散加快,条纹中心线法由于其方法的局限性(存在较大的条纹判读误差)导致误差较大,而本文采用的图像处理方法由于利用的是图像的相位信息,不受温度影响,故在较高温度时仍具有良好的精度.

表 1 蔗糖水溶液-水扩散系的质扩散系数测量结果比较

T/K	$D/10^{-6} \times \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$		相对误差 $\sigma_1/\%$	改进的条纹中心线法 $D/10^{-6} \times \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	相对误差 $\sigma_2/\%$
	文献数据 ^[9]	本文方法			
288.15	4.62	4.72	2.22	4.93	6.34
298.15	5.56	5.69	2.35	6.29	11.66
303.15	5.89	6.06	2.86	6.56	10.26
313.15	7.66	8.02	4.57	8.62	11.20
333.15	9.87	10.37	4.84	11.17	11.65

4 结 论

本文在基于傅里叶变换的相位检测基本原理的基础上,提出了一种新的利用激光干涉图像中的相位信息测量流体质扩散系数的图像处理方法.该方法的特点在于:①在空间域滤波去噪的过程中采用可调整阈值的小波分解算法,能够比传统的线性滤波方法及采用全局阈值的 Donoho 小波系数算法更加有效地去除全息干涉条纹图像中的噪声;②在一级频谱提取过程中采用矩形窗口函数的方法,使得对特定频谱的提取更加准确,为下一步骤中物光波的准确再现奠定了较高的精度基础;③在缠绕相位的解包裹过程中,采用基于快速离散余弦变换的最

小二乘去包裹算法,既满足了精度要求,又兼顾了计算效率.

通过对实验中采集的 0.33 mol/L KCl 溶液在 298.15 K 下与水的质扩散干涉条纹图像的处理,以及与文献值的比较,验证了本文方法的准确性.通过对实验中采集的 5 个温度点下 0.1 mol/L 蔗糖溶液-水扩散系的质扩散干涉条纹图像进行处理,并传统的改进条纹中心线法的处理结果进行比较,验证了本文方法的优越性.本文介绍的图像处理方法由于充分利用了激光全息图的相位信息,从而进一步提高了处理实验数据的精度,通过误差分析可知该方法的精度在理论上可以达到 0.1%,从而可为激光全息干涉法测量流体质扩散系数实验提供新的手段.

参考文献:

- [1] 李明. 激光全息技术的发展及应用趋势研究[J]. 激光杂志, 2005, 26(6): 13-15.
LI Ming. Research on the development and application trend of laser holography [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 26(6): 13-15.
- [2] MATTISSON C, NYLANDER T, AXELSSON A. Diffusion measurements using holographic laser interferometry in a cubic lipid-water phase [J]. Chemistry and Physics of Liquids, 1996, 84(7): 1-12.
- [3] 赵长伟, 何明霞, 朱春英, 等. 实时激光全息干涉法测量液相扩散系数[J]. 天津大学学报, 2004, 37(5): 438-442.
ZHAO Changwei, HE Mingxia, ZHU Chunying, et al. Determination of liquid diffusion coefficient by real-time holographic interferometer [J]. Transactions of Tianjin University, 2004, 37(5): 438-442.
- [4] 马友光, 李欣, 冯惠生. 液相扩散系数的激光全息法测定[J]. 天津大学学报, 2001, 34(5): 678-680.
MA Youguang, LI Xin, FENG Huisheng, et al. Measurement of liquid diffusion coefficients by laser holographic interference technique [J]. Transactions of Tianjin University, 2001, 34(5): 678-680.
- [5] RICHTER J, LEUCHTER A, GROSSER N. Digital image holography for diffusion measurements in molten salts and ionic liquids-method and first results [J]. Journal of Molecular Liquids, 2003, 103/104: 359-370.
- [6] 何茂刚, 刘逊, 张颖. 数字全息干涉法流体质扩散系数实验研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(S2): 69-72.
HE Maogang, LIU Xun, ZHANG Ying. Measurement of mass diffusion coefficients using digital image holographic interferometry system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(S2): 69-72.
- [7] HE Mao-Gang, ZHONG Qiu, ZHANG Ying. Measurement of mass diffusion coefficients of saccharose solution and dimethyl ether in air using digital image holographic interferometry system. [J]. High Temperature and High Pressure, 2008, 37(1): 61-70.
- [8] CAI T T, SILVERMAN B W. Incorporating information on neighboring coefficients into wavelet estimation [J]. Indian Journal of Statistics: B, 2001, 63(2): 127-145.
- [9] GRAY L G, FENICHEL H. Holographic interferometric study of liquid diffusion [J]. Applied Optics, 1979, 18(4): 343-345.

(编辑 葛赵青 荆树蓉)

第六届压缩机与制冷国际会议在我校召开

由我校主办、国际制冷学会等协办的压缩机与制冷技术国际会议“International Conference on Compressor and Refrigeration 2008”于 2008 年 9 月 26 日上午在我校国际学术交流中心开幕. 会议主席、我校李连生教授致开幕词.

这一国际会议已在中国成功举办了 5 届, 会议研讨的范围包括压缩机及制冷系统的模拟、设计、分析和运行控制等技术方向. 该会议作为国际制冷学会的系列会议之一, 已在国内外压缩机与制冷技术领域产生了广泛影响, 成为该领域内重要的国际学术会议之一.

本次会议为期 3 天, 共有 150 多位中外学者及企业代表参加, 其中来自美国、英国、意大利、德国、瑞典、奥地利、巴西、日本、韩国、新加坡及中国台湾等 12 个国家和地区的海外代表近 60 名. 与会代表交流并讨论了国内外压缩机、制冷及相关领域内的最新技术、产品及相关信息等. 会议由国际制冷学会、中国制冷学会、中国制冷空调工业协会、中国通用机械工业协会压缩机分会协办, 并得到了欧洲气动协会以及上海海立、Atlas Copco、Carrier、开山、汉钟等企业的支持.

会议共收到论文近 70 篇(其中海外论文近 30 篇). 会议还特别邀请来自美国、欧洲、日本及中国的著名学者作了主题报告, 其中: 美国伊利诺伊大学的 Predrag S. Hrnjak 教授作了题为“Carbon Dioxide as Refrigerant: Challenges, the Role and the Prospective”的主题报告; 英国城市大学的 Nikola Stosic 教授作了题为“Geometry of Screw Compressor Rotors and Their Tools”的主题报告; 美国马里兰大学的 Yunho Hwang 教授作了题为“Advanced Technology for Air-Conditioning and Refrigeration”的主题报告; 欧洲气动协会副主席 Filip Vandenberghe 先生作了题为“An Introduction to Pneurop”的主题报告; 日本东京工业大学的 A. Saito 教授与我校的俞炳丰教授作了题为“Introduction to International Journal of Refrigeration”的主题报告. 会上众多的报告及深入的研讨对未来几年制冷及压缩机行业的发展将产生积极影响.

(来源: 西安交大新闻网 <http://www.xjtu.edu.cn>)