中国科学: 技术科学 2018 年 第 48 卷 第 8 期: 908 ~ 920
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

论 文

热毛细对流自由面微弱位移信号高灵敏度相位检测系统

曹文慧[1,2], 段俐[1*], 李永强[2], 康琦[1*]

1. 中国科学院力学研究所, 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100190;
2. 东北大学理学院, 沈阳 110819
* E-mail: duanli@imech.ac.cn; kq@imech.ac.cn

收稿日期: 2017-10-27; 接受日期: 2018-06-07; 接受日期: 2018-08-02
国家自然科学基金(批准号: 11372328, 11502271)和自然科学基金联合基金(批准号: U1738116)资助项目

摘要 在流体力学的研究领域, 流体自由面的变化是一种非常重要的物理现象. 针对自由面的形变位移, 研制一套双频激光相位光电检测系统. 将光学干涉技术与相位计相结合, 实时获得相位计输出的反映流体表面形变的信号. 本文详述了此双频激光相位光电检测系统的原理和装置. 通过高精度PI步进电机驱动物体移动, 标定系统的性能特性. 应用激光位移传感器验证该系统的精度, 同时分析环境对干涉测量系统的影响. 将该系统应用于浮力热毛细对流自由面形变测量中, 获得有意义的实验结果.

关键词 表面变形, 干涉测量, 相位计, 热毛细流动

1 引言

液体表面具有特殊的现象和特性, Gibbs, Langmuir等对液体表面性质展开研究, 获得了显著成就[1]. 液体的分子结构、成分、分子间的热运动以及温差、压强的变化都可能引起液体表面张力的变化, 从而引起表面形变. 表面波就隐藏在表面形变内. 表面张力随着温度的增加而减小. 由温度引起的表面张力变化驱动流体运动的现象就是热毛细对流. 热毛细对流发展过程中, 表面存在表面变形和表面波, 它是热毛细对流转捩过程的基本特征, 仔细研究该物理现象对理解流体对流的机理具有重要意义[2]. 随着科学手段的不断发展, 人类对空间的探索也在加深. 微重力环境下, 热毛细对流占据主导地位, 是对流的主要方式, 也是影响流体传质, 传热过程的主要因素. 对热毛细对流现象的研究能够有助于我们更好地开展空间科学实验和应用.

对热毛细对流的研究主要集中在温度、速度和表面位移3个方面. 大部分实验主要测量温度和速度, 实现对热毛细对流的研究. 诸如, Vince和Dubois[3]通过阴影法研究了液层在水平温度梯度下的热毛细对流. 实验中发现, 当温差大于临界值时, 液层会产生行波. Daviaud和Vince[4]通过阴影法在一个长容器中进行实验, 得出热毛细对流的各种不稳定性. 周彬等人[5]利用PIV

引用格式: 曹文慧, 段俐, 李永强, 等. 热毛细对流自由面微弱位移信号高灵敏度相位检测系统. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 908–920
Cao W H, Duan L, Li Y Q, et al. High-sensitivity phase detecting system for measurement of weak displacement signals on the liquid free surface in thermocapillary convection (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 908–920, doi: 10.1360/N092017-00366

© 2018 《中国科学》杂志社

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对矩形液池热毛细流动的不稳定性进行了实验研究, Selver和Kati[6]使用热像仪和示踪粒子实验研究了冷端不同的热边界条件对热毛细对流转捩的影响.

然而, 相比于热毛细对流在温度和速度方面的研究, 对于热毛细对流表面波的实验研究非常少. Riley和Neitzel[7]用阴影法定性观察了流体表面张力梯度引起的表面变形. Dabiri和Gharib[8]测量了湍流引起的大尺度表面形变, 认为在表面形变内存在很强的能量. 近年来, 采用光学检测系统对表面波进行相关研究也有报道. 段俐等人[9]将光学干涉测量技术引入到热毛细对流实验中, 搭建了一套用于测量流体表面微米级变化的光学测量系统. 该光学检测系统采用Michelson干涉法, 由图像采集和处理系统组成, 与常规的流体力学测量方法相比, 通过干涉图像处理可以直接获得定量的实验结果, 并且能够分辨1/40λ的界面形变, 具有更高的测量灵敏度. 并且通过对连续采集图像法分析, 可研究时间历程的变化. 但干涉条纹图像占据大存储空间而难以延长实验测量时间, 同时使用者也难以完成大量的图像后处理工作. Zhang等人[10]在研究环形液池浮力-热毛细对流表面形变的特性和规律时, 使用激光位移传感器进行表面变形的研究实验. 其测量原理依据三角测量法. 反射光在CCD上的位置随着目标物位置的改变而改变, 通过检测该变化就可以测量物体表面的位移量. 该位移传感器的最高测量灵敏度可以达到0.1 μm, 能够实现对环形液池浮力-热毛细对流流体自由面形变的测量. 但我们长期以来的一个微重力流体研究模型—矩形液池浮力-热毛细对流流体自由面形变特别小, 应用该检测系统容易受环境影响, 导致测量结果的偏差.

电子技术的发展使人们不必再去观察干涉仪产生的干涉条纹, 而可以对相干光的相位差直接进行测量. 针对热毛细对流自由面位移测量, 将相位计引入到光学测量系统中, 把待测量的信息表现为光波动携带的相位变化, 从而通过测量相位的变化得到待测量. 直接测得物光和参考光的相位差不仅能够满足长时间测量和实时获得流体界面形变数据的要求, 而且测量精度大幅度提高. 利用相位计以一周360°精确划分两个条纹之间的相位变化, 位移的分辨率取决于相位的分辨率, $\Delta L=\frac{\Delta\phi}{2\pi}\lambda$, 其中$\lambda$为光波波长. 相位计分辨率越高, 位移的分辨率也就越高, 系统的测量灵敏度能够获得提高. 此光学测量系统在微弱光信号下, 本机振荡光功率P_L比信号光功率P_S大几个数量级, 根据转换增益公式$G=2P_L/P_S$, 系统转换增益可高达10^7~10^8, 有较高的转换增益, 具有天然的检测微弱信号的能力[11]. 并且有良好的滤波性能, 信号处理部分能够将其他杂光产生的噪声滤掉, 只有在干涉混频后产生的频带内的杂光不能够被系统滤掉. 相比其他液面测量系统, 此系统的信噪比损失小、抗噪能力强、对环境要求不高.

2　双频激光相位光电检测系统原理

2.1　光波的调制原理

两束频率相差很小的单色光能够发生干涉, 这样的两束光波的叠加将产生光学理论中所谓的“拍”现象. 设两束振幅相等的光的表达式分别为

$$E_1=A\cos(2\pi f_1 t+\phi_1), \tag{1}$$

$$E_2=A\cos(2\pi f_2 t+\phi_2). \tag{2}$$

两束光叠加后的表达式:

$$E=E_1+E_2. \tag{3}$$

使用三角公式将其分解合并后有:

$$E=2A\cos\left(\pi\Delta f t+\frac{1}{2}\Delta\phi\right)\cos(2\pi f t+\phi), \tag{4}$$

其中, $\Delta f=f_1-f_2$, $f=(f_1+f_2)/2$, $\Delta\phi=\phi_1-\phi_2$, $\phi=(\phi_1+\phi_2)$. Δf为两束光的频差.

两束光的频率相差很小, Δf与f之比也很小. 式(4)中的$\cos(2\pi f t+\phi)$项随时间的变化比$\cos\left(\pi\Delta f t+\frac{1}{2}\Delta\phi\right)$项要快很多. 可以把两束光的叠加看成一个频率为$f$的高频简谐波振动, 振幅$2A\cos\left(\pi\Delta f t+\frac{1}{2}\Delta\phi\right)$不是常数项, 它是随时间缓慢变化的函数.

图1表示了两个波的叠加情况, 其中图1(a)和(b)分别表示未叠加前的两个单色波, 图1(c)中实线代表叠加后合成波的变化, 虚线是叠加后振幅的变化曲线, 振幅的变化频率为$\frac{1}{2}\Delta f$, 从图中可以直观看到振幅变换缓慢而合成波E变化极快.

两束频差不大的光叠加后的光强度I与合成波E的平方成正比, 则合成波光强度的表达式为

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$
\begin{aligned}
I &\propto \left(A\cos(2\pi f_2 t+\phi_1)+A\cos(2\pi f_1 t+\phi_2)\right)^2\\
&=\frac{A^2}{2}(1+\cos(4\pi f_2 t+2\phi_2))+\frac{A^2}{2}(1+\cos(4\pi f_1 t+2\phi_1))\\
&+A^2[\cos((2\pi f_2+2\pi f_1)t+\phi_2+\phi_1)+\cos((2\pi f_2-2\pi f_1)t+\phi_2+\phi_1)]\\
&=\underbrace{\frac{A^2+A^2}{2}}_{\text{直流项}}+\underbrace{\frac{A^2}{2}\cos(4\pi f_2 t+2\phi)+\frac{A^2}{2}\cos(4\pi f_1 t)+A^2\cos((2\pi f_2+2\pi f_1)t+\phi_2+\phi_1)}_{\text{高频项}}\\
&+\underbrace{A^2\cos((2\pi f_2-2\pi f_1)t+\phi_2-\phi_1)}_{\text{拍频项}}. \qquad (5)
\end{aligned}
$$

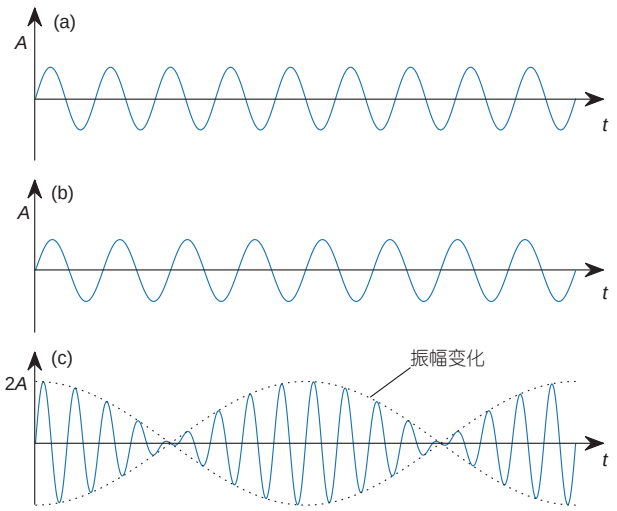

图 1 (网络版彩图)频率不同的两光波的叠加

结果显示合成波的光强有3部分组成: 直流项、高频项和拍频项. 采用光电探测器接收合成波光强时, 直流项和高频项被滤掉, 低频率的拍频被保留下来. 这样就可以获得以Δf为拍频的周期性电信号, 如图2所示.

2.2 相位计原理

相位计是基于锁相放大器设计的用于测量信号相位变换的仪器. 锁相放大器是被用来对交变信号进行相敏检测的放大器, 能够精确测量被噪音源遮蔽了的小信号. 它将和被测量信号有相同频率和相位关系的参考信号作为参考基准, 通过鉴相器(相敏探测器)把测量信号从噪音中挑选出来, 只对被测信号本身和那些与参考信号同频的噪声分量有响应. 因此, 能大幅度抑制无用噪声, 改善检测信噪比. 此外, 锁相放大器有很高的检测灵敏度, 信号处理比较简单, 是弱光信号检测的一种有效方法. 图3是锁相放大器的工作原理图.

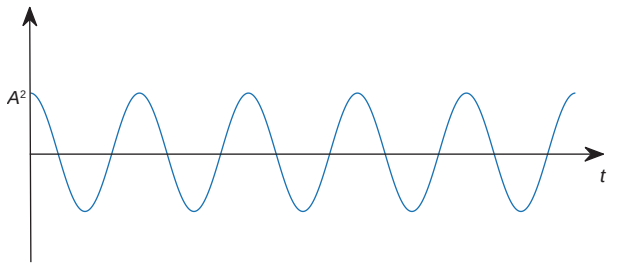

图 2 (网络版彩图)周期为1/Δf的电信号

探测到的交流信号经过交流放大器后, 以电压为$V_{\rm sig}$、频率为$f_{\rm sig}$的信号输入到鉴相器中. 设参考信号的电压为$V_{\rm L}$、频率为$f_{\rm L}$, 两信号经过鉴相器后混合, 输出结果为

$$
\begin{aligned}
V_{\rm psd} &= V_{\rm sig}V_{\rm L}\cos(2\pi f_{\rm sig}t+\phi_{\rm sig})\cos(2\pi f_{\rm L}t+\phi_{\rm L})\\
&=\frac{1}{2}V_{\rm sig}V_{\rm L}\cos(2\pi(f_{\rm sig}-f_{\rm L})t+\phi_{\rm sig}-\phi_{\rm L})\\
&\quad-\frac{1}{2}V_{\rm sig}V_{\rm L}\cos(2\pi(f_{\rm sig}+f_{\rm L})t+\phi_{\rm sig}+\phi_{\rm L}). \qquad (6)
\end{aligned}
$$

由式(6)知, 鉴相器输出两个交流信号, 一个信号的频率是$f_{\rm sig}-f_{\rm L}$, 另一个信号的频率是$f_{\rm sig}+f_{\rm L}$. 移相器使得参考信号频率可调, 从而形成与信号同频的参考信号, 即$f_{\rm sig}=f_{\rm L}$. 鉴相器的输出信号经过低通滤波器后, 输出结果变为

$$
V_{\rm psd}=\frac{1}{2}V_{\rm sig}V_{\rm L}\cos(\phi_{\rm sig}-\phi_{\rm L}). \qquad (7)
$$

输出一直流量, 直流量的大小随相位差变化, 在参考信号相位一定的情况下, 根据直流量的值的变化就可以得到测量信号的相位变化.

2.3 双频激光相位光电检测系统的组成

该系统采用塞曼激光稳频技术制成的双频激光器. 激光器发出来的光为正交线偏振光, 且两束光频差不大.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

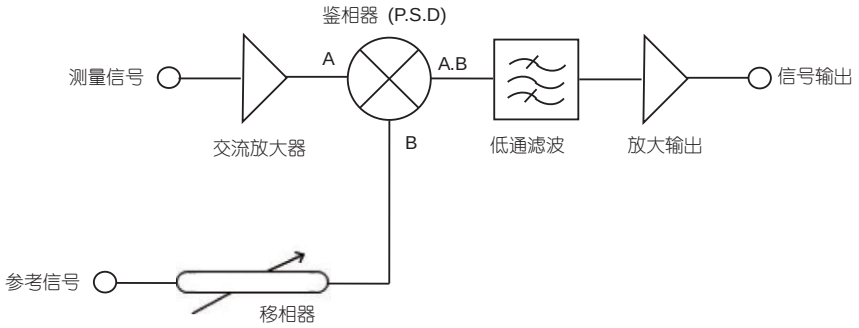

图 3　锁相放大器工作原理

图4是双频激光相位光电检测系统测量示意图. 激光器发出频率为f_1和f_2频率相差很小的正交线偏振光, 分光镜将总光线分成两部分. 一部分光线经过反射后进入检偏器1, 两束正交偏振光通过检偏器后成为振动方向相同的两束光, 这两束光发生干涉, 得到式(4)中的光波. 干涉后的光波进入光电器件1后将光信号转换为电信号, 滤掉直流项和高频项, 得到参考电信号$\cos[2\pi(f_1-f_2)t]$. 另一部分光透过分光镜后进入偏振分光镜, 垂直于纸面频率为f_1的偏振光被偏振分光镜全反射, 而平行于纸面频率为f_2的偏振光被偏振分光镜全部透过. 被全反射的光进入一固定好的直角锥棱镜后又被反射回偏振分光镜, 被透射的光进入被测量物体表面后也被反射回偏振分光镜. 两反射回来的光束经偏振分光镜后经过检偏器2后振动方向相同, 两束光叠加在一起形成干涉拍频. 同样在光电检测器件2上得到测量电信号$\cos[2\pi(f_1-f_2)t]$. 在研制的测量系统中信号拍频频率为1.788 MHz. 被测量物体表面不动时, 测量信号和参考信号相同. 被测量物体表面移动时, 根据多普勒效应, 频率f_2发生改变. 假设测量直角锥棱镜移动速度为v, 则频率变化为

$$\Delta f_2 = \pm\frac{2v}{c}f_2, \tag{8}$$

式中的正负号代表了被测量物体表面的移动方向. 则测量信号变为$\cos[2\pi(f_1-f_2\pm\Delta f)t]$, 即测量信号同参考信号相比, 相位变化为

$$\Delta\phi = 2\pi\Delta f_2 t. \tag{9}$$

将Δf_2的表达式代入:

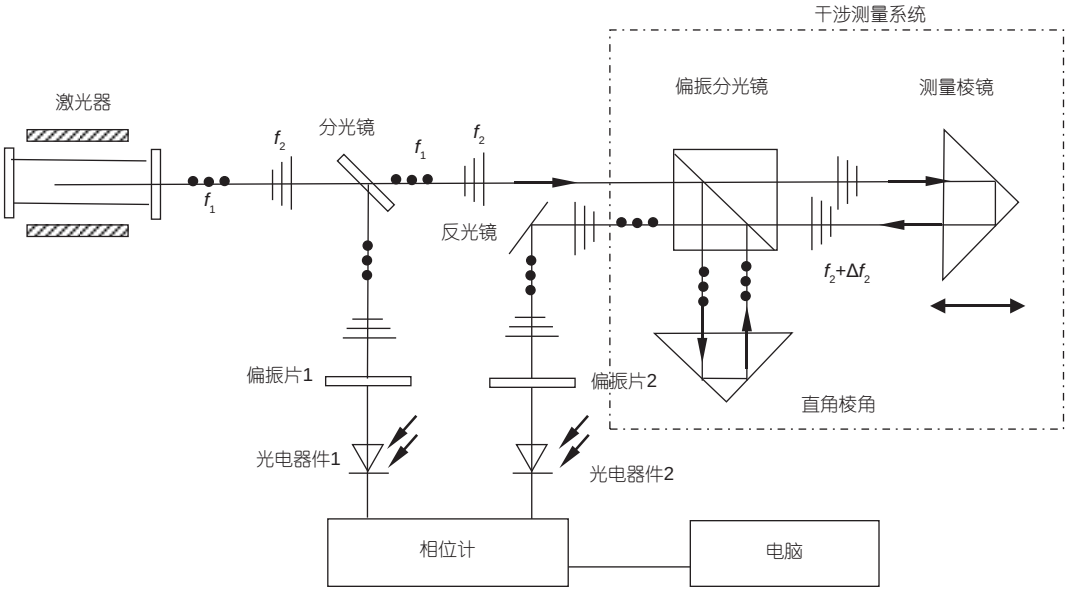

图 4　双频激光相位光电检测系统示意图

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\Delta\phi = \pm 2\pi \frac{2v}{c} f_2 t = \pm 2\pi \frac{2\Delta L}{\lambda_2}. \tag{10}$$

由于波长为632.8 nm的激光器比较常见且稳频效果好所以选用此波长的激光, 即λ_2=632.99076 nm, 由式(10)可得, 可将移动物体距离的变化转变为测量信号相位的变化. 将测量信号和参考信号载入相位计, 根据相位计的工作原理, 可得到测量信号的相位变化, 由此可以得到位移的变化.

测量系统中使用的相位计的工作原理是基于脉冲填充和时间平均. 完全采用数字电路, 特殊设计的鉴相电路可以避免毛刺干扰和提高时间特性. 其分辨力可以通过改变相位计的信号采样频率来加以提高, 分辨力公式为$r = \frac{\sqrt{f_l f_s}}{f_c} \cdot \frac{\lambda_2}{N}$, 其中$f_l$为信号频率, f_s为信号采样频率, f_c为相位计时钟频率, N为光拍频数, λ_2为测量光波长. 由于我们研制的测量系统中, λ_2=632.99076 nm, N=2, f_l=f_1−f_2=1.788 MHz, f_c=320 MHz. 若信号采样频率选取为f_s=100 kHz, 相位计分辨力换算为位移的分辨力为0.418 nm. 这也是测系统理论上的分辨力. 由于光电接收器和环境噪音的影响, 研制的测量系统实际的分辨力要比理论值高.

对于实际的热毛细对流系统, 我们项目组大量的研究工作表明[2,10,12], 表面振荡的振幅通常在0.1~100 μm范围内. 本设备的测量分辨力完全可以满足对热毛细对流表面振荡的测量需求.

3 测量系统的实验对比标定

为了验证双频激光相位光电检测系统的稳定性和可靠性. 用高精度步进电机驱动移动物体表面的移动, 测量系统如图5所示. 物体表面移动时, 测量系统实时采集移动数据显示在电脑上, 得到物体的移动距离. 把测量到的移动距离和步进电机设定的移动距离进行对比, 验证系统的准确性.

步进电机及控制器选用德国PI公司生产的产品, 控制器型号为C-863, 促动器型号为M-227, 如图6所示. 步进电机有着极高的精度, 电机移动1 mm需要机芯旋转283715步. 改变步进电机的移动步长就可以实现测量棱镜移动距离. 电机行程为25 mm, 最小移动步长为0.05 μm.

此外, 双频激光相位光电检测系统在测量物体表面的移动时, 用激光位移传感器同时测量物体表面的移动, 将获得的数据进行对比. 本次实验对比中采用的激光位移传感器为Keyence公司生产的LK-H080型号, 如图7(a)中所示. 其标称灵敏度可以达到0.1 μm. 它的测量基于三角形测距原理, 如图7(b)所示. 激光位移传感器将可见光投射到靶面上的o点, 反射光通过光学成像系统成像与CCD上的o′点处. 当测量物体移动时, 投射到物体上的光点也跟着移动, 其对应的CCD上的接收光电位置也跟着移动. 被测量物体的位移通过CCD上对应的接受光电点位移被精确检测.

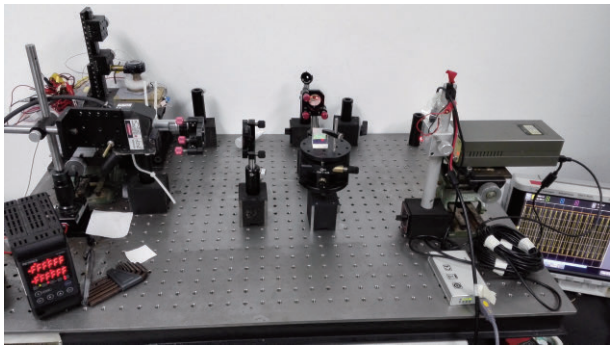

图 5 (网络版彩图)双频激光相位光电检测系统

图 6 (网络版彩图)步进电机及控制器

3.1 系统抗噪性能标定

理想情况下, 当被测量物体表面未移动时, 双频激光相位光电检测系统和激光位移传感器显示的移动距离应为0. 由于环境和测量系统等因素的存在, 系统中存在噪音. 此外, 系统的分辨力和系统的抗噪能力有关, 噪音大, 微弱信号淹没在噪音中, 不能够被测量到. 现在需要对测量系统中的噪音进行量化. 进而确定系统分辨力. 当被测量物体表面不移动时, 将我们研制的测量系统的光和日本Keyence生产的LK-H080型号的激光位移传感器的光同时投射到棱镜上进行数据采样, 得到系统中的噪音大小, 采样频率为10 Hz, 时间为10 min.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

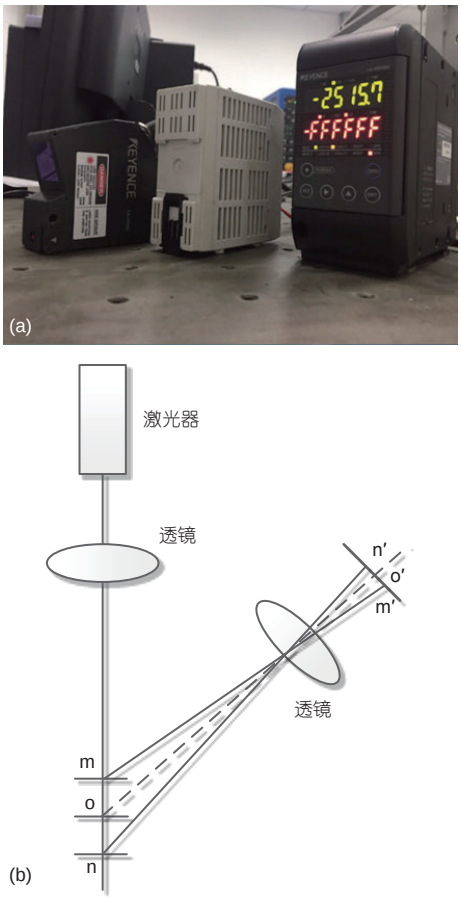

图 7　(网络版彩图)激光位移传感器原理及实物图. (a) 激光位移传感器实物图; (b) 三角测距原理

图8为棱镜未移动时激光位移传感器采集的数据, 其中图8(a)为激光位移传感器获得的原始数据, 由于系统中存在着线性漂移, 将数据去掉漂移趋势后得到的噪音, 如图8(b)所示. 由此可以得激光位移传感器的噪音大约在−0.17~0.17 μm范围内. 为使系统测量信号能够和噪音完全分离开来, 实际噪声测量中激光位移传感器在噪声的影响下分辨力为0.17 μm.

图9所示为我们研制的双频激光相位光电检测系统采集得到的噪音. 由图可知, 我们研制的检测系统的噪音在−0.05~0.05 μm范围内变化. 为将系统测量信号能够和噪音完全分离开来, 系统的分辨力0.05 μm. 双频激光相位光电检测系统的分辨力除了受到相位计本身的影响外还受到光电接收器等的影响, 实际能够达到的分辨力要比理论值大.

比较图8和9可知, 由于受气流、振动等环境变化以及系统本身因素的影响, 系统中普遍存在着噪音, 不同的测量系统噪音大小不一样. 我们研制的双频激光相位光电检测系统相比于激光位移传感器系统噪音要小得多, 也就是说系统受环境影响小, 抗噪能力比较强, 系统相应的分辨力也比激光位移传感器高.

3.2　系统线性度

控制电机的步长, 使得测量棱镜移动不同的距离, 分别用双频激光相位光电检测系统和激光位移传感器采集位移数据, 对数据进行处理, 得到位移的实际测量结果. 本次对比标定实验中, 测量棱镜移动12个不同距离点, 每个距离点测量5次, 剔除异常量后对每个点的测量值求平均. 表1是液面振荡测量系统得到的测量结果, 表2是激光位移传感器得到的测量结果.

理想中的输出-输入关系应当具有直线特性, 并且直线和输入坐标成45°的夹角. 但由于种种原因, 其输出-输入特性总有不同程度的非线性. 将实验得到的数据进行线性拟合, 如图10所示. 其中图10(a)为双频激

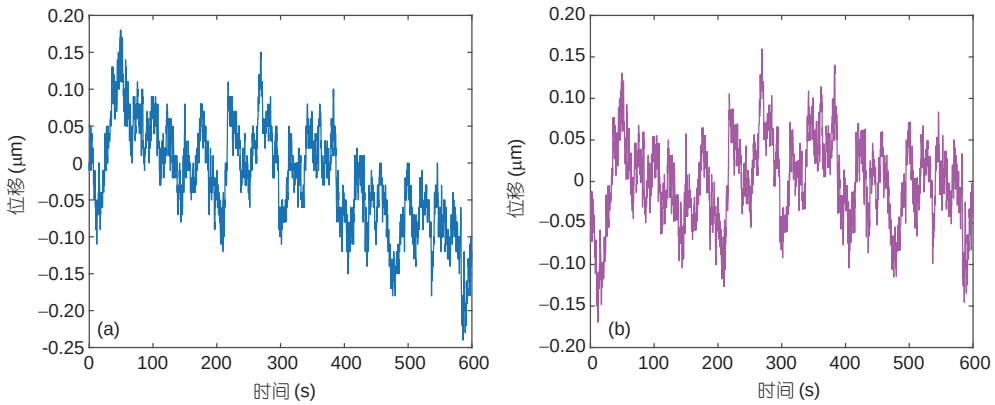

图 8　(网络版彩图)激光位移传感器噪音大小. (a) 原始采集数据; (b) 消除漂移得到的噪声

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

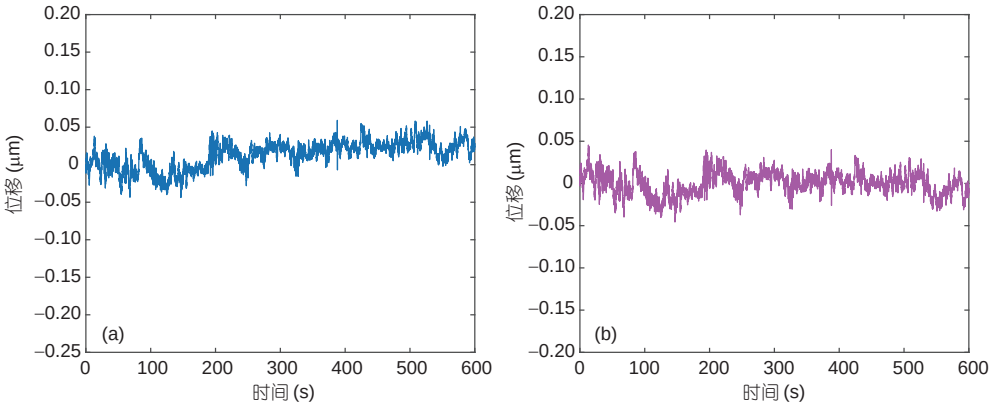

图 9 (网络版彩图)液面测量系统噪音大小. (a) 原始采集数据; (b) 消除漂移后得到的噪音

表 1 双频激光相位光电检测系统测量值

电机移动 (μm)	实际测量 (μm)	电机移动 (μm)	实际测量 (μm)
2	1.84	8	7.81
3	2.89	9	8.8
4	3.91	10	9.79
5	4.92	12	11.78
6	5.9	14	13.73
7	6.79	16	16.11

表 2 激光位移传感器测量值

电机移动 (μm)	实际测量(μm)	电机移动(μm)	实际测量(μm)
2	2.02	8	8.59
3	3.21	9	9.43
4	4.38	10	10.26
5	5.34	12	11.99
6	6.08	14	13.81
7	7.72	16	15.82

光相位光电检测系统测得数据的拟合，图10(b)为激光位移传感器测得数据的拟合. 图中小圆形表示实验测量点, 直线是对12个实验测量点进行拟合的结果.

根据实验测量点标定两个测量系统的最小二乘线性度:

$$\xi_{\mathrm{L}}=\frac{\left|(\Delta y_{\mathrm{L}})_{\max}\right|}{y_{\mathrm{FS}}}\times 100\%, \tag{11}$$

其中y_{FS}为满量程输出，$(\Delta y_{\mathrm{L}})_{\max}$为实验测量点与最小二乘直线的最大偏差，得到双频激光相位光电检测系统的最小二乘线性度ξ_{L}=0.0136%，激光位移传感器的最小二乘线性度为ξ_{L}=0.0258%. 可知此双频激光相位光电检测系统有着比激光位移传感器更好的线性度. 输入与输出的线性拟合关系式为

$$D=kx+b, \tag{12}$$

其中双频激光相位光电检测系统中k=1.0012，b=−0.1537, 激光位移传感器中k=0.9705, b=0.4567.

3.3 重复性

多次重复测量同一位移点时，每次测量的值可能都不太一样，大小是随机的，这种随机性可以用重复性这一指标进行标定. 以移动量为x轴，测量值为y轴, 同一测量点多次测量时得到不同的坐标点，用直线将得到的坐标点和原点相连. 测量的重复性可用直线重合度表示.

如图11所示为多个测距点的重复性，每个移动点测量5次. 其中图11(a)表示双频激光相位光电检测系统测量点重复性，直线重合度高，图11(b)表示激光位移传感器测量点重复性, 线性重合度低.

根据实验结果, 在整个测量范围, 用选取的测量点计算整个测量过程的标准偏差, 公式为

$$s=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}s_i^{\,2}}, \tag{13}$$

其中, s_i为第i个测量点的标准偏差, 整个测量过程的标准偏差s就可以描述测量系统的随机误差, 测量系统的重复性指标为[13]

$$\delta_{\mathrm{R}}=\frac{3s}{y_{\mathrm{FS}}}\times 100\%, \tag{14}$$

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

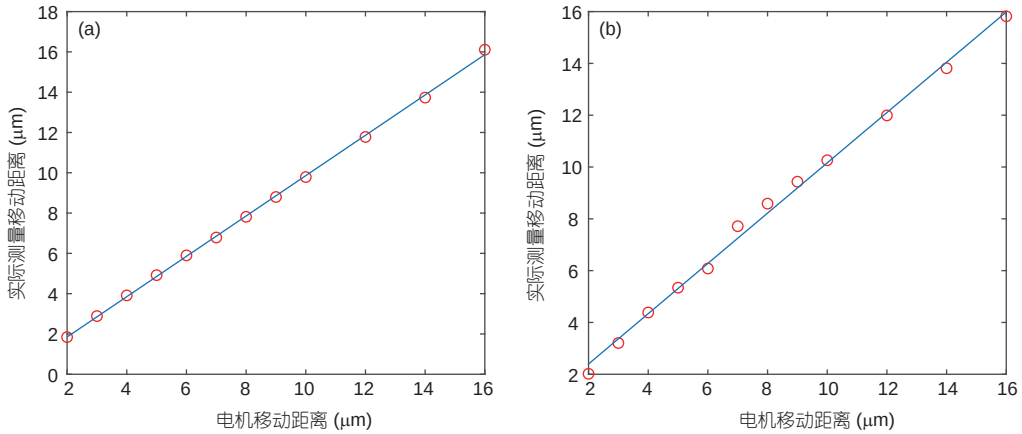

图 10　(网络版彩图)测量数据的拟合. (a) 检测系统; (b) 激光位移传感器

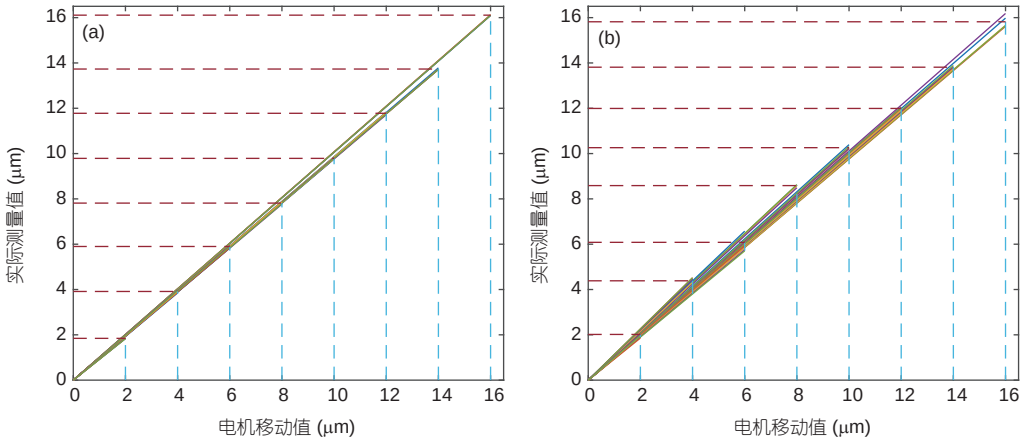

图 11　(网络版彩图)多个测距点的重复性. (a) 测量系统; (b) 激光位移传感器

其中双频激光相位光电检测系统重复性指标为δ_R=0.67×10^{-5}, 激光位移传感器的重复性指标为δ_R=0.268×10^{-4}. 相比下, 我们研制的双频激光相位光电检测系统测量重复性更好.

4　误差分析

实验室环境环境温度的变化会对测量结果产生位移漂移, 从而引起测量误差. 根据梁浴榕[14]研究的外差激光干涉仪中温度对位移漂移影响的测试结果, 在3小时的位移测量过程中, 温度变化0.5℃时, 位移漂移为90 nm. 究其原因, 温度的变化使得光学器件中的温度场分布不均匀, 使得参考光束和测量光束经过光学器件的光程发生变化, 从而在测量过程中引入测量误差. 因而消除位移漂移的方法是保持测量光束和参考光束的光程相等. 测量光束和参考光束在光学器件中的光程差为

$$\Delta D = 2(n_m - n_r)L + (n_{r2}L_{r2} - n_{r1}L_{r1}), \tag{15}$$

其中, n_m为测量光束路径上分光棱镜的折射率, n_r为参考光束路径上分光棱镜折射率, L为分光镜的边长, n_{r2}为测量角锥棱镜的折射率, L_{r2}是其几何长度, n_{r1}为参考角锥棱镜的折射率, 几何长度为L_{r1}.

因此, 要降低位移漂移必须要保证参考光和测量光的等光程, 以及保持光学器件的温度场分布均匀以减小测量光束和参考光束之间的折射率之差. 根据哈尔滨工业大学刁晓飞[15]的研究, 对于等光程设计的光学路径, 测量系统的漂移非常小, 从而能够减小对系统的影响.

激光的频率会随时间变动. 激光干涉频率的不稳

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

定性影响会对测量系统的结果产生影响. 频率变化如果不能限制在一定范围内, 测量系统的性能就会变坏. 本次实验用到的激光源为单横模运转的激光器, 光频稳定性达到10^{-9}量级, 由频率不稳定性引起的对测量精度的影响可以忽略不计.

理论上, 测量系统的参考光和测量光平行并垂直入射到光电探测器表面上, 即两束光的波前在光电探测器上保持相同的相位关系. 实际测量系统中两束光存在一定程度的夹角, 影响拍频信号. 要想形成强的拍频信号, 必须保证两束光在空间准直的良好性. 夹角需满足的条件可表示为

$$\sin\theta \ll \frac{\lambda_2}{\pi r}, \tag{16}$$

式中, λ_2为测量光波长, r为光束直径. 本测量系统中r=6 mm, 则θ<<1.9×10^{-3} rad. 可通过改良优化光学器件的装调工艺, 使得两束光的夹角在条件要求范围内, 从而提高测量精度.

光学器件性的选择和光路的调整也对测量系统的精度有影响. 理想状态下, 两束线偏振光经过偏振分光镜后完全分离, 但由于加工工艺等因素的限制, 两束光不能完全分离经检偏器后发生干涉, 使得分离的光束进入光电检测器后产生微小的交流信号影响测量精度. 为了消除残留的交流信号, 采用消光比T_p/T_s>1000的偏振分光镜, 使得残留交流信号足够小, 经放大滤波后被滤掉.

5 热毛细对流自由面的测量

用双频激光相位光电检测系统测量热毛细对流自由面形变是我们的研制目标. 为测量热毛细对流自由面的振荡, 搭建实验测量系统, 它主要有控制系统和自由面位移测量系统两部分组成. 该实验测量系统提供了研究热毛细对流自由面的实验装置, 并且可以对其进行自由面位移的实时监测, 以及对实验结果的再现和性能分析.

5.1 热毛细对流模型控制系统

热毛细对流实验模型控制系统主要有矩形液池、直流电源和温度控制器组成. 液池的尺寸为52 mm×36 mm×6 mm, 液池的前后面和底面材质相同, 由K9光学玻璃组成, K9玻璃的材质均匀, 具有良好的光透性. 液池的左右侧面由6 mm厚的铜块构成, 其中右侧壁的铜块上贴有电热膜进行加热, 左侧壁的铜块附有半导体制冷片实现制冷效果, 图12为液池的模型和实物图. 在重力因素的影响下, 浮力会对热毛细对流产生影响. 本文主要观测在矩形液池薄层流体内浮力-热毛细对流自由表面形变及振荡等.

图13为热毛细对流模型的温度控制系统. 热电偶是一种被广泛应用的温度测量器件, 其本身具有良好的线性度、灵敏度、稳定性等特点. 热电偶的原理是热电效应, 它是两种材质不同的导体温度不同引起电势差的热电现象. 热电偶利用热电效应将温度信号转

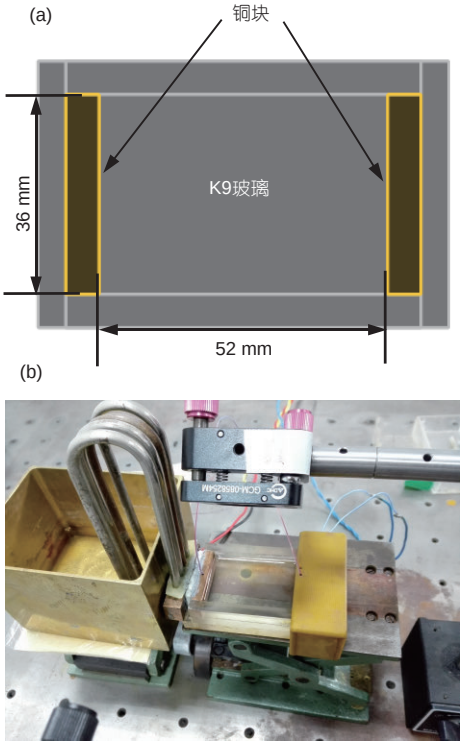

图 12 (网络版彩图)液池实验模型(a)和实物图(b)

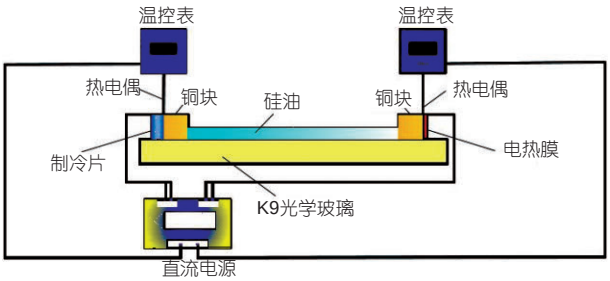

图 13 (网络版彩图)热毛细对流实验温度控制系统

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

化为电信号, 具有测量精度高、反应灵敏等优点, 并且与测量物体直接接触而不受其他物质的影响. 结构简单, 便于实验操作也是热电偶能够被广泛使用的重要因素. 根据材料类型的不同, 热电偶的型号可以分为T型、K型、R型等. 在测量实验中, 我们选用T型热电偶进行温度控制. 热电偶偶丝直径为0.08 mm, 温度测量的范围为−40℃~125℃.

加热端温度通过直流电源、热电偶、温控表和电热膜进行控制. 温度调节由温控表设置, 实验中温控表采用英国欧陆公司的ERUOTHERM3504型温度调节器, 下文用欧陆表简称. 热端加热时, 通过与欧陆表相连的热电偶实时反馈铜块的温度变化. 欧陆表通过PID算法将测量值和设定值进行对比, 从而控制直流电源的功率和电热膜的工作, 使得铜块的温度达到设定值. 同样的方法, 在冷端利用直流电源、欧陆表、热电偶和半导体制冷片通过PID进行温度控制, 使得冷端温度稳定在一定值, 达到制冷效果.

选用信越公司(Shin-Etsu Chemical Co. Ltd)的KF-96L硅油作为实验流体介质, 硅油的型号为2cSt, 物性参数在表3中列出. 硅油作为一种液体没有毒性和气味, 并且化学性质稳定.

表 3　实验流体的物性参数

参数	数值
硅油(cSt)	2
运动黏度	2×10^{-6}
密度ρ ($\times10^3$ kg/m^3)	873
热膨胀系数β (℃$^{-1}$)	0.00124
热扩散系数κ (m^2/s)	7×10^{-8}
表面张力σ (N m^{-1})	0.0183
表面张力梯度$\partial\sigma/\partial T$ (N m^{-1} ℃$^{-1}$)	-7.16×10^{-5}
Pr数	29

5.2　热毛细对流自由面测量系统

在不考虑液面挥发的情况下, 影响液体流动状态主要因素为液池的几何形状, 如液池的长度L、液层厚度h; 硅油的物性参数, 如热扩散系数κ, 热膨胀系数β, 运动黏度系数υ, 密度系数ρ, 表面张力系数$\partial\sigma/\partial T$, 以及表面张力温度系数$\sigma_T$; 液池的冷热端温差$\Delta T$; 重力加速度$g$等. 这些影响因素可以组合为不同的无量纲数, 这些无量纲数具有不同的物理意义, 用来描述流体的状态和特性. 在实验中, 不同的硅油标号对应不同的Pr数, 并且液池的长高比用$\Gamma=L/h$表示. 热毛细对流的强弱可以用Marangoni数表示:

$$Ma=\left(\frac{\partial\sigma}{\partial T}\right)\left(\frac{\Delta T}{L}\right)h^2/(\rho\upsilon\kappa). \tag{17}$$

并且可以用Bond数描述浮力和热毛细力的相对强弱:

$$Bo=\Delta\rho g\beta h^2/\left(\frac{\partial\sigma}{\partial T}\right). \tag{18}$$

实验中, 采用我们研制的双频激光相位光电检测系统对热毛细对流自由面的振荡进行了测量, 图14是

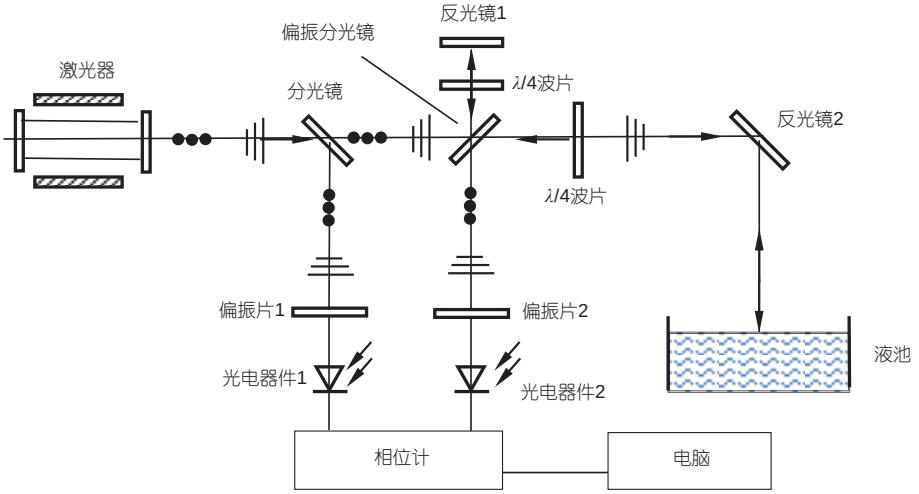

图 14　(网络版彩图)液池测量示意图

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

测量系统的示意图. 我们在液池的加热端加热时, 设定欧陆表程序进行自动线性升温, 升温速率为1℃/min, 在液池的冷端温度控制在室温, 分别测量在不同液层厚度时浮力-热毛细对流自由面的振荡过程. 采集到的信号数据进行处理, 对数据进行频谱分析可以得到自由面振荡的频率. 由于测量到的信号中包含一平滑的上升趋势, 需要在进行频谱分析之前对数据进行去除长期趋势, 否则会在频谱图上出现杂频, 从而将自由面振荡的主频淹没. 图15~17分别给出了2cSt硅油1.2 mm厚度液层、1.6 mm厚度液层和2 mm厚度液层中浮力-热毛细对流自由面振荡信号和相应的频谱.

由上面3个液面振荡信号可知, 不同厚度的液层中浮力-热毛细对流自由面振荡温差也不相同. 将实验结果和姜欢等人[12,16]在矩形液层热毛细对流转捩途径及表面波动特性实验研究中用热电偶测量温度振荡的结果对比, 由于实验条件及测试方法不完全一样, 但在合理的区间内双频激光相位光电检测系统测量的自由面位移振荡频率和姜欢等人[12,16]实验中测量到的温度振荡频率相吻合. 实验结果表明研制的测量系统可以实现对流体自由面微弱形变的测量.

6 结论

介绍了一套双频激光相位光电检测系统研制方法, 通过测量电机移动的距离, 标定测量系统的各项性能, 并和激光位移传感器获得的测量数据进行对比. 实验证明, 该测量系统有很好的抗噪能力, 更适合在复杂的环境中获取微弱信号. 并且线性度和测量重复性良

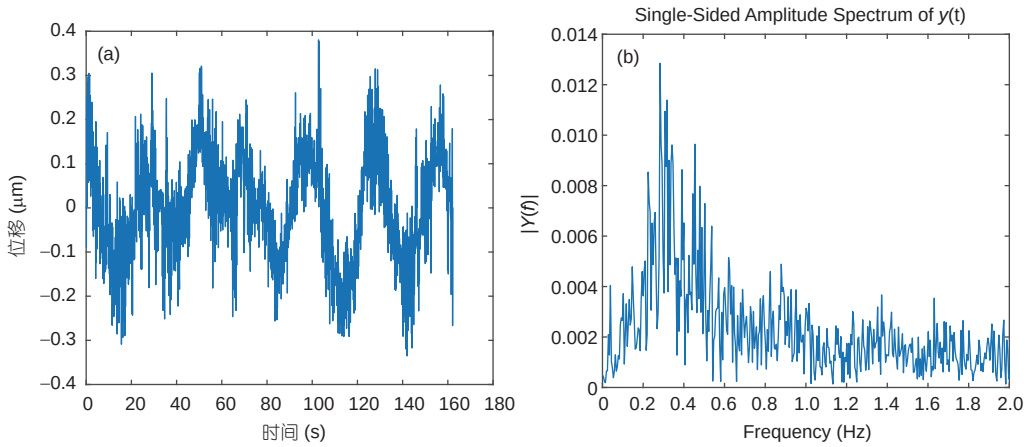

图 15 (网络版彩图)2cSt硅油1.2 mm厚度液层, ΔT=25℃. (a) 时域信号; (b) 频域

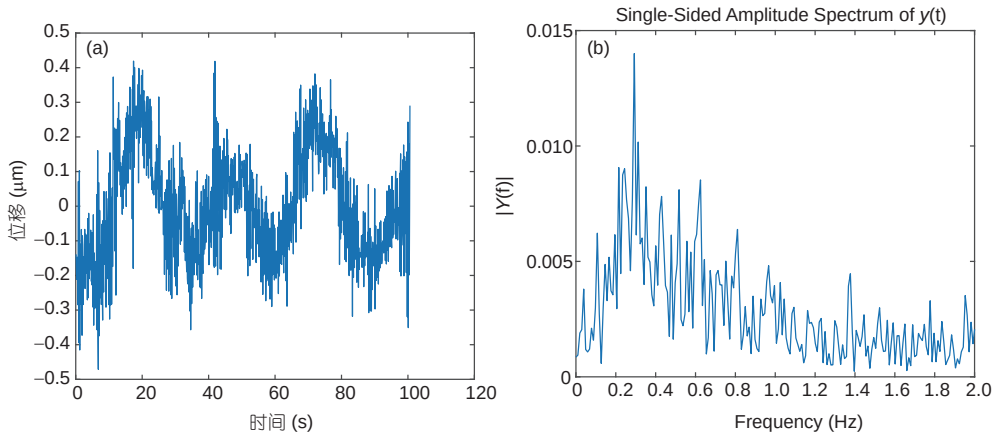

图 16 (网络版彩图)2cSt硅油1.6 mm厚度液层, ΔT=22.6℃. (a) 时域信号; (b) 频域

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

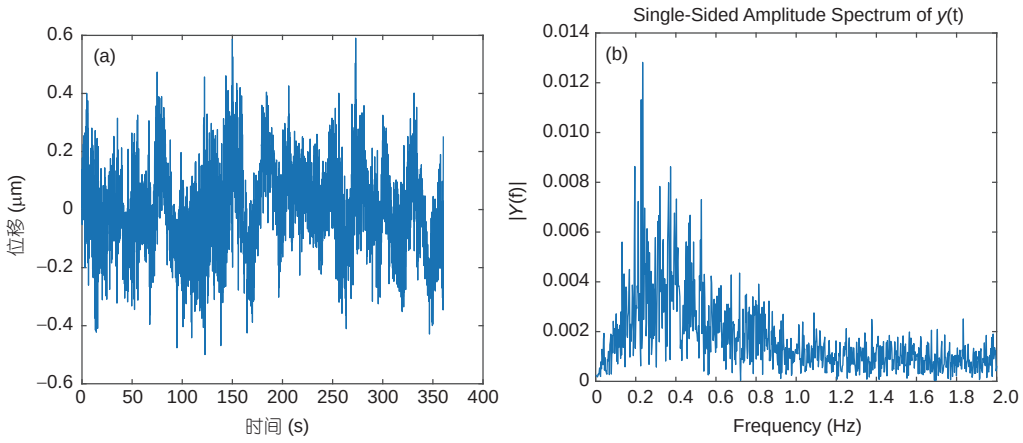

图 17　(网络版彩图)2cSt硅油2 mm厚度液层, ΔT=21℃. (a) 时域信号; (b) 频域

好, 能够满足对热毛细流动中自由面振荡的测量. 此外, 应用该测量系统测量了热毛细对流中自由面的振荡, 观察到对于不同厚度的液层有着不同的自由面振荡温差.

参考文献

1　杨永正. 液体表面与界面特性研究的新途径. 西北工业大学报, 1989, 3: 279–285
2　Kang Q, Duan L, Hu W R. Experimental study of surface deformation and flow pattern on buoyant-thermocapillary convection. Microgravity Sci Technol, 2004, 15: 18–24
3　Vince J M, Dubois M. Hot wire below the free surface of a liquid: Structural and dynamical properties of a secondary instability. Europhys Lett, 1992, 20: 505–510
4　Daviaud F, Vince J M. Traveling waves in a fluid layer subjected to a horizontal temperature gradient. Phys Rev E, 1993, 48: 4432–4436
5　周彬, 朱鹏, 段俐, 等. 矩形液池内热毛细对流的流动不稳定性. 力学与实践, 2013, 3: 39–45
6　Selver R, Kati E. Transition from the steady to the oscillatory thermocapillary convection in a rectangular container under various cold wall temperature effects. Microgravity Sci Technol, 2010, 23: 277–285
7　Riley R J, Neitzel G P. Instability of thermocapillary-buoyancy convection in shallow layers. Part 1. Characterization of steady and oscillatory instabilities. J Fluid Mech, 1998, 359: 143–164
8　Dabiri D, Gharib M. Simultaneous free-surface deformation and near-surface velocity measurements. Exp Fluids, 2001, 30: 381–390
9　段俐, 康琦, 胡文瑞. 热毛细对流自由表面特征. 中国科学E辑: 技术科学, 2006, 11: 1335–1343
10　Zhang L, Duan L, Kang Q. An experimental research on surface oscillation of buoyant-thermocapillary convection in open cylindrical annuli. Acta Mech Sin, 2014, 30: 681–686
11　郭培源, 付扬. 光电检测技术与应用. 第2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015. 112–116
12　Jiang H, Duan L, Kang Q. A peculiar bifurcation transition route of thermocapillary convection in rectangular liquid layers. Exp Thermal Fluid Sci, 2017, 88: 8–15
13　古天祥, 王厚军, 习友宝. 电子测量原理. 北京: 机械工业出版社, 2006. 60–75
14　梁浴榕. 外差激光干涉仪中的高精度相位测量研究. 博士学位论文. 武汉: 华中科技大学, 2013. 20–22
15　刁晓飞. 基于空间分离的高速外差激光干涉测量若干关键技术研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. 53–55
16　姜欢. 矩形液层热毛细对流转捩途径及表面波动特性试验研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2017. 33–60

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

High-sensitivity phase detecting system for measurement of weak displacement signals on the liquid free surface in thermocapillary convection

CAO WenHui[1,2], DUAN Li[1], LI YongQiang[2] & KANG Qi[1]

[1] *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*
[2]*Faculty of Science, Northeast University, Shenyang 110819, China*

In the research of fluid mechanics, the change on the fluid free surface is a very important physical phenomenon. To measure the displacement of the free surface deformation, a dual frequency laser photoelectric phase detecting system is developed. Combining the optical interference technology with the phasemeter, the detecting system collects real time phasemeter signals reflecting the deformation on the fluid free surface. The principle and setup of this dual frequency laser photoelectric phase detecting system are discussed in detail in this paper. By using the high-precision PI step motor to drive the object to move, the performance characteristics of the system is determined. The accuracy of this system is verified by the laser displacement sensor, and the environment influence on the interferometry system is also analyzed. Applying this system in the measurement of free surface deformations in buoyancy-thermocapillary convection, we have obtained meaningful experimental results.

surface deformation, interferometry, phasemeter, thermocapillary flow

doi: 10.1360/N092017-00366

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net