

◇ 研究报告 ◇

# 基于超声回波重组相位分析的颗粒粒径测量方法\*

谭红 王力虎<sup>†</sup> 梁维刚 陈代勇 郁凡

(广西师范大学物理科学与技术学院 桂林 541004)

**摘要:** 将超声波作用于沉降的颗粒时,由于颗粒的移动,超声回波会出现相位差异。该文通过对测量杯中某一确定深度处的回波信号进行相位分析和重组,发现重组后信号的频率可以计算出粒径;并分别对两种不同粒径分布的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 微球悬浮液进行了超声波信号采样重组和去噪的实验,实验结果经小波时频方法分析后,证实了颗粒粒径分布与重组信号频率构成的确存在很高的相关性。

**关键词:** 超声波;颗粒沉降;相位;粒径测量

中图分类号: TB559; TH89

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2023)01-0166-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2023.01.022

## Particle size measurement based on ultrasonic echo phase analysis and recombination

TAN Hong WANG Lihu LIANG Weigang CHEN Daiyong YU Fan

(College of Physics Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

**Abstract:** When ultrasonic waves are applied to detect the settling particles, the phase differences of ultrasonic echoes will appear owing to particle movement. In this paper, by analyzing the phase and recombining the signal of the ultrasonic echoes at a determined depth in the measuring cup, it is found that the frequency of the recombined signal can calculate the particle size. In addition, the experiments of sampling and recombining ultrasonic signals were conducted for two suspensions of polymethyl methacrylate (PMMA) with different particle size distributions. The experimental results were analyzed by wavelet time-frequency method, and it was confirmed that there was indeed a high correlation between the particle size distribution and the frequency distribution of the combined signal.

**Keywords:** Ultrasound; Settling particles; Phase; Particle size measurement

2022-06-29 收稿; 2022-09-02 定稿

\*广西研究生教育创新计划资助项目 (XYCS22020050)

作者简介: 谭红 (1996-), 女, 重庆人, 硕士研究生, 研究方向: 超声波检测。

<sup>†</sup>通信作者 E-mail: lhwang@mailbox.gxnu.edu.cn

## 0 引言

目前,颗粒材料广泛应用于医药、化工、环保,能源等各行业。粒度是指颗粒的大小,是颗粒材料的研究基础,是表征颗粒特性的重要参数。因此粒径测量,尤其是粒径的在线快速检测已经受到学者们的特别关注<sup>[1-2]</sup>。粒径检测已经可以实现全流场瞬态测量,如:粒子跟踪测速技术、粒子图像测速技术等,可以测得颗粒群的速度分布、粒径等,但往往由于操作需要一定门槛、对设备要求高、后期处理技术复杂等无法实现快速在线的要求<sup>[3-4]</sup>。近期,常见基于沉降原理获取颗粒粒径的简单测量方法,如:沉降天平法、沉降光透法、沉降超声透射法等,但多数方法指向颗粒群体速度测量,很少能做到对颗粒速度分布的测量,且测量精度存在一定局限性<sup>[5-6]</sup>。

根据文献[7]提供的思路,本文尝试以超声波作为探测手段,对超声测量的回波信号进行相位分析和重组,通过重组后信号的频率去计算颗粒的沉降速度,从而为粒径分布的快速准确测量提供了可能。本方法成本低廉,操作简单,易于满足在线测量的要求。

## 1 基本原理

基于超声波测距原理可知,当颗粒沉降到不同位置时,超声回波信号仅表现为相位不同,如图 1 所示,且颗粒的沉降速度越快,单位时间内回波信号的相位差就越大,因此回波的相位变化速度(角频率 $\omega$ )与颗粒的沉降速度( $v$ )相关。设颗粒在 $\Delta t$ 时间间隔内以恒定速度 $v$ 沉降了 $\Delta R$ 的路程,则相同的时间间隔内,超声波到达颗粒并返回到探头,总相位变化了 $\Delta\varphi$ ,波长变为 $\lambda$ ,此时可推导出 $\omega$ 与 $v$ 的具体关系:

$$\lambda = \lambda_c + \frac{v}{f_c}, \quad (1)$$

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{2\Delta R}{\lambda}, \quad (2)$$

$$\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = 2\pi \frac{2\Delta R}{\lambda\Delta t} = 2\pi \frac{2v}{\lambda} = 2\pi \frac{2vf_c}{v_c + v}, \quad (3)$$

其中: $\lambda_c$ 为超声波的波长(单位为m), $f_c$ 为探头发出的中心频率(单位为Hz), $v_c$ 为超声波在介质中的传播速度(单位为m/s)。因此,检测回波的相位变化

速度就可以知道颗粒的沉降速度,从而计算出颗粒的粒径。但是面对复杂的颗粒构成,很难一下测得所有不同沉速的颗粒所对应的回波相位变化速度。

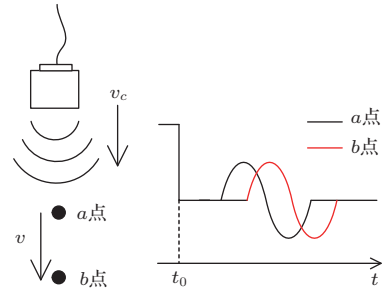


图 1 颗粒沉降示意图

Fig. 1 Schematic diagram of particle settling

换一种角度观察,在颗粒沉降过程中,观察同一深度,颗粒会依次通过,由此可以简化测量的复杂性,从而获得测量区域内某一确定深度处的回波相位变化速度,进而实现粒径测量的目的。

为了实现这一目的,首先可以按一定的重复频率发射超声波脉冲,并不断地对回波信号一帧一帧地采集(如图 2 所示),然后取出这些采集信号每一帧的同一序号点的数据,按采集时间间隔进行重组,

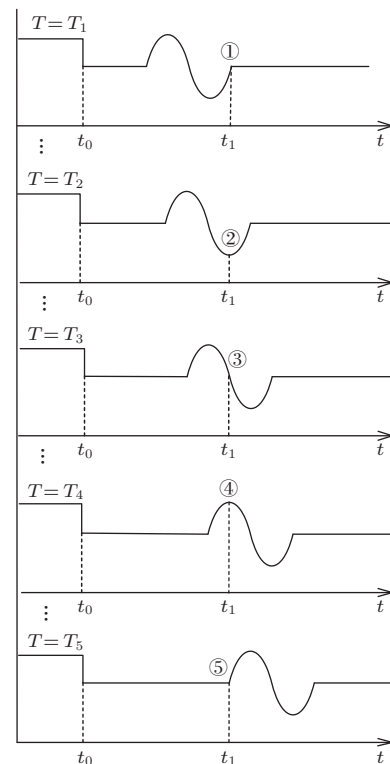


图 2 回波的多次采集信号图

Fig. 2 Multiple acquisition signal map of the echo

就可以得到该序号点所对应深度的重组图(如图3所示),这相当于对同一深度处的颗粒沉降进行频闪照相,从而记录同一深度处的颗粒沉降状态<sup>[7]</sup>。重组信号反映了确定深度处的回波随时间的变化,其信号频率( $f$ )可以表征此深度处回波的相位变化速度(式(4)),而回波的相位变化速度与颗粒的沉降速度相关,因此将式(4)的关系式代入式(3)中,就可以由重组信号的频率计算出该深度处的颗粒沉降速度(式(5))。

$$\omega = 2\pi f, \quad (4)$$

$$v = \frac{fv_c}{2f_c - f}. \quad (5)$$

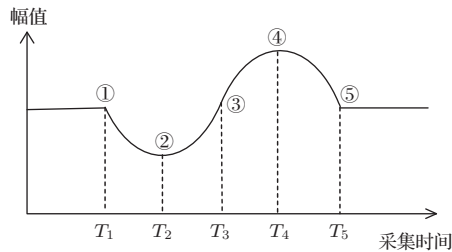


图3 确定深度处的重组图

Fig. 3 Determine the recombination map at depth

根据Stokes沉降公式(式(6)),颗粒在液体中匀速沉降时,沉降速度与颗粒直径的平方成正比。因此结合上述推导,将式(5)的关系式代入式(6)中,就可以由重组信号的频率计算出经过该深度处的颗粒的直径,推导结果如下:

$$v = \frac{(\delta - \rho) \cdot g}{18\mu} d^2, \quad (6)$$

$$d = \sqrt{\frac{18\mu v_c f}{(\delta - \rho) g (2f_c - f)}}, \quad (7)$$

其中: $\delta$ 为颗粒的密度(单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ ), $\rho$ 为介质的密度(单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ ), $g$ 为重力加速度(取值为 $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ ), $d$ 为颗粒的直径(单位为 $\text{m}$ ), $\mu$ 为介质的黏滞系数(单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ), $f$ 为重组图信号的频率(单位为 $\text{Hz}$ )。

当以聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl methacrylate, PMMA)微球作为实验对象时, $\delta = 1190.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;当超声波探头的中心频率为 $3.0 \text{ MHz}$ 时, $f_c = 3.0 \times 10^6 \text{ Hz}$ ;当温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 并以清水作为介质时, $\mu = 0.8937 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , $v_c = 1486.54 \text{ m}/\text{s}$ <sup>[8]</sup>, $\rho = 1000.0 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,由此式(7)可写为式(8),关系如图4所示。

$$d = 0.1133 \sqrt{\frac{f}{6 \times 10^6 - f}}. \quad (8)$$

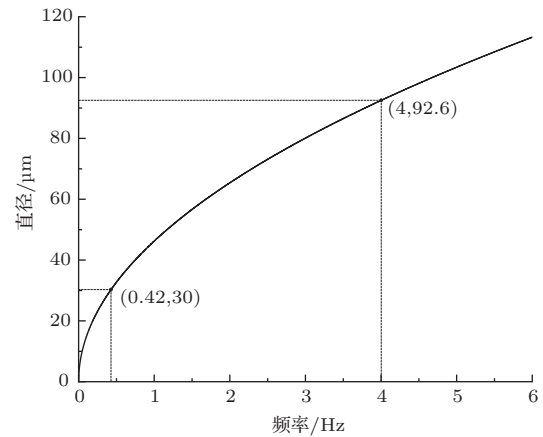


图4 重组图信号的频率与颗粒直径关系图

Fig. 4 Plot of the signal frequency of the recombination map versus the diameter of the particles

显然频率越大,表明颗粒的粒径越大,且当频率小于 $0.4 \text{ Hz}$ 时,曲线较陡,表现为小颗粒且分辨率较差;当频率位于 $0.4 \sim 4 \text{ Hz}$ 时,曲线稍平缓,表现为中颗粒且分辨率适中;当频率大于 $4 \text{ Hz}$ 时,曲线平缓,表现为大颗粒且分辨率较好。

## 2 实验方法和过程

本文选定两种粒径分布的PMMA微球作为实验样品,样品1、样品2的中位径分别为 $17.611 \mu\text{m}$ 、 $47.77 \mu\text{m}$ ,商家提供的粒径分布分别如图5、图6所示,可见样品1是小粒径颗粒且分布范围较集中,样品2大粒径颗粒较多且分布范围较宽。

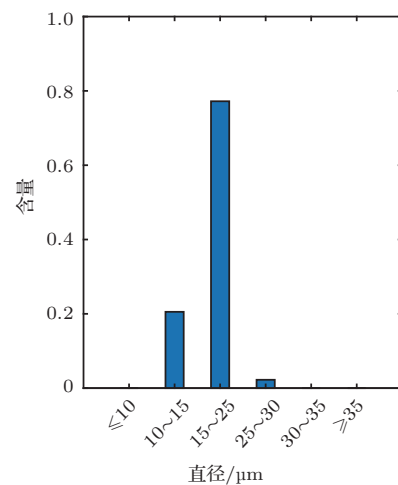


图5 样品1粒径分布

Fig. 5 Particle size distribution of Sample 1

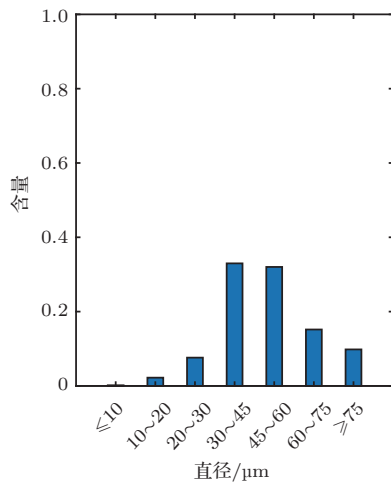


图6 样品2粒径分布

Fig. 6 Particle size distribution of Sample 2

## 2.1 实验装置

图7为实验测量装置,以USB-UT350(T)超声波脉冲收发器和中心频率为3.0 MHz的压电式超声波直探头作为数据采集工具。UT350负责驱动探头产生超声波,并将采集到的数据传输给上位机。上位机通过编程设置UT350的参数,以及采集每一帧信号的时间间隔和采集总时长。

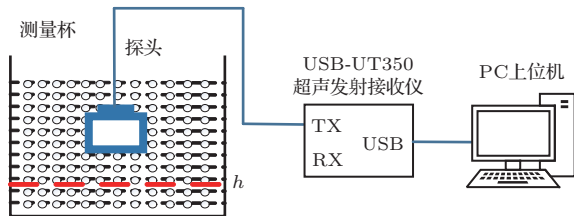


图7 实验装置图

Fig. 7 Experimental set-up diagram

## 2.2 测量过程

本实验是在温度为25 °C并以清水作为介质的条件下开展的,以一段时间内通过某确定深度处的颗粒沉降情况作为分析内容,实验步骤如下:

(1) 配制悬浮液:大量文献表明,测颗粒沉降速度时,颗粒溶液质量浓度通常应位于0.01%~1%,因此本实验用精度为0.01 g的电子秤称量0.50 g样品放置烧杯中,加入275.00 g清水,用磁力搅拌器均匀搅拌,将样品均配制成质量浓度为0.18%的溶液。

(2) 测量:设置UT350的参数:脉冲宽度100 ns,采样率50 MHz,脉冲幅度90 V,增益68 dB,其余参数默认,并在40 min内每隔50 ms采集一帧回波信号,共计48000帧信号,每帧信号长度为2300。

(3) 重组:取出每帧信号序号为2100的数据,按顺序以50 ms的采集时间间隔进行重组,从而得到该序号所对应距离探头深度为0.031 m的重组信号图。

(4) 数据分析:对样品1、样品2、清水的重组信号去噪,并进行时域分析、时频分析。

## 3 结果分析

### 3.1 时域分析

经过上述实验可以得到样品1、样品2以及清水在0.031 m深度处的重组信号,经小波去噪后,结果如图8~10所示。对照3幅图可知,样品1在2000 s以前信号明显,对应着在0.031 m深度处颗粒沉降正在发生,2000 s以后信号消失,对应着颗粒沉降完毕;对于样品2,可知其在0.031 m深度处的沉降结束时间为800 s,且表现出大颗粒相对小颗粒先沉降完毕的现象,与实验观察结果相吻合。清水中无颗粒存在,所以0.031 m深度处的时域信号强度较弱。

### 3.2 时频分析

对样品1、样品2和清水在0.031 m深度处的重组信号分别进行小波时频分析,分析结果如图11~13所示。结合基本原理中式(8)、图4的结论,从小波时频分析图中可得到如下信息:

(1) 样品1时频图中,频率分布范围跨度小且频率均小于0.4 Hz,说明颗粒粒径分布较均匀;样品2时频图中,频率分布范围较广且频率大多高于0.4 Hz,说明颗粒粒径分布范围大且粒径相较样品1整体偏大。

(2) 根据各时频图的频率成分截止时间知,样品1、样品2在0.031 m深度处的沉降结束时间分别为2000 s、800 s,与时域信号反映的各样品的沉降结束时间相印证;且在样品2的时频图中,明显表现出频率的值越大,频率截止时间越快,这是因为频率值更大表征颗粒更大,大颗粒沉降更快,因此该频率更早截止。

(3) 样品1时频图中,频率基本均在0.4 Hz以下,结合图4知,此范围内的频率表现为小颗粒且分辨率较差,所以样品1的粒径偏小且时频图中频率成分表现较均一;样品2频率多集中于0.5~1.5 Hz,所以样品2多表现为中颗粒且时频图中频率表现出较好的分辨率。

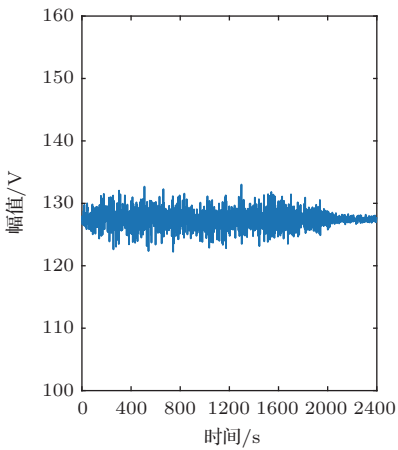


图8 样品1去噪后的重组信号

Fig. 8 Sample 1 denoised recombinant signal

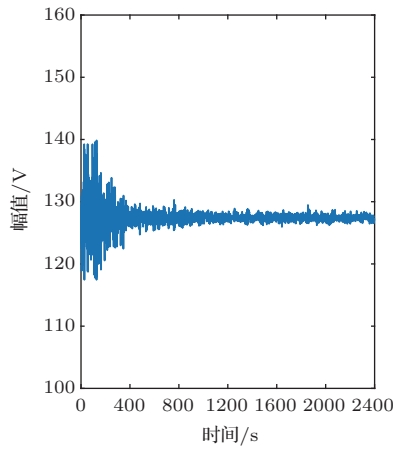


图9 样品2去噪后的重组信号

Fig. 9 Sample 2 denoised recombinant signal

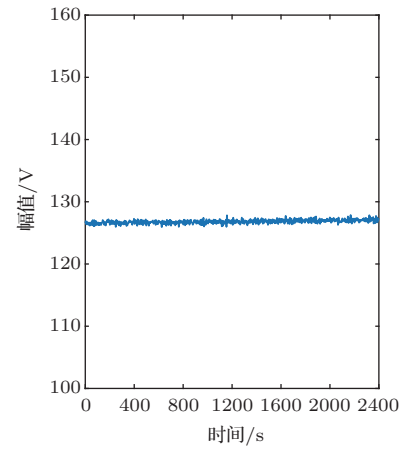


图10 清水去噪后的重组信号

Fig. 10 Recombinant signal after clear water denoising

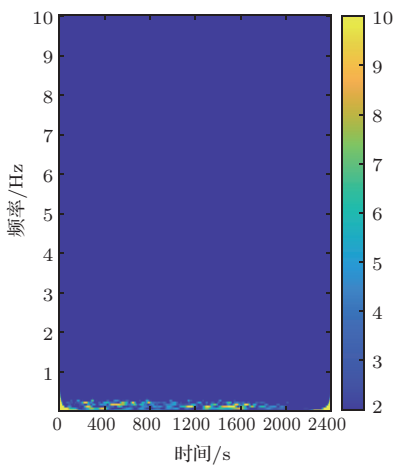


图11 样品1小波时频图

Fig. 11 Sample 1 wavelet time-frequency diagram

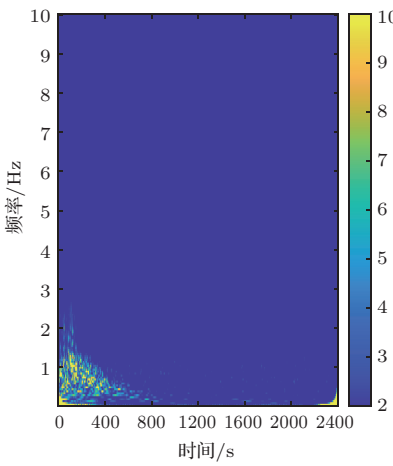


图12 样品2小波时频图

Fig. 12 Sample 2 wavelet time-frequency diagram

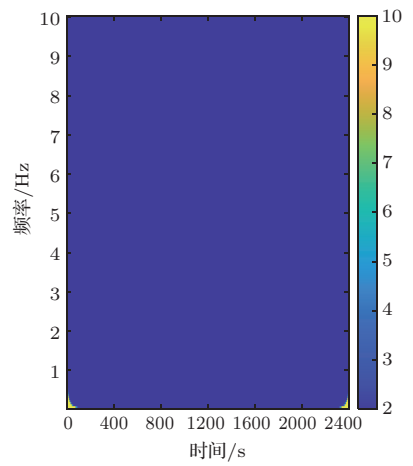


图13 清水小波时频图

Fig. 13 Clear water wavelet time-frequency diagram

(4) 清水时频图中,随着时间变化,没有任何频率信息,说明清水中无颗粒存在。

综上,可见样品、清水的时频图反映的信息符合颗粒的物理沉降规律,可以大致反映样品的粒径分布情况,能定性地区分样品1、样品2、清水,且其表现符合图4中重组信号的频率与粒径的相关关系。

### 4 结论

本文通过对某一确定深度处的超声回波信号进行重组和分析,以重组信号的频率表征颗粒的粒

径,为粒径的在线测量提供了一条切实可行的途径。此外本文在进行重组时,对于深度选取基本没有要求,结合小波时频分析方法可以实现动态监控颗粒的沉降情况,有利于应用研究。

### 参 考 文 献

- [1] 吴丽, 王晓伟, 路兴杰, 等. 颗粒测试技术发展现状及应用进展[J]. 工业计量, 2019, 29(1): 1-8.
- [2] Lichti M, Bart H J. Particle measurement techniques in fluid process engineering[J]. ChemBioEng Reviews, 2018, 5(2): 79-89.
- [3] Scharnowski S, Kähler C J. Particle image velocimetry - Classical operating rules from today's perspective[J]. Op-

- tics and Lasers in Engineering, 2020, 135: 106185.
- [4] Shi B, Wei J, Pang M. A modified cross-correlation algorithm for PIV image processing of particle-fluid two-phase flow[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015, 45: 105-117.
- [5] 王力虎, 潘福东, 曹磊, 等. 一种基于沉降法的粉体粒度检测装置和检测方法: 中国, 201810558460.4[P]. 2018-11-23.
- [6] 徐钱芳. 颗粒粒度分布沉降分析的分辨率研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2008.
- [7] Yasuhiro F Y K. Ultrasonic wave particle size measuring instrument, and ultrasonic wave particle size measurement method: Japan, JP2013108902[P]. 2013-06-06.
- [8] 肖安琪, 刘烈. 超声光栅研究声速与溶液浓度及温度的关系[J]. 实验室研究与探索, 2012, 31(3): 44-46, 67. Xiao Anqi, Liu Lie. Study of relationship among velocity of ultrasonic wave, solution concentration and liquid temperature by using ultrasonic grating[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2012, 31(3): 44-46, 67.