

希尔伯特-黄变换的纳米颗粒 Zeta 电位分析方法

鲁梦娣, 邱健, 余宛真, 李萍, 韩鹏, 骆开庆, 彭力

华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006

摘要 激光多普勒电泳光散射法是测量胶体溶液中纳米颗粒表面 Zeta 电位的标准方法之一,然而该技术的测量准确度往往受低频噪声分量以及自相关函数自身误差的影响。为了提高该技术的测量准确度和重复性,采用基于希尔伯特-黄变换的分析方法。该方法对散射光强自相关信号进行经验模式分解,剔除低频噪声以及自相关函数自身误差的干扰,再对信号进行重构。仿真结果和实验结果均验证了该方法是可行和有效的。

关键词 散射; 激光多普勒电泳法; 准确度; 希尔伯特-黄变换; Zeta 电位; 纳米颗粒

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.012901

Study on Nanoparticle Zeta Potential Based on Hilbert-Huang Transform

Lu Mengdi, Qiu Jian, Yu Wanzhen, Li Ping, Han Peng, Luo Kaiqing, Peng Li

School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University,

Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract Laser Doppler electrophoretic light scattering is one of the standard methods for measuring the zeta potential of nanoparticles. However, the signal is usually mixed with the low frequency noises and the deviation from mathematical model of autocorrelation function. We introduced the Hilbert-Huang transform into the data analysis of the measurement in order to improve the measurement accuracy. After decomposing the original signal into several intrinsic modes, we found that by eliminating the low frequency noises and the deviation from mathematical model of autocorrelation function, the reconstructed signal was greatly improved. The simulated and experimental results demonstrate the feasibility and validity of this method.

Key words scattering; laser Doppler electrophoretic method; accuracy; Hilbert-Huang transform; zeta potential; nanoparticle

OCIS codes 290.5825; 290.5850; 120.3180; 070.4790

1 引言

纳米颗粒在胶体悬浮液中的稳定性是颗粒制备的重要特性,通过测量胶体溶液中纳米颗粒的 Zeta 电位,可以研究这些颗粒表面电荷分布和表面电位大小,预测与控制胶体悬浮液的稳定性。目前测量 Zeta 电位的方法主要有电渗法^[1]、流动电位法^[2]、超声波法^[2]以及电泳法^[3],其中电泳法又可以分为显微电泳测量法和激光多普勒电泳测量法^[4]。激光多普勒电泳法(LDE)是一种基于电泳技术和光学相关的检测方法,具有易于实现,能够实时在线测量,以及可测量显微电泳测量法不能测量的纳米颗粒等优点,因此它的应用最为广泛。

LDE 技术的测量原理是对悬浮于溶液中的表面带电纳米颗粒施加电场,使其在无规则的布朗运动的基

收稿日期: 2016-09-20; 收到修改稿日期: 2016-09-30; 网络出版日期: 2016-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(61371176)、广东省自然科学基金(2014A030313433)

作者简介: 鲁梦娣(1988—),女,硕士研究生,主要从事光电技术及系统方面的研究。E-mail: 695325733@qq.com

导师简介: 邱健(1975—),男,博士,副教授,主要从事光电技术及系统方面的研究。

E-mail: qiuj@scnu.edu.cn(通信联系人)

基础上叠加一个沿电场方向的定向运动;颗粒运动会引起散射光出现多普勒效应。根据光子相关光谱(PCS)技术原理^[5],对散射光信号作自相关运算,从而获取信号的多普勒频移,可以计算得到纳米颗粒的电泳迁移率,进而计算得到它们的 Zeta 电位。为了提高 Zeta 电位测量准确度,人们提出了多种方法,例如相位分析光散射(PALS)技术^[6],移频技术^[7]等,但是这些方法大多需要调整仪器测量系统的结构,一方面增加了杂散光、电噪声等方面的干扰,造成测量结果的不稳定性;另一个方面也会造成仪器系统在光学结构和电路控制上更为复杂。

希尔伯特-黄变换(HHT)是由华裔科学家黄鄂等在时频分析的研究基础上提出来的一种主要用于非平稳、非线性信号分析的方法^[8]。HHT 方法能够反映出信号局部变化特性,而且此方法没有固定的先验基函数,比小波变换和傅里叶变换等信号频谱处理方法具有更强的适应性。HHT 作为一种新的时频分析方法,在特征提取^[9]、物理检测^[10]、医学分析^[11]等方面应用广泛。

通常电泳光散射法测量 Zeta 电位的方法是在 LDE 技术基础上,利用 PCS 技术提取多普勒频移量,再由 Smoluchowski 关系式和 Henry 关系式计算出 Zeta 电位。为了提高 Zeta 电位的测量准确度和重复性,本文提出了利用 HHT 的经验模态分解(EMD),将 PCS 的自相关曲线分解出不同的本征模态分量(IMF);剔除 IMF 中残余分量(Res)后重构出新的自相关曲线(ACF),再进行多普勒频移量的提取,从而计算出 Zeta 电位。该方法主要利用信号处理的手段,通过 Res 的剔除,降低了 ACF 中的低频噪声分量以及自相关函数自身模型误差对 Zeta 电位测量的影响,从而提高 Zeta 电位测量的准确度和重复性。目前由于 HHT 变换的特点,该方法是一种经验的方法,本文通过理论仿真和实验验证了该方法的可行性和有效性。

2 LDE 测量原理及 HHT 基本原理

2.1 LDE 测量原理

图 1 所示为 LDE 技术的测量原理示意图。当两束相干光在样品池中相交时形成干涉区域,产生明暗相间的干涉条纹。颗粒沿电场方向做垂直于干涉条纹的定向运动,由于多普勒效应,散射光强将随着干涉条纹的明暗变化,产生周期性的涨落变化。

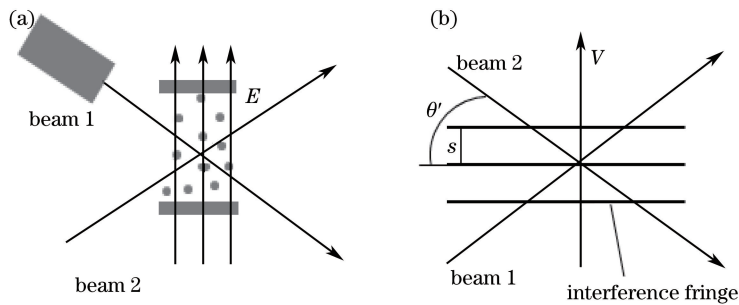


图 1 (a) LDE 测量原理中颗粒电泳运动示意图;(b)入射光及其干涉条纹原理图

Fig. 1 (a) Schematic of particle movement in LDE measurement; (b) incident light paths and interference fringe pattern

从 ACF 中提取出的多普勒频移量为 Δf ,根据频移量与颗粒的电泳速度 v 的关系可得

$$v = \frac{\lambda_0 \Delta f}{2n \sin \theta'} \quad (1)$$

式中 λ_0 是入射激光在真空中的波长, n 为光从空气射到样品池溶液时的折射率, θ' 为光路中的散射角。

根据 Smoluchowski 公式^[13],可以得到颗粒的电泳迁移率为

$$\mu = \frac{v}{E} = \frac{\lambda_0 \Delta f}{2En \sin \theta'} \quad (2)$$

式中 E 为电场强度。再根据 Henry 公式可以得到纳米颗粒的 Zeta 电位为^[12]

$$\xi = \frac{3\mu\eta}{2\epsilon f(kr)} = \frac{3\eta\lambda_0 \Delta f}{4\epsilon En f(kr) \sin \theta'} \quad (3)$$

式中 ϵ 为介电常数, $f(kr)$ 为 Henry 函数,其中 r 为球形颗粒半径, k 为常数。对于胶体水溶液, $kr=3/2$,若

是有有机溶液, $kr=1$ ^[13]。

在单一粒径和单一电泳迁移率的纳米颗粒体系中,当加入外加电场时,颗粒将做随机的布朗运动,以及沿电场方向的定向运动,根据 PCS 原理,散射光强的自相关曲线为^[14]

$$G^{(2)}(\tau) = I_L^2 + 2I_L I_S \exp(-\Gamma\tau) \cos(2\pi\Delta f)\tau, \quad (4)$$

式中 I_L 为参考光强度, I_S 为散射光强度, Γ 为衰减率, τ 为延迟时间。

图 2 为常温下粒径为 200 nm、Zeta 电位为 100 mV 的颗粒水溶液,在电场强度为 1600 V/m 情况下仿真得到的 ACF。由上述分析及(4)式可知,颗粒的运动包括了定向运动与布朗运动,颗粒定向运动是自相关函数中的周期性信号,布朗运动产生的是指数衰减信号。周期信号的频率与颗粒的定向运动速度的大小有关,即为电泳速度所产生的多普勒频移量。由图 2 可知,自相关曲线的多普勒频移量是一个低频的信号,信号的频率高低会因颗粒的 Zeta 电位或者电泳电场强度的不同而发生改变,因此很难用固定模式的滤波方式进行信号的处理。然而低频噪声分量以及自相关函数自身模型误差在 Δf 范围内,且是宽谱信号,因此会干扰甚至是淹没周期信号,从而影响 Zeta 电位的测量准确度和重复性。本文将运用信号频谱处理的方法,剔除低频噪声以及自相关函数自身模型误差对周期信号的干扰来提高测量 Zeta 电位的准确度和重复性。

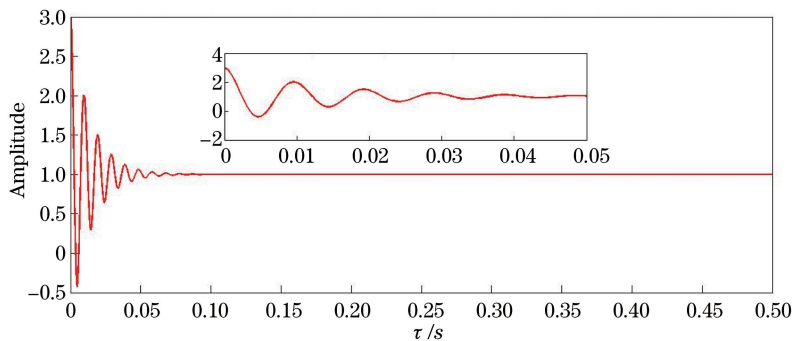


图 2 电场强度 1600 V/m、带 100 mV 电位的直径为 200 nm 的颗粒的自相关仿真曲线

Fig. 2 Simulated autocorrelation function curve of 200 nm-diameter and 100 mV-potential particles at the electric field intensity 1600 V/m

2.2 HHT 基本理论

HHT 方法是通过经验模态分解(EMD)将信号自适应分解成有限个内在模分量和 1 个表征信号趋势变化的残余信号,并且对得到的各个 IMF 运用希尔伯特变换进行时频分析,得到相应的特征参数。

HHT 方法的核心在于 EMD 分解,其分解步骤如下所示。

- 1) 找出信号 $x(t)$ 的局部极大值点和局部极小值点,并通过三次样条插值求出上下包络线的均值 $m(t)$ 。
- 2) $h_1(t) = x(t) - m(t)$ 。
- 3) 若 $h_1(t)$ 符合 IMF 的条件(信号波形局部关于零平均值对称,且极值点和过零点的数目之差不超过 1 个),即为第 1 个 IMF 分量;否则,继续上述迭代过程。
- 4) 当残余分量 Res 为单调函数或只有 1 个极值点时,结束迭代,此时得到 n 个 IMF 分量和 1 个残余分量 Res。

图 3 所示是对带有高斯白噪声的 ACF(图 2)进行 EMD 分解得到的 5 个 IMF 分量和 1 个残余分量 Res。从图 3 中可以看出,随着 IMF 阶数的增加,本征模态分量的瞬时频率成分逐渐由高频向低频变化。其中第 1 个本征模态分量为 IMF1,其瞬时频率最高,主要来源于高斯白噪声。下面的分量依次为 IMF2~IMF5,瞬时频率逐渐降低。表 1 所示是 IMF1~IMF5 通过频谱变换得到的频率带宽范围,从表中可以发现从 IMF1 到 IMF5 几乎涵盖了信号的主要频率成分,而小于 20 Hz 的低频成分则在 Res 中,而且是宽谱信号。

表 1 本征模态分量的频率

Table 1 Frequency of IMFs

IMF	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5
Bandwidth range /Hz	4500-10000	1800-4500	76-130	44-110	20-107

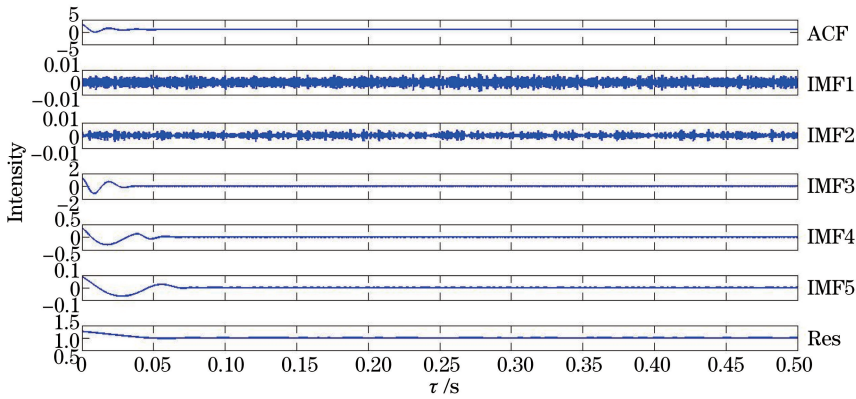


图3 EMD分解的5个本征模态分量和残余分量

Fig. 3 Five IMFs and residual component in EMD decomposition

以粒径为 200 nm、Zeta 电位为 100 mV 作为条件,改写(4)式,进行了(无噪声干扰)理想状态下的仿真分析。仿真过程中,仅对改写后的(4)式曲线分别进行了 EMD 分解,剔除 Res 分量,重构新的自相关曲线,提取剔除 Res 前后的 Δf ,计算出剔除 Res 前后的 Zeta 电位值。结果发现,相对于含有高斯白噪声的(4)式仿真结果来说,理想状态下未做剔除 Res 处理的仿真结果还是会比较接近假设的 100 mV 结果的。但是剔除 Res 后得到的 Zeta 电位仿真结果仍然与未做剔除 Res 处理的仿真结果不同,处理后的仿真结果会更加接近 100 mV,相对误差很小,几乎都在 1% 以下。这可以说明(4)式中指数函数与余弦函数相乘的数学模型存在着一定误差。

因此,通过 EMD 分解,剔除 Res 的处理方法能够剔除两种使 Δf 出现偏差的影响。一种是来源于 ACF 中的高斯白噪声,另一种是来源于自相关函数中数学模型的误差或噪声。由于无法准确界定并提取带有高斯白噪声的 ACF 中的低频分量和自相关函数中数学模型的误差特征频谱,不适合用快速傅里叶变换或者小波变换等固定频率的滤波器进行滤除。HHT 是根据信号的峰-谷特征进行模式分解的算法,具有自适应性,一个 IMF 中就含有多种频率分量,能够适当地剔除低频噪声以及自相关函数本身模型误差频谱成分的干扰,从而提高多频谱频移分量的信噪比,最终实现 Zeta 电位测量准确度的提高。

3 自相关曲线的模拟及剔除 Res 方法的验证

为了验证剔除残余分量将有利于提高 Zeta 电位测量的准确度和重复性,对直径为 200 nm、Zeta 电位 ξ_0 为 100 mV 的颗粒进行不同电场强度下的仿真研究。其中温度为 298.15 K,水溶液的粘滞系数为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,折射率为 1.33,散射角为 25° 。为了模拟实际测量时噪声干扰较大的情况,在模拟的自相关曲线中添加了信噪比为 50 dB 的高斯白噪声。

仿真过程中外加电场电压范围为 40~120 V,假设电极间的距离为 5 cm,对应的电泳电场强度为 800~2400 V/m,图 5(a)、(b)是电场强度为 1600 V/m 时,仿真得到的 ACF 及其频谱图。

图 4(a)是电泳电场强度在 1600 V/m 下仿真得到的 ACF。图 4(b)是 ACF 的频谱图。从图 4(b)中可以得到,在低频处有很高的频谱分量,由于该频谱具有一定的范围,与电泳运动产生的较为单一的多普勒频谱的特征不同,应该是低频噪声分量和自相关函数自身模型误差在低频处的分量。该分量过大容易降低电泳运动的周期信号的信噪比,甚至几乎淹没周期信号,最终影响了颗粒 Zeta 电位的获取。

图 5(a)是对图 4(a)的 ACF 进行 EMD 分解后,先剔除残余分量 Res,然后再将其余的 IMF 分量相加重构出新的 ACF。图 6(b)所示就是剔除 Res 后重构出的 ACF 的频谱图。将残余分量剔除后,低频噪声成分和自相关函数自身误差的低频成分基本得到剔除,可以清晰地获得颗粒电泳运动的多普勒频谱峰值的大小;除此之外还可以清楚地得到曲线的半峰全宽,进行颗粒的布朗运动造成的频谱展宽情况的研究。

为了对比处理前后多普勒频移量和 Zeta 电位的结果,应用(1)~(3)式进行了定量计算。表 2 分别是根据图 4(b)和图 5(b)得到的多普勒频移量,计算得到的 Zeta 电位大小,以及与假设的 ξ_0 (100 mV) 的相对误差结果。第一行为由图 4(b)的频谱图得到的结果,第二行为图 5(b)的频谱图得到的结果。通过表 2 对比可

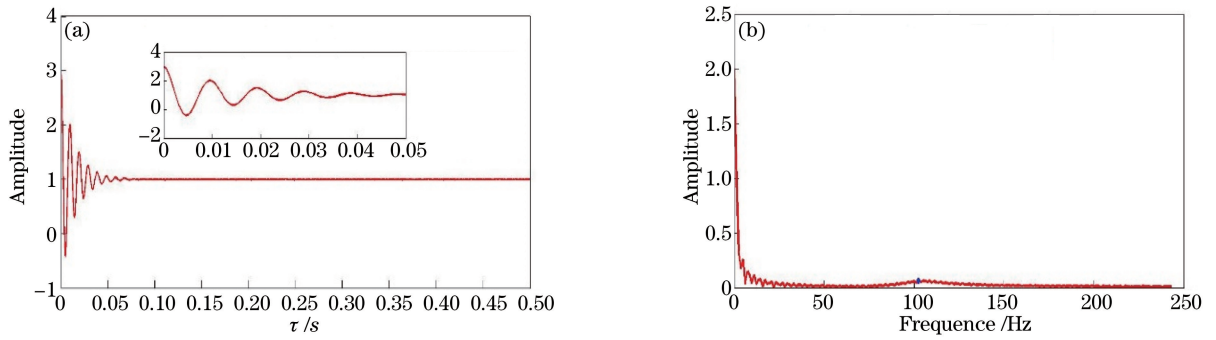


图 4 (a)原始自相关函数曲线及(b)其频谱曲线图

Fig. 4 (a) Original autocorrelation function and (b) its spectrum

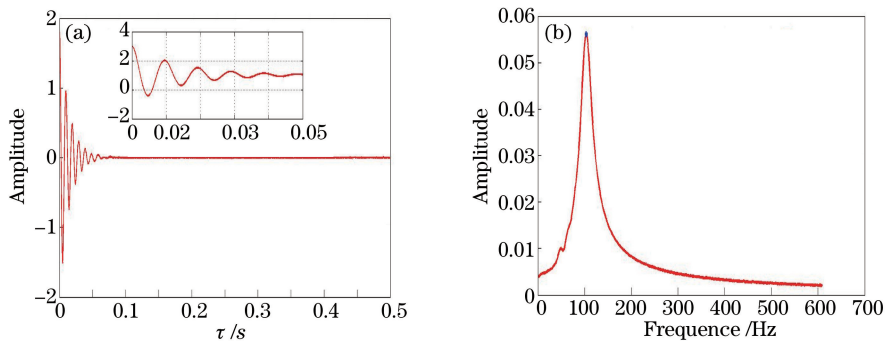


图 5 (a)重构自相关函数曲线及(b)其频谱曲线图

Fig. 5 (a) Reconstructed autocorrelation function and (b) its spectrum

以看出,剔除 Res 后,计算得到的 Zeta 电位更加接近预先假设的 100 mV 电位,其平均误差为 0.1%,远小于剔除 Res 前得到的 Zeta 电位的平均误差 1.2%。

表 2 剔除 Res 前后 Zeta 电位的平均误差

Table 2 Average error of zeta potential before or after eliminating Res component

Parameter	Doppler shift /Hz	Zeta potential /mV	Average error /%
Before	104.37	101.2	1.2
After	103.15	100.1	0.1

上述的初步仿真可以说明利用 HHT 的 EMD 分解,剔除 Res 的方法将能够明显地提高 Zeta 电位的测量准确度。为了验证该方法在不同的 Δf 下情况时的结果,通过改变电泳电场强度的高低来改变 Δf 的大小,对上述的仿真结果进行验证,如表 3、表 4 所示。表 3 第一列为电泳电场强度,第二列为改变电泳电场强度后,在对应的 ACF 中直接提取的 Δf ,第三列为计算得到的 Zeta 电位大小,第四列为计算结果与 ξ_0 (100 mV) 的相对误差。表 3 计算得到的 Zeta 电位与 ξ_0 (100 mV) 之间的差值较大,并且波动较大,其误差小于 4%;表 4 则是剔除低频 Res 后,重构 ACF 后得到的 Δf ,计算得到的 Zeta 电位,以及计算结果与 ξ_0 (100 mV) 的相对误差。表 3 和表 4 的结果对比可知,剔除 Res 处理后的 Zeta 电位与 ξ_0 更为接近,并且平均误差小于 1.5%,波动更小。

表 3 原始自相关函数曲线计算得到的 Zeta 电位平均误差

Table 3 Average error of zeta potential calculated from the original autocorrelation function curve

Electric field intensity /(V/m)	Doppler shift Δf /Hz	Zeta potential /mV	Average error /%
800	54.32	105.4	5.4
1000	65.31	101.4	1.4
1200	79.35	102.6	2.6
1400	93.38	103.5	3.5
1800	117.19	101.0	1.0
2000	131.23	101.8	1.8
2200	142.21	100.3	0.8
2400	156.25	101.0	1.0

表 4 重构自相关函数曲线计算得到的 Zeta 电位平均误差

Table 4 Average error of zeta potential calculated from the reconstructed autocorrelation function curve

Electric field intensity / (V/m)	Doppler shift / Hz	Zeta potential / mV	Average error / %
800	51.88	100.6	0.6
1000	64.69	100.4	0.4
1200	78.13	101.0	1.0
1400	91.55	101.5	1.5
1800	116.58	100.5	0.5
2000	129.39	100.4	0.4
2200	142.82	100.8	0.3
2400	154.42	99.9	0.1

图 6 展示了不同电场强度下,剔除 Res 分量前后 Zeta 电位结果的相对误差对比。由图可知,剔除 Res 前的 Zeta 电位大小与 ξ_0 之间的误差在 1%~6% 之间波动,波动较大而且误差很大;剔除 Res 后的 Zeta 电位与 ξ_0 比较接近,并且其误差趋势比较平稳,误差小于 1.5%,剔除残余分量的处理效果明显大大改善并提高了 Zeta 电位的测量准确度。

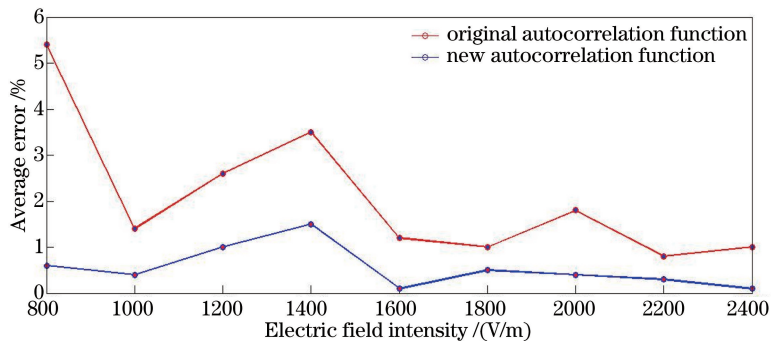


图 6 HHT 处理前后计算得到的 Zeta 电位与预先假设电位 100 mV 之间的平均误差

Fig. 6 Average error between the zeta potential calculated before and after HHT and the 100 mV set potential

表 5 是在电场强度为 800, 1000, 1200 V/m 下的原 ACF 数据未经过处理的三次 Zeta 电位计算结果。表 5 的数据表明,通过长时间的多次测量平均,原始自相关曲线计算所得到的 Zeta 电位结果具有较高的重复性。表 6 是在同样条件下,经 EMD 分解剔除 Res 后三次 Zeta 电位计算结果。数据表明,剔除 Res 处理后的 Zeta 电位结果同样保持着很好的重复性。通过表 5 和表 6 对比可知,应用 HHT 的 EMD 分解,剔除 Res 的数据方法,不会造成测量结果产生额外的波动,在保证准确度获得提高的同时,还能够保证数据处理后结果保持着很好的重复性。

表 5 原始自相关函数曲线 Zeta 电位重复性验证

Table 5 Repeatability validation of zeta potential based on the original autocorrelation function curve

Electric field intensity / (V/m)	The first time	The second time	The third time
800	105.4	105.4	105.4
1000	101.4	101.4	101.4
1200	102.6	102.6	102.6

表 6 HHT 处理后重构自相关函数曲线 Zeta 电位重复性验证

Table 6 Zeta potential repeatability validation of reconstructed autocorrelation function curve after HHT treatment

Electric field intensity / (V/m)	The first time	The second time	The third time
800	100.6	100.6	100.6
1000	100.4	100.4	100.4
1200	101.0	101.0	101.0

由以上的仿真实验可知:采用 HHT 中 EMD 分解的方法,将 ACF 分解为不同的 IMF 分量和残余分量 Res 后,通过剔除残余分量 Res 并重构出新的 ACF 的数据处理方法,可以减弱低频噪声频谱分量和自相关函数自身模型误差频谱分量对多普勒频移量的影响,从信号处理方法入手,能够改进基于 LDE 的 Zeta 电位测量的准确度和重复性。

对于上述结论,还通过样品直径为 400 nm 的单分散聚苯乙烯标准颗粒进行实验验证。实验条件分别为:温度为 298.15 K,水溶液的粘滞系数为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,折射率为 1.33,散射角为 25° ,两极间距离为 8 cm。该样品先利用英国马尔文公司 Zetasizer HS 系列的 Zeta 电位分析仪器进行了测量,Zeta 电位为 -49 mV 。然后再利用搭建的 Zeta 电位测量实验装置对样品进行测量,先获取了在 750,1000,1250 V/m 不同电场强度下的自相关信号曲线,然后分别完成了剔除 Res 分量处理前后的结果对比。

图 7(a)是电泳电场强度在 750 V/m 下得到的 ACF 的频谱图。图 8(b)是通过 ACF 做剔除 Res 处理后得到的新的 ACF 的频谱图。从图 7(a)中可以看出,在实际测量过程中的频谱曲线与仿真的曲线十分接近,在低频处有很高的低频分量,导致周期信号不明显。图 8(b)是将 Res 剔除后,重构 ACF 所得到的频谱图。图中显示低频噪声的频率分量以及自相关函数自身误差的频率分量基本得到剔除,颗粒电泳运动的多普勒频谱峰值的大小可以清晰地获得。

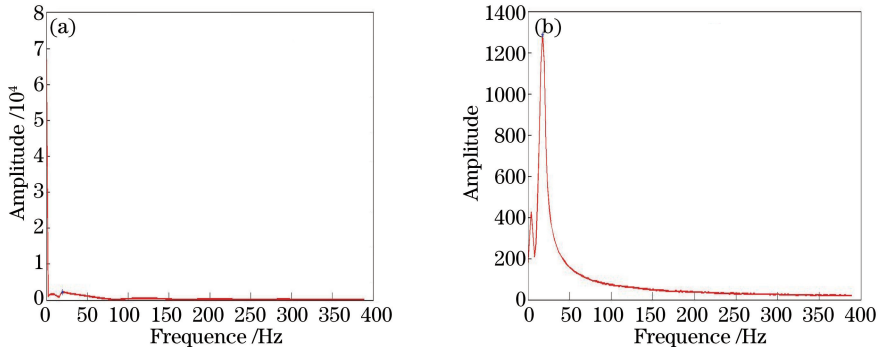


图 7 剔除 Res 前后电泳电场强度在 750 V/m 下的 ACF 频谱图。(a)剔除前;(b)剔除后

Fig. 7 ACF spectra at the electric field intensity 750 V/m before and after eliminating Res component. (a) Before; (b) after

由表 7 和表 8 的结果对比可知,对于相同的样品施加不同的电泳电场强度,没有经过剔除 Res 分量处理的结果与 Zeta 电位分析仪器测量结果偏差较大,经过处理后计算得到的 Zeta 电位结果则更加吻合。说明原始的自相关曲线中包含的低频干扰会造成电泳运动的多普勒频移量存在偏差;剔除 Res 分量后,可以剔除这部分频谱成分的干扰,从而提高 Zeta 电位测量的准确度。而且由表 7 和表 8 的相对误差可知,处理后得到的结果稳定性也得到了提高。实际的测量结果也表明,所提出的方法对于提高 Zeta 电位测量的准确性和重复性是完全可行、可靠的。

表 7 原始自相关曲线计算得到的 Zeta 电位平均误差

Table 7 Average error of Zeta potential calculated from the original autocorrelation curve

Electric field intensity / (V/m)	Doppler shift / Hz	Zeta potential / mV	Average error / %
750	24.44	58.8	20.00
1000	33.20	60.0	22.44
1250	35.00	57.8	17.50

表 8 重构自相关函数曲线计算得到的 Zeta 电位平均误差

Table 8 Average error of Zeta potential calculated from the reconstructed autocorrelation function curve

Electric field intensity / (V/m)	Doppler shift / Hz	Zeta potential / mV	Average error / %
750	19.53	47.0	4.08
1000	29.30	52.9	7.35
1250	31.25	51.6	5.30

4 结 论

低频噪声与自相关函数的数学模型误差使 Zeta 电位测量结果会产生偏差。提出了利用 HHT,将信号的 ACF 分解为多个本征模态分量和残余分量 Res,然后剔除 Res 并重构 ACF 的处理方法。详细阐述了剔除 Res 分量,重构新的 ACF,提取多普勒频移量,以及利用 Henry 公式计算 Zeta 电位等处理过程。通过仿

真实验,对比处理前后的 Zeta 电位结果表明,根据重构的 ACF 计算得到的 Zeta 电位的准确度和重复性得到了明显的改善。

仿真实验中,通过改变电泳电场的大小得到了剔除 Res 分量前后不同多普勒频移量时的 Zeta 电位仿真结果。仿真结果表明,处理后得到的颗粒 Zeta 电位结果比原始信号得到的结果更加接近于预先假设的 100 mV,误差也更小;重复性的仿真实验表明,该方法处理后能够保证测量结果有很好的稳定性。最终利用 400 nm 直径的单分散聚苯乙烯标准颗粒的实验,证明了利用该方法处理后的结果与 Zeta 电位分析仪器测量结果是完全吻合的,进一步说明该方法是可行、可靠的。

综上所述,基于 HHT 的 EMD 分解后,剔除 Res 的方法能够从信号处理方面明显地提高 Zeta 电位的测量精确度和重复性。仿真结果和实验结果均说明,该方法在提高纳米颗粒 Zeta 电位测量技术方面是具有可行性和有效性的。

参 考 文 献

- [1] Cevheri N, Yoda M. Evanescent-wave particle velocimetry measurements of zeta-potentials in fused-silica microchannels [J]. *Electrophoresis*, 2013, 34(13): 1950-1956.
- [2] Schnitzer O, Zeyde R, Yavneh I, *et al.* Weakly nonlinear electrophoresis of a highly charged colloidal particle[J]. *Physics of Fluids*, 2013, 25(5): 052004.
- [3] Weng Youling, Sha Aimin. New techniques of zeta potential analyzer[J]. *China Measurement Technology*, 2005, 31(4): 20-23.
翁优灵, 沙爱民. 多普勒电泳光散射 Zeta 电位分析新技术[J]. *中国测试技术*, 2005, 31(4): 20-23.
- [4] Zheng Zhong. Electrophoretic light scattering[J]. *Chemistry*, 1986(2): 23-29.
郑 忠. 电泳光散射[J]. *化学通报*, 1986(2): 23-29.
- [5] Robert P. *Dynamic light scattering: application of photon correlation spectroscopy* [M]. New York: Plenum Press, 1985.
- [6] Provider T. Particle size distribution III [M]. Washington D C: American Chemical Society, 1998: 327-340.
- [7] Lü Yongwei, Wu Heng, Luo Kaiqing, *et al.* Optical frequency shift technology based on piezoelectric ceramic[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(4): 48-50.
吕永维, 吴 恒, 骆开庆, 等. 基于压电陶瓷的光学移频技术研究[J]. *光学与光电技术*, 2015, 13(4): 48-50.
- [8] Hou Bin, Gui Zhixian, Hu Min. Time-frequency spectral analysis of seismic data based on Hilbert-Huang transform [J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2009, 32(4): 248-251.
侯 斌, 桂志先, 胡 敏, 等. 基于希尔伯特-黄变换的地震信号时频谱分析[J]. *勘探地球物理进展*, 2009, 32(4): 248-251.
- [9] Peng Mingjin, Li Zhi. Analysis and feature extraction of laser micro-Doppler signatures based on Hilbert-Huang transforms[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0809004.
彭明金, 李 智. 基于希尔伯特-黄变换的激光微多普勒信号分析与特征提取[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0809004.
- [10] He Junfeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.* A denoising method for backscatter signal of laser ceilometer based on Hilbert-Huang transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0201001.
何俊峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 基于希尔伯特-黄变换的激光云高仪后向散射信号去噪方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0201001.
- [11] Zhou Zhenyu, Yang Hongyu, Gong Hui, *et al.* Brain signal analysis of functional near-infrared imaging based on Hilbert-Huang transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 307-312.
周振宇, 杨宏宇, 龚 辉, 等. 基于希尔伯特-黄变换的近红外脑功能成像信号分析[J]. *光学学报*, 2007, 27(2): 307-312.
- [12] Henry D C. The cataphoresis of suspended particles. Part I. The equation of cataphoresis[J]. *Proceedings of the Royal Society London A*, 1931, 133(821): 106-129.
- [13] Wu G G, Xiang J, Yang G L, *et al.* Study on the effects of noises on the measurement results of nanoparticles' effective diameter and polydispersity using PCS[C]. *SPIE*, 2009, 7506: 750607.
- [14] Xu R L. Particle characterization: light scattering methods[J]. *China Particuology*, 2003, 1(6): 271.