

文章编号: 1001-3806(2014)03-0389-05

快速反演算法在汽轮机蒸汽湿度测量中的应用

刘芳艳¹, 黄竹青^{1,2*}, 曹小玲¹, 蔡成¹, 杨颖¹

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 长沙 410114; 2. 湖南有色金属职业技术学院, 株洲 412006)

摘要: 为了解决汽轮机通流部分蒸汽湿度的在线测量问题, 提出了一种基于散射相函数的半经验公式快速反演散射光强分布的计算方法。该算法采用 MATLAB 自带的 *cftool* 进行相函数的双高斯拟合, 拟合误差低, 且拟合函数可以快速得到 Mie 散射理论的近似解析解, 即从散射光强分布到水滴质量中间半径的快速反演。结果表明, 在约束水滴粒径范围内, 得到了颗粒大小与散射比之间的半经验模型, 对比实验测得散射比, 吻合良好, 且由半经验模型反演得到水滴质量中间半径为 $1.1\mu\text{m}$ 。在一定条件下, 可以有效解决蒸汽湿度的在线测量问题。

关键词: 散射; 水滴质量中间半径; 双高斯拟合; 汽轮机

中图分类号: O436.2 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.03.023

Application of fast inversion algorithm in measurement of steam humidity of steam turbine

LIU Fangyan¹, HUANG Zhuqing^{1,2}, CAO Xiaoling¹, CAI Cheng¹, YANG Ying¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Hunan Nonferrous Metals Vocational and Technical College, Zhuzhou 412006, China)

Abstract: In order to solve the problem confronted with the online steam humidity measurement of turbine flow pass, a semi-empirical formula of phase function computing method was proposed to improve the inversion algorithm on scattering light distribution. Phase function of double Gaussian fitting by using MATLAB with *cftool* was adopted in this algorithm. The fitting result shows that the relative error is in small, and the approximate analytic solution of the Mie scattering theory could be got by the fitting function, which means that a rapid inversion from the scattering light intensity distribution to water quality radius. According to the results, with the restriction of the range of the droplet size, the approximation of the theory between the droplet size and scattering ratio was got. Contrast experiment showed the measured scattering ratio was similar with the simulated scattering ratio. Based on the semi-empirical model, the water quality of middle radius was $1.1\mu\text{m}$. The fast inversion algorithm can well resolve the online measurement of steam humidity.

Key words: scattering; water quality middle radius; double Gaussian fitting; turbine

引 言

汽轮机低压缸常期在湿蒸气状态下运行, 在湿蒸气流过叶片时, 会造成腐蚀, 影响机组经济、安全运行, 降低汽轮机级效率。而对水滴粒径的在线测量, 对于实现汽轮机蒸汽湿度测量, 以适时调整汽轮机组蒸汽进口参量, 提高机组运行的安全性和经济

性具有重要意义。

自 20 世纪 70 年代以来, 流动蒸汽湿度的测量技术才取得了较大进展。随着激光技术、光电技术及计算机技术的迅速发展和广泛应用, 基于激光散射法测量颗粒粒径分布^[1]的技术得到了广泛应用。由于激光散射法^[2-4]具有适用性广、粒径测量范围宽、测量准确、精度高、重复性好、测量速度快、所需知道的被测颗粒及分散介质的物理参量少、仪器的自动化及智能化程度高、可实现在线测量等优点, 同样被应用于汽轮机水滴粒径的测量中^[5-6]。

传统的水滴粒径的测量方法是基于 Mie 散射理论, 通过对测量得到的前向小角度散射光强分布进行反演^[7]实现的。然而经典 Mie 散射理论计算量

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(12JJ2031); 湖南省科技厅重点资助项目(2011GK4005)

作者简介: 刘芳艳(1987-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光学测量中实验数据处理及分析。

* 通讯联系人。E-mail: huangzhuqing@aliyun.com

收稿日期: 2013-05-27; 收到修改稿日期: 2013-06-21

大,且要经过大量迭代,非常耗时,不能满足实时测量的要求。因此,本文中提出了一种基于散射相函数的半经验公式快速反演散射光强分布的算法,并采用 MATLAB 内置命令 cftool 对水滴群散射相函数进行双高斯拟合,得到散射相函数近似的半经验公式,从而建立起水滴粒径分布与散射光强之间的快捷桥梁,为测量汽轮机低压缸的蒸汽湿度,提供了快速可行的方案。采用参考文献[8]中的实验图像,分析得到与散射光强分布关联的实验散射比,验证了数值模拟结果。

1 Mie 理论与 MATLAB 数值模拟

在经典 Mie 散射理论的基础上,运用参考文献[8]中的改进算法,充分利用 MATLAB 的内置命令与函数集,可以实现散射系数、消光系数、散射相函数在任意较宽颗粒粒径范围内的快速计算。非偏振光情形下,散射光强表示式为^[8]:

$$I_s = \frac{\lambda^2 I_0}{8\pi^2 r^2} [S_1^2(\theta, r) + S_2^2(\theta, r)] \quad (1)$$

式中, I_s 为总散射光强, I_0 为入射光强, λ 为激光波长, r 为颗粒半径, $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 为振幅函数。

将水滴质量中间半径代入(1)式可数值模拟散射光强值的分布情况。但其逆向解,即实验测得散射光无法应用文献方法求得水滴质量中间半径。在汽轮机通流部分蒸汽湿度在线测量要求下,需寻求 Mie 散射理论解可替代近似公式。

2 相函数的双高斯拟合

Mie 氏理论在已知散射光强条件下,反演颗粒粒径分布时,其矩阵为变态矩阵,没有解析解。因此,为了获得散射光强的逆向解,这里将水滴的散射相函数作双高斯拟合,得到拟合公式——半经验公式。其中,散射相函数是散射光强随散射角度变化的函数。

在参考文献[9]中的改进 Mie 计算方法下,得出散射相函数计算式。当入射光为非偏振光时,其表达式为:

$$p(\theta, r) = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} (|S_1(\theta, r)|^2 + |S_2(\theta, r)|^2) f(r) dr}{2k^2 \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} Q_{\text{scat}}(r) \pi r^2 f(r) dr} \quad (2)$$

式中, $p(\theta, r)$ 为散射相函数, θ 为散射角, r 为颗粒尺

寸半径, m 为两相介质相对折射率(因两相介质相对稳定,这里不做讨论), $k = \frac{2\pi m}{\lambda}$ 为激光波数, $Q_{\text{scat}}(r, m)$ 为散射系数, r_{\max} 和 r_{\min} 为水滴半径的最大值及最小值, $f(r)$ 为水滴尺寸分布概率密度函数。 $f(r)$ 服从罗辛-拉姆勒(Rosin-Rammler, R-R)分布,该分布函数特别适合于描述喷雾形成的液滴群,在一定范围内是可靠的,其表达式为:

$$f(r) = 0.693 \frac{K-1}{r_{0.5}} \left(\frac{r}{r_{0.5}}\right)^{K-1} \exp\left[-0.693\left(\frac{r}{r_{0.5}}\right)^K\right] \quad (3)$$

式中, $r_{0.5}$ 为水滴质量中间半径, K 为水滴分布的宽度参量。

采用 MATALB 编程,分别计算了不同波长、水滴质量中间半径下散射相函数图像随角度变化关系曲线,如图 1 和图 2 所示。从图中可知:(1)波长越短,散射现象越明显,且主要集中在前向小角度;(2)水滴质量中间半径越大,散射现象越明显,在前向小角度集中分布,且在较大角度处振荡明显。

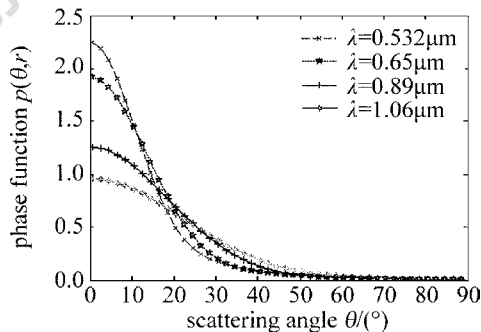


Fig. 1 Phase function under different wave length of scattering

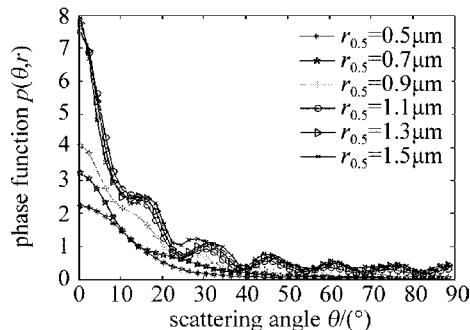


Fig. 2 Phase function under different water quality middle radius

可见,影响散射光强分布的因素很多,且水滴质量中间半径是影响蒸汽湿度测量的关键因素。在汽轮机低压缸中,一次水滴粒径范围在 $0.1\mu\text{m} \sim 2\mu\text{m}$ 之间,取水滴质量中间半径范围为 $0.5\mu\text{m} \sim 1.5\mu\text{m}$,假定其它参量为定值,如 $\lambda = 0.532\mu\text{m}$, $K = 5$,结合(2)式数值模拟 $r_{0.5} = 0.5\mu\text{m}$ 时散射相函数图像,如

图 3 所示,同时采用 MATLAB 内置命令 cftool 及函数集在同一图像上进行高斯拟合及双高斯(double Gaussian)拟合。拟合结果显示,采用双高斯函数拟合结果更为理想。

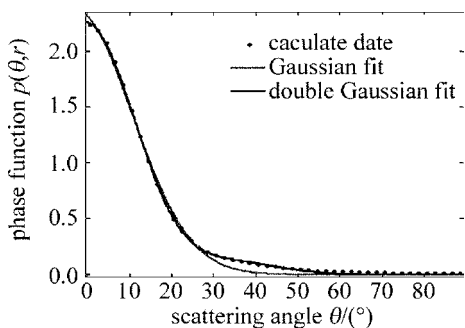


Fig. 3 Gaussian fitting and double Gaussian results for phase function

经 MATALB 内置命令 cftool 及编程所得双高斯拟表达式,即相函数近似半经验公式:

$$p'(\theta, r, \lambda) = \alpha_1 \exp\left[-\left(\frac{\theta - \beta_1}{\gamma_1}\right)^2\right] + \alpha_2 \exp\left[-\left(\frac{\theta - \beta_2}{\gamma_2}\right)^2\right] \quad (4)$$

式中, $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \alpha_2, \beta_2$ 和 γ_2 均为拟合待定参量, $p'(\theta, r, \lambda)$ 拟合散射相函数。显然参量与激光波长、水滴质量中间半径 $r_{0.5}$ 等因素有关。当 λ 取 $0.532\mu\text{m}, 0.65\mu\text{m}, 0.89\mu\text{m}, 1.06\mu\text{m}$ 时,得到的拟合特定参量与波长相关关系如图 4 所示,由于实验条件及波长的可控因素,仅对 $\lambda = 0.532\mu\text{m}$ 进行分析。 $r_{0.5}$ 在 $0.5\mu\text{m} \sim 1.5\mu\text{m}$ 范围内时,拟合参量与半径相关关系如图 5 所示。

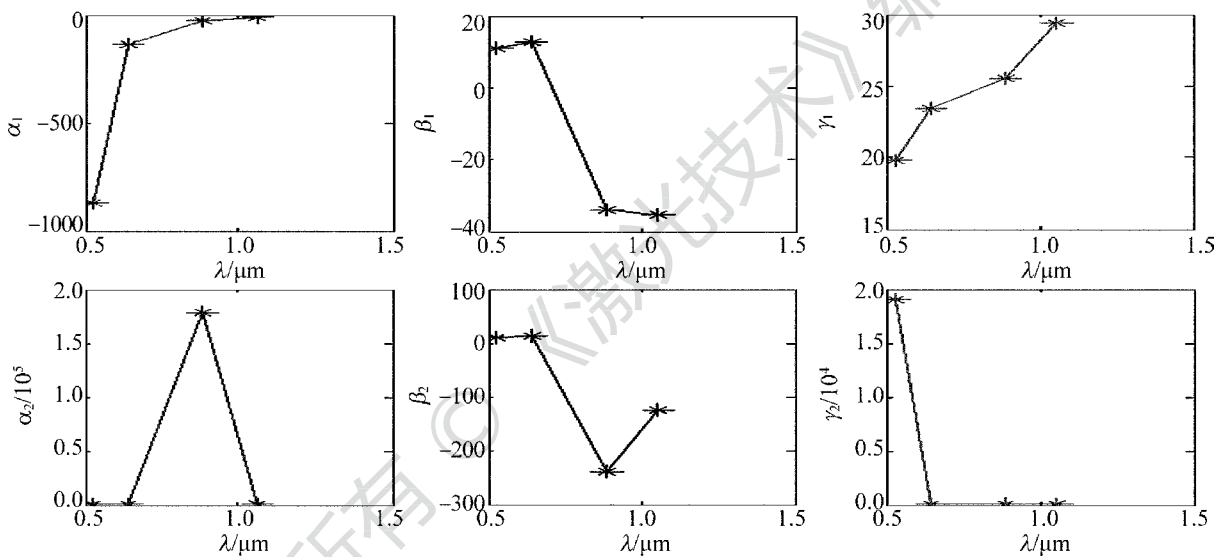


Fig. 4 Double Gaussian fitting parameters changing with the laser wavelength

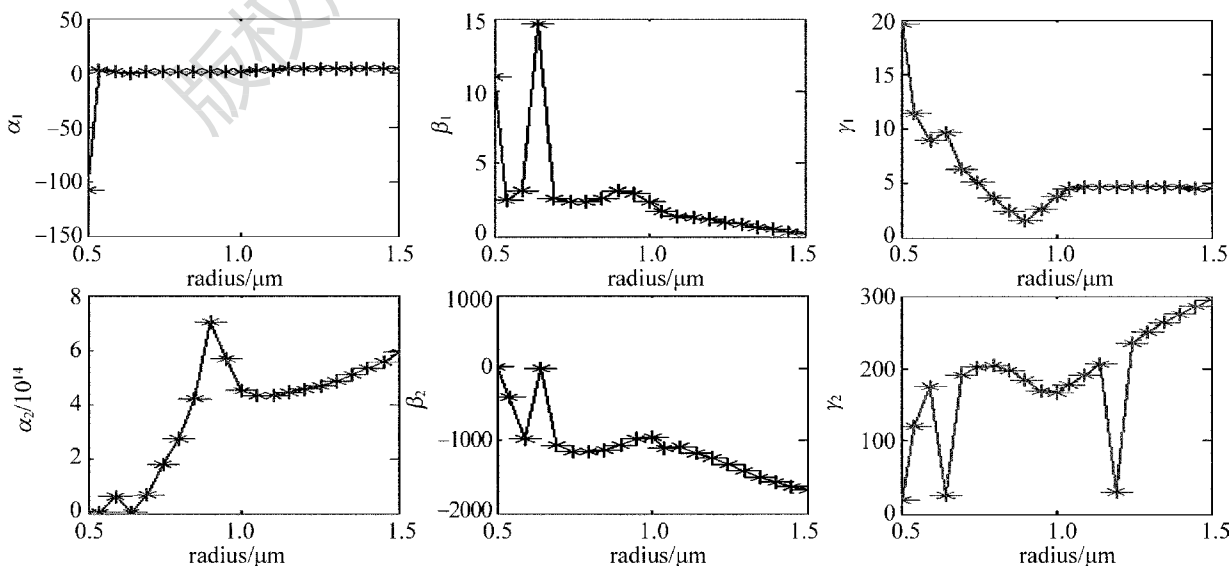


Fig. 5 Double Gaussian fitting parameters changing with water quality middle radius

假设散射角为 θ 时, 散射光强为 $I(\theta)$, 拟合散射相函数为 $p'(\theta, r, \lambda)$; 散射角为 θ_0 时, 散射光强为 $I(\theta_0)$, 拟合散射相函数为 $p'(\theta_0, r, \lambda)$ 。可得如下散射比 K_s 关系式:

$$K_s = \frac{I(\theta)}{I(\theta_0)} = \frac{p'(\theta, r, \lambda)}{p'(\theta_0, r, \lambda)} = \frac{1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \exp\left[\left(\frac{\theta - \beta_1}{\gamma_1}\right)^2 - \left(\frac{\theta - \beta_2}{\gamma_2}\right)^2\right]}{1 + \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \exp\left[\left(\frac{\theta_0 - \beta_1}{\gamma_1}\right)^2 - \left(\frac{\theta_0 - \beta_2}{\gamma_2}\right)^2\right]} \quad (5)$$

在实验测得散射光强灰度图像条件下, 经转化得不同散射角 $\theta = 3.4^\circ \sim 5.6^\circ$, $\theta_0 = 3.2^\circ$ 下, 散射光强比值 $\frac{I(\theta)}{I(\theta_0)}$, 根据半经验公式(4)式, 应用图 4 中双高斯拟合参量随水滴质量中间半径变化关系, 便可计算得到水滴质量中间半径 $r_{0.5}$ 。以此半径代入经典 Mie 散射理论, 数值模拟得散射光强值 $\frac{I'(\theta)}{I'(\theta_0)}$ 。

3 散射比结果分析

在 MATLAB 开发环境下, 为了检测 cftool 自带双高斯函数反演方法的可靠性, 用参考文献[10]中对模拟汽轮机低压缸平台实验所摄 CCD 灰度图像进行分析, 并提取灰度曲线, 如图 6 所示。实验结果表明, 在散射角 $\theta = 3.2^\circ$ 时, 灰度值最强, 随后灰度值迅速下降。

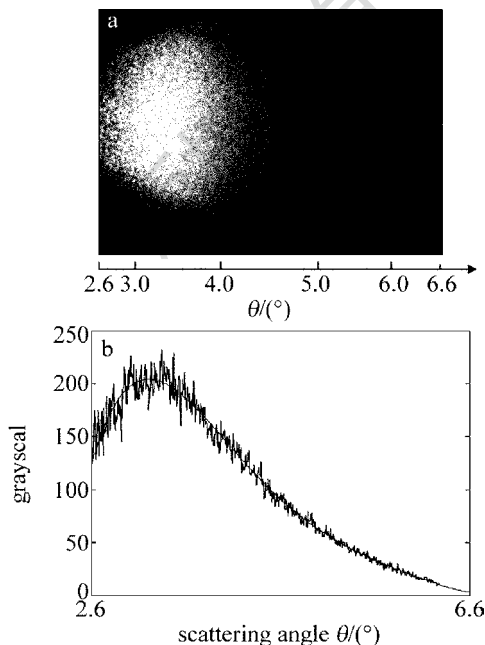


Fig. 6 Forward small angle scattering intensity distribution and the axial grayscale

实验中测得散射比以后, 利用相函数半经验公式推导出的散射比关系(5)式及相函数拟合参量点进行反演^[10], 计算在背压为 0.50MPa 下, 可得湿蒸气的水滴质量中间半径为 1.1 μm 。将水滴质量中间半径代入(1)式, 经 Mie 理论数值模拟得理论散射比, 结果如表 1 所示。

Table 1 Under different scattering angle, the scattering ratio results between the experiment and Gaussian fitting

scattering angel θ/θ_0	scattering ratio		error analysis
	experiment results	numerical simulation results	
3.4/3.2	190/200 = 0.95	0.9720	0.0220
3.6/3.2	170/200 = 0.85	0.8439	-0.0061
3.8/3.2	150/200 = 0.75	0.7156	-0.0344
4.0/3.2	126/200 = 0.63	0.6875	0.0575
4.2/3.2	102/200 = 0.51	0.5596	0.0496
4.4/3.2	82/200 = 0.41	0.5322	0.1222
4.6/3.2	62/200 = 0.31	0.4054	0.0954
4.8/3.2	50/200 = 0.25	0.3793	0.1293
5.0/3.2	39/200 = 0.195	0.2539	0.0644
5.2/3.2	30/200 = 0.15	0.2295	0.0795
5.4/3.2	22/200 = 0.11	0.2060	0.0960
5.6/3.2	13/200 = 0.065	0.1836	0.1171

从表 1 可以看出, 由于受大角度孔径光阑的限制及环境和测量误差等因素的影响, 在散射比为 $\frac{4.4^\circ}{3.2^\circ} \sim \frac{5.6^\circ}{3.2^\circ}$ 时, 实验值较理论值要小。但总的来说, 经半经验公式反演简化后, 数值模拟散射比结果与实验测得结果吻合良好。

实验测得多组散射比, 代入(5)式, 求出拟合参数值, 由拟合参量与水滴质量中间半径关系, 可求得水滴质量中间半径为 $r_{0.5} = 1.1 \mu\text{m}$, 采用半经验公式数值模拟结果与参考文献[11]中用经典 Mie 散射理论计算结果相近, 说明该方法有效。将反演 $r_{0.5} = 1.1 \mu\text{m}$ 代入以下两式, 便可对汽轮机通流部分蒸汽湿度 Y 进行计算^[8]:

$$V_m = \frac{8\pi}{3} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^3 n(r) dr \quad (6)$$

$$Y = \frac{\frac{V_m}{v_m}}{\frac{V_m}{v_m} + \frac{(1 - V_m)}{v_s}} \times 100\% \quad (7)$$

式中, V_m 为单位体积内的水滴总容量, $n(r)$ 为尺寸分布函数; v_m 是饱和水的比容, v_s 是饱和汽的比容, 均可通过查表获取。

4 结 论

针对经典 Mie 散射理论测量颗粒粒度大小时没有严格解析解情形,这里用 MATLAB 自带 cftool 对相函数进行双高斯拟合,得出相函数半经验公式,使 Mie 理论解变得简单、快速可解。实验中测得散射比,经半经验公式反演得到水滴质量中间半径为 $1.1\mu\text{m}$,再用于散射相函数数值模拟,计算得散射比。

可以说所求得半径即为模拟汽轮机低压缸内水滴颗粒质量中间半径。

与其它算法相比,其优点表现在:(1)计算简单,数值模拟结果与实验结果吻合较好;(2)可以实现汽轮机通流部分蒸汽湿度在线测量问题;(3)具有一定的理论意义和工程实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] KADONO T, ARAKAWA M, KOUCHIC A. Size distributions of chondrules and dispersed droplets caused by liquid breakup: An application to shock wave conditions in the solar nebula [J]. *Icarus*, 2008, 197(2):621-626.
- [2] SIGEL R. Light scattering near and from interfaces using evanescent wave and ellipsometric light scattering[J]. *Colloid & Interface Science*, 2009, 14(6):426-437.
- [3] GOGOI A, BURAGOHAIN A K, CHOUDHURY A, *et al.* Laboratory measurements of light scattering by tropical fresh water diatoms[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2009, 110(14/16):1566-1578.
- [4] SHCHERBAKOV A A, TISHCHENKO A V. Light scattering in plane dielectric layers: modeling in the 2-D reciprocal space[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2012, 113(18):2424-2430.
- [5] WU W, QIN Sh Q, HUANG Zh Q. A fast inversion method for water droplet size determination in scattering light measurement[J]. *Journal of Optics*, 2011, 31(7):1-5(in Chinese).
- [6] HUANG Zh Q, YANG J M, SUN Ch Sh. Application of the laser scattering theory for monitoring steam wetness and droplet size in steam turbines[J]. *Journal of Power Engineering*, 2006, 26(2):241-244(in Chinese).
- [7] CAI W W, ZHAO Y, MA L. Direct recursion of the ratio of Bessel functions with applications to Mie scattering calculations[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2008, 109(16):2673-2678.
- [8] HUANG Zh Q, QIN Sh Q. Investigation of exhaust wetness measurement method in steam turbine based on mie scattering of laser [D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2010:1-118(in Chinese).
- [9] ZHANG H Y, ZHAO W J, REN D M, *et al.* Improved algorithm of Mie scattering parameter based on MATLAB [J]. *Journal of Light Scattering*, 2008, 20(2):102-110(in Chinese).
- [10] GODDEERIS C, CUPPO F, REYNAERS H, *et al.* Light scattering measurements on microemulsions: estimation of droplet sizes [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2006, 312(1/2):187-195.
- [11] HUANG Zh Q, CAO X L, YANG J M, *et al.* Application of CCD in measuring steam moisture and droplet size [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(4):39-43(in Chinese).