

文章编号: 1001-3806(2014)02-0316-05

## 异轴角散射法测量湿蒸气参量的方法研究

杨 颖<sup>1</sup>, 黄竹青<sup>1,2\*</sup>, 曹小玲<sup>1</sup>

(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:** 为了实时监测汽轮机末级湿蒸气中水滴大小分布和浓度的变化, 指导汽轮机的安全经济运行和锅炉给水量, 减小湿蒸气对汽轮机的影响, 提出了一种以 CCD 为探测器、测量湿蒸气参量的异轴角散射方法; 根据模拟汽缸的结构和参量建立数学模型, 并进行了仿真分析, 得出水滴群质量中间半径、水滴数浓度和尺度分布参量的变化对散射比的影响规律; 分别对不同工况下的湿蒸气进行了实验测量; 仿真和实验结果变化趋势基本一致。结果表明, 利用异轴角散射法测量湿蒸气参量变化是可行的。该研究对湿蒸气参量以及其它微粒的监测是有帮助的。

**关键词:** 散射; 湿蒸气参量; 异轴角散射法; CCD; 灰度值

中图分类号: O436.2 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2014. 03. 007

## Research of measurement of wet steam parameters with off-axis angular scattering method

YNAG Ying<sup>1</sup>, HUANG Zhuqing<sup>1,2</sup>, CAO Xiaoling<sup>1</sup>

(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 monitor the density and distribution of water-drop at the end stage of the steam turbine, the off-axis angular scattering method was proposed to measure the parameters of wet steam. In this way, it not only guides economic operation of the turbine but also guarantee water allowance of the boiler. At the same time, it can reduce the influence of wet steam on the turbine. Based on the structure and parameters of mock cylinder, a mathematic model was built. This mathematic model can find whether the middle radius of quantity, the density of number and the distribution of magnitude in water-drop have impact on the scattering ratio. The wet steam was measured under different conditions. The analysis result was similar to the experimental result. The experimental results proved the off-axis angular scattering method is feasible for measuring wet steam parameters. This research is helpful for monitoring the parameters of wet steam and other particles.

**Key words:** scattering; wet steam parameter; off-axis angular scattering method; CCD; gray value

## 引言

湿蒸气对汽轮机的影响主要有两点, 一是汽轮机末级蒸汽凝结过程中产生的热力学损失及其形成水滴使汽轮机组效率降低, 也就是湿气损失; 二是蒸汽流动过程中形成的高速水滴使汽轮机末级叶片产生水蚀, 甚至断裂。因此, 实时监测汽轮机末级湿蒸

基金项目: 湖南省科技厅重点基金资助项目  
(2011GK4005)

作者简介: 杨 颖(1985-), 男, 硕士研究生, 现主要从事汽轮机故障诊断的研究。

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

收稿日期: 2013-06-06; 收到修改稿日期: 2013-06-25

气中水滴大小分布和浓度的变化, 对汽轮机的安全经济运行和指导锅炉给水有着重要的意义。针对该问题, 经过参考分析<sup>[1-3]</sup>, 本文中提出一种测量湿蒸气参量的异轴角散射方法, 并对该方法进行仿真分析和实验研究。

## 1 测量原理

异轴角散射法<sup>[4]</sup>是通过光电探测器采集散射立体角  $\theta_1 \sim \theta_2$  范围内的散射光能来实现的。本文中提出的实验模型如图 1 所示。激光光束进入湿蒸气到达探测器先后经历衰减、散射、衰减 3 个过程, 这 3 个过程分别遵循 Lambert-Beer 定律、Mie 散射理论和 Lambert-Beer 定律。

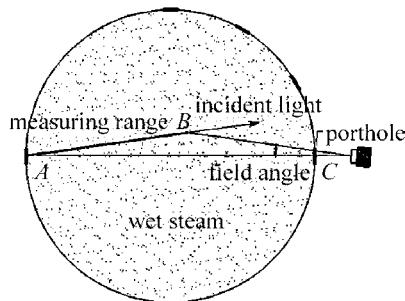


Fig. 1 Experimental model

### 1.1 数学模型

在整个研究过程中,假设衰减区和散射区水滴分布均匀,水滴群中的各个水滴是相互独立的散射体,各个水滴之间的散射光互不相关,所以水滴群的散射特性是散射区域内各个水滴散射特性的线性叠加。作者以适合描述破碎形成的微粒群的 Rosin-Rammler 分布函数表示水滴群的尺寸分布,其尺寸分布概率密度函数表达式为<sup>[5]</sup>:

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

式中,  $r$  为半径,  $\bar{r}$  是质量中间半径,  $K$  是尺度分布参数, 设入射激光光强为  $I_0$ , 到达散射区之前的光程为  $L_{01}$ , 散射区长度为  $L$ , 散射区和出光孔之间的距离为  $L_{02}$ 。理论公式推导如下:

衰减区  $L_{01}$ :

$$I_1 = I_0 \exp \left[ -\pi N L_{01} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^2 \cdot f(r) Q_{\text{ext}} dr \right] \quad (2)$$

散射区:

$$I_2 = I_1 dS N \int_{r_1}^{r_2} I_s(r, \theta) f(\bar{r}) dr \quad (3)$$

式中,  $Q_{\text{ext}}$  是消光系数, 由 Mie 系数求得;  $dS$  是像元对应的散射区面积;  $N$  是单位体积内粒子个数, 即水滴浓度;  $I_s$  是单个粒子在散射立体角内的散射光强, 表达式为:

$$I_s = \frac{\lambda^2 I_0}{2\pi^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [i_1(r, \theta) + i_2(r, \theta)] \cdot \sin \theta \varphi(\theta) d\theta \quad (4)$$

$$\varphi(\theta) = \arccos \left[ \frac{\cos \left( \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} \right) - \cos \left( \frac{\theta_2 + \theta_1}{2} \right) \cos \theta}{\sin \left( \frac{\theta_2 + \theta_1}{2} \right) \sin \theta} \right] \quad (5)$$

式中,  $i_1(r, \theta)$  和  $i_2(r, \theta)$  是散射强度函数, 由 Mie 散射理论求得,  $\varphi(\theta)$  是极化角和散射角之间的关系。为了提高 Mie 散射理论的计算精度和运算速度, 采用 LENTZ 改进的连分式<sup>[6]</sup>方法和向前递推<sup>[7-8]</sup>计算 Mie 系数。

衰减区  $L_{02}$ :

$$I_3 = I_2 \exp \left[ -\pi N L_{02} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^2 f(r) Q_{\text{ext}} dr \right] \quad (6)$$

综合(1)式~(6)式, 得到散射比:

$$T_s = \frac{I_3}{I_0} = \exp \left[ -\pi N (L_{01} + L_{02}) \cdot \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r^2 f(r) Q_{\text{ext}} dr \right] dS \cdot \ln \int_{r_1}^{r_2} I_s(r, \theta) f(\bar{r}) dr \quad (7)$$

### 1.2 参量计算

测量装置主要由蒸汽发生器、激光器、CCD 光电探测器<sup>[9-11]</sup>组成, 成像光路如图 2 所示, 散射微元和接收截面组成散射立体角, 经过镜头成像于对应的像元。

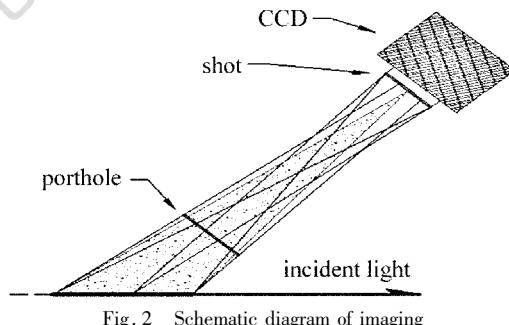


Fig. 2 Schematic diagram of imaging

首先使激光光束通过汽缸的水平直径与 CCD 靶面中垂线重合, 然后将激光光束逆时针旋转, CCD 按接收截面中垂线顺时针旋转, 旋转角度分别为  $b$  和  $\beta$ ,  $O$  是 CCD 相机镜头所在位置, 由 CCD 相机配合镜头的视场角  $\varphi$  结合有效像元个数  $n$  将散射区域  $AN$  平均划分为  $n$  个相对应的散射区,  $BM$  是垂直于  $AF$  的辅助线, 根据图 3 得到如下关系:

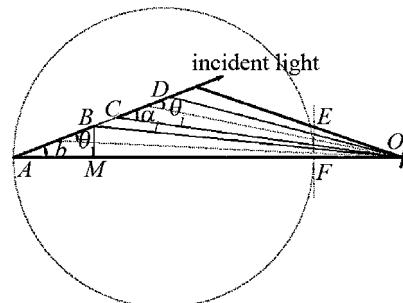


Fig. 3 Schematic diagram of receiving structure

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_j = \frac{\varphi}{n}(j - \frac{1}{2}) + b \\ \alpha_j = \frac{\varphi}{n}(j - 1) + b \\ L_j = \frac{L_{j-1} \sin \alpha_{j-1}}{\sin \left( \frac{\varphi}{n} \right)} \\ \frac{\cos \alpha_j + \frac{\sin \alpha_j}{\tan \left( \frac{\varphi}{n} \right)}}{\sin \left( \frac{\varphi}{n} \right)} \end{array} \right. , (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{01,j} = L_{01,j-1} + L_{j-1} \\ L_{02,j} = \frac{L_j \sin \alpha_j}{\sin \left( \frac{\varphi}{n} \right)} - \frac{OF}{\cos \left( \frac{j\varphi}{n} \right)} \end{array} \right.$$

$$\text{初始值为:} \left\{ \begin{array}{l} L_{01,1} = 0 \\ L_1 = \frac{AF}{\cos b + \frac{\sin b}{\tan \left( \frac{\varphi}{n} \right)}} \end{array} \right. \quad (9)$$

式中,  $n$  是有效像元个数,  $L_j$  是像元  $j$  所对应的散射区长度(如  $AB, CD$  等),  $L_{01,j}$  和  $L_{02,j}$  是像元  $j$  所对应的衰减区长度(如  $AC, DE$ ),  $\theta_j$  和  $\alpha_j$  分别是像元  $j$  所对应的平均散射角和接收立体角的起始角度。

散射立体角的计算如图 4 所示。 $CD$  是接收截面,  $B$  是某一像元对应的散射区,  $DE$  是垂直于  $OB$  的辅助线, 散射立体角的范围为  $\theta_j \pm \Delta\theta$ ,  $\Delta\theta$  与接收截面的大小和  $\theta_j$  有关, 计算过程如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\theta = \arctan \left( \frac{DE}{BE} \right) \\ DE = OD \cdot \sin \left( \frac{\pi}{2} + \theta_j - b - \beta \right) \\ BE = OB - OE \\ OB = \frac{AO \cdot \tan \beta}{\sin(\theta_j - \beta) + \tan \beta \cos(\theta_j - \beta)} \\ OE = OD \cdot \cos \left( \frac{\pi}{2} + \theta_j - b - \beta \right) \end{array} \right. \quad (10)$$

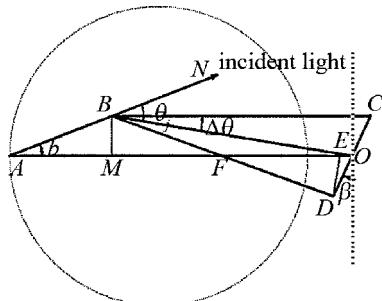


Fig. 4 Schematic diagram of the scattering structure

根据实验仪器的具体参量,  $L_j, L_{01,j}, L_{02,j}$  和散射立体角变化规律如图 5 所示。

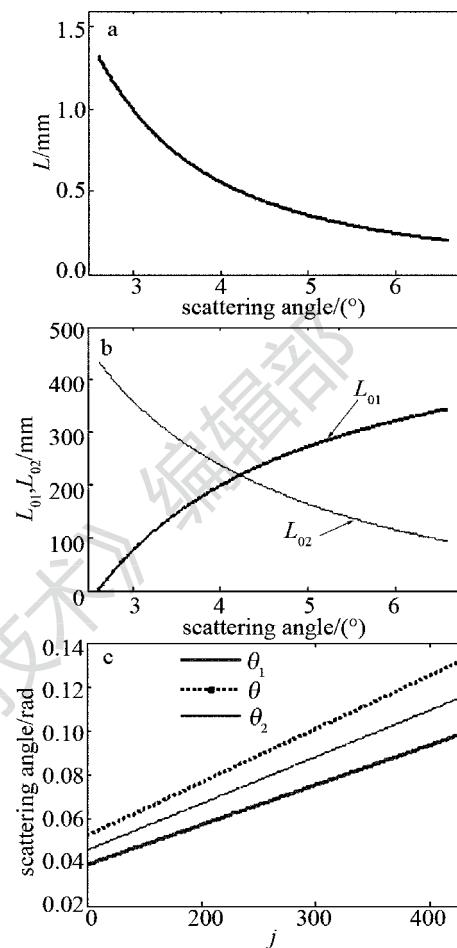


Fig. 5 a—variety of scattering region varying along with angle b—variety of attenuation region varying with angle c—variety of scattering solid angle varying with  $j$

## 2 仿真与实验分析

### 2.1 实验参量与仿真

主要实验仪器参量: 模拟汽缸直径为 437mm, 激光波长  $\lambda = 0.532\mu\text{m}$ , 功率为 0mW ~ 100mW 连续可调; CCD 探测器分辨率为 656pixel  $\times$  493pixel, 镜头焦距为 75mm, 视场角为  $4^\circ$ , 折射率  $m = 1.33$ 。实验测量时, 将激光光束逆时针旋转  $2.6^\circ$ , CCD 按接收截面中垂线顺时针旋转  $2^\circ$ 。结合实验仪器的参量和(7)式进行仿真, 得到改变质量中间半径  $\bar{r}$ 、尺度分布参量  $K$ 、水滴数浓度  $N$  对散射比的影响规律(见图 6)。由仿真结果可知:(1)随着角度的增加, 散射比非线性地减小;(2)水滴浓度  $N$  和尺度分布参量  $K$  不变的情况下, 质量中间半径  $\bar{r}$  增大, 散射比增大, 且随着散射角度的增加变化越快;(3)尺度分

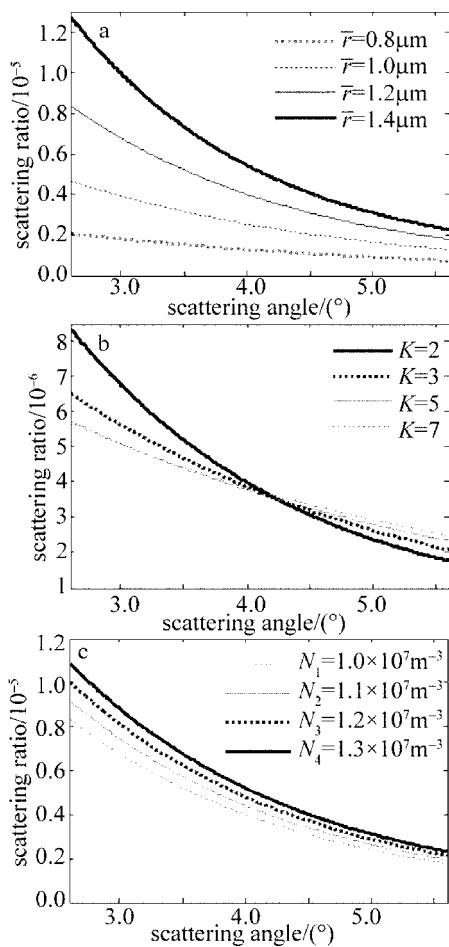


Fig. 6 Analysis of the mock result

a—影响不同中间半径  $r$  的量对散射比的影响  
 b—影响不同参数分布对散射比的影响  
 c—影响不同水滴密度对散射比的影响  
 布参数  $K$  越大, 水滴群的半径就越集中, 表现出单一分散系的振荡特性, 散射比随角度的变化越快; (4) 水滴浓度  $N$  增加, 散射区内水滴数量增多, 散射比增大。

## 2.2 实验结果

根据理论模型设计实验, 测量出不同工况(见表1)下的散射信号, 转变成灰度图像(见图7), 并对其进行中值平滑滤波, 由于CCD像元灰度在接收到的光强未达到饱和时, 像元灰度值与光强呈线性关系<sup>[12]</sup>, 即像元灰度值越高, 像元上接收到的散射光强越大, 因此, 可以用灰度值随角度的变化趋势表示散射光强的变化趋势。

Table 1 Different condition of parameters setting

parameter	initial pressure /MPa	inlet /°C	back pressure /MPa	outlet /°C
condition 1	0.62	162	0.5	152
condition 2	0.66	164	0.46	149
condition 3	0.65	164	0.32	135

取灰度图像中线上  $3.6^\circ \sim 5.6^\circ$  对应的灰度值,

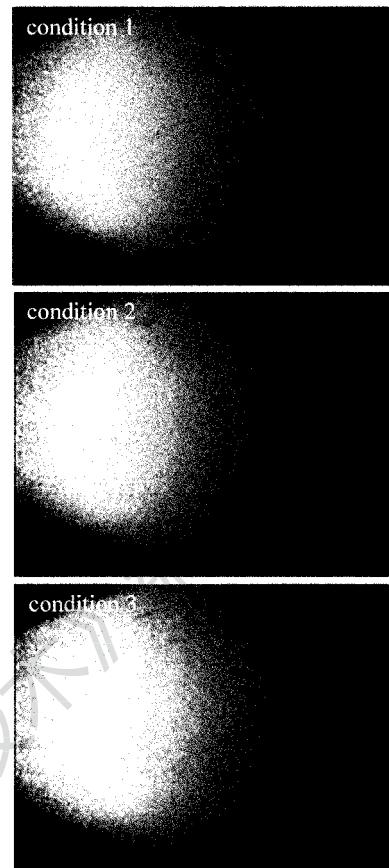


Fig. 7 Gray-scale diagram of different conditions

如图8所示:像元灰度值随角度的变化呈下降趋势;不同工况时得到的图片灰度值不同,随着汽缸背压的减小,对应的像元灰度值增大,这是因为模拟汽缸内的湿蒸气随着背压的下降,焓降增加,蒸汽湿度增大。蒸汽湿度跟水滴半径和水滴数浓度有关,湿度越大,水滴半径或水滴数浓度就越大;实验数据的变化趋势和仿真分析的结果基本一致。表1为不同工况的参数设定。

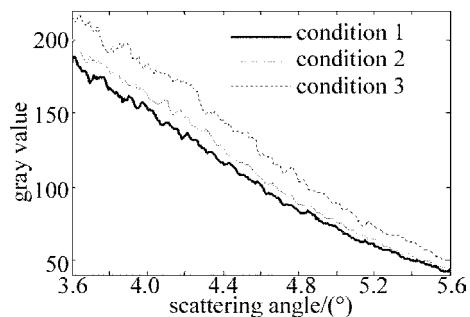


Fig. 8 Variety of gray-scale value corresponding to different conditions varying with angle

## 3 结 论

采用异轴角散射法, 以CCD作为散射光探测器

进行实验研究,通过仿真和实验数据的比较,实验数据的变化趋势符合仿真分析的结果;另外,如果以正常状态下微粒群的灰度图像作为标准,实时测量的数据和标准图像作比较,就能够快速地得出微粒群参量的变化趋势。所以本文中所提出的测量湿蒸气参量的方法是可行的。该方法还能应用到煤粉、空气质量等微粒群的测量上。

## 参考文献

- [1] HUANG Zh Q, YANG J M, SUN C Sh, *et al*. 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).
- [2] ZHOU L X, ZHANG M Zh, WANG S L, *et al*. Situation and development of steam wetness measurement in turbine exhaust casing [J]. Journal of North China Electric Power University, 2001, 28 (2) : 72-76 (in Chinese).
- [3] WANG L L, CAI X Sh. Progress in research on water droplet size in two phase wet steam flow in steam turbine [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2003, 25 (4) : 307-311 (in Chinese).
- [4] HUANG T L, ZHENG G, WANG N N. Theory study of light scattering measurement technology on particulate contamination under ultraclean environment [J]. Journal of Guilin Institute of Electronic Technology, 2000, 20 (1) : 6-12 (in Chinese).
- [5] ITO S. Optical wave propagation in discrete random media with large particles a treatment of the phase function [J]. Applied Optics, 1993, 32 (9) : 1652-1656.
- [6] LENTZ W J. Generating Bessel funtions in Mie scattering calculations using continued fractions [J]. Applied Optics, 1976, 15 (3) : 668-671.
- [7] DAVE J V. Coefficients of the legendre and Fourier series for the scattering functions of spherical particles [J]. Applied Optics, 1970, 9 (8) : 1888-1896.
- [8] BAYVEL L P, JONES A R. Electromagnetic scattering and its applications [M]. London, UK: Applied Science Press, 1981; 26-27.
- [9] ZHANG B D, QIN Sh Q, JIA H J, *et al*. Measurement model and uncertainty analysis of pulsed laser far field energy density based on CCD imaging [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20 (9) : 1417-1920 (in Chinese).
- [10] ZHONG J, WENG J D, LUO Zh X, *et al*. Study on stray facula of array CCD detector irradiated by laser pulse [J]. Laser Technology, 2010, 34 (6) : 835-838 (in Chinese).
- [11] SU P, NIU Y X, LI D Q, *et al*. Image acquisition and processing of a laser warning system based on planar array CCD [J]. Laser Technology, 2013, 37 (3) : 394-399 (in Chinese).
- [12] WANG Q Y. Application technology of CCD [M]. Tianjing: Tianjing University Press, 2000; 17-27 (in Chinese).