

文章编号: 1001-3806(2013)03-0310-04

## 基于激光后向散射测量蒸汽湿度的仿真研究

焦 焯<sup>1</sup> 黄竹青<sup>1,2\*</sup> 曹小玲<sup>1</sup> 蔡 成<sup>1</sup> 刘芳艳<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 长沙 410110; 2. 湖南有色金属职业技术学院 株洲 412006)

**摘要:** 为了研究测量湿蒸汽特性对汽轮机正常运行的影响,采用了一种利用激光后向散射原理及联合 CCD 成像原理来测量湿蒸汽的新方法,得到湿蒸汽直径相关参量的测量结果。结果表明,通过仿真得到了尺寸参量、接收角度等参量对后向散射光强的影响,以及一些参量的最佳取值范围;当接收角度为 180°和接收距离为 0.5m 时,能够得到较高的散射比例。这为实际测量提供了一定的参考依据。

**关键词:** 散射; CCD; 湿蒸汽; 汽轮机; MATLAB

中图分类号: O436.2 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.03.009

### Simulation study on steam moisture measurement based on the method of optical back-scattering

JIAO Ye<sup>1</sup>, HUANG Zhu-qing<sup>1,2</sup>, CAO Xiao-ling<sup>1</sup>, CAI Cheng<sup>1</sup>, LIU Fang-yan<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410110, China; 2. Hunan Nonferrous Metals Vocational and Technical College Zhuzhou 412006, China)

**Abstract:** In order to study the effect of wet steam characteristics on the normal operation of the steam turbine unit, a new method was proposed to measure the diameter of the wet steam based on laser scattering principle and co-CCD imaging principle. After simulation, the effect of the size parameter, acceptance angle and other parameters on the backscatter intensity was obtained, optimal parameters were known. When the acceptance angle is 180° and receiver distance is 0.5m, a higher proportion of the scattering can be obtained. The results can provide a good reference for actual measurements.

**Key words:** scattering; CCD; moisture steam; turbine; MATLAB

### 引 言

随着节能技术的要求不断提高,汽轮机正朝着高参量、大容量方向发展,为此对汽轮机的技术要求也要逐渐加强,然而汽轮机末级仍处于湿蒸汽下工作,且核电气轮机基本处于湿蒸汽状态下工作,湿蒸汽给汽轮机发电机组带来极大的影响,主要是叶片产生水蚀,且降低机组效率。尽管目前电厂采用中间再热抽汽方法来降低部分蒸汽湿度,但是仍然无法避免湿蒸汽存在,因此,蒸汽湿度的测量成为火电和核电急需解决的问题。

随着计算机技术、光电技术、信号和图像处理技术的飞速发展,基于光散射原理法测量颗粒浓度具

有适时、在线、不接触等优点,光散射法也已成为测量汽轮机末级蒸汽湿度非取样测量技术的主流方向。光散射法根据散射接收角分类大致可分为前向、侧向和后向散射法。当颗粒在低浓度下时,更多的散射信号采用前向散射或侧向散射能够被接收,以致测量效果更加可靠。但颗粒的浓度比较高时,由于光对颗粒的复散射与消光作用,如应用前向散射和侧向散射就会产生较大的测量误差,并且当更高浓度颗粒时,必须减小光学厚度,且还需设计采样系统,这既给系统增加复杂性,又增加经济成本<sup>[1]</sup>。此外,前向散射法和侧向散射法的探测器与光源仍为分离放置,因此安装复杂,要求角度精确;光后向散射法的最大优势在于探测器与光源可集成在一起,无需角度调试;因各种测量法的优缺点,作者提出一种利用激光后向散射法及联合 CCD 进行测量汽轮机末级湿蒸汽技术,通过 Mie 理论分析计算出散射光强和蒸汽湿度的关系,并通过 MATLAB 仿真进行分析,得到了散射光强与各相关参量的关系。

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(12JJ2031)

作者简介: 焦 焯(1986-),男,硕士研究生,现主要从事汽轮机故障诊断方面的研究。

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

收稿日期: 2012-07-11; 收到修改稿日期: 2012-11-14

### 1 激光后向散射原理

当光通过均匀介质时,按几何光学知识,光线将沿直线传播;当介质不均匀时,光线将偏离其原来方向,向各个方向进行传播,然而在传播过程中入射光不仅发生散射作用,同时存在着透射和吸收作用。当入射光和液滴作用时,光的分布发生改变,把不按原方向传播的这部分光称作散射光。在这些散射光中,携带了大量颗粒的信息,如大小、浓度等,因此,研究散射光能得到颗粒的相关信息<sup>[2]</sup>。

图 1 为湿蒸汽对激光作用原理图。当一束强度为  $I_0$  的入射光通过流道中的蒸汽后,入射光发生散射、透射和吸收作用,光强减弱,然而散射光向四周传播;其中后向散射指的是入射光和散射光的夹角  $\theta$  在  $90^\circ \sim 270^\circ$  范围内的散射光<sup>[3]</sup>。

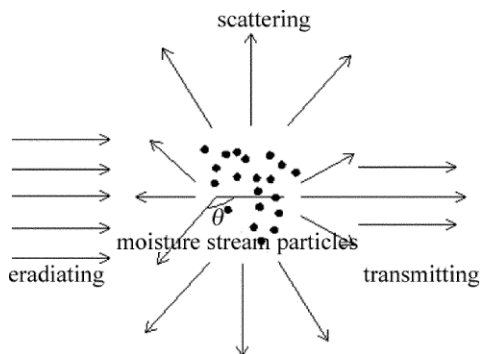


Fig. 1 Schematic diagram of moisture steam for laser function

假设散射颗粒为球形,其平均直径为  $D$ ,  $\lambda$  为入射光的波长,则其尺寸参量为  $k = \frac{2\pi d}{\lambda}$ 。经瑞利、MIE 等专家研究证实发现,尺寸参量  $k$  对颗粒散射光的特性起主要作用<sup>[4]</sup>。其中,Mie 散射理论<sup>[5]</sup>解释的是入射波长与颗粒直径在同一数量级发生的散射状况,而此散射形式不遵循瑞利散射理论<sup>[6]</sup>。Mie 散射理论适用于任何大小的各向同性的球体,电厂汽轮机末级湿蒸汽的粒径一般都在几微米到几百微米的范围内,利用同一数量级的测量光波长能够计算出后向散射光强,这样能够得到测量湿蒸汽特性的目的。当波长为  $\lambda$ ,强度为  $I_0$  的平行光入射到直径为  $D$  的球形液滴上时,散射角为  $\theta$ ,根据 Mie 散射理论,则散射光  $I_1$ <sup>[5,7]</sup> 为:

$$I_1 = \frac{I_0}{r^2} \sigma = \frac{I_0 \lambda^2}{8\pi^2 r^2} [i_1(k, m, \theta) + i_2(k, m, \theta)] \quad (1)$$

式中  $I_0$  为入射光强;  $r$  为空间与散射粒子的之间距离;  $\sigma$  为单水滴的散射系数;  $k$  为尺寸参量;  $\lambda$  为光束的波长;  $m$  为被测颗粒折射率;  $\theta$  为入射光和散射光

的夹角;  $i_1(k, m, \theta)$  和  $i_2(k, m, \theta)$  为散射强度函数,分别表示平行于和垂直于散射面的强度分量。颗粒散射光同样对其它颗粒发射作用,以此不断多次散射作用,这样的散射称为复散射。到目前为止,解决关于复散射等相关问题仍然没有一个系统的理论方案,且颗粒之间的相关性还与浓度有关,此类问题同样复杂。

因此,本文中按照不相关单散射进行研究。当单位体积内的水滴为  $N$  时,可知  $N\sigma$  为单位散射体的散射系数,其中散射体中水滴的粒径分布用水滴的平均直径  $D$  来表示。故当一入射光作用到一个单位散射体上时,则距离为  $r$  处的散射光强  $I_2$  为:

$$I_2 = \frac{I_0}{r^2} N\sigma = N \frac{I_0 \lambda^2}{8\pi^2 r^2} [i_1(k, m, \theta) + i_2(k, m, \theta)] \quad (2)$$

$$\begin{cases} i_1(k, m, \theta) = |S_1(k, m, \theta)|^2 \\ i_2(k, m, \theta) = |S_2(k, m, \theta)|^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$S_1(k, m, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \times \{a_n \pi_n(\cos\theta) + b_n \tau_n(\cos\theta)\} \quad (4)$$

$$S_2(k, m, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \times \{a_n \tau_n(\cos\theta) + b_n \pi_n(\cos\theta)\} \quad (5)$$

式中,散射振动幅度函数  $S_1(k, m, \theta)$ ,  $S_2(k, m, \theta)$  表示平行和垂直散射面的强度分量,用来分别代替  $i_1$  和  $i_2$ ; 而复数  $a_n$ ,  $b_n$  为 Mie 系数,它们是与  $k, m$  有关的量,其值可根据贝塞尔 (Ricattic-Bessel) 函数决定。

$$\pi_n = \frac{p_n(\cos\theta)}{\sin\theta} \quad (6)$$

$$\tau_n = \frac{d}{d\theta} p_n(\cos\theta) \quad (7)$$

式中,勒让德 (Legendre) 函数  $p_n$  能够计算出  $\pi_n$ ,  $\tau_n$ , 且它们仅和散射角  $\theta$  有关。那么由 (2) 式可以发现,散射光强和各个参量之间的关系,可知当入射波长  $\lambda$ 、入射光强  $I_0$ 、接收距离  $r$ 、被测粒径的尺寸参量  $k$ 、折射率  $m$  以及后向散射角  $\theta$  都确定时,那么散射光强  $I_2$  就与单位体积的水滴数  $N$  成正比,根据湿度定义:在气、液两相均匀混合物中,液态部分的质量与混合物总质的百分比,得出湿度为:

$$Y = \frac{N \left(\frac{1}{6}\right) \pi D^3 \rho_l}{\rho_g + N \left(\frac{1}{6}\right) \pi D^3 \rho_l} \quad (8)$$

式中  $Y$  为湿度  $\rho_l$  和  $\rho_g$  分别为悬浮介质气相和液相的密度 这就是激光后向散射法测蒸汽湿度的依据。

### 2 CCD 测量散射光强实验原理

图 2 为测量模拟汽轮机低压缸蒸汽散射光强分布的实验原理。图中,入射光线与光轴之间的夹角为  $\alpha$ ,像元位置  $M$  处的散射角记为  $\theta$ ,其灰度值为  $g$ ,设单位像元对应的水平角度为  $\eta$ ,则<sup>[8]</sup>:

$$\beta = M\eta \quad (9)$$

散射光强为:

$$I_\beta = K \cdot g \quad (10)$$

设入射光强度为  $I_0$ ,孔径总透过率为  $T$ ,则散射角  $\theta$  处的散射系数  $\gamma$  为:

$$\gamma = \frac{I_\beta}{I \cdot T} = \frac{K \cdot g}{I \cdot T} \quad (11)$$

式中  $K$  为 CCD 的能量-灰度比例因子。通过采用面阵 CCD 探测器测量散射光强度,能够测量不同散射角的光强分布,进而得到各个散射角下的散射系数  $\gamma$ ,由这些散射比得到蒸汽湿度  $Y$  和水滴直径  $D$ ,再根据蒸汽湿度的计算公式,最终通过数值分析求解得到水滴的尺度和粒径分布<sup>[9]</sup>。

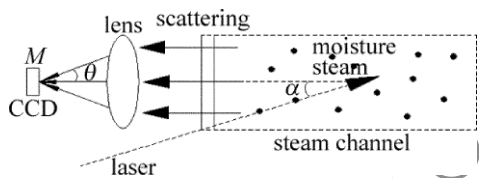


Fig. 2 Cross section diagram of scattering light measurement by using CCD

### 3 仿真分析

根据 Mie 散射原理以及 MATLAB 的优点,对其进行计算编程,根据(2)式可知其中各个参量与散射光强有着直接或者间接的联系。仿真结果得出尺寸参量、接收角度、接收距离和单位体积的水滴数对后向散射光强的影响<sup>[10]</sup>,如图 3 所示。

(1) 图 3a 中横纵坐标分别为尺寸参量  $k$  和散射占总光强的比例  $I_s/I_0$ 。散射角度接近  $180^\circ$  时,可以看到:当尺寸参量  $k$  在  $0 \sim 1$  时,散射光强所占总光强比例相对有较多波动,且波动较大,但是后向散射光强所占比例仍比  $k$  在其它范围大;在尺寸参量为  $1 \sim 4$  时,比例首先由  $1 \sim 2.5$  时,比例逐渐下降;在  $2.5 \sim 4$  时,比例有个较小程度的上升;在  $k$  到达 4 后,散射光强占总散射光强的比例逐渐下降并趋于平稳。由以上可知,尺寸参量选取应当处于  $0 \sim 1$  的

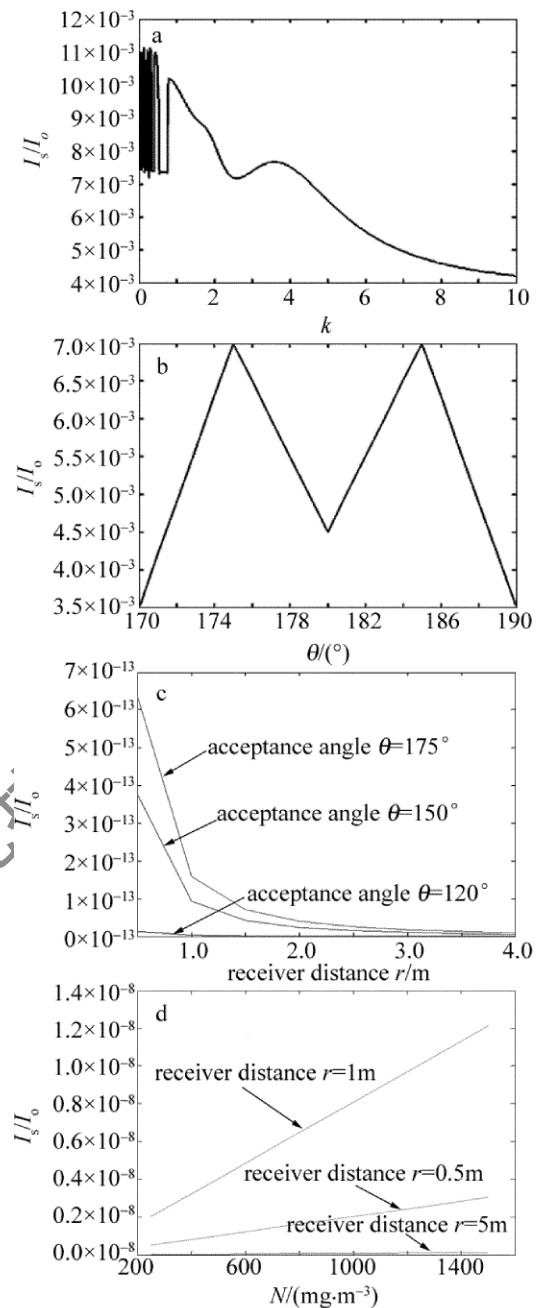


Fig. 3 a—relationship between scattering ratio  $I_s/I_0$  and size parameter  $k$  b—relationship between scattering ratio  $I_s/I_0$  and acceptance angle  $\theta$  c—relationship between scattering ratio  $I_s/I_0$  and receiver distance  $r$  d—relationship between scattering ratio  $I_s/I_0$  and unit volume of droplets

范围,也就是颗粒的直径须和入射波长属于同一数量级。(2) 图 3b 中横纵坐标分别为接收角度  $\theta$  和散射光强占总光强的比例  $I_s/I_0$ 。可以看到,当散射角度在  $175^\circ$  和  $185^\circ$  附近时散射比例较高,达到  $7.0 \times 10^{-3}$  左右。但是从整个所占比例来讲还是较少的,因此必须采取其它的措施,例如采用后向多角度接收,由此使得比例增加,使得测量效果更加明显。

(3) 图 3c 中横纵坐标分别为接收距离  $r$  和散射光强占总光强的比例  $I_s/I_0$ 。可以发现,光强比例与接收距离的平方成反比关系,且接收角度为  $175^\circ$  时,散射光强比例明显大于其它角度下的光强比例。为此,根据环境条件,实验时接收距离的最佳选取范围为  $0.5\text{m} \sim 1\text{m}$ ,且选取  $175^\circ$  的接收角度,CCD 能够接收到更多散射光强。(4) 图 3d 中横纵坐标分别为单位体积的水滴数  $N$  和散射光强占总光强的比例  $I_s/I_0$ 。由图可见,散射光强与单位体积的水滴数基本成线性关系,且接收距离为  $1\text{m}$  情况下明显强于其它距离的散射比例,这对实验的测量非常有利,这也是采用后向散射测量蒸汽湿度重要原因之一。

#### 4 结 论

基于激光后向散射法,通过仿真分析,得出了接收角度、接收距离等参量和散射比例的关系,其中选取接收角度  $\theta = 180^\circ$  和接收距离  $r = 0.5\text{m}$  时,后向散射能够达到很好的测量效果。且该测量法优点在于探测器与光源可集成在一起,无需角度调试;无论在测量原理上还是在测量装置上都属于比较简单的一种,同样具有较高的灵敏度。这将为光学法测量汽轮机湿蒸汽有很大的扩展以及一定的实验参考依据。

#### 参 考 文 献

- [1] YU D Y, CAI X S, SU M X *et al.* Study of back-scattering of high concentration particle system[J]. China Powder Science and Technology 2001, 7(4): 1-3( in Chinese ).
- [2] WANG F. Application study of the laser scattering theory for monitoring steam wetness and droplet size in steam turbines[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2008: 12( in Chinese ).
- [3] LI L F, ZHANG L, DONG L *et al.* Experimental study of the concentration of soot based on the method of optical back-scattering [J]. Acta Photonica Sinica 2006, 35(6): 915-918( in Chinese ).
- [4] WANG Y R, FENG D Z, ZHANG Z J. Research on measuring the thickness of soot by scattered light[J]. Journal of Jinan University ( Science Edition ) 2001, 15(3): 253-255( in Chinese ).
- [5] HULST V D. Light scattering by small particle[M]. New York, USA: Dover Publications, 1981: 11-15.
- [6] ZHAO K H, ZHONG X H. Optics( book two) [M]. Beijing: Peking University Press, 1984: 251-254( in Chinese ).
- [7] KERKER M. The scattering of light and other electromagnetic radiation[M]. New York, USA: Academic Press, 1969: 94-96.
- [8] WANG Q Y. Application technology of CCD[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000: 183-184( in Chinese ).
- [9] HUANG Z 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 ).
- [10] QIAN X. Study on dust concentration measurement technique based on optical back-scattering[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 17( in Chinese ).