

基于激光的后向角散射法测量蒸汽湿度

黄竹青^{1,2}, 丁 涛¹, 许春山¹

(1. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 湖南有色金属职业技术学院, 湖南 株洲 412006)

摘 要: 为了能够更加准确地测量出汽轮机末级蒸汽湿度, 为锅炉给水量提供依据, 促进汽轮机内部除湿技术的发展, 本文采用后向角散射法的思路设计湿蒸汽参数测量模型, 并对该模型所需物理量的计算方法进行了详细的研究, 为后向散射法测量蒸汽湿度的研究提供参考。通过定性分析各个参数对水滴群散射光强分布的影响, 提出以后向 150° 作为采光角, 并对其进行仿真模拟, 得到了散射光光强与蒸汽湿度参数有关。在此基础上通过反演寻优得到了稳定工况与变工况条件下的蒸汽湿度。该研究对光散射法测量蒸汽湿度的实验分析是有帮助的。

关键词: 散射; 蒸汽湿度; 后向角散射法; 质量中间半径; 采光角

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2016.01.004

Research on steam humidity measurement by the backward angle scattering

HUANG Zhu-qing^{1,2}, DING Tao¹, XU Chun-shan¹

(1. College 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 precisely measure the steam turbine humidity at the final stage, the parameter measurement model of steam humidity was designed by backward angle scattering method, and the computing methods of this model was studied. The effects of the various parameters on the scattering light intensity distribution of the drop group were qualitatively analyzed, and the backward direction of 150° was set as the lighting angle and simulation experiments were done. The results show that scattering light intensity is related to the steam humidity parameters. On this basis, the steam humidity under the stable and unstable condition was obtained through inversion and optimization. The study is helpful for measuring the steam humidity by laser scattering method.

Key words: scattering; wet steam parameters; backward angle scattering method; quality middle radius; lighting angle

1 引 言

大型凝汽式汽轮机末几级和核电站中大型汽轮机全部都在湿蒸汽状态下工作, 湿蒸汽的存在

大大降低了汽轮机效率, Baumann 在 1910 年提出: 蒸汽湿度每增加 1%, 就会使汽轮机效率降低大约 1%; 同时, 湿蒸汽中高速流动的水滴撞击叶片表

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51376025); 湖南省科技厅重点项目 (No. 2011GK4005) 资助。

作者简介: 黄竹青 (1964 -), 女, 博士, 教授, 现主要从事湿蒸汽测量方面的研究。

通讯作者: 丁 涛 (1990 -), 男, 硕士在读, 现主要从事湿蒸汽测量方面研究。E-mail: 123804297@qq.com

收稿日期: 2015-04-27; **修订日期:** 2015-06-15

面造成低压级叶片水蚀,叶片的强度和振动特性向着有害的方向改变,表面变得粗糙,出现凹坑,甚至断裂,造成叶片事故,严重威胁汽轮机组的安全运行^[1]。根据实时的蒸汽湿度及时地调整锅炉的给水量和内部除湿技术的应用能够降低蒸汽湿度^[2-3]。近年来,各国诸多研究机构都在对其进行深入研究,研究过程中不可避免的需要对蒸汽湿度进行测量,其测量的准确程度直接影响到实验结果的可信度。因此,准确地测量出蒸汽湿度对汽轮机的安全经济运行以及汽轮机除湿技术的发展有着重要的意义。

随着激光技术和图像传感技术的迅速发展,激光散射法成为测量蒸汽湿度参数的主要方法之一^[4-5],与传统的热力学法测量蒸汽湿度相比,光散射法具有测量范围广、重复性好、非接触、精度高和测量速度快等优点,且方便与计算机相结合,实现测量和数据处理的自动化。由单个颗粒的散射特性可知^[6-7],前向散射光强远大于后向散射,但当颗粒浓度很大或调节合适的入射光强度时,后向散射光强同样能够容易被光电探测器接收。并且,由于后向测量只需在模拟汽缸单侧进行,因此,实验设计和操作相对于更加简单。本文根据后向角散射法设计实验模型,测量散射光强度,得到蒸汽湿度参数,并对其进行理论分析、仿真模拟和实验研究。

2 测量原理及模型

激光散射法测量湿蒸汽参数是以描述球形粒子散射特性的 Mie 散射理论为基础,通过光电探测器接收水滴群在某个角度范围内的散射光信号。获取到的散射光信号中包含了水滴粒径、粒径分布、水滴浓度以及水滴对周围介质的折射率等信息,然后再根据 Mie 散射理论对测量数据进行反演,从而求得湿蒸汽中水滴粒径、粒径分布和浓度等参数^[8]。

根据后向异轴角散射法设计实验模型,如图 1 所示,实验模型主要由模拟汽缸、激光器和 CCD 相机组成。CCD 相机和长焦距镜头作为光电探测器接收散射立体角内的光强。在视场角很小的情况下,散射区域范围比较小,可以看作散射区域内水滴粒径分布均匀,即水滴粒径分布和浓度处处相等,水和蒸汽对于可见光的吸收很小,可以忽略,水滴之间的距离远远大于水滴半径,可看作只发生单次散射,

不考虑复散射的影响。

根据 CCD 成像原理可知,每个像元分别对应一定大小体积的散射区,当波长为 λ 、光强为 I_0 的入射光照射到湿蒸汽中时,每个像元将接收到相对应的散射区在某个散射立体角范围内的散射光,并以灰度值的形式存储于灰度图像中。由 CCD 相机工作原理可知^[9],在像元灰度值未达到饱和时,灰度值与光强成线性关系,因此只要准确地标定灰度值与光强的比例关系,便能将各个像元的灰度值换算成散射光强。

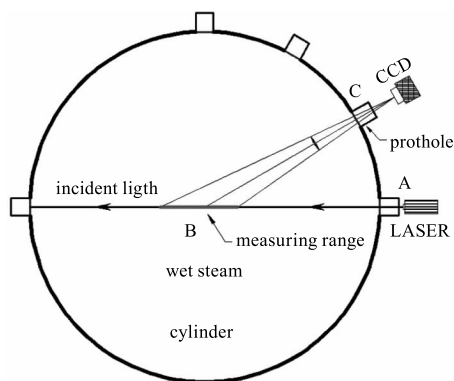


图 1 后向散射法测量湿蒸汽参数模型

Fig. 1 Backscatter measurement parameter model of wet steam

3 理论模型及几何参数推导

3.1 理论模型推导

如图 1 所示,激光器发出的光束到达探测器先后经历了衰减($A \rightarrow B$)→散射(B)→衰减($B \rightarrow C$)三个过程。在这三个过程中, $A \rightarrow B$ 、 $B \rightarrow C$ 遵循 Lambert-Beer 定律,散射时遵循 Mie 散射理论。假设入射光强为 I_0 ,经过距离 L_{01} 到达散射区,则衰减后的光强为:

$$I_1 = I_0 \exp(-\tau L_{01}) \quad (1)$$

L_{01} 是衰减区($A \rightarrow B$)的长度,介质浊度 τ 的表达式如下:

$$\tau = -\pi \cdot N \cdot \int_{r_1}^{r_2} r^2 \cdot f(r) \cdot Q_{ext} dr$$

其中, N 表示单位体积中的水滴数量; Q_{ext} 是消光系数; r_1 和 r_2 分别是水滴群中水滴半径的下限和上限,假设汽缸内水滴服从 Rosin-Rammler 分布,水滴粒径概率密度函数如下^[10]:

$$f(r) = 0.693 \frac{k-1}{\bar{r}_{0.5}} \left(\frac{r}{\bar{r}_{0.5}} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[-0.693 \left(\frac{r}{\bar{r}_{0.5}} \right)^k \right] \quad (2)$$

其中, $\bar{r}_{0.5}$ 是质量中间半径; K 是分布参数; r 是水滴

半径。

经过衰减后到达散射区 B, I_1 经过水滴群散射后的光强记作 I_2 , 表达式如下:

$$I_2 = \int_{r_1}^{r_2} I_s \cdot V \cdot N \cdot f(r) dr \quad (3)$$

其中, V 是散射区体积; I_s 表示单个水滴在 $\theta_1 \sim \theta_2$ 范围内的散射光强, 表达式如下:

$$I_s = \frac{\lambda^2 I_1}{8\pi^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [i_1 + i_2] \cdot \sin(\pi - \theta) \cdot \Delta\phi d\theta \quad (4)$$

式中, i_1 和 i_2 是散射强度函数, 是 Mie 系数 a_n 、 b_n 和角度分布函数 π_n 、 τ_n 的函数, Mie 系数的计算方法已得到深入的研究^[11-13], 在此不再重复叙述; $\Delta\phi$ 是方位角。散射光强 I_2 经过衰减区 (B→C) 后的光强记作 I_3 :

$$I_3 = I_2 \exp(-\tau L_{02}) \quad (5)$$

其中, L_{02} 是衰减区 (B→C) 的长度。综合上述步骤, 整理公式得:

$$I_3 = I_0 \exp[-\tau(L_{01} + L_{02})] \cdot \left\{ \frac{\lambda^2 V N}{8\pi^2} \int_{r_1}^{r_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [i_1 + i_2] \cdot \sin(\pi - \theta) \cdot \Delta\phi f(r) d\theta dr \right\} \quad (6)$$

3.2 几何参数推导

公式(6)中涉及几个几何参数, 散射区体积 V 、散射角 θ 、散射角上限和下限, 且每个散射区都不相同。第 i 个像元对应的散射区体积 V_i 与 CCD 相机视场角 $\phi_1 \times \phi_2$ 、像元个数 $n_1 \times n_2$ 和激光光束尺寸 μ 有关。单个像元的视场角为 $\Delta\phi_1 \times \Delta\phi_2$ ($\Delta\phi_1 = \frac{\phi_1}{n_1}$,

$\Delta\phi_2 = \frac{\phi_2}{n_2}$); 如图 2 所示, 当光电探测器接收截面的

中轴线与光束的夹角 γ 为 30° 时, 第 i 个像元对应的散射区长度 L_i 、宽度 W_i 和体积 V_i 计算方法如下:

$$\begin{cases} L_i = \frac{AD \cdot \sin 30^\circ}{\tan[\alpha + (i-1)\Delta\phi_1]} - \frac{AD \cdot \sin 30^\circ}{\tan(\alpha + i\Delta\phi_1)} \\ W_i = \frac{AD \sin 30^\circ}{\sin[\alpha + (i-0.5)\Delta\phi_1]} \cdot \Delta\phi_2 \\ V_i = L_i \cdot W_i \cdot \mu \end{cases} \quad (7)$$

同样, 每个像元对应着不同的散射角范围 θ_1 、 θ_2 和衰减区长度 L_{01} 、 L_{02} , 图 3 是第 i 个像元对应的散射立体角剖面图, 第 i 个散射体位于点 O , BC 是镜头接收截面, A 是接收截面的中心点, AD 是接收截面的中垂线, 与入射光光束交于 D , $\angle BOC$ 是第 i 个散射体对应的散射立体角。

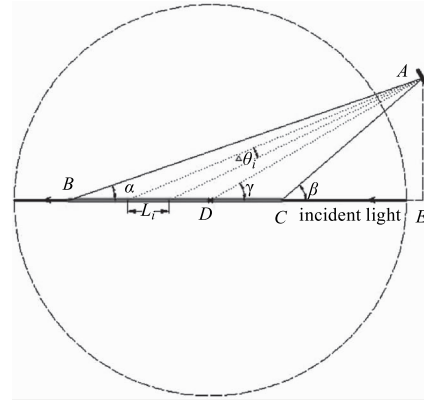


图 2 散射区体积计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculating scattering volume

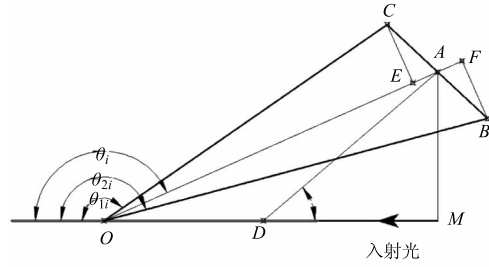


图 3 散射角计算示意图

Fig. 3 The scattering angle calculation sketch

第 i 个散射体对应的衰减区长度 L_{01i} 、 L_{02i} 的计算表达式为:

$$\begin{cases} L_{01i} = \frac{AD \sin 30^\circ}{\tan \angle AOD} \\ L_{02i} = \frac{AD \sin 30^\circ}{\sin \angle AOD} \end{cases} \quad (8)$$

第 i 个散射体对应的散射角及其范围 θ_{1i} 和 θ_{2i} , 如图 3 所示, 计算表达式如下:

$$\begin{cases} \theta_i = \pi - \alpha - (i - 0.5) \cdot \frac{\phi_1}{n_1} \\ \theta_{1i} = \theta_i - \arctan \frac{CE}{AO - AE} \\ \theta_{2i} = \theta_i + \arctan \frac{BF}{AO + AF} \end{cases} \quad (9)$$

方位角 $\Delta\phi$ 随着散射角 θ 变化而变化, 图 4 是后向异轴散射模型散射立体角的纵向剖面图, 入射光沿 Z 轴负方向, 散射体位于原点 O , BG 是接收截面接收散射立体角 $\angle BOG$ 内的散射光强, C 是接收截面上任意一点, 图 5 是沿图 4 中 AC 的水平截面图, 根据图 4、图 5, 可得 $\Delta\phi$ 和 θ 的关系:

$$\Delta\phi = \arccos \left[\frac{\cos(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}) - \cos(\pi - \theta) \cdot \cos(\pi - \frac{\theta_2 + \theta_1}{2})}{\sin(\pi - \theta) \sin(\pi - \frac{\theta_2 + \theta_1}{2})} \right]$$

(10)

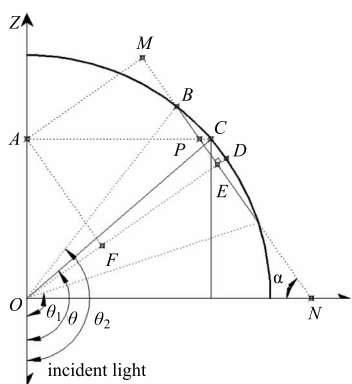


图4 水滴散射空间剖面

Fig. 4 Droplets scatter space profile

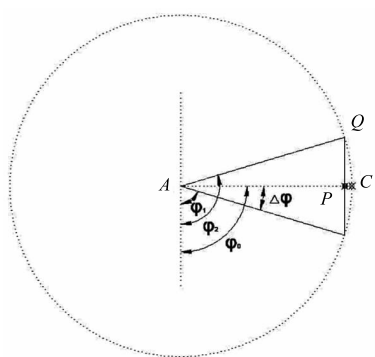


图5 散射立体角的投影

Fig. 5 The scattering of solid angle projection

4 仿真模拟

理论上,给定取值范围内的质量中间半径 $\bar{r}_{0.5}$ 、尺度分布参数 K 和水滴数密度 N ,根据所设计的实验模型以及求得的几何参数,是能够计算出每个像元上接收到的散射光强大小的,因此,根据上述方法,在参数取值范围内设置参数值进行仿真研究,分析三个参数的变化对散射光强分布的影响。仿真结果如图6所示。

图6(a)是对尺度分布参数 K 进行分析,结果表明,尺度分布参数 K 越大,各个像元接收到散射光强度越大,这是因为 K 值越大水滴群的半径分布越集中,散射光强分布就越接近单分散系的散射特性;散射光强随像元位置的分布根据水滴质量中间半径的不同变化比较大,如图6(b)所示,这种规律是由于不同质量中间半径的微粒群的散射光强随角度分布规律不相同;图6(c)是针对水滴数密度进行分析,从图中可以看出,当水滴数浓度在某个值以内时,像元接收到的散射光强值随浓度的增加而增大,但当到单位

体积内水滴数量达一定的值之后,散射光强值随水滴数密度的增加反而减小,这是水滴群对光强衰减引起的,当微粒浓度达到一定的值时,透射光强与入射光强的比以自然常数 e 的几何级数减小。

由上述仿真可知,散射光光强与参数 $\bar{r}_{0.5}$ 、 K 和 N 相关。若测得散射光强随像元位置的分布,便可通过反演寻优的方法求取参数 $\bar{r}_{0.5}$ 、 K 和 N 的值。反演的过程即相当于在三维空间里寻找一个点,这个点所示参数值对应的各个像元的散射光强与测量值最佳逼近。

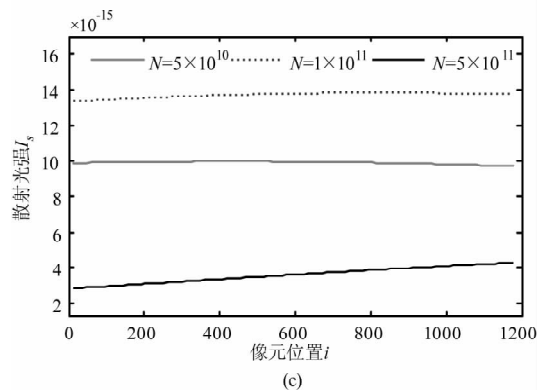
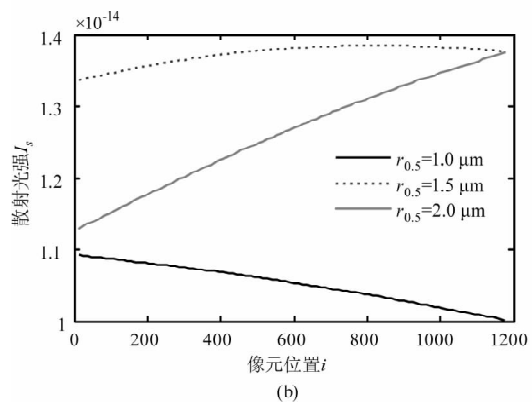
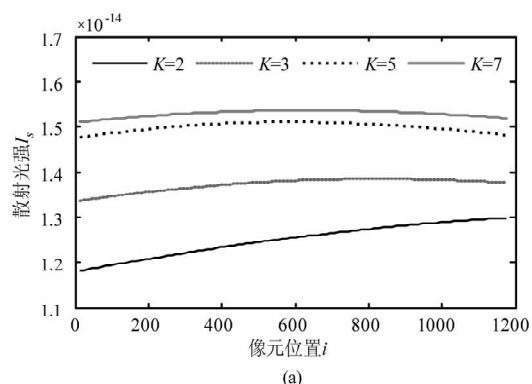


图6 散射光强随像元位置的变化

Fig. 6 The change of the scattering intensity with the pixel position

5 实验研究

根据设计的实验模型,搭建了如图7所示的实验台,其主要的实验装置有激光光源、模拟汽缸(湿蒸汽发生器)、探测器(CCD相机)、精密支架和计算机。

当模拟汽缸内湿蒸汽达到了如表1所列的稳定工况时,采集到如图8所示的散射光图像。

表1 稳定工况湿蒸汽参数

Tab. 1 The stability of wet steam parameters

Inlet pressure /MPa	Outlet pressure /MPa	Inlet temperature /℃	Outlet temperature /℃	Specific steam /($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	Specific water /($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)
0.58	0.22	158	123	0.80101	0.0010633

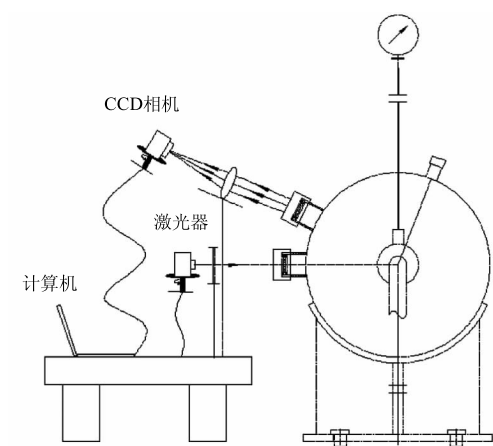


图7 后向散射测量装置示意图

Fig. 7 Backscatter measurements device schematic diagram

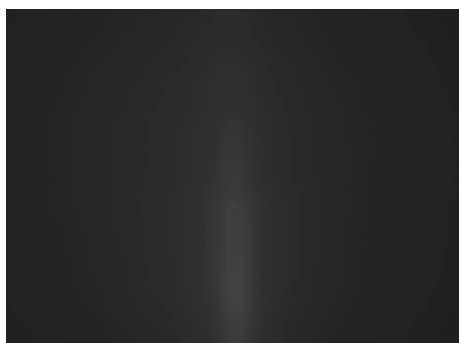


图8 稳定工况实验图像

Fig. 8 experiment image in steady working condition

通过 MATLAB 软件对实验图像进行分析,可得到像元位置与灰度值的关系图^[14-15]。然而,此时的图像中包含着噪声信号,因此需要对图像进行去噪处理。

实验中,图像灰度值都是以整数显示的,相当于离散信号,而处理图像的目的是去除随机噪声并使灰度值连续变化,故在此采用均值滤波的方法。如图9所示,通过均值滤波后,图中纵向中线的灰度值变

得平滑,从而使湿蒸汽参数反演时的精度得到了提高。

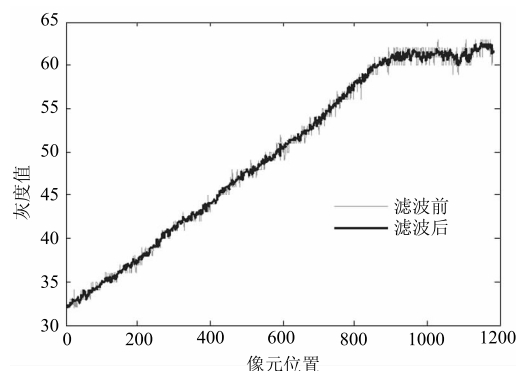
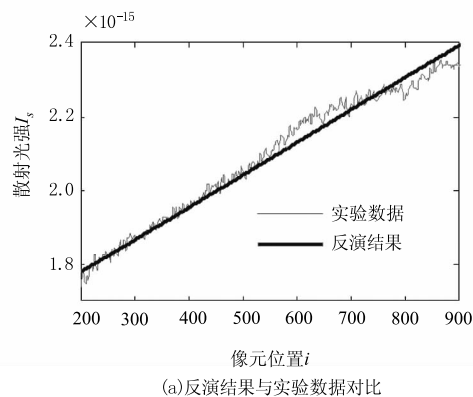


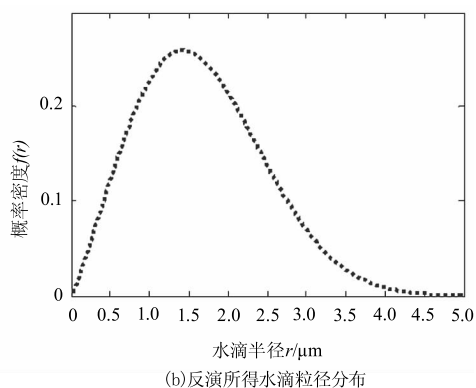
图9 滤波前后灰度值对比

Fig. 9 The gray value contrast between before and after filtering

根据上述工况下得到的实验数据,采用多种群遗传算法(MPGA)进行反演寻优,可获得如图10所示的反演结果。根据反演结果可得,质量中间半径 $\bar{r}_{0.5} = 1.6046 \mu\text{m}$, 尺度分布参数 $K = 2.1826$, 水滴数密度 $N = 4.9972 \times 10^{11} \text{m}^{-3}$, 计算得到湿度为 $Y = 1.41\%$ 。



(a) 反演结果与实验数据对比



(b) 反演所得水滴粒径分布

图10 工况3反演结果

Fig. 10 Inversion results in working situation 3

通过改变模拟汽缸内湿蒸汽背压,按上述方法分别计算不同背压下的蒸汽湿度,可得如图11所示

的蒸汽湿度变化图。

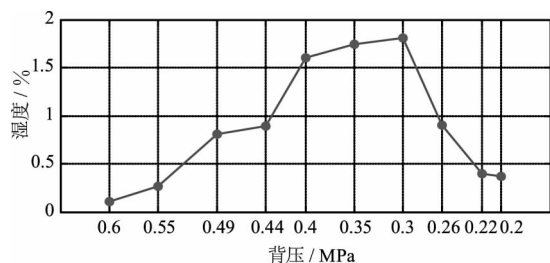


图 11 湿度随背压变化曲线

Fig. 11 The curve of relative humidity

从图中可以看出,随着背压的降低,测量得到的蒸汽湿度先增大后减小。在 0.6 ~ 0.3 MPa 范围内下降时,蒸汽湿度逐渐增加,这是由于背压降低时,焓降增加,蒸汽湿度就增大;当背压低于 0.3 MPa 时,蒸汽湿度随背压的降低反而减小,这是由于背压低于 0.3 MPa 时,背压与初压之比小于湿蒸汽的临界压力比,而实验所用的是渐缩型喷嘴,由喷嘴流出的蒸汽达不到超音速,最大为音速,所以蒸汽在喷嘴内到达音速时就不再膨胀,多余的焓降在喷嘴外对蒸汽进行加热,从而使蒸汽湿度减小。

对湿蒸汽状态参数连续变化下测量得到的一组实验数据进行平滑处理并反演,得到水滴粒径参数,计算出的蒸汽湿度在 0.5% ~ 2.5% 之间随背压有规律的变化,如图 12 所示。

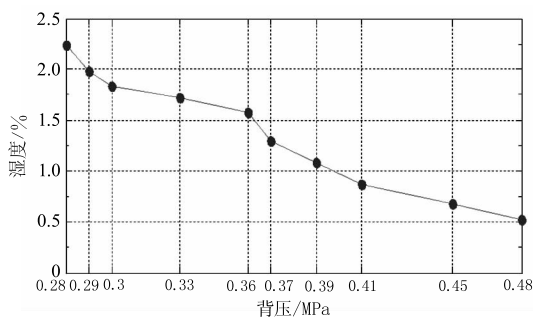


图 12 湿度随背压变化曲线

Fig. 12 The curve of relative humidity with the back pressure variation

本文只从其变化趋势进行分析,而由图 11 与图 12 曲线图可知,当工况稳定时,蒸汽湿度变化不大,在变工况时蒸汽湿度的变化趋势与热力学原理相符^[15]。因此,所设计的实验测量模型测量蒸汽湿度是可行的。

6 结 论

通过对后向散射光光能分布进行分析,得到

了后向 150° 处的散射光光强对各个参数的变化比较敏感,并且此时的实验台搭建相对容易;在此基础上,根据后向角散射法设计了测量湿蒸汽水滴参数的实验模型并搭建了实验台;通过对实验模型的仿真模拟,发现散射光光强和蒸汽参数的关系,从而确定了反演寻优的可行性;通过上述实验与反演寻优,最终得到了稳定工况与变工况时的蒸汽湿度曲线,曲线的趋势符合相关热力学定律,从而可以证明实验测量模型具有可行性。

实验研究中标定像元灰度值与光强的比例关系和搭建精确的实验台是难点,对测量误差影响较大;同时提高 CCD 相机的灵敏度和使用光源稳定、发散角小的激光器也是提高测量精度的重要手段。

参考文献:

- [1] HUANG Zhuqing, YANG Jiming, SUN Chunsheng, et al. Application of the laser scattering theory for monitoring steam wetness and droplet size in steam turbines [J]. Power Engineering, 2006, (2): 241 - 244. (in Chinese)
黄竹青, 杨继明, 孙春生, 等. 激光散射理论在汽轮机蒸汽湿度及水滴直径测量中的应用 [J]. 动力工程, 2006, 02: 241 - 244.
- [2] LIU Jiancheng, LIN Zhihong, WEN Xueyou, et al. The development of technology of moisture removal of steam turbine [J]. Thermal Power Engineering, 2005, (1): 1 - 5. (in Chinese)
刘建成, 林志鸿, 闻雪友, 等. 汽轮机内部除湿技术的发展 [J]. 热能动力工程, 2005, (1): 1 - 5.
- [3] ZHANG Hong, CAI Xiaoshu, SHANG Zhitao, et al. The measurement of size, velocity and flow angle of coarse water with single image method [J]. Heat Turbine, 2008, (1): 26 - 29. (in Chinese)
张弘, 蔡小舒, 尚志涛, 等. 单帧图像二次水滴粒径、速度和流动角度测量方法研究 [J]. 热力透平, 2008, (1): 26 - 29.
- [4] HAN Zonghe, YANG Kun. Reviews on wetness measurement methods of wet steam in turbine [J]. Journal of North China Electric Power University, 2002, (4): 44 - 47. (in Chinese)
韩中合, 杨昆. 汽轮机中蒸汽湿度测量方法的研究现状 [J]. 华北电力大学学报, 2002, (4): 44 - 47.
- [5] HUANG Xuefeng, SHENG Deren, CHEN Jianhong, et al.

- Development study on measuring moisture of the wet steam two phase flow [J]. Power System Engineering, 2006, (5): 1-4. (in Chinese)
- 黄雪峰, 盛德仁, 陈坚红, 等. 湿蒸汽两相流湿度测量方法研究进展[J]. 电站系统工程, 2006, (5): 1-4.
- [6] ZHANG Wei, LU Yuan, DU Shiming, et al. Analysis of characteristics of Mie scattering. [J]. Optical Technique, 2010, (6): 936-939. (in Chinese)
- 张伟, 路远, 杜石明, 等. 球形粒子 Mie 散射特性分析[J]. 光学技术, 2010, (6): 936-939.
- [7] ZHANG Heyong, REN Deming, ZHAO Weijiang, et al. Research of scattering phase function of spheric particle under polarized state [J]. Opto Electronic Engineering, 2008, 35(9): 71-75. (in Chinese)
- 张合勇, 任德明, 赵卫疆, 等. 偏振状态下球形粒子的散射相位函数研究[J]. 光电工程, 2008, 35(9): 71-75.
- [8] WU Wei, QIN Siqiao, HUANG Zhuqing. A fast inversion method of water droplet size determination in scattering light measurement [J]. Journal of Optics, 2011, (7): 156-160. (in Chinese)
- 吴伟, 秦石乔, 黄竹青. 水滴粒径散射测量中的快速反演方法研究[J]. 光学学报, 2011, (7): 156-160.
- [9] WANG Qingyou. Application of CCD Technology [M]. Tianjin: Tianjin University press, 2000: 32-39. (in Chinese)
- 王庆友. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000: 32-39.
- [10] JIAO Yie, HUANG Zhuqing, CAO Xiaoling, et al. Simulation study on steam moisture measurement based on the method of optical back-scattering [J]. Laser Technology, 2013, (3): 310-313. (in Chinese)
- 焦烨, 黄竹青, 曹小玲, 等. 基于激光后向散射测量蒸汽湿度的仿真研究[J]. 激光技术, 2013, (3): 310-313.
- [11] J V DAVE. Scattering of visible light by large water sphere[J]. Applied Optics, 1969, 8(2): 155-161.
- [12] WANG Lianfen, LIU Guangbin, et al. Onwards continued fraction algorithm for Mie scattering and numerical simulation [J]. optical technique, 2009, (4): 541-543. (in Chinese)
- 王莲芬, 刘光斌, 等. Mie 散射向前递推连分式算法及其数值模拟[J]. 光学技术, 2009, (4): 541-543.
- [13] W J Lentz. Generating bessel functions in Mie scattering calculations using continued fractions [J]. Applied Optics, 1976, 15(3): 668-671.
- [14] HUANG Zhuqing. Investigation of moisture steam characteristic measurement methods in steam turbine based on light scattering [D]. Changsha: National University of defense technology, 2010. (in Chinese)
- 黄竹青. 基于光散射的汽轮机湿蒸汽特性测量方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [15] HUANG Zhuqing, CAO Xiaoling, YANG Jiming, et al. Application of CCD in measuring steam moisture and droplet size [J]. Opto Electronic Engineering, 2010, (4): 39-43. (in Chinese)
- 黄竹青, 曹小玲, 杨继明, 等. 基于 CCD 的蒸汽湿度及水滴直径测量[J]. 光电工程, 2010, (4): 39-43.