

330 MW 低压汽轮机湿蒸汽二次水滴测量实验研究

项延辉¹, 蔡小舒¹, 周 鹭¹, 梁志宏², 艾东明², 魏明业²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 太仓港协鑫发电有限公司, 苏州, 215433)

摘要: 研制了基于单帧单曝光图像法(SFSEI)的测量探针,并将其布置在330 MW 低压汽轮机末级后侧,有效捕获了湿蒸汽二次水滴图像,对其湿度、粒径和速度进行了测量.实验测量结果表明,二次水滴的粒径与湿度受汽轮机运行负荷影响较大.负荷较低时,汽轮机内湿度较大;负荷增加时,由于叶片表面温度上升的延迟,在工况开始变化的一段时间内,二次水滴的湿度会有一定的增加.末级叶片上的拉筋对二次水滴的形成有一定影响,当蒸汽流经拉筋后,其二次水滴的湿度明显增大.此外,二次水滴的速度受到汽轮机内主蒸汽流量和二次水滴粒径大小等因素的影响.

关键词: 低压汽轮机; 湿蒸汽; 二次水滴; SFSEI

中图分类号: TK 267; TK 31 **文献标志码:** A

Experimental Research on the Coarse Water Droplets Measurement in a 330 MW LP Steam Turbine

XIANG Yanhui¹, CAI Xiaoshu¹, ZHOU Wu¹, LIANG Zhihong², AI Dongming², WEI Mingye²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Taicang Harbor Golden Concord Electric-Power Generation Co., Ltd., Suzhou 215433, China)

Abstract: The measurement probe system based on the method of single frame and single exposure imaging (SFSEI) was developed and applied to measure coarse water droplets in wet steam flow behind the last stage of a 330 MW low-pressure (LP) steam turbine. The wetness, diameter and speed of coarse water droplets were measured. The results show that the diameter and wetness of coarse water droplets are greatly influenced by the operating load of steam turbine. The wetness of coarse water droplets is relatively higher in the lower load operation, and it would raise with the increase of the operating load of steam turbine, because of the time delay in temperature changing on the surface of blades. The lacing wires have impacts on the formation of coarse water droplets. Thus, the wetness of coarse water droplets would raise when the steam flow passes by the lacing wires. Moreover, the speed of coarse water droplets is influenced by the flux of main steam flow and the diameter of coarse water droplets.

Keywords: LP steam turbine; wet steam; coarse water droplets; SFSEI

收稿日期: 2017-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51206112)

第一作者: 项延辉(1992-),男,硕士研究生.研究方向: 汽轮机湿蒸汽在线测量. E-mail: yanhui_xiang@hotmail.com

通信作者: 蔡小舒(1955-),男,教授.研究方向: 颗粒与两相流测量. E-mail: usst_caixs@163.com

凝汽式汽轮机广泛地应用于大型火力发电站,其低压缸末几级叶片基本工作在湿蒸汽区。湿蒸汽会造成末几级叶片的水蚀破坏,不仅降低汽轮机运行的工作效率,甚至威胁机组运行的安全^[1]。湿蒸汽由一次水滴和少量二次水滴组成,其中二次水滴粒径较大,一般为一次水滴粒径的数十倍以上,与主蒸汽流的跟随性较差,并且会产生动不平衡力,被认为是造成叶片水蚀的主要原因^[2]。二次水滴的形成机理一直以来都是汽轮机湿蒸汽研究的重要内容,长期以来,基于角散射、氧化镁薄膜法、全息法、超声波法、液滴群撞击、高速摄影等原理的测量方法被应用于汽轮机二次水滴的测量,为二次水滴的研究提供了数据支撑^[3-10]。由于上述方法测量设备结构复杂、体积大、成本高等因素,没有在汽轮机内二次水滴测量应用中得到发展。

近数十年来,随着互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)技术、数字图像处理技术和计算机技术的快速发展,使得图像法在两相流在线测量方法中迅速发展。随着单帧单曝光图像法(single frame and single exposure imaging, SFSEI)的提出及应用,通过CMOS相机直接获得汽轮机湿蒸汽中二次水滴的图像,从而实现了二次水滴粒径、速度、流动角度等参数的同时在线测量^[11-12]。本文测量实验采用基于SFSEI研制的图像法探针,在江苏太仓港协鑫发电有限公司330 MW低压汽轮机末级后侧进行湿蒸汽二次水滴测量,并对实验测量二次水滴的结果进行分析讨论。

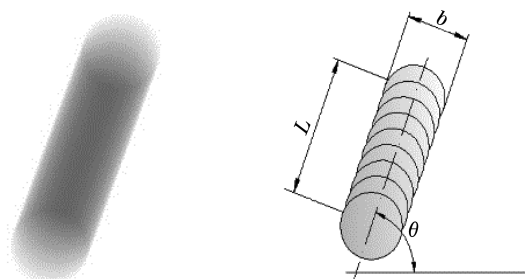
1 SFSEI的测量原理

SFSEI测量的基本原理是建立在几何光学的基础上,并结合成像器件来实现。当用CMOS相机拍摄运动物体时,在确定的曝光时间内运动物体与CMOS相机之间发生相对位移,使得捕捉到的图像出现运动模糊。因曝光时间为已知条件,所以在运动物体为匀速直线运动的假设条件下,可以获取运动物体的运动方向、速度以及物体的直径大小。SFSEI的核心原理就是通过确定的长曝光时间来获得运动物体的模糊图像,如图1所示。假设二次水滴为球形或近似球形,由此提取出颗粒的运动轨迹信息,即模糊宽度 b 和模糊长度 L 。设定相机的曝光时间为 t ,镜头放大倍率为 β ,便可由此计算出水滴的运动角度 θ 、水滴的速度 v 和直径 d 等参数^[13]。则水滴的

速度 v 和直径 d 可表示为

$$v = \frac{L - d}{t\beta} \quad (1)$$

$$d = \frac{b}{\beta} \quad (2)$$



(a) 运动模糊轨迹图像

(b) 成像过程的物理模型

图1 典型的运动模糊图像及处理

Fig.1 Typical motion-blurred image and its processing

由于CMOS拍摄的空间局限性,只能在景深范围内才能得到较为清晰的运动轨迹图像,所以通过统计在测量时间 τ 内拍摄到的二次水滴通过景深测量区内的数量为 M ,从而分析计算便可得到 τ 时间内二次水滴的总体积 V_e ,即

$$M = \sum_{i=1}^k N_i \quad (3)$$

$$V_e = \frac{\pi}{6\tau} \sum d_i^3 N_i \quad (4)$$

式中, N_i 为对应直径 d_i 的二次水滴数目。结合湿蒸汽流场参数,就可以得到二次水滴的湿度 Y ,即

$$Y = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100\% \quad (5)$$

式中: m_1 和 m_2 分别为湿蒸汽中二次水滴的质量和蒸汽的质量。

2 测量系统与实验工况

2.1 图像法汽轮机湿蒸汽测量实验系统

图像法汽轮机湿蒸汽测量系统包括探针、探针控制箱系统、计算机及电源。其中,探针由CMOS相机、白光光源、远心镜头等组成,如图2所示。探针控制系统包括坐标架控制系统和白光光源控制。其中坐标系统包括前后移动控制和转动控制,其移动和转动精度分别为0.5 mm和0.5°。

探针测量段是整个实验装置中最重要的部分,探针头实物如图3所示。在流动区域两侧,即光源和镜头的外侧安装高透光率的玻璃窗镜,从而保护设备不被水蚀。同时利用外界大气压差,在探针测量段

内布置了镜面吹扫孔,以防止窗镜表面形成的水膜影响探针正常工作。

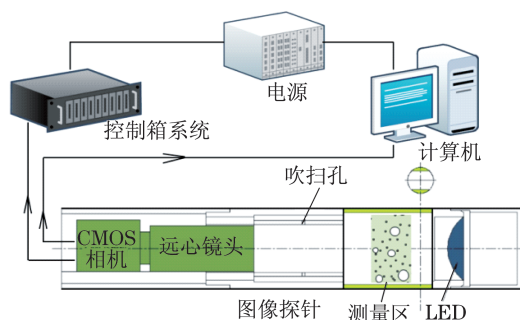


图2 测量探针系统示意图

Fig.2 Schematic of the measurement probe system

两次湿蒸汽测量实验(序号1:2014年11月;序号2:2015年5月)所采用的CMOS相机均是12位彩色相机,其尺寸为29mm(W)×29mm(H)×

51.1 mm (D),像元大小为 $4.4\ \mu\text{m} \times 4.4\ \mu\text{m}$,传感器大小为 $1/1.8''$,曝光时间为 $1\sim 3\ 600\ \mu\text{s}$,分辨率为 $1\ 624\ (\text{H}) \times 1\ 232\ (\text{V})$.而对于远心镜头和光源的选择,两次实验采用了不同的系统参数,如表1所示。



图3 探针头

Fig.3 Photo of the probe head

表1 两次实验的系统参数

Tab.1 System parameter in the two experiments

实验序号	镜头放大倍率	工作距离/mm	景深/mm	分辨率/ μm	光源功率/W
1	0.45	85.0	4.4	18.3	3
2	1.0	110.0	2.2	13.75	5

2.2 实验测点布置与实验工况

应用上述测量探针系统在330 MW 低压汽轮机末级后侧进行湿蒸汽二次水滴测量,实验装置如图4所示。



图4 实验装置安装图

Fig.4 Photo of the experimental apparatus installation

两次实验分别进行了32个和19个测点的湿蒸汽测量.为便于比较,选取序号2实验的19个测点作为对象进行分析.实验测点布置于汽轮机末级后,距离末级叶片200 mm,并沿着叶高每隔20 mm布置一个测点,测量汽轮机排汽的湿度信息.探针的测点布置如表2所示,测量位置如图5所示(见下页)。

表2 实验测点布置

Tab.2 Arrangement of the measured points in experiments

测点	叶高/mm	测点	叶高/mm
#1	905	#11	705
#2	885	#12	685
#3	865	#13	665
#4	845	#14	645
#5	825	#15	625
#6	805	#16	605
#7	785	#17	585
#8	765	#18	565
#9	745	#19	545
#10	725		

该机组额定主蒸汽和再热蒸汽温度为 $538\ ^\circ\text{C}$,额定背压为 $4.9\ \text{kPa}$.两次测量实验的汽轮机运行负荷与运行参数如表3所示。

序号1实验工况基本稳定,但在序号2实验中,汽轮机运行负荷处于变化情况.其中,前6个测点测量时负荷稳定在250 MW,第7~9个测点测量时负荷逐渐上升到280 MW,第12个测点测量时负荷逐

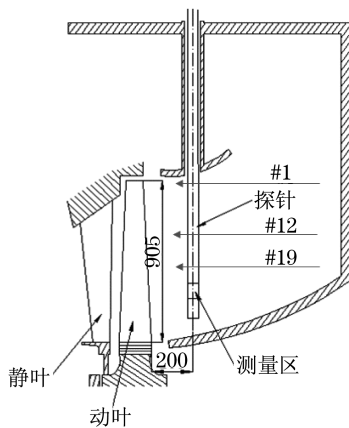


图5 探针测量位置示意图

Fig.5 Schematic of measurement positions of the probe

渐降低到 250 MW,随后 6 个测点(13~18 测点)测量时负荷稳定在 250 MW,第 19 个测点测量时负荷略有上升并达到 262 MW. 序号 2 实验的低压缸排

汽温度为 36 °C,背压为 7.2 kPa,大于序号 1 测量时的低压缸排汽温度 33 °C 和背压 4.1 kPa.

3 实验结果与分析

3.1 典型的二次水滴图像及其处理过程

实验获得了典型的二次水滴图像及其二值化处理图像,如图 6 所示,其中所使用镜头的放大倍率为 1,相机曝光时间为 31 μ s. 图 6(a)中可见二次水滴在曝光时间内形成轨迹图像,通过对二次水滴轨迹图像二值化处理,获得图 6(b)的图像. 计算分析得到二次水滴的粒径为 101.3 μ m,运动速度为 15.1 m/s,角度为 39°. 由此可见,基于 SFSEI 原理研制的湿蒸汽二次水滴测量探针能够有效地捕获湿蒸汽二次水滴图像,可为湿蒸汽二次水滴研究提供直观可靠的数据.

表 3 两次实验的汽轮机运行参数

Tab.3 Operation parameters of the steam turbine in the two experiments

实验序号	汽轮机负荷/MW	主汽流量/(t·h ⁻¹)	中压缸排汽温度/°C	低压缸排汽温度/°C	背压/kPa
1	277	900	347	33	4.1
2	250~280	790~920	367	36	7.2

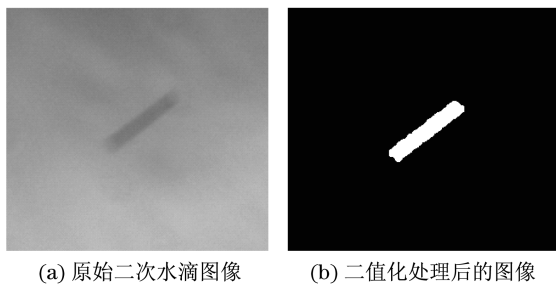


图6 典型二次水滴图像及其处理

Fig.6 Typical image of coarse water droplet and its processing

3.2 二次水滴参数测量结果与分析

实验获得了大量的湿蒸汽二次水滴图像,为了对比两次不同工况下二次水滴情况,选取统一的 5 min 时间段图像进行处理,获得两次实验二次水滴平均湿度、平均粒径与平均速度参数测量结果,如图 7 所示.

图 7 中,序号 1 实验在第 13,14,19 这 3 个测点处并没有捕捉到二次水滴的图像,但在序号 2 实验中在该 3 个测点处捕捉到了一定量的二次水滴图像. 其具体原因可能与序号 1 实验时汽轮机运行负荷相对较高、二次水滴较少有关,或与序号 1 实验时

间较短(5 min)有关,在该时域内未测得二次水滴.

从图 7(a)和图 7(b)可以看出,二次水滴在序号 2 实验中测量得到的粒径和湿度都较序号 1 的测量结果高. 这是因为序号 2 实验汽轮机运行负荷低于序号 1 实验,且排汽压力相对较高^[14],有利于一次水滴在叶片表面进一步凝聚成液膜,最终破裂生成更多更大的二次水滴,使得一次水滴数量浓度减少而二次水滴数量浓度增加.

从图 7(b)和图 7(c)不难发现,序号 1 实验测得的二次水滴平均粒径在 100 μ m 左右,平均速度为 50 m/s;而序号 2 实验测得的二次水滴平均粒径在 145 μ m 左右,平均速度为 20 m/s. 上述现象形成原因与两次实验主蒸汽流量不同有关,同时随着二次水滴粒径的增大、质量的增加,其主蒸汽流动的加速度变小,也会造成在测量区测得的二次水滴速度减小^[15]. 由于序号 2 实验中汽轮机运行负荷处于变化情况,而序号 1 实验属稳定工况,两次实验中二次水滴速度测量情况有别的原因还有待进一步实验研究.

从图 7(a)和图 7(b)还可以发现,在第 7 个测点即叶片 785 mm 处,二次水滴粒径和湿度有一个突然增大的现象. 通过末级叶片的结构分析可以发现,拉筋的位置在第 8 个测点附近,根据末级主汽流运

动的扩张可知,第7测点可能处于蒸汽流经拉筋后流向的位置.由于拉筋对主汽流具有一定的扰动作用,使蒸汽压力、温度、流速减小,容易在拉筋迎汽流一侧上形成液膜,并在主汽流作用下破裂生成更多的二次水滴^[16].图8是该汽轮机末级叶片拉筋的照片,从照片上可知上面一道拉筋高度是752 mm左右.由于在末级叶片上的汽流是扩张的流动,因此,二次水滴经过200 mm的流动,正好到达7号测点的位置.

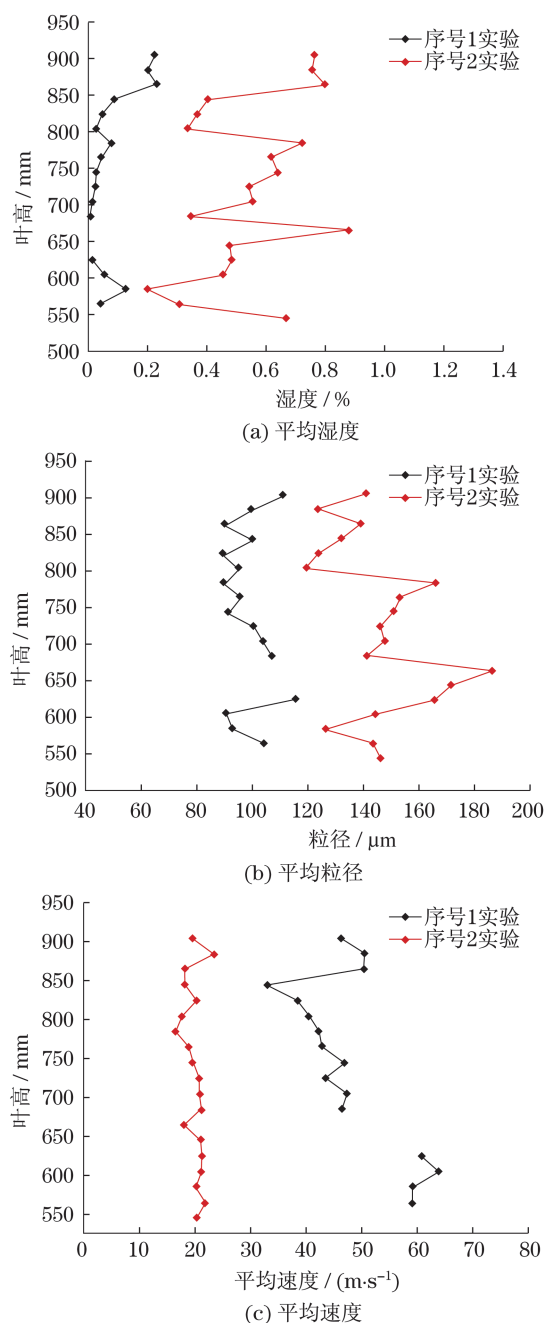


图7 两次实验二次水滴参数测量结果

Fig.7 Measurement results of coarse water droplets parameters in the two experiments



图8 汽轮机末级叶片

Fig.8 Last stage blade of the steam turbine

同时,由图7(a)和图7(b)可以发现,相对于序号1实验,序号2实验中7,8,9这3个测点测得的二次水滴粒径与湿度的结果比4,5,6这3个测点测得的结果都有了明显的增加.其原因是由于此时汽轮机运行负荷从250 MW逐渐增加到280 MW,其背压升高,蒸汽温度有一定的上升,但汽轮机末级叶片表面温度上升具有一定的延迟,以致叶片的温度低于主蒸汽的温度,从而使得叶片上更容易凝结形成液膜,进而产生更多的二次水滴.

此外,从图7(a)和图7(b)还可以发现,第13个测点,即在叶高665 mm处,序号2实验测得的二次水滴的粒径和湿度也出现急剧上升的现象,此处测量时汽轮机的运行负荷由260 MW下降到252 MW,但由于序号1实验并未测得该点的有效数据,二次水滴产生如此较大的变化还有待进一步的实验研究.

4 结 论

a. 基于SFSEI原理研制的湿蒸汽二次水滴图像探针能够有效地捕获汽轮机末级叶片后侧湿蒸汽二次水滴图像,通过对二次水滴图像的识别和处理可以同时获得其粒径、速度参数.

b. 通过对两次二次水滴测量实验的对比分析可知:汽轮机运行负荷较低时,由于排汽压力相对较高,容易形成粒径较大的二次水滴,且二次水滴湿度也相应增加,同时二次水滴运动速度受主蒸汽流量和二次水滴粒径影响较大.

c. 当汽轮机负荷升高时,由于叶片表面温度上升延时,在开始的一段时间,容易在叶片上形成更多水膜,进而使二次水滴有一定的增加.此外,主蒸汽流经拉筋后,受拉筋的影响也会产生更多的二次水滴.

参考文献:

- [1] MOORE M J, SIEVERDING C H. Two-phase steam flow in turbines and separators: theory, instrumentation, engineering[M]. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1976.
- [2] 蔡小舒, 苏明旭, 沈建琪. 颗粒粒度测量技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [3] PETR V, KOLOVRATNIK M. Modelling of the droplet size distribution in a low-pressure steam turbine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2000, 214(2): 145 - 152.
- [4] KLEITZ A, DOREY J M. Instrumentation for wet steam[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2004, 218(1): 811 - 841.
- [5] WALTER P T. Wetness and efficiency measurements in L. P. turbines with an optical probe as an aid to improving performance[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1987, 109(1): 85 - 91.
- [6] 李锴, 尚德敏. 超声波检测汽轮机中水蒸汽湿度方法的探讨[J]. 热能动力工程, 2002, 17(11): 559 - 560, 564.
- [7] WACHTER J. An optical probe for measuring the moisture and droplet size of wet steam in turbines [C]// Particulate Laden Flows in Turbomachinery Conference. USA: ASME, 1982.
- [8] 张智慧, 高铁瑜, 李皓璠, 等. 气液两相液滴群撞击法湿度测量实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6432 - 6440.
- [9] KLEITZ A, LAALI A R, COURANT J J. Water droplet sizing in LP and HP wet steam turbines[C]// Fluid Machinery Forum. USA: ASME, 1991.
- [10] LANFORD R W, MOORE M J. The measurement of steam wetness fraction in operating turbines[C]// Sixth Thermodynamics and Fluid Mechanics Convention. Cambridge, UK: Cambridge University, 1976.
- [11] 王娜, 张弘, 蔡小舒. 二次水滴可视化探针的设计[J]. 热力透平, 2006, 35(2): 79 - 82.
- [12] 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, 37(1): 26 - 29.
- [13] 张晶晶. 基于单帧单曝光图像法的多相流速度场和粒度分布测量研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2011.
- [14] 李亮, 李瑜, 吴晓明, 等. 汽轮机中湿蒸汽两相凝结流动研究[J]. 热力透平, 2008, 37(4): 235 - 239.
- [15] 李春国, 王新军, 王贤钢, 等. 汽轮机静叶栅中水滴运动与沉积规律的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1076 - 1080.
- [16] XIAOSHU C, YANHUI X, HAO L. A novel integrated image probe and measurements of wet steam flow in LP turbine [C]// Wet Steam Conference. Prague, 2016.

(编辑: 董伟)