

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0265-05

# 激光散射干度传感器测量的数据处理方法的研究

何贵振 刘海波 梅程强 周慧敏

(吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要** 主要研究利用激光散射干度传感器对火力发电站汽轮机末级蒸汽干度测量的数据处理方法。首先, 利用 Mie 散射理论的结果计算出的水蒸气的相函数, 通过查表并进行反演拟合得出汽轮机末级液态水滴的众数半径; 接着根据蒸汽凝水粒子尺度的广义 Gamma 分布, 利用前面所求的液态水滴众数半径和相关的谱参数来计算液态水的含量; 然后利用汽轮机中的压力传感器和温度传感器所测得的汽轮机内部的蒸汽压力和温度, 通过理想气体状态方程计算出干蒸汽的含量; 最后利用所得液态水的含量和干蒸汽含量根据蒸汽干度的定义计算出了出汽轮机末级的蒸汽干度值。

**关键词** 传感器; 干度; Mie 散射理论; EDA 仿真

中图分类号 TB22 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0265

## Study about Data Processing of the Measurement of Laser Scattering Wetness Sensor

He Guizhen Liu Haibo Mei Chengqiang Zhou Huimin

(College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012 China)

**Abstract** Using the laser scattering wetness sensor, the data processing method of turbine last stage wetness measuring in the thermal power station has been researched. Firstly, we calculate the results of the vapor phase function using Mie scattering theory, and get the most probable radius of liquid water droplets at the end-turbine by the method of the look-up table and inversion fitting; Then according to the generalized Gamma distribution of the steam condensation water under the particle size, using the most probable radius of liquid water droplets we get before and using some related spectrum parameters to calculate the of liquid water content at the end-turbine; then using the pressure and temperature in the steam turbine and according to the ideal gas equation to calculate the dry steam content, the temperature and pressure is measured by temperature sensor and pressure sensor in the turbine; At the end, use the liquid water content, dry steam content and the definition of dryness fraction to calculate the dryness fraction at end-turbine.

**Key words** sensors; wetness; Mie scattering theory; EDA simulation

## 1 引言

近些年来, 如何提高火力发电站的发电效率成为人们所密切关注的问题。蒸汽干度在火力发电站的汽轮机中是一个极为关键的参数, 蒸汽在汽轮机中的膨胀做功, 遵循朗肯循环, 为了提高汽轮机的工作效率, 应尽可能的提高蒸汽机的初始压力和初始温度, 初始温度一般在 540~550 摄氏度之间, 但是由于金属材料的限制, 所以做完功的乏汽应尽可能低, 这样又带来一定的问题, 即乏汽温度和压力

又不可能降至更低的值, 因为如果乏汽压力降为  $0.4 \times 10^5$  Pa, 蒸汽干度降为 0.718, 汽轮机末级中蒸汽携带的水珠将会使得蒸汽的动能损耗, 同时由于水珠进入转动叶片的方向和主蒸汽流的流向不一致, 造成汽轮机的叶片受到夹杂着大量水滴的湿蒸汽冲击而迅速损坏, 即水蚀, 每次维修的费用以及停止发电也势必会造成巨大的经济损失。总之, 干度的大小不仅仅和所含热量有关, 而是关系到安全、效率甚至成败的问题; 蒸汽干度过大或者过小,

**作者简介:** 何贵振(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事集成电路设计方面的研究。E-mail: higildedzest@hotmail.com

**导师简介:** 刘海波(1958-), 男, 副教授, 主要从事传感器方面的研究。E-mail: liuhaibo209@163.com

都会直接或者间接的造成火力发电厂经济效益的降低;蒸汽干度的测量以及实时监控变得极为重要。本文运用光学方法中的角散射法,早在 1957 年, Penndorf<sup>[1]</sup>就给出了对于球形粒子的 Mie 散射系数。1965 年, Godbois 等<sup>[2, 3]</sup>开始从汽液两相流的角度研究水粒子的散射问题。1970 年, Wyler<sup>[4, 5]</sup>就将激光散射探管的方法用于测量汽轮机低压缸的含水量。1985 年, 日本日立公司 Takeshi Sato 等<sup>[6]</sup>提出了采用光纤导光的测量仪器的美国专利。而在国内, 1999 年, 朱震等<sup>[7]</sup>提出了 Mie 理论的高精度算法; 2006 年, 国防科技大学的黄竹青等<sup>[8]</sup>根据激光散射理论和 Mie 散射理论, 利用半导体激光器发射出三个不同波长的光能够在线测出汽轮机末级蒸汽湿度及水滴颗粒大小和分布, 为监控和减少湿蒸汽对汽轮机的危害提供最直接的数据。

## 2 基本理论

### 2.1 球形粒子的散射相函数和谱分布

根据 Mie 散射理论和斯托克斯关系, 我们可以得到单粒子的散射相函数。然后对单个粒子相函数与相应谱分布的乘积在全部半径范围内积分可得到粒子群的散射相函数:

$$p(\theta) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} P(\theta, r) n(r) dr \quad (1)$$

上式中蒸汽凝水粒子的尺度谱分布是未知的, 目前尚无完整的理论可以确定何以形成某种形式分布, 在实际要进行的计算中采用较为普遍的广义伽马分布:

$$n(r) = ar^{\alpha} \exp(-br^{\gamma}) \quad (2)$$

其中  $a, \alpha, b, \gamma$  均为谱参数,  $n(r)$  的单位是个/ $\text{cm}^3$ , 几条不同谱分布参数的数据如表 1 所示。

表 1 几条不同谱分布参数的数据表

Table 1 data of distribution of several different parameters

Curve	$a$	$\alpha$	$b$	$\gamma$
1	1.30	2.00	$2.000000 \times 10^{-2}$	1.00000
2	0.30	2.50	$3.333334 \times 10^{-2}$	1.00000
3	1.20	2.00	$2.666667 \times 10^{-2}$	1.00000
4	3.00	2.00	$2.000000 \times 10^{-2}$	1.20000
5	50	1.0	$1.333333 \times 10^{-2}$	1.00000
6	200	0.6	$6.666667 \times 10^{-3}$	1.00000
7	400	0.2	0.002000	0.80000

上面的参数表 1 所对应的蒸汽凝水粒子的尺度谱分布曲线如图 1 所示。

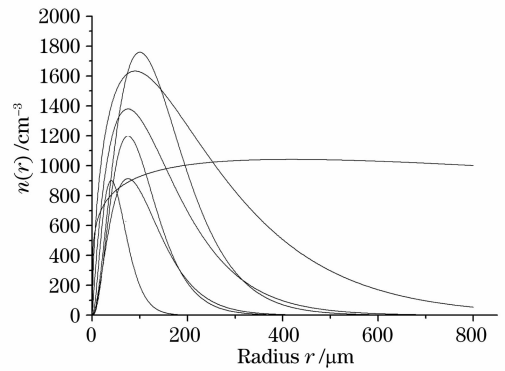


图 1 表 1 对应的蒸汽凝水粒子的尺度谱分布  
Fig. 1 Curves of steam condensation granule's scale according to table 1

与谱分布相关的几个量为

$$\text{平均半径} \quad r_m = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} n(r) r dr}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} n(r) dr}, \quad (3)$$

$$\text{有效半径} \quad r_e = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} n(r) r^3 dr}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} n(r) r^2 dr}, \quad (4)$$

$$\text{众数半径} \quad R_c = \frac{\alpha}{b}, \quad (5)$$

众数半径  $r_c$  为对应的  $n(r)$  最大值的  $r$  值。对  $n(r)$  在空间积分便可得到液态水含量 LWC, 单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$

$$\text{LWC} = \frac{4}{3} \pi \rho \int_0^{\infty} r^3 n(r) dr. \quad (6)$$

根据谱分布和给出的概率  $P$ , 可以定义最大粒子半径  $r_{\max}$ 。取  $N = \int_0^{\infty} n(r) dr$ , 则使  $\int_0^R \frac{n(r)}{N} dr = 1 - P$  的  $R$  值即为最大粒子半径  $r_{\max}$ 。谱宽度  $r_w$ , 定义为  $n(r)$  最大值的二分之一对应的两个半径之差。

将(2)式代入液态水含量公式(6)式得

$$\text{LWC} = \frac{4}{3} \pi \rho a \int_0^{\infty} r^{\alpha+3} \exp(-br^{\gamma}) dr, \quad (7)$$

令  $x = br^{\gamma}$ , 则有  $r = (\frac{x}{b})^{1/\gamma}$ ,  $dr = \frac{1}{b\gamma} (\frac{x}{b})^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} dx$  代入(7)式并进行化简可得

$$\text{LWC} = \frac{4}{3} \pi \rho a \frac{1}{b\gamma^{\frac{\alpha+4}{\gamma}}} \int_0^{\infty} x^{\frac{\alpha+4}{\gamma}-1} \exp(-x) dx, \quad (8)$$

其中  $\int_0^{\infty} x^{\frac{\alpha+4}{\gamma}-1} \exp(-x) dx$  是 Gamma 函数。令  $s = \frac{\alpha+4}{\gamma}$ , 由 Gamma 函数  $\Gamma(s) = \int_0^{\infty} x^{s-1} e^{-x} dx$  可得

$$\text{LWC} = \frac{4}{3} \pi \rho a \frac{1}{b\gamma^s} \Gamma(s), \quad (9)$$

单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

## 2.2 蒸汽干度的计算

众所周知,把水加热后会产生水蒸汽,在一定的空间中,如果单位时间内从液态水转化为气态水的分子数目与从气态水转化为液态水的分子数目相等,则称这样的水蒸汽为饱和水蒸汽。一般情况下的水蒸汽中都或多或少的含有悬浮的液态水滴,我们把含有悬浮的液态水滴的饱和蒸汽称为湿饱和蒸汽;如果饱和蒸汽中不含有悬浮的液态水滴,只有气态的水分子存在,则称此饱和蒸汽为干饱和蒸汽。所谓蒸汽干度就是指湿饱和蒸汽中干饱和蒸汽所占的百分数<sup>[9]</sup>,通常用  $\chi$  表示:

$$\chi = \frac{\text{干饱和蒸汽的质量}}{\text{湿饱和蒸汽的总质量}} \quad (10)$$

对于饱和水来说,蒸汽干度  $\chi = 0$ ;对于饱和干蒸汽来说,蒸汽干度  $\chi = 1$ 。由于可以算出了蒸汽中液态水的含量,也可以算出干蒸汽的含量,所以这里的式(10)可以表示为:

$$\chi = \frac{\text{干饱和蒸汽的总质量}}{\text{液态水的总质量} + \text{干饱和蒸汽的总质量}} \quad (11)$$

## 3 实验设计

### 3.1 传感器结构及电路原理设计

本论文所设计出的传感器结构如图 2 所示。主要包括:激光散射装置(包括激光器电源),光纤瞄准装置,光电转换装置,A/D转换器,单片机数据采集和计算机等六个主要部分组成。其中在激光器电源部分设计了具有稳定输出功率的电源电路,在光电转换部分采用了具有高精度和良好动态特性对

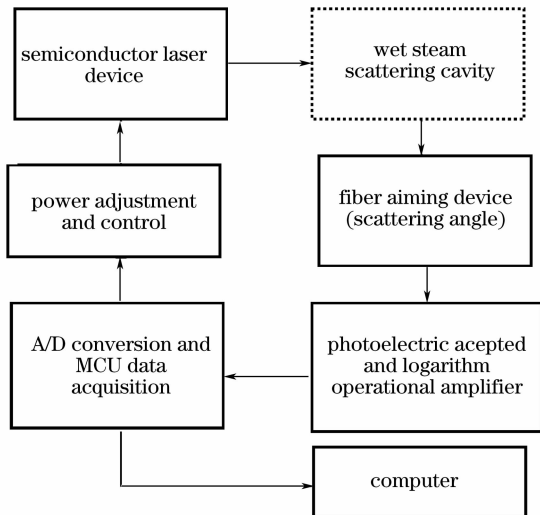


图 2 传感器系统结构的设计

Fig. 2 Design of system structure of the sensor

数运算放大器-LOG114。而对于湿蒸汽散射腔光学窗口的设计应该根据实际的工作情况采取有效的防雾化措施,以保证测量的精度要求。

### 3.2 数据处理的整体设计

利用上面传感器系统设计所给出的信号,我们对数据进入计算机以后的处理方法进行了详细的设计,并且利用现有的EDA工具对该设计进行了实际的仿真实验。该数据处理系统整体设计主要包括六个部分:串并行数据转换部分(S/P convert)、时钟产生模块部分(Clock)、众数半径模块部分(RC)、液态水含量模块部分(LWC)、蒸汽干度模块部分(Dryness)、寄存器输出部分(REG\_OUT)。该设计的整体框图如图 3 所示:

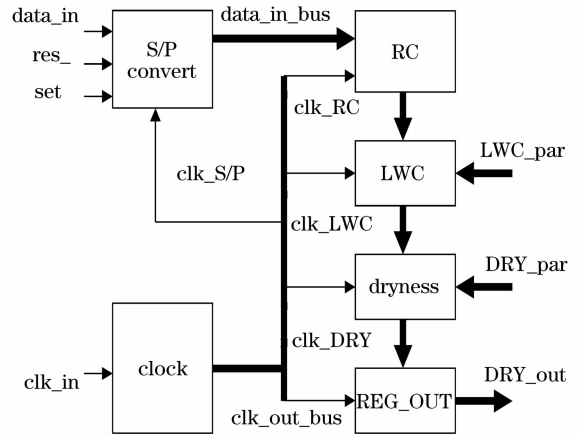


图 3 整体设计框图

Fig. 3 The overall design diagram

其具体的工作情况是:首先由外部的标准时钟信号经过时钟产生模块生成其他各个模块所需要的不同频率的时钟信号;由前面的合作者通过 A/D 转换器给出串行输入数据信号经由串并行数据转换模块转换成并行数据,交给众数半径模块部分;结合时钟和相关参数利用众数半径模块求出粒子的众数半径,然后再作为液态水含量模块的输入部分;通过液态水含量模块再配以适当的参数求出汽轮机中液态水的含量,求出了液态水含量之后,再作为蒸汽干度模块的输入部分;蒸汽干度模块部分利用外部的温度传感器和压力传感器给出的温度和压力信号求出干饱和蒸汽的密度,在配上液态水含量模块送进来的液态水的含量即可求出汽轮机末级蒸汽的干度;最后求出的干度经由寄存器输出模块输出,给出最终的蒸汽干度。求出的蒸汽干度供给后端的监控设备并反馈到前面的控制部分来控制汽轮机中的蒸汽干度情况,使其保持在一定的范围之内,以

求使火力发电站的整体经济效益保持在一个相对较高的水平。

### 3.3 各个模块的实验结果

#### 3.3.1 众数半径模块

图4给出了液态水滴的众数半径模块在Quartus II中的仿真结果的波形。

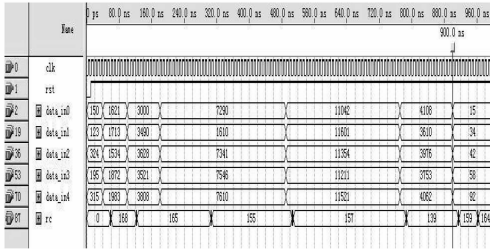


图4 众数半径模块的仿真波形

Fig. 4 Simulation wave form of the most probable radius module

从仿真结果中可以很明显的看出，通过给定的相关输入信号，在经过一定的时钟周期之后，便会输出相应的液态水滴的众数半径  $R_c$  的值，而且输出的  $R_c$  值与我们所预期的输出结果一致，虽然有一点点毛刺现象的出现，但是这些毛刺完全不影响它作为后面液态水含量模块部分的输入端口。

#### 3.3.2 液态水含量部分

图5显示了液态水含量模块的仿真结果。

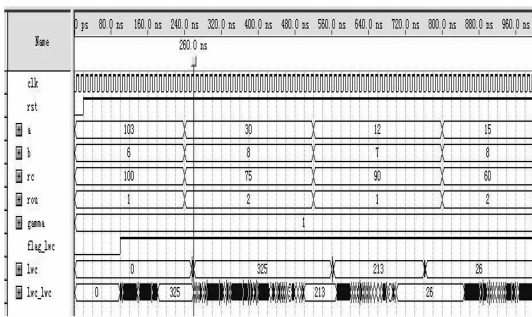


图5 液态水含量模块的仿真结果

Fig. 5 Simulation result of liquid water content module

从仿真结果中可以看出，在输出标志符 flag\_lwc 输出为 1 之后不到 20 个周期的时间内，液态水含量输出信号 lwc 便可以得到相应的输出值，且与理论的结果相一致。

#### 3.3.3 干饱和和蒸汽密度部分

图6给出了干饱和和蒸汽密度部分的仿真结果。

仿真结果显示，对于不同的温度和压力，在不到 10 个时钟周期的时间内便可以给出相应的干蒸汽密度值，且其结果与我们计算的结果一致。

#### 3.3.4 蒸汽干度部分

该蒸汽干度模块部分在 Quartus II 中的仿真结果如图 7 所示。

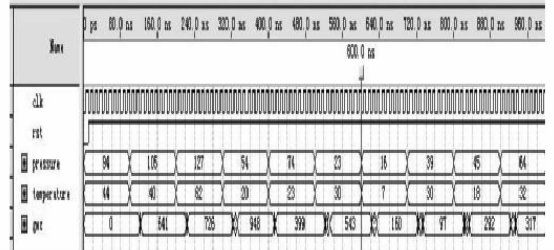


图6 干饱和和蒸汽密度部分的仿真结果

Fig. 6 Simulation result of the part of the dry saturated steam

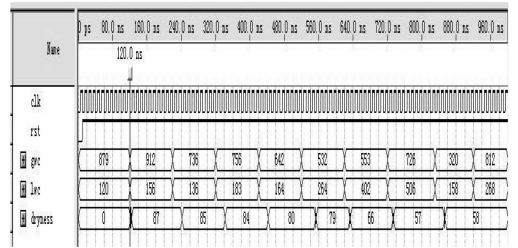


图7 蒸汽干度模块的仿真结果

Fig. 7 Simulation result of steam wetness module

从仿真结果中可看到，对于每一组输入的液态水含量 (LWC) 和干蒸汽密度 (GWC) 的值，在低电平有效的复位信号不起作用的情况下，大约 10 个时钟周期的时间，即可得出相应的蒸汽干度值 (dryness)，且几乎没有毛刺，结果比较理想。

#### 3.3.5 全部模块整合

将前面设计所提出的六个模块整合到一起，用 Quartus II 进行仿真，仿真结果如图 8 所示。

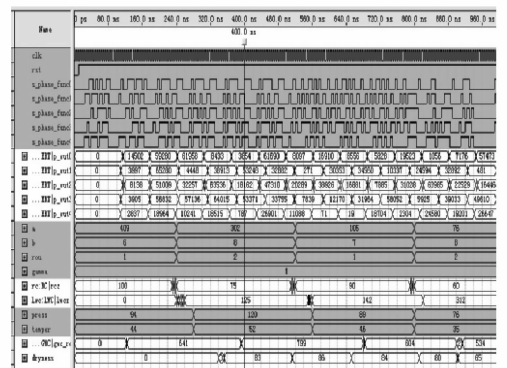


图8 整体设计的仿真结果

Fig. 8 Simulation result of the whole design

上面的仿真结果无论是我们插入的中间值还是我们最终需要的蒸汽干度值，都符合我们的设计要求。

## 4 结 论

本论文主要内容是对汽轮机末级蒸汽干度测量的数据处理方法进行研究,采用 Verilog HDL 硬件描述语言、Altera 公司的 FPGA 集成开发环境 Quartus II<sup>[10~12]</sup> 软件对数据处理部分进行设计和仿真。首先给设计定义了一个整体的框架,包括六个部分,接着分别对其中的四个核心模块进行设计、综合和仿真,最后将前面设计的各个部分整合到一起进行整体的设计、综合和仿真,设计的结果和仿真的结果完全符合我们的设计需求。该工作为我们以后实际进行干度传感器的研制打下了良好的基础。

### 参 考 文 献

- 1 R. B. Penndorf. New tables of total mie scattering coefficients for spherical particles of real refractive indexes ( $1.33 \leq n \leq 1.50$ ), *Journal Optical Society of America*, 1957, **47**(11): 1010~1015
- 2 S. E. Godbois. Droplet Studies in Supersonic Two-Phase Steam Flow with Normal Shocks[D], University of Conn., 1965
- 3 V. V. Kryshev. Interaction between moisture and runner blades and moisture removal in steam turbines[J], *Heat Transfer Soviet Research*, 1970, **2**(2): 48~69
- 4 J. S. Wyler. Moisture measurements in a low2 pressure steam turbine using laser light, scattering Probe[J]. *Tran. ASME.*, 1978, **10**(100): 544~548
- 5 P. T. Walters. Optical measurements of water droplets in wet steam flows[J]. *Inst. Mech Engrs. Conf. Pub.*, 1973, (3): 66~74
- 6 Takeshi Sato. *Stream Wetness Measuring Apparatus* [P], US Patent, 1985
- 7 Zhu Zhen, Ye Mao, Lu Yong *et al.*. Light-scattering measurement of the intensity of Mie theory of high-precision algorithm [J]. *Photoelectric Laser*, 1999, **10**(2): 135~138  
朱震,叶茂,陆勇等. 光散射粒度测量中 Mie 理论的高精度算法[J]. *光电子·激光*, 1999, **10**(2): 135~138
- 8 Huang Zhuqing, Yang Jiming, Sun Chunsheng *et al.*. The application of the laser scattering theory in the steam turbine humidity and drop diameter measurement [J]. *Power Engineering*, 2006, (2): 241~244  
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, (2): 241~244
- 9 Gu Yingming. Thermal engineering foundation, Production Division of Water conservation electric power department[M]. 1986  
谷应鸣. 热工学基础,水利电力部生产司,1986
- 10 Quartus II Handbook[S]. Altera Corporation. May 2006
- 11 Designing with SynplifyPro and Quartus II Software[S]. Altera Corporation, 2004
- 12 IEEE Standard Verilog Hardware Description Language [S]. IEEE Computer Society, 2001