

# 超声波检测汽轮机中水蒸气湿度方法的探讨

李 锴, 尚德敏

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 理论上探讨了使用超声波检测湿蒸气两相流湿度的方法, 并得到了精确的解析式; 使用脉冲时差法测定两相流中的声速, 简便、快捷、精确。对超声湿度检测计的组成、工作原理作了理论上的预测。

**关 键 词:** 超声波; 水蒸气; 湿度; 声速; 检测

中图分类号: TK264.2 文献标识码: A

## 1 引 言

大型汽轮机的安全运行是一个很重要的问题。进入汽轮机内的水蒸气的膨胀过程一般由多级叶片来完成, 到达最后几级叶片的水蒸气温降、压降很大, 水蒸气可能凝结成水, 称之为湿蒸气两相流。正常情况下, 凝结的水滴直径一般都不会超过  $1 \sim 2 \mu\text{m}$ , 不会造成安全上的问题。当蒸汽湿度过大时, 汽相中夹带的水滴直径较大, 一般在几个微米到几十个微米之间, 甚至更大。这样的水滴质量和惯性很大, 进入汽轮机后对叶片产生水蚀, 造成很大危害, 严重时会导致叶片的断裂、损毁。因此, 蒸汽湿度的检测对汽轮机的安全运行很重要。

蒸汽湿度测量的方法有很多种, 常用于测定蒸汽发生器出口到汽轮机之间的方法是化学法和原子—化学法, 两种都是部分蒸汽取样法。其主要缺点是: 主汽流受到干扰, 结果不够精确, 而且设备尺寸大、复杂, 使用繁琐、费事。

超声波检测蒸汽湿度的原理是<sup>[1]</sup>: 声波在气液两相混合物中的传播速度明显小于在纯液与纯气中的传播速度, 并且, 由于气液两相含量的变化, 也会引起声速的变化, 这就为超声波检测蒸汽湿度提供了可能。本文就是利用这个原理, 探讨超声波检测汽轮机中含液量的可行性, 以及与微机结合, 制成一体化、智能化检测计的可行性。

## 2 汽水混合物中湿度与声速的关系

对于汽轮机中的湿蒸气两相流, 液态水的含量

较少, 两相流动中汽水之间没有速度滑移, 速度及方向总能保持一致, 从而形成均匀的混合体, 流动可以用均质模型描述。并作以下假设: (1) 两相流气液等温, 不可压缩; (2) 两相流中各处压力相等; (3) 超声波在两相流中传播设为绝热过程。

由以上假设, 汽水混合物的声速采用 Wood 绝热声速公式<sup>[2]</sup>:

$$c^2 = c_1^2 \frac{\rho_1}{x_1 \rho} \quad (1)$$

其中:  $c_1$  为同等条件(湿度、压力)下纯水蒸气中的声速,  $\text{m/s}$ ;  $\rho_1$  为水蒸气的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho$  为汽液混合物的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $x_1$  为水蒸气的体积组分; 下标 1, 2 分别表示气液两相, 下同。则

$$\begin{aligned} \rho &= x_1 \rho_1 + x_2 \rho_2 \\ &= (1 - x_2) \rho_1 + x_2 \rho_2 \end{aligned}$$

则式(1)变为

$$\left(\frac{c}{c_1}\right)^2 = \frac{\rho_1}{(1 - x_2)[(1 - x_2) \rho_1 + x_2 \rho_2]}$$

最后整理得

$$Ax^2 + Bx + C = 0 \quad (2)$$

其中:  $A = \rho_1 - \rho_2$

$$B = \rho_2 - 2\rho_1$$

$$C = \rho_1 \left[1 - \left(\frac{c_1}{c}\right)^2\right]$$

从而得到一个二元一次方程(式(2)中的  $x$  即  $x_2$ ), 从中可以解出液态水的体积组分  $x$ , 进而求出其质量组分, 即蒸汽湿度, 定义为水分的质量占整个汽水混合物的总质量的份额, 即

$$X = \frac{x \rho_2}{\rho} = \frac{x \rho_2}{(1 - x) \rho_1 + x \rho_2} \quad (3)$$

## 3 声速的测量

为了便于测量汽轮机中蒸汽湿度, 在叶片附近加测量管道, 用于导入蒸汽及安置测量设备, 文献[3]中提供了很多测量声速方法, 鉴于管道中流体

的流动会对声波的传播产生作用, 本文采用脉冲时差法测量声速。这种方法不仅能得到湿蒸气中的声速, 同时还能得到湿蒸气两相流的流速, 一举两得。其原理是通过测量超声脉冲沿两相流顺向和逆向传播的声速差来求得流速和声速。

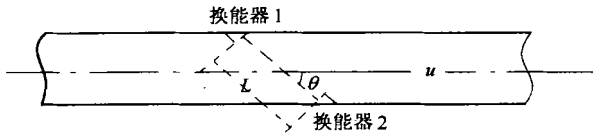


图1 换能器安装示意图

对于如图1所示安装的超声换能器, 假设两换能器间距离为  $L$ , 换能器安装的方向和轴线之间的夹角是  $\theta$ , 超声波在湿蒸气中的传播速度为  $c$ , 则当管道内水汽流速为  $u$  时, 超声波顺向传播声速  $c_1$  和逆向传播声速  $c_2$  分别为

$$\begin{aligned} c_1 &= L/t_1 = c + u \cos \theta \\ c_2 &= L/t_2 = c - u \cos \theta \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $t_1, t_2$  为超声波顺向、逆向传播时间。则由此可以得到两相流的流速为

$$u = \frac{L}{2 \cos \theta} \left( \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) = \frac{L}{2 \cos \theta} \cdot \frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2} \quad (5)$$

同时也得到湿蒸气中的声速

$$c = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) = \frac{L}{2} \cdot \frac{t_1 + t_2}{t_1 t_2} \quad (6)$$

由式(5)得到的流速与管道截面积的乘积即是流量; 由式(6) 求出气液混合物中的声速  $c$ , 就可以利用方程(2) 解得水的体积组分。而且, 由式(5)、(6) 可见, 测得的流速  $u$  与湿蒸气的声速  $c$  无关, 因此, 用时差法测量两相流中的声速将不受湿蒸气成分改变的影响, 同时也大大减小了温度对测量的影响, 这对于现场测量是十分有利的。

## 4 讨论

### 4.1 几个参数的来源

方程式(2) 中含有几个与水蒸气和液态水有关的参数, 其来源分别为:

4.1.1 两相流中水蒸气和液态水共存, 而且是实际气体和液体, 不能按照理想气体和液体求其状态参数  $\rho_1$  和  $\rho_2$ , 应查阅相关的图表得到。为了方便利用微机计算, 由下面的状态方程可以求出过热或饱和水蒸气的比容<sup>[4]</sup>:

$$\frac{p v_1}{T} = 455.3 - 23.14 \left( \frac{p}{27.586 \times 10^5} \right)^{1.35} \left( \frac{588.9}{T} \right)^{5.58}$$

式中:  $p$  为压力, Pa;  $T$  为绝对温度, K。由此可得水蒸气密度  $\rho_1 = 1/v_1$ 。而对于饱和液态水, 可由下式求得其密度<sup>[5]</sup>:

$$\rho_2 = 642.91 \Delta T_r^n + 315.46$$

其中:  $\Delta T_r = (647.3 - T)/274.15$

$$n = 0.3745 + 0.0056 \Delta T_r -$$

$$0.0505 \Delta T_r^2 - 0.0317 \Delta T_r^3$$

至于未饱和水, 与相同温度下饱和水的密度相差不大, 工程上可按上式计算。

4.1.2 蒸汽相的声速  $c_1$ , 也不能按照理想气体声速公式 ( $c_1 = \sqrt{\frac{kRT}{M}}$ ,  $k$  为绝热系数), 而应该用下面的公式<sup>[6]</sup>

$$c_1^2 = \frac{RT}{M} \left( 1 + \frac{R}{C_{v,m}} \right) \quad (7)$$

其中:  $R$  为通用气体常数,  $R = 8314 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为绝对温度, 由测温装置测得;  $M$  为水蒸气的分子量,  $M = 18$ ;  $C_{v,m}$  为  $T$  温度下水蒸气定容摩尔比热, 可由水蒸气图表查得。

另外, 利用迈耶公式得出<sup>[7]</sup>

$$\frac{C_{v,m}}{R} = (a_1 - 1) + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4 \quad (8)$$

其中  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  为常数, 对于水蒸气  $a_1 = 4.070$ ;  $a_2 = -1.108 \times 10^{-3}$ ;  $a_3 = 4.152 \times 10^{-6}$ ;  $a_4 = -2.964 \times 10^{-9}$ ;  $a_5 = 0.807 \times 10^{-12}$ 。

由以上数据和公式, 得最后结果为

$$x = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (9)$$

### 4.2 蒸汽湿度和声速的关系

由以上公式及各参数, 可以得到水蒸气湿度和声速的关系, 如图2。图中绘出三个温度下的湿度与声速的关系, 由于湿度一般不会太大, 所以图中仅取 0 ~ 20%。三条曲线均表明 随着水蒸气湿度的不同, 声速也相差很大, 因此完全可以利用本文所构想的方法进行湿蒸气两相流的精确检测; 而且随着湿度的增加, 声速随之减少, 这与文献[1] 的结论也是完全一致的。从图中还可以看出, 对于同一湿度而言, 温度越高, 声速也越大, 这符合气体或液体中声速随温度增大而增大的规律。值得指出的是, 温度达到水的临界温度 373.99 °C 以上时, 不再有液态水存在, 全部是干蒸汽, 因此湿度为 0, 就无所谓湿度和声速的关系了。

(下转第 564 页)

通过热力学第一和第二定律内含经济理论的分析,使我们初步地明确热力学分析与经济学分析相结合还另有一条新途径。同时对热力学两定律本身存在着的误导和不确切的理解进行了一次清理,提出我们的意见,对与否还需要进一步讨论。我们体会研究这类问题需要有辨证的观点。一过程进行带来负面影响,但其另一面又可能对它是一补偿,如经过一个过程,环境发生了变化,经济上必然再经历一个相应的进化(Co-evolution)来弥补给环境带来的变化。研究这些问题时常使我们处于一个“明与暗交界”(penumbra)的两可之间。在这里B可以是A,也可以是非A,要刻意追求质量的变化才是经济过程的本质。对于热力学来说不也是一样吗?我们常说的一本热力学发展史,就是在使实际过程向理想过程趋近的刻意追求中发展起来的。说到这里我

们才能理解 Geotrgescu Roegen 关于“熵定律本是所有自然定律中,本质上最经济的经济过程”的深刻内容。

当今,人类面临着持续发展可能性的挑战,把代表质量指标的熵流置于经济理论的核心的这类暗喻尤显出其必要性。

参考文献:

[1] ROBERT U AGERS. Eco-thermodynamics: economics and second law [J]. *Ecological Economics*. 1998, 26: 189-209.  
 [2] GEORGESCU ROEGEN N. The entropy law and Economic Process [M]. Harvard University Press, Cambridge, Mass, 1971.  
 [3] DALY H E. Steady-state Economics[M]. Island Press, Washington D C 1991.

(渠源 编辑)

(上接第 560 页)

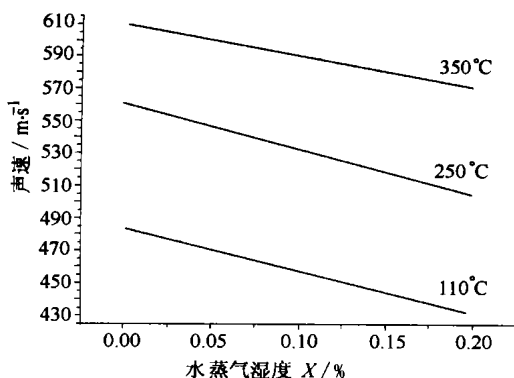


图 2 水蒸气湿度和声速的关系

4.3 可能存在的误差

本方法可能产生误差主要出现在声速的测量方面。在测定声波顺向和逆向传播时间时,应该考虑由于电路、电缆及换能器等产生的延时  $\tau_1, \tau_2$ <sup>[8]</sup>, 则式(5)、式(6)可表示为

$$u = \frac{L}{2 \cos} \left( \frac{1}{t_1 - \tau_1} - \frac{1}{t_2 - \tau_2} \right)$$

$$c = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{t_1 - \tau_1} + \frac{1}{t_2 - \tau_2} \right)$$

其中:  $\tau_1, \tau_2$  主要由测量设备本身的性质决定,因此只要确定了  $\tau_1, \tau_2$ , 就很容易准确测量声速。

4.4 检测计微机方案

为了提高检测的效率和准确性,整体检测过程可由微机来控制。整个检测装置主要有以下几个部分组成:一个测压装置,一个测温装置,两个超声波发射接收及测时装置和一台微机。

两个超声波发射接收及测时装置分别触发换能器 1 和换能器 2,使之发射超声脉冲并分别由对方接受,测得超声脉冲顺相传播时间和逆向传播时间。微机直接读取从超声波测时、测压、测温装置中传送来的数字信号,对它们进行预处理和计算,并在屏幕上以数据、曲线等形式显示各参数和最后结果,自动进行存贮或打印。

而且,还可以将用到的图表存到微机上,以备计算时查找;表中未有的数据,微机可以采用插值的方法获得。这样不仅迅速,还免除了人工查表的麻烦和误差。

最后,计算出的 X 还可以与标准湿度相比较,超标则进入报警或进行其他控制。

参考文献:

[1] 付志胜. 译. 苏联的随钻检测气侵技术[J]. 石油钻探技术, 1990 18(1): 10-12.  
 [2] 赵建福. 气液两相流动中的声速[J]. 应用基础与工程科学学报, 1999 9(3): 321-325.  
 [3] 同济大学声学教研室. 超声工业测量技术[M]. 上海: 上海人民出版社, 1998.  
 [4] 蔡颐年. 湿蒸气两相流[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.  
 [5] 陈则韶. 饱和液体密度的推算法和通用算式[J]. 工程热物理论, 2001 22(6): 9-12.  
 [6] 马大猷. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1983.  
 [7] 沈维道. 工程热力学[M] (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2001.  
 [8] 梁军汀. 微机化超声波气体流量计的研制[J]. 声学技术, 1995, 2(3): 210-213.

(渠源 编辑)

煤燃烧过程中汞释放的研究现状 = **Recent Advances in the Study of Mercury Release in a Coal Combustion Process** [刊, 汉] / WANG Quan-hai, QIU Jian-rong, WU Hao (National Key Laboratory of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 547 ~ 550

The average content of mercury in Chinese coals is higher than that found in coals of the United States and other countries, resulting in a relatively serious mercury-related pollution. The authors have summed up some study results concerning such pollution, focusing on the following aspects: distribution features of mercury found in coal, migration/transformation and emission characteristics as well as their control. **Key words:** mercury, coal, distribution law, migration/transformation, emission of pollutants

IGCC 电站中气化炉控制系统研究 = **A Study of the Control System of a Gasifier in a IGCC Power Plant** [刊, 汉] / NI Wei-dou WEI Si-liang, LIU Shang-ming (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 551 ~ 554

By way of analyzing the operating characteristics of a gasifier in an integrated gasification combined cycle (IGCC) power plant the basic configuration of a control system of the gasifier has been determined. On the basis of the gasifier dynamic characteristics a control system was designed. The results of its simulation indicate that the coupling factor between the two major links of the gasifier, namely, its temperature and syngas heating value, is relatively low. By using the control system designed by the authors it is possible to fulfill the main control aim of the gasifier. **Key words:** integrated gasification combined cycle (IGCC), gasifier, control system

部分煤气化结合流化床燃烧技术的联合循环(PGFBC-CC)发电系统参数分析 = **Parametric Analysis of a Partial Gasification and Fluidized Bed Combustion-based Combined Cycle (PGFBC - CC) Power Generating System** [刊, 汉] / YU Yan-fang, LIN Zhong-da, CAI Ning-sheng (Power Engineering Department, Southeastern University, Nanjing, China. Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 555 ~ 558

A relatively comprehensive parametric analysis was performed with respect to a typical partial gasification and fluidized bed combustion-based combined cycle (PGFBC-CC) power generating system and the main parameters influencing the system performance were identified. Furthermore, some beneficial measures and proposals have been put forward with a view to enhancing the performance of this type of power generating systems. **Key words:** partial gasification and fluidized bed combustion-based combined cycle system, power generating system, parametric analysis

超声波检测汽轮机中水蒸气湿度方法的探讨 = **Exploratory Study of an Ultrasonic Method for Detecting Steam Wetness in a Steam Turbine** [刊, 汉] / LI Kai, SHANG De-min (Department of Thermal Energy and Power Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 559 ~ 560, 564

The use of an ultrasonic method for detecting the two-phase flow wetness of wet steam is theoretically explored with an accurate analytical expression being obtained. The determination of sonic speed in a two-phase flow by the use of a pulse time-difference method features simplicity, rapidity and precision. The composition and operating principles of a wetness-detection ultrasonic device are predicted from an theoretical perspective. **Key words:** ultrasonic method, water steam, wetness, sonic speed, detection

热力学分析与经济理论结合的新探讨——从热力学定律中揭示其内含的经济理论 = **A New Exploratory Study on the Combination of Thermodynamic Analysis with Economic Theory - an Economic Theory Aimed at**