

流动蒸汽湿度测量方法的研究与比较

宁德亮, 高雷, 刘新全

(中国船舶重工集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要: 针对流动湿蒸汽湿度测量的重要性, 总结了目前用于测量流动蒸汽湿度的常用方法和正在探讨中的方法, 并分析了各方法在应用中的局限性。基于在相同的温度和压力下, 饱和湿蒸汽的等效介电常数不同, 则电容器的容量也不同这一原理, 提出并分析了采用圆筒形电容式传感器进行流动蒸汽湿度在线测量的新方法。标定试验结果表明, 这种传感器静态特性稳定, 在 12% 的湿度范围内, 汽流湿度与输出频率差之间呈现出一种较为明显的非线性关系。同时, 文中还提出了标定试验及传感器设计过程中需要注意的问题。

关键词: 流动蒸汽; 湿度测量; 等效介电常数; 电容法

中图分类号: TK26

文献标识码: A

引言

对于船用压水堆核动力装置和核电站而言, 都是利用湿饱和蒸汽来推动汽轮机做功的, 蒸汽湿度的存在不但会降低透平级的运行效率, 而且给运行机组的安全性带来隐患, 如对于一台 1 300 MW 的核电机组, 蒸汽湿度所造成的功率损失约为 70 MW^[1]。蒸汽湿度的测量是汽流特性研究的一个主要方面, 对核电机组安全运行具有重要的意义。自 20 世纪 70 年代以来, 蒸汽湿度测量技

术的研究取得了很大进展, 主要的测量方法包括: 氯根法、热力学法、光学法、示踪剂法、电导率法、分离法、临界速度法以及孔板测量法等, 较为常用流动湿蒸汽湿度测量的方法是氯根法、热力学法、光学法和示踪剂法, 但近年来, 微波法、超声波法、电容法等也正处于探讨之中。

1 流动蒸汽湿度测量的常用方法

蒸汽湿度可以定义为^[2]:

$$Y = m_f / (m_f + m_g) \quad (1)$$

式中: m_f 、 m_g —汽流中的水滴质量流量和蒸汽质量流量。目前, 应用于常规电站和核电站蒸汽湿度测量中较为成熟的方法有氯根法、热力学法、光学法和示踪剂法。

1.1 氯根法

氯根法常用于普通锅炉产汽的湿度测量。其测定原理是^[3], 在中性溶液中, 氯化物与硝酸银作用生成氯化银白色沉淀, 而过量的硝酸银与铬酸钾作用会生成红色铬酸银沉淀, 使溶液显橙色, 此时可以作为滴定的终点。滴入的硝酸银量可以表示出溶液中的氯化物含量, 用该方法测得蒸汽和锅水的氯化物含量之比即为饱和蒸汽湿度。氯根法适于测定氯化物含量为 5 ~ 100 mg/L 的水

样, 使用该方法时需要配制标准试剂, 分别对锅水和蒸汽进行采样、滴定和计算, 测量过程复杂、耗时长且误差较大。

1.2 热力学法

热力学法是自 20 世纪 60 年代开始发展起来的根据热力学理论测量蒸汽湿度的一系列方法。热力学法主要包括: 节流法、凝结法、加热法、蒸汽—空气混合法等, 它们都属于抽汽取样法, 即从蒸汽的主汽流中抽取蒸汽试样, 然后引向测量段。

1.2.1 节流法

节流法测量湿度的原理是将蒸汽试样在绝热节流的条件下降低到较低压力, 使节流后的蒸汽处于过热状态, 根据节流后蒸汽试样的压力 (p_2) 和温度 (t_2), 可以得到此时蒸汽的焓值。然后根据节流前后蒸汽焓值不变的条件, 结合节流前的蒸汽压力 (p_1) 和温度 (t_1), 即可求出主汽流的湿度值。

利用节流法制成的典型测量装置有, 德国研制的用于 Biblis 1 300 MW 核电站的蒸汽发生器出口处蒸汽湿度测量的节流式量热计^[4]。

1.2.2 凝结法

凝结法的测量原理是将抽取的蒸汽试样在冷凝器中凝结成水, 根据冷凝器中冷却水所吸收

的蒸汽凝结放热量来推算出主蒸汽的湿度值。应用该方法制成的较为成功的产品是英国 GEC 所研制的凝结式量热计^[5]。

1.2.3 蒸汽—空气混合法

蒸汽—空气混合法是在绝热条件下,将蒸汽试样与外界引入的干空气在混合室中混合,且保证混合后的空气中水分含量未达到饱和,根据质能守恒原理,可以求出抽取试样的湿度。混合前后空气中的蒸汽和空气的比例可由干湿球温度计来测量。德国汉诺威工业大学利用该方法研制了蒸汽—空气混合式量热计,用于测量 365 MW 和 515 MW 汽轮机的排汽湿度^[6]。

1.2.4 加热法

加热法是将饱和湿蒸气试样加热到干饱和状态或者过热状态,然后测量出蒸汽试样的流量、加入的热量和加热前后试样的热力参数变化量,来计算出主汽流的湿度。最为典型的应用加热法制成的产品是英国电力中心实验室(CERL)研制的过热式量热计^[7]。西安交通大学的李炎锋博士在这种量热计的基础上进行了改进,研制出了一套新型的加热法测量流动湿蒸气的测量装置。该装置采用双层套管结构,均匀热流密度加热蒸汽试样方式,减小了各种热损失,提高了湿度测量精度^[8]。

1.2.5 热力学法应用的局限性

对于节流法来讲,由于受到节流后压力降低和保证节流后蒸汽为过热状态的限制,所以节流法不适合用于测量低压区和湿度大于 8% 的湿蒸气;在凝结法中,由于要对取样流量、冷却水量、冷却水温度等多个参数进行测量,所以会同时引入多个较大的测量误差,使得湿度测量精度较低;蒸

汽—空气混合法,虽然不必测量抽取的湿蒸气量和热空气量,简化了测量装置,但为保证在混合室出口处空气中的水分含量未达到饱和,必须送入大量的热空气,因此当用该方法对汽轮机低压区蒸汽湿度进行测量时,需要配置一台容量很大的真空泵;加热法虽然有加热量、散热损失等误差来源,但与其它热力学法相比具有测量原理简单、精度较高、量热计使用方便等优点,仍是一种合适的湿度测量方法。

如上所述,热力学法均需要从湿蒸气的主汽流中抽取部分试样,然后引向测量段进行测量,故不能实现在线测量,测量过程耗时长。由于蒸汽试样的抽取要能充分代表主汽流的状态,所以热力学法的测量精度不但取决于测量环节,还要受到试样抽取环节的影响。

1.3 光学法湿度测量

蒸汽湿度的光学测量法是建立在光的散射原理基础上的,其基本原理是光线通过含有细微颗粒的均匀介质时,一部分光产生散射现象,另一部分光被颗粒吸收^[9]。光学湿度测量法主要分为两类:角散射法和全散射法(或称消光法)。

1.3.1 角散射法

角散射法是通过测量水滴对入射光的某一散射特性,然后根据 Mie 理论对测量数据进行处理求得被测汽流中水滴直径和蒸汽湿度的。根据 Mie 理论,当波长为 λ , 光强为 I_0 的线偏振光平行照射到直径为 d 的各相同性的球形颗粒上时,在散射角为 θ 、距离散射体 r 处的散射光强为:

$$I = (\lambda^2/8\pi^2) \times [(i_1 + i_2)/r^2] I_0 \quad (2)$$

式中: i_1, i_2 —与 θ 有关的强度函

数。

当散射颗粒的相对折射率 m 一定时,不同大小的颗粒对应着不同的散射光强分布。通过测量不同散射角的散射微粒光强,即可确定微粒的平均直径或直径分布。在用该方法测量蒸汽湿度时,流过散射区的蒸汽量可由测量点的蒸汽速度求得,水滴量可用公式计算得到:

$$m_t = \frac{\rho_l}{A} \frac{1}{6} \pi \sum_{i=1}^n D_i^3 N_i \quad (3)$$

式中: ρ_l —液相密度; D —水滴直径; N_i —单位时间的水滴数。德国阿亨工业大学研制的角散射法光学探针,用来测量流动湿蒸气的湿度和汽流中的水滴直径。

1.3.2 全散射法

全散射法是通过测量湿蒸气对入射光的衰减来确定水滴直径和蒸汽湿度的。当一束波长为 λ 的平行光束穿过含有水滴的蒸汽流时,受蒸汽、水滴光散射效应的影响,透射光强度 I 要小于入射光强度 I_0 , 根据光的透射定律,在不相关单射条件下满足:

$$\ln(I/I_0) = -\frac{\pi}{4} D^2 L N E \quad (4)$$

式中: D —水滴直径; L —光在湿蒸气中的行程; E —散射系数。由于蒸汽湿度与水滴直径间存在关系:

$$\frac{\pi}{6} D^3 N = \frac{\rho_g Y}{\rho_l (1-Y)} \quad (5)$$

结合式(4)和式(5)可得:

$$\frac{E}{D} = \frac{2}{3} \ln \left[\frac{I_0}{I} \right] \frac{\rho_l (1-Y)}{\rho_g Y} \frac{1}{L} \quad (6)$$

通过采用双波长法及多对波长法对式(6)进行求解,可以获得水滴的平均直径和蒸汽湿度值。

瑞士 BBC 公司、美国西屋公司、英国 CERL 公司均研制出了全散射式光学探针^[10],上海理工大学王乃宁教授对该方法进行了长期的研究^[11],并取得了很好的成果。

1.3.3 光学法的应用局限性

不能否定光学法应用于湿度测量时的优越性, 如: 能够实现在线实时测量, 探针外形较小等, 但要真正推广还受到很多限制。由于湿蒸汽中水滴的大小不同, 分布不均匀, 所以会造成光学法测量结果的随机性很强; 鉴于实际可用光的波长限制, 光学法通常只能对湿蒸气中直径小于 $3\ \mu\text{m}$ 的水滴进行测量, 造成测量结果低于真实值; 光学法对测量环境的要求十分严格, 光学法的关键之一就是要保持光学窗口的洁净, 保证窗口不能与油污和水接触, 这一点在实际测量中是很难实现的; 测量设备造价较高, 并且对测量现场的仪器配置和测量条件要求很高。

1.4 示踪剂法测量蒸汽湿度

压水堆核电站广泛采用示踪剂法测量主蒸汽湿度, 其中示踪剂有化学碳酸铯 (Cs_2CO_3) 和放射性钠-24 (^{24}Na)。此方法的基本原理是借助于一种易溶于水而不挥发的示踪剂, 通过测定蒸汽发生器内部的示踪剂浓度和饱和蒸汽中水滴带走的示踪剂的量就可以确定蒸汽发生器出口的蒸汽湿度^[12]。蒸汽湿度可表示为:

$$Y = C' / C \quad (7)$$

式中: C' —给水中的示踪剂浓度; C —蒸汽发生器沸水区的示踪剂浓度。

1.4.1 放射性示踪法

放射性示踪法是利用性质稳定、只溶于水且不挥发的同位素物质, 如碳酸钠 (Na_2CO_3) 中的 ^{24}Na 进行蒸汽湿度测量的。放射性 ^{24}Na 示踪剂法由美国西屋公司研究发明, 由于其测量精度较高 (2% 左右), 法国电力公司在其国内电站自 1977 年以后也广泛采用。放射性的同位素 ^{24}Na 容易检测和测量, 测试结果清晰明确。

在测量过程中, 相对较小的剂量就可以得到范围比较宽的动态反应数据, 可以及时跟踪系统的任何变化。

1.4.2 非放射性示踪法

非放射性示踪法是利用非放射性化学示踪物质, 如碳酸铯 (Cs_2CO_3)、氢氧化锂 (LiOH)、硝酸锂 (LiNO_3) 以及某些氰化盐进行蒸汽湿度测量的。这些非放射性物质具有溶解于水、不溶于蒸汽、不易挥发、不被金属表面吸收等特性。非放射性化学示踪物质的注入和溶解平衡后, 代表性取样简便, 通过浓度的测定和后期的质量平衡计算, 结果较为准确, 且能满足精度要求。我国大亚湾核电站曾利用碳酸铯 (Cs_2CO_3) 作为示踪剂, 对 1 号和 2 号机组进行了蒸汽湿度测量^[13], 并取得了满意的结果。

1.4.3 示踪剂法的应用局限性

应用示踪剂法时要分别在给水管线、蒸汽发生器的排污管线和主蒸汽管线进行间断, 重复多次取样, 不能实现在线测量, 并且在多份取样时, 还要保证取样时间的一致性。对试样的分析处理程序复杂, 所用仪器 (如原子吸收光谱分析仪) 昂贵, 操作过程复杂。

而对于放射性示踪法来讲, 还必须要有放射性物质持有和使用中所需要的特别许可证明和相应的必要防护及危害处理程序, 在实际使用过程中, 放射性同位素示踪物质的选用、运输、配置、注入和取样都需要专门的人员和设备, 运行成本昂贵。

2 蒸汽湿度测量方法的探讨

近年来, 随着测量技术和计算机技术的发展以及工程要求的提高, 蒸汽湿度测量方法正向着能够在线测量、测量设备小型化、

操作过程简单化、测量结果直观化方向发展, 其中: 超声波法、微波法、电容法等正处于探讨和日趋完善之中。

2.1 超声波法检测蒸汽湿度

超声波检测蒸汽湿度的原理是^[14]: 声波在气液两相流混合物中的传播速度明显小于在纯液体和纯气体中的传播速度, 并且气液两相含量的不同, 也会引起声速的变化, 根据这一原理, 可以利用超声波检测蒸汽湿度。声波在汽水混合物中的传播速度可以采用 Wood 绝热声速进行计算:

$$c^2 = c_1^2 \frac{\rho_g}{x_g \rho} \quad (8)$$

式中: c_1 —同等条件 (温度、压力) 下纯水蒸气中的声速; ρ_g —水蒸气的密度; ρ —汽液混合物的密度; x_g —水蒸气的体积组分。则:

$$\rho = x_g \rho_g + (1 - x_g) \rho_f \quad (9)$$

通过在测量管道中安装超声换能器, 采用脉冲时差法可以检测出湿蒸气中的声速 c 。然后利用式 (8) 和式 (9) 计算出 x_g , 进而可以得到蒸汽湿度:

$$Y = \frac{(1 - x_g) \rho_f}{\rho} = \frac{(1 - x_g) \rho_f}{x_g \rho_g + (1 - x_g) \rho_f} \quad (10)$$

2.2 微波法测量蒸汽湿度

微波是波长为 $1 \sim 1000\ \text{nm}$ 的电磁波, 它的定向发射装置容易制造, 传输性能良好, 受温度、灰尘、强光等影响很小。微波检测是由发射天线发射微波, 遇到被测物时微波被吸收或者反射, 使功率发生变化, 再利用接收天线, 接收通过被测物体或由被测物反射回来的微波, 并将它转换成电信号, 再由测量电路测量和指示。

当前, 微波法的应用主要针对对于土壤、砂石、木材和烟丝等固体材料水分含量的检测^[15]。用微波判定材料中水分含量的依据

是,在微波频段,水的介电常数要明显大于一般材料。材料湿度的变化可以明显改变材料的介电性能,通过测量一些与介电常数密切相关的物理量,如功率衰减、相位变化和谐振频率等,就能够判断材料的含水量,具体的测量方法有3种:透射波法、反射波法和谐振法。

华北电力大学的韩中合博士根据谐振腔的谐振频率随腔内电介质的介电常数变化发生偏移这一特性,研究了采用微波谐振腔微扰来测量流动湿蒸气湿度的方法。该方法的基本思想是基于微波谐振腔的微扰,即微波谐振腔的谐振频率随腔内电介质的介电常数变化发生偏移,在一定的温度、压力下,蒸汽的湿度不同,其介电常数不同,且一定温度、压力下湿蒸气的介电常数只与其湿度有关,因此当蒸汽流过谐振腔时,通过测量谐振腔谐振频率的偏移即可测量出湿蒸气的介电常数,进而确定蒸汽湿度。蒸汽湿度与谐振腔频偏的关系可表示为^[19]:

$$Y = \left\{ 1 + \frac{\rho_g}{\rho_f} \times \left[\frac{3(\epsilon_f - \epsilon_g) / (\epsilon_f + 2\epsilon_g) - 1}{1 - \frac{2\delta}{Bf_0}} / \epsilon_g - 1 \right] \right\}^{-1} \quad (11)$$

式中: ϵ_g 、 ϵ_f —水蒸气的相对介电常数和水的相对介电常数; B —谐振腔的结构因子; f_0 —空腔的谐振频率; δ —湿蒸气流过谐振腔时,谐振频率的偏移量。应用该方法时,通过测量相对频偏量 (δ/f_0),即可确定蒸汽的湿度。

对不同频率的微波,水对其的衰减程度是不同的,因此测量时要选择适当的频率,使得微波衰减随蒸汽湿度不同具有最大的变化率,以使测量结果具有较高的精度。

3 电容法测量蒸汽湿度的探讨

根据电磁学知识,电容器在极板面积和极板间距不变的情况下,电容量的大小只与电容器内电介质的介电常数大小有关。利用电容器的这一性质,很多学者已进行了电容法测量固态物质(如木屑、纸张)中水分含量和石油中水分含量的研究^[17~18]。近些年来,已有学者和工程人员利用电容法进行了气液两相流空泡份额的测量^[19~21],并取得了较为满意的结果。但工程实践中,饱和湿蒸气的温度和压力都较高,而当今已有的电容式湿度测量仪主要用于测量空气的相对湿度,并且对温度(小于100℃)和压力的适用范围都较小。

为此,笔者提出了一种同轴圆筒形电容式传感器测量蒸汽湿度的方法。当一定压力、温度的水蒸气流过电容器时,蒸汽湿度的变化会导致其等效介电常数的变化,进而引起电容器容量的变化。在进入电容器的蒸汽湿度发生变化的情况下,电容器的容量就会发生改变,外部测量电路会将电容器的容量变化进行捕捉和转化处理,最终在频率计数器上显示电容器的充放电频率值。电容法测量蒸汽湿度的原理如图1所示。

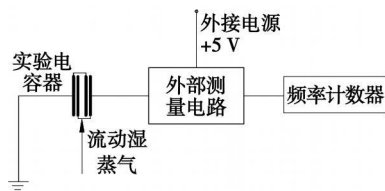


图1 电容法测量蒸汽湿度原理图

图1所示的电容传感器是由不锈钢制成的同轴圆筒形电容,其结构如图2所示。

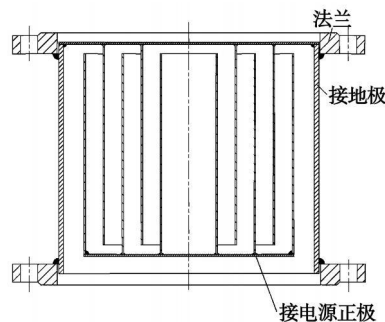


图2 电容器结构图

电容传感器两端的法兰直接与蒸汽管道上的法兰相连接,可使蒸汽以全流量通过电容器,电容器内部极板由若干个同轴不锈钢圆筒组成,其中,相间的极板采用导线连接,分别构成电容器的接地极和测量极;为将各个极板更好地定位,采用强度和绝缘性能都很好的材料(如电木板)固定各极板。这样,就构成了一个由若干个电容器相互并联的电容传感器。

此外,在传感器设计过程中需要注意减小环境温度、湿度等变化所产生的误差,保证绝缘材料的绝缘性能;结构上消除和减小边缘效应与泄漏电容的影响等。

电容传感器的充放电频率与蒸汽湿度间的关系式可表示为:

$$Y = F(\delta) \quad (12)$$

式中: δ —干饱和和蒸汽通过电容器时的频率值 f_0 与湿蒸气通过电容器时的频率 f 值之差, $\delta = f_0 - f$ 。具体的函数关系 F 可以通过电容器标定系统进行确定。

在空气—喷雾系统中对自行研制的电容式湿度传感器进行标定试验,其结果如图3所示。

图3表明,在12%的湿度范围内,汽流湿度与输出频率差之间呈现出一种较为明显的非线性关系。也就是说,当气水混合物中空气的体积含量大,而水的体积含量很小时,湿度与输出频率间的关系是非

线性的。根据非线性曲线回归方法, 采用二阶多项式将图 3 中的数据点拟合, 得到输出频率差与湿度间的函数关系式为:

$$\delta f = -0.545Y^2 + 14.335Y - 7.152 \quad (13)$$

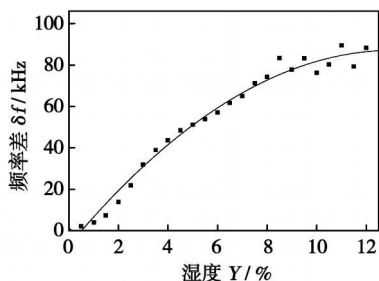


图 3 湿度与频率差的关系曲线

交换图 3 的横轴与纵轴, 即求解式 (13) 的反函数, 经回归数据点得到:

$$Y = 8.648 \times 10^{-4} (\delta f)^2 + 0.044 (\delta f) + 0.677 \quad (14)$$

式 (14) 的均方差 $R = 0.96152$, 标准差 $SD = 0.75398$ 。

标定试验中发现, 在长期的连续试验过程中, 作为固定支架的电木板会吸附一些水分子, 使自身的电阻率降低, 导致传感器性能下降; 噪声的存在会使输出频率产生突升和突降的现象, 影响了测量结果的稳定性, 降低了传感器的测量精度。此外, 测量频率也会引起测量误差, 尽管这种误差很小, 但仍需要注意, 要使采样频率不能过低和过高。以上这些问题都是在今后的研究工作中需要解决的。

总之, 与其它蒸汽湿度的测量方法相比, 圆筒形电容器蒸汽湿度测量法系统简单、操作方便, 蒸汽全流量通过电容器, 无需抽汽取样, 对环境条件要求不高, 其设备造价也不高, 测量成本很低, 是一种值得开发研究的流动湿蒸汽湿度在线测量方法。

4 结 论

(1) 目前国内外用于流动蒸汽湿度测量的方法都具有各自的优势, 但也都存在着较大的应用局限性。

(2) 新型圆筒形电容式传感器测量蒸汽湿度的方法, 是利用水和蒸汽介电常数的不同进行湿蒸汽湿度测量的, 测量系统简单, 无需抽汽采样, 对环境要求不高, 设备造价低廉, 操作过程简便, 是一种值得研究开发的蒸汽湿度在线测量方法。

(3) 标定试验结果表明, 这种传感器静态特性稳定, 在 12% 的湿度范围内, 气流湿度与输出频率差之间呈现出一种较为明显的非线性关系。

(4) 在传感器的设计及试验过程中还存在着一些需要解决的难题。

参考文献:

[1] 李炎锋, 王新军. 蒸汽透平中流动湿蒸汽湿度测量方法的分析与比较[J]. 汽轮机技术, 2000, 42(3): 156-161.

[2] 沈维道, 郑佩芝, 蒋淡安. 工程热力学[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1983.

[3] 曹子栋. 锅炉测试技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.

[4] G DIBELIUS A Dor. Erfahrungen mit der bestimmung der dampffuchte bei den abnahmeversuchen in kernkraftwerk bibils [J]. VGB Kraftwerkstechnik Heft, 1977 (9): 62.

[5] WILLIAMS G J. Instruments for wet steam measurements // Sixth Thermodynamics and Fluid Mechanics Convention [C]. In: Mech Engrs 1976. 116.

[6] 蔡颐年, 王乃宁. 湿蒸汽两相流[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.

[7] LANGFORD R W, MOORE M J. The measurement of steam wetness fraction in operating turbines // Sixth Thermodynamics and Fluid Mechanics Convention [C]. In: Mech Engrs 1976. 152.

[8] 李炎锋, 王新军. 流动湿蒸汽湿度的加热法测量方法及其装置[J]. 中国电力, 1997, 30(10): 16-19.

[9] 卫敬明, 杨其国. 应用光学法饱和蒸汽湿度仪测量汽轮机末级蒸汽湿度[J]. 汽轮机技术, 1996 38(5): 306-312.

[10] WALTERS P T. Wetness and efficiency measurement in LP 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.

[11] 蔡小舒, 王乃宁, 卫敬明. 雾状湿蒸汽两相流湿度和水滴尺寸分布的光学法测量[J]. 工程热物理学报, 1992, 13(2): 212-216.

[12] DIBELIUS G. Biblis 核电站验收试验中蒸汽湿度测量的经验[J]. 张万锋, 译. 热力发电译丛, 1991(4): 52-61.

[13] 刘子烈, 耿国山, 苟智才. 浅析非放射性示踪法在主蒸汽湿度测定试验中的应用[J]. 黑龙江电力, 2003, 25(3): 168-171.

[14] 李 锴, 尚德敏. 超声波检测汽轮机中水蒸气湿度方法的探讨[J]. 热能动力工程, 2002, 17(6): 559-560, 564.

[15] CANCELLA P A, BARRETTE P, ROSENBLUM F. On-line moisture determination of ore concentrates: a review of traditional methods and introduction of a novel solution [J]. Minerals Engineering 2003 (16): 151-163.

[16] 韩中合, 张淑娥. 汽轮机排汽湿度谐振腔微扰测量法的研究[J]. 中国电机工程学报 2003, 23(12): 199-202.

[17] 刘尧军, 黄祖光. 电容法测定砂土含水量的试验研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2002, 15(2): 10-12.

[18] 戴永寿, 雷国江. 补偿式电容法原油含水分析仪的研制[J]. 石油大学学报, 1994, 18(6): 112-115.

[19] 庞凤阁. 电容法测量气-液两相流截面含气率实验研究[J]. 核动力工程, 1991, 12(6): 78-83.

[20] JAWOREK A, KRUPA A. Gas/liquid ratio measurements by rf resonance capacitance sensor [J]. Sensors and Actuators A, 2004(113): 133-139.

[21] JAWOREK A, KRUPA A, TRELA M. Capacitance sensor for void fraction measurement in water/steam flows [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2004(15): 317-324.

(编辑 伟)

流动蒸汽湿度测量方法的研究与比较= **Study and Comparison of Flowing-steam Wetness Measurement Methods** [刊, 汉] / NING De-liang, GAO Lei, LIU Xin-quan (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 149 ~ 153

In the light of the importance of flowing wet-steam wetness measurement, summed up were both the commonly used methods and the approach under current exploration for measuring the flowing-steam wetness along with an analysis of the limitations of various methods during their applications. Based on the theory that with a different equivalent permittivity of saturated wet steam the capacity of a capacitor will also be different at an identical pressure and temperature, presented and analyzed was a new approach for the on-line measurement of the flowing-steam wetness by using a cylindrically shaped capacitor type sensor. The calibration test results show that this type of sensors has stable static characteristics, and when the wetness ranges from 0 to 12%, the steam flow wetness assumes a comparatively conspicuous nonlinear relationship with the output frequency difference. Finally, the authors have mentioned problems needing special attention during the calibration tests and sensor design. **Key words:** flowing steam, wetness measurement, equivalent permittivity, capacitance method

抑制叶顶间隙泄漏的叶轮机叶片流场的模拟= **Flow Field Simulation of Turbomachine Blades with Their Tip Clearance Leakage Being Suppressed** [刊, 汉] / MAO Jia-ni (College of Energy Source and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), CAO Zi-yin (Applied Mathematics and Mechanics Research Institute, Shanghai University, Shanghai, China, Post Code: 200072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 154 ~ 157

With the growth of national economy, turbomachines are widely used in industrial and mining enterprises. In the light of the special feature of a major influence as exercised by blade-tip clearance stream on turbomachine performance, designed was a new type of blades. The blades in question are provided with a “dovetail crown” at the blade tip, forming a “barb” at both the pressure and suction side of the blade tip. Through a numerical simulation of the flow fields in the blades and other ordinary blades, compared was the difference of the overall performance, flow field characteristics and blade-tip clearance leakage of a compressor between the above two kinds of blades under equivalent conditions. The authors concluded that the “dovetail crown” shaped blades thus optimized and designed can relatively well maintain the pressure on the blade surfaces, reduce the possibility that a leakage vortex occurs at blade tips and diminish the leakage from the blade tip clearance. The data and relevant conclusions thus obtained can provide a helpful reference and basis for improving and raising the operating performance of turbomachines. **Key words:** turbomachine, “dovetail crown” shaped blade, numerical simulation, blade-tip clearance stream, leakage vortex

结构化网格在气热耦合计算中的应用= **Application of Structured Grids in a Gas-heat Coupled Calculation** [刊, 汉] / GUO Zhao-yuan, WANG Qiang, YAN Pei-gang, et al (Propulsion Theory and Technology Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 158 ~ 162

A structured grid for calculating gas-heat coupling was established by adopting a commercial grid generator, and multi-block grid technology was employed to improve the grid quality. The areas of flow- and thermal boundary layers etc. subject to a relatively big change of flow field parameters have been refined. In the meantime, a high-precision numerical transfer mode was used to perform a numerical transfer among various grid blocks, thereby ensuring the high-precision difference scheme among the grid blocks not to be destroyed and thus enhancing the coupled calculating efficiency. Finally, through a gas-heat coupled calculation of Mark II blades and a comparison of the calculation results with test ones, it has been found that the difference of the pressure distribution along the blade profile at the pitch diameter was in a range of 1%, while that of the temperature distribution in a majority of places, in a range of 4%. **Key words:** structured grid, high ac-