

电容法测量湿蒸汽湿度的可行性研究

牛凤仙, 蔡小舒, 沈嘉祺

(上海理工大学动力工程学院, 上海市 杨浦区 200093)

Feasibility Study of the Capacitance Method for Wetness Measurement

NIU Feng-xian, CAI Xiao-shu, SHEN Jia-qi

(College of Power Engineering, University of Shanghai for Science & Technology, Yangpu District, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: At the same temperature and pressure, the dielectric constant of water is much greater than that of steam. When the wet steam flows by the capacitive sensor, the sensor capacitance changes with the steam wetness. The relative capacitance change is related to the steam wetness, regardless of the sensor geometry. The relative capacitance change caused by the steam wetness change was calculated, the effect of the salts contained was discussed. As manifested by the results of calculation with the steam pressure lower than 15 MPa, the derivative of the sensor capacitance with respect to the steam wetness increases with the constant steam wetness and the increasing steam pressure, and increases with the constant steam pressure and the increasing steam wetness. According to the calculation results and several application backgrounds of steam wetness measurement, the feasibility of the capacitance method for steam wetness measurement was studied.

KEY WORDS: steam wetness; dielectric constant; capacitance method; measurement

摘要: 由于在同温度、同压力下, 水和水蒸气的相对介电常数存在很大差异, 当一定压力的湿蒸汽通过电容传感器时, 湿度的变化会引起传感器电容的变化, 且相对变化只与湿度有关, 与电容器的结构无关。以平板电容器为例, 计算湿蒸汽通过时由于湿度变化引起的电容相对变化量, 并探讨了含盐量的影响。蒸汽压力小于 15 MPa 范围内的计算结果显示: 在同一湿度下, 电容传感器电容量相对于湿度的变化率随着饱和蒸汽压力的增大而增大; 在同一压力下, 电容传感器电容量相对于湿度的变化率随湿度的增大而增大。根据计算结果并结合湿度测量的具体应用, 分析了电容传感器用于测量湿蒸汽湿度的可行性。

关键词: 蒸汽湿度; 介电常数; 电容法; 测量

基金项目: 国家自然科学基金项目(50336050); 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL0902)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50336050).

0 引言

蒸汽湿度监测在工业过程中有广泛的需求。在大型火力电厂中, 汽轮机低压缸的末几级和压水堆核电站大型汽轮机的全部级都在湿蒸汽状态下工作, 而蒸汽的湿度存在不仅降低了汽轮机的低压级效率, 而且造成末几级动叶片的水蚀破坏^[1-3]。因此, 蒸汽湿度的检测对汽轮机的安全经济运行十分重要。对于工业锅炉, 蒸汽湿度的大小是蒸汽品质的重要指标^[4]; 如用于稠油热采的注汽锅炉, 出口的蒸汽湿度直接关系着稠油热采的效果及注汽锅炉的运行安全^[5-6]。另外, 许多行业的生产工艺需要用有一定湿度的蒸汽来保证产品生产的品质, 如卷烟生产, 纺织、医药生产、食品生产等在生产中都需要具有一定温度和湿度的蒸汽。因此, 开展蒸汽湿度长期在线测量方法和仪器的研究具有很重要的现实意义。

目前的蒸汽湿度测量技术方法还不能完全满足在线测量的需要: 如氯根法需要取样并配置标准试剂, 测量过程复杂, 耗时长且误差较大^[7]; 热力学法多不能实现在线测量且耗时长, 节流孔板式热力学法可在在线测量蒸汽湿度, 但精度影响因素较多^[8-9]; 示踪剂法虽然测量结果满意但同样不能实现在线测量, 且测量过程各个方面都需要专门的人员和设备, 运行成本昂贵^[10]; 光学法可以较准确地在线测量湿蒸汽的湿度, 还可以同时测量湿蒸汽中水滴的粒径分布, 但测量结构复杂, 设备造价高, 对测量现场的仪器配置和测量条件要求也高, 目前主要用于汽轮机中湿蒸汽产生的机理研究中^[11-12]。对于一般的工业生产及生产工艺中, 并不关心湿度以外的其他参数, 而是期望有一种简单、可靠、准确, 能够长时间在线测量的方法。本文针对目前常用湿

度测量方法存在的这些问题,从机理上分析了一种新的湿度测量方法——电容法测量的原理,并对其用于不同场合湿度测量场合做了可行性分析。

1 电容法测量湿度的机理

一定温度和压力下,水和水蒸气的介电常数有很大差别,如在1个大气压下,水和饱和水蒸气的介电常数分别为55.527和1.006。如果在电容传感器中,湿蒸汽作为传感器中的介质,如图1所示,则随着流过的蒸汽湿度的变化,其等效介电常数会发生改变,从而导致传感器的电容量也会随之变化。通过测量电容器的电容量变化,就可以反推得到湿度。

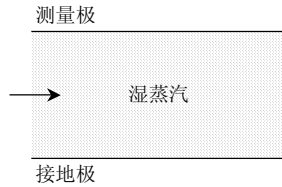


图1 电容法测量原理

Fig. 1 Schematic of the capacitance method

所谓蒸汽湿度是指饱和水蒸气中水的质量占蒸汽总质量的百分比^[13],其定义式为

$$Y = \frac{m_w}{m_w + m_v} \times 100\% \quad (1)$$

式中 m_w 、 m_v 分别表示蒸汽流中水滴的质量和蒸汽的质量。

上式可以写成:

$$Y = 1/[1 + (\rho_w/\rho_v)(V_w/V_v)] \quad (2)$$

式中: V_w 为单位体积中水的体积; V_v 为单位体积中蒸汽的体积; ρ_w 和 ρ_v 分别为该饱和压力下饱和水和饱和蒸汽的密度。

如果用 λ 表示湿蒸汽中的水滴所占的体积比,即

$$\lambda = V_w/(V_w + V_v) \quad (3)$$

则 $V_w/V_v = \lambda/(1 - \lambda)$,代入式(2)可得

$$Y = (1 - \lambda)/[1 + (\rho_w/\rho_v - 1)\lambda] \quad (4)$$

假设湿蒸汽中的水滴是均匀分布在蒸汽中的球形颗粒,根据Lichtenecher公式^[14],湿蒸汽的等效相对介电常数 ϵ_e 可以由下式求得:

$$\epsilon_e^{1/2} = \lambda\epsilon_w^{1/2} + (1 - \lambda)\epsilon_v^{1/2} \quad (5)$$

式中: ϵ_w 代表该饱和压力下湿蒸汽中饱和水的静电介电常数; ϵ_v 为干饱和蒸汽的介电常数。

解方程式(5)可得到:

$$\lambda = (\epsilon_e^{1/2} - \epsilon_v^{1/2})/(\epsilon_w^{1/2} - \epsilon_v^{1/2}) \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)并化简可得

$$Y = \frac{(\epsilon_w^{1/2} - \epsilon_e^{1/2})}{(\rho_w/\rho_v - 1) + \epsilon_w^{1/2} - \epsilon_v^{1/2} \rho_w/\rho_v} \quad (7)$$

对于结构一定的传感器,有

$$C = b\epsilon_e \quad (8)$$

式中: C 为电容值; b 为只与传感器结构有关的常量。

当干饱和蒸汽流过电容传感器时,电容量 C_v 为

$$C_v = b\epsilon_v \quad (9)$$

将式(8)和式(9)代入式(7)中可得到湿度与电容的变化关系,即

$$Y = \frac{[\epsilon_w^{1/2} - (C\epsilon_v/C_v)^{1/2}]}{(\rho_w/\rho_v - 1) + \epsilon_w^{1/2} - \epsilon_v^{1/2} \rho_w/\rho_v} \quad (10)$$

2 电容的理论计算与结果分析

2.1 水和水蒸气的介电性能

根据德拜方程^[15],相对介电常数为

$$\epsilon_w^* = \epsilon_{w,\infty} + \frac{\epsilon_w - \epsilon_{w,\infty}}{1 + 4\pi^2 \tau^2 f^2} \quad (11)$$

式中: ϵ_w^* 为水在一定频率下的相对介电常数; $\epsilon_{w,\infty}$ 为无穷大频率下的介电常数; τ 为弛豫时间; f 为频率。

根据文献[16]可知 $2\pi\tau$ 的数量级为 10^{-10} ,即 $4\pi^2\tau^2$ 的数量级为 10^{-20} ,而目前精确测量电容的方法普遍是通过测量振荡电路的频率及变化测量电容量,一般振荡频率不超过10MHz,即 f^2 的数量级小于 10^{14} 。显然 $1 + 4\pi^2\tau^2 f^2$ 基本等价于1,误差小于百万分之一。此时上式变为 $\epsilon_w^* = \epsilon_w$,可见在测量频率不太高的情况下,水的介电常数可以用静电介电常数来代替。根据文献[17-19]可知,饱和水蒸气的介电常数也可按照静电介电常数来计算。

IAPWS—1997年水和水蒸气性质表的静电介电常数方程^[20]为

$$\epsilon = \frac{1 + A + 5B + (9 + 2A + 18B + A^2 + 10AB + 9B^2)^{0.5}}{4 - 4B} \quad (12)$$

A 和 B 由以下2式给出,即:

$$A = \frac{10^3 N_A \mu^2 \rho g}{M \epsilon_0 k T} \quad (13)$$

$$B = \frac{10^3 N_A \alpha \rho}{3M \epsilon_0} \quad (14)$$

式中: k 为波尔兹曼常量; N_A 为阿伏伽德罗常量; α 平均分子极化率; ϵ_0 为真空介电常数; μ 为分子偶极距; M 为摩尔质量; g 为Harris-Alder因子。

计算得到水和水蒸气的静电相对介电常数随温度、压力的变化曲线,如图2所示。

可以看出饱和水和饱和水蒸气的介电常数差别很大,即使随着压力的增大饱和水的相对介电常

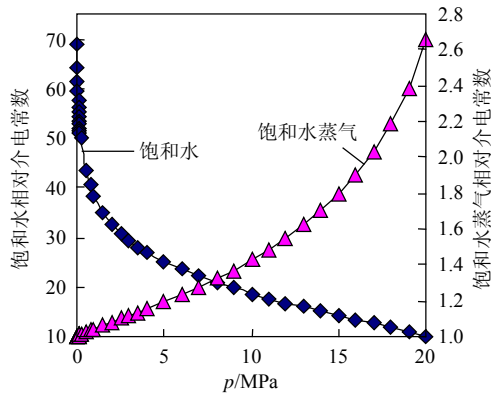


图 2 饱和水和饱和水蒸气相对介电常数随压力的变化
Fig. 2 Dependence of the relative dielectric constant of saturated water liquid/vapor on the pressure

数逐渐减小，且饱和水蒸气的相对介电常数也逐渐增大，但饱和水的相对介电常数仍远大于饱和气的相对介电常数。到临界状态，二者相同。

2.2 含盐量对相对介电常数的影响

由于蒸汽的机械携带及溶解性携带，对于电站锅炉及工业锅炉，蒸汽中都含有一定的盐分。锅炉标准中对电站锅炉及工业锅炉的蒸汽出口含盐量都有一定的指标^[21]，详见表 1 和 2。

表 1 电站锅炉的蒸汽品质指标

蒸汽压力/ MPa	w(Na)/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	w(SiO ₂)/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	w(Fe)/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	w(Cu)/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
< 5.88	≤ 20	≤ 20	5.88	≤ 15
5.88~18.62	≤ 10	≤ 20	≤ 20	≤ 5

表 2 工业锅炉的蒸汽品质指标

参数	有过热器	无过热器的 水管锅炉	无过热器的 锅壳式锅炉
饱和蒸汽的 湿度	≤ 0.01	≤ 0.03	≤ 0.05
w(Na)/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	< 300	—	—

在湿蒸汽中，大部分的盐分会溶解到水中。因此需考虑这部分盐分对水的介电常数的影响。文献[16]中介绍了含盐量对水的介电常数的影响，即

$$\epsilon_w(t, N) = \epsilon_w(t, 0) a(N) \tag{15}$$

式中：t 为水的温度；N 为水中含盐量的当量浓度。其中关于 a(N) 的具体计算见文献[16]，即

$$a(N) = 1.000 - 0.255 1N + 5.151 \times 10^{-2} N^2 - 0.6889 \times 10^{-3} N^3 \tag{16}$$

本文以含盐量较多的工业锅炉为例，假设工业锅炉蒸汽出口的盐分全部溶解在蒸汽含有的饱和水中，这样每kg饱和水中则含有 30 mg 钠。由于饱和水的密度随温度的增大而减小，取水的密度为 1000 kg/m³，则钠的当量浓度小于甚至远小于

0.001 3N，代入式(16)可知盐分对饱和水介电常数的影响在 10⁻⁴级上。再将其代入式(5)中，则完全可以忽略这点影响，即含有微量的盐分对最终结果没有影响。

2.3 电容的计算与串并联

对于最简单的理想平板电容器，其电容大小为

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \tag{17}$$

式中：ε₀为真空中的介电常数；ε为湿蒸汽等效相对介电常数；S为平板的正对面积；d为平板间距。

假设湿蒸汽通过时湿度变化引起的等效相对介电常数由ε变为ε+Δε，则有

$$C + \Delta C = \frac{(\epsilon + \Delta\epsilon)\epsilon_0 S}{d} \tag{18}$$

上式可改写为

$$\Delta C / C = \left(\frac{\Delta\epsilon\epsilon_0 S}{d} \right) / \left(\frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d} \right) = \Delta\epsilon / \epsilon \tag{19}$$

对于几个平板电容器的并联情况有

$$\frac{\sum \Delta C_k}{\sum C_k} = \frac{\sum \Delta\epsilon\epsilon_0 S_k / d_k}{\sum \epsilon\epsilon_0 S_k / d_k} = \frac{\Delta\epsilon \sum \epsilon_0 S_k / d_k}{\epsilon \sum \epsilon_0 S_k / d_k} = \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} \tag{20}$$

同样对于并联的圆筒式传感器也可以计算得到电容的相对变化值，即

$$\frac{\sum \Delta C_k}{\sum C_k} = \frac{\sum 2\pi\epsilon_0 \Delta\epsilon l_k / \ln(R_{kA} - R_{kB})}{\sum 2\pi\epsilon_0 \epsilon l_k / \ln(R_{kA} - R_{kB})} = \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} \tag{21}$$

同理可以推出平板电容器及圆筒式电容器串联时，总的电容量相对变化依旧是Δε/ε。其他结构和尺寸的电容也有同样的特性。

由此可见，在一定压力或温度下，由于饱和水和饱和水蒸气的相对介电常数是确定的，湿度变化引起的等效相对介电常数的变化也随之确定。对于各种结构的传感器，ε和Δε都可以作为常数来考虑，显见电容的相对变化只与Δε/ε有关，与传感器的类型、极板的面积及极板间距无关，且与并联电容的个数无关。这样也从另一方面论证了式(9)的正确性，b为只与传感器结构有关的一常量，对电容的相对变化没有影响，对湿度的计算也没有影响。

当然这只是针对理想电容器，在实际中还要从减小边缘效应、测量环境要求及经济科技条件限制等其他方面综合考虑传感器的优化设计。

2.4 结果分析与讨论

本文以理想平板电容器为例，计算湿蒸汽流过电容传感器时电容量的相对变化与压力、湿度的

关系。

由下图3可见,在图示压力范围内,随着压力的增大,电容相对变化量逐渐增大。且同一压力下,对应相同的湿度变化,高湿度时的电容相对变化量大于低湿度时的电容相对变化量。从图2可知,压力增大到20 MPa,饱和水蒸气的介电常数增长速度急剧上升,而饱和水和饱和水蒸气比容比增长速度变慢,预计在高于20 MPa的某个压力后电容量的

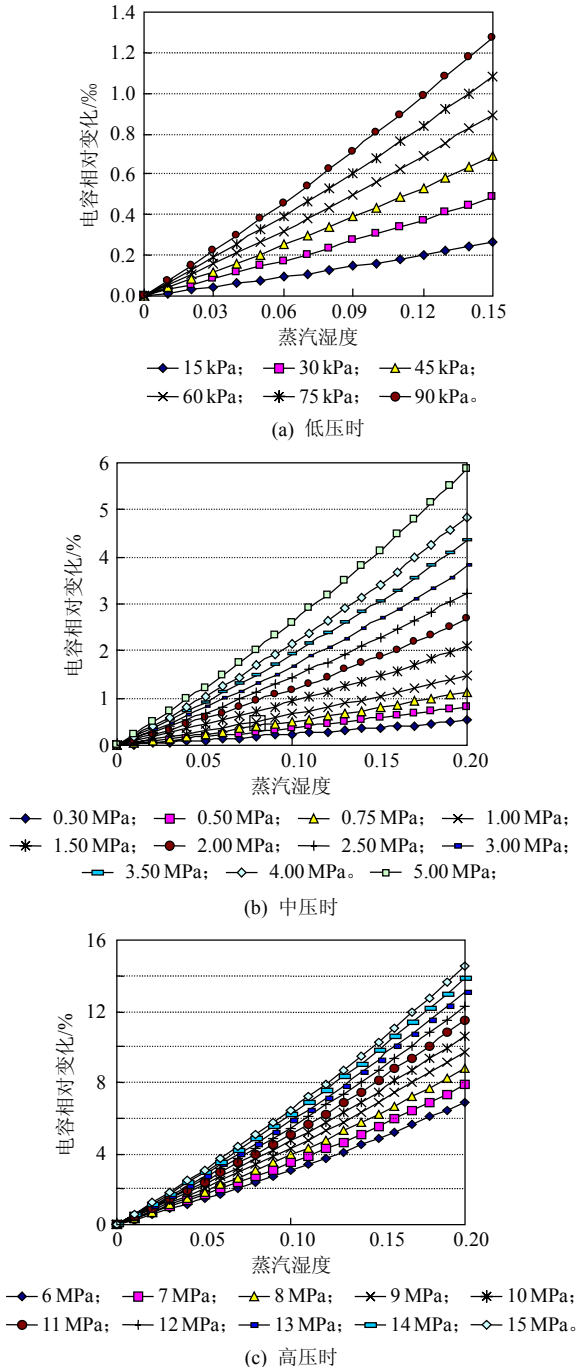


图3 不同压力下,电容相对变化与湿度变化的关系
Fig. 3 Dependence of the relative capacitance change on the steam wetness

相对变化会随压力的增大而减小,直至到临界点不再发生变化。

在实际测量中,由于要从测量环境的制约、不妨碍流体流动及要尽量减小边缘效应的影响等各方面的限制综合设计电容传感器,故传感器一般较小,即电容的绝对值不会太大。目前测量pF级电容一般可以精确测量到fF级^[22-24]。下面根据图3所示结果并结合目前电容测量技术,从低压到高压对各种湿蒸汽的湿度测量情况分别进行讨论。

1) 在低压时,电容的相对变化很小,对应此时的蒸汽参数,如在汽轮机低压缸排汽压力一般仅5 kPa左右,即使在背压较高的空冷汽轮机低压缸,排汽压力也只有15到60 kPa左右。由图3(a)可见,在此低压时,湿度变化0.01所对应的电容相对变化不足万分之一,即使压力达90 kPa,蒸汽湿度从0增加到0.15,电容量的变化也仅有1.3%,目前的电容测量技术还很难达到这样的要求。另外对于核电高压汽轮机低压缸出口湿度的测量情况,最末级湿度一般在0.13~0.17的范围内,但压力和湿冷汽轮机差不多仅为5~8 kPa,也即此时的电容变化也非常小。可见就当前的电容测量技术水平来看,电容法测量汽轮机低压缸的湿蒸汽湿度是不合适的,也不能用于其他如此低压力的湿蒸汽测量。

2) 压力在1 MPa左右的测量情况下,如核电汽轮机高压缸的排汽及低压缸的进汽压力都在1 MPa左右。在设计制造时,绝大多数核电汽轮机采用1个高压缸或1个高中压合缸加上2~4个低压缸的结构^[25]。蒸汽在汽轮机高压缸膨胀做功后,压力降为1 MPa左右,湿度则增加到0.1甚至更大。0.01的湿度变化对应的电容量的相对变化,如图中显示为0.08%左右,此时湿度较大,要求不太精确时可采用电容法,估计绝对误差为 ± 0.01 。低压缸进汽压力虽然也是1 MPa左右,但汽水分离及蒸汽再热的作用下保证了低压缸的进汽有一定的过热度,则此时采用电容法测湿度显然是不可行的。

3) 压力1~2 MPa左右的测量情况下,如工业锅炉的蒸汽出口压力一般在这个范围内,为保证其出口蒸汽的品质,工业锅炉标准要求对于有过热器的锅炉,饱和蒸汽湿度不大于0.01,对于无过热器的水管锅炉,饱和蒸汽湿度不大于0.03,而对于无过热器的锅壳式锅炉,饱和蒸汽湿度不大于0.05。在该压力范围,对应湿度变化0.01,电容相对变化为0.59%~1.16%。但此时蒸汽湿度较小,具体

的湿度值，通过电容法或许难以测量准确，因此可以考虑用来检测蒸汽品质是否超标。而在一些生产工艺中，可能需要该参数的蒸汽湿度控制在 0.08~0.1，则可用电容法来检测蒸汽湿度是否满足工艺要求。

4) 中压情况下，如在核电汽轮机高压缸中，蒸汽进口压力一般为 5~7 MPa，进汽蒸汽过热度大多数为 0 或带有一定湿度(小于 0.003)，虽然此时的湿度很小，但 0.01 的湿度变化带来电容量大约 0.25% 的变化，即 0.001 的湿度变化也能得到 0.02% 的电容量变化。故有可能实现核电高压汽轮机进口蒸汽湿度的监测，估计最大湿度测量绝对误差为 ± 0.0005 。

5) 对高压时的情况，如对于油田开采用注汽锅炉，其出口蒸汽干度不能超过 0.9，一般控制在 0.75~0.8 的干度，即 0.2~0.25 的湿度。且由于须将产生的蒸汽强制送入地下油层，故其设计压力一般大于 11 MPa，湿度变化 0.01，电容相对变化大于 6.5%。且湿度只需控制在 0.2~0.25 之间，理论上较前面 4 种情况更易实现湿度的电容法在线测量。

从图 3 还可以看出，随湿度增加，电容量的相对变化不是完全线性的。在湿度较高时，电容量的相对变化也略大，即在相同压力下，电容相对变化与绝对湿度有关。这里以 0.5 和 1 MPa 时的变化情况为例，如图 4 所示，在高湿度时，如 0.5 湿度，湿度变化 0.01 所对应的相对变化为湿度 0.1 时的 4 到 5 倍。因此可以考虑将电容法用于高湿度时的湿度在线测量。

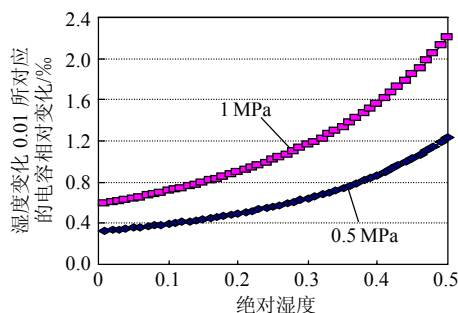


图 4 0.5 及 1 MPa 时电容相对变化与绝对湿度的关系
Fig. 4 Dependence of the derivative of the capacitance with respect to the steam wetness on the absolute wetness (at 0.5 and 1 MPa respectively)

3 结论

电容法是目前新发展的一种测量蒸汽湿度的方法，本文通过进行可行性分析，得出以下结论：

1) 由于饱和水和饱和汽的介电参数差别很大，

通过检测湿蒸汽流过电容传感器时传感器电容的变化，可能可以实现蒸汽湿度的在线测量。

2) 蒸汽出口带的微量盐分对最终的电容量变化的影响可以忽略。

3) 电容的相对变化与电容的结构及串并联均没有关系，只与该温度和压力下的等效相对介电常数的相对变化有关。

4) 在蒸汽压力小于 15 MPa 范围内的计算结果显示：在同一湿度下，电容传感器电容量相对于湿度的变化率随着饱和蒸汽压力的增大而增大；在同一压力下，电容传感器电容量相对于湿度的变化率随着湿度的增大而增大。

5) 从目前的电容测量技术水平来看，电容法用于低压时的水蒸气湿度测量，如汽轮机低压缸排汽湿蒸汽湿度的测量是不合适的；对于压力稍高些，如压力在 1 MPa 左右的核电汽轮机高压缸排汽湿度的测量及压力在 1~2 MPa 左右，一般工业锅炉出口蒸汽品质的检测，用电容法是可能的，但精度不高，对于此压力范围内的高湿度情况，测量精度会有所提高；对于 5~7 MPa 左右的核电汽轮机高压缸进汽湿度的测量，由于此时湿度很小，较难得到准确的结果，但可以作为参考湿度是否超过规定要求；在 10 MPa 高压情况下的蒸汽湿度测量采用电容法是可行的，如对油田开采用注汽锅炉出口这样的高压大湿度饱和蒸汽的干度控制。

参考文献

- [1] 蔡小舒, 宁廷保, 牛凤仙, 等. 300 MW 直接空冷汽轮机低压末级鼓风态流场及湿度测量[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(26): 7-13. Cai Xiaoshu, Niu Fengxian, Ning Tingbao, et al. Measurement of wet steam in a 300 MW direct air-cooling LP turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(26): 7-13(in Chinese).
- [2] 英国中央电业研究实验室, 比利时冯卡门流体力学研究所. 透平和分离器中的双相流[M]. 蔡颐年, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983: 1-6.
- [3] 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: 175-179.
- [4] 林宗虎, 张永照. 锅炉手册[M]. 西安: 机械工业出版社, 1989: 351-354
- [5] 崔艳艳. 油田注汽锅炉蒸汽干度测量方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [6] 孙健. 油田注汽锅炉蒸汽干度控制方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [7] 李之光, 范柏樟. 工业锅炉手册[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1988: 997-999.
- [8] 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, 22(5): 1-4. 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, 22(5): 1-4(in Chinese).
- [9] 张兆基, 杜秉乾, 曾功德, 等. 蒸汽湿度的测量[J]. *热力发电*, 1984(6): 1-5.
- [10] 傅丰, 赵再三, 郁鸿凌. 气液双相流体干度测量的研究与发展[J]. *动力工程*, 1991, 11(3): 51-59.
- [11] 蔡小舒, 王乃宁, Renner M, 等. 能同时测量低压汽轮机流场和湿度的联合探针的研制及实验研究[J]. *动力工程*, 1999, 19(3), 55-58.
Cai Xiaoshu, Wang Naining, Renner M, et al, The development and experimental study of a novel probe for measuring flow field and wetness in LP steam turbine[J]. *Chinese Journal of Power Engineering*, 1999, 19(3): 55-58(in Chinese).
- [12] 蔡小舒, 牛凤仙, 宁廷保, 等. 300 MW直接空冷汽轮机低压末级湿蒸汽测量研究[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(2): 1-7.
Cai Xiaoshu, Niu Fengxian, Ning Tingbao, et al. Measurement of wet steam in a 300MW direct air-cooling LP turbine[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(2): 1-7(in Chinese).
- [13] 沈维道, 郑佩芝, 蒋淡安. *工程热力学*[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1983: 251-258.
- [14] Goncharenko A V, Lozovski V Z, Venger E F, Lichtenecher's equation: Application and limitations[J]. *Optics Communications*, 2000(174): 19-32.
- [15] Alison G B, Gee G B, Tyler S W. Vadose-zone techniques for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions[J]. *Soil Science Society of America*, 1994(58), 6-14.
- [16] Stogryn A. Equations for calculating the dielectric constant of saline water[J]. *IEEE Trans. on Microwave Theory Techniques*, 1971, 19(8): 733-736.
- [17] 韩中合, 张淑娥, 田松峰, 等. 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.
Han Zhonghe, Zhang Shu'e, Tian Songfeng, et al. Study on a method of wetness measurement based on resonant cavity perturbation for steam turbine exhaust[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2003, 23(12): 199-202(in Chinese).
- [18] 张淑娥, 熊华. 谐振腔测量蒸汽湿度不确定性分析改进[J]. *华北电力大学学报*. 2007, 34(3): 22-26.
Zhang Shu'e, Xiong Hua. Error analysis and improvement of microwave resonant cavity in steam turbine exhaust wetness measurement[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2007, 34(3): 22-26(in Chinese).
- [19] 宁德亮. 新型电容传感器在蒸汽湿度测量中的研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [20] 娃格纳 W, 克鲁 A. 水和蒸汽的性质[M]. 项红卫, 译. 北京: 科学出版社, 2003: 32-33.
- [21] 车得福, 庄正宁, 李军, 等. 锅炉[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 519-527.
- [22] Ghidini C, Marioli D, Sardini E, et al. A 15 ppm resolution measurement system for capacitance transducers[J]. *Measurement Science and Technology*, 1996(7): 1787-1792.
- [23] Ashkan A, Hossein G. A high precision method for measuring very small capacitance changes[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(8): 3483-3487.
- [24] 王雷, 王保良, 冀海峰, 等. 电容传感器新型微弱电容测量电路[J]. *传感技术学报*. 2002(4): 273-277.
Wang Lei, Wang Baoliang, Ji Haifeng, et al. New small capacitance measuring circuit for capacitance sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*. 2002(4): 273-277(in Chinese).
- [25] 陈婴. 核电汽轮机的现状[J]. *热力透平*. 2006, 35(2): 4-7.
Chen Ying. The current status of nuclear turbine[J]. *Thermal Turbine*. 2006, 35(2): 4-7(in Chinese).

收稿日期: 2009-02-12。

作者简介:

牛凤仙(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为湿蒸汽测量技术, niufengxian@163.com;

蔡小舒(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为两相流测量, 汽轮机热力系统, 燃烧排放检测诊断等。



牛凤仙

(编辑 张媛媛)