

电容法测量蒸汽湿度的可行性研究

宁德亮¹, 刘新全¹, 梁毅², 高雷¹

(1. 中国船舶重工集团公司, 第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036;

2. 哈尔滨量具刃具集团有限责任公司 设备工具分公司, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 结合介电理论以及水和水蒸气的性质, 研究了水和水蒸气的静态相对介电常数随压力和温度的变化趋势, 并分析了造成水和水蒸气介电常数变化的原因。研究结果表明, 水的介电常数受温度的影响更大, 而水蒸气的介电常数则受压力的影响更大。由于水和水蒸气的介电常数差异非常大, 根据电容法测量原理, 利用圆筒形电容传感器进行了湿度测量试验, 结果表明利用电容法测量饱和湿蒸气湿度是可行的。

关键词: 介电常数; 水; 水蒸气; 电容法; 测量蒸汽湿度

中图分类号: TK26 文献标识码: A

引言

能源紧缺是目前全世界共同面对的一个难题, 发展核电成为实现能源、经济和环境协调发展的有效途径。压水堆占目前投入运行反应堆总数的一半以上^[1], 但自然循环式蒸汽发生器一般产生的是湿饱和蒸汽, 为确定蒸汽品质, 必须要测量蒸汽湿度。蒸汽湿度是指饱和湿蒸气中水滴的质量占蒸汽总质量的百分比^[2], 其定义式为:

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

式中: m_w 、 m_v —蒸汽中水滴质量和蒸汽质量。

蒸汽湿度是以饱和蒸汽为工质的汽轮机运行的一个重要参数。蒸汽湿度的准确测量对核电站以及动力系统中汽轮机等装置的安全经济运行具有重要意义。目前常用的蒸汽湿度测量方法有热力学法和光学法^[3], 但热力学法的测量周期较长、误差较大; 光学法存在着随机性大、测量值偏小、测量设备和测量成本高等缺点, 所以需要寻找一种快速、准确、测量成本低的方法来测量蒸汽湿度。电容法测量蒸汽湿度便成为一种可选的方法。

1 电容法测量原理

物体间的电容量与其结构参数密切相关, 通过

改变物性参数而改变物体间的电容量来实现对被测量的检测, 就是电容法的测量原理^[4]。物体间的电容量与构成电容元件的两个极板的形状、大小、相互位置以及极板间介质的介电常数有关, 可表示为:

$$C = f(\epsilon, S, \delta) \quad (2)$$

式中: C —电容量; ϵ 、 δ 、 S —极板间介质的介电常数、极板间距离以及极板间相互覆盖面积。对某一电容器, 在其极板面积和极板间距不变的情况下, 电容量的大小就只与电容内电介质的介电常数大小有关。

2 水和水蒸气的介电常数

水分子 H_2O 是一个典型的极性分子, 其正电中心和负电中心不相重合, 二者之间存在一定的距离, 偶极矩不等于零。水分子的偶极矩为 $6.1 \times 10^{-30} C \cdot m$, 属于极性比较大的分子。水分子的极化率为 $1.48 \times 10^{-30} m^3$, 电离常数 $K_a = 1.8 \times 10^{-16}$, 分子具有等腰三角形的结构, 两个 $H-O$ 键为部分共价键, 键角为 104.5° , 其键能为 $18.8 kJ/mol$ ^[5]。水和水蒸气的静态介电常数可写成如下形式^[6]:

$$\epsilon = [1 + A + 5B + (9 + 2A + 18B + A^2 + 10AB + 9B^2)^{0.5}] / (4 - 4B) \quad (3)$$

式(3)中, A 和 B 由以下两式给出:

$$A = \frac{10^3 N_A \mu^2 \rho g}{M \epsilon_0 k T} \quad (4)$$

$$B = \frac{10^3 N_A \alpha^2}{3 M \epsilon_0} \quad (5)$$

式(4)、(5)中使用的系数 k 、 N_A 、 α 、 ϵ_0 和 μ 在表 1 中给出; 水的摩尔质量 M 为:

$$M = 18.015257 g/mol \quad (6)$$

式(4)中, Harris—Alder g —因子的关联方程为:

$$g = 1 + \sum_{i=1}^n n_i \delta \tau^i + n_{12} \delta \left[\frac{T}{228 K} - 1 \right]^{-1.2} \quad (7)$$

式中: $\delta=\rho/\rho^*$, $\tau=T^*/T$, $\rho^*=\rho_c$, $T^*=T_c$, ρ_c 和 T_c 分别指水的临界密度和临界温度, 其中, $\rho_c=322\text{ kg/m}^3$, $T_c=647.096\text{ K}$ 。表 2 给出了式(7)中的系数 n_i 及指数 I_i 和 J_i 。式(3)的适用温度和压力范围为:

$$273.15\text{ K}\leq T\leq 323.15\text{ K}\qquad 0<p\leq 1\,000\text{ MPa}$$
$$323.15\text{ K}\leq T\leq 873.15\text{ K}\qquad 0<p\leq 600\text{ MPa}$$

根据以上方程式便可做出水和水蒸气的介电常数随温度、压力的变化曲线。

表 1 式(4)和式(5)中所使用的各常数

物理量	数值
波尔兹曼常量 $k/\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$	1.381×10^{-23}
阿伏伽德罗常量 N_A/mol	6.022×10^{23}
平均分子极化率 $\alpha/\text{C}^2\cdot\text{m}^2\cdot\text{J}^{-1}$	1.636×10^{-40}
真空介电常数 $\epsilon_0/\text{C}^2\cdot(\text{J}\cdot\text{m})^{-1}$	8.854×10^{-12}
分子偶极矩 $\mu/\text{C}\cdot\text{m}$	6.138×10^{-30}

表 2 式(7)的系数和指数

i	I_i	J_i	n_i
1	1	0.25	0.978 224 486 286
2	1	1	-0.957 771 379 375
3	1	2.5	0.237 511 794 148
4	2	1.5	0.714 692 244 396
5	3	1.5	-0.298 217 036 956
6	3	2.5	-0.108 863 472 196
7	4	2	$0.949\,327\,488\,264\times 10^{-1}$
8	5	2	$-0.980\,469\,816\,51\times 10^{-2}$
9	6	5	$0.165\,167\,634\,970\times 10^{-4}$
10	7	0.5	$0.937\,359\,795\,772\times 10^{-4}$
11	10	10	$-0.123\,179\,218\,720\times 10^{-9}$
12	—	—	$0.196\,096\,504\,426\times 10^{-2}$

2.1 水的介电常数随温度、压力的变化

饱和状态下水的静态相对介电常数随温度、压力的变化曲线如图 1 和图 2 所示。

由图 1、图 2 看出, 随温度和压力的升高, 饱和态水的介电常数都是逐渐降低的, 这是由于水的饱和压力与饱和温度是相关的, 饱和温度的升高同时就意味着饱和压力的增大。由于水的可压缩性很小, 压力变化对其密度影响不大, 所以随着饱和温度的升高, 水的密度逐渐降低, 即单位体积内水分子的数量在减少, 这一点可由图 3(不同温度下, 水的密度与压力的关系曲线)清晰地看出来。同时, 水分子的偶极子转向极化率随温度上升而降低。这导致了

饱和状态下水的静态相对介电常数随温度、压力的升高而逐渐减小。

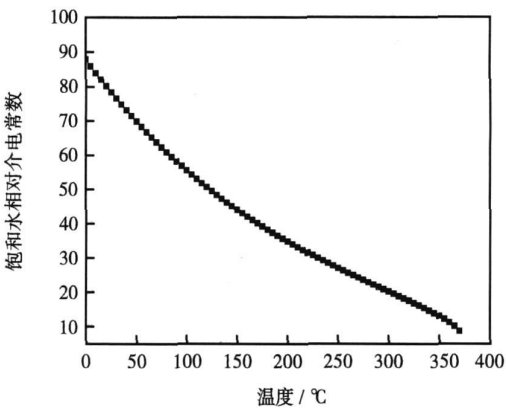


图 1 饱和水静态相对介电常数随温度的变化曲线

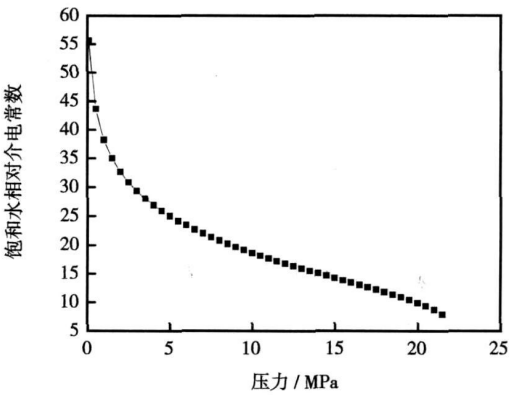


图 2 饱和水静态相对介电常数随压力的变化曲线

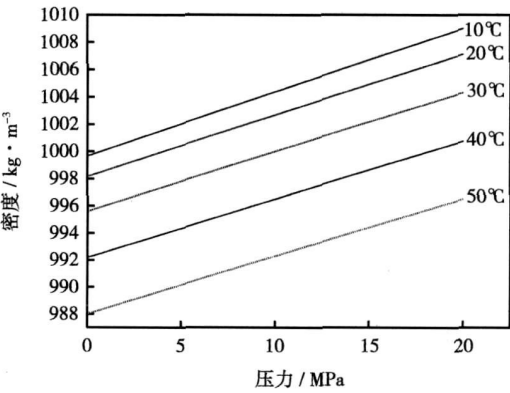


图 3 不同温度下, 水的密度随压力的变化曲线

由图 3 发现, 不同温度下, 水的密度都是随压力的增加而略有增大的, 并且增大的斜率是几乎相同的; 水的温度差别越大, 其密度的差别也越大, 特别是在温度较高时, 相同的温差会产生更大的密度差。

所以温度对水的密度的影响要强于压力的影响。在水温不变(50 °C)条件下,水的静态相对介电常数随压力的变化曲线如图4所示;不同压力下,水的静态相对介电常数随温度的变化曲线如图5所示。

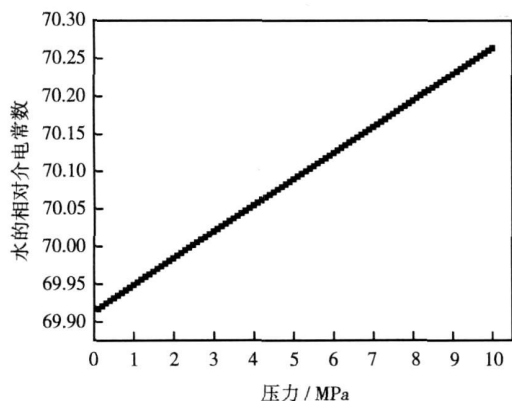


图4 水(50 °C)相对介电常数随压力的变化曲线

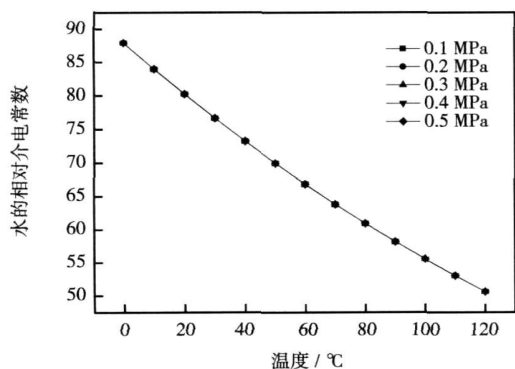


图5 不同压力下,水的相对介电常数随温度的变化曲线

图4表现出,在水温不变(50 °C)时,随压力增大,水的静态相对介电常数是略有增加的,这与图2所表现出的现象恰恰相反。在图4中,当水温保持50 °C不变,压力从0.1 MPa增大到10 MPa的过程中,其相对介电常数虽然呈增大趋势,但是变化量不大,在这种情况下,水的相对介电常数可用线性关系式表达:

$$\epsilon_w = 0.035\,03p + 69.914\,03$$

$$(0.1\text{ MPa} \leq p \leq 10\text{ MPa}) \quad (8)$$

该式的标准差 $SD = 2.17 \times 10^{-4}$,可见其线性度是很好。在10 MPa的范围内, ϵ_w 的变化量仅为0.346 8,其相对变化量为0.5%。

由图5可见,不同压力下,水的介电常数都是随温度升高而逐渐减小的,且变化幅度较大。各压力

下的曲线几乎重合在一起,这说明压力对水的介电常数影响不大。图1~图5充分说明了温度对水的静态相对介电常数的影响要远远强于压力对水的介电常数的影响。

2.2 水蒸气的介电常数随温度、压力的变化

与图1、图2的表现相反,图6、图7中饱和水蒸气的静态相对介电常数是随温度、压力的增加而逐渐增大的,并且在温度小于300 °C、压力低于15 MPa时,介电常数的变化幅度较小,在温度、压力超过上述值后,介电常数的变化幅度会迅速增大。造成这种现象的根本原因是由于水蒸气的可压缩性较大,饱和压力的增大会使水蒸气的密度增大,即单位体积内的分子数量增加,从而引起介电常数增大。图8表现了不同温度下,水蒸气的密度随压力的变化关系。

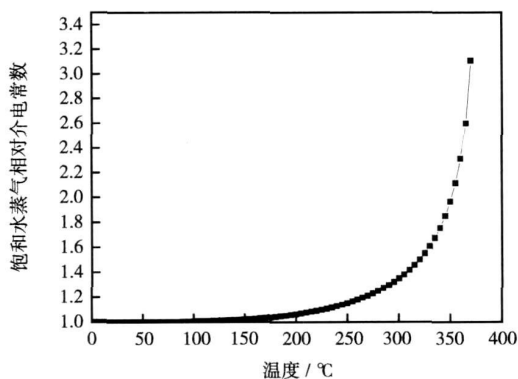


图6 饱和水蒸气静态相对介电常数随温度的变化曲线

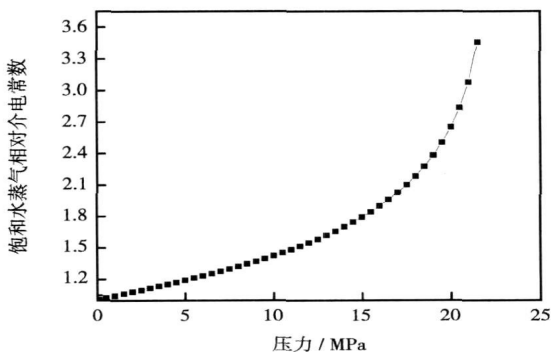


图7 饱和水蒸气静态相对介电常数随压力的变化曲线

由图8可见,不同温度下,水蒸气的密度都会随着压力的增大而迅速增加,且变化幅度很大。在同一压力下,蒸汽温度越高,由温差造成的密度差越

小, 这说明压力对水蒸气密度的影响要远远强于温度对其密度的影响。在水蒸气温度不变 (300 ℃) 时, 其静态相对介电常数随压力的变化, 如图 9 所示。图 10 表现了不同压力下, 水蒸气的静态相对介电常数随温度的变化趋势。

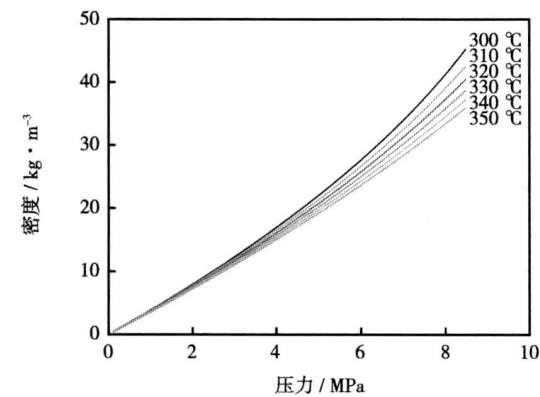


图 8 不同温度下, 水蒸气密度随压力变化曲线

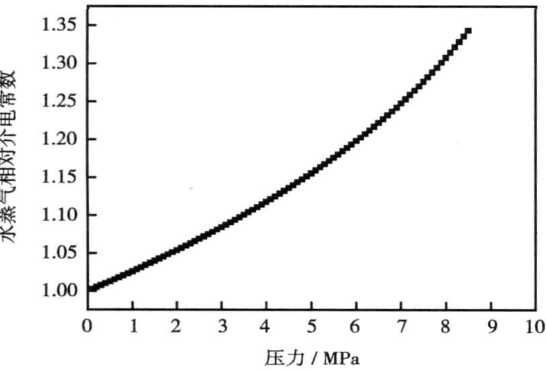


图 9 水蒸气 (300 ℃) 的相对介电常数随压力的变化曲线

图 9 所示, 当蒸汽温度一定时 (300 ℃), 其相对介电常数是随压力增加而增大的, 图中曲线可表示为:

$$\begin{aligned} \epsilon_v = & 2.311\,4 \times 10^{-4} p^3 - 5.42 \times 10^{-4} p^2 + \\ & 0.028\,25 p + 0.998\,36 \end{aligned} \quad (0.1\,\text{MPa} \leq p \leq 8.5\,\text{MPa}) \quad (9)$$

式 (9) 的均方根误差 $R=0.999\,95$, 标准差 $SD=6.72 \times 10^{-4}$ 。在计算范围内, ϵ_v 的变化量为 0.341 05, 其相对变化量为 34.0%, 这说明压力对水蒸气的相对介电常数的影响要大大强于温度的影响。经典的介电理论认为, 当气体温度恒定时, 极性气体的介电常数与压力的关系为一直线。这种说法主要是针对空气的, 并且当气体压力不大, 且 $\epsilon \approx 1$ 时才成

立。从以上的论述中发现, 式 (9) 的各高次项系数都很小, 并且压力范围较大, 可见这种结果与介电理论并不相悖。

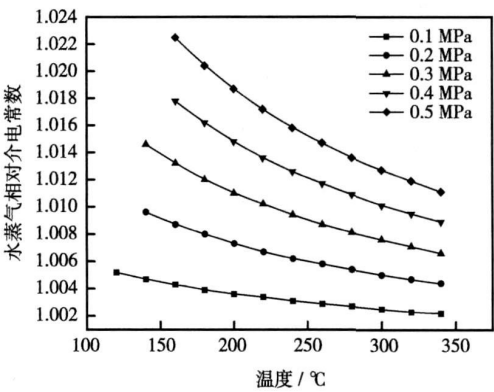


图 10 不同压力下, 水蒸气相对介电常数随温度变化曲线

图 10 中, 不同压力下水蒸气的介电常数都是随温度的增加而略有减小的, 这与图 6 中的曲线形式相反。图 10 中各曲线的形式与经典介电理论所阐述的“在压力不变条件下, 极性气体介电常数将随温度上升而下降”相一致^[7]。图 6 ~ 图 10 充分说明了压力对水蒸气介电常数的影响要远远强于温度的影响。

在湿蒸气区, 蒸汽的压力和温度不是相互独立的参数, 所以要确定湿蒸汽的状态, 除了压力、温度以外, 还必须寻找另一个热力参数。用测量的方法确定蒸汽的焓、熵比较困难, 因此, 湿度的测量就成为确定湿蒸汽另一个状态参数的有效手段。文献 [3] 中给出了湿饱和蒸汽的等效相对介电常数 ϵ_e 的近似表达式:

$$\epsilon_e = \epsilon_v \left[1 + 3 \left(\frac{\epsilon_w - \epsilon_v}{\epsilon_w + 2\epsilon_v} \right) \frac{1}{1 + \rho_w (1/Y - 1) / \rho_v} \right] \quad (10)$$

式中: Y —蒸汽湿度; ρ_w 、 ρ_v —水滴和蒸汽的密度值。由上式可见, 湿蒸汽的介电常数与蒸汽湿度 Y 有较大关系, 蒸汽湿度的变化会显著影响湿蒸汽的介电常数。

为验证电容法测量蒸汽湿度的可行性, 利用自行设计的多电极圆筒形电容传感器在空气—喷雾系统中进行了标定试验, 试验中采用 NE555 多谐振荡器测量传感器的输出效率。试验环境温度 18 ℃, 空气流量 200 kg/h, 喷水温度 16 ℃, 最大喷水量 20 kg/h。试验结果表明, 汽流湿度的变化会引起传感器容量的变化, 从而导致测量电路输出频率的变化。图 11 为试验中所用的电容传感器, 图 12 为初步标

定试验结果。

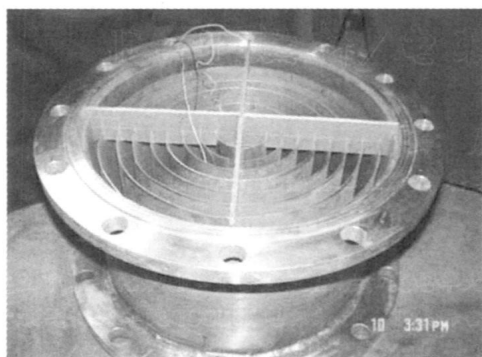


图 11 试验用电容传感器

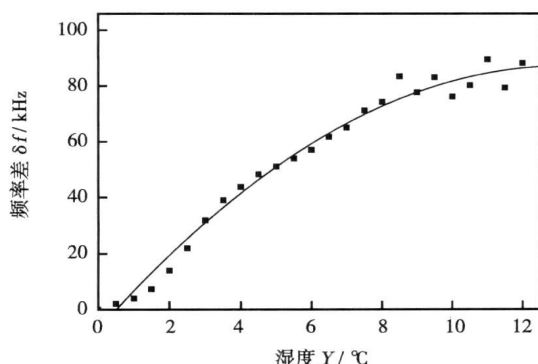


图 12 湿度与频率差的关系曲线

试验结果表明, 汽流湿度与输出频率差之间呈现出较为明显的非线性关系。经回归数据点得到:

$$Y = 8.648 \times 10^{-4} (Y)^2 + 0.044 (Y) + 0.677 \quad (11)$$

式(11)的均方差 $R = 0.961\ 52$, 标准差 $SD = 0.753\ 98$ 。

结合介电理论, 在压力不变时, 随着水温升高, 水的体积膨胀, 密度减小, 单位体积内的分子数量减少, 即单位体积内的正电荷总和 Q 减小, 从而导致单位体积内电偶极矩的总和降低, 极化强度 P 减小。在恒定电场作用下, 根据克劳修斯方程^[8]:

$$P = \epsilon_0 (\epsilon_s - 1) E \quad (12)$$

可见, 水的静态相对介电常数是随温度升高而逐渐减小的。同理, 对于介电常数受压力影响远大于温度影响的水蒸气来讲, 在温度一定时, 压力的增大减小了水分子间的距离, 增大了蒸汽密度, 根据上面的分析可知, 随着压力的升高, 蒸汽的介电常数是逐渐增加的。

综上所述, 水和水蒸气的介电常数都会随着温度和压力的变化而变化。温度对水的介电常数的影

响要远强于压力的影响; 压力对水蒸气介电常数的影响远强于温度的影响。从以上图线中可以看出, 水的介电常数要远远大于水蒸气的介电常数, 即使在压力、温度都非常高的状态下, 液态水的介电常数都不会小于 20, 而水蒸气的介电常数都不会高于 1.5, 也就是说, 不同湿度的饱和蒸汽, 其等效介电常数会产生非常明显的差异, 这就为电容法测量湿饱和蒸汽的湿度提供了可能性。初步标定试验结果也表明电容法测量蒸汽湿度是可行的。

3 结 论

通过以上分析、研究可以得到以下结论:

(1) 饱和水的静态介电常数会随温度、压力的升高而降低; 在水温不变情况下, 其静态介电常数会随压力的增大略有增加; 在压力不变的条件下, 水的静态介电常数会随温度的升高而大幅降低; 温度对水的介电常数的影响要远强于压力的影响。

(2) 饱和态水蒸气的静态介电常数会随温度、压力的升高而增大; 在温度不变时, 水蒸气静态介电常数会随压力的增大迅速增加; 在压力不变时, 水蒸气静态介电常数会随温度的升高而略有降低; 压力对水蒸气静态介电常数的影响要远强于温度的影响。

(3) 水与水蒸气的介电常数存在非常明显的差异, 对于不同湿度的饱和湿蒸汽, 其等效介电常数会产生很大的差异, 初步标定试验结果表明, 利用电容法测量蒸汽湿度是可行的。

参考文献:

- [1] 彭敏俊. 核动力装置热力分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2003.
- [2] 李炎锋, 王新军, 徐廷相, 等. 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.
- [3] 韩中合, 杨 昆. 汽轮机中蒸汽湿度测量方法的研究现状[J]. 华北电力大学学报, 2002, 29(4): 44-47.
- [4] 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [5] 文书明. 微流边界层理论及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [6] (德)瓦格纳 W, 克鲁泽 A. 水和蒸汽的性质[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [7] 殷之文. 电介质物理学(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [8] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

(编辑 滨)

电容法测量蒸汽湿度的可行性研究= **Feasibility Study of the Capacitance Method for Measuring Steam Wetness**[刊, 汉] / NING De-liang, LIU Xin-quan, GAO Lei (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) LIANG Yi (Equipment Tools Subsidiary, Harbin Measuring and Cutting Tools Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150040) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 300 ~ 304

By combining dielectric theory with water and water steam properties, the variation tendency of the static relative permittivity of water and water steam with the change of pressure and temperature was studied and the causes of the change of water and water steam permittivity were analyzed. The research results show that the influence of temperature on water permittivity is far greater than that of the pressure while the influence of pressure on steam permittivity is stronger than that of the temperature. As the permittivity of water differs very greatly from that of steam, on the basis of the capacitance-method measurement theory, a wetness measurement experiment was performed by using a self-designed cylindrical capacitance transducer. The test results indicate that the capacitance method for measuring saturated wet steam wetness is feasible. **Key words:** permittivity, water, water steam, capacitance method

燃气轮机拉杆转子有限元模型研究及临界转速计算= **A Study of a Finite Element Model for a Gas Turbine Tie-rod Rotor and its Critical Speed Calculation**[刊, 汉] / GAO Rui, YUAN Qi, GAO Jin (College of Energy Source and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 305 ~ 308

Modern gas turbine rotors mainly consist of tie-rod ones, and their forms can be classified as either central single tie rod type or circumferential multiple tie rod ones. No matter what form they assume, the tie-rod rotors are no longer of a continuous structure and the contacting surface between the wheel disks will influence the kinetic characteristics of rotors. The authors first analyzed the force bearing condition of the tie rod rotor, and then considered the influence of the contact surface rigidity on rotor kinetic characteristics. The traditional finite element method has been improved, and a corresponding calculation program, prepared. Finally, a bare shaft, a pair of contacting disk sample and the critical speed of the tie rod rotor of a certain type gas turbine were calculated. The calculation results were compared respectively with those obtained from the traditional and three-dimensional finite element method as well as the measured results, thus verifying the correctness and validity of the improved finite-element model. **Key words:** gas turbine tie-rod rotor, tie-rod rotor, critical speed, normal contact stiffness, finite element method

膜片式气动逻辑元件特性试验研究= **Experimental Study of the Characteristics of Membrane Type Pneumatic Logic Elements**[刊, 汉] / QI Hong-wei (Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), HE Ru, CHEN Lin, WEI Wei (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(3). — 309 ~ 312

The membrane-type pneumatic logic element under discussion is a key item in a turbocharged unit for compressor surge control and steam turbine overspeed protection. The authors have described the structure and working principle of the surge protection device. Regarding various test items, such as the response characteristics, working characteristics and pressure difference flow characteristics of the surge protection device, a detailed description was given of the test principles, methods and processes. The test results show that the response time of the surge protection device is 250 ms, the working characteristic curves agree well with the standard ones, and the actual pressure-difference flow characteristic curves at the outlet of the valve assume a variation tendency identical with that of the theoretical ones. All the characteristic tests display a good stability and repeatability. **Key words:** membrane type pneumatic logic element, surge protection device, characteristic test

燃气轮机变工况对 IGCC 系统性能的影响= **Influence of Gas Turbine Off-design Operating Conditions on the Performance of an IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) System**[刊, 汉] / CHEN Lei, ZHANG Zhong-xiao, XIE Hao (College of Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), LI Zhen-zhong (National Research Center of Power Plant Combustion Engineering Technology, Shenyang,