

两种能衡式蒸汽干度仪的研究

李世武, 康 芹

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 水蒸气干度是水蒸气的品质参数, 在许多工业生产中需要实时测量与控制该参数。文中分析了现有蒸汽干度的测量方法和测量仪器, 根据能量守恒原理以及混合式和凝结式蒸汽干度的测量原理, 研制了两种能衡式干度测量仪, 定量分析了它们的测量精度, 并从实用稳定性的角度得出了凝结式蒸汽干度仪更佳。为了验证测量精度, 建立了蒸汽干度实验台。实验不仅验证了能衡凝结式蒸汽干度仪的精度高达 98% 以上, 而且还表明它具有稳定性、准确性和实用性。

关 键 词: 蒸汽干度; 干度仪; 测量精度

中图分类号: TK123 文献标识码: A

引 言

含有气相水蒸气和液相水的混合物称作湿蒸气, 其中气相干饱和蒸汽的质量与湿蒸气质量的比被定义为湿蒸气的干度。湿蒸气的干度是水蒸气的重要品质参数, 在蒸汽轮机的末端几级叶片, 蒸汽干度对汽轮机的叶片寿命和汽轮机效率影响很大^[1]。在化工、食品加工、制药等工业中的许多场合, 蒸汽干度需要实时检测与控制, 尤其是在用于石油开采过程的热力采油中, 向油层注入的高温湿蒸气其干度对采油的经济性有着重要的影响^[2~4]。

由于水蒸气干度的实时测量与控制对热力采油的经济性有着重要的影响, 而国内外现还没有具有实时测量、准确度高、寿命长、造价低、性能可靠的工程测量仪器^[5], 所以对水蒸气干度测量仪器的研究与研制有着现实的意义。

水蒸气干度的测量方法, 可分为 3 类, 即化验方法、非热力学方法和热力学方法。通过文献资料研究以及对蒸汽干度在线测量的调研可知, 混合法和凝结法是一种热力学方法, 在工程中具有良好的实用性, 以下将对该方法以及依据该方法所研制的蒸

汽干度测量仪进行分析研究。

1 两种能衡式蒸汽干度仪

根据质量守恒、能量守恒原理, 以及混合式和凝结式蒸汽干度的测量原理, 提出并研制了如下能衡混合式和能衡凝结式蒸汽干度测量仪。

1.1 能衡混合式蒸汽干度仪

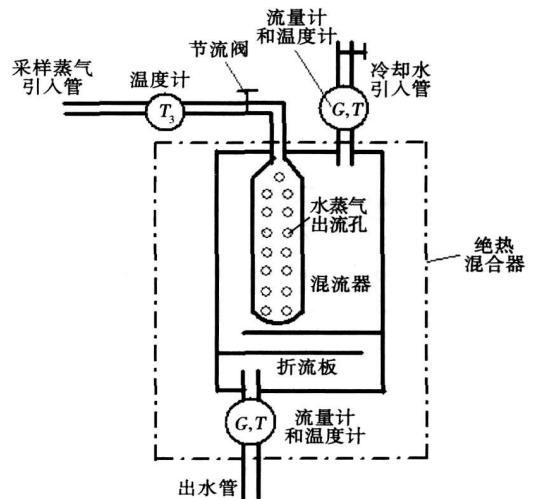


图 1 能衡混合式蒸汽干度仪

能衡混合式蒸汽干度仪如图 1 所示, 测量原理为: 将采样水蒸气与冷却水分别引入绝热混合器内混合, 使水蒸气降温、形成液态的水流出绝热混合器。通过测量入口冷却水的流量与温度、出口水的流量和温度以及水蒸气温度, 由:

冷却水能量 E_1 :

$$E_1 = G_1 C_{0-1} T_1 \quad (1)$$

出水能量 E_2 :

$$E_2 = G_2 C_{0-2} T_2 \quad (2)$$

采样蒸汽能量 E_3 :

$$E_3 = G_3 \cdot X \cdot r + G_3 C_{0-3} T_3 \quad (3)$$

混合器质量守恒:

$$G_3 = G_2 - G_1 \quad (4)$$

混合器能量守恒:

$$E_3 = E_2 - E_1 \quad (5)$$

联立上式, 得出采样蒸汽干度 X :

$$X = \frac{G_1 \cdot (C_{0-3} \cdot T_3 - C_{0-1} \cdot T_1) + G_2 \cdot (C_{0-2} \cdot T_2 - C_{0-3} \cdot T_3)}{(G_2 - G_1) \cdot r} \quad (6)$$

式中: G_1 、 T_1 —冷却水流量和温度; G_2 、 T_2 —离开绝热混合器的出水流量和温度; T_3 —采样蒸汽的温度; C_{0-1} — T_1 与 0°C 之间水的平均比热; C_{0-2} — T_2 与 0°C 之间水的平均比热; C_{0-3} — T_3 与 0°C 之间水的平均比热; r —温度 T_3 下的汽化潜热。

1.2 能衡凝结式蒸汽干度仪

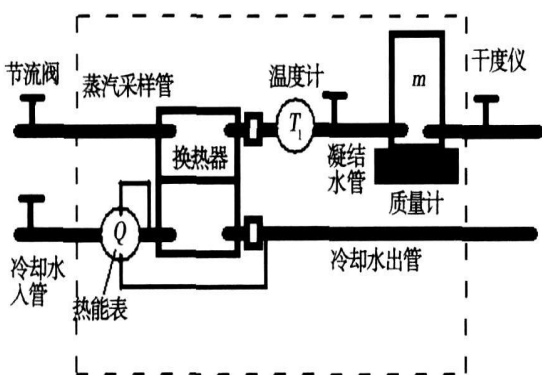


图 2 能衡凝结式蒸汽干度仪

能衡凝结式蒸汽干度仪如图 2 所示, 测量原理为: 将采样水蒸气与冷却水分别引入绝热换热器中, 使水蒸气降温形成凝结水流出。通过测量冷却水在换热器的吸热量、凝结水温和凝结水量, 由绝热换热器的能量平衡方程:

$$Q = [m \cdot X \cdot h_v + m \cdot (1-X) \cdot h_w] - m \cdot h_1 \quad (7)$$

解出采样水蒸气干度 X :

$$X = \frac{(Q/m + h_1) - h_w}{h_v - h_w} \quad (8)$$

式中: Q —在一个测量周期内冷却水在绝热换热器中获得的热量; m —在一个测量周期内凝结水的质量; h_1 —凝结水温度 T_1 下的焓; h_v 和 h_w —采样水蒸气在待测压力下的干饱和蒸汽焓和饱和水焓。

2 能衡式蒸汽干度测量仪的精度分析和实验

2.1 能衡混合式蒸汽干度仪的精度分析

能衡混合式蒸汽干度仪中涉及的测量参数有冷却水流量 G_1 和温度 T_1 , 离开绝热混合器的出水流量 G_2 和温度 T_2 , 采样蒸汽的温度 T_3 , 如式(6)所示。由于采样蒸汽为饱和蒸汽, 而蒸汽炉产生的饱和蒸汽可通过饱和压力得出饱和温度。当蒸汽炉的蒸汽压力测量准确则蒸汽温度也准确, 所以这里不分析采样蒸汽温度 T_3 的测量误差, 仅分析由 G_1 、 T_1 、 G_2 和 T_2 的测量误差所引起的蒸汽干度的测量误差。在能衡混合式蒸汽干度仪中, 流量 G_1 和 G_2 的测量采用的是电磁流量计, 其最大测量误差为 $\pm 0.5\%$, 温度 T_1 和 T_2 的测量采用的是晶体管温度计, 在量程范围内的最大测量误差为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 在本干度仪中折算的最大测量误差为 $\pm 0.5\%$ 。

为表明 G_1 与 G_2 以及 T_1 与 T_2 的叠加误差对所测蒸汽干度误差的影响, 这里引出两个定义, 分别为同比同向误差和同比反向误差。同比同向误差, 表示两个测量计在其测量误差范围之内, 所测参数的误差比例相同且为同向(即都大于或都小于实际参数); 同比反向误差, 表示两个测量计在其测量误差范围之内, 所测参数的误差比例相同且为反向(即一个大于而另一个小于实际参数)。

图 3 给出了当 G_1 、 G_2 、 T_1 和 T_2 都有测量误差时, 叠加误差所引起的蒸汽干度测量误差。图中实线表示 G_2 与 G_1 以及 T_2 与 T_1 均为同比同向误差的情形, 虚线表示 G_2 与 G_1 以及 T_2 与 T_1 均为同比反向误差的情形。

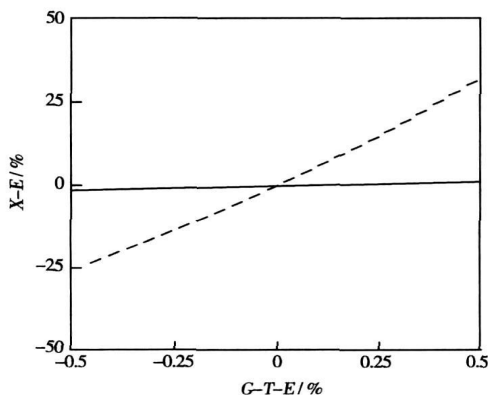


图 3 $G_1 G_2 T_1 T_2$ 对干度的叠加误差

由图 3 可见, 当 G_2 与 G_1 以及 T_2 与 T_1 均为同

比同向误差时, 它们各自测量误差的叠加导致了所测干度的误差远超出了允许的范围, 而当 G_2 与 G_1 以及 T_2 与 T_1 均为同比反向误差时, 它们各自测量误差的叠加引起的干度测量误差仅在 1.4% 之内, 这是相当高的测量精度。由此得出: 能衡混合式蒸汽干度仪的可行性, 即满足工程允许的干度测量误差 4%, 在于选择同比同向流量计 G_1 与 G_2 , 以及同比同向温度计 T_1 与 T_2 , 否则能衡混合式蒸汽干度仪将没有实用性。

2.2 能衡凝结式蒸汽干度仪的精度分析

能衡凝结式蒸汽干度仪中涉及的测量参数有冷却水的吸热量 Q 、凝结水质量 m 和凝结水温 T_1 , 如式(8)所示。这里分析由 Q 、 m 和 T_1 的测量误差所引起的蒸汽干度的测量误差。在能衡凝结式蒸汽干度仪中, 热量 Q 的测量采用的是高性能、SST 技术的海威茨热能表, 经过校核补偿后其最大测量误差为 $\pm 0.8\%$, 质量 m 的测量采用的是容重 6 kg 最大测量误差为 $\pm 0.1\%$ 的电子天平, 温度 T_1 的测量采用的是晶体管温度计, 其最大测量误差为 $\pm 0.5\%$ 。

图 4 给出了当 Q 、 m 和 T_1 都有测量误差时, 它们的叠加误差所引起的蒸汽干度测量误差。图中实线表示 m 和 T_1 与 Q 为同比同向误差的情形, 虚线表示 m 和 T_1 与 Q 为同比反向误差的情形。

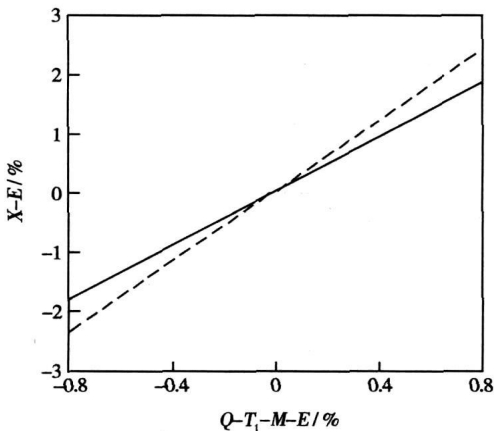


图 4 Q 、 m 和 T_1 对干度的叠加误差

由图 4 可见, 当 m 和 T_1 与 Q 为同比同向误差时, 它们各自测量误差的叠加所引起的最大干度测量误差仅在 1.9% 之内, 当 m 和 T_1 与 Q 为同比反向误差时, 它们各自测量误差的叠加所引起了最大干度测量误差仅在 2.45% 之内, 这都达到了在工程允许的干度测量误差 4% 之内。

对比能衡混合式蒸汽干度仪和能衡凝结式蒸汽

干度仪的精度分析, 在实用中由于选择同比同向测量仪以及区分同比反向测量仪需作细致的工作, 从实用稳定性和可靠性的角度来说, 能衡凝结式蒸汽干度仪的性能更佳。

2.3 静态蒸汽干度仪以及干度仪对比实验台

为了验证能衡凝结式蒸汽干度仪的可测量蒸汽干度的实用性以及测量精度, 在实验室里, 设计加工了静态蒸汽干度仪, 并建立了静态蒸汽干度仪与能衡凝结式蒸汽干度仪对比实验台, 如图 5 所示。图中, 静态蒸汽干度仪由蒸汽进入管、绝热混合水箱(由导热系数小比热容小的材料制成, 且外敷隔热材料)、冷水进入管与热水排出管、电子天平、高精度温度计组成; 对比实验台由饱和蒸汽发生器、静态蒸汽干度仪、能衡凝结式蒸汽干度仪、三通管和附属管路组成, 且所有管路均有优良的保温。

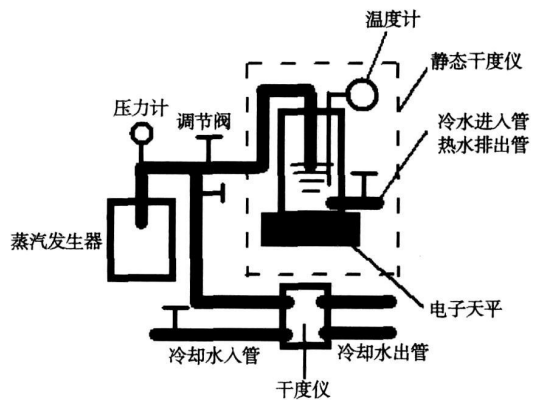


图 5 干度仪对比实验台

静态蒸汽干度仪, 是将一定比例的冷水与待测干度的蒸汽进行绝热混合, 成为纯液态的热水, 由能量衡算确定蒸汽干度这一原理来研制的, 其测量方法为: 在 τ_1 时刻, 由电子天平测量绝热混合水箱的总重量 m_1 , 其中包括内装的冷水质量 $m_{1,1}$ (已在 τ_1 时刻前测量), 由高精度温度计测量绝热混合水箱内冷水的温度 T_1 , 然后由稳定工况下的饱和蒸汽发生器导入适量的饱和蒸汽, 并由压力计测量饱和蒸汽发生器的蒸汽压力 p 。当混合水箱内的冷水与蒸汽充分混合并成为纯液态的热水, 此时为 τ_2 时刻。在 τ_2 时刻, 由电子天平测量绝热混合水箱的总重量 m_2 , 由高精度温度计测量绝热混合水箱内混合热水的温度 T_2 , 根据绝热混合水箱的能量平衡方程:

$$(m_2 - m_1 + m_{1,1}) \cdot h_2 = [(m_2 - m_1) \cdot X \cdot h_v + (m_2 - m_1) \cdot (1 - X) \cdot h_w] + m_{1,1} \cdot h_1 \quad (9)$$

解出采样水蒸气干度 X :

$$X = \frac{(m_2 - m_1 + m_{1,1}) \cdot h_2 - m_{1,1} h_1 - (m_2 - m_1) \cdot h_w}{(m_2 - m_1) \cdot (h_v - h_w)} \quad (10)$$

式中: h_1 —冷水温度 T_1 下的焓; h_2 —热水温度 T_2 下的焓; h_v 、 h_w —待测干度的饱和蒸汽在压力 p 下的干饱和蒸汽焓和饱和水焓。

对于饱和蒸汽发生器在稳定工况下连续导出的饱和蒸汽,由于静态蒸汽干度仪涉及的测量仪器仅有电子天平和高精度温度计两个,且电子天平的最大测量误差为 0.1%、高精度温度计的最大测量误差为 0.5%,所以静态蒸汽干度仪的精度高于能衡凝结式蒸汽干度仪,它可作为干度测量的标准来评价能衡凝结式蒸汽干度仪的测量精度。

在干度仪对比实验台上,将连接于饱和蒸汽发生器与静态蒸汽干度仪和凝结式蒸汽干度仪之间的三通管调节阀打开,就可同时进行这两个干度仪的干度测量实验;当关闭静态蒸汽干度仪的蒸汽入口管阀门,就仅能进行凝结式蒸汽干度仪的干度测量实验。实验表明:两种干度仪所测的干度值很接近,两者误差在 1.5% 之内。通过对比实验,验证了能衡凝结式蒸汽干度仪的准确性,尤其是凝结式蒸汽干度仪单独进行的多次数小时连续实验,验证了它具有稳定性和实用性。

3 结 论

混合法和凝结法是测量蒸汽干度的两种热力学方法。本文根据能量守恒原理以及混合式和凝结式蒸汽干度的测量原理,提出和研制了两种能衡式蒸汽干度测量仪,通过分析研究得出:在现有测量仪表的技术下,能衡凝结式蒸汽干度仪的测量精度能达到 98%;在加工和实用性方面,能衡凝结式蒸汽干度仪要明显优于能衡混合式蒸汽干度仪;能衡凝结式蒸汽干度仪具有稳定性、准确性和实用性,能在实际工程中应用。

参考文献:

- [1] 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(3): 44-47
- [2] 尚思贤,赵芳茹,张利明. 稠油热采井下蒸汽干度测试工艺的研究与应用[J]. 西安石油学院学报, 2000, 15(3): 22-25
- [3] 冯建忠,董振光,宋林松. 稠油热采注蒸汽系统设计参数探讨[J]. 石油规划设计, 2005, 16(3): 28-29
- [4] 曲 丽,姜泽菊,安申法,等. 稠油注汽管网蒸汽流量干度调控装置研究[J]. 石油机械, 2003, 31(8): 55-56
- [5] 陈万洪. 蒸汽热采测试技术现状及发展方向[J]. 特种油气藏, 1995, 2(2): 37-42

(编辑 渠 源)

新技术

三菱重工的 250 MW IGCC 示范电厂

据《Gas Turbine World》2007年1~2月号报道,日本清洁煤发电研究开发公司正准备在 Nakoso 电站投运一台采用吹空气煤气化炉的 250 MW IGCC(整体煤气化联合循环)发电装置,该示范装置计划于 2007 年中期试验。

该发电装置是按照半商业规模设计和建造,作为示范机组用来证明用于新一代先进的吹空气煤气化炉商业电厂的新技术。

装置的输出:采用次烟煤供料和 $5\ 030\ \text{kJ}/\text{m}^3$ 合成气作为燃料,额定净输出功率为 220 MW, LHV 效率为 42%。

联合循环:由烧合成气并抽取空气的 M701DA 燃气轮机、余热锅炉和加大尺寸的汽轮机供给动力。

气化炉:干供料吹空气的气化炉,煤处理能力为每天 1 700 t,膜式水冷壁,冷煤气净化。

排放:应用 SCR(选择催化还原)设备, NO_x 排放低于 $5\ \text{ml}/\text{m}^3$;使用湿式化学吸收脱硫技术使 SO_x 排放低于 $8\ \text{ml}/\text{m}^3$ 。

(吉桂明 供稿)

两种能衡式蒸汽干度仪的研究=A Study of Two Types of Energy-balanced Steam Dryness-fraction Measuring Instrument[刊, 汉]/LI Shi-wu, KANG Qin (College of Power and Energy Source, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2007, 22(5). — 517 ~ 520

The steam dryness fraction is a quality parameter of steam, which needs to be real-time measured and controlled in many industrial production processes. Analyzed are the current measuring methods and instruments of steam dryness-fraction. On the basis of energy conservation theory and measurement theory of hybrid and condensing type steam dryness-fraction, two types of energy-balanced steam dryness-fraction measuring meter have been developed. Furthermore, their measurement accuracy is quantitatively analyzed and from the viewpoint of practical stability the authors have concluded that the condensing type steam dryness-fraction meter is superior to the hybrid type. To verify measurement accuracy, a steam dryness-fraction test rig has been set up. The tests not only show that the energy-balanced condensing type meter has attained an accuracy higher than 98% but also indicate that it is stable, accurate and practical. **Key words:** steam dryness-fraction, dryness-fraction measuring meter, measurement accuracy

加热器端差对机组热经济性影响的定量分析方法=A Method for the Quantitative Analysis of the Impact of Terminal Temperature Differences of Heaters on Thermal Effectiveness of Power Generating Units[刊, 汉]/LIU Qiang, WANG Yi-lin (Power Department, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, China, Post Code: 211167), GUO Min-chen (Power Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206), TIAN Yong-wei (National Engineering Research Center of Thermal Power Plant Vibrations, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2007, 22(5). — 521 ~ 524

A mathematical model has been established to analyze the impact of terminal temperature differences of heaters under a given flow rate on the thermal effectiveness of power generating units. By using the model, different types of heaters are discussed and it is no longer necessary to independently calculate the influence of the change in terminal temperature differences on the heat absorption quantity of boilers. By taking into account in a comprehensive way the structural features of a thermal system and also an auxiliary steam-water system, an integral and quantitative analysis was performed of the impact of the terminal temperature differences of heaters on thermal effectiveness of power generating units. The foregoing can well provide a theoretical basis for achieving energy saving, reducing coal consumption of thermal power plants as well as performing a quantitative analysis of the thermal systems. The analysis of a calculation example for a 600 MW power generating unit shows that the greater the terminal differences, the lower the thermal effectiveness of the power plant and the smaller the terminal differences, the higher the thermal effectiveness of the plant. **Key words:** thermal system, terminal temperature difference, thermal effectiveness, matrix method

自激励脉动燃烧式锅炉设计方法=A Method for the Design of Self-excited Pulsation-combustion Boilers[刊, 汉]/LI Hua, DENG Kai, ZHONG Ying-jie, et al (College of Electromechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, China, Post Code: 310014)//Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2007, 22(5). — 525 ~ 528

The use of self-excited pulsation combustion technology to a boiler can not only enhance its thermodynamic performance but also reduce its emission of flue gas pollutants. Concerning this issue, a theoretical study of pulsation boiler design and its experimental verification has been performed. On the basis of analyzing the restrictions encountered during the use of the pulsation combustion technology to boilers, the pulsation boiler design criteria can be given as follows: the burners should be located at a flow passage 1/4 length of distance from the fan inlet, the total area of the cross sections of various flue pipes should be 20% to 30% of the cross section area of the furnace with the diameter of a tail pipe being determined by the pulsation frequency. The effective flow area of various gas flow passages should be equal. According to the above design criteria, a pulsation boiler has been designed and manufactured and a thermodynamic performance test con-