

热流量计量分析与应用

冯殿义¹, 徐 波²

(1. 辽宁工学院 机械与自动化学院, 辽宁 锦州 121001; 2. 上海理工大学 动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 阐述了蒸汽闭路循环系统的热能计量原理与方法, 在一定的范围内, 建立了过热水蒸气热和冷凝水热流量计算的数学模型; 给出了闭路循环系统中用户实际消耗热能的计算式和计量方法, 使热能计量更趋于合理。采用热能计量方法, 促进了企业能源节约和合理使用, 节能效果显著。

关 键 词: 热流量; 计算公式; 数学模型; 闭路循环系统

中图分类号: TK11 文献标识码: B

符号说明

G_v, G_w — 蒸汽、冷凝水质量流量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$;
 $\Delta G_v, \Delta G_w$ — 蒸汽、冷凝水的质量误差/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$;
 $\Delta G_{v, \text{Lim}}, \Delta G_{w, \text{Lim}}$ — 蒸汽、冷凝水质量流量的极限误差/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$;
 h_v, h_w — 蒸汽、冷凝水焓值/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;
 $\Delta h_v, \Delta h_w$ — 蒸汽、冷凝水焓的测量误差/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;
 $\Delta h_{v, \text{Lim}}, \Delta h_{w, \text{Lim}}$ — 蒸汽、冷凝水焓极限误差/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;
 p — 过热蒸汽的绝对压力/ MPa ;
 Δp — 蒸汽压力变送器仪表误差/ MPa ;
 Δp_{Lim} — 蒸汽压力测量极限误差/ MPa ;
 Q — 系统消耗热流量/ $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$;
 Q_e — 系统额定消耗热流量/ $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$;
 Q_v, Q_w — 蒸汽、冷凝水热流量/ $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$;
 ΔQ — 系统消耗热流量测量误差/ $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$;
 ΔQ_e — 系统消耗额定热流量测量误差/ $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$;
 $\Delta Q_v, \Delta Q_w$ — 蒸汽、冷凝水热流量测量误差/ $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$;
 $\Delta Q_{v, \text{Lim}}, \Delta Q_{w, \text{Lim}}$ — 蒸汽、冷凝水热流量极限误差/ $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$;
 t_v, t_w — 蒸汽、冷凝水的温度/ $^{\circ}\text{C}$;
 $\Delta t_v, \Delta t_w$ — 蒸汽、冷凝水的温度变送器仪表误差/ $^{\circ}\text{C}$;
 $\Delta t_{v, \text{Lim}}, \Delta t_{w, \text{Lim}}$ — 蒸汽、冷凝水的温度极限误差/ $^{\circ}\text{C}$;
 ΔV — 蒸汽流量变送器仪表误差/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1 前 言

目前在热能计量管理和经济核算中, 蒸汽计量

通常采用质量流量计量方法, 这种传统的计量方法不能真正反映用户的能量消耗情况, 主要表现在两个方面: 一是蒸汽的质量流量不能体现蒸汽携带的热量, 不同压力与温度的蒸汽携带热量不同; 二是对于闭路循环系统不能体现用户实际消耗热能, 用户消耗的热能为蒸汽携带的热量与冷凝水送回系统的热量之差。因此, 蒸汽质量流量计量不能真正反应蒸汽的成本。

本文对蒸汽热流量计量原理与方法进行分析, 并在生产中应用, 表明在现有的流量计量基础上, 实现蒸汽热流量计量方便可行, 且收到较好的效果。

2 蒸汽热流量计量原理

2.1 热流量测量原理

蒸汽携带的热流量为质量流量与蒸汽焓的乘积, 即:

$$Q_v = G_v \cdot h_v \quad (1)$$

对于闭路系统, 用户送回系统的热能为冷凝水的热流量质量流量与焓的乘积:

$$Q = G_w \cdot h_w \quad (2)$$

闭合回路消耗热流量:

$$Q = G_v \cdot h_v - G_w \cdot h_w \quad (3)$$

用蒸汽和水的焓值对蒸汽质量流量按式(3)进行修正, 即可实现蒸汽热流量。

2.2 焓值的计算

目前国际上尚未规定焓计算式, 蒸汽和水的焓值计算式可按蒸汽热力性质表数据回归得到, 蒸汽的焓与压力和温度有关, 所以蒸汽焓回归计算式为压力和温度的二元函数:

$$h_v = f(p, t_v) \quad (4)$$

压力对冷凝水焓的影响可忽略不计, 冷凝水的

焓只是温度的函数, 得到:

$$h_w = f(t_w) \tag{5}$$

焓为温度和压力的函数, 因此, 通过压力和温度的测量, 可通过式(4)和式(5)间接测量蒸汽和水的焓值。

2.3 热流量计算式

用户消耗的热流量与质量流量、温度和压力有关, 可描述为:

$$Q = f(G_v, t_v, p, G_w, t_w) \tag{6}$$

3 误差分析

各闭合回路消耗热流量的测量为间接测量, 测量的极限误差可按下式估算^[1]:

$$\Delta Q_{Lim} = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial G_v}\right)^2 \cdot \Delta G_{v, Lim}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial t_v}\right)^2 \cdot \Delta t_{v, Lim}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial p}\right)^2 \cdot \Delta p_{Lim}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial G_w}\right)^2 \cdot \Delta G_{w, Lim}^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial t_w}\right)^2 \cdot \Delta t_{w, Lim}^2} \tag{8}$$

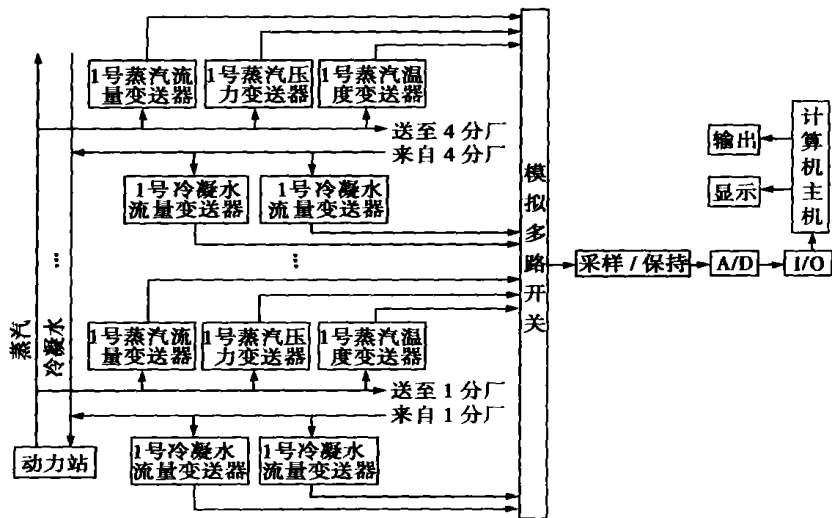


图 1 闭路供热系统消耗热流量测量系统示意图

质量流量极限误差由流量变送器的精度决定。焓值误差由方法误差, 即最小二乘法拟合误差和间接测量的一次仪表误差两部分组成。蒸汽焓值是压力和温度的二元函数, 对于冷凝水焓的间接极限误差仅与温度有关, 则各系统蒸汽和冷凝水焓值极限误差分别为:

$$\Delta h_{wv, Lim} = \Delta h_{v1, Lim} + \sqrt{\left(\frac{\partial h_v}{\partial p}\right)^2 \cdot \Delta p_{Lim}^2 + \left(\frac{\partial h_v}{\partial t_v}\right)^2 \cdot \Delta t_{v, Lim}^2} \tag{9}$$

$$\Delta h_{w, Lim} = \Delta h_{w1, Lim} + \sqrt{\left(\frac{\partial h_w}{\partial t_w}\right)^2 \cdot \Delta t_{w, Lim}^2} \tag{10}$$

4 实际应用

4.1 测量系统

某制药公司动力分厂蒸汽动力站为闭路供热系统, 动力站向 4 个分厂提供由合成分厂的余热锅炉回收的化学反应热和动力站 10 t/h 锅炉生产的过热蒸汽, 动力站向各分厂供汽压力为 0.4 ~ 0.6 MPa, 温度 212 °C。各分厂冷凝水经气水分离器分离掉蒸汽后送回动力站, 除去杂质后直接作为锅炉给水使用, 冷凝水温度为 60 ~ 80 °C。1999 年, 动力站将各分厂的质量流量计量核算方法改为热流量计量核算。在原流量测量装置基础上采用多路开关式计算机测量系统, 实现热流量计量。测量系统如图 1 所示。

4.2 热流量计算

本文分别对压力为 0.4 ~ 0.7 MPa, 温度为 160 ~ 220 °C 范围内的过热蒸汽和温度在 50 ~ 90 °C 冷凝水, 按最小二乘法拟合得到计算式为:

$$h_s = 3219.817 - 0.00762t_v - 79193.5 \frac{1}{t_v} + 21.163 \frac{1}{p} + 0.1567t_v \tag{11}$$

$$h_w = -0.36 + 4.1918t_w \tag{12}$$

式(11)和式(12)的最大拟合误差分别为 $\Delta h_{v1} = 10.01$ kJ/kg, $\Delta h_{w1} = 8.9$ kJ/kg, 相对误差分别为 $\delta_{v1} = 0.36\%$ 和

$$\delta_{w1} = 0.32\%$$

4.3 极限误差计算

4.3.1 仪表误差

系统测量所用变送器为 DDZ - III 型。压力变送器和温度变送器精度均为 1.0 级, 蒸汽测量采用涡街流量变送器, 冷凝水测量采用涡轮流量变送器。仪表参数见表 1。

表 1 仪表参数

变送器	温度变送器	温度变送器	压力变送器	涡街流量变送器	涡轮流量变送器
测量范围	0 ~ 150 °C	100 ~ 300 °C	0 ~ 1.0 MPa	200 ~ 2000 m ³ /h	0.6 ~ 4.0 m ³ /h
误差 / %	±1.5	±2.0	±0.01	±1.0	±0.5

4.3.2 焓的极限误差

$t_v = 212$ °C 的蒸汽, 当 $p = 0.4$ MPa, 蒸汽焓极限误差值最大, 由式 (9) 和式 (11) 计算得到:

$$\Delta h_{v, \text{Lim}} = 1.495 \text{ kJ}$$

冷凝水焓值的极限误差由式 (10) 和式 (12) 计算得到:

$$\Delta h_{w, \text{Lim}} = 2.515 \text{ kJ}$$

4.3.3 系统消耗热流量误差

闭路系统消耗热流量测量误差可通过编程计算得到。

蒸汽质量流量取量程的取大值:

$$G_v = 2.067 \times 150 = 310.05 \text{ kg/h}$$

各分厂冷凝水损失的质量流量为 30%, 即返回动力站的冷凝水的最大质量流量为:

$$G_w = G_v \times 70\% = 274.90 \text{ kg/h}$$

$t_v = 180$ °C 的蒸汽, 当 $p = 0.6$ MPa 时, 闭路系统的热流量测量绝对误差最大, 由式 (8) 热流量极限误差为:

$$\Delta Q_{\text{Lim}} = 7545.78 \text{ kJ/h}$$

热流量测量最大误差为:

$$\Delta Q_{\text{max}} = 15091.56 \text{ kJ/h}$$

当 $t = 212$ °C, $p = 0.6$ MPa 时, 闭路系统的热流量测量相对误差最大, 误差为:

$$\frac{\Delta Q}{Q} \times 100\% = 1.95\%$$

测量系统具有较高精度, 满足工程要求。

5 结 语

在所述的闭路系统热能测量方法中, 热量计量充分反映了用户热能的消耗, 在能源管理和经济核算中更趋合理, 促进了能源的合理分配和使用, 从而节约能量。本文所述的热量计量方法是在流量测量基础上, 建立数学模型, 借助计算机或智能仪容易实现。本文实例中, 采用这一方法后, 各分厂清楚地了解到本企业的真正能耗水平, 加强冷凝水回收和设置保温工作, 从中收到了明显的经济效益。整个系统冷凝水回收率由原来的 30% 增加到 70%, 平均温度增加了 22 °C, 仅此一项节能 4.7×10^9 kJ/a, 节水约 8.7×10^5 t/a, 节能效果显著。随着热量计量方法的推广应用, 将会带来显著的经济效益和社会效益。

参考文献:

- [1] 庞麓鸣, 陈 军. 水蒸气热力图和简表[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- [2] 程 贺. 流量测量及补偿技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1995.

化学回热燃蒸联合循环效率再提高

据《Теплоэнергетика》2002 年 12 月号报道, 俄罗斯教德萨工业大学研究探讨了一种新型高效的利用燃气轮机后燃气的热量来蒸汽转化天然气的燃蒸联合循环装置, 提供了该装置热力系统计算和分析的结果。

全球对电能的需求日益增加以及预期有大量的发电装置由于已耗尽其使用寿命将退出运行, 摆在动力工程面前的一个任务就是研制并投运新的发电装置。

燃蒸联合循环装置在最大程度上满足这些要求。这些燃气轮机装置的效率处于 38% ~ 39.5% 水平, 燃蒸联合装置的效率为 56% ~ 58%。

如果利用排气热量化学回热, 则可以显著提高现代燃蒸联合装置的效率。为此, 应该把它们设计成具有低的压比, 燃气轮机后的排气最初进入化学转化器, 然后进入余热锅炉。

应该利用焓效率评定具有化学回热的燃蒸联合装置的效率。具有化学回热的燃蒸联合装置的焓效率在向用户供给转化气的情况下约为 80%, 在生产转化气的装置内部分使用转化气的情况下为 63% ~ 64%。

(吉桂明 供稿)

ment, Wondersun Milk Products Industrial Co.Ltd., Harbin, China, Post Code: 150090) //Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2004, 19(5). — 534 ~ 536

The classification and layout schemes of supplementary-firing burner units for gas-steam combined cycle heat-recovery boilers are described, and the design and construction features of an in-built supplementary-firing burner unit operating on gas fuel analyzed. A method for calculating the major parameters of the above-mentioned unit and the composition of a supplementary firing system are given. In addition, a correction formula for calculating the theoretical consumption of oxygen is proposed and the main factors affecting maximum supplementary-firing fuel consumption are indicated. Also given is the calculation method and formula for determining the maximum supplementary-firing fuel consumption. The information given above may serve as a guide during the design and type selection of supplementary-firing burner units as well as the design of heat recovery boilers. **Key words:** supplementary firing, supplementary-firing burner unit, combined cycle, heat recovery boiler

300 MW 机组排污膨胀器的事故分析及改造 = **Failure Analysis and Modification of the Blow-down Flash Tank of a 300 MW Unit** [刊, 汉] / JIN Chun-nan, HE fu-dong, et al (Harbin No.703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), MAN Guo-dong (Shuangyashan Electric Power Plant, Shuangyashan, China, Post Code: 155136) //Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2004, 19(5). — 537 ~ 538

The periodic blow-down flash tank of a 300MW unit suffered serious overpressure and serious carry-over of water at a steam exhaust port during its operation. Through calculations and a structural analysis the causes of the failure were identified as irrational structure and insufficient volume of the flash tank as well as an excessively small section area of the steam exhaust port. In light of the results of failure analysis it was decided to change the flash tank dimensions and structure. Three years of stable operation after completion of the flash tank modification indicate that the implemented changes have brought about excellent results, showing promise of its prospective wide application in other analogous units. **Key words:** expansion tank, critical speed, flashing, small hole injection

热流量计量分析与应用 = **Analysis and Application of Heat Energy Flux Metering** [刊, 汉] / FENG Dian-yi (Liaoning Engineering Institute, Jinzhou, China, Post Code: 121001), XU Bo (Power Engineering College under the Shanghai University of Science &Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2004, 19(5). — 539 ~ 541

The principle and method of heat energy flux metering is expounded for a closed steam circulation system. Within a certain range a mathematical model was set up for calculating the heat energy flux of superheated steam and condensate. Calculation formulas and a metering method are presented for the actually consumed heat energy by end-users in a closed circulation system, making the metering of heat energy flux tend to be more rational. The application of this heat-energy metering method will promote the rational consumption and considerable savings of energy in industrial enterprises. **Key words:** heat energy flux, calculation formula, mathematical model, closed circulation system

浅析吹风气余热回收锅炉的运行 = **Brief Commentary on the Operation of a Heat Recovery Boiler by Utilizing Blown-in High-temperature Air** [刊, 汉] / CHEN Tian-shui, SUI Guang-ke, JIAN Yu-fen (Thermal Power Plant Affiliated to Lunan Chemical Fertilizer Factory, Tengzhou, Shandong Province, China, Post Code: 277527) //Journal of Engineering for Thermal Energy &Power. — 2004, 19(5). — 542 ~ 543

The basic structure of a Q75/900-25-3. 82/450 heat recovery boiler is presented, which operates by utilizing blown-in high-temperature air. Some problems in operation are analyzed along with a description of load adjustment and economic benefits being achieved. **Key words:** blown-in air, waste heat recovery, vibration