

过热蒸汽热量的计算及仪表

张锡林

(计算机及自动化系)

摘要: 本文提出了有关计算过热蒸汽热量的实用数学模型,同时简要介绍了根据这些数学模型研制的热量计。

关键词: 过热蒸汽, 热量计, 数学模型, 单片微型计算机

1 前 言

供热蒸汽热量的计量是热电厂(或集中供热锅炉房)及热用户的主要经济指标,长期以来,计量供热蒸汽热量的方法是:由测量到的汽温、汽压(取数天的平均值,有的甚至取额定参数)从蒸汽焓—熵表查得焓值,再乘上由蒸汽流量表测量到的流量累计值,便得到热量。这种测量加人工计算的热量计量方法,不仅计算工作量大,而且不能反映汽温、汽压变动时对热量值的影响。因为蒸汽流量是通过测量节流件的差压得到,而节流件是根据额定参数设计制造的,当蒸汽参数偏离额定值时,流量的测量将产生较大的误差,这样用以上的这种方法来计量蒸汽热量误差较大,精度很低。为了加强能量管理,提高能量计量的精度,降低能耗,研制一种能直接测量供热蒸汽热量且精度又较高的仪表,就成为一个迫切需要解决的课题。

由于蒸汽热量的测量,需要进行复杂的运算,同时蒸汽参数又经常变化,所以研制的“热量计”必须具有很强的运算功能和随蒸汽参数的变化而自动进行修正的功能。因此这种仪表采用微型单片机为其核心是最适宜的。因它除具有一般微机的智能化功能外,它体积小,价格低,运行安全可靠,维护简单,是今后仪表智能化的发展方向。

我系“热量计”研制组研制成的“热量计”,由于采用了单片机,从而实现了对供热蒸汽热量的直接测量。它除有较优良的性能和较高的测量精度外,在测量热量的同时,又能把温度、压力、蒸汽流量也测量了出来,是功能齐全的智能化仪表。

2 数学模型的建立

建立数学模型,是实现了对供热蒸汽热量测量的首要任务。“热量”并不是工质的参数,它是工质状态变化过程中吸收或放出的能量,是与工质状态变化过程有关的过程函数。而“热量计”所要测量的供热蒸汽的“热量”,并不是指上述定义下的热量,而是供热蒸汽参数下的蒸汽总焓值,即:

$$H = Gh$$

式中, G —蒸汽流量 “kg/h”

h —焓 “KJ/kg”

H —总焓值 “kJ/h”

焓是只与工质状态有关的态函数, 因此是与热量有本质区别的两个物理量。但是由于习惯上的原因, 这儿仍然把它称之为“热量”。测量到蒸汽流量及焓值后, 就可根据上式由单片机计算出热量, 并把它显示或打印记录下来。

蒸汽流量是压差、比容等参数的函数, 它可用差压计测量节流件的压差, 再由“流量计”的运算单元, 根据流量公式计算出来。而焓值是与温度、压力有关的导出参数, 不能象温度、压力那样直接测量到, 只能根据温度和压力值, 从焓—熵表(或图)查得。因此寻找一个合适的计算焓值的数学模型是实现供热蒸汽热量测量的首要任务。

2.1 蒸汽流量计算公式

一般是采用以下的实用公式来计算蒸汽的流量的:

$$G = 0.0125 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot dt^2 \cdot \sqrt{h_{20}/v}$$

式中 h_{20} —节流件前后压差, “mmH₂O”

v —蒸汽比容 “m³/kg”

α —流量系数

ε —流束膨胀系数

dt —工作温度下节流件孔径 “mm”

测量流量的节流件(节流孔板、喷嘴等)是根据额定蒸汽参数设计制造, 运行中蒸汽参数变化时, 蒸汽比容 v 、流束膨胀系数 ε 、流量系数 α 和节流件孔径 dt 均要发生变化。若不考虑蒸汽参数变化所造成的影响, 势必产生较大的测量误差, 达不到精确计量能量的目的。要实现对蒸汽热量的精确计量, 研制的“热量计”必须具有随蒸汽参数变化, 能对蒸汽比容、流束膨胀系数、流量系数和孔板直径等进行自动修正的动能。其中流束膨胀系数和孔板直径可根据常规公式进行修正。

2.1.1 蒸汽比容计算公式

计算比容的经验公式较多, 但它们有各自的适用范围。有的公式虽然适用的参数范围较宽, 但精度较低; 有的公式虽然有一定的精度, 但适用的参数范围较窄, 实用性受到限制; 另外有的公式比较复杂, 采用像MCS—48系列单片机的指令, 对其编程很复杂要占据较多的内存。为了使研制的“热量计”能适用于较宽的参数范围和一定的精度, 们整理出如下的计算过热蒸汽比容的公式:

$$v = \frac{0.004702(t+273)}{P} - \frac{1.23 \times 10^6}{(t+273)^3} \quad \text{“m}^3/\text{kg”}$$

式中: P —蒸汽绝对压力. “kg/cm²”

t —蒸汽温度。

该公式的适用范围：压力由3绝对大气压—13绝对大气压，温度200℃~300℃时，其平均相对误差为0.1%；温度150℃~190℃，其平均相对误差约0.2%。

2.1.2 流量系数a的修正

对于给定的节流装置（包含一定的取压方式）流量系数仅与雷诺数有关，即与蒸汽流量和汽温有关。在流量测量前确定该值是困难的，所以一般采用额定参数下，正常工作流量时的流量系数值。这种处理方式，对量程范围较大的仪表来说，会产生较大的误差。如流量范围为 $15 \times 10^3 \sim 105 \times 10^3$ “kg/h” 时，流量系数的变化范围约为 0.6542~0.65403，变化很大，故流量系数取定值而不加以修正会严重影响到仪表的精度。

那么如何来修正流量系数呢？

对于法兰取压节流装置，可首先用额定参数下，正常工作流量时的流量系数值计算出蒸汽流量近似值（G'），代入下式，即可求得真实的流量系数：

$$\begin{aligned} a &= a' \left[1 + \frac{\beta A}{R_{\text{D}}} \right] \\ &= a' \left[1 + \frac{\beta A D_t \eta_t}{36.1 \times 10^{-3} G'} \right] \end{aligned}$$

式中， β ， A ， a' 只与节流件孔径 d_t ，管道内径 D_t 有关，基本上是一定值。粘性系数 η_t 也可取额定温度下的值。流量系数求得后，就可对流量值 G' 进行修正

$$G = \frac{G'}{a'} \times a$$

a' 为额定参数下，正常工作流量时的流量系数。

经过这样修正后的流量值，就大大减小了由于流量系数取值不当而造成的误差。

2.2 焓值计算公式

在一般热工计算中，焓值是根据温度和压力，从水蒸汽焓—熵表中查得的，而由仪表（微机）查表是很不方便的。国际上虽然有一个计算过热蒸汽焓值的公认经验公式，但它极其复杂、极其冗长，使用极不方便，用 MCS—48 系列单片机的简单运算指令进行编程是很困难的（更不用说要占据大量贮存单元）。因此整理出一个比较简单，精度又比较高的焓值计算公式，就成为蒸汽热量测量仪表需要解决的重要环节。

过热蒸汽的焓与温度、压力成非线性关系，特别在接进饱和区，非线性程度更大。那么能否在离饱和区较远的过热蒸汽区用线性关系式拟合呢？经我们采用大量数据计算表明，用线性关系表示焓与温度、压力的关系，只适用于较窄的汽温、汽压范围。由于供热管路分散，有的管路很长，散热量大，在热用户处，汽温、汽压下降很多，特别在低负荷时，汽压高而汽温低，已几乎接近饱和区，采用线性函数关系很难适应上述供热蒸汽参数变化的特点。因此我们用数学方法整理出二个计算焓值的非线性公式

$$h_1 = a_1 + b_1 t - c_1 P + \frac{1.0^7}{t^{4.1} P}$$

$$h_2 = a_2 + b_2 t - c_2 P + d_2 t^2 - \frac{1.2 \times 10^6}{t^6}$$

式中: t 、 P 为汽温、汽压; a 、 b 、 c 、 d 、 e 为常数。

根据不同汽温、汽压采用不同的计算公式,这样既能使“热量计”有较高的测量精度,又能适应较宽的参数变化范围。

上述公式的应用范围: 3绝对大气压—13绝对大气压,温度为200℃—300℃范围内,平均相对误差为0.05%,温度为150°—190℃范围内,其平均相对误差为0.1%。

与线性公式相比,上述两个计算焓值的公式比较复杂,这样增加了计算机的工作量和计算时间。但根据我们的测算,完成蒸汽流量、焓值、热量的计算,仅需500ms—550ms。这样采样周期定为1秒钟,热量的累计可采用自然递增的办法。由于蒸汽参数变化,差压为几十秒钟至几分钟;压力为几分钟至10分钟;温度为10分钟至20分钟,因此采样周期定为1秒,完全能满足采样定理的要求。

3 浮点数运算程序的设计与编制

针对热量计算中的数据特点,运算程序需采用至少是四字节的浮点数运算程序。四字节的浮点数运算程序,其运算速度相当于三字节定点数运算程序,精度是7位十进制数,这对工业仪表完全能保证其精度。采用浮点数运算的原因是,数学模型中各系数和变量的数值变化范围大,若采用定点数运算需设计四字节整数和四字节小数的定点数运算程序,其运算速度要比用四字节浮点数运算程序慢得多,所占RAM单元也多。

由于运算过程中不可能出现负数,故为了节省程序存储单元,减少运算时间,可采用无符号浮点数(即都是正浮点数)运算。

同时,热量的瞬时值很小,约 10^{-2} 数量级(单位:百万千焦/秒),而其累计值、累计时间为1个月—2个月却又很大,约为 10^{12} 数量级(单位:百万千焦),其浮点数的阶差可能大于24,这样,在累计热量时,若仍然采用浮点数相加,就会造成误差,故累计程序便采用八个字节定点数(四字节整数、四字节小数)来完成,为此又需设计六字节规格化程序,这样才能保证仪表的精度。

4 ZG—87型热量计介绍

ZG—87型热量计是我组最近研制成的测量供热蒸汽热量的智能化新型仪表。征得本研制组的同意,假此机会,把该仪表作简要介绍。

本仪表是以8039单片机为核心,扩展了0809A/D转换器1片,2732ROHM1片,8155I/O口一片,并配置了显示器、键盘和微型打印机等。仪表根据上述数学模型编制的约2.5K字节的运算程序和0.7K字节的监控程序,来完成采样、数据处理及运算和显示、打印等一系列工作。

本仪表有较齐全的功能：软件计时，能完成秒、分、时、日、月、年的自然递增，並控制采样—运算—显示和打印；仪表能显示热量的累计值，並定期把温度、压力、流量、热量等打印出来，同时还可通过六个功能键随机地把上述各量显示打印出来。

本仪表从软件到硬件，采取了抗干扰措施，从而使仪表有较强的抗干扰能力，能适应不同的现场环境。

本仪表由于采用了全面的在线自动补偿，数学模型有较高的精度，并用浮点数运算定点累加，同时又采取了软件滤波、A/D线性化等措施，因而使得仪表有较高的精度。根据调试及现场实测，仪表本身的相对误差小于0.5%，完全达到了设计时所提出的目标。

下面是根据ZG—87型热量计的测试及现场运行纪录进行整理的结果。

表1 试验记录

序号	目	I_t (mA)	I_p (mA)	$I_{\Delta p}$ (mA)	T °C	P表 (kg/cm ²)	F测 (kg/S)	H测 (KJ/S)
1		6	4	6	211.37	2+3	22.30	0.06408×10^6
2		7.41	6	10	259.41	3+3	29.24	0.08686×10^6
3		7	6	7	244.3	3+3	25.064	0.07366×10^6
4		6.18	3.65	2.95	215.49	1.843+3	15.695	0.04523×10^6
5								

表中： I_t 、 I_p 、 $I_{\Delta p}$ ——分别为向仪表输入的温度、压力、压差模拟量

T、P表、F测、H测——分别为仪表测量到的温度、压力、流量和热量（瞬时值）。

其打印记录如下：

1、1987年8月21日09时

H₁ ·06408—00

F₁ ·22300—02

T₁ ·21137—03

P₁ ·20000—01

2、1987年8月26日10时

H₂ ·292400—02

F₂ ·292400—02

T₂ ·259410—03

P₂ ·300000—01

3、1987年8月29日08时

H₃ ·073660—00

F₃ ·250640—02

T₃ ·244310—03

P₃ ·300000—01

表2 测量值与实际值的比较结果

项目 序 号	与 $t, p, \Delta p$ 相对应的实际参数			仪表测得热量	实际热量	误 差
	$t (^{\circ}\text{C})$	$P (\text{kg}/\text{cm}^2)$	$\Delta P (\text{mm H}_2\text{O})$	$H_{\text{测}} \text{ "kJ/S"}$	$H_{\text{实}} \text{ "kJ/S"}$	
1	210	5	3600	0.06408×10^6	0.06415×10^6	0.11 %
2	259.4	6	6000	0.08686×10^6	0.086903×10^6	0.05 %
3	245	6	4200	0.07366×10^6	0.07383×10^6	0.23 %
4	216.3	4.83	1770	0.04523×10^6	0.04527×10^6	0.09 %

从表中看出, 瞬时热量的测量值与实际值的相对误差, 最大为 0.23 %, 最小为 0.05 %, 其平均误差大大低于设计时提出的误差小于 0.5 % 的要求。

参 考 文 献

- (1) 西德工程师协会编, 西安热工研究所译 水和水蒸汽热力学性质图表 水电出版社 1974年9月
(2) 国家标准 GB—2624—81

The Method to Calculation The Calorific Value of Heating Steam And Calorimeter

Zhang Xilin

(Department of computer and automation)

Abstract: A mathematical model of the calculating quantity of super-heated steam is developed and A Steam Calorimeter based on this model is introduced in this paper

keywords: super-heated steam, steam calorimeter, mathematical model, single-chip microcomputer