POSTAN

博思达技术方案7

采用能量计量评估蒸汽能耗方案

——对《蒸汽热量计算方法》国家标准的讨论

北京博思达新世纪测控技术有限公司　张志力　王京安　100191

摘要： 由于没有蒸汽物性值（密度、比焓等）计算方法的统一标准，给蒸汽的质量（能量）计量和贸易结算造成诸多困难。蒸汽一直沿用质量计量，这对于评估蒸汽能耗尚存在不足。本文在介绍《蒸汽热量计算方法》国家标准的基础上，分析了蒸汽能量计量的几个问题，希望引起流量界同仁的关注，共同探讨蒸汽计量的科学方法。

关键词： 国家标准　蒸汽能量计量　蒸汽密度　蒸汽比焓

1. 标准立项背景

GB17167-2006《用能单位能源计量器具配备和管理通则》已于2007年1月1日颁布实施，该文件对用能单位能源计量器具的配备率、能源计量器具的准确度等级、能源计量器具的管理都有了明确规定，大多数一次仪表都有相应的标准和检定规程可依，只需按标准及检定规程生产、检定，就能保证一定的准确度。然而，流体物性值对流量测量的影响是毋容质疑的，在有关流量测量的标准（例如GB/T2624-2006《用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流量》）中都对这些影响有明确的描述，流体的密度、粘度、等熵指数都直接或间接地影响流量的量值。

蒸汽在工业企业以及社会能源消费中占有很大比重，由于我国没有蒸汽物性值（密度、粘度、等熵指数等）计算方法的标准，致使在蒸汽计量中物性值取值方法不统一，给蒸汽的质量计量和贸易结算造成诸多困难。

蒸汽作为载能工质，用户使用的是蒸汽所携带的热量，而温度、压力不同，蒸汽比焓不同，所以用质量流量来评估蒸汽用量或损耗显然存在缺陷。目前我国蒸汽贸易结算已部分采用热量计量，但由于没有国家标准，比焓、热量的计算和补偿方法不统一，必然影响蒸汽能量准确计量。制定《蒸汽热量计算方法》的国家标准是解决这一问题的重要环节。为此，国家标准化委员会批准制定《蒸汽热量计算方法》国家标准立项（计划编号：20121520 - T - 424）。

2. 标准涉及的主要内容

2.1 本标准主要参考IAPWS – IF97国际水和蒸汽性质公式（International Steam Tables Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97）。

2.2 本标准给出了蒸汽物性值：比焓、密度、比熵、声速、动力粘度、等熵指数的计算方法(定义与作用见表1)；蒸汽热量的计算方法以及比焓不确定度的估算方法。

表1 比焓、密度、比熵、声速、动力粘度、等熵指数的定义与作用

名称	定义	作用
密度	单位体积的蒸汽质量	流量计流量计算的必要参数
比焓	单位质量的蒸汽所含有的能量	由蒸汽质量计算蒸汽热量的必要参数
比熵	单位质量的蒸汽所具有的熵	可用于计算等熵指数
动力粘度	流体的应力与应变速率之比	雷诺数计算公式中的一个参数
声速	声波在蒸汽中的传播速度	超声波流量计计算流体速度的一个基准参数
等熵指数	在基本可绝热（等熵）转换条件下，压力的相对变化与密度的相对变化之比。	标准节流式流量计可膨胀性系数的计算公式中的一个参数

2.3 本标准适用范围为：

当 273.16 K ≤ T ≤ 623.15 K时，0 MPa < p ≤ ps (T)（温度T对应的饱和蒸汽压力）MPa；

当 623.15 K < T ≤ 1073.15 K时，0 MPa < p ≤ 16.5292 MPa。

3. 标准应用的几个问题

3.1 统一物性值计算，提高水蒸汽质量计量准确度

在实际蒸汽的流量计量过程中，人们重点关注的是温度、压力和差压信号的准确性；由于缺乏对蒸汽密度计算复杂程度和计算依据的了解，往往忽略了密度值对蒸汽计量准确度的影响。节流式流量计蒸汽质量流量计算公式为：

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}}\varepsilon\frac{\pi}{4}d^2\sqrt{2\Delta p\rho_1} \qquad (1)$$

式中 q_m ——体积流量，m^3/s；　ε ——可膨胀性系数；

d ——节流件开孔直径，m；　D ——管道内径，m；

β ——直径比，(β=d/D)；　ρ_1 ——蒸汽密度，kg/m^3；

Δp ——差压，Pa；　C ——流出系数。

从式1可以看出：差压值Δp和密度值 在计算中是处于同等位。此外，可膨胀性系数ε、流出系数C也会产生影响（此文不详述），节流件开孔直径d、管道内径D的准确性可通过控制加工和安装精度予以保证。正是因为蒸汽密度等物性值计算复杂，目前很多流量二次仪表的蒸汽密度的计算采用：

(1) 采用简易的数学模型（出版物给出的或自己拟合的公式）。一般出版物给出的蒸汽密度计算公式都是根据蒸汽性质表拟合得到，不仅存在拟合误差，一般只适用某一区域（过热区或饱和区）且量值范围比较小。这类公式在一些特定的条件和场所是可用的，但作为计量用计算模型其准确度和适用范围必须经过科学的认证。

（2）查表法。蒸汽表数据量很大且不连续（两个数据间的数值准确度难以保证），在实际操作中有很大困难。

（3）PVT气体方程修正法。在DCS上蒸汽密度计算普遍采用此法。用IAPWS-IFC 1997公式和PVT方程分别计算蒸汽密度值，对比数据见表2。

表2 用IAPWS-IFC 1997公式和PVT方程计算蒸汽密度值对比

（以250℃、3.9MPa的过热蒸汽密度为参考点）

计算方法	t / pa	250/℃		300/℃		350/℃		400/℃		450/℃		500/℃	
		密度	偏差%	密度	偏差%	密度	偏差%	密度	偏差%	密度	偏差%	密度	偏差%
97公式	2.0 MPa	8.9699	11.88	7.9681	14.91	7.2153	16.69	6.6134	17.84	6.1148	18.64	5.6922	19.21
PVT方程		10.0352		9.1558		8.4194		7.7934		7.2547		6.7859	
97公式	3.9 MPa	19.4781	0	16.5040	7.65	14.6350	11.62	13.2575	13.99	12.1677	15.68	11.2701	16.83
PVT方程		19.4781		17.7659		16.3349		15.1120		14.0750		13.1666	
97公式	8.5 MPa			45.3758	-15.76	35.9942	-2.37	31.2217	4.20	27.9907	8.22	25.5516	10.93
PVT方程				38.2250		35.1428		32.5328		30.2911		28.3441	

从表2中的数据可以看出，不同的计算方法所得到的密度值差别很大，远远超出了人们的想象。蒸汽密度的计算方法不能统一，不仅给能源管理造成了一定的混乱，甚至引发贸易纠纷。另外，现场还有大量的蒸汽计量用表尚未配温度、压力补偿，其准确度难以评估。

3.2 正确评估用能设备的能耗

1）蒸汽能量计算原理

蒸汽的比焓是表征单位质量的蒸汽所具有能量的系统状态参数，已知蒸汽的质量流量及其比焓，蒸汽热量Q按式（2）计算。

$$Q=\int_{t_0}^{t_1} q_m \Delta h'' dt=\int_{t_0}^{t_1} q_m (h_1''-h_2'')dt \qquad (2)$$

式中：

q_m —— 蒸汽质量流量，单位为千克每秒（kg/s），测量；

$\Delta h''$ —— 为蒸汽温度、压力发生变化前后（某一装置或设备入口与出口处）的蒸汽的比焓之差；

h_1'' h_2'' —— 分别为蒸汽温度、压力发生变化前后（某一装置或设备入口与出口处）蒸汽的比焓，单位为千焦每千克（kJ/kg）。

2）质量计量对用能设备能耗评估的缺陷

某生产装置过热蒸汽采用阶梯式运行方式，即蒸汽经过两级（或多级）装置做功，蒸汽（仍是过热状态）的温度、压力逐级降低，焓值也逐级下降，但各极装置的质量流量不变（见图1）。

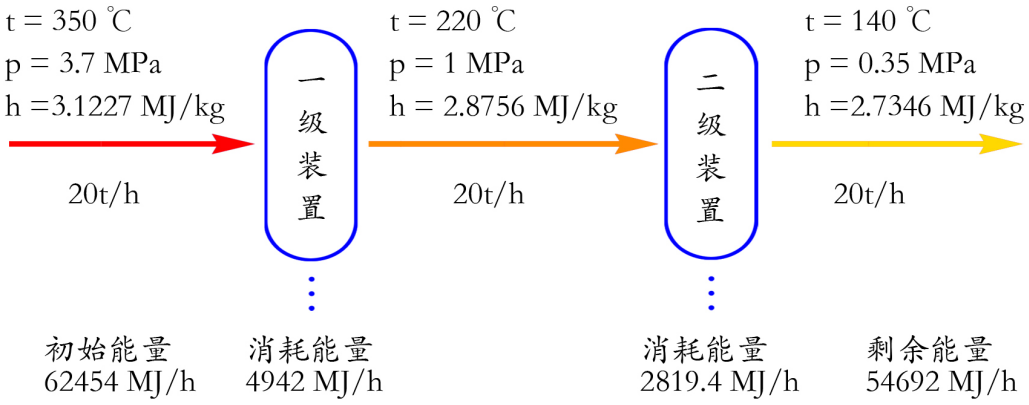


图1 某生产装置过热蒸汽阶梯式运行示意图

从上图可以看出；入口的蒸汽（350℃、3.7Mpa）比焓值为3.1227MJ/kg，末级出口的蒸汽（140℃、0.35Mpa）比焓为2.7346MJ/kg，两者相差12%，以质量流量进行结算，难以对单套生产装置进行能耗考核或能效评估。

3）采用能量计量评估用能设备蒸汽能耗

方案A：此方案可以计量单个生产装置的蒸汽能耗情况。该生产装置在运行过程中无蒸汽的质量损失（或可忽略），在生产装置的蒸汽入口安装一套蒸汽能量计量仪表（由蒸汽流量计、温度、压力补偿仪表，以及流量计算机构成），在生产装置的蒸汽出口安装一套温度、压力测量仪表（见图2）

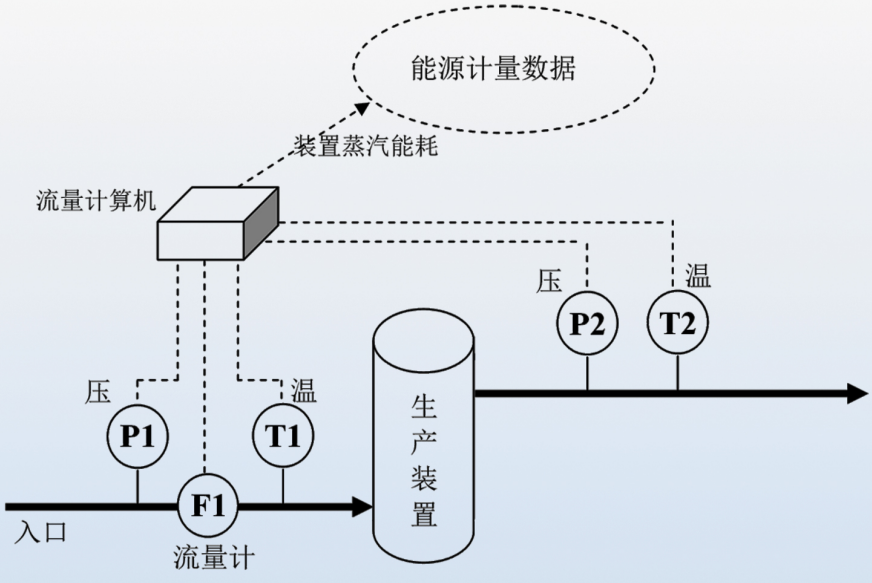


图2

流量计算机根据生产装置入口处流量F1、温度T1、压力P1和出口处的温度T2、压力P2，可按式2计算该装置蒸汽能耗，并可通过网络将数据传送到企业的能源计量数据中心。

方案B：如果生产过程中蒸汽有质量损失，可采用此方案（见图3）。

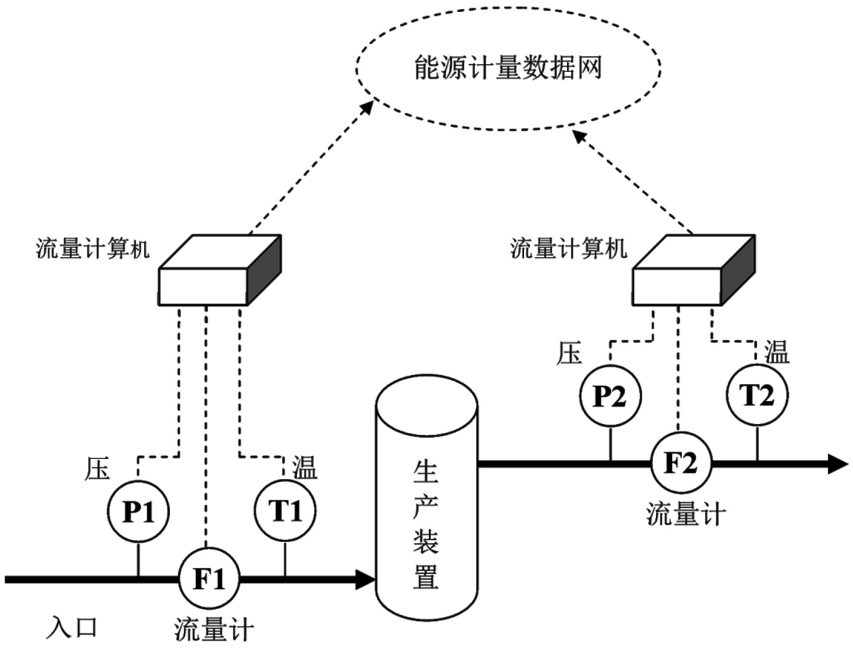


图3

此方案与方案A不同的是在生产装置蒸汽出口再安装一台蒸汽计量仪表。流量计算机根据生产装置入口处流量F1、温度T1、压力P1和出口处的温度F2、T2、压力P2，可按式3计算该装置蒸汽能耗。流量计算机将整个装置的蒸汽能耗通过网络传送到企业的能源计量数据中心。

$$Q=\int_{t_0}^{t_1}(q_{m1}h_1''-q_{m2}h_2'')dt \qquad (3)$$

式中：q_{m1}、q_{m2} —— 分别为在温度、压力变化过程前后（换热装置入口与出口处）的操作条件下测得的蒸汽质量流量，单位为千克每秒（kg/s），

3.3 采用能量计量评估蒸汽管网损耗

1）基本分析

众所周知，蒸汽管输过程中存在不容忽视的损耗。习惯上，蒸汽的损耗是通过蒸汽流量（质量）输差（管网进口流量与出口流量之差）来进行评估。人们已经注意到，除蒸汽的工况（温度、压力、流量）条件对用能设备效率产生影响外，蒸汽的损耗与蒸汽输送流速、管道保温、气候条件等因素有很大关系。然而，只有通过能量计量才能科学的评估各种关联因素与损耗之间的关系，这是解决问题的重要举措。

蒸汽的损耗来自于能量（热量）损失和质量损失。以过热蒸汽为例，蒸汽在管道输送过程中，在状态未发生变化（保持过热）的情况下，尽管温度、压力沿蒸汽走向逐渐降低，虽其质量流量不变，但能量损失了。这部份损耗就是能量（热量）损失，是无法通过质量流量进行定量评估的。

在管网末端蒸汽的损耗往往同时来自能量（热量）损失和质量损失。此时情况比较复杂，除了热量损失（其中应包括蒸汽发生相变所消耗的汽化潜热），还有质量损失，其中包括管道泄漏和湿饱和蒸汽析出的冷凝水（一般蒸汽计量仪表无法检测这部分冷凝水的质量）。

2）解决方案

方案C：长输管道（有质量损失）能量损耗计量（见图4）。

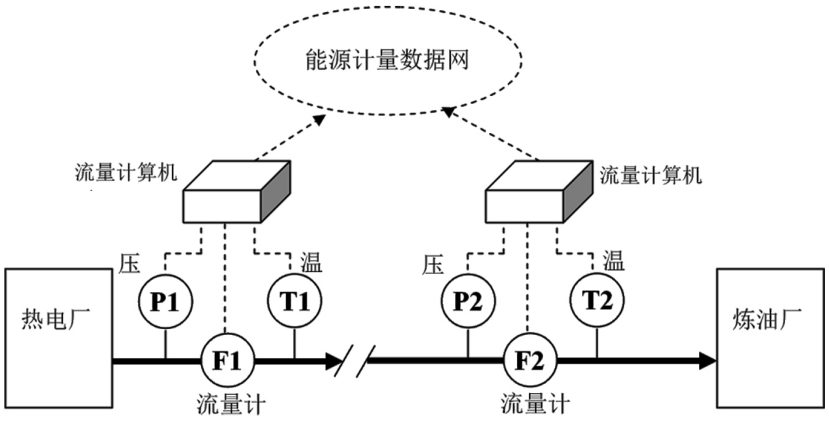


图4

此方案是在蒸汽生产厂（如热电厂）的蒸汽出口和蒸汽接收方（如炼油厂）的入口各安装一套蒸汽能量计量仪表（由蒸汽流量计、温度、压力补偿仪表，以及流量计算机构成），流量计算机可显示瞬时、累积质量流量和瞬时、累积能量。并通过网络将数据传送到企业的能源计量数据中心。

方案D：长输管道（无质量损失）能量损耗计量（见图5）。

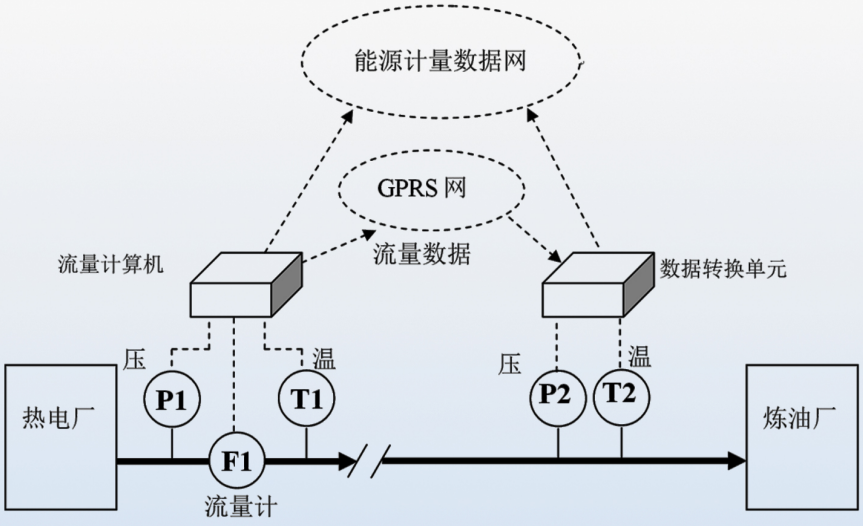


图5

此方案中在蒸汽生产厂（如热电厂）的蒸汽出口安装一套蒸汽能量计量仪表（由蒸汽流量计、温度、压力补偿仪表，以及流量计算机构成），在蒸汽接收方（如炼油厂）的入口仅安装一套温度、压力测量仪表以及一台数据转换单元。此方案可在过热蒸汽管道或不考虑管道输送中蒸汽的质量损失（即忽略跑、冒、滴、漏以及管道疏水）的情况下采用。值得指出的是，上述方案已分别在两个石化企业蒸汽计量中应用，并达到预期效果。

3）建立关联数据库，为科学管理能源提供依据。

将蒸汽管损能量计量数据与蒸汽工况（流量、温度、压力）信息、气候信息、管道保温工程信息等关联因素共建数据库，引入大数据概念，总结规律。在为能源考核工作奠定基础的同时，也为调整蒸汽输配方案、维护或改造蒸汽管网以及相关节能工程提供科学、可靠的依据。

结束语

《蒸汽热量计算方法》国家标准的出台，统一了我国蒸汽物性值的计算，为蒸汽质量的准确计量奠定了基础，也为能量计量创造了条件。让新标准在节能降耗中发挥作用，是我们共同的期盼。

参考文献

IAPWS －IF97 国际水和蒸汽性质公式（International Steam Tables Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97）

GB/T 21188-2007 用临界流文丘里喷嘴测量气体流量

GB/T 32224-2015 热量表

GB/T17167-2006 用能单位能源计量器具配备和管理通则

GB/T17611-1998 封闭管道中流体流量的测量术语和符号

GBT3102.4-1993 热学的量和单位

地址：北京市海淀区花园东路10号 高德大厦705　　邮编：100191
电话：010-84637969 010-84638065　　传真：010-84648082
Web：www.polestar.com.cn　　Email:sales@polestar.com.cn