

# 水和水蒸气热力性质 IAPWS-IF97 计算模型 分析及算法设计

周艳明, 李继庚, 刘焕彬, 张鼎华

(华南理工大学 制浆造纸工程国家重点实验室, 广东 广州 510641)

**摘要:** 用面向对象的方法实现了最新水和水蒸气热力性质工业公式 IAPWS-IF97(2007.8 修订版), 对其各区的计算模型进行了详细地分析并设计了相应的实现算法。实现了其所有区的基本方程、导出方程、各种属性的计算公式、反推方程。实现了 2 区的亚稳态蒸汽区的补充方程、B23 方程和 B2bc 方程。给出了区域区分算法、2 区子区域区分算法和 3 区通过压力 P 和温度 T 求密度  $\rho$  的牛顿迭代算法。详细地介绍了最新 IAPWS-IF97 的实现方法、注意事项、相关推导过程并且补充了等容比热容  $c_v$  的计算机程序验证值。提高了 B23 与  $T_s(P)$  边界和 B2bc 与  $P_s(T)$  边界的一致性。通过在造纸工业中的应用, 表明该实现算法具有全面、精确、快速和自动测试等优点。

**关键词:** IAPWS-IF97; 水和水蒸气; 热力性质; 工业公式; 造纸工业

中图分类号: TK214; O29 文献标识码: A

## 引 言

水和水蒸气的热力性质广泛应用于工业领域, 如锅炉效率与动力循环等。早在 1967 年, 国际公式化委员会 IFC 在第 6 届水蒸气性质国际会议上, 就发布了著名的官方标准 IFC-67<sup>[1]</sup>。在此后的几十年中, 工业领域水和水蒸气的热力性质的计算都是采用 IFC-67 即使是到现在, 由于历史原因, 诸多的应用场合依然采用的是 IFC-67<sup>[2~3]</sup>。为满足科学计算的需要, 水和水蒸气性质的国际组织 IAPWS 于 1995 年制订了 IAPWS-95<sup>[4~5]</sup>。随着计算环境的显著改善, 同时为更好地满足工业领域的应用需求, IAPWS 于 1997 年制订了新的水和水蒸气热力性质的工业公式 IAPWS-IF97 并且于 2007 年 8 月在瑞士的卢森堡发布了 IAPWS-IF97 的最新修订版, 该版本将 5 区的压力从原来的 10 MPa 扩展到 50 MPa<sup>[6~7]</sup>。

由于 IAPWS-IF97 无论在精度、计算速度和区

域边界的一致性等方面都优于 IFC-67 所以随着 IAPWS-IF97 的发布, 工业领域涌现许多采用 IAPWS-IF97 来计算水和水蒸气热力性质的软件<sup>[8~14]</sup>。这些软件基本都实现了 IAPWS-IF97 的要求, 但在全面、精度、速度等方面存在不足, 并且都没有实现 IAPWS-IF97 关于计算机程序验证 (Computer-program verification) 的要求, 而且 5 区的压力范围没有扩展到 50 MPa。比如 IAPWS 官方网站 ([www.iapws.org](http://www.iapws.org)) 上公布的 B SPang 实现的 VBA 计算程序 `iapwsif97_v13` (2002 年) 就没有实现声速  $w$  和 2 区的亚稳态蒸汽区的补充方程。又比如文献 [8~14] 也都没有实现 2 区的亚稳态蒸汽区的补充方程。而精度和速度的不足表现在于, 或采用拟合<sup>[11]</sup>、简化<sup>[12]</sup>的方法或采用插值<sup>[13~14]</sup>的方法。

本研究根据最新的 IAPWS-IF97 (2007.8 修订版), 用面向对象的方法实现了计算水和水蒸气热力性质的软件, 对其各区的计算模型进行了详细地分析并设计了相应的实现算法, 其具有全面、精确、快速和自动测试等优点。本研究详细地介绍了最新水和水蒸气热力性质工业公式的实现、注意事项和相关推导过程并且补充了等容比热容  $c_v$  的计算机程序验证值, 提高了 B23 与  $T_s(P)$  边界和 B2bc 与  $P_s(T)$  边界的一致性。

## 1 公式结构

IAPWS-IF97 公式有效范围:

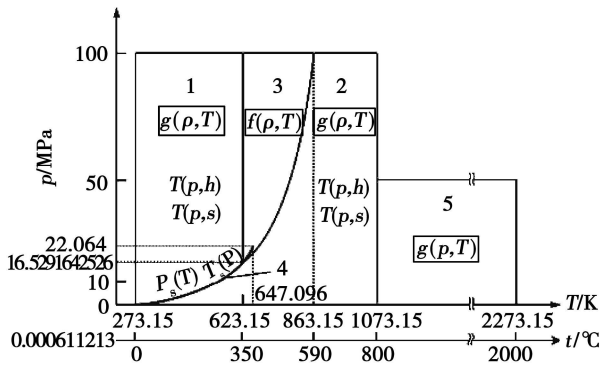
$$273.15 \text{ K} \leq T \leq 1073.15 \text{ K}; 611.212 \text{ 677 4 Pa} \leq P \leq 100 \text{ MPa}$$
$$1073.15 \text{ K} < T \leq 2273.15 \text{ K}; 611.212 \text{ 677 4 Pa} \leq P \leq 50 \text{ MPa}$$

IAPWS-IF97 公式将有效范围划分成 5 个区域, 如图 1 所示。

收稿日期: 2009-03-10 修订日期: 2010-01-14

基金项目: 粤港关键领域重点突破招标基金资助项目 (20070109-2); 广东省科技计划基金资助项目 (2007B050200010)

作者简介: 周艳明 (1971-), 男, 湖南邵阳人, 华南理工大学博士生, 现工作在电子科技大学中山学院, 高级工程师。



1区: 过冷水区; 2区: 过热蒸汽区; 3区: 临界水区和汽区; 4区: 饱和曲线区; 5区: 高温区

图 1 IAPWS-IF97 的区域和方程

从图 1 可明显看出各个区域之间的边界, 其中 2 区和 3 区之间的边界称之为 B23 方程。用长方形框起来的是各个区的基本方程。其中 1 区、2 区和 5 区的基本方程都是比吉布斯 (Gibbs) 自由能  $g(p, T)$ , 其中  $p$  是压力, MPa;  $T$  是温度, K。3 区的基本方程是比亥姆霍兹 (Helmholtz) 自由能  $f(\rho, T)$ , 其中  $\rho$  是密度,  $\text{kg/m}^3$ 。4 区即饱和曲线区的基本方程是饱和压力方程  $P_s(T)$ 。4 区的方程主要是用来判断 1 区和 2 区之间的边界。在 1 区、2 区和 5 区内, 通过输入  $p$  和  $T$  可求得水和水蒸气的热力性质: 比容  $v$  比内能  $u$  比焓  $h$  比熵  $s$  等压比热容  $c_p$  等容比热容  $c_v$  声速  $w$  密度  $\rho$ 。在 3 区内, 通过输入  $\rho$  和  $T$  可求得水和水蒸气的热力性质: 压力  $p$  比容  $v$  比内能  $u$  比焓  $h$  比熵  $s$  等压比热容  $c_p$  等容比热容  $c_v$  声速  $w$ 。

在 1 区、2 区和 4 区分别给出了相应的反推方程。其中 1 区和 2 区的反推方程为  $T(p, h)$  和  $T(p, s)$ , 即通过输入压力  $p$  和比焓  $h$  或者压力  $p$  和比熵  $s$  可求得温度  $T$  然后再通过基本方程求得水和水蒸气的所有其它热力性质。4 区的反推方程为饱和和温度方程  $T_s(p)$ , 即通过输入饱和压力  $p$  可求得饱和和温度  $T$ 。

图中虚线部分表示, 对于 B23 方程, 当  $p=100$  MPa 的时候,  $T=863.15$  K 与 4 区饱和曲线的交点为:  $T=623.15$  K  $p=16.5291642526$  MPa。4 区饱和曲线的终点为:  $T=647.096$  K  $p=22.064$  MPa。从图上看, 起点为:  $T=273.15$  K  $p=0$  MPa 通过饱和和压力方程  $P_s(T)$  计算, 真正的起点应当是:  $T=273.15$  K  $p=0.0006112126774$  MPa。

## 2 区域区分算法

当用户输入合法的  $p$  和  $T$  之后, 首先要自动判断该点属于哪个区域, 然后再调用该区域的获取所有属性值的方法, 这样就可以获得水和水蒸气的的所有热力性质值。根据用户输入的  $p$  和  $T$  来判断该点属于哪个区域的算法为:

```

if (273.15 K ≤ T ≤ 623.15 K) and
(Eq (30) (T) = P_s(T) MPa ≤ p ≤ 100 MPa)
return 区域 1
if ((273.15 K ≤ T ≤ 623.15 K) and
(611.2126774 Pa ≤ p ≤ Eq (30) (T) = P_s(T)
MPa)) or
((623.15 K ≤ T ≤ 863.15 K) and
(611.2126774 Pa ≤ p ≤ Eq (5) (T) = P(T)
MPa)) or
((863.15 K ≤ T ≤ 1073.15 K) and
(611.2126774 Pa ≤ p ≤ 100 MPa))
return 区域 2
if (623.15 K ≤ T ≤ T(p) = Eq (6) (p) K) and
(Eq (5) (T) = P(T) MPa ≤ p ≤ 100 MPa)
return 区域 3
if (273.15 K ≤ T ≤ 647.096 K) and
(611.2126774 Pa ≤ p ≤ 22.064 MPa)
return 区域 4
if (1073.15 K ≤ T ≤ 2273.15 K) and
(611.2126774 Pa ≤ p ≤ 50 MPa)
return 区域 5
    
```

其中 Eq (30) (T), Eq (5) (T), Eq (6) (p) 的方程参考文献 [6-7]。

## 3 各区方程实现

所有区的方程基本上是由基本方程、导出方程、各种属性的计算公式和反推方程组成, 其实现的方法也非常类似。下面主要论述 1 区方程的实现, 其它区方程的实现主要论述实现上的不同点。

### 3.1 1 区方程实现

1 区的基本方程为比吉布斯 (Gibbs) 自由能  $g(p, T)$ , 其无量纲形式方程为  $\gamma = g/(RT)$ , 它有 5 个导出方程, 各种属性 (即水和水蒸气的热力性质) 的计算公式有 7 个, 它们都是通过对基本方程求偏导而得到的, 以该区的比内能  $u$  推导为例, 即:

$$\begin{aligned}
u &= g - T(\partial g / \partial T)_p - P(\partial g / \partial P)_T \\
&= RT\gamma - T(\partial(RT\gamma) / \partial T)_p - P(\partial(RT\gamma) / \partial P)_T \\
&= RT\gamma - T(R\gamma + RT \frac{\partial \gamma}{\partial T}) - P(RT \frac{\partial \gamma}{\partial P}) \\
&= RT\gamma - T(R\gamma + RT(\frac{T^*}{T})\gamma_\tau) - P(RT(\frac{P}{P^*})\gamma_\pi) \\
&= RT\gamma - T(R\gamma + RT(\frac{T^*}{T})\gamma_\tau) - P(RT(\frac{1}{P})\gamma_\pi) \\
&= RT\gamma_\tau - RT\gamma_\pi = RT(\gamma_\tau - \gamma_\pi)
\end{aligned}$$

所以:  $\frac{u(\pi, \tau)}{RT} = \gamma_\tau - \gamma_\pi$

另外,在计算比容  $v$  的值时要注意,由于  $v$  的单位为  $m^3/kg$  所以  $v = \frac{\pi \gamma_\pi RT}{1000 P}$  推导过程为:

$$\frac{kJ/kg \cdot K^{-1} \cdot K}{MPa} = \frac{J}{1000 kgPa} = \frac{Nm}{1000 kg \frac{N}{m^2}} = \frac{1}{1000}$$

$m^3/kg$

在计算声速  $w$  的值时要注意,由于  $w$  的单位为

$m/s$  所以  $w = \frac{\sqrt{\frac{1000 RT\gamma_\pi^2}{(\gamma_\pi - \tau\gamma_{\pi\tau})^2} - \gamma_{\pi\pi}}}{\sqrt{\tau^2 \gamma_{\tau\tau}}}$ , 推导过程为:

$$\begin{aligned}
\sqrt{kJ/kg \cdot K^{-1} \cdot K} &= \sqrt{1000} \times \sqrt{\frac{J}{kg}} = \sqrt{1000} \times \\
\sqrt{\frac{kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}}{kg}} &= \sqrt{1000} m \cdot s^{-1}
\end{aligned}$$

用面向对象的方法实现 IAPWS-IF97 首先将基本方程的系数和指数以数组形式的私有成员属性存储,并在类的构造函数中初始化。对于基本方程和导出方程,分别以相应的保护成员方法实现,成员方法命名时尽量做到顾名思义,即名称与公式的希腊名称一致并包含基本、反推、导出方程及区域的意义。如 1 区的基本方程  $\gamma(\pi, \tau)$  可以命名为 `double gamma_pi_tau_l(double pi, double tau)`, 导出方程  $\gamma_{\pi\tau}(\pi, \tau)$  可以命名为 `double gamma_d_pi_tau_l(double pi, double tau)`, 其中 `d` 表示 derivative 即导出的含义。各种属性的计算公式可以用一个公有成员方法实现,如 `void Get_parameters_pi_tau_l(double pi, double T, double &v, double &u, double &s, double &h, double &g, double &cs, double &w)`。另外,对于该区的计算机程序验证测试用例,可以用一个单独的保护成员方法实现,如 `void Test_Get_parameters_pi_tau_l(void)`, 其它所有方程的计算机程序验证测试用例的实现都与此类似。

1 区的反推方程有 2 个  $T(P, h)$  和  $T(P, s)$ , 它们

的实现和基本方程的实现类似。

### 3.2 2区方程实现

2 区的基本方程、导出方程和各种属性的计算公式的实现基本与 1 区相对应的实现类似。不过在从饱和水蒸气线到 5% 的平衡水分线之间的亚稳态蒸汽区给出了相应的补充方程和导出方程,而各种属性的计算公式则同基本方程的一样,因此补充方程的实现与基本方程的实现也类似。补充方程的有效范围是  $273.15 K \leq T \leq 584.1495 K$ ,  $P = 611.657 Pa \leq P \leq 10 MPa$  ( $P_t$  为三相点的压力)。该区的另外一个不同点是反推方程不再是  $T(P, h)$  和  $T(P, s)$  2 个,而是将该区划分成 3 个子区域 (2a, 2b, 2c), 对应每个子区域都有 2 个反推方程,所以 2 区的反推方程总共有 6 个,如图 2 所示。

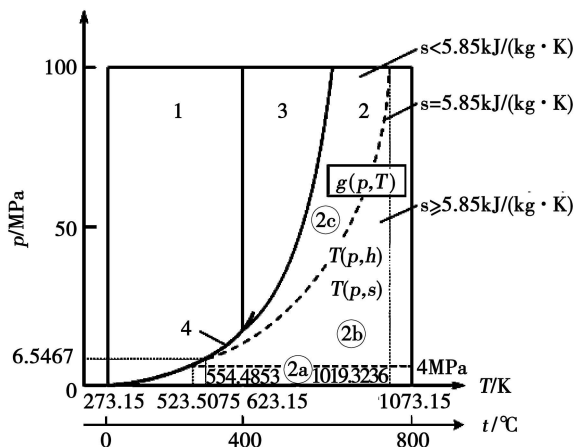


图 2 2区子区域的划分

子区域 2a 与 2b 之间的划分是通过  $P = 4 MPa$  这条等压线,它与饱和水蒸气曲线的交点是:  $T = 523.5075 K$ ,  $P = 4 MPa$ 。子区域 2b 与 2c 之间的划分是通过  $s = 5.85 kJ/(kg \cdot K)$  这条等熵线,它与饱和水蒸气曲线的交点是:  $T = 554.4853 K$ ,  $P = 6.5467 MPa$ 。当  $P = 10 MPa$  时,这条等熵线对应的  $T = 1019.3236 K$ 。而对于反推方程  $T(P, h)$ , 这条等熵线近似用  $B_2 b$  方程来表示。

所有子区域反推方程的实现与 1 区的反推方程的实现类似,关键在于如何根据  $P, h$  或者  $P, s$  来判断该点属于哪个子区域。2 区反推方程  $T(P, h)$  子区域区分算法为:

```

if(611.2126774 Pa <= P <= 4 MPa)
return 子区域 2a
if(4 MPa <= P <= 6.5467 MPa) or
((6.5467 MPa <= P <= 10 MPa) and

```

( $\leq P(h) = Eq(20)(h)$ ))

return 子区域 2b)

if (6.5467 MPa  $\leq P \leq$  100 MPa) and

( $Eq(20)(h) = P(h) \leq P$ )

return 子区域 2c)

其中  $Eq(20)(h)$  的方程参考文献 [6-7]。

2 区反推方程  $T(P, \rho)$  子区域区分算法为:

if (611.2126774 Pa  $\leq P \leq$  4 MPa) and

$\geq 5.85 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )

return 子区域 2a)

if (4 MPa  $\leq P \leq$  100 MPa) and

$\geq 5.85 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )

return 子区域 2b)

if (6.5467 MPa  $\leq P \leq$  100 MPa) and

$\geq 5.85 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ )

return 子区域 2c)

### 3.3 3 区方程实现

3 区不包含反推方程, 其方程的实现类似于 1 区或者 2 区的基本方程、导出方程和各种属性的计算公式的实现。在 3 区, 通过温度  $T$  和密度  $\rho$  计算压力  $P$  时, 由于  $P$  的单位为 MPa, 所以:

$$P = \frac{\rho RT \phi_\delta}{1000}$$

推导过程为:

$$\text{kgm}^{-3} \text{kJkg}^{-1} \text{K}^{-1} \text{K} = \text{kNm}^{-3} = \text{kNm}^{-2} = \text{kPa} =$$

$$\frac{\text{MPa}}{1000}$$

$$1000$$

不同的是, 3 区的输入参数是  $\rho$  和  $T$  但用户输入的一般是  $P$  和  $T$  这时则需要运用牛顿迭代算法<sup>[19]</sup> 求解对应的  $\rho$ 。已知  $P$  和  $T$  用牛顿迭代法求 3 区的密度  $\rho$  的算法为:

if ( $T \in [623.15, 647.096]$  &&  $P < P_s(T)$ )  $\rho_{old} =$

100

else  $\rho_{old} = 600$

$\tau = T^* / T$

for (; ; ) {

$\delta = \rho_{old} / \rho^*$

$$\rho' = \frac{1000RT}{\rho^*} (2\rho_{old}\phi_\delta + \frac{\rho_{old}^2}{\rho^*}\phi_\delta);$$

$$\rho_{new} = \rho_{old} + (1000000P - 1000RT\frac{\rho_{old}^2}{\rho^*}\phi_\delta) / \rho';$$

if ( $|\rho_{new} - \rho_{old}| < \epsilon$ ) return  $\rho_{new}$ ;

$\rho_{old} = \rho_{new}$  }

### 3.4 其它方程实现

5 区没有反推方程, 其基本方程、导出方程和各

种属性的计算公式的实现类似于 1 区或者 2 区的基本方程, 导出方程和各种属性的计算公式的实现。

$B_2b$  方程,  $B_2b'$  方程, 4 区的基本方程  $P_s(T)$  和反推方程  $T_s(P)$  的实现类似于 1 区的基本方程的实现。

### 3.5 其它细节

临界参数  $T_c, P_c, \rho_c$  可通过 3 区的方程计算得出, 但得出的  $\rho_c$  是一个错误的数值: 280434874.419528。三相点的参数  $u'_t, s'_t, h'_t$  可通过 1 区的方程计算得出。

在  $B_2b$  和  $T_s(P)$  相交处, 即  $T_s = 623.15 \text{ K}$  从原来的 16.5291643 MPa 改为 16.5291642526 MPa 分别从  $B_2b$  和  $T_s(P)$  进行计算, 拟合程度更高。另外, 在  $B_2b'$  和  $P_s(T)$  相交处, 即  $P_s = 6.5467 \text{ MPa}$   $T$  从原来的 554.485 K 改为 554.48529 K 分别从  $B_2b'$  和  $P_s(T)$  进行计算, 拟合程度更高。另外, 通过 4 区饱和曲线的饱和压力方程  $P_s(T)$  计算, 当  $T = 273.15 \text{ K}$  时, 对应的升华压力  $P$  应当是 611.2126774 Pa 而不是 611.153 Pa。

除  $\phi_\delta$  外, IAPWS-IF97 都提供了所有水和水蒸气的热力性质的计算机程序验证值。通过对所有方程的计算机程序验证值的实现与比较, 补充  $\phi_\delta$  的计算机程序验证值如表 1 所示。

表 1 不同区  $\phi_\delta$  的计算机程序验证值

1 区	$T=300 \text{ K}$ $P=3 \text{ MPa}$	$T=300 \text{ K}$ $P=80 \text{ MPa}$	$T=500 \text{ K}$ $P=3 \text{ MPa}$
$\phi_\delta / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	0.412 120 160 $\times 10^1$	0.391 736 606 $\times 10^1$	0.322 139 223 $\times 10^1$
2 区	$T=300 \text{ K}$ $P=0.0035 \text{ MPa}$	$T=700 \text{ K}$ $P=0.0035 \text{ MPa}$	$T=700 \text{ K}$ $P=30 \text{ MPa}$
$\phi_\delta / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	0.144 132 662 $\times 10^1$	0.161 978 333 $\times 10^1$	0.297 553 837 $\times 10^1$
2 区亚稳态蒸汽区	$T=450 \text{ K}$ $P=1 \text{ MPa}$	$T=440 \text{ K}$ $P=1 \text{ MPa}$	$T=450 \text{ K}$ $P=1.5 \text{ MPa}$
$\phi_\delta / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	0.195 830 730 $\times 10^1$	0.208 622 142 $\times 10^1$	0.241 213 708 $\times 10^1$
3 区	$T=650 \text{ K}$ $\rho=500 \text{ kg/m}^3$	$T=650 \text{ K}$ $\rho=200 \text{ kg/m}^3$	$T=750 \text{ K}$ $\rho=500 \text{ kg/m}^3$
$\phi_\delta / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	0.319 131 787 $\times 10^1$	0.404 118 76 $\times 10^1$	0.271 701 677 $\times 10^1$
5 区	$T=1500 \text{ K}$ $P=0.5 \text{ MPa}$	$T=1500 \text{ K}$ $P=30 \text{ MPa}$	$T=2000 \text{ K}$ $P=30 \text{ MPa}$
$\phi_\delta / \text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	0.215 337 784 $\times 10^1$	0.219 274 829 $\times 10^1$	0.239 589 436 $\times 10^1$

本研究实现的程序对标准中所有区的计算机程序验证值 (有效数 9 位) 都是 100% 无误差地验证通过, 因此表 1 在有效数 9 位的情况下是无误差的。

## 4 实例验证

我们对广州造纸集团有限公司和金东纸业 (江

苏)股份有限公司的能量系统用“三环节”的方法<sup>[19]</sup>进行了建模与仿真。在能流分析过程中,需要计算能量转换、利用和回收三环节各种工段(如锅炉、汽轮机、脱墨线加热、纸机干燥部、纸机废气回收等)在不同条件下的能量效率和 $\eta_{\text{用}}$ 效率,经常需要通过查表的形式获取水和水蒸气在相应条件下的焓和熵等物性值,既不方便而且有较高的精度损失。通过用面向对象的方法实现 IAPWS-IF97,以源代码或动态链接库的形式嵌入到我们开发的仿真系统 eIMS 中 (Energy Tri-link Method System 能量“三环节”方法建模与仿真系统,该仿真系统已获计算机软件著作权登记,登记号:2009SR09023),不仅使用方便,而且运算速度更快、精度更高,与查表方式相比,对能量系统的能量效率和 $\eta_{\text{用}}$ 效率的分析结果,提高了 1%~2% 之间的精度。

如对能量转换环节的锅炉系统中的供出能过热蒸汽,在流量为 561 000 kg/h 温度为 540 °C,压力为 9.5 MPa 的情况下,通过查询 EasyQuery (V1.0),能量效率计算的结果为 542 183 kW,而通过 eIMS 计算的能量效率为 542 622 kW,精度提高  $(542 622 - 542 183) / 542 183 \times 1 000 = 0.81\%$ 。

又如对能量转换环节的锅炉系统中的供出能汽动泵排汽,在流量为 47 651.18 kg/h 温度为 203 °C,压力为 0.257 MPa 的情况下,通过查询 EasyQuery (V1.0), $\eta_{\text{用}}$ 效率计算的结果为 8 753 kW,而通过 eIMS 计算的 $\eta_{\text{用}}$ 效率为 8 894 kW,精度提高  $(8 894 - 8 753) / 8 753 \times 100 = 1.6\%$ 。

## 5 结 论

用面向对象的方法实现了 2007.8 修订版的最新的 IAPWS-IF97。用户只需要输入水和水蒸气的温度、压力,压力、比焓,压力、比熵,密度、温度等就可以自动计算出水和水蒸气的物性数据,如  $p, T, v, u, h, s, G, \rho, \eta$  等。通过在造纸工业中的应用,表明实现的 IAPWS-IF97 具有全面、精确、快速和自动测试等优点。

(1) 实现了所有区的基本方程(含导出方程),还将 5 区的压力从原来的 10 MPa 提升至 50 MPa,而且还实现了 1、2 区的反推方程,其中 1 区的反推方程 2 个,2 区的反推方程 6 个。另外,还实现了 2 区的位于饱和线附近的亚稳态蒸汽区的补充方程,并且对于 3 区的方程,用牛顿迭代法求临界区的密度,从而用户可以像在 1、2、5 区一样,只需要输入压

力和温度就可以计算水和水蒸气的所有物性数据。从 IAPWS 官方网站上目前公布的程序及所掌握的资料来看,我们这次对 IAPWS-IF97 的实现是最新和最全面的。

(2) 通过采取相应的优化措施,有效地避免了浮点数运算误差的累积,从而使运算精度比 IAPWS-IF97 要求的更高。在 B23 和  $T_s(P)$  交接处,即  $T_s = 623.15 \text{ K}$ ,  $P$  从原来的 16 529 164.3 MPa 改为 16 529 164 252.6 MPa。在 B2b 和  $P_s(T)$  交接处,即  $P_s = 6 546.7 \text{ MPa}$ ,  $T$  从原来的 554 485 K 改为 554 485.29 K。这样提高了 B23 与  $T_s(P)$  边界和 B2b 与  $P_s(T)$  边界的一致性。

(3) 由于采用了合并已知量、代数变换、删除公共子表达式、代码外提、强度削弱等优化手段,从而不仅有效地避免了浮点数运算误差的累积,还使得计算速度更快。如对于 1 区的基本方程,按乘法和幂运算次数计,可以从原来的 136 次减少到 79 次,运算次数下降约 42%<sup>[17]</sup>。

(4) 实现、包含并满足 IAPWS-IF97 要求的计算机程序验证的测试用例,可以对不同的计算平台,如 Intel、AMD 等,及其它们的不同版本,可以自动测试该计算平台该版本是否满足 IAPWS-IF97 的计算精度要求,并且补充了所有区  $\rho$  的计算机程序验证值。

致谢:感谢华南理工大学刘金平教授对本文提出的修改意见。

## 参考文献:

- [1] International Formulation Committee of the 6th International Conference on the Properties of Steam: The 1967 IFC Formulation for Industrial Use [R]. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1967.
- [2] 李维特. IFC 公式的迭代与收敛性质及其在动力工程上的应用 [J]. 华北电力学院学报, 1994, 21(3): 40-45.
- [3] 田瑞峰, 张志俭, 孙浩伟. 低参数单缸多级汽轮机热力计算程序开发 [J]. 汽轮机技术, 2004, 46(5): 336-338.
- [4] WAGNER W, PRÜP A. The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use [J]. J Phys Chem, 2002, 31: 387-535.
- [5] IAPWS Release on the IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use [EB/OL]. Available at <http://www.iapws.org>.
- [6] WAGNER W, COOPER J R, DITTMANN A et al. The IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam [J]. J Eng Gas Turbines and Power, 2000, 122: 150-182.

- [ 7 ] IAPWS Revised release on the IAPWS industrial formulation 1997 for the thermodynamic properties of water and steam (2007-8) [ EB/OL]. Available at <http://www.iapws.org>
- [ 8 ] 李春曦. 工业用水和水蒸气热力性质计算公式— IAPWS-IF97 [ J]. 锅炉技术, 2002, 33(6): 15-19.
- [ 9 ] 贾俊颖, 王培红, 程懋华. 水和水蒸气性质通用计算软件的算法研究 [ J]. 热能动力工程, 2000, 15(6): 666-669.
- [ 10 ] 汪国山, 朱晓星, 谭 锐等. 水和水蒸气热力性质国际工业标准 IAPWS-IF97 和计算程序编制 [ J]. 汽轮机技术, 2005, 47(3): 161-164, 167.
- [ 11 ] 蒋寻寒, 曹祖庆. 一组性能优良的水和水蒸气高精度特性公式 [ J]. 动力工程, 2003, 23(6): 2777-2780, 2809.
- [ 12 ] 祁海涛, 周宇阳, 胡念苏, 等. 汽水性质 IAPWS-IF97 公式简化模型 [ J]. 汽轮机技术, 2003, 45(2): 73-75.
- [ 13 ] 孙 龙, 周克毅, 胥建群, 等. Ms\_excel 在锅炉热力计算中的应用 [ J]. 锅炉技术, 2001, 32(8): 11-14.
- [ 14 ] 舒 倩, 胡念苏, 陈 波. 基于数据库的可视化水蒸气电子图表 [ J]. 汽轮机技术, 2004, 46(5): 353-355.
- [ 15 ] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析 [ M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1982.
- [ 16 ] 解新安, 刘焕彬. 造纸企业能量系统“三环节”模型的建立及应用探讨 ( I )—造纸企业“三环节”能量结构模型的建立 [ J]. 造纸科学与技术, 2004, 23(1): 25-31.
- [ 17 ] ZHOU YANMING, LI JIGENG, TAO JINGSONG, et al. A new method for optimizing the computing process of IAPWS-IF97 // Global Optimization: theory methods & applications I [ C]. Hongkong Global-link Publisher, 2009, 984-992.

(本文责任编辑 孙显辉)

## 新技术、新工艺

## 湿压缩技术显著改进 Fr7 EA 燃气轮机的性能

据《Gas Turbine World》2009 年 5—6 月号报道, 在 2008 年计划的维修停机期间, 美国南部主要的电力事业 Dominion Virginia Power 与 Caldwell Energy 合作, 在它的于 20 世纪 90 年代初投入使用的 4 台以天然气作为燃料的 FG7121 EA 调峰机组上安装增加功率的湿压缩内冷系统。

所有这 4 台机组早已安装了水雾化蒸发入口空气冷却系统, 以便增加热天运行时的输出功率, 现在又补充装上了湿压缩系统, 可以使热天最大的输出功率约增加 7 MW。

Dominion Virginia Power 电站对具有蒸发空气入口冷却和湿压缩系统的 Fr7 EA 机组的试验结果如表所示。

装置的性能	基本的燃气轮机机组	具有入口雾化	具有湿压缩	联合的加强
环境温度 (干球的) /°C	37	37	37	38
水流量 /kg·s <sup>-1</sup>	0	1.12	5.0	6.12
天然气流量 /kg·s <sup>-1</sup>	4.92	5.09	5.52	5.57
基本负荷装置输出功率 /kW	70970	74560	81480	82710
NO <sub>x</sub> 排放 /mg·kg <sup>-1</sup>	31	30	18	17
压气机进口温度 /°C	37	27	23	23
压气机出口温度 /°C	371	366	318	312
压气机出口压力 /MPa	1.03	1.06	1.10	1.10

比较表明, 与基本的燃气轮机机组比较, 采用湿压缩使输出功率增加了 10.5 MW, NO<sub>x</sub>排放减少 42%; 联合使用入口雾化和湿压缩可使输出功率增加 11.7 MW, NO<sub>x</sub>排放减少 45%。

(吉桂明 摘译)

the optimum pressure ratio of the gas turbine based simple cycle. Hence, the chemical recuperative cycle can be regarded as one not restricted by the pressure ratio. The depth of the fuel steam conversion in the chemical recuperative cycle is relatively heavily affected by the exhaust gas temperature. The lower the exhaust gas temperature, the less the growth rate of the heating value of the fuel. Key words: gas turbine; chemical recuperative cycle; performance analysis; entropy-temperature diagram; thermal efficiency; pressure ratio

水和水蒸气热力性质 IAPWS-IF97 计算模型分析及算法设计 = An Analysis of IAPWS-IF97 Formulae-based Model for Calculating Water and Steam Thermodynamic Properties and Its Algorithm Design [刊, 汉] / ZHOU Yanming, LI Jigen, LU Huanbin, ZHANG Dinghua (National Key Laboratory on Pulp Preparation and Papermaking Engineering, South China University of Science and Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510641) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2). — 166 ~ 171

By adopting an object-oriented method, implemented was the latest industrial formulae-based IAPWS-IF97 (2007.8 Revision) for calculating water and steam thermodynamic properties. The calculation models for various zones were analyzed in detail with their corresponding implementation algorithms being designed. The basic equations, derivative equations, calculation formulae in various attributes and reversely derived equations for all the zones were implemented. The supplementary equation B23 equation and B2bc equation for the metastable steam regions in two zones were also executed. The authors have presented the regional differentiated algorithm, sub-regional differentiated algorithm in two zones and Newton iterative algorithm in three zones to determine the density  $\rho$  from pressure  $P$  and temperature  $T$ . They have also described in detail the latest IAPWS-IF97 implementation method, matters meriting attention and relevant derivative processes, and supplemented the verification values of the computer program for specific heat capacity of equilibrium  $c_p$ , thus enhancing the consistency of B23 with boundary  $T_s(P)$  as well as that of B2bc with boundary  $P_s(T)$ . The application of the above in the papermaking industry indicates that the implemented method enjoys such a variety of merits as comprehensiveness, accuracy, speedy and automatic testing etc. Key words: IAPWS-IF97; water and steam; thermodynamic properties; industrial formulae; papermaking industry

TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对相变悬浮液流变和导热系数特性影响研究 = Study of the Influence of TiO<sub>2</sub> Nano-particles on the Rheology and Heat Conduction Coefficient Characteristics of a Phase-change Suspension [刊, 汉] / JIN Jian, LU Peiqing, LN Guiping (College of Aeronautical Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100191), DING Yulong (College of Particle Science and Engineering, University of Leeds, Leeds, UK, Post Code: LS2 9JT) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(2). — 172 ~ 176

By using an experimental method, studied were the viscosity and heat conduction coefficient of a phase-change suspension after it has been mixed with TiO<sub>2</sub> nano-particles. The research results show that when the concentration of the nano-particles does not exceed 5%, the suspension can still be viewed as a Newtonian fluid and its viscosity will increase nonlinearly with an increase of the concentration of the nano-particles. When the concentration of the mass nano-particles equals 105%, the viscosity of the phase-change suspension will rise by about 23%. The addition of the nano-particles is capable of significantly improving the heat conduction coefficient of the suspension in question. When the concentration of the nano-particles is 5%, the heat conduction coefficient of the phase-change suspension will increase by about 7%. When the concentration of the nano-particles is relatively low, the growth margin of the heat conduction coefficient of the phase-change suspension caused by the nano-particles will be higher than that of the water. The authors have analyzed from different perspectives the advantages of using the new type of