

## IFC 公式在热能动力工程中的应用

(哈尔滨工业大学) 王世忠 李忠鄂 王怀彬 张洪军

[摘要] 利用 IFC 公式和一维寻根程序, 在计算机上实现焓-熵图查找和热力计算, 并且在 200 MW 汽轮机“快关”计算和 300 MW 汽轮机旁路系统阀设计中得到应用。不但提高了计算速度, 还提高了计算精度。

关键词 IFC 公式 一维寻根 焓-熵图 热力计算  
计算机分析

中图分类号 TK123

## 1 IFC 公式

随着数字计算机应用的普及, 特别是对于电厂设计和热力系统最优化计算, 需要一套便于工业应用的水和水蒸气性质公式。为此, 第六届国际水蒸气性质会议成立的国际公式化委员会 IFC (International Formulation Committee) 制定了 IFC 公式<sup>[1]</sup>。根据 IFC 公式的方程组, 水和水蒸气性质完全可以计算出来。这套公式主要供热能动力工程领域的科研、设计、制造和运行部门使用。它得到美国、英国、独联体、日本、德国等十六个国家的工程协会的同意。因此, IFC 公式也是国际合作的重要成

$$X_2 = T_0 + B_0 \Theta - \sum_{v=1}^5 B_{0v} (v-2) \Theta^{v-1} - \sum_{\lambda=1}^s U \sum_{v=1}^{n(\lambda)} B_{-\lambda v} \{1 + z(\lambda, v) \Theta\} X^{z(\lambda, v)} -$$

$$\sum_{v=1}^{n(\lambda)} B_{-\lambda v} X^{2(\lambda, v)} \{1 + z(\lambda, v) \Theta\} \frac{\Theta \sum_{\lambda=1}^{L(\lambda)} x(\lambda, \lambda) b_{\lambda} X^{x(\lambda, \lambda)}}{U^{2-} + \sum_{\lambda=1}^{L(\lambda)} b_{\lambda} X^{x(\lambda, \lambda)}} +$$

$$\sum_{\lambda=1}^8 \frac{B^{2-} + \sum_{\lambda=1}^{L(\lambda)} b_{\lambda} X^{x(\lambda, \lambda)}}{B^{2-} + \sum_{\lambda=1}^{L(\lambda)} b_{\lambda} X^{x(\lambda, \lambda)}} +$$

$$U \left( \frac{U}{U} \right)^{10} \sum_{v=0}^6 \left[ \left\{ 1 + \Theta \left( \frac{10U}{U} + vb \right) \right\} B_{\varphi} X^v \right] \quad (1)$$

$$e_2 = -T_1 - h \ln U + U_0 h \Theta - \sum_{Y=1}^5 (Y-1) B_{0Y} \Theta^{Y-2} - \sum_{\lambda=1}^5 B_{-\lambda} \sum_{v=1}^{n(\lambda)} z(\lambda, v) B_{-\lambda v} X^{2(\lambda, v)} -$$

$$\sum_{v=1}^{n(\lambda)} B_{-\lambda v} X^{2(\lambda, v)} z(\lambda, v) - \frac{\sum_{\lambda=1}^{L(\lambda)} x(\lambda, \lambda) b_{\lambda} X^{x(\lambda, \lambda)}}{B^{2-} + \sum_{\lambda=1}^{L(\lambda)} b_{\lambda} X^{x(\lambda, \lambda)}} + U \left( \frac{U}{U} \right)^{10} \sum_{\lambda=0}^6 \left[ \left\{ \frac{10U}{U} + vb \right\} B_{\varphi} X^v \right] \quad (2)$$

在公式 (1) (2) 中引用常数的意义和数值详见文献 [1]

收稿日期 1997-11-06

本文联系人 王世忠 男 150001 哈尔滨工业大学 304 信箱

©1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

果。

水蒸气的性质不是互相独立的。如果取压力  $P$  和温度  $T$  为自变量, 那么比容  $v$ 、比熵  $s$  和焓  $h$  可以利用下面正则函数的偏微分得到:

$$g = g(P, T)$$

式中  $g$  是自由焓 (吉布斯函数)

同理, 如果取比容  $v$  和温度  $T$  为自变量, 那么压力  $P$ 、比熵  $s$  和焓  $h$  可以利用下面正则函数的偏微分得到:

$$f = f(v, T)$$

式中  $f$  是自由能 (亥姆霍兹函数)

IFC 公式提供了压力  $P = 0 \sim 10^8$  Pa, 温度  $T = 273.15 \sim 1073.15$  K 的水和水蒸气的性质。并且按照上述压力、温度范围划分为 6 个子区域。下面作为例子给出水蒸气常用的子区域 2 的公式:

若记  $\Theta = T/T_{c1}$ —折合温度;  $U = P/P_{c1}$ —折合压力;  $X_2 = v/(P_{c1} v_{c1})$ —折合焓;  $e_2 = S/(P_{c1} v_{c1}/T_{c1})$ —折合比熵。则 IFC 公式如下:

### 2 计算机查表和计算机查找焓-熵图

在计算机应用日益普及的今天,在热能动力工程领域的科研、设计、制造和运行部门,大多数人仍然依靠手工查找水和水蒸气性质表、查找焓-熵图和用笔算进行热力计算。在查表时还经常需要进行插值计算。这种传统的方式既容易出错,又费时、费力。而 IFC公式的问世,使人们可以摆脱这种传统的方式,利用计算机查找水和水蒸气性质表、查找焓-熵图和进行热力计算。

#### 2.1 计算机查表

计算机查表实际上是根据 IFC公式直接计算水和水蒸气性质。例如,如果已知水蒸气的压力  $P$  和温度  $T$ ,那么根据公式 (1)、(2) 就可以直接计算出水蒸气的焓  $h$  比熵  $s$  在这里,因为压力  $P$  和温度  $T$  都可以取连续的数值,所以可以避免插值计算和由此而产生的计算误差。

#### 2.2 计算机查找焓-熵图

计算机查找焓-熵图不能根据 IFC公式直接进行计算,但可以借助于一维寻根程序和 IFC公式来实现。为简便起见,将公式 (1)、(2) 记作以下形式:

$$h = f_1(P, T) \tag{3}$$

$$s = f_2(P, T) \tag{4}$$

当已知水蒸气的压力  $P$  和比熵  $s$  的时候,根据公式 (1)、(2) 直接计算水蒸气的温度  $T$  和焓  $h$  是不可能的。可将公式 (4) 变成下面方程的形式:

$$s - f_2(P, T) = 0 \tag{5}$$

因为在方程 (5) 中,水蒸气的压力  $P$  和比熵  $s$  都是已知的,所以方程 (5) 是一个以温度  $T$  为变量的复杂一元非线性方程。这样确定温度  $T$  的问题就转化为求复杂一元非线性方程 (5) 的根的问题。显然,方程 (5) 是没有解析解的。用笔算求解也是不可能的。但是,在计算机上利用一维寻根程序,不但很容易得到方程 (5) 的根,而且能够达到人们需要的精确度。方程 (5) 的根就是所要求的温度  $T$ 。得到温度  $T$  以后,就可以将压力  $P$  和温度  $T$  代入方程 (3),直接计算出水蒸气的焓  $h$ 。

同理,当已知水蒸气的温度  $T$  和焓  $h$  的时候,可将公式 (3) 变成下面方程的形式:

$$h - f_1(P, T) = 0 \tag{6}$$

再利用一维寻根程序得到方程 (6) 的根。方程 (6) 的根就是所要求的压力  $P$ 。得到压力  $P$  以后,就可以将压力  $P$  和温度  $T$  代入方程 (4),直接计算出不蒸气的比熵  $s$ 。

### 3 热力计算应用实例

热力计算需要根据具体的热力过程来进行。下面的两个实例代表两个典型的热力过程,即等熵过程和等焓过程。

#### 3.1 200 MW汽轮机‘快关’时的热力计算<sup>[2]</sup>

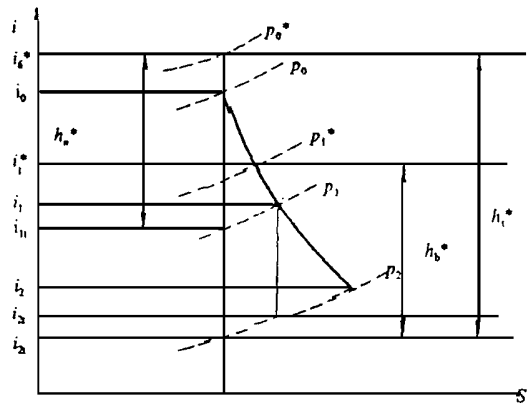


图 1 热力过程焓-熵图

当电力系统用负荷时,快速关闭进入中压汽缸的水蒸气的阀门,将高压汽缸的排气暂时积存在起缓冲作用的再热器中,使得汽轮机的出力瞬间减少,避免汽轮机输入功率与发电机输出功率的不平衡。这种快速关闭汽缸阀门的方法被人们称作“快关”。为了采用“快关”技术,能源部在朝阳发电厂作过实验。我们对于朝阳发电厂 # 机组,即国产 200 MW 汽轮发电机组在‘快关’时的情况进行了计算<sup>[3]</sup>。其中汽轮机各级热力过程的计算是借助于一维寻根程序和 IFC公式来实现的。

汽轮机各级热力过程焓-熵图如图 1 所示。图中  $P_0, i_0, i_0^*$ —汽轮机各级喷嘴入口处水蒸气的压力、焓和滞止焓;

$P_1, i_1, i_1^*$ —汽轮机各级喷嘴出口处,即叶片前水蒸气的压力、焓和滞止焓;

$P_2, i_2, i_2^*$ —叶片后水蒸气的压力、焓和滞止焓;

其中压力  $P_0, P_1, P_2$  均由汽缸控制属于不变量。

由各级喷嘴入口处水蒸气的温度  $T_0$  压力  $P_0$  和流速  $C_0$  可以计算出喷嘴入口的焓  $i_0$  滞止焓  $i_0^*$  和比熵  $s_0$ 。因为水蒸气在汽轮机中膨胀做功的过程可以作为等熵过程,所以喷嘴出口处水蒸气的比熵  $s_1$  和叶片后水蒸气的比熵  $s_2$  都等于  $s_0$ 。这样,利用计算机查找焓-熵图的方法,由已知的  $P_1, P_2$  和  $s_0$  可以求得  $T_1$  和  $T_2$ 。再利用 IFC公式 (1)、(2),由  $P_1, P_2, T_1$  和  $T_2$  计算得到  $i_1, i_2$ 。进一步得到汽轮各级焓降、各级叶片前后的流速  $C_1, C_2$ 。再根据流量  $Q$  和流速  $C_1, C_2$  计算得到各级叶片加在汽轮机转子轴系上的扭矩。由转子动力学计算汽轮机转子轴系对于“快关”的

响应,即“快关”瞬间汽轮机转子轴系扭转角随时间变化的情况。最后,计算汽轮机转子轴系各截面上的应力并校核其动态强度。

### 3.2 300 MW 汽轮机 35% 旁路系统阀热力计算

300 MW 汽轮机 35% 旁路系统阀国产化设计是能源部和国务院重大办八五期间的重大攻关项目。由哈尔滨发电设备制造总厂承担。300 MW 汽轮机 35% 旁路系统阀包括高压和低压 2 级, 6 种总共 9 个阀门。我们参加了其中高压蒸汽转换阀、低压蒸汽转换阀、高压喷水调节阀和低压喷水调节阀的设计计算工作。在热动力工程中这些阀属于减温减压装置,其中高压蒸汽转换阀结构最复杂(见图 2)。计算最困难,因为涉及冷却水与水蒸气混合流动,多级多孔节流计算,所以需要根据两相流体动力学原理和可压缩流体动力学理论给出计算模型。

高压蒸汽转换阀的工作过程是首先经过小阀瓣节流的冷却水与经过大阀瓣节流的高压水蒸气在混合室里汇合,然后经过 1 级、2 级和 3 级孔板节流,最后流入中压汽缸(见图 2)。

可压缩流体经过孔板节流前后流束特性与压力变化如图 3 所示:

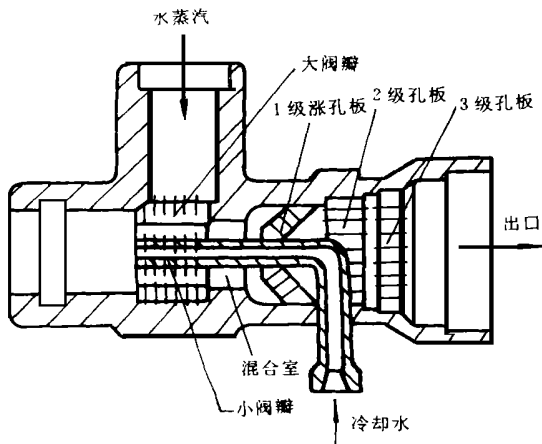


图 2 高压蒸汽转换阀

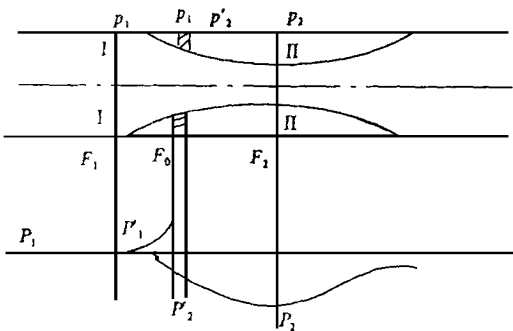


图 3 孔板节流前后流束特性与压力变化

图中  $F_0$ —节流孔截面积;

$F_1$ 、 $F_2$ —分别为管道截面积和流束最狭窄处截

面积;

$P_1$ 、 $P_2$ —分别为节流前压力和节流后流束最狭窄处压力。

根据容积流量  $Q$  节流孔截面积  $F_0$ 、孔板的截面收缩比  $m = F_0 / F_1$ 、流束收缩系数  $\mu = F_2 / F_0$ 、节流前压力  $P_1$  和密度  $d_1$ , 根据以下方程可以求出节流前后压力比  $P_1 / P_2$ :

$$\frac{Q^2 d_1}{2F_0^2 P_1} \left[ 1 - \mu^2 \left[ \frac{P_2}{P_1} \right]^{\frac{2}{k}} \right] = \frac{K}{K-1} \mu^2 \left[ \frac{P_2}{P_1} \right]^{\frac{2}{k}} \left[ 1 - \left[ \frac{P_2}{P_1} \right]^{\frac{K-1}{K}} \right] \quad (7)$$

进一步可以求出节流后的压力  $P_2$ 。因为水蒸气在阀体中节流的过程可以作为等焓过程,所以孔板前后水蒸气的焓相等  $i_1 = i_2$ 。利用计算机查找焓-熵图的方法,借助于一维寻根程序和 IFC 公式,由已知的  $P_1$ 、 $T_1$ 、 $i_1$ 、 $i_2 = i_1$  和  $P_2$  可以求得  $T_2$  和  $s_2$ 。这样,依次求出阀瓣前后和各级孔板节流后水蒸气的热力学性质,完成全部热力计算。如果输出的压力、温度不符合设计要求,那就重新选择节流孔面积  $F_0$  和孔板的截面收缩比  $m = F_0 / F_1$ 。然后重复以上计算,直到输出的压力、温度符合设计要求。如此计算结果与铁岭发电厂实测结果相符。最后根据阀瓣前后和各级孔板前后的压力、温度用有限元方法计算阀体的强度。如果阀体的强度不符合要求,那就重新选择阀体的壁厚,直到符合设计要求。

## 4 结论

(1) 利用 IFC 公式和一维寻根程序,在计算机上可以快速、准确地计算出水和蒸气性质,并且可以十分方便地实现计算机查找焓-熵图;

(2) 利用 IFC 公式 (1)~(6)、公式 (7) 和一维寻根程序,对于 200 MW 汽轮机“快关”和 300 MW 汽轮机旁路系统阀进行热力计算的结果与发电厂实测结果相符;

(3) 实际应用表明,IFC 公式是热动力工程计算机辅助设计的有力工具,建议尽早推广应用。

## 参考文献

- (西德) 斯密特 E, 格里古尔 U. 国际单位制的水和水蒸气的性质, 赵兆颐译. 北京, 水利电力出版社: 1983, 9: 12-40.
- 哈尔滨汽轮机厂、朝阳发电厂. 20 万千瓦汽轮机结构及运行. 水利电力出版社, 北京: 1992, 7: 355~360.
- 王世忠, 孔宪仁等. 水蒸气与冷却水混合流动多级多孔节流流场分析. 哈尔滨工业大学学报, 1992, 26(6): 124~128.
- 王世忠, 王本利等. 200 MW 汽轮发电机转子在“快关”时的动态强度分析. 哈尔滨工业大学学报, 1995, 27(1): 32~37.

(渠源 编辑)

ence of an internal heat source, obtained by the use of a complex series method, and in tandem with the introduction of plate corner heat flux corner conditions, the anisotropic heat source-containing rectangular domain temperature field of four-side convection heat exchange was analyzed for the first time. Discussed is the effect of ply angle, anisotropic degree, boundary convection heat exchange factor and length-to-width ratio on the temperature field distribution. Key words anisotropic steady state heat conduction, convection, rectangular domain, analytic solution, corner condition, heat source

**有换热的流化床废液焚烧炉燃烧室热力计算 = Thermodynamic Calculation of the Furnace of a Fluidized Bed Waste Liquid Incinerator Containing Heating Surfaces [刊,中] /Bie Rushan, Liu Wentie, Yang Lidan, et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 441~ 443**

A furnace thermodynamic calculation method has been established for a fluidized bed waste liquid incinerator equipped with heating surfaces. By solving for dense phase zone and rarified phase zone heat balance equation obtained are the dense phase zone and rarified phase zone outlet incineration temperature as well as the formula for calculating auxiliary fuel consumption and incinerator efficiency. All the above has provided a theoretical basis for the design of fluidized bed waste liquid incinerators. Key words fluidized bed, incinerator, thermodynamic calculation, heat transfer, auxiliary fuel consumption, thermal efficiency

**蒸汽透平全三元粘性流场计算 = The Calculation of A Steam Turbine Three-dimensional Viscous Flow Field [刊,中] /Huang Diangui (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 444~ 446**

This paper gives a brief description of the method for calculating three-dimensional viscous flow field of a steam turbine blade row with the use of a finite volume time marching method. The specific calculation of an existing steam turbine blade row has demonstrated the validity and correctness of the calculation method and procedures. The proposed method can be used for conducting a detailed analysis of steam turbine blade performance. Key words turbine, three-dimensional flow, viscosity

**热电厂热负荷预测的神经网络模型 = A Neural Network Model for Predicting Cogeneration Plant Thermal Loads [刊,中] /Li Yong, Sun Haibo (Beijing College of Electric Power Engineering), Zhou Qin (Jilin Dongguan Cogeneration Plant) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 447~ 448**

On the basis of an improved version of BP network the authors propose a synthesized BP network model for predicting cogeneration plant thermal loads. Discussed also are the network structure constructing method and fitting precision. The results of actual prediction show that this prediction model based on the synthesized BP network performs very well in the prediction of cogeneration plant thermal loads. Key words thermal load, neural network, prediction model

**IFC公式在热能动工程中的应用 = The Application of IFC Formula in Thermal Energy Power Engineering [刊,中] /Wang Shizhong, Li Zhongying, Wang Huaibin (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 449~ 451**

By the use of IFC (International Formulation Committee) formula and one-dimensional root-searching program realized is the seeking-out of enthalpy-entropy diagram and a thermodynamic calculation. In addition, the formula has also found its application in the "fast closing" calculation of a 200 MW steam turbine and in the design of 300 MW steam turbine bypass system valves, bringing about an enhancement not only in calculation speed but also in calculation precision. Key words IFC formula, one-dimensional root search, enthalpy-entropy diagram, thermodynamic calculation, computer analysis.

**锅炉单冲量给水调节器设计的改进 = An Improvement in the Design of Boiler Single-element Feedwater Regulator** [刊,中]/Wang Xianzhong, Du Wei, Liu Mandan (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 454~ 456

In the course of regulating drum water level in a large-sized boiler there will emerge a serious false water level when a sudden change in steam or feedwater flow rate takes place. The authors have applied the prediction control form of Smith to the feedwater flow rate feedback and steam flow rate feed forward in order to compensate system non-minimal phase characteristics. Furthermore, a PI regulator is divided into a P regulator and a I regulator, at the same time not allowing the feedback and feed forward to enter the I regulator with a view to eliminating steady-state error. The control system as a whole features a simple structure. The results of simulation demonstrate that the system is characterized by a fine control effectiveness and high robustness. Key words drum water level control, non-minimal phase, Smith prediction

**现代动力工程技术是现代城市规划与建设的基础和依据 = Modern Power Engineering Technology as a Foundation and Basis for Modern Metropolis Planning and Construction** [刊,中]/Tu Junjie (Nanchong Nonferrous Metallurgical Design Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 457~ 459

**钠离子交换器再生系统的腐蚀与防护 = The Corrosion and Protection of Regeneration System of a Sodium Ion Exchanger** [刊,中]/Zhao Danya (Yunnan Industrial University), Guo Ping (Kunming Nonferrous Metallurgical Design Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 460~ 461

**燃气-蒸汽联合循环汽轮机参数的匹配 = The Matching of Steam-Gas Turbine Combined Cycle Parameters** [刊,中]/Zeng Xiangba (Shenzhen Nanshan Cogeneration Co. Ltd) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 462~ 464

**管式空气预热器钢管及套管磨损的处理方法 = A Method for Coping with the Wear of Tubular Air Preheater Steel tubes and Sleeve Pipes** [刊,中]/Hu Rongquan (Chongqing Songsaw Mine Bureau Power Station) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). 464

**Kalina 循环及在电站中的应用 = Kalina Cycle and Its Application in Power Stations** [刊,中]/Ding Li (Chongqing College of Electrical Power Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 465