

汽轮机性能试验中湿蒸气区焓值的计算方法

周留坤, 沈发荣, 严正波

(云南电力试验研究院(集团)有限公司 电力研究院, 云南 昆明 650217)

摘 要: 针对目前汽轮机湿蒸气区抽汽焓值计算模型的缺点, 利用抽汽口级效率的概念建立了湿蒸气区抽汽焓值的计算模型, 并利用国内三大汽轮机厂的原始数据对该模型进行了验证。由湿蒸气区抽汽焓值的计算结果, 拟合热力过程线得出排汽焓值。通过能量平衡法对排汽焓值进行验算, 该方法的特点是迭代计算量小, 迭代计算 3 次内可完成计算, 当最末一级处于湿蒸气区时, 程序不需要迭代计算。结果表明: 该计算模型简单, 程序移植性好, 所需测点少, 测点积累误差小, 误差小于 0.25%, 计算精度高。

关 键 词: 汽轮机; 抽汽口级效率; 湿蒸气区; 焓值计算; 热力过程线

中图分类号: TK262 文献标识码: A

引 言

在汽轮机的性能验收试验或者在线性能计算中, 由于目前尚不具备在线测量湿蒸气湿度的手段, 当最末几级抽汽及排汽处于湿蒸气区域时, 其压力和温度不再是独立参数。因此, 在性能计算中, 其焓值不能由蒸汽图标查出, 从而湿蒸气区焓值及低压缸效率的计算不能采用常规的计算方法。

ASME PTC6A-1982 中推荐两种方法: (1) 根据汽轮机总的输入、输出热量的平衡, 通过计算汽轮机功率确定排汽焓, 即利用热平衡方程、物质平衡方程和汽轮机功率方程, 对回热机组的热力系统进行计算。该方法先假定一个初始的排汽焓, 然后得出相应湿抽汽点焓值再进行迭代计算, 当两个焓值偏差在一定范围内, 计算结束; (2) 根据已知的再热蒸汽状态点和抽汽状态点作出做功膨胀线, 然后将此曲线平滑外推至湿蒸气区, 得出处于湿蒸气区的抽汽及排汽焓。该方法由于曲线拟合点数目较少, 精度较差。

1 国内外几种湿蒸气区焓值的计算方法

1.1 最小二乘法的曲线拟合处理法^[1]

文献 [1] 中提出通过最小二乘法拟合出一条光滑的压力—焓值曲线, 然后外推至湿蒸气区域, 由湿蒸气区各未知点的压力得出各未知点的焓值。这种计算方法满足了热力过程线光滑的要求, 但在曲线拟合中, 要求根据已知的参数用最小二乘拟合出的曲线必须是凹的, 且曲线不能有拐点, 因此当机组最后两级抽汽处于湿蒸气区时, 拟合出来的曲线不能满足曲线要求, 而需要对曲线进行特殊处理。

1.2 直线处理法

假定排汽比焓初值为 h_{dep} , 则湿蒸气区域抽汽的比焓值计算式为:

$$h_{qi} = h_{ip} - \Delta h_{is} \eta_p$$

式中: h_{qi} —所求抽汽点焓值; h_{ip} —低压缸进汽焓值; Δh_{is} —低压缸进汽口至抽汽口等熵焓降; η_p —低压缸效率。

目前, 研究者在进行汽轮机性能验收试验计算时, 多采用此方式或者该方式的改进公式进行处理。该方法的优点是计算简单方便; 缺点在于将低压缸的热力过程线简化为一条直线, 如图 1 中 1 线所示, 与汽轮机实际热力过程线有较大的出入^[2]。

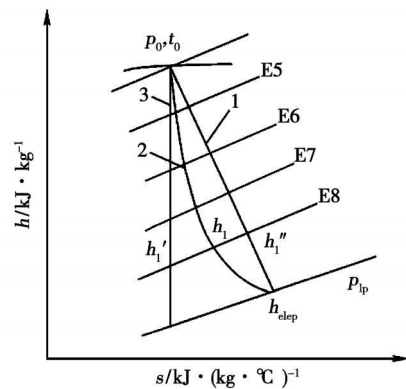


图 1 汽轮机低压缸热力过程线

收稿日期: 2009-04-20 修订日期: 2009-11-23

作者简介: 周留坤(1978—), 男, 河南安阳人, 云南电力试验研究院(集团)有限公司工程师, 工学硕士。

1.3 曲线处理法^[3]

曲线处理法考虑到了实际的热力过程线为曲线,如图1中2线所示,图中实际湿蒸气抽汽焓值为 h ; h'_1 为将低压缸热力过程线按照直线处理得到的抽汽焓值; h''_1 为抽汽压力 p 下的等熵焓值。因此将 h 与 h'_1 、 h''_1 的关系近似表达为:

$$h = (h'_1 + h''_1) / 2$$

该方法的优点在于根据热力过程线的实际状况做了近似处理,计算结果相对于直线处理法更加合理。该方法的问题在于当低压缸存在两段的湿蒸气抽汽时,如果两段湿蒸气都采用该方法计算,则其中的一段焓值误差较大。

1.4 国外计算方法^[4]

根据ASME 62-WA209在计算汽轮机低压部分性能时,对其热力过程线处理上采用的计算为:

$$S = 10 \frac{h_b - (h + Y)}{371.0} + R_0 (h - h_b) + S_b - Z$$

其中,

$$R_0 = \frac{(S_A - S_b) + Z \left\{ 10 \left[\frac{h_b - (h_A + Y)}{371.0} \right] \right\}}{(h_A - h_b)}$$

$$Z = 10^{-(Y/371.0)}$$

式中: h_A 、 S_A —热力过程起始点参数; h_b 、 S_b —热力过程线终点参数; S —热力过程线上任意一点参数。该方法对GE公司机型 Y 值取650在处理非GE公司机型或计算偏离设计值时,通过改变 Y 值来调整机组的热力线,达到与现场实际测量值相符合。缺点是对非GE机组 Y 值确定困难。

2 湿蒸气区焓值的计算模型

以上介绍的4种湿蒸气区焓值计算方法各有特点,在实际使用中各有优势也有局限性,现提出一种湿蒸气区焓值的计算方法并确定了热力过程线。

当主蒸汽参数达到设计参数,机组负荷低于70%时,最末两级抽汽可能处于湿蒸气区域,否则,通常情况下只有最末一级抽汽处于湿蒸气区域。因此在计算最末两级抽汽焓值时,首先需要对倒数第二级抽汽蒸汽状态进行判断,如倒数第二级抽汽蒸汽处于过热区,只计算最末一级抽汽。

在分析湿蒸气区焓值计算方法前,首先说明抽汽口级效率的定义。抽汽口级效率为两级抽汽口之间的级效率。

由图2可以看出:由于多级汽轮机前一级的余

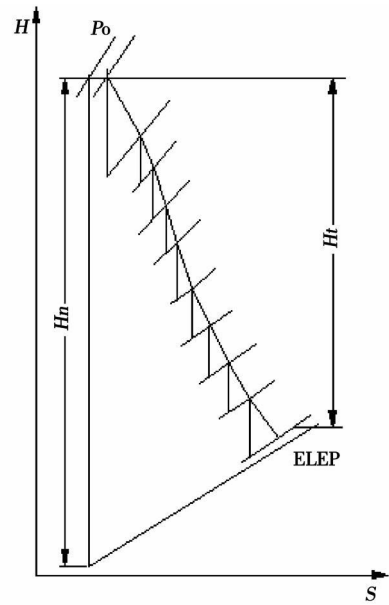


图2 多级汽轮机热力过程线

速损失在一定的条件下可以在下一级中得到利用,因此,各级等熵焓降之和大于整个汽轮机的等熵焓降 H_0 ,两者的比值大于1。因此,多级汽轮机总的内效率大于各级平均内效率^[5]。汽轮机内每一级效率逐级降低,两相邻的级效率偏差很小,而且通过验证低压缸最后一级级效率和低压缸效率偏差较小。在抽汽焓值计算中,首先假使两相邻抽汽口级效率相同计算抽汽焓值。如果倒数两级都处于湿蒸气区域时,最后一级抽汽只能按照倒数第三级抽汽口效率计算,计算结果偏差较大,此时按照低压缸效率计算取得很好的效果。模型如下:

如最末两级抽汽处于湿蒸气区,如图1中E7、E8所示,E7计算焓值方法为:

$$h_{E7} = h_{E6} - \Delta h_{E6} \eta_{56}$$

式中: h_{E7} —E7段抽汽焓值; h_{E6} —E6段抽汽焓值; Δh_{E6} —E6、E7抽汽口间的等熵焓降; η_{56} —E5、E6抽汽口级效率。

E8计算焓值方法为:

$$h_{E8} = h_{E7} - \Delta h_{E7} \eta_{67}$$

式中: h_{E8} —E8段抽汽焓值。

如仅最后一级处于湿蒸气区域,如图1中E8所示,计算焓值方法为:

$$h_{E8} = h_{E7} - \Delta h_{E8} \eta_{67}$$

式中: h_{E8} —E8段抽汽焓值; h_{E7} —E7段抽汽焓值; Δh_{E8} —E7、E8抽汽口间的等熵焓降; η_{67} —E6、E7抽汽口级效率。

表 1 300 MW 机组焓值计算结果

状态	机型	抽汽口	设计值	计算值	误差 /%
E7 处于过热区	东汽	E8	2 625.5	2 626.7	0.05
	东汽	E8	2 629.5	2 628.7	0.03
	上汽	E8	2 514.2	2 512.3	0.08
E7 处于湿蒸气区	东汽	E7	2 751.2	2 755.9	0.17
		E8	2 626.0	2 629.9	0.15
	上汽	E7	2 648.9	2 648.1	0.03
		E8	2 514.0	2 518.0	0.16
	哈汽	E7	2 618.0	2 623.3	0.20
	E8	2 491.0	2 495.4	0.18	

表 2 该程序计算结果与文献 [6] 结果比较

状态	E7 抽汽	E8 抽汽	热耗试验结果	热耗修正结果
本文结果	2 668.56	2 520.43	8 376.89	8 352.87
文献 [6] 结果	2 668.50	2 517.21	8 376.95	8 366.30
误差 /%	0.002	0.13	0.0007	0.16

表 2 是采用该方法设计的计算程序与文献 [6] 的对比, 由计算结果可知: 该方法计算精度高, 满足工程需要。由计算过程可知, 采用本研究介绍的模型在迭代计算过程中, 一般迭代 2~3 次即可完成。

4 误差分析

由误差结果分析可知: 当 E7 处于过热区时, 计算值与设计值误差很小, 接近实际值; 当 E7 处于湿蒸气区时, E7 与 E8 计算结果与设计值偏差相对较大, 但最大误差小于 0.2%。该误差产生的原因是由于假设相邻两抽汽口的间级效率相等建立数学模型, 而在实际计算中相邻两抽汽口的间级效率并不相等, 两者之间存在偏差。因此最终结果引起计算误差。由公式 $h_{E7} = h_{E6} - \Delta h_{E7} \eta_{56}$ 得知, 误差主要产生原因是由于 η_{56} 不等于 η_{67} 。计算结果误差为:

$$\delta = \frac{h_{E7} - h'_{E7}}{h'_{E7}} = \frac{h_{E6} - \Delta h_{E7} \eta_{56} - (h_{E6} - \Delta h_{E7} \eta_{56})}{h_{E6} - \Delta h_{E7} \eta_{56}}$$

$$= \frac{\Delta h_{E7} (\eta'_{56} - \eta_{56})}{h_{E6} - \Delta h_{E7} \eta_{56}} = \frac{\eta'_{56} - \eta_{56}}{h_{E6} / \Delta h_{E7} - \eta'_{56}}$$

$$= \frac{\eta'_{56} - \eta_{56}}{(h_{E6} - h'_{E7} + h'_{E7}) / \Delta h_{E7} - \eta'_{56}} = \frac{\eta'_{56} - \eta_{56}}{h'_{E7} / \Delta h_{E7}} < \frac{\eta'_{56} - \eta_{56}}{2}$$

式中: h_{E7} —E7 段抽汽焓值; h'_{E7} —该文假设情况下计算值。由误差计算公式可知: 假设计算误差小于两抽汽口级效率偏差的 1/2 由于两抽汽口级效率偏差一般小于 0.5%, 因此该计算误差小于 0.25%。

由误差分析可知: 该假设计算的误差主要在于

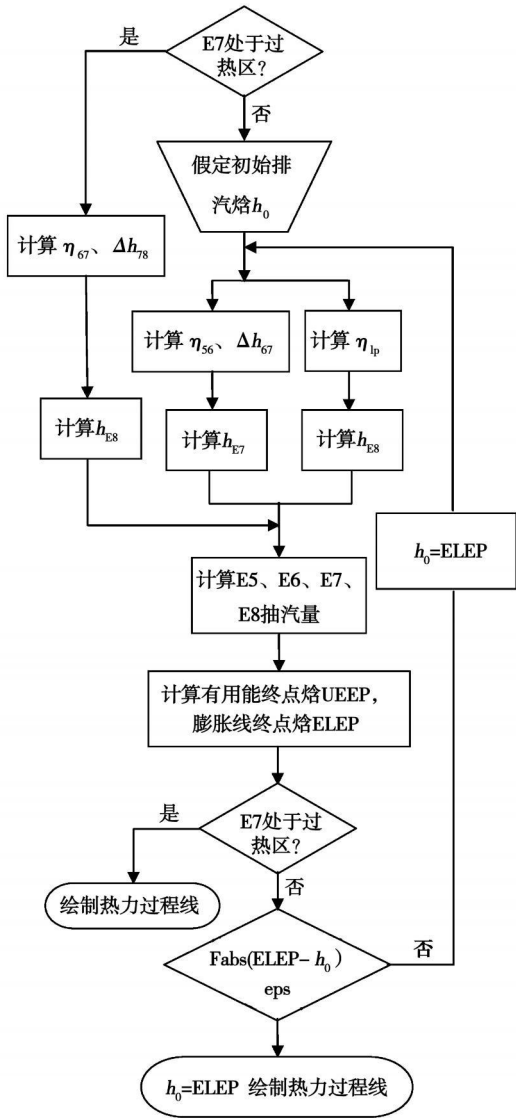


图 3 热力线绘制过程

以图 1 中低压缸有 4 级抽汽计算流程如图 3 所示, 当 E7 处于过热区时, 低压缸排汽热力过程线不需要迭代计算即可完成; 即使 E7 处于湿蒸气区域, 本计算仅有 E8 需要参与迭代计算, 相对于 ASME PTC6A-1982 中推荐的方法更加快捷, 由于仅有 E8 参与迭代计算, 热力过程线的拟合更加精确。

3 模型验证

表 1 参照国内三大汽轮机厂家的典型机组设计热力计算书和本计算模型对 E7 是否处于湿蒸气区域分别进行了验证, 计算结果与制造厂计算数据吻合很好。

上一级抽汽口级效率和计算级抽汽口级效率的偏差大小。随着湿蒸气区抽汽级数的增加,后面几级湿蒸气抽汽焓值只能按照第一次假设计算,抽汽口级效率偏差增大,导致计算误差增大,因此该模型仅适合火电机组最末两级可能处于湿蒸气区域的计算,其中仅一级利用假设创建的模型进行计算。不适合计算几级抽汽处于湿蒸气区域的核电机组。

5 结 论

利用抽汽口级效率的概念建立了新的湿蒸气区焓值计算数学模型,该模型仅计算一级抽汽焓值。若位于湿蒸气区抽汽是两级抽汽,利用已有的数学模型计算另外一级抽汽焓值取得了很好的效果。所推荐的计算方法与其它介绍的4种方法相比有以下特点和优势:

- (1) 该模型方便程序的移植,计算精度高。
- (2) 与曲线拟合程序相比,该方法简单,方便在excel中编写程序。
- (3) 与最小二乘法的曲线拟合处理法和直线处理法相比,如果只有最末一级处于湿蒸气区域,该方

法不需要迭代计算,精度更高;如果最末两级处于湿蒸气区域仅有一级参与迭代计算,既保证了精度又提高了迭代速度。

(4) 本文介绍的方法在东汽、上汽、哈汽等厂家的多台300和600 MW亚临界、超临界汽轮机组上实际计算证明:计算方便快捷,编程容易实现,误差小于0.2%,迭代次数小于3次,值得采用及推广。

参考文献:

- [1] 任浩仁. 汽轮机在线性能计算中排汽焓的确定[J]. 动力工程, 1998, 18(6): 1-4
- [2] COTTON K C. Evaluating and improving steam turbine performance[M]. NY: Cotton Fact, 1998
- [3] 胥传普. 一种新型火电机组热经济型分析软件[J]. 中国电力, 1998, 31(10): 53-54
- [4] SPENCAR R C, COTTON K C. A method for predicting the performance of steam turbine generators 16 500 kW and larger[R]. GE Corporation, 1974
- [5] 沈士一, 庄贺庆, 康松, 等. 汽轮机原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995
- [6] 刘凯. 汽轮机试验[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005

(编辑 何静芳)

新技术、新工艺

提高蒸燃联合装置余热锅炉耐浸蚀—腐蚀可靠性的途径

据《Тяжелое машиностроение》2009年3月号报道,被安装在ППУ—450蒸燃联合循环装置中的余热锅炉在运行过程中产生了汽水通路部件腐蚀以及浸蚀—腐蚀破坏问题。在低压蒸发器(ИИД)内的浸蚀—腐蚀磨损是典型的破坏(达到40%)。

对于具有水平受热面的立式余热锅炉,低压蒸发器弯头的浸蚀—腐蚀磨损和余热锅炉(КУ)停炉时受热面的停机腐蚀是金属被破坏所具有代表性的两种形式。

应用铬含量不少于0.3%的钢材并借助于使用不挥发的反应剂使液膜的PH值保持大于9.5可以保证减少低压蒸发器部件在运行条件下的浸蚀—腐蚀磨损。浸蚀—腐蚀磨损问题彻底的解决办法是通过完善余热锅炉的结构来达到。

应用基于十八烷基胺(ОДА)的封存工艺可以保证受热面避免停机腐蚀,并有助于减少余热锅炉通流部分部件的浸蚀—腐蚀磨损。

借助于定期、定点地把规定剂量的十八烷基胺加入低压蒸发器,可以大大降低弯头的浸蚀—腐蚀磨损。

(吉桂明 摘译)

very well adjust the working point of the compressor thereby playing an important regulation role in modifying the gas turbine. To change the geometry of the power turbine can even better improve the off-design performance of the unit. Key words: gas turbine; small deviation equation; variable geometry turbine

汽轮机性能试验中湿蒸气区焓值的计算方法 = A Method for Calculating an Enthalpy Value in the Wet Steam Zone During the Performance Test of a Steam Turbine [刊, 汉] / ZHOU Liukun SHEN Fa'rong YAN Zheng-bo (Electric Power Research Institute Yunnan Electric Power Test Academy (Group) Co., Ltd., Kunming, China; Post Code: 650217) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3). — 265 ~ 268

In the light of the shortcomings of the models currently available for calculating the extracted steam enthalpy of a steam turbine in the wet steam zone, a concept of the stage efficiency at the steam extraction port was adopted to establish a model for calculating the above extracted steam enthalpy and the original data from the three largest domestic turbine works were used to verify the model in question. The calculation results from the extracted steam enthalpy value in the wet steam zone were used to effect a fitting of the thermodynamic process and to obtain the exhaust steam enthalpy value. By adopting an energy balancing method, the exhaust steam enthalpy was rechecked. The method features a small amount of iterative calculations, which can be completed in three times. When the last stage enters into the wet steam zone, no iterative calculation will be needed. It has been found that the calculation model is simple and its program enjoys a good program transplantation, requiring fewer measuring points and featuring a small accumulative error of the measuring points assessed at less than 0.25% and a high calculation precision. Key words: steam turbine; stage efficiency at the steam extraction port; wet steam zone; enthalpy calculation; thermodynamic process curve

有气膜孔燃气轮机燃烧室燃烧流场的数值模拟 = Numerical Calculation of the Combustion Flow Field in a Gas Turbine Combustor With Air-film Holes [刊, 汉] / SONG Shaolei LITongqiao (Harbin Steam Turbine Works Co., Ltd., Harbin, China; Post Code: 150046), LI Jinying (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China; Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3). — 269 ~ 272

By using software Fluent, numerically simulated was the combustion condition of a gas turbine combustor with air film holes. During the simulation, the standard $k-\epsilon$ turbulent flow model, a "simple chemical reaction system" model and "quick chemical reaction" assumptions were adopted and the SIMPLE algorithm was employed to seek solutions based on a pressure-speed coupling. Through an analysis of the simulation results, the variation tendency of such parameters as excess air ratio, flame length and average wall surface temperature of the flame tube etc. with load changes was obtained and compared with the corresponding condition without air film cooling. A relatively big improvement has been mainly realized in the combustion mixing and dilution, as well as flame tube wall surface temperature. The conclusion thus obtained has a certain reference value for structural improvement and optimization of the combustors. Key words: gas turbine; combustor; air film hole; numerical simulation

纯环路型和混合型行波热声发动机的对比实验 = Contrast Experiment of Travelling-wave Thermoacoustic Engines of Pure Loop and Hybrid Type [刊, 汉] / WANG Hongji WANG Shuangfeng (Education Ministry Key Laboratory on Heat Transfer Intensification and Process Energy Conservation, South China University of Science and Technology, Guangzhou, China; Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3). — 273 ~ 277

A travelling-wave thermoacoustic engine test rig was developed with ceramic material serving as a plate stack. A contrast experiment of the thermodynamic performance of thermoacoustic engines of pure loop and hybrid type was