

汽轮机热力性能考核指标的通用方程

阎顺林, 郭佳雷

(华北电力大学 能源与动力工程学院, 河北 保定 071003)

摘 要: 掌握汽轮机组的热力性能对整个火电机组的安全经济运行起着至关重要的作用。目前汽轮机热力性能试验规程中关于其指标的计算只给出了各项指标的定义及基本计算公式, 对于不同的机组要分别分析列出计算式, 通用性比较差, 不利于计算机通用程序的开发。在长期的分析和思考基础上, 通过建立统一的火电机组物理模型, 提出了汽轮机热力性能考核指标的通用方程。其不仅为编制通用的汽轮机热力试验计算指标提供了依据, 而且也为试验规程的进一步细化奠定了基础。

关 键 词: 热力性能; 考核指标; 通用方程

中图分类号: TK26 文献标识码: A

引 言

汽轮机组的热力性能对于火电机组的节能降耗和保护环境具有重要的作用。汽轮机热力性能试验是考核机组经济性能的主要方式, 目前国内一般按国家标准 GB 8117—87《电站汽轮机热力性能验收试验规程》或者美国 ASME PTC 6—2004《蒸汽轮机》标准执行。但是现有标准中只给出的各项指标的定义及基本计算公式<sup>[1~2]</sup>, 对于不同的汽轮机组需要根据定义及基本计算公式列出需要考核的汽轮机组指标计算方程, 然而由于火电机组的结构多样性和复杂性, 热力试验指标计算系统的开发, 都是针对特定机组进行的, 致使开发费用很高。

针对上述问题, 作者通过长期的分析和思考, 先建立火电机组的统一物理模型, 而后再建立通用的数学模型。目前, 已实现了这一设想, 建立了火电机组统一的物理模型, 并在此基础上, 建立了汽轮机组热力性能考核指标的通用方程。统一物理模型简明规范, 在此基础上建立汽轮机组热力性能考核指标的通用方程也较简单, 且物理意义比较明确。这不但为汽轮机热力性能试验考核指标计算通用模型的

开发奠定了基础, 而且也为一般的热经济性分析、机组的变工况分析和制定热经济分析及能耗计算的统一标准提供了新的理论工具, 具有重要的理论意义和使用价值。

1 统一物理模型

以能量平衡方程和质量平衡方程为基础, 建立了火电机组统一物理模型, 如图 1 上部分虚线所示。

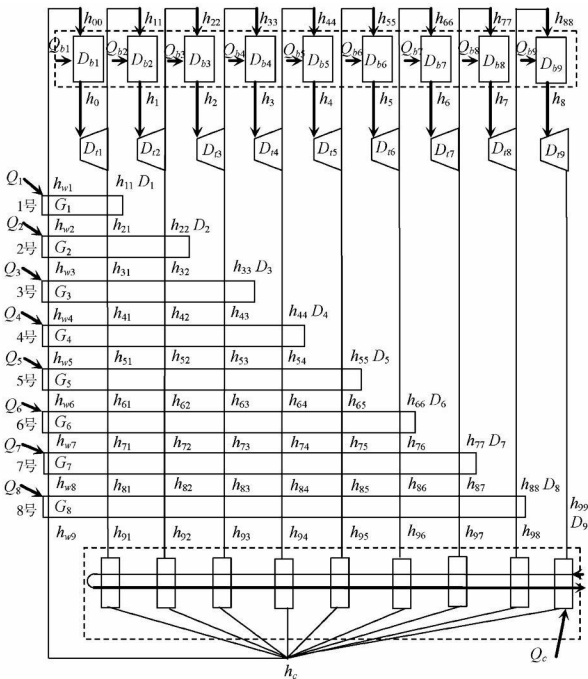


图 1 火电机组统一物理模型

1.1 回热系统

回热系统中的加热器有的是混合式、有的是表面式, 对于表面式加热器其疏水有的是自流入下一级加热器, 有的是自流入凝汽器的热水井, 还有的是

用疏水泵打入主凝结水管路。另外,辅助汽水的引入(出)方式和引入(出)数量也不同。为了适应如此复杂的系统,目前的回热系统汽水分布方程形式比较复杂,同时,使用的规则也就比较多。为解决这一问题,采取的措施是:

(1) 将所有的加热器都视为“表面式加热器”,如图 1 中 1 号~8 号所示;

(2) 假设任意一级加热器抽汽的疏水都逐级自流过其后的各级加热器,各股抽汽的疏水互不混合。

(3) 将原系统的热力参数通过特定映射规律映射到新的回热系统中<sup>[3]</sup>。

## 1.2 锅炉和汽轮机本体

机组有无再热以及再热的次数等,直接影响了与锅炉本体和汽轮机本体密切关联的汽轮机级热耗量和内功率方程。再热的次数越多,则这两个方程的形式越复杂。对此问题的解决措施是:

(1) 以汽轮机的  $n$  个抽汽口为分界点,将汽轮机分为  $n+1$  个做功单元,即  $n+1$  个小汽轮机,如图 1 上部分虚线所示;

(2) 假设每个小汽轮机都有一个为其提供热量的小锅炉,所有的小锅炉统称为广义锅炉,如图 1 上部分虚线所示。

## 1.3 凝汽器

在建立回热系统的统一物理模型时,假设各股抽汽的疏水都进入到了凝汽器,假定每一股抽汽的疏水和汽轮机低压缸的排汽都进入一个对应的小凝汽器,所有的小凝汽器统称为广义凝汽器。

## 1.4 统一模型中各量的说明

$h_{ii}$  为第  $i$  个小汽轮机的排汽焓;  $h_i$  为第  $i+1$  个小锅炉的出口工质焓;  $Q_{bi}$  为第  $i$  个小锅炉的辅助汽水热量代数;  $D_i$  为汽轮机的第  $i$  级名义抽汽量;  $D_{bi}$  为第  $i$  个小锅炉中工质流量;  $D_{ti}$  为第  $i$  个小汽轮机中参与做功的蒸汽流量;  $G_i$  为进出第  $i$  级控制体的名义水流量;  $h_{wi}$  为进出第  $i$  级控制体冷介质的焓;  $Q_i$  为进入第  $i$  级控制体的名义加热量;  $h_j$  为第  $j$  级抽汽进出第  $i$  级控制体的焓。具体各量的映射关系,已经在“火电机组热力系统的通用拓扑模板”中阐述,详见文献<sup>[3]</sup>。

## 2 热力性能考核指标的通用方程

在统一物理模型的基础上建立汽轮机热力试验计算指标过程并不复杂,即:根据《电站汽轮机热力

性能验收试验规程》中各考核指标的含义及基本表达式,在统一物理模型的基础上列出各考核指标的计算式<sup>[4~5]</sup>,经过数学变换推导得到汽轮机热力性能考核指标的通用方程。

(1) 热耗量:是指汽轮发电机组从外部热源所取得的热量。在火电机组统一物理模型中热耗量表示在机组的整个循环中,工质从广义锅炉吸收的热量,即:工质在各个小锅炉中吸收的热量之和(kJ/h):

$$Q_0 = \sum_{i=1}^{n+1} D_{bi}(h_{i-1} - h_{i-1,i-1}) + \sum_{i=1}^{n+1} Q_{bi} \quad (1)$$

(2) 内功率:是汽轮机单位时间内以热量计的汽轮机组所做的功。在火电机组统一物理模型中内功率是机组在循环中,在单位时间内,各个小汽轮机中所做的内功之和(kg/h):

$$W_i = \sum_{i=1}^{n+1} D_{ti}(h_{i-1} - h_{ii}) \quad (2)$$

(3) 热耗率:是指汽轮发电机组热耗量与其电功率的比值(kJ/(kW·h)):

$$q_0 = Q_0 / P_e \quad (3)$$

(4) 热效率(汽轮机绝对电效率):汽轮发电机组热效率是指汽轮发电机组每千瓦时发电量相当的热量占发电热耗量的百分比:

$$\eta_q = \frac{3600}{q_0} \times 100 \quad (4)$$

(5) 汽轮机绝对内效率:是指一定时间内汽轮机所做的功与其做功的热耗量之比:

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_0} \times 100 \quad (5)$$

(6) 发电煤耗率(kg/(kW·h)):

$$b^s = \frac{3600 Q_0}{29270 \eta_b \eta_p W_i \eta_m \eta_g} \quad (6)$$

式中:  $\eta_b$ —锅炉热效率;  $\eta_p$ —管道热效率;  $\eta_m$ —机械效率;  $\eta_g$ —发电机效率。

(7) 供电煤耗率(kg/(kW·h)):

$$b_n^s = \frac{3600 Q_0}{29270 \eta_b \eta_p W_i \eta_m \eta_g (1 - \epsilon_{ap})} \quad (7)$$

式中:  $\epsilon_{ap}$ —厂用电率。

以热耗量式(1)和汽轮机的内功率式(2)为基础,将式(3)~式(7)中的  $Q_0$  和  $W_i$  提出,可写成如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ 1/\eta_i \\ 1/\eta_q \\ b^s \\ b_n^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\eta_m \eta_g \\ 1 \\ 1/3600 \eta_m \eta_g \\ 3600/29270 \eta_b \eta_p \eta_m \eta_g \\ 3600/[29270 \eta_b \eta_p \eta_m \eta_g (1 - \epsilon_{ap})] \end{bmatrix} \frac{Q_0}{W_i}$$

其中:

$$Q_0=[D_{b1} \quad D_{b2} \cdots D_{b(n+1)}] \begin{bmatrix} h_0-h_{00} \\ h_1-h_{11} \\ \vdots \\ h_n-h_{nn} \end{bmatrix} +$$
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{n+1} \end{bmatrix}$$
$$W_i=[D_{i1} \quad D_{i2} \cdots D_{i(n+1)}] \begin{bmatrix} h_0-h_{11} \\ h_1-h_{22} \\ \vdots \\ h_n-h_{(n+1)(n+1)} \end{bmatrix}$$

以上方程即为汽轮机热力性能考核指标的通用式。如果以热耗量  $Q_0$  和发电机的功率  $P_e$  作为计算的基础, 则热力性能考核指标通用式可写为:

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ 1/\eta_i \\ 1/\eta_q \\ b^s \\ b_n^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_m \eta_g \\ 1/3\,600 \\ 3\,600/29\,270\,\eta_b\,\eta_p \\ 3\,600/[29\,270\,\eta_b\,\eta_p(1-\epsilon_{ap})] \end{bmatrix} \frac{Q_0}{P_e}$$

其中:

$$Q_0=[D_{b1} \quad D_{b2} \cdots D_{b(n+1)}] \begin{bmatrix} h_0-h_{00} \\ h_1-h_{11} \\ \vdots \\ h_n-h_{nn} \end{bmatrix} +$$
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_{n+1} \end{bmatrix}$$

电功率  $P_e$  为热力试验测量获得。

3 方程的验证

为了验证方程的正确性, 利用上述通用方程和传统方法对火电机组的热力系统进行验算。以哈尔滨汽轮机有限责任公司的 N600-16. 7/537/537 型汽轮机为例。

表 1 N600-16. 7/537/537 型汽轮机组热力性能考核指标

考核指标	本文方法	传统方法	相对误差/%
热耗量/ $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	4 725 505 500	$4.73\times 10^9$	-0.10
内功率/ $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$	2 216 641 000	$2.22\times 10^9$	-0.15
热耗率/ $\text{kJ}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	7 830 419 23	7 830	0.01
绝对电效率/%	45.974 55	46.0	-0.06
绝对内效率/%	46.908 02	46.9	0.02
发电煤耗率/ $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	296.710 924	297	-0.10
供电煤耗率/ $\text{g}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	312.327 288	312	0.10

注: 本文方法采用的是本文通用方程计算机编程的计算结果; 传统方法采用的是热平衡的手工算法(保留了三位有效数字)。

4 结 论

(1) 统一物理模型适用于任意形式的火电机组热力系统, 由此导出的汽轮机热力性能考核指标通用方程形式简单统一, 且通用性强。

(2) 用汽轮机热力性能考核指标通用方程替代传统的热力性能试验考核指标的计算方法, 不仅省去了对每一机组分别列出计算方程繁琐步骤, 简便易行, 而且经过实例计算可知, 通用方程计算结果完全正确。

(3) 根据热力性能考核指标的通用方程, 可以开发出适应于各种形式的通用火电机组热力性能试验考核指标的计算应用程序, 从而解决了开发出的计算机应用程序只适应于特定机组的问题。

(4) 汽轮机热力性能考核指标通用方程由于具有广泛的适应性, 所提供的公式对《电站汽轮机热力性能验收试验规程》的进一步细化具有重要的参考价值。

参考文献:

[ 1 ] 国家机械工业委员会. GB 8117—87 电站汽轮机热力试验规程 [ S ] .  
[ 2 ] ASME. ASME PTC 6—2004 Steam Turbines [ S ] .  
[ 3 ] YAN SHUNLIN, XU HONG. The general topological template and the general steam-water distribution equation of thermal system for the coal-fired power Unit //International Conference on Power Engineering—2007 [ C ] . Hangzhou: Springer Press and Zhejiang University Press, 2007. 117—120.  
[ 4 ] 郑体宽. 热力发电厂 [ M ] . 北京: 中国电力出版社, 1999.  
[ 5 ] 国家发展和改革委员会. DL/T904—2004 火力发电厂技术经济指标计算方法 [ S ] .

(编辑 滨)

was analyzed in a comprehensive way. On this basis, a study was conducted of the conversion of a high power simple-cycle marine gas turbine (MGT-33) to an intercooled cycle one. The precondition of the conversion is to keep the majority of the flow path and structure of the original engine gas generator unchanged to inherit the reliability of the prototype machine. The results of the study indicate that after the adoption of the IC cycle, under the precondition of minimum structure modification and retaining the compactness of the whole machine, the overall performance of the gas turbine still secures a conspicuous enhancement, with its power output being increased by about 34% and the efficiency, enhanced by approximately 4.1%, thus demonstrating the merits of the relevant engineering modifications. **Key words:** marine gas turbine, IC (Intercooled Cycle) cycle

汽轮机热力性能考核指标的通用方程 = **A General Equation of Indexes for Appraising the Thermodynamic Performance of a Steam Turbine**[刊, 汉]/ YAN Shun-lin, GUO Jia-lei (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(1). - 65 ~ 67

For the safe and cost-effective operation of a whole thermal power plant, it is of the utmost importance to grasp and know well the thermodynamic performance of steam turbine units. Currently, only a definition and basic calculation formulae of various indexes are given in the technical specification for thermodynamic performance tests of a steam turbine. If for different steam turbine units, calculation formulae are to be listed separately, a relatively poor generalization will result and this is not conducive to the development of general-purpose computer programs. On the basis of a long-time analysis and observation, a unified physical model of thermal power plants was established, and a general-purpose equation of indexes for appraising the thermodynamic performance of a steam turbine, proposed. This not only provides an underlying basis for preparing the calculation indexes of steam turbine thermodynamic tests, but also lays a foundation for a further refinement of the test specification. **Key words:** thermodynamic performance, indexes for appraisal, general equation

一种识别气液两相流流型的新方法 = **A New Approach for Identifying Gas-liquid Two-phase Flow Patterns**[刊, 汉]/ ZHOU Yun-long, LI Hong-wei, YUAN Jun-wen (College of Energy Source and Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin, China, Post Code: 132012)// Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(1). - 68 ~ 72

In the light of the statistical characteristics of image grey-scale histograms, proposed was a new method for identifying gas-liquid two-phase flow patterns by combining an image processing with an ameliorated supportive vector machine. The method in question is to use a high-speed video camera to acquire an image of 7 typical flow patterns on a gas-liquid two-phase flow test rig. Through the image processing, the statistical characteristics of the image grey-scale histograms were extracted to form an eigenvector, which serves as a flow pattern specimen to perform a training for and identification of the ameliorated supportive vector machine. The test results show that the characteristics of the image grey-scale histograms can very well reflect the difference of various flow patterns. Compared with the original supportive vector machine, the ameliorated one provides a good classification performance, a short operation time and a network identification rate as high as 99.04%, thus providing a new effective approach for an on-line discrimination of flow patterns. **Key words:** flow pattern identification, image processing, statistical characteristics of grey-scale histograms, ameliorated supportive vector machine

直接空冷凝汽器单元样机流动和传热性能研究 = **A Study of the Flow and Heat Transfer Performance of a Direct Air-cooled Condenser Sample Unit**[刊, 汉]/ SHI Lei (College of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, Post Code: 100044), SHI Cheng (China Electric Power Engineering Consultant Group Corporation, Bei-