

# The Influence of Main Steam-Turbine Pressure Disturbance on Turbine's Economy

Yuhong Mi

Hong Sheng Electric Co., Ltd., Company of Jiayuguan, Jiayuguan  
Email: miyuhong@jiugang.com

Received: Aug. 5<sup>th</sup>, 2013; revised: Aug. 27<sup>th</sup>, 2013; accepted: Sep. 8<sup>th</sup>, 2013

Copyright © 2013 Yuhong Mi. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Abstract:** The accurate calculation of the influence of the main steam pressure disturbance on the economy is important to the safe and economical operation of the unit. In our study, we deduced the formula of the impact of the main steam pressure disturbance on the unit economy based on the unified physical model and thermal system state equation. We also studied the unit of 600 MV and analyzed the impact of the main steam pressure changes on coal consumption under rated conditions and different conditions. Compared with the analysis results of the thermal test correction curves given by manufacturers, relative error does not exceed 3%, which demonstrates that this unified physical model has the advantages of being simple, accurate calculation, etc.

**Keywords:** Steam-Turbine; Main Steam Pressure Disturbance; Economy

## 汽轮机主汽压力扰动对机组经济性的影响

米玉鸿

嘉峪关宏晟电热有限责任公司, 嘉峪关  
Email: miyuhong@jiugang.com

收稿日期: 2013年8月5日; 修回日期: 2013年8月27日; 录用日期: 2013年9月8日

**摘要:** 准确计算主汽压力扰动对经济性的影响, 对机组安全运行、经济运行具有重要意义。本文以统一物理模型和热力系统状态方程为基础, 推导出了主汽压力扰动对机组经济性的影响计算公式。并以 600 MW 机组为研究对象, 分析额定工况和不同工况下主汽压力变化对煤耗的影响。并与厂家所给出的热力试验修正曲线的计算分析结果进行对比, 相对误差不超过 3%, 表明利用该统一物理模型简单、计算准确等优点。

**关键词:** 汽轮机; 主汽压力扰动; 经济性

### 1. 引言

汽轮机主蒸汽压力是热力系统重要的监测指标之一。为保障机组安全、可靠和经济的运行, 在设计汽轮机主蒸汽参数时是考虑了多方面的因素而做出的最优选择。在机组实际运行中, 运行人员往往从安全性考虑, 使主汽压力并不能更好的维持在设计工况, 运行值要比设计值偏低, 这就不可避免造成了机

组经济性降低。定量分析主汽压力扰动对机组经济性影响, 对机组初参数的设计优化、节能改造、现场运行管理有重要的意义。因此, 有必要对主汽压力扰动造成的影响进行定量分析、计算。

一般进汽参数偏离标准值而造成机组经济指标的相对变化, 可通过对机组进行热力特性试验或者由汽轮机厂家提供的热力特性曲线获得。当没有特性曲

线,也不方便进行热力试验时,则需采用别的方法进行计算。本文将从节能的角度,结合某引进型 600 MW 机组,运用统一物理模型和汽水分布矩阵方程对由主汽压力扰动造成的机组经济性降低做定量的实例计算分析,强化经济运行意识、安全运行意识。

## 2. 统一物理模型的建立<sup>[1]</sup>

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循环吸热量方程和比内功方程。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,见图 1。
- 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,见图 1。

通过(1)、(2)使得循环吸热量方程和比内功方程形式大为简化,且物理意义明确,便于进行热经济性的分析与计算。

对进、出各个小汽机的辅助汽水作了如下划分:

- ①从第  $i$  个小锅炉出口到第  $i$  个小汽机进口之间管路

上漏出的辅助蒸汽,记为  $D_{fri} (i=1,2,3,\dots,n+1)$ ; ②从第  $i$  个小汽机出口到第  $i+1$  个小锅炉进口管路之间进出的辅助汽水,记为  $D_{fci} (i=1,2,3,\dots,n+1)$ , (实际上从此处管路上进入的辅助汽水大多为零,只有再热喷水处不为零,其带来的热量按进入第  $i$  个小锅炉的辅助汽水计算),辅助汽水进入为正,流出为负。进入第  $n$  个小锅炉中的工质流量  $D_{bn}$  为:

$$D_{bn} = D_0 + D_{frj} + D_{fci} + \sum_{i=1}^{n-1} D_{fri} + \sum_{i=1}^{n-1} D_{fci} + \sum_{i=1}^{n-1} D_{ri} - \sum_{i=1}^{n-1} D_i \quad (1)$$

对于汽轮机进入第  $n$  个小汽机的流量为

$$D_m = D_0 + D_{frj} + D_{fci} + \sum_{i=1}^n D_{fri} + \sum_{i=1}^{n-1} D_{fci} + \sum_{i=1}^{n-1} D_{ri} - \sum_{i=1}^{n-1} D_i \quad (2)$$

## 3. 基于统一物理模型的数学模型的建立

通过对统一物理模型的建立与研究可以在此基础上建立统一的数学模型。在众多的数学模型中,热力系统的汽水分布方程、比内功方程和循环吸热量方程是最基本的,是进行机组热经济性分析、耗差分析

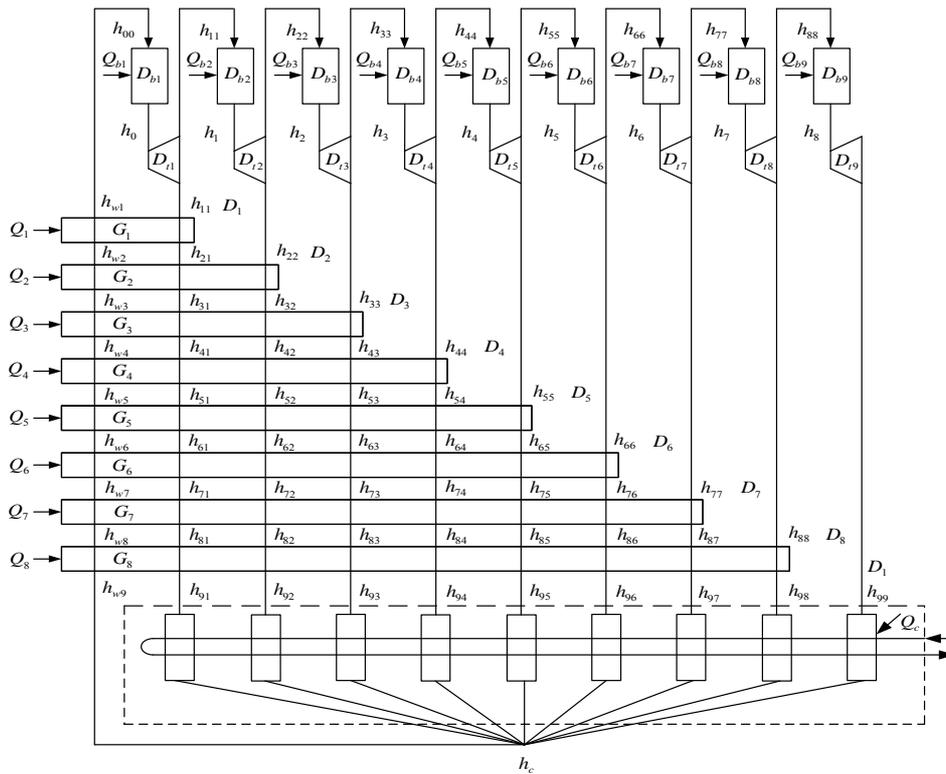


Figure 1. Unified physical model of thermal economic analysis of thermal power unit  
图 1. 火电机组热经济性分析统一物理模型

的基础。

### 3.1. 循环吸热量方程

循环吸热量表示在机组的整个循环中，工质从广义蒸汽发生器吸收的热量，即：

$$Q = \sum_{i=1}^{n+1} D_{bi} (h_{i-1} - h_{i-1,i-1}) + \sum_{i=1}^{n+1} Q_{bi} \quad (3)$$

### 3.2. 比内功方程

比内功是机组在循环中，在各个小汽轮机中所做的比内功之和，即：

$$N = \sum_{i=1}^{n+1} D_{ii} (h_{i-1} - h_{ii}) \quad (4)$$

### 3.3. 汽水分布方程<sup>[2]</sup>

利用热力学第一定律建立能量平衡方程，得到如下通用的汽水分布线性方程组：

$$\sum_{j=1}^i a_{ij} D_j + Q_i = \tau_i G_i, (i=1, \dots, n) \quad (5)$$

上式中的每一个方程，例如第  $i$  个方程表示，1~ $i$  股抽汽在第  $i$  个加热器中放热量和进出第  $i$  个加热器辅助能量之和等于给水或凝结水在第  $i$  个加热器中的焓升。

## 4. 主汽压力扰动对机组热经济性影响模型的建立

在对进汽压力的改变对机组经济性的影响的分析时，主蒸汽的温度、再热蒸汽的温度、调节阀开度和开数、汽轮机的背压、各级加热器的端差及各类的辅助汽水的流量不变。

主汽压力改变后，不但机组各级抽汽的比焓和各个级组的理想比焓降都发生变化，同时流过各个级组的流量也发生了变化。改变后流过各个小汽机和锅炉的流量可以由式(1)和(2)得到。

### 4.1. 抽汽压力的变化

确定变工况参数的基本方法是弗留格尔公式，即通过级组通流量决定级组前后的蒸汽压力<sup>[3]</sup>

$$\frac{D_1}{D_1'} = \sqrt{\frac{p_1^2 - p_2^2}{p_1'^2 - p_2'^2}} \cdot \sqrt{\frac{T_1'}{T}} \quad (6)$$

式中的下脚标 1、2 分别为级组前后的参数，带上角标为变化后的参数，式中的温度修正项近似等于 1，一般可以忽略。而级组是以抽汽口划分的，所以级组前后的压力比  $p_2/p_1$  总是很小，可以略去式中的  $p_2'$  和  $p_2$  项，则式(6)可变为以下较简单的形式

$$\frac{D_1}{D_1'} \approx \frac{p_1}{p_1'} \quad (7)$$

### 4.2. 抽汽比焓及各级组的理想比焓降的变化<sup>[4]</sup>

主汽压力的变化引起的焓值的改变量可以由蒸汽参数查表直接求得，也可以由高精度的拟合公式求得。在进汽参数发生小扰动的情况下，我们认为调节汽门的开度并未发生变化，所以可以将调节级组和第一级组合并为第一级来计算。因此第 1 级组的理想比焓降为：

$$H_{1la} = (h_0 - m) \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (8)$$

其中， $m$  为与特定机组有关的一个定值，一般取值范围为(2940~2950)。当主汽压的扰动值很小时，各级组的压比保持基本不变，所以对于第 1 个小汽机的理想比焓降的增量为：

$$\Delta H_{1la} = H'_{1la} - H_{1la} = \frac{H_{1la}}{h_0 - m} \cdot \Delta h_0 \quad (9)$$

同理，对于再热前的第  $i$  个小汽机，其理想比焓降和各级抽汽比焓的变化量的递推公式为：

$$\Delta H_{ia} = \frac{H_{ia}}{h_{i-1} - m} \cdot \Delta h_{i-1} \quad (10)$$

$$\Delta h_{i-1} = \Delta h_0 - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta H_{ja} \cdot \eta_j \quad (11)$$

同理对于再热( $n_h$  为再热的级组)后第  $i$  级理想焓降和抽汽比焓的变化的递推公式为：

$$\Delta H_{ia} = \frac{H_{ia}}{h_{i-1} - m} \cdot \Delta h_{i-1} \quad (12)$$

$$\Delta h_{i-1} = \Delta h_{r} - \sum_{j=n_h}^{i-1} \Delta H_{ja} \cdot \eta_j \quad (13)$$

### 4.3. 循环吸热量和比内功的变化

以上分析可知将上述结算结果代入式(3)中可得

变化后的循环吸热量  $Q'$  :

$$\begin{aligned}
 Q' &= \sum_{i=1}^{n+1} D'_{bi} (h'_{i-1} - h'_{i-1,i-1}) + \sum_{i=1}^n Q_{bi} \\
 &= \sum_{i=1}^{n+1} D'_{bi} (h_{i-1} + \Delta h_{i-1} - h_{i-1,i-1} + \Delta h_{i-1,i-1}) + \sum_{i=1}^n Q_{bi} \\
 &= \sum_{i=1}^{n+1} D'_{bi} (h_{i-1} - h_{i-1,i-1}) + \sum_{i=1}^{n+1} D'_{bi} (\Delta h_{i-1} - \Delta h_{i-1,i-1}) + \sum_{i=1}^n Q_{bi}
 \end{aligned} \tag{14}$$

同理，主汽压力变化后的比内功为：

$$\begin{aligned}
 N' &= \sum_{i=1}^{n+1} D'_{ii} (h'_{i-1} - h'_{i,i}) \\
 &= \sum_{i=1}^{n+1} D'_{ii} (h_{i-1} + \Delta h_{i-1} - h_{i,i} + \Delta h_{i,i}) \\
 &= \sum_{i=1}^{n+1} D'_{ii} (h_{i-1} - h_{i,i}) + \sum_{i=1}^{n+1} D'_{ii} (\Delta h_{i-1} - \Delta h_{i,i}) \\
 &= \sum_{i=1}^{n+1} D'_{ii} (h_{i-1} - h_{i,i}) + \sum_{i=1}^{n+1} D'_{ii} (\Delta H_{ia} \cdot \eta_i)
 \end{aligned} \tag{15}$$

一般当机组的初参数偏离基准工况很小时，其各个辅助汽水的流量一般不会发生很大的变化，因此可以认为各个辅助汽水的流量不发生变化。从而根据主汽流量的变化和各个加热器的抽汽量就可以得到流过各个锅炉和小汽机的工质的流量。

#### 4.4. 供电煤耗<sup>[5]</sup>

标准煤耗率可表明一个电厂范围内能量转换过程的技术完善程度，也反映其管理水平和运行水平。同时也是厂际、班组间的经济评比、考核的重要指标之一。本文均以发电标准煤耗率作为指标来计算分析

机组的热经济性。机组的发电标准煤耗率计算式可写为

$$b_s = \frac{3600Q}{7000 \times 4.1868 \eta_b \eta_m \eta_g N} \tag{16}$$

式中： $b_s$ 为发电标准煤耗率，g/kw·h； $\eta_b$ 为锅炉效率； $\eta_m$ 为汽机机械效率； $\eta_g$ 为发电机效率； $Q$ 为循环吸热量，kj/kg； $N$ 为机组循环内功，kj/kg。当机组的进汽参数改变时会引起机组循环热效率的变化，进而影响机组的发电标准煤耗率即：(带上角标的为改变后的参数)

$$\begin{aligned}
 \Delta b_s &= \frac{0.123}{\eta_b \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g} \cdot \frac{\eta_i - \eta'_i}{\eta'_i} \\
 &= \frac{0.123}{\eta_b \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g} \cdot \frac{N \cdot Q' - N' \cdot Q}{N' \cdot Q}
 \end{aligned} \tag{17}$$

将  $Q'$  和  $N'$  带入式(16)中即可得到进汽压力的改变对机组供电煤耗的影响。

## 5. 实例计算

### 5.1. 100%THA 工况

以某引进型 600 MW 机组 THA 工况为例，该机组为亚临界、一次中间再热、单轴四缸四排汽、反动凝汽式机组，机组型号：N600-16.7/537/537，机组回热原则性热力系统如图 2 所示。根据机组实际运行情况，用本文的计算模型计算了主汽压力的变化对煤耗的影响(煤耗 1)，并与厂家所给出的热力试验修正曲线的计算分析结果(煤耗 2)进行了对比。计算结果如表 1

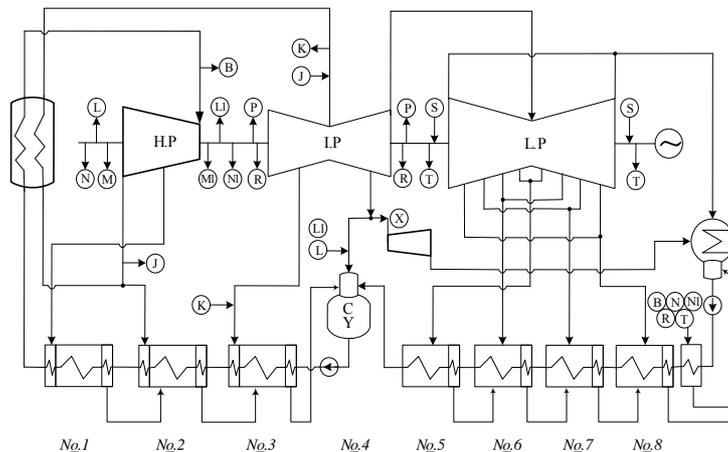
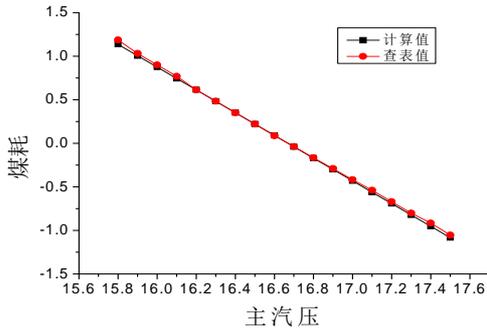


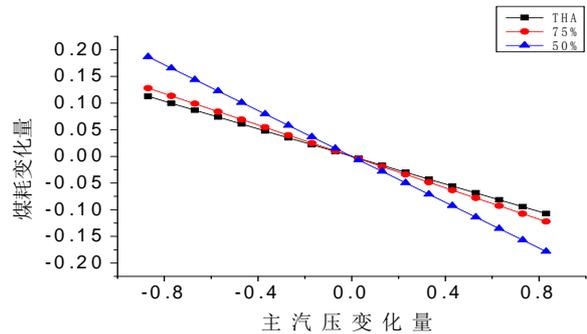
Figure 2. N600-16.7/537/537 thermal system figure of a power plant  
图 2. 某电厂 N600-16.7/537/537 机组热力系统图

**Table 1. The results of the effect of the main steam pressure change on unit coal consumption under the condition of 100% THA**  
**表 1. 100%THA 工况下主蒸汽压力变化对机组煤耗影响的计算结果**

$\Delta P_0$ (MPa)	-0.37	-0.27	-0.17	-0.07	0.03	0.13	0.23	0.33	0.43
煤耗值 1 (g/kw-h)	0.4677	0.3413	0.2149	0.0885	-0.0379	-0.1643	-0.2908	-0.4172	-0.5436
煤耗值 2 (g/kw-h)	0.4797	0.3489	0.2181	0.0872	-0.0371	-0.1635	-0.2878	-0.4143	-0.5342
相对误差(%)	2.5	2.17	1.44	1.46	2.31	0.49	1.02	0.70	1.75
绝对误差(g/kw-h)	0.012	0.0076	0.0031	0.0013	0.0009	0.0008	0.0029	0.0029	0.0094



**Figure 3. The impact of the main steam pressure change on coal consumption under THA conditions**  
**图 3. THA 工况下主汽压变化对煤耗的影响**



**Figure 4. The impact of main steam pressure disturbance on the unit coal consumption under different conditions**  
**图 4. 不同工况下主蒸汽压力扰动对机组煤耗的影响**

所示。

将表 1 绘制成图标如图 3 所示。

### 5.2. 不同工况计算结果

以本文计算模型为基础，分别以机组 100%THA 工况、75%THA 工况、50%THA 工况为例计算主汽压力的变化对煤耗的影响。对计算结果进行分析、对比，并将计算结果绘制成图，如图 4 所示。

## 6. 结论

本文通过严谨的数学推导我们构建了以统一物理模型方程为基础的主汽压力变化对机组循环吸热量和比内功影响的数学模型，并以 600 MW 机组为例进行实例计算比较。该模型易于 matlab 编程计算，减少人工计算量。对于上述计算结果作如下分析：

1) 从表 1 可得，利用本文模型所计算的煤耗变化量(煤耗值 1)和与厂家提供的煤耗变化量的修正值(煤耗值 2)十分接近，相对误差不超过 3%从而证明了本文模型的正确性。

2) 从图 4 可以看出主汽压同样变化 1 个单位，在低负荷时对机组煤耗率的影响比高负荷要大，且随着负荷的降低，影响越来越大，所以在低负荷下更应当注意主汽压的变化对机组煤耗的影响。因此，在实际运行过程中应该加强对主汽压力波动的监视，尤其是加强机组运行的经济性管理，强化安全、经济运行意识是十分有必要的。

## 参考文献 (References)

- [1] 闫顺林, 胡三高, 徐鸿, 李永华 (2008) 火电机组热经济性分析的统一物理模型和数学模型. *中国电机工程学报*, **23**, 37-41.
- [2] 王艳军, 吴彦坤, 张春发, 黄海东 (2007) 主蒸汽参数变化对机组功率影响的定量研究. *热力透平*, **9**, 165.
- [3] 张春发, 张素香, 崔映红 等 (2001) 现行电力系统热经济性状态方程. *工程热物理学报*, **11**, 665-667.
- [4] 李娟, 张春发 (2007) 电厂热力系统节能分析的线性化处理及改进. 华北电力大学, 北京.
- [5] 李玉辉 (2009) 大机组运行方式优化. 华北电力大学, 北京.