

# 汽轮机功率背压特性的通用计算方法及其应用

徐大懋, 柯 严, 王世勇

(中国广东核电集团有限公司, 广东 深圳 518031)

**摘 要:** 提出了一种汽轮机功率背压特性(即微增出力)的通用计算方法, 该方法有两大特点: 一是简单, 只需知道低压排汽面积和排汽流量即可; 二是精确, 与运行或试验数据相比, 误差仅在 0.3% 以内。具体介绍了计算方法的原理及分析各种假定可能引起的误差。

**关 键 词:** 汽轮机; 功率背压特性; 性能考核试验; 系统优化

中图分类号: TK262 文献标识码: B

## 引 言

汽轮机功率背压特性(以下简称背压特性)是指当背压改变时功率的变化特性, 也常称“微增出力”。背压特性对供货方、设计院和电厂都非常重要<sup>[1-3]</sup>, 它是汽轮机性能考核和系统优化的重要依据。长期以来, 背压特性一直由供货方提供, 每台机组均不相同, 供货方是通过详细的热平衡和通流计算而获得。通常情况下, 业主只能在项目招标后才能知道功率背压特性。为此, 有必要研究一种对不同汽轮机可通用的计算方法, 原因如下:

(1) 建立一种工程实用的计算方法, 使其获得的汽轮机功率背压特性可与供货方提供的特性相比较, 以选择公平合理的性能试验考核方案。

(2) 在缺少供货方功率背压特性的情况下, 电力设计院可采用本通用计算方法, 对电厂进行前期技术经济分析和系统优化。

经过多年的研究和完善, 提出了有足够精度的通用计算方法, 并系统介绍了计算方法的原理和关键技术。

## 1 常规计算方法

供货方计算功率背压特性首先给出不同背压, 对每一背压均从主汽阀进口开始进行热平衡和通流

计算, 将不同背压下算出的功率和额定功率相减, 即得功率差值和相应的百分比。

通流计算方法可用一维、二维或三维, 背压特性计算一般用二维即可。

常规的背压特性计算必须知道汽轮机通流部分的大量几何参数, 如直径、叶片高度和型线等。供货方一般不对外提供这些核心技术数据, 所以非供货方也不可能按常规方法进行背压特性计算。

为便于对计算精度进行分析, 定义几种相关的功率及功率偏差:

$$\delta N_s = \Delta N / \Delta N_s$$

$$\delta N_s = \Delta N / N_s$$

$$\delta N_r = \Delta N / N_{st}$$

式中:  $N_s$ —末级功率;  $N_r$ —全机功率;  $\Delta N_s$ —额定功率和夏季功率之差;  $\Delta N$ —功率误差或功率增量, 含意因应用场合而异。下标  $s$ 、 $st$ —末级和全机;  $r$ 、 $s$ — $w$ —额定工况、夏季工况和冬季工况。

对大多数汽轮机可以近似认为:

$$\Delta N_s / N_s / N_{st} \approx 3/10/100$$

## 2 通用算法

### 2.1 从未级出口开始计算

不必计算全过程, 简单、精确、未知数少, 解决了能不能算的问题。背压本身是变量, 为了唯一地确定状态点, 还需知道蒸汽的干度。汇总各类汽轮机的数据, 给出了由背压  $P_B$  确定干度  $x$  的经验式:

$$x = \frac{P_B + 13.8}{P_B + 16.0} A \quad (1)$$

式中:  $P_B$ —背压, kPa;  $x$ —无量纲;  $A$ —修正系数, 对不同机型取值如表 1 所示。经分析, 用式(1)确定状态点所引起的  $\delta N_s$  最大为 1%。

表 1 A<sub>x</sub>的经验值

	轻水堆	重水堆	火电, 超、超超及无再热	火电, 有再热
A <sub>x</sub>	1.0	0.985	1.02	1.03

2.2 假设 P<sub>B</sub>改变时末级流量不变

实际上末级流量也有微小改变。当背压增大时, 由于凝汽温度上升, 低加抽汽量减少, 因而通过末级的流量增加。分析计算表明, 背压每差 1 kPa, 流量改变约 0.5%, 由于流量的改变而引起的 δN<sub>s</sub> 小于 2%。

2.3 计算 w-r 的热力过程

效率计算式为:

$$\eta_{rs} = \eta_{rs}^d - K_{\gamma} (\gamma_s + \gamma_r) \quad (2)$$

式中: η<sub>rs</sub><sup>d</sup>—干蒸汽过程效率, 可取 0.92 γ—湿度; K<sub>γ</sub>—湿度影响系数, 取 0.4~0.5 如去湿措施较好, 可取 0.4 正常情况下, η<sub>rs</sub><sup>d</sup>取 0.92 所引起的最大 δN<sub>s</sub> 为 2%。夏季背压特别高时末级效率有可能因汽流分离而明显下降, 这种情况在背压特性计算中不予考虑。

图 1 为用通用法计算夏季工况的热力过程。

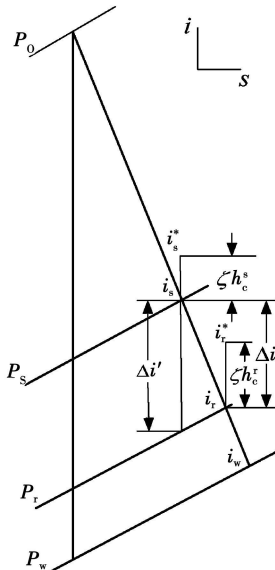


图 1 通用计算法示意图

$$\begin{aligned} \Delta N_s &= G(i_1^* - i_3^*) \\ &= G(i_1 + \zeta h_c^s) - (i_3 + \zeta h_c^r) \\ &= G[(i_1 - i_3) - \zeta(h_c^r - h_c^s)] \\ &= G(\Delta i_s - \zeta \Delta h_c^s) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: G—通过末级的蒸汽流量; i—焓值; ζ—余速损失系数; h<sub>c</sub>—末级后无扩压器时的余速损失。当 G

增加时, Δh<sub>c</sub><sup>rs</sup> 也增加, 对 ΔN<sub>s</sub> 的影响可部分抵消。

2.4 余损系数 ζ

图 2 为解释余损系数 ζ 的示意图。当末级后有扩压器时, 扩压器出口压力为给定背压 P<sub>2</sub>; 而末级后压力 P<sub>3</sub> 可比 P<sub>2</sub> 低, 做功增加, 出口滞止焓下降, 相当于余损减小, 则:

$$\zeta = \frac{h_c - (i_2^* - i_3^*)}{h_c} = \frac{h_c - \Delta i_2^*}{h_c} \leq 1 \quad (4)$$

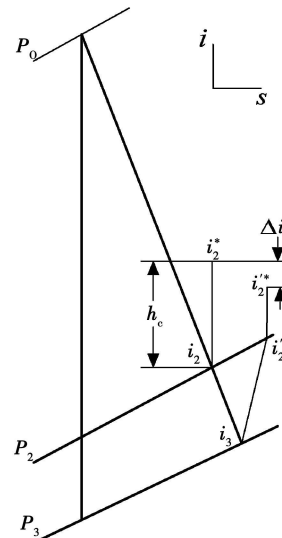


图 2 余损系数 ζ 示意图

一般情况下 0.7 ≤ ζ ≤ 0.85 通用法假定 ζ=0.85 误差可达 20%, 而式 (3) 中 Δh<sub>c</sub><sup>rs</sup> 约占 Δ 的 15%, 故 δN<sub>s</sub> 最大为 3%。

2.5 计算余损 h<sub>c</sub> 时只考虑轴向速度 C<sub>a</sub>

$$C_2 = \frac{G_0}{\mu F \sin \alpha_2} \approx \frac{G_0}{F} = C_a \quad (5)$$

$$\mu = 1 + \frac{\gamma}{2} = 1.05 \sim 1.12$$

式中: F—末级排汽面积; μ—流量系数; γ—末级出口湿度; α<sub>2</sub>—末级出口气流绝对速度与切向夹角, 一般接近 90°, sin α<sub>2</sub> = 0.85~1.0 取 μ sin α<sub>2</sub> = 1 引起 h<sub>c</sub> 最大误差约 7%, 而 ζΔh<sub>c</sub> 约占 Δ 的 30%, 故引起最大 δN<sub>s</sub> 约为 2%。

通用算法只需要知道 G 和 F 两个数据, 获得并不困难。

2.6 误差分析

表 2 中的 5 项假定所引起的 δN<sub>s</sub> 为 10%。注意 ΔN<sub>s</sub>/N 约为 3%, 故 δN<sub>s</sub> 约为 0.3%。之所以能达到如此高的精度, 原因有两点: 一是从膨胀终点计算, 避免了计算 N<sub>s</sub> 的各种系统误差; 二是只计算 r- 段, 仅占总功率 3%, 对 δN<sub>s</sub> 影响很小。

表 2 通用法的分项误差和总误差

假定项	$\delta N_{rs}/\%$
末级出口参数确定	1.0
末级流量不变	2.0
干蒸汽效率=0.92	2.0
$\zeta=0.85$	3.0
末级余速轴向出口	2.0
综合	10.0

### 3 结果比较

用通用法对 10 多台汽轮机进行了计算, 并与供货方提供资料和运行数据进行了对比, 为节省篇幅, 本研究只列出部分有代表性的案例。

图 3~图 5 均有运行数据, 与通用计算结果非常吻合, 而图 3 的厂商提供值却与运行值相差甚远。图 4 无厂商提供数据, 图 5 的厂商提供值、运行值和通用计算值均很符合。

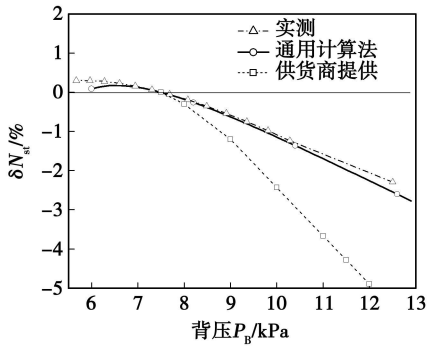


图 3 汽轮机 AD 功率背压特性

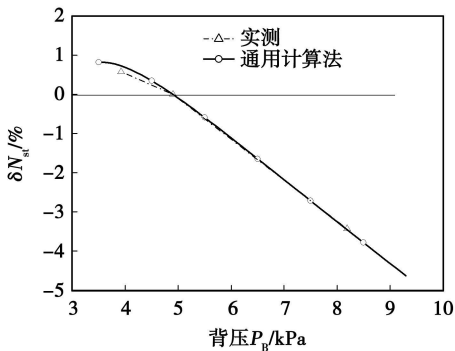


图 4 汽轮机 HQ 功率背压特性

图 6 的通用法算法和外商提供值差 0.5%, 这是除图 3 外通用法结果和厂商提供值差别较大的

一例, 其特点是夏季工况计算值低于厂家提供值。与图 6 相反, 图 7 则是夏季工况的计算值高于厂家提供值。其它算例通用法和厂商提供值之差均小于 0.3%。

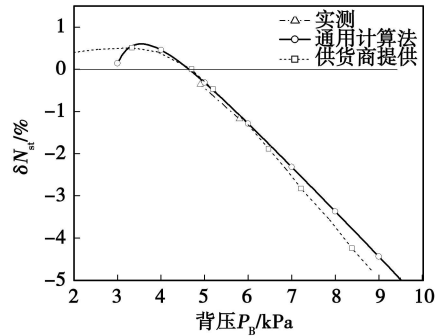


图 5 汽轮机 RT 功率背压特性

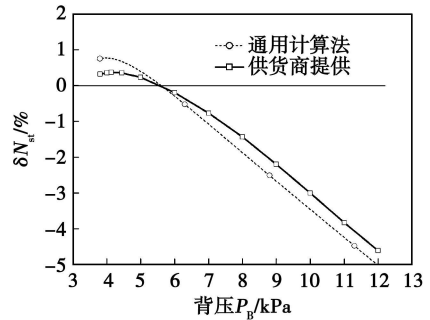


图 6 汽轮机 AI 功率背压特性

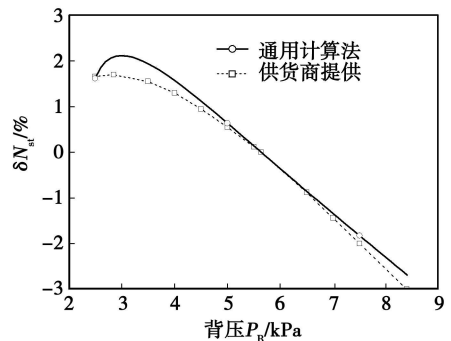


图 7 汽轮机 SY 功率背压特性

### 4 通用算法的应用

#### 4.1 确定性能考核试验方案

电站的性能考核试验是商务和技术密切相关的重要项目, 功率背压特性则是性能考核试验的依据。试验时的背压不一定是额定背压, 冬天时背压低于

额定值<sup>[9]</sup>,可将背压调高至额定值;夏天背压高于额定值则无法降低,通常是按供货方提供的特性线修正到额定工况。少数供货方从商业利益出发,提供不正确的背压特性,如图3所示。为防止此类现象,可用通用法计算背压特性与供货方提供值进行比较,再确定修正方案。如计算结果类似图6即夏季工况供货方提供值高于计算值,则可同意按提供值进行修正;反之,若类似图7即夏季工况供货方提供值低于计算值,则可不同意按厂商提供曲线修正,而将考核试验延期到可达额定背压时进行,一般无须进行老化修正,或老化修正值很小。

#### 4.2 冷端优化和开展前期工作

所谓冷端优化,即在给定的年平均环境温度下,通过技术经济计算和分析,求出最佳背压,使得年运行的经济性最优。背压改变,汽机效率、厂用电、凝汽器面积和循环水系统投资等也随之改变,必存在一最佳值,使得综合经济性最优。功率背压特性是冷端优化的重要依据,长期来由于该特性只能由供货方提供,冷端优化也只能由供货方进行。但供货方对电价、厂用电和循环水系统投资等并不熟悉,所选背压一般不是优化背压。在核电招标中曾出现这样现象:某外商投标两种汽轮机方案,总排汽面积基本相同,按原理优化背压也应相同,但结果却相差0.8 kPa,影响效率近1%。

掌握了通用背压特性方法计算后,电力设计院或业主即可在项目前期进行系统优化和设计,并可在标书中对供货方提出合理要求。

## 5 结 论

(1) 提出了功率背压特性的通用计算方法。由于采用了独特的技巧和假定,不仅使计算成为可能,且具有较高的精度,误差小于0.3%。

(2) 通用计算方法无需提供汽轮机的各种原始数据,知道末级蒸汽流量和排汽面积即可,计算过程简单,易于掌握。

(3) 在性能考核试验时,可将通用算法结果可与供货方提供的功率背压性能曲线进行对比,选择合理考核方案,科学而公正地顾及双方的利益,减少经济损失。

(4) 通用算法可使电力设计院或业主独立开展系统设计和优化,提前开展电站的前期工作。提高了工作效率,掌握了电站设计的主动权,并可对标书提出合理的要求。

#### 参考文献:

- [1] 中国动力工程学会. 火力发电设备技术手册: 第二卷 汽轮机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [2] 沈士一. 汽轮机原理 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992
- [3] 李 勇, 孙海滨, 曹祖庆. 背压变化对汽轮机热经济性的影响 [J]. 汽轮机技术, 1998, 40(3): 167-169
- [4] 李秀云, 严俊杰, 林万超. 用等效焓降法确定排汽压力变化对机组经济性的影响 [J]. 热能动力工程, 1999, 14(5): 353-355
- [5] 李维特, 黄保海. 汽轮机变工况热力计算 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001
- [6] ASME PTC6-2004 Steam Turbines Performance Test Codes Section 3 Guiding Principles [S].

(编辑 伟)

#### 技术市场信息

## 世界将有 14型燃气轮机退出生产

据《Gas Turbine World》2010年度手册报道:在2006~2010年5年间世界将有14型燃气轮机退出生产线。

退出生产燃气轮机的原因有以下几个方面:(1)市场上不具有竞争力的;(2)生产重叠;(3)许可证协议被终止。尽管特定的型号不再正常生产,但制造者仍将根据专门的订单再建造它们。

手册中列出了退出生产的燃气轮机主要性能参数和相关的信息,包括原设备制造者、燃气轮机型号、推出年份、ISO条件下额定输出功率、热耗率、效率、退出生产年份。

(吉桂明 摘译)

汽轮机功率背压特性的通用计算方法及其应用 = Universal Method for Calculating the Power/Back-Pressure Characteristics of a Steam Turbine and Its Applications [刊, 汉] / XU Damao, KE Yan, WANG ShiYong (China Guangdong Nuclear Power Group Co. Ltd., Shenzhen, China, Post Code: 518031) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6), — 605 ~ 608

Proposed was a universal method for calculating the power/back pressure characteristics (i.e. micro increased capacity) of a steam turbine. The method in question boasts two big features: one is simple, it is only necessary to know the low pressure exhaust steam area and flow rate, and another is accurate, the errors relative to the operating or test data are within a range of 3%. Its theory was described in detail and the errors possibly caused by various assumptions were analyzed. Key words: steam turbine, power/back-pressure characteristics, performance examination test, system optimization

水蒸气在  $Ti_2$  改性表面冷凝传热特性实验研究 = Experimental Study of the Condensing and Heat Transfer Characteristics of Vapor on Pure Titanium ( $Ti_2$ ) Denatured Surfaces [刊, 汉] / QI Baojin, ZHANG Li, XU Hong et al (United Nations Key Laboratory on Chemical Engineering, College of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200237) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6), — 609 ~ 613

Through denaturing of pure titanium ( $Ti_2$ ) surfaces, obtained were the condensing surfaces with different static contacting angles and visualization experimentally studied were the heat transfer characteristics of vapor on surfaces of various test specimens. The test results show that the steam assumes a hybrid condensing in coexistence of both liquid droplets and rivulet liquid film on the original surfaces and a film-shaped condensing on the HF etched surfaces, thus the heat transfer performance of the latter will drop to less than 30% of that of the former. However, it assumes a conspicuous droplet-shaped condensing on the surfaces oxidated by  $H_2O_2$  and that treated in the same way after being etched by HF. The corresponding heat transfer performance will also be enhanced significantly, approximately 1.3 ~ 1.6 times of the heat transfer performance of the original surfaces. Furthermore, the intensified condensing effectiveness of the surfaces treated in the two steps is even more conspicuous. The microscopic morphological observation and analysis of the specimen surfaces show that the microscopic morphological change of the condensing surfaces should be the main cause of the differences in the static contacting angles and condensing morphology of various specimen surfaces. Key words: surface denaturing, titanium, drop-shaped condensing, heat transfer characteristics

骨架发热多孔介质通道内单相流阻力与换热特性数值模拟 = Numerical Simulation of the Resistance and Heat Exchange Characteristics of a Single-phase Flow in the Passages of a Skeleton Heat Generation Porous Medium [刊, 汉] / YU Li zhang (Zhonghe Qingyuan Environmental Technology Engineering Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100037), SUN Li cheng, SUN Zhong ning (College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6), — 614 ~ 616