

汽轮机热力试验中参数测量误差对性能指标影响的算法研究

谢林贵,程懋华,高 亶

(东南大学 火电机组振动国家工程研究中心 江苏 南京 210096)

摘 要: 为评估汽轮机热力性能试验中参数测量误差对性能指标影响,基于误差传递理论,利用泰勒级数和数值微分等数值分析方法,建立了无需参数修正曲线和性能指标计算函数的计算式。以某电厂 600 MW 机组为例,利用该算法计算了参数测量误差对性能指标的影响,并和传统计算方法的结果进行了比较。结果表明:本研究提出的数值误差分析算法和传统方法计算的机组热耗率不确定度的误差为 0.023%。该算法是传统误差分析方法使用条件难以满足情况下,用以计算测量参数误差对机组性能指标影响的一种有效方法。

关 键 词: 汽轮机; 热力性能试验; 误差分析

中图分类号: TK263; O242 文献标识码: A

引 言

分析汽轮机热力性能试验中参数测量误差对试验结果的影响,对提高结果的可靠性,正确评估试验结果具有重要意义^[1-3]。传统误差分析方法有基于热力计算书提供的参数修正曲线计算和基于性能指标计算函数偏微分方程的计算方法。基于参数修正曲线的误差分析方法需要参数修正曲线,但通常只有主要参数对主要性能指标影响的修正曲线可以获得,如主蒸汽压力对热耗率的影响,而缺少其它参数对其它性能指标的影响,如中压缸进汽压力对中压缸内效率的影响修正曲线。此外,基于性能指标计算函数偏微分方程的误差分析方法,仅在以测量参数为变量的性能指标计算函数表达式为显式函数时可以应用,偏微分方程的导出过程也较复杂。这些问题的存在使得传统方法在某些使用条件不能满足工程条件的应用,需要研究适用性更好的误差分析方法。

本研究基于误差传递理论,利用泰勒级数和数值微分等数值分析理论,建立了无需参数修正曲线和性能指标计算函数偏微分方程的数值计算方法。

分别以某电厂 600 MW 机组和 330 MW 机组试验数据为对象,利用该算法计算参数测量误差对性能指标的影响,并与传统方法的计算结果和应用范围进行比较。

1 参数测量误差对性能指标影响的算法分析

1.1 性能指标不确定度的基本计算式

设 x_1^*, x_2^* 为准确值,其函数准确值为 $y^* = f(x_1^*, x_2^*)$, 则函数值 y 的误差为:

$$e(y) = y^* - y = f(x_1^*, x_2^*) - f(x_1, x_2) \quad (1)$$

将 $f(x_1^*, x_2^*)$ 在 (x_1, x_2) 处做 Taylor(泰勒)展开,并取一阶 Taylor 多项式,得 $e(y)$ 的近似表达式:

$$e(y) \approx \frac{\delta f(x_1, x_2)}{\delta x_1} e(x_1) + \frac{\delta f(x_1, x_2)}{\delta x_2} e(x_2) \quad (2)$$

式中: $e(x_1) = x_1^* - x_1$, $e(x_2) = x_2^* - x_2$ 。

函数值 y 的相对误差为:

$$e_r(y) \approx \frac{\delta f(x_1, x_2)}{\delta x_1} \frac{x_1}{f(x_1, x_2)} e_r(x_1) \times \frac{\delta f(x_1, x_2)}{\delta x_2} \frac{x_2}{f(x_1, x_2)} e_r(x_2) \quad (3)$$

式中: $e_r(x_1) = \frac{x_1^* - x_1}{x_1}$, $e_r(x_2) = \frac{x_2^* - x_2}{x_2}$ 。

不确定度与标准差的关系为^[4]:

$$U_Y = 1.96S_Y \quad (4)$$

因此,不确定度也适用于随机误差传递定律^[5]。对式(3)使用随机误差传递定律,则合成函数值的相对不确定度公式为:

$$U_Y = \pm \left\{ \left(\frac{\delta f(x_1, x_2)}{\delta x_1} \times \frac{x_1}{f(x_1, x_2)} \times U_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\delta f(x_1, x_2)}{\delta x_2} \times \frac{x_2}{f(x_1, x_2)} \times U_{x_2} \right)^2 \right\}^{0.5} \quad (5)$$

收稿日期: 2011 - 09 - 27; 修订日期: 2011 - 11 - 30

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划) 基金资助项目(6450104232)

作者简介: 谢林贵(1986 -) 男,四川内江人,东南大学硕士研究生。

因此,若性能指标 Y 是由两个以上的直接测量参数 X_1, X_2, \dots, X_n 通过函数关系 $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 计算确定的,则性能指标 Y 的相对不确定度 U_Y 的计算式为:

$$U_Y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta Y}{\delta x_i} \times \frac{x_i}{Y} \times U_{X_i} \right)^2} \quad (6)$$

1.2 性能指标对直接测量参数偏导数的计算方法

分析性能指标的不确定度计算公式,其计算重点是各个直接测量参数的不确定度计算,以及性能指标对各个直接测量参数的偏导数计算。各个直接测量参数的不确定度可以根据直接测量参数的不确定度计算式计算。但直接利用函数表达式计算性能指标对直接测量参数的偏导数,仅在以测量参数为变量的性能指标计算函数为显式函数时可以应用,偏微分过程也较复杂。

针对这些问题,引入了数值微分的方法来计算性能指标对直接测量变量的偏导数。这种方法不需要借助函数表达式,具有很好的通用性。

性能指标是由直接测量参数和间接测量参数组成的,其中,间接测量参数又由直接测量参数组成^[6-7]。因此,构成性能指标的直接测量参数可以根据是否涉及间接测量参数来划分。性能指标对未涉及间接测量参数的直接测量参数的偏导数,可以直接利用性能指标的函数表达式计算。性能指标对涉及间接测量参数的直接测量参数的偏导数转化为,性能指标对间接测量参数的偏导数与间接测量参数对直接测量参数的偏导数的乘积。如中压缸内效率对中压缸进汽压力的偏导数:

$$\frac{\delta \eta}{\delta p} = \frac{\delta \eta}{\delta h(p, t)} \times \frac{\delta h(p, t)}{\delta p} \quad (7)$$

性能指标对间接测量参数的偏导数可以直接根据性能指标的函数表达式计算。间接测量参数对直接测量参数的偏导数根据数值微分的三点公式计算^[8]。

设性能指标涉及 k 个间接测量变量,每个间接测量变量 $y_j (0 \leq j \leq k)$ 是由两个以上的直接测量变量 $X_1, X_2, \dots, X_m (m \leq n)$ 通过函数 $y_j = f_j(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 确定的。则间接测量变量对直接测量变量偏导数的计算式:

$$\frac{\delta y_j}{\delta x_i} = \frac{1}{2\Delta X_i} \left(-f_j(X_1, \dots, X_i - \Delta X_i, \dots, X_m) + f_j(X_1, \dots, X_i + \Delta X_i, \dots, X_m) \right) \quad (8)$$

通常情况下,三点公式的三点分别取为 $X_i - \Delta X_i, X_i, X_i + \Delta X_i$ 。其中, X_i 为该直接测量参数的测

量值 ΔX_i 为该直接测量参数的绝对不确定度。这样取值可以有效地把直接测量参数的数值控制在该参数不确定度限制的范围内。

1.3 误差分析流程

整个误差分析流程如图1所示。

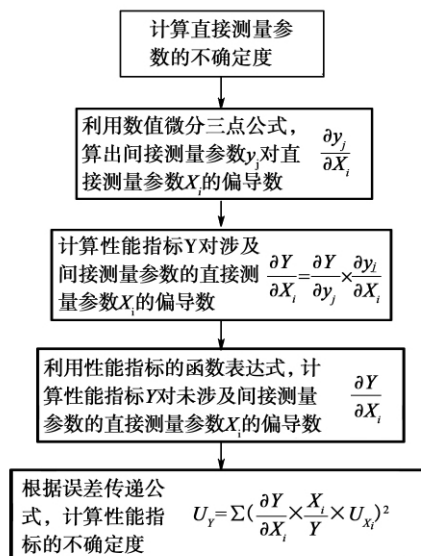


图1 误差分析流程

Fig. 1 Flow path for an error analysis

2 性能指标不确定度的实例计算分析

2.1 算法计算分析

以某电厂1号600 MW汽轮机热力性能试验中的额定工况下3阀全开状态为计算分析对象。本次试验共设置了39个压力测点(包括大气压力)、56个温度测点、13个差压测点、2个电功率测点和3个水位测点。主流量采用ASME PTC6标准推荐的经过校验的喉部取压长颈式流量喷嘴测量主凝结水流量。电功率采用精度为0.08级的日本Yokogawa公司生产的WT2030型多功能三相电功率表测量。压力采用0.075级Rosemount3051型压力变送器测量。温度采用E型热电偶或J型热电偶和温度变送器测量。

热再热蒸汽流量为1689.725 t/h,冷再热蒸汽流量为1614.266 t/h,给水流量为1918.579 t/h,过热减温水流量为39.752 t/h,系统不明泄漏流量为4.45 t/h,主蒸汽流量为1953.881 t/h。根据电功率表校验报告,发电机出力的不确定度为0.06%。表1记录了主凝结水流量、各辅助流量的测量值以及不确定度,表2记录了各压力、温度测点的测量值以及不确定度。

表 1 主凝结水流量、辅助流量的测量值及不确定度

Tab.1 Measuring values and uncertainties of the main and auxiliary condensate flow rates

	测量值/ $t \cdot h^{-1}$	不确定度/%
主凝结水流量	1 552.571	0.13345
门杆一段漏汽量	0.286	0.70360
高压缸前的轴封一段漏汽量	4.757	0.9
高压缸后的轴封一段漏汽量	5.429	0.9
轴封二段漏汽量	1.885	0.40519
小汽机进汽量	69.805	0.30273
再热减温水流量	75.459	0.35654

表 2 压力、温度实测数据统计

Tab.2 Statistics of the data of pressure and temperature actually measured

	测量值	测量精度	不确定度/%
主蒸汽压力/MPa	16.0495	0.2%	0.58102
主蒸汽温度/ $^{\circ}C$	527.35	0.4%	0.26726
冷再热蒸汽压力/MPa	3.9075	0.3%	0.29574
冷再热蒸汽温度/ $^{\circ}C$	325.9	0.4%	0.26818
热再热蒸汽压力/MPa	3.5285	0.3%	0.33070
热再热蒸汽温度/ $^{\circ}C$	538.1	0.4%	0.26733
最终给水温度/ $^{\circ}C$	281.0	1.2 $^{\circ}C$	0.31902
再热减温水压力/MPa	10.115	0.5%	0.86226
再热减温水温度/ $^{\circ}C$	175.3	1.2 $^{\circ}C$	0.45902
过热减温水压力/MPa	18.289	0.5%	0.61252
过热减温水温度/ $^{\circ}C$	177.05	1.2 $^{\circ}C$	0.45499
排汽压力/MPa	0.006265	0.4%	1.41790

根据表 1 计算得到主蒸汽流量的不确定度为 0.135%。

本研究提出的误差分析算法计算得到该机组试验热耗率的不确定度为 0.299%。

采用同样试验数据按照传统误差分析算法^[9]得到的热耗率不确定度是 0.322%。本研究提出的算法计算结果和传统方法结果误差是 0.023%，两种算法的计算结果相差很小。

采用本研究提出的误差分析算法，计算出传统方法难以计算的该机组高压缸效率不确定度为 1.267%，中压缸效率不确定度为 1.339%。

2.2 应用实例计算

某电厂一台原 300 MW 机组，通过改造通流部分后将额定功率提高到了 330 MW。改造后的机组缺少主要热力参数对性能指标影响的修正曲线，无法采用基于修正曲线计算的误差分析方法。

以这台机组改造后的额定工况热力试验数据为实例计算分析对象^[10]，利用本研究的数值误差分析算法，计算参数测量误差对性能指标的影响。试验采用锅炉省煤器入口给水流量作为试验流量基准。其中，省煤器入口给水流量为 902.6667 t/h，除氧器入口凝结水流量为 633 t/h，主蒸汽流量为 915.7283 t/h，主汽压力为 16.2960 MPa，主汽温度为 535.75 $^{\circ}C$ 。

采用本研究提出误差分析算法计算出该机组试验热耗率的不确定度为 0.283%，高压缸效率的不确定度为 1.141%，中压缸效率的不确定度为 1.237%。因此，本研究给出的误差分析算法是缺少性能指标修正曲线情况下，试验结果误差分析的有效方法。

3 结 论

(1) 利用本研究建立的数值误差分析方法计算了 600 MW 机组参数测量误差对性能指标的影响，并和传统计算方法的结果进行了比较。实例计算分析表明，本研究提出的数值误差分析算法和传统方法计算的机组热耗率不确定度的相差为 0.023%。

(2) 在传统方法无法应用情况下，利用建立的数值误差分析方法计算了 330 MW 机组的额定工况试验热耗率不确定度为 0.283%。说明所提出算法无需参数修正曲线和性能指标计算函数的偏微分方程，是传统误差分析方法使用条件难以满足的情况下，计算测量参数误差对机组性能指标影响的一种有效方法。

参考文献:

[1] ASME PTC6 - 1996, Performance Test Code 6 on Steam Turbines [S].

[2] 王学军. 汽轮机热力性能试验中不确定度的计算[J]. 热力发电, 2001, 30(4): 30 - 35, 44.
WANG Xue-jun. Calculation of the uncertainty in the thermodynamic performance tests of steam turbines [J]. Thermal Power Generation, 2001, 30(4): 30 - 35, 44.

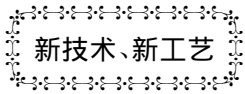
[3] 李利平, 张春发, 牛玉广, 等. 大型热力发电机组能耗参数的统计分析与应用[J]. 热能动力工程, 2007, 22(6): 661 - 664.
LI Li-ping, ZHANG Chun-fa, NIU Yu-guang, et al. Statistical analysis and application of energy-consumption parameters of large-sized thermal power plants [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(6): 661 - 664.

[4] VDI 2048-2000, Uncertainties of measurement during acceptance tests on energy-conversion and power plants [S].

[5] 沙定国. 误差分析与测量不确定度评定 [M]. 北京: 中国计量

- 出版社 2003.
SHA Ding-guo. Error analysis and evaluation of uncertainties measured [M]. Beijing: China Metrology Publishing House 2003.
- [6] 刘凯. 汽轮机试验 [M]. 北京: 中国电力出版社 2005.
LIU Kai. Steam turbine tests [M]. Beijing: China Electric Power Publishing House 2005.
- [7] 阎顺林, 郭佳雷. 汽轮机热力性能考核指标的通用方程 [J]. 热能动力工程 2009, 24(1): 65-67.
YAN Shun-lin, GUO Jia-lei. General-purpose equation of indexes for appraising the thermodynamic performance of a steam turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power 2009, 24(1): 65-67.
- [8] 孙志忠, 袁慰平, 闻震初. 数值分析 [M]. 第二版. 南京: 东南大学出版社 2002.
SUN Zhi-zhong, YUAN Wei-ping, WEN Zhen-chu. Numerical analysis [M]. Second edition, Nanjing: Southeast University Press 2002.
- [9] 能源部西安热工研究所. 热工技术手册 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
Energy Source Ministry Xi'an Thermodynamics Research Institute. Thermodynamic Technology Handbook [M]. Beijing: Water Conservation and Electric Power Press, 1991.
- [10] 郭振宇. 江苏常熟发电有限公司#3机大修后性能试验报告 [R]. 南京: 江苏省电力试验研究院有限公司, QJ-B4-2006-037 2006.
GUO Zhen-yu. Performance test report of Jiangsu Changshu Power Company #3 Unit after an Overhaul [R]. Nanjing: Jiangsu Provincial Electric Power Experiment Research Institute Co. Ltd, QJ-B4-2006-037 2006.

(丛敏编辑)



新技术、新工艺

Alstom Power 公司的 KA24/26 系列燃气轮机

据《Gas Turbine World》2012 年报道,为了适应当前市场简单循环和联合循环电站的需要,Alstom 公司已提高了 60 Hz GT24 和 50 Hz GT26 燃气轮机的效率和灵活性。

与其以前的 296 MW 和 39.6% 设计效率比较,最新的 GT26 燃气轮机额定输出功率超过 320 MW,简单循环效率达到 40.0%。

单轴 KA26 联合循环装置的额定净输出功率为 467 MW,净效率 59.5%。

为了响应负荷波动,KA26 联合循环装置在冷态启动少于 15 min 的时间内就能输出 350 MW 功率。

在停机 8 小时后,仍然热机状态的装置在少于 30 min 的启动时间内就能达到满基本负荷的输出功率。

与其以前的 188.2 MW 和 36.9% 效率比较,新的改进型 GT24 燃气轮机额定输出功率为 230.7 MW,简单循环效率达 40.0%。

60 Hz GT24 燃气轮机将主要用于联合循环装置。用于标准的 2+1 配置(2 台燃气轮机加 1 台汽轮机),KA24-2 联合循环装置的额定净输出功率超过 660 MW,效率高于 58.3%。

基于 GT24 和 GT26 的联合循环装置,Alstom 公司指出,联合循环输出功率从 100% 满负荷降低到 80%,其效率几乎保持不变,优于标准装置的性能。

此外,对于 GT24/26 型燃气轮机,顺序的 DLE(干式低排放)燃烧系统,在低于燃气轮机满负荷输出功率 40% 的所有工况下,NO_x 排放少于 25 mg/kg。

(吉桂明 摘译)

nyang ,China ,Post Code: 110085) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(4) . - 416 ~ 419

Numerically simulated and studied were the air film cooling efficiency of the jet flow from fan-shaped holes with various widths at the outlet at different air blowing ratios. The emphasis was placed on an analysis of the influence of the vortex configuration and vorticity on the cooling efficiency. It has been found that to increase the outlet width will not only decrease the vorticity but also change the direction of the vortex. When the outlet width increases to 2.5 times bigger than that of the inlet diameter ,the streamlines of the cooling air at the downstream of the hole center will point to the wall surface from the fuel gas ,effectively improving the attachment property of the cooling air. The bigger the outlet width of the air film hole ,the higher the cooling efficiency. With an increase of the air blowing ratio ,the influence of the outlet width of the air film hole on the cooling efficiency will become more conspicuous. **Key words:** turbine blade ,air film cooling ,vorticity ,cooling efficiency ,numerical simulation

汽轮机热力试验中参数测量误差对性能指标影响的算法研究 = **Study of the Algorithm for Calculating the Influence of the Measurement Errors of the Parameters During a Thermal Test of a Steam Turbine on Its Performance Indexes** [刊 ,汉] XIE Lin-gui ,CHENG Mao-hua ,GAO Wei (National Engineering Research Center for Unit Vibration in Thermal Power Plants ,Southeast University ,Nanjing ,China ,Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(4) . - 420 ~ 423

Based on the error transfer theory and by using the numerical analytic theory such as Taylor series and numerical differential etc. ,presented was a numerical calculation method for evaluating the influence of the measurement errors of parameters during the thermodynamic performance test of a steam turbine on its performance indexes not needing any parameter correction curves and performance index calculation function partial differential equations. With the test data of a 600 MW unit in a power plant serving as the object ,the algorithm in question was used to calculate the influence of the measurement errors of parameters on the performance indexes and the calculated results were compared with those obtained by using the conventional calculation method. It has been found that the uncertainty error of the heat rate of the unit calculated by using the numerical error analytic method proposed by the authors and the conventional calculation method is only 0.023% ,which is very small and such a result is reliable ,indicating that the error analytic calculation method under discussion is correct. Therefore ,it is an effective method for calculating the influence of measurement errors of parameters on the performance index of a unit when the conditions for using the conventional error analytic method are difficult to meet. **Key words:** steam turbine ,thermodynamic per-

formance test ,error analysis ,Taylor series

基于变工况分析的供热机组负荷特性研究 = **Study of the Load Characteristics of a Heat-supply Unit Based on an Analysis of Its Off-design Operating Conditions** [刊 ,汉] WU Long ,YUAN Qi (College of Energy Source and Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710049) ,DING Jun-qi ,WANG Xue-tong (Shandong Electric Power Research Institute ,Jinan ,China ,Post Code: 250002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(4) . - 424 ~ 428

At present ,there exist universally disputes between power plants and the electric power dispatchment departments concerning the matter how to determine the dispatchment scope of the heat-power load for a heat-supply unit. On the basis of the thermal parameters and characteristics of the heat-supply unit together with its off-design operating condition thermal calculation results ,curves showing the relationship of the heat-power load dispatchment were obtained. Through a comparison with the curves showing the heat-power relationship obtained by using the chart of the operating conditions of the unit ,it can be found that the curves obtained from the thermal calculation have an enough calculation precision. Moreover ,through adopting the thermal calculation method ,other factors ,which limit the load dispatchment of the unit ,can be taken into account properly ,thus making the dispatchment scope more rational and reasonable. At the same time ,the method in question can effectively predict the influence of a change in the steam extraction parameters on the load dispatchment of the unit. Through a comparison ,it can be found that for a unit with a relatively high heat supply steam extraction pressure ,to properly reduce the steam extraction pressure can enhance the power dispatchment scope of the unit. The method under discussion can offer a sound and correct solution to the load dispatchment problem between a power plant and its heat-power dispatchment department. **Key words:** heat supply unit ,off-design operating condition calculation ,load dispatchment ,steam extraction pressure

闭式循环喷雾冷却传热特性实验研究 = **Experimental Study of the Atomization Cooling and Heat Transfer Characteristics of a Closed Type Cycle** [刊 ,汉] ZHANG Wei ,WANG Zhao-liang ,XU Ming-hai (College of Storage ,Transportation and Architectural Engineering ,China Petroleum University ,Qingdao ,China ,Post Code: 266555) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(4) . - 429 ~ 433

With distilled water and anhydrous alcohol serving as the working medium respectively ,studied was the influence of the atomization flow rate ,surface structure and atomization working medium on the heat transfer performance in a