

# 汽轮机性能试验热耗率不确定度的分析计算

张志恒 孙戈 钟农兵

(四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072)

**摘要:** 介绍了汽轮机性能试验不确定度的主要来源和评定方法, 对测量参数的测量不确定度、影响系数和热耗不确定度进行了分析探讨, 并给出了一台 315 MW 机组汽轮机性能试验热耗率不确定度的分析计算实例, 对解析微分法和小扰动分析法求影响系数进行了比较, 并指出了影响热耗率不确定度的主要因素和解决办法。

**关键词:** 汽轮机; 性能试验; 热耗率不确定度

**Abstract:** The main source and evaluation method for the uncertainty of turbine performance test are introduced, and the measurement uncertainty of measuring parameters, the influencing coefficients and the uncertainty of heat rate are analyzed and discussed. An example for the uncertainty of heat rate is given for a 315 MW steam turbine, and the differential methods to calculate the influencing coefficients are compared such as the analytical differentiation and small disturbance analysis method.

Finally, the main factors affecting the uncertainty of heat rate and the solutions are pointed out.

**Key words:** steam turbine; performance test; uncertainty of heat rate

中图分类号: TK267 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)03-0082-04

汽轮机热力性能试验是在规定的热力循环系统中, 用热工测量的方法获取各种有关的试验值。根据试验目的选择相应的试验标准, 是汽轮机热力性能试验的首要任务。但由于各种原因, 试验要求与标准规定是有所偏差的, 因此需要对热耗率不确定度进行分析计算。

## 1 试验不确定度的主要来源

### 1.1 不确定度是选择出来的

汽轮机性能试验的不确定度由试验所参照的标准来控制, 如 ASME PTC6-2004 试验热耗率的不确定度约为 0.25%<sup>[1]</sup>。可以认为, 选定试验标准本身所具有的不确定度即为试验的基本不确定度。

### 1.2 测量次数和试验工况对试验不确定度的影响

测量次数越大, 试验标准偏差越可靠, 一般要求测量次数应充分大。试验工况在一定小范围内应该是稳定的, 所有热力性能试验标准对工况的稳定及参数波动范围均有明确规定, 控制参数是使试验不确定度达到或接近期望值, 同时减少修正计算的量。

### 1.3 系统隔离对试验不确定度的影响

试验系统隔离对试验结果的不确定度影响是比较大的, 一般情况下, 系统不明泄漏率对试验热耗率

的影响是 1:1。如 ASME PTC6-2004 规定, 试验时不明泄漏量不能超过满负荷时主蒸汽流量的 0.1%<sup>[1]</sup>。

### 1.4 测量仪表对试验不确定度的影响

仪表不确定度反映了仪表及二次测量系统的测量精度, 它包括仪表的精密性、仪表的量程与该参数的大小之比、仪表因环境偏差而造成的各种附加误差和二次测量系统的不确定度。试验前, 需要对各个仪表进行校验, 并根据校验报告, 对测量参数进行仪表修正, 以确保得到试验标准要求的最小不确定度, 如果使用未经校准的仪表, 将使不确定度更大。

## 2 试验不确定度的评定

### 2.1 不确定度的 A、B 评定

不确定度依其评定方法可分为 A、B 两类, 当不确定度是采用统计方法得到的称 A 类评定, 当用非统计方法得到的称 B 类评定。不确定度的 A 类评定和 B 类评定并无本质差别, 只是评定方式不同而已。A 类评定通常根据重复读数和多重测点, 如试验中的压力等参数的时间和空间的不确定度采用 A 类评定; B 类评定一般根据其他信息进行不确定度估计, 如用仪器的校证书, 试验中仪器的不确定度采用 B 类评定。

### 2.2 合成不确定度

影响测量结果不确定度的因素很多,为了计算总不确定度,需要将各不确定度分量进行合成。在计算合成不确定度之前,需要确定各输入量的不确定度是否彼此相关。对汽轮机性能试验而言,各输入量函数关系为确定关系,认为互不相关,因此合成不确定度可由 A 类和 B 类评定所计算得到的多个不确定度用方和根方法进行合成得到。

### 2.3 扩展不确定度

扩展不确定度是将合成不确定度和所选的包含因子相乘得到,在工程技术领域中,测量结果的不确定度大都要求用扩展不确定度表示。如 ASME PTC6 标准中不确定度是扩展不确定度  $U_{95}$ ,即置信概率取 95%,但包含因子直接取 2,且要求自由度大于 30<sup>[2]</sup>。

## 3 试验不确定度的计算

在汽轮机试验中,测量不确定度包括直接测量不确定度和间接测量不确定度两个部分。如压力、温度的不确定度属于直接测量不确定度,功率、流量的不确定度属于间接测量不确定度。

### 3.1 直接测量参数不确定度

直接测量参数不确定度由仪器的不确定度、时间的不确定度和空间的不确定度三部分组成。

#### 3.1.1 仪器的不确定度

仪表本身的不确定度是测量不确定度的主要来源,仪表不确定度反映了仪表及二次测量系统的测量精度,它包括仪表的精密密度、环境温度影响、二次测量系统的不确定度等。

$$U'_I = \sqrt{U_1 \cdot \frac{FS}{\bar{X}} + U_1^2 + U_{sys}^2 + \dots}$$

其中  $U'_I$  为单台仪器的不确定度;  $U_1$  为仪表或变送器的精密密度;  $FS$  为仪表或变送器的量程;  $\bar{X}$  为参数的平均值;  $U_1$  为环境温度影响,对带有自动温度补偿的智能型变送器,此项一般不予考虑;  $U_{sys}$  为二次测量系统的不确定度,对于采用数字输出的智能型变送器,此项为 0。

若被测量参数是通过相同类型和精度等级的多重测点测量得到的,则该平均值的不确定度为

$$U_I = U'_I / \sqrt{m}$$

其中,  $U_I$  为仪表造成的测量平均值的不确定度;  $m$

为试验时仪器的台数。

#### 3.1.2 时间的不确定度

时间不确定度来自试验工况的稳定性,由试验标准差表征。一般情况下,试验标准均给出了最小的样本数量的要求,其计算公式如下。

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 / (n-1)}$$
$$U'_T = \frac{t'_v}{\bar{X}} \cdot \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

其中,  $S_x$  为试验标准差;  $U'_T$  为单台仪器因采样时间变化造成的读数平均值的不确定度;  $X_i$  为单次采集的数据;  $n$  为测量次数;  $v$  为自由度,  $v = n - 1$ ;  $t'_v$  为置信度为 95% 的学生  $t$  氏分布值,可查表得到,当  $2 \leq n \leq 10^5$  时,

$$t'_v \approx \exp\left[\frac{0.498n + 0.242}{0.74n - 1}\right]$$

若用多台仪器测量,然后再取平均值,则

$$U_t = \frac{t'_v}{\bar{X}} \cdot \frac{\bar{S}}{\sqrt{m \cdot n}}$$
$$\bar{S} = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2 / m}$$

其中,  $\bar{S}$  为各台仪器的测量值计算的  $S$  的平均值;  $U_t$  为多台仪器因采样时间变化造成的读数平均值的不确定度,自由度  $v = m \times (n - 1)$ ;  $\bar{X}$  为  $m$  个测点实测数据平均值的平均值。

#### 3.1.3 空间的不确定度

因测量位置不同,同一被测参数的测量值会出现差异,即产生空间不确定度,如试验中的排汽压力。如样本数量大于 10 个,用计算时间的不确定度的方法;如样本数量小于 10 个,用下面公式估算。

$$U_s = \frac{t'_m \cdot R}{\bar{X}}$$

其中  $U_s$  为因采样位置不同使被测量参数出现差异造成的不确定度;  $t'_m$  为自由度  $v = m$  的代用  $t$  分布值,可查表得到;  $R$  为  $m$  个测点实测数据平均值的范围,即最大平均值与最小平均值的差值  $R = \bar{X}_{max} - \bar{X}_{min}$ 。

#### 3.1.4 测量不确定度的合成

一旦确定上述三方面的不确定度,则被测参数的测量不确定度为

$$U_p = \sqrt{U_I^2 + U_t^2 + U_s^2}$$

其中,  $U_p$  为被测参数的测量不确定度。

### 3.2 间接测量参数不确定度

试验中,有些计算变量是由若干测量参数计算而得到的,它们的不确定度是由相关测量参数的不确定度合成确定的。由下式决定为

$$U_R = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left( \frac{\partial R}{\partial P_i} \cdot U_{pi} \right)^2}$$

式中  $\partial R/\partial P_i$  为影响系数,即计算变量  $R$  对测量  $P_i$  参数的变化的敏感性;  $U_{pi}$  为测量参数的测量不确定度。

### 3.2.1 主蒸汽流量的不确定度

如试验是以主凝结水流量为主流量,则主蒸汽流量的不确定度不仅取决于实测的系统主流量和各辅助流量的测量不确定度,而且与系统不明漏率有关。主蒸汽流量的不确定度计算如下。

$$\frac{dF_{ms}}{F_{ms}} \approx \sqrt{\left( \frac{dF_{cw}}{F_{cw}} \right)^2 + \left( \frac{F_{un}}{F_{ms}} \right)^2 + \left( \sum \frac{F_{aux}}{F_{ms}} \cdot \frac{dF_{aux}}{F_{aux}} \right)^2}$$

其中,  $dF_{ms}/F_{ms}$  为主蒸汽流量不确定度;  $dF_{cw}/F_{cw}$  为主凝结水流量测量不确定度;  $F_{un}/F_{ms}$  为系统不明泄漏量率;  $F_{aux}/F_{ms}$  为辅助流量与主蒸汽流量的比值;  $dF_{aux}/F_{aux}$  为辅助流量的测量不确定度。

本次试验中,凝结水流量不确定度为 0.213 9%,系统不明泄漏率为 0.2%,由于辅助流量的不确定度对主蒸汽流量不确定度影响较小,暂不考虑,则主蒸汽流量的不确定度为

$$\frac{dF_{ms}}{F_{ms}} \approx \sqrt{0.2139^2 + 0.2^2}/100 = 0.2928\%$$

### 3.2.2 功率测量不确定度

功率测量不确定度取决于功率测量元件、电压互感器、电流互感器和数据采集系统的测量不确定度,计算如下。

$$U_p = \sqrt{U_l^2 + U_{PT}^2 + U_{CT}^2 + U_{sys}^2}$$

式中  $U_l$  为功率的测量不确定度;  $U_{PT}$  为电压互感器的不确定度;  $U_{CT}$  为电流互感器的不确定度;  $U_{sys}$  为二次测量系统的不确定度,对于数字输出,此项为 0。

本次试验中,功率的测量不确定度为 0.103 5%,电压互感器的不确定度为 0.057 7%,电流互感器的不确定度为 0.028 9%,则功率的不确定度为

$$U_p = \sqrt{0.1035^2 + 0.0577^2 + 0.0289^2}/100 = 0.122\%$$

### 3.3 热耗率的不确定度

与测量参数的不确定度一样,热耗率的不确定度是其计算式中的各个计算变量的不确定度的方和根。公式如下。

$$U_{HR} = \sqrt{\sum_{i=1}^k U_{HRi}^2}$$

其中,  $U_{HRi}$  为热耗率各计算变量的不确定度,等于变量对热耗率的影响系数与各变量的测量不确定度的乘积。

计算热耗率不确定度的关键在于确定各个变量的影响系数,对于影响系数,可采用查表法、解析微分法和小扰动分析法来计算。

#### 3.3.1 查表法

查表法是指利用文献中给出的参数变量不确定度对热耗率的影响系数来计算热耗率的不确定度,但是有适用范围和使用局限性。对于试验中热耗率的修正产生的附加影响,可利用修正曲线来获得修正参数的影响系数。

#### 3.3.2 解析微分法

解析微分法计算影响系数,首先要获得热耗率对试验中各个测量参数的数学表达式,然后通过对每个参数求偏导数的方法来获得参数对热耗率的影响系数。标准 ANSI/ASME PTC6 REPORT-1985 对解析方法的计算过程做了详细的阐述<sup>[2]</sup>,该方法主要适用于测量主给水流量的热力性能试验,对于包含各级抽汽加热器参数和主凝结水流量较复杂的热力性能试验,通过解析法求取主蒸汽流量对热耗率的影响系数计算则比较复杂。

#### 3.3.3 小扰动分析法

对于较为复杂的汽轮机性能试验,采用编制的热耗率计算程序,分别使用某一变量的两个数值对试验进行两次评估并注意其差别,从而得到各个变量对热耗率的影响系数。

## 4 热耗率不确定度的试验示例

以某电厂 315 MW 机组为例,按照 ASME PTC6-2004 标准进行性能试验,其中压力、绝压和差压变送器的精度等级为 0.1,温度测点用等级精度为 0.4 热电偶进行测量,功率采用精度为 0.1 级的 GXM305 多用校验仪测定。数据采集用输力强 IMP 分散式数据采集系统,由计算机控制采集和存储。试验时间为 2 h,每 30 s 记录一次,总共 240 个数据点。试验数据计算如下:表 1 为主要参数的测量不确定度,其中,主蒸汽温度、背压 4 个测点,主蒸汽压力、再热压力、再热温度、冷再压力、冷再温度、最终给水温度 2 个测点;表 2 给出了解析微分法和小扰动分析法计算变量参数对热耗率的影响系数,两种

表 1 直接测量参数的测量不确定度

参数名称	平均值	仪表量程	仪器 /%	时间 /%	空间 /%	合成 /%
主汽压力	16.45 MPa	25 MPa	0.107 5	0.027 7		0.111 0
主汽温度	538.72 °C		0.200 0	0.010 3		0.200 3
高排压力	3.76 MPa	6 MPa	0.112 8	0.012 9		0.113 6
高排温度	336.29 °C		0.282 8	0.018 5		0.283 4
热再压力	3.42 MPa	6 MPa	0.124 1	0.013 3		0.124 9
热再温度	536.15 °C		0.282 8	0.021 1		0.283 6
背压	7.96 kPa	200 kPa	1.255 7	0.043 0	0.450 0	1.334 5
最终给水压力	18.79 MPa	32 MPa	0.170 3	0.030 3		0.172 9
最终给水温度	277.32 °C		0.282 8	0.002 9		0.282 9
凝结水压力	1.48 MPa	4 MPa	0.271 2	0.043 2		0.274 6
凝结水温度	109.88 °C		0.400 0	0.010 9		0.400 1
凝结水差压 1	111.98 kPa	200 kPa	0.178 6	0.137 2		0.225 3
凝结水差压 2	111.14 kPa	200 kPa	0.179 9	0.138 1		0.226 8
电功率	318.16 MW		0.100 0	0.026 8		0.103 5

表 2 解析微分法与小扰动分析法计算变量参数对热耗率的影响系数

测量参数	小扰动分析法			解析微分法		
	影响热耗率 不确定度 /% A	修正附加 影响 /% B	变量对热耗率的 影响系数 /% C = A - B	影响热耗率 不确定度 /% A	修正附加 影响 /% B	变量对热耗率的 影响系数 /% C = A - B
主蒸汽流量	1.005 1		1.005 1	1.000 0		1.000 0
电功率	-1.000 0		-1.000 0	-1.000 0		-1.000 0
主蒸汽压力	-0.070 9	-0.090 4	0.019 5	-0.073 0	-0.090 4	0.017 4
主蒸汽温度	0.580 3	-0.146 9	0.727 3	0.584 9	-0.146 9	0.731 8
最终给水压力	-0.006 6		-0.006 6	0.000 0		0.000 0
最终给水温度	-0.525 3		-0.525 3	-0.557 6		-0.557 6
再热压力	-0.010 8	0.091 7	-0.102 5	-0.010 4	0.091 7	-0.102 1
再热温度	0.380 0	-0.142 8	0.522 8	0.385 9	-0.142 8	0.528 7
冷再压力	0.029 5	0.091 7	-0.062 2	0.032 8	0.091 7	-0.058 9
冷再温度	-0.257 8		-0.257 8	-0.263 2		-0.263 2
排汽压力	0.000 0	-0.010 2	0.010 2		-0.010 2	0.010 2

表 3 热耗率总不确定度

测量参数	小扰动分析法		$F = E_2$	解析微分法	
	测量不确定度 /% D	热耗率不确定度 /% $E = C \times D$		热耗率不确定度 /% $E = C \times D$	$F = E^2$
主蒸汽流量	0.292 8	0.294 3	0.086 6	0.292 8	0.085 7
电功率	0.122 0	-0.122 0	0.014 9	-0.122 0	0.014 9
主蒸汽压力	0.111 0	0.002 2	0.000 0	0.001 9	0.000 0
主蒸汽温度	0.200 3	0.145 6	0.021 2	0.146 6	0.021 5
给水压力	0.172 9	-0.001 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0
给水温度	0.282 9	-0.148 6	0.022 1	-0.157 7	0.024 9
再热压力	0.124 9	-0.012 8	0.000 2	-0.012 8	0.000 2
再热温度	0.283 6	0.148 3	0.022 0	0.149 9	0.022 5
冷再压力	0.113 6	-0.007 1	0.000 0	-0.006 7	0.000 0
冷再温度	0.283 4	-0.073 1	0.005 3	-0.074 6	0.005 6
排汽压力	1.334 5	0.013 6	0.000 2	0.013 6	0.000 2
$\Sigma F$			0.172 5		0.175 4
热耗率总不确定度 $\sqrt{\Sigma F}$ /%			0.415 4		0.418 8

(下转第 90 页)

## 5 结 论

(1) 针对一管多机长引水系统水电站的动态响应特点,提出适应电力系统中长期稳定分析的水轮机降阶模型。

(2) 针对水电站调压井结构复杂、阻抗系数难以确定等特点,提出以调压井结构系数动态修正调压井溢流时间常数的方法,提高仿真模型的准确性。

(3) 与电网实测扰动数据的对比分析表明,该模型能够正确反映中长期过程中水电机组的动态响应,可用于此类特殊布置水电站的安全稳定性分析。

### 参考文献

[1] 高慧敏,刘宪林,徐政.水轮机详细模型对电力系统暂态稳定分析结果的影响[J].电网技术,2005,29(2):5-9.

[2] 李华,史可琴,范越,等.电力系统稳定计算用水轮机调速器模型结构分析[J].电网技术,2007,31(5):25-30.

[3] 汤涌,宋新立,刘文焯,等.电力系统全过程动态仿真中的长过程动态模型——电力系统全过程动态仿真软件开发之三[J].电网技术,2002,26(11):20-25.

[4] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies. Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies[J]. Transactions on Power System,1992,7(1):167-179.

(上接第85页)

方法计算出的影响系数差别不大,因此,对于复杂的函数建议采用小扰动分析法;从表3知,热耗率的不确定度超出了标准的要求,主要是主蒸汽流量的不确定度太大,功率不确定度也没达到标准要求。

## 5 结 论

主要介绍了汽轮机热耗率不确定度的分析计算过程,并给出了计算实例,从数据中可以看出,主蒸汽流量、功率和温度对热耗率产生的不确定度影响比较大,压力测点对测量结果的不确定度影响较小。因此,可在试验过程中考虑降低这些参数的不确定度,如增加重要测点个数、用精度较高的温度测温元

[5] Hannett L. N, Feltes J. W, Fardanesh B, et al. Modeling and Control Tuning of a Hydro Station with Units Sharing a Common Penstock Section [J]. IEEE Transactions on Power Systems,1999,14(4):1407-1414.

[6] 曾云,张立翔,郭亚昆,等.共用管段的水力解耦及非线性水轮机模型[J].中国电机工程学报,2012,32(14):103-108.

[7] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill,1994.

[8] DL/T 5058-1996,水电站调压室设计规范[S].

[9] 程永光,杨建东.用三维计算流体力学方法计算调压室阻抗系数[J].水力学报,2005,36(7):787-792.

[10] 付亮,王义国.有调压井水电站甩负荷试验与仿真分析[J].水电能源科学,2012,30(6):154-157.

### 作者简介:

汤凡(1984),硕士,工程师,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制技术研究;

丁理杰(1981),博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制技术研究;

张华(1985),硕士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析;

滕予非(1984),博士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析;

魏巍(1984),博士,工程师,主要研究方向为电力系统安全稳定分析。

(收稿日期:2014-02-11)

件和减少系统不明泄漏率等。

### 参考文献

[1] ASME PTC-2004. Steam Turbines Performance Test Codes [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers,2005.

[2] ANSI/ASME PTC-6 REPORT 1985. Guidance for Evaluation of Measurement Uncertainty in Performance Tests of Steam Turbines [S]. New York: The American Society of Mechanical Engineers,1986.

### 作者简介:

张志恒(1977),硕士研究生,工程师,主要从事发电厂设备调试和性能试验方面的研究。

收稿日期:2014-04-08)