

不确定度分析在电站锅炉效率计算中的应用

韩伟¹, 刘慧超²

(1. 四川电力工业调整试验所, 四川 成都 610072; 2. 四川水利职业技术学院, 成都 崇州 611230)

摘要:介绍了不确定度分析和评定的基本原理,建立锅炉效率计算中不确定度的分析数学模型方法,以及各个参数测量精度不确定度和偏差不确定度的计算方法,并以苏丹 Garri-4 纯烧石油焦锅炉为例,对锅炉热效率不确定度进行分析评定。

关键词:不确定度; 锅炉热效率; 精度不确定度; 偏差不确定度

Abstract: The basic theory of the uncertainty analysis and evaluation is introduced, the mathematical models for uncertainty in boiler efficiency calculation are established, and the calculation methods for the measurement precision uncertainty and bias uncertainty of parameters are proposed. Taking Sudan Garri-4 petroleum-coke-fired CFB boiler for example, the uncertainty of boiler thermal efficiency is analyzed and evaluated.

Key words: uncertainty; thermal efficiency of boiler; precision uncertainty; bias uncertainty

中图分类号: TK223.7 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)04-0080-04

电站锅炉热效率是反映设备运行经济性的一项非常重要的指标,特别是一些新投运机组或旧机组大修后,一般都要进行锅炉热效率试验,以确定锅炉运行的经济性,分析锅炉的节能潜力,查找影响锅炉经济运行的主要因素。试验完成后,在测试单位出具的报告中,不但包括锅炉热效率的计算结果和相关测试数据,还应该包括对测算结果的可信度以及质量的评价。不确定度分析就是定量表达试验结果精度的一种方法,因此试验前后不确定度分析是性能试验的重要工作^[1]。

测量不确定度是指测量结果的可靠程度,并不说明试验结果是否接近真值。一般而言,测量不确定度越小,测试结果的质量越高,测试水平越先进,使用价值越高。

1 不确定度分析原理

1.1 数学模型

为了方便进行不确定度分析,需要建立满足测量不确定度评定的数学模型,测量中,测试结果 R 有多个独立的被测量 $x_1 \sim x_M$ 通过函数关系 f 来确定,即

$$R = f(x_1, x_2, \dots, x_M) \quad (1)$$

1.2 不确定度分类

ASME PTC4-1998 规程中,把试验的不确定度分为两类:精度不确定度和偏差不确定度。将某一参数的不确定度归类为偏差不确定度还是精度不确定度并非易事,一般而言,精度不确定度与时间变化有关,而偏差不确定度被认为不随时间变化。精度不确定度基于的事实是同一试验人员、使用同一测量设备、对同一变量进行多次测量时,得到不同的值。而偏差不确定度是测量系统的特征体现,不是随机的,当采用测试设备和计算方法固定时,其值理论上是不变的。

1.3 两种不确定度的计算方法

1.3.1 精度不确定度

两类测量不确定特征不同,其计算方法也不尽相同。单点多次测量:在单一点随时间进程对某一定值参数进行多次测量,比如环境温度和大气压力等参数,其精度指标^[1]为

$$PI = S_x = \sqrt{\frac{S_x^2}{N}} \quad (2)$$

$$\text{式中 } S_x^2 = \left(\frac{1}{N-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (3)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i \quad (4)$$

自由度为

$$v = N - 1$$

多点多次测量: 在网格中每一点随时间进程进行多次测量, 随时间进程的每一点测量值取平均值, 以确定在该点的参数值, 比如烟气温度和烟气中氧量, 其精度指标^[1]为

$$PI = \frac{1}{m} [\sum_{i=1}^m (S_{x_i})^2]^{1/2} \quad (5)$$

$$\text{式中 } x_i = \frac{1}{N_j} \sum_{j=1}^N (x_j)_i \quad (6)$$

自由度为

$$v = \frac{PI^4}{\sum_{i=1}^m [\frac{S_{x_i}^4}{m^4 \cdot v_i}]} \quad (7)$$

式中 S_{x_i} 为点 i 处参数的精度指标, 由公式 (2) 计算获得; m 为测点的网格点数; v_i 为 S_{x_i} 的自由度, 即点 i 处读数的次数减 1。

某一变量的精度不确定度由该测试结果的精度指标与其对应的 t 分布值的乘积, t 分布值基于结果的精度指数的自由度和选定的概率水平 (规程 ASME PTC4 - 1998 规定概率水平为 95% 为计算基准)。

1.3.2 偏差不确定度

偏差不确定度的确定一般通过以下几种方法获得: 以前测试的历史数据、基于长期经验的正确判断、试验仪器所提供的技术文件、校准证书或检定证书提供的数据、规定试验方法的国家标准给出的重复性限等。

1.3.3 合成不确定度

确定了精度和偏差不确定度后, 需要确定由数据计算结果的不确定度, 称之为不确定度传递, 因为精度和偏差不确定度属于不同类型的量, 因此分别计算各自的不确定度传递, 最后合成计算结果不确定度。得到每个变量的精度不确定度和偏差不确定度后, 其基本传递方程式为

$$e_R = [(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot ex_1)^2 + (\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot ex_2)^2 + \dots + (\frac{\partial f}{\partial x_M} \cdot ex_M)^2]^{1/2} \quad (8)$$

式中 e 对精度为精度指标, 对偏差为偏差不确定度; M 为独立被测量参数的个数。

合成不确定度计算为

$$U = (U_p^2 + U_B^2)^{1/2} \quad (9)$$

式中 U_p 为精度合成不确定度; U_B 为偏差合成不确定度。

2 锅炉热效率不确定度分析模型

锅炉设备型号各不相同, 但其热效率计算原理大致是相同的, 仅计算的表达形式有所区别。根据 ASME PTC4 - 1998 规程规定, 以能量平衡法计算锅炉热效率, 热效率基本计算公式^[1]如下。

$$EF = 100 - Q_p L + Q_p B \quad (10)$$

式中 EF 为燃料效率; $Q_p L$ 为系统热损失之和; $Q_p B$ 为系统热增益之和。

$$Q_p L = Q_p LDFg + Q_p LH2F + Q_p LWF + Q_p LWA + Q_p LUbC + Q_p LRs + Q_p LNOx \quad (11)$$

式 (11) 右端各项依次为干烟气损失、燃料中氢燃烧生成水而造成的损失、因固体燃料中水分造成的损失、因空气中水分引起的损失、由灰渣中未燃尽碳造成损失和形成 NO_x 而引起的损失。

$$Q_p B = Q_p BDA + Q_p BWA + Q_p BF \quad (12)$$

式 (12) 右端各项依次为进入系统的干空气所携带的热增益、空气中水分携带的热增益和燃料显热携带的热增益。

在锅炉热效率计算各项热损失和热增益中, 需要测试的参数有: 干湿球温度 (需仪器干湿球温度计)、环境大气压力 (需仪器大气压力表)、烟气温度、空气预热器进口风温 (需仪器 T 型热电偶)、烟气中氧量、烟气中 NO_x 含量 (需仪器烟气分析仪)、石油焦取样分析、飞灰和底渣取样分析等。

通过计算以上各参数变量的不确定度, 然后按照不确定传递的计算公式, 最后计算出锅炉热效率结果的不确定度。

2.1 烟气中 O_2 和 NO_x 测试不确定度分析

烟气 O_2 和 NO_x 测量采用网格法, 测点与烟气温度测点位置相同, 其不确定度包括精度不确定度和偏差不确定度。精度不确定度基于重复多次、多点测试带来, 根据公式 (5) ~ (7) 计算。偏差不确定度主要包括: 由于分析仪精度带来的不确定度, 其值可根据烟气分析仪的精度等级和使用的量程确定, 也可根据使用烟气分析仪器的检定证书; 标准气体标定烟气分析仪带来的测量不确定度, 烟气分析仪在使用前必须用标准气体进行标定, 标准气体示值的不确定度会带来测试结果的偏差, 这部分不确定度可根据标准气体的检定证书进行计算; 测量方法带来的不确定度, 主要是指由于烟气成分在空间分

布的不均匀性,而测点布置无法做到完全覆盖整个截面以精确测量,即测点数量的有限性带来的不确定度;被测烟气成分本身的不稳定性带来的不确定度,主要指因锅炉燃烧不稳定而导致烟气成分波动,即烟气成分时间上的不均匀性带来的不确定度。

2.2 干、湿球温度测试不确定分析

干、湿球温度测试不确定主要包括重复多次测量带来的精度不确定度和由于测量仪器精度限制带来的偏差不确定度,其偏差不确定度可根据仪器的极限误差或者仪器的校准证书给出的不确定度进行计算。

2.3 大气压力测试不确定分析

其方法与干、湿球温度测试不确定度分析方法类似。

表 1 锅炉热效率测算结果

名称	单位	结果
干球温度	℃	33.4
湿球温度	℃	28.5
大气压力	Pa	96730
空预器进风温度	℃	38.4
排烟温度	℃	133.8
烟气中氧量	%	5.15
炉渣温度	℃	901
烟气中 NO _x	ppm	331
石油焦分析		
碳	%	85.77
氢	%	3.6
氧	%	0.9
氮	%	1.24
硫	%	0.24
灰分	%	1.84
水分	%	6.4
挥发分	%	10.04
固定碳	%	81.72
高位发热量	kJ/kg	33990
灰渣分析		
飞灰未燃碳含量	%	16.7
底渣未燃碳含量	%	8.5
锅炉效率	%	91.78

2.4 排烟温度测试不确定度分析

排烟温度测试一般采用网格法测试,一次仪表采用“T”型热电偶,二次仪表采用数据采集系统。其不确定度也有精度不确定度和偏差不确定度两种类型。精度不确定度基于重复多次测量带来,根据公式(5)~(7)计算。其偏差不确定度影响因素较多:由一次仪表即热电偶带来的不确定度,一般根据热电偶的等级,按照均匀分布确定热电偶带来的偏

差不确定度;二次仪表带来的测试不确定度,由于数据采集系统具有很高的测量精度,因此一般忽略由数据采集系统带来的不确定度。测量方法带来的不确定度,主要是指由于排烟温度在空间分布的不均匀性,而测点布置无法做到完全覆盖整个截面以精确测量,即测点数量的有限性带来的不确定度;被测烟气温度本身的不稳定性带来的不确定度,主要指因锅炉燃烧不稳定而导致烟气温度波动,即烟气温度时间上的不均匀性带来的不确定度。

2.5 石油焦分析结果的不确定度分析

入炉石油焦成分不确定度也包括精度不确定度和偏差不确定度。

对平行样(一般取 2~3 个样)的分析结果进行统计分析,得到的评定结果为精度不确定度。

表 2 锅炉热效率不确定度计算结果

基本效率	91.78
干球温度	0.027
湿球温度	0.011
大气压力	0.041
空预器进风温度	0.007 5
排烟温度	0.085 3
烟气中氧量	0.014 2
炉渣温度	0.000
烟气中 NO _x	0.027
碳	0.123 1
氢	0.082 7
氧	0.003 1
氮	0.004 2
硫	0.017 8
灰分	0.210 4
水分	0.000 3
挥发分	0.041 1
高位发热量	0.310 2
飞灰未燃碳含量	0.027
底渣未燃碳含量	0.031
结果的精度指标	0.024 1
整体自由度	27.86
t - 分布	2.048
不确定度的精度分量	0.049 36
结果正偏差 不确定度分量	0.468 2
结果负偏差 不确定度分量	0.468 2
正的整体不确定度	0.470 8
负的整体不确定度	0.470 8

偏差不确定度来源主要有取样过程带来的不确定度,主要指所取石油焦成分不能完全代表热效率试验期间入炉石油焦的成分;制样过程带来的不确定度,主要指所分析的石油焦样不可能和所取石油焦样完全一致;分析仪器带来的不确定度,主要指由于仪器本身精度限制,一般此不确定度服从均匀分布,可从仪器的校准证书直接获得。需要注意的是石油焦分析的结果是空干基状态,其分析不确定度

还不能直接带入锅炉热效率计算中,还需要根据不确定度传递原理转换到收到基状态,然后再进行锅炉热效率不确定度计算。

2.6 灰渣分析结果的不确定度分析

与石油焦成分不确定度分析方法类似。

3 应用实例

苏丹 Garri - 4 期纯烧石油焦锅炉为例,分析锅炉热效率计算结果的不确定度。根据能量平衡法以及上述计算公式,锅炉热效率测算^[1-2]结果如表1和不确定度计算^[1]结果如表2。

4 结论

介绍了不确定度分析的相关内容及其计算的理论基础,并以苏丹吉里电厂纯烧石油焦锅炉效率计

(上接第59页)

高,油中溶解有氢时,设备中某些油漆(醇酸树脂),在某些不锈钢的催化下,甚至可能生成大量的氢。这些气体的存在一般不影响设备的正常运行。为做好单纯氢气含量超过注意值的电流互感器的技术监督工作,提出以下几点建议。

(1) 对于明确判断为因设备材质和制造工艺原因引起的单纯氢气含量超过注意值的设备,可以判断为正常,从经济角度来看,无须进行处理。对氢气含量特别高($\geq 500 \mu\text{L/L}$)的设备应引起注意,在条件允许的情况下应对其进行脱气处理,主要从两个方面的原因来考虑:①氢气含量过高容易掩盖某些早期的潜伏性故障,而造成错过发现故障的最佳时期;②由于氢气在变压器油中的奥氏瓦尔特系数比较小(50℃时仅为0.06),油中氢气含量过高容易造成氢气游离出油中,以微小气泡的形式从油中析出,在狭长的缝隙中逐渐积聚并附着在绝缘表面上,形成气泡性电晕放电。若放电发生在导线绝缘和垫块之间或导线绝缘与撑条的缝隙处,则造成的危害就更大。在长期工作电压作用下,气泡内的烃类气体分子形成的带电粒子会导致电流瞬间增大,造成绝缘击穿,引发恶性安全事故。

(2) 正常情况,此类设备油中的氢气含量一般在投入运行3~5年后,油中的氢气含量达到稳定,或有缓慢的下降趋势。对氢气含量已趋于稳定后,

算为样本,建立了不确定度分析的数学模型和评定实例,结果表明影响不确定度的主要因素是石油焦的取样和分析、氧量测试以及空气预热器进风温度和排烟温度的测试。测试过程中,降低这些参数的测试不确定度即能减少了测试结果的不确定度。

参考文献

[1] ASME PTC4 - 1998, Fired Steam Generator Performance Test Code [S].

[2] IAPWS IF97, Properties of Water and Steam [S].

作者简介:

韩伟(1979)男,工程师,在四川电力工业调整试验所工作,长期从事电站锅炉性能试验及电站锅炉煤粉燃烧技术研究;

刘慧超(1974)女,工程师,从事电站设计及新技术研发等工作。

(收稿日期:2012-04-25)

发现氢气含量再次增长,尤其是甲烷等烃类气体也有明显增长趋势,总烃未超过注意值亦应引起高度重视。

(3) 严格把好设备入网验收关,电流互感器投入运行前严格执行国家相关标准(油中氢气含量应低于 $50 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)。设备投入运行后,发现氢气含量超过注意值,在未弄清原因之前应缩短跟踪检测周期,待查明原因后,根据具体情况制定相应的检测周期,切不可任意认定为非故障气体。

4 结论

通过对成都电网电流互感器油中氢气来源的研究,发现如下结论:①电流互感器油中单纯氢气含量超过注意值大多是由于设备材质和制造工艺所致,为非故障气体,一般情况下不影响设备的正常运行。②电流互感器油中氢气主要来自不锈钢组件在钢加工过程中吸附氢气的释放和树脂类油漆催化脱氢,而非普遍认为的环烷烃催化脱氢、设备受潮水解等原因。

参考文献

[1] GB/T 7252 - 2001, 变压器油中溶解气体的分析和判断导则 [S].

(收稿日期:2012-02-15)