

ICS 27.060.01

J98

CBWA

# 团 体 标 准

T/CBWA XXXX-XXXX

## 锅炉风机现场性能试验温升法

Performance testing in situ for boiler fan temperature rise method

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国锅炉及锅炉水处理协会发布

# 前言

本文件按 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本文件由中国锅炉与锅炉水处理协会提出、归口管理和负责解释。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次制定。

本文件在执行过程中的意见或建议反馈至中国锅炉与锅炉水处理协会。

# 目 次

1.范围.....	1
2.规范性引用文件.....	1
3.术语和定义.....	1
4.试验要求.....	6
5.测量项目及测试方法.....	9
6.结果计算.....	12
7.不确定度分析.....	16
8.试验报告.....	23
附录 A 风机流量计算公式推导过程.....	24
附录 B 风机试验数据记录.....	24

## 1.范围

本文件规定了基于温升法的锅炉风机现场性能试验要求、测量项目及测试方法、结果计算、不确定度分析以及试验报告的要求。

本文件适用于风机压力超过 3kPa、电机直连驱动的锅炉送风机、引风机、一次风机、返料风机、排粉风机、烟气再循环风机、烟气脱硫装置的增压风机和磨煤机用的密封风机，其他风机可参照使用。

本文件不包括噪声试验、振动试验和机械运转试验。

## 2.规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 1236 工业通风机 用标准化风道性能试验
- GB/T 1032 三相异步电动机试验方法
- GB/T 1311 直流电机试验方法
- GB/T 5321 量热法测定电机的损耗和效率
- GB/T 10178 工业通风机 现场性能试验
- GB/T 10180 工业锅炉热工性能试验规程
- GB/T 10184 电站锅炉性能试验规程
- GB/T 16157 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法
- GB/T 25442 旋转电机（牵引电机除外）确定损耗和效率的试验方法
- GB/T 27418 测量不确定度评定与表示
- GB/T 34861 确定大电机各项损耗的专用试验方法
- DL/T 469 电站锅炉风机现场性能试验
- JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

## 3.术语和符号

### 3.1术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1.1 风机 **fan**

一种保持气体连续流动的旋转机械，通常压比不超过 1.3。

#### 3.1.2 叶轮 **impeller**

风机的旋转部件，通过其叶片将能量传送给气体。

#### 3.1.3 机壳 **casing**

风机的静止部件，使气流从风机进口流向风机出口。

#### 3.1.4 风机进口面积 $S_1$ **fan inlet area**

通常指机壳进口平面的总面积。

### 3.1.5 风机出口面积 $S_2$ fan outlet area

通常指机壳出口平面的总面积。

### 3.1.6 风机质量流量 $m_F$ mass flowrate

单位时间内通过风机进口或出口截面的流体质量。

### 3.1.7 温度 $t$ temperature

表征物体分子振动速度大小的物理量，可用测温元件获取的数值，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.1.8 绝对温度 $T$ absolute temperature

热力学温度，单位为K。

$$T = t + 273.15 \quad (1)$$

### 3.1.9 静态温度 $T$ static temperature

测量元件按流体速度移动时测量到的绝对温度。

### 3.1.10 滞止温度 $T_{\text{sg}}$ stagnation temperature

在无外加或损失能量或热量的情况下，理想气体的流动等熵至静止时的绝对温度。

$$T_{\text{sg}} = T + \frac{v^2}{2c_p} \quad (2)$$

### 3.1.11 绝对压力 $p$ absolute pressure

表征静止流体分子对单位面积的容器侧壁面垂直作用力的大小，相对于周围环境静止时测得的流体实际压力值。

### 3.1.12 大气压力 $p_a$ atmospheric pressure

风机平均高度处的自由大气的绝对压力。

### 3.1.13 表压 $p_e$ gauge pressure

以测量点大气压力为基准压力时测得的相对压力值。

$$p_e = p - p_a \quad (3)$$

### 3.1.14 气体常数 $R_g$ specific gas constant

每千克气体温度每升高 1K（或  $1^{\circ}\text{C}$ ）所需要的能量。对理想气体，气体常数表达式如下：

$$R_g = \frac{p}{\rho T} \quad (4)$$

### 3.1.15 风机单位质量功 $y_F$ fan work per unit mass

通过风机每单位质量流体的机械能增量。

### 3.1.16 风机空气功率 $P_u$ fan air power

公称输出功率为质量流量与风机单位质量功的乘积。

### 3.1.17 叶轮功率 $P_r$ impeller power

供给风机叶轮的功率。

### 3.1.18 风机轴功率 $P_a$ fan shaft power

由驱动装置输出到风机轴的机械功率，包括叶轮功率、轴承损失、密封装置损失等。

### 3.1.19 电动机轴功率 $P_o$ motor output power

电动机转轴的输出功率，即驱动轴的可用功率。

### 3.1.20 电动机输入功率 $P_e$ motor input power

驱动装置输入端的功率，即电动机获得的总功率。

### 3.1.21 转速 $n$ rotational speed

风机叶轮每秒钟的转数。

## 3.2 符号

表 1 中所列符号及单位适用于本文件。

表 1 符号和单位

序号	符号	名称	单位
1	$A$	随空间的	/
2	$A_w$	系数	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
3	$a$	被测量可能值区间的半宽度	/
4	$B$	流量求解系数	/
5	$C$	流量求解系数	/
6	$C_a$	极差系数	/
7	$\cos \varphi$	电动机功率因数	/
8	$c_p$	气体定压比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
9	$c_{p,a}$	干空气定压比热容	$\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$
10	$c_{p,\text{CO}}$	一氧化碳定压比热容	$\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$
11	$c_{p,\text{CO}_2}$	二氧化碳定压比热容	$\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$
12	$c_{p,\text{fg}}$	烟气定压比热容	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
13	$c_{p,\text{NO}}$	一氧化氮定压比热容	$\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$

14	$c_{p,N_2}$	氮气定压比热容	$J/(m^3 \cdot K)$
15	$c_{p,O_2}$	氧气定压比热容	$J/(m^3 \cdot K)$
16	$c_{p,SO_2}$	二氧化硫定压比热容	$J/(m^3 \cdot K)$
17	$c_{p,w}$	湿空气定压比热容	$J/(kg \cdot K)$
18	$c_{p,wv}$	水蒸气定压比热容	$J/(m^3 \cdot K)$
19	$c_{x_i}$	灵敏系数	/
20	$D_e$	非圆形截面管道的当量直径	m
21	$e$	标准不确定度	/
22	$F$	风机表面积	$m^2$
23	$g$	重力加速度	$m/s^2$
24	$h_u$	空气的相对湿度	%
25	$h_1$	风机进口气体焓	J/kg
26	$h_2$	风机出口气体焓	J/kg
27	$I_e$	现场试验中所测得的平均线电流	A
28	$i$	随时间进程, 网格中的点的读数次数	/
29	$j$	网格中的点	/
30	$K$	风机表面与环境空气之间平均换热系数	$W/(m^2 \cdot K)$
31	$k$	置信因子/包含因子	/
32	$M$	独立被测量的数目	/
33	$m$	网格点数	/
34	$m_F$	风机质量流量	kg/s
35	$n$	转速	r/s
36	$P_a$	风机轴功率	W
37	$P_e$	电动机输入功率	W
38	$P_o$	电动机轴功率	W
39	$P_r$	叶轮功率	W
40	$P_u$	风机空气功率	W
41	$p$	绝对压力	Pa
42	$p_a$	大气压力	Pa
43	$p_e$	表压	Pa
44	$p_{sat}$	饱和蒸汽压力	Pa
45	$p_v$	空气中水蒸气分压力	Pa
46	$p_x$	截面 $x$ 气体压力	Pa
47	$p_1$	风机进口气体绝对压力	Pa
48	$p_2$	风机出口气体绝对压力	Pa
49	$Q$	风机表面散热功率	W

50	$R$	结果, 例如流量	/
51	$R_a$	极差	/
52	$R_{fg}$	烟气的气体常数	J/(kg·K)
53	$R_g$	气体常数	J/(kg·K)
54	$R_w$	湿空气的气体常数	J/(kg·K)
55	$S_x$	截面 $x$ 的面积	m <sup>2</sup>
56	$S_1$	风机进口面积	m <sup>2</sup>
57	$S_2$	风机出口面积	m <sup>2</sup>
58	$s(\bar{x})$	算术平均值的实验标准偏差	/
59	$s(x_k)$	实验标准偏差	/
60	$T$	静态温度	K
61	$T_b$	风机表面平均温度	K
62	$T_{sg}$	滞止温度	K
63	$T_{sg1}$	风机进口气流滞止温度	K
64	$T_{sg2}$	风机出口气流滞止温度	K
65	$T_x$	截面 $x$ 气体静态温度	K
66	$T_0$	环境温度	K
67	$T_1$	风机进口气体静态温度	K
68	$T_2$	风机出口气体静态温度	K
69	$t$	气体温度	°C
70	$t_a$	干球温度	°C
71	$t_w$	湿球温度	°C
72	$U$	扩展不确定度	/
73	$U_e$	现场试验中所测得的平均电压	V
74	$u_A(\bar{R})$	被测量估计值 $\bar{R}$ 的 A 类标准不确定度	/
75	$u_A(\bar{x})$	被测量估计值 $\bar{x}$ 的 A 类标准不确定度	/
76	$u_B(\bar{R})$	被测量估计值 $\bar{R}$ 的 B 类标准不确定度	/
77	$u_{B_x}$	参数平均值的 B 类标准不确定度	/
78	$u_{B_{xi}}$	仪表回路 $i$ 的 B 类标准不确定度	/
79	$v$	气流速度	m/s
80	$v_x$	截面 $x$ 气体平均速度	m/s
81	$v_1$	风机进口气体平均速度	m/s
82	$v_2$	风机出口气体平均速度	m/s
83	$X$	输入量	/
84	$x$	测量量	/
85	$y_F$	风机单位质量功	J/kg
86	$\bar{y}$	变量 $y$ 随时间或空间的连续变量模型积分值	/
87	$z_1$	风机进口高度	m

88	$z_2$	风机进口高度	m
89	$\Delta z$	气压计标高减去风机标高	m
90	$\delta x_i$	某一微小量	/
91	$\eta_a$	风机轴效率	/
92	$\eta_e$	总效率	/
93	$\eta_{mot}$	电动机效率	/
94	$\eta_o$	风机电动机轴效率	/
95	$\eta_r$	风机叶轮效率	/
96	$\eta_{tr}$	传动效率	/
97	$\nu$	自由度	/
98	$\rho$	流体密度	kg/m <sup>3</sup>
99	$\rho_{fg}$	烟气密度	kg/m <sup>3</sup>
100	$\rho_m$	平均密度	kg/m <sup>3</sup>
101	$\rho_w$	湿空气密度	kg/m <sup>3</sup>
102	$\rho_x$	截面 $x$ 气体密度	kg/m <sup>3</sup>
103	$\rho_1$	风机进口气体密度	kg/m <sup>3</sup>
104	$\rho_2$	风机出口气体密度	kg/m <sup>3</sup>
105	$\tau$	随时间的	/
106	$\varphi_{CO,fg}$	烟气中一氧化碳的体积分数	%
107	$\varphi_{CO_2,fg}$	烟气中二氧化碳的体积分数	%
108	$\varphi_{NO,fg}$	烟气中一氧化氮的体积分数	%
109	$\varphi_{N_2,fg}$	烟气中氮气的体积分数	%
110	$\varphi_{O_2,fg}$	烟气中氧气的体积分数	%
111	$\varphi_{SO_2,fg}$	烟气中二氧化硫的体积分数	%
112	$\varphi_{wv,fg}$	烟气中水蒸气的体积分数	%

#### 4. 试验要求

##### 4.1 锅炉风机能量平衡边界

本文件规定的锅炉风机能量平衡边界见图1，风机进口平面应取气体输送装置上游末端的界面，风机出口平面应取气体输送装置下游始端的界面。

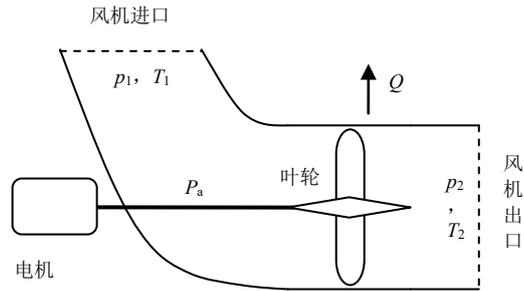


图1 锅炉风机能量平衡边界

#### 4.2 风机安装类别

GB/T 1236标准认可四种安装类别：

- A类：自由进口，自由出口；
- B类：自由进口，管道出口；
- C类：管道进口，自由出口；
- D类：管道进口，管道出口。

本文件不适用于A类无管道条件的测试。B类、C类、D类安装分别对应送风机、引风机和增压风机的安装类别。

#### 4.3 试验前应达成的协议

试验前应达成协议的内容如下：

- a) 试验目的与试验项目；
- b) 试验单位及职责范围；
- c) 试验项目的测试和计算方法；
- d) 试验测试项目、测点位置及数量；
- e) 试验所用仪器及其检定、校准；
- f) 应用的合同性能曲线和/或规定的性能及运行条件；
- g) 风机界面（指定的风机进、出口截面位置）；
- h) 其他在本标准内的未尽事宜。

#### 4.4 试验大纲

试验大纲由试验负责单位编写，并经试验各方认可，内容至少应包括：

- a) 试验目的；
- b) 试验条件及要求；
- c) 试验内容；
- d) 测试项目、仪器设备、测点位置及测试方法；
- e) 试验数据处理原则；
- f) 试验人员及组织；
- g) 试验日程及计划。

#### 4.5 试验条件

试验应具备如下条件：

- a) 经初步检查确认风机运行正常后方可进行现场试验；

- b) 风机与任何流量或压力测量面之间的风管，应无明显的内、外漏气现场；
- c) 风机进、出口之间不得存在未规定的气体循环；
- d) 为保障试验操作人员安全及机器免受损坏所采取的措施，不应影响试验风机的运行特性产生任何明显的影响；
- e) 在验收试验开始之前，供货方有权检查风机工作状态是否良好，并进行必要的调整；
- f) 为保证没有影响测量的障碍物，测量速度和/或压力的管道平面的内部检查应由试验各方共同进行，有灰尘聚集的地方，应避免由于速度不足以将沉淀的灰尘携带走而使管道面积减小。

#### 4.6 运行点

本文件规定了确定风机单个运行点性能的方法，如果需要进行多于一个运行点的试验，则需对每一运行点逐个进行试验。在试验前，试验各方应对改变系统阻力的方法达成一致意见，以获得各运行工况点。如果需要获得性能曲线，试验各方还应在试验进行前对需要的运行工况点数目及其位置达成一致意见，以便绘制特性曲线。不同测试点的选取方法可参考GB/T 10178的相关规定。如果需要实时监测风机流量与效率，可参照本文件的测试与计算方法进行。

#### 4.7 运行方式

4.7.1 当系统内有并联运行的风机时，在试验期间，被试验的风机应在手动控制方式下运行，而系统中其余的风机按习惯跟踪负荷变化。被试风机应在调节挡板和叶片位置不变的情况下恒速运行。在每一测试点的试验周期内，转速平均值的误差不应超过 $\pm 0.5\%$ 。

4.7.2 系统应在保持气体流量和其他运行条件不变的情况下运行。例如对锅炉引风机，锅炉负荷应稳定；试验期间吹灰器不应时开时关，如果必须进行吹灰，则吹灰器应在整个风机试验期间内均投运；运行的磨煤机、给煤机、布袋除尘器、烟气脱硫装置、空气预热器等均不得影响试验结果。

4.7.3 自试验开始后，不允许进行可能影响试验结果的风机调整。如果必须对风机进行此类调整，则应取消前面已进行的试验，并重新开始试验。任何再调整和重新试验均应得到试验各方的同意。

#### 4.8 预备性试验

预备性试验的目的是培训试验人员，确定所有仪器的功能是否合适，检验系统与风机是否相匹配，以便进行正确的正式试验。如试验各方认为试验过程和条件满足试验大纲要求，预备性试验也可作为正式试验。

#### 4.9 参考测量

为确定系统已达到稳定状态，证明运行条件恒定，并达到在试验期间风机在不变的运行点运行的目的，可进行下面各项参考测量。

- a) 转速；
- b) 驱动功率或某些与驱动功率相关的参数；
- c) 风机进口静压；
- d) 风机出口静压；
- e) 风机进口温度；
- f) 风机出口温度；
- g) 风机进口或出口动压。

按照确定风机性能的要求测量的转速和功率可直接用作参考，压力和温度的参考测量采用单点测量即可。连接到相应指示器上的能够观察全压、静压、动压和温度的探头应固定在进口和出口平面的中心位置上，直到试验结束。这些探头测量值仅作为参考目的，不必精确定向或校验。由试验负责人决定运行条件是否足够稳定、可以开始或继续试验。

#### 4.10 有关锅炉运行参数的确定

按照DL/T 469的规定，对于风机运行性能试验，除在风机每个测点的测试期间保持锅炉运行工况稳定外，还必须同时了解锅炉的有关运行参数，以便进行分析。相关参数的确定方法可参考GB/T 10180或GB/T 10184。

### 5. 测量项目及测试方法

#### 5.1 主要测量项目

现场试验主要测量项目包括：

- a) 风机进口、出口温度、环境温度；
- b) 风机进口、出口压力、大气压力；
- c) 风机功率；
- d) 烟气成分。

#### 5.2 仪表仪器

5.2.1 验收试验中，主要测量项目所用仪表仪器宜为专用设备。

5.2.2 所有参与试验的仪表仪器应在检定或校准有效期内。

5.2.3 如果运行表计达到试验要求的精度等级，并具备法定计量部门出具的检定或校准合格证，也可采用运行表计。

5.2.4 如果需要，验收试验主要测量仪器可在试验后进行复校，如发现异常，则应对所测数据进行修正或者舍弃所测数据。

5.2.5 主要测量仪器的允许误差见表2。

表2 主要测量仪器的最大允许误差

序号	测量项目	允许误差（按满量程计）
1	温度	0.1℃
2	相对湿度	2%
3	大气压力	200Pa
4	风机压力	0.25%
5	转速	0.25%
7	功率	0.2%（无须修正的） 0.5%（经校准曲线修正过的）
8	电压	0.2%（无须修正的） 0.5%（经校准曲线修正过的）
9	电流	0.2%（无须修正的） 0.5%（经校准曲线修正过的）
10	烟气成分 氧量（O <sub>2</sub> ） 二氧化碳（CO <sub>2</sub> ） 一氧化碳（CO） 二氧化硫（SO <sub>2</sub> ） 一氧化氮（NO）	1% 1% 5% 5% 5%

#### 5.3 温度测量

5.3.1 对于截面积较大的管道，应采用网格法测量；温度场较均匀时，可采用代表点测量；测点位置的选取可参考GB/T 16157的相关规定。

5.3.2 气流的干球与湿球温度应在试验间内可测得空气进入试验风管条件的地方测定。对仪表应进行屏蔽，以防止热表面的辐射影响。湿球温度计应放置在速度至少为3m/s的气流中。套筒应保持干净，与湿球体保持良好接触，并且用纯净水保湿。

5.3.3 常规温度测量仪表的测量值介于气流滞止温度与静温度之间，若采用总温探针，可测量得到气流滞止温度。气流速度越高，二者之差越大。建议选择气流速度介于0~25m/s之间的实验段，或者在进口风室测定。

## 5.4 压力测量

### 5.4.1 大气压力测量

5.4.1.1 对于直读汞柱型气压表，应读出最接近的100Pa（1mbar）或最接近的1mm汞柱的读数。如果预定刻度适于仪表区域 $g$ 值（ $\pm 0.01\text{m/s}^2$ ）和室温（ $\pm 10^\circ\text{C}$ 内），可以不对读数进行修正，否则应按GB/T 1236的规定对读数进行修正。

5.4.1.2 气压计的安放位置最好是在试验间内。如果要放在现场的其他位置，当高度差超过10m，则应采用修正系数 $\rho_a \cdot g \cdot \Delta z$ (Pa)进行修正。

### 5.4.2 风机压力测量

5.4.2.1 试验用压力计可采用垂直或斜管液柱式压力计，也可用达到同样精度和校准要求的带有指示或记录仪表的压力传感器。压力计的校准按GB/T 10178的规定进行。对各种压力计应在读取读数的前后，在不影响仪表的情况下，对压力计的零读数进行检查。

5.4.2.2 压力计应按风机的平均高度安放并校准，当安放高度差超过10m时，应按5.4.1中所述进行修正。

5.4.2.3 确定风机压力时，应在风机的进口和出口侧尽可能靠近风机的平面上测定静压。压力测量平面应选在任何弯管、扩散管或其他障碍物下游至少 $5D_e$ 处，同时距风机进口的距离不应小于 $1.5D_e$ ，距风机出口距离不应小于 $5D_e$ 。测量平面与风机之间的管道压力损失可根据摩擦系数进行计算，光滑管道的摩擦系数见GB/T 10178。

5.4.2.4 在较均匀的（无旋流和分离现象）流动条件下，可采用均匀布置在管子圆周上（如果是矩形管，则应在四边的中心位置）的四个管壁测孔来测量静压。此时，任意两孔的测量压差应小于四孔压力算术平均值的5%，可用一集管将测孔互联起来测量得到平均表压。要求这些测孔要平整、内无毛刺；相邻的管壁要光滑、清洁、无起伏、无断裂。

当四个管壁测孔之间的任意两孔的测量压差大于其算术平均值的5%而小于10%时，则管壁测孔应由皮托静压管取代。在圆形风道适当的压力测量平面内，应至少选择四个测点，并等距、对称地布置在轴线周围，位于距管壁约1/8管道直径处；在矩形风道上，距每边中心的距离为1/8管道宽度处。在稳定流动条件下，静压应分别在每一测点读取数值，并计算其平均值，或将四根皮托静压管互联起来测量。

当四个皮托静压管读数中的任何一个与其算术平均值之差大于10%而小于15%时，应按照GB/T 10178的相关规定进行逐点测量。

当逐点测量读数和其算术平均值之间的差值大于15%平均值时，则认为压力测量平面不适合现场测试。

应注意所有管子和接头均无堵塞和泄漏。

## 5.5 功率测量

5.5.1 若需要将现场试验结果与试验台测得的结果进行比较,则两种情况时宜采用相同的方法测定功率。

5.5.2 当电动机作为驱动时,输入功率等于电动机端子的电功率;其他情况,输入功率应按燃料、蒸汽、压缩空气等的消耗量来确定。

5.5.3 当风机直连驱动时,风机轴功率 $P_a$ 等于电动机轴功率 $P_o$ 。在其他情况下,风机轴功率按下式计算:

$$P_a = \eta_{tr} P_o \quad (5)$$

式中:

$\eta_{tr}$ ——传动效率。

5.5.4 当需要确定叶轮功率时,应从电动机轴功率中减去轴承及其他传动损失,损失值应由各方协商确定。

5.5.5 电动机轴功率的测定

5.5.5.1 采用损耗分析法确定

驱动电机的轴功率等于在电动机端子处测得的输入电功率乘以电动机效率(损耗分析法计算所得)。直流电动机、感应电动机及同步电动机的损耗与效率计算方法,应符合GB/T 1311、GB/T 1032及GB/T 25442的相关要求。电动机的损失也可用量热法进行测量,应符合GB/T 5321或GB/T 34861的相关要求。

5.5.5.2 参考与所用电动机性能相同的电动机确定

无法采用损耗分析法时,经各方商定,可采用与现场试验所用电动机相同性能的数据(制造商提供),以及所测得的电动机输入参数,来确定现场试验电动机的输出功率。现场试验电动机的功率应与参考电动机功率一致。现场试验时电压的平均值与参考电动机电压相差不应大于2%。电动机输出功率确定方法主要包括以下3种情况:

- a) 由输出功率与输入功率的关系直接得出;
- b) 由输出功率与电动机效率的关系得出,三相电动机的输出功率由下式确定:

$$P_o = P_e \eta_{mot} \quad (6)$$

式中:

$P_e$ ——电动机输入功率, W;

$\eta_{mot}$ ——电动机效率, %。

- c) 根据电动机效率与功率因数的关系间接得出,三相电动机的输出功率由下式确定:

$$P_o = \cos \varphi \sqrt{3} U_e I_e \eta_{mot} \quad (7)$$

式中:

$P_o$ ——电动机轴功率, W。

$U_e$ ——现场试验中所测得的平均电压, V;

$I_e$ ——现场试验中所测得的平均线电流, A;

$\cos \varphi$ ——电动机功率因数。

### 5.5.5.3 采用经校准的电动机确定

采用经校准电动机来确定输出功率，可用给定的效率曲线或有效机械功随电动机输入电功率变化的函数曲线导出。给定的曲线应由各方认可。电压变化范围为额定电压的-10%~10%。应在电动机带载运转至少90min后开始测量。现场试验时的平均相电压与校准时电压相差不应大于2%。

5.5.6 测量仪表的选择应使其读数大于全刻度读数的1/2。为将误差减至最小，测量用的电流互感器和电压互感器的选择应尽可能接近其额定负载下工作，同时，仪表应尽可能靠近电机端子连接，以防电缆中的电压降影响测量精度。

## 5.6 烟气成分测量

5.6.1 对于引风机或烟气再循环风机，需测量烟气成分以确定气体密度及定压比热。锅炉烟气成分测量项目主要包括氧气（O<sub>2</sub>）含量、一氧化碳（CO）含量、二氧化碳（CO<sub>2</sub>）含量、二氧化硫（SO<sub>2</sub>）含量、氮氧化物（NO<sub>x</sub>）含量等，测定方法和推荐采用的分析仪器可参考《锅炉节能环保技术规程》及GB/T 10184的相关规定。

5.6.2 烟气成分测点应开设在烟道截面上工质流速比较均匀的位置，一般在直管段上。烟气成分和风机温度测量可采用同一个测点。

5.6.3 烟气取样管端口应插至烟道直径（当量）的1/3~2/3处。当烟道截面较大时，可采用笛型采样管进行采样，也可采用网格法采样。

## 6. 结果计算

### 6.1 风机流量

6.1.1 风机流量按式（8）计算，附录A提供了推导过程：

$$m_F = \sqrt[3]{B + \sqrt{B^2 + \left(\frac{C}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{B - \sqrt{B^2 + \left(\frac{C}{3}\right)^3}} \quad (8)$$

其中B、C为流量求解系数，分别按照式（9）、（10）计算：

$$B = \frac{P_a - Q}{R_g^2 \left( \frac{T_2^2}{S_2^2 p_2^2} - \frac{T_1^2}{S_1^2 p_1^2} \right)} \quad (9)$$

$$C = \frac{2c_p(T_2 - T_1)}{R_g^2 \left( \frac{T_2^2}{S_2^2 p_2^2} - \frac{T_1^2}{S_1^2 p_1^2} \right)} \quad (10)$$

式中：

$m_F$ ——风机质量流量，kg/s；

$c_p$ ——气体定压比热，J/(kg·K)；

$T_1$ ——风机进口气体静态温度，K；

$T_2$ ——风机出口气体静态温度，K；

$S_1$ ——风机进口面积， $m^2$ ；

$S_2$ ——风机出口面积， $m^2$ ；

$p_1$ ——风机进口气体绝对压力，Pa；

$p_2$ ——风机出口气体绝对压力，Pa；

$R_g$ ——气体常数， $J/(kg \cdot K)$ ；

$P_a$ ——风机轴功率，W；

$Q$ ——风机表面散热功率，W。按式（11）计算：

$$Q = KF(T_b - T_0) \quad (11)$$

式中：

$K$ ——风机表面与环境空气之间平均换热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ，可实测或查表获得；

$F$ ——风机表面积， $m^2$ ；

$T_b$ ——风机表面平均温度，K；

$T_0$ ——环境温度，K。

一般而言，由于风机表面与环境之间的温差较小或表面包覆保温（降噪）材料，因此实际计算时也可忽略风机表面散热功率。

6.1.2 若采用总温探针测量得到气流滞止温度，风机流量按式（12）计算：

$$m = \frac{P_a - Q}{c_p (T_{sg2} - T_{sg1})} \quad (12)$$

式中：

$T_{sg1}$ ——风机进口气流滞止温度，K；

$T_{sg2}$ ——风机出口气流滞止温度，K。

6.1.3 空气的气体常数按式（13）计算：

$$R_w = \frac{287}{1 - 0.378 \frac{p_v}{p_a}} \quad (13)$$

式中：

$R_w$ ——湿空气的气体常数， $J/(kg \cdot K)$ ；

$p_a$ ——大气压力，Pa；

$p_v$ ——空气中水蒸气分压力, Pa, 按式 (14) 或 (15) 计算:

$$p_v = (p_{\text{sat}})_{t_w} - p_a A_w (t_a - t_w) \quad (14)$$

式中:

$t_a$ ——干球温度, °C;

$t_w$ ——湿球温度, °C;

$(p_{\text{sat}})_{t_w}$ ——湿球温度  $t_w$  下的饱和蒸汽压力, Pa;

$A_w$ ——系数, 当  $t_w$  在 0~150°C 范围内时,  $A_w = 6.66 \times 10^{-4} \text{°C}^{-1}$ ; 当  $t_w$  小于 0°C 时,  $A_w = 5.94 \times 10^{-4} \text{°C}^{-1}$ 。

$$p_v = h_u (p_{\text{sat}})_{t_a} \quad (15)$$

式中:

$h_u$ ——空气的相对湿度, %;

$(p_{\text{sat}})_{t_a}$ ——干球温度  $t_a$  下的饱和蒸汽压力, Pa。

当  $t$  在 0~50°C 范围内时, 饱和蒸汽压力可按 (16) 计算, 也可查表获得。

$$p_{\text{sat}} = 611.7927 + 42.7809t + 1.6883t^2 + 1.2079 \times 10^{-2}t^3 + 6.1637 \times 10^{-4}t^4 \quad (16)$$

6.1.4 空气的定压比热容按式 (17) 计算:

$$c_{p,w} = \frac{c_{p,a}(p_a - p_v) + c_{p,wv}p_v}{\rho_w p_a} \quad (17)$$

式中:

$c_{p,a}$ 、 $c_{p,wv}$ ——干空气和水蒸气的定压比热容, J/(m<sup>3</sup>·K);

$\rho_w$ ——湿空气密度, kg/m<sup>3</sup>。

6.1.5 烟气的气体常数按式 (18) 计算:

$$R_{\text{fg}} = \frac{8314}{31.998\varphi_{\text{O}_2,\text{fg}} + 44.009\varphi_{\text{CO}_2,\text{fg}} + 28.010\varphi_{\text{CO},\text{fg}} + 64.064\varphi_{\text{SO}_2,\text{fg}} + 28.014\varphi_{\text{N}_2,\text{fg}} + 30.006\varphi_{\text{NO},\text{fg}} + 18.015\varphi_{\text{wv},\text{fg}}} \quad (18)$$

式中:

$\varphi_{\text{O}_2,\text{fg}}$ 、 $\varphi_{\text{CO}_2,\text{fg}}$ 、 $\varphi_{\text{CO},\text{fg}}$ 、 $\varphi_{\text{SO}_2,\text{fg}}$ 、 $\varphi_{\text{N}_2,\text{fg}}$ 、 $\varphi_{\text{NO},\text{fg}}$ 、 $\varphi_{\text{wv},\text{fg}}$ ——烟气中 O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、

NO 和水蒸气的体积分数, %, 其中:  $\varphi_{\text{O}_2,\text{fg}} + \varphi_{\text{CO}_2,\text{fg}} + \varphi_{\text{CO},\text{fg}} + \varphi_{\text{SO}_2,\text{fg}} + \varphi_{\text{N}_2,\text{fg}} + \varphi_{\text{NO},\text{fg}} + \varphi_{\text{wv},\text{fg}} = 100\%$ 。

6.1.6 烟气的定压比热容按式 (19) 计算:

$$c_{p,fg} = \frac{c_{p,O_2}\varphi_{O_2,fg} + c_{p,CO_2}\varphi_{CO_2,fg} + c_{p,CO}\varphi_{CO,fg} + c_{p,SO_2}\varphi_{SO_2,fg} + c_{p,N_2}\varphi_{N_2,fg} + c_{p,NO}\varphi_{NO,fg} + c_{p,wv}\varphi_{wv,fg}}{\rho_{fg}} \quad (19)$$

式中：

$c_{p,O_2}$ 、 $c_{p,CO_2}$ 、 $c_{p,CO}$ 、 $c_{p,SO_2}$ 、 $c_{p,N_2}$ 、 $c_{p,NO}$ 、 $c_{p,wv}$ —— $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $CO$ 、 $SO_2$ 、 $N_2$ 、 $NO$ 和水蒸气的定压比热容， $J/(m^3 \cdot K)$ ；

$\rho_{fg}$ ——烟气密度， $kg/m^3$ 。

与烟气中其他组分相比， $CO$ 、 $NO$ 和 $SO_2$ 含量极少，在进行气体常数和比热容计算中也可忽略。

## 6.2 风机效率

### 6.2.1 风机空气功率按式 (20) 计算：

$$P_u = my_F \quad (20)$$

$y_F$ ——风机单位质量功， $J/kg$ 。按式 (21) 计算：

$$y_F = \frac{p_2 - p_1}{\rho_m} + \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \quad (21)$$

式中：

$v_1$ 、 $v_2$ ——风机进口、出口气体平均速度， $m/s$ 。按式 (22) 计算：

$$v_x = \frac{m}{\rho_x S_x} \quad (22)$$

$\rho_m$ ——平均密度， $kg/m^3$ 。按式 (23) 计算：

$$\rho_m = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \quad (23)$$

$\rho_1$ 、 $\rho_2$ ——风机进口、出口气体密度， $kg/m^3$ 。按式 (24) 计算：

$$\rho_x = \frac{p_x}{RT_x} \quad (24)$$

### 6.2.2 风机叶轮效率按式 (25) 计算：

$$\eta_r = \frac{P_u}{P_r} \quad (25)$$

式中：

$P_r$ ——叶轮功率， $W$ 。

### 6.2.3 风机轴效率按式 (26) 计算：

$$\eta_a = \frac{P_u}{P_a} \quad (26)$$

式中：

$P_a$ ——风机轴功率，W。

6.2.4 风机电动机轴效率按式（27）计算：

$$\eta_o = \frac{P_u}{P_o} \quad (27)$$

6.2.5 总效率按式（28）计算：

$$\eta_e = \frac{P_u}{P_e} \quad (28)$$

## 7. 不确定度分析

### 7.1 概述

7.1.1 标准不确定度评定内容包括标准不确定度 A 类评定、标准不确定度 B 类评定、标准不确定度传递、合成标准不确定度的计算等。

#### 7.1.2 不确定度分析原则

7.1.2.1 测量过程中随机效应和系统效应引起的不确定度均会导致测量不确定度。随机效应引起的不确定度与时间有关，可以用精密度表示随机误差的大小；系统效应引起的不确定度不随时间变化，可以用准确度表示系统误差的大小。虽然对已知的系统效应进行了修正，但被测量的结果依然是估计值，仍然有随机效应造成的不确定度和由于对系统效应修正不完善造成的不确定度。从不确定度评定方法上所做的 A 类评定、B 类评定的分类与产生不确定度的原因无任何联系，不应称为随机不确定度和系统不确定度。

7.1.2.2 测量不确定度一般由若干分量组成，每个分量用其概率分布的标准偏差估计值表征，称为标准不确定度。用标准不确定度表示的各分量用  $u_i$  表示。根据对  $X_i$ （输入量）的一系列测得值  $x_i$  得到实验标准偏差的方法为 A 类评定。根据有关信息估计的先验概率分布得到标准偏差估计值的方法为 B 类评定。A 类不确定度和 B 类不确定度本质是相同的，名称不同是为了区别他们是通过不同的方法被估计出来的。

#### 7.1.3 参数变化特性的模型

7.1.3.1 锅炉风机性能试验过程中烟气温度和成分等参数随空间或时间变化，是物理过程不应理解为试验偏差。

7.1.3.2 定值模型。假定被测量参数不随时间或空间变化，如测量管道外径、管壁厚度等。定值模型的算术平均值按式（29）计算，算术平均值的样本标准偏差按式（30）计算：

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \dots\dots\dots (29)$$

$$s(\bar{x}) = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (30)$$

7.1.3.3 连续变量模型。假定参数随时间、空间或二者连续变化，如测量温度、烟气成分等。连续变量模型的时间、空间变化平均值按式（31）计算。

$$\bar{y} = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} \left( \frac{1}{A} \int_0^A y dA \right) d\tau \dots\dots\dots (31)$$

## 7.2 标准不确定度的 A 类评定

### 7.2.1 概述

7.2.1.1 被测量不随时间变化。通过重复测量得到一系列符合相应标准规定（数据之间相差很小）的数据，然后计算出其平均值，测量值在平均值附近的分散性导致了平均值的 A 类不确定度。

7.2.1.2 被测量随时间变化。对被测量随时间而变化的速率，也称“漂移”速率，漂移通常有可能部分的（或者完全的）湮没于随机波动中，其不确定度由被测量测量值的分散程度来决定。

7.2.1.3 A 类标准不确定度评定通用公式。对被测量进行独立重复观测，通过所测得的一系列测得值，用统计分析方法获得实验标准偏差  $s(x)$ ，当用算术平均值  $\bar{x}$  作为被测量估计值时，被测量估计值的 A 类标准不确定度按公式（32）计算：

$$u_A = u(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{N}} \dots\dots\dots (32)$$

### 7.2.2 单个参数的标准不确定度

7.2.2.1 随时间进行，在单一点对某一参数进行多次测量时，实验标准偏差可按贝塞尔公式（33）计算：

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots (33)$$

被测量估计值的 A 类标准不确定度（平均值的实验标准偏差）按公式（34）计算：

$$u_A = \frac{s(x_k)}{\sqrt{N}} \dots\dots\dots (34)$$

自由度按式（35）计算：

$$\nu = N - 1 \dots\dots\dots (35)$$

7.2.2.2 积分平均参数（加权或非加权平均值），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，按式（36）计算：

$$\bar{x}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_j)_i \dots\dots\dots (36)$$

式中：

$i$  - 随时间进程，网格中的点的读数次数；

$j$ -网格中的点;

实验标准偏差、平均值的实验标准偏差以及自由度是在每一网格点计算的,也就是把该参数视为定值。积分平均参数的标准不确定度按式(37)计算:

$$u_A = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N ((x_j)_i - (\bar{x}_j))^2}{N(N-1)}} \dots\dots\dots (37)$$

式中:

$m$ -网格点数;

相关自由度按式(38)计算:

$$v = m \cdot N - 1 \dots\dots\dots (38)$$

### 7.2.3 中间结果的标准不确定度和自由度

7.2.3.1 概述。在锅炉风机性能试验过程中,某些项目由其他检测数据计算得到。一般可以通过两种方法计算标准不确定度,第一种,在求平均值前将数据先转换成中间结果,然后计算结果的标准不确定度;第二种,用标准不确定度传递公式,并结合中间结果与测量参数间的关联式。

7.2.3.2 几种特定情况的计算方法。

a) 形如  $z = C\sqrt{x}$  的参数。首先将测量值  $x_i$  转换成  $z_i$ , 然后,由  $z_i$  计算  $z$  的平均值、实验标准偏差和标准不确定度。

b) 形如  $z = a_0 + a_1\bar{x} + a_2\bar{x}^2 + \dots + a_n\bar{x}^n$  的参数。求样本平均值标准不确定度的公式(32)可以应用于只有一个变量的函数,如  $z = a_0 + a_1\bar{x} + a_2\bar{x}^2 + \dots + a_n\bar{x}^n$ , 变量为  $\bar{x}$ , 则  $\bar{x}$  的灵敏系数按式(39)计算:

$$c_x = \frac{\partial z}{\partial x} = a_1 + 2a_2\bar{x} + \dots + na_n\bar{x}^{n-1} \dots\dots\dots (39)$$

其标准不确定度按式(40)计算:

$$u_A = \sqrt{[c_x \cdot s(\bar{x})]^2} \dots\dots\dots (40)$$

c) 对于使用累积法测量电量的,一般 A 类标准不确定可以忽略。

### 7.2.4 试验结果的标准不确定度和自由度

7.2.4.1 如果试验结果是某一测量参数,则结果的标准不确定度和自由度也就是参数本身的标准不确定度和自由度值。如果试验结果必须由试验数据计算得到,例如锅炉风机流量,则结果的标准不确定度和自由度应由各个参数的对应值计算得到。

7.2.4.2 标准不确定度的组合按式(41)计算:

$$u_A = \left\{ \sum_{i=1}^n [c_{x_i} \cdot s(\bar{x}_i)]^2 \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (41)$$

式中:

$c_{x_i}$  -被测量  $R$  与有关的输入量  $X_i$  之间的函数对于输入量的估计值  $x_i$  的偏导数, 称为灵敏系数,

$$c_{x_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i};$$

$n$  -用来计算  $R$  的参数总数。

7.2.4.3 自由度组合按式 (42) 计算:

$$v_{s(\bar{x})} = \frac{[s(\bar{x})]^4}{\sum_{i=1}^k \frac{[c_{x_i} \cdot s(\bar{x}_i)]^4}{v_{x_i}}} \dots\dots\dots (42)$$

7.2.4.4 一般在测量次数较少时, 可采用极差法评定以获得实验标准偏差。在重复性条件或复现性条件下, 对  $X_i$  进行  $n$  次独立重复观测, 测得值中的最大值与最小值之差称为极差, 用符号  $R_a$  表示。在  $X_i$  接近高斯分布的前提下, 单个测得值  $x_k$  的实验标准偏差按式 (43) 进行评定。

$$s(x_k) = \frac{R_a}{C_a} \dots\dots\dots (43)$$

式中:

$R_a$  -极差;

$C_a$  -极差系数。

极差系数  $C_a$  及自由度  $v$  可查表3得到。

表 3 极差系数  $C_a$  及自由度  $v$

$n$	2	3	4	5	6	7	8	9
$C_a$	1.13	1.69	2.06	2.33	2.53	2.70	2.85	2.97
$v$	0.9	1.8	2.7	3.6	4.5	5.3	6.0	6.8

被测量估计值的标准不确定度按式 (44) 计算:

$$u_A = s(\bar{x}) = s(x_k) / \sqrt{n} = \frac{R_a}{C_a \sqrt{n}} \dots\dots\dots (44)$$

7.2.4.5 对锅炉风机流量和效率, 本文件推荐使用扰动法近似计算灵敏系数, 每次使一个参数变化一微小量  $\delta x_i$ , 其他参数保持不变, 评估试验结果计算值的变化量  $\delta R$ 。灵敏系数按式 (45) 计算:

$$c_{x_i} = \frac{\partial R}{\partial x_i} \approx \frac{\delta R}{\delta x_i} \dots\dots\dots (45)$$

式中:

$\delta x_i$  -某一微小量, 如  $x_i / 100$  或  $x_i / 1000$ 。

### 7.3 标准不确定度的 B 类评定

#### 7.3.1 仪表的 B 类标准不确定度

7.3.1.1 B 类标准不确定度  $u_B$  由式 (46) 计算:

$$u_B = \frac{a}{k} \dots\dots\dots (46)$$

式中:

$a$  - 被测量可能值区间的半宽度。

$k$  - 根据概率论获得的 $k$ 称为置信因子，当 $k$ 为扩展不确定度的倍乘因子时称为包含因子。

7.3.1.2 区间半宽  $a$  应符合 GB/T 27418 的要求，部分确定方法举例如下：

- a) 生产厂提供的测量仪器的最大允许误差为 $\pm\Delta$ ，并经计量部门检定合格，则评定仪器的不确定度时，可能值区间的半宽度为 $a = \Delta$ ；
- b) 校准证书提供的校准值，给出了其扩展不确定度为 $U$ ，则区间的半宽度为 $a = U$ 。
- c) 由手册查出所用的参考数据，其误差限为 $\pm\Delta$ ，则区间的半宽度为 $a = \Delta$ ；
- d) 由有关资料查得某参数的最小可能值 $a_-$ 和最大可能值为 $a_+$ ，最佳估计值为该区间的中点，则区间半宽度可估计为 $a = (a_+ - a_-) / 2$ ；
- e) 当测量仪器或实物量具给出准确度等级时，可以按检定规程规定的该等级的最大允许误差得到对应区间的半宽度。
- f) 必要时，可根据经验推断某量值不会超出的范围，或用实验方法来估计可能的区间。

7.3.1.3 当符合高斯分布时，概率  $p$  和置信因子  $k$  的关系见表 4。当不符合非高斯分布时，不同分布类别的置信因子  $k$  及 B 类标准不确定  $u_B$  查表 5 得到。

表 4 高斯分布情况下概率  $p$  与包含因子  $k$  间的关系

$p$	0.50	0.68	0.90	0.95	0.9545	0.99	0.9973
$k$	0.675	1	1.645	1.960	2	2.576	3

表 5 常用非高斯分布的包含因子  $k$  及 B 类标准不确定度  $u_B$

分布类别	$p/\%$	$k$	$u_B$
三角形	100	$\sqrt{6}$	$a / \sqrt{6}$
梯形 ( $\beta=0.71$ )	100	2	$a / 2$
矩形 (均匀)	100	$\sqrt{3}$	$a / \sqrt{3}$
反正弦	100	$\sqrt{2}$	$a / \sqrt{2}$
两点	100	1	$a$

7.3.1.4 如果有证书或报告给出的不确定度是具有包含概率为 0.95、0.99 的扩展不确定度，可按高斯分布来评定。其他的概率分布按 JJF1059.1 的规定进行评定。

7.3.1.5 如果仪表系统的每一部分均有各自的 B 类标准不确定度，则测量的组合 B 类标准不确定度按式 (47) 计算：

$$u_B = (u_{B_1}^2 + u_{B_2}^2 + \dots + u_{B_m}^2)^{1/2} \dots\dots\dots (47)$$

式中：  
 $m$ -系统的各个组成部分。

7.3.1.6 在某一点用一台仪器进行多次测量时，例如，用相同的热电偶在烟道横截面上若干点测量温度，参数平均值的 B 类标准不确定度为单次测量的仪表 B 类标准不确定度，按式 (48) 计算：

$$u_{\bar{x}} = u_{\bar{x}_i} \dots\dots\dots (48)$$

式中:

$u_{\bar{x}}$  -平均参数的B类标准不确定度;

$u_{\bar{x}_i}$  -仪表回路*i*的B类标准不确定度。

7.3.1.7 在若干位置用多台仪表进行多次测量时,例如,用固定热电偶网格点测量平均烟气温度,所有仪表回路均具有相同的B类标准不确定度,例如,每一热电偶加补偿导线、数据装置等组成的回路B类标准不确定度相同,平均参数的B类标准不确定度等于任一回路的仪表B类标准不确定度。仪表不同回路中具有不同的B类标准不确定度。平均参数的仪表B类标准不确定度等于所有回路的仪表B类标准不确定度的平均值,按式(49)计算:

$$u_{\bar{x}_i} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{B_{xi}} \dots\dots\dots (49)$$

式中:

$N$ -不同仪表回路的个数。

### 7.3.2 对未测参数数值假设值的B类标准不确定度评定

某假设参数的合理“上下限”值间的中点通常取作性能计算中该参数的值。本文件推荐采用“上下限”值之差值的一半作为B类标准不确定度。

### 7.3.3 B类标准不确定度的自由度

B类标准不确定度的自由度按式(50)近似计算,详细描述见JJF1059.1。一般情况下,B类评定的标准不确定度可以不用给出其自由度。

$$v_i \approx \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta[u(x_i)]}{u(x_i)} \right]^2 \dots\dots\dots (50)$$

式中:

$\frac{\Delta[u(x_i)]}{u(x_i)}$  - $u(x_i)$ 的相对标准不确定度。

### 7.3.4 试验结果的标准不确定度B类评定

由测量参数值和假设参数值计算的某一结果的整体B类标准不确定度可以用式(51)计算,该公式假设导致测量不确定度的各分量 $u_B(x_i)$ 相互间不相关。

$$u_B(R) = \left\{ \sum_{i=1}^k [c_{x_i} \cdot u_B(x_i)]^2 \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (51)$$

式中:

$u_B(R)$ 的自由度按式(52)计算:

$$v_{u_B(R)} = \frac{[u_B(R)]^4}{\sum_{i=1}^k \frac{[c_{x_i} \cdot u_B(x_i)]^4}{v_{u_B(x_i)}}} \dots\dots\dots (52)$$

7.4 标准不确定度传递

因为A类评定和B类评定方法不同，所以，分别计算各自的传递，然后在不不确定度计算的最后一步合并起来。假设某一个结果的计算式为式（53）：

$$R = f(x_1, x_2, \dots, x_M) \dots\dots\dots (53)$$

式中：

$x_1 \sim x_M$  -独立的被测量。

每个 $x$ 都可以使用A类标准不确定度和B类标准不确定度进行评定。对每一类型的不确定度，其基本传递方程为式（54）：

$$e_R = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} e_{x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} e_{x_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial f}{\partial x_M} e_{x_M} \right)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (54)$$

式中：

$e$  -标准不确定度；

$M$  -独立被测量的数目。

传递方程可写为无因次型式，见式（55）：

$$\frac{e_R}{R} = \left\{ \sum_{i=1}^M \left[ \left( \frac{x_i}{R} \frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \frac{e_{x_i}}{x_i} \right]^2 \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (55)$$

式中：

$e_{x_i}$  -  $x_i$  的不确定度；

$\left( \frac{x_i}{R} \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)$  -相对灵敏系数。

因为计算过程复杂，这些导数常用数值扰动法来估计，即式（56）：

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{f(x_1, \dots, x_i + \delta x_i, \dots, x_M) - f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_M)}{\delta x_i} \dots\dots\dots (56)$$

每次一个参数，依次将每个参数( $x_i$ )改变一个小量 ( $\delta x_i$ ，一般是0.1%~1%)，用扰动参数代替标称值，所有其他参数维持不变，重新进行计算。用扰动计算的结果值与标称值计算的结果间的差值除以扰动量来估计偏导数。每一独立参数计算一次。

7.5 合成标准不确定度的计算

某一试验结果的A类标准不确定度和B类标准不确定度按式（57）组合为试验的标准不确定度。

$$u_c(R) = \left\{ [u_A(R)]^2 + [u_B(R)]^2 \right\}^{1/2} \dots\dots\dots (57)$$

式中：

试验结果  $u_c(R)$  的自由度由式（58）计算得到：

$$v_{u_c(R)} = \frac{\left\{ [u_A(R)]^2 + [u_B(R)]^2 \right\}^2}{\frac{[u_A(R)]^4}{v_{u_A(R)}} + \frac{[u_B(R)]^4}{v_{u_B(R)}}} \dots\dots\dots (58)$$

式中：

$v_{u_A(R)}$  - A 类标准不确定度的自由度；

$v_{u_B(R)}$  - B 类标准不确定度的自由度。

## 7.6 扩展不确定度的评定方法

扩展不确定度  $U$  由合成标准不确定度  $u_c(R)$  乘包含因子  $k$  得到，按公式 (59) 计算。

$$U = k \cdot u_c(R) \dots\dots\dots (59)$$

在通常测量中，一般取  $k = 2$ 。当  $k$  取其他值时，应说明其来源。当给出扩展不确定度  $U$  时，一般应注明所取的  $k$  值；若未注明  $k$  值，则指  $k = 2$ 。

## 8. 试验报告

试验报告至少应包括以下内容：

### a) 摘要

表明风机的配置和型式、试验的原因、规定的风机性能、在规定运行条件下测量的风机性能和由试验结果得出的结论；

### b) 试验基本信息

表明试验目的、试验负责人和各方试验代表，应清楚标明制造厂家、风机的型式、系列号、所有者和地点、规定的风机性能、规定的运行条件等；

### c) 测试项目、仪器设备、测点布置和试验方法

包括确定的测试项目、使用的仪器设备及检定（校准）单位、测点位置、必要的测点安装图、各试验项目的进行顺序等；

### d) 试验数据整理

包括记录的测量数据和计算结果，如用了减少原始数据的技术，应在本节说明；

### e) 试验结果分析

试验结果应用清楚得格式表示出来，应讨论和分析试验获得的结果和意见。

### f) 结论

应简要叙述或逐条列出由试验结果获得的结论。

### g) 附件

包括所有记录结果，必要时可附有原始记录、采用的测量技术及仪表的补充说明、附件等的复印件。

## 附录 A

### (资料性附录)

#### 风机流量计算公式推导过程

气体流经风机时，能量方程如式 (A.1) 所示：

$$m_F h_1 + \frac{1}{2} m_F v_1^2 + m_F g z_1 + P_a = m_F h_2 + \frac{1}{2} m_F v_2^2 + m_F g z_2 + Q \quad (\text{A.1})$$

式中：

$h_1$  —— 风机进口气体焓，J/kg；

$h_2$  —— 风机出口气体焓，J/kg；

$z_1$  —— 风机进口高度，m；

$z_2$  —— 风机出口高度，m；

$g$  —— 地球重力加速度， $\text{m/s}^2$ 。

一般而言，风机进出口高度差较小， $z_1 \approx z_2$ 。风机进出口各参数满足如下方程：

$$P_a - Q = c_p m_F (T_2 - T_1) + \frac{1}{2} m_F (v_2^2 - v_1^2) \quad (\text{A.2})$$

式中：

$v_1$ 、 $v_2$  按式 (A.3) 计算：

$$v_x = \frac{m_F}{\rho_x S_x} = \frac{m_F R_g T_x}{S_x p_x} \quad (\text{A.3})$$

代入式 (A.2) 可得：

$$P_a - Q = c_p m_F (T_2 - T_1) + \frac{m_F^3 R_g^2}{2} \left( \frac{T_2^2}{S_2^2 p_2^2} - \frac{T_1^2}{S_1^2 p_1^2} \right) \quad (\text{A.4})$$

求解式 (A.4) 可得风机流量  $m_F$ 。

## 附录 B

(资料性附录)

### 风机试验数据记录

表 B.1 风机静压、温度测量记录

试验日期：\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日                      试验编号：\_\_\_\_\_  
风机功能：\_\_\_\_\_ 风机编号：\_\_\_\_\_ 风机型号：\_\_\_\_\_  
用户：\_\_\_\_\_ 锅炉编号：\_\_\_\_\_  
风机进口面积：\_\_\_\_\_ 风机出口面积：\_\_\_\_\_  
记录人：\_\_\_\_\_ 审核人：\_\_\_\_\_

序号	名称	单位	工况I	工况II
1	记录时间	/		
2	大气压力	Pa		
3	环境温度	°C		
4	风机进口静压	Pa		
5	风机进口温度	°C		
6	风机出口静压	Pa		
7	风机出口温度	°C		
8	风机调节门就地开度	%		

表 B.2 风机消耗功率测量记录

试验日期：\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_日      试验编号：\_\_\_\_\_  
 风机功能：\_\_\_\_\_风机编号：\_\_\_\_\_风机型号：\_\_\_\_\_  
 用户：\_\_\_\_\_锅炉编号：\_\_\_\_\_  
 电机型号：\_\_\_\_\_额定功率：\_\_\_\_\_额定转速：\_\_\_\_\_  
 额定电压：\_\_\_\_\_额定电流：\_\_\_\_\_额定效率：\_\_\_\_\_  
 电流互感比值：\_\_\_\_\_电压互感器比值：\_\_\_\_\_电能表常数：\_\_\_\_\_  
 测量位置：\_\_\_\_\_仪表校验系数：\_\_\_\_\_  
 记录人：\_\_\_\_\_审核人：\_\_\_\_\_

测量方法	功率表法		电能表法	电压电流法			转速		
	$W_1$	$W_2$	每 10 转时间	电压	电流	功率因数	r/min	滑差	电源频率
平均									

表 B.3 烟气分析和环境条件

试验日期：\_\_\_\_\_年\_\_\_\_\_月\_\_\_\_\_日      试验编号：\_\_\_\_\_  
 风机功能：\_\_\_\_\_风机编号：\_\_\_\_\_风机型号：\_\_\_\_\_  
 用户：\_\_\_\_\_锅炉编号：\_\_\_\_\_  
 测量位置：\_\_\_\_\_仪器型号：\_\_\_\_\_仪器编号：\_\_\_\_\_  
 记录人：\_\_\_\_\_审核人：\_\_\_\_\_

测量时间	进口侧			出口侧			环境条件		
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	干球温度	湿球温度	大气压力
平均									