

风机性能测试不确定度评定

裘俊¹, 应金源¹, 陈坤¹, 孟令飞¹, 茅忠明², 陈彪³

(1. 浙江省机电产品质量检测所, 杭州 310051; 2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

3. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 以风机抽检产品的风机流量、压力、效率等关键性能指标的测试结果进行不确定度分析, 确定本次测试的不确定度, 对各个仪表在测试过程中对不确定度的影响进行评估, 得出关键性能测试过程中主要测试仪表选取的指导意见. 对风机流量、压力和效率进行了公式推算, 对风机性能测试过程中的各个基本测量量进行不确定度分析.

关键词: 风机流量; 风机效率; 风机压力; 不确定度

中图分类号: TH 432 **文献标志码:** A

Uncertainty Assessment of Fan Performance

QIU Jun¹, YING Jinyuan¹, CHEN Kun¹, MENG Lingfei¹, MAO Zhongming², CHEN Biao³

(1. Zhejiang Testing Inspection Institute for Mechanical and Electrical Products Quality, Hangzhou 310051, China; 2. School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 3. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: An analysis on the uncertainty was made for the results of sampling of a certain product based on three key performance indicators, i. e. fan flow rate, pressure and efficiency. Getting the uncertainty of the test and evaluating each instrument's contribution to the uncertainty in the test process, the choosing guideline of main test equipment was obtained. The formulas for calculating the fan flow rate, pressure and efficiency were presented and the uncertainty for each measurement parameter in the test was analyzed.

Key words: fan flow rate; fan efficiency; fan pressure; uncertainty

在风机性能测试过程中, 由于测试方法、仪器精度、环境和人为因素的影响, 使得测试的结果与真值间存在一定的误差. 由于真值的未知性质, 误差也是未知的, 但是, 被测量参数值的不确定度是可以估计的. 不确定度表征了被测量参数值的分散性, 通过不确定度可以估计被测量参数结果的可信度.

为了解可直接测量的参数对风机性能测试结果

的准确度和可信度的影响, 找出对测试影响较大的环节, 对产品性能测试数据正确度有一个基本的评估, 本文对国标 GB/T 1236-2000《工业风机用标准化风道进行性能试验》中 C 型装置风机主要性能(风机流量、风机压力、风机效率), 依据中华人民共和国国家计量技术规范 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》进行不确定度分析和评估^[1], 估

收稿日期: 2014-10-20

基金项目: 浙江省科学技术厅科技条件建设项目(2013F0074)

第一作者: 裘俊(1981-), 男, 工程师. 研究方向: 流体机械、风机检测. E-mail: 36119688@qq.com

计出风机性能测试结果的可信度,为用户选择风机提供参考依据.

1 基本测量的不确定度分析

风机性能测试过程中直接测量得到的量为基本量,主要是空气温度、湿度、压力、喷嘴直径及功率等,这些基本量的准确度直接影响风机的主要性能.对这些基本量的不确定度评定有A类评定,即用统计方法估计不确定度,可采用重复测试得到.还有B类评定,即依据其他信息估计的不确定度,这些信息主要来自于生产厂家的技术说明书,将仪器误差限以一定的置信概率换算成标准不确定度来表示.

A类评定的计算标准不确定度^[1]

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (1)$$

式中: x_i 为一组测量 n 个重复读数; $\bar{x}$ 为测量平均值(或标称值).

自由度 $\nu_A(x) = n - 1$.

B类评定的计算不确定度^[1]:

a. 数据采集仪器对测量不确定度的影响,一般按说明书,仪器的误差限为 C ,均匀分布,其可信度为100%,则仪器产生的不确定度 $u_1(x) = \frac{C}{\sqrt{2}}$,自由度 $\nu_1(x) = \infty$.

b. 传感器对测量不确定度的影响,传感器最大误差为 y ,正态分布,可信度为80%(不确定度20%),则产生的不确定度分量 $u_2 = \frac{y}{2.58}$,自由度

$$\nu_2(x) = \frac{1}{2 \times 0.2^2} = 12.5$$

c. 合成不确定度

$$u(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_1^2(x) + u_2^2(x)} \quad (2)$$

根据GB/T 1236-2000,以C型装置为例,装置图如图1所示^[2],采用90°弧进口喷嘴测定流量.

分析中被测风机为9-26No12.5D,喷嘴和风管直径为710 mm,实测大气压为100.949 kPa,喷嘴压差为569.85 Pa,风管压力为8 029.44 Pa,空气干球温度为33℃,空气湿度为60.3%,功率变送器读数为1.53 kW,电流互感器变比为100.根据测试结果对风机的主要性能参数进行不确定度评定.

测量结果的不确定度与每次测试过程的多种因素有关.本次测试采用的仪器有安捷伦的数据采集仪、横河的压力变送器、维萨拉湿度传感器.功率

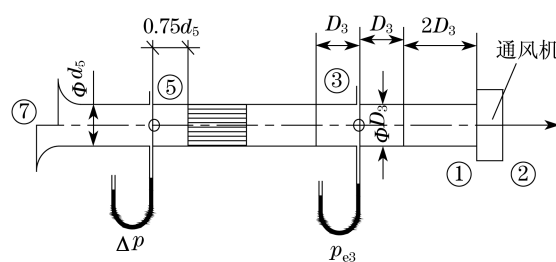


图1 90°弧进口喷嘴及风机示意图

Fig.1 Schematic diagram of 90° arc inlet nozzle and the ventilator

测量采用电测法,转速测量采用红外脉冲,温度测量采用铂电阻温度计.

通过计算机自动采集进风干球温度 t_a 、环境湿度 h_a 、大气压力 p_a 、喷嘴压差 Δp 、风管压力 p_{e3} 并进行A类和B类标准不确定度评定,再合成计算性能参数的不确定度.

安捷伦数据采集仪的分辨率达 2^{21} ,包含因子 $K=2$ 给出的相对扩展不确定度为 $4 \times 10^{-5} \%$,其相对标准不确定度为 $2 \times 10^{-5} \%$.在采集过程中,可以通过对采集仪滤波常数进行设置(参见安捷伦说明书^[3])并加以偏振数据处理,求得的基本参数A类不确定度比较B类不确定度可以忽略不计,在不确定度分析中,不计入安捷伦数据采集仪的影响.本文对除去喷嘴直径外的其他基本参数不确定度的分析主要依据变送器的技术文献进行B类不确定度评定.

1.1 喷嘴直径的不确定度

在风量测试过程中,喷嘴直径以45°角划分4个测量点,用0.2级1 m钢直尺测量标称直径 d 为710 mm的文丘里喷嘴,分别测得直径 d_i ,可得A类标准不确定度

$$u_A(d) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d - d_i)^2}{n(n-1)}} = 2.137 6 \text{ mm}$$

0.2级1 m钢直尺误差限

$$(0.2\%X + 0.1\%L) = 0.3 \text{ mm}$$

式中: X 为测量值; L 为量程.

喷嘴直径的B类不确定度

$$u_B(d) = \frac{0.3}{\sqrt{3}} = 0.173 2 \text{ mm}$$

喷嘴直径引起的合成不确定度

$$u(d) = \sqrt{u_A^2(d) + u_B^2(d)} = 2.144 6 \text{ mm} \quad (3)$$

相对合成不确定度

$$\frac{u(d)}{d} = 0.302 1 \% \quad (4)$$

1.2 大气压力和大气湿度的不确定度^[4]

大气压力和大气湿度的测量是计算空气密度 ρ_a 不可缺少的量. 大气压力的测量选用横河 EJA530 压力变送器, 量程为 90~110 kPa, 误差限为 $\pm[0.05\%X + 0.15\%L]$, 当实测大气压为 100.949 kPa 时, 其置信半区间宽度为

$$100\,949 \times 0.05\% + 110\,000 \times 0.15\% = 215.4 \text{ Pa}$$

按正态分布置信概率 95%, 包含因子 $k_p = 1.96$, 可求得大气压力的不确定度

$$u(p_a) = \frac{215.4}{1.96} = 109.94 \text{ Pa} \quad (5)$$

湿度的测量选用维萨拉 HMW83 湿度变送器, 允许误差限为 $\pm 3\% \text{ RH}$, 其标准不确定度

$$u(h_u) = \frac{3.0}{\sqrt{3}} = 1.732\% \quad (6)$$

1.3 喷嘴压差和风管压力的不确定度

喷嘴压差 Δp 的测量选用横河 EJA110-L 压力变送器, 量程为 2 kPa, 风管压力 p_{e3} 测量选横河 EJA110-M 压力变送器, 量程为 10 kPa, 误差限为 $\pm[0.025\%X + 0.05\%L]$. 当喷嘴压差测得 569.85 Pa 和风管压力测得 8 029.44 Pa 时, 分别计算喷嘴压差和风管压力的不确定度

$$u(\Delta p) = \frac{1.142\,4}{1.96} = 0.582\,8 \text{ Pa} \quad (7)$$

$$u(p_{e3}) = \frac{5.149\,2}{1.96} = 2.627\,1 \text{ Pa} \quad (8)$$

1.4 进风干球温度的不确定度

干球温度的测定采用铂电阻温度计 Pt 100, 铂电阻温度计的精度为 $\pm 0.05\,^\circ\text{C}$, 其不确定度

$$u(t_a) = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029\,^\circ\text{C} \quad (9)$$

1.5 电机输入功率的不确定度

功率变送器为 0.2 级, 量程为 0~4 kW, 电流互感器 0.2 级, 变比 $k_e = 500/5$, 又电机输入功率 $P_e = k_e P$, P 为功率, 变送器测量值、允许误差限均为 $0.2\%L$, 均匀分布, 可得不确定度

$$u(P_e) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_e}{\partial P}\right)^2 u^2(P) + \left(\frac{\partial P_e}{\partial k_e}\right)^2 u^2(k_e)} = 0.245 \text{ kW} \quad (10)$$

2 风机流量不确定度分析

风机流量的测量原理是根据流体通过喷嘴节流装置, 使部分压力能转变为动能而产生差压信号; 由流体连续性方程和伯努利方程可推得质量流量方

程式^[2,5-6].

质量流量

$$q_m = \frac{\alpha \epsilon \pi d_5^2}{4} \sqrt{2 \rho_7 \Delta p} \quad (11)$$

容积流量

$$q_v = \frac{q_m}{\rho_a} = \alpha \epsilon \pi d_5^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{8 \rho_a}}$$

流量系数

$$\alpha = \frac{0.985\,8 - 0.196 \beta^{4.5}}{(1 - \beta^4)^{0.5}}$$

对自由进口流量计而言, 直径比

$$\beta = \frac{d}{D} = 0, \quad D \rightarrow \infty$$

膨胀系数

$$\epsilon = \left[\frac{k r_d^{\frac{2}{k}}}{k-1} \frac{1 - r_d^{\frac{k-1}{k}}}{1 - r_d} \right]^{0.5} \approx 1 - 0.55 \frac{\Delta p}{p_a}$$

式中: ρ_7 为喷嘴进口气体平均密度; d_5 为喷嘴直径; D 为上游风道的直径; $k = 1.4$; $r_d = 1 - \frac{\Delta p}{p_a}$.

可得质量流量不确定度计算式为^[7]

$$u^2(q_m) = \left(\frac{\partial q_m}{\partial \alpha}\right)^2 u^2(\alpha) + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \epsilon}\right)^2 u^2(\epsilon) + \left(\frac{\partial q_m}{\partial d_5}\right)^2 u^2(d_5) + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \rho_7}\right)^2 u^2(\rho_7) + \left(\frac{\partial q_m}{\partial \Delta p}\right)^2 u^2(\Delta p) \quad (12)$$

2.1 流量系数的不确定度

根据国标 GB/T 1236-2000 的 C 型装置, 文丘里进口流量计的雷诺数大于 10^5 时, 流量系数与雷诺数无关. 流量系数最大误差为 0.017^[1]. 按正态分布, 置信度 80% 计, 则流量系数 α 的不确定度

$$u(\alpha) = \frac{0.017}{2.58} = 6.59 \times 10^{-3} \quad (13)$$

2.2 膨胀系数的不确定度

由膨胀系数 $\epsilon = 1 - 0.55 \frac{\Delta p}{p_a}$, 其不确定度

$$u(\epsilon) = \sqrt{\left(\frac{\partial \epsilon}{\partial \Delta p}\right)^2 u^2(\Delta p) + \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial p_a}\right)^2 u^2(p_a)}$$

当喷嘴压差 $\Delta p = 569.85 \text{ Pa}$ 时,

$$u(\epsilon) = 3.202 \times 10^{-9} \quad (14)$$

由于量级很小, 因此, 膨胀系数的不确定度可忽略不计.

2.3 气体密度的不确定度

图 1 中截面 7 的气体平均密度 $\rho_7 = \rho_a$

$$\rho_a = \frac{p_a}{R_w(t_a + 273.15)}$$

气体常数

$$R_w = \frac{287}{1 - 0.378 p_v / p_a}$$

$$p_v = h_u \exp \left[\frac{17.438 t_a}{239.78 + t_a} + 6.4147 \right]$$

式中, p_v 为 t_a 对应的饱和蒸汽压力。

推导得到密度计算式为

$$\rho_7 = \frac{p_a - 0.378 h_u \exp \left(\frac{17.438 t_a}{239.78 + t_a} + 6.4147 \right)}{287(t_a + 273.15)}$$

根据式(3)可推得密度不确定度

$$u^2(\rho_7) = \left(\frac{\partial \rho_7}{\partial p_a} \right)^2 u^2(p_a) + \left(\frac{\partial \rho_7}{\partial t_a} \right)^2 u^2(t_a) + \left(\frac{\partial \rho_7}{\partial h_u} \right)^2 u^2(h_u) \quad (15)$$

当测量值大气压为 100 949 Pa, 空气干球温度为 33 °C, 空气湿度为 60.3% 时, 计算可得

$$u(\rho_7) = 1.31 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$$

求得各基本量的标准不确定度之后, 再推导出各自偏导数, 可以计算各分量的不确定度。

$$\left(\frac{\partial q_m}{\partial \alpha} \right)^2 u^2(\alpha) = 8.73 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$\left(\frac{\partial q_m}{\partial d_5} \right)^2 u^2(d_5) = 7.77 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

$$\left(\frac{\partial q_m}{\partial \rho_7} \right)^2 u^2(\rho_7) = 4.41 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

$$\left(\frac{\partial q_m}{\partial \Delta p} \right)^2 u^2(\Delta p) = 1.01 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$$

2.4 流量的合成不确定度

通过式(12)各对应分量的计算, 得到合成质量流量不确定度

$$u(q_m) = 0.016894 \text{ kg/s} \quad (16)$$

质量流量的百分率不确定度

$$\frac{u(q_m)}{q_m} = 0.121\% \quad (17)$$

3 风机压力不确定度分析

在风机性能试验中, 除了风机压力以外, 风量测

$$u(p_{sg1}) = \sqrt{\left(\frac{\partial p_{sg1}}{\partial p_3} \right)^2 u^2(p_3) + \left(\frac{\partial p_{sg1}}{\partial q_m} \right)^2 u^2(q_m) + \left(\frac{\partial p_{sg1}}{\partial R_w} \right)^2 u^2(R_w) + \left(\frac{\partial p_{sg1}}{\partial \Theta_3} \right)^2 u^2(\Theta_3) + \left(\frac{\partial p_{sg1}}{\partial Re_{D_3}} \right)^2 u^2(Re_{D_3})} \quad (20)$$

根据测量值和计算得到的各分量不确定度, 由式(20)合成得进口压力不确定度

$$u(p_{sg1}) = 110.896 \text{ Pa} \quad (21)$$

由式(20)可以得到风机出口压力的合成不确定度

试同样也是借助于压力来完成的, 通过对风机压力的计算推导, 分析出影响风机压力的因素, 推导和计算出压力的不确定度, 得到压力测试的可信度评估。

3.1 风机压力计算推导

根据国家标准^[2], 风机进口压力 p_{sg1} 按下式进行计算:

$$p_{sg1} = p_3 + \frac{\rho_3 V_3^2}{2}; \quad \rho_3 = \frac{p_3}{R_w \Theta_3}; \quad p_3 = p_{e3} + p_a$$

式中, ρ_3 , V_3 , p_3 分别为截面 3 的气体密度、速度和压力。

考虑截面 1—3 的损失(系数 ζ_{1-3}), 得到风机进口压力^[2,5]

$$p_{sg1} = p_3 + \frac{8q_m^2}{\pi^2 D_3^4 \rho_3} [1 - (\zeta_{1-3})_3] \quad (18)$$

$$(\zeta_{1-3})_3 = 0.015 + 1.26 (Re_{D_3})^{-0.3}$$

$$Re_{D_3} = \frac{4q_m}{15\pi D_3 \rho_3} \times 10^6$$

$$p_3 = p_{e3} + p_a$$

$$\Theta_3 = \Theta_{sg3} = \Theta_{sg1} = \Theta_a = t_a + 273.15$$

式中: $(\zeta_{1-3})_3$ 为截面 1—3 的常规损失系数, 用截面 3 计算; Re_{D_3} 为截面 3 的雷诺数; Θ_a 为大气温度; Θ_3 为截面 3 的静态温度; Θ_{sg1} , Θ_{sg3} 分别为截面 1, 3 的滞止温度。

风机出口压力 p_{sg2} 按下式进行计算^[2]:

$$p_{sg2} = p_2 + \frac{1}{2\rho_2} \left(\frac{q_m}{A_2} \right)^2 \quad (19)$$

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R_w \Theta_{sg2}}$$

$$\Theta_{sg2} = \Theta_{sg3} + \frac{P_c}{q_m c_p}$$

$$p_2 = p_a$$

式中: ρ_2 , p_2 , A_2 分别为截面 2 的气体密度、压力和面积; Θ_{sg2} 为截面 2 的滞止温度; c_p 为比定压热容。

风机压力

$$p_{Ft} = p_{sg2} - p_{sg1}$$

3.2 风机压力不确定度计算

由式(18)可以得到风机进口压力的合成不确定度

$$u^2(p_{sg2}) = \left(\frac{\partial p_{sg2}}{\partial p_2} \right)^2 u^2(p_2) + \left(\frac{\partial p_{sg2}}{\partial q_m} \right)^2 u^2(q_m) +$$

$$\left(\frac{\partial p_{sg2}}{\partial \rho_2} \right)^2 u^2(\rho_2) + \left(\frac{\partial p_{sg2}}{\partial A_2} \right)^2 u^2(A_2) \quad (22)$$

根据已计算得到的各分量, 由式(22)中各项合

成得到出口压力的合成不确定度

$$u(p_{sg2}) = 111.106 \text{ Pa} \quad (23)$$

最后,风机压力的合成不确定度

$$u(p_{Ft}) = \sqrt{u^2(p_{sg1}) + u^2(p_{sg2})} = 156.979 \text{ Pa} \quad (24)$$

风机压力的百分率不确定度

$$\frac{u(p_{Ft})}{p_{Ft}} = 0.177\% \quad (25)$$

4 风机效率不确定度分析

风机的效率为风机空气功率和电机输入功率之比,风机空气功率^[2,5]

$$u(P_{ut}) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{ut}}{\partial q_m}\right)^2 u^2(q_m) + \left(\frac{\partial P_{ut}}{\partial R_w}\right)^2 u^2(R_w) + \left(\frac{\partial P_{ut}}{\partial \Theta_{sg1}}\right)^2 u^2(\Theta_{sg1}) + \left(\frac{\partial P_{ut}}{\partial p_{sg1}}\right)^2 u^2(p_{sg1}) + \left(\frac{\partial P_{ut}}{\partial p_{sg2}}\right)^2 u^2(p_{sg2})}$$

由已计算得到的各分项不确定度合成,得到风机空气功率的不确定度

$$u(P_{ut}) = 1\,199.06 \text{ W} \quad (26)$$

风机效率的不确定度

$$u(\eta_{rt}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_{rt}}{\partial P_{ut}}\right)^2 u^2(P_{ut}) + \left(\frac{\partial \eta_{rt}}{\partial P_e}\right)^2 u^2(P_e)}$$

计算式中各项合成,得到风机效率合成不确定度

$$u(\eta_{rt}) = 7.8 \times 10^{-3} \quad (27)$$

风机效率的百分率不确定度

$$\frac{u(\eta_{rt})}{\eta_{rt}} = 0.83\% \quad (28)$$

5 结 论

a. 计算结果表明,风机流量、风机压力和风机效率的百分率不确定度都在 1% 以内,可以认为本次测试具有较高的可信度。

b. 效率的计算包含了电机的损耗,如果仅考虑风机效率,则电测法风机效率还需要考虑电机性能的特性曲线精确度对不确定度的影响。

c. 比较式(12)各分量的计算结果可以看出,直径的不确定度分量比大气密度和喷嘴压差的不确定度分量大一个量级。对风量测量结果的影响最大,应特别重视对喷嘴的精确度的要求。同时,再比较式(15)各分量的计算结果可以看出,大气压力和进风

$$P_{ut} = q_v p_{Ft}$$

$$q_v = \frac{q_m}{\rho_{sg1}}$$

$$\rho_{sg1} = \frac{p_{sg1}}{R_w \Theta_{sg1}}$$

整理可得

$$P_{ut} = q_m R_w \Theta_{sg1} \left(\frac{p_{sg2}}{p_{sg1}} - 1 \right)$$

风机效率

$$\eta_{rt} = \frac{P_{ut}}{P_e}$$

由功率变送器读数 1.53 kW 和电流互感器变比 100 计算,可推得风机空气功率的不确定度

干球温度的测量不确定度比大气湿度的测量不确定度对气体密度不确定度的影响大一个量级,因此,应重视大气压力和温度测量仪表的选取。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 1236-2000 工业风机用标准化风道进行性能试验[S]. 北京:中国标准出版社,2000.
- [3] Agilent Technologies. Agilent_34970A_Users_Manual [M]. 3rd ed. Loveland: Agilent Technologies, 2013: 326-327.
- [4] 于建清,程绍华,贾伟广,等. 温湿度传感器相对湿度示值误差测量结果的不确定度评定[J]. 海洋技术, 2013,32(1):83-86.
- [5] 周植鹏,巨广刚,孔令刚. GB/T 1236-2000 工业风机空气动力性能试验主要参数的计算方法(C型装置)[J]. 矿业安全与环保,2004,31(1):20-22.
- [6] Wang T F. Air flow rate measuring nozzle and its application in air flow measurement in the laboratory [J]. Journal of Northwestern Institute of Architectural Engineering, 1993(1):62-68.
- [7] 曹小林,李雄林,喻首贤,等. 调器性能测试平台测量不确定度的研究[J]. 制冷学报,2009,30(5):58-62.

(编辑:石 瑛)