



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××—2019

风量罩校准规范

Calibration Specification for Air Flowrate Hood

20××-××-××发布

20××-××-××实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

风量罩校准规范
Calibration Specification for
Air Flowrate Hood

JJF ××—20××

归口单位: 全国气象专用计量器具计量技术委员会

主要起草单位: 福建省计量科学研究院

××××

参加起草单位: ××××

××××

××××

本规范委托全国气象专用计量器具计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

×××（福建省计量科学研究院）

×××（福建省计量科学研究院）

×××（福建省计量科学研究院）

×××（×××××××××）

参加起草人：

×××（×××××××××）

×××（×××××××××）

×××（×××××××××）

目 录

引言	(11)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和计量单位	(1)
3.1 术语	(1)
3.2 计量单位	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 示值误差	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 测量标准及其他设备	(3)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准方法	(3)
8 校准结果表达	(4)
8.1 校准数据处理	(5)
8.2 校准证书	(5)
8.3 校准结果不确定度评定	(5)
9 复校时间间隔	(5)
附录 A 标准风量值和空气密度计算	(6)
附录 B 风量罩校准记录(式样)	(6)
附录 C 校准证书校准结果内容	(7)
附录 D 风量罩示值误差测量结果不确定度评定(示例)	(8)

引 言

本规范按照 JJF 1001-2011《通用计量名词术语与定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》、JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》为基础性系列规范进行制定。

本规范主要参考 JJF 1431-2013《风电场用磁电式风速传感器校准规范》及风量罩的技术说明书编制而成。

本规范为首次制定。

风量罩校准规范

1 范围

本规范适用于测量范围为 (100~3500) m^3/h 风量罩 (以下简称风量罩) 的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件:

JJF 1431-2013 《风电场用磁电式风速传感器校准规范》

凡是注日期的引用文件, 仅注日期的版本适用于本规范。凡不注日期的引用文件, 其最新版本 (包括所有的修改单), 适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 术语

JJF 1001 和 JJF 1004 界定的以及下列术语和定义适用于本规范。

3.1.1 风量 Air Flow

单位时间内气体的流通量, 即管道、出风口或其他气体装置单位时间送出或吸入的空气总体积, 用于表明通风设备或鼓风机的送风或排风能力。

3.2 计量单位

风量使用的单位为立方米每小时, 符号为 m^3/h 。

4 概述

风量罩一种用来测量低压通风管道通往大气风口风量的仪器。利用集风罩, 将风汇集至底座上的风速均匀器, 通过测量均匀器上的风速变化值和底座的通风截面积计算出风量值, 并通过测量仪表直接显示风量的测量仪器设备 (见图 1)。



图 1 风量罩示意图

1—风罩; 2—测量底座; 3—主机

风量罩广泛应用于暖通空调、净化技术及医药等行业通风管道气体流通量的测量。风量罩的主机由传感器和测量仪表组成，传感器安装于测量底座内，可采用皮托静压管或热敏风速探头。风罩的尺寸可根据待测风口尺寸选择不同规格。

5 计量特性

5.1 示值误差

示值误差一般不超过量程的 $\pm (3\% \sim 10\%)$ 。

注：以上指标不是用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

校准时环境温度：(20 ± 5) °C；

相对湿度：30% \sim 85%；

大气压力：(950 \sim 1060) hPa。

6.2 测量标准及其他设备

风量标准装置的扩展不确定度应不大于被检风速仪最大允许误差绝对值的1/3。

风量标准装置可采用风速标准装置或流量测量装置。

风速标准装置由风速测量装置、风速发生及控制装置和试验管道三部分构成。

风速测量装置是由皮托静压管（以下简称皮托管）、微压计组成的标准风速装置。

流量测量装置是由节流装置和标准流量计组成的标准流量装置，不确定度优于风量标准装置合成不确定度。节流装置包括节流件、取压装置和前后直管段在内的整个装置。节流件一般采用标准孔板或标准喷嘴。

测量标准及其他设备见表1、表2。

表1 测量标准

序号	仪器设备		技术指标
1	风洞	调速范围	(2 \sim 40) m/s
		均匀性	不大于 1%
		稳定性	在 1min 内不大于 0.5%
2	标准流量计	稳定性	不大于 1%。
		均匀性	不大于 2%

表 2 其他设备

序号	仪器设备	技术指标
1	皮托管	检定系数为 0.995~1.006
2	微压计	测量上限不低于 1000Pa, MPE: $\pm 0.5\text{Pa}$ 。
3	气压计	0.2 级数字气压计或空盒气压表
4	温度计	用于风洞流场环境测量, MPE: $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。
5	湿度计	用于风洞流场环境测量, MPE: $\pm 10\% \text{RH}$ 。
6	绝压计	(87~110) kPa, 0.1 级。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

风量罩的校准项目为风量罩的示值误差。

7.2 校准方法

7.2.1 校准准备工作

测量标准与被校仪器设备各零部件安装应正确、牢固, 可动部分应灵活可靠, 尼龙风罩不得有破损漏风现象。显示表上数字显示应清晰, 不得有缺笔画现象, 如有电源接口, 不得出现锈蚀。

7.2.2 示值误差校准

- 校准点应均匀分布在整个测量范围的整数点上, 原则上应包括上限值、中值和下限值在内不少于 5 个校准点。用户有要求时, 可按用户要求选择校准点。
- 开启风量标准装置电源, 将标准器和被校风量罩置零, 将风量发生及控制装置的流量值调节到校准点上, 风量稳定时间不小于 2min, 先读取测量标准的示值, 再读取被校风量罩示值, 如此重复 6 次, 取各自的平均值作为测量结果。
- 读取室内气压、温度和湿度值, 读数准确到分度值的 1/5 或数显仪表的分辨力。
- 整个校准过程中不允许调整标准器和被校风量罩的零位, 当校准结束时, 应再次确认标准器和被校风量罩的零位, 如采用差压计作为标准器, 差压计的零位变化应不超过 0.3 Pa, 被校风量罩的零位应无变化。

7.2.3 示值误差计算

根据 7.2.2 示值误差校准时测得的空气温度、湿度、气压和微压计示值计算

出各校准点的标准风速,采用标准皮托管和微压计组成的标准风速测量系统的标准风量值计算见附录 A。

风量罩示值误差按式(1)计算:

$$\Delta Q = Q - Q_0 \quad (1)$$

式中:

ΔQ —— 风量罩示值误差, m^3/h ;

Q —— 被检风量罩示值, m^3/h ;

Q_0 —— 标准风量值, m^3/h 。

8 校准结果表达

8.1 校准数据处理

风量罩校准记录(式样)见附录 B。所有数据应先计算后修约, **出具的校准数据与风量罩显示数据位数保持一致。**

8.2 校准证书

风量罩校准结果出具校准证书,校准证书应包括的信息及校准证书校准结果内页(式样)见附录 C。

8.3 校准结果不确定度评定

校准结果的不确定度评定按照 JJF 1059.1—2012 进行,不确定度评定实例见附录 D。

9 复校时间间隔

复校时间间隔的长短取决于其使用情况,使用单位可根据实际使用情况自主决定复校的时间,建议复校时间间隔为 1 年。

附录 A

标准风量值和空气密度计算

A.1 标准风量值计算

采用风速测量装置、风速发生器及控制装置和试验管道三部分构成风速标准装置与皮托静压管、微压计组成的标准风速装置。根据皮托静压管安装处空气流量测量装置截面积大小及微压计测得压力值，用式（A.1.1）计算标准风量值 Q_s ：

$$Q_s = v_b \times S \quad (\text{A.1.1})$$

式中：

Q_s —— 标准器显示风压对应的风量示值， m^3/h ；

v_b —— 标准器显示风压对应的风速示值， m/s ；

S —— 风洞试验段截面积， m^2 。

其中， v_b 由式(A.1.2)计算：

$$v_b = \sqrt{\frac{2}{r} p \xi} \quad (\text{A.1.2})$$

式中：

n_b —— 标准风速值， m/s ；

p —— 微差压读数， Pa ；

x —— 皮托静压管校准系数，1.000；

r —— 空气密度， kg/m^3 。

A.2 空气密度计算

空气密度由式(A.2.1)计算。

$$r = 3.48353 \times 10^{-3} \times \frac{1}{T} (P_0 - 0.378 H e_w) \quad (\text{A.2.1})$$

式中：

r —— 空气密度， kg/m^3 ；

T —— 试验段空气温度， K ；

P_0 —— 试验段气压， Pa ；

H —— 试验段相对湿度，用小数表示；

e_w —— T 温度下的饱和水汽压， Pa 。

其中：

$$e_w = k \times e^{(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T})} \quad (\text{A.2.2})$$

式中：

e_w —— T 温度下的饱和水汽压, Pa;

T —— 试验段空气温度, K;

$k=1$ Pa;

A 、 B 、 C 、 D 是常数, 其值分别如下:

$$A = 1.2378847 \times 10^{-5} \text{ K}^{-2};$$

$$B = -1.9121316 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1};$$

$$C = 33.93711047;$$

$$D = -6.3431645 \times 10^3 \text{ K}.$$

A.3 (采用节流装置 (标准孔板) 和差压计组成的标准风量装置, 标准风量可由式 (A.3.1) 计算:

$$Q_s = \frac{Ce}{\sqrt{1-b^4}} \frac{p}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{r_1}} \cdot 3600 \quad (\text{A.3.1})$$

式中:

Q_s — 标准风量, m^3/h ;

C — 孔板流出系数, 无量纲;

e — 孔板可膨胀系数, 无量纲;

b — 孔板的直径比(由式(A.3.2)给出)

$$b = \frac{d}{D} \quad (\text{A.3.2})$$

式中:

d — 孔板的开孔直径, 此处 $d=190.077\text{mm}$;

D — 管道内径, 此处 $D=300.000\text{mm}$ 。

ΔP — 差压, Pa;

r_1 — 气体在上游取压孔处的密度, 由公式(D.3)给出, kg/m^3 。

k_o — 一流量常数, 大小取决于所采用的风量标准装置, 由公式(C.3)给出, $(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

/h。

$$r_1 = \frac{MP_1}{RT} \left[1 - \left(1 - \frac{M_v}{M} \right) \frac{j_0 P_w}{P_1} \right] \quad (A.3.3)$$

式中：

P_1 ——气体在孔板上游处的绝对压强, Pa;

M ——干空气摩尔质量, 0.0289635kg/mol;

T ——风量标准装置测量段温度, K;

R ——通用气体常数, 8.31441J/mol·K;

M_v ——水蒸气摩尔质量, 0.018015 kg/mol;

j_0 ——风量标准装置测量段相对湿度, %

P_w ——空气温度为 T 时的饱和水蒸气分压力, 见表 A.1。

表 A.1 不同温度下干空气密度与饱和水蒸气分压力表

空气温度 /°C	干空气密度 /kg/m ³	饱和水蒸气分压力/kPa	空气温度 /°C	干空气密度 /kg/m ³	饱和水蒸气分压力/kPa
0	1.293	0.611	21	1.201	2.486
1	1.288	0.657	22	1.197	2.643
2	1.284	0.705	23	1.193	2.808
3	1.279	0.757	24	1.189	2.983
4	1.275	0.813	25	1.185	3.167
5	1.270	0.872	26	1.181	3.361
6	1.265	0.935	27	1.177	3.564
7	1.261	1.001	28	1.173	3.779
8	1.256	1.072	29	1.169	4.005
9	1.252	1.147	30	1.165	4.243
10	1.248	1.227	31	1.161	4.492
11	1.243	1.312	32	1.157	4.755
12	1.239	1.402	33	1.154	5.030
13	1.235	1.497	34	1.150	5.320
14	1.230	1.598	35	1.146	5.623

15	1.226	1.704			
16	1.222	1.817			
17	1.217	1.937			
18	1.213	2.063			
19	1.209	2.196			
20	1.205	2.337			

注 1：干空气密度表引用自《化工工艺设计手册》第四版上册表 21-10 干空气和水蒸气含量表。

注 2：饱和水蒸气分压表引用自 GB/T 6999-2010 《环境试验用相对湿度查算表》表 6 纯水平面饱和水气压表

附录 B

风量罩校准记录（式样）

风量罩校准记录（式样）见表B.1。

表B.1 风量罩校准记录（式样）

一、基本信息								
委托单位					记录编号			
样品信息	名称			型号/规格		分度值 / 或分辨力		
	制造厂				出厂编号			
校准用测量仪器	名称	编 号	型号/规格	不确定度/准确度等级/最大允许误差			证书编号/溯源机构	
环境条件		温度 °C;	相对湿度 %	大气压	hPa			
校准地点								
校准技术依据		JJF ××—20××《风量罩校准规范》						
示值误差 单位: m³/h								
校准点		次数1	次数2	次数3	次数4	次数5	次数6	平均值
	标准器							示值误差
	风量罩							测量不确定度, k=2
	标准器							
	风量罩							
	标准器							
	风量罩							
	标准器							
	风量罩							
	标准器							
	风量罩							
备注:								

校准员: _____ 核验员: _____ 校准日期: ____ 年 ____ 月 ____ 日

附录 C**校准证书校准结果内容**

C.1 校准证书至少包括以下信息：

- a) 标题，如“校准证书”；
- b) 证书编号、页码及总页数；
- c) 校准实验室的名称和地址；
- d) 进行校准的日期；
- e) 进行校准的地点；
- f) 委托单位的名称和地址；
- g) 被校准风量罩的信息，包括接收样品日期；
- h) 校准所依据的校准规范名称和代号；
- i) 测量标准及其他设备的名称、技术参数、证书编号与有效期及溯源机构；
- j) 校准时的环境条件；
- k) 校准结果；
- l) 校准结果的测量不确定度；
- m) 必要时，给出复校时间间隔的建议；
- n) 校准人签名、核验人签名、批准人签名及批准日期；
- o) 校准结果仅对校准对象有效的声明；
- p) 未经校准实验室书面批准，不得部分复制校准证书的声明。

B.2 风量罩校准证书内页（式样）

风量罩校准证书内页（式样）见表B.1。

表B.1 校准证书校准结果内页（式样）

单位：m³/h

标准风量值	风量罩示值	示值误差	扩展不确定度 (k=2)

附录 D

风量罩示值误差测量结果不确定度评定（示例）

D.1 采用风速标准装置、皮托静压管、微压计组成的风量标准装置。

D.1.1 概述

采用直接比较法，将风量罩正确安装在风洞中，调整风洞的风速至校准点，读取标准器压力读数，将该值按对应的换算公式计算得出对应的标准风量，被校风量罩示值与计算标准风量值之间的差值，即为被校风量罩的示值误差。

表 D.1 测量标准和配套设备

名称	名称型号	测量范围	技术指标
标准器	皮托静压管/L	(0~60) m/s	校准系数 $\xi=1.000$, $U=0.005$, $k=2$
	数字压力计/DPI150	(0~2500) Pa	$MPE: \pm 0.05\%FS$
配套设备	环形风洞	(0.2~50) m/s	稳定性 $\leq 0.5\%/\text{min}$, 均匀性 $\leq 1.0\%$ 。 由流场均匀性引入不确定度分量 $u=0.3\%$, 阻塞比 $\leq 5\%$ 。 试验段直径 $d=0.72\text{m}$ 。
	温湿度传感器	(-20~80) °C	$MPE: \pm 0.5\text{°C}$
		(0~100) %RH	$MPE: \pm 8\%\text{RH}$
	气压传感器	(800~1100) hPa	$MPE: \pm 1.0\text{hPa}$

以测量范围 (100~3500) m^3/h 的风量罩 ($MPE: \pm 5\%$) 为例进行不确定度评定。

D.1.2 测量模型

$$\Delta Q = Q - Q_0 \quad (\text{D.1.1})$$

式中：

ΔQ —— 风量罩示值误差, m^3/h ;

Q —— 被校风量罩示值, m^3/h ;

Q_0 —— 标准风量值, m^3/h 。

由式 (C.1.1) 得灵敏系数为

$$c_1 = \frac{\partial \Delta_i}{\partial L_i} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta_i}{\partial L_s} = -1$$

$$u^2(\Delta Q) = u^2(Q) + u^2(Q_0) \quad (\text{D.1.2})$$

D.1.3 标准不确定度分量的来源与评定

D.1.3.1 被校风量罩引入的不确定度分量 u_1

以 $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ 风量校准点为例，在重复性条件下重复测量 10 次，风量罩校准结果见表 D.2。

表 D.2 风量罩校准结果

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
被校风量 (m^3/h)	2980	2966	2975	2986	2990	2967	2983	2988	2986	2978

测量数据经处理得单次测量实验标准偏差 (s) 为

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 8.4 \text{ m}^3/\text{h}$$

实际测量时，在重复条件下连续测量 6 次，以 6 次测量的算术平均值作为测量结果，则可得标准不确定度为

$$u_{12} = \frac{s}{\sqrt{6}} = 3.4 \text{ m}^3/\text{h}$$

由于风量罩分辨力为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ，其量化误差以等概率分布（均匀分布）落在宽度为 0.5 mm 的区间内。被校风量罩分辨力引入的标准不确定度为：

$$u_{12} = \frac{(0.5)}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ m}^3/\text{h}$$

u_{12} 小于 u_{11} ，因此量化误差引入的标准不确定度可忽略不计，被校风量罩引入的不确定度分量 $u_1 = 3.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

D.1.3.2 测量仪器引入的不确定度分量 u_2

测量仪器引入的不确定度即是标准风量的平均值 v_b 引入的不确定度，测量模型为：

$$Q_s = v_b S \quad (\text{D.1.3})$$

$$v_b = \sqrt{\frac{2}{r} p \xi} \quad (\text{D.1.4})$$

式中：

v_b ——标准风速值， m/s ；

p ——微差压读数, Pa;

x ——皮托静压管校准系数, 1.000;

r ——空气密度, kg/m³;

S ——试验段横截面积, m²。

D.1.3.2.1 数字压力计 p 引入的不确定度分量 u_p

数字压力计 p 引入的不确定度分量 u_p 主要是其最大允许误差引入, 其分辨力引入的分量很小, 忽略不计。

查得最大允许误差为 $\pm 0.05\%FS$, 其量程为 2500Pa, 则半宽 $a=2500\times 0.05\% = 1.25\text{Pa}$, 以等概率分布(矩形分布)落在宽度为 1.25Pa 的区间内, 其引入的标准不确定度为:

$$u_p = a/k = 1.25/\sqrt{3} = 0.72\text{Pa}$$

D.1.3.2.2 皮托静压管校准系数 x 引入的不确定度分量 u_x

从皮托静压管校准证书获知, $U=0.005$, $k=2$, 则

$$u_x = U/k = 0.005/2 = 0.0025$$

D.1.3.2.3 空气密度 r 引入的不确定度分量 u_r

D. 1.3.2.3.1 饱和水汽压 e_w 计算

$$e_w = ke^{(AT^2+BT+C+D/T)} \quad (\text{D.1.5})$$

式中:

e_w —— T 温度下的饱和水汽压, Pa;

T ——试验段空气温度, K;

$k=1\text{Pa}$;

B 、 C 、 D 是常数, 其值分别如下:

$$A = 1.2378847 \times 10^{-5} \text{ K}^{-2};$$

$$B = -1.9121316 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1};$$

$$C = 33.93711047;$$

$$D = -6.3431645 \times 10^3 \text{ K}.$$

试验段的空气温度为 24.90°C , 即 298.05K , 则饱和水汽压 e_w :

$$e_w = k e^{(AT^2 + BT + C + D/T)} = 3259.863 \text{ Pa}$$

(a) 计算空气密度 r

$$r = 3.48353 \times 10^{-3} \times \frac{1}{T} (P_0 - 0.378H e_w) \quad (\text{D.1.6})$$

式中:

r ——空气密度, kg/m^3 ;

T ——试验段空气温度, K ;

p_0 ——试验段的气压, Pa ;

H ——试验段的相对湿度, 用小数表示;

e_w —— T 温度下的饱和水汽压, Pa 。

试验段的空气温度为 24.46°C , 湿度为 $53.51\% \text{ RH}$, 气压为 1003.35hPa , 由式 D.1.6 计算

$$r = 3.48353 \times 10^{-3} \times \frac{1}{T} (P_0 - 0.378H e_w) = 1.17 \text{ kg/m}^3$$

(b) 计算产生空气密度引入的不确定度分量

由表 D.1 查得:

温度表 $MPE = \pm 0.5^\circ\text{C}$, $u_T = 0.5 / \sqrt{3} = 0.2887^\circ\text{C}$

湿度表 $MPE = \pm 0.8\%$, $u_H = 0.8\% / \sqrt{3} = 0.0462$

气压表 $MPE = \pm 1.0\text{hPa}$, $u_{p_0} = 1.0 \times 100 / \sqrt{3} = 57.7367\text{Pa}$

(c) 产生饱和水汽压 e_w 各分量灵敏系数及不确定度

饱和水汽压: e_w

$$e_w = k \times e^{(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T})}$$

$$d(e_w) = k \times e^{(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T})} \times (2AT + B - \frac{D}{T^2}) d_T$$

$$= -31.2989 Pa$$

$$r = 3.48353 \times 10^{-3} \times \frac{1}{T} (P_0 - 0.378 H e_w)$$

$$a) \quad d(r_T) = 3.48353 \times 10^{-3} \times (P_0 - 0.378 H e_w) 1/T^2 dT$$

$$= 0.00351798 \text{ kg/m}^3;$$

$$u_T = 0.00351798 \text{ kg/m}^3$$

$$b) \quad d(r_{p_0}) = 3.48353 \times 10^{-3} \times 1/T d(P_0)$$

$$= 0.00068 \text{ kg/m}^3$$

$$u_{p_0} = 0.00068 \text{ kg/m}^3$$

$$c) \quad d(r_H) = -3.48353 \times 10^{-3} \times 1/T * e_w d(H)$$

$$= -0.00161 \text{ kg/m}^3$$

$$u_H = 0.00161 \text{ kg/m}^2$$

$$d(r e_w) = -3.48353 \times 10^{-3} \times 1/T * H d(e_w)$$

$$= -0.000172 \text{ kg/m}^3$$

$$u e_w = 0.000172 \text{ kg/m}^2$$

D.1.3.2.3.2 空气密度不确定度 u_r

$$u_r = \sqrt{c_T^2 u_T^2 + c_{p_0}^2 u_{p_0}^2 + c_H^2 u_H^2 + c_{e_w}^2 u_{e_w}^2} = 0.0022 \text{ kg/m}^3$$

D.1.3.2.4 计算测量仪器合成不确定度 u_3

标准风速为 2.05m/s、试验段面积为 0.41m²、微差压计读数为 16.8Pa、皮托管静压管校准系数为 1.000、空气密度为 1.17kg/m³。

由式 D.1.3、式 D.1.4 测量模型，求得灵敏度系数：

$$c_{p_0} = \partial(v_b) / \partial p = v / 2p = 2.05 / (2 \times 16.8) = 0.06101;$$

$$c_x = \partial(v_b)/\partial x = v/2x = 2.05/(2 \times 1.000) = 1.025 ;$$

$$c_r = \partial(v_b)/\partial r = -v/2r = -2.05/(2 \times 1.17) = 0.876;$$

$$u_p = a/k = 0.250/\sqrt{3} = 0.14434 Pa ; \quad u_x = U/2 = 0.5\%/2 = 0.0025 ;$$

$$u_p = 0.0022 \text{kg/m}^3$$

$$u_2 = \sqrt{(c_{p_0} u_{p_0})^2 + (c_x u_x)^2 + (c_r u_r)^2} = 13.8 \text{m}^3/\text{h}$$

D.1.3.3 风洞不均匀性引入的不确定度分量 u_3

从风洞技术文件查得其风速不均匀性 $\leq 0.3\%$ ，考虑为均匀分布，则：

$$u_3 = 0.3\%/\sqrt{3} \times 3000 = 5.2 \text{m}^3/\text{h}$$

D.1.4 计算校准结果合成不确定度 u_c

校准结果的合成不确定度 u_c 为 u_1 、 u_2 、 u_3 的合成，他们互相独立，则

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = \sqrt{3.4^2 + 13.8^2 + 5.2^2} = 15.1 \text{m}^3/\text{h}$$

D.1.5 扩展不确定度 U

$$U = 2u_c = 15.1 \times 2 = 30 \text{ m}^3/\text{h}$$

表 D.3 标准不确定度分量汇总表

标准不确定度		不确定度来源	标准不确定度分量
u_1		被校风量罩	3.4 m^3/h
u_2	u_{p_0}	微差压计测量误差	13.8 m^3/h
	u_x	皮托管校准系数	
	u_r	空气密度	
u_3		风洞流场不均匀	5.2 m^3/h

D.1.6 结论

风量测量范围 (100~3500) m^3/h ，在 $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ 风量校准时，其示值误差为 $-20.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、校准结果测量不确定度 $U=30 \text{ m}^3/\text{h}$ ， $k=2$ 。

D.2 由标准孔板和标准流量计组成的标准流量测量系统

(采用标准孔板和差压计组成的标准风量装置)

D.2.1 被测对象

以分辨力为 $1\text{m}^3/\text{h}$ 、测量范围为 $(100\sim 3500)\text{m}^3/\text{h}$ 的风量仪为例,选用开孔直径为 190.077mm 的标准孔板节流装置及差压计组成风量测量装置作为测量标准,评定风量仪在校准点 $1000\text{ m}^3/\text{h}$ 时示值误差的测量不确定度。

D.2.2 测量方法

将风量标准装置与被检风量仪连接,启动标准风量装置,将风量值调节到校准点上,待风量稳定 2min 后,读取风量标准装置和被检风量仪的风量取 6 次读数的算术平均值作为测量结果并计算示值误差。

D.2.3 测量模型

$$\Delta Q = \bar{Q} - \bar{Q}_s \quad (\text{D.1})$$

式中:

ΔQ —被检风量仪的示值误差, m^3/h ;

\bar{Q} —校准点风量仪示值的算术平均值, m^3/h ;

\bar{Q}_s —校准点风量标准装置示值的算术平均值, m^3/h 。

按公式(D.2)计算标准风量:

$$Q_s = \frac{Ce}{\sqrt{1-b^4}} \frac{p}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{r_1}} \cdot 3600 = k_\varrho Ce \sqrt{\frac{\Delta P}{r_1}} \quad (\text{D.2})$$

式中:

Q_s —标准风量, m^3/h ;

C —孔板流出系数, 无量纲;

e —孔板可膨胀系数, 无量纲;

b —孔板的直径比(由公式(D.3)给出)

$$b = \frac{d}{D} \quad (\text{D.3})$$

式中:

d —孔板的开孔直径, 此处 $d=190.077\text{mm}$;

D —管道内径, 此处 $D=300.000\text{mm}$ 。

ΔP —差压, Pa ;

r_1 —气体在上游取压孔处的密度, 由公式(D.3)给出, kg/m^3 。

k_ϱ —一流量常数, 大小取决于所采用的风量标准装置, 由公式(D.4)给出, $(\text{m}^2 \cdot \text{s})/\text{h}$ 。

$$k_Q = \frac{d^2}{\sqrt{1-b^4}} \frac{p}{4} 3600 \sqrt{2=157.73} \text{ (m}^2 \cdot \text{s) /h} \quad (\text{D.4})$$

D.2.3 方差与灵敏度系数

$$u_c = c_Q^2 u^2(\bar{Q}) + c_{Q_s}^2 u^2(\bar{Q}_s) \quad (\text{D.5})$$

式中：

$$\text{灵敏系数: } c_Q = \frac{\partial \Delta Q}{\partial \bar{Q}} = 1; c_{Q_s} = \frac{\partial \Delta Q}{\partial \bar{Q}_s} = -1$$

$u(\bar{Q})$ —被检仪器引入的标准不确定度

$u(\bar{Q}_s)$ —标准装置引入的标准不确定度

D.2.4 测量不确定度的来源

被检仪器引入的标准不确定度 $u(\bar{Q})$

(1)被检仪器的分辨力引入的标准不确定度 $u_1(\bar{Q})$

(2)示值波动引入的标准不确定度 $u_2(\bar{Q})$

标准装置引入的标准不确定度 $u(\bar{Q}_s)$

(1)孔板流出系数引入的相对标准不确定度 $u_r(C)$;

(2)膨胀系数引入的相对标准不确定度 $u_r(e)$;

(3)数字差压计引入的相对标准不确定度 $u_r(\Delta P)$;

(4)气体密度引入的相对标准不确定度 $u_r(r_1)$;

(5)风量波动引入的相对标准不确定度 $u_r(w)$

D.2.5 测量不确定度的评定

D.2.5.1 被检仪器引入的标准不确定度 $u(\bar{Q})$

被检风量仪的读数分辨力为 $1 \text{ m}^3/\text{h}$, 半开区间为 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 考虑为均匀分布计算:

$$u_1(\bar{Q}) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ m}^3/\text{h}$$

D.2.5.1.2 示值波动引入的标准不确定度 $u_2(\bar{Q})$

用 A 类标准不确定度评定。以校准点 $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ 为例, 风量标准装置与被校风量仪连接, 启动风量标准装置调整到校准点, 待风量稳定 2min 后, 读取风量标准装置和被校风量仪的风量显示值, 共读取 10 组, 测量值及计算结果见表 D.1。

表 D.1 测量及计算结果 (单位: m^3/h)

组数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
标准风量值 Q_s	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
被校风量仪风量示值 Q	2980	2966	2975	2986	2990	2967	2983	2988	2986	2978
差值 ΔQ	20	34	25	14	10	33	17	12	14	22
$\overline{\Delta Q} = 20.1 \text{ m}^3/\text{h}$										
$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta Q_i - \overline{\Delta Q})^2}{n-1}} = 8.4 \text{ m}^3/\text{h}$										

由实际校准过程中每次读数 6 次可得:

$$u_2(\overline{Q}) = \frac{8.4}{\sqrt{6}} = 3.4 \text{ m}^3/\text{h}$$

D.2.5.1.3 被检仪器引入的标准不确定度 $u(\overline{Q})$ 合成计算

分辨力引入的标准不确定度和示值波动引入的标准不确定度取其较大值, 因此被检仪器的合成标准不确定度为:

$$u(\overline{Q}) = u_2(\overline{Q}) = 3.4 \text{ m}^3/\text{h}$$

D.2.5.2 标准装置引入标准不确定度 $u(Q_s)$

D. 2.5.2.1 孔板流出系数引入的相对标准不确定度 $u_r(C)$

对于标准孔板, 如果不考虑直径比 b 、管道内径 D 、雷诺数 Re 和相对粗糙度 K/D 其中, K 为管道等效绝对粗糙度的不确定度的情况下, 流出系数 C 的相对标准不确定度:

当 $b \leq 0.60$ 时, $dC/C = 0.6\%$

当 $0.60 < b \leq 0.75$ 时, $dC/C = b\%$

实际测量中 $b = 0.63359$, $D = 0.300\text{m}$, 由此 $b = 0.63359$

$$u_r(C) = 0.634\%$$

D.2.5.2.2 膨胀系数引入的相对标准不确定度 $u_r(e)$

如果不考虑直径比 b 、压力比 $\Delta P / P_1$ 和等熵指数 k 的不确定度, 则可膨胀系数的标准不确定度:

$$u_r(e) = \frac{4\Delta P}{P_1} \%$$

实际测量的平均差压值为 $\Delta P = 121\text{Pa}$, $P_1 = 102504\text{Pa}$, 则 $u_r(e) = 0.005\%$

D.2.5.2.3 数字差压计引入的相对标准不确定度 $u_r(\Delta P)$

差压主要由数字差压计进行测量, 其准确度等级为 0.05 级, 考虑为均匀分布, 测量范围(0~2500)Pa, 引入的相对标准不确定度:

$$u_r(\Delta P) = \frac{0.05\% \times 2500}{\sqrt{3} \times 121} = 0.6\%$$

D.2.5.2.4 气体密度引入的相对标准不确定度 $u_r(r_1)$

$$r_1 = \frac{MP_1}{RT} \left[1 - \left(1 - \frac{M_v}{M} \right) \frac{j_0 P_w}{P_1} \right] \quad (\text{D.6})$$

式中:

P_1 —气体在孔板上游处的绝对压强, Pa;

M —干空气摩尔质量, 0.0289635kg/mol;

T —风量标准装置测量段温度, K;

R —通用气体常数, 8.31441J/mol · K;

M_v —水蒸气摩尔质量, 0.018015 kg/mol;

j_0 —风量标准装置测量段相对湿度, %

P_w —空气温度为 T 时的饱和水蒸气分压力, Pa

由上所述可得湿空气密度

$$r_1 = 3.484 \times 10^{-3} \frac{P_1 - 0.378j_0 P_w}{T}$$

对湿空气密度的合成相对标准不确定度为

$$u_r(r_1) = \sqrt{c_{r1}^2 u_r^2(P_1) + c_{r2}^2 u_r^2(T) + c_{r3}^2 u_r^2(j_0)}$$

对湿空气密度的合成相对标准不确定度估计为矩形分布, 因此包含因子

$k=\sqrt{3}$ ，实际测量得到管道内标准孔板气体平均压强 $P_1=102504\text{Pa}$ ，温度 $T=293.15\text{K}$ ，

该温度下饱和水蒸气分压力 $P=2337\text{Pa}$ ，湿度 $j_0=64.4\%\text{RH}$ ；同时已知气压计测量范围(87~110)kPa, 0.1 级；温度计测量范围(0~50)℃, ±0.20℃；湿度计其最大允许误差满足相对湿度±5%

则各个灵敏度系数、相对标准不确定度分量为：

$$c_{r1} = \frac{P_1}{r_1} \frac{\partial r_1}{\partial P_1} = \frac{P_1}{P_1 - 0.378j_0 P_w} = 1.006 \quad u_r(P_0) = \frac{0.1\% \times 110000}{\sqrt{3} \times 102504} = 0.062\%$$

$$c_{r2} = \frac{T}{r_1} \frac{\partial r_1}{\partial T} = -1 \quad u_r(T) = \frac{0.2}{\sqrt{3} \times 293.15} = 0.040\%$$

$$c_{r3} = \frac{j_0}{r_1} \frac{\partial r_1}{\partial j_0} = \frac{-0.378j_0 P_w}{P_1 - 0.378j_0 P_w} = -5.582 \times 10^{-3} \quad u_r(j_0) = \frac{5\%}{\sqrt{3} \times 64.4\%} = 4.5\%$$

可得空气密度相对标准不确定度：

$$u_r(r_1) = \sqrt{c_{r1}^2 u_r^2(P_1) + c_{r2}^2 u_r^2(T) + c_{r3}^2 u_r^2(j_0)} = 0.079\%$$

D.2.5.2.5 风量波动引入的相对标准不确定度为 $u_r(w)$

风量波动对校准结果的影响为±0.3%，其半宽区间为0.3%，考虑为均匀分布，引入的相对标准不确定度为

$$u_r(w) = \frac{0.3\%}{\sqrt{3}} = 0.17\%$$

D.2.5.2.6 标准装置引入的标准不确定度 $u(\bar{Q}_s)$ 合成计算

由于实测风量是通过间接测量得到的，差压计、标准孔板和用于测量流场温度、湿度和绝压的仪器测量不确定度都影响风量测量的结果，并且与风量波动引入的标准不确定度互相独立，互不相关。根据风量公式：

$$Q_s = 157.73 \cdot C e \sqrt{\frac{\Delta P}{r_1}}$$

风量公式为乘积形式，因此标准装置的合成相对标准不确定度为

$$u_r(Q_s) = \sqrt{u_r^2(C) + u_r^2(e) + \frac{1}{4} u_r^2(\Delta P) + \frac{1}{4} u_r^2(r_1) + u_r^2(w)} = 0.723\%$$

在 $Q_s=3000 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，得到标准不确定度 $u(Q_s) = u_r(Q_s) \cdot Q_s = 21.7 \text{ m}^3/\text{h}$

D.2.6 合成标准不确定度

D.2.6.1 标准不确定度分量一览表见表 D.2

表 D.2 标准不确定度分量一览表

不确定度来源 u	灵敏系数 c	$ c u$
被检仪器的标 准不确定度 $u(\bar{Q})$	被检仪器的分辨 力引入的标准不 确定度 $u_1(\bar{Q})$	$0.29 m^3/h$
		$3.4 m^3/h$
标准装置引入 的标准不确定 度 $u(\bar{Q}_s)$	孔板流出系数引 入的相对标准不 确定度 $u_r(C)$	0.634%
	膨胀系数引入的 相对标准不确定 度 $u_r(e)$	0.005%
	数字微压计引入 的相对标准不确定 度 $u_r(\Delta P)$	0.6%
	气体密度引入的 相对标准不确定 度 $u_r(r_1)$	0.079%
	风量波动引入的 相对标准不确定 度 $u_r(w)$	0.17%

D.2.6.2 合成标准不确定度的计算

$$u_c = \sqrt{c_q^2 u^2(\bar{Q}) + c_{\bar{Q}_s}^2 u^2(\bar{Q}_s)} = 22 m^3/h$$

D.2.6.3 扩展不确定度的计算

取包含因子 $k=2$ ，则在 $3000 m^3/h$ 的风量校准点时，扩展不确定度为

$$U = k u_c = 44 m^3/h \quad (k=2)$$

D.2.7 结论

风量测量范围 $(100 \sim 3500) m^3/h$ ，在 $3000 m^3/h$ 风量校准时，其示值误差
为 $-20.1 m^3/h$ 、校准结果测量不确定度 $U=44 m^3/h$ ， $k=2$ 。

