



中华人民共和国工业和信息化部 轻工计量技术规范

JJF（轻工）***-202*

低速风洞校准规范

Calibration Specification for low-speed wind tunnels
(送审稿)

202*—XX—XX 发布

202*—XX—XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部发布

低速风洞校准规范

Calibration Specification for low-speed
wind tunnels

JJF（轻工）***-202*

归口单位：中国轻工业联合会

起草单位：苏州市计量测试院有限公司

本规范由主要起草单位负责解释

本规范主要起草人：

吴振一（苏州市计量测试院有限公司）

任 豪（苏州市计量测试院有限公司）

汤文良（苏州市计量测试院有限公司）

参加起草人：

陈恩坤（苏州市计量测试院有限公司）

管 瑛（苏州市计量测试院有限公司）

目 录

引 言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和定义.....	(1)
4 概述.....	(1)
5 计量特性.....	(2)
5.1 流速范围.....	(2)
5.2 流速均匀性.....	(2)
5.3 流速稳定性.....	(3)
5.4 紊流度.....	(3)
6 校准条件.....	(3)
6.1 环境条件.....	(3)
6.2 校准用计量器具及配套设备.....	(3)
7 校准项目和校准方法.....	(3)
7.1 流速范围.....	(3)
7.2 流速均匀性.....	(4)
7.3 流速稳定性.....	(5)
7.4 紊流度.....	(5)
8 校准结果表达.....	(7)
9 复校时间间隔.....	(7)
附录 A 标准风速值计算方法.....	(8)
附录 B 流速均匀性测点布置图.....	(9)
附录 C 校准原始记录格式.....	(10)
附录 D 校准证书内页格式.....	(14)
附录 E 低速风洞校准不确定度评定示例.....	(15)

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑校准规范制修订工作的基础性系列规范。

本规范的附录 A “标准风速值计算方法（参考件）”、附录 B “流速均匀性测点布置图（参考件）”、附录 C “校准原始记录格式（参考件）”、附录 D “校准证书内页格式（参考件）”、附录 E “低速风洞校准不确定度评定示例（参考件）” 均为资料性附录。

本规范为首次发布。

低速风洞校准规范

1 范围

本规范适用于流速范围为（0.2~60）m/s 的低速风洞的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

QX/T 87-2007 《气象低速风洞性能测试规范》

GB/T 44448-2024 《低速风洞性能测试规范》

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）适用于本规范。

3 术语和定义

QX/T 87-2007 《气象低速风洞性能测试规范》、GB/T 44448-2024 《低速风洞性能测试规范》界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1 试验段 test section

用于安装仪器或标准器的风洞段。

3.2 流速范围 velocity range

风洞试验段内所能达到稳定可用的最低(下限)至最高(上限)流速。

3.3 流速均匀性 uniformity of velocity

风洞试验段内同一横截面上气流速度分布的均匀程度，用该截面上各点气流速度的相对标准偏差表示。

3.4 流速稳定性 stability of velocity

风洞试验段内气流速度随时间脉动的程度，用规定时间间隔内气流速度相对于气流平均速度变化量的最大值与平均速度之比表示。

3.5 紊流度 turbulence intensity

风洞试验段内相对于任何一点的气流速度而存在的高频脉动程度，用脉动速度的均方根值与平均流速之比表示。

4 概述

低速风洞按照风洞结构主要分为直流式风洞和回流式风洞。直流式风洞是试验段与环境大气相连通的直路风洞，由进气口、整流段、收缩段、试验段、扩散段、动力段、支架以及控制系统组成，直流式风洞示意图如图 1 所示。回流式风洞是气流经过封闭试验段后由导流管导回循环使用的回路式风洞，主要由蜂窝器、阻尼网、稳定段、收缩段、试验段、扩散段、拐角导流片、动力段、回流段、支架以及控制系统组成，回流式风洞示意图如图 2 所示。

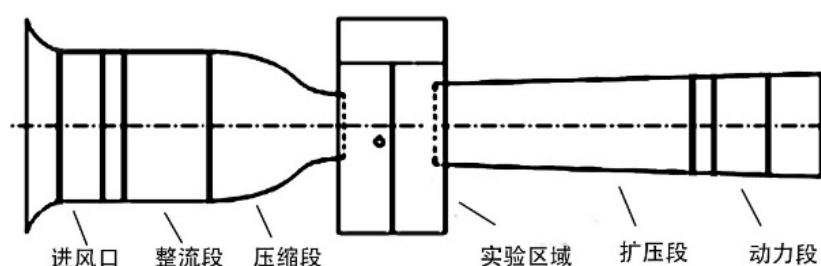
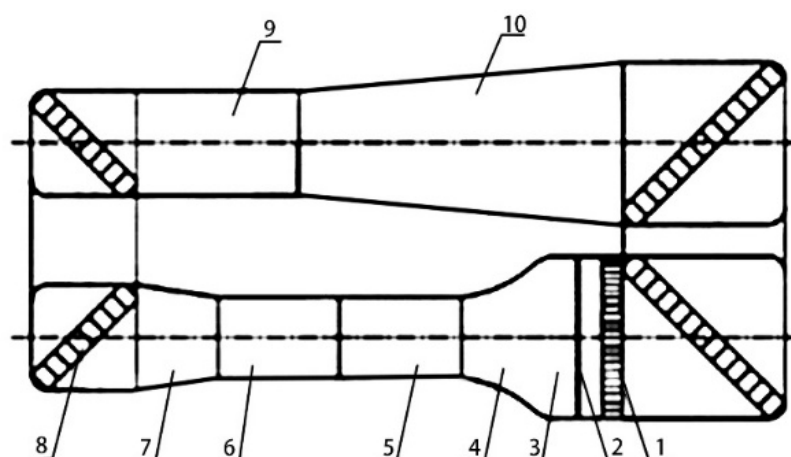


图 1 直流式风洞结构示意图



说明：

1——蜂窝器；2——阻尼网；3——稳定段；4——收缩段；5——主试验段；

6——第二试验段；7——扩散段；8——拐角导流片；9——动力段；10——回流段

图 2 回流式风洞结构示意图

5 计量特性

5.1 流速范围

不低于风洞的标称流速范围。

5.2 流速均匀性

不大于1%。

5.3 流速稳定性

不大于0.5%。

5.4 紊流度

不大于0.5%。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：（15～30）℃。

6.1.2 相对湿度：≤80%。

6.2 校准用计量器具及配套设备

校准用计量器具及配套设备应有有效的检定/校准证书，其技术要求见表 1

表 1 校准用计量器具及配套设备技术要求

序号	设备名称	技术要求
1	热式风速仪	测量范围不低于（0.2～5）m/s， MPE：±（5% <i>R</i> +0.1）m/s
2	标准皮托管	校准系数：0.997～1.003
3	微压差计	测量上限不低于 2500Pa MPE：±0.5Pa
4	温度计	测量范围（0～50）℃ MPE：±0.5℃
5	湿度计	测量范围：（5～95）%RH， MPE：±5%RH
6	大气压计	测量范围：（86～106）kPa， MPE：±0.2kPa。

7 校准项目和校准方法

7.1 流速范围

7.1.1 流速下限

将热式风速仪探头安装在风洞试验段的截面中心点，使试验段流速缓慢上升，达到风洞设计下限流速并稳定后，读取热式风速仪示值，重复测量 3 次。

7.1.2 流速上限

将标准皮托管安装在风洞试验段的截面中心点，使试验段流速逐渐升至风洞标称上限流速并稳定后，读取微差压计的示值，重复测量 3 次。同时读取温度、湿度、大气压测量仪器的示值。

7.1.3 数据处理

流速值及流速范围按照下列方法进行计算：

- a) 3 次流速下限测得值的算术平均值为该试验段流速下限值；
- b) 3 次流速上限测得值的算术平均值为该试验段流速上限值；
- c) 试验段流速下限与流速上限之间所涵盖的范围，为该试验段的流速范围；
- d) 所有试验段流速范围的下限最小值与上限最大值，为该风洞的流速范围。

注：标准皮托管测流速计算方法见附录 A。

7.2 流速均匀性

7.2.1 校准位置的选择

选择试验段仪器安装截面作为被测截面。同一截面测点的布置应采用等间距法或坐标轴法，选择的测点应确保在有效试验区域内，测点不少于 5 个，测点的布置应符合附录 B 的规定。

注：测量截面和测点的分布见附录 B。

7.2.2 校准点的选择

应根据使用范围选择 3 个（含）以上校准点，至少应包括该试验段上限、下限及中间流速点。下限流速点宜取 2m/s。

7.2.3 校准步骤

应按照下列步骤进行：

- a) 将标准皮托管固定在校准位置上，并对准气流来向；
- b) 控制电机转速，将风洞流速稳定在选定的流速点；
- c) 风洞流速稳定后，读取该点风速示值；
- d) 依次完成所有测点校准；

7.2.4 数据处理

被测截面的平均风速按照公式（1）计算：

$$\overline{v}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{a,i} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中

$\overline{v_a}$ ——被测截面平均风速, 单位为米每秒 (m/s);

n ——测点数;

$v_{a,i}$ ——第 i 测点风速读数值, 单位为米每秒 (m/s)。

被测截面相应流速下的均匀性 μ 按照公式 (2) 计算:

$$\mu = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\frac{v_{a,i} - \overline{v_a}}{\overline{v_a}})^2 / (n - 1)} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2)$$

以所有风速校准点测得的 μ 最大值作为该风洞的流速均匀性。

7.3 流速稳定性

7.3.1 校准位置的选择

应选取试验段被测截面中心点作为校准位置。

7.3.2 校准点的选择

在试验段流速范围内均匀选择流速点, 至少选择该试验段流速的上限、下限及中间点。下限流速点宜取 2m/s。

7.3.3 校准步骤

应按照下列步骤进行:

- a) 将标准皮托管固定在校准位置上, 并对准气流来向;
- b) 控制电机转速, 将风洞流速稳定在选定的流速点;
- c) 风洞流速稳定后, 每隔 5s 读一次数据, 1min 内共读取 12 次数据;
- d) 依次完成所有测点校准。

7.3.4 数据处理

流速稳定性 η 按照公式 (3) 计算:

$$\eta = \frac{|v_{b,i} - \overline{v_b}|_{\max}}{\overline{v_b}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$v_{b,i}$ ——某次校准中第 i 个瞬时风速, 单位为米每秒 (m/s);

$\overline{v_b}$ ——某次校准中 1min 内平均风速, 单位为米每秒 (m/s)。

以所有风速校准点测得的 η 最大值作为该风洞的流速稳定性。

7.4 紊流度

7.4.1 校准位置的选择

紊流度校准截面选择与流速稳定性测试相同。测点位置选择如下：以风洞轴线与被测截面的交点为原点，沿着风洞轴线方向为 X 轴，在水平面上垂直于 X 轴的为 Y 轴，垂直于水平面度的为 Z 轴。在 3 轴等间距点选择点 x、y、z。间距一般为 100mm~150mm。

7.4.2 校准点的选择

在试验段流速范围内均匀选择流速点，至少选择该试验段流速的上限、下限及中间点。下限流速点宜取 2m/s。

7.4.3 校准步骤

应按照下列步骤进行：

- a) 将标准皮托管皮托管固定在原点位置上，并对准气流来向；
- b) 控制电机转速，将风洞流速稳定在选定的流速点；
- c) 风洞流速稳定后，读取原点流速数据，完成后移动到 X 轴、Y 轴、Z 轴测点完成流速数据读取，数据至少读取 6 次，测量间隔为 1s；
- d) 依次完成所有测点校准数据读取。

7.4.4 数据处理

紊流度 ε 按照公式 (4) 计算：

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)/3}}{v_0} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- v_0 ——某次校准中的原点流速值，单位为米每秒 (m/s)；
- u_x ——某次校准中的 X 轴流速高频脉动值，单位为米每秒 (m/s)；
- u_y ——某次校准中的 Y 轴流速高频脉动值，单位为米每秒 (m/s)；
- u_z ——某次校准中的 Z 轴流速高频脉动值，单位为米每秒 (m/s)。

其中， $u_i = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\frac{v_i - \bar{v}_i}{n})^2}$

式中：

- u_i ——某次校准中的 X、Y、Z 某一轴流速高频脉动值，单位为米每秒 (m/s)；
- v_i ——某次校准中的 X、Y、Z 某一轴瞬时流速值，单位为米每秒 (m/s)；
- $\bar{v}_i$ ——某次校准中的 X、Y、Z 某一轴流速值平均值，单位为米每秒 (m/s)；
- n ——某次校准中的 X、Y、Z 某一轴流速值采集数。

以所有风速校准点测得的 ε 最大值作为该风洞的紊流度。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书或校准报告上反映，校准证书或报告至少包括以下信息：

- a) 标题，如“校准证书”或“校准报告”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 送校单位的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接受日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及编号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识，校准员、核验员的签名以及校准日期；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

9 复校时间间隔

仪器复校时间间隔由使用者根据仪器的使用情况、仪器本身性能等因素所决定，推荐复校时间间隔不超过一年。在相邻两次校准期间，如对仪器的检测数据有怀疑或仪器更换主要部件及修理后应对仪器重新校准。

附录 A

标准风速值计算方法

A.1 用风洞试验段内的空气温度按公式 (A.1) 计算出饱和水汽压:

$$e_w = k \times e^{(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T})} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

e_w —— T 温度下的饱和水汽压, Pa;

T ——试验段内空气温度, K;

$k=1\text{Pa}$;

A、B、C、D均为常数, 其值如下:

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

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

$C=33.93711047$

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

A.2 用风洞试验段内的空气温度、相对湿度和气压值按公式 (A.2) 计算出空气密度。

$$\rho = 3.48353 \times 10^{-3} \times \frac{1}{T} (P_0 - 0.378He_w) \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

T ——试验段内空气温度, K;

P_0 ——试验段内气压, Pa;

H ——试验段内空气相对湿度, 用小数表示;

e_w —— T 温度下的饱和水汽压, Pa。

A.3 将空气密度值和微压计示值代入公式 (A.3) 计算出标准风速值。

$$v = k \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \dots\dots\dots (A.3)$$

v ——标准风速, 单位为米每秒 (m/s);

ρ ——空气密度, 单位千克每立方米 (kg/m³);

p ——微压计示值, 单位为帕 (Pa);

k ——皮托管校准系数。

附录 B

流速均匀性测点布置图

B.1 等间距法

以被测截面中心点为对称点，将其分成面积相等的数十个小正方形，每个小正方形的中心点为所选测点位置。圆形试验段截面等间距法和等坐标法测点布置如图 B.1 所示，八角形或其他形状试验段截面测点位置参考圆形截面布置。

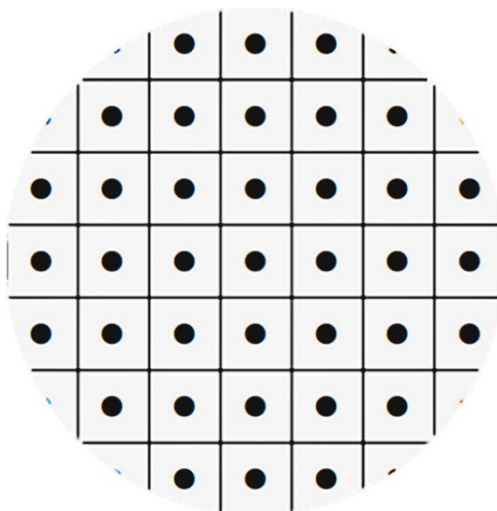


图 B.1 圆形试验段截面等间距法测点布置图

B.2 坐标轴法

以被测截面中心点为原点，水平方向为 X 轴，垂直方向为 Y 轴，选择测点位置在 X 轴、Y 轴上均匀分布。圆形试验段截面坐标轴法测点布置如图 B.2 所示，八角形或其他形状试验段截面测点位置参考圆形截面布置。

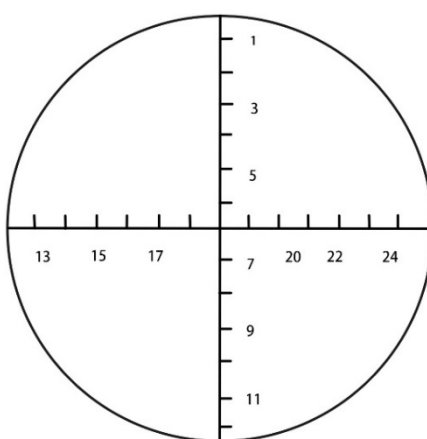


图 B.2 圆形试验段截面坐标轴法测点布置图

附录 C

校准原始记录格式

送校单位: _____ 证书编号: _____

仪器名称: _____ 制造厂商: _____

仪器型号: _____ 仪器编号: _____ 测量范围: _____

校准环境温度: _____ °C 湿度: _____ %RH 大气压: _____ kPa

校准地点: _____

校准依据: _____

校准使用的主要设备

名称	编号	测量范围	不确定度或准确度等级或最大允许误差	证书编号	证书有效期至

一、流速范围校准:

流速上限 m/s	微压计读数 Pa			温度 °C	湿度 %RH	大气压 kPa	计算风速 m/s
测量不确定度							
流速下限 m/s	风速仪读数 m/s			平均风速 m/s			
测量不确定度							

二、流速均匀性 (□等间距法; □坐标轴法)

环境 参数	温度 °C	湿度 %RH	大气压 kPa

测点	试验段流速下限		试验段流速中间		试验段流速上限	
	微压计读数 Pa	换算风速 m/s	微压计读数 Pa	换算风速 m/s	微压计读数 Pa	换算风速 m/s
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
均匀性						

三、流速稳定性校准

环境参数	温度 ℃	湿度 %RH	大气压 kPa

测量次数	试验段流速下限		试验段流速中间		试验段流速上限	
	微压计读数 Pa	换算风速 m/s	微压计读数 Pa	换算风速 m/s	微压计读数 Pa	换算风速 m/s

1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
稳定性						

四、紊流度校准

位置	流速上限	流速中间	流速下限
0 点			
X 轴			

Y 轴			

Z 轴			
紊流度			

校准员：_____ 核验员：_____ 校准日期：_____

附录 D

校准证书内页格式

校准结果

校准项目		校准结果	不确定度
流速范围	流速下限		
	流速上限		
均匀性			/
稳定性			/
紊流度			/

附录 E

低速风洞校准不确定度评定示例

E.1 评定依据

本规范的测量不确定度评定依据是JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》。

E.2 标准设备和被校对象

E.2.1 标准设备

标准器及配套设备主要技术指标见表E.1。

表E.1 标准器及配套设备主要技术指标

分 类	名 称	主要技术指标
标准器	热式风速仪	范围：0.2m/s～5m/s；MPE：±(5%R+0.1)m/s
	标准皮托管	校准系数 <i>k</i> ：0.997～1.003，重复性≤0.3%
	微差压计	范围：0～2500Pa；MPE：±0.5Pa
配套设备	温度测量仪器	测量范围：（0～50）℃，MPE：±0.5℃
	湿度测量仪器	测量范围：（5～95）%RH，MPE：±5%RH
	大气压测量仪器	测量范围：（86～106）kPa，MPE：±0.2kPa。

E.2.2 被测对象

器具名称： 环形低速风洞

器具型号：DHS-500*500/830*830-VIII

制造单位：重庆蓝天仪器有限公司

E.3 流速范围不确定度评定

E.3.1 流速下限

将热式流速仪探头安装在风洞试验段截面中心点，使试验段流速缓慢上升，达到风洞设计下限流速并稳定后，读取热式流速仪示值，重复测量3次。

E.3.1.1 建立测量模型和分析不确定度来源

E.3.1.2 测量模型

校准过程中，流速下限为3次热式风速仪测量值的平均值，计算如公式（E.2）

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^n v_i \quad (\text{E.2})$$

式中：

v_i —热式风速仪单次测量值，m/s；

$\bar{v}$ —3次平均风速值，m/s。

E.3.1.3. 不确定度来源分析

(1) 热式风速测量重复性引入的标准不确定度;

(2) 热式风速仪引入的标准不确定度;

E. 3. 1. 4 不确定度分量评定

E. 3. 1. 4. 1 热式风速测量重复性引入的标准不确定度

6次测量值分别为0.24m/s、0.21m/s、0.23m/s、0.22m/s、0.23m/s、0.23m/s。计算6次测量值的标准偏差并按照实际校准工作时测量3次除以 $\sqrt{3}$, 得到测量重复性引入的标准不确定度: $u_1 = 0.006\text{m/s}$

E. 3. 1. 4. 2 热式风速引入的标准不确定度

根据热式风速仪证书, 热式风速仪在0.2m/s最大允许误差为0.11m/s, 热式风速仪引入的标准不确定度: $u_2 = 0.064\text{m/s}$ 。

E. 3. 1. 5 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总见表E. 3。

表E. 3 标准不确定度一览表

标准不确定度来源	u_i
测量重复性引入的标准不确定度 u_1	0.006m/s
热式风速仪引入的标准不确定度 u_2	0.064m/s

由公式E.4计算合成标准不确定度 $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}$ (E. 4) 得, $u_c = 0.064\text{m/s}$

E. 3. 1. 6 扩展不确定度

流速下限扩展不确定: $U_b = 2 \times u_c = 0.13\text{m/s}$, $k=2$

E. 3. 2 流速上限

将标准皮托管安装在风洞试验段截面中心点, 使试验段流速缓慢上升, 达到风洞设计上限流速并稳定后, 使用标准皮托管配合微差压计测量风洞上限流速。

E. 3. 2. 1 建立测量模型和分析不确定度来源

E. 3. 2. 2 测量模型

校准过程中, 使用标准皮托管配合微差压计测量风洞上限流速, 计算如下公式。

用风洞试验段内的空气温度按公式(E.5)计算出饱和水汽压:

$$e_w = k \times e^{(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T})} \quad (\text{E.5})$$

式中:

e_w —— T 温度下的饱和水汽压, Pa;

T ——试验段内空气温度, K;

$k=1\text{Pa}$;

A、B、C、D均为常数, 其值如下:

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

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

$C=33.93711047$

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

用风洞试验段内的空气温度、相对湿度和气压值按公式 (E.6) 计算出空气密度。

$$\rho = 3.48353 \times 10^{-3} \times \frac{1}{T} (P_0 - 0.378He_w) \quad (\text{E.6})$$

式中:

T ——试验段内空气温度, K;

P_0 ——试验段内气压, Pa;

H ——试验段内空气相对湿度, 用小数表示;

e_w —— T 温度下的饱和水汽压, Pa。

A.3 将空气密度值和微压计示值代入公式 (E.7) 计算出标准风速值。

$$v = k \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (\text{E.7})$$

v ——标准风速, 单位为米每秒 (m/s);

ρ ——空气密度, 单位千克每立方米 (kg/m^3);

p ——微压计示值, 单位为帕 (Pa);

k ——皮托管校准系数。

$$\text{将以上公式合成可得: } v = 23.961 \times K \sqrt{p} \times \sqrt{\frac{273.15+t}{P_0-0.378He_w}} \quad (\text{E.8})$$

故, 流速上限 v 的测量模型为 $Y = AX_1^{p_1}X_2^{p_2}\dots X_N^{p_N}$, 且各输入量的不确定度不相关, 由此得:

$$u_v = \sqrt{\frac{1}{4}u_p^2 + \frac{1}{4}u_T^2 + \frac{1}{4}u_r^2(P_0-0.378He_w) + u_\xi^2} \quad (\text{E.9})$$

E.3.2.3 不确定度来源分析

(1) 测量重复性引入的标准不确定度;

(2) 微差压计引入的标准不确定度;

(3) 皮托静压管校准系数引入的标准不确定度;

(4) 温度仪引入的标准不确定度;

(5) 气压计引入的标准不确定度;

(6) 湿度仪引入的标准不确定度。

E. 3. 2. 4 不确定度分量评定

E. 3. 2. 4. 1 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

6次微差压计测量值分别为40.32m/s、40.48m/s、40.37m/s、40.29m/s、40.34m/s、40.41m/s。计算6次测量值的标准偏差并按照实际校准工作时测量3次除以 $\sqrt{3}$, 得到测量重复性引入的标准不确定度: $u_1 = 0.04\text{m/s}$

E. 3. 2. 4. 2 微差压计引入的标准不确定度 u_p

微差压计的最大允许误差为 $\pm 0.5\text{Pa}$, 取均匀分布, 在40m/s附近差压值为970Pa左右, 微差压计引入的相对标准不确定度为:

$$u_p = \frac{0.5}{970 \times \sqrt{3}} \times 100\% = 0.03\%$$

E. 3. 2. 4. 3 标准皮托管校准系数引入的标准不确定度 u_ξ

根据标准皮托管检定证书, L型标准皮托管的重复性为0.30%, 检定L型标准皮托管装置的不确定为激光多普勒流速仪 $U_{\text{rel}} = 0.18\%$, 空气流速装置不确定为 $U_{\text{rel}} = 0.1\%$

按照JJG 518-2023皮托管检定规程, 每个点需重复测量6次故

$$u = \sqrt{\left(\frac{0.30\%}{\sqrt{6}}\right)^2 + \left(\frac{0.18\%}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.1\%}{2}\right)^2} = 0.16\%$$

试验使用的标准皮托管的校准系数为: $\xi = 1.002$, 故由标准皮托管校准系数引入的绝对不确定度分量为

$$u_\xi = 0.16\% \times 1.002 = 0.16\%$$

E. 3. 2. 4. 4 数显温湿度表进行温度测量。由数显温湿度表的校准证书可知, 扩展不确定度为 $U = 0.3^\circ\text{C}$ ($k=2$), 测试时环境温度 t 为 20.8°C , 则 T 的相对标准不确定度为:

$$u_T = \frac{0.3}{2 \times (20.8 + 273.15)} \times 100\% = 0.05\%$$

E. 3. 2. 4. 5 大气压力的相对标准不确定度 u_{p_0}

用大气压传感器进行大气压力测量。根据所用大气压传感器的校准证书, 准确度为0.1级, 按均匀分布, 则大气压力 P 的相对标准不确定度为:

$$u_{p_0} = \frac{0.001}{\sqrt{3}} \times 100\% = 0.058\%$$

E. 3. 2. 4. 6 空气相对湿度的相对标准不确定度 u_H

用温湿度计进行空气相对湿度测量。根据所用温湿度计的校准证书, 扩展不确定度为 $U=1.2\%RH(k=2)$, 测试时相对湿度为45%, 则空气相对湿度的相对标准不确定度为:

$$u_H = \frac{1.2\%}{2 \times 45\%} \times 100\% = 1.3\%$$

E. 3. 2. 4. 7 $u_r(P_0-0.378He_w)$ 的计算

根据公式(E. 5), 计算得到在校准环境温度 t 为 20.8°C 时, 饱和水蒸气压力 $e_w=2457.6\text{Pa}$,

则 $P_0-0.378He_w=101782.0\text{Pa}$

$$\begin{aligned} u^2(P_0-0.378He_w) &= u_{p_0}^2 + 0.378^2 H^2 u^2(e_w) + 0.378^2 e_w^2 u_H^2 \\ &= p^2 u_{p_0}^2 + 0.378^2 H^2 u^2(e_w) + 0.378^2 e_w^2 u_H^2 \end{aligned}$$

根据公式(3)计算得到:

$$u(e_w) = \frac{\partial(e_w)}{\partial(T)} u(T) = (2AT + B - \frac{D}{T^2}) e_w u(T) = 14.0247\text{Pa}$$

则由公式(6)计算得到: $u^2(p-0.378He_w) = 3665.18 (\text{Pa}^2)$

$$u(p-0.378He_w) = 60.54\text{Pa}$$

因此, $u_r(p-0.378He_w) = \frac{60.54}{101782.0} = 0.06\%$

根据公式(E. 9)合成计算各个标准器合成的标准不确定度:

$$u_v = \sqrt{\frac{1}{4} u_p^2 + \frac{1}{4} u_T^2 + \frac{1}{4} u_r^2(P_0-0.378He_w) + u_\xi^2} = 0.17\%$$

风洞流速上限3次测量平均值为 40.36m/s , 故合成标准不确定度为 0.07m/s

E. 3. 2. 5 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总见表E. 10。

表E. 10 标准不确定度一览表

标准不确定度来源	u_i
测量重复性引入的标准不确定度 u_1	0.04m/s
各个标准器合成不确定度 u_v	0.07m/s

由公式E.11计算合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_v^2} \quad (\text{E. 11})$$

得, $u_c=0.08 \text{ m/s}$

E. 3. 2. 6 扩展不确定度

流速上限扩展不确定: $U_0=2 \times u_c=0.16\text{m/s}$, $k=2$
