

JJF

中华人民共和国民用航空部门计量技术规范

JJF(民航)0107-2020

代替 JJF(民航)0107-2010

冲压空气涡轮测试仪

RAM Air Turbine Tester

2020-07-20 发布

2020-10-01 实施

中国民用航空局 发布

冲压空气涡轮测试仪 校准规范

Calibration Specification for

RAM Air Turbine Tester

JJF(民航) 0107—2020

代替 JJF(民航) 0107—2010

本规范经中国民用航空局2020年07月20日批准，并自2020年10月01日起施行。

归口单位：中国民用航空局航空器适航审定司

起草单位：北京飞机维修工程有限公司

本规范由起草单位负责解释。

本规范起草人：

王 悦 (北京飞机维修工程有限公司)

崔文涛 (北京飞机维修工程有限公司)

田 乐 (北京飞机维修工程有限公司)

陈永超 (北京飞机维修工程有限公司)

孟延伟 (北京飞机维修工程有限公司)

杜伟军 (中国民航科学技术研究院)

目 录

引言	(I)
1 范围	(1)
2 概述	(1)
3 计量特性	(1)
4 校准条件	(2)
4.1 环境条件	(2)
4.2 校准设备	(3)
5 校准项目	(3)
6 校准方法	(4)
7 校准结果	(7)
8 复校时间间隔	(7)
附录 A 冲压空气涡轮测试仪校准记录格式	(8)
附录 B 冲压空气涡轮测试仪校准证书内容	(12)
附录 C 冲压空气涡轮测试仪不确定度评定方法	(13)
附录 D 冲压空气涡轮测试仪不确定度评定示例	(24)

引 言

本规范参考 JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则和 JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示的编制，其主要内容依据厂家操作手册《INSTRUCTION MANUAL HYCOM RAT KIT HRT-01:32700 HFK-02-AC-DC:3270》08, Jul, 2014 和《PGRAT1 Technical Manual》Date of issue: 31. 12. 2009 英文版编写。对 JJF(民航)0107-2010《HFK-02 型冲压空气涡轮测试仪校准规范》进行修订的。与《HFK-02 型冲压空气涡轮测试仪校准规范》JJF（民航）0107-2010 相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

- 将规范从仅适用于 HFK-02 型扩大至包括 PGRAT1 型，同时适用于内场液压试验台与冲压空气涡轮测试仪相同参数的校准；
- 增加 PGRAT1 型冲压空气涡轮测试仪计量特性，包括：压力示值、温度计示值、转速指示器示值、流量计示值；
- 温度计校准设备更换为计量炉；
- 转速指示器校准设备信号发生器的允差要求提高；
- 压力示值的校准（指针式压力表示值的校准和数显压力指示器示值的校准）增加 PGRAT1 型校准点；
- 温度计示值的校准增加 PGRAT1 型校准点；
- 转速指示器示值的校准增加 PGRAT1 型校准点；
- 流量计示值的校准增加 PGRAT1 型校准点；
- 压力示值不确定度评定数据增大；
- 增加了各参数不确定度评定点，增加 PGRAT1 型冲压空气涡轮测试仪不确定度示例。

本规范历次发布的版本 JJF（民航）0107-2010。

冲压空气涡轮测试仪校准规范

1 范围

本规范适用于民用航空系统飞机维修中应用的冲压空气涡轮测试仪（以下简称测试仪）的校准，对于内场液压试验台，如果本规范能够满足其相关参数的技术要求，可参照本规范进行校准。

2 概述

测试仪适用于民用航空维修领域中辅助液力系统冲压空气涡轮的功能测试和校准。用于测量冲压空气涡轮转速、由涡轮旋转驱动的液力泵产生的压力、以及由液力泵产生的相关回路的流量、压力和温度。

测试仪主要由指针式压力表、温度计、转速指示器、数显压力指示器、流量控制阀、流量计、油料过滤器、接线盒以及进油管路和回油管路等组成。

3 计量特性

3.1 压力示值

3.1.1 指针式压力表示值

指针式压力表测量范围及允差见表 1。

表 1

型号	测量范围	允差
HFK-02 型	(0~27.6) MPa [(0~4 000) psi]	±0.27 MPa (40 psi)
PGRAT1 型	(0~25) MPa [(0~250) bar]	±0.25 MPa (2.5 bar)

3.1.2 数显压力指示器示值

数显压力指示器测量范围及允差见表 2。

表 2

型号	测量范围	允差
HFK-02 型	(0~20) MPa [(0~2 901) psi]	±0.1 MPa (15 psi)
PGRAT1 型	(0~30) MPa [(0~4 350) psi]	±0.15 MPa (21.75 psi)

3.2 温度计示值

温度计测量范围及允差见表 3。

表 3

型号	测量范围	允差
HFK-02 型	(0~100) °C	±1.6 °C
PGRAT1 型		±1.0 °C

3.3 转速指示器示值

转速指示器测量范围及允差见表 4。

表 4

型号	测量范围	允差
HFK-02 型	(0~5 333) r/min	±27 r/min
PGRAT1 型	(0~10 000) r/min	±2 r/min

3.4 流量计示值

流量计测量范围及允差见表 5。

表 5

型号	测量范围	允差
HFK-02 型	(0~60) L/min	±2% 读数
PGRAT1 型	(5~150) L/min	±1.5 L/min

4 校准条件

4.1 环境要求

环境温度：(20±10) °C

相对湿度：≤85%RH

4.2 校准设备

4.2.1 压力标准装置

测量范围：(0~40) MPa

准确度等级：0.05 级

4.2.2 计量炉

测量范围：(0 ~100) °C

温场均匀度: ± 0.1 °C

偏差: ± 0.2 °C

4.2.3 流量标准装置

测量范围: 应覆盖被校测试仪流量计的校准点

允差: $\pm 0.3\%$ 读数

4.2.4 直流电压校准源

测量范围: (0~12) V

允差: $\pm 0.1\%$ 读数

4.2.5 信号发生器

频率范围: (DC~20 kHz)

允差: ± 50 ppm

4.2.6 辅助设备

4.2.6.1 直流稳压源

(0~30) V, 6 A

4.2.6.2 液力源

工作流量: 大于 150 L/min

4.2.6.3 管路和接头

系统连接所需要的管路和接头

5 校准项目

校准项目如下:

- a) 外观检查;
- b) 通电试压检查;
- c) 压力示值的校准;
- d) 温度计示值的校准;
- e) 转速指示器示值的校准;
- f) 流量计示值的校准。

6 校准方法

6.1 外观检查

测试仪各部件应齐全完好，无影响正常工作的机械损伤，内部安装应牢固、无松动现象，管路、接头无破损。指针表分度盘应平整光洁，各标识应清晰可辨，表玻璃应无色透明，不应有影响读数的损伤。指针式压力表的指针应位于零位标志内。

6.2 通电试压检查

6.2.1 启动测试仪电源开关。通电后测试仪各仪表显示值应清晰、无叠字断划、亮度应均匀，小数点和极性、过载的状态显示应正确。

6.2.2 预热 15 min 后测试仪数显仪表显示值不应有间隔计数顺序的跳动。

6.2.3 按图 1 连接测试仪、流量标准装置、液力源。

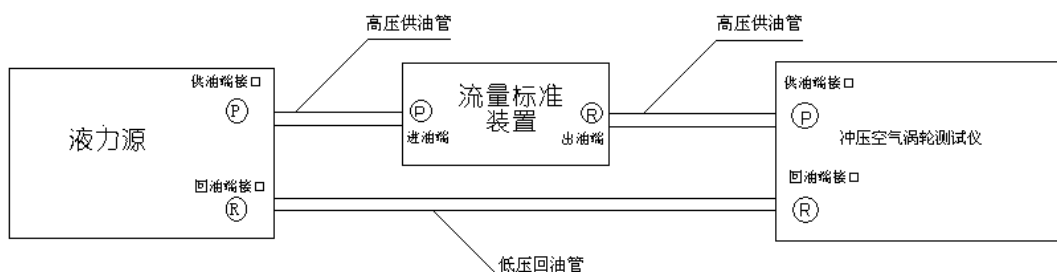


图 1 试压检查连接图

6.2.4 进行试压检查。启动液力源，平稳增加流量输出直至测试仪流量上限，测试仪各仪表应显示正常，内部管路接口处无渗漏。

6.2.5 试压后，将液力源流量降至 0 L/min，将测试仪电源开关关闭。

6.3 指针式压力表示值的校准

6.3.1 将指针式压力表与测试仪之间的管路断开，连接至压力标准装置的测量接口上。

6.3.2 调节压力标准装置，按照表 6 的校准点依次提供标准压力，读取指针式压力表的示值，将数据填入附录 A 的表 A1 中。

表 6

型号	校准点
HFk-02 型	0 MPa(0 psi)、3.4 MPa(500 psi)、6.9 MPa(1 000 psi)、10.3 MPa(1 500 psi)、13.8 MPa(2 000 psi)、17.2 MPa(2 500 psi)、20.7 MPa(3 000 psi)、24.1 MPa(3 500 psi)、27.6 MPa(4 000 psi)
PGRAT1 型	0 MPa(0 bar)、5 MPa(50 bar)、10 MPa(100 bar)、15 MPa(150 bar)、20 MPa(200 bar)、25 MPa(250 bar)

6.3.3 校准完毕后，恢复指针式压力表与测试仪之间的连接。

6.4 数显压力指示器示值的校准

6.4.1 将测试仪的数显压力指示器信号输入端与直流电压校准源连接，并将直流电压校准源和测试仪电源打开。

6.4.2 调节直流电压校准源，按照表 7 的校准点依次提供标准电压，读取压力示值填入附录 A 的表 A.2 中。

表 7

型号	校准点
HFK-02 型	1.2 V[1 MPa(145 psi)]、2.2V[6 MPa(870 psi)]、 3.0 V[10 MPa(1 450 psi)] 、3.8 V[14 MPa(2 031 psi)]、 5 V[20 MPa(2 901 psi)]
PGRAT1 型	1 V[0 MPa(0 psi)]、2 V[5 MPa(725 psi)]、3 V[10 MPa(1 450 psi)]、 4 V[15 MPa(2 175 psi)]、5 V[20 MPa(2 900 psi)]、 6 V[25 MPa(3 625 psi)]、6.01 V[25.042 MPa(3 632 psi)]、 7 V[30 MPa(4 350 psi)]

6.4.3 校准完毕后，将直流电压校准源和测试仪的电源关闭，断开测试仪与直流电压校准源的连接。

6.5 温度计示值的校准

6.5.1 将温度计的感温包从测试仪上拆下，插入计量炉恒温区中。

6.5.2 设定计量炉温度，按照表 8 的校准点依次提供标准温度，待示值稳定后，读取被校温度计示值，将数据填入附录 A 的表 A.3 中。

表 8

型号	校准点
HFK-02 型	40 °C、60 °C、80 °C
PGRAT1 型	5 °C、30 °C、60 °C、90 °C

6.5.3 校准完毕后，恢复温度计的感温包与测试仪的连接。

6.6 转速指示器示值的校准

6.6.1 将测试仪的转速指示器信号输入端与信号发生器连接，并将信号发生器和

测试仪电源打开。

6.6.2 调节信号发生器,按照表9的校准点依次提供标准频率,读取转速示值,将数据填入附录A的表A.4中。

表9

型号	校准点
HFK-02 型	100 Hz (333 r/min)、300 Hz (1 000 r/min)、900 Hz (3 000 r/min)、1 200 Hz (4 000 r/min)、1 600 Hz (5 333 r/min)
PGRAT1 型	150 Hz (500 r/min)、300 Hz (1 000 r/min)、1 500 Hz (5 000 r/min)、3 000 Hz (1 0000 r/min)

6.6.3 校准完毕后,将信号发生器和测试仪电源关闭,断开测试仪与信号发生器的连接。

6.7 流量计示值的校准

6.7.1 将测试仪电源开关打开。

6.7.2 启动液力源,调节液力源和测试仪面板上的控制阀,按照表10的校准点依次提供流量值,记录流量标准装置显示的流量值和测试仪流量计显示的流量值,每一个校准点应测量6次。计算6次测量数据的平均值,将测量数据和计算结果分别填入附录A的表A5中。

表10

型号	校准点
HFK-02 型	10 L/min、20 L/min、30 L/min、40 L/min、50 L/min、60 L/min
PGRAT1 型	5 L/min、30 L/min、60 L/min、90 L/min、120 L/min、150 L/min

6.7.3 校准完毕后,关闭液力源流量输出,将液力源和测试仪电源关闭,拆掉外部的连接油管。

7 校准结果

经校准的测试仪出具校准证书。校准证书的内容见附录B。测量不确定度评定参见附录C。测量不确定度评定示例参见附录D。

8 复校时间间隔

测试仪的复校时间间隔一般不超过 12 个月，必要时可随时送校。

附录 A

校准记录格式

设备名称	_____	型号规格	_____
制造厂	_____	设备编号	_____
送校单位	_____	相对湿度	_____
环境温度	_____	校准结果	_____

校准员 _____ 核验员 _____ 校准日期 _____

外观检查: _____

通电试压检查: _____

表 A.1 指针式压力表示值误差校准记录

压力校准点 ()	被校表轻敲后示值 ()	示值误差 ()	允许误差 ()

表 A.2 数显压力指示器示值误差校准记录

标准值		测量值 psi	示值误差 psi	允许误差 psi
V	psi			

表 A.3 温度计示值误差校准记录

标准值 ℃	测量值 ℃	示值误差 ℃	允许误差 ℃

表 A.4 转速指示器示值误差校准记录

标准值		测量值 r/min	示值误差 r/min	允许误差 r/min
Hz	r/min			

表 A.5 (续)

流量校准点 (L/min)	测量值 (L/min)		标准值 (L/min)		示值误差 (L/min)	允许误差 (L/min)
	测量值	平均值	标准值	平均值		

附录 B

校准证书的内容

校准证书的内容应排列有序、清晰，一般包括下列内容：

- a) 标题“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 证书或报告的唯一性标识（如编号），页码及总页的标识；
- d) 送校单位的名称和地址；
- e) 被校测试仪的描述和明确标识；
- f) 校准日期；
- g) 采用本校准规范的说明，包括名称、代号以及对本规范的任何偏离、增加或减少的说明；
- h) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- i) 校准环境的描述；
- j) 校准结果：数据及测量不确定度的说明；
- k) 校准证书或校准报告签发人的签名或等效标识，以及签发日期；
- l) 复校时间间隔的建议；
- m) 校准实验室签章；
- n) 校准结果仅对被校对象有效的说明；
- o) 未经实验室书面批准，不得局部复制校准证书的声明。

附录 C

冲压空气涡轮测试仪不确定度评定方法

C.1 指针式压力表示值的不确定度评定方法

C.1.1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据: HYCOM HFK-02 冲压空气涡轮程序手册

PGRAT1 校准手册

测量标准: 压力标准装置

数学模型: $\delta_p = p_{\text{被}} - p_{\text{标}}$

式中: δ_p ——指针式压力表的压力示值误差, psi;

$p_{\text{被}}$ ——指针式压力表在被测点上的示值, psi;

$p_{\text{标}}$ ——加压后的标准器产生的标准压力值, psi。

灵敏系数: $c_1 = \frac{\partial \delta_p}{\partial p_{\text{被}}} = 1$; $c_2 = \frac{\partial \delta_p}{\partial p_{\text{标}}} = -1$

不确定度分布: 见表 C.1。

表 C.1

标准不确定度分量	不确定度来源	灵敏系数
$u(p_{\text{被}1})$	测量重复性	1
$u(p_{\text{被}2})$	估读误差引入的不确定度	1
$u(p_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度	-1

C.1.2 不确定度 $u(p_{\text{被}})$ 的评定方法

C.1.2.1 计算方法

$u(p_{\text{被}})$ 包括两个不确定度分量 $u(p_{\text{被}1})$ 和 $u(p_{\text{被}2})$, 计算方法见下列公式。

$$u(p_{\text{被}}) = \sqrt{u(p_{\text{被}1})^2 + u(p_{\text{被}2})^2}$$

C.1.2.2 不确定度分量 $u(p_{\text{被}1})$ 的评定方法

设测试仪指针式压力表的压力示值在某点附近, 在重复性条件下用标准器连续

校准 n 次, $n \geq 10$, 得到观察列 x_i ($i=1 \sim n$)。 $u(p_{\text{被}1})$ 属于 A 类不确定度, 采用贝塞尔公式计算, 求出观测值的算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 单次实验标准差

$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ 。 若在实际测量中取 m 次测量的算术平均值为一次测量

结果, 则 $u(p_{\text{被}1}) = \frac{s_0}{\sqrt{m}}$, s_0 可以选取为实验室经验数值的实验标准差 $s(x_i)$ 。

C.1.2.3 不确定度分量 $u(p_{\text{被}2})$ 的评定方法

由于指针式压力表的读数是由人眼观察指针在分度盘上指出的被测压力值, 因此在读数过程中必将产生一定的误差, 其引入的不确定度 $u(p_{\text{被}2})$ 属于 B 类不确定度。人眼的读数误差为人眼最小分辨力读数的半宽, 人眼最小分辨力读数为指针式压力表最小分度值的五分之一, 设最小分辨力为 a 。 $u(p_{\text{被}2})$ 所属分布类型的包含因子为 $\sqrt{3}$, 因此: $u(p_{\text{被}2}) = \frac{a}{2\sqrt{3}}$

C.1.3 不确定度分量 $u(p_{\text{标}})$ 的评定方法

$u(p_{\text{标}})$ 是由压力标准装置引入的不确定度, 属于 B 类不确定度。若标准器检定证书或校准证书上出具了不确定度的可直接引用在测量点上的标准不确定度 (需注意的是证书经常给出的是扩展不确定度, 应将其除以扩展系数换算为标准不确定度); 若标准器检定证书或校准证书上未出具不确定度, 可引用标准器在此测量点上的准确度或允差计算得到的不确定度, 设允差为 $\pm a$, 所属分布类型的包含因子为

$$\sqrt{3}, u(p_{\text{标}}) = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

C.1.4 合成不确定度 $u(\delta_p)$ 及扩展不确定度 U 的评定方法

按下列公式计算合成标准不确定度。

$$u(\delta_p) = \sqrt{c_1^2 u(p_{\text{被}})^2 + c_2^2 u(p_{\text{标}})^2}$$

按下列公式计算扩展不确定度 U

$$U = ku (\delta_p)$$

式中： k 为包含因子，一般取2。

C.2 温度示值的不确定度评定方法

C.2.1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据：HYCOM HFK-02 冲压空气涡轮程序手册

PGRAT1 校准手册

测量标准：计量炉

数学模型： $\delta_t = t_{\text{被}} - T_{\text{标}}$

式中： δ_t ——压力式温度计的示值误差，℃；

t ——压力式温度计测量示值，℃；

T ——计量炉的温度示值，℃。

灵敏系数： $c_1 = \frac{\partial \delta_t}{\partial t_{\text{被}}} = 1$ ； $c_2 = \frac{\partial \delta_t}{\partial T_{\text{标}}} = -1$

不确定度分布：见表C.2。

表 C.2

标准不确定度分量	不确定度来源	灵敏系数
$u(t_{\text{被}1})$	测量重复性	1
$u(t_{\text{被}2})$	估读误差引入的不确定度	1
$u(T_{\text{标}1})$	计量炉温度偏差	-1
$u(T_{\text{标}2})$	计量炉温场均匀性	-1

C.2.2 不确定度分量 $u(t_{\text{被}})$ 的评定方法

C.2.2.1 计算方法

$u(t_{\text{被}})$ 包括两个不确定度分量 $u(t_{\text{被}1})$ 和 $u(t_{\text{被}2})$ ，计算方法见下列公式。

$$u(t_{\text{被}}) = \sqrt{u(t_{\text{被}1})^2 + u(t_{\text{被}2})^2}$$

C.2.2.2 不确定度分量 $u(t_{\text{被}1})$ 的评定方法

设测试仪压力式温度计的温度示值在某点附近，在重复性条件下用标准器连续校准 n 次， $n \geq 10$ ，得到观察列 x_i ($i=1 \sim n$)。 $u(t_{\text{被}1})$ 属于 A 类不确定度，采用贝塞尔

公式计算，求出观测值的算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ ，单次实验标准差

$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ 。若在实际测量中取 m 次测量的算术平均值为一次测量结果，则 $u(t_{\text{被}1}) = \frac{s_0}{\sqrt{m}}$ ， s_0 可以选取为实验室经验数值的实验标准差 $s(x_i)$ 。

果，则 $u(t_{\text{被}1}) = \frac{s_0}{\sqrt{m}}$ ， s_0 可以选取为实验室经验数值的实验标准差 $s(x_i)$ 。

C.2.2.3 不确定度分量 $u(t_{\text{被}2})$ 的评定方法

$u(t_{\text{被}2})$ 来源于被测温度计的示值估读，此处压力式温度计示值估读的最小单位为其最小分度值的十分之一，设最小估读值为 a_0 ，所属分布类型的包含因子为 $\sqrt{3}$ ，

则 $u(t_{\text{被}2}) = \frac{a}{2\sqrt{3}}$

C.2.3 不确定度分量 $u(T_{\text{标}})$ 的评定方法

C.2.3.1 计算方法

$u(T_{\text{标}})$ 由两部分组成分别是 $u(T_{\text{标}1})$ 和 $u(T_{\text{标}2})$ ，按下列公式计算：

$$u(T_{\text{标}}) = \sqrt{u(T_{\text{标}1})^2 + u(T_{\text{标}2})^2}$$

C.2.3.2 不确定度分量 $u(T_{\text{标}1})$ 的评定方法

$u(T_{\text{标}1})$ 是由计量炉温度偏差引入的标准不确定度分量，设温度偏差为 $\pm a$ ，所属分布类型的包含因子为 $\sqrt{3}$ ， $u(T_{\text{标}1}) = \frac{a}{\sqrt{3}}$

C.2.3.3 不确定度分量 $u(T_{\text{标}2})$ 的评定方法

$u(T_{\text{标}2})$ 是由计量炉温度均匀性引入的标准不确定度分量，设均匀性为 $\pm a$ ，所属分布类型的包含因子为 $\sqrt{3}$ ， $u(T_{\text{标}2}) = \frac{a}{\sqrt{3}}$

C.2.4 合成不确定度 $u(\delta_t)$ 及扩展不确定度 U 的评定方法

合成标准不确定度按下列公式计算。

$$u(\delta_t) = \sqrt{c_1^2 u(t_{\text{被}})^2 + c_2^2 u(T_{\text{标}})^2}$$

用下列公式计算扩展不确定度 U 。

$$U = k u(\delta_t)$$

式中： k 为包含因子，一般取 2。

C.3 流量示值的不确定度评定

C.3.1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据：HYCOM HFK-02 冲压空气涡轮程序手册

PGRAT1 校准手册

测量标准：流量标准装置

数学模型： $\delta v = Q_v - Q_{v_s}$

式中： δv ——齿轮流量计的示值误差，L/min；

Q_v ——单位时间流过被检流量计的实际体积值，L/min；

Q_{v_s} ——单位时间流过流量标准装置的实际体积值，L/min。

灵敏系数： $c_1 = \frac{\partial \delta v}{\partial Q_v} = 1$ ； $c_2 = \frac{\partial \delta v}{\partial Q_{v_s}} = -1$ ；

不确定度分布见表 C.3。

表 C.3

标准不确定度分量	不确定度来源	灵敏系数
$u(q_{\text{被}1})$	被校流量计测量重复性	1
$u(q_{\text{被}2})$	流量显示表分辨率	1
$u(q_{\text{标}1})$	标准器的准确度等级	-1
$u(q_{\text{标}2})$	标准器的准确度等级	-1

C.3.2 不确定度分量 $u(q_{\text{被}})$ 的评定方法

C.3.2.1 计算方法

$u(q_{\text{被}})$ 包括两个不确定度分量 $u(q_{\text{被}1})$ 和 $u(q_{\text{被}2})$, 计算方法见下列公式。

$$u(q_{\text{被}}) = \sqrt{u(q_{\text{被}1})^2 + u(q_{\text{被}2})^2}$$

C.3.2.2 不确定度分量 $u(q_{\text{被}1})$ 的评定方法

设测试仪流量计示值在某点附近, 在重复性条件下用标准器连续校准 n 次, $n \geq 10$, 得到观察列 x_i ($i=1 \sim n$)。 u_1 属于 A 类不确定度, 采用贝塞尔公式计算, 求出

观测值的算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 单次实验标准差 $s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$

若在实际测量中取 m 次测量的算术平均值作为测量结果, 则 $u_1 = \frac{s_0}{\sqrt{m}}$, s_0 可以选取

为实验室经验数值的实验标准差 $s(x_i)$ 。

C.3.2.3 不确定度分量 $u(q_{\text{被}2})$ 的评定方法。

$u_2(r_{\text{被}})$ 转速指示器的最小分辨力带来的不确定度分量, 属于 B 类不确定度。设最小分辨力为 a , 分量变化为半宽, 所属分布类型的包含因子 k 为 $\sqrt{3}$, $u(q_{\text{被}2}) = \frac{a}{2\sqrt{3}}$

C.3.3 不确定度 $u(q_{\text{标}})$ 的评定方法

C.3.3.1 计算方法

标准器引入的不确定 $u(q_{\text{标}})$ 由两部分组成分别为 $u(q_{\text{标}1})$ 和 $u(q_{\text{标}2})$, 按下列公式计算:

$$u(q_{\text{标}}) = \sqrt{u(q_{\text{标}1})^2 + u(q_{\text{标}2})^2}$$

C.3.3.2 不确定度分量 $u(q_{\text{标}1})$ 的评定方法

若标准器检定证书或校准证书上出具了不确定度的可直接引用在测量点上的标准不确定度 (需注意的是证书经常给出的是扩展不确定度, 应将其除以扩展系数换算为标准不确定度); 若标准器检定证书或校准证书上未出具不确定度, 可引用标准

器在此测量点上的准确度或允差计算得到的不确定度, 设允差为 $\pm a$, 所属分布类型的包含因子为 $\sqrt{3}$, $u(q_{\text{标}1}) = \frac{a}{\sqrt{3}}$

C.3.3.3 不确定度分量 $u(q_{\text{标}2})$ 的评定方法

设流量标准装置流量示值在某点附近, 在重复性条件下连续校准被测流量计 n 次, $n \geq 10$, 得到标准值列 x_i ($i=1 \sim n$)。 u_3 属于 A 类不确定度, 采用贝塞尔公式计

算, 求出观测值的算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。

单次实验标准差 $s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ 若在实际测量中取 m 次测量的算术

平均值为一次测量结果, 则 $u_3 = \frac{s_0}{\sqrt{m}}$, s_0 可以选取为实验室经验数值的实验标准差

$s(x_i)$ 。

C.3.4 合成不确定度 $u(\delta_v)$ 及扩展不确定度 U 的评定方法

合成标准不确定度按下列公式计算,

$$u(\delta_v) = \sqrt{c_1^2 u(q_{\text{被}})^2 + c_2^2 u(q_{\text{标}})^2}$$

用下列公式计算扩展不确定度 U , 式中: k 为包含因子, 一般取 2。

$$U = ku(\delta_v)$$

C.4 数显压力指示器示值的不确定度评定方法

C.4.1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据: HYCOM HFK-02 冲压空气涡轮程序手册

PGRAT1 校准手册

测量标准: 直流电压校准源

数学模型: $\delta_p = p_{\text{被}} - p_{\text{标}}$

式中: δ_p ——数显压力指示器的示值误差, psi;

$p_{\text{被}}$ ——数显压力指示器在被测点上的测量示值, psi;

$p_{\text{标}}$ ——电压所对应的标准值, psi;

$$\text{灵敏系数: } c_1 = \frac{\partial \delta_p}{\partial p_{\text{被}}} = 1 ; c_2 = \frac{\partial \delta_p}{\partial p_{\text{标}}} = -1$$

不确定度分布: 见表 C. 4。

表 C. 4

标准不确定度分量	不确定度来源	灵敏系数
$u(p_{\text{被}1})$	数显压力指示器示值重复性	1
$u(p_{\text{被}2})$	压力指示器的最小分辨力	1
$u(p_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度	-1

C. 4. 2 不确定度分量 $u(p_{\text{被}})$ 的评定方法

C. 4. 2. 1 计算方法

$u(p_{\text{被}})$ 包括两个不确定度分量 $u(p_{\text{被}1})$ 和 $u(p_{\text{被}2})$, 计算方法见下列公式。

$$u(p_{\text{被}}) = \sqrt{u(p_{\text{被}1})^2 + u(p_{\text{被}2})^2}$$

C. 4. 2. 2 不确定度分量 $u(p_{\text{被}})$ 的评定方法

设测试仪数显压力指示器示值在某点附近, 在重复性条件下用标准器连续校准 n 次, $n \geq 10$, 得到观察列 x_i ($i=1 \sim n$)。 $u(p_{\text{被}})$ 属于 A 类不确定度, 采用贝塞尔公式

计算, 求出观测值的算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 单次实验标准差

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{若在实际测量中取 } m \text{ 次测量的算术平均值为一次测量结果, 则 } u(p_{\text{被}}) = \frac{s_0}{\sqrt{m}}, s_0 \text{ 可以选取为实验室经验数值的实验标准差 } s(x_i)。$$

C. 4. 2. 3 不确定度分量 $u(p_{\text{被}2})$ 的评定方法

$u(p_{\text{被}2})$ 转速指示器的最小分辨力带来的不确定度分量, 属于 B 类不确定度。设

最小分辨力为 a , 分量变化为半宽, 所属分布类型的包含因子 k 为 $\sqrt{3}$, $u(p_{\text{被}2}) = \frac{a/2}{\sqrt{3}}$

C.4.3 不确定度分量 $u(p_{\text{标}})$ 的评定方法

$u(p_{\text{标}})$ 是由直流电压校准源引入的不确定度。由于标准器提供给数显压力指示器的是电压信号, 和对应的压力指示值存在线性关系, 线性系数为 725, 因此在计算不确定度时需将电压信号转换为压力信号。若标准器检定证书或校准证书上出具了不确定度的可直接引用在测量点上的标准不确定度 (需注意的是证书经常给出的是扩展不确定度, 应将其除以扩展系数换算为标准不确定度); 若标准器检定证书或校准证书上未出具不确定度, 可引用标准器在此测量点上的准确度或允差计算得到的不确定度, 设允差为 $\pm a$, 所属分布类型的包含因子为 $\sqrt{3}$, 按下面公式计算 $u(p_{\text{标}})$:

$$u(p_{\text{标}}) = \frac{a \times 725}{\sqrt{3}}$$

C.4.4 合成不确定度 $u(\delta_p)$ 及扩展不确定度 U 的评定方法

按下列公式计算合成标准不确定度。

$$u(\delta_p) = \sqrt{c_1^2 u(p_{\text{被}})^2 + c_2^2 u(p_{\text{标}})^2}$$

按下列公式计算扩展不确定度 U

$$U = k u(\delta_p)$$

式中: k 为包含因子, 一般取 2。

C.5 转速指示器示值的不确定度评定方法

C.5.1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据: HYCOM HFK-02 冲压空气涡轮程序手册

PGRAT1 校准手册

测量标准: 信号发生器

数学模型: $\delta_r = r_{\text{被}} - R_{\text{标}}$

式中: δ_r ——转速指示器的示值误差, r/min;

$r_{\text{被}}$ ——转速指示器在被测点上的测量示值, r/min;

$R_{\text{标}}$ ——标准器给出频率所对应的标准值, r/min。

$$\text{灵敏系数: } c_1 = \frac{\partial \delta_r}{\partial r_{\text{被}}} = 1 ; c_2 = \frac{\partial \delta_r}{\partial R_{\text{标}}} = -1$$

不确定度分布: 见表 C.5。

表 C.5

标准不确定度分量	不确定度来源	灵敏系数
$u(r_{\text{被}1})$	转速指示器示值重复性	1
$u(r_{\text{被}2})$	转速指示器的最小分辨力	1
$u(R_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度	-1

C.5.2 不确定度分量 $u(r_{\text{被}})$ 的评定方法

C.5.2.1 计算方法

$u(r_{\text{被}})$ 包括两个不确定度分量 $u(r_{\text{被}1})$ 和 $u(r_{\text{被}2})$, 计算方法见下列公式。

$$u(r_{\text{被}}) = \sqrt{u(r_{\text{被}1})^2 + u(r_{\text{被}2})^2}$$

C.5.2.2 不确定度分量 $u(r_{\text{被}1})$ 的评定方法

设测试仪数显转速指示器示值在某点附近, 在重复性条件下用标准器连续校准 n 次, $n \geq 10$, 得到观察列 x_i ($i=1 \sim n$)。 $u(r_{\text{被}})$ 属于 A 类不确定度, 采用贝塞尔公式

计算, 求出观测值的算术平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 单次实验标准差

$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ 若在实际测量中取 m 次测量的算术平均值为一次测量结

果, 则 $u(r_{\text{被}1}) = \frac{s_0}{\sqrt{m}}$, s_0 可以选取为实验室经验数值的实验标准差 $s(x_i)$ 。

C.5.2.3 不确定度分量 $u(r_{\text{被}2})$ 的评定方法。

$u_2(r_{\text{被}})$ 转速指示器的最小分辨力带来的不确定度分量, 属于 B 类不确定度。设

最小分辨力为 a , 分量变化为半宽, 所属分布类型的包含因子 k 为 $\sqrt{3}$, $u(r_{\text{被}2}) = \frac{a}{2\sqrt{3}}$

C.5.3 不确定度分量 $u(R_{\text{标}})$ 的评定方法

$u(R_{\text{标}})$ 是由信号产生器引入的不确定度, 属于 B 类不确定度。由于标准器提供给数显转速指示器的是频率信号, 和对应的转速指示值存在线性关系, 线性系数为 3.33, 因此在计算不确定度时需要将频率信号转换为转速信号。若标准器检定证书或校准证书上出具了不确定度的可直接引用在测量点上的标准不确定度 (需注意的是证书经常给出的是扩展不确定度, 应将其除以扩展系数换算为标准不确定度); 若标准器检定证书或校准证书上未出具不确定度, 可引用标准器在此测量点上的准确度或允差计算得到的不确定度, 设允差为 $\pm a$, 所属分布类型的包含因子为 $\sqrt{3}$,

$$u(R_{\text{标}}) = \frac{a \times 3.33}{\sqrt{3}}$$

C.5.4 合成不确定度 $u(\delta_r)$ 及扩展不确定度 U 的评定方法

按下列公式计算合成标准不确定度。

$$u(\delta_r) = \sqrt{c_1^2 u(r_{\text{被}})^2 + c_2^2 u(R_{\text{标}})^2}$$

按下列公式计算扩展不确定度 U

$$U = k u(\delta_r)$$

式中: k 为包含因子, 一般取 2。

附录 D

冲压空气涡轮测试仪不确定度评定示例

D.1 HFK-02 型

D.1.1 指针式压力表示值的不确定度评定

D.1.1.1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据：HYCOM HFK-02 冲压空气涡轮程序手册。

测量标准：压力标准装置

数学模型：

$$\delta_p = p_{\text{被}} - p_{\text{标}}$$

式中： δ_p ——指针式压力表的压力示值误差，psi；

$p_{\text{被}}$ ——指针式压力表在被测点上的示值，psi；

$p_{\text{标}}$ ——加压后的标准器产生的标准压力值，psi。

不确定度分布：见表 D.1。

表 D.1

标准不确定度分量	不确定度来源
$u(p_{\text{被}1})$	测量重复性
$u(p_{\text{被}2})$	人眼读数引入的不确定度
$u(p_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度

D.1.1.2 由被测量引入的不确定度评定

D.1.1.2.1 不确定度分量 $u(p_{\text{被}1})$ 的评定

以 HFK-02 冲压空气涡轮测试仪指针式压力表压力示值在 4 000 psi 为例，用数字压力计为标准器连续校准 10 次，得到观察列，采用贝塞尔公式计算。

被校指针式压力表压力示值如下：

$$x_1=4\ 020\ \text{psi} \quad x_2=4\ 020\ \text{psi}$$

$$x_3=4\ 020\ \text{psi} \quad x_4=4\ 020\ \text{psi}$$

$$x_5=4\ 020\ \text{psi} \quad x_6=4\ 040\ \text{psi}$$

$$x_7=4\ 020\ \text{psi} \quad x_8=4\ 040\ \text{psi}$$

$$x_9=4\ 020\ \text{psi} \quad x_{10}=4\ 020\ \text{psi}$$

则 x 的平均值 ($n=10$) 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 4\ 024\ \text{psi}$$

$$\text{实验标准差: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 8.4\ \text{psi}$$

重复条件或复现条件下多次测量的算术平均值的分布符合正态分布。一般用观测的算术平均值作为测量结果, 所以测量重复性引入的标准不确定度分量为算术平均值的实验标准差:

$$u(p_{\text{被}1}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 2.6\ \text{psi}$$

D. 1. 1. 2. 2 不确定度分量 $u(p_{\text{被}2})$ 的评定

由于指针式压力表的读数是由人眼观察指针在分度盘上指出的被测压力值, 因此在读数过程中必将产生一定的误差, 其引入的不确定度 $u(p_{\text{被}2})$ 属于 B 类不确定度。人眼的读数误差为人眼最小分辨力区间的半宽, 人眼最小分辨力读数为指针式压力表最小分度值的五分之一即 20 psi, $u(p_{\text{被}2})$ 所属分布类型的包含因子为 $\sqrt{3}$,

$$\text{因此 } u(p_{\text{被}2}) = \frac{20}{2 \times \sqrt{3}} = 5.8\ \text{psi}。$$

D. 1. 1. 3 由标准器引入的不确定度评定

标准器采用的是量程为 (0~40)MPa 的数字压力计, 准确度为满刻度的 $\pm 0.05\%$, 则由标准器引入的不确定度分量为:

$$u(p_{\text{标}}) = \frac{0.05\% \times 40}{\sqrt{3}} = 0.012\ \text{MPa} = 1.7\ \text{psi}$$

D. 1. 1. 4 合成不确定度 $u(\delta_p)$ 及扩展不确定度 U 的评定

不确定度分布如表 D. 2 所示。

表 D.2

psi

标准不确定度分量	不确定度来源	数值
$u(p_{\text{被}1})$	测量重复性	2.6
$u(p_{\text{被}2})$	估读误差引入的不确定度	5.8
$u(p_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度	1.7

合成不确定度为:

$$u(\delta_p) = \sqrt{u(p_{\text{被}})^2 + u(p_{\text{标}})^2} = 6.6 \text{ psi}$$

扩展不确定度为:

$$U = ku(\delta_p) = 13.2 \text{ psi}$$

$$k = 2$$

D.1.1.5 报告测量结果

标称值 4 000 psi, 其测量结果为 4 024 psi, $U=13.2$ psi, $k=2$ 。

D.1.2 温度计示值的不确定度评定

D.1.2.1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据: HYCOM HFK-02 冲压空气涡轮程序手册。

测量标准: 计量炉

数学模型:

$$\delta_t = t_{\text{被}} - T_{\text{标}}$$

式中: δ_t ——压力式温度计的示值误差, °C;

t ——压力式温度计测量示值, °C;

T ——标准温度值, °C。

不确定度分布见表 D.3。

表 D. 3

标准不确定度分量	不确定度来源
$u(t_{\text{被}1})$	被测温度计的示值重复性
$u(t_{\text{被}2})$	被测温度计的示值估读
$u(T_{\text{标}1})$	计量炉的温度偏差
$u(T_{\text{标}2})$	计量炉的温度均匀性

D. 1. 2. 2 不确定度分量 $u(t_{\text{被}1})$ 的评定

以 HFK-02 冲压空气涡轮测试仪压力式温度计温度示值在 80 °C 为例, 在重复性条件下连续校准 10 次, 得到观察列, 采用贝塞尔公式计算。

被校压力式温度计温度示值如下:

$$x_1=80.8 \text{ °C} \quad x_2=81.0 \text{ °C}$$

$$x_3=80.8 \text{ °C} \quad x_4=80.8 \text{ °C}$$

$$x_5=80.6 \text{ °C} \quad x_6=80.8 \text{ °C}$$

$$x_7=80.8 \text{ °C} \quad x_8=81.0 \text{ °C}$$

$$x_9=81.0 \text{ °C} \quad x_{10}=80.8 \text{ °C}$$

则 x 的平均值 ($n=10$) 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 80.8 \text{ °C}$$

$$\text{实验标准差: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.13 \text{ °C}$$

重复条件或复现条件下多次测量的算术平均值的分布符合正态分布。一般用观测的算术平均值作为测量结果, 所以测量重复性引入的标准不确定度分量为算术平均值的实验标准差:

$$u(t_{\text{被}1}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 0.04 \text{ °C}$$

D. 1. 2. 3 不确定度分量 $u(t_{\text{被}2})$ 的评定

$u(t_{\text{被}2})$ 来源于被测温度计的示值估读, 此处压力式温度计示值估读的最小单位为其最小分度值的十分之一即 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 所引起的误差区间半宽为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 所属分布类型的包含因子为 $\sqrt{3}$, 则 $u(t_{\text{被}2}) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

D.1.2.4 不确定度分量 $u(T_{\text{标}1})$ 的评定

计量炉的温度偏差为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 按均匀分布考虑, 则

$$u(T_{\text{标}1}) = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$$

D1.2.5 不确定度 $u(T_{\text{标}2})$ 的评定

计量炉的温度均匀度为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 按均匀分布考虑, 则

$$u(T_{\text{标}2}) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$$

D.1.2.6 合成不确定度 $u(\delta_p)$ 及扩展不确定度 U 的评定

不确定度分布如表 D.4 所示。

表 D.4

$^{\circ}\text{C}$

标准不确定度分量	不确定度来源	数值
$u(t_{\text{被}1})$	被测温度计的示值重复性	0.04
$u(t_{\text{被}2})$	被测温度计的示值估读	0.06
$u(T_{\text{标}1})$	标准计量炉的温度偏差	0.12
$u(T_{\text{标}2})$	标准计量炉的温度均匀性	0.06

合成不确定度为:

$$u(\delta_i) = \sqrt{u(t_{\text{被}})^2 + u(T_{\text{标}})^2} = 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$$

扩展不确定度为:

$$U = ku(\delta_i) = 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$k = 2$$

D.1.2.6 报告测量结果

标称值 80.0 °C，其测量结果为 80.8 °C， $U=0.3$ °C， $k=2$ 。

D. 1. 3 流量示值的不确定度评定

D. 1. 3. 1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据：HYCOM HFK-02 冲压空气涡轮程序手册

测量标准：流量标准装置

数学模型：

$$\delta v = Q_v - Q_{v_s}$$

式中： δv ——齿轮流量计的示值误差，L/min；

Q_v ——流过被检流量计的实际体积值，L/min；

Q_{v_s} ——流过流量标准装置的实际体积值，L/min。

不确定度分布见表 D. 5。

表 D. 5

标准不确定度分量	不确定度来源
u_1	被校流量计测量重复性
u_2	标准器的线性度误差
u_3	标准器测量重复性

D. 1. 3. 2 不确定度分量 u_1 的评定

以 HFK-02 冲压空气涡轮测试仪流量计流量示值在 60 L/min 为例，在重复性条件下用流量标准装置连续校准 10 次，得到观察列，采用贝塞尔公式计算。

被校流量计示值如下：

$$x_1=60.13 \text{ L/min} \quad x_2=60.09 \text{ L/min}$$

$$x_3=60.06 \text{ L/min} \quad x_4=60.07 \text{ L/min}$$

$$x_5=60.05 \text{ L/min} \quad x_6=60.08 \text{ L/min}$$

$$x_7=60.01 \text{ L/min} \quad x_8=60.03 \text{ L/min}$$

$$x_9 = 60.05 \text{ L/min} \quad x_{10} = 59.99 \text{ L/min}$$

则 x 的平均值 ($n=10$) 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 60.06 \text{ L/min}$$

$$\text{单次实验标准差: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.04 \text{ L/min}$$

重复条件或复现条件下多次测量的算术平均值的分布符合正态分布。一般用观测的算术平均值作为测量结果, 所以测量重复性引入的标准不确定度分量为算术平均值的实验标准差:

$$u_1 = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 0.01 \text{ L/min}$$

D.1.3.4 不确定度分量 u_2 的评定

标准器采用的是量程为 0~180 L/min 流量标准装置, 由上级的校准证书给出的该标准装置的线性度误差为 0.3%, 则由标准器引入的不确定度分量为:

$$u_2 = \frac{0.003 \times 60}{\sqrt{3}} = 0.10 \text{ L/min}$$

D.1.3.5 不确定度分量 u_3 的评定

连续校准 10 次, 得到观察列, 采用贝塞尔公式计算。

标准器流量示值如下:

$$x_1 = 60.67 \text{ L/min} \quad x_2 = 60.64 \text{ L/min}$$

$$x_3 = 60.63 \text{ L/min} \quad x_4 = 60.64 \text{ L/min}$$

$$x_5 = 60.60 \text{ L/min} \quad x_6 = 60.62 \text{ L/min}$$

$$x_7 = 60.62 \text{ L/min} \quad x_8 = 60.64 \text{ L/min}$$

$$x_9 = 60.60 \text{ L/min} \quad x_{10} = 60.57 \text{ L/min}$$

则 x 的平均值 ($n=10$) 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 60.62 \text{ L/min}$$

$$\text{单次实验标准差: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.03 \text{ L/min}$$

重复条件或复现条件下多次测量的算术平均值的分布符合正态分布。一般用观测的算术平均值作为测量结果，所以测量重复性引入的标准不确定度分量为算术平均值的实验标准差：

$$u_3 = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 0.01 \text{ L/min}$$

D. 1. 3. 6 合成不确定度 $u(\delta_v)$ 及扩展不确定度 U 的评定

不确定度分布如表 D. 6 所示。

表 D. 6

L/min

标准不确定度分量	不确定度来源	数值
u_1	被校流量计测量重复性	0.01
u_2	标准器准确度等级	0.10
u_3	标准器测量重复性	0.01

合成不确定度为：

$$u(\delta_v) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 0.10 \text{ L/min}$$

扩展不确定度为：

$$U = ku(\delta_v) = 0.2 \text{ L/min}$$

$$k = 2$$

D. 1. 3. 6 报告测量结果

标准值 60.62 L/min 时，其测量结果为 60.06 L/min， $U=0.2$ L/min， $k=2$ 。

D. 1. 4 数显压力指示器示值的不确定度评定

D. 1. 4. 1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据：HYCOM HFK-02 冲压空气涡轮程序手册。

测量标准：直流电压校准源

数学模型：

$$\delta_p = p_{\text{被}} - p_{\text{标}}$$

式中： δ_p ——数显压力指示器的示值误差，psi；

$p_{\text{被}}$ ——数显压力指示器在被测点上的测量示值，psi；

$p_{\text{标}}$ ——电压所对应的标准值，psi。

不确定度分布见表 D. 7。

表 D. 7

标准不确定度分量	不确定度来源
$u(p_{\text{被}1})$	数显压力指示器示值重复性
$u(p_{\text{被}2})$	压力指示器的最小分辨力
$u(p_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度

D. 1. 4. 2 不确定度分量 $u(p_{\text{被}})$ 的评定

以 HFK-02 冲压空气涡轮测试仪数显压力表示值在 2 901 psi 为例，在重复性条件下用直流电压校准源连续测量 10 次，得到观察列，采用贝塞尔公式计算。

被校数显压力表示值如下：

$$x_1=2\ 900\ \text{psi} \quad x_2=2\ 901\ \text{psi}$$

$$x_3=2\ 901\ \text{psi} \quad x_4=2\ 901\ \text{psi}$$

$$x_5=2\ 901\ \text{psi} \quad x_6=2\ 901\ \text{psi}$$

$$x_7=2\ 901\ \text{psi} \quad x_8=2\ 902\ \text{psi}$$

$$x_9=2\ 902\ \text{psi} \quad x_{10}=2\ 901\ \text{psi}$$

则 x 的平均值 ($n=10$) 为：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 2\ 901\ \text{psi}$$

$$\text{实验标准差: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.60 \text{ psi}$$

重复条件或复现条件下多次测量的算术平均值的分布符合正态分布。一般用观测的算术平均值作为测量结果, 所以测量重复性引入的标准不确定度分量为算术平均值的实验标准差:

$$u(p_{\text{被}}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 0.19 \text{ psi}$$

D. 1. 4. 3 不确定度分量 $u_2(r_{\text{被}})$ 的评定

测试仪数显压力指示器示值最小分辨力为 1 psi, 分量变化为最小分辨力区间的半宽, 且包含因子 k 为 $\sqrt{3}$, 则 $u_2(r_{\text{被}}) = \frac{1/2}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ psi}$ 。

D. 1. 4. 4 不确定度分量 $u(p_{\text{标}})$ 的评定

直流电压校准源的允许误差为 $\pm 0.02\%$ 读数 $\pm 0.005\%$ 量程, 使用的电压量程为 $0 \sim 12 \text{ V}$, 电压信号与压力信号的线性转换系数为 725, 则在该校准点

$$u(p_{\text{标}}) = \frac{(0.02\% \times 5 + 0.005\% \times 12) \times 725}{\sqrt{3}} = 0.67 \text{ psi}。$$

D. 1. 4. 5 合成不确定度 $u(\delta_p)$ 及扩展不确定度 U 的评定

不确定度分布如表 D. 8 所示。

表 D. 8

psi

标准不确定度分量	不确定度来源	数值
$u(p_{\text{被}1})$	数显压力指示器示值重复性	0.19
$u(p_{\text{被}2})$	压力指示器的最小分辨力	0.29
$u(p_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度	0.67

合成不确定度为:

$$u(\delta_p) = \sqrt{u(p_{\text{被}})^2 + u(p_{\text{标}})^2} = 0.79 \text{ psi}$$

扩展不确定度为:

$$U = ku(\delta_p) = 1.6 \text{ psi}$$

$$k = 2$$

D.1.4.4 报告测量结果

标称值 2 901 psi, 其测量结果为 2 901 psi, $U=1.6$ psi, $k=2$ 。

D.1.5 转速指示器示值的不确定度评定

D.1.5.1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据: HYCOM HFK-02 冲压空气涡轮程序手册

测量标准: 信号产生器

数学模型:

$$\delta_r = r_{\text{被}} - R_{\text{标}}$$

式中: δ_r —— 转速指示器的示值误差, r/min;

$r_{\text{被}}$ —— 转速指示器在被测点上的测量示值, r/min;

$R_{\text{标}}$ —— 标准器给出频率所对应的标准值, r/min。

不确定度分布见表 D.9。

表 D.9

标准不确定度分量	不确定度来源
$u(r_{\text{被}1})$	转速指示器示值重复性
$u(r_{\text{被}2})$	转速指示器的最小分辨力
$u(R_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度

D.1.5.2 不确定度分量 $u(r_{\text{被}1})$ 的评定

以 HFK-02 冲压空气涡轮测试仪转速指示器示值在 5 333 r/min 为例, 在重复性条件下用信号发生器连续校准 10 次, 得到观察列, 采用贝塞尔公式计算。

被校转速指示器示值如下:

$$x_1 = 5\ 334 \text{ r/min} \quad x_2 = 5\ 333 \text{ r/min}$$

$$x_3 = 5\ 333 \text{ r/min} \quad x_4 = 5\ 333 \text{ r/min}$$

$$x_5 = 5\ 333\ \text{r/min} \quad x_6 = 5\ 333\ \text{r/min}$$

$$x_7 = 5\ 333\ \text{r/min} \quad x_8 = 5\ 333\ \text{r/min}$$

$$x_9 = 5\ 333\ \text{r/min} \quad x_{10} = 5\ 333\ \text{r/min}$$

则 x 的平均值 ($n=10$) 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 5\ 333\ \text{r/min}$$

$$\text{实验标准差: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.32\ \text{r/min}$$

重复条件或复现条件下多次测量的算术平均值的分布符合正态分布。一般用观测的算术平均值作为测量结果, 所以测量重复性引入的标准不确定度分量为算术平均值的实验标准差:

$$u(r_{\text{被}1}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 0.10\ \text{r/min}$$

D. 1. 5. 3 不确定度分量 $u(r_{\text{被}2})$ 的评定

HFK-02 冲压空气涡轮测试仪转速指示器示值最小分辨力为 1 r/min, 分量变化为最小分辨力区间的半宽, 且包含因子 k 为 $\sqrt{3}$, 则 $u(r_{\text{被}2}) = \frac{1/2}{\sqrt{3}} = 0.29\ \text{r/min}$ 。

D. 1. 5. 4 不确定度分量 $u(R_{\text{标}})$ 的评定

作为标准器的信号发生器的允许误差为 $\pm 100\ \text{ppm}$, 频率信号与转速的线性转换系数为 3.33, 则在该校准点由标准器引入的不确定度分量为:

$$u(R_{\text{标}}) = \frac{(0.01\% \times 1600) \times 3.33}{\sqrt{3}} = 0.31\ \text{r/min}$$

D1. 5. 5 合成不确定度 $u(\delta_r)$ 及扩展不确定度 U 的评定

不确定度分布如表 D. 10 所示。

表 D. 10

r/min

标准不确定度分量	不确定度来源	数值
$u_1(r_{\text{被}})$	转速指示器示值重复性	0.10
$u_2(r_{\text{被}})$	转速指示器的最小分辨力	0.29
$u(R_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度	0.31

合成不确定度为:

$$u(\delta_r) = \sqrt{u_1(r_{\text{被}})^2 + u_2(r_{\text{被}})^2 + u(R_{\text{标}})^2} = 0.44 \text{ r/min}$$

扩展不确定度为:

$$U = ku(\delta_r) = 0.9 \text{ r/min}$$

$$k = 2$$

D. 1. 5. 6 报告测量结果

标称值 5 333 r/min, 其测量结果为 5 333 r/min, $U=0.9$ r/min, $k=2$ 。

D. 2 PGRAT1 型

D. 2. 1 指针式压力表示值的不确定度评定

D. 2. 1. 1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据: PGRAT1 校准手册

测量标准: 压力标准装置

数学模型:

$$\delta_p = p_{\text{被}} - p_{\text{标}}$$

式中: δ_p ——指针式压力表的压力示值误差, bar;

$p_{\text{被}}$ ——指针式压力表在被测点上的示值, bar;

$p_{\text{标}}$ ——加压后的标准器产生的标准压力值, bar。

不确定度分布见表 D. 11。

表 D. 11

标准不确定度分量	不确定度来源
$u(p_{\text{被}1})$	测量重复性
$u(p_{\text{被}2})$	估读误差引入的不确定度
$u(p_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度

D. 2. 1. 2 由被测量引入的不确定度评定

D. 2. 1. 2. 1 不确定度分量 $u(p_{\text{被}1})$ 的评定

以 PGRAT1 冲压空气涡轮测试仪指针式压力表压力示值在 250bar 为例, 用数字压力计为标准器连续校准 10 次, 得到观察列, 采用贝塞尔公式计算。

被校指针式压力表压力示值如下:

$$x_1 = 252 \text{ bar} \quad x_2 = 252 \text{ bar}$$

$$x_3 = 251 \text{ bar} \quad x_4 = 252 \text{ bar}$$

$$x_5 = 251 \text{ bar} \quad x_6 = 251 \text{ bar}$$

$$x_7 = 252 \text{ bar} \quad x_8 = 252 \text{ bar}$$

$$x_9 = 251 \text{ bar} \quad x_{10} = 252 \text{ bar}$$

则 x 的平均值 ($n=10$) 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 252 \text{ bar}$$

$$\text{实验标准差: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.5 \text{ bar}$$

重复条件或复现条件下多次测量的算术平均值的分布符合正态分布。一般用观测的算术平均值作为测量结果, 所以测量重复性引入的标准不确定度分量为算术平均值的实验标准差:

$$u(p_{\text{被}1}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 0.16 \text{ bar}$$

D. 2. 1. 2. 2 不确定度分量 $u(p_{\text{被}2})$ 的评定

由于指针式压力表的读数是由人眼观察指针在分度盘上指出的被测压力值，因此在此读数过程中必将产生一定的误差，其引入的不确定度 $u(p_{\text{被}2})$ 属于 B 类不确定度。人眼的读数误差为人眼最小分辨力区间的半宽，人眼最小分辨力读数为指针式压力表最小分度值的五分之一即 1 psi， $u(p_{\text{被}2})$ 所属分布类型的包含因子为 $\sqrt{3}$ ，

$$\text{因此 } u(p_{\text{被}2}) = \frac{1}{2 \times \sqrt{3}} = 0.3 \text{ bar}。$$

D. 2. 1. 2. 4 不确定度 $u(p_{\text{被}})$ 的评定

$$u(p_{\text{被}}) = \sqrt{u(p_{\text{被}1})^2 + u(p_{\text{被}2})^2} = 0.34 \text{ bar}$$

D. 2. 1. 3 由标准器引入的不确定度评定

标准器采用的是量程为(0~40)MPa 的数字压力计，准确度为满刻度的 $\pm 0.05\%$ ，则由标准器引入的不确定度分量为：

$$u(p_{\text{标}}) = \frac{0.05\% \times 40}{\sqrt{3}} = 0.012 \text{ MPa} = 0.12 \text{ bar}$$

D. 2. 1. 4 合成不确定度 $u(\delta_p)$ 及扩展不确定度 U 的评定

不确定度分布如表 D. 12 所示。

表 D. 12

bar

标准不确定度分量	不确定度来源	数值
$u(p_{\text{被}1})$	测量重复性	0.16
$u(p_{\text{被}2})$	估读误差引入的不确定度	0.30
$u(p_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度	0.12

合成不确定度为：

$$u(\delta_p) = \sqrt{u(p_{\text{被}})^2 + u(p_{\text{标}})^2} = 0.35 \text{ bar}$$

扩展不确定度为：

$$U = ku(\delta_p) = 0.7 \text{ bar}$$

$$k = 2$$

D.2.1.5 报告测量结果

标称值 250 bar，其测量结果为 252 bar， $U=0.7$ bar， $k=2$ 。

D.2.2 温度计示值的不确定度评定

D.2.2.1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据：PGRAT1 校准手册

测量标准：计量炉

数学模型：

$$\delta_t = t_{\text{被}} - T_{\text{标}}$$

式中： δ_t ——压力式温度计的示值误差， $^{\circ}\text{C}$ ；

t ——压力式温度计测量示值， $^{\circ}\text{C}$ ；

T ——标准温度值， $^{\circ}\text{C}$ 。

不确定度分布见表 D.13。

表 D.13

标准不确定度分量	不确定度来源
$u(t_{\text{被}1})$	被测温度计的示值重复性
$u(t_{\text{被}2})$	被测温度计的示值估读
$u(T_{\text{标}1})$	计量炉的温度偏差
$u(T_{\text{标}2})$	计量炉的温度均匀性

D.2.2.2 不确定度分量 $u(t_{\text{被}1})$ 的评定

以 PGRAT1 冲压空气涡轮测试仪压力式温度计温度示值在 90°C 为例，在重复性条件下连续校准 10 次，得到观察列，采用贝塞尔公式计算。

被校压力式温度计温度示值如下：

$$x_1 = 90.6^{\circ}\text{C} \quad x_2 = 90.4^{\circ}\text{C}$$

$$x_3 = 90.6^{\circ}\text{C} \quad x_4 = 90.6^{\circ}\text{C}$$

$$x_5 = 90.8^{\circ}\text{C} \quad x_6 = 90.6^{\circ}\text{C}$$

$$x_7 = 90.4^{\circ}\text{C} \quad x_8 = 90.4^{\circ}\text{C}$$

$$x_9 = 90.4 \text{ } ^\circ\text{C} \quad x_{10} = 90.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

则 x 的平均值 ($n=10$) 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 90.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{实验标准差: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

重复条件或复现条件下多次测量的算术平均值的分布符合正态分布。一般用观测的算术平均值作为测量结果, 所以测量重复性引入的标准不确定度分量为算术平均值的实验标准差:

$$u(t_{\text{被}1}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 0.04 \text{ } ^\circ\text{C}$$

D. 2. 2. 3 不确定度分量 $u(t_{\text{被}2})$ 的评定

$u(t_{\text{被}2})$ 来源于被测温度计的示值估读, 此处压力式温度计示值估读的最小单位为其最小分度值的十分之一即 $0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$, 所引起的误差区间半宽为 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$, 所属分布类型的包含因子为 $\sqrt{3}$, 则 $u(t_{\text{被}2}) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.06 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

D. 2. 2. 4 不确定度分量 $u(T_{\text{标}1})$ 的评定

$$u(T_{\text{标}1}) = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

D. 2. 2. 5 不确定度 $u(T_{\text{标}2})$ 的评定

$$u(T_{\text{标}2}) = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.06 \text{ } ^\circ\text{C}$$

D. 2. 2. 6 合成不确定度 $u(\delta_p)$ 及扩展不确定度 U 的评定

不确定度分布见表 D. 14。

表 D. 14

℃

标准不确定度分量	不确定度来源	数值
$u(t_{\text{被}1})$	被测温度计的示值重复性	0.04
$u(t_{\text{被}2})$	被测温度计的示值估读	0.06
$u(T_{\text{标}1})$	标准计量炉的温度偏差	0.12
$u(T_{\text{标}2})$	标准计量炉的温度均匀性	0.06

合成不确定度为:

$$u(\delta_t) = \sqrt{u(t_{\text{被}})^2 + u(T_{\text{标}})^2} = 0.15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

扩展不确定度为:

$$U = ku(\delta_t) = 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$k = 2$$

D. 2. 2. 6 报告测量结果

标称值 90.0 ℃，其测量结果为 90.6 ℃， $U=0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ， $k=2$ 。

D. 2. 3 流量示值的不确定度评定

D. 2. 3. 1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据：PGRAT1 校准手册

测量标准：流量标准装置

数学模型：

$$\delta v = Q_v - Q_{v_s}$$

式中： δv ——齿轮流量计的示值误差，L/min；

Q_v ——流过被检流量计的实际体积值，L/min；

Q_{v_s} ——流过流量标准装置的实际体积值，L/min。

不确定度分布见表 D. 15。

表 D. 15

标准不确定度分量	不确定度来源
u_1	被校流量计测量重复性
u_2	流量显示器分辨力
u_3	标准器的准确度等级
u_4	标准器测量重复性

D. 2. 3. 2 不确定度分量 u_1 的评定

以 PGRAT1 冲压空气涡轮测试仪流量计流量示值在 150 L/min 为例, 在重复性条件下用流量标准装置连续校准 10 次, 得到观察列, 采用贝塞尔公式计算。

被校流量计示值如下:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= 150.4 \text{ L/min} & x_2 &= 150.5 \text{ L/min} \\
 x_3 &= 150.1 \text{ L/min} & x_4 &= 150.2 \text{ L/min} \\
 x_5 &= 150.3 \text{ L/min} & x_6 &= 150.1 \text{ L/min} \\
 x_7 &= 150.2 \text{ L/min} & x_8 &= 150.2 \text{ L/min} \\
 x_9 &= 150.2 \text{ L/min} & x_{10} &= 150.1 \text{ L/min}
 \end{aligned}$$

则 x 的平均值 ($n=10$) 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 150.2 \text{ L/min}$$

$$\text{实验标准差: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.13 \text{ L/min}$$

重复条件或复现条件下多次测量的算术平均值的分布符合正态分布。一般用观测的算术平均值作为测量结果, 所以测量重复性引入的标准不确定度分量为算术平均值的实验标准差:

$$u_1 = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 0.04 \text{ L/min}$$

D. 2. 3. 3 不确定度分量 u_2 的评定

测试仪数显流量指示器示值最小分辨力为 0.1 L/min, 分量变化为最小分辨力区间的半宽, 且包含因子 k 为 $\sqrt{3}$, 则 $u_2 = \frac{0.1/2}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{ L/min}$ 。

D. 2. 3. 4 不确定度分量 u_3 的评定

标准器采用的是量程为 0~180 L/min 流量标准装置, 由上级的鉴定证书给出的校准结论是此流量标准装置的准确度为 0.3%, 则由标准器引入的不确定度分量为:

$$u_3 = \frac{0.003 \times 150}{\sqrt{3}} = 0.26 \text{ L/min}$$

D. 2. 3. 5 不确定度分量 u_4 的评定

连续校准 10 次, 得到观察列, 采用贝塞尔公式计算。

标准器流量示值如下:

$$\begin{array}{ll} x_1=149.8 \text{ L/min} & x_2=149.7 \text{ L/min} \\ x_3=149.8 \text{ L/min} & x_4=149.7 \text{ L/min} \\ x_5=149.7 \text{ L/min} & x_6=149.7 \text{ L/min} \\ x_7=149.7 \text{ L/min} & x_8=149.8 \text{ L/min} \\ x_9=149.7 \text{ L/min} & x_{10}=149.7 \text{ L/min} \end{array}$$

则 x 的平均值 ($n=10$) 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 149.7 \text{ L/min}$$

$$\text{实验标准差: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0.05 \text{ L/min}$$

重复条件或复现条件下多次测量的算术平均值的分布符合正态分布。一般用观测的算术平均值作为测量结果, 所以测量重复性引入的标准不确定度分量为算术平

均值的实验标准差:

$$u_4 = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 0.02 \text{ L/min}$$

D.2.3.6 合成不确定度 $u(\delta_v)$ 及扩展不确定度 U 的评定

不确定度分布见表 D.16。

标准不确定度分量	不确定度来源	数值
u_1	被校流量计测量重复性	0.04
u_2	流量显示器分辨力	0.03
u_3	标准器准确度等级	0.26
u_4	标准器测量重复性	0.02

合成不确定度为:

$$u(\delta_v) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \approx 0.26 \text{ L/min}$$

扩展不确定度为:

$$U = ku(\delta_v) = 0.5 \text{ L/min}$$

$$k = 2$$

D.2.3.6 报告测量结果

标准值 149.7 L/min 时, 其测量结果为 150.2 L/min, $U = 0.5 \text{ L/min}$, $k=2$ 。

D.2.4 数显压力指示器示值的不确定度评定

D.2.4.1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据: PGRAT1 校准手册

测量标准: 直流电压校准源

数学模型:

$$\delta_p = p_{\text{被}} - p_{\text{标}}$$

式中: δ_p —— 数显压力指示器的示值误差, psi;

$p_{\text{被}}$ ——数显压力指示器在被测点上的测量示值, psi;

$p_{\text{标}}$ ——电压所对应的标准值, psi。

不确定度分布见表 D. 17。

表 D. 17

标准不确定度分量	不确定度来源
$u(p_{\text{被}1})$	数显压力指示器示值重复性
$u(p_{\text{被}2})$	压力指示器的最小分辨力
$u(p_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度

D. 2. 4. 2 不确定度分量 $u(p_{\text{被}})$ 的评定

以 PGRAT1 冲压空气涡轮测试仪数显压力表示值在 4 350 psi 为例, 在重复性条件下用直流电压校准源连续测量 10 次, 得到观察列, 采用贝塞尔公式计算。

被校数显压力表示值如下:

$$x_1=4\ 350\ \text{psi} \quad x_2=4\ 350\ \text{psi}$$

$$x_3=4\ 350\ \text{psi} \quad x_4=4\ 350\ \text{psi}$$

$$x_5=4351\ \text{psi} \quad x_6=4\ 350\ \text{psi}$$

$$x_7=4\ 350\ \text{psi} \quad x_8=4\ 350\ \text{psi}$$

$$x_9=4\ 350\ \text{psi} \quad x_{10}=4\ 352\ \text{psi}$$

则 x 的平均值 ($n=10$) 为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 4\ 351\ \text{psi}$$

$$\text{实验标准差: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 1\ \text{psi}$$

重复条件或复现条件下多次测量的算术平均值的分布符合正态分布。一般用观测的算术平均值作为测量结果, 所以测量重复性引入的标准不确定度分量为算术平均值的实验标准差:

$$u(p_{\text{被}}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 0.32 \text{ psi}$$

D. 2. 4. 3 不确定度分量 $u_2(r_{\text{被}})$ 的评定

测试仪数显压力指示器示值最小分辨力为 1 psi, 分量变化为最小分辨力区间的半宽, 且包含因子 k 为 $\sqrt{3}$, 则 $u_2(r_{\text{被}}) = \frac{1/2}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ psi}$ 。

D. 2. 4. 4 不确定度分量 $u(p_{\text{标}})$ 的评定

直流电压校准源的允许误差为 $\pm 0.02\%$ 读数 $\pm 0.005\%$ 量程, 使用的电压量程为 0~12 V, 电压信号与压力信号的线性转换系数为 725, 则在该校准点由标准器引入的不确定度分量为:

$$u(p_{\text{标}}) = \frac{(0.02\% \times 7 + 0.005\% \times 12) \times 725}{\sqrt{3}} = 0.84 \text{ psi}。$$

D. 2. 4. 5 合成不确定度 $u(\delta_p)$ 及扩展不确定度 U 的评定

不确定度分布见表 D. 18。

表 D. 18

psi

标准不确定度分量	不确定度来源	数值
$u(p_{\text{被}1})$	数显压力指示器示值重复性	0.32
$u(p_{\text{被}2})$	压力指示器的最小分辨力	0.29
$u(p_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度	0.84

合成不确定度为:

$$u(\delta_p) = \sqrt{u(p_{\text{被}})^2 + u(p_{\text{标}})^2} = 0.94 \text{ psi}$$

扩展不确定度为:

$$U = ku(\delta_p) = 1.9 \text{ psi}$$

$$k = 2$$

D. 2. 4. 4 报告测量结果

标称值 4350 psi, 其测量结果为 4 351 psi, $U = 1.9 \text{ psi}$, $k = 2$ 。

D. 2. 5 转速指示器示值的不确定度评定

D. 2. 5. 1 测量依据、测量标准、数学模型和不确定度分布

测量依据：PGRAT1 校准手册

测量标准：信号产生器

数学模型：

$$\delta_r = r_{\text{被}} - R_{\text{标}}$$

式中： δ_r ——转速指示器的示值误差，r/min；

$r_{\text{被}}$ ——转速指示器在被测点上的测量示值，r/min；

$R_{\text{标}}$ ——标准器给出频率所对应的标准值，r/min。

不确定度分布见表 D. 19。

表 D. 19

标准不确定度分量	不确定度来源
$u_1(r_{\text{被}})$	转速指示器示值重复性
$u_2(r_{\text{被}})$	转速指示器的最小分辨力
$u(R_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度

D. 2. 5. 2 不确定度分量 $u_1(r_{\text{被}})$ 的评定

以 PGRAT1 冲压空气涡轮测试仪转速指示器示值在 10 000 r/min 为例，在重复性条件下用信号发生器连续校准 10 次，得到观察列，采用贝塞尔公式计算。

被校转速指示器示值如下：

$$x_1=10\ 000\ \text{r/min} \quad x_2=10\ 000\ \text{r/min}$$

$$x_3=10\ 000\ \text{r/min} \quad x_4=10\ 000\ \text{r/min}$$

$$x_5=10\ 000\ \text{r/min} \quad x_6=10\ 000\ \text{r/min}$$

$$x_7=10\ 000\ \text{r/min} \quad x_8=10\ 000\ \text{r/min}$$

$$x_9=10\ 000\ \text{r/min} \quad x_{10}=10\ 000\ \text{r/min}$$

则 x 的平均值 ($n=10$) 为：

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 0 \text{ r/min}$$

$$\text{实验标准差: } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0 \text{ r/min}$$

重复条件或复现条件下多次测量的算术平均值的分布符合正态分布。一般用观测的算术平均值作为测量结果，所以测量重复性引入的标准不确定度分量为算术平均值的实验标准差：

$$u_1(r_{\text{被}}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = 0 \text{ r/min}$$

D. 2. 5. 3 不确定度分量 $u_2(r_{\text{被}})$ 的评定

HFK-02 冲压空气涡轮测试仪转速指示器示值最小分辨力为 1 r/min，分量变化为最小分辨力区间的半宽，且包含因子 k 为 $\sqrt{3}$ ，则 $u_2(r_{\text{被}}) = \frac{1/2}{\sqrt{3}} = 0.29 \text{ r/min}$ 。

D. 2. 5. 4 不确定度分量 $u(R_{\text{标}})$ 的评定

作为标准器的信号发生器的允许误差为 $\pm 100 \text{ ppm}$ ，频率信号与转速的线性转换系数为 3.33，则在该校准点由标准器引入的不确定度分量为：

$$u(R_{\text{标}}) = \frac{(0.01\% \times 3000) \times 3.33}{\sqrt{3}} = 0.58 \text{ r/min}$$

D. 2. 5. 5 合成不确定度 $u(\delta_r)$ 及扩展不确定度 U 的评定

不确定度分布见表 D. 20。

标准不确定度分量	不确定度来源	数值
$u_1(r_{\text{被}})$	转速指示器示值重复性	0
$u_2(r_{\text{被}})$	转速指示器的最小分辨力	0.29
$u(R_{\text{标}})$	标准器引入的不确定度	0.58

合成不确定度为：

$$u(\delta_r) = \sqrt{u_1(r_{\text{被}})^2 + u_2(r_{\text{被}})^2 + u(R_{\text{标}})^2} = 0.65 \text{ r/min}$$

扩展不确定度为:

$$U = ku(\delta_r) = 1.3 \text{ r/min}$$

$$k = 2$$

D.2.5.6 报告测量结果

标称值 10 000 r/min, 其测量结果为 10 000 r/min, $U = 1.3 \text{ r/min}$, $k=2$ 。
