

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2051—2023

臭氧老化试验箱校准规范

Calibration Specification for Ozone Aging Test Chambers

2023-06-30 发布

2023-12-30 实施

国家市场监督管理总局 发布

臭氧老化试验箱校准规范

Calibration Specification for
Ozone Aging Test Chambers

JJF 2051—2023

归口单位：全国环境化学计量技术委员会

主要起草单位：上海市计量测试技术研究院

苏州市计量测试院

参加起草单位：上海市环境保护产品质量监督检验总站

苏州宏瑞净化科技有限公司

贝尔实验室装备江苏有限公司

本规范委托全国环境化学计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

张爱亮（上海市计量测试技术研究院）

朱 兰（苏州市计量测试院）

丁臻敏（上海市计量测试技术研究院）

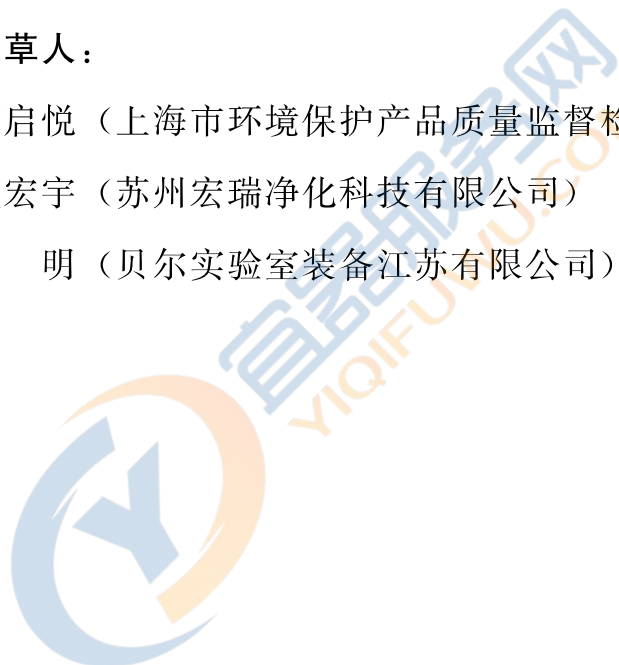
刘 悦（上海市计量测试技术研究院）

参加起草人：

陈启悦（上海市环境保护产品质量监督检验总站）

左宏宇（苏州宏瑞净化科技有限公司）

华 明（贝尔实验室装备江苏有限公司）



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 环境条件	(2)
6.2 负载条件	(3)
6.3 计量标准器	(3)
7 校准方法	(3)
7.1 校准方法	(3)
7.2 数据处理	(5)
8 校准结果表达	(7)
9 复校时间间隔	(8)
附录 A 臭氧老化试验箱校准原始记录格式 (参考)	(9)
附录 B 臭氧老化试验箱校准证书 (内页) 格式 (参考)	(11)
附录 C 臭氧老化试验箱臭氧浓度示值误差的不确定度评定示例	(12)
附录 D 臭氧老化试验箱温度示值误差的不确定度评定示例	(20)
附录 E 臭氧老化试验箱相对湿度示值误差的不确定度评定示例	(25)

引 言

本规范依据 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》、和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范的技术指标参考了 JJF 1101—2019《环境试验设备温度、湿度参数校准规范》、GB/T 35804—2018《硫化橡胶或热塑性橡胶 耐臭氧龟裂 测定试验箱中臭氧浓度的试验方法》、GB/T 7762—2014《硫化橡胶或热塑性橡胶 耐臭氧龟裂 静态拉伸试验》和 GB/T 12706.1—2020《额定电压 1 kV ($U_m = 1.2$ kV) 到 35 kV ($U_m = 40.5$ kV) 挤包绝缘电力电缆及附件 第 1 部分：额定电压 1 kV ($U_m = 1.2$ kV) 和 3 kV ($U_m = 3.6$ kV) 电缆》等标准和规范。

本规范为首次发布。



臭氧老化试验箱校准规范

1 范围

本规范适用于臭氧浓度范围为（0~400） $\mu\text{mol/mol}$ 、温度范围为（0~100） $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度范围为（10~100）%的臭氧老化试验箱的校准。

其他类似设备也可参照本规范进行校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1101—2019 环境试验设备温度、湿度参数校准规范

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

3.1 工作空间 working space

臭氧老化试验箱中能将规定的臭氧浓度、温度和湿度性能保持在规定范围内的空间。

3.2 稳定状态 steady state of testing equipment

臭氧老化试验箱工作空间内任意点的臭氧浓度、温度和湿度变化量达到设备本身性能指标要求时的状态。

3.3 臭氧浓度示值误差 ozone concentration indication error

臭氧老化试验箱稳定状态下，臭氧浓度显示值的平均值与工作空间所有测量点实测臭氧浓度平均值的差值。

3.4 臭氧浓度波动度 ozone concentration fluctuation

臭氧老化试验箱稳定状态下，在规定的时间内，工作空间任意一点臭氧浓度随时间的变化量。

3.5 臭氧浓度位置偏差 deviation of ozone concentration position

臭氧老化试验箱稳定状态下，工作空间中任意两个测试点臭氧浓度平均值之间的差值。

3.6 负载 load

利用臭氧老化试验箱进行试验的样品。

4 概述

臭氧老化试验箱主要是用来模拟和强化大气中的臭氧条件，研究臭氧对橡塑等材料的作用规律，快速鉴定和评价材料抗臭氧老化性能的设备。其主要由臭氧浓度控制系统、温湿度控制系统及工作空间构成。臭氧浓度控制系统一般通过高压放电或紫外线照

射产生一定浓度的臭氧气体，其和温湿度控制系统一起在臭氧老化箱工作空间内产生试验所需的臭氧和温湿度的条件。其结构示意图 1。

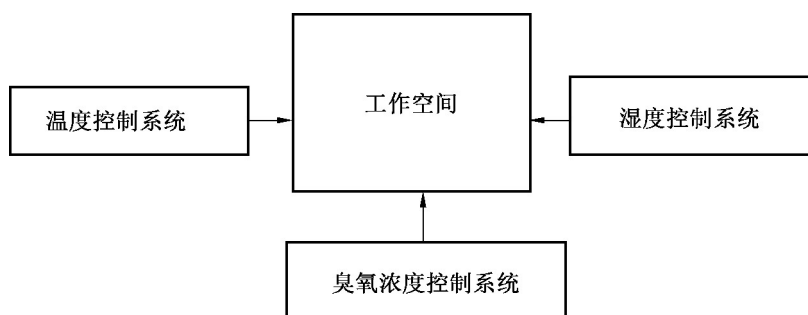


图 1 臭氧老化试验箱结构示意图

5 计量特性

臭氧老化试验箱的计量特性见表 1。

表 1 臭氧老化试验箱计量特性

参数名称		臭氧浓度	温度	相对湿度
范围		(0~400) $\mu\text{mol/mol}$	(10~85) $^{\circ}\text{C}$	$\leq 75\%$
示值误差	臭氧	$\pm 20\%$	——	——
	温度	——	$\pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$	——
	相对湿度	——	——	$\pm 5.0\%$
位置偏差	臭氧	20%	——	——
均匀度	温度	——	2.0 $^{\circ}\text{C}$	——
	相对湿度	——	——	7.0%
波动度	臭氧	$\pm 10\%$	——	——
	温度	——	$\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$	——
	相对湿度	——	——	$\pm 3.0\%$
注：				
1 对计量特性另有要求的臭氧老化试验箱，按有关技术文件规定的要求进行校准。				
2 以上指标要求不用于合格性判断，仅供参考。				

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：(10~35) $^{\circ}\text{C}$ ；

相对湿度：不大于 85%。

臭氧老化试验箱周围应无强烈振动及腐蚀性气体存在，应避免其他冷、热源影响。

6.2 负载条件

一般在空载条件下校准，根据用户需要可以在负载条件下进行校准，但应说明负载的情况。

注：应考虑负载的几何尺寸和迎风面积等因素。

6.3 计量标准器

6.3.1 臭氧浓度计量标准器

臭氧浓度计量标准器一般应选用紫外臭氧分析仪，测量范围为 $(0\sim 400)\mu\text{mol/mol}$ ，分辨力为 $0.001\mu\text{mol/mol}$ ，最大允许误差为 $\pm 5\%$ 。

6.3.2 温度计量标准器

温度计量标准器由铂电阻、热电偶等温度传感器与数据采集器组成，通道传感器数量不少于5个，并能满足校准工作需求。测量范围为 $(-20\sim 100)^{\circ}\text{C}$ ，分辨力为 0.1°C ，最大允许误差为 $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ 。

6.3.3 湿度计量标准器

湿度测量标准器一般应选用多通道温湿度显示仪表或多路温湿度测量装置，通道传感器数量不少于3个，并能满足校准工作需求。相对湿度测量范围为 $10\%\sim 100\%$ ，分辨力为 0.1% ，最大允许误差为 $\pm 2.0\%$ 。

7 校准方法

7.1 校准方法

7.1.1 臭氧浓度、温度、湿度校准点的选择

校准臭氧浓度、温度、湿度一般根据用户需要选择常用的臭氧浓度、温度、湿度进行。

7.1.2 传感器布点位置

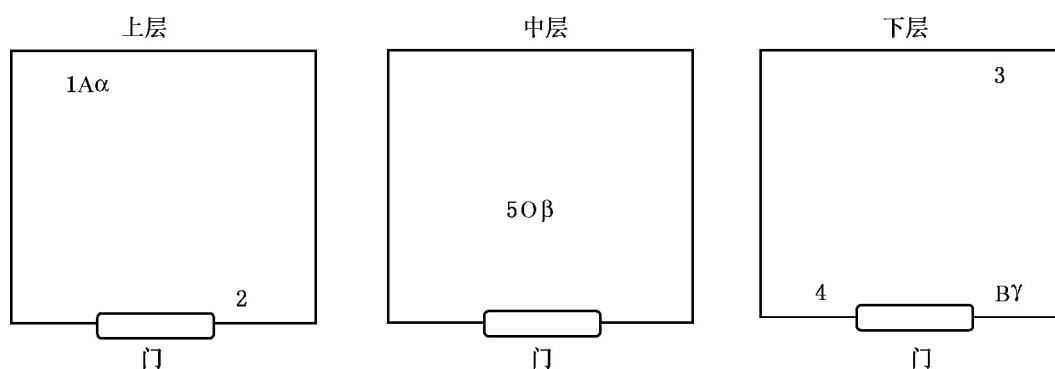
传感器应布放在设备工作空间内的3个校准层面上，称为上、中、下3层，中层为通过工作空间几何中心的平行于底面的校准工作面。各布点位置与工作空间内壁的距离为各边长的 $1/10$ ，遇风道时，此距离可加大，但不应超过 500 mm 或边长的 $1/5$ 。如果设备带有样品架或样品车时，下层测试点可布放在样品架或样品车上方 10 mm 处。

布点位置也可根据用户实际工作需求进行布置。

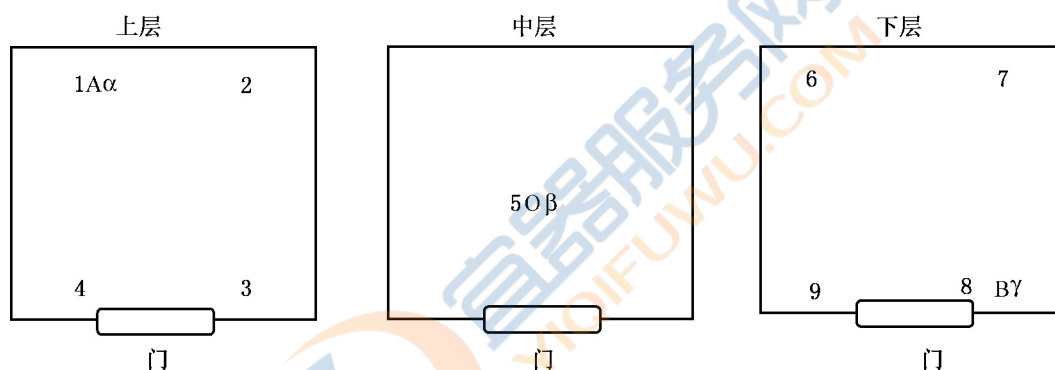
7.1.3 传感器布点数量

臭氧浓度测试点布点用 α 、 β 、 γ ……字母表示，温度传感器布点用1、2、3……数字表示，湿度传感器布点用A、B、O……字母表示。

7.1.3.1 设备容积小于等于 0.5 m^3 时，臭氧布点为3个，温度布点为5个，湿度布点为3个。臭氧点 β 、温度点5、湿度点O位于设备工作空间中层几何中心处，如图2所示。

图2 布点图（设备容积小于等于 0.5 m^3 ）

7.1.3.2 设备容积大于 0.5 m^3 小于等于 2 m^3 时，臭氧布点为 3 个，温度布点为 9 个，湿度布点为 3 个。臭氧点 β 、温度点 5、湿度点 O 位于设备工作空间中层几何中心处，如图 3 所示。

图3 布点图（设备容积大于 0.5 m^3 小于等于 2.0 m^3 ）

7.1.3.3 设备容积大于 2 m^3 时，可根据实际需要协商增加布点数量并图示说明。

7.1.4 臭氧浓度的校准

按照 7.1.2、7.1.3 规定布放采样管，将臭氧老化试验箱臭氧浓度设定到校准浓度，开启运行。臭氧老化试验箱稳定后，使用紫外臭氧分析仪依次测量各测试点臭氧浓度。对于每个测试点，记录初始浓度数据，之后每隔 1 min 记录一次数据，连续记录 6 个数据，记录臭氧浓度实测值的同时记录被校臭氧老化箱的臭氧浓度显示值。3 个测试点共形成 18 个数据。臭氧浓度稳定时间以说明书为依据，说明书中没有给出的，一般按以下原则执行：臭氧浓度达到设定浓度，待其达到稳定状态后开始记录数据，等待时间不超过 60 min。

7.1.5 温度的校准

按照 7.1.2、7.1.3 规定布放温度传感器，将试验设备设定到校准温度，开启运行。试验设备稳定后，记录初始温度数据，之后每隔 2 min 记录一次数据，30 min 内共记录 16 组数据，记录温度实测值的同时记录被校臭氧老化箱的温度显示值。温度稳定时间以说明书为依据，说明书中没有给出的，一般按以下原则执行：温度达到设定温度，待其达到稳定状态后开始记录数据，等待时间不超过 60 min。

7.1.6 湿度的校准

按照 7.1.2、7.1.3 条规定摆放湿度传感器，将试验设备设定到校准湿度，开启运行。试验设备稳定后，记录初始湿度数据，之后每隔 2 min 记录一次数据，30 min 内共记录 16 组数据，记录湿度实测值的同时记录被校臭氧老化箱的湿度显示值。湿度稳定时间以说明书为依据，说明书中没有给出的，一般按以下原则执行：湿度达到设定湿度，待其达到稳定状态后开始记录数据，等待时间不超过 60 min。

7.2 数据处理

7.2.1 臭氧浓度数据处理

7.2.1.1 臭氧浓度示值误差

臭氧老化试验箱稳定状态下，臭氧浓度显示值的平均值 ($\overline{C_p}$) 与工作空间所有测量点实测臭氧浓度平均值 ($\overline{C_d}$) 分别由式 (1)、式 (2) 计算，按式 (3) 计算臭氧浓度示值误差。

$$\overline{C_p} = \frac{\sum_{i=1}^{18} C_{pi}}{18} \quad (1)$$

$$\overline{C_d} = \frac{\sum_{i=1}^{18} C_{di}}{18} \quad (2)$$

$$\Delta C = \frac{\overline{C_p} - \overline{C_d}}{\overline{C_d}} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

C_{pi} ——第 i 次臭氧浓度显示值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

C_{di} ——第 i 次臭氧浓度实测值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

ΔC ——臭氧浓度示值误差；

$\overline{C_p}$ ——18 个臭氧浓度显示值的平均值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

$\overline{C_d}$ ——臭氧浓度所有测量点 18 个测量数据的平均值， $\mu\text{mol/mol}$ 。

7.2.1.2 臭氧浓度位置偏差

臭氧老化试验箱在稳定状态下，工作空间各测试点在 5 min 内每 1 min 测试一次，臭氧浓度位置偏差用式 (4) 计算。

$$\Delta C_u = \frac{\overline{C_{\max}} - \overline{C_{\min}}}{\overline{C_d}} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

ΔC_u ——臭氧浓度位置偏差；

$\overline{C_{\max}}$ ——各测量点臭氧浓度平均值的最大值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

$\overline{C_{\min}}$ ——各测量点臭氧浓度平均值的最小值， $\mu\text{mol/mol}$ 。

7.2.1.3 臭氧浓度波动度

工作空间各测量点实测最高浓度与最低浓度之差的一半，冠以“±”号，取全部测

量点中变化量的最大值作为臭氧浓度波动度校准结果。

$$\Delta C_f = \pm \max_j \left\{ \frac{C_{j\max} - C_{j\min}}{2 \bar{C}_d} \right\} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

ΔC_f ——臭氧浓度波动度；

$C_{j\max}$ ——测试点 j 在 6 次测量中的最高浓度， $\mu\text{mol/mol}$ ；

$C_{j\min}$ ——测试点 j 在 6 次测量中的最低浓度， $\mu\text{mol/mol}$ 。

7.2.2 温度数据处理

7.2.2.1 温度示值误差

$$\Delta t = \bar{t}_p - \bar{t}_d \quad (6)$$

式中：

Δt ——温度示值误差， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\bar{t}_p$ ——16 个温度显示值的平均值， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\bar{t}_d$ ——温度所有测量点 16 次测量实测值的平均值， $^{\circ}\text{C}$ 。

7.2.2.2 温度均匀度

臭氧老化试验箱在稳定状态下，在 30 min 内每 2 min 测试一次，每次测试中实测最高温度与最低温度之差的平均值为湿度均匀度。

$$\Delta t_u = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{i\max} - t_{i\min})}{n} \quad (7)$$

式中：

Δt_u ——温度均匀度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$t_{i\max}$ ——各校准点在第 i 次测得的最高温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$t_{i\min}$ ——各校准点在第 i 次测得的最低温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

n ——测量次数。

7.2.2.3 温度波动度

臭氧老化试验箱在稳定状态下，工作空间各测量点 30 min 内每 2 min 测试一次，实测最高温度与最低温度之差的一半，冠以“ $\pm$ ”号，取全部测量点中变化量的最大值作为温度波动度校准结果。

$$\Delta t_f = \pm \max_j \left\{ \frac{t_{j\max} - t_{j\min}}{2} \right\} \quad (8)$$

式中：

Δt_f ——温度波动度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$t_{j\max}$ ——测量点 j 在 16 次测量中的最高温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$t_{j\min}$ ——测量点 j 在 16 次测量中的最低温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

7.2.3 湿度数据处理

7.2.3.1 相对湿度示值误差

$$\Delta h = \bar{h}_p - \bar{h}_d \quad (9)$$

式中：

Δh ——相对湿度示值误差，%；

$\overline{h_p}$ ——16 个相对湿度显示值的平均值，%；

$\overline{h_d}$ ——湿度所有测量点 16 次测量实测值的平均值，%。

7.2.3.2 湿度均匀度

臭氧老化试验箱在稳定状态下，在 30 min 内每 2 min 测试一次，每次测试中实测最高相对湿度与最低相对湿度之差的算术平均值为湿度均匀度。

$$\Delta h_u = \frac{\sum_{i=1}^n (h_{i\max} - h_{i\min})}{n} \quad (10)$$

式中：

Δh_u ——湿度均匀度，%；

$h_{i\max}$ ——各校准点在第 i 次测得的最高相对湿度，%；

$h_{i\min}$ ——各校准点在第 i 次测得的最低相对湿度，%；

n ——测量次数。

7.2.3.3 湿度波动度

臭氧老化试验箱在稳定状态下，工作空间各测量点 30 min 内每 2 min 测试一次，实测最高相对湿度与最低相对湿度之差的一半，冠以“±”号，取全部测量点中变化量的最大值作为湿度波动度校准结果。

$$\Delta h_f = \pm \max_j \left\{ \frac{h_{j\max} - h_{j\min}}{2} \right\} \quad (11)$$

式中：

Δh_f ——湿度的波动度，%；

$h_{j\max}$ ——测量点 j 在 16 次测量中的最高相对湿度，%；

$h_{j\min}$ ——测量点 j 在 16 次测量中的最低相对湿度，%。

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：

- 标题，如“校准证书”或“校准报告”；
- 实验室名称和地址；
- 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- 客户的名称和地址；
- 被校对象的描述和明确标识；
- 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收日期；
- 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) 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- 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) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识，以及签发日期；
- 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

臭氧老化试验箱复校时间间隔由使用者根据设备的使用情况、设备本身性能等因素所决定，推荐复校时间间隔不超过 1 年。在相邻两次校准期间，如对设备的检测数据有怀疑或设备更换主要部件及修理后，应对设备重新校准。

附录 A

臭氧老化试验箱校准原始记录格式（参考）

送校单位：_____

设备型号：_____ 设备编号：_____ 制造厂商：_____

校准环境温度：_____℃ 相对湿度：_____%

校准依据：_____ 校准用标准和装置：_____

计量性能校准：

臭氧浓度参数校准记录表

单位： $\mu\text{mol/mol}$

次数	设定值	显示值	臭氧浓度		
			α	β	γ
1					
2					
3					
4					
5					
6					
平均值	_____				
最大值	_____				
最小值	_____				

臭氧浓度示值误差：_____%

臭氧浓度位置偏差：_____%

臭氧浓度波动度：_____%

温度参数校准记录表

单位：℃

次数	设备示值	温度									最大值	最小值
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1												
2												
⋮												
⋮												
15												
16												
平均值		_____	_____	_____	_____		_____	_____	_____	_____	_____	_____
最大值	_____										_____	_____
最小值	_____										_____	_____

温度示值误差：_____℃

温度均匀度：_____℃

温度波动度：_____℃

湿度参数校准记录表

单位：%

次数	设备示值	相对湿度			最大值	最小值
		A	O	B		
1						
2						
⋮						
⋮						
15						
16						
平均值		——		——	——	——
最大值	——				——	——
最小值	——				——	——

湿度示值误差：____% 湿度均匀度：____% 湿度波动度：____%

校准员：_____

核验员：_____

日期：_____

日期：_____

附录 B

臭氧老化试验箱校准证书（内页）格式（参考）

校 准 结 果

1. 测试分布示意图

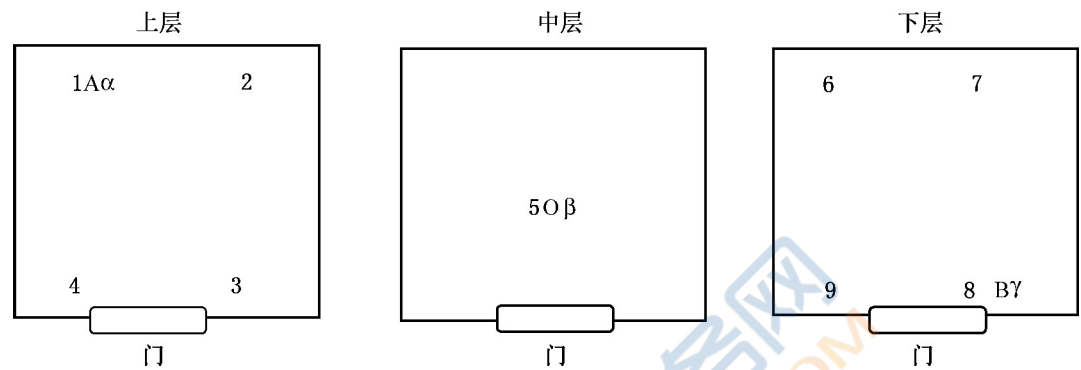


图 B 测试点分布示意图

2. 校准结果表达

校准项目	设定值	示值误差	位置偏差	均匀度	波动度
臭氧浓度	$\mu\text{mol/mol}$	%	%	——	%
温度/℃			——		
相对湿度/%			——		

3. 校准结果不确定度：

臭氧浓度示值误差校准结果不确定度：

温度示值误差校准结果不确定度：

湿度示值误差校准结果不确定度：

附录 C

臭氧老化试验箱臭氧浓度示值误差的不确定度评定示例

C.1 测量方法

在低浓度范围选择 $0.250 \mu\text{mol/mol}$ 和 $0.500 \mu\text{mol/mol}$ ，在高浓度范围选择 $275 \mu\text{mol/mol}$ 校准点分别评定不确定度。开启臭氧老化箱并运行。臭氧老化试验箱稳定后，使用紫外臭氧分析仪依次测量各测试点臭氧浓度。对于每个测试点，记录初始浓度数据，之后每隔 1 min 记录一次数据，连续记录 6 组数据。3 个测试点共形成 18 个数据。记录数据的同时记录臭氧浓度显示值。根据公式 (C.1) 计算臭氧浓度示值误差。

C.2 测量模型

$$\Delta C = \overline{C_p} - \overline{C_d} \quad (\text{C.1})$$

式中：

ΔC ——臭氧浓度示值误差， $\mu\text{mol/mol}$ ；

$\overline{C_p}$ ——臭氧浓度显示值的平均值， $\mu\text{mol/mol}$ ；

$\overline{C_d}$ ——臭氧浓度所有测量点 18 个测量数据的平均值， $\mu\text{mol/mol}$ 。

根据公式 C.1，计算灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta C}{\partial \overline{C_p}} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta C}{\partial \overline{C_d}} = -1$$

C.3 不确定度来源分析

a) 测量随机误差引入的不确定度 $u(\overline{C_p})$ ，由测量重复性引起；

b) 测量系统误差引入的不确定度 $u(\overline{C_d})$ ，主要由臭氧浓度位置偏差、臭氧浓度波动度以及紫外臭氧分析仪引起。

C.4 各不确定度分量评定

C.4.1 测量随机误差引入的不确定度 $u(\overline{C_p})$

选择一台常规水平的臭氧老化试验箱。设定臭氧浓度校准点并开启运行，用紫外臭氧分析仪测量被测点实际臭氧浓度，待臭氧浓度的显示值和实测值均稳定后记录读数，显示值读数记为 C_p ，实测值读数记为 C_d 。关闭臭氧老化箱的制臭氧功能，使得紫外臭氧分析仪与采样管处于不连接的状态。待臭氧浓度显示值明显降低后，开启臭氧老化箱的制臭氧功能，重新连接紫外臭氧分析仪与采样管。重复上述测量步骤，记录显示值和实测值，重复测量 10 次。在 $0.250 \mu\text{mol/mol}$ 、 $0.500 \mu\text{mol/mol}$ 和 $275 \mu\text{mol/mol}$ 的 3 个浓度条件下分别对 7.1.3 中的 3 个臭氧浓度测量点 α 、 β 、 γ 进行重复测量。数据见表 C.1、表 C.2 和表 C.3。

表 C.1 0.250 $\mu\text{mol/mol}$ 校准点臭氧浓度示值误差校准数据表

测量点位	测量次数 (第 k 次)	臭氧浓度显示值 C_{pk} $\mu\text{mol/mol}$	臭氧浓度实测值 C_{dk} $\mu\text{mol/mol}$	$\Delta C_k = C_{pk} - C_{dk}$ $\mu\text{mol/mol}$
α	1	0.250	0.254	-0.004
	2	0.251	0.250	0.001
	3	0.250	0.246	0.004
	4	0.249	0.243	0.006
	5	0.250	0.252	-0.002
	6	0.250	0.251	-0.001
	7	0.250	0.247	0.003
	8	0.250	0.245	0.005
	9	0.250	0.249	0.001
	10	0.250	0.253	-0.003
β	1	0.250	0.233	0.017
	2	0.250	0.229	0.021
	3	0.249	0.230	0.019
	4	0.249	0.231	0.018
	5	0.250	0.227	0.023
	6	0.250	0.229	0.021
	7	0.250	0.232	0.018
	8	0.251	0.237	0.014
	9	0.250	0.231	0.019
	10	0.251	0.226	0.025
γ	1	0.250	0.246	0.004
	2	0.250	0.241	0.009
	3	0.251	0.243	0.008
	4	0.250	0.240	0.010
	5	0.252	0.245	0.007
	6	0.250	0.239	0.011
	7	0.249	0.234	0.015
	8	0.249	0.244	0.005
	9	0.250	0.242	0.008
	10	0.250	0.237	0.013

表 C.2 0.500 $\mu\text{mol/mol}$ 校准点臭氧浓度示值误差校准数据表

测量点位	测量次数 (第 k 次)	臭氧浓度显示值 C_{pk} $\mu\text{mol/mol}$	臭氧浓度实测值 C_{dk} $\mu\text{mol/mol}$	$\Delta C_k = C_{pk} - C_{dk}$ $\mu\text{mol/mol}$
α	1	0.500	0.505	-0.008
	2	0.500	0.509	-0.012
	3	0.500	0.511	-0.005
	4	0.500	0.514	-0.009
	5	0.500	0.508	-0.011
	6	0.500	0.499	-0.001
	7	0.500	0.506	-0.008
	8	0.500	0.501	-0.013
	9	0.500	0.503	-0.004
	10	0.500	0.511	-0.009
β	1	0.500	0.487	0.013
	2	0.500	0.491	0.009
	3	0.500	0.484	0.016
	4	0.500	0.488	0.012
	5	0.500	0.489	0.011
	6	0.500	0.480	0.02
	7	0.500	0.487	0.013
	8	0.500	0.492	0.008
	9	0.500	0.483	0.017
	10	0.500	0.488	0.012
γ	1	0.500	0.497	0.003
	2	0.500	0.501	-0.001
	3	0.498	0.493	0.005
	4	0.500	0.499	0.001
	5	0.500	0.491	0.009
	6	0.500	0.502	-0.002
	7	0.500	0.498	0.002
	8	0.499	0.492	0.007
	9	0.500	0.497	0.003
	10	0.500	0.495	0.005

表 C.3 275 $\mu\text{mol/mol}$ 校准点臭氧浓度示值误差校准数据表

测量点位	测量次数 (第 k 次)	臭氧浓度显示值 C_{pk} $\mu\text{mol/mol}$	臭氧浓度实测值 C_{dk} $\mu\text{mol/mol}$	$\Delta C_k = C_{pk} - C_{dk}$ $\mu\text{mol/mol}$
α	1	275	278	—3
	2	275	279	—4
	3	275	281	—6
	4	275	282	—7
	5	275	280	—5
	6	275	279	—4
	7	275	282	—7
	8	275	280	—5
	9	275	280	—5
	10	275	281	—6
β	1	275	274	1
	2	275	272	3
	3	275	273	2
	4	275	272	3
	5	275	272	3
	6	276	273	3
	7	275	272	3
	8	275	275	0
	9	276	272	4
	10	275	273	2
γ	1	275	278	—3
	2	275	277	—2
	3	275	275	0
	4	275	277	—2
	5	276	278	—2
	6	275	276	—1
	7	275	277	—2
	8	275	277	—2
	9	275	278	—3
	10	275	278	—3

测量重复性引入的不确定度通过以下方式计算：

校准点为 $0.250 \mu\text{mol/mol}$ 时，对于测量点 α ：

$$\overline{\Delta C}_\alpha = \frac{\sum_{k=1}^{10} \Delta C_k}{10} = 0.001 (\mu\text{mol/mol})$$

$$s_\alpha(\Delta C) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (\Delta C_k - \overline{\Delta C}_\alpha)^2}{10-1}} = 3.46 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$$

同理， $s_\beta(\Delta C) = 3.14 \times 10^{-3} \mu\text{mol/mol}$ ， $s_\gamma(\Delta C) = 3.40 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$ 。

$$s_p(\Delta C) = \sqrt{\frac{s_\alpha^2(\Delta C) + s_\beta^2(\Delta C) + s_\gamma^2(\Delta C)}{3}} = 3.34 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$$

$$u(\overline{C}_p) = s_p(\Delta C) = 3.34 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$$

校准点为 $0.500 \mu\text{mol/mol}$ 时，对于测量点 α ：

$$\overline{\Delta C}_\alpha = \frac{\sum_{k=1}^{10} \Delta C_k}{10} = -0.007 (\mu\text{mol/mol})$$

$$s_\alpha(\Delta C) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (\Delta C_k - \overline{\Delta C}_\alpha)^2}{10-1}} = 4.79 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$$

同理， $s_\beta(\Delta C) = 3.67 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$ ， $s_\gamma(\Delta C) = 3.43 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$ 。

$$s_p(\Delta C) = \sqrt{\frac{s_\alpha^2(\Delta C) + s_\beta^2(\Delta C) + s_\gamma^2(\Delta C)}{3}} = 4.01 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$$

$$u(\overline{C}_p) = s_p(\Delta C) = 4.01 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$$

校准点为 $275 \mu\text{mol/mol}$ 时，对于测量点 α ：

$$\overline{\Delta C}_\alpha = \frac{\sum_{k=1}^{10} \Delta C_k}{10} = -5 (\mu\text{mol/mol})$$

$$s_\alpha(\Delta C) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (\Delta C_k - \overline{\Delta C}_\alpha)^2}{10-1}} = 1.32 (\mu\text{mol/mol})$$

同理， $s_\beta(\Delta C) = 1.17 \mu\text{mol/mol}$ ， $s_\gamma(\Delta C) = 0.943 \mu\text{mol/mol}$ 。

$$s_p(\Delta C) = \sqrt{\frac{s_\alpha^2(\Delta C) + s_\beta^2(\Delta C) + s_\gamma^2(\Delta C)}{3}} = 1.15 (\mu\text{mol/mol})$$

$$u(\overline{C}_p) = s_p(\Delta C) = 1.15 (\mu\text{mol/mol})$$

C.4.2 测量系统误差引入的不确定度 $u(\overline{C}_d)$

首先计算臭氧浓度位置偏差引入的不确定度 $u_1(\overline{C}_d)$ 。

对于该台臭氧老化试验箱，按照 7.1.4 方法进行校准，得到 3 个浓度条件下 3 个不同测量点的数据见表 C.4、表 C.5 和表 C.6。

表 C.4 0.250 $\mu\text{mol/mol}$ 校准点臭氧浓度示值误差校准数据表

测量次数	α 点臭氧浓度实测值 $\mu\text{mol/mol}$	β 点臭氧浓度实测值 $\mu\text{mol/mol}$	γ 点臭氧浓度实测值 $\mu\text{mol/mol}$
1	0.251	0.229	0.241
2	0.248	0.234	0.243
3	0.252	0.230	0.245
4	0.249	0.228	0.244
5	0.245	0.231	0.240
6	0.247	0.228	0.239

表 C.5 0.500 $\mu\text{mol/mol}$ 校准点臭氧浓度示值误差校准数据表

测量次数	α 点臭氧浓度实测值 $\mu\text{mol/mol}$	β 点臭氧浓度实测值 $\mu\text{mol/mol}$	γ 点臭氧浓度实测值 $\mu\text{mol/mol}$
1	0.512	0.485	0.495
2	0.513	0.484	0.495
3	0.505	0.482	0.494
4	0.507	0.488	0.499
5	0.508	0.489	0.495
6	0.509	0.489	0.498

表 C.6 275 $\mu\text{mol/mol}$ 校准点臭氧浓度示值误差校准数据表

测量次数	α 点臭氧浓度实测值 $\mu\text{mol/mol}$	β 点臭氧浓度实测值 $\mu\text{mol/mol}$	γ 点臭氧浓度实测值 $\mu\text{mol/mol}$
1	281	274	276
2	281	274	278
3	281	272	278
4	279	272	276
5	282	273	277
6	279	274	278

校准点为 0.250 $\mu\text{mol/mol}$ 时, α 点平均值为 0.249 $\mu\text{mol/mol}$, β 点平均值为 0.230 $\mu\text{mol/mol}$, γ 点平均值为 0.242 $\mu\text{mol/mol}$, 则

$$u_1(\overline{C_d}) = \frac{0.249 \mu\text{mol/mol} - 0.230 \mu\text{mol/mol}}{2\sqrt{3}} = 5.48 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$$

校准点为 0.500 $\mu\text{mol/mol}$ 时： α 点平均值为 0.509 $\mu\text{mol/mol}$ ， β 点平均值为 0.486 $\mu\text{mol/mol}$ ， γ 点平均值为 0.496 $\mu\text{mol/mol}$ ，则

$$u_1(\overline{C_d}) = \frac{0.509 - 0.486}{2\sqrt{3}} = 6.64 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$$

校准点为 275 $\mu\text{mol/mol}$ 时： α 点平均值为 280 $\mu\text{mol/mol}$ ， β 点平均值为 273 $\mu\text{mol/mol}$ ， γ 点平均值为 277 $\mu\text{mol/mol}$ ，则

$$u_1(\overline{C_d}) = \frac{280 - 273}{2\sqrt{3}} = 2.02 (\mu\text{mol/mol})$$

其次计算臭氧浓度波动度引入的不确定度 $u_2(\overline{C_d})$ 。

根据表 C.4、表 C.5 和表 C.6 计算臭氧浓度波动度引入的不确定度 $u_2(\overline{C_d})$ 。

校准点为 0.250 $\mu\text{mol/mol}$ 时：

$$\begin{aligned} \max_{j=\alpha,\beta,\gamma} \{C_{j\max} - C_{j\min}\} &= 0.007 (\mu\text{mol/mol}) \\ u_2(\overline{C_d}) &= \frac{0.007}{2\sqrt{3}} = 2.02 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol}) \end{aligned}$$

校准点为 0.500 $\mu\text{mol/mol}$ 时：

$$\begin{aligned} \max_{j=\alpha,\beta,\gamma} \{C_{j\max} - C_{j\min}\} &= 0.008 (\mu\text{mol/mol}) \\ u_2(\overline{C_d}) &= \frac{0.008}{2\sqrt{3}} = 2.31 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol}) \end{aligned}$$

校准点为 275 $\mu\text{mol/mol}$ 时：

$$\begin{aligned} \max_{j=\alpha,\beta,\gamma} \{C_{j\max} - C_{j\min}\} &= 3 (\mu\text{mol/mol}) \\ u_2(\overline{C_d}) &= \frac{3}{2\sqrt{3}} = 0.866 (\mu\text{mol/mol}) \end{aligned}$$

最后计算紫外臭氧分析仪引入的不确定度 $u_3(\overline{C_d})$ 。

校准点为 0.250 $\mu\text{mol/mol}$ 时，根据表 C.4，臭氧浓度实测值为 0.240 $\mu\text{mol/mol}$ 。紫外臭氧分析仪的最大允许误差不超过 $\pm 5\%$ ，假设服从均匀分布。则

$$u_3(\overline{C_d}) = \frac{5\% \times 0.240}{\sqrt{3}} = 6.93 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$$

校准点为 0.500 $\mu\text{mol/mol}$ 时，根据表 C.5，臭氧浓度实测值为 0.497 $\mu\text{mol/mol}$ 。紫外臭氧分析仪的最大允许误差不超过 $\pm 5\%$ ，假设服从均匀分布。则

$$u_3(\overline{C_d}) = \frac{5\% \times 0.497}{\sqrt{3}} = 0.0143 (\mu\text{mol/mol})$$

校准点为 275 $\mu\text{mol/mol}$ 时，根据表 C.6，臭氧浓度实测值为 277 $\mu\text{mol/mol}$ 。紫外臭氧分析仪的最大允许误差不超过 $\pm 5\%$ ，假设服从均匀分布。则

$$u_3(\overline{C_d}) = \frac{5\% \times 277}{\sqrt{3}} = 8.00 (\mu\text{mol/mol})$$

于是可以得到：

校准点为 0.250 $\mu\text{mol/mol}$ 时：

$$u(\overline{C_d}) = \sqrt{u_1^2(\overline{C_d}) + u_2^2(\overline{C_d}) + u_3^2(\overline{C_d})} = 9.06 \times 10^{-3} (\mu\text{mol/mol})$$

校准点为 0.500 $\mu\text{mol/mol}$ 时:

$$u(\overline{C_d}) = \sqrt{u_1^2(\overline{C_d}) + u_2^2(\overline{C_d}) + u_3^2(\overline{C_d})} = 0.0159 (\mu\text{mol/mol})$$

校准点为 275 $\mu\text{mol/mol}$ 时:

$$u(\overline{C_d}) = \sqrt{u_1^2(\overline{C_d}) + u_2^2(\overline{C_d}) + u_3^2(\overline{C_d})} = 8.30 (\mu\text{mol/mol})$$

C.5 合成标准不确定度

标准不确定度汇总如表 C.7 所示。

表 C.7 标准不确定度汇总表

输入量的标准 不确定度符号	不确定度来源	校准点 $\mu\text{mol/mol}$	标准不确定度 $\mu\text{mol/mol}$	灵敏系数
$u(\overline{C_p})$	测量随机误差引 入的不确定度	0.250	$3.34 \times 10^{-3} \mu\text{mol/mol}$	1
		0.500	$4.01 \times 10^{-3} \mu\text{mol/mol}$	
		275	$1.15 \mu\text{mol/mol}$	
$u(\overline{C_d})$	测量系统误差引 入的不确定度	0.250	$9.06 \times 10^{-3} \mu\text{mol/mol}$	-1
		0.500	$0.0159 \mu\text{mol/mol}$	
		275	$8.30 \mu\text{mol/mol}$	

计算合成标准不确定度:

$$u_c(\Delta C) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta C}{\partial \overline{C_p}}\right)^2 u^2(\overline{C_p}) + \left(\frac{\partial \Delta C}{\partial \overline{C_d}}\right)^2 u^2(\overline{C_d})} = \sqrt{u^2(\overline{C_p}) + u^2(\overline{C_d})}$$

代入表 C.7 中各数值, 得:

校准点为 0.250 $\mu\text{mol/mol}$ 时: $u_c(\Delta C) = 9.66 \times 10^{-3} \mu\text{mol/mol}$;

校准点为 0.500 $\mu\text{mol/mol}$ 时: $u_c(\Delta C) = 0.0164 \mu\text{mol/mol}$;

校准点为 275 $\mu\text{mol/mol}$ 时: $u_c(\Delta C) = 8.38 \mu\text{mol/mol}$ 。

C.6 扩展不确定度

扩展不确定度: $U = k \times u_c(\Delta C)$, 取 $k=2$, 得:

校准点为 0.250 $\mu\text{mol/mol}$ 时: $U = 0.019 \mu\text{mol/mol}$, $k=2$;

校准点为 0.500 $\mu\text{mol/mol}$ 时: $U = 0.033 \mu\text{mol/mol}$, $k=2$;

校准点为 275 $\mu\text{mol/mol}$ 时: $U = 17 \mu\text{mol/mol}$, $k=2$ 。

附录 D

臭氧老化试验箱温度示值误差的不确定度评定示例

D.1 测量方法

将臭氧老化试验箱的温度设定为 40.0 °C，开启运行。按 7.1.5 方法进行校准，臭氧老化试验箱温度稳定后，记录下温度显示值的平均值 $\overline{t_p}$ 和温度所有测量点实测值的平均值 $\overline{t_d}$ 。根据公式 (D.1) 计算温度示值误差。

D.2 测量模型

$$\Delta t = \overline{t_p} - \overline{t_d} \quad (\text{D.1})$$

式中：

$\overline{t_p}$ ——温度显示值的平均值，°C；

$\overline{t_d}$ ——温度所有测量点实测值的平均值，°C；

Δt ——温度示值误差，°C。

D.3 不确定度来源分析

- a) 测量重复性引入的不确定度；
- b) 温度测量标准引入的不确定度。

D.4 各不确定度分量评定

D.4.1 测量重复性引入的不确定度 $u(x_1)$

选择 1 台常规水平的臭氧老化试验箱。设定温度为 40.0 °C 并开启运行，用温度测量标准测量被测点实际温度，待温度显示值和实测值均稳定后记录读数，显示值读数记为 t_p ，实测值读数记为 t_d 。将温度设定为 25.0 °C，待温度显示值明显降低后，将温度重新设定为 40.0 °C。重复上述测量步骤记录显示值和实测值，重复测量 10 次。分别对 7.1.3 中的 9 个温度测量点 1, 2, 3, ..., 9 进行重复测量。数据列于表 D.1。

表 D.1 温度校准数据表

测量点位	测量次数 (第 k 次)	温度显示值 t_{pk} °C	温度实测值 t_{dk} °C	$\Delta t_k = t_{pk} - t_{dk}$ °C
1	1	40.0	39.7	0.3
	2	40.0	39.5	0.5
	3	40.0	39.8	0.2
	4	40.0	39.6	0.4
	5	40.0	39.8	0.2
	6	40.0	39.7	0.3
	7	40.0	39.8	0.2
	8	40.0	39.6	0.4
	9	40.0	39.8	0.2
	10	40.0	39.7	0.3

表 D.1 (续)

测量点位	测量次数 (第 k 次)	温度显示值 t_{pk} ℃	温度实测值 t_{dk} ℃	$\Delta t_k = t_{pk} - t_{dk}$ ℃
2	1	40.0	39.6	0.4
	2	40.0	39.8	0.2
	3	40.0	39.6	0.4
	4	40.0	39.6	0.4
	5	40.0	39.8	0.2
	6	40.0	39.7	0.3
	7	40.0	39.6	0.4
	8	40.0	39.7	0.3
	9	40.0	39.9	0.1
	10	40.0	39.7	0.3
3	1	40.0	39.8	0.2
	2	40.0	39.9	0.1
	3	40.0	39.9	0.1
	4	40.0	39.9	0.1
	5	40.0	40.0	0
	6	40.0	40.0	0
	7	40.0	39.9	0.1
	8	40.0	39.8	0.2
	9	40.0	39.8	0.2
	10	40.0	40.0	0
4	1	40.0	39.8	0.2
	2	40.0	39.7	0.3
	3	40.0	39.7	0.3
	4	40.0	39.8	0.2
	5	40.0	39.8	0.2
	6	40.0	39.7	0.3
	7	40.0	39.8	0.2
	8	40.1	39.9	0.2
	9	40.0	39.8	0.2
	10	40.0	39.8	0.2

表 D.1 (续)

测量点位	测量次数 (第 k 次)	温度显示值 t_{pk} ℃	温度实测值 t_{dk} ℃	$\Delta t_k = t_{pk} - t_{dk}$ ℃
5	1	40.0	39.7	0.3
	2	40.0	39.7	0.3
	3	40.0	39.7	0.3
	4	40.0	39.6	0.4
	5	40.0	39.6	0.4
	6	40.0	39.5	0.5
	7	40.0	39.6	0.4
	8	40.0	39.6	0.4
	9	40.0	39.5	0.5
	10	40.0	39.6	0.4
6	1	40.0	39.3	0.7
	2	39.9	39.3	0.6
	3	40.0	39.3	0.7
	4	40.0	39.4	0.6
	5	40.0	39.4	0.6
	6	40.0	39.3	0.7
	7	40.0	39.2	0.8
	8	39.9	39.3	0.6
	9	40.0	39.4	0.6
	10	40.0	39.4	0.6
7	1	40.0	39.2	0.8
	2	40.0	39.3	0.7
	3	40.0	39.1	0.9
	4	39.9	39.2	0.7
	5	40.0	39.1	0.9
	6	40.0	39.2	0.8
	7	40.0	39.3	0.7
	8	40.0	39.2	0.8
	9	40.0	39.3	0.7
	10	40.1	39.1	1.0

表 D.1 (续)

测量点位	测量次数 (第 k 次)	温度显示值 t_{pk} ℃	温度实测值 t_{dk} ℃	$\Delta t_k = t_{pk} - t_{dk}$ ℃
8	1	40.0	39.4	0.6
	2	40.1	39.5	0.6
	3	40.0	39.5	0.5
	4	40.0	39.4	0.6
	5	40.0	39.5	0.5
	6	40.0	39.3	0.7
	7	40.0	39.4	0.6
	8	40.0	39.4	0.6
	9	40.1	39.5	0.6
	10	40.0	39.4	0.6
9	1	40.0	39.7	0.3
	2	40.0	39.8	0.2
	3	40.0	39.7	0.3
	4	40.0	39.6	0.4
	5	40.0	39.7	0.3
	6	40.0	39.7	0.3
	7	40.0	39.8	0.2
	8	40.0	39.8	0.2
	9	40.0	39.7	0.3
	10	40.0	39.7	0.3

对于检测点 1,

$$\overline{\Delta t_1} = \frac{\sum_{k=1}^{10} \Delta t_k}{10} = 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$s_1 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (\Delta t_k - \overline{\Delta t_1})^2}{10 - 1}} = 0.105 \text{ } ^\circ\text{C}$$

同理, $s_2 = 0.105 \text{ } ^\circ\text{C}$, $s_3 = 0.082 \text{ } ^\circ\text{C}$, $s_4 = 0.048 \text{ } ^\circ\text{C}$, $s_5 = 0.074 \text{ } ^\circ\text{C}$, $s_6 = 0.071 \text{ } ^\circ\text{C}$, $s_7 = 0.105 \text{ } ^\circ\text{C}$, $s_8 = 0.057 \text{ } ^\circ\text{C}$, $s_9 = 0.063 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 s_i^2}{9}} = 0.082 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$u(x_1) = s_p = 0.082 \text{ } ^\circ\text{C}$$

D.4.2 温度测量标准引入的不确定度 $u(x_2)$

温度测量标准的最大允许误差不超过 $\pm 0.6 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，假设服从均匀分布。则

$$u(x_2) = \frac{0.6 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

D.5 合成标准不确定度的评定

D.5.1 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \Delta t}{\partial t_p} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta t}{\partial t_d} = -1$$

D.5.2 标准不确定度汇总表

标准不确定度汇总表见表 D.2。

表 D.2 标准不确定度汇总表

输入量的标准 不确定度符号 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度	c_i	输出量的不 确定度分量 $u_i(\delta) = c_i u(x_i)$
$u(x_1)$	测量重复性引入 的不确定度	$0.082 \text{ } ^\circ\text{C}$	1	$0.082 \text{ } ^\circ\text{C}$
$u(x_2)$	温度测量标准引入 的不确定度	$0.35 \text{ } ^\circ\text{C}$	-1	$0.35 \text{ } ^\circ\text{C}$

D.5.3 合成标准不确定度的计算

$$u_c(\Delta t) = \sqrt{c_1^2 u^2(x_1) + c_2^2 u^2(x_2)}$$

代入表 D.2 中各数值，得：

$$u_c(\Delta t) = 0.36 \text{ } ^\circ\text{C}$$

D.6 扩展不确定度

扩展不确定度： $U = k \times u_c(\Delta t)$ ，取 $k=2$ ，得：

$$U = 0.7 \text{ } ^\circ\text{C}, k=2。$$

附录 E

臭氧老化试验箱相对湿度示值误差的不确定度评定示例

E.1 测量方法

将臭氧老化试验箱的相对湿度设定为 60.0%，开启运行。按 7.1.6 方法进行校准，臭氧老化试验箱湿度稳定后，记录下湿度显示值的平均值 $\overline{h_p}$ 和湿度所有测量点实测值的平均值 $\overline{h_d}$ 。根据公式（E.1）计算相对湿度示值误差。

E.2 测量模型

$$\Delta h = \overline{h_p} - \overline{h_d} \quad (\text{E.1})$$

式中：

$\overline{h_p}$ ——相对湿度显示值的平均值，%；

$\overline{h_d}$ ——相对湿度所有测量点实测值的平均值，%；

Δh ——相对湿度示值误差，%。

E.3 不确定度来源分析

- a) 测量重复性引入的不确定度；
- b) 湿度测量标准引入的不确定度。

E.4 各不确定度分量评定

E.4.1 测量重复性引入的不确定度 $u(x_1)$

选择 1 台常规水平的臭氧老化试验箱。设定相对湿度为 60.0% 并开启运行，用湿度测量标准测量被测点实际湿度，待湿度显示值和实测值均稳定后记录读数，显示值读数记为 t_p ，实测值读数记为 t_d 。将湿度设定为 0，待湿度显示值明显降低后，将相对湿度重新设定为 60.0%。重复上述测量步骤，记录显示值和实测值，重复测量 10 次。分别对 7.1.3 中的 3 个湿度测量点 A、B、O 进行重复测量，数据列于表 E.1。

表 E.1 湿度示值误差校准数据表

测量点位	测量次数 (第 k 次)	相对湿度显示值 h_{pk} %	相对湿度实测值 h_{dk} %	$\Delta h_k = h_{pk} - h_{dk}$ %
A	1	59.8	59.3	0.5
	2	60.0	59.6	0.4
	3	60.0	59.5	0.5
	4	59.9	59.3	0.6
	5	60.0	59.5	0.5
	6	60.0	59.5	0.5
	7	60.0	59.6	0.4
	8	60.0	59.4	0.6

表 E.1 (续)

测量点位	测量次数 (第 k 次)	相对湿度显示值 h_{pk} %	相对湿度实测值 h_{dk} %	$\Delta h_k = h_{pk} - h_{dk}$ %
A	9	60.0	59.6	0.4
	10	60.1	59.5	0.6
B	1	60.0	58.9	1.1
	2	60.0	59.1	0.9
	3	60.0	59.0	1.0
	4	60.0	58.9	1.1
	5	60.0	59.0	1.0
	6	60.0	59.1	0.9
	7	60.0	59.0	1.0
	8	60.1	59.1	1.0
	9	60.0	58.9	1.1
	10	60.0	59.0	1.0
O	1	59.8	59.6	0.4
	2	60.0	59.6	0.3
	3	60.0	59.7	0.3
	4	59.9	59.7	0.3
	5	60.0	59.6	0.4
	6	60.0	59.8	0.2
	7	60.0	59.8	0.2
	8	59.9	59.7	0.2
	9	60.0	59.8	0.2
	10	60.1	59.7	0.3

对于检测点 A,

$$\overline{\Delta h} = \frac{\sum_{k=1}^{10} \Delta h_k}{10} = 0.5\%$$

$$s_A = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (\Delta h_k - \overline{\Delta h})^2}{10 - 1}} = 0.082\%$$

同理, $s_B = 0.074\%$, $s_C = 0.079\%$ 。

$$s_p = \sqrt{\frac{s_A^2 + s_B^2 + s_C^2}{3}} = 0.078\%$$

$$u(x_1) = s_p = 0.078\%$$

E.4.2 湿度测量标准引入的不确定度 $u(x_2)$

湿度测量标准的最大允许误差不超过 $\pm 2.0\%$ ，假设服从均匀分布。则

$$u(x_2) = \frac{2.0}{\sqrt{3}} = 1.2\%$$

E.5 合成标准不确定度的评定

E.5.1 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \Delta h}{\partial h_p} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta h}{\partial h_d} = -1$$

E.5.2 标准不确定度汇总表（见表 E.2）

表 E.2 标准不确定度汇总表

输入量的标准 不确定度符号 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度	c_i	输出量的不 确定度分量 $u_i(\delta) = c_i u(x_i)$
$u(x_1)$	测量重复性引入 的不确定度	0.078%	1	0.078%
$u(x_2)$	湿度测量标准引入 的不确定度	1.2%	-1	1.2%

E.5.3 合成标准不确定度的计算

$$u_c(\Delta h) = \sqrt{c_1^2 u^2(x_1) + c_2^2 u^2(x_2)}$$

代入表 E.2 中各数值，得：

$$u_c(\Delta h) = 1.2\%$$

E.6 扩展不确定度

扩展不确定度： $U = k \times u_c(\Delta h)$ ，取 $k=2$ ，得：

$$U = 2.4\%, k=2$$