**探空仪用臭氧传感器校准规范**

**试验报告**

《探空仪用臭氧传感器校准规范》起草组

2025年7月

1. 试验目的

按照规范中对探空仪用臭氧传感器计量特性的要求，分别对臭氧分压示值误差、重复性、温度示值误差、臭氧响应时间、反应池背景电流、气泵取样时间等项目进行校准，并对校准数据进行分析，验证计量标准器和主要设备选择的准确性和可靠性，校准对象计量性能规定的正确性，证明校准方法的科学性和合理性，以判定规范的可行性。

1. 试验项目

气泵取样时间：使用皂膜流量计和电子秒表，测量臭氧传感器中气泵抽取100mL气样的时间。

反应池背景电流：使用臭氧校准仪向被校准臭氧传感器电化学反应池通入零点气体，测量传感器反应池电流瞬时值。

温度示值误差：使用铂电阻温度计作为标准器，恒温槽作为配套设备，调节恒温槽测试传感器温度探头在0℃、10℃、20℃、30℃、40℃、50℃各点的示值误差。

臭氧分压示值误差：使用臭氧分析仪作为标准器，臭氧校准仪作为配套设备，调节臭氧校准仪测试臭氧分压在2.5mPa、5mPa、10mPa、15mPa、20mPa、25mPa各点的示值误差。

重复性：使用臭氧分析仪作为标准器，臭氧校准仪作为配套设备，调节臭氧校准仪，测试臭氧分压在10mPa时的重复性。

臭氧响应时间：使用臭氧分析仪作为标准器，臭氧校准仪作为配套设备，测试探空仪用臭氧传感器臭氧分压从15mPa下降到 5mPa所用的时间。

1. 试验环境

本次试验的环境条件以规范规定的条件执行，即温度：（20～30）℃,温度波动：不超过±2℃，湿度：不大于80％RH，大气压力：(850～1100)hPa，压力波动：不超过±5 hPa；无影响仪器正常工作的电磁场干扰；通风良好，无影响校准准确度的干扰气体。

1. 试验样品

名称：臭氧探空仪

臭氧分压范围：0～30mPa；分辨力：0.01mPa

规格型号：CYT-1型、GTH1型、GTH2型、GTH3型、GTH4型、GTH5型和GTH6型

出厂编号：05314、06734、06844、06874、07064、07514、07604、07684、07914、08004。

注：试验用样品均经多次测试性能稳定。

1. 试验设备

试验用标准器和配套设备见表1.

表1 标准器和配套设备列表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 设备名称 | 规格型号 | 出厂编号 | 选取数量 | 技术指标 |
| 1 | 臭氧分析仪 | 49i-DINAA | CM22137090 | 1 | 测量范围：（0 ～800）ppb  最大允许误差：不超过±2%FS。 |
| 2 | 数字温度计 | SWJ-KB | 2110211、2110212 | 2 | 测量范围：（0 ～+50 ）℃；  最大允许误差：不超过±0.1℃。 |
| 3 | 电子秒表 |  |  | 1 | 测量范围：（0 ～30）min；  最大允许误差：不超过±0.10s/30min。 |
| 4 | 数字多用表 | 34401A | MY47060458 | 1 | 分辨力：0.0001mA。 |
| 5 | 数字式气压计 | PTB220 | E4260094 | 1 | 测量范围：(500～1060)hPa；  准确度等级：0.03级。 |
| 6 | 臭氧校准仪 | 49i-PS | 1407660595 | 1 | 控制范围：（0 ～800）ppb；  臭氧浓度11.0µmol/mol。 |
| 7 | 标准溶液 | KI溶液 | / | 10 | 饱和溶液。 |
| / | 10 | 浓度：1%。 |
| 8 | 皂膜流量计 |  |  |  | 测量容量范围：100mL；  准确度级别不低于1.0级。 |
| 9 | 恒温槽 | WLR-2D | 5964 | 1 | 控制范围：（-10 ～+50 ）℃；  波动度：不超过±0.02℃ ；  均匀度：≤0.02℃ 。 |
| 10 | 温度传感器 | HMP45D | A3510045 | 1 | 测量范围：（10 ～40 ）℃；  最大允许误差：±0.5℃。 |
| 11 | 湿度传感器 | HMP45D | A3510045 | 1 | 测量范围：（30 ～95 ）%RH；  最大允许误差：±8%RH。 |
| 注：试验用设备均经检定合格或经校准符合要求。 | | | | | |

1. 试验内容

6.1试验前准备

6.1.1选择样品

首先用目测的方式对臭氧传感器的外观和结构进行检查，选择10台符合试验要求的臭氧探空仪。

6.1.2设备安装

将臭氧传感器从臭氧探空仪上拆下来，提前48小时向待测臭氧传感器内加入标准溶液，并使用配件连接电化学反应池接口，提前1小时开启臭氧校准仪。

对于臭氧传感器的测试，首先进行反应池背景电流、气泵取样时间和温度示值误差测试，并将反应池背景电流、气泵取样时间和温度示值误差的校准结果输入臭氧传感器参数设置端；然后将臭氧传感器进气管与臭氧分析仪和臭氧校准仪输气管连接，进行臭氧分压示值误差、重复性和臭氧响应时间的校准。

6.2气泵取样时间测试

根据《双池电化学型臭氧探空传感器技术要求》的要求，确定气泵采样时间最大不超过（30±1.4)s”。

使用皂膜流量计和电子秒表，测量气泵取样时间。将臭氧传感器电化学反应池阴极进气端通过阴极进气管与采样单元出气口相连，臭氧传感器电化学反应池阴极出气端与皂膜流量计进气管相连；接通臭氧探空传感器电源，稳定 5min后开始测量。按压皂膜流量计下方红色胶头直至产生的皂泡在玻璃管内随气流上升，皂泡经过皂膜流量计刻度零线时，利用秒表开始计时，皂泡通过 100mL 刻度线时计时结束，记录所用时间。为考察气泵取样时间测试方法的可靠性，本次实验，分两次进行，第一次使用10台样品进行1次测量；第二次取其中2台样品进行连续3次重复测量，每次测量间隔时间不少于 30 s。计算平均值作为气泵取样时间。试验结果见表2。

表2气泵取样时间测试结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 测试次数 | 第一次测试 | | 第二次测试 | | | | | 两次测试的差值 |
| 样品编号 | 时间 | 测试值（s） | 时间 | 测试值（s） | | | |
| 1 | 2 | 3 | 平均 |
| 1 | 05314 | 2025年6月10日 | 30.3 | / | / | / | / | / | / |
| 2 | 06734 | 2025年6月10日 | 30.2 | / | / | / | / | / | / |
| 3 | 06844 | 2025年6月10日 | 29.6 | / | / | / | / | / | / |
| 4 | 06874 | 2025年6月10日 | 30.2 | / | / | / | / | / | / |
| 5 | 07064 | 2025年6月10日 | 30.4 | / | / | / | / | / | / |
| 6 | 07604 | 2025年6月10日 | 30.0 | / | / | / | / | / | / |
| 7 | 07684 | 2025年6月10日 | 30.0 | / | / | / | / | / | / |
| 8 | 07914 | 2025年6月10日 | 29.9 | / | / | / | / | / | / |
| 9 | 07514 | 2025年6月10日 | 28.9 | 2025年6月19日 | 30.0 | 30.1 | 30.0 | 30.0 | -1.1 |
| 10 | 08004 | 2025年6月10日 | 30.3 | 2025年6月19日 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | +0.3 |

从试验结果可以看出，测量气泵取样时间时，间隔30 s连续测量3次，其测量结果变化很小；对于同一台仪器，在不同时间段测量时，其测量结果由于皂膜流量计的液体浸润时间、泵体运行状态、人员操作等原因，会有差值，但差值较小。由于臭氧传感器在使用前，均需将气泵取样时间测量值置入仪器参数参加臭氧分压的计算，所以差值不会对臭氧分压的测量结果造成影响。因此，本校准规范中的气泵取样时间技术指标符合要求、校准方法合理可行。

6.3反应池背景电流测试

根据《电探空仪用臭氧传感器功能规格需求书》和《双池电化学型臭氧探空传感器技术要求》的规定，综合考虑本规范确定反应池背景电流≤0.1μA。

使用臭氧校准仪向被校准臭氧传感器电化学反应池通入零点气体1min后，测量传感器反应池电流瞬时值。为考察高浓度臭氧对反应池背景电流测量值的影响，本次实验，分两次进行，第一次使用10台样品对新加入的标准溶液进行连续3次反应池背景电流测量；第二次取其中2台样品进行连续3次重复测量，每次测量反应池背景电流后均进行一次响应时间测量，计算经响应时间测量后反应池背景电流的变化量。试验结果见表3。

表3反应池背景电流测试结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 测试次数 | 第一次测试 | | | | 第二次测试 | | | | | |
| 样品编号 | 时间 | 测试值（s） | | | 时间 | 测试值（s） | | 变化量（s） | 测试值（s） | 变化量（s） |
| 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | 05314 | 2025年6月10日 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | / | / | / | / |  | / |
| 2 | 06734 | 2025年6月10日 | 0.007 | 0.007 | 0.007 | / | / | / | / |  | / |
| 3 | 06844 | 2025年6月10日 | 0.007 | 0.007 | 0.007 | / | / | / | / |  | / |
| 4 | 06874 | 2025年6月10日 | 0.007 | 0.007 | 0.007 | / | / | / | / |  | / |
| 5 | 07064 | 2025年6月10日 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | / | / | / | / |  | / |
| 6 | 07604 | 2025年6月10日 | 0.007 | 0.007 | 0.007 | / | / | / | / |  | / |
| 7 | 07684 | 2025年6月10日 | 0.007 | 0.007 | 0.007 | / | / | / | / |  | / |
| 8 | 07914 | 2025年6月10日 | 0.007 | 0.007 | 0.007 | / | / | / | / |  | / |
| 9 | 07514 | 2025年6月10日 | 0.007 | 0.007 | 0.007 | 2025年6月19日 | 0.014 | 0.041 | 0.027 | 0.048 | 0.007 |
| 10 | 08004 | 2025年6月10日 | 0.007 | 0.007 | 0.007 | 2025年6月19日 | 0.014 | 0.041 | 0.027 | 0.046 | 0.005 |

从试验结果可以看出，由于零点气体不对臭氧浓度产生影响，连续3次测量反应池背景电流时，其测量值保持不变，所以在实际校准工作中只需对其进行1次测量即可，证明本校准规范中的反应池背景电流校准方法合理可行；对于同一台仪器的同一溶液，当其经过高浓度臭氧测试后再进行反应池背景电流时，由于溶液残留臭氧导致其反应池背景电流增大，如果经过高浓度臭氧测试后，不通入零点气体对仪器零点进行调整，则产生臭氧浓度的测量误差，因此在臭氧分压、重复性和响应时间测试前，首先应进行反应池背景电流的测试，并对仪器零点进行调整，证明本校准规范中的相关方法合理可行。

6.4温度示值误差测试

臭氧传感器的温度示值主要是用来计算探空过程中的臭氧分压，根据锡林浩特国家基准观测站历年臭氧探空观测数据分析，由于臭氧传感器的温度探头经过保护措施处理，整个探空过程中，臭氧传感器温度示值范围为（0 ～+50 ）℃，因此本规范规定的臭氧传感器温度测量范围为（0 ～+50 ）℃，并通过考核温度示值的准确性确保臭氧分压的准确性；由于臭氧传感器的温度示值是用来计算探空过程中的臭氧分压的主要分量，为降低由其引入的臭氧分压测量结果的不确定度，本规范规定温度示值最大允许误差不超过±1.0℃。

本次测试使用铂电阻温度计作为标准器，恒温槽作为配套设备，采用比较法，将臭氧传感器温度探头和铂电阻温度计的感应部分同时置于恒温槽的测试区域中央位置，尽量靠近并保持在同一水平面上。调整恒温槽温度测试点从0℃开始，依次测试10℃、20℃、30℃、40℃、50℃点，整个测试过程中，每个测试点应平稳地升温，待温度稳定后开始测试。每间隔30s同时录取标准器示值和臭氧传感器温度示值，共记录4组数据。计算每个校准点标准器示值和臭氧传感器温度示值的平均值和温度测量误差。试验结果见表4。

表4温度示值误差测试结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 时间 | 样品编号 | 测试点 | 测试次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 平均 | 示值误差 |
| 2025年6月11日 | 07514 | 50℃ | 标准值 | 49.99 | 49.99 | 49.98 | 49.99 | 49.99 | -0.29 |
| 样品示值 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 |
| 40℃ | 标准值 | 39.93 | 39.92 | 39.93 | 39.93 | 39.93 | -0.03 |
| 样品示值 | 39.9 | 39.9 | 39.9 | 39.9 | 39.9 |
| 30℃ | 标准值 | 29.95 | 29.96 | 29.95 | 29.95 | 29.95 | 0.05 |
| 样品示值 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 |
| 20℃ | 标准值 | 19.95 | 19.95 | 19.96 | 19.95 | 19.95 | 0.25 |
| 样品示值 | 20.2 | 20.2 | 20.2 | 20.2 | 20.2 |
| 10℃ | 标准值 | 9.95 | 9.95 | 9.95 | 9.94 | 9.95 | 0.55 |
| 样品示值 | 10.5 | 10.5 | 10.5 | 10.5 | 10.5 |
| 0℃ | 标准值 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.88 |
| 样品示值 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| 2025年6月11日 | 07604 | 50℃ | 标准值 | 49.98 | 49.98 | 49.98 | 49.99 | 49.98 | -0.28 |
| 样品示值 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 |
| 40℃ | 标准值 | 39.93 | 39.92 | 39.93 | 39.93 | 39.93 | -0.23 |
| 样品示值 | 39.7 | 39.7 | 39.7 | 39.7 | 39.7 |
| 30℃ | 标准值 | 29.95 | 29.95 | 29.95 | 29.96 | 29.95 | 0.05 |
| 样品示值 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 |
| 20℃ | 标准值 | 19.94 | 19.95 | 19.94 | 19.94 | 19.94 | 0.26 |
| 样品示值 | 20.2 | 20.2 | 20.2 | 20.2 | 20.2 |
| 10℃ | 标准值 | 9.95 | 9.95 | 9.94 | 9.95 | 9.95 | 0.45 |
| 样品示值 | 10.4 | 10.4 | 10.4 | 10.4 | 10.4 |
| 0℃ | 标准值 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.89 |
| 样品示值 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| 2025年6月11日 | 07684 | 50℃ | 标准值 | 49.99 | 49.99 | 49.98 | 49.99 | 49.99 | -0.29 |
| 样品示值 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 |
| 40℃ | 标准值 | 39.93 | 39.92 | 39.93 | 39.93 | 39.93 | -0.13 |
| 样品示值 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 |
| 30℃ | 标准值 | 29.95 | 29.95 | 29.96 | 29.95 | 29.95 | 0.05 |
| 样品示值 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 |
| 20℃ | 标准值 | 19.94 | 19.94 | 19.94 | 19.95 | 19.94 | 0.26 |
| 样品示值 | 20.2 | 20.2 | 20.2 | 20.2 | 20.2 |
| 10℃ | 标准值 | 9.95 | 9.95 | 9.96 | 9.96 | 9.96 | 0.54 |
| 样品示值 | 10.5 | 10.5 | 10.5 | 10.5 | 10.5 |
| 0℃ | 标准值 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.89 |
| 样品示值 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| 2025年6月11日 | 07064 | 50℃ | 标准值 | 49.97 | 49.96 | 49.95 | 49.96 | 49.96 | -0.26 |
| 样品示值 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 |
| 40℃ | 标准值 | 39.92 | 39.92 | 39.93 | 39.92 | 39.92 | -0.12 |
| 样品示值 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 |
| 30℃ | 标准值 | 29.94 | 29.93 | 29.94 | 29.95 | 29.94 | 0.06 |
| 样品示值 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 |
| 20℃ | 标准值 | 19.97 | 19.98 | 19.99 | 19.98 | 19.98 | 0.22 |
| 样品示值 | 20.2 | 20.2 | 20.2 | 20.2 | 20.2 |
| 10℃ | 标准值 | 9.96 | 9.97 | 9.96 | 9.96 | 9.96 | 0.54 |
| 样品示值 | 10.5 | 10.5 | 10.5 | 10.5 | 10.5 |
| 0℃ | 标准值 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.99 |
| 样品示值 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2025年6月11日 | 07914 | 50℃ | 标准值 | 49.98 | 49.98 | 49.99 | 49.99 | 49.99 | -0.19 |
| 样品示值 | 49.8 | 49.8 | 49.8 | 49.8 | 49.8 |
| 40℃ | 标准值 | 39.92 | 39.93 | 39.93 | 39.93 | 39.93 | -0.13 |
| 样品示值 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 |
| 30℃ | 标准值 | 29.94 | 29.94 | 29.94 | 29.95 | 29.94 | 0.16 |
| 样品示值 | 30.1 | 30.1 | 30.1 | 30.1 | 30.1 |
| 20℃ | 标准值 | 19.97 | 19.98 | 19.98 | 19.98 | 19.98 | 0.32 |
| 样品示值 | 20.3 | 20.3 | 20.3 | 20.3 | 20.3 |
| 10℃ | 标准值 | 9.96 | 9.96 | 9.97 | 9.96 | 9.96 | 0.64 |
| 样品示值 | 10.6 | 10.6 | 10.6 | 10.6 | 10.6 |
| 0℃ | 标准值 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.99 |
| 样品示值 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 2025年6月11日 | 06844 | 50℃ | 标准值 | 49.99 | 49.99 | 49.99 | 49.98 | 49.99 | -0.29 |
| 样品示值 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 |
| 40℃ | 标准值 | 39.96 | 39.97 | 39.98 | 39.98 | 39.98 | -0.18 |
| 样品示值 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 |
| 30℃ | 标准值 | 29.95 | 29.94 | 29.94 | 29.94 | 29.94 | 0.06 |
| 样品示值 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 |
| 20℃ | 标准值 | 19.98 | 19.97 | 19.97 | 19.96 | 19.97 | 0.33 |
| 样品示值 | 20.3 | 20.3 | 20.3 | 20.3 | 20.3 |
| 10℃ | 标准值 | 9.96 | 9.95 | 9.95 | 9.95 | 9.95 | 0.65 |
| 样品示值 | 10.6 | 10.6 | 10.6 | 10.6 | 10.6 |
| 0℃ | 标准值 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.88 |
| 样品示值 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| 2025年6月11日 | 06874 | 50℃ | 标准值 | 49.99 | 49.98 | 49.99 | 49.99 | 49.99 | -0.29 |
| 样品示值 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 |
| 40℃ | 标准值 | 39.98 | 39.99 | 39.97 | 39.98 | 39.98 | -0.18 |
| 样品示值 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 |
| 30℃ | 标准值 | 29.94 | 29.95 | 29.95 | 29.96 | 29.95 | 0.05 |
| 样品示值 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 |
| 20℃ | 标准值 | 19.97 | 19.96 | 19.96 | 19.95 | 19.96 | 0.24 |
| 样品示值 | 20.2 | 20.2 | 20.2 | 20.2 | 20.2 |
| 10℃ | 标准值 | 9.95 | 9.96 | 9.95 | 9.94 | 9.95 | 0.45 |
| 样品示值 | 10.4 | 10.4 | 10.4 | 10.4 | 10.4 |
| 0℃ | 标准值 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.88 |
| 样品示值 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| 2025年6月11日 | 05314 | 50℃ | 标准值 | 50.00 | 50.00 | 50.01 | 50.01 | 50.01 | -0.31 |
| 样品示值 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 |
| 40℃ | 标准值 | 39.98 | 39.98 | 39.99 | 39.98 | 39.98 | -0.18 |
| 样品示值 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 |
| 30℃ | 标准值 | 29.96 | 29.95 | 29.95 | 29.94 | 29.95 | 0.15 |
| 样品示值 | 30.1 | 30.1 | 30.1 | 30.1 | 30.1 |
| 20℃ | 标准值 | 19.95 | 19.96 | 19.97 | 19.97 | 19.97 | 0.33 |
| 样品示值 | 20.3 | 20.3 | 20.3 | 20.3 | 20.3 |
| 10℃ | 标准值 | 9.94 | 9.94 | 9.95 | 9.94 | 9.94 | 0.76 |
| 样品示值 | 10.7 | 10.7 | 10.7 | 10.7 | 10.7 |
| 0℃ | 标准值 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.89 |
| 样品示值 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| 2025年6月11日 | 06734 | 50℃ | 标准值 | 50.01 | 50.00 | 50.00 | 49.99 | 50.00 | -0.30 |
| 样品示值 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 |
| 40℃ | 标准值 | 39.98 | 39.99 | 39.98 | 39.97 | 39.98 | -0.18 |
| 样品示值 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 |
| 30℃ | 标准值 | 29.95 | 29.95 | 29.95 | 29.96 | 29.95 | 0.05 |
| 样品示值 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 |
| 20℃ | 标准值 | 19.96 | 19.96 | 19.95 | 19.96 | 19.96 | 0.24 |
| 样品示值 | 20.2 | 20.2 | 20.2 | 20.2 | 20.2 |
| 10℃ | 标准值 | 9.94 | 9.93 | 9.93 | 9.93 | 9.93 | 0.67 |
| 样品示值 | 10.6 | 10.6 | 10.6 | 10.6 | 10.6 |
| 0℃ | 标准值 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.79 |
| 样品示值 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| 2025年6月11日 | 08004 | 50℃ | 标准值 | 49.99 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | 50.00 | -0.30 |
| 样品示值 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 | 49.7 |
| 40℃ | 标准值 | 39.97 | 39.99 | 39.98 | 39.99 | 39.98 | -0.18 |
| 样品示值 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 | 39.8 |
| 30℃ | 标准值 | 29.96 | 29.95 | 29.94 | 29.95 | 29.95 | 0.05 |
| 样品示值 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 | 30.0 |
| 20℃ | 标准值 | 19.97 | 19.98 | 19.98 | 19.98 | 19.98 | 0.32 |
| 样品示值 | 20.3 | 20.3 | 20.3 | 20.3 | 20.3 |
| 10℃ | 标准值 | 9.94 | 9.94 | 9.94 | 9.95 | 9.94 | 0.76 |
| 样品示值 | 10.7 | 10.7 | 10.7 | 10.7 | 10.7 |
| 0℃ | 标准值 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.89 |
| 样品示值 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |

从试验结果可以看出，臭氧传感器温度示值在50℃点示值误差绝对值最大为0.31℃，40℃点示值误差绝对值最大为0.23℃，30℃点示值误差绝对值最大为0.16℃，20℃点示值误差绝对值最大为0.33℃，10℃点示值误差绝对值最大为0.76℃，0℃点示值误差绝对值最大为0.99℃。总体来看，温度示值误差变化趋势一致，均在30℃点示值误差较小，大于30℃和小于30℃各点示值误差成逐渐增大趋势；大于等于20℃各点示值误差较小，小于20℃各点示值误差较大，均满足校准规范规定的最大允许误差不超过±1.0℃的要求；0℃、10℃、20℃、30℃、40℃、50℃点的测试结果表明，可以通过测试3个点（即常温点和两个边界点）的示值误差，来考核臭氧传感器温度示值的准确性，证明本校准规范中的相关校准方法合理可行。

6.5臭氧分压示值误差测试

根据目前臭氧探空观测数据及探空仪臭氧传感器的测量范围分析确定，臭氧分压测量范围为（0～30mPa），根据臭氧探空观测业务对臭氧分压示值准确度的要求，确定当臭氧分压≤7.5mPa时，其最大允许误差不超过±0.3mPa；当臭氧分压＞7.5mPa时，其最大允许误差不超过±4%。

本次测试使用臭氧分析仪作为标准器，臭氧校准仪作为配套设备，选取8台臭氧探空仪，测试其臭氧分压在2.5mPa、5mPa、10mPa、15mPa、20mPa、25mPa各点的示值误差；选取2台臭氧探空仪，测试其臭氧分压在2.5mPa、5mPa、10mPa、15mPa、20mPa、30mPa各点的示值误差。由于臭氧分析仪和臭氧校准仪的输出示值为臭氧浓度，所以首先读取当前气压值，并按照公式（1）计算各测试点的臭氧分压值对应的臭氧浓度值，调节臭氧校准仪测试各点，再按照公式（2）将臭氧分析仪的臭氧浓度换算为臭氧分压值，。

 （1）

 （2）

式中：

——臭氧浓度值，ppb；

——臭氧分压，mPa；

——当前大气压，hPa。

整个测试过程中，臭氧校准仪可准确地稳定在各测试点上，臭氧分析仪的臭氧分压值在各测试点上保持稳定不变。调节臭氧校准仪，待示值稳定2min后，记录标准值和被校臭氧传感器示值，重复测量3次，读数间隔时间不少于 10 s。计算标准值和被校臭氧传感器的平均值、示值误差和相对示值误差。试验结果见表5。

表5臭氧分压示值误差测试结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 测试时间 | 被测仪器编号 | 臭氧分压（mPa） | | | | | | |
| 标准器 | 被测仪器 | | | | | |
| 示值 | 第1次 | 第2次 | 第3次 | 平均 | 示值误差 | 相对示值误差 |
| 1 | 2025年6月10日 | 05314 | 2.5 | 2.25 | 2.26 | 2.28 | 2.26 | -0.24 | / |
| 5 | 4.61 | 4.63 | 4.70 | 4.65 | -0.35 | / |
| 10 | 9.42 | 9.60 | 9.49 | 9.50 | -0.50 | -5.0% |
| 15 | 14.43 | 14.45 | 14.39 | 14.42 | -0.58 | -3.8% |
| 20 | 20.13 | 20.23 | 19.97 | 20.11 | 0.11 | 0.5% |
| 25 | 24.85 | 24.81 | 24.82 | 24.83 | -0.17 | -0.7% |
| 2 | 2025年6月10日 | 06734 | 2.5 | 2.32 | 2.32 | 2.33 | 2.32 | -0.18 | / |
| 5 | 4.81 | 4.81 | 4.81 | 4.81 | -0.19 | / |
| 10 | 9.70 | 9.69 | 9.70 | 9.70 | -0.30 | -3.0% |
| 15 | 14.81 | 14.82 | 14.80 | 14.81 | -0.19 | -1.3% |
| 20 | 19.95 | 19.93 | 19.95 | 19.94 | -0.06 | -0.3% |
| 25 | 25.12 | 25.11 | 25.13 | 25.12 | 0.12 | 0.5% |
| 3 | 2025年6月10日 | 06844 | 2.5 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | -0.30 | / |
| 5 | 4.65 | 4.63 | 4.62 | 4.63 | -0.37 | / |
| 10 | 9.35 | 9.36 | 9.38 | 9.36 | -0.64 | -6.4% |
| 15 | 14.49 | 14.50 | 14.47 | 14.49 | -0.51 | -3.4% |
| 20 | 19.75 | 19.76 | 19.83 | 19.78 | -0.22 | -1.1% |
| 25 | 24.70 | 24.68 | 24.73 | 24.70 | -0.30 | -1.2% |
| 4 | 2025年6月10日 | 06874 | 2.5 | 2.15 | 2.15 | 2.17 | 2.16 | -0.34 | / |
| 5 | 4.69 | 4.76 | 4.71 | 4.72 | -0.28 | / |
| 10 | 9.34 | 9.31 | 9.31 | 9.32 | -0.68 | -6.8% |
| 15 | 14.45 | 14.28 | 14.28 | 14.34 | -0.66 | -4.4% |
| 20 | 19.23 | 19.14 | 19.40 | 19.26 | -0.74 | -3.7% |
| 25 | 24.77 | 24.68 | 24.60 | 24.68 | -0.32 | -1.3% |
| 5 | 2025年6月10日 | 07604 | 2.5 | 2.33 | 2.34 | 2.33 | 2.33 | -0.17 | / |
| 5 | 4.81 | 4.83 | 4.87 | 4.84 | -0.16 | / |
| 10 | 9.91 | 9.88 | 9.9 | 9.90 | -0.10 | -1.0% |
| 15 | 15.04 | 15.01 | 15.18 | 15.08 | 0.08 | 0.5% |
| 20 | 20.49 | 20.49 | 20.42 | 20.47 | 0.47 | 2.3% |
| 30 | 29.91 | 29.77 | 29.82 | 29.83 | -0.17 | -0.6% |
| 6 | 2025年6月10日 | 07514 | 2.5 | 2.32 | 2.32 | 2.31 | 2.32 | -0.18 | / |
| 5 | 4.89 | 4.8 | 4.81 | 4.83 | -0.17 | / |
| 10 | 9.73 | 9.69 | 9.71 | 9.71 | -0.29 | -2.9% |
| 15 | 14.46 | 14.46 | 14.4 | 14.44 | -0.56 | -3.7% |
| 20 | 19.29 | 19.24 | 19.21 | 19.25 | -0.75 | -3.8% |
| 25 | 24.35 | 24.32 | 24.16 | 24.28 | -0.72 | -2.9% |
| 7 | 2025年6月10日 | 07064 | 2.5 | 2.26 | 2.24 | 2.24 | 2.25 | -0.25 | / |
| 5 | 4.57 | 4.62 | 4.54 | 4.58 | -0.42 | / |
| 10 | 9.53 | 9.46 | 9.51 | 9.50 | -0.50 | -5.0% |
| 15 | 14.61 | 14.66 | 14.70 | 14.66 | -0.34 | -2.3% |
| 20 | 19.65 | 19.90 | 19.92 | 19.82 | -0.18 | -0.9% |
| 25 | 24.77 | 24.76 | 24.75 | 24.76 | -0.24 | -1.0% |
| 8 | 2025年6月10日 | 07684 | 2.5 | 2.22 | 2.222 | 2.24 | 2.23 | -0.27 | / |
| 5 | 4.72 | 4.69 | 4.68 | 4.70 | -0.30 | / |
| 10 | 9.96 | 9.94 | 9.93 | 9.94 | -0.06 | -0.6% |
| 15 | 15.02 | 15.06 | 15.04 | 15.04 | 0.04 | 0.3% |
| 20 | 20.37 | 20.34 | 20.38 | 20.36 | 0.36 | 1.8% |
| 30.00 | 29.81 | 29.74 | 29.88 | 29.81 | -0.19 | -0.6% |
| 9 | 2025年6月10日 | 07914 | 2.5 | 2.31 | 2.30 | 2.3 | 2.30 | -0.20 | / |
| 5 | 4.79 | 4.73 | 4.75 | 4.76 | -0.24 | / |
| 10 | 9.69 | 9.82 | 9.75 | 9.75 | -0.25 | -2.5% |
| 15 | 14.86 | 14.86 | 14.81 | 14.84 | -0.16 | -1.0% |
| 20 | 20.10 | 20.03 | 20.05 | 20.06 | 0.06 | 0.3% |
| 25 | 25.47 | 25.30 | 25.30 | 25.36 | 0.36 | 1.4% |
| 10 | 2025年6月10日 | 08004 | 2.5 | 2.46 | 2.46 | 2.46 | 2.46 | -0.04 | / |
| 5 | 4.72 | 4.73 | 4.73 | 4.73 | -0.27 | / |
| 10 | 9.66 | 9.61 | 9.63 | 9.63 | -0.37 | -3.7% |
| 15 | 14.61 | 14.6 | 14.57 | 14.59 | -0.41 | -2.7% |
| 20 | 20.07 | 20.06 | 20.09 | 20.07 | 0.07 | 0.4% |
| 25 | 24.71 | 24.69 | 24.65 | 24.68 | -0.32 | -1.3% |

从试验结果可以看出，在选取的10台臭氧探空仪中，有4台不符合校准规范规定的要求，而且这4台仪器的超差测试点主要集中在5mPa和10mPa两个点，其他仪器中5mPa和10mPa两个点的示值误差比较其他测试点跟接近规范要的临界值，所以为准确考核臭氧分压示值的准确性，臭氧分压5mPa、10mPa和两个边界点是必测点；根据测试结果，30mPa测试点的示值误差均较小，所以实际校准时取25mPa点作为边界点进行校准即可，故本规范规定的臭氧分压校准点选定方法更加科学合理，也证明本校准规范中的相关校准方法合理可行。

6.6重复性测试

使用臭氧分析仪作为标准器，臭氧校准仪作为配套设备，调节臭氧校准仪，测试臭氧分压在10mPa时的重复性。调节臭氧校准仪，设置臭氧校准仪臭氧分压为10mPa，待示值稳定2min后，每隔10s记录1组标准值和被校臭氧传感器示值，共读取10组数据。按公式（3）计算被校臭氧传感器的重复性。试验结果见表6。

 （3）

式中:

——被校臭氧传感器的重复性；

——被校臭氧传感器示值，mPa；

——被校臭氧传感器n次测量结果的算术平均值，mPa；

n——读取组数，n=10。

表6臭氧分压重复性测试结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 测试时间： | | | | | | | | | | | | |
| 序号 | 被测仪器编号 | 臭氧分压重复性（mPa） | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 重复性 |
| 1 | 05314 | 9.69 | 9.78 | 9.37 | 9.3 | 9.40 | 9.64 | 9.60 | 9.70 | 9.71 | 9.65 | 1.7% |
| 2 | 06734 | 9.76 | 9.75 | 9.80 | 9.78 | 9.81 | 9.85 | 9.83 | 9.81 | 9.83 | 9.87 | 0.4% |
| 3 | 06844 | 9.73 | 9.69 | 9.74 | 9.75 | 9.72 | 9.72 | 9.76 | 9.78 | 9.72 | 9.79 | 0.3% |
| 4 | 06874 | 9.35 | 9.20 | 9.36 | 9.31 | 9.20 | 9.04 | 9.14 | 9.38 | 9.52 | 9.53 | 1.6% |
| 5 | 07604 | 9.78 | 10.16 | 10.15 | 10.13 | 9.88 | 10.08 | 9.9 | 10.17 | 9.93 | 10.11 | 1.4% |
| 6 | 07514 | 9.38 | 9.41 | 9.52 | 9.44 | 9.59 | 9.45 | 9.53 | 9.49 | 9.74 | 9.69 | 1.2% |
| 7 | 07064 | 9.34 | 9.42 | 9.41 | 9.39 | 9.46 | 9.44 | 9.53 | 9.47 | 9.49 | 9.54 | 0.6% |
| 8 | 07684 | 9.39 | 9.37 | 9.44 | 9.47 | 9.48 | 9.50 | 9.53 | 9.57 | 9.57 | 9.51 | 0.7% |
| 9 | 07914 | 9.71 | 9.78 | 9.81 | 9.82 | 9.75 | 9.84 | 9.79 | 9.77 | 9.83 | 9.95 | 0.6% |
| 10 | 08004 | 9.60 | 9.70 | 9.59 | 9.67 | 9.64 | 9.66 | 9.61 | 9.61 | 9.66 | 9.65 | 0.4% |

从试验结果可以看出，选取的10台臭氧探空仪重复性均小于2%，测试数据波动较小，仪器性能较稳定，符合校准规范规定的要求。根据测试结果，故本规范规定的臭氧分压校准点选定方法更加科学合理，也证明本校准规范中的相关校准方法合理可行。

6.7臭氧响应时间测试

根据高空大气的特征和高空探测的需求，结合探空仪气象行业标准和国军标文件，本规范确定臭氧响应时间：≤40s。

使用臭氧分析仪作为标准器，臭氧校准仪作为配套设备，测量探空仪用臭氧传感器臭氧分压从15mPa下降到 5mPa所用的时间。通入零点气体调整仪器零点后，设置臭氧校准仪臭氧分压为15mPa，通入臭氧标准气体，待样品臭氧传感器示值稳定5min后记录示值，通入零点气体，同时启动秒表，待样品臭氧传感器示值降至臭氧分压变化量的90%的臭氧分压值6mPa时，暂停秒表，记录秒表示值让仪器回到零点。本次实验，分两次进行，第一次使用10台样品对标准溶液进行1次臭氧响应时间测量；第二次取其中2台样品进行连续3次重复测量，每次测量响应时间后均进行一次反应池背景电流测量。试验结果见表7。

表7臭氧响应时间测试结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 测试次数 | 第一次测试 | | 第二次测试 | | | | |
| 样品编号 | 时间 | 测试值（s） | 时间 | 测试值（s） | | | |
| 1 | 2 | 3 | 平均 |
| 1 | 05314 | 2025年6月10日 | 23.2 | / | / | / | / | / |
| 2 | 06734 | 2025年6月10日 | 24.0 | / | / | / | / | / |
| 3 | 06844 | 2025年6月10日 | 26.6 | / | / | / | / | / |
| 4 | 06874 | 2025年6月10日 | 26.1 | / | / | / | / | / |
| 5 | 07064 | 2025年6月10日 | 23.7 | / | / | / | / | / |
| 6 | 07604 | 2025年6月10日 | 25.4 | / | / | / | / | / |
| 7 | 07684 | 2025年6月10日 | 27.0 | / | / | / | / | / |
| 8 | 07914 | 2025年6月10日 | 24.1 | / | / | / | / | / |
| 9 | 07514 | 2025年6月10日 | 25.4 | 2025年6月19日 | 21.9 | 20.5 | 19.6 | 20.7 |
| 10 | 08004 | 2025年6月10日 | 23.4 | 2025年6月19日 | 24.5 | 24.6 | 22.2 | 23.8 |

从试验结果可以看出，连续测量3次臭氧响应时间，3次测量结果变化很小；对于同一台仪器，在不同时间段测量时，其测量结果由于皂膜流量计的液体浸润时间、泵体运行状态、人员操作等原因，会有差值，但其值均在规范规定的范围内，符合要求。根据试验，测量臭氧响应时间时，只需测量1次即可，因此，本校准规范中的臭氧响应时间校准方法合理可行。

1. 试验结论

7.1探空仪用臭氧传感器臭氧响应时间应≤40s，取1次测量结果作为校准结果。

7.2探空仪用臭氧传感器反应池背景电流应≤0.1μA，取1次测量结果作为校准结果。

7.3探空仪用臭氧传感器气泵取样时间最大允许误差应不超过（30±1.4)s，取3次连续测量结果的平均值作为校准结果。

7.4探空仪用臭氧传感器温度测量范围：0～50℃，最大允许误差：不超过±1.0℃，取3次连续测量结果的平均值作为校准结果。

7.5探空仪用臭氧传感器臭氧分压测量范围：0～30mPa，最大允许误差：不超过±0.3mPa（臭氧分压≤7.5mPa时）、不超过±4%（臭氧分压＞7.5mPa时），取3次连续测量结果的平均值作为校准结果。

7.6探空仪用臭氧传感器臭氧分压重复性一般不大于2%，取10组测量结果的标准偏差作为校准结果。

上述10台臭氧探空仪中，有6台臭氧传感器的气泵取样时间、反应池背景电流、温度示值误差、臭氧分压示值误差、重复性、臭氧响应时间测试结果均符合校准规范的要求。试验结果表明，采取本规范的方法可以对探空仪用臭氧传感器的气泵取样时间、反应池背景电流、温度示值误差、臭氧分压示值误差、重复性、臭氧响应时间等项目进行校准，因此，本规范的可行性可以得到验证。