

# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

## 气体排放测量差分吸收激光雷达标准装 置校准规范

Calibration Specification for Differential Absorption LiDAR Standard

Facility for Gas Emission Measurement

(征求意见稿)

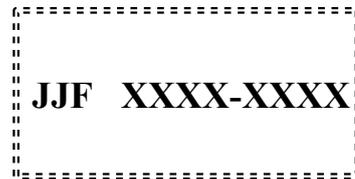
202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

# 气体排放测量差分吸收激光雷达标准装置校准规范

Calibration Specification for Differential  
Absorption LiDAR Standard Facility for Gas  
Emission Measurement



归口单位：全国生态环境监管专用计量测试技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

郑州计量先进技术研究院

中国环境监测总站

参加起草单位：成都生态环境监测站

本规范委托全国生态环境监管专用计量测试技术委员会负责解释

**本规范主要起草人：**

臧金亮（中国计量科学研究院）

张亮（郑州计量先进技术研究院）

师耀龙（中国环境监测总站）

武亮（郑州计量先进技术研究院）

**参加起草人：**

胡宇鑫（郑州计量先进技术研究院）

肖况（成都生态环境监测站）



## 目 录

引 言.....	I
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语和计量单位.....	1
4 概述.....	2
5 计量特性.....	3
5.1 差分吸收激光雷达气体排放测量系统.....	3
5.2 示值重复性.....	3
6 校准条件.....	3
6.1 环境条件.....	3
6.2 测量标准及其他设备.....	4
7 校准项目和校准方法.....	4
7.1 气体排放量校准.....	4
7.2 气体空间浓度校准.....	5
7.3 距离分辨校准.....	6
7.4 角度分辨校准.....	7
8 校准结果表达.....	8
9 复校时间间隔.....	8
附录 A 标准气体及其浓度要求.....	9
附录 B 差分吸收激光雷达气体排放测量系统校准记录.....	10
附录 C 校准证书内页格式.....	12
附录 D 差分吸收激光雷达气体排放测量系统校准不确定度评定示例.....	14



# 引 言

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

本规范参考 GB/T 32150《工业企业温室气体排放核算和报告通则》、JJF 1934《超声波风向风速测量仪器校准规范》、CEN/TC264/WG38《无组织挥发性有机化合物排放的测定》（DETERMINATION OF FUGITIVE VOC EMISSIONS）编制而成。

本规范为首次发布。



# 差分吸收激光雷达气体排放测量系统校准规范

## 1 范围

本规范适用于大气污染物和温室气体等主要气体排放量测量的差分吸收激光雷达计量装置及其他差分吸收激光雷达测量系统的校准。

本规范适用于地基差分吸收激光雷达系统校准，其他差分吸收激光雷达系统校准也可参考本规范

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

JJF 1071 国家计量校准规范编写规则

JJF 1934 超声波风向风速测量仪器校准规范

GB/T 32150 工业企业温室气体排放核算和报告通则

CEN/TC264/WG38 《无组织挥发性有机化合物排放的测定》（DETERMINATION OF FUGITIVE VOC EMISSIONS）

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 术语和计量单位

### 3.1 术语及定义

#### 3.1 排放量 Emission rate

排放量是指单位时间内向大气中排放的大气污染物或温室气体的质量。

#### 3.2 可控气体释放装置 Controlled gas release Facility

能够控制目标气体浓度和排放速率的装置，一般包括标准气体通路、控制系统和气体排放设备。

#### 3.3 扫描线 Scan line

激光雷达发射测量光束在空间通过的路径。

### 3.4 后向散射信号 Backscatter signal

向空气中发射激光后，由于空气中微粒和气溶胶的米散射效应，向激光发射方向的后方散射传播的光学信号。

### 3.5 积分浓度 Integral concentration

积分浓度是每条扫描线计算的沿激光路径的累积浓度。

### 3.6 距离分辨浓度 Distance-resolved concentration

距离分辨浓度是能够沿激光路径识别不同距离处的浓度。

### 3.7 累加平均 Cumulative average

是指差分吸收激光雷达回波较弱，采用多样本累积平均，通过增加脉冲个数抑制随机成分的效果。

## 3.2 计量单位

3.2.1 长度单位：千米，符号 km；米，符号 m；或毫米，符号 mm。

3.2.2 面积单位：平方米，符号 m<sup>2</sup>。

3.2.4 流速单位：米每秒，符号 m/s。

3.2.5 流量单位：立方米每[小]时，符号 m<sup>3</sup>/h；千克每[小]时，符号 kg/h。

3.2.6 压力单位：帕[斯卡]，符号 Pa；或千帕，符号 kPa。

3.2.7 温度单位：摄氏度，符号 °C；或开尔文，符号 K。

3.2.8 湿度单位：体积比，符号 %。

3.2.9 浓度单位：体积比，符号 ppm 或 ppb。

## 4 概述

差分吸收激光雷达气体排放测量系统（下称激光雷达）是在开放空间利用差分吸收激光雷达法远程遥感检测企业或区域气体排放量。它可以在不影响企业正常生产情况下测量气体排放量。其工作原理是：通过激光器发射出两束或多束波长交替工作的脉冲激光。一束被称为“共振波长”，是一种被测气体吸收的波长。另一种是“非共振波长”，是一种不被测气体明显吸收的波长。这两束波长的吸收率的差异与被测气体的浓度有关。脉冲激光束的回波信号可作为时间函数来测量激光的距离。通过扫描被测气体获得一条或多条时间函数的回波信号，分析两束波长的回波信号的吸收差异和时间函数获得一条或多条扫描线的气体距离分辨浓度分布。通过将多条距离分辨浓度的扫描线空间组合获得扫描截面二维空间浓度分布。基于二个或多个高度梯度的风速风向仪获得扫描期间近地面风廓线，然后将垂直于浓度数据的平面上风矢量相乘，得出排放源的排放速率。

激光雷达主要由激光发射单元、光信号接收单元、光信号处理单元、数据采集单元、其他辅助设备和气象测量单元组成。

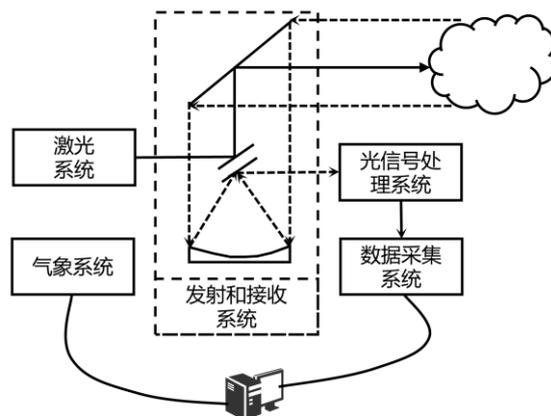


图 1 差分吸收激光雷达系统结构示意图

## 5 计量特性

### 5.1 差分吸收激光雷达气体排放测量系统

计量性能见表 1

表 1 计量特性

序号	计量特性要求	技术指标
1	气体排放量示值误差	$\leq 20\%$
2	气体空间浓度示值误差	$\leq 20\%$
3	距离分辨示值误差	$\leq 10\text{m}$
4	角度分辨率示值误差	$\leq 0.05^\circ$

注：以上指标不用于合格性判定，仅作参考。

### 5.2 示值重复性

气体排放量示值重复性一般不大于 20%。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(-10 ~ 45) °C

6.1.2 环境：无雨雪等对光学镜头产生影响的天气。

6.1.3 供电电源：电压稳定，无明显电磁干扰。

6.1.4 大气压：(70 ~ 106) kPa。

6.1.5 风速：大于 1m/s。

6.1.6 风向：激光雷达扫描方向与风向夹角不小于 30°，不大于 150°

## 6.2 测量标准及其他设备

### 6.2.1 标准仪器设备

校准用标准仪器设备见表 3

表 2 标准仪器设备

序号	设备名称	主要性能指标及功能	用途
1	可控释放标准装置	排放量不确定度小于 3%	气体排放量校准
2	标准气体分析仪	测量精度不大于示值误差 1/3	气体空间浓度校准
3	标准钢卷尺	测量精度不大于示值误差 1/3	距离分辨、角度分辨校准
4	激光测距仪	测量精度不大于示值误差 1/3	距离分辨校准

### 6.2.2 配套设备

表 3 配套设备

序号	设备名称	主要性能指标
1	气体标准物质	符合附录 A

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 气体排放量校准

#### 7.1.1 校准项目

气体排放量示值误差和重复性

#### 7.1.2 校准方法

##### a) 一般检查

外观检查确定差分吸收激光雷达标识清晰明确（制造厂家、型号、出厂编号、光谱调谐范围、排放量测量范围、测量距离等）

##### b) 校准前准备

- 1) 按照测量距离合理部署差分吸收激光雷达系统、可控释放装置、气象系统位置。
- 2) 确定校准气体种类，选择合适的光谱参数。
- 3) 差分吸收激光雷达预热、调试并达到工作状态。

4) 将标准器可控释放装置与相应气体和排放口连接, 并检查气密性, 排放口距离地面的高度应不小于激光发射端与地面的高度。

5) 根据排放量测量范围选取  $Q_{\min}$ 、 $0.3Q_{\max}$ 、 $0.5Q_{\max}$ 、 $0.8Q_{\max}$ 、 $Q_{\max}$ 。

c) 气体排放量校准步骤

1) 打开可控释放装置释放气体, 使连接管道内充满气体。

2) 分别控制可控释放装置排放量为  $Q_{\min}$ 、 $0.3Q_{\max}$ 、 $0.5Q_{\max}$ 、 $0.8Q_{\max}$ 、 $Q_{\max}$ ,

3) 差分吸收激光雷达气体排放量测量, 记录后向散射信号和气象数据, 计算排放量。

4) 重复测量 4 次。

5) 示值误差

排放量示值误差见公式 (1)

$$E = \frac{Q_{DIAL} - Q_{CRF}}{Q_{CRF}} \quad (1)$$

式中:

$E$  --- 气体排放量示值误差, %;

$Q_{DIAL}$  --- 差分吸收激光雷达排放量示值, kg/h;

$Q_{CRF}$  --- 可控释放装置排放量, kg/h。

6) 重复性

排放量重复性采用贝塞尔公式:

$$E_s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - \overline{E_{DIAL}})^2} \quad (2)$$

式中:

$E_s$  --- 排放测量重复性;

$n$  --- 校准次数;

$E_i$  --- 第  $i$  次排放示值, kg/h;

$\overline{E_{DIAL}}$  ---  $n$  次排放测量平均值, kg/h。

## 7.2 气体空间浓度校准

### 7.2.1 校准项目

气体空间浓度示值误差

## 7.2.2 校准方法

### a) 一般检查

外观检查确定差分吸收激光雷达标识清晰明确（制造厂家、型号、出厂编号、光谱调谐范围、排放量测量范围、测量距离等）

### b) 校准前准备

1) 确认气体种类，选择合适的光谱参数。

2) 差分吸收激光雷达预热、调试并达到工作状态。

3) 按照测量距离  $L_{\min}$ 、 $0.3L_{\max}$ 、 $0.5L_{\max}$ 、 $0.8L_{\max}$ 、 $L_{\max}$  放置气体分析仪，并设置气体采样参数，预热达到工作状态。

4) 检查气体分析仪采样端口是否在激光路径。

### c) 校准步骤

1) 差分吸收激光雷达沿气体分析仪位置进行气体浓度测量，记录后向散射信号，选择合适的距离分辨率计算浓度。

2) 记录气体分析仪气体浓度数值。

3) 示值误差

$$E_c = \frac{c_{DIAL} - c_{gas}}{c_{gas}} \quad (3)$$

式中：

$E_c$ ——气体空间浓度示值误差；

$c_{DIAL}$ ——差分吸收激光雷达浓度，ppm；

$c_{gas}$ ——气体分析仪显示浓度示值，ppm。

## 7.3 距离分辨校准

### 7.2.1 校准项目

距离分辨示值误差

### 7.2.2 校准方法

#### a) 一般检查

外观检查确定差分吸收激光雷达标识清晰明确（制造厂家、型号、出厂编号、光谱调谐范围、排放量测量范围、测量距离等）

#### b) 校准前准备

- 1) 确认差分吸收激光雷达距离分辨率。
- 2) 差分吸收激光雷达预热、调试并达到工作状态。
- 3) 根据距离分辨率，在激光路径中放置一块玻璃板。

c) 校准步骤

- 1) 开启差分吸收激光雷达，观察后向散射强反射点。
- 2) 沿激光路径向后移动玻璃板，当观察到后向散射信号中强反射点位置发生改变，停止移动，标记为 0 点。再次向后移动，直到强反射点位置再次发生改变，记录该点与 0 点的距离。
- 3) 使用钢卷尺或激光测距仪重复测量 5 次。
- 4) 距离分辨率示值误差

$$E_l = \frac{l_d - l_m}{l_m} \quad (4)$$

式中：

$E_l$ ——距离分辨率示值误差；

$l_d$ ——差分吸收激光雷达浓度，m；

$l_m$ ——钢卷尺或激光测距仪重复测量平均值，m。

## 7.4 角度分辨校准

### 7.2.1 校准项目

角度分辨率示值误差

### 7.2.2 校准方法

a) 一般检查

外观检查确定差分吸收激光雷达标识清晰明确（制造厂家、型号、出厂编号、光谱调谐范围、排放量测量范围、测量距离、角度分辨率等）

b) 校准前准备

- 1) 确认差分吸收激光雷达角度分辨率。
- 2) 差分吸收激光雷达预热、调试并达到工作状态。
- 3) 使用 532nm 连续激光器代替激光源，放置在激光发射端口。
- 4) 在激光路径中放置一块带有刻度纸板。

c) 校准步骤

- 1) 开启 532nm 连续激光器，观察纸板上绿色激光光斑，并标记中心。
- 2) 以最小角度分辨率转动，观察纸板上绿色激光光斑，并标记中心
- 3) 使用钢卷尺或激光测距仪重复测量 5 次。
- 4) 数据处理：

$$\theta_m = \arctan\left(\frac{a}{2b}\right) \quad (5)$$

式中：

$a$ ——光斑中心距离，m；

$b$ ——激光发射端和光斑中心距离，m；

$\theta_m$ ——差分吸收激光雷达计算角度，°。

- 5) 角度分辨率示值误差

$$E_\theta = \frac{\theta_d - \theta_m}{\theta_m} \quad (6)$$

式中：

$E_\theta$ ——距离分辨率示值误差；

$\theta_d$ ——差分吸收激光雷达角度，°；

## 8 校准结果表达

差分吸收激光雷达经校准后出具校准证书，校准证书信息应符合 JJF1071-2010 中 5.12 的要求，校准证书内页格式参见附录 C，不确定评定示例参见附录 D

## 9 复校时间间隔

差分吸收激光雷达气体排放测量系统复校时间间隔建议为 12 月。

复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间。

## 附录 A

## 标准气体及其浓度要求

A.1 气体标准物质应是有证标准物质，并在有效期内使用

A.2 气体标准物质的浓度以体积比表示法表示。气体标准物质的标准值允许偏差应不超过表所规定值的 $\pm 2\%$ 。其相对扩展不确定度 $u_{rel}=2\%$  ( $k=2$ )

A.3 附录 A 为可增加的标准库，后续根据测量实验，可添加其他气体物质。

表 A.1 气体标准物质的浓度

序号	标准气体	浓度	相对扩展不确定度
1	甲烷	99.9%	2%
2	乙烷	99.9%	2%
3	丙烷	99.9%	2%

## 附录 B

## 差分吸收激光雷达气体排放测量系统校准记录

标准器	可控释放装置		
测量范围		气体种类	
气体排放量校准			
校准点	测量次数	可控释放装置实际排放量	差分吸收激光雷达排放量示值
1	1		
	2		
	3		
2	1		
	2		
	3		
3	1		
	2		
	3		
空间浓度校准			
校准点	测量次数	气体分析仪实际浓度	差分吸收激光雷达浓度示值
1	1		
	2		
	3		
2	1		
	2		
	3		
3	1		
	2		
	3		
距离分辨率			
校准点	测量次数	钢卷尺/激光测距仪测量实际距离分辨率	差分吸收激光雷达示值
1	1		
	2		
	3		
2	1		
	2		
	3		

3	1		
	2		
	3		

角度分辨率

校准点	测量次数	钢卷尺/激光测距仪计算角度	差分吸收激光雷达示值
1	1		
	2		
	3		
2	1		
	2		
	3		
3	1		
	2		
	3		

附录 C

校准证书内页格式

标准器	可控释放装置																							
测量范围		气体种类																						
气体排放量	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>工况</th> <th>校准点</th> <th>校准系数</th> <th>重复性</th> <th>标准不确定度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				工况	校准点	校准系数	重复性	标准不确定度	1					2					3				
工况	校准点	校准系数	重复性	标准不确定度																				
1																								
2																								
3																								
气体空间浓度	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>工况</th> <th>校准点</th> <th>校准系数</th> <th>重复性</th> <th>标准不确定度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				工况	校准点	校准系数	重复性	标准不确定度	1					2					3				
工况	校准点	校准系数	重复性	标准不确定度																				
1																								
2																								
3																								
距离分辨率	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>工况</th> <th>校准点</th> <th>校准系数</th> <th>重复性</th> <th>标准不确定度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				工况	校准点	校准系数	重复性	标准不确定度	1					2					3				
工况	校准点	校准系数	重复性	标准不确定度																				
1																								
2																								
3																								
角度分辨率	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>工况</th> <th>校准点</th> <th>校准系数</th> <th>重复性</th> <th>标准不确定度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				工况	校准点	校准系数	重复性	标准不确定度	1					2					3				
工况	校准点	校准系数	重复性	标准不确定度																				
1																								
2																								
3																								

校准结果的扩展不确定度：

差分吸收激光雷达气体排放量  $U_{r,1} =$             % ( $k=2$ )

差分吸收激光雷达空间浓度  $U_{r,2} =$             % ( $k=2$ )

差分吸收激光雷达距离分辨率  $U_{r,3} =$             % ( $k=2$ )

差分吸收激光雷达角度分辨率  $U_{r,4} =$             % ( $k=2$ )

复校时间间隔建议：12 个月

## 附录 D

## 差分吸收激光雷达气体排放测量系统校准不确定度评定示例

## D.1 气体排放量

## D.1.1 概述

## D.1.2 被校仪器：

名称：差分吸收激光雷达气体排放测量系统。

## D.1.3 校准依据

《气体排放测量差分吸收激光雷达标准装置校准规范》

## D.1.4 校准方法：

通过在开放空间里控制可控气体释放装置释放速率，用差分吸收激光雷达系统和气象系统测量排放，取 5 次测量结果的算术平均值为测量值，该系统测量值与标准气体释放量值为系统的测量误差。

## D.1.5 测量模型

$$\delta = \frac{F_{DIAL} - F_{CRF}}{F_{CRF}} \quad (D.1)$$

式中：

$\delta$ ——差分吸收激光雷达测量示值误差；

$F_{DIAL}$ ——差分吸收激光雷达气体排放示值；

$F_{CRF}$ ——可控气体释放装置排放速率。

## D.1.6 测量不确定度来源

测量标准物质引入的不确定度

可控气体释放装置引入的不确定度

差分吸收激光雷达气体排放量测量重复性

## D.1.7 各输入量的标准不确定度评定

## D.1.8 输入量的标准不确定度评定

不确定度分量包括标准装置溯源引入的不确定度，标准气体引入的不确定度。

## a) 标准气体引入的标准不确定度

根据校准规范，标准气体相对扩展不确定度不大于 2%， $k=2$ ，即相对不确定度  $u_1(gas)=1\%$

b) 可控气体释放装置引入的不确定度

根据校准规范，可控气体释放装置相对扩展不确定度不大于 2.2%， $k=2$ ，即相对不确定度  $u_2(crf)=1.1\%$

c) 差分吸收激光雷达气体排放量测量重复性

以差分吸收激光雷达气体排放测量系统在可控气体释放装置以 7 kg/h 排放速率为例，在同一条件下重复测量 5 次，得到 7.01kg/h、7.32kg/h、6.91kg/h、7.1kg/h、7.01kg/h 测量数据，采用贝塞尔公式计算实验标准偏差。

$$s_F = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (F_j - \bar{F})^2} = \sqrt{\frac{1}{5-1} [(-0.06)^2 + (0.25)^2 + (0.16)^2 + (0.03)^2 + (-0.06)^2]} = 0.16 \text{ kg/h}$$

差分吸收激光雷达测量重复性

$$u_3(DIAL) = \frac{s_F}{F \cdot \sqrt{n}} = \frac{0.16}{7.07 \cdot \sqrt{5}} = 1.01\%$$

D.1.9 合成相对不确定度

a) 标准不确定度汇总表

表 D.1 标准不确定度分量汇总表

相对不确定度分量	不确定度来源	相对不确定度值
$u_1(gas)$	证书	1%
$u_2(crf)$	证书	1.1%
$u_3(DIAL)$	重复性	1.01%

b) 合成标准不确定度：

输入量彼此独立不相关，所以合成标准不确定度按下式得到：

$$u_r(F) = \sqrt{(u_1(gas))^2 + (u_2(crf))^2 + (u_3(DIAL))^2} = \sqrt{(1\%)^2 + (1.1\%)^2 + (1.01\%)^2} = 1.80\%$$

D.1.10 扩展不确定度

差分吸收激光雷达气体排放测量示值误差不确定度取包含因子  $k=2$ ，校准结果的不确定度：

$$U_r = k \cdot u_r = 2 \cdot 1.8\% = 3.6\%$$

## D.2 气体空间浓度校准规范示例

### D.2.1 概述

#### D.2.2 被校仪器：

名称：差分吸收激光雷达气体排放测量系统。

#### D.2.3 校准依据

《气体排放测量差分吸收激光雷达标准装置校准规范》

#### D.2.4 校准方法：

差分吸收激光雷达沿气体分析仪位置进行气体浓度测量，记录后向散射信号，选择合适的距离分辨率计算浓度。

#### D.2.5 测量模型

$$E_c = \frac{C_{DIAL} - C_{gas}}{C_{gas}}$$

#### D.2.6 测量不确定度来源

测量标准物质引入的不确定度

气体分析仪引入的不确定度

差分吸收激光雷达气体排放量测量重复性

#### D.2.7 各分量不确定度

##### a) 气体分析仪不确定

根据校准规范，气体分析仪扩展不确定度不大于 1%， $k=2$ ，即相对不确定度

$$u_1(\text{instrument}) = 0.05\%$$

##### b) 标准物质不确定度

根据校准规范，标准气体相对扩展不确定度不大于 2%， $k=2$ ，即相对不确定度

$$u_1(\text{gas}) = 1\%$$

##### c) 差分吸收激光雷达测量浓度重复性测量

以校准点 1 为例，差分吸收激光雷达气体浓度分为 1.98ppm、2.02ppm、2.00ppm、1.99ppm、2.03ppm，使用贝塞尔公式计算重复性。

$$s_c = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} = \sqrt{\frac{1}{5-1} [(-0.024)^2 + (0.016)^2 + (-0.004)^2 + (-0.014)^2 + (0.026)^2]} = 0.02\text{ppm}$$

重复性:

$$u_c(DIAL) = \frac{s_c}{c \cdot \sqrt{n}} = \frac{0.02}{2.004 \cdot \sqrt{5}} = 0.2\%$$

#### D.2.8 合成相对不确定度

##### a) 标准不确定度汇总表

表 D.2 标准不确定度分量汇总表

相对不确定度分量	不确定度来源	相对不确定度值
$u_1(\text{instrument})$	证书	0.05%
$u_2(\text{gas})$	证书	1%
$u_c(\text{DIAL})$	重复性	0.2%

##### b) 合成标准不确定度:

输入量彼此独立不相关, 所以合成标准不确定度按下式得到:

$$u_r(F) = \sqrt{(u_1(\text{instrument}))^2 + (u_2(\text{gas}))^2 + (u_c(\text{DIAL}))^2} = \sqrt{(0.05\%)^2 + (1\%)^2 + (0.2\%)^2} = 1.02\%$$

#### D.2.9 扩展不确定度

差分吸收激光雷达气体空间浓度示值误差不确定度取包含因子  $k=2$ , 校准结果的不确定度:

$$U_r = k \cdot u_r = 2 \cdot 1.02\% = 2.04\%$$

### D.3 距离分辨率

#### D.3.1 概述

#### D.3.2 被校仪器:

名称: 差分吸收激光雷达气体排放测量系统。

#### D.3.3 校准依据

《气体排放测量差分吸收激光雷达标准装置校准规范》

#### D.3.4 校准方法:

沿激光路径向后移动玻璃板, 当观察到后向散射信号中强反射点位置发生改变, 停止移动, 标记为 0 点。再次向后移动, 直到强反射点位置再次发生改变, 记录该点与 0 点的距离。

#### D.3.5 测量模型

$$E_l = \frac{l_d - l_m}{l_m}$$

#### D.3.6 测量不确定度来源

标准器钢卷尺、激光测距仪不确定度

钢卷尺重复性

#### D.3.7 各分量不确定度

##### a) 钢卷尺引入不确定度

根据校准规范, 钢卷尺扩展不确定度不大于 1%,  $k = 2$ , 即相对不确定度  $u_1(r) = 0.05\%$

##### b) 钢卷尺重复性

以校准点 1 为例, 测得距离分辨率为 3.77m、3.75m、3.73m、3.78m、3.74m, 用贝塞尔公式计算重复性

$$s_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} = \sqrt{\frac{1}{5-1} [(0.016)^2 + (-0.004)^2 + (-0.024)^2 + (0.026)^2 + (-0.014)^2]} = 0.02\text{m}$$

$$u_m = \frac{s_m}{m \cdot \sqrt{n}} = \frac{0.02}{3.754 \cdot \sqrt{5}} = 0.11\%$$

#### D.3.8 合成相对不确定度

##### a) 标准不确定度汇总表

表 D.3 标准不确定度分量汇总表

相对不确定度分量	不确定度来源	相对不确定度值
$u_1(\mathbf{r})$	证书	0.05%
$u_m$	重复性	0.11%

b) 合成标准不确定度：

输入量彼此独立不相关，所以合成标准不确定度按下式得到：

$$u_r(F) = \sqrt{(u_1(\mathbf{r}))^2 + (u_m)^2} = \sqrt{(0.05\%)^2 + (0.11\%)^2} = 1.00\%$$

### D.3.9 扩展不确定度

差分吸收激光雷达距离分辨率示值误差标准不确定度取包含因子  $k=2$ ，校准结果的不确定度：

$$U_r = k \cdot u_r = 2 \cdot 1.00\% = 2.00\%$$

## D.4 角度分辨率

### D.4.1 概述

### D.4.2 被校仪器:

名称: 差分吸收激光雷达气体排放测量系统。

### D.4.3 校准依据

《气体排放测量差分吸收激光雷达标准装置校准规范》

### D.4.4 校准方法:

开启 532nm 连续激光器, 观察纸板上绿色激光光斑, 并标记中心。以最小角度分辨率转动, 观察纸板上绿色激光光斑, 并标记中心使用钢卷尺或激光测距仪重复测量 5 次。

### D.4.5 测量模型

$$E_{\theta} = \frac{\theta_d - \theta_m}{\theta_m}$$

### D.4.6 测量不确定度来源

标准器钢卷尺、激光测距仪不确定度

钢卷尺重复性

### D.4.7 各分量不确定度

#### c) 钢卷尺引入不确定度

根据校准规范, 钢卷尺扩展不确定度不大于 1%,  $k=2$ , 即相对不确定度  $u_1(\mathbf{r})=0.05\%$

#### d) 钢卷尺重复性

以校准点 1 为例, 测得距离分辨率为  $0.11^{\circ}$ 、 $0.12^{\circ}$ 、 $0.09^{\circ}$ 、 $0.08^{\circ}$ 、 $0.10^{\circ}$ , 用贝塞尔公式计算重复性

$$s_{\theta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2} = \sqrt{\frac{1}{5-1} [(0.01)^2 + (0.02)^2 + (-0.01)^2 + (-0.02)^2 + (0)^2]} = 0.016^{\circ}$$

$$u_{\theta} = \frac{s_{\theta}}{\theta \cdot \sqrt{n}} = \frac{0.016}{0.1 \cdot \sqrt{5}} = 3.16\%$$

### D.4.8 合成相对不确定度

#### a) 标准不确定度汇总表

表 D.4 标准不确定度分量汇总表

相对不确定度分量	不确定度来源	相对不确定度值
$u_1(r)$	证书	0.05%
$u_\theta$	重复性	3.16%

b) 合成标准不确定度：

输入量彼此独立不相关，所以合成标准不确定度按下式得到：

$$u_r(\theta) = \sqrt{(u_1(r))^2 + (u_\theta)^2} = \sqrt{(0.05\%)^2 + (3.16\%)^2} = 3.16\%$$

D.4.9 扩展不确定度

差分吸收激光雷达距离分辨率示值误差标准不确定度取包含因子  $k=2$ ，校准结果的不确定度：

$$U_r = k \cdot u_r = 2 \cdot 3.16\% = 6.32\%$$

