

ICS 27.060.30
CCS J 98



中华人民共和国国家标准

GB/T 45869—2025

锅炉碳排放在线监测技术指南

Technical guideline for online monitoring of boiler carbon emission

2025-08-01 发布

2026-02-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准管理委员会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 监测原理	2
5 监测系统	3
6 性能指标	7
7 监测站房	10
8 系统安装	10
9 检测方法	11
10 运行维护	13
11 数据审核和处理	15
附录 A (规范性) 数据计算和处理	17
附录 B (资料性) 烟气组分测量采样方式示意图	23
附录 C (资料性) 计算流体力学(CFD)数值模拟	27
附录 D (规范性) $t_{0.95(n-1)}$ 分布	30
附录 E (资料性) 常用烟气流速测量方法	31
附录 F (规范性) 二氧化碳和氧气体积分数监测单元实验室检测方法	36
附录 G (规范性) 监测系统现场检测方法	41
附录 H (资料性) 监测系统不确定度评定示例	45
附录 I (规范性) 数据采集处理和传输系统	51
参考文献	55



前　　言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国锅炉压力容器标准化技术委员会(SAC/TC 262)提出并归口。

本文件起草单位：中国特种设备检测研究院、广东省特种设备检测研究院顺德检测院、中国计量科学研究院、北京雪迪龙科技股份有限公司、青岛明德环保仪器有限公司、国家电投集团江西电力有限公司新昌发电分公司、国电环境保护研究院有限公司、西安华电清洁能源技术有限公司、西安交通大学、清华大学、清华大学山西清洁能源研究院、广东省市场监督管理局、燕山大学。

本文件主要起草人：笪耀东、卢伟业、常勇强、张倩喧、徐军、陈小华、潘冠福、江建忠、邓磊、马修元、李越胜、彭志敏、黄中、王益科、张云刚、王茜、梁奎、杭晨哲、谢涛。

锅炉碳排放在线监测技术指南

1 范围

本文件提供了锅炉碳排放在线监测的监测原理、监测系统、性能指标、监测站房、系统安装、检测方法、运行维护及数据审核和处理的技术指南。

本文件适用于燃用化石燃料(含掺烧非化石燃料)的锅炉。

本文件不适用垃圾焚烧锅炉、余热锅炉以及纯烧生物质的锅炉。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 16157 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法

GB 50093 自动化仪表工程施工及质量验收规范

HJ 75 固定污染源烟气(SO_2 、 NO_x 、颗粒物)排放连续监测技术规范

HJ/T 397 固定源废气监测技术规范

JJF 1059.1 测量不确定度评定与表示

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

锅炉碳排放 carbon emission of boiler

锅炉燃料燃烧及其烟气处理过程(脱硫、脱硝等)产生的二氧化碳排放。

3.2

锅炉碳排放在线监测系统 carbon emission online monitoring system of boiler

在线监测锅炉碳排放浓度和排放量所需要的全部设备。

注:简称“监测系统”。

3.3

标准状态 standard state

温度为 273 K, 压力为 101.325 kPa 时的状态。

注:简称“标态”。

[来源:HJ 76—2017,3.13,有修改]

3.4

测量不确定度 measurement uncertainty; uncertainty of measurement

根据所用到的信息,表征赋予被测量值分散性的非负参数。

注:简称“不确定度”。

[来源:JJF 1059.1—2012,3.12]

3.5

目标不确定度 target uncertainty

根据测量结果的预期用途,规定作为上限的测量不确定度。

[来源:JJF 1059.1—2012,3.30]

3.6

参比方法 reference method

用于与监测系统测量结果相比较的国家或行业发布的标准方法。

[来源:HJ 75—2017,3.7,有修改]

3.7

满量程 full scale

根据实际应用需要设置监测系统各监测单元的最大测量值。

[来源:HJ 76—2017,3.3,有修改]

3.8

系统响应时间 system response time

从监测系统采样探头通入标准气体的时刻起,到分析仪示值达到标准气体标称值 90% 的时刻止,中间的时间间隔。

注:包括管线传输时间和仪器响应时间。

[来源:HJ 75—2017,3.11,有修改]

3.9

零点漂移 zero drift

在仪器未进行维修、保养或调节的前提下,监测系统按规定的时间运行后通入零点气体,仪器的读数与零点气体初始测量值之间的偏差相对于满量程的百分比。

[来源:HJ 76—2017,3.5,有修改]

3.10

量程漂移 span drift

在仪器未进行维修、保养或调节的前提下,监测系统按规定的时间运行后通入量程校准气体,仪器的读数与量程校准气体初始测量值之间的偏差相对于满量程的百分比。

[来源:HJ 76—2017,3.6,有修改]

3.11

零点气体 zero gas

不存在测量组分或小于规定值、其他组分浓度不干扰测量组分结果或产生的测量组分干扰可忽略不计的气体。

[来源:HJ 870—2017,3.1,有修改]

3.12

速度场系数 velocity field coefficient

采用参比方法与监测系统同步测量烟气流速,参比方法测量的烟气平均流速与同时间区间且相同状态的监测系统测量的烟气平均流速的比值。

[来源:HJ 75—2017,3.16,有修改]

4 监测原理

通过锅炉碳排放在线监测系统,在线测量烟气中的二氧化碳、氧气和水蒸气的体积分数、烟气流速、烟气温度、烟气压力等参数,经过实时数据采集、处理和传输,持续监测锅炉的碳排放浓度、碳排放量等

锅炉碳排放数据。

5 监测系统

5.1 系统组成和功能需求

5.1.1 监测系统主要由烟气组分(二氧化碳体积分数、氧气体积分数、水蒸气体积分数)、烟气流速、烟气温度、烟气压力和大气压力(可选)监测单元以及数据采集、处理单元等组成,主要包括测量仪器仪表、数据采集与处理设备、样品采集和传输装置(抽取式采样时)、预处理设备(抽取式采样时)以及其他辅助设备等。

5.1.2 监测系统主要具备以下功能:

- a) 监测烟气组分,包括二氧化碳体积分数、氧气体积分数、水蒸气体积分数;
- b) 监测烟气流速;
- c) 监测烟气温度、烟气压力;
- d) 计算碳排放浓度和碳排放量,数据计算和处理方法宜按照附录 A 执行;
- e) 显示(可支持打印)和记录各种数据和参数;
- f) 形成相关图表;
- g) 通过数据、图文等方式传输;
- h) 手动和(或)自动方式进行零点和量程校准;
- i) 条件具备时,增加锅炉碳排放强度计算功能。

5.2 主要监测项目、测量方法与采样方式

5.2.1 主要监测项目及常用测量方法见表 1。也可采用满足本文件性能指标的其他测量方法。

表 1 主要监测项目与常用测量方法

序号	监测项目		测量方法
1	烟气组分	二氧化碳体积分数	非分散红外吸收法 傅里叶变换红外光谱法 可调谐半导体激光吸收光谱法
2		氧气体积分数	氧化锆法 顺磁法 电化学法
3		水蒸气体积分数	阻容法 干湿氧法 可调谐半导体激光吸收光谱法
4	烟气流速		差压法 超声波时差法
5	烟气温度		热电偶 热电阻
6	压力		压阻式压力传感器

5.2.2 烟气组分测量的采样方式分为抽取式(包括冷干法、热湿法和稀释法)和非抽取式。烟气组分测量采样方式的示意图见附录 B。

5.3 系统配置

5.3.1 基本原则

5.3.1.1 根据锅炉烟气条件、监测环境条件以及目标不确定度选择合适的测量方法、测量方式、仪器仪表、采样传输装置、预处理设备以及辅助设备等。烟气和监测环境条件主要包括：

- a) 烟气温度、压力范围；
- b) 烟气中二氧化碳、氧气、水蒸气体积分数的范围；
- c) 烟气中的烟尘(颗粒物)浓度范围；
- d) 环境温度范围及大气压力；
- e) 潜在干扰物质的浓度范围；
- f) 烟气流场分布。

5.3.1.2 仪器仪表的量程范围取决于被测量的预期范围，部分仪器仪表满量程值的推荐范围见表 2。

表 2 仪器仪表满量程值推荐范围

测量项目	燃料类型	推荐范围
烟气中二氧化碳的体积分数	煤	20%~25%
	燃料油	15%~20%
	天然气/石油气	10%~15%
	液化石油气	15%~20%
	高炉煤气	30%~35%
烟气中氧气的体积分数	—	≥21%
烟气中水蒸气的体积分数	煤、燃料油、天然气、石油气、高炉煤气	20%~25%
烟气压力	—	±5 000 Pa
测量烟气流速时的差压	—	≥2 000 Pa
烟气流速	—	≥30 m/s

5.3.1.3 烟气组分、温度、压力监测一般可采用单点采样或测量。

5.3.1.4 当烟道直径小于或等于 1 m 时,烟气流速监测一般可采用单点测量。对于矩形烟道,以当量直径计,其当量直径根据公式(1)计算。

$$D = \frac{2AB}{A + B} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

式中：

D ——当量直径,单位为米(m)；

A、B ——边长,单位为米(m)。

当烟道直径或当量直径大于 1 m 时,对计划安装位置的烟气流场进行调查,宜按以下程序选择适宜的烟气流速测量方式。

- a) 烟气流场调查在高烟气流速和低烟气流速两种工况下进行,可通过现场实测或计算流体力学(CFD)数值模拟进行。现场实测按照 GB/T 16157 执行。采用 CFD 方法时,附录 C 给出了分析要点,根据数值模拟结果按照 GB/T 16157 中测点位置(测点数量取上限值)确定各测点的轴向流速。

b) 根据公式(2)~公式(4), 分别计算两种工况下流速分布再现性(R_f)、峰值系数(C_p)和偏斜度(C_s)。

$$R_f = t_{0.95(n-1)} \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1i} - x_{2i})^2}{2n}} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

式中：

$t_{0.95(n-1)}$ ——置信水平为 0.95, 自由度为 $n-1$ 的 t 因子, 根据附录 D 查取;

x_{1i} —— 高流速工况下流速测量线上第 i 个测点的烟气流速与烟气平均流速的比值；

——低流速工况下流速测量线上第 i 个测点的烟气流速与烟气平均流速的比值；

n ——测点数量。

式中：

v_p ——每个工况下流速测量线上各测点中的最高流速,单位为米每秒(m/s);

\bar{v} ——每个工况下流速测量线上各测点中流速的算术平均值,单位为米每秒(m/s)。

式中：

\bar{v}_h 、 \bar{v}_l ——分别计算流速测量线上对称中心一侧各测点流速的算术平均值和另一侧各测点流速的算术平均值,算术平均值高的为 \bar{v}_h ,算术平均值低的为 \bar{v}_l ,单位为米每秒(m/s)。

c) 根据再现性、峰值系数和偏斜度计算结果(均取最大值),选择表 3 规定的烟气流速测量方式。常用烟气流速测量方法的原理、技术特点等见附录 E。

表 3 烟气流速测量方式

再现性	峰值系数	偏斜度	流速测量方式
≤5.0%	≤1.3	≤1.2	点测量或探头式线测量
	>1.3	≤1.2	单通道贯穿式线测量或网格法点测量
	>1.3	>1.2	单通道贯穿式线测量(经过最高偏斜度平面)或网格法点测量
>5.0%	≤1.3	≤1.2	单通道贯穿式线测量或网格法点测量
	>1.3	≤1.2	单通道贯穿式线测量(经过最高偏斜度平面)或网格法点测量
	>1.3	>1.2	多通道贯穿式线测量或网格法点测量(采用多点皮托管法,测点满足GB/T 16157 的规定)

5.3.2 工作条件

监测系统在以下条件下能够正常工作：

- a) 室内环境温度为(15~35) °C,室外环境温度为(-20~50) °C;
 - b) 相对湿度小于或等于 85%;
 - c) 大气压力为(80~106) kPa;
 - d) 供电电压 AC(220±22) V,(50±1) Hz;
 - e) 低温、低压等特殊环境条件下,仪器设备的配置满足当地环境条件的使用规定。

5.3.3 外观

- 5.3.3.1 监测系统产品铭牌上宜标有仪器名称、型号、制造单位、出厂编号和制造日期等信息。
- 5.3.3.2 仪器仪表设备表面完好无损,无明显缺陷,各零部件连接可靠,各操作键、按钮使用灵活,定位准确。
- 5.3.3.3 主机面板显示清晰,涂色牢固,字符、标识易于识别,无影响读数的缺陷。
- 5.3.3.4 外壳或外罩耐腐蚀、密封性能良好、防尘、防雨。

5.3.4 安全

- 5.3.4.1 在环境温度为(15~35) °C,相对湿度小于或等于 85% 的条件下,监测系统电源端子对地或机壳的绝缘电阻不小于 20 MΩ。
- 5.3.4.2 在环境温度为(15~35) °C,相对湿度小于或等于 85% 的条件下,监测系统在 1 500 V(有效值)、50 Hz 正弦波实验电压下持续 1 min,不出现击穿或飞弧现象。
- 5.3.4.3 监测系统需具有漏电保护装置,具备良好的接地措施,防止雷击等对系统造成损坏。

5.3.5 样品采集和传输装置

- 5.3.5.1 样品采集装置具备加热、保温和反吹净化功能。其加热温度一般在 120 °C 以上,且高于烟气露点温度 10 °C 以上,其实际温度值能够在机柜或系统软件中显示查询。
- 5.3.5.2 样品采集装置的材质选用耐高温、防腐蚀和不吸附、不与气态污染物发生反应的材料,不影响二氧化碳的正常测量。
- 5.3.5.3 二氧化碳样品采集装置具备颗粒物过滤功能。其采样设备的前端或后端需具备便于更换或清洗的颗粒物过滤器,过滤器滤料的材质不吸附和不与二氧化碳发生反应,过滤器至少能够过滤(5~10) μm 粒径以上的颗粒物。
- 5.3.5.4 样品传输管线长度适中,原则上不宜超过 70 m。当使用伴热管线时,伴热管线具备稳定、均匀加热和保温的功能;其设置加热温度在 120 °C 以上,且高于烟气露点温度 10 °C 以上,其实际温度值能够在机柜或系统软件中显示查询。
- 5.3.5.5 样品传输管线内包覆的气体传输管至少为 2 根,一根用于样品气体的采集传输,另一根用于标准气体的全系统校准;样品采集和传输装置具备完成监测系统全系统校准的功能。样品传输管线使用不吸附和不与二氧化碳发生反应的材料。
- 5.3.5.6 采样泵具备克服烟道负压的足够抽气能力,并且保障采样流量准确可靠、相对稳定。

5.3.6 预处理设备

- 5.3.6.1 预处理设备及其部件方便清理和更换,材质使用不吸附二氧化碳和不与二氧化碳发生反应的材料。
- 5.3.6.2 除湿设备的设置温度保持在 4 °C 左右(设备出口烟气露点温度小于或等于 4 °C),正常波动在±2 °C 以内,其实际温度数值能够在机柜或系统软件中显示查询。
- 5.3.6.3 除湿设备除湿过程产生的冷凝液采用自动方式通过冷凝液收集和排放装置及时、顺畅排出。
- 5.3.6.4 为防止颗粒物污染二氧化碳分析仪,在气体样品进入分析仪之前可设置精细过滤器;过滤器滤料使用不吸附和不与二氧化碳发生反应的疏水材料,过滤器至少能过滤(0.5~2) μm 粒径以上的颗粒物。
- 5.3.6.5 恒流稀释预处理设备要配备烟气流量恒定装置,确保抽取的烟气量不随烟道内的温度、压力变化而变化。
- 5.3.6.6 恒流稀释预处理设备的取样探头需具备负压监测功能,实时监测取样探头负压,保证烟气具备

良好的流动性,可进行连续取样和实时测量。

5.3.7 辅助设备

5.3.7.1 尾气排放管路规范敷设是十分必要的,防止排放尾气污染周围环境。当室外环境温度低于0℃时,尾气排放管配套加热或伴热装置,确保排放尾气中的水分不冷凝或结冰,造成尾气排放管堵塞和排气不畅。

5.3.7.2 配备定期反吹装置,用以定期对样品采集装置进行反吹,默认为不少于8 h 反吹一次,避免出现由于颗粒物等累积造成的堵塞状况。

5.3.7.3 具有防止外部光学镜头和插入烟囱或烟道内的反射或测量光学镜头被烟气污染的净化系统(即气幕保护系统);净化系统需能克服烟气压力,保持光学镜头的清洁;净化系统使用的净化气体需经过适当预处理确保其不影响测量结果。

5.3.7.4 机柜内部气体管路以及电路、数据传输线路等需规范敷设,同类管路宜集中汇总设置;不同类型的管路或不同作用、方向的管路需采用明确标识加以区分;各种走线安全合理,便于查找维护维修。

5.3.7.5 机柜内布置良好的散热装置,确保机柜内的温度符合仪器正常工作温度;需配备照明设备,便于日常维护和检查。

5.3.7.6 稀释零空气要经过滤干燥处理和去除二氧化碳处理,处理后其水含量小于400 μmol/mol,二氧化碳含量小于1 μmol/mol。

5.3.7.7 为保证稀释取样探头具有足够负压,稀释零空气流量宜处于5 L/min~10 L/min。

5.3.7.8 采用抽取式采样方式的监测系统,具备固定的和便于操作的标准气体全系统校准功能,即能够完成从样品采集和传输装置、预处理设备和测量仪器的全系统校准。

5.3.7.9 采用非抽取式采样方式的监测系统,具备稳定可靠和便于操作的标准气体流动等效校准功能,即能够通过内置或外置的校准池,完成对系统的等效校准。

5.3.8 数据采集和传输单元

5.3.8.1 显示和记录超出其零点以下和量程以上至少10%的数据值。当测量结果超过零点以下和量程以上10%时,数据记录存储其最小或最大值。

5.3.8.2 具备显示、设置系统时间和为数据进行时间标签标注功能,数据为设置时段的平均值。数据处理系统能够显示仪器现场工作状态。

5.3.8.3 能够显示实时数据,具备查询历史数据的功能,并能以报表或报告形式输出。

5.3.8.4 具有数据通信功能,周期地采集各个现场数据采集器发来的各种信息,进行处理、存储、显示相应数据。提供网络接入功能,向数据监控中心定时传输数据和图表,并随时接受数据查询。

5.3.8.5 具有中文数据采集、记录、处理和控制软件。

5.3.8.6 仪器掉电后,能自动保存数据;恢复供电后系统可自动启动。

5.3.8.7 数据传输系统具备数据加密功能。

6 性能指标

6.1 基本原则

监测系统满足实验室检测性能指标和现场检测性能指标是十分必要的,其测量不确定度宜满足目标不确定度。

6.2 实验室检测性能指标

6.2.1 二氧化碳和氧气体积分数监测单元

二氧化碳和氧气体积分数监测单元的性能指标见表 4, 检测方法宜按照附录 F 执行。

表 4 二氧化碳和氧气体积分数监测单元的性能指标

序号	检测项目	性能指标		检测方法
		CO ₂	O ₂	
1	仪器响应时间	抽取式测量≤90 s, 非抽取式测量≤60 s		F.2
2	重复性	相对标准偏差≤2%	相对标准偏差≤1%	F.3
3	线性误差	在满量程的±2%以内	在满量程的±1%以内	F.4
4	24 h 零点漂移	在满量程的±2%以内	在满量程的±1%以内	F.5
5	24 h 量程漂移	在满量程的±2%以内	在满量程的±1%以内	F.5
6	一周零点漂移	在满量程的±3%以内	在满量程的±1%以内	F.6
7	一周量程漂移	在满量程的±3%以内	在满量程的±1%以内	F.6
8	环境温度变化的影响	在满量程的±3%以内	在满量程的±1.5%以内	F.7
9	进样流量变化的影响	在满量程的±2%以内	在满量程的±1%以内	F.8
10	供电电压变化的影响	在满量程的±2%以内	在满量程的±1%以内	F.9
11	干扰成分的影响	在满量程的±4%以内	在满量程的±2%以内	F.10
12	振动的影响	在满量程的±2%以内	在满量程的±1%以内	F.11

6.2.2 水蒸气体积分数监测单元

水蒸气体积分数监测单元的性能指标如下:

- a) 烟气中水蒸气体积分数大于或等于 1%且小于或等于 5%时, 水蒸气体积分数监测单元的绝对误差在±0.50%以内;
- b) 烟气中水蒸气体积分数大于 5%时, 水蒸气体积分数监测单元的相对误差在±10%以内。

6.2.3 烟气温度监测单元

烟气温度监测单元的绝对误差在±1.5 °C 以内。

6.2.4 烟气压力监测单元

烟气压力监测单元的准确度等级小于或等于 1.0 级。

6.2.5 差压法流速监测单元

差压法流速监测单元差压传感器的绝对误差在±5 Pa 以内; 差压法流速监测单元皮托管校准系数的重复性小于或等于 0.5%。

6.2.6 超声波流速监测单元

超声波流速监测单元的准确度等级小于或等于 2.0 级, 重复性小于或等于相应准确度等级对应的

最大允许误差绝对值的 1/5。

6.3 现场检测性能指标

6.3.1 二氧化碳和氧气体积分数监测单元

二氧化碳和氧气体积分数监测单元的性能指标见表 5, 检测方法宜按照附录 G 执行。

表 5 二氧化碳和氧气体积分数监测单元的性能指标

序号	检测项目	性能指标		检测方法
		CO ₂	O ₂	
1	系统响应时间	抽取式测量≤150 s, 非抽取式测量≤60 s		G.1.1
2	示值误差	在满量程的±2%以内	在满量程的±1%以内	G.1.2
3	零点漂移	在满量程的±2%以内	在满量程的±1%以内	G.1.3
4	量程漂移	在满量程的±2%以内	在满量程的±1%以内	G.1.4
5	准确度	≤6%	≤3%	G.1.5

6.3.2 烟气温度监测单元

烟气温度监测单元现场检测方法宜按照 G.2 执行。烟气温度监测单元与参比方法测量结果平均值的绝对误差在±3 ℃以内。

6.3.3 水蒸气体积分数监测单元

水蒸气体积分数监测单元现场检测方法宜按照 G.3 执行。采用参比方法测量烟气水蒸气体积分数的平均值满足如下规定:

- a) 烟气中水蒸气体积分数大于或等于 1%且小于或等于 5%时,烟气中水蒸气体积分数测量装置测量结果平均值的绝对误差在±0.75%以内;
- b) 烟气中水蒸气体积分数大于 5%时,烟气中水蒸气体积分数测量装置测量结果平均值的相对误差在 15%以内。

6.3.4 烟气流速监测单元

6.3.4.1 烟气流速监测单元现场检测方法宜按 G.4 执行,检测结果满足 6.3.4.2 和 6.3.4.3。

6.3.4.2 速度场系数精密度或相关系数:速度场系数精密度不宜大于 5%,当速度场系数精密度大于 5%时,参比方法测量结果与流速监测单位测量结果组成的有效数据对数不小于 9 时,相关系数不小于 0.9。

6.3.4.3 准确度:对于在用锅炉,当用参比方法测量烟气流速的平均值时,流速监测单元测量结果平均值与参比方法测量结果平均值的相对误差宜满足表 6 的规定。对于新建锅炉,当用参比方法测量烟气流速的平均值时,流速监测单元测量结果平均值与参比方法测量结果平均值的相对误差在±5%以内。

表 6 烟气流速监测单元的性能指标

序号	锅炉额定负荷	性能指标
1	锅炉额定蒸发量≥1 000 t/h	相对误差在±5%以内
2	1 000 t/h>锅炉额定蒸发量≥65 t/h 或锅炉额定热功率≥46 MW	相对误差在±8%以内

表 6 烟气流速监测单元的性能指标(续)

序号	锅炉额定负荷	性能指标
3	锅炉额定蒸发量<65 t/h 或锅炉额定热功率<46 MW	流速>10 m/s 时,相对误差在±8%以内 流速≤10 m/s 时,相对误差在±10%以内

7 监测站房

监测站房宜按照 HJ 75 执行。

8 系统安装

8.1 安装位置

8.1.1 安装位置位于固定污染源排放控制设备的下游和比对监测断面上游。

8.1.2 不受环境光线和电磁辐射影响。

8.1.3 烟道振动幅度尽可能小,避开引起信号处理单元、超声换能器等部件发生共振的环境。

8.1.4 安装位置尽量避开烟气中水滴和水雾的干扰,如不能避开,选用能够适应该环境的检测探头及仪器。

8.1.5 安装位置不能有漏风。

8.1.6 安装监测系统的工作区域设置 1 个防水低压配电箱,内设漏电保护器和不少于 2 个 10 A 的插座,保证监测设备所需电力。

8.1.7 采样平台与采样孔的布置宜按照 HJ 75 执行。

8.1.8 优先选择在垂直管段和烟道负压区域,确保所采集样品的代表性。

8.1.9 监测断面最重要的是避开烟道弯头和断面急剧变化的部位。烟气流速、烟气组分监测断面设置在与上游方向弯头、阀门、变径管的距离大于或等于 4 倍烟道直径或当量直径,以及与下游方向上述部件的距离大于或等于 2 倍烟道直径或当量直径处。

8.1.10 对于新建锅炉,监测系统与排气装置同步设计、同步建设,确保监测断面满足 8.1.9 规定。对于在用锅炉,当无法找到满足 8.1.9 规定的监测断面时,选择在气流稳定的断面,并采取相应措施保证监测断面烟气分布相对均匀,断面无紊流。

断面烟气流分布均匀程度采用流速相对均方根 σ_r 法,当 σ_r 小于或等于 0.15 时视为烟气分布均匀, σ_r 根据公式(5)计算。

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{(n - 1) \bar{v}^2}} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

式中:

σ_r ——流速相对均方根;

v_i ——测点烟气流速,单位为米每秒(m/s);

\bar{v} ——断面烟气平均流速,单位为米每秒(m/s);

n ——断面上的流速测点数量,宜按照 GB/T 16157 执行。

8.1.11 烟气组分采样点以及烟气温度、压力测点一般可设置在监测断面直径的 1/3~1/2 处。宜通过测量监测断面上的速度和二氧化碳体积分数的分布,根据公式(6)计算平均体积分数,选择与平均浓度

最接近的测点作为烟气组分的采样点。

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i v_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

式中：

\bar{c} ——断面平均体积分数, %;

c_i ——断面测点体积分数, %;

n ——断面上的流速和二氧化碳测点数量,宜按照 GB/T 16157 执行。

8.1.12 为了便于流速参比方法的校验和比对监测,监测系统不宜安装在烟道内烟气流速 <5 m/s 的位置。

8.1.13 若一个固定污染源排气先通过多个烟道或管道后进入该固定污染源的总排气管时,宜尽可能将监测系统安装在总排气管上,但要便于用参比方法校验监测系统;不宜只在其中的一个烟道或管道上安装监测系统,并将测定值作为该固定污染源的碳排放量结果;但允许在每个烟道或管道上安装监测系统,碳排放测量值为所有烟道测量值的和,各烟道或管道安装分别符合本文件规定。

8.1.14 若固定污染源排放控制设备后安装有碳捕集装置,宜在碳捕集装置下游的固定污染源总排气管上和碳捕集装置排气管安装监测系统,碳排放量为排气管测量值的和。

8.2 安装施工

安装施工宜按照 GB 50093 和 HJ 75 执行。



9 检测方法

9.1 实验室检测

9.1.1 基本原则

9.1.1.1 系统具备双量程或多量程时(非硬件调整),只针对仪器的最小量程进行技术指标检测。

9.1.1.2 检测期间除进行系统零点和量程校准外,不对系统进行计划外的维护、检修和调节。

9.1.1.3 如果因供电问题造成测试中断,在供电恢复正常后,继续进行检测,已经完成的测试指标和数据有效。

9.1.1.4 如果因监测系统故障造成测试中断,在监测系统恢复正常后,重新开始检测,已经完成的测试指标和数据无效。

9.1.1.5 可设定任一时间对监测系统进行零点和量程的自动校验和校准;检测期间,自动校验校准时间间隔设置为大于或等于 24 h。

9.1.1.6 各技术指标检测数据均采用监测系统数据采集与处理单元存储记录的最终结果。

9.1.2 标准物质

9.1.2.1 采用有证标准物质或标准样品,标准气体贮存在铝或不锈钢瓶中,不确定度小于或等于 2%。较低浓度的标准气体可以使用高浓度的标准气体采用等比例稀释方法获得,等比例稀释装置的精密度在 1% 以内。

9.1.2.2 零点气体(零气)宜采用纯度不小于 99.999% 的氮气。当测量烟气中二氧化碳时,零气中二氧

化碳小于或等于 $400 \mu\text{mol/mol}$, 含有其他气体的浓度不宜干扰仪器的读数。

9.1.2.3 量程标准气体(量程标气)采用二氧化碳和氧气两种标准气体或者两者的混合气体, 其浓度控制在满量程的 80%~100%。

9.1.3 检测内容

9.1.3.1 二氧化碳和氧气体积分数监测单元的实验室检测内容包括仪器响应时间、重复性、线性误差、24 h 零点漂移和量程漂移、一周零点漂移和量程漂移、环境温度变化的影响、进样流量变化的影响、供电电压变化的影响、干扰成分的影响和振动的影响, 检测方法宜按照附录 F 执行。

9.1.3.2 水蒸气体积分数监测单元、烟气温度监测单元、烟气压力监测单元、差压法流速监测单元和超声波流速监测单元的实验室检测方法参照相应的校准或检定规程。

9.2 现场检测

9.2.1 基本原则

9.2.1.1 现场参比方法采样位置、采样孔数量以及采样点设置等宜按照 GB/T 16157 执行。日常运行中更换监测系统分析仪表或变动监测系统取样点位时, 满足本文件相关内容, 并进行现场检测。

9.2.1.2 现场完成监测系统安装、初调后, 连续运行时间不少于 168 h。

9.2.1.3 监测系统连续运行 168 h 后, 可进入现场检测阶段, 现场检测周期为 72 h, 在现场检测期间, 不进行计划外的检修和调节仪器。

9.2.1.4 如果因监测系统故障、固定污染源故障、断电等原因造成现场检测中断, 在上述因素恢复正常后, 重新开始进行为期 72 h 的现场检测。

9.2.1.5 对于抽取式监测系统, 当对全系统进行零点校准和量程校准、示值误差和系统响应时间的检测时, 零气和标准气体通过预设管线输送至采样探头处, 经由样品传输管线回到站房, 经过全套预处理设施后进入气体分析仪。现场检测时, 先做示值误差和系统响应时间, 不符合技术性能指标的, 则不再继续开展其余项目。

9.2.2 标准物质

现场检测使用的标准物质参数与 9.1.2 相同。

9.2.3 检测内容

9.2.3.1 二氧化碳和氧气体积分数监测单元的现场检测内容包括系统响应时间、示值误差、零点漂移、量程漂移和准确度检测, 检测方法宜按照附录 G 的 G.1 执行。

9.2.3.2 烟气温度监测单元的现场检测内容主要包括准确度检测, 检测方法宜按照 G.2 执行。

9.2.3.3 水蒸气体积分数监测单元的现场检测内容主要包括准确度检测, 检测方法宜按照 G.3 执行。

9.2.3.4 烟气流速监测单元的现场检测方法主要包括速度场系数精密度检测和准确度检测, 检测方法宜按照 G.4 执行。

9.3 测量不确定度评定

9.3.1 测量不确定度的评定宜按 JJF 1059.1 的规定执行。

9.3.2 测量不确定度评定流程如图 1 所示。

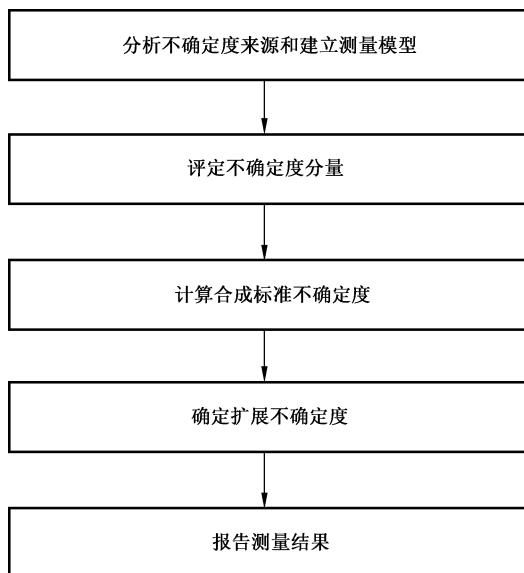


图 1 评定测量不确定度的一般流程

9.3.3 附录 H 给出了监测系统的不确定度评定示例。

10 运行维护

10.1 基本原则

监测系统运维单位根据监测系统使用说明书和本文件内容编制仪器运行管理规程,确定系统运维人员的工作职责。运维人员宜具备足够的电气设备运维知识,并熟练掌握监测系统的原理、使用和维护方法。在运行管理过程中,当监测系统不能满足技术指标时,及时查明原因,并采取纠正措施,直至满足技术指标。

10.2 巡检

监测系统运维单位根据本文件和仪器使用说明中的相关内容制定巡检规程,巡检人员根据规程开展日常巡检工作并做好记录。日常巡检记录包括检查项目、检查日期和被检项目的运行状态等内容,每次巡检记录并归档。监测系统日常巡检时间间隔不宜超过 7 d。

10.3 维护保养

监测系统运维单位根据监测系统说明书明确监测系统保养内容、保养周期或耗材更换周期等内容,记录并归档每次保养情况。每次进行备件或材料更换时,记录并归档更换的备件或材料的品名、规格和数量等信息。如更换有证标准物质或标准样品,记录新标准物质或标准样品的来源、有效期和浓度等信息。系统管理维护人员及时处理并记录维护保养中发现的故障或问题。

10.4 校准

监测系统运维单位根据本文件制订定期校准操作规程,监测系统定期校准内容如下:

- 具有自动校准功能的监测系统每 24 h 至少自动校准一次仪器的零点和量程,同时测试并记录零点漂移和量程漂移;
- 无自动校准功能的非抽取式监测系统每 15 d 至少校准一次仪器的零点和量程,同时测试并记

- 录零点漂移和量程漂移；
- 无自动校准功能的抽取式监测系统每 7 d 至少校准一次仪器的零点和量程,同时测试并记录零点漂移和量程漂移；
 - 抽取式监测系统每 3 个月至少进行一次全系统的校准,零气和标准气体从监测站房发出,经采样探头末端与样品气体通过的路径(包括采样管路、过滤器、洗涤器、调节器和分析仪表等)一致,进行零点和量程漂移、示值误差和系统响应时间的检测；
 - 具有自动校准功能的流速监测单元每 24 h 至少进行一次零点校准,无自动校准功能的流速监测单元每 30 d 至少进行一次零点校准；
 - 校准技术指标宜满足表 7 中的要求。

10.5 校验

监测系统投入使用后,燃料的变化、安装点的振动等都会对测量结果的准确性产生影响。监测系统运维单位宜根据本文件制定定期校验操作规程,定期校验根据下面条款进行:

- 有自动校准功能的测试单元每 6 个月至少做一次校验,没有自动校准功能的监测单元每 3 个月至少做一次校验;校验用参比方法和监测系统同时段数据进行比对,宜按 9.2 进行；
- 校验结果需符合表 7 指标,不符合时,则需扩展为 CO₂ 和 O₂ 体积分数监测单元的准确度或/和流速监测单元的速度场系数(或相关性)的校正,直到监测系统满足 6.3 性能指标,方法宜按照附录 G 执行。

10.6 监测系统定期校准校验技术指标及数据失控时段的判别与修约

监测系统在定期校准、校验期间的技术指标及数据失控时段的判别标准见表 7。

表 7 监测系统定期校准校验技术指标及数据失控时段的判别

项目	类型	校准功能	校准周期	技术指标	指标	失控指标	最少样品数(对)
定期校准	CO ₂ 和 O ₂ 监测单元	抽取测量或非抽取测量	自动	24 h	零点漂移	Z _{CO₂,d} ^a ≤2.0% Z _{O₂,d} ^a ≤1.0%	Z _{CO₂,d} ≥4.0% Z _{O₂,d} ≥2.0%
					量程漂移	S _{CO₂,d} ^b ≤2.0% S _{O₂,d} ^b ≤1.0%	S _{CO₂,d} ≥4.0% S _{O₂,d} ≥2.0%
	CO ₂ 和 O ₂ 监测单元	抽取测量	手动	7 d	零点漂移	Z _{CO₂,d} ≤2.0% Z _{O₂,d} ≤1.0%	Z _{CO₂,d} ≥4.0% Z _{O₂,d} ≥2.0%
					量程漂移	S _{CO₂,d} ≤2.0% S _{O₂,d} ≤1.0%	S _{CO₂,d} ≥4.0% S _{O₂,d} ≥2.0%
	CO ₂ 和 O ₂ 监测单元	非抽取测量	手动	15d	零点漂移	Z _{CO₂,d} ≤2.0% Z _{O₂,d} ≤1.0%	Z _{CO₂,d} ≥4.0% Z _{O₂,d} ≥2.0%
					量程漂移	S _{CO₂,d} ≤2.0% S _{O₂,d} ≤1.0%	S _{CO₂,d} ≥4.0% S _{O₂,d} ≥2.0%

表 7 监测系统定期校准校验技术指标及数据失控时段的判别(续)

项目	类型	校准功能	校准周期	技术指标	指标	失控指标	最少样品数(对)
定期校准	流速监测单元	自动	24 h	零点漂移或绝对误差	$ Z_{v,d} ^c \leq 3.0\%$ 或 $ \Delta v \leq 0.9 \text{ m/s}$	$ Z_{v,d} > 6.0\%$ 且 $ \Delta v > 1.8 \text{ m/s}$	—
		手动	30 d	零点漂移或绝对误差	$ Z_{v,d} \leq 3.0\%$ 或 $ \Delta v \leq 0.9 \text{ m/s}$	$ Z_{v,d} > 6.0\%$ 且 $ \Delta v > 1.8 \text{ m/s}$	—
定期校验	CO ₂ 和 O ₂ 监测单元		3 个月或 6 个月	准确度	满足 6.3.1	不满足 6.3.1	9
	流速监测单元				满足 6.3.4	不满足 6.3.4	5

^a $|Z_{CO_2,d}|$ 和 $|Z_{O_2,d}|$ 分别为 CO₂ 监测单元和 O₂ 监测单元的零点漂移的绝对值。
^b $|S_{CO_2,d}|$ 和 $|S_{O_2,d}|$ 分别为 CO₂ 监测单元和 O₂ 监测单元的量程漂移的绝对值。
^c $|Z_{v,d}|$ 和 $|\Delta v|$ 分别为流速监测单元零点漂移和绝对误差的绝对值。

当发现任一参数不满足技术指标时,及时根据本文件及仪器说明书等的相关内容,采取校准、调试乃至更换设备重新验收等纠正措施直至满足技术指标为止。当发现任一参数数据失控时,宜记录失控时段(即从发现失控数据起到满足技术指标后止的时间段)及失控参数,并根据 11.2.3 进行数据修约。

11 数据审核和处理

11.1 数据审核

11.1.1 锅炉生产状况下,经验收合格的监测系统正常运行时段为监测系统数据有效时间段。监测系统非正常运行时段(如监测系统故障期间、维修期间、超出 10.4 期限未校准时段、失控时段以及有计划的维护保养、校准等时段)均为监测系统数据无效时间段。

11.1.2 锅炉计划停运一个季度以内的,不宜停运监测系统,日常巡检和维护仍根据第 10 章执行;计划停运超过一个季度的,可停运监测系统。锅炉启动前,提前启运监测系统,并进行校准,在锅炉启运后的两周内进行校验,满足表 7 技术指标的,视为启动期间自动检测数据有效。

11.1.3 排放单位在每个季度前五个工作日对上个季度的监测系统数据进行审核,确认上季度所有分钟、小时数据符合附录 I,计算本季度的锅炉监测系统有效数据捕集率。监测系统季度有效数据捕集率达到 75% 以上。

注: 季度有效数据捕集率(%)=(季度小时数-数据无效时段小时数-锅炉停运时段小时数)/(季度小时数-锅炉停运时段小时数)×100%

11.2 数据无效时间段数据处理

11.2.1 监测系统故障期间、维修时段数据宜按照 11.2.2 处理,超期未校准、失控时段数据宜按照 11.2.3 处理,有计划(质量保证/质量控制)的维护保养、校准等时段数据宜按照 11.2.4 处理。

11.2.2 监测系统因发生故障需要停机进行维修时,其维修期间的数据替代宜按 11.2.4 处理;也可以用参比方法监测的数据替代,频次不低于一天一次,直至监测系统技术指标调试合格为止。如使用参比方法监测的数据替代,则参数监测过程宜按照 GB/T 16157 和 HJ/T 397 进行,替代数据包括烟气组分、流速、温度、压力和二氧化碳排放量。

11.2.3 监测系统数据失控时段二氧化碳排放量根据表 8 进行修约,烟气组分、流速、温度、压力不修

约。监测系统超期未校准的时段视为数据失控时段,二氧化碳排放量根据表 8 进行修约,烟气组分、流速、温度、压力不修约。

表 8 失控时段的数据处理方法

季度有效数据捕集率 α	连续无效小时数 N/h	修约参数	选取值
$\alpha \geqslant 90\%$	$N \leqslant 24$	二氧化碳 排放量	上次校准前 180 个有效小时排放量最大值
	$N > 24$		上次校准前 720 个有效小时排放量最大值
$75\% \leqslant \alpha < 90\%$	—		上次校准前 2 160 个有效小时排放量最大值

11.2.4 监测系统有计划(质量保证/质量控制)的维护保养、校准及其他异常导致的数据无效时段,该时段二氧化碳排放量根据表 9 进行修约,烟气组分、流速、温度、压力不修约。

表 9 维护期间和其他异常导致的数据无效时段的处理方法

季度有效数据捕集率 α	连续无效小时数 N/h	修约参数	选取值
$\alpha \geqslant 90\%$	$N \leqslant 24$	二氧化碳 排放量	失效前 180 个有效小时排放量最大值
	$N > 24$		失效前 720 个有效小时排放量最大值
$75\% \leqslant \alpha < 90\%$	—		失效前 2 160 个有效小时排放量最大值



附录 A
(规范性)
数据计算和处理

A.1 二氧化碳浓度的计算

A.1.1 浓度转换计算关系

A.1.1.1 标准状态下二氧化碳体积分数与质量浓度转化根据公式(A.1)计算：

$$C_{sn} = C_s \times \frac{44}{22.4} \times 10^{-2} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{A.1})$$

式中：

C_{sn} —— 标准状态下二氧化碳的质量浓度, 单位为千克每立方米(kg/m^3)；

C_s —— 监测系统测量的二氧化碳体积分数, %。

注：公式(A.1)中质量浓度和体积分数干湿基状态相同。

A.1.1.2 二氧化碳干基浓度和湿基浓度转化根据公式(A.2)计算：

$$C_d = \frac{100C_w}{100 - X_{sw}} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{A.2})$$

式中：

C_d —— 二氧化碳的干基质量浓度, 单位为千克每立方米(kg/m^3)；

C_w —— 二氧化碳的湿基质量浓度, 单位为千克每立方米(kg/m^3)；

X_{sw} —— 烟气中水蒸气体积分数, %。

A.1.2 二氧化碳浓度统计计算公式

A.1.2.1 二氧化碳质量浓度分钟平均值根据公式(A.3)计算：

$$\overline{C}_{Qsnj} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{Qsni}}{n} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{A.3})$$

式中：

\overline{C}_{Qsnj} —— 监测系统第 j 分钟测量的二氧化碳干基/湿基标志质量浓度平均值, 单位为千克每立方米(kg/m^3)；

C_{Qsni} —— 监测系统最大间隔 5 s 采集测量的二氧化碳干基/湿基标志质量浓度瞬时值, 单位为千克每立方米(kg/m^3)；

n —— 监测系统在该分钟内采集的有效测量的瞬时数据数(n 大于或等于 12)。

其他监测因子如烟气含氧量、烟气流速、烟气温度、烟气动压、烟气静压、烟气中水蒸气体积分数计算方法相同。

A.1.2.2 二氧化碳质量浓度小时平均值根据公式(A.4)计算：

$$\overline{C}_{Qsnh} = \frac{\sum_{j=1}^k \overline{C}_{Qsnj}}{k} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{A.4})$$

式中：

\overline{C}_{Qsnh} —— 监测系统在第 h 小时测量得到的二氧化碳干基/湿基标志质量浓度平均值, 单位为千克每立方米(kg/m^3)；

k ——监测系统在该小时内采集的有效测量的分钟数据数(k 大于或等于 45)。

其他监测因子如烟气含氧量、烟气流速、烟气温度、烟气动压、烟气静压、烟气中水蒸气体积分数计算方法相同。

A.1.2.3 二氧化碳质量浓度日均值根据公式(A.5)计算：

$$\overline{C_{Q_{\text{snd}}}} = \frac{\sum_{h=1}^m \overline{C_{Q_{\text{snh}}}}}{m} \quad (\text{A.5})$$

式中：

$\overline{C_{Q_{\text{snd}}}}$ ——监测系统在第 d 天测量得到的二氧化碳干基/湿基标态质量浓度平均值,单位为千克每立方米(kg/m^3)；

m ——监测系统在该日内采集的有效测量的小时数据数(m 大于或等于 20)。

其他监测因子如烟气含氧量、烟气流速、烟气温度、烟气动压、烟气静压、烟气中水蒸气体积分数计算方法相同。

A.2 烟气排放流量的计算

A.2.1 烟道或烟囱断面烟气平均流速

烟道或烟囱断面烟气平均流速根据公式(A.6)计算：

$$\overline{V_s} = K_v \times \overline{V_p} \quad (\text{A.6})$$

式中：

$\overline{V_s}$ ——烟道或烟囱断面烟气平均流速瞬时值,单位为米每秒(m/s)；

K_v ——监测系统设置的速度场系数；



$\overline{V_p}$ ——监测系统最大间隔 5 s 测量的烟气流速值,单位为米每秒(m/s)。

A.2.2 碳排放分钟工况流量计算

锅炉碳排放分钟实际工况下的湿烟气流量 Q_{sj} 根据公式(A.7)计算：

$$Q_{sj} = 60 \times F \times \overline{V_{sh}} \quad (\text{A.7})$$

式中：

Q_{sj} ——实际工况下的分钟湿烟气流量,单位为立方米每分(m^3/min)；

$\overline{V_{sh}}$ ——监测断面的湿排气流速的分钟均值,单位为米每秒(m/s)；

F ——监测断面的面积,单位为平方米(m^2)。

A.2.3 标准状态下干烟气流量计算

标准状态下干烟气分钟排放流量根据公式(A.8)计算：

$$Q_{\text{sndj}} = Q_{sj} \times \frac{273}{273 + t_s} \times \frac{B_a + P_s}{101325} \times \frac{100 - X_{\text{sw}}}{100} \quad (\text{A.8})$$

式中：

Q_{sndj} ——标准状态下分钟干烟气流量,单位为立方米每分(m^3/min)；

t_s ——烟气温度,单位为摄氏度($^\circ\text{C}$)；

B_a ——大气压力,单位为帕斯卡(Pa)；

P_s ——烟气静压,单位为帕斯卡(Pa)。

A.2.4 标准状态下湿烟气流量计算

标准状态下湿烟气分钟排放流量根据公式(A.9)计算：

$$Q_{\text{snwj}} = Q_{sj} \times \frac{273}{273 + t_s} \times \frac{B_a + P_s}{101325} \quad (\text{A.9})$$

式中：

Q_{snwj} ——标准状态下分钟湿烟气流量,单位为立方米每分(m^3/min)。

A.3 锅炉碳排放量计算公式

A.3.1 锅炉分钟碳排放量

锅炉分钟碳排放量根据公式(A.10)或公式(A.11)计算：

$$G_j = \overline{C_{\text{Qsnbj}}} \times Q_{\text{snwj}} \quad (\text{A.10})$$

$$\overline{C_{\text{Qsnwj}}} = \overline{C_{\text{Qsnbj}}} \times \overline{C_{\text{Qsnwj}}} \quad (\text{A.11})$$

式中：

G_j ——监测系统第 j 分钟监测的碳排放量,单位为千克每分(kg/min)；

$\overline{C_{\text{Qsnbj}}}$ ——监测系统第 j 分钟测量的二氧化碳干基标态质量浓度平均值,单位为千克每立方米(kg/m^3)；

$\overline{C_{\text{Qsnwj}}}$ ——监测系统第 j 分钟测量的二氧化碳湿基标态质量浓度平均值,单位为千克每立方米(kg/m^3)。

A.3.2 锅炉小时碳排放量

锅炉小时碳排放量根据公式(A.12)计算：

$$G_h = \frac{\sum_{j=1}^k G_j}{k} \times 60 \quad (\text{A.12})$$

式中：

G_h ——监测系统第 h 小时监测的碳排放量,单位为千克每小时(kg/h)。

A.3.3 锅炉日碳排放量

锅炉日碳排放量根据公式(A.13)计算：

$$G_d = \sum_{h=1}^{24} G_h \quad (\text{A.13})$$

式中：

G_d ——监测系统第 d 天监测的碳排放量,单位为千克每天(kg/d)。

A.3.4 锅炉月碳排放量

锅炉月碳排放量根据公式(A.14)计算：

$$G_m = \sum_{d=1}^p G_d \quad (\text{A.14})$$

式中：

G_m ——监测系统第 m 月监测的碳排放量,单位为千克每月($\text{kg}/\text{月}$)；

p ——第 m 月天数。

A.3.5 锅炉全年碳排总放量

锅炉全年碳排总放量根据公式(A.15)计算：

式中：

G_y ——监测系统全年监测碳排总放量,单位为千克(kg)。

A.4 锅炉碳排放强度计算

A.4.1 锅炉分钟碳排放强度

锅炉分钟碳排放强度根据公式(A.16)计算：

式中：

E_j ——监测系统第 j 分钟监测的锅炉碳排放强度,单位为千克二氧化碳每吉焦(kgCO_2/GJ);

Q_j ——锅炉第 j 分钟输出热量,单位为吉焦每分(GJ/min)。

A.4.2 锅炉小时碳排放强度

锅炉小时碳排放强度根据公式(A.17)计算：

式中：

E_h ——监测系统第 h 小时监测的锅炉碳排放强度, 单位为千克二氧化碳每吉焦(kgCO_2/GJ);

Q_h ——锅炉第 h 小时输出热量, 单位为吉焦每小时(GJ/h)。

A.4.3 锅炉日碳排放强度

锅炉日碳排放强度根据公式(A.18)计算：

式中：

E_d ——监测系统第 d 天监测的锅炉碳排放强度,单位为千克二氧化碳每吉焦(kgCO_2/GJ);

Q_d ——锅炉第 d 天输出热量, 单位为吉焦每天(GJ/d)。

A.4.4 锅炉月碳排放强度

锅炉月度碳排放强度根据公式(A.19)计算：

式中：

E_m ——监测系统第 m 月监测的锅炉碳排放强度,单位为千克二氧化碳每吉焦(kgCO_2/GJ);

Q_m ——锅炉第 m 月输出热量, 单位为吉焦每月(GJ/月)。

A.4.5 锅炉年碳排放强度

锅炉年度碳排放强度根据公式(A.20)计算：

式中：

E_y ——监测系统全年监测的锅炉碳排放强度,单位为千克二氧化碳每吉焦(kgCO_2/GJ);

Q_y ——锅炉全年输出热量,单位为吉焦(GJ)。

A.5 气体相对分子质量和烟气密度计算

A.5.1 烟气气体相对分子质量的计算

已知烟气中各成分气体的体积分数 φ_i 和其相对分子质量 M_i , 烟气气体的相对分子质量根据公式(A.21)计算:

式中：

M ——烟气气体的相对分子质量,单位为千克每千摩尔(kg/kmol);

φ_i ——某一成分气体的体积分数, %;

M_i ——某一成分气体的相对分子质量,单位为千克每千摩尔(kg/kmol)。

A.5.2 干烟气气体相对分子质量的计算

干烟气气体的相对分子质量根据公式(A.22)计算：

$$M_d = \frac{1}{100} \times (M_{O_2} \varphi_{O_2,d} + M_{CO_2} \varphi_{CO_2,d} + M_{N_2} \varphi_{N_2,d} + M_{CO} \varphi_{CO,d} + M_{NO} \varphi_{NO,d} + M_{SO_2} \varphi_{SO_2,d})$$

..... (A.22)

式中：

M_d ——干烟气气体的分子量,单位为千克每千摩尔(kg/kmol);

——干烟气中 O₂、CO₂、N₂、CO、NO 和 SO₂ 的体积分数, %。

与烟气中其他组分相比,CO、NO 和 SO₂含量极少,在进行气体相对分子质量计算中可以忽略。

A.5.3 湿烟气气体相对分子质量的计算

锅炉烟气实际为含有水蒸气的湿烟气,湿烟气气体的相对分子质量根据公式(A.23)计算:

$$M_w = \frac{1}{100} \times [M_d \times (100 - \varphi_{H_2O,w}) + M_{H_2O} \varphi_{H_2O,w}] \quad \dots \dots \dots \quad (A.23)$$

式中：

M_w ——湿烟气气体的相对分子质量,单位为千克每千摩尔(kg/kmol);

$\varphi_{H_2O,w}$ ——湿烟气中水蒸气的体积分数, %;

$M_{\text{H}_2\text{O}}$ ——水蒸气的相对分子质量, 单位为千克每千摩尔(kg/kmol)。

A.5.4 标准状态下湿烟气密度的计算

标准状态下湿烟气密度可根据湿烟气气体的相对分子质量根据公式(A.24)计算:

式中：

ρ_w ——标准状态下湿烟气气体的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3)。

A.5.5 实际工况下湿烟气密度的计算

实际工况下湿烟气密度根据公式(A.25)计算：

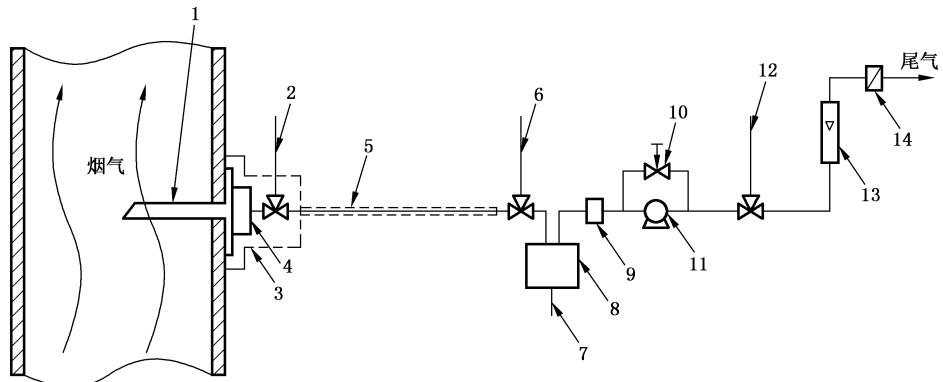
$$\rho_s = \rho_w \frac{273}{273 + t_s} \times \frac{B_a + P_s}{101.325} \quad \dots \dots \dots \quad (A.25)$$

式中：

ρ_s ——测量状态下湿烟气气体的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3)。

附录 B
(资料性)
烟气组分测量采样方式示意图

B.1 冷干抽取式自动测量系统示意图,见图 B.1。

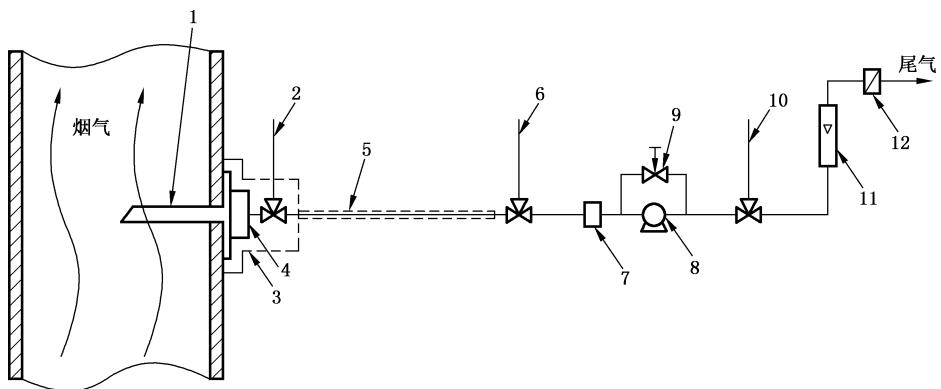


标引序号说明:

- 1 ——气体采样探头；
- 2 ——整个系统核查用校准气路；
- 3 ——加热器；
- 4 ——一级过滤器；
- 5 ——采样管线(带有加热功能)；
- 6 ——处理系统和分析仪核查用校准气路；
- 7 ——冷凝水排放口；
- 8 ——除湿装置；
- 9 ——二级过滤器；
- 10——针型阀；
- 11——采样泵；
- 12——分析仪核查用校准气路；
- 13——流量计；
- 14——气体分析仪。

图 B.1 冷干抽取式自动测量系统示意图

B.2 热湿抽取式自动测量系统示意图,见图 B.2。

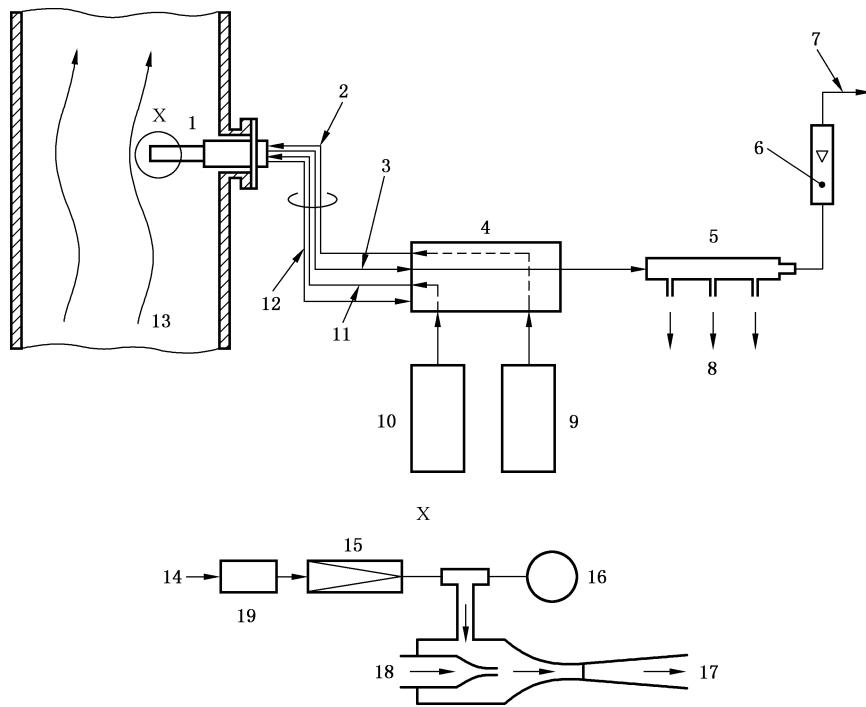


标引序号说明:

- 1 —— 气体采样探头；
- 2 —— 整个系统核查用校准气路；
- 3 —— 加热器；
- 4 —— 一级过滤器；
- 5 —— 采样管线(带有加热功能)；
- 6 —— 处理系统和分析仪核查用校准气路；
- 7 —— 二级过滤器；
- 8 —— 采样泵；
- 9 —— 针型阀；
- 10 —— 分析仪核查用校准气路；
- 11 —— 流量计；
- 12 —— 气体分析仪。

图 B.2 热湿抽取式自动测量系统示意图

B.3 抽取式稀释取样自动测量系统示意图,见图 B.3。

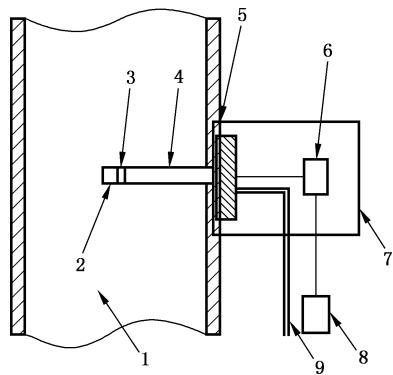


标引序号说明：

- 1 ——稀释取样探头；
- 2 ——稀释空气管线；
- 3 ——稀释后样气管线；
- 4 ——控制器；
- 5 ——分流管；
- 6 ——流量计；
- 7 ——废气；
- 8 ——气体分析仪进气管路；
- 9 ——加压空气(零气)；
- 10——校准气体；
- 11——校准管线；
- 12——真空计管线；
- 13——烟气；
- 14——样品气体；
- 15——临界限流孔；
- 16——真空计；
- 17——稀释后样气；
- 18——稀释空气；
- 19——过滤器。

图 B.3 抽取式稀释取样自动测量系统示意图

B.4 非抽取式自动测量系统示意图,见图 B.4。



标引序号说明:

- 1 —— 烟气;
- 2 —— 探头过滤器;
- 3 —— 测量室;
- 4 —— 气体采样探头;
- 5 —— 采样探头安装支架;
- 6 —— 收发器;
- 7 —— 外壳;
- 8 —— 数据记录器;
- 9 —— 校准气路。

图 B.4 非抽取式自动测量系统示意图

附录 C
(资料性)
计算流体力学(CFD)数值模拟

C.1 通则

CFD 分析可以为正确选择烟气测速方式提供指导。在开始模拟之前,宜仔细考虑计算目标和所涉及的物理现象,所有可能影响工程决策或测量准确性的因素都宜包含在计算模型内。分析者需要考察、确定并报告 C.2~C.5 中所列出的 CFD 分析要点。

C.2 离散格式

采用二阶精度及以上的数值格式来离散流动方程。

C.3 收敛准则

对于不需要精确求解近壁面区域的情形(如使用壁面函数或无黏流欧拉方程),通常可以通过检查残差来判断收敛与否,残差限值取决于 CFD 具体计算内容和残差缩放类型,分析者可以根据商业软件的使用说明绘制若干全局参数的残差曲线来判断收敛情况。但商业 CFD 程序所给出的收敛标准可能过于保守。对于需要精确求解近壁面区域的情形,对相关全局变量(如进出口压力损失)收敛情况的检验尤为重要,特别是当近壁面网格节点较多时,温度场收敛所需要的时间可能会显著增加。

C.4 误差和不确定度来源

误差有许多不同的定义,根据误差来源可分为 4 类:

- a) 问题描述误差;
- b) 数值模型误差;
- c) 数值方法误差;
- d) 使用及程序误差。

C.5 将详细阐述这些误差的含义,并对如何减小误差给出指导。

C.5 误差

C.5.1 问题描述误差

C.5.1.1 概述

问题描述误差是最常见的误差类型。CFD 模拟需要选择准确的模拟方法,使用适当的边界条件,基于正确的几何模型来分析问题。

C.5.1.2 模拟方法(错误的模拟方法)

在评估 CFD 模拟时,首先要分析所涉及的重要物理现象,然后选择合适的模拟方法(如二维或三维、稳态或瞬态)来求解这些物理现象。

C.5.1.3 边界条件(错误或不确定的边界条件)

错误地使用边界条件是常见的误差来源。为了求解重要的物理特征,宜明确各类边界条件。

C.5.1.4 几何误差

C.5.1.4.1 概述

CFD 模拟通常需要对几何模型进行一定程度的简化,在评估 CFD 模拟时,需要考虑几何简化对关键物理现象的影响。C.5.1.4.2~C.5.1.4.4 中给出了典型的几何误差。

C.5.1.4.2 简化

较小的几何特征(如圆角、小台阶或间隙)通常可以忽略不计,但在忽略这类特征时,需要评估它们对重要物理现象(如流动发展)产生的影响。

C.5.1.4.3 公差和制造差异

如果几何模型的公差非常大,或者制造过程中可能会产生非理想的形状或位置,那么有必要增加相应的 CFD 模拟来覆盖实际几何外形的变化范围。

C.5.1.4.4 表面条件(粗糙度、焊缝、台阶、间隙等)

CFD 模拟通常假设表面绝对光滑,而实际中的表面是非光滑的,它们可能具有焊缝、台阶甚至间隙,这将导致模拟结果的差异。如果关注的物理现象(如转捩预测、泄漏流的穿透和掺混等)可能受到表面条件的影响,则需要在模拟过程中充分考虑这些因素。

C.5.2 数值模型误差

确定模拟方法后,下一步是确定模拟所需的数值模型,宜考虑以下几点:

- a) 气体属性(不可压缩/可压缩,理想气体/实际气体等);
- b) 湍流建模(湍流模型类型,近壁面处理方式等);
- c) 其他模型(燃烧模型、喷雾模型等)。

在评估与数值模型相关的误差时,要掌握所选模型的特征,并分析这些特征和可能存在的不足会对物理行为的预测产生什么影响。

C.5.3 数值方法误差

C.5.3.1 概述

典型的数值方法误差包括离散误差、收敛误差和舍入误差。

C.5.3.2 离散误差

离散误差可以分为空间离散误差和时间离散误差。

空间离散误差就是通常所说的离散误差,表示精确解和空间离散数值解之间的差异。空间离散误差难以定量评估,通常采用以下方法减小该误差:

- a) 至少使用二阶精度格式,最好使用三阶精度格式。部分商业程序默认使用一阶迎风格式,但该格式扩散程度较高,往往会出现计算结果过度平顺化的情况;
- b) 宜采用多种疏密程度的网格进行模拟,以此评估网格无关性;
- c) 对流项采用迎风格式离散,避免使用中心差分格式,以防数值计算结果出现振荡。

在边界层和其他速度梯度较大的区域内,需要有足够数量的网格单元。网格宜与所使用的湍流模型相匹配。

时间离散误差主要影响瞬态模拟。当使用时间推进法进行稳态模拟时,时间离散误差可能会对最终的稳态解产生影响。对时间的离散可以采用一阶格式、二阶格式或龙格-库塔法实现。部分程序可自适应时间步长,但通常需要先预设一个值。将时间步长视为基于时间的网格,并确保时间网格的分辨率足够精细以捕捉流动的最高频率。为了避免时间离散误差造成的问题,需要考虑以下几点:

- a) 时间离散上至少使用二阶格式;
- b) 预先估算重要流动现象的特征频率,选择足够精细的时间步长来捕获流动频率,随后检查模拟获得的频率,确保在所选的时间步长下可以解析频率特征;
- c) 采用多种时间步长来进行模拟,以确保时间步长无关性。

C.5.3.3 收敛误差

除了评估残差,在求解过程中,还需要评估全局参数,如静压分布、总压损失、摩擦因子和传热系数。

C.5.3.4 舍入误差

当使用单精度求解器时,需要注意避免舍入误差。使用壁面函数或无粘流欧拉方程的模拟通常可以在单精度下进行。对于需要数值求解的边界层($y^+ \sim 1$),通常需要使用双精度求解器。如果在非常精细的网格分辨率下使用双精度求解器,需确保网格也是在双精度下创建的。当使用高级数值模型(如自由表面模拟、喷雾模拟和具有快速动网格的瞬态模拟)时,通常也需要使用双精度求解器。

C.5.4 使用及程序误差

这些误差与程序漏洞或操作失误有关。

附录 D
(规范性)
 $t_{0.95(n-1)}$ 分布

$t_{0.95(n-1)}$ 分布临界值, 见表 D.1。

表 D.1 $t_{0.95(n-1)}$ 分布临界值表

平行测量次数	$t_{0.95(n-1)}$	平行测量次数	$t_{0.95(n-1)}$
3	2.920	13	1.782
4	2.353	14	1.771
5	2.132	15	1.761
6	2.015	16	1.753
7	1.943	17	1.746
8	1.895	18	1.740
9	1.860	19	1.734
10	1.833	20	1.729
11	1.812	25	1.711
12	1.796	30	1.701



附录 E

(资料性)

E.1 总则

目前国内烟气流速在线监测主要采用压差法、超声波时差法等。

E.2 压差法

E.2.1 概述

常用压差法流速测量主要有单点皮托管、多点皮托管、矩阵流量计与均速管等。

E.2.2 单点皮托管

E.2.2.1 基本原理

皮托管测速的基本原理为伯努利方程,烟气流速根据公式(E.1)计算:

式中：

V_p ——烟气流速,单位为米每秒(m/s);

Δp ——动压,单位为帕斯卡(Pa);

ρ_s ——测量状态下湿烟气气体的密度,单位为千克每立方米(kg/m^3)。

上式的 Δp 是假设理想不可压缩流体在定常流动下的动压值,但在实际应用中,流体存在黏性力等作用,因此需引进一个皮托管修正系数 K_p ,即:

$$V_p = K_p \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad \dots \dots \dots \quad (E.2)$$

式中：

K_p ——皮托管修正系数,对于标准型皮托管 K_p 取 0.99 ± 0.01 ,对于 S 型皮托管 K_p 取 0.84 ± 0.01 。标准皮托管和 S 型皮托管的结构见 GB/T 16157。

由于标准皮托管测孔很小,易被堵塞,用于锅炉烟气流速在线监测的情况很少。S型皮托管法的测压孔开口较大,不易被烟尘堵塞,且易于吹扫,是目前应用广泛的烟气流速测量方法。

E.2.2.2 技术特点

单点皮托管法测量烟气流速的技术特点如下：

- a) 一般不能用于流速 $<5\text{ m/s}$ 的场合；
 - b) 皮托管全压孔需正对来流；
 - c) 存在磨损、腐蚀及堵塞等风险；
 - d) 安装、运行、维护较简单；
 - e) 单点测量，在不均匀流场使用时准确度低。

E.2.3 多点皮托管

E.2.3.1 基本原理

由于监测断面流场往往分布不均,单点皮托管对测点设置要求高,代表性点选取难度大,对流速变化的适应性差。多点皮托管法通过在监测断面网格法多点布置测速单元,每个测点的测速单元中均设有差压变送器和S型皮托管,分别计算各测点处烟气流速,再取各测点处烟气流速的算术平均值作为烟气平均流速。

多点皮托管流量计的烟气流速根据公式(E.3)计算:

$$\overline{V_p} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n} \quad \text{.....(E.3)}$$

式中:

$\overline{V_p}$ ——烟气平均流速,单位为米每秒(m/s);

V_i ——第*i*个测点的烟气流速,单位为米每秒(m/s)。

E.2.3.2 技术特点

多点皮托管法测量烟气流速的技术特点如下:

- a) 用于解决烟道流场不均匀问题;
- b) 一般不能用于流速<5 m/s 的场合;
- c) 皮托管全压孔需正对来流;
- d) 存在磨损、腐蚀及堵塞等问题;
- e) 皮托管及差压变送器数量多,安装较复杂,运行维护要求较高。

E.2.4 矩阵式流量计



E.2.4.1 基本原理

矩阵式流量计与多点皮托管法的测点布置方式类似,均为网格法多点测量,但烟气平均流速的计算方法不同。矩阵流量计测量整个烟道断面的平均动压,然后根据伯努利方程计算烟气流速。烟气平均流速根据公式(E.4)计算:

$$\overline{V_p} = K \times \sqrt{\frac{2 \overline{\Delta p}}{\rho_s}} \quad \text{.....(E.4)}$$

式中:

K ——修正系数;

$\overline{\Delta p}$ ——整个烟道断面的平均动压,单位为帕斯卡(Pa)。

E.2.4.2 技术特点

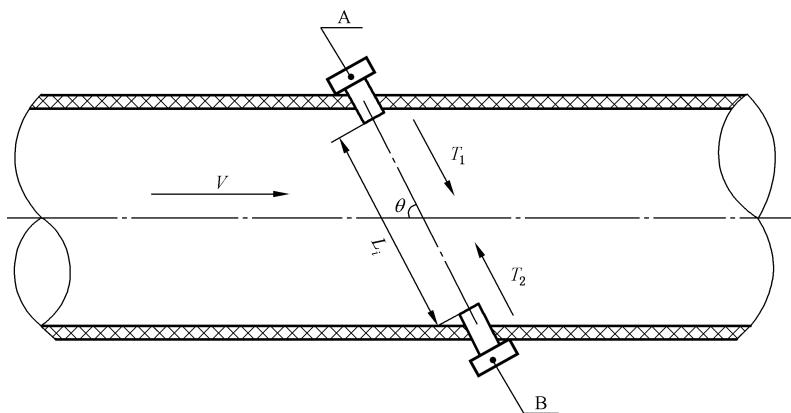
矩阵式流量计测量烟气流速的技术特点如下:

- a) 用于解决烟道流场不均匀问题;
- b) 一般不能用于流速<5 m/s 的场合;
- c) 存在磨损、腐蚀及堵塞等问题;
- d) 与多点皮托管相比,减少差压变送器数量;
- e) 安装较复杂,取压孔堵塞等判别困难,运行维护要求高。

E.3 超声波时差法

E.3.1 基本原理

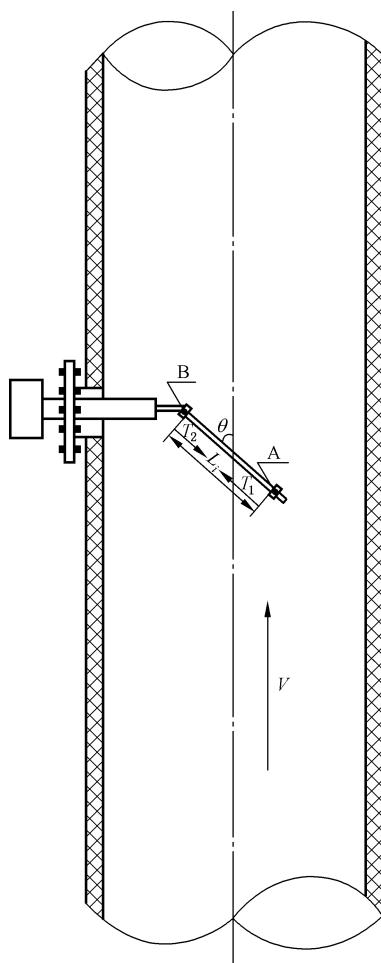
目前通过超声波在线监测烟气流速主要采用时间差法,是以测量声波在流动烟气中的传播时间为
基础工作的,属于线测量方式。常见的超声波流量计有对穿式和探头式两种,图 E.1 和图 E.2 分别给出了对穿式和探头式超声波时差法流速测量示意图。在 A、B 位置各装有 1 个能发送和接受超声波脉冲的换能器。气体流量为零时,超声波脉冲从 A 到 B 的渡越时间 T_1 与从 B 到 A 的渡越时间 T_2 相等。但当有气体流动时,根据公式(E.5)和公式(E.6),声脉冲从 A 到 B 的渡越时间将缩短,而从 B 到 A 的渡越时间将增加。



标引符号说明:

- A —— 换能器 A;
- B —— 换能器 B;
- L_i —— 声道长度;
- V —— 烟气流速;
- θ —— 声道夹角;
- T_1, T_2 —— 声脉冲从 A 到 B 的渡越时间和从 B 到 A 的渡越时间。

图 E.1 对穿式测量示意图



标引符号说明：

A —— 换能器 A；

B —— 换能器 B；

L_i —— 声道长度；

V —— 烟气流速；

θ —— 声道夹角；

T_1 、 T_2 —— 声脉冲从 A 到 B 的渡越时间和从 B 到 A 的渡越时间。

图 E.2 探头式测量示意图

声脉冲从 A 到 B 的渡越时间 T_1 和从 B 到 A 的渡越时间 T_2 分别为：

$$T_1 = \frac{L_i}{c + v_i \cos\theta} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{E.5})$$

$$T_2 = \frac{L_i}{c - v_i \cos\theta} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{E.6})$$

式中：

L_i —— 声道长度，单位为米(m)；

c —— 声速，单位为米每秒(m/s)；

v_i —— 声道 i 上的烟气流速，单位为米每秒(m/s)；

θ —— 声道夹角，单位为弧度(rad)；

T_1 、 T_2 ——声脉冲从 A 到 B 的渡越时间和从 B 到 A 的渡越时间, 单位为秒(s)。

由公式(E.5)和公式(E.6)可得出声道 i 上的烟气流速:

$$V_i = \frac{L_i}{2\cos\theta} \times \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \quad \dots \dots \dots \quad (E.7)$$

E.3.2 技术特点

超声波时差法测量烟气流速的技术特点如下：

- a) 量程宽且测量重复性高；
 - b) 受被测气体温度、压力、密度、黏度等参数影响小，测量精度高；
 - c) 适用于各种形状的大口径管道气体流量测量，以及各种低流速环境下的测量；
 - d) 抗干扰能力较差，易受气泡、结垢以及噪声的干扰；
 - e) 对穿式超声波流量计的安装精度要求高。

E.4 流速测量方法对比分析

不同的流速测量方法对比分析如表 E.1 所示。

表 E.1 不同的流速测量方法对比分析

项目	流速测量方法					
	压差法			超声波时差法		
仪器种类	单点皮托管	多点皮托管	矩阵式流量计	探头式超声波流量计	对穿式单通道超声波流量计	对穿式多通道超声波流量计
测量方式	点测量	网格法点测量	网格法点测量	探头式线测量	单通道贯穿式线测量	多通道贯穿式线测量
安装方式	烟道一侧	烟道横截面	烟道横截面	烟道一侧	烟道两侧,发射/接收端	烟道两侧,发射/接收端
量程	一般 $\geq 5 \text{ m/s}$			$\geq 0.5 \text{ m/s}$		
特点	直管段要求高,安装、运维简单	可降低对直管段的要求,安装较复杂,运维要求较高	可降低对直管段的要求,安装较复杂,运维要求高	直管段要求高,安装精度要求较高,运维简单	直管段要求较高,安装精度要求高,运维简单	可降低对直管段的要求,安装精度要求高,运维简单
准确度	低	高	中	中	较高	高

附录 F

(规范性)

二氧化碳和氧气体积分数监测单元实验室检测方法

F.1 概述

在进行测定前,根据制造商规定的时间进行预热,若制造商未明确预热时间,则至少预热 2 h。

在二氧化碳和氧气体积分数监测单元的性能特征进行检测前,根据制造商的规定对分析仪进行设置。

对于所有的性能特征测定,测定条件保持在以下范围之内:

——环境温度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$;

——采样压力 $\pm 0.2 \text{ kPa}$;

——电源电压为额定线电压的 $\pm 1\%$ (对电压的敏感性测定除外)。

使用浓度和不确定度相适应的气体标准物质/标准样品测定各种性能特征。

注:对于原位式系统,响应时间、零点和量程点的重复性、线性误差,干扰成分的影响、零点漂移和量程漂移、环境温度变化的影响、供电电压变化的影响和振动的影响使用外置的测定室进行测定。

F.2 仪器响应时间

待测分析仪器运行稳定后,根据分析仪器设定进样流量通入零点气体,待读数稳定后以相同流量通入量程校准气体,同时用秒表开始计时;当待测分析仪器显示值上升至标准气体浓度标称值 90%时,停止计时;记录所用时间为待测分析仪器的上升时间。待量程校准气体测量读数稳定后,以相同流量通入零点气体,同时用秒表开始计时,当待测分析仪器显示值下降至量程校准气体浓度标称值的 10%时,停止计时;记录所用时间为待测分析仪器的下降时间。

重复上述步骤 3 次,取 3 次测得值的算术平均值作为仪器响应时间。平均值符合表 4 中的性能指标。

F.3 重复性

待测分析仪器运行稳定后,通入量程校准气体,待读数稳定后记录显示值,使用同一浓度量程校准气体重复上述测试操作至少 6 次,根据公式(F.1)计算待测分析仪器的重复性(相对标准偏差),符合表 4 中的性能指标。

$$S_r = \frac{1}{x} \times \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (\text{F.1})$$

式中:

S_r ——待测分析仪器重复性,%;

x_i ——第 i 次的测量值,%;

\bar{x} ——测量值 x_i 的平均值,%;

N ——重复测量次数。

F.4 线性误差

待测分析仪器运行稳定后,分别进行零点校准和满量程校准。依次通入浓度为($20\% \pm 5\%$)满量程、($40\% \pm 5\%$)满量程、($60\% \pm 5\%$)满量程和($80\% \pm 5\%$)满量程的标准气体;读数稳定后分别记录各浓度标准气体的显示值;再通入零点气体,重复测试 3 次,根据公式(F.2)计算待测分析仪器每种浓度标

准气体测量误差相对于满量程的百分比 L_{ei} , L_{ei} 的最大值符合表 4 中的性能指标。

$$L_{ei} = \frac{\overline{C}_{di} - C_{si}}{R} \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (\text{F.2})$$

式中：

L_{ei} ——待测分析仪器测量第 i 种浓度标准气体的线性误差, %;

C_{si} —— 第 i 种浓度标准气体浓度标称值, %;

\bar{C}_{di} ——待测分析仪器测量第 i 种浓度标准气体 3 次测量平均值, %;

R ——待测分析仪器满量程值, %。

F.5 24 h 零点漂移和量程漂移

待测分析仪器运行稳定后,通入零点气体,记录分析仪器零点稳定读数为 Z_0 ;然后通入量程校准气体,记录稳定读数 S_0 。通气结束后,待测分析仪器连续运行 24 h(期间不进行任何校准和维护)后分别通入同一浓度零点气体和量程校准气体重复上述操作,并分别记录稳定后读数 Z_n 和 S_n 。根据公式(F.3)、公式(F.4)、公式(F.5)和公式(F.6)计算待测分析仪器的 24 h 零点漂移 Z_d 和 24 h 量程漂移 S_d ,然后可对待测分析仪器进行零点和量程校准(如果不校准可将本次零点和量程测量值作为监测系统运行 24 h 后零点和量程漂移测试的初始值 Z_0 和 S_0)。重复上述测试 7 次,全部 24 h 零点漂移值 Z_d 和 24 h 量程漂移 S_d 均符合表 4 中的性能指标。

$$Z_d = \frac{\Delta Z_n}{R} \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (\text{F.4})$$

式中：

Z_d ——24 h 零点漂移, %;

Z_0 ——零点读数初始值, %;

Z_n ——24 h 后通入零点气体的测量值, %;

ΔZ_n ——24 h 后的零点变化值, %;

R ——仪器满量程值, %。

式中：

S_d ——24 h 量程漂移, %;

S_0 ——量程读数初始值, %;

S_n ——24 h后通入量程校准气体的测量值, %;

ΔS_n —— 24 h 后的量程点变化值, %。

F.6 一周零点漂移和量程漂移

待测分析仪器运行稳定后,通入零点气体,记录分析仪器零点稳定读数为 Z_0 ;然后通入量程校准气体,记录稳定读数 S_0 。通气结束后,待测分析仪器连续运行168 h(期间进行任何手动校准和维护)后重复上述操作,并分别记录稳定后读数 Z_n 和 S_n 。分别根据公式(F.3)、公式(F.4)、公式(F.5)和公式(F.6)计算待测分析仪器的一周零点漂移 Z_d 和一周量程漂移 S_d ,然后可对待测分析仪器进行零点和量程校准(如果不校准可将本次零点和量程测量值作为监测系统运行一周后零点和量程漂移测试的初始值 Z_0 和 S_0)。重复上述测试7次,全部一周零点漂移值 Z_d 和一周量程漂移 S_d 均符合表4中的性能指标。

F.7 环境温度变化的影响

环境温度变化的影响检测方法如下：

- 待测分析仪器在恒温环境中运行后,设置环境温度为(25±1)℃,稳定至少30 min,记录标准温度值 t_0 ,通入零点气体,记录待测分析仪器读数 Z_0 ;通入量程校准气体,记录待测分析仪器读数 M_0 ;
- 缓慢调节(升温速率或降温速率小于或等于1℃/min,以下相同)恒温环境温度为(35±1)℃,稳定至少30 min,记录标准温度值 t_1 ,分别通入同一浓度零点气体和量程校准气体,记录待测仪器零点读数 Z_1 和量程读数 M_1 ;
- 缓慢调节恒温环境温度为(25±1)℃,稳定至少30 min,记录标准温度值 t_2 ,分别通入同一浓度零点气体和量程校准气体,记录待测仪器零点读数 Z_2 和量程读数 M_2 ;
- 缓慢调节恒温环境温度为(15±1)℃,稳定至少30 min,记录标准温度值 t_3 ,分别通入同一浓度零点气体和量程校准气体,记录待测仪器零点读数 Z_3 和量程读数 M_3 ;
- 缓慢调节恒温环境温度为(25±1)℃,稳定至少30 min,记录标准温度值 t_4 ,分别通入同一浓度零点气体和量程校准气体,记录待测仪器零点读数 Z_4 和量程读数 M_4 ;
- 根据公式(F.7)计算待测分析仪器环境温度变化的影响 b_{st} ,符合表4中的性能指标。

$$b_{st} = \frac{(M_3 - Z_3) - \frac{(M_2 - Z_2) + (M_4 - Z_4)}{2}}{R} \times 100$$

$$\text{或 } \frac{(M_1 - Z_1) - \frac{(M_0 - Z_0) + (M_2 - Z_2)}{2}}{R} \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (\text{F.7})$$

式中：

- b_{st} ——待测分析仪器环境温度变化的影响,%;
 M_0 ——环境温度 t_0 ,待测分析仪器量程校准气体测量值,%;
 M_1 ——环境温度 t_1 ,待测分析仪器量程校准气体测量值,%;
 M_2 ——环境温度 t_2 ,待测分析仪器量程校准气体测量值,%;
 M_3 ——环境温度 t_3 ,待测分析仪器量程校准气体测量值,%;
 M_4 ——环境温度 t_4 ,待测分析仪器量程校准气体测量值,%;
 Z_0 ——环境温度 t_0 ,待测分析仪器零点气体测量值,%;
 Z_1 ——环境温度 t_1 ,待测分析仪器零点气体测量值,%;
 Z_2 ——环境温度 t_2 ,待测分析仪器零点气体测量值,%;
 Z_3 ——环境温度 t_3 ,待测分析仪器零点气体测量值,%;
 Z_4 ——环境温度 t_4 ,待测分析仪器零点气体测量值,%。

F.8 进样流量变化的影响

待测分析仪器运行稳定后,根据初始设定进样流量,通入量程校准气体,稳定后记录待测分析仪器读数 T ;调节待测分析仪器进样流量高于初始设定流量值10%,通入同一浓度标准气体,稳定后记录待测分析仪器读数 P ;调节待测分析仪器进样流量低于初始设定流量值10%,通入同一浓度标准气体,稳定后记录待测分析仪器读数 Q 。根据公式(F.8)计算待测分析仪器进样流量变化的影响 V ,重复测试3次,平均值符合表4中的性能指标。

$$V = \frac{P - T}{R} \times 100 \text{ 或 } \frac{Q - T}{R} \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (\text{F.8})$$

式中：

V——待测分析仪器进样流量变化的影响,%;

T——初始设定进样流量条件下量程校准气体测量值, %;

P — 进样流量高于初始设定流量值 10% 时, 量程校准气体测量值, %;

Q ——进样流量低于初始设定流量值 10%时，量程校准气体测量值，%。

F.9 供电电压变化的影响

待测分析仪器运行稳定后,在正常电压条件下,通入量程校准气体,稳定后记录待测分析仪器读数W;调节待测分析仪器供电电压高于正常电压值10%,通入同一浓度标准气体稳定后记录待测分析仪器读数X;调节待测分析仪器供电电压低于正常电压值10%,通入同一浓度标准气体,稳定后记录待测分析仪器读数Y。根据公式(F.9)计算待测分析仪器供电电压变化的影响U,重复测试3次,平均值符合表4中的性能指标。

$$U = \frac{X - W}{R} \times 100 \text{ 或 } \frac{Y - W}{R} \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (\text{F.9})$$

式中：

U ——待测分析仪器供电电压变化的影响, %;

W——正常电压条件下量程校准气体测量值,%;

X——供电电压高于正常电压 10%时,量程校准气体测量值,%;

Y——供电电压低于正常电压10%时,量程校准气体测量值, %。

F.10 干扰成分的影响

干扰测试气体见表 F.1。待测分析仪器运行稳定后,通入零点标准气体,记录待测分析仪器读数 a ;通入表 F.1 中对应浓度的干扰气体,记录待测分析仪器读数 b 。零点气体和每种干扰气体参照上述操作重复测试 3 次,计算平均值 \bar{a} 和 \bar{b}_i ,根据公式(F.10)计算待测分析仪器每种干扰气体干扰成分的影响 IE_i ;将 IE_i 大于满量程值 0.5% 的正干扰值和小于满量程值 -0.5% 的负干扰值分别相加,可得到正干扰影响值和负干扰影响值;均符合表 4 中的性能指标。

$$IE_i = \frac{\bar{b}_i - \bar{a}}{R} \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (F.10)$$

式中：

IE_i ——待测分析仪器测量第 i 种干扰气体干扰成分的影响, %;

\bar{b}_i ——第 i 种干扰气体 3 次测量的平均值, %;

\bar{q} ——零点气体 3 次测量平均值, %;

i ——测试干扰气体的序号(*i*=1~5)。

表 F.1 实验室检测使用的干扰成分气体

干扰物质	质量浓度或体积分数	
	值	单位
O ₂	3% 和 21%	—
H ₂ O	30%	—
CO	300	mg/m ³
CO ₂	15%	—

表 F.1 实验室检测使用的干扰成分气体 (续)

干扰物质	质量浓度或体积分数	
	值	单位
NO	300	mg/m ³
SO ₂	200	mg/m ³

F.11 振动的影响

将待测分析仪器根据正常的安装方式安装在振动测试装置上,待测分析仪器运行稳定后分别通入零点气体和量程校准气体,稳定后记录待测分析仪器读数 Z_0 和 M_0 。将振动测试装置调节到位移幅值 0.15 mm,然后分别在 3 个互相垂直的轴线上在(10~55~10) Hz 频率范围内依次以对数规律进行扫频,扫频速率为 1 个倍频程/min,每个方向上的振动测试时间均保持 10 min。振动测试结束后仪器恢复 2 h,再次分别通入零气和量程校准气体,稳定后记录待测分析仪器读数 Z_1 和 M_1 ,重复振动后零点和量程标准气体测量 3 次,取测量结果的平均值;根据公式(F.11)和公式(F.12)分别计算待测分析仪器的零点处振动的影响和量程点处振动的影响;均符合表 4 中的性能指标。

$$u_0 = \frac{\bar{Z} - Z_0}{R} \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (F.11)$$

$$u_{\text{sp}} = \frac{\overline{M} - M_0}{R} \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (\text{F.12})$$

式中：

u_0 ——待测分析仪器零点处振动的影响, %;

\bar{Z} —— 经过振动测试后零点气体测量平均值, %;

Z_0 ——正常没有外界振动条件下零点气体平均值, %;

u_{sp} ——待测分析仪器量程点处振动的影响, %;

\bar{M} —— 经过振动测试后量程校准气测量平均值, %;

M_0 ——正常没有外界振动条件下量程校准器气体测量值, %。

附录 G
(规范性)
监测系统现场检测方法

G.1 二氧化碳和氧气体积分数监测单元现场检测方法

G.1.1 系统响应时间

待测监测系统运行稳定后,根据系统设定的采样流量通入零点气体,待读数稳定后以相同流量通入量程校准气体,同时用秒表开始计时;观察分析仪示值至读数开始跃变止,记录并计算样气管路传输时间 T_1 ;继续观察并记录待测分析仪器显示值上升至标准气体浓度标称值 90% 时的仪表响应时间 T_2 ;系统响应时间为 T_1 和 T_2 之和。重复测定 3 次,取平均值;系统响应时间检测结果符合表 5 中的性能指标。

G.1.2 示值误差

待测分析仪器运行稳定后,通入零气,调节仪器零点;通入高浓度(满量程值的 80%~100%)标准气体,调整仪器显示浓度值与标准气体浓度值一致;仪器经上述校准后,根据零气、高浓度标准气体、零气、中浓度(满量程值的 50%~60%)标准气体、零点气、低浓度(满量程值的 20%~30%)标准气体的顺序通入标准气体,待显示浓度值稳定后读取测定结果。重复测定 3 次,取平均值。根据公式(F.2)计算每种浓度标准气体示值误差 L_{ei} ;示值误差 L_{ei} 符合表 5 中的性能指标。

G.1.3 零点漂移

待测分析仪器运行稳定后,系统通入零气(经过滤的不含颗粒物、待测气体的清洁干空气或高纯氮气),校准仪器至零点,记录 Z_{0i} 。24 h 后,再通入零气,待读数稳定后记录零点读数 Z_i ,按调零键,仪器调零。连续操作 3 d,根据公式(F.3)和公式(F.4)计算零点漂移 Z_d 。零点漂移 Z_d 符合表 5 中的性能指标。

G.1.4 量程漂移

待测分析仪器运行稳定后,系统通入高浓度(满量程的 80%~100%)标准气体,校准仪器至该标准气体的浓度值,测试并记录初始读数 S_{0i} ;24 h 后,再通入同一标准气体,待读数稳定后记录标准气体读数 S_i ,按校准键,校准仪器。连续操作 3 d,根据公式(F.5)和公式(F.6)计算量程漂移 S_d 。量程漂移 S_d 符合表 5 中的性能指标。

G.1.5 准确度

当系统响应时间、示值误差、零点漂移和量程漂移通过现场检测,并且生产设施达到最大生产能力 50% 以上时,可进行准确度测试,测试方法如下:

- 待测碳排放浓度(含 O₂)监测单元运行稳定后,分别进行零点校准和满量程校准;
- 待测碳排放浓度(含 O₂)监测单元与参比测试方法同步对碳排放浓度(含 O₂)进行测量,由数据采集器每分钟记录 1 个累积测量值,连续记录至参比方法测试结束;
- 取同一时间区间内(一般为 3 min~15 min)参比方法与碳排放浓度(含 O₂)监测单元测量结果平均值组成一个数据对,确保参比方法与碳排放浓度(含 O₂)监测单元测量数据在同一条件下(烟气温度、压力、湿度和含氧量等,一般取标态干基浓度);

- d) 每天获取至少 9 组有效数据对, 用于准确度计算, 但需报告所有的数据对, 包含舍去的数据对, 连续进行 3 d;
- e) 根据公式(G.1)~公式(G.6)计算全部数据对与参比方法测量数据的相对准确度, 符合表 5 中的性能指标。

$$RA = \frac{|\bar{d}| + |cc|}{\overline{RM}} \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (G.1)$$

式中:

RA —— 相对准确度, %;

\overline{RM} —— 全部数据对中参比方法测量结果的平均值, %, 计算公式见公式(G.2);

\bar{d} —— 碳排放浓度(含 O₂)监测单元与参比方法测量各数据对之差的平均值, %, 计算公式见公式(G.3);

cc —— 置信系数, %, 计算公式见公式(G.5)。

$$\overline{RM} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RM_i \quad \dots \dots \dots \quad (G.2)$$

式中:

n —— 数据对的个数(n 大于或等于 9);

RM_i —— 第 i 个数据对中的参比方法测定值, %, 见公式(G.4)。

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad \dots \dots \dots \quad (G.3)$$

$$d_i = RM_i - CEMS_i \quad \dots \dots \dots \quad (G.4)$$

式中:

d_i —— 每个数据对之差, %;

$CEMS_i$ —— 第 i 个数据对中的碳排放浓度(含 O₂)监测单元测定值。

在计算数据对差的和时, 保留差值的正、负号。

$$cc = \pm t_{f,0.95} \frac{S_d}{\sqrt{n}} \quad \dots \dots \dots \quad (G.5)$$

式中:

$t_{f,0.95}$ —— 统计常数, 由 t 表查得, $f = n - 1$;

S_d —— 参比方法与碳排放浓度(含 O₂)监测单元测定值数据对之差的标准偏差, %, 计算公式见公式(G.6)。

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}{n-1}} \quad \dots \dots \dots \quad (G.6)$$

表 G.1 计算置信系数用 t 界值表

f	$t_{f,0.95}$	f	$t_{f,0.95}$	f	$t_{f,0.95}$
8	2.306	11	2.201	14	2.145
9	2.262	12	2.179	15	2.131
10	2.228	13	2.160	16	2.120

G.2 烟气温度监测单元现场检测方法

烟气温度监测单元现场检测方法主要包括准确度测试, 测试方法如下:

- a) 待测烟气温度监测单元与参比测试方法同步测量烟气温度,由数据采集器每分钟记录1个温度连续测量系统累积测量值,连续记录至参比方法测量结束;
- b) 取同一时间区间内(一般用参比方法一个样品的测量时间)参比方法与烟气温度监测单元测量平均值组成一个数据对,每天至少获得5个有效数据对;当多于5个时可适当舍去1个~2个数据对,宜报告记录全部数据对,包括舍去的数据对和舍弃原因;
- c) 准确度计算,将每天参比方法测量值与烟气温度监测单元测量值数据对的平均值进行比较,计算两者的绝对误差。

G.3 烟气中水蒸气体积分数测量装置现场检测方法

烟气中水蒸气体积分数测量装置现场检测方法主要包括准确度测试,测试方法如下。

- a) 待测烟气中水蒸气体积分数测量装置与参比测试方法同步测量烟气中水蒸气体积分数,由数据采集器每分钟记录1个烟气中水蒸气体积分数测量装置累积测量值,连续记录至参比方法测量结束。
- b) 取同一时间区间内(一般用参比方法一个样品的测量时间)参比方法与烟气中水蒸气体积分数测量装置测量平均值组成一个数据对,每天至少获得5个有效数据对;当多于5个时可适当舍去1个~2个数据对,宜报告记录全部数据对,包括舍去的数据对和舍弃原因。
- c) 准确度计算,将每天参比方法测量值与烟气中水蒸气体积分数测量装置测量值数据对的平均值进行比较,计算两者的绝对误差。
- d) 采用氧传感器通过测量烟气含氧量计算得到烟气中水蒸气体积分数的测量装置,其氧传感器首先根据G.2.2~G.2.5的检测方法检测氧气的各项指标;合格后,再根据G.4中a)~c)进行湿度准确度的检测,烟气中水蒸气体积分数的计算方法见公式(G.7)。

$$X_{sw} = \left(1 - \frac{C'_{O_2}}{C_{O_2}} \right) \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (G.7)$$

式中:

X_{sw} ——烟气中水蒸气体积分数,%;

C'_{O_2} ——湿烟气中氧气的体积分数,%;

C_{O_2} ——干烟气中氧气的体积分数,%。

G.4 烟气流速监测单元现场检测方法

G.4.1 流速测量的参比方法

当采样断面与上游方向弯头、阀门、变径管的距离大于或等于4倍烟道直径或当量直径,以及与下游方向上述部件的距离大于或等于2倍烟道直径或当量直径处时,宜按GB/T 16157中的烟气流速测定方法执行;若采样位置无法满足上述条件或采样断面气流不稳定,宜采用DL/T 2376或其他国家、行业发布的三维皮托管标准方法作为参比方法测定烟气流速。

G.4.2 速度场系数精密度

烟气流速监测单元速度场系数精密度的现场检测方法如下。

- a) 由参比方法测量断面烟气平均流速和同时间区间烟气流速监测单元测量断面某一固定点或线上的烟气平均流速,速度场系数根据公式(G.8)计算:

$$K_v = \frac{F_s}{F_p} \times \frac{\bar{V}_s}{\bar{V}_p} \quad \dots \dots \dots \quad (G.8)$$

式中：

K_v ——速度场系数；

F_s ——参比方法测量断面的横截面积,单位为平方米(m^2)；

F_p ——烟气流速监测单元测量断面的横截面积,单位为平方米(m^2)；

\overline{V}_s ——参比方法测量断面的平均流速,单位为米每秒(m/s)；

\overline{V}_p ——烟气流速监测单元测量断面的流速,单位为米每秒(m/s)。

- b) 待测烟气流速监测单元与参比测试方法同步测量烟气流速,由数据采集器每分钟记录1个流速监测单元累积测量值,连续记录至参比方法测量结束。
- c) 取同一时间区间内(一般用参比方法一个样品的测量时间)参比方法与烟气流速监测单元测量平均值组成一个数据对,计算速度场系数。
- d) 现场检测初检期间每天至少获得5个速度场系数,计算速度场系数日平均值 $\overline{\overline{K}_v}$,当数据多于5个时可舍去1个~2个数据,宜报告所有的数据,包括舍去的数据和原因。重复测试至少4 d,根据公式(G.9)计算速度场系数日均值的平均值 $\overline{\overline{K}_v}$ 。

$$\overline{\overline{K}_v} = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{K}_{vi}}{n} \quad \text{(G.9)}$$

式中：

$\overline{\overline{K}_v}$ ——检测期间测试速度场系数日均值的平均值；

\overline{K}_{vi} ——每天获得速度场系数的日均值；

i ——测试每天的序号($i=1 \sim n$)；

n ——检测天数(n 大于或等于4)。

- e) 根据公式(G.10)和公式(G.11)计算速度场系数精密度 C_v 。

$$C_v = \frac{S}{\overline{\overline{K}_v}} \times 100 \quad \text{(G.10)}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\overline{K}_{vi} - \overline{\overline{K}_v})^2}{n-1}} \quad \text{(G.11)}$$

式中：

C_v ——速度场系数精密度, %；



S ——检测期间测试速度场系数日均值的标准偏差,单位为米每秒(m/s)。

G.4.3 准确度

烟气流速监测单元准确度的现场检测方法如下：

- a) 现场检测期间,需进行准确度检测；
- b) 将G.4.2获得的符合6.3.4.2性能指标的速度场系数平均值 $\overline{\overline{K}_v}$,输入烟气流速监测单元参数设置,对烟气流速监测单元测量结果进行修正；
- c) 检测过程同G.4.2中b),至少获得5个有效数据对;当多于5个时可适当舍去1个~2个数据对,宜报告记录全部数据对,包括舍去的数据对和舍弃原因；
- d) 准确度计算,将每天参比方法测量值与输入速度场系数后的烟气流速监测单元测量值数据对的平均值进行比较,计算两者的相对误差。

附录 H
(资料性)
监测系统不确定度评定示例

H.1 概述

本示例根据烟气流场和烟气参数调查结果选取合适的锅炉碳排放在线监测系统，并在安装前根据流场调查烟气流速尽量高的工况下对该套锅炉碳排放在线监测系统进行不确定度评定，不确定度评定来源主要考虑了监测系统组成单元的B类不确定度，实际安装后的不确定度评定还需考虑安装环境、取样的代表性等影响因素引起的不确定度。

某350 MW燃煤火电锅炉计划安装位置的烟气流场和烟气参数调查结果如下：

- 监测位置烟囱直径为5 m；
- 烟气温度为70 °C；
- 烟气流速为18 m/s；
- 烟气静压为-160 Pa；
- 烟气成分：O₂体积分数为4%（干基）、CO₂体积分数为16.5%（干基）、水蒸气体积分数为10%；
- 大气压力为101 000 Pa。

由上述参数，根据附录A计算可得：

实际状态湿烟气体积流量： $Q_{sh} = 60 \times F \times \overline{V}_{sh} = 21\ 205.75\ m^3/min$ 。

标准状态干烟气流量： $Q_{snh} = Q_{sh} \times \frac{273}{273+t_s} \times \frac{B_a + P_s}{101\ 325} \times \frac{100 - X_{sw}}{100} = 15\ 117.53\ m^3/min$ 。

标准状态干烟气条件下CO₂的质量浓度 $C_{sn} = C_s \times \frac{44}{22.4} \times 10^{-2} = 0.324\ kg/m^3$ 。

锅炉分钟碳排放量： $G_h = C_{sn} \times Q_{snh} = 4\ 900\ kg/min$ 。

根据上述调查结果选取的锅炉碳排放在线监测系统的测量方法和性能指标见表H.1。

表 H.1 锅炉碳排放监测系统测量方法

序号	项目	测量方法	测量范围	性能指标
1	烟气温度	K型热电偶	-50 °C~200 °C	绝对误差在±1.5 °C以内
2	烟气流速	超声波法	0 m/s~40 m/s	1.0 级
3	CO ₂ 体积分数	抽取式非分散红外吸收法	0%~20%	见表 H.2
4	O ₂ 体积分数	抽取式氧化锆法	0%~25%	见表 H.3
5	水蒸气体积分数	阻容法	0%~20%	相对误差在±8.0%以内
6	烟气压力	压力传感器	(0~±4 000)Pa	绝对误差在±1.0%FS以内
7	大气压力	压力传感器	(50~130)kPa	绝对误差≤500 Pa

H.2 二氧化碳和氧气体积分数监测单元性能特征的不确定度评定

H.2.1 原则

烟气成分监测单元性能特征的不确定度评定模型方程以及不确定度分量的计算与分析仪的测量值

有关, CO_2 含量和 O_2 含量以体积分数(%)表示。某一性能特征对标准不确定度影响的分量计算如下:

a) 如果极限值以零为中心对称分布则不确定分量按矩形分布根据公式(H.1)进行计算;

式中：

$u(x_j)$ ——性能特征的标准不确定度；

$\Delta x_{j,p}$ ——性能特征的测定值。

b) 性能特征的值即为测定结果，则测定结果即认为是不确定度贡献。例如，对于性能特征中的“实验室中零点的重复性标准偏差”和“实验室中量程点的重复性标准偏差”，属于后者，即性能特征的值即为测定结果，测定结果即认为是不确定度贡献。而对于其他的性能特征，则属于前者，为极限值，以零为中心对称分布，则根据公式(H.1)计算不确定度分量。

H.2.2 二氧化碳和氧气体积分数监测单元的不确定度分量计算结果

SZ 在对二氧化碳和氧气体积分数监测单元的不确定度分量进行不确定评定前,需要先根据附录 F 对二氧化碳和氧气体积分数监测单元的性能指标进行检测。使用抽取式非分散红外吸收法进行 CO₂ 含量测量的监测单元的性能特征检测结果见表 H.2。使用氧化锆法进行 O₂ 含量测量的监测单元的性能特征检测结果见表 H.3。

表 H.2 抽取式非分散红外吸收法进行二氧化碳体积分数监测单元的性能特征

序号	项目	性能指标	抽取式非分散红外吸收法
1	测量范围	—	0%~20%(体积分数)
2	仪器响应时间	≤90 s(抽取式)	53 s
3	重复性	相对标准偏差≤2%	1.3%
4	线性误差	在满量程的±2%以内	0.6%
5	24 h 零点漂移	在满量程的±2%以内	1.00%
6	24 h 量程漂移	在满量程的±2%以内	-0.4%
7	一周零点漂移	在满量程的±3%以内	1.3%
8	一周量程漂移	在满量程的±3%以内	1.3%
9	环境温度变化的影响	在满量程的±3%以内	0.5%
10	进样流量变化的影响	在满量程的±2%以内	0.1%
11	供电电压变化的影响	在满量程的±2%以内	-0.1%
12	干扰成分的影响	在满量程的±4%以内	0.5%
13	振动的影响	在满量程的±2%以内	-0.6%

表 H.3 氧化锆法进行氧气体积分数监测单元的性能特征

序号	项目	性能指标	抽取式氧化锆法
1	测量范围	—	0%~25%(体积分数)
2	仪器响应时间	≤90 s(抽取式)	65 s
3	重复性	相对标准偏差≤1%	0.56%

表 H.3 氧化锆法进行氧气体积分数监测单元的性能特征(续)

序号	项目	性能指标	抽取式氧化锆法
4	线性误差	在满量程的±1%以内	0.55%
5	24 h 零点漂移	在满量程的±1%以内	0.45%
6	24 h 量程漂移	在满量程的±1%以内	0.13%
7	一周零点漂移	在满量程的±1%以内	0.16%
8	一周量程漂移	在满量程的±1%以内	0.19%
9	环境温度变化的影响	在满量程的±1.5%以内	0.23%
10	进样流量变化的影响	在满量程的±1%以内	0.03%
11	供电电压变化的影响	在满量程的±1%以内	-0.06%
12	干扰成分的影响	在满量程的±2%以内	0.14%
13	振动的影响	在满量程的±1%以内	-0.25%

使用二氧化碳和氧气体积分数测量的锅炉碳排放监测系统的性能特征的不确定度评定计算结果见表 H.4。

表 H.4 二氧化碳和氧气体积分数测量监测单元性能特征的不确定度评定

序号	项目	标准不确定度分量	CO ₂	O ₂
1	重复性	$u_{r,s}$	$1.3\% \times 20 = 0.26$	$0.56\% \times 25 = 0.14$
2	线性误差	u_{lof}	$\frac{0.6\% \times 20}{\sqrt{3}} = 0.07$	$\frac{0.55\% \times 25}{\sqrt{3}} = 0.08$
3	24 h 零点漂移	$u_{d,0}$	$\frac{1.0\% \times 20}{\sqrt{3}} = 0.12$	$\frac{0.45\% \times 25}{\sqrt{3}} = 0.06$
4	24 h 量程漂移	$u_{d,s}$	$\frac{-0.4\% \times 20}{\sqrt{3}} = -0.05$	$\frac{0.13\% \times 25}{\sqrt{3}} = 0.02$
5	一周零点漂移	$u_{d,w,0}$	$\frac{1.3\% \times 20}{\sqrt{3}} = 0.15$	$\frac{0.16\% \times 25}{\sqrt{3}} = 0.02$
6	一周量程漂移	$u_{d,w,s}$	$\frac{1.3\% \times 20}{\sqrt{3}} = 0.15$	$\frac{0.19\% \times 25}{\sqrt{3}} = 0.03$
7	环境温度变化的影响	$u_{inf,t}$	$\frac{0.5\% \times 20}{\sqrt{3}} = 0.06$	$\frac{0.23\% \times 25}{\sqrt{3}} = 0.03$
8	进样流量变化的影响	$u_{inf,f}$	$\frac{0.1\% \times 20}{\sqrt{3}} = 0.01$	$\frac{0.03\% \times 25}{\sqrt{3}} = 0.00$
9	供电电压变化的影响	$u_{inf,V}$	$\frac{-0.1\% \times 20}{\sqrt{3}} = -0.01$	$\frac{-0.06\% \times 25}{\sqrt{3}} = -0.01$
10	干扰成分的影响	u_{i,CO_2}	$\frac{0.5\% \times 20}{\sqrt{3}} = 0.06$	$\frac{0.14\% \times 25}{\sqrt{3}} = 0.06$
11	振动的影响	$u_{inf,vib}$	$\frac{-0.6\% \times 20}{\sqrt{3}} = -0.07$	$\frac{-0.25\% \times 25}{\sqrt{3}} = -0.04$

H.2.3 二氧化碳和氧气体积分数监测单元性能特征的合成和扩展不确定度计算

H.2.3.1 概述

合成标准不确定度 $u(C_s)$ 和扩展不确定度 $U(C_s)$ 计算如公式(H.2)和公式(H.3)所示：

$$u(C_s) = \sqrt{u_{r,s}^2 + u_{lof}^2 + u_{d,0}^2 + u_{d,s}^2 + u_{d,w,0}^2 + u_{d,w,s}^2 + u_{inf,t}^2 + u_{inf,f}^2 + u_{inf,V}^2 + u_{i,CO_2}^2 + u_{inf,vib}^2} \quad \text{.....(H.2)}$$

$$U(C_s) = k \times u(C_s) \quad \text{.....(H.3)}$$

式中：

k ——包含因子($=2$)；

$u(C_s)$ ——合成标准不确定度；

$U(C_s)$ ——扩展不确定度。

H.2.3.2 二氧化碳和氧气体积分数监测单元性能特征的不确定度评定

根据表 H.4 所列的每个标准不确定度分量的数值,用公式(H.2)计算 CO₂ 含量监测单元合成标准不确定度 $u(C_s)$:

$$\begin{aligned} u(C_s) &= \sqrt{0.26^2 + 0.07^2 + 0.12^2 + (-0.05)^2 + 0.15^2 + 0.15^2 + 0.06^2 + 0.01^2 + (-0.01)^2 + 0.06^2 + (-0.07)^2} \% \\ &= \sqrt{0.14} \% = 0.38 \% \end{aligned}$$

因此,二氧化碳体积分数监测单元性能特征的合成标准不确定度 $u(C_s)$ 为 0.38%(体积分数),该值为最低测量范围上限的 1.9%。

因此,二氧化碳体积分数监测单元性能特征的扩展不确定度 $U(C_s)$ 计算为 $2 \times 0.38 = 0.76\%$ (体积分数),该值为最低测量范围上限的 3.8%。

同理求得,氧气体积分数监测单元性能特征的合成标准不确定度 $u(O_s)$ 为 0.19%(体积分数),该值为最低测量范围上限的 0.76%;氧气体积分数监测单元性能特征的扩展不确定度 $U(O_s)$ 计算为 $2 \times 0.19 = 0.38\%$ (体积分数),该值为最低测量范围上限的 1.5%。

H.3 烟气流量监测单元的不确定度评定

H.3.1 概述

本示例采用超声波法测量烟气流速,因此烟气流量监测单元的不确定度分量主要包括:烟气流速测量的不确定度、烟气温度测量的不确定度、烟气中水蒸气体积分数测量的不确定度和烟气绝对压力测量的不确定度。

H.3.2 烟气流速(V_s)的标准不确定度

本案例中烟气流量监测单元的流速监测方法为超声波法,与超声波法测量烟气流速相关的不确定度取决于:

- a) 测量设备的准确度等级(包括传感器和显示仪器);
- b) 所用传感器的分辨率;
- c) 所用传感器的声速偏差;
- d) 所用传感器各声道间的最大声速差;
- e) 测量设备的时间检出限。

以上所列各不确定度影响因素中除第一项,其他各项在计算中可以被忽略(本文件中接下来的不确

定度评定仅考虑监测设备校准/检定的不确定度)。超声波烟气流速监测单元校准/检定的准确度等级为1.0级,测量量程为0 m/s~40 m/s,可知超声波烟气流速监测单元的最大允许误差为0.4 m/s,对应的标准不确定度 $u(V_s)=\frac{0.4}{2}=0.2$ m/s。

H.3.3 烟气温度(t_s)的标准不确定度

与温度测量相关的不确定度取决于:

- a) 测量设备的校准不确定度(包括传感器和显示仪器);
- b) 所用温度传感器的分辨率;
- c) 测量设备的漂移;
- d) 测量设备的线性度;
- e) 测量设备的滞后性。

以上所列各不确定度影响因素中除第一项,其他各项在计算中可以被忽略。根据表H.1可知烟气温度监测单元校准的扩展不确定度为±1.5 °C,求得烟气温度监测单元校准的标准不确定度 $u(t_s)=\frac{1.5}{2}=0.75$ °C。

H.3.4 烟气中水蒸气体积分数(X_{sw})的标准不确定度

根据表H.1可知烟气中水蒸气体积分数测量的相对误差在±8.0%以内,因此烟气中水蒸气体积分数监测单元校准的相对扩展不确定度为8.0%,对应的相对标准不确定度 $u_{rel}(X_{sw})=\frac{8.0\%}{2}=4.0\%$,标准不确定度 $u(X_{sw})=4.0\%\times 10\%=0.4\%$

H.3.5 烟道内绝对压力(P_c)的标准不确定度

烟道内绝对压力的标注不确定度根据公式(H.4)计算:

$$u(P_c)=\sqrt{u^2(B_a)+u^2(P_s)} \quad \dots \quad (\text{H.4})$$

根据表H.1可知:大气压力测量的不确定度 $u(B_a)=250$ Pa;烟气压力测量的不确定度 $u(P_s)=20$ Pa。

根据公式(H.4)求得烟道内绝对压力的标准不确定度 $u(P_c)=\sqrt{u^2(B_a)+u^2(P_s)}=\sqrt{250^2+20^2}=250.8$ Pa。

H.3.6 实际状态烟气流量的标准不确定度

由于是对碳排放监测系统的不确定度评定,因此在此不考虑烟道尺寸测量引入的不确定度。

$$u^2(Q_{sj})=\frac{\partial f^2}{\partial V_s} \times u^2(V_s)=(60 \times F)^2 \times u^2(V_s) \quad \dots \quad (\text{H.5})$$

求得实际状态烟气流量的标准不确定度 $u(Q_{sj})=235.62$ m³/min。

H.3.7 标准状态干烟气的标准不确定度

标准状态干烟气流量根据公式(H.6)计算:

$$Q_{snj}=Q_{sj} \times \frac{273}{273+t_s} \times \frac{P_c}{101.325} \times \frac{100-X_{sw}}{100} \quad \dots \quad (\text{H.6})$$

标准状态干烟气流量标准不确定度根据公式(H.7)计算:

$$\frac{u^2(Q_{snh})}{Q_{snh}^2}=\frac{u^2(Q_{sh})}{Q_{sh}^2}+\frac{u^2(P_c)}{P_c^2}+\frac{u^2(X_{sw})}{(100-X_{sw})^2}+u^2(t_s) \times (273+t_s)^2 \quad \dots \quad (\text{H.7})$$

求得：

标准状态干烟气流量的标准不确定度 $u(Q_{snj}) = 187.71 \text{ m}^3/\text{min}$ ；

标准状态干烟气流量的扩展不确定度 $U_c(Q_{snj}) = \pm 375.42 \text{ m}^3/\text{min}, k = 2$ ；相对扩展不确定度 $U_{c,rel}(Q_{snj}) = \pm 2.48\%, k = 2$ 。

H.4 碳排放量的不确定度评定

根据 H.1 可知标准状态干烟气条件下 CO_2 的质量浓度 $C_{sn} = C_s \times \frac{44}{22.4} \times 10^{-2} = 0.324 \text{ kg/m}^3$ 。

标准状态干烟气条件下 CO_2 的质量浓度标准不确定度根据公式(H.8)计算：

$$u^2(C_{sn}) = \frac{\partial f^2}{\partial C_s} \times u^2(C_s) = \left(\frac{44}{22.4} \times 10^{-2} \right)^2 \times u^2(C_s) \quad \dots \quad (\text{H.8})$$

求得：

标准状态干烟气条件下 CO_2 的质量浓度标准不确定度 $u(C_{sn}) = 0.00746 \text{ kg/m}^3$ ；

根据 H.1 可知锅炉分钟碳排放量： $G_j = C_{sj} \times Q_{snj} = 4900 \text{ kg/min}$ 。

$$u^2(G_j) = \frac{\partial f^2}{\partial Q_{snj}} \times u^2(Q_{snj}) + \frac{\partial f^2}{\partial C_{sn}} \times u^2(C_{sn}) = C_{sn}^2 \times u^2(Q_{snj}) + Q_{snj}^2 \times u^2(C_{sn})$$

求得：

碳排放量的标准不确定度为 $u(G) = 112.85 \text{ kg/min}$ ；

碳排放量的扩展不确定度为 $U_c(G) = 225.70 \text{ kg/min}, k = 2$ ；

碳排放量的相对扩展不确定度为 $U_{c,rel}(G) = \pm 4.6\%, k = 2$ 。

附录 I
(规范性)
数据采集处理和传输系统

I.1 概述

监测系统具有数据采集、处理、存储、表格和图文显示、故障警告、安全管理和打印等功能；系统设置通信接口，用于数据输出和通信功能。

I.2 数据采集和处理

I.2.1 由监测系统的控制功能协调整个系统的时序，系统能够将采集和记录的实时数据自动处理为1 min数据和1 h数据。

I.2.2 至少每5 s采集一组系统测量的实时数据。主要包括二氧化碳体积分数或质量浓度、氧气体积分数、水蒸气体积分数、烟气流速、烟气温度、烟气压力、大气压力。

I.2.3 至少每1 min记录存储一组系统测量的分钟数据，数据为该时段的平均值。主要包括二氧化碳体积分数或质量浓度、氧气体积分数、水蒸气体积分数、烟气流速和流量、烟气温度、烟气压力、大气压力、锅炉分钟碳排放量和锅炉负荷。若测量结果有湿/干基不同转换数值，则同时显示记录该测量值湿基和干基的测量数据。

I.2.4 小时数据包含本小时内至少45 min的分钟有效数据，数据为该时段的平均值。主要包括二氧化碳体积分数或质量浓度、氧气体积分数、水蒸气体积分数、烟气流量、烟气温度、烟气压力、大气压力、锅炉小时碳排放量和锅炉负荷。小时数据记录表即为日报表。

I.2.5 日数据包含本日至少20 h的小时有效数据，数据为该时段的平均值。主要包括二氧化碳体积分数或质量浓度、氧气体积分数、水蒸气体积分数、烟气流量、烟气温度、烟气压力、大气压力、锅炉日碳排放量和锅炉负荷。日数据记录表即为月报表。

I.2.6 月数据包含本月至少25 d(其中二月份至少23 d)的日有效数据，数据均为该时段的平均值。主要包括二氧化碳体积分数或质量浓度、氧气体积分数、水蒸气体积分数、烟气流量、烟气温度、烟气压力、大气压力、锅炉月碳排放量和锅炉负荷等。月数据记录表即为年报表。

I.2.7 数据报表中宜统计记录当日、当月、当年各指标数据的最大值、最小值和平均值。

I.2.8 监测系统日报表、月报表和年报表中的二氧化碳浓度和烟气流量为标准状态值，且干湿基状态一致。

I.3 数据格式

监测系统记录处理实时数据和定时段数据时，数据格式宜符合表I.1和表I.2。

表 I.1 监测系统数据格式一览表

序号	项目名称	单位	小数位
1	二氧化碳体积分数	—	2
2	二氧化碳质量浓度	kg/m ³	3
3	氧气体积分数	%	2
4	水蒸气体积分数	%	2

表 I.1 监测系统数据格式一览表 (续)

序号	项目名称	单位	小数位
5	烟气流速	m/s	2
6	烟气温度	℃	1
7	烟气压力	Pa(或 kPa)	0(或 2)
8	大气压力	kPa	1
9	烟道截面积	m ²	2
10	锅炉分钟碳排放量	kg/min	0
11	锅炉小时碳排放量	t/h	3
12	锅炉日碳排放量	t/d	3
13	锅炉月碳排放量	t/m	3
14	锅炉全年碳排放总量	t	3
15	分钟烟气流量	m ³ /min	2
16	小时烟气流量	m ³ /h	0
17	日烟气流量	×10 ⁴ m ³ /d	3
18	锅炉负荷率	—	1

表 I.2 监测系统数据时间标签一览表

数据时间类型	时间标签	定义	描述与示例
实时数据	YYYYMMDDHHMMSS	时间标签为数据采集的时刻,数据为相应时刻采集的测量瞬时值	20140628130815 为 2014 年 6 月 28 日 13 时 8 分 15 秒的测量瞬时值
分钟数据	YYYYMMDDHHMM	时间标签为测量开始时间,数据为此时刻后一分钟的测量平均值	201406281308 为 2014 年 6 月 28 日 13 时 8 分 00 秒至 13 时 9 分 00 秒之间的测量平均值
小时数据	YYYYMMDDHH	时间标签为测量开始时间,数据为此时刻后一小时的测量分钟平均值	2014062813 为 2014 年 6 月 28 日 13 时 00 分 00 秒至 14 时 0 分 00 秒之间的测量平均值
日数据	YYYYMMDD	时间标签为测量开始时间,数据为当日 0 时至 24 时(第二天 0 时)的测量小时平均值	20140628 为 2014 年 6 月 28 日 0 时 00 分 00 秒至 29 日 0 时 00 分 00 秒的测量平均值
月数据	YYYYMM	时间标签为测量开始时间,数据为当月 1 日至最后一日的测量日平均值	201406 为 2014 年 6 月 1 日 1 时至 30 日的测量平均值

I.4 数据状态标记

监测系统在分钟数据记录表和小时数据记录表的各数据组后面给出系统和(或)锅炉运行状态标记。

分钟数据标记方法:“N”表示系统各检测参数正常,“F”表示锅炉停运,“St”表示锅炉启炉过程,“Sd”表示锅炉停炉过程,“B”表示锅炉闷炉,“C”表示校准,“M”表示维护保养,“Md”表示系统无数

据,“D”表示系统故障。

小时数据标记方法如下:

- N ——本小时内系统各检测参数正常,检测时间大于 45 min;
- F ——本小时内锅炉处于停运状态,其时间大于或等于 45 min;
- St ——本小时内锅炉处于启炉状态,其时间大于或等于 45 min;
- Sd ——本小时内锅炉处于停炉状态,其时间大于或等于 45 min;
- B ——本小时内锅炉处于闷炉状态,其时间大于或等于 45 min;
- C ——本小时内系统处于校准状态,其时间大于 15 min;
- M ——本小时内系统处于维护、修理状态,其时间大于 15 min;
- Md ——本小时内系统无数据;
- D ——本小时内系统处于故障、断电状态,其时间大于 15 min。

对于 N、F、St、Sd 和 B 状态,均表明系统在本小时内处于正常工作状态;对于 C、M、D 和 Md 状态,则表明系统在本小时内处于非正常工作状态。

数据标记优先级顺序从高到低依次为 F→D→M→C→St、Sd、B→N。数据审核标记(针对小时均值)实测数据计算、手工数据替代修约数据。

I.5 数据处理

I.5.1 生成定时段数据组

系统能够将采集和记录的实时数据自动处理为 1 min 数据组和整点 1 h 数据组。

1 min 数据组包括以下项目:时间标签、二氧化碳体积分数(或质量浓度)、氧气体积分数、水蒸气体积分数、热态流量、标准状态烟气流量、烟气流速、烟气温度、烟气压力和大气压力(可输入当地年平均值)的 1 min 数据平均值和分钟碳排放量。在 1 min 数据组后面给出系统和(或)锅炉运行状态标记。

整点 1 h 数据组包括以下项目:时间标签、二氧化碳体积分数(或质量浓度)、氧气体积分数、水蒸气体积分数、烟气流速、烟气温度、烟气压力、烟气流量的 1 h 数据平均值和小时碳排放量。在 1 h 数据组后面给出系统和(或)锅炉运行状态标记。

数据时间标签格式根据表 I.2 执行。

I.5.2 其他

数据处理的其他功能如下:

- a) 系统可以接收机组接入锅炉停运的开关信号,当接收到锅炉处于停运状态信号时,二氧化碳浓度与流速设置为零;
- b) 当二氧化碳检测值高于系统测量上限时,实时和 1 min 数据组的质量浓度值记录为仪器测量上限;
- c) 系统采集和处理数据时,二氧化碳浓度和烟气流量为标准状态值,且干湿基状态一致。

I.6 数据存储

系统可存储定时段数据和实时数据,其中 1 min 数据存储 12 个月以上;1 h 数据存储 36 个月以上;实时数据存储时间可根据需要设定。系统存储的定时段数据能够自动在非系统磁盘中备份。

I.7 数据显示、查询和文档管理

系统的显示和操作界面均为简体中文。

系统能够定时显示二氧化碳排放数据、相关烟气参数;可查询和导出设定期间的定时段数据;能够

自动生成 1 h 数据构成的月数据曲线图。

软件具备运行参数设置功能,能够查询和修改设置相关参数,主要包括:

- a) 系统运行参数:日期、时间、地点、锅炉排放口的尺寸和截面积、二氧化碳浓度与烟气参数测量量程以及皮托管系数等;
- b) 系统维护参数:系统反吹、维护的时间间隔设置、耗材和部件的维护周期等;
- c) 系统测量参数:烟气流速速度场系数等。

系统能够生成并保存《烟气二氧化碳排放连续监测小时平均值日报表》《烟气二氧化碳排放连续监测日平均值月报表》《烟气二氧化碳排放连续监测月平均值季报表》和《烟气二氧化碳排放连续监测月平均值年报表》;能够生成并保存运行操作记录报告,其格式不做统一规定。

系统具有支持打印以上数据、图表和报表的功能。

I.8 数据输出和通信

数据输出和通信宜按照 HJ 212 执行。

I.9 安全管理

安全管理宜按照 HJ 75 执行。

参 考 文 献

- [1] DL/T 2376 火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范
 - [2] HJ 75—2017 固定污染源烟气(SO_2 、 NO_x 、颗粒物)排放连续监测技术规范
 - [3] HJ 76—2017 固定污染源烟气(SO_2 、 NO_x 、颗粒物)排放连续监测系统技术要求及检测方法
 - [4] HJ 870—2017 固定污染源废气 二氧化碳的测定 非分散红外吸收法
 - [5] JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示
-



