JJF

**广 东 省 地 方 计 量 技 术 规 范**

JJF(粤)XXX－XXXX

烟气排放连续监测系统流量计

计量技术规范

**Metrological Technical Specification for Flowmeters used in Continuous Emission Monitoring System**

（审定稿）

XXXX-XX-XX发布 XXXX-XX-XX实施

 **广东省市场监督管理局** 发 布

|  |  |
| --- | --- |
| 烟气排放连续监测系统流量计计量技术规范 | JJF(粤)XXX-XXXX |
| **Metrological Technical Specification for Flowmeters used in Continuous Emission Monitoring System** |

归 口 单 位：广东省碳达峰碳中和计量技术委员会

主要起草单位：广东省计量科学研究院

参加起草单位：中国计量科学研究院

广州钛尔锐科技有限公司

广东大唐国际雷州发电有限责任公司

广东粤电靖海发电有限公司

本规程委托广东省碳达峰碳中和计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

目 录

引言 II

1 范围 3

2 引用文件 3

3 术语和计量单位 3

3.1 术语 3

3.2 计量单位 3

4 概述 4

5 计量特性 4

5.1 示值误差 4

5.2 重复性 4

6 校准条件 4

6.1 环境条件 4

6.2 校准用设备 4

7 校准项目和校准方法 5

7.1 校准前准备 5

7.2 流量计示值误差 5

7.3 重复性 7

7.4 速度场系数 7

7.5 校准结果的表达 8

7.6 复校时间间隔 8

附录A 测量点布点方法及烟气轴向流速权重系数 9

附录B 流速标准装置流量计算方法及状态转换方法 11

附录C 烟道截面面积测量方法 14

附录D 校准原始记录参考格式 15

附录E 校准证书内页参考格式 16

附录F 测量不确定度评定示例 17

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制定的基础性系列规范。

本规范在编制中充分考虑了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》、JJG 518《皮托管》、JJG 1030《超声流量计》和HJ/T 397《固定源废气监测技术规范》的部分技术指标。

本规范为首次发布。

烟气排放连续监测系统流量计计量技术规范

1 范围

本规范适用于安装在水力直径大于300 mm的圆形或矩形烟道中烟气排放连续监测系统流量计的现场校准。

2 引用文件

本规程引用了下列文件：

JJF 1004 流量计量名词术语及定义

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

DL/T 2376 火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范

HJ 75 固定污染源烟气（SO2、NOx、颗粒物）排放连续监测技术规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规程；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规程。

3 术语和计量单位

3.1 术语

3.1.1 轴向速度 axial velocity

烟气气流平行于烟道轴线的速度矢量。

[来源：DL/T 2376，3.16]

3.1.2 俯仰角 pitch angle

烟道轴线与烟气流速矢量在俯仰面上的投影之间的夹角。

注：俯仰面为采样线和烟道轴线确定的平面。

[来源：DL/T 2376，3.14]

3.1.3 偏航角 yaw angle

烟道轴线与烟气流速矢量在偏航面上的投影之间的夹角。

注：偏航面为通过某一采样点垂直于采样线的平面。

[来源：DL/T 2376，3.15]

3.1.4 速度场系数 velocity field coefficient

流速标准装置与烟气排放连续监测系统同步测量烟气流量，流速标准装置测量的平均流量与同时间区间且相同状态的烟气排放连续监测系统测量的平均流量的比值。

3.2 计量单位

3.2.1 长度单位：米，符号m；或毫米，符号mm。

3.2.2 面积单位：平方米，符号m2。

3.2.3 角度单位：度，符号°。

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m3/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℃；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%或μmol/mol；或毫克每立方米，符号：mg/m3。

4 概述

烟气排放连续监测系统流量计（以下简称流量计）是烟气排放连续监测系统用于监测烟道内烟气流量的测量设备，按测量原理可分为皮托管流量计、矩阵式流量计、超声流量计等类型。流量计测量方法通常分为点速度面积法和线速度面积法，其中，烟气皮托管流量计采用点速度面积法，烟气矩阵式流量计类似于点速度面积法，烟气超声流量计采用线速度面积法。

5 计量特性

流量计示值误差通常用相对误差表示，其计量特性见表1。

表1 流量计计量特性

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 准确度等级 | 示值误差 | 重复性 |
| 6.0 | ±6.0% | 不应超过相应准确度等级的示值误差绝对值的1/3 |
| 8.0 | ±8.0% |
| 10.0 | ±10.0% |

注：以上各项指标不适用于合格性判定，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

温度：（0~40）℃；

相对湿度：≤95%。

6.2 校准用设备

主标准器应满足表2要求，配套设备应满足表3要求。

表2 主标准器一览表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 设备名称 | 技术要求 |
| 1 | 流速标准装置 | （1）测量范围：（1~30）m/s（2）最大允许误差：优于被校流量计最大允许误差的1/2 |

表3 配套设备一览表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 设备名称 | 技术要求 |
| 1 | 激光测距仪 | （1）测量范围：（0.3~100）m（2）最大允许误差：±2 mm |
| 2 | 钢卷尺 | （1）测量范围：（0~5）m（2）最大允许误差：±0.5 mm |
| 3 | 烟气湿度仪 | （1）测量范围：含湿量（0~40）%（2）最大允许误差：±10%（相对误差） |
| 4 | 烟气分析仪 | （1）测量范围：O2: （0~25）%CO: （0~10000）μmol/molCO2:（0~50）%NO: （0~3000）μmol/molNO2: （0~500）μmol/molN2O: （0~500）μmol/molSO2: （0~3000）μmol/mol（2）浓度最大允许误差：±5%（相对误差） |

7 校准项目和校准方法

7.1 校准前准备

7.1.1 检测孔位置检查

a）按表4确认流速标准装置安装处测量截面检测孔数量。

b）按表4确认流速标准装置安装处上下游直管段长度。

1. 表4 测量位置和检测孔要求

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 截面形状 | 直管段长度 | 检测孔数量 | 布置要求 |
| 圆形 | 上游直管段长度≥6倍直径且下游直管段长度≥3倍 | ≥1 | / |
| 上游直管段长度≥2倍直径且下游直管段长度≥0.5倍 | ≥2 | 检测孔轴线夹角为80°~100° |
| 矩形 | 上游直管段长度≥2倍直径且下游直管段长度≥0.5倍 | ≥1（边长≤0.32m）；≥2（0.32m＜边长≤1.34m）；≥3（1.34m＜边长≤2.25m）；≥4（2.25m＜边长≤4m）；≥5（4m＜边长≤5m）；≥6（5m＜边长≤6m）；≥7（6m＜边长≤7m）；≥8（7m＜边长≤8m）；≥9（8m＜边长≤9m）；≥10（9m＜边长≤10m）； | 均匀分布 |

7.1.2 测量点位置确定

按照GB/T 16157 4.2.4的布点方法确定测量点位置及数量，具体方法见附录A。

7.2 流量计示值误差

7.2.1 烟道截面平均轴向流速测量

7.2.1.1 校准步骤

在测量过程中保持烟道流速波动小于5%。

a）对于每个检测孔，测量前，将流速标准装置插入烟道中，开机运行5 min后，开始测量。

b）对测量截面上每条测量线的测量点逐次进行流速测量，待流速标准装置示值稳定后，读取流速标准装置上记录的烟气轴向流速，每个测量点重复测量不少于3次，在每个测量点的总测量时间不少于1 min。对于不能自动计算烟气轴向流速的装置，可参考附录B方法进行计算。

c）每组测量结束后，读取被校流量计在测量期间的流量测量数据，计算流量相对标准偏差，相对标准偏差应≤5%，否则该组测量结果无效。

d）按步骤b）~c）重复测量不少于3组。

注：一组测量为完成全部检测孔对应测量线上所有测量点的一组测量。

7.2.1.2 截面平均轴向流速计算

按式（1）计算测量截面平均轴向流速：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （1） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量的测量截面平均轴向流速，m/s； |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量中第*j*个测量点的烟气轴向流速，m/s； |
|  | ——流速标准装置第*j*个测量点烟气轴向流速的权重系数，计算方法见附录A； |
| *m* | ——测量点数量。 |

7.2.2 流量计示值误差计算

a）流速标准装置和流量计的流量值应换算至相同的状态下，换算方法见附录B。

b）流量计示值误差计算方法

按式（2）计算第*i*组测量流量计示值误差，取绝对值最大的作为流量计的示值误差：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （2） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *Ei* | ——第*i*组测量流量计示值误差； |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量平均流量，m3/h； |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量期间被校流量计测量的流量值，m3/h； |
| *A* | ——流速标准装置测量处烟道内截面面积（测量方法见附录C），m2； |
| *A*c | ——被校流量计测量处烟道内截面面积（预设参数），m2； |
|  | ——第*i*组测量流速标准装置平均轴向流速，m/s； |
|  | ——第*i*组测量被校流量计测量截面平均轴向流速，m/s。 |

7.3 重复性

按式（3）计算流量计的重复性：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （3） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——流量计的重复性； |
| （*Ei*）max | ——第*i*组测量流量计示值相对误差的最大值； |
| （*Ei*）min | ——第*i*组测量流量计示值相对误差的最小值； |
| *dn* | ——极差系数。 |

极差系数见表5。

表5 *dn*数值表

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *n* | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| *dn* | 1.13 | 1.69 | 2.06 | 2.33 | 2.53 | 2.70 | 2.85 | 2.97 | 3.08 |

7.4 速度场系数

按式（4）计算第*i*组测量速度场系数：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （4） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *Ki* | ——第*i*组测量速度场系数； |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量平均流量，m3/h； |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量期间被校流量计流量值，m3/h； |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量平均流速，m/s； |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量期间被校流量计截面平均轴向流速，m/s； |
| *A* | ——流速标准装置测量处烟道内截面面积，m2； |
| *A*c | ——被校流量计测量处烟道内截面面积（预设参数），m2。 |

按式（5）计算速度场系数：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （5） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *K* | ——速度场系数； |
| *n* | ——测量组数。 |

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包括以下信息：

1. 标题：“校准证书”；
2. 实验室名称和地址；
3. 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
4. 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
5. 客户的名称和地址；
6. 被校对象的描述和明确标识；
7. 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；
8. 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
9. 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
10. 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
11. 校准环境的描述；
12. 校准结果及其测量不确定度的说明；
13. 对计量技术规范的偏离的说明；
14. 校准证书签发人的签名、职务或等效标识；
15. 校准结果仅对被校对象有效的说明；
16. 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔由使用者根据流量计的使用情况、本身性能等诸因素所决定，推荐复校时间间隔不超过1年。在相邻两次校准期间，如对流量计的检测数据有怀疑或流量计更换主要部件及修理后等，可考虑对流量计重新校准。

附录A
流速标准装置流量计算方法及状态转换方法

A.1 流速标准装置截面平均轴向流速计算

当使用的流速标准装置不能自动计算烟气轴向流速时，按式（A.1）计算测量点轴向流速：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （A.1） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量中第*j*个测量点的烟气轴向流速，m/s； |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量中第*j*个测量点的烟气流速，m/s； |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量中第*j*个测量点的烟气俯仰角，°； |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量中第*j*个测量点的烟气偏航角，°。 |

注：烟气俯仰角及偏航角可根据实际情况参考DL/T 2376-2021附录E等方法进行测量。

按式（A.2）计算测量点烟气流速：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （A.2） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——第*i*组测量中第*j*个测量点的烟气流速，m/s； |
| *dpij* | ——第*i*组测量中第*j*个测量点的烟气动压，Pa； |
| *ρ* | ——烟气密度，kg/m3。 |

按式（A.3）计算测量截面轴向平均轴向流速：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （A.3） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——流速标准装置第*i*组测量的测量截面轴向平均流速，m/s； |
|  | ——流速标准装置第*j*个测量点的烟气轴向流速的权重系数； |
| *n* | ——测量点数量。 |

A.2 流速标准装置流量计算

按式（A.4）计算测量截面流速标准装置流量值：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （A.4） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——流速标准装置流量值，m3/h； |
|  | ——流速标准装置测量截面平均轴向流速，m/s； |
|  | ——烟道截面面积，m2。 |

A.3 烟气密度计算

按式（A.5）计算干烟气分子量：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （A.5） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *M*d | ——干烟气分子量，g/mol； |
| *Bk* | ——第*k*种干烟气中主要组分的体积比，%； |
| *Mk* | ——第*k*种干烟气中主要组分的分子量，g/mol； |
| *q* | ——烟气组分种类数量。 |

按式（A.6）计算烟气分子量：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （A.6） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *M*s | ——烟气分子量，g/mol； |
| *M*d | ——干烟气分子量，g/mol； |
| *B*ws | ——烟气中水蒸气的体积比，%。 |

按式（A.7）计算烟气密度：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （A.7） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *ρ* | ——烟气密度，kg/m3； |
| *P*s | ——流速标准装置测量处烟气静压和大气压的差压，Pa； |
| *B*a | ——检测孔高度的大气压，Pa； |
| *P*sa | ——流速标准装置测量处烟气静压（绝对压力），Pa； |
| *M*s | ——烟气分子量，g/mol； |
| *R* | ——理想气体常数，为8.314J/（mol·K）； |
| *t* | ——流速标准装置测量处烟气温度，℃。 |

A.4 测量截面流量状态转换

在计算速度场系数时，流速标准装置和流量计的量值应换算至相同的状态下。例如将工况下测量截面流量转换为标况下的值，按式（A.8）计算标况下流量值：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （A.8） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——标况下测量流量值，m3/h； |
|  | ——烟气工况下测量流量值，m3/h。 |

如流量计所测轴向平均流速为干基流量，则需将流速标准装置所测流量值也转换为干基流量，按式（A.9）计算干基流量：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （A.9） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——干基流量，m3/h； |
|  | ——烟气工况下测量流量值，m3/h； |
| *B*ws | ——烟气中水蒸气的体积比。 |

附录B
测量点布点方法及烟气轴向流速权重系数

B.1 圆形烟道

1. 将圆形烟道分成适当数量（按表B.1规定）的等面积同心圆环，各测量点选在环各等面积中心线与垂直相交的直线的交点上，如图B.1所示。原则上测量点数量不超过20个。
2. 烟道直径小于0.3m，流速分布比较均匀、对称的，可取烟道中心为测量点。
3. 圆形烟道的烟气轴向流速的权重系数。*p*为测量点个数。

表B.1 圆形烟道分环及测量点数确定

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 烟道直径/m | 等面积圆环数 | 测量直径数 | 测量点个数 |
| ＜0.3 | / | / | 1 |
| 0.3~0.6 | 1~2 | 1~2 | 2~8 |
| 0.6~1.0 | 2~3 | 1~2 | 4~12 |
| 1.0~2.0 | 3~4 | 1~2 | 6~16 |
| 2.0~4.0 | 4~5 | 1~2 | 8~20 |
| ＞4.0 | 5 | 1~2 | 10~20 |



图B.1 圆形烟道测量点分布示意图

B.2 矩形或方形烟道

a）将烟道横截面分成适当数量（按表B.2规定）的等面积小块，以各块中心为测量点，如图B.2所示。原则上测量点数量不超过20个。

b）烟道横截面面积小于0.1m2，流速分布比较均匀、对称的，可取横截面中心作为测量点。

c）矩形烟道的烟气轴向流速的权重系数。*p*为测量点个数。

表B.2 矩形烟道的等面积分块和测量点数

| 烟道截面积/$m^{2}$ | 等面积小块边长度/m | 测量点总数 |
| --- | --- | --- |
| ＜0.1 | ＜0.32 | 1 |
| 0.1~0.5 | ＜0.35 | 1~4 |
| 0.5~1.0 | ＜0.5 | 4~6 |
| 1.0~4.0 | ＜0.67 | 6~9 |
| 4.0~9.0 | ＜0.75 | 9~16 |
| ＞9.0 | ≤1.0 | ≤20 |



图B.2 矩形烟道测量点分布示意图

附录C
烟道截面面积测量方法

烟道截面面积按以下方法测量：

a）确定烟道截面面积测量位置，与流速测量截面位置相同。

b）使用激光测距仪测量烟道远端内壁面到检测孔外沿距离，重复测量10次，取算术平均值。

c）使用钢卷尺测量烟道近端内壁面到检测孔外沿距离，重复测量10次，取算术平均值。

d）按照下式计算烟道截面面积。

圆形烟道截面面积计算公式：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （C.1） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *A* | ——烟道截面面积，m2； |
| *D* | ——圆形烟道远端内壁面到检测孔外沿距离，m； |
|  | ——圆形烟道近端内壁面到检测孔外沿距离，m。 |

矩形烟道截面面积计算公式：

|  |  |
| --- | --- |
|  | （C.2） |

式中：

|  |  |
| --- | --- |
| *A* | ——烟道截面面积，m2； |
|  | ——矩形烟道长边远端内壁面到检测孔外沿距离，m； |
|  | ——矩形烟道短边远端内壁面到检测孔外沿距离，m； |
|  | ——矩形烟道长边近端内壁面到检测孔外沿距离，m； |
|  | ——矩形烟道端边近端内壁面到检测孔外沿距离，m。 |

附录D
校准原始记录参考格式

|  |  |
| --- | --- |
| 委 托 方： | 仪器名称： |
| 制 造 厂： | 型号规格： |
| 编 号： | 设 备 号： |
| 证书编号： | 记录编号： |
| 校准地点： |
| 环境条件： |
| 依 据： |
| 校准所用的主要标准器 |
| 标准器名称 | 编号 | 准确度等级 | 最大允许误差 | 证书编号 | 有效期限 |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
| 被校流量计 |
| 烟道形状 |  | 烟道截面尺寸 |  | 烟道截面面积 |  |
| 流速范围 |  | 上游直管段长度 |  | 下游直管段长度 |  |
| 介质温度 |  | 介质压力 |  | 原速度场系数 |  |
| 测量结果 |
| 第 组第 条测量线 |
| 测量点 | 烟气流速/（m/s） | 俯仰角/（°） | 偏航角/（°） | 轴向流速/（m/s） | 权重系数 |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
| 第 组流速标准装置流量平均值（m³/h）： |
| 第 组同时间段内被校流量计流量值（m³/h）： |
| 第 组示值误差（%）： |
| 第 组重复性（%）： |
| 第 组测量速度场系数： |

校准员 核验员 日期

附录E
校准证书内页参考格式

1 外观检查

2 校准项目与结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 校准项目 | 校准结果 | 备注 |
| 1 | 流量计示值误差 |  |  |
| 2 | 重复性 |  |  |
| 3 | 速度场系数 |  |  |
| 不确定度 |  |  |

附录F
测量不确定度评定示例

F.1 概述

F.1.1 烟道条件

烟道截面为圆形，设计直径8.50 m，烟道上游直管段为60 m，下游为30 m，介质为烟气。

F.1.2 环境条件

温度：（28~30）℃；相对湿度：（65~70）%RH。

F.1.3 标准器及配套设备

主要标准器及配套设备技术特征见表1。

1. 表1 主要标准器及配套设备技术特征

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 设备名称 | 技术特征 |
| 1 | 流速标准装置 | 测量范围：（1~30）m/s | 最大允许误差：±3.0% |
| 2 | 激光测距仪 | 测量范围：（0.3~100）m | 最大允许误差：±2 mm |
| 3 | 钢卷尺 | 测量范围：（0~5）m | 最大允许误差：±0.5 mm |

F.1.4 被测对象

某电厂3号烟囱的烟气排放连续监测系统流量计，测量范围（0～30）m/s，分度值0.1 m/s。

F.1.5 测量方法

F.1.5.1 烟道截面面积

用激光测距仪测量烟道远端内壁面到检测孔外沿距离，重复测量10次，取算术平均值。

用钢卷尺测量烟道近端内壁面到检测孔外沿距离，重复测量10次，取算术平均值。

F.1.5.2截面轴向流速

用校准后的流速标准装置对被校流量计进行在线测量，按照GB/T 16157 4.2.4的布点方法，在1条直径上采用等分面积法选取12个不同测量点，对测量截面进行逐点测量，根据各测量点数据计算出本组测量的截面平均轴向流速，每组测量结束后，读取被校流量计在测量期间测量数据均值。重复测量3组。

F.2 不确定度来源

F.2.1 测量模型

流量测量模型如下：

**

式中：

|  |  |
| --- | --- |
|  | ——测量平均流量，m3/h； |
|  | ——流速标准装置测量截面平均轴向流速，m/s； |
| *A* | ——流速标准装置测量处烟道内截面面积，m2； |
| *D* | ——流速标准装置测量处烟道远端内壁面到检测孔外沿距离，m； |
| *e*0 | ——流速标准装置测量处烟道近端内壁面到检测孔外沿距离，m。 |

各输入量彼此独立不相关，合成标准不确定度可按下式计算得到：



其中：







因此，相对合成标准不确定度可按下式计算得到：



F.2.2 不确定度来源

经分析，流量测量不确定度主要包括流速测量引入的不确定度分量、烟道远端内壁面到检测孔外沿距离测量引入的不确定度分量以及烟道近端内壁面到检测孔外沿距离测量引入的不确定度分量。

F.2.2.1 流速测量引入的不确定度来源

1. 测量重复性引入的不确定度；
2. 流速标准装置的不确定度。

F.2.2.2 烟道远端内壁面到检测孔外沿距离测量引入的不确定度来源

1. 测量重复性引入的不确定度；
2. 激光测距仪的不确定度。

F.2.2.3 烟道近端内壁面到检测孔外沿距离测量引入的不确定度来源

1. 测量重复性引入的不确定度；
2. 钢卷尺的不确定度。

F.3 标准不确定度评定

F.3.1 流速测量引入的标准不确定度评定

F.3.1.1 流速测量重复性引入的标准不确定度

由烟气流速浓度变化等随机因素引起，为了减少烟气流速浓度变化的影响，不单独分别考虑和的测量重复性，而采取考虑和差值的测量重复性。

可以通过在相同的试验条件下连续多次手动测量和差值的标准偏差获得，采用A类方法评定。

流速测量数据如表2所示。

表2 测量数据汇总表

1. m/s

|  |  |
| --- | --- |
| 测量位置 | 重复多次测量数据 |
| 1 | 2 | 3 |
| 被校流量计 | 标准装置 | 被校流量计 | 标准装置 | 被校流量计 | 标准装置 |
| 流速示值 | 18.69 | 18.13 | 18.90 | 18.21 | 18.86 | 18.28 |
| 差值 | +0.56 | +0.69 | +0.58 |
| 流速测量平均值  | 18.21 | 标准偏差 | 0.077 |

实际测量中，重复测量3次，取算术平均值作为测量结果，测量数据的标准偏差采用极差法计算，因此，流速测量重复性引入的相对标准不确定度为：



F.3.1.2 流速标准装置的标准不确定度

用B类评定方法进行评定。实际测量使用流速标准装置的最大允许误差为±3.0%，可认为服从均匀分布，查表得到，由流速标准装置引入的相对标准不确定度为：



F.3.1.3 流速测量引入的标准不确定度

与不相关，因此，流速测量引入的相对标准不确定度为：



F.3.2 烟道远端内壁面到检测孔外沿距离测量引入的标准不确定度评定

F.3.2.1 烟道远端内壁面到检测孔外沿距离测量重复性引入的标准不确定度

用A类评定方法进行评定。实际测量重复测量10次，测量数据如表3所示。

1. 表3 烟道远端内壁面到检测孔外沿距离测量数据汇总表
2. m

|  |  |
| --- | --- |
| 序号 | 测量值 |
| 1 | 8.786 |
| 2 | 8.802 |
| 3 | 8.788 |
| 4 | 8.802 |
| 5 | 8.801 |
| 6 | 8.791 |
| 7 | 8.786 |
| 8 | 8.792 |
| 9 | 8.791 |
| 10 | 8.802 |
| 平均值*D* | 8.794  |
| 标准偏差*s*(*D*) | 0.0070 |

因此，烟道远端内壁面到检测孔外沿距离测量重复性引入的相对标准不确定度为：



F.3.2.2 激光测距仪的标准不确定度

用B类评定方法进行评定。实际测量使用激光测距仪的最大允许误差为±2 mm，可认为服从均匀分布，查表得到，由激光测距仪引入的相对标准不确定度为：



F.3.2.3 烟道远端内壁面到检测孔外沿距离测量引入的标准不确定度

与不相关，因此，烟道内直径测量引入的标准不确定度为：



F.3.3 烟道近端内壁面到检测孔外沿距离测量引入的标准不确定度评定

F.3.3.1 烟道近端内壁面到检测孔外沿距离测量重复性引入的标准不确定度

用A类评定方法进行评定。实际测量重复测量10次，测量数据如表4所示。

1. 表4 烟道近端内壁面到检测孔外沿距离测量数据汇总表
2. m

|  |  |
| --- | --- |
| 序号 | 测量值 |
| 1 | 0.287 |
| 2 | 0.294 |
| 3 | 0.293 |
| 4 | 0.288 |
| 5 | 0.289 |
| 6 | 0.292 |
| 7 | 0.287 |
| 8 | 0.294 |
| 9 | 0.286 |
| 10 | 0.288 |
| 平均值*e*0 | 0.290 |
| 标准偏差*s*(*e*0) | 0.0030 |

因此，烟道近端内壁面到检测孔外沿距离测量重复性引入的相对标准不确定度为：



F.3.3.2 钢卷尺的标准不确定度

用B类评定方法进行评定。实际测量使用钢卷尺的最大允许误差为±0.5 mm，可认为服从均匀分布，查表得到，由激光测距仪引入的相对标准不确定度为：



F.3.3.3 烟道近端内壁面到检测孔外沿距离测量引入的标准不确定度

与不相关，因此，烟道内直径测量引入的标准不确定度为：



F.4 合成标准不确定度

测量结果的相对合成标准不确定度为：



取包含因子*k*=2，则测量结果的相对扩展不确定度为：

