# 气体流量计*K*系数的测量

# 不确定度评定与表示

李彭 叶苗 陈芮 宋海英 冯渝 郑静

（重庆气矿计量检测中心，重庆江北区 400021）

**摘要：**用音速喷嘴气体流量标准装置测量气体流量计，流量计*K*系数的测量不确定度主要由测量装置*V*m和流量计输入脉*N*引入的不确定度构成。在实际分析*V*m标准不确定度分量的过程中，由于测量设备、环境条件、测量方法和分析人员业务能力不同，评定的测量结果也有所不同。文章以使用音速喷嘴气体流量标准装置测量涡轮流量计和罗茨流量计为例,全面对测量不确定度的影响量进行了分析，考虑了平时容易被忽视的空气湿度的影响，总结出评定气体流量计*K*系数的测量不确定度的方法和步骤，并给出完整的测量结果报告。

关键词： 测量装置 测量不确定度 输入脉冲 *K*系数 不确定度评定

0.引言

气体流量计是计量气体流量的仪表，是测量气体在单位时间内通过某一横截面的体积、质量或能量。常用的测量体积的气体流量计有速度式、容积式和差压式等。其中速度式和容积式流量计的示值误差可以表示为累计流量的示值误差和流量计*K*系数的示值误差，在分析测量不确定度的时候，大部分的技术文献或资料中，罗茨流量计的测量不确定度仍以采用累积流量的示值误差表示为主。随着电子检测技术的高速发展，各行业中使用的音速喷嘴气体流量标准装置已能实现用流量计*K*系数表示罗茨流量计示值误差。本文以使用音速喷嘴气体流量标准装置测量涡轮流量计和罗茨流量计流量计*K*系数为例,全面对测量不确定度的影响量进行分析，特别是平时容易被忽视的空气湿度的影响。总结出用流量计*K*系数表示测量结果的测量不确定度的评定方法和步骤，并给出完整的测量结果及其不确定度报告，可为该行业的从业人员提供一定的参考。

1.概述

1.1测量依据

JJG 633-2005《气体容积式流量计》、JJG 1037-2008《涡轮流量计》、JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》

1.2环境条件

环境温度：（22.8～23.1）℃；相对湿度：70.1%～70.5%；大气压力：（97.22～97.37）kPa

介质温度：（19.9～20.5）℃；介质压力：（96.69～97.10）kPa

1.3测量标准

测量标准准确度等级为0.3级的音速喷嘴气体流量标准装置，测量范围（1～638.5）m3/h，测量介质为空气。使用的主标准器及配套设备基本信息如下：

表1使用的标准器及配套设备溯源信息

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **测量数据** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** |
| **标准器名称** | 喷嘴#1-9# | 压力变送器1#-5# | 温度变送器1#-6# | 晶振 | 温湿度计 | 空盒气压表 |
| **型号规格** | 1.35mm-23.99mm | EJX110A-DMS4J-912NB | YTA110,Pt100 | LXH-600-K | 608-H1 | DYM3 |
| **不确定度或准确度 等级或最大允许误差** | *U*r=0.15% k=2 | 0.05级 | *U*=0.2℃ k=2 | *U*r=1×10-7，k=2 | U=0.3℃,k=2 U=1.2%RH,k=2 | 温度系数-0.03hPa/℃ 补充修正值0.1hPa |

1.4被测对象

准确度等级为1.0级的TBQZ-50B型涡轮流量计，测量范围（10～100）m³/h；

准确度等级为1.0级的G160-3-FCM型罗茨流量计，测量范围（1.73～250）m³/h。

1.5测量方法

采用9只音速喷嘴并联作标准，利用水循环真空泵抽真空使音速喷嘴前后背压比小于临界背压比，从而使音速喷嘴喉部处气体流量达到当地音速，在稳定的工况下，流经喷嘴和被检流量计的气体质量流量是相同的，测量出喷嘴滞止腔内及被测流量计处温度和压力，可以换算出在时间*t*内通过被测流量计的累计体积流量*V*m。被测流量计的体积量*V*m与流量计输入的脉冲数*N*之比为流量计*K*系数，当被测流量计用*K*系数表示流量计示值误差时，此时*K*系数的测量不确定度为装置测量该类流量计的不确定度。

2.测量模型

流量计*K*系数的计算公式：  （1）

累计体积流量计算公式：  （2）

空气摩尔质量计算公式：  （3）

式中：*K*——被检流量计*K*系数，1/m3；

*N*——被检流量计输入的脉冲数，无量纲；

*V*m——被检流量计实际累计体积流量，m3；

*A*\*——喷嘴喉部的截面积，m2；

*C*——喷嘴的流出系数，无量纲；

*C*\*——实际空气的临界流函数，无量纲；

*P*0——喷嘴前空气的绝对滞止压力，Pa；

*T*0——喷嘴前空气的绝对滞止温度，K；

*P*m——被检流量计处空气的绝对压力，Pa；

*T*m——被检流量计处空气的绝对温度，K,；

*Z*m——被检流量计处空气的压缩因子，无量纲，此处*Z*m≈1；

*R——*通用气体常数，8.31441J/(mol˙K)；

*M*——空气摩尔质量，kg/mol；

*ψ*——空气相对湿度，%RH；

*P*w——空气饱和水蒸气压力，kPa；

*t*——检定时间，s；

3.传播系数

# 分析式上述计算模型可知，影响流量计*K*系数的测量不确定度的因素*A\*、C*、*C*\*、*P*0、*T*m、*Z*m*、t*的传播系数为-1，*N*、*P*m的传播系数为1，*M*、*T*0,的传播系数为0.5，并可认为这些量互不相关。

4.标准不确定度评定

4.1测量重复性引入的标准不确定度*u*r1（A类评定）

用上述测量装置测量上述涡轮流量计和罗茨流量计的仪表系数*K，*测量结果分别为7776.58/m3和359.17/m3。取涡轮流量计重复性最大的流量点20m3/h计算装置测量重复性。当测量次数n≥6时，用贝塞尔公式计算；当测量次数n＜6时用极差法计算,装置测量重复性。



表2涡轮流量计重复性测量数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **测量次数** | **1** | **2** | **3** | **5** | **6** | **重复性%** | ***u*r1,%** |
| **流量计系数*K*ij** | 7825.02 | 7818.18 | 1813.45 | 7828.50 | 7825.09 | 0.08 | 0.032 |
| **示值误差%** | 0.050 | -0.026 | -0.090 | -0.085 | 0.098 |

# 4.2喷嘴喉部截面积*A\**引入的标准不确定度*u*r2

喷嘴经上级机构溯源，喉部截面积为某一常数，故*u*r2=0。

4.3喷嘴流出系数*C*引入的标准不确定度*u*r3

喷嘴经上级机构溯源，其流出系数*C*的扩展不确定度*U*=0.15%，*k*=2。依据JJG 643-2003《标准表法流量标准装置》，并联使用的喷嘴组的准确度不低于单只喷嘴的准确度，因此可取单只喷嘴进行分析，故*u*r3=0.15%/2=0.075%。

4.4实际空气的临界流函数*C*\*引入的标准不确定度*u*r4

依据JJG 620-2008《临界流文丘里喷嘴》，可估算*C*\*扩展不确定度*U*=0.1%，*k*=2，故*u*r4=0.1%/2=0.05%。

4.5喷嘴前绝对滞止压力*P*0和被检流量计处绝对压力*P*m引入的标准不确定度*u*r5和*u*r6

压力变送器准确度等级为0.05级，按均匀分布估算，故*u*r3=*u*r4=0.05%/=0.029%。

4.6喷嘴前绝对滞止温度*T*0和被检流量计处绝对温度*T*m引入的标准不确定度*u*r7和*u*r8

温度变送器扩展不确定度*U*=0.2℃，*k*=2，测量时气体温度取20℃，故*u*r7=*u*r8=0.2/（293.15×2）=0.034%。

4.7被检流量计处空气压缩因子*Z*m引入的标准不确定度*u*r9

在上述检测环境下空气的压缩因子接近1，由压缩因子引入的不确定度很小，所以可估算*u*r9=0

4.8空气摩尔质量*M*引入的标准不确定度*u*r10

测量时空气湿度为70%RH，根据测量时介质温度和压力估算*P*w=2.337kPa,*P*0=97kPa,测量湿度的温湿度计的*U*=1.2%RH, *k*=2，由式（3）计算出*u*r10=0.1846×1.2/2=0.11%。

4.9测量时间*t*引入的标准不确定度*u*r11

装置采用采集卡中计数器硬件测量时间，时钟脉冲源为12MHz，扩展不确定度*U*r=1×10-7，k=2。因此本装置时间测量的误差主要为装置中计算机循环采集的时间间隔的误差，本装置自动采集时间的分辨率±1ms，取装置最短测量时间为60s，按均匀分布计算，故*u*r7 =0.001/=0.00096%，可忽略不计。

将上述各分量合成即为*V*m的标准不确定度。

4.10被检流量计输入脉冲*N*引入的标准不确定度*ur*N

检定过程中，应保证一次检定中流量计输入的脉冲数由分辨率带来的相对不确定度不大于被检流量计最大允许误差绝对值的1/10。对于高频输入的气体流量计，输入的脉冲数一般都满足该要求，但对于低频输入的气体流量计的低流量范围（如口径较大的罗茨流量计的低流量点），则需要延长检定时间增加输入脉冲数才能满足该要求。本文被测涡轮流量计和罗茨流量计的准确度等级为1.0级，所以要求输入脉冲*N*≥1000，脉冲测量误差△*N*=±1，按均匀分布计算。

对涡轮流量计，实测点20m³/h检定时间60s的输入脉冲数5204，故*ur*N=1/=0.011%，*k*=2；对罗茨流量计，实测点50m³/h检定时间180s的输入脉冲数898，故*ur*N=1/=0.065%，*k*=2。

4.11标准不确定度分量汇总表

表3各项标准不确定度来源及数据汇总表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **序号** | **不确定度来源** | **传播系数*Ci*** | **标准不确定度*uri,*%** |
| **1** | 测量重复性 | -1 | 0.032 |
| **2** | 喷嘴喉部截面积*A*\* | -1 | 0 |
| **3** | 喷嘴流出系数*C* | -1 | 0.075 |
| **4** | 气体临界流函数*C*\* | -1 | 0.05 |
| **5** | 喷嘴前绝对滞止压力*P*0 | -1 | 0.029 |
| **6** | 和被检流量计处绝对压力*P*m | 1 | 0.029 |
| **7** | 喷嘴前绝对滞止温度*T*0 | 0.5 | 0.034 |
| **8** | 被检流量计处绝对温度*T*m | -1 | 0.034 |
| **9** | 被检流量计空气压缩因子*Z*m | -1 | 0 |
| **10** | 空气摩尔质量*M* | -0.5 | 0.11 |
| **11** | 测量时间*t* | -1 | 忽略不计 |
|  | 被检流量计实际累计体积流量*V*m |  | *urvm*=0.11 |
| **12** | 流量计输入脉冲*N* | 1 | *ur*N=0.011(涡轮) |
| *ur*N=0.065(罗茨) |

5.合成不确定度*u*cr

合成不确定度：涡轮流量计*u*cr==0.13%;罗茨流量计*u*cr==0.14%。

6.扩展不确定度*U*r

扩展不确定度：涡轮流量计*U*r=*k*˙*u*cr=0.26%,*k*=2；罗茨流量计*U*r=*k*˙*u*cr=0.28%,*k*=2。

7.测量结果报告

用准确度等级为0.3级、测量范围为（1～638.5）m3/h的音速喷嘴气体流量标准装置测量准确度等级为1.0级、流量范围（10～100）m³/h的TBQZ-50B型涡轮流量计，流量计*K*系数的测量结果为：*K*=7776.581/m3 （*U*r=0.26% *k*=2）；测量准确度等级为1.0级、流量范围（1.73～250）m³/h的G160-3-FCM型罗茨流量计，测量结果为：*K*=359.17/m3 （*U*r=0.28% *k*=2）。

8.结论

(1)在气体流量计*K*系数的测量结果不确定度主要由测量装置*V*m的不确定度和流量计输入脉*N*的不确定度构成；

(2)当测量装置经上级机构溯源有效后，可直接引用检定或校准证书中给出装置*V*m的不确定度或准确度等级或最大允许误差计算其标准不确定度而不必重复3.1的步骤；当测量装置未经上级机构溯源而直接使用时，可以参照4.1-4.9的步骤全面分析影响装置不确定度的因素；

(3)对于输入脉冲，虽然可以通过延长测量时间降低输入脉冲对流量计测量不确定度的影响，但测量时间过长会降低响应速度；因此在低流量范围适当延长测量时间的同时，可以按检定规程对流量计输入的脉冲数的最低要求估算其对测量不确定度的影响。

参考文献

[1]沈文新.气体容积式流量计JJG 633-2005[S].北京：国家质量监督检验检疫总局.

[2]李旭.涡轮流量计JJG 1037-2008[S].北京：国家质量监督检验检疫总局.

[3]赵艳琴，张永胜.脉冲信号流量计仪表系数的两种表示方法[J].北京：中国计量，2010.2.

[4]叶德培.测量不确定度评定与表示JJF1059.1-2012[S].北京：国家质量监督检验检疫总局.

[5]段慧明.标准表法流量标准装置JJG 643-2003[S].北京：国家质量监督检验检疫总局.

[6]徐英华.临界流文丘利喷嘴JJG 620-2008[S].北京：国家质量监督检验检疫总局.

[7]潘丕武，张明.天然气计量技术基础[M].北京：石油工业出版社.2013.5.

[8]工业仪表与自动化学会.针对脉冲式输出流量计的信号测量[C].第五届工业仪表与自动化学术会议论文集.2004.

[9]天然气发热量、密度、相对密度和沃泊指数的计算方法GB/T11062-2014[S].北京：中华人民共和国国家质量监督检验

检疫总局.

[10]王新辉，张辉.浅析空气湿度对音速喷嘴计量性能的影响[J].北京：石油化工自动化，Vol.52,No.2 April,2016.

[11][美]R.W米勒编著，孙延柞译.流量测量工程[M].北京：机械工业出版社.1990.5