doi：10.11823/j.issn.1674－5795.2019.01.10

标准表法流量计算及不确定度评估分析

张永胜，于华伟，张毅治
（航空工业北京长城计量测试技术研究所，北京 100095）

摘 要：以圆柱齿轮流量计做为标准流量计为例，介绍了在标准表法流量标准装置中非定点使用的标准流量计的几种典型流量计算方法，并给出各种流量算法引入的不确定度评定方法。实例对比表明，采用最小二乘法拟合计算，选择与流量计自身特性匹配的拟合阶次可有效降低算法引入的不确定度；选用流量修正值计算流量，对于低流量区域算法引入的相对不确定度较大；采用仪表系数和流量修正系数计算流量引入的不确定度比较接近。

关键词：计量学；标准表法；流量标准装置；不确定度
中图分类号：TB9 **文献标识码：**A **文章编号：**1674－5795(2019)01－0042－05

Master Meter Method Flow Calculation and Uncertainty Evaluation

ZHANG Yongsheng, YU Huawei, ZHANG Yizhi
(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Taking the cylindrical gear meter that is used as master flow meter as an example, several typical flow calculation methods for the master flow meter used in the non－fixed point in the standard flow facility by master meter are introduced, and the uncertainty of each flow calculation method is evaluated. The comparison of the examples shows that using the least squares fitting calculation and selecting the fitting order matching the characteristics of the flowmeter can reduce the uncertainty introduced by the algorithm obviously, the method of selecting the flowrate correction value to calculate the flow rate is relatively inefficient for the low flow range, and the uncertainty introduced by using the meter factor is relatively close with that introduced by using the flow rate correction coefficient.

Key words: metrology; master meter method; flow standard facility; uncertainty

0 引言

液体流量标准装置包括质量法、容积法、体积管法和标准表法几种[1-2]，其中标准表法流量标准装置是目前使用比较广泛的传递标准装置之一。与前三种流量标准装置相比，标准表法流量装置具有成本低、结构简单、易操作、建设周期短、流量范围宽、效率高等优点。

标准表法液体流量标准装置基于质量流量守恒原理，即在一定时间内，串联在同一管道内的标准流量计和被检流量计通过的液体容积相等，流体在相同时间间隔内连续通过标准流量计与被检流量计，比较两者的输出流量值，即可确定被检流量计的计量性能。标准表法流量标准装置一般由泵、试验管路系统、标准流量计、被检流量计、温度变送器、压力变送器、测控系统及校准软件等组成。标准表法流量标准装置比其他方法结构更简单、测量效率更高；同时由于可以并联多台标准流量计对被检流量计进行校准，因此标准表法装置容易形成更大的流量范围。

依据 JJG 643－2003《标准表法流量标准装置检定规程》，该类流量标准装置的不确定度主要包括标准流量计算引入的不确定度、计时器引入的不确定度、标准流量计配套仪器未同时送检引入的不确定度、标准流量计检定与使用流体条件不一致引入的不确定度、数采系统引入的不确定度及上级标准装置引入的不确定度等几个方面[3]。如果标准流量计非定点使用，标准流量计算方法引入的不确定度是最为重要的一项。标准流量计算方法不同，引入的不确定度也存在一定差异。

1 标准流量计算和不确定度评估方法

标准流量计非定点使用，可通过仪表系数、流量修正值和流量修正系数等几种方式计算标准流量，而仪表系数、流量修正值和流量修正系数都可通过最小二乘法和线性内插法进行计算。

通过上级标准装置进行校准可获得一组试验数据，

如 (x_1,y_1)，(x_2,y_2)，…(x_i,y_i)…(x_n,y_n)，本文中 x 可用于表示频率 f 和流量显示值 q，y 可用于表示仪表系数 K、流量修正值 Δq 和流量修正系数 F，分别通过式(1)、式(2)和式(3)计算，其中，q_s 为上级标准装置给定标准流量。

$$K = \frac{f}{q_s} \tag{1}$$

$$\Delta q = q_s - q \tag{2}$$

$$F = \frac{q_s}{q} \tag{3}$$

1.1 最小二乘法

通过最小二乘法拟合，可获得 y（K，Δq，F）与 x（f，q，q）的函数关系，可通过式(4)表示，当 $c = 0$ 时为线性拟合，当 $c \neq 0$ 时为二次拟合。本文中未对更高阶次拟合方法进行探讨。

$$y = a + bx + cx^2 \tag{4}$$

第 i 点拟合残差可通过式(5)计算。

$$V_i = y_i - a - bx_i - cx_i^{\ 2} \tag{5}$$

最小二乘法拟合引入绝对不确定度 $u(y)$ 可通过式(6)计算[4-6]。

$$u(y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} V_i^2}{n-2}} \tag{6}$$

1.2 线性内插法

对于某 x，在满足 $x_{i-1} < x \leqslant x_i (2 \leqslant i \leqslant n)$ 的工况下，y 可通过线性内插公式计算

$$y = \frac{(y_i - y_{i-1})(x - x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} + x_{i-1} \tag{7}$$

线性内插计算引入绝对不确定度可通过式(8)计算[7-8]。

$$u(y) = \left[\frac{(y_i - y_{i-1})}{2\sqrt{3}}\right]_{\max} \tag{8}$$

1.3 流量相对不确定度计算

1.3.1 仪表系数计算流量

通过最小二乘法或线性内插法获得仪表系数 K 与频率 f 之间的函数关系，由拟合计算引入的相对标准不确定度可由式(9)计算，其中 $\bar{K}$ 通过式(10)计算。$u(K)$ 分别通过式(6)或式(8)计算。

$$u_{\mathrm{rel}}(K) = \left[\frac{u(K)}{\bar{K}}\right]_{\max} \tag{9}$$

$$\bar{K} = \frac{1}{2}[(K_i)_{\min} + (K_i)_{\max}] \tag{10}$$

1.3.2 流量修正值计算流量

通过最小二乘法或线性内插获得流量修正值 Δq 与流量 q 之间的函数关系，由拟合引入的相对标准不确定度可由式(11)计算，其中 q 是某示值流量。$u(\Delta q)$ 分别通过式(6)或式(8)计算。

$$u_{\mathrm{rel}}(q) = \frac{u(\Delta q)}{q} \tag{11}$$

1.3.3 流量修正系数计算流量

通过最小二乘法或线性内插获得流量修正系数 F 与流量 q 之间的函数关系，由拟合引入的相对标准不确定度可由式(12)计算，$u(F)$ 分别通过式(6)或式(8)计算。

$$u_{\mathrm{rel}}(q) = u(F) \tag{12}$$

2 计算实例

涡轮流量计、容积式流量计、科里奥利质量流量计、电磁流量计等性能优良的流量计均可作为标准流量计使用。以圆柱齿轮流量计为例进行标准流量及不确定度计算。圆柱齿轮流量计属于容积式流量计，对于中高粘度液体介质具有良好计量性能。表 1 是某齿轮流量计校准数据。表中示值通过平均仪表系数[9]和对应流量点频率计算。

2.1 仪表系数计算流量

由于圆柱齿轮流量计内部齿轮与壳体之间存在间隙，导致流量计运行时存在内泄露，内泄露存在层流模式和湍流模式两种形式[10]，可分别用式(13)和式(14)表示。

$$q_{\mathrm{leak}} = C_1 \frac{\Delta p}{\eta} \tag{13}$$

$$q_{\mathrm{leak}} = C_2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \tag{14}$$

式中：C_1 为层流状态下与流量计结构有关的常数；C_2 为湍流状态下与流量计结构有关的常数；Δp 为流量计前后压降；η 为流体动力粘度。

齿轮流量计内泄露随转动速度改变而变化，其仪表系数并非恒定数值，而是随转动频率非线性变化的。图 1 是齿轮流量计仪表系数与频率之间的拟合曲线。通过最小二乘法线性拟合引入的不确定度约为 0.26%；而最小二乘法二次拟合引入的不确定度降低很多，约为 0.057%；通过线性内插方法引入不确定度约为 0.073%，与二次拟合引入的不确定度比较接近。

表 1　标准齿轮流量计校准数据

上级标准值 /(L·min^{-1})	频率 /Hz	仪表系数 /(L^{-1})	平均仪表系数 /(L^{-1})	示值 /(L·min^{-1})	修正值 /(L·min^{-1})	修正系数
252.16	846.97	201.54	202.47	250.99	1.17	1.0047
227.10	764.32	201.94		226.50	0.60	1.0026
201.85	680.87	202.39		201.77	0.08	1.0004
176.82	597.49	202.75		177.06	−0.24	0.9986
151.18	511.58	203.03		151.60	−0.42	0.9972
124.96	423.45	203.32		125.49	−0.53	0.9958
81.792	277.26	203.39		82.163	−0.37	0.9955
50.323	170.41	203.18		50.499	−0.18	0.9965
26.023	87.902	202.67		26.049	−0.026	0.9990
14.788	49.893	202.44		14.785	0.003	1.0002

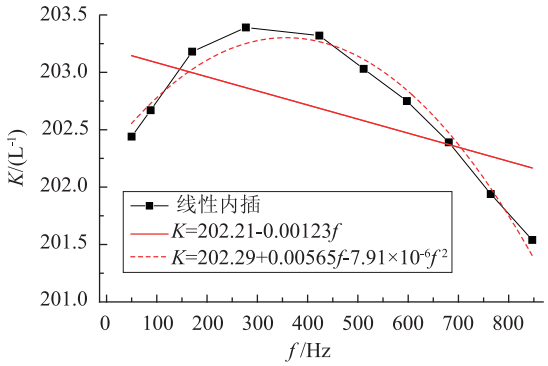

图 1　仪表系数计算流量拟合曲线

表 2　仪表系数计算流量不确定度

线性拟合		二次拟合		线性内插	
残差 V_i	$u_{rel}(K)$/%	残差 V_i	$u_{rel}(K)$ /%	$u(K)$	$u_{rel}(K)$/%
−0.627	0.26	0.139	0.057	0.057	0.073
−0.328		−0.048		0.064	
0.019		−0.080		0.051	
0.277		−0.092		0.040	
0.452		−0.080		0.041	
0.633		0.056		0.010	
0.524		0.142		0.030	
0.183		0.157		0.073	
−0.428		−0.056		0.033	
−0.705		−0.112		/	

2.2　流量修正值计算流量

由于内泄露的存在，各流量点流量修正值随流量呈非线性变化。图 2 是齿轮流量计流量修正值与流量示值之间的拟合曲线。通过最小二乘法线性拟合引入的绝对不确定度约为 0.455 L/min；而最小二乘法二次拟合引入的不确定度约为 0.110 L/min；通过线性内插方法引入不确定度约为 0.113 L/min，与二次拟合引入的不确定度相当。采用流量修正值计算流量，在低流量段引入的相对不确定度较大，三种方法引入相对的不确定度分别为 3.08%，0.74%，0.76%。

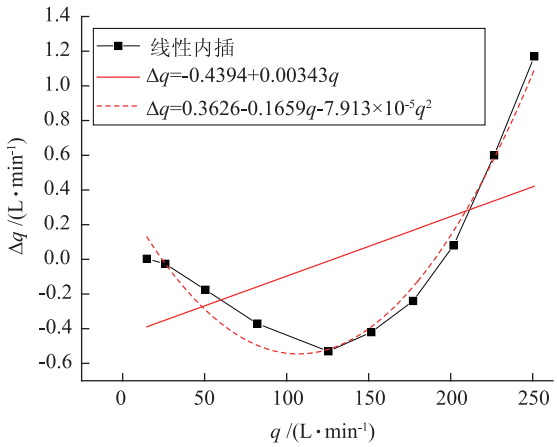

图 2　流量修正值计算流量拟合曲线

表 3　流量修正值计算流量不确定度

流量示值 /(L·min^{-1})	线性拟合		二次拟合		线性内插	
	$u(\Delta q)$ /(L·min^{-1})	$u_{rel}(q)$ /%	$u(\Delta q)$ /(L·min^{-1})	$u_{rel}(q)$ /%	$u(\Delta q)$ /(L·min^{-1})	$u_{rel}(q)$ /%
250.99	0.455	0.18	0.110	0.04	0.113	0.05
226.50		0.20		0.05		0.05
201.77		0.23		0.05		0.06
177.06		0.26		0.06		0.06
151.60		0.30		0.07		0.07
125.49		0.36		0.09		0.09
82.163		0.55		0.13		0.14
50.499		0.90		0.22		0.22
26.049		1.75		0.42		0.43
14.785		3.08		0.74		0.76

2.3　流量修正系数计算流量

图 3 是齿轮流量计流量修正系数与流量示值之间的拟合曲线。通过最小二乘法线性拟合引入的相对不确定度约为 0.31%；而最小二乘法二次拟合引入的不确定度约为 0.056%；通过线性内插方法引入不确定度约为 0.072%，与二次拟合引入的不确定度比较接近。

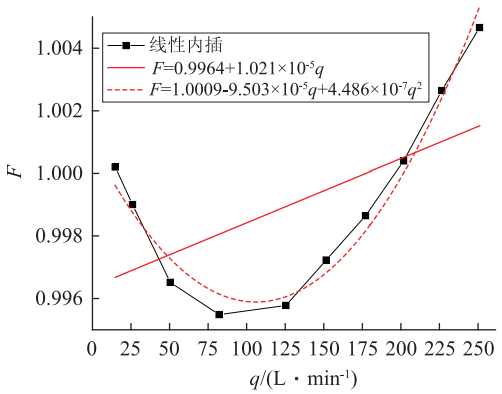

图 3　流量修正系数计算流量拟合曲线

3　总结

对标准法装置中几种非定点使用流量计算方法和算法引入的不确定度评估方法进行了介绍，并以某齿轮流量计校准数据为实例进行了计算及分析。经总结，

表 4　流量修正系数计算流量不确定度

线性拟合		二次拟合		线性内插	
残差 V_i	$u_{rel}(q)$ /%	残差 V_i	$u_{rel}(q)$ /%	$u(F)$ /%	$u_{rel}(q)$/%
0.005729	0.31	−0.0006669	0.056	0.058	0.072
0.003967		0.0002391		0.065	
0.001967		0.0003877		0.051	
0.000467		0.0004868		0.041	
−0.000688		0.0004061		0.042	
−0.001874		−0.0002826		0.008	
−0.001724		−0.0006559		0.030	
−0.000371		−0.0007503		0.072	
0.002366		0.0002529		0.035	
0.003682		0.0005899		/	

标准表法流量标准装置应用中应注意以下几点：①采用最小二乘法拟合计算标准流量，拟合阶次需结合流

量计自身特性确定，可有效降低计算方法引入的不确定度；②采用线性内插法计算标准流量，在上级校准流量点足够多的情况下，相邻数据点内插引入的不确定度可满足标准装置整体要求，无需过多关注流量计自身特性；③采用流量修正值计算标准流量，采用最小二乘法和线性内插法在低流量区域引入的相对不确定度较大；④对于脉冲信号输出类型流量计，建议采用仪表系数进行标准流量计算；⑤对于模拟量或数字通信信号输出类型流量计，建议采用流量修正系数进行标准流量计算。

参 考 文 献

[1] 苏彦勋．流量检测技术[M]．北京：计量质检出版社．2012.

[2] 王池，王自和．流量测量技术全书[M]．北京：化学工业出版社，2012.

[3] 国家质量监督检验检疫总局．JJG 643－2003 标准表法流量标准装置检定规程[S]．北京：中国计量出版社，2003.

[4] 周艳茁．Excel 在最小二乘法不确定度评定中的应用[J]．理化检验(化学分册)，2006，42(6)：445－447.

[5] 梁志国，孙璟宇，李滨．最小二乘独立线性度的测量不确定度[J]．计测技术，2002，22(4)：28－33.

[6] 金正一，李凤岐．一元线性参数最小二乘法中斜率及截距的不确定度[J]．沈阳工业学院学报，2000，19(1)：73－76.

[7] 李慎安．JJF 1059－1999《测量不确定度评定与表示》讨论之三十六采用内插计算结果的不确定度[J]．工业计量，2011，21(5)：27－27.

[8] 黄向阳，李长武，罗强．标准表法气体流量标准装置及不确定度分析[J]．计量技术，2006(7)：45－48.

[9] JJG 667－2010 液体容积式流量计检定规程[S]．北京：中国计量出版社，2010.

[10] 刘海生，占树言，谢文华，等．基于间隙流态外层流的容积式流量计计量特性研究[J]．机床与液压，2017，45(7)：44－48.

收稿日期：2018－11－23

作 者 简 介

张永胜(1980－)，男，高级工程师，硕士，从事流量校准及标准装置研发工作。

《化学分析计量》2019 年第 1 期目次

标准物质

甲醇中甲苯溶液标准物质的研制

溶液型非牛顿流体黏度标准物质的研制

分析测试

紫外可见分光光度法测定水中六价铬的线性范围

测定土壤中重金属元素的样品消解方法

高效液相色谱－串联质谱法测定塑料中的 1－甲基－2－吡咯烷酮

基于 13C 同位素分布模型的多重液相色谱－质谱实验数据校准匹配算法

高效液相色谱法分析玉屏风散成分

电感耦合等离子体发射光谱法间接测定石灰岩矿中游离二氧化硅含量

气相色谱－质谱法测定眼用全氟丙烷气体中甲醇、甲醛

基于石墨烯修饰的分子印迹膜丝网印刷电极快速测定烟草中苯霜灵农药残留

固体核磁共振定量分析聚丙烯催化剂中的有机组分

电感耦合等离子体原子发射光谱法测定钛合金中的硼

逆王水微波消解－电感耦合等离子体质谱法测定地球化学样品中的碘和溴

超声波提取－气相色谱－质谱法测定脱水污泥中的多氯联苯

气相色谱－质谱法快速测定食品塑料包装材料中的邻苯二甲酸二(2－乙基己)酯

硫脲络合－火焰原子吸收光谱法测定古炉渣中的银、镉、钴、镍

火焰原子吸收光谱法测定木瓜中 7 种微量元素的含量

电感耦合等离子体原子发射光谱法测定镍矿石中的铂和钯

艾士卡熔融－离子色谱法测定沉积物中全硫

微波消解－原子吸收光谱法测定口红中的铅、汞

催化热解－冷原子吸收分光光度法测定大米中的汞含量

高效液相色谱法测定浓缩果汁中 5 种可溶性糖

改良咔唑法测定重组人溶菌酶滴眼液中透明质酸钠的含量

分散液液微萃取－气相色谱法测定地表水中三氯苯

钼酸铵分光光度法测定地表水总磷含量的样品采集与预处理

计量技术

建立天然气检测实验室的技术方案

2018 版实验室认可准则对设备管理的要求及应对措施

仪器设备

煤矿束管监测系统红外线气体分析仪的校准

便携式气相色谱－质谱联用仪校准方法

综述

硝基苯分析方法综述