

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.03.002

高精度标准表法标准装置研究^{*}

涂 波¹, 李晓明^{1*}, 叶凌云², 宋开臣²

(1. 浙江理工大学 机械学院, 浙江 杭州 310018; 2. 浙江大学 生物医学工程与仪器学院, 浙江 杭州 310058)

摘要:为解决受标准表本身线性度影响,使得标准表法标准装置的扩展不确定度较高的问题,将通过流压缩量计测量范围来提高流量计精度的技术应用到标准表法标准装置中。开展了影响涡街流量计精度因素的分析,建立了流量计线性度和标准装置不确定度之间的关系。提出了通过压缩流量计来提高标准表精度,来减小标准装置的扩展不确定度的方法。对流量计量程压缩前、后的标准装置的扩展不确定度进行了评价,进行了模拟实验。研究表明,通过压缩流量计量程和优化组合能够降低标准装置的扩展不确定度。

关键词: 涡街流量计; 测量范围; 线性度; 扩展不确定度

中图分类号: TH814

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)03-0307-06

Standard facilities with high precision using master meter method

TU Bo¹, LI Xiao-ming¹, YE Ling-yun², SONG Kai-chen²

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. College of Biomedical Engineering & Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to solve the problem of the standard facilities with high expanded uncertainty which affected by the linearity of the standard flowmeter itself, the improvement of flow meter accuracy by compressing measurement range was investigated after the analysis of the effect of the accuracy of vortex flowmeter, the relationship between the linearity of the standard flowmeters and the expanded uncertainty of the standard facilities was established. A method was presented to reduce the expanded uncertainty of the standard facilities. The expanded uncertainty of the standard facilities were evaluated on the theoretical calculation, the efficacy were tested. The experimental results show that we can reduce the expanded uncertainty of the standard facilities by compressing measurement range and combination optimization.

Key words: vortex flow meter; measurement; linearity; expanded uncertainty

0 引 言

标准表法流量标准装置是使用对比法、根据流体力学中的连续性原理确定被检流量计性能的标准装置。在流量稳定的情况下,同一时间通过被检流量计的质量流量和通过一台或多台标准流量计的质量流量相同。通过相应的计算模型得到待检表的仪表系数。速度式流量计、临界流流量计、容积式流量计通常作为装置的标准流量计^[1-2]。使用速度式流量计作为标准

表的标准装置工作效率高、功耗低并且投资也低。笔者研究的是将涡街流量计作为标准表的标准装置,降低装置扩展不确定度的方法。

目前,标准表法标准装置以音速喷嘴作为标准表的居多,音速喷嘴为定点使用,并且并联使用非常方便,只要使用风机使得装置背压达到一定的值,就能够输出稳定且精度较高的质量流量。浙江省杭州市计量学院的音速喷嘴装置扩展不确定度低于0.3%。标准装置使用气体腰轮流量计作为标准表时,可以达到很

收稿日期: 2014-11-03

基金项目: 浙江省自然科学基金青年基金资助项目(LQ12E05017)

作者简介: 涂 波(1990-),男,江西宜春人,主要从事流量计方面的研究. E-mail: tubo_1990@hotmail.com

通信联系人: 李晓明,男,副教授,硕士生导师. E-mail: 38771756@qq.com

高的精度,浙江省检疫鉴定局的标准装置扩展不确定度低于 0.15%。

标准装置标准表使用方式有定点使用和非定点使用两种:标准表定点使用的标准装置精度高,但是控制方法较复杂,能够检测的点较少;标准表非定点使用时标准装置精度较低,但标定范围很宽,控制方法简单。现以速度式流量计作为标准表的装置中,标准表定点使用的装置居多,因为其很容易提高精度,但控制复杂,需要使用的标准多。所以研究标准装置标准表非定点使用时提高整个装置的精度是非常必要的^[3-4]。

根据国家标准表法装置检定规程,标准装置的合成不确定度受 7 个变量的影响^[5]。根据经验,对标准装置合成不确定度影响最大的是标准流量计的测量 A 类不确定度 u_1 及检定标准流量计的流量标准装置的合成不确定度 u_7 ,而 u_7 一般小于 0.15%。所以标准表测量 A 类不确定度是影响标准装置不确定度的主要因素。目前工业仪表涡街流量计一般为 1.0 级或 1.5 级,得到标准表的一般做法是在众多的涡街流量计中挑出几个线性度很好,能满足 0.5 级要求的流量计作为标准表。但即使是这样,通过计算,标准装置非定点使用时的不确定度仍然较高。

笔者研究通过压缩标准表的流量范围提高标准表的精度,并研究多台标准表并联使用时的不确定度影响,降低标准装置的不确定度,提高标准装置的精度。

1 涡街流量计的原理及线性测量误差产生的原因

1.1 涡街流量计测量原理

涡街流量计基于卡门涡街原理而研制成的速度式流量计,使用于液体、气体以及蒸汽等介质流量的测量。在流量计表体中安装旋涡发生体,当管道流体流经旋涡发生体时,流体会在旋涡发生体的下游的两侧交替分理处两列反方向有规律的漩涡。在一定的流速范围内,漩涡的频率正比于流速。传感器所测得频率信号经过电路板的放大滤波得到稳定的频率,再通过计算模型得到当前的瞬时流量^[6]。

大量的实验数据和理论证明:旋涡发生频率 f 与旋涡发生体附近的流速 v_1 ,以及阻流件的宽度 d 有如下关系式^[7]:

$$f = S_t \frac{v_1}{d} \quad (1)$$

式中: v_1 —传感器两侧的流速; S_t —斯特劳哈尔数;当雷诺数 R_e 在 300 ~ 200 000 范围内, S_t 为一常数。

1.2 涡街流量计线性误差产生的原因

由涡街流量计的原理可知,传感器所测的频率值反映的是旋涡发生体两侧的流速,并不是流经流量计的平均流速 v 。在紊流状态时,不同的雷诺系数时管道内的流速分布不同。这说明了传感器两侧的流速 v_1 与平均流速的关系不是唯一确定的,非线性误差的产生是由涡街流量计的检测机理所决定的。根据理论力学的关系式,理想的紊流状态下,管道内流体的流速分布规律有如下规律^[8]:

$$v_p = \frac{y}{R} v_{\max}^n \quad (2)$$

式中: y — p 点到管壁的距离, R —管道半径, n —雷诺系数函数, $v_{\max}$ —管道中的最大流速, v_p — p 点的速度。

由于涡街流量计旋涡发生体的位置是固定的,当雷诺系数在很小的一段范围内时,涡发生体附近的流速 v_1 与平均流速 v 具有固定的比例关系。可简化为函数式^[9-10]:

$$v = f(R_e) v_1 \quad (3)$$

由以上分析可知,压缩流量计的测量范围可以使使得雷诺数变化很小,在量程内管道中的流速分布大致相同,从而能够提高涡街流量计的线性度。

2 标准表法标准装置标定的运算模型

标准表法标准装置能够一台涡街标准表单独使用,也能多台涡街标准表并联使用。标准表定点使用时一般只能一台涡街标准表单独使用,不像使用音速喷嘴那样只要背压达到一定的值,就能够很方便地多台并联使用,所以笔者研究的是标准流量计非定点使用的标准系统。标准装置采用负压法,当流量稳定时,在同一段时间内,流经标准流量计的质量流量等于流经待检表的质量流量。涡街流量计测的是工况下累积体积流量值,通过温压补偿得到标况下的累积体积流量值。由于空气在常温常压的状态下压缩因子为 1,且标况下的密度值为常数,同一累计时间内标准表与待检表的标况累计体积流量相同。

$$V_t = \sum_{i=1}^n V_{si} \quad (4)$$

$$\frac{N_t}{K_t} \times \frac{P_t}{101.325} \times \frac{(273.5 + 20)}{273.5 + T_t} = \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{N_{si}}{K_{si}} \times \frac{P_{si}}{101.325} \times \frac{(273.5 + 20)}{273.5 + T_{si}} \quad (6)$$

$$K_t = N_t \times \frac{P_t}{273.5 + T_t} \times \sum_{i=1}^n \frac{K_{si}}{N_{si}} \times \frac{273.5 + T_{si}}{P_{si}}$$

式中: V_t —待检表的标况累计体积流量值, V_{si} —并联标

准表标况累计体积流量值, N_i —待检表累计脉冲数, N_{si} —标准表累计脉冲数, K_i —待检表仪表系数, K_{si} —标准表仪表系数, P_i —待检表压力值, P_{si} —标准表压力值, T_i —待检表温度值, T_{si} —标准表温度值。

3 标准表全量程使用不确定度计算

根据 JJG 643—2003 有关规定,标准装置非定点使用标准流量计,使用仪表系数时,可根据下式来计算不确定度:

$$u_k = \frac{e_K}{K} \tag{7}$$

式中: e_K —用最小二乘拟合的流量-仪表系数曲线的标准不确定度, K —标准流量计的常用仪表系数。

由于标准表非定点使用,且在量程范围内均是使用同一仪表系数,则根据检定规程,标准流量计测量 A 类不确定度分为两部分:定点重复性不确定度;线性差

值引入的不确定度。依据国家检定规程,平均仪表系数如式(8)所示,去最大值与最小值的平均仪表系数;线性度计算按照式(9)来计算。根据式(10)来计算定点重复性不确定度。根据式(11),其中线性差值引入的不确定度按照均匀分布来计算,并且按照标准不确定度的 B 类评定方法来计算^[11]。5 台经过多点检定的流量计如表 1~5 所示。标准装置选择使用其中的几台表作为标准表来使用。以上各公式如下:

$$K = \frac{(K_i)_{\max} + (K_i)_{\min}}{2} \tag{8}$$

$$E = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{K_{\max} + K_{\min}} 100\% \tag{9}$$

$$E_r(K_i) = \frac{1}{K} \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (K_{ij} - K_i)^2^{\frac{1}{2}} 100\% \tag{10}$$

$$E_l(K_i) = \frac{|K_i - K|}{\sqrt{3}K} 100\% \tag{11}$$

表 1 DN25 全量程标定数据

流量/(m ³ ·h ⁻¹)	8	12	16	24	30	40	50	60
$K_i/(1 \cdot m^{-3})$	69 702.96	68 662.01	68 161.30	67 915.62	67 880.43	68 085.32	68 096.88	67 999.24
$E_r(K_i)/(\%)$	0.17	0.11	0.11	0.06	0.07	0.06	0.05	0.19
$E_l(K_i)/(\%)$	0.76	0.11	0.53	0.73	0.76	0.59	0.58	0.66

表 2 DN40 全量程标定数据

流量/(m ³ ·h ⁻¹)	20	24	32	50	64	80	120	160
$K_i/(1 \cdot m^{-3})$	17 972.99	17 894.95	17 972.21	17 906.23	17 930.34	17 919.05	17 496.43	16 463.06
$E_r(K_i)/(\%)$	0.02	0.12	0.12	0.15	0.14	0.05	0.09	0.15
$E_l(K_i)/(\%)$	2.53	2.27	2.53	2.31	2.39	2.35	0.93	2.53

表 3 DN50 全量程标定数据

流量/(m ³ ·h ⁻¹)	30	40	50	75	100	150	200	250
$K_i/(1 \cdot m^{-3})$	9 385.49	9 292.46	9 264.25	9 247.12	9 268.28	9 273.94	9 330.35	9 232.00
$E_r(K_i)/(\%)$	0.26	0.02	0.08	0.23	0.20	0.04	0.11	0.17
$E_l(K_i)/(\%)$	0.47	0.10	0.28	0.38	0.25	0.21	0.13	0.47

表 4 DN80 全量程标定数据

流量/(m ³ ·h ⁻¹)	75	100	120	180	240	350	450	600
$K_i/(1 \cdot m^{-3})$	2 242.59	2 243.44	2 240.96	2 247.20	2 251.40	2 239.99	2 228.41	2 229.18
$E_r(K_i)/(\%)$	0.13	0.11	0.20	0.11	0.18	0.16	0.05	0.10
$E_l(K_i)/(\%)$	0.07	0.09	0.03	0.19	0.29	0.00	0.29	0.28

表 5 DN100 全量程标定数据

流量/(m ³ ·h ⁻¹)	120	150	200	300	400	600	800	1000
$K_i/(1 \cdot m^{-3})$	1 171.19	1 171.19	1 152.11	1 165.63	1 171.28	1 164.57	1 162.40	1 168.09
$E_r(K_i)/(\%)$	0.20	0.34	0.22	0.20	0.32	0.14	0.07	0.13
$E_l(K_i)/(\%)$	0.47	0.47	0.48	0.20	0.48	0.14	0.03	0.32

DN25、DN40、DN50、DN80、DN100 全量程标定数据如表 1~5 所示。其仪表系数 K 、线性度 E 、重复性 E_r 及线性差值不确定度可分别按照式(8~11)来计算。通过计算,表 1~5 中各口径仪表线性度分别为 1.32%、4.38%、0.82%、0.51%、0.83%;重复性分别为 0.19%、0.15%、0.23%、0.20%、0.34%。

$$u_1 =_{\max}(E_r(K_i) + E_l(K_i)) \tag{12}$$

根据式(12)计算得: u_1 (DN25) = 0.93%; u_1 (DN40) = 2.68%; u_1 (DN50) = 0.73%; u_1 (DN80) = 0.47%; u_1 (DN100) = 0.81%。

要使得整个标准装置的流量标定范围较大而且尽量减少标准表的数量,所以本研究选择 3 台表 DN25

(8 m³/h ~ 60 m³/h)、DN50(30 m³/h ~ 250 m³/h)、DN100(120 m³/h ~ 1 000 m³/h)作为标准表,整套标准装置的流量范围为 8 m³/h ~ 1 000 m³/h。按照每台表均单独使用,其标准流量计测量 A 类不确定度: $u_1 = \max(u_i) = 0.93\%$,按照 $k = 2, u_7 = 0.15\%$,其他忽略不计,来计算标准扩展不确定度:

$$U = u \times k = (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2)^{1/2} \times k > 2u_1 \quad (13)$$

故装置扩展不确定度 $U = 1.884\,0\%$,按照涡街流

量计检定规程,装置的扩展不确定度($k = 2$)应不大于被检流量计最大允许误差的 1/2。所以该装置最多只能检定精度等级为 4.0 级或 5.0 级的流量计,只能够检定精度很低的仪表。

4 标准表压缩流量范围和并联不确定度计算

5 台仪表压缩流量范围后的数据表 6 ~ 10 所示。

表 6 DN25 $K = 68\,020.87$ $E_r = 0.19\%$ $E = 0.21\%$

流量/(m ³ · h ⁻¹)	16	24	30	40	50	60
$K_i/(1 \cdot m^{-3})$	68 161.30	67 915.62	67 880.43	68 085.32	68 096.88	67 999.24
$E_r(K_i)/(\%)$	0.11	0.06	0.07	0.06	0.05	0.19
$E_l(K_i)/(\%)$	0.12	0.09	0.12	0.05	0.06	0.02

表 7 DN40 $K = 17\,933.94$ $E_r = 0.15\%$ $E = 0.22\%$

流量/(m ³ · h ⁻¹)	20	24	32	50	64	80
$K_i/(1 \cdot m^{-3})$	17 972.99	17 894.95	17 972.21	17 906.23	17 930.34	17 919.05
$E_r(K_i)/(\%)$	0.02	0.12	0.12	0.15	0.14	0.05
$E_l(K_i)/(\%)$	0.13	0.13	0.12	0.09	0.01	0.05

表 8 DN50 $K = 9\,269.79$ $E_r = 0.23\%$ $E = 0.24\%$

流量/(m ³ · h ⁻¹)	40	50	75	100	150
$K_i/(1 \cdot m^{-3})$	9 292.46	9 264.25	9 247.12	9 268.28	9 273.94
$E_r(K_i)/(\%)$	0.02	0.08	0.23	0.20	0.04
$E_l(K_i)/(\%)$	0.14	0.03	0.14	0.01	0.03

表 9 DN80 $K = 2\,245.70$ $E_r = 0.20\%$ $E = 0.25\%$

流量/(m ³ · h ⁻¹)	75	100	120	180	240	350
$K_i/(1 \cdot m^{-3})$	2 242.59	2 243.44	2 240.96	2 247.20	2 251.40	2 239.99
$E_r(K_i)/(\%)$	0.13	0.11	0.20	0.11	0.18	0.16
$E_l(K_i)/(\%)$	0.08	0.06	0.12	0.04	0.15	0.15

表 10 DN100 $K = 1\,165.25$ $E_r = 0.14\%$ $E = 0.24\%$

流量/(m ³ · h ⁻¹)	600	800	1 000
$K_i/(1 \cdot m^{-3})$	1 164.57	1 162.40	1 168.09
$E_r(K_i)/(\%)$	0.14	0.07	0.13
$E_l(K_i)/(\%)$	0.03	0.14	0.14

根据公式(12)计算得: u_1 (DN25) = 0.23%; u_1 (DN40) = 0.25%; u_1 (DN50) = 0.37%; u_1 (DN80) = 0.33%; u_1 (DN100) = 0.27%。量程分别为 16 m³/h ~ 60 m³/h; 20 m³/h ~ 80 m³/h; 40 m³/h ~ 150 m³/h; 75 m³/h ~ 350 m³/h; 600 m³/h ~ 1 000 m³/h。

当使用多台流量计并联标定时,由于每台标准流量都为独立工作,标准表并联组合后的不确定度表示为:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i u_i)^2}{\sum_{i=1}^n q_i^2}^{1/2} \quad (14)$$

式中: q_i —各标准表的瞬时流量, u_i —标准表的测量 A

类不确定度, u —装置标准表并联的测量 A 类不确定度。由式(14)计算得出的并联组合不确定度如图 1 所示。

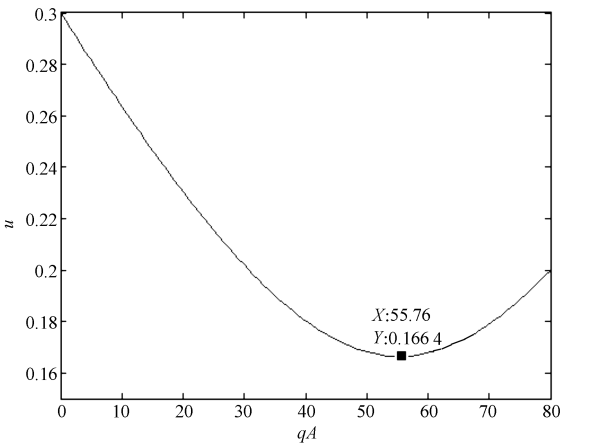


图 1 并联不确定度

假设两台标准表 A、B,流量量程均为 0 ~ 80 m³/h,不确定度分别为 $u_A = 0.2\%$, $u_B = 0.3\%$ 。x

轴表示标准表 A 的流量, y 轴表示便准表并联不确定度。假设并流量为 $80\text{ m}^3/\text{h}$ 。

由上可知,标准装置使用 5 台标准表组合而成,标准表并联使用时,不确定度小于单台标准表最大不确

定,图 1 曲线部分凹陷部分不确定度小于单台标准表最小不确定度,所以可认为标准表并联不确定度范围为 $\min(u_i) \leq u \leq \max(u_i)$ 。根据流量范围来确定标准表的组合如表 11 所示。

表 11 不同标准表组合的不确定度

流量范围(m^3/h)	DN25	DN40	DN50	DN80	DN100	u_1 (%)
$16 \leq q \leq 20$	✓					0.23 (min)
$20 \leq q \leq 40$	✓					0.23 (min)
		✓				0.25
$40 \leq q \leq 60$	✓					0.23 (min)
		✓				0.25
			✓			0.37
$60 \leq q \leq 80$	✓	✓				[0.23, 0.25]
		✓				0.25
			✓			0.37
	✓	✓				[0.23, 0.25] (min)
	✓		✓			[0.23, 0.37]
		✓	✓			[0.25, 0.37]
$80 \leq q \leq 150$			✓			0.37
				✓		0.33
	✓	✓				[0.23, 0.25] (min)
	✓		✓			[0.23, 0.37]
	✓			✓		[0.23, 0.33]
		✓	✓			[0.25, 0.37]
		✓		✓		[0.25, 0.33]
			✓	✓		[0.33, 0.37]
$150 \leq q \leq 350$				✓		0.33
	✓			✓		[0.23, 0.33]
		✓		✓		[0.25, 0.33]
			✓	✓		[0.33, 0.37]
	✓	✓		✓		[0.23, 0.33] (min)
	✓		✓	✓		[0.23, 0.37]
		✓	✓	✓		[0.25, 0.37]
$350 \leq q \leq 650$	✓	✓	✓	✓		[0.23, 0.37]
$600 \leq q \leq 1000$					✓	0.27
	✓				✓	[0.23, 0.27]
		✓			✓	[0.25, 0.27]
			✓		✓	[0.27, 0.37]
				✓	✓	[0.27, 0.33]
	✓	✓			✓	[0.23, 0.27] (min)
			✓	✓	✓	[0.27, 0.37]

当在特定的流量下,标准表并联组合时的不确定度不为常数时,取数值区间的最大值作为并联使用时的不确定度。特定流量下标准表的组合方式有多种时,数值区间最小的组合为最优组合。通过压缩流量范围及优化流量计组合,可以最大限度的减少装置标准流量计测量 A 类不确定度。多台标准表并联不确定度的计算方法如下式所示:

$$u_1 = \frac{\sum_{i=1}^n l_i u_{li}}{\sum_{i=1}^n l_i}$$

(15)

式中: l_i —表 11 中的流量范围, u_{li} —该范围下的不确定度。

通过式(15)计算得: $u_1 = 0.322\%$,按按照 $k = 2$, $u_7 = 0.15\%$,其他忽略不计,来计算标准扩展不确定度,根

(下转第 323 页)