

双量程差压流量计不确定度和量程比的验证

魏峥¹, 谢林², 纪波峰³, 陈杰³, 纪纲³

(1.盐城热电有限责任公司, 江苏 盐城 224006; 2.上海电力公司电力科学研究院,
上海 200437; 3.上海同欣自动化仪表有限公司, 上海 200070)

提 要 用差压法测量流体流量是个已经应用了一百多年的经典方法, 由于它有很多优点, 所以直到现在还在广泛应用。但是由于流量与差压信号之间的平方根特性, 使其量程比不够大, 在双量程标准差压流量计中, 由于增设了一台低量程差压变送器, 使量程低段的差压测量精确度提高 33 倍 (典型值), 从而使量程低段的流量测量精确度得到提高。这就好比一台小表与一台大表串联起来完成一个测量任务。经按国家标准和国际标准所提供的不确定度公式计算, 测量液体时不确定度能达到 1.0%, 测量蒸汽和组份稳定的气体时不确定度能达到 1.5%, 量程比能达到 100:1。但是检验真理的唯一标准是实践, 文中提供了 DN80 和 DN200 共 6 套双量程差压流量计在水流量标准装置上的验证数据, 验证得到的误差比计算结果略小, 优于技术指标。并在现场使用中得到证实。

关键词: 双量程 差压流量计 不确定度 量程比 验证

中图分类号: TH814

文献标志码: B

The verification of Uncertainty and turndown ratio for dual range DP flowmeters

Wei Zheng, Xie Lin, Ji Bofeng, Chen Jie, Ji Gang

(1. Yancheng Thermal Power Co., Ltd., Yancheng, 224006, China;

2. Electric Power Research Institute SMETC, Shanghai, 200437, China;

3. Shanghai Tontion Automation Instrumentation Co., Ltd., Shanghai, 200070, China)

Abstract: Measurement of fluid flow by differential pressure is a classic method which applied over a hundred years. It has many advantages, so till now it's still widely used. However, flow is the square root of the differential pressure, turndown ratio is not big enough to make it. In dual range DP flowmeters, we setup a extra DP transmitter at lower range, the DP measurement accuracy increases 33 times in the lower range, and improves flow measurement accuracy in lower range. Just like measure by a small meter and a large meter in one pipe. We calculate uncertainty which provide by National standard and International standard, it's lower than 1.0% when measure liquid flow, and it's lower than 1.5% to measure steam and stable component gas, turndown ratio reaches 100:1. Practice is the only criteria for test truth, the test data of 6 dual range DP flowmeters is also included in the paper which verified on the water flow standard device, the error is smaller than calculation value in the test, and better than technical specifications. And it's also verified in practice.

Key words: dual range; differential pressure (DP) flowmeters; uncertainty; turndown ratio; verification

1. 不确定度与量程比的关系

1.1 范围度的定义

国际标准化组织 (ISO) 于 1998 年颁发国际标准 ISO11631《流体流量测量—规定流量仪表性能的方法》, 对范围度作了重新定义^[1]。

(1) 范围度 (turn down, turn down ratio) 是测量范围的最大流量被最小流量除的值。

(2) 上限 (值) 范围度 (rangeability) 是“范围最大上限值”与“最小上限值”间的比。

重新定义适应了流量测量技术发展的需要。范围度也称量程比, 老式的流量计只有一档量程, 以前用英文 rangeability 并无歧意, 但现在有很多流量计, 测量范围可以根据使用需要设定, 于是重新定义的术语 rangeability 定义为测量上限可调比。

还有一个重要概念, 即范围度或量程比指的是保证精确度的最大流量与最小流量之比。有些流量计, 在百分比流量很小时仍可测量, 但精确度保证不了, 例如涡街流量计, 在雷诺数 ≥ 5000 后就有稳定的旋涡产生, 但一直到雷诺数 ≥ 20000 后才能保证精确度, 所以, 计算量程比中的最小流量只能取 $Re_D=20000$ 所对应的流量值^[2]。

1.2 关于分界流量

在 JJG1030-2007 中, 分界流量 (transition flowrate) 定义是在最大流量和最小流量之间的流量值, 它将流量范围分割成允许误差不同的两个区, 即“高区”和“低区”^{[3][4]}。

例如外夹式超声流量计用来测量液体流量时, 在分界流量到最大流量之间, 往往确定为 1% 精确度。而在最小流量到分界流量之间, 精确度确定为 2%。这就解决了在整个测量范围内不同精确度的描述问题, 因为百分比流量很小时, 能够达到的精确度比百分比流量大的高区要低一些。而流量计的使用者对“低区”的精确度也很关注。

“低区”的精确度除了用示值误差表示之外, 有的也用引用误差来描述。

“高区”和“低区”的分界大多用百分比流量表示, 有的也用流速表示。

1.3 不确定度和量程比的关系

GB/T 17611-1998 中, 精确度 (Accuracy) 的定义是被测量的测量结果与 (约定) 真值间的一致程度。精确度的定量表示应采用不确定度。好的精确度意味着小的随机误差和系统误差。

在同一标准中, 系统不确定度 (systematic uncertainty) 的定义是与系统误差有关的不确定度分量, 它对平均值的影响不能通过多次测量来减小。

不确定度与量程比有着密切关系。同一台仪表如果确定的精确度等级较高, 只能在较低的量程比条件下得到, 如果想得到较大的量程比, 则必须降低精确度等级。例如腰轮流量计, 量程比为 5:1 时, 基本误差为 $\pm 0.2\% \text{MV}$, 量程比为 10:1 时, 则降为 $\pm 0.5\% \text{MV}$ 。因此, 在承诺一台流量计不确定度时, 同时要给出量程比数据。

有人将一台新型差压装置与差压变送器组成的流量测量系统放在流量标准装置上标定, 发现在 3:1 量程比条件下, 能得到 0.3% 的线性度, 同时又确定这种流量计的量程比为 10:1, 但又没有验证过在 10:1 量程比条件下是否仍能达到 0.3% 的精确度, 也没做过不确定度分析计算, 这是有问题的。殊不知, 在满量程流量 10% 处, 差压只有满量程差压的 1%, 0.065% 精确度等级的差压变送器, 此时的不确定度只能达到 4.3%^[5], 仅此一项就与 0.3% 的承诺相去甚远。

2. 标准差压流量计精确度等级的确定

2.1 精确度等级的确定必须以理论分析和实验数据为基础

流量计不确定度的确定是一件非常慎重的事情, 它是仪表制造厂对用户所做的承诺。要有充分而可靠的理论依据以及充分的实验数据来支持。没有依据的夸张不仅得不到用户的信任, 而且会变成笑料造成恶劣影响。

曾经有一本杂志刊登了一幅广告, 说某个仪表公司的差压流量计用一台高精度差压变送器, 用来测量天然气流量, 精确度等级 1.5 级, 量程比可达 65 倍。殊不知在满量程流量 1/65 处, 差压只有满量程差压的 1/4225。且不说气体温度压力等因素对系统不确定度的影响, 仅差压测量不确定度的影响就已相当可观, 即使采用的是当今世界上精确度等级最高的 0.04% 差压变送器, 在差压为 0.024% FS 点, 差压变送器输出为 0~0.064% FS 都有可能, 这哪里还有精确度可言呢。

2.2 被测流体为液体时的不确定度

GB/T 2624-2006 和 ISO5167:2003 (E) 规定, 标准孔板不确定度能做到 0.5%^{[6][7]}, 在此基础上, 引入差压测量不确定度, 当被测流体为液体例如水时, 系统不确定度能做到 1% MV, 其实表示不确定度时, 数字后面用不着带 MV (Measurement Value), 这里拖了一个 MV 是为了强调这个 1% 不是引用误差。从不确定度估算来看, 能够达到 1% 系统不确定度的量程比并不大, 约 6:1, 因为当流量为 16.7% FS 时, 差压只有满量程差压的 2.78%, 该点的差压测量不确定度为 1.56%, 按照差压不确定度与流量测量不确定度的关系可知, 差压测量不确定度引入的流量测量不确定度最多为 $1.56\% / 2$ ^{[8][9]}, 按系统不确定度合成公式计算^[8], 系统不确定度可优于 1%。

在水流量标准装置上对标准孔板流量计系统 (配 0.065 级差压变送器) 进行检定时, 如果系统进行了雷诺数自动补偿, 量程比一般能达到 10:1, 即在 10% FS 的流量检定点, 仍能通过 1% FS 精确度的检定, 这是因为该检定点对应的差压只有 1% FS, 已经非常靠近零点, 而在流量检定操作过程中, 都有一项校零操作, 即阀门关闭测量管内流体流速为零时, 将流量计示值调到零, 所以此时的差压测量实际不确定度比

计算公式给出的结果要小一些。

2.3 被测流体为蒸汽时的不确定度

被测流体为蒸汽和组份稳定的气体时，能够达到的不确定度要比测量液体时大，这是因为绝大多数液体密度较稳定，在液体的温度稳定时，其密度就是一个常数，在温度变化时，其密度也只有微小的变化，只要进行温度补偿就可忽略密度影响。但是蒸汽和气体的密度测量较复杂，对流量测量的影响很大。

气体流量测量的另一个难点是其可膨胀性^[10]，在测量液体时，因为液体可以认为是不可压缩流体，因此 ε 总是等于 1，所以在系统不确定度分析中，无此项影响。

引入密度测量不确定度影响和可膨胀性影响后，被测流体为蒸汽和组份稳定的气体时，系统不确定度只能达到 1.5%，能满足国家标准 GB17167-2006 的要求^[11]。量程比也能达到 6:1。

2.4 双量程差压流量计的量程比

双量程差压流量计的关键是在原有差压变送器的基础上增设了一台低量程差压变送器，从而使低量程段的差压测量精确度得到提高，进而提高系统精确度^[12]。在保证精确度的基础上，量程比得到大幅度提高，从而使这一使用了一百多年的经典方法，产生一次飞跃。其系统不确定度和量程比如下：

- ① 被测流体为液体时
 - (1~3) %FS 区间，低量程上限的 $\pm 1.0\%$ ；
 - (3~100) %FS 区间，流量示值的 $\pm 1.0\%$ 。
- ② 被测流体为蒸汽和组份稳定的气体时
 - (1~3) %FS 区间，低量程上限的 $\pm 1.5\%$ ；
 - (3~100) %FS 区间，流量示值的 $\pm 1.5\%$ 。

从量程比的定义来看，上述指标对应的量程比为 100:1。

其实，保证示值误差 1.0%和 1.5%的量程比只有 33:1，其中，高量程差压变送器覆盖的量程比只有 5.77:1，低量程差压变送器覆盖的量程比也只有 5.77:1，由于 $5.77 < 6$ ，所以不确定度估算的结果，精确度也是有保证的。双量程差压流量计不确定与量程比的完整分析详见参考文献^[13]。

3. 不确定度与量程比的验证

3.1 验证方法

对流量计不确定度和量程比的理论分析和计算是重要的，它是从原理上揭示了变量之间的内在联系和客观规律，但是，理论毕竟是理论，它还要经得起实践的检验，因为检验真理的唯一标准是实践。具体检验是放在流量标准装置上实流检定。

差压式流量计的现行检定规程是 JJG640-1994，该规程规定，不管流量计测量的介质是什么，都可以放在水流量标准装置上实流检定，可惜该规程只说到对组成系统的各单元进行单表检定^[14]，没有说到系统检定，因此换个 JJG897-95《质量流量计检定规程》^[15]，将一套差压式流量计当作一台质量流量计检定。

不同流体的差压流量计检定的理论基础是动力学相似，即同一套流量计测量不同的流体，流体的性质不同，但只要有相同雷诺数就有相同的流出系数，因此，用水检定合格的差压流量计，测量其他流体也是合格的。

3.2 验证结果

具体在水流量标准装置上检定的流量计共 6 套，其中 DN80 两套，DN200 四套，各台表验证的结果如表 1~6 所示。六张检定证书如图 7 所示，7 张检定原始记录如图 8 所示。

表 1 检定结果（被检表编号：FE-3201-1）

检定点 %FS	13	30	40	70	100
被检表示值/t·h ⁻¹	4.055	8.986	12.190	21.298	30.374
标准器示值/t·h ⁻¹	4.038	8.950	12.148	21.381	30.218
示值误差/%	0.42	0.40	0.34	0.55	0.52

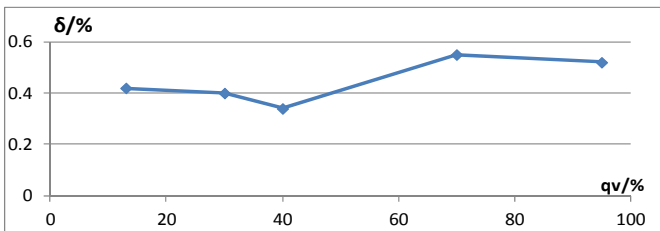


图 1 误差曲线（被检表编号：FE-3201-1）

表 2 检定结果 (被检表编号: FE-3201-2)

检定点%FS	13	30	40	70	100
被检表示值/t·h ⁻¹	4.090	9.179	11.805	21.352	30.510
标准器示值/t·h ⁻¹	4.092	9.166	11.791	21.395	30.445
示值误差/%	-0.04	0.14	0.11	0.22	0.21

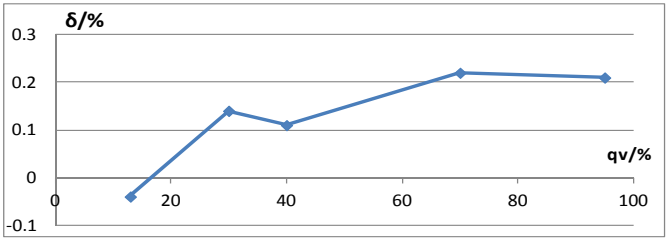


图 2 误差曲线 (被检表编号: FE-3201-2)

表 3 检定结果 (被检表编号: FE-2781-1)

试验点%FS	12.5	30	40	70	100
被检表示值/t·h ⁻¹	34.368	83.083	110.770	200.820	274.388
标准器示值/t·h ⁻¹	34.262	82.873	110.459	200.192	272.838
示值误差/%	0.31	0.25	0.28	0.32	0.57

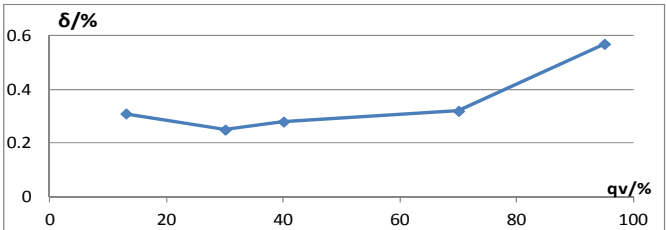


图 3 误差曲线 (被检表编号: FE-2781-1)

表 4 检定结果 (被检表编号: FE-2781-2)

试验点%FS	12.5	30	40	70	100
被检表示值/t·h ⁻¹	33.339	84.086	111.850	195.657	275.335
标准器示值/t·h ⁻¹	33.575	83.918	111.545	194.645	273.399
示值误差/%	-0.70	0.20	0.27	0.52	0.71

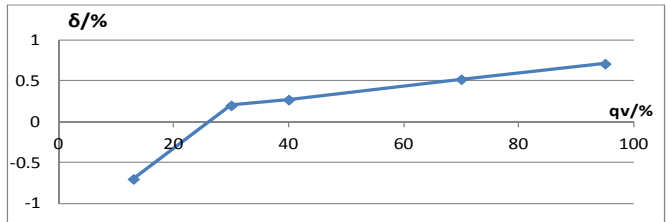


图 4 误差曲线 (被检表编号: FE-2781-2)

表 5 检定结果 (被检表编号: FE-2881-1)

试验点%FS	12.5	30	40	70	100
被检表示值/t·h ⁻¹	26.349	64.080	88.903	153.665	218.566
标准器示值/t·h ⁻¹	26.232	64.007	88.777	153.273	217.793
示值误差/%	0.45	0.12	0.14	0.26	0.35

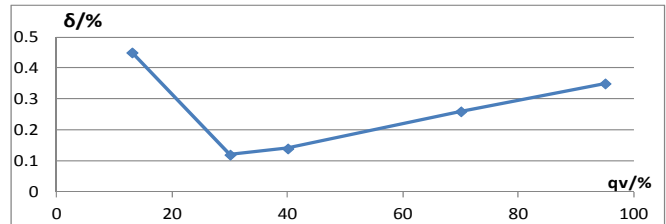


图 5 误差曲线 (被检表编号: FE-2881-1)

表 6 检定结果 (被检表编号: FE-2881-2)

试验点%FS	3	12.5	30	40	70	100
被检表示值/t·h ⁻¹	8.819	34.368	83.083	110.770	200.820	274.388
标准器示值/t·h ⁻¹	8.824	34.262	82.873	110.469	200.192	272.836
示值误差/%	-0.06	0.31	0.25	0.28	0.32	0.57

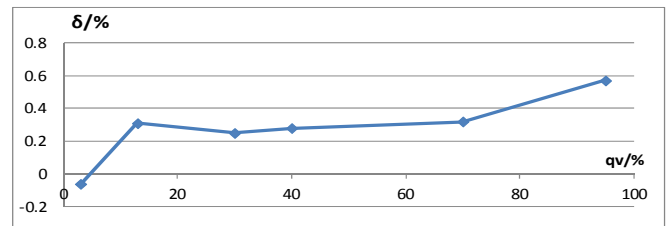


图 6 误差曲线 (被检表编号: FE-2881-2)

差压式流量传感器检测/校准记录									
委托单位: 中国计量科学研究院		制造单位: SIPAUTRONICS		仪器名称: SIPAUTRONICS		型号规格: SIPAUTRONICS		检定/校准日期: 2018.08.01	
检测/校准环境条件: 温度: (15-35) °C; 大气压力: (86-106) kPa; 相对湿度: (45-85) %; 无剧烈振动/无强电磁干扰; 室温: 20 °C; 大气压力: 101.3 kPa; 相对湿度: 50 %; 校准: 合格		检测/校准人员: 张明		检测/校准日期: 2018.08.01		审核人员: 张明		校准有效期至: 2019.08.01	
序号	仪器名称	型号	编号	检定有效期至	测量范围	不确定度或准确度等级	计量标准证书号	证书有效期至	备注
1	标准式气体流量标准装置	2001-10000 L	SIPAUTRONICS	2018.08.01	(0.016-1000) m³/h	±0.20% k=2	1	2018.08.01	
2	静态容积法流量标准装置	DN40-DN500	SIPAUTRONICS	2018.08.01	(3-3000) m³/h	0.05 级	1	2018.08.01	
3	动态质量法流量标准装置	DN25	SIPAUTRONICS	2018.08.01	(0.52-7.6) m³/h	±0.08% k=2	1	2018.08.01	
序号	时间	标尺	流量	平均值	输出电流	示值误差	重复性	温度	压力
1	2018.08.01	0.016	0.016	0.016	4.090	-0.04	0.01	20	101.3
2	2018.08.01	0.032	0.032	0.032	9.179	0.14	0.01	20	101.3
3	2018.08.01	0.048	0.048	0.048	11.805	0.11	0.01	20	101.3
4	2018.08.01	0.160	0.160	0.160	21.352	0.22	0.01	20	101.3
5	2018.08.01	0.320	0.320	0.320	30.510	0.21	0.01	20	101.3

2018.08.01	0.016	0.016	0.016	0.016	4.090	-0.04	0.01	20	101.3
2018.08.01	0.032	0.032	0.032	0.032	9.179	0.14	0.01	20	101.3
2018.08.01	0.048	0.048	0.048	0.048	11.805	0.11	0.01	20	101.3
2018.08.01	0.160	0.160	0.160	0.160	21.352	0.22	0.01	20	101.3
2018.08.01	0.320	0.320	0.320	0.320	30.510	0.21	0.01	20	101.3

图 7 检定原始记录 (其余 5 份原始记录从略)

SITHIAS

上海仪器仪表自控系统检验测试所
Shanghai Inspection and Testing Institute of Instruments and Automatic Systems

校准证书
CALIBRATION CERTIFICATE

证书编号: **D13-007-JG-06**
Certificate No.

送校单位 上海同欣自动化仪表有限公司
Client

计量器具名称 标准孔板
Equipment to be Verified

型号/规格 LGHK2.5-200C
Model/Type

出厂编号 FE-2881-2 128745B
Serial No.

制造单位 上海同欣自动化仪表有限公司
Manufacturer

校准依据 参照 JJG640-1994
Standard/Specification for the Calibration

批准人 张子强
Authorized by
核 验 员 张子强
Checked by
校 准 员 张子强
Calibrated by

校准日期 2013 年 01 月 06 日
Issue Date

地址: 上海市漕宝路 103 号
Address: 103 Cao Bao Road Shanghai 200333, China
电话: 021-64849355
Fax: 021-64849355
E-mail: sithias@vip.sina.com

电话: 021-64516350
Tel: 021-64516350
邮编: 200233
Post Code: 200233
网址: www.sithias.com
Website: www.sithias.com

第 1 页 共 2 页
Page 1 of 2

SITHIAS

本次校准所使用的主要计量标准器具:
Standard of measurement used in this calibration:

名称 Name	型号 Model	编号 Serial No.	证书编号 Certificate No.	有效期 Due date	测量范围 Measuring range	不确定度或准确度 等级或最大允许误差 Uncertainty/accuracy class/ maximum permissible error
静态容积法水流量标准装置	/	/	[2011]沪量标证字第 S009 号	2015.2.27	(3~774) m³/h	0.05 级

以上计量标准器具的量值溯源至国家基准。
The value of the quantity of measurement standard used in this verification is traced to those of the national primary standards in the P.R.China.

检定的地点、时间、环境条件:
place and time of the verification, environmental condition
地点: 上海仪器仪表自控系统检验测试所
Place: 上海仪器仪表自控系统检验测试所
时间: 2013.01.06
Time: 2013.01.06
温度: 6.0 (°C)
Temp: 6.0 (°C)
相对湿度: 80 (%)
R.H: 80 (%)
大气压力: 101.7 (kPa)
Atmosphere Pressure: 101.7 (kPa)

校准数据 / 结果
Data / Results of Calibration

序号	测试点的流量 (m³/h)	仪表输出 (mA)	仪表示值 (m³/h)	示值误差 (%)	重复性 (%)
1	278.612	/	280.086	0.53	0.03
2	140.959	/	141.291	0.23	0.05
3	71.058	/	71.065	0.01	0.02
4	35.278	/	35.207	-0.20	0.02
5	17.460	/	17.440	-0.11	0.04

校准介质: 水
满量程流量: /
准确度等级: 1.0 级合格
本次校准结果的扩展不确定度: U=0.07% (k=2)

以下空白

说明:
1. 使用过程中, 如对校准仪器的技术指标产生怀疑, 请重新校准。
2. 通常情况下 2 年校准一次。

证书编号: D13-007-JG-06
Certificate No. D13-007-JG-06
本证书的有效性依赖于校准所具备的资质。
This calibration certificate refers only to the complete record.
2. 本证书的有效性依赖于校准所具备的资质。
This verification certificate shall not be reproduced except in full, without the written approval of the laboratory.

第 2 页 共 2 页
Page 2 of 2

图 8 检定证书 (其余 5 张证书从略)

从表 1~6 可以看出 6 套流量计中, 5 套量程比做到 8:1, 1 套做到 32:1。6 套流量计中, 误差最大的一套, $\delta=0.71\%$, 其余的 5 套依次为 0.57%、0.55%、0.53%、0.45%和 0.22%, 之所以 3%FS 检定点只做一套, 是为了节省检定费和节省检定时间。

3.3 检定数据的利用

检定数据是一个资源, 合理地利用它能使系统精确度进一步提高。可惜的是在大多数情况下, 这些数据只作为判定仪表是否合格的依据。

将各套流量计检定原始记录中各检定点的误差值依次排列, 制成误差随流量变化的关系曲线, 如图 1~6 所示, 从曲线的形状可以看出, 曲线比较平滑, 如果将各检定点的示值乘上一个合适的误差校正系数, 就可将各点误差校正掉, 这种校正可以在流量二次表中用 10 段折线予以实现。经误差校正的流量计如果在流量标准装置上重复做检定点的误差试验, 就可做到基本没有误差, 但是具体试验时会发现, 还是存在 0.1%以下的微小误差。这是由流量计的重复性误差引起的。

采用误差校正的方法能使系统精确度有一个显著的提高, 但由于重复性误差的存在, 变送器和二次表等的时漂, 以及介质不同引起的误差, 最终流量计仍会有一定的误差, 这种误差一般 $\leq 0.5\%$ 。但是有一个要领, 就是配套校验配套使用, 如果变送器 (尤其是差压变送器) 或二次表更换过了, 原来各检定点的误差值会有明显的变化, 于是原来的误差校正系数也就不再正确了。必须重新标定, 才能获得 0.5%的精确度。

4. 结束语

① 标准孔板流量计, 如果只配用一台差压变送器, 理论分析只能得到 6:1 的量程比, 但经雷诺数补偿和其他各项补偿后, 在流量标准装置上验证, 实际能达到 10:1 的量程比。

② 增设了一台低量程差压变送器后, 由于低量程段差压测量精确度提高 33 倍, 量程比可达 100:1, 其中 (3~100) %FS 区间, 系统不确定度可达 1% (液体) 和 1.5% (蒸汽等)。在水流量标准装置上的验证结果证明了这一点。

③ 利用实流标定数据绘制误差曲线，并在流量二次表中用折线法进行误差校正，可使系统不确定度提高到 0.5%。

④ 流量二次表用 HART 通信的方法去差压变送器直接读取差压值，去压力变送器直接读取压力值，从而消除了变送器中的 D/A 转换和流量二次表中的 A/D 转换引入的误差，可使系统不确定度进一步改善。

⑤ 双量程标准差压流量计，其系统不确定度经依据相关标准进行的分析计算，能达到国家标准 GB17167-2006 的要求，量程比可达 100:1，这一结论得到权威机构实流检定确认。

这一方法是对已经广泛使用了一百多年的经典产品的一次重要改进，使老产品焕发了青春。

参 考 文 献

1. 上海工业自动化仪表研究所.GB/T 22133-2008 流体流量测量—规定流量仪表性能的方法[S].北京：中国标准出版社，2009
2. 姜仲霞，姜川涛，刘桂芳. 涡街流量计[M]. 北京：中国石化出版社，2006.
3. 纪纲. 流量测量仪表应用技巧[M].2 版. 北京：化学工业出版社，2009.55
4. 中国计量科学研究院.JJG 1030-2007 超声流量计检定规程[S].北京：中国标准出版社，2007
5. 中石油工程设计有限公司西南分公司.GB/T 21446-2008 用标准孔板流量计测量天然气流量[S]. 北京：中国标准出版社，2008.
6. ISO.ISO 5167-2: 2003 (E) Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full[S].Switzerland:ISO, 2003.
7. 上海工业自动化仪表研究所. GB/T 2624-2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量[S]. 北京：中国标准出版社，2007.
8. 王池. 流量测量不确定度分析[M]. 北京：中国计量出版社，2002:61~66
9. 蔡武昌，孙淮清，纪纲. 流量测量方法和仪表的选用[M].北京：化学工业出版社，2001
10. 纪纲，纪波峰. 流量测量系统远程诊断集锦[M]. 北京：化学工业出版社，2012:18~23
11. 全国节能监测管理中心.GB17167-2006 用能单位能源计量器具配备和管理通则[S].北京：中国标准出版社，2006.
12. 袁均钢，倪长旺，纪纲. 双量程差压流量计原理与应用：2008 全国能源计量优秀论文集[C]. 北京：中国计量出版社，2008:554~559.
13. 陈勇，马璐文，陈新亮，等. 双量程孔板流量计不确定度及量程比[J].石油化工自动化，2013，49(5).
14. 中国计量科学研究院.JJG 640-1994 差压式流量计检定规程[S].北京：中国计量出版社，1994.
15. 翟秀贞、杨宗玉.JJG 897-95 质量流量计检定规程[S].北京：中国计量出版社，1995.

刊登在《石油化工自动化》2013，50（6）：54-57