

现场服务型标准表法气体流量标准装置的研制

侯学青^{1,2}, 李斌², 姚蜜¹, 强盛²

(1. 上海市质量监督检验技术研究院 计量检测所, 上海 201114;

2. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要: 针对目前气体流量计检测送检时间长, 实验室检测工况与流量计实际使用工况不同造成误差扩大等问题, 设计了移动式、单元化的现场服务型标准表法气体流量标准装置; 介绍了该装置的工作原理, 装置硬件的选型以及结构; 工控机通过 Modbus 控制变频器与风机形成稳定的负压源, 并通过电流与频率采集模块采集标准表, 被检表及相应温度压力传感器的数据; 软件通过虚拟仪器技术使用 LabWindows/CVI 设计了简单易用的程序; 通过分析装置的不确定度, 稳定性及进行传递比较法的验证, 证实了这种现场服务型标准表法气体流量标准装置可应用于现场的气体流量计的检定; 节省了送检时间, 提高了企业设备使用效率。

关键词: 气体流量标准装置; 标准表法; LabWindows/CVI; 不确定度; 稳定性

Development of Field Service Gas Flow Standard Device with Master Meter Method

Hou Xueqing¹, LI Bin², YAO Mi¹, QIANG Sheng²

(1. Shanghai Institute Of Quality Inspection and Technical Research, Measurement and Testing Institute, Shanghai 201114, China;

2. Shanghai University, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai 200444, China)

Abstract: Aiming at the problem of long inspection time of gas flowmeter, and the error caused by difference of laboratory inspection conditions and actual use conditions. A mobile and modular master meter gas flow standard device is designed. The working principle, selection and structure of device hardware are introduced. The industrial computer controls the frequency converter and fan to form a stable negative pressure source through Modbus, and collects the data of master meter, tested flowmeter and corresponding temperature and pressure sensor through current and frequency acquisition module. The software uses LabWindows / CVI to design a simple and easy-to-use program. Through the analysis of the uncertainty, stability and transfer comparison method of the device, it is confirmed that the field service master meter method gas flow standard device can be applied to the verification of the field gas flowmeter. The inspection time is saved, the use efficiency of enterprise equipment is improved.

Keywords: Gas flow standard device; Master meter method; LabWindows/CVI; Uncertainty; Stability

0 引言

我国提出, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。这意味着, 非化石能源逐步取代化石能源是大势所趋。在从化石能源向可再生能源转型的过程中, 我国首要任务就是降低煤炭的消费量。但不得不承认的是, 可再生能源的建设和发展周期又相对较长。在这样的情况下, 天然气作为介于传统化石能源以及可再生能源之间的低

碳清洁能源, 其碳排放量低于煤炭、石油, 且价格比可再生能源低廉。因此, 中长期来看, 天然气将是中国实现碳中和目标的能源转型桥梁。在今后 10~15 年内, 中国天然气快速发展的基本面没有改变, 天然气消费持续增长的客观条件依然存在, 天然气必将在未来的新兴能源体系中占据一席之地^[1-2]。

天然气从生产到销售再到客户手中等过程均需要计量, 计量使用的流量计数量就有数百万之多^[3], 除

收稿日期: 2021-11-06; 修回日期: 2021-11-30。

作者简介: 侯学青(1984-), 男, 上海人, 硕士, 高级工程师, 主要从事流量计量方向的研究。

引用格式: 侯学青, 李斌, 姚蜜, 等. 现场服务型标准表法气体流量标准装置的研制[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 288-294.

天然气之外,在压缩空气、氧气、氮气以及相似类型能源如液化石油气改天然气、煤改气的计量中,也需要使用大量的气体流量计,计量这些气体用到的流量计在逐年增加。如果被用于贸易结算,其计量精度和可靠性就必须要高,有些还要和国际能接得上轨,买家也希望价格昂贵的流量计能够物有所值,这对流量计维持准确度提出了更高的要求^[4]。

对于气体流量计的检测一般使用音速喷嘴法气体流量标准装置、pVTt法气体流量标准装置和钟罩式气体流量标准装置。这些装置一般体积都比较大、装置的重重量非常重,需要在开放的环境使用^[5-6]。同时气体流量计送检,需要送到指定检测单位进行离线检测,检测好之后再取回,来回送取通常需要一到两天,再加上排队及检测的时间,最快也要一个礼拜才能重新装在装置上使用,大大增加了企业停产时间,降低了生产效率。目前已有使用音速喷嘴法气体流量标准装置安装在卡车上进行移动的设计^[7]。但是音速喷嘴为定点使用,不能连续调节流量,致使想要的流量点无法校准。亦有使用其他流量计作为标准表的移动式气体流量标准装置^[8],但是以上装置的重重量都很重,需要的运输工具很大,不方便携带,也无法进实验室。因此,要求标准装置既能准确地对流量计进行检测,同时又能方便的移动到流量计的工况环境成了标准装置的一个新的发展方向。

本文在学习总结国内外先进技术及各种设计的基础上进行创新,设计模块化,方便组装及可移动的标准表法气体流量标准装置,以解决气体流量计现场高精度检测的问题。

1 装置概述及设计指标

该装置是以减少占用空间、可移动至现场、提高标定效率、降低能耗、提供高准确度的标定服务为总体设计思路。设计指标:

- 1) 整体占用场地空间:不大于 $L2\ 200\ \text{mm} * W\ 1\ 500\ \text{mm} * H1\ 800\ \text{mm}$;
- 2) 整体重量: $\leq 300\ \text{kg}$;
- 3) 适用环境:温度 $(5 \sim 45)^\circ\text{C}$;湿度 $(35 \sim 95)\%\text{RH}$;大气压力 $(86 \sim 106)\ \text{kPa}$;
- 4) 介质:空气;
- 5) 适用口径:DN15, 25, 40, 50, 80;
- 6) 流量范围: $0.5 \sim 270\ \text{m}^3/\text{h}$;

7) 装置的相对扩展不确定度不大于 0.63% ($k=2$);

8) 稳定性不超过 0.3% 。

2 装置原理

整个装置的设计及检定的依据是 JJG 643—2003《标准表法流量标准装置》^[9]。装置是以空气为气源的负压法装置。负压法气体流量标准装置由于不需要大容量的储罐储存压缩空气,结构相对简单,整套装置处于常压或负压状态,对装置设备的压力等级要求低,整套装置的投资额仅相当于正压法气体流量装置的一半,且减轻了装置的整体重量。由于负压法装置不需要储气过程,仅依靠真空泵或风机连续抽负压即可工作,不像正压法装置那样一般只能间断性的工作,因此负压法装置的工作效率是最高的,能在短时间内完成大量的检定校准工作^[10]。

图1为本装置的结构原理图。标定时,首先根据设定的流量点选取标准表通道,然后打开相应通道的电动球阀,设置流量调节阀开度,启动变频器控制离心风机进行流量调节,在离心风机的作用下,空气通过被检流量计流入稳流罐,之后进入已选定的标准流量计,接着流入汇集罐,最后经离心风机流出。通过调节变频器频率和阀门开度使流量稳定。当设定流量稳定后,控制系统开始接收标准表和被检流量计的信号,并测量标准表和被检流量计处的温度和压力。到结束测试时,停止接收标准表和被检表的信号。控制系统把标准表的体积量换算为被检表的温度和压力状况下的体积量,最终得出被检流量计的计量性能。被检流量计类型可以为涡街流量计、涡轮流量计、气体腰轮流量计、膜式燃气表^[11-14]。

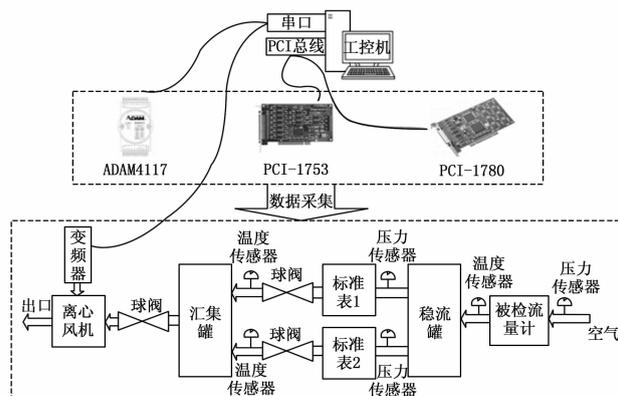


图1 装置的结构原理图

3 装置的硬件设计

3.1 硬件的选型与装置结构

常用以音速喷嘴流量计、速度式流量计和容积式流量计为标准表的标准装置，在流量范围、装置能耗等方面各有特色^[15]。三类装置的性能比较如表 1 所示。

表 1 三类标准装置的性能的比较

比较项目	音速喷嘴	速度式	容积式
流量上限	很大	很大	较小
流量下限	很小	不能很小	很小
压损	>20 kPa	≤2 kPa	≤2 kPa
气源	真空泵	风机	风机
能源消耗	较大	较小	较小

该装置的标准表选用 2 台 Elster 气体腰轮流量计 (DN50, DN100, 容积式)。这类流量计重复性 (0.1%)、长期稳定性非常优良。控制器单元采用研华公司的 IPC-900 工控机、PCI 系列板卡以及 ADAM 数据采集模块组成，其中，ADAM-4117 模块采集罗斯蒙特温度压力变送器 4~20 mA 数据。PCI-1753 中断控制板卡以标准表的脉冲作为外部中断源，启停 PCI-1780 的脉冲计数功能。PCI-1780 高速计数器板卡实现对标准表和被检流量计脉冲输出的计数以及输出高低电平至继电器控制电磁阀的开关。流量的调节是工控机通过 Modbus 协议控制 ABB 变频器，Elektorr 离心风机及阀门结合实现的，可以在量程范围内快速准确地调节到所需流量，使得标定工作效率大大提高。硬件电气结构示意图如图 2 所示。

3.2 标准表的信号处理型

由于 PCI-1780 可接受的电压为 TTL 5 V，故需对标准表的频率信号要做相应的处理。

标准表信号经过一级 RC 低通滤波，再通过 TI OPA2347 运放进行放大，最后经一级 NE555 定时器构成的施密特触发器将波形整形后输出给 PCI-1780 及 PCI-1753。信号处理电路如图 3 所示。

3.3 硬件功能的实现

当流量通过变频器和阀门结合，达到设定点的 ±5% 且稳定后，启动标定功能。令 PCI-1780 发送 1 MHz 高频脉冲，同时启动 3 路脉冲计数器，分别记录被检流量计脉冲，高频脉冲，标准表 1 或 2 的脉

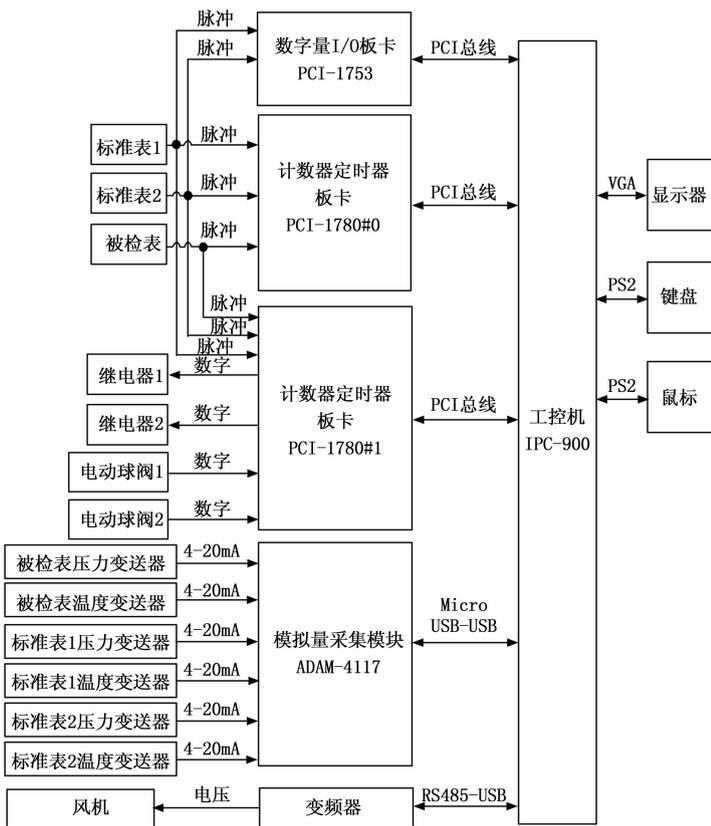


图 2 硬件电气结构示意图

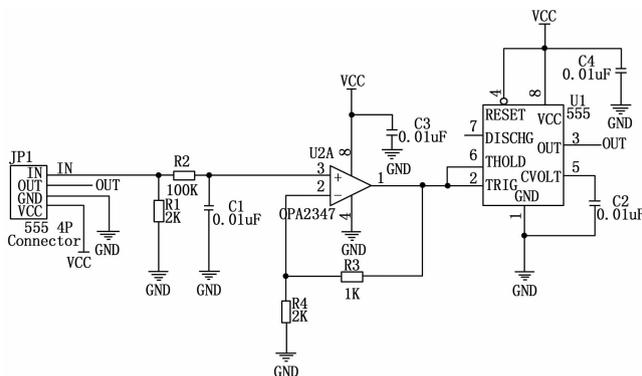


图 3 标准表信号处理电路

冲数 (流量小于 40 m³/h，使用标准表 1，大于 40 m³/h，则使用标准表 2)。PCI-1753 的 C0 或 C2 号口作为标准表 1 或 2 的脉冲中断控制，开始标定后，不立即开始计数，当 C0 或 C2 号口的标准表脉冲到达下一个脉冲上升沿时，触发中断，记录此时的被检流量计的脉冲数 NM1，标准表 1 或 2 的脉冲数 NS1，同时记录此时的高频脉冲数 HF1。

当达到被检流量计 1 000 个脉冲后 (若被检流量计 1 000 个脉冲不足 30 秒，则取标准表用时 30 秒)，不立即停止计数，当 C0 或 C2 号口的标准表脉冲到

达下一个脉冲上升沿时, 触发中断, 停止计数, 记录此时的被检表脉冲数 NM2, 标准表 1 或 2 的脉冲数 NS2, 同时记录此时高频脉冲数 HF2。

可得出相关数据如下: 被检流量计脉冲数 $NM = NM2 - NM1$, 标准表脉冲数 $NS = NS2 - NS1$, 时间 $T = (HF2 - HF1) / 1\ 000\ 000$ 。分别将被检流量计和标准表的脉冲数乘以各自的脉冲当量, 即可得到 T 时间段内的被检流量计和标准表的累积体积量 Q_m 和 Q_s 。再根据 ADAM-4117 采集到的被检流量计及标准表处的温度, 压力。根据气体状态方程, 将通过标准表的累计量修正到被检表的温度、压力状态下的累计量。其流量计算的数学公式^[16]为:

$$Q_{sm} = \frac{Q_s * (273.15 + t_m) P_s}{(273.15 + t_s) P_m} \quad (1)$$

检定流量下的示值误差:

$$E = \frac{Q_m - Q_{sm}}{Q_{sm}} \quad (2)$$

式中, Q_s 为标准表的累计体积量, t_m 是被检流量计处温度, t_s 为标准表处温度, P_m 是被检流量计处压力, P_s 是标准表处压力。 Q_m 、 Q_{sm} 分别为被检流量计的累积体积量、标准流量计温压补偿后的累积体积量。

4 装置的软件设计

4.1 软件的界面设计

随着检测技术的发展, 虚拟仪器技术因为其强大的数据分析能力, 强大的兼容性和集成化交互式的编程方式, 在自动化检测领域发挥着越来越大的作用。LabWindows/CVI 是 NI 公司推出的交互式 C 语言开发软件, 其将功能强大、使用灵活的 C 语言平台与用于数据采集、分析、显示的测控专业工具有机结合^[17]。装置的软件系统提供了进行标定的简单易用程序。通过软件系统录入工作订单以及检定参数可存储到 MySQL 数据库中, 并通过数据库和 WORD 文件格式将可跟踪的标定数据存储到本地。

因为 CVI 提供了丰富的反馈函数和图形控件, 人性化的软件界面能被设计出来。本软件包含两个主要界面, 登录界面和主界面。登录界面根据输入的账户信息分配当前登录人员可以使用的权限与功能。主界面包含 7 个子界面: 工具界面、用户管理界面, 信息管理界面, 被检仪表界面, 标定设置界面, 标定监控界面和记录证书界面。工具界面用于输入修改当前系统的硬件参数信息。用户管理界面实现添加账户、

修改账户信息以及删除账户的功能。信息管理界面用于测试人员输入当前委托以及测试样品信息。被检仪表界面用于选择当前测试的样品以及测试介质信息的修改。标定监控界面主要实现被检流量计检定功能, 记录证书用于实现将测试信息整理导出。软件系统如图 4 所示。同时被检流量计的检定流程如图 5 所示。

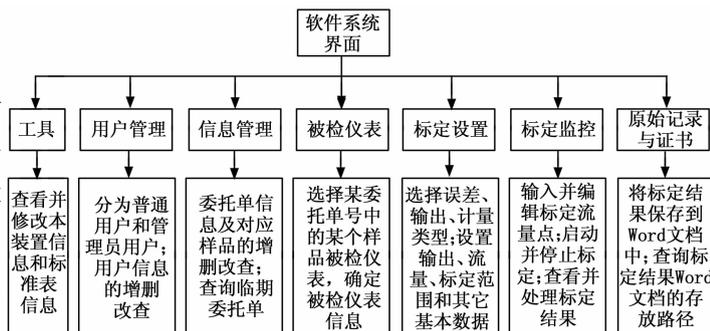


图 4 软件系统框图

4.2 软件的数据库设计

标准表法气体流量标准装置应用软件在使用过程中会产生大量关于被检流量计的流量标定以及相关录入信息等数据, 因此, 为了方便对上述信息数据进行管理, 对标准表法气体流量标准装置应用软件对 MySQL 数据库系统进行了设计。

通常一份委托单中不仅具有客户基本信息, 还对应一个或多个待检样品。依照数据库的第三范式规定, 数据表中的每一列数据都应与主键直接相关。而委托单中存在着明显的主次关系, 且功能需求中有明确的业务管理要求, 大量不必要的数据将增加数据库的操作响应时间。为了满足数据库第三范式设计要求, 提高系统的实时操作效率, MySQL 数据库将委托单中的业务信息与样品信息存放在不同数据表中。

MySQL 数据库中进行数据库结构设计时, 共计 User、Order、Sample、Calibrationsetting、Caliresult、Record 和 Facilityinfo 七个数据表, 其中前六个数据表存放流量标定业务流程中涉及较多的相关信息, 最后一个表中存放标准表法气体流量标准装置的相关信息和检定依据。具体内容如表 2 所示。

5 闭环控制算法

由于装置的量程范围较大: $0.5 \sim 270 \text{ m}^3/\text{h}$, 且可检定的被检流量计的口径较多 (DN15, DN25, DN40, DN50, DN80), 后期还可能进行扩展。若使用 PID 控制, 则需要不同口径的条件下, 在不同

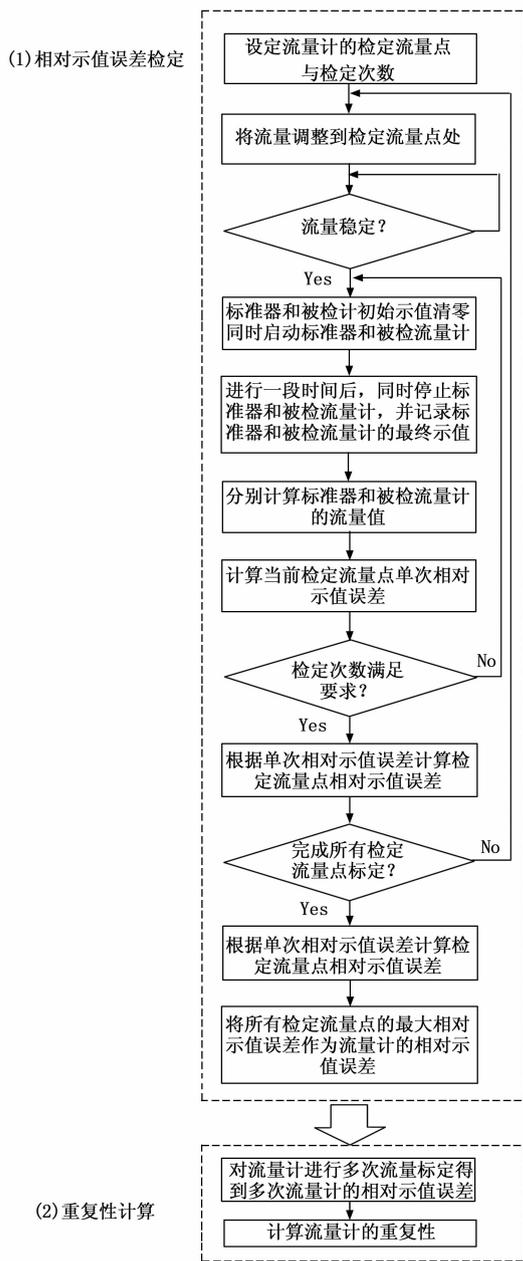


图 5 流量计检定流程

的流量段内使用多套不同的 PID 参数,故 PID 参数整定工作量大,且在不同的工况及不同类型不同压损的被检表时可能会造成误差。为了解决上述问题,故设计了一种新的闭环控制算法。

首先通过阀门及变频器定频使流量达到设置标定点的±5%稳定,通过在流量范围对应的变频器频率如表 3 所示。

通过稳定性公式^[9]按设计要求稳定性 0.3%,计算出该标定点的最大计算容差。由气体腰轮流量计的规格书得知标准表 DN50, $Q_{max} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,频率为

表 2 数据库结构设计

数据表	字段
User	员工号(主键),用户名,真实姓名,密码,权限,是否可用,上次登录时间
Order	委托单号(主键),委托单位,样品名称,样品数量,检测类型,委托时间,完成时间,联系人,联系电话
Sample	委托单号(主键)、出厂编号,样品名称,型号规格,口径,生产厂家,通讯类型,检定人,检定日期
Calibrationsetting	参数编号(主键),出厂编号,输出范围,输出范围单位,流量范围,流量范围单位,标定范围,标定范围单位,脉冲当量,最大允许误差,误差类型,输出类型,计量类型
Calireresult	委托单号(主键),出厂编号,设定流量点,序号,标定时长,标准表示值,标准表脉冲数,被检流量计示值,被检流量计脉冲数,单次误差,平均误差,重复性
Record	报表编号(主键),出厂编号,原始记录编号
Facilityinfo	编号(主键),装置名称,装置编号,测量范围,准确度,证书编号,有效期

表 3 流量范围对应的变频器频率

标定范围/(m^3/h)	变频器频率/Hz
0.5~20	40
20~180	65
180~270	75

127 Hz。故标准表 DN50, $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,10 个脉冲用时约为 3 秒;标准表 DN100, $Q_{max} = 400 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,频率为 295 Hz。故标准表 DN100, $10 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,23 个脉冲用时约为 3 秒。故在使用标准表 DN50 时,设定流量点 * 10 的数量为控制脉冲数(若流量小于 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,则取 10 个脉冲作为控制脉冲数);使用标准表 DN100 时,设定流量点 * 2.3 的数量为控制脉冲数。

进入标定后,取第一组控制脉冲数的平均流量作为基准,之后每组控制脉冲数的平均流量与基准进行比较,若差值大于计算容差,则降低变频器频率 0.1 Hz;反之若差值小于计算容差,则增加变频器频率 0.1 Hz。若差值在计算容差范围内,则变频器频率保持不变。

6 装置的不确定度

装置的不确定度由上海市计量测试技术研究院依

据 JJG 643—2003《标准表法流量标准装置检定规程》^[9] 检定。

1) 检定标准表装置的相对标准不确定度 $U_1 = 0.10\%$;

2) 拟合曲线引起的相对标准不确定度 $U_2 = 0.14\%$;

3) 标准表处温度测量的相对标准不确定度 $U_3 = 0.059\%$;

4) 被检流量计处温度测量的相对标准不确定度 $U_4 = 0.059\%$;

5) 标准表处压力测量的相对标准不确定度 $U_5 = 0.12\%$;

6) 被检流量计处压力测量的相对标准不确定度 $U_6 = 0.12\%$;

7) 计时器的相对标准不确定度 $U_7 = 0.001\%$;

8) 配套管路泄露引起的相对标准不确定度 $U_8 = 0.15\%$ 。

装置的合成相对扩展不确定度:

$$U_{rel} = 2(U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2 + U_6^2 + U_7^2 + U_8^2)^{1/2} = 0.59\% \quad (3)$$

7 实验结果与分析

7.1 累计时间之间的流量稳定性测试

测试时应根据装置流量范围选合适流量点进行测试, 在单次累计时间内, 各流量点应连续取 10 个以上瞬时流量值进行处理, 最后取各流量点测试结果最大值作为标准装置流量稳定性。

瞬时流量均值与流量稳定性计算公式如 (4) ~ (5) 所示。

$$\bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n} \quad (4)$$

式中, \bar{q} 为瞬时流量均值, m^3/h ; q_i 为瞬时流量单次测量值, m^3/h ; n 为测量次数。

$$E_q = \frac{k}{q} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n-1}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, E_q 为流量稳定性; k 为覆盖因子, 取 $k=2$ 。

标准装置流量稳定性试验采用一台 DN50 口径的气体涡街流量计作为被测对象, 分别对标准装置 $35 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $70 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $140 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $200 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $270 \text{ m}^3/\text{h}$ 流量点进行测试, 结果显示装置流量稳定性优于 0.123% , 测试数据及处理结果如表 4 所示^[18]。

表 4 流量稳定性测试数据

次数	流量点 m^3/h				
	35	70	140	200	270
1	35.11	69.75	138.86	201.51	268.71
2	35.18	69.76	138.96	201.48	268.80
3	35.14	69.80	138.93	201.45	268.38
4	35.13	69.83	138.91	201.50	268.90
5	35.16	69.73	138.92	201.51	268.72
6	35.12	69.83	139.00	201.52	268.50
7	35.16	69.77	138.99	201.47	268.85
8	35.11	69.80	138.97	201.49	268.75
9	35.16	69.79	138.89	201.47	268.79
10	35.14	69.77	139.06	201.46	268.75
\bar{q}	35.14	69.78	138.95	201.49	268.72
E_q	0.123	0.093	0.085	0.023	0.118

7.2 累计时间之间的流量稳定性测试

测量结果的验证采用传递比较法^[19-20], 选取一台 DN25 气体腰轮流量计作为被测对象, 测量范围为 $1 \sim 35 \text{ m}^3/\text{h}$, 准确度等级为 1.5 级。被考核计量标准和高一级计量标准分别为: 本装置, 测量范围为 $0.5 \sim 270 \text{ m}^3/\text{h}$, 装置标准不确定度 $U_{lab} = 0.59\%$ ($k=2$); 上海安钧智能科技股份有限公司的音速喷嘴法气体流量标准装置, 测量范围为 $0.5 \sim 3\,700 \text{ m}^3/\text{h}$, 装置不确定度 $U_{ref} = 0.26\%$ ($k=2$)。结果见表 5。

表 5 对比结果

流量点 m^3/h	本装置的误差 $y_{lab}/\%$	喷嘴误差 $y_{ref}/\%$	$ y_{lab} - y_{ref} /\%$
1	-0.746	-1.164	0.418
7	1.346	1.164	0.182
35	0.873	0.785	0.088

通过表 4 可以看出 $|y_{lab} - y_{ref}| \leq \sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2} = 0.645$, 因此验证结果合格。同时可以看出使用该标准表法气体流量标准装置检测被检流量计的重复性数据与更高不确定的音速喷嘴法标准装置检测出的重复性数据几乎是相同的水平。而且用该装置的检测时间为 30 s , 音速喷嘴法标准装置的检测时间为 60 s 。因此, 检测效率提高了 50% 。

8 结束语

本装置具有体积小、重量轻、易于移动、重复性好、效率高、成本低等优点, 解决了现场标定问题。装置上的标准表、温度压力表等以及整套装置都经过上海

市计量测试技术研究院溯源检定, 检定结果达到设计要求。可用于多种类型气体流量计的检定。可提高企业、实验室设备的使用效率, 带来经济效益的显著提升, 促进我国流量测量事业的发展。未来可进一步扩展装置的流量上限以及增加可检定气体流量计的管径。

参考文献:

- [1] 陆家亮. “双碳”时代, 中国天然气怎么做大、做优、做实? [N]. 石油商报, 2021-03-11.
- [2] 安娜. “双碳”目标下天然气产业谋划发展新路径 [N]. 经济参考报, 2021-08-30.
- [3] 贺虎. 低功耗智能涡街流量计的研制 [D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [4] 纪纲. 流量测量仪表应用技巧 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 1-16.
- [5] 徐英华. 浅谈气体流量标准装置的发展状况 [J]. 现代测量与实验室管理, 2004, 12 (2): 7-8.
- [6] 苏彦勋, 梁国伟, 盛健. 流量计量与测试 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [7] 周轶, 赵作广, 王韞韬, 等. 移动实验室气体流量标准装置的研制 [J]. 中国计量, 2019, 2019 (2): 95-98.
- [8] 信彦峰, 桑培勇, 贾正红, 等. 车载气体流量校准装置配套方案探讨 [J]. 计测技术, 2015 (Z1): 143-145.
- [9] 全国流量容量计量技术委员会. 标准表法流量标准装置检定规程: JJG 643—2003 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2003.

(上接第 287 页)

- [4] 王光源, 毛世超, 刘智勇. 基于 OODA 的单舰实战化防空作战能力评估研究 [J]. 舰船电子工程, 2018 (2): 13-16.
- [5] 陆欣, 谭乐祖, 高斌. 水面舰艇平台防空作战能力指标体系与评估 [J]. 舰船电子工程, 2020 (4): 27-30.
- [6] 徐建志. 水面舰艇作战能力综合分析方法研究 [J]. 舰船科学技术, 2005, 27 (1): 49-51.
- [7] 吴岩华, 任耀峰, 周胜. 海战场环境下舰艇作战能力评估 [J]. 舰船电子工程, 2013, 33 (5): 4-5.
- [8] 杨娟, 罗小明, 闵华侨. 导弹作战体系作战能力评估方法研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2009 (6): 1-3.
- [9] 赵磊, 李仁松, 王勇, 等. 一种航母编队编成方案评估及优化方法 [J]. 舰船电子工程, 2008 (4):

- [10] 李林. 负压法气体流量标准装置的优劣 [J]. 石油化工应用, 2013, 32 (6): 112-113+122.
- [11] 全国流量容量计量技术委员会. 涡街流量计检定规程: JJG 1029—2007 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [12] 全国流量容量计量技术委员会. 涡轮流量计检定规程: JJG 1037—2008 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2008.
- [13] 全国流量容量计量技术委员会. 气体容积式流量计检定规程: JJG 633—2005 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2005.
- [14] 全国流量容量计量技术委员会. 膜式燃气表计量检定规程: JJG 577—2012 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2012.
- [15] 施荣理. 标准表法气体流量标准装置的研制 [D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- [16] 袁明. 气体流量计检定思路的改进 [J]. 工业计量, 2011, 2011 (4): 48-49, 61.
- [17] 陈益江, 黄荣. 基于 LabWindows/CVI 软件设计实现与研究 [J]. 信息与电脑 (理论版), 2019 (16): 55-58.
- [18] 刘丁发. 并联式标准表法气体流量标准装置研究 [D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.
- [19] 全国法制计量管理计量技术委员会. 计量标准考核规范: JJF 1033—2016 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2016.
- [20] 张宏廷. 标准表法气体流量标准装置及测量结果不确定度分析 [J]. 石油工业技术监督, 2019, 35 (1): 33-36.
- [4] 尹肖云, 邹强, 冯佳晨, 等. 中远程舰空导弹作战能力评估研究 [J]. 舰船电子工程, 2020 (4): 27-30.
- [11] 马良, 王书齐. 舰空导弹网络化协同反导作战效能分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 20-100.
- [12] 张思滨, 等. 防空导弹武器系统作战能力影响关系分析 [D]. 哈尔滨: 国防科学技术大学: 研究生院, 2010.
- [13] 毕长剑, 董冬梅. 作战模拟训练效能评估 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 20-80.
- [14] 张杰, 等. 效能评估方法研究 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 8-42.
- [15] 马亚龙, 邵秋峰, 孙明, 等. 评估理论和方法及其军事应用 [M]. 国防工业出版社, 2012: 31-37.