

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106552

基于视觉技术的金属量器自动检定装置^{*}

张东飞¹ 郝华东² 陈曹浪¹ 何 操¹ 施浩磊² 王莹莹²

(1. 苏州市计量测试院 苏州 215128; 2. 舟山市质量技术监督检测研究院 舟山 316000)

摘 要: 针对金属量器传统检定方法存在准确度低、水资源浪费和检定效率低等问题,提出了一种基于视觉技术的金属量器自动检定方法。基于该方法设计了新型容量检定标准装置,设计了标准和被检金属量器自动对接的机械结构,以及开发了一种基于 LabVIEW 和 PLC 的检定系统软硬件,并对该装置进行了不确定度评定。实验结果表明,基于所提方法的标准装置能较好地维持检定过程中容量和状态参数的稳定,与传统手动检定方法相比,效率提高 30% 以上,该自动测量扩展不确定度为 6.4 mL($k=2$),可满足金属量器的检定要求。

关键词: 金属量器;视觉技术;自动控制;检定装置;检定效率

中图分类号: TB937 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

The metal tank automatic verification device based on visual technology

Zhang Dongfei¹ Hao Huadong² Chen Caolang¹ He Cao¹ Shi Haolei² Wang Yingying²

(1. Suzhou Institute of Metrology, Suzhou 215128, China; 2. Zhoushan Institute of Calibration and Testing for Quality and Technology Supervision, Zhoushan 316000, China)

Abstract: On the issues of solving several problems such as low accuracy, water waste and low efficiency in traditional standard tank verification methods. This paper provides a set of standard tank automatic verification method based on the principle of visual technology. The standard facility of capacity verification is developed by this method. Moreover, we developed the mechanical structure automatically docking with metal tank and designed a verification system, whose software and hardware is based on LabVIEW platform and PLC. In addition, it conducts the uncertainty evaluation on the devices as well. According to results of this principle, the standard facility of this structure can maintain stability of capacity and state parameters during verification. Experimental results indicate the verification efficiency is improved by more than 30%, the uncertainty of verification is 6.4 mL($k=2$), which can meet the requirements of detection for metal tank.

Keywords: standard tank; visual technology; automatic control; verification facility; measure efficiency

0 引 言

金属量器作为计量液体体积的一种计量器具,在石油贸易结算中已得到广泛使用,其计量结果的准确性将直接影响油品的贸易交接,所以研究金属量器的溯源方法具有重要的现实意义。目前国内计量检定机构对金属量器的检定方法大致雷同,一般采用容量比较法,但该方法的缺点是劳动强度较大,操作过程繁琐,检定时间较长、水资源浪费等^[1-2],并且由于刻度读数和液位控制需要人工干预,导致检定精度不高,检定复现性较差。常见的非接触式测量方法中,超声波^[3]和电容式^[4]受制于传感器精度不高,激光式^[5]虽然精度高,但其穿透性强,无法用于透明液位的测

量。随着计算机信息处理技术和机器视觉技术的不断发展,自动化检测技术在计量仪表领域得到越来越多的应用^[6-9],国内许多学者利用视觉技术对水位的测量进行了试验研究^[10-11],并取得一定的效果,文献[12-13]证明了视觉技术对金属量器液位测量的可行性和可靠性,但没有做到自动识别和自动测量,检定效率不高。

针对金属量器传统检定方法的上述问题,本文选用加油站计量核查使用的 20L 三等金属量器,采用视觉图像处理技术对液位刻度进行图像信息自动识别和采集,并利用计算机控制技术设计了金属量器自动检定系统,实现检定用水循环使用、标准金属量器刻度自动调整与图像识别验证、被检金属量器刻度图像自动采集等,大大减小了检定劳

收稿日期:2021-04-29

^{*} 基金项目:浙江省市场监督管理局质量技术监督基础建设项目(20190132)、舟山市科技计划项目(2019C31057)资助

动强度,缩短了检定时间,提高了检定精度,该方法与传统检定方法相比效率提高30%以上。

1 装置工作原理

装置采用容量比较法,该方法的主标准是二等标准金属量器,检定时首先通过循环泵和管路向标准金属量器内注水,直至水位到达标准刻度,然后将标准金属量器内的水排放至被检金属量器,最后读取被检金属量器的液位刻度和分度容积值,经过一系列的修正计算得出金属量器标称容积的液位刻度值,根据JJG 259-2005《标准金属量器》国家检定规程要求给出结论^[14-15]。

被检金属量器标称容积对应的液位高度 H 由式(1)计算:

$$H = \sum_{i=1}^n H_i \quad (1)$$

式中: H_i 为第 i 次测量时换算到标称容积下的的液高度值, mm。

液位高度 H_i 由式(2)计算:

$$H_i = h_i + \frac{V_{B_i} - [V_{20}]_i}{f} \quad (2)$$

式中: h_i 为第 i 次测量时被检金属量器中的液位高度, mm; f 为被检金属量器计量颈的分度容积, mL/mm; V_{B_i} 为标准金属量器第 i 次 20 °C 时的容积值; $[V_{20}]_i$ 为被检金属量器的第 i 次测量刻度 h_i 的 20 °C 容积值。

被检金属量器的第 i 次测量刻度 h_i 的 20 °C 容积值 $[V_{20}]_i$ 由式(3)计算:

$$[V_{20}]_i = V_{B_i} [1 + \beta_1 (t_{i1} - 20) + \beta_2 (20 - t_{i2}) + \beta_w (t_{i2} - t_{i1})] \quad (3)$$

式中: t_{i1} 为标准金属量器处水温, °C; t_{i2} 为被检金属量器处水温, °C; β_1 为标准金属量器的体膨胀系数, °C⁻¹; β_2 为被检金属量器的体膨胀系数, °C⁻¹; β_w 为检定介质在 $t_{i1} \sim t_{i2}$ 范围内的平均体膨胀系数, °C⁻¹, 若检定介质为水, 则 $\beta_w = 0.0002 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

根据被检金属量器计量颈容量, 选择相应玻璃标准量器的容积 V 注入至刻线位置, 用检定介质注入被检金属量器至 H_a 刻线位置, 将标准玻璃量器中的水注入金属量器计量颈中, 读取被检金属量器液位 H_b , 然后按照式(4)计算第 1 次测量计量颈分度容积 f_1 ^[16]:

$$f_1 = \frac{V}{H_b - H_a} \quad (4)$$

计量颈分度容积一般进行不少于 3 次测量, 取其平均值 f 作为计量颈分度容积检定结果。

2 装置机械设计

针对金属量器传统检定装置的缺陷和问题, 本文研发设计出新型的 20L 标准金属量器检定装置标准装置。主体结构设计如图 1 所示, 装置主要由水源系统、20L 标准金属

量器、20L 被检金属量器、视觉测量系统、自动控制系统、数据采集和校准系统组成。

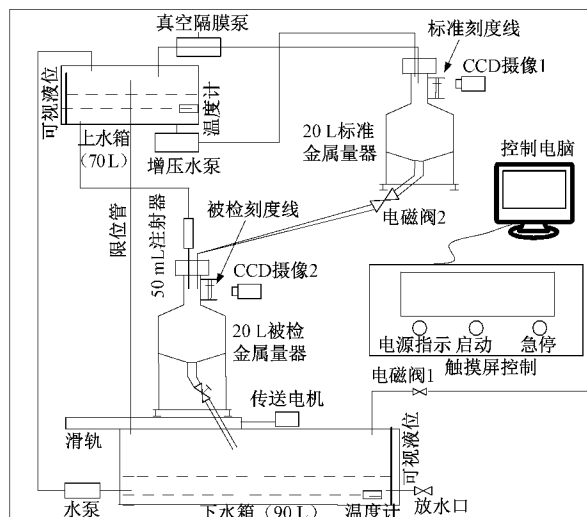


图1 标准金属量器检定装置结构

水源系统由下水箱(90 L)和上水箱(70 L)组成, 上水箱装均设计了限位管, 实现检定用水的循环使用; 视觉测量系统由温度传感器和高清摄像模块组成, 其中高清摄像模块包括第一工业相机和第二工业相机, 第一工业相机设置在标准金属量器的瓶颈侧边, 用于读取标准金属量器的刻度, 第二工业相机设置在待校准金属量器的瓶颈侧边, 用于读取待校准金属量器的刻度; 自动控制系统由电机、传送带和限位系统组成, 可将被检金属量器自动传送至检定位置实现一键全自动检定。数据采集和校准系统包括中央处理单元、第一数据采集单元、第二数据采集单元和水泵控制单元, 第一数据采集单元与第一工业相机电连接, 第二数据采集单元与第二工业相机电连接, 水泵控制单元与水泵电连接, 系统能够自动读取刻度和自动控制校准过程, 避免人为因素干扰, 节约时间, 提高校准效率。

下水箱部分: 下水箱容积为 90 L, 内有温度计和可视化液位, 通过水泵可将水抽至上水箱, 底部有放水口, 方便多次使用后更换清洁水源。

上水箱部分: 上水箱容积为 70 L, 内有温度计和可视化液位, 通过增压水泵可将水排进标准金属量器中。水箱底部有一根滴定管可用于量杯取水, 用于被检金属量器分度容积的检测, 另有一根限位管通至下水箱, 防止上水箱溢水。

20L 标准金属量器部分: 回流泵管线插入标准金属量器计量颈中, 与标准 20L 刻度线平齐, 开启回流泵可将 20L 标准刻度线以上部分水抽回至上水箱中。通过放水阀可将标准金属量器中水放至被检金属量器中。

20L 被检金属量器部分: 针对底部无排液口的金属量器, 直接开启传送电机可实现被检金属量器翻转, 将水直接排进下水箱。有排液口的金属量器, 直接打开排液阀门即

可排水至下水箱。

控制柜部分:控制水泵开启,将下水箱水打至上水箱;通过调节增压水泵打水时间(通过实验,设定时间为1 min 45 s),可以控制打进标准金属量器中的水位达到标准刻度线以上;再开启回流泵,将标准金属量器中标准刻度线以上的水抽回上水箱;控制传送电机使被检金属量器翻转至固定位置,将量器中水排至下水箱。

3 装置软硬件设计

标准装置可分为硬件控制系统和软件检定系统。其中硬件控制系统采用可编程逻辑控制器(PLC)的控制系统,实现控制电机的转动、编码器反馈信号的采集、控制阀门的启闭、温度值和液位值的采集换算等功能;软件检定系统依据JJG 259-2005《标准金属量器》检定规程,采用LabVIEW进行软件设计,包括被检量器参数设定、检定时间设定、温度值和容量值计算等,最终实现金属量器的检定。装置的系统控制原理如图2所示。

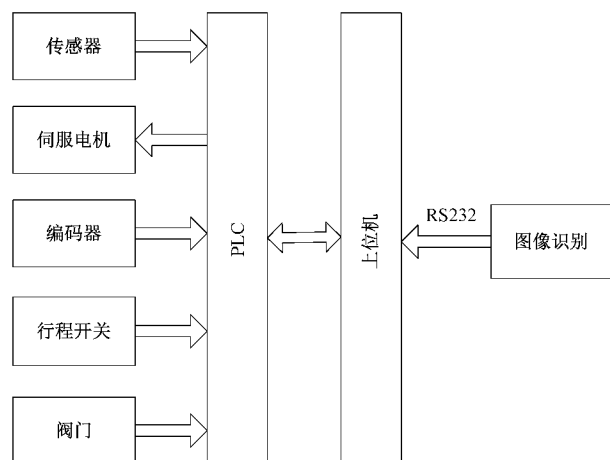


图2 装置总体控制原理

3.1 装置硬件系统

硬件控制系统主要包括西门子PLC、控制电路模块、行程开关、电机驱动器、伺服电机、湿度传感器、温度传感器、电磁阀和气控阀门等,可控制增压水泵、回流泵、传送电机、阀门等设备,实现注水、排水、调整标准刻度、急停和复位等过程;被检金属量器的驱动装置是由气缸进行X轴方向上的左右运动,并装有限位开关;视觉测量系统采用两台高可靠性和稳定性的工业相机进行液位刻度图像自动识别处理和采集,实现被检金属量器和标准金属量器的液位刻度的读数。装置所采用的主要测量设备如表1所示,其中CCD相机的测量范围是指上下抓拍范围。

3.2 装置软件系统

装置软件系统如图3所示,主要包括视觉图像处理系统和数据分析计算系统。数据分析计算系统采用LabVIEW软件设计编程,该软件具有图形化编程方式、界面人性化、扩展性能好、程序可读性好和易反复开发等优

表1 装置主要测量设备

仪器设备	标准金属量器/L	蠕动泵/ mL	温度计/ ℃	CCD相机/ mm
测量范围	20	50	0~50	-200~+200
最大允许误差	±0.005	±0.2	±0.2	±0.2

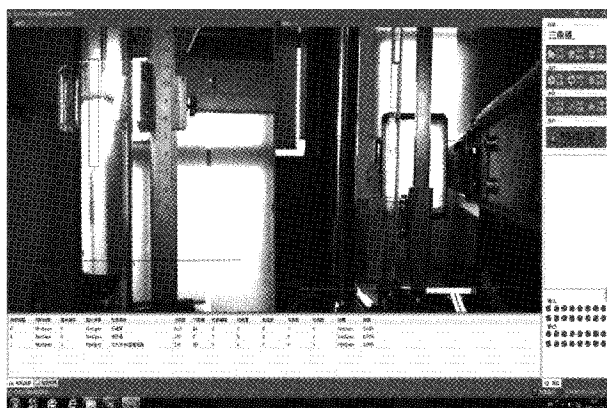


图3 装置软件系统

点,实现参数设置、信号采集、硬件驱动、数据管理等功能。

视觉图像处理系统采用高清工业相机,和其自带的图像处理软件来实现刻度值的数字化。其中图像处理技术主要采用图像二值化分割、滤波、边缘提取和直线检测等方法,实现自动识别量器刻度位置,自动计算相应刻度值。

1) 图像二值化。首先对采集到的原始黑白图像进行二值化分割,初步分开前景目标和背景。假设 $f(m, n)$ 表示二值化之前的图像第 m 行第 n 列的灰度值, $g(m, n)$ 表示二值化之后的图像灰度值, m 和 n 代表图像的总行数和总列数, T 表示分割阈值,为了能适应光线的变化,阈值 T 根据待检图像的平均灰度进行自动设定,范围在(0~255)之间,如式(5)所示,最终的二值化可以表示为:

$$g(m, n) = \begin{cases} 0, & f(m, n) > T \\ 255, & f(m, n) \leq T \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中, } T = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N f(m, n).$$

经过二值化之后,图像的目标区域为黑色,主要为刻度线区域,而剩余背景区域则是白色,有利于进行后续的图像处理。

2) 滤波。经过二值化后的图像,仍然存在一定的背景噪声干扰,因此需要进行滤波,以去除干扰噪声。根据所采集到的图像的特点,本文采用形态学滤波方法中腐蚀运算和膨胀运算来进行滤波。腐蚀和膨胀运算基于数学集合运算,记 A 为原始图像集合, B 为结构元素,则 A 被 B 所腐蚀可以用如下公式表示:

$$A - B = \{z \mid (B)_z \cap A^c \neq \emptyset\} \quad (6)$$

而 A 被 B 所膨胀可以表示为:

$$A \oplus B = \{z \mid (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (7)$$

腐蚀使得目标缩减和细化,有助于减少小的噪声点,而膨胀运算会使目标边缘扩展,有助于弥补一些不该有的缝隙,使得目标更加完整。本文选用的是 3×3 的结构元素。

3)边缘提取。对于经过滤波后的二值化图像,本文采用 Sobel 算子来提取目标中边缘,来获得检测所需要的刻度线。如果原始图像为 A , G_x 和 G_y 分别表示经过横向和纵向边缘提取的结果,则利用 Sobel 算子提取边缘可以表示为:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{bmatrix} * A \quad G_y = \begin{bmatrix} +1 & +2 & +1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A \quad (8)$$

4)直线检测。得到目标的边缘信息后,本文采用 Hough 变换来提取最终的刻度线。Hough 变换的基本思想是点线的对偶性。一方面,图像空间中共线的点对应在参数空间里相交的线;另一方面,在参数空间中相交于同一个点的所有直线在图像空间里都有共线的点与之对应^[16]。因此 Hough 变换把在图像空间中的直线检测问题转换到参数空间中对点的检测问题,通过在参数空间里进行简单的累加统计完成检测任务。

4 装置实验及不确定度分析

4.1 装置实验部分

装置的检定过程包括准备阶段、标准刻度调整、被检刻

度读取、分度容积检定、排气与排液能力试验等,流程如图 4 所示。

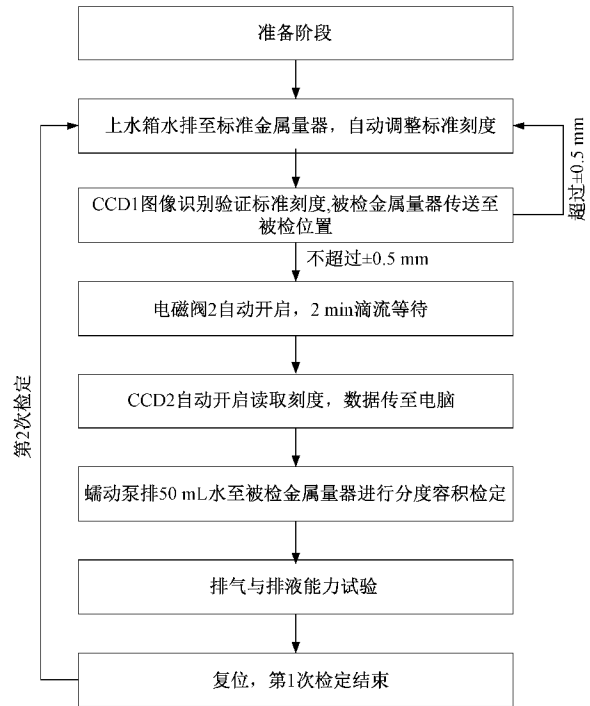


图 4 装置检定流程

金属量器检定依据 JJG 259-2005《标准金属量器》要求需连续检定 3 次,实验数据如表 2 所示。

表 2 连续检定 3 次数据

次数	标准金属量器			被检金属量器			
	水温/ °C	自动调整刻度/ mm	CCD 验证/ mm	水温/ °C	图像读取刻度/ mm	注入 50 mL 后图像 读取刻度/mm	分度容积/ (mL·mm ⁻¹)
1	18.5	84.60	84.668	19.0	53.069	119.087	0.757 4
2	18.7	84.60	84.806	19.0	55.322	120.995	0.761 3
3	18.3	84.60	84.770	19.3	52.108	119.704	0.739 7

增压水泵将上水箱中的水排至标准金属量器,按照预设时间(105 s),结束后水位到标准刻度线以上。水位稳定后,开启真空隔膜泵,将标准刻度线以上部分水抽回上水箱,使标准金属量器的水位控制在标准 20L 刻线位置,即 84.60 mm,实现了自动调整标准刻度^[17]。

图像处理过程如图 5 所示,经过二值法、滤波、边缘提取和直线检测等。通过 CCD 图像识别验证,结果如图 6 所示,得到的刻度与标准刻度相差不超过 ± 0.5 mm,证明图像读取刻度的准确性较高。

利用图像识别技术分别读取被检金属量器 20L 标尺刻度和分度容积试验后的标尺刻度,第 1 次如图 7 所示。

连续试验 3 次,金属量器实验结果的误差 E 用式(9)计算:

$$E = [\text{MAX}(H_i) - \text{MIN}(H_i)] \times f \quad (9)$$

JJG 259-2005 规定, H_i 的最大值与最小值之差,乘以计量颈分度容积 f 应小于等于被检金属量器的最大允许误差。按照式(9)计算示值误差为 2.42 mL,小于其最大允许误差 10 mL,检定结果为合格。

装置检定用水循环使用,既节省了传统检定的水温恒温时间,又节约了水资源,检定各个步骤自动衔接,数据采集和处理均自动进行,检定质量达到预期要求。使用传统方法检定 3 次需要 30 min 以上,使用该自动化装置检定时小于 20 min 与传统手动检定方法相比其效率提高 30% 以上。

4.2 不确定度分析

该装置检定系统的测量模型为:

$$[V_{20}] = V_B [1 + \beta_1(t_1 - 20) + \beta_2(20 - t_2) + \beta_w(t_2 - t_1)] \quad (10)$$

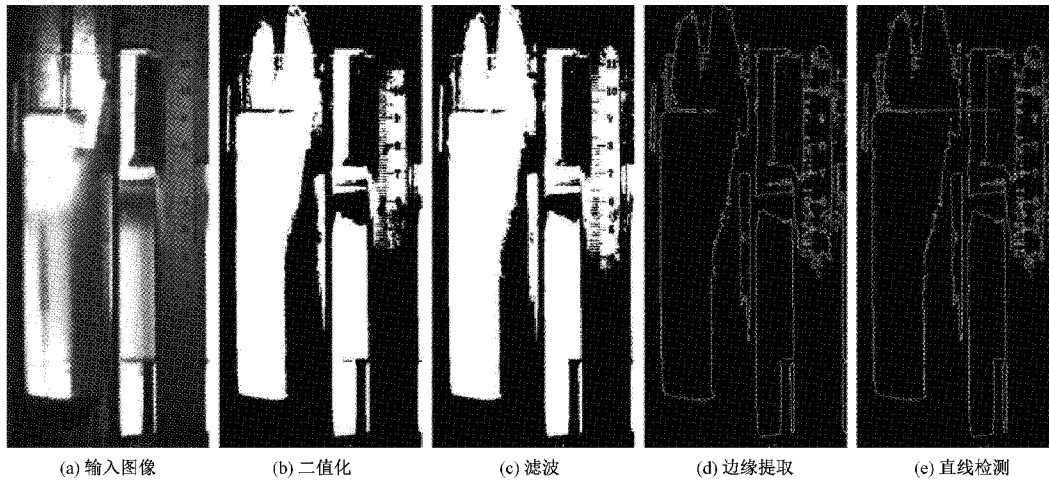


图5 图像处理过程

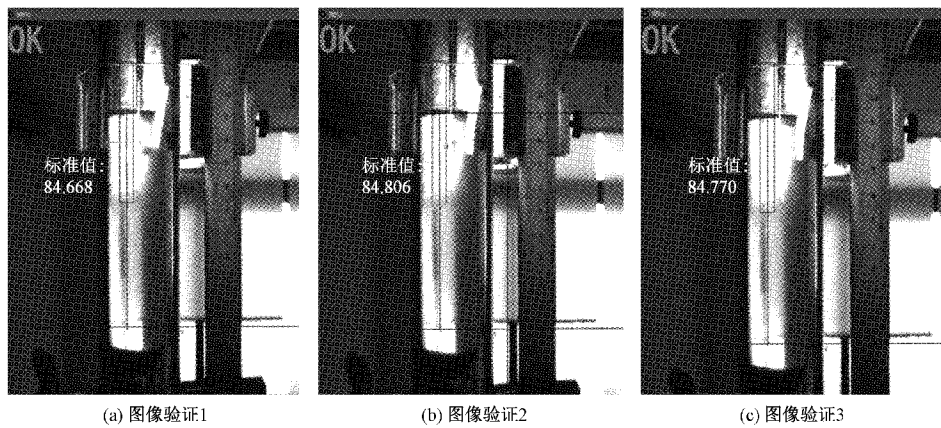


图6 图像识别验证标准金属量器刻度

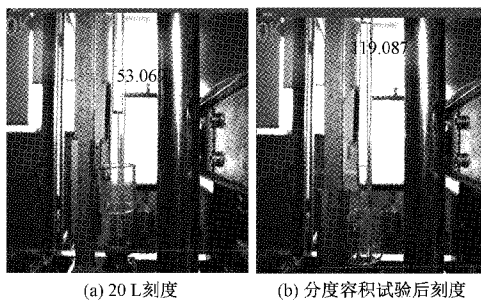


图7 图像识别读取被检金属量器刻度

取 $\beta_1 = \beta_2 = 50 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta_w = 2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $t_1 = 18.5 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_2 = 19.0 \text{ } ^\circ\text{C}$, $V_B = 20\ 000 \text{ mL}$ 。

用式(11)和(12)对金属量器的测量不确定度进行计算。

$$c(x_i) = \partial V_{20} / \partial x_i \tag{11}$$

$$u_c = |c(x_i)| \times u(x_i) \tag{12}$$

装置测量不确定度一览表如表3所示,由公式计算可得装置合成标准不确定度 $u_c = 3.16 \text{ mL}$,扩展不确定度 $U = 6.4 \text{ mL}$, $k = 2$ 。完全满足金属量器的检定要求。

表3 测量不确定度一览表

标准不确定度 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值	灵敏系数 $c(x_i)$	u_c
$u(V_B)$	标准金属量器	2.5 mL	1.000 35	2.501 0
$u(\beta_1)$	标准金属量器体膨胀系数	$2.887 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$-30\ 000 \text{ mL} \cdot ^\circ\text{C}$	0.086 6
$u(t_1)$	标准金属量器水温测量	0.116 $^\circ\text{C}$	$-3 \text{ mL}/^\circ\text{C}$	0.348 0
$u(D_1)$	标准金属量器 CCD 液位读数	0.160 mL	1	0.160 0
$u(\beta_2)$	被检金属量器体膨胀系数	$2.887 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$20\ 000 \text{ mL} \cdot ^\circ\text{C}$	0.057 8
$u(t_2)$	被检金属量器水温测量	0.116 $^\circ\text{C}$	$-3 \text{ mL}/^\circ\text{C}$	0.348 0
$u(D_2)$	被检金属量器 CCD 液位读数	0.152 mL	1	0.190 0
$u(\delta)$	被检金属量器测量重复性	1.439 mL	1	1.439 0
$u(\beta_w)$	水体膨胀系数	$1.155 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$10\ 000 \text{ mL} \cdot ^\circ\text{C}$	1.155 0

5 结 论

该标准装置提出了一种基于视觉技术的标准金属量器全自动检定方法,实验结果表明,图像采集标尺刻度与实际刻度相差不超过 ± 0.5 mm,检定示值误差小于其最大允许误差,测量扩展不确定度为 6.4 mL, $k=2$,检定效率相比传统手动检定方法提高30%以上。同时实现检定用水资源的循环使用,符合国家大力提倡“节能减排、绿色环保”的要求。

参考文献

- [1] 杨经荣,车建军. 标准金属量器使用中的注意事项[J]. 中国计量,2018(5): 116-118.
- [2] 张海鹏. 燃油加油机全自动检定系统的设计与实现[D]. 镇江:江苏大学,2016.
- [3] 关学忠,孙占文. 基于单片机的储油罐液位无线监测系统[J]. 自动化技术与应用,2020,39(2):138-142.
- [4] 徐乐年,林敏,孙崇雨,等. 电容式灌装液位检测系统的设计[J]. 仪表技术与传感器,2019(2):72-74.
- [5] 闫达海,胥光申. 面曝光快速成形激光液位检测系统的研究[J]. 天津工业大学学报,2013,32(1):79-83.
- [6] 吕政阳,邓涛,张丽艳. 一种基于机器视觉的飞机钣金件跨粒度识别方法[J]. 仪器仪表学报,2020,41(2): 195-204.
- [7] 程敏杰,王建义. 利用机器视觉的直齿轮在线测量方法研究[J]. 机械设计,2020,37(3): 19-22.
- [8] 郭斐,靳伍银,王猛. 基于改进的Faster R-CNN算法的机械零件图像识别[J]. 机械设计,2019,36(9): 113-116.
- [9] 焦传佳,江明. 基于AprilTag图像识别的机器人定位研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(1): 110-119.
- [10] 贾伟广,吉建华,马志刚,等. 基于数字图像处理的高精度海洋潮位计量检测技术[J]. 计量学报,2015, 36(5): 513-516.
- [11] 仲志远. 一种基于图像识别的水位测量算法[J]. 国外电子测量技术,2017,36(5):96-99.
- [12] 贾杰明,赵翠莲. 标准金属量器的动态液位图像跟踪[J]. 电子测量技术,2020,43(17):110-114.
- [13] 张海鹏,赵不贻,石建荣,等. 标准金属量器液位图像识别装置的研制[J]. 计算机测量与控制,2016, 24(7): 205-207,211.
- [14] 全国流量容量计量技术委员会. 中华人民共和国国家检定规程:标准金属量器JJG 259-2005[S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局,2005: 9.
- [15] 李峰,何伦志,塔依尔,等. 能源计量中容量量值传递技术研究[J]. 中国测试,2017,43(6): 22-26.
- [16] 戴激光,宋伟东,李建军. 一种有效的直线提取算法[J]. 测绘通报,2012(11):59-61.
- [17] 张东飞,胡志刚,陈曹浪. 提高20L标准金属量器检定效率的方法探讨[J]. 中国计量,2018(7): 111-112.

作者简介

张东飞,高级工程师,硕士,主要研究方向为容量、流量计量及检测装置设计等。

E-mail:zhangdf@szjl.com.cn