

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313969

JJG/API 体积管标定方法差异及应对方法研究^{*}

张三军¹ 施浩磊² 张迪¹ 张哲¹ 许惠中¹

(1. 通标标准技术服务(上海)有限公司舟山分公司 舟山 316013; 2. 舟山市质量技术监督检测研究院 舟山 316013)

摘要: 体积管标定是流量计溯源的重要步骤,各国规范、标准有所不同这给用户使用带来诸多不便。本文首先比较国内 JJG 规程、国际 API 标准对体积管标定主要技术内容,接着系统分析体积管容积值、重复性计算模型,然后基于国外某油田活塞式体积管校准数据验证,表明两个标准(规范)所计算的标准容积值差异很小(1×10^{-6})、重复性差异较大(可达 200×10^{-6});测量次数对重复性差异有着直接影响,API 标准、JJG 规程的测量次数的重复性差异分别达 50×10^{-6} 、 179×10^{-6} ,分析指出重复性差异较大主要原因是 JJG 规程采用贝塞尔公式,API 标准采用无极差系数且没有明确置信概率的极差法。通过理论推导及数据验证,将极差系数与置信概率还原到重复性计算公式中,获得普适性处理方法,在测量次数 $n \geq 5$ 下 API 标准、JJG 规程重复性差异小,可为以后规程修订、方法选择提供参考。

关键词: 体积管;标准容积;重复性;极差法;贝塞尔公式;差异

中图分类号: TH814 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460

Research on the difference of JJG/API for volume tube calibration and recommendation of countermeasures

Zhang Sanjun¹ Shi Haolei² Zhang Di¹ Zhang Zhe¹ Xu Huizhong¹

(1. SGS-CSTC Standards Technical Services (Shanghai) Co., Ltd., Zhoushan Branch, Zhoushan 316013, China; 2. Zhoushan Institute of Calibration and Testing for Qualitative and Technical Supervision, Zhoushan 316013, China)

Abstract: Volumetric tube calibration is an important process of the traceability of flowmeter, but the standards and benchmarks are different from each other in the countries, leading to the inconvenience for the users. In this paper the main technical contents between the domestic JJG regulations and international API standards for volumetric tube calibration are firstly compared. Then we systematically analyzes the volume value of the volumetric tube and repeatability calculation model. Based on the validation for the calibration data of the piston type volumetric tube in one foreign oil field, we demonstrate that the difference between the standard volume value calculated by the two standards (specifications) is very small (1ppm) but the repeatability has large difference (up to 200 ppm). The number of measurements has a direct impact on the repeatability. The repeatability differences of the API standard and the JJG standard are 50 ppm and 179 ppm, respectively. The analysis indicates the differences arise from Bessel formula of the JJG standard and the polarization method of the API standard free of the polarization coefficient and confidence probability. Through theoretical derivation and data validation, the coefficient of polarization and confidence probability can be reduced to the repeatability calculation formula to obtain a universal counteraction method. For the $n \geq 5$ measurements between API standards and JJG regulations, repeatability differences are small. This work can provide reference for the future revision of the regulations and method selection.

Keywords: volume tube; standard volume; repeatability; range method; Bessel formula; difference

0 引言

体积管是体积管流量标准装置的简称,是用于对液体流量计进行检定、校准的标准设备^[1],由设在同一内径直管

段里的两个检测开关和在管内移动的活塞及其操作机构组成,标准体积管主要有 3 种类型:单向型、双向型及活塞型^[2]。体积管标定工作原理是体积管内置换器(球或活塞)在液体推动下,以一定速度先后触发两个检测开关,将置换

收稿日期:2023-06-26

* 基金项目:舟山科技计划项目(2022C31069)资助

出液体导入标准器内,由标准器指示值经换算求得体积管标准容积值,流量计检定时,将体积管标准容积值换算成流量计工作条件下容积值,与串联被检流量计的指示值相比较,得到被检流量计示值误差。体积管因具有重复性好、精度高特点,广泛用于油田外输、长输管线、检定中心站等场所对流量计进行现场标定^[3-5]。在国际油气贸易计量中^[6-8],存在不同国家采用不同标准现象,体积管作为油气贸易中重要设备,有时其量值溯源标准也常不统一,如目前中国现行有效标准为《JJG 209-2010 体积管检定规程》(以下简称“JJG”)^[9-10],国际上普遍采用美国石油学会石油产品测量操作标准,相对应条文主要为 API MPMS 4.3、4.7 与 12.2(以下简称“API”)^[11-13]。两个标准虽然设备操作流程及取值方式基本相同,因标准容积值与重复性计算公式差异,致相同溯源数据处理结果差异较大,对于油品这种单价高,数量大的国际贸易,标准的差异给贸易双方带来很大的困扰,甚至产生大额的计量纠纷,许多学者发现这一现象,但没有深入分析原因并给予合适的解决方案或建议^[14-15]。

为此,本文通过理论分析推导,基于国外某油田活塞式体积管实际校准数据,开展体积管标准容积值与重复性计算公式差异研究,总结出变化规律并得出差异产生原因,提出减少差异可操作性方案。

1 JJG/API 标准差异分析

体积管标定体积管检定可以采用容积法和质量法。容积法的标准器为标准金属量器,检定由一套水标定系统组成;质量法的标准器为秤。本文讨论采用容积法进行检定,水标定系统包括:二等标准金属量器、换向器或电磁阀、水箱或水池、水泵、阀门及连接管线等。检定时,体积管的入口直接与水泵连接,出口与检定装置相连。

检定过程如下:

1) 排气。启动水泵,向体积管内注水,打开各个排气阀,使水流经体积管、换向器和标准器流回水池。经过一段时间的水循环,确认排气阀已无气体排出时,关闭排气阀;

2) 在进行水循环的过程中,测量体积管入口、出口、标准器及水池的水温,确认整个水循环系统的水温基本达到恒定时,即可进行检定;

3) 用调节阀调节流量,以确认置换器通过检测开关 D1 和 D2 时的流量。为保证置换器能够以同一速度经过 D1 和 D2,在检定过程中调节阀的开度应保持一致。置换器在 D1 和 D2 间运行时,可以适当加大流量,流量大小应以所用标准器能连续倒换为准;

4) 初始位置时换向器将水流导向旁通侧,启动置换器运行;

5) 当置换器按一定的流量触发检测开关 D1 时,启动换向器运行,换向器将水流从旁通侧切换至标准器侧,开始计量。读取体积管出口的压力值,作为该次检定时体积管

的压力,并读取体积管进、出口处的温度;

6) 置换器在 2 个检测开关间运行时间应小于 5 min,按以上程序进行检定,检定次数不少于 3 次^[16]。

体积管检定的误差来源主要是:

1) 检定流程中排气阀、四通阀、排空阀等若不能完全关断,会产生液流漏失;

2) 液流中夹带气体也会直接影响体积管的检定结果;

3) 检定用的介质(水)要纯净,不能含有油花、明显泡沫以及颗粒杂质。油花及泡沫等会对检定容积值及重复性产生影响,而颗粒杂质流经电磁阀,易造成电磁阀阻塞、关闭不严,导致流量漏失、检定失真;

4) 体积管检定过程中二等金属量器材质、体积管材质、水等由于温度变化的非完全修正;

5) 置换器(检定橡胶球)和管壁之间的漏失;

6) 检测开关的稳定性,或复现性引起的误差;

7) 标定系统换向器的换向造成的误差;

8) 检定过程中的人员操作误差^[17]。

经比较,“JJG”、“API”两个标准操作流程、校准方式基本相同,核心校准参数有所不同,其中“JJG”核心校准参数为标准容积值、重复性与复现性(如果不满足复现性检测条件,可以不检复现性);“API”核心校准参数为标准容积值、重复性,故下面主要以标准容积值、重复性两个校准参数作差异化比较。

在符合性判定方面,“JJG”、“API”两个标准均要求测量次数 ≥ 3 ,重复性优于 0.02% (200×10^{-6})。JJG 规程中标准状态为温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、压力 101.325 kPa ; API 标准中标准状态为温度 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 、压力 101.325 kPa ,下面研究采用案例标准金属量器为 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 标准容积,将 JJG 标准状态统一至 API 标准状态。

1.1 标准容积计算公式

1) JJG 标准容积计算

依据 JJG 209—2010 7.3.3.3(b),采用带测量杆的体积管标准容积值计算,其计算公式如下:

$$V_{ps} = V_s [1 + \beta_s(t_s - 15) + \beta_w(t_p - t_s) - 2\alpha_p(t_p - 15) - \alpha_r(t_r - 15) - P_p \left(\frac{D}{Et} + F_w \right)] \quad (1)$$

其中, V_{ps} 、 V_s 分别为体积管在标准状态下容积值、标准量器指示值; β_s 、 β_w 分别为标准量器材质、水的体膨胀系数; t_p 、 t_s 、 t_r 分别为体积管壁温、标准量器壁温、测量杆(殷钢杆)温度; D 、 t 分别为体积管标准容积段内直径、壁厚; P_p 、 E 、 F_w 分别为体积管内液体表压力、体积管材质弹性模量、水压缩系数; α_p 为体积管材质线的膨胀系数, α_r 为殷钢杆材质的线膨胀系数。

2) API 标准容积计算

依据 API MPMS 4.3 小型活塞式体积管、API MPMS 4.9 体积管与标准金属量器校准方法,以及 API MPMS

12.2 油量计算等,活塞式体积管校准容积值计算公式如下:

$$CPV = BMV_a \times \frac{CTDW \times CCTS}{CPL \times CPS} \quad (2)$$

其中,CPV 为体积管在标准状态下容积值, BMV_a 为标准量器指示值,CTDW 为标准量器与体积管内水因温度差异导致体积修正系数;CCTS 为标准量器、体积管材质因温度变化带来的体积修正系数;CPL、CPS 分别为体积管内流体承压和体积管管体承压而产生的体积修正系数。

令标准量器、体积管内流体密度分别为 RHO_{tm} 、 RHO_p ,则 CTDW 有:

$$CTDW = \frac{RHO_{tm}}{RHO_p} \quad (3)$$

由 API MPMS 11.2.3, RHO_p 计算如下:

$$RHO_p = [(9.998\ 395\ 639 \times 10^2) + (6.798\ 299\ 989 \times 10^{-2}) \times T_p - (9.106\ 025\ 564 \times 10^{-3}) \times T_p^2 + (1.005\ 272\ 999 \times 10^{-4}) \times T_p^3 - (1.126\ 713\ 526 \times 10^{-5}) \times T_p^4 + (6.591\ 795\ 606 \times 10^{-9}) \times T_p^5] / 1\ 000 \quad (4)$$

将式(4)中 T_p 换成 T_{tm} ,即 RHO_{tm} 计算公式。

令标准量器、体积管材质温度修正系数分别为 CTS_{tm} 、 CTS_p ,则 CCTS 有:

$$CCTS = \frac{CTS_{tm}}{CTS_p} \quad (5)$$

CTS_{tm} 、 CTS_p 计算公式为:

$$CTS_{tm} = 1 + (T_{tm} - T_b) \times G_{cm} \quad (6)$$

$$CTS_p = [1 + (T_p - T_b) \times G_a] \times [1 + (T_d - T_b) \times G_t] \quad (7)$$

其中, T_{tm} 、 T_b 、 T_p 、 T_d 分别为标准量器壁温、标准状态温度、体积管壁温和股钢杆温度; G_{cm} 、 G_a 、 G_t 分别为标准量器材质体膨胀系数、体积管面膨胀系数和股钢杆线膨胀系数。

CPL、CPS 计算公式为:

$$CPL = \frac{1}{1 - 4.64 \times 10^{-9} \times P_p} \quad (8)$$

$$CPS = 1 + \frac{P_p \times ID}{E \times WT} \quad (9)$$

其中, P_p 为体积管内液体的表压力, ID 为体积管标准容积段内径, E 为体积管材质的弹性模量, WT 为体积管材质的弹性模量。

由上述公式可知, JJG 与 API 对标准容积值的修正差异较大,一是运算方式, JJG 为各影响因素的修正因数相加减,形成一个最终的修正因数, API 为各影响因素的修正因数直接与容积值相乘,直接体现修正量,从理论上无本质区别。二是修正因子,两个标准表中差异具体如下:

1)CTDW 值

CTDW 值 API 中用式(3)计算;在 JJG 中,则以水的膨胀系数表示:表达式为: $1 + \beta_w(t_p - t_s)$, 水的膨胀系数可查

询规程中附录 D。参照《密度计量》^[18], 液体密度随温度变化关系式为:

$$\frac{RHO_{tm}}{RHO_p} = 1 + \beta_w(t_p - t_s) \quad (10)$$

由上可知, API 直接采用密度比值,而 JJG 则采用温差与水膨胀系数的乘积,其本质一样。

2)CCTS 值

API 中 CCTS 值如式(5),涉及 CTS_{tm} 与 CTS_p , API 中 CTS_{tm} 值与 JJG 的计算方式完全一致,但 CTS_p 值有较大差异。API 中如式(7), JJG 对应表达式为:

$$CTS_{JJG} = 1 - 2\alpha_p(t_p - 15) - \alpha_r(t_r - 15) \quad (11)$$

由式(7)、(11)可知,计算差异较大, API 中采用体积管管体的面膨胀系数 G_a 、股钢杆的线膨胀系数 G_t ,而 JJG 却采用 2 倍体积管管体线膨胀系数 α_p 和股钢杆线膨胀系数 α_r 。由膨胀系数的概念可知,面膨胀系数 ≈ 2 倍线膨胀系数,因此可知,两个标准本质一致。

3)CPL 值

API 中 CPL 值计算式如式(8), JJG 中对应表达式为:

$$CPL_{JJG} = 1 - P_p F_w \quad (12)$$

可知, API 中压力单位为 kPa, 对水的压缩系数^[19]直接取值 464×10^{-9} , 计算公式中位于分母位置,而 JJG 中水压缩系数 F_w 依据《JJG 209-2010 体积管检定规程》附录 D 在 $0^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 温度区间取值,且标明压力区间为 $0.3 \sim 0.5$ MPa, 压力单位为 Pa; 压缩系数最大值 508×10^{-12} 、最小值 440×10^{-12} , 中位数为 474×10^{-12} 。由以上比较可知, JJG 中水的压缩系数以 10°C 间隔取值,精度更高,但 API 与 JJG 水的压缩系数取值的绝对误差很小,其差异可忽略。

4)CPS 值

API 中 CPS 值如式(9), JJG 中对应表达式为:

$$CPS_{JJG} = 1 - P_p \frac{D}{Et} \quad (13)$$

由上可知,两个标准使用的参数因子相同,但 API 为正号, JJG 为负号,这是两个标准表达方式不同导致的,由式(2)可知, API 各因素直接修正采用乘除方式, CPS 在分母位置,由式(1)可知, JJG 采用各修正因子相加减计算统一修正值,由于压力的影响为体积管内压力越大,标准器示值反向修正应越多,因此,两个标准符号相反,但修正方向是一致的,故在形式上,两个标准差异貌似很大,但其修正结果,两者方向上是吻合的。

1.2 重复性计算公式

1)JJG 重复性计算

设 V_{ps} 为体积管在标准状态下容积值, \bar{V}_{ps} 为体积管在标准状态下平均容积值, δ 为标准偏差; $t_p(v)$ 为在测量次数为 n 条件下、置信概率为 95% 的 t 分布包含因子, S_{JJG} 为以 JJG 计算体积管测量重复性。 JJG 重复性采用 t 分布计算公式,推荐置信概率为 95%, 计算公式如下:

$$\delta = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n [(V_{ps})_i - \bar{V}_{ps}]^2}{n-1} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$S_{rJJG} = \frac{t_p(v)\delta}{V_{ps}} \times 100\% \quad (15)$$

2) API 重复性计算

设 CPV_{max} 、 CPV_{min} 分别为一组测量中标准状态下体积管标准段容积的最大值、最小值, S_{API} 为以 API 标准计算的体积管测量重复性, 则 API 计算公式为:

$$S_{rAPI}(\%) = \frac{(CPV_{max} - CPV_{min})}{CPV_{min}} \times 100\% \quad (16)$$

由上可知, 两个标准对重复性计算也存在较大差异。JJG 采用贝塞尔公式^[20]计算标准差, 并取置信概率 95%, 用 t 分布进行估计。API 采用极差法计算标准差, 但未给予极差系数, 且对置信概率也没有提及。

2 试验数据分析

2.1 试验概述

图 1 为 18 英寸丹尼尔体积管, 图 2 为体积管校准系统。在国外某油田采用标准金属量器水标的方式对活塞式

体积管进行现场校准, 体积管与标准金属量器信息如表 1 所示。



图 1 18 英寸丹尼尔体积管

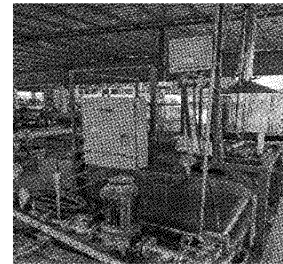


图 2 体积管校准系统

表 1 现场体积管与标准量器信息

| 设备名称 | 型号 | 编号 | 标准容积值 | 材质 |
|----------|-----------------|------------------|--|-----------------|
| 活塞式体积管 | P186B3B2A1KZAA1 | 1205-482868-10-1 | 120 L | 17-4PH 不锈钢镀硬铬钢体 |
| 二等标准金属量器 | BJL-120 | 2110 | 15 °C 条件下 0 刻度时为 119.97 L, 计量颈分度容积为 9.997 mL | 316 不锈钢 |

相关取值如下(数值依据厂家说明书及推算, 符号采用 JJG 表达方式): 标准量器材质体膨胀系数 β_s ; 依据校准证书取值: $47.7 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$; 体积管标准容积段内径 $D = 444.5 \text{ mm}$; 体积管材质弹性模量 $E = 1.965\ 005\ 745 \times$

10^{12} Pa ; 体积管标准容积段壁厚 $t = 31.75 \text{ mm}$; 测量杆(殷钢杆)线膨胀系数 $\alpha_r = 1.44 \times 10^{-6}$; 体积管线膨胀系数 $\alpha_p = 1.08 \times 10^{-5}$; 体积管的面膨胀系数 $G_a = 2.16 \times 10^{-5}$ 。对体积管进行连续 9 次测量, 数据如表 2 所示。

表 2 9 次校准数据

| 检定次数 | 量器读数/mm | 量器示值/L | 标准量器壁温/ $^\circ\text{C}$ | 体积管壁温/ $^\circ\text{C}$ | 体积管表压力/MPa | 测量杆温度/ $^\circ\text{C}$ |
|------|---------|-----------|--------------------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| 1 | 31.0 | 120.279 9 | 20.38 | 20.15 | 0.20 | 14.78 |
| 2 | 29.0 | 120.259 9 | 20.70 | 20.68 | 0.20 | 15.82 |
| 3 | 31.0 | 120.279 9 | 20.98 | 20.80 | 0.20 | 17.61 |
| 4 | 31.0 | 120.279 9 | 20.50 | 20.20 | 0.21 | 14.90 |
| 5 | 30.0 | 120.269 9 | 20.60 | 20.40 | 0.20 | 15.95 |
| 6 | 29.0 | 120.259 9 | 20.66 | 20.70 | 0.20 | 17.40 |
| 7 | 29.0 | 120.259 9 | 21.79 | 21.39 | 0.20 | 16.83 |
| 8 | 31.0 | 120.279 9 | 22.67 | 22.27 | 0.20 | 17.55 |
| 9 | 29.0 | 120.259 9 | 23.11 | 22.69 | 0.20 | 18.69 |

2.2 体积管标准容积值比较

表 3 为两个标准计算标准容积值比较, 当 $n = 3 \sim 9$, 依

据 JJG 与 API 标准计算, 由表可知, JJG 标准容积值比 API 略大, 其差异在 10^{-6} 级, 可忽略不计。

2.3 重复性计算比较

当 $n=3\sim 9$, 依据 JJG 与 API 标准计算, 体积管重复性结果如表 4 所示。

表 3 两个标准计算的标准容积值比较

| 校准次 数(n) | JJG 标准 容积值/L | API 标准 容积值/L | 绝对误 差/L | 相对 JJG 误差/% |
|-----------------|-----------------|-----------------|------------|----------------|
| 3 | 120.274 804 | 120.274 742 | 0.000 062 | 0.000 052 |
| 4 | 120.275 330 | 120.275 271 | 0.000 059 | 0.000 049 |
| 5 | 120.274 251 | 120.274 190 | 0.000 061 | 0.000 051 |
| 6 | 120.272 774 | 120.272 711 | 0.000 063 | 0.000 052 |
| 7 | 120.270 719 | 120.270 657 | 0.000 062 | 0.000 052 |
| 8 | 120.271 951 | 120.271 891 | 0.000 060 | 0.000 050 |
| 9 | 120.270 741 | 120.270 680 | 0.000 061 | 0.000 051 |

表 4 两个标准计算的重复性比较

| 校准次 数(n) | JJG 重复 性/% | API 重复 性/% | 绝对误 差/% | 相对 JJG 误差/% |
|-----------------|---------------|---------------|------------|----------------|
| 3 | 0.032 5 | 0.014 0 | 0.018 5 | 56.9 |
| 4 | 0.019 8 | 0.014 0 | 0.005 8 | 29.3 |
| 5 | 0.016 0 | 0.014 0 | 0.002 0 | 12.5 |
| 6 | 0.014 6 | 0.014 0 | 0.000 6 | 4.1 |
| 7 | 0.017 3 | 0.019 0 | -0.001 7 | -9.8 |
| 8 | 0.016 9 | 0.019 0 | -0.002 1 | -12.4 |
| 9 | 0.017 0 | 0.019 0 | -0.002 0 | -11.8 |

图 3 为两个标准计算的重复性差异图, 当 $n=6$ 时两个标准计算出的重复性最接近; $n<6$ 时, JJG 计算值大于 API 计算值; $n>6$ 时, API 计算值大于 JJG 计算值, 两个标准计算出来的重复性差值以 $n=6$ 为界, $n<6$ 随着 n 增大呈逐渐减小趋势, 且斜率较大; $n>6$ 后, 差值逐渐增大, 斜率较小。

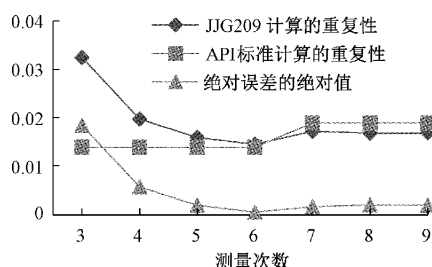


图 3 两个标准计算的重复性差异图

就各自标准内比较, n 不同, API 计算重复性值在整个范围内变化不大, 不同 n 所计算出重复性最大差异仅为 50×10^{-6} , 而 JJG 计算出来重复性差异较大, 最大差异达到

179×10^{-6} 。在 $n \geq 5$ 后, 不同 n 值计算出的重复性差异最大值仅为 27×10^{-6} 。

3 两个标准重复性差异原因分析及应对策略推荐

3.1 API 对体积管重复性计算本质

API 对体积管的重复性计算实际上采用了极差法^[21-22], 但对 n 不同却没有进行极差系数予以区别, 且对置信概率没有提及。因为极差法是对正态分布 n 较小的简单估计, 如果加上极差系数、置信概率所对应的包含因子, 可理解为在 API 对体积管重复性计算中, 置信概率所对应包含因子恰好等于极差系数。

设 δ_j 为极差法表示的标准差, d_n 为极差系数, K 为对应置信概率的包含因子, 则完整复原的极差法表示重复性 S_r 公式如下:

$$S_r = \frac{\delta_j}{CPV} \times K \times 100\% = \frac{CPV_{\max} - CPV_{\min}}{d_n \times CPV} \times K \times 100\% \quad (17)$$

而标准体积重复性要求为 0.02% , 即 \overline{CPV} 与 CPV_{\min} 相差非常小, $\overline{CPV} \approx CPV_{\min}$, 故重复性可表示为:

$$S_r \approx \frac{CPV_{\max} - CPV_{\min}}{d_n \times CPV_{\min}} \times K \times 100\% \quad (18)$$

由式(16)可知, S_r 是 S_{rAPI} 完整复原, 应相等, 即:

$$\frac{CPV_{\max} - CPV_{\min}}{d_n \times CPV_{\min}} \times K \times 100\% = \frac{CPV_{\max} - CPV_{\min}}{CPV_{\min}} \times 100\% \quad (19)$$

则可推算出: $d_n = K$ 。

API 中重复性可整体理解为: 在测量次数为 n 条件下, 在包含因子 $K = d_n$ 置信概率下, 用极差法估计重复性值。

3.2 JJG 与 API 计算的重复性差异最小化策略

在实际操作中, 要使 S_{rAPI} 尽可能地接近 S_{rJJG} , 假设 $S_{rAPI} = S_{rJJG}$, 由式(13)、(15)可知:

$$\frac{\delta_j}{CPV} \times d_n \times 100\% = \frac{\delta}{V_{ps}} \times t_p(v) \times 100\% \quad (20)$$

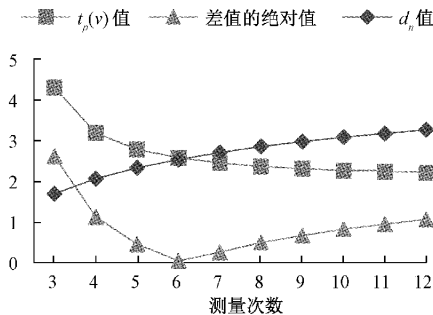
因极差法计算标准差 δ_j 与贝赛尔公式计算标准差 δ 只是不同计算方法, 在结果上差异较小, 故只有尽可能使 d_n 与 $t_p(v)$ 接近, 则 S_{rAPI} 将与 S_{rJJG} 差距最小。

表 5 为不同 n 值 d_n 值与 $t_p(v)$ 值数值表, 当 $n=3\sim 12$ 时, 相应极差系数 d_n 值与 t 分布包含因子 $t_p(v)$ 如表 5 所示。

图 4 为不同测量次数 n 极差系数与 t 分布包含因子, 如图所示 $n=6$ 时, 极差系数 d_n 与 t 分布包含因子两个值

表 5 不同 n 值 d_n 值与 $t_p(v)$ 值数值表

| 检测次数 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| d_n | 1.69 | 2.06 | 2.33 | 2.53 | 2.7 | 2.85 | 2.97 | 3.08 | 3.17 | 3.26 |
| $t_p(v)$ | 4.3 | 3.18 | 2.78 | 2.57 | 2.45 | 2.36 | 2.31 | 2.26 | 2.23 | 2.2 |
| 差值 | -2.61 | -1.12 | -0.45 | -0.04 | 0.25 | 0.49 | 0.66 | 0.82 | 0.94 | 1.06 |

图 4 不同测量次数 n 的极差系数与 t 分布包含因子

最接近, $n < 6$ 时, 极差系数 $d_n > t$ 分布包含因子, $n > 6$ 时, 极差系数 $d_n < t$ 分布包含因子。两者之间的差值也是以 $n = 6$ 为界, $n < 6$ 时, 随着 n 增大呈逐渐减小趋势, 且斜率较大, $n > 6$ 后, 差值逐渐增大, 但斜率较小。

就极差系数 d_n 与 t 分布包含因子自身比较, n 不同, 极差系数 d_n 在整个范围内变化相对较小, 不同 n 所计算出的 d_n 值最大差异 1.57, 而 t 分布包含因子差异相对较大, 最大差异达到 2.1, 但在 $n \geq 5$ 后, 不同 n 值 t 分布包含因子最大差异值仅为 0.58。

由以上分析可知, 极差系数 d_n 与 t 分布包含因子之间关系与前文 JJG/API 两个规程计算重复性高度相似, 说明以上分析具有普适性。

4 结 论

JJG 检定规程、API 标准对体积管标准容积值的差异在 10^{-6} 级, 可忽略不计; 而对体积管重复性计算的差异较大, 最大差值接近 200×10^{-6} , 接近判定标准线, 不可忽略。

API 标准中, 体积管重复性计算公式受测量次数 n 的影响相对较小, 在以上实验数据中, 最大差异仅为 50×10^{-6} ; JJG 检定规程中, 受测量次数 n 影响较大, 最大差异达到 179×10^{-6} , 而在 $n \geq 5$ 后, 因测量次数 n 带来的差异最大值仅为 27×10^{-6} , 仅为前值的 $1/6$ 。

当测量次数 $n = 6$ 时, JJG 检定规程、API 标准对体积管重复性计算差异最小;

为减少 JJG 检定规程、API 标准对体积管重复性计算的差异, 推荐测量次数 $n \geq 5$ 。

参考文献

[1] 徐英华, 王自和. 力学计量测试丛书: 流量计量(下)[M]. 北京: 中国质检出版社、中国标准出版

社, 2014.

- [2] 李占鹏, 涂程旭, 包福兵, 等. 活塞式标准体积管发展现状[J]. 机床与液压, 2023, 51(8): 150-158.
- [3] 欧凯恩, 任江跃, 魏佳, 等. 双向体积管检定影响因素分析[J]. 中国计量, 2021(10): 125-126, DOI: 10.16569/j.cnki.cn11-3720/t.2021.10.049.
- [4] 张毅治, 张永胜, 于华伟. 主动式活塞体积管流量标准装置阶跃特性研究[J]. 计测技术, 2020, 40(2): 64-67.
- [5] 孙兴伟, 李宜霖, 杨赫然, 等. 流体粘度对涡轮流量计计量特性影响研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 182-190, DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108606.
- [6] 禹胜阳, 蒋璐朦, 信硕, 等. 原油贸易交接计量中被动活塞式体积管的可靠性分析[J]. 油气田地面工程, 2020, 39(11): 63-67, 72.
- [7] 刘宪英. 油气交接计量的探讨[J]. 计量技术, 2018(11): 14-15.
- [8] 马建国, 肖啸, 吕莉莉. 油气对外交接计量现状与适应性分析[J]. 中国标准化, 2021(12): 194-197.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. 体积管检定规程: JJG 209—2010[S]. 中国计量科学研究院, 2010.
- [10] 李永杰, 徐英华. JJG209—2010《体积管》检定规程修订说明[J]. 中国计量, 2010(7): 125-127.
- [11] American Petroleum Institute. Manual of petroleum measurement standards chapter 4-proving system section 3 small volume provers [S]. American Petroleum Institute, 1993.
- [12] American Petroleum Institute. Manual of petroleum measurement standards chapter 4-proving system section 7 field standard test measures[S]. American Petroleum Institute, 2009.
- [13] American Petroleum Institute. Manual of petroleum measurement standards chapter 12-calculation of petroleum quantities using dynamic measurement methods and volumetric correction factors section 2 calculation of petroleum quantities using dynamic measurement methods and volumetric correction factors part 4 calculation of base prover volumes by the

- waterdraw method: API MPMS 12. 2. 2-2013 [S]. American Petroleum Institute, 2009.
- [14] 李永杰, 郑东志, 范宗奎. 常规式体积管重复性计算方法的发展和比较[J]. 石油化工自动化, 2008(3): 77-78.
- [15] 范宗奎. 标准体积管重复性的计算[J]. 油气储运, 2009, 28(2): 74-76, 79, 9.
- [16] 刘亮, 陆地. 交接计量仪表及体积管的标定[J]. 石油化工自动化, 2016, 52(5): 58-60.
- [17] 王志刚, 李高峰, 邹德超等. 影响体积管标准容积值准确性的因素分析[J]. 中国计量, 2015(8): 109-111.
- [18] 徐秀华. 密度计量测试丛书[M]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
- [19] 李佳, 史秀敏. 基于 IAPWS-IF97 水和蒸汽体膨胀系数和压缩系数[J]. 煤气与热力, 2012, 32(4): 1-4.
- [20] 陈凌峰. 标准不确定度 A 类评定中极差法的深入讨论[J]. 计量学报, 2019, 40(2): 347-352.
- [21] 杨逸臣. 极差法中极差系数的数值仿真研究与应用[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(10): 22-26, 9.
- [22] 班琦, 李耕雨, 王燕. 极差法和贝塞尔法在检测实验室评定 A 类不确定度中的应用[J]. 质量与认证, 2021(4): 58-60, DOI:10.16691/j.cnki.10-1214/t.2021.04.005.

作者简介

张三军, 工程师, 硕士, 主要从事流量标准装置及检测技术研究。

E-mail: 13927305003@126.com

许惠中(通信作者), 工程师, 学士, 主要从事容量流量计量专业方向研究。