

运载火箭贮箱多液位容积测量偏差与修正研究

张鑫, 彭江涛, 顾中华, 韩磊, 张学舜, 张文龙, 周博扬
(天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)

摘要: 运载火箭燃料贮箱多液位容积主要采用基于流量计的测量方法。为提高贮箱多液位容积测量的准确性, 将理论和试验相结合, 研究了试验介质温度、压力、贮箱膨胀对容积测量结果的影响。结果表明: 为避免贮箱容积偏差超过 0.05%, 应对容积测量时的温度变化进行控制或进行实时补偿; 压力对密度的影响进而导致的容积偏差可以忽略, 在 0.4 MPa 静水压力下, 影响低于 0.01%; 基于现有设计和使用准则, 光筒段贮箱的体积膨胀成为贮箱容积测量最主要的偏差来源, 达到了 0.1% 的偏差量级, 且随着贮箱气枕压力、液位高度、贮箱直径、试验介质密度的增加, 其测量结果相对于空箱状态的偏差越大, 必要时应针对不同试验介质进行修正。

关键词: 贮箱; 容积测量; 偏差; 修正

中图分类号: V462 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5825(2024)04-0495-06

Study on Deviation and Correction of Multiple Liquid Level Cubage Measurement in Fuel Tanks of Launch Vehicle

ZHANG Xin, PENG Jiangtao, GU Zhonghua, HAN Lei, ZHANG Xueshun,
ZHANG Wenlong, ZHOU Boyang

(Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing co. Ltd, Tianjin 300462, China)

Abstract: Fuel tank cubage of launch vehicle is measured mainly based on the flowing method. The influences of temperature of the test medium, the pressure and the fuel tank expansion were studied theoretically and experimentally in this paper. The results showed that to control the deviation under 0.05%, the test medium temperature must be controlled or compensated in real-time. Density change caused by pressure change could be negligible, since there was only a 0.01% deviation with pressure change up to 0.4 MPa. Tank expansion with inner pressure approaching its designed pressure could cause above 0.1% deviation to liquid level cubage, and the deviation was amounted with the increment of fuel tank pressure, liquid level height, fuel tank diameter and test medium density, thus the correction of multiple liquid level cubage was necessary.

Key words: fuel tank; cubage measurement; deviation; correction

1 引言

新一代运载火箭燃料贮箱内部设置多个液位监测点, 能够反映贮箱在加注或飞行时序状态下的整体容积和推进剂的剩余量, 是火箭设计和控制的重要参数, 其控制精度通常要求不低于

0.1%。针对容积的测量方法包括几何尺寸测量法^[1]、容积比较法^[2]、气体标定法^[3]、称重测量法、流量计测量法^[4-5]等。运载火箭液位点监测较多、容积测量精度要求高, 各液位点沿着箭轴方向分布, 目前主要采用称重测量方法和流量计测量方法, 将贮箱立式放置, 测量不同液位下试验介

质的量来进行标定。逯军等^[6]分析了流量计测量方法的不确定度,其系统不确定度小于0.07%,并对不确定度的次要因素也进行了说明,包括加注流量的稳定性、温度、压力、贮箱膨胀等。

随着技术的发展,在实际生产加注过程中流量的稳定性得到了进一步提升。但运载火箭燃料贮箱直径和长度不断增加,温度、压力、罐体在水压作用下发生膨胀变形等的影响将进一步扩大,甚至不再成为次要因素。马键等^[7]分析了贮箱温度和变形的影响,通过具体示例给出了容积测量偏差(达到0.12%);蒋亮亮等^[8]采用有限元和理论计算相结合的方法研究了贮箱温度和贮箱均匀内压作用下的变形影响,但未考虑实际贮箱容积测量过程中静水压力的影响,因此有必要开展相关研究确定其影响。

基于质量流量计方法进行贮箱容积测量时,测量各液位点试验介质的质量,利用试验过程中测量介质密度和温度,计算得到各液位点的体积,所测量质量流量的不确定度分析已在文献^[6]中进行了详细的讨论。本文以实际贮箱内各液位点以下实际空腔的体积为容积基准,着重分析试验介质温度测量、试验介质静压力导致的密度梯度以及贮箱受压膨胀等影响,通过理论分析与试验分析,确定系统测量容积的偏差和修正方法。

2 理论分析

2.1 试验介质温度测量

试验过程中贮箱会受到环境温度和介质温度影响而发生热胀冷缩,其影响主要基于材料的膨胀率,可通过理论方法进行修正^[8],目前均已采用温度补偿公式进行修正。另一方面,当贮箱容积较大,加注时间较长,且试验介质与环境温差较大时,需考虑细微的试验介质温度变化对容积测量结果的影响。为此,本文基于1990版国际温标水密度表中温度和密度的对应关系,分析箱内液位点触发时试验介质平均密度 $\bar{\rho}$ 对应温度 T_0 与整箱加注完成后试验介质的实际测量温度 T_1 存在差别时对贮箱液位点以下容积的影响。 T_1 对应密度 ρ_1 ,则测量容积 V_1 相对于实际容积 $\bar{V}$ 的偏差 r 如式(1)所示。分析4~30℃的 $\bar{T}$ 温度下, $T_1-T_0=\pm 1^\circ\text{C}$ 和 $T_1-T_0=\pm 2^\circ\text{C}$ 的容积偏差,如图1、图2所示。

$$r = \frac{V_1 - \bar{V}}{\bar{V}} = \frac{\frac{m}{\rho_1} - \frac{m}{\bar{\rho}}}{\frac{m}{\bar{\rho}}} = \frac{\bar{\rho} - \rho_1}{\rho_1} \quad (1)$$

式中, m 为液位点触发时质量流量计测量的试验介质的质量。

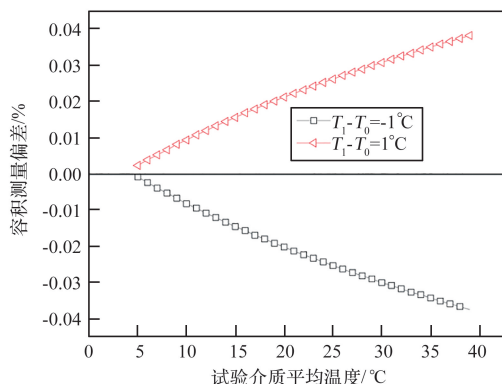


图1 温差1℃容积测量偏差

Fig. 1 Cubage deviation with temperature measurement deviation of 1℃

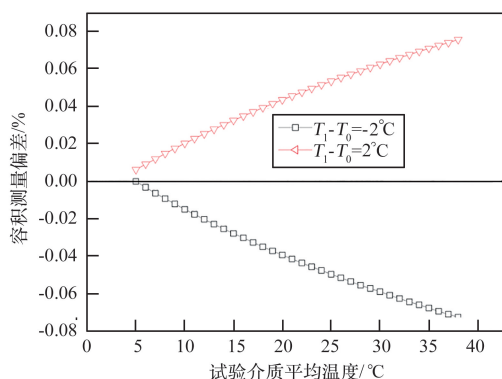


图2 温差2℃容积测量偏差

Fig. 2 Cubage deviation with temperature measurement deviation of 2℃

由图可知,为避免贮箱容积偏差超过0.05%,水温低于23℃时,应使贮箱容积测量时温度变化低于2℃;水温高于23℃时,应使贮箱容积测量时温度变化低于1℃。工程上可控制使得加注开始时贮箱最低侧纯水温度与加注结束贮箱最低和最高处温度偏差小于上述温度控制要求,或者采用实时高精度温度测量和修正补偿。

2.2 试验介质密度梯度影响

贮箱长度通常在20 m以下,随着新型号运载火箭的发展,贮箱长度越来越长,目前长度已接近40 m,此时试验介质液柱产生的静水压力将达到

近 0.4 MPa,因此,需对静水压力导致密度梯度变化的影响进行分析。不同深度的密度与压力、深度的微分关系如式(2)所示。

$$\frac{dp}{\rho} = C_0 dp = C_0 \rho g dh \quad (2)$$

式中, h 为试验介质液面往下的深度, p 为深度 h 处的静水压力, ρ 为深度 h 处的试验介质密度, C_0 为试验介质的压缩系数, g 为重力加速度。相关变量的示意图如图 3。

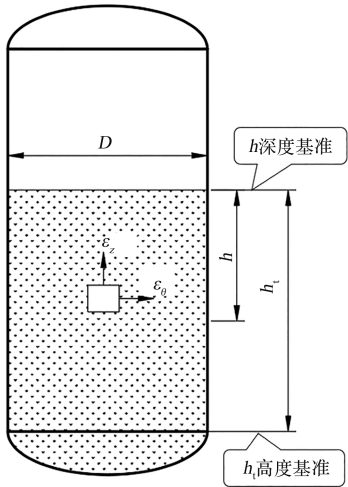


图 3 变量定义示意图

Fig. 3 Schematic diagram of variable definition

代入试验介质液面下深度 0 m 处的密度 ρ_0 , 计算可得液面下深度 h 处的介质的密度,如式(3)所示。

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - C_0 \rho_0 g h} \quad (3)$$

贮箱容积测量过程中,试验介质在贮箱内的液面不断升高,接连触发贮箱内不同高度处安装的传感器的触发点,实现贮箱内不同柱段高度液位点的容积测量。分析贮箱内高度为 h_t 液位点触发时情况,此时液面的高度(即液位高度)为 h_t ,则试验介质液面下深度 h 在 $0 \sim h_t$ 范围内变化,因液柱压力导致的测量相对误差如式(4)、(5)所示。

$$r = \frac{\int_0^{h_t} \frac{\rho_0 S_0}{1 - C_0 \rho_0 g h} dh - \rho_0 S_0 h_t}{\rho_0 S_0 h_t} \quad (4)$$

$$r = \frac{-\frac{\ln(1 - C_0 \rho_0 g h_t)}{C_0 \rho_0 g} - h_t}{h_t} \quad (5)$$

式中, S_0 为贮箱截面积, r 为容积测量误差,贮箱膨胀变形在 2.3 节分析,本处不考虑膨胀变形。

本文选取 15 ℃ 下 100~500 kPa 时水的压缩系数 $C_0 = 467.9 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ [9],取重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,液面下深度 0 m 处的密度取 15 ℃ 纯水密度 $\rho_0 = 999.099 \text{ kg/m}^3$ 。根据公式(5),在 0~40 m 高度范围内,贮箱内不同高度的传感器液位点触发时(即不同的液位高度 h_t)的测量误差如图 4 所示。当液位高度达到 40 m 时,静水压力约 0.4 MPa,此时静水压力导致的密度梯度引起的容积偏差小于 0.01%。因此,当试验介质的压缩系数在 $100 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ 量级时,试验介质竖直方向上的密度梯度对容积测量的影响可以忽略。此外,当加注过程中液面上方存在气枕压力时,可以根据气枕压力值修正 ρ_0 ,提高测量结果的准确性。

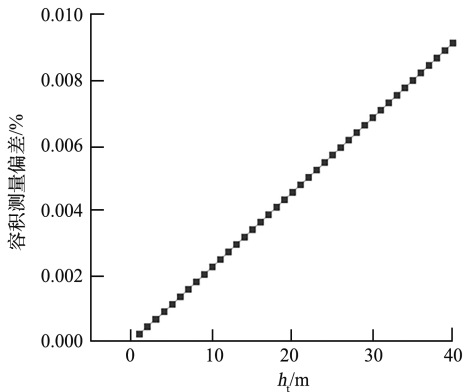


图 4 静水压力引起密度变化导致的容积偏差

Fig. 4 Cubage deviation with density change under different hydrostatic pressures

2.3 罐体受内压膨胀

实际容积测量过程中,由于静水压力的影响,贮箱受压膨胀直径增大。因此,实际容积测量结果包含了该膨胀的影响,势必与试验介质的静水压力有关。本文针对光筒段贮箱分析不同试验介质测量容积的影响,研究试验介质静水压力影响后与空箱状态贮箱的相对关系,以及不同试验介质测量结果之间的相对关系。

由于贮箱均采用超大径厚比的设计(径与厚度比值为 250 左右),本文近似采用二维平面应力状态进行分析。

根据公式(3),当试验介质的压缩系数在 $1 \times$

10^{-14} Pa^{-1} 量级时,液位高度 40 m 范围内,试验介质的密度变化较小。以水为例,液位高度 40 m 高度范围内,水的密度变化不到 0.02% 密度变化导致的各深度静水压力的变化不超过 0.02%,进而导致贮箱受压膨胀的直径变化不超过 $0.02\% \times \varepsilon$, ε 为贮箱环向弹性应变,其值通常小于 1%。因此,在计算静水压力导致的贮箱受压膨胀变形时,可以忽略试验介质密度梯度导致的静水压力变化所产生的影响,此时,水深 h 处的静水压力 $p = \rho_0 gh$ 。式(6)为贮箱圆形筒段受压时环向应变 ε_θ 计算公式,代入 $p = \rho_0 gh$ 可得式(7)。轴向应力 ε_z 计算如式(8)所示。

$$\varepsilon_\theta = \frac{pD}{2tE} \quad (6)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{\rho_0 ghD}{2tE} \quad (7)$$

$$\varepsilon_z = -\gamma \varepsilon_\theta \quad (8)$$

式中, D 为贮箱直径, t 为贮箱壁板厚度, E 为贮箱壁板材料的弹性模量, γ 为贮箱材料的泊松比。

由于 ε_θ 在 10^{-3} 左右,忽略高阶小量,此时截面积变化量如式(9)所示。

$$\Delta S = \frac{\pi(D + \varepsilon_\theta D)^2 - \pi D^2}{4} = \frac{\pi \varepsilon_\theta D^2}{2} \quad (9)$$

式中, ΔS 为贮箱筒段截面积变化,代入计算可得式(10)。

$$r_1 = \frac{\int_0^{h_1} \Delta S dh + S_0 \int_0^{h_1} \varepsilon_z dh}{S_0 h_1} \quad (10)$$

式中, r_1 为加注或者泻出过程中静水压力导致的不同液位高度实测容积相对于理论未形变贮箱的对应液位点下容积的误差。

气枕压力 p_0 引起的应力状态为二向应力状态,因此式(11)~(13)成立。

$$\varepsilon_\theta = \frac{(2 - \gamma)p_0 D}{4tE} \quad (11)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(1 - 2\gamma)p_0 D}{4tE} \quad (12)$$

$$r_2 = (5 - 4\gamma) \frac{p_0 D}{4tE} \quad (13)$$

式中, r_2 为液面上气枕头压力导致的实测容积相对于理论未形变贮箱的对应液位点下容积的误差。

两处应力应变叠加,可得贮箱受内压膨胀导致的容积测量偏差 r 如式(14)所示。

$$r = (2 - \gamma) \frac{D\rho_0 gh_1}{4tE} + (5 - 4\gamma) \frac{p_0 D}{4tE} \quad (14)$$

取值 $g = 9.8011 \text{ m/s}^2$,选取 15°C 下水的密度 $\rho_0 = 999.099 \text{ kg/m}^3$, $p_0 = 0 \text{ MPa}$,直径 $D = 5 \text{ m}$,泊松比 $\gamma = 0.34$,弹性模量取值 $E = 7.20\text{E}+10 \text{ Pa}$,壁厚 $t = 0.004 \text{ m}$,不同高度液位的测量偏差如图 5 所示。图 5 中同时给出了液氢密度 $\rho_0 = 71 \text{ kg/m}^3$,直径 $D = 3.35 \text{ m}$, $p_0 = 0.2 \text{ MPa}$ 的容积测量偏差情况。

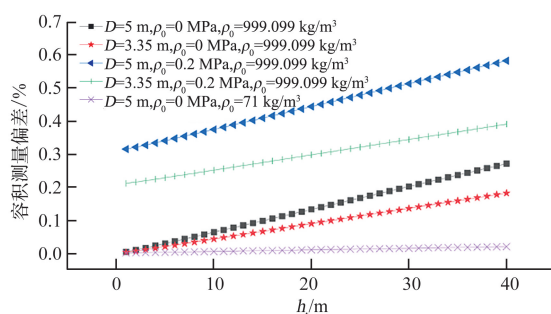


图 5 贮箱膨胀引起的容积测量偏差

Fig. 5 Cubage deviation caused by tank expansion

综上,贮箱受内压膨胀成为贮箱容积测量最主要的误差来源,误差超过了 0.1%,且随着贮箱液位高度、气枕压力、贮箱直径、试验介质密度的增加,其试验结果相对于空箱状态的误差也越大。需要说明的是,贮箱前、后封头受内压膨胀变形量受到封头型面的影响,为非均匀变形,本文容积测量偏差分析未包含。

2.4 容积测量结果修正

实际型号使用燃料与纯水密度存在差别,如液氢的密度约为 71 kg/m^3 ,则采用纯水试验介质测量的液位容积要高于采用低密度液氢测量的液位容积(排除贮箱冷却收缩影响),以直径 5 m、高 20 m 的贮箱为例,误差最大可达到 500 L,超过 0.1% 的误差上限。实际上,型号使用燃料的加注量比贮箱的真实液位点容积(该液位点下所有试验介质体积)更加重要。因此,在实际容积测量结果数据使用过程中,应当对相关的误差进行修正。基于公式(14),建立同一贮箱不同容积测量介质和不同气枕压力下贮箱内相同液位点容积的换算关系,即式(15)成立。

$$V_B = V_A \frac{4tE + (2 - \gamma)\rho_{0B}gh_lD + (5 - 4\gamma)p_{0B}D}{4tE + (2 - \gamma)\rho_{0A}gh_lD + (5 - 4\gamma)p_{0A}D} \quad (15)$$

当试验介质的压缩系数在 $1 \times 10^{-13} \text{ Pa}^{-1}$ 以上时,应将密度梯度影响包含在内,换算公式如式(16)所示。

$$V_B = V_A \frac{4tE + (2 - \gamma)\rho_{0B}gh_lD + (5 - 4\gamma)p_{0B}D}{4tE + (2 - \gamma)\rho_{0A}gh_lD + (5 - 4\gamma)p_{0A}D} \times \frac{C_{0A}\rho_{0A}g\ln(1 - C_{0B}\rho_{0B}gh_l)}{C_{0B}\rho_{0B}g\ln(1 - C_{0A}\rho_{0A}gh_l)} \quad (16)$$

式中, V 为液位高度 h_l 对应的液位点容积的测量结果,采用下标 A、B 代表不同容积测量介质工况。当取值 $\rho_{0B} = 0, p_{0B} = 0$ 时, V_B 表示修正后的贮箱的真实液位点容积。当采用实际燃料为 B 介质,液面深度 0 m 处的密度和气枕压力时,则 V_B 表示修正后的 B 介质在不同液位点的实际加注量。

3 试验研究

3.1 试验设计

为验证上述理论计算的准确性,设计了直径 5 m、高 20 m 的贮箱开展容积测量实验。为避免累计误差的影响,本文采用固定的触发点间距(取 $L = 2.414 \text{ m}$),放置贮箱内 2~18 m 之间的不同高度,如图 6 所示,通过试验测量,确定相关的结果。

由式(14)计算可得,相邻两触发点之间的测量容积可按照式(17)计算。同时,由上文分析,容积测量偏差主要受介质温度测量和贮箱受内压膨胀影响较大,因此,为排除温度关联因素影响,试验过程中测量产品温度变化,当变化温度超过 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,试验作废,不做统计。

$$\Delta V = S_0 h_{l1}(1 + r_{h1}) - S_0 h_{l2}(1 + r_{h2}) \quad (17)$$

式中, h_{l1}, h_{l2} 为同一个传感器上相邻 2 个液位高度, r_{h1}, r_{h2} 为 h_{l1}, h_{l2} 液位高度分别对应的容积测量偏差, ΔV 为同一个传感器上相邻 2 个液位高度之间水的体积,即两液位容积差。

3.2 试验结果

试验共计有效数据 10 组,分别在 10 个贮箱上开展试验,10 组试验之间测点高度基本相同,贮箱内径维持在 $4.992 \sim 4.994 \text{ mm}$ 之间,测点间距 L 通过采用相同的工艺液位传感器保证,因此,

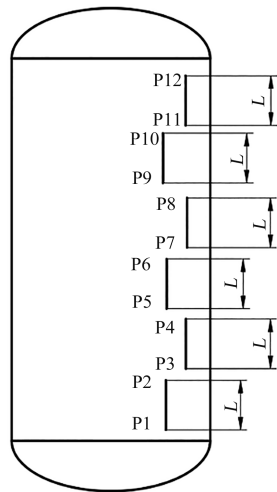


图 6 试验测点分布示意图
Fig. 6 Sketch of the test points

L 间距可认为基本相同。

图 7 为试验结果,图中横坐标为图 6 中显示的 P1、P3、P5、P7、P9、P11 测点所在的高度。经过比较,贮箱理论计算结果与产品试验结果最大偏差 0.064%,基本一致,验证了本文理论分析的准确性。试验结果表明,随着测点在贮箱内液位高度的增加,相同测量间隔内的贮箱容积测量结果不断增大,贮箱 2 m 高度处的贮箱相邻测点间的容积比 16 m 高度时测出的容积少约 80 L,对贮箱容积测量结果影响较大。图 7 结果波动的主要原因为贮箱加工偏差导致直径不同及试验时试验介质密度不同等影响。

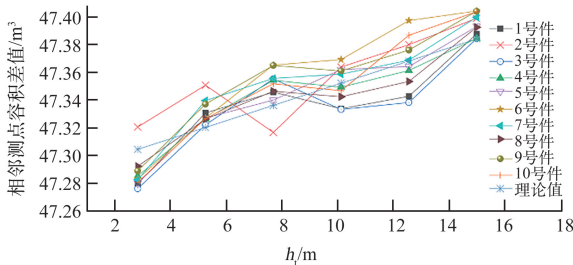


图 7 试验结果与理论结果对比
Fig. 7 Comparison of the test result and theoretical result

4 结论

1) 为避免贮箱容积偏差超过 0.05%,水温低于 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,应使贮箱容积测量时温度变化低于 $2 \text{ }^\circ\text{C}$;水温高于 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,温度变化应低于 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。工程上可控制加注开始贮箱最低侧纯水温度与加

注结束贮箱最低和最高处温度等。

2)当贮箱液位高度接近 40 m 时,贮箱底部静水压力达到约 0.4 MPa,静水压力导致的水介质的密度梯度引起的误差接近 0.01%,相对较小,基本可以忽略。

3)贮箱受内压膨胀是贮箱容积测量最主要的偏差来源,达到了 0.1%的误差量级,且随着贮箱液位高度、气枕压力、贮箱直径、试验介质密度的增加,其试验结果相对于空箱状态的误差也越大。试验结果表明,液位容积的实测结果与理论计算结果基本一致,证明了液位容积测量偏差计算方法以及修正方法的准确性。

参考文献 (References)

- [1] 傅青喜. 铁路罐车容积测量不确定度的评定[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(3): 121-125.
Fu Q X. Evaluation of the uncertainty in capacity measurement of rail tankers[J]. China Railway Science, 2006, 27(3): 121-125. (in Chinese)
- [2] 介骏祥, 廉永胜, 黎锐锦. 用容积比较法对地埋卧式金属罐容积测量的研讨[J]. 计测技术, 2003(5): 16-17.
Jie J X, Lian Y S, Li R J. Disquisition of document metal container measurement by way of capacity compare[J]. Metrology & Measurement Technology, 2003(5): 16-17. (in Chinese)
- [3] 张婷, 满满, 张翼, 等. 运载火箭用蓄压器膜盒容积测量方法及影响因素研究[J]. 液压与气动, 2020(4): 87-90.
Zhang T, Man M, Zhang Y, et al. Measurement method and influencing factors of the volume of the accumulator box[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020(4): 87-90. (in Chinese)

- nese)
- [4] 赵浦, 张涤新, 冯焱. 高精度气体微流量计工作容积的测量[J]. 机床与液压, 2011, 39(11): 85-87.
Zhao N, Zhang D X, Feng Y. Working volume measurement of a high-precision gas micro-flow meter[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(11): 85-87. (in Chinese)
- [5] 李超, 杜秋华. 容积测量方法研究[J]. 机械设计与制造, 2014(5): 218-220.
Li C, Du Q H. Research on the method of capacity measurement[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(5): 218-220. (in Chinese)
- [6] 逐军, 孙海涛, 唐永欣, 等. 一种基于流量法的大型贮罐容积标定系统[J]. 宇航计测技术, 2010, 30(6): 20-25.
Lu J, Sun H T, Tang Y X, et al. A cubage calibration system based on flowing method for large scale tanks[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2010, 30(6): 20-25. (in Chinese)
- [7] 马键, 童飞, 陈祖奎. 贮箱容积偏差及测量精度分析[J]. 火箭推进, 2013, 39(1): 41-45.
Ma J, Tong F, Chen Z K. Analysis on deviation and measuring precision of tank volume[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(1): 41-45. (in Chinese)
- [8] 蒋亮亮, 王博, 李国爱, 等. 基于壳单元的火箭推进剂贮箱容积计算算法[J]. 计算机辅助工程, 2014, 23(5): 59-63.
Jiang L L, Wang B, Li G A, et al. Volume calculation algorithm of rocket propellant tank based on shell element[J]. Computer Aided Engineering, 2014, 23(5): 59-63. (in Chinese)
- [9] 范宗奎, 田峰. 体积管检定中水的压缩系数的计算[J]. 工业计量, 2023, 33(2): 103-105.
Fan Z K, Tian F. Calculation of coefficient of water compressibility with pipe prover calibration[J]. Industrial Metrology, 2023, 33(2): 103-105. (in Chinese)

(责任编辑:冯雪梅)