一种低温液体推进剂流量测量及液位监测系统

丁博深　杨金龙　李艳艳
（北京航天试验技术研究所，北京 100074）

摘要：以某液氢/氧火箭发动机试验台建立为背景，介绍一种高精度低温液体推进剂（液氢/氧）稳态体积流量测量及液位监测系统。该系统由推进剂贮箱、分节电容液面计、二次仪表、采集设备等构成。改进现有系统，使其除了具有获取发动机工作过程中推进剂稳态体积流量的功能外，还能够在推进剂加注时实时监测贮箱内的液位，为推进剂加注操作过程提供依据。重点阐述了大容积推进剂贮箱的标定方法及标定过程中需要注意的问题。经分析及试验验证，该系统实时液位监测精度可达到3%，对液氢/氧稳态体积流量测量的精度分别可达0.539%和0.457%。

关键词：稳态体积流量；液位监测；贮箱标定；测量不确定度

A Measurement System of Cryogenic Liquid Propellant Flowrate and Liquid Level Monitoring

Ding Boshen　Yang Jinlong　Li Yanyan
(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074)

Abstract：Based on the establishment of a liquid LHx/LOx rocket engine test bed, the paper introduces a kind of high precision cryogenic liquid propellant (liqiud LHx/LOx) steady state volume flowrate measurement and liquid level monitoring system. This system includes a propellant tank, a sectionalized liquid level gauge, secondary instrument, and acquisition device etc. On the basis of the existing system, the system can not only obtain the steady volume flow of propellant in the process of engine operation, but also monitor the liquid level in the tank in real time when the propellant is filled, which provides the basis for the propellant filling operation process. This paper focuses on the calibration method of large volume propellant tank and the problems needing attention in the calibration process. Through analysis and verification, the accuracy of real-time liquid level monitoring can reach 3%, and the accuracy of liquid hydrogen / oxygen steady-state volume flow measurement can reach 0.539% and 0.457%.

Key words：steady state volume flowrate measurement；liquid level monitoring；tank calibration；uncertainty in measurement

1　引言

以液氢/氧低温介质为推进剂的火箭发动机地面试验中，液氢/氧稳态质量流量对发动机性能的评估具有十分重要的意义。稳态质量流量由稳态体积流量乘以密度得到，而密度一般可通过测量液氢/氧的温度和压力查表获得。液氢/氧稳态质量流量的测量目标为获得稳态体积流量，稳态体积流量由单位时间内贮箱内下降的液位乘以贮箱的截面积得到，其中，液位是通过分节电容液面计测出的，贮箱的截面积是通过贮箱的标定得出的。因此，贮箱内氢/氧的液位对发动机试验至关重要。此外，液位是控制加注速度及加注量的主

作者简介：丁博深（1988），硕士，测试计量技术及仪器专业；研究方向：测控技术和测控系统。
收稿日期：2020−03−25

要依据，也为防止气蚀关机提供重要监视。目前，稳态流量测量系统在发动机试验时测得的体积流量非常精确，但用它实时监测加注液位时，由于贮箱还未冷透，液面波动较大，无法监测液位[1]。基于此建立一种既可精确测量发动机试验时的稳态体积流量，又可监测加注时液位的稳态体积流量测量系统很有意义。

2　稳态体积流量测量系统组成及改进

稳态体积流量测量系统的核心是分节电容液面计和电容液位变送仪，改进后除可提供发动机工作过程中体积流量计算所需信息外，还可提供加注过程中液氢/氧的液位信息。

2.1　体积流测量系统组成

稳态体积流量测量系统主要由贮箱、分节电容液面计、电容液位变送仪、数据采集设备组成，如图1所示。

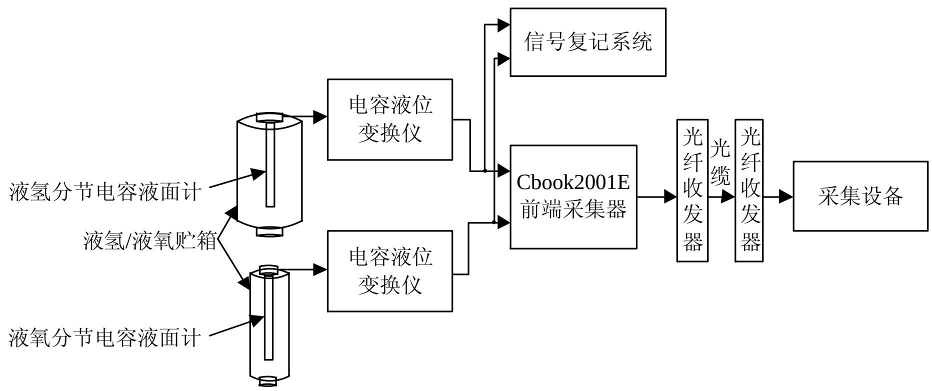

图1　稳态体积流量测量系统组成

2.1.1　贮箱

贮箱是液氢/氧推进剂的贮存装置，圆柱体结构，两端为半圆形封头，材质为不锈钢，立式安装。上封头开孔处装入分节电容液面计，下封头开孔处与发动机相连接，为发动机提供液氢/氧的同时，也是液氢/氧的加注口。

2.1.2　电容液面计

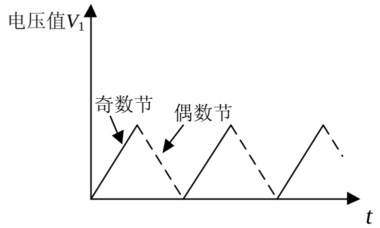

图2　稳态流量信号输出形式

分节式电容液面计是在电容液面计基础上改进而来的，其外管被分割成相邻的高度相同/互相绝缘的若干节，为电容的一极，另一极为内管。将外管奇、偶数节分别连接在一起，奇数节（与内管）电容记为C_1，偶数节（与内管）电容记为C_2，两个电容作为电桥相邻两臂。在加注或泄出过程中，奇偶节电容随着气液相转变，获得如图2所示的三角波。其中，各极值点与奇偶节间的交界处相对应，观测三角波数，即可判断液位高度。

2.1.3　电容液位变送仪

电容液位变送仪将电容的变化转化为交流电压的变化，再通过检波器转换成模拟直流电压值输出。

2.1.4　采数据采集设备

数据采集设备由采集工控机和前端采集器构成，电容液位变送仪将电压信号输入到Cbook2001E前端采集器，采集器将模拟信号转为数字信号，再经过光纤收发器转换为光信号远传到采集工控机。采集工控机用LabVIEW开发的采集软件采集，该软件还有液位、三角波显示及数据存盘功能。

2.2　测量系统改进

2.2.1　液位实时监测

在发动机工作过程中，贮箱已经完全预冷，液位下降平稳，通过上述三角波电压信号计算稳态体积流量容易实现，但该方法难以用于推进剂加注过程中的实时液位监测，原因在于加注过程中，贮箱内的气液分界附近始终处于剧烈的沸腾状态，三角波电压V_1将变得杂乱难辨。此外，受阀门动作导致液位较大波动，加注和泄出都产生三角波，通过人工或软件判断加注量难以实现。

因此求得分节电容液面计实时总电容，即将奇、

偶节电容之和作为液位检测的依据，是最为合理可行的实现方案。将奇数节、偶数节电容实时求和后的电容变换为总液位信号，相当于将分节电容液面计作为连续电容液面计使用。根据发动机试验验证，连续电容液面计测量精度可达到3%以内[2]，可以满足实时液位监测的要求。即变送电路同时分别测量得到如图2、图3所示的两种变换信号，电压V_2用来监测液位，实际上，液位高位变化速率不可能始终保持恒定，相应输出波形只是近似呈线性。

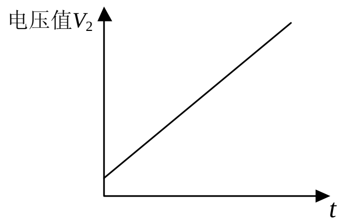

图3　液位电压输出信号

通过上述改进后，稳态体积流量测量系统在液氢/氧加注时具有液位实时监测功能。经过多次液氮调试比对，改进后的稳态体积流量测量系统液位实时监测的精度可达到±3%。

2.2.2　电容液位变送仪

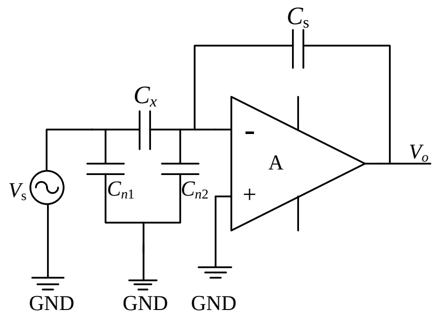

图4　电缆分布电容抑制基本原理

分节电容液面计的输出电容量级约几nF，对于配套使用电容复制比液位变送仪而言，由于所处位置与贮箱内分节电容液面计距离较远，受长电缆带来的分布电容等杂散因素影响，要将微小电容变化从大本底电容中精确、实时提取并稳定放大的实现难度很大。分节电容液面计输出的最小差动电容在全气-液态下的最大变化仅约6pF，而1m长的低电容电缆的分布电容也接近 100pF。当电容液位变送仪与贮箱内分节电容液面计距离近百米时，有用信号则完全被淹没。本系统中的电容液位变送仪采用长线测量抑制技术，有效地消除了线缆分布电容的干扰，原理如图4所示。激励源V_s驱动待测电容的一个电极，另一电极连接运算放大器A的反相输入端，C_{n1}、C_{n2}为线缆分布电容，C_x、C_s分别代表待测电容和固定大小的参考电容。当正弦波信号源内阻与C_{n1}的抗相比足够小时，C_{n1}影响可忽略，而运算放大器A的反相输入端处于“虚地”状态时，C_{n2}两端的电位相等，从而达到了消除线缆分布电容干扰的目的。

3　大容积贮箱标定

在发动机工作过程中为获得稳态体积流量，要精确获得贮箱对应的截面积。由图1可知，贮箱需要标定的部分为贮箱的直线段，即与分节电容液面计相配合工作的部分。

3.1　稳态体积流量计算

根据文献[3]的规定，液体火箭发动机试验体积流量的不确定度由贮箱标定不确定度、液位差测量不确定度和时间测量不确定度构成。稳态体积流量计算如式（1）所示。

$$q_v=\left|\frac{V_1-V_2}{t_1-t_2}\right|=\left|\frac{\sum_{i=1}^{n}S_i\cdot h_i}{\Delta t}\right|=\left|\frac{h\cdot\sum_{i=1}^{n}S_i}{\Delta t}\right| \tag{1}$$

式中：q_v——低温介质的稳态体积流量；V_1——t_1时刻三角波峰对应的体积；V_2——t_2时刻三角波峰对应的体积；Δt——计算稳态体积流量的时间段；n——t_1至t_2时刻对应分节电容液面计的节数；S_i——第i节分节电容液面计对应贮箱的截面积；h_i——第i节分节电容液面计的高度，精确加工及严格筛选后，可认为每一节的高度相同，即$h_1=h_2\ldots=h_i=h$。

由式（1）可知，精确测得贮箱截面积S_i十分重要，也是研究重点之一。

3.2　贮箱截面积标定方法

贮箱容积误差来源主要由生产制造、贮箱变形和标定介质计量等误差构成[4]。需要标定液氢/氧贮箱属于大容积贮箱（容积10m^3/4m^3，高约5m），对其精确标定困难较大。分别阐述标定要求、方法及标定过程需要注意的问题。

3.2.1　贮箱标定要求

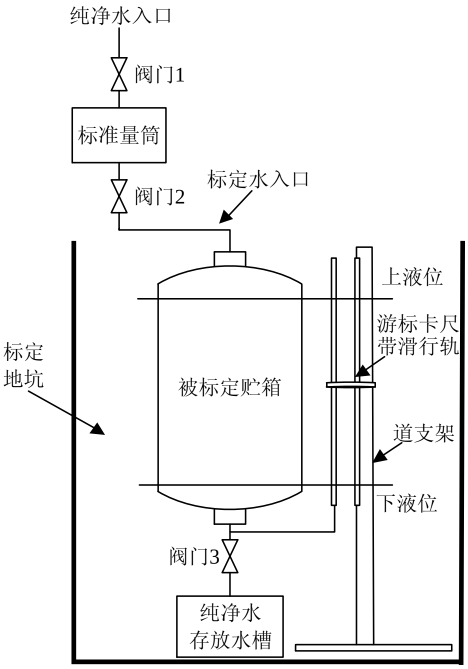

图5 推进剂贮箱标定示意图

为满足精度要求，对液氢/液氧贮箱的标定制定了详细的要求，液氢/液氧贮箱的标定示意图如图5所示。

a. 由于贮箱高超过5m以上，应对整个贮箱直线段进行分段标定，避免累积不确定度放大；

b. 使用纯净水为标定介质，每段标定5次（根据数据重复性决定是否增加标定次数），便于不确定度计算；

c. 为保证标定精确性，标定贮箱安装的垂直度要求很高，确定方法为由上法兰口引出铅垂线，确保铅垂线与贮箱直线段上端、下端距离之差小于10mm；

d. 标定结束后，使用衡量法，在贮箱直线段上随机取若干个100mm液位差的水，称其质量，通过温度，密度换算为体积来标定符合。

3.2.2 标定步骤

贮箱标定步骤流程图如图6所示。

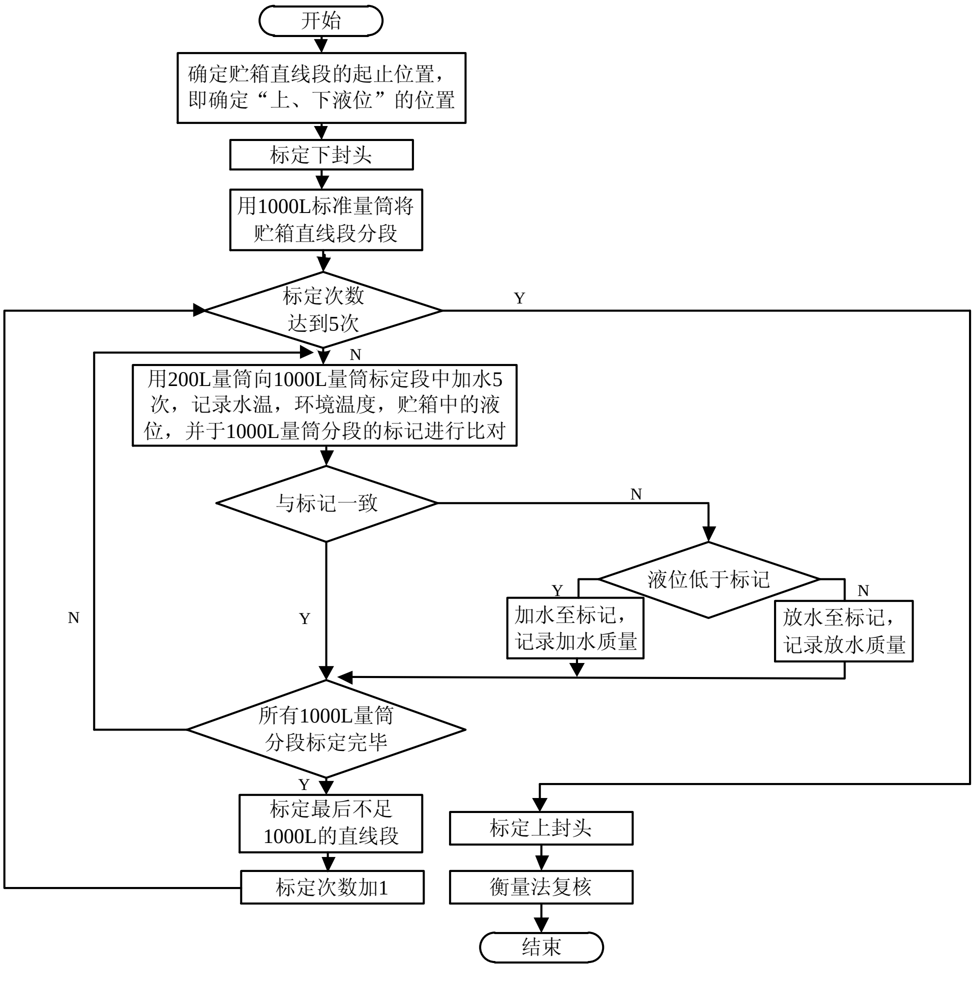

图6 贮箱标定流程

确定贮箱直线段起止位置：贮箱直线段的起止位置可直接由设计图纸上获得，但在实际制造过程中会有5%～10%的误差，因此，在确定直线段起止位置时，为其确保直线段起止位置正确，在满足贮箱实际使用的前提下适当调整。

分割贮箱直线段：根据文献[5]中“标准量筒与被标定的贮箱的容积比不大于1:10”的要求，结合贮箱直线段实际情况，使用1000L标准量筒对氢贮箱的直线段分段，不足1000L的部分，可使用500L、200L等不同容积标准量筒确定其容积。

衡量法复核：是在贮箱中随机抽取若干段液位差为100mm的标定水，称量水的质量，通过温度、密度计算出该段水的体积，计算出每毫米分度值后，与之前标定的结果相比较。

4 稳态体积流量测量不确定度评估

由式（1）可知，稳态体积流量的不确定度由贮箱标定不确定度、液位差测量不确定度和时间测量不确定度构成。使用分节电容液面计测量液位差，因此其测量不确定度受到分节电容液面计装配时每一节长度测量及分节电容液面计放入低温介质时热膨胀系数引入不确定度的影响。试验的时基信号由标准时基装置提供，因此时间测量不确定度由标准时基装置和采集系统判读的不确定度构成。通过计算，稳态体积流量测量的合成标准不确定度[3]为：液氢 0.539%、液氢 0.457%。

5 结束语

介绍一种高精度低温液体推进剂稳态体积流量测量及液位监测系统，并在现有测量系统基础上改进，使得稳态流量测量系统在精确测量发动机试验稳态体积流量的同时，具备液氢/氧推进剂加注过程液位实时监测的功能。详细介绍了大容积低温贮箱的标定方法及不确定评估，该标定方法的准确性为型号试验提供了有力保障。

参考文献

1 耿卫国. 高精度低温介质稳态质量流量、液位自动测量系统[J]. 低温工程，2001(1)：6～10

2 于海磊，陈锋. 低温推进剂液位监测系统设计[J]. 火箭推进，2010(3)：54～57

3 QJ1789.3—2011. 液体火箭发动机试验测量不确定度评定[S]

4 马键，童飞. 贮箱容积偏差及测量精度分析[J]. 火箭推进，2013(1)：41～45

5 JJG259—2005. 标准金属量器检定规程[S]

※※

（上接第12页）

基底上采用真空沉积法镀制膜层的方法可以保证膜层质量，后续将开展膜层环境适应性验证及在轨长寿命验证。

参考文献

1 丁亚林，田海英，刘立国，等. 一种提高碳纤维复合材料框架结构应用性能的结构技术[J]. 光学精密工程，2003，34(1)：8～26

2 李威，郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学，2011，4(3)：201～212

3 罗列超，赵荣根，孟佳，等. 航天器用铝光亮阳极氧化涂层特性研究[J]. 无机材料学报，2002，17(6)：1269～1276

4 王伟. 浅析真空镀膜技术的现状及进展[J]. 科学技术创新，2018(28)：146～147

5 邸英浩，曹晓明. 真空镀膜技术的现状及进展[J]. 天津冶金，2004(5)：45～54

6 程丙勋. 磁控溅射制备Al膜和Cu膜的结构与性能研究[D]. 四川：四川大学，2007

7 Paul B W, Jack D, Sam D. Fabrication and thermo-optical properties of the mls composite primary reflector[J]. Proc. of SPIE, 1999(3786)：200～205

8 王旭东，何世禹，杨德庄，等. 美国用于空间站辐射强中的热控涂层[J]. 宇航材料工艺，2002(1)：12～18

9 Hass G, Ramsey J B, Heaney J B, et al. Reflectance, solar absorptivity, and thermal emissivity of SiO_2-coated aluminum[J]. Applied Optics, 1969，8(2)：275～282

10 吴庆. 提高碳纤维复合材料界面粘接性能的方法和粘接机理[D]. 上海：东华大学，2001

11 王德山. 磁控溅射镀膜附着力的优化机制研究[J]. 大众科技，2013，15(171)：66～68

12 Yang Yang, Akihiro K, Han Weizhong, et al. Liquid-like, self-healing aluminum oxide during deformation at room temperature[J]. Nano letters, 2018, Vol.18(4): 2492～2497