

发动机试验液氢流量测量不确定度评定

庄 建, 李志刚, 李伟乐
(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 针对某型号液体火箭发动机试验, 介绍了液氢低温流量测量系统组成及原理。根据液氢质量流量测量数学模型, 分析影响液氢流量测量不确定度的主要压力对贮箱容积的影响因素, 依据不确定度评定相关标准和方法, 对各种影响因素进行分析, 最终得出液氢质量流量扩展不确定度为 $\pm 0.88\%$, 满足发动机设计部门对液氢低温质量流量测量不确定度 $\pm 1\%$ 的要求。

关键词: 火箭发动机试验; 液氢流量测量; 不确定度评定

中图分类号: V434⁺.3-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 03-0074-05

Uncertainty evaluation of liquid hydrogen flow measurement in rocket engine test

ZHUANG Jian, LI Zhigang, LI Weile

(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: The composition and principle of the liquid hydrogen flow measurement system used in the test of a liquid rocket engine are introduced in this paper. According to the mathematical model of liquid hydrogen mass flow measurement, the influence of main pressure on storage tank volume is analyzed, which is the main factor to affect the uncertainty of the liquid hydrogen flow measurement. The various factors of affecting the uncertainty is analyzed according to the uncertainty evaluation standards and methods. It is concluded that the expanded uncertainty of liquid hydrogen mass flow is $\pm 0.88\%$, which can meet the $\pm 1\%$ uncertainty requirement made by the engine design sector for the liquid hydrogen low-temperature mass flow.

Keywords: rocket engine test; liquid hydrogen flow measurement; uncertainty evaluation

0 引言

液体火箭发动机地面试验中推进剂流量的测量准确性关系到发动机比冲、混合比等关键性能

参数的计算, 而参数测量结果都具有一定的误差。流量测量不确定度就是表征流量测量误差大小, 即评定液体火箭发动机试验过程中流量测量结果准确性的指标。

收稿日期: 2016-09-07; 修回日期: 2016-11-16

作者简介: 庄建 (1981—), 男, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验测量技术

本研究以 GJB3756 《测量不确定度的表示与评定》和航天行业标准《液体火箭发动机试验测量不确定度评定 第 3 部分: 稳态流量》为基础, 介绍某型号液体火箭发动机试验液氢流量测量原理及其测量不确定度评定方法和结果。

1 液氢流量测量系统组成及原理

目前火箭发动机试验中推进剂质量流量一般通过测量体积流量乘以密度来获得, 液氢液氧发动机使用的推进剂为低温液氢和液氧, 其中又以液氢的流量测量最为困难。目前国内外普遍采用分节式电容液位计来测量液氢体积流量。

分节式电容液位计由内管、外管组成 (见图 1), 其中外管分成若干节, 每一节的长度根据测量要求来定, 其中奇数节连接起来与内管构成电容 C_1 , 偶数节连接起来与内管构成电容 C_2 , 将电容 C_1 和 C_2 接入电容电桥的相邻两臂, 这样随着推进剂液面的下降, 电桥输出如图 2 所示的三角波。该电压信号经信号处理后进入采集系统, 经计算机处理后, 通过分析分节式液位计三角波输出波形和查阅容器容积表可以得出一定时间段内发动机消耗的推进剂体积, 由此可以计算出平均体积流量。流量测量系统组成如图 3 所示。

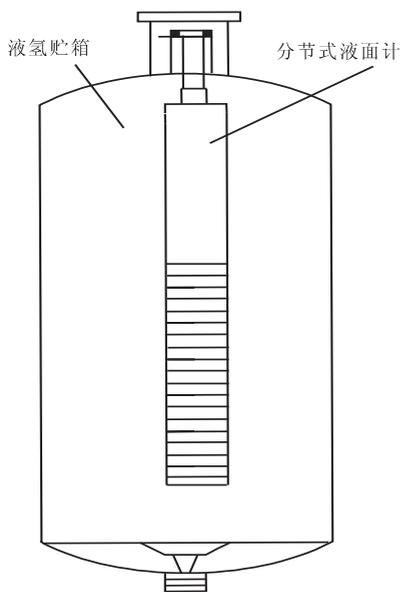


图 1 分节式液位计结构图

Fig. 1 Structure of segment type liquidometer

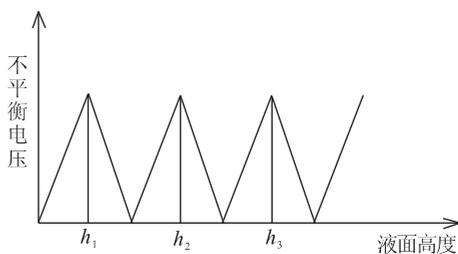


图 2 分节式液位计输出信号示意图

Fig. 2 Schematic diagram for output signal of segment type liquidometer

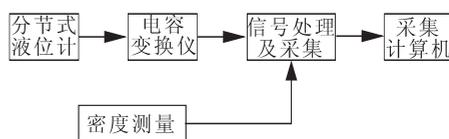


图 3 流量测量系统组成框图

Fig. 3 Flow measurement system composition diagram

运用分节式液面计的结构是比较测量的方法, 具有补偿作用, 较好地克服了连续式电容液位计在低温介质中使用产生的“零位漂移”问题, 输出波形的拐点正好是相邻两节的分界面, 与被测介质的物理性质无关, 与二次仪表的性能无关。由于这些拐点是液位计本身的校准点, 与量程无关, 因此分节式电容液面计的测量精度非常高。此外, 分节式液位计具有动态响应快、测量范围宽等特点。

2 测量不确定度评定

2.1 数学模型的建立

根据液氢流量测量原理, 可知液氢质量流量为体积流量和密度的乘积, 计算公式如下:

$$Q_m = Q_v \times \rho \tag{1}$$

式中: Q_m 为质量流量, kg/s; Q_v 为体积流量, m^3/s ; ρ 为推进剂密度, kg/m^3 。

体积流量 Q_v 由一定时间内贮箱液面下降高度来计算, 其计算公式为:

$$Q_v = (S \times h) / t \tag{2}$$

式中: S 为扣除液位计截面积的容器净截面积,

m^2 ; h 为液位变化量, kg/m^3 ; t 为对应液位变化所用的时间, s 。

得出液氢质量流量计算公式为:

$$Q_m = [(S \times h) / t] \times \rho \quad (3)$$

2.2 容器截面积测量不确定度

由于液氢容器承重等问题, 贮箱由中国计量科学研究院国家大容量第二计量站对贮箱直圆筒部分采用标准钢卷尺测量内周长和专用电子千分表内径测量尺内测直径的方法, 高度每增加 100 mm 测量一个截面积, 同时为了提高标定精度, 增加贮箱椭圆度测量。

数学模型:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} + \Delta S_{\text{椭}} + \Delta S_{\text{修}} \quad (4)$$

式中: D 为直圆筒内直径, m ; $\Delta S_{\text{椭}}$ 为椭圆度产生误差; $\Delta S_{\text{修}}$ 为低温收缩面积修正误差。

由式 (4) 得合成方差为:

$$u_s = \left[\frac{u_c(s)}{s} \right]^2 = c_1^2 [u(D)]^2 + c_2^2 [u(\Delta_{\text{椭}})]^2 + c_3^2 [u(\Delta_{\text{修}})]^2 \quad (5)$$

灵敏系数: 由式 (4) 求偏导数后得: $c_1=2$; $c_2=1$; $c_3=1$ 。

2.2.1 内直径测量引起的标准不确定度分量

直径测量采用标准钢卷尺测量内周长的方法, 考虑到钢卷尺固有误差、温度修正误差和操作误差, 内周长测量最大误差为 2 mm, 每个测量平面测量 6 次, 用极差法有: $n=6$, $d_n=2.53$; $u(L)=2/2.53=0.791$ mm; $u_1(D)=u(L)/\pi=0.252$ mm。

按 80 m^3 的液氢贮箱, 内直径为 2 800 mm 计算: $u_2(D)=u_1(D)/D=8.99 \times 10^{-5}$, 由于整个罐高度 12 000 mm, 按每隔 100 mm 分层, 共分 120 层, 所以直径测量的不确定度为:

$$u(D) = \frac{u_2(D)}{\sqrt{120}} = 8.2 \times 10^{-6} \quad (6)$$

2.2.2 贮箱椭圆度引起的标准不确定度

在测量贮罐容量时将罐视为正圆筒形, 实际上它存在一定的椭圆度, 将罐视为正圆筒时其体积 $V=\pi R^2 h$, 若考虑贮箱的椭圆形则 $V=\pi abh$ (其中 a , b 分别为椭圆的长、短半轴), 引起容

量的误差为: $\Delta V/V = [(a-b)/2R]^2$ 。由于罐的椭圆度不得超过 $\pm 1\%$, 其概率分布为均匀分布, 故椭圆度引起容量的相对标准不确定度为:

$$u(\Delta_{\text{椭}}) = (0.01/2.8)^2 / \sqrt{3} = 7.36 \times 10^{-6} \quad (7)$$

2.2.3 截面积温度修正引起的标准不确定度

截面积在常温 20~24 $^{\circ}C$ 时标定, 在 -253 $^{\circ}C$ 下工作, 面积需温度修正, 贮箱材料为不锈钢, 其线性膨胀系数为 10.14×10^{-6} , 膨胀系数的误差为 $\pm(2\sim 3)\%$, 其低温修正引入误差为:

$$u(\Delta_{\text{修}}) = 2 \times \alpha_{\text{钢}} \times \Delta T \times 3\% = 2 \times 10.14 \times 10^{-6} \times (253+22) \times 3\% = 0.017\% \quad (8)$$

2.2.4 其他因素

经实测贮箱焊缝、倾斜度 (小于 1 度) 引起的误差极小, 可以忽略。

此外, 贮箱设计阶段考虑了使用压力对贮箱容积的影响, 并对其进行了有限元分析, 分析结果表明: 增压压力对贮箱容积变化影响极小, 可以忽略。

2.2.5 贮箱截面积合成标准不确定度

综上, 由式 (5) 可得容器截面积合成标准不确定度为:

$$u_s = 0.037\%$$

2.3 高度测量不确定度

液面高度测量不确定度主要由液面计小节加工误差, 量具引入的误差, 液面计高度温度修正引入的误差组成。

2.3.1 液面计加工误差

液位传感器每节长 100 mm, 加工公差可以控制在 ± 0.01 mm, 液位计装配过程中会对小节进行筛选和匹配, 因此该误差不会累积。

$$u_{\text{加工}} = (0.01/100) \times 100\% = 0.01\% \quad (9)$$

2.3.2 量具引入的测量误差

液位传感器每节长 100 mm, 千分尺误差 0.005 mm。

$$u_{\text{量具}} = (0.005/100) \times 100\% = 0.005\% \quad (10)$$

2.3.3 高度的温度修正引入的测量误差

液面计高度在常温 20~24 $^{\circ}C$ 时标定, 在 -253 $^{\circ}C$ 下工作, 高度需温度修正, 液面计外管材料为硬

铝, 其线性膨胀系数为 $15.48 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 膨胀系数的误差为 $\pm(2\sim 3)\%$, 其低温修正引入误差为:

$$u_{h\text{修}} = \alpha_{\text{铝}} \times \Delta T \times 3\% = 15.48 \times 10^{-6} \times (253+22) \times 3\% = 0.013\% \quad (11)$$

2.3.4 动态液位测量误差

依据参考文献 (3), 液面计在液氢内动态液位及复现误差小于 $\pm 2 \text{ mm}$, 液位计实际使用高度大于 $5\ 500 \text{ mm}$, 则动态液位引入的测量误差为:

$$u_{\text{动态}} = (2/5500) \times 100\% = 0.036\% \quad (12)$$

2.3.5 液位高度标准测量不确定度

$$u_h = \sqrt{(u_{\text{加工}})^2 + (u_{\text{量具}})^2 + (u_{h\text{修}})^2 + (u_{\text{动态}})^2} = \pm 0.056\% \quad (13)$$

2.4 密度测量不确定度

在该型号试验中氢箱压力概值一般为 0.4 MPa , 氢箱温度概值一般为 $20\sim 21 \text{ K}$ 。据 NASA 报告《液氢的热物理性能表》得出相关数据, 见表 1。

表 1 液氢压力、温度与密度表

Tab. 1 Lists of pressure, temperature and density of LH₂

温度/K	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)			
	0.35 MPa 时	0.40 MPa 时	0.45 MPa 时	0.50 MPa 时
20	71.437 8	71.503 5	71.576 3	71.641 2
21	70.278 2	70.350 7	70.422 7	70.494 1
22	69.032 4	69.112 7	69.192 2	69.271 1
23	67.675 2	67.766 5	67.856 7	67.946 0
24	66.193 5	66.297 4	66.399 9	66.501 3

2.4.1 温度测量不确定度对密度不确定度的影响

温区为 $20\sim 40 \text{ K}$ 的热敏电阻温度传感器经现场校验, 其测量不确定度为: $u_T = \pm 0.27 \text{ K}$, 压力不变时 ($p=0.4 \text{ MPa}$), 温度变化 1 K ($T=20\sim 21 \text{ K}$) 影响密度变化为:

$$u_{\rho 1\text{K}} = \left(\frac{\rho_{20\text{K}} - \rho_{21\text{K}}}{\rho_{20\text{K}}} \times 100\% \right) = 1.64\% \quad (14)$$

假设压力测量的不确定度 $u_p=0$, 温度测量不确定度对密度不确定度影响为:

$$u_{\rho T} = u_T \times u_{\rho 1\text{K}} \times 100\% = \pm 0.44\% \quad (15)$$

2.4.2 压力测量不确定度对密度不确定度的影响

经评定, 压力测量不确定度为: $u_p = \pm 0.26\%$, 温度不变时 ($T=20 \text{ K}$), 压力变化 0.1 MPa ($p=0.4\sim 0.5 \text{ MPa}$) 时, 影响密度变化为:

$$u_{\rho 0.1\text{MPa}} = \left(\frac{\rho_{0.5\text{MPa}} - \rho_{0.4\text{MPa}}}{\rho_{0.5\text{MPa}}} \times 100\% \right) = 0.19\% \quad (16)$$

假设温度测量的不确定度 $u_T=0$, 氢箱压力概

值为 0.4 MPa 时, 一般选用 1 MPa 以内压力传感器, 压力测量不确定度对密度不确定度影响为:

$$u_{\rho p} = 0.26\% \times 1 \times u_{\rho 0.1\text{MPa}} \div 0.1 = \pm 0.005\% \quad (17)$$

2.4.3 密度标准测量不确定度

由以上结果可知, 液氢密度主要受温度影响较大, 压力影响基本可以忽略不计。

$$u_\rho = \sqrt{(u_{\rho p})^2 + (u_{\rho T})^2} = \pm 0.44\% \quad (18)$$

2.5 时间测量误差

时间判断误差为 $\pm 0.01 \text{ s}$, 试验时间 100 s , 去除发动机启动、关机段, 实际计算时间约 80 s 。

$$u_t = [0.01/80] \times 100\% = 0.012\% \quad (19)$$

2.6 液氢质量流量合成不确定度

$$u_Q = \sqrt{(u_s)^2 + (u_h)^2 + (u_\rho)^2 + (u_t)^2} = \pm 0.44\% \quad (20)$$

2.7 液氢质量流量扩展不确定度

按照置信概率 0.95 考虑, 扩展因子取 $k=2$, 则液氢质量流量扩展不确定度为:

$$U_Q = k \times u_Q = 2 \times 0.44\% = \pm 0.88\% \quad (21)$$

3 结论

通过研究液氢质量流量测量系统的组成和测量原理,分析测量不确定度主要分量的误差来源,逐个对分量的确定度进行评定,最终得出液氢质量流量扩展不确定度为 $\pm 0.88\%$,满足发动机设计部门的要求。该分析与评定方法可以供同类应用液位计测量质量流量的系统参考借鉴。

参考文献:

- [1] 于玉绵,叶政学.低温推进剂的液位测量[J].低温工程,1994(2): 1-4.
- [2] 马礼耀,汤维.高精度分节式电容液位计[J].制冷学报,1980,(2): 17-25.
- [3] 赵万明.液氧密度测量技术研究[J].火箭推进,2007,(8): 52-62.
- [4] 朱子环,耿卫国,管理等.某型号大推力火箭发动机试验推力测量不确定度评定[J].火箭推进,2012(10): 81-85.
- ZHU Zihuan, GENG Weiguo, GUAN Li, et al. Assessment of thrust measurement uncertainty for test of large thrust rocket engine [J]. Journal of rocket propulsion, 2012, (10): 81-85.
- [5] 刘曼,李玮.大型低温贮箱容积标定方法及不确定度评估[J].火箭推进,2015(2): 68-74.
- LIU Man, LI Wei. Volume calibration technology based on combination measuring application for large cryogenic tank [J]. Journal of rocket propulsion, 2015(2): 68-74.
- [6] 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(2): 41-45.
- MA Jian, TONG Fei, CHEN Zukui. Analysis on deviation and measuring precision of tank volume [J]. Journal of rocket propulsion, 2013(2): 41-45.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 27 页)

- [5] 李宁,潘卫明.液氧加注数值计算模型[J].低温工程,2008(3): 26-29.
- [6] 何家声.流速和管径对热力特性的影响[J].低温工程,2007(2): 46-49.
- [7] 符锡理.加注过程中液氧的温升和液氧泵的变频调速技术[J].低温工程,1998(4): 1-4.
- [8] 周庭宇,鲁雪生.液氧过冷用热交换器的热力设计[J].低温工程,2007(3): 35-39.
- [9] 陈国邦,黄永华,包锐.低温流体热物理性质[M].北京:国防工业出版社,2006: 391-427.
- [10] 陈国邦,张鹏.低温绝热与传热技术[M].北京:科学出版社,2004.

(编辑: 马 杰)