

低温推进剂液位监测系统设计

于海磊, 陈 锋, 郑勤生, 李庆年
(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 以液体火箭发动机地面试验用低温推进剂为研究对象, 建立了以电容式液位传感器和 C-V 线性电容变送仪为主体的低温推进剂液位测量系统。经某型号氢氧发动机真实试车过程中的搭载试验证明, 该系统能准确、快速的跟踪并实时显示低温容器中的液位值, 具有精度高、重复性好、操作简单及安全可靠等质量特性, 很好的解决了试验过程中低温推进剂液位实时监测显示的技术难题, 具备了应用地面试车试验的条件。

关键词: 液体火箭发动机; 低温推进剂; 液位测量; 实时

中图分类号: V433.9

文献标识码: A

文章编号: (2010) 03-0054-04

Design of monitoring system for cryogenic propellant level

Yu Hailei, Chen Feng, Zheng Qinsheng, Li Qingnian
(Beijing Aerospace Test Technique Institute, Beijing, 100074)

Abstract: Monitoring system for cryogenic propellant level used in the ground tests of liquid propellant rocket engine was established. The capacitance level sensor and C-V linear capacitance transmission instrument were the main equipments in this system. A LH₂/LOX engine test proved that the system can accurately and rapidly obtain and display the real-time liquid level of the cryogenic propellant containers. It was also demonstrated that the system operated safely and reliably with high precision, fine repeatability and simple operation.

Key words: liquid propellant rocket engine; cryogenic propellant; measure of liquid level; real time

收稿日期: 2009-12-23; 修回日期: 2010-01-17。

作者简介: 于海磊 (1982—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机地面试验测控技术和虚拟试验技术。

0 引言

液体火箭发动机中使用的推进剂分常温 and 低温两种, 常用低温推进剂主要有液氢、液氧、液态甲烷及液态丙烷等。随着我国新一代大运载火箭发动机研制工作的发展, 低温推进剂的消耗量将越来越大, 而作为试验用贮存低温推进剂的容器或贮槽, 必须配备各种安全附件才能保证低温推进剂在各种载荷下安全运行。液位测量元件(液位计)就是一种低温推进剂容器必不可少的测量元件和安全附件, 是低温推进剂容器正常、安全运行的保障。

由于低温液体密度小、沸点低、易汽化等特点, 液位监测和测量很困难, 准确地进行液位监测和测量尤为困难。目前对低温液体进行液位监测和测量的手段很多, 常用的有电容法、压差法及浮筒法, 新的方法有射频导纳法、热式测量法、超声波法、光纤法及核辐射法等^[1,2]; 市场上按照上述原理研制成型的液位计产品有很多, 但是其工作温度最低只能达到 220K 左右, 而用作推进剂的液氢和液氧温度分别是 22K 和 93K, 因此市场已有的成熟液位计产品不适用于液体火箭发动机的试验, 自主研发设计了一套液位测量系统, 以满足试验需求, 保证液体火箭发动机试验的安全进行。

1 低温推进剂电容式液位监测系统

由于电容式液位传感器具有结构可靠、安装快捷、制造简易、稳定性好及受外界电磁等干扰小的特点, 普遍应用于各种低温非导电介质的液位监测。根据试验现场实际情况, 结合已有的文献资料的研究成果^[3,4], 设计了基于电容式液位计的低温推进剂液位监测系统, 其原理框图如图 1 所示。

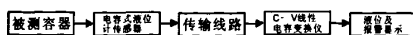


图 1 电容式液位监测系统原理图

Fig.1 Principle of the capacitance level monitoring system

低温推进剂电容式液位监测系统主要部件由两部分组成: 电容式液位传感器和 C-V 线性电容液位变换仪, 前者用于感测容器实时液位, 后者为液位测量显示仪表, 二者用同轴信号电缆连接。工作原理是当贮箱液位变化(升高或降低)时, 液面计的介质电容也随之变化, 然后通过电容变换仪得到与液位呈线性比例关系的直流电压信号。下面对这两部分的设计原理分别予以介绍。

1.1 电容式液位传感器设计

电容式液位传感器结构原理如图 2 所示, 它由两根垂直放置的铝制芯管和外管同轴装配组成, 作为液面探测元件, 内外管分别构成了电容的两个电极, 内外电极之加有绝绕垫, 用来固定内外电极并使两者彼此绝缘。工作原理如图 3 所示。

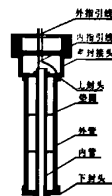


图 2 电容式液位传感器结构原理

Fig.2 Structure of the capacitance level sensor

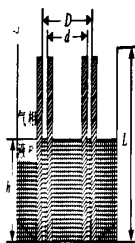


图 3 电容液位传感器工作原理

Fig.3 Operation principle of the capacitance level sensor

液位计总长度为 l , 当没有液体进入时, 液位计的初始电容为 C_0 , 当浸入液位计(传感器)的液体高度为 h 时, 液位计的电容为 C , 电容变化量为 ΔC , 计算关系如下:

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{2\pi(\epsilon_1 - \epsilon_g)h}{\ln(D/d)} \quad (1)$$

式中, D 为液位计外管的内径; d 为液位计内管的外径; ϵ_g 为介质的气相介电常数; ϵ_1 为介质的液相介电常数。由此可见, 对某一介电常数为定

值的液体，液位计的电容变化量与液体高度成线性关系，而与液位计长度无关。

1.2 C-V 线性电容变换仪的设计

C-V 线性电容变换仪的作用是把电容式液位计传感器输出的电容信号，线性转换为直流电压信号，再通过二次仪表显示为实时液位值。

电容变换仪的工作原理图如图 4 所示，其工作过程为：由电源激励 OSC 产生频率 1kHz 的交流电压信号，用自动平衡锁零电容电桥快速跟踪前端液位传感器电容及变化；电桥输出是交流正弦电压，然后经过检波及有源滤波，得到直流输出电压，并通过二次仪表显示为贮箱内液体的体积或液位高度。

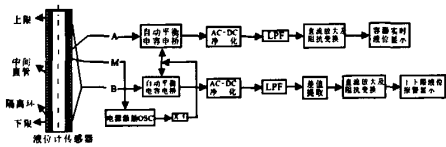


图 4 C-V 线性电容变换仪的工作原理图

Fig.4 Principle of linear capacitance level transmission instrument

其中直流输出电压的电压变化 ΔU 与传感器的电容变化 ΔC 之间具有线性比例关系：

$$\Delta U_o = \frac{U_i}{C_s} \cdot \Delta C = K \cdot \Delta C \tag{2}$$

式中， K 为电容变换灵敏系数，设定为 1mV/pf ； U_i 为传感器激励交流电压（常量）， V ； C_s 为电路中基准电容，交流平衡电桥基准桥臂， F 。

把公式（1）代入公式（2）可得到直流输出电压的电压变化 ΔU 与容器内液位实时高度 h （或体积）之间的线性关系式：

$$\Delta U_o = \frac{U_i}{C_s} \cdot \frac{2\pi(\epsilon_l - \epsilon_g)}{\ln(D/d)} \cdot h = K' \cdot h \tag{3}$$

式中， K' 为系统结构系数（常量）， V/m 。由公式（3）可以得出系统可以直接标度实时液位的容积数， m^3 或 L 。

同时该测量系统后端电容变换仪可支持传感器信号远程传输，采用独特的噪声抑制技术，彻底解决了电容信号在长线传输中受分布电容干扰的问题，消除了信号长线（0~1Km 或更长）引起

的分布电容影响（分布电容高达被测量电容的几千甚至上万倍）。

1.3 电容式液位监测系统设计小结

以液位传感器和电容变送仪为主体设计的液位监测系统，除了能准确实时的测量液位值外，还设计了点液位报警显示功能，即该监测系统可对低温推进剂容器上、中、下限液位作出准确快速报警。通过查阅资料^[1,2,5]和调研以往实际使用的测量方式，上下限液位报警通常使用的传感器是热敏电阻，利用传热学原理，即热敏电阻对温度变化的具有大响应特性进行报警；但在使用过程中发现，低温推进剂容器内的温度在试验过程中（时间<500s）变化非常小，热敏电阻不能及时对点液位变化做出响应，且在超低温工作环境下寿命有限，需经常更换；而设计的液位报警小节，采用的还是电容式传感器原理，电容变化对介质变化响应迅速、且传感器材质为铝制，可常年使用，维修周期可长达几年至十几年。

2 试验记录及结果分析

2.1 试验记录

在某型号氢氧发动机地面试验试车过程中，按照图 1 组成了基于电容式液位计的低温推进剂液位监测系统；图 5 是电容式液位传感器，它垂直置于低温推进剂贮箱内；图 6 是四通道 C-V 线性电容液位变送仪，它置于远离试验现场的控制间，供指挥员实时观测液位。传感器与变送仪之间通过同轴电缆连接。



图 5 电容式液位传感器

Fig.5 Capacitance liquid sensor

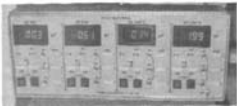


图 6 电容式液位变送仪

Fig.6 Capacitance level transmission instrument

表 1 电容式液位监测系统试验数据记录

Tab.1 Test data of the capacitance level monitoring system

电容变化量 $\Delta C/\text{pF}$	220	294	458	848	890	931	1001	1030	1142
液位实际值 V_1/m^3	1.08	1.44	2.25	4.17	4.37	4.58	4.92	5.06	5.61
液位测量值 V_2/m^3	1.03	1.49	2.35	4.2	4.3	4.62	4.93	5.09	5.62
差值 $\Delta V=V_2-V_1$	-0.05	0.05	0.1	0.03	-0.07	0.04	0.01	0.03	0.01
测量误差值									
$x_i=\frac{\Delta V}{V_1}\times 100\%$	-4.63	3.47	4.44	0.72	-1.6	0.87	0.2	0.59	0.18

表 1 是以低温推进剂-液氧容器为监测对象, 记录容器电容变化量与液位值, 其中电容变化量 ΔC 和液位测量值 V_2 是电容变送仪所得, 液位实际值 V_1 是通过试验现场加注车的数据记录所得。

下面将计算一下液位变送仪的测量误差, 计算测量误差 x 的平均值 \bar{x} 如下:

$$\bar{x}=\frac{1}{9}[(-4.63)+3.47+4.44+0.72+(-1.6)+0.87+0.2+0.59+0.18]=0.471$$

由此可以得出后端采集设备—电容变送仪的测量精度达到了 0.471%, 按照设计要求前端传感器分辨率可高达 $\pm 1\text{mm}$, 考虑到传感器的加工误差、被测介质环境变化等因素, 整个液位监测系统的精度可以控制在 3% 之内, 符合液体火箭发动机地面试验的技术要求。

2.2 试验结果分析

通过观察电容式液位测量系统在真实试车过程中的响应以及分析得到的试验数据, 可以发现该系统有如下优点:

- (1) 电容式液位传感器对液位的分辨率可高达 $\pm 1\text{mm}$, 精确实现了点液位显示及上、下限液位报警功能;
- (2) 传感器和电容变送仪之间的传输线回路总长达 700m, 分布电容高约 70000pF, 而传感器本身的电容初始值约 2500pF、变化量 1000pF 左右。在这种情况下, 后端电容变换仪仍能准确、快速提取电容传感器的真实信号, 解决了电容信号在长线传输中受分布电容干扰的问题;
- (3) 系统测量精度优于 3%, 从电容变化到终端液位值显示, 响应时间不超过 50ms;
- (4) 电容变换仪的操作简单、便于维修, 可

长时间连续工作; 且监测系统的设计具有功耗低、使用寿命长的特点。

3 结论

经过实际试车搭载试验证明, 该低温液位监测系统响应时间快、重复性好、精确度高, 很好地解决了超低温液体液位测量和电容信号远距离传输的技术难题; 研究发现电容式传感器若采用分节式结构^[6], 将能进一步提高系统测量精度, 这也是下一步将要实现的目标; 同时该液位监测技术同样适用于甲烷、煤油、汽油等其他非导电液态介质, 有着很好的应用领域和市场推广前景。

参考文献:

[1] 臧春喜, 耿卫国, 郑勤生. 低温推进剂液位测量技术研究 [C]. 第八届全国低温工程大会暨中国航天低温专业信息网, 2007.

[2] 王际强. 几种低温液体液位的测量方法 [J]. 深冷技术, 2007, (4): 37-39.

[3] 马礼耀, 汤维维, 张玉清. 低温流量测量系统[J]. 低温工程, 1983, (3): 22-24.

[4] 杜玉清, 鲁雪生. 低温储罐电容液位计设计 [J]. 低温超导, 2004, 32(1): 9-11.

[5] 吴江, 刘立强, 张亮. 低温工质液位与流量的热式测量方法的研究[J]. 低温与特气, 2000, (3): 8-10.

[6] 何彤, 范明军. 串联式电容液位计的测量原理分析[J]. 计量技术, 2006, (5): 14-16.

(编辑: 马 杰)