

数字式低温液位测量系统

段文浩, 张 佳, 王虹玥
(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 液体火箭发动机试验中, 低温推进剂 (液氢、液氧、液态甲烷等) 的稳态流量是发动机设计的重要参数。目前用自主研发的分节式电容液面计、电容变换仪、采集设备和计算机组成流量测量系统, 实现氢氧发动机高空模拟试验及校准试验中高精度稳态流量的测量和实时液位监测。为了提高电容式液位计的测量精度和可靠性, 对变送仪表的性能进行了改进。研制了基于 FPGA 的数字式液位测量仪, 测量系统仅由分节式液位传感器、数字式液位测量仪和计算机构成一套完整的解决方案, 实现了仪器的智能化和数字化。

关键词: 发动机试验; 低温推进剂; 液位测量; 数字化测量系统

中图分类号: V434+.3-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 03-0079-06

Digital measurement system for cryogenic liquid level

DUAN Wenhao, ZHANG Jia, WANG Hongyue
(Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: In liquid rocket engine test, steady-state flow rate of cryogenic propellants (such as liquid hydrogen, liquid oxygen, liquid methane, etc.) is an important parameter of the engine design. Currently, the flow measurement system consists of self-developed sub-section capacitive liquid level gauge, matching capacitance meter, acquisition equipment and computers. It can implement high-precision steady-state flow measurement and real-time liquid level monitoring in altitude simulation test and calibration test of a hydrogen oxygen engine. In order to improve accuracy and reliability of capacitive liquidometer, the performance of transmission instruments was improved and the FPGA-based digital liquidometer was developed, so that a complete set of solutions could be constituted by only the section level sensor, digital level measuring instruments and computers to achieve intelligentization and digitization of the instrument.

Keywords: engine test; cryogenic propellant; liquid level measurement; digitization measuring system

收稿日期: 2016-09-08; 修回日期: 2016-10-21

作者简介: 段文浩 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为火箭发动机试验测控技术

0 引言

在液体火箭发动机试验中,低温推进剂(如液氢、液氧、液态甲烷等)的稳态流量是发动机设计的重要参数。目前,北京航天试验技术研究所使用自主研发的分节式电容液面计、电容变换仪、采集设备和计算机组成流量测量系统,实现在氢氧发动机高空模拟试验、校准试验中的高精度稳态流量测量和实时液位监测。

低温流量测量中,分节式电容液面计技术已经成熟,但配套的电容变换仪却存在稳定性不高、精度不高和智能化程度不高的不足。由于内部是纯模拟电路,每一个信号处理环节都需通过调节电位器来实现,电路中电位器多达几十个,一旦不小心触碰某一电位器会使事先调试好的电路发生变化,导致输出信号失真。这种模拟电路加调节电位器实现的方法比较原始,在北京航天试验技术研究所试验台的应用中已暴露出这一问题。

目前,重型运载火箭的研制已进入关深阶段,对新试验台数字化、智能化、自动化和信息化的需求日益迫切,对相关的试验技术和测量手段也提出了更高的要求。为了提高电容式液位计的精度及可靠性,研制了基于FPGA(现场可编程逻辑门阵列)的数字式液位测量仪。该仪器内部电路高度集成,信号的处理通过FPGA中Verilog HDL(硬件描述语言)语言编程实现,载波稳定度高,仪器抗电磁干扰性强。另外,该仪器集采集和通信于一体,输出信号为数字信号,可通过串口直接与计算机通信,使得仅由分节式液位传感器、数字式液位测量仪和计算机就可构成一套完整的解决方案,实现了仪器的智能化和数字化。

1 设计任务与要求

1.1 设计任务

设计的基于FPGA的数字式液位测量仪主要用于某大推力氢氧发动机的地面校准试验,不仅可在加注、试车、回收过程中提供实时液位信息,还可提供试车中的稳态流量参数。该液位测

量系统由安装在低温推进剂贮箱内的液位传感器、位于后端测量间的数字式液位测量仪以及上位机采集处理软件组成,可实时显示加注、试车中的贮箱液位信息,并采集试车中的稳态流量数据。另外,该系统在设计上兼容其他待测低温介质(液氮、液态甲烷等)、不同贮箱结构及测量距离,具有较广的适用范围。

1.2 技术指标

- 1) 总电容测量范围: 0~20 000 pF;
- 2) 三角波测量拐点精度不低于 0.5%;
- 3) 电容测量分辨率: 优于 1 pF;
- 4) 总电容测量精度优于 1%, 线性度优于 0.5%;
- 5) 响应时间不大于 50 ms;
- 6) 信号电缆长度小于 500 m;
- 7) 液晶显示器可同时动态显示测量的电容值、液氢容积、三角波电压值,每 0.5 s 刷新一次;
- 8) 输出三角波电压 0~7.2 V 可调,三角波周期数精确对应液位传感器奇/偶节组合数目;
- 9) 具有采集和通信功能。

2 电容式液位传感器原理

利用介质在气相和液相下介电常数的不同进行测量。电容式液位计工作原理如图 1 所示。

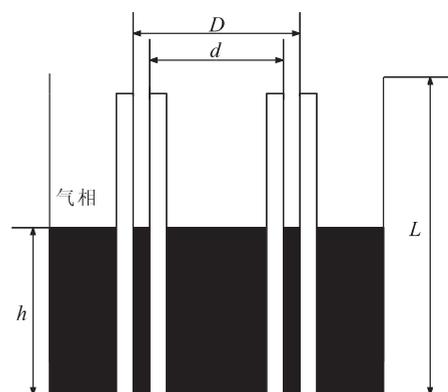


图 1 电容液位传感器工作原理

Fig. 1 Working principle of capacitive liquid level sensor

基于节省空间、方便安装等因素考虑,传感

器通常采用双层圆筒式结构, 内、外管分别作为测量电极。液位传感器 (液位计) 总长度为 L , 当没有液体进入时, 传感器的初始电容为 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 , 它们之间的计算关系如 (1) 式:

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

式中: D 为液位计外管内径; d 为液位计内管外径; ϵ_g 为介质的气相介电常数; ϵ_l 为介质的液相介电常数。

电容式液位计具有结构可靠、安装快捷、制造维修简单、使用寿命长、稳定性好、受外界电磁等干扰小的特点, 在各种非导电介质的液位监测中应用广泛。理论上, 所测电容值将与液位变化成线性关系。但实际上, 介电常数受温度、压力影响, 会给测量结果带来误差。特别是随着贮箱压力的增加, 要充分考虑到贮箱内增压气体介质和低温推进剂的热力学性质发生改变以及贮箱内温度分层等因素影响。

北京航天试验技术研究所是氢氧发动机试验及参数测量的专业单位, 在低温贮箱点式液位测量中曾采用自行研制的热敏电阻液位计方案, 连续液位测量主要采用自行研制的连续式电容液位计、分节式电容液位计。由于传统电容式液位计受温度, 压力影响, 导致非线性和零点漂移误差。解决方法是加入温度、压力补偿或改变传感器结构与测量形式。在 20 世纪 70 年代末, 北京航天试验技术研究所马礼耀等人研制出新型的分节式电容液位计, 采用细分直管段和比较式测量原理, 有效克服了外界因素影响带来的漂移, 显著提高了液位测量精度, 处于国内外先进水平。

分节液面计的基本特征是由两根垂直放置的内管和外管同轴装配组成, 作为液面探测元件。其中, 内、外管分别构成电容的两个电极, 内外电极之加用绝缘支撑件保持固定。与普通电容液面计不同, 其外管被分割成相同高度并相互绝缘的若干节。若从贮箱底部向上计数, 依次与内管构成电容 C_1 、 $C_2 \dots C_{2n-1}$ 、 C_{2n} , 将奇数节电容 C_1 、 $C_3 \dots C_{2n-1}$ 并联, 偶数节电容 C_2 、 $C_4 \dots$

C_{2n} 并联, 所形成电容分别记为 $C_{奇}$ 、 $C_{偶}$, 如图 2 所示。

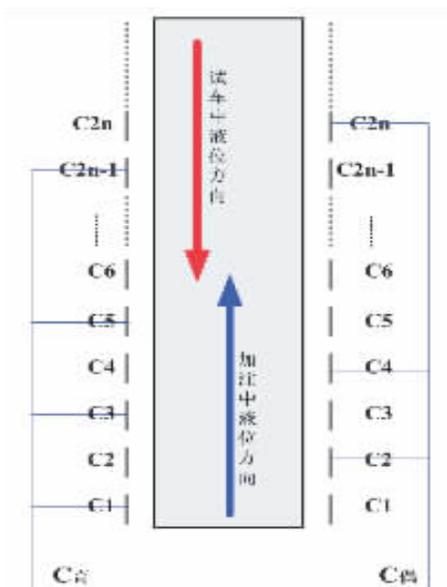


图 2 信号连接实现方式

Fig. 2 Signal connection mode

将这两个电容作为电桥相邻两个桥臂进行比较测量, 随着试车过程的液位下降, 奇、偶数小节电容所处状态将交替从液相回到气相, 如果下降速度均匀平稳, 输出将获得连续的三角波, 如图 3 所示。只要提前对贮箱进行特定高度与对应容积之间的标定, 即已知每一节对应的容积, 通过对若干个三角波的完整周期测量, 可以获得液位下降的速率或体积流量的精确数据。

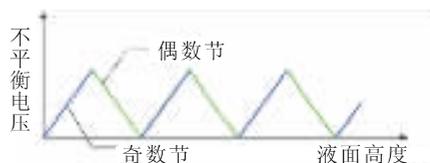


图 3 稳态流量信号形式

Fig. 3 Signal form for steady state flow

3 测量系统硬件设计

3.1 电容液位测量仪设计

该测量仪器的工作原理是通过由 FPGA 产生

的正弦激励信号作用至电容式液位传感器的一个电极（内管），然后传感器的另一个电极（外管）经过 C-V 变换电路（自动平衡电容电桥电路、精密检波电路、低通滤波电路）转换为与

传感器的电容变化呈线性关系的直流电压信号，再经过加减法电路送至 AD 进行采集，FPGA 对采集的信号进行数据处理，系统结构框图如图 4 所示。

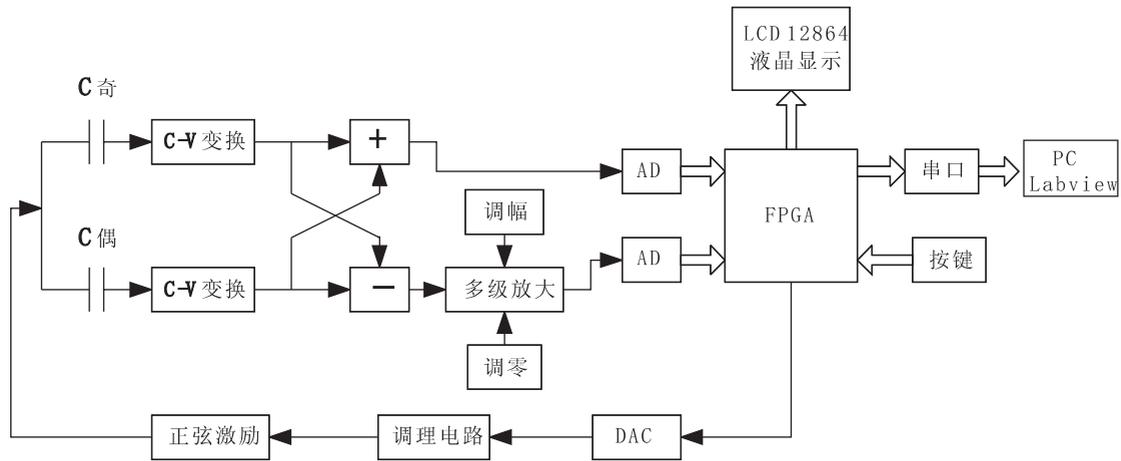


图 4 仪器结构框图

Fig. 4 Structure block diagram of device

具体过程为：在频率、幅值稳定的正弦波电压 U_x 激励下，用两个自动电容平衡电桥分别快速跟踪测量传感器奇数节电容 C_1 和偶数节电容 C_2 ，分别得到奇、偶数节的交流变换电压 U_{s1} 和 U_{s2} ，具体计算关系如下， C_s 为仪器内部标准电容。

$$U_{s1} = U_x C_1 / C_s \quad (2)$$

$$U_{s2} = U_x C_2 / C_s \quad (3)$$

U_{s1} 和 U_{s2} 经过交流放大、AC-DC 变换、低通平滑后，分别得到奇、偶数节直流变换电压 U_1 和 U_2 。当贮箱内的液面上升或下降时， C_1 和 C_2 分别发生相应改变，电容变化量记为 ΔC_1 和 ΔC_2 ，相应的直流电压变化值记为 ΔU_1 和 ΔU_2 。由式 (2) 和 (3) 知， ΔU_1 和 ΔU_2 亦分别与 ΔC_1 和 ΔC_2 成正比关系。

将 ΔU_1 和 ΔU_2 相减，即可得到与 ΔC_1 和 ΔC_2 之差成正比的电压，在液位上升或下降过程中，呈现连续的三角波变化，精确测量三角波周期数后，可计算点火过程中的稳态流量。

与之类似，将 ΔU_1 和 ΔU_2 相加，即可得到与 ΔC_1 和 ΔC_2 之和成正比的电压，在液位上升或下

降过程中，可用来测量总液位。

仪器内部电路分为模拟电路、数字电路、电源电路三部分，分别在三块电路板上实现。其中 C-V 变换电路为模拟部分，在设计该电路的过程中用 Multisim 软件做了大量的仿真分析，最后确定电路中阻容元件的最佳参数，用固定阻值的电阻取代可调电位器；数字部分的核心是 FPGA，主要完成对 ADC 输出的高速串行数据的解串、串口数据传输和驱动液晶显示器显示功能，FPGA 选用的是 Altera 公司的 cyclone III 系列 EP3C16E144C8N，FPGA 设计是仪器的关键所在，整个开发流程在 Altera 公司的 Quartus II 开发环境下完成；电源电路产生 $\pm 15\text{ V}$ 和 $+5\text{ V}$ 电压为系统供电。

3.2 电容液位测量仪的功能与特点

根据实际测量需要，研制的数字式电容液位测量仪具有如下功能与特性：

1) 实时测量显示传感器的总电容值，并根据电容值的变化自动计算并显示出液位容积。

2) 显示三角波电压值，并可根据需要调节三角波的零位和幅度，系统的阻尼时间小，实时跟踪能力强。

3) 采用电容三端测量技术, 消除前后端数百米传输线缆带来的约几万 pF 的随机分布电容、电磁干扰和共模干扰影响。

4) 对传感器电容变化有极高的变换灵敏度, 分辨率为 1 pF, 系统工作稳定性高。

5) 输出信号为数字信号, 可通过串口直接与上位机通信。

4 上位机采集软件设计

上位机软件采用 LabVIEW 语言来编写。程序中用到 VISA 资源包, VISA 是虚拟仪器软件构架的缩写, 是仪器编程的标准 I/O API, 可控制 GPIB、串口、USB、以太网、PXI 或 VXI 仪器, 可根据仪器的通信类型调用相应的驱动程序。

LabVIEW 收录系统流程图如图 5 所示。按下开始采集按钮后, 程序进行串口配置, 串口配置好后通信分两路实现, 分别用于数据读取和数据存储, 读取的数据显示在波形窗口中, 存储的数据以二进制格式 .dat 文件存储在硬盘中。存储之前程序会弹出对话框制定存储路径。波形显示采集数据的同时, 可以回放之前已存储的数据文件, 进行对比分析。

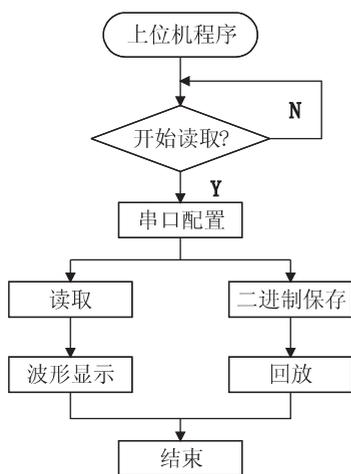


图 5 LabVIEW 收录系统流程图

Fig. 5 Flow chart for LabVIEW recorded system

根据上位机软件流程图, 编写完成的系统界面如图 6 所示。上面部分为开始采集、数据存储、波形回放、退出系统 4 个控制按键以及采集

时间显示, 两个图形控件分别显示读取波形和回放波形, 读取值以数字形式显示在左下角读取值窗口。



图 6 上位机 LabVIEW 操作界面

Fig. 6 Operating interface for PC LabVIEW

5 结果与性能分析

仪器研制后需要进行大量测试验证, 测试的目的是要观察传感器在长传输电缆连接的情况下仪器对电容发生微小变化和相对较大改变时的反应灵敏度, 即分别对应其微观液位和宏观液位的测量性能。

基本测试方法是通过外接标准电容来模拟分节液面计在使用中的奇、偶数节电容变化过程, 测量样机相应的信号变换电压输出。其中, 输出电压测量选用美国 Agilent 公司生产的 6 位半数字台式电压表 34401A, 电容标定选用美国 Andeen Hagerling 公司生产的高精度电容电桥 AH2500A, 信号线缆为 300 m 同轴电缆。为减少环境因素影响, 标准电容放置于恒温恒湿箱内, 保证测试条件一致。

首先进行微观液位测量功能测试, 步骤如下:

1) 在数字式电容液位测量仪的 a 、 m 和 b 、 m 输入端分别外接 5 100 pF 的标准电容, 用这两个电容来模拟传感器的奇偶节总电容, 调节前面板的“三角波电压调零”旋钮, 使液晶显示器的三角波电压读数为 0.0 V;

2) 在 a 、 m 端上并联 1 个 5.27 pF 的电容 C_{s1} (模拟小节电容在气、液相时的变化量), 调节样机前面板的“三角波电压调幅”旋钮, 使样机三角波电压 V_{s1} 为 527.0 mV, 即设定变换灵敏度 $K_1=0.1$ V/pF;

3) 在该设定灵敏度下, 重复测量 5 次, 三角波零位电压 V_0 的最大偏差小于 0.8 mV, V_{s1} 的最大偏差小于 0.5 mV, K_1 的重复性优于 0.2%;

4) 用 1 个从最小 5 pF 到最大 25 pF 连续可调的可变电容器 C_{s2} (模拟三角波变化) 代替 a 和 m 上并联的 C_{s1} , 分别用 AH2500A 和本样机进行测试, 模拟范围包括液面计细分小节使用时的变化区间, 结果如表 1 所示。样机测量值是电压, 经灵敏度 K_1 换算回电容。

表 1 微观液位测量性能测试结果

Tab. 1 Test results for micro level measurement performance

AH2500A 标定值/pF	样机测量平均值 (5 次)/pF	最大相对 偏差/%
5.23	5.36	0.16
8.57	8.51	0.11
10.15	10.25	0.26
13.88	13.65	0.28
15.52	15.36	0.35
17.73	17.64	0.29
20.32	20.58	0.43
23.15	23.43	0.38
25.47	25.52	0.18

从表 1 中可见, 用于微观液位测量时, 在液氢、液氧分节液面计的一个小节电容的全气-液相变化范围内, 样机的测量误差不超过 0.5%, 测量精度优于任务书要求的 1%。

6 结论

基于 FPGA 的数字式液位测量仪+LabVIEW 编写的上位机程序构成的低温液位测量系统研制后, 经过了大量的测试验证。测量数据表明, 该测量仪器具有响应快、精度高、重复性好的特点。特别是很好地解决了从试验现场至测控站的小电容信号远距离 (几百至上千米) 传输的技术难题, 满足某大推力氢氧发动机试验台的地面校准试验要求。同时, 该系统同样适用于液氮、液态甲烷等低温介质以及煤油、汽油等其他非导电液态介质的高精度实时液位测量。由于系统智能化和集成度高, 省去价格昂贵的采集设备且搭建简单, 便于向民用市场推广应用。

参考文献:

- [1] 马礼耀, 汤维维. 高精度分节式电容液位计[J]. 制冷学报 (试刊), 1978: 23-28.
- [2] 马礼耀, 汤维维, 张清玉. 低温流量测量系统[J]. 低温工程, 1983 (3): 11-15.
- [3] 耿卫国. 高精度稳态质量流量、液位自动测量系统[J]. 低温工程, 2001 (1): 6-10.
- [4] 黄伟, 吴伯枚. 分节式电容液面计[J]. 低温物理, 1982, 4 (1): 31-34.
- [5] 张春生, 苏开友, 等. FPGA 数字信号处理与工程应用实践[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.
- [6] 杨乐平, 李海涛. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [7] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程[M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [8] 陈学英, 李颖. FPGA 应用实验教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [9] 林英撑, 童晓华, 刘向宇. FPGA 嵌入式系统设计与开发指南[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

(编辑: 陈红霞)