

低温介质下电容液位测量系统的研究

刘岳鹏, 蔡睿, 敖春芳

(北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘要: 针对低温介质的贮存和使用问题, 设计一种数字化的高精度电容液位测量系统样机; 采用连续与分节相结合的方式对电容液位计的结构进行优化, 系统的硬件部分以微控制器为核心, 将电容的变化量转换为数字信号, 实现与上位机的网口通信; 通过电容标定工具和液氢对样机的性能进行验证, 结果显示, 系统的电容测量精度优于 0.1 pF, 且能够有效分辨出 1.37 mm 的液氢液位变化, 满足低温介质液位测量的精度要求。

关键词: 低温介质; 液位; 电容; 微控制器; 数字信号

Research of Capacitance level Measurement System in Cryogenic Medium

LIU Yuepeng, CAI Rui, AO Chunfang

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

Abstract: Aiming at the problem of storage and use of cryogenic medium, a digital prototype of high-precision capacitance liquid level measurement system was designed. The structure of capacitance level meter was optimized by combining continuous and segmented. The system's hardware part took the microcontroller as the core, which converted the change of capacitance into digital signal, and realized the communication with the host computer by the network interface. The performance of the system prototype was tested and verified by the capacitance calibration instrument and liquid hydrogen. The results show that the capacitance measurement accuracy of the system is better than 0.1 pF, and the liquid hydrogen level change of 1.37 mm is able to be distinguished effectively, which meets the accuracy requirements of cryogenic liquid level measurement.

Keywords: cryogenic medium; liquid level; capacitance; microcontroller; digital signal

0 引言

随着航天技术的发展和人类对宇宙的探索不断深入, 确保航天器能够长期在轨运行显得至关重要。尤其是在我国未来规划中的载人登月、空间站建设、深空探索、天基补给站等长周期任务, 对推进剂和燃料的高效利用提出了较高的要求。目前, 火箭和航天器所使用的低温推进剂(如液氢、液氧、液态甲烷等)在贮存、运输和使用过程中, 会受其自身物理特性^[1-2](如沸点低、易汽化)和绝热条件等因素影响, 且贮箱又会频繁进行增压、泄压等操作, 这使得实时准确了解贮箱内推进剂余量十分困难。因此, 实现对低温介质的高精度液位测量, 是对低温推进剂进行管控, 以及确保后续型号在轨应用任务顺利进行的基础条件^[3-4]。

在液位测量领域, 国内外最常用的技术有电容法、差压法、浮子法、超声波法、光纤法、雷达法、射频导纳法、热式测量法等^[5-8]。经过对相关文献调研, 每种方法都因各自的优劣势在不同领域中有较广泛的应用。但对于航天试验领域的低温介质液位测量, 又都相对存在一定的问题。例如, 压差法在存在温度分层情况时, 测量误差较大, 需要其他数据进行补偿和修正; 浮子法适用于静态测量, 在

需要加注、泄出等过程时精度较差; 电阻热式测量仅适用于关键点位测量, 不能实现连续液位监测; 超声波测量技术受低温推进剂的温度、密度等因素影响, 测量精度不高, 对温度的响应较差^[5]。

电容液位计因结构简单可靠、稳定性好等特点^[9], 在国内外低温推进剂测量领域中的应用最为普遍, 最常用的电容液位计有连续式和分节式两种结构, 在液体火箭发动机试验任务的应用中也确保了众多型号试验任务的顺利开展。但两种方式在某些需求场合仍存在一定的局限^[2]: 连续式电容液位计能获得连续的液位变化, 但温度和压力对测量精度有较大影响, 会造成零位电容值发生漂移; 分节式电容液位计对动态液位测量具有很高的准确性, 但无法实现静态液位的测量。

本文针对低温介质的液位测量问题, 提出一种新型结构的电容液位传感器, 弥补连续式和分节式液位计的不足; 并研制数字化的电容测量硬件, 通过以太网实现数据传输, 最终实现建立一套具有精度高、数字传输和远程可控等特点的电容液位测量系统样机的目的。

1 电容液位计

根据电容器的特性, 电容传感器的测量原理包括变间

收稿日期: 2021-05-20; 修回日期: 2021-06-18。

作者简介: 刘岳鹏(1990-), 男, 北京人, 工程师, 主要从事航天发动机试验相关的测控系统软硬件开发方向的研究。

引用格式: 刘岳鹏, 蔡睿, 敖春芳. 低温介质下电容液位测量系统的研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 74-78, 84.

距、变面积和变介电常数 3 种方式, 根据应用场景的差异, 可以设计为各种不同结构类型。在航天领域中对低温介质的液位测量领域, 电容式液位计一般采用双层圆筒式结构, 由内管和外管作为电容的两个电极, 利用介质在气相和液相下介电常数不同的原理进行测量。液位计的总长度为 L , 当传感器没有进入液体中时, 传感器的初始电容为 C_0 , 当传感器浸入液体中的高度为 h 时, 液位计的电容为 C , 电容的变化量为 ΔC , 它们之间的关系如 (1) 式所示, 电容的变化量 ΔC 与液位高度 h 成正比^[10]。

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

式中, ϵ_l 为介质在液相时的介电常数, ϵ_g 为介质在气相时的介电常数, D 为电容传感器的外管直径, d 为电容传感器的内管直径。

但在实际应用中, 低温介质的液位测量会受到温度、压力等环境因素影响, 电容值会产生一定的漂移, 导致测量结果的精度不高, 这也是连续式电容液位计在应用中存在的主要问题。而分节式电容液位计可以通过奇数节和偶数节的差值较好地测量出动态的液位变化, 但静态测量过程存在无法准确确定当前液位处于哪一个小节的问题, 因此, 无法获得静态液位的精准测量值。

本文研制的电容液位计的结构结合了连续式和分节式电容液位计的特点, 它在上、中、下位置设置了 3 个报警限位, 各由两个小节组成; 并在中间设置两个连续的大节, 一共八个分节。在以往的分节式电容液位计上, 所有奇数节并联在一起, 仅引出一组测量线, 偶数节同理。而本文的研究中, 每个分节的电容都单独测量, 并在后端的测控软件中对八个电容值进行融合与分析, 这样我们既可以分别取得上、中、下位置对应的差分信号, 同时又可以通过各分节电容的相互补偿得到测量段的连续信号, 为我们实现液位的准确测量提供依据。电容液位计的尺寸如下: 内管直径 d 和外管直径 D 分别为 32 mm 和 36 mm, 每个小节电容对应液位变化为 25 mm, 连续节分别为 299 mm 和 251 mm。电容液位传感器的实物图与结构示意图如图 1 所示。

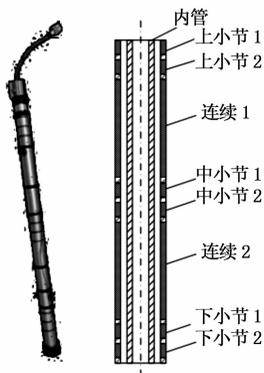


图 1 电容液位传感器结构

2 液位测量系统硬件设计

本文设计的高精度电容测量系统的硬件包括模拟电路和数字电路两部分, 其中, 模拟电路主要是将电容变化转变为电压变化的 C/V (Capacitance to Voltage) 变换电路, 数字电路部分以嵌入式微控制器为核心, 控制 DDS (Direct Digital Synthesis 直接数字合成) 激励模块、高速 A/D (Analog-Digital) 转换模块和以太网通讯模块 3 个部分, 实现集电容测量、处理和传输于一体的功能。硬件部分的结构框图如图 2 所示。

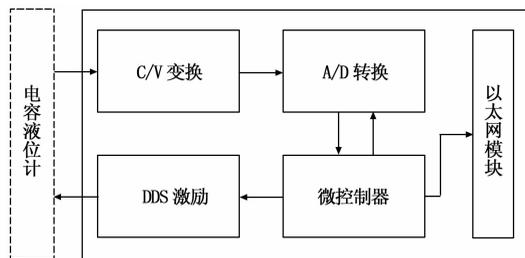


图 2 电容测量硬件结构框图

2.1 C/V 变换电路

由于电容传感器在低温介质的液位测量过程中的变化量很小, 只有几 pF 到几十 pF, 远远小于传输线缆的分布电容, 为避免线缆分布电容对被测电容值的影响, 本文采用 C/V 变换电路将液位计电容值的变化转变为电压的变化, 如图 3 所示为电容变换电路, 其能够有效地抑制线缆分布电容的影响^[11]。图 3 中, 被测电容 C_x 的两个电极分别接激励源 V_s 和运算放大器的反相输入端, C_{n1} 和 C_{n2} 为传感器线缆的分布电容, C_s 为大小固定的参考电容。当激励的正弦信号源的内阻与 C_{n1} 的容抗相比足够小时, C_{n1} 的影响可忽略不计, 而运算放大器的反相输入端处于“虚地”状态时, C_{n2} 两端电位相等, 也可忽略, 从而消除了线缆分布电容的影响。

2.2 数字电路模块

采用模拟电路进行电容测量时, 需要通过信号放大、整流、滤波和 AD 转换等过程, 将激励的正弦信号变成直流信号接入采集设备, 这就存在某些器件自身的漂移造成最终结果的误差。因此, 本文的电容液位测量电路采用数字化的设计方案, 以稳定性和可靠性较高的数字芯片实现各种功能。同时降低模拟信号在电缆中的传输距离, 避免电气和振动噪声等环境因素产生的干扰。电路的工作过程是由微控制器控制 DDS 模块产生激励信号, 并加载到电容液位计的一个极板, 传感器的另一极板经 C/V 变换电路后接入高精度 A/D 转换模块, 微控制器读取 A/D 转换结果后, 再通过以太网传输模块以数字信号的方式实现与上位机的通信。

微控制器采用意法半导体的单片机, 型号选择 STM32F407VGT6, 其采用 ARM CortexTM-M4 架构, 具有

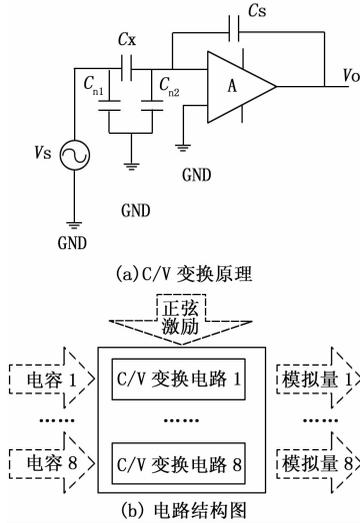


图 3 C/V 变换电路

DSP 指令与浮点运算能力, 80 个可复用的 GPIO 管脚和 1 024 kB 的 ROM 空间, 可满足大部分控制与信号处理等方面的市场需求^[12-13]。在本文电路设计中, 通过 STM32F407VGT6 单片机的 FSMC、中断、定时器和通用 IO 等外设功能, 实现对其他数字芯片模块的控制和电容测量。

DDS 信号激励模块选用 ADI 公司的 AD9850 芯片^[14], 其采用先进的 CMOS 技术, 内部通过可编程 DDS 系统、高性能 DAC 和高速比较器, 实现全数字编程控制的频率合成。为节约单片机的硬件资源, 本文采用 AD9850 芯片的串行数据传输模式^[15], 与单片机之间仅需 4 个 IO 口进行连接, 可降低布线密度, 便于电路性能优化。同时, 作为被测电容的激励源, 单片机通过发送指令控制 AD9850 按要求输出频率为 1 kHz 的正弦信号。

本文选用的 A/D 转换模块采用 ADI 公司的 8 通道 16 位数字芯片 AD7606, 其通过单电源 5 V 供电, 即可实现 ±10 V 和 ±5 V 两种范围的双极性输入, 所有通道可实现最高 200 kSPS 的同步采集^[16]。STM32F407VGT6 单片机与 AD7606 芯片通过 16 位并口进行连接, 程序运行时, 单片机可以将 AD7606 看作一个外部存储器, 通过 FSMC (灵活的静态存储控制器) 读取数据。同时, 为保证程序能够按照既定的频率进行数据采集, 利用单片机的定时器功能产生频率为 100 kHz 的 PWM 脉冲信号, 连接到 AD7606 的 CONVST 引脚, 用于控制启动 A/D 转换; 单片机根据转换结束时产生的中断信号, 判断转换是否完成, 再经 FSMC 功能将转换结果读取到程序的内存中。

以太网接口模块采用 DP83848 芯片^[17]和 S16116G 芯片, 其中, DP83848 支持 100BASE-TX 的以太网络格式, 兼容 IEEE802.3 标准, 可为嵌入式应用提供高效、低引脚数、低成本和低功耗的以太网解决方案; S16116G 芯片是以太网滤波器, 通过电平耦合, 达到信号增强、电压隔离和阻抗匹配等作用。在电路设计时, STM32F407VG 单片

机与 DP83848 芯片之间通过 RMI 接口规范进行连接^[18], 再经以太网滤波器 S16116G 和 RJ45 网线接口实现与上位机的通信。由于常规网线一般最长只能满足 70~80 米的传输需求, 而在航天测控领域中, 测控间与试验前端之间距离通常会超过 100 米, 无法保证数据稳定可靠地传输, 因此, 需要在中间加设光纤收发器, 确保信号通信不受影响。本文通过以太网光纤替代了传统的同轴电缆传输方式, 避免了大量铺设电缆带来的人力和经济成本, 同时以数字信号传输数据, 也提高了系统的抗干扰能力和可扩展性。

图 4 所示为电容测量系统的数字电路部分结构图, 其中, 2 个 8 引脚的插座对应液位计的 8 个分节电容的测量结果, 与图 3 所示的 C/V 变换电路进行连接, RJ45 网线接口负责与上位机的通信。另外, 电路中还预留了便于调试和程序优化管理的 SWD 接口和 UART 接口, 电路各元件的布局按功能划分区域, 既保证布线便捷简短, 又可避免各功能模块之间的相互干扰。

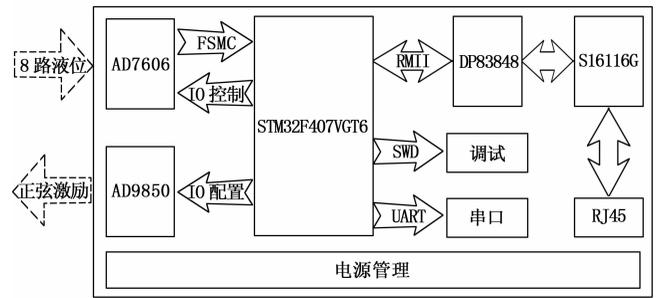


图 4 电容测量系统的数字电路结构图

3 电容测量系统软件设计

本文研究的电容测量系统软件包括嵌入式程序和上位机检测程序, 前者负责电容值的采集和处理, 并通过网口实时发送到上位机; 后者实现对数据的分析和计算, 将电容值转换为液位信息, 同时实现对数据的显示和存储, 便于操作人员对测量结果进行监测。

3.1 嵌入式软件程序设计

作为嵌入式系统核心的 STM32F407VG 芯片需要控制和管理 AD9850、AD7606、DP83848 各部分模块的功能, 程序的代码在 Keil MDK5 开发环境下, 通过 C 语言进行编写, 实现 DDS 激励信号的输出控制、高精度和高速 A/D 转换控制、以太网输入输出控制等功能。嵌入式软件的工作流程如图 5 所示。

嵌入式系统上电复位后, 程序首先进行设备初始化, 包括 STM32 芯片的时钟设置、UART 配置、GPIO 接口配置、定时器的 PWM 配置、FSMC 外设配置等; 待单片机的初始化完成后, 程序调用 AD9850、AD7606 和 DP83848 芯片的驱动函数, 初始化这 3 个芯片, 并配置以太网的 IP 地址和端口号, 并以 UDP 协议实现硬件与上位机之间的通信, 之后系统就进入循环等待阶段。在循环过程中, 首先

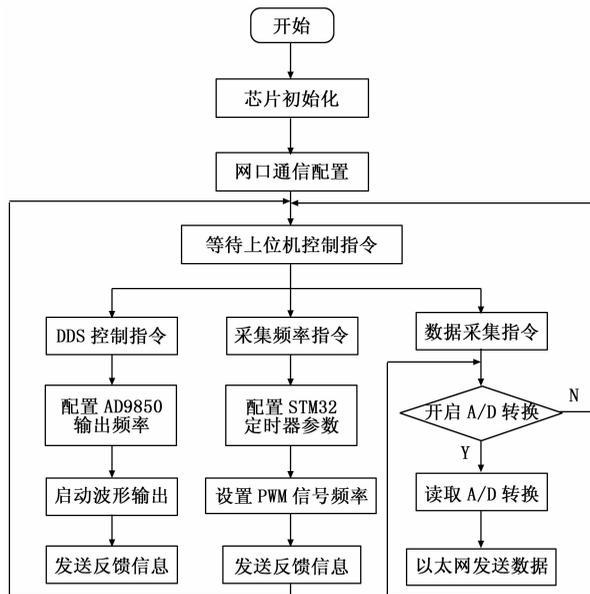


图 5 嵌入式软件流程图

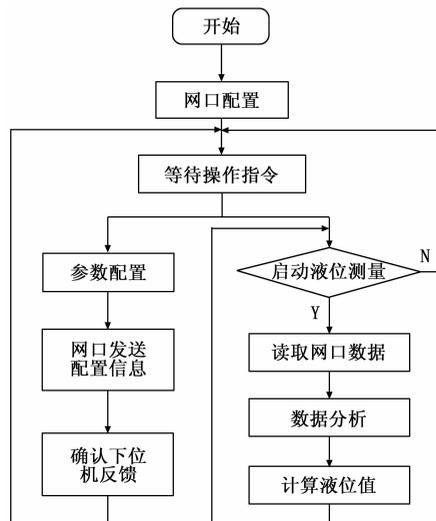


图 6 上位机测量软件流程图

等待上位机通过以太网发送来的控制命令，然后对接收到的指令进行识别并执行相应程序：如果接收到的指令为 DDS 控制指令，程序则调用 AD9850 驱动函数，向其写入相应频率相位控制字，并启动正弦波形输出；如果指令为采集频率控制指令，则配置 STM32 定时器参数，控制 PWM 输出信号的频率；如果指令为数据采集指令，则须判断该指令为开启还是中止，然后相应地控制定时器 PWM 波形产生与中止、中断的使能与禁止。在电容数据的采集过程中，当单片机的 PWM 上升沿到达 AD7606 的两个 CONVST 引脚时，启动一次 AD 转换，当转换完成时，AD7606 会在 BUSY 端口产生一个下降沿，触发单片机的外部中断，在中断程序中，将数据通过 FSMC 功能经并行接口读取到 STM32 单片机的数据缓存区中^[19]，同时，调用以太网发送函数，将 8 个通道的数据封装后依次发送至上位机。其中，设置单片机的定时器周期为 10 μs，则可产生频率为 100 kHz 的 PWM 方波信号，即能够满足各通道 100 kHz 的同步采样需求。

3.2 上位机液位测量软件设计

电容液位测量的上位机测量软件采用 NI 公司的 LabVIEW 软件进行开发，其源程序采用框图和数据流结合的形式替代了传统的文本编程方式，通过调用适当的控件和函数，可方便快捷地设计出美观规范的监控软件界面，能有效提高系统开发和维护的效率^[20]。本文的电容液位测量软件在设计时涵盖了与嵌入式系统的通信功能、电容液位数据的采集和处理功能，液位测量软件的流程如图 6 所示。

上位机软件启动后，先对 UDP 通信协议的端口等信息进行配置，并等待操作人员的控制指令。若操作人员给出的指令为参数配置，即是对 DDS 激励信号或 A/D 转换速率进行设置，上位机软件则会通过以太网端口将控制信息发

送给嵌入式系统硬件，待下位机设置完毕后，上位机会接收到反馈消息，并再次进入等待操作指令的环节。若指令为启动液位测量，则先向下位机发送指令，并通过网口将电容数据不断采集到软件中，根据数据包的封装格式拆分成 8 个通道的电容测量信号，各通道的数据都是与 DDS 激励信号频率（1 kHz）相同而幅值不同的正弦信号。对液位计每个分节的电容测量数据，以电压的峰—峰值作为衡量电容值大小的指标，且每次取 100 组峰—峰值数据计算电压的平均值，再根据设备在标准电容下测得的校准系数，换算出电容值；最后，再把 8 个分节电容的数据进行融合计算，主要思路是通过上、中、下三组分节电容各自的差值判断液位所处的测量区间，并将连续段的电容测量值与校准的初始电容值进行对比，从而得到此时对应的具体液位信息。同时，试验过程的数据也通过软件进行实时的显示和存储。按这种方式进行数据计算时，系统对液位的变化的响应时间约为 0.1 s。

4 系统测试

本文通过对电容液位计和测量系统的设计，研制了用于低温介质液位测量系统的样机，并进行相关性能测试和试验验证工作。液位测量系统的性能标定采用的仪器是 AH2500A 型电容电桥，该仪器具有极高精度，可作为其他电容标定的基准。

首先采用 AH2500A 型电容电桥对样机的测量状态进行标定，由于图 3 所示的电容传感器结构共可分成 2 个连续节和 6 个小节，从上到下分别称为上 1、上 2、连续 1、中 1、中 2、连续 2、下 1 和下 2 小节，测量出各分节电容在气态和液氢介质下的实际电容值，以及对应的液位值；然后再通过系统样机测量得到各分节电容对应的 8 个通道的电压值；最终计算出电容值、液位值和电压值三者之间的比例关系，具体的测试结果见表 1。

表 1 传感器的在液氢中的测量结果

		上 1	上 2	连续 1	中 1	中 2	连续 2	下 1	下 2
电容/pF	气态	19.367	15.549	144.617	15.801	15.314	122.201	16.391	24.123
	液氢	23.337	18.736	173.902	18.993	18.522	147.548	19.577	27.735
	变化量	3.97	3.187	29.285	3.192	3.208	25.347	3.186	3.612
液位/mm	下限值	1011.5	979.5	673.3	641.3	609.3	351.1	319.1	287.1
	上限值	1036.5	1004.5	972.5	666.3	634.3	602.3	344.1	312.1
	液位变化	25	25	299.2	25	25	251.2	25	25
电压/mV	液氢下限值	12427.029	10000.806	13643.168	10031.423	9611.373	11786.286	10340.590	15554.269
	液氢上限值	14974.419	12050.620	16405.915	12057.896	11624.778	14231.005	12350.542	17883.251
	电压变化	2547.390	2049.815	2762.747	2026.473	2013.405	2444.718	2009.952	2328.981
电容/液位(pF/mm)		0.159	0.127	0.098	0.128	0.128	0.101	0.127	0.144
电压/电容(mV/pF)		641.66	643.18	94.34	634.86	627.62	96.45	630.87	644.79
电压/液位(mV/mm)		101.896	81.993	9.234	81.059	80.536	9.732	80.398	93.159

从表 1 中的数据可以看出，两个连续节的液位尺寸设计非完全一致，在液氢和气态条件下的电容值的变化量分别为 29.285 pF 和 25.347 pF，另外 6 个小节的液位尺寸均为 25 mm，电容的变化量为 3~4 pF 之间。通过研制的液位采集系统对每个分节的电压值进行测量，并通过软件算法提取每个通道信号的电压值，计算出每 1 mm 液位对应的电压值最小为 9.2 mV，远远大于 AD7606 芯片的分辨率 0.305 mV，因此，本文研制的系统完全可以满足液位 1 mm 的测量精度。同时，系统测量的每 pF 电容对应的电压值最小为 94 mV，据此分析，系统能满足至少 0.1 pF 的电容测量精度。

在本文所研制的液位测量系统对某工况下的液氢储箱蒸发试验的应用中，截取其中某段时间的测试结果进行分析，如图 7 所示，经上位机软件计算出该区域的液位变化是从 344.02 mm 到 319.33 mm，结合表 1 看出，该阶段包含在下 1 小节内。图 7 中显示的是储箱蒸发试验过程中 18 个完整“憋压—排放”周期的数据，观察到液位的变化具有明显的规律性，计算出平均每个周期的液位变化为 1.37 mm。从图 7 的结果可以分析出，本文研制的电容液位测量系统能够满足在液氢储箱蒸发试验过程中至少 1.37 mm 的液位测量需求。

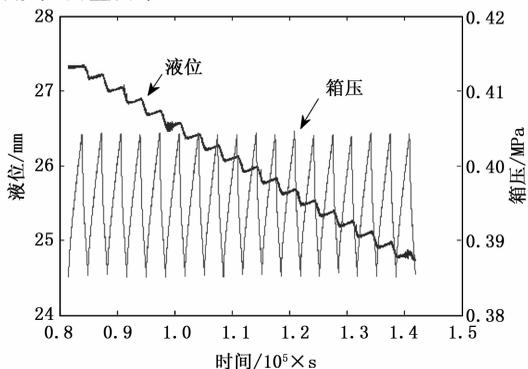


图 7 液氢蒸发试验中液位和箱压的变化规律

5 结束语

本文针对航天领域的低温介质下的液位测量问题，研制了高精度的电容液位测量系统样机。液位传感器采用圆筒型的电容结构，并结合了连续式和分节式电容液位计的优点，通过数字化的嵌入式测量设备研制和监测软件设计，实现以太网方式的数据传输和高精度的液位测量。经标准电容标仪对系统进行性能测试，验证了电容测量精度优于 0.1 pF。在液氢蒸发试验中，通过对各分节电容数据的融合分析和补偿算法，提高了液位测量的准确性，通过对细节的分析，实现了对液氢储箱蒸发试验中对每个“憋压—排放”周期中液位 1.37 mm 的分辨能力，满足试验过程对液位的测量需求。综上所述，本文的研究为低温介质的液位测量提供了一种有效的解决方案。

参考文献:

- [1] 于玉锦, 叶政学. 低温推进剂的液位测量 [J]. 低温工程, 1994 (2): 1-4.
- [2] 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 年度学术交流会议论文集, 2007: 419-434.
- [3] 刘月瑶, 郭立杰, 杨洋, 等. 航天运载器贮箱低温液位校准装置的误差分析与精度设计 [J]. 导弹与航天运载技术, 2014, (6): 74-77.
- [4] 孙金云, 刘砚涛, 尹伟, 等. 贮箱低温试验液位监测方法研究及应用 [J]. 强度与环境, 2017, 44 (3): 53-58.
- [5] 朱永炉, 冯红亮, 吴硕, 等. 低温推进剂测量技术研究及系统实现 [J]. 遥遥遥控, 2017, 38 (5): 36-43.
- [6] 杨必武, 郭晓松. 推进剂液位检测技术研究及仪器设计 [J]. 宇航计测技术, 2002, 22 (4): 44-48.
- [7] 李亦健, 吴舒琴, 金滔. 低温浆体电容式液位计的优化及实验 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2018, 52 (5): 966-970.

(下转第 84 页)