

# 基于无线通信的 LNG 气瓶液位监测系统设计

余世刚, 赵宇, 胡月娥, 曹亚运, 袁峥峥

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164)

**摘要:** 液化天然气 (LNG) 是目前公认的一种清洁能源, 以 LNG 为燃料的汽车已投入使用; LNG 车载气瓶是 LNGV 车载燃料汽车动力系统的核心部分, 为保证车载气瓶使用过程中的安全性, 需实时监控 LNG 气瓶液位参数, 故设计一种基于无线通信的 LNG 气瓶液位监测系统; 系统利用电容式液位传感器对液位对象进行测量, 通过无线通信技术将数据进行传输, 选用 STM32 单片机作为中央处理单元, 完成对数据的处理与判读, 达到 LNG 车载气瓶液位监测工作要求; 经反复验证, 系统运行可靠且测量误差不超过 1.5%, 完全满足 LNG 气瓶液位监测要求。

**关键词:** LNG 车载气瓶; 电容式液位传感器; 无线通信; STM32 单片机

## Design of LNG Gas Cylinder Liquid Level Monitoring System Based on Wireless Communication

She Shigang, Zhao Yu, Hu Yuee, Cao Yayun, Yuan Zhengzheng

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** Liquefied natural gas (LNG) is now recognized as a clean energy source, LNG fuel vehicles have been put into use. LNG vehicle-borne gas cylinder is the core part of LNGV vehicle-borne fuel vehicle power system. in order to ensure the safety of the vehicle-borne gas cylinder in the process of use, it is necessary to monitor the LNG gas cylinder liquid level parameters in real time, so a LNG gas cylinder liquid level monitoring system based on wireless communication is designed. By using the capacitance sensor, the liquid level object is measured and the data is transmitted by wireless communication technology, and the STM32 single chip microcomputer is selected as the central processing unit, complete the processing and interpretation of the data to meet the LNG vehicle gas cylinder level monitoring requirements. After repeated verification, the system runs reliably and the measurement error is not more than 1.5%, which fully meets the requirements of LNG gas cylinder liquid level monitoring.

**Keywords:** LNG vehicle gas cylinder; capacitive level sensor; wireless communication; STM32 microcontroller

## 0 引言

液化天然气因为其无污染而被称为“清洁能源” (LNG, liquefied natural gas), LNGV 车载燃料汽车利用 LNG 作为燃料应运而生。现阶段对 LNG 汽车方面的研究较多, 随着 LNG 燃料汽车的大力发展, LNG 气瓶作为 LNGV 车载燃料汽车的动力核心部分, 对 LNG 气瓶进行实时监测就变得十分必要。但现有的 LNG 气瓶检测技术仍然相对滞后, 这是阻碍 LNG 气瓶推广使用的最大瓶颈<sup>[1]</sup>。通过对市场进行调查研究不难发现, 目前市面上投入运行的 LNG 气瓶监测设备大部分面临压力值测量不精确、液量监测精度低、数据传输滞后等缺点<sup>[2]</sup>。

现有的设备关于监测气瓶内部压力通常使用高精度的压力传感器进行实时监测, 以达到避免气瓶内部压力过大, 威胁汽车安全运行的目的。但针对气瓶内部液位测量技术却远未达到理想值, 调查显示如今用于监测气瓶内部液位值的方法普遍采用差压法。其工作原理是通过测量气罐内

部液柱上下两端的静态压力, 而后利用密度公式进行计算, 从而得到液柱的容量及液柱高度。通过这种方法测量液位不仅所测精度低, 而且随着 LNG 气瓶规格的变化, 计算公式也需要做出相应变化, 不能做到监测简化。因此差压法测量液量存在测量精度较差、工作难度较大等缺点。此外为保证气瓶安全运行, 需操控人员实时掌握气瓶液位状态, 这故需将所测得的液位数据传输到操控室显示仪表盘上显示。传统的数据传输通常采用 RS485 等串口通信方式, 而这些通信技术存在接口标准杂乱、连接线路过多等诸多问题<sup>[3]</sup>。为避免上述存在的问题, 本系统提出了一种基于无线通信的 LNG 气瓶液位监测系统。该系统基于电容式液位传感器对液量信息进行数据采集, 然后通过 STM32 中央处理单元进行数据判断、分析处理, 最后将采集到的数据通过无线传输技术进行收并发, 完成数据传输工作。本文采用 NRF24L01 芯片进行无线通信, 从而实现无线通信监测系统的设计<sup>[4-5]</sup>。

收稿日期: 2020-06-10; 修回日期: 2020-07-15。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775410)。

作者简介: 余世刚(1972-), 男, 辽宁昌图人, 硕士生导师, 教授, 主要从事精密测量与控制技术以及智能仪器仪表方向的研究。

引用格式: 余世刚, 赵宇, 胡月娥, 等. 基于无线通信的 LNG 气瓶液位监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(2): 14-19.

# 1 LNG 气瓶液位监测系统

## 1.1 系统总体方案设计

为保证 LNG 气瓶运行安全, 本文以液位为设计参数, 设计基于电容式液位传感器的液位监测系统, 感知层利用电容液位计、ADUM1411 芯片, 配合 STM32 单片机<sup>[6]</sup> 控制完成数据采集工作, 而后利用 NRF24L01 芯片完成数据无线传输工作, 界面显示模块采用 LCD1602 液晶显示屏实现流量数据显示。系统设置液位阈值, 当电容式液位传感器监测液位高度超出阈值时, 发出警报并通过 LCD 显示屏显示, 系统总体设计如图 1 所示。

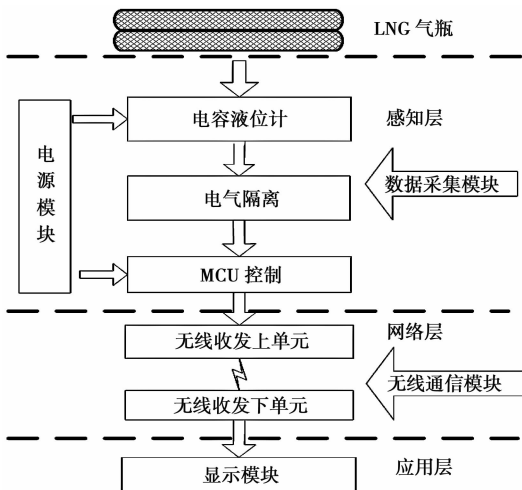


图 1 系统总体设计框图

## 1.2 电容式液位计测量 LNG 气瓶液位的方法

采用筒式电容液位传感器监测气瓶的液位参数, 其工作原理如下<sup>[7]</sup>: 设筒的内直径为  $d$ , 外直径为  $D$ , 传感器的长度为  $L$ , 液位的高度为  $H$ , LNG (液化天然气) 的相对介电常数设为  $\alpha$ , 液面表层空气的介电常数即绝对介电常数以  $\beta$  (约为 1) 来计算, 若这些参数在稳定的情况下, 则传感器的电容值即  $C$  的大小就仅仅取决于液位的高度。这样就可以通过测量电容值  $C$  的大小来得到液位的高度。具体公式如下:

电容  $C$  与传感器长度  $L$ 、液面高度的关系为:

$$C = \frac{2\pi\alpha\beta}{\ln(D/d)}H + \frac{2\pi\beta}{\ln(D/d)}(L - H) \quad (1)$$

当液位高度  $H$  为 0 时, 此时储液罐处于空瓶状态。此时的电容  $C$  为:

$$C = \frac{2\pi\beta}{\ln(D/d)}L \quad (2)$$

当液位高度  $H$  达到最大值时, 储液罐处于满瓶状态, 此时的电容  $C$  为:

$$C = \frac{2\pi\alpha\beta}{\ln(D/d)}L \quad (3)$$

式中,  $C$  为电容值,  $\alpha$  为液化天然气的相对介电常数,  $\beta$  为液面表层空气的介电常数即绝对介电常数,  $H$  为液面的高度,  $D$  为罐体的外径,  $d$  为罐体的内径,  $L$  为传感器长度。

# 2 液位远程监控系统的硬件电路设计

## 2.1 MCU 电路设计

本设计使用的是 STM32F401 微控制器<sup>[8-9]</sup>, 因其功耗低、模式种类多且具有 3 路 USART (速度高达 10.5 Mbit/s)、4 路 SPI (速度高达 42 Mbit/s) 等优点而被广泛应用。

STM32F401 微控制器及外围电路原理图如图 2 所示, 主要包括引脚 7 的复位电路、引脚 5、6、18、19 的时钟电路、引脚 20、44 的启动电路、引脚 45 的警报电路、引脚 34、35 调试接口、PA2 是蜂鸣器接口, STM32F401 单片机与 ADUM1411 芯片、NRF24L01 之间均通过 SPI 方式进行通信<sup>[10]</sup>, 引脚 25~28 与电气隔离芯片相连, 单独设置电气隔离模块不仅可以减少垃圾数据占用单片机内存, 加快其处理速度, 同时可减小电路干扰, 提高数据传输准确性。引脚 VIA、VOD 为液位信号输入输出接口。因本系统采用电容式液位传感器, 其输出电压为 1~5 V, 而 ADUM1411 芯片信号接入口电压为 0.5~2.7 V, 故需在接口处设置下拉电阻, 将电压转换 ADUM1411 芯片所需值, 随后将数据传输至 MCU 控制模块进行判断处理, 若测得的液位值超出所设阈值, 则触发警报功能, 且引脚 29~32 是通信模块中无线收发上单元连接接口, 完成对液位数据无线传输工作, 送至 HMI 液晶屏上面显示。

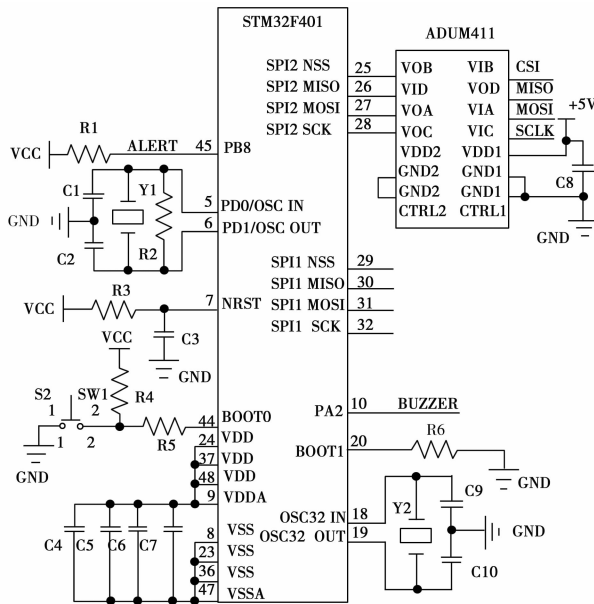


图 2 MCU 主控及外围电路原理

## 2.2 电容式液位测量电路设计

LNG 气瓶液位测量电路如图 3 所示, 为便于验证监测系统的准确性与一致性, 共设置两个监测点。JP0 中 1、2 管角连接电容式液位传感器。因传感器外接电源, 为防止 2 号监测点接入电压过高, 故接入一个 BAV10-A9 开关管保护电路; 同时在电路中的每个引脚上均添加一个保护电阻。管脚 9、10、11 与外围电路相连; 为提高传感器与 MCU 主控模块之间数据传输精度, 减小电频信号干扰, 在 SPI 总线接口处连接 ADUM1411 数字隔离器来保证数据的准确传

输。数字隔离器具有 4 路独立通道，隔离干扰能力强，适用于本监测系统；ADUM1411 的 11 引脚设为输出端口，便于电容充放电，10 引脚与隔离芯片内部反向模拟比较器相连，常规比较引脚 9、10 之间的模拟电压高低，确定反向模拟器输入电压<sup>[11-12]</sup>。

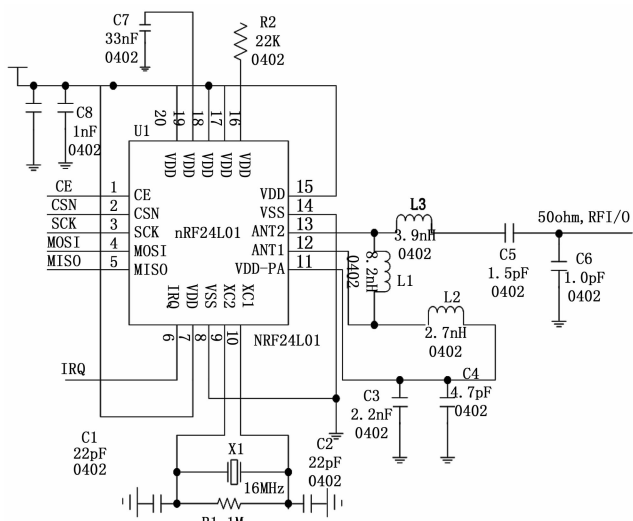


图 3 电容式液位测量电路图

2.3 无线通信模块设计

本文设计的无线通信模块分为无线收发上、下单元，上单元与 MCU 控制模块连接，下单元与显示模块相连。采用的是 NRF24L01 芯片<sup>[13-14]</sup>，其最高工作速率可达 2 Mbps，且具有高效的 GFSK 调制，同时该芯片抗干扰能力强；此芯片具有 125 个可选的频道，可满足多点信和调频通信的需要；芯片内置 CRC 检错和点对多点的通信地址控制，以此确保数据的可靠传输。此芯片通过 SPI 与外部 MCU 控制模块进行通信，模块 VCC 引脚使用 3.3 V 电压。该芯片除了 VCC 和 GND 脚，其它引脚都可以和 5 V 单片机的 I/O 口直连，故在使用上具有很大优势。接口电路如图 4 所示。

号。LCD1602 液晶显示屏最多可同时显示 32 个字符。LCD 液晶的显示原理是利用液晶的物理特性，通过电压对显示区域进行控制。LCD1602 液晶显示屏采用了标准的 16 脚接口，通过 3 个控制端接口实现控制要传输的指令或者数据。除了几个电源正负极引脚外，通讯只需用到 NRF24L01 芯片上空闲的 11 个 I/O 口即可；LCD1602 内含复位电路，提供清屏、字符闪烁、显示移位等各种控制命令。因此方便使用和编程，同时可满足于液位测量系统的显示。LCD1602 与无线收发下单元相连，将 NRF24L01 芯片的 P3 接口接入到显示屏上，可完成将电容式液位传感器测得的数据显示到 LCD1602 显示屏上。其电路如图 5 所示。

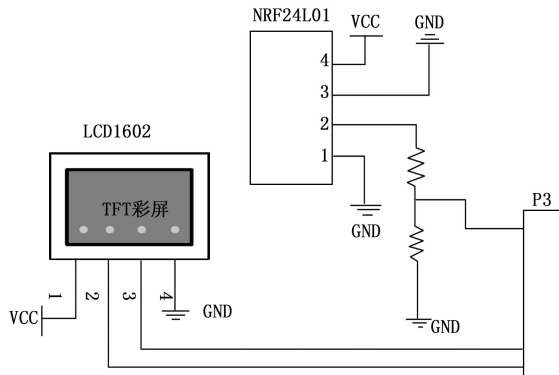


图 5 显示模块原理图

2.4 显示模块设计

本系统的显示模块采用 LCD1602 液晶显示屏，LCD1602 点阵型液晶模块<sup>[15]</sup>可用于显示字母、数字、符

2.5 电源模块设计

电源模块部分的作用主要是为电路中的各个模块提供稳定的工作电压使其能够正常的工作。在实验的情况下，系统的电源通常由开关电源或者 USB 接口提供，为了将电源电压转换为单片机以及芯片所需的 3.3 V 工作电压。本设计电源模块电路首先设置由开关管和二极管组成的 BUCK 电路对交流电供电电压进行降压，降至电压调节器 LM5007 的工作电压范围，LM5007 电压调节器的输入直流电压范围为 12~45 V，经过 LM5007 与外围电路再将电压降至 5 V 输出。设置电容 CA1 滤除输入电源中的高频扰动，再经电容 C34、C38 吸收输入电源中低频纹波，将 5 V 电压经过线性稳压器 TPS70933DBVR 及其外围电路降压至 3.3 V 稳压电源。采用 AMS1117 系列稳压器，稳压器的片上微调可将把基准电压调整到 1.5% 的误差范围以内而且电流限制也能得到调整，这样可以尽量减少因稳压器和电源电路超载所带来的压力。本系统所设计的电源模块通过整流以及滤波再经过 7805 将电源转换为 5 V 电压，最后经过 AMS1117 转换为单片机所需的 3.3 V 电压，具体电源电路如图 6 所示。

3 系统的主程序设计

一个完整可靠的监测系统应该包含软件以及硬件部分，只有通过二者的协调工作才能更好的完成监测任务。系统的软件设计主要包括数据采集、MCU 控制模块以及无线收发通信模块。

系统主程序以低耦合高内聚为核心进行软件设计，完

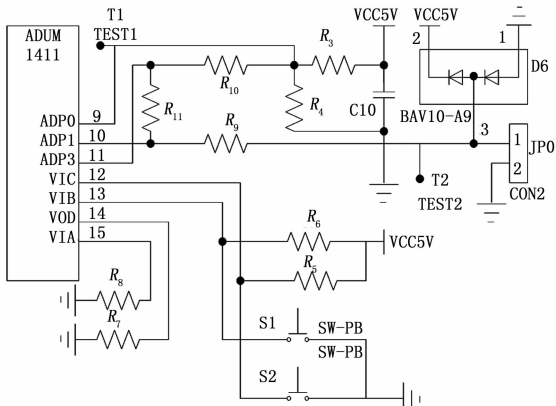


图 4 无线通信模块原理图

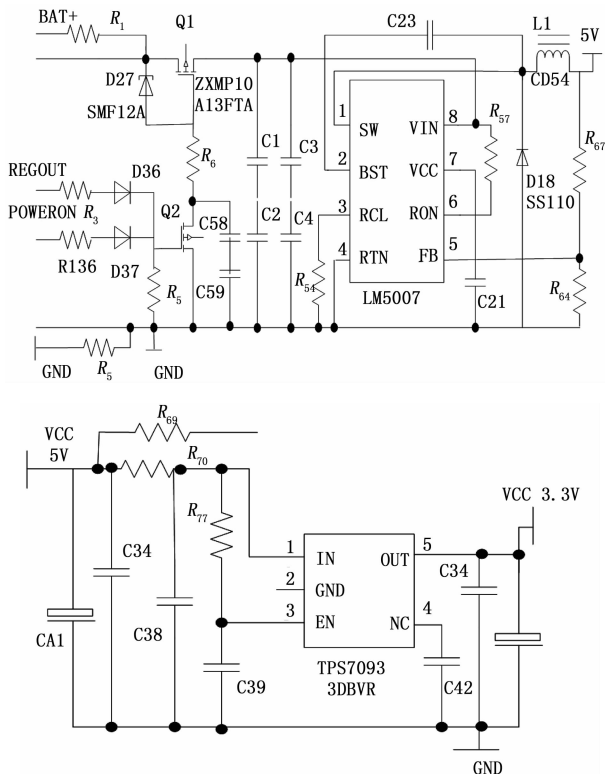


图 6 电源模块原理图

成对各个模块调用工作。整体程序设计如图 7 所示, 系统上电后对各个模块硬件接口、寄存器进行配置; 并对串口驱动、定时器等程序进行初始化; 初始化完成后开始应用程序调用, 首先读取系统停机前 LNG 气瓶状态参数信息; 接着开始对 LNG 气瓶当前液位状态进行信息采集, 随后利用算法对电容式液位传感器采集的液位数据进行计算比较, 判断液位值是否超出阈值, 若超出所设阈值, 则系统发出警报设置蜂鸣器发声; 在数据采集分析处理完成后将数据进行存储, 而后将数据通过 NRF 无线传输到上位机显示界面, 整个程序完成。

本系统采用 C 语言编程, 程序部分主要介绍无线发送部分以及无线接收部分, 具体程序如下所示:

无线发送部分:

```
#include "system.h"
#include "SysTick.h"
#include "adc.h"
#include "nrf24l01.h"
void sendok(void);
/*****
* 函数名: main
* 函数功能: 主函数
* 输入: 无
* 输出: 无
*****/
int main()
{
```

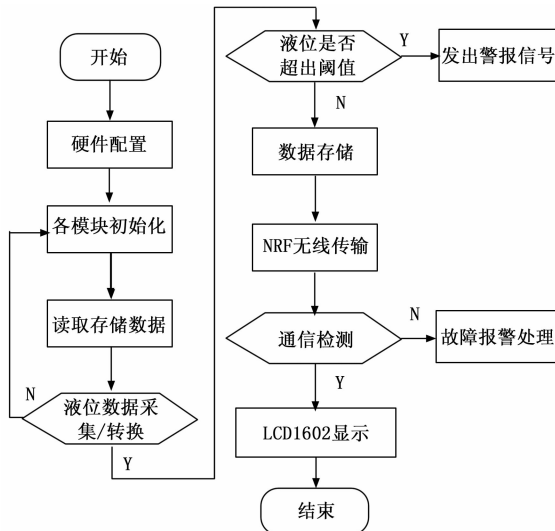


图 7 系统主程序

```
u8 str[4];
u16 value=0;
u8 m_water;
SysTick_Init(168);
NVIC_PriorityGroupConfig(NVIC_PriorityGroup_2); //中
断优先级分组 分两组
ADCx_Init();
NRF24L01_Init();
NRF24L01_TX_Mode();//设置 NRF24L01 为发送模式
while(1)
{
value=Get_ADC_Value(ADC_Channel_5,20);//获得电压
m_water=(u8)(value * 100.0/4096);
str[0]=m_water/100+0x30;
str[1]=m_water%100/10+0x30;
str[2]=m_water%10+0x30;
str[3]='\0';
// printf("%d%",m_water);
while(NRF24L01_Check()); //检测 NRF24L01 是否存在
while(NRF24L01_TxPacket(str) == TX_OK);//一直等待
他发送完成
}
}
```

无线接收部分:

```
#include "system.h"
#include "SysTick.h"
#include "beep.h"
#include "usart.h"
#include "nrf24l01.h"
void sendok(void);
/*****
* 函数名: main
* 函数功能: 无
* 输入: 无
*****/
```

```

* 输出:无
* * * * *
int main()
{
u8 str[4];
u8 m_water;
SysTick_Init(168);
  BEEP_Init();
  USART1_Init(9600);
  NVIC_PriorityGroupConfig(NVIC_PriorityGroup_2); //中
断优先级分组 分两组
  NRF24L01_Init();
  NRF24L01_RX_Mode();//设置 NRF24L01 为接收模式
  while(1)
  {
  while(NRF24L01_Check()); //检 NRF24L01 是否存在
  if(NRF24L01_RxPacket(str)==0) //接收到数据显示
  {
printf("t0.txt=\"%s\"",str); //HMI 串口屏协议
sendok();
}
if(m_water<10)
{
beep=! beep;
delay_ms(1000); //1s
}
else
{
beep=1;
}
void sendok()
{
u8 i;
for(i=0;i<3;i++)
}
{
}
USART_SendData(USART1,0xff);
while( USART_GetFlagStatus( USART1, USART_FLAG_
TXE)==RESET);
delay_ms(10);
}

```

### 4 实验结果与分析

为验证本文设计的 LNG 车载气瓶液位监测系统的一致性、稳定性及准确性,故在实验室的环境下,按照所需的实验要求搭建实验平台,对本文设计的监测系统整体功能进行全面测试。

首先验证液位监测系统的一致性与精确性,选择一参量为定量,测量相对参量值。故选择测量 3 个容器中液位值分别为 300 mm、500 mm、700 mm 的液体,分别进行 4

次测量,并记录下测量数据。实验结果如表 1 所示,为试验中连续 4 次测量 3 组容器不同液位值所得数据。

表 1 同一容器 4 次测量值

| 实际液位/mm | 测量值/mm | 绝对误差/mm | 相对误差/% |
|---------|--------|---------|--------|
| 300     | 298.59 | 1.41    | 0.98   |
| 300     | 301.18 | 1.18    | 0.83   |
| 300     | 300.95 | 0.95    | 0.67   |
| 300     | 300.81 | 0.81    | 0.57   |
| 500     | 500.59 | 0.59    | 0.42   |
| 500     | 498.36 | 1.64    | 1.16   |
| 500     | 489.89 | 1.11    | 1.14   |
| 500     | 501.22 | 1.22    | 0.86   |
| 700     | 699.24 | 0.76    | 0.54   |
| 700     | 700.24 | 0.24    | 0.17   |
| 700     | 700.53 | 0.53    | 0.37   |
| 700     | 700.39 | 0.39    | 0.28   |

对实验结果进行分析可得,在连续 4 次测量中,实际液位值与该电容式液位传感器测得的值误差均在 2 mm 内波动,且相对误差值不超过 1.5%。直接验证 LNG 车载气瓶液位监测系统具有很好的一致性和精确性。

接着对 LNG 车载气瓶液位监测系统的稳定性进行测试,验证选择电容式液位传感器测量 LNG 气瓶液位值,相较于其他测量方法更具有稳定性。同样选择在实验室条件下进行系统实验,在同一容器每次均匀地增加液位的高度,连续测量 6 组数据,将监测系统测得的值与实际值进行比较,验证系统的稳定性和精确性。实验结果如表 2 所示,为连续 6 次均匀地增加液位高度,监测系统所测值。

表 2 均匀增加液位高度测量值

| 实际液位/mm | 测量值/mm | 绝对误差/mm | 相对误差/% |
|---------|--------|---------|--------|
| 500     | 498.94 | 1.06    | 0.75   |
| 550     | 549.10 | 0.9     | 0.64   |
| 600     | 601.42 | 1.42    | 1.00   |
| 650     | 648.99 | 1.01    | 0.71   |
| 700     | 701.27 | 1.27    | 0.90   |
| 750     | 751.19 | 1.19    | 0.84   |

通过对表 2 的 6 组实验数据进行分析可得:即使实时改变容器内液位值,该监测系统测量值与液位实际值之间的绝对误差不超过 2 mm,相对误差同样在 1% 范围内,故可验证该气瓶液位监测系统精确性高、稳定性好。

### 5 结束语

随着国家对清洁能源的大力推广,LNG 汽车的使用量将会日益增长。LNG 气瓶作为 LNG 燃料汽车的核心部件,对 LNG 气瓶的液位进行监测就显得十分必要。在生产需求的基础上,本论文设计了一套基于无线通信方式的 LNG 气瓶液位监测系统。该监测系统提出了以 STM32 单片机为 MCU 控制核心;基于电容式液位传感器采集点采集数据;

监测数据通过无线通信方式传输的先进监测方式。一方面解决了传统 LNG 气瓶监测中连接线路过多、接口标准杂乱、不便于扩展等诸多问题; 另一方面提高了数据传输可靠性及准确性。经试验验证, 该监测系统可安全、准确、可靠地监测 LNG 气瓶液位信息, 并实时传输气瓶液位数据, 也证明该监测系统的实用性与可行性。

#### 参考文献:

- [1] 罗旭. 基于无线通信技术的物资计量数据采集监控系统 [J]. 太钢科技, 2006 (3): 49-52.
- [2] 聂茹. 基于无线通信的液位远程监控系统. 微型电脑应用 [J]. 2016, 10 (2): 21-23.
- [3] 钟晓强. 基于单片机实现的液位控制器设计 [J]. 现代电子技术, 2009, 32 (2): 51-53.
- [4] 余世刚, 袁峥峥, 尹泽明, 等. 基于无线传输的助力自行车中轴力矩测量系统的设计与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (1): 48-53.
- [5] 余世刚, 胡月娥, 赵宇, 等. 基于无线通信和传感器的动力电池在线监测系统设计 2019, 27 (12): 57-61.
- [6] 马小红. LNG 车载气瓶 [J]. 煤气与动力, 2011, 90 (4): 54-55.
- [7] Tao H, Liu W. Measurement System for Liquid Level based on Laser Triangulation and Angular Tracking [J]. Journal of Computer, 2010, 2010, 5 (9): 1444-1447.
- [8] 招惠玲. 电容式液位测量系统的设计 [J]. 传感器技术, 2004, 23 (2): 11-13.
- [9] 高天光. 模数转换器应用技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2001, 19 (1): 51-53.
- [10] 王芸, 张国雄, 樊玉铭. 基于运算法的电容式液位传感器设计 [J]. 电子测量技术, 2008, 31 (3): 122-124.
- [11] 杨雷, 卢广建. 液位测量中的信号采集与处理 [J]. 微计算机信息, 2006, 2 (4): 1-2.
- [12] 潘礼正, 尹泽明, 余世刚, 等. 基于 FCA-ReliefF 的融合生理信号情绪识别研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 179-183.
- [13] 吴兴中, 屈泽明. 一种基于单片机的液位控制器设计 [J]. 微型机与应用, 2016, 47 (2): 71-73.
- [14] 朱景波, 高天德, 张博强. 水下磁感应无线通信模块设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 231-235.
- [15] Bhattacharya A, Kumar A. Delay constrained optimal relay placement for planned wireless sensor networks [A]. Proceedings of 18th International Workshop on Quality of Service [C]. Beijing, 2010: 1-9.
- [16] 张超, 杨华民, 韩成, 等. 基于格雷码结构光的编解码研究 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版), 2009, 32 (4): 635-638.
- [17] 吴成东, 耿飞, 楚好, 等. 基于彩色条纹结构光的物体三维重建方法 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2009, 30 (7): 928-931.
- [18] 张斌, 杨腾达, 宋文豪, 等. 基于双结构光的微小圆柱端面缺陷检测 [J]. 郑州大学学报 (理学版), 2019, 51 (4): 11-15.
- [19] 马宗正, 刘杰, 潘高杰, 等. 基于结构光表面缺陷检测系统设计 [J]. 现代制造工程, 2018 (5): 139-143.
- [20] 张华, 赵碧霞, 刘桂华, 等. 双目结构光的钢轨表面缺陷检测系统设计 [J]. 自动化仪表, 2018, 39 (4): 92-95.
- [21] 徐国艳, 牛欢, 郭宸阳, 等. 基于三维激光点云的目标识别与跟踪研究 [J]. 汽车工程, 2020, 42 (1): 38-46.
- [22] 房建武, 王贺, 薛建儒, 等. 基于视觉和激光数据融合的 3D 多目标跟踪 [J]. 无人系统技术, 2019, 2 (5): 24-29.
- [23] 胡秀华, 王长元, 肖锋, 等. 利用空间结构信息的相关滤波目标跟踪算法 [J]. 计算机应用, 2019, 39 (4): 1150-1156.
- [24] 姜道伟, 袁亮, 巨刚. 基于图像技术与粒子滤波融合新算法的机器人多目标跟踪 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016 (12): 31-34.
- [25] 德国 GOM 公司. ATOS [EB/OL]. <https://www.gom.com/cn/metrology-systems/atos.html>.
- [26] 惠普. ProS3 结构光 3D 扫描仪 [EB/OL]. [https://solusi3d.co.id/hp\\_pro\\_scanner\\_s3/](https://solusi3d.co.id/hp_pro_scanner_s3/).
- [27] 天远公司. FreeScanTrak [EB/OL]. <https://www.3dscan.com.cn/product/26.html>.
- [28] 于洋, 魏生民, 刘平, 等. 数控加工中线性进给率控制研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (11): 2520-2523.
- [29] 宋大虎, 李忠科, 王忠, 等. 特征保持的点云光顺算法 [J]. 中国机械工程, 2014, 25 (11): 1498-1501.
- [30] 李晋江, 张彩明, 范辉. 群体智能点云光顺去噪算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17 (5): 935-945.
- [31] 徐永安, 缪静姣, 李谦. 基于离散曲率的点云光顺算法 [J]. 计算机工程与应用, 2017, 53 (10): 209-212.
- [32] 周海平. 基于三维激光扫描的物体重建建模 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (12): 203-206.
- [33] 张明武, 冷文韬, 沈华. 隐私保护的点与任意多边形位置关系判定 [J]. 密码学报, 2019, 6 (4): 443-454.
- [34] Chang S, Ahn C, Lee M, et al. Graph-matching-based correspondence search for nonrigid point cloud registration [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2020, 192: 45-47.
- [35] Rusu R B, Marton Z C, Blodow N, et al. Towards 3D point cloud based object maps for household environments [J]. Robotics and Autonomous Systems Journal, 2008, 56 (11): 927-941.
- [36] Sapidis N S. Designing fair curves and surfaces [J]. Mathematics of Computation, 1996, 65: 892-893.