

# 基于射频技术的油罐车在途状态监测系统设计

张 昱<sup>1</sup>, 郭忠印<sup>1</sup>, 樊兆董<sup>2,3</sup>, 张瀚坤<sup>2,3</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 山东省交通科学研究院, 济南 250031;

3. 山东省路域安全与应急保障交通运输行业重点实验室, 济南 250031)

**摘要:** 针对油罐车罐体温度过高、罐体倾斜、阀门漏油等问题, 文章设计了基于射频一体化芯片 SI1000 的油罐车罐体状态监测系统, 车载终端控制单元以 S3C2440A 为主控制器, SI1000 芯片为从控制器, 设计了主从结构的片上系统 (SOC) 方案, 提出了各个模块的硬件设计和软件流程; 该罐体状态监测系统应用 GPRS 技术、GPS 技术以及温度传感器、倾角传感器、铅封锁能够对车辆位置、罐壁温度、罐体倾角、油阀状态等参数进行远程在线监测; 通过实验测试, 各个参数的测量误差值在 5% 以内, 且系统运行情况良好, 符合系统设计需求。

**关键词:** 油罐车; 状态监测; SI1000; 电子铅封; SOC

## Design of Monitoring System of Oil Tank Trunk Transportation Condition Based on Radio Frequency Technology

ZHANG Yu<sup>1</sup>, GUO Zhongyin<sup>1</sup>, FAN Zhaodong<sup>2,3</sup>, ZHANG Hankun<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shandong Transportation Institute, Jinan 250031, China; 3. Shandong Road Region Safety and Emergency Support Transportation Industry Laboratory, Jinan 250031, China)

**Abstract:** Aimed at the problems such as high temperature of the tank, tilting of the tank and oil leakage, the monitoring system of oil tank trunk transportation condition based on radio frequency technology is designed. The on-board terminal control unit with S3C2440A as the main controller, the SI1000 chip is the chip system (SOC) scheme, and proposes the hardware design and software process of each module. The tank state monitoring system uses GPRS technology, GPS technology, temperature sensor, inclination sensor, lead blockade and can remotely online monitor the vehicle position, tank temperature, tank inclination, oil valve status and other parameters. The measurement error of each parameter in the experimental test is within 5%. The system runs well and meets the system design requirements.

**Keywords:** oil tank truck; state acquisition; SI1000; electronic lead seal; SOC

## 0 引言

当今社会机动车保有量稳步增长, 由此引发的车辆交通安全问题也引起社会的广泛关注, 其中对于危

化学品车辆的运输安全管理更是研究热点。由于危化品自身理化性质特殊, 不适宜进行大批量铁路运输, 只能通过公路路网进行运输。当危化品车辆经过人员密

收稿日期: 2021-06-10; 修回日期: 2021-08-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目(71673201)。

作者简介: 张 昱(1987-), 男, 山东济南人, 博士生, 主要从事道路交通安全与环境工程方向的研究。

通讯作者: 郭忠印(1962-), 男, 山东鄄城人, 博士, 教授, 主要从事道路交通安全与环境工程方向的研究。

引用格式: 张 昱, 郭忠印, 樊兆董, 等. 基于射频技术的油罐车在途状态监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 65-71, 105.

集、复杂路段、车辆交织区域时，易导致交通运输事故发生<sup>[1-3]</sup>。

研究发现，危化品在运输过程中由于罐体倾斜、温度过高、超速行驶都会引起交通运输事故。因此，实现对罐体倾角、温度、铅封状态、车速的监测，及时告知驾驶员，才能有效防止罐体倾翻、温度过高、危化品泄漏等危险事故的发生。

国内外研究人员对于危化品运输监管进行了一系列研究<sup>[4-6]</sup>，然而大多是针对车辆轨迹监测和驾驶员主动防御方面的，缺少对罐体状态的研究。文献 [7] 开发了罐车防盗油监测系统，可对罐车阀门状况进行监测；文献 [8-9] 开发的危化品车辆远程监测系统，均可对罐体温度、倾斜角度等数据进行远程监测。然而，危化品车辆监管<sup>[10-11]</sup>需要考虑多种耦合因素，本文研究了一种综合车辆定位、罐体状态监测、电子铅封油阀、危险报警功能于一体的油罐车车辆状态监测系统。

### 1 油罐车状态监测系统总体结构及原理

#### 1.1 油罐车状态监测系统总体方案

车辆状态监测系统<sup>[20-21]</sup>应用全球定位系统技术(GPS)、电子铅封技术和 GPRS 技术<sup>[18]</sup>，通过安装在油罐车上的状态监测系统实时获取车辆位置信息、罐体状态参数，实现各阀门无线电子铅封，同时采用 GPRS 网络和互联网实现车载终端与监控中心的远程实时通信、无线电子铅封、车辆定位、罐体状态监测、数据远程传输、报警等功能。

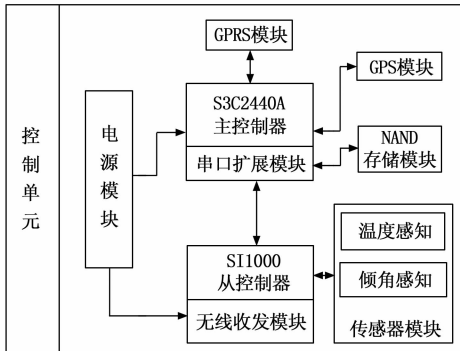


图 1 油罐车状态监测系统控制单元结构原理图

#### 1.2 系统结构及原理

车辆状态监测系统由安装在罐车上的车载终端与远程运管中心显示系统组成，车载终端由控制单元和 4 个油阀铅封单元构成。

控制单元采用主从控制器结构，主控制器采用 S3C2440A 芯片<sup>[12]</sup>，负责与铅封单元通信、感知罐壁温度、罐体姿态以及数据存储，并通过 GPS 模块、GPRS 模块实现车辆定位以及远程数据收发功能。从控制器最小系统设计综合功率消耗、片内资源、处理速度能力以及成本要求等几个因素，采用 SOC 方案。选用 Silicon Labs 公司的射频一体化微控制器 SI1000<sup>[13]</sup>作为从控制器，通过无线收发模块实现与油阀铅封单元通信，无线控制铅封单元的电控锁。整个控制单元安装在车体的底盘上。控制单元采用主从控制器的结构设计，是基于以下两方面考虑：(1) 采用模块化设计思想，便于二次开发以及模块功能扩展；(2) 控制单元采用主从结构便于与各个铅封单元无线通信，在一定程度上减轻了主控制器的工作负担。

油阀铅封单元位于油罐车罐体的 4 个进、出油口阀门处，它由 SI1000 微控器、电源模块、电控铅封锁构成，用于实现各个阀门的施封、解封操作。状态监测系统控制单元与铅封单元结构原理分别如图 2 (a)、(b) 所示。

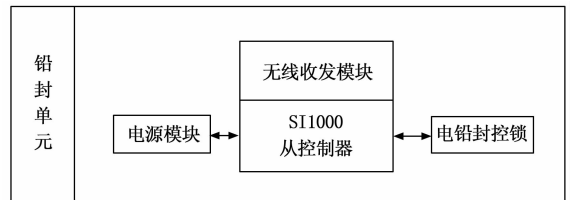


图 2 油罐车状态监测系统铅封单元结构原理

### 2 罐车状态监测车载终端硬件设计

#### 2.1 控制单元硬件设计

##### 2.1.1 电源模块

终端控制单元需要 5 V，3.3 V，1.2 V 三种直流稳压电源。第一级电源转换由汽车电源 12 V 转换为 5 V，第二级再分别从 5 V 转到 3.3 V 和 1.2 V。在第一级电源转换模块里选用开关稳压电源的方案，采用 LM2596S-5.0 芯片。车载终端的 S3C2440A 和 MG323 模块及其它芯片使用 3.3 V 电压供电，经过线性稳压芯片 AS2815AR 输出得到 3.3 V 电压。ARM 内核供电电压 1.2 V，采用 LTC3406-1.2 降压型稳压芯片。电源转换电路如图 3 所示。

##### 2.1.2 存储单元模块

S3C2440A 处理器配有 NAND Flash 控制器，为

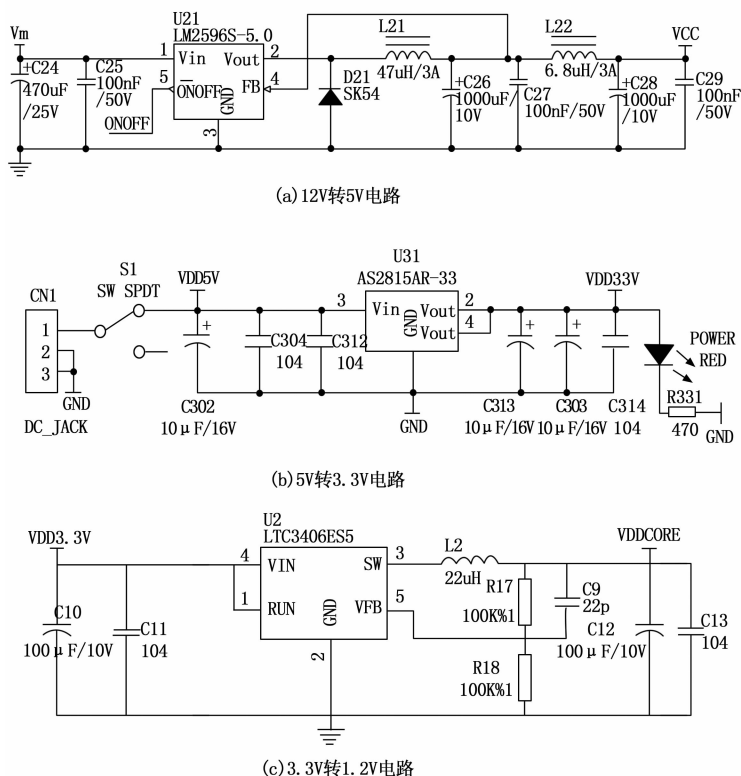


图 3 电源转换电路

储存车辆运行过程中产生的数据信息,设计选用三星公司生产的芯片 K9F2G08U0B 作为扩展 NAND Flash 的存储单元模块。该存储器提供了 256 M×8 Bit 的存储空间。设计的硬件电路如图 4 所示。

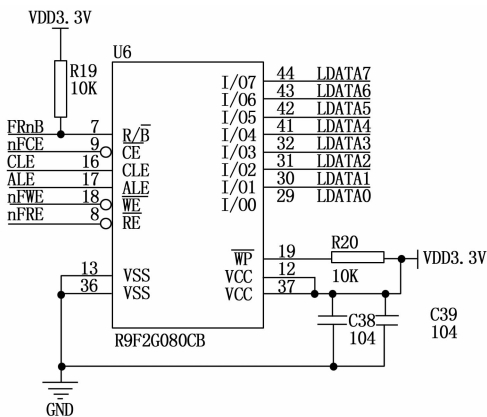


图 4 NAND Flash 接口电路

### 2.1.3 GPRS 模块

为了电路简便,设计采用通用异步收发传输器(UART)串口将 EM310 模块与 S3C2440A 连接,然后在 TXD 管脚加 6.2 kΩ 电阻,其天线装置与 EM310 模块的 5 引脚相连,经过 68 nH 的电感接地,

EM310 模块的 TERM\_ON 引脚经 0 Ω 的电阻接地,为的是在上电时就拉低引脚,以达到启动 EM310 模块的目的。其接口电路如图 5 所示。

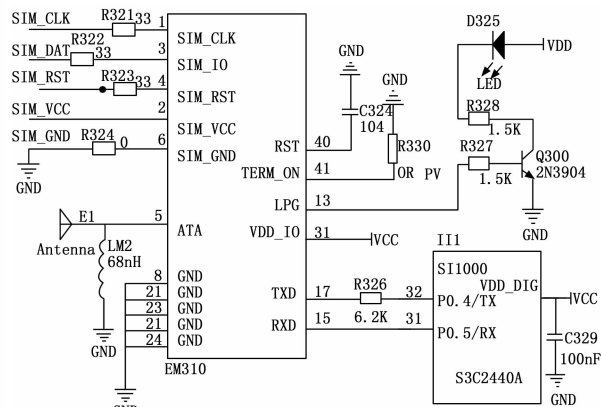


图 5 GPRS 模块接口电路

### 2.1.4 GPS 模块

GPS 模块可以通过计算三至四颗卫星所发出的定位信号,获取当前车辆的经纬度位置、时间、运动速度等数据。本设计选用 U-BLOX 公司所产核心为 NEO-6M 的 GPS 模块,该模块拥有具有 -161 dBm 的车辆跟踪灵敏度以及高达 50 个通道,数据采集频率为 5 Hz。该模块结构简单,是通过串口与 ARM 主控制器 S3C2440A 通信的,其外围接口电路如图 6 所示。

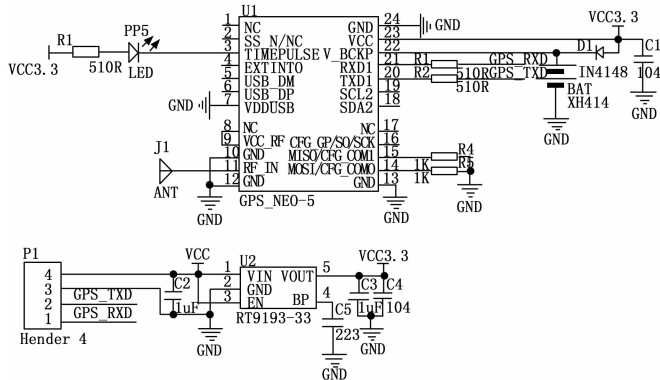


图 6 GPS 模块接口电路

### 2.1.5 从控制器最小系统模块

从控制器 S11000 最小系统设计参考了典型应用电路,供电电压为 3.3 V 可由电源模块供电,其时钟晶振选取为 32.768 kHz,外部晶振选取为 30 MHz,在电源部分,电容值为 100 nF, 100 pF, 1 μF,起电源滤波作用。

### 2.1.6 无线收发模块

SI1000 芯片的内部集成了 EZRadio-PRO Transceiver 射频收发模块<sup>[14]</sup>。MCU 内核与射频模块是通过内部 SPI1 口完成数据通信的；数据进入射频模块的先进先出模块 (FIFO) 实现无线传输，需要经过天线收发电路模块传输出去。

无线信号发射电路与接收电路共用一个前端射频天线装置，采用单刀双掷的射频开关 UPG2214TB 对信号发射和接收电路进行切换。系统通过对 SI1000 的 GPIO1 和 GPIO2 引脚的配置，实现对发送接收通道的切换。无线收发电路如图 7 所示。

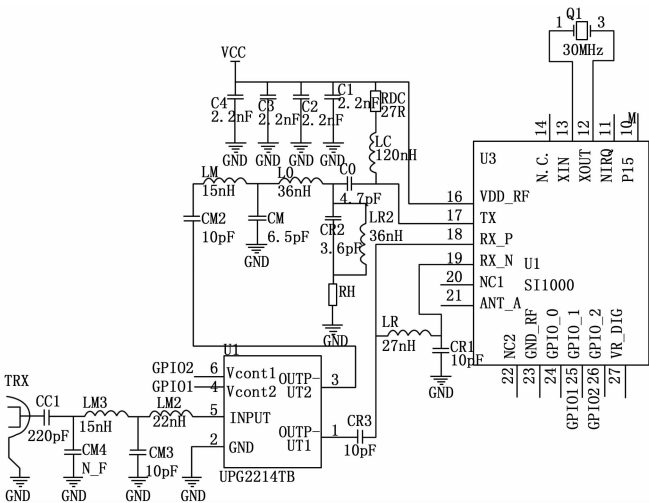


图 7 无线收发电路

### 2.1.7 温度采集模块

考虑到油罐车的运行环境条件恶劣，并从监测精度、成本、可操作性几方面考虑，温度传感器选用 DS18B20。该芯片内部由温度传感器、光刻 ROM 存储器 and 配置寄存器等部分构成。

DS18B20 通过一条线即可实现与 SI1000 的 P1.5 引脚连接，温度传感器与 SI1000 接口电路如图 8 所示。

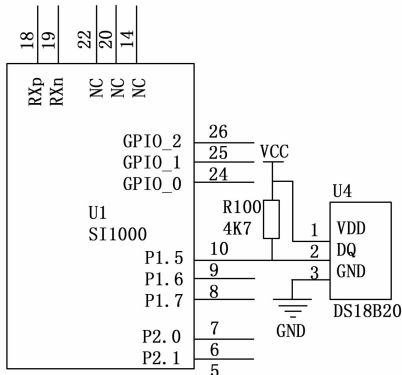


图 8 DS18B20 接口电路

### 2.1.8 倾角采集模块

本文采用双轴倾角计 ADXL203 实现对罐体倾角的采集，该传感器采用晶体硅固体结构，性能稳定，受温度的影响极小，同时还具有体积小、输入简单、倾斜度测量精度高等优点。在罐体倾斜度测量时，双轴倾角计需以重力方向作为基准测定被测物体的方位，同时将传感器的  $x$  轴与重力方向垂直设置（即与水平面平行）。设计将传感器芯片沿水平面放置， $X$ 、 $Y$  轴均处于水平方向，便可测量罐体的倾斜度，根据以下公式可将芯片输出的模拟电压信号  $VX$ 、 $VY$  分别换算成对应的  $g$  值变化量  $GX$ 、 $GY$ ：

$$GX = \frac{VX - 2.5V}{1\ 000\ mV/g} \quad (1)$$

$$GY = \frac{VY - 2.5V}{1\ 000\ mV/g} \quad (2)$$

再将  $GX$ 、 $GY$  代入倾斜角度的计算公式中，得到罐体在途过程中的倾角，俯仰角 ( $pitch$ ) 和倾斜角 ( $roll$ )，从而判断罐体姿态是否正常。

$$pitch = \arcsin\left(\frac{GX}{lg}\right) \quad (3)$$

$$roll = \arcsin\left(\frac{GY}{lg}\right) \quad (4)$$

图 9 (a) 为 ADXL203 用于双轴斜度测量仪的原理示意图。

ADXL203 芯片输出的是模拟电压信号，经过相应的滤波电路、放大调理电路后与从控制器相连接。接口电路中的滤波电容  $CX$  和  $CY$ ，电容值选为  $0.1\ \mu F$ ，由此知信号设置为  $50\ Hz$  的带宽，开启时间为  $20\ ms$ 。经过低通滤波后的电压信号，通过差动输入方式连接到微控器 SI1000 的 P2.3（引脚 4）和 P2.5（引脚 2）上，通过这两个引脚内部集成的 ADC 可以直接进行 AD 采样。图 9 (b) 为双轴倾角计接口电路。

## 2.2 铅封单元硬件设计

油阀铅封单元安装在罐体油口阀门一侧，该油罐车共 4 个铅封单元。该单元硬件电路由无线微控器、电控锁模块和无线收发电路构成。微控器选用射频一体化芯片 SI1000，用于与车载终端控制单元通信，以实现铅封、解封操作。

电控锁控制电路与锁芯密封装于 API 油阀内，四线制的电控锁中有两根控制信号线 NO (normal open) 和 NC (normal close)，另外两根是电源与接

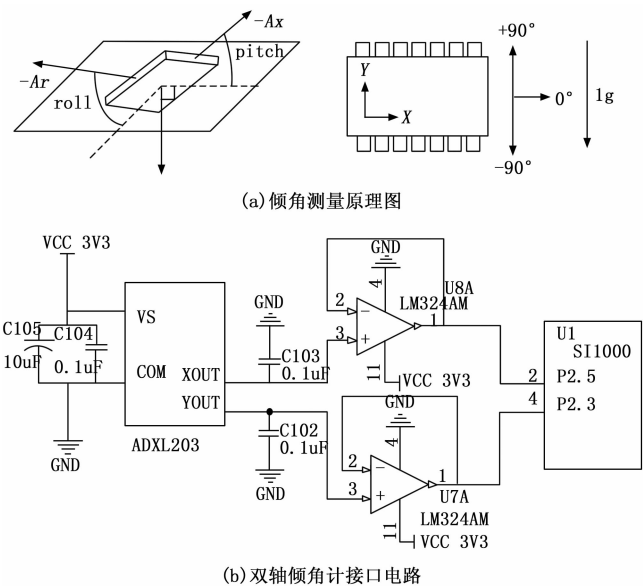


图 9 罐体状态采集原理及接口电路

地线。将控制信号线分别与 SI1000 的 I/O 口 P2. 4 和 P2. 6 相连。电控锁根据 NO、NC 电平出现的高低变化发生置 0、置 1 变化。当 NO、NC 同时高电平或低电平时, 说明有非法操作电控锁短路(油阀非正常开启、关断), 对应状态与 MCU 的 I/O 关系如表 1 所示。

表 1 油阀感测状态

NO(P2. 4)	NC(P2. 6)	状态
0	0	错误
0	1	油阀施封
1	0	油阀解封
1	1	错误

### 3 罐车状态监测车载终端软件设计

#### 3.1 系统数据通信

系统的数据通信包括车载终端与信息平台间的 GPRS 通信和控制单元与铅封单元的无线 RF 通信。

##### 3.1.1 GPRS 网络通信

GPRS 网络可通过以下三种方式连接到公网。

拨号上网: 非对称数字用户线路(ADSL)可申请公网 IP 地址, 以便数据中心与移动网关通过 VPN 隧道专线连接。

固定 IP 上网: 申请固定公网 IP 地址给 GPRS 模块即可直接将数据发送至监控中心。

定时发送: 首先在 GPRS 模块中设置数据发送时间间隔(默认为 60 秒), 即每隔一段时间向 Internet 上对应 IP 地址上发送一段数据, 该 IP 下的服务器将所接受收据直接存储在服务器中, 确认 ID 无误后存储, 并向车载终端发送一段确认报文, 终端收到该报文后, 确定发送成功; 否则重新发送信息。

##### 3.1.2 控制单元与铅封单元的无线通信

控制单元的无线收发模块与油阀铅封单元采用无线方式通信, 从控制器 SI1000 采用的通信协议是 EZMac 协议。该协议是一种常用于 EZRadioPRO 和无线微控制单元的通信协议, 其各项基本参数均符合 FCC 的规定, 为增加通信可靠性并降低功耗, 该协议中包含 4 个通信频道, 可在不依附 MCU 的情况下直接通过 ISM 频率采用短帧格式进行数据收发; 该协议具有占用资源少、支持广域寻址、数据包清洗与信号自纠自检等优点。

EZMac 通信协议的结构包括帧头、载荷和帧尾三部分, 帧头内有前导码、同步字、地址信息和数据包长度几个部分, 载荷是通信模块传输的有效数据帧尾由两个字节的 CRC 校验位, 用于识别是否有错误的的数据位。EZMac 数据帧格式如表 2 所示。

#### 3.2 控制单元软件设计

终端控制单元软件设计采用模块化编程方法, 采用 C 语言编程, 部分底层函数应用汇编语言设计。主程序包括系统初始化、建立 GPRS 连接、GPS 模块的数据提取、罐壁温度提取、罐体姿态提取以及与铅封单元通信<sup>[16-17]</sup>等。系统初始化是在主控制器上电后, 在 main() 函数中完成的, 包括设置系统时钟、初始化中断向量表、设置相应 I/O 口的工作模式。主控制器运行在主程序模块下, 建立好 GPRS 网

表 2 无线数据帧格式

AA	.....	AA	2D	D4	CTRL	CID	SID	DID	PL	D0	.....	DN	CRC
前导码 Preamble			同步字 Sync		控制字节	用户地址	源地址	目的地址	包长 Pay load	有效载荷数据 payload data			校验
5Byte			2 Byte		1 Byte	4 Byte			1 Byte				2 Byte

络连接后，在接收到信息中心控制命令时，就会以中断方式获取各个模块的数据信息。

GPS 模块初始化，再将接收到的定位数据存入指定缓冲区，判断是否接收到完整的 GPRMC 语句，最后从中提取出定位数据。

罐壁温度采集流程就是传感器得到数据采集命令后，对 DQ 下拉至低电平，然后再 15 s 之内拉高总线，如果 DQ 为高电平，则数据采集成功，并将该温度值作为返回值返回。

罐体倾角采集利用 ADXL203 芯片对 X 轴和 Y 轴两路数据采集，调用 ADC0 初始化程序对相关寄存器配置使能，通过获取 X、Y 轴的电压值，由对应公式计算加速度值，并转换为相应的角度值。油罐车车载终端控制单元软件流程如图 10 所示。

### 3.3 铅封单元软件设计

铅封单元被唤醒后，采集油阀当前铅封状态并通过无线方式发送给控制单元，收到施封、解封命令后，驱动电控锁装置动作。铅封单元的主程序负责调用各子程序，状态采集、数据发送和数据接收程序都是通过主程序调用实现。

## 4 实验测试

为验证基于 SI1000 的罐车状态监测系统设计合

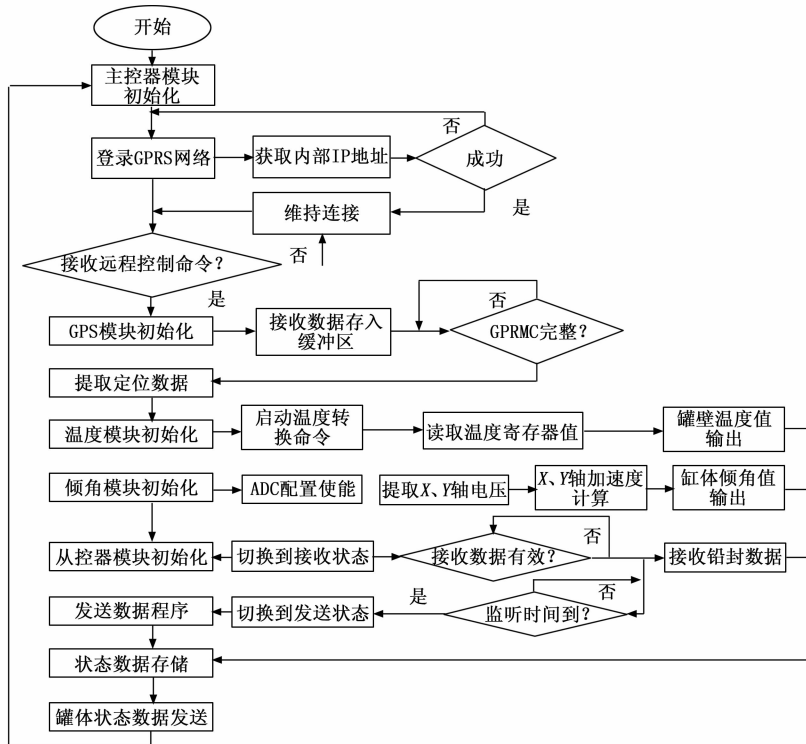


图 10 终端控制单元软件流程

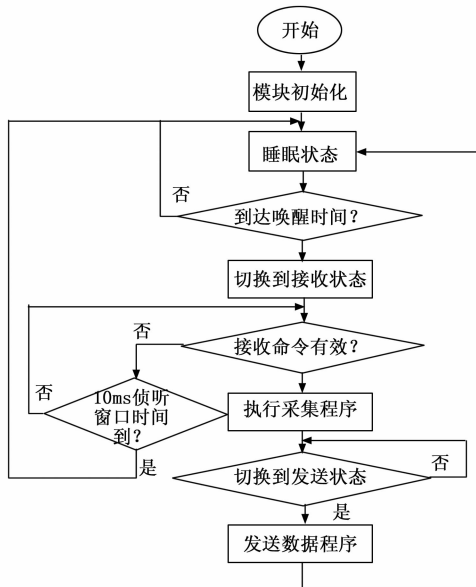


图 11 铅封单元软件流程

理性，进行系统调试。选取东风天龙铝合金半挂油罐车分别在罐车底盘安装车载终端控制单元，在进、出油口分别安装铅封单元。在上位机安装客户端软件，车载终端的 GPRS 模块中设置好上位机服务器 IP，确保车载终端与服务器通信正常。上位机显示界面如图 12 所示。

### 4.1 调试数据采集

启动系统，打开上位机，进行参数设置观察系统是否正常运行。正常运行后，根据状态监测参数对系统进行测试。具体技术要求如下：

- 1) 远程数据传输采用 TCP/IP 通讯协议，波特率为 115 200。
- 2) 采集监测信息，具体参数要求见表 3。

表 3 采集数据标准

状态要素	测量范围	分辨率
温度/℃	0~80	0.1
罐壁俯仰角/(°)	0~10	0.1
罐壁倾斜角/(°)	0~10	0.1
油阀铅封	油阀关闭状态	
油阀解封	油阀开启状态	

3) 通过测试，分别记录五组数据的测量值和标准值，进行系统误差分析。

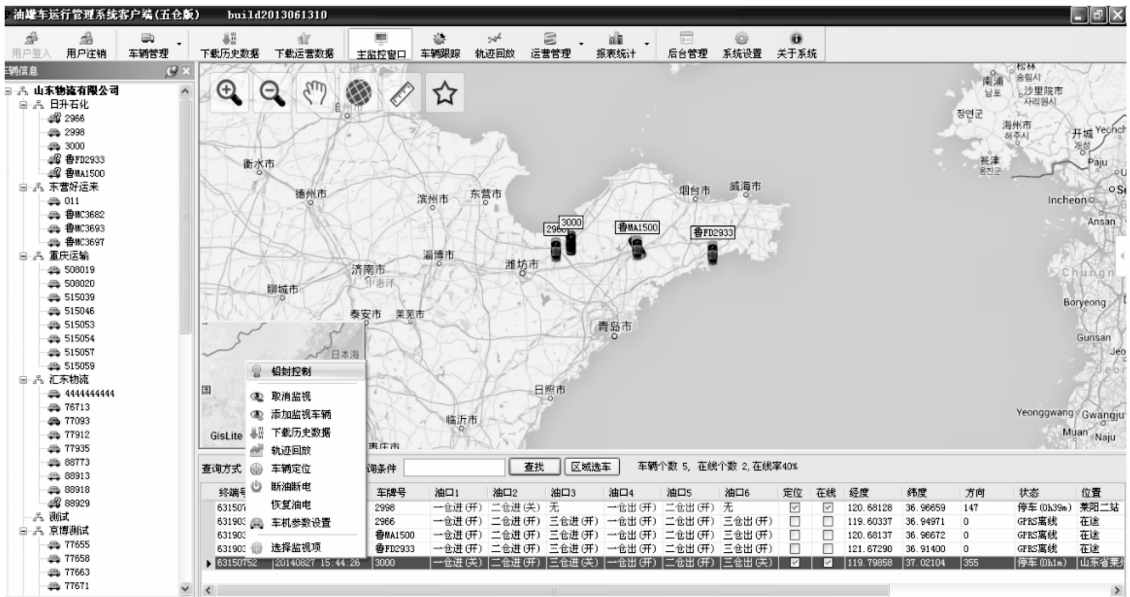


图 12 上位机状态监测系统显示界面

### 4.2 罐壁温度测试

采用计量检定合格的遥感式测温仪采集罐壁温度, 同时记录由终端控制单元 DS18B20 温度传感器测量在上位机显示的罐壁温度, 分别记录五组数据。上位机显示的罐壁温度为系统测量值, 测温仪实测的温度值为标准值。

### 4.3 罐体倾角测试

采用计量检定合格的带磁角度尺测量罐体俯仰角和倾斜角, 同时记录由终端控制单元 ADXL203 芯片测量在上位机显示的罐体俯仰角和倾斜角, 分别记录五组数据。上位机显示的罐体倾角为系统测量值, 角度尺实测的罐体倾角为标准值。

### 4.4 油阀铅封状态测试

在上位机操作系统改变油阀铅封状态, 同时记录实际观测到的油阀铅封状态, 分别记录五组数据。上位机操作后显示的铅封状态为系统测量值, 实际观测状态为标准值。

### 4.5 系统测试结果分析

为分析系统实际运行可靠性与测量精度, 对油罐车状态监测系统对比实验测试, 记录各个参数的实验数据并进行误差分析, 系统误差计算公式如下式所示:

$$\epsilon = \left| \frac{a-x}{a} \right| \times 100\% \quad (5)$$

式 (5) 中,  $\epsilon$  为误差值,  $a$  为标准值,  $x$  为测量值。系统监测数据表如表 4 所示。

表 4 系统监测数据表

测试参数	温度/ ℃	俯仰角/ (°)	倾斜角/ (°)	油阀 铅封	油阀 解封	
1	$x$	40.1	3.0	2.5	1	-1
	$a$	39.9	3.1	2.4	1	-1
	$\epsilon$	0.50	3.23	4.17	0	0
2	$x$	40.3	3.2	2.6	1	-1
	$a$	40.1	3.1	2.5	1	-1
	$\epsilon$	0.49	3.23	4.0	0	0
3	$x$	40.2	3.1	2.5	1	-1
	$a$	40.0	3.2	2.4	1	-1
	$\epsilon$	0.50	3.13	4.17	0	0
4	$x$	39.8	3.1	2.4	1	-1
	$a$	39.7	3.0	2.4	1	-1
	$\epsilon$	0.25	3.33	0	0	0
5	$x$	40.2	3.3	2.5	1	-1
	$a$	40.1	3.2	2.4	1	-1
	$\epsilon$	0.25	3.13	4.17	0	0

注: 铅封状态用“1”表示, 解封状态用“-1”表示。

由表 4 可知: 罐壁温度标准取值在 39.7~40.1℃ 区间范围内, 温度波动度为 0.4℃, 系统误差在 0.25%~0.5% 之间。罐体俯仰角标准取值在 3.0°~3.2° 区间范围内, 倾角波动度为 0.2°, 系统误差在 3.13%~3.33% 之间。罐体倾斜角标准取值在 2.4°~2.5° 区间范围内, 倾角波动度为 0.1°, 系统误差在 0°~4.17° 之间。油阀的铅封与解封操作分别执行五次, 远程操控电控锁进行铅封、解封操作, 未出现失误。

(下转第 105 页)