

# 运载火箭推进剂温度地面高精度测量系统设计

梁艳迁<sup>1</sup>, 梁建国<sup>1</sup>, 张众<sup>1</sup>, 陈超<sup>2</sup>, 古艳峰<sup>1</sup>, 朱亮聪<sup>1</sup>

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109; 2. 华东计算机技术研究所, 上海 201808)

**摘要:** 为了满足运载火箭推进剂贮箱温度测量需求, 研制了一种铂电阻高精度地面温度测量系统; 该系统采用四线制铂电阻 Pt100 作为温度传感器, 使用精密运放产生恒流源驱动铂电阻产生电压, 通过仪表放大电路进行信号放大, 并选用高精度 AD 转换器进行信号采集; 各路阻值测量电路之间采用隔离设计, 降低了通道之间的干扰, 提高了测量精度; 通过自检设计以及校准设计, 提高了测试设备的可靠性及测量准确性; 测试结果表明, 该测温系统稳定可靠, 测量误差小于  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 能够准确测量并记录运载火箭各贮箱推进剂温度变化情况, 为火箭加注后采取保障措施提供依据, 同时为飞行结果分析提供射前实测温度数据支持。

**关键词:** 推进剂温度测量; 铂电阻; 恒流源

## Design of Launch Vehicle Propellant Temperature High-precision Measurement System

Liang Yanqian<sup>1</sup>, Liang Jianguo<sup>1</sup>, Zhang Zhong<sup>1</sup>, Chen Chao<sup>2</sup>, Gu Yanfeng<sup>1</sup>, Zhu Liangcong<sup>1</sup>

(1. Shanghai Research Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201109, China;

2. East China Research Institute of Computer Technology, Shanghai 201808, China)

**Abstract:** In order to meet the requirement of temperature measurement of propellant for launch vehicle, a high-precision temperature measurement system based on platinum resistance is proposed. Four-wired platinum resistance is used as the temperature sensor, which is driven by a constant current power supply to generate measure voltage. After instrumentation amplifier, signal is collected by high precision AD. Isolation design is adopted among the measurement circuits, which reduces the interference between channels and improves the measurement accuracy. Through self-checking and calibration design, the reliability and accuracy of the system is improved. The test results show that the temperature measurement system is stable and reliable, and the temperature measurement tolerance is less than  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The system record the temperature change of the launch vehicle after propellant filling, and provide the measured temperature data for the analysis of flight results.

**Keywords:** propellant temperature measurement; platinum resistance; constant current

## 0 引言

运载火箭贮箱用于存放运载火箭发射所需的推进剂, 包括燃料箱及氧化剂箱。根据运载火箭发射流程, 贮箱加注推进剂结束至发射还需要  $12\sim 24\text{ h}$ , 特殊情况下可能延迟数日。这期间贮箱温度会随着环境温度变化而发生变化, 这个变化可能会引起贮箱内气压上升等后果<sup>[1]</sup>。因此需要对运载火箭贮箱内推进剂温度进行实时监测。

铂电阻温度传感器是一种应用十分广泛的测温传感器, 其原理是铂电阻元件的阻值随温度变化而变化, 通过测量阻值可对得到具体温度。铂电阻温度传感器具有精度高、稳定性好的特点, 是运载火箭领域中的一种常用传感器<sup>[2]</sup>。

本文针对运载火箭贮箱内推进剂温度测量需求, 设计了一种地面温度测量系统, 该测量系统采用铂电阻作为温度测量传感器, 配合地面测温装置进行温度数据采集及处理, 可测量并记录运载火箭加注过程及加注后至发射前的各贮箱推进剂温度变化情况, 为火箭加注后采取保障措施

提供依据, 同时为飞行结果分析提供射前实测温度数据。

## 1 推进剂测温原理及系统设计

推进剂测温系统归属于火箭附加系统, 主要用于测量并记录火箭加注过程及加注后各贮箱内推进剂温度变化情况, 为火箭加注后采取保障措施提供依据, 同时为飞行结果分析提供射前实测温度数据由地面测温系统(包括数字式温度测试仪、测温地面电缆等)与箭上加注温度传感器一起, 完成测量、显示、记录、保存箱内温度的工作。推进剂测温系统组成框图见图 1。

为提高测量精度, 消除导线电阻对测量的影响, 本次推进剂温度测量中的铂电阻温度传感器采用四线制接法<sup>[3]</sup>。地面测温装置中的调理电路采用恒流源方式, 将测试电流加在被测铂电阻上, 电阻两端产生的差分电压经运放放大后由 AD 采集, 测得的电压值根据电流反算成被测电阻的电阻值, 再由测得的电阻值经电缆阻值补偿后根据热敏电阻温度~阻值 ( $R-T$ ) 曲线获得的温度值。

地面测温装置包括阻值采集模块及数据处理显示模块, 其原理如图 2 所示。阻值采集模块可对 8 路铂电阻传感器进行测试, 为防止相互干扰, 各通道的信号调理电路和 AD

收稿日期: 2019-06-22; 修回日期: 2019-07-31。

作者简介: 梁艳迁(1983-), 男, 河北沧州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事运载火箭总体方向的研究。

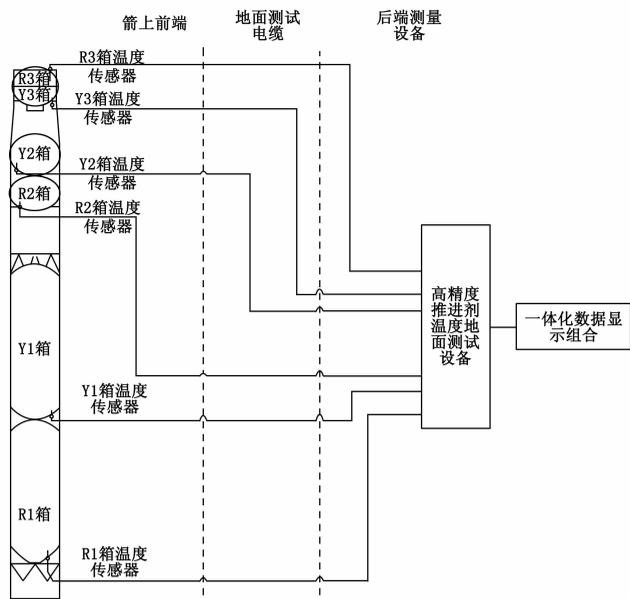


图 1 推进剂测温系统原理图

采集电路的地线及电源线相互隔离。各模块作用如下:

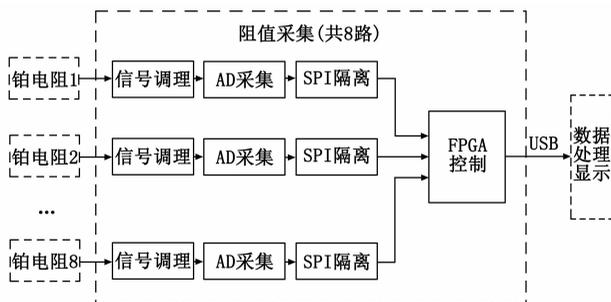


图 2 地面测温装置原理框图

信号调理电路产生高精度阻值测试所需的恒电流源并对输入的信号进行滤波处理, AD采集电路将信号调理电路加在温度传感器采样电阻两端电压转化为16位数字量信号; SPI隔离电路将采样电路与控制电路间地线隔离, 并产生模拟采样电路所需工作电源; FPGA电路负责USB通信, 并控制多路SPI/I<sup>2</sup>C的串行模拟量采集和模拟指令控制输出。所采集的数据在数据处理显示模块进行数据处理、显示及保存。

## 2 系统硬件设计

### 2.1 信号调理电路设计

信号调理电路包括恒流源以及差分放大电路, 如图3所示。

恒流源电路是铂电阻温度测试的关键部分<sup>[4]</sup>, 恒流源的稳定性及输出电流的大小对温度测试的准确度有很大影响<sup>[5]</sup>。为减小铂电阻的自热效应, 并保证信噪比, 设计了一个可以产生1 mA恒定电流的恒流源。该恒流源中选用高精度电压基准芯片 ADR4525 产生 2.5 V 参考电压, 该芯片输出电压噪声为 1.25  $\mu\text{V}_{\text{p-p}}$ , 初始电压偏差为  $\pm 0.02\%$ 。运放选

用 Maxim 公司的低噪声、低失调、高开环增益双极性运算放大器 OP07。运放正端接 2.5 V 参考电压, 输出端通过三极管 2N3700 进行反馈, 可提高电流负载能力。调节电阻  $R_{\text{REF}}$  选用 2.5 k $\Omega$  高精度电阻, 可稳定输出 1 mA 电流。

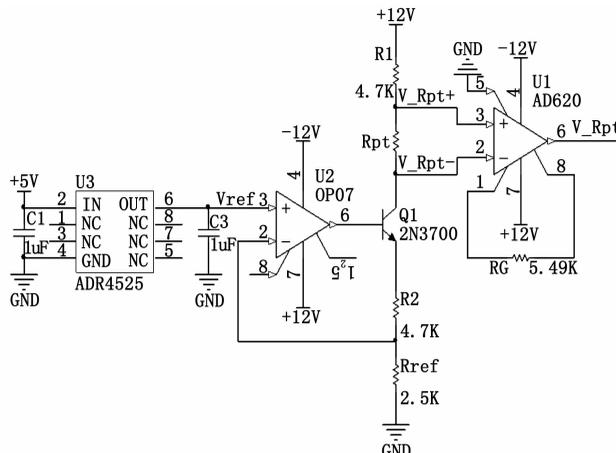


图 3 信号调理电路原理图

经查表, 铂电阻传感器测温范围内的电阻值为 0 ~ 125  $\Omega$ , 1 mA 电流经过后压降在 0.125 V 以内。为精确测量, 采用仪表放大器 AD620 对信号进行差分放大, 放大倍数设置为 10。AD620 具有低噪声、宽增益带宽、高共模抑制比等优点<sup>[6]</sup>, 适用于进行小信号的信号调理, 能有效减少系统中共模干扰对采集电路的影响<sup>[7]</sup>。

### 2.2 模数转换电路设计

信号经差分放大后传递给后续 A/D 转换器进行数据采集。如图 4 所示, 模数转换电路选用的 A/D 芯片为 LTC2462, 该芯片为 16 位  $\Delta\Sigma$  型 A/D 转换器, 其增益误差为 0.01%, 偏移误差为 2LSB, 并具有 2 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  的漂移性能<sup>[8]</sup>。LTC2462 为 SPI 接口, 各路 A/D 芯片输出的数据经 SPI 隔离芯片 LTM2883 隔离后, 送入主控芯片 FPGA 进行处理。LTM2883 是一种电流数字型隔离器, 在输入输出逻辑接口之间提供了 2500VRMS 的隔离度, 适用于接地环路的隔离。通过各路温度测量电路的隔离, 可有效减小各路之间的相互干扰, 提高测量精度<sup>[9]</sup>。

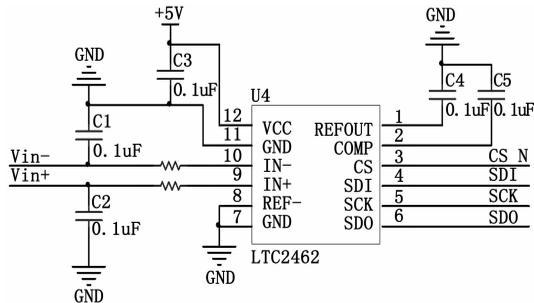


图 4 AD 转换电路原理图

## 3 软件设计

地面测温装置包括两种软件, 1) 硬件控制软件, 由 FPGA 实现, 对应如下功能: 对 USB 协议芯片进行控制, 实现阻值采集模块与上位机数据处理显示模块通信; 对多

路 SPI 接口的 A/D 转换器控制和采集, 并进行数据调度。  
2) 上位机软件用于进行数据处理及显示, 具备以下功能: 通过 USB 发送控制指令, 接收采集数据; 对采集数据进行显示、保存等处理; 对保存数据进行回放和检索。

软件工作流程如图 5 所示。

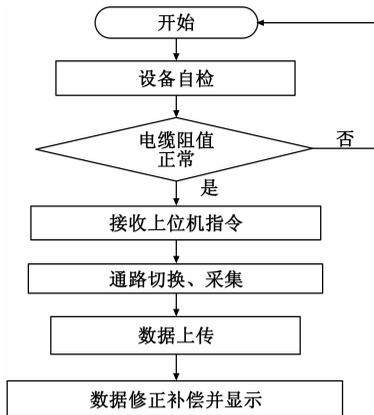


图 5 软件流程图

测温设备上电后, 先进行设备自检, 然后在 FPGA 的控制下以一定速率并行采集 8 路独立隔离的 16 位模拟量值, 并不断刷新 FPGA 内的与数据处理系统通信的 UART 的发送缓冲区; 上位机软件按设定速率向温度阻值采集模块发送取采样值指令, 并将从温度阻值采集模块反馈的模拟量按公式转化为阻值, 经补偿后获得对应通道铂电阻温度传感器阻值, 再将这个阻值根据公式转化为温度值进行相应显示和存储处理, 从而完成温度阻值的采集功能。

## 4 系统标定及误差分析

为了真实反映推进剂温度情况, 需要保证地面测温装置的可靠性以及温度测试的准确性<sup>[10]</sup>。设计时采用了自检设计及校准设计, 具体如下:

### 4.1 自检设计

设备自检是为了保证测温系统加电前自身工作正常、安全可靠。本装置自检策略是在给铂电阻温度传感器加电测试前, 先对已连接的测试电缆进行阻值测试, 并将测试值与事先设定阻值参数进行比较, 如在正常范围内, 可以确认测温系统的信号调理电路、隔离及 AD 采集电路、FPGA 控制电路、数据处理系统软硬件以及温度传感器测试链路连接都正常。这样就可以通过自检测试确保推进剂地面测温系统工作正常情况下将测试通路切换到温度传感器通路进行温度监测, 从而实现了对推进剂温度的连续监测。此外测试通路阻值也可以作为带线路测量时的电缆补偿值, 从而获得精确的温度传感器阻值。

### 4.2 校准设计

对于测温系统, 相关参数实际值与设计值之间会有一些的偏差, 不同元器件间也会有一些的不一致性, 为了提高测试精度, 引进一个校准系数  $F$ , 通过对比标准电阻获得校准系数, 再通过软件实现校准补偿。

为了简化校准操作, 方便设备使用, 测温系统校准采用

一个高精度、高稳定度具有温度补偿功能电阻来模拟铂电阻温度传感器。该电阻值预先通过高精度万用表 ( $0.000\ 1\ \Omega @ 100\ \Omega$ ) 进行校准测试, 并换算成标准温度值。将该电阻采用四线制方式连接到测温装置测试插座入口, 测温装置对该电阻进行阻值测试并根据显示换算的温度实测值与校准值偏差进行软件计算修正系数  $F$  修正, 修正后再进行阻值测试和偏差值判别, 反复进行直至测试值与校准值偏差到允许范围内, 记录和存储软件计算系数  $F$ 。8 个测温通道都按此操作步骤分别进行, 从而完成设备标定和校准。正常使用时则将测试阻值乘上该系数  $F$  再换算成相应温度值。

### 4.3 精度和稳定度分析

根据测温装置中的阻值采集电路, 对于恒流源方式采集来说, 测试的稳定度主要取决于一些关键元器件的稳定度, 具体分析参见表 1。

表 1 元器件对测试稳定性分析表

器件型号	温度参数/℃	功能
Rref	$\pm 5\text{ppm}$	产生恒流比较电压
ADR4525	$\pm 2\text{ppm}$	产生恒流基准电压
RG	$\pm 5\text{ppm}$	运放放大比率调节
AD620BN	$0.6\ \mu\text{V}$	信号放大
LTC2462	$\pm 2\text{ppm}$	AD 采样

从上述信号调理电路中各器件电路功能分析, 对于表 1 中器件, 其温度系数都在  $5\ \text{ppm}/\text{C}$  ( $5 \times 10^{-6}/\text{C}$ ) 以下, 当工作温度在  $-10 \sim +60\ \text{C}$  范围内变化时, 最大温漂为  $0.03\%$  ( $60\ \text{C} \times 5 \times 10^{-6}/\text{C}$ )。按铂电阻阻值  $100\ \Omega$  量级, 阻值温漂为  $0.03\ \Omega$  左右小于  $0.038\ \Omega/0.1\ \text{C}$ , 因此能够达到测试稳定度小于  $0.1\ \text{C}$  的测试精度。

铂电阻常温阻值为  $100\ \Omega @ 0\ \text{C}$ , 对应温度系数为  $0.38\ \Omega/\text{C}$ , 对于  $1\ \text{mA}$  恒定电流和 10 倍采样电压运放放大比例, 任务书  $0.1\ \text{C}$  对应采样电压为  $0.4\ \text{mV}$ 。测温装置中选用的 AD 芯片为 LTC2462, 其输入电压范围为  $-1.25 \sim +1.25\ \text{V}$ , 采样位数为 16 位, 每 LSB 对应约为  $0.04\ \text{mV}$ , 约为  $0.1\ \text{C}$  对应采样电压为  $0.4\ \text{mV}$  的十分之一, 因此本设计采样精度能够达到温度分辨率  $+0.1\ \text{C}$ , 显示精度  $0.01\ \text{C}$  的指标, 满足推进剂测温需求。

### 4.4 温度采集和显示设计

为了消除测温设备屏幕显示温度值变化有停顿现象, 对温度采集模块与数据处理系统通讯协议开展设计。

根据测温设备技术方案, 数据处理系统与温度阻值采集模块通信采用 UART 接口, 每次通信由测温程序发起, 发送包括控制指令、数据回传指令 (取采样值指令) 或数据回送指令, 采温程序识别测温程序指令进行相应操作。数据处理系统端接受 UART 数据时, 根据通信协议一次要接受多个字节数据, 因此会采用帧方式, 即事先设定接受数据个数, PC 的硬件电路会根据设定参数自动接收数据并进行计数, 当接收计数个数与设定值一致时会自动更新接收状态位, 测温程序在发出通信指令后如需接受数据就会

不停查询该状态位, 如状态位有效就从接受缓冲区中取走设定个数的数据进行处理, 同时会复位接受状态位。

测温程序对回传数据处理时会判断帧头, 校验字节等, 如出现异常会认为本次通信数据不可靠, 判定当次接受数据不采用, 同时延后 10 s 启动新一次数据收发流程。由于 UART 通信本身存在一定的误码率, 同时测温设备内部通信传输物理链路受电磁干扰时也可能在产生多余数据, 从而干扰通信。

考虑上述可能存在的故障状态, 通过测温程序优化设计, 取消 10 s 定时重发机制, 并设定当串口接受数据判断有错误时及时重发, 最多重发三次, 如连续三次出错, 则表明设备通信接口间有故障且不能恢复, 并通过软件提醒功能在程序界面报警。

同时为了进一步增加系统可靠性, 测温程序在发送“取采样值指令”前, 先取空 UART 的接受缓冲区, 以尽可能避免因干扰或上帧通信异常造成 UART 接受缓冲区有多余字节对下一帧通信影响, 提高串口通信的容错和自恢复能力。

测温系统温度采集和显示功能模块在 4 台测温设备上经过累计不小于 20 小时连续常温带电老练, 工作正常, 验证了温度采集和显示功能模块可靠性和稳定性, 如表 2 所示。

表 2 温度显示稳定性测试记录情况

设备编号	时间	通道 1	通道 2	通道 3	通道 4
01001	29:403	51.51	-245.8	-245.82	-35.62
	29:512	51.51	-245.8	-245.82	-35.62
	49:620	51.51	-245.8	-245.82	-40.68
	59:698	51.51	-245.8	-245.82	-40.69
01004	33:862	-245.8	-245.82	-245.82	-245.82
	34:314	-245.8	-245.82	-245.82	-245.82
	54:766	-245.8	-245.82	-245.82	-245.82
	04:843	-245.8	-245.82	-245.82	-245.82
01004	50:702	0.04	51.51	0.01	51.52
	51:702	0.04	51.51	0.01	51.52
	12:698	0.04	51.51	0.01	51.53
	22:776	0.04	51.51	0.01	51.52

### 5 试验结果及应用情况分析

在实验室恒温箱中对推进剂地面测温装置进行了测试, 测试数据见表 3。通过测试数据对比, 本测温装置在各温度

表 3 温度测试数据列表

序号	设定温度/℃	实测温度/℃	误差值/℃
1	-10.00	-9.992	0.008
2	0.00	0.002	0.002
3	10.00	9.996	0.004
4	20.00	19.991	0.009
5	30.00	30.001	0.001
6	40.00	40.008	0.008
7	50.01	49.993	0.007
8	59.99	59.995	0.005

点的误差值均在 0.01 ℃ 内。并将本测温系统与火箭加注系统进行对接, 连接推进剂贮箱中铂电阻温度传感器进行测试, 测试数据均满足要求。

推进剂测温系统参与了长征四号丙运载火箭完成发射嫦娥四号中继星任务, 该任务为长征四号运载火箭首次在西昌卫星发射场执行发射任务, 如图 6 所示。5 月 20 日 8:30 开始进行推进剂加注本次发射属于首次在 27 基地发射, 推进剂测温系统对加注过程推进剂温度进行了具体测量, 实现了推进剂实时高精度测量和推进剂温度预估模型的校准, 也验证了推进剂测温系统原理及工程可行性, 同时, 也为确保嫦娥四号中继星发射任务的顺利实施奠定基础。



图 6 推进剂测温设备及操作界面

### 6 结论

本文设计了一种用于运载火箭推进剂温度测量的地面测温系统, 该测温系统采用四线制对铂电阻温度传感器进行测量, 采用仪表放大器及高精度 AD 器件进行信号采集, 并通过隔离采集、自检设计以及校准设计等方式实现了精确的温度测量, 温度测量误差为 0.01 ℃。该测量系统工作稳定、测量精度高, 可对运载火箭推进剂温度进行实时监测, 为运载火箭成功发射提供真实可靠的测量数据。

#### 参考文献:

- [1] 李善宝. 常规储箱温度的预测研究 [J]. 石油化工自动化, 2006 (2): 46-48.
- [2] 王晶晶, 李芳培, 李安顺. 低温推进剂火箭超低温温度测量技术 [J]. 重庆理工大学学报, 2012, 26 (10): 42-45.
- [3] 杨永军. 温度测量计算现状和发展概述 [J]. 计测技术, 2009, 29 (4): 62-65.
- [4] 薛风国. 一种恒流源驱动的高精度温度测量系统设计 [J]. 信息技术, 2012 (9): 5-8.
- [5] 郑泽祥, 姜周曙, 黄国辉, 等. 铂电阻高精度温度测量系统设计 [J]. 机电工程, 2013, 30 (12): 1494-1497.
- [6] 赵金奎. 共模干扰和差模干扰及其抑制技术 [J]. 电子质量, 2006 (5): 72-76.
- [7] 李寿安, 李曙林, 何卫锋. 某型飞行数据记录器防护壳体优化设计 [J]. 沈阳航空工业学院学报, 2002, 19 (2): 8-9.
- [8] LTC2460/LTC2462, Ultra-Tiny, 16-Bit  $\Delta\Sigma$  ADCs with 10 ppm/°C Max Precision Reference [Z]. Linear Technology, 2010.
- [9] 马国红, 金雷. 基于铂电阻 PT100 的隔离测温仪设计 [J]. 微计算机信息, 2012, 28 (10): 216-217.
- [10] 胡鹏程, 时玮泽, 梅健挺. 高精度铂电阻测温系统 [J]. 光学精密工程, 2014, 22 (4): 988-995.