

# 真空热试验数字温度测量系统设计与实现

朱 熙, 李振伟, 葛哲阳, 费泽林, 文 晶

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 温度测量是航天器真空热试验中一项非常重要的测量项目, 一般采用热电偶进行温度测量; 为了在真空热试验过程中减少测量线路的引线数量、提高测量系统的抗干扰程度以及测量准确度高, 设计了一种可用于真空热试验的数字温度测量系统, 实现了对航天器及地面工装设备温度的数字化测量; 该系统由数字温度传感器 DS18B20 以及采集设备组成, 可通过 LAN 网络与远程监视计算机连接实现温度远程监视; 文章给出了数字温度测量系统的硬件结构、通信协议以及软件设计; 通过在真空热环境中的测试以及与铂电阻测温系统的比对, 结果表明该系统的稳定性好, 其测量值与铂电阻测量值的差值在  $0.5^{\circ}\text{C}$  以内, 线性度约为  $\pm 0.1\%$ , 满足真空热试验的需求。

**关键词:** 真空热试验; 数字温度测量; DS18B20; 通信协议

## Design and Implementation of Digital Temperature Measurement System in Vacuum Thermal Test

Zhu Xi, Li Zhenwei, Ge Zheyang, Fei Zelin, Wen Jing

(Beijing Institute of Spacecraft Environment and Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Temperature measurement is a very important measurement project in spacecraft vacuum thermal test, and thermocouple measurement system is generally used for temperature measurement. In order to reduce the number of wire measuring circuit and improving the anti disturbance of measurement system and high measurement accuracy in vacuum thermal test process, which can be used in digital temperature measurement system of vacuum thermal test design, realizes the digital temperature measuring equipment of spacecraft and ground equipment. The system is composed of digital temperature sensor DS18B20 and acquisition device. It can be connected with remote monitoring computer through LAN network to realize remote monitoring of temperature. The hardware structure, communication protocol and software design of the digital temperature measurement system are given in this paper. The vacuum thermal environment test and comparison with the platinum resistance temperature measurement system. The results show that the stability of the system is good and the difference between the measured value and the platinum resistance measurement is within  $0.5^{\circ}\text{C}$ , and the linearity is about  $\pm 0.1\%$  which satisfies the requirement of vacuum thermal test.

**Keywords:** vacuum thermal test; digital temperature measurement; DS18B20; communication protocol

## 0 引言

真空热试验是航天器在发射前必须通过的一项非常重要的地面试验。在航天器真空热试验过程中, 需要测量的重要参数是试验设备和航天器上有关部位的温度<sup>[1]</sup>。

传统的航天器真空热试验温度测量系统, 一般选用热电偶温度测量系统, 穿舱热电偶线缆数量太多, 可能在一定程度上改变航天器内部温度原本分布的情况<sup>[2]</sup>; 其次, 热电偶是一种模拟式温度传感器, 由于连接测量点和信号处理单元间的热偶电缆比较长, 传输路径经环境的温度梯度和噪声对高准确度的测量将产生不利影响。而且热电偶线较细、较长, 在试验准备过程中容易被折断或绝缘皮破损, 导致测点出现断路和绝缘性能不好, 并且热电偶测温系统还存在测量线缆数量多、粘贴及焊接工序复杂、不能重复使用等缺点。

针对真空热试验中热电偶测量系统在航天器以及地面工装测温的局限, 通过基于单总线数字测量方法和技术的研, 研制一套数字温度测量系统。将数字测温传感器技术应用于航天

器以及地面工装的温度测量中, 测量线路布置简单(从真空容器内到真空容器外只需使用 3 根测量导线), 并且测温传感器可重复使用, 解决真空热试验时热电偶传感器一次性利用造成浪费以及在试验准备工作中粘贴、焊接热电偶繁杂等问题, 同时也增加真空热试验温度测量手段的多样性。

## 1 系统总体设计

### 1.1 总体架构

系统的总体硬件连接如图 1 所示, 主要由以下部分组成: 数字温度传感器 DS18B20、分支器、采集设备、交换机、服务器以及监控计算机。

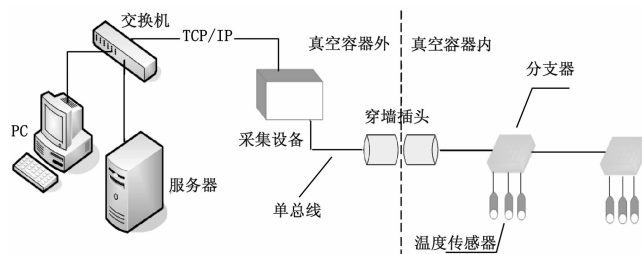


图 1 系统的硬件连接示意图

采集设备接收由数字温度传感器 DS18B20 传送过来的数字信号, 并将其转换为温度数据。所有温度传感器都通过分支

收稿日期: 2017-08-31; 修回日期: 2017-10-18。

基金项目: 北京卫星环境工程研究所自主研发项目。

作者简介: 朱 熙(1985-), 男, 浙江兰溪人, 硕士研究生, 主要从事航天器热试验温度测量与控制方向的研究。

器挂载在单总线上，这样减少了测量引线数量。PC 机对整个测温过程进行监视管理，包括系统参数设置、巡回检测各测温点温度并实时显示温度信息以及对超过上下限的温度报警等。

### 1.2 软硬件组成

采集设备是该系统的核心部分，其主要功能是控制温度传感器采集温度、存储并显示温度数据以及通过 TCP/IP 协议与监视计算机进行通信。其主要由 EMB3680 嵌入式工控板、C8051F020 单片机以及它们的外围电路组成，结构框图如图 2 所示。

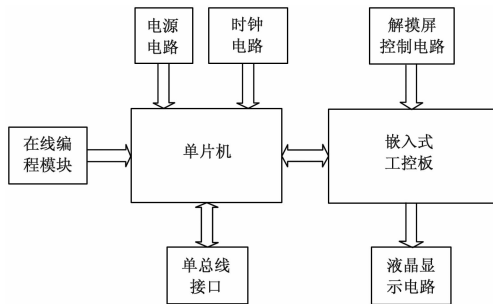


图 2 采集设备结构框图

本系统的软件设计是基于 XPE (Windows XP Embedded) 平台，利用 Visual Basic 语言进行开发的。Windows XP Embedded 是一种嵌入式操作系统，可以以组件化的形式提供 Windows 操作系统的功能。Windows XP Embedded 是基于 Win32 编程模型，可以采用 Visual Studio 等常见的工具开发所需的应用程序，这样嵌入式操作系统与桌面应用程序可无缝集成，有利于缩短研发时间。

上位机软件是运行在嵌入式工控板上的测温系统管理软件，由它负责对所有测温点进行监测和管理，主要包括以下几个方面内容：

- 1) 数据采集：与单片机以及监视计算机进行通信，实现温度数据的采集。
- 2) 数据显示：将所有测温点的温度值显示在面板上。
- 3) 数据存储：将实时温度数据保存在本地及服务器上文本文件，以便监视程序读取。
- 4) 曲线显示：允许用户对实测数据、历史数据以曲线方式进行查看。
- 5) 参数设置：允许用户对系统的测量周期、文件保存路径等参数进行设置。
- 6) 传感器设置：可以读取温度传感器的地址并对其进行编号。

这 6 个方面的内容可以分为 3 个功能模块，分别是数据采集处理模块、数据管理模块以及参数设置模块。数字温度测量系统的管理软件的功能层次结构如图 3 所示。

## 2 系统硬件设计

采集仪器以 EMB3680 嵌入式工控板和 C8051F020 单片机为核心，实现温度数据的采集、存储以及采集仪器与计算机进行通信等功能，并采用液晶显示和触摸屏完成人机交互界面。

### 2.1 嵌入式工控板

系统采用 EMB3680 嵌入式工控板，其装有 XPE 嵌入式操作系统，可以作为温度数据采集的服务器，远程 PC 机可以通过 TCP/IP 协议对其实现访问以及数据共享的功能。采用 7 寸

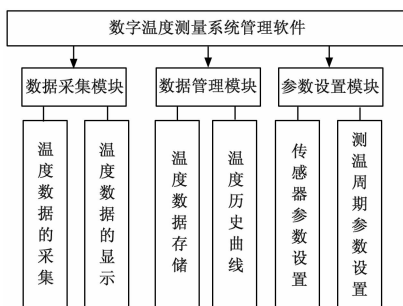


图 3 测温管理软件功能层次结构图

触摸液晶显示器可以对其进行操作，实现人机交互功能。嵌入式工控板与单片机之间采用 RS232 接口。

### 2.2 采集设备

在本系统中采用 Silicon Labs 公司生产的 C8051F020 单片机作为系统的控制管理器。C8051F020 是一款高集成度的单芯片片上系统 (SOC) 的混合信号芯片，具有 100 个引脚封装。本系统采用了 C8051F020 单片机作为控制管理器主要是基于其以下特点：

- 1) 具有 JTAG 接口，易于烧录和修改。通过对 JTAG 接口实现对 Flash、熔丝位和锁定位的编程，可以很容易的进行程序的烧录和修改。
- 2) 上电复位以及可编程的掉电检测。片内具有经过标定的 RC 振荡器；可以通过软件进行选择时钟频率。
- 3) 丰富的 I/O 口：具有 8 个 8 位的 I/O 口线。I/O 口数量越多，可以挂接温度传感器的单总线数量越多，提高了真空热试验时温度测量的效率。
- 4) 具有可编程的串行口 USART：可以很方便的通过 RS232 或 RS485 与上位机进行通信。

由于 C8051F020 具有丰富的片上资源，内部带有 64K 字节的 Flash ROM 数据存储，因此温度数字测量系统的电路设计不用外接数据存储器。同时 C8051F020 内部具有通用同步和异步串行接收器和转发器 (USART)，可以很方便的利用上位机的串口与其通信，也十分适合于 RS485 总线通信。

选择 C8051F020 单片机为控制管理器的另一个原因是它还具有 JTAG 接口，可以方便地在程序中设置断点，进行软件在线调试。在软硬件调试初期，可以节省大量的人力、物力和财力，大大缩短了开发周期。

在本文所述数字温度测量系统中使用系 C8051F020 单片机的 UART0 串行通信接口，对应引脚为 P0.0 和 P0.1，通过 RS232 通信方式与 EMB3680 嵌入式工控板进行通信<sup>[3]</sup>；温度传感器单总线对应引脚为 P1.4；JTGA 编程芯片与 C8051F020 的对应引脚相连；采用 24 MHz 晶振为系统提供了时钟电路，并在电路中加入了去耦电容以提高电路的稳定性。MCU 电路图如图 4 所示。

### 2.3 温度采集模块

本系统的温度采集模块由温度传感器 DS18B20 组成，DS18B20 有 3 个引脚，其中两根是电源线 VDD 和接地线 GND，另外一根用作总线 DQ。其具有两种封装形式：3 脚 TO-92 封装和 8 脚 SOIC 封装。由于 TO-92 封装形式的 DS18B20 体积更小，所以本系统采用 TO-92 封装形式的温度传感器。

DS18B20 输入和输出都是数字信号且与 TTL 电平兼容，因

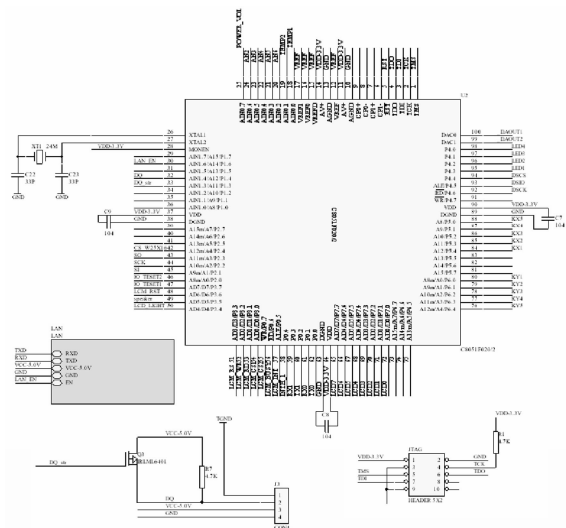


图 4 MCU 应用电路

此可以与单片机接口直接进行连接。本系统采用的温度采集模块如图 5 所示。图中, 单片机的 PA0 口连接单总线, 单总线上可以挂接多个 DS18B20, 在单总线上采用一只 4.7 kΩ 的上拉电阻, 使得单总线在空闲时都处于高电平状态。为了给 DS18B20 提供足够的工作电流, 系统采用外部供电方式。该电路图中只画出了一路测温通道, 在实际应用中, 可根据航天器上有关部位温度测量点的分布情况来决定测量通道的数量, 数据总线可从单片机的各 I/O 口引出, 构成星型网状的测温系统。

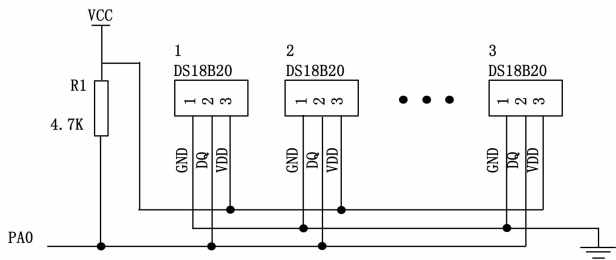


图 5 温度采集模块电路图

### 2.4 液晶显示和触摸屏模块

数字温度测量系统的人际交互界面主要由 LCD (液晶体显示) 以及触摸屏完成。本文选用的 LCD 控制器是日本 SEIKO EPSON 公司生产的 SED1335 系列芯片。SED1335 系列芯片的指令功能以及与 CPU 接口较为简单并且便于控制, 其驱动能力可达 640×256 点阵。液晶显示电路如图 6 所示。

触摸屏控制芯片选用的是 ADS7843, 该芯片主要包括两项功能: 第一, 是完成电路中电压的切换; 第二, 是对接触点处的电压值进行采集。ADS7843 具有 12 位 A/D 转换并且其模拟开关的导电电阻值较低, 非常容易实现电路中电压的切换, 并且能进行快速模数转换。ADS7843 的供电电压较低, 为 2.7 V ~ 5 V, 在实际应用中很容易实现。

## 3 采集及上位软件

### 3.1 采集软件设计

采集软件的主要功能是实现单片机与温度传感器之间的通信。采集软件采用模块化的方法进行编写, 主要由主程序、温度采集指令接收及发送子程序、串口通信子程序等组成。开始

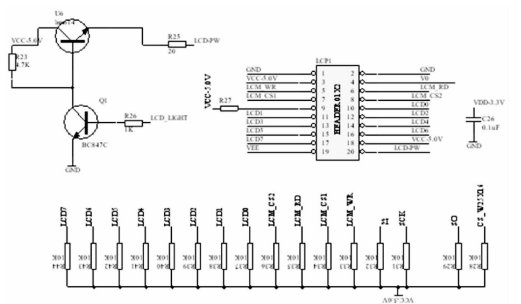


图 6 液晶显示电路

温度采集时, 单片机首先通过单总线向 DS18B20 发出复位信号, DS18B20 接收到复位信号后向单片机返回复位成功信号; 接着单片机向 DS18B20 发送启动温度转换命令, 并延时 800 ms, 等待 DS18B20 温度转化完成; 最后单片机向 DS18B20 发送读取寄存器数据指令, 完成整个温度数据采集过程。

在此需要值得注意的是, 每个 DS18B20 的 ROM 中都具有唯一的 64 位序列号, 采集软件通过匹配与 64 位序列号相同的 DS18B20, 匹配成功后, 读取该传感器的温度。接着匹配下一个 DS18B20, 直到所有传感器的温度都读取完成。在温度采集开始之前, 应先读出 ROM 中数字温度传感器 DS18B20 的 64 位序列号。每一个 DS18B20 的 64 位序列号都是不同的, 如果在该温度测量系统中使用的 DS18B20 数量大于或等于 2 时, 那么在温度采集之前需要编写一个读取 DS18B20 中 64 位序列号的软件, 并将该序列号作为在测温系统中的唯一编号。需要注意的是, 在读取 DS18B20 的 64 位序列号时, 总线上一次只能接一只 DS18B20。这项工作可以在真空热试验之前完成。

在软件编写过程中, 若程序运行不正常, 则可以利用虚拟示波器观察 DS18B20 工作时的时序, 通过对时序的分析对程序进行修改。示波器显示的时序图如图 7 所示。DS18B20 的数据读写包括读“0”、读“1”、写“0”、写“1”4 种类型, 图 6 中写时序是向 DS18B20 写入“11001100”(从低位写入), 读时序是从 DS18B20 读出“11011100”(从低位读出)。

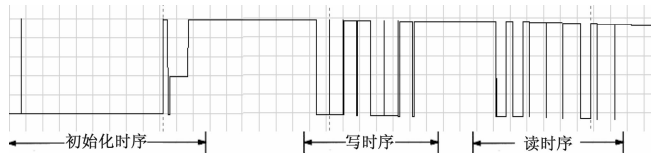


图 7 DS18B20 时序图

### 3.2 软件主界面

本系统软件主界面如图 8 所示, 分别由测量界面、探头设置及使用说明 3 个模块组成。其中测量界面模块的主要功能有: 1) 对已启用的温度传感器进行采样; 2) 显示所有测点的温度值; 3) 保存历史温度数据。点击“测量界面”, 软件界面切换至如图 9 所示, 此时只启用前 7 路温度传感器。该界面显示 50 个测量点的温度值, 如果某一测量点未启用, 则显示“空缺”。当点击测量界面上某一测点的温度值文本框, 将显示该点温度变化的历史曲线。

## 4 系统测试与分析

### 4.1 比对测试方法

为了验证该系统测量温度的准确性以及线性度指标, 对数字温度测量系统进行了测试。测试在北京卫星环境工程研究所的 KM6F 空间环境模拟器中进行, 选用的试件为一个直径为



图 8 测试软件主界面

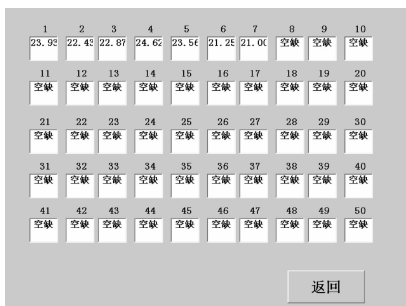


图 9 测量界面显示图

100 mm，高 100 mm 的铜圆柱体，在圆柱体的中间开了一个直径为 40 mm，高 40 mm 的孔。该试件的热惯性比较大，内腔可以形成温度比较均匀的温度场，在内腔内放置 1 只铂电阻和 2 只 DS18B20 温度传感器后灌入真空导热硅脂，可以认为在温度传感器处的温度是一致的。

当热沉通液氮后，试件从常温环境下开始降温；到达一定温度后，热沉停止通液氮，试件从低温回到常温。

### 4.2 误差分析

由于试验的数据量很大，本文选取了其中部分温度数据进行分析，选取从常温开始至 -40 ℃ 温度段的试验数据，各温度传感器所测得的温度及误差如表 1 所示。

表 1 温度数据及误差

Pt100/ (℃)	1号 DS18B20/ (℃)	误差 1/ (℃)	2号 DS18B20/ (℃)	误差 2/ (℃)
-20.37	-20.063	0.307	-20.125	0.245
-10.572	-10.25	0.322	-10.188	0.384
-0.281	0	0.281	0.125	0.406
10.104	10.375	0.271	10.363	0.259
21.372	21.563	0.191	21.75	0.378
40.534	40.75	0.216	40.875	0.341
61.381	61.563	0.182	61.75	0.369
81.212	81.5	0.288	81.588	0.376

注：绝对误差（简称误差）= 测量值 - 真值

在本测试系统中，铂电阻已经过精确标定，其测量误差小于 ±0.1 ℃，所以将铂电阻测温系统所测得的温度值视为真值，DS18B20 所测得的温度值为测量值。其中误差 1 为同一时刻 1 号 DS18B20 温度与 PT100 温度的差值，误差 2 为同一时刻 2 号 DS18B20 温度与 PT100 温度的差值。从表 1 中可以看出，数字温度测量系统与铂电阻测温系统的差值在 0.5 ℃ 以内。误差 1 和误差 2 都为正值，这是由于数字温度传感器 DS18B20 的热惯性比 PT100 的热惯性大所造成。

### 4.3 线性度分析

DS18B20 的测量范围为 -55 ℃ ~ +125 ℃，一般规定<sup>[7]</sup>，正常测量值在满量程的 50% ~ 70%。为了保证 DS18B20 的测量准确度，取其在 -10 ℃ ~ +80 ℃ 范围内的温度数据，发现校准曲线和拟合曲线的最大偏差出现在 -10 ℃ ~ 0 ℃ 温度区间内，如图 10 所示。

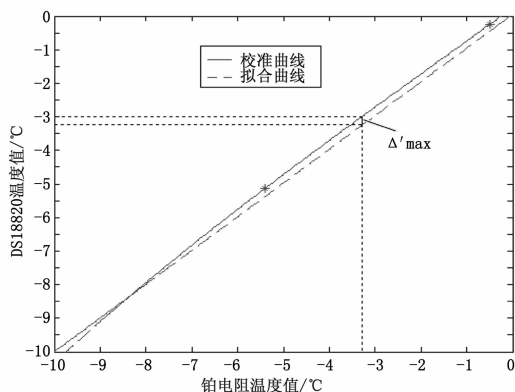


图 10 数字温度测量系统的线性度曲线

由线性度计算公式<sup>[8]</sup>可得：

$$\delta_f = \pm \frac{\Delta'_{max}}{\text{仪表量程}} \times 100 \frac{0}{0} = \pm \frac{0.25}{125 - (-55)} \times 100 \frac{0}{0} = \pm 0.139\%$$

从计算结果可以看出，数字温度测量系统具有非常好的线性度。

### 5 结束语

本文介绍了一种可用于真空热试验的数字温度测量系统，该测量系统的温度传感器引线较粗，不易被损坏、折断，温度传感器可以重复使用，并且该系统具有结构简单，操作方便以及便于携带的特点。并且该系统采用的传感器为单总线数字温度传感器，所有温度传感器只需挂接在一条测量电缆上即可，而且数字信号的抗干扰能力强，比较适合用于对测量电缆数量有限以及测试环境比较恶劣的场合。通过符系统的测试及分析表明，该系统在真空热环境条件下测量误差优于 ±0.5 ℃，线性度大约为 ±0.1%。该数字温度测量系统不仅适合用于航天器地面工装设备的测温，还适用于真空热试验部组件测温以及室外航天器包装箱等设备测温，具有较广的应用前景。

### 参考文献：

- [1] 郭 赣. 真空热试验的温度测量系统 [J]. 航天器环境工程, 2009, 26 (1): 33-36.
- [2] 闫 格, 杨建斌, 刘 强, 等. 热真空环模试验中温度参数的探讨 [J]. 真空与低温, 2011, 17 (1): 32-36.
- [3] 唐 琳, 方 方, 罗正华. 基于 ARM+交换芯片的协议转换器的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (2): 195-201
- [4] 刘 彬. 基于单总线数字温度传感器的单总线多点测温技术 [J]. 化工自动化及仪表, 2015, 42 (12): 1308-1310
- [5] 汤锦杰, 粟 灿, 王 迪, 等. 基于 DS18B20 的数字式温度采集报警系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33 (3): 99-102.
- [6] 余 瑾, 姚 燕. 基于 DS18B20 测温的单片机温度控制系统 [J]. 微计算机信息, 2009, 25 (8): 105-106.
- [7] 郭剑花. 过程测量及仪表 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [8] 单成祥. 传感器的理论与设计基础及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.