

# 高精度轻质无线测温系统研制与实现

余 群, 王 骞, 王思峰, 王领华, 吕建伟

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘要:** 作为航天器研制与试验当中的重要组成部分, 高精度、高可靠的温度采集与监测, 对航天器的设计与改进都具有重要的指导作用; 为了满足对航天器内部环境和设备温度采集和测试要求, 摒弃传统传感器有线布线方式, 优化航天器整器装配周期, 降低测温系统重量, 提高系统可靠性, 分析并设计了高精度轻质无线温度测量系统; 该系统能够采集各测点的温度信号, 再对信号进行运算处理后, 通过无线网络传送给上位机进行数据分析和温度实时显示; 最后对系统性能指标及功能进行验证, 证明了测温系统具有轻质、长待机时间、高精度、远传输距离和高可靠性等特点, 满足单路温度采集系统重量低于 2 g, 待机时间不少于 240 h 的任务指标要求, 且可对航天器内部环境和设备温度进行实时监测与分析处理。

**关键词:** 轻质; 无线; 测温; ZigBee; LabView

## Development and Implementation of High Precision Light Wireless Temperature Measurement System

YU Qun, WANG Qian, WANG Sifeng, WANG Linghua, LYU Jianwei

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** As an important part in the development and test of spacecraft, high-precision and high-reliability temperature acquisition and monitoring plays an important role in guiding the design and improvement of spacecraft. In order to meet the requirements for temperature collection and testing of the internal environment and equipment in the spacecraft, abandon traditional sensor wired wiring methods, optimize the assembly cycle of whole device, reduce the weight of the temperature measurement system, and improve the reliability of the system, a precision light-weight wireless temperature measurement system is analyzed and designed. The system can collect the temperature signal of each measuring point, and then transmit the signal to the upper computer through wireless network for data analysis and real-time temperature display after the arithmetic processing of the signal. After that, the performance index and function of the system are verified, which proves that the temperature measurement system has the characteristics of light weight, long standby time, high precision, long transmission distance and high reliability, which can meet the requirements that the weight of the single-channel temperature acquisition system is less than 2 g and the standby time is no less than 240 hours, it can monitor and analyze the internal environment and equipment temperature of the spacecraft in real time.

**Keywords:** light-weight; wireless; temperature measurement; ZigBee; LabVIEW

### 0 引言

温度作为航天器研制与试验当中重要参数, 对航天器的设计与改进都具有重要的指导作用<sup>[1-2]</sup>。当前航天运载器、航天器在飞行过程需要进行大量的温度数据采集, 以掌握其工作状态, 保障航天器上设备产品质量安全。由于航天器内部环境复杂、空间紧凑, 温度范围差异较大, 且存在多种电磁干扰, 因此对测温系统的测温精度、通道数量和可靠性提出了更高的要求<sup>[3-4]</sup>。且随着科学和经济的发展, 对航天器的重量、研制周期、维修性等也提出了更高要求, 使得温度测量向自动化、智能化方向进展<sup>[5]</sup>。

现有航天器上的温度采集仍然采用传统有线方式, 要想满足航天器上各设备、结构等温度采集速度、准确度以及控温精度, 必须要布置足够多数量的测温传感器。但过

多的测温传感器必然会导致航天器内部电缆数量的增加, 而布线数目的增加必然会使航天器面临多个方面问题, 一方面, 温度采集电缆多, 增加了航天器系统自身重量, 有效载重量减小。另一方面, 在有限的空间内, 在保证安全、稳定的条件下, 布线的数目是有限的, 有限的测量通道数将无法满足不同精度控温需求。三是布线复杂, 装配困难, 影响系统可靠性, 工作耗时长。且温度传感器为耗材, 使用次数和使用期限都有限制, 测试成本高<sup>[6-8]</sup>。针对以上有线测温方式存在的问题, 可采用无线测温方式替代。无线测量凭借其测点数目多、无线信息传输等优势, 受到越来越多的关注<sup>[9-12]</sup>。无线温度测量在民用产品上已有较多的应用<sup>[13-18]</sup>, 但由于其采用的多是半导体传感器, 仅适应于空气环境温度的测量, 且响应时间长, 无法满足航天器上应用需求。

收稿日期: 2022-09-06; 修回日期: 2022-09-30。

作者简介: 余 群(1984-), 女, 江西临川人, 博士, 高级工程师, 主要从事航天器热控设计、航天器测试等方向的研究。

引用格式: 余 群, 王 骞, 王思峰, 等. 高精度轻质无线测温系统研制与实现[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 49-55.

针对航天器舱内有限空间下有线测温方法存在的问题,设计采用无线测温的方式代替。为了满足对航天器内部设备温度采集和测试要求,分析并设计了高精度轻质无线测温系统,测温系统的温度采集器体积小、准确度高,通过 ZigBee 等无线信号传输的方式可将采集的温度数据传输到上位机保存、处理。

## 1 方案设计

### 1.1 设计目标

根据航天器承担任务的重要性,项目总体对温度测量系统重量、测温精度、可靠性、待机时间等提出了更高要求,要求每路温度采集系统的重量低于 2 g,且待机时间不少于 240 h。围绕温度测量系统重量行了调查研究,目前现有航天器上应用的温度测量系统均为有线温度测量系统,每路温度传感器的重量均超过 30 g,指标不满足总体要求,统计结果如表 1 所示。

表 1 现有航天器上温度测量系统重量指标

产品代号	温度敏感元件重量/g	接插件重量/g	采集器重量/g	电缆重量/g	总重量/g	测量通道数	每路重量/g
XX-1	66	324	1 706	1 538	3 634	79	46
XX-2	78	376	1 203	1 657	4 350	87	50
XX-4	103	404	1 358	1 865	4 200	120	35
XX-5	129	400	1 478	2 007	4 800	160	30

注:每路重量是包括温度敏感元件、电缆、接插件和采集器组成,采集器多路共用时质量均摊。

上述温度测量系统为有线方案,民品上有些无线的应用,但也存在一定局限性。调查情况如表 2 所示。

表 2 现有温度测量系统测量方式调查表

产品代号	重量指标/g	待机时间/s	响应时间/s	表面温度测量	测量方式
XX-1	46	/	5	是	有线
XX-2	50	/	3	是	有线
XX-4	35	/	5	是	有线
XX-5	30	/	2	是	有线
民品 1	5	半年(非连续工作)	10	否	无线
民品 2	7	半年(非连续工作)	8	否	无线

上述调查显示,有线测温系统无法满足航天器对温度测量系统提出的更高重量指标要求。因此,为满足对温度测量系统重量及其他指标要求,需研制新型轻质无线测量系统,该系统能够采集各测点的温度信号,在对信号进行运算处理后,通过无线网络发送给航天器数据采集系统进行数据采集,用于后续判读。

### 1.2 无线传输网络总体方案设计

无线通信技术是指在不依赖任何有线电缆的前提下,利用电磁波进行信号传输。根据传输距离的长短,可以将无线通信技术分为短距离无线通信技术和远距离无线通信技术<sup>[19]</sup>。由于本无线测温系统计划在航天器上使用,因此

主要适用短距离无线通信模块。目前市场较为流行的短距离无线通信模块主要有 Wi-Fi 模块、蓝牙 (Bluetooth) 模块和 ZigBee 模块等<sup>[20-23]</sup>。结合任务需求和总体目标,对分别使用 Wi-Fi 模块、蓝牙 (Bluetooth) 模块和 ZigBee 模块设计的无线测温系统进行了调研讨论,利用亲和图对 3 种无线测温系统方案特点进行了归纳梳理,结果如图 1 所示。

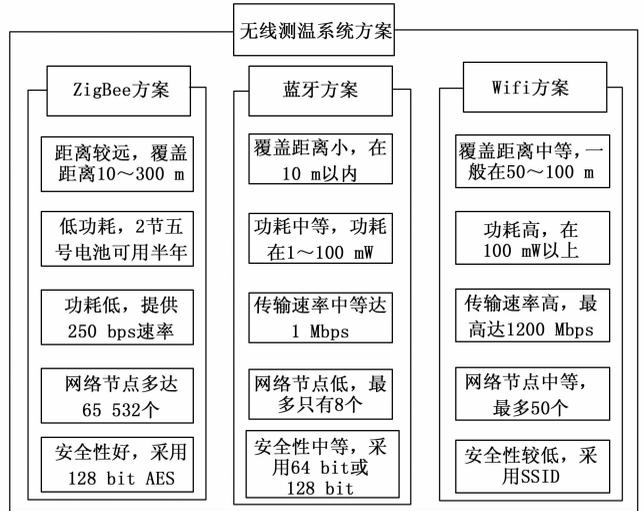


图 1 无线测温系统方案亲和图

对以上 3 种方案特点进行对比分析,如表 3 所示。

表 3 无线通信技术特点对比

项目	ZigBee 方案	蓝牙方案	Wifi 方案
覆盖距离/m	10 300	10	50
功耗/mW	1~3	1~100	100
传输速率	250 kbps	1 Mbps	1~1 200 Mbps
网络节点数	65 532	8	50
安全性	128 bit AES	64 bit, 128 bit	SSID

结合以上的分析,考虑总体任务要求,按如下权重比例对上面的 3 种案进行了评估分析,评估系列列表如表 4 所示。

表 4 评估系列表

项目	评分				
	5 分	4 分	3 分	2 分	1 分
覆盖距离	最远	较远	中等	较低	近
功耗	低	较低	中等	较高	高
传输速率	高	较高	中等	较低	低
网络节点数	高	较高	中等	较低	低
安全性	高	较高	中等	较低	低
分类图标	★	■	◆	●	▲

评估结果如表 5 所示。

根据评估分析方法的评估结果,综合考虑覆盖距离、功耗、传输速率、网络节点数、安全性等指标,ZigBee 方

案具有功耗更低、价廉、稳定性好、可靠性更高等优势, 方案最优。因此本文利用 ZigBee 技术来实现无线通信功能。

表 5 评估结论表

项目	权重	ZigBee	蓝牙	Wifi
覆盖距离	0.9	★	▲	■
功耗	1	★	■	●
传输速率	0.5	▲	●	★
网络节点数	0.8	★	▲	◆
安全性	0.7	★	★	■
总计		17.5	10.2	12.4

基于减小设备体积, 减轻设备重量、降低功耗、提高可靠性等设计原则, 本文完成了基于 ZigBee 技术的无线测温系统硬件和软件详细设计。下面将从硬件和软件两方面详细介绍无线测温系统设计方案。

## 2 系统硬件设计

ZigBee 无线温度采集方案硬件主要由温度传感器和 ZigBee 系统 2 大部分组成。无线测温系统硬件组成如图 2 所示。

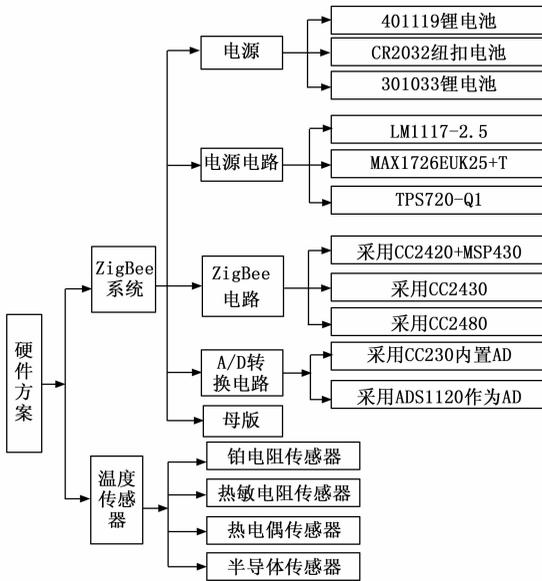


图 2 无线测温系统硬件组成示意图

### 2.1 温度传感器模块设计方案

目前温度传感器的应用几乎遍布于所有领域。温度传感器不断的推陈出新, 常见的有电偶传感器、电阻式温度传感器、半导体式温度传感器等。已有型号产品上常用的温度传感器有铂电阻、热敏电阻、热电偶、半导体传感器<sup>[24]</sup>, 这 4 种传感器, 各有有缺点。表 6 从测温精度、测量电路复杂度、抗干扰能力以及测温范围等方面开展了对比分析。

根据任务需求的重要度, 分别按 1—5 分 (1 分——不影响功能实现的需求; 3 分——比较重要的影响功能实现的需求; 5 分——基本的、重要的需求。) 进行重要性分析评

估。评估分析显示, 测量电路复杂度低, 抗干扰能力强的热敏电阻传感器最优, 该传感器电路简单可靠, 满足系统研制要求。

表 6 温度传感器硬件选择研究

序号	温度传感器	精度	测量电路复杂度	抗干扰能力	测温范围
1	铂电阻传感器	最高, 可优于 0.1 °C	复杂, 需要恒流源驱动, 需要高精度放大器	差, 小信号易受干扰	中等, 可测 (-100~1 000)°C
2	热敏电阻传感器	高, 可优于 0.5 °C	简单, 输出信号大, 可直接数据采集	好, 输出信号大抗干扰能力强	中等, 可测 (-100~1 000)°C
3	热电偶传感器	低, 可达 1 °C	复杂, 输出信号小, 需要高倍放大	较差, 输出信号弱, 易受干扰	最宽, 可测 (-100~2 000)°C
4	半导体传感器	中等, 一般可达到 1 °C 以上	较简单, 有部分是数字接口芯片可直接读取温度值	好, 数字接口抗干扰能力强	最窄, 一般为 (-40~85)°C

### 2.2 ZigBee 系统方案

ZigBee 系统硬件方案设计时, 遵循继承、通用的原则, 对于主板, 选用现有产品上的组件。下面分别对电源、电源电路和 ZigBee 电路的不同元件开展了选择分析。

表 7 为电源电路选择调查情况统计, 经过重要性打分及评估分析, 电压精度更高、空载电流更小且可关断省电的 MAX1726EUK25+T 最优, 可作为电源电路方案, 虽然其输出电流较低, 但满足任务需求。表 8 为 ZigBee 电路方案选择研究方案。

表 7 电源电路方案选择研究

序号	电源电路方案	电压精度/%	空载电流 (典型值)	最大输出电流	是否可关断
1	LM1117-2.5	2	12 mA	1 A	否
2	MAX1726EUK25+T	1.5	2 μA	80 mA	是
3	TPS720-Q1	2	30 μA	350 mA	是

表 8 ZigBee 电路方案选择研究

序号	电路方案	开发成本	小型化	无线性能	开发难易
1	CC2420+MSP430 方案	高, 软件复杂, 需要两套, 费用增加	低, 需要两块芯片, 体积难以减小	高, 能发挥最佳无线性能	高, 软件复杂, 需要两套软件
2	CC2430 方案	低, 集成度高, 一套软件开发, 技术成熟	高, 单芯片方案, 高度集成体积小	低, 集成度高, 单片机内核对无线性能有一定影响	低, 单芯片方案, 软件集成度高
3	CC2480 方案	中等, 介于两者之间	中等, 体积介于上两者之间	性能与 CC2430 方案类似	中等, 介于上两者之间

经过对比分析, CC2430 方案开发成本低、体积小、容易开发, 只需要配合少量的外围电路和元件就能使用。且

CC2430 芯片电压范围比较大 (2.0~3.6 V)，功耗低，在待机模式下耗电量小于 0.6 A/h，而在休眠模式下则小于 0.9 A/h。其内优丰富的集成元件和强大的开发工具，可满足系统功能需求。因此虽然其无线性能不是最优的，但其仍是 ZigBee 电路方案首选。

由于 ZigBee 方案低功耗特性，选用锂电池或纽扣电池来为模块供电，就可以满足无线测温系统功耗要求。下面从电池电压、电池容量以及电池重量等因素对常用的 401119 锂电池、CR2032 纽扣电池和 301033 锂电池展开了选用分析，详见表 9。

表 9 电源方案选择研究

序号	电源	电池电压/V	电池容量/mAh	电池重量/g
1	401119 锂电池	3.7	100	4
2	CR2032 纽扣电池	3	210	3.1
3	301033 锂电池	3.7	70	2.5

通过对比分析，虽然 CR2032 纽扣电池电压较另两种电池电压稍低，但其电池容量更大，重量更轻，因此综合考虑，CR2032 纽扣电池最优，因此电源方案选用 CR2032 纽扣电池。

热敏电阻传感器通过连接器连接到采集板卡的输入端，将温度模拟信号转换为电流，采集板卡接收到热敏电阻温度电流后，进行滤波、分压和放大处理，经模拟开关选择进入 A/D 转换器进行模数转换。其中 A/D 转换器选择如表 10 所示。

表 10 热敏电阻 A/D 转换硬件选择研究

序号	A/D 转换器方案	精度	测量路数	电路复杂度
1	采用 CC2430 内置 A/D	较高, A/D 转换器为 12 位	多, 可测量 8 路温度信号	简单, 不需要增加硬件
2	采用 ADS1120 作为 A/D 转换器件	高, A/D 转换器为 12 位	较多, 可测量 4 路温度信号	复杂, 需要增加 A/D 转换电路

其中采用 CC2430 内置 A/D 的热敏电阻传感器 A/D 转换器测量路数多、电路简单，满足项目总体任务要求。

### 3 系统软件设计

无线测温系统的软件设计主要包含两部分，温度采集终端上的嵌入式系统软件和设备管理软件平台上的应用软件，其中温度采集终端上的嵌入式系统软件主要负责温度的采集、报警检测和用户上传的功能；设备管理软件平台上的应用软件主要负责对温度采集终端进行出厂初始化设置、用户自定义温度采集终端的系统工作参数（例如开机时间、关机时间和温度测量间隔），以及获取温度采集终端采集的温度进行可视化的操作。软件设计组成如图 3 所示。

#### 3.1 下位机软件设计

下位机软件设计是采用 C 程序设计语言开发。C 程序设计语言具有十分丰富的基础功能函数库、编译效率高、

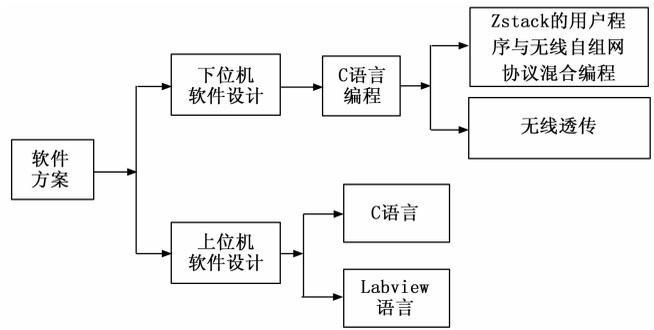


图 3 软件组成示意图

处理速度快，可移植性很好，且更具有模块化的结构，可读性更高，代码更工整，很好的支持模块化的程序设计，具有更好的扩展性，容易进行更改。就开发周期、灵活度以及可靠性等特征，重点开展了 2 种不同 C 语言编程方案的比较，比较结果如表 11 所示，无线透传虽灵活度低，但其具有高可靠性且开发周期短的巨大优势，因此可作为下位机软件设计方案。

表 11 两种 C 语言编程方案特点对比分析

序号	C 语言编程方案	开发周期	灵活度	可靠性
1	Zstack 的用户程序与无线自组网协议混合编程	20 小时	高, 编程复杂, 可实现硬件的全部功能	较低, 软件测试程度不够容易出现 bug
2	无线透传	2 小时	低, 软件协议已封装好, 可实现的功能简单	高, 经多次长期测试及改进, 软件稳健性强

具体的下位机软件编写流程如下。

首先，选择一款具有无线透传功能的软件，该软件已经过长时间测量和使用功能完善，软件性能稳定，因此只要在此基础上开展少量适应性修改后就能满足温度采集、存储功能，可放心使用；之后，使用 cc-debugger 仿真器完成该下位机软件烧写；最后利用厂家提供的软件开展完成相关功能测试，至此，下位机软件编写完成。下位机软件具有多路模拟量采集功能，可实现自组网，后对该软件的串口读写功能进行了测试，其串口通信速率实测值为 115 200 bps，不低于要求的 57 600 bps，满足项目总体任务要求。

#### 3.2 上位机软件设计

上位机软件设计和下位机软件稍有不同，下位机软件设计是基于 C 语言编制完成，而上位机软件则是对 C 语言编程方案和 Labview 语言编程方案进行了对比分析，比较结果如表 12 所示。LabView 为虚拟仪器编程专用软件，图形化编程，具有丰富的软硬件接口子程序，可进行方便的断口调试，且其开发周期较短，可作为此次无线测温系统研制中上位机软件设计编程首选方案。

上位机软件采用 Labview 编程语言进行程序开发，首先完成软件流程图的设计编写，在此基础上，依次完成数据接收模块、温度修正模块、温度显示模块的设计编写，

且完成各模块的组装, 生成可执行程序, 最后完成了上位机软件的功能测试。该上位机软件具有热敏电阻温度值修正功能, 能直接显示各类的温度数据, 并能存储及回放, 其测试软件界面如图 4 所示。

表 12 上位机软件编程方案选择调查表

序号	方案	专业性	开发周期	调试便利性
1	C 语言	通用	30 小时	通用软件, 功能强大, 对软件使用者要求高
2	Labview 语言	专业	5 小时	Labview 为虚拟仪器编程专用软件, 采用直观的图形化编程方式, 编程过程简单方便, 是当前虚拟仪器的主流开发, 具有丰富的软硬件接口子程序, 可进行方便的断点调试



图 4 上位机软件界面

根据以上一系列对比分析选择后, 新型高精度轻质无线温度传感器的最佳方案, 如图 5 所示。

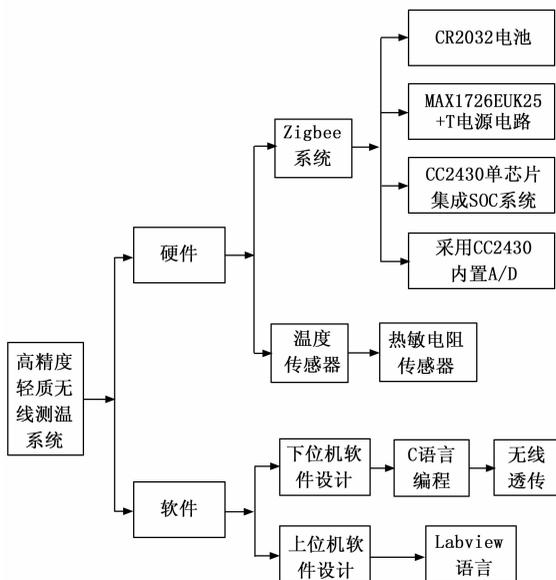


图 5 新型高精度轻质无线温度传感器最佳方案

## 4 测试与分析

### 4.1 ZigBee 无线传感器电路板实现

ZigBee 无线传感器电路板的设计在遵循电子产品通用设计流程图 (见图 6) 的基础上, 针对无线射频电路板的设计特点, 按以下设计流程, 对每一步进行了实施。

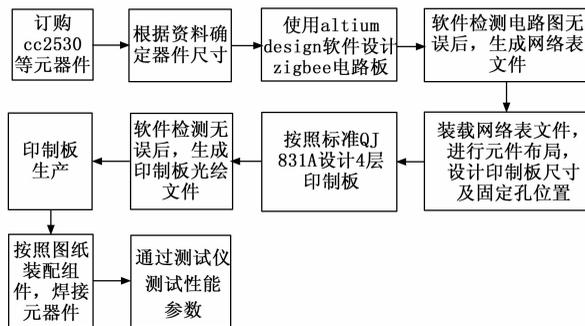


图 6 ZigBee 无线传感器电路板实现流程图

对上述流程图中设计的 4 层印制板部分进行详细说明, 将网络表文件装载后, 对 5 种 24 只元器件进行印制板布局、绘制印制板边框, 确定印制板尺寸为 20 mm×40 mm; 然后设置印制板参数、各种焊盘的尺寸和印制线宽度; 最后进行印制板布线, 布线过程中需经常进行布线错误排查; 完成布线并检测无误后, 完成印制板设计, 具体印制板设计如图 7 所示。

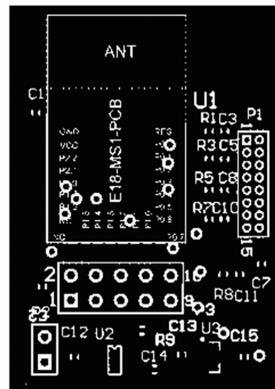


图 7 无线传感器印制板图

之后, 完成了无线温度传感器内导线焊接, 印制板电源安装, 整器装配。

最后使用测试仪器, 完成了 ZigBee 无线测温系统温度采集装置性能测试, 结果如表 13 所示。

表 13 无线测温系统温度采集装置性能测试结果

序号	指标	实测值	指标满足情况
1	CPU 主频: 32 MHz	32 MHz	满足
2	印制板尺寸: 20 mm×40 mm	20 mm×40 mm	满足

### 4.2 温度传感器网络联试

热敏电阻温度传感器存在很大的非线性, 需要根据温度使用范围, 通过软件计算出最优的温度补偿点, 因此装

配前需完成热敏电阻温度传感器温度参数拟合，装配完成后，把热敏电阻温度传感器温度数据拟合公式导入软件，用于后期温度数值补偿。

按照任务总体要求及航天系统设备联试的统一技术要求，完成了对无线温度传感器的整机装配和信号联通性的测试，具体流程如图 8 所示。

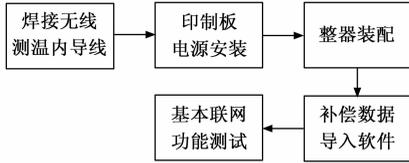


图 8 无线测温系统整机装配和信号联通性测试流程

软件中导入了温度补偿公式，无线测温系统温度采集装置可实现自组网功能，并完成无线网络下温度数据采集，且采集到的温度数据是经过补偿修正后的准确的温度数据。

### 4.3 无线测温系统温度采集装置性能测试

按照项目总体及航天系统设备测试的统一技术要求，完成了对已加工的多个无线测温系统重量、测温精度、待机时间以及通信距离等基本技术指标及电气性能的测试。首先完成了测量系统重量测定，得到了单路温度传感器重量（如表 14 所示），表 15 给出了无线测量系统待机时间测量统计结果。

表 14 无线测温系统重量测量统计表

序号	无线测量系统重量/g	路数	单路重量/g
1	12.1	8	1.512
2	11.8		1.475
3	12.0		1.500
4	12.3		1.537
5	12.6		1.575
6	12.2		1.525
7	12.2		1.525
8	12.0		1.500
9	12.1		1.512
10	11.8		1.475

表 15 无线测温系统待机时间测量统计表

序号	无线测温系统待机时间/h
1	421
2	507
3	450
4	469
5	486
6	524
7	583
8	452
9	467
10	532

其中通信距离测试结果如图 9 所示，对已生产的 10 块无线测温系统，其通信距离都大于 100 m。且测温精度测试显示，在 0~70 °C 内测量的温度数据显示，测温精度优于 0.6 °C；表 14 显示单路温度传感器重量约为 1.5 g，表 15 显示整体无线测温系统待机时间大于 300 h，满足航天器测温精度高、重量轻等要求。

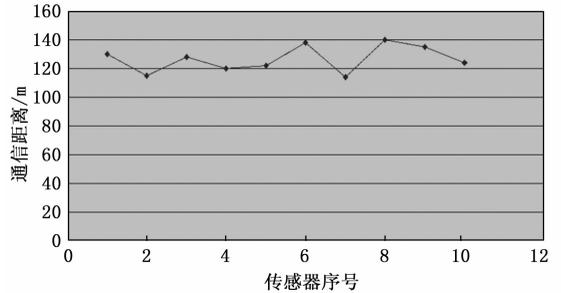


图 9 无线测温系统通信距离

## 5 结束语

针对当前航天运载器、航天器上传统有线温度数据采集系统重量大，布线复杂，影响系统可靠性等特点，设计并研制了可满足航天应用需求的新型轻质无线测温系统，该系统具有维护方便、安装方便、测量精准等优点。本文对新型轻质无线测温系统方案选择，硬件及软件设计进行了详细描述。经实际测试后发现，本系统单路质量小于 2 g，测温精度优于 0.6 °C，待机时间长于 300 h，极大的满足了航天器中减重、测温精度要求，应用前景广阔。

不过目前轻质无线测温系统还仅是处在试验室测试阶段，距离后续的飞行应用还需开展较多飞行测试试验验证。通过技术的不断发展和完善，其将更好地为复杂航天器内各设备温度测量和实时控制提供服务。

### 参考文献:

- [1] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2008.
- [2] McCLINTON C R, REUBUSH D E, SITZ J, et al. Hyper-X Program Status [R]. AIAA Paper 2001-1910, 2001.
- [3] 丁小恒. 高超声速飞行试验热流密度测量方法与装置研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [4] 霍明瑞. 多通道高精度温度测量装置的研究与设计 [D]. 太原: 中北大学, 2019.
- [5] 高伟, 吴静文, 谷山林, 等. 一种航空用大尺寸空间设备无线测温技术的研究 [J]. 计量与测试技术, 2021, 48 (11): 26-29.
- [6] 郭赣. 真空热试验温度测量系统 [J]. 航天器环境工程, 2009, 26 (1): 33-36.
- [7] 孙兴华, 苏新明, 陶涛. 真空热试验热电偶测温参考点分析改进 [J]. 航天器环境工程, 2012, 29 (5): 522-526.
- [8] 朱熙, 韩放, 申彬, 等. 真空热试验温度参考点热响应测试系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26

- (5): 5-8.
- [9] 李运正. 无线测温技术应用研究 [J]. 数字技术与应用, 2017 (1): 113-114.
- [10] 袁洋. 电力设备无线测温系统的应用 [J]. 机电信息, 2020 (36): 66-67.
- [11] 王璋. 航空发动机的无线自供能测量技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [12] 刘晓哈. 飞机制造过程中无线测温技术的探讨 [J]. 计量与测试技术, 2019, 46 (4): 80-84.
- [13] 许广文, 高立峰. 基于 CC2530 的无线温度采集装置的研究 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2020 (3): 114-117.
- [14] 胡国才. 基于蓝牙技术的电磁炉无线测温系统的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [15] 刘慧瑾, 张大鹏. 基于物联网无线测温系统在电厂的应用和研究 [J]. 上海节能, 2022 (5): 590-595.
- [16] 赵宏建. 极低功耗气体监测无线传感器节点 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [17] 张庆平, 高博, 李学锋, 等. 大电流配网设备用无源温度传感器设计与应用 [J]. 电气技术与经济, 2022 (2): 29-33.
- [18] 涂兵, 肖洪祥, 王笑宇. 无线测温在电子产品中的应用研究 [J]. 家电科技, 2008, 13: 60-61.
- [19] 袁伟. 无线通信技术在现代温室中的应用综述 [J]. 中国新通信, 2018 (1): 229.
- [20] 何尚平. 基于蓝牙模块的 ZIGBEE 协议在无线环境监测模拟系统的应用与实现 [J]. 沈阳工程学院学报 (自然科学版), 2010, 6 (4): 369-371.
- [21] 季雨枫. 基于 SIP 协议的智能家居网关的研究与实现 [D]. 福州: 福建工程学院, 2018.
- [22] TOULSON R, WILMSHURST T. Wireless communication-bluetooth and Zigbee [J]. Fast and Effective Embedded Systems Design, 2017: 257-290.
- [23] 姜仲, 刘丹. ZigBee 技术与实训教程——基于 CC2530 的无线传感网技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [24] SONG GT, JIN C, ZHANG RL, et al. Study for fluorescence optical fiber temperature measuring system based on Labview knowledge engineering and software engineering [C] // Shenzhen: Pacific-Asia Conference on Knowledge Engineering and Software Engineering, 2009: 15-17.
- ~~~~~
- (上接第8页)
- [39] 周健, 许祺, 王中伟, 等. 一种微服务的动态缩扩容方法、装置及设备 [P]. 山东: CN114490078A, 2022-05-13.
- [40] 冀超, 彭鑫, 赵文耘. 基于负载关系图的微服务自动伸缩方法 [J]. 计算机应用与软件, 2022, 39 (6): 12-20.
- [41] 郭骏, 张勇, 王琪, 等. 基于云计算的海量微服务资源调度系统设计与实现 [J]. 电子设计工程, 2019, 27 (11): 43-46.
- [42] 曹伟, 何伊妮, 韦昌福, 等. 一种电力系统云平台计算分析微服务资源调度方法 [P]. 广西: CN110737517A, 2020-01-31.
- [43] 严丽云, 何震苇, 张凌, 等. 微服务资源调度方法和系统 [P]. 北京: CN111158895A, 2020-05-15.
- [44] 张宇鹏, 吴自力, 陈鸣, 等. 面向交叉微服务链的任务调度优化 [J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48 (6): 32-39.
- [45] 冯国聪, 黄翔, 莫剑峰, 等. 微服务容器调度系统、方法、装置和计算机设备 [P]. 广东: CN112631680A, 2021-04-09.
- [46] 李鑫, 周俊松, 韦鑫, 等. 云环境下拓扑感知的微服务应用调度的方法及应用 [P]. 江苏: CN114625500A, 2022-06-14.
- [47] 赵继胜. 一种基于机器学习的微服务调度与通信优化系统 [P]. 上海: CN114301986A, 2022-04-08.
- [48] 刘磊. 一种微服务资源调度系统和方法 [P]. 北京: CN112799817A, 2021-05-14.
- [49] 王子勇, 王焘, 张文博, 等. 一种基于执行轨迹监测的微服务故障诊断方法 [J]. 软件学报, 2017, 28 (6): 1435-1454.
- [50] 陈皓, 许源佳, 王焘, 等. 基于相似度匹配的微服务故障诊断方法 [J]. 计算机系统应用, 2021, 30 (5): 1-11.
- [51] MA S P, FAN C Y, CHUANG Y, et al. Using service dependency graph to analyze and test microservices [C] //2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC). IEEE, 2018.
- [52] 王平, 潘宜城, 马萌. 一种微服务架构信息系统的故障根因定位方法及系统 [P]. 北京: CN112698975A, 2021-04-23.
- [53] 薛晓东. 基于异常传播的微服务故障诊断系统设计与实现 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [54] 陈宁江, 陈玉华, 郑盈盈. 基于故障传播图的微服务故障根因定位方法 [P]. 广西: CN114385397A, 2022-04-22.
- [55] 彭鑫, 冀超. 一种基于运行时图谱分析的微服务故障定位方法 [P]. 上海: CN111737033A, 2020-10-02.
- [56] 王帅. 基于日志的微服务化系统监测与故障预测的研究与实现 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [57] 余阳, 陈锦航. 一种基于微服务日志的软件故障检测方法 [P]. 广东: CN11290900A, 2020-06-16.
- [58] 钱斌, 石少青, 肖勇, 等. 一种微服务的故障监测方法和装置 [P]. 广东: CN111694721A, 2020-09-22.
- [59] 何东, 王红凯, 徐海洋, 等. 一种面向微服务系统的调用链跟踪与分析方法 [P]. 浙江: CN111459766A, 2020-07-28.
- [60] 季学纯, 徐丽燕, 王纪立, 等. 一种微服务系统故障根因定位方法及装置 [P]. 江苏: CN113282635A, 2021-08-20.
- [61] 李学, 徐军, 李军, 等. 一种基于神经网络的微服务故障诊断的方法和存储介质 [P]. 湖北: CN113900845A, 2022-01-07.
- [62] 庄卫金, 张鸿. 基于深度学习的微服务故障检测研究 [J]. 计算机工程与应用, 2022, 58 (16): 326-332.