用于高空气象探测的标准探空仪系统设计

周 悦[1]，刘清惓[1]，杨 杰[2]，戴 伟[2]，余 寅[1]

（1. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心，南京 210044;
2. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室，南京 210044）

摘要：为给气象探测中日常使用的探空仪提供对比和校准，提出一种基于高精度温度测量电路和 ARM 处理器的标准探空仪系统。该系统包括球载部分和地面部分，球载部分集成了阵列式探空温度传感器，且可以外接高精度露点仪、压力计等气象传感器。利用计算流体动力学（computational fluid dynamic，CFD）方法对阵列式温度传感器进行数值仿真，仿真结果显示该传感器可降低热污染误差。搭建一套高空环境模拟实验装置，实验结果表明，阵列式探空温度传感器与传统探空温度传感器相比，降低了横梁尾流在上升过程中对传感器探头的影响，与仿真结果吻合度较高。该标准探空仪系统与业务探空仪相比，具有温度测量精度高、噪声低、扩展能力强等优点。

关键词：电子、通信与自动控制技术其他学科；标准探空仪；探空温度传感器；太阳辐射；计算流体动力学；传感器阵列

中图分类号：TP212.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-2850(2016)22-2376-12

Design of a reference radiosonde for high altitude meteorological sounding

ZHOU Yue[1], LIU Qingquan[1] , YANG Jie[2], DAI Wei[2], YU Yin[1]

(1. *Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology*, *Nanjing University of Information Science Technology, Nanjing* 210044, *China*;
2. *Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044, *China*;)

Abstract: In order to provide comparison and calibration for the daily use of radiosonde meteorological observation, a reference radiosonde system based on a high-precision thermometer and an ARM processor is proposed. The system includes an airborne subsystem and a ground-based subsystem. The airborne subsystem includes an array-based sounding temperature sensor. A variety of meteorological sensors, such as dew point hygrometer and pressure sensor can be integrated. A computational fluid dynamic (CFD) method is utilized to simulate the array-based temperature sensor. Simulation results suggest that the new design helps to reduce the solar radiation error resulted from heat contamination. A low-air-pressure experiment platform is constructed to simulate high altitude environment. Experimental results indicate that this array-based sensor is able to reduce the error resulted from the heat contamination considerably, which agrees with the simulation results. The sensor also features relatively small radiation error, compared to traditional bead thermistor sounding temperature sensors. The reference radiosonde system, compared with the traditional radiosonde, features high precision of temperature observation, low noise and high extensibility.

基金项目：国家公益性行业（气象）科研专项（GYHY200906037，GYHY201306079）；国家自然科学基金（41275042）；江苏高校优势学科建设工程（KYLX15_0866）

作者简介：周悦（1990—），男，硕士，主要研究方向：气象传感器及其信号处理

通信联系人：刘清惓，教授，主要研究方向：微电子机械系统传感技术与气象探测. E-mail: qqliu@nuist.eud. cn

Key words: other subjects of electrics, communication and autocontrol technology; reference radiosonde; sounding temperature sensor; solar radiation; computational fluid dynamics; sensor array

0 引言

高空气象观测系统作为综合气象观测系统的重要组成部分，在天气预报和气候监测中发挥着重要作用。同时，高空气象观测资料对大气遥感真实性检验和校准的基准具有难以替代的作用[1]。探空仪通常搭载具有良好瞬态特性的温度传感器、湿度传感器、气压计、GPS 定位模块、无线发射模块等组件，由上升速度约为 5～6 m/s 的气球搭载，对高空温湿度、气压、风速风向等参数进行探测[2~3]。

国内外常规探测使用的探空仪通常被称为业务用探空仪。为研究业务用探空仪的传感器误差特性，并对其进行修正，需要一种可搭载高精度参考级传感器的探空观测仪器[4]，标准探空仪正是为满足这种需求而提出的，可为业务用探空仪提供对比和校准数据。

本文设计一种基于高精度温度测量电路和 ARM 处理器的标准探空仪系统。该系统的阵列式探空温度传感器包含 4 个热电偶探头，在各种风切角下，总有至少一个探头不受横梁尾流热污染影响，可显著降低探空仪上升过程中横梁尾流热污染对探空温度传感器的影响，有望降低辐射误差。将待测传感器和本文提出的标准探空仪系统挂载在同一个气球上进行探测，可检验各种待测探空传感器在高空的误差特性，从而可获得待测传感器的误差修订数据。

1 标准探空仪系统设计

所设计的标准探空仪系统包括空中测量子系统和地面接收子系统。系统框图如图 1 所示。

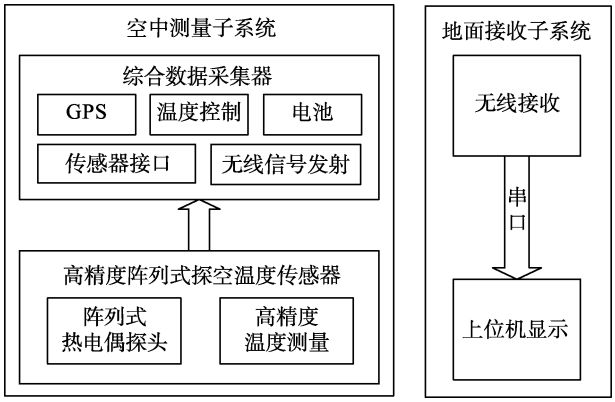


图 1 系统框图

Fig. 1 System blocks

空中测量子系统包括综合数据采集器和高精度阵列式探空温度传感器。综合数据采集器由传感器接口、温度控制、GPS、无线信号发射等部分组成。空中测量子系统主要处理两类工作，第一类是将内置阵列式探空温度传感器、外接高精度气压传感器、外接高精度露点传感器以及各待测传感器的数据和 GPS 模块接收到的数据一并进行处理并组成数据包，然后通过无线发射模块进行发送；第二类是通过温度控制模块对电路板进行加热，以确保高空测量时各模块尤其是 GPS 模块和无线发射模块不会因为温度过低而产生问题。

地面接收子系统包括微处理器核心模块、无线信号接收模块、RS232 电平转换模块、上位机显示软件等。地面接收子系统中，微处理器初始化无线接收模块并等待无线接收模块接收到无线数据。当接收到无线数据，微处理器将对数据包进行解析，随后通过 RS232 电平转换模块发送至上位机的串口调试助手进行显示。

2 阵列式温度传感器设计与 CFD 仿真

探空温度传感器通常由微型温度传感器探头及其测量电路构成。为提高高空温度测量的响应速度，温度传感器的探头一般安装在探空仪的上部并充分暴露在空气中。为防止探头在校准和施放的过程中遭到损坏，并降低探头在高空中受到冰雹撞击的概率，安装探头的框架通常使用含有顶部横梁的基板。基板在探空仪上升过程中会因太阳辐射导致自身升温，因此横梁会产生高于环境温度的尾流，在一定的风

切角条件下会进一步增大对探空温度传感器的太阳辐射误差，这便会形成探空温度传感器的“热污染”现象。由于基板在飞行过程中会受到湍流、探空仪悬挂姿态等因素的影响，因此难以始终保持垂直的状态（其倾角通常为–45～45°）。在这样的探测条件下，如果仅使用单个测温探头，则无法保证在各种角度下该探头均不受或受到最小化的“热污染”影响。

阵列式传感器探头示意图如图 2 所示。为提高对太阳辐射的反射率，安装传感器探头的基板使用厚度为 0.6 mm 的铝片（如图 2a 所示）。本文选用的温度传感元件为微型热电偶，其具有雷诺数低、对流传热系数高等特点，因此有利于减小太阳辐射误差。将 4 个线径为 0.13 mm 的微型热电偶的热端分别固定在基板横梁下方的两侧，相邻热电偶的间隔为 2 mm（如图 2b 所示）. 由于铂电阻温度传感器具有高精度、高稳定性等优点[5]，因此将铂电阻作为 4 个热电偶共用的冷端温度补偿器件[6]。由于高反射率铜球具有较低的太阳辐射吸收系数，因此将热电偶的冷端和铂电阻一起放在铜球中，如图 2c 所示。这种设计使铜球内的铂电阻亦具有较小的太阳辐射误差，从而降低了热电偶两端因太阳辐射造成的温差，提高了热电偶的测量精度。

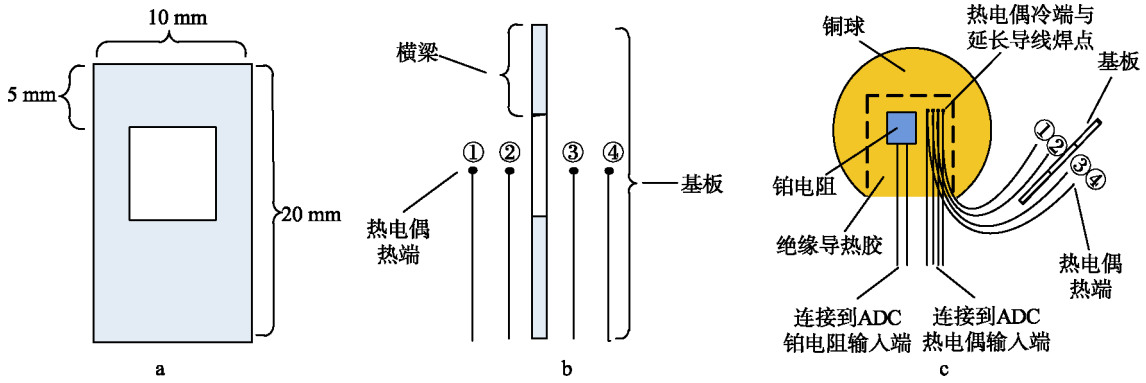


图 2　传感器探头示意图

Fig. 2　Schematic of sensor probe

a—基板正视示意图；b—传感器阵列侧视示意图；c—热电偶冷端铜球示意图

a-Front view of base board; b-Side view of sensor array; c-Thermocouple’s cold spot and copper ball

传统的太阳辐射误差的研究方法有经验修订法和风洞实验法等。经验修订法较为简单，不能对高空温度测量进行有效可靠的误差修正，而风洞实验法受到技术和成本的制约，在目前条件下，难以有效又经济地实施。CFD 是通过计算机数值计算和图像显示，对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。与传统方法相比，CFD 软件可以方便地模拟从地面到 20 km 高空不同海拔环境下，温度传感器受气压、太阳高度角、风速风向以及传感器外形、结构、材料等多种因素的影响。因此，本文使用 CFD 软件对探空温度传感器基板周围的温度场分布进行模拟，以便于初步评估阵列式探空温度传感器结构设计的合理性。

FLUENT 软件可以实现包括物理模型的计算、施加边界条件与设置材料特性、网格模型的导入、求解和后处理等功能[7]。其软件的求解过程主要包括前处理器、求解器和后处理器等步骤。前处理器主要用于仿真模型的建立、网格的划分及边界的定义等；求解器的核心任务是数值求解算法，包括初始和边界条件设定、材料属性定义、迭代收敛设置、求解方程的选取及计算等；后处理器的功能是将计算的结果输出与显示。

研究采用 ICEM-CFD（integrated computer engineering and manufacturing code for computational fluid

dynamics）软件对搭载探空温度传感器探头的基板及其周围流体区域进行了四面体非结构网格划分。对传感器及其周围区域的网格进行了较密的划分，而对温度变化较慢区域的网格进行了较疏的划分，以此来保证仿真的精度。生成的网格需要经网格质量检验，确保网格中没有负网格存在。经检验，网格质量大于 0.35，网格质量良好，如图 3 所示。

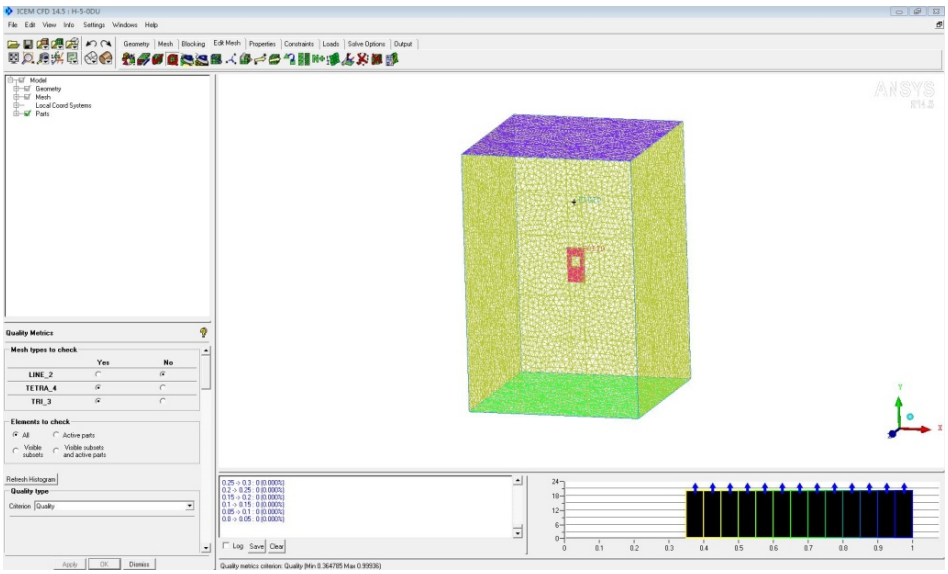
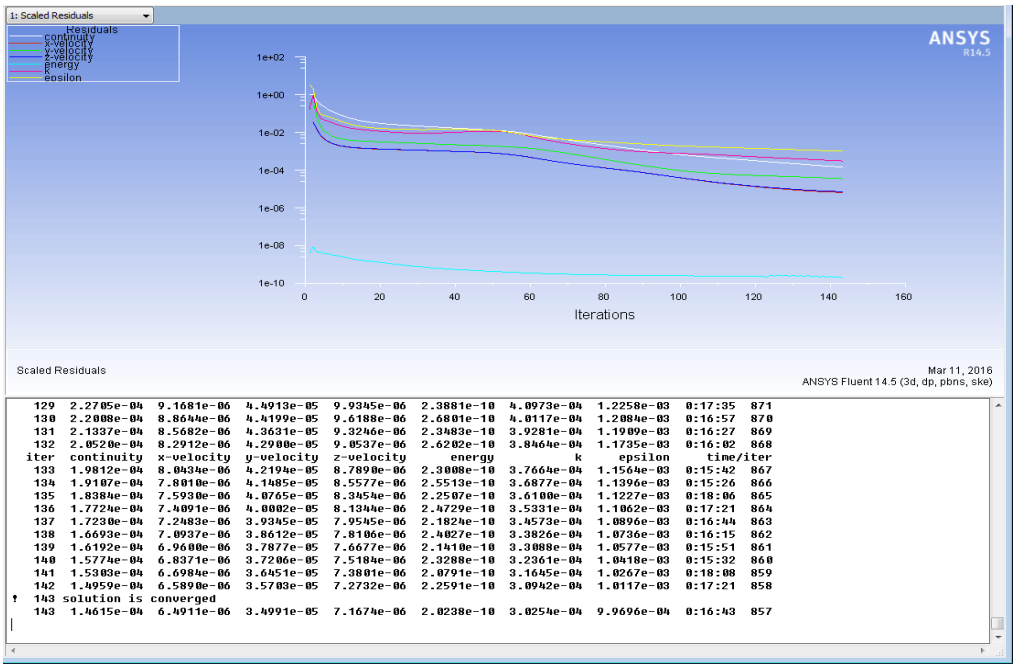


图 3 网格质量

Fig. 3 Grid quality

在进行仿真计算时，需要对仿真对象及边界条件进行设置。为使仿真与实验保持一致，设置吸收率为 10%，环境温度为 300 K，太阳辐射强度为 1 000 W/m^2. 通过 FLUENT 软件对低辐射误差传感器进行流固耦合辐射传热的仿真分析，经过 140 步迭代计算，达到收敛，残差收敛分析图如图 4 所示。




```
   129  2.2705e-04  9.1681e-06  4.4913e-05  9.9345e-06  2.3881e-10  4.0973e-04  1.2258e-03  0:17:35  871
   130  2.2008e-04  8.8644e-06  4.4199e-05  9.6188e-06  2.6801e-10  4.0117e-04  1.2084e-03  0:16:57  870
   131  2.1337e-04  8.5682e-06  4.3631e-05  9.3246e-06  2.3483e-10  3.9281e-04  1.1909e-03  0:16:27  869
   132  2.0520e-04  8.2912e-06  4.2900e-05  9.0537e-06  2.6202e-10  3.8464e-04  1.1735e-03  0:16:02  868
  iter  continuity  x-velocity  y-velocity  z-velocity      energy           k     epsilon     time/iter
   133  1.9812e-04  8.0434e-06  4.2194e-05  8.7890e-06  2.3008e-10  3.7664e-04  1.1564e-03  0:15:42  867
   134  1.9107e-04  7.8010e-06  4.1485e-05  8.5577e-06  2.5513e-10  3.6877e-04  1.1396e-03  0:15:26  866
   135  1.8384e-04  7.5930e-06  4.0765e-05  8.3454e-06  2.2507e-10  3.6100e-04  1.1227e-03  0:18:06  865
   136  1.7724e-04  7.4091e-06  4.0002e-05  8.1344e-06  2.4729e-10  3.5331e-04  1.1062e-03  0:17:21  864
   137  1.7230e-04  7.2483e-06  3.9345e-05  7.9545e-06  2.1824e-10  3.4573e-04  1.0896e-03  0:16:44  863
   138  1.6693e-04  7.0937e-06  3.8612e-05  7.8106e-06  2.4027e-10  3.3826e-04  1.0736e-03  0:16:15  862
   139  1.6192e-04  6.9600e-06  3.7877e-05  7.6677e-06  2.1410e-10  3.3088e-04  1.0577e-03  0:15:51  861
   140  1.5774e-04  6.8371e-06  3.7206e-05  7.5184e-06  2.3288e-10  3.2361e-04  1.0418e-03  0:15:32  860
   141  1.5303e-04  6.6984e-06  3.6451e-05  7.3801e-06  2.0791e-10  3.1645e-04  1.0267e-03  0:18:08  859
   142  1.4959e-04  6.5890e-06  3.5703e-05  7.2732e-06  2.2591e-10  3.0942e-04  1.0117e-03  0:17:21  858
!  143  solution is converged
   143  1.4615e-04  6.4911e-06  3.4991e-05  7.1674e-06  2.0238e-10  3.0254e-04  9.9696e-04  0:16:43  857
```

图 4 残差收敛分析

Fig. 4 Residual convergence analysis

模型中的太阳高度角为 90°，温度单位为 K. 通过仿真获得在风切角为 0°、15°、30°和 45°，海拔分别为 0，4，8，12，16，20 km 时，共 24 种工作环境下的温度场分布。以探空仪工作中比较常见的 15°风切角为例，仿真结果如图 5 所示。

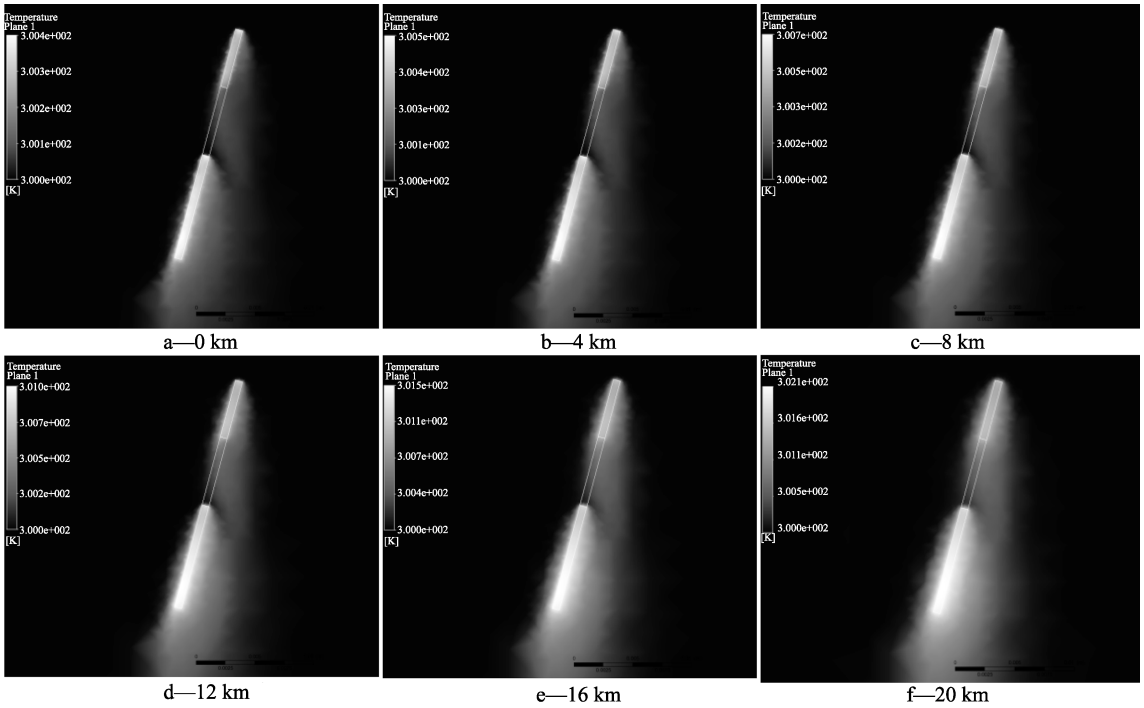


图 5　15°风切角情况下的尾流温度场

Fig. 5　Wake flow temperature field in the case of wind shear angle 15°

仿真结果中，以探空仪工作中比较常见的 15°风切角为例，在 0 km 时横梁升温 0.26℃，如仅使用单个热电偶，则横梁热污染引起的热电偶升温达 0.071℃；若使用阵列式热电偶，则受横梁热污染最小的热电偶升温仅 0.001℃. 在 12 km 时横梁升温 0.72℃，如仅使用单个热电偶，则横梁热污染引起的热电偶升温达 0.233℃；若使用阵列式热电偶，则受横梁热污染最小的热电偶升温仅 0.001℃. 在 20 km 时横梁升温 1.45℃，如仅使单个热电偶，则横梁热污染引起的热电偶升温达 0.582℃；若使用阵列式热电偶，则受横梁热污染最小的热电偶升温仅 0.001℃. 使用单个热电偶与使用阵列式热电偶的结果对比如表 1 所示。

表 1　风切角 15°情况下单个热电偶与阵列式热电偶的结果对比

Tab. 1　Comparison results of a single thermocouple with array type thermocouples in the case of wind shear angle 15°

海拔高度/km	单个热电偶升温误差仿真值/℃	阵列式热电偶升温误差仿真值/℃
0	0.071	0.001
4	0.099	0.001
8	0.149	0.001
12	0.233	0.001
16	0.373	0.001
20	0.582	0.001

仿真结果表明，如仅使用单个热电偶作为探空温度传感器，则横梁热污染引起的热电偶升温量可达到横梁升温量的 11.15%～40.06%；使用阵列式热电偶作为探空温度传感器，则受横梁热污染最小的热电偶升温量可降低到横梁升温量的 0.04%～8.24%.

3　标准探空仪电路设计

3.1　阵列式温度传感器电路设计

阵列式传感器结构框图如图 6 所示。其主要由基于 Cortex-M3 内核的 32 位微处理器 STM32VCT6

和 24 位 Σ-Δ 低噪声模数转换器（analog to digital converter，ADC）AD7794 组成。为实现高精度温度测量，使用具有极低噪声的线性电源对 ADC 供电；同时，采用 ADR444 基准电压源芯片为 A/D 采样提供基准电压。4 个热电偶输出的差分模拟量通过各自的电容滤波电路后连接到 AD7794 的高输入阻抗模拟输入端口。为进一步提高测量精度，利用斩波方法，使微弱电压信号的输入失调误差降低至 μV 量级。铂电阻温度传感器的测量电路采用四线制恒流源测温电路[8]，可消除引线电阻误差。使用 Vishay 公司研制的 Z 型金属箔精密电阻作为参考，其温度系数低至百万分之±0.05 每摄氏度，从而使实现百万分之一级测量精度成为可能。

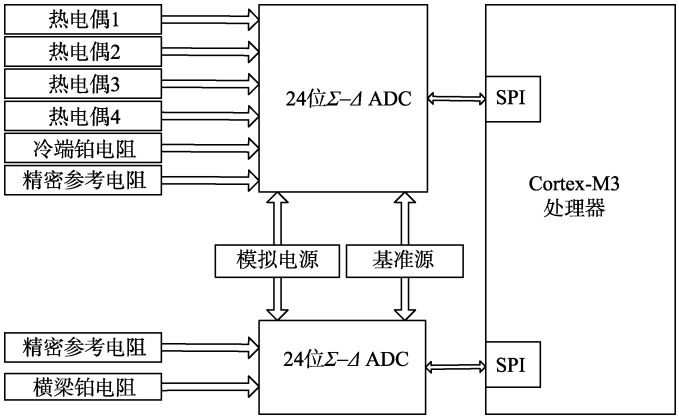


图 6 阵列式传感器结构框图

Fig. 6 Array type sensor structure blocks

本文设计的阵列式探空温度传感器，需采集的温度数据有 6 组，分别为 4 路热电偶的数据、1 路冷端铂电阻数据和 1 路精密参考电阻的数据。因此，选用具有 6 路输入端的 AD7794 作为阵列式探空温度传感器的模数转换器。ADR444 基准源为 AD7794 提供基准电压。在阵列式探空温度传感器电路中，4 个热电偶连接到 ADC 的通道 1～通道 4，冷端铂电阻连接到 ADC 的通道 5，精密参考电阻连接到 ADC 的通道 6. 阵列式热电偶测量电路原理图如图 7 所示。为滤除高次谐波、降低测量电路噪声，每个模拟输入端都使用了 2 个 10 nF 电容（C22、C27）进行滤波，100 nF 电容（C25）为采样保持电路，保持已采集的输入信号，确保在 A/D 转换期间保持输入信号不变。由于热电偶的信号可低至 μV 量级，因此采用 128 倍增益对其进行放大。

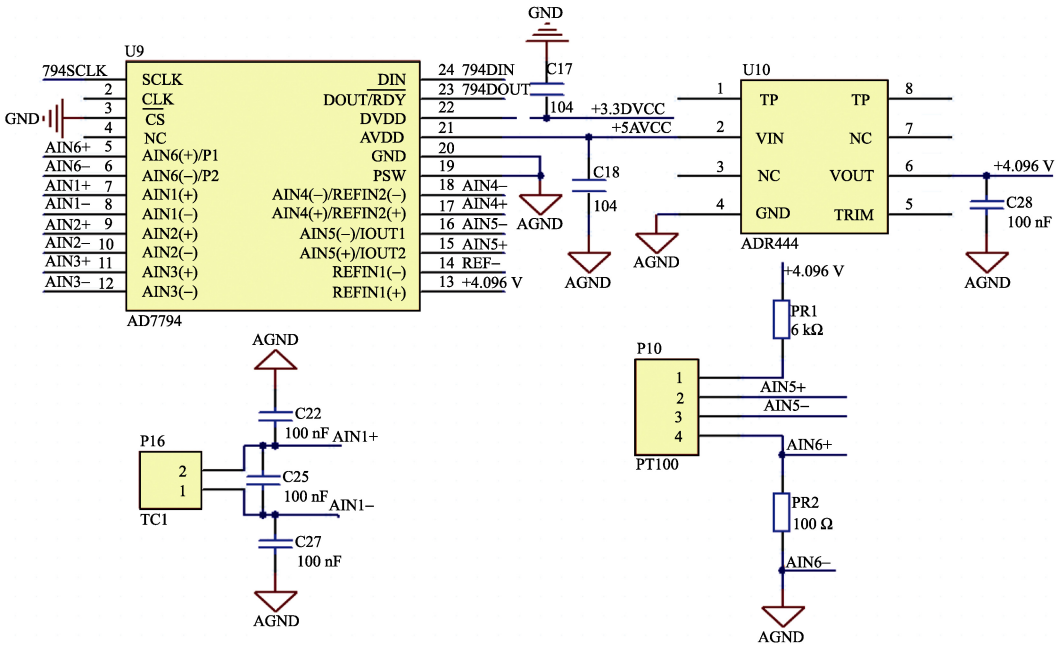


图 7 阵列式热电偶测量电路原理图

Fig. 7 Schematic diagram of array type thermocouple measurement circuit

测量热电偶信号前，使用短接热电偶 2 个焊盘的方式进行了热电偶测量电路的噪声测试。100 组测

试实验结果表明，热电偶测量电路的RMS噪声为0.098 6 mK，从而验证了该测量电路的低噪声特性。铂电阻测量电路的测试标定实验则使用了测温精度可达0.015 mK、模拟输入端噪声低至3 nV的Fluke 1595A超级电阻测温仪，同时采用了水三相点作为温度参考源，为高精度温度测量提供了支撑。

3.2　综合数据采集器电路设计

图8为综合数据采集器与地面接收系统的电路功能框图。采集器使用以Cortex-M3为内核的32位微处理器STM32F107VCT6，GPS模块为采用第6代U-blox芯片的CT1612UB模块，无线发射与接收模块采用TI公司的低成本单片射频UHF收发器芯片CC1101，电机转速测量由3144霍尔传感器模块和12 V直流电机组成，RS232电平与TTL电平间的转换选用MAX3232芯片实现。

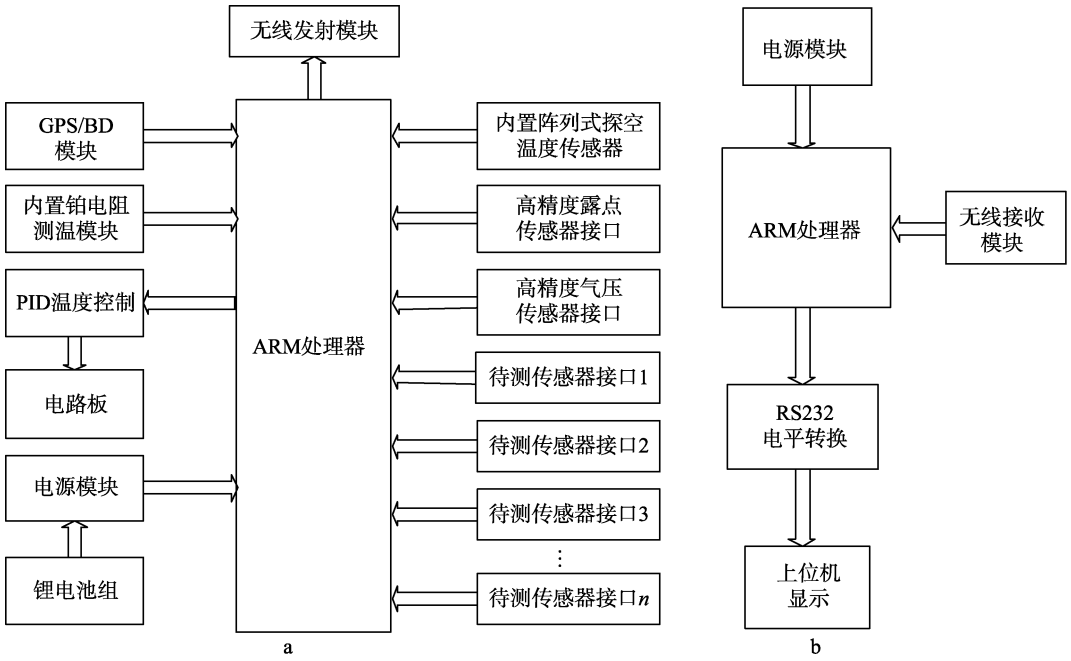


图8　采集器与地面接收电路结构框图

Fig. 8　System structure blocks of collector and ground receiving circuits

a—采集器电路；b—地面接收电路

a-Collector circuit; b-Ground receiving circuit

探空仪在实施高空探测时，最低工作环境温度可低至–90℃. 这样的低温恶劣环境，会影响无线传输模块和GPS模块的正常工作。为保证无线模块和GPS模块正常工作，需要对整个电路板进行温度控制。电路板的温度测量采用铂电阻传感器Pt100，模数转换器选用AD7793. AD7793是适合高精度测量应用的低功耗、低噪声、完整模拟前端的Σ-Δ型24位ADC，有3个输入通道，输出数据速率可通过软件编程设置。AD7793可以提供恒流源，为保证精度，采用四线制的铂电阻测量方法。系统中将铂电阻和精密电阻接在恒流源上，通过比值法得到铂电阻的电阻值，然后通过查表法得出当前温度值。

本文的温度控制模块主要采用了温控比例积分微分（proportional integrating differentiation，PID）算法与脉宽调制（pulse width modulation，PWM）相结合的方法。微处理器STM32F107VCT6对采集到的温度进行初步分析，然后与所设定的温度值进行对比并送给PID程序，PID程序控制微处理器发出PWM信号，进而通过模拟开关控制加热电阻的加热功率。采集器电路原理图如图9所示，采集器的印刷电路板（printed circuit board，PCB）如图10所示。

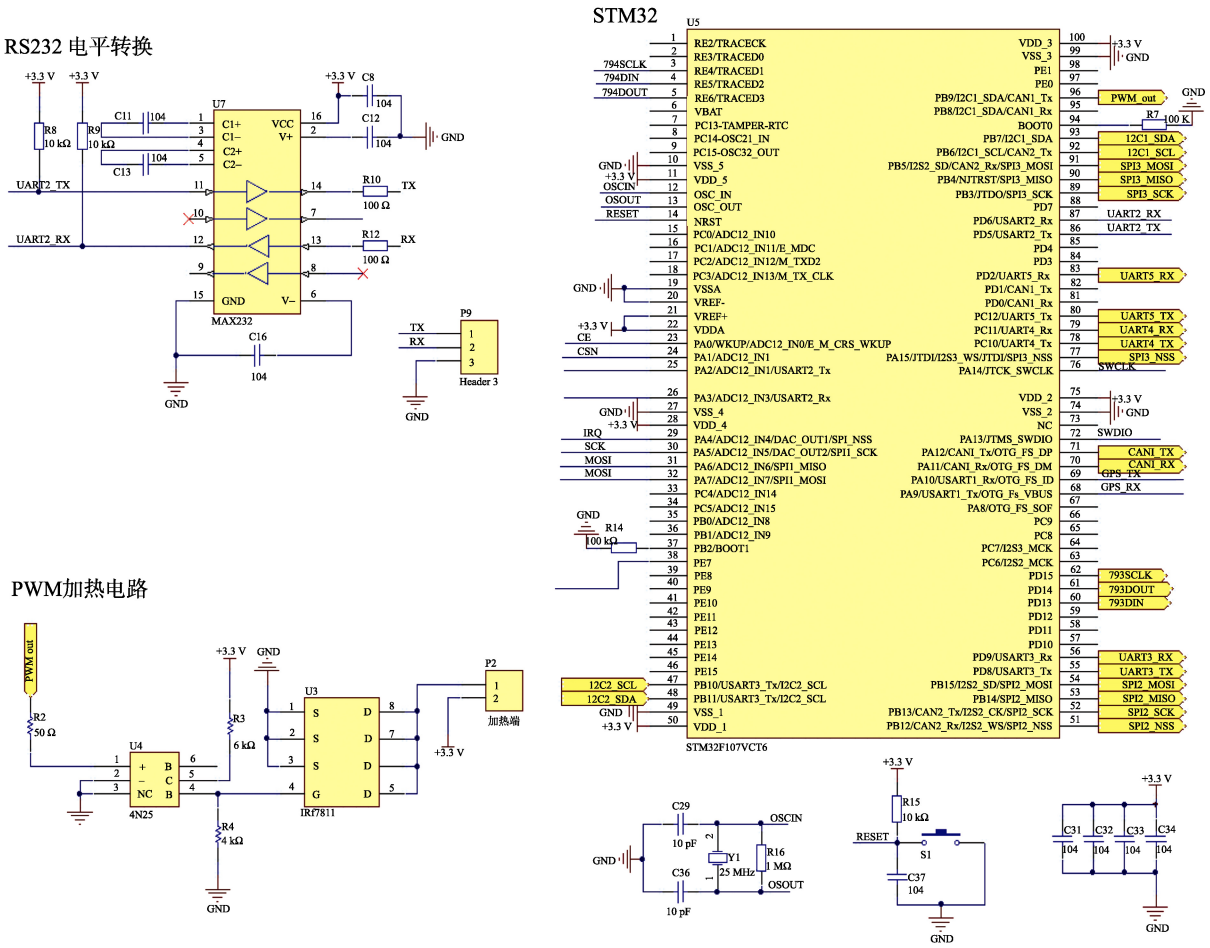


图 9 采集器电路原理图

Fig. 9 Schematics of collector circuit

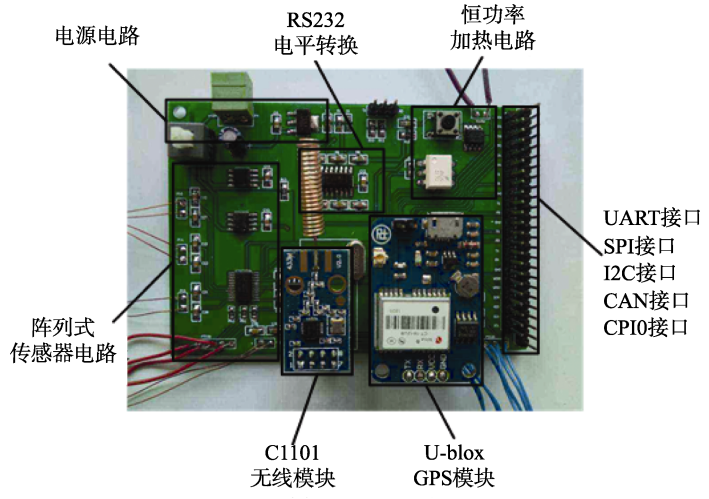


图 10 采集器 PCB

Fig. 10 PCB of collector

4 标准探空仪系统软件设计

图 11 为标准探空仪系统的软件设计流程图，分为空中测量部分和地面接收部分。

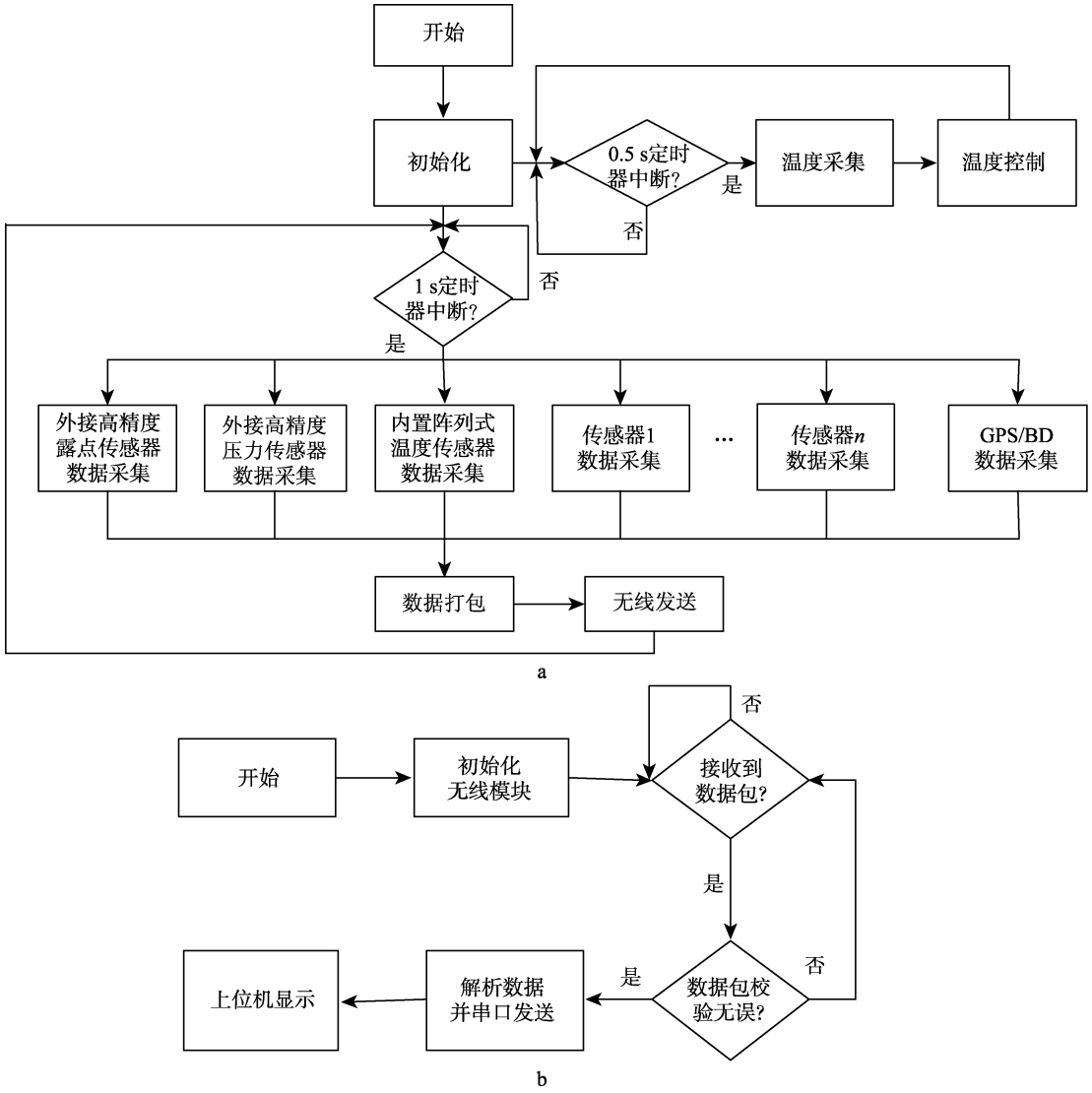


图11　软件设计流程图

Fig. 11　Software design flow chart

a—空中测量部分；b—地面接收部分

a-Air measurement part; b-Ground receiving part

空中测量部分的软件主要包括温度控制程序、各气象要素的数据采集程序、GPS数据的读取程序、数据处理与打包发送程序等。上电后微处理器先进行初始化操作，包括时钟、定时器、IO口、传感器接口的初始化等。当定时器中断每0.5 s时采集电路板的温度，判断是否需要加热，如需要加热则进行PID温度控制工作。当定时器中断每1 s时采集高精度阵列式温度传感器、高精度露点传感器、高精度压力传感器以及各待测传感器的数据，然后采集GPS的数据。数据采集完毕后，对数据进行打包，最终通过无线模块发送出去。

地面接收部分的软件主要包括无线数据的接收程序、数据包检验与解析程序和串口发送程序等。上电后微处理器先进行初始化操作，包括时钟、定时器以及与各模块的通讯建立等。随后初始化无线模块，等待无线模块接收到来自空中测量部分的数据包。当接收到数据包后，对数据包进行校验，若数据无错误则进行解包操作，最终通过串口发送至上位机。

5 实验平台搭建与结果分析

实验中，使用 LED 光源模拟 1 000 W/m^2 太阳辐射（LED 光源的辐射强度使用 TES1333 太阳辐射仪校准）对微型热电偶探头进行照射以获得其辐射误差特性。在 0～20 km 海拔中，每 4 km 间隔采集一次用 LED 垂直照射时热电偶的输出和关闭 LED 后热电偶的输出，相减后得到热电偶的升温情况，如表 2 所示。传统珠状热敏电阻在 20 km 时的太阳辐射误差达 0.5～0.6℃[9]，由表 2 可知微型热电偶在 20 km 时的太阳辐射误差为 0.265℃，因此本文提出的微型热电偶温度传感器具有一定的优势。

表 2 不同海拔下热电偶的升温值

Tab. 2 Temperature rise values of thermocouple at different altitudes

海拔/km	升温值/℃
0	0.004
4	0.032
8	0.061
12	0.130
16	0.190
20	0.270

为便于测试探空仪上升过程中横梁升温后产生的尾流对探空温度传感器的影响，将加热电阻通过导热硅胶贴在基板的横梁上，由 STM32F103VCT6 微处理器产生 PWM 波形来控制功率开关的通断，以此来控制加热电阻的功率。在处理器的引脚输出端和功率开关之间通过光耦连接，防止电流的高频分量对处理器和测量电路造成干扰[10]。

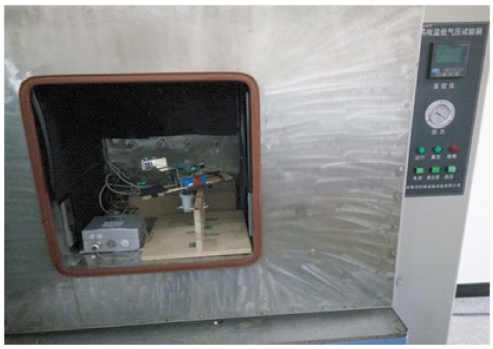


图 12 模拟实验装置图

Fig. 12 Simulation experiment device

在高低温低气压实验箱中，微处理器控制加热电阻对横梁进行恒功率模式的加热，测出在 0°、15°、30°、45° 风切角下，4 个热电偶随海拔上升时的热污染升温量。模拟实验装置如图 12 所示。

表 3～表 6 为风切角分别为 0°、15°、30°、45° 时，使用单个热电偶与使用阵列式热电偶的结果对比，包括使用 FLUENT 计算仿真值及使用模拟实验装置测量值两种。

表 3 风切角 0° 情况下单个热电偶与阵列式热电偶的结果对比

Tab. 3 Comparison results of a single thermocouple with array type thermocouples in the case of wind shear angle 0°

海拔高度/km	单个热电偶升温误差仿真值/℃	阵列式热电偶升温误差仿真值/℃	单个热电偶升温误差测量值/℃	阵列式热电偶升温误差测量值/℃
0	0.008	0.001	0.073	0.013
4	0.013	0.002	0.094	0.016
8	0.021	0.004	0.121	0.026
12	0.037	0.008	0.183	0.035
16	0.065	0.018	0.337	0.073
20	0.097	0.029	0.458	0.144

表 4 风切角 15° 情况下单个热电偶与阵列式热电偶的结果对比

Tab. 4 Comparison results of a single thermocouple with array type thermocouples in the case of wind shear angle 15°

海拔高度/km	单个热电偶升温误差仿真值/℃	阵列式热电偶升温误差仿真值/℃	单个热电偶升温误差测量值/℃	阵列式热电偶升温误差测量值/℃
0	0.071	0.001	0.138	0.006
4	0.099	0.001	0.155	0.014
8	0.149	0.001	0.185	0.016
12	0.233	0.001	0.239	0.022
16	0.373	0.001	0.317	0.041
20	0.582	0.001	0.491	0.065

表5　风切角30°情况下单个热电偶与阵列式热电偶的结果对比

Tab. 5　Comparison results of a single thermocouple with array type thermocouples in the case of wind shear angle 30°

海拔高度/km	单个热电偶升温误差仿真值/℃	阵列式热电偶升温误差仿真值/℃	单个热电偶升温误差测量值/℃	阵列式热电偶升温误差测量值/℃
0	0.070	0.001	0.083	0.002
4	0.102	0.001	0.107	0.008
8	0.163	0.001	0.142	0.015
12	0.269	0.001	0.208	0.026
16	0.459	0.001	0.273	0.039
20	0.758	0.001	0.652	0.077

表6　风切角45°情况下单个热电偶与阵列式热电偶的结果对比

Tab. 6　Comparison results of a single thermocouple with array type thermocouples in the case of wind shear angle 45°

海拔高度/km	单个热电偶升温误差仿真值/℃	阵列式热电偶升温误差仿真值/℃	单个热电偶升温误差测量值/℃	阵列式热电偶升温误差测量值/℃
0	0.066	0.001	0.023	0.003
4	0.101	0.001	0.049	0.004
8	0.165	0.001	0.092	0.005
12	0.298	0.001	0.157	0.009
16	0.532	0.001	0.246	0.011
20	0.859	0.001	0.436	0.016

测量结果中，以探空仪工作中比较常见的15°风切角为例，在0 km时横梁升温0.46℃，如仅使用单个热电偶，则横梁热污染引起的热电偶升温达0.138℃；若使用阵列式热电偶，则受横梁热污染最小的热电偶升温仅0.006℃. 在12 km时横梁升温0.79℃，如仅使用单个热电偶，则横梁热污染引起的热电偶升温达0.239℃；若使用阵列式热电偶，则受横梁热污染最小的热电偶升温仅0.022℃. 在20 km时横梁升温1.18℃，如仅有单个热电偶，则横梁热污染引起的热电偶升温达0.491℃；若使用阵列式热电偶，则受横梁热污染最小的热电偶升温仅0.065℃.

为更加清楚地表示出尾流升温效应，研究对上文提到的风切角为15°情况下的实验数据进行了归一化处理，即用热电偶升温量除以横梁升温量所得到的百分比作为y轴参数。如图13所示，曲线代表仿真拟合结果，符号代表测量值。

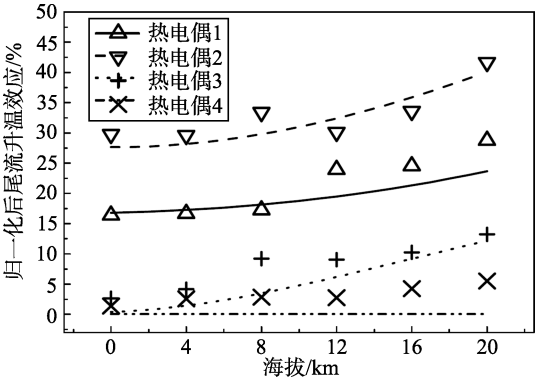


图13　CFD仿真与实验测量结果对比

Fig. 13　Comparison of CFD simulation and experimental measurement results

6　结论

设计了一种用于高空气象探测的标准探空仪系统，包括高精度阵列式温度传感器、综合数据采集器和地面接收子系统。这种阵列式温度传感器包括4个微型热电偶探头和低噪声、高精度测温电路。使用CFD方法对阵列式温度传感器进行数值仿真，初步验证了传感器设计的合理性。搭建了一套太阳辐射误差模拟装置，并将CFD仿真结果与模拟实验装置的测量结果进行对比。可得出如下结论：

1）在风切角不变的条件下，随着海拔高度的增加，横梁尾流对探空温度传感器造成的热污染误差呈增大趋势；海拔高度不变的条件下，4种风切角情况下总有一个热电偶受横梁尾流热污染效应的影响最低。

2）如仅使用单个热电偶作为探空温度传感器，则横梁热污染引起的热电偶升温量可达到横梁升温量

的 8.13%～41.65%；使用阵列式热电偶作为探空温度传感器，则受横梁热污染最小的热电偶升温量可降低至横梁升温量的 0.43%～8.72%. 实验测量结果与仿真结果相差–3.02%～5.44%，吻合度较高。

3）使用热电偶传感器在 0～20 km 海拔高度的太阳辐射误差仅为 0.004～0.270℃，低于相同海拔下传统珠状热敏电阻的误差值。

本文提出的这种标准探空仪系统集成了高精度阵列式温度传感器。阵列式温度传感器可显著降低横梁热污染误差，有利于提高高空温度探测精度。标准探空仪可连接高精度露点、压力传感器，亦可连接多种待测的探空传感器，可完成各类探空传感器高空测试比对实验，以检测待测探空传感器的特性及其误差。该标准探空仪与业务探空仪相比，具有温度测量精度高、噪声低、扩展能力强等优点。经过进一步改进，将来亦有望在高精度气候观测和气象灾害的预警中获得应用。

[参考文献] (References)

[1] 李伟，赵培涛，郭启云，等. 国产 GPS 探空仪国际比对试验结果[J]. 应用气象学报，2011，22（4）：453-462.
LI W, ZHAO P T, GUO Q Y, et al. Domestic GPS radiosonde international comparison test results[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(4): 453-462. (in Chinese)

[2] MORADI I, BUEHLER S A, JOHN V O. Comparing upper tropospheric humidity from microwave satellite instruments and IGRA radiosonde data[C]//IEEE. 11th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad). IEEE, 2010: 146-151.

[3] CHEN Y Q, HUANG J Y, FENG Z H, et al. A new-generation radiosonde in L band[C]//IEEE. 2nd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. IEEE, 2000: 699-702.

[4] HINZPETER M F E. The reference radiosonde as a tool for improving meteorological data from conventional radiosondes[J]. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 1973, 11(2): 110-123.

[5] 张瑜，张升伟. 基于铂电阻传感器的高精度温度检测系统设计[J]. 传感技术学报，2010，23（3）：311-314.
ZHANG Y, ZHANG S W. A design of high accurate temperature measuring system based on platinum resistance transducers[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(3): 311-314. (in Chinese)

[6] 郭锐，徐玉斌. K 型热电偶冷端补偿方案[J]. 仪器仪表学报，2006，27（增）：331- 333.
GUO R, XU Y B. Design of K-thermocouple cold-junction compensation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 (Suppl.): 331- 333. (in Chinese)

[7] STAŠA P, FUCHSÍKOVÁ P, KEBO V, et al. Modelling potential action for building protection against flow of methane from the underground using the Fluent software[C]//13th International Carpathian Control Conference. IEEE, 2012: 677-683.

[8] QUADRI U, RANGAREE P, ASUTKAR G M. FPGA implementation of an emulator for wireless sensor node with Pt100 temperature sensor[C]//TENCON 2013 IEEE Region 10 Conference. IEEE, 2013: 1-5.

[9] 刘清惓，戴伟，杨荣康，等. 探空温度测量太阳辐射误差的流体动力学分析[J]. 高原气象，2013，32（4）：1157-1164.
LIU Q Q, DAI W, YANG R K, et al. Fluid dynamics analysis on solar radiation error of radiosonde temperature measurement[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(4): 1157-1164. (in Chinese)

[10] 李霆霆，张明，潘明俊. 一种 MHz 光耦隔离放大器的设计与分析[J]. 电子学报，2014，42（7）：1398-1402.
LI T T, ZHANG M, PAN M J. Design and analysis of an optocoupler isolation amplifier with MHz bandwidth[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(7): 1398-1402. (in Chinese)