

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.06.09

大气环境温度与压力传感器的自动化标定系统研究

李强¹, 王建航^{2,3}, 胡纯^{2,3*}

(1.北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 北京 100070;

2.北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081; 3.北京理工大学前沿交叉科学研究院, 北京 100081)

摘要: 目前大气环境传感器的测试和标定主要依赖于人工手动操作完成, 测试和标定效率较低, 结果准确率较差。为解决该问题, 在分析大气环境传感器工作原理的基础上, 搭建了一套由真空泵电机、气压控制器、高低温箱、金属密封腔、标准数字温度计、工控机、待标定大气环境传感器等部分组成的大气环境传感器硬件测试平台, 并设计了大气环境自动化软件测试系统, 通过工控机控制标准环境, 对标准环境参数进行周期采样, 自动判定稳态并记录标定所需参数, 从而拟合出标定曲线。对待标定温度和压力传感器进行自动化标定测试, 结果显示: 温度标定的拟合相关系数为 0.994 5, 重复性误差为 0.087%; 压力标定的拟合相关系数为 0.996, 重复性误差为 0.046%, 验证了测试系统的可行性。此研究成果为大气环境传感器快速部署应用提供了有力支撑, 对于推动自动化技术在大气环境参数测量领域中的应用具有重要意义。

关键词: 大气参数; 传感器标定; 平台搭建; 自动化系统; 软件开发

中图分类号: TB93; TB94; TP319 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2023) 06-0076-08

Research on automatic calibration system for temperature and pressure sensors in atmospheric environment

LI Qiang¹, WANG Jianhang^{2,3}, HU Chun^{2,3*}

(1.CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd, Beijing 100070, China;

2.School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

3.Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Currently, the testing and calibration of atmospheric environmental sensors heavily rely on manual operations, resulting in low efficiency and poor accuracy. To address this issue, the working principles of atmospheric environmental sensors was analyzed. Based on this, a hardware testing platform for atmospheric environmental sensors was established. It consists of vacuum pump motor, pressure controller, high and low-temperature chambers, metallic sealed chamber, standard digital thermometer, industrial computer, and the atmospheric environmental sensors to be calibrated. Additionally, an automated software testing system for atmospheric environmental conditions was designed. Controlled by an industrial computer, this system periodically samples standard environmental parameters, automatically determines stability, and records calibration parameters to fit calibration curves. Automated calibration tests were performed on temperature and pressure sensors, yielding fitting correlation coefficients of 0.994 5 and 0.996, with repeatability errors of 0.087% and 0.046%, respectively. The results validate the feasibility of the testing system. This research provides robust

收稿日期: 2023-06-30; 修回日期: 2023-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61827901)

引用格式: 李强, 王建航, 胡纯. 大气环境温度与压力传感器的自动化标定系统研究[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 76-83.

Citation: LI Q, WANG J H, HU C. Research on automatic calibration system for temperature and pressure sensors in atmospheric environment[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 76-83.



support for the rapid deployment of atmospheric environmental sensors and holds significant implications for advancing the application of automation technology in the measurement of atmospheric environmental parameters.

Key words: atmospheric parameters; sensor calibration; platform building; automatic system; software development

0 引言

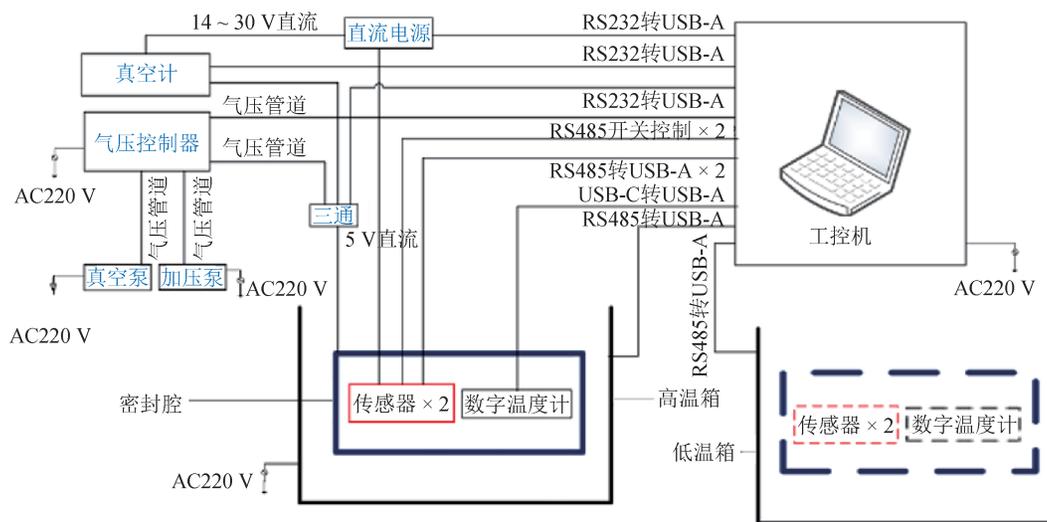
随着科技的不断进步,大气环境对人类活动的影响越发显著^[1]。精确获取大气环境参数对航空航天、交通、工农业等领域至关重要。大气环境参数主要包括温度、压力、湿度和风速等,其中温度和压力测量是当前的研究热点。大气压力和温度传感器能否实现准确测量,直接影响农业生产、天气预报等领域的发展。通常,需要集成多种环境参数传感器于探空仪中进行大气环境探测,为确保这些温度和压力传感器实现准确测量,必须对其进行校准和标定测试。然而,目前的标定测试仍依赖于手动操作,效率低且准确性较差。

针对此问题,本文研究并构建了一套大气环境传感器的自动化测试系统,通过硬件的串口通讯实现全过程的自动化^[2],并编写了相应的软件程序,实现在 $-60 \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度环境、 $1 \sim 100\text{ kPa}$ 压力环境下,温度和压力传感器的自动化标定。

1 硬件部分

1.1 总体结构

大气环境温度与压力传感器自动化标定系统硬件主要包括加压泵、真空泵、气压控制器、真空计、高温箱、低温箱、金属密封腔、标准温度传感器、工控机、直流电源等,总体系统结构图如图1所示,实物图如图2所示。



注:高低温箱不能同时使用。

图1 总体系统结构图

Fig.1 Overall system structure diagram

温度系统硬件部分包括高温箱、低温箱、标准数字温度计、金属密封腔和待标定大气温度传感器。高温箱、低温箱分别采用纯水和无水乙醇作为介质,使温度上升或下降至设定值,为大气温度传感器的标定提供温度环境,产生 $-60 \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度。高温箱、低温箱分别通过RS485总线与工控机连接。标定时,将金属密封腔置于温箱液体中,将标准数字温度计和大气温度传感器置于金属密封腔内,标准数字温度计和大气温度传感器

分别通过USB-C转USB-A线和RS485总线与工控机连接,标准数字温度计测量得到金属密封腔内温度环境真值。

气压系统硬件部分包括气压控制器、真空泵电机、金属密封腔和待标定大气压力传感器。气压控制器分别与真空泵电机和金属密封腔连接,通过真空泵和气压控制器联合调控金属密封腔内气压,为大气压力传感器的标定提供压力环境,产生的压力范围为 $1 \sim 100\text{ kPa}$ 。标定时,大气压力



图2 总体系统实物图

Fig.2 Overall system physical diagram

传感器置于金属密封腔内,通过RS485总线与工控机实现通讯;气压控制器读取密封腔内压力值作为压力真值,并通过RS232总线与工控机实现通讯。

1.2 硬件参数及性能

1.2.1 高、低温箱

使用航空工业计量所生产的CIMM-TH-80型恒温槽作为低温箱,CIMM-TH-0型恒温槽作为高温箱。高温箱、低温箱外部尺寸均为64 cm × 58 cm × 118 cm,内部槽体工作区均为圆柱形(直径为13 cm,高度为48 cm),电源规格为220 V / 50 Hz,使用RS485总线通讯,波特率为19 200 bit / s,采用MODBUS通讯协议。

1.2.2 标准数字温度计

使用中航长城计量测试(天津)有限公司生产的棒式数字温度计ET3860B,其整体长度为50 cm,测量范围可达-80 ~ 300 °C,测量误差不超过±0.02 °C,测量分辨力可达0.001 °C,接口为USB-A(工控机端)转USB-C(温度计端),波特率为9 600 bit / s,采用ET3860 SCPI通讯协议。

1.2.3 气压控制器

气压控制器选择英国Druck公司的PACE6000系列,PACE6000通过沟槽刻蚀谐振技术保证了内置压力传感单元的高精度及长期稳定性。气压控制在0 ~ 300 kPa,工作电压为(200 ~ 240) V / 60 Hz,工作电流为5 A,接口为RS232,波特率为9 600 bit / s,采用PACE6000通讯协议。

1.2.4 真空泵及电机

使用德国Leybold公司生产的真空泵D8C,其功率为550 W。使用利莱森玛电机科技(福州)有限

公司生产的单相双值电容异步电动机LS90RP-4P,其功率为750 W。

1.2.5 待标定大气环境传感器

待标定的大气温度传感器为上海领技实业有限公司生产的MGB05单端玻封NTC负温度系数热敏电阻传感器,其工作温度为-70 ~ 300 °C,具有测量温度范围大、灵敏度高^[3-7]、尺寸小、易集成等特性^[8-12]。

待标定的大气压力传感器为瑞士MEAS公司生产的高分辨力气压传感器MS5611,其具有SPI和I²C两种总线接口,气压测量范围可达1 ~ 120 kPa,并可将来自压阻式压力传感器的未补偿模拟输出电压转化为24位数字值,直接读取数字压力值,尺寸为5 mm × 3 mm × 1 mm,具有量程大、体积小、灵敏度高、温度适应性强、便于集成的优点^[13-17]。

两款大气环境传感器均被集成在探空仪电路板中,以便后期探空仪标定实验使用。温度、压力传感器集成电路实物图如图3所示,温度、压力传感器集成电路封装实物图如图4所示。

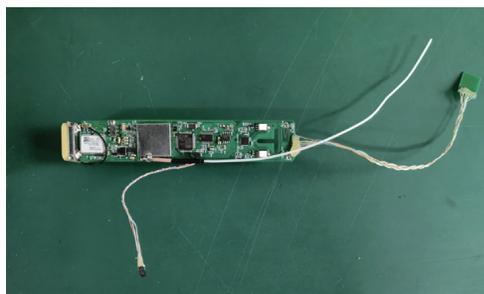


图3 温度、压力传感器集成电路实物图

Fig.3 Temperature and pressure sensor integrated circuit physical diagram

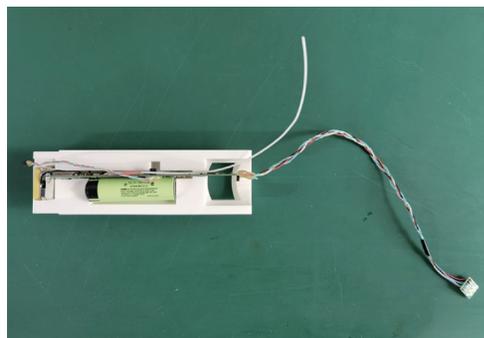


图4 温度、压力传感器集成电路封装实物图

Fig.4 Temperature and pressure sensor integrated circuit package

2 测试环境构建

2.1 温度环境构建

工控机、高低温箱、标准数字温度计、待标定大气温度传感器和金属密封腔通过有线方式连接，构成大气温度传感器自动化标定的温度环境。

温度标定时，工控机通过 MODBUS 协议向高低温箱发送控制指令，传输设定温度值并控制温箱工作。金属密封腔置于温箱水槽中通过水浴控制其内部温度环境。同时工控机全程通过 SCPI 通讯协议采集标准数字温度计测得的金属密封腔内部环境温度真值，通过算法判定产生的温度环境是否达到稳态波动性要求；待温度环境达到稳态后，工控机通过探空仪协议读取该温度点稳态时的大气温度传感器电阻值，再进行下一温度点的控制，采集记录该大气温度传感器所有温度点稳态时电阻，即完成该大气温度传感器的标定。重复测量多次，得到多组稳态温度真值和电阻值，并拟合得出电阻-温度曲线，完成标定。

2.2 压力环境构建

工控机、气压控制器、真空泵电机、金属密封腔和待标定大气压力传感器，通过有线和管道方式连接，构成大气温度传感器自动化标定的气压环境。

压力标定时，手动打开真空泵电机，使其持续工作，工控机通过 PACE6000 通讯协议向气压控

制器发送指令，传输设定压力值并控制其工作；通过 PACE6000 通讯协议采集气压控制器读取的金属密封腔内部气压真值，通过算法判定产生的压力环境是否达到稳态要求；待气压环境达到稳态后，工控机通过探空仪通讯协议读取大气压力传感器数字气压值，再进行下一压力点的控制，采集记录该大气压力传感器所有压力点的设定值和采集真值，即完成该大气压力传感器的标定。重复测量多次，得到多组气压真值和压力传感器气压值，并拟合出气压真值-压力传感器气压值曲线，完成标定。

3 自动化系统试验验证

3.1 用户界面(Uesr Interface, UI)设计

温度和压力系统交互界面图分别如图 5 和图 6 所示。交互界面包含测量曲线、拟合曲线、键入参数点、实时参数值、记录稳态所需参数等模块。

测量曲线模块中，工控机实验全程通过串口采集标准数字温度计温度真值和压力控制器压力真值，并通过动态折线图的形式展示在实时测量曲线框图中。拟合曲线模块记录每一个温度、压力点达到稳态后的所需参数，以横纵坐标形式记录在拟合曲线框图，并以相应的拟合多项式拟合，得到拟合曲线，完成标定。键入参数点模块可用于用户自行输入任意温度和压力值，开始运行后，工控机将自行读取用户设置的温度和压力值并通

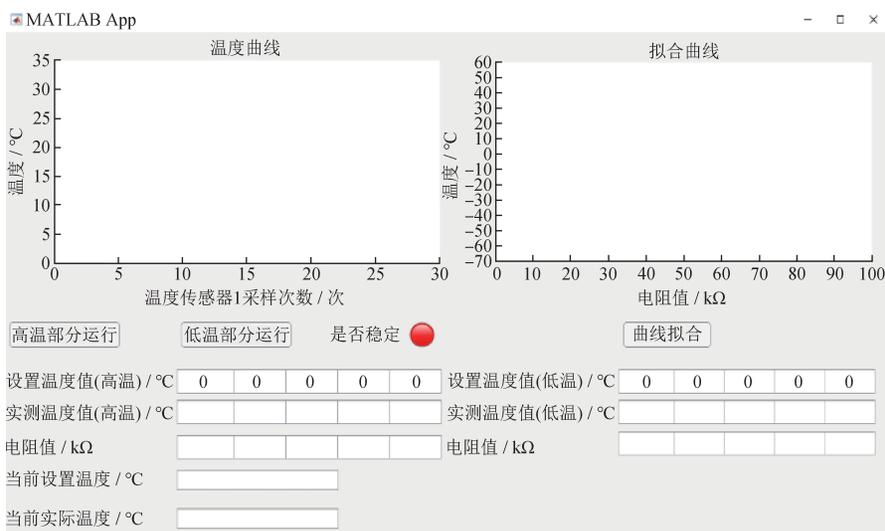


图5 温度系统交互界面图

Fig.5 Temperature system interface diagram

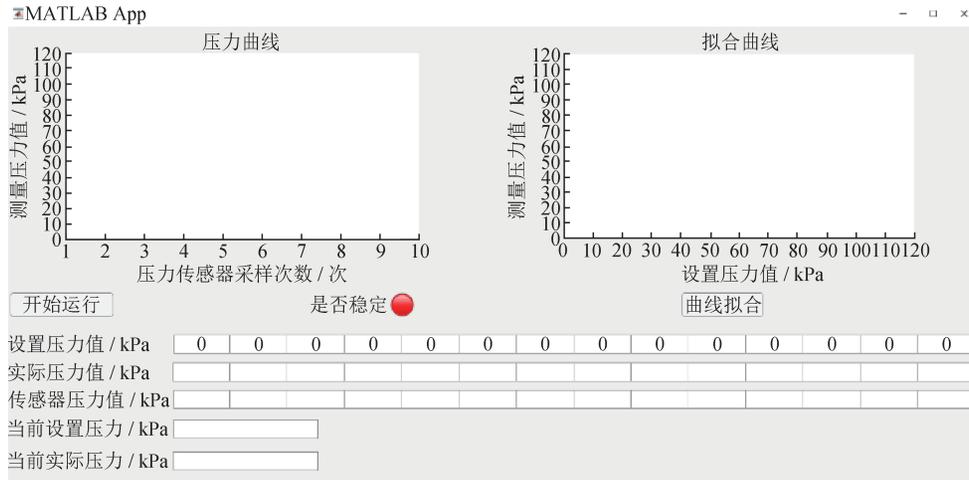


图6 压力系统交互界面图

Fig.6 Pressure system interface diagram

过相应协议转化为指令通过有线方式传输到温箱和压力控制器，控制其工作，产生相应的温度和压力环境。记录实时参数值模块将当前读取到的标准数字温度计温度真值和压力控制器压力真值以数值形式显示在文本框中，便于用户实时查看。记录稳态所需参数模块将稳态时的温度、压力值以及稳态时的大气温度传感器电阻值和大气压力传感器的压力值以数值形式记录在文本框中。

3.2 软件总体流程设计

软件总体设计流程图如图7所示。

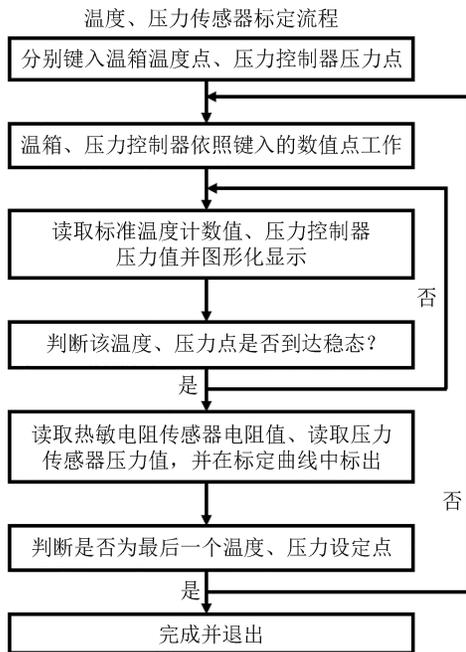


图7 软件总体设计流程图

Fig.7 Software overall design flow chart

1) 温度部分

在UI界面“设置温度值”中输入温度值，点击“开始运行”按钮后，工控机将温度值转化为13字节MODBUS功能码指令发送至温箱，控制温箱工作，通过ET3860 SCPI协议实时采集数字标准温度计测得的温度真值，实时显示温度曲线，通过算法判定每周期是否达到稳态。若未达稳态，则继续读取下一周期；达到稳态后，工控机通过ET3860 SCPI协议读取标准数字温度计稳态温度真值，通过探空仪协议读取该温度下的大气温度传感器电阻值，并将坐标点记录在UI界面拟合曲线图像中。重复上述操作，待多个坐标点全部记录完成后，点击曲线拟合，得到电阻-温度曲线，标定完成。

2) 压力部分

在UI界面“设置压力值”中输入压力值，点击“开始运行”按钮后，工控机通过PACE6000协议将设置压力值数据传输至气压控制器，气压控制器调节金属密封腔内压力值，并通过PACE6000协议实时采集气压控制器读取的金属密封腔内气压真值，实时显示压力曲线，利用算法判定每周期是否达到稳态。若未达到稳态，则继续读取下一周期；达到稳态后，工控机通过PACE6000协议读取气压控制器测得的金属密封腔内压力真值，通过探空仪协议读取该压力值下大气压力传感器数字压力值，并将坐标点记录在UI界面的拟合曲线中。重复上述操作，待多个坐标点全部记录完成后，点击曲线拟合，得到压力真值-压力传感器压力值曲线，标定完成。

3.3 结果分析

利用 MATLAB 资源库中的 Test & Measurement Tool 串口通讯和 APP Designer 进行 UI 界面设计。通过构建大气温度和压力传感器自动化标定测试环境，建立各设备之间的串口通讯。大气环境传感器自动化标定测试温度部分运行结果如图 8 和图 9 所示。

由图 8 和图 9 可知，温度部分自动化标定测试系统可正常运行，工控机能够根据输入的温度值，向高低温箱发送 MODBUS 指令进行温度控制，正常显示实时温度变化和拟合所需坐标点，并记录各温度点稳态时所需电阻值、当前设置情况及实时温度。得到温度检定点对应电阻值后，通过曲

线拟合获得电阻-温度曲线，如图 10 所示。

图 10 中， T 为大气温度传感器的相对温度， R 为大气温度传感器的电阻， B 为大气温度传感器的材料常数， t 、 r 、 b 、 k 均为待定多项式系数。模型拟合相关系数 $R^2 = 0.9945$ ，模型拟合效果较贴合。重复测量多次，得到重复性误差为 0.087%，回程误差为 0.045%，线性误差为 0.09%，证明本温度系统可以准确完成温度传感器标定任务，符合设计要求。

压力部分运行过程如图 11 所示。由图 11 可知，压力部分自动化标定测试系统能够正常运行。工控机根据输入的压力值，向气压控制器发送指令进行压力控制，系统能够正常显示实时压力变

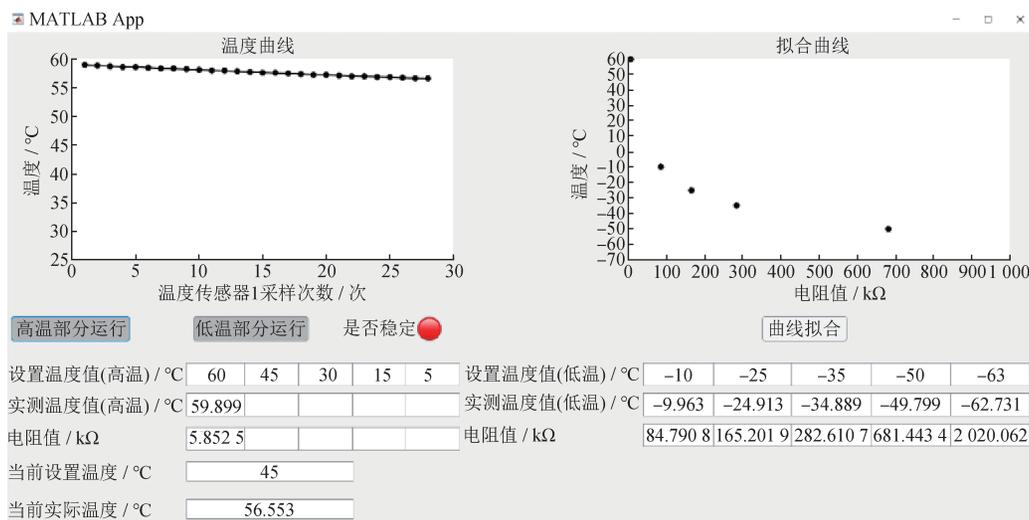


图 8 温度标定运行结果 1

Fig.8 Results of temperature calibration runs 1

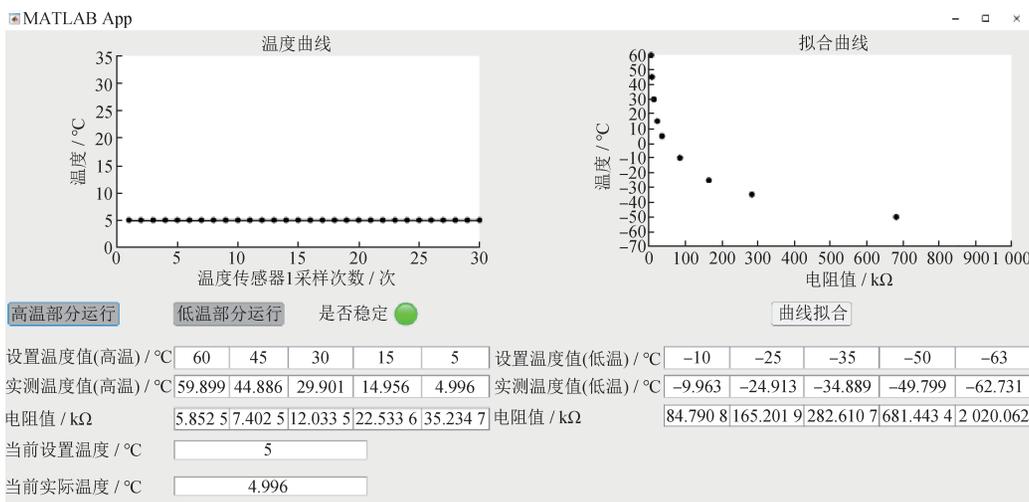


图 9 温度标定运行结果 2

Fig.9 Results of temperature calibration runs 2

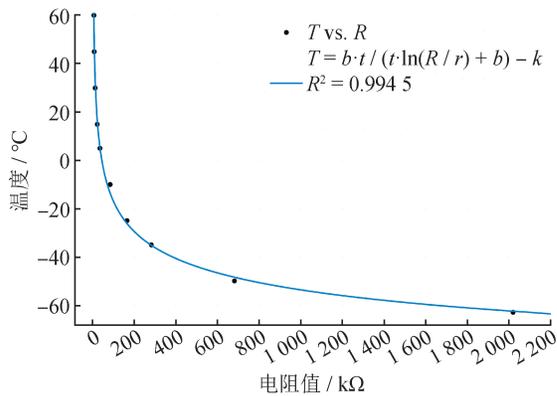


图10 电阻-温度拟合曲线

Fig.10 Resistance-temperature fitting curve

化和拟合所需要的坐标点信息, 准确地记录各压力点稳态时所需要的数据、当前设置情况及实时压力。

压力真值-测量压力值拟合曲线如图12所示, 其中 P_1 为待测大气压力传感器测量压力值, P_2 为压力控制器测量得到的压力真值, 该数据拟合出的相关系数 $R^2 = 0.996$, 模型拟合效果较贴合。重复测量多次, 得到重复性误差为0.046%, 回程误差为0.031%, 线性误差为0.04%, 证明本压力系统可以准确完成温度传感器标定任务, 符合设计要求。

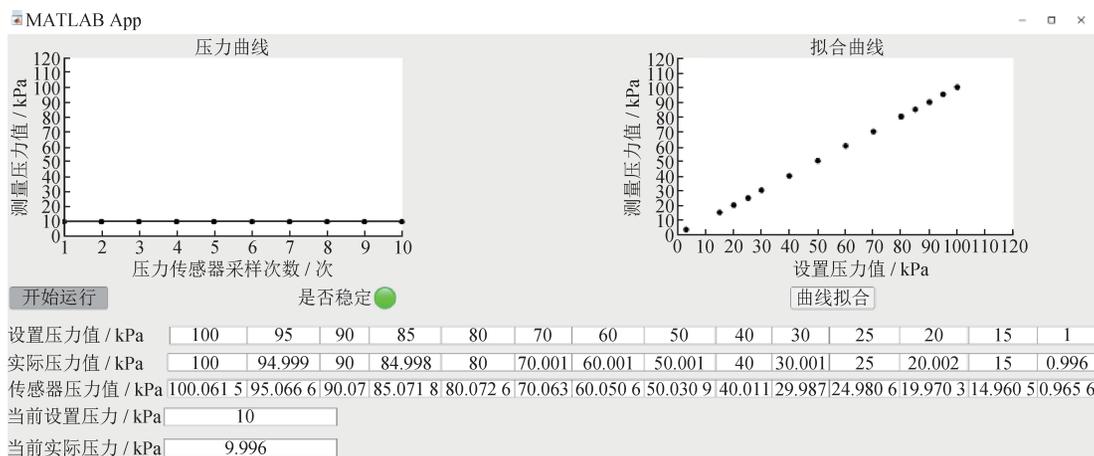


图11 压力标定运行过程

Fig.11 Pressure calibration operation procedure

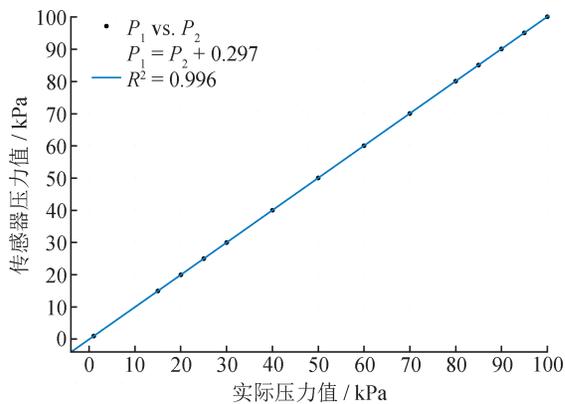


图12 压力真值-测量压力值拟合曲线

Fig.12 True pressure value-measured pressure value fitting curve

4 结论

搭建了大气环境温度与压力传感器自动化标定测试平台, 并设计了相应的自动化整体软件运行系统, 在 $-60 \sim 60$ °C温度环境、 $1 \sim 100$ kPa压力

环境下对大气温度和压力传感器开展自动化标定测试, 结果表明温度标定的拟合相关系数和重复性误差分别为0.994 5、0.087%, 压力标定的拟合相关系数和重复性误差分别为0.996、0.046%, 证明了本测试系统的可行性。研制的大气环境温度与压力传感器自动化标定系统具有操作效率高、测量准确性高等优点, 可有效解决探空设备现场校准的技术难题, 为提高大气环境参数探测可靠性提供了重要支撑, 具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 李飞. 探空温度传感器的设计及测试[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- LI F. Design and testing of airborne temperature sensors [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [2] CHEN A B, LI D P, ZHENG D Z, et al. A fast calibration method for sensors of atmospheric detection system [J]. Applied Sciences, 2022, 12(22).

- [3] 孙强. 温度传感器自动检定系统设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
SUN Q. Temperature sensor automatic calibration system design [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [4] ALTENBURG H, MROOZ O, PLEWA J, et al. Semiconductor ceramics for NTC thermistors: the reliability aspects [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2001, 21(10-11): 1787-1791.
- [5] 高俊峰. 负温度系数热敏电阻的制备和电性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
GAO J F. Preparation and electrical properties of negative temperature coefficient thermistors [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
- [6] METZ R. Electrical properties of NTC thermistors made of manganite ceramics of general spinel structure: $Mn_{3-x-x'}M_xN_xO_4$ ($0 \leq x + x' \leq 1$; M and N being Ni, Co or Cu). Aging phenomenon study [J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35: 4705-4711.
- [7] CASTELAN P, AI B, LOUBIERE A, et al. Aging study of nickel-copper-manganite negative temperature coefficient thermistors by thermopower measurements [J]. *Journal of Applied Physics*, 1992, 72(10): 4705-4709.
- [8] SHPOTYUK O, KOVALSKIY A, MROOZ O, et al. Technological modification of spinel-based $Cu_xNi_{1-x-y}Co_yMn_{2-y}O_4$ ceramics [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2001, 21(10-11): 2067-2070.
- [9] SARRIÓN M L M, MORALES M. Preparation and characterization of NTC thermistors: nickel manganites doped with lithium [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(4): 915-921.
- [10] PLEWA J, ALTENBURG H, BRUNNER M, et al. Chemical-technological approach to the selection of ceramic materials with predetermined thermistor properties [J]. *Key Engineering Materials*, 2002, 206.
- [11] PARK K, LEE J K. Mn-Ni-Co-Cu-Zn-O NTC thermistors with high thermal stability for low resistance applications [J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57(4): 329-332.
- [12] 包宏权. 压力传感器结构设计和优化分析[D]. 南京: 东南大学, 2016.
BAO H Q. Structural design and optimisation analysis of pressure sensors [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [13] JANKOVIĆ N. Semiconductor sensors [J]. 1997.
- [14] BANNIKOPPA S, KATAGERI A C, BALAVALAD K B, et al. Design of piezoresistive pressure sensor for enhanced sensitivity [C]// 2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS). IEEE, 2016: 706-710.
- [15] 孙以材, 刘玉岭, 孟庆浩. 压力传感器的设计、制造与应用[M]. 冶金工业出版社, 2000.
SUN Y C, LIU Y L, MENG Q H. Design, manufacture and application of pressure sensors [M]. Metallurgical Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [16] 安跃. 压阻式压力传感器性能优化和结构设计[D]. 南京: 东南大学, 2017.
AN Y. Performance optimisation and structural design of piezoresistive pressure sensors [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [17] SMITH C S. Piezoresistance effect in germanium and silicon [J]. *Physical Review*, 1954, 94(1): 42.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 李强 (1987—), 男, 工程师, 主要研究方向为通信信息。



作者简介: 王建航 (2000—), 男, 主要研究方向为智能感测技术、多源信息融合与决策等。



通讯作者: 胡纯 (1987—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为先进传感与智能仪器、复杂极端环境感知。