

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313904

临近空间探空仪温度传感器设计*

宋小凡^{1,2} 刘清倦^{1,2} 姚澄^{1,2} 王亚楠^{1,2}

(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.南京信息工程大学江苏省气象探测与信息处理重点实验室 南京 210044)

摘要: 针对开展临近空间科学探测的需求增加,设计了一种基于微型珠状热敏电阻的临近空间探空仪温度传感器。首先用计算流体动力学(CFD)方法对探头进行仿真并计算出太阳辐射误差;然后使用逆向传播(BP)神经网络和遗传算法优化的逆向传播(GA-BP)神经网络训练数据比较预测模型;并搭建模拟临近空间条件的低气压风洞实验平台测试不同参数下的太阳辐射误差,比较测试结果与预测模型输出数据,证实传感器的测量精度。实验表明,本文提出的传感器探头的平均测量误差为0.007 3 K,误差均方根为0.009 8 K。

关键词: 临近空间;探空仪;计算流体动力学;珠状热敏电阻;遗传算法;逆向传播神经网络

中图分类号: TP212.9;P412.2;P422.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Design of temperature sensor for near space radiosonde

Song Xiaofan^{1,2} Liu Qingquan^{1,2} Yao Cheng^{1,2} Wang Yanan^{1,2}

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In response to the increasing demand for scientific exploration in proximity space, a temperature sensor for near-space sounding instruments has been devised, predicated upon miniature bead-shaped thermistors. This methodology encompasses several pivotal stages: Primarily, the Computational Fluid Dynamics technique was enlisted to simulate and quantify the solar radiation error entailing the sensor probe. Subsequently, a backpropagation network and optimized through a genetic algorithm-based backpropagation neural network were employed to train on the accumulated dataset, thus comparing and facilitating the construction of a predictive model. Furthermore, a low pressure wind tunnel experimental platform was erected to emulate conditions reminiscent of those in the near-space milieu. This permitted the evaluation of solar radiation errors under diverse parameter configurations. The obtained test results were then compared with the data output from the predictive model to validate the precision of the sensor's measurements. The experiments revealed that the average measurement error of the sensor probe was 0.007 3 K, with a root mean square error of 0.009 8 K.

Keywords: near space; radiosonde; computational fluid dynamics; bead-shaped thermistor; genetic algorithm; backpropagation neural network

0 引言

临近空间一般定义为距地面20~100 km的空域^[1],以往人们认为这一高度的大气过于稀薄,测得的大气环境数据难以对气象预测产生效果。随着全球气候变化的加剧,科学家发现平流层和对流层有强烈的相互作用^[2]。20世纪80年代,Quiroz^[3]分析美国探空观测资料时,得知中高

纬度平流层增温会引起平流层大气密度等参数的变化;2009年,吕仁达等^[4]指出,临近空间内大气基本处在辐射平衡状态,而平流层的温度垂直结构和辐射平衡之间存在密切联系;Zhao等^[5]利用SABER、激光雷达等多种观测资料对中层大气长期变化进行了综合评估,总结并获得了全球和南北半球多个区域不同高度的温度变化趋势,发现北半球平流层中上部和中间层下部的降温相对显著。因

收稿日期:2023-06-14

* 基金项目:国家自然科学基金(42275143)项目资助

此,对平流层中上部临近空间的大气进行探测非常有必要。近年来,临近空间飞行器成为国防和航空航天领域的热点,探测临近空间的温度等气象数据对飞行器的飞行安全保障有至关重要的作用^[6]。

传统探空仪由气球搭载,主流探空气球技术成熟,高度通常可达 30 km 左右。丁枫^[7]研究的阵列球形温度传感器,适用于测量 10~30 km 的大气环境,获得 0.16 K 的平均辐射误差。毛晨^[8]研究的平流层探空温度传感器平均辐射误差为 0.15 K。但大多数探空气球上升到 30 km 左右的高度有发生爆裂的风险。用于 30 km 以上的探空仪通常采用探空火箭携带至临近空间中上部并伞降。由于太阳辐射的影响,探空温度传感器的测量值会高于大气真实温度,由此产生的误差叫辐射误差。临近空间大气稀薄、太阳辐射更强导致临近空间探空仪太阳辐射误差高于低层大气^[9],特别在白天的探空观测中太阳辐射是主要测量误差来源^[10],因此有必要研究如何减小太阳辐射对探空温度传感器所造成的加热误差。温度传感器是探空仪最重要的一种载荷,国内探空仪搭载的温度传感器主要包括珠状热敏电阻、棒状热敏电阻、片状热敏电阻和热电偶。棒状热敏电阻长度、体积较大不利于降低太阳辐射吸收功率,也不利于提高提高对流换热能力;片状热敏电阻尺寸指标与新一代珠状热敏相比不占优势;热电偶的物理原理导致其测量不确定性比 NTC 热敏电阻等器件高。针对上述应用需求,本文提出一种针对 30 km 以上空间的临近空间探空仪,搭载一种微型珠状热敏电阻温度传感器^[11],微型珠状热敏电阻的直径降低至小于 1 mm,其体积和大部分传统的温度传感器相比具有一定的优势,对减少太阳辐射吸收功率,促进和空气的对流换热有利。此外太阳辐射误差随大气密度、气流速度、太阳辐射强度等的变化而变化,为了修正太阳辐射误差,本文提出采用计算流体动力学(computational fluid dynamic, CFD)方法进行模拟,利用遗传算法优化的逆向传播(genetic algorithm-optimized backpropagation, GA-BP)神经网络训练预测模型得到误差修正算法,并建立模拟临近空间环境的低气压风洞实验平台,验证临近空间温度传感器的精度和可靠性。

1 临近空间探空温度传感器设计与 CFD 分析

1.1 物理模型

本文针对临近空间大气物理环境和探空仪搭载火箭升空的特点,提出一种基于微型珠状热敏电阻温度传感器的探空仪系统设计方案,其结构框图如图 1 所示。

由于在地面进行气象探测时使用的防辐射罩体积大、散热差、热惰性大,会强烈地吸收太阳辐射,产生显著升温,形成强烈的红外辐射源;又因高空大气密度低导致散热本身较地面更慢,且探空仪被投放后的剧烈摆动过程中,防辐射罩易对传感器探头造成热污染。因此,防辐射罩会对温度测量造成干扰,不适用于临近空间探空仪。本文提出的

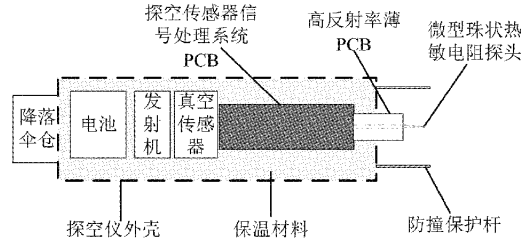


图 1 探空仪结构示意图

设计是将温度传感器探头置于探空仪的最前端。为了防止运输、安装过程中操作人员意外触碰损坏探头,在探空仪头部设有两根长度为 60~80 mm、直径为 2~3 mm 的针状保护杆。保护杆表面为高反射率材质的铝或银减少热传导。

1.2 多物理场仿真分析

根据太阳辐射对临近空间探空仪上温度传感器测温误差的影响以及低气压风洞实验平台的条件,本文主要围绕 30~42 km 海拔高度,研究太阳辐射强度、风速、太阳高度角与太阳辐射误差的关系。通过 ICEM 网格分割软件对不同计算区域的微型珠状热敏电阻模型进行不同尺寸大小的四边形网格划分,在 Fluent 流固耦合分析中开启 Realizable 的 $k-\epsilon$ 湍流模型,使模型仿真的收敛性、精确度得以保障^[12]。用 CFD 方法创建微型珠状热敏电阻的流体动力学模型,如图 2 所示。

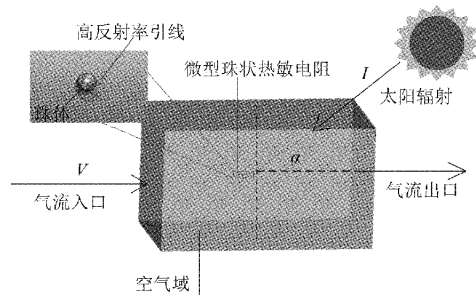


图 2 仿真模型原理

图 2 中, V 表示风速、 I 表示太阳辐射强度、 α 表示太阳高度角、 ΔT 表示辐射误差。不同临近空间大气环境下微型热敏电阻传感器探头的模拟温度场如图 3 所示,微型珠状热敏电阻探头上的辐射误差分别为 $\Delta T_1 = 0.0280 \text{ K}$ 、 $\Delta T_2 = 0.0277 \text{ K}$ 。

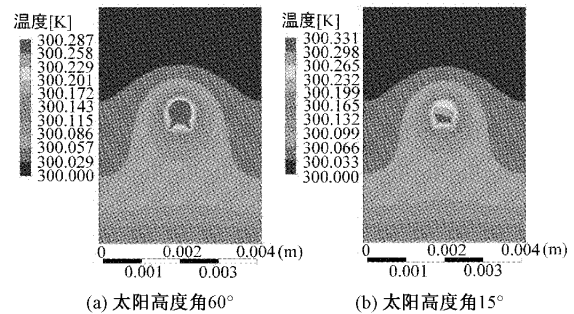


图 3 海拔 30 km 温度传感器探头温度场分布

1.3 不同环境因素对辐射误差的影响

为了探究微型珠状热敏电阻温度传感器探头在不同海拔高度、不同风速、不同太阳辐射强度、不同太阳高度角影响下的辐射误差,本文通过CFD方法分别对不同条件下的微型珠状热敏电阻温度传感器探头进行仿真。依据海拔高度为30~42 km范围设置对应的空气密度,风速 V 设置为0.5~6 m/s,太阳辐射强度 I 设置为200~1 400 W/m²,太阳高度角 α 设置为0°~75°。珠状热敏电阻探头的尺寸为0.53 mm,太阳辐射误差的仿真结果如图4所示。

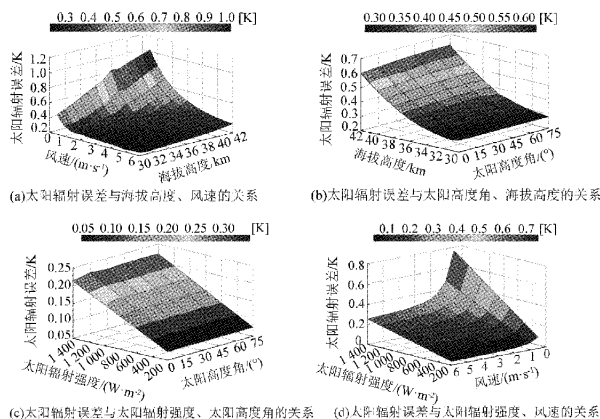


图4 太阳辐射误差与海拔高度、风速、太阳高度角、太阳辐射强度的关系图

由图4(a)可知,相同风速下,太阳辐射误差随着海拔高度的增加而变大;相同海拔高度下,太阳辐射误差随着风速的降低而增大。由图4(b)可知,当海拔高度一定时,太阳高度角对辐射误差影响小,误差最大值为0.033 K;当太阳高度角不变时,太阳辐射误差随着海拔高度的增长而增长的趋势明显,最大值为0.347 K。由图4(c)可知,当太阳辐射强度一定时,太阳高度角对太阳辐射误差的影响较小;太阳辐射误差随着太阳辐射强度的增加而增加。由图4(d)可知:当风速一定时,太阳辐射误差随着太阳辐射强度的增加而增加;当太阳辐射强度一定时,太阳辐射误差随着风速的增加而降低。风速为0.5~2.5 m/s时太阳辐射误差最大为0.365 K,而风速为2.5~6 m/s时太阳辐射误差最大为0.041 K。

2 GA-BP神经网络算法设计

2.1 GA-BP神经网络

遗传算法(genetic algorithm, GA)是一种用于并行随机搜索的优化方法。由于逆向传播(backpropagation, BP)神经网络总是落在梯度的负方向,易收敛到局部最小值,无法获得全局最优解。而GA在解决无约束非线性优化问题方面性能强大,通常可以最大程度逼近全局最优解^[13]。所以本文引入遗传算法优化的BP神经网络来预测数据,GA-BP流程如图5所示。

遗传算法将自然生物进化原则引入到码组最佳参数的

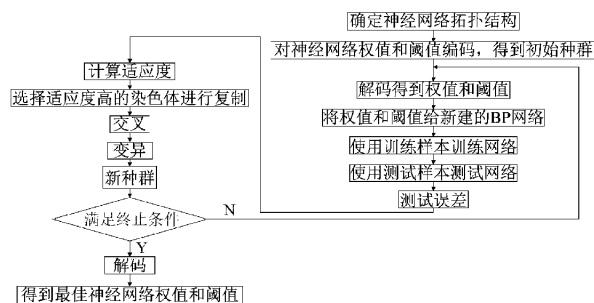


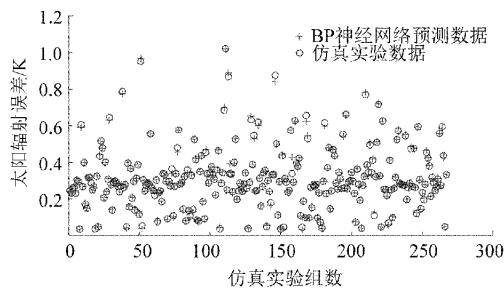
图5 遗传算法优化流程

形成中,通过遗传选择、交叉和突变,根据选择的适应度过筛个体^[14]。如图5所示,遗传算法在优化过程经历选择、交叉和变异3个步骤,找到个体的最佳自适应值,得到最佳权值和阈值,经过网络训练预测输出。本文设置最大遗传代数为50代、个体长度为10、代沟为0.95、交叉概率0.7、变异概率0.01。

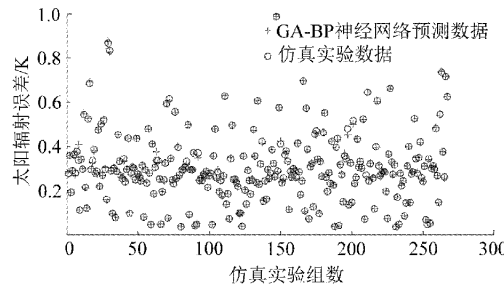
2.2 GA-BP与BP神经网络对比分析

遗传算法优化BP神经网络的进化会随着进化代数的增长误差变化越来越小,到达最大遗传代数时,测试集预测数据与仿真数据的绝对误差降低至0.052 K。

为了方便对比BP神经网络、GA-BP神经网络的误差修正效果,取一组仿真数据中的76%的数据构成训练集,剩下的24%的数据构成测试集。对上述两种网络进行训练、测试操作,分别将两者的拟合输出结果与仿真实验数据进行对比,得到BP神经网络预测数据误差以及GA-BP神经网络预测数据误差如图6所示。



(a) 仿真数据与BP神经网络训练集预测数据的误差对比



(b) 仿真数据与GA-BP神经网络训练集预测数据的误差对比

图6 仿真数据与训练集预测数据的误差对比

BP神经网络拟合数据与仿真数据的平均测量误差为0.005 1 K,均方根误差为0.009 6 K。GA-BP神经网络拟

合数据的拟合度为 0.999 07,与仿真数据的平均测量误差为 0.003 4 K,均方根误差为 0.006 7 K。对比可知,GA-BP 神经网络预测效果更佳,对于不同环境条件下太阳辐射误差预测更精确。

3 硬件设计与实验分析

3.1 硬件电路设计

为临近空间探空仪微型珠状热敏电阻温度传感器的硬件电路 PCB 设计如图 7 所示,主要包括主控制器、温度采集电路、数据通信电路。综合考虑功耗及成本问题,选择 STM32F103C8T6 微处理器作为主控芯片^[15]。为了达到高精度的电路设计目标,本文采用高分辨率、低噪声、低功耗的 $\Sigma\Delta$ 型 ADC 芯片 AD7794 对温度传感器进行采样。将工作电路与测量电路分开以减少线阻影响,借助模数转换器的前置仪表放大器的高阻抗特性,引入的测量误差减小。

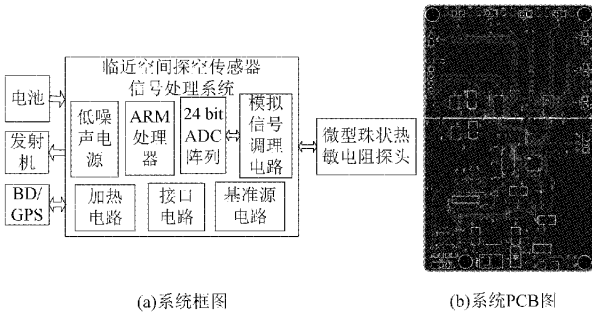


图 7 探空仪系统框图及传感器 PCB 图

为了进一步提高采集速度,本文采用阵列式微型珠状热敏电阻做测温模块配合多个 AD7794 模数转换模块同时工作进行交错采集^[16],可以大大提高采集速率。

3.2 实验平台搭建

为了验证微型珠状热敏电阻温度传感器的测量精度,本文使用低压风洞、太阳能模拟器构建了一套实验装置,用于模拟临近空间环境状况,如图 8 所示。实验装置包含 2 台并联工作的真空泵模拟 30 km 以上高空的大气环境;1 个真空腔作为低气压风洞;1 台气压检测仪保证腔内气压达到设定值;1 台气体流速检测仪测试风速达到预设定的值;1 台太阳能模拟器可产生不同强度的太阳辐射模拟中高空环境的太阳光照。将珠状热敏电阻探头放置在真空腔内,调节流量计并扭动进气口阀门控制进入真空腔内的气体流量、监控腔内气体流速,从而模拟温度传感器伞降过程中的气流速度。使用挡板阀控制腔内气压、真空计监测气压值,以表征不同海拔高度的大气密度^[17]。

3.3 实验结果分析

将微型珠状热敏电阻温度探头放置于低气压风洞实验装置中,对海拔高度、气流速度、太阳辐射强度以及太阳高度角与太阳辐射误差的关系进行研究。设置海拔高度范围为 30~42 km,气流速度为 0.5~6 m/s,太阳辐射强度为

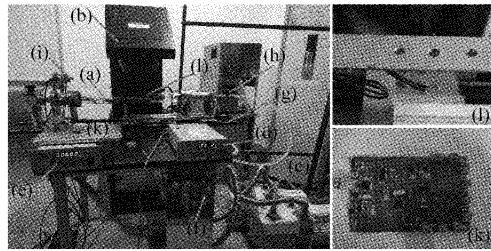


图 8 低气压风洞实验装置

200~1 400 W/m²,太阳高度角范围为 0°~75°。部分实验数据如表 1 所示。

表 1 部分实验条件数据

| 实验组数 | 海拔高度/km | 太阳辐射强度/(W·m ⁻²) | 风速/(m·s ⁻¹) | 太阳高度角/(°) |
|------|---------|-----------------------------|-------------------------|-----------|
| 1 | 30 | 1400 | 1 | 0 |
| 2 | 30 | 1 400 | 2 | 0 |
| 3 | 30 | 1 400 | 2 | 75 |
| 4 | 30 | 1 400 | 3 | 0 |
| 5 | 35 | 1 400 | 3 | 0 |
| 6 | 36 | 400 | 2 | 15 |
| 7 | 36 | 800 | 2 | 15 |
| 8 | 35 | 800 | 2 | 45 |
| 9 | 35 | 1 000 | 2 | 60 |
| 10 | 35 | 1 400 | 2 | 60 |
| 11 | 31 | 1 400 | 2 | 75 |

根据表 1 所列环境条件得到的实验数据以及相同环境条件下 BP 神经网络和 GA-BP 神经网络预测得到的太阳辐射误差数据如表 2 所示。

为了便于观察 3 组数据的差别将这 3 组数据在 1 张图上展示出来,如图 9 所示。

图 9 中星形代表风洞实验数据,方形代表遗传算法优化后的 BP 神经网络预测数据,下三角代表没有经过优化的 BP 神经网络预测数据。表 2 的后两列为 BP 神经网络以及遗传算法优化后的 BP 神经网络的预测数据与实验数据的误差,预测误差对比图如图 10 所示。

图 10 中带圆点的线表示实验数据与 GA-BP 神经网络预测数据的误差,带三角的线代表实验数据与 BP 神经网络的预测数据的误差。由图 10 可知,总的趋势大致相同,但红色线尖峰更多。根据平均绝对误差以及均方根误差计算式可得,实验数据与 BP 神经网络预测数据的平均绝对误差为 0.008 9 K,均方根误差为 0.011 K。GA-BP 神经网络预测数据与实验数据的平均绝对误差为 0.007 3 K,均方根误差为 0.009 8 K。

表2 对应表1的实验结果及预测数据

| 实验组数 | 风洞实验数据 | BP神经网络预测太阳辐射误差 | GA-BP神经网络预测太阳辐射误差 | BP神经网络预测误差 | GA-BP神经网络预测误差 |
|------|--------|----------------|-------------------|------------|---------------|
| 1 | 0.337 | 0.312 | 0.321 | -0.025 | -0.016 |
| 2 | 0.280 | 0.245 | 0.278 | -0.035 | -0.002 |
| 3 | 0.280 | 0.255 | 0.280 | -0.025 | 0.000 |
| 4 | 0.264 | 0.230 | 0.269 | -0.034 | 0.005 |
| 5 | 0.285 | 0.246 | 0.277 | -0.039 | -0.008 |
| 6 | 0.132 | 0.099 | 0.099 | -0.033 | -0.033 |
| 7 | 0.235 | 0.193 | 0.209 | -0.042 | -0.026 |
| 8 | 0.196 | 0.163 | 0.199 | -0.033 | 0.003 |
| 9 | 0.266 | 0.213 | 0.246 | -0.053 | -0.020 |
| 10 | 0.365 | 0.312 | 0.347 | -0.053 | -0.018 |
| 11 | 0.267 | 0.257 | 0.288 | -0.010 | 0.021 |

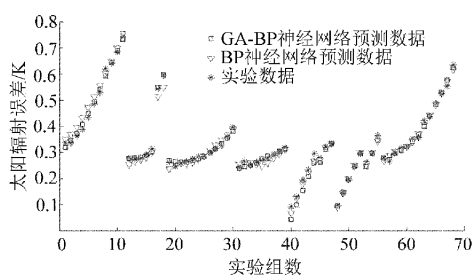


图9 实验数据与预测数据对比

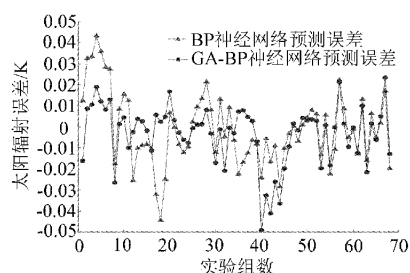


图10 实验数据与预测数据的误差比较

4 结 论

本文设计了一种临近空间探空仪温度传感器,突破了传统探空仪的高度限制,使用微型珠状热敏电阻探头从而降低太阳辐射误差。首先利用CFD仿真不同环境参数下传感器辐射误差,其次建立基于GA-BP的预测模型,再利用低气压风洞和太阳模拟器作为实验平台进行验证研究,得出如下结论:

微型珠状热敏电阻探头,当太阳辐射强度和太阳高度角一定时,太阳辐射误差与海拔高度同向增长,太阳辐射误差与风速成负相关;当海拔高度和风速一定时,太阳辐射误差与太阳辐射强度成正比,太阳辐射误差与太阳高度角成反比。

微型珠状热敏电阻温度传感器温度测量误差的均方根误差为0.0098 K,可有效降低太阳辐射误差,满足大气环境观测的精度要求。

GA-BP神经网络拟合的太阳辐射误差预测模型拟合优度为0.99907满足拟合精度需求。

优化算法中最大遗传代数、变异交叉概率等参数的设置对预测精度的影响,后续会继续开展实验研究并进一步完善。

参考文献

- [1] 韩丁,盛夏,尹珊建,等. 临近空间大气温度和密度特性分析[J]. 遥感信息, 2017, 32(3): 17-24.
- [2] 黄荣辉,陈文,魏科,等. 平流层大气动力学及其与对流层大气相互作用的研究: 进展与问题[J]. 大气科学, 2018, 42(3): 463-487.
- [3] QUIROZ R S. Variations in zonal mean and planetary wave properties of the stratosphere and links with the troposphere[J]. Pure and Applied Geophysics, 1980, 118(1): 416-427.
- [4] 吕达仁,陈泽宇,郭霞,等. 临近空间大气环境研究现状[J]. 力学进展, 2009, 39(6): 674-682.
- [5] ZHAO X R, SHENG Z, SHI H Q, et al. Middle atmosphere temperature changes derived from SABER observations during 2002-20[J]. Journal of Climate, 2021, 34(19): 7995-8021.
- [6] 范志强. 临近空间大气环境探测资料分析研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2018.
- [7] 丁枫. 新型云水含量传感器与阵列式球形温度传感器设计[D]. 南京:南京信息工程大学, 2021.
- [8] 毛晨. 平流层平漂式探空温湿度传感器设计[D]. 南京:南京信息工程大学, 2022.
- [9] ELIZABETH C K, PETER K T. Correction of marine air temperature observation for solar radiation

- effects [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1993, 10(6): 900-906.
- [10] 刘清倦, 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.
- [11] FRIEHE C A, KHELIF D. Fast-response aircraft temperature sensors[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1992, 9(6): 784-795.
- [12] 任建波, 苗超, 李强, 等. 基于数值仿真的 MED-TVC 喷射泵参数优化与性能研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10): 82-88.
- [13] 吴振, 吴红兰. 基于改进遗传算法的无人机航路规划[J]. 电子测量技术, 2021, 44(24): 52-58.
- [14] 吴有训, 王周青, 汪文烈, 等. 遗传算法优化 BP 网络的汛期降水预测模型[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(2): 299-303.
- [15] 陈继华, 吴晨曷, 谌志新. 基于 STM32 的 Delta-Sigma 调制的鱼探仪发射机信号源设计[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(S1): 67-73.
- [16] 史籍, 常越, 李海国. 基于 FPGA 的多通道数据采集系统的设计[J]. 电气自动化, 2016, 38(1): 15-18.
- [17] 孙星. 基准探空温度传感器设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.

作者简介

宋小凡, 硕士研究生, 主要研究方向为传感器设计及其信号处理。

E-mail: 1643525910@qq.com

刘清倦(通信作者), 教授, 主要研究方向为微电子 MEMS 传感器技术。

E-mail: andyu@d@163.com