

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416182

机载探空温度传感器设计与研究^{*}毛家龙^{1,2,3} 刘清倦^{1,2,3} 潘旭^{1,2,3} 王柯^{1,2,3}

(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; 3.南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要: 针对无人机开展高空气象探测的需求,本文设计了一种带防辐射罩铠装铂电阻温度传感器。首先,采用计算流体动力学(CFD)的方法计算出有无防辐射罩铠装铂电阻温度传感器在多物理场下的太阳辐射误差,并进行对比分析。然后,使用支持向量机(SVM)和粒子群优化支持向量机(PSO-SVM)算法训练数据比较预测模型。最后,搭建低气压风洞实验平台模拟高空大气环境,对比实验数据与算法预测结果。实验表明,本文提出的带防辐射罩铠装铂电阻温度传感器测量的平均误差为 0.014 1 K,均方根误差为 0.015 0 K。

关键词: 无人机; 铠装铂电阻; 防辐射罩; 计算流体动力学; 粒子群优化支持向量机

中图分类号: TN376 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.402

Design and research of airborne radiosonde temperature sensor

Mao Jialong^{1,2,3} Liu Qingquan^{1,2,3} Pan Xu^{1,2,3} Wang Ke^{1,2,3}

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. The Jiangsu Key Lab for Meteorological Detection and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Aiming at the demand of UAV for high-altitude weather detection, in this paper, an armoured platinum resistance temperature sensor with radiation shield is designed. Firstly, a computational fluid dynamics (CFD) approach was employed to work out the solar radiation error of armoured platinum resistance temperature sensors with or without radiation shield under multi-physical fields, and the comparative analysis was carried out. Then, Support Vector Machine (SVM) and Particle Swarm Optimization Support Vector Machine (PSO-SVM) algorithms were used for training data to compare the the forecast models. Finally, a low-pressure wind tunnel experimental setup was constructed for simulating the upper atmosphere environment, and the experimental data and the algorithm prediction results were compared. The experimental findings indicate that the mean measurement discrepancy of the proposed platinum resistance temperature sensor with radiation shield is 0.014 1 K, and the root mean square error is 0.015 0 K.

Keywords: unmanned aerial vehicle; armoured platinum resistor; radiation shield; computational fluid dynamics; particle swarm optimization support vector machine

0 引言

近年来由于全球变暖加快,导致干旱、暴雨、冰雹、台风等极端天气频率^[1]的增加,我国常受自然灾害的困扰,其中气象灾害^[2]占各类自然灾害的70%以上,并且仍有上升趋势。因此,加强气象探测^[3]体系的建设,这对于减小数值分析场和预报场^[4]引起的误差有着关键作用。从而应对突发的气象灾害可以提供更为准确的气象资料,可以有效降低

气象灾害带来的损失。由于雷达、卫星等传统气象预警系统^[5]的垂直分辨率较差,并且垂直分辨率较好的传统探空仪是由气球搭载^[6],很容易受到冰雹、暴雪、台风等恶劣天气的影响,导致探空仪轨迹的不确定性,传统气象探测系统很难获取极端天气下大气的内部资料。因此,近年来国内外通过无人机搭载探空仪升空、投放用来探测极端天气中大气数据的方式发展较快,对于气象探测起着突破性的作用。

收稿日期:2024-06-04

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(42275143, 41875035)项目资助

无人机下投探空仪是一种重要的气象探测手段,但其本身的稳定性会直接影响到观测大气资料的质量。所以,为了提高气象探测的精度^[7],国内外很多学者都投入到这项研究中。Faber 等^[8]曾对探空仪尾迹效应进行分析,发现探空资料中存在热尾迹效应会引起大气环境温度偏高导致测量温度偏高,但是未考虑到太阳辐射对温度传感器测量精度的影响。毛晨^[9]研究的阵列式热电偶温度传感器获得了 0.135 K 平均测量误差,刘清倦等^[10]设计的基于压电陶瓷振动温度传感器获得的平均测量误差为 0.050 K,但是都未考虑到探空仪在下投过程中剧烈摇摆引起太阳高度角变化对传感器辐射误差的影响。

大气温度一直是气象探测的重要参数,本文设计了一种带防辐射罩铠装铂电阻温度传感器。铠装铂电阻温度传感器可以避免传感器在冰雹、暴雪等极端天气下直接裸露,防止恶劣的大气环境对温度传感器造成不可逆的损伤,保护温度传感器测量的稳定性。此外,在气象探测中,太阳辐射是温度传感器误差的主要来源^[11],为了降低传感器采集温度时的辐射误差,本文在传感器外部设计了一种圆环状镀银铝板防辐射罩,从硬件优化与软件仿真结合的角度设计高精度探空传感器。首先采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)的方法对比有无防辐射罩传感器的辐射误差。然后使用支持向量机(support vector machines, SVM)和粒子群优化支持向量机(particle swarm optimization support vector machines, PSO-SVM)算法训练数据比较预测模型。最后使用风洞实验平台验证防辐射罩的可靠性。实验表明,本文设计的带防辐射罩铠装铂电阻温度传感器测量的平均误差为 0.014 1 K,均方根误差为 0.015 0 K,满足机载探空温度传感器高精度测量的要求。

1 探空传感器结构设计与仿真分析

1.1 探空仪结构设计

本文针对平流层下部和对流层的高空大气环境以及无人机下投式探空仪的特点,提出了一种新型的具有防辐射罩铠装铂电阻测温传感器探空仪的设计方案。将探空传感器放在探空仪的最前端,并在其外面放置一个防辐射罩。探空仪的外壳采用保温性比较好的材料制成,电路板(printed circuit board, PCB)采用高反射率薄膜制造,便于反射太阳辐射。探空仪的结构图如图 1 所示。

1.2 传感器结构设计

由于无人机在对流层开展高空气象探测时会遇到恶劣的天气环境,为了避免温度传感器在对流层中遭受如雨雪、冰雹等极端天气的影响,导致温度传感器直接裸露而引起传感器不可逆的损坏,影响温度传感器测量的稳定性,因此,本文设计了柱状铠装铂电阻温度传感器。柱状铠装铂电阻温度传感器是用柱状不锈钢外壳进行封装,此类传感器相比于常用的珠状热敏电阻,更适合在恶劣的大气环境

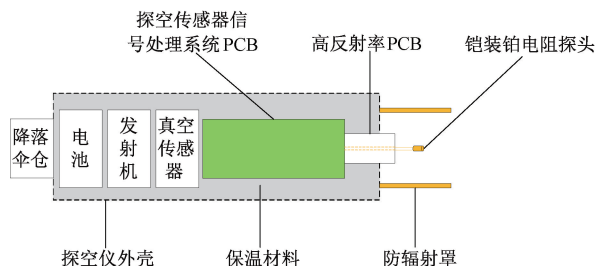


图 1 探空仪结构图

Fig. 1 Sounding structure diagram

下使用并且具有精度高、线性度优异、年漂小的优点。此外,考虑到太阳辐射是导致传感器探头测温误差的首要原因,所以无人机高空探测温度传感器防辐射罩的设计,应尽可能地防止阳光照射到温度传感器上,还要尽量提高传感器探头内部和外部的空气互换的频率,将里面的热流驱散。

本文设计的柱状铠装铂电阻温度传感器直径为 2 mm、高为 5 mm,引线长度为 10 mm、直径为 0.3 mm。而防辐射罩是一个外面镀银、里面涂黑的铝环。防辐射罩外侧银层反射率高达 95%,可以有效反射太阳辐射,而内部黑色涂层的吸收率为 95%,可以有效的吸收太阳辐射,避免防辐射罩内表面将太阳辐射反射到温度传感器上。防辐射罩的直径为 30 mm、高为 40 mm、厚度为 0.7 mm。防辐射罩和铠装铂电阻温度传感器结构图如图 2 所示。

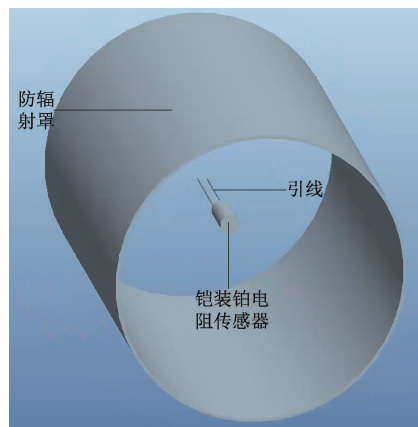


图 2 探空传感器结构图

Fig. 2 Structure diagram of sounding sensor

1.3 划分网格和流固耦合分析

传感器外部实际环境为无限大的空气域,但是在 CFD 的方法中不能这样设置^[12]。因此,本文通过(integrated computer engineering and manufacturing, ICEM)计算机工程与制造一体化网格划分和 Fluent 流固耦合分析来平衡计算效率和在实际环境中的测量精度^[13],模拟多物理场对于温度传感器测量误差的影响。图 3(a)展示出不带防辐射罩温度传感器的流固耦合模型,有防辐射罩温度传感器流固耦合模型如图 3(b)。使用 ICEM 对传感器流固耦合模型进行网格划分,首先不带防辐射罩温度传感器流固耦

合模型的空气域大小设置为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$, 网格数量为 2 848 426, 网格质量均大于 0.38。其次带防辐射罩温度传感器流固耦合模型的空气域大小设置为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, 网格数量为 3 936 108, 网格质量均大于 0.36, 不带防辐射罩和带防辐射罩温度传感器网格模型质量均达到 Fluent 流固耦合分析的网格质量要求。Fluent 流固耦合分析软件对两个网格模型都打开能量方程、k-epsilon 模型、太阳辐射模型, 设置太阳高度角、气流速度入口面、压力出口面、滑移壁面。

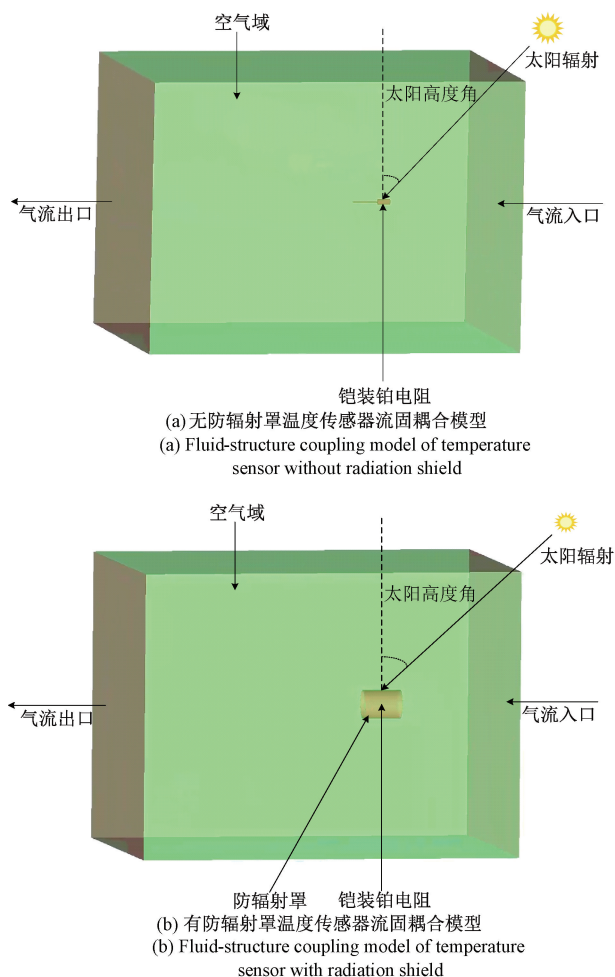


图3 传感器流固耦合模型

Fig. 3 Fluid-structure coupling model of sensor

1.4 温度场分析

为了模拟铂装铂电阻温度传感器在无人机下投过程中的大气环境, 根据海拔高度在 $2 \sim 20\text{ km}$ 范围内, 设定不同的空气密度^[14], 空气流速设定在 $5 \sim 16\text{ m/s}$, 在 CFD 仿真过程中太阳辐射强度设置为 $1\,200\text{ W/m}^2$ 。对无防辐射罩温度传感器探头进行 CFD 仿真分析, 首先将海拔高度设定为 2 km , 空气流速设定为 5 m/s , 并且在图 4(a) 中示出了它的温度场, 其太阳辐射误差为 0.852 K 。然后, 将海拔高度设定为 10 km , 空气流速设定为 10 m/s , 并且在图 4(c) 中示出了它的温度场, 其太阳辐射误差为 0.955 K 。最后, 将海拔高度设定为 20 km , 空气流速设定为 16 m/s , 并且在图 4(e) 中示出了它的温度场, 其太阳辐射误差为 1.717 K 。

中示出了它的温度场, 其太阳辐射误差为 0.955 K 。最后, 将海拔高度设定为 20 km , 空气流速设定为 16 m/s , 并且在图 4(e) 中示出了它的温度场, 其太阳辐射误差为 1.717 K 。

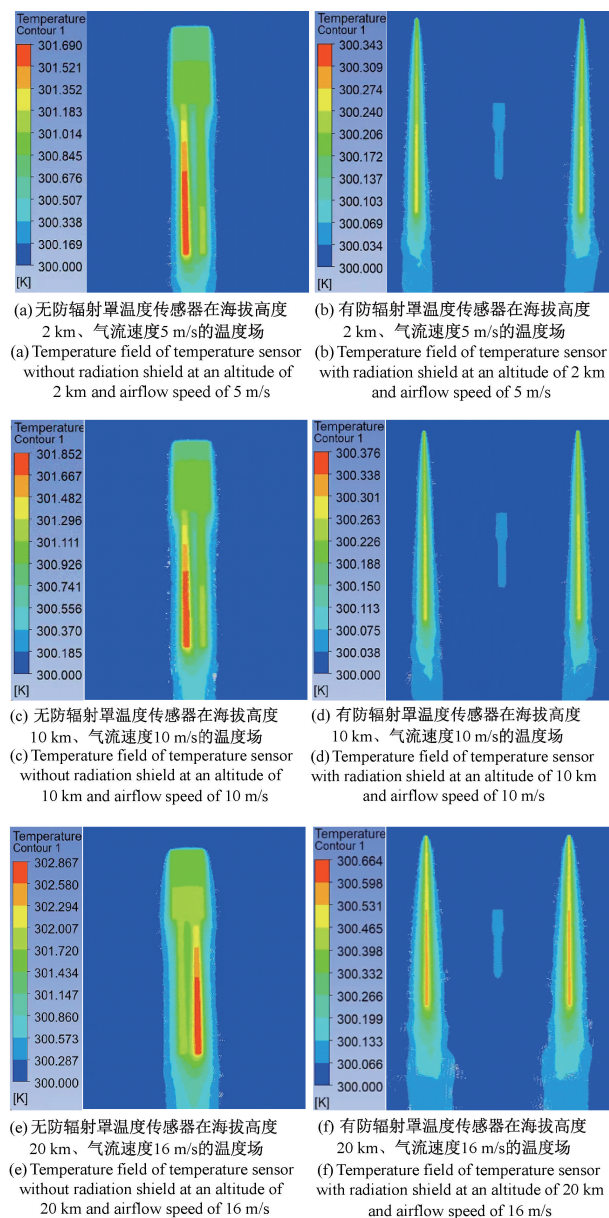


图4 传感器温度场

Fig. 4 Sensor temperature field

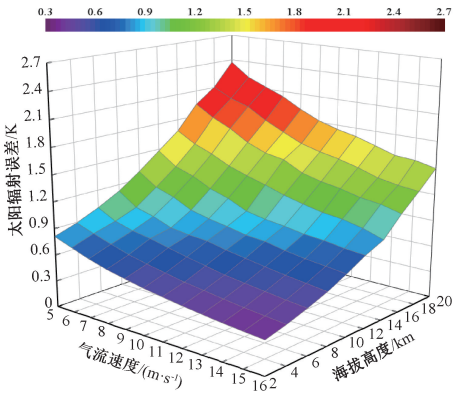
对有防辐射罩温度传感器探头进行 CFD 仿真分析, 设置仿真的环境条件和不带防辐射罩探头保持一致。首先, 将海拔高度设置为 2 km , 空气流速设置为 5 m/s , 其温度场如图 4(b) 所示, 其太阳辐射误差为 0.051 K 。然后, 将海拔高度设置为 10 km , 空气流速设置为 10 m/s , 其温度场如图 4(d) 所示, 其太阳辐射误差为 0.057 K 。最后将海拔高度设置为 20 km , 空气流速设置为 16 m/s , 其温度场如图 4(f) 所示, 其太阳辐射误差为 0.104 K 。通过将无防辐射罩和有防辐射罩传感器探头放置在不同环境下进行对比

分析双方的温度场,可知本文设计的防辐射罩对于降低温度传感器的太阳辐射误差效果较好。

1.5 仿真结果分析

由于探空仪在无人机下投的过程中自身会发生震动,引起温度传感器的太阳高度角发生变化,因此本文设置 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的太阳高度角。设定太阳辐射强度为 $1\,200\text{ W/m}^2$,空气流速为 $5\sim 16\text{ m/s}$,海拔高度设置为 $2\sim 20\text{ km}$,仿真实际的大气环境。本文主要从不同海拔高度、空气流速、太阳高度角,来研究有无防辐射罩传感器的辐射误差。无防辐射罩传感器 CFD 仿真结果如图 5 所示,有防辐射罩传感器 CFD 仿真结果如图 6 所示。

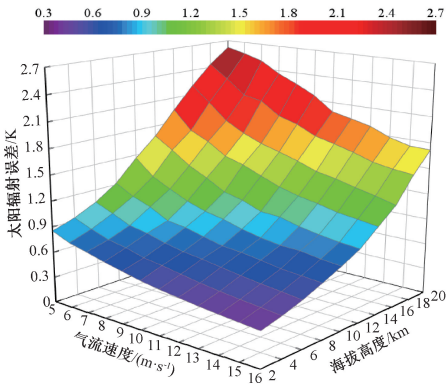
由图 5 和图 6 可知,带有防辐射的温度传感器比不带防辐射的温度传感器太阳辐射误差小很多。并且在太阳高度角为 $0^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的环境下,防辐射罩都可以有效的抵挡阳光的辐射。在此基础上,进一步证实了本论文所提出的防辐射罩的效果好,可以有效的降低太阳辐射对温度传感器测量精度的影响。由图 6 可知,当高度角和海拔高度保持不变时,带防辐射罩传感器辐射误差会随着空气流速的增大



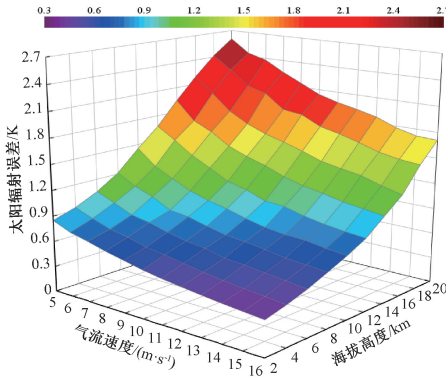
(c) 太阳高度角为 40° 时无防辐射罩传感器辐射误差与气流速度、海拔高度之间的关系
(c) The relationship between the radiation error of the sensor without the radiation shield and the airflow speed and the altitude when the solar altitude angle is 40°

图 5 无防辐射罩传感器辐射误差与太阳高度角、气流速度、海拔高度之间的关系

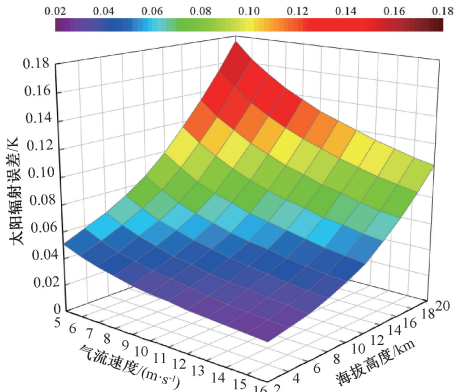
Fig. 5 The relationship between the radiation error of the sensor without the radiation shield and the solar elevation angle, the airflow speed, and the altitude



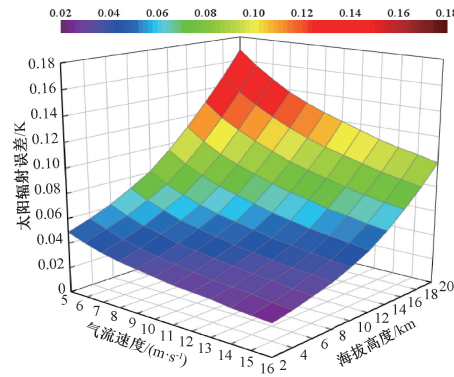
(a) 太阳高度角为 0° 时无防辐射罩传感器辐射误差与气流速度、海拔高度之间的关系
(a) The relationship between the radiation error of the sensor without the radiation shield and the airflow speed and the altitude when the solar elevation angle is 0°



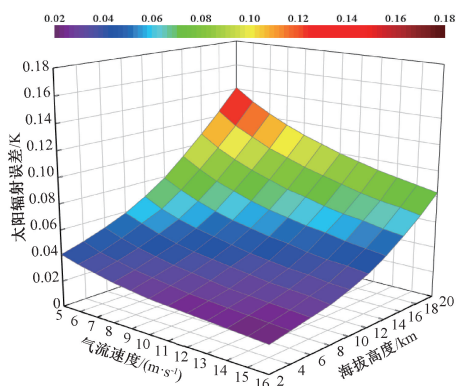
(b) 太阳高度角为 20° 时无防辐射罩传感器辐射误差与气流速度、海拔高度之间的关系
(b) The relationship between the radiation error of the sensor without the radiation shield and the airflow speed and the altitude when the solar altitude angle is 20°



(a) 太阳高度角为 0° 时有防辐射罩传感器辐射误差与气流速度、海拔高度之间的关系
(a) The relationship between the radiation error of the sensor with the radiation shield and the airflow speed and the altitude when the solar elevation angle is 0°



(b) 太阳高度角为 20° 时有防辐射罩传感器辐射误差与气流速度、海拔高度之间的关系
(b) The relationship between the radiation error of the sensor with the radiation shield and the airflow speed and the altitude when the solar elevation angle is 20°



(c) 太阳高度角为40°时有防辐射罩传感器辐射误差与气流速度、海拔高度之间的关系

(c) The relationship between the radiation error of the sensor with the radiation shield and the airflow speed and the altitude when the solar elevation angle is 40°

图6 有防辐射罩传感器辐射误差与太阳高度角、气流速度、海拔高度之间的关系

Fig. 6 The relationship between the radiation error of the sensor with the radiation shield and the solar elevation angle, the airflow speed, and the altitude

而减小。当海拔8 km、高度角0°时,空气流速为5 m/s,传感器辐射误差最大,为0.074 K,空气流速为16 m/s,传感器探头的辐射误差最小,为0.038 K。当高度角和空气流速一定时,带防辐射罩温度传感器探头的太阳辐射误差会随着海拔高度的增大而增大。当空气流速为8 m/s、高度角20°时,海拔为2 km,传感器探头的辐射误差最小,为0.037 K,海拔为20 km,传感器辐射误差最大,为0.138 K。当海拔高度和空气流速一定时,带防辐射罩温度传感器探头的太阳辐射误差会随着高度角的增大而减小。当海拔16 km、空气流速12 m/s时,高度角为0°,传感器辐射误差最大,为0.086 K,太阳高度角为40°,传感器探头的辐射误差最小,为0.069 K。因此,从仿真结果分析,本文设计的防辐射罩对于机载下投式探空温度传感器提高测量精度方面有着巨大的潜力。

2 PSO-SVM 神经网络算法设计

2.1 SVM 神经网络算法设计

在解决小样本、非线性、高纬度的问题中,SVM 神经网络算法有着巨大的优势,将上文带有防辐射罩温度传感器 CFD 仿真的环境参数和太阳辐射误差数据作为此算法的训练集:

$$T = \{(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N)\} \quad (1)$$

式中: x_i 是第 i 个环境参数, y_i 是在 x_i 环境下的太阳辐射误差, N 是样本的数量。

SVM 神经网络算法的回归模型如下:

$$f(x) = \omega \cdot \varphi(x) + b \quad (2)$$

式中: $\varphi(x)$ 为回归模型的非线性输入与输出对应关系; ω

为回归模型的加权数; b 为回归模型的阈值。

SVM 神经网络算法的回归函数如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) k(x_i, x_j) + b \quad (3)$$

式中: α_i 和 α_i^* 是两个拉格朗日乘子; $k(x_i, x_j)$ 是 SVM 神经网络的核函数。

核函数的径向基函数在将数据转换到高维空间方面展现出优秀的非线性特性^[15],能有效地捕获数据间的复杂关系。同时由于其较小的复杂度,使用径向基函数作为核函数可以在一定程度上降低计算成本,同时保留较好的映射能力,因此被选用作为本算法的核函数:

$$k(x_i, x_j) = \exp(-g \|x_i - x_j\|^2) \quad (4)$$

SVM 神经网络算法在引入核心函数之后的回归函数如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) \exp(-g \|x_i - x_j\|^2) + b \quad (5)$$

式中: x_j 为类别标签; g 是一个核函数参数,其决定了核函数在局部的影响范围。当 g 达到其最优值时,模型的泛化能力也达到最佳状态。如果 g 值太大或太小,都会导致 SVM 神经网络模型泛化能力下降。

SVM 神经网络算法流程如图7所示。将带有防辐射罩温度传感器 CFD 仿真的环境参数中高度角、海拔高度和空气流速作为样本输入,将辐射误差作为样本输出,将600个样本数据按照4:11的比例划分为测试集数据和训练集

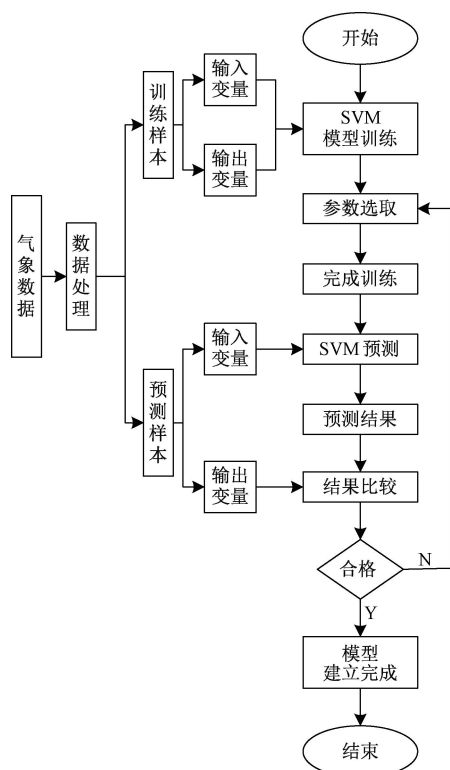


图7 SVM 神经网络流程图

Fig. 7 Flowchart of SVM neural network

数据。本文 SVM 预测数据调用 LIBSVM 程序库,用训练集数据训练 SVM 模型,然后将测试集数据放入训练好的 SVM 模型进行预测输出辐射误差数据,并且和测试集里的辐射误差数据输出数据进行比较。由于惩罚因子 C 与核函数参数 g 共同影响着 SVM 神经网络模型的预测能力,因此对 2 个参数进行寻优可以提高 SVM 预测模型的准确性。

2.2 PSO-SVM 神经网络算法设计

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法具有良好的全局寻优性能^[16],其基本思路是利用种群间及种群个体间的信息分享,来求取最佳方案。所以,PSO 算法是目前最常用的优化算法之一。

第 i 个粒子在维度 M 空间的速率公式是 $V_i = (V_1, V_2, \dots, V_M)^T$,位置公式是 $X_i = (X_1, X_2, \dots, X_M)^T$ 。在第 k 次递归的过程中,第 i 个粒子要基于它在第 $k-1$ 次递归的过程中,找到其最佳值 $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iM})^T$ 和群体中的最佳值 $Q_i = (Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{iM})^T$ 来进行速率和位置信息的更新^[17],以下公式更新它的速率和位置信息:

$$V_{im}^k = \tau V_{im}^{k-1} + c_1 r_1 (P_{im}^{k-1} - X_{im}^{k-1}) + c_2 r_2 (Q_{im}^{k-1} - X_{im}^{k-1}) \quad (6)$$

$$X_{im}^k = X_{im}^{k-1} + V_{im}^k \quad (7)$$

式中: τ 是一个惯性因子; c_1 和 c_2 是两个学习因子; r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 之间的 2 个随机数。

本文使用 PSO 神经网络算法对 SVM 神经网络的惩罚因子 C 与核函数参数 g 进行寻优处理,并返回 2 个参数的最优组合值^[18],从而构建 PSO-SVM 最优修正模型。使用 PSO 算法优化 SVM 神经网络的流程如图 8 所示。首先将 600 个样本数据按照 4:11 的比例划分为测试集数据和训练集数据。然后选择 SVM 神经网络算法的核函数,初始化 PSO 的种群和参数,设置粒子群维数 M 为 2,种群数量 n 为 20,两个学习因子 c_1 和 c_2 都设置为 1.5。最后结合 SVM 神经网络算法迭代更新 PSO 中的粒子参数,寻找惩罚因子 C 与核函数参数 g 的最优组合值,得到最优惩罚因子 C 为 27.3284,最优核函数参数 g 为 1.0538。

2.3 SVM 和 PSO-SVM 神经网络算法对比分析

为了方便对比 SVM 和 PSO-SVM 神经网络算法误差修正效果,将带防辐射罩温度传感器 CFD 仿真的环境参数中空气流速、高度角、海拔高度作为样本输入,将辐射误差作为样本输出,并且将 600 个样本数据按照 4:11 的比例划分为测试集数据和训练集数据,用 SVM 和 PSO-SVM 神经网络对数据进行拟合。得到 SVM 神经网络算法预测的辐射误差数据和 PSO-SVM 神经网络算法预测的辐射误差数据。分别将上述两种神经网络算法预测的温度传感器太阳辐射误差数据和仿真数据进行对比^[19],如图 9 所示。

为了评估神经网络算法的准确性,分别计算 SVM 和 PSO-SVM 神经网络算法的平均绝对误差 MAE 和均方根误差 RMSE:

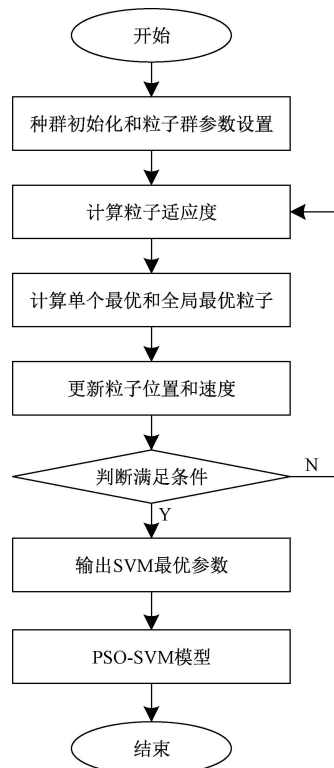


图 8 PSO 算法优化 SVM 神经网络流程图

Fig. 8 Flowchart of SVM neural network optimized by PSO algorithm

$$MAE = \sum_{i=1}^N |x_i - y_i| / N \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2 / N} \quad (9)$$

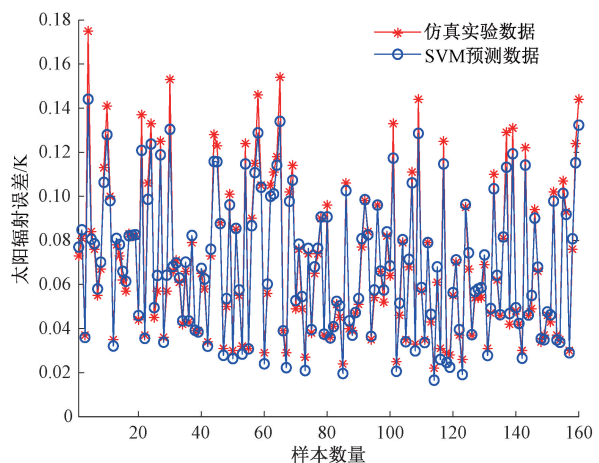
式中: x_i 为带防辐射罩温度传感器仿真数据的太阳辐射误差值; y_i 为神经网络算法预测的太阳辐射误差值; N 为样本总数。

从图 9 可以看出两个神经网络模型预测的整体趋势一致,但是 SVM 数据尖峰更多,并且根据平均误差和均方根误差公式可知,基于 SVM 神经网络预测值与仿真值平均误差为 0.004 3 K,均方根误差为 0.006 2 K,基于 PSO-SVM 神经网络预测值与仿真值平均误差为 0.002 2 K,均方根误差为 0.003 2 K。因此,PSO-SVM 神经网络算法具有更好的预测能力,在不同环境下辐射误差的预测精度更高。所以本论文采取 PSO-SVM 神经网络算法来拟合太阳辐射误差数据。

3 硬件设计与实验分析

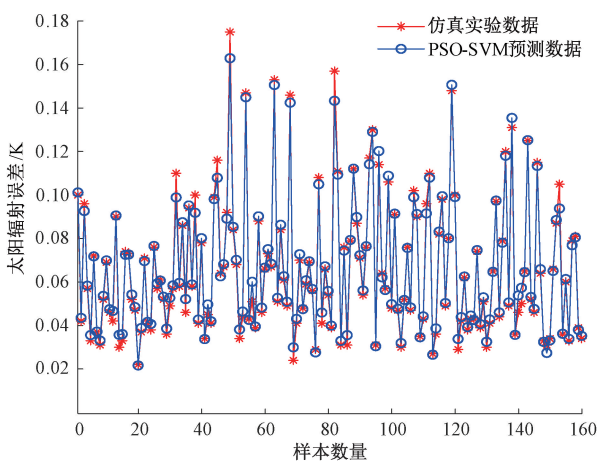
3.1 硬件设计

本文介绍了一种新型的机载下投探测系统,该系统由温度采集、北斗定位、通讯、无线收发和供电等模块组成。为了将整个探空仪系统的成本费用和电力消耗考虑在内,本文选择高性能、低功耗、外设丰富的 STM32F103 作为主



(a) 仿真数据与SVM预测数据误差对比

(a) Comparison of error between simulation data and SVM prediction data



(b) 仿真数据与PSO-SVM预测数据误差对比

(b) Comparison of error between simulation data and PSO-SVM prediction data

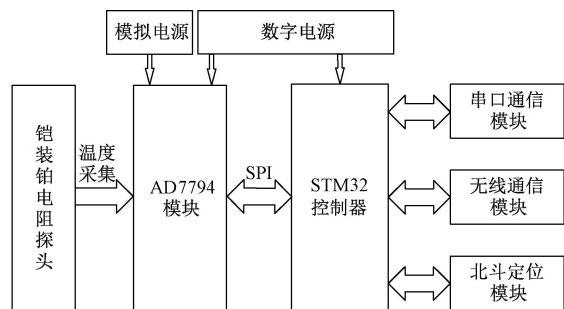
图 9 算法预测结果与仿真数据对比

Fig. 9 Comparison of algorithm prediction results with simulation data

控芯片。为了增强温度传感器的测量精度,本文选取 AD7794 模数转换芯片,该芯片具有高分辨率、低噪声和快速响应等优点,用于对温度进行高精度采样。利用国产北斗模块来获取探空仪的位置信息。采用无线通信模块将探空仪搭载的传感器测量数据传回地面的上位机中,便于对数据进行实时的监测和分析。探空仪系统框图和系统 PCB 如图 10 所示。

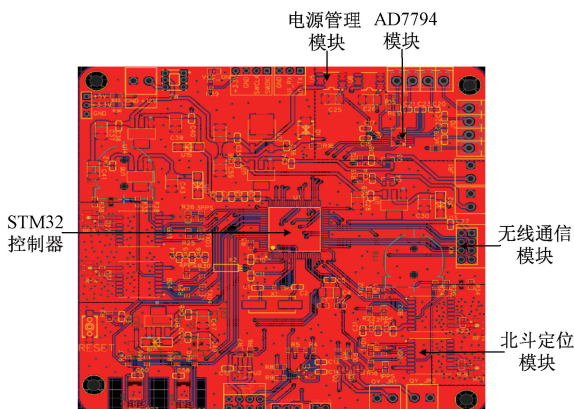
3.2 实验平台搭建

为了验证带防辐射罩铠装铂电阻温度传感器测量精度,本文通过搭建风洞和太阳模拟器来模拟带防辐射罩温度传感器的大气环境。实验装置如图 11 所示,太阳模拟器可以模拟高空大气的太阳辐射强度和太阳高度角,真空腔放置传感器探头。气泵提供空气,通过调节进气口阀门改变风洞里的气流速度,流量计可以观察风洞里的气流速度是否达到预定值。通过调节挡板阀来改变真空腔风洞里的



(a) 探空仪系统框图

(a) Block diagram of the radiosonde system



(b) 探空仪系统PCB

(b) Sonde system PCB

图 10 探空仪系统框图和系统 PCB

Fig. 10 Radiosonde system block diagram and system PCB

空气密度,气压检测仪真空计可以检测真空腔内的空气密度是否达到设定值。

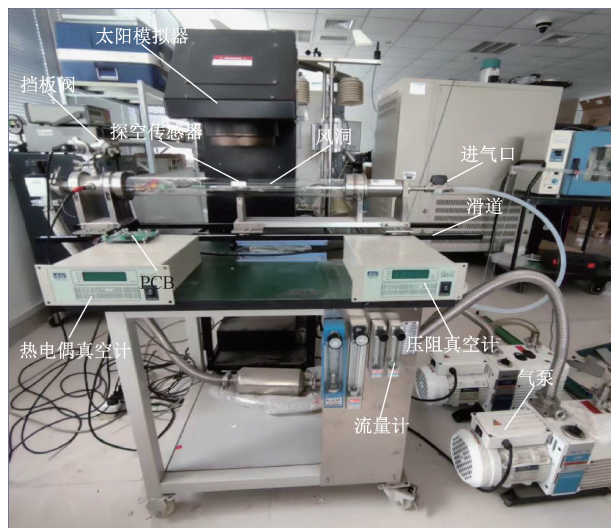


图 11 风洞实验平台

Fig. 11 Wind tunnel experimental platform

3.3 实验数据分析

将带防辐射罩铠装铂电阻探头放置风洞中,分析不同海拔高度、空气流速和高度角对探头辐射误差的影响,实验

流程如图 12 所示。因为试验条件的限制,设定 2~20 km 的海拔,5~10 m/s 的空气流速,1 200 W/m² 的太阳辐射,以及 0°~40° 的太阳高度角,获取温度传感器在不同环境的实验值。并且将设置的环境参数带入到 PSO-SVM 误差修正模型,得出 PSO-SVM 预测的辐射误差数据。为了验证带防辐射罩铠装铂电阻温度传感器的测量精度,将传感器的实验数据和 PSO-SVM 修正后的辐射误差数据对比,如表 1 所示,可知带防辐射罩传感器试验值与 PSO-SVM 预测值的误差很小。通过平均误差和均方根误差公式计算可知,带防辐射罩铠装铂电阻温度传感器测量的平均误差为 0.014 1 K,均方根误差为 0.015 0 K,相较于文献[10]设计的基于压电陶瓷振动温度传感器平均测量误差 0.050 K,可以得出本文设计的带防辐射罩铠装铂电阻温度传感器具有较高的测量精度,满足机载探空温度传感器高精度测量的要求。

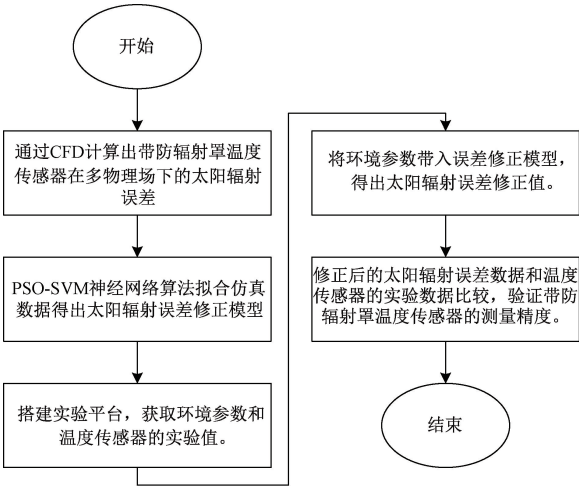


图 12 实验流程图

Fig. 12 Flowchart of the experiment

表 1 实验结果和预测数据

Table 1 Experimental results and predicted data

海拔 高度/ km	气流 速度/ (m·s ⁻¹)	太阳 高度角/ (°)	风洞 实验值/ K	PSO-SVM 预测值/ K	误差 绝对值/ K
2	5	40	0.049	0.041	0.008
2	6	40	0.045	0.038	0.007
4	6	40	0.049	0.041	0.008
6	7	0	0.066	0.056	0.010
8	7	20	0.070	0.060	0.010
10	8	20	0.075	0.063	0.012
12	8	20	0.088	0.074	0.014
12	8	0	0.092	0.077	0.015
14	9	0	0.101	0.085	0.016
16	9	20	0.115	0.097	0.018
18	10	0	0.134	0.113	0.021
20	10	0	0.153	0.129	0.024
20	10	40	0.124	0.104	0.020

4 结 论

为了应对对流层雨雪、冰雹等恶劣的大气环境,本文首次提出铠装铂电阻温度传感器,避免传感器直接裸露而受到恶劣天气环境造成不可逆的物理损伤。同时,为了降低太阳辐射对传感器测温精度的影响,设计了一种圆环状镀银铝板防辐射罩,并且提出了基于 PSO-SVM 误差修正算法。

首先,对传感器和防辐射罩结构进行设计。其次,将有防辐射罩传感器在多物理场下的太阳辐射误差进行对比分析。在此基础上,利用 PSO-SVM 建立了太阳辐射误差预测修正模型。最后,利用风洞试验平台对该传感器进行了测试,得到如下结论:

比较了多物理场条件下有无防辐射罩对传感器探头太阳辐射误差的影响。结果表明,本文设计的防辐射罩能较好地减小传感器辐射误差。在一定的海拔高度、高度角条件下,辐射误差与空气流速之间存在着负相关性。在一定的海拔高度与空气流速条件下,辐射误差与高度角存在着负相关性。在一定的高度角与空气流速条件下,辐射误差与海拔高度之间存在着正相关性。PSO-SVM 算法拟合的太阳辐射误差数据的平均误差为 0.002 2 K,均方根误差为 0.003 2 K,说明 PSO-SVM 算法预测精度高。带防辐射罩铠装铂电阻温度传感器测量的平均误差为 0.014 1 K,均方根误差为 0.015 0 K,满足机载探空温度传感器高精度测量的要求。

本文设计的铠装铂电阻温度传感器没有考虑到传感器尺寸大小和太阳散射辐射等因素的影响,后续会继续研究并完善。

参考文献

[1] PASTOR-PAZ J, NOY I, SIN I, et al. Projecting the effect of climate change on residential property damages caused by extreme weather events [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 276: 111012.

[2] 马婧, 张佳佳, 赵奕安, 等. 基于实时气象数据分布制图系统的服务与应用 [J]. 山地气象学报, 2024, 48(2): 89-94.

MA J, ZHANG J J, ZHAO Y AN, et al. Service and application based on real-time meteorological data distribution mapping system [J]. Journal of Mountain Meteorology, 2024, 48(2): 89-94.

[3] BARNET C D, SMITH N, IDE K, et al. Evaluating the value of CrIS shortwave-infrared channels in atmospheric-sounding retrievals [J]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 547.

[4] LIN CH Y, YU Y, WU L Y, et al. Unsupervised learning on U. S. weather forecast performance [J].

- Computational Statistics, 2023, 38(3): 1193-1213.
- [5] 张旭, 刘清倦, 杨杰, 等. 机载下投式探空温度传感器设计与实验研究[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(2): 107-113.
- ZHANG X, LIU Q Q, YANG J, et al. Design and experimental study of airborne downcast radiosonde temperature sensor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(2): 107-113.
- [6] 郭启云, 杨荣康, 钱媛, 等. 气球携带探空仪上升和降落伞携带探空仪下降的全程探空对比分析[J]. 气象, 2018, 44(8): 1094-1103.
- GUO Q Y, YANG R K, QIAN Y, et al. Comparative analysis of the whole process of radiosonde ascent carried by balloon and descent carried by parachute[J]. Meteorological Journal, 2018, 44(8): 1094-1103.
- [7] 孙星, 刘清倦, 戴伟, 等. 探空温度传感器的太阳辐射误差修正方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2018(11): 118-122.
- SUN X, LIU Q Q, DAI W, et al. Research on solar radiation error correction method of radiosonde temperature sensor[J]. Instrument Technology and Sensor, 2018(11): 118-122.
- [8] FABER J, GERDING M, SCHNEIDER A, et al. Evaluation of wake influence on high-resolution balloon-sonde measurements [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(8): 4191-4210.
- [9] 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.
- MAO CH. Design of stratospheric drift sounding temperature and humidity sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022.
- [10] 刘清倦, 施泓伊, 杨杰. 探空温度传感器辐射误差修正与实验研究[J]. 现代电子技术, 2022, 45(10): 15-20.
- LIU Q Q, SHI H Y, YANG J. Radiometric error correction and experimental study of radiometric temperature sensor [J]. Modern Electronics Technique, 2022, 45(10): 15-20.
- [11] CAO H X, LIU M M, LIU X Y, et al. Research on solar radiation error of sounding temperature sensor[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 300(3): 032021.
- [12] YANG J, LIU Q Q, DAI W, et al. A temperature error correction method for a naturally ventilated radiation shield[J]. Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, 2016, 149: 40-45.
- [13] 汤鸿霄. 临近空间探空温度传感器设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- TANG H X. Design of near space sounding temperature sensor[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2023.
- [14] 戴伟. 面向高精度探空温度传感器的结构设计 with 数值模拟[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(11): 5-8.
- DAI W. Structure design and numerical simulation of high-precision radiosonde temperature sensor [J]. Sensors and Microsystems, 2022, 41(11): 5-8.
- [15] YADAV K A, PATERIYA R K, GUPTA N K, et al. Hybrid machine learning model for face recognition using SVM[J]. Computers Materials & Continua, 2022, 72(2): 2697-2712.
- [16] 许诺. 基于改进 PSO 算法的 UAV 三维路径规划研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(2): 78-83.
- XU N. Research on UAV 3D path planning based on improved PSO algorithm[J]. Electronic Measurement Technique, 2022, 45(2): 78-83.
- [17] 刁宁昆, 马怀祥, 王金师, 等. 基于 MPE 与 PSO-SVM 的滚动轴承故障诊断[J]. 电子测量技术, 2021, 44(21): 44-48.
- DIAO N K, MA H X, WANG J SH, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on MPE and PSO-SVM[J]. Electronic Measurement Technique, 2021, 44(21): 44-48.
- [18] 刘秀丽, 王鸽, 吴国新, 等. VMD 及 PSO 优化 SVM 的行星齿轮箱故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 54-61.
- LIU X L, WANG G, WU G X, et al. Fault diagnosis of planetary gearbox based on VMD and SVM optimized by PSO [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2022, 36(1): 54-61.
- [19] 宋小凡, 刘清倦, 姚澄, 等. 临近空间探空仪温度传感器设计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(20): 1-6.
- SONG X F, LIU Q Q, YAO CH, et al. Design of temperature sensor for near space radiosonde [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(20): 1-6.

作者简介

毛家龙, 硕士研究生, 主要研究方向为传感器与信号处理。

E-mail: 2201742930@qq.com

刘清倦(通信作者), 教授, 博士生导师, 主要研究方向为集成电路、传感器技术、气象探测。

E-mail: qqliu@nuist.edu.cn