

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210147

一种气象温度传感器设计及实验研究*

姚澄^{1,2} 刘清倦^{1,2} 杨杰² 王亚楠^{1,2} 朱化难²

(1.南京信息工程大学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: 针对传统防辐射罩内气流不易流通以及其工作能耗较大的问题,提出了一种具有低辐射误差、组合自然通风与强制通风的气象温度传感器设计。首先使用计算流体力学(CFD)仿真分析在不同环境变量和风扇速度下的辐射误差优化设计,其次利用支持向量回归(SVR)算法训练仿真结果得到预测模型,最后搭建户外实验测试平台验证本设计的可行性以及预测模型的测量精度。实验结果表明,本文提出的气象温度传感器可将测量辐射误差降低至 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,其降低辐射效果显著且预测模型准确度高,实验值与076B强制通风防辐射罩测量值的均方根误差为 $0.185\text{ }^{\circ}\text{C}$,与预测值的均方根误差是 $0.129\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 气象温度传感器;辐射误差;计算流体力学;支持向量回归

中图分类号: P412.1 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4

Design and experimental research of a meteorological temperature sensor

Yao Cheng^{1,2} Liu Qingquan^{1,2} Yang Jie² Wang Yanan^{1,2} Zhu Huanan²

(1. Collaborative Innovation Center of 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: Focus on the problems that the airflow in the traditional radiation shield is not easy to circulate and the energy consumption of its work is relatively large, a design of a meteorological temperature sensor with low radiation error is proposed, which combined natural ventilation and forced ventilation. Firstly, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation is used to analyze the radiation error optimization design under different environmental variables and fan speeds. Secondly, the support vector regression (SVR) algorithm is used to train the simulation results to obtain the prediction model. Finally, an outdoor experimental test platform is built to verify the feasibility of the design and the measurement accuracy of the prediction model. The experimental results show that the proposed meteorological temperature sensor can reduce the measurement radiation error to less than $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, which has a significant effect on reducing radiation and the accuracy of the prediction model is high, and the RMS error between the experimental value and the measurement value of the 076B forced ventilation radiation shield is $0.185\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the RMS error with the predicted value is $0.129\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Keywords: meteorological temperature sensor; radiation error; computational fluid dynamics; support vector regression

0 引言

太阳辐射是大气运动的主要能量来源,空气团受到太阳辐射带来的不平衡的热量后会造空气团对流和气压变化,产生蒸发和沉淀,构成了以时空变化为特征的气候系统^[1]。气候系统中的各元素是完全相互关联的。沈贝蓓和宋帅峰等研究发现了近30年来全球近97%的陆地表面都

具有增温趋势,年平均气温增加了 $0.835\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。由此引起的气候变化对地球生态和人类生活的影响显著,近年来,各地区频发高温干旱、暴雨洪涝、低温霜冻等极端天气,对农业生产造成巨大影响^[3]。因此实现气象精细化预报与气候分析以及灾害监测,对人类的生存和发展都非常重要。气温数据主要是通过温度传感器进行测量,目前常用的温度传感器都存在一定的太阳辐射误差^[4],即太阳照射使传感

收稿日期:2022-05-28

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(41875035)、江苏省产学研合作项目(BY2022544)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJ CX22_0334)、江苏省高校大学生创新创业训练计划项目(202210300011Z)资助

器温度升高所产生的测量误差。

自然通风是一种零能耗通风手段,利用外部风促进罩内空气流动带走罩内热量,从而减小辐射误差,提高测温精确度。因此,常利用百叶箱或防辐射罩来减弱太阳辐射带来的测量误差。余江研究发现在 1960~2013 年间我国近地层风速呈长期减少趋势,主要是表现在风速低于 2 m/s 的频率增加,风速位于 2~8 m/s 范围的频率减少^[5],Wania 等研究城市植被发现植被会降低自然风速,抑制峡谷通风^[6]。严家德等^[7]指出我国地面气象观测站普遍使用百叶箱,缺少强制通风装置,导致测量的温度值与实际值存在较大偏差。袁超等^[8]发现自然通风防辐射罩气温年较差大于百叶箱,由于防辐射罩的通风性大于百叶箱且易受罩内小气候影响,常有高温偏高、低温偏低的情况。因此,目前常用温度传感器难以满足气象观测日益提高的精度要求。

本文提出了一种结合自然通风与强制通风的气象温度传感器,既可保证良好的通风性又能减少气象探测成本。首先采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)仿真分析在不同环境变量和风扇速度下的辐射误差,其次利用支持向量回归(support vector regression, SVR)算法对仿真结果进行训练和预测,以进一步提高测量精度。最后为验证本设计的测量精度,开展基于 076B 强制通风防辐射罩的数据测量对比实验研究。

1 气象温度传感器的设计

1.1 结构设计

通过 Creo 建模软件搭建配有散热风扇的镜面铝板的天气温度传感器模型,其二维图如图 1 所示,包含 1 个表面反射率高的镜面铝板、1 个安装在镜面铝板中央的小型散热风扇和 4 根支撑架。铝板的边长 10 cm,厚度 0.3 cm,其底部涂覆一层吸热率约为 0.9 的黑色涂层,主要用于吸收下垫面反射辐射。对比传统自然通风防辐射罩表面的白色

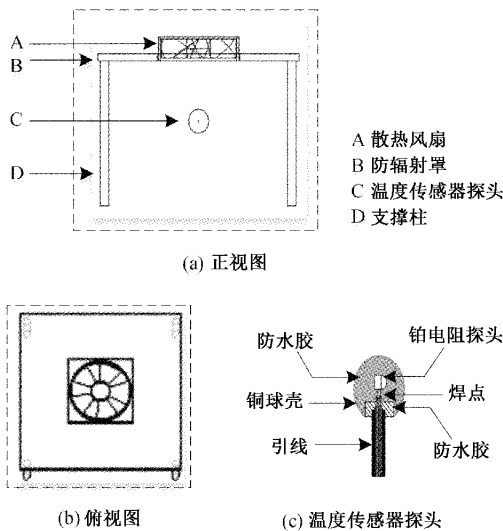


图 1 气象温度传感器及其探头结构

涂层,镜面铝板抗氧化能力强,从而增加使用寿命。散热风扇的边长 4 cm,厚度 1 cm,风扇风口向上,通过扇叶旋转把位于风扇背面四周的空气向上挤压,使背面的压强大于正面的压强,从而使空气由下向上流通。测温时,感温探头可置于风扇正下方的 2 cm 处,通过风扇可以提高探头周围的对流效果,从而降低探头的测量误差。本文选用的感温测温元件是由直径为 1 cm 的铜球包裹直径为 0.06 cm 的铂电阻温度传感器探头,由于铜球反射率较高,因此太阳辐射吸收系数较低。本文气象温度传感器的物理模型所用材料特性参数如表 1 所示,该参数用于构建 CFD 物理模型。

表 1 气象温度传感器材料特性参数

材料	热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
环氧树脂	1 200	0.2
铂电阻	138	73
防水胶	2 100	0.9
焊点	220	67
铝	871	202.4
铜	381	387.6

1.2 计算域与网格划分

为进行下一步的数值计算分析,首先将模型变为有限元进行分析,其计算域如图 2 所示。

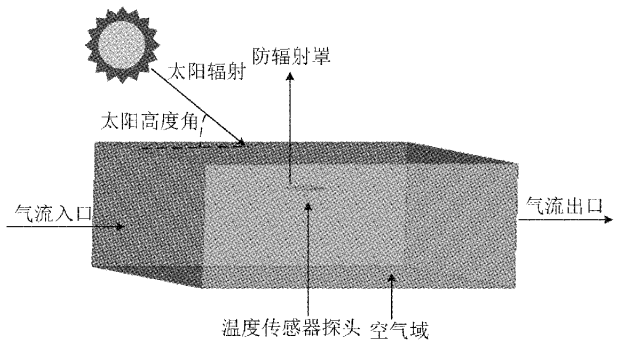


图 2 气象温度传感器与其流体域

使用 ICEM 对计算域及模型进行网格划分,随着网格划分网格数量的增多,仿真时辐射误差变化小^[9],为得到更贴近现实的仿真结果,对上述模型及其周围空间域进行局部加密,当网格数量达到 149 万时,网格质量良好。为保证流场数值稳定计算,建立风扇流道,由于风扇结构的旋转区域比较复杂,故采用非结构化四面体网格^[10],其非结构网格图如图 3 所示。

1.3 温度场和流场分布

本文仿真实验使用 Fluent 对温度传感器进行稳态流固耦合传热分析,环境模型考虑了能量方程, Solar Ray Tracing 太阳辐射模型,风扇的模型采用 Realizable 的 k-ε 湍流模型^[11],此模型在模拟计算旋转流动和圆柱射流的发散比率等情况的精度较精确。计算方法采用 SIMPLE 压

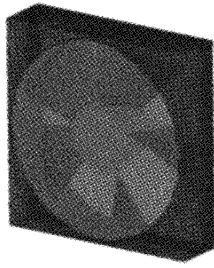
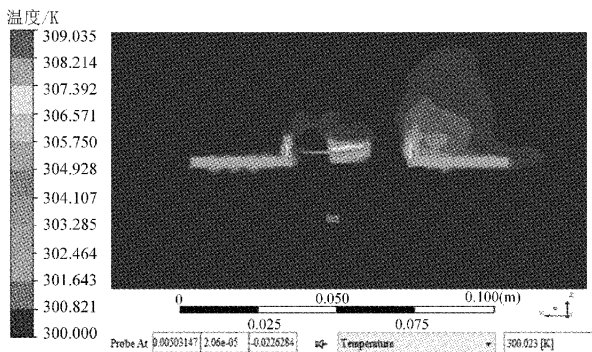


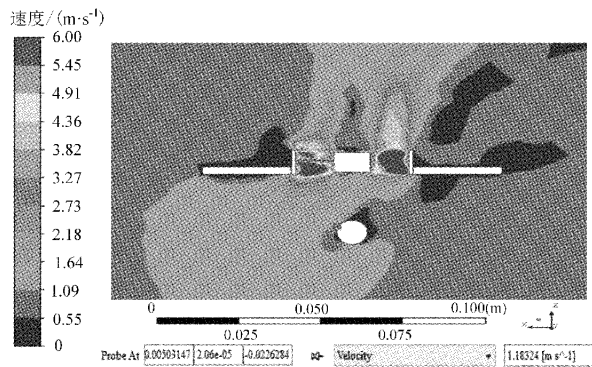
图 3 风扇的非结构网格划分图

力耦合的半隐式算法,湍流动能、压力以及湍流耗散率等的求解均采用二阶迎风格式离散^[12]。最后通过 Frame Motion 来激活风扇的动旋转参考系模型,并给定气流转向和转速条件。

在数值仿真过程中,将太阳高度角设为 45°、太阳辐射强度设为 1 000 W/m²,风扇转速设为 5 000 rpm,下垫面反射率设为 0.2。风速设为 1 m/s,温度场和流场分布结果如图 4 所示,铂电阻探头一侧的辐射误差为 0.023 °C、气流速度为 1.183 m/s。由仿真结果可得,该气象温度传感具有良好的防辐射效果和通风性。



(a) 温度场分布



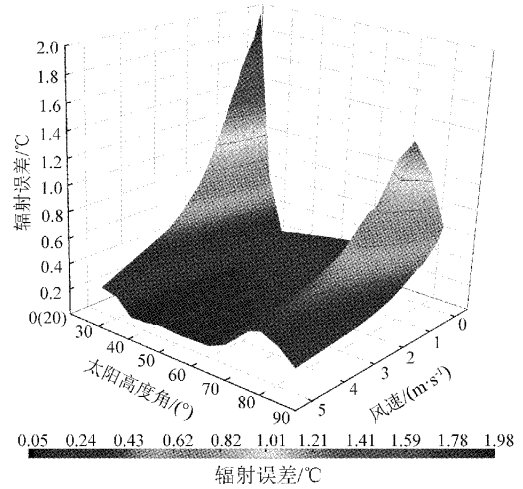
(b) 流场分布

图 4 气象温度传感器的温度场及流场分布

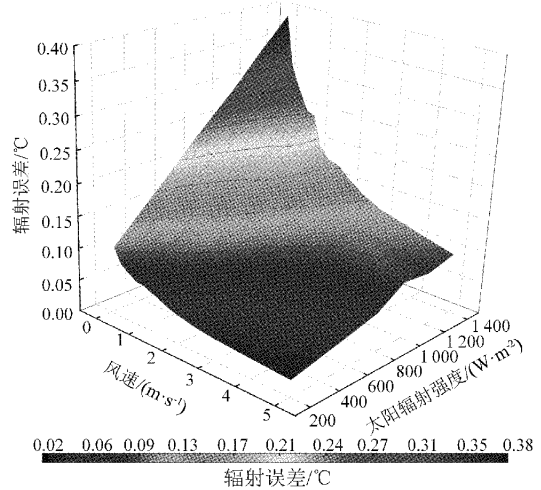
1.4 仿真结果研究与分析

为模拟真实实验环境,忽略气象站海拔高度、器件涂层反射率等影响辐射误差变化较小的因素,通过改变太阳辐射强度、风速、风扇转速和太阳高度角进行与辐射误差变化

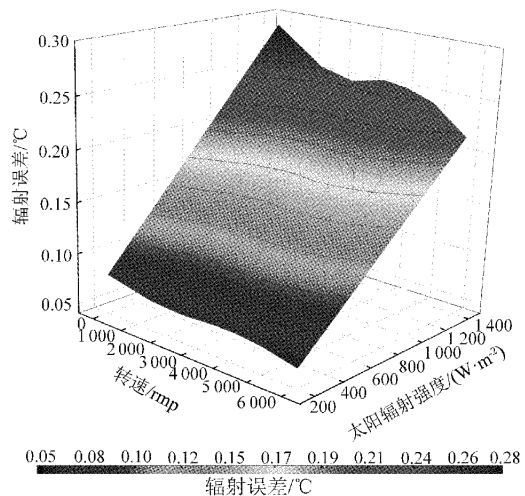
关系的研究分析。太阳辐射强度为 200~1 400 W/m²,风速为 0~5 m/s,风扇转速为 0~6 000 rpm,太阳高度角为 25°~85°。仿真结果如图 5 所示。



(a) 风速、太阳高度角和辐射误差的关系



(b) 风速、太阳辐射强度和辐射误差的关系



(c) 风扇转速、太阳辐射强度和辐射误差的关系

图 5 仿真结果图

由图 5(a)可知,当太阳辐射高度角相同时,气象温度传感器的辐射误差随风速增大而减小,但当太阳高度角从 0° 变化为 90° 时,辐射误差与太阳高度角不再是单调关系。当太阳高度角在 $25^\circ \sim 50^\circ$ 以及 $80^\circ \sim 85^\circ$ 的范围内,传感器的辐射误差随太阳高度角的增大而减小,最小低至 0.058°C ; 在太阳高度角从 55° 升至 75° 时,由于风扇的扇叶不足以遮蔽全部太阳光,传感器的辐射误差会随太阳高度角的增大而增大,辐射误差最大可达 1.281°C 。

由图 5(b)可知,在太阳辐射强度相同时,气象温度传感器的辐射误差与气流速度呈负相关,而在相同风速下,辐射误差与太阳辐射强度呈正相关,辐射强度变化带来的辐射误差变化的差值的绝对值可在 0.05°C 以下。

由图 5(c)可知,当太阳辐射强度一定时,气象温度传感器的辐射误差与风扇转速大致呈负相关,当转速在 $0 \sim 2\,500\text{rpm}$ 时,辐射误差随风扇转速增大而减小,但当转速升至 $3\,500\text{rpm}$ 时,其辐射误差增大可达 0.007°C ,而风扇转速增至 $6\,000\text{rpm}$ 时,传感器的辐射误差降幅明显,其辐射误差变化的差值的绝对值可达 0.026°C 。由以上仿真结果可知,该气象温度传感器在提高地面温度观测精度方面具有较大的潜力,且在成本和能耗上有较可观的市场前景。

2 SVR 回归预测算法

2.1 持向量回归算法

SVR 是支持向量机(support vector machine, SVM)的重要分支,多用于回归预测拟合分析,在回归问题上表现优秀^[13]。SVR 的原理是将输入空间的样本在非线性下映射在高维的特征空间里,最后在特征空间中用线性回归方法求最优线性分类超平面,即求解回归函数^[14]。

本文预测数据选用 LIBSVM 工具箱自动通过网格遍历计算最优的参数 c 和 g ^[15],为当前模型配置最优模型。在样本数与特征数比值较小时,SVM 的预测效果最好^[16]。王慧勤和雷刚^[17]研究发现用 LIBSVM 去预测风速,由于风速的随机性很大,当实际风速变化波动较小时,预测效果较为理想。因此,支持向量机预测模型在实际应用中是一种有效预测方法。

2.2 预测分析

本文 SVR 预测数据选用 LIBSVM 工具箱,首先提取数据集,设特征项为 5 项,包括太阳辐射强度、太阳高度角和风速以及风扇转速与辐射误差,其次按 3:1 分为训练集和测试集,再来为避免输入的各变量数量级相差过大,而影响训练效果,因此调用 scale 归一化处理训练集和测试集,归一化公式:

$$y = \frac{x - \frac{1}{2}(x_{\max} + x_{\min})}{\frac{1}{2}(x_{\max} + x_{\min})} \quad (1)$$

式(1)中, y 为归一化后的数值, x 为初始实验数据, x_{\max} 为最大的初始实验数据, x_{\min} 为最小初始实验数据。

SVR 预测效果很大程度上受核函数类型及参数选择的影响。对于本文的预测模型,输入变量与输出变量之间明显是非线性关系,且线性核函数不包含可调参数,故优先确定用 RBF 径向基核函数,RBF 径向基核函数的公式为:

$$K(x, x_i) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

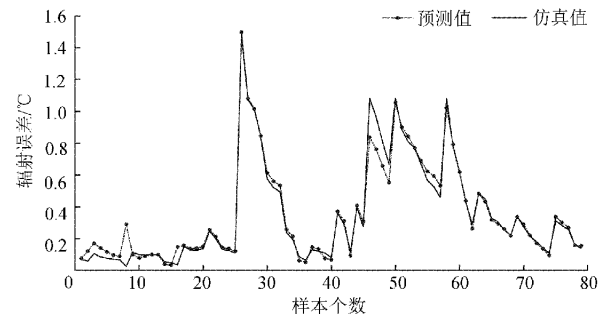
式(2)中, σ 是宽度系数, x_i 是初始实验数据的第 i 个数据。根据 SVR 算法,建立预测模型,即寻找输入与输出之间的关系,回归函数的公式为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i K(x, x_i) + b \quad (3)$$

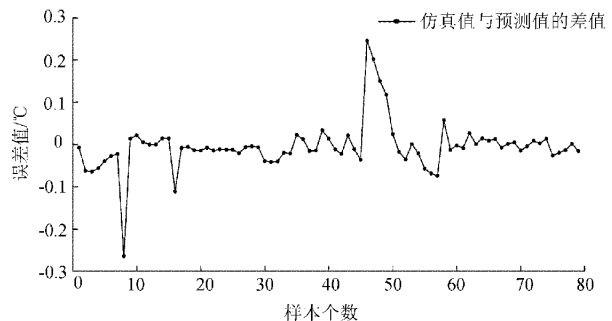
式(3)中, a_i 均为拉格朗日乘子, $K(x, x_i)$ 为核函数, b 为阈值。

接下来调用 LIBSVM 工具箱选取最佳参数 c 与 g 对整个训练集进行训练获取预测模型,最后取 $c = 45.25$ 与 $g = 2$ 。最后利用训练后得到的模型进行测试与预测分析。

本文将仿真结果与预测结果进行对比。实验数据包括太阳辐射强度、太阳高度角、风速和风扇转速与辐射误差。输入测试数据进行预测,如图 6 以测试数据为例显示 LIBSVM 模型拟合效果较好。系统输出的预测结果为:预测值与真实值之间的均方根误差是 0.058 ,平方相关系数是 0.969 。同时输出预测的辐射误差数据,预测结果与仿真结果之间差值的绝对值在 0.3°C 以内。



(a) 仿真值与预测值对比



(b) 仿真值与预测值的差值

图 6 仿真结果与预测结果图

3 实验测试及分析

为验证该气象温度传感器设计的可靠性及预测算法的准确性,搭建户外实验测试平台,该外场观测平台如图 7 所示。

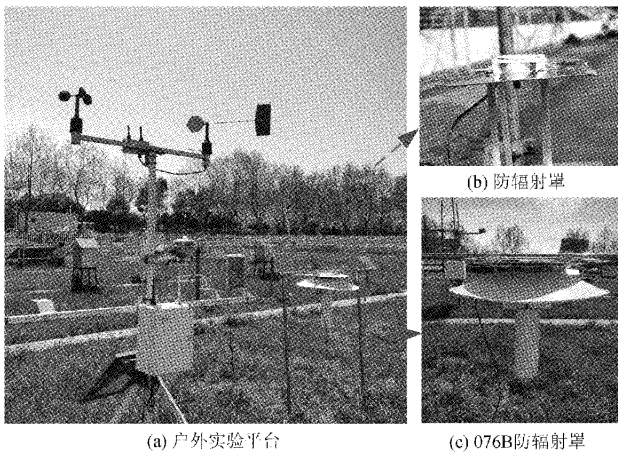


图 7 外场观测平台

在太阳辐射强度较大时,仅考虑太阳辐射强度和气流速度对测温的影响,每日 9:00~17:00 防辐射设备的测量误差可认为由系统误差和辐射误差两项构成。外场实验测得的太阳辐射强度与风速数据如图 8 所示。由于 076B 型强制通风防辐射罩的产品手册上给出的误差值小于 0.03 °C,其测温精度较高,因此在外场实验测试中,同时用 076B 型强制通风防辐射罩所测得的气温观测值作为基准数据。统计该时段气象温度传感器和 076B 型防辐射罩的测温数据,从而确定本设计辐射误差值。气象温度传感器在外场实验测试中的辐射误差数据结果如图 9 所示。

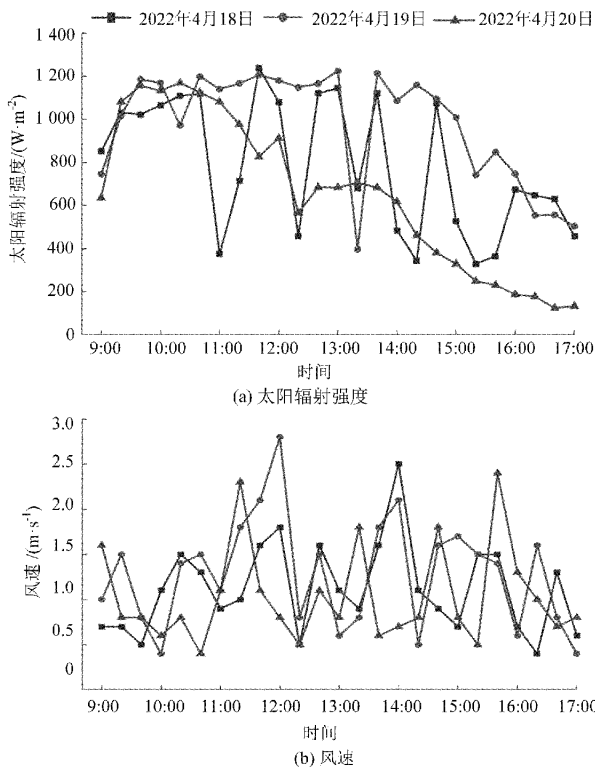


图 8 外场实验的太阳辐射强度与风速数据

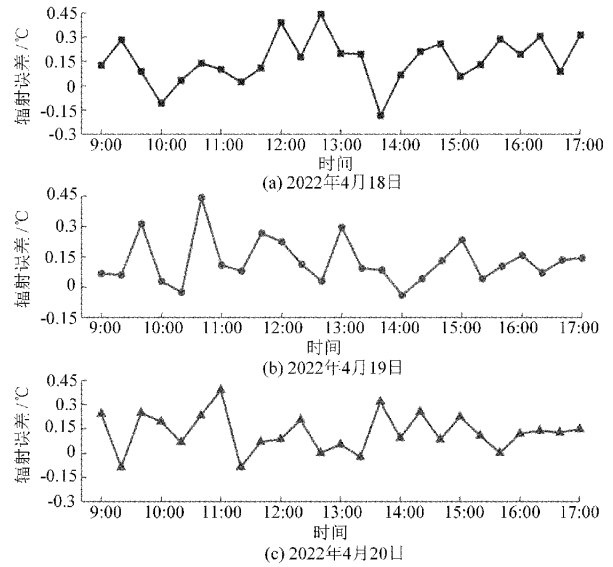


图 9 外场实验的辐射误差

由图 9 可知,经 076B 型强制通风防辐射罩气温观测值与本文的气象温度传感器外场实验数据对比,其均方根误差为 0.185 °C。因此,本设计具有较好的防辐射效果,能够有效提高温度传感器测温精度。

最后,为验证 SVR 算法的预测精度,将外场实验中测得 3 组辐射误差结果和预测结果进行比对分析,算法计算出的均方差是 0.129 °C,如图 10 所示,算法预测结果与实验误差相差结果较小,差值的绝对值在 0.3 °C 以内。因此,SVR 预测模型在实际应用中可作为预测气象温度的一种有效方法,在之后的研究中将把预测模型搭载在软件系统中,搭配本设计和自动气象站进行远程测量。由此可得,本设计具有较好的防辐射效果,且算法预测精度较高,对未来气象预测和灾害预警等相关研究有一定推进作用。

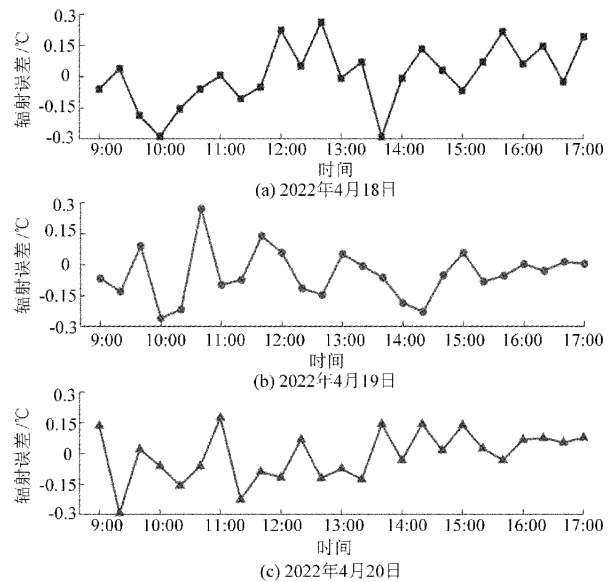


图 10 实验值与预测值的差值

4 结 论

本文设计了一种具有低辐射误差、功耗低且易维护的气象温度传感器。首先利用 CFD 仿真不同环境参数下传感器的辐射误差。其次研究运用 LIBSVM 针对多变量预测辐射误差的方法,建立基于 SVM 的预测模型。再来利用外场实验测试平台对本设计及 SVR 算法进行验证,最后得出以下结论:

本设计基于自然通风防辐射罩,搭配散热风扇进行强制通风,能有效减小传统自然通风防辐射罩内小气候的影响,且使用寿命长。相比于传统的强制通风防辐射罩,本设计具有功耗低、结构简单、易维护、安装方便等优势。

实验数据发现,本设计可将测量辐射误差降低至 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,其在提高气象观测精度方面具有较大的潜力。

基于外场实验平台数据,实测值与算法预测值较为符合。因此在预测气象温度上值得深入研究 SVR 预测算法。

本文提出的气象温度传感器和 SVR 预测模型有较好的测量精度,但实验研究时忽略了一些细节,如风扇的扇叶(本文采用了小型散热风扇,遮蔽太阳辐射的效果不是很理想)、太阳高度角较低的情况(在入射角较低太阳光下,辐射误差较高)、引线和 PCB 板(本文仿真实验忽略了 PCB 板和引线造成的传热影响)等,这些都将在后续实验中进行优化,使之能更好地应对真实的地面观测环境。

参考文献

- [1] 杨林祥. 构成了以时空变化为特征的气候系统[D]. 西安建筑科技大学, 2020.
- [2] 沈贝蓓, 宋帅峰, 张丽娟, 等. 1981—2019 年全球气温变化特征[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2660-2672.
- [3] RAMIREZ-VILLEGAS J, JARVIS A, LÄDERACH P. Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: the EcoCrop model and a case study with grain sorghum[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 170: 67-78.
- [4] 罗远鹏, 刘清倦, 杨杰. 具有辐射误差修正功能的自动气象站[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(12): 274-278.
- [5] 余江. 全球变暖背景下中国风能(速)的变化特征及影响因子研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2020.
- [6] WANIA A, BRUSE M, BLOND N, et al. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations [J]. Journal of Environmental Management, 2012, 94(1): 91-101.
- [7] 严家德, 王成刚, 金莲姬, 等. 百叶箱和通风防辐射罩气温观测系统的数据对比与订正[J]. 气候与环境研究, 2015, 20(5): 533-543.
- [8] 袁超, 丁善文, 于成献, 等. 防辐射罩与百叶箱温度观测差异性分析[J]. 山东气象, 2015, 35(3): 60-62.
- [9] 冯琪, 刘清倦, 杨杰, 等. 强制通风温度传感器计算流体力学设计与分析[J]. 仪表技术与传感器, 2017(11): 17-20.
- [10] 边泽强, 刘昕, 邵乐骥, 等. 自动气象站传感器抗风能力测试风洞设计与实现[J]. 电子测量技术, 2020, 43(21): 15-18.
- [11] 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.
- [12] 王福山, 王锡勇, 张照程, 等. 铁路机车散热风扇气动特性仿真与试验验证[J]. 机械设计, 2020, 37(3): 86-91.
- [13] 房国志, 罗毅, 谢文清, 等. 城市空间典型下垫面温度监测与估算[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 161-168.
- [14] LIU W, YAN L, ZHANG X, et al. A denoising SVR-MLP method for remaining useful life prediction of lithium-ion battery [C]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2019.
- [15] 王文凯, 邓斌. 基于 DAE-IPSO-SVM 的电缆早期故障识别方法[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 29-35.
- [16] JIAO W, LIN S. Overall-improved fault diagnosis approach based on support vector machine[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument (S0254-3087), 2015, 36(8): 1861-1870.
- [17] 王慧勤, 雷刚. 基于 LIBSVM 的风速预测方法研究[J]. 科学技术与工程, 2011(22): 5440-5442.

作者简介

姚澄, 硕士研究生, 主要研究方向为传感器设计及误差修正算法。

E-mail: yaocheng5317@163.com

刘清倦, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为 MEMS 传感器技术、气象探测。

E-mail: qqliu@nuist.edu.cn

杨杰(通信作者), 博士, 主要研究方向为探空湿度传感器的设计与仿真。

E-mail: 002837@nuist.edu.cn