

机载下投式探空温度传感器设计与实验研究^{*}

张旭^{1,2} 刘清倦^{1,2} 杨杰^{1,2} 薛良玉² 赵自强² 许广佳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:为降低太阳辐射对机载下投式探空仪中温度传感器的影响,设计了一种阵列式 NTC 珠状热敏电阻探空温度传感器。该传感器阵列通过探头间的太阳辐射误差比值推算大气环境温度的真实值。首先,通过计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)方法选出传感器探头的最优引线夹角,再对表面涂覆不同太阳辐射反射率涂层的探头进行太阳辐射误差比值计算;然后利用支持向量机(support vector machine,SVM)拟合仿真,得到辐射误差比值拟合模型;最后,搭建低气压风洞以及太阳模拟器实验平台。实验结果表明,该温度传感器阵列可将测量误差降低至 0.065℃,均方根误差降至 0.078℃,有望将太阳辐射误差对下投式探空仪温度测量的影响降低至 0.1℃以内。

关键词:辐射误差修正;机载下投式探空仪;温度传感器阵列;计算流体动力学;支持向量机

中图分类号: TP414.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design and experimental study of airborne dropsonde temperature sensor

Zhang Xu^{1,2} Liu Qingquan^{1,2} Yang Jie^{1,2} Xue Liangyu² Zhao Ziqiang² Xu Guangjia²

(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 order to reduce the impact of solar radiation on temperature sensors of airborne dropsondes, an array-style NTC bead thermistor temperature sensor for use on board the dropsonde aircraft was designed. The true value of atmospheric temperature was inferred by the ratio of solar radiation error between the probes. Firstly, the radiation error of the different probe lead angles was calculated by computational fluid dynamics (CFD) method, and the probe angle with small and stable radiation error was selected. Then, the solar radiation error ratio of the thermistor probes coated with different solar radiation reflection materials on the surface was calculated. Subsequently, a radiation error ratio correction model was obtained through fitting simulation by support vector machine (SVM). Finally, to verify the measurement accuracy of the array-type NTC bead thermistor temperature sensor, a low-pressure wind tunnel and a solar simulator experiment platform were built. The experimental results indicate that the temperature sensor array can reduce the measurement error to 0.065℃ and the root mean square error to 0.078℃, it is expected that the impact of solar radiation errors on temperature measurement of the dropsonde can be reduced to within 0.1℃.

Keywords: radiation error correction; airborne dropsonde; temperature sensor array; computational fluid dynamics; support vector machine

0 引言

政府间气候变化专门委员会(intergovernmental pan-

el on climate change, IPCC)第6次评估报告中表明,人类活动导致的全球变暖^[1]已经增加了极端天气的出现频率^[2-3]。其中台风造成的人员伤亡与经济损失最为严

收稿日期:2023-08-09

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

重^[4],据统计我国每年因台风造成的经济损失高达数百亿^[5]。世界气象组织(world meteorological organization, WMO)指出,准确的气象预警系统可有效减少此类气象灾害带来的损失^[6]。

服务于气象预警系统的卫星、雷达等传统的遥感观测技术的垂直分辨率较差,极大限制路径预测的准确性^[7]。因而国内外开始探索^[8]使用无人机投放探空仪的方式来采集极端天气的气象数据^[9]。目前美国已建立了完善的无人机气象探测业务,而我国起步较晚,此类探索实验较为匮乏^[10]。

机载下投式探空仪等观测仪器的稳定性与观测数据的误差会对观测数据的质量产生直接影响,因此为提高测量精度,国内外诸多学者投身于该方面研究。Söder等^[11]研究了探空仪尾流对测量结果的影响,该研究表明探空仪热尾流将导致测量温度偏高。Wang等^[12]、高平安^[13]则从硬件优化角度设计了应用于气象探测的温度传感器。但国内外对于太阳辐射误差的研究较少。且越来越多的研究^[14]指出,在自加热效应、尾流热污染、太阳辐射等因素中,太阳辐射是导致测量数据偏离真实值的重要影响因素^[15]。太阳辐射误差指因太阳辐射照射在测温仪器上导致的升温。辐射误差会随着海拔的上升而增大^[16],在30 hPa时,误差最大可达3.3℃^[17],因此降低太阳辐射误差对高空气象探测的意义重大。

为降低机载下投式探空仪在采集温度数据时的太阳辐射误差,本文提出一种阵列式探空温度传感器,从软件仿真与硬件优化结合的角度设计了一种适用于该探空仪投放环境的阵列式温度传感器。

1 机载下投式探空温度传感器设计

1.1 阵列式温度传感器工作原理

阵列式温度传感器4个探头涂有不同太阳辐射反射率的涂层,从而在同一环境下太阳辐射误差不同,因此只需要量化传感器探头的太阳辐射误差与各个环境因素之间的关系就可以通过计算反推出环境温度的真实值。传感器阵列结构示意图如图1所示。

图1中探头A表面涂有深灰色涂层,太阳辐射反射率约为20%。探头B表面为淡黄色涂层,反射率约为50%。探头C表面为亮白色涂层,反射率约为90%。探头D表面镀银,反射率为95%。在无太阳辐射下测量温度均记为 T_x ,在加入太阳辐射条件下,A、B、C、D4个探头的太阳辐射误差分别记为 ΔT_A 、 ΔT_B 、 ΔT_C 、 ΔT_D ,测得的带有辐射误差的值分别记为 T_A 、 T_B 、 T_C 、 T_D 。其中探头A作为参考探头,使用其他3个探头与之相比可得公式如下:

$$\frac{\Delta T_B}{\Delta T_A} = \eta(R, v) \quad (1)$$

$$\frac{\Delta T_C}{\Delta T_A} = \gamma(R, v) \quad (2)$$

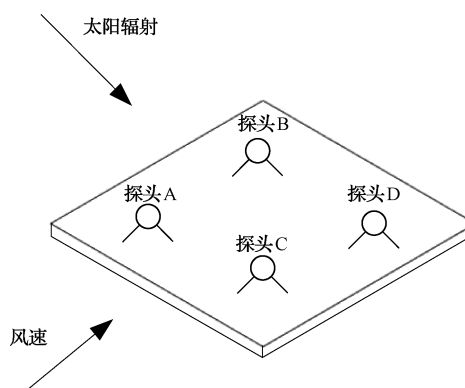


图1 传感器阵列结构示意图

$$\frac{\Delta T_D}{\Delta T_A} = \Phi(R, v) \quad (3)$$

式中: $\eta(R, v)$ 、 $\gamma(R, v)$ 、 $\Phi(R, v)$ 分别为关于 R 、 v 待定函数,可由实验中仿真数据求得。其中 R 为太阳辐射, v 为风速。由此可得:

$$\frac{T_B - T_x}{T_A - T_x} = \eta(R, v) \quad (4)$$

$$\frac{T_C - T_x}{T_A - T_x} = \gamma(R, v) \quad (5)$$

$$\frac{T_D - T_x}{T_A - T_x} = \Phi(R, v) \quad (6)$$

由此可推算出环境真实温度 T_x ,并取三者的加权平均值作为测得的环境真实温度,其中 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为根据各个探头的测量稳定性所确定的权重。

$$\frac{T_B - \eta(R, v)T_A}{1 - \eta(R, v)} = T_{x1} \quad (7)$$

$$\frac{T_C - \gamma(R, v)T_A}{1 - \gamma(R, v)} = T_{x2} \quad (8)$$

$$\frac{T_D - \Phi(R, v)T_A}{1 - \Phi(R, v)} = T_{x3} \quad (9)$$

$$T_x = \frac{\omega_1 T_{x1} + \omega_2 T_{x2} + \omega_3 T_{x3}}{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3} \quad (10)$$

1.2 阵列式温度传感器探头设计

本文采用4个涂覆不同太阳辐射反射率涂层的NTC珠状热敏电阻探头组成传感器阵列,通过不同探头之间的太阳辐射误差比值反推真实环境温度,从而减小太阳辐射对测量结果的影响。温度传感器探头结构如图2所示。

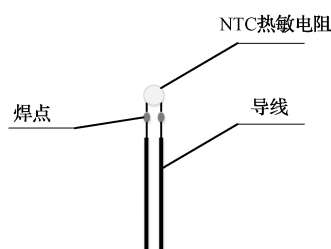


图2 温度传感器探头结构

1.3 温度测量电路系统设计

机载下投式探空仪的温度采集电路主要包括主控制器、温度采集电路、电源电路以及通信电路。其中主控制器考虑到性能、功耗、成本等问题,选择 STM32F103C8T6,低噪声的高精度 AD7794 作为数模转换器,并选用提供噪声 $2.25\ \mu\text{V}$ 的 ADR445ARZ 作为基准电源,处理器通过串口与上位机进行通信。阵列式温度测量电路设计框图如图 3 所示。

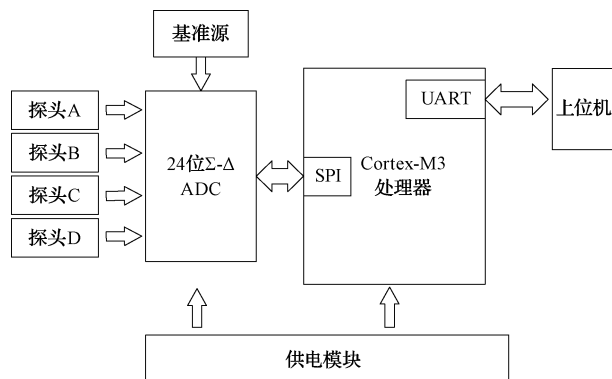


图3 阵列式温度测量电路框图

2 CFD 仿真分析与误差修正

2.1 传感器探头的 CFD 建模及仿真

探空仪下投过程中的震动及自旋会导致太阳高度角产生变化,从而导致不同的探头引线夹角对太阳辐射误差产生影响,因此本次仿真实验将对 0° 、 45° 、 90° 、 135° 及 180° 5 种不同的引线夹角的热敏电阻进行仿真。

首先利用 Pro/E 软件对 5 个不同引线角度的探头进行建模,其参数如下:探头直径为 $0.4\ \text{mm}$,引线直径为 $0.05\ \text{mm}$,引线长度为 $1\ \text{mm}$,而后在传感器探头周围建立 $5\ \text{mm} \times 5\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ 的立方体空气域。不同引线夹角的传感器探头模型如图 4 所示。

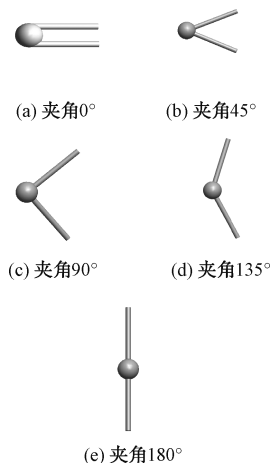
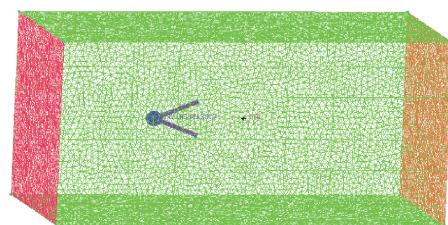


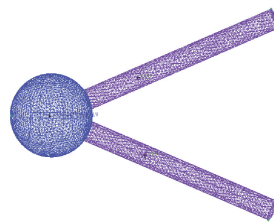
图4 5种引线夹角的探头模型

其次利用 ICEM 软件对模型进行非结构化网格的划分,且为得到更为贴合实际的仿真效果,对探头结构进行局部加密处理,经过划分后的网格数量约为 450 000,网格

质量均大于 0.35,非结构化网格划分情况如图 5 所示。



(a) 整体网格



(b) 探头局部加密网格

图5 网格划分情况

最后将网格质量达标的模型导入 Fluent 中进行流固耦合传热分析,仿真时开启能量方程,选择 k-epsilon 标准湍流模式,计算方法采用 SIMPLE 算法与二阶迎风模式进行求解。仿真气流速度范围为 $5 \sim 16\ \text{m/s}$,仿真海拔范围为 $2 \sim 20\ \text{km}$,并根据海拔改变空气密度。为进一步考虑太阳高度角对传感器探头辐射误差的影响,仿真相对于两引脚所在平面,从 $0^\circ \sim 90^\circ$,以 30° 为步长设置不同的太阳高度角。其温度场分布如图 6 所示。

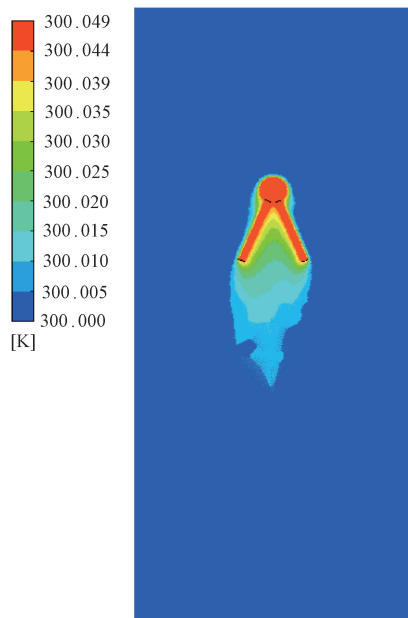


图6 探头温度场分布

2.2 仿真结果分析

随着风速增大传感器探头的太阳辐射误差逐渐降低,为验证该设计方案的有效性,选取不同夹角下辐射误差波

动最大且较为明显的低风速情况,即风速 5 m/s 时,得到 5 种不同引线夹角的 NTC 珠状热敏电阻在不同太阳高度角下的太阳辐射误差计算结果,如图 7 所示。通过仿真计算可知,引线夹角为 0° 与 180° 时,改变太阳高度角与海拔导致的太阳辐射误差波动均较为明显,引线夹角为 45° 、 90° 、 135° 时太阳高度角与海拔导致的太阳辐射误差波动均低于 0° 与 180° ,但夹角 45° 时太阳辐射误差相对较小且更为稳定,因此本文设计采用 45° 引线夹角。

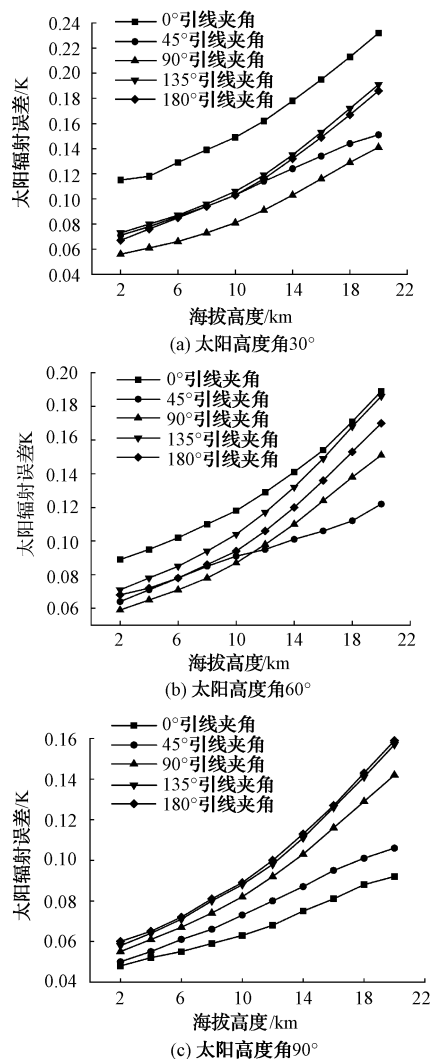


图 7 太阳高度角引线角度对辐射误差影响关系

2.3 阵列式温度传感器的建模及流固耦合分析

经上述分析,此次设计采用 45° 引线夹角。建模时 4 个热敏电阻探头呈口字形排列,间距设置为 4 mm,并在周围建立 10 mm×10 mm×20 mm 的立方体空气域,模型如图 8 所示。利用 ICEM 进行非结构网格划分,并分别在 4 个传感器探头进行网格局部加密处理。

运用 CFD 方法对网格质量达标的模型进行仿真,4 个传感器探头表面设置 20%、50%、90% 及 95% 4 种不同对太阳辐射反射率,并设置太阳辐射强度为 $1\,200\text{ W/m}^2$,海

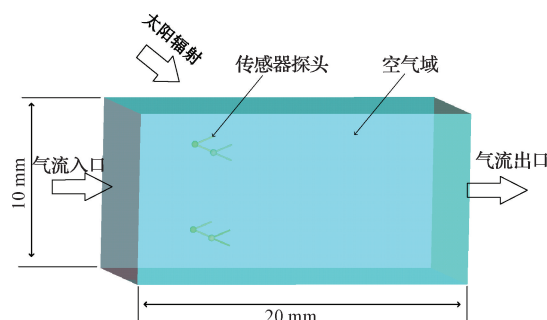


图 8 阵列式温度传感器仿真模型

拔范围为 2~20 km,风速范围为 5~16 m/s。其风速与海拔对太阳辐射误差比值影响的仿真结果如图 9 所示。

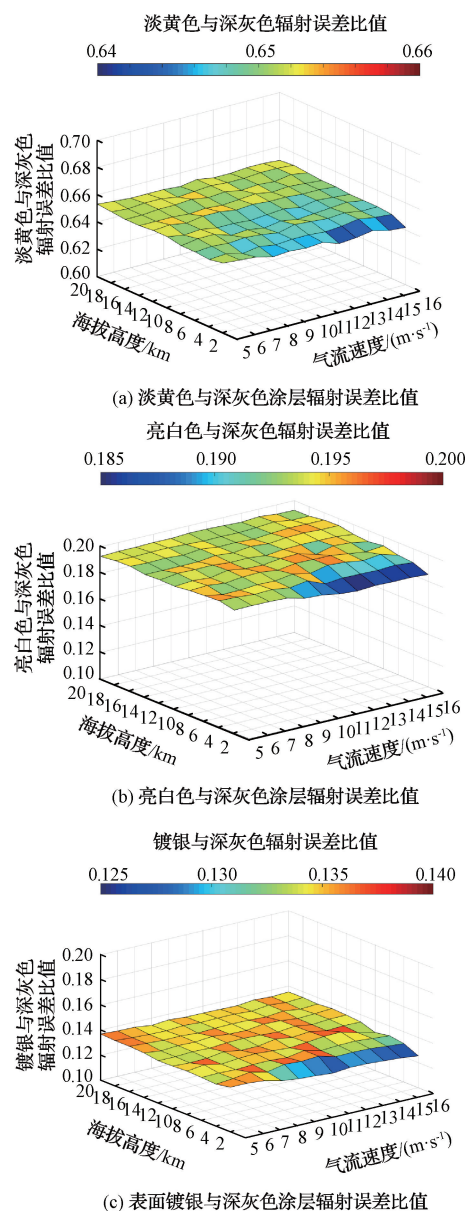


图 9 不同表面反射率下太阳辐射误差比值与风速海拔关系

由仿真结果可知,淡黄色与深灰色涂层的辐射误差比值 $\Delta T_B/\Delta T_A$ 在 0.65 附近小范围波动,波动最大达到 0.02;亮白色与深灰色涂层的辐射误差比值 $\Delta T_C/\Delta T_A$ 在 1.93 处上下浮动,波动最大值为 0.04;表面镀银与深灰色涂层的辐射误差比值在 1.35 附近波动,最大可达 0.05。且均在 2 km 左右时波动达到最大。可见辐射误差比值并不能简单的认为是一个常数,而是一个与环境变量相关的非线性多元函数。

2.4 辐射误差比值修正方法

由于 CFD 方法只适用于离散情况,因此需借助算法得到连续情况下的辐射误差比值拟合模型。本文采用基于鲸鱼算法(whale optimization algorithm, WOA)优化的支持向量机算法(support vector machine, SVM)来拟合仿真采集的数据。WOA-SVM 算法因其在收敛的速度与精度上均优于传统的 SVM 算法,被广泛应用于房价预测、温度预测、风速预测等领域。该算法不受初值影响、全局搜索能力强,可以保证找到全局最优解,防止出现局部最优的情况。虽然其满足不了实时性要求,但对本次实验影响较小,因此本次数据拟合使用鲸鱼算法优化 SVM 算法。

支持向量回归(support vector regression, SVR)是 SVM 拟合的重要方法,其基本思想是找到一个核心平面,让所有样本点距离该平面最近,从而利用该平面进行预测。

在 SVR 中,若给定 x_i 为训练集输入, y_i 为训练集输出,则有训练集合 $\{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n\}$ 。将 x 使用非线性映射映射 $H(x)$ 到高维空间,然后在此空间构建线性回归模型:

$$f(x, \omega) = \omega \cdot H(x) + b \quad (11)$$

式中: $f(x, \omega)$ 为估计函数, ω 与 b 为该模型的权向量和阈值; $H(x)$ 为输入向量。

在该方法中,WOA 算法用于优化 SVM 回归的超参数,包括惩罚参数和核函数类型等,以提高预测精度和鲁棒性。

为验证该算法的可靠性,将海拔与风速为条件带入到完成训练模型中经计算得到辐射误差比值,将通过 CFD 仿真得出的太阳辐射误差比值作为验证集进行验证,最后计算均方根误差(RMSE)如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_p - E_s)^2}{n}} \quad (12)$$

式中: E_p 为修正值; E_s 为仿真值; n 为样本数量。

其拟合结果如图 10 所示,未经过 WOA 算法优化的预测结果如图 11 所示,可见其样本数 20、60 处左右存在坏点,预测结果并不理想,优化后的修正值与实际值的均方根误差 $RMSE=0.003\ 93$,拟合结果较好,可以达到目标精度。

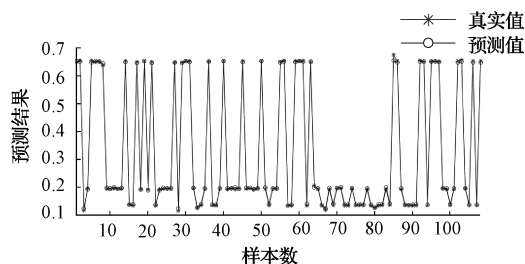


图 10 WOA 优化后辐射误差比值修正值与仿真值对比

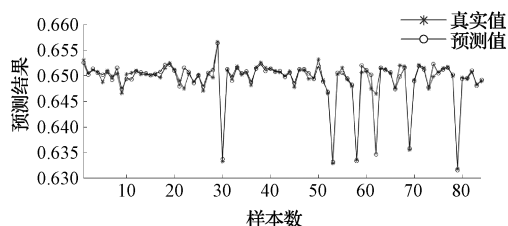


图 11 未经过 WOA 算法优化的预测结果

3 实验环境的搭建与测试分析

3.1 NTC 珠状热敏电阻的标定

NTC 热敏电阻在使用中,若直接使用厂家给出的 B 值,不在使用前对其进行标定会出现很大的测量误差。

标定实验选取 4 个 NTC 珠状热敏电阻同时进行,选用恒温插槽在 0~100 °C 范围内进行标定实验,并选用标准铂电阻温度计作为主标准器,通过查表转化为温度值。

标定方法主要有经验公式标定法、Steinhart-Hart 方程标定法与多项式标定法。Steinhart-Hart 方程标定法相较于经验公式标定法精度更高,且较多项式法更加方便,因此在实验中使用 Steinhart-Hart 方程标定法:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3 \quad (13)$$

式中: T 为温度; R 为温度 T 时的电阻值; A 、 B 、 C 为拟合常数。其中, A 、 B 、 C 可以通过测量 NTC 热敏电阻在 3 个温度点上的阻值计算得到。

3.2 实验平台搭建

实验使用低气压风洞系统来模拟高空的大气环境,系统如图 12 所示。包括两台并联工作的双极旋片式真空泵;1 台全光谱射线模拟系统;1 根石英玻璃管组成的真空腔;1 台气压检测器以及流量监测器。

实验将传感器阵列置于真空腔中,使用全光谱射线模拟器提供所需的太阳辐射,并通过观察真空计与流量计读数来调节气泵获得不同海拔下的气压与风速。

3.3 实验测试及分析

为验证阵列式 NTC 珠状热敏电阻传感器测量精度是否达到预期效果,使用低气压风洞模拟平台进行实验测试。调节全光谱射线模拟平台将太阳辐射强度设定为 1 200 W/m²,太阳高度角选取 90°,模拟海拔高度区间为 0~20 km,气体流速范围为 5~16 m/s。实验结果中部分有代表性的实验数据如表 1 所示。

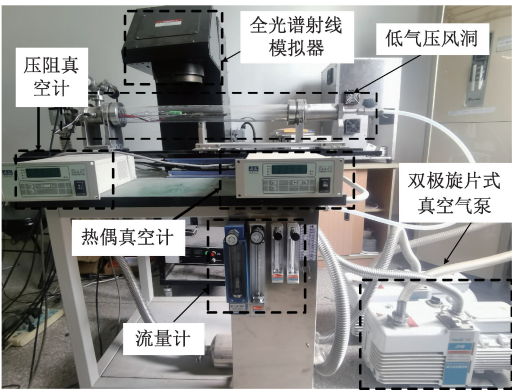


图 12 低气压风洞实验平台

表 1 辐射误差比值修正值与实验值

海拔高度 /km	风速 /(m·s ⁻¹)	修正值与实验值误差绝对值		
		$\Delta T_B/\Delta T_A$	$\Delta T_C/\Delta T_A$	$\Delta T_D/\Delta T_A$
4	6	0.054	0.079	0.024
4	12	0.037	0.057	0.049
6	6	0.071	0.031	0.025
6	12	0.065	0.022	0.037
8	6	0.055	0.012	0.116
8	12	0.086	0.034	0.059
10	6	0.062	0.101	0.026
10	12	0.043	0.82	0.102
12	6	0.064	0.041	0.053
12	12	0.068	0.033	0.026
14	6	0.103	0.051	0.051
14	12	0.075	0.023	0.037
16	6	0.072	0.105	0.021
16	12	0.051	0.012	0.035

根据表 1 可知,经算法拟合后 $\Delta T_B/\Delta T_A$ 、 $\Delta T_C/\Delta T_A$ 、 $\Delta T_D/\Delta T_A$ 实验值与仿真值差值的平均值分别为 0.065、0.049、0.047。经式(7)~(9)计算可得环境温度,其计算值与环境真实温度差值如表 2 所示。计算值与真实值误差均值为 0.065℃,误差均方根为 0.078℃。

表 2 计算修正温度与环境实际温度

海拔高度 /km	风速 /(m·s ⁻¹)	计算温度 /℃	真实温度 /℃	误差绝对 值/℃
4	6	19.68	19.65	0.03
4	12	19.11	19.04	0.07
6	6	19.35	19.31	0.04
6	12	19.32	19.23	0.09
8	6	19.73	19.83	0.10
8	12	19.14	19.09	0.05
10	6	20.31	20.19	0.12
10	12	19.64	19.61	0.03

续表

海拔高度 /km	风速 /(m·s ⁻¹)	计算温度 /℃	真实温度 /℃	误差绝对 值/℃
12	6	19.12	19.20	0.08
12	12	19.46	19.35	0.11
14	6	20.19	20.14	0.05
14	12	19.96	19.90	0.06
16	6	19.83	19.76	0.07
16	12	19.72	19.70	0.02

4 结 论

为降低太阳辐射与太阳高度角对机载下投式探空温度传感器的影响,本文设计了一种利用辐射误差比值反推环境真实温度值的阵列式 NTC 珠状热敏电阻探空温度传感器。首先采用 CFD 方法对传感器探头下不同的引线夹角进行仿真,在选取合适的引线夹角后,对不同大气环境下的太阳辐射误差进行仿真分析,然后利用鲸鱼优化的 SVM 算法对太阳辐射误差比值仿真结果进行拟合,最后在低气压风洞实验平台进行实验验证,得到如下结论。

1)由 CFD 仿真结果可知,在引线夹角低于 45°或高于 90°时,太阳辐射误差受太阳高度角的影响较大;引线夹角调节在 45°时,太阳辐射误差受太阳高度角影响导致的测量波动最小,效果最佳。

2)经算法拟合与 CFD 仿真后的辐射误差比值均方根 RMSE=0.003 93,拟合效果达到预期,证明了该算法的可靠性。

3)本文设计的阵列式 NTC 珠状热敏电阻温度传感器误差均值在 0.1℃以内,均方根误差为 0.078℃,表明误差计算值与实际值较为符合,误差范围较为稳定,有望进一步降低机载下投式温度传感器的太阳辐射误差。

本文设计的阵列式 NTC 珠状热敏电阻温度传感器未考虑散射辐射及传感器探头尺寸等因素的影响,后续会继续研究并完善。

参 考 文 献

[1] OGUNBODE C A, DORAN R, BÖHM G. Exposure to the IPCC special report on 1.5 C global warming is linked to perceived threat and increased concern about climate change[J]. Climatic Change, 2020, 158: 361-375.

[2] 刘远,代潭龙,尹宜舟,等. 2021 年中国气候年景及主要气象灾害概述[J]. 灾害学,2023,38(1):130-135.

[3] 翟盘茂,周佰铨,陈阳,等. 气候变化科学方面的几个最新认知[J]. 气候变化研究进展,2021,17(6): 629-635.

[4] SHI X, LIU S, YANG S, et al. Spatial-temporal distribution of storm surge damage in the coastal

- areas of China[J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(1): 237-247.
- [5] 聂超甲,叶回春,张世文,等. 海南岛农业台风灾害风险评估与可持续发展对策[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(23): 237-246.
- [6] 杨加春,王彦明,李庆军,等. 探空温度传感器误差预测技术研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(12): 24-36.
- [7] KREN A C, CUCURULL L, WANG H. Impact of UAS global hawk dropsonde data on tropical and extratropical cyclone forecasts in 2016[J]. *Weather and Forecasting*, 2018, 33(5): 1121-1141.
- [8] WICK G A, HOCK T F, NEIMAN P J, et al. The NCAR-NOAA global hawk dropsonde system[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018, 35(8): 1585-1604.
- [9] 彭铎,牛成群,张腾飞. 基于 WSN 技术的高空数据采集系统的设计[J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(5): 159-164.
- [10] 高涛,郭然,刘振宇,等. 高空大型无人机下投探空观测资料分析[J]. *海南大学学报(自然科学版)*, 2023, 41(2): 182-190.
- [11] SÖDER 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.
- [12] WANG Z, HUANG M, QIAN L, et al. High-altitude balloon-based sensor system design and implementation[J]. *Sensors*, 2020, 20(7): 2080.
- [13] 高平安. 一种低功耗农田气象数据监测器设计[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(5): 150-153.
- [14] YANG J, LIU Q, DAI W. Computational fluid dynamic design and experimental study of a temperature sensor array used in climate reference station[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2019, 36(9): 1835-1847.
- [15] 戴伟. 面向高精度探空温度传感器的结构设计及数值模拟[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(11): 5-8, 17.
- [16] LEE S W, PARK E U, CHOI B I, et al. Correction of solar irradiation effects on air temperature measurement using a dual-thermistor radiosonde at low temperature and low pressure[J]. *Meteorological Applications*, 2018, 25(2): 283-291.
- [17] 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.

作者简介

张旭,硕士研究生,主要研究方向为传感器设计与应用、气象探测。

E-mail: 964642612@qq.com

刘清倦(通信作者),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,副教授,硕士生导师,主要研究方向为传感器芯片研制、CFD 流固耦合传热分析等。