

用于气象观测的阵列式温度传感器流体动力学分析与实验研究

杨杰 刘清倦 戴伟 冒晓莉 张加宏 李敏

Fluid dynamic analysis and experimental study of a temperature sensor array used in meteorological observation

Yang Jie Liu Qing-Quan Dai Wei Mao Xiao-Li Zhang Jia-Hong Li Min

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 094209 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.094209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分布式光纤 Sagnac 干涉仪中基于倒谱的多分辨率入侵定位算法

Multi-resolution intrusion localization algorithm through cepstrum in distributed fiber optic Sagnac interferometer

物理学报.2016, 65(4): 044210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044210>

准晶体结构光纤表面等离子体共振传感器特性研究

Quasi-crystal photonic fiber surface plasmon resonance sensor

物理学报.2015, 64(6): 064213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064213>

一种基于微波谐振测量 Sagnac 效应的新方案

A new scheme of measuring Sagnac effect based on microwave resonant

物理学报.2015, 64(4): 044205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044205>

基于辅助电介质层的棱镜表面等离子体共振效应研究

Study of prism surface plasmon resonance effect based on dielectric-aided layer

物理学报.2014, 63(3): 034207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034207>

仅用一根局部微结构长周期光纤光栅实现温度与弯曲曲率的同时测量

Simultaneous measurement of temperature and bending-curvature using a single local micro-structured longperiod fiber grating

物理学报.2014, 63(2): 024206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.024206>

用于气象观测的阵列式温度传感器流体动力学分析与实验研究*

杨杰^{1)2)†} 刘清倦³⁾⁴⁾ 戴伟¹⁾²⁾ 冒晓莉³⁾⁴⁾ 张加宏³⁾⁴⁾ 李敏³⁾⁴⁾

1) (南京信息工程大学, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

2) (南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044)

3) (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)

4) (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)

(2015年12月23日收到; 2016年1月23日收到修改稿)

传统百叶箱和防辐射罩内部的温度传感器受到太阳辐射会导致其温度高于大气真实温度, 升温量可达 0.8 K 甚至更高. 为提高大气温度观测精度, 本文设计了一种阵列式温度传感器. 利用计算流体动力学方法分析计算该传感器在不同环境条件下的辐射升温量, 采用遗传算法对计算结果进行拟合, 获得辐射升温量修正方程. 为验证阵列式温度传感器的实际性能, 研制了强制通风温度测量平台. 将阵列式温度传感器、配有传统防辐射罩的温度传感器和强制通风温度测量平台置于相同环境下, 进行大气温度观测对比实验. 配有传统防辐射罩的温度传感器辐射升温量平均值为 0.409 K; 与前者相比, 阵列式温度传感器的辐射升温量仅为 0.027 K. 这种阵列式温度传感器可将辐射升温引起的误差降低约 93%. 辐射升温量实验测量值与修正方程修正值之间的平均偏移量为 0.0174 K, 均方根误差为 0.0215 K, 该结果验证了计算流体动力学方法与遗传算法的准确性. 如果配合计算流体动力学方法与遗传算法, 温度测量精度有进一步提高的潜力.

关键词: 辐射升温, 温度传感器, 传感器阵列, 计算流体动力学

PACS: 42.81.Pa, 47.11.-j, 47.55.pb, 92.60.Vb

DOI: 10.7498/aps.65.094209

1 引言

大气温度是表征大气冷热程度的物理量, 大气温度资料能够反映大气热力和动力过程, 是进行气候变化预估、气候诊断预测和大气环境监测等相关科学研究的基础信息, 而准确可靠的天气和气候信息对公众的生产、生活及社会各个领域具有非常广泛的影响. 近年来随着对气候变化研究的不断深入, 国内外学者针对地面气温变化已开展了大量研究^[1-5]. Qian 等^[6]将中国地区 1961—2009 年最低气温观测数据划分成

3 个气候模式, 分别是 1961—1990, 1971—2000 和 1981—2009. 1961—1990 年最低气温的升温率约为 $-0.3 \text{ K}/10 \text{ a}$, 1971—2000 年该参数变化较小, 1981—2009 年变化约为 $-0.52 \text{ K}/10 \text{ a}$. Dillon 等^[7]分析了 3186 个气象站点 1961—2009 年近 50 年的气温观测数据, 温度数据表明, 热带地区大气温度增加了 0.4 K, 北半球增加了 0.95 K. Wigley 等^[8]分析了 1850—2000 年近 150 年的气温数据, 结果表明, 1850—2000 年全球大气平均温度增加了约 1.5 K, 1970—2000 年全球大气平均温度增加了约 0.65 K. 基于上述资料研究发现, 大气温度观测系统测量精度需达到 10 mK 数量级. 然而用于大

* 国家公益性行业(气象)科研专项(批准号: GYHY200906037, GYHY201306079)、国家自然科学基金(批准号: 41275042, 61306138)、江苏省博士研究生科研创新计划项目(批准号: KYLX15_0866)、东南大学 MEMS 教育部重点实验室开放研究基金(批准号: 2013-3)和江苏高校优势学科 II 期建设工程资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangjie396768@163.com

气温度观测的温度传感器受到太阳辐射会导致其温度测量值高于真实的大气温度值, 升温量可达 0.8 K 甚至更高. 近年来, 随着微电子技术的进步, 经过 ITS-90 国际温标的固定点精确标定的铂电阻温度传感器探头在常温下的误差约为 mK 量级, 高精度低噪声温度传感器测温误差亦降低至 mK 量级. 和辐射升温相比, 电子器件与电路引起的误差低 1—2 个量级, 因此辐射升温已成为气温测量的主要误差来源.

为提高气温测量精度, 必须降低辐射升温量. 世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 气象仪器和观测方法指南要求区域自动气象站采用百叶箱或防辐射罩, 百叶箱或防辐射罩可避免太阳对温度传感器探头的直接辐射, 降低辐射升温量. 然而, 由于传统百叶箱和防辐射罩的白色涂层达不到 100% 反射率, 因此在一定程度上传统百叶箱和防辐射罩, 尤其是其叶片和环片仍会产生显著的辐射升温, 导致流入其内部的气流被加热, 引起温度传感器测量误差. 此外, 叶片和环片不利于气流流通, 降低了温度传感器响应速度, 同时低气流速度亦会导致辐射升温量进一步加大. WMO 推荐的内部气流速度为 2.5 m/s 或更高一些. Lin 等^[9–11] 研究发现 maximum-minimum temperature system (MMTS), Gill 防辐射罩和百叶箱 (CRS) 内部气流速度与环境风速呈线性关系, 当环境风速小于 5 m/s 时, 内部气流速度小于 2 m/s. 当内部气流速度小于 2 m/s 时, 由太阳辐射引起的辐射升温量可达 0.2 K. 由于在大部分地区平均风速难以达到 5 m/s, 因此传统百叶箱和防辐射罩不能从根本上解决辐射升温问题^[12,13].

随着对大气温度观测精度研究的不断深入, 针对配有传统百叶箱和防辐射罩的温度传感器辐射升温的研究已有大量成果^[14–17]. Erell 等^[18] 通过理论分析和实验验证了辐射升温量与太阳辐射强度成正比例关系, 与气流速度成反比例关系. Nakamura 和 Mahrt^[19] 研究分析了不同高度植被对辐射升温的影响. Lin 等^[9,10] 认为传统防辐射罩通风量不足, 内部温度传感器存在测量误差. 当外部气流速度和太阳辐射强度分别为 2 m/s 和 1080 W/m² 时, 美国 R. M. Young 公司研制的 41003 型防辐射罩内部温度传感器的辐射升温量约为 0.7 K. 增加通风可降低辐射升温量, 美国 R. M. Young 公司研制的 43502 型强制通风防辐射罩

气流速度范围为 5—11 m/s, 当气流速度和太阳辐射强度分别为 11 m/s 和 1000 W/m² 时, 内部温度传感器辐射升温量可降至 0.2 K, 辐射升温量依然难以满足高精度大气温度观测需求. 王晓蕾和韩有君^[20] 分析了较强太阳辐射时气流速度和辐射升温量的数据, 气象站常用强制通风温度传感器的平均辐射升温量为 0.43 K. 若希望降低辐射升温量至 0.1 K 甚至更低, 需用大功率风扇形成速度更高的气流. 然而, 大多数野外气象站的太阳能供电系统无法支撑风扇的功率需求. 此外, 尘土、冰雪、昆虫等环境因素使得大功率风扇在野外的可靠性无法得到长期保障. 进一步探索提高气象站观测精度的方法已成为气象观测领域的前沿科学技术问题之一.

本文设计了一种阵列式温度传感器, 显著降低了太阳辐射升温引起的气温观测误差. 采用计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法^[21–23] 对阵列式温度传感器进行数值计算. 采用遗传算法对计算结果进行拟合, 获得辐射升温量修正方程, 进一步提高了阵列式温度传感器测量精度.

2 阵列式温度传感器流体动力学分析

2.1 流体动力学模型

本文采用 CFD 方法建立阵列式温度传感器的流体动力学模型, 对其施加外部复杂对流-太阳辐射耦合热边界条件, 进行流-固耦合传热计算, 得到阵列式温度传感器温度场分布.

阵列式温度传感器包含铂电阻探头、导管形防辐射罩、镀银镜面铝板和电位差计式电桥测温模块. 阵列式温度传感器如图 1 所示, 上方圆盘为镀银镜面铝板, 直径和厚度分别为 700 mm 和 2 mm. 导管形防辐射罩放置于镀银镜面铝板下方, 防辐射罩由方形铝管制成, 尺寸为 40 mm × 40 mm × 80 mm, 厚度为 2 mm. 较大的空气域尺寸有利于提高计算精度, 但会导致计算变得困难且难以求解; 反之, 可以使得算法容易实现, 但计算误差较大. 因此需对空气域尺寸进行优化, 通过比较不同空气域尺寸模型的模拟计算情况, 从精度和求解的难易程度上考虑, 得出阵列式温度传感器的合理空气域尺寸为 300 mm × 2000 mm × 5000 mm.

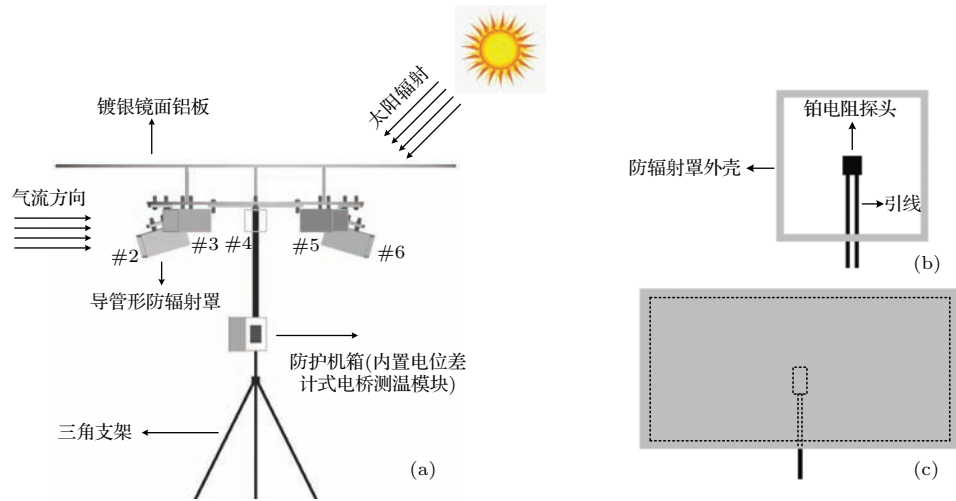


图1 阵列式温度传感器示意图 (a) 整体结构图; (b) 导管形防辐射罩正视图; (c) 导管形防辐射罩侧视图

Fig. 1. Schematic of the temperature sensor array: (a) Structure of the weather station; (b) front view of the radiation shield featuring a tube-shaped; (c) side view of the radiation shield.

由图1(a)可知, 导管形防辐射罩#3、#4和#5水平放置. 由于太阳日出方位角和日落方位角较小, 为防止太阳直接照射铂电阻探头, 导管形防辐射罩#1、#2、#6和#7向下倾斜15°. 上方镀银镜面铝板不仅可避免太阳直接照射阵列式温度传感器, 还可反射98%的太阳辐射, 避免辐射热污染铂电阻探头. 电位差计式电桥测温模块放置于防护机箱内部. 如图1(b)和图1(c)所示, 铂电阻探头置于导管形防辐射罩中心位置, 引线封装层采用强度较

高的低热导率材料, 在防止导管形防辐射罩的辐射热污染探头的同时还可起到对探头的支撑作用.

当气流方向固定时, 阵列式温度传感器各个导管形防辐射罩的通风量不同. 通风量最大的导管形防辐射罩对应的铂电阻探头辐射升温量最小; 反之, 辐射升温量最大. 阵列式温度传感器的辐射升温量取其最小值. 在水平面360°任意气流方向条件下, 总存在至少1个导管形防辐射罩具有良好的通风. 导管形防辐射罩阵列如图2所示.

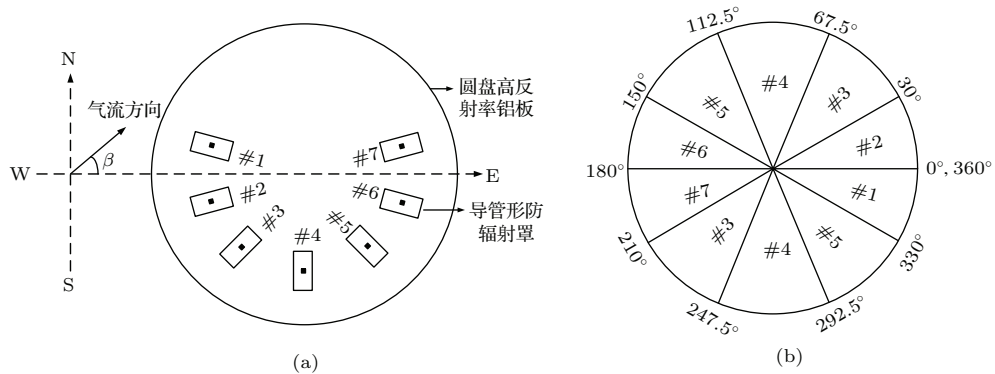


图2 (a) 导管形防辐射罩阵列顶视示意图; (b) 气流方向角度范围与铂电阻探头之间的对应关系

Fig. 2. (a) Schematic top view of the radiation shields; (b) relationship between the airflow angular range and platinum resistance sensor.

图2(a)所示为导管形防辐射罩阵列, #1与#2之间夹角为30°, #2与#3之间夹角为30°, #3、#4和#5相邻之间夹角为45°, #5与#6之间夹角为30°, #6与#7之间夹角为30°. β 为气流方向与正东方向之间的夹角, β 的变化范围为0°—360°. 图2(b)所示为气流方向角度范围与辐射升温量最小的铂电阻探头之间的对应关系, 气流方向不同,

对应的最小辐射升温量的铂电阻探头亦不同.

考虑到铂电阻探头电极的总尺寸(微米量级)与封装体的尺寸(毫米量级)相比很小, 太阳辐射对整个探头的温度场分布影响可忽略, 为了简化模型, 采用硼化玻璃代替铂电阻探头作为温度场分析主体. 阵列式温度传感器材料的相关特性参数如表1所列.

表1 阵列式温度传感器材料特性基本参数

Table 1. Material properties of the temperature sensor array.

材料	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	热容/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	热导率/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
铝	2719	871	202.4
ABS塑料	110	1591	0.2
铂	21450	138	73
银	10500	230	421
木板	700	2310	0.173
硼化玻璃	2230	1.256	1.2
陶瓷	3900	840	35

为获得理想的网格划分质量, 本文采用网格划分软件ICEM CFD对计算模型进行网格划分, 采用适应性较强的非结构化四面体网格划分技术生成得到的四面体网格. 为精确计算流体和固体之间热量交换, 对流固交界面进行了边界层网格设计. 为验证网格的无关性, 对50—100万网格数量模型进行仿真计算. 当网格数量从70万变至100万时, 随着网格数量的增加, 辐射升温量变化较小, 可认为70万的网格已达到网格无关的要求, 因此取数量为70万的网格作为计算网格.

求解时基于压力求解器, 并采用非定常流动计算. 模型中采用能量方程进行传热计算. 湍流模型采用 k -epsilon标准模型^[24], 压力和速度解耦采用SIMPLE算法^[25], 动量、能量以及湍流参数的求解采用一阶迎风模式.

2.2 温度场分布

为比较分析阵列式温度传感器和配有传统防辐射罩的温度传感器的辐射升温情况, 本文将阵列式温度传感器和配有传统防辐射罩的温度传感器置于相同外部环境条件下, 运用CFD方法进行仿真计算, 气流速度、气流方向角度和太阳辐射强度分别为0.5 m/s, 0° 和 1000 W/m^2 , 传统防辐射罩、镀银镜面铝板和导管形防辐射罩外表面反射率分别为80%, 95% 和 87%. 温度场分布如图3所示.

由计算结果可知, 铂电阻探头#1—#7的辐射升温量分别为0.039, 0.04, 0.569, 1.992, 1.085, 0.619和0.209 K, 因此阵列式温度传感器辐射升温量为0.039 K. 配有传统防辐射罩的温度传感器辐射升温量为0.767 K. 由此可知, 配有传统防辐射罩的温度传感器已较难满足越来越高的大气温度测量精度要求, 而本文提出的阵列式温度传感器可

显著提高大气温度观测精度. 由图2(b)可知, 当气流方向角度为 0° 时, 铂电阻探头#1和#2的辐射升温量最小, 而图3(a)计算结果亦表明探头#1和#2的辐射升温量相差0.001 K, #1的辐射升温量最小. 因此, 阵列式温度传感器的仿真计算结果与设计相符合, 从仿真计算方面验证了设计的合理性.

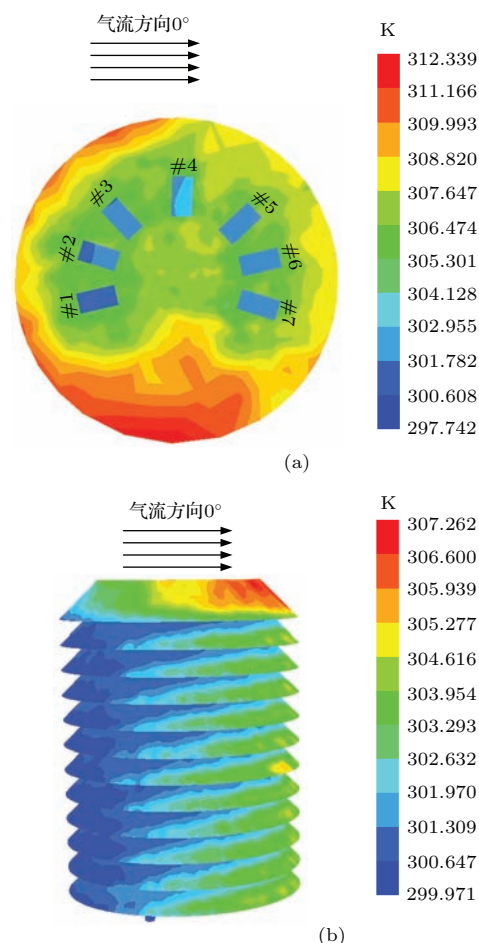


图3 (网刊彩色) 仿真获得的温度场分布图 (a) 阵列式温度传感器; (b) 配有传统防辐射罩的温度传感器

Fig. 3. (color online) Simulation results of the temperature field: (a) Temperature sensor array; (b) A temperature sensor equipped with a traditional radiation shield.

2.3 太阳辐射强度对辐射升温的影响

太阳直接辐射是影响大气温度测量精度的主要因素, 运用CFD方法对不同太阳辐射强度条件下的阵列式温度传感器和配有传统防辐射罩的温度传感器进行辐射传热计算, 得到太阳辐射强度与阵列式温度传感器及配有传统防辐射罩的温度传感器辐射升温量之间的关系. 太阳辐射强度变化范围为 $100\text{--}1200 \text{ W/m}^2$, 气流速度和气流方向角度

分别为0.5 m/s和0°. 阵列式温度传感器与配有传统防辐射罩的温度传感器辐射升温量和太阳辐射强度之间的关系如图4所示.

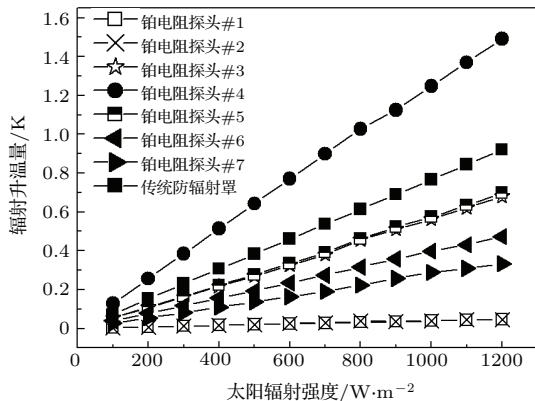


图4 太阳辐射强度和辐射升温量的关系

Fig. 4. The relationship between solar radiation intensity and temperature rise induced by solar radiation.

辐射升温量随着太阳辐射强度的增加而变大, 是因为太阳辐射强度的增加会导致辐射热增加, 从

而导致辐射升温量变大. 当气流方向角度为0°时, 铂电阻探头#1和#2辐射升温量最小. 如图4所示, 铂电阻探头#1和#2的辐射升温量最小且两者基本符合, 最大辐射升温量0.046 K. 由于导管形防辐射罩#4通风量最小, 所以铂电阻探头#4的辐射升温量最大. 当太阳辐射强度达到1000 W/m²时, 阵列式温度传感器的辐射升温量为0.039 K, 而传统防辐射罩内部的温度传感器辐射升温量为0.767 K.

2.4 气流方向角度对辐射升温的影响

为得到气流方向角度与辐射升温量之间的关系, 应用CFD方法对不同气流方向角度条件下阵列式温度传感器进行辐射传热计算. 气流方向角度变化范围为0°—360°. 气流速度和太阳辐射强度分别为0.5 m/s和1000 W/m². 铂电阻探头#1—#7和阵列式温度传感器在不同气流方向角度条件下的辐射升温量计算结果如表2所列.

表2 不同气流方向角度下辐射升温量计算结果

Table 2. Calculation results of the temperature rise caused by solar radiation under different airflow direction.

气流方向角度/(°)	探头辐射升温量/K							阵列式传感器辐射升温量/K
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	
0	0.039	0.04	0.596	1.992	1.085	0.619	0.209	0.039
30	0.643	0.041	0.04	1.187	2.341	1.978	0.307	0.04
60	1.580	0.595	0.039	0.151	2.546	2.043	0.474	0.039
90	2.129	1.707	0.653	0.04	0.663	1.714	2.152	0.04
120	0.602	2.275	2.267	0.113	0.041	0.592	1.651	0.041
150	1.569	1.535	2.363	0.695	0.039	0.039	0.705	0.039
180	0.213	0.651	1.175	2.085	0.632	0.041	0.041	0.041
210	0.398	0.071	0.579	1.297	1.674	0.556	0.04	0.04
240	1.927	0.291	0.042	0.927	3.347	1.517	0.56	0.042
270	2.176	2.671	0.485	0.041	0.475	2.746	2.201	0.041
300	0.523	1.686	3.062	0.927	0.042	0.355	2.029	0.042
330	0.041	0.64	1.964	1.415	0.668	0.079	0.559	0.041

由表2可见, 当气流方向角度为0°时, 铂电阻探头#1的辐射升温量最小, 因此阵列式温度传感器的辐射升温量为0.039 K. 当气流方向角度为180°时, 探头#6和#7的辐射升温量相同且最小, 因此阵列式温度传感器的辐射升温量为0.041 K. 当气流方向角度为270°时, 探头#4的辐射升温

量最小, 因此阵列式温度传感器的辐射升温量为0.041 K. 当气流方向角度在0°—360°之间变化时, 阵列式温度传感器的辐射升温量最大值与最小值之间的差值为0.003 K. 由此可知, 气流方向角变化时, 对应最小辐射升温量的探头亦随之变化, 气流方向角度变化引起的阵列式温度传感器辐射升温

为mK量级.

2.5 辐射升温量修正

为得到阵列式温度传感器辐射升温量修正方程, 运用CFD方法对不同气流速度和太阳辐射强度条件下阵列式温度传感器进行辐射传热计算, 得到气流速度、太阳辐射强度和阵列式温度传感器辐射升温量三者之间的关系. 气流速度变化范围从0.1—10 m/s, 太阳辐射强度变化范围从100—1000 W/m². 气流方向角度0°、气流速度、太阳辐射强度和阵列式温度传感器辐射升温量之间的关系如图5所示.

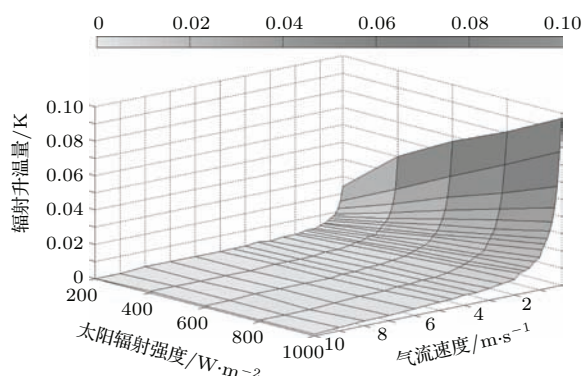


图5 气流速度、太阳辐射强度与辐射升温量之间的关系
Fig. 5. Plot of airflow rate, solar radiation intensity and temperature rise caused by solar radiation.

由图5可知, 辐射升温量随着气流速度的增加而减小, 随着太阳辐射强度的增加而增大. 这是因为气流速度越大, 铂电阻探头越容易散热, 从而辐射升温量减小, 而太阳辐射强度的增加可导致辐射热进一步变大, 从而辐射升温量增大. 当气流速度和太阳辐射强度分别为0.1 m/s和1000 W/m²时, 辐射升温量为0.097 K; 当气流速度大于0.4 m/s时, 辐射升温量可降至0.05 K; 当气流速度大于2 m/s时, 辐射升温量降至0.01 K. 如图5所示, 阵列式温度传感器辐射升温量在0.1 K以内.

由于CFD方法仅能计算有限种类的模型, 如能获得任意气流速度和太阳辐射强度条件下阵列式温度传感器的辐射升温量, 就能对测量值进行修正, 进一步提高测量精度. 采用遗传算法对CFD方法计算结果进行拟合, 获得了辐射升温量 ΔT 与气流速度 x_1 及太阳辐射强度 x_2 之间的修正方程:

$$\Delta T = [p_1 + p_3 \ln(x_1) + p_5 \ln(x_2) + p_7 \ln^2(x_1) + p_9^2 \ln(x_2) + p_{11} \ln(x_1) \ln(x_2)]$$

$$\times [1 + p_2 \ln(x_1) + p_4 \ln(x_2) + p_6 \ln^2(x_1) + p_8^2 \ln(x_2) + p_{10} \ln(x_1) \ln(x_2)]^{-1}, \quad (1)$$

其中, $p_1 = 2.2583$, $p_2 = 50.5702$, $p_3 = 0.5803$, $p_4 = 21.0453$, $p_5 = -0.9285$, $p_6 = 4.9004$, $p_7 = -0.0118$, $p_8 = -2.3384$, $p_9 = 0.1019$, $p_{10} = -4.237$, $p_{11} = -0.115$.

将气流速度和太阳辐射强度测量值代入修正方程, 计算出辐射升温量, 即可对阵列式温度传感器测量值进行修正, 提高测温精度.

3 实验装置搭建

为验证辐射升温量修正方程的修正效果和和分析阵列式温度传感器的实际性能, 在太阳辐射强度较大的晴天将阵列式温度传感器、配有传统防辐射罩的温度传感器和强制通风温度测量平台置于相同环境下进行大气温度对比观测实验.

阵列式温度传感器采用电位差计式电桥测温电路设计, 该测温电路恒流源采用可换向高精度恒流源, 参考电阻采用高精度低温漂参考电阻. 利用参考电阻温漂修正算法降低参考阻值漂移带来的测量误差, 利用数字滤波算法降低噪声带来的干扰误差, 利用铂电阻自热修正算法降低自热带来的误差. 通过水三相点、镓固定点、汞固定点和计量使用的Fluke1595 A超级测温电桥完成铂电阻温度传感器阵列的校准标定. 由于水三相点、镓固定点和汞固定点可稳定到 ± 0.2 mK, Fluke1595 A电桥测温精度为 ± 0.04 mK, 从而保证本实验中的电位差计式电桥和铂电阻探头阵列构成的传感器测温精度优于 ± 0.01 K.

为获得真实大气温度作为对比的参考值, 搭建了强制通风温度测量平台. 该平台由铂电阻温度传感器、L形导流罩和抽气泵组成, 导流罩内气流速度可达20 m/s. 与国外研制的强制通风防辐射罩不同, 该平台可用软件控制L形导流罩水平旋转, 使其始终对准上风方向, 从而显著降低了导流罩对传感器探头的热污染误差. 实验装置如图6所示, 图6(a)为阵列式温度传感器实验装置, 图6(b)为强制通风温度测量平台.

根据CFD仿真结果, 当太阳辐射强度为1000 W/m²时, 强制通风温度测量平台辐射升温量为0.002 K. 为验证CFD仿真获得该平台的参数, 利用直射光源模拟太阳光, 从侧面照射该仪器的外

壁. 实验结果显示, 模拟太阳光引起的辐射升温为 mK 量级, 低于传感器电子元件、测量电路和环境温度波动的背景噪声. 因此, 该平台可作为对比实验的参考.

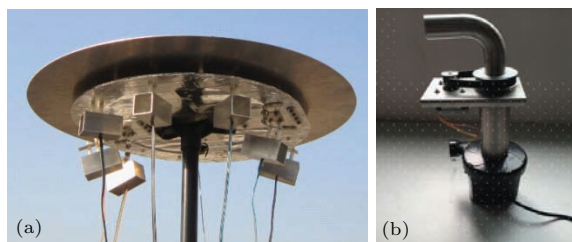


图6 (网刊彩色) 实验装置 (a) 阵列式温度传感器; (b) 强制通风温度测量平台

Fig. 6. (color online) Photos of experimental devices: (a) Temperature sensor array; (b) forced ventilation temperature measurement platform.

4 实验结果分析

4.1 外场对比观测

本文在天气晴朗的 2015 年 10 月 27 日、2015 年 11 月 2 日、2015 年 11 月 3 日和 2015 年 11 月 5 日不

同时刻将阵列式温度传感器、配有传统防辐射罩的温度传感器和强制通风温度测量平台置于相同环境下, 进行了大气温度观测对比实验. 不同时刻的大气温度测量值如图 7 所示.

由图 7 可见, 阵列式温度传感器和强制通风温度测量平台的大气温度测量值基本符合, 差值在 0.05 K 之内. 配有传统防辐射罩的温度传感器与强制通风温度测量平台测量值相差约 0.5 K.

本文将强制通风温度测量平台测量值作为真实大气温度值, 阵列式温度传感器的辐射升温量为其测量值与强制通风温度传感器测量值之差. 阵列式温度传感器和传统防辐射罩内部的温度传感器在不同时刻的辐射升温量如图 8 所示.

由图 8 可见, 阵列式温度传感器辐射升温量实验平均值为 0.027 K, 配有传统防辐射罩的温度传感器辐射升温量实验平均值为 0.409 K. 配有传统防辐射罩的温度传感器已很难满足日益提高的大气温度观测精度要求, 而阵列式温度传感器可将辐射升温引起的误差降低约 93%, 为大气温度观测精度的显著提高提供了可能.

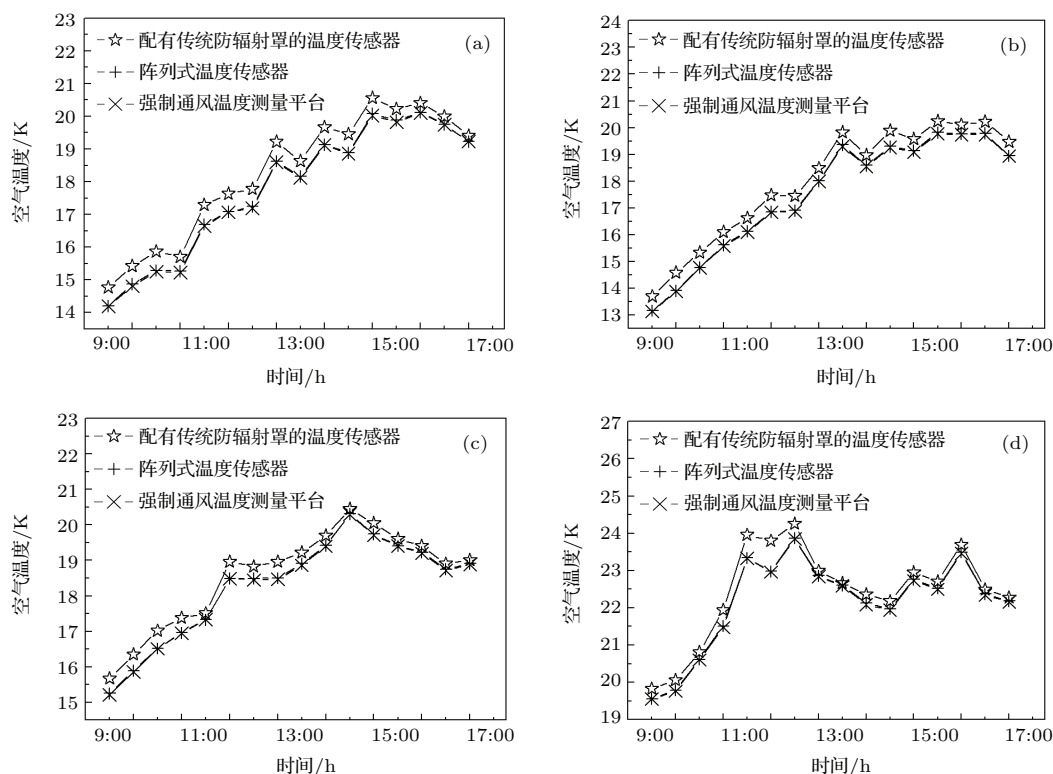


图7 不同时刻大气温度测量值 (a) 2015 年 10 月 27 日; (b) 2015 年 11 月 2 日; (c) 2015 年 11 月 3 日; (d) 2015 年 11 月 5 日

Fig. 7. Atmospheric temperature measurement results at different times: (a) Oct. 27, 2015; (b) Nov. 2, 2015; (c) Nov. 3, 2015; (d) Nov. 5, 2015.

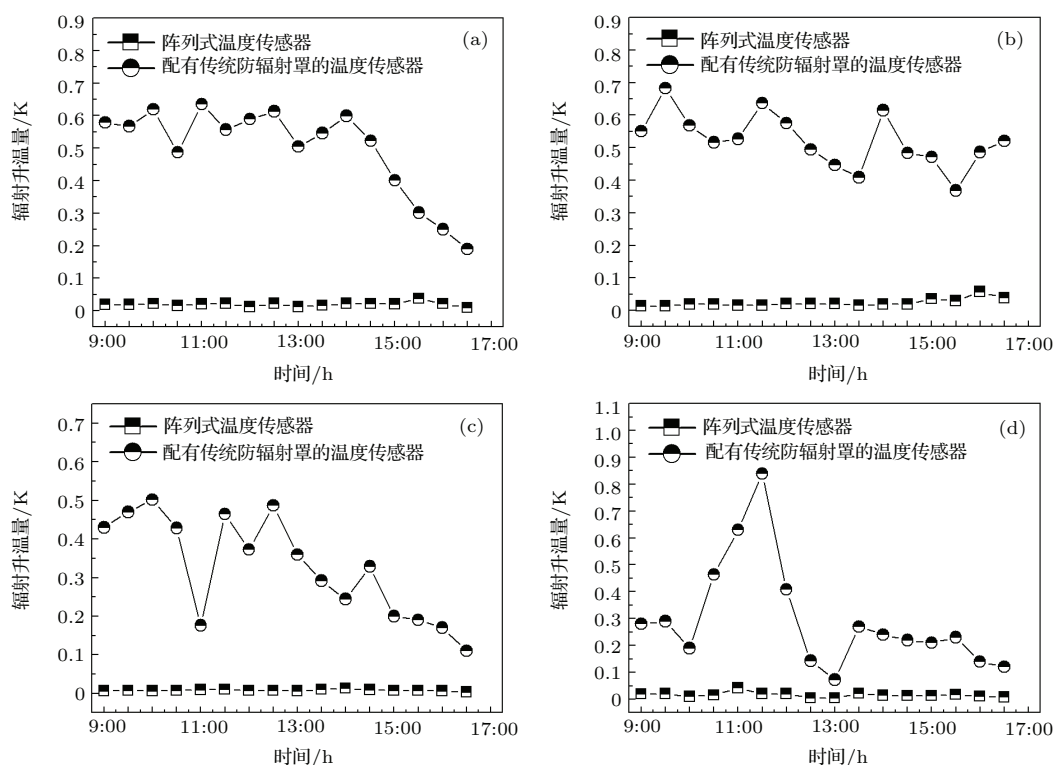


图8 不同时刻辐射升温量对比 (a) 2015年10月27日; (b) 2015年11月2日; (c) 2015年11月3日; (d) 2015年11月5日
Fig. 8. Comparison of temperature rise caused by solar radiation at different times: (a) Oct. 27, 2015; (b) Nov. 2, 2015; (c) Nov. 3, 2015; (d) Nov. 5, 2015.

4.2 辐射升温修正值与测量值分析

为验证辐射升温量修正方程的修正效果, 利用 TES-1333 R 太阳功率表进行太阳辐射强度测量, 采用 Vantage Pro2 自动气象站进行气流速度测量. 将气流速度和太阳辐射强度测量值代入修正方程中计算得到辐射升温量修正值. 辐射升温实验测量值与修正值比较如表 3 所列.

根据表 3 可得, 阵列式温度传感器辐射升温量修正值与测量值之间的平均偏移量和均方根误差分别为 0.0174 K 和 0.0215 K, 表明修正值与测量值符合较好, 辐射升温量修正方程具有较好的修正效果. 将气流速度和太阳辐射强度代入修正方程, 便可较方便地计算出辐射升温量修正值, 阵列式温度传感器测量值扣减掉修正值即可获得较为精确的大气温度值. 总之, 本文研制的阵列式温度传感器及其流体动力修正方法为精确测量大气温度提供了一条新的途径.

5 结 论

本文设计并试制了一种阵列式温度传感器, 通

过 CFD 方法对其在不同太阳辐射强度、气流速度、气流方向角度等条件下进行了数值计算. 采用遗传算法对计算结果进行拟合, 获得辐射升温量修正方程, 应用修正方程可进一步提高阵列式温度传感器测量精度. 将阵列式温度传感器、配有传统防辐射罩的温度传感器和强制通风温度测量平台置于相同环境下, 进行大气温度观测比对实验. 得到以下结论:

1) 阵列式温度传感器和配有传统防辐射罩的温度传感器的辐射升温量均随着太阳辐射功率密的增加而变大, 当气流速度为 0.5 m/s, 太阳辐射强度达到 1000 W/m^2 时, 阵列式温度传感器和配有传统防辐射罩的温度传感器的辐射升温量分别为 0.039 K 和 0.767 K;

2) 阵列式温度传感器的辐射升温量随着气流速度的增加而减小, 太阳辐射强度为 1000 W/m^2 , 气流速度为 0.1 m/s 时, 辐射升温量为 0.097 K; 气流速度大于 0.4 m/s 时, 辐射升温量降至 0.05 K; 气流速度大于 2 m/s 时, 辐射升温量可降至 0.01 K;

3) 气流方向角变化时, 对应最小辐射升温量的探头也随之变化, 气流方向角度变化引起的阵列式温度传感器辐射升温为 mK 量级;

表3 辐射升温修正值与测量值的比较

Table 3. Comparison of corrected values and measured results of the temperature rise caused by solar radiation.

时间/h		辐射功率 / $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	气流 速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	辐射升温 修正值/K	辐射升温 测量值/K	修正值与测量值 之差/K
2015/10/27	9 : 00	760	0.8	0.0189	0.01	0.0089
	10 : 00	890	0.9	0.02	0.04	-0.02
	11 : 00	892	0.9	0.02	0.05	-0.03
	12 : 00	1002	1.8	0.0118	0.05	-0.0382
	13 : 00	1037	1.8	0.0122	0.04	-0.0278
	14 : 00	970	0.9	0.0217	0.03	-0.0083
	15 : 00	900	0.9	0.02016	0.06	-0.03984
	16 : 00	660	0.6	0.0213	0.01	0.0113
2015/11/2	9 : 00	730	1.2	0.0126	0.03	-0.0174
	10 : 00	860	0.9	0.0193	0.01	0.0093
	11 : 00	945	1.3	0.0151	0.03	-0.0149
	12 : 00	907	0.9	0.0203	0.04	-0.0197
	13 : 00	890	0.9	0.0199	0.06	-0.0401
	14 : 00	862	0.9	0.0193	0.03	-0.0107
	15 : 00	756	0.4	0.0347	0.05	-0.0153
	16 : 00	490	0.1	0.0568	0.05	0.0068
2015/11/3	9 : 00	750	2.5	0.0064	0.04	-0.0336
	10 : 00	800	2.7	0.0063	0.01	-0.0037
	11 : 00	915	2.2	0.0089	0	0.0089
	12 : 00	920	2.7	0.0073	0.04	-0.0327
	13 : 00	920	3.1	0.0063	0.05	-0.0437
	14 : 00	810	1.3	0.013	0.01	0.003
	15 : 00	700	2.2	0.0068	0	0.0068
	16 : 00	643	1.7	0.0056	0.03	-0.0244
2015/11/5	9 : 00	406	0.4	0.0186	0.01	0.0086
	10 : 00	430	0.9	0.0097	0.01	-0.0003
	11 : 00	906	0.4	0.0417	0.01	0.0317
	12 : 00	870	0.9	0.0195	0.02	-0.0005
	13 : 00	55	0.9	0.0036	0.01	-0.0064
	14 : 00	820	1.2	0.0141	0.03	-0.0159
	15 : 00	728	1.2	0.0126	0.02	-0.0074
	16 : 00	419	0.8	0.0105	0.02	-0.0095

4) 本文试制的强制通风温度测量平台具有较强的防辐射性能, 太阳辐射强度为 1000 W/m^2 时, 辐射升温量为 0.002 K ; 其测量值可作为真实大气温度的参考;

5) 配有传统防辐射罩的温度传感器辐射升温量实验平均值 0.409 K ; 与前者相比, 阵列式温度传感器的辐射升温量仅为 0.027 K ; 这种阵列式温度传感器可将辐射升温引起的误差降低约 93% , 如配合计算流体动力学方法与遗传算法, 温度测量精度有进一步提高的潜力;

6) 阵列式温度传感器辐射升温量修正值与实验测量值之间的平均偏移量为 0.0174 K ; 均方根误

差为 0.0215 K ; 该结果验证了计算流体动力学方法与遗传算法的准确性.

由于空气随海拔高度的增加而变得稀薄, 空气散热能力逐渐变差, 从而导致辐射升温量变大. 目前阵列式温度传感器仅在低海拔地区进行了数值模型分析和实验验证, 针对高海拔地区的数值模型分析和实验研究还未开展, 因此本文提出的修正方程目前仅适用于低海拔地区大气温度观测. 后期将开展针对空气稀薄的高海拔地区的仿真分析和实验研究工作; 此外还将考虑在模型中增加影响辐射升温量的因素, 使之能够更好地符合地面气温观测的真实环境.

参考文献

- [1] Dai X G, Liu Y, Wang P 2015 *Chin. Phys. B* **24** 049201
- [2] Toggweiler J R, Joellen R 2008 *Nature* **451** 286
- [3] Joan B, Oller J M, Huey R B, Gilchrist G W, Luis S 2007 *Science* **315** 1497
- [4] Kerr R A 2011 *Science* **334** 173
- [5] Wang X J, Zhi R, He W P, Gong Z Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 029201
- [6] Qian Z H, Hu J G, Feng G L, Cao Y Z 2012 *Chin. Phys. B* **21** 109203
- [7] Dillon M E, George W, Huey R B 2010 *Nature* **467** 704
- [8] Wigley T M, Jones P D, Raper S C 1997 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **94** 8314
- [9] Lin X, Hubbard K G, Walter-Shea E A, Brandle J R, Meyer G E 2001 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **18** 1470
- [10] Lin X 1999 *Ph. D. Dissertation* (Lincoln: University of Nebraska)
- [11] Lin X, Hubbard K G, Walter-Shea E A 2001 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **44** 1299
- [12] Thomas C K, Smoot A R 2013 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **30** 526
- [13] Richardson S J, Brock F V, Semmer S R, Jirak C 1999 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **16** 1862
- [14] Holden Z A, Klene A E, Keefe R F, Moisen G G 2013 *Arg. Forest. Meteorol.* **180** 281
- [15] Lopardo G, Bertiglia F, Curci S, Roggero G, Merlone A 2014 *Int. J. Climatol.* **34** 1297
- [16] Hubbart J, Link T, Campbell C, Cobos D 2005 *Hydrol. Process.* **19** 1517
- [17] Georges C, Kaser G 2002 *J. Geophys. Res.* **107** ACL 15-1
- [18] Erell E, Leal V, Maldonado E 2005 *Bound-Lay. Mmteorol.* **114** 205
- [19] Nakamura R, Mahrt L 2005 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **22** 1046
- [20] Wang X L, Han Y J 2008 *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments* **2** 68 (in Chinese) [王晓蕾, 韩有君 2008 气象水文海洋仪器 **2** 68]
- [21] Chen F Z, Qiang H F, Gao W R 2014 *Acta Phys. Sin.* **62** 230206 (in Chinese) [陈福振, 强洪夫, 高巍然 2014 物理学报 **62** 230206]
- [22] Jiang Y M, Liu Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 204501 (in Chinese) [蒋亦民, 刘佑 2013 物理学报 **62** 204501]
- [23] Mao X L, Xiao S R, Liu Q Q, Li M, Zhang J H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 144701 (in Chinese) [冒晓莉, 肖韶荣, 刘清倦, 李敏, 张加宏 2014 物理学报 **63** 144701]
- [24] Wang F J 2004 *Computational Fluid Dynamics: Principle and Application of CFD Software 1* (Beijing: Tsinghua University Press) pp6-7 (in Chinese) [王福军 2004 计算流体动力学分析-CFD软件原理与应用 1(北京: 清华大学出版社) 第6—7页]
- [25] Anderson J D (translated by Wu S P, Liu Z S) 2010 *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications* (Beijing: China Machine Press) pp179-180 (in Chinese) [约翰D·安德森 著(吴颂平, 刘赵森 译) 2010 计算流体力学基础及其应用(北京: 机械工业出版社) 第179—180页]

Fluid dynamic analysis and experimental study of a temperature sensor array used in meteorological observation*

Yang Jie^{1)2)†} Liu Qing-Quan³⁾⁴⁾ Dai Wei¹⁾²⁾ Mao Xiao-Li³⁾⁴⁾
Zhang Jia-Hong³⁾⁴⁾ Li Min³⁾⁴⁾

1) (Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

2) (School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

3) (Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

4) (Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Observation and Information Processing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

(Received 23 December 2015; revised manuscript received 23 January 2016)

Abstract

Until now, the air temperature sensors inside thermometer screens and radiation shields are affected by solar radiation, which causes the measuring result to become greater than the actual temperature. The temperature rise can reach 0.8 K or even higher. In this paper, a temperature sensor array design is established for obtaining high precision measurement results. The temperature sensor array consists of an array of radiation shields which features a tube-shape, a platinum resistance sensor array, an aluminum plate with a silver mirror surface and a temperature measurement module that includes a high accuracy thermometer circuit. There is always at least one radiation shield that supplies relatively good ventilation under any airflow direction. A computational fluid dynamic method is implemented to analyze and calculate the temperature rise induced by radiation under various environmental conditions. A correction equation of the temperature rise is obtained by surface fitting using a genetic algorithm. The measurement accuracy can be further improved by this correction equation. In order to verify the performance of the sensor array, a forced ventilation temperature measurement platform is constructed, which consists of a platinum resistance sensor, an L-shaped radiation shield and an air pump. The airflow rate inside the radiation shield can be up to 20 m/s, and the L-shaped radiation shield can horizontally rotate under the control of a software to minimize the error caused by the heated radiation shield. The temperature sensor array, a temperature sensor with traditional radiation shield, and the forced ventilation temperature measurement platform are characterized in the same environment. To experimentally verify the computational fluid dynamic method and the genetic algorithm, a number of contrast tests are performed. The average temperature rise of sensors equipped with the traditional radiation shields is 0.409 K. In contrast, the temperature rise of the sensor

* Project supported by the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant Nos. GYHY200906037, GYHY201306079), National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 412475042, 61306138), Colleges and Universities in Jiangsu Province Plans to Graduate Research and Innovation, China (Grant No. KYLX15_0866), the Open Research Fund of Key Laboratory of MEMS of Ministry of Education, Southeast University, China (Grant No. 2013-3), and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, China.

† Corresponding author. E-mail: yangjie396768@163.com

array is as low as 0.027 K. This temperature sensor array allows the error caused by solar radiation to be reduced by a percentage of approximately 93%. The temperature rise of temperature sensor array, caused by the angular variation of airflow direction is on the order of several mK. When the solar radiation intensity and the airflow rate are 1000 W/m^2 and 0.1 m/s, respectively, the temperature rise is 0.097 K. The temperature rise is 0.05 K, when the airflow rate is greater than 0.4 m/s. The temperature rise can be reduced to 0.01 K, when the airflow rate is greater than 2 m/s. The average offset and root mean square error between the correction equation and experimental results are 0.0174 K and 0.0215 K, respectively, which demonstrates the accuracy of the computational fluid dynamic method and genetic algorithm proposed in this research. The temperature measurement accuracy has the potential to be further improved by utilizing the computational fluid dynamics method and the genetic algorithm.

Keywords: radiation temperature, temperature sensor, sensor array, computational fluid dynamics

PACS: 42.81.Pa, 47.11.-j, 47.55.pb, 92.60.Vb

DOI: [10.7498/aps.65.094209](https://doi.org/10.7498/aps.65.094209)