

探空温度传感器的计算流体动力学分析与实验研究

戴伟 刘清倦 杨杰 宿恺峰 韩上邦 施佳驰

Computational fluid dynamics analysis and experimental study of sounding temperature sensor

Dai Wei Liu Qing-Quan Yang Jie Su Kai-Feng Han Shang-Bang Shi Jia-Chi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 114701 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.114701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.114701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I11>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于间断有限元方法的并列圆柱层流流动特性

Numerical simulation of laminar flow past two side-by-side cylinders by discontinuous Galerkin method

物理学报.2016, 65(8): 084701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084701>

三角波脉动流通栓的晶格玻尔兹曼方法模型

Triangle wave pulsating flow effect on thrombus simulated by the lattice Boltzmann method

物理学报.2016, 65(7): 074701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074701>

多孔介质中流体流动及扩散的耦合格子 Boltzmann 模型

A coupled lattice Boltzmann model for fluid flow and diffusion in a porous medium

物理学报.2016, 65(1): 014702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014702>

干斜压大气拉格朗日原始方程组的半解析解法和非线性密度流数值试验

Semi-analytical solution of the dry baroclinic Lagrange primitive equation and numerical experiment of a non-linear density current

物理学报.2015, 64(19): 194702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194702>

流体力学拉氏守恒滑移线算法设计

Conservative sliding algorithms for hydrodynamics

物理学报.2015, 64(19): 194701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.194701>

# 探空温度传感器的计算流体力学分析与实验研究\*

戴伟<sup>1)2)†</sup> 刘清倦<sup>3)4)5)</sup> 杨杰<sup>1)2)</sup> 宿恺峰<sup>3)4)5)</sup> 韩上邦<sup>3)4)5)</sup> 施佳驰<sup>3)4)5)</sup>

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)

5)(南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

(2016年2月1日收到; 2016年3月3日收到修改稿)

伴随着数值天气预报和气候变化研究精细化程度的不断提高, 希望探空温度传感器的观测精度达到 0.1 K 数量级. 为了实现此目标, 运用计算流体力学方法对珠状热敏电阻从海平面上升至 20 km 高空的整个过程进行数值仿真分析. 并在此基础上, 针对影响测温精度的太阳辐射强度和传感器倾斜角度两个因素进行分析. 仿真结果表明, 太阳辐射强度和海拔高度是辐射误差的重要影响因子. 当传感器倾斜角度为  $90^\circ$  时, 珠状热敏电阻的辐射误差最小. 通过麦夸特法和通用全局优化法对仿真数据进行拟合, 获得不同海拔高度和太阳辐射强度下的辐射误差修正方程; 为验证方程的准确性, 设计和搭建太阳辐射误差模拟系统. 实验结果表明, 辐射误差实验测量值与修正方程修正值之间的平均偏移量为 0.017 K, 均方根值 *RMS* 误差为 0.023 K, 验证了计算流体力学方法、麦夸特法和通用全局优化法获得辐射误差数据的准确性.

**关键词:** 探空温度传感器, 珠状热敏电阻, 计算流体力学, 辐射误差

**PACS:** 47.11.-j, 47.27.-i, 87.19.lt, 92.60.Vb

**DOI:** 10.7498/aps.65.114701

## 1 引言

大气中各个高度层面上的温度资料能够反映大气热力和动力过程, 是进行天气预报<sup>[1-3]</sup>、气候诊断预测、气候变化预估<sup>[4-8]</sup>和大气环境监测等相关科学研究的基础信息. 高空温度场在垂直结构上的准确测量, 可以有效提高各种类型天气预报的准确性, 特别是区域性和局地性天气预报; 可以指示垂直方向上存在的云或雾的结构, 从而推断大气的稳定性, 预报空中的云量和云状. 由于影响地面温度测量的因素复杂, 使得预报难度较大, 一些研究

者尝试通过多种预报途径对地面温度的预报方法展开研究. 有学者发现 850 hPa 温度资料是地面温度的重要预报因子. 冀新琪<sup>[9]</sup>发现晴空时 850 hPa 温度资料可作为日最高气温的主要预报因子; 刘梅等<sup>[10]</sup>使用日最高温度与 850 hPa 的温差作为预报因子建立夏季日最高气温模型.

近年来随着对气候变化研究的不断深入, 已有诸多针对地面气温变化的研究成果<sup>[11-14]</sup>, 但气候变化的观测和机理分析离不开对大气温度垂直结构变化的研究, 气候系统内部的相互联系使得高空大气温度的变化趋势成为气候变化研究的焦点之一. 薛德强等<sup>[15]</sup>分析近 40 a (1961—2000 年)

\* 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)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: daiweilove@163.com

中国年平均气温变化趋势,发现自地面至700 hPa绝大部分地区气温上升,最大线性趋势系数为 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,而对流层顶层至50 hPa的气温在降低,尤其是50 hPa降温最为显著,线性趋势系数为 $-0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ .程瑛等<sup>[16]</sup>分析了1986年6—9月祁连山冰川消融随高空气温的变化特征和高空气温与河西地区托来河流量之间的关系,得出两者之间可能存在的关联.王荣英等<sup>[17]</sup>分析了近30 a (1979—2008年)华北高空年平均气温的线性变化趋势,发现850 hPa气温每10 a增加 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,250 hPa气温每10 a增加 $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,50 hPa气温下降最明显,每10 a大约下降 $1.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ .基于上述资料研究发现高空温度变化趋势可能在 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 至 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 数量级,因此希望探空温度传感器能够提高到与之相应的准确度.近年来全球气候观测系统(GCOS)也要求对对流层上部和平流层下部的温度进行精确测量,因此探索将探空温度传感器的精度进一步提高的方法,已成为一个前沿科学技术问题.

无线电探空仪是目前探测30—40 km以下海拔高度的惟一直接观测温度、湿度和气压的探测仪器,其观测数据可为气象卫星和雷达的遥感测量结果提供校准<sup>[18-20]</sup>.无线电探空仪上的温度传感器在进行高空观测业务时,存在多种因素影响测量的准确性,测量误差来源主要包括自加热效应、滞后性、长波辐射和太阳辐射等,其中辐射误差是影响高空温度测量精度的最大影响因子.根据世界气象组织(WMO)气象仪器和观测方法指南第12章提供的高空温度测量资料,当太阳高度角为 $20^{\circ}$ 时,各类温度传感器在300 hPa高度的辐射误差可达 $0.3\text{—}1.0\text{ K}$ ,在100 hPa高度的辐射误差可达 $0.8\text{—}1.8\text{ K}$ ,30 hPa高度的辐射误差可达 $1.4\text{—}3.3\text{ K}$ ,10 hPa高度的辐射误差可达 $1.8\text{—}5.1\text{ K}$ .上述数据表明,辐射误差对于高空温度观测的准确性有显著影响,如不能得到妥善解决,将会制约天气预报和气候变化研究水平的提高.

为了改善辐射误差对温度观测精度的影响,国内外学者针对探空温度传感器的太阳辐射误差开展了一系列研究<sup>[21-23]</sup>.1986年,美国航天局(NASA)的Schmidlin等<sup>[24]</sup>提出了探空热敏电阻传感器的解析模型,该模型中热敏电阻的对流传热系数采用经验公式估算,因此可以较为容易地计算出太阳辐射误差.但在探空仪飞行过程中,热敏电

阻、引线和支架的复杂几何结构使得探空温度传感器与空气的对流传热过程变得相当复杂,试图用解析方法计算出一个准确的对流传热系数几乎是不可能的,所以该方法的实施不易得到准确的量化结果.在Schmidlin的研究基础上,美国Dayton大学研究院的Luers<sup>[25]</sup>进一步对当时应用较为广泛的棒状热敏电阻建立了简化模型,但模型中使用的努塞尔数和雷诺数仍需要通过经验公式估算.Luers和Eskridge<sup>[26]</sup>在其后续研究中,对美国海洋和大气管理局的VIZ探空仪和Vaisala RS-80探空仪的温度传感器进行了建模分析,依然使用粗略的经验公式来估算努塞尔数和雷诺数.2003年,瑞士气象局高空气象站的Ruffieux和Joss<sup>[27]</sup>利用气泵和热板搭建了一个简易的低气压辐射风洞,在真空试验箱内针对特定的热电偶型探空温度传感器进行了辐射误差研究,并通过建立的简化近似的计算公式,初步获得了和试验研究有对应关系的数据.这种简易试验装置取得的测试结果是否能代表高空探测环境的实际探空数据,尚缺乏深入的后续研究.同时该研究方法忽略了诸多影响因素,对雷诺数的计算公式也过于简单,因此其适用面较窄,难以推广到各种类型的探空温度传感器,也难以适应高空多种复杂的气流情况.

针对上述研究方法的不足,本文提出运用计算流体动力学方法<sup>[28-30]</sup>对珠状热敏电阻的太阳辐射误差进行研究,尝试量化海拔高度、太阳辐射强度和传感器倾斜角度三个因素对辐射误差的影响.并采用麦夸特法和通用全局优化法对量化结果进行数据拟合,获得珠状热敏电阻的辐射误差修正方程,同时设计和搭建太阳辐射误差模拟实验装置用于验证修正方程数据的准确性.

## 2 探空温度传感器的计算流体动力学分析

### 2.1 流体动力学模型的建立

珠状热敏电阻具有体积小、灵敏度高、散热能力强等优点,现已成为无线电探空仪上进行温度探测的主流传感器,用于精确测量各个垂直高度的大气温度.珠状热敏电阻在白天进行探空观测时,将直接暴露于太阳辐射环境中,为减小探空仪外壳对温度测量值的影响,探空仪厂家将珠状热敏电阻放

置于壳体外部. 探空温度观测系统的结构如图 1 所示, 图中角  $\alpha$  为温度传感器的倾斜角度.

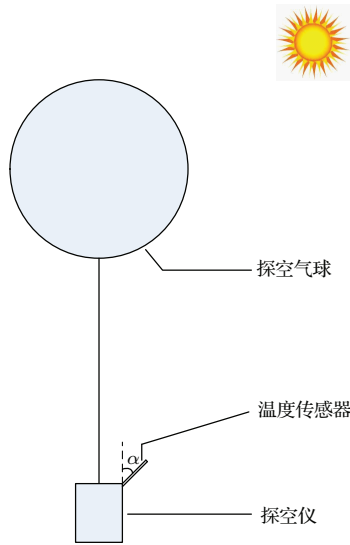


图 1 探空温度观测系统结构

Fig. 1. The structure of the sounding temperature observation system.

珠状热敏电阻的结构和尺寸如图 2 所示, 其由电阻体 (1)、封装体 (2) 和引线 (3) 组成. 它的工作原理是通过测量电阻体的阻值, 并根据电阻输出值与环境温度的函数关系计算得到温度数据.

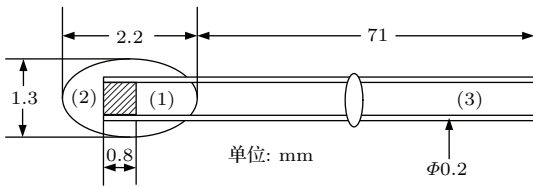


图 2 珠状热敏电阻平面结构和尺寸示意图

Fig. 2. 2D drawing and feature size of the bead thermistor.

通过计算流体动力学方法对珠状热敏电阻进行流固耦合仿真分析时, 需要考虑珠状热敏电阻升空时的热力学平衡过程. 其传热过程包括: 太阳直射辐射、大气对流换热以及珠状热敏电阻内部导热.

外部不可压空气的流动控制方程为

$$\nabla \cdot v = 0, \tag{1}$$

$$\rho v \cdot \nabla v = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g \beta (T - T_f). \tag{2}$$

其中  $v$  为速度矢量;  $\rho, p, \mu$  分别为密度、压力和动力黏度;  $g, \beta$  分别为重力加速度和空气热膨胀系数.

珠状热敏电阻内部能量方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T. \tag{3}$$

珠状热敏电阻表面换热边界条件为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -q_{dn} + q_{co}, \tag{4}$$

式中,  $q$  表示珠状热敏电阻表面热流密度, 沿外法线方向为正;  $q_{dn}, q_{co}$  分别表示直接太阳辐射和外界空气的对流换热. 根据 (3) 式可知, 通过数值计算求解珠状热敏电阻内部能量方程时, 需要知道珠状热敏电阻各个部件的密度、比热容和热导率, 其物性参数如表 1.

表 1 珠状热敏电阻的物性参数

Table 1. The physical parameters of the bead thermistor.

材料: 部件	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	比热容/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	热导率/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
玻璃: 绝缘层	2500	790	0.2
氧化铝: 电阻体	3900	840	35
铁镍: 引线	8385	449	86

进行高空大气温度观测时珠状热敏电阻需从海平面升至约 32 km 的高空, 升空速度大约 6 m/s. 由于各个海拔高度对应的气压环境不同, 不同气压条件下珠状热敏电阻表面的对流换热效果不同, 因此需要通过计算流体动力学方法研究海拔高度变化对珠状热敏电阻辐射误差的影响. 由于 1976 年美国标准大气模型 30 km 以下的大气数据同中国中纬度 (45°N) 实际大气十分接近, 故中国国家标准总局将此大气模型的 30 km 以下部分选作中国的国家标准 (GB1920-80). 根据 1976 年美国标准大气模型 [31] 可获得气压与海拔高度的数据呈如图 3 所示的指数函数关系, 气压随着高度增加而减小, 幅度变化约三个数量级.

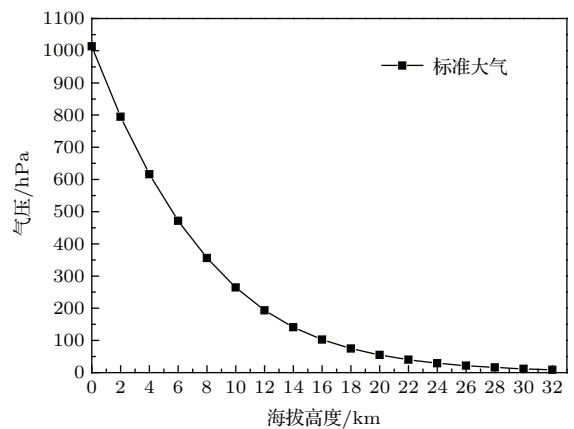


图 3 气压与海拔高度的关系

Fig. 3. The relationship between air pressure and altitude.

由于珠状热敏电阻的外部环境是无限空气域,但数值计算无法通过建立无限网格来模拟无限空气域.为平衡计算效率和精度,在珠状热敏电阻实体模型外部建立一个大小适中的长方体空气域,代替无限空气域进行数值计算.通过计算流体动力学方法分析珠状热敏电阻和外围空气域的物理模型如图4,模型中长方体的左边(即探空仪的上方)为气流入口,右边为气流出口,并对气流方向的空气域进行加长,以保证空气流动能够充分发展.

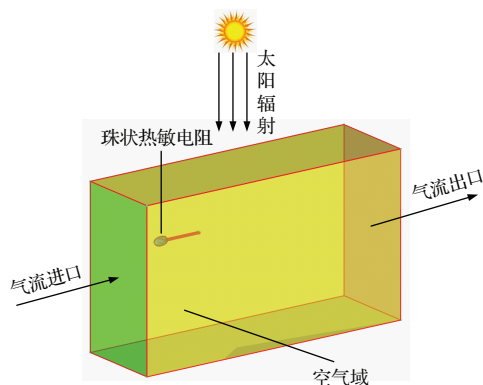


图4 (网刊彩色) 珠状热敏电阻和外围空气域的物理模型  
Fig. 4. (color online) Physical model of the bead thermistor and peripheral air domain.

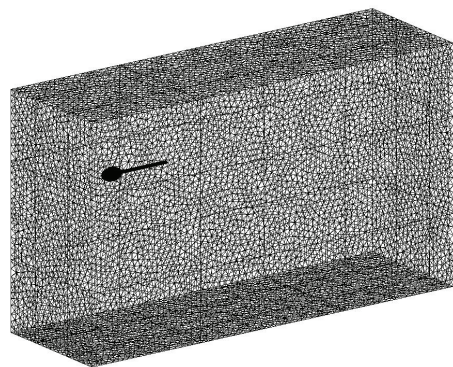


图5 珠状热敏电阻和外围空气域的网格划分  
Fig. 5. The grids of the bead thermistor model and peripheral air domain.

本文采用自适应性较强的非结构化网格划分技术生成珠状热敏电阻和外围空气域的网格模型,对不同计算区域采用不同的网格大小,珠状热敏电阻的网格大小采用0.05,外围空气域的网格大小采用1.通过对流固耦合面采用边界层网格处理,提高数值仿真结果的精度和捕捉边界层内的物理现象.为验证网格的无关性,对50—100万网格数量模型进行数值计算.根据计算结果,80—100万网

格通过数值计算后的结果差距小于1%,可认为80万的网格已达到网格无关的要求,因此物理模型的网格划分方案采用80万网格,其非结构网格划分如图5所示.

## 2.2 流固耦合分析

运用计算流体动力学方法对珠状热敏电阻进行流固耦合仿真分析,其中外部辐射耦合边界条件采用热流密度表示,太阳辐射强度为 $1000 \text{ W/m}^2$ .在计算模型中,流体进口采用速度入口边界条件,出口采用压力出口边界条件,求解器采用压力基求解器,并进行定常流动计算.模型中因涉及辐射传热、对流换热及热传导计算,故使用能量方程.压力和速度耦合采用SIMPLE算法,动量、能量以及湍流参数的求解先采用一阶迎风格式使计算结果收敛,再采用二阶迎风格式提高计算结果的精度.珠状热敏电阻在太阳辐射和强制对流换热环境中的温度场分布如图6所示.

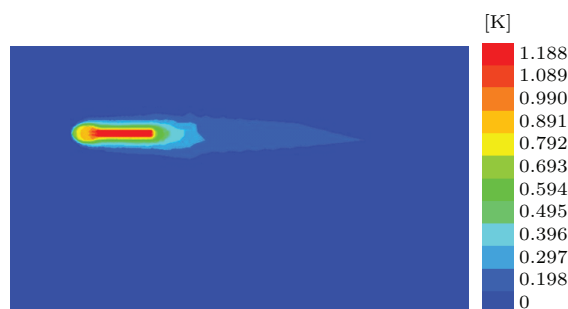


图6 (网刊彩色) 珠状热敏电阻的温度场分布  
Fig. 6. (color online) The temperature field of the bead thermistor model.

根据仿真结果,珠状热敏电阻在太阳辐射环境中的温度高于周围空气域的温度,由此产生的温度差值称为辐射误差.图中的空气尾流温度已逐步过渡到环境温度,说明空气域的长度已达到模拟真实物理环境的要求.

## 2.3 传感器倾斜角度对辐射误差的影响

国内外学者尚未对传感器倾斜角度的设置制定标准,现有的探空仪传感器存在多种倾斜角度,为揭示传感器倾斜角度对珠状热敏电阻温度测量精度的影响,通过计算流体动力学方法对不同传感器倾斜角度和海拔高度条件下的珠状热敏电阻进行流固耦合稳态热分析.传感器倾斜角度变化

范围为 $0^\circ\text{--}90^\circ$ ，步长为 $15^\circ$ ；海拔高度变化范围为 $0\text{--}20\text{ km}$ ，步长为 $2\text{ km}$ ；气流速度和太阳辐射强度分别为 $6\text{ m/s}$ 和 $1000\text{ W/m}^2$ 。通过数值计算获得倾斜角度、海拔高度与珠状热敏电阻辐射误差的关系，如图7所示。

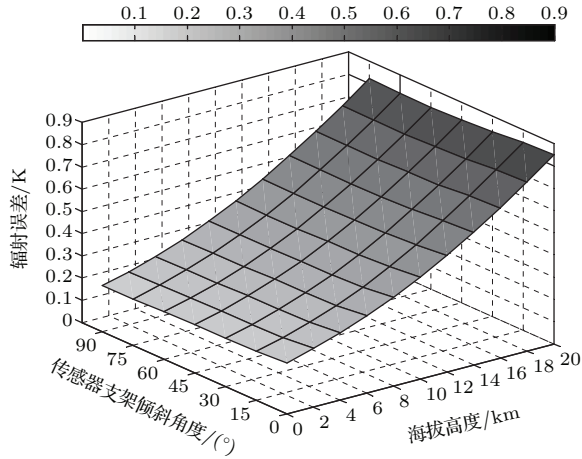


图7 不同传感器倾斜角度下辐射误差与海拔高度的关系  
Fig. 7. The discrepancy of the solar radiation errors with respect to different sensor angles.

根据图7中的仿真结果，辐射误差与海拔高度之间呈指数函数关系且单调递增，即辐射误差随着海拔高度的上升而迅速增大。辐射误差随着传感器倾斜角度的增大而减小，但其对辐射误差的影响程度低于海拔高度的影响。当传感器倾斜角度为 $90^\circ$ 时，太阳辐射对珠状热敏电阻的加热升温量最小，因此这种倾斜形态有利于降低辐射误差。

### 2.4 太阳辐射强度对辐射误差的影响

太阳直接辐射是影响高空大气温度观测精度的主要因素，运用计算流体动力学方法对不同太阳辐射强度和海拔高度条件下的珠状热敏电阻进行流固耦合稳态热分析，太阳辐射强度变化范围为 $200\text{--}1000\text{ W/m}^2$ ，海拔高度变化范围为 $0\text{--}20\text{ km}$ ，气流速度和传感器倾斜角度分别为 $6\text{ m/s}$ 和 $45^\circ$ 。通过数值计算获得太阳辐射强度、海拔高度与珠状热敏电阻辐射误差的关系，如图8所示。

根据图8中的数据可知，辐射误差与海拔高度之间呈指数函数关系且单调递增，即辐射误差随着海拔高度的上升而迅速增大。在海平面或近海平面低空，辐射强度引起的太阳辐射误差变化量仅有

$0.17\text{ K}$ 。但随着海拔高度的增加，不同辐射强度引起的辐射误差变化迅速增大。当海拔高度为 $20\text{ km}$ 时， $200\text{ W/m}^2$ 和 $1000\text{ W/m}^2$ 辐射强度引起的辐射误差变化差距可达 $0.66\text{ K}$ 。

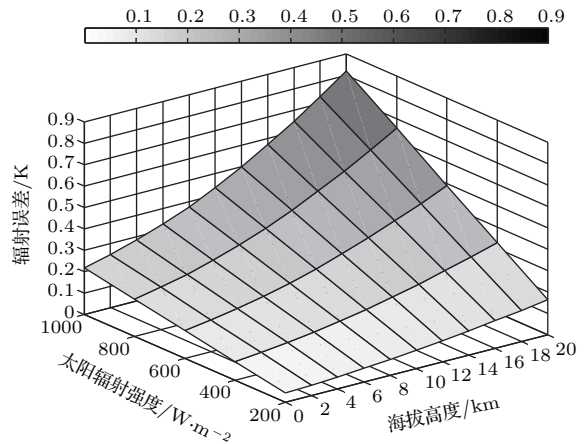


图8 不同太阳辐射强度下辐射误差与海拔高度的关系  
Fig. 8. The discrepancy of the solar radiation errors with respect to different solar radiation intensities.

### 2.5 辐射误差修正公式的拟合

由于计算流体动力学方法仅能计算有限离散值模型，因此难以分析连续变化的物理量。如能获得任意海拔高度和太阳辐射强度条件下珠状热敏电阻的辐射误差修正公式，将获得一条解决上述问题的途径。本文采用麦夸特法和通用全局优化法对计算流体动力学方法的数值分析结果进行公式拟合，获得了辐射误差 $\Delta T$ 与海拔高度 $x$ 和太阳辐射强度 $y$ 之间的修正方程：

$$\Delta T = \frac{p_1 + p_2 * x + p_3 * x^2 + p_4 * x^3 + p_5 * y}{1 + p_6 * x + p_7 * x^2 + p_8 * x^3 + p_9 * y} \quad (5)$$

其中， $p_1 = 0.00159$ ， $p_2 = -0.00061$ ， $p_3 = 5.86478 \times 10^{-5}$ ， $p_4 = -1.62835 \times 10^{-6}$ ， $p_5 = 0.00022$ ， $p_6 = -0.06903$ ， $p_7 = 0.00208$ ， $p_8 = -2.41251 \times 10^{-5}$ ， $p_9 = -1.168481 \times 10^{-7}$ 。

(5)式的拟合效果可以用样本决定系数 $r^2$ 来衡量，该值介于0和1之间， $r^2$ 的数值越接近1，说明公式和样本数据拟合程度越好。(5)式的 $r^2$ 值为0.99998，非常接近1，因此可认为(5)式在海拔高度和太阳辐射强度确定后能够精确地计算出辐射误差修正值。

### 3 太阳辐射误差模拟装置的搭建

为验证辐射误差修正方程的准确性,设计搭建可用于研究珠状热敏电阻辐射误差的低气压辐射实验装置,图9(a)为装置的结构图,图9(b)为装置的实物图.该装置由高低温低气压实验箱、电机控制的旋转机械结构、精密测量电路、数据采集与无线发送电路、上位机数据接收模块和珠状热敏电阻等组成.高低温低气压实验箱腔体内表面采用黑色涂层技术,利用Fluke Ti400红外热像仪测量出黑色涂层的发射率达到0.92,可以有效减小反射辐射效应对测量结果的影响.

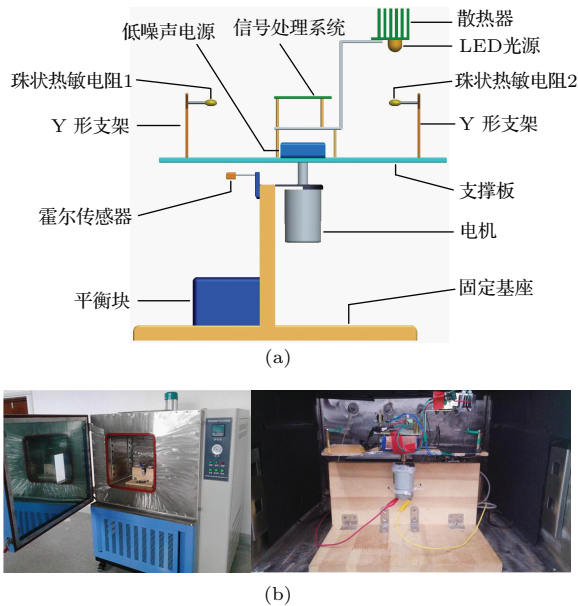


图9 (网刊彩色) 探空温度传感器太阳辐射误差模拟实验装置 (a) 结构图; (b) 实物图

Fig. 9. (color online) The solar radiation error simulation device of the sounding temperature sensor: (a) Structure of the device; (b) real graph of the device.

太阳模拟器是用于模拟太阳光辐射的常用科学仪器.基于光谱匹配度、辐照不均匀度和辐照不稳定性等技术指标的最优化考虑,短弧氙灯凭借光谱匹配性好,输出功率大,亮度高等因素,已经成为太阳模拟器采用最广泛的光源<sup>[32,33]</sup>.但本实验装置要求太阳光模拟光源的体积小、功耗低和可在旋转环境下工作,而短弧氙灯需要在大空间和散热环境好的条件下工作,难以适用于本实验装置的要求.基于这种情况,实验装置选用体积小和功耗低的LED光源作为太阳光模拟光源.

本实验装置的信号采集系统置于旋转电机上方,珠状热敏电阻1和2分别置于支撑板的两端.珠状热敏电阻1用于测量真实空气温度,珠状热敏电阻2在LED光源的照射下将被辐射加热,测量结果将高于空气温度,两者的差值即为辐射误差.由于珠状热敏电阻在进行探空观测时通常以6 m/s的平均速度升空,为了用实验装置模拟出珠状热敏电阻升空时的对流换热环境,运用步进电机旋转支撑板实现类似升空的效果.在此基础上,通过霍尔传感器调节支撑板旋转的角速度,使珠状热敏电阻的旋转速度稳定在6 m/s.高低温低气压实验箱可用于模拟高空大气的低气压环境,其气压工作范围为40—1000 hPa.根据1976年美国标准大气模型中气压与海拔高度的数据关系,可知高低温低气压实验箱能够提供0—20 km海拔高度的气压环境.对流层顶的最大高度不超过18 km,且各种重要天气现象几乎都出现在对流层,因此该实验装置主要对0—20 km的海拔高度进行研究.

### 4 实验结果分析

#### 4.1 太阳辐射强度对辐射误差的影响

LED光源的辐射强度测量装置包括全波段光电式总辐射传感器、信号采集系统和上位机软件,此装置可用于研究LED光源辐照距离与辐射强度之间的变化特性.在研究过程中,通过从远到近的方式调整LED光源与辐射传感器之间的距离,并利用超声波测距系统和上位机软件采集辐照距离和辐射强度数据.为了揭示辐照距离变化对辐射强度的影响,运用遗传算法对实验数据进行公式拟合,获得了辐照距离 $R_L$ 与辐射强度 $x$ 之间的函数关系:

$$R_L = p_1 + p_2 * x + \frac{p_3}{x} + p_4 * x^2 + \frac{p_5}{x^2} + p_6 * x^3 + \frac{p_7}{x^3}, \quad (6)$$

其中,  $p_1 = 13.573$ ,  $p_2 = -0.0294$ ,  $p_3 = -181.851$ ,  $p_4 = 2.779 \times 10^{-5}$ ,  $p_5 = 57209.953$ ,  $p_6 = -8.674 \times 10^{-9}$ ,  $p_7 = -1594557.914$ .

拟合公式与样本数据之间的决定系数 $r^2$ 值为0.996,此数值证明(6)式能够根据辐射强度大小准确地计算出辐照距离.故通过(6)式分别计算出200, 400, 600, 800和1000 W/m<sup>2</sup>等五个辐射强度对应的LED光源辐照距离,用于研究不同太阳辐

射强度下珠状热敏电阻的辐射误差. 传感器的倾斜角度为  $45^\circ$ , 高低温低气压实验箱提供  $0\text{--}20\text{ km}$  的气压环境, 信号处理系统采集珠状热敏电阻 1 和 2 的输出, 两者温度测量值相减后的数据如图 10 所示.

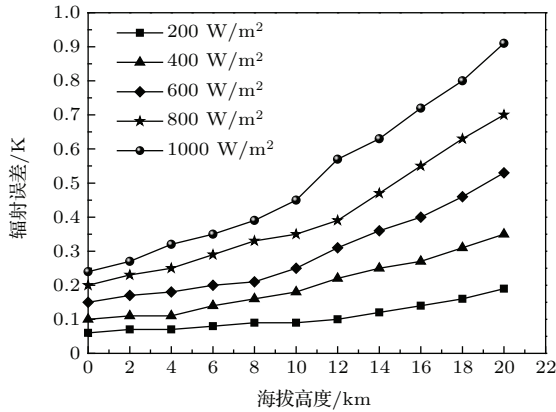


图 10 不同太阳辐射强度下辐射误差与海拔高度的关系  
Fig. 10. The discrepancy of the solar radiation errors with respect to different solar radiation intensity.

图 10 中的实验数据表明, 辐射误差与海拔高度之间呈近似指数函数关系且单调递增, 即辐射误差随着海拔高度的上升而迅速增大. 在海平面或近海平面低空, 不同辐射强度引起的太阳辐射误差变化量差距仅为  $0.2\text{ K}$ . 但随着海拔高度的增加, 不同辐射强度引起的辐射误差变化迅速增大. 当海拔高度为  $20\text{ km}$  时,  $200\text{ W/m}^2$  和  $1000\text{ W/m}^2$  之间的辐射误差变化差距可达  $0.72\text{ K}$ . 通过将实验中获得的测量数据与修正方程的计算数据进行对比发现实验值与修正值符合较好, 两者误差在  $0.06\text{ K}$  以内.

#### 4.2 传感器倾斜角度对辐射误差的影响

由于传感器倾斜角度的不同将导致珠状热敏电阻在进行探空观测时经历不同的风场环境, 使得珠状热敏电阻表面产生不同的对流换热效果. 为了在地面实验室对传感器倾斜角度进行研究, 通过旋转太阳辐射误差模拟实验装置中的 Y 形支架使得珠状热敏电阻与气流方向形成夹角  $\alpha$ , 实现类似传感器倾斜的效果, 如图 11 所示.

为揭示传感器倾斜角度、海拔高度与辐射误差之间的关系, 通过太阳辐射误差模拟实验装置对不同海拔高度和传感器倾斜角度下的珠状热敏电阻进行研究, 获得的相关实验数据如图 12 所示. 其中传感器倾斜角度变化范围为  $0^\circ\text{--}90^\circ$ , 变化步长为

$15^\circ$ ; 海拔高度变化范围为  $0\text{--}20\text{ km}$ , 步长变化为  $2\text{ km}$ .

实验数据表明, 不同传感器倾斜角度引起的太阳辐射误差变化差距在  $0.2\text{ K}$  量级, 且辐射误差随着倾斜角度的增大而减小, 当倾斜角度为  $90^\circ$  时, 珠状热敏电阻的辐射误差最小. 各种倾斜角度下珠状热敏电阻的辐射误差与海拔高度之间呈近似指数函数关系且单调递增, 即辐射误差随着海拔高度的上升而迅速增大, 当海拔高度为  $20\text{ km}$  时, 辐射误差最大可达  $0.94\text{ K}$ . 通过将实验中获得的测量数据与修正方程的计算数据进行对比发现实验值与修正值符合较好, 两者误差在  $0.1\text{ K}$  以内.

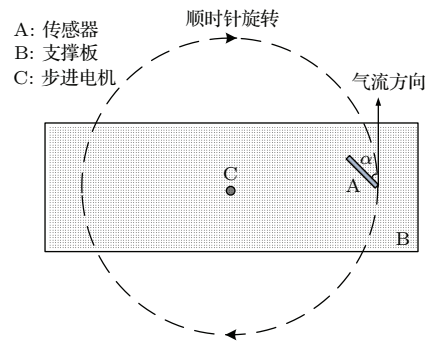


图 11 太阳辐射误差模拟装置的旋转方向示意图  
Fig. 11. The schematic of the rotation direction of the solar radiation error simulation device.

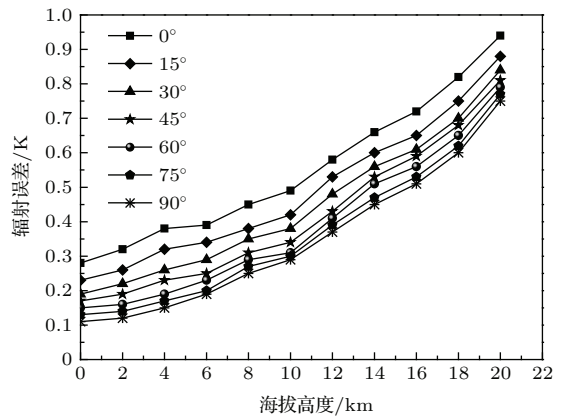


图 12 不同传感器倾斜角度下辐射误差与海拔高度的关系  
Fig. 12. The discrepancy of the solar radiation errors with respect to different sensor angles.

#### 4.3 辐射误差修正值与实验测量值的对比分析

为验证辐射误差修正方程的准确性, 利用太阳总辐射传感器对 LED 光源辐射强度进行测量, 利用全温度范围精度  $\pm 0.01\%$  的 Vaisala PTB330 高



精度气压测量装置对本文中研制的气压测量系统进行标定后, 对高低温低气压实验箱的腔内气压进行实时测量, 气压和海拔高度的换算公式亦集成在信号处理系统中. 为了便于比较辐射误差修正值和

实验测量值, 通过将实验中具有代表性的海拔高度和太阳辐射强度数值代入修正方程中计算得到辐射误差修正值, 辐射误差修正值与实验测量值的对比如表 2 所列.

表 2 辐射误差修正值与实验测量值的对比  
Table 2. Comparison of corrected values and measured results of the radiation errors.

$I/W \cdot m^{-2}$	$H/km$	$T_c/K$	$T_e/K$	$T_c - T_e/K$	$H/km$	$T_c/K$	$T_e/K$	$T_c - T_e/K$
200	0	0.05	0.06	-0.01	12	0.1	0.1	0
	4	0.06	0.07	-0.01	16	0.13	0.14	-0.01
	8	0.08	0.09	-0.01	20	0.17	0.19	-0.02
400	0	0.09	0.1	-0.01	12	0.20	0.22	-0.02
	4	0.12	0.11	0.01	16	0.27	0.27	0
	8	0.15	0.16	-0.01	20	0.34	0.35	-0.01
600	0	0.13	0.15	-0.02	12	0.31	0.31	0
	4	0.17	0.18	-0.01	16	0.4	0.4	0
	8	0.23	0.21	0.02	20	0.51	0.53	-0.02
800	0	0.18	0.2	-0.02	12	0.41	0.39	0.02
	4	0.23	0.25	-0.02	16	0.54	0.55	-0.01
	8	0.31	0.33	-0.02	20	0.68	0.7	-0.02
1000	0	0.22	0.24	-0.02	12	0.51	0.57	-0.06
	4	0.29	0.32	-0.03	16	0.67	0.72	-0.05
	8	0.39	0.39	0	20	0.85	0.91	-0.06

$I$ , 太阳辐射强度;  $H$ , 海拔高度;  $T_c$  和  $T_e$ , 修正值和测量值.

根据表 2 中的数据, 珠状热敏电阻的辐射误差修正值与实验测量值之间的平均偏移量和均方根值  $RMS$  分别为 0.017 K 和 0.023 K, 表明修正值与测量值符合较好, 辐射误差修正方程具有较好的修正效果. 将太阳辐射强度和海拔高度代入修正方程, 便可较方便地计算出辐射误差修正值, 珠状热敏电阻观测值与修正值之差即可作为高精度的大气温度值.

## 5 结 论

本文提出利用计算流体动力学方法对珠状热敏电阻在不同太阳辐射强度、海拔高度和传感器倾斜角度条件下进行了流固耦合稳态热分析, 并通过太阳辐射误差模拟实验装置对数值仿真数据进行验证. 根据数值仿真和实验数据可得到以下结论:

1) 珠状热敏电阻的辐射误差随着海拔高度的

增加而迅速增大, 两者之间呈近似指数函数关系且单调递增;

2) 太阳辐射强度的增强将导致珠状热敏电阻辐射误差的增大, 其幅度随着海拔高度的增加越发显著;

3) 珠状热敏电阻的辐射误差随着传感器倾斜角度的增大而减小, 当倾斜角度为  $90^\circ$  时, 珠状热敏电阻的辐射误差最小;

4) 珠状热敏电阻的数值仿真数据与辐射误差修正方程之间的决定系数为 0.99998, 基于此数据可认为辐射误差修正方程的拟合精度很高;

5) 珠状热敏电阻的辐射误差修正值与实验测量值之间的平均偏移量为 0.017 K, 均方根值  $RMS$  为 0.023 K, 此数据验证了计算流体动力学方法与辐射误差修正方程的准确性.

目前本文通过计算流体动力学分析和实验研究提出的珠状热敏电阻辐射误差修正方程适用于

计算不同太阳辐射强度和海拔高度下珠状热敏电阻的辐射误差,可初步满足探空温度传感器辐射误差修正的需求. 为避免让实验和修正算法过于复杂,该模型尚未考虑不同上升速度和传感器安装方式对辐射误差的影响,因此在后续研究中将这些因素纳入计算流体力学分析和实验研究,使得珠状热敏电阻辐射误差修正方程具有更强的普适性. 本文研究的珠状热敏电阻辐射误差方法可为天气预报和气候变化研究提供太阳辐射误差更低的探测资料,并有望还原出滤除太阳辐射误差的真实高空温度历史资料.

### 参考文献

- [1] Kann A, Seidl H, Wittmann C, Haiden T 2010 *Wea. Forecast.* **25** 290
- [2] Frick C, Wernli H 2012 *Wea. Forecast.* **27** 1217
- [3] Ware H R, Rocken C, Solheim S F, Exner M 1996 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **77** 19
- [4] Seidel D J, Angell J K, Christy J, Free M, Klein S A, Lanzante J R, Mears C, Parker D, Schabel M, Spencer R, Sterin A, Thorne P, Wentz F 2004 *J. Climate* **17** 2225
- [5] Thorne P W, Parker D E, Christy J R, Mears C A 2005 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **86** 1437
- [6] Free M, Durre I, Aguilar E, Seidel D, Peterson T C, Eskridge R E, Luers J K, Parker D, Gordon M, Lanzante J, Klein S, Christy J, Schroeder S, Soden B, McMillin L M, Weatherhead E 2002 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **83** 891
- [7] Seidel D J, Free M 2006 *J. Climate* **19** 854
- [8] Luers J K 1997 *J. Climate* **11** 1002
- [9] Ji X Q 2005 *Xinjiang Meteorol.* **28** 12 (in Chinese) [冀新琪 2005 新疆气象 **28** 12]
- [10] Liu M, Pu M J, Gao P, Shen S Q, Sun Y 2008 *Meteorol. Sci. Technol.* **36** 728 (in Chinese) [刘梅, 濮梅娟, 高萍, 沈树勤, 孙燕 2008 气象科技 **36** 728]
- [11] Toggweiler J R, Joellen R 2008 *Nature* **451** 286
- [12] Joan B, Oller J M, Huey R B, Gilchrist G W, Luis S 2007 *Science* **315** 1497
- [13] Harris P P, Huntingford C, Cox P M 2008 *Philosoph. Trans. Royal Soc. London B: Biol. Sci.* **363** 1753
- [14] Tang H Y, Zhai P M 2005 *Chin. J. Geophys.* **48** 526 (in Chinese) [唐红玉, 翟盘茂 2005 地球物理学报 **48** 526]
- [15] Xue D Q, Tan Z M, Gong D L, Wang X T 2007 *Plateau Meteorol.* **26** 141 (in Chinese) [薛德强, 谈哲敏, 龚佃利, 王兴堂 2007 高原气象 **26** 141]
- [16] Cheng Y, Li D L, Hu W C, Shen F 2002 *Plateau Meteorol.* **21** 217 (in Chinese) [程瑛, 李栋梁, 胡文超, 沈福 2002 高原气象 **21** 217]
- [17] Wang R Y, Zhou S W, Wu P, Wang X M, Wu Y 2010 *Meteorolog. Environm. Sci.* **33** 31 (in Chinese) [王荣英, 周顺武, 吴萍, 王晓敏, 吴雁 2010 气象与环境科学 **33** 31]
- [18] Shangguan M J, Xia H Y, Dou X K, Wang C, Qiu J W, Zhang Y P, Shu Z F, Xue X H 2015 *Chin. Phys. B* **24** 094212
- [19] Zhao R C, Xia H Y, Dou X K, Sun D S, Han Y L, Shangguan M J, Guo Jie, Shu Z F 2015 *Chin. Phys. B* **24** 024218
- [20] Sheng Z, Fang H X 2013 *Chin. Phys. B* **22** 029301
- [21] Sherwood S C, Lanzante J R, Meyer C L 2005 *Science* **9** 1556
- [22] Randel W J, Wu F 2006 *J. Clim.* **19** 2094
- [23] Haimberger L, Tavolato C, Sperka S 2008 *J. Clim.* **21** 4587
- [24] Schmidlin F J, Luers J K, Hoffman P D 1986 *NASA Tech.* **2637** 1
- [25] Luers J K 1990 *J. Atmos. Ocean. Technol.* **7** 882
- [26] Luers J K, Eskridge R E 1995 *J. Appl. Meteor.* **34** 1241
- [27] Ruffieux D, Joss J 2003 *J. Atmos. Ocean. Technol.* **20** 1576
- [28] Chen F Z, Qiang H F, Gao W R 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 230206 (in Chinese) [陈福振, 强洪夫, 高巍然 2014 物理学报 **63** 230206]
- [29] 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, 刘清慤, 李敏, 张加宏 2014 物理学报 **63** 144701]
- [30] Wang X H, Yi S T, Fu J, Lu X G, He L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 054706 (in Chinese) [王小虎, 易仕和, 付佳, 陆小革, 何霖 2015 物理学报 **64** 054706]
- [31] NOAA, NASA, USAF 1976 *U. S. Standard Atmosphere* (Washington D.C.: U.S. Government Printing office) pp53-63
- [32] Gao Y, Liu H B, Wang L, Gu G C 2013 *Chin. Opt.* **6** 570 (in Chinese) [高雁, 刘洪波, 王丽, 顾国超 2013 中国光学 **6** 570]
- [33] Gao Y, Liu H B, Wang L, Gu G C 2014 *Chin. Opt.* **7** 657 (in Chinese) [高雁, 刘洪波, 王丽, 顾国超 2014 中国光学 **7** 657]

# Computational fluid dynamics analysis and experimental study of sounding temperature sensor\*

Dai Wei<sup>1)2)†</sup> Liu Qing-Quan<sup>3)4)5)</sup> Yang Jie<sup>1)2)</sup> Su Kai-Feng<sup>3)4)5)</sup>  
Han Shang-Bang<sup>3)4)5)</sup> Shi Jia-Chi<sup>3)4)5)</sup>

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*)

5) (*School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

( Received 1 February 2016; revised manuscript received 3 March 2016 )

## Abstract

Owing to the fact that the increasing amount of attention has been focused on numerical weather forecast and climate change research, it is desired that the observation error of upper air temperature with using sounding temperature sensors can be reduced down to 0.1 K. However, the temperature measurement errors of bead thermistor sounding temperature sensors, induced by solar radiation, are on the order of 1 K or more, which is a few orders of magnitude larger than the errors produced by the measurement circuits and digital signal processing systems in radiosondes. Hence, the solar radiation error poses an important bottleneck for improving the measurement accuracy. To tackle this problem, a numerical analysis method is proposed in this research. By employing a computational fluid dynamics (CFD) method, the influences of various solar radiation intensity, sensor angles, and air pressures from sea level to 20 km altitude on temperature measurement accuracy are studied. In this CFD model, the boundary conditions of external convection and solar radiation of the bead thermistor are taken into consideration. The modeling results indicate that solar radiation intensity and altitude are important factors that affect the amplitude of the radiation error. With the elevation increasing from sea level, the solar heating error appears to have an exponential correlation with the altitude, which exhibits a growing slope rate. When the sensor angle is 90°, the radiation error of a bead thermistor sensor probe is minimal. The simulation results are fitted by a Levenberg-Marquardt method and a global optimization method. A correction equation of the radiation error is obtained, where the altitude of the sensor and solar radiation intensity act as two major variables in the equation. In order to verify the equation obtained in this study, an experimental platform for solar radiation error, which includes a low-pressure temperature chamber, a rotation apparatus, an LED-based radiation source, and a wireless communication system, is designed and constructed. It can be found that the solar radiation errors of the bead thermistor

\* Project supported by the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant Nos. GYHY200906037, GYHY201306079), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 412475042, 61306138), and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, China.

† Corresponding author. E-mail: [daiweilove@163.com](mailto:daiweilove@163.com)

based on fluid dynamics numerical calculation are generally consistent with experimental data. The average offset and root mean square error between the correction equation and experimental results are 0.017 K and 0.023 K, respectively, which can demonstrate the accuracies of the computational fluid dynamics method, the Levenberg-Marquardt method and the global optimization method proposed in this research. The methods and techniques introduced in this paper may open the way for correcting the solar radiation errors of the bead thermistor sounding temperature sensors.

**Keywords:** sounding temperature sensor, bead thermistor, computational fluid dynamics, radiation error

**PACS:** 47.11.-j, 47.27.-i, 87.19.lt, 92.60.Vb

**DOI:** [10.7498/aps.65.114701](https://doi.org/10.7498/aps.65.114701)