

# 探空温度传感器受太阳辐射影响的仿真分析

杨荣康<sup>1</sup> 张利<sup>2</sup> 刘清倦<sup>2</sup> 李敏<sup>2</sup> 张加宏<sup>2</sup> 戴伟<sup>3</sup>

## 摘要

随着高空温度探测精度要求的日益提高,如何减小温度传感器测量误差已成为亟需解决的问题,而太阳辐射作为影响温度传感器探测性能的重要因素已成为该领域研究的热点.利用计算机仿真技术,引入太阳高度角、引线夹角2个影响因子,根据流体动力学模型模拟分析探空温度传感器从海平面上升到32 km高空时所受太阳辐射的影响,最终得到辐射误差与海拔高度的关系曲线族,仿真结果将为开展高空温度传感器误差分析提供基础依据,从而提高传感器测量准确度.

## 关键词

探空温度传感器;太阳辐射;计算流体力学;误差修正

中图分类号 P412.23

文献标志码 A

收稿日期 2013-05-10

资助项目 公益性行业(气象)科研专项(GY-HY200906037,GYHY201106048);国家自然科学基金(41075026);江苏高校优势学科建设工程(PADD)项目;江苏省科技支撑计划重点项目(BE2011006)

## 作者简介

杨荣康,男,工程师,主要研究方向为高空探测传感器技术以及观测资料处理方法.

yrkaoc@cma.gov.cn

刘清倦(通信作者),男,博士,教授,主要研究方向为MEMS传感器技术以及气象探测.

q.liu@ieec.org

## 0 引言

随着科学技术的发展,气象状况变化对人类活动的影响显得尤为突出.世界各国在发展高空气象探测系统方面投入了大量的人力、物力,使高空气象探测系统有了较大的发展.其中,大气温度是大气物理参数的核心变量,在短期天气预报和气候变化监测中具有极其重要的作用.在气象探测领域,探空温度传感器测得的高空大气温度是天气预报和气候变化研究所需的关键观测资料,其准确性和实时性直接影响到高空天气形势和气候系统的分析和预报结果<sup>[1]</sup>.数值预报模式是以积分模拟大气四维时空运动偏微分方程组为基础,微小的误差经过模式预报里数学公式的不断积分,可使误差变得显著,这会直接影响模式预报的准确性.

由于珠状热敏电阻<sup>[2]</sup>具有体积小、响应速度快等优点,对提高与空气的对流换热效果有利,近年来,在高空气象观测领域,普遍采用珠状热敏电阻代替了原有体积较大,散热能力有限的棒状热敏电阻.设计者为了提高探空温度传感器的探测准确性和灵敏度,将其部分暴露于大气中,但这种设计使得传感器敏感元件充分与大气进行接触的同时,也更大程度地受到了太阳辐射的影响,造成探空温度传感器因吸收太阳辐射而产生的温升叠加在测温元件所测真实温度上,从而影响测温准确性.为了减少辐射对传感器的影响,设计者在传感器表面喷涂了防辐射涂层,提高传感器对辐射的反射率.表1为实测防辐射涂层反射率.

表1 实测防辐射涂层反射率

Table 1 Reflectivity of radiation coating

	波长/nm									
	250	500	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	5 000	8 000	10 000
反射比	0.859	0.888	0.911	0.955	0.959	0.966	0.939	0.944	0.943	0.943
吸收率	0.141	0.112	0.089	0.045	0.041	0.034	0.061	0.056	0.057	0.057

由于传感器体积过小无法进行反射率实测,表1数据是将防辐射涂层涂在光滑玻璃表面进行测试的,传感器实际反射率应小于测量值.通过表1可以看出:1)目前防辐射涂层对于长波辐射具有较高反射率,在波长大于3 000 nm(通常认为大气长波辐射)时反射率超过

1 中国气象局气象探测中心,北京,100081

2 南京信息工程大学 电子与信息工程学院,南京,210044

3 南京信息工程大学 大气物理学院,南京,210044

93%,几乎可忽略不计;2)太阳直射辐射是对传感器影响最大的因素,且反射率较低(多小于90%),太阳直射辐射成为温度传感器误差的最主要来源。

本文通过计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术<sup>[3-6]</sup>,对探空温度传感器进行地面到32 km高空不同气压条件下的热数值模拟分析,考虑探空温度传感器的外部热环境情况,施加对流-太阳辐射耦合热边界条件,建立探空温度传感器的热分析模型,并引入引线夹角和太阳高度角两个影响参数,最终计算获得了辐射误差与海拔高度的关系曲线族,其计算结果可作为日后实际测量时的辐射误差修正依据,从而提高探测温度测量精度。

## 1 探空温度传感器基本模型

### 1.1 探空温度传感器物理模型

探空温度传感器的结构示意图以及几何尺寸如图1所示,珠状热敏电阻外部(2)是以环氧树脂作为封装材料,内部(1)为陶瓷电阻体,引线部分(3)材料为铂,风向为6 m/s的垂直风。模型中各材料的物理参数见表2(其中,由于防辐射涂层厚度为mm量级,除反射率外的物理参数可被忽略)。

表2 珠状热敏电阻温度传感器物理参数

Table 2 Physical parameters of bead thermistor temperature sensor

传感器组件	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	热容/(J/kg·K)	热导率/(W/m·K)
铂引线	21 450	130	73
环氧树脂	980	1 200	0.2
陶瓷电阻体	3 900	840	35

### 1.2 探空温度传感器数学模型

温度场的整场求解包括固体域和流体域,不同的区域采用相同的基本控制方程<sup>[7-8]</sup>,建立流固耦合质量、动量、能量守恒方程,如式(1)~(3)<sup>[9]</sup>所示。动量守恒定律也可写成X、Y和Z 3个方向的动量守

恒方程,又称为 Navier-Stokes(N-S)方程<sup>[10]</sup>,且 CFD 以连续方程和 Navier-Stokes(N-S)方程表示流体流动满足的质量守恒、动量守恒定律和能量守恒定律,仿真计算探空传感器因吸收太阳辐射而产生的测量误差。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

式(1)中 $\rho$ 为空气密度, $t$ 为时间, $u, v, \omega$ 分别表示速度矢量在X、Y、Z轴方向上的速度分量。

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u, \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v, \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{W}) = \text{div}(\mu \text{grad} \omega) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_\omega, \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\mu$ 是流体运动粘度,固体的运动粘度为无穷大, $p$ 为压力, $u, v, \omega$ 为速度矢量 $\mathbf{U}$ 在X、Y、Z方向的分量, $S_u, S_v, S_\omega$ 是广义源项。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} T\right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_T, \quad (3)$$

其中 $T$ 是流体温度, $\lambda$ 是导热系数, $S_T$ 为源项。

### 1.3 探空温度传感器数值模型

本文利用网格软件 ICEM CFD<sup>[11-12]</sup>对探空温度传感器及流体区域进行六面体网格划分,并采用自下而上方法创建 Block,同时对模型中的椭球体、球体、圆柱体采用其中 O-Block 方法<sup>[13]</sup>。流体域优化尺寸为80 mm×80 mm×50 mm,通过改变网格尺寸定义可以控制网格的疏密程度,在物性变化较为缓慢的流体区域,可以将网格尺寸增加,而在探空温度传感器附近将网格尺寸减小<sup>[14]</sup>。实际生成流体域及传感器整体的网格如图2a所示,共近20万网格。探空传感器的网格如图2b所示。

## 2 计算方法及边界条件设定

本文利用 FLUENT 软件对模型施加载荷,并进

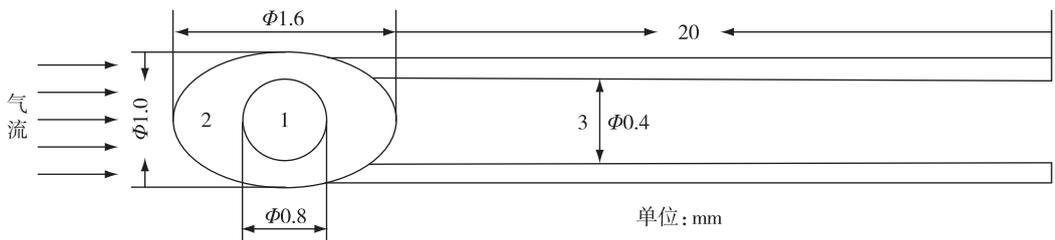


图1 珠状热敏电阻示意

Fig. 1 Structural diagram of the bead thermistor

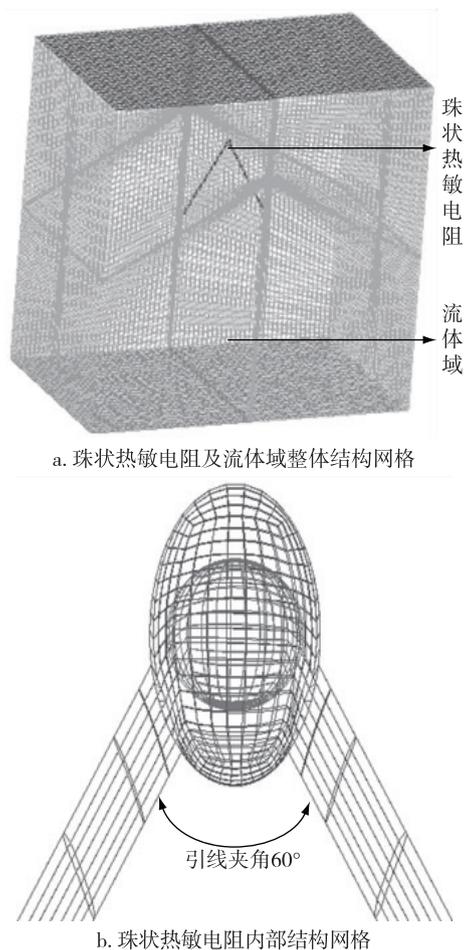


图2 珠状热敏电阻及流体域结构化网格

Fig. 2 Overall structure grid of bead thermistor and fluid domain and inner structure grid of bead thermistor

行求解. FLUENT 是当前国际主流的 CFD 软件,是求解流体和固体耦合传热问题较为有效的工具. 根据前面提到的温度传感器和大气特性,在本次计算过程中做了如下简化:1) 空气的物性参数为常数且不考虑云层、水汽等的长波辐射(及少量反射短波辐射)对测量的影响;2) 流体的流动是定常流动<sup>[15]</sup>;3) 传感器表面对太阳直射辐射光谱综合反射率按 70% 计算;4) 太阳直射辐射光谱较复杂,不考虑大气光学厚度对太阳直射辐射衰减. 求解器采用基于压力的求解器. 由于计算中涉及到对流换热,需利用能量方程. 将辐射类型定义为太阳直射短波辐射,并根据计算要求设置太阳辐射方向. 湍流粘性采用 Laminar 模型. 控制方程采用 SIMPLE 算法. 计算流体进口采用速度入口边界条件,设定流体流速(6 m/s)、温度;墙面定义为流动墙面;出口采用压力出口边界条件. 对已设定的条件进行初始化并计算,最终完成数值计算.

### 3 求解结果及讨论

#### 3.1 太阳高度角定义

因探空仪放飞时间段不同,故太阳光线照射到传感器上并与之形成的辐射角度亦有所区别,该辐射角度称为太阳高度角. 本文模拟分析太阳射线分别在  $YOZ$ 、 $XOZ$  平面内移动时所形成的太阳高度角( $0^\circ \sim 90^\circ$ ,步长为  $30^\circ$ )对太阳辐射误差的影响. 图 3 分别为  $YOZ$ 、 $XOZ$  平面内的太阳高度角示意.

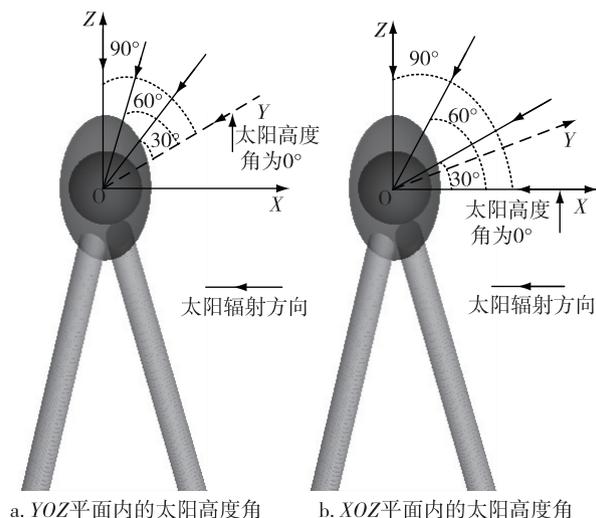


图3 定义太阳高度角的示意

Fig. 3 Structural diagram of the definition to solar altitude angles in  $YOZ$  plane and in  $XOZ$  plane

#### 3.2 计算结果对比

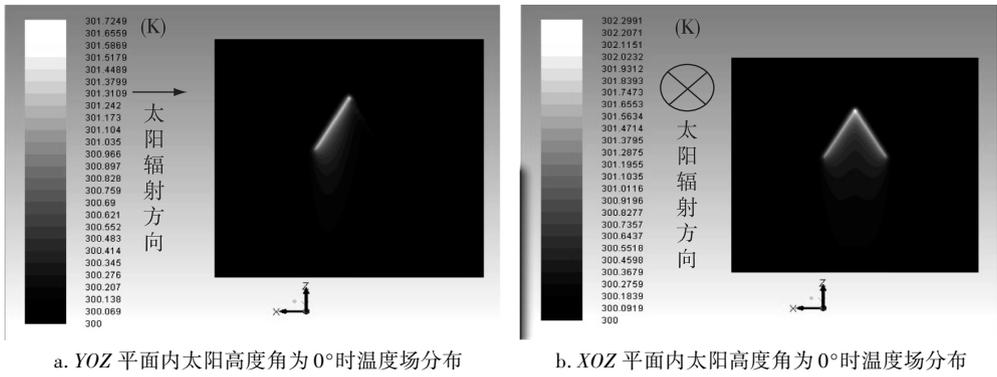
通过 CFD 软件进行热数值模拟后得到如图 4 所示的辐射误差温度场分布,图 4a、4b 分别对应图 3a、3b 中太阳高度角为  $0^\circ$  时,引线夹角为  $60^\circ$  的探空仪在 32 km 高空的辐射误差温度场分布. 通过对比,从图 4 中可直观看出太阳高度角对探空测量有显著的影响.

#### 3.3 结果分析

图 5a、5c、5e、5g 和 5i 为太阳高度角在  $YOZ$  平面内变化时因太阳辐射而产生的温度与海拔高度关系曲线族,而图 5b、5d、5f、5h 和 5j 是太阳高度角在  $XOZ$  平面内变化时因太阳辐射而产生的温度与海拔高度关系曲线族. 从图 5 中可反映出探空温度传感器在空中测量时因吸收太阳辐射而辐射误差最高可达到  $2.5^\circ\text{C}$  甚至更高,所以,辐射误差在实际测量中是不可忽略的,必须对实际测量值进行误差修正.

由图 5 中 5 组曲线族对比可知:

1) 同一模型、相同海拔高度时,两种不同状态

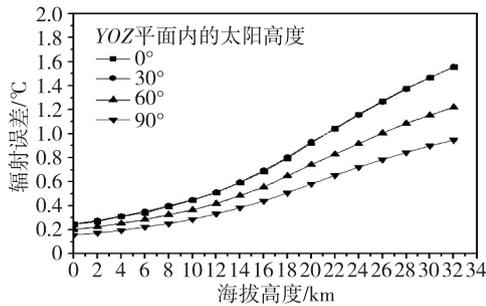


a. YOZ 平面内太阳高度角为 0° 时温度场分布

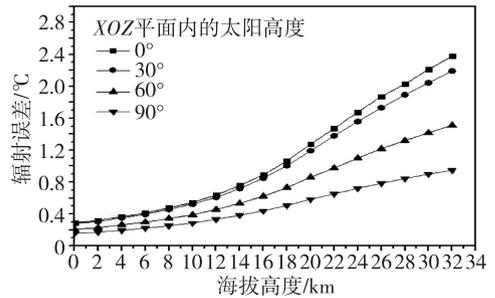
b. XOZ 平面内太阳高度角为 0° 时温度场分布

图 4 不同太阳高度角时的辐射误差温度场分布

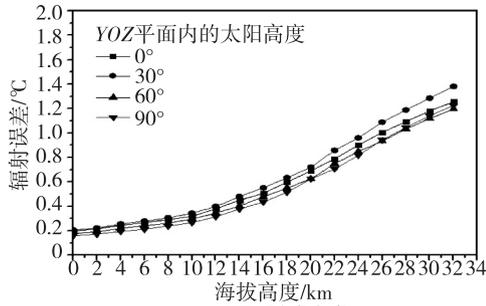
Fig. 4 Temperature distribution of the radiation error under solar altitude angle of 0° in YOZ plane (a) and XOZ plane (b)



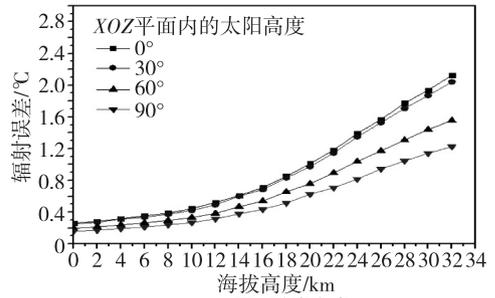
a. YOZ 平面, 引线夹角 30°



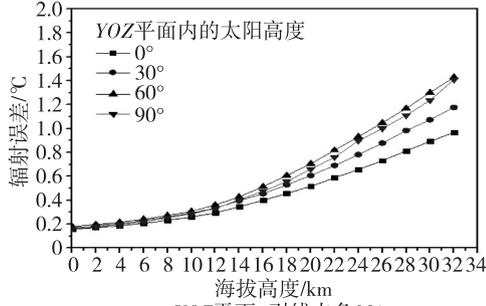
b. XOZ 平面, 引线夹角 30°



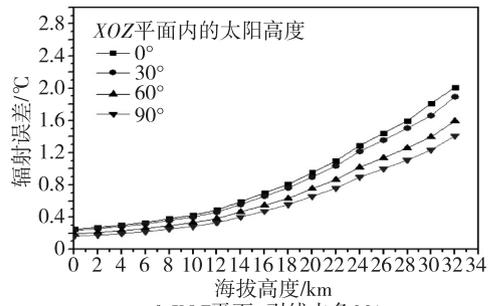
c. YOZ 平面, 引线夹角 60°



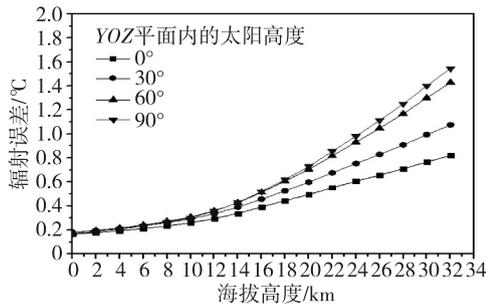
d. XOZ 平面, 引线夹角 60°



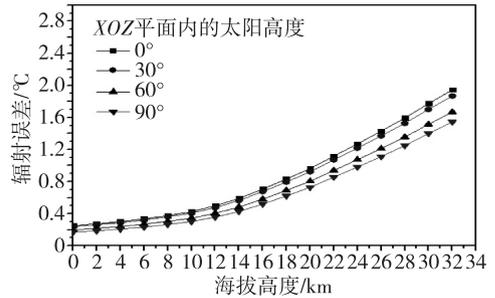
e. YOZ 平面, 引线夹角 90°



f. XOZ 平面, 引线夹角 90°



g. YOZ 平面, 引线夹角 120°



h. XOZ 平面, 引线夹角 120°

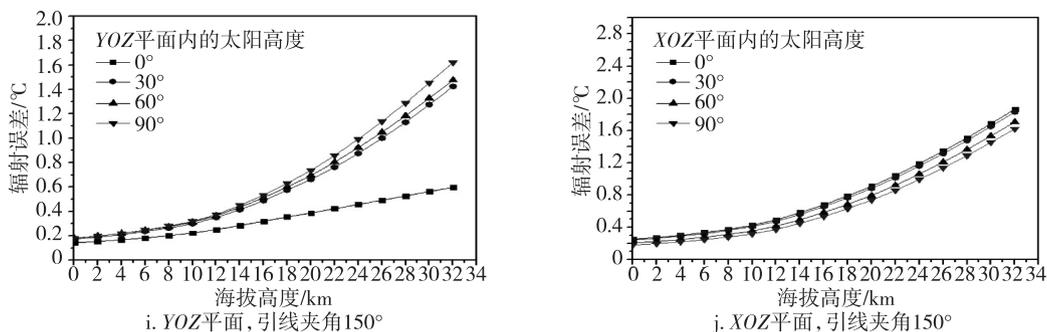


图5 辐射误差与海拔高度关系曲线

Fig. 5 Relationship between radiation error and altitude with lead angle

太阳辐射高度角之间相差最高可达到 1.5 °C. 因此, 太阳辐射高度角为太阳辐射误差的重要影响因子;

2) 因引线夹角不同, 故引线表面接受太阳辐射的面积不同且在相同风速条件下散热量也不同, 所以, 引线夹角亦是太阳辐射误差的影响因子;

3) 辐射误差与海拔高度之间成类抛物线关系, 最大差值可达 2.1 °C, 海拔高度也是太阳辐射误差的重要影响因子;

4) 引线夹角为 60° 时, 各太阳高度角情况下误差一致性较好且总体较小, 具有较好的探测特性.

以引线夹角为 60° 的模型为例, 探空温度传感器从海平面飞行到 32 km 高空时, 分别在 YOZ、XOZ 平面内太阳高度角从 0° 变化到 90°, 仿真得到的数据拟合成公式, 更加快捷、准确地进行测量误差修正. 公式如下:

$$\begin{cases} Z_a = a_1 + a_2 / (1 + ((x - a_3) / a_4)^2) + \\ a_5 / (1 + ((y - a_6) / p_7)^2) + a_8 / ((1 + \\ ((x - a_3) / a_4)^2) \times (1 + ((y - a_6) / a_7)^2)), \\ Z_b = b_1 / (1 + ((x - b_2) / b_3)^2) + \\ b_4 / (1 + ((y - b_5) / b_6)^2) + b_7 / ((1 + \\ ((x - b_2) / b_3)^2) \times (1 + ((y - b_5) / b_6)^2)), \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中的  $Z_a$ 、 $Z_b$  分别表示探空温度传感器在 YOZ、XOZ 平面内, 受太阳辐射影响而产生的温度误差值,  $x$  为海拔高度 ( $0 \leq x \leq 32$ , 单位为 km),  $y$  为太阳高度角 ( $0^\circ \leq y \leq 90^\circ$ , 步长为  $30^\circ$ ). 系数的值分别为  $a_1 = -0.04$ ,  $a_2 = 1.231$ ,  $a_3 = 33.495$ ,  $a_4 = -14.421$ ,  $a_5 = 0.075$ ,  $a_6 = 18.509$ ,  $a_7 = -9.603$ ,  $a_8 = 0.375$ ,  $b_1 = 0.8$ ,  $b_2 = 33.711$ ,  $b_3 = 13.34$ ,  $b_4 = -0.066$ ,  $b_5 = 11.99$ ,  $b_6 = 53.846$ ,  $b_7 = 1.457$ .

#### 4 结论

根据本文分析, 太阳直射辐射造成传感器及支

架的升温效应明显, 是导致传感器数据产生偏差的直接因素. 在对传感器支架和大气环境等热场影响因素进行简化的基础上, 针对 3 个重要影响因子即海拔高度、太阳辐射高度角、引线夹角导致太阳辐射误差的仿真结果, 最高可达到 2.5 °C 甚至更高. 同时, 本文还得到如图 5 所示的辐射误差与海拔高度关系曲线族以及式(4), 可作为探空温度传感器探测误差修正的部分参考依据, 以提高探空温度传感器的探测准确性. 在后续的研究计划中, 结合此关系曲线族将引入大气光学厚度、云层反射光谱、支架的形状、风脉动、气球热污染效应等变量, 建立更真实的辐射误差模型, 有望在提高数值天气预报准确性的同时为气候变化研究的发展提供帮助.

#### 参考文献

##### References

[1] 马颖, 姚雯, 黄炳勋. 59 型与 L 波段探空仪温度和位势高度记录对比[J]. 应用气象学报, 2010, 21(2): 214-220  
MA Ying, YAO Wen, HUANG Bingxun. Comparison of temperature and geopotential height records between 59 type and L-band radiosonde systems[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(2): 214-220

[2] 夏林甫. 热敏电阻传感器在汽车中的一些应用[J]. 电子元件与材料, 1993, 12(4): 9-13  
XIA Linfu. Some applications of thermistor sensor in the vehicle[J]. Electronic Components and Materials, 1993, 12(4): 9-13

[3] 云和明, 程琳. 基于 CFD 的电子器件散热最优间距的数值研究[J]. 电子器件, 2007, 30(4): 1181-1187  
YUN Heming, CHENG Lin. Numerical research on the optimum space of heat dissipation for electronic elements by CFD methods[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2007, 30(4): 1181-1187

[4] 吴永礼. 计算流体力学[J]. 国外科技新书评介, 2011(8): 1-2  
WU Yongli. Introduction to computational fluid dynamics

- [J]. Scientific & Technological Book Review, 2011(8): 1-2
- [5] Anderson J D. Computational fluid dynamics: The basics with applications[M]. New York: McGraw-Hill, 1995
- [6] Lin C L, Tawhai M H, McLennan G, et al. Computational fluid dynamics[J]. Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE, 2009, 28(3): 25-33
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7-11  
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 7-11
- [8] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 211-215  
YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 211-215
- [9] 周庆生, 黄苏融, 张琪, 等. 新型冷却结构超高精度平面电机定子温度场分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 134-138  
ZHOU Qingsheng, HUANG Surong, ZHANG Qi, et al. Temperature field analysis of novel cooling structure ultra-precision planar motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(15): 134-138
- [10] Chou S Y, Baganoff D. Kinetic flux-vector splitting for the Navier-Stokes equations [J]. Journal of Computational Physics, 1997, 130(2): 217-230
- [11] 韩志华, 陈大为, 潘晶. 基于 ICEM CFD 对电站锅炉炉膛网格划分时的基本原则浅析[J]. 东北电力技术, 2011, 32(1): 46-49  
HAN Zhihua, CHEN Dawei, PAN Jing. Principles on meshing division of utility boiler furnace based on ICEM CFD[J]. Northeast Electric Power Technology, 2011, 32(1): 46-49
- [12] Wulf A, Akdag V. Tuned grid generation with ICEM CFD [M]//NASA, Lewis Research Center. Surface Modeling, Grid Generation, and Related Issues in Computational Fluid Dynamic (CFD) solutions, 1995: 477-488
- [13] 纪兵兵, 陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 206-243  
JI Bingbing, CHEN Jinping. ANSYS ICEM CFD mesh generation examples [M]. Beijing: China Water Power Press, 2012: 206-243
- [14] 杨春信, AIQI, 周建辉, 等. 小型轴流 CPU 风扇设计与数值模拟[J]. 电子器件, 2007, 30(5): 1846-1850  
YANG Chunxin, AIQI, ZHOU Jianhui, et al. Design and numerical simulation of small axial fan[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2007, 30(5): 1846-1850
- [16] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 2-9  
HAN Zhanzhong, WANG Jing, LAN Xiaoping. FLUENT fluid simulation examples and its applications [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004: 2-9

## Simulation analysis of error of sounding temperature sensor influenced by solar radiation

YANG Rongkang<sup>1</sup> ZHANG Li<sup>2</sup> LIU Qingquan<sup>2</sup> LI Min<sup>2</sup> ZHANG Jiahong<sup>2</sup> DAI Wei<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081

<sup>2</sup> School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

<sup>3</sup> School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** With the increasing attention focused on the measurement accuracy of the high altitude air temperature, it is necessary to research into the source of the radiosonde temperature sensor error. Solar radiation makes the most significant contribution to the error in upper air temperature measurement. A computational fluid dynamics (CFD) method is employed to study the errors induced by solar radiation and lead angles, from sea level to 32 km altitude. The results show that lead angle and solar incident angle are important factors that affect the errors. Simulation results can be used as a reference for error correcting, which has a potential to improve the measuring accuracy.

**Key words** sounding temperature sensors; solar radiation; computational fluid dynamics; error correction