

## 探空湿度测量太阳辐射误差修正流体动力学研究\*

冒晓莉<sup>1)2)3)†</sup> 肖韶荣<sup>2)3)4)</sup> 刘清倦<sup>1)2)</sup> 李敏<sup>1)2)</sup> 张加宏<sup>1)2)</sup>

1)(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)

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)

4)(南京信息工程大学物理与光电工程学院, 南京 210044)

(2013年11月20日收到; 2014年4月13日收到修改稿)

针对太阳辐射加热导致的误差显著限制了相对湿度测量的准确度, 提出一种新颖的相对湿度误差修正方法——基于流体动力学的数值分析法. 在流体-固体耦合传热数值模拟分析中考虑探空湿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, 建立了地面到32 km高空不同气压和温度条件下探空湿度传感器的温度误差分析模型. 结合Goff-Gratch饱和水汽压逼近公式, 进而提出了相应的相对湿度误差流体动力学数值分析模型, 并且着重研究了太阳辐射方向、传感器尺寸、反射率和衬底材料热导率等物理参数对相对湿度误差的影响. 分析数值仿真结果表明: 随着海拔的升高, 其与太阳辐射加热引起的相对湿度误差之间存在非线性的单调递增关系; 太阳辐射方向对于湿度测量精度的影响显著, 当太阳辐射方向垂直于传感器正面时误差最大、传感器顶部时次之、侧面时误差最小; 虽然通过减小探空湿度传感器的尺寸、降低衬底材料的热导率以及提高反射率均可以一定程度地降低太阳辐射加热引起的相对湿度误差, 但是在低气压高空条件下, 太阳辐射加热误差对于湿度准确性的影响仍然十分明显, 需加以修正. 与实验结果对比表明, 基于流体动力学模拟仿真的相对湿度误差数值分析法为辐射误差修正提供了一种新的途径.

关键词: 湿度传感器, 太阳辐射, 误差修正, 流体动力学

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

DOI: 10.7498/aps.63.144701

## 1 引言

近些年来, 洪涝、干旱、冰冻等自然天灾频发, 给国家造成巨大经济损失的同时, 给人民生活和健康也带来了严重的威胁<sup>[1]</sup>. 鉴于这些恶劣的天气和气候的发生与高空温度、湿度、气压、风速等气象因素密切相关, 因而高空大气气象要素的观测对于气候诊断预测、气候变化预估、大气环境监测以及气象灾害预警与减灾来说均具有重要意义<sup>[2,3]</sup>. 目前在高空探测领域, 国内外普遍采用气球悬挂探空仪技术探测大气气象要素的垂直廓线<sup>[4]</sup>, 虽然在温度、风速、气压测量方面已达到较高精度, 但是由于

易受测量环境的影响以及技术和工艺上的不足导致湿度传感器的测量精度受到了限制<sup>[5]</sup>. 然而高空中湿度测量数据是否准确, 对于天气预报是否有降水至关重要<sup>[6,7]</sup>, 对于秋冬天雾的生成和预报也不可或缺. 并且由于水是极性分子, 会影响电磁波在大气中的折射率从而影响无线导航和定位. 此外, 国外已有专家利用探空湿度资料反演云资料工作<sup>[8]</sup>, 而云相关参数对于全球天气和气候预测也起着重要作用<sup>[9]</sup>. 可见, 提供精确的湿度测量资料意义重大.

湿度测量通常利用湿度传感器来完成<sup>[10]</sup>. 由于温度系数低、响应速度快和滞后量小等优势, 电容式湿度传感器已成为探空仪测湿的首选. 探空电

\* 国家自然科学基金(批准号: 41275042, 61306138, 61307113)、江苏省自然科学基金(批准号: BK2012460)和江苏高校优势学科建设工程资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: mxl426@163.com

容湿度传感器测量误差源自诸多因素, 传感器本身的电气性能易受高空温度环境的影响, 且影响过程复杂, 而标定过程、操作流程、测量时间常数和相关算法修订等都会产生测量误差 [5,11,12]. 目前湿度传感器的误差修订工作主要集中在温度补偿方面. 感湿式电容传感器由于感湿材料的介电常数不仅随外界相对湿度改变而变化, 也会随着温度有小的漂移, 这导致在不同温度下相同电容值并非对应于相同的相对湿度, 因而需要进行温度补偿 [13]. 关于温度补偿, 除了可以采用硬件进行抵消补偿外, 还可以在算法修订中实现. 算法补偿国内较流行的是采用改进的人工神经网络算法 [14]. 值得指出的是, 算法修订中除了常规温度补偿外, 还有一个重要的、但常被忽略的修订——太阳辐射误差修订, 对此需要仔细研究 [15-18].

一般情况下, 探空湿度传感器测量湿度时, 为了保持良好的通风效果, 需要裸露在空气中, 这同时也会暴露在太阳辐射之中. 湿度传感器吸收太阳辐射导致衬底温度比周围大气温度有所升高, 从而改变感湿材料周围空气的相对湿度, 使得测量的相对湿度值偏干 [16]. 经验表明, 在低温环境下, 温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ , 饱和水汽压将升高一倍 [19], 这导致相对湿度降为原来的一半. 可见, 太阳辐射误差对湿度的测量准确性影响显著, 制约了与高空湿度相关的天气预报和气候变化预估预警等研究水平的提高. 为了解决上述问题, 需对太阳辐射误差进行修正. 但是国内外的关于湿度传感器的太阳辐射误差修订报道较少 [15,20,21], 相关的研究尚不充分. 目前研究方法主要包括风洞实验法和经验估测法, 但是这两种方法均存在不足 [18]. 一方面, 设计和建设能够模拟高空低气压太阳辐射环境的低气压辐

射风洞具有相当大的难度, 成本也非常高昂. 另一方面, 探空仪厂商提供的经验估测修正方法未考虑传感器材料的多样性、外形尺寸的变化以及表面反射率的变化等因素, 而实际上这些因素都能够显著影响太阳辐射误差修正的效果.

针对探空湿度传感器太阳辐射误差的具体问题, 考虑到上述影响因素的复杂性, 很难获得可求解的解析传热模型来计算太阳辐射加热引起的误差修正值. 为了真实地模拟出探空湿度传感器的外部热环境、外界流场、表面获得的太阳辐射能量、对外辐射能量以及传感器内部的温度场分布等物理参数, 本文提出采用计算流体动力学 (CFD) 方法 [22-25] 对探空湿度传感器进行数值模拟计算分析, 系统地研究太阳辐射对湿度传感器的温湿特性的影响; 探讨传感器的不同尺寸、反射率、衬底材料与相对湿度测量误差的关系, 给传感器制造过程中尺寸和材料的选择提供一定的依据; 重点探讨不同海拔高度下测量误差值, 同时结合饱和水汽压计算公式给出相对湿度具体测量修正值, 提出修正方法, 为探空湿度修正提供数据支撑.

## 2 湿度测量原理及辐射误差修正理论

图 1 (a), (b) 分别为电容式湿度传感器的俯视和剖面示意图. 湿度传感器的制备工艺如下: 首先在衬底上生长一层二氧化硅绝缘层, 然后溅射金属并对其进行光刻刻蚀形成金属叉指电极, 再涂覆感湿介质 (如聚酰亚胺等), 最后进行亚胺化. 感湿膜一般采用高分子湿敏材料, 它会随周围环境的相对湿度成比例地吸附和释放水分子, 由于这类高分子材料大多数是具有较小介电常数的电介质, 而存在

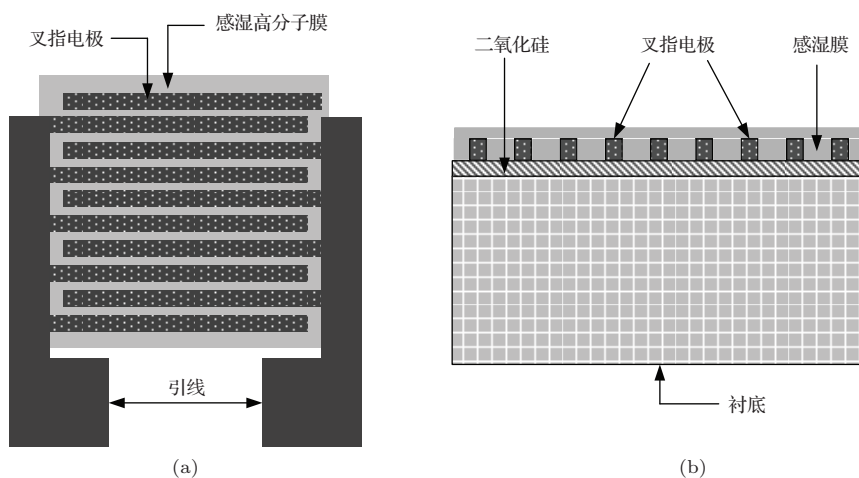


图 1 电容式湿度传感器示意图 (a) 俯视; (b) 剖面

偶极矩的水分子的介电常数  $\epsilon$  可达 80 以上, 这样吸附水分子的湿敏材料的介电常数会发生显著变化. 实际测量时, 传感器与被测量气体充分接触, 感湿膜中的水汽与外界水汽充分交流达到平衡, 介电常数与环境的相对湿度成正比, 而介电常数的显著变化直接反映到电容值上, 故通过测量电容值得到环境的相对湿度 [26].

相对湿度  $RH$  是表征大气干湿程度的一个重要的物理量, 可以定义为空气中实际水汽压  $e$  与当时气温下的饱和水汽压  $E$  之比的百分数:

$$RH = (e/E) \times 100\%, \quad (1)$$

它是一个无量纲的数. 随着温度的升高, 饱和水汽压  $E$  越大, 由 (1) 式可知在实际水汽压  $e$  不变的情况下, 温度升高, 相对湿度  $RH$  会降低. 因此一般提供相对湿度的同时也必须提供温度的数据. 温度  $T$  与饱和水汽压  $E$  的关系可根据世界气象组织 (WMO) 1966 年推荐使用的 Goff-Gratch 饱和水汽压逼近公式进行计算. 纯水平面表面饱和水汽压  $E_w$  的常用对数为

$$\begin{aligned} \lg E_w = & 10.79574 \times \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) \\ & - 5.02800 \times \lg \left(\frac{T}{T_1}\right) \\ & + 1.50475 \times 10^{-4} \\ & \times \left(1 - 10^{-8.2969\left(\frac{T}{T_1} - 1\right)}\right) \\ & + 4.2873 \times 10^{-4} \\ & \times \left(10^{4.76955\left(1 - \frac{T_1}{T}\right)} - 1\right) \\ & + 0.78614. \end{aligned} \quad (2)$$

纯冰平面表面饱和水汽压  $E_i$  的常用对数为

$$\begin{aligned} \lg E_i = & 9.09685 \times \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) \\ & - 3.56654 \times \lg \left(\frac{T_1}{T}\right) \\ & + 0.87682 \times \left(1 - \frac{T}{T_1}\right) \\ & + 0.78614. \end{aligned} \quad (3)$$

(2) 式温度适用范围为  $0^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$ , (3) 式温度适用范围为  $-100^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}$ , 式中  $T_1 = 273.16\text{ K}$ , 为水的三相点温度. 必须指出, 湿空气中的纯水平面饱和水汽压除了与温度有关外, 还与气压  $P$  有关,

但是由于修正误差小于 0.5%, 影响微弱, 因而本文中忽略气压  $P$  的影响, 从低空到高空, 统一采用以上公式进行饱和水汽压的计算.

探空用电容湿度传感器测量的是空气的相对湿度, 在探空过程中, 探空仪同时提供相对湿度和温度. 湿度传感器由于其需要与环境充分接触的特性, 当暴露在太阳辐射下, 吸收太阳辐射后, 湿度传感器上的温度会高于环境温度. 值得注意的是, 传感器上温度的升高也随即提升了感湿膜周围空气的温度, 根据 (2) 和 (3) 式可知, 饱和水汽压也会随之升高. 由于空气中的实际水汽压并未改变, 因而相对湿度降低. 换言之, 此时湿度传感器提供的测量值并非探空仪温度传感器测量温度下的相对湿度, 因此需要对相对湿度测量值进行太阳辐射误差修正. 假设某一高度  $H$  空气实际温度为  $T_0$ , 由于太阳辐射引起温度升高  $\Delta T$  后至  $T_1$ , 利用 Goff-Gratch 公式分别计算出升温前后的饱和水汽压  $E_0$  和  $E_1$ . 假设实际水汽压为  $e$ , 则实际相对湿度  $RH_0 = e/E_0(T_0)$ , 而由于太阳辐射传感器升温致使饱和水汽压为  $E_1$ , 此时传感器提供的相对湿度  $RH_1 = e/E_1(T_1)$ , 由此引起的相对湿度的测量相对误差  $r$  可定义为

$$\begin{aligned} r = & \frac{RH_1 - RH_0}{RH_0} \times 100\% \\ = & \frac{E_1 - E_0}{E_0} \times 100\% \\ = & \frac{G(T_1) - G(T_0)}{G(T_0)} \times 100\%, \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $G(T)$  为 Goff-Gratch 公式, 由 (4) 式可以看出, 测量相对误差  $r$  与传感器的温度  $T_1$  直接相关. 换言之, 研究相对湿度的测量误差需研究传感器的温度分布场. 本文通过 CFD 商业软件包 fluent 模拟仿真得到太阳辐射温度误差  $\Delta T$  随影响因素变化的曲线, 再结合 (2) — (4) 式可推导出相对湿度的太阳辐射相对误差随影响因素的变化趋势.

### 3 计算模型及研究方法

#### 3.1 三维实体建模

结合探空仪上湿度传感器的实际使用情况, 计算模型采用湿度传感器连接 PCB 板的结构 [10]. 图 2 是采用 CAD 三维软件 Pro/E 建立的计算模型示意图. 在构建模型的空气域时, 考虑到较大的空气域可以提高计算精度, 但同时会加大计算量,



而一般情况下,当空气域尺寸达到器件模型的10倍时,精度足以满足计算要求.因此,本文空气域的尺寸设置为器件模型的10倍.器件模型中湿度传感器与PCB板之间采用引线相连,从PCB板走线将信号送至电路箱进行处理,故湿度传感器应处于PCB的上方(气球的上升过程中)<sup>[10]</sup>,即处于空气域的进风口.由于国际上并未统一湿度传感器的尺寸,根据实际业务使用情况,本文分别建立了边长为3, 5, 10, 15 mm以及厚度为0.3, 0.6, 0.9 mm的湿度传感器的三维实体模型.模型中引线半径为0.5 mm,长度为2 mm. PCB板尺寸选取20 mm × 15 mm × 2 mm,虽然实际长度大于20 mm,但是计算表明选取20 mm足以反映PCB板对传感器温度场的影响.

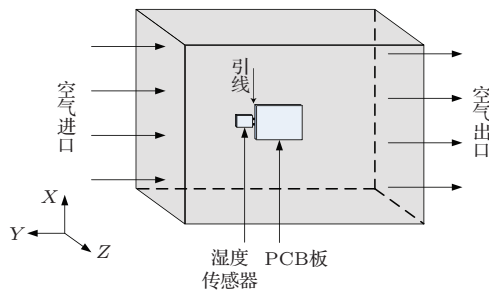


图2 实体模型示意图

### 3.2 网格划分

应用前处理软件ICEM对Pro/E建立的实体模型进行网格划分.采用适应性较强的非结构化四面体网格生成方法,图3(a)为网格整体情况,中间黑色部分为器件实体,外围为空气域.权衡计算规模和计算精度两个因素,进一步采用了局部加密的网格划分方法,并采用10层棱柱网格加强边界的处理.图3(b)为内部网格截面图,不同区域采取了不同的网格大小,实体部分的网格远小于空气域的网格,而且可清晰地看出边界处的棱柱层网格.

### 3.3 流体动力学计算方法及相关参数设置

Ansys Fluent是当前国际主流的CFD软件,是求解流体流动和传热问题强有力的工具.本文采用Fluent仿真软件建立探空湿度传感器的稳态传热模型,对其施加外部复杂对流-太阳辐射耦合热边界条件,进行流固耦合传热分析.通过Fluent仿真分析,研究该条件下湿度传感器的温度场分布,

求解出太阳辐射下传感器上的温度变化之后,再结合(2)—(4)式推导出由温度变化引起的相对湿度测量误差.

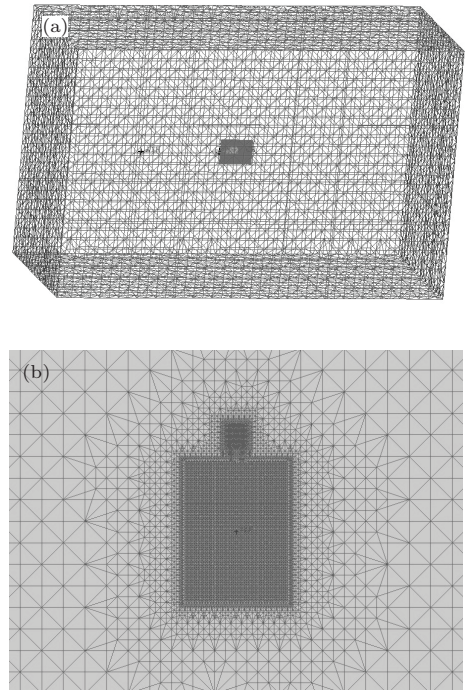


图3 网格划分情况 (a) 整体网格; (b) 局部网格

考虑到湿度传感器感湿膜和电极的总尺寸(微米量级)与衬底的尺寸(毫米量级)相比很小,吸收太阳辐射后对整个传感器的温度场分布影响可忽略,为了简化模型,采用衬底(陶瓷、硼硅玻璃、硅)代替传感器作为温度场分析主体.PCB和引线材料分别设置为环氧树脂和铂,材料的相关特性参数见表1.

GPS探空仪探测空间一般从地面到高空几百帕的高度,约30 km左右.大气压随海拔高度的升高而降低,地面大概是1000 hPa,海拔32 km处气压只有8 hPa,而传感器的对流换热与其密切相关.根据美国1976年标准大气<sup>[27]</sup>获知大气压与海拔高度的关系曲线如图4所示,由于大气压可转换成大气密度,因此在Fluent软件中可以采用设置空气密度来表征不同的海拔高度.图4也给出了温度垂直廓线,温度随海拔并非单调递减,0—11 km温度随海拔高度的升高递减,变化率为 $-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ; 11—20 km大气温度保持不变; 20—32 km,温度随海拔高度的升高而递增,变化率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ .本文在Fluent仿真以及饱和水汽压的计算中均考虑了上述不同海拔高度的实际温度分布.

表1 湿度传感器测量系统材料特性

材料	密度/kg·m <sup>-3</sup>	热容/J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	热导率/W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>
环氧树脂	980	1200	0.2
铂	21450	138	73
陶瓷	3900	840	35
硼化玻璃	2230	1.256	1.2
硅	2330	150	156

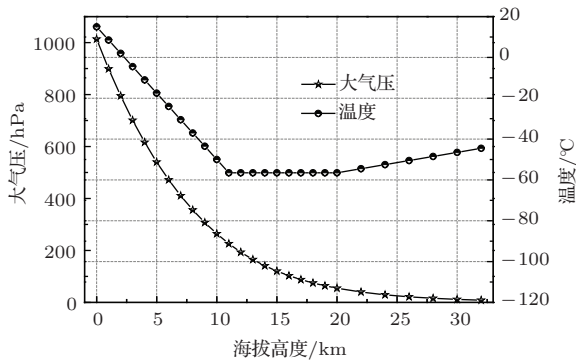


图4 大气压及温度与海拔高度的关系

图2模型中长方体的左边(即探空仪的上方)为流体入口,右边为流体出口,流速根据探空仪的上升速度定义为6 m/s(暂未考虑上升过程中速度的变化情况).因流体流速较低,可设为不可压缩气体,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 $k-\omega$ 标准模型;压力和速度解耦采用SIMPLE算法;动量、能量以及湍流参数的求解采用一阶迎风模式.在模型中,计算流体进口采用速度入口条件,给定流体流速、温度及相应的湍流条件;出口

采用压力出口边界条件.此外,值得注意的是,探空仪在上升过程中,在水平风速的推动下,气球的飞行并非垂直上升,而是伴随水平漂移.理想状态下,探空仪的水平漂移来自于水平风速,可以简单地认为速度与水平风速一致.但实际情况并非按理想轨迹运行,探空仪会随着气球的飞行水平漂移同时摆动前进,而这个摆动属于复杂的二维摆动.如图5(a)中插图所示,假设 $o$ 点为气球下端, $m$ 为探空仪,它在以半径为 $l$ 、锥角为 $2\theta$ 的圆锥面上做复杂的二维摆动;由气流方向平面图可以看出,气流并非沿 $Y$ 方向垂直向下,在水平气流的影响下,气流与垂直方向呈角度 $\theta$ .采用Fluent仿真了 $\theta$ 为 $0^\circ$ (不考虑水平风速)、 $10^\circ$ 和 $20^\circ$ (考虑水平风速造成气流方向变化)三种情况,图5(a)和(b)分别表示 $\theta$ 为 $0^\circ$ 时与 $10^\circ$ 和 $20^\circ$ 时的温度误差和相对湿度误差的区别.由图5可以看出,当考虑水平气流的影响即 $\theta \neq 0^\circ$ 时,误差会变小,太阳辐射为 $X$ 和 $Y$ 方向接近零, $Z$ 方向略大,但是相对湿度的相对误差差别均小于0.6%,仍然可以忽略,所以在后面的计算中,均忽略水平气流的影响.

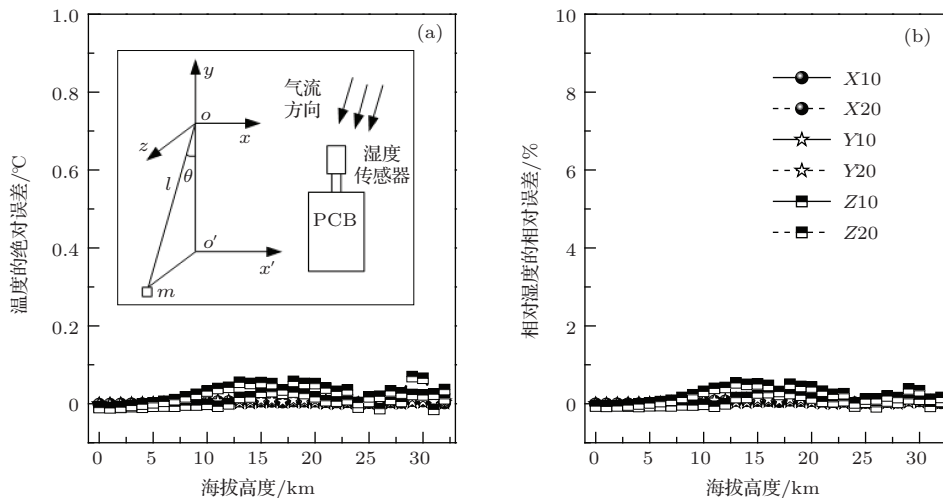


图5 水平气流对误差产生的影响 (a)  $\theta = 0^\circ$  时的温度误差与  $\theta \neq 0^\circ$  时的区别; (b)  $\theta = 0^\circ$  时的相对湿度误差与  $\theta \neq 0^\circ$  时的区别 (其中  $X, Y, Z$  分别代表不同的太阳辐射方向, 10 和 20 代表倾角  $\theta$  的度数)

## 4 结果与讨论

### 4.1 太阳辐射方向对于湿度测量的影响

众所周知,不同时间段太阳天顶角的变化会引起太阳的辐射方向发生相应变化.为了具体研究太阳辐射方向对湿度测量的影响,我们在XYZ坐标系内初步选取了三个坐标轴向(X, Y, Z)来模拟不同的太阳辐射方向.根据上文的讨论,首先通过Fluent软件对尺寸为5 mm × 5 mm × 0.6 mm、陶瓷衬底(反射率为70%)的湿度传感器进行温度场的数值模拟.图6(a), (b), (c)给出传感器在海拔32 km处、XOY平面内太阳辐射分别为X(传感器侧面)、Y(传感器顶部)、Z(传感器正面)方向的温度场分布情况.比较三幅图不难发现,迎着太阳辐射方向的表面温度均较高,这导致如图截面的温度场分布存在明显差异,表明太阳辐射方向显著影响湿度传感器系统的温度特性.由于太阳辐射及其方向不同的影响,从图中还可以看出两个比较显著的特征:第一,PCB板上的温度明显高于传感器上的温度,原因在于PCB板受太阳辐射的面积远大于传感器;第二,无论是传感器还是PCB板均是Z方向温度场升高最大,这主要归因于传感器热辐射量相同的情况下Z方向接受的太阳辐射量最大.

上面我们定性地分析了X, Y, Z三个方向的温度场分布的不同,图7则具体给出了传感器上温度的绝对误差以及相应的相对湿度测量误差与海拔高度的关系.由图7(a)可知,随着海拔的升高,X, Y, Z三个方向的温度误差均单调递增.海拔10 km以下,递增的速度相对较慢,而10 km以上,变化趋势明显增强,特别是Z方向,当海拔高度达

到32 km处温度误差高达8 °C.由图7(a)的放大图则不难发现,10 km以下X方向温度误差略大于Y方向;而10 km之后,Y方向的误差反超X方向.产生这种结果的原因在于低海拔时,由于太阳辐射较弱,Y方向与气流方向平行有利于传感器表面热量的散发,而X方向则与气流方向垂直热量散发较弱,最终导致低海拔时X方向的温度误差大于Y方向.当海拔高于10 km时,由于太阳辐射较强,这时PCB板上热量的散发对传感器温度的影响开始凸显.太阳辐射为X方向时,PCB板的升温集中在侧边,温度很难通过引线传递给传感器芯片,故对传感器温度的影响较弱.而太阳辐射为Y方向时,PCB板吸收太阳辐射的能量集中在引线下方,很容易通过引线将一部分热量传递给传感器,故在相同的海拔下传感器的温度要比X方向大.图7(b)给出的是由于温度误差引起的相对湿度的相对误差随海拔变化的关系.太阳辐射为Z方向时,相对湿度的相对误差随海拔高度呈快速递增趋势,可见不同的海拔高度需用不同的相对湿度修正值.虽然地面上相对误差只有5%,但高空32 km处误差则高达60%.即使在误差较小的X, Y方向,高空中的误差也可达到10%以上.由文献[28]中得知,我国大部分地区32 km处的相对湿度在20%左右,但是如果由于太阳辐射的影响,使得传感器上的温度升高近8 °C,则此时传感器输出的相对湿度大概是8%,与实际相比偏干了12%,这显然与国际气象探测上对相对湿度的测量误差控制在2%以内的要求相差甚远.因此,气象探空业务使用的湿度传感器不能忽略太阳辐射加热误差的影响,必须对其进行相关的误差修正[16,20,21].

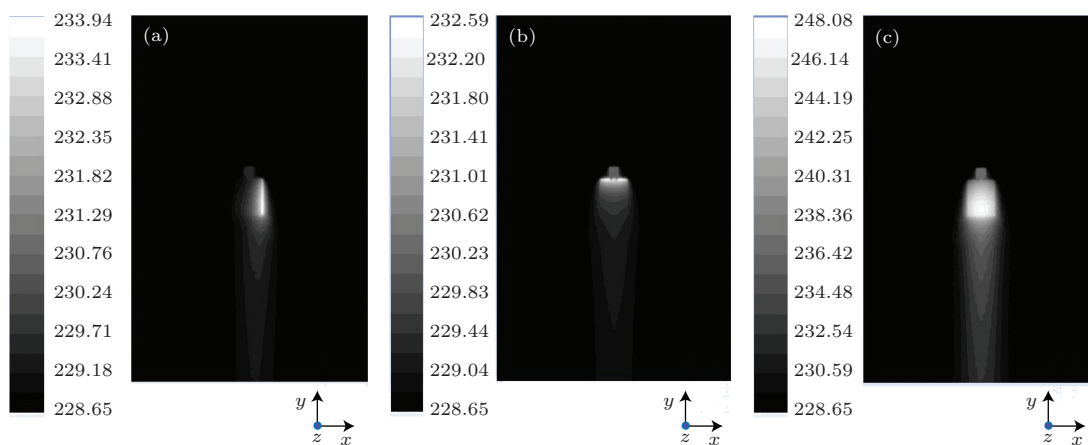


图6 (网刊彩色) 不同太阳辐射方向温度场分布 (a) X方向; (b) Y方向; (c) Z方向



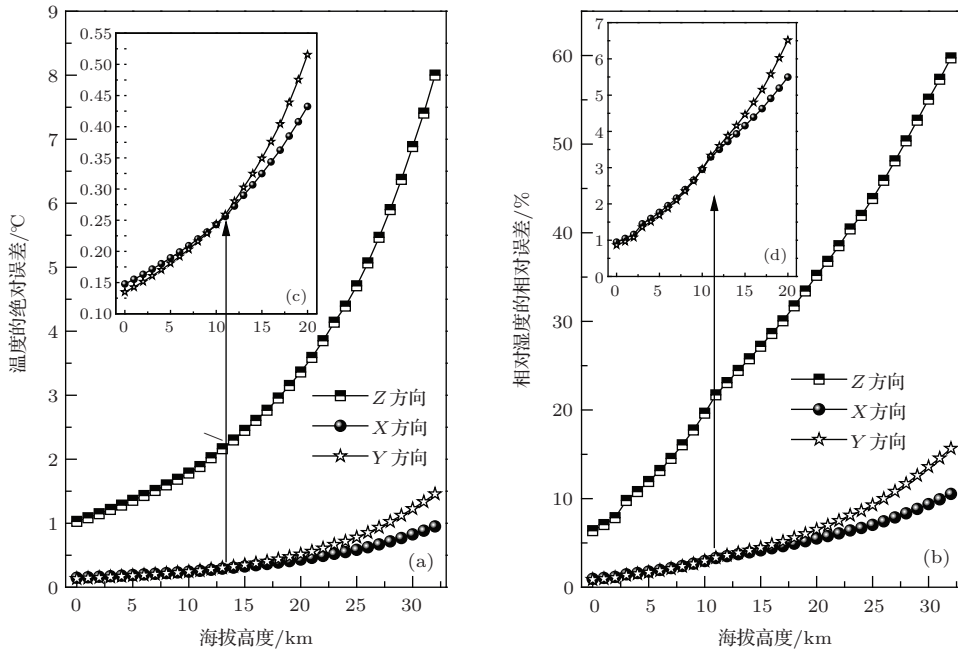


图7 不同太阳辐射方向引起的误差与海拔高度的关系 (a) 温度的绝对误差与海拔高度的关系; (b) 相对湿度的相对误差与海拔高度的关系

### 4.2 传感器材料反射率对湿度测量的影响

材料的反射率直接影响其对太阳辐射的吸收量, 根据一些探空仪厂家提供的资料和现有技术所能达到的水平, 湿度传感器衬底的反射率约为70%. 考虑到部分材料反射率达不到70%(下限设50%)以及未来探空材料工艺的发展(上限设90%), 本文针对反射率在50%—90%之间的湿度传感器, 研究比较了太阳辐射条件下由于反射率不同引起的温度误差和相对湿度误差的差异. 流体动力学计算中采用的湿度传感器尺寸为5 mm × 5 mm × 0.6 mm, 衬底为陶瓷材料, 太阳辐射方向为Z方向. 图8(a)和(b)分别为温度的绝对误差和相对湿度的相对误差与海拔高度及反射率之间的三维关系图. 由图8(a)可以明显看出, 太阳辐射引起的温度误差随着海拔高度的升高迅速增大, 但随着反射率的增加而明显减小. 图8(b)给出了相对湿度的相对误差与反射率及海拔高度的关系曲面. 变化趋势与温度误差随海拔高度以及反射率的变化趋势一致, 即随海拔高度的升高相对湿度的相对误差增大, 随反射率的增强相对湿度的相对误差减小. 根据数值模拟的数据可以拟合出相对湿度的相对误差  $r$  与海拔高度  $h$  及衬底反射率  $f$  之间曲面方程:

$$r = \frac{p_1 + p_2h + p_3h^2 + p_4h^3 + p_5f + p_6f^2}{1 + p_7h + p_8h^2 + p_9h^3 + p_{10}f}, \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} p_1 &= 22.2101, & p_2 &= 0.5081, \\ p_3 &= -0.0295, & p_4 &= 0.0005, \\ p_5 &= -0.1983, & p_6 &= -0.0005, \\ p_7 &= -0.6154, & p_8 &= 0.0018, \\ p_9 &= -1.9146, & p_{10} &= -0.0015. \end{aligned}$$

显而易见, 利用该公式可以方便地对表面反射率不同的湿度传感器测量结果进行误差修正. 这里只是给出了一个拟合公式的例子, 针对具体的问题, 实际上各种因素对湿度测量结果的影响都可以通过本文的数值分析法求出, 再结合数值拟合软件可给出最优的拟合公式, 从而可简便快速地对测量误差进行全量程修正.

### 4.3 传感器衬底材料热导率对湿度测量的影响

人们一般对电容湿度传感器的关键材料——感湿膜关注较多, 主要研究其温湿特性和响应时间, 而对其衬底的研究鲜有报道. 目前探空湿度传感器衬底材料主要包括硼硅玻璃(SiO<sub>2</sub>)、硅(Si)和陶瓷(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)等, 在太阳辐射条件下, 考虑到材料的物理特性参数, 特别是热导率的不同, 可能会导致流固耦合传热系统的温度场存在较大差异, 故本文对三种衬底材料下的湿度传感器的太阳辐射影响进行

详细的研究. 在对比研究中, 除了衬底材料不同之外, 其余所有参数设置均一致. 如图 9 所示, 随着海拔高度的升高, 温度的绝对误差和湿度的相对误差均具有相似的变化趋势, 且硼硅玻璃产生的误差要明显大于其余两种衬底材料, 根本原因是硼硅玻璃的热导率最小, 热量交换最慢, 无法快速地将吸收的太阳辐射量通过空气对外进行辐射散热. 结合

表 1 和图 9 可以发现, 随着材料热导率的增加, 太阳辐射引起的误差将不断减小. 同时我们也发现虽然硅的热导率比陶瓷的热导率大得多, 但是太阳辐射引起的误差曲线几乎重合. 该结果表明热导率增加到一定的数值时, 辐射误差基本不再减小, 换言之, 此时热导率对于太阳辐射误差的影响基本不变.

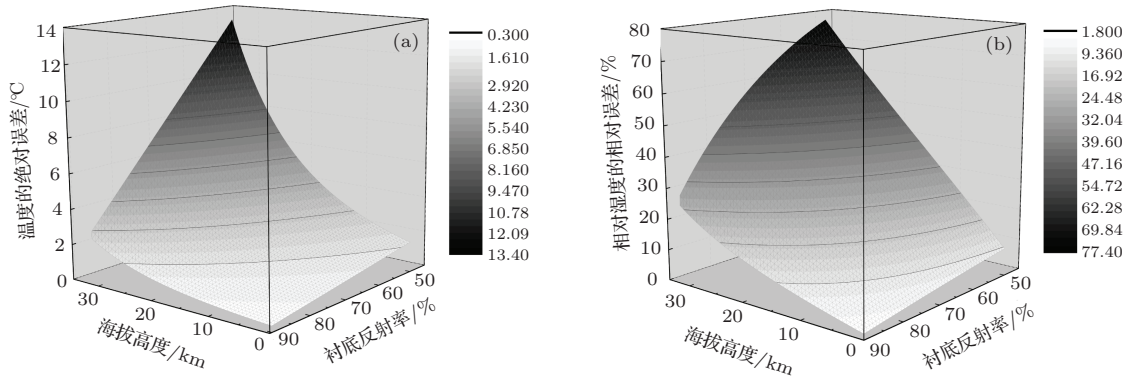


图 8 不同衬底反射率引起的误差与海拔高度之间的关系 (a) 温度的绝对误差与衬底反射率及海拔高度的关系曲面; (b) 相对湿度的相对误差与衬底反射率及海拔高度的关系曲面

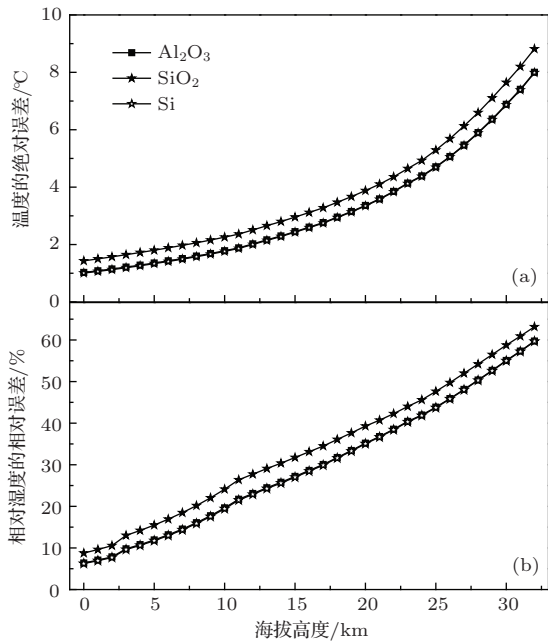


图 9 不同衬底材料下误差与海拔高度的关系 (a) 温度的绝对误差与海拔高度的关系; (b) 相对湿度的相对误差与海拔高度的关系

#### 4.4 传感器尺寸对湿度测量的影响

众所周知, 国际气象组织并未给出湿度传感器尺寸的统一标准, 因而各厂家根据各自工艺条件和传感器性能要求所生产的湿度传感器的长度、宽度和厚度存在很大差异. 本文中首先固定长宽为 5 mm × 5 mm, 根据调研发现, 作为衬底的硅、陶

瓷和玻璃的常规厚度在 0.2—1 mm 之间, 故本文选取 0.3, 0.6, 0.9 mm 三个典型的厚度进行了计算比较, 具体的温度的绝对误差和相对湿度的相对误差随海拔高度的关系如图 10 所示. 其中, 图 10 (a) 和图 10 (b) 的太阳辐射方向为 X 方向, 图 10 (c) 和 (d) 为 Y 方向, 图 10 (e) 和 (f) 为 Z 方向. 从图中可以看出, 在不同的厚度下, 温度和湿度的误差均随海拔高度的升高而呈现非线性单调递增趋势. 当海拔高度较低时, 厚度对温度和湿度的影响较弱, 而高海拔时厚度的影响明显增强. 值得注意的是, 在 X 和 Y 方向温度和湿度的误差均与厚度成正比, 即厚度越大, 误差越大. 原因在于厚度的增加导致直接接受的太阳辐射量明显增加, 而与厚度变大引起的对外热辐射量的增加相比, 接受的太阳辐射量更大, 因此温湿度误差越发显著.

仔细观察 X 和 Y 方向, 不难发现两者也存在一些差异: 前者不同厚度下的三条曲线之间几乎是等间距分布, 且随海拔高度的升高, 间距越大; 而后者三条曲线之间不等间距, 且同样海拔高度下, 间距比 X 方向小. 正如前面的分析可知, 太阳辐射为 X 方向时, 集中在 PCB 侧边的升温对湿度传感器的影响很小, 所以温湿度误差仅仅取决于 X 方向接受太阳辐射的面积. 而太阳辐射为 Y 方向时, 集中在引线下方 PCB 板上吸收的太阳辐射能量会通过引线将一部分热量传递给传感器, 从而缩小了由于



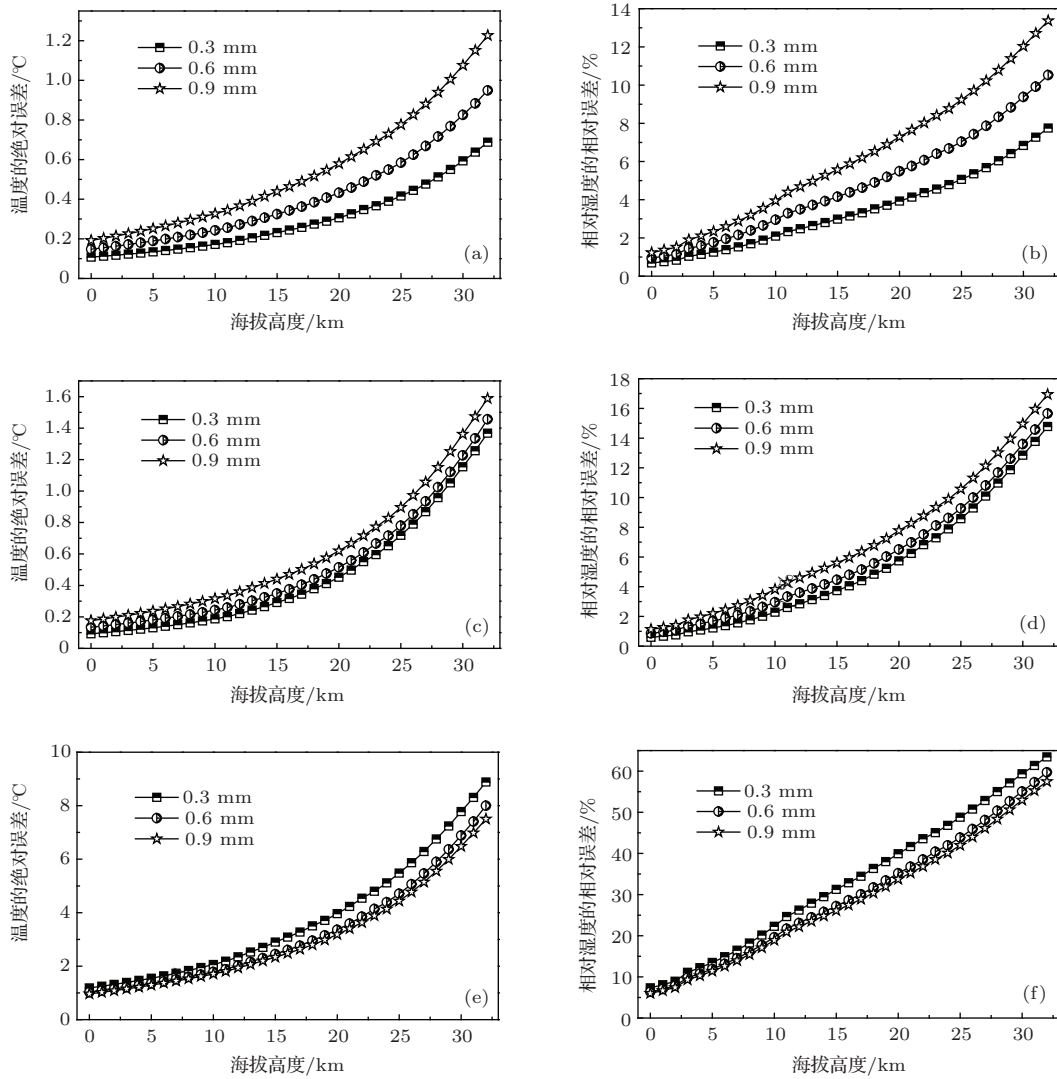


图 10 不同厚度下误差与海拔高度的关系 (a), (b) X 方向; (c), (d) Y 方向; (e), (f) Z 方向

厚度不同引起的温湿度误差. 此外, 从图 10(e) 和 (f) 可知, 太阳辐射为 Z 方向时, 误差随厚度的变化趋势与 X, Y 方向相反, 即厚度越大, 误差越小. 这是因为 Z 方向接受太阳辐射的面积恒定为  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ , 即接受的太阳辐射量相同, 而厚度不同导致对外热辐射表面积不同, 显然厚度越大, 对外辐射越大, 导致平均温度越低, 从而使得温湿度误差随厚度增加而减小. 我们也观察到厚度为 0.6 和 0.9 mm 的温湿度误差随海拔高度变化的曲线几乎重合, 这说明当厚度达到一定的值时, 厚度对误差的影响效果微弱, 可以忽略不计.

从原理上讲, 为了减小太阳辐射对探空湿度传感器的测量准确性的影响, 需尽量缩小传感器的尺寸, 但是尺寸越小, 加工工艺复杂增加, 一致性和稳定性也都难以控制, 因此根据一些探空仪厂家的数据, 本文将传感器的长宽尺寸控制在 3—15 mm

之间. 图 11 给出了不同长宽 (为了简化模型, 流体动力学计算中设置了相同的长和宽) 条件下湿度传感器的温湿度误差与海拔高度的关系曲线, 不难发现, 它们均随海拔升高而非线性单调递增. 通过比较图 11 还可以发现长宽对温湿度误差的影响在三个太阳辐射方向显示出不同的特征, 首先, 在 X 和 Y 方向温湿度误差随着长宽的增加而减小, 而 Z 方向趋势刚好相反. 对于 X 和 Y 方向来说, 太阳辐射面积线性增加时, 湿度传感器体积呈平方关系增加, 所以随着长和宽增加时, 虽然总辐射量增加了, 但是体积内的平均辐射量却在减小, 从而导致的温湿度误差表现出随长和宽增加而降低的趋势. 对于 Z 方向而言, 不同长宽的传感器所对应的平均太阳辐射量不变, 随着长宽的增加对外平均热辐射量却在明显减小, 平均温度升高, 因而温湿度误差随长宽的增大而增加. 其次, 长宽对 Z 方向的温湿度误

差影响最大, Y方向次之, X方向的影响最小. 实际上, 探空仪在上升过程中由于气流等各方面的原因, 传感器的姿态一直处于变化中, 太阳辐射也不可能是某一个固定的方向, 因此太阳辐射引起的误差应该是三个方向的叠加作用的结果. 根据以上分析可知, 长宽对太阳辐射为 X 方向的影响几乎可以忽略, 但对 Z 方向的影响却不容忽视, 因此在传感器尺寸参数优化设计中必须考虑长宽的影响.

### 5 实验结果对比

上面我们系统地研究探讨了太阳辐射方向、传感器尺寸、衬底材料热导率和反射率对太阳辐射加热引起温湿度测量误差的影响, 初步展现了基于计算流体动力学的太阳辐射加热误差修正方法——数值分析法的潜力. 为了进一步说明本文数值

分析修正法的准确性和有效性, 下面将本文数值计算的相对湿度相对误差修正结果与已有文献报道中关于太阳辐射湿度误差修正的实验结果进行对比. 需要说明的是: 一方面, 由于不同的实验中采用的湿度传感器有差异, 同时湿度测量时的太阳天顶角 (太阳辐射条件) 和湿度环境也有所不同, 因此, 有的文献中给出的实验修正是一段数值范围; 另一方面, 本文基于流体动力学的数值分析法在具体的计算过程中选取了不同的热导率、表面反射率以及传感器尺寸来模拟仿真湿度传感器差异的影响, 并且也选取了不同太阳辐射方向来模拟不同的辐射条件, 因而给出的修正值也是一段数值范围, 具体比较结果见表 2.

表 2 中, 本文的修正误差模型为了尽量与实验测试中的情况接近, 做了如下参数设置: 考虑衬底材料的热导率对误差影响较小, 故采用常用衬底陶

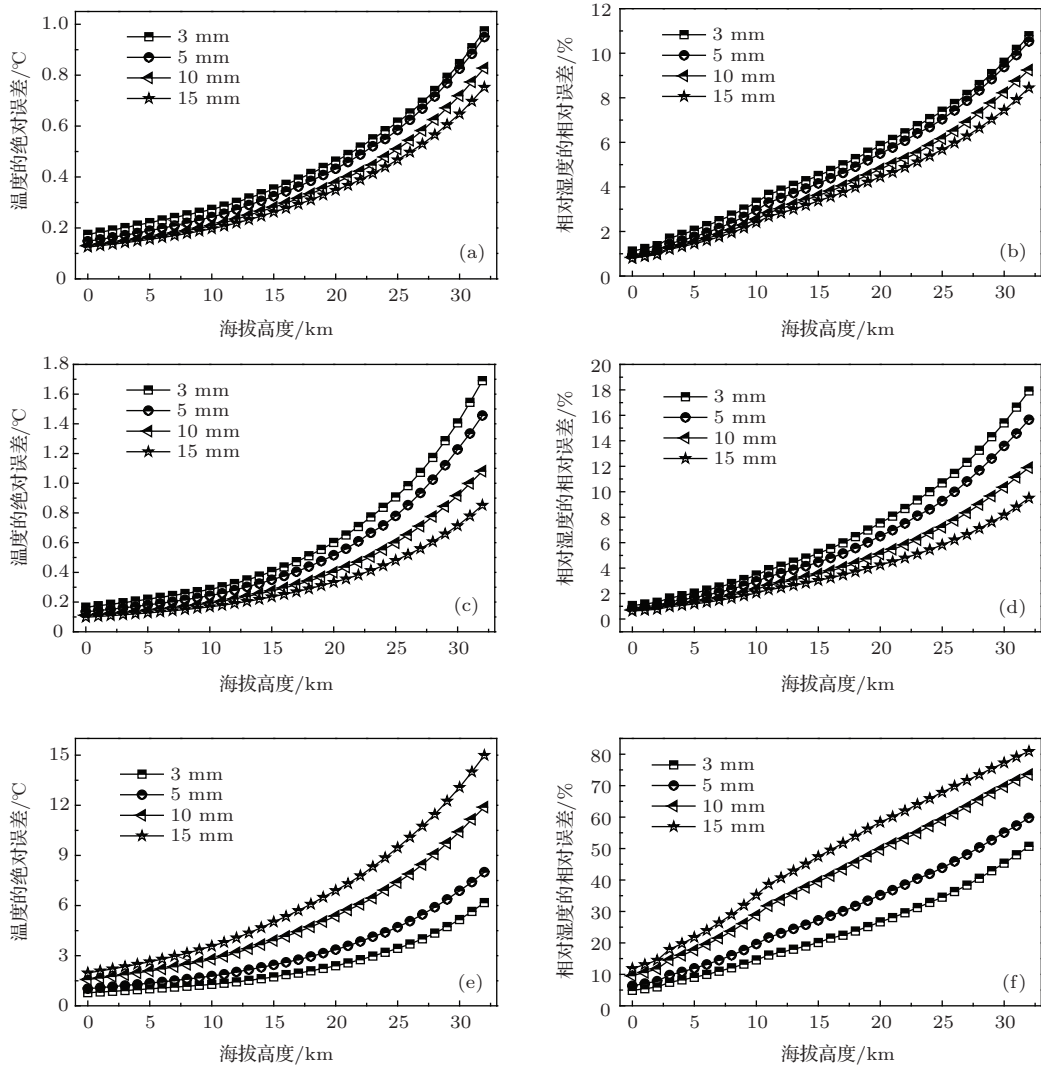


图 11 不同尺寸下误差与海拔高度的关系 (a), (b) X 方向; (c), (d) Y 方向; (e), (f) Z 方向

表2 本文数值分析法计算的太阳辐射误差修正结果与已有文献实验修正结果对比

气压/hPa	对应海拔/km	实验修正误差/%		本文修正误差/%
1000—500	0—5.6	5.3—8.9 <sup>[16]</sup>	1.8—9.5 <sup>[29]</sup>	4—16.3
400	7	8 <sup>[16]</sup>	10.2—18.9 <sup>[29]</sup>	9—19.9
300	9	8.8 <sup>[16]</sup>	24.7—31.3 <sup>[29]</sup>	10.1—24.2
200	12	16.4 <sup>[16]</sup>	38.5—47.6 <sup>[29]</sup>	14—31.1
100	16	30.2 <sup>[16]</sup>	32.7—52.7 <sup>[29]</sup>	17.7—38.3
30	24	—	—	27.1—52.9
10	31	—	—	39.8—66.6

瓷; 反射率采用常用的70%; 根据 $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ 三个方向按面积比计算出有效辐射面积来模拟太阳辐射的情况; 根据文献[10]阳江比对可知, 传感器的长宽范围设定在3—10 mm之间, 厚度设为0.6 mm. 从表2中可以看出, 不同文献中的实验修正值存在一定的差异<sup>[16,29]</sup>, 这主要是由于采用的测试设备型号及测量环境不同所导致. 综合比较可以看出, 本文基于流体动力学计算的修正值范围和实验结果符合较好, 这在一定程度上表明本文数值分析法的有效性. 值得注意的是, 在实际的修正过程中, 为了准确地提供太阳辐射误差而导致的湿度修正数据, 必须对湿度测量中的湿度传感器的各种物理参数以及测量环境要素进行提取, 作为流体动力学计算时的必要参数. 本文对研究模型进行了简化, 因为实际结构中的框架和安装角度的影响在讨论上述问题的过程中均可相互抵消, 所以简化模型中不考虑这些因素对本文的研究结果没有影响. 此外, 气球上升过程中尾流和风速引起的测试系统倾斜旋转等因素较为复杂, 本文暂不加以讨论. 在后续研究中将逐步细化数值分析模型, 使之能够更好地符合高空探测的真实环境.

## 6 结 论

通过计算流体力学CFD软件对探空湿度传感器在不同海拔高度(0—32 km)的温湿度特性进行了数值模拟分析, 详细探讨了传感器尺寸、衬底材料和反射率对太阳辐射加热引起温湿度测量误差影响的关系, 初步展现了太阳辐射加热误差修正方法——数值分析法的潜力. 研究分析得到以下结论.

1) 太阳辐射对探空电容式湿度传感器的测量有显著影响, 其加热引起传感器上温度升高从而导致湿度测量值明显偏干, 且随着海拔高度的升高误

差显著增加, 必须对其进行相关修正. 计算结果表明, 尺寸为5 mm × 5 mm × 0.6 mm、衬底采用反射率为70%陶瓷的探空湿度传感器, 在海拔较低时, 修正值 $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ 方向分别是真值的1.6%, 1.5%, 10.8%左右, 高海拔时 $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ 方向则分别达到了真值的10.5%, 15.6%, 59.7%左右, 相对湿度修正值呈现明显上升趋势.

2) 探空仪在不同的地区和时间上升时, 由于太阳辐射方向不同而引起的相对湿度测量误差也存在明显差异. 数值模拟结果表明,  $X$ 和 $Y$ 方向的误差接近且较小, 而 $Z$ 方向的误差明显变大. 例如, 海拔32 km处,  $Z$ 方向的温度误差达到8 °C, 此时相对湿度的修正值高达真值的60%.

3) 传感器常用衬底材料为陶瓷、硼化玻璃和硅, 由于它们的热导率不同, 太阳辐射误差也存在差异, 表明热导率是太阳辐射加热误差的影响因子. 太阳辐射误差随热导率的增加而降低, 硅和陶瓷的误差曲线重合则表明当热导率增加至一定的值时, 误差不再降低.

4) 通过设置传感器的反射率50%—90%进行数值模拟, 结果表明太阳辐射对湿度传感器加热引起的误差随反射率的降低呈单调线性增加的趋势. 反射率为50%时太阳辐射误差是反射率为90%的2.89倍, 因此反射率的提高能够显著改善太阳辐射对探空湿度传感器测量的影响, 其减小太阳辐射加热误差的同时可以提高辐射湿度误差修正的精度.

5) 传感器不同尺寸条件下太阳辐射误差修正值之间存在明显差异. 当截面为5 mm × 5 mm, 由于厚度的不同对太阳辐射误差影响较小, 其中厚度分别为0.3 mm和0.9 mm时, 在高海拔太阳辐射 $Z$ 和 $X$ 方向的修正值均相差真值的6%,  $Y$ 方向相差真值的2%; 当厚度为0.6 mm, 由于长宽的不同对太阳辐射误差的影响较大, 在海拔32 km处, 长宽



为15 mm的传感器在Z方向太阳辐射误差修正值是同条件下3 mm传感器的1.6倍,这是一个很大的误差,需要进行修正.而与实验上相对湿度的太阳辐射误差修正值比较发现,本文流体动力学数值分析法能够为太阳辐射误差修正提供数据支撑.

## 参考文献

- [1] Deng Z Y, Min Q W, Zhang Q, Li W H, Liu X S, Wang L X, Lu Q, Li S D, Cao J H, Xu J Q 2010 *Plateau Meteor.* **29** 810 (in Chinese) [邓振镛, 闵庆文, 张强, 李文华, 刘兴士, 王礼先, 卢琦, 李世东, 曹建华, 徐金强 2010 高原气象 **29** 810]
- [2] Elliott William P, Ross Rebecca J 1998 *J. Climate* **11** 2424
- [3] Posada R, García-Ortega E, Sánchez J L, López L 2013 *Atom. Res.* **122** 174
- [4] Liu Z Z, Li M, Zhong W K, Wong M S 2013 *J. Geodrn.* **72** 86
- [5] Li W 2012 *Plateau Meteor.* **31** 568 (in Chinese) [李伟 2012 高原气象 **31** 568]
- [6] Campmany E, Bech J, Rodríguez-Marcos J, Sola Y, Lorente J 2010 *Atom. Res.* **97** 385
- [7] Koulali A, Ouazar D, Bock O, Fadil A 2012 *Atom. Res.* **104–105** 273
- [8] Berton Roland P H 2008 *Atom. Res.* **89** 12
- [9] Yue P, Zhang Q, Zhao W, Wang J S, Wang R Y, Yao Y B, Wang S, Hao X C, Yang F L, Wang R A 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 209201 (in Chinese) [岳平, 张强, 赵文, 王劲松, 王润元, 姚玉璧, 王胜, 郝小翠, 阳伏林, 王若安 2013 物理学报 **62** 209201]
- [10] Nash J, Oakley T, Vömel H, Li W 2011 *WMO Intercomparison of High Quality Radiosonde Systems Yangjiang, China, 12 July–3 August, 2010* p9
- [11] Miloshevich Larry M, Paukkunen Ari, Vömel Holger, Oltmans Samuel J 2004 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **21** 1305
- [12] Du L P, Tian R F, Sun Z N, Liu X Y 2012 *Proc. CSEE* **32** 86 (in Chinese) [杜利鹏, 田瑞峰, 孙中宁, 刘晓一 2012 中国电机工程学报 **32** 86]
- [13] Fleming Rex J 1998 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **15** 1511
- [14] Peng J W, Lü W H, Xing H Y, Wu X J 2013 *Chin. J. Sci. Instrum.* **34** 153 (in Chinese) [彭基伟, 吕文华, 行鸿彦, 武向娟 2013 仪器仪表学报 **34** 153]
- [15] Kent Elizabeth C, Taylor Peter K 1996 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **13** 1317
- [16] Guichard F, Parsons D, Miller E 2000 *J. Climate* **13** 3611
- [17] Zhang Q, Huang J, Zhang L, Zhang L Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 139202 (in Chinese) [张强, 黄菁, 张良, 张立阳 2013 物理学报 **62** 139202]
- [18] Liu Q Q, Dai W, Yang R K, Zhang J H, Li M 2013 *Plateau Meteor.* **32** 1157 (in Chinese) [刘清倩, 戴伟, 杨荣康, 张加宏, 李敏 2013 高原气象 **32** 1157]
- [19] Li Y G, Fan J P 1990 *Humidity Measurement 1* (Beijing: China Meteorological Press) pp466–470 (in Chinese) [李英干, 范金鹏 1990 湿度测量 1 (北京: 气象出版社) 第466–470]
- [20] Ciesielski Paul E, Johnson Richard H, Wang J H 2009 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **26** 1763
- [21] Wang J H, Zhang L Y, Dai A G, Immler F, Sommer M, Vomel H 2013 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **30** 197
- [22] Liu L, Zhang S L, Ma Y K, Wu G H, Zheng S K, Wang Y Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 038802 (in Chinese) [刘磊, 张锁良, 马亚坤, 吴国浩, 郑树凯, 王永青 2013 物理学报 **62** 038802]
- [23] Jiang Y M, Liu M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 204501 (in Chinese) [蒋亦民, 刘佑 2013 物理学报 **62** 204501]
- [24] Yin J F, You Y X, Li W, Hu T Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 044701 (in Chinese) [尹纪富, 尤云祥, 李巍, 胡天群 2014 物理学报 **63** 044701]
- [25] Tao Y J, Huai X L, Li Z G 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 074701
- [26] Zhao C L, Qin M, Huang Q A 2011 *IEEE Sens. J.* **11** 2986
- [27] COESA 1976 *Standard Atmosphere* (Washington DC: U.S. Government Printing Office) pp53–63
- [28] Gao H, Weng N Q, Sun G, Zhang C Y 2012 *J. Atmos. Environ. Opt.* **7** 101 (in Chinese) [高慧, 翁宁泉, 孙刚, 张彩云 2012 大气与环境光学学报 **7** 101]
- [29] Ajil K, Buehler Stefan A, John Viju O, Miloshevich Larry M, Mand M, Holl G 2012 *J. Atmos. Ocean. Tech.* **29** 248

# Fluid dynamic analysis on solar heating error of radiosonde humidity measurement\*

Mao Xiao-Li<sup>1)2)3)†</sup> Xiao Shao-Rong<sup>2)3)4)</sup> Liu Qing-Quan<sup>1)2)</sup>  
Li Min<sup>1)2)</sup> Zhang Jia-Hong<sup>1)2)</sup>

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

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

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

4) (*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

( Received 20 November 2013; revised manuscript received 13 April 2014 )

## Abstract

The error of humidity sensor induced by solar radiation seriously affects the accuracy of the relative humidity measurement. To solve this problem, this paper presents a novel numerical analysis method of correcting the error of relative humidity based on computational fluid dynamics. In view of the external thermal environmental conditions of radiosonde humidity sensors, the convection-solar radiation coupled thermal boundary conditions are adopted in the numerical simulation with analysis method of fluid-solid coupled heat transfer. The temperature error analysis model is first established from the ground to 32 km altitude with different pressures and temperatures. Combined with Goff-Gratch approximation formulas of saturation vapor pressure, the corresponding fluid dynamic numerical analysis model of relative humidity is put forward for error correction. Moreover, the relative humidity errors are reported in the different physical parameters such as the direction of the solar radiation, the reflectivity of sensor, thermal conductivity of the substrate material, the size of sensor, etc. The data analysis shows that the error of relative humidity, caused by solar radiation nonlinearly increases with altitude. The humidity measurement accuracy is affected notably by the direction of solar radiation. Among the errors caused by solar radiation, the error in the direction perpendicular to the front of the sensor is biggest, the error in the direction of the top of the sensor is the next, and the error in the direction of the side of the sensor is smallest. The data analysis also indicates that the solar heating error of the relative humidity can be reduced by reducing the size of the sensor, reducing the thermal conductivity of the substrate material, or improving the reflectivity of sensor. However, the solar heating error can not be neglected under low air pressure at high altitude. A comparison with experimental results shows that the numerical analysis method of the relative humidity error based on fluid dynamics simulation provides a new way to enhance the radiation error correction.

**Keywords:** humidity sensor, solar radiation, error correction, computational fluid dynamics

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

**DOI:** 10.7498/aps.63.144701

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 412475042, 61306138, 61307113), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK2012460), and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions.

† Corresponding author. E-mail: [mxl426@163.com](mailto:mxl426@163.com)