

凝结式湿度传感器系统设计与试验^{*}代中华¹ 高太长¹ 赵世军¹ 翟东力²

(1. 解放军理工大学气象海洋学院 南京 211101; 2. 南京英恩特环境技术有限公司 南京 211153)

摘 要:大气湿度是地面以及高空气象观测的基本要素之一,为了设计气象业务用露点型湿度传感器,本文基于凝结法测湿原理,结合显微光学、图像识别、嵌入式系统和自动控制等技术,成功设计并研制了凝结式湿度传感器样机。重点突破了凝结镜面设计、镜面温度控制和凝结物检测识别算法等关键技术,并将样机分别与 MBW373 湿度标准器和 HMP155a 测湿传感器进行了静态和动态对比试验。测试结果显示,样机与对比仪器均有较好的一致性,与标准器相对湿度测量偏差在 $-2.86\%RH$ 到 $-0.95\%RH$ 之间,测量的平均误差为 $-1.66\%RH$,满足地面气象观测业务要求。

关键词:湿度测量;凝结式;系统设计;对比试验

中图分类号: TN603 P412 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 170.1520

System design and experiment of humidity sensor
based on condensation methodDai Zhonghua¹ Gao Taichang¹ Zhao Shijun¹ Zhai Dongli²

(1. Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

2. Yingente Environmental Technologies Ltd, Nanjing 211101, China)

Abstract: The air humidity is one of basic elements of ground and upper air meteorological observation. In order to design a dew point type hygrometer for meteorological business, this article introduce a condensation-type humidity sensor which is infused with microscopic optics, image recognition, embedded system and automatic control technology. After computing and simulation, the sensor is successfully designed based on the principle of condensation method. Mainly key technologies such as condensation mirror design, temperature control, condense identification algorithm and so on are solved. Then static and dynamic test with humidity standard device MBW373 and humidity sensor HMP155a are carried out separately in different conditions. The test results shows that the prototype has good consistency with both contrasts, the deviation of relative humidity with the standard device is between $-2.86\%RH$ and $-0.95\%RH$, the mean error is $-1.66\%RH$ which meet the business application of ground meteorological observation.

Keywords: humidity measurment; condensation-type; system design; contrast test

1 引 言

空气湿度是表示大气中水汽含量多少的物理量,早期主要作为气象参量用于表征大气的湿度状态,近代已扩展到工业、农业等科技领域中。在许多工艺过程中,气体湿度是一个基本且极为重要的技术参数,不仅关系到工业产品的质量与产量,而且对安全生产、节能减排等都具有十分重要的意义^[1];在农业生产中,空气湿度是影响植物生长发育的重要因子,直接影响植物的蒸腾速率、开花授粉以及各种病虫害的发生发展。由于湿度受气温、气压的影

响较大,至今全温域、全量程的湿度测量仍是世界上大气探测领域的主要难题之一^[2]。

目前测湿仪器种类繁多,从原理上可以划分为称量法、热力学法、吸湿法、光学法、凝结法等。其中,称量法常作为湿度的计量基准,但操作过程复杂、繁琐,测量时间长,无法应用于日常测量。热力学测湿法以台站常用的干湿表为代表,常温下测量准确度较高,但低温时湿度变化所对应的干湿球温度差变化减小,导致低温时测湿误差较大。吸湿法可分为以毛发湿度表为代表的机械形变类元件和以湿敏电容/阻为代表的电学类元件,毛发感湿具有

收稿日期:2016-06

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(41475022)项目、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206035)项目资助

滞后性、温度效应和低湿瘫痪现象,通常作为低温下干湿表的替代观测仪器^[2-6];目前业务用自动气象站中广泛应用了湿敏电容,其体积较小,直接输出相对湿度值,在低温低湿情况下,测量准确度不高^[7]。光学法利用水汽对光辐射或者电磁波吸收衰减作用来测定水汽含量,如红外湿度计、微波湿度计等,需要经常进行校准,目前仅用于科学研究中。露点仪作为凝结法测湿的代表仪器,测量精度高,是目前唯一一种可以在全温度量程内达到较高准确度的测湿仪器。凝结法测湿仪器又分为光电法、振动频率法、SAW法以及图像法等,由于现有的凝结式露点仪结构复杂、体积较大、使用环境要求高、维护难度大等因素,主要应用于实验室作为计量标准仪器使用,不能满足气象观测仪器在野外条件下、无人值守时的复杂环境性要求,仪器测量的稳定性和长期可靠性难以保证,限制了其在地面气象观测业务中的推广应用^[8-10]。国内外研究表明,影响露点仪测量精度的主要因素集中在镜面真实温度和镜面温度传感器测量值之间的误差、过冷水识别问题、凝结面动态特性差等方面,许多学者进行过相关研究。

随着显微光学、图像识别、嵌入式系统、自动控制等技术逐渐发展成熟,为开发可业务应用的小型凝结式湿度传感器提供了可能^[11-12]。本文研究了小型凝结式湿度传感器系统结构,解决了凝结镜面设计、镜面温度快速控制和凝结物检测识别等多项关键技术,研制出了凝结式湿度传感器样机,并进行了静态和动态对比试验。测试结果显示,常温 and 高温下,该样机相对湿度精度在3%RH以内,外场测试与目前业务用HMP155a一致性较好,初步满足业务要求。

2 测量原理及结构设计

2.1 测量原理

通常大气中含有一定量的气态水,不同温度的大气所能包含的最大气态水的量不同,温度越高,所能包含的气态水量也越大。对一定温度下的湿空气进行等压降温,当温度降低至空气的露点温度时,气体中的水分会逐渐达到平水面饱和状态,当有凝结核存在时,水蒸气就会凝结为

露滴,水蒸气达到饱和时的温度即为露点温度。通过露点温度和环境温度,根据WMO规定的饱和水汽压计算公式^[4](Goff-Gratch公式,式(1)和式(2)所示),露点温度与水汽压是一一对应的关系。又因为在一定的温度下,水的饱和水汽压是已知的,故通过测定露点温度便可知气体中水汽的含量。

对平液面, $-49.9 \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内,

$$\lg e_w = 10.79574 \left(1 - \frac{T_1}{T} \right) - 5.028 \lg \left(\frac{T}{T_1} \right) + 1.50475 \times 10^{-4} \times [1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T}{T_1} - 1 \right)}] + 0.42873 \times 10^{-3} \times [10^{4.76955 \left(1 - \frac{T_1}{T} \right)} - 1] + 0.78614 \quad (1)$$

对平冰面, $-100 \sim 0^\circ\text{C}$ 范围内,

$$\lg e_{si} = -9.09685 \left(\frac{T_1}{T} - 1 \right) - 3.56654 \lg \left(\frac{T_1}{T} \right) + 0.87682 \left[1 - \frac{T}{T_1} \right] + 0.78614 \quad (2)$$

通过饱和水汽压可计算相对湿度,

$$U = \left[\frac{e_w}{e_w'} \right]_{p, T} \times 100\% \quad (3)$$

式中: T_1 为水的三相点温度, T 为绝对温度, e_w 为平液面实际水汽压, e_{si} 为平冰面实际水汽压, e_w' 为饱和水汽压, U 为相对湿度, p 为大气压。

2.2 结构设计

小型凝结式湿度传感器由感应与防护单元、显微成像单元、采集与处理单元3个单元组成,如图1所示。

感应与防护单元主要用于感应环境温度和空气水汽状况,实现对镜面温度的快速准确控制以及保证感应部分在工作过程中的长期稳定性与准确性,这个单元包括一个半导体制冷块、一个高度抛光的金属凝结镜面和两个温度传感器。当气体进入传感器,半导体制冷块对气体进行等压降温,当温度降低至空气的露点温度时,被测气体中的水汽接近饱和状态,会在光洁的金属凝结镜面凝结成小露珠,达到汽-液平衡,这时停止制冷,利用两个温度传感器分别获取环境温度和镜面温度。为了保证传感器长期测量的稳定性,必须使用防护措施防止灰尘、大的污染颗粒等空气中其他污染物的影响,同时,不能影响空气的流动。

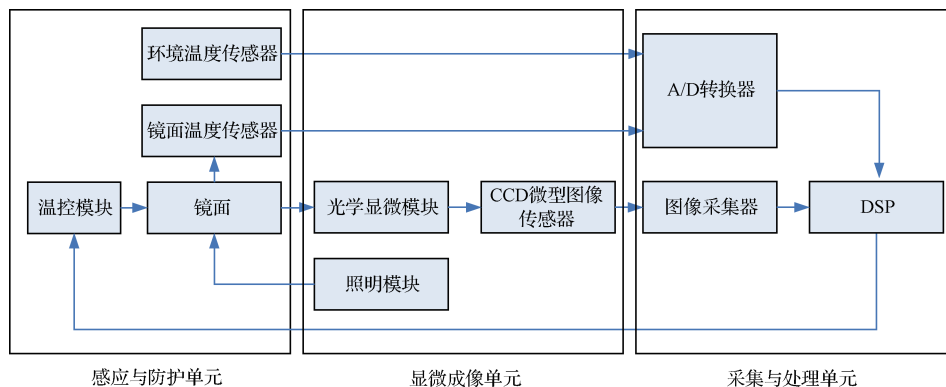


图1 传感器结构

显微成像单元主要实现对镜面凝结物的快速清晰成像,它包含一套光学放大系统、照明模块和面阵 CCD 模块。光学放大系统固定在传感器中部,经过精准对焦后可实现对凝结物的清晰放大,面阵 CCD 模块置于传感器上部,用于实时采集放大后的镜面图像。由于光照对图像的质量影响很大,而外界自然光无法准确控制,为消除外界自然光的影响,传感器采用内部照明模式,主要是利用一组 LED 灯,通过合理设计,实现同轴明场照明。

采集处理单元实现对环境温度和镜面温度的采集,并处理大量的镜面图像,进行凝结物的检测和识别,输出露点温度和相对湿度。主要硬件包括一个 DSP 处理器和单片机处理器,DSP 中事先写入图像处理算法,主要通过边缘检测和图像纹理分析以及模式识别的方法,对镜面凝结的露/霜进行检测识别。当镜面有凝结物时,镜面图像会出现变化,通过图像识别算法及时检测出凝结物的生成。当温度在 -20°C 到 0°C 之间时,镜面凝结的既可能是露,也可能是霜,但露霜的图像特点不同,通过提取边缘信息确定熵值,区分出露和霜,利用热敏电阻温度计获取平衡点温度。根据金属镜面的平衡温度以及判别出的凝结物相态,计算实际水汽压,进而得到相对湿度。单片机主要功能是向外发送数据和接收控制指令并监视 DSP 运行状态,保证其正常运行。

根据上述基本原理,设计了小型凝结式湿度传感器结构,如图 2 所示。

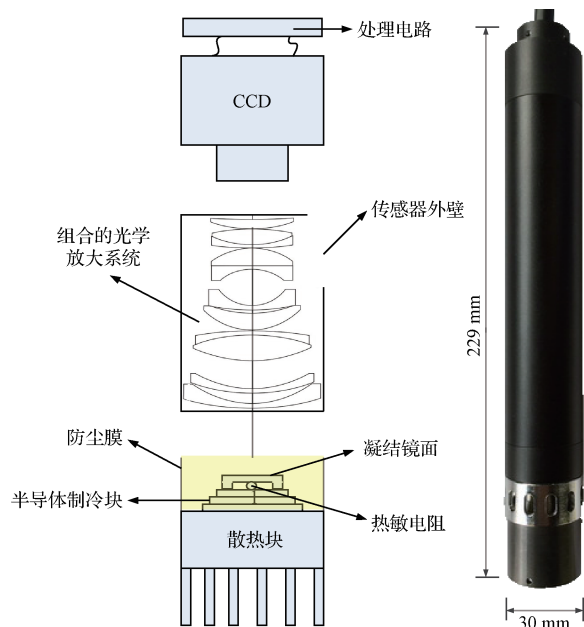


图2 凝结式湿度传感器结构及外观

正常工作时,仪器开机后半导体制冷块会先加热 40 s,确保镜面的凝结物全部被蒸发,同时也可去除部分易蒸发的污染物,然后半导体制冷块对镜面进行降温,CCD

实时采集镜面图像并送 DSP 处理,当温度降低至空气的露点温度时,气体中的水分会逐渐达到平水面饱和状态,水汽会在光洁凝结面形成露滴,此时停止降温,由于热传导,镜面温度会逐渐回升,凝结物逐渐消失,此时控制制冷块缓慢降温,如此反复,最终达到汽-液平衡,检测出此时的镜面温度,即为气体的露点温度,通过公式换算成相对湿度。

3 关键系统构建

为实现可应用于地面气象观测业务的凝结式湿度传感器,要求其在全温域、全量程范围内测量准确度较高、环境适应性好、功耗小、价格适中,在设计时采用了显微成像方式、通过小型面阵 CCD 图像进行镜面凝结物识别的技术路线,在重点解决了凝结镜面设计,镜面温控技术、凝结物识别算法等技术难题后,构建出了原理样机系统。

3.1 凝结镜面设计

凝结式湿度传感器测湿的关键是使气体中的水蒸气能在凝结镜面上凝结为露或霜,并准确获取凝结时的镜面温度。露滴形成的基本条件是有一个憎水的抛光表面和一定数量的露核(抛光面上的微小颗粒)或者表面上的微小裂痕。因此,镜面材料的选取对形成凝结时的温度有很大的影响。如果材料选取不当,会出现提前结露或者露滴过大等问题;此外,镜面材料必须具有良好的导热性能,镜面与测温原件之间热传递响应的快慢对温度控制有重要的影响,要求镜面材料须具有良好的导热性能,以减小测湿响应时间。另外,要应用于地面气象观测业务中,还要求镜面抗污染、抗腐蚀能力要强、基本不需维护或维护的周期要尽量长等。

因此,镜面材料的选取应以憎水、导热性能好、抗污染、耐腐蚀、硬度高、耐磨、光学性能好等为依据,过去常用的有铜、银、金、铂等。经过试验和综合分析,本文采用 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 大小的高度抛光不锈钢镀铬合金作为镜面材料,其具有导热性能好、耐腐蚀、硬度高、耐磨、光学性能好、憎水等特点,利于露滴的生成和镜面温度的稳定。

为保证温度传感器能准确测量镜面的温度,在镜面的背面设计一个条形的凹槽,用于安置小型热敏电阻。试验发现,用两只热敏电阻同时放置在镜面背面和镜面正面,同一时刻多次测量其误差小于 0.05°C ,说明置于背面的热敏电阻可以很好的反映凝结镜面的温度,为露点温度的准确测量提供了基础。

3.2 镜面温控技术

镜面温度控制包含两个部分:制冷块选择和温控算法设计。制冷块必须具备快速升降温的能力,且功耗要小;温控算法要保证镜面温度快速准确达到指定的温度点。半导体制冷块是一种小型的制冷设备,主要利用半导体的 Peltier 效应,它具有没有滑动部件、可靠性高、无需制冷剂、无污染等优点,外观如图 3 所示。

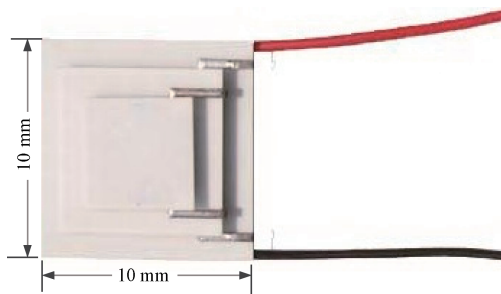


图3 半导体制冷块

镜面温度控制是一个二阶响应系统,通过控制半导体制冷块使镜面温度逐渐振荡逼近露点或霜点温度。为了缩小响应时间,当镜面温度与露点温度差异较大时,制冷速率必须很大,当温度差异逐渐减小时,必须降低制冷速率,保证平稳接近而保持镜面在露点温度。PID(proportion integration differentiation)控制算法是工业控制中应用最为广泛的技术之一,它结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便,主要根据给定值 $y_d(t)$ 与实际输出值 $y(t)$ 构成控制偏差:

$$error(t) = y_d(t) - y(t) \quad (4)$$

PID 的控制规律为:

$$u(t) = k_p [error(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t error(t) dt + T_D \frac{derror(t)}{dt}] \quad (5)$$

式中: k_p 为比例系数, T_I 为积分时间常数, T_D 为微分时间常数。

3.3 凝结物检测识别算法

凝结物的检测识别是凝结式湿度传感器设计中的关键环节,当镜面温度降低,空气中水汽达到饱和进而在镜面凝结时,包含检测识别算法的 DSP 必须能快速识别凝结物并进行及时反馈调节镜面温度。目前,国内外露点仪镜面凝结物检测识别的方法主要有光电管法、声表面波法、振动频率法、图像识别法等,考虑到能识别过冷水并且硬件结构简单、体积小、易实现的只有图像识别法,所以系统采用图像识别的方法进行露霜识别。

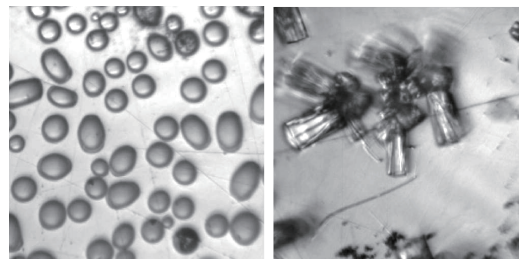
如图4所示为是镜面的露霜图像,可以发现,结露图像和结霜图像差异明显,露滴的图像呈明显的圆形或椭圆形,分布较为均匀,而霜图像则是一串条状小冰晶。从数字图像的角度看主要是存在边缘差异和纹理差异,灰度共生矩阵是一种用来分析图像纹理特征的重要方法,通过对所有像素一定方向、一定距离的灰度相关性的统计,反映图像在方向、相邻间隔、变化幅度及快慢上的综合信息。灰度共生矩阵定义为从图像 $f(x, y)$ 灰度为 i 的像素点出发,统计在距离为 d 、方向为 θ 的点 $f(x + Dx, y + Dy)$ 灰度为 j 出现的概率 $P(i, j, d, \theta)$ 。数学表达式为:

$$p(i, j, \theta, d) = \{ (x, y), (x + Dx, y + Dy) \mid f(x, y) = i, f(x + Dx, y + Dy) = j \} \quad (6)$$

图像熵值是图像纹理特征的一种直接体现,若图像没

有任何纹理,则灰度共生矩阵几乎为零矩阵,熵值的计算公式为:

$$Ent = - \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N p(i, j, \theta, d) * \log(p(i, j, \theta, d)) \quad (7)$$



(a) 结露图像

(b) 结霜图像

图4 露和霜的图像

本文对采集的 1 080 幅图像进行熵值计算,其中干净镜面、结露图像、结霜图像分别为 360 幅,为减少计算量,每幅灰度 1 图像取其中固定大小的一块区域进行处理计算,计算结果如图5所示。从图中可以很明显发现3种不同的图像熵值分布在不同的区域,其中,干净镜面图像的熵值最小,平均值为 3.225 3,结露图像的熵值稍大,平均值为 5.812 2,结霜图像的熵值最大,平均值为 9.159 7。为较好的区分干净镜面、结露图像以及结霜图像,分别取图像熵值 4.5 和 7.5 作为阈值,由于3种图像熵值区间有一定的重叠,因此,该算法无法实现完全识别,通过大量试验发现,识别准确率约为 80%。为满足传感器需求,使用熵值法进行判断时必须提高图像采样频率,以每秒 10 次识别的平均结果作为输出用来调节镜面温度,大大减小了识别误差。

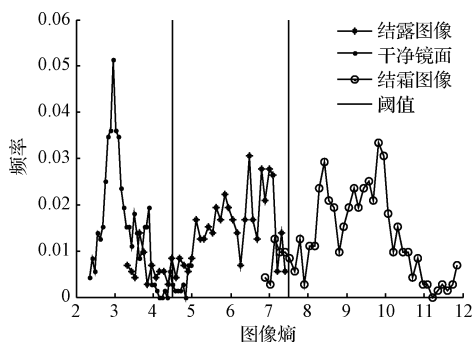


图5 3种不同图像的图像熵值统计

4 试验对比与分析

4.1 静态试验

为检验凝结式湿度传感器样机的性能,将样机与一级计量站的测湿标准装置进行了对比观测,测湿标准装置主要包括一等标准双压法湿度发生器和 MBW373 型数字式高智能露点仪两部分组成,利用前者形成特定湿度环境,将后者作为标准器,比较两种测量原理相同的测湿仪器

性能。

将两台测湿仪器同时置于双压法湿度发生器中,根据数字式高精度露点仪的工作温度($-10\sim+50^{\circ}\text{C}$)选择3个温度点: 50°C 、 20°C 、 -10°C ,在 50°C 、 20°C 两个温度点从高到低选择30%、60%和95%3个湿度点进行测试,在 -10°C 下高湿测量时会导致传感器上凝结大量的霜,对仪器有损坏,考虑到实际大气基本不会出现这种低温高湿的情况,所以只选择30%和60%两湿度点进行测试。在测试过程中,比较两台测湿仪器的凝结点的温度和相态。测试结果如表1和图6所示。

表1 湿度传感器静态测试结果

温度测试点 / $^{\circ}\text{C}$	湿度测试点 (%RH)	凝结物相态 (露/霜)	MBW373		传感器样机		露点温度 误差/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度误差 (%RH)
			露点温度 / $^{\circ}\text{C}$	相对湿度 (%RH)	露点温度 / $^{\circ}\text{C}$	露点温度 (%RH)		
50	95	露	48.6	93.26	48.21	91.45	-0.39	-1.81
	60	露	39.98	59.74	39.52	58.29	-0.46	-1.45
	30	露	27.66	30.04	26.97	28.85	-0.69	-1.19
20	95	露	19.24	95.39	19	93.97	-0.24	-1.42
	60	露	11.93	59.71	11.63	58.54	-0.3	-1.17
	30	露	1.98	30.15	1.53	29.2	-0.45	-0.95
-10	60	霜	-15.63	54.44	-16.21	51.58	-0.58	-2.86
	30	霜	-22.83	27.62	-23.69	25.17	-0.86	-2.45

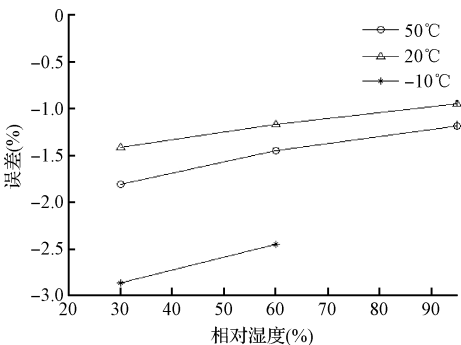


图6 样机测量误差

表1和图6反映了不同温度和湿度下样机的测量状态,可以看出,样机凝结物的识别结果与MBW373是一致的,露点温度测量的平均误差为 -0.496°C ,相对湿度测量的平均误差为 $-1.66\%\text{RH}$,证明了上述传感器设计和算法的可行性。误差分布在 $-2.86\%\text{RH}$ 到 $-0.95\%\text{RH}$ 之间,可以满足地面气象观测业务的要求。

同时,静态测试的结果也暴露出传感器存在的一些问题。

1)所有的测量误差值均小于零,这说明露点温度的测量值低于真实测量值。可能的原因是图像熵值检测不敏感,当露或霜开始在镜面凝结时,由于凝结量很小,与原图像相比,凝结图像的熵值变化很小。

2)不同温度下的测量性能不同。在 20°C 下的相对湿度测量误差为 $-1.18\%\text{RH}$,比 50°C 下的测量误差 $-1.48\%\text{RH}$ 要好,但二者都比 -10°C 下的测量误差 $-2.66\%\text{RH}$ 好。主要原因有两个:①测量镜面温度的传感器为热敏电阻,其不同温度下的测量误差不同;②在 20°C 和 50°C 下,镜面凝结的为露,而在 -10°C 下凝结的为

霜,霜的凝结速率要远远小于露,这就需要更长的稳定时间,也增大了测量误差。

4.2 动态对比

为了测试传感器的动态性能,将传感器样机与地面自动气象站中广泛应用的维萨拉HMP155a湿度传感器同时放置在百叶箱中进行外场试验,如图7所示为一天的实验对比结果,湿度变化显示出很好的一致性,两者间差值在3%以内,样机测试值比HMP155a测试值偏低,也和前面静态测试结果较一致。

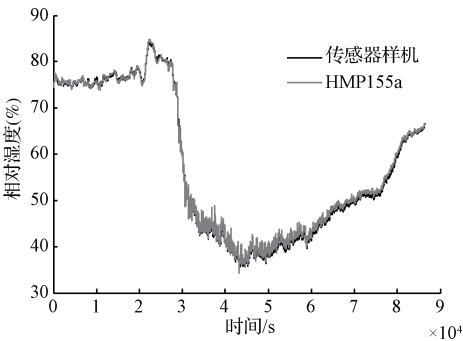


图7 样机与HMP155a动态对比结果(黑色线为传感器样机,灰色线为HMP155a传感器)

5 结论

为解决露点测湿法在气象业务中的应用,本文基于凝结法测湿原理设计了凝结式湿度传感器。传感器采用了显微成像方式,通过放大光路和小型面阵CCD对高度抛光不锈钢镀铬合金凝结面上的凝结物进行实时采集,并利用熵值法对镜面图像进行检测和识别,利用PID算法控制半导体制冷块进行温度控制,通过热敏电阻,准确获取镜

面温度,即露点温度,实现了露点测湿仪器的小型化、低功耗。通过静态和动态试验,对传感器性能进行了检验,与标准器湿度测量偏差在3%RH以内,与HMP155a动态测量结果一致,说明了上述设计的可行性和可靠性,测量误差基本能够满足业务化应用需求。同时,测试中也发现传感器存在一些问题,还需要在复杂的环境条件下进行更多试验,确保传感器测量的可靠性和长期稳定性,同时,还需要继续完善传感器样机,尽早实现该传感器的业务运用。

参考文献

- [1] 崔剑,张学范,傅兴天,等. 湿度测量及其在化工与其它领域中的应用[J]. 山东化工, 2006,35(1): 23-27.
- [2] 孙学金,王晓蕾,李浩,等. 大气探测学[M]. 北京:气象出版社, 2009: 123-151.
- [3] 郭洪艳. 湿度测量及控制方法[J]. 天津科技, 2012(4): 68-69.
- [4] WMO. 气象仪器和观测方法指南[M]. 第六版. 北京:气象出版社, 2005: 71-103.
- [5] 崔学林,梁宝龙,黄斌,等. 湿度传感器测量不确定度评定[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10): 1544-1549.
- [6] 吕雪芹,敖振浪. 冷镜式露点仪动态测量误差的实验与分析[J]. 仪器仪表学报, 2013,34(12):14-18.
- [7] 陈振林,杨小涛,周庆福. 温度、风速对湿度传感器响应时间影响的研究[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(6): 19-22.
- [8] 王欢,黄晨. 高精度无线环境温湿度测量系统设计研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013,27(3): 211-216.
- [9] 苏小勇,赵世军,高太长,等. 冷镜式露点仪现状及关键技术分析[J]. 大气与环境光学学报, 2011,6(5): 323-328.
- [10] 陈振林,马延平. 精密光电露点仪的研制[J]. 仪器仪表学报, 2005,26(8):411-413.
- [11] 水浩森,顾乐明. 基于图像处理方法的冷镜式露点仪[J]. 工业计量, 2013(增刊1):85-87.
- [12] 赵士伟. 冷镜式露点仪的研制[D]. 南京:中国人民解放军理工大学, 2010.

作者简介

代中华,2013年于解放军理工大学获得学士学位,现为解放军理工大学气象海洋学院硕士研究生,主要研究方向为大气探测理论与技术。

E-mail:daiz_zhongh@163.com

高太长(通讯作者),1982年于空军气象学院获得学士学位,现为解放军理工大学气象海洋学院教授、博士生导师,主要研究方向为大气探测理论与技术。

E-mail:2009gaotc@gmail.com