



相对湿度测量教学实验设计

盛 健, 刘 聪, 杨其国, 张 华, 武卫东, 黄晓璜

(上海理工大学 能源动力工程国家级实验教学示范中心, 上海 200093)

摘要: 深度融合湿度、湿空气、测量、标定等多个课程知识点, 利用湿敏元件在吸湿或脱湿过程中电阻值变化的原理, 采用高分子纳米复合气湿敏材料, 设计了基于分压和放大电路的电子湿度计, 在不同相对湿度下检测电压值, 以校验电压值与相对湿度的线性关系。实验项目训练内容综合性强、难度适中, 兼具热工基本量的测量、电工电子等知识和操作, 有助于培养学生创新等综合能力。

关键词: 实验教学; 测量; 传感器; 相对湿度

中图分类号: TP206

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220086

Design of Teaching Experiment of Relative Humidity Measurement

SHENG Jian, LIU Cong, YANG Qiguo, ZHANG Hua, WU Weidong, HUANG Xiaohuang

(National Demonstration Centre for Energy and Power Engineering Experimental Education, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The knowledge points of humidity, wet air, measurement, calibration and other knowledge points in courses were deeply integrated in this experimental teaching project. The principle of the change of resistance value of humidity sensor in the process of moisture absorption or dehumidification were using. The humidity sensitive material is polymer nanocomposite. An electronic hygrometer is designed based on partial voltage and amplification circuit, which can detect the voltage value under different relative humidity to verify the linear relationship between voltage value and relative humidity. The training content of the experimental project is highly comprehensive and moderate in difficulty. It covers the knowledge of measurement, the basic thermal quantities, electricians and electronics, and practical operation which is helpful to cultivate students' comprehensive abilities such as innovation.

Key words: experimental teaching; measurement; sensor; relative humidity

湿度是生产和生活中十分重要的热工物理量。过高的湿度会使衣料、纸张、食品发生霉变, 精密仪器灵敏度和准确度下降等; 而过低的湿度会引起静电、开裂等破坏^[1-2]。在工农业生产、气象、制冷和暖通等行业中, 对环境湿度的测量与控制是非常重要的。湿度与干球温度具有高度相关性, 也是最难准确测量的热物理参数。表征湿度时, 又分为相对湿度、绝对湿度、湿球温度和露点温度等, 而涉及湿度传感器的实验教学内容很少开展。湿度的测量方法多并且均采用间接测量的方法。如普通干湿球温度计利用两根普通温度计, 一根测量气温, 即干球温度; 另一

根的感温球用纱布包裹并浸湿, 测量空气的干燥程度。两根温度计共同确定湿度, 而其测量精度则取决于湿球温度计的浸湿、通风状态等。而湿度传感器一般测量湿敏材料的电阻值来换算湿度。湿度的控制一般采用冷冻除湿、吸附除湿、喷饱和水蒸气等温加湿或喷淋水等焓加湿等技术, 因此学生对湿度概念和对湿度传感器测量与控制原理的理解与掌握难度大^[3-4]。

1 湿度的概念

湿度表示气体中水蒸气含量多少的尺度, 测量气体湿度就是测量气体中水蒸气含量, 进而确

收稿日期: 2022-02-25; 修回日期: 2022-03-22

基金项目: 教育部第二批新工科研究与实践项目(E-NYDQHGC20202210); 2020 年上海高校本科重点教育改革项目(20200165); 上海市 2020 年度“科技创新行动计划”技术标准项目(20DZ2204400); 上海市 2021 年度“科技创新行动计划”科普专项项目(21DZ2305500)。

作者简介: 盛健(1985-), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事实验中心建设与管理工作。E-mail: sjhvac@usst.edu.cn

定气体的干燥程度。为更好表征湿度概念,通常有以下几种表达方法:绝对湿度、相对湿度、含湿量和露点温度。

1) 绝对湿度

绝对湿度是单位容积气体中水蒸气质量,可理解为湿空气中水蒸气的密度。绝对湿度只能说明湿空气中实际所含水蒸气的质量,但不能说明湿空气干燥或潮湿程度及吸湿能力。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

式中: ρ 为绝对湿度, kg/m^3 ; m 为水蒸气质量, kg ; V 为湿空气体积, m^3 。

2) 相对湿度

相对湿度表示湿空气中水蒸气距离饱和状态的程度,即湿空气吸收水蒸气能力的大小。物理意义是湿空气的水蒸气压力与相同工况下饱和湿空气的水蒸气压力之比。

$$\varphi = \frac{P_q}{P_{qb}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: φ 为相对湿度; P_q 为水蒸气压力, kPa ; P_{qb} 为饱和湿空气的水蒸气压力, kPa 。

3) 含湿量

在物料干燥、冷却塔蒸发冷却等过程中,均利用空气来吸收水分。而无论湿空气的状态如何变化,其中干空气的质量不变,仅水蒸气的质量改变。因此,常采用干空气质量作为计算基准。故含湿量是湿空气中单位质量干空气所含有的水蒸气的质量。

$$d = 1000 \times \frac{m_s}{m_w} \quad (3)$$

式中: d 为含湿量, $\text{g}/\text{kg}_\text{干}$; m_s 为湿空气中水蒸气的质量, kg ; m_w 为湿空气中干空气的质量, kg 。

4) 露点温度

露点温度指在一定大气压下,将空气进行冷却,当温度下降时,水蒸气从未饱和状态逐渐达到饱和,并凝结形成露珠所对应的温度,即湿空气中水蒸气分压力相对应的饱和温度。

露点温度值可用来表示空气的湿度情况。因为当空气温度高于露点温度越多时,表明空气中的水蒸气距离饱和状态越远。

露点温度对锅炉等设备的设计及运行有重要意义,如烟气管路内壁温低于烟气的露点温度,则其中的水蒸气会凝结,并附着烟气中的颗粒物及 NO_x 和 SO_x 等,形成灰堵和腐蚀。

2 湿度的测量

常见的湿度测量方法有动态法(双压法、双温法、分流法)、静态法、露点法、干湿球法和电子式传感器法等^[5-7]。与测量温度、压力等热工参数相同,测量湿度时,首先要确定测量范围、测量精度等。

2.1 普通干湿球湿度计

普通干湿球温度计是最常见的湿度计,由一对并列装置、完全相同的温度计组成。其中一支温度计为干燥状态,以测量干球温度;另一支温度计感温包外包覆浸透蒸馏水的脱脂纱布,以测量湿球温度。干、湿球温度值相差越多,说明空气越干燥。

普通干湿球温度计在测量时,需要分别读出干球、湿球温度,查表或计算获得相对湿度,测量过程需要人工,且非常麻烦,不能满足自动化要求。

2.2 电子湿度计

电子湿度计是一种能够准确检测待测环境中的湿度变化的装置,种类很多,但其工作原理均是将待测环境中水分含量及其变化转换成相应的电信号输出,如电阻式、电容式、光学式和声表面波式等。主要部件为湿度敏感检测元件和转换元件两部分。在大多数情况下,为了检测准确和便于观察,通常还设置温度补偿装置以及数字化显示屏。

3 实验设计

通过项目探究式实验教学过程,布置学生课前自学湿度计的原理、结构、检测电路、信号转换等,并总结其优缺点。再根据能源动力测控技术实验室现有湿度计检测与校准实验项目中有的部件和按实验指导书开展实验实践^[8-10]。

目前电阻式与电容式湿度传感器具有检测方式简单、精度较高、技术成熟等优点,仍是湿度传感器的主流,但也存在一定的缺点,如低湿度条件下测量精度差等。因此,寻找新型敏感材料已经成为传感器发展的重要方向之一,而且新材料、新技术与新工艺的交叉融合促进湿度检测的发展。

3.1 湿敏材料选择

3.1.1 电子湿度计的测量要求

1) 具有较大的湿度量程,表明具有广泛的适用范围。

2) 具有高精度,具体要求,如表1所示。

表 1 湿度计精度要求

干球温度/℃	湿度/%	精度
0~40	0~90	±3%以上
	90~100	±5%以上
-40~0	0~90	±5%以上
40~60	90~100	±7%以上

3) 使用寿命周期内精度下降应小于 $\pm 0.05\%$ RH/y。

4) 在湿度量程范围内应具有较好的线性度。

3.1.2 湿敏材料选择

近年,随着高分子材料逐渐与半导体工艺相结合,此类材料具有成本造价低、制造简单、灵敏度较好等特点,因此高分子湿度传感器成为研究热点。对比各种高分子湿敏材料,参考浙江大学研制的高分子纳米复合气湿敏材料,制备了具有双层结构的交联季铵化聚(4-乙烯基吡啶)(QC-P4VP)/PANI 和 QC-P4VP/RGO 复合湿敏元件^[11]。湿敏元件特性如下。

1) 阻抗在湿度范围 22%~97%RH 内变化约 3 个数量级,阻值从 107 Ω 下降到 104 Ω ,在湿度测量范围内整体呈现出高灵敏度。

2) 在中低湿度范围内,湿敏材料随着湿度的增加,阻抗呈现出较好的线性度,只有在大于 90%RH 时,阻抗的变化稍有减弱,但呈现的线性度相比于其他高分子湿敏材料在高湿度环境下更好。

3) 通过该材料所制备的湿敏膜呈现出仅有 1% 相对湿度的滞后,湿滞性相比于其他湿敏材料小很多,具有高精度湿度检测。

4) 在 15 $^{\circ}\text{C}$ ~32 $^{\circ}\text{C}$, 温度漂移大概是 -0.36% ~ -0.53% RH/ $^{\circ}\text{C}$, 高于普通湿度传感器(温度漂移大约为 -0.6% RH/ $^{\circ}\text{C}$)。

3.2 湿度计设计

3.2.1 电极基片设计

选择工艺成熟且应用广泛的叉指形结构作为传感器电极。考虑到大多数电极基片不仅薄而且指间距很小,需要材料具有良好的延展性使其加工及设计更为精确与便捷。此外,电极基片材料必须要保证不与湿敏材料发生反应,不能影响传感器使用寿命和测量精度,所以选取金属铂作为电极基片材料。如图 1 所示,为控制湿敏电阻的大小,设计其宽度为 10.0 mm、长度为 13.5 mm、指间距为 1.0 mm。

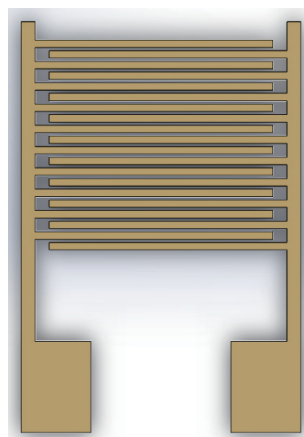


图 1 湿度计电极基片

3.2.2 电极基片基底设计

基底的主要作用是将湿敏材料电阻产生的热量散失,保证湿敏材料不会升温而产生过大的误差。目前基底的主流材料有玻璃、硅与石英 3 种,而石英价格过高,玻璃在电极基底制作上发现不能牢固固定,故选取具有二氧化硅层的硅片作为电极基底材料。既保留良好的传输热量的能力,又克服硅自身绝缘性差的缺点。如图 2 所示,硅层厚度为 1.0 mm,二氧化硅层厚度为 1.0 mm。

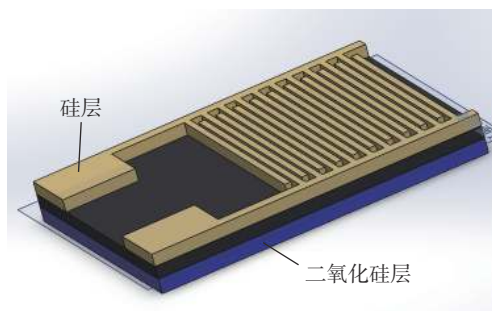


图 2 电极基片及基底

3.2.3 湿敏材料涂层

将湿敏材料均匀地涂抹于电极基片上,待其固化形成一定厚度的湿度敏感膜,厚度为 1.0 mm。

3.2.4 空气过滤膜

为保证湿敏材料不受污染,需要在外壳上贴上空气过滤膜,过滤空气中大部分尘埃颗粒以及其他杂质。

选择聚偏二氟乙烯微孔滤膜作为空气过滤膜,具有优良的耐腐蚀性,微孔分布均匀,且因其孔隙率较大能够保证空气自然的流通,同时过滤空气中大部分杂质颗粒。

3.2.5 湿度计外壳

为保证湿敏芯片的稳定性及耐久性,需要将

其封装以免湿敏膜受物理破坏, 但又要保证其与待测空气充分接触, 所以在外壳顶部四周均匀分布小孔, 保证与空气的接触。

首先在外壳整体尺寸方面, 为契合湿敏电阻的大小以及保证其结构紧凑, 设计外壳长度 15.5 mm, 宽度 12.0 mm, 高度 5.5 mm。

在外壳顶部中间开 3 列 5 排 1.0 mm×1.0 mm 的小孔, 左右与上下间距均为 1.0 mm; 两侧开深度 1.5 mm, 2.5 mm×1.0 mm 的方孔, 如图 3 所示。

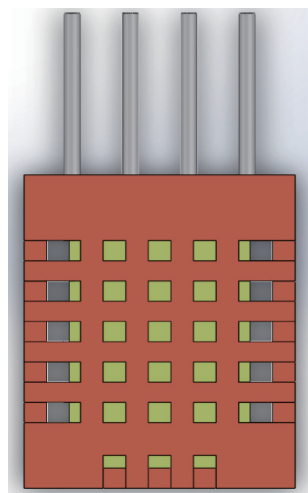


图 3 外壳顶部设计

在外壳的底部设计上, 必须要保证湿敏电阻充分的散热, 防止温升导致的精度降低, 所以确定在底部开 2 条 1.0 mm×13.5 mm 缝隙保证散热, 如图 4 所示。

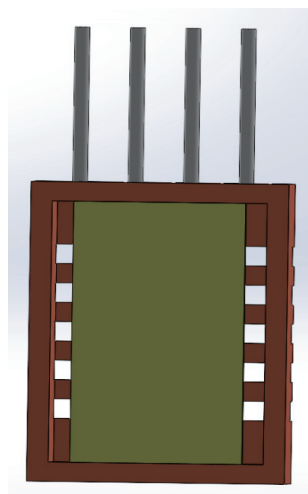


图 4 外壳底部设计

外壳材料选用聚苯硫醚(PPS), 综合性能优异, 不仅有良好的物理机械加工性能与良好的尺寸稳定性, 而且机械强度高、耐高温, 很大程度上保证湿敏芯片的安全。

3.2.6 电路设计

如图 5 所示, 电路主要分为 3 个部分, 分别为直流电源部分、测量部分和直流电压信号输出部分。直流电源部分为湿度计提供 +5V 直流电源。测量部分由湿敏电阻、可变电阻组成增益调节器与差分式放大电路, 并经过线性化的处理, 湿敏电阻分得的电压在 0~3 V 范围内与相对湿度呈线性关系。直流电压信号输出部分则数字电压表检测电路, 实时查看湿度计显示电压值的大小, 直流电压 0~3 V 与相对湿度 0~100% 成近似线性关系^[12]。

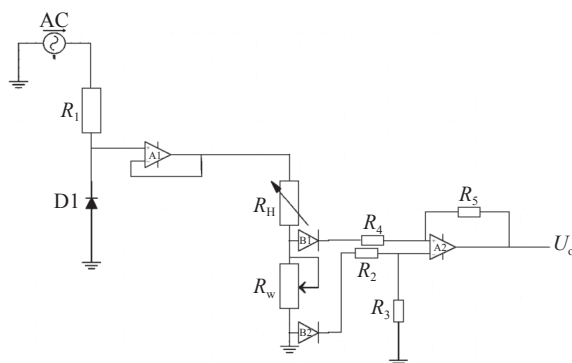


图 5 新型湿度计电路图

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

将新设计并组装好的湿度计放置在恒温恒湿箱中, 并设置不同相对湿度对温度计检测进行校验。表 2 为恒温恒湿箱内的湿度以及数字电压表的电压读数, 所得相对湿度与湿度计电压值的关系如图 6 所示。

表 2 实验数据记录

相对湿度/%	30	40	50	60	70	80
电压/V	1.64	1.67	1.88	2.28	2.46	2.78

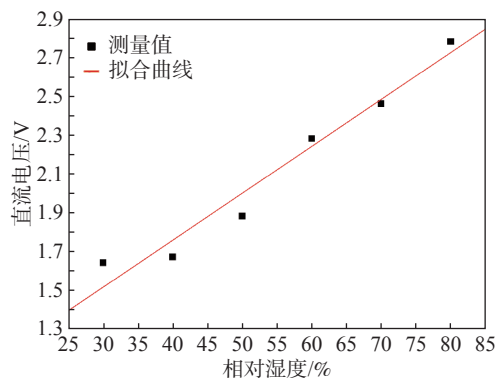


图 6 输出电压与相对湿度的关系

4.2 数据分析

将实验数据进行线性拟合, 电压值与相对湿度的拟合方程为:

$$U = 0.0242 RH + 0.7873 \quad (4)$$

而理论上, 所设计制作的湿度计的电压值应随相对湿度呈线性关系, 即关联式为:

$$U = 0.03 RH \quad (5)$$

理论关系式与实验拟合方程式相比, 比例因子发生较大的变化, 即随着相对湿度的逐渐增加, 理论的电压增加量大于实际的电压增加量, 而电压的增加量的多少是电阻值变化的表现, 所以理论的湿度传感器的湿敏电阻随着湿度的增加, 电阻值增加大于实际湿敏电阻, 故理论的湿敏电阻对于高湿度的变化更加敏感。

4.3 误差分析

在理想情况下, 实际输出的电压与相对湿度之间应为线性关系, 而目前比例因子发生变化一定是由各种原因造成的, 主要原因分析有以下两种。

1) 湿敏元件的自然老化。由于高分子式湿敏电阻寿命较短, 湿敏电阻老化严重直接导致湿敏电阻初始阻值增加。该湿度传感器所使用的湿敏材料为高分子式湿敏材料, 而此类湿敏材料在高相对湿度下容易发生冲蚀, 在实验操作过程中, 反复使用的湿度传感器长期处于高相对湿度环境中, 加速了仪器的老化。

2) 空气过滤膜的老化。空气过滤膜的老化使得空气中的杂质颗粒吸附到湿度敏感膜表面, 造成湿敏元件污染, 影响传感器灵敏性。

5 结束语

实验中所设计、搭建的湿度计测量系统测量范围大、精度高、灵敏度好, 传感器电路设计简

单。学生可以进行课堂读图、接线、检验和测量校准, 直接反馈测量电压值, 提高了学生对湿度概念、检测原理、测量电路、非电量电测技术与二次仪表等综合知识的掌握, 培养了创新、研究与实验等综合能力。

参考文献

- [1] 黄素逸. 动力工程现代测试技术[M]. 武汉: 华中科技大学, 2001.
- [2] 齐振宇, 吴正辉, 洪之奇, 等. 科研温室植物补光系统的设计与应用[J]. 实验科学与技术, 2021, 19(3): 22-27.
- [3] 李洁. 热工测量及控制[M]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [4] 王彦昭, 周宇, 刘国栋, 等. 利用电容微小变化测量空气相对湿度[J]. 大学物理, 2018, 37(6): 66-69.
- [5] 宋江明, 刘心蕊, 张铭朗, 等. 基于STM32的温湿度检测系统设计及实现[J]. 机电工程技术, 2020, 49(7): 158-159.
- [6] 张冬至, 王东岳, 张勇, 等. 基于LabVIEW的石墨烯复合薄膜湿度检测装置开发[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(12): 39-42.
- [7] 余振养. 基于Packet Tracer的温湿度传感器的实训设计[J]. 现代信息科技, 2020, 4(20): 166-168.
- [8] 王向玲. Proteus模拟温室温湿度控制系统的实践教学[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(1): 120-124.
- [9] 王艺历, 梁晨, 刘欣悦, 等. 湿敏功能材料的制备及应用研究进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 88-96.
- [10] 韩铮, 于明军, 张俊清. 多点无线温湿度采集实训系统的设计[J]. 实验室科学, 2015, 18(5): 63-65.
- [11] 陈友汜. 高分子及其复合湿敏、气敏材料的设计、制备和敏感特性[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [12] 张聪慧. 一种基于惠斯通电桥原理的矿用湿度传感器设计[J]. 煤矿机电, 2020, 41(4): 34-36.

编辑 张莉