

文章编号: 1672-8785(2018)10-0022-07

对射式激光湿度传感系统研究

潘 延¹ 周劲峰¹ 常 洋² 张学健² 李彦林² 张秀昌²

(1. 北京工业大学应用数理学院, 北京 100124;

2. 北京航天易联科技发展有限公司, 北京 100176)

摘 要: 针对传统气体传感器普遍存在的价格昂贵、精度低、放置不方便等缺点, 构建了一套对射式激光湿度分析系统。该系统采用半导体激光器作为光源, 在测量机柜两边分别架设光发送单元和光接收单元, 通过将激光穿过中间的测量部分即可测得该部分的湿度数值。实验结果表明, 这种对射式传感系统标定的决定系数 R^2 为 0.9976; 3 m 光程下的湿度含量与理论值的复测误差分别为 0.82%、0.46%、0.44%、0.42%; 待仪器稳定后的 40 min 测试中, 实测放置柜内湿度含量的范围波动最大为 30, 样本总体标准差值为 7.88, 平均相对误差为 0.4%。

关键词: 湿度传感器; 激光吸收光谱; 光电检测; 对射式

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.10.004

Research on Opposite-type Laser Humidity Sensing System

PAN Yan¹, ZHOU Jin-feng¹, CHANG Yang², ZHANG Xue-jian², LI Yan-lin², ZHANG Xiu-chang²

(1. College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Aerospace Yilian Science & Technology Development Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: To overcome the shortcomings of high cost, low precision and inconvenient placement of traditional gas sensors, a set of opposite laser humidity sensing system is constructed. The system uses a semiconductor laser as a light source. A light transmitting unit and a light receiving unit are respectively arranged on both sides of a measuring cabinet. When a laser beam passes through the measuring portion in the middle of the measuring cabinet, the humidity value of the portion can be measured. The experimental results show that the calibration coefficient R^2 of the opposite sensing system is 0.9976. The retesting errors of the humidity content and the theoretical calculation value in the three-meter optical path are 0.82%, 0.46%, 0.44%, and 0.42% respectively. Within the 40-minute test after the instrument stabilizes, the humidity content range in the actual test cabinet is fluctuated to a maximum of 30. The standard deviation is 7.88 and the relative error is 0.4%.

Key words: humidity sensor; laser absorption spectroscopy; optoelectronic detection; opposite-type

收稿日期: 2018-07-28

作者简介: 潘延(1993-), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。

E-mail: log_horizon@emails.bjut.edu.cn

0 引言

湿敏电容法是目前主流的湿度测量方法, 其核心部件需要和空气中的水汽接触之后才能进行测量。所以在测量某一密闭空间或者外部箱体不便打开的空间的湿度时, 传统方法会给人们的生产和生活带来极大不便, 而且该方法在低温高湿条件下还存在测量精度降低、响应时间慢等问题^[1]。因此, 通过研发一套对射式激光湿度传感系统, 可实现对内部湿度的非接触式测量, 并可提高湿度测量的精度、响应时间和重复性等^[1-2]。

1 工作原理

1.1 TDLAS 技术的原理

在光电检测中, 当一束光穿过特定的材料或介质时, 该光束会被材料部分吸收, 从而导致其光强衰减^[3]。通过对所得的气体光谱信息进行分析, 可以算出相应气体的浓度值。这就是所谓的可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术^[4-5]。该技术可由比尔-朗伯定律描述, 其关系式为

$$I_t = I_0 \exp[-\alpha(T)\varphi p x L] \quad (1)$$

式中, I_0 和 I_t 分别为初始光强和吸收后的光强; $\alpha(T)$ 为待测气体的吸收谱线强度; φ 为该气体吸收线型函数的幅值; x 为激光吸收单位体积气体的分子数目, 即被测气体浓度, 其单位为 mol/L; L 为光程, 其单位为 cm; p 为气室所处环境的气体压强, 其单位为 atm。

将 $\ln(I_t/I_0)$ 定义为吸光度函数。利用经探测得到的吸光度函数对算法进行控制。当吸光度函数值大于该设定阈值时, 采用直接扣除法; 当吸光度函数值小于该设定阈值时, 采用二次谐波提取法。如果吸光度函数值与该设定阈值相等, 那么周围环境的变化都会使得算法产生切换。在实验以及后期使用中, 以上两种算法实现了自动切换^[6-7]。

1.2 温度修正原理

在标定和测量时, 传感气室所处环境或激

光通过环境的温度将会对各能级粒子的分布产生影响, 进而影响特征吸收峰的吸收系数, 最终使得检测结果产生误差。因此, 必须对环境温度因素的影响进行修正^[2-3]。图 1 所示为温度修正矩阵。

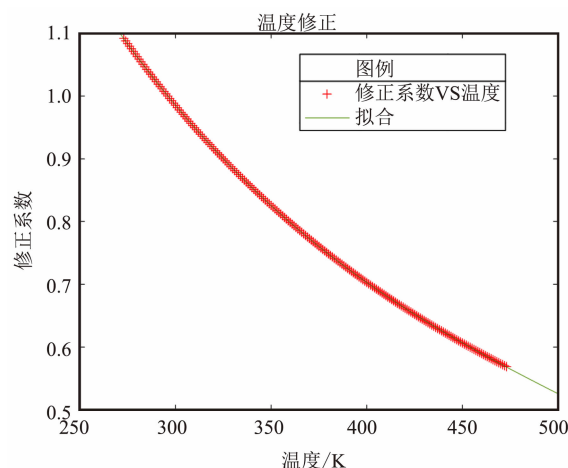


图 1 温度修正矩阵(部分)

2 系统设计

2.1 整体设计

所谓对射式装置, 就是在待测机柜两旁分别放置一个光发射单元和一个光接收单元。由激光器发出的波长为 $1.37 \mu\text{m}$ 的激光从上位机中输出。该路光信号经光纤传递至光发射单元^[4], 通过准直器后进入待测机柜中, 然后从另一端进入光接收单元。光接收单元内置有一个光电二极管, 它可将该路经过水汽吸收的光学信号转换为电信号, 并通过 SMA 线连接至上位机。经过一系列的电信号处理后, 在上位机上输出该机柜内部的相对湿度、湿度含量(即 ppmV)和温度等数值。其中, 温度探测使用 PT100 铂热电阻。图 2 为对射式激光湿度传感系统的示意图。

2.2 主机标定

仪器研发和标定等工作均在北京航天易联科技发展有限公司中进行。使用某双压法湿度发生器生成的相对湿度范围为 25%RH~90%RH, 误差 $\leq 1\%$ 。该环境用于水汽标定的湿度环境生成; 使用某型露点仪作为湿度校准设备, 用于提供相对湿度误差 $\leq 1\%$ RH 的校准。根据

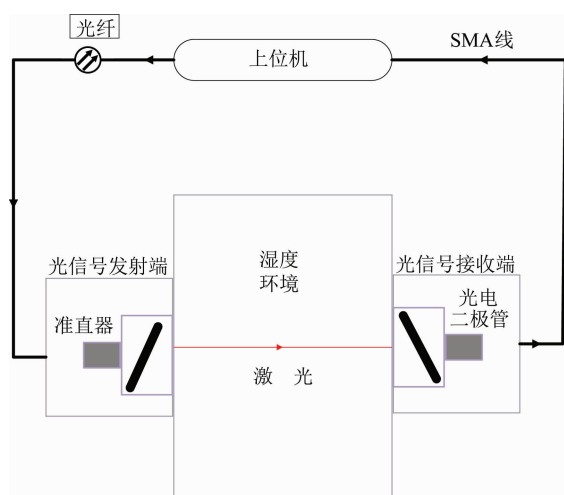


图 2 对射式激光湿度传感系统的示意图

使用需求,选择 23 ℃ 下的 25% RH、50% RH、80% RH 和 90% RH 条件进行水汽标定工作。标定时,准直器已经集成在光纤与气室的连接处,光电二极管集成在气室末端。信号直接在气室末端被转换为电信号,并通过 SMA 线传输至电路模块,经数据处理后被采集。图 3 所示为湿度标定曲线。其中,横轴为吸光度函数,其表达式为 $\text{ratio} = \ln(I_0/I_t)$,该单位无量纲;纵轴为湿度含量的计算值,该值是一个比例值,由露点仪读取的湿度含量数值(即 ppmV)换算而来,因此也无量纲。从标定效果来看,该曲线的决定系数 $R^2 = 0.9976$,可以满足使用要求。

2.3 长度补偿

由于实际使用环境中的光程较长,为避免激光探测过程中出现过度吸收情况,需要对系统本身进行长度补偿。补偿后便可在更大的长度范围内进行长度调节以测量湿度。选取 0.8 m、2.4 m、4 m 和 8 m 对长度补偿系数进行标定。图 4 所示为测出的长度补偿算法。其中,决定系数 $R^2 = 0.9992$,满足可使用的要求。

至此,这种对射式激光湿度传感系统的标定工作全部完成。

3 实验数据及分析

3.1 3 m 光程对射测试

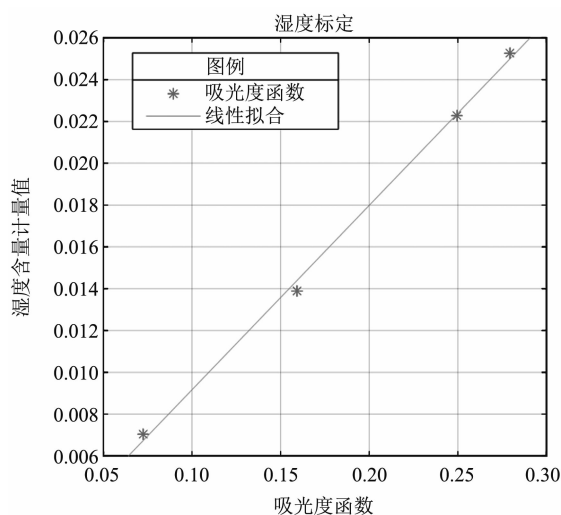


图 3 常温标定曲线

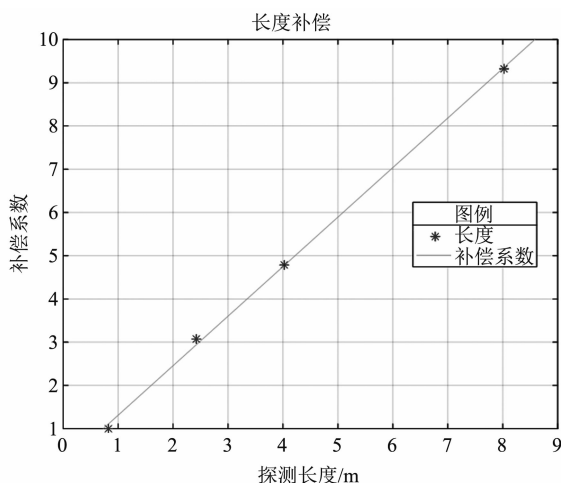


图 4 长度补偿矩阵

标定完成后,对这种对射式系统进行 3 m 光程测试实验。具体方法如下:将发射端和接收端的探头放置于环境两旁,中间间隔 3 m;中间使用实验装置营造出湿度环境氛围。采用上位机软件收集数据。测试时,每个湿度点要稳定 20 min。通过吸收曲线形状以及湿度含量测量值的误差大小来判定其测试情况^[6-7]。图 5 所示为 3 m 光程的测试实验结果。其中,横轴为电流扫描范围,该值表示电流在某一范围内的取点数量,因此无量纲;纵轴为光电二极管探测到的光强转换数值,该值仅仅作为光照强度的表征,因此也无量纲。表 1 列出了 3 m 光程复测数据。

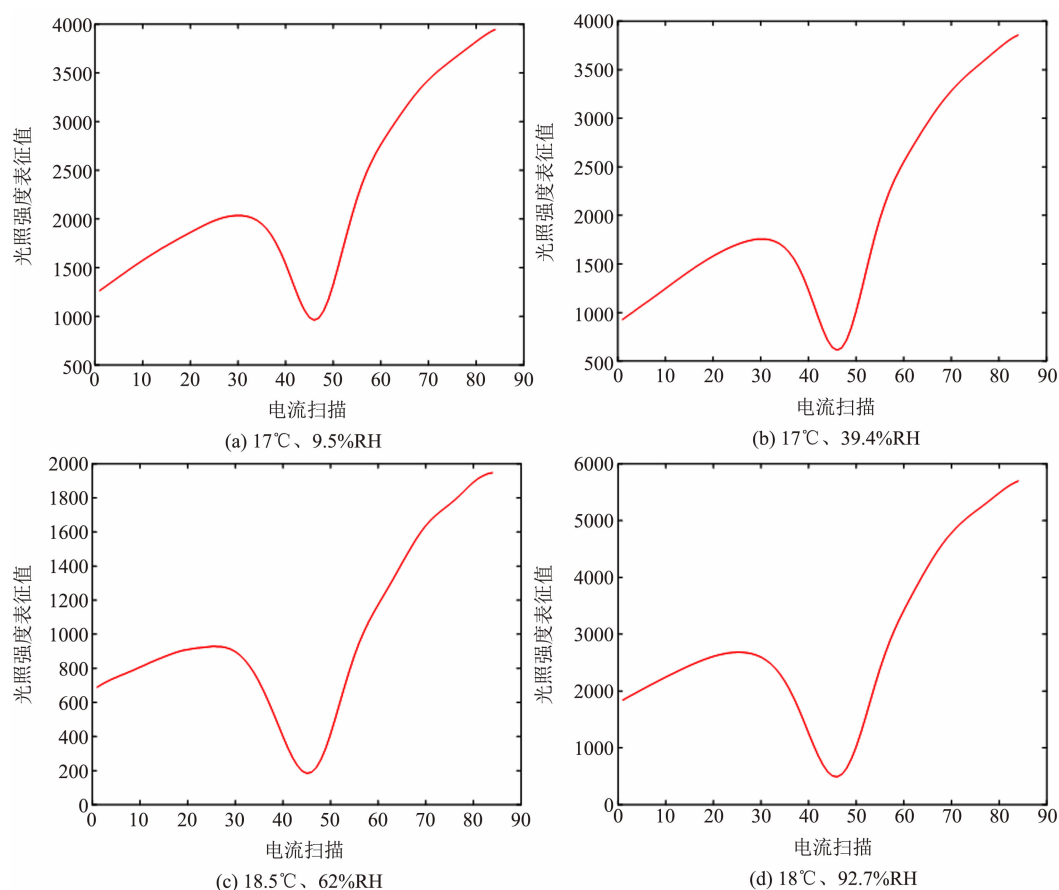


图 5 3 m 光程复测吸收曲线

表 1 3 m 光程复测数据统计

测试环境 项目	17 °C ; 9.5%RH	17 °C ; 39.4%RH	18.5 °C ; 62%RH	18 °C ; 92.7%RH
测试含量	1811	7650	13240	19268
理论含量	1826	7685	13298.3	19310
误差数值	15	35	58.3	42
相对误差	0.82%	0.46%	0.44%	0.22%

3.2 机柜对射测试

在长度为 3.03 m 的机柜一旁放置发射端探头, 在入射探头端使用红光笔校准对射光路。光路校准完成后, 在对侧的相应位置上安装接收端探头。安装完成后即可开始测试。其中, 初始温度为 10 °C, 初始相对湿度为 52% RH, 理论湿度含量为 6363。

图 6 所示为实验结果。其中, 横轴为数据点数, 纵轴为机柜内部的湿度含量。试验中, 设备 6 min 稳定后, 持续测试近 40 min, 其中

上位机每 2 s 读取一组数据。

从图 6 中可以看出, 6 min 稳定后, 机柜内部的湿度含量变化范围在 6340 ~ 6370 之间, 其平均值为 6355.6, 极差为 30, 样本总体标准差值为 7.88; 平均温度为 8.62 °C; 平均相对湿度为 57.22% RH, 其理论值为 6380.7, 测量值与理论值的相对误差为 0.4%。由此可见, 测量结果稳定, 对射式激光湿度传感系统的测量性能稳定, 符合使用条件。同时也可看出, 该机柜的保温保湿能力较强, 且在

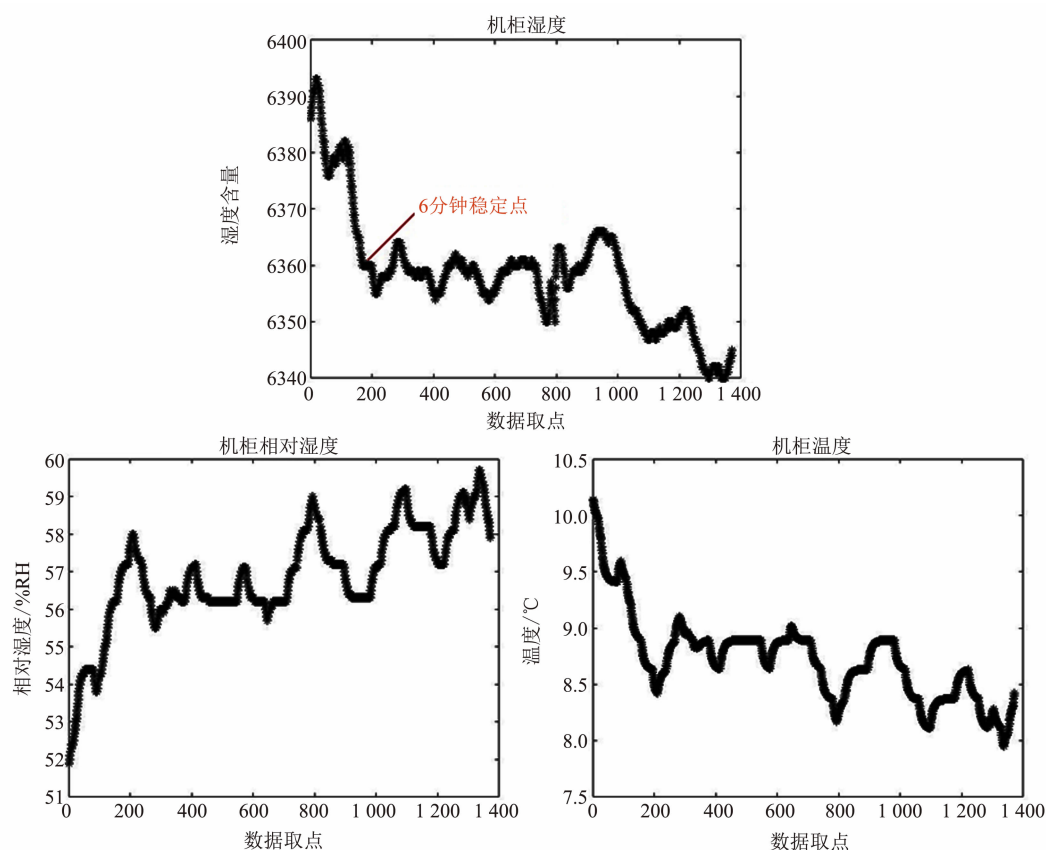


图 6 机柜测试

实验持续时间内受到周围人流和呼吸的影响较小。

4 结论

(1) 基于 TDLAS 技术的湿度测量方法效果较好, 其标定曲线的决定系数 $R^2 = 0.9976$, 且吸收曲线稳定。

(2) 实现了对射式结构测量, 无需改变机柜内部; 集成了温度修正和长度补偿算法, 可测量较为稳定的密闭环境。

(3) 四组 3 m 光程测试的误差分别为 0.82%、0.46%、0.44%、0.42%; 吸收曲线正常, 虽然光程较长, 但未发现过度吸收现象。

(4) 在仪器 6 min 稳定后进行的近 40 min 测量中, 仪器波动较小, 极差为 30, 样本标准差值为 7.88; 测量值与理论值的相对误差为 0.4%。

(5) 这种对射式湿度传感系统不仅可以应用在机柜中, 而且还可适用于空旷环境中的湿度测量。不过, 该系统也有一定的局限性。当测试机柜的四周不透光时, 这种对射式湿度传感系统便无法实现。在采用长度补偿算法时, 取点数量较少; 在光程较长时, 测量精度略显不足。由于该机柜中的环境相对简单, 只对这种系统进行了直线标定。但是如果测量环境的工况较为复杂, 那么该系统的测量精度会降低。由于该结构为对射式, 需要开展细致的光路校准工作, 否则便会导致信号接收端的光电二极管无法接收到经过吸收的光信号。

参考文献

- [1] 贾渠, 李彦林, 常洋, 等. TDLAS 湿度传感器与维萨拉湿度传感器性能对比研究 [J]. 科技创新导报, 2015, 12(7): 30-32.

(下转第 39 页)