

# 一种高灵敏度快速 CO<sub>2</sub> /水汽分析仪设计\*

张 静, 刘建国, 赵 欣, 桂华侨, 陆亦怀, 田勇志

(1. 中国科学院 环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;  
2. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所 环境光学中心, 安徽 合肥 230031)

**摘 要:** CO<sub>2</sub> 和水汽通量是全球碳循环和水循环的重要特征参数, 而碳水通量测量难点在于需要精度高、频率响应快的气体传感器。基于 DSP 与 CPLD 作为核心控制与处理模块, 设计了一种非分光红外 CO<sub>2</sub> /水汽分析仪。通过与标准气体对比, CO<sub>2</sub> 相对偏差为 1.638 mg/m<sup>3</sup>, 精度可达到 1 × 10<sup>-6</sup>; 水汽相对偏差为 5.39 mg/m<sup>3</sup>, 精度可达 10 × 10<sup>-6</sup>。同时, 与商业仪器进行了对比测量实验, 气体浓度值基本一致, 结果表明: 该仪器能够准确测定 CO<sub>2</sub> 水汽浓度。

**关键词:** 涡度相关技术; CO<sub>2</sub> /水汽分析仪; 数字信号处理器; 复杂可编程逻辑器件

**中图分类号:** TP274      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-9787(2013)04-0121-04

## Design of a high sensitivity fast response CO<sub>2</sub> /water vapor analyzer\*

ZHANG Jing, LIU Jian-guo, ZHAO Xin, GUI Hua-qiao, LU Yi-huai, TIAN Yong-zhi

(1. Key Laboratory of Environment Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;  
2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** CO<sub>2</sub> and water vapor flux is an important characteristic parameters of global carbon cycle and water cycle. The difficulty of measuring CO<sub>2</sub> and water vapor flux is the need of high precision, fast frequency response gas sensor. A non-dispersive infrared CO<sub>2</sub> /water vapor analyzer, based on DSP and CPLD as the core control and processing module, is developed. Compared with standard gas, relative deviation of CO<sub>2</sub> is 1.638 mg/m<sup>3</sup>, the precision can reach 1 × 10<sup>-6</sup>; relative deviation of water vapor is 5.39 mg/m<sup>3</sup>, the precision can reach 10 × 10<sup>-6</sup>. By comparative experiment, the concentration is consistent with commercial instruments. The result shows that the CO<sub>2</sub> /water vapor analyzer can accurately measure CO<sub>2</sub> and water vapor concentration.

**Key words:** eddy covariance technique; CO<sub>2</sub> /water vapor analyzer; DSP; CPLD

### 0 引 言

地表湍流是近地层大气运动的一个重要物理特征, 湍流输送是地面和大气间进行热量、动量和水汽交换的主要方式。测量湍流输送有很多方法, 例如: 箱法、梯度法、能量平衡法、涡度相关法等<sup>[1]</sup>。涡度相关法作为目前世界热水通量交换测量推荐的标准方法, 应用最为广泛。它是通过测定和计算物理量(如温度、CO<sub>2</sub>、水汽等)的脉动与垂直风速脉动的协方差求算湍流输送量(湍流通量)。该技术需要高精度、频率响应能力极快的湍流脉动测量装置<sup>[2]</sup>。

目前, 气体浓度的快速检测技术、检测方法根据被测气体性质、实际检测条件、检测精度的差别而有所不同, 大多数 CO<sub>2</sub> 检测仪都只适合高浓度 CO<sub>2</sub> 气体的检测, 而环境中 CO<sub>2</sub> 气体在本底值上的脉动非常小, 很多检测方法的精度

无法满足脉动值测量。本文研究的开路式 CO<sub>2</sub> /水汽分析仪测量光路完全暴露在空气中, 开路式的设计能够使空气动力学干扰达到最小, 并且可以用 10 Hz 以上的频率测定空气中的 CO<sub>2</sub> /水汽的密度脉动, 在其原理上符合涡度相关法的技术要求, 并且不用进行气体预处理, 可直接进行在线自动连续监测, 灵敏度高、能够适应各种检测环境。

### 1 系统总体设计

开路式 CO<sub>2</sub> /水汽分析仪是以非分光红外吸收原理为基础的一种光机电测量系统, 光学系统框图如图 1。分析仪光学系统的工作原理是, 红外光源出射的红外光经过斩波轮上的窄带滤波片, 其中, 斩波轮由直流无刷电机带动, 斩波轮上装有 4 个窄带滤光片, 它们相隔 90° 均匀分布, 滤光片中心波长是 CO<sub>2</sub> 和水汽的吸收波长(4.26 μm 和 2.59 μm)

收稿日期: 2012-10-22

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60908035); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ CX2-EW-N07)

以及对目标气体都不吸收的参考波长(3.95  $\mu\text{m}$ )。由高速旋转斩波轮的滤光片顺次横切光路,通过第一个透镜准直后,光束进入开放的大气路径,此时出射光被目标气体分子吸收,剩余部分继续按照原方向传播。根据比尔-朗伯定律,通过待测气体后的光信号强度会衰减,而衰减程度与待测气体浓度有关。因此,探测器顺次测定出辐射强度,然后计算吸收波长与参考波长透过辐射强度之比,即透射率,最后计算出吸收率。将所得值代入浓度与吸收率的关系式,即可得到  $\text{CO}_2$  和水汽气体浓度。

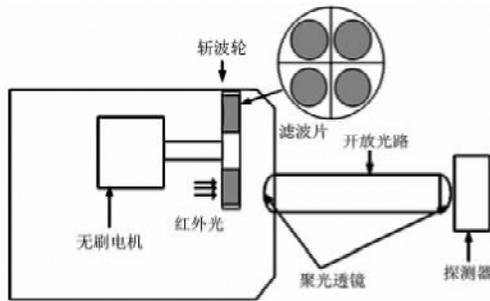


图 1  $\text{CO}_2$ /水汽分析仪光学系统框图

图 1 Optical system block diagram of  $\text{CO}_2$ /water vapor analyzer

## 2 系统硬件设计

本系统充分利用了 DSP 的高速处理<sup>[3]</sup>与 CPLD 时序逻辑控制<sup>[4]</sup>的优点以协同控制处理模块。系统硬件框图如图 2 所示。通过 CPLD 时序控制前端调理模块进行信号采集,同时将采集到的数据经 DSP 和 CPLD 协同处理,将处理后的结果通过串口通信传至 PC 机。

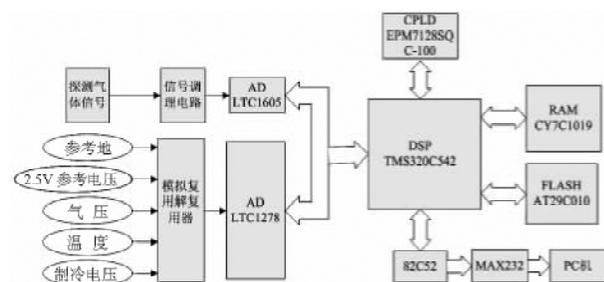


图 2 系统硬件框图

Fig 2 Block diagram of system hardware

### 2.1 前端调理模块

前端调理模块主要包括信号调理电路和 A/D 转换模块。信号调理电路主要是红外探测器探测到的微弱气体信号经过前置放大和二级滤波放大电路,再经过 12 bit 分解乘以 A/D 转换器实现所需要的归一化信号,最后经过四阶巴特沃斯低通滤波电路,得到稳定的气体信号。

本系统中采用了 2 个并行的 A/D 转换芯片。LTC1605<sup>[5]</sup>是 TI 公司生产的高速、低功耗、精密基准的 16 bit A/D 转换器,主要用于探测气体信号的采集;LTC1278<sup>[6]</sup>是 Linear 公司生产的单 5V 电源供电 12 bit A/D 转换器,主要采集用于  $\text{CO}_2$ /水汽分析仪标定校准<sup>[7]</sup>用的辅助测量量,包括温度、气压、2.5 V 参考电压、参考地(GND)、

制冷电压等。这些辅助测量量通过模拟复用解复用器选通某一路输出至 LTC1278。

### 2.2 DSP 与 CPLD 协同处理模块

DSP 和 CPLD 协同处理模块是本系统的核心,其主要完成对多路 AD 采集信号的切换控制、数据的计算、以及相应的逻辑和时序控制。系统设计中,采用 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320C542 和 ALTERA 公司的 CPLD 芯片 EPM7128SQ C100-10。

TMS320C542 数字信号处理器是美国 TI 公司推出的低功耗、高性能的 16 位定点数字信号处理器,最高主频达 100 MHz,内部采用先进的改进型哈佛结构,片内集成 1 条程序存储器总线和 3 条数据存储器总线的增强型多总线结构。其采用 5V 电源供电,由外部电路提供电源和时钟信号,可以直接与外部 A/D 转换、CPLD、串口通信模块连接,避免了 2 个器件接口电路电压不一致的电平转换的问题,缩减了电路的复杂性。

EPM7128SQ C100-10 是由 ALTERA 公司推出的 MAX7000 系列高性能的可编程逻辑芯片,开发环境是 Quartus II,设计采用硬件编程语言 VHDL。本系统中 CPLD 的时钟信号是由 DSP 的时钟输出 CLKOUT 提供。CPLD 在 DSP 中的控制功能框图如图 3 所示。CPLD 主要完成以下控制模块:

时钟频率模块:时钟输入由 DSP 的时钟输出 40MHz 提供,经分频转换为适合系统各模块所需的时钟。包括 DSP 的看门狗信号、标准的电机斩波信号、帕尔贴恒温控制设置的 PWM 信号。整个系统运行过程中,要始终保持时序的同步。

Convert 信号模块:设计要求 AD 每秒采集数据 152 次,保证每次都从同一个位置开始采集,并保证连续、实时,因此需要电机的转速高达 9000 rpm。斩波轮上平均分布的有 127 个缺槽(126 个小的,1 个大的)。当电机带动斩波轮上的滤光片转动转到大的缺槽时,即产生复位信号,此信号取反引发 DSP 中断,触发 AD 采集数据。

多路 AD 采集切换模块:系统中要求采集气体信号和用于计算气体浓度的辅助测量量。这些信号需要 CPLD 时序控制选通依次输出。

82C52、外部 RAM、FLASH 的片选( $\overline{\text{CE}}$ )、读( $\overline{\text{OE}}$ )写( $\overline{\text{WE}}$ )控制信号:利用 CPLD 丰富的逻辑电路单元,把有限的 DSP 读、写控制信号和高位地址信号进行逻辑运算,产生对不同模块的不同片选信号,从而避免了控制和地址总线的冲突。

### 3 系统软件实现

本系统 DSP 集成开发环境采用 CCS 3.3,软件设计主要包括系统的初始化和数据的采集、处理、分析和发送,系统软件流程图如图 4 所示。主程序启动后,首先对 DSP 系统初始化和各寄存器设置,82C52 初始化。当光耦探测器探测到电机带动的斩波轮上大的缺槽信号时,即产生 RE-

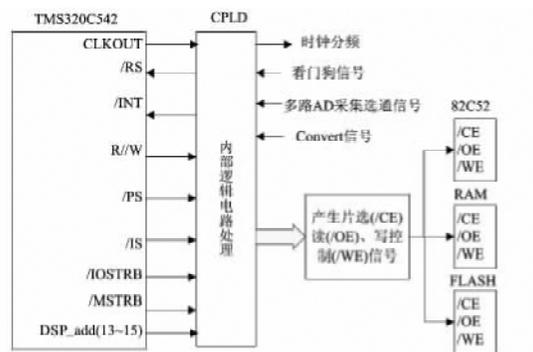


图 3 CPLD 功能框图

Fig 3 Functional block diagram of CPLD

SET 信号。当电机带动相应的滤光片顺次转到光路上时,根据 CPLD 时序逻辑控制,即产生 Convert 信号的高电平,取反引发 DSP 的 int 3 中断,开始温度、气压、制冷电压等的采集。通过滤光片的气体信号的采集。对采集到的信号进行处理,并根据标定系数拟合出的多项式计算气体浓度,并上传至 PC 机。

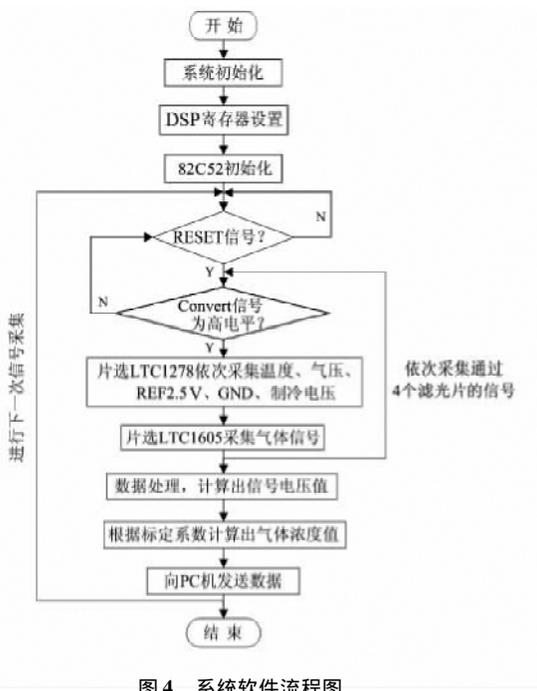


图 4 系统软件流程图

Fig 4 Flow chart of system software

#### 4 实验结果分析

##### 4.1 信号采集

如图 5 所示, B 为光耦探测器探测到的电机带动的斩波轮上的狭缝信号。当电机转到大的缺槽时,产生一个 RESET 信号,这样可以保证 AD 每次都从此位置开始采集信号。A 为气体经过光路吸收后得到的原始信号。其中,第一个方波为光源通过 CO<sub>2</sub> 滤光片经过吸收后探测器探测到的信号,第二个方波为光源通过水汽滤光片经过吸收后探测到的信号,第三个、第四个方波为光源经过参考滤光片后探测器探测到的信号。如此循环探测。图中可以看出经过 CO<sub>2</sub> 滤光片和水汽滤光片后的信号与参考信号有明显的

差异,正是利用该差异来获取目标气体浓度值。

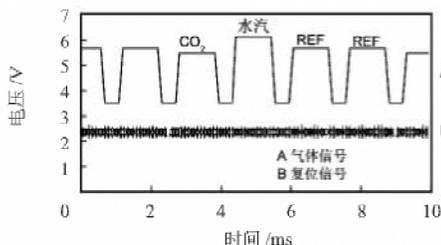


图 5 采集的原始信号

Fig 5 Acquired original signal

##### 4.2 数据处理与分析

由于 AD 采集到的气体信号是电压信号,电压信号与光强信号呈比例关系,因此,吸光度可以用采集的电压值的比值来获取。测量中气体信号受温度、压强、气体间相互干扰、零点漂移的影响,需要对朗伯-比尔定律进行修正,根据数据反演理论,通过多组标准气体的标定,拟合出反映浓度和吸光度关系的多项式函数,因此,通过测量出目标气体吸光度,即可利用函数反演目标气体浓度值。

待系统标定,运行稳定后,选取 196.428 mg/m<sup>3</sup> 浓度的 CO<sub>2</sub> 标准气体,通入标定气管内,待示值稳定后,记录 10 组测量浓度值。然后求其平均值为 194.79 mg/m<sup>3</sup>,相对偏差为 -1.638 mg/m<sup>3</sup>,满足 1 × 10<sup>-6</sup> 的精度;选取 80.36 mg/m<sup>3</sup> 浓度的水汽标准气体,通入标定气管内,待示值稳定后,记录 10 组测量浓度值,然后求其平均值为 85.75 mg/m<sup>3</sup>,相对偏差为 5.39 mg/m<sup>3</sup>,满足 10 × 10<sup>-6</sup> 的精度。

如图 6、图 7 为采用自行研制 CO<sub>2</sub>/水汽分析仪在合肥市科学岛安光所综合实验场做实验测得的 CO<sub>2</sub>、水汽浓度曲线。图 6 中,实点是采用自行研制的 CO<sub>2</sub>/水汽分析仪测得的 CO<sub>2</sub> 浓度曲线,空心点是采用安装在安光所综合实验楼上的美国 TEL 公司测量精度为 1 × 10<sup>-6</sup> 的 TEL-7001 红外 CO<sub>2</sub> 分析仪测得的 CO<sub>2</sub> 浓度曲线。由图知,2 台仪器测得的 CO<sub>2</sub> 浓度曲线基本吻合,表明自行研制的 CO<sub>2</sub>/水汽分析仪能够准确测量 CO<sub>2</sub> 浓度。图 7 中,实点是采用自行研制的 CO<sub>2</sub>/水汽分析仪测得的水汽浓度曲线,空心点是采用 Vaisala 公司生产的测量精度为 ±1% RH 的 HMP-155 温度湿度传感器测得的水汽浓度曲线。由图知,自行研制的分析仪比 HMP-155 每个点都大致多 1 mg/m<sup>3</sup>,可能是由于系统标定原因造成的,但两台仪器测得的水汽浓度曲线趋势基本吻合,表明自行研制的 CO<sub>2</sub>/水汽分析仪能够准确测量水汽气体浓度。

##### 5 结论

本文实现了基于 DSP 与 CPLD 作为核心控制与处理模块的非分光红外 CO<sub>2</sub>/水汽分析仪的设计,该方案简洁、可靠,并可以同时测量 CO<sub>2</sub>、水汽浓度。CO<sub>2</sub>、水汽精度分别为 1 × 10<sup>-6</sup> 和 10 × 10<sup>-6</sup>,采样频率达到 10 Hz,满足生态通量测量中高灵敏度和快速检测的要求,适合构建湿度相关系统,具有广泛的应用前景。

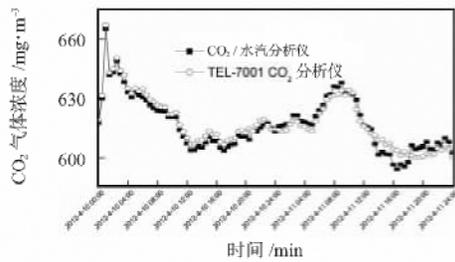


图 6 CO<sub>2</sub>/水汽分析仪与 TEL-7001 测定 CO<sub>2</sub> 浓度对比图  
Fig 6 Comparison diagram of CO<sub>2</sub> concentration measured by CO<sub>2</sub>/water vapor analyzer and TEL-7001

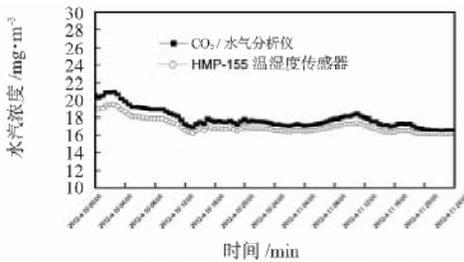


图 7 CO<sub>2</sub>/水汽分析仪与 HMP-155 测定水汽浓度对比图  
Fig 7 Comparison diagram of water vapor concentration measured by CO<sub>2</sub>/water vapor analyzer and HMP-155

(上接第 120 页)

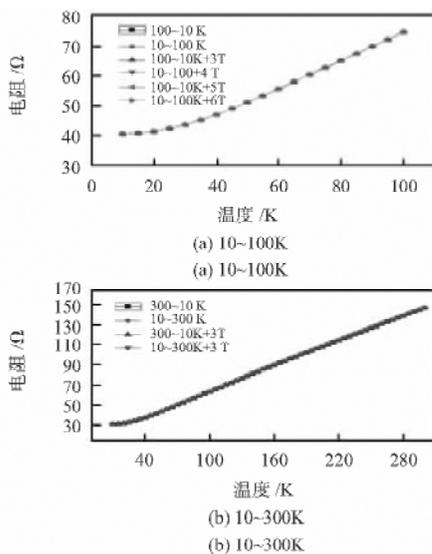


图 3 传感器电阻与温度的关系

Fig 3 Relation between resistance of sensor and temperature

### 3 结束语

采用 MEMS 的薄膜微加工工艺可以使铂电阻温度微传感器的小型化、可集成化以及批量生产得以实现。所加工的铂电阻温度微传感器在低于  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  的低温区域稳定性好,TCR 相对较高,在温度高于  $30\text{ K}$  ( $-243\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 时可达  $9980 \times 10^{-6}/\text{K}$ ,同时在低于  $30\text{ K}$  ( $-243\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 的深低温区域 TCR 也可达到  $3730 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。磁场对温度传感器的影响非常小,从而在有磁场的环境中测量可以更加精确。

### 参考文献:

- [1] Pattey E, Strachan I B, Desjardins R L, et al. Application of a tunable diode laser to the measurement of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from field to landscape scale using several micrometeorological techniques [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 136: 222 - 236.
- [2] 于贵瑞. 陆地生态系统通量观测的原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 姜沫岐. DSP 原理与应用从入门到提高 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [4] 李莹平, 曾水平. 基于 DSP 的高速信号采集系统设计 [J]. 通信与信息处理, 2010, 29(11): 50 - 53.
- [5] TI Corporation. LTC1605 datasheet [EB/OL]. [2011-10-19]. <http://www.ti.com>. Rev S.
- [6] Linear Corporation. LTC1278 datasheet [EB/OL]. [2011-12-23]. <http://www.linear.com>. Rev B.
- [7] McDermitt D K, Eckles R D, Wells J M. Effects of temperature and pressure on CO<sub>2</sub> infrared absorption with special emphasis on problems resulting from operation at high flow rates [EB/OL]. [2011-08-25]. <http://www.licor.com>.

### 作者简介:

张 静(1987 -), 女, 山西长治人, 硕士研究生, 主要从事环境监测新技术研究。

因此, 该铂电阻温度微传感器具有宽的温度适用范围, 相对较高的电阻温度系数, 可集成度高等优点。

### 参考文献:

- [1] Mitin V F, Tkhorik Yu A, Venger E F. All-purpose technology of physical sensors on the base of Ge/GaAs heterostructures [J]. Microelectronics Journal, 1997, 211: 617 - 625.
- [2] Mitin V F, Kholevchuk V V, Kolodych B P. Ge-on-GaAs film resistance thermometers: Low-temperature conduction and magneto-resistance [J]. Cryogenics, 2011, 51: 68 - 73.
- [3] Mitin V F, Boltovets N S, Kholevchuk V V, et al. Dual function sensors for concurrent measurement of temperature and magnetic field in cryogenic applications. cryogenics [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 4(2): 1 - 4.
- [4] Dorill B C, Kraue J K. Performance characteristics of silicon diode cryogenic temperature sensors [J]. Applications of Cryogenic, 1991, 10: 85 - 106.
- [5] Berry R J. Platinum resistance thermometry below 10K [J]. IOP Science, 1967, 3(3): 53 - 57.
- [6] Orlova M P, Sharevskaya D I, Astrov D N, et al. The derivation of the provisional reference table CCT 64,  $T = f(W)$  for platinum resistance thermometers for the range from 12 to 273.15K: Part I. The derivation of the table for the range from 12 to 95 K [J]. IOP Science, 1966, 2(1): 6 - 10.

### 作者简介:

梅加兵(1986 -), 男, 安徽安庆人, 硕士, 主要研究深低温传感器。