

· 光电测量与检测 ·

用于 CH₄ 气体 TDLAS 检测系统的信号发生电路研制李奥奇^{1,2}, 王彪¹, 许玥^{1,2}, 黄硕^{1,3}, 戴童欣^{1,2}, 连厚泉^{1,2}

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;
2.中国科学技术大学, 合肥 230026;
3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对天然气广泛使用带来的 CH₄ 气体检测需求, 基于可调谐半导体激光吸收技术, 使用 STM32 和 AD9102 设计了一种多路信号发生电路。该电路采用 STM32F103 作为主控, 控制 AD9102 产生 1 路用于激光器调制的正弦波信号, 并使用其内部 PWM 模块产生 2 路用于锁相放大检测的正交方波信号, 用于 CH₄ 气体检测系统。经实际电路测试, 该电路具有精度高、稳定性好的特点, 达到 CH₄ 气体检测系统对信号发生电路的需求, 同样适用于其它的 TDLAS 气体检测系统。

关键词: CH₄; TDLAS; AD9102; PWM; 信号发生电路

中图分类号: TN249 文献标识码: A DOI 编码: 10.14016/j.cnki.jgzz.2019.12.006

Development of CH₄ gas TDLAS detection system signal generation circuitLI Aoqi^{1,2}, WANG Biao¹, XU Yue^{1,2}, HUANG Shuo^{1,3}, DAI Tongxin^{1,2}, LIAN Houquan^{1,2}

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2.University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: With the demand of CH₄ gas detection brought by the widely using of natural gas, based on tunable diode laser absorption spectroscopy, we use STM32 and AD9102 to design a multi-channel signal generation circuit for CH₄ gas TDLAS detection system. The STM32F103 is used as control chip to control AD9102 for outputting one-way sine wave for laser modulation, and the two-way square wave generated by PWM module for phase-lock amplify is for CH₄ gas TDLAS detection system. The actual test shows that the circuit is stable and precise, which can meet the needs of CH₄ gas detection system of signal generation circuit, and can be also applied to other TDLAS gas detection systems.

Key words: CH₄; TDLAS; AD9102; PWM; signal generation circuit

1 引言

近些年来, 随着清洁能源的普及和“西气东输”等工程项目的进行, 天然气得到更广泛的使用, CH₄ 作为天然气的主要成分, 在带来便利的同时, 其易燃易爆的特性也引起了社会对 CH₄ 气体检测的高度重视。对于 CH₄ 气体的检测, 传统方法多采用半导体传感器, 该办法精度较低, 容易受到其他气体干扰, 寿命较短。

在气体检测领域, 可调谐半导体二极管激光吸收

光谱 TDLAS(Tunable diode laser absorption spectroscopy) 技术以其高精度、高选择性、长寿命等特点, 得到广泛的关注, 近些年来有了快速的发展^[1-5]。在 CH₄ 气体 TDLAS 检测系统中, 需要使用信号发生电路产生正弦信号叠加到另一路扫描信号上, 驱动激光器产生特定频率的光束, 通过测量穿过气体后的光束强度变化来获得气体的浓度。为了满足检测系统的需求, 产生调制所需的正弦信号和锁相放大检测所需的正交方波, 设计了该全数控信号发生电路^[6-10]。

2 系统总体框图

CH₄ 气体检测系统对信号发生电路输出信号的精度和稳定性有较高的要求。为了产生符合要求的信号, 所设计的信号发生电路主要有以下 4 个部分组

收稿日期: 2019-07-13

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制项目(No.61727822)

作者简介: 李奥奇(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统软硬件方面研究。E-mail: 13107670949@163.com

通信作者: 王彪(1981-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事嵌入式系统软硬件方面研究。E-mail: wb5996@163.com

成: 基于 STM32F103 的主控器模块 ,用于产生锁相放大检测所需正交方波的 PWM 模块 ,产生调制用正弦信号的 AD9102 模块 ,用于正弦信号放大的放大电路模块。系统总体框图如图 1 所示。

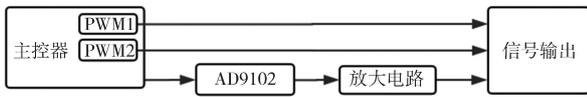


图 1 系统总体框图

STM32F103 通过 SPI 接口控制 AD9102 产生 1 路调制用正弦信号 ,同时使用内置的 PWM 模块产生锁相放大检测需要的 2 路同频正交的方波。AD9102 的正弦波输出通过 OPA695 放大电路后用于驱动激光器。主控器通过自定义串口命令与上位机进行通讯 ,可以接收设置命令对正弦波输出的幅度和频率进行设置 ,两路方波频率会跟随正弦波频率变化 ,保持为正弦波频率的 2 倍。

3 硬件电路设计

3.1 STM32 主控器模块

本电路采用 ST 公司的生产的基于 ARM Cortex-M3 内核的嵌入式处理器 STM32F103RCT6 作为主控芯片 ,该芯片工作频率为 72 MHz ,具有充足的内存和 IO 口 ,内置 PWM ,AD ,DA ,RTC 等常用模块 ,支持串口 ,SPI 等多种通信接口 ,具有速度快 ,功耗低 ,性价比高优点 ,被广泛地应用于系统控制和嵌入式设备等领域。满足本电路对主控的需求 ,主控器模块电路如图 2 所示。

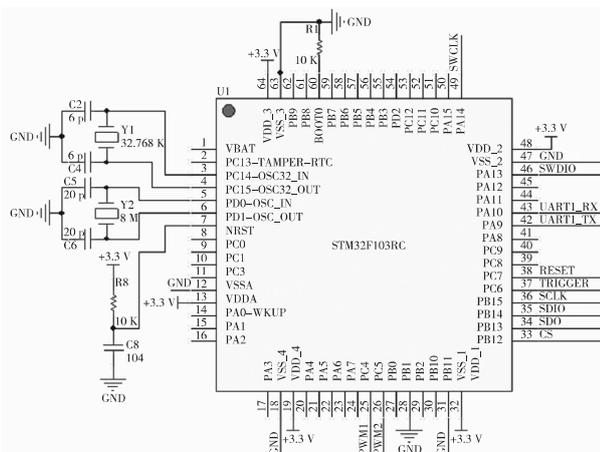


图 2 主控器模块电路

在本设计中 ,利用 STM32F103 内置的 PWM 模块产生 2 路方波 ,通过 SPI 接口驱动 AD9102 生产 1 路正弦信号 ,利用串口进行参数接收。本设计自定义了

相关的串口协议 ,通过指定的命令可以控制波形的输出、停止 ,设定正弦波的频率、幅度。电路工作时 ,主控芯片先对参数进行初始化 ,输出默认参数的波形 ,若从串口获取到新的正弦波参数 ,将对正弦波输出的幅度和频率进行重新设置 ,为了使 2 路方波的频率保持为正弦波频率 2 倍 ,STM32 也会改变 PWM 输出的正交方波频率。

3.2 PWM 正交信号发生模块

CH₄ 气体 TDLAS 检测系统工作时 ,需要两路频率为正弦波驱动信号 2 倍 ,相位差 90°的正交方波来实现锁相放大正交检测功能。为了产生这 2 路方波信号 ,我们采用了 STM32F103 内置的 PWM 功能。STM32F103 内置的定时器除了 TIM6 和 7 ,均可输出 PWM ,同时支持最高 30 路的波形输出。可通过设置捕获/比较模式寄存器 (TIMx_CCMR1/2) 来选择 PWM 的模式和输出通道 ,设置 TIMx_CCRx 来控制占空比 ,使用分频和起始延时设置频率和相位差。ST 还提供了官方库来简化 PWM 模块的设置和使用。图 3 展示了一路 PWM 的工作原理。

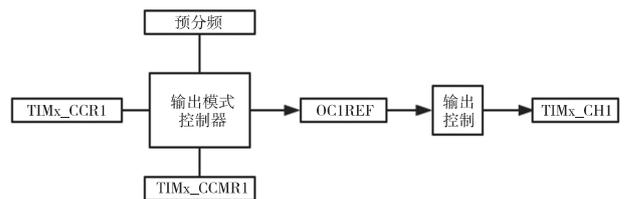


图 3 PWM 模块工作原理

本电路使用定时器 3 的通道 3,4 输出锁相放大检测所需的 2 路正交方波信号 ,方波的频率为正弦波 2 倍 ,正弦波频率变化时 ,方波频率也随之变化 ,保持为正弦波频率的 2 倍 ,两路方波相位差保持为 90° ,幅度固定为 3.3 V。实际电路工作时 ,PWM 输出频率能够跟随正弦波频率变化 ,且相位差和幅度保持恒定。

3.3 正弦波调制信号发生电路模块

在系统检测 CH₄ 气体浓度时 ,需要 1 路正弦信号叠加到扫描信号上 ,驱动激光器工作 ,通过测量特定频率激光穿过待测气体后的衰减情况来计算气体浓度。气体检测系统对调制正弦信号的精度和稳定性有较高的要求。为满足检测系统的要求 ,本设计采用了美国 ANALOG DEVICE 公司生产的 AD9102 芯片来产生所需波形 ,该芯片内置 4096x14 位模式存储器 ,片内 DDS ,锯齿发生器和伪随机信号发生器。内置 DDS 是一个 14 位输出、最高 180 MSPS 的主时钟正弦波发生器 ,可通过内置寄存器选择信号源 ,设置输出

信号的频率、相位和幅度等参数,具有精度高、转换快的特点^[11]。芯片通过 SPI 接口连接主控芯片,支持对寄存器的读写来设置和获取参数。为了使输出信号更加稳定,本电路采用差分信号作为参考时钟信号输入^[12]。其电路图如图 4 所示。

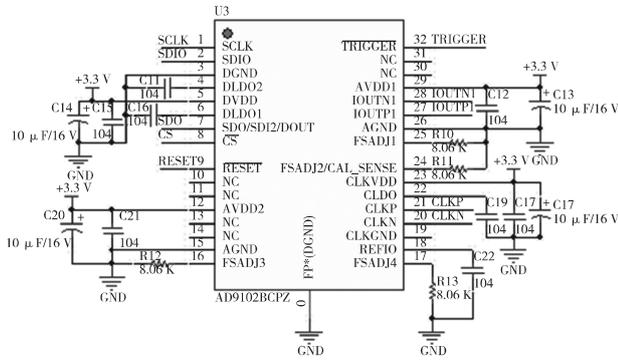


图 4 AD9102 模块电路图

系统启动后,先对 AD9102 进行寄存器复位,复位完成后,使用 SPI 接口对 AD9102 进行初始化,主要包括时钟信号选择,初始信号幅度、相位、频率设置,运行模式的选择,然后启动信号输出。工作过程中,可通过串口传输正弦波的幅度、频率参数,主控芯片接收到后,可对 AD9102 的输出信号的频率和幅度进行重新设置。经过测试,AD9102 的输出正弦信号达到较高的精度和稳定性,可以很好地满足气体检测系统对调制信号的需求。

3.4 驱动放大模块

AD9102 的输出信号为电流差分信号,不能直接驱动激光器,需要经过电压转换和放大电路才可以驱动激光器^[13]。本电路采用美国 TI 公司的 OPA695 对输出信号进行放大处理,将输出电流信号通过电阻转为电压信号后经 OPA695 放大 2 倍。OPA695 是一款超宽带,电流反馈型运算放大器,具有 4 300 V/ μ s 的高转换速率,二倍增益下 1 400 MHz 的超高带宽,其参数能很好地满足电路要求。图 5 为放大模块电路图。

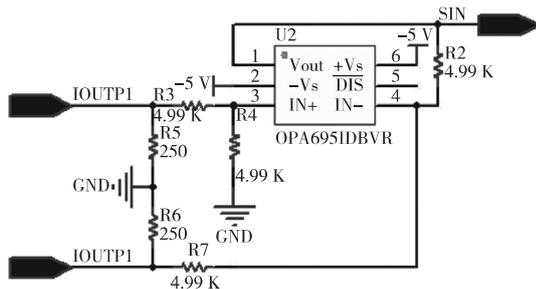


图 5 放大模块电路图

经过实验测试,AD9102 输出信号经电压转换和 OPA695 放大后,能够满足检测系统对信号的幅度要求。

4 测试结果

本系统设计了专用的串口命令包来控制电路的工作,包括开始命令、停止命令,以及正弦波参数设置命令。通过串口命令包可以设置电路输出频率 1~10 kHz,幅度 0~1 V 的正弦波,PWM 模块输出方波频率会自动跟随正弦波变化,产生频率 2 倍于方波,范围 2~20 kHz,幅度固定为 3.3 V 的 2 路正交方波。每个串口命令数据包包含 8 个字节,其中包括帧头、命令字、数据、校验和帧尾组成,其中校验和为命令中除帧头、帧尾之外各字节的累加和对 256 求余得到的值,主控芯片接收到对应命令包后会进行相应操作^[14]。表 1 介绍了本设计自定义串口命令包。

表 1 串口命令包

| 命令包 | 功能 |
|---|------------------|
| 0xFA 0xC1 (4 字节 0x00) (校验和) 0xF5 | 启动信号输出 |
| 0xFA 0xC2 (4 字节 0x00) (校验和) 0xF5 | 停止信号输出 |
| 0xFA 0xC3 (2 字节频率值) (2 字节幅度值) (校验和) 0xF5 | 设置正弦信号的 频率和幅度 |

发送串口命令,设置电路输出频率 1 kHz,幅度 0.9 V 的正弦波,STM32F103 根据正弦波参数输出频率 2 kHz,相位差为 90°的 2 路方波用于测试。3 路波形的参数如表 2 所示。

表 2 波形参数设置

| 通道序号(对应波形) | 频率(kHz) | 幅度(V) |
|------------|---------|-------|
| CH0(方波 1) | 2 | 3.3 |
| CH1(方波 2) | 2 | 3.3 |
| CH2(正弦波) | 1 | 0.9 |

本次测试采用 4 通道的 RIGOL 示波器进行测量,测量得到的 3 路波形如图 7 所示。3 路波形分别为输出的 2 路正交方波和 1 路正弦波,通过测量结果和设置参数比较,可以看出电路达到了预期的效果。在进一步的测试中,通过串口发送参数使电路输出不同频率、幅度的正弦波,均得到了较好的结果,其中 AD9102 可以通过设置寄存器参数可以输出频率在 1 kHz 至 10 kHz,电压在 0 V 至 1.0 V 范围内的正弦信号,达到了 CH₄ 气体 TDLAS 气体检测系统对信号

发生电路的要求。

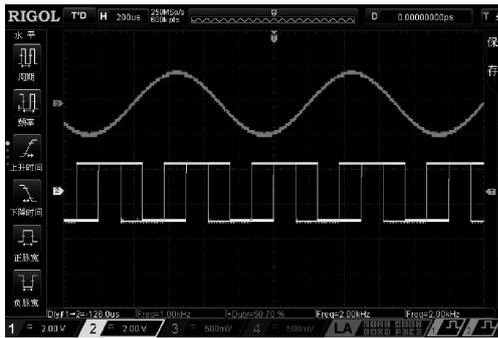


图 6 波形测量结果图

5 结论

本系统使用 STM32F103 作为主控芯片,驱动 AD9102 产生用于激光器调制用的正弦波,同时使用其内部 PWM 模块产生 2 路用于锁相放大检测的正交方波。经实际测试,电路工作稳定,输出信号精度高,稳定性好,能够满足 CH₄ 气体检测系统的需求。该电路的输出信号参数设置灵活,可以运用到其它 TDLAS 气体检测系统中去,有较好的通用性。

参考文献

[1] 庞涛,王煜,夏滑,等.基于 TDLAS 技术的全量程激光甲烷传感器[J].光子学报,2016,45(09):104-110.
[2] 李春光,董磊,王一丁,等.基于 TDLAS 和 ICL 的紧凑中红外痕量气体探测系统[J].光学精密工程,2018,26(08):1855-1861.
[3] 许坤,付林杰,钟发成,等.高光束质量垂直腔面发射激

光器同相耦合阵列[J].发光学报,2018,39(06):844-849.
[4] 季文海,吕晓翠,胡文泽,等.TDLAS 技术在烯烃生产过程中的多组分检测应用[J].光学精密工程,2018,26(08):1837-1845.
[5] 刘翠翠,井红旗,倪羽茜,等.915 nm/974 nm 单发射区半导体激光器光纤耦合模块设计[J].发光学报,2018,39(11):1598-1603.
[6] 高彦伟,张玉钧,陈东,等.基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度测量研究[J].光学学报,2016,36(03):275-281.
[7] 张志荣,孙鹏帅,庞涛,等.激光吸收光谱技术在工业生产过程及安全预警标识性气体监测中的应用[J].光学精密工程,2018,26(08):1925-1937.
[8] 李保志,邹永刚,王小龙,等.宽范围可调谐内腔液晶垂直腔面发射激光器设计与研究[J].发光学报,2018,39(11):1621-1626.
[9] 聂伟,许振宇,阚瑞峰,等.可调谐二极管激光吸收光谱技术测量低温流场水汽露点温度[J].光学精密工程,2018,26(08):1862-1869.
[10] 薛正群,王凌华,苏辉.反射式倒装对 1300 nm 激光器性能改善的分析[J].发光学报,2018,39(04):534-540.
[11] 金鑫,田伟,赵玉贤.基于 DDS 的任意符号速率信号调制算法及实现[J].电视技术,2018,42(12):42-46+50.
[12] 赵云娣,杨小献.基于 AD9958 的双通道直接频率合成器的设计[J].无线电工程,2006(03):45-46+50.
[13] 冯廷亮,黄明,徐德仁,吉祥,汪弈舟.500 MHz 宽带放大电路的设计[J].电子科学技术,2016,03(05):563-565.
[14] 沈梦梦,姜英,王亦诚.基于 SNP 协议的 LabVIEW 与 PLC 的通讯实现[J].电子技术与软件工程,2018(24):107.