

基于 FPGA 的便携式 四极杆质谱控制系统设计

葛卫敏, 许春华, 林利泉, 陈家新, 吴曼曼, 乔佳

(广州禾信仪器股份有限公司, 广东 广州 510535)

摘要: 针对便携式仪器小型化和低功耗的研制需求, 本文设计了一套便携式四极杆质谱的下位机控制系统, 基于 Xilinx Spartan-6 系列现场可编程的门阵列 (FPGA) 平台进行开发, 采用 FPGA 单一芯片替代传统多种芯片组合的繁琐架构, 去掉主控电路板上原有的 W5500\MCU(微控制单元芯片)\DSP(数字信号处理专用芯片)\DDR(双倍速率同步动态随机存储器)等功能芯片, 将这些芯片实现的扫描、控制、采集、存储、数据处理和高速传输等功能集成于同一 FPGA 片内。与现有的小型化四极杆质谱控制系统比较, 本系统在功能和性能不变的前提下, 不仅节省了芯片成本, 而且主控硬件板卡的功耗节省了约 2.7 W, 约为原板卡功耗的 37%, 主控硬件板卡的面积减小了约 20 cm², 约为原板卡面积的 10%。本研究设计的便携式四极杆质谱下位机控制系统已成功应用于便携式四极杆质谱仪中, 并且针对类似的小型化仪器有着较高的技术移植性和实用价值。

关键词: 便携; 四极杆; 质谱; 现场可编程的门阵列 (FPGA)

中图分类号: O657.63

文献标志码: A

文章编号: 1004-2997(2023)01-0087-09

doi: 10.7538/zpxb.2022.0080

Design of Portable Quadrupole Mass Spectrometry Control System Based on FPGA

GE Wei-min, XU Chun-hua, LIN Li-quan, CHEN Jia-xin, WU Man-man, QIAO Jia

(Guangzhou Hexin Instrument Co., Ltd., Guangzhou 510535, China)

Abstract: To meet the requirements of miniaturization and low power consumption of portable instruments, a set of lower computer control system of portable quadrupole mass spectrometry was designed. The new control system was developed based on Xilinx spartan-6 series field programmable gate array (FPGA) platform. A single FPGA chip was used to replace the cumbersome architecture of traditional multiple chip combinations. The original W5500\MCU\DSP\DDR and other functional chips on the main control circuit board were removed, and the scanning, control, acquisition, storage, data processing, high-speed transmission and other functions realized by these chips were integrated into the same FPGA chip. The control system mainly communicated with the lower computer through the upper computer. The lower computer controlled

the DAC voltage to scan the quadrupole, and at the same time linked the 16 bit ADC to collect data. The collected data was processed by some columns of algorithms, and then a large amount of data was accumulated and compressed, stored in the chip. Finally, the whole spectrum data was integrated according to the frame format and uploaded to the upper computer for displaying. The lower computer control system also integrated tuning control, feedback control, high voltage control and other functional modules. The difficulty in the design of the whole system lied in the high utilization of chip resources, which required a reasonable allocation of various chip resources and a balance in performance, speed and area. Compared with the existing miniaturized quadrupole mass spectrometry control system, the new control system not only saved the chip cost on the premise of unchanged function and performance, but also saved about 2.7 W in the power consumption of the master hardware board, which was about 37% of the power consumption of the original board, and reduced about 20 cm² in the area of the master hardware board, which was about 10% of the area of the original board. The performance of the portable quadrupole mass spectrometer lower computer control system was fully verified by the 25 volatile organic compounds (VOCs) mixed standard test experiment, and was successfully applied in the portable quadrupole mass spectrometer. This design has high technology portability and practical value for similar miniaturized instruments. At this stage of the design, it is not possible to integrate all the functions of the instrument and realize a real single-chip lower computer control system, and the integrated functional modules need to be further optimized. Under the demand of miniaturization and low power consumption of portable instruments, the concept and design of integration will go further and further, and will slowly and truly achieve simple substitution for cumbersome, single substitution for combination, so as to make the concept of portability to the extreme and obtain the maximum value with the least consumption.

Key words: portable; quadrupole; mass spectrometry; field programmable gate array (FPGA)

四极杆质谱仪广泛用于生物成分分析、环境污染分析和食品安全等领域。便携式四极杆质谱仪因具有体积小、功耗低、移动性强等特点,可以较好地应对现场快速、精准检测,深受人们的关注和青睐^[1-2]。

传统四极杆质谱仪的下位机控制系统通常使用芯片组合架构,如 Polaris Q 的设计是使用微控制单元芯片(MCU)+现场可编程的门阵列(FPGA)架构实现控制和传输,上位机+数字信号处理专用芯片(DSP)芯片实现数字信号算法处理,网络协议芯片(如 W5500)实现数据高速传输,控制器+双倍速率同步动态随机存储器(DDR)实现数据的缓冲和存储^[2-3]。这种架构设计会占用过多的硬件板卡空间,增加功耗负担,不能满足对空间体积及功耗有严格要

求的便携式四极杆质谱仪。在仪器功能和性能不变的前提下,降低功耗和减小板卡面积对于便携式质谱仪的发展具有重要意义。

本文针对便携式四极杆质谱仪体积小和功耗低的要求,使用单一芯片架构替代现有的芯片组合架构,将原本分散的扫描、控制、采集、存储、数据处理和高速传输功能集成于同一FPGA芯片内,希望能够有效降低系统功耗和板卡面积。

1 控制系统设计

便携式四极杆控制系统采用上位机+FPGA的结构,示于图1。上位机与下位机采用千兆以太网通信,负责指令的下发和质谱图的显示。上位机选用研华PCM-9376工控机,其采用

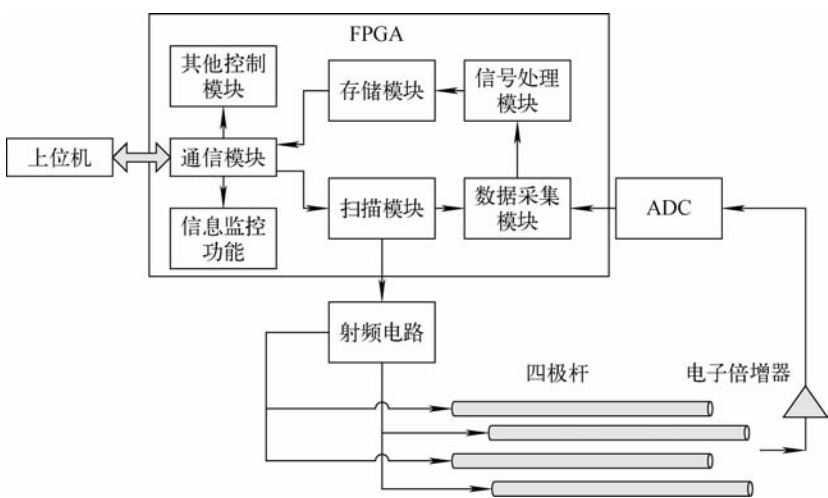


图 1 便携式四极杆控制系统架构

Fig. 1 Portable quadrupole control system architecture

AMD G 系列 CPU,DDR3-SODIMM 的 4 GB 缓存,接口丰富,并搭载了 Windows 嵌入式系统,可以满足低功耗小型仪器的人机交互。下位机 FPGA 选用 Xilinx 的 Spartan-6 低功耗芯片开发平台,相比于同级竞品 Altera 公司 EP 系列的 Cyclone III EP3C25Q240C8,该芯片采用六输入查找表技术,资源利用率更高,并且采用 45 nm 低功耗敷铜技术,在功耗、性能、成本之间可以更好地平衡。下位机集成开发的模块包括通信模块、扫描模块、数据采集模块、信号处理模块、存储模块及其他控制模块和信息监控功能,资源使用率相对较高。

整个控制系统通过上位机控制下位机实现。首先,上位机发送扫描采集指令到 FPGA, FPGA 内部的扫描状态机按照离子扫描顺序配置数模转换器(DAC)电压值,配置的电压值经射频放大电路后对四极杆进行动态扫描,从而筛选带电目标离子通过四极杆^[4]。然后,将筛选的离子打在电子倍增器上将微弱信号放大形成微弱电流,被模数转换器(ADC)芯片采集,在芯片内部将模拟信号转换成 16 bit 位宽的 digital 信号,传送至 FPGA 内部进行处理和帧协议整合。最后,将处理后的数据存储在并上传至电脑端上位机,生成谱图^[5]。

1.1 通信模块

以太网通信速率有 10、100 和 1 000 Mb 3 种模式。支持片上系统(如 Linux、Windows)的主控 CPU,在系统端集成了完整的以太网协

议,数据传输可达 1 000 Mb;其余不支持片上系统的主控芯片通常选择搭载协议芯片完成网络传输。常用的协议芯片(如以太网控制芯片 W5500、以太网协议栈芯片 CH395)仅支持 10、100 Mb 速率模式。此外,协议芯片与主控芯片的数据交互采用串行外设接口(SPI),最高传输时钟仅 10 MHz,由于传输过程中的固有字段消耗以及内部多级缓存逻辑的交互延时,实测吞吐量只有 3~5 Mb。

由于引脚资源的稀缺,系统采用通道复用的设计,在 FPGA 与上位机之间使用单一网口传输外围模块的控制指令及回传信息、各类突发告警信息、内外部模块的运行状态信息,以及扫描功能的指令和采集的数据,各类数据由内部协议按需分配通道资源。此外,其他板卡的 MCU 会将 FPGA 芯片作为信息桥,与上位机进行上下行的数据传输,此时 FPGA 内部承担了协议转译和 MCU 数据传输,该功能同样会占用大量的通道资源。经计算吞吐量,搭载协议芯片的方案已不能满足系统的数据传输。与此同时,考虑到后期数据量的扩展和多平台技术的兼容性,使用 FPGA 芯片引脚资源完成了千兆传输接口,使用 FPGA 内部逻辑资源完成了协议栈的设计,设计的千兆速率模式可以兼容百兆和十兆速率模式。首先,采用 FPGA 的数字 I/O 接口开发标准的吉比特介质独立接口(RGMII),示于图 2。然后,输入端时钟使用物理层 PHY(端口物理层)芯片(RTL8211EG)的

125 MHz 输出时钟,输出端时钟利用内部锁相环将输入时钟锁存再输出,频率同样为 125 MHz。最后,上行数据和下行数据各占用 4 根数字 I/O,在内部分别使用了输入端双沿采样(Iddr)资源和输出端双沿采样(Oddr)资源完成时钟上升沿和下降沿的双边采样,这样该设计在硬件上能够满足 1 000 Mb 全双工的传输速率。

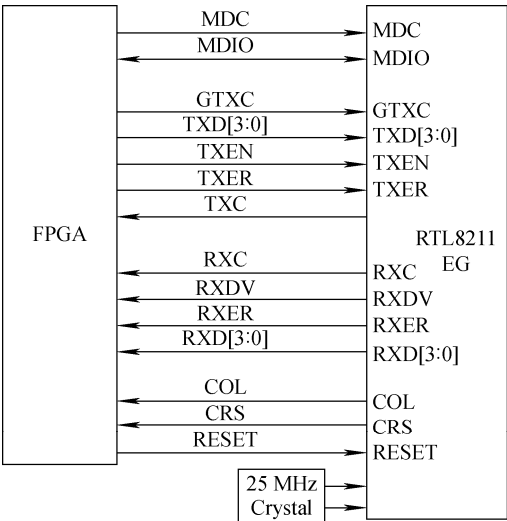


图 2 通信硬件结构图

Fig. 2 Diagram of communication hardware

在实时传输的应用场景下,点对点的用户数据报协议(UDP)比传输控制协议(TCP)更适用。本控制系统中设计的标准以太网 UDP 协议在内部固定了媒体存取控制位址(MAC)和静态网际互连协议(IP),按照协议最大传输单元(MTU)分包传输,实现了千兆以太网传输,可以满足便携式四极杆质谱仪高速、稳定的传输要求。

UDP 协议属于公有协议,负责上位机和下位机的通信,为确保仪器内部传输的保密性,设计了以寄存器为主导的私有传输协议嵌套在 UDP 协议内部。私有协议中设计了 16 bit 位宽寄存器地址和 16 bit 位宽数据,采用少量显示查找表(LUT)资源为系统提供了 65 536 个双字节的大容量控制单元。

相较于 FPGA+协议芯片的组合设计,本控制系统不仅实现了 1 000 Mb 以太网传输,而且硬件板卡的面积减小约 2 cm×3 cm,功率降低了 0.6 W(参照协议芯片 W5500)。

1.2 扫描模块

射频电压驱动四极杆产生的电场可以筛选相应质荷比的目标离子通过筛选器。改变射频电压可实现不同质量的离子通过四极杆^[6]。扫描控制流程示于图 3。本文设计的扫描功能是根据目标离子和扫描范围设定的,上位机将首个目标离子对应的电压值 V_0 、目标离子个数 N 、步进电压 ΔV 以及扫描速率和循环周期等参数按照寄存器数据流的形式下发给 FPGA。此时,FPGA 内部的扫描模块根据这些参数构建出整套阶梯扫描模型。扫描模型包括 DAC 的配置数值、电压驻留时间和台阶数。根据公式 $V_n = V_0 + n \times \Delta V$ 可计算出每个台阶的电压值,按照时段顺序配置给 DAC 芯片,通过射频放大电路后,以射频高压驱动四极杆产生电场^[7-8]。电压驻留时间以 μs 为单位,其误差会直接影响离子筛选的结果,本设计的 FPGA 内部以 100 MHz 的时钟控制状态机的运行,精度可达 ns,能够精准控制四极杆扫描时序和采集功能的联动。设计的扫描模块最快可在 150 ms 内完成 m/z 50~300 全扫描。

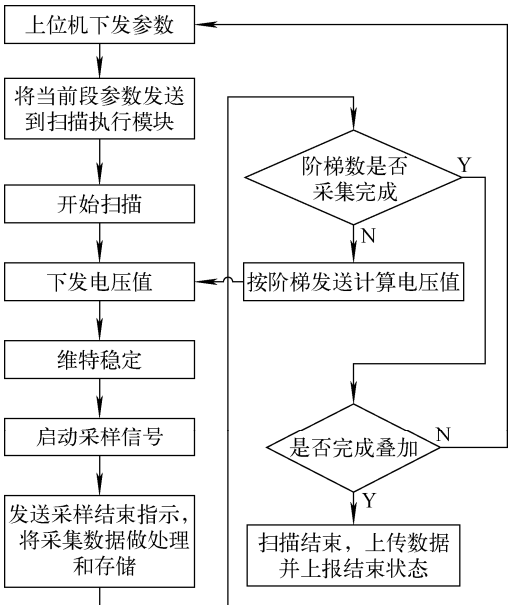


图 3 扫描控制流程图

Fig. 3 Flow chart of scanning control

上位机可通过参数组合的形式选择不同的扫描模式,下位机 FPGA 根据上位机的参数组合,采用参数分组和内部状态机复用的方式实

现全扫描和选择性离子扫描两种模式,以达到资源高效复用的目的。

1.3 数据采集模块

数据采集模块的设计使用 AD7723 (Analog Devices 公司产品) 作为模拟-数字转换器。数据采集模块采用与扫描功能实时联动机制,在每阶射频电压稳定后触发开始采集信号,有效地避开了振荡期畸变信号的影响,确保数据采集的准确性^[9]。

1.4 信号处理模块

ADC 模块采集的原始信号存在信号基线与基准零压不匹配的问题,同时存在信噪比差、波峰分裂和毛刺突兀等问题。采用 CPU 或 DSP 专用芯片,通过一系列的数字信号处理可解决此类问题^[10]。本文设计的控制系统利用 FPGA 的高实时性以及模块之间并行处理的优势,将信号处理算法集成于 FPGA 芯片内部,在节省算法芯片成本的同时,降低主控 CPU 的运算负荷。该设计使硬件板卡减少了约 3 cm×3 cm 的面积,功率降低了约 1.5 W (参照 TMS320 系列)。

本设计的 FPGA 系统集成算法包括基线校准算法、数字低通滤波器算法、局部平滑算法和阈值去噪算法。其中,基线校准算法解决了基线偏差问题;数字低通滤波器算法将谱图的信噪比提升了 40 dB;局部平滑算法有效去除了噪声中突发的高强毛刺噪声;阈值去噪算法有效消除噪声中的毛刺,降低了噪声^[11]。

1.4.1 基线校准算法 由于 ADC 芯片自身特性以及硬件电路设计的不足,导致采集基线

与零压基线存在偏差。此外,外部干扰(如电源、射频线、高速通信线路等)也会对采集端产生不确定的噪声干扰,多方面因素导致数据采集基准线与零压偏差增大,且这种偏差的大小在仪器每次启动时无法提前预测,会直接影响仪器的稳定性和准确性。

本设计的基线校准算法根据以往的测试预设 1 个基准值,上电启动后,将采集的谱图数据加和并平均,然后对比计算值与预设基准值,其差值补偿到下一张谱图采集的数据中,通过不断调整和优化基准值以达到无限接近零压的目的。

1.4.2 数字低通滤波器算法 数字滤波器分为有限长单位冲激响应(FIR)和无限长单位冲激响应(IIR)。相比于 IIR, FIR 形式具有严格的线性相位,信号内不同频率成分之间仍保持原始相位差,只改变信号波形幅值,质谱信号失真较小^[12]。不同于其他 FPGA+外部模块的设计,本设计的 FIR 滤波器采用 FPGA 内部 DSP 资源以及内部只读存储器(ROM)存储资源完成开发。

FIR 的系统差分方程为 $y(n) = \sum h(m) \times x(n-m)$ 。式中, $y(n)$ 是当前滤波器的输出信号; n 是滤波器阶数; m 是滤波器的当前阶; $h(m)$ 是滤波器中的系数; $x(n-m)$ 是输入数据。由该方程可知,滤波器的输出信号是由连续的采集信号与滤波系数做线性时不变卷积运算所得,其信号质量完全取决于滤波系数的设计。滤波器结构示于图 4,根据内部资源与运算速率匹配的要求,本设计的滤波器阶数为100

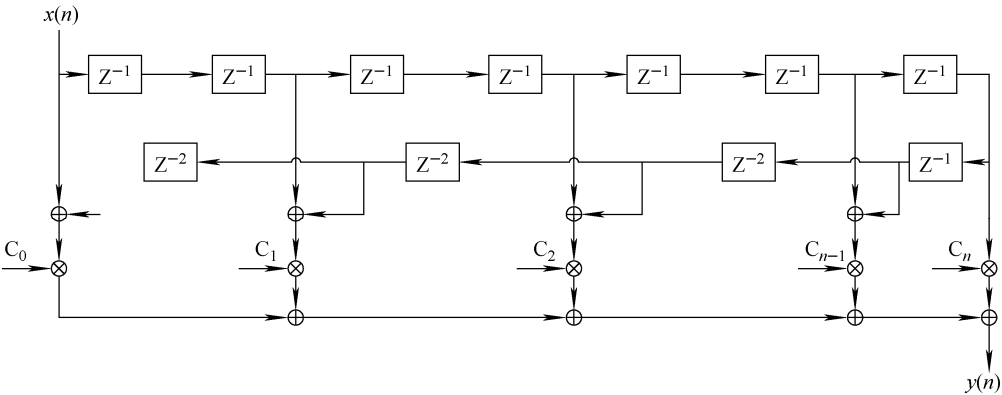


图 4 滤波器结构图

Fig. 4 Diagram of filter

阶,需要 matlab 模拟出 100 个滤波系数。在 matlab 仿真平台上将大量数据做傅里叶变换,得到有效信号的截止频率为 80 kHz,根据截止频率设计通带、过渡带和衰减率,最终生成 100 阶的滤波器系数,再将这些系数转换为二进制,最后固化在滤波器模型的 ROM 中。根据低通滤波器的对称性和时钟速率,使用 FPGA 内部 4 个 DSP 资源和 ROM 资源建立滤波器模型,经过实际测试,在有效信号不变的情况下噪声衰减 40 dB。

1.4.3 局部平滑算法和阈值去噪算法 实验时可以根据噪声不连续的特性区分大部分有效信号和噪声。局部平滑算法是对连续 16 个噪声信号做均值,用来减弱噪声信号的强度差和突兀信号。阈值去噪算法是对比设置的阈值与噪声,强度高于阈值的毛刺会被筛选出来做线性衰减^[13]。这 2 种算法都是在数据采集后实时处理,有效地减弱了噪声信号,去除噪声中突兀毛刺,提升了谱图信号的辨别度^[14]。

1.5 存储模块

由于便携式四极杆质谱仪对离子检测的实时性和准确度有较高要求,所以在仪器设计时采集大量数据做分析,且对数据传输有较高要求,通常在缓存端外置 DDR 存储芯片做一级缓存^[15]。在本系统的数据采集过程中,同一阶梯的驻留时间内,ADC 采集的是同一个离子的强度信号(16 bit),将本次采集的信号做累加(通常 10~30 个数据),之后再归一化,这种处理称为采集数据的横向累加。对于同组参数的多张谱图(10~20 张),信号以点对点的方式累加,之后同样做归一化,称为采集数据的纵向累加。大量数据经过横向累加和纵向累加处理后,达到单点数据对应单点离子的效果,有效地将数据总量压缩 80~100 倍,压缩后的最大数据量可以从 50 MB 降至 500 kB。处理后的数据可以使用 FPGA 内部 RAM 资源进行缓存,替代外设 DDR 方案。该设计不仅降低了物料成本,同时节省硬件板卡约 2 cm×2 cm 面积,功率降低约 0.7 W(参照 DDR 芯片 MT41J64M16LA_187E)。

1.6 其他控制模块和信息监控功能

除上述的模块功能外,在整个控制系统中还有其他多个 DAC、ADC 及外部功能模块的

控制集成,主要实现数字频率合成(DDS)控制、预杆电压控制、轴向电压控制等功能,以及每个状态和告警的实时监控和上报功能。

2 实验测试

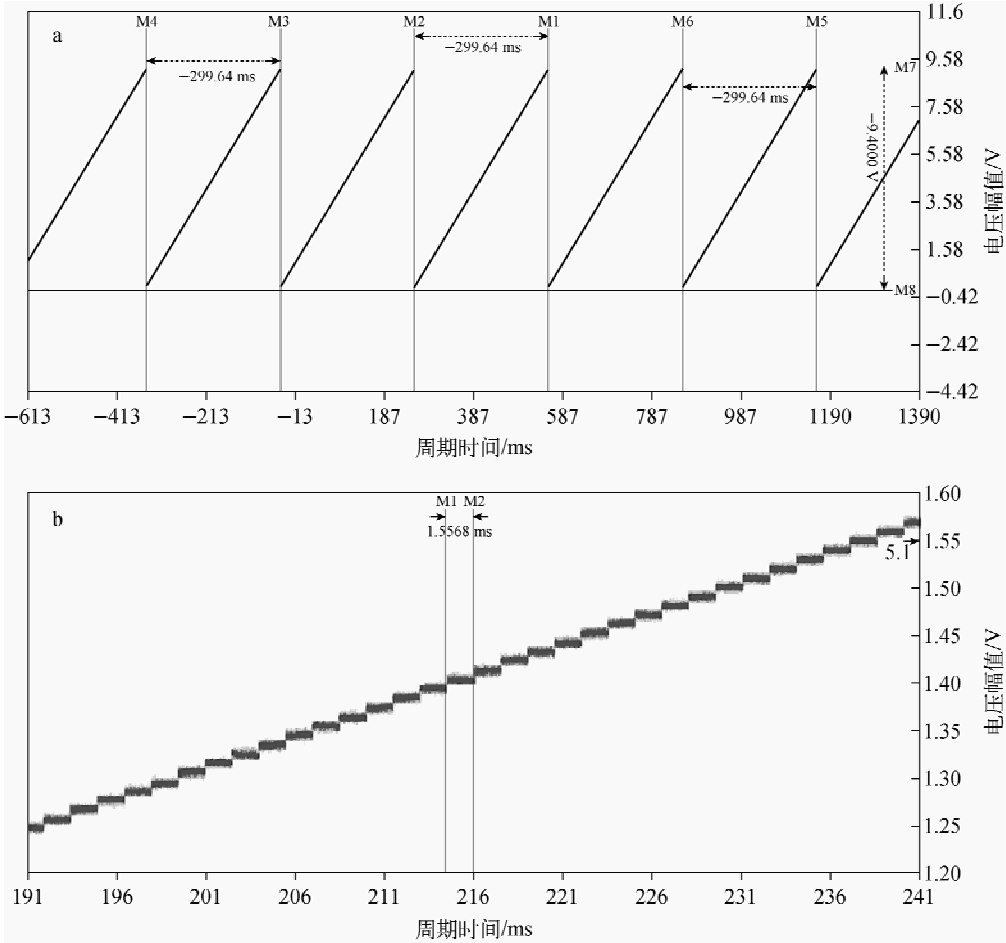
2.1 系统性能测试实验

上位机下发全扫描模式(测试范围 m/z 0~500),由高质量数向低质量数扫描,FPGA 内部时序按阶梯模型将电压值输出给 DAC。输出端 DAC 采用 16 bit 位宽的 AD669,外部参考电压为 10 V,配置转换速率 130 ns,完全满足精度 μ s 的电压配置输出。使用示波器检测循环扫描的电压幅值和周期时间,可以清晰地看到周期扫描的 V_{pp} 为 $-0.42\sim 9.58$ V,与参考电压 10 V 完全一致,示于图 5a。在示波器中可以看到 500 个离子质量数的扫描周期为 -299.64 ms,与理论值 300 ms 相比误差为 0.12%,在仪器允许误差范围内。阶梯电压测试图示于图 5b,可以清晰地看到阶梯电压的时序分布,阶梯之间的电压差均衡,未有明显抖动,驻留时间一致,能够满足四极杆驱动电压的条件。多次测试结果表明,扫描电压无干扰信号或抖动,具有较好的重复性和稳定性。

2.2 25 种组分挥发性有机物的混标测试

将本文设计的主控机+FPGA 控制系统应用于自制的便携式四极杆质谱仪中,通过检测 25 种组分挥发性有机物(VOCs)标准样品,测试其可行性和稳定性。自制的便携式四极杆与磐诺 A91plus 气相色谱仪联用:1) 色谱条件:进样量 1 μ L,40 $^{\circ}$ C 保持 1 min,以 30 $^{\circ}$ C/min 升温至 190 $^{\circ}$ C,保持 2 min,进样口温度 200 $^{\circ}$ C,接口温度 230 $^{\circ}$ C;2) 质谱条件:EI 电离源,能量 70 eV,质量扫描范围 m/z 50~300,扫描速率 2 500 u/s。25 种组分 VOCs 检测结果示于图 6,经与 NIST 标准谱库匹配,可检出全部 25 种物质,无目标离子漏采缺失,定性结果列于表 1。结果表明,本文设计的控制系统可以较好地应用于便携式四极杆质谱系统,能够满足系统控制、底层数据处理及传输等功能,且运行稳定。

其中,苯、四氯化碳、1,4-二氯苯 3 个典型物质的质谱图示于图 7。



注：a. 扫描信号循环周期图；b. 阶梯电压图

图 5 扫描阶梯电压测试图

Fig. 5 Test diagram of scan step voltages

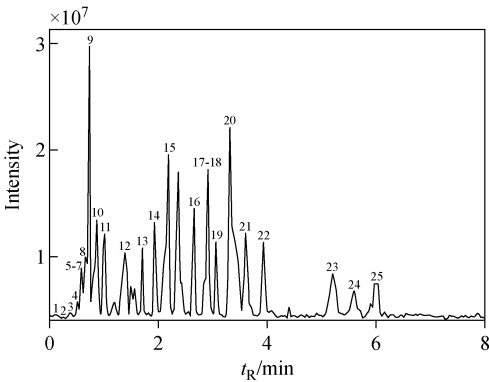


图 6 25 种组分 VOCs 混标 TIC 图

Fig. 6 Mixed standard TIC chromatogram of 25 component VOCs

3 结论

本文设计了一种可应用于便携式四极杆质谱仪的下位机控制系统。该系统主要利用 FP-

GA 内部资源,将扫描、控制、采集、存储、数据处理和高速传输等功能集成于单一 FPGA 芯片内,替代了主控板上原有的 W5500\MCU\ DSP\DDR 等功能芯片。经过系统性能测试实验和 VOCs 混标测试发现,该控制系统能够满足便携式四极杆质谱仪的各项指标和需求。通过验证和测量,并与传统的四极杆质谱仪下位机控制系统相比,在保证仪器功能和性能不变的前提下,本系统的主控板功耗降低了 37%,板卡面积减少了 10%,并且在高速传输和底层运算功能方面得到了一定提升。本研究对于小型化仪器,特别是便于移动和有现场测试需求的仪器而言,具有较高的借鉴价值。同时,其功能模块可在多个技术平台进行移植和使用,应对不同的应用场景,无需改变硬件,只需简单修改内部代码即可,具有较高的灵活性和兼容性。

表 1 25 种组分 VOCs 混标定性结果

Table 1 Qualitative results of 25 component VOCs mixed standard

序号 No.	化合物 Compound	保留时间 Retention time/min	特征离子 Characteristic ion
1	氯乙烯	0.1	$62[\text{C}_2\text{H}_3^{35}\text{Cl}]^+, 64[\text{C}_2\text{H}_3^{37}\text{Cl}]^+$
2	二氯甲烷	0.14	$49[\text{CH}_2^{35}\text{Cl}]^+, 84[\text{CH}_2^{35}\text{Cl}_2]^+$
3	反式-1,2,-二氯乙烯	0.25	$61[\text{C}_2\text{H}_2^{35}\text{Cl}]^+, 96[\text{C}_2\text{H}_2^{35}\text{Cl}_2]^+$
4	2-氯-1.3 丁二烯	0.36	$53[\text{C}_4\text{H}_5]^+, 88[\text{C}_4\text{H}_5^{35}\text{Cl}]^+$
5	顺式-1,2-二氯乙烯	0.5	$61[\text{C}_2\text{H}_2^{35}\text{Cl}]^+, 96[\text{C}_2\text{H}_2^{35}\text{Cl}_2]^+$
6	1,1 二氯乙烯	0.52	$61[\text{C}_2\text{H}_2^{35}\text{Cl}]^+, 96[\text{C}_2\text{H}_2^{35}\text{Cl}_2]^+$
7	三氯甲烷	0.55	$83[\text{CH}^{35}\text{Cl}_2]^+$
8	1,2 二氯乙烷	0.65	$62[\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}]^+, 64[\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}]^+$
9	四氯化碳	0.7	$117[\text{CCl}_3]^+$
10	苯	0.87	$78[\text{C}_6\text{H}_6]^+$
11	三氯乙烯	0.99	$130[\text{C}_2\text{H}^{35}\text{Cl}_3]^+, 95[\text{C}_2\text{H}^{35}\text{Cl}_2]^+$
12	环氧氯丙烷	1.38	$57[\text{C}_3\text{H}_5\text{O}]^+$
13	甲苯	1.69	$91[\text{C}_7\text{H}_7]^+$
14	四氯乙烯	1.94	$166[\text{C}_2\text{H}_2^{35}\text{Cl}_3^{37}\text{Cl}]^+$
15	氯苯	2.13	$77[\text{C}_6\text{H}_5]^+, 112[\text{C}_6\text{H}_5^{35}\text{Cl}]^+$
16	乙苯	2.66	$91[\text{C}_7\text{H}_7]^+, 106[\text{C}_8\text{H}_{10}]^+$
17	对二甲苯	2.94	$91[\text{C}_7\text{H}_7]^+, 106[\text{C}_8\text{H}_{10}]^+$
18	间二甲苯	2.94	$91[\text{C}_7\text{H}_7]^+, 106[\text{C}_8\text{H}_{10}]^+$
19	三溴甲烷	3.08	$173[\text{CHBr}_2]^+$
20	苯乙烯	3.31	$104[\text{C}_8\text{H}_8]^+$
21	邻二甲苯	3.59	$91[\text{C}_7\text{H}_7]^+, 106[\text{C}_8\text{H}_{10}]^+$
22	异丙苯	3.923	$105[\text{C}_8\text{H}_9]^+, 120[\text{C}_9\text{H}_{12}]^+$
23	1,4-二氯苯	5.2	$146[\text{C}_6\text{H}_4\text{Cl}_2]^+$
24	1,2-二氯苯	5.51	$146[\text{C}_6\text{H}_4^{35}\text{Cl}_2]^+$
25	六氯丁二烯	6.007	$225[\text{C}_4\text{H}_2^{35}\text{Cl}_4]^+, 190[\text{C}_4\text{H}_2^{35}\text{Cl}_3]^+$

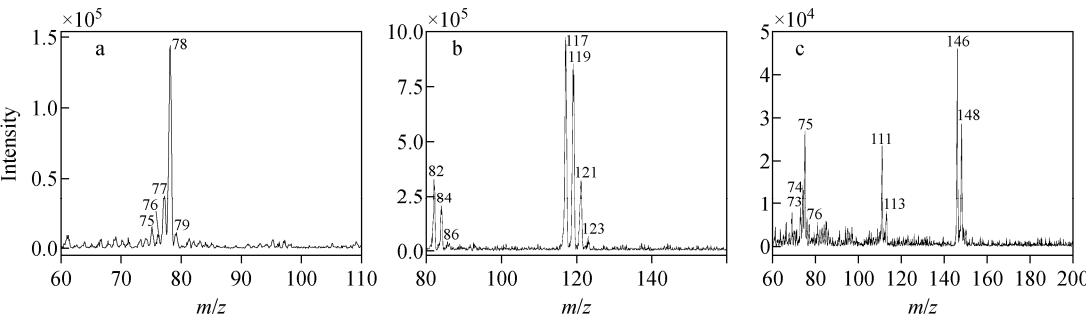


图 7 苯(a)、四氯化碳(b)、1,4-二氯苯(c)的质谱图

Fig. 7 Mass spectra of benzene (a), carbon tetrachloride (b) and 1, 4-dichlorobenzene (c)

参考文献：

[1] DAWSON P H. Quadrupole mass spectrometry and its applications [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company,1976: 1-151.

[2] GAO L, SONG Q Y, PATTERSON G E, COOKS R G. Handheld rectilinear ion trap mass spectrometer[J]. Anal Chem, 2006, 78 (17): 5 994-6 002.

- [3] 王晓俊,孙传强,龚子珊,张涛,杨茹,赵学珏,汪曦. 基于NI开发平台的三重四极杆质谱控制系统设计[J]. 分析测试学报,2019,38(1):31-38.
WANG Xiaojun, SUN Chuanqiang, GONG Zi-shan, ZHANG Tao, YANG Ru, ZHAO Xue-hong, WANG Yan. Design of triple quadrupole mass spectrometry control system based on NI development platform[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2019, 38(1): 31-38(in Chinese).
- [4] GLISH G L, BURINSKY D J. Hybrid mass spectrometers for tandem mass Spectrometry[J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2008, 19(2): 161-172.
- [5] 黄超,鲁湛,贺健,杨秀芹. 基于ZYNQ的微型光谱仪高速数据采集系统设计[J]. 现代电子技术, 2016,39(3):109-111.
HUANG Chao, LU Zhan, HE Jian, YANG Xiu-qin. Design of ZYNQ-based high-speed data acquisition system for micro-spectrometer[J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(3): 109-111(in Chinese).
- [6] 方向,覃莉莉,白岗. 四极杆质量分析器的研究现状及进展[J]. 质谱学报,2005,26(4):234-242.
FANG Xiang, QIN Lili, BAI Gang. An introduction to quadrupole mass filter[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2005, 26(4): 234-242(in Chinese).
- [7] 郭静,龙涛,包泽民,王培智,田地,刘敦一. 飞行时间质谱仪数据采集系统设计[J]. 分析测试学报,2014,33(12):1 426-1 430.
GUO Jing, LONG Tao, BAO Zemin, WANG Peizhi, TIAN Di, LIU Dunyi. Design of a data acquisition system for time-of-flight mass spectrometer[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2014, 33(12): 1 426-1 430(in Chinese).
- [8] 李凯,李明,唐兴斌,梁斌. 直接数字频率合成技术在四极质谱仪射频电源中的应用[J]. 冶金分析,2014,34(2):20-24.
LI Kai, LI Ming, TANG Xingbin, LIANG Bin. Application of direct digital frequency synthesis technology in radio-frequency power of quadrupole mass spectrometer[J]. Metallurgical Analysis, 2014, 34(2): 20-24(in Chinese).
- [9] 杨金宙,徐东明,王艳. 基于FPGA的高速数据采集系统设计与实现[J]. 中国集成电路,2017(21):20-24.
YANG Jinzhou, XU Dongming, WANG Yan. Design of high speed data acquisition system based on FPGA[J]. China Integrated Circuit, 2017(21): 20-24(in Chinese).
- [10] 杨宗凯. 小波去噪极其在信号检测中的应用[J]. 华中理工大学学报,1997,25(2):1-4.
YANG Zongkai. Noise elimination by wavelet and its application to signal detection[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 1997, 25(2): 1-4(in Chinese).
- [11] 禹海兰,李天云. 基于小波理论的噪声信号分析[J]. 东北电力学院学报,1997,17(3):36-40.
YU Hailan, LI Tianyun. Noise signal analysis based on wavelet theory[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 1997, 17(3): 36-40(in Chinese).
- [12] 刘福泉. 基于FPGA的FIR数字滤波器实现[D]. 北京:北京邮电大学,2012.
- [13] BLAUM K, GEPPERT C, MÜLLER P, NORTERSHAUSER W, WENDT K, BUSH-AW B A. Peak shape for a quadrupole mass spectrometer; comparison of computer simulation and experiment[J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2000, 202(1/3): 81-89.
- [14] 马翠梅,陈禾,章菲菲. 脉冲压缩定点处理的量化噪声分析[J]. 北京理工大学学报,2013(9):965-969.
MA Cuimei, CHEN He, ZHANG Feifei. Quantization noise analysis of fixed-point pulse compression[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013(9): 965-969(in Chinese).
- [15] 陈晓水,侯宏卫,边照阳,唐纲岭,胡清源. 气相色谱-串联质谱(GC-MS/MS)的应用研究进展[J]. 质谱学报,2013,34(5):308-320.
CHEN Xiaoshui, HOU Hongwei, BIAN Zhao-yang, TANG Gangling, HU Qingyuan. Research progress on application of GC-MS/MS[J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2013, 34(5): 308-320(in Chinese).

(收稿日期:2022-04-28;修回日期:2022-11-16)