

多通道高精度时间-数字转换器的研制

李清江¹, 徐 欣¹, 孙兆林¹, 李 楠¹, 李耀立³, 周 振^{2,3}

(1. 国防科技大学, 湖南 长沙 410073;

2. 上海大学环境与化学工程学院, 环境污染与健康研究所, 上海 200072;

3. 广州禾信分析仪器有限公司, 广东 广州 510663)

摘要:介绍了一种基于 USB2.0 接口的多通道高精度时间-数字转换器(time-to-digital converter, TDC)的设计与实现。完成了 NIM-LVPECL 电平转换电路、高速串并转换电路、基于 FPGA 的数据处理及相关逻辑控制等单元电路的设计,最后给出了 TDC 的测试性能指标。结果表明,TDC 的最小时间分辨率为 403 ps,测量时间范围为 0~420 us,测量“死时间”<13 ns。TDC 可广泛应用于高精度的时间间隔测量领域,特别是作为飞行时间质谱仪(time-of-flight mass spectrometer, TOF-MS)的数据采集卡。

关键词:时间数字转换(TDC);核仪器插件(NIM);串并转换;FPGA;飞行时间质谱仪(TOF-MS)

中图分类号:O 657. 63 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-2997(2010)01-0028-06

Multi-Channel, High Resolution Time-to-Digital Converter

LI Qing-jiang¹, XU Xin¹, SUN Zhao-lin¹, LI Nan¹, LI Yao-li³, ZHOU Zhen^{2,3}

(1. National University of Defence Technology, Changsha 410073, China;

2. Institute of Environment Pollution and Health, School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

3. Hexin Analytical Instrument Co. LTD, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The design and the realization of a multi-channel, high resolution time-to-digital converter(TDC) based on USB2.0 were introduced. The NIM-to-LVPECL logic level converter, the high-speed series-to-parallel converter, and the FPGA based data process and logic control circuit are completed. In the end, some parameters of the TDC are measured and given. The parameters of the TDC show that the minimum time resolution is 403 ps, the range of measurement is 420 us, and the dead time is less than 13 ns. The TDC can be used in the fields which high resolution time measurement are required, for example, in the application of time-of-flight mass spectrometer(TOF-MS).

Key words: time-to-digital converter (TDC); NIM; series-to-parallel converter; FPGA; time-of-flight mass spectrometer(TOF-MS)

收稿日期:2009-06-22;修回日期:2009-10-16

基金项目:国防科技大学研究生创新基金资助项目(s090404)

作者简介:李清江(1986~),男(汉族),山东人,硕士研究生,从事高速数据采集系统的研制与开发。

E-mail: anshiliqingjiang@yahoo. cn

通信作者:周 振(1969~),男(汉族),福建人,研究员,从事质谱仪器研究。E-mail: zhouzhen@gig. ac. cn

精密的时间测量在科学仪器,原子核和粒子物理研究,深空通讯,激光测距和物质成分检测等领域均有着广泛的应用。飞行时间质谱仪(time-of-flight mass spectrometer, TOF-MS)作为快速、高精度、高灵敏度的分析仪器,是通过测量待测离子飞过一定距离所需要的时间来区分不同离子的质荷比(m/z),进而鉴别离子成分。TOF-MS 快速、高精度、高灵敏度的特点决定其必须具有高时间分辨率和高灵敏度数据采集及处理设备,目前最常用的有高速模拟数字转换器(analog-to-digital converter, ADC)和高精度时间数字转换器(time-to-digital converter, TDC)。其中 TDC 的原理是通过记录一段时间内离子脉冲信号相对于触发信号(start)的到达时间和数量,继而判定粒子的种类及其含量。

我国对可用于飞行时间质谱仪且时间分辨率小于 1 ns 的高精度时间数字转换器的研究还很少,目前仅有少数几所大学从事相关研究工作。本实验室根据 TDC 的基本原理,结合长期

从事高速数据采集的成功研发经验,研制了一种通用性较强的多通道时间数字转换器,其最小时间分辨率为 403 ps ,测量时间范围为 $0\sim 420\text{ us}$,系统死时间 $< 13\text{ ns}$,并在飞行时间质谱仪器中得到应用。

1 TDC 总体结构与基本工作原理

TDC 系统主要由前端信号调理模块、高速串并转换模块、高速时钟产生模块、FPGA 模块、USB 接口模块等部分组成,示于图 1。信号调理模块由数模转换芯片 MAX5525 和高速比较器 ADCMP567 组成;高速串并转换模块主要由串并转换芯片 MAX3885 组成;高速时钟产生模块由 AD 公司的时钟产生芯片 AD9517-1 组成;数据处理及控制模块由 XILINX VIRTEX-4 SX35 FPGA 及相关外围电路组成;USB2.0 传输及控制模块由 Cypress 公司的 CY7C68013 及相关外围电路组成。

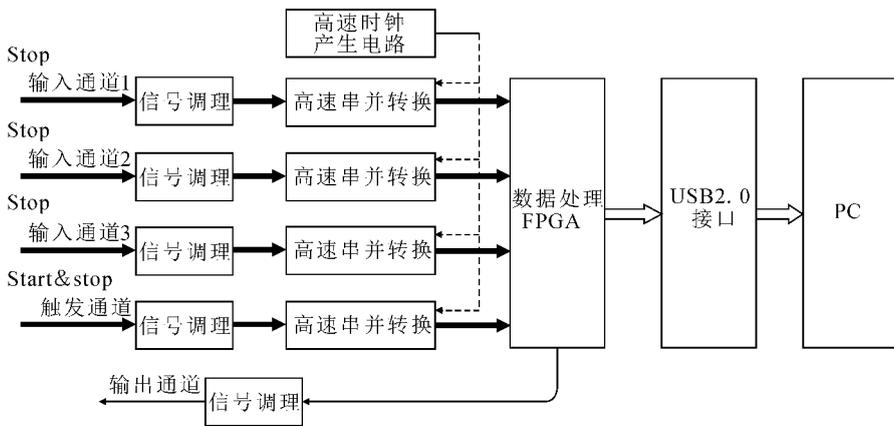


图 1 TDC 硬件结构图

Fig. 1 Hardware structure of TDC

TDC 具有内、外触发两种工作模式。在内触发工作模式下,由 TDC 系统自身产生触发信号,并由输出通道产生电子引出脉冲信号,以引导质谱仪前端设备。同时,在内触发工作模式下,通道 1~4 为完全相同的硬件输入通道,用来独立采集停止(stop)信号。而在外触发工作模式下,通道 4 为专用外触发采集通道,通道 1~3 为停止信号采集通道,输出通道可以空置或作为其他相关设备的触发信号。

以外触发工作模式为例。触发通道(通道

4)采集外部触发信号以作为转换的时间起点,3 个停止信号采集通道将 NIM 电平的串行脉冲信号进行信号调理后传至串并转换部分,并将其转换为最高 156.25 MHz 的 16 位并行信号,以直接利用 FPGA 进行数据处理。FPGA 通过“沿判断原理”判断各停止信号采集通道采集到的停止脉冲信号的数量以及相对于触发信号为计时起点的到达时间,并将处理结果通过 USB2.0 接口传至 PC 以进行质谱图的绘制。由于串并转换的最高时钟频率为 2.5 GHz ,即可达到 400 ps

的时间分辨率。针对不同的应用背景,本 TDC 串并转换的时钟频率可调,调节范围为 500 MHz~2.5 GHz,即时间分辨率在 400 ps~2 ns 可调。

2 系统关键模块设计与实现

2.1 前端信号调理模块

在飞行时间质谱仪器中,离子探测器输出信号一般为 NIM 信号,幅值在 0~−800 mV 范围内。该信号首先需经过幅度甄别,逻辑符合,延时等处理。为了能直接与这类前续 NIM 逻辑功能插件相连^[1],同时也为了提高系统的通用性,TDC 输入通道设计允许的动态范围为 −2.425~+2.425 V。考虑到串并转换电路要求输入信号为 PECL 电平及板上高速信号传输过程中的抗噪问题,设计中采用高速比较器 ADCMP567 将输入信号转换为 LVPECL 电平信号。由于输入信号幅度的动态范围较大,设计中采用数模转换器 MAX5525 来产生比较器的门限电压,而具体的门限值可由 FPGA 解析 PC 端,通过 USB2.0 发送的命令来设定。门限调节范围为 −2.425~+2.425 V,调节步进为 2 mV。输入通道信号调理框图示于图 2。

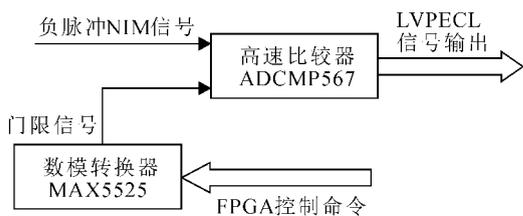


图 2 信号调理模块结构图

Fig. 2 Structure of signal conditioning module

高速比较器 ADCMP567 的传输延时为 250 ps,但由于比较器对 start 和 stop 信号的传输延时基本一致,而 TDC 测量的是二者的差值,故 ADCMP567 的器件传输延时对 TDC 测量结果的影响可以忽略。

TDC 在内触发工作模式下由输出通道发出电子引导脉冲,以提高输出通道的隔离和驱动负载能力。输出通道信号调理电路由 3 态缓冲器 SN74LVC125 构成,这里不再赘述。

2.2 高速串并转换模块

在气体检测的应用中,TDC 输入信号的最

小时间间隔为 400 ps,即信号频率最高为 2.5 GHz,远远超出了 FPGA 处理数据能力。为此,设计中将最高频率 2.5 GHz 的串行脉冲输入信号经高速串并转换为 16 位的并行信号,这样数据的最高频率就降为 156.25 MHz,从而可以直接利用 FPGA 进行脉冲数量和到达时间等相关数据处理,提高了 TDC 的功能灵活性。

高速串并转换模块由串并转换芯片 MAX3885 及外围电路构成。MAX3885 是一款 1:16 串并转换芯片,单 3.3 V 供电。芯片接收 PECL 电平标准的差分串行输入数据和时钟,输出 LVDS 电平标准的差分 16 位并行数据和同步时钟。

2.3 高速时钟产生模块

为保证 TDC 测量脉冲时间间隔的精度,高速串并转换模块需要一个高时间稳定度、最高频率为 2.5 GHz 的转换时钟。为此,TDC 选用集成锁相环芯片 AD9517-1 来产生时钟信号。AD9517-1 是一个集成 PLL 频率合成器与时钟分配器,单片 AD9517-1 即可为 4 个输入通道分别提供独立的转换时钟,时钟稳定度 $< 20 \times 10^{-6}$ 。在 TDC 中,AD9517-1 的输出频率调节范围为 500 MHz~2.5 GHz,即 TDC 时间分辨率在 400 ps~2 ns 可调。

2.4 USB2.0 模块

为了降低 TDC 对 PC 硬件配置的要求和 TDC 本身的便携性,设计中采用 USB2.0 接口来实现 TDC 与 PC 间的数据传输。在气体检测的应用中,飞行时间质谱仪器中的离子飞行时间较短,每秒采样的数据量较少(为几十 kHz),而利用集成 USB2.0 控制芯片 CY7C68013 可实现最高为 48 Mbyte/s 的数据传输速度,故可以满足传输速度的要求。

3 基于 FPGA 的 TDC 数据处理

飞行时间质谱仪的数据定义一般包括以下几个参数:采样长度,是指每个触发周期内质荷比最大离子的飞行时间;脉冲频率,是指每秒钟对离子的检测次数;脉标,是指每个触发脉冲的编号;累加次数,是指得到一个完整质谱图所用的触发脉冲个数;测量时间,是指做一次完整检测所需要的时间,一般由完整质谱图的个数来定义;总测量时间,是脉冲频率倒数、累加次数和质谱图个数的乘积^[2,10]。

用户在 PC 端设定好采样长度、累加次数、谱图个数、时间分辨率、触发电平等参数后,通过 USB2.0 向 FPGA 发送相应命令。在外触发模式下,FPGA 解析命令后等待 TDC 触发通道采集到外触发信号以开始转换。其中每一个扫描周期内的数据处理流程示于图 3。

测量时间差值的统计标准差即为 TDC 的时间分辨率。考虑到统计标准差随延长线的长度差有一定的涨落,故时间分辨率实际上取该统计标准差的最大值^[3-8]。

根据上述时间分辨率的测试方法,本 TDC 的时间分辨率测试结果列于表 1。

与串并转换输出数据同步的计数器,用于记录 16 位并行数据的顺序,此顺序值称为时标

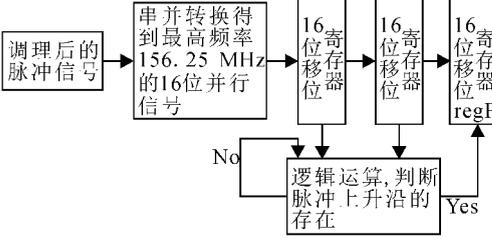


图 3 数据处理流程图

Fig. 3 Flow chart of data processing

脉冲信号经串并转换后得到一连串的 16 位并行信号,其频率最高为 156.25 MHz。信号进入 FPGA 后,2 个 16 位的移位寄存器进行逻辑运算,FPGA 检测寄存器中,前后两位数据是否存在从 0 到 1 的跳变,若存在则可认为检测到了输入信号中的一个脉冲,将此 16 位并行信号存到数据寄存器 regF 中。此时 FPGA 启动相应逻辑,将脉标(扫描周期数)、时标(16 位并行信号的顺序)和数据寄存器 regF 中的数据存入 FPGA 的 FIFO 中,并通过相关通信协议将 FIFO 中的数据经 USB2.0 传送至 PC 进行后期数据处理。PC 端通过对数据中脉标、时标和数据的解读,即可恢复出脉冲信号相对于触发信号的真实时间,时间分辨率最高为 400 ps。

表 1 时间分辨率测试结果

Table 1 Testing result of the time resolution

时间分辨率	实测分辨率
400 ps	402.922 ps
800 ps	808.356 ps
1.2 ns	1.253 ns
1.6 ns	1.677 ns
2.0 ns	2.088 ns
4.0 ns	4.122 ns

4.2 TDC 线性度测试

测试采用数字脉冲/延时产生器 DDG-200 来产生延迟信号,并在时间分辨率为 400 ps 模式下进行测试,同时采用 Tektronix TDS210 示波器进行参考测量。限于测试环境,测试时间间隔区间为 30 ns~5 us,没有进行时间间隔 30 ns 以下和 5 us 以上的测试,线性度测试结果列于表 2。

表 2 线性度测试结果

Table 2 Testing result of linearity

参考测量值/ns	TDC 测量值/ns
30	23.2
50	43.6
70	63.2
90	83.6
100	93.6
200	193.6
500	493.6
1 000	993.2
2 000	1 993.6
5 000	4 993.6

4 TDC 性能测试

4.1 TDC 时间分辨率测试

时间分辨率测试采用延迟线测量法,利用 Tektronix 双通道任意波形发生器 AFG3102 来产生 start 和 stop 信号。start 和 stop 信号的频率同为 100 kHz,两者间延时为 15 ns,以规避系统死时间。利用功分插件将 stop 信号分为相同的两路,并利用长度不等的延迟线将两路信号分别输入通道 1 和通道 2。

根据延迟线测量法的原理,通道 1 与通道 2

在 30 ns~5 us 的测量范围内,TDC 测量值均比参考测量值小 6.4~6.8 ns,经分析可知,这是由于 FPGA 相关逻辑在判断触发信号到达时

间上存在延迟所致,这一偏差可在 PC 数据处理时做相应的修正。从测量数据可以看出,本 TDC 测量结果的线性度较好,积分非线性 < 0.03% ^[1,3,9]。

4.3 TDC 质谱实验

4.3.1 检测环境 实验中将本 TDC 与广州禾信分析仪器有限公司和上海大学所研发的 EI-TOFMS-1000 相连^[10],记录真空背景气体质谱

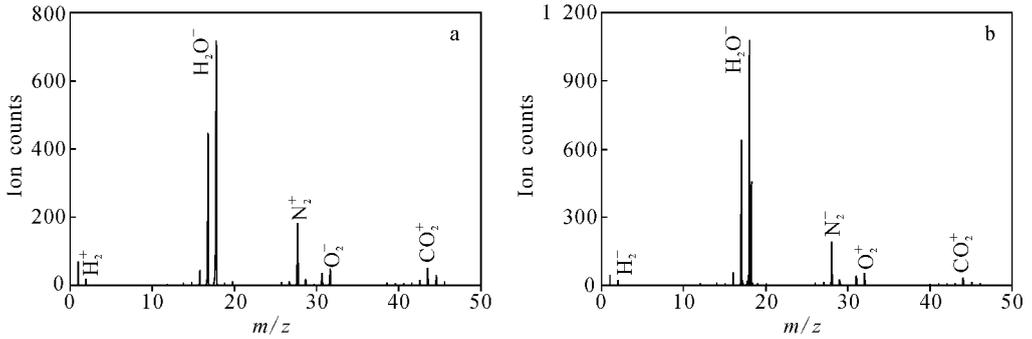


图 4 EI-TOFMS-1000 飞行时间质谱图

a. 自制 TDC; b. ORTEC9353

Fig. 4 Mass spectra from EI-TOFMS-1000 taken by home-made TDC(a) and ORTEC9353(b)

4.3.2 测试结果分析 从图 4 可以看出,两张 TDC 卡所得的质谱图相似,在 8×10^{-6} Pa 真空中,检测出的成分主要是 H_2O^+ 、 H_2^+ 、 O_2^+ 、 N_2^+ 、 CO_2^+ 等。总体上,单位时间内自制 TDC 所采到的峰高较 ORTEC9353 稍高,更详细地可以通过计算峰面积的方法对 4 个主要质谱峰进行比较,结果列于表 3。同时可以看出,高度差别最大的质谱峰是 H_2O^+ 及 OH^+ ,这主要是由于 TDC 饱和,阈值电压的微小差别及两张卡采样原理的差别造成。

表 3 真空背景下目标化合物峰面积比较

Table 3 Peak area of the target compound under vacuum background

阈值电压 9 mV, 时间分辨率 400 ps

目标峰	峰面积		自制与 ORTEC 峰面积比较
	ORTEC 9353	自制 TDC 数据采集卡	
H_2	101	135	1.3
N_2	1 870	2 431	1.3
O_2	470	580	1.2
CO_2	390	482	1.2

5 结论

根据飞行时间质谱仪器的应用背景,提出了一种基于高速串并转换原理的多通道高精度时间-数字转换器的设计方案,经实际制作与调试,本设计达到了预期的设计目标,时间测量范围为 $0 \sim 420$ us,实际测试最小时间分辨率为 403 ps,线性度良好。目前,该 TDC 已应用于广州禾信分析仪器有限公司飞行时间质谱仪器的相关实验中,累计运行多于 400 h,体现了较高的可靠性。今后的重点将针对检测动态范围,最小时间分辨率和灵敏度等主要参数进一步优化。

致谢:感谢上海大学黄正旭博士、高伟博士和广州禾信分析仪器有限公司粘惠青硕士在工作中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 林延畅,王小斌,韩少敏,等. 一种时间-数字转换 NIM 插件的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2008,28(1): 68-70.
- [2] 王福源,杨玉叶,时伟. 高分辨率时间数字转换电路的 PLD 实现[J]. 半导体技术, 2006,(6): 452-455.

- [3] 宋 健,安 琪,刘树彬. 基于 PCI 总线的高精密时间间隔测量仪的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2006, 20(3): 40-41.
- [4] CHRISTIANSEN J, LJUSLIN C, MARCHIORO A. An intergrated 16 channel CMOS time to digital converter [J]. Nuclear Science Symp, 1993, 625-629.
- [5] 潘 欣. 时间-数字转换器在时间间隔误差测量中的应用[J]. 宇航计测技术, 2004, (1): 53-56.
- [6] 丁建国,沈国保,刘松强. 基于数字延迟线的高分辨率 TDC 系统 [J]. 核技术, 2005, 28 (3): 173-175.
- [7] 张 延,黄佩诚. 高精度时间间隔测量技术与方法 [J]. 天文学进展, 2006, 24(1): 1-15.
- [8] MOTA M, CHRISTIANSEN J. A high-resolution time interpolator based on a delay locked loop and an RC delay line [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1999, 34(10): 1 360-1 366.
- [9] MOTA M. Design and characterization of CMOS high-resolution time-to-digital converter [D]. Universidade Téchica de Lisboa Instituto Superior Téchico, 2000.
- [10] 高 伟,黄正旭,郭长娟,等. 电子轰击源垂直加速式飞行时间质谱仪的研制 [J]. 质谱学报, 2008, 29(4): 209-212.

《质谱学报》投稿须知

●文稿务求论点明确,文字简练,数据可靠。

●文题简明(20个汉字以内);中英文摘要须包括题目、作者姓名、作者单位、城市名、省名和邮政编码,并写成叙述性文摘(含有研究目的、方法、结果和结论);关键词为3~5个。

●文稿应采用阿拉伯数字进行分级编号,最多可用4级。引言不编号,也不写"引言"字样。

●基金项目名称及项目编号、作者简介(第1作者姓名(出生年~)、性别(民族)、籍贯、职称、学位、从事专业、E-mail)需在首页以页下注形式写明。

●文稿中外文字母、符号须分清大、小写;上下角的字母、数码和符号等位置的高低应区别明显;易混淆的外文字母、符号在第1次出现时用铅笔(电子版用红色)注明文种。

●文稿中的数据不能同时以表和图表述,只能选择其一;采用法定计量单位,物理量用法定量符号表示,不得用废弃的物理量,例如压强的单位用帕斯卡(Pa),不要用 bar 或者 torr 表示;在图和表中用量与单位的比值表示数值,即量与单位之间用除号"/"相隔,如 t_R/min ;正文中插图下要写明中英文图号、图题和图注。

●参考文献须按《文后参考文献著录规则》著录。

●欢迎登录网站投稿,网址 <http://www.jcmss.com.cn>。

●来稿须附作者单位(学术委员会或业务部门)对文稿内容的学术性、真实性,作者署名是否准确以及内容有无保密问题的审查证明和版权转让协议书,以上两项均可在网站的"下载中心"下载。

●收稿后本刊立即向作者发送收稿通知单;若待审处理时间超过3个月不予回复,作者可改投他刊;退修稿逾期半年不修回者,本刊即作自动退稿处理;录用稿一经排版,作者要求退稿需部分补偿编辑部经济损失。

●来稿一经刊登,本刊将按规定酌致稿酬,并赠作者当期《质谱学报》2册。本刊已纳入重庆维普、《中国学术期刊(光盘版)》、《方正 Apabi 电子期刊》、《中文科技期刊数据库》、《CEPS 中文电子期刊服务》、《书生数字期刊》和入网"万方数据-数字化期刊群"等数据库,本刊所付稿酬包含上述几项报酬。

●请勿一稿两投。