

# 基于碳纳米管 X 射线源的静态扫描系统设计

石 伟 洪序达 张成祥 梁 栋

(中国科学院深圳先进技术研究院 生物医学与健康工程研究所  
保罗·C·劳特伯生物医学成像研究中心 深圳 518055)

**摘 要** 相比传统热阴极 X 射线源而言, 碳纳米管 X 射线源具有结构紧凑、高时间分辨率、可编程式发射等优势, 因此可以采用电子式的扫描方式取代传统扫描方式, 提高采集图像的时间分辨率, 减少运动伪影, 降低辐射剂量。文章针对该新型 X 射线源静态扫描系统进行软硬件平台设计。其中, 硬件平台集成了多光束 X 射线源及其驱动电路、高压发生器、复合真空计和数字平板探测器; 下位机软件采用 Quartus II 开发平台, Verilog 硬件描述语言, 实现多路脉冲及触发信号的产生; 上位机软件平台采用 LabVIEW 图形化编程工具, 实现多台仪器的集成控制, 完成多光束 X 射线源静态扫描、高压控制、真空度监测和图像采集功能。本系统设计通过实验验证, 可实现多光束碳纳米管 X 射线源脉冲式静态扫描成像, 为碳纳米管静态 CT 的研制提供了实验和测试平台。

**关键词** 碳纳米管; X 射线源; 静态扫描

**中图分类号** TP 29 **文献标志码** A

## Design of Stationary Scan System Based on Carbon Nanotube X-ray Source

SHI Wei HONG Xuda ZHANG Chengxiang LIANG Dong

(Paul C. Lauterber Research Center for Biomedical Imaging, Institute of Biomedical and Health Engineering,  
Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

**Abstract** Compared with conventional hot-cathode X-ray source, carbon nanotube X-ray source has multiple advantages, such as compact structure, high time-resolution and programmable emission. Therefore, the electronic scanning strategy can be used to replace traditional scanning method for improving the time resolution of image acquisition, and reducing motion artifacts and radiation dose. This paper aims at designing the software and hardware platforms for this new-type stationary scanning system with X-ray source. Among them, the hardware platform integrates multi-beam X-ray source and its corresponding drive circuit, a high voltage generator, a compound vacuum gauge and digital flat-panel detector; the lower computer software implements the generation of multi-channel pulse and trigger signal using Quartus II development platform and Verilog hardware description language; the upper computer software platform implements the integrated control of multiple instruments and completes the stationary scanning, high voltage control, vacuum degree

收稿日期: 2016-03-01 修回日期: 2016-05-24

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(61501446); 广东省科技计划项目静态数字乳腺断层成像系统(2015B020233014); 深圳市科技计划项目碳纳米管静态数字乳腺断层摄影的基础研究(JCYJ20140610151856710)

作者简介: 石伟, 硕士, 研究方向为 CT 技术与装备; 洪序达, 硕士, 研究方向为碳纳米管阴极材料; 张成祥, 工程师, 研究方向为机械设计; 梁栋(通讯作者), 博士, 研究方向为高端医学影像技术, E-mail: dong.liang@siat.ac.cn。

monitoring and image acquisition of multi-beam X-ray source adopting LabVIEW graphical programming tools. The design of this system was verified by our experiments, which reveals that it can realize the imaging of pulse-type stationary scanning of multi-beam carbon nanotube X-ray source, and thereby provide the experimental and testing platforms for the development of carbon nanotube stationary CT.

**Keywords** carbon nanotube; X-ray source; stationary scan

## 1 引 言

在传统的计算机断层成像技术(Computed Tomography)中, X 射线球管采用单个电子发射源对应着单个阳极靶的结构, 形成单个 X 射线焦点, 即产生单个 X 射线束。X 射线源围绕扫描对象作机械式转动, 从不同角度获取投影图像。由于采用这样的扫描方式需要机械转动, 从而限制了扫描时间并产生运动伪影。Zhang 等<sup>[1]</sup>提出了一种基于碳纳米管(Carbon Nanotube, CNT)场发射的静态多光束 X 射线源: 将多个碳纳米管阴极集成在一个 X 射线球管中, 每个碳纳米管阴极对应产生不同位置的 X 射线焦斑。采用逐点脉冲曝光方式实现焦点的移动, 从而无需运动光源便可以获取不同角度的投影图像, 实现静态 CT 扫描<sup>[2]</sup>。

相比传统的热阴极 X 射线源采用加热阴极到 1 000℃ 以上高温, 通过热电子发射的方式产生电子束, 场发射 CNT 阴极拥有诸多优势: 首先, 场发射对控制信号的响应时间达到纳秒级, 可实现高时间分辨、可编程控制 X 射线发射<sup>[3]</sup>; 其次, 由于采用冷阴极使得 CNT 工作温度低、功耗小, 容易实现单个 X 射线源集成多个阴极。由碳纳米管阴极阵列构成的 X 射线源不需要机械转动便可实现不同视角 X 射线扫描, CNT 阴极 X 射线源对脉冲控制信号的响应时间达到纳秒级。因此 X 射线源的开关时间可忽略, 扫描时间就等于曝光时间, 最大程度上缩短了扫描时间, 降低辐射剂量, 并且不需要机械转动从而不会产

生运动伪影。

基于碳纳米管 X 光源阵列的新型 X 射线源, 相关科研机构已经开始进行应用研究, 以美国 North Carolina 大学 Otto Zhou 教授为代表的科学家通过多年的技术攻关, 进行基于碳纳米管场发射的 X 射线源以及多源阵列研究, 研发了世界上第一台基于碳纳米管 X 光源阵列的高分辨显微 CT 系统<sup>[4]</sup>, 另外还研发了基于碳纳米管多光束 X 射线源阵列的静态数字乳腺机断层扫描系统以及静态胸部 CT 系统<sup>[5-8]</sup>。目前, 国内碳纳米管 X 光源技术已经取得一定的进展。其中, 电子科技大学陈泽祥教授团队研制的基于碳纳米管阵列的微聚焦 X 射线管在实验中取得了很好的发射特性<sup>[9]</sup>。本项目团队通过多年的技术攻关, 研制的碳纳米管 X 射线源成像系统获得了国内首张 X 射线二维成像图<sup>[10]</sup>, 本设计在此基础上进一步对多光束碳纳米管 X 射线源阵列静态扫描系统进行搭建, 并通过初步实验验证本设计的合理性和可靠性。

## 2 碳纳米管场发射理论

场发射现象可以通过著名的富勒-诺德海姆(Fowler-Nordheim, FN)方程来描述。在该理论中, 场发射系统简化为平行于电场方向的一维结构, 发射尖端被描述为功函数  $\phi$  的半无限量子势阱, 局域电场  $F$  为线性。该方程对于 CNT 来说能够较好地描述场发射现象, 但由于 CNT 并不是简单的金属针尖, 与理论假设有偏差, 必须对方程中的参数进行标定<sup>[11]</sup>。场致电子发射原理如

图 1 所示。

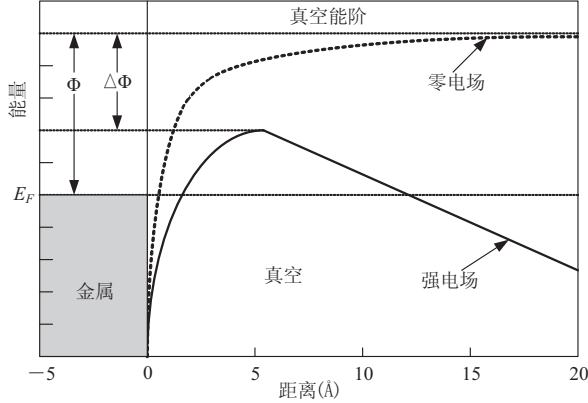


图 1 场致电子发射<sup>[12]</sup>

Fig. 1 The field emission of electron<sup>[12]</sup>

场发射电流密度, FN 方程描述为:

$$J = \int f(E)D(E)dE \quad (1)$$

其中,  $f(E)$  是发射体中的电子分布函数; 当金属为 Fermi-Dirac 分布、半导体为 Boltzmann 分布时,  $D(E)$  为隧穿几率。

考虑势函数的形式, 采用 WKB (Wenzel, Kramers, Brillouin) 近似, 可以计算出隧穿几率  $D(E)$ 。对于金属型发射体, 当不考虑镜像力, 势函数为  $V(x) = E_{vac} - eFx$ , 是一个三角形的势, 电场强度这里用  $F$  表示; 对于镜像力, 如果认为发射源是一个无穷大的平面, 则可以表示为

$-\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{4x^2}$ , 势函数修正为:

$$V(x) = E_{vac} - eFx - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{4x} \quad (2)$$

采用量子力学的计算, 可以得到势函数 (2) 的隧穿几率:

$$D(E) = \exp \left[ -\frac{8\pi\sqrt{2m|E|^3}}{3heF} v(y) \right] \quad (3)$$

考虑了发射体内部的能量带结构, 对于隧穿几率在费米能级附近展开, 可得到场发射电子的能量分布为:

$$J(E) = \frac{4\pi emf(E)}{h^3 c(E_f)} e^{-b(E_f)} e^{(E-E_f)c(E_f)} \cdot \left[ 1 - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{-E_i^m(E, \phi_p)/d} d\phi_p \right] \quad (4)$$

其中,

$$b(E_f) = \frac{8\pi(2m\phi^3)^{1/2}}{3heF} v(y)$$

$$c(E_f) = \frac{1}{d} = \frac{4\pi(2m\phi)^{1/2} t(y)}{3heF}$$

$$t(y) = v(y) - \frac{2}{3} y \frac{dv(y)}{dy}$$

$$y = \frac{\sqrt{e^3 F}}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 |E|}}$$

公式 (4) 中括号中的积分就是能带项;  $J$  为电流密度;  $E_i^m$  是入射电子的纵向最大能量;  $\phi_p$  是入射电子在横向动量的角度;  $e$  为基本电荷量;  $h$  为普朗克常数;  $m$  为电子质量;  $\phi$  为逸出功;  $v(y)$  是 Nordheim 函数, 是一个与椭圆函数有关的积分函数, 通常用有理函数作为近似。场发射电流需上式对能量积分求出。

忽略能带结构影响, 场发射电子能量分布可以表示为:

$$J(E) = \frac{4\pi mkT}{h^3} \exp \left[ -\frac{8\pi\sqrt{2m|E|^3}}{3heF} v(y) \right] \cdot \ln \left[ 1 + \exp \left( -\frac{E-E_f}{kT} \right) \right] \quad (5)$$

此时的场发射电流如下表示:

$$J(T) = e \int_{-\infty}^{\infty} \frac{4\pi mkT}{h^3} \exp \left[ -\frac{8\pi\sqrt{2m|E|^3}}{3heF} v(y) \right] \cdot \ln \left[ 1 + \exp \left( -\frac{E-E_f}{kT} \right) \right] dE \quad (6)$$

在绝对零度，场发射电流可近似如下：

$$J(0) = \frac{e^3 F^2}{8\pi h \phi t^2 (y_0)} \exp \left[ -\frac{8\pi\sqrt{2m}}{3he} \frac{\phi^{3/2}}{F} v(y_0) \right] \quad (7)$$

其中， $J(T) = J(0) \frac{\pi kT/d}{\sin(\pi kT/d)}$ 。

温度会导致电子的分布变化，在不太高的温度下，考虑温度效应可得到所谓的热场发射电子能量分布的公式：

$$J(E) = J_0 \frac{e^{E/d}}{d} \cdot \frac{1}{1 + e^{E/pd}} \quad (8)$$

其中， $p = \frac{kT}{d}$ 。

对能量积分即得热场发射电流公式：

$$J(T) = J(0) \frac{\pi kT/d}{\sin(\pi kT/d)} \quad (9)$$

从以上场发射公式可以看出，影响碳纳米管电子发射的两个主要因素是逸出功  $\phi$  和加载在发射端的电场  $F$ ，逸出功  $\phi$  由碳纳米管本身性能决定，电场  $F$  由加载在发射端阴极与阳极之间的电压大小决定<sup>[13]</sup>。

### 3 静态扫描系统设计

碳纳米管 X 射线源静态扫描系统设计主要包括三个部分：系统整体结构设计、硬件平台设计和软件平台设计。

#### 3.1 系统整体结构

碳纳米管 X 射线源静态扫描系统由系统控制平台、多光束驱动控制电路、高压发生器、复合真空计、多光束 X 射线源、数字平板探测器 6 个主要部分构成，具体如图 2 所示。其中，系统控制平台主要实现对多光束驱动电路的脉冲输出控制、高压发生器的电压控制、X 射线源装置真空度监测、探测器图像采集控制；多光束驱动电路则根据上位机控制指令实现相应支路 MOS 管的

开断，从而控制对应支路 X 射线脉冲输出，并完成同步触发 X 射线源与探测器时序控制；高压发生器采用两台高压电源，一台用于提供栅极电压，另一台提供阳极电压；多光束 X 射线源则集成多个碳纳米管阴极并封装特制的真空装置中；复合真空计用于监测真空装置的真空度；数字平板探测器则根据 X 射线曝光进行图像采集。

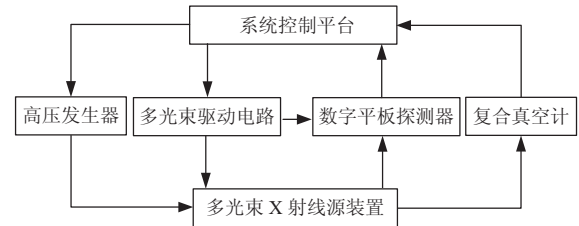


图 2 静态扫描系统整体结构

Fig. 2 Structure of stationary scan system

#### 3.2 硬件平台设计

根据系统的整体结构，硬件平台需要集成多台仪器以及控制电路，如图 3 所示。

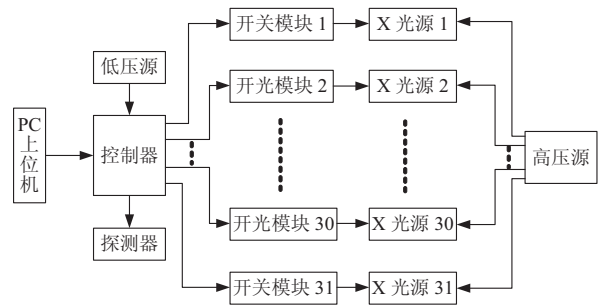


图 3 硬件平台框架

Fig. 3 The framework of hardware platform

##### 3.2.1 X 射线源

X 射线源包括碳纳米管阴极阵列、阳极靶条以及对应的高压电极，整个 X 射线源装置放置在定制的真空腔体中。碳纳米管 X 射线源阵列中各阴极通过 31 个耐压值为 3 kV 的电极引出，同时引出两个耐压值为 10 kV 的电极作为聚焦极对出射电子束进行聚焦。阳极高压引入电极采用 90 kV 设计标准，X 射线出射窗口采用 1 mm 厚度铝板。真空腔体配备分子泵机组，不断地抽取腔体中的空气保持真空度在一定水平，并通过复

合真空计监测整个装置腔体的真空度。

### 3.2.2 多光束驱动电路

本设计选用 Altera 公司生产的 Cyclone IV E 系列 FPGA, 型号为 EP4CE10E22C8L。采用 FPGA 作为主控芯片可以实现本系统多个 I/O 口输出脉冲, 高速、并行处理的时序控制需求。硬件电路设计主要包含两大部分: FPGA 最小系统电路和外围控制电路。其中, FPGA 最小系统电路由电源电路、外部时钟电路、复位电路和下载电路组成; 外围控制电路由脉冲驱动电路、信号调理电路、串口通讯电路、探测器触发电路和系统电源电路组成。

### 3.2.3 高压发生器

由于碳纳米管阴极电子场发射机制, 本系统需采用两台高压发生器, 除了需要加载在 X 射线管阴极与阳极之间形成强电场, 用来加速阴极逸出的电子束的阳极高压电源外, 还需要提供栅极电压用于激发出碳纳米管电子束的栅极高压电源。本系统阳极电压源采用 Spellman 公司 XRV160 型高压电源, 栅极电压源采用松定公司 AU10R60 型高压电源。两台高压电源参数如表 1 所示。

表 1 高压电源具体参数

Table 1 Parameters of high voltage power supply

参数	Spellman XRV160	Matsusada AU10R60
直流输出电压	0~160 kV	0~10 kV
输出电压极性	单极性	双极性
最大输出电流	30 mA	60 mA
最大输出功率	3.0 kW	600 W
电压调整率	0.05%	0.005%
电流调整率	0.05%	0.005%
纹波电压(p-p)	<0.05%	<0.1%
远程控制接口	RS-232	GPIB

### 3.2.4 复合真空计

X 射线源装置需要实时进行真空度监测。本系统采用成都睿宝公司 ZDF-5227 复合真空计。该复合真空计采用了单片机系统对测量数据进行

非线性处理及误差修正, 因此具有更高的精确度和重复性、响应快、测量稳定可靠、抗干扰能力强等优点。并采用全自动工作方式, 在真空计正常工作时不需要手动操作。两个真空规管将自动判断启动与关闭: 当电阻单元测量的真空度高于  $1.0E-1$  Pa 时, 系统自动启动电离规管工作; 当电离单元测量的真空度低于  $2.0E-1$  Pa 时, 系统自动关闭电离规管, 电阻单元部分一直显示电阻规测量的真空度。

### 3.2.5 数字平板探测器

本设计成像系统采用美国 Varian 公司生产的 PaxScan2520D 数字平板探测器, Varian 作为全球综合放射治疗设备以及 X 光诊断设备关键软硬件的供应商, 推出了商品化平板式 X 射线实时成像装置 PaxScan 系列产品。该产品具有非晶硅探测器阵列, 采用辐射转换材料, 低噪音高速数字图像采集和处理技术, 特制的 ASIC 控制和处理芯片<sup>[14]</sup>。PaxScan2520D 作为高性能的实时成像非晶硅平板探测器, 其主要性能指标如表 2 所示。

表 2 PaxScan2520D 主要技术性能指标

Table 2 Parameters of PaxScan2520D

参数名	参数指标
有效检测区域	25 cm×20 cm
像元矩阵	1 536(h)×1 920(v)
像元尺寸	127 μm
分辨率	3.94 lp/mm
闪烁体转换屏	CsI 或 Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S
能量范围	40~150 kVp
A/D 转换位深度	14 bit
帧率	1~10 fps(1×1)、1~15/30 fps(2×2)
采集图像接口	Intel® Pro/1000GT Desktop Adaptor (PCI)

### 3.3 软件平台设计

系统软件平台分为两个部分: 下位机软件 and 上位机软件部分。其中, 下位机软件部分主要实现 31 路脉冲控制和探测器触发信号产生; 上位机部分主要实现高压电源、复合真空计、数字平板探测器的控制以及通过串行总线向下位机发送



控制命令。软件平台功能模块如图4所示。

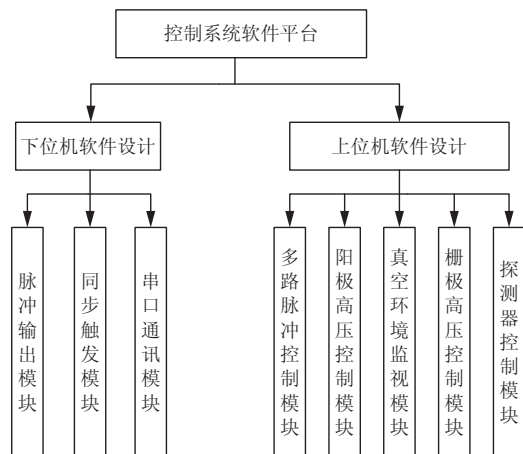


图4 系统软件平台功能框图

Fig. 4 Functional of software platform

### 3.3.1 下位机软件

下位机程序设计采用 Quartus II 软件开发平台。Quartus II 是 Altera 公司推出的一款综合开发工具，它集中了 Altera 的 FPGA/CPLD 开发流程中涉及到的所有工具和第三方软件接口<sup>[15]</sup>。下位机软件具有三个功能模块：脉冲输出模块、同步触发模块、串口通讯模块。

#### (1) 脉冲输出模块

本设计 X 射线源采用 31 个 X 射线发射单元，对应需要 31 路脉冲信号对各单元进行控制，即对每个 X 射线发射单元的曝光时间、周期以及各个 X 射线源开关时序进行控制。因此要求 31 路输出脉冲的周期和占空比可以随意调节；31 路脉冲相对于同步脉冲的延时时序可以调节；输出脉冲数量可设置，即当脉冲数量寄存器值不为 0 时，输出脉冲按照预先设定周期和占空比循环输出，而当脉冲数量寄存器值减到 0 时，无脉冲输出。根据上面的分析可知，每路脉冲需要 3 个寄存器组分别用来存储高电平持续时间参数、低电平持续时间参数、脉冲延时时间参数，31 路脉冲需要 93 个 32 位寄存器，再加上 1 个 16 位脉冲数量寄存器。由于 FPGA 内部采用并行处理方

式，各路脉冲是相互独立、并行输出，因此以单通道脉冲产生过程为例对脉冲输出程序模块进行说明，程序流程如图5所示。

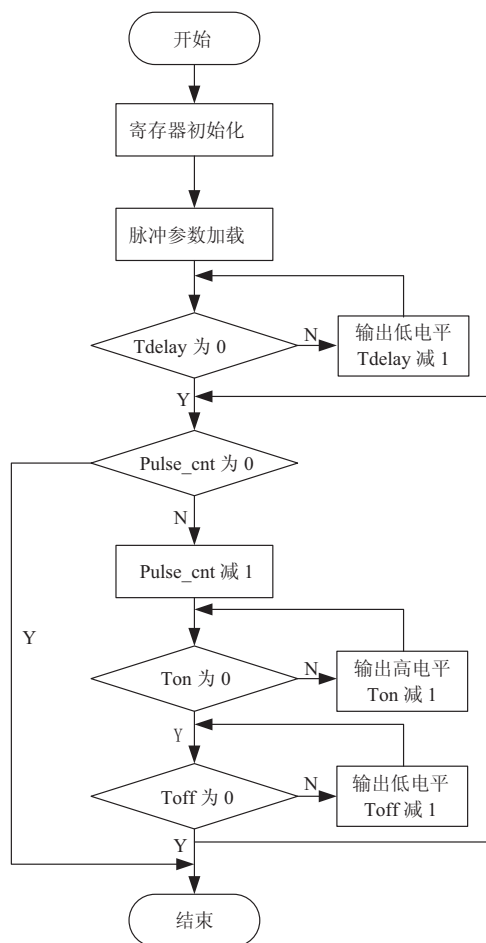


图5 单通道脉冲产生流程图

Fig. 5 The flow chart of single channel pulse generation

FPGA 复位信号有效时，从上位机传递过来的脉冲参数存储在相应寄存器中。当每个时钟信号到来时，首先检查脉冲延时寄存器中 Tdelay 参数是否为 0，不为 0 时延时寄存器 Tdelay 的值自减 1，并输出低电平，直至减到 0 完成该路脉冲延时。然后判断脉冲数量寄存器 Pulse\_cnt 的值是否为 0：当 Pulse\_cnt 值为 0 时，表示没有脉冲输出，并结束脉冲输出检测；当 Pulse\_cnt 值不为 0 时，完成脉冲数量寄存器 Pulse\_cnt 的值减 1，再判断高电平延时寄存器 Ton 的值，当 Ton

的值不为 0 时持续输出高电平, 并在每个时钟信号到来时完成自减 1 操作, 用来给输出高电平计时, 当 Ton 的值减到 0 时, 输出脉冲高电平持续时间结束。同理, 对低电平延时寄存器 Toff 进行类似操作, 输出预设低电平, 完成一个周期脉冲输出。然后再检测脉冲数量寄存器 Pulse\_cnt 的值, 不为 0 则继续输出脉冲, 直到 Pulse\_cnt 值为 0 完成整个脉冲输出过程, 程序终止。

### (2) 同步触发模块

同步触发模块主要用来完成 X 射线源与探测器同步工作。PaxScan2520D 数字平板探测器提供两个控制外部触发方式的信号, Expose\_OK(读触发信号)和 User\_Sync(同步信号), 通过对这两个信号的控制可实现探测器与 X 射线源的同步工作。如图 6 所示, 当 FPGA 输出脉冲控制 X 射线源开启后, 检测 X 射线脉冲(Xray\_pulse)下降沿, 当下降沿到来时产生探测器同步信号 User\_Sync。当探测器检测到有效的同步信号后, Expose\_OK 信号被触发, 探测器进入读出时间, 进行数据帧读取, 完成一次图像采集。探测器同步触发信号 User\_Sync 的产生由 FPGA 完成, 具体产生流程与上面脉冲输出模块描述类似, 不再重复说明。

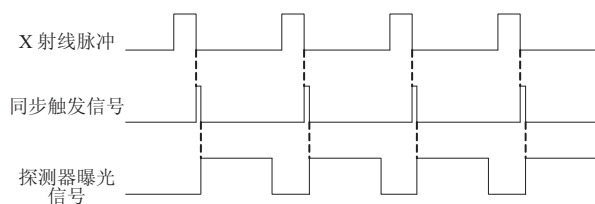


图 6 外部同步触发时序图

Fig. 6 Sequence of external synchronous triggering

### (3) 串口通讯模块

串口通讯模块采用 RS232 接口标准规范进行设计, 定义数据包格式: 数据包识别起始位、数据位、数据包停止位。其中, 数据位部分包括 31 路脉冲高电平延时、低电平延时、脉冲延时、脉冲个数, 以及 1 路探测器外部同步触发信

号。由于本设计下位机通讯模块只用于接收上位机传递的脉冲控制命令及控制参数, 因此只需要对数据接收模块进行设计。如图 7 所示, 通用异步收发传输器(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART)接收模块接收从上位发送过来的 10 位串行数据(1 个起始位、8 个数据位、1 个停止位), 并提取出 8 位数据的值, 然后缓存到先入先出队列(FIFO)中, 提供给其他程序模块调用。

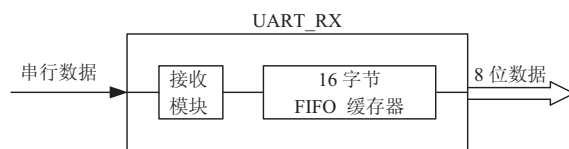


图 7 UART 接收模块

Fig. 7 Receiver module of UART

### 3.3.2 上位机软件

上位机软件平台采用 LabVIEW, 该平台提供了丰富的数据采集、显示、分析和存储库函数和各种仪器通讯标准的功能函数, 其采用的图形化编程语言便于程序设计和修改, 从而大大降低了系统开发周期, 提高开发效率<sup>[16]</sup>。本设计通过 LabVIEW 软件平台集成五个功能模块: 多路脉冲控制模块、栅极高压控制模块、阳极高压控制模块、真空环境监测模块和探测器控制模块。

#### (1) 多路脉冲控制模块

多路脉冲控制模块 LabVIEW 程序前面板设计如图 8 所示。前面板采用 32 个脉冲通道, 每个通道设置三个输入控件用于脉冲参数的设置, 分别是脉冲开启时间、脉冲关闭时间、脉冲延时时间。

#### (2) 栅极高压控制模块

栅极高压控制模块 LabVIEW 程序前面板设计如图 9 所示, 前面板采用选项卡控件界面显示, 包含两行选项卡分别对应于两种栅极高压输出控制方式。选项卡一界面高压电源采用逐步提升方式, 图表输出碳纳米管阴极场发射 I-V 曲

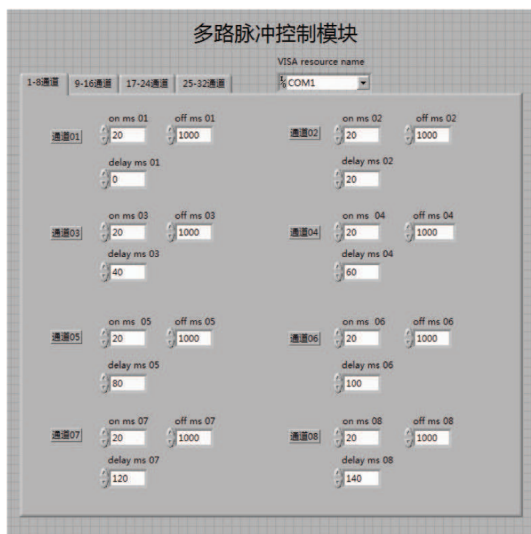


图 8 多路脉冲控制模块

Fig. 8 Control module of multiplex pulse

线，并将采集到的对应电压、电流数据以 TXT 文档形式存储。选项卡二界面高压电源电压输出设置为固定值，图表输出碳纳米管阴极场发射电流随时间变化曲线，同样将采集到的数据以 TXT 文档形式存储。栅极高压控制模块，既能使电压根据输入控件设定的增量参数和时间参数逐步提升，提供碳纳米管阴极场发射性能测试平台；又可以持续稳定输出设定电压，提供 X 射线脉冲输出所需栅极电压。

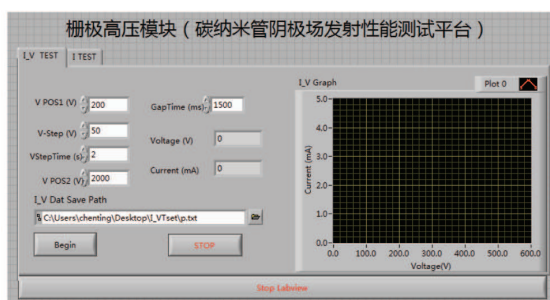


图 9 栅极高压控制模块

Fig. 9 Control module of grid high voltage

(3) 阳极高压控制模块

阳极高压控制模块 LabVIEW 程序前面板如图 10 所示，前面板选项卡系统状态栏采用布尔控件指示电源内部各种状态；系统控制栏主要用

于电压和电流写入参数设置；主电源控制栏主要用于高压的开启与高压状态显示；并采用图表分别用来显示输出电压和电流。

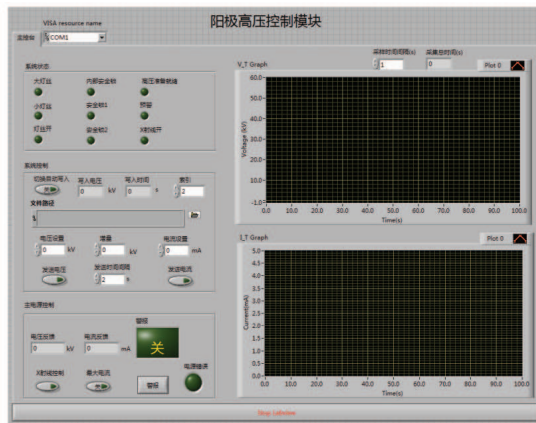


图 10 阳极高压控制模块

Fig. 10 Control module of anode high voltage

(4) 真空环境监测模块

真空环境监测模块程序界面如图 11 所示，通过前面板输入控件可以设置真空度曲线采样点时间间隔，以及 TDMS 文件存储数据的时间间隔。设置两个显示控件分别显示低真空值和高真空值。通过图表实时显示真空度随时间变化 P\_V 曲线，并把采集到的数据以 TDMS 文件形式存储。

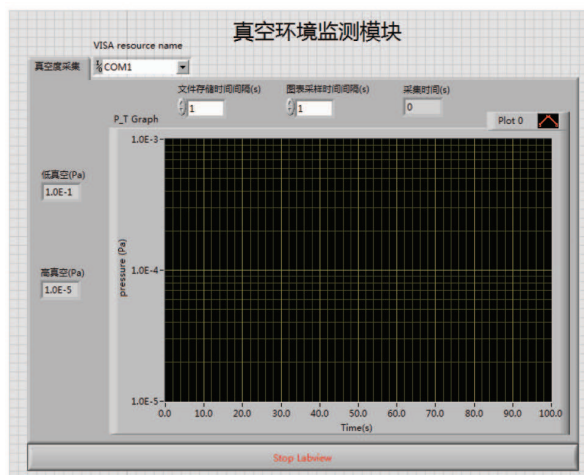


图 11 真空环境监测模块

Fig. 11 Monitor module of vacuum environment



### (5) 探测器控制模块

数字平板探测器 LabVIEW 控制程序界面如图 12 所示, 探测器有 3 种图像采集模式: 模式 1 采集帧率最高为 30 fps; 模式 2 采集帧率最高为 15 fps; 模式 3 采集帧率最高为 10 fps, 探测器默认采集方式为模式 1。触发方式可分为内部触发与外部触发两种, 本设计采用外部触发方式实现探测器与 X 射线源同步工作。外部触发信号由 FPGA 产生, 当输出脉冲控制 X 射线源开启后, 对 X 射线脉冲下降沿进行检测, 当下降沿到来时产生探测器同步信号。当探测器检测到有效的同步信号后, 探测器进入读出时间, 进行数据帧读取, 完成一次图像采集。

通过 LabVIEW 前面板还可以对采集图像的帧率和采集图像帧数进行设置以及前面提到的采集时间设置。要实现平板探测器正常工作需要加载探测器配置文件, 前面板提供了探测器配置文件路径选择。同时还提供了探测器采集图像存储路径选择, 方便图像数据存储。



图 12 探测器控制模块

Fig. 12 Control module of detector

## 4 静态扫描成像实验与结论

在进行多光束静态扫描成像验证中采用单个

焦点  $3.6 \text{ mm}^2$  大小的碳纳米管阴极阵列, 阴极发射面积越小对应 X 射线聚焦性能越好。实验中采用两路脉冲控制, 如图 13 所示, 输出脉冲周期 100 ms, 占空比 20%, 对应 X 射线曝光时间为 20 ms, 栅极高压采用 2 kV, 阳极高压采用 25 kV, 实验中测得发射电流稳定在 1 mA 左右。探测器图像帧采集设置为模式 1, 帧率 10 fps, 通过外部触发方式与射线源进行同步控制, 同步触发实验波形如图 14 所示, 实验中成功采集到两个不同角度扫描得到的图像, 如图 15 所示。

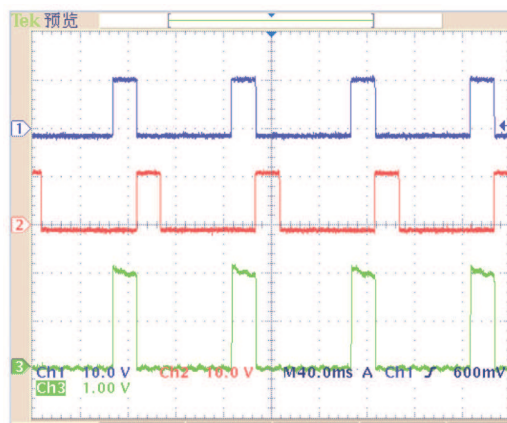


图 13 脉冲输出波形

Fig. 13 Waveform of pulse output

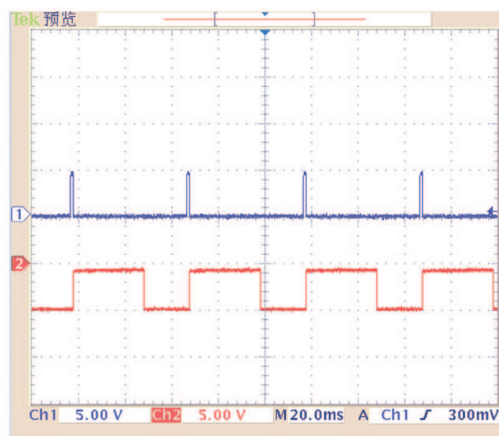


图 14 同步触发脉冲波形

Fig. 14 Waveform of synchronous triggering pulse

由于本次试验中使用的碳纳米管阴极场发射电流比较小, 实验中采用更容易分辨的金属材料

物质进行静态扫描成像功能的验证。图 15 中也可以观察到两幅图像清晰度存在一定的差别,这是由于两路脉冲分别控制的两个碳纳米管场发射 X 射线源电流一致性不好导致的。即在相同的曝光时间中,由于碳纳米管阴极发射出的电流不一致,导致不同发射源电流时间积  $\text{mAs}$  不一致,探测器接收到的 X 射线剂量存在差异。探测器将 X 射线转换为可测量的电信号,再根据电信号生成可供处理的二维图像,最终导致阴极发射电流的差异体现在图像清晰度上。

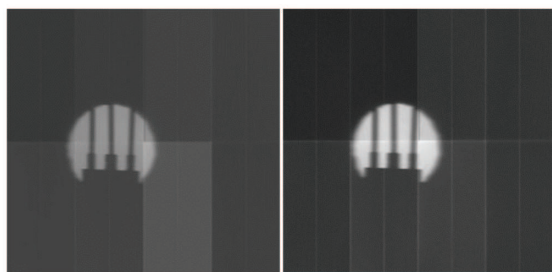


图 15 静态扫描图

Fig. 15 Image of stationary scan

基于碳纳米管 X 射线源的静态扫描成像被认为是下一代的 CT 成像技术,国内外目前仅有 Otto Zhou 教授团队掌握该项技术,国内除本项目组外还有个别组在这方面进行初步研究,但未进行相关实验验证。本文详细介绍了静态扫描系统的设计思路和实现方法,并通过实验验证静态扫描成像系统的基本功能,为国内从事相关研究的人员提供借鉴和参考意义。未来,本项目组将进一步改进碳纳米管阴极材料的制作工艺,获取更大的电流发射性能和稳定性;进一步完善静态扫描系统,解决多光束 X 射线源的电流一致性、电子聚焦等问题,为项目组进行碳纳米管静态 CT 的国产化研制提供技术积累。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang J, Yang G, Cheng Y, et al. Stationary scanning X-ray source based on carbon nanotube field emitters [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(18): 184104.
- [2] 郁朋, 代秋声, 邢晓曼, 等. 大束流场发射阴极 X 射线管的阳极设计 [J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(6): 1127-1131.
- [3] 陈垚, 陈婷, 桂建保, 等. 基于碳纳米管阴极的 X 射线源与成像技术进展 [J]. *CT 理论与应用研究*, 2013, 22(2): 363-372.
- [4] Peng R, Zhang J, Calderon-Colon X, et al. Design, optimization and testing of a multi-beam micro-CT scanner based on multi-beam field emission X-ray technology [C] // *Proceedings of SPIE 7622, Medical Imaging 2010: Physics of Medical Imaging*, 2010: 76221G.
- [5] Qian X, Tucker A, Gidcumb E, et al. High resolution stationary digital breast tomosynthesis using distributed carbon nanotube X-ray source array [J]. *Medical Physics*, 2012, 39(4): 2090-2099.
- [6] Tucker AW, Lu J, Zhou O. Dependency of image quality on system configuration parameters in a stationary digital breast tomosynthesis system [J]. *Medical Physics*, 2013, 40(3): 031917.
- [7] Shan J, Chtcheprov P, Tucker AW, et al. Stationary chest tomosynthesis using a CNT X-ray source array [C] // *Proceedings of SPIE 8668, Medical Imaging 2013: Physics of Medical Imaging*, 2013: 86680E.
- [8] Shan J, Tucker AW, Lee YZ, et al. Evaluation of imaging geometry for stationary chest tomosynthesis [C] // *Proceedings of SPIE 9033, Medical Imaging 2014: Physics of Medical Imaging*, 2014: 903317.
- [9] 张继君, 李海, 李俊, 等. 碳纳米管场发射微焦点高速 X 射线管 [J]. *真空电子技术*, 2015(1): 8-11.
- [10] 深圳先进技术研究院. 我国在碳纳米 X 射线成像技术取得进展 [J]. *功能材料信息*, 2013, 10(1): 43.
- [11] 邢晓曼, 代秋声. 碳纳米管场发射阴极制备技术的最新进展 [J]. *CT 理论与应用研究*, 2013, 22(1): 181-194.
- [12] Temple D. Recent progress in field emitter array development for high performance applications [J]. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 1999, 24(5): 185-239.
- [13] 柳鹏. 碳纳米管场发射特性研究及新型发射体的制备 [D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [14] 周晋锋. 基于 PaxScan2520V 平板探测器药柱 X 射线实时成像系统的开发 [D]. 太原: 中北大学, 2009.
- [15] 牛立强, 徐振宇. Quartus II 软件在 FPGA 技术课程教学中的应用 [J]. *科技信息*, 2011(36): 570.
- [16] 赵敏. 基于 LabVIEW 的运动控制系统的软件设计 [D]. 太原: 中北大学, 2014.