

PCI-E 图像采集系统的 WDF 驱动程序设计

黎绍秀 卫红 兰春嘉

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要 介绍了一种基于 WDF 模型的 PCI Express 红外图像采集系统的驱动程序设计。分析了 WDF 模型的框架结构及驱动程序设计流程, 重点讨论了基于自行研发的 PCI-E 图像采集卡的 WDF 驱动程序开发, 主要包括硬件访问、DMA 传输及中断通知等内容。经测试, 该驱动程序能稳定、可靠地工作。

关键词 WDF 驱动 PCI Express 总线 DMA 中断

中图分类号 TN919.82; **文献标志码** A

随着计算机和信息技术的飞速发展, 各种图像数据的传输带宽需求也迅速提高。高速率高帧频的图像传输、海量数据的采集处理以及实时视频的传输处理都需要更高效更快速的总线技术作为支撑, 传统的 PCI 总线已不能满足这些海量高带宽数据的传输要求。于是 Intel 联合多家公司提出了 PCI Express (PCI-E) 总线技术。PCI-E 是新一代的总线技术, 与以往 PCI、AGP 等传统并行总线的主要区别是它采用了点到点的串行连接方式, 每个设备都有自己的专用连接, 不需要共享总线带宽, 因而能提供极高的带宽来满足系统的要求。PCI-E 总线的规格从 x1 通道到 x32 通道, 其 x1 通道双向传输速度为 5Gbps, 而 PCI-E 3.0 规范中 x32 通道双向传输速度可达 320Gbps。PCI-E 总线具有很强的扩展性, 能满足不同设备对传输速率的不同需求。

PCI-E 总线技术的应用已经非常广泛, 因此如何开发高效、可靠、稳定的 PCI-E 设备驱动程序也必然成为工程师们面临的棘手问题。以往 PCI-E 设备驱动程序的开发都采用 WDM (Windows Driver Model) 框架, 但其编程复杂, 初学者难以快速掌握其编程要领。本文所述的 PCI-E 图像采集系统的驱动程序采用微软最新推出的 WDF (Windows Driver Foun-

dation) 驱动模型。WDF 提供了面向对象和事件驱动的驱动程序开发框架, 大大降低了驱动程序的开发难度^[1]。这样驱动工程师就能专注于研发与硬件设备相关的驱动程序, 而无需关注复杂的操作系统, 开发出针对自己设备的驱动程序。

1 PCI-E 图像采集系统架构

本文所述的驱动程序是基于自行研发的 PCI-E 红外图像采集系统的。该系统的架构框图如图 1 所示。

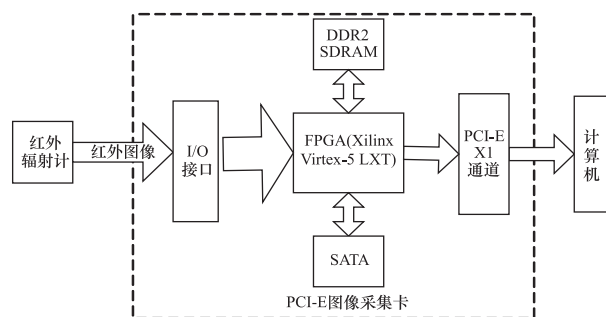


图 1 PCI-E 图像采集系统架构图

图像采集系统选用 Xilinx 公司 Vitex-5 LXT 系列 FPGA 作为图像采集处理及传输的核心控制器。该款 FPGA 中内嵌了 PCI-E 集成端点模块和 RocketIO GTP 收发器, 根据 PCI-E 总线的分层模型, 集成端点模块提供事务层、数据链路层、物理层以及配

2011 年 3 月 1 日收到, 3 月 7 日修改

第一作者简介: 黎绍秀 (1985—), 女, 云南人, 硕士研究生, 研究方向: 红外信号与信息处理。

置空间所具有的全部功能,提供了符合《PCI Express 基本规范 v1.1》的 PCI-E 解决方案^[2,3]。通过使用 Xilinx 公司提供的 PCI-E LogiCORE IP Endpoint Block Plus 核,可实现符合 PCI-E 总线协议的数据传输。图像采集系统工作流程如下:首先红外辐射计采集到的图像经过 I/O 接口传送至 FPGA,FPGA 根据计算机的指令将图像直接存入 SATA 硬盘或缓存到 DDR2 SDRAM,已缓存的图像在 FPGA 内部 DMA 传输控制器的控制下通过 PCI-E 总线 x1 通道传送至计算机,计算机收到图像后进行实时显示、存储及其他处理。在整个工作流程中,计算机访问硬件系统、图像的 DMA 传输以及一帧图像传输完毕时中断的处理等都需要驱动程序的支持。驱动程序作为应用程序与硬件通信的桥梁,其重要性不言而喻。

2 WDF 驱动程序设计

WDF (Windows Driver Foundation) 是微软在 WDM 基础上改进而来的最新一代驱动程序模型。它采用基于对象的技术,精心设计了对象模型并进行了封装,为驱动程序设计人员提供了面向对象、事件驱动的驱动程序开发框架^[4]。在 WDM 模型中,驱动程序一方面要处理硬件设备的行为,另一方面还要实现与操作系统内核的交互,这就大大增加了驱动程序的开发难度^[5],且容易在与操作系统内核交互过程中出错而导致整个系统的崩溃。WDF 通过引入框架的概念,将驱动程序和操作系统内核进行了分离。驱动程序通过框架内定义的对象及方法来实现自己的功能,而具体与操作系统内核之间的通信则交由框架去完成^[5]。WDF 框架实现了即插即用 (PnP)、电源管理等与操作系统内核相关的功能,于是驱动程序就可以专注地处理与硬件设备相关的行为,避免了直接与操作系统内核交互,不仅大大简化了驱动程序的编程,还提高了整个系统的可靠性和稳定性。WDF 驱动模型的架构如图 2 所示。

WDF 驱动程序包括两个类型:KMDF (Kernel-

Mode Driver Framework) 和 UMDF (User-Mode Driver Framework),前者用于内核模式,后者用于用户模式。本文所述的驱动程序采用 KMDF 模式,由于 KMDF 驱动程序运行在内核模式,因而使用 KMDF 进行驱动程序开发,不仅编程简单方便,而且代码运行效率高,能为 PCI-E 设备提供高效可靠的驱动程序。

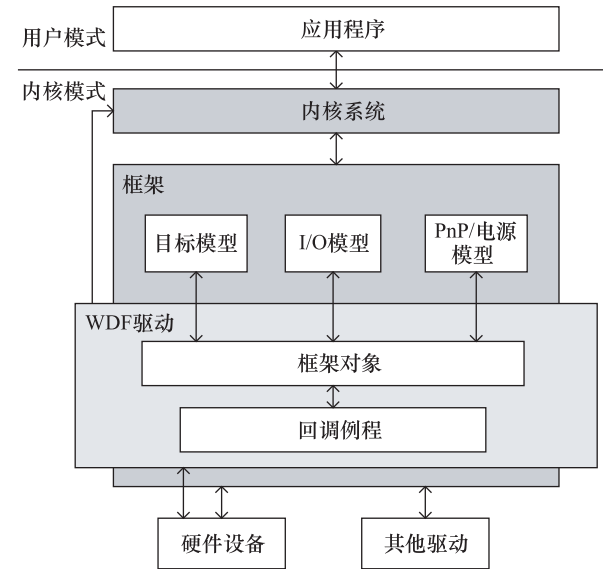


图 2 WDF 驱动模式架构

2.1 WDF 驱动程序开发流程

前文已述 WDF 提供了两种驱动程序框架,本文所述驱动程序都是在 KMDF 框架下设计与实现的,所用开发环境为 Microsoft Windows Driver Kit (WDK) 7.1.0.7600 和 Visual C++ 6.0。由于微软没有提供创建 KMDF 框架驱动程序的工具,因而当要创建一个 KMDF 框架驱动程序时,需要按照以下步骤进行。

- (1) 从已安装的 WDK 目录下 src 文件中拷贝一个 KMDF 示例驱动程序到自己创建的文件夹目录下。
- (2) 将 dirs 文件中内容修改为:DIRS = sys。
- (3) 将该示例驱动程序中驱动程序文件名和安装程序文件名修改成自己需要的文件名。
- (4) 利用 GUIDGEN 生成设备接口 GUID,并根据需求定义相关的设备 IO 命令。

这样就创建了一个 KMDF 框架的驱动程序,根据所需功能编写好驱动程序即可进入 WDK 中进行编译。

2.2 基于 WDF 的 PCI-E 设备驱动实现

PCI-E 总线是在传统 PCI 总线的基础上提出的,虽然它采用串行连接技术,但在软件上却是向下兼容 PCI 的。PCI-E 具有和 PCI 相同的存储器空间、配置空间和 I/O 空间,虽然地址空间有所扩展,但地址空间模型没有变化。PCI-E 提出了 MSI 中断方式,但仍支持传统中断方式。因而 PCI-E 设备驱动程序的开发仍可沿用 PCI 设备驱动程序的开发流程。

本文所述驱动程序是在自行研发的 PCI-E 图像采集系统中开发的,该驱动程序主要实现硬件设备访问、图像的 DMA 传输、图像传输中断处理及中断事件通知等功能。驱动程序的运行流程如图 3。

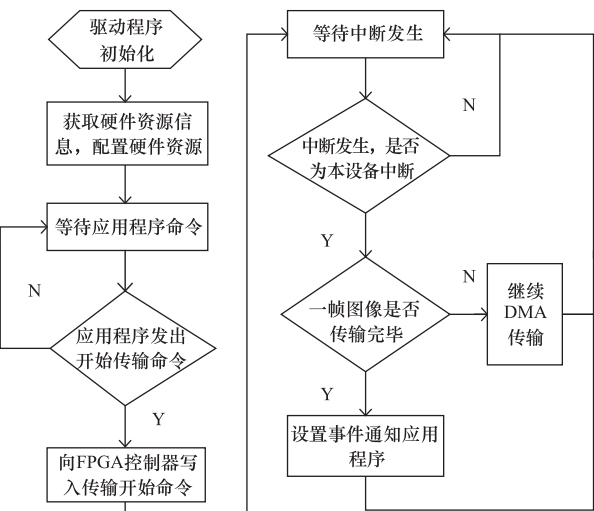


图 3 驱动程序运行流程图

2.2.1 PCI-E 设备的硬件访问

在驱动程序初始化时,总线驱动程序会获取 PCI-E 设备的配置空间信息,并将配置空间中的基址寄存器映射到计算机的内存空间。在基址寄存器中存放着所需映射的内存空间类型和大小,这样计算机就能分配一段相同类型和大小的内存空间,用于映射到 FPGA 的 Block RAM 地址空间,于是当需要访问 FPGA 的 Block RAM 地址空间时只需要访问映射好的计算机内存空间即可。

KMDF 提供了访问存储器映射和 I/O 映射设备的函数,驱动程序需根据配置空间定义地址指针。本系统中仅采用了存储器映射,驱动程序编写主要包括以下步骤:

- (1) 在设备环境变量结构中声明地址指针。

```
typedef struct _DEVICE_CONTEXT {
    PVOID   MemBaseAddress;          //内存映射地址
    ULONG   MemLength;
} DEVICE_CONTEXT, *PDEVICE_CONTEXT
```
- (2) 在 EvtDevicePrepareHardware 例程中初始化地址指针。

```
for( i = 0; i < WdfCmResourceListGetCount ( ResourceListTranslated );
    i ++ )//获取配置资源 { descriptor = WdfCmResourceListGetDescriptor
    ( ResourceListTranslated, i );//获取资源描述符
pDeviceContext -> MemBaseAddress = MmMapIoSpace ( descriptor -
    > u. Memory. Start, descriptor -> u. Memory. Length, MmNonCached )
//将物理地址转为内核地址 pDeviceContext -> MemLength = de-
    scriptor -> u. Memory. Length; }
```

- (3) 在 EvtDeviceReleaseHardware 例程中,解除物理地址与系统内核模式地址的关联。

- (4) 当需要访问存储器映射芯片时,可使用 KMDF 提供的函数,本设计对 PCI - E 设备的访问使用如下代码:

```
WRITE_RESISTER_ULONG(( PULONG)( inMemInfo -> OffsetAddr ),
inMemInfo -> data); //往存储器中写一个双字数据。其中 inMem-
Info -> OffsetAddr 是寄存器地址,inMemInfo -> data 是要写的数
据,它们都是由应用程序中设置并通过 DeviceIoControl 传递给
驱动程序的,这样用户只需修改应用程序中相应的参数,就可
以访问硬件设备所支持的任意存储器空间。
```

2.2.2 红外图像的 DMA 传输

本系统用于采集传输高速率高帧频的大量红外图像,必须采用 DMA 传输方式才能保证图像在传输过程中不丢失,因而涉及到了 DMA 传输的驱动程序编写。本设计中 DMA 传输编程主要包括以下几方面:

- (1) 在设备环境变量结构中声明 DMA 的三个对象:WDFDMAENABLER、WDFDMATRANSACTION 和 WDFCOMMONBUFER。
- (2) 在 EvtDeviceAdd 例程中,分别使用 WdfDmaEnablerCreate、WdfCommonBufferCreate 和 WdfDmaTransactionCreate 例程创建 DMA 的三个对象。

(3) 本驱动中采用 CommonBuffer 作为 DMA 读写缓存区,当有 I/O 请求时,在 EvtIoRead 或 EvtIoWrite 例程中使用 WdfDmaTransactionInitialize 函数初始化 DMA 传输,调用 WdfDmaTransactionExecute 函数启动 DMA 编程,并在 PCIe_EvtProgramDma 中对硬件的 DMA 操作寄存器进行编程。

```
mdl = IoAllocateMdl ( pDeviceContext -> CommonBufferBase, Length,
FALSE, FALSE, NULL ); //DMA 存储区 Mdl
MmBuildMdlForNonPagedPool ( mdl );
virtualAddress = MmGetMdlVirtualAddress ( mdl ); //DMA 存储区的内核模式地址
status = WdfDmaTransactionInitialize ( dmaTransaction, PCIe_EvtProgramDma, WdfDmaDirectionReadFromDevice, mdl, virtualAddress, length );
//初始化 DMA 传输
status = WdfDmaTransactionExecute ( dmaTransaction, WDF_NO_CON-
TEXT ); //启动 DMA 编程
WRITE_RESISTER_ULONG ( ( PULONG ) ( inMemInfo -> OffsetAddr ),
inMemInfo -> data ); //启动 DMA 传输,此处存储器地址和 DMA 启动的控制代码均由应用程序传递,增加了驱动程序的通用性和灵活性。
```

(4) 本设计中 DMA 传输的字节长度由应用程序设置为一帧图像的大小(128 KByte)并通过 DeviceIoControl 传递给驱动程序,因而完成一次 DMA 传输即完成一帧图像的传输。

2.2.3 中断处理

在图像传输过程中,当一帧图像传输完毕时,硬件采集系统会产生中断,驱动程序收到中断后需要将此中断信息通知应用程序,以便应用程序对图像进行实时显示、存储及相关处理。本文所述驱动程序实现中断通知包括以下几个步骤的驱动程序及应用程序编程。

(1) 应用程序创建一个自动重置事件,并将其句柄传递给驱动程序,然后等待事件发生。

(2) 驱动程序定义一个指向事件的指针 KEvent,使用 DeviceIoControl 例程接收应用程序传递过来的事件句柄,并构造一个内核事件。

```
typedef struct _QUEUE_CONTEXT
{
    PKEVENT Event; //定义指向事件的指针
    QUEUE_CONTEXT, * PQUEUE_CONTEXT;
    status = WdfRequestRetrieveInputBuffer ( Request, 4, &buffer, NULL );
    //应用程序创建的事件句柄
```

```
hEvent = * (HANDLE *) buffer; //构造内核事件
status = ObReferenceObjectByHandle ( hEvent,
SYNCHRONIZE, * ExEventObjectType, UserMode,
&pQueueContext -> Event, NULL );
```

(3) 当一帧图像传输完毕产生中断时,驱动程序首先判定是否为自己设备的中断,如若是则将已构造好的事件设为信号状态通知给应用程序,实现了驱动程序对应用程序的通信,核心代码如下:

```
ULONG INTStatus;
INTStatus = READ_RESISTER_USHORT ( ( PUSHORT ) INTFLG );
//读取中断状态寄存器的值
if ( ( INTStatus & 0x1 ) == 0x1 ) //判断中断是否为自己设备产生,判断规则与硬件配置和约定有关
WRITE_RESISTER_USHORT ( ( PUSHORT ) INTCLR, 0x1 ); //若是自己设备的中断,则清除并禁止中断
WdfInterruptQueueDpcForIsr ( Interrupt );
//调用中断延时处理例程 PCIe_EvtInterruptDPC 测试 DMA 传输是否结束,若未结束则调用 WdfDmaTransactionExecute 函数启动 DMA 编程,否则完成一帧图像的传输。
KeSetEvent ( pQueueContext -> Event, 0, FALSE ); //当一帧图像传输完毕时,在中断延迟处理程序中,设置事件为信号状态,通知应用程序
```

4 结束语

驱动程序作为应用程序与硬件通信的桥梁,对系统性能的影响举足轻重。高效、可靠、稳定的驱动程序对系统性能的提升具有重要意义。

本文所述的 PCI-E 设备驱动程序,使用了 WDF 模型,该模型提供了面向对象、事件驱动的驱动程序开发框架,由框架负责管理与操作系统内核相关的功能,这样就使得驱动程序的编写简单方便而且可靠性和稳定性提高。

经测试,本文所述的基于 WDF 模型的驱动程序能稳定、可靠地工作,PCI-E 红外图像采集系统在 DMA 传输模式下速度可达 130 MByte/s。在本驱动程序的设计中,所有参数均由应用程序设置后传递给驱动程序,因而该驱动程序具有很强的通用性,只需针对实际应用进行少量修改即可用于其他基于 PCI-E 或 PCI 标准接口的数据传输设备。

(下转第 3832 页)

Set-pair Rough Analysis Model of Multi-attribute Decision Making Based on Linminted Dominance Restriction

MO Jing-lan¹, ZHU Guang-sheng²

(Department of Basic Teaching, Lushan College of Guangxi University of Technology¹, Liuzhou 545616, P. R. China;

Department of Mechanical Engineering, Guangxi University of Technology², Liuzhou 545005, P. R. China)

[Abstract] Now there are several extensions in the incomplete preference information system, such as ,based on extended dominance relation, based on generalized extended dominance relation, based limited dominance relations. Unfortunately, these extensions are present their own limitations. Set-pair α almost limited dominance restriction is defined by introducing set-pair analysis ideas. A new extension of rough decision analysis model based on set-pair α almost limited dominance restriction is presented. This model not only didn't the extension reserve the advantage of limited dominance relation, but also its flexibility is increased by adjusting the value of the almosty α while its accuracy is also guaranteed. This model is suited to deal with large incomplete preference information system.

[Key words] multi-attribute decision making of imcomplete preference system limited dominance restriction
set-pair analysis set-pair α almost limited dominance restriction

(上接第 3827 页)

参 考 文 献

- 1 武安河. Windows 设备驱动程序 WDF 开发. 北京: 电子工业出版社, 2009
- 2 Xilinx inc, LogiCORE IP Endpoint Block Plus v1.13 for PCI Express. UG341, <http://www.xilinx.com>. December 2, 2009
- 3 Xilinx inc, Virtex-5 FPGA Integrated Endpoint Block for PCI Express Designs. UG197, <http://www.xilinx.com>. July 22, 2009
- 4 Orwick P, Smith G. Developing drivers with the microsoft windows driver foundation. Microsoft Press, 2007
- 5 邹敬轩, 蔡皖东. 基于 WDF 过滤驱动的 USB 存储设备监控系统. 计算机工程与科学, 2010; 32(3): 42

The WDF Driver Design for PCI-E Image Acquisition System

LI Shao-xiu, WEI Hong, LAN Chun-jia

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, P. R. China)

[Abstract] A WDF model which use to design driver for PCI-E infrared image acquisition system is introduced. WDF Architecture and flow of driver design are illustrated. Emphasis is design of WDF driver based on PCI-E image acquisition card, which include hardware access, DMA transaction and interrupt processing. According to the result of experimentation, the driver works stably and reliably.

[Key words] WDF driver PCI Express bus DMA Interrupt