

# PCI-E 接口驱动软件设计与实现

刘娟,田泽,黎小玉

(中国航空计算技术研究所,陕西西安 710119)

**摘要:**PCI Express 作为第三代 IO 总线标准,以其双通道、高带宽、低功耗、传输可靠等优点,正逐渐取代原有 PCI 总线,被广泛应用于嵌入式领域。其驱动程序作为应用与 PCI-E 硬件设备通信的桥梁,对系统性能的影响举足轻重。文中结合某自研芯片 PC 环境下 PCI-E 主机接口的软硬件协同设计与验证的实践,首先阐述了 Windows 环境下 PCI-E 接口驱动模型的选择,然后分析了 KMDF 驱动框架,在此基础上给出了驱动接口的设计与实现。该 PCI-E 接口驱动采用面向对象和事件驱动的 WDF 驱动开发模型,有效地降低了开发难度、缩短开发周期。利用该驱动,有效地验证了 PCI-E 主机接口逻辑功能的正确性。

**关键词:**PCI-E;WDF;KMDF;中断;DMA 缓存

**中图分类号:**TP31

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2012)08-0053-03

## Design and Implementation of PCI-E Interface Driver Software

LIU Juan, TIAN Ze, LI Xiao-yu

(Aeronautics Computing Technique Research Institute, Xi'an 710119, China)

**Abstract:**PCI Express is the third IO bus standard which had been implemented widely in embedded system. As the advantages of PCI-E in dual-channel, high-bandwidth, low-power dissipation, reliable transfers and so on, the traditional PCI bus had been replaced. PCI-E driver as the bridge between application and PCI-E hardware, it is very important for system performance. With the help of hardware and software co-design and verification of PCI-E host interface which could be implemented in sorts of self-design SoC, mainly describe the selection of PCI-E driver model, architecture of KMDF driver, design and implementation of all driver interfaces for sorts of PCI-E driver. The PCI-E driver uses WDF driver model, the WDF driver model was driven by oriented object and event, which can reduce development effort, shorten development cycle. The use of this driver can verify PCIE perfectly.

**Key words:**PCI-E;WDF;KMDF;interrupt;DMA buffer

## 0 引言

PCIExpress(简称 PCI-E)<sup>[1]</sup>,突破了传统第二代 IO 总线 PCI、PCI-X 等的并行总线结构设计,以采用串行总线结构、点对点的互联方式等显著特点,成为第三代 IO 总线的标准<sup>[2,3]</sup>。由于 PCI-E 在总线结构上采取了变革,使得每一个设备独享通道带宽,数据传输速率有了极大的提高,满足现在和将来一定时间内一些高速通信系统中对通信带宽的要求。同时由于 PCI-E 具有电源消耗低、在软件上向后兼容 PCI 等优点,使得其正逐步取代 PCI 总线被应用在高性能的嵌入式系统中。

由于 PCI-E 在嵌入式系统中的应用,如何快速地

设计高效、稳定、可靠的 PCI-E 驱动软件,已成为工程师们面临的问题。文中结合某自研芯片的 PCI-E 接口的软硬件协同设计与验证,分析了 Windows 环境下驱动模型的选择以及 KMDF 驱动框架,在此基础上,详细阐述 PCI-E 驱动接口的实现。

## 1 PCI-E 接口驱动需求

在某型芯片中,提供 PCI-E 主机接口,该 PCI-E 接口设有三个存储器类型的 BAR 空间,均为 32 位访问,PCI-E 中断采用 INTA,另外,该 PCI-E 提供有 PCI-E 专用 DMA,该 DMA 操作由硬件控制,仅需软件申请主机的一段内存空间作为 DMA 缓存,基于以上 PCI-E 接口设计,在进行该接口的验证时 PCI-E 接口驱动软件需提供以下功能接口:配置空间访问、存储器空间访问、中断处理、DMA 空间申请及释放。

## 2 驱动开发模型选择

Windows 驱动开发最先开始采用的是 VXD(WIN-

收稿日期:2012-03-20;修回日期:2012-06-23

基金项目:装备预先研究项目(51308010601)

作者简介:刘娟(1984-),女,陕西宝鸡人,硕士,研究方向为 SoC 设计与验证;田泽,博士,研究员,中航工业集团首席技术专家,研究方向为 SoC 设计、嵌入式系统设计、VLSI 设计。

DOWS 95 和 98), 自 Windows2000 开始, 开发驱动以 WDM(Windows Driver Model)为基础<sup>[4]</sup>, 在 VISTA 系统之后, 微软推出了在 WDM 基础上改进而来的最新一代的 WDF 驱动模型(Windows Driver Foudation)。WDF 驱动模型如图 1 所示, 采用基于对象的技术, 提供了比 WDM 更高层次抽象的、高度灵活的、可扩展的、可诊断的驱动程序框架。简化了驱动程序设计人员的开发难度, 并且向后兼容 Windows2000、WindowsXP 等操作系统<sup>[5]</sup>, 因此, 本 PCI-E 驱动开发采用 WDF 驱动模型。WDF 包括 KMDF 和 UMDF 两个框架, KMDF 用于内核模式, UMDF 用于用户模式, 文中的设计基于 KMDF。

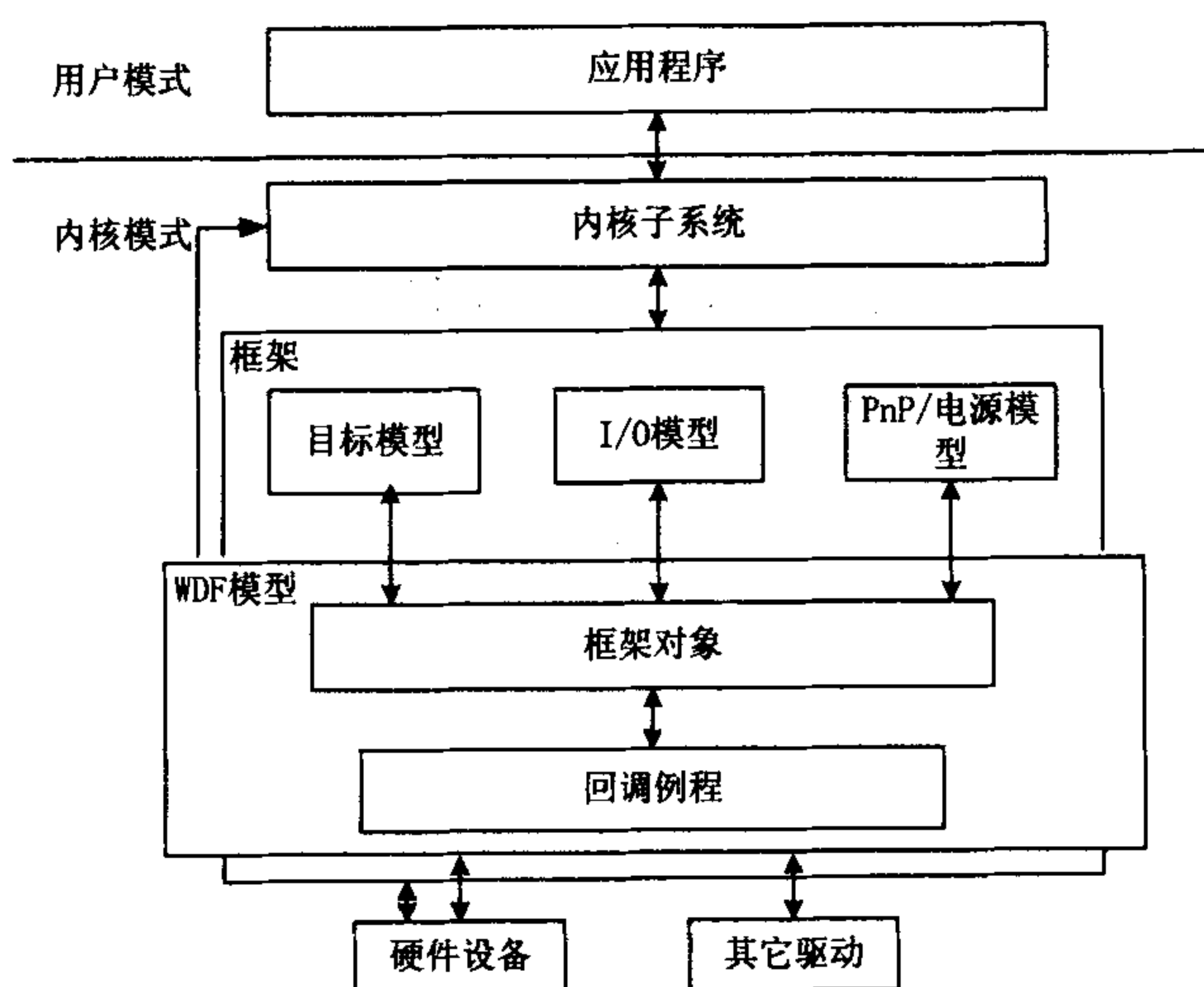


图 1 WDF 驱动模型结构

### 3 驱动设计及实现

开发基于 WDF 的 PCI-E 驱动, 首先必须熟悉 KMDF 驱动框架, 创建 PCI-E 驱动的 KMDF 驱动程序框架, 基于 KMDF 驱动模型的驱动开发主要是根据驱动需求开发各事件的回调函数以及添加和应用程序通信的控制代码。

#### 3.1 KMDF 驱动框架

KMDF 驱动框架为驱动程序设计人员提供了面向对象、事件驱动的开发框架, 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。KMDF 驱动框架包括: 一个 DriverEntry 例程、一个 EvtDeviceAdd 例程、IO 处理例程、即插即用和电源管理、其它回调例程、如对象的清除例程、中断处理例程等。

KMDF 驱动程序的标准入口函数是 DriverEntry, 负责驱动程序和框架的初始化, 所有的驱动都必须包含 DriverEntry, 当第一次装载驱动程序时调用该例程, 然而与 WDM 不同的是, 它只进行对象的初始化和构造工作, 将设备管理完全放在 EvtDeviceAdd 例程中处理。

EvtDeviceAdd 例程是当设备被首次枚举, 在系统初始化的时候调用<sup>[6]</sup>, EvtDeviceAdd 例程首先创建及初始化框架设备对象、创建框架队列、创建设备接口, 然后进行

设备资源的识别, 设置 PNP 和电源管理以及 IO 处理的回调例程, 最后创建中断对象并初始化中断处理等。

IO 处理例程处理应用程序与驱动程序之间的通信, IO 处理例程是当框架获得 IO 请求时按驱动程序提供的 IO 处理例程进行调用。包括 EvtIoDeviceControl、EvtIoRead、EvtIoWrite 等。

对于即插即用和电源管理<sup>[7]</sup>, KMDF 框架实现了智能的默认行为并提供了一组特定于状态的回调, 如果程序注册了某个回调, 框架则在对应的状态变化时调用此回调, 否则就采用默认的处理方式。对于大部分过滤和功能驱动程序, KMDF 的默认配置已经可以满足它们对于即插即用和电源管理的处理。

#### 3.2 驱动接口实现

##### 3.2.1 配置空间访问接口

配置空间访问主要是完成配置空间的读写功能, PCI-E 配置空间由几组配置寄存器组成<sup>[8]</sup>, 包括配置头标区、PCI-E 设备专用寄存器及新能力寄存器组以及 PCI-E 扩展配置空间寄存器组。在 PCI-E 配置空间的头标区, 包含一个 Capability Pointer 寄存器, 该寄存器存放 Capability 结构链表的头指针, 在 PCI-E 设备中, 包含多个 Capability 结构, 这些寄存器组成一个链表, 链表的最后一个寄存器组的能力指针为 0, 表示后面不再有能力寄存器组。

图 2 为本芯片中 PCI-E 的 Capability 结构组成。

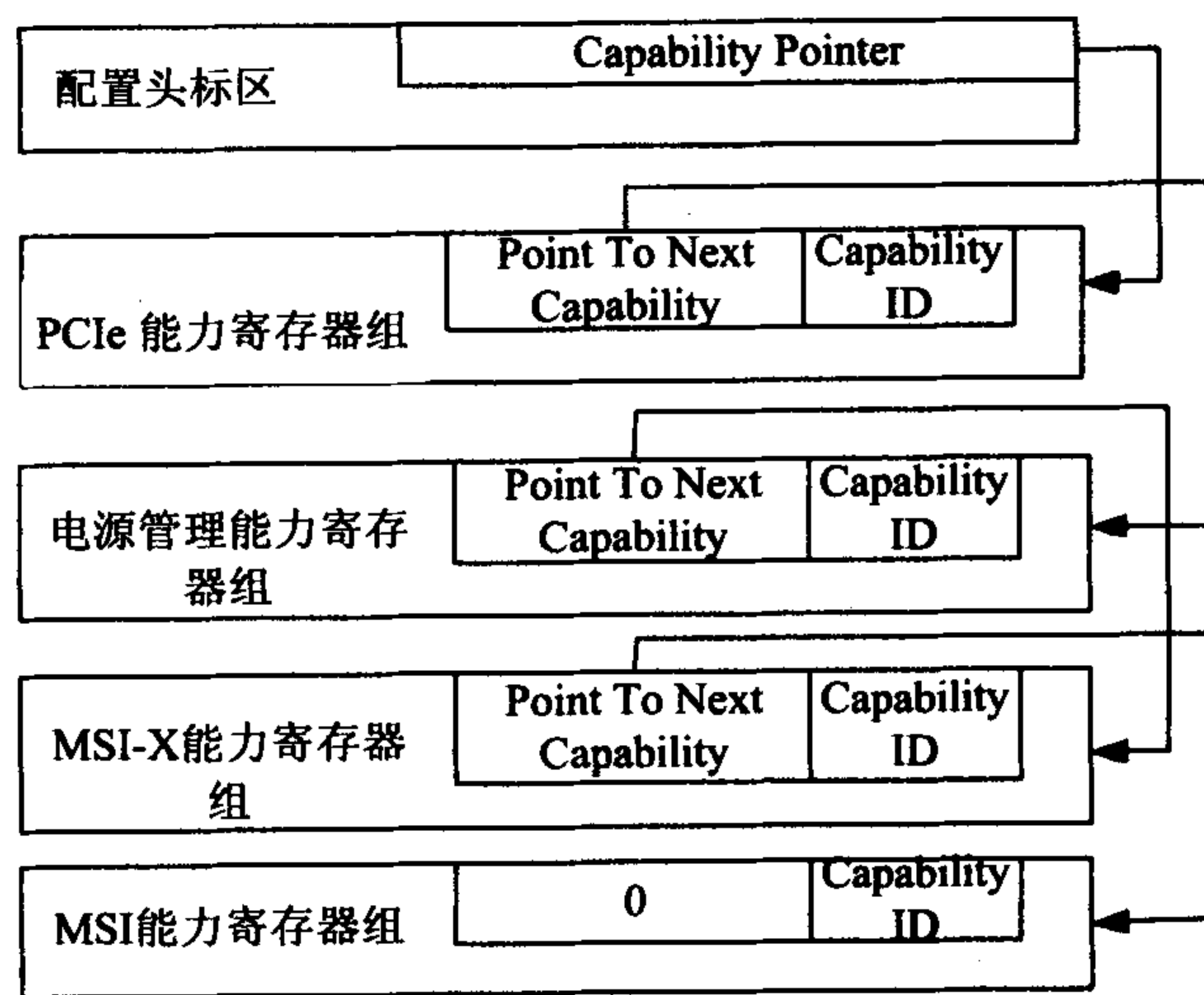


图 2 PCI-E 配置空间的 Capability 结构组成

本接口的实现需完成以下工作:

a. 在 EvtDeviceAdd 中添加 PCIeDrvBoardConfigInit 函数, 在 PCIeDrvBoardConfigInit 中按照 PCI-E 配置空间的寄存器链表组织方式逐个搜索能力寄存器组, 采用 BUS\_INTERFACE\_STANDARD 具有的 GetBusData 方法获取配置空间的寄存器值, 并将寄存器值保存于预先定义的 BOARD\_CONFIG\_STRUCT 结构体 BoardConfig 中。

b. 在 EvtIoDeviceControl 中添加 BOARD\_CONFIG\_IOCTL 控制码的解析, 在对该控制码的处理中, 获取应用传递的读写方向, 如果是读方向, 根据应用程序提供的地

址偏移和长度将 BoardConfig 作为该控制码的输出传递给应用程序。如果是写方向,根据应用程序提供的地址偏移和数据,采用 BUS\_INTERFACE\_STANDARD 的 SetBusData 方法将应用程序需修改的值写入的配置空间的寄存器,并且使用 GetBusData 方法更新 BoardConfig 结构体。

### 3.2.2 存储器空间访问接口

存储器空间访问接口主要需提供 PCI-E 的 BAR1、BAR2 和 BAR3 的用户空间地址,应用接口借助该地址对 PCI-E 的 BAR1、BAR2 和 BAR3 空间进行访问,由于在驱动程序初始化时,KMDF 框架自动调用即插即用例程 EvtDevicePrepareHardware 函数来获取设备的资源<sup>[9]</sup>,所以该接口的主要工作是完成 BAR1、BAR2 和 BAR3 的物理地址空间获取以及将物理地址转化为用户空间虚拟地址。

可分两个阶段完成:

a. 在该 EvtDevicePrepareHardware 函数添加 ScanPcieResources 用来获取该设备的资源,ScanPcieResources 采用如图 3 所示的处理流程。

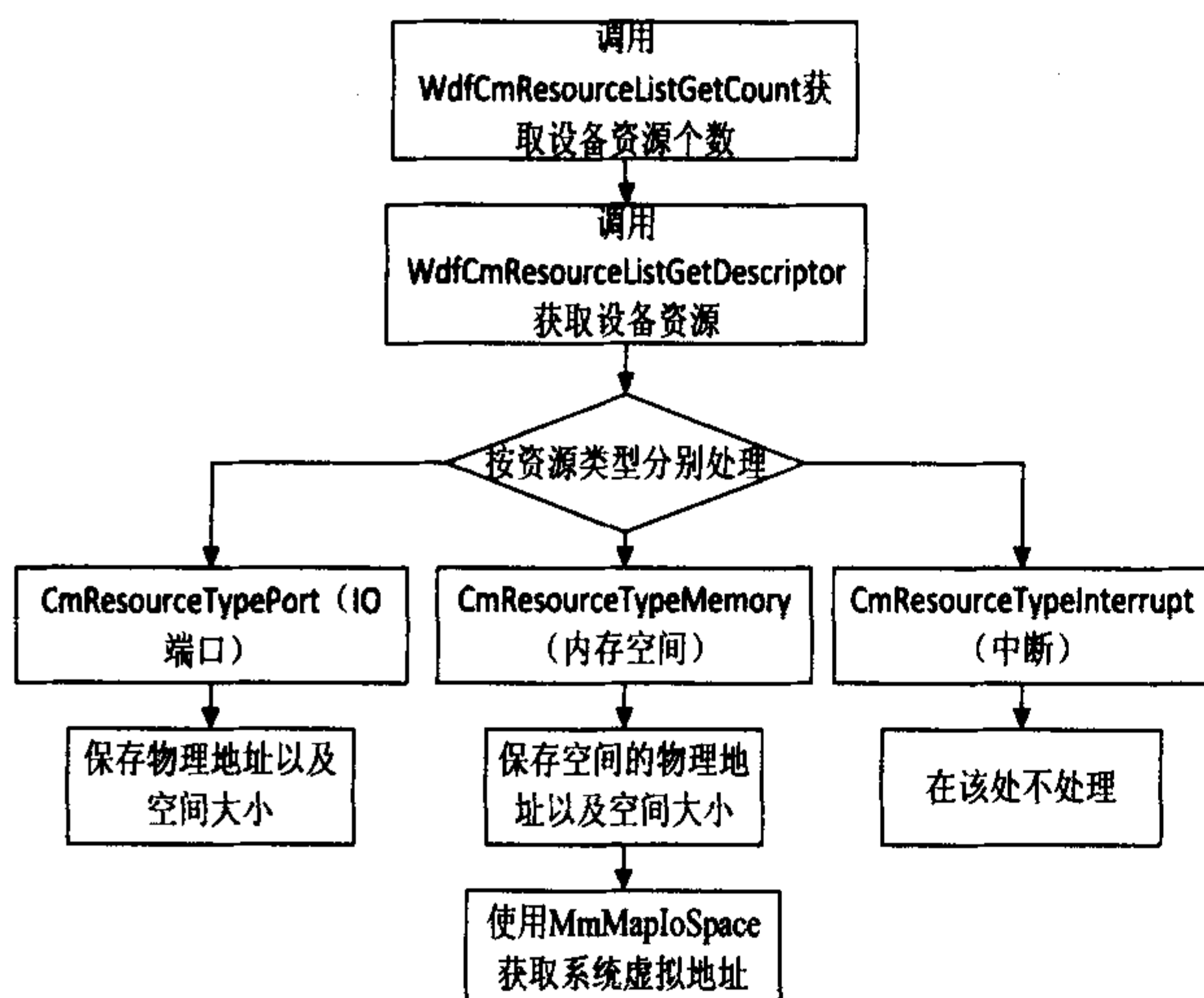


图3 ScanPcieResources 函数处理流程

b. 定义获取存储空间的 GET\_BAR\_ADDR\_IOCTL 控制码,并在 EvtIoDeviceControl 中添加对该控制码的解析,对该控制码的解析按如下步骤进行:调用 IoAllocateMdl 创建一个针对 ScanPcieResources 函数中获取的系统空间虚拟地址的 MDL;然后调用 MmBuildMdlForNonPagedPool 来建立虚拟地址与物理地址页面的直接映射;接着调用 MmMapLockedPagesSpecifyCache 将 MDL 描述的内存映射到用户虚拟地址空间;最后将用户虚拟空间地址传递给应用程序。

### 3.2.3 中断处理

与 WDM 中断相同,KMDF 将中断服务程序分为两级,中断服务程序在高优先级的 DISPATCH-LEVEL,不能进行长时间的内核调用,因此采用延迟过程调用(DPC)来解决<sup>[10,11]</sup>,DPC 是在中断服务程序完成之后,用来处理比较费时的工作,与 WDM 不同的是,WDF 设备中断的管理由 EvtInterruptEnable 例程、EvtInterruptDisable 例程、中都服务例程(ISR)和 DpcForIsr 例程完成。

在该驱动程序的设计中,中断的管理由 PCIeDrvIntrISR、PCIeDrvIntrEnable、PCIeDrvIntrDisable、PCIeDrvIntrDpcForISR 例程完成,WDF 框架在 EvtDeviceAdd 中初始化中断相关例程,首先调用 WDF\_INTERRUPT\_CONFIG\_INIT 初始化 WDF\_INTERRUPT\_CONFIG 结构体,安装 PCIeDrvIntrISR 和 PCIeDrvIntrDpcForISR,建立 PCIeDrvIntrEnable 回调例程和 PCIeDrvIntrDisable 回调例程。最后创建中断对象并初始化。

CPU 在收到硬件中断进入中断服务程序 PCIeDrvIntrISR,PCIeDrvIntrISR 的主要工作是清除中断,并获取中断状态位,将中断处理放在 PCIeDrvIntrDpcForISR 中,另外,也可以将中断的处理交由应用程序去做,这样应用程序需创建一个事件,并通过 DeviceIoControl 将事件句柄传递给驱动程序,在中断服务程序中清除中断后使用 KeSetEvent 通知应用程序有中断发生,应用程序可从事件的参数中获取中断状态并进行处理。

### 3.2.4 DMA 缓存申请及释放接口

由于 Windows 操作系统的内存管理采用了虚拟地址的概念,应用程序访问的地址为虚拟地址,而 DMA 操作的却是一块物理地址连续的空间<sup>[12]</sup>,所以 DMA 缓冲申请实际上需要按照应用程序指定的大小申请一块物理地址连续的空间,并将空间的物理地址和用户空间虚拟地址返回给应用程序。针对 DMA 操作,KMDF 提供了 WDF-COMMONBUFFER 对象,该对象用于申请系统提供的公共缓存区。

a. 缓存区申请的实现需要完成以下操作:

添加 DMA 缓存申请控制码 DMA\_BUFFER\_ALLOC\_IOCTL 控制码,并在 EvtIoDeviceControl 中添加该控制码的解析,在该控制码的解析中完成 DMA 缓存的申请以及物理地址与虚拟地址之间的转化。首先 WdfCommonBufferCreateWithConfig 创建一个 DMA 和设备都可以访问的内存空间,调用 WdfCommonBufferGetAlignedVirtualAddress 函数就可以得到分配的这片内存空间的虚拟地址,调用 WdfCommonBufferGetAlignedLogicalAddress 得到这块空间的物理地址。然后使用存储器空间访问接口中的地址转化方法,就可以得到用户空间虚拟地址。最后,将得到的物理地址和用户空间虚拟地址作为该控制码的输出传递给应用程序。

b. 缓存区释放的实现需要完成以下操作:

添加 DMA 缓存释放控制码 DMA\_BUFFER\_FREE\_IOCTL,在 EvtIoDeviceControl 中添加对该控制码的解析,即对需要释放的缓存区调用 WdfObjectDelete 释放缓冲。

另外,对缓存区的申请和释放必须采用机制保证所要释放的缓存区和已申请的缓存匹配。本驱动程序的设计中,采用链表的方式,对申请的缓冲采用链表的结构进行记录,在释放缓冲时需在链表中进行查找,对查找到的缓冲,释放该缓冲并从链表中删除。

(下转第 59 页)

就会被认为是符合要求的匹配,而文中的算法不仅考虑概念因素的影响还结合向量上余弦计算使得查准率提高。

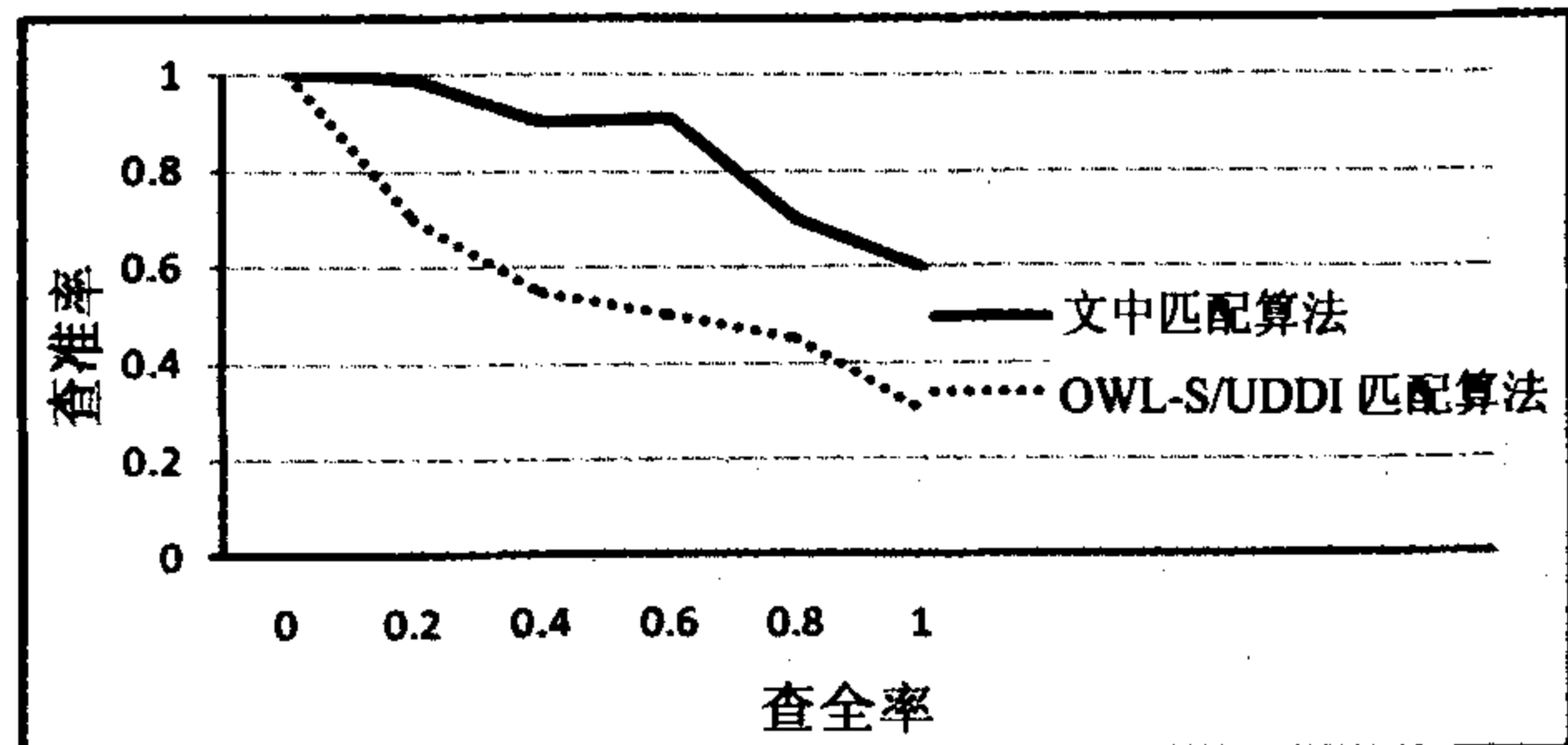


图2 QCR-QAR 曲线

#### 4 结束语

文中提出了一种新的语义 Web 服务匹配算法,通过在本体中计算两个概念之间的相似度基础上计算概念向量的相似度得到 Web 服务输入与输出匹配度,最后将各分量匹配度乘以权值求和得到综合匹配度,将其排序后的结果集返回给用户。根据实验的结果显示了该算法显著提高了服务匹配准确率。

#### 参考文献:

- [1] Christensen E, Curbera F, Meredith G, et al. Web services description language (WSDL) 1.1 [EB/OL]. 2001. <http://www.w3.org/TR/2001/NOTE-wsdl-20010315>.
- [2] Martin D, Burstein M, Hobbs J, et al. OWL-S: semantic mark-

up for web services [EB/OL]. 2004. <http://www.w3.org/Submission/OWL-S/>.

- [3] 于敏,曹宝香. 基于 QoS 的语义 Web 服务匹配策略[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(9): 78-82.
- [4] 黄志成,李华. 改进的语义 Web 服务匹配算法设计与实现[J]. 计算机工程, 2009, 35(20): 88-90.
- [5] 聂规划,左秀然,陈冬林. 本体映射中一种改进的概念相似度计算方法[J]. 计算机应用, 2008, 28(6): 1563-1565.
- [6] 张献,李舟军,李梦君. 一种基于语义 web 服务匹配的策略和实现[J]. 计算机科学, 2007, 34(5): 99-103.
- [7] Paolucci M, Kawamura T, Payne T, et al. Semantic matching of web services capabilities [C]//Lecture Notes in Computer Science. [s.l.]: [s.n.], 2002: 333-347.
- [8] 彭晖,史忠植,邱莉榕,等. 基于本体概念相似度的语义 Web 服务匹配算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(15): 51-53.
- [9] 杨惠荣,刘珊珊,尹宝才,等. 基于语义距离的 Web 服务匹配算法[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(4): 591-595.
- [10] Bonino D, Corno F. Self-similarity Metric for Index Pruning in Conceptual Vector Space Models [C]//19th International Conference on Database and Expert Systems Application. [s.l.]: [s.n.], 2008: 225-229.
- [11] Klusch M, Fries B, Khalid M, et al. Owls-mx: hybrid owl-s service match making [EB/OL]. 2005. <http://www.aaai.org/Papers/Symposia/Fall/2005/FS-05-01/FS05-01-011.pdf>.
- [12] Yang Zhi, Chen Junliang, Wu Budan. A New Ontology-based Service Matching Algorithm [C]//2010 6th World Congress on Services. [s.l.]: [s.n.], 2010: 170-171.

(上接第 55 页)

#### 4 结束语

文中阐述了 Windows 环境下的 PCI-E 驱动设计和实现,该驱动采用 WDF 驱动模型开发,该模型提供了比以往的 WDM 更高层次抽象的高度灵活、可扩展、可诊断的驱动程序框架,封装了驱动中的某些共同行为,并将驱动程序与操作系统之间进行了分离,因此简化了驱动程序设计人员的开发难度,缩短了开发周期。笔者对该驱动程序在自研的某芯片验证板卡上进行了功能和性能测试,经测试,各接口功能正确,可以稳定、可靠的工作;DMA 读速率为 460MB/s, DMA 写速率为 570MB/s,驱动接口功能及性能满足该芯片的 PCI-E 接口验证的需求。

#### 参考文献:

- [1] 马鸣锦. PCI、PCI-X、PCI Express 的原理及体系结构[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [2] PCI Express 2.0 Base Specification [EB/OL]. [2006-09-1]. <http://www.pcisig.com>.

- [3] PCI local bus specification v3.0 [EB/OL]. [2010-03-10]. <http://www.pcisig.com>.
- [4] 张帆,史彩成. Windows 驱动开发技术详解[M]. 北京:电子工业出版社, 2008.
- [5] 李正军. WDF 设备驱动程序的设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(5): 228-230.
- [6] Orwick P. Developing Drivers with the Microsoft Windows Driver Foundation [M]. US: Microsoft Press, 2007.
- [7] 程海全,胡君. PCI 设备电源管理驱动程序开发[J]. 现代电子技术, 2010(14): 196-201.
- [8] 廖寅龙,田泽. FC 网络通信中 PCIe 的接口的设计与实现[J]. 航空计算技术, 2010, 40(4): 127-130.
- [9] 武安河. Windows 设备驱动 WDF 开发[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [10] Microsoft Windows driver kit 7600 [EB/OL]. [2009-10-01]. <http://www.microsoft.com>.
- [11] Oney W. Programming The Microsoft Windows Driver Model (WDM) [M]. US: Microsoft Press, 1999.
- [12] 黎邵秀. PCI-E 图像采集系统的 WDF 驱动程序设计[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(16): 3824-3832.

作者: 张姗姗, 成卫青, 豆仁福  
作者单位: 张姗姗,成卫青(南京邮电大学计算机学院,江苏南京210003), 豆仁福(95856部队,江苏南京210028)  
刊名: 计算机技术与发展  
英文刊名: Computer Technology and Development  
年, 卷(期): 2012(8)

参考文献(12条)

- 1.马鸣笛 PCI、PCI-X、PCI Express的原理及体系结构 2007
- 2.PCI Express 2.0 Base Specification 2006
- 3.PCI local bus specification v3.0 2010
- 4.张帆,史彩成 Windows驱动开发技术详解 2008
- 5.李正军 WDF设备驱动程序的设计与实现[期刊论文]•计算机技术与发展 2007(05)
- 6.Orwick P Developing Drivers with the Microsoft Windows Driver Foundation 2007
- 7.程海全;胡君 PCI设备电源管理驱动程序开发[期刊论文]•现代电子技术 2010(14)
- 8.廖寅龙;田泽 PC网络通信中PCIe的接口的设计与实现[期刊论文]•航空计算技术 2010(04)
- 9.武安河 Windows设备驱动WDF开发 2009
- 10.Microsoft Windows driver kit 7600 2009
- 11.Oney W Programming The MicrosoftWindows Driver Model(WDM) 1999
- 12.黎德秀 PCI主图像采集系统的WDF驱动程序设计[期刊论文]•科学技术与工程 2011(16)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjtz201208013.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201208013.aspx)