

基于龙芯 2K2000 处理器的 SATA 驱动设计与实现

刘飞洋¹ 郭 锋¹ 李若玮¹
LIU Feiyang GUO Feng LI Ruowei

摘 要

针对目前国产嵌入式龙芯系列芯片的设备接口驱动适配工作需要完善的现状,文章选取了 SATA 盘设备进行研究。为实现在龙芯系列处理器上适配 SATA 驱动和使用大容量外部存储设备的功能,通过分析龙芯 2K2000 处理器上 SATA 设备的工作原理,根据 SATA 接口采用的 AHCI 技术协议,提出了一种可以适配 LoongArch 架构和 MIPS64 架构的 SATA 驱动模型,在嵌入式操作系统上设计并实现了完整的 SATA 驱动程序。经过不同场景下的功能和可靠性测试,验证 SATA 驱动的读写一致性和读写速率等基本功能,测试结果显示所提出的 SATA 驱动程序满足龙芯系列 2K2000 处理器的基本功能需求,可以应用在嵌入式操作系统程序中。

关键词

龙芯 2K2000; SATA 驱动; 龙芯 LoongArch 架构; 嵌入式操作系统; AHCI; HBA; 性能测试

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.11.016

0 引言

在全国高科技产业逐步走向国产自主化研发的趋势中,龙芯中科公司在嵌入式芯片领域取得了相当有成效的进步。本文主要研究对象是该公司的芯片产品功能,龙芯 2K2000 处理器(简称龙芯 2K2000)是龙芯中科研发的通用嵌入式芯片,芯片内部集成了两个 LA364 处理器核,采用国产自研的 LoongArch 指令架构^[1]系统,并集成各种系统 IO 接口。龙芯架构(LoongArch)是一种具有精简指令集计算机(reduced instruction set computing, RISC)风格的指令系统架构。这款基于 LoongArch 架构的 SOC(system on chip)芯片具有高性能、接口丰富、功耗伸缩性强等特点。目前龙芯 2K2000 在网络安全、工业控制、电力、轨道交通、移动智能终端、信息教育等多个领域有较大应用前景。

随着现实中芯片处理设备需要面对的工作场景逐渐变得复杂,嵌入式系统软件也快速发展和广泛应用。大部分软件对硬件设备的功能和性能要求更加严格,特别是对大容量外部存储设备^[2]的需求越来越强烈。SATA 的特点更适用于解决这一需求问题。最新的龙芯 2K2000 集成了龙芯自主研发的 3D GPU 核,支持 SATA 3.0 接口,它的 SATA 接口兼容串行 ATA 3.3 规范和 AHCI 1.3.1 规范。为了更好地面向用户服务,需要进行软件适配实现相应的 BSP(Board Support Package)层^[3-4]软件。本文将在龙芯 2K2000 处理器上研究 SATA 驱动程序的设计与实现。

1 SATA 设备工作原理

SATA(serial advanced technology attachment)设备是一种高速串行通信的大容量电子盘的控制单元,它具备的特点可以使其取代传统的并行 ATA(parallel ATA)接口,可以提供更高的传输速度和更简洁的布线方案。SATA 通常有 3 种工作模式:IDE、AHCI 和 RAID。不同的工作模式各有特点,适用于相应的工作环境,当前主流计算机的 SATA 盘大多采用 AHCI 模式^[5-10]。

1.1 SATA 协议

SATA 接口协议^[11]实现借鉴了经典的 TCP/IP 模型,将 SATA 接口划分为 4 个层次来实现,包括物理层、链路层、传输层、应用层。

(1)物理层采用全双工串行传输方式,主要功能是进行信号的串并转化。物理层接收来自链路层的数据信息,然后将接收到的并行数字逻辑信号转化为串行的差分物理信号,再将其发送到主机端。与此相对应的,物理层会将主机端发送来的串行差分物理信号转化为并行数字逻辑信号后,再将连接状态发送到链路层。

(2)链路层主要通过控制 SATA 协议原语的传递来控制帧信息结构(frame information structure, FIS)的整个传输过程,从而保证帧信息能够被正确的发送与接收。并且链路层可以进行帧流量控制,从而防止在信息传输的过程中出现数据发送过快或接收过多的情况。链路层还会进行 CRC 校验,对数据加扰、解扰。

(3)传输层主要负责帧信息结构的封装与解封,主机

1. 中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所
陕西西安 710065

和设备通过传输层帧的交互来完成命令交互和数据传递。

(4) 应用层则主要完成对收到的 ATA/ATAPI 命令 (register FIS) 进行解析, 并做出相应的回应。

1.2 AHCI 协议

AHCI (serial ATA advanced host controller interface) 是一种用于连接计算机主机系统和 SATA 设备的接口标准 [12-14]。AHCI 通过包含一个 PCI BAR (基址寄存器) 实现原生 SATA 功能, 它提供了高速数据传输和一些高级功能, 使计算机系统能更有效地与硬盘驱动器进行通信, 同时实现了热插拔、NCQ (native command queuing) 在内的诸多功能。

AHCI 本质上是一种 PCI 类设备, 在系统内存总线和串行 ATA 设备内部逻辑之间扮演着通用接口的角色。这说明在不同的操作系统和硬件中是通用的。AHCI 统一接口的特点相当有用处, 在开发支持串行 ATA 功能的产品时, 可以简化整个开发过程。

AHCI 主机控制器 (host bus adapter, HBA) 支持 1 到 32 个端口, 图 1 直观地表示了 HBA 内存空间的划分使用状态。HBA 必须支持 ATA、ATAPI 设备, 以及 PIO、DMA 协议。软件和 SATA 设备之间的大多数通信都是通过 HBA 操作系统内存描述符进行的, 内存描述符表示了接收和发送 FIS 的状态, 以及数据传输指针。对于每个端口和全局控制寄存器, 通过 HBA 的寄存器进行附加通信。

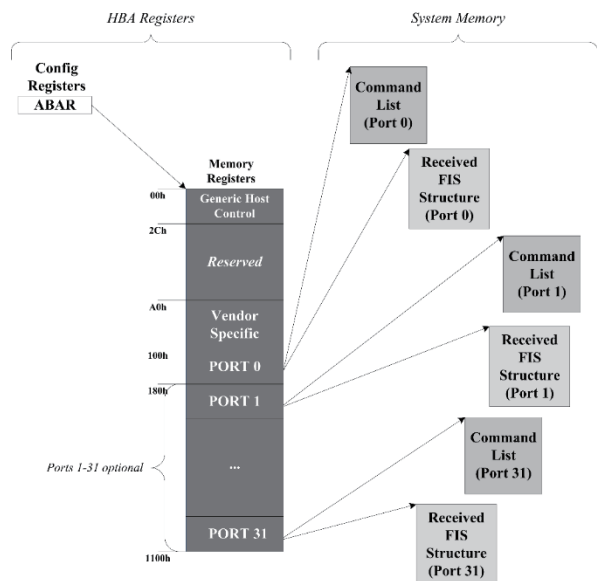


图 1 HBA 内存空间使用

HBA 的每个端口有两个描述符来传递信息。一个是 FIS 描述符, 包含了从设备接收的 FIS; 另一个是命令列表 (command list), 包含了端口执行可获得的 1~32 个命令。HBA 寄存器的每个指针存储的都是 64 位值, 32 位不支持 64 位地址映射。图 2 是端口系统内存结构, 描述了内存中每个段存储的信息。

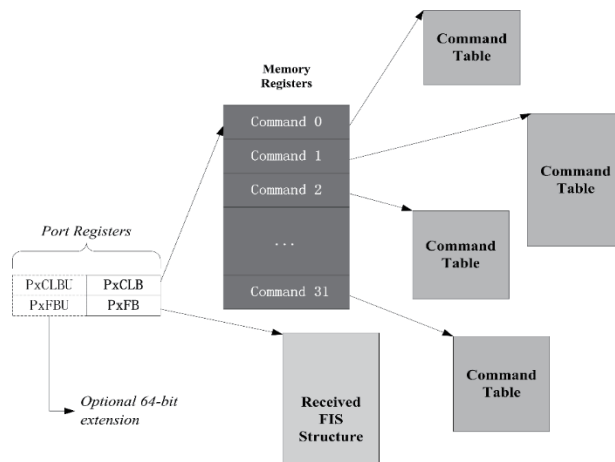


图 2 端口系统内存结构

2 龙芯 2K2000 的 SATA 驱动实现

2.1 配置 SATA 控制器

龙芯 2K2000 中的 IO 互连网络采用南北桥结构, SATA 连接在南桥上。访问 SATA 的设备寄存器空间需要先读取其配置头空间中的 BAR 地址作为其配置空间的起始地址, 然后再对相应设备寄存器进行读写。

64 位模式下访问配置头空间的地址格式: 龙芯 2K2000 中定义地址段 0xFE0000000-0xFE1FFFFFFF 是 CPU 的 64 位配置地址空间, CPU 通过这段地址访问各个设备的 PCI 配置头。由地址的 [63:28] 决定配置头类型 (0xFE0 是 Type0, 0xFE1 是 Type1, 其他保留); [23:16] 在 Type1 类型配置头访问时表示总线号, Type0 时保留; [15:11] 表示设备号 (device number); [10:8] 表示功能号 (function number); [27:24] 和 [7:0] 组合起来表示偏移, 大小 4 kB。

SATA 的设备号是 8, 功能号是 0。配置头空间遵循 PCI Type0 类型, SATA 的基址寄存器 BAR5 的偏移值是 0x24。SATA 中断由南北桥产生, 中断号是 (16+32)。阅读龙芯 2K2000 处理器数据手册, 通过配置 PCI 配置头空间来访问 SATA 控制器。

2.2 HBA 的软件初始化

在执行任何任务前, HBA 必须被初始化。初始化包括两个独立的阶段: 固件初始化 (平台 BIOS) 和系统软件初始化。HBA 的 PCI 配置空间初始化不在这个规范之内。为了确保系统软件处于运行状态, BIOS 会初始化平台功能支持的寄存器。在固件初始化后, 系统中的驱动程序将使 AHCI HBA 处于最小初始化状态。在龙芯 2K2000 平台上, SATA 驱动软件初始化的流程如下。

(1) 通过将 GHC.AE 设置为 “1”, 表示 SATA 驱动软件程序可识别 AHCI, 即将 SATA 设置为 AHCI 模式。

(2) 通过读取 PI 寄存器, 确定 HBA 实现了哪些接口。寄存器位图的值可以帮助驱动软件确定有多少端口可用以及哪些端口寄存器需要初始化。

(3) 通过读取并检查每个已实现端口的 PxCMD 寄存器, 确保控制器未处于运行状态。如果 PxCMD.ST、PxCMD.CR、PxCMD.FRE 和 PxCMD.FR 都被清除, 则端口处于空闲状态。否则, 端口不是空闲的, 应该在操作 HBA 和端口特定寄存器之前将其置于空闲状态。

(4) 通过读取寄存器 CAP.NCS 位的值, 确定 HBA 支持的命令插槽数量。

(5) 对于每个已实现的端口, 如果 CAP.S64A 被设置为“1”, 驱动程序应为 PxCLB、PxCLBU、PxFB 和 PxFBU 四个寄存器分配内存。SATA 驱动程序将已分配的内存清零。在设置 PxCLB 和 PxFB 为 FIS 接收区域的物理地址后, 驱动程序将设置 PxCMD.FRE 为“1”。

(6) 对于每个实现的端口, 通过向每个实现的位写“1”来清除 PxSERR 寄存器。

(7) 确定应导致中断的事件类型, 使用适当的使能设置去设置每个已实现端口的 PxIE 寄存器。如果要使 HBA 产生中断, SATA 驱动程序应该设置 GHC.IE 为“1”。这个步骤有个重要的前提, 由于 AHCI HBA 的中断机制是二层结构, 因此驱动程序必须先确保 PxIS (清除第一层) 和 IS.IPS (清除第二层) 寄存器已经被清除为“0”, 再对 PxIE 和 GHC.IE 寄存器进行操作。

此时, 经过驱动程序的初始化后, HBA 将处于最小初始化状态。然后 SATA 驱动程序可以根据操作系统和处理器平台采用的实现策略对 GHC 寄存器、端口 PxCMD 和 PxSCTL 寄存器进行操作, 实现接下来的设备运行过程。

2.3 端口 DMA 引擎的软件操作

每个端口包含两个主要的 DMA 引擎。一个 DMA 引擎遍历命令列表, 由 PxCMD.ST 控制。另一个 DMA 引擎将接收到的信息帧 (FIS) 放到系统内存中, 由 PxCMD.FRE 控制。

当 PxCMD.ST 被设置为“1”时, 软件在允许对端口执行的操作上会受到许多限制。在 HBA 进入低功耗 D3 状态前, 软件应将 PCMD.ST 清除为“0”。

设置 PxCMD.FRE 时, PxCMD.FR 被设置为“1”, HBA 从设备接收 FIS 并将其复制到系统内存中。清除 PxCMD.FRE 时, HBA 接收的信息帧继续在内部保存。如果 HBA 的内部 FIFO 已满, 则会阻止后续更多的信息帧接收。当 HBA 复位后, PxCMD.FRE 位的值将被清除。

2.4 软件复位操作

AHCI 支持三级复位: 软件、端口和 HBA 复位。软件复位重置其中一个端口的单个设备, 但 HBA 和物理通信保持不变。端口复位会禁用 HBA 和端口上设备之间的物理通信。HBA 复位重置整个 HBA, 并禁用所有端口。其中, 软件复位是对设备影响最小的。

本文在龙芯 2K2000 上采用了软件复位机制。传统软件包含一个对于串行 ATA 设备的生成复位标准机制, 这需要在

设备控制寄存器中设置 SRST (软件复位) 位, 从而实现设备复位。

SATA 驱动程序通过在命令列表中构建两个 HBA 操作设备 (HBA to Device, H2D) 寄存器。第一个寄存器在 FIS 控制字段中将 SRST 位设置为“1”, 在寄存器 FIS 中将“C”位设置为“0”, 并且将命令表中 CH[R] (复位) 和 CH[C] (清除 R_OK 上的 BSY) 位设置为“1”。第二个寄存器在 FIS 字段中将 SRST 位设置为“0”, 在寄存器 FIS 中将“C”位设置为“0”, 并且将命令表中 CH[R] (复位) 和 CH[C] (清除 R_OK 上的 BSY) 位清除为“0”。

在发出软件复位命令时, 命令列表中不应有其它命令。在发出软件复位前, 软件需要清除 PxCMD.ST, 等待端口空闲 (PxCMD.CR=“0”), 然后重新设置 PxCMD.ST。

2.5 SATA 驱动读写

为了改善 SATA 硬盘读写效率问题, SATA 接口规范支持 NCQ 功能, 它使硬盘内部优化命令的执行顺序, 通过对队列中命令重新排序实现智能数据管理。SATA 盘在使用过程中可以分成多个扇区, 读写过程均通过操作扇区来实现。

向 SATA 盘写入一个或多个扇区的时候, SATA 驱动实现过程调用了 ahciBlockWrite() 接口, 传入参数为 ahciDrive 设备, 起始扇区号, 要写入的扇区总数, 数据缓冲指针, 写入状态。首先要检查 SATA 设备状态, 其次唤醒处于待机或睡眠状态的设备, 然后执行向扇区中写入数据过程, 获取设备收到的命令, 设置 NCQ 使能, 向 AHCI 设备发送命令进行通信。

从 SATA 盘读取特定扇区的数据时, SATA 驱动程序要调用 ahciBlockRead() 接口, 它和写入扇区函数复用相同的接口, 传入参数仅读写状态不同, 选择读取状态。通过与 SATA 写入扇区时类似的发送、接受命令建立通信, 从 SATA 设备中读取特定的数据。

2.6 适配 LoongArch 架构

LoongArch 架构是国产自主研发的具有 RISC 风格的指令系统架构。LoongArch 架构分为 32 位和 64 位两个版本, 而龙芯 2K2000 处理器支持的是 LA64 架构。在 SATA 驱动程序代码实现的具体细节中, 需要注意适配 LoongArch 架构特性。龙芯系列的嵌入式芯片还可以支持 MIPS64 架构, 如龙芯 2K1000 等。为了验证本文实现的 SATA 驱动程序的通用性, 故该 SATA 驱动同时兼容 MIPS64 架构。

在处理器板级信息配置文件中配置不同的处理器板级信息, 主要包括龙芯处理器 SATA 寄存器基地址和中断向量号。在 SATA 驱动软件进行设备初始化、寄存器读写和值得传递过程中, 代码实现需要注意兼容 LoongArch 和 MIPS64 两种架构。

访问 AHCI 设备基址寄存器时, 龙芯 2K2000 的基址是 64 位, 定义 ahciDriveBar 设备基址为 unsigned long 类型。分

配 AHCI 特定结构内存空间（包括命令列表、命令表和接收 FIS）时，申请的 AHCI 结构总内存空间在 CACHE 访问内存空间中，与 UNCACHE 访问相比速度更快。

写入 AHCI 寄存器值时，需要根据不同架构特点将虚拟地址映射为访问硬件设备的物理地址。LoongArch 架构的 MMU 支持两种虚实地址翻译模式：直接地址翻译模式和映射地址翻译模式。龙芯 2K2000 使用映射地址翻译模式中的直接映射模式，通过直接映射配置窗口机制进行虚实地址的直接映射。每个直接映射配置窗口可以配置一个 2^{PALEN} 字节固定大小的虚拟地址空间，DMW_CACHE 是窗口配置的可 CACHE 访问空间，DMW_UNCACHE 是窗口配置的非 CACHE 访问空间，当虚地址命中某个有效的直接映射配置窗口时，其物理地址直接等于虚地址的 [PALEN-1:0] 位。

为了兼容 MIPS64 架构，需要参考 MIPS64 架构的地址空间划分，虚拟地址位于 64 位地址空间的 KSEGn (0、1)。KSEG0 和 KSEG1 的虚地址不需要经过 TLB 进行虚实地址转换，被直接映射为物理地址。

3 验证与测试

为验证本文所设计并实现的龙芯 2K2000 SATA 驱动程序的有效性和稳定性，本文采用了两种场景进行性能测试，测试该 SATA 驱动程序的读写一致性和读写速率。

第一种，直接在 SATA 裸盘上进行读写测试和读写速率测试。通过向 SATA 盘的扇区上先写不同大小的数据（1 kB、1 MB、1 GB），然后读取扇区的内容，通过程序设计比较读写内容，测试读写结果一致。SATA 盘读写时平均速率接近 120 Mbit/s。

第二种，将 SATA 盘挂载在文件系统上进行读写一致性测试和读写速率测试。选取不同大小的文件（1 kB、1 MB、1 GB）上传到文件系统挂载的 SATA 盘设备上，再将该文件下载到本地，使用专业的文本比较工具 Beyond Compare 软件，对以上不同内存大小的新旧文件的内容进行一致性比较，测试结果显示从 SATA 盘下载的多种文件与相对应的原始文件内容完全一致，即证明了该 SATA 驱动程序的读写一致性功能。测算挂载文件系统后的 SATA 驱动读写速率平均为 90 Mbit/s。

4 结语

龙芯 2K2000 处理器是龙芯系列中新一代自主通用嵌入式芯片，它基于国产自研的 LoongArch 架构，在性能上有着优异的表现，其支持的各种接口服务可以满足不同场景下的需求。但是龙芯 2K2000 芯片目前作为一款新产品，它支持的接口服务亟需研究人员进行很多相应的功能适配与验证工作。

本文选取了龙芯 2K2000 处理器的 SATA 接口支持，对 SATA 驱动的工作原理和技术协议进行了深入研究，根据

AHCI 协议设计并实现了适配 LoongArch 架构的 SATA 驱动程序，而且兼容龙芯系列中的 MIPS64 架构芯片。通过一系列性能测试验证了本文所提出的 SATA 驱动是有效的，满足了龙芯 2K2000 芯片所支持的 SATA 基本功能，可以应用于嵌入式操作系统软件，后续还将基于龙芯 2K2000 开展进一步的设备驱动研发工作。

参考文献：

- [1] Assembly Language for LoongArch[Z].2023.
- [2] 晁大海.基于 VxWorks 平台下大容量硬盘存储设备设计[J].电脑开发与应用,2008,21(12):28-30.
- [3] 周启平,张杨.VxWorks 下设备驱动程序及 BSP 开发指南[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [4] 曹桂平.VxWorks 设备驱动研发详解[M].北京:电子工业出版社,2011.
- [5] GRIMSRUD K, SMITH H. Serial ATA storage Architecture and application[M]. USA: Intel Press, 2003:11-13.
- [6] AT attachment 8 - ATA/ATAPI command set (ATA8-ACS) revision 4a[EB/OL](2007-12-11)[2024-05-26].https://download.csdn.net/download/darkblue_85/1994067.
- [7] Serial ATA international organization: serial ATA revision 3.0[EB/OL](2009-05-05)[2024-06-03].<https://www.docin.com/p-2119303413.html>.
- [8] 肖忠炳,吴林峰,任金牛.基于 VxWorks 的大容量 SATA 电子盘驱动[J].航空电子技术,2012(3):39-41.
- [9] 王婷,朱守园,段海军,等.基于 PowerPC 处理器的 SATA 电子盘驱动设计与实现[J].信息通信,2013(3):65-66.
- [10] ANDERSON D. SATA storage technology[M]. USA: Mind-Share Inc, 2007:26-54.
- [11] 周文.SATA 固态硬盘传输层与应用层的实现[D].上海:华中科技大学,2010:23-36.
- [12] Serial ATA AHCI 1.3 specification [EB/OL][2024-06-05].https://www.intel.cn/content/dam/www/public/us/en/documents/technical-specifications/serial-ata-ahci-spec-rev1_3.pdf.
- [13] 盘勇军,张霄晔,任金牛.大容量机载记录模块 AHCI 驱动开发[J].航空电子技术,2015,46(4):38-41.
- [14] 陈康,翟正军,焦航.基于 Vxbus 的大容量储存模块 AHCI 驱动开发[J].计算机测量与控制,2013,21(8):2286-2289.

【作者简介】

刘飞洋（1998—），男，河南南阳人，硕士，助理工程师，研究方向：嵌入式操作系统驱动程序开发。

郭锋（1992—），男，陕西渭南人，硕士，工程师，研究方向：嵌入式操作系统体系结构开发。

李若玮（1998—），女，陕西西安人，硕士，助理工程师，研究方向：嵌入式操作系统体系结构开发。

（收稿日期：2024-08-19）