

车载测试数据传输系统免驱 USB 主从机设计

刘慧丰¹, 崔建峰², 李爱佳², 邓泽平²

(1. 北京特种车辆试验场, 北京 100072; 2. 中北大学 电气与控制工程学院, 太原 030051)

摘要: 基于 USB 的车载测试数据传输系统原有设计方案存在着跨操作系统平台应用不便、无法实现与计算机及外部 USB 存储设备的双向通信、驱动安装偶发性故障等问题; 针对上述问题, 提出了一种车载测试数据传输系统免驱 USB 主从机设计方法; 该方法以 USB 接口芯片 CH378 为核心进行 USB 主从机传输系统设计, 通过专门的 USB 主从机状态电路实现 USB 主从模式的自动切换, 通过嵌套 USB2.0 协议、USB Mass Storage 协议、FAT32 文件系统协议实现免驱获取测试数据的功能; 重点介绍了新型车载测试数据传输系统的总体设计方案、CH378 硬件接口电路、USB 主从机状态电路以及 USB 从机模式下免驱功能的实现要点; 通过实验验证, 该设计可以实现车载测试数据传输系统免驱 USB 主从机功能, 给车载测试数据传输系统的应用与维护带来了便利。

关键词: USB 主机; USB 从机; 免驱; CH378

Free Drive Design of USB Host & Device for Vehicle Test Data Transmission System

Liu Huifeng¹, Cui Jianfeng², Li Aijia², Deng Zeping²

(1. Beijing Armoured Vehicle Proving Ground, Beijing 100072, China;

2. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: There have some application problems about traditional design of vehicle test data transmission system, such as inconvenient for cross application operating system platform, unable to realize two-way communication with the computer and the external USB storage device, sporadic failure of driver installation, and so on. Aiming at these issues, a free drive design of USB Host & Device for vehicle test data transmission system is proposed. The design uses USB interface chip CH378 as the core of transmission system, and realizes automatic switching between USB host and USB device by USB Host & Device state circuit. Moreover, it achieves free drive design through the nested USB2.0 protocol, the USB Mass Storage protocol and FAT32 file system protocol. Some aspects are discussed emphatically, such as the overall design plan, CH378 hardware interface circuit, USB Host & Device state circuit and free drive functions. Through experimental verification, the design can realize free drive of USB Host & Device and provide convenience to the application and maintenance of vehicle test data transmission system.

Keywords: USB host; USB device; free drive; CH378

0 引言

为满足运动车辆以及恶劣环境条件下的测试, 车载数据采集分析系统常采用存储测试技术。在车辆道路试验过程中及完成后, 数据传输及导出的快速性与便捷性成为后续分析工作的重要保障。由于 USB 总线具有热插拔、即插即用、接口体积小、成本低、性能可靠等优良特性, 因此通过 USB 总线及其接口向上位机传输所采集到的数据成为现有车载测试系统的主要传输方式之一^[1-5]。

在传统的车载 USB 数据传输系统方案设计中, 常采用一些成熟的 USB 转串口/并口芯片或特定厂家的 USB 接口芯片来构建系统^[2-3]; 这种方案开发难度较低、开发周期短, 能够较好且快速地满足车载测试系统数据传输的应用需求。然而这种方案存在以下不足之处: 1) 在应用前需要安装相应模块/芯片驱动。这些芯片驱动可能与已有系统组件冲突而导致安装失败或在应用中产生错误, 给测试人员带来不便; 2) 难以快速地满足数据传输的跨平台应用需求; 3) 对于野外作业, 必须

携带上位机以导出数据, 无法将数据暂时转存至 U 盘等便携存储设备上。因此, 为了满足现场应用需求, 需要新研制的车载测试数据传输系统能够实现免驱 USB 主从机功能。

在 USB 主从机功能实现上, 张颖、朱庆双、赵永礼等人基于 CH375 先后实现了燃料电池发动机车载控制系统、机床数控系统及激光三维雕刻控制系统的 USB 主从机通讯功能^[6-8]; 惠玥琳、辛华峰则分别基于 ISP1362 与 SL811HS 实现了通用数据采集系统的 USB 主从机功能^[9-10]。但这些系统不具备从机免驱功能, 当其作为 USB 从机设备进行使用时, 计算机仍然需要安装相应芯片驱动程序。因此, 为了实现免驱从机功能, 还需要借助操作系统自带的一些 USB 设备类驱动程序进行实现, 如基于 USB RNDIS 规范的网络接口设备类、基于 USB UVC 规范的视频设备类或基于 USB Mass Storage 规范的大容量存储设备类等^[11-13]。

针对上述设计方案的不足, 本文将提出一种车载测试数据传输系统免驱 USB 主从机的设计方案。该方案将基于 USB 接口芯片 CH378 进行设计, 通过将底层存储测试系统基于 USB Mass Storage 规范虚拟成 U 盘实现免驱操作, 同时实现同一外部接口的 USB 主机功能, 以便将数据存储至外部 U 盘等便携存储设备上。

收稿日期: 2017-07-22; 修回日期: 2017-08-27。

作者简介: 刘慧丰(1965-), 男, 河北无极人, 硕士, 高工, 主要从事车辆试验与车载测试技术方向的研究。

1 系统总体设计

系统总体设计如图 1 所示。

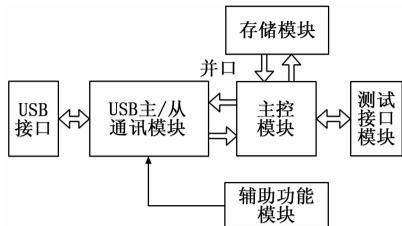


图 1 系统总体设计框图

免驱 USB 主从机车载测试数据传输系统主要由主控模块、存储模块、USB 主从通讯模块、测试接口模块、辅助功能模块组成。其中主控模块负责整个车载数据传输系统的控制逻辑处理，同时还负责 USB Mass Storage 协议及 FAT32 协议的实现。存储模块用于实现 Flash 存储功能。USB 主从通讯模块则主要负责进行 USB 协议的封装、解析，完成与 USB 主机或 USB 外部存储设备之间的通讯；另外，该模块还需要负责实现 USB 主/从模式的自动切换。测试接口模块用于实现具体的测试功能；辅助功能模块主要实现整个系统的供电、时钟等的配给。由于本文主要说明免驱 USB 主从机的实现方法，因此，在后续内容中将不详细介绍存储模块、测试接口模块及辅助功能模块的具体实现。

2 硬件设计方案

USB 主从机实现方案设计难点在于：一是要有合适的 USB 接口协议芯片可同时支持 USB 主机方式和 USB 设备方式；二是要有相应的外部主/从切换电路，可以动态判别当前系统 USB 接口工作方式。下面将针对相关内容进行详细叙述。

2.1 USB 接口芯片的选择

通过对比多家主流 USB 接口协议芯片生产厂商的相关产品^[6-10]，最终选用南京沁恒公司生产的 USB 接口芯片 CH378。它是一款 USB2.0 总线的通用接口芯片，支持 USB 主机接口和 USB 设备接口并支持动态切换。当其工作于主机模式时，由于它内置了 USB 通讯协议基本固件及 FAT 文件系统的管理固件，因此，可以快速实现读写 U 盘或者 SD 卡功能。但在从机模式下，它只有基本 USB 通讯协议固件可用，如要实现基于 USB Mass Storage 协议的免驱功能，还需要利用主控模块进行相应的功能固件编写。

在本地端，CH378 具有 8 位并口、SPI 接口和异步串口，主控芯片可以通过上述任何一种通讯接口控制 CH378 芯片。考虑到最终的数据传输速度要求较高，本文选择 8 位并口来实现 CH378 的通讯控制。USB 主机/设备与 CH378 芯片之间则通过 USB 总线 D+ 和 D- 来完成信号的传输。

2.2 主控与 USB 模块接口电路设计

主控与 USB 模块接口电路设计如图 2 所示^[14-15]。CH378 采用 8 位并口模式与主控芯片相连。其中包括双向数据总线 D [0: 7]、并口片选信号线 PCS# (# 表示信号低电平有效)、并口读选通信号线 RD#、并口写选通信号线 WR# 及并口地址信号线 A0；主控芯片将 CH378 看作一个 I/O 设备，通过上述信号线及专门的 I/O 指令实现对 CH378 内部寄存器的操作。CH378 的地址线 A0 用于选择操作对象是命令寄存

器还是数据寄存器。当 CH378 因 USB2.0 通讯事件产生中断时，通过中断信号线 INT# 向主控芯片请求中断，主控芯片通过该命令获取中断状态，分析中断原因并处理。在本设计中，INT# 将与主从状态信号线 USB_MS 共同形成 USB 主从机自动切换机制。另外，为了确保 CH378 能够有效复位，将 CH378 的外部复位信号线 RSTI# 也连接到主控芯片相应的 IO 引脚上。

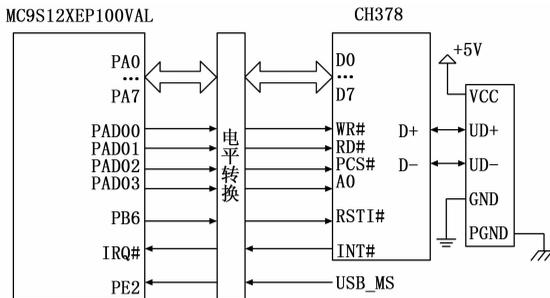


图 2 主控与 CH378 连接示意图

需要说明的是，图 2 中并未绘制出 CH378 本身的一些配置引脚连接情况，为了实现 8 位并口通讯方法，CH378 的 SEL 引脚需要接地，TXD 引脚可连接至 VCC 或者悬空。

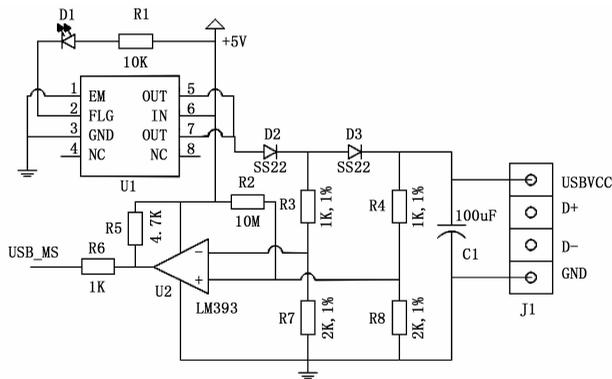


图 3 USB 主从机状态电路

2.3 USB 主从机自动切换的实现

CH378 芯片虽然支持主从机切换，但并不能根据外部连接情况自主设置。在此通过专门的 USB 主从机状态电路来获取外部连接的状态，然后通过主控模块操作 CH378 实现主从机的实时切换^[6]。USB 主从机状态电路如图 3 所示。D2 和 D3 为肖特基二极管，它们使两个二极管间的节点电压低于系统内部 USB 供电电压 VCC 及外部标准 USB 设备的 USB 电源电压 USBVCC；R3 与 R7、R4 与 R8 分别构成两个分压网络，用于将输入共模比较电压降到比较器 LM393 可以接受的范围。当外部没有连接任何设备时，R7 上的采样电压高于 R8 上的采样电压，因此，比较器 LM2903 输出 USB_MS 低电平。

当外部连接有 USB 从设备（如 USB 存储设备）时，此时比较器 LM393 输出 USB_MS 仍为低电平，同时 CH378 会产生一个有设备插入的中断信号 INT# 通知主控单片机；当 USB 主机（如上位机）通过延长线插入 USB 接口时，USB 主机的 USB 接口提供 5V 电源使 USBVCC 比二极管间节点的电压高，比较器 LM393 输出 USB_MS 为高电平，此时，CH378 同样会产生一个有设备插入的中断信号通知主控单片

机。因此, 根据比较器 LM393 的输出 USB_MS 及 CH378 的中断信号 INT# 可以自主判别本地 USB 接口的工作方式。

当本地 USB 接口工作于主机方式时, 若有外部 USB 从设备接入, 将会产生较大的瞬态电流, 引起系统内部电压波动。为减弱过大瞬态电流的影响, 并防止外部接线短路等故障, 使用 USB 电源管理芯片 U1 进行限流及失效处理操作; 同时利用 C1 的并联储能作用进行去耦。R1 与 D1 构成过流指示电路, 当有过流或短路现象发生时, U1 将根据过流大小与时长来判断是否关闭外部 USB 设备的电源供给, 同时在 FLG 引脚上输出低电平以指示过流或外部短路, 此时 D1 将被点亮。

3 固件设计方案

由于 CH378 工作于主机模式时, 内置了 USB 通讯协议基本固件及 FAT 文件系统的管理固件, 因此, 通过操作 CH378 可以快速实现 USB 主机功能, 即读写 U 盘或者 SD 卡功能^[14-15], 具体固件设计方法可以参考文献 [15] 或 CH378 官方开发板相关例程。在此仅重点叙述基于 USB Mass Storage 协议的免驱 USB 从机功能固件设计方法。

为了实现免驱 USB 从机功能, 本文基于 USB Mass Storage 协议将车载测试数据传输系统虚拟成 USB 存储设备。当车载测试数据传输系统通过 USB 电缆连接到上位机的 USB 接口上时, 上位机的 USB 主机控制器按照 USB 协议对设备进行枚举。车载测试数据传输系统按照大容量存储设备的特征返回设备描述符和端点描述符。当设备枚举完成以后, 上位机通过 SCSI 的上层协议与设备进行通讯。通讯过程中, 车载测试数据传输系统将向主机返回预先定义的存储设备参数和 MBR 数据。若返回的数据符合大容量存储协议, 且 MBR 数据符合操作系统定义的标准, USB 数据传输系统在上位机上将被识别成一个大容量存储设备。

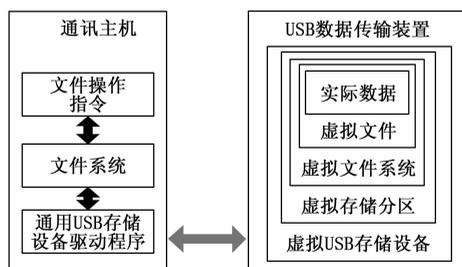


图 4 免驱 USB 从机功能实现方法

根据上面的叙述, 固件设计需要在遵从 USB2.0 协议框架的前提下, 实现如下四层子功能 (如图 4 所示): 1) 自行处理 USB 请求, 定义本地设备类型; 2) 基于 USB Mass Storage Class Bulk-only 子类通讯协议实现 SCSI 接口指令集; 3) 本地设备实现 FAT16 或 FAT32 文件系统; 4) 将实际数据映射成虚拟文件。这样上位机就可通过虚拟 U 盘上的虚拟文件来访问实际测试数据。下面将对上述子功能的固件编程要点进行较为详细的叙述。

3.1 虚拟 USB 存储设备类实现

根据 USB2.0 相关协议, 可通过在接口描述符中将 bInterfaceClass 字段设置为 08H 来实现将设备类别定义为 USB 存储类, 以便操作系统使用默认 USB 存储类驱动程序对 USB 设备进行操作。另外, 在接口描述符中还需要设置 bInterfaceSubClass 与 bInterfaceProtocol 字段以定义 USB 批量传输时所使用

的指令集及通讯子协议。本文将上述两个字段分别设置为 06H 与 50H 以表示使用 SCSI 指令集及 Bulk-only 通讯子协议, 这也是大多数 USB 大容量存储设备所采用的一种组合形式。

3.2 虚拟文件系统实现

USB 主机通过 SCSI 指令对 USB 设备进行读写操作, 但所读写的数据为了能够得到操作系统的正确理解, 还需要使这些数据组织符合特定的文件系统数据类型。这样操作系统在得到这些数据后, 就可以利用相应的文件系统驱动程序对数据进行解析。如果不符合特定的文件系统规定, 那么就如同使用一个未格式化的 USB 存储设备, 在主机上将无法正确解读, 从而操作系统会要求进行相应的格式化处理。

本文基于 FAT32 文件系统进行设计, 此时需要实现相应的主引导记录 (MBR)、分区引导记录 (BPB)、文件分配表 (FAT)、根目录;

文件系统结构如图 5 所示。这些记录内容均有特定格式要求^[16]。



图 5 FAT32 文件系统结构示意图

需要说明的是: 由于 FAT32 以扇区及簇为基本单元进行存储与管理, 而车载测试数据传输系统中以 Flash 存储块为基本单元进行存储; 因此, 此处固件设计的要点是要将各区域进行正确的映射, 即实现扇区与簇、簇与逻辑块间的一一对应关系^[16]。

以将底部固态存储虚拟为 512 MB 的 U 盘为例, 其总簇数粗略计算需要约 $512 \times 1\,000 \times 1\,000 / (4 \times 512) = 250\,000$ 个簇; 以每簇 4 个扇区计, 则需要 1 000 000 个扇区。在这些扇区中, 需要提供 $1\,000\,000 / 512 \approx 1\,954$ 个扇区给文件分配表, 另外考虑到隐藏扇区、Fsinfo、FAT 镜像区等的分配, 最终可要求固态存储数据区对齐于 0x0F90 (十进制: 3 984) 扇区处; 此时, 由于固态存储的数据块大小为 2 048B, 与虚拟磁盘逻辑簇大小一致, 这样就可根据对齐扇区位置, 计算固态存储中不同数据块的扇区编号, 供传输子程序使用。

4 实验结果与分析

为了验证系统设计的有效性, 通过提前在车载测试数据传输系统 Flash 中写入固定格式数据, 然后依次与计算机及外部 USB 存储设备连接对系统进行检测, 并通过总线数据包监视和控制开发工具软件 BusHound 进行通讯过程的监测。检测结果显示, 车载测试数据传输系统可以自动切换 USB 主从状态, 并能够正确输出存储数据至计算机及外部 USB 存储设备中。其中当与计算机连接时, 计算机无需额外安装专用驱动, 就可以将车载测试数据传输系统正确识别为虚拟 U 盘, 且内部数据文件可以正确复制到计算机中。图 6 为虚拟 U 盘识别过程图。虚拟 U 盘的卷号 NUCUDISK 是在文件系统 FAT32 实现时, 通过将根目录数据进行相应设置实现的。

5 结论

本文提出了一种车载测试数据传输系统免驱 USB 主机设计方法。该设计方案可以实现车载测试数据传输系统与计算机及外部 USB 存储设备的双向通信, 并根据外部连接情况,



图 6 虚拟 U 盘识别过程图

自动进行主从机切换。而且，当车载测试数据传输系统做为 USB 从机设备时，通过嵌套 USB2.0 协议、USB Mass Storage 协议、FAT32 文件系统协议，最终实现了免驱动获取测试数据的功能，给车载测试数据传输系统的应用与维护带来了便利。

参考文献:

[1] 李远哲, 荆敏, 车登山, 等. 通用串行总线接口在车载数据采集系统中的应用 [J]. 兵工学报, 2006, 27 (2): 367-370.
 [2] 曾春年, 张晓伟. 基于 SL811HS 芯片的车载 USB 主机研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30 (2): 125-128.
 [3] 韩屏. 基于 USB 的车载信息系统 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
 [4] 吴蔚珍, 周志飞, 杨颖, 等. 基于脚本编程的可视化车载 USB 设备性能测试技术 [J]. 机车电传动, 2016 (2): 80-84.
 [5] Kong F, Zhang L, Zeng J, et al. Automatic measurement and control system for vehicle ECU Based on CAN bus [A]. IEEE International Conference on Automation and Logistics [C]. Jinan, 2017: 964-968.
 [6] 张颖, 全书海. 基于 DSP 的 USB 主从机双向通信接口设计 [J]. 计算机工程与应用, 2006, 42 (29): 94-96.
 [7] 朱庆双. 一种应用于数控系统的 USB 主从机系统的设计与实现 [D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
 [8] 赵永礼, 杨寅华, 王红. 基于 USB 总线的激光三维雕刻控制系统 [J]. 计算机工程, 2010, 36 (22): 239-241.
 [9] 辛华峰, 于枫, 谭健, 等. 嵌入式 USB 主/从机应用模块 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2005, 35 (2): 166-169.
 [10] 惠玥琳. 基于单片机的 USB 主从机的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
 [11] 李晓伟, 谢晓燕. 移动数据卡中免驱模块的实现方法 [J]. 西安邮电大学学报, 2013, 18 (1): 95-98.
 [12] 殷开亮. 基于 UVC 协议的 USB3.0 图像采集系统设计 [D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
 [13] 石武. 一种实现 USB 设备免驱动的方法, CN102339260A [P]. 2012.
 [14] 段晓敏, 徐晓辉, 李建其, 等. 基于 CH378 的便携式高速数据采集系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (8): 2855-2857.
 [15] 邓星星, 王锋, 焦国太, 等. 基于 CH378 嵌入式存储系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (2): 597-599.
 [16] Microsoft Corporation. Microsoft extensible firmware initiative FAT32 File System Specification [EB/OL]. Microsoft, 2000 [2017]. <http://download.microsoft.com/download/1/6/1/161ba512-40e2-4cc9.../fatgen103.doc>.

从表 2 可以看出，本文所提算法在 GPU 上的执行时间明显少于在 CPU 上的执行时间，基于 CUDA 的并行化实现方法具有显著的加速效果，1024 × 1024 的图像的加速比达到 75.756，这是因为本文所提算法具有较好的并行特性，能够充分利用 GPU 的架构和存储结构特点，并行计算各像素的处理过程；随着图像尺寸的增大，加速比逐渐提高，这是因为系统调度和数据传输需要一定的时间开销，数据规模较大时，虽然调用的线程较多，数据传输时间较长，但其在整体运行时间中所占比重较小，因此加速比较大。

5 结论

本文提出一种基于噪声可见性函数的 SAR 图像增强快速算法及其基于 GPU 的并行化实现方法。实验结果表明，该算法能够充分利用图像分层的内在并行性，实现并行加速，在有效提高图像质量，增强图像细节的同时，减少计算时间，进一步满足 SAR 图像增强系统实时性要求。

参考文献:

[1] 陈建飞, 李跃华, 王剑桥. 毫米波被动合成孔径成像系统 [J]. 微波学报, 2012, S1: 253-256.
 [2] 尹奎英. SAR 图像处理及地面目标识别技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
 [3] 陈沫. SAR 图像军事目标识别方法研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2013.
 [4] 张舒. GPU 高性能运算之 CUDA [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

[5] 姚旺, 胡欣, 刘飞, 等. 基于 GPU 的高性能并行计算技术 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (12): 4160-4162.
 [6] 宋晓丽, 王庆. 基于 GPGPU 的数字图像并行化预处理 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (6): 1169-1171.
 [7] Branchitta F, Diani M, Romagnoli M. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images [J]. Optical Engineering, 2009, 48 (9): 6401.
 [8] Voloshynovskiy S, Pereira S, Iquise V, et al. Attack modelling: towards a second generation watermarking benchmark [J]. Signal Processing, 2001, 81 (6): 1177-1214.
 [9] 汤代佳, 尚东方. 基于噪声可见性函数的交通流量异常预警算法 [J]. 上海电机学院学报, 2012, 15 (6): 386-389.
 [10] 班阳阳, 张劲东, 陈家瑞, 等. 后向投影成像算法的 GPU 优化方法研究 [J]. 雷达科学与技术, 2014 (6): 659-665.
 [11] 张绍良, 闫钧华, 刘成, 等. 基于 CUDA 的红外图像快速增强算法研究 [J]. 电子设计工程, 2012, 20 (17): 153-157.
 [12] Zhao C, You W, Wang Y, et al. GPU implementation for real-time hyperspectral anomaly detection [A]. IEEE International Conference on Digital Signal Processing [C]. IEEE, 2015: 940-943.
 [13] Yiu B Y S, Tsang I K H, Yu A C H. Real-time GPU-based software beamformer designed for advanced imaging methods research [C]. Ultrasonics Symposium. IEEE, 2011: 1920-1923.
 [14] 李大禹, 胡立发, 穆全全, 等. CUDA 架构下的液晶自适应波面数值解析 [J]. 光学精密工程, 2010, 18 (4): 848-854.
 [15] 曾炫杰, 陈强, 谭海鹏, 等. 基于 CUDA 的加速双边滤波算法 [J]. 计算机科学, 2015, 42 (s1).
 [16] 段群, 吴粉侠, 刘小豫. 基于 CUDA 的椒盐噪声自适应中值滤波算法 [J]. 航空计算技术, 2013, 43 (2): 60-63.