

第 3 章



STM32 系列微控制器

本章对 STM32 微控制器进行概述,内容包括 STM32F407ZGT6 概述、STM32F407ZGT6 芯片内部结构、STM32F407VGT6 芯片引脚和功能 and 最小系统设计。

3.1 STM32 微控制器概述

STM32 是意法半导体(STMicroelectronics)公司较早推向市场的基于 Cortex-M 内核的微处理器系列产品,该系列产品具有成本低、功耗优、性能高、功能多等优势,并且以系列化方式推出,方便用户选型,在市场上获得了广泛好评。

目前常用的 STM32 有 STM32F103~107 系列,简称“1 系列”,ST 公司推出的高端系列 STM32F4xx,简称“4 系列”。前者基于 Cortex-M3 内核,后者基于 **Cortex-M4** 内核。

Cortex-M4 处理器是由 Arm 公司专门开发的嵌入式处理器,在 Cortex-M3 处理器的基础上强化了运算能力,新增了浮点、DSP、并行计算等,用于满足需要控制和信号处理混合功能的数字信号控制市场。Cortex-M4 处理器将 32 位控制与领先的数字信号处理技术集成,用于满足需要很高能效级别的市场。高效的信号处理功能与 Cortex-M 系列处理器的低功耗、低成本和易于使用的优点的组合,旨在满足专门面向电动机控制、汽车、电源管理、嵌入式音频和工业自动化市场的新兴类别的灵活解决方案。

Cortex-M4 处理器已设计具有适用于**数字信号控制**市场的多种高效信号处理功能。Cortex-M4 处理器在很多地方和 Cortex-M3 处理器相同,如流水线、编程模型等。Cortex-M4 处理器支持 Cortex-M3 处理器的所有功能,并额外支持各种面向 DSP 应用的指令,如扩展的单周期乘累加单元(Multiply and Accumulate Cell,MAC)指令、优化的 SIMD(Single Instruction, Multiple Data,即一条指令操作多个数据)指令、饱和运算指令和一个可选的单精度浮点单元(Single precision floating point unit,FPU)。

Cortex-M4 处理器的 SIMD 操作可以并行处理两个 16 位数据和 4 个 8 位数据。在某些 DSP 运算中,使用 SIMD 指令可以加速计算 16 位和 8 位数据,因为这些运算可以并行处理。但是,一般的编程中,C 编译器并不能充分利用 SIMD 运算能力,这是 Cortex-M3 处理

器和 Cortex-M4 处理器典型 Benchmark(基准)分数差不多的原因。然而, Cortex-M4 处理器的内部数据通路和 Cortex-M3 处理器的内部数据通路不同,在某些情况下 Cortex-M4 处理器可以处理得更快(如单周期 MAC 指令,可以在一个周期中写回到两个寄存器)。

Cortex-M4 的处理器架构采用**哈佛结构**,为系统提供 3 套总线,独立发起总线传输读写操作。这 3 套总线分别是: **I-Code 总线**,用于取指令; **D-Code 总线**,用于操作数据; **系统总线**,用于访问其他系统空间,包括指令、数据访问, CPU 及调试模块发起的访问和支持位访问。

Cortex-M4 是 32 位系统,总线宽度是 32 位,一次取一条 32 位指令。若是 16 位的 Thumb 指令,则处理器每隔一个周期做一次取指,一次能够取两条 16 位的 Thumb 指令。Cortex-M4 支持三级流水线:取指、译码和执行。当执行跳转指令时,整个流水线会刷新,重新从目的地址取指令。Cortex-M4 采用分支预测,以避免流水线气泡(Bubble)过大。Cortex-M4 处理器架构如图 3-1 所示。

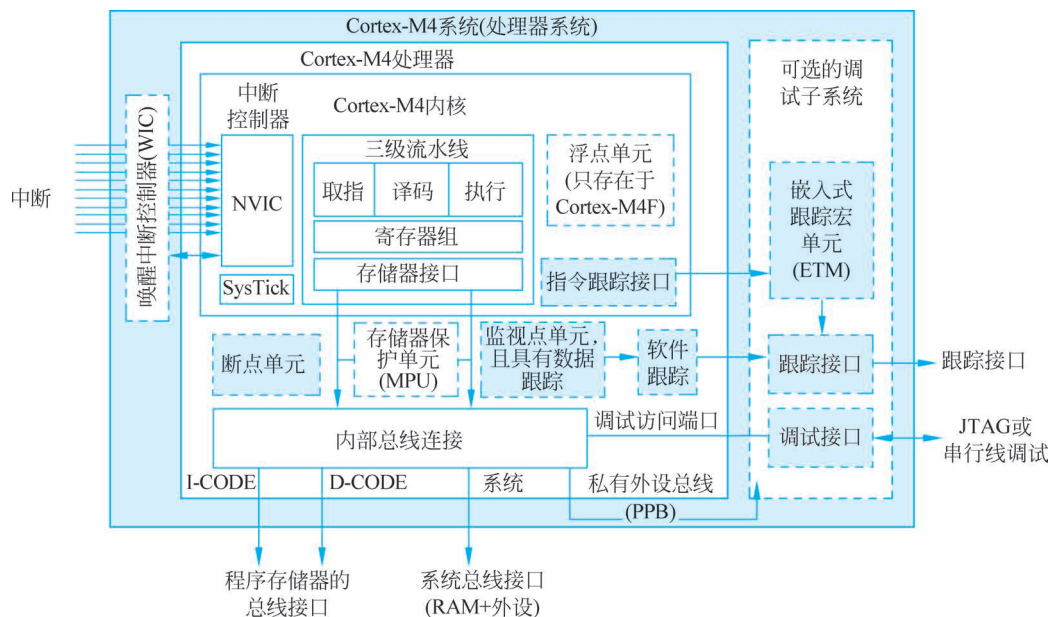


图 3-1 Cortex-M4 处理器架构

Cortex-M4 处理器实现基于 Thumb-2 技术的 Thumb 指令集版本,确保高代码密度和降低程序内存需求。Cortex-M4 处理器紧密集成了一个可配置的嵌套中断控制器,以提供领先的中断性能。中断包括不可屏蔽中断等,提供多达 256 个中断优先级。Cortex-M4 处理器提供了一个可选的内存保护单元,它提供细粒度内存控制,使应用程序能够利用多个特权级别,根据任务分离和保护代码、数据和堆栈。

Cortex-M4 内核仅仅是一个 CPU 内核,而一个完整的微控制器还需要集成除内核外的很多其他组件。芯片生产商在得到 Cortex-M4 内核的使用授权后,可以把 Cortex-M4 内核用在自己的芯片设计中,添加存储器、片上外设、I/O 及其他功能块。Cortex-M4 系列微控

制器内部构造如图 3-2 所示。不同厂家设计的微控制器会有不同的配置,存储器容量、类型、外设等都各具特色。如果想要了解某个具体型号的微控制器,还需查阅相关厂家提供的文档。很多领先的 MCU 半导体公司已经获得 Cortex-M4 内核授权,并已有许多成熟的微控制器产品,其中包括 ST 公司(STM32F4 系列微控制器)、恩智浦(LPC4000 系列微控制器)和德州仪器(TM4C 系列微控制器)等。

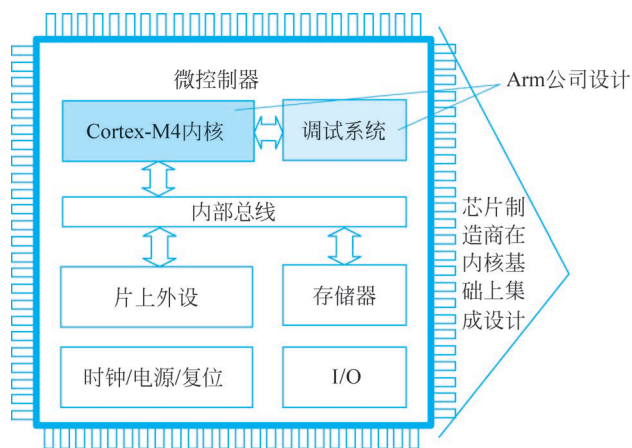


图 3-2 Cortex-M4 系列微控制器内部构造

STM32F4xx 系列在以下诸多方面进行了优化：

- (1) 增加了浮点运算；
- (2) 具有数字信号处理器(DSP)功能；
- (3) 存储空间更大,高达 1MB 以上；
- (4) 运算速度更高,以 168MHz 高速运行时处理能力可达到 210DMIPS^①；
- (5) 新增更高级的外设,如照相机接口、加密处理器、USB 高速 OTG 接口等,提高性能,具有更快的通信接口、更高的采样率、带 FIFO 的 DMA 控制器。

STM32 系列单片机具有以下优点。

1. 先进的内核结构

- (1) 哈佛结构使其在处理器整数性能测试上有着出色的表现,运行速度可以达到 1.25DMIPS/MHz,而功耗仅为 0.19mW/MHz。
- (2) Thumb-2 指令集以 16 位的代码密度带来了 32 位的性能。
- (3) 内置了快速的中断控制器,提供了优越的实时特性,中断的延迟时间降到只需 6 个 CPU 周期,从低功耗模式唤醒的时间也只需 6 个 CPU 周期。
- (4) 具有单周期乘法指令和硬件除法指令。

2. 3 种功耗控制

STM32 经过特殊处理,针对应用中 3 种主要的能耗要求进行了优化,这 3 种能耗要求

^① DMIPS 即 Dhrystone Million Instructions executed Per Second,主要用于衡量整数计算能力。

分别是运行模式下高效率的动态耗电机制、待机状态时极低的电能消耗和电池供电时的低电压工作能力。因此,STM32 提供了 3 种低功耗模式和灵活的时钟控制机制,用户可以根据自己所需要的耗电/性能要求进行合理优化。

3. 最大程度地集成整合

(1) STM32 内嵌电源监控器,包括上电复位、低电压检测、掉电检测和自带时钟的看门狗定时器,减少对外部器件的需求。

(2) 使用一个主晶振可以驱动整个系统。低成本的 25MHz 晶振即可驱动 CPU、USB 以及所有外设,使用内嵌锁相环(Phase Locked Loop,PLL)产生多种频率,可以为内部实时时钟选择 32kHz 的晶振。

(3) 内嵌出厂前调校好的 8MHz RC 振荡电路,可以作为主时钟源。

(4) 拥有针对实时时钟(Real Time Clock,RTC)或看门狗的低频率 RC 电路。

(5) LQPF100 封装芯片的最小系统只需要 7 个外部无源器件。

因此,使用 STM32 可以很轻松地完成产品的开发。ST 公司提供了完整、高效的开发工具和库函数,帮助开发者缩短系统开发时间。

4. 出众及创新的外设

STM32 的优势来源于两路高级外设总线,连接到该总线上的外设能以更高的速度运行。

(1) USB 接口速度可达 12Mb/s。

(2) USART 接口速度高达 4.5Mb/s。

(3) SPI 速度可达 37.5Mb/s。

(4) I2C 接口速度可达 400kHz。

(5) 通用输入输出(General Purpose Input Output,GPIO)的最大翻转频率为 84MHz。

(6) 脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation,PWM)定时器最高可使用 168MHz 时钟输入。

3.1.1 STM32 微控制器产品介绍

目前,市场上常见的基于 Cortex-M3 的 MCU 有 ST 公司的 STM32F103 微控制器、德州仪器公司(TI)的 LM3S8000 微控制器和恩智浦公司(NXP)的 LPC1788 微控制器等,基于 Cortex-M4 的 MCU 有 ST 公司的 STM32F407 和 STM32F429 微控制器,其应用遍及工业控制、消费电子、仪器仪表、智能家居等各个领域。

ST 公司于 1987 年 6 月成立,是由意大利的 SGS 微电子公司和法国 THOMSON 半导体公司合并而成。1998 年 5 月,改名为意法半导体有限公司(简称 ST 公司),是世界最大的半导体公司之一。从成立至今,ST 公司的增长速度超过了半导体工业的整体增长速度。自 1999 年起,ST 公司始终是世界十大半导体公司之一。据工业统计数据,ST 公司是全球第五大半导体厂商,在很多领域居世界领先水平。例如,它是世界第一大专用模拟芯片和电源转换芯片制造商,世界第一大工业半导体和机顶盒芯片供应商,而且在分立器件、手机相机

模块和车用集成电路领域居世界前列。

在诸多半导体制造商中,ST 公司是较早在市场上推出基于 Cortex-M 内核的 MCU 产品的公司,其根据 Cortex-M 内核设计生产的 STM32 微控制器充分发挥了低成本、低功耗、高性价比的优势,以系列化的方式推出,方便用户选择,受到了广泛的好评。

STM32 系列微控制器适合的应用有替代绝大部分 8/16 位 MCU 的应用、替代目前常用的 32 位 MCU(特别是 Arm7)的应用、小型操作系统相关的应用以及简单图形和语音相关的应用等。

STM32 系列微控制器不适合的应用有程序代码大于 1MB 的应用、基于 Linux 或 Android 的应用、基于高清或超高清的视频应用等。

STM32 系列微控制器的产品线包括高性能类型、主流类型和超低功耗类型三大类,分别面向不同的应用,如图 3-3 所示。

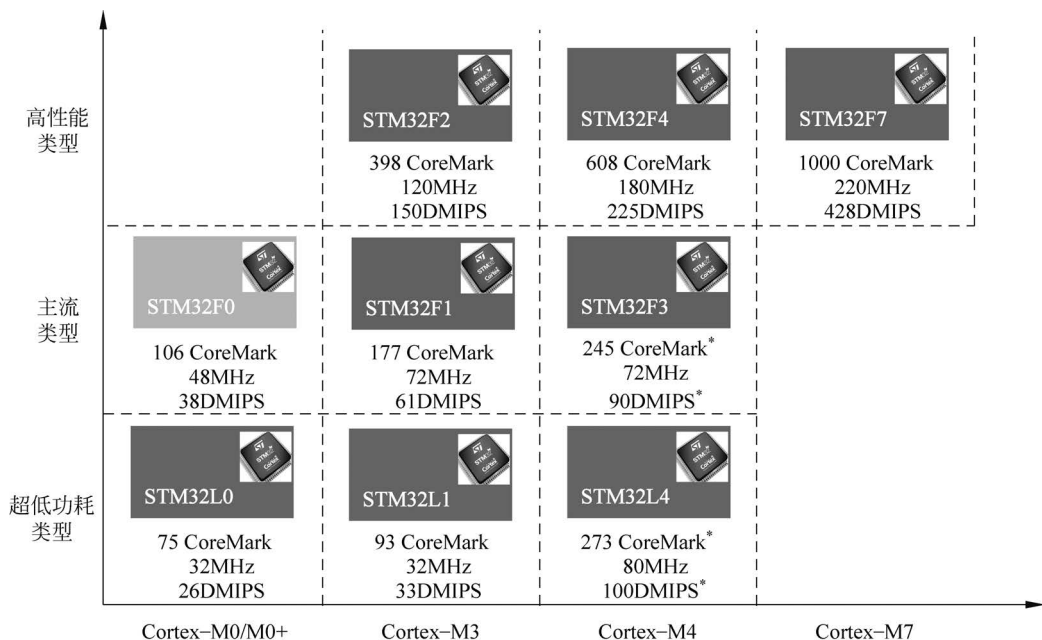


图 3-3 STM32 系列微控制器产品线

1. STM32F1 系列(主流类型)

STM32F1 系列微控制器基于 Cortex-M3 内核,利用一流的外设和低功耗、低压操作实现了高性能,同时以可接受的价格,利用简单的架构和简便易用的工具实现了高集成度,能够满足工业、医疗和消费类市场的各种应用需求。凭借该产品系列,ST 公司在全球基于 Arm Cortex-M3 的微控制器领域处于领先地位。

2. STM32F0 系列(主流类型)

STM32F0 系列微控制器基于 Cortex-M0 内核,在实现 32 位性能的同时,传承了 STM32 系列的重要特性。它集实时性能、低功耗运算和与 STM32 平台相关的先进架构及

外设于一身,将全能架构理念变成了现实,特别适合成本敏感型应用。

3. STM32F4 系列(高性能类型)

STM32F4 系列微控制器基于 Cortex-M4 内核,采用了 ST 公司的 90nm 非易失性存储器(Non Volatile Memory, NVM)工艺和自适应实时(Adaptive Real Time, ART)加速器,在高达 180MHz 的工作频率下通过 Flash 执行时,其处理性能达到 225DMIPS/608CoreMark。由于采用了动态功耗调整功能,通过 Flash 执行时的电流消耗范围为 STM32F401 的 128 μ A/MHz 到 STM32F439 的 260 μ A/MHz。

4. STM32F7 系列(高性能类型)

STM32F7 是一款基于 Cortex-M7 内核的微控制器。它采用 6 级超标量流水线和浮点单元,并利用 ART 加速器和 L1 缓存,实现了 Cortex-M7 的最大理论性能——无论是从嵌入式 Flash 还是外部存储器执行代码,都能在 216MHz 处理器频率下使性能达到 462DMIPS/1082CoreMark。由此可见,相对于 ST 公司以前推出的高性能微控制器,如 STM32F2、STM32F4 系列,STM32F7 系列的优势就在于其强大的运算性能,能够适用于那些对于高性能计算有巨大需求的应用,对于可穿戴设备和健身应用来说,将会带来革命性的颠覆,起到巨大的推动作用。

3.1.2 STM32 系统性能分析

下面对 STM32 系统性能进行分析。

(1) **Arm Cortex-M4 内核**。与 8/16 位设备相比,Arm Cortex-M4 32 位 RISC 处理器提供了更高的代码效率。STM32F407xx 微控制器带有一个嵌入式的 Arm 核,可以兼容所有 Arm 工具和软件。

(2) **嵌入式 Flash 和 SRAM**。内置多达 1024KB 的嵌入式 Flash,可用于存储程序和数据;多达 192KB 的嵌入式 SRAM 可以以 CPU 的时钟速度进行读/写。

(3) **可变静态存储器(Flexible Static Memory Controller, FSMC)**。FSMC 嵌入在 STM32F407xx 中,带有 4 个片选,支持 5 种模式:Flash、RAM、PSRAM、NOR 和 NAND。

(4) **嵌套向量中断控制器(NVIC)**。可以处理 43 个可屏蔽中断通道(不包括 Cortex-M3 的 16 根中断线),提供 16 个中断优先级。紧密耦合的 NVIC 实现了更低的中断处理延时,直接向内核传递中断入口向量表地址。紧密耦合的 NVIC 内核接口允许中断提前处理,对后到的更高优先级的中断进行处理,支持尾链,自动保存处理器状态,中断入口在中断退出时自动恢复,不需要指令干预。

(5) **外部中断/事件控制器(EXTI)**。外部中断/事件控制器由 23 根用于产生中断/事件请求的边沿探测器线组成。每根线可以被单独配置用于选择触发事件(上升沿、下降沿,或者两者都可以),也可以被单独屏蔽。有一个挂起寄存器维护中断请求的状态。当外部线上出现长度超过内部高级外围总线(Advanced Peripheral Bus, APB)APB2 时钟周期的脉冲时,EXTI 能够检测到。多达 112 个 GPIO 连接到 16 根外部中断线。

(6) **时钟和启动**。在系统启动时要进行系统时钟选择,但复位时内部 8MHz 的晶振被

选作 CPU 时钟。可以选择一个外部的 25MHz 时钟,并且会被监视判定是否成功。在这期间,控制器被禁止并且软件中断管理也随后被禁止。同时,如果有需要(如碰到一个间接使用的晶振失败),PLL 时钟的中断管理完全可用。多个预比较器可以用于配置高性能总线(Advanced High performance Bus, AHB)频率,包括高速 APB(APB2)和低速 APB(APB1),高速 APB 最高的频率为 168MHz,低速 APB 最高的频率为 84MHz。

(7) **Boot 模式**。在启动时,Boot 引脚被用来在 3 种 Boot 选项中选择一种:从用户 Flash 导入、从系统存储器导入、从 SRAM 导入。Boot 导入程序位于系统存储器,用于通过 USART1 重新对 Flash 存储器编程。

(8) **电源供电方案**。 V_{DD} 电压范围为 3.0~3.6V,外部电源通过 VDD 引脚提供,用于 I/O 和内部调压器。 V_{SSA} 和 V_{DDA} 电压范围为 2.0~3.6V,外部模拟电压输入,用于 ADC(模/数转换器)、复位模块、RC 和 PLL,在 V_{DD} 范围之内(ADC 被限制在 2.4V), V_{SSA} 和 V_{DDA} 必须相应连接到 VSS 和 VDD 引脚。 V_{BAT} 电压范围为 1.8~3.6V,当 V_{DD} 无效时为 RTC(实时时钟,Real Time Clock),外部 32kHz 晶振和备份寄存器供电(通过电源切换实现)。

(9) **电源管理**。设备有一个完整的上电复位(POR)和掉电复位(PDR)电路。这个电路一直有效,用于确保电压从 2V 启动或掉到 2V 时进行一些必要的操作。

(10) **电压调节**。调压器有 3 种运行模式,分别为主(MR)模式、低功耗(LPR)模式和掉电模式。MR 模式用在传统意义上的调节模式(运行模式),LPR 模式用在停止模式,掉电模式用在待机模式。调压器输出为高阻,核心电路掉电,包括零消耗(寄存器和 SRAM 的内容不会丢失)。

(11) **低功耗模式**。STM32F407xx 支持 3 种低功耗模式,从而在低功耗、短启动时间和可用唤醒源之间达到一个最好的平衡点。

3.1.3 Cortex-M4 的三级流水线

流水线技术通过多个功能部件并行工作缩短指令的运行时间,提高系统的效率和吞吐率。

一条指令的执行可以分解为多个阶段,各个阶段使用的硬件部件不同,这样指令执行就可以重叠,实现多条指令并行处理。指令的执行还是顺序的,但是可以在前一条指令未执行完成时,提前执行后面的指令,并与前面的指令不冲突,以加快整个程序的执行速度。

随着流水线级数的增加,可简化流水线各级的逻辑,进一步提高处理器的性能。但是,由于流水线级数的增加,会增加系统的延迟,即内核在执行一条指令之前,需要更多的周期填充流水线。过多的流水线级数常常会削弱指令的执行效率。例如,一条指令的下一条指令需要该条指令的执行结果作为输入,那么下一条指令只能等待这条指令执行完成后才能执行。再如,若出现跳转指令,普通的流水线处理器要付出更大的代价。

Arm 微处理器种类繁多,其中不同系列使用的流水线级别也不尽相同,不过大致可以分为三级流水线、五级流水线和超流水线。其中,三级流水线的实现逻辑最简单,五级流水线的实现逻辑最经典,超流水线的实现逻辑最复杂。从理论上说,流水线深度越深的处理器

执行效率就越高,不过执行的逻辑也越复杂,需要解决的冲突也越多。

流水线技术提高了 CPU 的吞吐量,但并没有降低每条指令的延迟。所谓延迟,是指一条指令从进入流水线到流出流水线所花费的时间;而吞吐量是指单位时间内执行的指令数。

Cortex-M4 是一个 32 位处理器内核,采用哈佛架构,支持 Thumb、Thumb-2 指令集。Cortex-M4 使用的是三级流水线:取指、译码和执行,如图 3-4 所示。

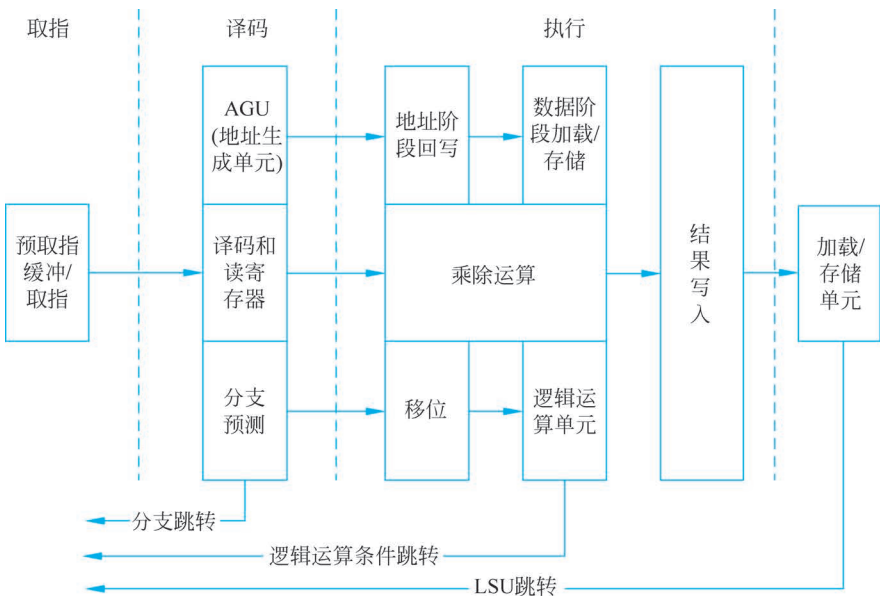


图 3-4 Cortex-M4 的三级流水线

1. 取指阶段

取指(Fetch)用来计算下一个预取指令的地址,从指令存储空间中取出指令,或者自动加入中断向量。在此阶段还包含一个预取指缓冲区,允许后续指令在执行之前在缓冲区中排队。也可以对非对齐的指令进行自动对齐,避免流水线的“断流”。因为 Cortex-M4 支持 16 位的 Thumb 指令和 32 位的 Thumb-2 指令,通过在预取指缓冲区中进行自动对齐确定指令的边界。缓冲区有 3 个字长,可以缓存 6 个 Thumb 指令或 3 个 Thumb-2 指令。该缓冲区不会在流水线中添加额外的级数,因此不会使跳转导致的性能下降更加恶化。由于 Cortex-M4 总线宽度为 32 位,所以一次读取 32 位的指令。如果代码都是 16 位的 Thumb 指令,那么处理器会每隔一个时钟周期进行取指,每次读取两条 Thumb 指令。如果缓冲区满了,那么指令缓冲区会暂停对指令的加载。

2. 译码阶段

译码(Decode)是对之前取指阶段送入的指令进行解码操作,分解出指令中的操作数和执行码,再由操作数相应的寻址方式生成操作数的加载/存储单元(Load/Store Unit,LSU)地址,产生寄存器值。如果操作数存储在外部存储器中,则可以由地址生成单元(Address Generation Unit,AGU)产生此操作数的访问地址。如果操作数存储在寄存器中,那么在此

阶段直接读取操作数。

3. 执行阶段

执行(Execute)用于执行指令,指令包括加减乘除四则运算、逻辑运算、加载外部存储器操作数、产生 LSU 的回写执行结果等。

如图 3-4 所示,在译码和执行阶段都可以产生跳转操作。当执行到跳转指令时,需要清理流水线,处理器将不得不从跳转的目的地重新取指,这样会影响代码执行效率。

Cortex-M4 处理器内核引入了分支预测技术,分支预测在指令的译码阶段就会预测是否会发生跳转,在取指阶段会自动加载预测后的指令,如果预测正确将不会产生流水线断流。许多算法都需要对指令反复执行运算,简单的分支预测有利于提高代码执行效率。

3.1.4 STM32 微控制器的命名规则

ST 公司在推出一系列基于 Cortex-M 内核的 STM32 微控制器产品线的同时,也制定了它们的命名规则。通过名称,用户能直观、迅速地了解某款具体型号的 STM32 微控制器产品。STM32 系列微控制器的名称主要由以下几部分组成。

1. 产品系列名

STM32 系列微控制器名称通常以 STM32 开头,表示产品系列,代表 ST 公司基于 Arm Cortex-M 系列内核的 32 位 MCU。

2. 产品类型名

产品类型是 STM32 系列微控制器名称的第二部分,通常有 F(Flash Memory,通用快速闪存)、W(无线系统芯片)、L(低功耗低电压,1.65~3.6V)等类型。

3. 产品子系列名

产品子系列是 STM32 系列微控制器名称的第三部分。

例如,常见的 STM32F 产品子系列有 050(Arm Cortex-M0 内核)、051(Arm Cortex-M0 内核)、100(Arm Cortex-M3 内核,超值型)、101(Arm Cortex-M3 内核,基本型)、102(Arm Cortex-M3 内核,USB 基本型)、103(Arm Cortex-M3 内核,增强型)、105(Arm Cortex-M3 内核,USB 互联网型)、107(Arm Cortex-M3 内核,USB 互联网型和以太网型)、108(Arm Cortex-M3 内核,IEEE 802.15.4 标准)、151(Arm Cortex-M3 内核,不带 LCD)、152/162(Arm Cortex-M3 内核,带 LCD)、205/207(Arm Cortex-M3 内核,摄像头)、215/217(Arm Cortex-M3 内核,摄像头和加密模块)、405/407(Arm Cortex-M4 内核,MCU+FPU,摄像头)、415/417(Arm Cortex-M4 内核,MCU+FPU,加密模块和摄像头)等。

4. 引脚数

引脚数是 STM32 系列微控制器名称的第四部分,通常有以下几种: F(20pin)、G(28pin)、K(32pin)、T(36pin)、H(40pin)、C(48pin)、U(63pin)、R(64pin)、O(90pin)、V(100pin)、Q(132pin)、Z(144pin)和 I(176pin)等。

5. Flash 容量

Flash 容量是 STM32 系列微控制器名称的第五部分,通常以下几种: 4(16KB Flash,

小容量)、6(32KB Flash,小容量)、8(64KB Flash,中容量)、B(128KB Flash,中容量)、C(256KB Flash,大容量)、D(384KB Flash,大容量)、E(512KB Flash,大容量)、F(768KB Flash,大容量)、G(1MB Flash,大容量)。

6. 封装方式

封装方式是 STM32 系列微控制器名称的第六部分,通常有以下几种: T(LQFP,薄型四侧引脚扁平封装),H(BGA,球栅阵列封装)、U(VFQFPN,超薄细间距四方扁平无铅封装),Y(WLCSP,晶圆片级芯片规模封装)。

7. 温度范围

温度范围是 STM32 系列微控制器名称的第七部分,通常有以下两种: 6(−40~85℃,工业级)和 7(−40~105℃,工业级)。

STM32F407 微控制器的命名规则如图 3-5 所示。

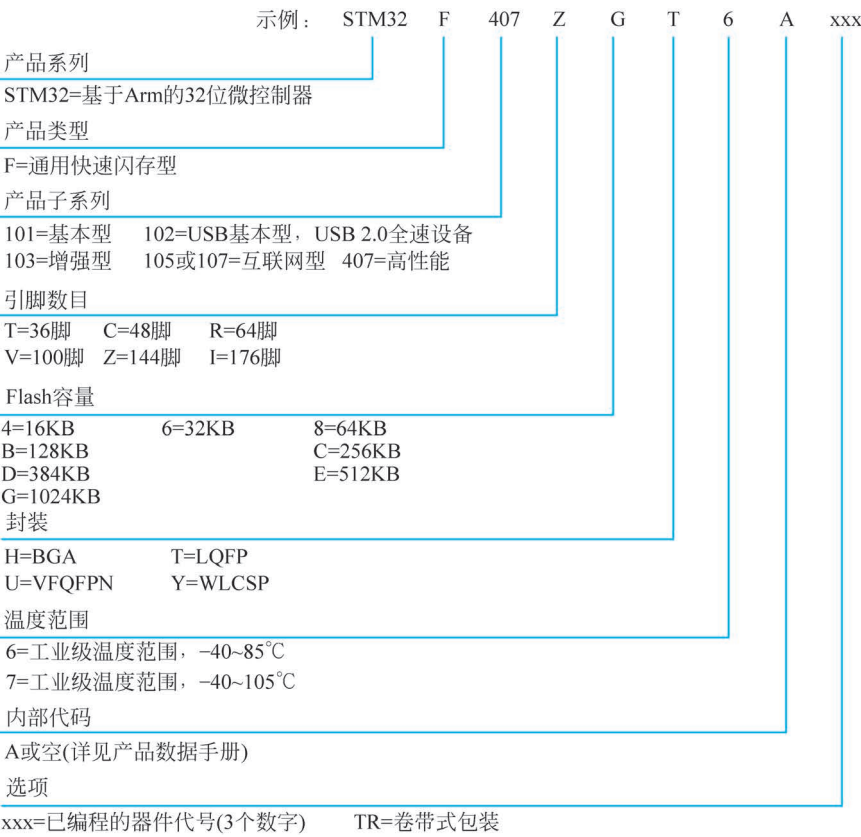


图 3-5 STM32F407 微控制器的命名规则

通过命名规则,用户能直观、迅速地了解某款具体型号的微控制器产品。例如,本书后续部分主要介绍的微控制器 STM32F407ZGT6,其中,STM32 代表 ST 公司基于 Arm Cortex-M 系列内核的 32 位 MCU,F 代表通用快速闪存型,407 代表基于 Arm Cortex-M4

内核的高性能子系列,Z代表144个引脚,G代表大容量1MB Flash,T代表LQFP封装方式,6代表 $-40\sim 85^{\circ}\text{C}$ 的工业级温度范围。

3.1.5 STM32F1 和 STM32F4 的区别

STM32F1 和 STM32F4 的区别如下。

- (1) STM32F1 采用 Cortex-M3 内核,STM32F4 采用 Cortex-M4 内核。
- (2) STM32F1 最高主频为 72MHz,STM32F4 最高主频为 168MHz。
- (3) STM32F4 具有单精度浮点运算单元,STM32F1 没有浮点运算单元。
- (4) STM32F4 具备增强的 DSP 指令集。STM32F4 执行 16 位 DSP 指令的时间只有 STM32F1 的 30%~70%;执行 32 位 DSP 指令的时间只有 STM32F1 的 25%~60%。
- (5) STM321 内部 SRAM 最大为 64KB,STM32F4 内部 SRAM 为 192KB(112KB+64KB+16KB)。
- (6) STM32F4 有备份域 SRAM(通过 V_{BAT} 供电保持数据),STM32F1 没有备份域 SRAM。
- (7) STM32F4 从内部 SRAM 和外部 FSMC 存储器执行程序的速度比 STM32F1 快很多。STM32F1 的指令总线 I-BUS 只接到 Flash 上,从 SRAM 和 FSMC 取指令只能通过 S-BUS,速度较慢。STM32F4 的 I-BUS 不但连接到 Flash 上,而且还连接到 SRAM 和 FSMC 上,从而加快从 SRAM 或 FSMC 取指令的速度。
- (8) STM32F1 最大封装为 144 脚,可提供 112 个 GPIO;STM32F4 最大封装为 176 脚,可提供 140 个 GPIO。
- (9) STM32F1 的 GPIO 内部上下拉电阻配置仅对输入模式有用,输出时无效。而 STM32F4 的 GPIO 在设置为输出模式时,上下拉电阻的配置依然有效。即 STM32F4 可以配置为开漏输出,内部上拉电阻使能,而 STM32F1 没有此功能。
- (10) STM32F4 的 GPIO 最高翻转速度为 84MHz,STM32F1 最大翻转速度只有 18MHz。
- (11) STM32F1 最多可提供 5 个 UART 串口,STM32F4 最多可以提供 6 个 UART 串口。
- (12) STM32F1 可提供两个 I2C 接口,STM32F4 可提供 3 个 I2C 接口。
- (13) STM32F1 和 STM32F4 都具有 3 个 12 位的独立 ADC,STM32F1 可提供 21 个输入通道,STM32F4 可以提供 24 个输入通道。STM32F1 的 ADC 最大采样频率为 1MSPS^①,两路交替采样可到 2MSPS(STM32F1 不支持 3 路交替采样)。STM32F4 的 ADC 最大采样频率为 2.4MSPS,3 路交替采样可到 7.2MSPS。
- (14) STM32F1 只有 12 个 DMA 通道,STM32F4 有 16 个 DMA 通道。STM32F4 的每个 DMA 通道有 4×32 位 FIFO,STM32F1 没有 FIFO。

^① MSPS 即 Million Samples per Second。

(15) STM32F1 的 SPI 时钟最高速度为 18MHz,STM32F4 可以到 37.5MHz。

(16) STM32F1 没有独立的 32 位定时器(32 位需要级联实现),STM32F4 的 TIM2 和 TIM5 具有 32 位上下计数功能。

(17) STM32F1 和 STM32F4 都有两个 I2S 接口,但是 STM32F1 的 I2S 只支持半双工,而 STM32F4 的 I2S 支持全双工。

3.1.6 STM32 微控制器的选型

在微控制器选型过程中,工程师常常会陷入这样一个困局:一方面抱怨 8 位/16 位微控制器有限的指令和性能,另一方面抱怨 32 位处理器的高成本和高功耗。能否有效地解决这个问题,让工程师不必在性能、成本、功耗等因素中作出取舍和折中?

通过前面的介绍,我们已经大致了解了 STM32 微控制器的分类和命名规则。在此基础上,根据实际情况的具体需求,可以大致确定所要选用的 STM32 微控制器的内核型号和产品系列。例如,一般的工程应用的数据运算量不是特别大,基于 Cortex-M3 内核的 STM32F1 系列微控制器即可满足要求;如果需要进行大量的数据运算,且对实时控制和数字信号处理能力要求很高,或者需要外接 RGB 大屏幕,则推荐选择基于 Cortex-M4 内核的 STM32F4 系列微控制器。

确定好产品线之后,即可选择具体的型号。参照 STM32 微控制器的命名规则,可以先确定微控制器的引脚数目。引脚多的微控制器的功能相对多一些,当然价格也贵一些,具体要根据实际应用中的功能需求进行选择,一般够用就好。确定好了引脚数目之后再选择 Flash 容量的大小。对于 STM32 微控制器,具有相同引脚数目的微控制器会有不同的 Flash 容量可供选择,它也要根据实际需要进行选择,程序大就选择容量大的 Flash,一般也是够用即可。到这里,根据实际的应用需求,确定了所需的微控制器的具体型号,下一步的工作就是开发相应的应用。

除了可以选择 STM32 外,还可以选择国产芯片。Arm 技术发源于国外,但通过研究人员十几年的研究和开发,我国的 Arm 微控制器技术已经取得了很大的进步,国产品牌已获得了较高的市场占有率,相关的产业也在逐步发展壮大之中。

(1) **兆易创新**于 2005 年在北京成立,是一家领先的无晶圆厂半导体公司,致力于开发先进的存储器技术和 IC 解决方案。该公司的核心产品线为 Flash、32 位通用型 MCU 及智能人机交互传感器芯片及整体解决方案,产品以“高性能、低功耗”著称,为工业、汽车、计算、消费类电子、物联网、移动应用以及网络和电信行业的客户提供全方位服务。与 STM32F103 兼容的产品为 GD32VF103。

(2) **华大半导体**是中国电子信息产业集团有限公司(CEC)旗下专业的集成电路发展平台公司,围绕汽车电子、工业控制、物联网三大应用领域,重点布局控制芯片、功率半导体、高端模拟芯片和安全芯片等,形成竞争力强劲的产品矩阵及全面的整体芯片解决方案。可以选择的 Arm 微控制器有 HC32F0、HC32F1 和 HC32F4 系列。

学习嵌入式微控制器的知识,掌握其核心技术,了解这些技术的发展趋势,有助于为我

国培养该领域的后备人才,促进我国在微控制器技术上的长远发展,为国产品牌的发展注入新的活力。在学习中,应注意知识学习、能力提升、价值观塑造的有机结合,培养自力更生、追求卓越的奋斗精神和精益求精的工匠精神,树立民族自信心,为实现中华民族的伟大复兴贡献力量。

3.2 STM32F407ZGT6 概述

与其他单片机一样,STM32 是一个单片计算机或单片微控制器。所谓单片,就是在一枚芯片上集成了计算机或微控制器该有的基本功能部件。这些功能部件通过总线连在一起。就 STM32 而言,这些功能部件主要包括 Cortex-M 内核、总线、系统时钟发生器、复位电路、程序存储器、数据存储器、中断控制、调试接口以及各种功能部件(外设)。不同的芯片系列和型号,外设的数量和种类也不同,常用的基本功能部件(外设)有输入/输出接口(GPIO)、定时/计数器(Timer/Counter)、通用同步/异步收发器(Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter,USART)、串行总线 I2C 和 SPI 或 I2S、SD 卡接口 SDIO、USB 接口等。

STM32F407 属于 STM32F4 系列微控制器,采用了最新的 168MHz 的 Cortex-M4 处理器内核,可取代当前基于微控制器和中低端独立数字信号处理器的双片解决方案,或者将两者整合成一个基于标准内核的数字信号控制器。微控制器与数字信号处理器整合还可以提高能效,让用户使用支持 STM32 的强大研发生态系统。STM32 全系列产品在引脚、软件和外设上相互兼容,并配有巨大的开发支持生态系统,包括例程、设计 IP、低成本的探索工具和第三方开发工具,可提升设计系统扩展和软、硬件再用的灵活性,使 STM32 平台的投资回报率最大化。因此,STM32F407 微控制器的相关结构、原理及使用方法适用于其他 STM32F4 系列微控制器,对于使用相同封装形式和相同功能的片上外设应用,代码和电路可以共用。

3.2.1 STM32F407 的主要特性

STM32F407 的**主要特性**如下。

(1) **内核**。带有 FPU 的 Arm 32 位 Cortex-M4 CPU,在 Flash 中实现零等待状态运行性能的自适应实时加速器(ART 加速器),主频高达 168MHz,具有内存保护单元(Memory Protection Unit,MPU),能够实现高达 210DMIPS 即 1.25DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1) 的性能,具有 DSP 指令集。

(2) **存储器**。高达 1MB 的 Flash,组织为两个区,可读写同步;高达 192KB+4KB 的 SRAM,包括 64KB 的 CCM(内核耦合存储器)数据 RAM;具有高达 32 位数据总线的灵活外部存储控制器:SRAM、PSRAM、SDRAM/LPDDR SDRAM、Compact Flash/NOR/NAND 存储器。

(3) **LCD 并行接口**,兼容 8080/6800 模式。

(4) **LCD-TFT 控制器**具有高达 XGA 的分辨率,具有专用的 Chrom-ART Accelerator,用于增强的图形内容创建(DMA2D)。

(5) **时钟、复位和电源管理**。

① 1.7~3.6V 供电和 I/O。

② 上电复位(Power On Reset,POR)、掉电复位(Power Down Reset,PDR)、可编程电压检测器(Programmable Voltage Detector,PVD)和欠压复位(Brownout Reset,BOR)。

③ 4~26MHz 晶振。

④ 内置经工厂调校的 16MHz RC 振荡器(1%精度)。

⑤ 带校准功能的 32kHz RTC 振荡器。

⑥ 内置带校准功能的 32kHz RC 振荡器。

(6) **低功耗**。

① 具有睡眠、停机和待机模式。

② V_{BAT} 可为 RTC、20×32 位备份寄存器+可选的 4KB 备份 SRAM 供电。

(7) 3 个 12 位 2.4MSPS **ADC**。多达 24 通道,三重交叉模式下的性能高达 7.2MSPS。

(8) 两个 12 位 **DAC**。

(9) **通用 DMA**: 具有 FIFO 和突发支持的 16 路 DMA 控制器。

(10) 12 个 16 位定时器和两个频率高达 168MHz 的 32 位定时器,每个定时器都带有 4 个输入捕获/输出比较/PWM 或脉冲计数器与正交(增量)编码器输入。

(11) **调试模式**。

① SWD & JTAG 接口。

② Cortex-M4 跟踪宏单元。

(12) 多达 140 个具有中断功能的 I/O 端口。

① 高达 136 个快速 I/O,最高 84MHz。

② 高达 138 个可耐 5V 的 I/O。

(13) 多达 15 个**通信接口**。

① 3 个 I2C 接口(SMBus/PMBus)。

② 4 个 USART 和两个 UART(10.5Mb/s,ISO 7816 接口,LIN,IrDA,调制解调器控制)接口。

③ 3 个 SPI(37.5Mb/s),两个可以复用的全双工 I2S,通过内部音频 PLL 或外部时钟达到音频级精度。

④ 两个 CAN(2.0B 主动)以及 SDIO 接口。

(14) **高级连接功能**。

① 具有片上 PHY 的 USB 2.0 全速器件/主机/OTG 控制器。

② 具有专用 DMA,片上全速 PHY 和 ULPI 的 USB 2.0 高速/全速器件/主机/OTG 控制器。

③ 具有专用 DMA 的 10/100 以太网 MAC,支持 IEEE 1588v2 硬件,MII/RMII 接口。

- (15) 8~14 位 **并行照相机接口**, 速度高达 54MB/s。
- (16) **真随机数发生器**。
- (17) **CRC** 计算单元。
- (18) **RTC**: 亚秒级精度, 硬件日历。
- (19) 96 位唯一 **ID**。

3.2.2 STM32F407 的主要功能

STM32F407xx 器件基于高性能的 Arm Cortex-M4 32 位 RISC 内核, 工作频率高达 168MHz。Cortex-M4 内核带有单精度浮点运算单元(FPU), 支持所有 Arm 单精度数据处理指令和数据类型。它还具有一组 DSP 指令和一个提高应用安全性的存储器保护单元(MPU)。

STM32F407xx 器件集成了高速嵌入式存储器(Flash 和 SRAM 的容量分别高达 2MB 和 256KB)和高达 4KB 的后备 SRAM, 以及大量连至两条 APB 总线、两条 AHB 总线和—个 32 位多 AHB 总线矩阵的增强型 I/O 与外设。

所有型号均带有 3 个 12 位 ADC、两个 DAC、一个低功耗 RTC、12 个通用 16 位定时器(包括两个用于电机控制的 PWM 定时器)、两个通用 32 位定时器。

STM32F407xx 还带有标准与高级通信接口, 主要功能如下。

- (1) 高达 3 个 I2C。
- (2) 3 个 SPI 和两个全双工 I2S。为达到音频级的精度, I2S 外设可通过专用内部音频 PLL 提供时钟, 或使用外部时钟以实现同步。
- (3) 4 个 USART 及两个 UART。
- (4) 一个 USB OTG 全速和一个具有全速能力的 USB OTG 高速(配有 ULPI 低引脚数接口)接口。
- (5) 两个 CAN 接口。
- (6) 一个 SDIO/MMC 接口。
- (7) 以太网和摄像头接口。

高级外设包括一个 SDIO、一个灵活存储器控制(FMC)接口、一个用于 CMOS 传感器的摄像头接口。

STM32F407xx 器件的工作温度范围为 $-40\sim 105^{\circ}\text{C}$, 供电电压范围为 1.8~3.6V。

若使用外部供电监控器, 则供电电压可低至 1.7V。

该系列提供了一套全面的节能模式, 可实现低功耗应用设计。

STM32F407xx 器件有不同封装, 范围从 64 引脚至 176 引脚, 所包括的外设因所选的器件而异。

这些特性使得 STM32F407xx 微控制器应用广泛:

- (1) 电机驱动和应用控制;
- (2) 工业应用, 如 PLC、逆变器、断路器;
- (3) 打印机、扫描仪;

- (4) 警报系统、视频电话、HVAC;
- (5) 家庭音响设备。

3.3 STM32F407ZGT6 芯片内部结构

STM32F407ZGT6 芯片主系统由 32 位多层 AHB 总线矩阵构成,STM32F407ZGT6 芯片内部通过 8 条主控总线(S0~S7)和 7 条被控总线(M0~M6)组成的总线矩阵将 Cortex-M4 内核、存储器及片上外设连在一起。

1. 8 条主控总线

- (1) Cortex-M4 内核 I 总线、D 总线和 S 总线(S0~S2)。

S0: **I 总线**,用于将 Cortex-M4 内核的指令总线连接到总线矩阵。内核通过此总线获取指令。此总线访问的对象是包含代码的存储器(内部 Flash/SRAM 或通过 FSMC 的外部存储器)。

S1: **D 总线**,用于将 Cortex-M4 内核的数据总线和 64KB CCM 数据 RAM 连接到总线矩阵。内核通过此总线进行立即数加载和调试访问。此总线访问的对象是包含代码或数据的存储器(内部 Flash 或通过 FSMC 的外部存储器)。

S2: **S 总线**,用于将 Cortex-M4 内核的系统总线连接到总线矩阵。此总线用于访问位于外设或 SRAM 中的数据。也可通过此总线获取指令(效率低于 I 总线)。此总线访问的对象是内部 SRAM(112KB、64KB 和 16KB)、包括 APB 外设在内的 AHB1 外设和 AHB2 外设,以及通过 FSMC 的外部存储器。

- (2) DMA1 存储器总线、DMA2 存储器总线(S3、S4)。

S3、S4: **DMA 存储器总线**,用于将 DMA 存储器总线主接口连接到总线矩阵。DMA 通过此总线执行存储器数据的传入和传出。此总线访问的对象是内部 SRAM(112KB、64KB、16KB)及通过 FSMC 的外部存储器。

(3) DMA2 外设总线(S5),用于将 DMA2 外设总线主接口连接到总线矩阵。DMA 通过此总线访问 AHB 外设或执行存储器间的数据传输。此总线访问的对象是 AHB 和 APB 外设及数据存储器(内部 SRAM 及通过 FSMC 的外部存储器)。

(4) 以太网 DMA 总线(S6),用于将以太网 DMA 主接口连接到总线矩阵。以太网 DMA 通过此总线向存储器存取数据。此总线访问的对象是内部 SRAM(112KB、64KB 和 16KB)及通过 FSMC 的外部存储器。

(5) USB OTG HS DMA 总线(S7),用于将 USB OTG HS DMA 主接口连接到总线矩阵。USB OTG HS DMA 通过此总线向存储器加载/存储数据。此总线访问的对象是内部 SRAM(112KB、64KB 和 16KB)及通过 FSMC 的外部存储器。

2. 7 条被控总线

- (1) 内部 Flash I 总线(M0)。
- (2) 内部 Flash D 总线(M1)。

- (3) 主要内部 SRAM1(112KB)总线(M2)。
- (4) 辅助内部 SRAM2(16KB)总线(M3)。
- (5) AHB1 外设(包括 AHB-APB 总线桥和 APB 外设)总线(M5)。
- (6) AHB2 外设总线(M4)。

(7) FSMC 总线(M6)。FSMC 借助总线矩阵,可以实现主控总线到被控总线的访问,这样即使在多个高速外设同时运行期间,系统也可以实现并发访问和高效运行。

此外,还有辅助内部 SRAM3(64KB)总线(仅适用于 STM32F42 和 STM32F43 系列器件)(M7)。

主控总线所连接的设备是数据通信的发起端,通过矩阵总线可以和与其相交被控总线上连接的设备进行通信。例如,Cortex-M4 内核可以通过 S0 总线与 M0 总线、M2 总线和 M6 总线连接 Flash、SRAM1 及 FSMC 进行数据通信。STM32F407ZGT6 芯片总线矩阵结构如图 3-6 所示。

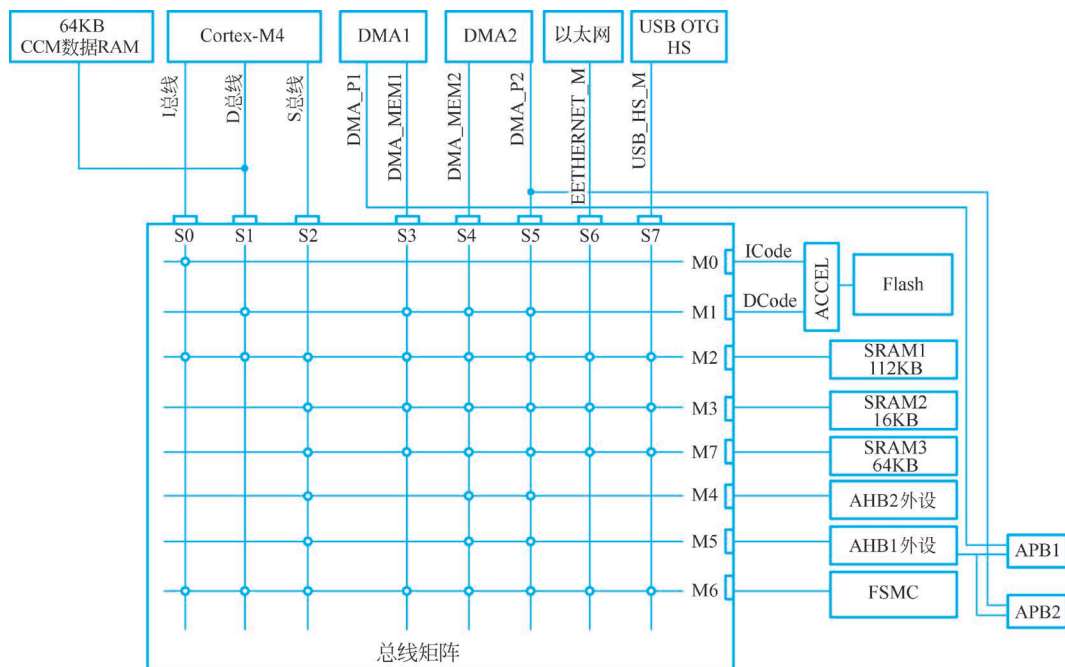


图 3-6 STM32F407ZGT6 芯片总线矩阵结构

3.4 STM32F407VGT6 芯片引脚和功能

STM32F407VGT6 芯片引脚如图 3-7 所示。图 3-7 只列出了每个引脚的基本功能,由于芯片内部集成功能较多,实际引脚有限,因此多数引脚为复用引脚(一个引脚可复用为多个功能)。对于每个引脚的功能定义请查看 STM32F407XX 数据手册。

STM32F4 系列微控制器的所有标准输入引脚都是 CMOS 的,但与 TTL 兼容。

STM32F4 系列微控制器的所有容忍 5V 电压的输入引脚都是 TTL 的,但与 CMOS 兼容。在输出模式下,在 2.7~3.6V 供电电压范围内,STM32F4 系列微控制器所有输出引脚都是与 TTL 兼容的。

由 STM32F4 芯片的电源引脚、晶振 I/O 引脚、下载 I/O 引脚、BOOT I/O 引脚和复位 I/O 引脚 NRST 组成的系统叫作最小系统。

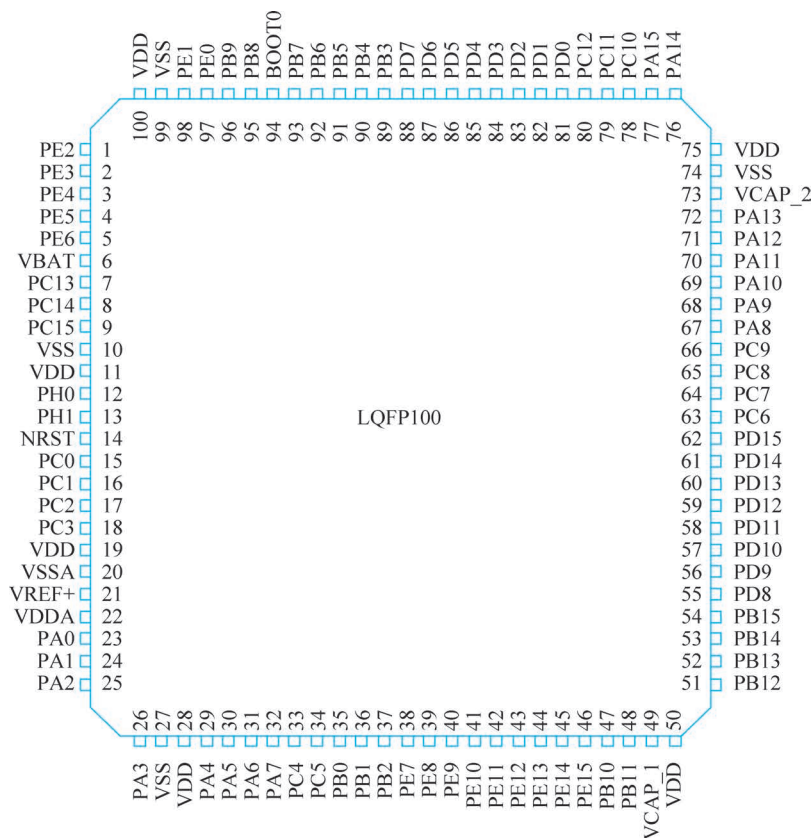


图 3-7 STM32F407VGT6 芯片引脚

3.5 STM32F407VGT6 最小系统设计

STM32F407VGT6 最小系统是指能够让 STM32F407VGT6 正常工作的包含最少元器件的系统。STM32F407VGT6 片内集成了电源管理模块(包括滤波复位输入、集成的上电复位/掉电复位电路、可编程电压检测电路)、8MHz 高速内部 RC 振荡器、40kHz 低速内部 RC 振荡器等部件,外部只需 7 个无源器件就可以让 STM32F407VGT6 工作。然而,为了方便,在最小系统中加入了 USB 转 TTL 串口、发光二极管等功能模块。

STM32F407VGT6 最小系统核心电路原理图如图 3-8 所示,其中包括了复位电路、晶体振荡电路和启动设置电路等模块。

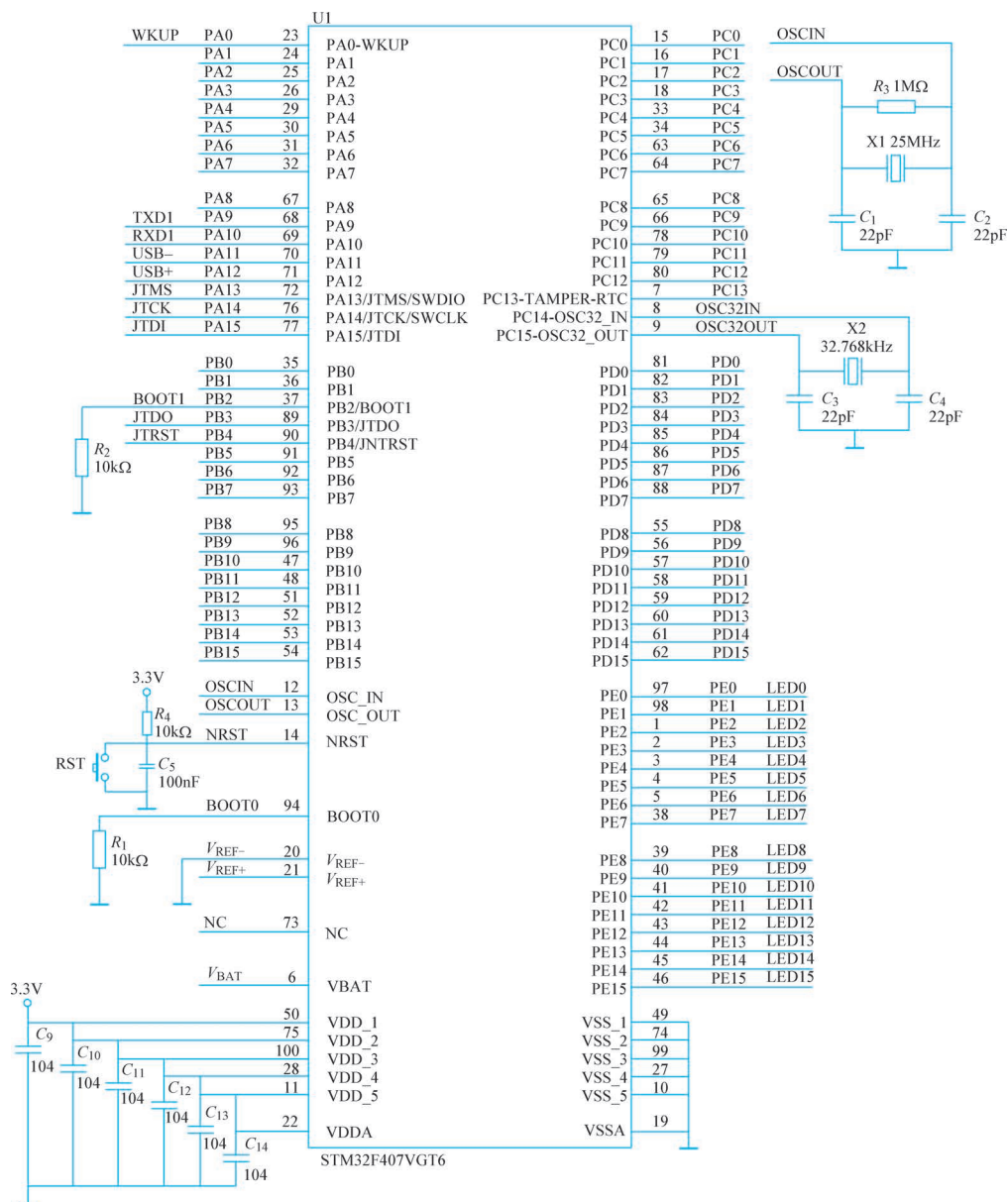


图 3-8 STM32F407VGT6 最小系统核心电路原理图

1. 复位电路

STM32F407VGT6 的 NRST 引脚输入中使用 CMOS 工艺,它内部连接了一个不能断开的上拉电阻 R_{pu} ,典型值为 $40k\Omega$;外部连接了一个上拉电阻 R_4 、按键 RST 及电容 C_5 。当按下 RST 按键时 NRST 引脚电位变为 0,通过这种方式实现手动复位。

2. 晶体振荡电路

STM32F407VGT6 一共外接了两个高振:一个 25MHz 的晶振 X1 提供给高速外部时

钟,另一个 32.768kHz 的晶振 X2 提供给全低速外部时钟。

3. 启动设置电路

启动设置电路由启动设置引脚 BOOT1 和 BOOT0 构成,二者均通过 10kΩ 的电阻接地,从用户 Flash 启动。

4. JTAG 接口电路

为了方便系统采用 J-Link 仿真器进行下载和在线仿真,在最小系统中预留了 JTAG 接口电路用来实现 STM32F407VGT6 与 J-Link 仿真器进行连接。JTAG 接口电路如图 3-9 所示。

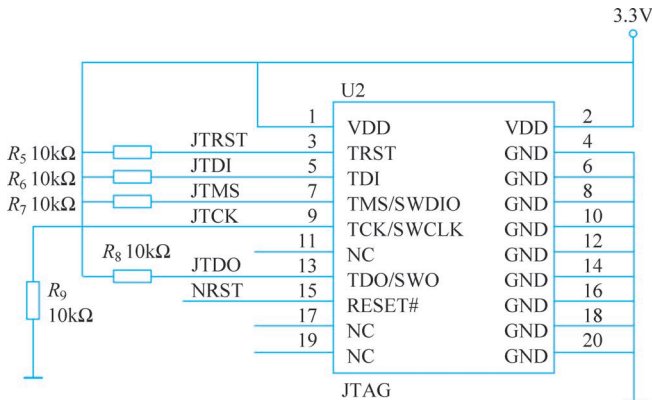


图 3-9 JTAG 接口电路

5. 流水灯电路

最小系统板载 16 个 LED 流水灯,对应 STM32F407VGT6 的 PE0~PE15 引脚,如图 3-10 所示。

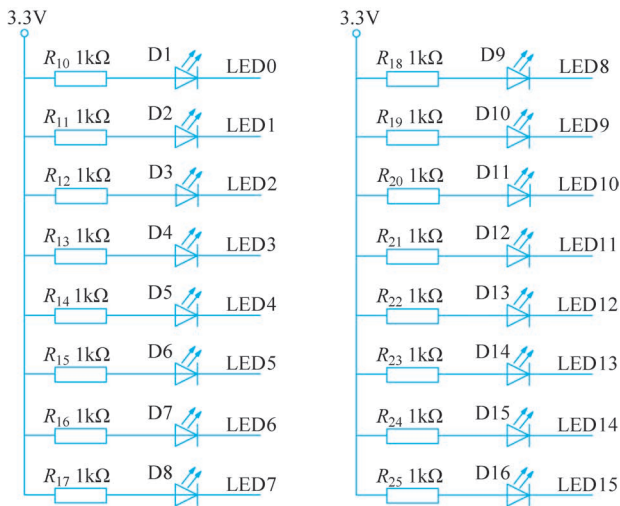


图 3-10 流水灯电路原理

另外,还设计有 USB 转 TTL 串口电路(采用 CH340G)、独立按键电路、ADC 采集电路(采用 10kΩ 电位器)和 5V 转 3.3V 电源电路(采用 AMS1117-3.3V),具体电路从略。