



第 3 章



STM32 系列微控制器

本章对 STM32 系列微控制器进行概述，介绍 STM32F1 系列产品系统架构和 STM32F103ZET6 内部结构、存储器映像、时钟结构，以及 STM32F103VET6 的引脚、最小系统设计。

3.1 STM32 微控制器概述



微课视频

STM32 是意法半导体（ST Microelectronics）公司较早推向市场的基于 Cortex-M 内核的微处理器系列产品，具有成本低、功耗优、性能高、功能多等优点，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 ~ STM32F107 系列，简称“1 系列”，最近又推出了高端系列 STM32F4xx 系列，简称“4 系列”。前者基于 Cortex-M3 内核，后者基于 Cortex-M4 内核。STM32F4xx 系列在以下诸多方面做了优化。

- （1）增加了浮点运算。
- （2）具有 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。
- （5）新增更高级的外设，如照相机接口、加密处理器、USB 高速 OTG（On-The-Go）接口等；提高性能，具有更快的通信接口、更高的采样率、带 FIFO（First Input First Output）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. 最大程度的集成整合

(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 4 ~ 16MHz 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 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。意法半导体公司提供了完整、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 18Mb/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 18MHz。

(6) 脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 定时器最高可使用 72MHz 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 有意法半导体公司的 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, 其应用遍及工业控制、消费电子、仪器仪表、智能家居等领域。

意法半导体公司于 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 月更名为意法半导体有限公司, 是世界最大的半导体公司之一。从成立至今, 意法半导体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, 意法半导体公司始终是世界十大半导体公司之一, 在很多领域居世界领先水平。例如, 意法半导体公司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,意法半导体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包括: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包括:程序代码大于 1MB 的应用、基于 Linux 或 Android 系统的应用、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,具体产品系列如图 3-1 所示。

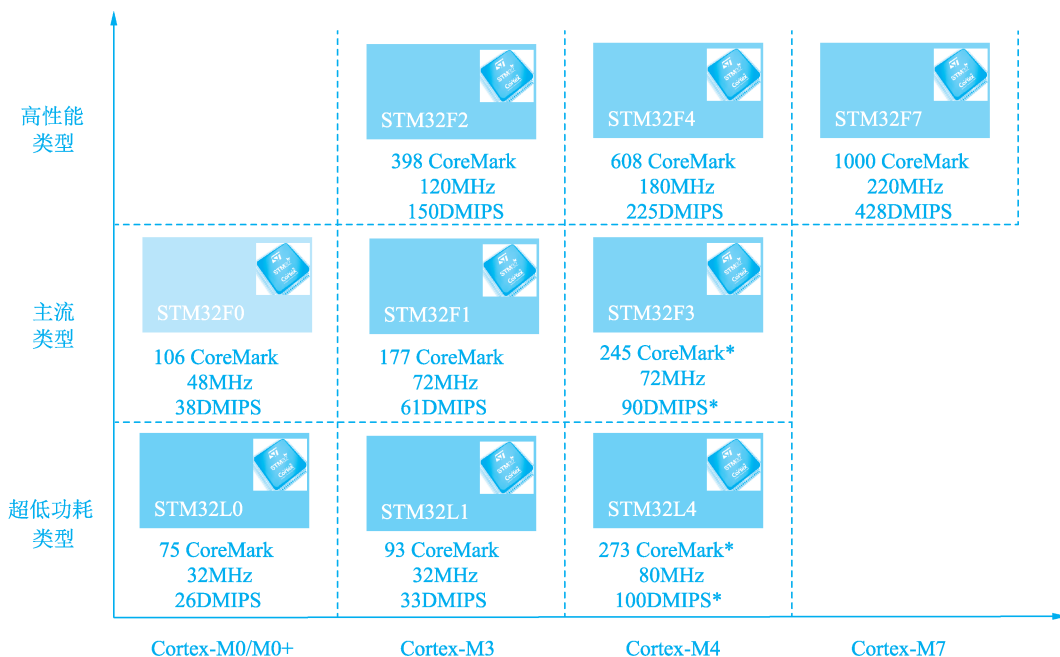


图 3-1 STM32 产品系列

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,意法半导体公司在全球基于 Arm Cortex-M3 的微控制器领域处于领先地位。本书后续章节即是基于 STM32F1 系列中的典型微控制器 STM32F103 进行讲述的。

截至 2016 年 3 月, STM32F1 系列微控制器包含以下 5 个产品线, 它们的引脚、外设和软件均兼容。

(1) STM32F100: 超值型, CPU 工作频率为 24MHz, 具有电机控制和 CEC 功能。

(2) STM32F101: 基本型, CPU 工作频率为 36MHz, 具有高达 1MB 的 Flash。

(3) STM32F102: USB 基本型, CPU 工作频率为 48MHz, 具备 USB FS (Full Speed) 接口。

(4) STM32F103: 增强型, CPU 工作频率为 72MHz, 具有高达 1MB 的 Flash、电机控制、USB 和 CAN。

(5) STM32F105/107: 互联型, CPU 工作频率为 72MHz, 具有以太网 MAC (媒体访问控制, Media Access Control)、CAN 和 USB 2.0 OTG。

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, 继承了 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, 特别适用于成本敏感型应用。

截至 2016 年 3 月, STM32F0 系列微控制器包含以下产品。

(1) STM32F0x0: 在传统 8 位和 16 位市场上极具竞争力, 并可使用户免于不同架构平台迁徙和相关开发带来的额外工作。

(2) STM32F0x1: 实现了高度的功能集成, 提供多种存储容量和封装的选择, 为成本敏感型应用带来了更加灵活的选择。

(3) STM32F0x2: 通过 USB 2.0 和 CAN 提供了丰富的通信接口, 是通信网关、智能能源器件或游戏终端的理想选择。

(4) STM32F0x8: 工作在 $1.8V \pm 8\%$ 电压下, 非常适合智能手机、配件和多媒体设备等便携式消费类应用。

3. STM32F4 系列 (高性能类型)

STM32F4 系列微控制器基于 Cortex-M4 内核, 采用了意法半导体公司的 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 的工作频率下通过闪存执行时, 其处理性能达到 225 DMIPS/608 CoreMark。这是迄今所有基于 Cortex-M 内核的微控制器产品能达到的最高基准测试分数。由于采用了动态功耗调整功能, 通过闪存执行时的电流消耗范围为 STM32F401 的 $128\mu A/MHz$ 到 STM32F439 的 $260\mu A/MHz$ 。

截至 2016 年 3 月, STM32F4 系列包括 9 条互相兼容的数字信号控制器 (Digital Signal Controller, DSC) 产品线, 是 MCU 实时控制功能与 DSP 功能的完美结合体。

(1) STM32F401: 84MHz CPU/105DMIPS, 尺寸最小、成本最低的解决方案, 具有卓越的功耗效率 (动态效率系列)。

(2) STM32F410: 100MHz CPU/125DMIPS, 采用新型智能 DMA (直接存储器存取),

优化了数据批处理的功耗（采用批采集模式的动态效率系列），配备的随机数发生器、低功耗定时器和 DAC，为卓越的功率效率性能设立了新的里程碑。

（3）STM32F411：100MHz CPU/125DMIPS，具有卓越的功率效率、更大的 SRAM 和新型智能 DMA，优化了数据批处理的功耗（采用批采集模式的动态效率系列）。

（4）STM32F405/STM32F415：168MHz CPU/210DMIPS，高达 1MB 的 Flash，具有先进连接功能和加密功能。

（5）STM32F407/STM32F417：168MHz CPU/210DMIPS，高达 1MB 的 Flash，增加了以太网 MAC 和照相机接口。

（6）STM32F446：180MHz CPU/225DMIPS，高达 512KB 的 Flash，具有 Dual Quad SPI 和 SDRAM 接口。

（7）STM32F429/STM32F439：180MHz CPU/225DMIPS，高达 2MB 的双区闪存，具有 SDRAM 接口、Chrom-ART 加速器和 LCD-TFT 控制器。

（8）STM32F427/STM32F437：180MHz CPU/225DMIPS，高达 2MB 的双区闪存，具有 SDRAM 接口、Chrom-ART 加速器、串行音频接口，性能更高，静态功耗更低。

（9）STM32F469/STM32F479：180MHz CPU/225DMIPS，高达 2MB 的双区闪存，具有 SDRAM 和 QSPI 接口、Chrom-ART 加速器、LCD-TFT 控制器和 MPI-DSI 接口。

4. STM32F7 系列（高性能类型）

STM32F7 是世界上第 1 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——无论是从嵌入式闪存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，相对于意法半导体公司以前推出的高性能微控制器，如 STM32F2 应用，对于目前还在使用简单计算功能的可穿戴设备和健身应用，STM32F7 系列将会带来革命性的颠覆，起到巨大的推动作用。

5. STM32L1 系列（超低功耗类型）

STM32L1 系列微控制器基于 Cortex-M3 内核，采用意法半导体公司专有的超低泄漏制程，具有创新型自主动态电压调节功能和 5 种低功耗模式，为各种应用提供了无与伦比的平台灵活性。STM32L1 系列微控制器扩展了超低功耗的理念，并且不会牺牲性能。与 STM32L0 一样，STM32L1 提供了动态电压调节、超低功耗时钟振荡器、LCD 接口、比较器、DAC 及硬件加密等部件。

STM32L1 系列微控制器可以实现在 1.65 ~ 3.6V 以 32MHz 的频率全速运行，其功耗参考值如下。

- （1）动态运行模式：功耗低至 177 μ A/MHz。
- （2）低功耗运行模式：功耗低至 9 μ A/MHz。
- （3）超低功耗模式 + 备份寄存器 + RTC：功耗低至 900nA（3 个唤醒引脚）。
- （4）超低功耗模式 + 备份寄存器：280nA（3 个唤醒引脚）。

除了超低功耗 MCU 以外, STM32L1 系列微控制器还提供了特性、存储容量和封装引脚数等选项, 如 32 ~ 512KB Flash、高达 80KB 的 SDRAM、真正的 16KB 嵌入式 EEPROM、48 ~ 144 个引脚。为了简化移植步骤和为工程师提供所需的灵活性, STM32L1 系列与不同的 STM32F 系列均引脚兼容。

3.1.2 STM32 系统性能分析

下面对 STM32 系统进行性能分析。

(1) 集成嵌入式 Flash 和 SRAM 的 Arm Cortex-M3 内核: 和 8/16 位设备相比, Arm Cortex-M3 32 位 RISC 处理器提供了更高的代码效率。STM32F103xx 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 RAM: 内置高达 512KB 的嵌入式 Flash, 可用于存储程序和数据; 高达 64KB 的嵌入式 SRAM 可以以 CPU 的时钟速度进行读写。

(3) 可变静态存储控制器 (Flexible Static Memory Controller, FSMC): FSMC 嵌入在 STM32F103xC、STM32F103xD、STM32F103xE 中, 带有 4 个片选, 支持 5 种模式, 分别为 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迟, 直接向内核传递中断入口向量地址; 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 19 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) 两个时钟周期的脉冲时, EXTI 能够探测到。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 晶振被选作 CPU 时钟。可以选择一个外部的 4 ~ 16MHz 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 的最高频率为 72MHz, 低速 APB 的最高频率为 36MHz。

(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, 即从用户 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中, 用于通过 USART1 重新对 Flash 编程。

(8) 电源供电方案: V_{DD} 电压范围为 2.0 ~ 3.6V, 外部电源通过 V_{DD} 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} 范围内（ADC 被限制在 2.4V）， V_{SSA} 和 V_{DDA} 必须相应连接到 V_{SS} 和 V_{DD} ； V_{BAT} 电压范围为 1.8 ~ 3.6V，当 V_{DD} 无效时为 RTC（实时时钟），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）、低功耗（LPR）和掉电模式。MR 用在传统意义上的调节模式（运行模式），LPR 用在停止模式，掉电用在待机模式。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：STM32F103xx 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。①睡眠模式：只有 CPU 停止工作，所有外设继续运行，在中断/事件发生时唤醒 CPU。②停止模式：在 STM32F103xx 的深睡眠模式的基础上结合了外设的时钟控制机制，在停止模式下调压器可运行在正常或低功耗模式。设备可以通过外部中断线从停止模式唤醒。外部中断源可以是 16 根外部中断线之一、PVD 输出。③待机模式：追求最少的功耗，内部调压器被关闭，这样 1.8V 区域断电，PLL、高速内部（High Speed Internal, HSI）时钟和高速外部（High Speed External, HSE）时钟 RC 振荡器也被关闭。在进入待机模式之后，除了备份寄存器和待机电路，SRAM 和寄存器的内容也会丢失。当外部复位（NRST 引脚）、IWDG 复位、WKUP 引脚出现上升沿时，设备退出待机模式。进入停止模式或待机模式时，IWDG 和相关的时钟源不会停止。

3.1.3 STM32 微控制器的命名规则

意法半导体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，代表意法半导体基于 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 2 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 3 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, 带摄像头)、215/217 (Arm Cortex-M3 内核, 带摄像头和加密模块)、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 4 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 5 部分, 通常有以下几种: 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 6 部分, 通常有以下几种: T (LQFP, 即 Low-profile Quad Flat Package, 薄型四侧引脚扁平封装)、H (BGA, 即 Ball Grid Array, 球栅阵列封装)、U (VFQFPN, 即 Very Thin Fine Pitch Quad Flat Pack No-lead Package, 超薄细间距四方扁平无铅封装)、Y (WLCSP, 即 Wafer Level Chip Scale Packaging, 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 7 部分, 通常有两种: 6 (-40 ~ 85℃, 工业级) 和 7 (-40 ~ 105℃, 工业级)。

STM32F103 微控制器的命名规则如图 3-2 所示。例如, 本书后续部分主要介绍的微控制器 STM32F103ZET6, 其中, STM32 代表意法半导体公司基于 Arm Cortex-M 系列内核的 32 位 MCU, F 代表通用快速闪存型, 103 代表基于 Arm Cortex-M3 内核的增强型子系列, Z 代表 144 个引脚, E 代表大容量 512KB Flash, T 代表 LQFP 封装方式, 6 代表 -40 ~ 85℃ 的工业级温度范围。

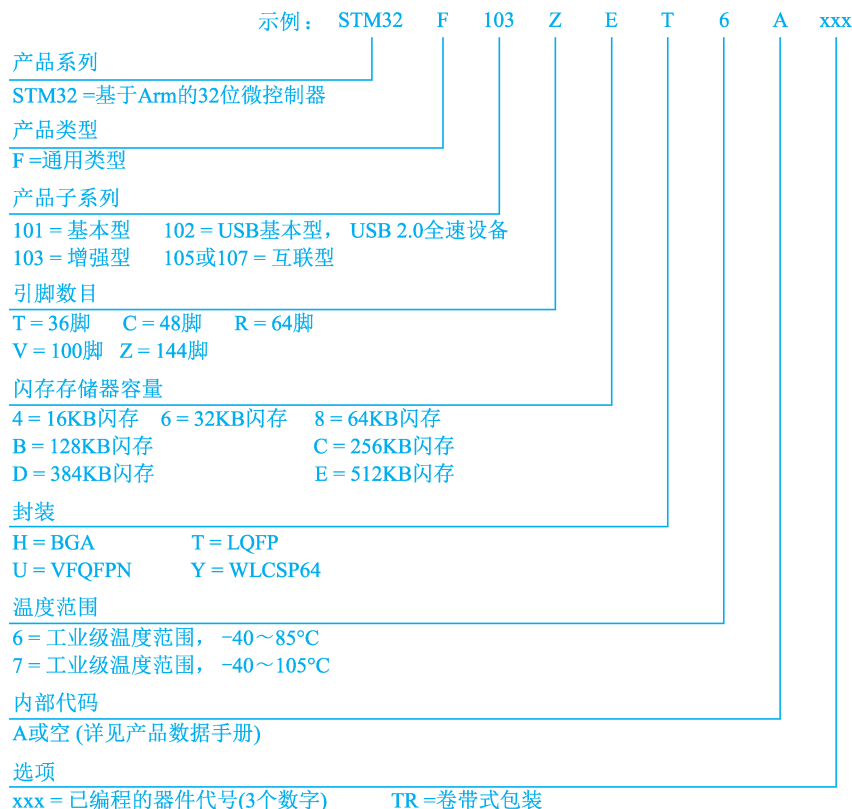


图 3-2 STM32F103 微控制器的命名规则

STM32F103xx 闪存容量、封装及型号对应关系如图 3-3 所示。

对 STM32 单片机内部资源介绍如下。

(1) 内核: Arm32 位 Cortex-M3 CPU, 最高工作频率为 72MHz, 执行速度为 1.25DMIPS/MHz, 完成 32 位 × 32 位乘法计算只需一个周期, 并且硬件支持除法 (有的芯片不支持硬件除法)。

(2) 存储器: 片上集成 32 ~ 512KB 的闪存, 以及 6 ~ 64KB 的 SRAM。

(3) 电源和时钟复位电路: 包含 2.0 ~ 3.6V 的供电电源 (提供 I/O 端口的驱动电压); 上电 / 断电复位 (POR/PDR) 端口和可编程电压探测器 (PVD); 内嵌 4 ~ 16MHz 晶振; 内嵌出厂前调校的 8MHz RC 振荡电路、40kHz RC 振荡电路; 供 CPU 时钟的 PLL 锁相环; 带校准功能供 RTC 的 32kHz 晶振。

(4) 调试端口: 有 SWD 串行调试端口和 JTAG 端口可供调试使用。

(5) I/O 端口: 根据型号的不同, 双向快速 I/O 端口数目可为 26、37、51、80 或 112。翻转速度为 18MHz, 所有端口都可以映射到 16 个外部中断向量。除了模拟输入端口, 其他所有端口都可以接收 5V 以内的电压输入。

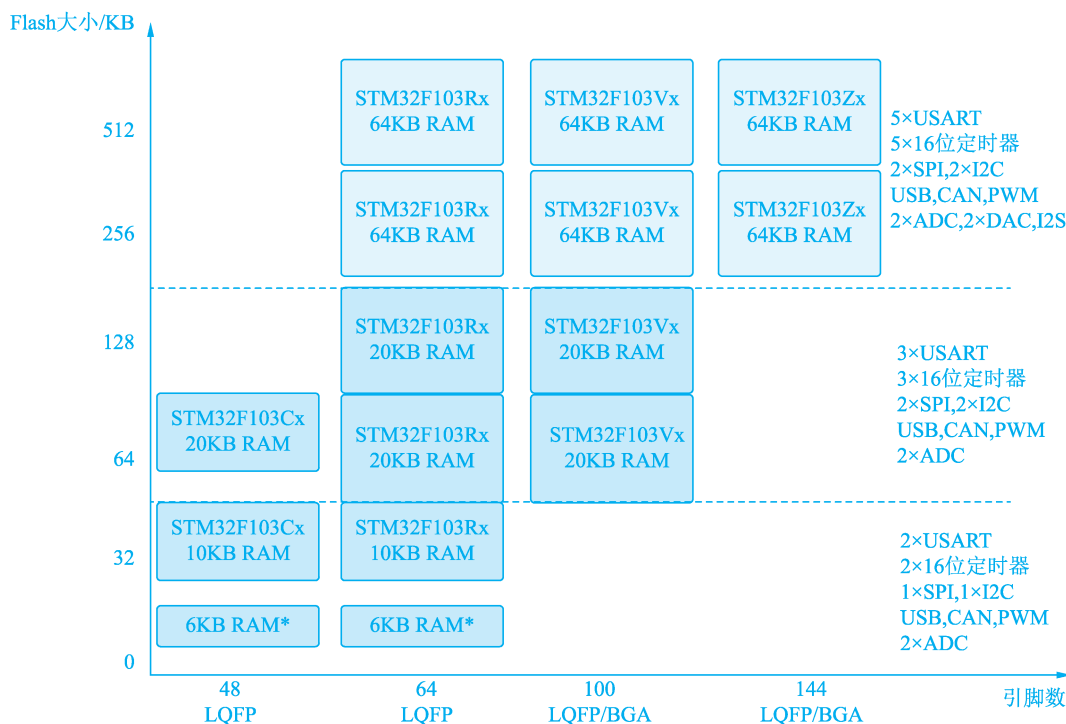


图 3-3 STM32F103xx 闪存容量、封装及型号对应关系

(6) DMA (直接内存存取) 端口: 支持定时器、ADC、SPI、I2C 和 USART 等外设。

(7) ADC: 带有两个 12 位的微秒级逐次逼近型 ADC, 每个 ADC 最多有 16 个外部通道和两个内部通道 (一个接内部温度传感器, 另一个接内部参考电压)。ADC 供电要求为 $2.4 \sim 3.6\text{V}$, 测量范围为 $V_{\text{REF-}} \sim V_{\text{REF+}}$, $V_{\text{REF-}}$ 通常为 0V , $V_{\text{REF+}}$ 通常与供电电压相同。ADC 具有双采样和保持能力。

(8) DAC: STM32F103xC、STM32F103xD、STM32F103xE 单片机具有 2 通道 12 位 DAC。

(9) 定时器: 最多有 11 个定时器, 包括 4 个 16 位定时器 (每个定时器有 4 个 PWM 定时器或脉冲计数器)、两个 16 位 6 通道高级控制定时器 (最多 6 个通道可用于 PWM 输出)、两个看门狗定时器——独立看门狗 (IWDG) 定时器和窗口看门狗 (WWDG) 定时器、一个系统滴答定时器 SysTick (24 位倒计数器)、两个 16 位基本定时器 (用于驱动 DAC)。

(10) 通信端口: 最多有 13 个通信端口, 包括两个 PC 端口、5 个通用异步收发传输器 (UART) 端口 (兼容 IrDA 标准, 调试控制)、3 个 SPI 端口 (18 Mb/s, 其中 IS 端口最多只能有两个) 和 CAN 端口、USB 2.0 全速端口、安全数字输入/输出 (SDIO) 端口 (这 3 个端口最多都只能有一个)。

(11) FSMC: FSMC 嵌入在 STM32F103xC、STM32F103xD、STM32F103xE 单片机



中，带有 4 个片选端口，支持闪存、随机存取存储器（RAM）、伪静态随机存储器（Pseudo Static Access Memory，PSRAM）等。

3.1.4 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、功耗等因素之间取舍和折中？

基于 Arm Cortex-M3 内核，意法半导体公司于 2007 年推出的 STM32 系列微控制器就很好地解决了上述问题。因为 Cortex-M3 内核的计算能力是 1.25DMIPS/MHz，而 Arm7TDMI 只有 0.95DMIPS/MHz。而且，STM32 拥有 1 μ s 的双 12 位 ADC、4Mb/s 的 UART、18Mb/s 的 SPI、18MHz 的 I/O 翻转速度，更重要的是，STM32 在 72MHz 工作时功耗只有 36mA（所有外设处于工作状态），而待机时功耗只有 2 μ A。

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。

在明确了产品系列之后，可以进一步选择产品线。以基于 Cortex-M3 内核的 STM32F1 系列微控制器为例，如果仅需要用到电动机控制或消费类电子控制功能，则选择 STM32F100 或 STM32F101 系列微控制器即可；如果还需要用到 USB 通信、CAN 总线等模块，则推荐选用 STM32F103 系列微控制器，这也是目前市场上应用最广泛的微控制器系列之一；如果对网络通信要求较高，则可以选用 STM32F105 或 STM32F107 系列微控制器。对于同一个产品系列，不同的产品线采用的内核是相同的，但核外的片上外设存在差异。具体选型情况要视实际的应用场合而定。

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。确定好引脚数目之后，再选择 Flash 存储器容量的大小。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 存储器容量可供选择，也要根据实际需要进行选择，程序大就选择容量大的 Flash 存储器，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。

除了选择 STM32 微控制器外，还可以选择国产芯片。Arm 技术发源于国外，但通过我国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。

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集成电路（Integrated Circuit, IC）解决方案。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，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。

华大半导体是中国电子信息产业集团有限公司（China Electronics Corporation, 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，提供了竞争力强劲的产品矩阵及整体芯片解决方案。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，我们应注重知识学习、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 STM32F1 系列产品系统架构和 STM32F103ZET6 内部架构



微课视频

STM32 跟其他单片机一样，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一样，常有的基本功能部件（外设）是输入/输出接口（GPIO）、定时/计数器（TIMER/COUNTER）、串行通信接口（USART）、串行总线（I2C、SPI 或 I2S）、SD 卡接口（SDIO）、USB 接口等。

STM32F10x 系列单片机基于 Arm Cortex-M3 内核，主要分为 STM32F100xx、STM32F101xx、STM32F102xx、STM32F103xx、STM32F105xx 和 STM32F107xx。STM32F100xx、STM32F101xx 和 STM32F102xx 为基本型系列，分别工作在 24MHz、36MHz 和 48MHz 主频。STM32F103xx 为增强型系列，STM32F105xx 和 STM32F107xx 为互联型系列，均工作在 72MHz 主频。其结构特点如下。

- （1）一个主晶振可以驱动整个系统，低成本的 4 ~ 16MHz 晶振即可驱动 CPU、USB 和其他所有外设。
- （2）内嵌出厂前调校好的 8MHz RC 振荡器，可以作为低成本主时钟源。
- （3）内嵌电源监视器，减少对外部器件的要求，提供上电复位、低电压检测、掉电检测。

- (4) GPIO 的最大翻转频率为 18MHz。
- (5) PWM 定时器：可以接收最大 72MHz 时钟输入。
- (6) USART：传输速率可达 4.5Mb/s。
- (7) ADC：12 位，转换时间最快为 1 μ s。
- (8) DAC：提供两个通道，12 位。
- (9) SPI：传输速率可达 18Mb/s，支持主模式和从模式。
- (10) I2C：工作频率可达 400kHz。
- (11) I2S：采样频率可选范围为 8 ~ 48kHz。
- (12) 自带时钟的看门狗定时器。
- (13) USB：传输速率可达 12Mb/s。
- (14) SDIO：传输速率为 48MHz。

3.2.1 STM32F1 系列产品系统架构

STM32F1 系列产品系统架构如图 3-4 所示。

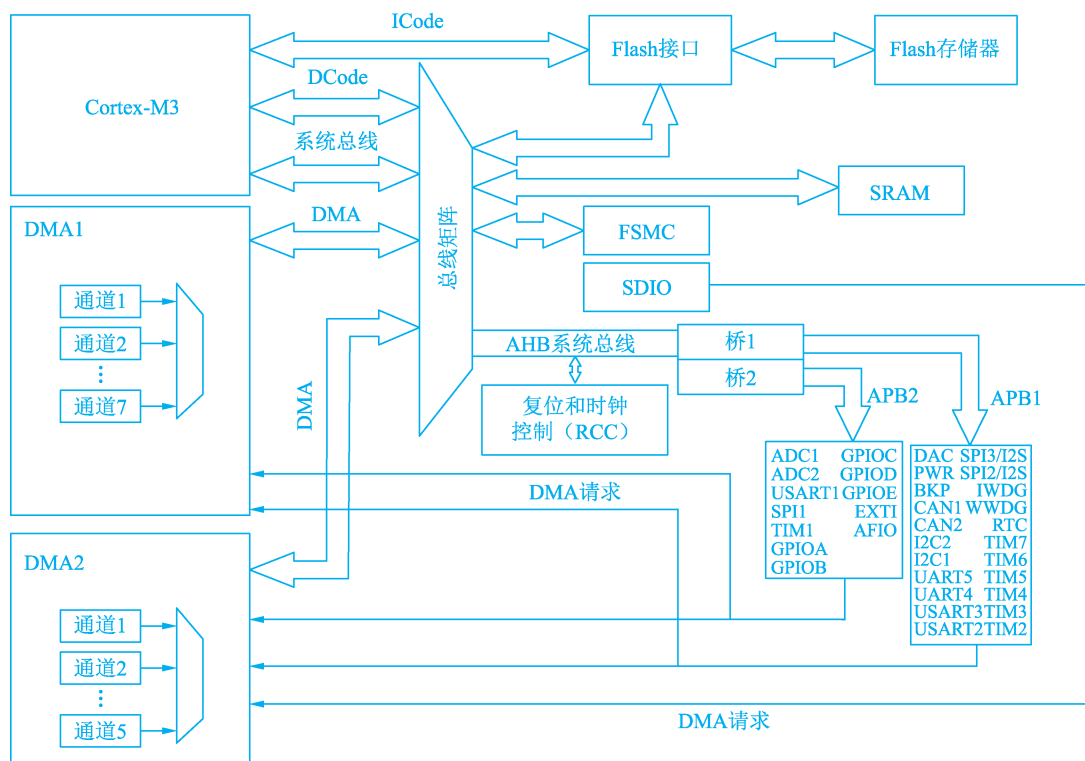


图 3-4 STM32F1 系列产品系统架构

STM32F1 系列产品主要由以下部分构成。

- (1) Cortex-M3 内核 DCode 总线 (D-Bus) 和系统总线 (S-Bus)。
- (2) 通用 DMA1 和通用 DMA2。
- (3) 内部 SRAM。
- (4) 内部 Flash 存储器。
- (5) 可变静态存储控制器 (FSMC)。
- (6) AHB 到 APB 的桥 (AHB2APBx), 它连接所有 APB 设备。

上述部件都是通过一个多级的 AHB 总线架构相互连接的。

(7) ICode 总线: 将 Cortex-M3 内核的指令总线与 Flash 指令接口相连接。指令预取在此总线上完成。

(8) DCode 总线: 将 Cortex-M3 内核的 DCode 总线与 Flash 存储器的数据接口相连接(常量加载和调试访问)。

(9) 系统总线: 连接 Cortex-M3 内核的系统总线 (外设总线) 到总线矩阵, 总线矩阵协调内核和 DMA 间的访问。

(10) DMA 总线: 将 DMA 的 AHB 主控接口与总线矩阵相连, 总线矩阵协调 CPU 的 DCode 和 DMA 到 SRAM、Flash 和外设的访问。

(11) 总线矩阵: 协调内核系统总线和 DMA 主控总线之间的访问仲裁, 仲裁采用轮换算法。总线矩阵包含 4 个主动部件 (CPU 的 DCode、系统总线、DMA1 总线和 DMA2 总线) 和 4 个被动部件 (Flash 存储器接口、SRAM、FSMC 和 AHB/APB 桥)。

(12) AHB 外设: 通过总线矩阵与系统总线相连, 允许 DMA 访问。

(13) AHB/APB 桥 (APB): 两个 AHB/APB 桥在 AHB 和两个 APB 总线间提供同步连接。APB1 操作速度限于 36MHz, APB2 操作于全速 (最高 72MHz)。

上述模块由高级微控制器总线架构 (Advanced Microcontroller Bus Architecture, AMBA) 总线连接到一起。AMBA 是 Arm 公司定义的片上总线, 已成为一种流行的工业片上总线标准。它包括 AHB 和 APB, 前者作为系统总线, 后者作为外设总线。

为更加简明地理解 STM32 单片机的内部结构, 对图 3-4 进行抽象简化后, STM32F1 系列产品抽象简化系统架构如图 3-5 所示, 这样对初学者的学习理解会更加方便些。

现结合图 3-5 对 STM32 的基本原理进行简单分析。

(1) 程序存储器、静态数据存储器 and 所有外设都统一编址, 地址空间为 4GB, 但各自都有固定的存储空间区域, 使用不同的总线进行访问。这一点与 51 单片机完全不一样。具体的地址空间请参阅意法半导体公司官方手册。如果采用固件库开发程序, 则可以不必关注具体的地址问题。

(2) 可将 Cortex-M3 内核视为 STM32 的 CPU, 程序存储器、静态数据存储器 and 所有外设均通过相应的总线再经总线矩阵与之相接。Cortex-M3 内核控制程序存储器、静态数据存储器 and 所有外设的读写访问。



(4) STM32 的系统时钟均由复位与时钟控制器 (RCC) 产生, 它有一整套的时钟管理设备, 由它为系统和各种外设提供所需的时钟以确定各自的工作速度。

3.2.2 STM32F103ZET6 内部架构

Cortex-M3 内核 CPU 通过总线阵列和 AHB 以及 AHB/APB 桥与两类 APB 总线相连接, 即 APB1 总线和 APB2 总线。其中, APB2 总线工作在 72MHz, 与它相连的外设有外部中断与唤醒控制、7 个通用目的输入 / 输出端口 (PA、PB、PC、PD、PE、PF 和 PG)、定时器 1、定时器 8、SPI1、USART1、3 个 ADC 和内部温度传感器。其中, 3 个 ADC 和内部温度传

感器使用 V_{DDA} 电源。

APB1 总线最高可工作在 36MHz，与 APB1 总线相连的外设有看门狗定时器、定时器 6、定时器 7、RTC 时钟、定时器 2、定时器 3、定时器 4、定时器 5、USART2、USART3、UART4、UART5、SPI2 (I2S2) 与 SPI3 (I2S3)、I2C1 与 I2C2、CAN、USB 设备和两个 DAC。其中，512B 的 SRAM 属于 CAN 模块，看门狗时钟源使用 V_{DD} 电源，RTC 时钟源使用 V_{BAT} 电源。

STM32F103ZET6 芯片内部具有 8MHz 和 40kHz 的 RC 振荡器，时钟与复位控制器和 SDIO 模块直接与 AHB 总线相连接，而可变静态存储器控制器 (FSMC) 直接与总线阵列相连接。

根据程序存储容量，ST 芯片分为三大类：LD (小于 64KB)、MD (小于 256KB)、HD (大于 256KB)，而 STM32F103ZET6 类型属于第 3 类，它是 STM32 系列的一个典型型号。

STM32F103ZET6 的内部架构如图 3-6 所示。STM32F103ZET6 具有以下特性。

(1) 内核方面：① Arm 32 位的 Cortex-M3 CPU，最高工作频率 72MHz，在存储器的零等待周期访问时运算速度可达 1.25DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1)；②具有单周期乘法和硬件除法指令。

(2) 存储器方面：① 512KB 的 Flash 程序存储器；② 64KB 的 SRAM；③带有 4 个片选信号的可变静态存储器控制器，支持 Compact Flash、SRAM、PSRAM、NOR 和 NAND 存储器。

(3) LCD 并行接口，支持 8080/6800 模式。

(4) 时钟、复位和电源管理方面：①芯片和 I/O 引脚的供电电压为 2.0 ~ 3.6V；②上电/断电复位 (POR/PDR)、可编程电压监测器 (PVD)；③ 4 ~ 16MHz 晶体振荡器；④内嵌经出厂调校的 8MHz 的 RC 振荡器；⑤内嵌带校准的 40kHz 的 RC 振荡器；⑥带校准功能的 32kHz RTC 振荡器。

(5) 低功耗：①支持睡眠、停机和待机模式；② V_{BAT} 为 RTC 和后备寄存器供电。

(6) 3 个 12 位模数转换器 (ADC)， $1\mu s$ 转换时间 (多达 16 个输入通道)，转换范围为 0 ~ 3.6V；采样和保持功能；温度传感器。

(7) 两个 12 位数模转换器 (DAC)。

(8) DMA：① 12 通道 DMA 控制器；②支持的外设包括定时器、ADC、DAC、SDIO、I2S、SPI、I2C 和 USART。

(9) 调试模式：①串行单线调试 (SWD) 和 JTAG 接口；② Cortex-M3 嵌入式跟踪宏单元 (ETM)。

(10) 快速 I/O 端口 (PA ~ PG)：多达 7 个快速 I/O 端口，每个端口包含 16 根 I/O 口线，所有 I/O 端口可以映像到 16 个外部中断；绝大多数端口均可容忍 5V 信号。

(11) 多达 11 个定时器：① 4 个 16 位通用定时器，每个定时器有多达 4 个用于输入捕获/输出比较/PWM 或脉冲计数的通道和增量编码器输入；②两个 16 位带死区控制和紧急

注: channels: 通道; as AF: 作为第二功能, 可作为外设功能脚的 I/O 端口; device: 设备; system: 系统; Power: 电源; volt.reg.: 电压寄存器; Bus Matrix: 总线矩阵; Supply supervision: 电源监视; Standby interface: 备用接口; Backup interface: 后备接口; Backup reg.: 后备寄存器。

(12) 多达 13 个通信接口：①两个 I2C 接口（支持 SMBus/PMBus）；②5 个 USART 接口（支持 ISO 7816 接口、LIN、IrDA 兼容接口和调制解调控制）；③3 个 SPI 接口（18Mb/s）；④一个 CAN 接口（支持 CAN 2.0B 协议）；⑤一个 USB 2.0 全速接口；⑥一个 SDIO 接口。

(13) 循环冗余校验（Cyclic Redundancy Check, CRC）计算单元，96 位的芯片唯一代码。

(14) LQFP（小外形四方扁平封装）144 封装形式。

(15) 工作温度： $-40 \sim +105^{\circ}\text{C}$ 。

以上特性使 STM32F103ZET6 非常适用于电机驱动、应用控制、医疗和手持设备、PC 和游戏外设、GPS 平台、工业应用、PLC、逆变器、打印机、扫描仪、报警系统、空调系统等领域。

3.3 STM32F103ZET6 的存储器映像

STM32F103ZET6 的存储器映像如图 3-7 所示。

由图 3-7 可知，STM32F103ZET6 芯片是 32 位的微控制器，可寻址存储空间大小为 $2^{32}\text{B}=4\text{GB}$ ，分为 8 个 512MB 的存储块，存储块 0 的地址范围为 $0\text{x}00000000 \sim 0\text{x}1\text{FFF FFFF}$ ，存储块 1 的地址范围为 $0\text{x}2000 0000 \sim 0\text{x}3\text{FFF FFFF}$ ，以此类推，存储块 7 的地址范围为 $0\text{x}\text{E}000 0000 \sim 0\text{x}\text{FFF FFFF}$ 。

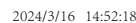
STM32F103ZET6 芯片的可寻址空间大小为 4GB，但并不意味着 $0\text{x}0000 0000 \sim 0\text{x}\text{FFF FFFF}$ 地址空间均可以有效访问，只有映射了真实物理存储器的存储空间才能被有效地访问。对于存储块 0，如图 3-7 所示，片内 Flash 映射到地址空间 $0\text{x}0800 0000 \sim 0\text{x}0807 \text{ FFFF}$ （512KB），系统存储器映射到地址空间 $0\text{x}1\text{FFF F}000 \sim 0\text{x}1\text{FFF F}7\text{FF}$ （2KB），用户选项字节（Option Bytes）映射到地址空间 $0\text{x}1\text{FFF F}800 \sim 0\text{x}1\text{FFF F}80\text{F}$ （16B）。同时，地址范围 $0\text{x}0000 0000 \sim 0\text{x}0007 \text{ FFFF}$ ，根据启动模式要求，可以作为 Flash 或系统存储器的别名访问空间。例如，BOOT0=0 时，片内 Flash 同时映射到地址空间 $0\text{x}0000 0000 \sim 0\text{x}0007 \text{ FFFF}$ 和地址空间 $0\text{x}0800 0000 \sim 0\text{x}0807 \text{ FFFF}$ ，即地址空间 $0\text{x}0000 0000 \sim 0\text{x}0007 \text{ FFFF}$ 是 Flash 存储器。除此之外，其他空间是保留的。

512MB 的存储块 1 中只有地址空间 $0\text{x}2000 0000 \sim 0\text{x}2000 \text{ FFFF}$ 映射了 64KB 的 SRAM，其余空间是保留的。

尽管 STM32F103ZET6 微控制器具有两个 APB 总线，且这两个总线上的外设访问速度不同，但是芯片存储空间中并没有区别这两个外设的访问空间，而是把全部 APB 外设映射到存储块 2 中，每个外设的寄存器占据 1KB 空间。



微课视频



注: block: 块; bank: 段; Reserved: 保留; Shared: 共享; registers: 寄存器; Option bytes: 选项字节;
System memory: 系统存储器; Aliased: 别名; depending on: 取决于; pins: 引脚。

程序存储器、数据存储器、寄存器和输入 / 输出端口被组织在同一个 4GB 的线性地址空间内。可访问的存储器空间被分为 8 个主要的块，每块为 512MB。

数据字节以小端格式存放在存储器中。一个字中的最低地址字节被认为是该字的最低有效字节，而最高地址字节是最高有效字节。

3.3.1 STM32F103ZET6 内置外设的地址范围

STM32F103ZET6 中内置外设的地址范围如表 3-1 所示。

表 3-1 STM32F103ZET6 中内置外设的地址范围

地址范围	外 设	所在总线
0x5000 0000 ~ 0x5003 FFFF	USB OTG 全速	AHB
0x4002 8000 ~ 0x4002 9FFF	以太网	
0x4002 3000 ~ 0x4002 33FF	CRC	AHB
0x4002 2000 ~ 0x4002 23FF	Flash 接口	
0x4002 1000 ~ 0x4002 13FF	复位和时钟控制（RCC）	
0x4002 0400 ~ 0x4002 07FF	DMA2	
0x4002 0000 ~ 0x4002 03FF	DMA1	
0x4001 8000 ~ 0x4001 83FF	SDIO	
0x4001 3C00 ~ 0x4001 3FFF	ADC3	
0x4001 3800 ~ 0x4001 3BFF	USART1	APB2
0x4001 3400 ~ 0x4001 37FF	TIM8 定时器	
0x4001 3000 ~ 0x4001 33FF	SPI1	
0x4001 2C00 ~ 0x4001 2FFF	TIM1 定时器	
0x4001 2800 ~ 0x4001 2BFF	ADC2	
0x4001 2400 ~ 0x4001 27FF	ADC1	
0x4001 2000 ~ 0x4001 23FF	GPIO 端口 G	
0x4001 1C00 ~ 0x4001 1FFF	GPIO 端口 F	
0x4001 1800 ~ 0x4001 1BFF	GPIO 端口 E	
0x4001 1400 ~ 0x4001 17FF	GPIO 端口 D	
0x4001 1000 ~ 0x4001 13FF	GPIO 端口 C	
0x4001 0C00 ~ 0x4001 0FFF	GPIO 端口 B	
0x4001 0800 ~ 0x4001 0BFF	GPIO 端口 A	
0x4001 0400 ~ 0x4001 07FF	EXTI	
0x4001 0000 ~ 0x4001 03FF	AFIO	



续表

地址范围	外 设	所在总线
0x4000 7400 ~ 0x4000 77FF	DAC	APB1
0x4000 7000 ~ 0x4000 73FF	电源控制 (PWR)	
0x4000 6C00 ~ 0x4000 6FFF	后备寄存器 (BKR)	
0x4000 6400 ~ 0x4000 67FF	bxCAN	
0x4000 6000 ~ 0x4000 63FF	USB/CAN 共享的 512B SRAM	
0x4000 5C00 ~ 0x4000 5FFF	USB 全速设备寄存器	
0x4000 5800 ~ 0x4000 5BFF	I2C2	
0x4000 5400 ~ 0x4000 57FF	I2C1	
0x4000 5000 ~ 0x4000 53FF	UART5	
0x4000 4C00 ~ 0x4000 4FFF	UART4	
0x4000 4800 ~ 0x4000 4BFF	USART3	
0x4000 4400 ~ 0x4000 47FF	USART2	
0x4000 3C00 ~ 0x4000 3FFF	SPI3/I2S3	
0x4000 3800 ~ 0x4000 3BFF	SPI2/I2S2	
0x4000 3000 ~ 0x4000 33FF	独立看门狗 (IWDG)	
0x4000 2C00 ~ 0x4000 2FFF	窗口看门狗 (WWDG)	
0x4000 2800 ~ 0x4000 2BFF	RTC	
0x4000 1400 ~ 0x4000 17FF	TIM7 定时器	
0x4000 1000 ~ 0x4000 13FF	TIM6 定时器	
0x4000 0C00 ~ 0x4000 0FFF	TIM5 定时器	
0x4000 0800 ~ 0x4000 0BFF	TIM4 定时器	
0x4000 0400 ~ 0x4000 07FF	TIM3 定时器	
0x4000 0000 ~ 0x4000 03FF	TIM2 定时器	

没有分配给片上存储器和外设的存储器空间都是保留的地址空间：0x4000 1800 ~ 0x4000 27FF、0x4000 3400 ~ 0x4000 37FF、0x4000 4000 ~ 0x4000 3FFF、0x4000 7800 ~ 0x4000FFFF、0x4001 4000 ~ 0x4001 7FFF、0x4001 8400 ~ 0x4001 7FFF、0x4002800 ~ 0x4002 0FFF、0x4002 1400 ~ 0x4002 1FFF、0x4002 3400 ~ 0x4002 3FFF、0x4003 0000 ~ 0x4FFF FFFF。

每个地址范围的第 1 个地址为对应外设的首地址,该外设的相关寄存器地址都可以用“首地址 + 偏移量”的方式找到其绝对地址。

3.3.2 嵌入式 SRAM

STM32F103ZET6 内置 64KB 的 SRAM。它可以以字节、半字 (16 位) 或字 (32 位) 进行访问。SRAM 的起始地址是 0x2000 0000。

Cortex-M3 存储器映像包括两个位带区。这两个位带区将位带别名区中的每个字映射到位带区中的一个位，在位带别名区写入一个字具有对位带区的目标位执行读—改—写操作的相同效果。

在 STM32F103ZET6 中，外设寄存器和 SRAM 都被映射到位带区，允许执行位带的写和读操作。

下面的映射公式给出了位带别名区中的每个字如何对应位带区的相应位。

$$\text{bit_word_addr} = \text{bit_band_base} + \text{byte_offset} \times 32 + \text{bit_number} \times 4$$

其中，bit_word_addr 为位带别名区中字的地址，它映射到某个目标位；bit_band_base 为位带别名区的起始地址；byte_offset 为包含目标位的字节在位带区中的序号；bit_number 为目标位所在位置（0～31）。

3.3.3 嵌入式 Flash

高达 512KB 的 Flash 由主存储块和信息块组成：主存储块容量为 64K×64 位，每个存储块划分为 256 个 2KB 的页；信息块容量为 258×64 位。

Flash 模块的组织如表 3-2 所示。

表 3-2 Flash 模块的组织

模 块	名 称	地 址	大小 /B
主存储块	页 0	0x0800 0000 ~ 0x0800 07FF	2K
	页 1	0x0800 0800 ~ 0x0800 0FFF	2K
	页 2	0x0800 1000 ~ 0x0800 17FF	2K
	页 3	0x0800 1800 ~ 0x0800 1FFF	2K
	...	...	...
	页 255	0x0807 F800 ~ 0x0807 FFFF	2K
信息块	系统存储器	0x1FFF F000 ~ 0x1FFF F7FF	2K
	选择字节	0x1FFF F800 ~ 0x1FFF F80F	16
Flash 接口寄存器	Flash_ACR	0x4002 2000 ~ 0x4002 2003	4
	Flash_KEYR	0x4002 2004 ~ 0x4002 2007	4
	Flash_OPTKEYR	0x4002 2008 ~ 0x4002 200B	4
	Flash_SR	0x4002 200C ~ 0x4002 200F	4
	Flash_CR	0x4002 2010 ~ 0x4002 2013	4
	Flash_AR	0x4002 2014 ~ 0x4002 2017	4
	保留	0x4002 2018 ~ 0x4002 201B	4
	Flash_OBR	0x4002 201C ~ 0x4002 201F	4
	Flash_WRP	0x4002 2020 ~ 0x4002 2023	4

Flash 接口的特性如下。

- (1) 带预取缓冲器的读接口（每字为 2×64 位）。
- (2) 选择字节加载器。
- (3) 闪存编程 / 擦除操作。
- (4) 访问 / 写保护。

Flash 的指令和数据访问是通过 AHB 总线完成的。预取模块通过 ICode 总线读取指令。仲裁作用在 Flash 接口，并且 DCode 总线上的数据访问优先。读访问可以有以下配置选项。

- (1) 等待时间：可以随时更改用于读取操作的等待状态的数量。

- (2) 预取缓冲区（两个 64 位）：在每次复位后被自动打开，由于每个缓冲区的大小（64 位）与 Flash 的带宽相同，因此只通过一次读 Flash 的操作即可更新整个级中的内容。由于预取缓冲区的存在，CPU 可以工作在更高的主频上。CPU 每次取指令最多为 32 位的字，取一条指令时，下一条指令已经在缓冲区中等待。

3.4 STM32F103ZET6 的时钟结构

STM32 系列微控制器中有 5 个时钟源，分别是高速内部（HSI）时钟、高速外部（HSE）时钟、低速内部（Low Speed Internal, LSI）时钟、低速外部（Low Speed External, LSE）时钟、锁相环（PLL）倍频输出。STM32F103ZET6 的时钟系统呈树状结构，因此也称为时钟树。

STM32F103ZET6 具有多个时钟频率，分别供给内核和不同外设模块使用。高速时钟供中央处理器等高速设备使用，低速时钟供外设等低速设备使用。HSI、HSE 或 PLL 可用来驱动系统时钟（SYSCLK）。

LSI、LSE 时钟作为二级时钟源，40kHz 低速内部 RC 时钟可用于驱动独立看门狗和通程序选择驱动 RTC。RTC 用于从停机 / 待机模式下自动唤醒系统。

32.768kHz 低速外部晶体也可用来通过程序选择驱动 RTC（RTCCLK）。

当某个部件不被使用时，任意时钟源都可独立地启动或关闭，由此优化系统功耗。

用户可通过多个预分频器配置 AHB、高速 APB（APB2）和低速 APB（APB1）的频率。AHB 和 APB2 的最大频率是 72MHz。APB1 的最大允许频率是 36MHz。SDIO 接口的时钟频率固定为 HCLK/2。

RCC 通过 AHB 时钟（HCLK）8 分频后作为 Cortex 系统定时器（SysTick）的外部时钟。通过对 SysTick 控制与状态寄存器的设置，可选择上述时钟或 Cortex（HCLK）时钟作为 SysTick 时钟。ADC 时钟由高速 APB2 时钟经 2、4、6 或 8 分频后获得。

定时器时钟频率分配由硬件按以下两种情况自动设置。

- (1) 如果相应的 APB 预分频系数为 1，定时器的时钟频率与所在 APB 总线频率一致；
- (2) 否则，定时器的时钟频率被设为与其相连的 APB 总线频率的 2 倍。

FCLK 是 Cortex-M3 处理器的自由运行时钟。

STM32 处理器因为低功耗的需要,各模块需要分别独立开启时钟。因此,当需要使用某个外设模块时,务必要先使能对应的时钟,否则这个外设不能工作。STM32 时钟树如图 3-8 所示。

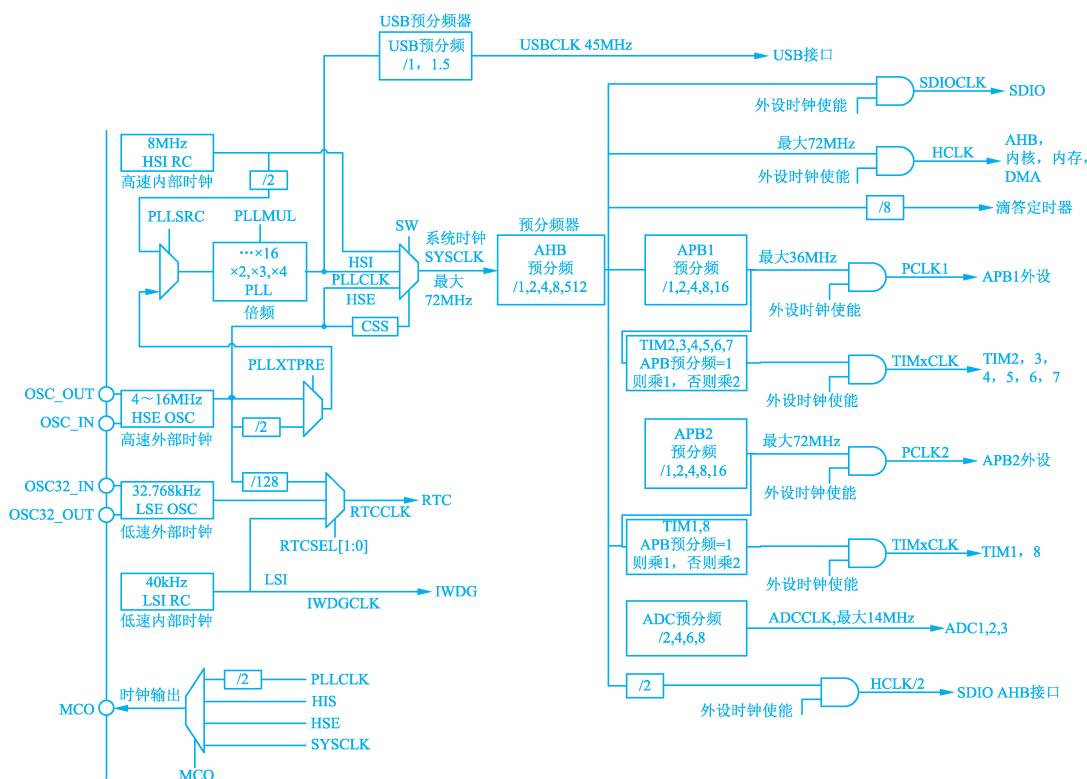


图 3-8 STM32 时钟树

1. HSE 时钟

高速外部 (HSE) 时钟信号一般由外部晶体 / 陶瓷谐振器产生。在 OSC_IN 和 OSC_OUT 引脚之间连接 4 ~ 16MHz 外部振荡器为系统提供精确的主时钟。

为了减少时钟输出的失真和缩短启动稳定时间,晶体 / 陶瓷谐振器和负载电容器必须尽可能地靠近振荡器引脚。负载电容值必须根据所选择的振荡器来调整。

2. HSI 时钟

HSI 时钟信号由内部 8MHz RC 振荡器产生,可直接作为系统时钟或在 2 分频后作为 PLL 输入。

HSI RC 振荡器能够在不需要任何外部器件的条件下提供系统时钟。它的启动时间比 HSE 晶体振荡器短。然而,即使在校准之后它的时钟频率精度仍较差。如果 HSE 晶体振荡器失效,HSI 时钟会被作为备用时钟源。

3. PLL

内部 PLL 可以用来倍频 HSI RC 振荡器的输出时钟或 HSE 晶体输出时钟。PLL 的设置（选择 HSI/2 或 HSE 振荡器为 PLL 的输入时钟，选择倍频因子）必须在其被激活前完成。一旦 PLL 被激活，这些参数就不能改动。

如果需要在应用中使用 USB 接口，PLL 必须被设置为输出 48MHz 或 72MHz 时钟，用于提供 48MHz 的 USBCLK 时钟。

4. LSE 时钟

LSE 晶体是一个 32.768kHz 的低速外部晶体或陶瓷谐振器。它为实时时钟或其他定时功能提供一个低功耗且精确的时钟源。

5. LSI 时钟

LSI RC 担当着低功耗时钟源的角色，它可以在停机和待机模式下保持运行，为独立看门狗和自动唤醒单元提供时钟。LSI 时钟频率大约为 40kHz（30 ~ 60kHz）。

6. 系统时钟（SYSCLK）选择

系统复位后，HSI 振荡器被选为系统时钟。当时钟源被直接或通过 PLL 间接作为系统时钟时，它将不能被停止。只有当目标时钟源准备就绪了（经过启动稳定阶段的延迟或 PLL 稳定），从一个时钟源到另一个时钟源的切换才会发生。在被选择时钟源没有就绪时，系统时钟的切换不会发生。直至目标时钟源就绪，才发生切换。

7. RTC 时钟

通过设置备份域控制寄存器（RCC_BDCR）中的 RTCSEL [1:0] 位，RTCCLK 时钟源可以由 HSE/128、LSE 或 LSI 时钟提供。除非备份域复位，此选择不能被改变。LSE 时钟在备份域里，但 HSE 和 LSI 时钟不在。

（1）如果 LSE 时钟被选为 RTC 时钟，只要 V_{BAT} 维持供电，尽管 V_{DD} 供电被切断，RTC 仍可继续工作。

（2）LSI 时钟被选为自动唤醒单元（Auto-Wakeup Unit, AWU）时钟时，如果切断 V_{DD} 供电，不能保证 AWU 的状态。

（3）如果 HSE 时钟 128 分频后作为 RTC 时钟， V_{DD} 供电被切断或内部电压调压器被关闭（1.8V 域的供电被切断）时，RTC 状态不确定。必须设置电源控制寄存器的 DPB 位（取消后备区域的写保护位）为 1。

8. 看门狗时钟

如果独立看门狗已经由硬件选项或软件启动，LSI 振荡器将被强制在打开状态，并且不能被关闭。在 LSI 振荡器稳定后，时钟供应给 IWDG。

9. 时钟输出

微控制器允许输出时钟信号到外部 MCO 引脚。相应地，GPIO 端口寄存器必须被配置为相应功能。可被选作 MCO 时钟的时钟信号有 SYSCLK、HSI、HSE、PLL/2。

3.5 STM32F103VET6 的引脚

STM32F103VET6 比 STM32F103ZET6 少了两个端口：PF 和 PG，其他资源一样。

为了简化描述，后续的内容以 STM32F103VET6 为例进行介绍。STM32F103VET6 采用 LQFP100 封装，引脚如图 3-9 所示。

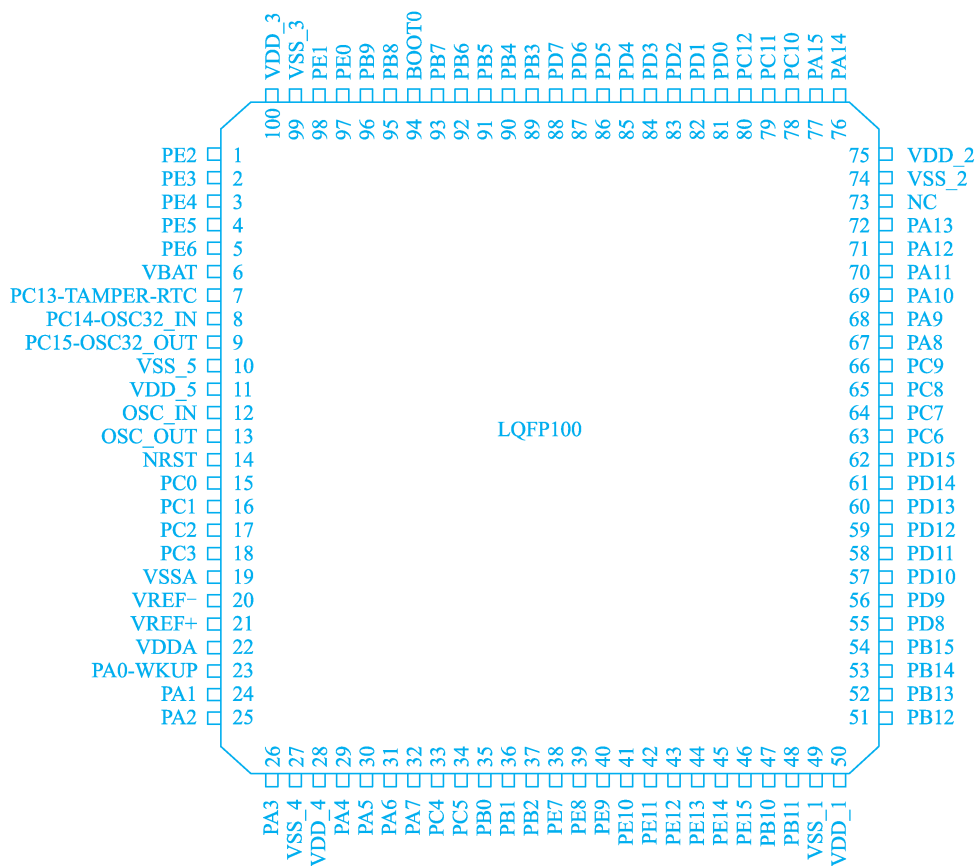


图 3-9 STM32F103VET6 的引脚

1. 引脚定义

STM32F103VET6 的引脚定义如表 3-3 所示。

表 3-3 STM32F103VET6 的引脚定义

引脚 编号	引脚名称	类 型	I/O 电平	复位后的 主要功能	复用功能	
					默认情况	重映射后
1	PE2	I/O	FT	PE2	TRACECK/FSMC_A23	
2	PE3	I/O	FT	PE3	TRACED0/FSMC_A19	



续表

引脚 编号	引脚名称	类 型	I/O 电平	复位后的 主要功能	复用功能	
					默认情况	重映射后
3	PE4	I/O	FT	PE4	TRACED1/FSMC_A20	
4	PE5	I/O	FT	PE5	TRACED2/FSMC_A21	
5	PE6	I/O	FT	PE6	TRACED3/FSMC_A22	
6	VBAT	S		VBAT		
7	PC13-TAMPER-RTC	I/O		PC13	TAMPER-RTC	
8	PC14-OSC32_IN	I/O		PC14	OSC32_IN	
9	PC15-OSC32_OUT	I/O		PC15	OSC32_OUT	
10	VSS_5	S		VSS_5		
11	VDD_5	S		VDD_5		
12	OSC_IN	I		OSC_IN		
13	OSC_OUT	O		OSC_OUT		
14	NRST	I/O		NRST		
15	PC0	I/O		PC0	ADC123_IN10	
16	PC1	I/O		PC1	ADC123_IN11	
17	PC2	I/O		PC2	ADC123_IN12	
18	PC3	I/O		PC3	ADC123_IN13	
19	VSSA	S		VSSA		
20	VREF —	S		VREF —		
21	VREF +	S		VREF +		
22	VDDA	S		VDDA		
23	PA0-WKUP	I/O		PA0	WKUP/USART2_CTS/ ADC123_IN0/TIM2_ CH1_ETR/TIM5_CH1/ TIM8_ETR	
24	PA1	I/O		PA1	USART2_RTS/ADC123_ IN1/TIM5_CH2/TIM2_CH2	
25	PA2	I/O		PA2	USART2_TX/TIM5_CH3/ ADC123_IN2/TIM2_CH3	
26	PA3	I/O		PA3	USART2_RX/TIM5_CH4/ ADC123_IN3/TIM2_CH4	
27	VSS_4	S		VSS_4		
28	VDD_4	S		VDD_4		
29	PA4	I/O		PA4	SPI1_NSS/USART2_CK/ DAC_OUT1/ADC12_IN4	
30	PA5	I/O		PA5	SPI1_SCK/DAC_OUT2/ ADC12_IN5	TIM1_BKIN

续表

引脚 编号	引脚名称	类 型	I/O 电平	复位后的 主要功能	复用功能	
					默认情况	重映射后
31	PA6	I/O		PA6	SPI1_MISO/TIM8_BKIN/ ADC12_IN6/TIM3_CH1	TIM1_CH1N
32	PA7	I/O		PA7	SPI1_MOSI/TIM8_CH1N/ ADC12_IN7/TIM3_CH2	
33	PC4	I/O		PC4	ADC12_IN14	
34	PC5	I/O		PC5	ADC12_IN15	
35	PB0	I/O		PB0	ADC12_IN8/TIM3_CH3/ TIM8_CH2N	TIM1_CH2N
36	PB1	I/O		PB1	ADC12_IN9/TIM3_CH4/ TIM8_CH3N	TIM1_CH3N
37	PB2	I/O	FT	PB2/BOOT1		
38	PE7	I/O	FT	PE7	FSMC_D4	TIM1_ETR
39	PE8	I/O	FT	PE8	FSMC_D5	TIM1_CH1N
40	PE9	I/O	FT	PE9	FSMC_D6	TIM1_CH1
41	PE10	I/O	FT	PE10	FSMC_D7	TIM1_CH2N
42	PE11	I/O	FT	PE11	FSMC_D8	TIM1_CH2
43	PE12	I/O	FT	PE12	FSMC_D9	TIM1_CH3N
44	PE13	I/O	FT	PE13	FSMC_D10	TIM1_CH3
45	PE14	I/O	FT	PE14	FSMC_D11	TIM1_CH4
46	PE15	I/O	FT	PE15	FSMC_D12	TIM1_BKIN
47	PB10	I/O	FT	PB10	I2C2_SCL/USART3_TX	TIM2_CH3
48	PB11	I/O	FT	PB11	I2C2_SDA/USART3_RX	TIM2_CH4
49	VSS_1	S		VSS_1		
50	VDD_1	S		VDD_1		
51	PB12	I/O	FT	PB12	SPI2_NSS/I2S2_WS/I2C2_ SMBA/USART3_CK/ TIM1_BKIN	
52	PB13	I/O	FT	PB13	SPI2_SCK/I2S2_CK/ USART3_CTS/TIM1_CH1N	
53	PB14	I/O	FT	PB14	SPI2_MISO/TIM1_CH2N/ USART3_RTS	
54	PB15	I/O	FT	PB15	SPI2_MOSI/I2S2_SD/ TIM1_CH3N	
55	PD8	I/O	FT	PD8	FSMC_D13	USART3_TX
56	PD9	I/O	FT	PD9	FSMC_D14	USART3_RX
57	PD10	I/O	FT	PD10	FSMC_D15	USART3_CK



续表

引脚 编号	引脚名称	类 型	I/O 电平	复位后的 主要功能	复用功能	
					默认情况	重映射后
58	PD11	I/O	FT	PD11	FSMC_A16	USART3_CTS
59	PD12	I/O	FT	PD12	FSMC_A17	TIM4_CH1/ USART3_RTS
60	PD13	I/O	FT	PD13	FSMC_A18	TIM4_CH2
61	PD14	I/O	FT	PD14	FSMC_D0	TIM4_CH3
62	PD15	I/O	FT	PD15	FSMC_D1	TIM4_CH4
63	PC6	I/O	FT	PC6	I2S2_MCK/TIM8_CH1/ SDIO_D6	TIM3_CH1
64	PC7	I/O	FT	PC7	I2S3_MCK/TIM8_CH2/ SDIO_D7	TIM3_CH2
65	PC8	I/O	FT	PC8	TIM8_CH3/SDIO_D0	TIM3_CH3
66	PC9	I/O	FT	PC9	TIM8_CH4/SDIO_D1	TIM3_CH4
67	PA8	I/O	FT	PA8	USART1_CK/TIM1_CH1/ MCO	
68	PA9	I/O	FT	PA9	USART1_TX/TIM1_CH2	
69	PA10	I/O	FT	PA10	USART1_RX/TIM1_CH3	
70	PA11	I/O	FT	PA11	USART1_CTS/USBDM/ CAN_RX/TIM1_CH4	
71	PA12	I/O	FT	PA12	USART1_RTS/USB DP/ CAN_TX/TIM1_ETR	
72	PA13	I/O	FT	JTMS-WDIO		PA13
73	NC					
74	VSS_2	S		VSS_2		
75	VDD_2	S		VDD_2		
76	PA14	I/O	FT	JTCK-SWCLK		PA14
77	PA15	I/O	FT	JTDI	SPI3_NSS/I2S3_WS	TIM2_CH1_ETR PA15/ SPI1_NSS
78	PC10	I/O	FT	PC10	UART4_TX/SDIO_D2	USART3_TX
79	PC11	I/O	FT	PC11	UART4_RX/SDIO_D3	USART3_RX
80	PC12	I/O	FT	PC12	UART5_TX/SDIO_CK	USART3_CK
81	PD0	I/O	FT	OSC_IN	FSMC_D2	CAN_RX
82	PD1	I/O	FT	OSC_OUT	FSMC_D3	CAN_TX
83	PD2	I/O	FT	PD2	TIM3_ETR/UART5_RX/ SDIO_CMD	
84	PD3	I/O	FT	PD3	FSMC_CLK	USART2_CTS
85	PD4	I/O	FT	PD4	FSMC_NOE	USART2_RTS

续表

引脚 编号	引脚名称	类 型	I/O 电平	复位后的 主要功能	复用功能	
					默认情况	重映射后
86	PD5	I/O	FT	PD5	FSMC_NWE	USART2_TX
87	PD6	I/O	FT	PD6	FSMC_NWAIT	USART2_RX
88	PD7	I/O	FT	PD7	FSMC_NE1/FSMC_NCE2	USART2_CK
89	PB3	I/O	FT	JTDO	SPI3_SCK/I2S3_CK	PB3/TRACESWO TIM2_CH2/SPI1_SCK
90	PB4	I/O	FT	NJTRST	SPI3_MISO	PB4/TIM3_CH1 SPI1_MISO
91	PB5	I/O		PB5	I2C1_SMBA/SPI3_MOSI/ I2S3_SD	TIM3_CH2/SPI1_MOSI
92	PB6	I/O	FT	PB6	I2C1_SCL/TIM4_CH1	USART1_TX
93	PB7	I/O	FT	PB7	I2C1_SDA/FSMC_NADV/ TIM4_CH2	USART1_RX
94	BOOT0	I		BOOT0		
95	PB8	I/O	FT	PB8	TIM4_CH3/SDIO_D4	I2C1_SCL/CAN_RX
96	PB9	I/O	FT	PB9	TIM4_CH4/SDIO_D5	I2C1_SCA/CAN_TX
97	PE0	I/O	FT	PE0	TIM4_ETR/FSMC_NBL0	
98	PE1	I/O	FT	PE1	FSMC_NBL1	
99	VSS_3	S		VSS_3		
100	VDD_3	S		VDD_3		

注：I= 输入（input），O= 输出（output），S= 电源（supply），FT= 可忍受 5V 电压。

2. 启动配置引脚

在 STM32F103VET6 中，可以通过 BOOT [1:0] 引脚选择 3 种不同的启动模式。STM32F103VET6 的启动配置如表 3-4 所示。

表 3-4 STM32F103VET6 的启动配置

启动模式选择引脚		启动模式	说 明
BOOT1	BOOT0		
X	0	主 Flash	主 Flash 被选为启动区域
0	1	系统存储器	系统存储器被选为启动区域
1	1	内置 SRAM	内置 SRAM 被选为启动区域

系统复位后，在 SYSCLK 的第 4 个上升沿，BOOT 引脚的值将被锁存。用户可以通过设置 BOOT1 和 BOOT0 引脚的状态选择复位后的启动模式。

在从待机模式退出时，BOOT 引脚的值将被重新锁存，因此在待机模式下 BOOT 引脚应保持为需要的启动配置。在启动延迟之后，CPU 从地址 0x0000 0000 获取堆栈顶的地址，

并从启动存储器的 0x0000 0004 指示的地址开始执行代码。

因为固定的存储器映像，代码区始终从地址 0x0000 0000 开始（通过 ICode 和 DCode 总线访问），而数据区（SRAM）始终从地址 0x2000 0000 开始（通过系统总线访问）。Cortex-M3 的 CPU 始终从 ICode 总线获取复位向量，即启动仅适合于从代码区开始（典型地从 Flash 启动）。STM32F103VET6 微控制器实现了一个特殊的机制，系统不仅可以从 Flash 或系统存储器启动，还可以从内置 SRAM 启动。

根据选定的启动模式，主 Flash、系统存储器或 SRAM 可以按照以下方式访问。

（1）从主 Flash 启动：主 Flash 被映射到启动空间（0x0000 0000），但仍然能够在它原有的地址（0x0800 0000）访问它，即 Flash 的内容可以在两个地址区域访问，0x0000 0000 或 0x0800 0000。

（2）从系统存储器启动：系统存储器被映射到启动空间（0x0000 0000），但仍然能够在它原有的地址（互联型产品原有地址为 0x1FFF B000，其他产品原有地址为 0x1FFF F000）访问它。

（3）从内置 SRAM 启动：只能在 0x2000 0000 开始的地址区访问 SRAM。从内置 SRAM 启动时，在应用程序的初始化代码中，必须使用 NVIC 的异常表和偏移寄存器，重新映射向量表到 SRAM 中。

（4）内嵌的自举程序：内嵌的自举程序存放在系统存储区，由厂商在生产线上写入，用于通过串行接口 USART1 对 Flash 进行重新编程。

3.6 STM32F103VET6 最小系统设计

STM32F103VET6 最小系统是指能够让 STM32F103VET6 正常工作的包含最少元器件的系统。STM32F103VET6 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 STM32F103VET6 工作。然而，为了使用方便，在最小系统中加入了 USB 转 TTL 串口、发光二极管等功能模块。

STM32F103VET6 的最小系统核心电路原理如图 3-10 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。

1. 复位电路

STM32F103VET6 的 NRST 引脚输入中使用 CMOS 工艺，它连接了一个不能断开的上拉电阻，其典型值为 40k Ω ，外部连接了一个上拉电阻 R4、按键 RST 及电容 C5，当按键 RST 按下时 NRST 引脚电位变为 0，通过这个方式实现手动复位。

2. 晶体振荡电路

STM32F103VET6 一共外接了两个晶振：一个 8MHz 的晶振 X1 提供给高速外部时钟，一个 32.768kHz 的晶振 X2 提供给全低速外部时钟。

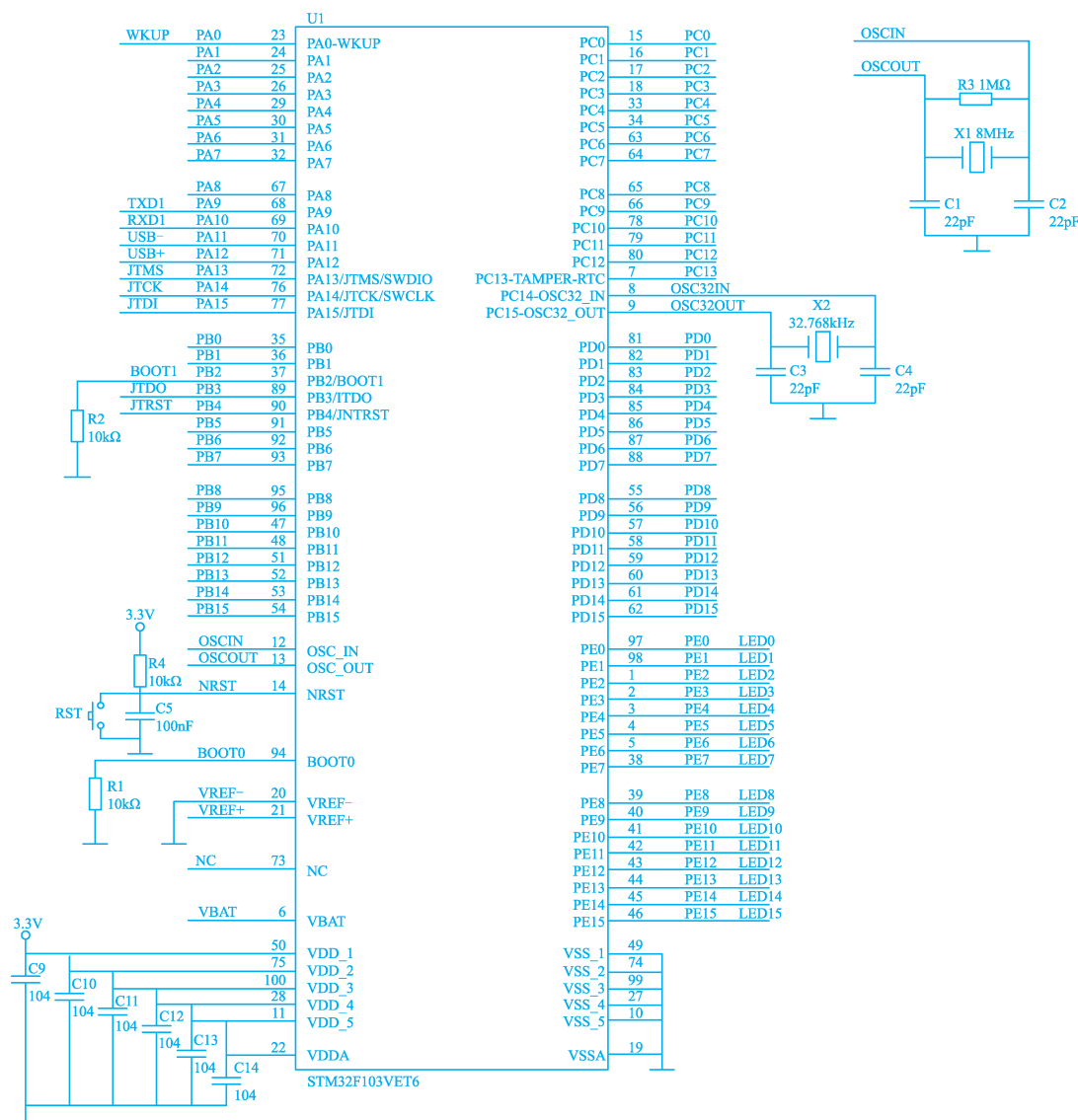


图 3-10 STM32F103VET6 的最小系统核心电路原理

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 JLINK 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 STM32F103VET6 与 JLINK 仿真器进行连接，JTAG 接口电路原理如图 3-11 所示。

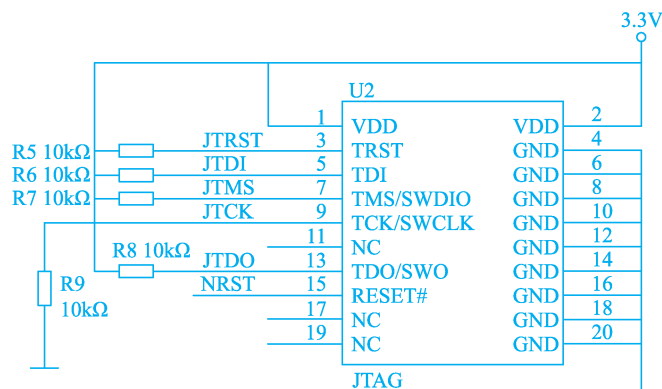


图 3-11 JTAG 接口电路原理

5. 流水灯电路

最小系统板载 16 个 LED 流水灯，对应 STM32F103VET6 的 PE0 ~ PE15 引脚，电路原理如图 3-12 所示。



图 3-12 流水灯电路原理

另外，STM32F103VET6 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。