

本章深入探讨 STM32 微控制器,从 STM32 的产品线、命名规则到具体选型方法提供了全面的概述;重点介绍 STM32F407ZGT6 微控制器,包括其主要特性、功能以及内部结构,详细讲解 STM32F407VGT6 的引脚布局和功能,以及如何设计一个基于 STM32F407VGT6 的最小系统。本章为读者提供了关于 STM32 微控制器系列的深入理解,特别是对 STM32F407 系列的详细介绍,为后续的应用开发奠定了基础。

本章的学习目标:

- (1) 掌握 STM32 微控制器的基本概念。
- (2) 深入了解 STM32F407ZGT6 的特性和功能。
- (3) 熟悉 STM32F407ZGT6 的内部结构。
- (4) 学习 STM32F407VGT6 芯片的引脚布局和功能。
- (5) 设计 STM32F407VGT6 的最小系统。

通过这些学习目标,学生将具备使用 STM32F407 系列微控制器进行嵌入式系统设计和开发的能力,为未来在嵌入式系统领域的工作或进一步学习奠定坚实的基础。

3.1 STM32 微控制器概述

STM32 是意法半导体(ST Microelectronics)有限公司(简称 ST 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。

STM32 目前常用的有 STM32F103~107 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) DSP 处理。
- (3) 存储空间更大,1 MB 以上。
- (4) 运算速度更高,以 168 MHz 高速运行时可达到 210 DMIPS 的处理能力。
- (5) 更高级的外设,新增外设,例如,照相机接口、加密处理器、USB 高速 OTG 接口等,更高性能,更快的通信接口,更高的采样率,带 FIFO 的 DMA 控制器。



视频讲解

STM32 系列微控制器具有以下优点。

1. 先进的内核结构

STM32 系列微控制器基于高效的 Arm Cortex-M 内核,提供从 Cortex-M0 到 Cortex-M7 的多种选择,支持高达 400 MHz 的处理速度。这些内核支持浮点运算(M4/M7),具备高级中断管理和多级流水线技术,确保高效的任務处理和优化的能耗表现。STM32 还支持位带操作和多种低功耗模式,适合需求多样的嵌入式系统应用,从简单控制到复杂的数字信号处理均能胜任。

(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,可以达到 1.25 DMIPS/MHz,而功耗仅为 0.19 mW/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) 单周期乘法指令和硬件除法指令。

2. 三种功耗控制

STM32 经过特殊处理,针对应用中三种主要的能耗要求进行了优化,这三种能耗需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。为此,STM32 提供了三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/性能要求进行合理的优化。

3. 最大程度集成整合

STM32 微控制器通过高度集成的设计显著降低了对外部器件的需求,集成了电源监控器、单一晶振驱动全系统、内置调校好的 RC 振荡器及低频 RC 电路优化时钟和看门狗功能。此外,最小系统配置仅需少量外部器件,大大简化了硬件设计和开发过程。ST 公司的全面开发工具和库函数进一步加速了产品开发,使 STM32 成为高效、经济的解决方案。

(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,减少了对外部器件的需求。

(2) 使用一个主晶振可以驱动整个系统。低成本的 4~16 MHz 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 32 kHz 的晶振。

(3) 内嵌出厂前调校好的 8 MHz RC 振荡电路,可以作为主时钟源。

(4) 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 12 Mb/s。

(2) USART 接口速度高达 4.5 Mb/s。

(3) SPI 接口速度可达 18 Mb/s。

- (4) I2C 接口速度可达 400 kHz。
- (5) GPIO 的最大翻转频率为 18 MHz。
- (6) 脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)定时器最高可使用 72 MHz 时钟输入。

3.1.1 STM32 微控制器产品线

目前,市场上常见的基于 Cortex-M3 内核的 MCU 有 ST 公司的 STM32F103 微控制器、德州仪器(TI)公司的 LM3S8000 微控制器和恩智浦(NXP)公司的 LPC1788 微控制器等,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。

在诸多半导体制造商中,ST 公司是较早市场上推出基于 Cortex-M 内核的 MCU 产品的公司,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: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 1 MB 的应用,基于 Linux 或安卓的应用,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,STM32 产品线如图 3-1 所示。

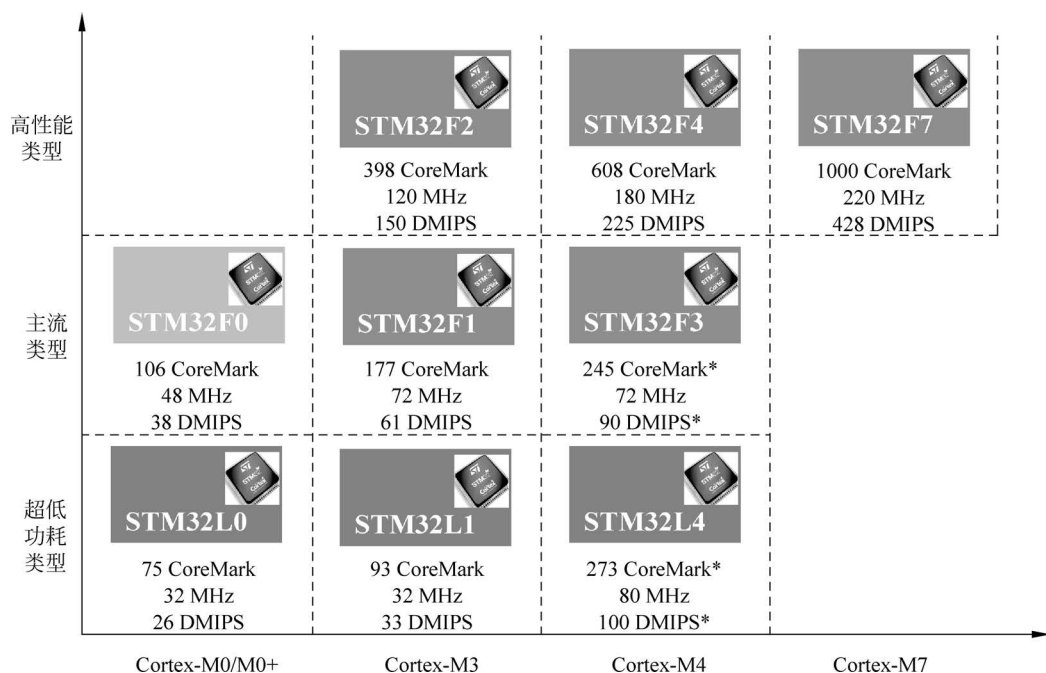


图 3-1 STM32 产品线

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内核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。

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,24 MHz CPU,具有电机控制功能。
- (2) STM32F101,基本型,36 MHz CPU,具有高达1 MB的闪存。
- (3) STM32F102,USB基本型,48 MHz CPU,具备USBFS。
- (4) STM32F103,增强型,72 MHz CPU,具有高达1 MB的闪存、电机控制、USB和CAN。
- (5) STM32F105/107,互联型,72 MHz CPU,具有以太网介质访问控制(Media Access Control,MAC)、CAN和USB2.0 OTG。

2. 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90 nm NVM工艺和ART加速器,在高达180 MHz的工作频率下通过闪存执行时,其处理性能达到225 DMIPS/608 CoreMark。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 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ 到STM32F439的260 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ 。

STM32F4系列包括8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信号处理功能的完美结合体。

- (1) STM32F401,84 MHz CPU/105 DMIPS,是尺寸较小、成本较低的解决方案,具有卓越的功耗效率(动态效率系列)。
- (2) STM32F410,100 MHz CPU/125 DMIPS,采用新型智能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),配备的随机数发生器、低功耗定时器和数模转换器(Digital to Analog Converter,DAC),为卓越的功率效率性能设立了新的里程碑(停机模式下89 $\mu\text{A}/\text{MHz}$)。
- (3) STM32F411,100 MHz CPU/125 DMIPS,具有卓越的功率效率和更大的SRAM(静态随机存取存储器,Static Random Access Memory)。
- (4) STM32F405/415,168 MHz CPU/210 DMIPS,高达1 MB的闪存,具有先进连接功能和加密功能。
- (5) STM32F407/417,168 MHz CPU/210 DMIPS,高达1 MB的闪存,增加了以太网MAC和照相机接口。
- (6) STM32F446,180 MHz CPU/225 DMIPS,高达512 KB的闪存,具有DualQuad SPI和SDRAM接口。
- (7) STM32F429/439,180 MHz CPU/225 DMIPS,高达2 MB的双区闪存,带SDRAM接口、Chrom-ART加速器和LCD-TFT控制器。
- (8) STM32F427/437,180 MHz CPU/225 DMIPS,高达2 MB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) SM32F469/479,180 MHz CPU/225 DMIPS,高达2 MB的双区闪存,带SDRAM和QSPI接口、Chrom-ART加速器、LCD-TFT控制器和MPI-DSI接口。

3. 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 ST 公司的 ART 加速器和 L1 缓存,实现了 Cortex-M7 内核的最大理论性能——无论是从嵌入式闪存还是从外部存储器来执行代码,都能在 216 MHz 处理器频率下使性能达到 462 DMIPS/1082 CoreMark。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 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。

4. STM32L1 系列(超低功耗类型)

STM32L1 系列微控制器基于 Cortex-M3 内核,采用 ST 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 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 1.65~3.6 V 内以 32 MHz 的频率全速运行,其功耗参考值如下。

- (1) 动态运行模式,低至 177 $\mu\text{A}/\text{MHz}$ 。
- (2) 低功耗运行模式: 低至 9 μA 。
- (3) 超低功耗模式+备份寄存器+RTC: 900 nA(3 个唤醒引脚)。
- (4) 超低功耗模式+备份寄存器: 280 nA(3 个唤醒引脚)。

除了超低功耗 MCU 以外,STM32L1 还提供了多种特性、存储容量和封装引脚数选项,如 32~512 KB 闪存、高达 80 KB 的 SDRAM、16 KB 真正的嵌入式 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 与 STM32F 系列的其他微控制器的引脚均兼容。

5. STM32G4 系列(高性能和模拟集成类型)

STM32G4 是一款基于 Cortex-M4 内核的微控制器。它结合了高性能计算和丰富的模拟外设,采用了 DSP 指令集和浮点单元,并集成了多种高级模拟功能,如高精度模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)、DAC 和运算放大器。STM32G4 系列微控制器在 170 MHz 处理器频率下可实现高达 213 DMIPS/550 CoreMark 的性能,并且具有高达 512 KB 的嵌入式闪存和 128 KB 的 SRAM。STM32G4 的主要优势在于其强大的数字信号处理能力和丰富的模拟外设,适用于电机控制、数字电源、工业传感器和照明系统等应用。对于需要高性能计算和精确模拟信号处理的应用,STM32G4 系列提供了一个高效且灵活的解决方案。通过其先进的功能和高性能,STM32G4 系列能够在工业自动化、智能家居和物联网等领域中发挥重要作用,推动这些领域的技术进步和创新。

6. STM32H7 系列(超高性能类型)

STM32H7 是一款基于 Cortex-M7 内核的微控制器。它采用双重核心架构,集成了 Cortex-M7 和 Cortex-M4 内核,旨在提供卓越的处理能力和灵活的任务分配。STM32H7 系列微控制器在高达 480 MHz 的处理器频率下,可实现高达 1327 DMIPS/3224 CoreMark 的性能,并且具有高达 2 MB 的嵌入式闪存和 1 MB 的 SRAM。STM32H7 的主要优势在于

其超高的运算性能和多核处理能力,适用于需要实时处理和复杂计算的应用,如高级图像处理、工业自动化、通信系统和高性能消费电子产品。通过其先进的架构和高性能,STM32H7系列能够在人工智能、物联网、智能家居和汽车电子等领域中发挥重要作用,推动这些领域的技术进步和创新。STM32H7系列的强大性能和灵活性使其成为高性能嵌入式应用的理想选择。

7. STM32U5 系列(超低功耗和高性能类型)

STM32U5 是一款基于 Cortex-M33 内核的微控制器。它结合了超低功耗和高性能计算,采用了 Arm TrustZone 技术和浮点单元,并集成了多种高级安全功能,如硬件加密和真随机数生成器。STM32U5 系列微控制器在 160 MHz 处理器频率下可实现高达 651 CoreMark 的性能,并且具有高达 2 MB 的嵌入式闪存和 786 KB 的 SRAM。STM32U5 的主要优势在于其卓越的能效比和强大的安全功能,适用于需要长寿命电池和高安全性的应用,如可穿戴设备、智能医疗、物联网终端和智能家居设备。通过其先进的低功耗技术和高性能,STM32U5 系列能够在便携式设备、节能系统和安全关键应用领域中发挥重要作用,推动这些领域的技术进步和创新。STM32U5 系列的低功耗特性和高安全性使其成为对能效和安全性要求苛刻的嵌入式应用的理想选择。

8. STM32MP1 系列(多核微处理器类型)

STM32MP1 是一款基于 Cortex-A7 和 Cortex-M4 内核的多核微处理器。它结合了高性能的应用处理能力和实时任务处理能力,采用了双核 Cortex-A7 和单核 Cortex-M4 的架构,提供了强大的计算性能和灵活的任务分配。STM32MP1 系列微处理器在 650 MHz 的 Cortex-A7 处理器频率下可实现高达 4550 DMIPS 的性能,并且具有高达 1 GB 的 DDR 外部存储支持和 256 KB 的嵌入式 SRAM。STM32MP1 的主要优势在于其强大的处理能力和多核架构,适用于需要复杂操作的系统和实时处理的应用,如工业自动化、智能家居、物联网网关和人机界面设备。通过其先进的架构和高性能,STM32MP1 系列能够在工业控制、智能设备和边缘计算等领域中发挥重要作用,推动这些领域的技术进步和创新。STM32MP1 系列的多核特性和高灵活性使其成为高性能嵌入式应用和复杂系统设计的理想选择。

9. STM32WB 系列(无线连接类型)

STM32WB 是一款基于 Cortex-M4 内核和 Cortex-M0+ 双核架构的微控制器,专为无线连接应用设计。它集成了 2.4 GHz 无线电模块,支持蓝牙 5.0、Zigbee 3.0 和 Thread 协议,提供了强大的无线通信能力和高效的处理性能。STM32WB 系列微控制器在 64 MHz 的 Cortex-M4 处理器频率下可实现高达 216 DMIPS 的性能,并且具有高达 1 MB 的嵌入式闪存和 256 KB 的 SRAM。STM32WB 的主要优势在于集成的无线连接功能和低功耗设计,适用于需要无线通信和低功耗的应用,如智能家居、可穿戴设备、物联网终端和工业传感器。通过其先进的无线通信技术和高性能,STM32WB 系列能够在物联网、智能家居和工业自动化等领域中发挥重要作用,推动这些领域的技术进步和创新。STM32WB 系列的无线连接特性和低功耗设计使其成为无线通信和低能耗嵌入式应用的理想选择。

3.1.2 STM32 微控制器的命名规则

ST 公司在推出以上一系列基于 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,通用闪存)、W(无线系统芯片)、L(低功耗低电压,1.65~3.6 V)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(20 pin)、G(28 pin)、K(32 pin)、T(36 pin)、H(40 pin)、C(48 pin)、U(63 pin)、R(64 pin)、O(90 pin)、V(100 pin)、Q(132 pin)、Z(144 pin)和 I(176 pin)等。

5. 闪存容量

闪存容量是 STM32 系列微控制器名称的第五部分,通常有以下几种: 4(16 KB 闪存,小容量)、6(32 KB 闪存,小容量)、8(64 KB 闪存,中容量)、B(128 KB 闪存,中容量)、C(256 KB 闪存,大容量)、D(384 KB 闪存,大容量)、E(512 KB 闪存,大容量)、F(768 KB 闪存,大容量)、G(1 MB 闪存,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(薄型四侧引脚扁平封装,Low-profile Quad Flat Package,LQFP)、H(球栅阵列封装,Ball Grid Array,BGA)、U(超薄细间距四方扁平无铅封装,Very Thin Fine Pitch Quad Flat Pack No-lead Package,VFQFPN)、Y(晶圆片级芯片规模封装,Wafer Level Chip Scale Packaging,WLCSP)。

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)、7(-40~105℃,工业级)。

STM32F103 微控制器的命名规则如图 3-2 所示。

通过命名规则,读者能直观、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 STM32F103ZET6 微控制器,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 512 KB 闪存, T 代表 LQFP 封装方式, 6 代表 -40~85°C 的工业级温度范围。

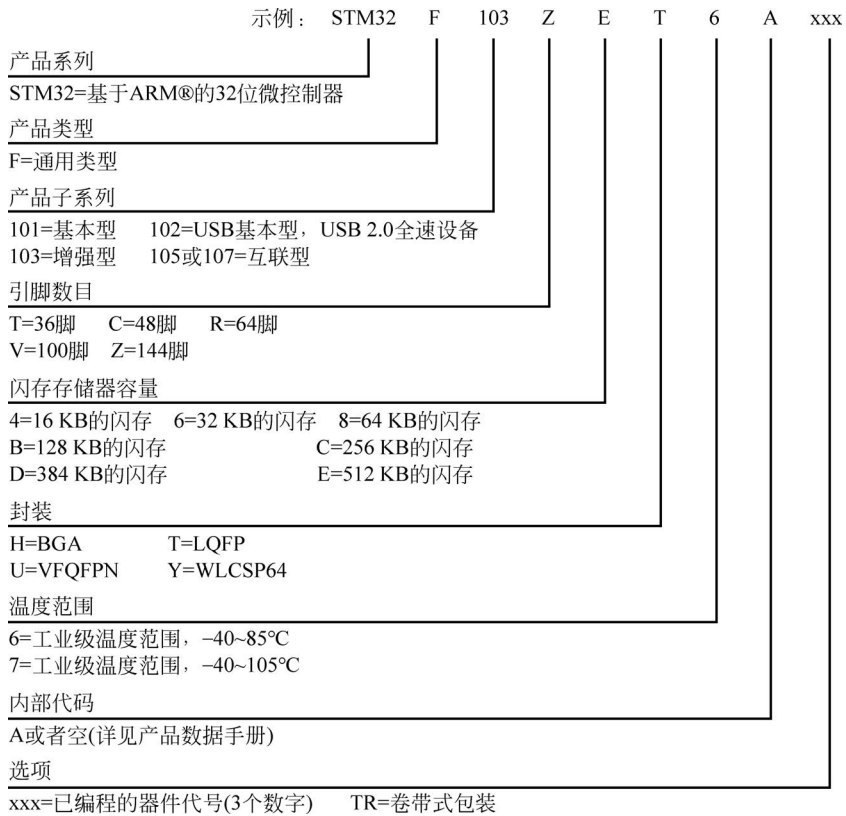


图 3-2 STM32F103 微控制器的命名规则

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 内核 CPU, 最高工作频率为 72 MHz, 执行速度为 1.25 DMIPS/MHz, 完成 32 位×32 位乘法计算只需用一个周期, 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 32~512 KB 的闪存, 6~64 KB 的 SRAM。

(3) 电源和时钟复位电路。包括: 2.0~3.6 V 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 4~16 MHz 的晶振; 内嵌出厂前调校 8 MHz 的 RC 振荡电路、40 kHz 的 RC 振荡电路; 供 CPU 时钟的 PLL; 带校准功能供 RTC 的 32 kHz 晶振。

(4) 调试端口。有 SWD 串行调试端口和 JTAG 端口可供调试用。

(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 18 MHz, 所有的端口都可以映射到 16 个外部中断向量。除了模拟输入端口, 其他所有的端口都可以接收 5 V 以内的电压输入。

(6) DMA(直接存储器访问)端口。支持定时器、ADC、SPI、I2C 和 USART 等外设。

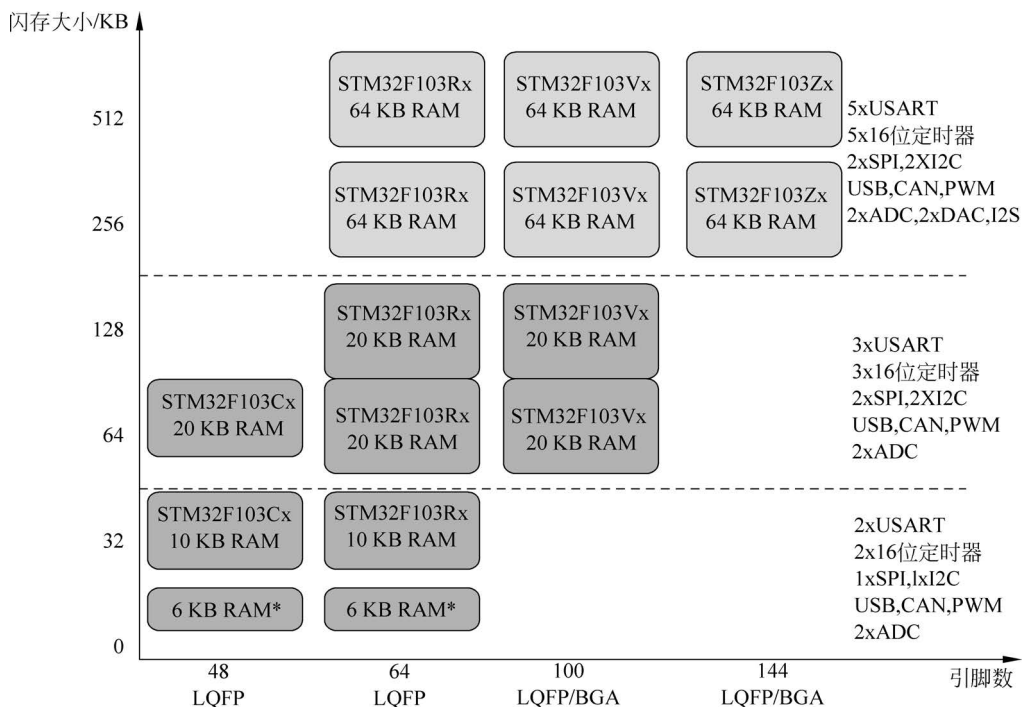


图 3-3 STM32F103xx 闪存容量、封装及型号对应关系

(7) ADC。带有 2 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 2 个内部通道。2 个内部通道中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 2.4~3.6 V,测量范围为 $V_{REF-} \sim V_{REF+}$, V_{REF-} 通常为 0 V, V_{REF+} 通常与供电电压一样。具有双采样和保持能力。

(8) DACSTM32F103xC、STM32F103xD、STM32F103xE 单片机具有 2 通道 12 位 DAC。

(9) 定时器。最多可有 11 个定时器,包括:4 个 16 位定时器,每个定时器有 4 个 PWM 定时器或者脉冲计数器;2 个 16 位的 6 通道高级控制定时器(最多 6 个通道可用于 PWM 输出);2 个看门狗定时器,包括独立看门狗(IWDG)定时器和窗口看门狗(WWDG)定时器;1 个系统滴答定时器 SysTick(24 位倒计数器);2 个 16 位基本定时器,用于驱动 DAC。

(10) 通信端口。最多可有 13 个通信端口,包括:2 个 PC 端口;5 个通用异步收发器(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 2 个,CAN 端口、USB 2.0 全速端口、安全数字输入/输出(SDIO)端口最多都只能有 1 个。

(11) FSMC。FSMC 嵌在 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(PSRAM)等。

3.2 STM32F407ZGT6 概述

STM32 跟其他单片机一样,是一个单片计算机或单片微控制器,所谓单片就是在一个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。



视频讲解

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: I/O 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 微控制器属于 STM32F4 系列微控制器,采用了最新的 168 MHz 的 Cortex-M4 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,与 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来讲,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、在闪存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 168 MHz,MPU 能够实现高达 210 DMIPS/1.25 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1)的性能,具有 DSP 指令集。

(2) 存储器。

① 高达 1MB 闪存,组织为两个区,可读写同步。

② 高达 192 KB+4 KB 的 SRAM,包括 64 KB 的内核耦合存储器(CCM)数据 RAM。

③ 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 1.7~3.6 V 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 4~26 MHz 晶振。

④ 内置经工厂调校的 16 MHz RC 振荡器(1% 精度)。

⑤ 带校准功能的 32 kHz RTC 振荡器。

⑥ 内置带校准功能的 32 kHz RC 振荡器。

(6) 低功耗。

① 睡眠、停机和待机模式。

- ② VBAT 可为 RTC、20×32 位备份寄存器+可选的 4 KB 备份 SRAM 供电。
- (7) 3 个 12 位、2.4 MSPS ADC: 多达 24 通道,三重交叉模式下的性能高达 7.2 MSPS。
- (8) 2 个 12 位 DAC。
- (9) 通用 DMA: 具有 FIFO 和突发支持的 16 路 DMA 控制器。
- (10) 多达 17 个定时器: 12 个 16 位定时器和 2 个频率高达 168 MHz 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 和 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 端口,最高 84 MHz。
 - ② 高达 138 个可耐 5 V 的 I/O 端口。
 - (13) 多达 15 个通信接口。
 - ① 多达 3 个 I2C 接口 (SMBus/PMBus)。
 - ② 高达 4 个 USART/2 个 UART(10.5 Mb/s、ISO7816 接口、LIN、IrDA、调制解调器控制)。
 - ③ 高达 3 个 SPI (37.5 Mb/s),2 个具有复用的全双工 I2S,通过内部音频 PLL 或外部时钟达到音频级精度。
 - ④ 2 个 CAN (2.0 B 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。
 - (15) 8~14 位并行照相机接口: 速度高达 54 MB/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 168 MHz。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 指令和提高应用安全性的一个 MPU。

STM32F407xx 器件集成了高速嵌入式存储器(闪存和 SRAM 的容量分别高达 2 MB 和 256 KB)和高达 4 KB 的后备 SRAM,以及大量连至 2 条 APB 总线、2 条 AHB 总线和 1 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、2 个 DAC、1 个低功耗 RTC、12 个通用 16 位定时器

(包括 2 个用于电机控制的 PWM 定时器)、2 个通用 32 位定时器。

STM32F407xx 还带有标准通信接口与高级通信接口,主要功能如下。

(1) 高达 3 个 I2C。

(2) 3 个 SPI,2 个 I2S 全双工。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 2 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)。

(5) 2 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。

STM32F405xx 和 STM32F407xx 器件的工作温度范围是 $-40\sim+105^{\circ}\text{C}$,供电电压范围是 $1.8\sim3.6\text{V}$ 。

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。

STM32F405xx 和 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 STM32F405xx 和 STM32F407xx 微控制器适合于如下广泛的应用。

- (1) 电机驱动和应用控制。
- (2) 工业应用: 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(内部闪存/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 64 KB 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(内部闪存或通过 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(112 KB、64 KB 和 16 KB),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 通过此总线来执行存储器数据的传入和传出。此总线访问的对象是如下数据存储器:内部 SRAM(112 KB、64 KB、16 KB)及通过 FSMC 的外部存储器。

(3) DMA2 外设总线(S5)。

S5: DMA2 外设总线。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)。

S6: 以太网 DMA 总线。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如下数据存储器:内部 SRAM(112 KB、64 KB 和 16 KB)及通过 FSMC 的外部存储器。

(5) USB OTG HS DMA 总线(S7)。

S7: USB OTG HS DMA 总线。用于将 USB OTG HS DMA 主接口连接到总线矩阵。USB OTG 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如下数据存储器:内部 SRAM(112 KB、64 KB 和 16 KB)及通过 FSMC 的外部存储器。

2. 7 条被控总线

(1) 内部闪存 I 总线(M0)。

(2) 内部闪存 D 总线(M1)。

(3) 主要内部 SRAM1(112 KB)总线(M2)。

(4) 辅助内部 SRAM2(16 KB)总线(M3)。

(5) 辅助内部 SRAM3(64 KB)总线(仅适用于 STM32F42 系列和 STM32F43 系列器件)(M7)。

(6) AHB1 外设(包括 AHB-APB 总线桥和 APB 外设)总线(M5)。

(7) AHB2 外设总线(M4)。

(8) 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。

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 总线连接闪存、SRAM1 及 FSMC 进行数据通信。STM32F407ZGT6 芯片总线矩阵结构如图 3-4 所示。

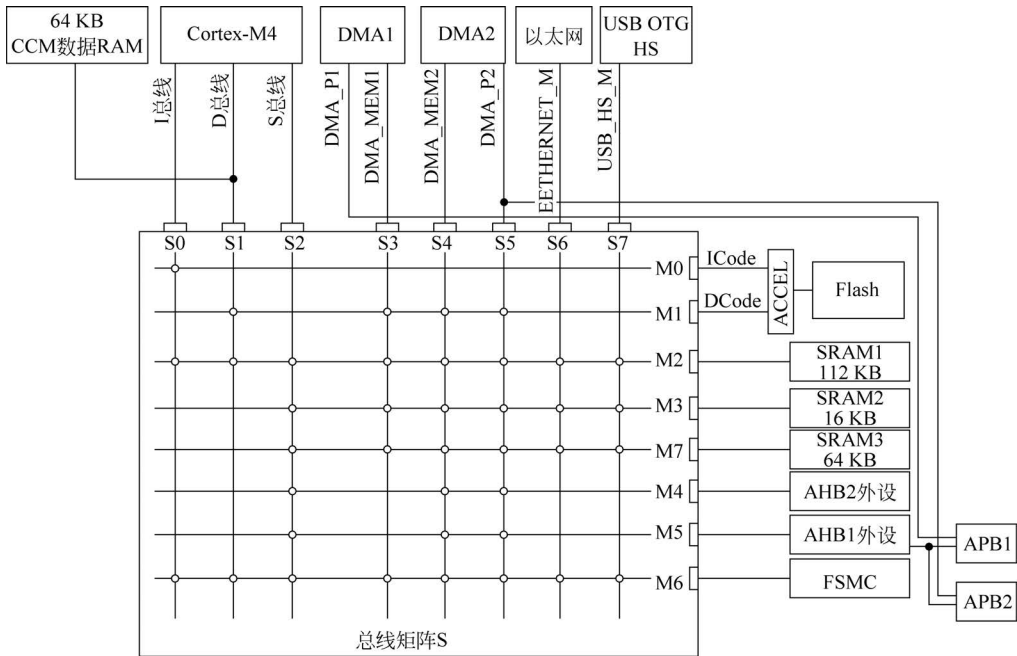


图 3-4 STM32F407ZGT6 芯片总线矩阵结构

3.4 STM32F407VGT6 芯片引脚和功能

STM32F407VGT6 芯片引脚如图 3-5 所示。图 3-5 只列出了每个引脚的基本功能。但

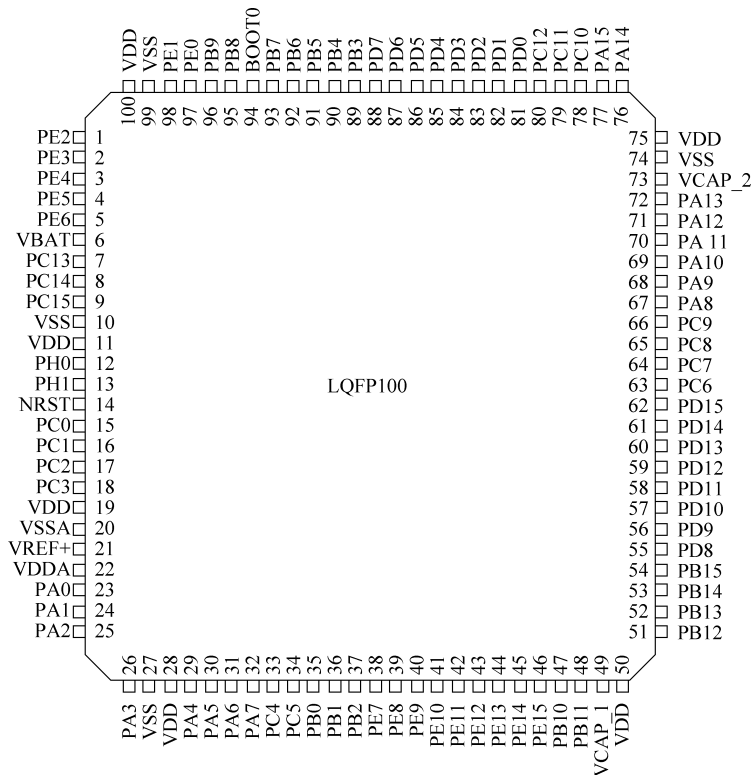


图 3-5 STM32F407VGT6 芯片引脚

是,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 5 V 电压的输入引脚都是 TTL 的,但与 CMOS 兼容。在输出模式下,在供电电压 2.7~3.6 V 的范围内,STM32F4 系列微控制器所有的输出引脚都是与 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(NRST)引脚组成的系统叫最小系统。

3.5 STM32F407VGT6 最小系统设计

STM32F407VGT6 最小系统是指能够让 STM32F407VGT6 正常工作的包含最小元件的系统。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)、8 MHz 高速内部 RC 振荡器、40 kHz 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。

STM32F407VGT6 的最小系统核心电路原理图如图 3-6 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

STM32F407VGT6 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 R_{pu} ,其典型值为 40 k Ω ,外部连接了一个上拉电阻 R4、按键 RST 及电容 C5,当 RST 按键按下时 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

STM32F407VGT6 一共外接了两个高振:一个 25 MHz 的晶振 X1 提供高速外部时钟,一个 32.768 kHz 的晶振 X2 提供全低速外部时钟。

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 10 k Ω 的电阻接地。启动设置电路从用户闪存启动。

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 接口电路原理图如图 3-7 所示。

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,流水灯电路原理图如图 3-8 所示。

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 10 k Ω 电位器)和 5 V 转 3.3 V 电源电路(采用 AMS1117-3.3V),具体电路从略。

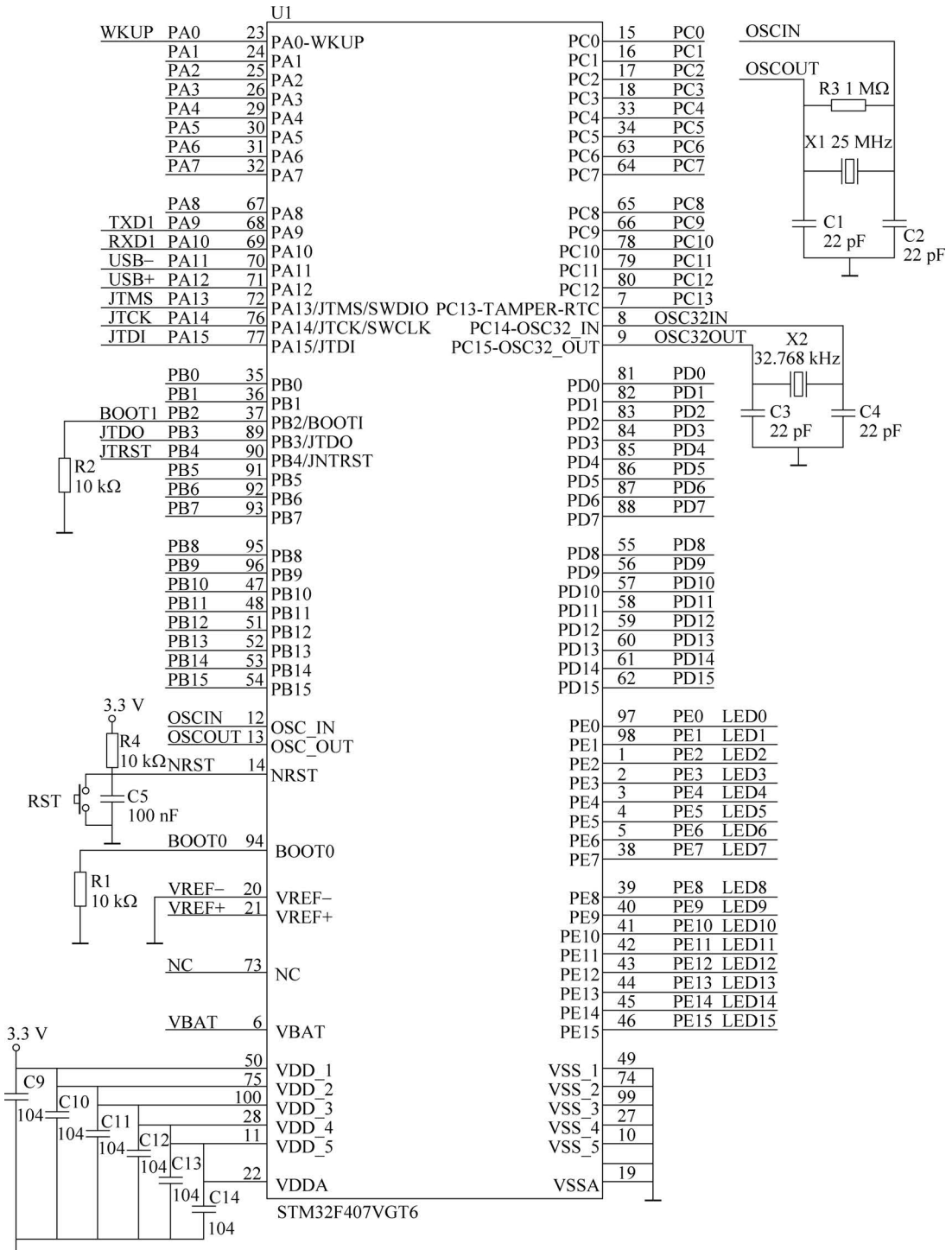


图 3-6 STM32F407VGT6 的最小系统核心电路原理图

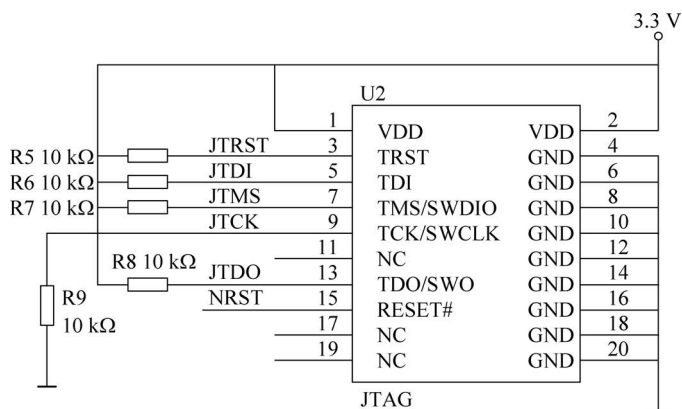


图 3-7 JTAG 接口电路原理图

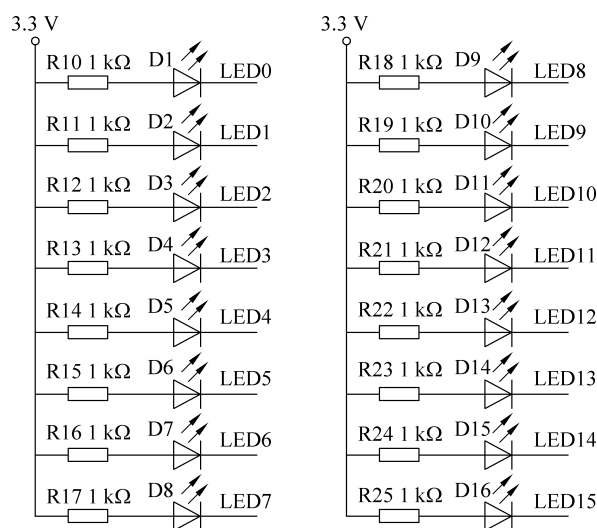


图 3-8 流水灯电路原理