

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材（电气工程及其自动化、自动化专业）

嵌入式单片机STM32 原理及应用

张淑清 胡永涛 张立国 等编著

Principle and Application
of STM32 Embedded
Microcontroller



非
外
借

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材
(电气工程及其自动化、自动化专业)

嵌入式单片机 STM32 原理及应用

张淑清 胡永涛 张立国 等编著

机械工业出版社

本书共 13 章, 内容包括: 嵌入式系统简介, 嵌入式单片机 STM32 的硬件基础、软件开发基础、通用功能输入输出 (GPIO)、外部中断 EXTI、通用同步/异步通信、通用定时器、直接存储器存取、模/数转换器、集成电路总线、串行外设接口, 基于机智云平台的 STM32 嵌入式物联网应用设计, 基于以太网的 STM32 嵌入式系统应用设计, 并在第 4~13 章给出了应用实例。

为了便于读者理解, 实例中给出了两种工程文件结构: 第一种是单结构文件, 是较简单结构的工程文件, 书中均给出了程序代码, 利于读者快速掌握; 第二种是结构化的编程方法, 更适用于实际工程应用, 在第 4 章的 GPIO 功能设计中详细给出了编程方法和调试结果, 可帮助读者培养良好的编程习惯。本书全部实例都经过调试, 可正常运行。

本书适合作为高等工科院校电子信息、计算机、自动化、测控、机电一体化等专业的嵌入式控制、单片机原理及设计等课程的教材。由于本书涉及大量工程领域相关内容, 也适于嵌入式单片机 STM32 的初学者及有一定嵌入式应用基础的电子工程技术人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式单片机 STM32 原理及应用/张淑清等编著. —北京: 机械工业出版社, 2019. 8

河北省精品课教材 “十三五” 国家重点出版物出版规划项目 卓越工程能力培养与工程教育专业认证系列规划教材. 电气工程及其自动化、自动化专业

ISBN 978-7-111-63352-5

I. ①嵌… II. ①张… III. ①单片微型计算机—高等学校—教材
IV. ①TP368. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 165404 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 吉玲 责任编辑: 吉玲 陈文龙

责任校对: 杜雨霏 封面设计: 鞠杨

责任印制: 孙炜

天津嘉恒印务有限公司印刷

2019 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15.5 印张 · 384 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-63352-5

定价: 39.80 元

电话服务

客服电话: 010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

机工教育服务网: www.cmpedu.com

前言

嵌入式单片机 STM32 是以 ARM 为内核架构, 基于 Cortex - M3 内核的嵌入式微控制器。其集成度高, 外围电路简单, 配合 ST 公司提供的标准库, 开发者可以快速开发高可靠性的工业级产品, 自推出以来就受到重视并获得广泛应用。STM32 单片机技术的开发应用也逐渐成为高等院校计算机、电气工程、自动化、机电一体化、测控等专业学生必须掌握的技术之一。本书介绍的嵌入式单片机 STM32F103RBT6 是 32 位的 ARM Cortex - M3 内核, 集成了 128KB Flash 和 20KB SRAM 以及丰富强大的硬件接口电路, 运行频率可达 72MHz。

本书第 1 章介绍嵌入式系统及 STM32 单片机相关概念、应用、发展趋势; 第 2 章介绍嵌入式单片机硬件基础; 第 3 章介绍嵌入式单片机软件开发基础。在此基础上, 第 4 章 ~ 第 11 章, 分别针对 STM32 可实现的各种功能模块 (通用功能输入输出 (GPIO)、中断、串行通信、定时器、DMA 传输、A/D 转换、I²C 总线、SPI 总线), 阐述其结构及应用设计方法。第 12 章和 13 章设计了 STM32 网络应用系统, 分别为基于机智云平台的 STM32 嵌入式物联网应用设计和基于以太网的 STM32 嵌入式系统应用设计, 方便读者了解和掌握嵌入式系统的互联网设计和开发方法。

本书各章内容贯穿了两个主题, 一是 STM32 单片机的结构及工作原理, 二是嵌入式 STM32 的开发及实践。第 4 ~ 10 章的应用实例均给出两种工程文件结构: 第一种是单结构的工程文件设计方法, 书中均给出文件结构及程序代码, 便于读者学习和快速掌握本章内容; 第二种是多结构化的编程方法, 利于与其他外设融合, 综合开发应用系统功能。为帮助读者培养良好的编程习惯, 在第 4 章 GPIO 功能设计中详细给出结构化的编程方法。鉴于篇幅有限, 其他章节的多结构化设计实例均给出工程文件结构及流程图。

本书结合编者多年的教学经验, 将理论实践一体化的教学方式融入其中。书中实例开发过程用到的是目前使用最广的正点原子 Mini STM32 的开发板 STM32F103, 由此开发各种功能, 书中实例均进行了调试。读者也可以结合实际或者手里现有的开发板开展实验, 均能获得实验结果。实践案例由浅入深, 层层递进, 在帮助读者快速掌握某一外设功能的同时, 有效融合其他外部设备, 如按键、触摸屏、各类传感器等设计嵌入式系统, 体现学习的系统性。

本书由张淑清、胡永涛、张立国、姜安琦、董明如、李梅梅编著。其中, 张淑清编写第 1 ~ 3 章, 胡永涛编写第 4 ~ 5 章, 张立国编写第 6 章, 董明如编写第 7 ~ 8 章, 姜安琦和李梅梅编写第 9 ~ 13 章。本书的程序调试和实验工作由胡孟飞、姜安琦、李梅梅、李盼、杨丽君、杨振宁、段晓宁、陈荣飞、董伟等完成。

吴希军、梁振虎、胡硕、苏连成、赵立兴、闫朝阳、温淑焕等为本书的编写提出了许多宝贵的意见。张晓文、张赞、左一格、刘婉、胥凤娇、苑世玉、要俊波等为本书做了许多校对工作。

目 录 Contents

前 言

第 1 章 嵌入式系统简介 1

1.1 嵌入式系统特点及发展趋势 1

1.1.1 嵌入式系统特点及应用领域 1

1.1.2 嵌入式系统发展趋势 2

1.2 嵌入式处理器 ARM Cortex - M3 特点 3

1.3 STM32 系列微控制器 4

1.3.1 STM32 系列单片机 4

1.3.2 STM32F10x 系列单片机 5

1.3.3 STM32 系列单片机开发工具 6

思考与练习 6

第 2 章 嵌入式单片机 STM32

硬件基础 8

2.1 STM32 系列单片机外部结构 8

2.1.1 STM32 系列单片机命名规则 8

2.1.2 STM32 系列单片机引脚功能 9

2.2 STM32 系列单片机内部结构 10

2.2.1 STM32F103 处理器内部总线 结构 10

2.2.2 STM32F103 处理器内部时钟 系统 12

2.2.3 STM32F103 处理器内部复位 系统 13

2.2.4 STM32F103 处理器内部存储器 结构 14

2.3 STM32F103 单片机输入输出 16

2.4 STM32F103 最小系统设计 18

思考与练习 20

第 3 章 嵌入式单片机 STM32 软件开发

基础 21

3.1 Cortex - M3 微控制器软件接口标准 CMSIS 21

3.1.1 CMSIS 概述 21

3.1.2 STM32F10x 标准外设库 22

3.2 基于 MDK 和标准库的 STM32 软件开发 过程 25

3.3 基于 MDK5 的 STM32 软件开发过程 ... 32 思考与练习 35

第 4 章 STM32 单片机的通用功能输入 输出 (GPIO) 37

4.1 STM32F10x 的 IO 端口的组成及功能 ... 37

4.1.1 STM32F10x 的 IO 端口的基本组成 结构 37

4.1.2 通用功能输入输出 (GPIO) 38

4.1.3 复用功能输入输出 (AFIO) 38

4.1.4 外部中断/唤醒功能 38

4.2 GPIO 常用库函数 39

4.3 GPIO 使用流程 43

4.3.1 普通 GPIO 配置 43

4.3.2 IO 复用功能 AFIO 配置 43

4.4 GPIO 应用设计实例 45

4.4.1 GPIO 应用实例 1: 系统工作 指示灯 46

4.4.2 GPIO 应用实例 2: 开关量状态 监测 49

思考与练习 58

第 5 章 STM32 单片机外部中断

EXTI 59

5.1 中断的相关概念 59

5.2 STM32F103 中断系统组成结构 60

5.2.1 中断源及中断向量 60

5.2.2 外部中断系统结构 63

5.3 中断控制 64

5.3.1 中断屏蔽控制 64

5.3.2 中断优先级控制 65

5.4 STM32 中断控制库函数 66

5.4.1 嵌套向量中断控制器 (NVIC) 库 函数 66

5.4.2 STM32 外部中断 EXTI 库函数	70	7.4 通用定时器常用库函数	107
5.5 外部中断使用流程	72	7.5 通用定时器使用流程	113
5.5.1 NVIC 设置	72	7.5.1 NVIC 设置	113
5.5.2 中断端口配置	73	7.5.2 TIM 中断配置	113
5.5.3 中断处理	73	7.5.3 定时器中断处理程序	114
5.6 STM32 外部中断应用设计实例	75	7.6 通用定时器应用设计	114
5.6.1 外部中断应用实例 1: 按键控制 LED 模拟手术室工作状态指示	75	7.6.1 定时器设计实例 1: 精确 延时	114
5.6.2 外部中断应用实例 2: 烟雾监测 紧急报警	79	7.6.2 定时器设计实例 2: 串行口定时 上传信息	119
思考与练习	81	思考与练习	121
第 6 章 STM32 通用同步/异步通信	82	第 8 章 STM32 直接存储器存取 DMA	122
6.1 串行通信简介	82	8.1 DMA 简介	122
6.1.1 串行通信与并行通信	82	8.2 STM32 的 DMA 结构	122
6.1.2 串行通信方式	82	8.3 DMA 的工作过程	124
6.1.3 串行异步通信和串行同步通信	82	8.4 DMA 常用库函数	125
6.1.4 串行异步通信的数据传输形式	83	8.5 DMA 使用流程	130
6.1.5 波特率	83	8.6 DMA 应用设计实例: 数据传输	131
6.2 STM32 的 USART 的结构及工作方式	83	思考与练习	141
6.2.1 STM32 的 USART 的结构	83	第 9 章 STM32 的模/数转换器	142
6.2.2 STM32 串行异步通信的工作 方式	85	9.1 STM32 应用系统简介	142
6.3 USART 常用库函数	86	9.1.1 STM32 应用系统输入/输出 通道	142
6.4 USART 使用流程	89	9.1.2 ADC 的性能指标	143
6.5 USART 应用设计实例	91	9.2 STM32 的 ADC 结构	144
6.5.1 串行异步通信应用实例 1: 收发 信息	91	9.3 ADC 的工作模式	146
6.5.2 串行异步通信应用实例 2: 上位 机控制 LED 亮灭	94	9.3.1 开关、时钟及通道	146
6.6 串行通信接口抗干扰设计	97	9.3.2 模式控制	147
6.6.1 TTL 电平通信接口	97	9.3.3 中断和 DMA 请求	148
6.6.2 标准串行通信接口 RS-232C	97	9.3.4 其他功能	148
6.6.3 RS-485 双机通信接口	98	9.4 ADC 常用库函数	149
思考与练习	99	9.5 ADC 使用流程	155
第 7 章 STM32 通用定时器	100	9.6 ADC 应用设计	156
7.1 STM32 定时/计数器概述	100	9.6.1 ADC 应用实例 1: 电压采集及 传输	156
7.2 STM32 通用定时器的结构	102	9.6.2 ADC 应用实例 2: 模拟数字量 综合测控系统	163
7.2.1 时钟源	102	思考与练习	167
7.2.2 通用定时器的功能寄存器	103	第 10 章 STM32 的集成电路总线 I²C	168
7.2.3 通用定时器的外部触发及 输入/输出通道	104	10.1 I ² C 总线通信简介	168
7.3 STM32 通用定时器的功能	104	10.1.1 I ² C 总线特点	168
7.3.1 定时功能	105	10.1.2 I ² C 总线术语	169
7.3.2 计数功能	106		

10.1.3 I ² C 硬件构成	169	11.3.8 错误标志	209
10.1.4 位传输	170	11.3.9 中断	209
10.1.5 数据传输格式	171	11.4 SPI 常用库函数	210
10.2 STM32 的 I ² C 模块的功能及结构	173	11.5 SPI 使用流程	214
10.3 I ² C 的通信方式	174	11.6 SPI 应用设计实例: 读取 W25X16 的 芯片 ID	215
10.3.1 I ² C 主模式	174	思考与练习	217
10.3.2 I ² C 从模式	177	第 12 章 基于机智云平台的 STM32 嵌 入式物联网应用设计	218
10.3.3 传输错误处理	178	12.1 机智云物联网开发步骤	218
10.4 I ² C 常用库函数	180	12.2 应用实例: 基于云平台的智能 灯光远程控制系统	226
10.5 I ² C 使用流程	183	12.2.1 项目方案及实现的功能	226
10.6 I ² C 应用设计实例	184	12.2.2 STM32 系统软件设计	226
10.6.1 I ² C 应用实例 1: AT24C02 数据 存取	184	12.2.3 远程云控制 LED 的实现	229
10.6.2 I ² C 应用实例 2: 1120 - 1 电压 报警上下限设置	197	12.2.4 调试结果	229
思考与练习	200	第 13 章 基于以太网的 STM32 嵌入式 系统应用设计	232
第 11 章 STM32 的串行外设接口		13.1 以太网模型及数据的接入	232
SPI	201	13.1.1 经典以太网模型	232
11.1 SPI 总线通信简介	201	13.1.2 TCP/IP 五层结构模型	233
11.1.1 SPI 总线的组成	201	13.1.3 以太网接入方案	236
11.1.2 SPI 总线的功能	202	13.2 以太网功能开发实例: 嵌入式远程 环境监控系统	236
11.2 STM32 的 SPI 特性及结构	203	13.2.1 方案设计	236
11.3 SPI 通信的实现	205	13.2.2 程序设计	237
11.3.1 从选择管理	205	13.2.3 系统测试	238
11.3.2 时钟相位与极性	205	13.2.4 运行结果	239
11.3.3 SPI 主模式	206	参考文献	242
11.3.4 SPI 从模式	207		
11.3.5 状态标志	208		
11.3.6 CRC 校验	208		
11.3.7 利用 DMA 的 SPI 通信	209		

国际电气和电子工程师协会 (IEEE) 定义的嵌入式系统是“用于控制、监视或者辅助操作机器和设备运行的装置” (原文为 devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment, machinery or plants)。这主要是从应用上加以定义的, 从中可以看出嵌入式系统是软件和硬件的综合体, 还可以涵盖机械等附属装置。目前国内普遍认同的嵌入式系统定义是, 以计算机技术为基础, 以应用为中心, 软件、硬件可剪裁, 适合应用系统对功能可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专业计算机系统。在构成上, 嵌入式系统以微控制器及软件为核心部件, 两者缺一不可; 在特征上, 嵌入式系统具有方便、灵活地嵌入到其他应用系统的特征, 即具有很强的可嵌入性。

1.1 嵌入式系统特点及发展趋势

1.1.1 嵌入式系统特点及应用领域

按嵌入式微控制器类型划分, 嵌入式系统可分为以单片机为核心的嵌入式单片机系统、以工业计算机板为核心的嵌入式计算机系统、以 DSP 为核心组成的嵌入式数字信号处理器系统、以 FPGA 为核心的嵌入式 SOPC (System on a Programmable Chip, 可编程片上系统) 等。

嵌入式系统在含义上与传统的单片机系统和计算机系统有很多重叠部分。为了方便区分, 在实际应用中, 嵌入式系统还应该具备下述三个特征。

1) 嵌入式系统的微控制器通常是由 32 位及以上的 RISC (Reduced Instruction Set Computer, 精简指令集计算机) 处理器组成的。

2) 嵌入式系统的软件系统通常是以嵌入式操作系统为核心, 外加用户应用程序。

3) 嵌入式系统在特征上具有明显的可嵌入性。

嵌入式系统主要应用在以下领域:

1) 智能消费电子产品。嵌入式系统最为成功的是在智能设备中的应用, 如智能手机、平板电脑、家庭音响、玩具等。

2) 工业控制。目前已经有大量的 32 位嵌入式微控制器应用在工业设备中, 如打印机、工业过程控制、数字机床、电网设备检测等。

3) 医疗设备。嵌入式系统已经在医疗设备中取得广泛应用, 如血糖仪、血氧计、人工耳蜗、心电监护仪等。

4) 信息家电及家庭智能管理系统。信息家电及家庭智能管理系统方面将是嵌入式系统

未来最大的应用领域之一。例如，冰箱、空调等的网络化、智能化将引领人们的生活步入一个崭新的空间，即使用户不在家，也可以通过电话线、网络进行远程控制。又如，水、电、煤气表的远程自动抄表，以及安全防水、防盗系统，其中嵌入式专用控制芯片将代替传统的人工检查，并实现更高效、更准确和更安全的性能。目前在餐饮服务领域，如远程点菜器等，已经体现了嵌入式系统的优势。

5) 网络与通信系统。嵌入式系统将广泛用于网络与通信系统之中。例如，ARM 把针对移动互联网市场的产品分为两类，一类是智能手机，一类是平板电脑。平板电脑是介于笔记本电脑和智能手机中间的一类产品。ARM 过去在 PC 上的业务很少，但现在市场对更低功耗的移动计算平台的需求带来了新的机会，因此，ARM 在不断推出性能更高的 CPU 来拓展市场。ARM 新推出的 Cortex - A9、Cortex - A55、Cortex - A75 等处理器可以用于高端智能手机，也可用于平板电脑。现在已经有很多半导体芯片厂商在采用 ARM 开发产品并应用于智能手机和平板电脑，如高通骁龙处理器、华为海思处理器均采用 ARM 架构。

6) 环境工程。嵌入式系统在环境工程中的应用也很广泛，如水文资源实时监测、防洪体系及水土质量检测、堤坝安全、地震监测网、实时气象信息网、水源和空气污染监测。在很多环境恶劣、地况复杂的地区，依靠嵌入式系统将能够实现无人监测。

7) 机器人。嵌入式芯片的发展将使机器人在微型化、高智能方面优势更加明显，同时会大幅度降低机器人的价格，使其在工业领域和服务领域获得更广泛的应用。

1.1.2 嵌入式系统发展趋势

嵌入式系统应用经历了无操作系统、简单操作系统、实时操作系统和面向 Internet 四个阶段。21 世纪无疑是一个网络的时代，互联网的快速发展及广泛应用为嵌入式系统的发展及应用提供了良好的机遇。“人工智能”这一热词一夜之间人尽皆知，而嵌入式在其发展过程中扮演着重要角色，如图 1-1 所示。

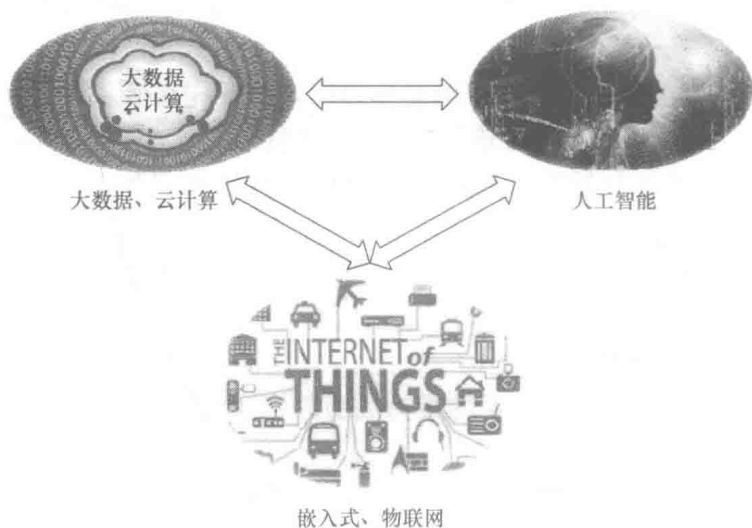


图 1-1 嵌入式与人工智能

嵌入式系统的广泛应用和互联网的发展导致了物联网概念的诞生，设备与设备之间、设

备与人之间以及人与人之间要求实时互联，导致了大量数据的产生，大数据一度成为科技前沿，每天世界各地的数据量呈指数增长，数据远程分析成为必然要求，云计算被提上日程。数据存储、传输、分析等技术的发展无形中催生了人工智能，因此人工智能看似突然出现在大众视野，实则经历了近半个世纪的漫长发展，其制约因素之一就是大数据，而嵌入式系统正是获取数据的最关键的系统之一。人工智能的发展可以说是嵌入式系统发展的产物，同时人工智能的发展要求更多、更精准的数据，更快、更方便的数据传输，这促进了嵌入式系统的发展，两者相辅相成，嵌入式系统必将进入一个更加快速的发展时期。

1.2 嵌入式处理器 ARM Cortex - M3 特点

ARM 公司自 1990 年成立以来，在 32 位和 64 位 RISC 的 CPU 开发设计上不断突破，其设计的微控制器架构已经从 v1 发展到了 v8。ARM 处理器的构架及核心见表 1-1。

表 1-1 ARM 处理器的构架及核心

构架	核心
v1	ARM1
v2	ARM2
v2a	ARM2As, ARM3
v3	ARM6, ARM600, ARM610, ARM7, ARM700, ARM710
v4	Strong ARM, ARM8, ARM10
v4T	ARM7TDMI, ARM7TDMI-S, ARM720T, ARM740T, ARM7EJ ARM9TDMI, ARM920T, ARM922T, ARM940T
v5TE	ARM9E-S, ARM10TDMI, AEM1020E
v6	ARM1136J(F)-S, ARM1176JZ(F)-S, ARM11, MPCore
v6T2	ARM1156T2(F)-S
v7	ARM Cortex - M0/3/4/7, ARM Cortex - R4/5/7/8, ARM Cortex - A5/7/8/9/15/17
v8	ARM Cortex - M23/33, ARM Cortex - R52, ARM Cortex - A32/35/53/55/57/72/73/75

ARM Cortex 处理器系列是基于 ARMv7/8 架构的产品，从尺寸和性能方面来看，既有少于 3.3 万个门电路的 ARM Cortex - M 系列，也有高性能的 ARM Cortex - A 系列。ARMv7/8 架构确保了与早期的 ARM 处理器之间良好的兼容性，既保护了客户在软件方面的投资，又为已存在的系统设计的转换提供了便捷。目前，ARM 主流系列为 Cortex，其应用领域见表 1-2。

表 1-2 ARM 主流架构分类及应用领域

系列	核心	架构	应用领域
Cortex - A	Cortex - A8/9/55/73/75	ARMv7/8	A 针对日益增长的运行需求，包括 Linux、Windows CE、Android 和 IOS 系统的消费电子和无线产品
Cortex - R	Cortex - R5/52	ARMv7/8	R 针对需要运行实时操作系统来进行控制应用的系统
Cortex - M	Cortex - M3/4/7	ARMv7	M 表示应用于当前 8/16 位单片机 MCU 的换代产品

ARM Cortex - M3 处理器是新一代的 32 位处理器，是一个高性能、低成本的开发平台，适用于微控制器、工业控制系统以及无线网络传感器等应用场合。其特点为：

1) 性能丰富成本低。专门针对微控制器应用特点而开发的 32 位 MCU，具有高性能、低成本、易应用等优点。

2) 低功耗。把睡眠模式与状态保留功能结合在一起，确保 Cortex - M3 处理器既可提供低能耗，又不影响其很高的运行性能。

3) 可配置性强。Cortex - M3 的 NVIC (Nested Vectored Interrupt Controller, 嵌套向量中断控制器) 功能提高了设计的可配置性，提供了多达 240 个具有单独优先级、动态重设优先级功能和集成系统时钟的系统中断。

4) 丰富的链接。功能和性能兼顾的良好组合，使基于 Cortex - M3 的设备可以有效处理多个 IO 通道和协议标准。

1.3 STM32 系列微控制器

意法半导体 (ST) 是世界领先的提供半导体解决方案的公司，生产信号调节、传感器、二极管、功率晶体管、存储器、射频晶体管、微控制器等多达 32 类产品。其生产的微控制器包含 8 位和 32 位，其中 STM32 系列单片机是目前最流行的 Cortex - M 微控制器。

随着技术的进步，新产品不断涌出，读者可以随时打开 ST 官网 <https://www.st.com/en/microcontrollers.html>，跟踪最新产品及系列。

1.3.1 STM32 系列单片机

STM32 单片机包含低功耗的 STM32Lx 系列、高性能的 STM32F2/4/7 系列及功耗与性能均衡的 STM32F0/1/3 系列产品。其中 STM32F1 为目前应用最多的主流微控制器，主要分为 3 个系列：基本型、增强型和互联型。基本型系列是 STM32F1 系列的入门产品，最高主频为 48MHz；增强型系列产品性能较好，主频为 72MHz，能实现高速运算；互联型相对于增强型增加了网络功能，主频为 72MHz。

STM32 系列单片机具有如下优点：

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 (Dhrystone Benchmark) 上有着出色的表现，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) 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/性能要求进行合理地优化。

3. 最大程度集成整合

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) 针对 RTC (Real Time Clock, 实时时钟) 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 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 12Mbit/s。

2) USART 接口速度高达 4.5Mbit/s。

3) SPI 接口速度可达 18Mbit/s。

4) I²C 接口速度可达 400kHz。

5) GPIO 的最大翻转频率为 18MHz。

6) PWM (Pulse Width Modulation, 脉冲宽度调制) 定时器最高可使用 72MHz 时钟输入。

1.3.2 STM32F10x 系列单片机

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 主频下。STM32F103xx 为增强型系列, STM32F105xx 和 STM32F107xx 为互联型系列, 均工作在 72MHz 主频下。其结构特点为:

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: 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 4.5Mbit/s。

- 7) ADC: 12 位, 转换时间最快为 1 μ s。
- 8) DAC: 提供 2 个通道, 12 位。
- 9) SPI: 传输速率可达 18Mbit/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 12Mbit/s。
- 14) SDIO: 传输速率为 48MHz。

1.3.3 STM32 系列单片机开发工具

目前世界上已有多种支持 STM32 系列单片机的开发工具, 其中用得最多的为 MDK - ARM 和 IAR, 见表 1-3。

表 1-3 STM32 系列单片机的开发工具

供应商	IDE	可支持的编译器	在线调试仿真器	说明
MDK - ARM	μ Vision4/5	ARW RVDS、Keiln C/C++、GUN C/C++	Keil ULink、Hitex Tanto、iSYSTEM iC3000、NohauE-MUL - ARM	μ Vision4/5 软件的 RealView MDK, ARM C/C++ 编译器和 ULink (USB/JTAG)
IAR	EWARW	IAR 的 ISO C/C++ 和拓展嵌入式 C++	AnbyICE、ARM Real-ViewICE、J - Link、MacraigorWiggler 和其他基于 RDI 的 JTAG 接口	EWARM 开发环境, IAR C/C++ 编译器和 J - Link (USB/JTAG)
Raisonance	RIDE	GUN C/C++	RLink	RIDE 开发环境, GNU C/C++ 编译器和 RLink (USB/JTAG)
Rowley	Cross - Works	GUN C/C++	CrossConnect、Macraigor Wiggler、IAR、J - Link	CrossConnect 软件的 Cross - Works, GNU C/C++ 编译器和 CrossConnect (JTAG)

随着开发工具的不断完善与提高, 还会有很多新的开发工具面世, 用户可以查询相关的官方网站, 本书所有例程采用 MDK - ARM 开发软件。

思考与练习

1. 什么是嵌入式系统? 列举三个嵌入式系统的特征, 区别于单片机系统和计算机系统。
2. 简述嵌入式系统与嵌入式操作系统之间的联系与区别。
3. 简述嵌入式系统的发展及应用。
4. 列举几个主流 ARM 架构及其应用。
5. ARMv7 架构分为哪几个系列? 各系列针对哪些应用?

6. 简述 ARM Cortex - M3 处理器的性能特点。
7. STM32F10x 处理器分为哪几个系列?
8. 简述 STM32F10x 系列处理器的优点。
9. 简述 STM32F10x 系列处理器的内部结构特点。
10. STM32F10x 系列处理器按性能分为哪几个系列? 各适合什么应用?
11. STM32 处理器常用开发工具有哪些?
12. 在 PC 上安装 MDK - ARM 开发软件, 了解开发环境。

第 2 章

嵌入式单片机 STM32 硬件基础

STM32F103 系列单片机是 ST 公司基于 32 位 ARM Cortex - M3 内核，主要面向工业控制领域推出的微控制器芯片。其集成度高，外围电路简单，配合 ST 公司提供的标准库，开发者可以快速开发高可靠性的工业级产品。STM32F103 系列应用最广泛，也是初学者最易学习的一个系列。目前，市场开发主流仍是 STM32F103 系列单片机，又称 STM32F103 系列控制器。

2.1 STM32 系列单片机外部结构

2.1.1 STM32 系列单片机命名规则

STM32F103 系列芯片包括从 36 引脚至 100 引脚不同封装形式，不同的封装和丰富的资源使得 STM32F103 系列适用于多种场合，如电动机驱动和应用控制，医疗和手持设备，PC 外设，变频器、打印机等工业设备，报警系统和视频对讲设备等。STM32 系列命名遵循一定的规则，通过名字可以确定该芯片引脚、封装、Flash 容量等信息。STM32 命名规则如图 2-1 所示。

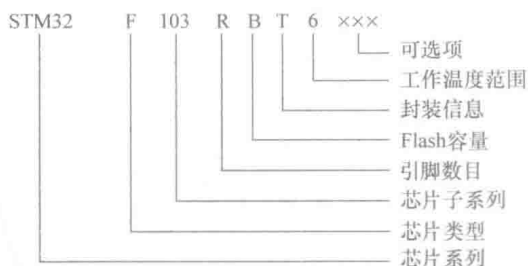


图 2-1 STM32 命名规则

- 1) 芯片系列：STM32 代表 ST 品牌 Cortex - Mx 系列内核 (ARM) 的 32 位 MCU。
- 2) 芯片类型：F—通用快闪，L—低电压 (1.65 ~ 3.6V)，W—无线系统芯片。
- 3) 芯片子系列：103—ARM Cortex - M3 内核，增强型；050—ARM Cortex - M0 内核；101—ARM Cortex - M3 内核，基本型；102—ARM Cortex - M3 内核，USB 基本型；105—ARM Cortex - M3 内核，USB 互联网型；107—ARM Cortex - M3 内核，USB 互联网型、以太网型；215/217—ARM Cortex - M3 内核，加密模块；405/407—ARM Cortex - M4 内核，不加密模块。

4) 引脚数目: R—64PIN, F—20PIN, G—28PIN, K—32PIN, T—36PIN, H—40PIN, C—48PIN, U—63PIN, O—90PIN, V—100PIN, Q—132PIN, Z—144PIN, I—176PIN。

5) Flash 容量: B—128KB Flash (中容量), 4—16KB Flash (小容量), 6—32KB Flash (小容量), 8—64KB 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) 封装信息: T—LQFP, H—BGA, U—VFQFPN, Y—WLCSP。

7) 工作温度范围: 6—-40~85℃ (工业级), 7—-40~105℃ (工业级)。

8) 可选项: 此部分可以没有, 也可以用于标示内部固件版本号。

2.1.2 STM32 系列单片机引脚功能

LQFP64 (64 引脚贴片) 封装的 STM32F103 芯片如图 2-2 所示, 各引脚按功能可分为电源、复位、时钟控制、启动配置和输入输出, 其中输入输出可作为通用输入输出, 还可经过配置实现特定的第二功能, 如 ADC、USART、I²C、SPI 等。下面按功能简要介绍各引脚, 涉及第二功能的引脚将在后面相关章节详细介绍。

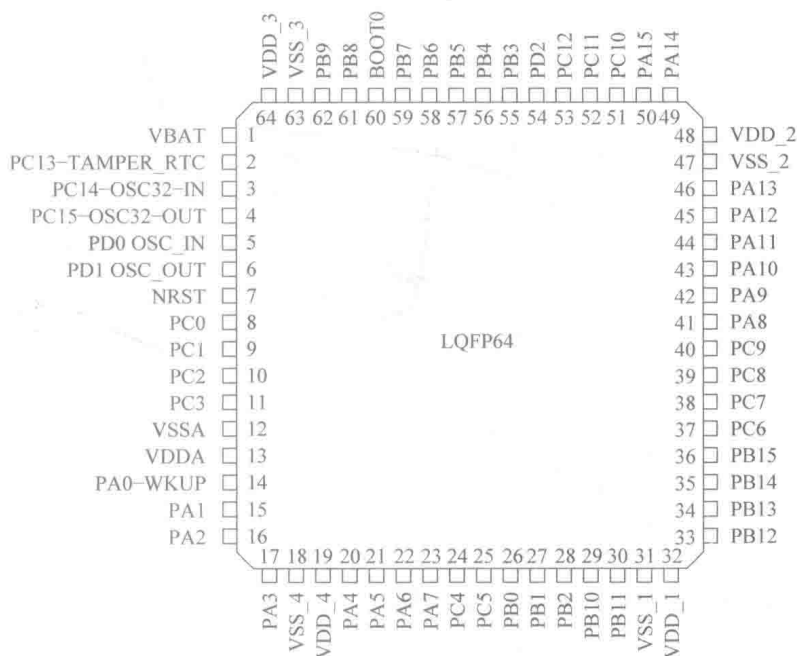


图 2-2 LQFP64 封装的 STM32F103 芯片

1. 电源: VDD_x (x=1, 2, 3, 4)、VSS_x (x=1, 2, 3, 4), VBAT, VDDA、VSSA

STM32F103 系列单片机的工作电压在 +2.0 ~ +3.6V 之间, 整个系统由 VDD_x (接 +2.0 ~ +3.6V 电源) 和 VSS_x (接地) 提供稳定的电源供应。需要注意的是:

1) 如果 ADC 被使用, VDD_x 的必须被控制在 2.4 ~ 3.6V; 如果 ADC 未被使用, VDD_x 在 2.0 ~ 3.6V。VDD_x 引脚必须连接带外部稳定电容器的电压。

2) VBAT 引脚给 RTC 单元供电, 允许 RTC 在 VDD_x 关闭时正常运行, 需接外部电池 (+1.8 ~ +3.6V), 如果没有接外部电池, VBAT 引脚需接到 VDD_x 电压上。

3) VDDA 和 VSSA 可为 ADC 单独提供电源以避免电路板的噪声干扰, VDDA 和 VSSA 引脚必须连接两个外部稳定电容器。

2. 复位: NRST

NRST 引脚出现低电平将导致系统复位, 通常加接一个按键连接到低电平以实现手动复位功能。

3. 时钟控制: OSC_IN、OSC_OUT、OSC32_IN、OSC32_OUT

OSC_IN 和 OSC_OUT 接 4 ~ 16MHz 的晶振, 为系统提供稳定的高速外部时钟; OSC32_IN 和 OSC32_OUT 接 32.768kHz 的晶振, 为 RTC 提供稳定的低速外部时钟。

4. 启动配置: BOOT0、BOOT1 (PB2)

通过设置 BOOT0 和 BOOT1 的高低电平配置 STM32F10x 的启动模式, 为便于设置可通过跳线与高低电平连接。

5. 输入输出: PAX (x = 0, 1, 2, ..., 15)、PBx (x = 0, 1, 2, ..., 15)、PCx (x = 0, 1, 2, ..., 15)、PD2

四个输入输出端口可作为通用输入输出, 有的引脚还具有第二功能 (需要配置)。

2.2 STM32 系列单片机内部结构

STM32F103 系列单片机片上资源丰富, 内核工作频率高达 72MHz, 内置高速存储器 (高达 128KB 的 Flash 和 20KB 的 SRAM), 具有丰富的 IO 端口和大量连接到内部两条 APB 总线的外设, 同时具有 2 个 12 位模/数转换器 (Analog to Digital Converter, ADC)、2 个通用 16 位定时器、2 个集成电路总线 (Inter-IC Control, I²C)、2 个串行外设接口 (Serial Peripheral Interface, SPI)、3 个通用同步异步收发器 (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter, USART)、1 个通用串行总线 (Universal Serial Bus, USB)、1 个控制器局域网络 (Controller Area Network, CAN) 等。

2.2.1 STM32F103 处理器内部总线结构

根据指令和数据所用的存储空间与总线形式的不同, 处理器分为冯·诺依曼结构和哈佛结构。冯·诺依曼结构的微处理器指令和数据共用一个存储空间和一条总线, 这样内核在取指时不能进行数据读/写, 反之亦然。哈佛结构的微处理器指令和数据存储在不同的存储空间, 采用独立的指令总线 and 数据总线, 可以同时进行取指和数据读/写操作, 从而提高了处理器的运行性能。ARM 处理器 (包括 STM32F103) 均采用哈佛结构。

STM32F103 的总线系统由驱动单元、被动单元和总线矩阵三部分组成, 如图 2-3 所示。

1. 驱动单元

1) 指令总线 (ICode): 将 Cortex-M3 内核的指令总线与 Flash 指令接口相连接, 取指操作在该总线上进行。