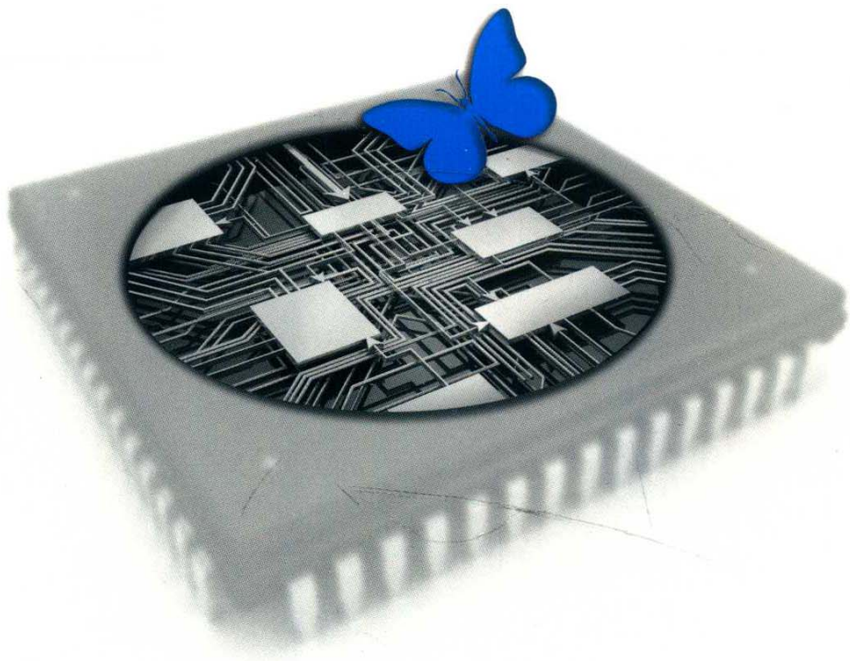
HZ BOOKS
华章科技

本书基于图形化软件平台STM32CubeMX生成初始代码。
涵盖ARM Cortex内核的STM32F072VBT6微控制器大部分外设。
使用C语言及HAL固件库开发，配套源代码，由浅入深，快速入门。

电子与嵌入式系统
设计丛书



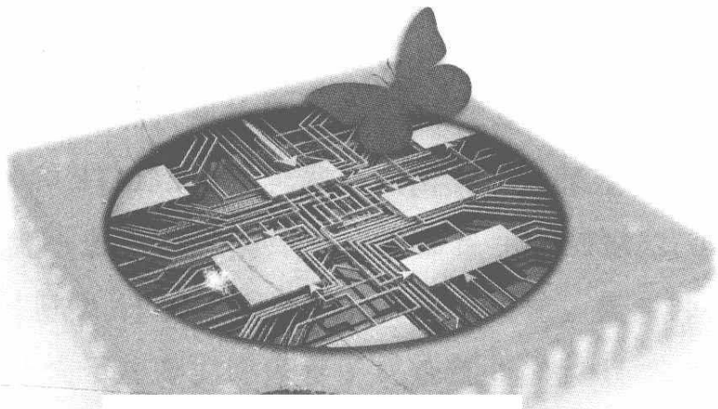
STM32F0实战

基于HAL库开发

高显生 编著

机械工业出版社
China Machine Press

电子与嵌入式系统
设计丛书



STM32F0实战

基于HAL库开发

高显生 编著

机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目（CIP）数据

STM32F0 实战：基于 HAL 库开发 / 高显生编著 . —北京：机械工业出版社，2018.10
（电子与嵌入式系统设计丛书）

ISBN 978-7-111-61296-4

I. S… II. 高… III. 单片微型计算机 – 程序设计 IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 254508 号

STM32F0 实战：基于 HAL 库开发

出版发行：机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码：100037）
责任编辑：余 洁 责任校对：殷 虹
印 刷：中国电影出版社印刷厂 版 次：2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
开 本：186mm × 240mm 1/16 印 张：47.25
书 号：ISBN 978-7-111-61296-4 定 价：129.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
客服热线：（010）88379426 88361066 投稿热线：（010）88379604
购书热线：（010）68326294 88379649 68995259 读者信箱：hzit@hzbook.com

前　言

意法半导体公司（下文简称意法公司）近年来在国内单片机市场上的业绩可圈可点，旗下STM32系列单片机凭借其高性能、高性价比成为32位单片机的市场主力，在如今的人才市场上，会不会使用STM8和STM32单片机往往是用人方选择硬件工程师的条件之一，其重要性和业界的影响力可见一斑。在意法公司的产品线中，STM32F0系列是32位微控制器中的入门级产品。该系列基于ARM公司的Cortex-M0内核，集实时性能、低功耗运算和STM32平台的先进架构及外设于一身，既保留了对传统8位和16位市场的压倒性竞争力，又可以传承STM32用户的开发平台和程序代码，是入门STM32开发的不二之选。本书将以STM32F0系列微控制器中的旗舰型号STM32F072VBT6微控制器为例，从整体架构、存储器、时钟树、异常处理、DMA和外设模块等方面做详细的介绍，特别是对微控制器片内的bxCAN模块和USB模块的原理和开发方法进行重点介绍。

学习ARM微控制器的方法其实与学习8位机并无两样，只要找准入门的方法就会事半功倍。在接触STM32F0系列的32位单片机之前，你一定也曾经是8位单片机的“发烧友”，回想当初我们使用8051单片机点亮一个LED时，那种激动的心情至今仍难以忘怀。在此笔者向大家推荐与当初学习8051单片机相同的方法，即从一个简单的实验入手，如点亮一个LED，由局部到整体，逐步积累开发经验，增强信心，循序渐进，由浅入深。要特别注意的是不要在你还没有学会使用寄存器和函数来操作STM32的时候，就贸然研究操作系统移植、图形用户界面（GUI）以及上位机开发等。这不但会让你对学习STM32望而却步，还会使你对学习嵌入式开发的信心丧失，这是最可怕的事情。本书不拘泥于概念和原理的探究，而是立足于实践，从系统板基础电路起步，一章一个例子、一章一个实验、一章一个总结、一个模块一套或多套代码，从最基本的I/O口学起，逐步拓展到定时器、时钟、串行口、ADC等，届时你会发现其实STM32与8位单片机也没有太大差别。

近期，意法公司专门针对旗下不同系列的微控制器产品推出了一款全新的开发软件——STM32CubeMX。该软件允许用户使用图形化界面简单直观地对目标微控制器的引脚、时钟等进行初始化设置，并能针对不同的集成开发环境，如EWARM、MDK-ARM、

TrueSTUDIO 等快速生成开发项目，这无疑是 STM32 入门用户最重大的利好消息。本书将利用 STM32CubeMX 作为项目建立和代码初始化工具，快速生成 STM32F0 系列微控制器的程序架构，并在 MDK-ARM 软件上对代码进行进一步的编辑修改，直至完成最终的项目开发。

作为 STM32 微控制器开发的新手，往往在从寄存器开发入手还是从固件库开发入手的选择上纠结不定。业界对开发 STM32 系列微控制器的方法通常也持有两种不同的观点：一种认为寄存器开发能使开发者明晰单片机内部结构，编写出简洁的代码，执行效率高；而另一种则认为固件库开发能避开对寄存器操作，减轻编程者的压力，还可以为开发者访问底层硬件提供一个中间应用编程界面（API），并方便上层软件的调用。笔者认为，作为开发 STM32 的硬件工程师，以上两种开发方法都应该掌握，原因是寄存器开发能加深对芯片内部结构和功能的理解，是微控制器入门的必经之路，而固件库开发则是一种趋势，它的编程思想更加先进，对应代码更规范，更具有可读性。本书基于 STM32CubeMX 软件自带的 HAL 库开发——HAL 库不同于以往的标准外设库，是意法公司最新推出的替代标准外设库的产品，书内附 HAL 库、函数、结构、常量等的详细说明及开发实例。

为了配合本书的出版，相应的开发板和视频教程“STM32 奇幻漂流记”也会在近期由“睿芯美微”淘宝网店同步推出，网址为 http://shop59521455.taobao.com。由于作者水平有限，加之写作时间仓促，书中错误在所难免，在此恳请读者和有识之士给予批评斧正，也欢迎大家通过互联网与笔者分享 STM32 的开发心得。

作者 QQ：710878209，微信号：gpmza2000。

本书得以出版，首先要特别感谢机械工业出版社华章公司朱捷等资深编辑，他们对本书的选题、立意和编纂给予了大力支持和悉心指导。其次要感谢的是广大热心网友，你们为本书内容、结构、写法献言献策，给予了莫大关心和支持。再次要感谢笔者的家人，在笔者奋笔疾书的日日夜夜照顾饮食起居，让笔者能更加专注于本书的创作。

尺有所短，寸有所长。每个人的天赋迥异，如果你发现自己对电子产业时常会萌发出一些新奇的想法或创意，请一定将其捕捉住，并且尽早阅读本书，那时你会发现使用 STM32 系列微控制器会让你的想法变为现实，会让你的创意尽情表达，这也许就是你走上研发之路的起点，你的人生也会因此而更加精彩！再次感谢你选择本书，祝学业有成，事业顺达！

高显生

于哈尔滨

目　录

第一篇

系统架构

STM32F0 系列是意法半导体 32 位微控制器中的入门级产品。但入门不代表低性能，相反，STM32F0 系列微控制器恰恰是集高运算能力和低功耗特性于一身的、极具竞争力的产品。全系列微控制器基于 ARM 公司的 Cortex-M0 高性能内核，集实时性、低功耗运算和 STM32 平台的先进架构及外设于一身，既保留了对传统 8 位和 16 位微控制器市场的压倒性竞争力，又传承了 STM32 用户的开发平台和程序代码，为成本敏感型应用带来了更加灵活的选择。不仅如此，STM32F0 系列微控制器通过集成了 USB 2.0 和 CAN 总线接口，提供了更加丰富的通信功能选项，成为智能电话、通信网关、智能能源器件、多媒体设备、游戏终端等众多便携式消费类应用的理想选择。

本篇将以 STM32F072VBT6 微控制器为例，重点讲述片内系统架构、存储器、系统配置、时钟以及电源管理等内容。在编程方法上，使用了 STM32CubeMX 软件生成开发项目，并且完成对时钟、外设模块的初始化，之后编辑用户应用程序源文件，使用 STM32CubeMX 软件提供的 HAL 库来实现对外设模块的运行控制。

第 1 章
“芯”系 ARM

在剑桥郊外一个不起眼的商业园区中，坐落着几栋随意排列的办公楼，这就是英国最成功的科技公司之一——ARM 公司的总部所在地。也许你对 ARM 这个名字还不太熟悉，但它的产品却在几乎所有智能手机中处于核心地位。从本章开始，我们将一起步入 ARM 的世界，领略它惊人的运算和处理能力。

1.1 强劲的 ARM 芯

ARM（Advanced RISC Machines）公司是微控制器行业的一家知名企业，设计了大量高性能、廉价、低耗能的 RISC 微控制器和相关技术及软件。通过将其技术授权给世界上许多著名的半导体、软件和 OEM 厂商，ARM 公司成为许多全球性 RISC 标准的缔造者。目前总共有 30 余家半导体公司与 ARM 签订了硬件技术使用许可协议，其中包括 Intel、IBM、LG 半导体、NEC、SONY、飞利浦和国家半导体等知名企业。

1.1.1 最成功的科技公司

采用 ARM 技术知识产权的微处理器已遍及工业控制、消费类电子产品、通信系统、网络系统、无线系统等各类产品市场，基于 ARM 技术的微处理器应用约占 32 位 RISC 微处理器 75% 以上的市场份额。目前，全世界超过 95% 的智能手机和平板电脑都采用 ARM 架构，ARM 技术正在逐步渗入我们生活的方方面面。

20 世纪 90 年代，ARM 业绩平平，处理器的出货量徘徊不前。由于资金短缺，ARM 做出了一个意义深远的决定，不再制造芯片，只将芯片的设计方案授权给其他公司，由它们来生产。正是这个模式，最终使得 ARM 芯片遍地开花。进入 21 世纪，由于手机制造行业的快速发展，出货量呈现爆炸式增长，ARM 处理器占据了全球智能手机市场的主导地位。2016 年 7 月，ARM 被日本软银收购，并欲成为下一个潜力巨大的科技市场即物联网的领导者。

在传统的计算设备中，如笔记本电脑、台式计算机和服务器等，Intel 和 AMD 两家公司生产的处理器占据了绝大多数的市场份额。应当说，单纯从计算能力来讲，Intel 和 AMD 的处理器都是非常强大的，大量机器运行的操作系统也都依靠这两家公司的芯片产品，包括

Windows、Mac OS 和 Linux。但强大的计算能力带来的是功耗的成倍提升，以 Intel 的处理器为例，其平均 80W 的功率显然不是一般移动设备所能承受的。而由 ARM 公司授权生产的处理器运行功率非常小，一个多核心的 ARM 处理器大约只有 4W 的功率，并能让整个系统都运行在一个芯片上。这一特点使其产品特别适合用于个人电子设备，更小的功率意味着更小的占用空间、更好的散热和更加经济的成本。这也是 ARM 处理器成功的关键。

1.1.2 ARMv6-M 架构

Cortex 是 ARM 公司一个处理器系列的名称。ARM 公司最初的处理器产品都以数字命名，如 ARM7、ARM9 和 ARM11 等。在 ARM11 之后，新推出的处理器产品则改用 Cortex 命名。Cortex 系列基于先进的 ARMv7 架构。按照应用领域不同，基于 ARMv7 架构的 Cortex 处理器系列所采用的技术也不尽相同：基于 v7A 的称为 Cortex-A 系列，定位为应用处理器，支持复杂的运算，主要面向尖端的、基于虚拟内存的操作系统和用户应用，代表型号如 Cortex-A9；基于 v7R 的称为 Cortex-R 系列，定位为实时高性能处理器，主要针对实时系统的应用，如硬盘控制器和汽车控制系统等，代表型号为 Cortex-R4；基于 v7M 的称为 Cortex-M 系列，定位为微控制器处理器，用于工业控制和低成本消费产品等嵌入式系统，代表型号为 Cortex-M3。我们所熟悉的 STM32F103xx 就是基于 Cortex-M3 内核的微控制器产品。

也许好多好的想法都源于偶然，就像牛顿的万有引力定律与苹果的关系一样。在基于 Cortex-M3 内核的微控制器产品获得成功后，一个全新的设计理念诞生了，这就是基于 Cortex-M0 的新系列微控制器产品。Cortex-M0 的设计理念源于酒吧里几位工程师的对话。作为 ARM 的开发者，他们都在寻找一种很小的 32 位处理器，这个想法很快就成为一个成熟的项目（代号为 Swift），于是在 2009 年，Cortex-M0 设计完成，并在很短的时间里便成为最成功的 ARM 处理器产品之一。

Cortex-M0 系列并没有基于传统的 ARMv7 架构，而是在 Cortex-M3 的基础上，在易用性和低功耗方面加以改进，以 ARMv7-M 架构的异常处理和调试特性为基础，使用了 ARMv6 架构的 Thumb 指令集，从而设计出了崭新的 ARMv6-M 架构。

1.1.3 Cortex-M0 处理器简介

Cortex-M0 系列处理器具有低功耗和操作简单的特点，主要面向的是入门级市场。为了实现这一目的，并且能够保留 Cortex-M3 特有的先进高端特性，Cortex-M0 系列的硅片面积进一步缩小，并且代码量极少，这使得该系列处理器能够在低成本应用中实现 32 位的高性能。Cortex-M3 和 Cortex-M0 指令集之间的对应关系如图 1-1 所示。

不仅如此，为了降低功耗，微控制器的结构也做了重大修改，从哈佛结构改为冯·诺依曼结构（单总线接口），进一步降低了系统的复杂性。Cortex-M0 使用 32 位的精简指令集（RISC）。该指令集被称为 Thumb，其中增加了几条 ARMv6 架构的指令，并且纳入了 Thumb-2 指令集的部分指令。Cortex-M0 处理器的内部结构如图 1-2 所示。

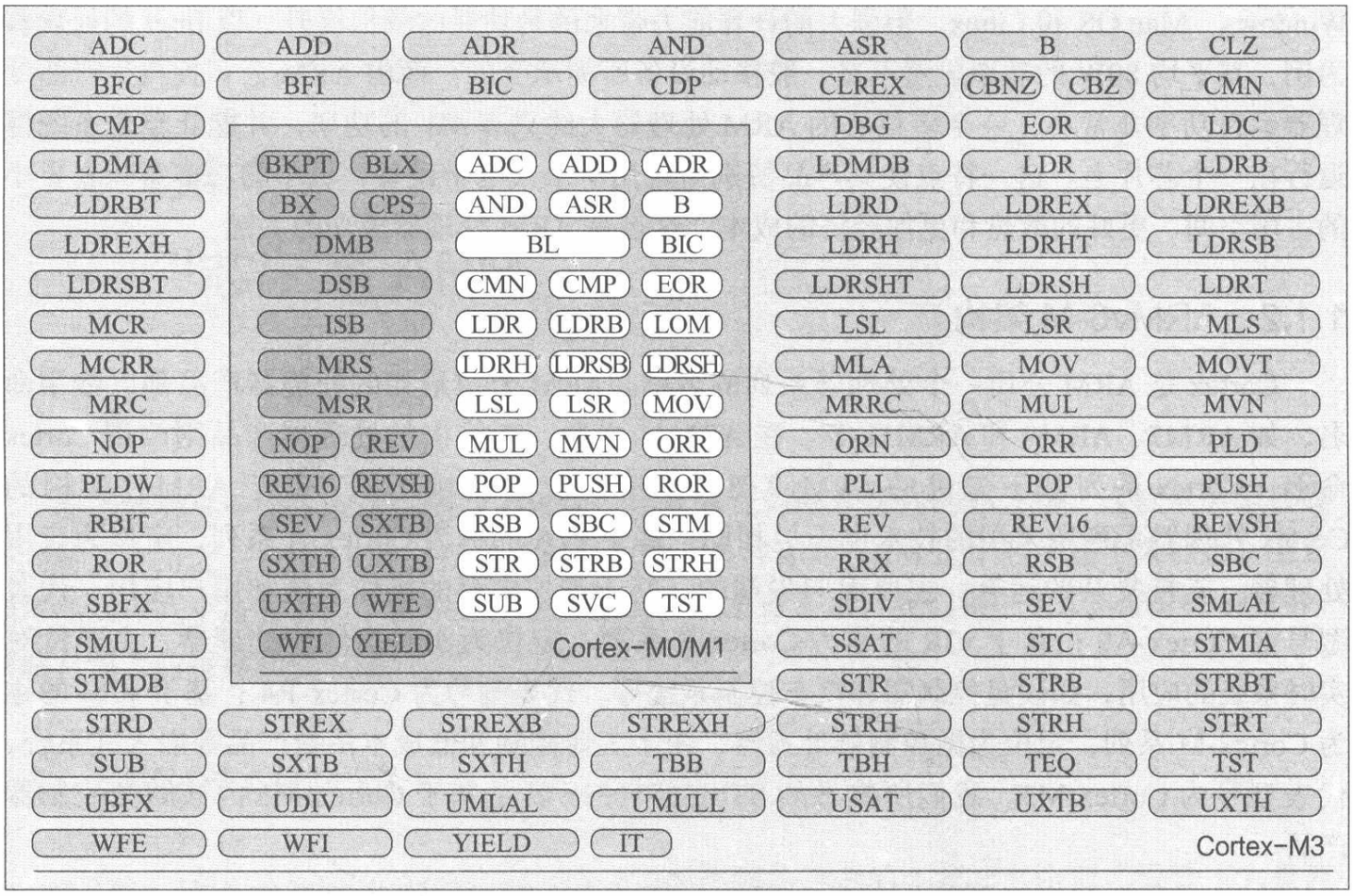


图 1-1 Cortex-M0 指令集（图片源自 ST 技术手册）

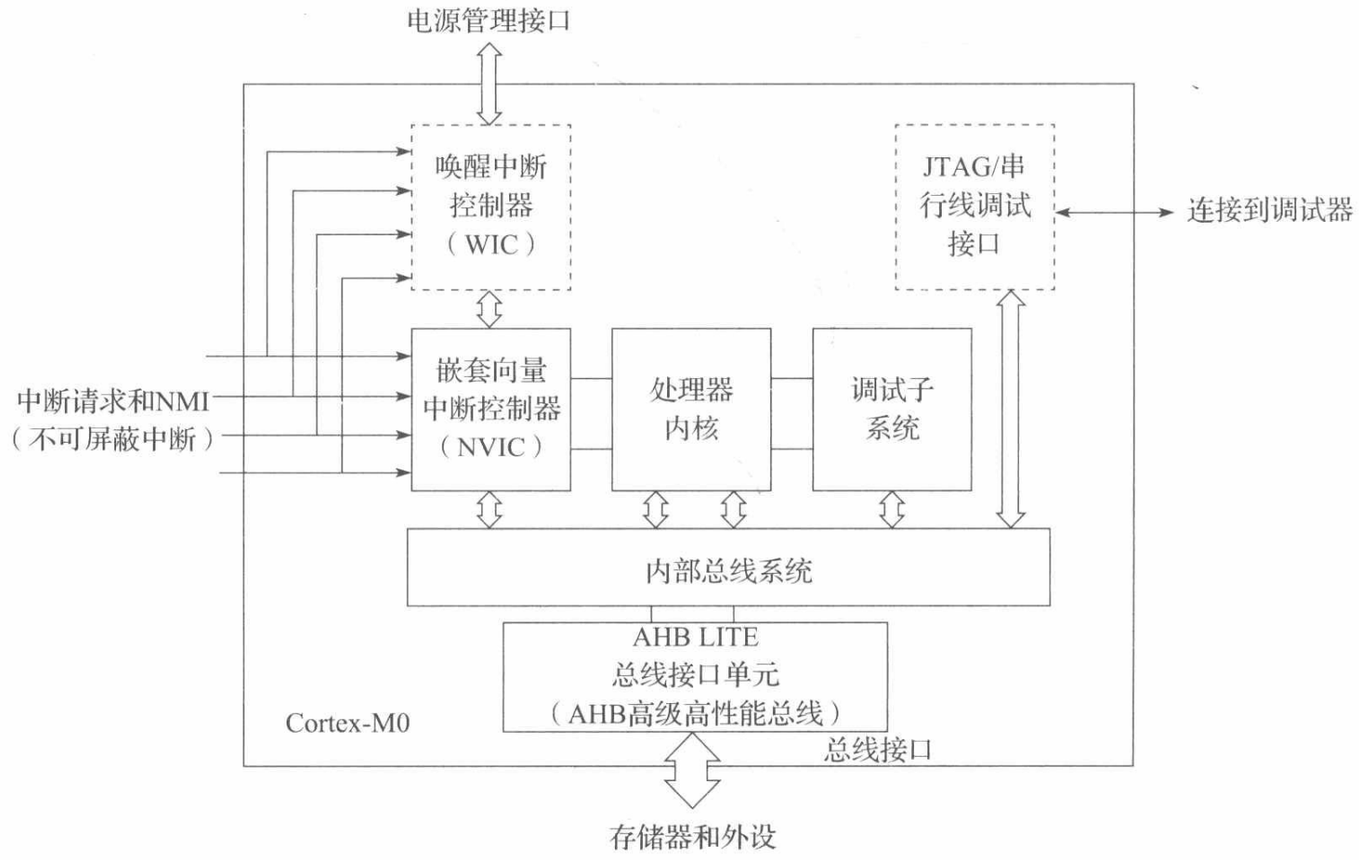


图 1-2 Cortex-M0 处理器的内部结构

Cortex-M0 处理器的各部分功能如下。

1）处理器内核包含寄存器组、算术逻辑单元（ALU）、数据总线和控制逻辑。按照设计要求，流水线可以工作在取指、译码和执行三种状态下。

2）嵌套向量中断控制器（NVIC）用于处理最多 32 个中断请求和一个不可屏蔽中断（NMI）输入，NVIC 需要比较正在执行中断和处于请求状态中断的优先级，然后自动执行高优先级的中断。

3）唤醒中断控制器（WIC）在低功耗应用中使用。当微控制器的大部分模块关闭后，微控制器会进入待机状态。此时，WIC 可以在 NVIC 和处理器处于休眠的情况下执行中断监测功能，当 WIC 检测到一个中断时，会通知电源管理器给系统上电，让 NVIC 和处理器内核执行剩下的中断过程。

4）调试子系统由多个模块构成，用于处理调试控制、程序断点和数据监视点。当调试进行时，处理器内核会自动进入暂停状态。

5）JTAG 和 SWD 接口提供了通向内部总线系统和调试功能的入口。JTAG 一般用作测试功能，而 SWD 则是一种新型接口，只需两根线（时钟线和数据线）就可以完成芯片编程或实现与 JTAG 相同的调试功能。

6）内部总线系统、处理器内核的数据通路以及 AHB-LITE 总线均为 32 位宽，其中 AHB-LITE 是片上总线协议，应用于多款 ARM 处理器中。AMBA 是 ARM 开发的总线架构，已经广泛应用于 IC 设计领域。

1.1.4 Cortex-M0 处理器的特点

Cortex-M0 微控制器功耗非常低、门数量少、代码占用空间小，能在 8 位微控制器的价位上获得 32 位微控制器的性能，可明显降低系统成本，同时能保留对功能强大的 Cortex-M3 微控制器开发工具的兼容能力。Cortex-M0 微控制器的主要特点如下。

1. 功耗低

降低功耗是 Cortex-M0 处理器的设计初衷，在使用 65nm 半导体制造工艺时，处理器的功耗为 12μW/MHz，在 180nm 工艺时功耗也仅为 85μW/MHz，这对于 32 位处理器来说已经是很低的水平了。在 Cortex-M0 处理器的开发过程中，ARM 应用了多种技术和优化措施，以确保硅片面积尽量小，并对处理器的每一部分都经过了小心处理和反复验证以降低功耗。通过尽量减少门数量，直接降低了芯片的动态功耗和漏电流：最低配置的 ARM 处理器仅需 12 000 个门；为了追求更佳的性能，门的数量通常控制在 17 000 ～ 25 000 个，这已经同一般的 16 位处理器差不多了，但性能却是 16 位处理器的两倍有余。

2. 效率高

Cortex-M0 处理器拥有高效率的架构，这主要归功于 Thumb 指令集以及高度优化的硬件设计，可以使用较低的时钟频率来降低动态电流并获取高性能。Cortex-M0 处理器片内有快速乘法器（单周期）和小型乘法器（32 周期）可供选择，在使用快速乘法器时，处理能力可以达到 0.9 DMIPS/MHz，而使用小型乘法器时，可以达到 0.85 DMIPS/MHz。这个性能与老