



### 本书特色

- >> 以两轮小型移动机器人作为学习平台
- >> 采用DIY ( Do It Yourself ) 和LBD ( Learning By Doing ) 方式
- >> 按工作导向理念着重培养工程实践能力
- >> 配以形象生动的案例, 潜移默化中获得嵌入式开发的编程智慧

# 基于ARM Cortex-M3的STM32系列 嵌入式微控制器应用实践 (第2版)

彭刚 秦志强 姚昱 ◎ 编著

武汉原创嵌入式工作室  
深圳市中科鸥鹏智能科技有限公司 ◎ 审校



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

工作导向创新实践教材

# 基于 ARM Cortex-M3 的 STM32 系列嵌入式微控制器应用实践 (第2版)

彭 刚 秦志强 姚 昱 编著

武汉原创嵌入式工作室

深圳市中科鸥鹏智能科技有限公司

审校

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

## 内 容 简 介

本书介绍了意法半导体 (STMicroelectronics, ST) 公司的 32 位基于 ARM Cortex-M3 内核的 STM32 单片机应用与实践。通过“学中做、做中学”, 即 DIY (Do It Yourself) 和 LBD (Learning By Doing) 的方式, 按照工作导向的思路展开教学与实践学习, 循序渐进地介绍和构建若干典型 STM32 单片机应用系统的硬件和软件, 以及相关传感器电路, 将 STM32 单片机的外围引脚特性、内部结构原理、片上外设资源、开发设计方法和应用软件编程等知识传授给学生, 对传统的教学方法和教学体系进行创新, 力求解决嵌入式系统课程抽象与难学的问题。

全书通俗易懂、内容丰富, 可作为高等院校和职业技术学院的计算机、电子信息、自动化、电力电气、电子技术及机电一体化等相关专业的“32 位高级单片机原理与应用”、“基于 ARM Cortex 内核的单片机系统开发”等课程的教材和教学参考书, 也可以作为工程实训、电子制作与竞赛的实践教材和实验配套教材, 同时还可以供广大从事自动控制、智能仪器仪表、电力电子、机电一体化等系统开发和设计的工程技术人员、教师或者个人参考自学使用, 并可作为 ARM 相关应用与培训课程的参考书。如需本书配套的 STM32 微控制器教学实验开发板及各种器件可与深圳市中科鸥鹏智能科技有限公司 ([www.szopen.cn](http://www.szopen.cn)) 联系。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

基于 ARM Cortex-M3 的 STM32 系列嵌入式微控制器应用实践 / 彭刚, 秦志强, 姚昱编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2017.1

ISBN 978-7-121-30435-4

I. ①基… II. ①彭… ②秦… ③姚… III. ①微控制器—高等学校—教材 IV. ①TP332.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 284525 号

策划编辑: 王昭松

责任编辑: 王昭松

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 23.75 字数: 608 千字

版 次: 2011 年 1 月第 1 版

2017 年 1 月第 2 版

印 次: 2017 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 3 000 册 定价: 55.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zlts@phei.com.cn](mailto:zlts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: (010) 88254015 [wangzs@phei.com.cn](mailto:wangzs@phei.com.cn) QQ: 83169290。

## 第 2 版前言

“工作导向创新实践教材”系列丛书距今已出版十年，得到了许多高等本科院校和职业技术学院的关心与厚爱，在此感谢所有使用过此系列丛书的读者。

工作导向的概念，不只是一个简单的概念游戏，而是包含了深刻的哲理。学习的目的，特别是对于未来想从事工程师职业的学生而言，不仅仅是学习某一个知识体系，如单片机的知识体系或者 C 语言的知识体系，而是应该更进一步，是要获得如何利用这些知识去解决实际工程问题的能力，也就是动手实践能力。《论工程教育的科学主导与工程回归》（秦志强著，高等工程教育研究，2005 年 5 期）一文中指出：抽象的“道”（知识）必须与实际的系统结合，才能发挥其作用。本书编著者经与多位企业经理探讨，总结出如图 0.1 所示的“嵌入式与电子工程师能力与素质培养体系架构图”。

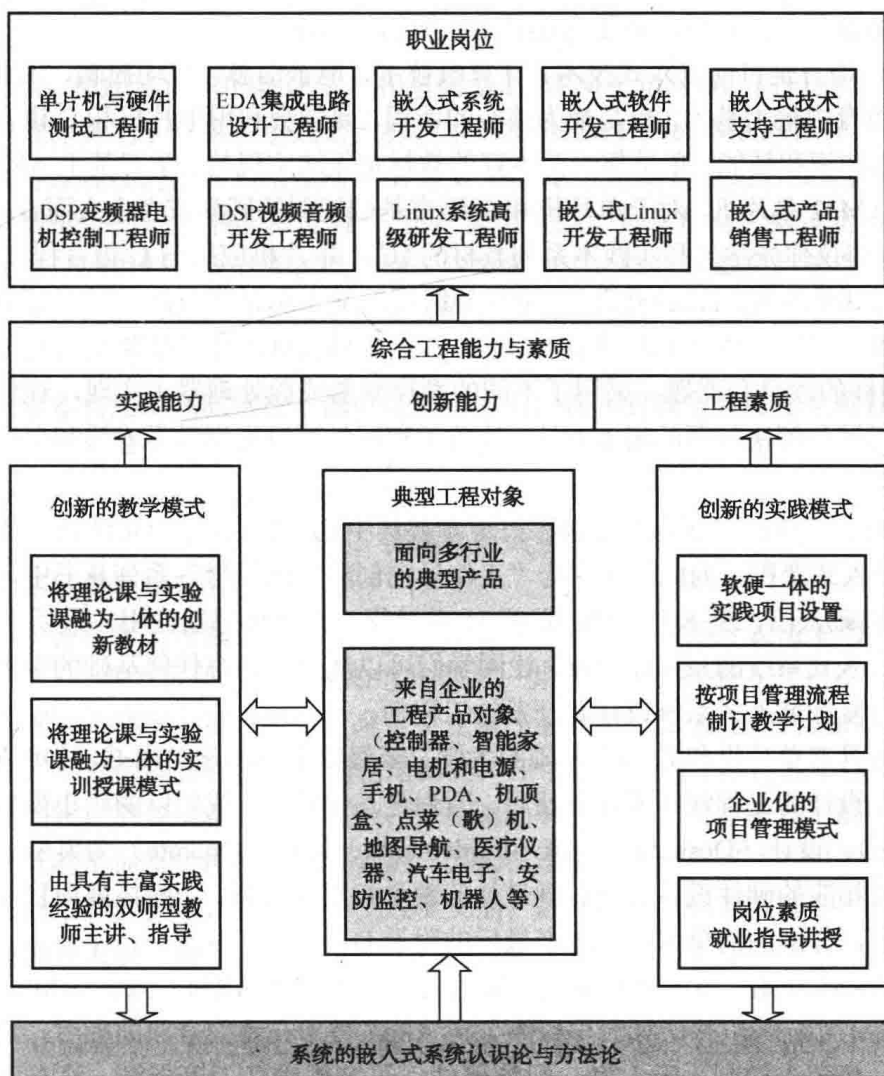


图 0.1 嵌入式与电子工程师能力与素质培养体系架构图

传统的嵌入式系统教材，基本上都是为了给学生建立知识体系，教学的结果却是不仅知识体系建立不起来，动手能力就更不用提了。工程师是为了解决问题，这种解决问题的能力只有从实践中才能获得。同时，单纯的实践也无法获得真正的能力，关键是如何从实践的经验和体会中，归纳出共性的知识，建立起知识体系，然后再将这些知识重新应用到新的实践中去。这也是当今的大学生要在未来的实际工作（无论是在企业研发还是在高校做研究）中所必须采取的学习和工作方法。因此，如何在大学三年或者四年中，掌握这种自我学习和提高的方法，是高等教育和工程教育改革的根本目的。而相应教材的编写，就是应该按照这种在未来的实际工作中学习和工作的方法来编写。做到了这一点，才是真正实践了工作导向的哲学理念：实践、归纳、总结和再实践。

因此，在使用“工作导向创新实践教材”系列丛书时，可以围绕典型的“工程对象或产品”，采用“基于工作过程”的教学法，按照“任务驱动—实践—归纳—总结—再实践”的教学模式进行教学，打破“讲课+实验”的传统教学模式，使学生在“学中做、做中学”，这样才能归纳、理解、总结出共性的知识，并建立起某个领域的知识体系。

单片机和 C 语言是目前嵌入式技术、计算机技术、电子信息、自动控制、工业电气、机电一体化等工程教育中最为基本，也是最为核心的课程。要学会利用单片机和 C 语言去实际问题，掌握核心知识和技能，单单靠一两本好的教材是无法实现的。学习基于 ARM Cortex-M3 内核的 32 位 STM32 单片机，对于单片机和 C 语言基础较弱的同学或者个人而言，也许会感觉比较困难。这时建议你先学习和实践本系列教材的《C51 单片机应用与 C 语言程序设计》或《单片机嵌入式系统编程与接口设计实践》。掌握好编程的基本思路和方法，并了解单片机的输入和输出接口特性，然后再使用本教材学习。同时，本系列教材还有《AVR 单片机与小型机器人制作》。对于同样的项目和课题，采用了不同的微控制器或微处理器去实现，让你能够从中掌握和理解分析问题和解决问题的根本方法，让教师和同学可以根据教学安排和自己的需要选择硬件平台。

只有学习完单片机和 C 语言并已经很好地掌握其中的知识点，才有可能进一步学习 ARM、Linux 等高级嵌入式课程。为此，在这套“工作导向创新实践教材”系列丛书中，形成从电子技术和 C 语言基础入门，到 8 位 AVR 或者 51 单片机，再到传感器应用，最后到 32 位 ARM 单片机等高端嵌入式系统的系列化教材，让同学们可以从一个没有任何基础的学生循序渐进地成长为可以进行复杂嵌入式系统设计和开发的工程师。

本书可作为具有单片机和 C 语言基础的大学三年级以上学生学习用书，还可以供其他希望学习嵌入式系统设计的工程师和爱好者使用。因为是工作导向，我们以两轮小型移动机器人的构思（Conceive）、设计（Design）、实施（Implement）、运行（Operate）为典型项目，所以每套教材最好配套相应的硬件设备方能达到最佳的教学和学习效果。一些拓展项目需要用到电子元器件和传感器，详细的清单可参考本书最后的附录 D。

从我接触 ARM 开始，就非常喜欢这个嵌入式处理器，从 ARM7，到 ARM9 和 ARM11，以及后来的 ARM Cortex，并切身参与和体会到 ARM 技术在我们身边的应用：消费电子、手机、工业测控、机器人控制、无人机、智能硬件、可穿戴设备、新能源、汽车电子、智能家居、物联网、无线传感器网络、医疗电子和航空航天系统。2008 年暑期，在华中科技大学召开的嵌入式技术研讨会上，时任 ARM 中国总裁的谭军博士与笔者交流了 ARM Cortex 内核在 MCU 方面的应用情况，笔者感觉到这个内核的广阔前景，因为越来越多的 MCU 应用对信号采集、人机界面、通信接口提出了更高的要求。这些年越来越多地发现：大多数学习 ARM 处

理器的学生或者个人上手较困难。个人感觉其中一个原因可能是 ARM 嵌入式处理器将内部总线分为不同速度总线：AHB 和 APB，即高速的系统总线和慢速的外设总线，其实这相当于 PC 主板中的北桥芯片所外接的高速系统总线和南桥芯片所接的外设总线。基于 ARM Cortex 内核的 MCU 内部结构与普通的 8/16 位单片机在系统结构上最大的区别就在这里。一般的单片机只有 1 个系统时钟频率，而基于 ARM Cortex 的 MCU 可以给内核和不同外设模块提供不同的时钟频率，加上片内各种外设众多（集成度高），于是多了很多在普通的 8/16 位单片机领域中没有的内容（如 DMA 等），造成了难学的局面。笔者建议读者可以先尝试简单了解一下 ARM7 或 ARM9 的体系结构，毕竟 Cortex 内核是基于 ARMv7 的，而 ARM7 嵌入式处理器使用的是 ARMv4，ARM9 嵌入式处理器使用的是 ARMv4 或者 ARMv5 体系结构，ARM10 嵌入式处理器使用的是 ARMv5，ARM11 嵌入式处理器使用的是 ARMv6 体系结构，因此，ARM Cortex 内核要先进和复杂些。

为了降低学习难度，本书各章节在讲述具体内容时，以任务为驱动，通过“学中做、做中学”，即 DIY（Do It Yourself）和 LBD（Learning By Doing）的方式，介绍和讲解所需要用到的新知识、新技能，按照认识论的规律学习和掌握基于 ARM Cortex-M3 内核的 STM32 单片机技术及其应用编程。有别于数据手册式的教材，本书将 ARM Cortex-M3 内核介绍、STM32 单片机的内部结构等原理性的内容列出在附录 B 中，各个章节也没有繁冗的寄存器说明（参见 ST 公司网页上的数据手册或本书配套资料），旨在突出重点。每章都有一些读者可能在学习过程中涉及的相关知识的讲解，希望读者能掌握一些背景知识；并且每章最后都有工程素质和技能归纳，启发学生进行知识的归纳和系统化。同时，附录 B 中也对 STM32 单片机原理性的内容做了进一步的解释和归纳，其内容很重要，务必引起注意。

无论是大学本科还是高职院校，都可以采用本书，具体的教学安排完全可以根据学校原有的教学计划，只是对上课的方式要进行调整，不必再单独开设理论和实验课程，项目拓展课程可以根据每个学校的情况灵活设置，没有必要统一。教师可在教学过程中增加一系列竞赛环节，使整个教学和学习过程充满挑战和乐趣，提高学习效果，并培养每个学生的理论联系实际、科学主导工程的系统世界观和方法论。

另外，书中各章有关内容有意将中文和英文进行对照，同时部分表格采用英文（参考芯片英文数据手册），一是为了让读者准确知道其含义，并掌握一定的嵌入式系统专业术语；二是希望读者在编程时不要用“汉语拼音”来定义变量和函数名，养成良好的编码风格，毕竟程序是用英文写的。本书例程文件名及代码也是如此。在帮助读者循序渐进地掌握 STM32 单片机原理与应用的同时，笔者也希望通过这种“任务驱动”的方式，引导读者了解如何去探索并学习新的技术，可能是你在学校里没有学到的，因为在这个技术发展迅速的世界，今后你自己可能会接触到各种最新的技术，资料是中文或英文的。这样做也是作为教师的一份责任：不仅仅授人以鱼，更要授人以“渔”。

本书的内容主要包括 STM32 单片机的时钟、I/O、中断、定时器、串口、显示接口、ADC、DMA、RTC、电源控制、看门狗、DAC 等，但没有涉及 CAN、USB、uCOS 移植等方面的内容（包含在高级实践教材中）。读者从本书中掌握了 STM32 单片机的基本原理后，加上良好的编程基础和学习方法，可以进一步学习这些内容。本书提供了基于 V1.0 版和 V2.0 版 STM32 固件库（FWLib）的参考例程，书中各章例程基于 V1.0 版固件库，但由于 STM32 固件库的优秀架构，使得用户应用程序的代码无须修改或少量修改，就可以在这两个版本固件库下运行。目前（2016 年 9 月，STM32 单片机最新版本的固件库为 V4.0 版，相比 V1.0 版和 V2.0 版，从

V3.0 版开始, 固件库改动较大。若要升级到目前常用的 V3.5 版或 V4.0 版固件库, 可参考 ST 公司的在线资料 ([www.stmcu.com.cn](http://www.stmcu.com.cn) 和 [www.st.com](http://www.st.com)), 以及关注微信号: STM32 单片机。

同时, 本书大量参考和引用了 ARM 公司 ([www.arm.com](http://www.arm.com)) 的技术参考手册和 ST 公司的芯片数据手册, 这些已经得到了 ARM 公司和 ST 公司的授权。所附配套资源包含开发工具、教学开发板硬件资料、基于 V1.0 版和 V2.0 版 FWLib 的各章例程源码、原版中英文数据手册、本书涉及的部分 STM32 微控制器寄存器说明, 以及第三方软件和工具等, 读者可以从华信教育资源网 (<http://www.hxedu.com.cn>) 或 [www.szopen.cn](http://www.szopen.cn) 或 [www.embedhr.org](http://www.embedhr.org) 网站免费下载。

本书由彭刚、秦志强和姚昱编著, 华中科技大学自动化学院的研究生王中南、程小科、杜兵, 武汉原创嵌入式工作室 ([www.embedhr.org](http://www.embedhr.org)) 及深圳市中科鸥鹏智能科技有限公司 ([www.szopen.cn](http://www.szopen.cn)) 的多位工程师参加了本书所用 STM32 单片机教学开发板的代码验证、电路绘制与测试等工作。还要特别感谢 ST 意法半导体公司的梁平经理、ARM 公司的赵慧波经理和电子工业出版社的编辑们, 给予本书的支持。

感谢华中科技大学的黄心汉教授, 也是我读博士时的导师, 是他引导我进入机器人这门学科。机器人是一个很好的教学与科研平台, 非常适合以它为工程对象, 来学习和掌握软件编程、嵌入式技术、控制技术、传感器技术、无线数据通信、机电一体化、图像处理与模式识别及人工智能等专业知识。机器人已广泛地应用于工业、医学、农业、建筑业及军事等领域, 本书采用机器人作为项目实践内容, 寓教于乐, 兴趣为先, 非常容易引起学生的兴趣和学习热情, 也希望读者能对机器人技术产生浓厚的兴趣, 正如电影《I, Robot》中的那样, 让机器人成为人类的伙伴, 实现人和机器人和谐相处的社会。

限于写作时间和作者水平, 以及 ST 技术文档本身也在不断修订, 书中难免有错误和不妥之处, 敬请批评指正。作者联系邮箱: [eepenggang@hotmail.com](mailto:eepenggang@hotmail.com)。

登楼高望, 滚滚长江, 时间如水, 奔流不息。白驹过隙, 岁月无痕, 逝者如斯, 不舍昼夜。伴随着微控制器技术的快速发展, 生活在这个技术发展迅速的世界, 科学、正确、高效、主动地学习才是积累知识和财富的法宝。

谨以此书献给我的家人!

编 者

2017 年 1 月

# 序

意法半导体 (STMicroelectronics) 有限公司于 2007 年 6 月发布了 STM32 系列单片机, 目前, STM32 已经成为业界最宽广的基于 ARM Cortex-M3 内核的微控制器系列, 带有丰富多样和功能灵活齐全的外设, 并保持全产品系列上的引脚兼容, 为用户提供了非常丰富的选型空间, 为释放广大工程设计人员的创造力提供了更大的自由度。

广义地讲, 微控制器产品 (MCU, 俗称单片机) 的作用是, 通过预先编制的程序, 接收特定的环境参数或用户操作, 按照一定的规则控制电信号的变化, 再通过各种转换机制把电信号转换成诸如机械动作、光信号、声音信号、显示图像等形式的变化, 从而达到智能化控制的目的。随着人们对智能化产品的需求不断地增加, 内嵌微控制器产品的应用领域也越来越多, 典型的应用方向包括工业控制、公共交通、汽车电子、智能家电、办公设备、医疗器械、安全防护等各个领域。

按照应用方向的不同, 微控制器产品有专用产品和通用产品之分。专用产品是用于特定应用的微控制器产品, 通常是为特定的应用而专门设计的产品, 在指定的应用中达到了最大的集成度, 并且没有或只有很少的冗余部件, 如应用于电视机、机顶盒、玩具、USB 存储 (U 盘) 等; 专用产品的特点是它所适用的产品面较小, 但单一应用方向的用量巨大, 并且对成本和性能的要求较高。通用微控制器产品则不是为特定应用而设计的, 通常可以适用于多个应用领域和多种应用场合; 通用产品的特点是它所适用的产品品种众多, 同时每一种 (类) 产品的产量并不是很大; 因为这一特点, 通用微控制器产品集成了大量常用的部件, 种类繁多配置各异, 可以满足多种应用领域的需要。

STM32 是一个通用微控制器产品系列, 为了适应众多的应用需求和低成本的要求, 在产品的规划和设计上遵循了灵活多样、配置丰富和合理提供多种选项的原则, 如齐全的闪存容量配置; 每一个外设都拥有多种配置选项, 使用者可以按照具体需要做出合适的选择, 如 USART 模块可以实现普通的异步 UART 通信, 还可以实现 LIN 通信协议、智能卡 ISO7816-3 协议、IrDA 编解码、同步的 SPI 通信, 以及进行简单的多机通信等。考虑到用户应用的多样性和大跨度的需要, STM32 很好地在整个系列保持了引脚的兼容性 & 外设配置的兼容性。

STM32 的成功得益于很多优良的特性和很高的性价比, 正是由于它的成功, 很多人都想学习它、应用它; 功能的灵活多样性是 STM32 广受青睐的优势, 同时也让不少初学者或从其他简单单片机产品转过来的工程师感到下手比较困难, 不知道应该从哪里入手。另外, 目前已有的关于 STM32 单片机教材, 多以芯片的手册为基础, 较多地涉及芯片内部的功能机制, 而较少涉及实际使用的分析与案例, 对于初学者来说学起来困难相对较大, 不利于 STM32 单片机的普及; 彭刚博士、秦志强博士和姚昱博士编著的这本书, 从分析实际需求出发, 推导出操作控制的基本动作、策略和基本算法, 再具体结合 STM32 功能部件的特点, 最终归纳总结出具体实现的方案与方法。这种以工作导向的概念, 基于工作过程的教学方法, 非常适合 STM32 的学习, 以点带面地帮助学习者逐步地建立起相应的知识体系, 在 “学中做、做中学”, 使得学习的过程中既涉及大量的基础和理论知识, 又很好地结合了具体问题的分析和解决, 做到了理论和实践的完美结合, 是学习使用 STM32 的一本很好的教材。

最后, 我要非常感谢彭刚博士、秦志强博士和姚昱博士为本书的编撰所付出的辛勤劳动,

也非常感谢其他为本书的出版做出卓越贡献的各位同行，感谢他们为推动 STM32 微控制器产品的应用向高端迈进、向普及迈进所做出的贡献。

意法半导体有限公司大中华区  
通用单片机和存储器产品部、应用部经理

梁平

# 目 录

|                                             |      |
|---------------------------------------------|------|
| 第 1 章 ARM Cortex-M3 处理器编程环境与嵌入式系统 .....     | (1)  |
| 1.1 单片机与 ARM Cortex-M3 处理器 .....            | (1)  |
| 1.2 基于 ARM Cortex-M3 的 STM32 单片机教学开发板 ..... | (5)  |
| 任务一 获得软件 .....                              | (7)  |
| 任务二 安装软件 .....                              | (8)  |
| 任务三 硬件连接 .....                              | (9)  |
| 1.3 创建工程和执行程序 .....                         | (11) |
| 任务四 你的第一个工程 .....                           | (11) |
| 任务五 你的第一个程序 .....                           | (15) |
| 任务六 下载可执行文件到教学开发板 .....                     | (18) |
| 任务七 用串口调试软件查看单片机输出信息 .....                  | (25) |
| 任务八 做完实验关断电源 .....                          | (29) |
| 工程素质和技能归纳 .....                             | (29) |
| 第 2 章 STM32 单片机 I/O 端口与伺服电机控制 .....         | (30) |
| 2.1 STM32 单片机的输入/输出端口 .....                 | (30) |
| 任务一 认识封装 .....                              | (30) |
| 任务二 单灯闪烁控制 .....                            | (33) |
| 2.2 STM32 单片机的时钟配置 .....                    | (36) |
| 2.3 STM32 单片机的 I/O 端口配置 .....               | (45) |
| 任务三 让另一个 LED 闪烁 .....                       | (58) |
| 任务四 流水灯 .....                               | (59) |
| 2.4 STM32 单片机 I/O 端口的应用 .....               | (60) |
| 任务五 机器人伺服电机控制信号 .....                       | (60) |
| 任务六 计数并控制循环次数 .....                         | (63) |
| 任务七 用你的计算机来控制机器人运动 .....                    | (66) |
| 工程素质和技能归纳 .....                             | (68) |
| 第 3 章 STM32 单片机程序模块化设计与机器人运动控制 .....        | (70) |
| 3.1 STM32 单片机程序调试方法 .....                   | (70) |
| 任务一 程序调试 .....                              | (70) |
| 3.2 STM32 单片机程序模块化设计 .....                  | (78) |
| 任务二 基本巡航动作 .....                            | (79) |
| 任务三 匀加速/减速运动 .....                          | (82) |
| 任务四 用函数调用简化运动程序 .....                       | (84) |
| 任务五 高级主题——用数组建立复杂运动 .....                   | (88) |
| 工程素质和技能归纳 .....                             | (92) |

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 第4章 STM32 单片机中断编程与机器人触觉导航 .....     | (93)  |
| 4.1 STM32 单片机按键输入检测 .....           | (93)  |
| 任务一 按键检测 .....                      | (94)  |
| 4.2 STM32 单片机输入端口的应用 .....          | (95)  |
| 任务二 安装并测试机器人的触觉——胡须 .....           | (95)  |
| 任务三 基于胡须的机器人触觉导航 .....              | (100) |
| 任务四 机器人进入死区后的人工智能决策 .....           | (103) |
| 4.3 STM32 单片机中断编程 .....             | (107) |
| 任务五 按键中断 .....                      | (113) |
| 任务六 中断方式测试机器人触觉 .....               | (129) |
| 工程素质和技能归纳 .....                     | (131) |
| 第5章 STM32 单片机输入/输出端口综合应用与红外导航 ..... | (132) |
| 任务一 搭建电路并测试红外发射器和接收器 .....          | (133) |
| 任务二 探测和避开障碍物 .....                  | (137) |
| 任务三 高性能的红外导航 .....                  | (141) |
| 任务四 俯视的探测器 .....                    | (143) |
| 工程素质和技能归纳 .....                     | (146) |
| 第6章 STM32 单片机定时器编程与机器人的距离检测 .....   | (147) |
| 6.1 STM32 单片机通用定时器 .....            | (147) |
| 任务一 通用定时器控制 LED 闪烁 .....            | (155) |
| 6.2 STM32 单片机通用定时器的应用 .....         | (158) |
| 任务二 距离探测 .....                      | (158) |
| 任务三 尾随小车 .....                      | (162) |
| 任务四 跟踪条纹带 .....                     | (168) |
| 6.3 STM32 单片机高级控制定时器 .....          | (170) |
| 任务五 高级控制定时器控制 LED 闪烁 .....          | (172) |
| 任务六 使用高级控制定时器实现 PWM 控制 .....        | (174) |
| 工程素质和技能归纳 .....                     | (182) |
| 第7章 STM32 单片机串口编程及其应用 .....         | (183) |
| 7.1 STM32 单片机串行通信接口 .....           | (183) |
| 任务一 编写串口通信程序 .....                  | (188) |
| 7.2 串行 RS-232 电平与 TTL 电平转换 .....    | (190) |
| 任务二 串口 Echo 回应程序 .....              | (194) |
| 工程素质和技能归纳 .....                     | (198) |
| 第8章 STM32 单片机 LCD 显示接口编程及其应用 .....  | (199) |
| 8.1 LCD 介绍 .....                    | (199) |
| 任务一 认识 LCD 模块 .....                 | (201) |
| 8.2 STM32 单片机 LCD 接口编程 .....        | (201) |
| 任务二 编写 LCD 模块驱动程序 .....             | (206) |

|                                          |              |
|------------------------------------------|--------------|
| 任务三 用 LCD 显示机器人运动状态 .....                | (209)        |
| 工程素质和技能归纳 .....                          | (213)        |
| <b>第 9 章 STM32 单片机模数转换编程及其应用 .....</b>   | <b>(214)</b> |
| 9.1 A/D 模数转换介绍 .....                     | (214)        |
| 任务一 认识传感器 .....                          | (216)        |
| 9.2 STM32 单片机 A/D 转换编程 .....             | (217)        |
| 任务二 编写 A/D 程序 .....                      | (224)        |
| 任务三 环境温度测量 .....                         | (226)        |
| 工程素质和技能归纳 .....                          | (231)        |
| <b>第 10 章 STM32 单片机 DMA 编程及其应用 .....</b> | <b>(232)</b> |
| 10.1 DMA 介绍 .....                        | (232)        |
| 10.2 STM32 单片机 DMA 编程 .....              | (234)        |
| 任务一 利用 DMA 方式进行 A/D 数据采集 .....           | (238)        |
| 任务二 DMA 与 USART、ADC、定时器综合编程 .....        | (242)        |
| 工程素质和技能归纳 .....                          | (246)        |
| <b>第 11 章 STM32 单片机实时时钟编程及其应用 .....</b>  | <b>(247)</b> |
| 11.1 RTC 实时时钟介绍 .....                    | (247)        |
| 任务一 进一步认识晶振 .....                        | (249)        |
| 11.2 STM32 单片机 RTC 的结构和寄存器 .....         | (251)        |
| 11.3 STM32 单片机的备份寄存器和电源控制寄存器 .....       | (255)        |
| 任务二 编写 RTC 程序 .....                      | (258)        |
| 任务三 RTC 时间设置编程 .....                     | (263)        |
| 任务四 闹钟提醒机器人编程 .....                      | (271)        |
| 11.4 STM32 单片机的侵入检测 .....                | (275)        |
| 任务五 侵入检测编程 .....                         | (275)        |
| 11.5 STM32 单片机的电源控制 .....                | (278)        |
| 任务六 电源控制编程 .....                         | (281)        |
| 工程素质和技能归纳 .....                          | (284)        |
| <b>第 12 章 STM32 单片机看门狗编程及其应用 .....</b>   | <b>(285)</b> |
| 12.1 看门狗介绍 .....                         | (285)        |
| 12.2 STM32 单片机独立看门狗编程 .....              | (287)        |
| 任务一 独立看门狗编程 .....                        | (290)        |
| 任务二 认识系统节拍定时器 .....                      | (294)        |
| 12.3 STM32 单片机窗口看门狗编程 .....              | (295)        |
| 任务三 窗口看门狗编程 .....                        | (298)        |
| 工程素质和技能归纳 .....                          | (304)        |
| <b>第 13 章 STM32 单片机数模转换编程及其应用 .....</b>  | <b>(305)</b> |
| 13.1 D/A 数模转换介绍 .....                    | (305)        |
| 13.2 STM32 单片机 D/A 结构和编程方法 .....         | (307)        |

|                                                 |       |
|-------------------------------------------------|-------|
| 13.3 STM32 单片机 D/A 转换编程.....                    | (316) |
| 任务一 三角波生成.....                                  | (316) |
| 任务二 噪声生成 .....                                  | (321) |
| 任务三 自定义波形生成.....                                | (322) |
| 工程素质和技能归纳.....                                  | (324) |
| 附录 A 本书所用 STM32 教学开发板主要电路图 .....                | (325) |
| 附录 B 基于 ARM Cortex-M3 的 STM32 微控制器原理归纳 .....    | (333) |
| B.1 基于 ARM Cortex-M3 内核的 STM32F10x 微控制器结构 ..... | (333) |
| B.2 存储映像地址.....                                 | (337) |
| B.3 芯片编号和引脚说明 .....                             | (344) |
| 附录 C STM32 固件库说明 .....                          | (351) |
| 附录 D 本书所使用的器材清单.....                            | (365) |
| 参考文献.....                                       | (367) |

# 第 1 章

## ARM Cortex-M3 处理器编程环境与嵌入式系统

### 1.1 单片机与 ARM Cortex-M3 处理器

#### 什么是单片机

一台能够工作的计算机包含这样几个部分：CPU（Central Processing Unit，中央处理单元：进行运算、控制）、RAM（Random Access Memory，随机存储器：数据存储）、ROM（Read Only Memory，只读存储器：程序存储）、输入/输出设备（串行口、并行口等）。在个人计算机上这些部分被分成若干块芯片或者插卡，安装在一个被称为主板的印制电路板上。而在单片机中，这些部分全部被做到一块集成电路芯片中，所以就称为单片机。

#### 单片机的用途

与个人计算机、笔记本电脑相比，单片机的功能显然很小，那学它干什么呢？实际生活中并不是任何需要计算机的场合都要求计算机有很高的性能，如空调温度的控制、冰箱温度的控制等都不需要很复杂、很高级的计算机。应用的关键是看是否够用，是否有很好的性能价格比。

单片机凭借体积小、质量轻、价格便宜等优势，已经渗透到我们生活的各个领域：导弹的导航装置、飞机上各种仪表的控制、工业自动化过程的实时控制和数据处理、广泛使用的各种智能 IC 卡、小汽车的安全保障系统、录像机、摄像机、全自动洗衣机、程控玩具、电子宠物等，更不用说自动控制领域的机器人、智能仪表和医疗器械了。因此，单片机的学习、开发与应用将造就一批计算机应用、嵌入式系统设计与智能化控制的科学家、工程师，是成为电子与嵌入式系统工程师必须掌握的基本技能。

#### ➔ 嵌入式系统

嵌入式系统是指嵌入到工程对象中能够完成特定功能的计算机系统。嵌入式系统嵌入到对象系统中，并在对象环境下运行。与对象领域相关的操作主要是对外界物理参数进行采集、处理，对对象实现控制，并与操作者进行人机交互等。

与通用计算机系统相比，嵌入式系统有其功能的特殊要求和成本的特殊考虑，从而决定



了嵌入式系统在高、中、低端系统三个层次共存的局面。在低端嵌入式系统中, 8 位单片机从 20 世纪 70 年代初期诞生至今还一直在工业生产和日常生活中广泛使用。近些年, 中端的 16 位单片机已应用于汽车电子、工业自动化等领域。鉴于嵌入式应用对象的响应要求、嵌入式系统应用的巨大市场, 以及单片机价格的不断下降, 目前 32 位单片机已经大量应用于消费电子、工业测控、机器人控制、无人机、智能硬件、可穿戴设备、新能源、汽车电子、智能家居、物联网、医疗电子和航空航天系统等领域。

## ARM Cortex-M3 系列处理器

ARM 即 Advanced RISC Machines 的缩写, 既可以认为是一个公司的名字, 也可以认为是对一类微处理器的统称, 还可以认为是一种技术的名字。1985 年 4 月 26 日, 第一个 ARM 原型在英国剑桥的 Acorn 计算机有限公司诞生, 由美国加州 San Jose VLSI 技术公司制造。20 世纪 80 年代后期, ARM 很快开发成 Acorn 的台式机产品。20 世纪 90 年代初, ARM 公司成立于英国剑桥, 设计了大量高性能、廉价、耗能低的 RISC (Reduced Instruction Set Computer) 处理器及相关技术和软件。ARM 公司既不生产芯片也不销售芯片, 它只出售芯片技术授权, 因此叫做 Chipless 公司。

世界各大半导体生产商从 ARM 公司购买其设计的 ARM 微处理器核, 根据各自不同的应用领域, 加入适当的外围电路, 从而形成自己的 ARM 微处理器芯片进入市场。利用这种合伙关系, ARM 很快成为全球性 RISC 标准的缔造者。目前, 采用 ARM 技术知识产权 (Intellectual Property, IP) 核的微处理器, 已遍及工业控制、消费类电子产品、通信系统、网络系统、DSP、无线移动应用等各类产品市场, 在低功耗、低成本和高性能的嵌入式系统应用领域中处于领先地位。

ARM Cortex 系列处理器是基于 ARMv7 架构的, 分为 Cortex-A、Cortex-R 和 Cortex-M 三类。在命名方式上, 基于 ARMv7 架构的 ARM 处理器已经不再沿用过去的数字命名方式, 如 ARM7、ARM9、ARM11, 而是冠以 Cortex 的代号。基于 v7A 的称为 “Cortex-A 系列”, 基于 v7R 的称为 “Cortex-R 系列”, 基于 v7M 的称为 “Cortex-M 系列”。

其中, ARM Cortex-A 系列主要用于高性能 (Advance) 场合, 一般针对日益增长的, 运行包括 Linux、Windows CE 和 Symbian 操作系统在内的消费者娱乐和无线产品设计与实现; ARM Cortex-R 系列主要用于实时性 (Real time) 要求高的场合, 针对的是需要运行实时操作系统来进行控制应用的系统, 包括汽车电子、网络和影像系统等; ARM Cortex-M 系列则主要用于微控制器单片机 (MCU) 领域, 是为那些对功耗和成本非常敏感, 同时对性能要求不断增加的嵌入式应用 (如微控制器系统、汽车电子与车身控制系统、各种家电、工业控制、医疗器械、玩具和无线网络等) 所设计与实现的。随着在各种不同领域应用需求的增加, 微处理器市场也在趋于多样化。为了适应市场的发展变化, 基于 ARMv7 架构的 ARM 处理器系列将不断拓展自己的应用领域。

Cortex-M3 是一个 32 位的单片机核, 在传统的单片机领域中, 有一些不同于通用 32 位 CPU 应用的要求。例如, 在工控领域, 用户要求具有更快的中断速度, Cortex-M3 采用了抢占 (Pre-emption)、尾链 (Tail-chaining)、迟到 (Late-arriving) 中断技术, 对中断事件的响应更加迅速。比如, 尾链技术完全基于硬件进行中断处理, 最多可减少 12 个时钟周期数, 背



对背中断之间的延时时间、从低功耗模式唤醒的时间只有 6 个时钟周期，特别适用于汽车电子和无线通信领域。

ARM Cortex-M3 处理器结合了多种创新性突破技术，使得芯片供应商可以提供超低费用的芯片。仅有 33000 门的 M3 内核，其性能可达 1.25 DMIPS/MHz，如主频为 72MHz 的 M3 处理器性能可达 90DMIPS。M3 处理器还集成了许多紧耦合系统外设，合理利用了芯片空间，使系统能满足下一代产品的控制需求。

Cortex 的优势在于将低功耗、低成本与高性能完美结合。

### 处理器性能

DMIPS (Dhrystone Million Instructions executed Per Second) 主要用于测整数计算能力。其中，MIPS (Million Instructions executed Per Second)，每秒百万条指令，用来计算同一秒内系统的处理能力，即每秒执行了多少百万条指令。D 是 Dhrystone 的缩写，Dhrystone 是测量处理器运算能力的最常见基准程序之一，常用于处理器的整数运算性能的测量，程序是用 C 语言编写的。

Dhrystone 的计量单位为每秒计算多少次 Dhrystone，后来把在 VAX-11/780 机器上的测试结果 1757 Dhrystones/s 定义为 1 Dhrystone MIPS (百万条指令每秒)。DMIPS 表示了在 Dhrystone 这样一种测试方法下的 MIPS。例如，一个处理器达到 200DMIPS 的性能，是指这个处理器测整数计算能力为 (200×100 万) 条指令/秒。

Cortex-M3 处理器包括处理器内核、嵌套向量中断控制器 (Nested Vectored Interrupt Controller, NVIC)、存储器保护单元、总线接口单元和跟踪调试单元等，为微控制器应用而开发的 ARM Cortex-M3 拥有以下性能：

- Cortex-M3 内核使用 3 级流水线哈佛架构，运用分支预测、单周期乘法和硬件除法功能实现了 1.25DMIPS/MHz 出色的运算效率（与 0.9DMIPS/MHz 的 ARM7 和 1.1DMIPS/MHz 的 ARM9 相比），而功耗仅为 0.19mW/MHz。
- 采用专门面向 C 语言设计的 Thumb-2 指令集，最大限度地降低了汇编语言的使用。而且 Thumb-2 指令集允许用户在 C 代码层面维护和修改应用程序，C 代码部分非常易于重用。可以这么说，没有必要使用任何汇编语言，这样新产品的开发将更易于实现，上市时间也大为缩短。
- Thumb-2 指令集免去了 Thumb 和 ARM 代码的互相切换，性能得到了提高。结合非对齐数据存储和原子位处理等特性，可在一个单一指令中实现读取/修改/编写，轻而易举地以 8 位、16 位器件所需的存储空间就实现了 32 位性能。
- 单周期乘法和乘法累加指令、硬件除法。
- 准确快速地进行中断处理，不超过 12 个周期，最快仅 6 个周期。内置的 NVIC 通过末尾连锁，即尾链 (Tail-chaining) 技术提供了确定的、低延迟的中断处理，并可以设置带有多达 240 个中断，可为中断较为集中的汽车应用领域实现可靠的操作。
- 对于工业控制应用，存储器保护单元 (Memory Protection Unit, MPU) 通过使用特权访问模式可以实现安全操作。
- Flash 修补和断点 (Flash Patch and Breakpoint-unit) 单元、数据观察点和跟踪 (Data



Watchpoint and Trace-DWT) 单元、仪器测量跟踪宏单元 (Instrumentation Trace Macrocell-ITM) 和嵌入式跟踪宏单元 (Embedded Trace Macrocell-ETM) 为嵌入式器件提供了廉价的调试和跟踪技术。

- 扩展时钟门控技术和内置睡眠模式适用于低功耗的无线设计领域, 具有低功耗时钟门控 (Clock Gating) 3 种睡眠模式。

因此, ARM Cortex-M3 处理器是专门为那些对成本和功耗非常敏感但同时对性能要求又相当高的应用而设计的。凭借缩小的内核尺寸、出色的中断延迟、集成的系统部件、灵活的硬件配置、快速的系统调试和简易的软件编程, Cortex-M3 处理器将成为广大嵌入式系统 (从复杂的片上系统到低端微控制器) 的理想解决方案, 基于 Cortex-M3 处理器的系统设计可以更快地投入市场。

## STM32F103 系列微控制器

STM32 系列微控制器是由 ST 意法半导体有限公司以 ARM Cortex-M3 为内核开发生产的 32 位微控制器 (单片机), 专为高性能、低成本、低功耗的嵌入式应用设计。分成几个不同系列: STM32F100 为“超值型”, STM32F101 为“基本型”, STM32F102 为“USB 基本型”, STM32F103 为“增强型”, STM32F105 或 107 为“互联型”, STM32L 为“超低功耗型”。例如, 基本型时钟频率为 36MHz, 以 16 位产品的价格得到比 16 位产品更好的性能, 是 16 位产品用户的最佳选择; 增强型系列时钟频率达到 72MHz, 是同类产品性能最高的。这些系列都内置 16KB 到 512KB 的闪存, 不同的是 SRAM 的最大容量和外设接口的组合。STM32 系列微控制器具有很高的集成度, 除丰富的接口外, 还内置复位电路、低电压检测、调压器、精确的 RC 振荡器等。STM32 系列微控制器时钟频率为 72MHz 时, 从闪存执行代码, 功耗为 36mA (所有外设处于工作状态), 是 32 位市场上功耗最低的, 相当于 0.5mA/MHz。而待机时, 功耗下降到 2 $\mu$ A。

STM32F103xx 增强型系列使用高性能的 ARM Cortex-M3 32 位的 RISC 内核, 其工作频率为 72MHz, 内置高速存储器 (最高可达 512KB 的闪存和 64KB 的 SRAM), 具有丰富的增强型 I/O 端口和连接到两条高性能外设总线 (Advanced Peripheral Bus, APB) 的外设。STM32F103Vx 系列都至少包含 2 个 12 位的 ADC、1 个高级定时器、3 个通用 16 位定时器 (具有 PWM 输出功能), 还包含标准和先进的通信接口: 2 个 I<sup>2</sup>C (SMBus/PMBus)、2 个 SPI 同步串行接口 (18Mb/s)、3 个 USART 异步串行接口 (4.5Mb/s)、1 个 USB 全速接口和一个 CAN (2.0B) 接口。I/O 翻转速度可达 18MHz。

2010 年年底, 意法半导体有限公司 (ST) 推出全新的 STM32F2 系列微控制器, 时钟频率达到了 120MHz, 处理性能高达 150 DMIPS。该系列整合了更多的定时器、串行接口、ADC、DAC、CAN 等外设, 还增加了对视频、音频、设备互连、安全加密等的支持, 并提供最高 1MB 的闪存和 128KB 的 SRAM。同时, F2 系列与 F1 系列微控制器的引脚和软件相互兼容。

图 1.1 是基于 ARM Cortex-M3 内核的 STM32F10x 系列微控制器的外观 (LQFP100 封装)。表 1.1 是 STM32F103xx 增强型微控制器 (Flash 不超过 128KB 的中小容量) 各系列的外设资源。大容量的 STM32F10x 系列单片机外设资源和芯片编号详细说明见附录 B。