

TURING

图灵电子与电气工程丛书

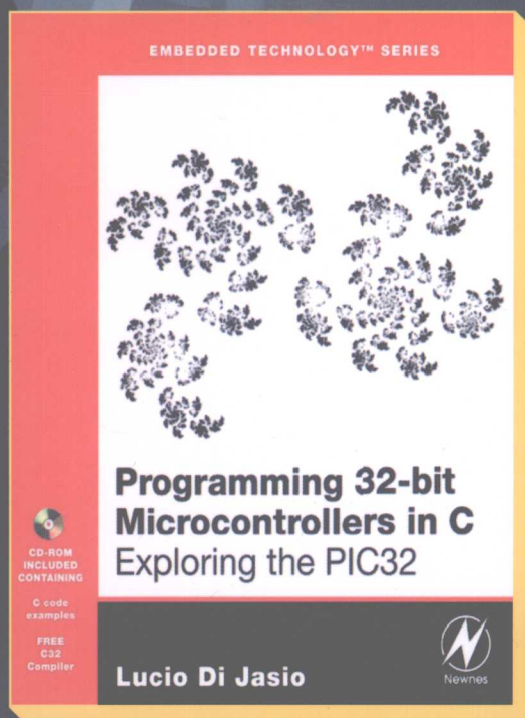


Microchip公司  
全套课程解决方案推荐用书

# 32位单片机C语言编程 基于PIC32

## Programming 32-bit Microcontrollers in C Exploring the PIC32

[意] Lucio Di Jasio 著  
张鼎 岳虹 等译



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

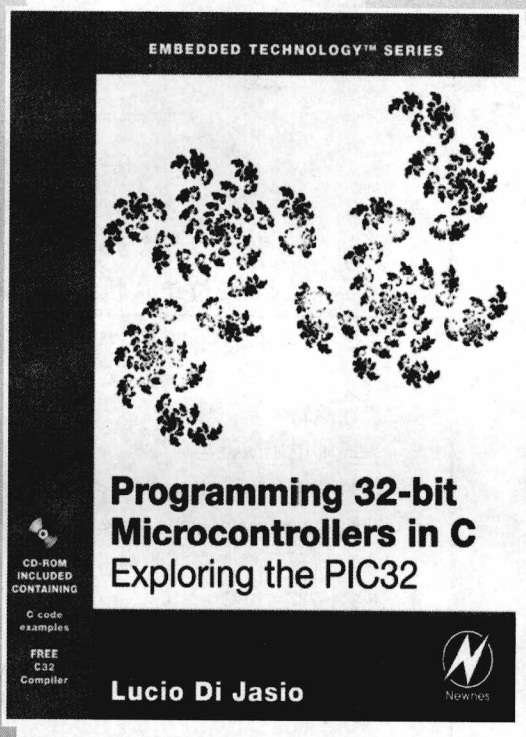
**TURING**

图灵电子与电气工程丛书

# 32位单片机C语言编程 基于PIC32

Programming 32-bit Microcontrollers in C  
Exploring the PIC32

[意] Lucio Di Jasio 著  
张鼎 岳虹 等译



人民邮电出版社  
北京

人民邮电出版社  
样书  
专用章

## 图书在版编目 (CIP) 数据

32位单片机C语言编程：基于PIC32/ (意) 贾西欧  
(Jasio, L. D.) 著；张鼎等译. —北京：人民邮电出版社，2009.12

(图灵电子与电气工程丛书)

书名原文：Programming 32-bit Microcontrollers in C:  
Exploring the PIC32

ISBN 978-7-115-21612-0

I. ①3… II. ①贾… ②张… III. ①单片微型计算机  
—C语言—程序设计 IV. ①TP368.1 ②TP312

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第189969号

## 内 容 提 要

本书介绍32位单片机PIC32的C语言编程技术，引导读者循序渐进地掌握基于PIC32单片机的嵌入式控制系统的软硬件设计技术。全书内容分为三部分，第一部分是基础知识，第二部分是基本实践，第三部分是高级应用。

本书内容新颖实用，趣味性强，既可作为嵌入式系统设计人员的参考书，也可作为高年级本科生、研究生的学习参考书。任何对嵌入式控制系统设计感兴趣的读者都会从中受益。

图灵电子与电气工程丛书

## 32位单片机C语言编程：基于PIC32

- ◆ 著 [意] Lucio Di Jasio  
译 张 鼎 岳 虹 等  
责任编辑 朱 巍
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京昌平百善印刷厂印刷
- ◆ 开本：787×1092 1/16  
印张：21.5  
字数：576千字 2009年12月第1版  
印数：1-3 000册 2009年12月北京第1次印刷

著作权合同登记号 图字：01-2009-5728号

ISBN 978-7-115-21612-0

定价：49.00元

读者服务热线：(010) 51095186 印装质量热线：(010) 67129223

反盗版热线：(010) 67171154

# 版 权 声 明

*Programming 32-bit Microcontrollers in C: Exploring the PIC32* by Lucio Di Jasio, ISBN: 978-0-7506-8709-6.

Copyright © 2008 by Elsevier Inc. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-981-272-220-1.

Copyright © 2009 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

## **Elsevier (Singapore) Pte Ltd.**

3 Killiney Road

#08-01 Winsland House I

Singapore 239519

Tel: (65)6349-0200

Fax: (65)6733-1817

First Published 2009

2009 年初版

Printed in China by POSTS & TELECOM PRESS under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由人民邮电出版社与 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 合作出版。本版仅限在中华人民共和国（不包括香港特别行政区和台湾地区）出版及标价销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

# 译者序

随着微电子技术的蓬勃发展，嵌入式控制系统正朝着微型化、功能化、智能化的方向大步前进，并已广泛应用于工业生产和日常生活中。嵌入式控制系统的核心是微处理器，而单片机则是其中使用最为广泛的一类微处理器。随着系统性能要求和任务难度的不断提高，单片机已经由经典的 8 位机发展为 16 位机以及最新的 32 位机，并且还集成了种类愈加丰富、功能愈加强大的外围设备。另一方面，由于系统功能的复杂度不断增大，嵌入式控制系统的软件设计也已由当初的汇编语言编程升级为以 C 语言为代表的高级语言编程。因此，嵌入式控制系统设计师有必要了解一些新器件，掌握一些高级语言编程技术。

本书正是在上述背景下出现的重要技术参考书，它依托最新型的 32 位单片机 PIC32 平台，详细介绍了基于 C 语言的嵌入式控制系统的软件设计方法，通过大量新颖而实用的工程实例，展示了 PIC32 单片机强大的运算处理能力和集成外围设备的丰富功能。

本书作者 Lucio Di Jasio 先生是一位经验丰富的嵌入式控制系统设计专家，曾长期从事基于 8 位单片机的系统设计工作。他结合自己从 8 位单片机升级到 32 位单片机、从汇编语言编程升级到 C 语言编程的体会，对比了 32 位单片机与 8 位单片机在运算处理能力上的区别，以及 C 语言与汇编语言在易用性方面的差异，使读者直观地感受到 32 位单片机的强大功能和 C 语言的优越性。全书在内容组织上注重循序渐进，首先介绍基础知识，使读者能够快速建立嵌入式控制系统软件的基本架构，学会基本的 I/O 操作，学会用定时器实现精确延时，掌握 PIC32 的中断系统等；然后通过精心设计的实例使读者利用 PIC32 单片机的各种片上外围设备，实现同步/异步串行通信、LCD 显示控制以及 ADC 采样等；最后，通过新颖的、趣味性极强的高级实例，使读者掌握 PS/2 键盘控制、视频显示、MMC/SD 卡接口、文件操作以及音频处理等技术。这样，既能使初学者在短时间内迅速掌握 PIC32 单片机和嵌入式控制系统 C 语言编程的关键技术，又能使经验丰富的 8 位或 16 位单片机行家掌握 PIC32 单片机的新功能，从嵌入式汇编语言设计高手轻松地转型为 C 语言编程高手。

本书主要由张鼎和岳虹翻译。Be Flying 工作室负责人肖国尊协助翻译质量和进度的控制与管理，在此予以衷心感谢。译文虽经多次修改和校正，但是由于译者的水平有限，加之时间仓促，错漏之处在所难免，我们真诚地希望同行和读者不吝赐教，译者不胜感激之至。

# 致 谢

谨以此书献给我的儿子 Luca。

如果没有我妻子 Sara 超凡的支持，是不可能完成这项工作的，她理解我，并不断鼓励我继续这项事业。我要特别感谢 Steve Bowling 和 Garry Champ，他们对嵌入式控制应用具有极高的热情与丰富的经验，都乐于无偿地审阅本书的技术内容。Garry 是初次从事这项工作，因而一开始并不清楚自己所面临的困难，但是 Steve 是我前一本书的主要技术顾问，因此他很清楚这个工作的艰辛。我还要特别感谢 Patrick Johnson，他从很早起就热情地支持本书的创意，并且排除万难使我能够直接接触到由他领导的高级设计与应用小组（该小组正在开发 PIC32 工程）。感谢“设计师” Joe Triage，他始终有求必应，并且一直都对我的工作经历饱含兴趣。感谢 Joe Drzewiecky 安装如此复杂的工具包，并且总是尽力使 MPLAB IDE 成为更好的开发平台。还要特别感谢 Nilesh Rajbharti 领导的整个 PIC32 应用小组，特别感谢 Adrian Aur、Dennis Lehman、Larry Gass 以及 Chris Smith 快速解答我提出的各种问题，并对我深入了解单片机、外围设备以及函数库的内部工作原理提供很大帮助。此外，我还要感谢我所有的朋友、Microchip 技术公司的同事以及多年来有幸一起工作的嵌入式控制工程师们。他们深深地影响了我的工作，从而造就了我在嵌入式控制领域这个神奇世界里的经历。

自从我的上一本书 *Programming 16-bit Microcontrollers in C: Learning to Fly the PIC 24*<sup>®</sup> 出版以来，我收到了很多反馈，很多读者都写信向我表示祝贺，同时还指出错误和问题。这令我十分惭愧，但同时也使我获益匪浅，非常感谢他们！我将把读者的建议尽可能多地吸收到这本新书中，并且期望能继续得到读者的支持与建议。

---

① 该书中文版《16 位单片机 C 语言编程：基于 PIC 24》即将由人民邮电出版社出版，敬请关注。——编者注

# 引 言

几乎所有的修复程序一开始都会声明该程序存在哪些局限。因此，在本书的最开始，我也想声明：我是一个 8 位机程序员！

我从高中就开始用 8 位微控制器进行编程，并且在我职业生涯的大部分时间里，都在从事这项工作。此外，尽管我对高级语言编程也很熟悉，但是最喜欢的还是汇编语言编程！

我曾经说过，我喜欢那种能够掌握嵌入式系统在每个机器周期内的每个微秒里都做了什么的感觉。我还很沉醉于控制：我希望掌握所使用的每个外围设备的每个配置位的含义。因此，我决不轻信编译器或者其他人的函数库，除非离开它们就无法工作，或者我已经对其完全反汇编。

那么，我为何要写一本关于 32 位微控制器的 C 语言编程方面的书呢？

事实上，我是在几年前第一次接触 16 位微控制器后才开始了被我称为“修复程序”的工作。PIC24 系列微控制器的引入使我有机会尝试并转到用 C 语言来对这个全新而令人激动的微控制器进行编程。而我获得的经验都写进了我的第一本书 *Programming 16-bit Microcontrollers in C: Learning to Fly the PIC24*。然而，当这本书出版的时候，Microchip 公司又传出消息说 32 位的微控制器刚刚面世，于是我又不得不另写一本新书。

我不打算向你介绍我是如何处理第一枚测试芯片的，但是我希望你了解，我花费了很长一段时间将大多数原本为 PIC24 那本书设计的程序，移植到一块装有 PIC32 芯片的 Explorer 16 旧开发板上，并使这些程序都能正常运行。

Microchip 公司的市场人员说，PIC32 架构的微控制器是经过特别设计的，它能够将基于 8 位和 16 位 PIC 架构微处理器的应用程序方便而无缝地“移植”到 PIC32 架构上来。但是，我必须亲自检验之后才能相信它。

还有谁能比一个钟爱汇编语言、沉醉于控制的 8 位程序员更适合为你介绍 PIC32 系列芯片呢？

## 读者对象

PIC32 是一款基于高性能 32 位内核处理器 (MIPS) 的芯片，并且包含很多支持工具、函数库和文档，因而很容易使用。本书只能使你对这个广阔的领域有个大致的了解，因此我将其称为第一次“探索”。我始终坚信学习过程应该是愉快的，并且我希望你有时间完成本书每章中那些“有趣的”练习和项目。不过，你还是需要一些必要的准备并且通过努力学习来消化所学内容，这样才能跟上本书前几章较快的进度。

本书适合于具有基本和中等水平的程序员，不适合那些“纯粹的”初学者，因为我不讲解二进制数、十六进制数表示或者编程基础知识。尽管如此，我还是会简要地回顾一下 C 语言编程，因为它和最新一代通用型 32 位微控制器的应用有关。之后，我才会介绍更加具有挑战性的工程开发。这里，我将读者分为以下四类。

- 嵌入式控制系统的程序员：具有丰富的微控制器汇编语言编程经验，初步掌握 C 语言编程。
- PIC 微控制器专家：初步掌握 C 语言编程。
- 学生或者专业人士：具备基于 PC 的 C (C++) 语言编程知识。

□ 其他的 SLF（高级生命）：我知道程序员们不喜欢被简单地区分等级，因此将他们归为这一特别的类别。

尽管不同读者的技术水平和经验并不相同，但是他们都能在第章获得些感兴趣的知识。本书每章都会讲一些使你掌握 C 语言编程技巧和新型硬件设备的技术细节。如果你对这两点都很熟悉，那么就请直接跳到那一章最后的“行家”部分，或者可以考虑去做附加的练习题、阅读参考书以及访问相关网页，以便进行更深入的研究和阅读。

我之前还写过一本关于 16 位 PIC 的 C 语言编程的书，对于读过那本书的读者我还有一些特别的提示。首先我要感谢你阅读该书，接着请允许我向你解释为什么会有似曾相识的感觉。这里，我决不是用那些旧的 16 位微控制器的内容来拼凑一本新书，而是重新开发了大部分工程，以便实际展示 PIC32 架构及其工具集的关键特性：它能无缝地移植 8 位和 16 位 PIC 应用程序，它能显著提高应用系统的性能并且保持易用性。在每章的末尾，我都准备了特别的一节，以说明在程序运行过程中可能碰到的问题、如何提升性能以及其他有助于你更自信、更快速地移植应用程序的信息。

你将通过本书掌握以下内容。

- 嵌入式控制系统的 C 语言程序的结构：循环、循环、再循环。
- 基本的定时和 I/O 操作。
- 基于 PIC32 中断的多任务嵌入式控制系统的 C 语言编程基础。
- PIC32 的新外围设备：（排序不分先后）
  - 输入捕获器；
  - 输出比较器；
  - 更改通知；
  - 并行主端口；
  - 异步串行通信器；
  - 同步串行通信器；
  - 模-数转换器。
- 如何控制 LCD 显示。
- 如何产生视频信号。
- 如何产生音频信号。
- 如何访问大容量存储设备。
- 如何与 PC 共享大容量存储设备上的文件。

## 内容结构

本书的每一章内容都可以作为探索 32 位嵌入式编程一天的学习内容。全书包括三部分。第一部分包含篇幅较小的 6 章内容，这些内容的难度逐步增大。在每一章，我们都会研究 PIC32MX 系列微控制器的一种基本外围设备，以及使用 MPLAB C32 编译器进行 C 语言编程的一些内容。此外，在每章我们都至少会开发一个演示工程。最开始开发这种工程只需使用 MPLAB SIM 软件仿真器，而不必使用实际的硬件。不过，有时可能需要使用 Explorer 16 演示板或者 PIC32 Starter Kit。

本书第二部分是“实验”，包含 5 章。此时 Explorer 16 演示板（或者第三方的类似产品）就变得必不可少，因为有些外围设备需要实际的硬件支持才能正常测试。

本书第三部分是“扩展”，包含篇幅较大的 5 章内容。其中每章都建立在之前学习内容的



基础之上，此外还增加了新的外围设备以完成更加复杂的工程。本书第三部分开发的工程都需要使用 Explorer 16 演示板，此外还要求你具备一定的原型板设计技术（是的，你可能还得使用烙铁）。如果你没有基本的 PCB 原型开发工具，那么可以考虑使用 <http://www.exploringpic32.com> 网站提供的专用扩展板（AV32），它包含完成这些工程需要的所有电路和元件。

本书附带资源<sup>①</sup>中包含每章所开发工程的所有源代码，它们都可以直接使用。

## 特别说明

本书并不能替代 Microchip 公司发布的 PIC32 微控制器的数据手册、参考手册以及程序员手册，它也不能替代 MPLAB C32 编译器用户指南以及 Microchip 公司提供的函数库和相关软件工具。这些文件的电子版请去 Microchip 公司的官方网站 (<http://www.microchip.com>) 下载最新的版本。你应当熟悉这些资料并且手头常备，因为我会在书中经常引用它们，并且在需要的地方使用其中的框图或者摘录。但是请注意，本书的叙述无法替代官方资料中的信息。如果你发现书中的叙述和官方文档不一致时，请务必以后者为准，并恳请你发邮件告知我，我会非常感激你的帮助，我们会在本书相关网站 (<http://www.exploringpic32.com>) 上发布更正和提示信息。

本书也不是一本 C 语言编程的入门书。尽管本书前几章回顾了 C 语言，但是你可以从参考文献中找到该内容更好的入门课程和书籍。

## 检查表

尽管本书并没有像我的上一本书那样直接以航空和飞行训练举例子，但还是保留了上一本书的一些做法。

其中一个做法是在开发工程前和开发过程中使用检查表核对每一个步骤。飞行员使用检查表，不是因为使用步骤太多怕他们记不全，也不是怕他们一时忘记。事实证明，人的记忆可能会出问题，并且在处于压力的情况下更容易出错，因此他们有必要用检查表。航空飞行比其他行业更容不得出错，飞行员们把安全看得比面子重。而程序员在开发 PIC32 的代码时，误操作或者忘记某项操作并不会带来生命危险，但是，我仍然准备了很多简单的检查表，帮助你完成最常见的编程和调试任务。真心希望这些检查表无论是在你刚开始学习使用新的 PIC32 工具集时，还是在你今后像我们一样交替使用不同厂商提供的很多工程和开发环境时，都能对你有所帮助。

---

<sup>①</sup> 本书附带资源请登录图灵教育网站 ([www.turingbook.com](http://www.turingbook.com)) 免费注册下载。——编者注

# 目 录

## 第一部分 探 索

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第 1 章 初识 PIC32           | 2  |
| 1.1 计划                   | 2  |
| 1.2 准备                   | 2  |
| 1.3 探索                   | 3  |
| 1.4 编译与链接                | 5  |
| 1.5 链接器脚本                | 6  |
| 1.6 生成第一个工程              | 6  |
| 1.7 使用仿真器                | 7  |
| 1.8 确定方向                 | 8  |
| 1.9 JTAG 端口              | 10 |
| 1.10 测试 PORTB            | 11 |
| 1.11 小结                  | 13 |
| 1.12 对汇编语言行家的提示          | 13 |
| 1.13 对 PIC MCU 行家的提示     | 14 |
| 1.14 对 C 语言行家的提示         | 14 |
| 1.15 提示与技巧               | 14 |
| 1.16 练习                  | 15 |
| 1.17 参考书                 | 15 |
| 1.18 链接                  | 15 |
| 第 2 章 循环                 | 16 |
| 2.1 计划                   | 16 |
| 2.2 准备                   | 16 |
| 2.3 探索                   | 17 |
| 2.4 while 循环             | 17 |
| 2.5 动态仿真                 | 19 |
| 2.6 使用逻辑分析仪              | 22 |
| 2.7 小结                   | 24 |
| 2.8 对汇编语言编程行家的提示         | 24 |
| 2.9 对 8 位 PIC 单片机行家的提示   | 24 |
| 2.10 对 16 位 PIC 单片机行家的提示 | 24 |
| 2.11 对 C 语言行家的提示         | 25 |
| 2.12 对 MIPS 行家的提示        | 25 |
| 2.13 提示与技巧               | 25 |
| 2.14 使用外围设备函数库的提示        | 25 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 2.15 练习                       | 26 |
| 2.16 参考书                      | 26 |
| 2.17 链接                       | 26 |
| 第 3 章 循环和数组                   | 27 |
| 3.1 计划                        | 27 |
| 3.2 准备                        | 27 |
| 3.3 探索                        | 27 |
| 3.4 do 循环                     | 27 |
| 3.5 变量声明                      | 28 |
| 3.6 for 循环                    | 29 |
| 3.7 更多循环示例                    | 30 |
| 3.8 数组                        | 30 |
| 3.9 发送一条信息                    | 31 |
| 3.10 用逻辑分析仪进行测试               | 33 |
| 3.11 用 Explorer 16 演示板进行测试    | 33 |
| 3.12 用 PIC32 Starter Kit 进行测试 | 34 |
| 3.13 小结                       | 35 |
| 3.14 对汇编语言行家的提示               | 35 |
| 3.15 对 PIC 单片机行家的提示           | 36 |
| 3.16 对 C 语言行家的提示              | 36 |
| 3.17 提示与技巧                    | 36 |
| 3.18 练习                       | 37 |
| 3.19 参考书                      | 37 |
| 3.20 链接                       | 37 |
| 第 4 章 算术操作与优化                 | 38 |
| 4.1 计划                        | 38 |
| 4.2 准备                        | 38 |
| 4.3 探索                        | 38 |
| 4.4 关于优化（完全不优化）               | 40 |
| 4.5 测试                        | 40 |
| 4.6 关于 long long 类型           | 40 |
| 4.7 整数除法                      | 41 |
| 4.8 浮点数                       | 42 |
| 4.9 评估系统的性能                   | 43 |
| 4.10 小结                       | 45 |
| 4.11 对汇编语言行家的提示               | 45 |
| 4.12 对 8 位 PIC 单片机行家的提示       | 46 |

|                                  |           |                              |            |
|----------------------------------|-----------|------------------------------|------------|
| 4.13 对 16 位 PIC 和 dsPIC 单片机行家的提示 | 46        | 6.12 对 C 语言行家的提示             | 83         |
| 4.14 提示与技巧                       | 47        | 6.13 对汇编语言行家的提示              | 83         |
| 4.14.1 数学函数库                     | 47        | 6.14 对 PIC 单片机行家的提示          | 83         |
| 4.14.2 复数数据类型                    | 47        | 6.15 提示与技巧                   | 84         |
| 4.15 练习                          | 48        | 6.16 练习                      | 84         |
| 4.16 参考书                         | 48        | 6.17 参考书                     | 84         |
| 4.17 链接                          | 48        | 6.18 链接                      | 84         |
| <b>第 5 章 中断</b>                  | <b>49</b> | <b>第二部分 实 践</b>              |            |
| 5.1 计划                           | 49        | <b>第 7 章 时间与初始化</b>          | <b>86</b>  |
| 5.2 准备                           | 49        | 7.1 计划                       | 86         |
| 5.3 探索                           | 49        | 7.2 准备                       | 86         |
| 5.4 中断和异常                        | 49        | 7.3 探索                       | 86         |
| 5.5 中断源                          | 50        | 7.4 性能与功耗                    | 88         |
| 5.6 中断优先级                        | 51        | 7.5 主振荡时钟链                   | 89         |
| 5.7 中断服务程序的声明                    | 53        | 7.6 外围设备总线时钟                 | 90         |
| 5.8 管理中断的函数库                     | 54        | 7.7 器件的初始配置                  | 90         |
| 5.9 单向量中断的管理                     | 54        | 7.8 在代码中设定配置位                | 91         |
| 5.10 管理多个中断                      | 57        | 7.9 艰巨的任务                    | 92         |
| 5.11 多重向量中断的管理                   | 59        | 7.10 准备、设置、出发                | 97         |
| 5.12 一个简单的应用示例                   | 62        | 7.11 微调 PIC32: 配置 Flash 等待状态 | 98         |
| 5.13 辅助振荡器                       | 66        | 7.12 微调 PIC32: 打开指令和数据缓存     | 99         |
| 5.14 实时时钟和日历 (RTCC)              | 66        | 7.13 微调 PIC32: 打开预取指令功能      | 100        |
| 5.15 小结                          | 68        | 7.14 微调 PIC32: 最后一步          | 101        |
| 5.16 对 PIC 单片机行家的提示              | 68        | 7.15 小结                      | 102        |
| 5.17 提示与技巧                       | 68        | 7.16 对汇编语言行家的提示              | 102        |
| 5.18 练习                          | 69        | 7.17 对 PIC 单片机行家的提示          | 102        |
| 5.19 参考书                         | 69        | 7.18 提示与技巧                   | 103        |
| 5.20 链接                          | 69        | 7.19 练习                      | 105        |
| <b>第 6 章 存储器</b>                 | <b>70</b> | 7.20 参考书                     | 105        |
| 6.1 计划                           | 70        | 7.21 链接                      | 105        |
| 6.2 准备                           | 70        | <b>第 8 章 通信</b>              | <b>106</b> |
| 6.3 探索                           | 70        | 8.1 计划                       | 106        |
| 6.4 存储空间分配                       | 71        | 8.2 准备                       | 106        |
| 6.5 查看映射                         | 75        | 8.3 探索                       | 106        |
| 6.6 指针                           | 77        | 8.4 同步串行接口                   | 106        |
| 6.7 堆                            | 78        | 8.5 异步串行接口                   | 108        |
| 6.8 PIC32MX 总线                   | 78        | 8.6 并行接口                     | 108        |
| 6.9 PIC32MX 存储器映射                | 79        | 8.7 基于 SPI 的同步通信             | 109        |
| 6.10 嵌入式控制应用的存储器映射               | 82        | 8.8 测试读状态寄存器命令               | 112        |
| 6.11 小结                          | 83        |                              |            |

|                 |                           |     |  |  |  |
|-----------------|---------------------------|-----|--|--|--|
| 8.9             | 向 EEPROM 写数据              | 114 |  |  |  |
| 8.10            | 读取存储器的内容                  | 114 |  |  |  |
| 8.11            | 32 位串行 EEPROM 存储器的<br>函数库 | 115 |  |  |  |
| 8.12            | 测试新的串行 EEPROM 存储器<br>函数库  | 117 |  |  |  |
| 8.13            | 小结                        | 118 |  |  |  |
| 8.14            | 对 C 语言编程行家的提示             | 118 |  |  |  |
| 8.15            | 对 Explorer 16 专家的提示       | 119 |  |  |  |
| 8.16            | 对 PIC24 行家的提示             | 119 |  |  |  |
| 8.17            | 提示与技巧                     | 119 |  |  |  |
| 8.18            | 练习                        | 120 |  |  |  |
| 8.19            | 参考书                       | 120 |  |  |  |
| 8.20            | 链接                        | 120 |  |  |  |
| <b>第 9 章</b>    | <b>异步通信</b>               | 121 |  |  |  |
| 9.1             | 计划                        | 121 |  |  |  |
| 9.2             | 准备                        | 121 |  |  |  |
| 9.3             | 探索                        | 121 |  |  |  |
| 9.4             | UART 的配置                  | 122 |  |  |  |
| 9.5             | 数据发送与接收                   | 124 |  |  |  |
| 9.6             | 测试串行通信程序                  | 125 |  |  |  |
| 9.7             | 生成一个简单的控制台函数库             | 127 |  |  |  |
| 9.8             | 测试 VT100 终端               | 128 |  |  |  |
| 9.9             | 将串行端口用作调试工具               | 130 |  |  |  |
| 9.10            | Matrix 工程                 | 130 |  |  |  |
| 9.11            | 小结                        | 132 |  |  |  |
| 9.12            | 对 C 语言编程行家的提示             | 132 |  |  |  |
| 9.13            | 对 PIC 单片机行家的提示            | 132 |  |  |  |
| 9.14            | 提示与技巧                     | 132 |  |  |  |
| 9.15            | 练习                        | 133 |  |  |  |
| 9.16            | 参考书                       | 133 |  |  |  |
| 9.17            | 链接                        | 133 |  |  |  |
| <b>第 10 章</b>   | <b>LCD 显示</b>             | 134 |  |  |  |
| 10.1            | 计划                        | 134 |  |  |  |
| 10.2            | 准备                        | 134 |  |  |  |
| 10.3            | 探索                        | 134 |  |  |  |
| 10.4            | 与 HD44780 控制器兼容           | 134 |  |  |  |
| 10.5            | 并行主端口                     | 137 |  |  |  |
| 10.6            | 配置 PMP 用于 LCD 模块控制        | 137 |  |  |  |
| 10.7            | 访问 LCD 显示模块的小型函数库         | 138 |  |  |  |
| 10.8            | 生成 LCD 函数库并使用 PMP<br>函数库  | 141 |  |  |  |
| 10.9            | 函数库 EXPLORER.C            | 144 |  |  |  |
| 10.10           | 创建 include 和 lib 目录       | 146 |  |  |  |
| 10.11           | 高级 LCD 控制                 | 147 |  |  |  |
| 10.12           | 进度条工程                     | 148 |  |  |  |
| 10.13           | 小结                        | 150 |  |  |  |
| 10.14           | 对 PIC24 单片机行家的提示          | 151 |  |  |  |
| 10.15           | 提示与技巧                     | 151 |  |  |  |
| 10.16           | 练习                        | 151 |  |  |  |
| 10.17           | 参考书                       | 151 |  |  |  |
| 10.18           | 链接                        | 152 |  |  |  |
| <b>第 11 章</b>   | <b>模数转换</b>               | 153 |  |  |  |
| 11.1            | 计划                        | 153 |  |  |  |
| 11.2            | 准备                        | 153 |  |  |  |
| 11.3            | 探索                        | 153 |  |  |  |
| 11.4            | 完成第一次转换                   | 155 |  |  |  |
| 11.5            | 自动采样的时序                   | 156 |  |  |  |
| 11.6            | 开发演示系统                    | 157 |  |  |  |
| 11.7            | 创建自己的小型 ADC 函数库           | 158 |  |  |  |
| 11.8            | 乐趣与游戏                     | 158 |  |  |  |
| 11.9            | 温度检测                      | 160 |  |  |  |
| 11.10           | 小结                        | 164 |  |  |  |
| 11.11           | 对 PIC24 行家的提示             | 164 |  |  |  |
| 11.12           | 提示与技巧                     | 164 |  |  |  |
| 11.13           | 练习                        | 164 |  |  |  |
| 11.14           | 参考书                       | 164 |  |  |  |
| 11.15           | 链接                        | 165 |  |  |  |
| <b>第三部分 扩 展</b> |                           |     |  |  |  |
| <b>第 12 章</b>   | <b>捕获用户输入</b>             | 168 |  |  |  |
| 12.1            | 计划                        | 168 |  |  |  |
| 12.2            | 准备                        | 168 |  |  |  |
| 12.3            | 按钮和机械开关                   | 168 |  |  |  |
| 12.4            | 封装按钮输入信号                  | 170 |  |  |  |
| 12.5            | 消除按钮输入弹跳                  | 171 |  |  |  |
| 12.6            | 旋转编码器                     | 173 |  |  |  |
| 12.7            | 中断驱动的旋转编码器输入              | 176 |  |  |  |
| 12.8            | 键盘                        | 179 |  |  |  |
| 12.9            | PS/2 物理接口                 | 179 |  |  |  |
| 12.10           | PS/2 通信协议                 | 180 |  |  |  |

|                    |                  |            |                     |                        |            |
|--------------------|------------------|------------|---------------------|------------------------|------------|
| 12.11              | PIC32 和 PS/2 相连接 | 180        | 13.24               | 小结                     | 251        |
| 12.12              | 输入捕获模块           | 180        | 13.25               | 对 PIC24 行家的提示          | 252        |
| 12.13              | 用激励脚本进行测试        | 184        | 13.26               | 提示与技巧                  | 252        |
| 12.14              | 仿真器的运行特性统计工具     | 188        | 13.27               | 练习                     | 253        |
| 12.15              | 变更通知模块           | 189        | 13.28               | 参考书                    | 253        |
| 12.16              | 开销评估             | 193        | 13.29               | 链接                     | 254        |
| 12.17              | I/O 轮询           | 193        | <b>第 14 章 大容量存储</b> |                        | <b>255</b> |
| 12.18              | 测试 I/O 轮询方法      | 197        | 14.1                | 计划                     | 255        |
| 12.19              | 开销和效能的考虑         | 199        | 14.2                | 准备                     | 255        |
| 12.20              | 键盘缓冲             | 200        | 14.3                | 探索                     | 255        |
| 12.21              | 按键码的解码           | 203        | 14.4                | 物理接口                   | 256        |
| 12.22              | 小结               | 206        | 14.5                | 和 Explorer 16 演示板连接    | 256        |
| 12.23              | 对 PIC24 行家的提示    | 206        | 14.6                | 开始一个新工程                | 257        |
| 12.24              | 提示与技巧            | 207        | 14.7                | 选择 SPI 的操作模式           | 258        |
| 12.25              | 练习               | 207        | 14.8                | 在 SPI 模式下发送命令          | 258        |
| 12.26              | 参考书              | 207        | 14.9                | 完成 SD 卡的初始化            | 260        |
| 12.27              | 链接               | 208        | 14.10               | 从 SD/MMC 卡读取数据         | 261        |
| <b>第 13 章 视频处理</b> |                  | <b>209</b> | 14.11               | 向 SD/MMC 卡写入数据         | 263        |
| 13.1               | 计划               | 209        | 14.12               | 测试 SD/MMC 接口           | 265        |
| 13.2               | 准备               | 209        | 14.13               | 小结                     | 268        |
| 13.3               | 探索               | 209        | 14.14               | 提示与技巧                  | 268        |
| 13.4               | 复合视频信号的产生        | 211        | 14.15               | 练习                     | 269        |
| 13.5               | 输出比较模块           | 215        | 14.16               | 参考书                    | 269        |
| 13.6               | 图像缓冲             | 217        | 14.17               | 链接                     | 270        |
| 13.7               | 串行化、DMA 和同步      | 218        | <b>第 15 章 读写文件</b>  |                        | <b>271</b> |
| 13.8               | 完成一个视频库文件        | 222        | 15.1                | 计划                     | 271        |
| 13.9               | 测试复合视频信号         | 225        | 15.2                | 准备                     | 271        |
| 13.10              | 测试性能             | 227        | 15.3                | 探索                     | 271        |
| 13.11              | 看到黑屏             | 227        | 15.4                | 扇区和簇                   | 271        |
| 13.12              | 测试模式             | 228        | 15.5                | 文件分配表                  | 272        |
| 13.13              | 绘图               | 230        | 15.6                | 根目录                    | 273        |
| 13.14              | 一片星空             | 231        | 15.7                | 寻宝                     | 275        |
| 13.15              | 画出一条线            | 232        | 15.8                | 打开文件                   | 283        |
| 13.16              | Bresenham 算法     | 233        | 15.9                | 从文件中读取数据               | 289        |
| 13.17              | 画出数学函数           | 236        | 15.10               | 关闭文件                   | 293        |
| 13.18              | 画出二维函数图          | 237        | 15.11               | fileio 模块              | 293        |
| 13.19              | 分形               | 240        | 15.12               | 测试 fopenM() 和 freadM() | 295        |
| 13.20              | 文本               | 245        | 15.13               | 向文件中写入数据               | 297        |
| 13.21              | 通过视频打印文本         | 247        | 15.14               | 关闭文件 (续)               | 300        |
| 13.22              | 文本测试             | 249        | 15.15               | 辅助函数                   | 302        |
| 13.23              | Matrix 程序的修改     | 250        | 15.16               | 测试完整的 fileio 模块        | 304        |

---

|               |                      |            |       |                  |     |
|---------------|----------------------|------------|-------|------------------|-----|
| 15.17         | 代码体积                 | 307        | 16.7  | 复制声音信息           | 317 |
| 15.18         | 小结                   | 307        | 16.8  | 媒体播放器            | 318 |
| 15.19         | 提示与技巧                | 307        | 16.9  | WAVE 文件格式        | 319 |
| 15.20         | 练习                   | 308        | 16.10 | play() 函数        | 320 |
| 15.21         | 参考书                  | 308        | 16.11 | 音频例程             | 326 |
| 15.22         | 链接                   | 308        | 16.12 | 一个简单的 WAVE 文件播放器 | 328 |
| <b>第 16 章</b> | <b>音乐播放器</b>         | <b>309</b> | 16.13 | 小结               | 329 |
| 16.1          | 计划                   | 309        | 16.14 | 提示与技巧            | 329 |
| 16.2          | 准备                   | 309        | 16.15 | 练习               | 330 |
| 16.3          | 探索                   | 309        | 16.16 | 参考书              | 330 |
| 16.4          | OC PWM 模式            | 311        | 16.17 | 链接               | 330 |
| 16.5          | 把 PWM 作为 D/A 转换器进行测试 | 312        | 16.18 | 免责声明             | 330 |
| 16.6          | 产生模拟波形               | 314        | 16.19 | 对于一些行家的最后提示      | 330 |

---

# 第一 部 分

## 探 索

（此處為模糊的背景文字，內容不可辨識）

# 第 1 章 初识 PIC32

## 1.1 计划

这将是我們首次探索 32 位单片机 PIC32，有些读者可能还是首次使用 MPLAB IDE（集成开发环境）以及 MPLAB C32 程序语言开发包开发工程。即使你从未听说过 C 语言，但是你也应该听说过著名的“Hello world”程序示例。如果你对此也很陌生，那我还是说说吧。

自从几十年前 Kernighan 和 Ritchie 编著了第一本 C 语言的书籍以来，任何正规的 C 语言书籍都会提到一个在电脑屏幕上显示“Hello World”的示例程序。成百上千的书籍都遵从这个传统，因此本书也不例外。但是，本书的示例会略有不同，它更加真实：由于我们要设计嵌入式控制应用系统，因此我们讨论的是单片机编程。虽说所有的个人电脑或者工作站都有显示屏，但是嵌入式控制应用系统却往往并非如此。因此，在本书的第一个嵌入式应用设计中，还是采用更为基本的输出方式：数字 I/O 引脚。在后面几章介绍高级应用时，嵌入式系统将与 LCD 显示屏相接，或者通过串行端口与另一个终端相接。到那时就将实现更加高级的功能，而不只是简单地显示“Hello World”。

## 1.2 准备

无论你是计划一次短期的户外旅行还是筹备一次大型的北极探险，都一定要携带合适的装备。尽管对 PIC32 架构的探索决不关乎生死，但是如果你能在出门前，我的意思是在开始编写代码前，完成下列简单工作，那么你就会备感轻松。

首先，请检查一下是否安装了下列必需的软件（这些软件可以从本书附带资源获得，也可以从 Microchip 公司的 PIC32 网站 [www.microchip.com/PIC32](http://www.microchip.com/PIC32) 下载最新版本）。

- MPLAB IDE，免费的集成开发环境（v8.xx 或更高版本）。
- MPLAB SIM，免费的软件仿真器（包含在 MPLAB 中）。
- MPLAB C32，C 编译器（免费的学生版）。

下面，我们将使用 New Project Setup 检查表在 MPLAB IDE 中创建一个新的工程。首先，在 Project 菜单中选择 Project Wizard。这样就会启动几个有用的对话框，在它们的指引下，只需完成几步就能有序而简洁地创建一个新工程。

(1) 第一个对话框要求用户选择器件型号。请选择 PIC32MX360F512L，然后单击 Next 按钮。尽管在本例中我们只需使用仿真器，并且可以使用很多型号的 PIC32 芯片来完成本工程的任务，但是在本书的整个探索过程中都是使用的这一款芯片。

(2) 在第二个对话框中，选择 PIC32 C-Compiler Tool Suite，然后单击 Next 按钮。目前市面上有很多针对其他各种 PIC 架构的编译工具包，并且至少有一款能用于 PIC32 的汇编语言开发。千万不要将它们混淆在一起！


(3) 在第三个对话框中，需要指定新工程的名称。也可以单击 Browse 按钮，并新建一个文件夹。将该文件夹命名为 Hello，在其中创建工程文件 Hello World，然后单击 Next 按钮。

(4) 第四个对话框是向工程中添加源文件，由于这里不需要从以前的工程或者其他目录复制源文件到新工程中，因此只要单击 Next 按钮进入下一个对话框即可。

(5) 单击 Finish 按钮完成创建工程。



由于这是第一次创建工程，因此还需完成以下步骤。

(6) 打开新的编辑窗口。方法是选择菜单 File | New，或者按下 Ctrl+N 快捷键，或者单击 MAPLAB 标准工具条中对应的图标  (New File)。

(7) 输入以下 3 行注释：

```
/*
**Hello Embedded World!
*/
```

(8) 选择菜单 File | Save As 将上述代码保存为文件 Hello.c。

(9) 在编辑窗口上单击鼠标右键，在弹出的编辑器上下文菜单中选择 Add to Project 选项，将新建的文件加入工程中。

(10) 选择菜单 Project | Save Project 保存工程。



**注解** 你会注意到，保存源文件后，编辑窗口里的 3 行代码会变成绿色。这是因为 MPLAB 的编辑器已经识别出该文件是 C 语言源文件（从.c 扩展名看得出来），并且使用默认的区分上下文的染色规则。根据这些规则，注释代码显示为绿色，C 语言关键字显示为蓝色，其余代码则显示为黑色。

完成工程创建后，电脑屏幕上的工程窗口就会如图 1-1 所示。如果未看到工程窗口，那么请选择菜单 View | Project。这样 View 菜单中的选项旁就会出现小对勾。请确认已选中 File 选项卡。在后面，我们还会学习使用另一个选项卡 (Symbols)。

根据个人习惯，你可能希望将工程窗口固定在工作区某处，而不是让其处于浮动的状态。单击标题栏，从上下文菜单中选择 Dockable 选项，之后就能将工程窗口拖动到期望的屏幕边缘处，这样它就会和编辑器分开并固定下来。

## 1.3 探索

下面该编写代码了。我能感觉到你有些紧张，特别是你可能从未用 C 语言编写过嵌入式控制应用代码。我们要写的第一行代码是：

```
#include <p32xxxx.h>
```

这并不能算是 C 语句，而是预处理指令（用于编译器），它将在执行进一步处理前引用器件相关的文件。文件 pic32xxxx.h 中又包含更多的 #include 指令，以便能包含与当前工程所选择的器件有关的文件。本例中将引用 p32mx360f5121.h 文件。我们也可以直接引用该文件，但是为了使代码更具独立性，并且便于将来移植到使用其他芯片的工程中，此处还是引用 p32xxxx.h。

如果你进一步查看 p32mx360f5121.h 文件的内容（这是一个普通的文本文件，可以使用 MPLAB 的文本编辑器打开它），就会发现它包含了大量定义，它们都是所选 PIC32 芯片的内部特殊功能寄存器（在很多文档里被简记作 SFR）名称的定义。如果所引用的文件准确，那么这些特殊功能寄存器的名称就和器件的数据手册以及 PIC32 参考手册中使用的名称一致。

下面是 p32mx360f5121.h 文件中的一段，包括控制看门狗模块 (WDTCON) 的特殊功能寄

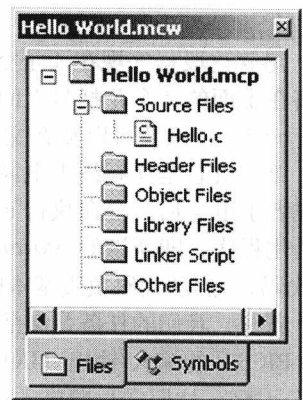


图 1-1 “Hello World”工程窗口