



Technology by

TEXAS

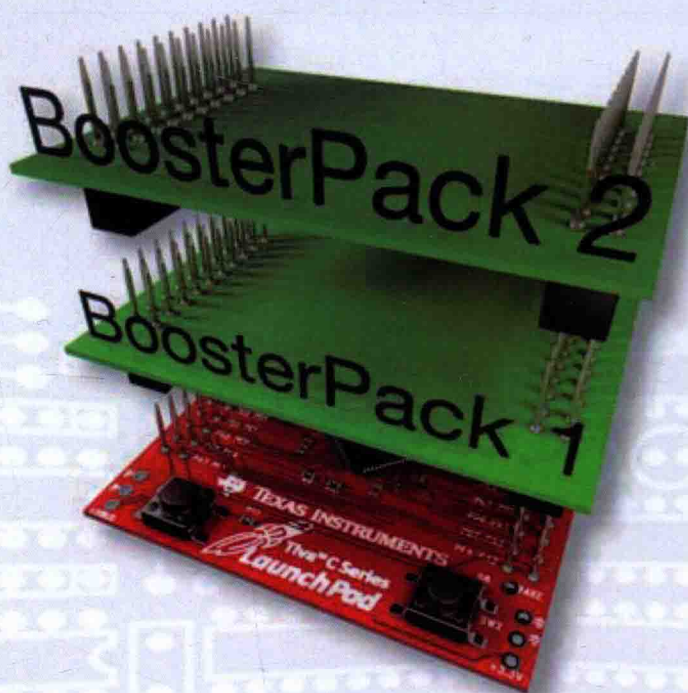
INSTRUMENTS

中国大学计划教材

电 气 信 息 工 程 丛 书

基于固件的ARM Cortex M4 原理及应用

刘 杰 陈昌川 编著



- 配有各章程序及相关资源，下载网址为www.cmpbook.com
- 采用真实硬件：EK-TM4C123GXL和虚拟硬件：Proteus 8.1



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气信息工程丛书

基于固件的 ARM Cortex M4 原理及应用

刘杰 陈昌川 编著



机械工业出版社

本书围绕 TI TM4C123G 的固件库函数这一主线,介绍了 TM4C123G6HPM 微处理器的基本外设特点、结构与功能,固件库的函数功能及其使用。本书采用了真实硬件 EK-TM4C123GXL LaunchPad 实验板(包括 DK-TM4C123G)与虚拟硬件 Proteus 8.1 相结合的方式介绍基于固件的软件编程与测试方法,以利于有真实板卡但资源不足或无 EK-TM4C123GXL 板卡的读者学习与测试基于固件的代码之用。

本书可供嵌入式工程师在基于固件的 ARM Cortex M4 开发时查阅,也可作为高校电类专业学习 ARM Cortex M4 的入门教材。

图书在版编目(CIP)数据

基于固件的 ARM Cortex M4 原理及应用/刘杰,陈昌川编著. —北京:机械工业出版社,2015.9

(电气信息工程丛书)

ISBN 978-7-111-51624-8

I. ①基… II. ①刘… ②陈… III. ①微处理器 IV. ①TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 226920 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:时 静

责任校对:张艳霞

责任印制:李 洋

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·32 印张·792 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-51624-8

定价:89.90 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前言

TI Tiva™ C 系列微控制器采用基于 ARM® Cortex™ - M4 内核的卓越架构, 具备强大的集成能力, 提供了成熟的软件和开发工具生态系统, 是嵌入式工程师的理想选择。为了提供最佳的性能和灵活性, Tiva™ C 系列架构推出了具有 FPU、各种集成存储器以及可编程 GPIO 的 80 MHz Cortex - M4 微控制器。Tiva™ C 系列可集成适合特殊应用的外设, 以及广泛的软件工具选项, 能大大降低电路板成本, 缩短产品的设计周期, 是用户理想的成本效益型解决方案。

随着 TI Stellaris M3 系列微控制器逐步退出历史舞台, Tiva™ C 系列芯片可帮助用户缩短产品上市时间、节省开发成本, 成为高性能 32 位应用的优选。但市面上或网络中有关 TM4C123G 系列微控制器的书籍和资料还很少, 使初学者很难上手, 所以编撰一本有关 Tiva™ C 系列微控制器的技术手册和入门级教科书很有必要, 本书就是在这样的形势下实施的。

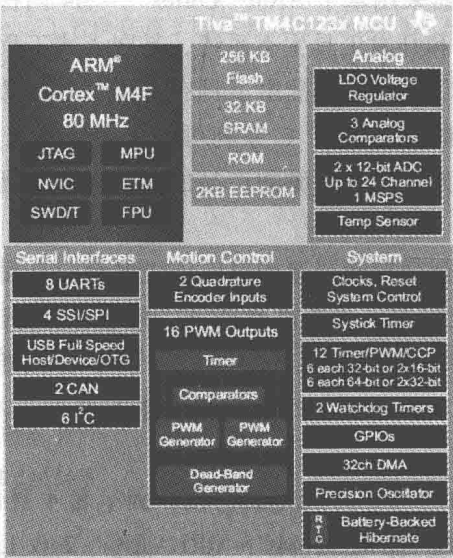
本书历时一年多, 于 2014 年 3 月底完成初稿, 因笔者 4 月份生病住院而耽误了书的进展。今年 1 月按照新版固件库 (SW - TM4C - DRL - UG - 2.0.1.11577) 重新对原有固件库函数进行了增减与修订, 修改了各章的外设功能简介, 增加了基于 Proteus 虚拟硬件测试的例程, 并于 2015 年 4 月 12 日完成全部工作。

对于初学者来说, 模仿不失为一种快速掌握 Tiva™ C 系列微控制器软件编程的有效方法, 参考文献中提到的一家公司为 Stellaris M3 能被国内的广大用户接受做了大量的推广工作, 并留下了许多宝贵的网络资源。国内的其他科技公司和大学也为 Stellaris M3 的推广做了一些有益工作, 但它们采用了不同的 ARM Cortex 开发软件, 这给初学者使用这些宝贵资源带来了不少的麻烦。为了规避这些问题, 本书较详细地介绍了 Keil5 for ARM、IAR for ARM、CCS 6 软件的使用方法, 为没有 LaunchPad 实验板或硬件、测试仪器匮乏的读者专门介绍了基于 Proteus 8.1 的软件测试方法, 因为仅就软件编程与测试方法来说, ARM Cortex M3 和 M4 并无多大区别。

本书摒弃了传统的通过配置寄存器来开发 ARM Cortex M4 的程序开发模式 (51 单片机式的), 可大大加快编写软件与测试的进度, 降低开发者的入门门槛。因为目前国外多采用基于模型设计的软件开发方法, 仅需开发者把主要精力投入算法模型的研究上, 代码由计算机自动生成。基于固件的开发本质上也继承了基于模型的观点, 让工程师从详细了解超 1000 页的 M4 芯片数据手册, 以及配置寄存器代码的长时间劳动中解放出来。把这些困难与繁重的工作交由芯片生产厂家去完成 (编写各寄存器的固件库函数代码), 开发者仅需专注项目的实现方法即可。本书紧扣固件库函数这一核心, 共 16 章, 详细介绍了固件库函数的功能及使用方法, 在书后附录中给出了常用固件库函数的功能简介 (为了压缩本书的厚度省略了注意事项, 读者在查阅附录时请留意, 如果遇到使用问题可参考 SW - TM4C - DRL -

UG-2.0.1.11577 固件库原文)，以期初学者能快速掌握基于固件的 ARM Cortex M4 的软件开发与测试方法。

有关 ARM Cortex 架构的书籍及网络资源很多，本书不再赘述这部分内容。对于不了解 ARM Cortex 架构的读者，在学习本书之前请先行阅读 ARM Cortex - M3 权威指南一书，这里仅给出 Tiva™ TM4C123x 的模块框图，如下图所示。



本书由刘杰、陈昌川编写，写作过程中得到了美国德州仪器中国大学部谢胜祥工程师、大学部经理沈洁、黄争、潘亚涛等大力支持，他们提供了本书全部的实验板卡、资料等。程泳、郭丹、李晗、吴仪炳、陈添丁、杨元廷、史进、谢文福、杨叶腾、陈松雷、寿永勇、余延臻、林东灿、林亮亮、许惠敏、王爱忠、苏泓、史永祥、陈鸿霖、周楠、赵建欣、王丽琴、谭笑、林静、黄荣、高建鸿、杜程远、张志鸿、张伟敏、吴承清、林肖、李加滨、江丽珍、黄冠莉、陈阳、董晓芳、陈志成、姜杨、彭浩书等同学参加了个别章节的结构和固件库函数的初始翻译与资料整理工作，机械工业出版社的时静编辑对本书的进展进行了全程监控并对书的结构提出了宝贵的建议，在此一并感谢，没有他们的辛勤劳动与帮助不可能完成本书的编撰工作。

由于书中 TI 技术资料的翻译与整理工作量较大，而且时间紧任务重，加之自己的水平有限，肯定存在对 TI 技术文献的理解歧义和错误，敬请读者批评指正。

刘 杰
2015.4 于福大怡园

目 录

前言	
第1章 开发工具使用入门	1
1.1 下载与安装所需的软件	1
1.2 第一个基于 CCS6 的 hello world 工程	2
1.2.1 导入已存在的工程	2
1.2.2 创建一个新工程	6
1.2.3 LM 闪存编程器	9
1.3 Keil for ARM 入门基础	12
1.3.1 导入一个 hello 工程	12
1.3.2 创建一个 hello 工程	15
1.4 IAR Embedded Workbench for ARM 入门基础	19
1.4.1 打开一个现有工程	19
1.4.2 创建一个新工程	21
第2章 EK-TM4C123GXL 及 Proteus 简介	26
2.1 EK-TM4C123GXL 简介	26
2.1.1 TM4C123GXL 的特点	26
2.1.2 评估板模块框图	27
2.2 Proteus 8.1 简介	28
2.2.1 新增功能	28
2.2.2 Proteus 8.1 界面简介	28
2.2.3 如何寻找 Proteus 中的元器件	29
2.2.4 虚拟仪器的使用	30
2.2.5 基于 Proteus 8.1 的 M3 编程与测试	33
2.2.6 基于 Proteus 8.1 的 M3 代码测试	38
第3章 通用异步收发器模块 (UART)	41
3.1 UART 模块	41
3.1.1 UART 的特点	41
3.1.2 UART 的结构框图	42
3.1.3 信号描述	42
3.1.4 UART 模块功能的简要介绍	44
3.2 UART 固件库函数	49
3.2.1 UART 固件库结构	49
3.2.2 UART 的基本操作	50
3.3 例程	50
第4章 模数转换器 (ADC)	57
4.1 ADC 模块	57
4.1.1 ADC 特点	57
4.1.2 ADC 模块框图	58
4.1.3 信号描述	60
4.1.4 功能简介	60
4.2 ADC 固件库函数	66
4.3 例程	66
第5章 通用输入/输出 (GPIO)	79
5.1 GPIO 模块	79
5.1.1 GPIO 特点	79
5.1.2 GPIO 模块框图	80
5.1.3 功能简介	80
5.1.4 寄存器映射及寄存器描述	82
5.2 GPIO 固件库函数	87
5.3 例程	88
第6章 模拟比较器 (COMP)	99
6.1 COMP 单元	99
6.1.1 COMP 特点	99
6.1.2 COMP 模块框图	99
6.1.3 信号描述	99
6.1.4 功能简介	100
6.1.5 寄存器映射	102
6.2 COMP 固件库函数	102
6.3 例程	103
第7章 系统定时与中断控制	113
7.1 NVIC 模块	114
7.1.1 NVIC 模块的特点	114

7.1.2 功能描述	115	10.3.3 ROM 固件更新	193
7.1.3 中断优先级	116	10.4 EEPROM 固件库函数	194
7.1.4 中断异常	116	10.5 例程	195
7.1.5 寄存器映射	116	10.5.1 写闪存例程	195
7.2 SysTick 与 NVIC 固件库函数 ..	118	10.5.2 读写 EEPROM 例程	198
7.2.1 SysTick 固件库	118	第 11 章 通用定时器 (GPTM)	203
7.2.2 NVIC 固件库	119	11.1 通用定时器单元	203
7.3 例程	119	11.1.1 主要特点	203
第 8 章 内部集成电路接口 (I2C) ...	136	11.1.2 GPTM 模块框图	204
8.1 I2C 单元	136	11.1.3 信号描述	205
8.1.1 I2C 特点	136	11.1.4 功能简介	205
8.1.2 I2C 模块框图	137	11.2 GPTM 固件库函数	213
8.1.3 信号描述	137	11.3 例程	213
8.1.4 功能描述	138	第 12 章 脉冲宽度调制 (PWM)	224
8.2 I2C 固件库函数	141	12.1 PWM 单元	224
8.2.1 主机操作	141	12.1.1 PWM 的主要特点	224
8.2.2 从机操作	142	12.1.2 PWM 的模块框图	225
8.2.3 I2C 固件库描述	143	12.1.3 信号描述	225
8.3 例程	143	12.1.4 功能简介	225
8.3.1 主从回环例程	143	12.2 PWM 固件库函数	231
8.3.2 基于 I2C 的 EEPROM 读写 例程	151	12.3 例程	231
第 9 章 同步串行接口 (SSI)	162	第 13 章 微直接存储器访问 (μDMA)	238
9.1 SSI 单元	162	13.1 μ DMA 单元	238
9.1.1 SSI 的特点	162	13.1.1 μ DMA 的特点	238
9.1.2 模块框图	163	13.1.2 μ DMA 模块框图	239
9.1.3 信号描述	164	13.1.3 功能简介	239
9.1.4 功能简介	164	13.2 μ DMA 固件库函数	247
9.1.5 寄存器映射	171	13.3 例程	247
9.2 SSI 固件库函数	172	第 14 章 通用串行总线控制器 (USB)	259
9.3 例程	173	14.1 USB 简介	259
第 10 章 内部存储器	183	14.2 TM4C123GH6PM USB 控制器 ...	266
10.1 内部存储器单元	183	14.2.1 USB 的特点	266
10.1.1 模块框图与控制逻辑	183	14.2.2 USB 模块框图	267
10.1.2 功能简介	183	14.2.3 USB 信号描述	267
10.2 闪存固件库函数	190	14.2.4 USB 功能描述	268
10.3 使用 ROM	191	14.3 USB 固件库函数	273
10.3.1 直接 ROM 调用	191	14.3.1 USB 的分层框架结构	273
10.3.2 映射 ROM 调用	192		

14.3.2	Driverlib 库函数介绍	275		函数简介	385
14.3.3	USBlb 库函数介绍	279	附录 C	第 5 章附录: GPIO 固件库 函数简介	397
14.4	例程	283	附录 D	第 6 章附录: 模拟比较器 固件库函数简介	409
第 15 章	FatFS 文件读取实验	300	附录 E	第 7 章附录: SysTick 与 NVIC 固件库函数简介	412
15.1	SD 卡概述	300	E.1	SysTick 固件库函数	412
15.1.1	SD 卡的内部结构及信号描述 ...	300	E.2	NVIC 固件库函数	413
15.1.2	SD 卡的命令	302	附录 F	第 8 章附录: I2C 固件库 函数简介	417
15.1.3	SD 卡的功能描述	304	附录 G	第 9 章附录: SSI 固件库 函数简介	429
15.1.4	SD 卡驱动程序解读	308	附录 H	第 10 章附录: 内部存储器的 固件库函数简介	435
15.2	SD 卡 FatFS 文件读取实验	320	H.1	闪存 (Flash) 固件库函数	435
15.2.1	FatFS 文件系统简介	320	H.2	闪存保护单元 (MPU) 固件库 函数	438
15.2.2	实验硬件连接图	321	H.3	EEPROM 固件库函数	441
15.2.3	导入 sd_card 工程	322	附录 I	第 11 章附录: GPTM 固件库 函数简介	448
第 16 章	基本图形库 (Glib)	335	附录 J	第 12 章附录: PWM 固件库 函数简介	458
16.1	图形库与液晶屏概述	335	附录 K	第 13 章附录: μ DMA 固件库 函数简介	473
16.1.1	图形库概述	335	附录 L	第 14 章附录: USB DriverLib 固件库函数简介	481
16.1.2	液晶屏简介	336	参考文献		503
16.2	TivaWare 图形库简介	346			
16.2.1	图形库的特点	346			
16.2.2	图形库源代码	347			
16.2.3	图形固件库函数	348			
16.2.4	实用工具 (Utilities)	365			
16.2.5	预定义的颜色参考	367			
16.3	例程	368			
附录		373			
附录 A	第 3 章附录: UART 固件库 函数简介	373			
附录 B	第 4 章附录: ADC 固件库				

第 1 章

开发工具使用入门

本章将简单介绍 CCS6、Keil for ARM、IAR for ARM 与 SW - EK - TM4C123GXL 驱动程序的安装及其使用方法。

本章的主要内容：

- CCS5 的安装及使用方法
- Keil for ARM 的安装及使用方法
- IAR for ARM 的安装及使用方法
- ICDI 驱动程序的安装



1.1 下载与安装所需的软件

SW - EK - TM4C123GXL 软件包的下载地址：<http://www.ti.com/tool/SW-EK-TM4C123GXL>

主要包括以下软件：

- ① 基于 CCS5/6 的软件包。
- ② 基于 IAR 的软件包。
- ③ 基于 KEIL 的软件包。

待下载的三个软件包如图 1-1 所示，已下载的 EK - TM4C123GXL - CCS 软件包内容如图 1-2 所示，然后按照手册的说明安装这三个软件包。限于篇幅这里不再详述。

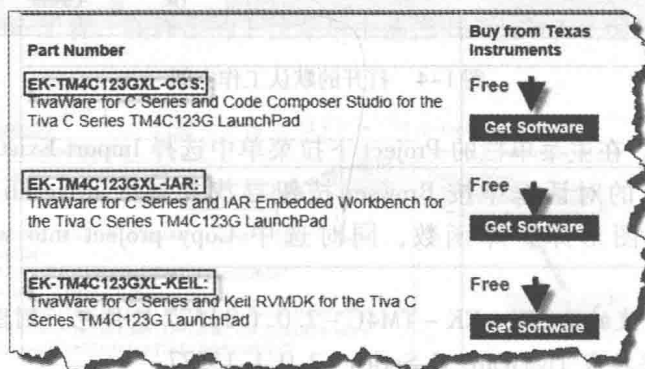


图 1-1 待下载的软件

注意：三个软件包与 LaunchPad 板子相关的驱动程序都是相同的，只安装一次即可。

双击菜单 TivaWare 中的 SW - EK - TM4C - 2.0.1.11577. exe，开始安装 TivaWare 开发软件包（如图 1-2 所示），安装完成后的开发软件包目录树如图 1-3 所示。

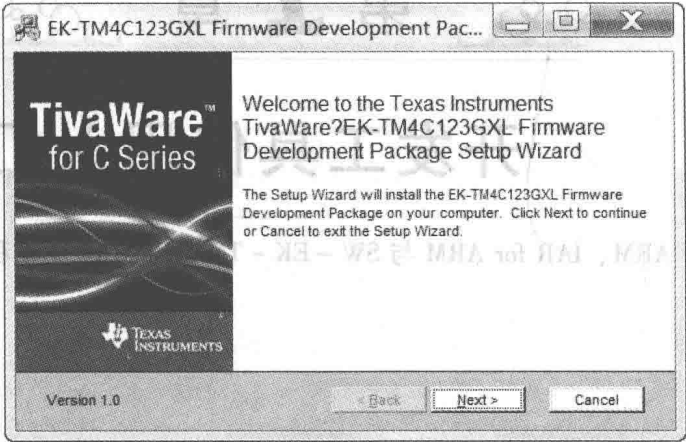


图 1-2 安装 EK - TM4C123GXL 开发包



图 1-3 TivaWare 开发软件包目录

1.2 第一个基于 CCS6 的 hello world 工程

1.2.1 导入已存在的工程

1) 按默认状态打开一个工作空间，如图 1-4 所示。

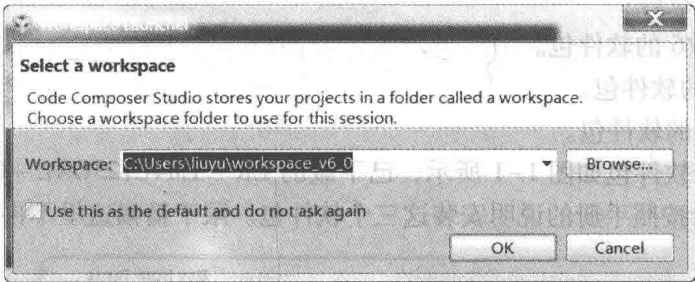


图 1-4 打开的默认工作空间

2) 导入库函数。在主菜单栏的 Project 下拉菜单中选择 Import Existing CCS Eclipse Project 子菜单，在弹出的对话框中按 Browser 按钮寻找并导入 driverlib（驱动库）、usbllib（usb 库）和 glib（图形库）库函数，同时选中 Copy project into workspace 选项，如图 1-5、1-6 所示。

注意：若用户安装的是 SW - EK - TM4C - 2.0.1.11577 软件包，则图 1-6 中的 TivaWare_C_Series 目录应该替换成 TivaWare_C_Series - 2.0.1.11577。

3) 将 EK - TM4C123GXL（LaunchPad）开发板的例程导入工作空间，如图 1-7 所示。

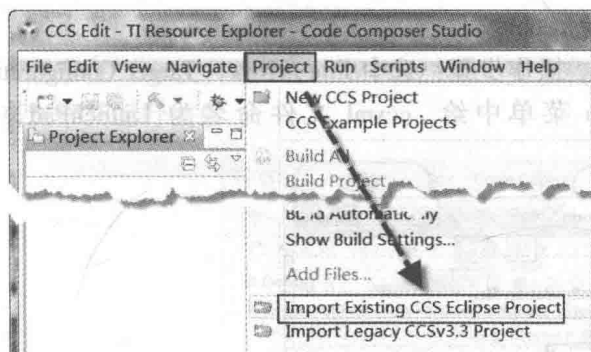


图 1-5 选中 Import Existing CCS
Eclipse Project 子菜单

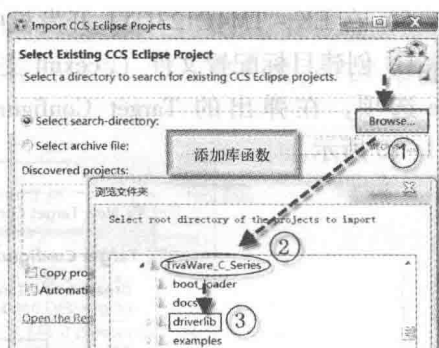


图 1-6 添加库函数的过程

4) 编译调试已存在的工程。

① 左键单击某工程来激活该工程，比如激活的 hello 工程如图 1-8 所示。



图 1-7 导入 EK - TM4C123GXL 开发板例程

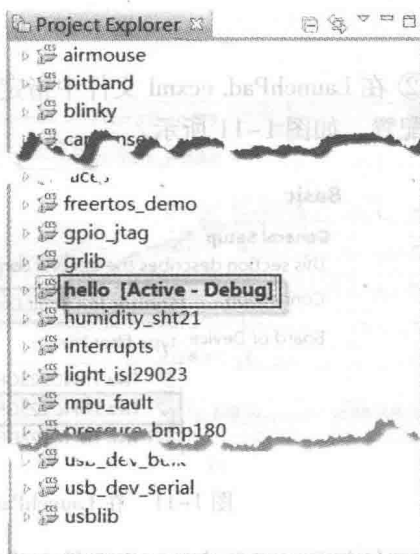


图 1-8 使 hello 工程处于激活状态

② 右键单击 hello 工程，在弹出的下拉菜单中选择 Build Project 编译 hello 工程，其结果如图 1-9 所示。

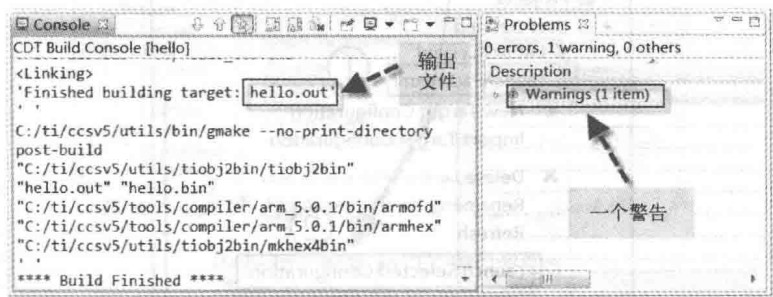


图 1-9 编译结果生成 .out 格式可执行文件

5) 在 EK - TM4C123GXL 开发板中运行 .out 文件。

① 创建目标配置文件 (.ccxml 文件)。操作步骤: 选中 File→New→Target Configuration File 选项, 在弹出的 Target Configuration 菜单中给 .ccxml 文件命名为 LaunchPad, 如图 1-10 所示。

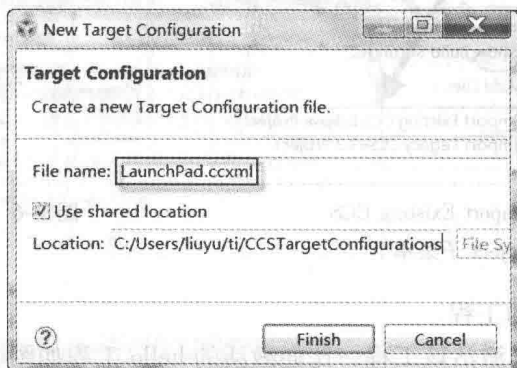


图 1-10 给 .ccxml 文件命名为 LaunchPad

② 在 LaunchPad.ccxml 文件中指定 ARM Cortex 芯片与仿真器, 然后按右侧的 Save 按钮保存配置, 如图 1-11 所示。

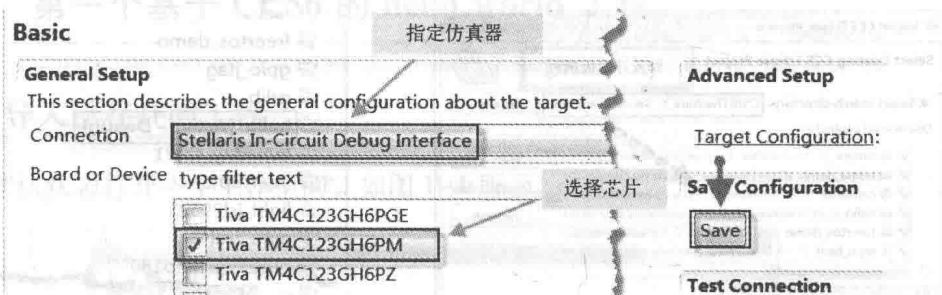


图 1-11 在 LaunchPad.ccxml 文件中指定仿真器与所用芯片

③ 右击 LaunchPad.ccxml 文件, 在弹出的下拉菜单中单击 Launch Selected Configuration 选项, 发出目标配置信息, 如图 1-12 所示。



图 1-12 发出目标配置信息

④ 按图 1-13 所示步骤导入 .out 文件并启动程序在 EK - TM4C123GXL 开发板上运行。为了观察在 .out 文件在 EK - TM4C123GXL 开发板中的运行结果，下面将采用 puTTY 串口助手来观察其运行结果。

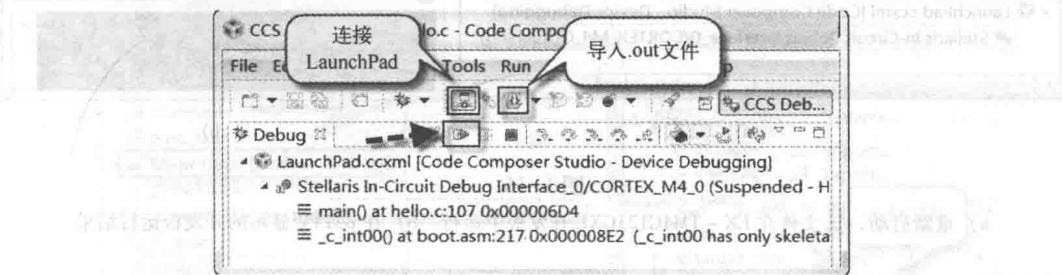


图 1-13 导入 .out 文件的过程及启动程序在 EK - TM4C123GXL 中测试

6) 寻找 EK - TM4C123GXL 板子的虚拟串口号与配置串口，如图 1-14a、b 所示。

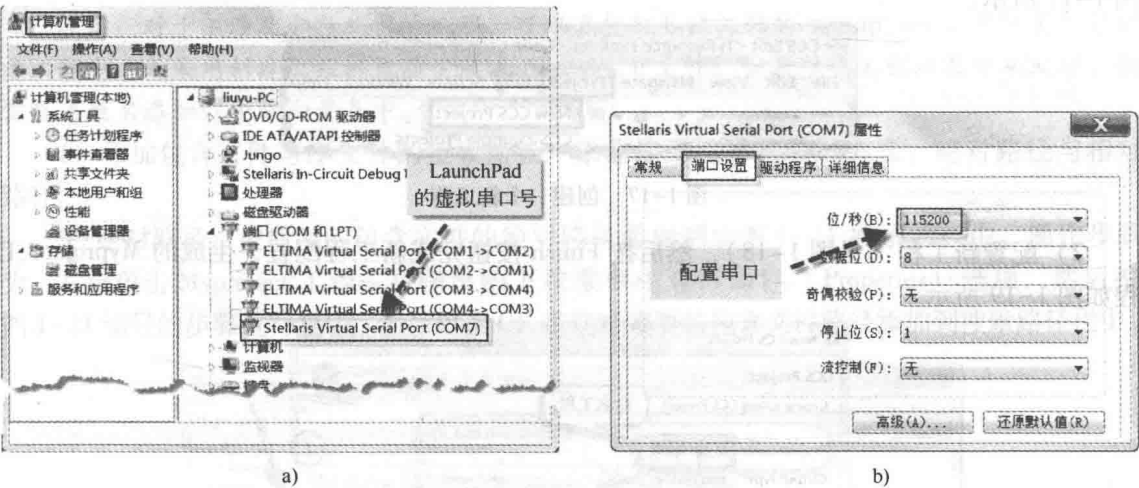


图 1-14

a) 寻找 EK - TM4C123GXL 板子的虚拟串口号 b) 配置虚拟串口参数

7) 配置 puTTY 串口参数如图 1-15 所示。

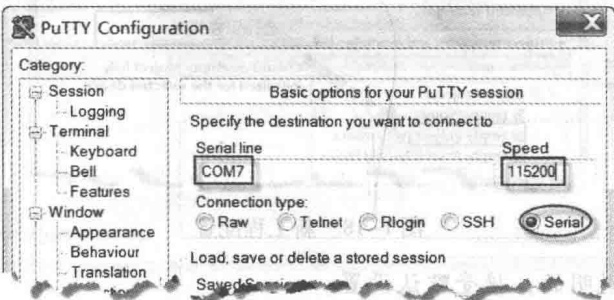


图 1-15 配置 puTTY 串口参数

说明：对于不同的 EK - TM4C123GXL 开发板和电脑，可能分配不同的虚拟串口。

8) 重新启动 .out 文件在 EK - TM4C123GXL 中运行, 在 puTTY 中显示的测试结果, 如图 1-16a、b 所示。

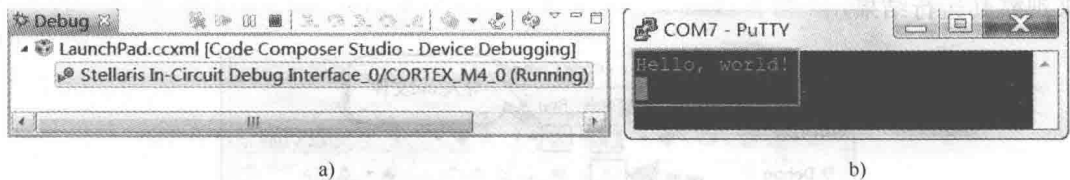


图 1-16

a) 重新启动 .out 文件在 EK - TM4C123GXL 开发板中运行 b) 在 puTTY 显示的开发板运行结果

1.2.2 创建一个新工程

1) 在主菜单中选择 Project→New CCS Project, 在弹出的工作空间创建一个新工程, 如图 1-17 所示。

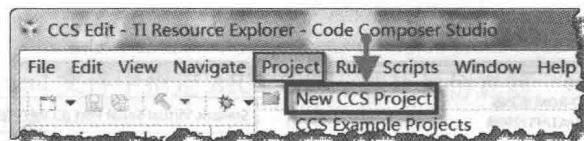


图 1-17 创建一个新工程

2) 配置新工程 (见图 1-18), 然后按 Finish 按钮完成新工程配置, 生成的 Myproject 工程如图 1-19 所示。

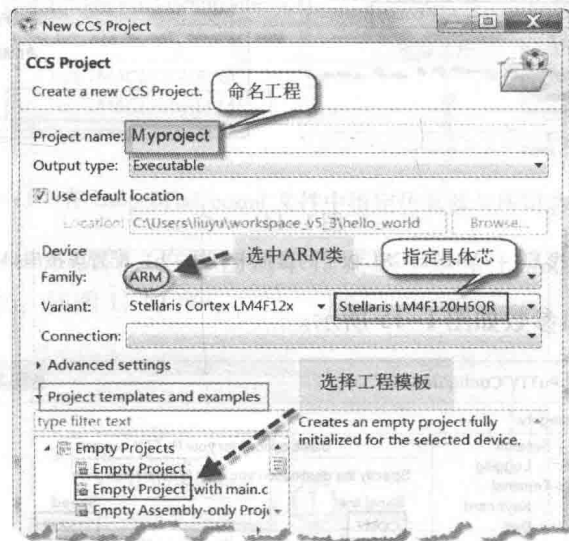


图 1-18 新工程配置

注意: 没有特别说明的, 接受默认设置。

3) 创建或添加 .c 文件到新建的工程中。

① 将 project0 工程中的 project0.c 文件内容全部复制到 main.c 文件中, 然后保存该文件。

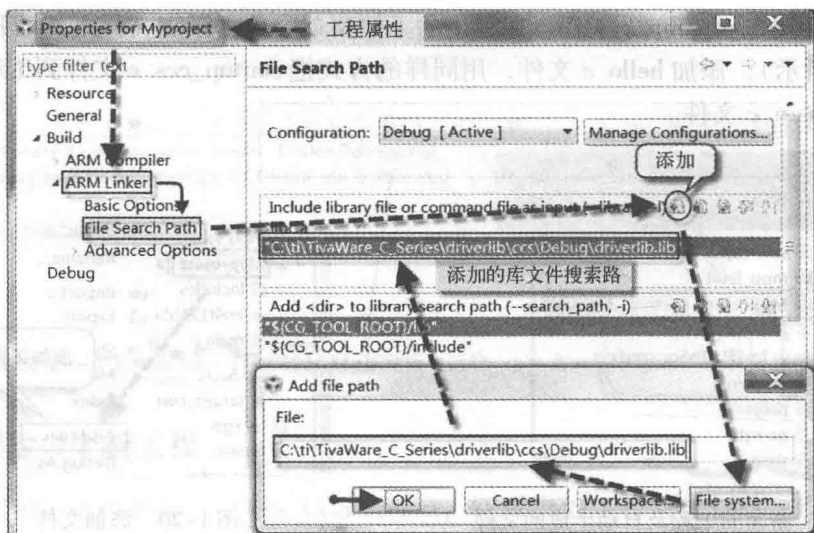


图 1-22 添加库文件绝对路径的步骤

首先在 Build 菜单下选中 Variables 选项，然后单击右边的添加（Add）按钮，创建 ORIGINAL_PROJECT_ROOT 和 SW_ROOT 两个变量，如图 1-23 所示。在搜索路径栏中引用变量产生相对路径，如图 1-24 所示。



图 1-23 创建变量

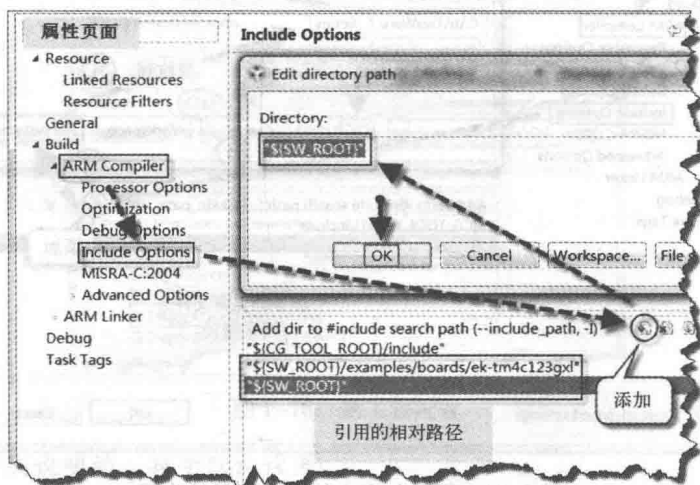


图 1-24 添加包含文件的相对搜索路径

用同样方法添加库文件的相对搜索路径，如图 1-25 所示。

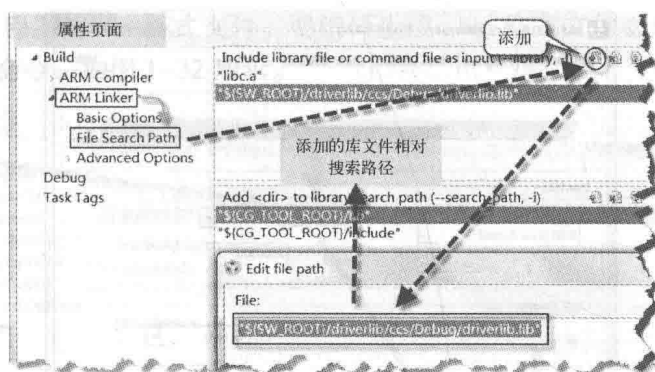


图 1-25 添加库文件的相对搜索路径

5) 编译配置成相对搜索路径的 Myproject 工程，其步骤及结果如图 1-26a、b 所示。

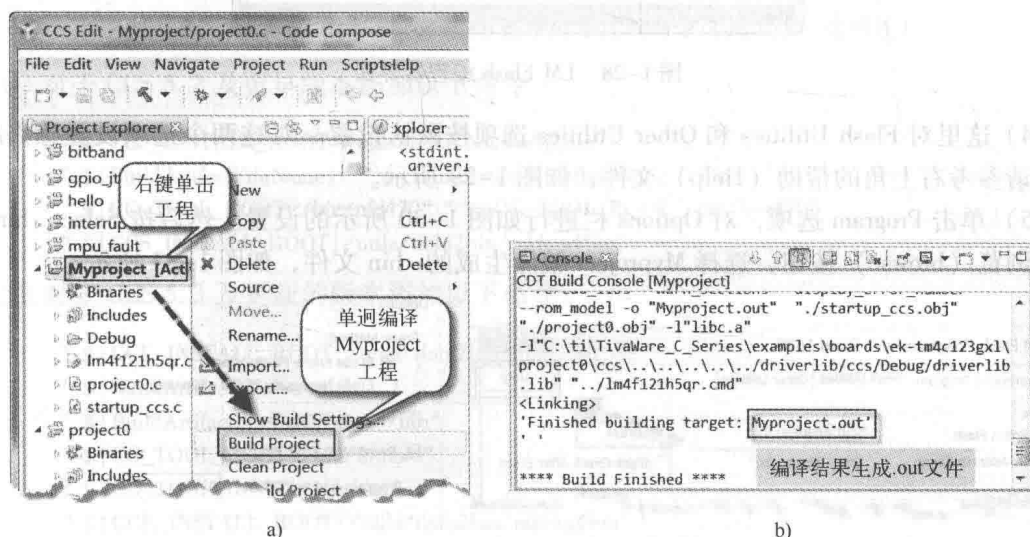


图 1-26

a) 编译 Myproject 工程 b) 设置成相对搜索路径的 Myproject 工程的编译结果

1.2.3 LM 闪存编程器

本小节将介绍 LM 闪存编程器的基本使用方法及编程示例。

1) LM 闪存编程器是一个独立的 GUI 编程，允许用户通过多个端口编程 Stellaris (Tiva) 器件的闪存。

2) 确保在 CCS 中没有运行代码的调试透视图，以避免 CCS 和 Flash 编程因 USB 端口控制权发生冲突。单击桌面上如图 1-27 所示的图标，打开闪存编程对话框，如图 1-28 所示。

3) 在配置 (Configuration) 选项的快速设置 (Quick Set) 栏中选定所需编程的开发板，例如选中 LM4F120 LaunchPad (EK - TM4C123GXL 评估板)。



图 1-27 LM Flash 图标