



Technology by

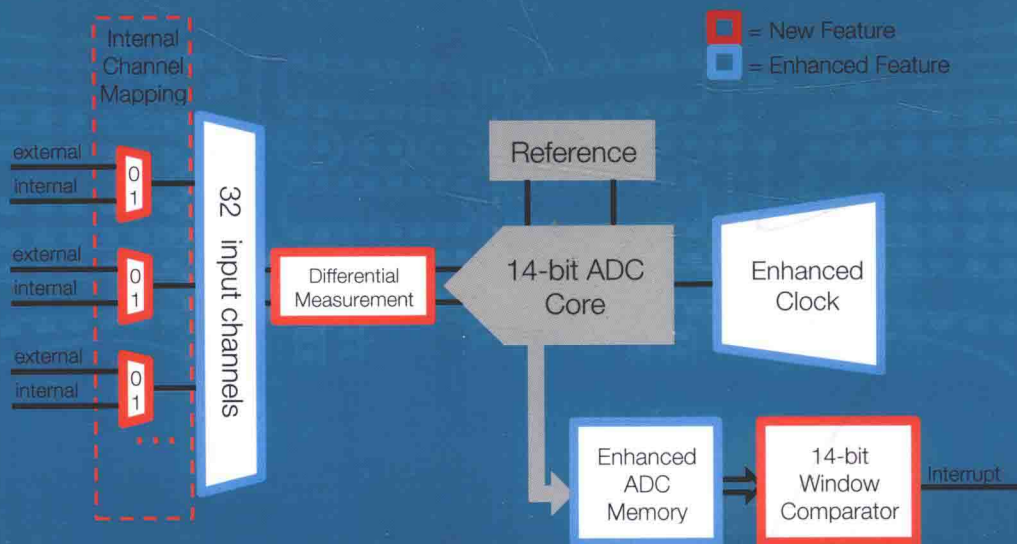
TEXAS

INSTRUMENTS

MSP432中国大学计划用书

基于固件的MSP432微控制器 原理及应用

刘 杰 著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



MSP432 中国大学计划用书

基于固件的 MSP432 微控制器原理及应用

刘 杰 著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书以 MSP432P401R 固件库函数为主线,介绍了 MSP432P401R 的基本外设特点、结构与功能、固件库的函数列表及使用。本书采用真实硬件 MSP-EXP432P401R LaunchPad 评估板来测试基于固件编写的程序,使用虚拟硬件 Proteus 8.3 来测试基于寄存器编写的程序,以便把高效的基于固件编程与传统的基于寄存器编程的优点结合起来,以加快 MSP432 软件的开发速度。

本书可作为嵌入式工程师在基于固件 MSP432 开发时的参考用书,也可作为高校电类专业学习 MSP432 或 Cortex-M4 的入门教材。

图书在版编目(CIP)数据

基于固件的 MSP432 微控制器原理及应用 / 刘杰著

. -- 北京:北京航空航天大学出版社,2016.5

ISBN 978-7-5124-2119-6

I. ①基… II. ①刘… III. ①微控制器 IV.

①TP332.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 103533 号

版权所有,侵权必究。

基于固件的 MSP432 微控制器原理及应用

刘 杰 著

责任编辑 孙兴芳

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@buaacm.com.cn 邮购电话:(010)82316936

北京市同江印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:23 字数:490 千字

2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2119-6 定价:55.00 元

前言

正值超低功耗的 MSP430 产品在业界做得风生水起的时候,2015 年初 TI 又推出了全新的超低功耗 MSP432 MCU 产品,这是一款将低功耗 MSP430 所具有的卓越性能引入 ARM Cortex 领域中的产品。其凭借 Cortex-M4F 内核、FPU 引擎、DSP 指令和 48 MHz 主频,更好地满足了那些正在寻求具有更高性能或行业标准内核的 MSP 用户和更低功耗的 ARM 用户的需求。

MSP432 MCU 可利用与 Cortex-M0C+(M4F 的性能比 M0+强 10 倍)相当的功耗来实现 Cortex-M4F 的全部性能,使得工业界或消费类应用领域的用户再也无须在低功耗与高性能之间做出取舍与权衡了。MSP432 MCU 旨在为业界提供具有最低功耗的 ARM Cortex-M4F 器件,这可通过 EEMBC(嵌入式微处理器基准评测协会)的 ULPBench(超低功率基准)评分来证明。在该项测试中,MSP432 MCU 在所有同类的 Cortex-M3/M4F 器件中获得了最高分——167.4 分。

MSP432 系列在工作状态下的电流仅为 95 $\mu\text{A}/\text{MHz}$,在支持实时时钟的待机状态,电流可低至 850 nA,并且还集成了针对超低功耗的外设,包括:

- ◇ 集成的 DC/DC,与低压降稳压器(LDO)相比,可降低 40%的功耗;
- ◇ 为 8 个 RAM 段中的每个段提供专用电源,从而使每个段的耗能减少 30 nA;
- ◇ 14 位 ADC,在 1 MSPS 时的电流仅为 375 μA ;
- ◇ 存储在 ROM 中的驱动库(即所谓的固件库),可比闪存省电 35%;
- ◇ 具有独立段的 256 KB 闪存,能同步执行内存读取和擦除;
- ◇ 存储在 ROM 驱动库(即所谓的固件库)中的数据,比保存在闪存中的数据执行速度快 200%。

AES 256 硬件加密加速器使得程序员能够保护器件和数据安全,而 MSP432 上的 IP 保护也可确保数据和代码的安全性。鉴于 MSP432 具有大的数据吞吐量、更加完整的高级算法和有线或无线物联网(IoT)堆栈,以及更高分辨率的显示图像等优点,或许 MSP432 的设计思想将代表今后 MCU 的发展方向,因而具有广泛的应用前景。

由于 MSP432 MCU 刚面市不久,国内还没有针对 MSP432 的原理及应用的相关技术书籍,因此作者撰写此书对其进行介绍。

前 言

本书的特点如下:

- ◇ 采用基于固件的软件编程模式:易学,省时,可降低程序员的入门门槛,并且可以大幅提高软件的开发速度,是替代传统的基于寄存器软件开发模式的不二选择。
- ◇ 较详细地介绍了软件调试与测试的技术细节,比如设置断点和单步调试方法,以利于初学者尽快跨进嵌入式程序员的门槛。
- ◇ 为充分利用现有的书籍及网络资源,本书还介绍了 CCS 6.1、Keil for ARM 与 IAR for ARM 三种最新版的开发软件。
- ◇ 最熟悉 TI 芯片的人莫过于 TI 自己的工程师,本书尽量原汁原味地把 TI 工程师的编程方法介绍给读者。
- ◇ 基于固件来介绍 MSP432 的软件编程方法,并不是抛弃基于寄存器的传统软件开发模式,而是将二者有机地结合起来。这样做,仅需在包含文件中加入 MSP432 的头文件即可,这样就可以在那些适于基于寄存器编程的地方添加基于寄存器的代码到应用程序中,并以基于 Proteus 8.3 虚拟软硬件平台的形式出现即可。这也可以使那些有 MSP-EXP432P401R LaunchPad 评估板但外围硬件有限或无该板卡的读者测试基于寄存器编写的代码了。
- ◇ 介绍了基于 Proteus 8.3 开发平台的软硬件编程与调试方法。
- ◇ 尽量将理论和实践结合起来,规避两种倾向(高校老师编写的书——偏理论,软硬件工程师编写的书——偏程序),特别适用于初学者。

本书的主要内容包括:

- ◇ 开发工具使用入门;
- ◇ MSP-EXP432P401R LaunchPad 开发板简介;
- ◇ 系统时钟模块;
- ◇ 数字 I/O 端口;
- ◇ 电源系统;
- ◇ 内部存储器;
- ◇ ADC14 模块;
- ◇ 比较器 E 及基准 A 模块;
- ◇ 定时器模块;
- ◇ 嵌套向量中断控制器;
- ◇ eUSCI_A 的 UART 模式;
- ◇ eUSCI 的 SPI 模式;
- ◇ eUSCI_B 的 I²C 模式;
- ◇ DMA 控制器;
- ◇ 基本图形库。

在本书的编写过程中使用了大量 TI 公司的中英文资源,并得到了 TI 中国大学

计划部谢胜祥工程师和潘亚涛经理等的大力协助;此外, TI 还为本书的软件测试提供了全部实验器材。王凯、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、彭浩书等同学参与了个别章节和固件库函数的初始翻译与资料整理工作;同时,在编写本书的过程中得到了北航出版社编辑的全程指导,以及 EEWorld 网站 <http://bbs.eeworld.com.cn/> 的大力支持,在此一并表示感谢。

本书可作为嵌入式工程师在基于固体的 MSP432 开发时的参考用书,也可作为高校电类专业学习 MSP432 或 ARM Cortex-M4 的入门教材。

由于时间紧,任务重,加上本人的水平有限,难免会有纰漏,敬请读者批评指正。

刘 杰

2015 年 11 月于福大怡园

目 录

第 1 章 搭建软件开发环境	1
1.1 下载与安装所需的软件	1
1.1.1 下载开发软件包	1
1.1.2 安装开发软件包	2
1.2 CCS 6.1 软件的使用简介	4
1.2.1 安装更新	4
1.2.2 创建一个基于 MSP432 的工程	5
1.3 EnergyTrace 技术	11
1.3.1 使能 EnergyTrace 技术与选择默认模式	12
1.3.2 控制 EnergyTrace 技术	12
1.3.3 EnergyTrace+模式	13
1.3.4 EnergyTrace 模式	15
1.4 Keil 5 软件的使用简介	17
1.5 MSPWare 软件的使用简介	21
1.5.1 打开一个已存在的工作空间	21
1.5.2 创建 BlinkLED 工程	21
1.5.3 在 Proteus 8.3 中测试 UART 工程	25
第 2 章 内核与开发板简介	29
2.1 Cortex-M4F 内核	29
2.1.1 Cortex-M4F 概述	29
2.1.2 Cortex-M4F 的主要特点	30
2.1.3 Cortex-M4F 的结构框图	31
2.1.4 编程模型	32
2.2 MSP432P401R 简介	34
2.2.1 MSP432P401R 的主要特性	35
2.2.2 MSP432P401R 的功能框图	37
2.2.3 MSP432P401R 芯片的顶视图	37

目 录

2.2.4	MSP432P401R 的引脚信号定义	38
2.3	MSP - EXP432P401R LaunchPad 开发板简介	47
2.3.1	MSP - EXP432P401R LaunchPad 开发板的轮廓图与结构框图	47
2.3.2	板载 XDS110 - ET 仿真器	50
第 3 章	时钟系统模块	52
3.1	时钟系统模块简介	52
3.2	时钟系统的操作	53
3.3	时钟系统模块的寄存器	59
3.4	时钟系统模块的固件库函数	60
3.5	例 程	61
第 4 章	数字 I/O 端口	69
4.1	数字 I/O 端口简介	69
4.2	数字 I/O 端口的操作	70
4.3	数字 I/O 寄存器	72
4.4	数字 I/O 的固件库函数	78
4.5	例 程	79
4.5.1	基于寄存器的流水灯程序	79
4.5.2	基于固件库的流水灯程序	83
4.5.3	基于 Proteus 8.3 的流水灯程序测试	85
第 5 章	电源系统	88
5.1	电源控制管理简介	88
5.1.1	电源控制管理概述	88
5.1.2	电源控制管理的低功耗模式	89
5.1.3	功耗模式切换	90
5.1.4	电源控制管理寄存器	93
5.1.5	软件与支持	93
5.2	供电系统简介	93
5.3	电源控制管理和供电系统的固件库函数	96
5.4	例 程	98
第 6 章	内部存储器	105
6.1	内部存储器简介	105
6.2	SRAM	106

6.3	内部存储器映射	107
6.4	闪 存	108
6.4.1	闪存的结构	108
6.4.2	闪存的编程模式和功能	108
6.4.3	闪存的擦除模式和功能	109
6.4.4	支持低频活动模式与低频 LPM0 模式	110
6.4.5	闪存控制器的寄存器	110
6.4.6	闪存的固件库函数	112
6.5	存储器保护单元	113
6.6	例 程	114
6.6.1	SRAM 例程	114
6.6.2	闪存例程	118
6.6.3	MPU 例程	122
6.6.4	在 ROM 中的调试例程	127
第 7 章	ADC14 模块	131
7.1	ADC14 模块简介	131
7.1.1	ADC14 模块的特性	131
7.1.2	ADC14 的模块框图	132
7.2	ADC14 的操作	133
7.2.1	ADC14 内核	133
7.2.2	采样和转换时序	133
7.2.3	ADC14 的转换模式	135
7.2.4	窗口比较器	139
7.2.5	ADC14 中断	140
7.3	ADC14 寄存器	141
7.4	ADC14 模块的固件库函数	141
7.5	例 程	143
第 8 章	比较器 E 及基准 A 模块	154
8.1	COMP_E 模块	154
8.1.1	COMP_E 的特性	154
8.1.2	COMP_E 的模块框图	155
8.1.3	COMP_E 的操作	155
8.1.4	COMP_E 寄存器	160
8.2	REF_A 模块	160

目 录

8.2.1	REF_A 的特性	160
8.2.2	REF_A 的模块框图	161
8.2.3	REF_A 工作原理	161
8.2.4	REF_A 寄存器	162
8.3	COMP_E 模块和 REF_A 模块的固件库函数	162
8.3.1	COMP_E 模块的固件库函数	162
8.3.2	REF_A 模块的固件库函数	163
8.4	例 程	164
第 9 章	定时器模块	170
9.1	定时器 A 模块	170
9.1.1	定时器 A 的特性与模块框图	170
9.1.2	定时器 A 的操作	172
9.1.3	定时器 A 寄存器	177
9.2	系统定时器 SysTick	178
9.3	32 位定时器模块	179
9.4	看门狗定时器	181
9.5	实时时钟模块	183
9.6	定时器的固件库函数	183
9.7	例 程	190
9.7.1	定时器 A 例程	190
9.7.2	定时器 32 例程	196
9.7.3	看门狗定时器例程	197
9.7.4	系统定时器例程	200
9.7.5	实时时钟例程	201
第 10 章	嵌套向量中断控制器	204
10.1	NVIC 简介	204
10.1.1	NVIC 的特性	204
10.1.2	电平式中断与脉冲中断	205
10.1.3	中断的硬件控制及软件控制	205
10.1.4	中断优先级	206
10.2	NVIC 的固件库函数	206
10.3	例 程	207

第 11 章 eUSCI_A 的 UART 模式	215
11.1 eUSCI_A 的 UART 模式简介	215
11.1.1 eUSCI_A 的 UART 模式特性	215
11.1.2 eUSCI_A 的 UART 模式框图	216
11.1.3 eUSCI_A 的 UART 模式操作	216
11.1.4 eUSCI_A 的 UART 寄存器	227
11.2 eUSCI_A 的 UART 固件库函数	227
11.3 例 程	229
第 12 章 eUSCI 的 SPI 模式	238
12.1 eUSCI 的 SPI 模式简介	238
12.1.1 eUSCI 的 SPI 模式特性	238
12.1.2 eUSCI 的 SPI 模式框图	239
12.1.3 eUSCI 的 SPI 模式操作	239
12.1.4 eUSCI_A 的 SPI 寄存器	244
12.2 eUSCI 的 SPI 固件库函数	244
12.3 例 程	248
第 13 章 eUSCI_B 的 I ² C 模式	259
13.1 eUSCI_B 的 I ² C 模式简介	259
13.1.1 eUSCI_B 的 I ² C 模式特性	259
13.1.2 eUSCI_B 的 I ² C 模式框图	260
13.1.3 eUSCI_B 的 I ² C 模式操作	261
13.1.4 eUSCI_B 的 I ² C 寄存器	273
13.2 eUSCI_B 的 I ² C 固件库函数	274
13.3 例 程	276
第 14 章 DMA 控制器	285
14.1 DMA 控制器简介	285
14.1.1 DMA 控制器的特性	285
14.1.2 DMA 控制器的模块框图	286
14.1.3 DMA 控制器的操作	287
14.1.4 DMA 寄存器	297
14.2 DMA 固件库简介	298
14.2.1 宏定义	298

目 录

14.2.2 DMA 固件库函数	299
14.3 例 程	300
第 15 章 基本图形库	309
15.1 液晶显示器简介	309
15.2 MSPWare 图形库简介	321
15.2.1 图形库的特性	322
15.2.2 图形库源码	323
15.2.3 图形固件库函数	323
15.3 例 程	343
参考文献	354

第 1 章

搭建软件开发环境

本章将简单介绍 CCS 6.1、Keil for ARM 和 MSPWare 软件包的下载、安装及使用方法，搭建 MSP432 的软件开发平台，并介绍 EnergyTrace 技术。

本章的主要内容：

- ◇ CCS 6.1 的安装及使用方法；
- ◇ Keil for ARM 的安装及使用方法；
- ◇ MSPWare 软件包的安装及使用方法；
- ◇ EnergyTrace 技术；
- ◇ 基于 Proteus8.3 的 MSP430 软件测试。

1.1 下载与安装所需的软件

本节将扼要介绍 CCS 6.1、Keil for ARM、IAR for ARM 和 MSPWare 软件包的下载与安装。

1.1.1 下载开发软件包

MSP-EXP432P401R LaunchPad 软件包 MSPWare_2_30_00_49_setup 的下载地址：

http://software-dl.ti.com/msp430/msp430_public_sw/mcu/msp430/MSPWare/latest/index_FDS.html。

CCS 6.1 软件的下载地址：

http://processors.wiki.ti.com/index.php/Download_CCS。

Keil for ARM(编号:MDK516a)软件的下载地址：

<http://www.keil.com/arm/mdk.asp>。

IAR for ARM(编号:EWARM-CD-7407-9865-1)的下载地址：

<http://supp.iar.com/Download/SW/?item=EWARM-EVAL>。

1.1.2 安装开发软件包

(1) CCS 6.1 的安装步骤

① 按默认路径安装,如图 1-1 所示。

② 选中 MSP432 Ultra Low Power MCUs(见图 1-2),默认条件下该芯片为非选中状态。

其他步骤按提示即可顺利完成,但只有 CCS 6.1 及更高版本的 CCS 软件才支持 MSP432。



图 1-1 按默认路径安装

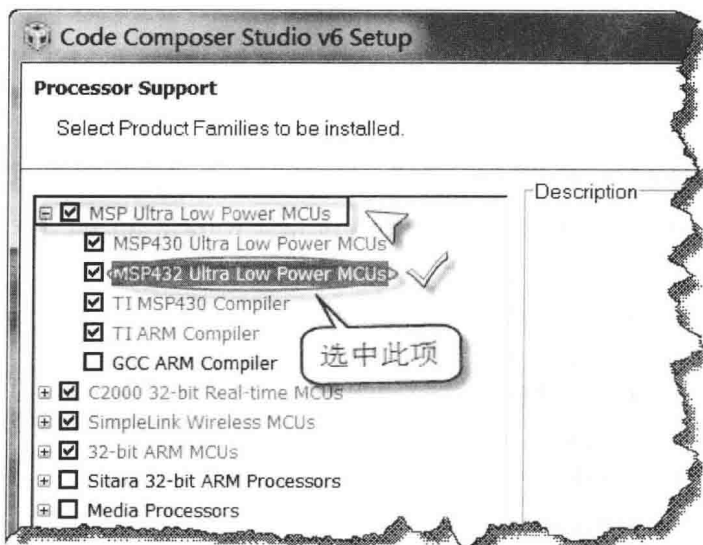


图 1-2 安装 CCS 6.1 时需选中 MSP432 Ultra Low Power MCUs

(2) Keil for ARM 的安装步骤

在完成 MDK515 的安装后,需单击 Pack Installer 图标以添加 MSP432 芯片,其步骤如图 1-3 所示。其他步骤按提示进行,便可顺利完成 Keil for ARM 的安装。

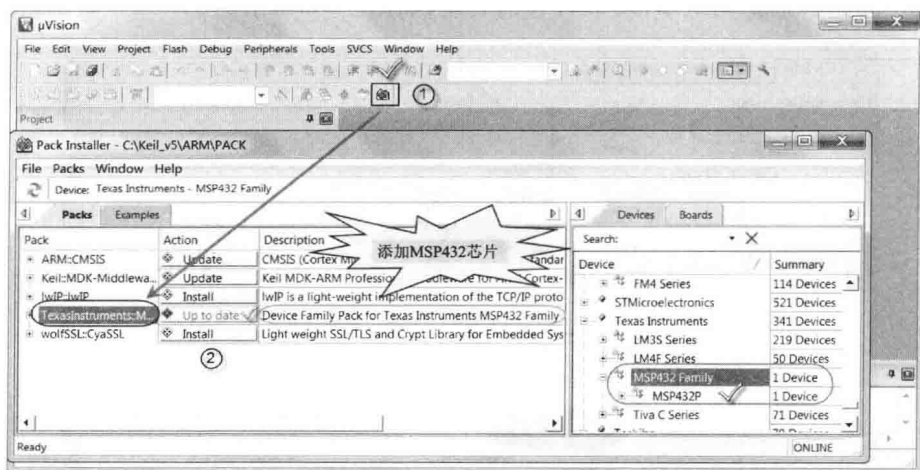


图 1-3 为 Keil for ARM 添加 MSP432 芯片

(3) MSPWare 软件包的安装步骤

① 单击  图标安装 MSPWare 软件包,如图 1-4 所示。



图 1-4 安装 MSPWare 软件包

② 按默认路径安装,如图 1-5 所示。



图 1-5 按默认路径安装 MSPWare 软件包

第 1 章 搭建软件开发环境

③ 按提示完成 MSPWare 软件包的安装,如图 1-6 所示。

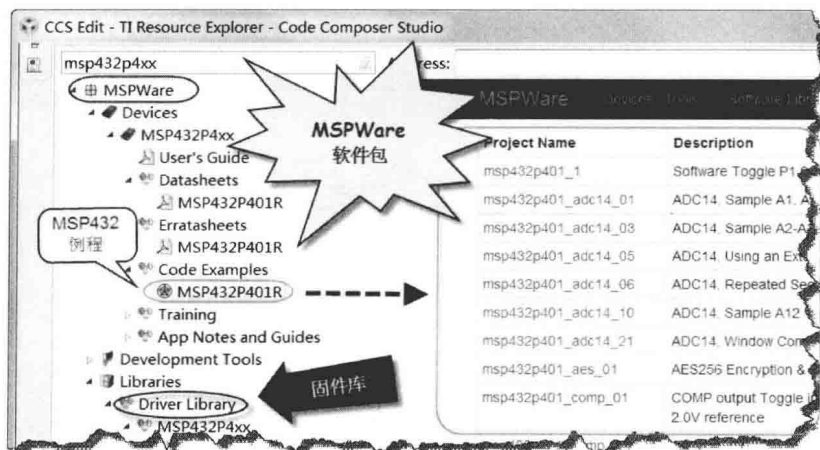


图 1-6 安装完成的 MSPWare 软件包

1.2 CCS 6.1 软件的使用简介

1.2.1 安装更新

在安装完成后初次使用 CCS 6.1 时需对其进行更新操作,方法如图 1-7 和图 1-8 所示。

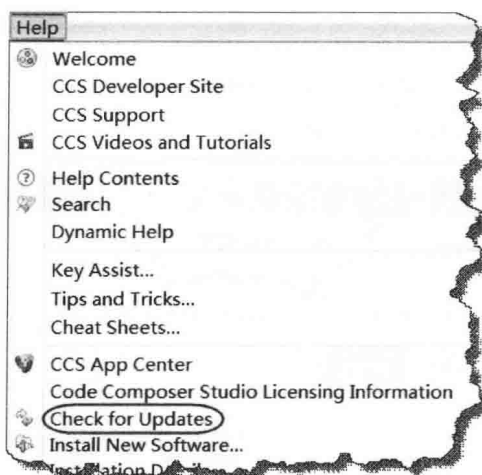


图 1-7 选择 Check for Updates 选项

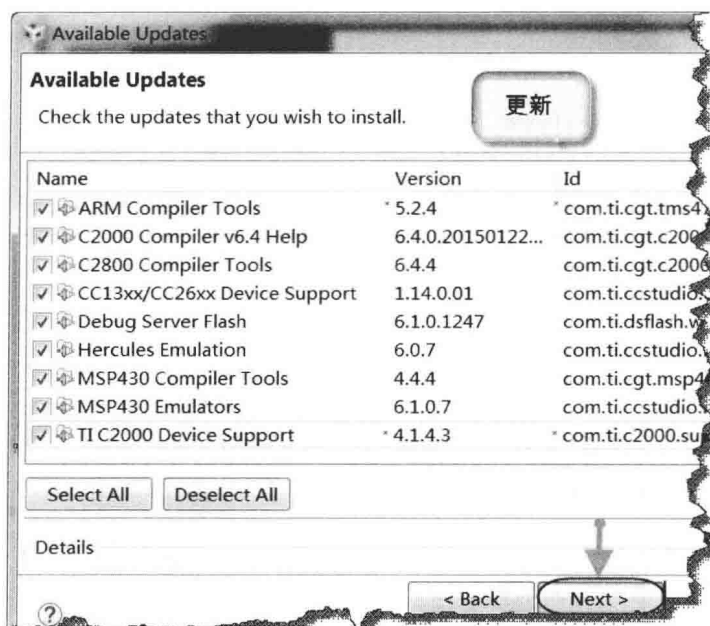


图 1-8 选中需要更新的部件,单击 Next 按钮进行更新操作

1.2.2 创建一个基于 MSP432 的工程

CCS 采用在一个工作区中来管理工程的方法。当用户第一次使用 CCS 时,会自动生成一个新的空白工作区。

(1) 在该工作区中创建一个工程(如 BlinkLED 工程)

在该工作区中创建一个工程的步骤:选择 File→New→CCS Project 菜单项,如图 1-9 和图 1-10 所示。

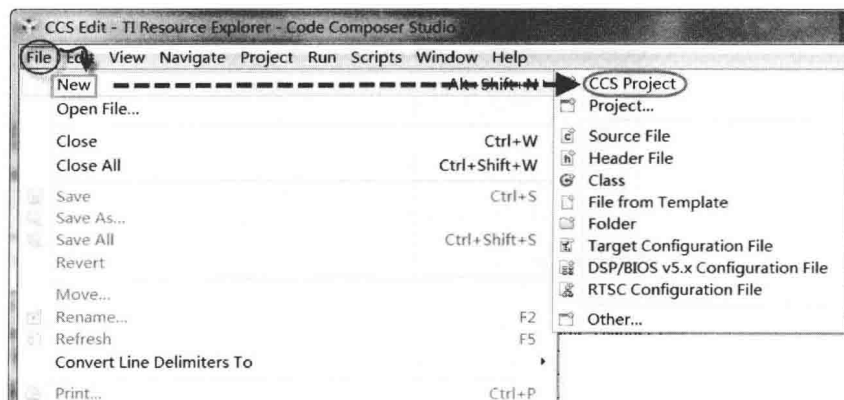


图 1-9 创建一个 CCS 工程的步骤(1)