



Technology by

TEXAS

INSTRUMENTS

MSP430中国大学计划教材

从零开启大学生 电子设计之路

——基于MSP430 LaunchPad口袋实验平台

杨 艳 傅 强 编著

MSP430



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



Technology by

TEXAS

INSTRUMENTS MSP430 中国大学计划教材

从零开启大学生电子设计之路 ——基于 MSP430 LaunchPad 口袋实验平台

杨艳 傅强 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书基于 MSP-EXP430G2 LaunchPad 口袋实验平台,内容包括:8 章基础知识,讲解了扩展板的硬件原理、CCS 开发软件的使用、编程基础知识、串行通信原理、LCD 显示控制、存储器原理、模/数转换器原理等;11 章单片机片内外设,讲解了 G2 系列单片机的系统时钟、GPIO、Timer_A 定时器、WDT 看门狗定时器、电容触摸、USCI_UART 通信、USCI_SPI 通信、USCI_I2C 通信、Flash 控制器、比较器 Comparator_A+、模/数转换器 ADC10;3 个综合设计实验,包括 PWM 原理实验、DAC 应用实验和自校准 DCO 频率实验。

本书可作为高等院校计算机、电子、自动化相关专业 MSP430 单片机课程的教材,也适合广大从事单片机应用系统开发的工程技术人员作为学习、参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

从零开启大学生电子设计之路:基于 MSP430
LaunchPad 口袋实验平台 / 杨艳,傅强编著. --北京:
北京航空航天大学出版社,2014.8

ISBN 978-7-5124-1568-3

I. ①从… II. ①杨… ②傅… III. ①单片微型计算
机 IV. ①TP368.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 170863 号

版权所有,侵权必究。

从零开启大学生电子设计之路 ——基于 MSP430 LaunchPad 口袋实验平台

杨艳 傅强 编著

责任编辑 张冀青

*

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@gmail.com 邮购电话:(010)82316524

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:700×1 000 1/16 印张:29 字数:618 千字

2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-5124-1568-3 定价:59.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

序 言

自 TI 公司推出超低功耗 MSP430 单片机以来, MSP430 凭借其优越的性能、丰富的外设、易于上手的特性备受业内工程师的欢迎。超高性价比 Value Line 系列的横空出世,使得 MSP430 在性价比上更具有其他单片机无法比拟的优势。

TI 中国大学计划一直致力于将 TI 先进技术、高性能器件推广到高校中。近几年更是加大了在“单片机与模拟大学计划”项目上的投入,在相关教学改革、学生创新与竞赛等方面加强与大学合作。2012 年, TI 中国大学计划开始与全国各高校合作成立了基于 MSP - EXP430G2 LaunchPad 的口袋实验室,使学生对单片机以及电路的入门学习不再局限于实验室,做到“一人一板,随时学习”。这一概念受到广大师生的欢迎和好评。

在实践的过程中,由于 MSP - EXP430G2 LaunchPad 自带的硬件资源较少,而 MSP430G2553 的集成外设相当丰富(ADC、Timer、Comparator、Touch Key、SPI、I²C、UART 等),为了学习到每一个外设,老师和同学们投入了相当多的精力和时间来开发相应的外围模块,以便能够完整地学习 MSP430G2553。其中,青岛大学的杨艳和傅强老师在开展口袋实验室教学的过程中积累了大量的经验,开发了一系列外围模块。为了向更多的兄弟院校以最简单便捷的方式推广他们的成功案例, TI 中国大学计划与两位老师共同设计开发了一套 G2 全功能“迷你”扩展板,作为 TI MCU 生态系统的一个组成部分:在和 LaunchPad 同等大小的 PCB 上,集成了多款 TI 模拟和数字器件来提供声、光、电相结合的实验,集学习性与趣味性于一体。这套实验板卡和配套材料一方面继承了口袋实验室的理念——所有实验都可以脱离实验室完成;另一方面,将单片机和模拟器件完美地结合在一起,通过该“迷你”扩展板,不仅可以学习到 MSP430 的所有外设,还可以学习基本的模拟知识和系统设计方法,可谓一举多得。

为方便大家的自学,杨艳和傅强两位老师付出了大量的心血和努力,历经一年,甚至牺牲了春节的休息时间,为大家精心准备了配套的学习资料,包括本书(特别推荐书中那些化繁为简、平实易懂的语言,绝对是帮助大家理解 MSP430 及其外围电路的好帮手)、PPT、参考例程、实验教学视频。这些资料将在 TI 第三方合作伙伴“艾

序 言

研信息”网站 <http://www.hpati.com/>上提供更新及下载。在此,特地向杨艳老师、傅强老师及其学生的辛勤与努力,表示衷心的感谢!

祝大家在学习中满载而归的同时,也享受到其中的乐趣,这是 TI 大学计划和合作老师们的一致追求! 如对 TI 中国大学计划有任何意见或建议,请发邮件到 frank-huang@ti.com。



中国大学计划总监
德州仪器半导体技术(上海)有限公司

2014 年 4 月

前言

MSP-EXP430G2 LaunchPad (以下简称 G2) 是 TI 公司推出的一款 MSP430 开发板。它提供了具有集成仿真功能的 14/20 引脚 DIP 插座目标板, 可通过 Spy Bi-Wire(二线 JTAG) 协议对系统内置的 MSP430 超值系列器件(G 系列) 进行快速编程和调试。

MSP-EXP430G2 的价格极具亲和力, 特别适用于在校学生单片机入门学习。受 TI 中国大学计划部委托, 特别设计了一款 MSP-EXP430G2 口袋实验平台扩展板。该扩展板基于 MSP430G2553 单片机设计, 面积与 MSP-EXP430G2 大小相等, 两者对插后可为 G2 提供丰富的实验外设。

本书编写的初衷是为扩展板编写实验教程, 换句话说, 书是扩展板的衍生品。但随着编写工作的深入, 对于本书的定位和理解发生了重大变化。关于 G2 的定位, 应该是针对单片机入门学生的, 如果仅抛出一个个孤立的实验, “显摆” 单片机和扩展板有多能耐, 是不能真正帮助学生入门的。因此, 编写思路最终为, 书是引领单片机入门学习的主线, 扩展板几经修改后成为辅助教学的得力工具。

第 1 章为扩展板硬件原理。本章最重要的知识是关于电源单元的讨论, 包含耦合干扰、滤波、去耦、地线冲突等诸多知识, 而其他硬件单元仅为概括性阐述, 在本书后面的章节里会有更详细的论述。

第 2 章为 CCS 软件。大多数教程对于单片机开发软件的安装使用, 仅限于“自古华山一条路” 的教法, 完全建立在没有任何意外和“创意” 的情况下。人不是机器, 人会犯各种错误, 会迸发各种靠谱、不靠谱的创意, 如果为了一个小小的软件问题困扰几天, 那么仅有的一点学习激情将会耗尽。因此, 在本章最后, 专门开辟一节常见问题解答, 将作者自己遇到过的、学生问过的各种软件问题集中起来解答。

第 3 章为基础知识。单片机的学习绝没有“XX 天学会” “XX 小时入门” 的可能性, 但也不是非得受过多“高等” 的教育才能学。学单片机只要会一点 C 语言的皮毛就行, 本章就是帮助大家梳理学习单片机前需要掌握的一些知识。任何知识都不是灌输能够教会的, 基础知识也不例外, 在初次学习时, 能记住多少记多少, 有个大概印象就行。在后面学习的过程中, 遇到问题, 再带着问题翻回基础知识部分复习, 这也

是学以致用、消化知识的过程。

第4章为MSP430x2xx系列单片机的系统时钟。从这一章开始,将以MSP430G2553单片机的片内外设为主线,讲解MSP430单片机的原理。这一章对初学者来说会有些枯燥,可以采用跳读的方法学习,但最根本的是要掌握用调取出厂校验参数的方法快速设定时钟,并理解低功耗实现的原理。待到本书最后一章,我们将返回时钟部分,将其彻底搞定。

第5章为GPIO。控制单片机最基本的就是控制其输入/输出(I/O),本章将介绍MSP430单片机I/O的控制方法和I/O中断的使用方法。另外,还有关于经典的上拉、下拉、图腾柱输出的科普知识。可以说,I/O不吃透,就不要再往下翻了。

第6章为Timer_A定时器。定时器是单片机中最重要的片内外设。没有定时器,其他花哨的外设都是浮云。Timer_A定时器除了普通闹钟用途外,最拿手的两个“本领”是捕获脉冲边沿和比较输出波形。本章的重点是捕获和比较的实现原理。本章最后,一劳永逸地将TA生成PWM写成库函数文件,以便在将来使用PWM的时候,事半功倍。

第7章为WDT定时器。在大多数单片机中,WDT定时器仅是一个“非正式”的定时器,除了WDT复位,一般不会去用它。但在MSP430G2系列单片机中,由于没有基础定时器(Basic Timer),WDT定时器就担当起闹钟的职责。类似于闹钟原理的定时节拍用法,是定时器使用的精华,本章将WDT定时器用到了极致,通过大量的例程,让大家深刻认识定时器在单片机编程中的巨大作用。本章没有学会,也不用往下翻了,先安心、耐心、细心地“养好”那只忠诚、可靠、能干的看门狗吧。

第8章为电容触摸。电容触摸属于比较花哨的内容,其实质是通过Timer_A的计数功能和看门狗的定时功能相结合而实现的。本章是对前面章节知识的总结,可在本章稍做休整和总结。觉得自己真的有所心得,准备好了,再开始新的征程。

第9章为串行通信原理。本章内容既不包括MSP430G2553单片机的片内外设,也不包含任何一行代码,而是从科普角度介绍串行通信的原理。本章没有什么内容是必须掌握的,能够领悟串行通信的思想最好,不能领悟就当字典以便将来翻看查找也行。

第10章为USCI的UART模式。主要介绍如何用CCS辅助初始化UART异步串行通信模块,如何通过UART与上位机通信从而实现人机交互。本章代码中,理解FIFO的原理和使用是亮点,需很好地掌握。

第11章为USCI的SPI模式。内容包括两个部分:一是如何真正使用硬件SPI模块,为其编写库函数文件;二是SD卡的初始化、读扇区、写扇区原理,以及为其编写库函数文件。在硬件SPI的使用上,与硬件UART有很大区别,需要用库函数将其封装起来才能用得顺手。像SD卡这种外设,说明书“规定”怎么操作,就得怎么操作。SD卡内容比较多,但都是依照操作时序按部就班地进行,也是需要封装成库函数才好使用,都是一劳永逸的事情。

第 12 章为 USCI 的 I²C 模式。内容包括两个部分：一是如何真正使用硬件 I²C 模块，为其编写库函数文件；二是基于 I²C 接口的 I/O 扩展芯片 TCA6416A 的使用。硬件 I²C 模块要真正用起来，比 SPI 更复杂些，必须封装成库函数才能用。至于 TCA6416A 则是调取 I²C 库函数，按说明书的时序操作就行，同样要再次封装成 TCA6416A 的库函数。在学完 TCA6416A 后，扩展板的功能才算是被“激活”了，按键和显示单元才能谈怎么用。

第 13 章为软件串行通信与条件编译。在任何情况下，都可以使用软件方法来模拟串行通信，这里面饱含“我命由己不由天”的英雄气概。对于硬件 SPI 和硬件 I²C 的库函数文件，想要看明白、想明白其实是很不容易的。这是因为，半硬半软的库函数受硬件掣肘颇多，库函数在编写过程中常有“憋屈”的感觉。而纯软件编写串行通信库函数，反倒感觉一气呵成，条理清楚。学完本章之后，再返回去看硬件 SPI 和 I²C，一定会有新的认识。

第 14 章为 LCD 段式液晶。本章分为 LCD 顶层库函数和 LCD 硬件驱动 HT1621 函数两个部分。在已知显示内容的情况下，如何计算出控制 LCD 显示的“显存”数据是一个难点。耐心、细心再加上手指头、脚趾头一定可以算出来的！这部分内容来不得半点跳读，你骗书，书就骗你。单看 HT1621 的说明书，不过是按时序进行控制。但扩展板上是用 I²C 协议的扩展 I/O 间接控制 HT1621，一想到这里，别说是 CPU，人脑子都要当机了。其实无论是用什么类型的 I/O 进行控制，都可以编写与硬件无关的 HT1621 库函数文件，这就是硬件隔离的编程思想。学会如何通过 TCA6416A 间接控制 HT1621，再控制 LCD 显示，就像打通了任督二脉，以后多复杂的控制程序都不是问题。

第 15 章为存储器。存储器是单片机系统的重要组成部分，本章于是对各种存储器原理做一综述，本身与 MSP430 单片机无关，也不包含任何一行代码。如果作为科普知识来阅读，可对存储器有比较宏观的了解，对入门后的学习会有裨益。

第 16 章为 Flash 控制器。MSP430 全系列单片机都提供了 Flash 控制器，可以实现程序运行中擦写 Flash ROM，这意味着，可将 Flash ROM 作为掉电不失存储器来使用。本章内容不涉及其他模块知识，主要是按“规定”操作寄存器，用数组搬运数据。编写 Flash 库函数文件可以方便地使用这一片内外设。

第 17 章为比较器 Comparator_A⁺。乍看这个章节的内容时，还以为标题写错了，怎么都觉得是在写模/数转换器(ADC)的。没错，比较器实际就是构成模/数转换器的核心器件。本章的前半部分是谈如何用比较器实现 ADC 的原理，后半部分是介绍一种只用一个比较器就能实现 Slope 型 ADC 的方法。最后，配以一个生动有趣的例程，在展示 Slope 型 ADC 性能的同时，学习代码移植的方法。

第 18 章为模/数转换器。本章也是科普章节，内容多且有一定难度。如果只是想要 ADC 出个数据，可以不看这一章；但是要想用好 ADC，本章内容还仅仅是抛砖。ADC 采样的知识需要不断地在实践中积累。本章最后给出了单极性 ADC 采集双极

性信号的方法,为重点掌握内容。

第19章为ADC10。有了前两章的浓墨铺垫,本章的内容显得轻松惬意。片内ADC的使用通常都非常简单,就是“吱一声”的事儿。最后,本章借温度传感器采样的例程,介绍了如何从CCS Example中移植修改代码。

第20章为PWM波形合成与双极性信号采样。从本章开始,进入综合实验部分。虽然在第6章已经介绍了PWM是什么,但只有经过本章的学习,才能真正领悟PWM的精髓。相信会给大家带来全新的收获。

第21章为DAC与AWG。对于初学者来说,ADC和DAC就像是单片机学习的双枪一样,少了DAC好像人生都不完美了。但是,DAC到手后拿来干什么是个问题,本章用AWG任意波形发生器的例子展示了DAC的非凡魅力,看完本章后对于扩展板上不到半粒米大小的DAC转换芯片,你肯定会刮目相看。为了让没有示波器的同学也能共享“发展成果”,特别加了音频功率放大器来驱动喇叭,如果从TF卡中读取音频文件来生成AWG,那么喇叭就可以播放音乐了。

第22章为自校准DCO。对于MSP430G2553的学习,是从系统时钟开始的,最后又回到时钟。出厂时,MSP430G2553单片机的DCO校准了1 MHz、8 MHz、12 MHz、16 MHz四个频率点。当全部内容学完后,投桃报李,还以颜色,可以校准任意频率点,而且精度高于出厂校准,为本书的学习画上完美的句号。

本书由杨艳、傅强编著。其中,杨艳编写第4~8章、第10~14章、第16~17章、第19~22章,傅强编写第1~3章、第9章、第15章和第18章。王景兵调试了全书的实验例程代码,周道亮校对了全书图表及文字。

美国德州仪器(TI)公司大学计划的黄争经理和崔萌工程师对本书的编写给予了极大的支持,就本书的内容提出了许多建设性意见。

作者

2014年4月

于青岛大学

目 录

第 1 章 扩展板硬件原理	1
1.1 概 述	1
1.2 供电单元	2
1.3 触摸板单元	10
1.4 I ² C 扩展 I/O 单元	10
1.5 LCD 显示单元	12
1.6 PWM 与滤波器单元	13
1.7 双极性信号采样单元	14
1.8 Slope ADC 单元	15
1.9 TF 卡单元	16
1.10 DAC 单元	16
1.11 音频功放单元	17
第 2 章 CCS 软件	18
2.1 概 述	18
2.2 下载并安装 CCS	18
2.3 新建 CCS 普通工程	19
2.4 CCS 创建工程举例	23
2.5 CCS 常见问题解答	24
2.6 CCS 使用技巧	28
第 3 章 基础知识	35
3.1 概 述	35
3.2 MSP430 单片机的位操作	35
3.3 MSP430 单片机的寄存器	37

3.4	使用 Grace 设置寄存器	40
3.5	MPS430 单片机的中断	45
3.6	非阻塞编程原则	47
3.7	MSP430 的函数与文件管理	47
第 4 章	MSP430x2xx 系列单片机的系统时钟	50
4.1	系统时钟概述	50
4.2	“BCS+”模块单元的基本构造	51
4.3	Grace 的 Basic User 模式	52
4.4	Grace 的 Power User 模式	54
4.5	低功耗模式	59
4.6	小 结	60
4.7	直接配置 System Clock	61
4.8	例程——观测 DCO 频率变化	61
4.9	前后台程序结构	66
第 5 章	GPIO	67
5.1	概 述	67
5.2	I/O 的一般读写控制	68
5.3	I/O 的输出类型	69
5.4	MSP430 单片机的 I/O 输出	72
5.5	MSP430 单片机的 I/O 输入中断	75
5.6	例程——中断按键	77
5.7	程序小结	80
第 6 章	Timer_A 定时器	82
6.1	概 述	82
6.2	Timer_A 模块	83
6.3	16 位主定时器	84
6.4	捕获/比较模块 CCRx	87
6.5	小 结	92
6.6	Timer_A 库函数文件	92
6.7	例程——基于 PWM 的 LED 调光控制	98
第 7 章	WDT 定时器	106
7.1	概 述	106

7.2 模块 WDT+	106
7.3 WDTCTL 控制寄存器	107
7.4 WDTCTL 寄存器配置注意事项	108
7.5 单片机复位详解	108
7.6 WDT 代码举例	109
7.7 使用 Grace 配置看门狗定时器	111
7.8 例程——呼吸灯	112
7.9 定时扫描按键原理	116
7.10 例程——定时扫描非阻塞按键	117
7.11 状态机建模	121
7.12 例程——长短键识别	124
第 8 章 电容触摸	132
8.1 概 述	132
8.2 I/O 振荡与电容触摸按键	132
8.3 Timer_A 测频原理	134
8.4 电容触摸库函数文件	134
8.5 例程——电容触摸按键	139
8.6 例程——电容触摸长短键	141
8.7 按键 LED 程序小结	146
第 9 章 串行通信原理	148
9.1 概 述	148
9.2 UART 原理	152
9.3 SPI 原理	156
9.4 I ² C 原理	158
9.5 小 结	163
第 10 章 USCI 的 UART 模式	164
10.1 概 述	164
10.2 UART 的初始化	164
10.3 UART 工作过程	167
10.4 使用 FIFO 发送 UART 数据	167
10.5 使用 FIFO 接收 UART 数据	168
10.6 UART FIFO 库函数文件	168
10.7 超级终端	175

10.8	例程——超级终端人机交互	177
10.9	人机交互演示	184
第 11 章	USCI 的 SPI 模式	185
11.1	概 述	185
11.2	三线制 SPI 主模式的 Grace 配置	185
11.3	SPI 的库函数文件	188
11.4	SD 存储卡	198
11.5	例程——SD 卡读写扇区	215
第 12 章	USCI 的 I²C 模式	218
12.1	概 述	218
12.2	使用 Grace 初始化 I ² C	219
12.3	I ² C 的初始化代码	221
12.4	I ² C 的库函数文件	225
12.5	I/O 扩展芯片 TCA6416A	231
12.6	TCA6416A 库函数文件	236
12.7	例程——I ² C 扩展 I/O	242
第 13 章	软件串行通信与条件编译	249
13.1	概 述	249
13.2	软件 SPI	249
13.3	使用条件编译	256
13.4	软件 I ² C	259
第 14 章	LCD 段式液晶	270
14.1	概 述	270
14.2	LCD 液晶原理	270
14.3	显存隔离与显示译码	273
14.4	显示译码库函数文件	275
14.5	LCD 驱动器 HT1621	283
14.6	硬件隔离的思想	285
14.7	HT1621 库函数文件	286
14.8	例程——LCD 显示自检	291
第 15 章	存储器	295
15.1	概 述	295

15.2	SRAM	295
15.3	DRAM	297
15.4	FIFO	298
15.5	场效应管浮栅存储原理	299
15.6	EEPROM	301
15.7	Flash ROM	302
15.8	FRAM	302
第 16 章	Flash 控制器	303
16.1	概 述	303
16.2	MSP430 单片机的内存结构	303
16.3	Flash 控制器的时钟	306
16.4	Flash 的写操作	307
16.5	Flash 的擦除操作	309
16.6	Flash 的寄存器	310
16.7	Flash 操作库函数文件	311
第 17 章	比较器 Comparator_A+	320
17.1	概 述	320
17.2	比较器的用途	321
17.3	比较器与普通运放的区别	324
17.4	模块 Copmarator_A+	325
17.5	Slope 型 ADC 的库函数文件	326
17.6	例程——拨盘电位器	334
第 18 章	模/数转换器	343
18.1	概 述	343
18.2	分辨率和采样率	343
18.3	ADC 采样	344
18.4	采样定理	345
18.5	频谱分析	346
18.6	抗混叠滤波	347
18.7	采样保持电路	349
18.8	同步采样与分时复用	350
18.9	单极性 ADC 采集双极性信号	352
18.10	单端、伪差分 and 全差分输入	354

18.11	ADC 校准	355
第 19 章	ADC10	356
19.1	ADC10 的采样转换过程	357
19.2	使用 Grace 高级模式配置 ADC10	357
19.3	使用 Grace 寄存器模式配置 ADC10	363
19.4	例程——温度传感器采样及显示	364
第 20 章	PWM 波形合成与双极性信号采样	373
20.1	概 述	373
20.2	面积等效原理与 PWM 波形合成	373
20.3	滤波器设计	376
20.4	SPWM 滤波与采样硬件电路	380
20.5	例程——SPWM 波形合成及采样	380
20.6	数据还原显示	384
20.7	示波器观测波形	386
20.8	小 结	394
第 21 章	DAC 与 AWG	396
21.1	概 述	396
21.2	数/模转换器 DAC7311/8311/8411	397
21.3	AWG 单元硬件原理图	400
21.4	例程——任意波形发生器 AWG	401
21.5	例程——基于 AWG 的音频播放	407
21.6	AWG 数据生成方法	416
第 22 章	自校准 DCO	422
22.1	概 述	422
22.2	自校准 DCO 的原理	422
22.3	例程——自校验 DCO	424
22.4	DCO 校验实验	435
22.5	借助 CCS 分析数据	437
22.6	常见问题解答	441
附 录		445
参 考 文 献		448

第 1 章

扩展板硬件原理

1.1 概 述

LaunchPad 系列口袋实验平台有两个特点：一是体积小，基本上与 LaunchPad 系列电路板一样大小；二是能够脱离实验室仪器在宿舍里自行学习。MSP - EXP430G2 口袋扩展板就是满足这样两个要求的口袋实验平台。

图 1.1 所示为口袋扩展板与 MSP - EXP430G2 电路板对插的实物图。两者的外形尺寸完全一致，配色方面也很吻合。图 1.2 为口袋扩展板正反两面的主视图。下面分单元讲解扩展板的硬件组成。

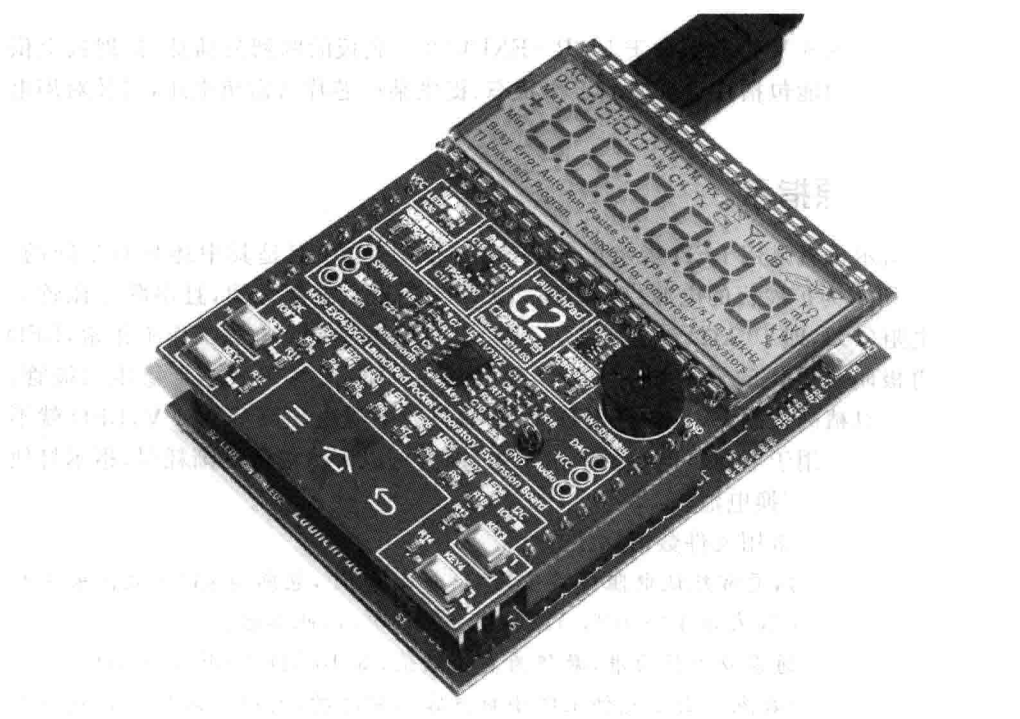


图 1.1 MSP - EXP430G2 及其扩展板

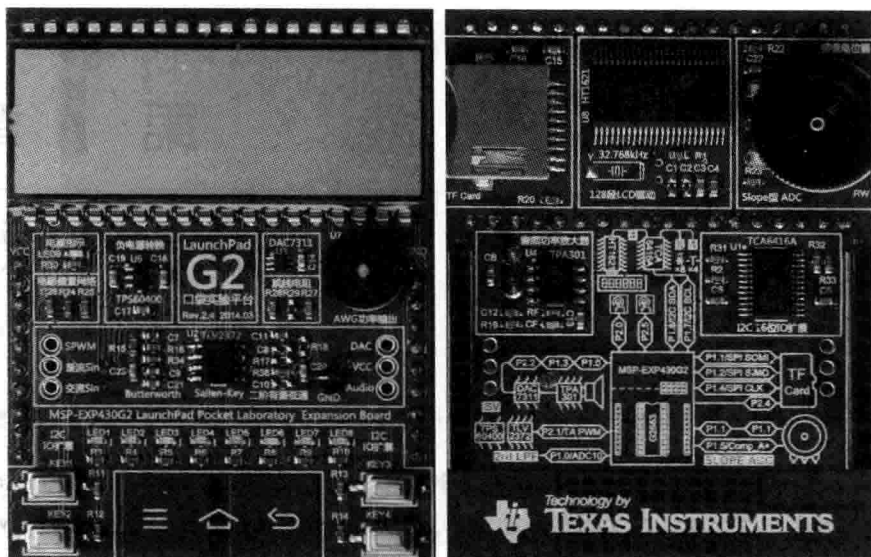


图 1.2 G2 扩展板正反两面主视图

1.2 供电单元

扩展板的 3.6 V 供电引自于 MSP-EXP430G2 底板的两列公插针, 扩展板上供电单元的主要功能包括指示电源的工作状态、提供某些芯片所需负电压, 以及对用电芯片去耦。

1.2.1 电源指示

电源指示也就是用 LED 指示电源状态, 看似很简单, 但是其中还是有学问的。图 1.3(a) 所示为扩展板的电源指示方案, LED 接于正负电源之间, 且串联了比较大的限流电阻 (103, 即 10 k Ω)。这种接法, 无论是正电源还是负电源工作不正常, LED 都将变得极暗。更优的方案如图 1.3(b) 所示: 在 LED 上再串联一个稳压二极管。这种接法可以精确控制 LED 的亮灭条件, 例如只要电源电压降低 0.2 V, LED 就不亮。这种方案常用于电池供电设备的指示中, 因为可以不待电池逐渐耗尽, 指示灯便可提前熄灭, 提醒更换电池。

下面简要说明常用元件数值标注方法:

- 1) 没有单位的, 通常默认电阻值单位为 Ω , 电容为 pF, 电感为 μH 。数值采用科学计数法读取, 如 103 表示 10×10^3 , 512 表示 51×10^2 , 以此类推。
- 2) 有单位的, 通常以单位为准, 数值为真实数值, 如 10 k Ω 、1 nF、100 μH 。
- 3) 单位兼职小数点。由于元件上印小数点容易被抹掉, 所以一般用单位充当小数点。例如, 电容 4n7 表示 4.7 nF, 电阻 1R1 表示 1.1 Ω , R001 表示 0.001 Ω 。