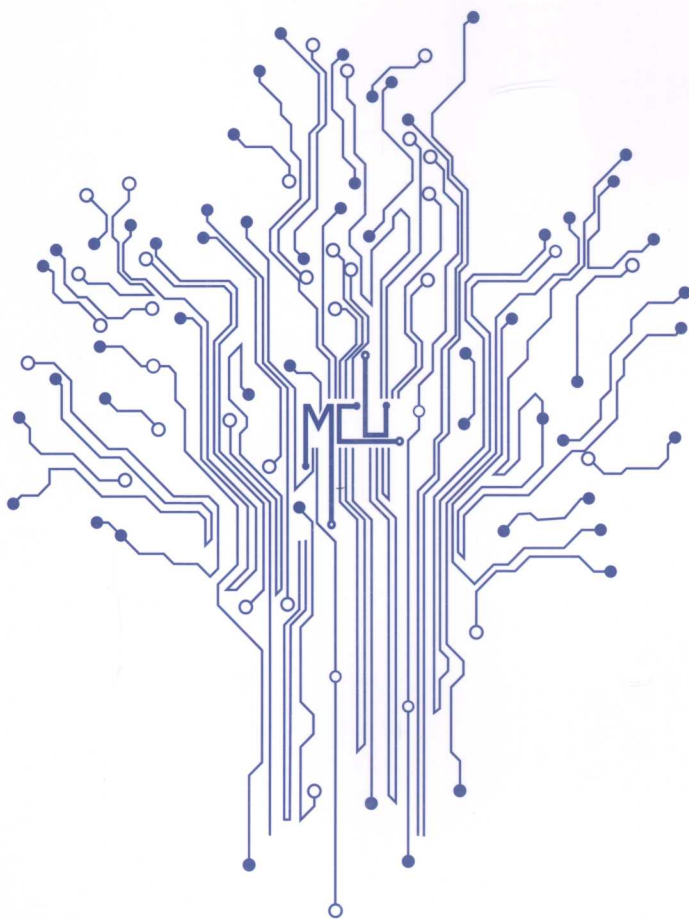




电子及相关专业大学生成长为合格MCU工程师的权威指南。  
以MSP430单片机为例的技术成长路线，辅以资深工程师的职场攻略。  
从小实验到大项目，从技术到职场，内容由浅入深，丰富全面。



单片机与嵌入式



# MCU工程师炼成记

我和MSP430单片机

丁武锋 庄严 周春阳 编著



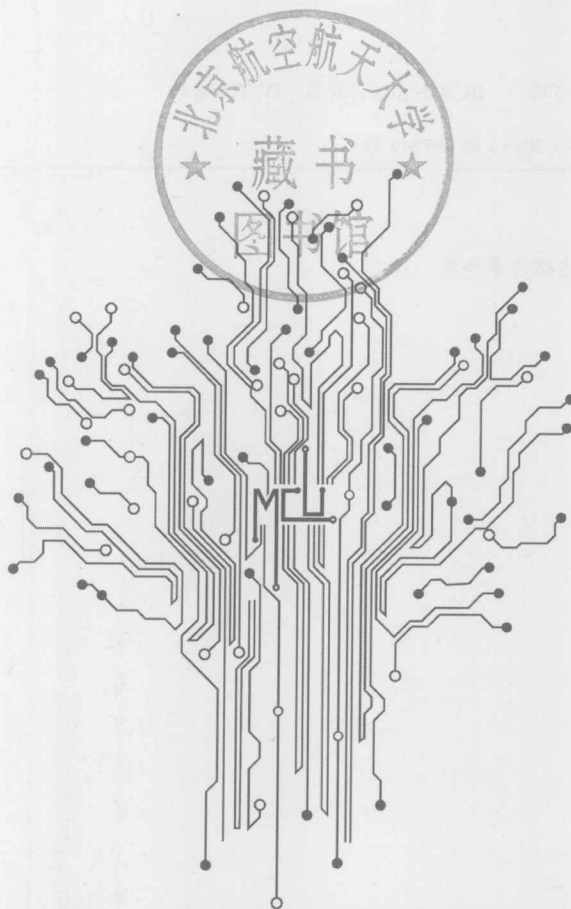
机械工业出版社  
China Machine Press

014003443

TP368.1

793

单片机与嵌入式



# MCU工程师炼成记

我和MSP430单片机

丁武锋 庄严 周春阳 编著



北航

C1691245



机械工业出版社  
China Machine Press

TP368.1

793

833800110

图书在版编目 ( CIP ) 数据

MCU 工程师炼成记：我和 MSP430 单片机 / 丁武锋，庄严，周春阳编著. —北京：机械工业出版社，2013.8

ISBN 978-7-111-43862-5

I. M… II. ①丁… ②庄… ③周… III. 单片微型计算机 IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 207249 号

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑：陈佳媛

三河市杨庄长鸣印刷装订厂印刷

2013 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

186mm × 240 mm · 19.5 印张

标准书号：ISBN 978-7-111-43862-5

定 价：59.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

客服热线：(010) 88378991 88361066

购书热线：(010) 68326294 88379649 68995259

投稿热线：(010) 88379604

读者信箱：hzsj@hzbook.com

## 推 荐 序

得知这本书完稿的消息时,我突然有些恍惚,我的记忆还停留在论坛里看到大家恭喜网友“Open82977352”大婚的时候,印象中那个正忙于准备电赛的大学生,怎么不经意间就已成为人夫了呢?这几年来,在 EEWORLD 论坛里跟着众多网友一起成长,目睹了大家的喜怒哀乐,看到了太多的讨论,从一个个技术的细节问题,到工作中的不快,或是对前途的迷茫。

相较之下,那些在读的电子相关专业的大学生,还有刚走出校门、在工作岗位上发现自己之前的一切都要“归零”的“准”工程师们,他们是困惑最多的一群人,或迷茫于技术,或迷茫于前途。作为过来人,这个过程于我是那么熟悉。记得自己刚入行时完全是两眼一抹黑,作为新人,欠缺的不只是专业知识,还有职场上的常识。同事们总是忙于自己的工作,专业书籍总是和现实很远,课堂上全是过时的教条,让人无所适从。于是全靠自己的摸索,一个跟头,一点明白。

实事求是地讲,“电子工程师”并不是现今人们眼中的“好职业”,但当你或为真心喜欢,或为稻粱谋,而选择走上这条路时,所能做的就只能是努力让自己成为一名真正的电子工程师。这条路究竟该如何走?于是我萌生出一个想法,能不能系统地编写一本书,一本能陪伴学生走上电子工程师之路的书。

当我把这个想法和版主“chunyang”沟通后,内心更加笃定。然而,落实下来很快就发现,这么大一个话题,很容易陷入泛泛之谈。如果聚焦于一个具体的点上,也许就可以窥一斑而见全豹。于是我们选择从“群众基础”最广泛的单片机入手,然后又从中选择了极易上手、开发板易获得的 MSP430 作为具体的实践对象。按照我们的设想,这本书会从技术入门、工作技术技能的提升、电子工程师的职场守则这三部分,把电子工程师的成长线路清晰地勾勒出来。

这本书的作者团队是我眼中的梦幻组合,也让我对自己做的这件事充满信心。也许你不知道庄严,但他的网名“WSTT”也算是大名鼎鼎,很多 EEWORLD 的网友都很认他,因为他喜欢分享,而且也善于分享,对于别人的问题总是及时回复,是一个典型的阳光大男孩。作为一名在读的研究生,“WSTT”承担了大部分的基础性工作。当大家看到这本书时,他已经告别了自己的学生生涯,成为一家著名国际芯片企业的系统工程师。我不知道庄严今后的路会如何,但他的成长过程本身就是一个很好的范例,展示了如何从一名在校大学生成为电子工程师。

EEWORLD 论坛里的老网友对“莫恩”这个名字都不会陌生，他就是丁武锋，前几年分享了很多自己的原创设计。他是那种典型的从小就组装收音机，看着《无线电爱好者》在南京的那个氛围里长大的。“莫恩”成为电子工程师是一种必然，同时也是一种偶然，他也是一个幸运的人，因为他让自己的爱好成为职业。他有许许多多的想法，有着技术人员的严谨，他是 MSP430 狂热的爱好者。“莫恩”和“WSTT”一起完成了书中的所有实验和写作，并现身说法如何成为一名出色的 MCU 系统开发工程师。

与莫恩类似，版主“chunyang”也是从小就折腾收音机、电视，但他是中国最早一批在论坛里出没的电子工程师。之所以请版主“chunyang”来，不是因为他技术高超，而是在于他的热心，在于他与一般的电子工程师不同，有一颗更加人文、更注重精神层面的心，作为一名导师是再合适不过了。所谓导师者，重要的是明白如何导之，而且愿意导之。我们有共同的想法，即技术只是一个方面，成为一名真正的电子工程师，重要的一点是要学会如何做，电子工程师有自己的轨迹。在这方面，“chunyang”则用自己的成长经历和多年来面对论坛里年青网友们碰到的各种问题，告诉我们他的体会。我很欣赏其中的一点，即“做有品位的工程师”，工作多年的人都会心领神会。

关于本书技术之外的部分，我不奢求大家能完全理解并吸收，但至少能明白这番苦心，并在今后能不时地翻出来看看。技术的东西终会过时，而这些则可以陪你渡过整个职业生涯，而这也是本书不同于其他技术类书籍的重要之处。我不知道看到这本书的人，最终有多少人会成为真正的电子工程师。但是我相信，您一定会从中收获些什么，因为我们是真正用心在做。

这是一个崇尚成功的社会，但大多数人注定和我一样，最终只能是一个普通的人，远远地欣赏乔布斯、马化腾的成功。但是普通并不意味着不幸福，普通并不意味着没有理想和追求。当我们达到自己的目标时，一样得喜悦，一样享受那个过程。

我很喜欢这样一群人，他们有时会自嘲为“电工”，他们默默地支撑着中国电子行业。没有互联网行业的炫目，没有垄断行业的高薪，但是他们可爱、重感情、更纯净，在全民皆商业的中国，肯静下心来钻研技术。他们的努力在未来一定会得到回报，因为我相信某些不公平只是暂时的，因为中国需要他们，他们使我们的生活更美好。

感谢 Triton zhang，他是 EEWORLD 的一位网友，但同时也是 TI 公司的 FAE。他利用自己的假期帮我们审校书稿。感谢三位作者的家人，允许他们牺牲了陪伴家人的时间来完成这样一本书。感谢汤汤，这位 EEWORLD 论坛人人皆知的“SOSO 姐”在怀着宝宝时组织了这本书的作者团，当这本书即将出版时她可爱的女儿已经快满周岁了。当然还要感谢机械工业出版社华章公司的编辑们，是他们让我们的想法变为现实。

感谢所有翻阅这本书的人，如有任何意见和问题，欢迎到 EEWORLD 论坛 (bbs.eeworld.com.cn) 来讨论。

EEWORLD 总编 向农

2013 年 6 月

# 前言

如何学习、掌握单片机技术以及如何成为一名合格的电子工程师是广大初学者非常关心的事情，这方面的书籍、文章其实也不算少，但在“信息爆炸”的时代，真正有效的东西却并不多见，这也是令初学者最感困惑和无奈的事情。

参与这本书算是机缘巧合。在一次电话中向农和我谈起打算推出一本专门面向初学者的单片机入门指导书，内容方面同时兼顾技术、入门方法以及给新人提供一些初步的职场生存建议等。以她的想法，这本书并未打算聘请资深的技术专家来专门写作，而是由三个不同阶段的“过来人”跟初学者们交流一下自己的成长经验。书的内容上不求高深，只求真实、易懂、接地气，重点虽然仍旧放在让读者掌握一门单片机开发技术上，但同时也兼顾可以复制的学习方法和职场生存经验，这是一种少有的尝试，不可谓不大胆。

在单片机的入门学习平台方面，本书选择了TI的MSP430单片机，除了单片机本身的必要技术资料之外，本书的重点在于讲解如何从零开始逐步理解单片机的基本结构和具体的编程方法以及电路设计方法。初学者们可以一步步地照着书中内容学习和操作，在认真学习完本书内容后，应该可以大致具备初步的单片机应用设计能力。同时，本书给初学者特别是那些即将走进职场的高校学生们提供了一些基本的职场生存建议，希望可以帮助大家更快、更好地适应自己的工作，并成为一名合格的电子工程师，这就是我们编写本书的终极目标。

本书总体上分为三部分。第一部分主要通过动手引导用户掌握MSP430单片机及其外设的使用。这部分主要由一些入门级的实验组成，让读者通过学习这些实验学会MSP430单片机的基本开发方式。第二部分主要通过具体项目锻炼读者的工程技能，考虑到一部分读者是学生，第8章用一章的内容帮助学生读者分析电赛题目，分享电赛经验。最后，三位作者分别从自己的角度讲了他们对MCU工程师修炼的看法。因为这部分内容相对独立，而且基本上算是他们的“一家之言”，更像是三篇独立的文章，我们将这作为第三部分内容放在了附录里。相信其中的真知灼见必定会引起读者的共鸣。

因时间和精力的关系，本书的撰写和完稿有些匆忙，未尽及错漏之处敬请谅解，同时欢迎大家在EEWORLD论坛上继续展开讨论与交流，内容不限于这本书，不限于MSP430。

周春阳

2013年6月

# 目 录

推荐序

前言

## 第一部分 预备篇

### 第1章 单片机改变世界 ..... 2

- 1.1 把iPhone变成一台心电图仪 ..... 2
- 1.2 成为改变世界的单片机工程师 ..... 8

### 第2章 改变世界从MSP430开始 ..... 11

- 2.1 MSP430系列微控制器的发展和应用 ..... 11
- 2.2 MSP430系列微控制器产品概况 ..... 12

### 第3章 吃透MSP430单片机的构架 ..... 19

- 3.1 MSP430总体构架 ..... 19
- 3.2 CPU结构和特点 ..... 20
- 3.3 存储空结构和地址空间 ..... 21
- 3.4 时钟系统 ..... 22
  - 3.4.1 时钟源 ..... 22
  - 3.4.2 时钟信号 ..... 25
  - 3.4.3 基本时钟模块寄存器 ..... 26
  - 3.4.4 时钟源的配置与使用 ..... 28

- 3.5 低功耗模式 ..... 29
- 3.6 中断系统 ..... 33
- 3.7 系统复位和初始化 ..... 35

### 第4章 熟悉MSP430开发工具 ..... 37

- 4.1 CCS集成开发环境介绍 ..... 37
  - 4.1.1 CCS基本使用流程 ..... 37
  - 4.1.2 资源库MSP430Ware ..... 48
  - 4.1.3 图形化外设配置工具Grace使用介绍 ..... 49
  - 4.1.4 ULP Advisor低功耗应用代码分析工具介绍 ..... 53
- 4.2 MSP430集成开发环境 IAR Embedded Workbench 介绍 ..... 58

### 第5章 熟悉硬件平台：LaunchPad ..... 67

- 5.1 LaunchPad开发板介绍 ..... 67
- 5.2 FRAM开发板介绍 ..... 69

### 第6章 解剖MSP430单片机 ..... 71

- 6.1 数字I/O口 ..... 71
  - 6.1.1 数字I/O口介绍 ..... 71
  - 6.1.2 数字I/O口操作及寄存器配置 ..... 72
  - 6.1.3 数字I/O口操作示例 ..... 75
- 6.2 看门狗定时器WDT ..... 76

|        |                          |     |        |                         |     |
|--------|--------------------------|-----|--------|-------------------------|-----|
| 6.2.1  | WDT介绍                    | 76  | 6.10.2 | DMA配置及使用                | 147 |
| 6.2.2  | WDT操作及寄存器配置              | 76  | 6.10.3 | DMA操作示例                 | 151 |
| 6.2.3  | WDT操作示例                  | 79  | 6.11   | 模数转换器ADC10和<br>ADC12    | 152 |
| 6.3    | 片上非易失存储器FLASH            | 80  | 6.11.1 | ADC10介绍                 | 152 |
| 6.3.1  | FLASH和FRAM介绍             | 80  | 6.11.2 | ADC10寄存器配置及<br>使用       | 159 |
| 6.3.2  | FLASH操作及寄存器配置            | 80  | 6.11.3 | ADC10使用示例               | 164 |
| 6.3.3  | FLASH操作示例                | 85  | 6.12   | 增强型比较器<br>Comparator_A+ | 167 |
| 6.4    | 片上铁电存储器FRAM              | 87  | 6.12.1 | Comparator_A+介绍         | 167 |
| 6.4.1  | 铁电存储器FRAM介绍              | 87  | 6.12.2 | Comparator_A+配置及<br>使用  | 170 |
| 6.4.2  | FRAM操作及寄存器配置             | 88  | 6.12.3 | Comparator_A+操作示例       | 171 |
| 6.4.3  | FRAM操作示例                 | 90  | 6.13   | 运算放大器                   | 172 |
| 6.5    | 通用定时器TIMER               | 91  | 6.13.1 | 运算放大器介绍                 | 172 |
| 6.5.1  | TIMER介绍                  | 92  | 6.13.2 | OA配置及使用                 | 176 |
| 6.5.2  | TIMER操作及寄存器配置            | 99  | 6.13.3 | OA操作示例                  | 179 |
| 6.5.3  | TIMER操作示例                | 101 | 6.14   | 电源电压监控SVS               | 180 |
| 6.6    | 通用异步串行接口UART             | 102 | 6.14.1 | SVS基本结构及原理              | 180 |
| 6.6.1  | UART介绍                   | 103 | 6.14.2 | SVS寄存器配置及使用             | 182 |
| 6.6.2  | UART操作及寄存器配置             | 109 | 6.14.3 | SVS操作示例                 | 183 |
| 6.6.3  | UART操作示例                 | 114 |        |                         |     |
| 6.7    | SPI接口                    | 115 |        |                         |     |
| 6.7.1  | SPI介绍                    | 116 |        |                         |     |
| 6.7.2  | SPI操作及寄存器配置              | 120 |        |                         |     |
| 6.7.3  | SPI操作示例                  | 123 |        |                         |     |
| 6.8    | I <sup>2</sup> C接口       | 125 |        |                         |     |
| 6.8.1  | I <sup>2</sup> C介绍       | 127 |        |                         |     |
| 6.8.2  | I <sup>2</sup> C操作及寄存器配置 | 131 |        |                         |     |
| 6.8.3  | I <sup>2</sup> C操作示例     | 135 |        |                         |     |
| 6.9    | 硬件乘法器MPY                 | 138 |        |                         |     |
| 6.9.1  | 硬件乘法器介绍                  | 138 |        |                         |     |
| 6.9.2  | 硬件乘法器配置及使用               | 140 |        |                         |     |
| 6.9.3  | 硬件乘法器操作示例                | 141 |        |                         |     |
| 6.10   | 直接内存存取DMA                | 142 |        |                         |     |
| 6.10.1 | DMA介绍                    | 142 |        |                         |     |

## 第二部分 修炼篇

### 第7章 技术进阶之一：熟练掌握MSP430单片机 186

|       |         |     |
|-------|---------|-----|
| 7.1   | 触摸按键实验  | 186 |
| 7.1.1 | 预备知识    | 186 |
| 7.1.2 | 实验目的    | 191 |
| 7.1.3 | 实验设计    | 191 |
| 7.2   | LCD显示实验 | 193 |
| 7.2.1 | 预备知识    | 193 |

|       |            |     |
|-------|------------|-----|
| 7.2.2 | 实验目的       | 196 |
| 7.2.3 | 实验设计       | 196 |
| 7.3   | PS/2键盘实验   | 201 |
| 7.3.1 | 预备知识       | 201 |
| 7.3.2 | 实验目的       | 203 |
| 7.3.3 | 实验设计       | 203 |
| 7.4   | 2.4G无线传输实验 | 208 |
| 7.4.1 | 预备知识       | 208 |
| 7.4.2 | 实验目的       | 210 |
| 7.4.3 | 实验设计       | 210 |
| 7.5   | 加速度传感器实验   | 213 |
| 7.5.1 | 预备知识       | 213 |
| 7.5.2 | 实验目的       | 215 |
| 7.5.3 | 实验设计       | 215 |
| 7.6   | 以太网传输实验    | 217 |
| 7.6.1 | 预备知识       | 217 |
| 7.6.2 | 实验目的       | 219 |
| 7.6.3 | 实验设计       | 219 |
| 7.7   | USB读取实验    | 220 |
| 7.7.1 | 预备知识       | 220 |
| 7.7.2 | 实验目的       | 224 |
| 7.7.3 | 实验设计       | 224 |
| 7.8   | DIY一个便携电视机 | 228 |
| 7.8.1 | 预备知识       | 228 |
| 7.8.2 | 硬件设计       | 229 |
| 7.8.3 | 软件设计       | 234 |
| 7.8.4 | 功能扩展与改进    | 242 |

## 第8章 技术进阶之二：电子设计大赛 244

|     |                |     |
|-----|----------------|-----|
| 8.1 | 参加设计大赛的准备      | 244 |
| 8.2 | 大赛题目解析——无线识别装置 | 246 |
| 8.3 | 大赛题目解析——声音引导系统 | 253 |

## 第9章 技术进阶之三：从零开始做心电图仪 260

|       |       |     |
|-------|-------|-----|
| 9.1   | 心电监测仪 | 260 |
| 9.1.1 | 需求分析  | 260 |
| 9.1.2 | 整体方案  | 261 |
| 9.1.3 | 电路设计  | 262 |
| 9.1.4 | 整体实现  | 267 |

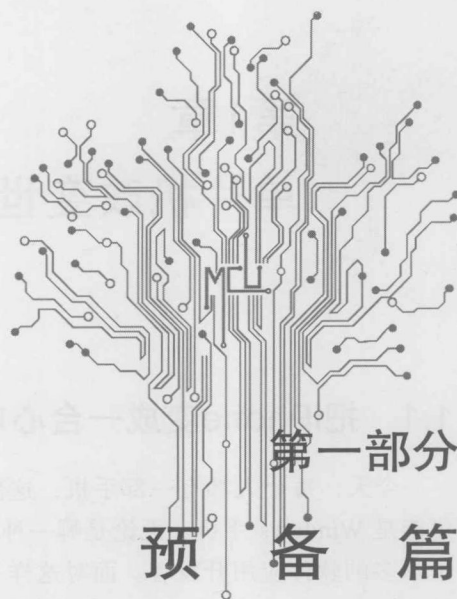
## 第三部分 起飞篇

|     |            |     |
|-----|------------|-----|
| 附录A | 庄严写于踏入职场之际 | 270 |
|-----|------------|-----|

|     |                |     |
|-----|----------------|-----|
| 附录B | 莫恩谈MCU工程师的技术精进 | 273 |
|-----|----------------|-----|

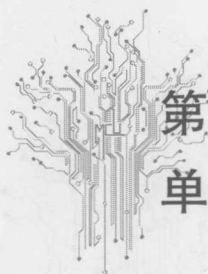
|     |              |     |
|-----|--------------|-----|
| 附录C | 春阳说电子工程师修炼之道 | 283 |
|-----|--------------|-----|

|     |                  |     |
|-----|------------------|-----|
| 附录D | 德州仪器在线技术支持社区使用指南 | 302 |
|-----|------------------|-----|



## 第一部分 预备篇

- 第 1 章 单片机改变世界
- 第 2 章 改变世界从 MSP430 开始
- 第 3 章 吃透 MSP430 单片机的构架
- 第 4 章 熟悉 MSP430 开发工具
- 第 5 章 熟悉硬件平台：LaunchPad
- 第 6 章 解剖 MSP430 单片机



## 第1章

# 单片机改变世界

### 1.1 把iPhone变成一台心电图仪

今天，每个人都有一部手机，这部手机可能是 iPhone，也可能是 Android 手机，还有可能是 Windows 手机。无论是哪一种智能手机，其实都是一款功能强大的开发平台，吸引了众多的软件应用开发者。面对这样一个平台，我们是否可以换个思路，不局限于设计各种软件应用，而是再添加一些硬件外设，做出更大胆的功能拓展。答案是肯定的！

图 1-1 展示 iPhone 心电图仪，只增加少量的硬件外设就把一部 iPhone 变成了一台心电图仪。

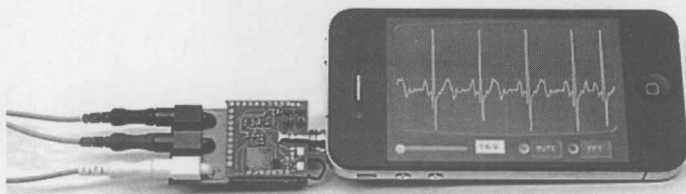


图 1-1 iPhone 心电图仪

下面我们来看看如何一步一步实现将一部 iPhone 变成便携式心电图仪。首先要考虑的问题是，增加的硬件外设如何与 iPhone 相连。iPhone 提供给外界接口是它独特的数据接口以及耳机接口，其他的手机一般可以提供 USB 接口和耳机接口。因此，实际上在手机上最通用的接口是耳机接口，而不是各种数据接口。

让我们看看手机上的耳机接口的定义，看看它能否完成硬件外设与手机通信的功能。耳机接口有 4 个信号线，分别是左声道、右声道、接地和麦克风，如图 1-2 所示。接口中各信号的方向是固定的，左声道和右声道用于驱动耳机，所以对于手机就是输出；麦克风是采集语音信号的，所以对于手机其方向为输入。总体上讲，手机耳机孔接口提供了两个输出通道和一个输入通道，可以满足手机和硬件



图 1-2 iPhone 耳机接口的定义

外设的双向通信的要求。

如果使用耳机接口作为外设电路与 iPhone 之间唯一的连接,那么电路必须从耳机接口取电,也就是需要依靠音频芯片输出的能量来驱动电路。

iPhone 的音频输出功率有多大呢?是否能够驱动外部电路呢?带着这些疑问,可以先测试 iPhone 手机一个声道的输出功率。图 1-3 是利用 iPhone 3GS 输出 20 ~ 20KHz 的信号在不同的负载阻抗下测试得到的输出电压有效值和输出电流以及输出功率的关系。其中抛物线形的曲线是输出电压与输出功率的关系,带圈的曲线是输出电流与输出电压的对应关系。输出功率在输出电压为 240mV 的时候达到峰值,这个时候输出功率达到 15.6mW,输出电流约为 66mA。

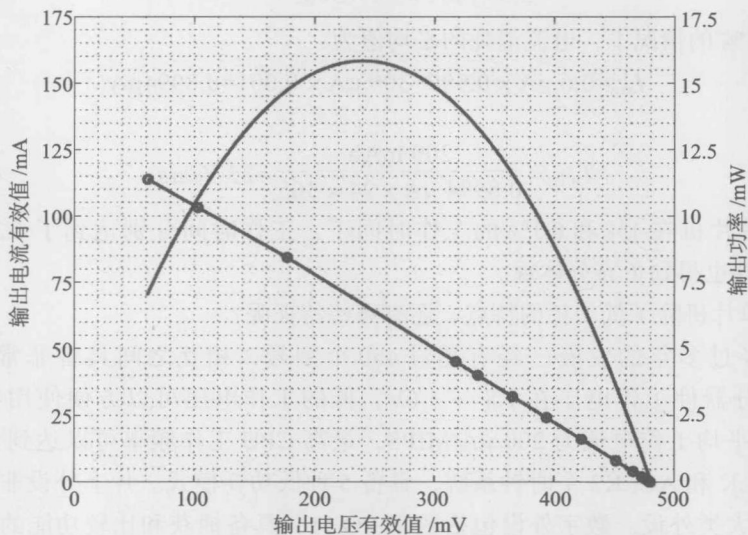


图 1-3 iPhone 3GS 单声道输出电压与输出电流及功率的关系

音频输出的最高功率达到 15.6mW,如果能够设计出低功耗的电路,这个功率能够支撑电路工作。有了能量保障,采集心电信号需要哪些功能电路呢?

心电信号非常微弱,而且受到的干扰非常严重,直接采集会淹没在噪声之中,所以必须设计降噪放大电路完成心电信号的调理。心电信号从模拟域到数字域的转换,就需要数模转换器来完成。除此以外,还希望电路具备一定的数字处理能力,完成心电信号的预处理以及与 iPhone 的通信。综合以上这些要求,可以选择一款具备数模转换等功能的低功耗单片机。

提到低功耗单片机,就会让人想起一款经常使用水果电池供电做演示超低功耗单片机——MSP430 单片机。MSP430 单片机很长时间以来一直作为低功耗单片机的标杆产品,那么它的功耗到底有多低呢?

可以做一个计算,假如使用 3V 的银锌纽扣电池 CR2032 供电,电池的容量为 200 mAh。

#### 4 第一部分 预 备 篇

单片机使用 MSP430F20xx 系列,在看门狗工作的待机模式下其消耗电流为  $0.6\mu\text{A}$ ,在 CPU 工作频率为  $1\text{MHz}$  的活动模式下消耗电流为  $300\mu\text{A}$ 。在实际的低功耗应用中,单片机一般情况下处于待机模式,中断请求到达时被唤醒,处理完中断请求后再次进入待机模式。因此,单片机在大部分状态下都处于待机模式,下面分别以  $1\%$  和  $0.1\%$  的工作时间对其进行评估。

工作时间为  $1\%$  的情况下,电流消耗的平均值为:

$$I_{\text{avg}} = 0.6\mu\text{A} \times 0.99 + 300\mu\text{A} \times 0.01 = 3.594\mu\text{A}$$

工作时间为:

$$T_{1\%} = \frac{200\text{ mAh}}{3.594\mu\text{A} \times 24 \times 365} = 6.35\text{ Years}$$

工作时间为  $0.1\%$  的情况下,电流消耗的平均值为:

$$I_{\text{avg}} = 0.6\mu\text{A} \times 0.999 + 300\mu\text{A} \times 0.001 = 0.8994\mu\text{A}$$

工作时间为:

$$T_{0.1\%} = \frac{200\text{ mAh}}{0.8994\mu\text{A} \times 24 \times 365} = 25\text{ Years}$$

MSP430 单片机在  $1\%$  和  $0.1\%$  的工作时间下,工作时间分别达到了 6.34 年和 25 年,其低功耗的特性也得到了充分体现。

MSP430 单片机除了低功耗的特点,还有哪些特征呢?

MSP430 经过多年的发展已经有超过 450 个型号,相互之间具备非常好的兼容性。MSP430 大部分器件工作电压在  $1.8 \sim 3.6\text{V}$ ,低的工作电压可以方便使用在单节电池供电的环境中。平均工作电流为  $200\mu\text{A/MIPS}$ ,最高 CPU 工作频率可以达到  $25\text{MHz}$ 。提供 MCLK、SMCLK 和 ACLK3 个时钟系统,具备 5 种低功耗模式。片上外设非常强大,具备数字和模拟两大类外设。数字外设包括数字 I/O 口,具备捕获和比较功能的定时器,支持 UART、I<sup>2</sup>C 和 SPI 的硬件串行接口,USB 接口,DMA,硬件乘法器,看门狗,RTC 等数字外设。模拟外设主要包括 10 位 ADC、12 位 ADC、16 位 SD、24 位 SD、12 位 D/A、模拟比较器、电源监测 BOR,运算放大器 OPA 等。可以根据具体应用选择所需要的外设,进而选取对应型号的 MSP430 单片机。

丰富的外设能够帮助简化电路的设计,但是会不会引起 MSP430 功耗的上升呢?在实际应用中可能用不到所有的外设,MSP430 可以选择关闭不使用的外设,这样就避免了功耗上升的风险。

制作 iPhone 心电图仪的硬件外设选用了 MSP430F1611 单片机。有了低功耗的单片机,下面来看看整个外设电路如何实现。

第一步实现能量的采集,从图 1-3 中的曲线数据可以知道输出电压有效值为  $240\text{mV}$  时,音频输出功率最大,这个时候负载阻抗为

$$R = \frac{V}{I} = \frac{0.24}{0.66} \Omega = 3.6\Omega$$

240mV 的电压较低, 需要升压才能作为单片机的供电电压。但是 240mV 的电压还不足以让 boost 升压电路工作。必须使用一种有效的升压方式, 音频信号为交流信号, 因此可以采用如图 1-4 所示的变压器电路, 利用 1:20 的变压器将音频信号升压。

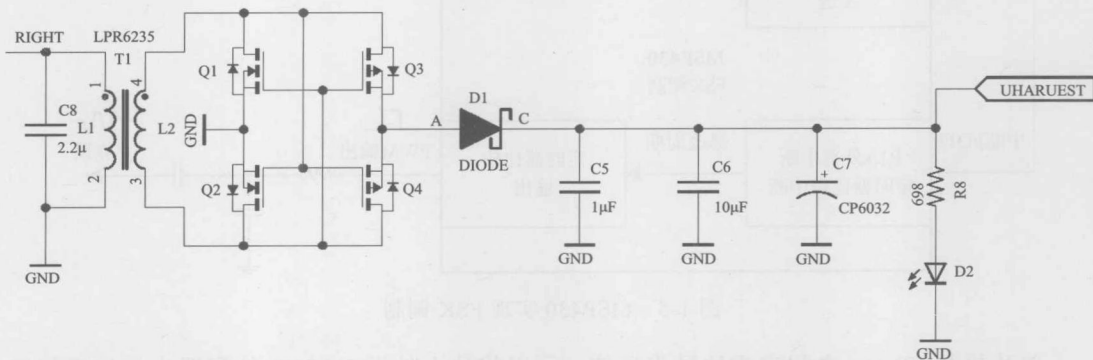


图 1-4 升压整流电路

为达到高效的能量传输, 负载和音频源端输出阻抗匹配。已知源端阻抗为  $3.6\ \Omega$ , 变压器初级线圈的电感为  $25\ \mu\text{H}$ , 就可以根据电感的感抗计算公式获得最佳的音频频率。

$$X_L = j\omega L = j2\pi fL$$

$$f = \frac{X_L}{2\pi L} = 22.9\text{KHz}$$

如图 1-4 所示使用右声道传输能量, 那么最佳的音频频率为 22.9KHz。由于变压器还有约为  $0.2\ \Omega$  的直流电阻, 升压后电压约为 4.2V。然后经过 MOS 管组成的整流电路, 将电压变为直流信号。采用 MOS 管做直流整流电路, 原理上与常见的二极管全波整流电路相似, 但是具备更低的管压降, 所以效率更高。整流滤波后的直流信号约为 4V, MSP430 的供电电压可以选定为 3V, 所以最后还需要降压电路。该降压电路最好选用 DC-DC 降压电路, 以取得较高的效率。

获得了电源, 还要完成单片机电路和心电信号的调理电路, 心电信号调理电路会在后面的章节中详细介绍。下面再看 MSP430 是如何完成与 iPhone 通信的。iPhone 的耳机接口中右声道已经被用作供给能量, 就剩下左声道和麦克风。左声道可以用作 iPhone 向 MSP430 传输数据, 而麦克风可以用作 MSP430 向 iPhone 传输数据。MSP430 和 iPhone 之间都是交流耦合, 所以直接传输数字电平信号是行不通的。这里可以借用无线传输中的一种方式, 通过 FSK 调制传输数据, 简单来说就是将数字信号调制到一个更高的载波信号上, 数字信号的 0 和 1 分别用不同频率的载波信号, 根据接收到的载波频率可分为 0 和 1。看似困难的调制与解调过程可以依赖于 MSP430 的片上外设轻松完成。

完成 FSK 调制, 需要使用到 MSP430 的 I/O 口中断, 通用异步、同步收发器 UASRT, 定时器的比较输出功能。整个过程除了一处简单的电路连接, 其他的过程都可以编程实现。FSK 的调制的实现过程如图 1-5 所示。

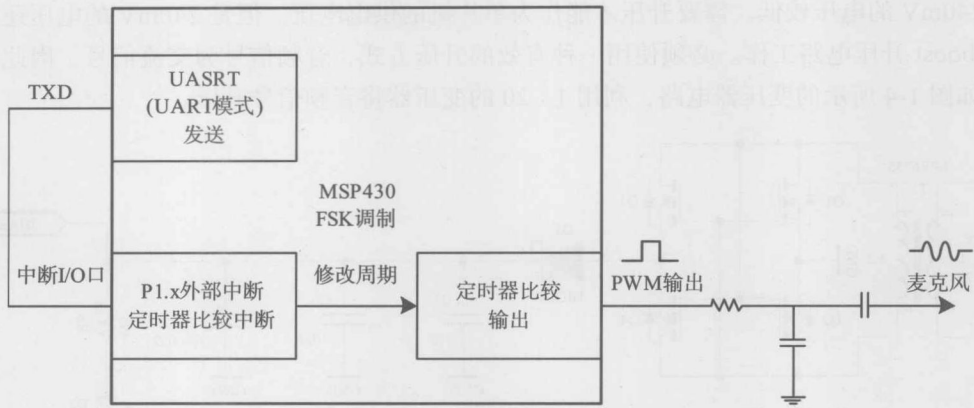


图 1-5 MSP430 实现 FSK 调制

单片机与 iPhone 之间完成的异步通信，可以将片上外设 UASRT 的配置为 UART 接口来实现，需要发送的数据直接写入 UASRT 既能够自动封装为符合串口标准的数据格式。接着将 UASRT 的输出管脚 TXD 输出的信号接至片上具备 I/O 口中断功能的 I/O 口管脚，P1 端口和 P2 端口的各 8 个管脚都可以选用。I/O 口管脚发现 TXD 管脚的电平变化就会发生中断，并在中断中修改定时器的定时周期，进而输出不同频率的 PWM 信号，输出的 PWM 信号如图 1-6 所示。

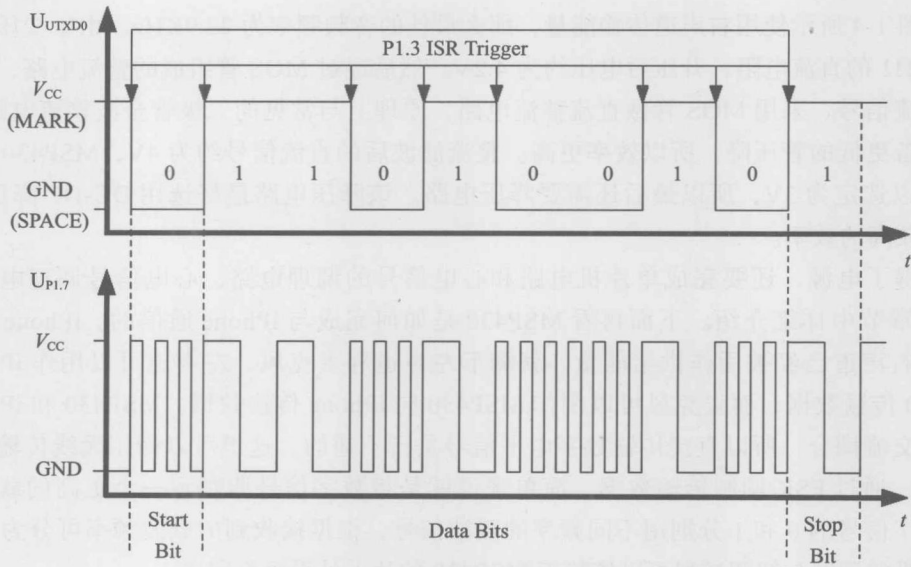


图 1-6 FSK 调制波形

由于 iPhone 和 MSP430 之间是交流耦合，所以 PWM 信号经过低通滤波并隔离直流分量，输出至麦克风接口被手机采集。手机具备很强的数值计算能力可以利用软件无线电算

法处理采集到的 FSK 信号并解调出 MSP430 发送的数字信号。

由 iPhone 发往 MSP430 的调制信号，也可以充分利用片上外设解调，实现框图如图 1-7 所示。

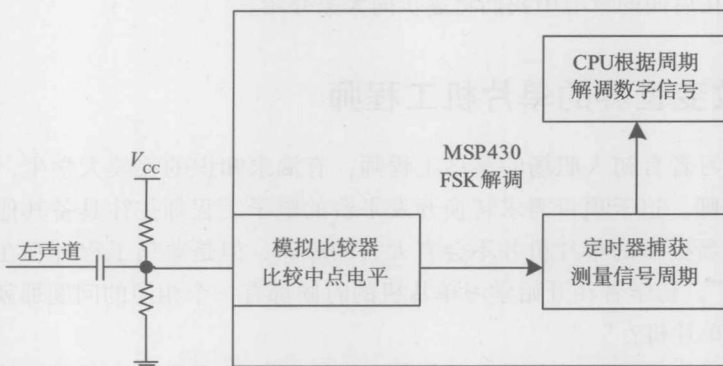


图 1-7 MSP430 实现 FSK 解调

iPhone 左声道传输的 FSK 信号也是交流信号，先使用电阻分压电路将该信号抬升至中点电平，即  $1/2 V_{CC}$ 。利用 MSP430 片上的模拟电压比较器，将输入的信号与  $1/2 V_{CC}$  进行比较，比较后的信号交由定时器进行捕获计数，测量 FSK 信号的周期。最终 CPU 根据信号周期判决解调出数字信号，解调波形如图 1-8 所示。

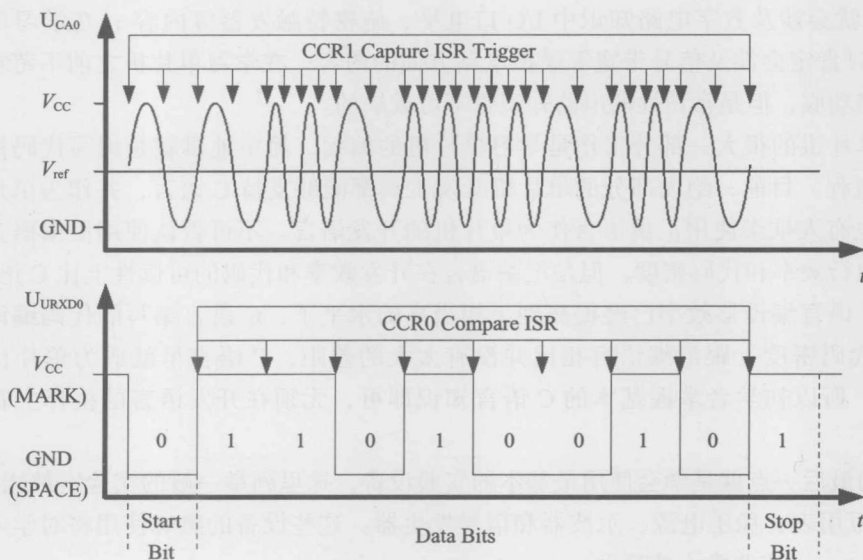


图 1-8 FSK 解调波形

通过以上方法就可以解决供电和通信两大难题，再配合 iPhone 上的应用软件就能够成

功地将一部手机转换为心电图仪。

从上面的介绍中可以看到大部分处理任务通过 MSP430 单片机片上外设就能完成，利用 MSP430 单片机强大的功能实现了单芯片解决方案。MSP430 单片机是一款资源丰富的超低功耗单片机，在后面的章节中我们将逐步向大家介绍。

## 1.2 成为改变世界的单片机工程师

单片机的学习者有初入职场的菜鸟工程师，有渴求知识的在校大学生，也有迫于项目需求的电子工程师。迫于项目需求转换开发平台的电子工程师往往具备其他类型单片机的使用经验，学习新类型的单片机并不会有太大的障碍，但是菜鸟工程师和在校大学生就是真正的“初学者”。初学者在开始学习单片机的时候都有一个相同的问题那就是“怎么才能尽快地学会使用单片机？”

菜鸟工程师由于身边有“老兵”的指导，加之有目的明确的工程项目的驱动，在单片机学习上并不会走太多的弯路。在校大学生在学习之初，首先要面对的就是“迷茫”，空有一腔热情，却不知如何下手。

在学习单片机之初应当有一些基础知识准备。单片机是电子技术发展到一定程度才出现的产物，本身就是众多电子技术的结晶，对其中一些知识的了解是学习单片机所必需的，所以网络上经常出现的“零基础”学习单片机是不客观的说法。在学习单片机之初，应该具备基础的电路知识，主要包括基本的数字电路和模拟电路知识。比如，在学习单片机的 I/O 口时，就会涉及数字电路知识中 I/O 口电平、施密特触发器等内容；在学习单片机的 ADC 通道时肯定会涉及信号带宽等模拟电路方面的内容。在学习单片机之前不苛求必须有深厚的电路功底，但是常识性的电路知识是不可或缺的。

学习单片机的很大一部分工作是学习单片机的编程，简单地讲就是编写代码控制单片机的工作流程。目前，绝大部分的单片机开发工具都能够支持 C 语言，并作为单片机的开发语言，也有人推崇使用汇编语言作为单片机的开发语言。不可否认使用汇编语言可以获得更高的执行效率和代码密度，但是汇编语言在开发效率和代码的可读性上比 C 语言要差。事实上，C 语言编译器效率已经提高到了相当高的水平了，C 语言编写的代码编译后在执行效率和代码密度上跟汇编语言相比并没有太大的差距，C 语言早就成为单片机开发的绝对主力。所以初学者掌握基本的 C 语言知识即可，无须在开发语言的抉择上花费太多的时间。

准备的最后一点就是学会使用最基本的实验设备，这里列举一般的实验室都能提供的 4 种设备：万用表、稳压电源、示波器和信号发生器。这些设备的熟练使用将对学习中遇到的调试（bebug）有非常大的帮助。

有了以上的准备，就可以正式开始单片机的学习了。初学者最好选用一款性能稳定，范例丰富并且推广较好的单片机作为学习目标。性能稳定，避免在学习过程中遇到由于芯