

一种基于超级电容器的光伏储能系统设计

王章尧

(彭水苗族土家族自治县职业教育中心, 重庆 彭水 409600)

摘要 伴随着新能源技术的不断进步,原本只在书本和网络上的新技术也逐渐走近我们的视野。其中,作为万物之源的太阳能应用技术已日趋成熟。太阳能的应用通常情况下有两种方式,一种是取阳光中的辐射热能来加热东西(如太阳能灶具、太阳能热水器),另一种是利用半导体界面的光生伏打效应将光能直接转变为电能,这种发电方式是直接转换成我们所用的二次能源中的电能,这样人类使用太阳能的方式就更为多样化。传统的太阳能光伏发电需要并网消纳或者自备电池组储能,前者受电网接纳能力的限制且政策上也有局限,后者在运行成本上有局限;而本次设计将结合当前新型的储能方式,使用超级电容器来储存电能,这种方式可以有更快速的充电速率,更强的负载能力以及更经济的运行维护成本。

关键词 太阳能 超级电容 功率变换

中图分类号: TM53

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2021)01-0001-08

本系统设计是基于光伏供电的场合,系统整体可满足小功率负载在离线情况下连续供电的需求;设计应有足够的带载能力,能够满足一般电压等级的用电器使用,自身功耗低,有一定的硬件资源冗余以方便产品迭代等特点。基于上述要求,系统至少应该具有一定的智能性,具备可靠的功率变换电路,能够实现较为友好的人机交互等功能^[1]。

1 系统方案

1.1 系统 MCU 的选择及方案论证

基于智能设计和人机交互的需求,设计时必须使用微控制器或嵌入式芯片。根据系统功能需求的分析,现设计两种方案。

1.1.1 ADC0809 和 AT89C51 组合实现电路参数测量

ADC0809 是 51 单片机中经典的模数转换芯片,硬件资源最大可提供分时 8 路 8 位精度的 AD 转换功能,8 位 AD 数据并行传输,可满足一般场合 AD 要求。其典型应用电路如图 1 所示,从图中可以看到该芯片在工作的时候需要额外的时钟,同时数据的传输是 8 位并行,所以在一定程度上会较多占用 MCU 的硬件资源,且实际使用时需要用到高精度参考电压源,实际的硬件电路会有更多的开销,因此对于此方案,在本次项目中不予采用。

1.1.2 STC12CA60S2 增强型单片机测量电路参数

STC12CA60S2 为国产单片机,对于本次的系统设计更为实用,该单片机是采用 51 内核的 8 位单片机,但 STC12C5A60S2 有 8 路 10 位 AD,带 PWM 功能,具有 SPI 接口可在线编程,内部 ROM 为 64K。这里的两个关键功能本次系统设计都可以直接使用,一个是自带的 AD,另一个就是超大的程序空间。在硬件电路上该单片只需要少量的外围器件即可工作,在最小系统的设计上,外部时钟都可以直接省略,因为其内部自带了 RC 时钟源在频率精度要求不高的场合可以完全适用。本次设计时还是参照了传统 51 单片机的外围电路设计,其最小系统如图 2 所示。

此外除了上述的两种方案之外,还可以使用 ST(STM32)

的单片机,功能上也能够兼容,但综合功能开发的难易程度、市场存量、价格、工艺等问题,此次的系统设计采用 STC12C5A60S2 单片机作为信号采集、处理芯片。并且在市场上 STC 的产品存量较大,成本有优势,对于工程开发来说,这也是一种最优化的选择。

1.2 系统功率变换电路方案选择

本次系统设计的重点是对太阳能电池所发电能的存储,由于电池输出的电压与当前环境下的光照强度有直接关系,而超级电容器在充电时是不能够超过其上限电压的,因此就需要设计一个电源变换电路将太阳能电池输出的电能转换成相对固定的电压再对电容器进行充电。本次设计试验所采用的超级电容器模组的充电上限是 12V,因此对应的功率变换电路可以在太阳能电池输出电压高于或者低于 12V 时将电容器的充电电压稳定到 12V 的上限值。该电路在设计时既要可以对直流电源进行升压也要可以降压才行。根据文献资料可以知道,经典的电路拓扑结构中有 BOOST—BUCK 电路和 SEPIC 电路可以满足要求。

1.2.1 Boost buck 拓扑电路结构分析

Boost buck 拓扑电路是开关电源三大基本拓扑结构(Boost、Buck、Boost—buck)中的一种,前两者只能升压或者降压,这种既可以升压也可以降压。其电路结构如图 3 所示, Multisim 仿真升降压效果如图 4、图 5 所示。

从图 4 和图 5 中可以看出, Boost buck 拓扑电路功能上确实可以完成电压的升降,但却有一个严重的缺陷,输出的电压与输入侧电压极性相反。而本次的系统设计在这种情况下难以使用单片机对其电压进行测量,因为参考点的选取不好处理。但该电路可以应用在需要负压的场合。

1.2.2 SEPIC 拓扑电路结构分析

SEPIC 拓扑电路是在三种基本拓扑电路结构的基础上演变的另外三种(Cuk、Zeta、Sepic)之一,其电路的基本拓扑结构如图 6 所示, Multisim 仿真升降压效果如图 7、图 8 所示。

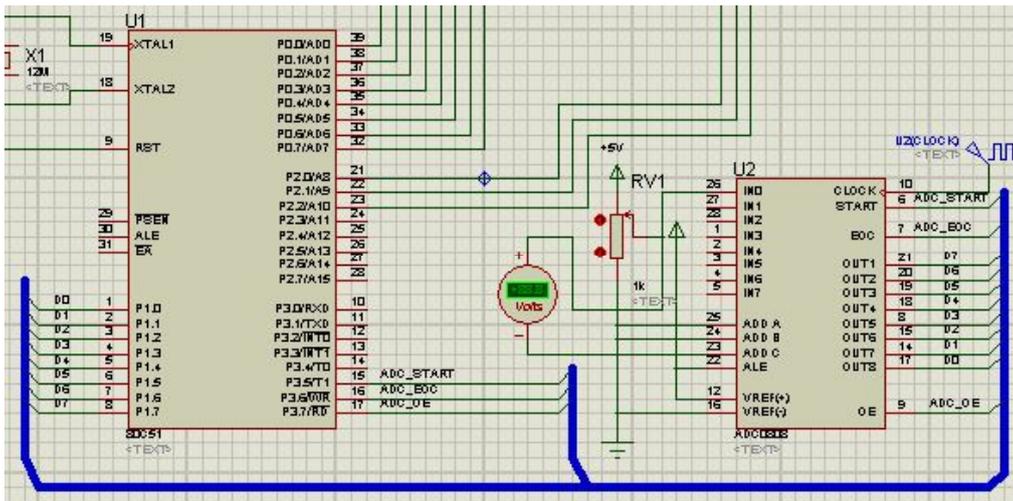


图 1 ADC0809 与单片机典型电路连接

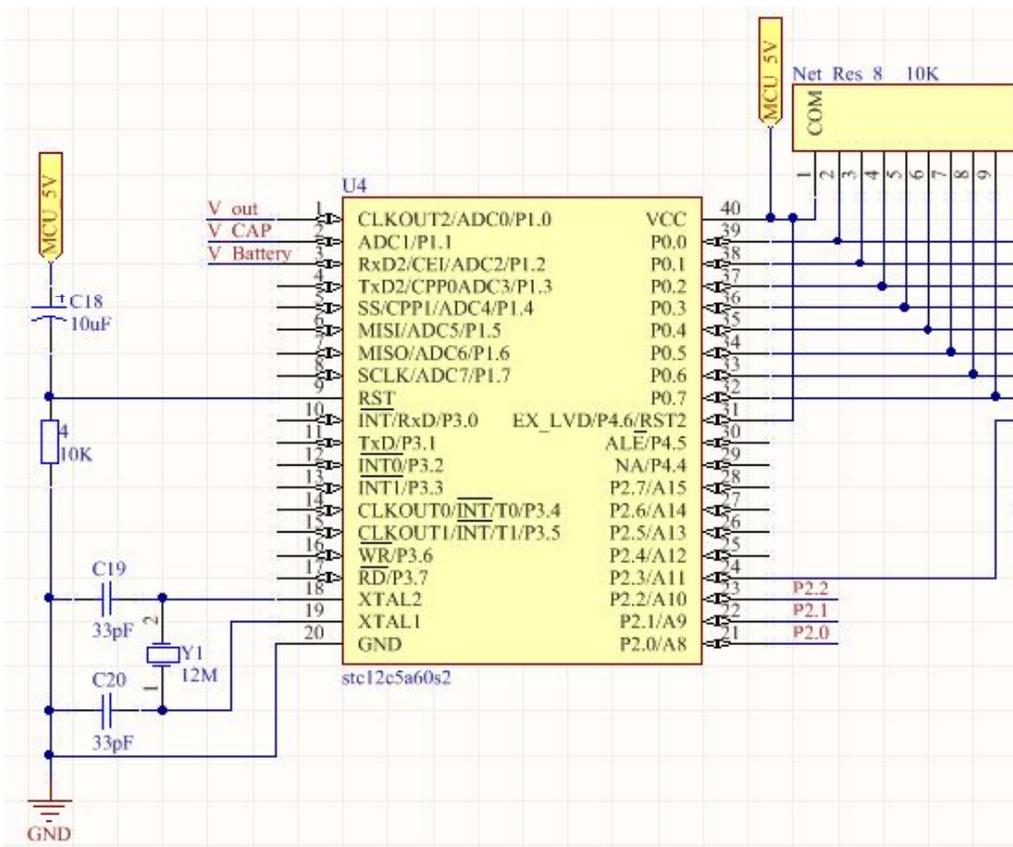


图 2 STC12C5A60S2 单片机最小系统

从图 7、图 8 中可以知道 SEPIC 拓扑电路可以完成直流电压的升降，同时不改变电压的极性，功能上可以达到系统设计的要求。而且该电路在搭建的时候可以适用的电源 IC 种类很多，可以说只要支持 Boost 拓扑结构（只升压）的 IC 基本都可以搭建此电路。市场上常用的电源芯片有芯龙半导体的 XL60XX 系列、TI 公司的 LM25XX 系列等。这种芯片的最大输出电流可以达到 3A，内置 MOS，只需要少量的外围器件即可工作，电路的搭建上要相对容易一些。

由以上两种方案中对比可知，此次的系统设计，SEPIC 拓扑结构更适合。

2 系统理论分析与计算

在系统方案里，确定了 STC12C5A60S2 为系统 MCU，负责系统中几个关键点的 AD 转换工作，同时通过特定的算法将其解算成当前电路的实际电压值，并在显示模块上显示出来。基于 XL6009 的三路 SEPIC 功率拓扑电路，将太阳能电池产生的电能经过变换后给超级电容器充电；将超级电容器存储的电能经过变换输出，使之可以匹配外接用电器的工作电压；将超级电容器存储的电能经过变换后供给测量电路，由于超级电容存储电量有限，对此电路独立控制，以查询的方式可以实时了解当前系统的工作情况。这里对

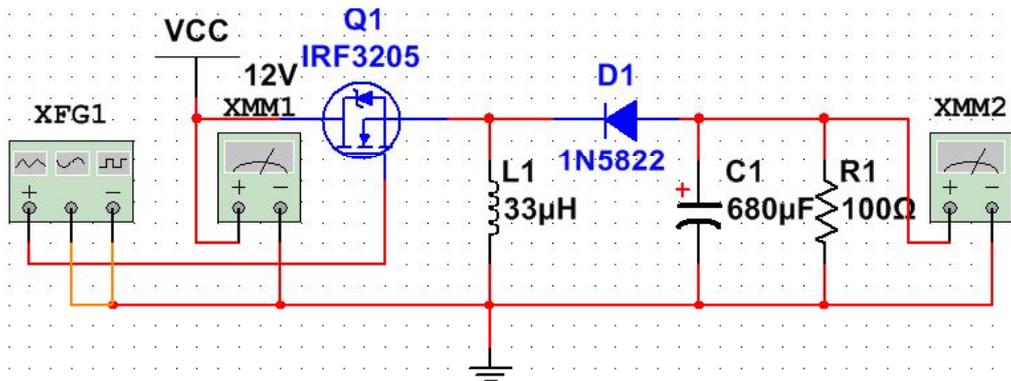


图3 boost-buck 电路拓扑结构

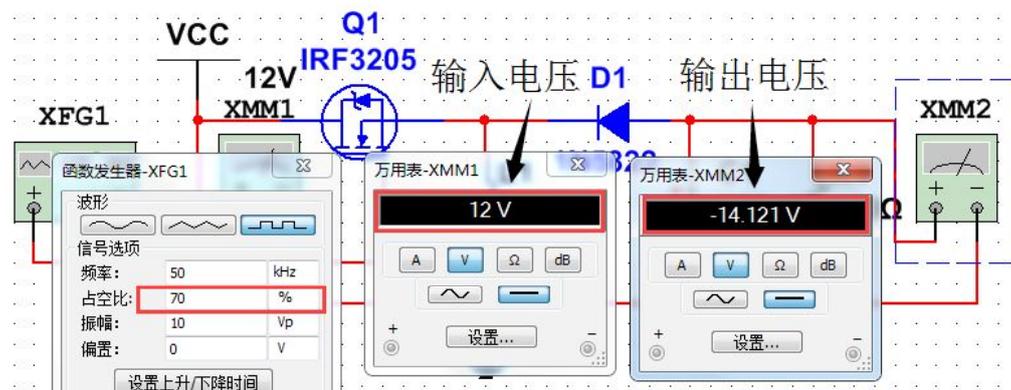


图4 boost-buck 电路升压效果

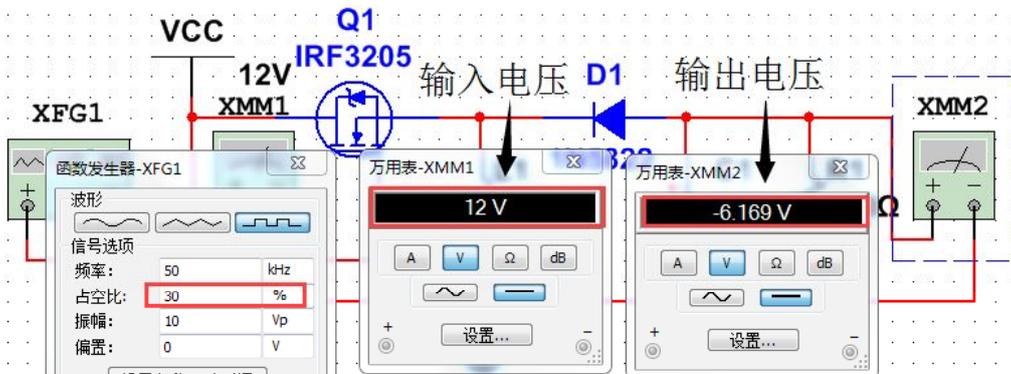


图5 boost-buck 电路降压效果

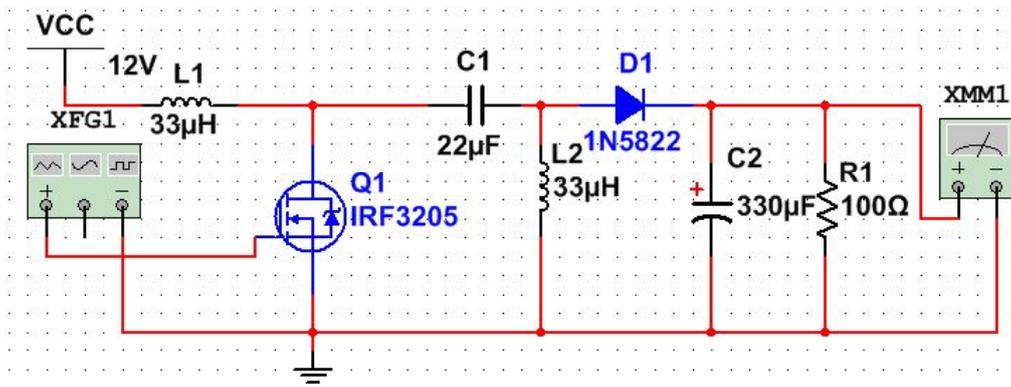


图6 SEPIC 拓扑电路结构

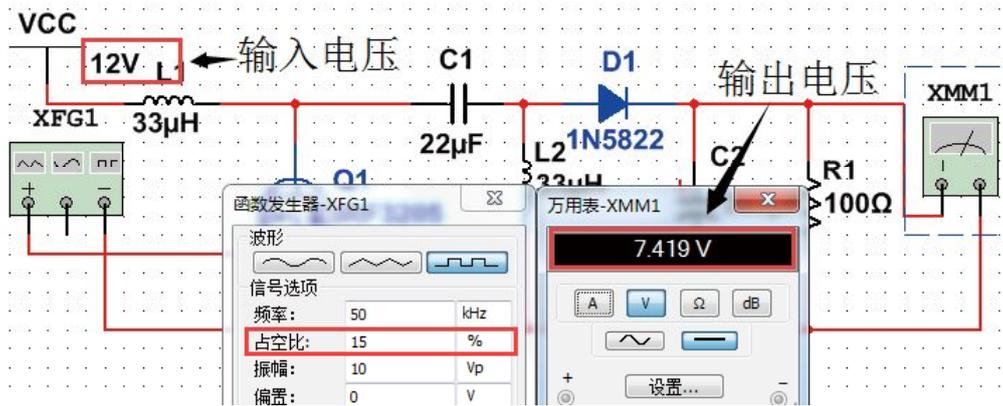


图 7 SEPIC 拓扑电路降压效果

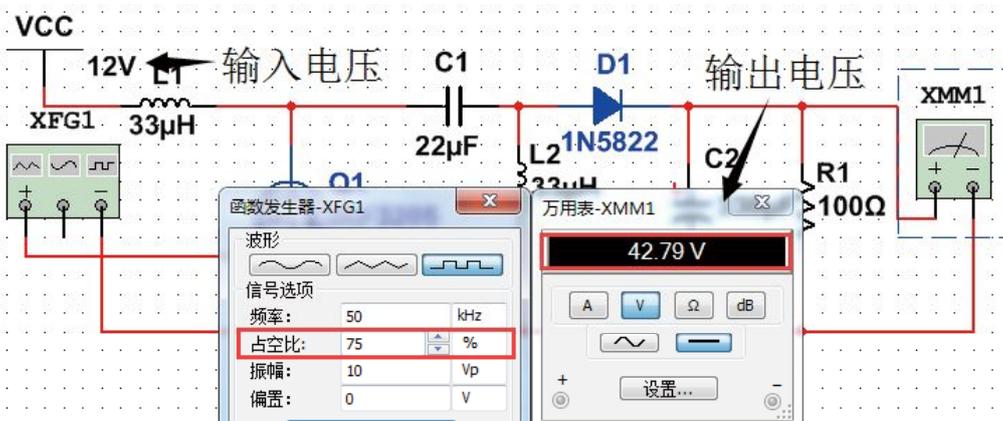


图 8 SEPIC 拓扑电路升压效果

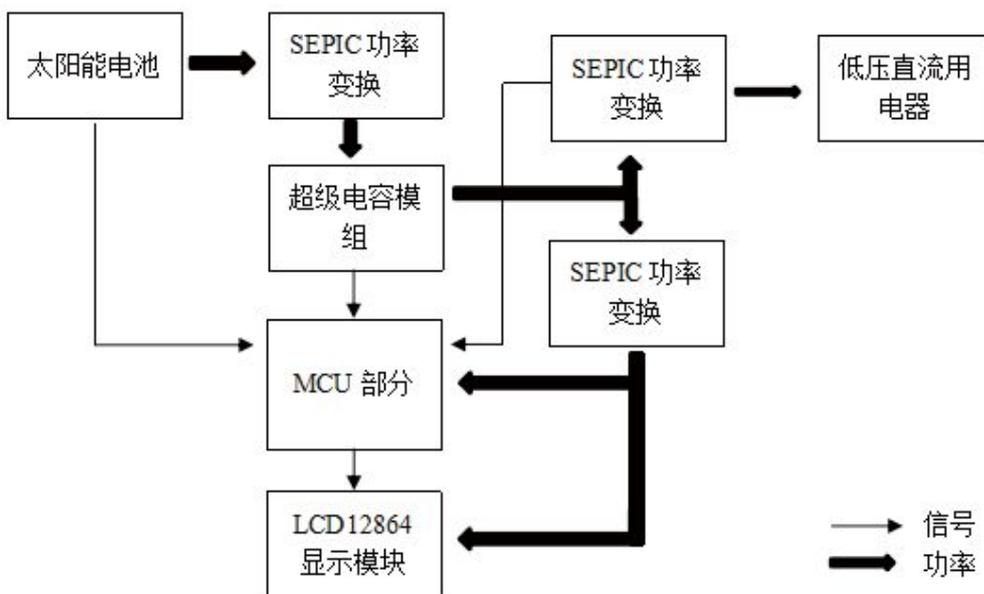


图 9 系统总框图

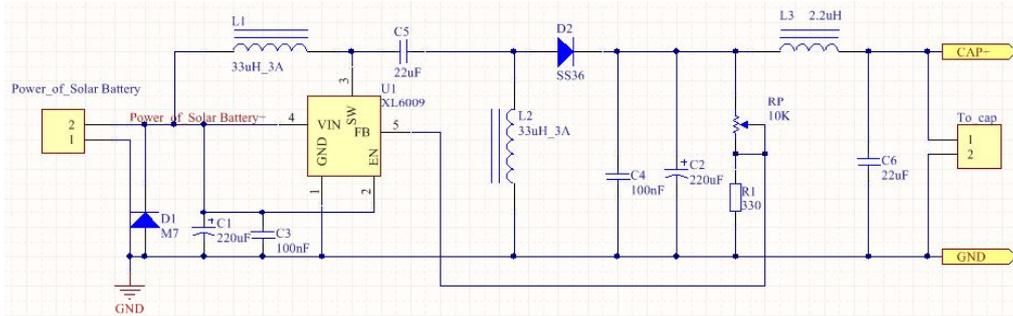


图 10 SEPIC 拓扑电路 (充电电路)

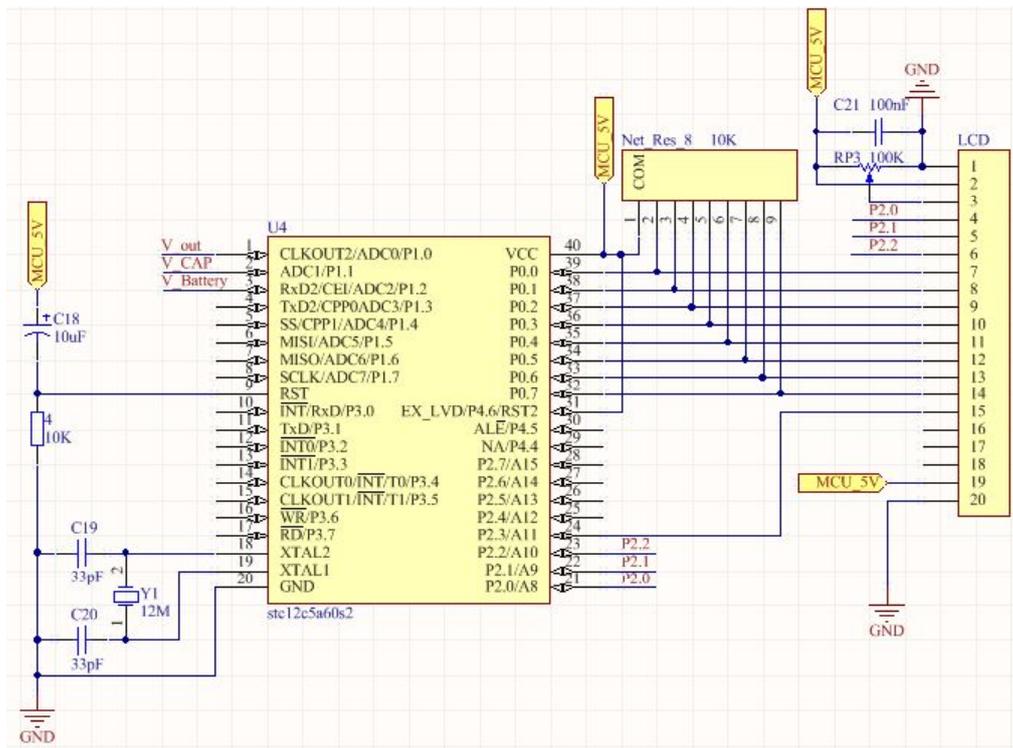


图 11 单片机最小系统及显示电路原理图

关键的计算点进行分析。

2.1 ADC 转换电压值算法

STC12C5A60S2 单片机内置 8 路 10 位 AD，这里只需要选择三个通道即可。该单片机的 AD 工作的时候没有单独参考电压，它直接使用电源作为测量参考。因此在电路设计的时候需要注意单片机供电电路的稳定性。单片机的 AD 采集之后，得到的是二进制数据，这里如果测量电压是 5V，那么从 AD 返回的值就为二进制“11111111”，如果是 0V，那么 AD 返回的值就为二进制“00000000”，对应十进制数就为 1023 和 0。这里涉及到将 0 到 1023 和 0 到 5 进行一个线性的对应操作，设计时使用一个一元一次的函数表达式就可以计算出当前的电压值 V。

$$V = (AD_value * 500) / 1023 \quad (\text{这里 } AD_value \text{ 为 AD 返回值})$$

基于 C 语言处理数据的特点，这里在解算的时候就预先将值扩大了 100 倍（所以看到的是 500 而不是 5），这样在显示的时候只要将得到的值逐个分离出来显示即可，然后人为的除以 100 保证数据的准确性。

2.2 超级电容器存储电量计算

在进行超级电容器电量计算的时候，需要先对电路中常用的公式做一个了解，然后推算得出超级电容电量的计算公式。

$$\text{电压 (U)} = \text{电流 (I)} \times \text{电阻 (R)} \quad \text{式 1}$$

$$\text{电荷量 (Q)} = \text{电流 (I)} \times \text{时间 (T)} \quad \text{式 2}$$

$$\text{功率 (P)} = U \times I \quad \text{式 3}$$

$$\text{能量 (W)} = P \times T = Q \times V \quad \text{式 4}$$

$$\text{容量 (F)} = \text{库伦 (C)} / \text{电压 (V)} \quad \text{式 5}$$

联立式 1 到式 5 即可将容量、电压转为等效电量表达式如下：

$$\text{电量} = \text{电压 (V)} \times \text{电荷量 (C)}$$

这里以本次系统设计为例，选用的是 100F、2.5V 的单体超级电容 6 个串联组成的模组。根据计算，这里的实际容量应该为 $100/6 \approx 16.7F$ ，由于电容的实际容量差别很大，所以这里在计算的时候只取整数 16。由于模组自身有均压电路存在，因此充电上限电压只有 12V。SEPIC 功

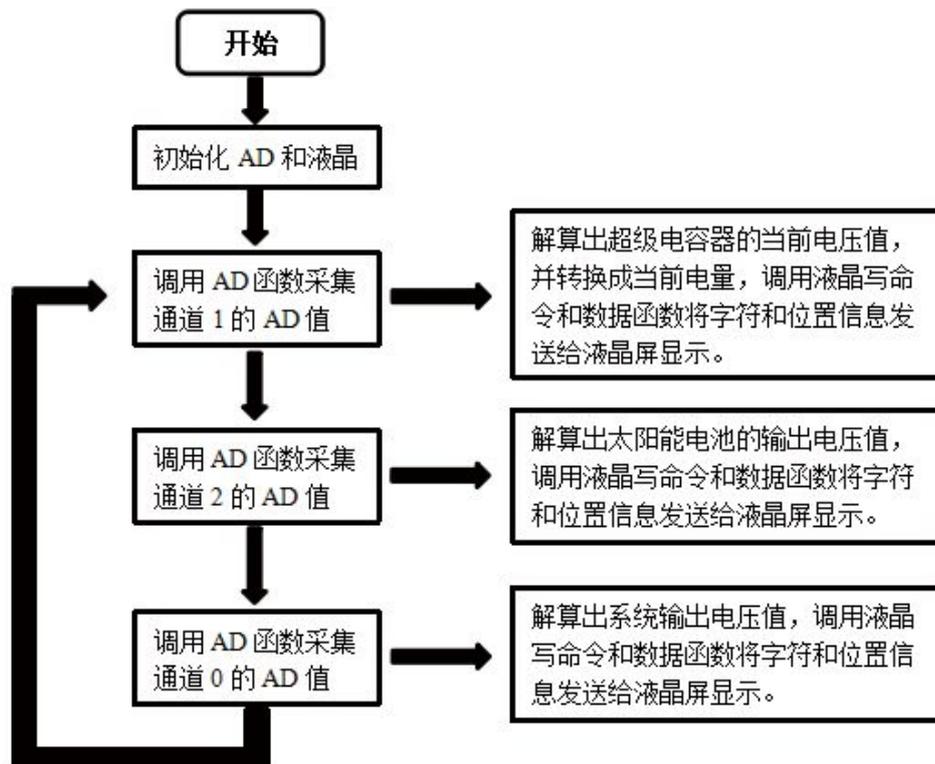


图 12 系统程序流程图

率变换部分的最低输入电压实测为 3.5V。因此这里超级电容器的有效电压为 $12V-3.5V=8.5V$ ，所以电量（能量） $=8.5 \times 16=136A \cdot S$ ，也就是如果以 136A 的电流放电，那么可以维持 1 秒钟。当然实际应用的时候，由于电路的效率问题，肯定不会有这么多的能量被使用到。

对于功率变换电路，因为是参考成熟的方案设计，对于电子元件的参数就没有做详细的计算。而对 XL6009 来说，输出电压由反馈电阻调节，根据反馈引脚的电压始终为 1.25V，来配置反馈电路的电阻即可^[2]。

3 电路与程序设计

3.1 电路的设计

3.1.1 系统总体框图

本次系统设计由功率变换、MCU、显示等模块构成，详细组成及连接关系如图 9 所示。

3.1.2 功率拓扑电路原理图

本次的系统设计根据需要基于 XL6009 搭建了三组 SEPIC 功率变换电路以满足，超级电容器充电、电能输出、系统自供电三部分的需求。电容充电电路中为避免太阳能电池接线极性接反，在输入侧加装了二极管（M7）防止反接，在电能输出部分和系统自供电部分，考虑到节能需求加装了独立开关控制电路的启闭，总体电路结构如图 10 所示。

3.1.3 单片机最小系统及显示电路原理图

本次系统设计采用 STC12C5A60S2 单片机，虽然在功能上相对于传统 51 强劲了很多，但其外围电路基本上沿用传统 51 单片机的电路即可，基本上就是复位和时钟电路，

这里由于单片机内置 RC 振荡器，在要求不高的地方可以直接使用，而不需要外部的时钟电路。显示电路，使用的是 12864 液晶屏。本次设计采用并口的方式传输数据，电路沿用标准的设计方案。单片机最小系统及显示电路原理图如图 11 所示。

3.2 程序的设计

3.2.1 程序功能描述与设计思路

本次系统设计的程序编写是基于 STC12C5A60S2 单片机进行的，功能上使用了内部 AD，这样在程序代码上需要对特定寄存器进行配置才可以。

功能上，程序完成指定的 3 个 AD 通道进行 AD 采集。同时对得到的 AD 值进行解算得到当前电路的实际电压值，进一步计算可得到超级电容器存储的电量值。除此之外，系统对外输出采用 12864 液晶屏，这里单片机与屏的通信方式为并行，数据口在 P0，同样程序需要配置相应的引脚，来控制液晶屏正常显示字符信息。

思路，根据程序功能需求，完成 AD 采集函数代码的编写，这样在使用时可以直接调用。在液晶屏显示数据的处理上，也采用单独函数的方式进行，液晶屏的写命令和写数据函数分开，在主函数中可以直接调用。主函数中，由于本人的能力有限，字符的显示采用一个字符一个字符的方式发送给液晶屏显示，大循环中直接调用各个功能函数，来执行相应的功能，对于计算的处理直接在主函数中以数学表达式的方式完成。

3.2.2 程序流程图

程序流程图如上图 12 所示。



图 13 系统万用表测试 5V 输出



图 14 系统在 5V 输出时电流超过 1A

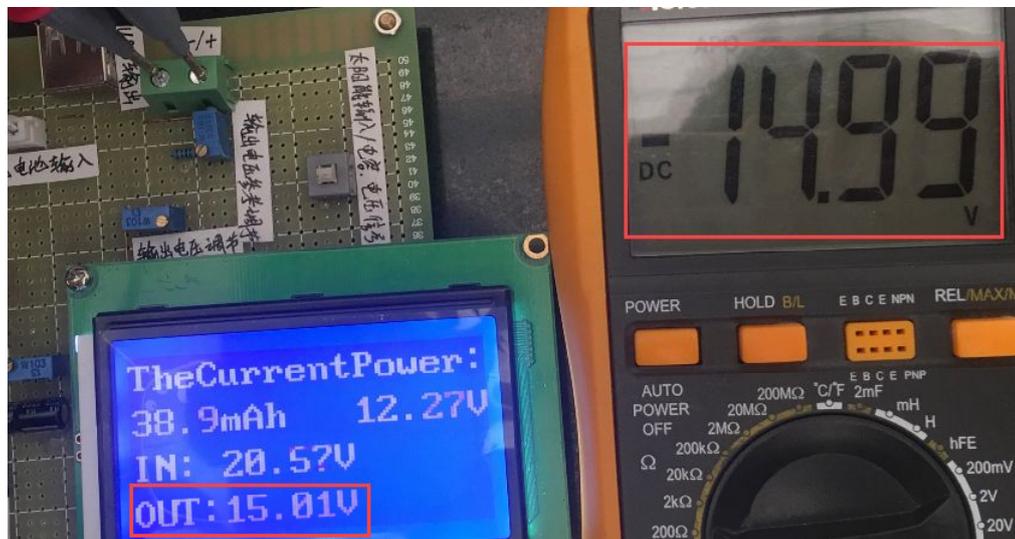


图 15 系统 15V 电压对比测试

4 测试方案与测试结果

本次系统设计在测试时分为两部分进行，一个是以 XL6009 构成 SEPIC 功率电路进行测试，其中包括电压调节、带载能力和稳定性。另一个是以 STC12C5A60S2 构成的电压测量电路的准确性的测试。

4.1 测试方案

本次系统设计针对硬件测试时，主要是对功率电路部分进行测试，测试时使用万用表测试输出电压的稳定性和输出电流的大小。硬件软件联调时主要测试，测量电路测

量数据的准确性。

4.1.1 硬件测试

在测试电路输出带载能力的时候，根据日常低压用电设备的情况，大多数为 5V 的用电，因此在实物搭建时特别增加了 USB 接口，方便 USB 设备使用，USB 设备使用时大多需要满足 1A 以上的电流负载能力。因此测试时调节电位器将输出电压调至 5V，将 4Ω 的电阻接到输出端口，使用万用表测量电路输出电压依旧为 5V，这时根据欧姆定律电流(I)=电压(U)/电阻(R)，可知此时的输出电流为 1.25A。

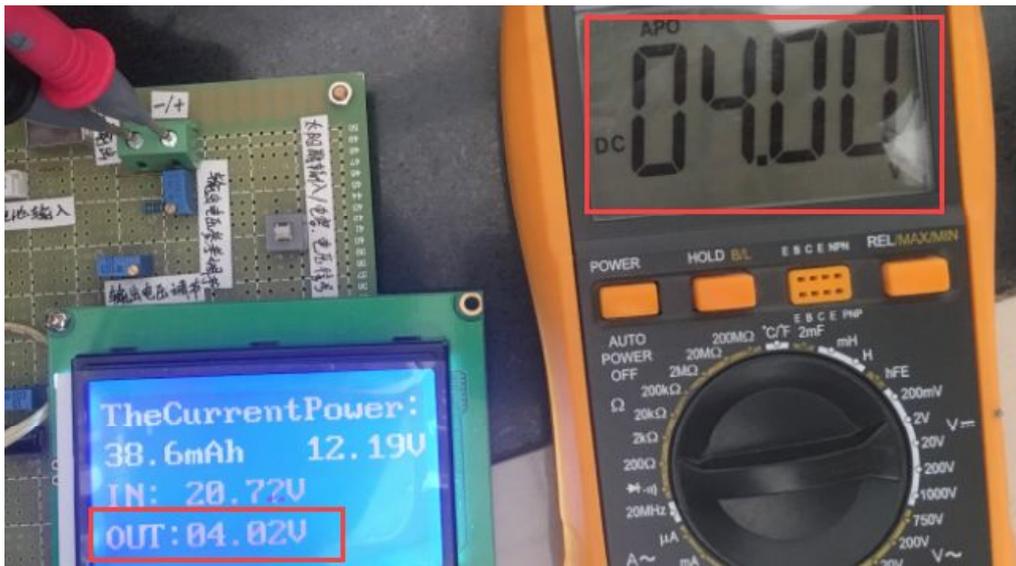


图 16 系统 4V 电压对比测试

由于模组存储电量有限,因此重载时间不应过长。(详细测试效果如图 13、图 14 所示)

这里的电流测量值不为 1.25A,也不是标准的 5V,其原因可能是重载情况下,反馈端到电源芯片处产生的压降所引起,但其负载能力也达到了将近 6W,所以这样的设计结果是可以接受的。

4.1.2 硬件软件联调

硬件软件联调时,将万用表接到系统输出端口,调整输出电压看液晶屏显示的数据和万用表的测数据是否一致。反复调节变送电路,直至测量电路显示的数据和万用表的测试读数大体相同(实测效果如图 15、图 16)。

从图 15 和图 16 中可以看出,系统测量电压可以达到 ± 0.05 的范围,而且测试可以输出 4-15V 的直流电压。满足更多电压等级用电设备的用电需求。

4.2 测试条件与仪器

本次系统设计的环境使用要求不高,普通场合即可。因此在普通的测试场地即可完成测试。当然,在太阳能电池充电测试的时候最好是选择晴朗的天气,保持太阳能电池板在阳光的直射状态,同时匹配的太阳能电池板功率应该满足设计要求。仪器选择普通的三位半万用表即可完成所有测试。

4.3 测试结果及分析

4.3.1 测试结果(数据)

表 1 系统输出电压测量对比

次数	输出电压自测	万用表测量
1	4.02	4.00
2	5.08	5.04
3	12.04	11.98
4	15.01	14.99

测试结果在前文的硬件和软件调试的附图中均由体现,现对测量时系统输出的几次不同的电压列表对比,详细如表 1 所示。

4.3.2 测试分析与结论

通过表 1 可以看出,系统测得误差是可以达到 0.2V 的设计要求。而且在硬件调试的时候实测输出电压范围可以是 3V-30V,该技术指标也是完全可以达到常规用电设备的需求。在系统充电电压上,只要保证发电功率,也完全可以在 5V-22V 这个供电区间对超级电容完成充电,当然这里如果是光照条件不好的情况下,太阳能电池的电压会被直接拉低至 3V 以下,这个时候是不能完成充电的。同时如果在阳光充足时,该系统在不挂接超级电容的情况下也是可以驱动小功率负载。

5 结论

从本次的系统设计可以知道,超级电容和光伏发电这两者的结合是完全可行的。同时较传统的光伏项目来说该系统具有充电快、短时负载能力强的优点,特别适合在功率负载转移时的过渡使用。超级电容作为新的储能方式其具有充电速度快、负载能力强的优点,而且由于其充电过程是物理变化,所以电容的性能衰减速度慢,这也是超级电容储能的优势所在。最后,系统在布局设计时就考虑了硬件上的冗余,其它的功能需求完全可以基于此进行二次开发^[9]。

参考文献:

- [1] 桑胜举,沈丁.单片机原理及应用[M].北京:中国铁道出版社,2010:45-52.
- [2] Sanjaya Maniktala,王健强.精通开关电源设计(第二版)[M].北京:人民邮电出版社,2019.
- [3] 何宾.STC单片机原理及应用—从器件、汇编、C到操作系统的分析和设计(立体化教程)(第2版)[M].北京:清华大学出版社,2019.